

**ANNEX G** フィリピン国大マニラ首都圏における主な建築種別の脆弱性カーブの生成 (*Development of Vulnerability Survey of Key Building Type in the Greater Metro Manila Area Philippines* 和訳)

フィリピン国  
大マニラ首都圏における  
主な建築種別の脆弱性カーブの生成  
DEVELOPMENT OF VULNERABILITY  
CURVE OF KEY BUILDING TYPES IN THE  
GREATER METRO MANILA AREA,  
PHILIPPINES

最終報告書

2014年2月

著者

Benito M. Pacheco, Jaime Y. Hernandez Jr., Peter Paul M. Castro,  
Eric Augustus J. Tingatinga, Raniel M. Suiza, Liezl Raissa E. Tan,  
Romeo Eliezer U. Longalong, Maria Clarissa L. Veron,  
Diocel Harold M. Aquino, Richmark N. Macuha, William L. Mata, Imee Bren O. Villalba,  
Marie Claire L. Pascua, Ulpiano P. Ignacio Jr., Fernando J. Germar, Joseph Romeo M. Diño,  
Gian Paulo D. Reyes, John Lemar M. Tirao, Mark Albert H. Zarco.

ケソン市フィリピン大学ディリマン校土木工学研究所

## 要約

本報告書は、Aus-Aid の支援によるリスク分析プロジェクト（RAP）、通称 GMMA（Enhancing Risk Analysis Capacities for Flood, Tropical Cyclone Severe Wind and Earthquake for Greater Metro Manila Area Project：大マニラ首都圏における、防災・気候変動に係る、リスク分析に関する関係者の能力強化プロジェクト）のために交わされたフィリピン大学ディリマン校土木工学研究所、科学技術省所管のフィリピン気象庁、フィリピン地震火山研究所の三者による合意覚書に基づく、最終報告書である。本覚書は「フィリピン国大マニラ首都圏における主な建築種別の脆弱性カーブの生成」プロジェクトのもとに交わされた。

本プロジェクトの主な目的は、1) GMMA 内にある建築物種別を特定し、構造型や建築材料による建物類型を提示すること、および2) 主要な建物類型に対して、強風、洪水、地震に対するリスク評価に資するための基本的な脆弱性カーブを示すことである。強風、洪水および地震に対して、それぞれ 17、15、18 の建物類型を特定した。建築材料別は、木造、石積み、コンクリート、鋼構造、および特殊な構造とした。特殊な構造とは広告塔（看板）や送電塔を指し、強風ハザードの検討対象とした。

脆弱性はある強度ないしは規模のハザード外力に対する建物種別の被害率（損傷率）と定義する。ハザード外力とは3秒平均風速、浸水深、あるいは地表加速度（地震力で近似）である。被害率は建物総費用に占める復旧費用の割合で表される。PAGASA や PHIVOLCS から提供される既往の強風や地震の被害データは脆弱性カーブを経験的に導出する際に有用であった。

脆弱性カーブ導出には経験的手法以外に2つの手法を用いた。計算による手法と思考的手法である。計算による手法では、数値流体力学を用いて強風ハザードを再現した。洪水に対しては建築要素ごとの復旧費用を算定した。地震に対してはキャパシティ・スペクトル法と連続モーダルプッシュオーバー法を使用して地表面加速度ごとの非線形応答解析を行った。

思考的手法では、本プロジェクトの目的を説明した上で、専門家への書面による調査を行った。地震に対しては、被害レベルごとに損傷度を推定するため、脆弱性カーブとは別に損傷度カーブも取得した。推定結果、特に最大の損傷レベルの結果は構造物の崩壊による死者数や負傷者数の推定にも有用である。

プロジェクトの中間成果は国内でのワークショップや国際会議でも議論され、これらは良いレビューの機会となった。

3手法（計算による手法、思考的手法、経験的手法）による結果にはばらつきが生じたが、それらを単純に平均することは避けた。その代わりとして、研究者の経験と判断に基づき、実用のための脆弱性カーブを最終決定した。本プロジェクトで提案した脆弱性カーブは、様々なハザード強度に対する建物の被害データをもとに継続的にアップデートされるべきものである。

## 謝辞

UPD-ICE は以下の関係各位に深い感謝の意を表する。彼らの協力なしに本プロジェクトの遂行は不可能であった：

PHIVOLCS-DOST や PAGASA-DOST を通じた AusAID による財務的支援、GA による技術的支援やコメント；

PHIVOLCS-DOST や PAGASA-DOST のカウンターパートからのデータ、アドバイス、技術情報；

PICE や ASEP による調査への参加、とりわけ Engr. Vinci Villasenor、Engr. Miriam Tamayo、Engr. Noel Ortigas の調査チームへのサポート；

所長である Alexis A. Acacio 博士のリーダーシップの下、UPD-ICE の同僚、研究所を挙げての惜しめないサポート。

フィリピン大学ディリマン校土木工学研究所

Benito M. Pacheco, Ph.D., P.E.

Jaime Y. Hernandez Jr., Ph.D. □ Peter Paul M. Castro □ Eric Augustus J. Tingatinga, Ph.D.

Fernando Germar, Ph.D. □ Ulpiano P. Ignacio Jr. □ Mark Albert H. Zarco, Ph.D.

Diocel Harold M. Aquino □ Joseph Romeo M. Diño □ Romeo Eliezer U. Longalong

Richmark O. Macuha □ William L. Mata □ Marie Claire L. Pascua □ Gian Paulo D. Reyes

Raniel M. Suiza □ Liezl Raissa E. Tan □ John Lemar M. Tirao □ Maria Clarissa L. Veron

Imee Bren O. Villalba

# 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b> .....	<b>1-1</b>
1.1	背景 .....	1-1
1.2	リスク要因と損害算出メソッド .....	1-2
1.3	脆弱性カーブと損傷度カーブ .....	1-3
1.4	既存建築物のインベントリーを基にした建築物の類型作成 .....	1-4
1.5	先行調査のレビュー .....	1-6
1.5.1	強風 .....	1-6
1.5.2	洪水 .....	1-12
1.5.3	地震 .....	1-13
1.6	本研究の目的とスコープ .....	1-14
1.7	プロジェクトパートナーの役割 .....	1-16
1.7.1	科学技術省PAGASA .....	1-16
1.7.2	科学技術省PHIVOLCS .....	1-16
1.7.3	フィリピン大学ディリマン校土木工学研究所UPD-ICE .....	1-17
<b>2</b>	<b>建築物類型(タイポロジー)と種類</b> .....	<b>2-19</b>
2.1	フィリピンにおけるUPD-ICE建築物類型のレビュー .....	2-19
2.2	ワークショップでの議論 .....	2-23
2.2.1	強風ハザード .....	2-24
2.2.2	洪水ハザード .....	2-24
2.2.3	地震ハザード .....	2-25
2.3	現地調査及び評価データ .....	2-27
2.4	UP-ICEによる、大マニラ首都圏のための建築物類型の作成 .....	2-27
<b>3</b>	<b>損害データのレビュー</b> .....	<b>3-29</b>
3.1	強風 .....	3-29
3.2	地震 .....	3-40
3.2.1	過去の地震イベントと建築物への影響評価 (BUILDING CONSEQUENCES) .....	3-40
3.2.2	2012年ネグロス島沖地震によるフィリピンの公立学校校舎で発生した損害 .....	3-41
<b>4</b>	<b>風に対する脆弱性分析</b> .....	<b>4-44</b>
4.1	メソドロジー .....	4-44
4.1.1	計算による手法 .....	4-44
4.1.2	思考的手法 .....	4-61
4.1.3	経験的手法 .....	4-65
4.2	結果 .....	4-66

4.2.1	計算による手法 .....	4-66
4.2.2	思考的手法 .....	4-69
4.2.3	経験的手法 .....	4-72
4.3	国際会議での議論 .....	4-75
<b>5</b>	<b>洪水に対する脆弱性分析 .....</b>	<b>5-77</b>
5.1	手法 .....	5-77
5.1.1	計算による手法 .....	5-77
5.1.2	思考的手法 .....	5-81
5.2	結果 .....	5-82
5.2.1	計算による手法 .....	5-82
5.2.2	思考的手法 .....	5-85
5.3	豪州地球科学機構での研修時の議論 .....	5-87
<b>6</b>	<b>地震に対する脆弱性分析 .....</b>	<b>6-89</b>
6.1	手法 .....	6-89
6.1.1	計算による手法 .....	6-89
6.1.2	思考的手法 .....	6-104
6.1.3	経験的手法 .....	6-108
6.2	結果 .....	6-111
6.2.1	計算による手法 .....	6-111
6.2.2	思考的手法 .....	6-115
6.2.3	経験的手法 .....	6-118
6.3	国際会議での議論 .....	6-120
<b>7</b>	<b>議論および提言 .....</b>	<b>7-121</b>
7.1	強風に対する脆弱性カーブ .....	7-121
7.2	洪水に対する脆弱性カーブ .....	7-128
7.3	地震に対する脆弱性カーブ .....	7-134
7.3.1	推奨する脆弱性カーブ .....	7-135
7.3.2	地震に対する損傷度カーブ .....	7-139

## 図一覧

図 1-1	リスク因子 .....	1-2
図 1-2	脆弱性カーブの例 .....	1-4
図 1-3	損傷度カーブの例 .....	1-4
図 1-4	CSAの動的負荷サイクル (Baskaran, 2010) .....	1-8
図 1-5	静的負荷率(Bisa, 2013).....	1-9
図 1-6	木くぎに対する繰り返しロードシーケンス (Bisa, 2013).....	1-9
図 1-7	孤立もしくは群生した応急住宅に対する損傷度カーブ(Diño, 2013).....	1-11
図 1-8	孤立もしくは群生した応急住宅に対する脆弱性カーブ (Diño, 2013).....	1-11
図 1-9	低層コンクリート建築物に対する損傷度カーブ(Veron, 2012).....	1-12
図 3-1	ミレニオ台風の際のEDSAにおける損傷写真 .....	3-30
図 3-2	ミレニオ台風の際のマニラ首都圏における損傷写真 .....	3-30
図 3-3	ミレニオ台風の際の低層構造物の損傷写真 .....	3-31
図 3-4	ミレニオ台風の際の構造物における屋根の損傷 .....	3-31
図 3-5	ミレニオ台風の際の構造物における壁と屋根の損傷 .....	3-32
図 3-6	ミレニオ台風の際のマニラ首都圏における広告版の損傷写真.....	3-32
図 3-7	ミレニオ台風の際のSorsogon Cityにおける損傷写真 .....	3-33
図 3-8	レミン台風の際のPili, Camarines Surにおける損害写真 .....	3-33
図 3-9	レミン台風の際のSipocot, Camarines Sur における損害写真.....	3-34
図 3-10	レミン台風の際のLegazpi, Albayにおける損害写真 .....	3-34
図 3-11	ジュアン台風の際のCabagan, Isabela における損害写真 .....	3-35
図 3-12	ジュアン台風の際のIligan, Isabela における損害写真.....	3-35
図 3-13	ジュアン台風の際のRoxas, Cagayanにおける損害写真.....	3-36
図 3-14	ペドリング台風の際のMabini, Isabelaにおける損害写真.....	3-37
図 3-15	ペドリング台風の際のBatal, Isabelaにおける損害写真.....	3-37
図 3-16	ペドリング台風の際のCabarroquis, Quirinoにおける損害写真.....	3-38
図 3-17	ペドリング台風の際のEchague, Isabelaにおける損害写真 .....	3-39
図 3-18	ペドリング台風の際のDiffun, Quirinoにおける損害写真 .....	3-39
図 3-19	PHIVOLCS とGAによる過去の災害イベント報告の例(2012).....	3-41
図 3-20	2012年ネグロス島沖地震によって損傷した公立学校建築物の評価.....	3-42
図 4-1	使用したメソドロジーの枠組み (Veron, 2012).....	4-45
図 4-2	標準建築物モデル .....	4-46
図 4-3	庇のある標準建築物モデル .....	4-46
図 4-4	防火壁のある標準建築物モデル .....	4-47
図 4-5	屋根庇と防火壁のある標準建築物モデル .....	4-47
図 4-6	(a) 広告版モデル1 (b) 広告版モデル2 .....	4-49
図 4-7	流入境界条件(Veron, 2012).....	4-49
図 4-8	流出境界条件(Veron, 2012).....	4-50
図 4-9	自由なスリップ壁境界条件(Veron, 2012).....	4-50

図 4-10	スリップ壁のない境界条件(Veron, 2012).....	4-51
図 4-11	屋根における適用風向 .....	4-52
図 4-12	横からの風向(perspective) .....	4-52
図 4-13	縦の風向(XY plane).....	4-53
図 4-14	縦の風向 (perspective) .....	4-53
図 4-15	縦の風向 (YZ plane).....	4-54
図 4-16	45度からの風向 .....	4-54
図 4-17	広告板に対する風の負荷パターン例 .....	4-55
図 4-18	C1-Mに使われた非因子の負荷チャート (出所: ASTM E1300-12a) ...	4-56
図 4-19	水平方向の風に対する風圧分布 .....	4-57
図 4-20	縦方向の風に対する風圧 .....	4-58
図 4-21	45度傾斜の風に対する風圧分布 .....	4-58
図 4-22	損傷度カーブの例 .....	4-60
図 4-23	脆弱性カーブの例 .....	4-61
図 4-24	思考的手法のメソドロジー .....	4-61
図 4-25	建築物に対する脆弱性カーブ一式 .....	4-62
図 4-26	特殊構造物に対する脆弱性カーブ一式 .....	4-63
図 4-27	建築物類型S1Lに対する回答者の信頼水準と業務経験年数の相関 .....	4-64
図 4-28	経験的手法のフロー .....	4-65
図 4-29	木造及び石積み造のための計算による風の脆弱性カーブ .....	4-67
図 4-30	鋼構造及びコンクリート造のための計算による風の脆弱性カーブ .....	4-68
図 4-31	特殊構造物のための計算による風の脆弱性カーブ .....	4-69
図 4-32	木造及び石積み造のための思考的手法による風の脆弱性カーブ .....	4-70
図 4-33	鋼構造及びコンクリート造のための思考的手法による風の脆弱性カーブ .....	4-71
図 4-34	特殊構造物のための思考的手法による風の脆弱性カーブ .....	4-72
図 4-35	木造及び石積み造のための経験的手法による風の脆弱性カーブ .....	4-73
図 4-36	鋼構造及びコンクリート造のための経験的手法による風の脆弱性カーブ .....	4-74
図 4-37	特殊構造のための経験的手法による風の脆弱性カーブ .....	4-75
図 5-1	計算による脆弱性カーブ作成の流れ .....	5-77
図 5-2	ICE洪水脆弱性計算ツールのメイン画面 .....	5-80
図 5-3	ICE洪水脆弱性計算ツールのインターフェース .....	5-80
図 5-4	計算による手法で作成した洪水脆弱性カーブ (木造および石積み建築物) .....	5-83
図 5-5	計算による手法で作成した洪水脆弱性カーブ (コンクリートおよび鋼構造建築物) .....	5-84
図 5-6	思考的手法による洪水脆弱性カーブ (木造および石積み建築物) .....	5-86
図 5-7	思考的手法による洪水脆弱性カーブ (コンクリートおよび鋼構造建築物) .....	5-87
図 6-1	計算による地震脆弱性カーブ作成の概略フロー .....	6-90
図 6-2	NSCPに掲載されている応答スペクトル .....	6-91
図 6-3	マニラ首都圏の地形・行政界および活断層 (Bautista, 2001) .....	6-92
図 6-4	拡大・縮小した設計応答スペクトル .....	6-94



図 6-5	ETABSの画面例.....	6-97
図 6-6	軽度および完全崩壊に対する閾値の設定例 .....	6-98
図 6-7	損傷状態評価の図解例 .....	6-99
図 6-8	建物種別ごとの被害率（専門家経験年数ごとに整理） .....	6-106
図 6-9	経験年数と回答への自信の程度の関係（建物種別C1-L） .....	6-107
図 6-10	Ilocos Norte州BacarraにあるSt. Andrew Parish教会 .....	6-110
図 6-11	CHB/MWS型式に対する経験に基づく脆弱性カーブ .....	6-111
図 6-12	最終的に提案した損傷度カーブ（計算による手法） .....	6-113
図 6-13	計算による手法で推定した地震に対する脆弱性カーブ .....	6-114
図 6-14	木造および石積み工に対する地震脆弱性カーブ（思考的手法） .....	6-116
図 6-15	コンクリート造に対する地震脆弱性カーブ（思考的手法） .....	6-117
図 6-16	鋼構造に対する地震脆弱性カーブ（思考的手法） .....	6-118
図 6-17	経験的手法による地震脆弱性カーブ（W1-L、MWS-L、CHB-L、URA-L） .....	6-119
図 7-1	強風脆弱性カーブの手法による比較（木造および石積み工） .....	7-122
図 7-2	強風脆弱性カーブの手法による比較（コンクリート造および鋼構造） .....	7-123
図 7-3	強風脆弱性カーブの手法による比較（特殊な構造） .....	7-124
図 7-4	提案する強風脆弱性カーブ（木造および石積み工） .....	7-126
図 7-5	提案する強風脆弱性カーブ（コンクリート造および鋼構造） .....	7-127
図 7-6	提案する強風脆弱性カーブ（特殊な構造） .....	7-128
図 7-7	洪水脆弱性解析のためのモデルデータベースの生成 .....	7-129
図 7-8	思考的手法で算定した個々の洪水脆弱性カーブ .....	7-131
図 7-9	思考的手法（青色）と計算（赤色）による洪水脆弱性カーブ（木造・石積み工） .....	7-132
図 7-10	思考的手法（青色）と計算（赤色）による洪水脆弱性カーブ（コンクリート造・鋼構造） .....	7-133
図 7-11	木造および石積み工に対する推奨地震脆弱性カーブ .....	7-137
図 7-12	コンクリート造に対する推奨地震脆弱性カーブ .....	7-138
図 7-13	鋼構造に対する推奨地震脆弱性カーブ .....	7-139

## 表一覧

表 1-1	リスク因子の特徴と例 (Suiza, 2010).....	1-3
表 1-2	リモートセンシングを用いた2001マニラ首都圏建築物インベントリー (Miura, 2006).....	1-5
表 1-3	建築物担当官や地方自治体エンジニアに対する調査を用いた建築物インベ ントリー (Vibrametrics, 2003).....	1-6
表 1-4	住宅建築クラスに対する損傷状態(HAZUS-MH).....	1-10
表 1-5	MMEIRSで予測された建築物に対する損傷の要約(JICA, 2004).....	1-14
表 2-1	素材による主要な建築物タイプ、階数、建築年.....	2-20
表 2-2	UPD-ICE 建築物類型とNSO分類の対応表.....	2-28
表 2-3	強風、洪水、地震に対する主要な建築物タイプ.....	2-29
表 4-1	閾値.....	4-56
表 4-2	各広告板モデルに対する閾値.....	4-57
表 4-3	住宅建築クラスに対する損傷状態.....	4-59
表 4-4	参照脆弱性カーブのパラメーター.....	4-63
表 4-5	建築物類型から考えられる専門性.....	4-63
表 4-6	重み付け割り当て.....	4-64
表 4-7	計算による手法を用いた脆弱性カーブのパラメーター.....	4-66
表 4-8	思考的手法を用いた脆弱性カーブのパラメーター.....	4-69
表 4-9	経験的手法を用いた脆弱性カーブのパラメーター.....	4-72
表 5-1	専門家用評価シートの一例.....	5-81
表 5-2	専門家の経験年数に応じた重み係数.....	5-81
表 5-3	計算による手法で作成した洪水脆弱性カーブの節点.....	5-82
表 5-4	思考的手法による洪水脆弱性カーブの節点.....	5-85
表 6-1	土壌型C、D、Eに対する地震係数.....	6-92
表 6-2	フィリピンで震源域ごとに発生しうる最大の地震 (MCE).....	6-93
表 6-3	震源への近接度を考慮した地震係数 (土壌型C、D、E).....	6-94
表 6-4	非線形フレームヒンジの特性.....	6-96
表 6-5	建物種別C1-Lにおける損傷状態の層間変形率の閾値 (HAZUS, Table 5.9d).....	6-97
表 6-6	チェックリストの該当割合と評価の関係.....	6-100
表 6-7	設計要求事項を評価するためのマトリックス.....	6-101
表 6-8	設計要求事項の定性評価 (出典: FEMA P695).....	6-101
表 6-9	試験データの定性評価 (出典: FEMA P695).....	6-101
表 6-10	インデックス原型モデルの定性評価 (出典: FEMA P695).....	6-101
表 6-11	低層鋼構造物に対する認識論的不確実性調査結果.....	6-102
表 6-12	低層RC構造物に対する認識論的不確実性調査結果.....	6-102
表 6-13	中高層鋼構造物に対する認識論的不確実性調査結果.....	6-102
表 6-14	中高層RC構造物に対する認識論的不確実性調査結果.....	6-102
表 6-15	認識論的不確実性の値.....	6-103

表 6-16	被害の範囲 .....	6-103
表 6-17	思考的手法に参加した専門家 .....	6-105
表 6-18	経験年数に応じて設定した重み係数 .....	6-107
表 6-19	過去の地震レポートからのサンプル抽出 .....	6-109
表 6-20	CHB/MWS型式の脆弱性カーブ導出に用いた経験データ .....	6-110
表 6-21	CHB/MWS型式の脆弱性カーブに適用した被害率 .....	6-110
表 6-22	計算によって推定した脆弱性カーブのパラメーター概略値 .....	6-111
表 6-23	最終的な損傷度カーブに適用した全体の不確実性 .....	6-112
表 6-24	最終的な対数正規累積分布関数のパラメーター .....	6-112
表 6-25	脆弱性カーブの対数正規分布のパラメーター（計算による手法） .....	6-115
表 6-26	脆弱性カーブの対数正規分布のパラメーター（思考的手法） .....	6-115
表 6-27	地震脆弱性カーブの対数正規分布のパラメーター（経験的方法） .....	6-119
表 7-1	推奨する洪水脆弱性カーブ .....	7-134
表 7-2	異なるアプローチによる地震脆弱性カーブの対数正規分布パラメーター .....	7-135
表 7-3	マニラ都市圏における主要建物種別の地震損傷度カーブと脆弱性カーブの 対数正規分布パラメーター .....	7-140

# 1 はじめに

## 1.1 背景

フィリピンにとって自然災害による人命と財産の損失が深刻な問題である。中でも地震、強風を伴う台風がもっとも深刻な影響を及ぼしている。フィリピンはいわゆる Ring of Fire といわれる Pacific Rim に沿っており地震活動が活発な地域に位置しているため、歴史的にも地震の被害を受けてきた。また国土の東側が太平洋に面しているため、台風の被害も受けやすい。洪水はほぼ毎年全国で発生している。

地震は強風や洪水と比べると発生頻度は低いが、一度発生するとその被害は甚大である。フィリピン地震火山研究所 (PHIVOLCS) によれば、1608 年から 2002 年までに、およそ 300 万回の地震が起こっている。うち記録に残る 5 万件は体を感じる地震で、90 件は損害をもたらした (PHIVOLCS, 2002)。最近で最も大きな被害をもたらした地震は、1990 年 7 月に発生したマグニチュード 7.8 のルソン地震である。この地震で、1283 名が亡くなり 12.2 億ペソの損害が発生した。国際協力機構 (JICA)、PHIVOLCS、MMDA が行った「MMEIRS」によれば、今後マニラ首都圏及び周辺地域で、マリキナバレー断層がマグニチュード 7.2 級の地震を発生させる可能性がある (JICA, 2004)。

台風由来の強風は頻繁に起こるようになり、人命や経済に対する被害は深刻になる可能性がある。近年、Milenyo (2006), Reming (2006), Frank (2008), Juan (2010), Pedring (2011), Pablo (2012) といった台風によって強風が発生している。

洪水はフィリピン各地で実際に毎年発生している。Ondoy (2009), Pepeng (2009), Sendong (2011)、Pablo (2012) の台風で発生した洪水は甚大な損害をもたらした。2012 年の habagat モンスーン雨のように 台風でなくモンスーン豪雨が深刻な洪水を発生させることもある。

自然災害発生時には、建築や他の構造物が危険に晒される。構造物の損害や崩壊は人命や財産の損失に加え、経済やその他社会的な損失を生み出す可能性がある。そのため、災害を軽減するためのリスク管理が非常に重要である。リスクを管理するためには、リスクが査定され、損害を見積もっておくことが重要である。

現在フィリピン政府は災害削減とリスクマネジメントの分野で様々な策を講じている。科学技術省 (DOST) は AusAID の支援を受け、所管のフィリピン地震火山研究所、フィリピン気象庁、Geoscience Australia、Philippine CSCAND (Collective Strengthening of Community Awareness for Natural Disasters) Agencies とともに「Enhancing Risk Analysis Capacities for Flood, Tropical Cyclone Severe Wind and Earthquake for Greater Metro Manila Area Project : 大マニラ首都圏における、防災・気候変動に係る、リスク分析に関する関係者の能力強化プロジェクト」(通称「RAP : リスク分析プロジェクト」) を実施している。

本プロジェクトの目的は、大マニラ首都圏における、熱帯サイクロン由来の強風、洪水、地震由来のリスクを分析することである。そのため、コミュニティの自然災害に対する強靭性を高めるべく、ハザード、暴露、脆弱性に関する情報や基礎的なデータセットを構築した。

災害削減計画の準備で大部分を占めるのは対象となる建築物の脆弱性の数値化である。中でも重要なコンポーネントとして、脆弱性カーブの生成がある。脆弱性カーブとは、一定のレベルの自然災害に対し、特定の損害に到達もしくは超える可能性を予測するのに用いられる。

地震のハザードのレベルは地盤振動もしくは表面最大加速度となるだろう。強風は特定の高度における風速となるだろう。洪水は、浸水深であろう。

脆弱性については、PHIVOLCS、PAGASA、フィリピン大学ディリマン校土木工学研究所（UPD-ICE）が「フィリピン国大マニラ首都圏における主な建築種別の脆弱性カーブの生成」と題する合意覚書を交わし調査を行った。本報告書はそのプロジェクトの結果である。

## 1.2 リスク要因と損害算出メソッド

地震、強風、洪水といった災害リスクの評価には3つの要素がある。それはハザード、暴露、脆弱性である（図 1-1 参照）。

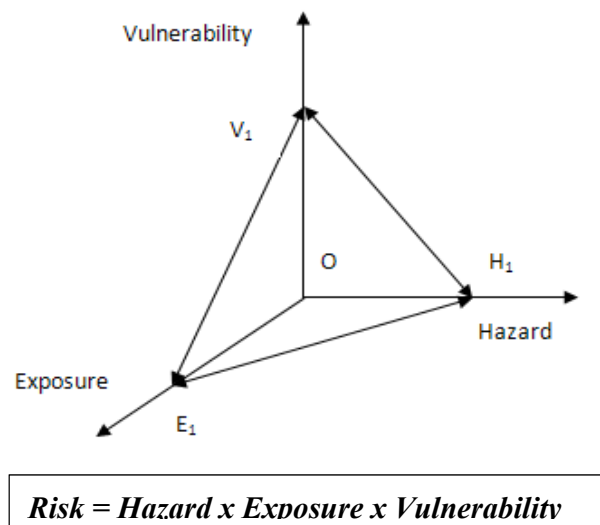


図 1-1 リスク因子

ハザードとは、リスクにおける外的要素の状態である。例えば特定の震度、風速、浸水深の起こりやすさである。暴露とはリスクにおける要素の接触の程度である。例えばハザードが起こった際に影響を受けるとされる区域内にある、建築物や財産の数量などがそれにあたる。一方で脆弱性はハザードに暴露している要素の影響の受けやすさ

(susceptibility) や弱さを示す。つまり回復力の反意語とも言える(Pacheco, 2009)。

表 1-1 にリスク要因の特徴を示した。

表 1-1 リスク因子の特徴と例 (Suiza, 2010)

Risk Factor	Characteristics	Examples
Hazard	External Danger	Earthquake Typhoon Landslide Flood
Exposure	Contact	Buildings Lives Businesses People
Vulnerability	Susceptibility	Physical Structural Economic Social

災害に対する損害を算出する方法は幾つかある。本調査では、経験、推測、計算による手法を検討した。経験的方法論は過去の事象に基づくものである（例えば、過去の地震後、台風後の調査報告など）(Pacheco, 2009)。この手法は実際の事象に基づいており、全ての実践的な詳細が考慮されているという点で最も現実的といえる。しかし特定の地域や環境に特異的であり、観察されたデータ量に依存する可能性もある(Rosetto, 2003)。

一方で推測に基づく手法は専門家の判断に基づくものである(Pacheco, 2009)。手法の信頼性はどの専門家が判断するかにかかっている(Rosetto, 2003)。最後に、計算に基づくメソッドは荷重に依るモデルの分析に基づくものである（地震荷重、風圧荷重など）。

### 1.3 脆弱性カーブと損傷度カーブ

脆弱性カーブと損傷度カーブは時として、区別せずに使用されることがある。しかし本調査においては、二つの曲線はそれぞれをきちんと定義づけるものとする。脆弱性カーブはハザードの一定の強度に対する建物の損害を算出するのに用いられる。本調査で報告されるハザードパラメーターには、強風、洪水、地震それぞれのハザードに対し、最大瞬間風速、洪水浸水レベル、表面最大加速度が含まれる。一定の強度のハザードに対する建築物の損害は損害比（the damage ratio）を用いて算出される。損害比とは、「建物の損害修復費用と再調達価格の比」と定義される。図 1.2 に示したのは典型的な脆弱性カーブで、横軸にハザードの強さ、縦軸に建物の損傷度合いを表したものである。

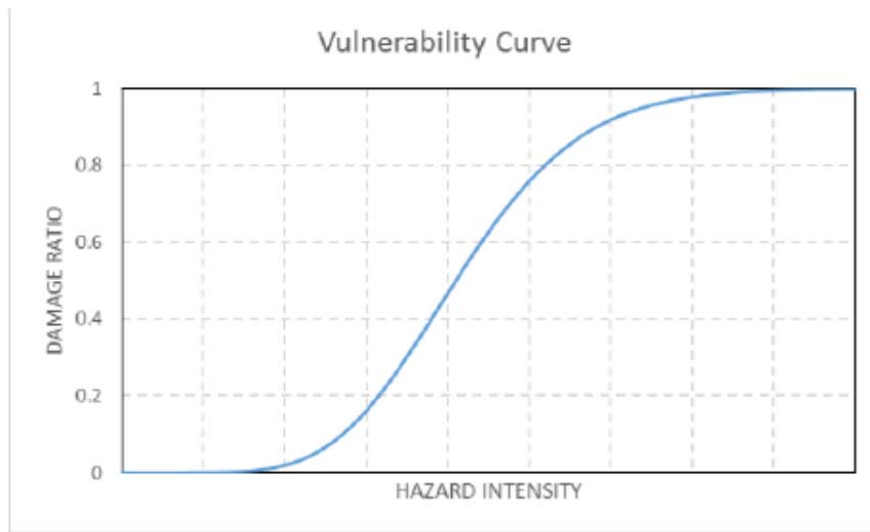


図 1-2 脆弱性カーブの例

一方で、損傷度カーブは一定のレベルのハザードに対する損傷状態、もしくはそれを越える累積確率を算出するのに用いる。図 1-3 に示すのは、損害状態に応じた4つの損傷度カーブである。

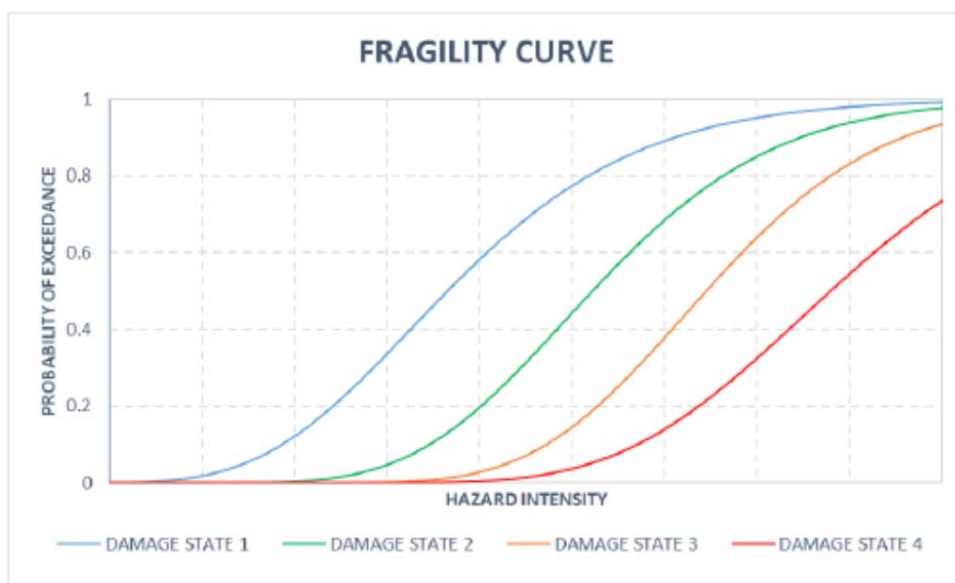


図 1-3 損傷度カーブの例

#### 1.4 既存建築物のインベントリーを基にした建築物の類型作成

既存建築物のインベントリーを作成するにあたり、National Statistics Office (NSO) や地方自治体 (LGUs) の市評価事務所が作成したセンサスの結果など、出所の違うデータを利用できる。NSO は 10 年毎に住宅調査を行っており、「人口と住宅センサス」の結果と

して公開されている。この調査には、住宅に関する幾つかの統計、例えば床面積、建物の区分、外壁、屋根の建築材料、所有権種別ごとのインベントリーが含まれている。非住宅建物については、NSO は承認済み建築許可を含む特別号を 4 半期ごとに発表している。

NSO のデータを使用するうえでの難しさは、NSO の住宅区分を建物区分に変換する点である。一方で市評価事務所の建築物分類は、数種ある既存の構造システムと区別するには不十分である。したがって、最初にリスク評価を行った調査者は、分析の際必要となる暴露データを入手するため、別の手法でデータを再分類する必要があった。

2001 年、Miura と Midorikawa はリモートセンシングを用いた高解像度の衛星画像によってマニラ首都圏の建築物インベントリーに関する研究を行った(Miura 2006)。本研究ではオルティガス、ケソン、マカティの商業区域を含むマニラ首都圏の約 75%の地域をカバーしている。本研究では、GIS を使用し、構造物の影を使って算出した建物の高さに従って建物のインベントリーを作成した。その後本研究で収集されたデータは、現地の専門家が評価した建物の地震時挙動に基づき、マニラ首都圏の地震損害算出のための別の研究に使用された。表 1-2 に示したのは、上述の研究で得られた建築物インベントリーで、約 129 万の建物が含まれている。

表 1-2 リモートセンシングを用いた 2001 マニラ首都圏建築物インベントリー (Miura, 2006)

Building Height	Storeys	Number of Buildings
Low (L)	1 to 3	1,281,400
Mid (M)	4 to 7	2,869
High (H)	8 to 15	812
Very High (V)	16 to 25	242
Extremely High (E)	26 to 35	115
Super High (S)	36 above	54
<b>Total</b>		<b>1,285,492</b>

Vibrametrics, Inc がこれと似た研究を 2003 年に行っている。この研究にはマニラ首都圏の約 13 の市と町が参加した。対象自治体の建築物担当官やエンジニアは各行政区画内にある公共建築物、民間建築物の数量を算出し、それらがどのような構造材、例えば鉄、木、中空コンクリート・ブロック (CHB)、ブロック等、で作られているかを調査した (Vibrametrics, 2003)。コンクリート建築物については、剛接骨組 (moment-resisting Frames: MRF) や耐震壁がその高さと共にさらに調査された。

表 1-3 は本研究の建築物インベントリーをまとめたものである。表内の数字は Miura の研究の数字ほど正確ではないように見える。というのも、本調査で使用されたデータ



は17市町のうち13で調査されたものであり、対象となったのは、許可を受け設計、報告された建築物であるためだ。従ってこの調査には、許可を受けて設計、報告されていない、インフォーマルセトルメントのような建物が含まれていない可能性が高い。そのため、中空コンクリート・ブロック、木、低層のコンクリート構造物が増加していることが読み取れる。

表 1-3 建築物担当官や地方自治体エンジニアに対する調査を用いた建築物インベントリー (Vibrametrics, 2003)

Building Type	Structures
CHB	415,277
C1L	232,314
C1M	26,200
C1H	5,741
C2H	2,623
C2V	2,912
C2E	2,349
C2S	1,499
Steel	47,376
Wood	48,655
Others	18,298
<b>Total (13 of 17 areas)</b>	<b>803,245</b>
<b>Projected Total (17 areas)</b>	<b>1,050,398</b>

## 1.5 先行調査のレビュー

### 1.5.1 強風

#### a. フィリピンにおける台風記録

科学技術省管轄化にあるフィリピン気象庁 (PAGASA) は台風のと現場視察を行う。様々な台風によって生じた損害に関するいくつかの情報は PAGASA の熱帯サイクロンモデルを使って確定される。PAGASA は構造物の損害データを対象地域の風速に応じた写真として持っている。

## **b. フィリピンの住宅事情**

フィリピンはサイクロンの通り道に位置することで知られている。フィリピンは多くの嵐に見舞われることがあるものの、まだ多くの人々が非工学的構造物 (non-engineered structures) に居住していることで自然災害の危険に晒されている。Anwar (1996)は、ローカルコードに含まれない最貧困層の伝統的な自己建築を含む非工学カテゴリーを検討している。

## **c. 風圧荷重における周辺構造への影響**

一般に都市で風圧荷重について調査を行う場合、周辺構造物を考慮することは非常に重要である。Holmes (2001) はシェルターや上流側の建築物 (upstream buildings) の空気力学的干渉効果は、風圧荷重を考慮するうえで特筆に価すると示した。この研究によれば、同じ高さの建築物のうち、上流側にあるものは、壁圧と屋根の先端における圧を大幅に現象させた。L. M. St. Pierre et al. (2003) らによる、隔離棟での実験は、同じような大きさの周辺構造物が存在する場合、住宅の風圧荷重が大幅に減少することを示した。

## **d. パフォーマンスに基づいた工学**

Rosowsky and Ellingwood (2002)は自然災害に強い住宅の設計について新しいアプローチから議論した。建築物を設計する際、個別の建物だけでなく、構造物全体のシステムのパフォーマンスを考慮に入れる必要があると強調した。これは「パフォーマンスに基づいた工学」と呼ばれている。建築物の要素を個別に評価する際、構造物全体のパフォーマンスを過小評価する可能性がある。パフォーマンスに基づいた設計では、自然災害発生の際、居住者の安全だけでなく、想定されるレベルの全体構造のパフォーマンスも考慮に入れる。

## **e. 屋根板の浮き上がり耐性**

強風の際、住宅でよく損害を受けるのは屋根である。Rosowsky and Schiffのプロトタイプ実験で屋根板の耐性が開発された。この実験では2つの屋根釘、2インチの6dと2.5インチの6dが使用された。実験から得られた屋根板上昇耐性は、屋根に対し25psf (1200 Pa) であった。

## **f. 負荷シミュレーションによる屋根留めのパフォーマンス解析**

Baskaranの研究によれば、屋根留めが違った条件化に置かれた際、強度が大幅に低下するという。この研究では、繰り返し荷重、めっき、浸水などが含まれる。Baskaranは主に繰り返し荷重に着目した。繰り返し荷重は動的風挙動 (dynamic wind behavior) をシミュレーションしたものであるためである。この実験で使用された風圧荷重テストサイクルは気象学的データに基づいたものである。屋根ふき材の強度に影響を与えると考えられるシートのねじれ (sheet distortion)、外周、seal attachment等に問題があった。Baskaranによれば、メタルシートの場合強度が30~50%低下し、木の場合10~20%低下した。

#### g. 屋根ふき材の浮き上がり耐性算出のための新しいアプローチ

Baskaran はその研究の中で、設備を圧力を使ってコントロールする Canadian Standard Association (CSA)の動的負荷サイクル (dynamic load cycles) を紹介した。様々な振幅サイクルのロードシーケンス (a loading sequence) を使用した。加えて、圧アクチュエーターを適用した最小圧力は図 1.4 のように増加し、最初の 1350 gust に対する最小圧力は 0 kPa である一方、次の 850 gust に対する最小圧力は 15 kPa である。

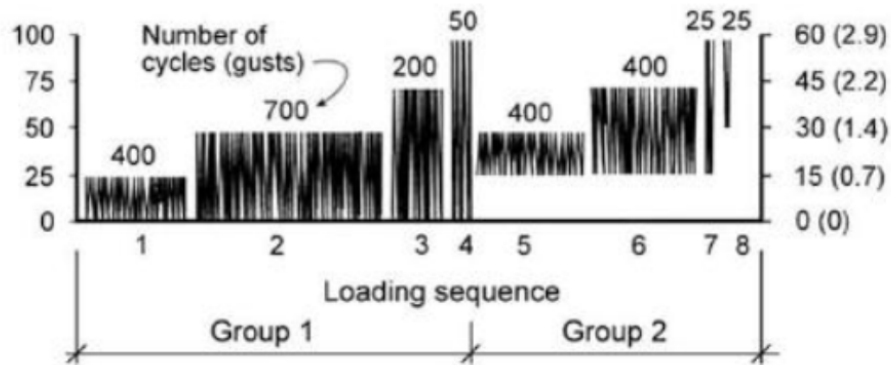


図 1-4 CSA の動的負荷サイクル (Baskaran, 2010)

#### h. 堤固定スチールクラッドにおける貫通破壊

台風の際、屋根ふき材はしばしばファスナー接続部の local pull-through failures に悩まされる(Mahendran, 2008)。屋根ふき材の Local failures はそのプロファイル、厚さ、pitch、深度、クラッドの強さに依存する。加えて、ねじ頭の大きさはキャパシティに影響を与える。Mahendran の実験によれば、local dimpling failure は the pull-through test の初期に起こり、pull-through failures は横方向の断裂の形をとる。研究結果によれば、屋根ふき材の実際のキャパシティは波型のもので 1.06 kN だった。Mahendran はまた、ファスナーリアクションは屋根の領域の中央部のサポートが最大だった。従って、失敗は the magnitude of the central support load per fastener.

#### i. 屋根接続部の経験的閾値

Bisa (2013) は UTM (Universal Testing Machine) を用いた実験を行い、屋根接続部の経験的閾値について研究した。静的負荷、繰り返し負荷を与え、違う種類のくぎ、ねじ、その混合の、引き抜きキャパシティの試験を行った。静的負荷の負荷レートは 2 mm/min. である (図 1-5)。大梁の動作はファスナーが完全引き抜きに至るまで一定である。動的負荷については、大梁は段階的振幅で上下する (図 1-6)。大梁の負荷レートは 75mm/min である。一定の振幅については標本に適用されたサイクルが一定数存在する。シーケンスは Baskaran の研究と似ているが、振幅とサイクル数は修正された。

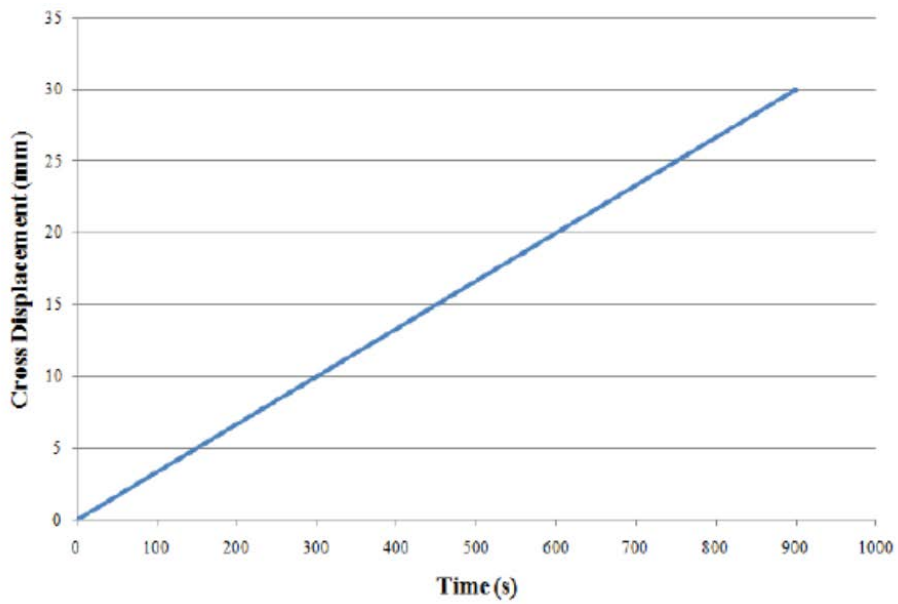


図 1-5 静的負荷率(Bisa, 2013)

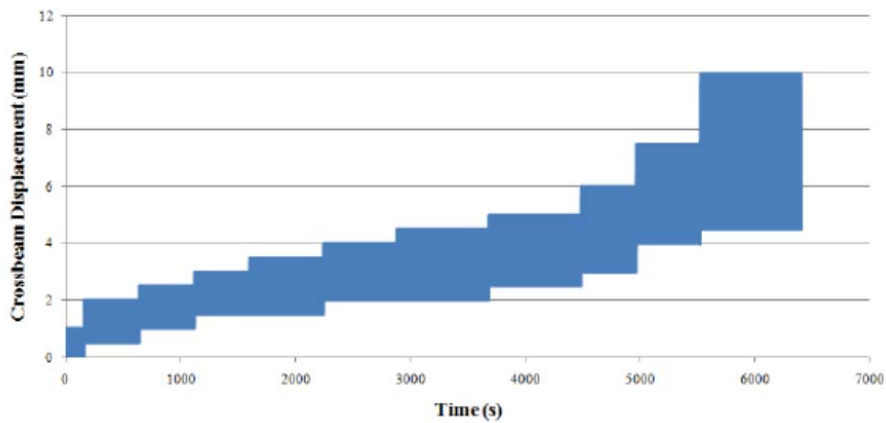


図 1-6 木くぎに対する繰り返しロードシーケンス (Bisa, 2013)

#### j. 住宅の損害状態と閾値

強風荷重を考慮する際、住宅の最も脆弱な部分は建物外面 (envelope) である。これには、屋根、壁、ドア、窓が含まれる。これらのコンポーネントの破壊 (Failure) は建築物の構造的統合性の減少を導くことがある。Vickery et al (2006) は表 1.4 に示すように、HAZUS のマルチ・ハザードハリケーンモデル (the Hazard US – Multi-Hazards (HAZUS-MH) Hurricane Model) を用いた損害状態を提供した。

表 1-4 住宅建築クラスに対する損傷状態(HAZUS-MH)

Damage State	Qualitative Damage Description	Roof Cover Failure	Window / Door Failure	Roof Deck	Missile Impacts on Wall	Roof Structure Failure	Wall Structure Failure
0	no damage or very minor damage	≤ 2%	No	No	No	No	No
1	minor damage	> 2% and ≤ 15%	one window, door, or garage door failure	No	< 5 impacts	No	No
2	moderate damage	> 15% and ≤ 50%	> one and ≤ the larger of 20% and 3	1 to 3 panels	typically 5 to 10 impacts	No	No
3	severe damage	> 50%	> the larger of 20% and 3 and ≤ 50%	> 3 and ≤ 25%	typically 10 to 20 impacts	No	No
4	destruction	typically > 50%	> 50%	> 25%	typically > 20 impacts	Yes	No

**k. 風荷重に対する応急住宅の脆弱性**

密集又は孤立した応急住宅の脆弱性は Dino (2013)による研究で議論された。

本研究では、マニラ首都圏でよく知られた住宅密集地 5 つにある 110 軒の応急住宅の現場調査も含まれる。本研究では、まず損害指数を用いて脆弱性カーブを作成した後、過疎地と密集地における損傷度カーブを決めるアプローチがとられた。結果は図 1-7 及び図 1-8 に示す。

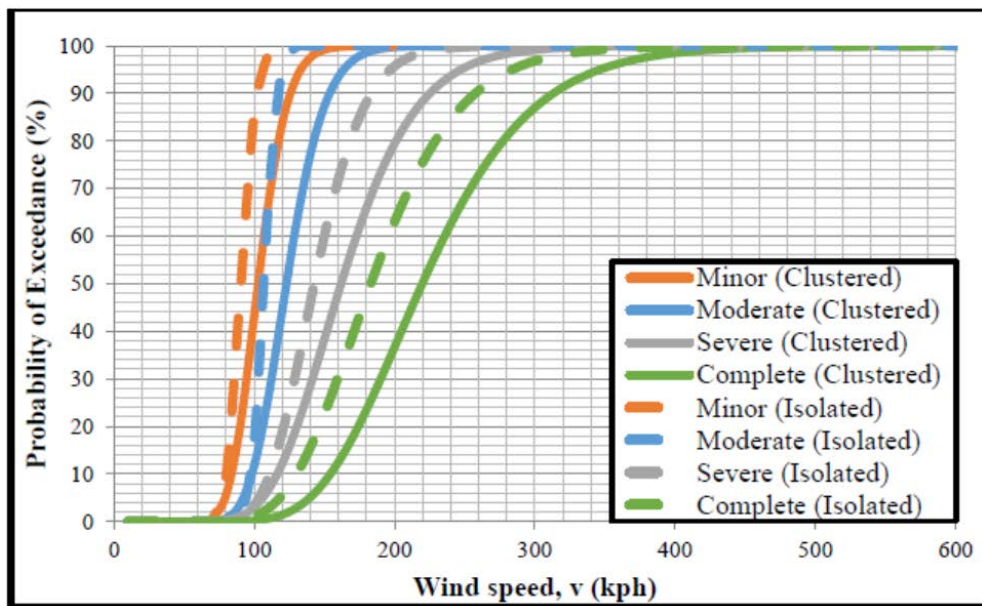


図 1-7 孤立もしくは群生した応急住宅に対する損傷度カーブ(Diño, 2013)

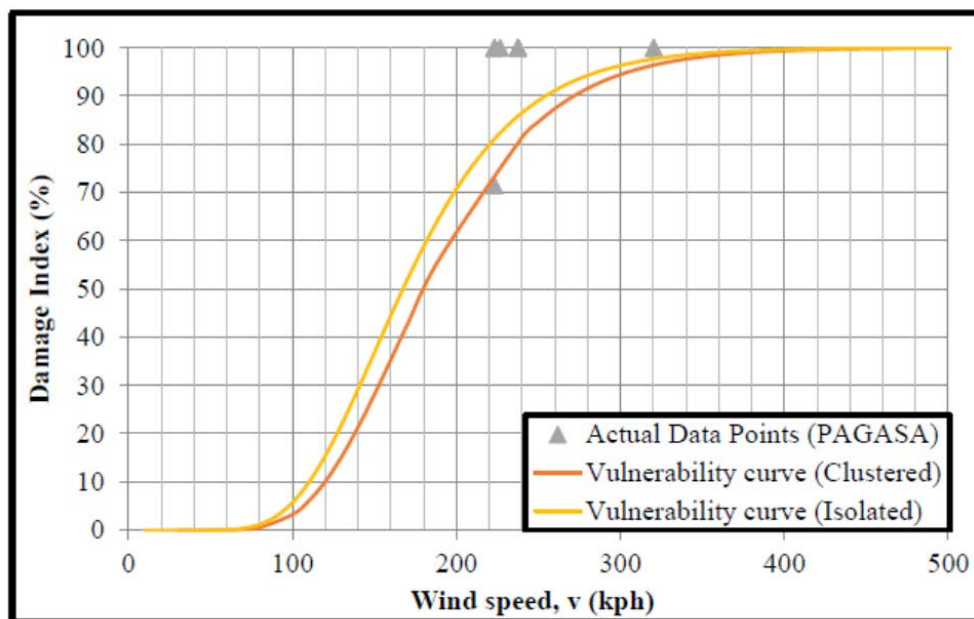


図 1-8 孤立もしくは群生した応急住宅に対する脆弱性カーブ (Diño, 2013)

#### I. 低層強化コンクリート建築物の損傷度カーブの生成

低層強化コンクリート住宅の損傷度については Veron (2012)の研究がある。図 1-9 に示したように、損傷度カーブは3方向からの違った風速を考慮して導かれた。結果は、強風負荷下においては、1階建ての建築物は、2階建てに比べ、やや低い故障確率を示した。

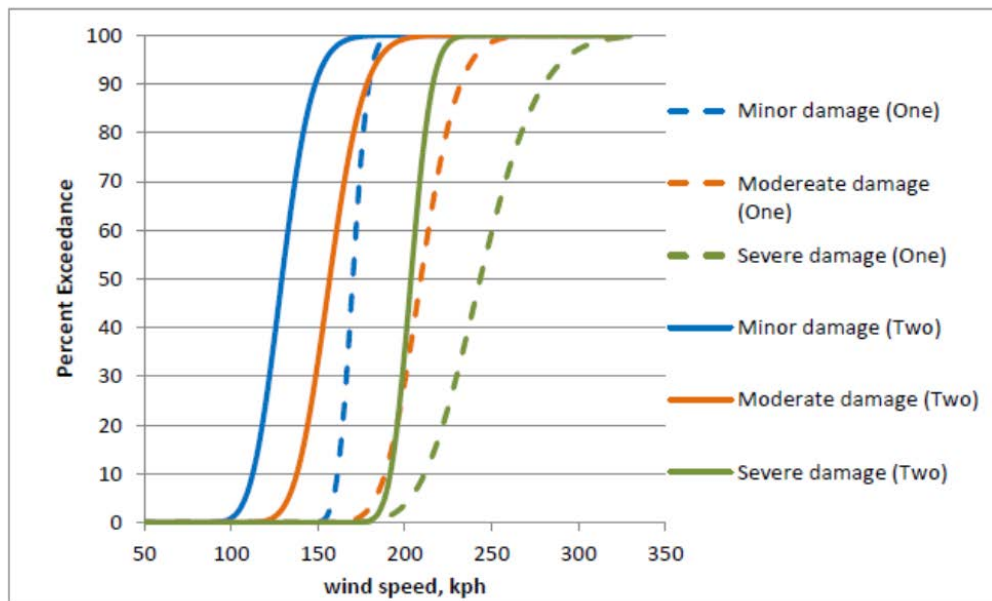


図 1-9 低層コンクリート建築物に対する損傷度カーブ(Veron, 2012)

## 1.5.2 洪水

構造物の洪水に対する物理的脆弱性評価は洪水リスク管理において必要不可欠である。構造脆弱性に関する研究においては、入手可能な損害データや求められる詳細さによって、幾つかのアプローチがある、保険会社や公的機関が損害データをきちんと記録している国もあり、脆弱性分析の主要なツールとして使用することができる。米国では、Federal Insurance Administration (FIA)、Federal Emergency Management Agency (FEMA)、US Army Corps of Engineers (USACE)の洪水損害データが、全国で適用可能な洪水脆弱性カーブの生成に使用されている。このカーブはマルチ・ハザードリスク評価プラットフォーム HAZUS-MH に組み込まれている(FEMA, 2009)。オーストラリアでは建築物の脆弱性を定義するに当たって、災害後調査や詳細な損害額算出 (detailed damage costing) を含む大規模な調査が行われている。

洪水による損害が日常的に記録されていない場所においては、近隣住民に対するインタビューに基礎的な価値があると証明されている。Zein (2010) と Sagala (2006)はそれぞれインドネシアの Surakarta 市とフィリピンの Naga 市において、建築物の物理的な脆弱性に関する記述を、洪水による損害状態のコンセプトとして使用した。この手法では、インタビューで得られた質的回答を数値化し、「何も起こっていない」を「ゼロ (0)」、「建物の全壊」を「1」とした。

一般に、建築物の大部分の構造コンポーネントは洪水に耐性があると期待されているが、構造的な仕上げ (structural finishes) は浸水によって深刻な損害を受けることがある(FEMA, 2009)。一般的に木造構造物はコンクリートや鉄の構造物に比べると脆弱である。建築分類では通常、床、壁、屋根に異なる材料を組み合わせで使用していることを基準としている。HAZUS-MH では、多くの情報が申告されたデータを基準にしているため、建築物の種類は、例えば住宅、商業用、産業用など、占有者の階級に従って分類されている。

人間の行いは、構造物の洪水に対する脆弱性に影響を与える。Maqsood (2011)は被保険、無保険の建築物の洪水後の対応における構造的な脆弱性の違いを指摘した。洪水イベントの際の対処機構 (Coping mechanisms) についても、洪水が起りやすいエリアで発展する。それは潜在的な損害をある程度まで減らそうとするためである。包括的な洪水リスク管理スキームに達するためには、脆弱性評価でこれらの要素も捉える必要がある。

### 1.5.3 地震

地震に関する損傷度カーブと脆弱性カーブの生成に関する研究活動は世界中で確立されている。よく知られている研究として、Hazard-US Multi-Hazard Loss Estimation Methodology (HAZUS-MH)があげられる。HAZUS-MH のコンポーネントの一つに、アメリカの 36 タイプの建築物に対する損傷度カーブの生成 (derivation) がある。この報告書には、構造システム、建築材、建築物の高さを元に作成した、研究対象地域における建築物のタイポロジーも含まれる。詳細な分類は、建築時における既存の建築基準をもとにした耐震レベルに拠る (Further classifications were due to seismic design levels as implied by the existing code at the time of construction.)。本研究では、特定の建築物タイプのキャパシティの算出についても議論している。

建築物キャパシティの算出は、専門家間で降伏値 (the yield value) と究極スペクトラル価を決めるためのパネルディスカッションから引き出された。しかし、この手法はローカルな条件化では応用できないため、キャパシティを算出する代替手法が使用された。

ATC-40 はパフォーマンスポイントに代表される、構造物の反応を見積もる手法である。構造物のパフォーマンスポイントはキャパシティ曲線と需要曲線の交差点と一致する。

キャパシティ曲線は低層から中層建築物に対しては非線形漸増荷重解析(NSP)分析から、高層建築物に対しては連続モーダルプッシュオーバー法(CMP)手法から導き出される。NSP は屋根部における水平力の増加を適用するインタラクティブな過程で、荷重が増分している間に発生した要素からなる。水平力はキャパシティカーブによる変位に対してプロットされる。これは崩壊まで繰り返し行われる。CMP は一方で、多段モーダルプッシュオーバー法を援用する。NSP のように、水平力は建築物に断続的に負荷するが、コントロールポイント (大抵の場合屋根) における変位は違うモード全体にわたってモニターされる。ステージの数は構造におけるポイントの変位に大きく貢献したモードの数に依存する。つまり、構造物の固有周期に依存すると言える (詳細な議論は Appendix C.1.7 を参照)。

需要曲線は、地震動記録から得られる。しかしながら、分析に利用可能な強い地震記録がない場合には、限界がある。従って本研究では、建築基準 (code) から入手可能な応答スペクトルを用いた。

需要応答スペクトルとキャパシティ曲線を重ね合わせる場合には、Acceleration-Displacement Response Spectra (ADRS) format に変換される。こうすることでパフォーマンスポイントが識別可能となる。建築物のパフォーマンスは損害状態に応じて計測される。HAZUS では、inter-story drift limits を使用して、損害状態を数量化した。これらの閾値は構造の損害状態を評価するために使用された。異なる地動パラメーター



における、一定の損害状態の発生頻度がプロットされる。曲線をこのポイントに適合することで、地震損傷度カーブ (the seismic fragility curves) となる。地震損傷度カーブへの適合に使用される通常の数学的モデルは、対数累積分布曲線である。損傷度カーブは従って、認識論的不確定性を説明するために調整される。

認識論的不確定性の数値化は、FEMA P695 を元にした。それは、設計基準、テストデータ、格付けによるモデリングの中の不確定性を数値化したものである。与えられた格付けと一致する変動性値のマトリックスは、FEMA P695 の中で提供されている。これは二乗平方根法(SRSS 法)による固有可変性と組み合わせる。

これと似た研究として、フィリピンで実施された MMEIRS (the Earthquake Impact Reduction Study for Metropolitan Manila) がある。2004 年、JICA、PHIVOLCS、MMDA はマニラ首都圏における災害管理計画策定を目的として、地震損害予測研究を実施した。この研究は 3 つの地震モデルシナリオを使用した。それぞれ、モデル 08 (ウェストバレー断層におけるマグニチュード 7.2 の地震)、モデル 13 (マニラ海溝におけるマグニチュード 7.9 の地震)、モデル 18 (1863 年に発生したマグニチュード 6.5 のマニラ湾地震の再発) である(JICA, 2004)。

表 1-5 MMEIRS で予測された建築物に対する損傷の要約(JICA, 2004)

		Model 08	Model 13	Model 18
Residential Buildings	Partly Damaged	168,300 (12.7%)	1900 (0.1%)	14,200 (1.1%)
	Heavily Damaged	339,800 (25.6%)	6,600 (0.5%)	52,700 (4.0%)
10-30 stories building (981)	Partly Damaged	11%	0.3%	2.3%
	Heavily Damaged	27%	2.8%	9.2 %
31-60 stories building (119)	Partly Damaged	2%	0%	0%
	Heavily Damaged	12%	0.1%	0.5%
Public Purpose Building	Partly Damaged	8-10%	0-0.2%	0-1%
	Heavily Damaged	20-25%	0-0.3%	2-3%

フィリピンで最近実施されたリスク評価に関するプロジェクトは、イロイロ市で実施された QuiveR Project である。この研究では、地震脆弱性カーブのみを取り上げている。GMMA-RAP と似た手法が使われた。手順の詳細や結果を含む報告書が 2012 年 5 月に発表された。調査手法の大きな違いは、多様な土壌型の種類、震源近傍に関する要素、高層建築物用に高度モード効果を組み込もうとしている点である。

## 1.6 本研究の目的とスコープ

PHIVOLCS、PAGASA、フィリピン大学ディリマン校土木工学研究所 (UPD-ICE) によ

る合意覚書に基づき、本プロジェクトは以下2つの目的により実施される。

- i. フィリピン国大マニラ首都圏における現存する建築物タイプを明らかにし、構造タイプ及び建築に使用された構造材の観点から建築物の類型システムを提案すること
- ii. フィリピン国大マニラ首都圏における主要な建築物のタイプの脆弱性カーブの一式を作成すること。この曲線は熱帯サイクロンによる強風、洪水、地震の影響に関するリスク評価に使用可能なものであること。

UPD-ICE の業務のスコープは下記の通りである。

- i. 対象地域の主要な建築物タイプを明らかにし、建築物の類型システムを提案する（これには、風に配慮した特別な建築物、広告板、送電塔を含む）。このシステムは熱帯サイクロンによる強風、洪水、地震について、フィリピン全国で応用可能なものである。
- ii. 熱帯サイクロンによる強風、洪水、地震に関する主要な建築物タイプの脆弱性カーブを生成する。
- iii. 科学技術省管轄である PAGASA 及び PHIVOLCS、CSCAND agencies、地方自治体 (LGUs)、GA と共に、建築物暴露データベースと関連調査手法の構築で求められる場合には、対象地域の建築物タイプの評価調査を実施し、PAGASA 及び PHIVOLCS に工学的助言を提供する。
- iv. 科学技術省管轄である PAGASA 及び PHIVOLCS、CSCAND agencies、地方自治体 (LGUs)、GA と共に、脆弱性カーブ開発ワークショップに参加する。このワークショップはフィリピンのエンジニアやその他主要なステークホルダーが、いずれ構築される脆弱性モデルのために明らかにされた主要な建築物タイプや、熱帯サイクロンによる強風、洪水浸水、地震地盤振動に関する脆弱性カーブを生成するための手法についての合意を形成する場である。
- v. 過去の強風、洪水、地震による損害報告を一体的にレビューし、科学技術省管轄である PAGASA 及び PHIVOLCS が明らかにした所与の震度に対する主要な建築物のタイプの損害の程度を明らかにする (PAGASA は補正と検証のため、過去の入手可能な熱帯サイクロン強風や洪水による損害調査データ、関連する風速及び洪水浸水深を提供する。PHIVOLCS は補正と検証のため、入手可能な過去の地震損害調査データと一致する震度を提供する)。
- vi. PAGASA 及び PHIVOLCS、CSCAND agencies、GA、地方自治体 (LGUs) と共に、調査手法を蓄積、選別、強化もしくは生成し、補正予算で実際の損害評価を行う必要がある場合には、それに協力する。

## 1.7 プロジェクトパートナーの役割

### 1.7.1 科学技術省 PAGASA

プロジェクト実施に当たって、技術的な調整、事務手続きの補佐を行う。具体的内容は下記に示すが、業務内容はこれに限定するものではない。

- i. プロジェクト実施、特に関連データ収集に関して、UPD-ICE の研究者と連携する人員を任命する。
- ii. セミナーやワークショップの形で、プロジェクトに関わる研究者（科学者やエンジニア）が、関連業務の更新や最終成果品作成前のコンサルテーションやプレゼンテーションのために、関連領域の専門家やコンサルタントと共に集まる機会を提供する。
- iii. UPD-ICE, PHIVOLCS, CSCAND agencies, GA、地方自治体（LGUs）と共に、脆弱性カーブ開発ワークショップを開催する。このワークショップはフィリピンのエンジニアやその他主要なステークホルダーが、いずれ構築される脆弱性モデルのために明らかにされた主要な建築物タイプや、熱帯サイクロンによる強風、洪水浸水、地震地盤振動それぞれに関する脆弱性カーブを生成するための手法についての合意を形成する場である。
- iv. 補正と検証のため、UPD-ICE に対し、過去の入手可能な熱帯サイクロン強風や洪水による損害調査データ、関連する風速及び洪水浸水深を提供する。
- v. Annex A に示すように、AusAid からの資金の一部を大学に送金する。これらの資金は、出張旅費、消耗品、事務経費、施設・設備借上げ費（これには学識者や専門のエンジニア等のリサーチャーサービスに対する支払いを含む）等プロジェクト実施に関わる支出に使用される。Annex A の「ワークプランと予算」（UPD-ICE 所長が明らかにした研究者及び専門家が従事する役職リストを含む）に従って支出する。謝金単価は最新のフィリピン政府監査基準に従い、それに収まる範囲とする。

### 1.7.2 科学技術省 PHIVOLCS

- i. プロジェクト実施に当たって、技術的な調整、事務手続きの補佐を行う。具体的内容は下記に示すが、業務内容はこれに限定するものではない。
- ii. プロジェクト実施、特に関連データ収集に関して、UPD-ICE の研究者と連携する人員を任命する。
- iii. セミナーやワークショップの形で、プロジェクトに関わる研究者（科学者やエンジニア）が、関連業務の更新や最終成果品作成前のコンサルテーションやプレゼンテーションのために、関連領域の専門家やコンサルタントと共に集まる機会を提供する。

- iv. UPD-ICE, PAGASA, CSCAND agencies, GA、地方自治体（LGUs）と共に、脆弱性カーブ開発ワークショップを開催する。このワークショップはフィリピンのエンジニアやその他主要なステークホルダーが、いずれ構築される脆弱性モデルのために明らかにされた主要な建築物タイプや、熱帯サイクロンによる強風、洪水浸水、地震地盤振動それぞれに関する脆弱性カーブを生成するための手法についての合意を形成する場である。
- v. 補正と検証のため、UPD-ICE に対し、過去の入手可能な熱地震による損害調査データ、関連する震度を提供する。
- vi. Annex A に示すように、AusAid からの資金の一部を大学に送金する。これらの資金は、出張旅費、消耗品、事務経費、施設・設備借上げ費（これには学識者や専門のエンジニア等のリサーチャーサービスに対する支払いを含む）等プロジェクト実施に関わる支出に使用される。Annex A の「ワークプランと予算」（UPD-ICE 所長が明らかにした研究者及び専門家が従事する役職リストを含む）に従って支出する。謝金単価は最新のフィリピン政府監査基準に従い、それに収まる範囲とする。
- vii. UPD-ICE, PAGASA, CSCAND agencies, GA、地方自治体（LGUs）と共に、建築物暴露データベースと関連調査手法の構築の中で求められる場合には、対象地域における建築物タイプの評価調査に関する UPD-ICE プロジェクトチームによる支出を負担する。

### 1.7.3 フィリピン大学ディリマン校土木工学研究所 UPD-ICE

- i. 対象地域の主要な建築物タイプを明らかにし、建築物の類型システムを提案する（これには、風に配慮した特別な建築物、広告板、送電塔を含む）。このシステムは熱帯サイクロンによる強風、洪水、地震について、フィリピン全国で応用可能なものである。
- ii. 熱帯サイクロンによる強風、洪水、地震に関する主要な建築物タイプの脆弱性カーブを生成する。
- iii. 科学技術省管轄であるPAGASA及びPHIVOLCS、CSCAND agencies、地方自治体（LGUs）、GAと共に、建築物暴露データベースと関連調査手法の構築で求められるであろう、対象地域の建築物タイプの評価調査を実施し、PHIVOLCSに工学的助言を提供する。（PHIVOLCSは建築物タイプ評価調査実施に関連して、調整するとともに、UPD-ICEによる調査に実施にかかる直接費を負担する。
- iv. PAGASA、CSCAND agencies、GA、地方自治体（LGUs）と共に、3.1.3及び3.2.3に示す脆弱性カーブ開発ワークショップに参加する。このワークショップはフィリピンのエンジニアやその他主要なステークホルダーが、いずれ構築される脆弱性モデルのために明らかにされた主要な建築物タイプや、熱帯サイクロンによる強風、洪水浸水、地震地盤振動それぞれに関する脆弱性カーブを生成す

- るための手法についての合意を形成する場である。
- v. 過去の強風、洪水、地震による損害報告を一体的にレビューし、3.1.4及び3.2.4に示される、所与の震度に対する主要な建築物のタイプの損害の程度を明らかにする。
  - vi. PAGASA、PHIVOLCS、CSCAND agencies、GA、地方自治体（LGUs）と共に、調査手法を蓄積、選別、強化もしくは生成し、補正予算で実際の損害評価を行う必要がある場合には、それに協力する。
  - vii. プロジェクト実施もしくはプロジェクト活動の実施に先立ち、PAGASA及びPHIVOLCSにワークプランと予算を提出する（Annex A参照）。これには、UPD-ICE所長が明らかにした研究者及び専門家が従事する役職リストを含む。
  - viii. PAGASA及びPHIVOLCSに対し定期的に業務の進捗を報告する
  - ix. PAGASA及びPHIVOLCSにインセプション・レポートを提出する。現地調査実施前が望ましい。
  - x. PAGASA及びPHIVOLCSに対し、レビューのためにpre-final comprehensive reportを提出し、その後プロジェクトの終了時にcomprehensive reportを提出する。報告書提出を以って本協定の終了となる。
  - xi. 本協定の全ての条件は関連する科学者及び研究者に適用されること。
  - xii. いかなる不正行為及びここに示した契約条項の違反は、PAGASA及びPHIVOLCSとの契約破棄の十分な根拠となる。
  - xiii. 必要かつ適切である場合には、関連する他機関及び個人と協力してプロジェクトを実施する。

## 2 建築物類型(タイポロジー)と種類

### 2.1 フィリピンにおける UPD-ICE 建築物類型のレビュー

脆弱性カーブと損傷度カーブの作成に先立ち、まずは、既存の建築物を分類、グループ分けするための類型システムを選定する必要がある。UPD-ICE は PHIVOLCS の QuiveR プロジェクトで使われた建築物類型を作成した。この建築物類型には、建築物の高さ、構造の水平力抑止システムに基づくカテゴリーも含まれる。

建築物タイプはそれぞれの構造システムの短い記述によって定義されている。建築物タイプによっては、階数に応じてさらに分類されている。その他の建築物タイプは HAZUS-MH と FEMA-178 の建築物原型 (building archetypes) とよく似ている。表 2-1 は主要な建築物タイプと実際に使用されているであろう種類をもとにした、UPD-ICE による分類をまとめたものである。この表には、National Structural Code of the Philippines の幾つかの規定変更により、古くなった構造物も含まれている。それぞれのタイプに附属するコードは、建物の高さに応じて、低層 (L, 1-2 階建て)、中層 (M, 3-7 階建て)、高層 (H, 7 階建て以上) を示している。高層は準高層 (very high) (V, 16-25 階建て)、極高層 (extremely high) (E, 26-35 階建て)、超高層 (super high) (S, 35 階建て以上) に分類される。それぞれの建築物タイプの種類は下記にまとめた。

**木造、軽量構造 (W1\*)** : 典型的な 1 家族もしくは複数家族住宅である。これらの建築物の重要な構造的特徴は、木製の壁に木の梁もしくは根太で繰り返し骨組みを組んでいる点である。荷重は軽くスパンは小さい。このような建築物の多くは、1 家族住宅は特に、設計されるのではなく、建築物コードの「慣習的建築」項目に従って建設されている。従って、大抵の場合、完全ではないものの、水平力抑止システムの要素がある。水平過重は隔壁に移動する。隔壁とは木、ベニヤ板、繊維版などで覆われた屋根パネルや床のことである。壁には、ボード、しっくい、ベニヤ板、石膏ボード、パーティクル・ボード、繊維版などで覆われた外壁、しっくいや石膏で覆われた内部の仕切り壁を指す。

**木造、商用・産業用 (W2\*)** : 広いフロアとあっても少しの内部壁からなる商業用建築物である。これらの建築物の重要な構造的特徴は、柱に対し梁 (beams) もしくは大きく水平方向にかかる部材が組まれていることである。水平方向の組立部材は、集成木材 (glu-lam)、製材梁 (solid-sawn wood beams)、木製トラス、鉄製梁もしくはトラスである。水平荷重に対して、多くの場合、木製の隔壁やベニヤ板、しっくい、その他のパネルでできた外壁で抵抗する。壁には筋かいがある場合もある。

**竹 (W3)** : 竹製住宅は、構造物の枠組みを作るために、竹製の 1 階建てのユニットを紐で縛り、持ち上げる。柱は地中に埋め込まれるが、居住部分は持ち上げられるため、下部は何も覆いがない。多くの場合、壁はドアや大きな窓の部分が開いている。竹製住宅はニッパヤシやアナハウの葉を使ったふき屋根で、ナイロンを使って竹製の梁や棟木に

接続している。

**応急住宅 (N)** : 応急住宅は間に合わせて作った軽量木造枠組みの1~2階建の構造で、これが主要な構造的特徴である。壁は、雨風をしのぐために釘で枠組みに固定されており、ベニヤ板、ダンボール、防水シート、めっきされた波形鉄板などで作られている場合もある。屋根はたいていの場合めっきされた波形鉄板が使われ、中空コンクリート・ブロックやゴムタイヤなどの重みで構造物に固定されている場合もある。

表 2-1 素材による主要な建築物タイプ、階数、建築年

Material	Type	Sub-Type	Description	Year of Construction			
				Pre-1972	1972-1992	Post-1992	
Wood	W1*	W1-L	Wood Frame with Area ≤ 500 sq. m (1-2 storeys)		✓		
	W2*	W2-L	Wood Frame with Area > 500 sq. m (1-2 storeys)		✓		
	W3	W3-L	Bamboo (1-2 storeys)		✓		
	N	N-L	Makeshift (1-2 storeys)		✓		
Masonry	CHB	CHB-L	Concrete Hollow Blocks (1-2 storeys)		✓		
	URA	URA-L	Adobe (1-2 storeys)		✓		
	URM*	URM-L	Brick (1-2 storeys)		✓		
	RM1*	RM1-L	Flexible Diaphragm (1-2 storeys)		✓		
	RM2*	RM2-L	Rigid Diaphragm (1-2 storeys)		✓		
		RM2-M	Rigid Diaphragm (3-7 storeys)		✓		
	MWS	MWS-L	Half-Masonry/Half-Wood/Metal (1-2 storeys)		✓		
Concrete	CWS	CWS-L	Half-RC Frame/Half-Wood/Metal (1-2 storeys)		✓		
	C1*	C1-L	Moment Frame (1-2 storeys)		✓		
		C1-M	Moment Frame (3-7 storeys)	✓	✓	✓	
		C1-H	Moment Frame (8-15 storeys)	✓	✓	✓	
	C2*	C2-L	Shear Walls (1-2 storeys)		✓		
		C2-M	Shear Walls (3-7 storeys)	✓	✓	✓	
		C2-H	Shear Walls (8-15 storeys)	✓	✓	✓	
	C4	C4-M	Shear Walls and Frames (3-7 storeys)	✓	✓	✓	
		C4-H	Shear Walls and Frames (8-15 storeys)	✓	✓	✓	
		C4-V	Shear Walls and Frames (16-25 storeys)		✓	✓	
		C4-E	Shear Walls and Frames (26-35 storeys)		✓	✓	
		C4-S	Shear Walls and Frames (36+ storeys)		✓	✓	
	PC1*	PC1-L	Precast Tilt-up (1-2 storeys)	✓	✓	✓	
	PC2*	PC2-L	Precast Frame (1-2 storeys)	✓	✓	✓	
		PC2-M	Precast Frame (3-7 storeys)	✓	✓	✓	
	Steel	S1*	S1-L	Moment Frame (1-2 storeys)	✓	✓	✓
			S1-M	Moment Frame (3-7 storeys)	✓	✓	✓
S1-H			Moment Frame (8-15 storeys)	✓	✓	✓	
S2*		S2-L	Braced Frame (1-2 storeys)	✓	✓	✓	
		S2-M	Braced Frame (3-7 storeys)	✓	✓	✓	
		S2-H	Braced Frame (8-15 storeys)	✓	✓	✓	
		S2-V	Braced Frame (16-25 storeys)	✓	✓	✓	
		S2-E	Braced Frame (26-35 storeys)	✓	✓	✓	
		S2-S	Braced Frame (36+ storeys)	✓	✓	✓	
S3*		S3-L	Light Metal (1-2 storeys)		✓		
S4*		S4-L	Frame w/ Cast-in-place Shear Wall (1-2 storeys)			✓	
		S4-M	Frame w/ Cast-in-place Shear Wall (3-7 storeys)			✓	
		S4-H	Frame w/ Cast-in-place Shear Wall (8-15 storeys)			✓	
	S4-V	Frame w/ Cast-in-place Shear Wall (16-25 storeys)			✓		
	S4-E	Frame w/ Cast-in-place Shear Wall (26-35 storeys)			✓		
	S4-S	Frame w/ Cast-in-place Shear Wall (36+ storeys)			✓		

\* - very similar to a HAZUS-MH Model Building Type with the same label (e.g. W1)

**中空コンクリート・ブロック (Concrete Hollow Blocks : CHB) :** 中空コンクリート・ブロックでできた壁が隅で組み合わさっており、鉄筋コンクリートの枠組みがない、中層構造物である。床はベニヤ板か被覆材 (board sheathing) でできており、木製のサブフレームによって支えられている。屋根はめっきされた波形鉄板が、木製もしくは軽量金属の屋根組みに付いている。

**無筋レンガもしくは石積みの耐力壁 (Unreinforced Adobe or Stone Bearing Walls) (URA) :** これらの建築物は URM に似ているが、壁が大きな石のブロック (日干しレンガなど) でできている場合を除く。

**無筋積込耐力壁 (URM\*) :** 補強されていない石工レンガの耐壁のある建築物である。壁は隔壁に付いている場合とそうでない場合がある。壁と隔壁の結合部は、床の枠組みに平行している壁 (walls that are parallel to the floor framing) よりも、耐壁であるのが一般的である。床と屋根は、ベニヤ板か被覆材 (board sheathing) で作られ、木製のサブフレームか、金属フレーム要素に支えられた金属製デッキに支えられている。床と屋根に相互に接続している内部パーティションがあれば、隔壁を除去することができるかもしれない。

**木材もしくは金属デッキ隔壁を持つ有筋積込耐力壁 (RM1\*) :** 有筋ブロック耐力壁を外周で囲んだ建物である。これらの壁は構造物の水平力抑止システムである。床や屋根の枠組みは、ベニヤ板や合板でできた木製の筋や梁 (joists and beams) や金属デッキのある鋼鉄梁でできている。木製の床枠組みは内部の木製ポストもしくは鉄の柱で支えられており、鋼鉄梁 (steel beams) は鋼鉄コラムに支えられている。

**プレキャストコンクリート側壁を持つ有筋積込耐力壁(RM2\*):** 屋根と床が厚版や T 字型梁のようなプレキャストコンクリートで構成されている点を除き、RM1 と似ている。プレキャストされた屋根や床の要素は、鋼鉄やコンクリート製の内部の梁やコラムに支えられている。プレキャストされた水平の要素はしばしば現場打ちトッピングがある。

**木もしくは軽量金属と中空コンクリート・ブロック(MWS) :** この構造物はたいてい、壁が中空コンクリート・ブロック積で、有筋コンクリート枠を持たない。上階の壁は下地版 (wood sheathing) か軽金属製である。床は木製のサブフレームで支えられた下地版でできている。屋根はめっきされた波形鉄板でできており、木もしくは軽金属製の屋根トラスに付いている。

**木もしくは軽金属と有筋コンクリート造 (ラーメン構造) (CWS):** この構造は、中空コンクリート・ブロックの代わりに有筋コンクリートフレームがあることを除いて、MWS と同じである。

**有筋コンクリート造 (ラーメン構造) (C1\*) :** この構造物は、有筋コンクリートフレー



ムがあることを除き、鋼鉄ラーメン構造と似ている。フレームシステムには様々な種類がある。古いコンクリート構造では、地震の際、建築物の一部崩壊もしくは全壊につながる骨組み部材の脆性破壊が起こる可能性がある。

地震活動の活発な区域におけるモダンフレームは、延性挙動に対してバランスの取れたきめ細かいものであり、地震の際に骨組み部材の脆性破壊や崩壊がなく、大きなゆがみに耐えられる可能性が高い。

**コンクリート造耐震壁(C2\*)**：これらの建築物の水平力抑止システムはコンクリート造耐震壁である。古い建築物では、壁は広域であり、壁応力 (wall stresses) は低いものの、補強力は軽い。新しい建築物では耐震壁 (shear walls) の程度が限られているため、境界部材や転倒力に関して懸念がある。

**コンクリート造耐震壁とフレーム(C4)**：これらの建築物の水平力抑止システムは、主方向においてはコンクリート造耐震壁で、それ以外の方向においてはコンクリートラーメン構造である。それぞれの方向において耐震壁とラーメン構造の混合も含むかもしれない。現代の「デュアル」システムにおいては、ラーメン構造は、相対的な鋼性に応じて耐震壁と一緒に機能する様デザインされる。

**プレキャストコンクリート造 (ティルトアップ壁) (PC1\*)**：これらの建築物は木材もしくは**金属デッキ屋根 (PC1\*)**：これらの建物は、たいていの場合大きな木製もしくは金属デッキの屋根隔壁を持ち、水平力をプレキャストコンクリート耐震壁へと分配する。壁は薄い、比較的重い。一方で屋根は比較的軽い。古い建築部材は、面外の力に対して屋根を壁に固定するための接続部が不十分であることが多い。パネル接続部はもろいことが多い。ティルトアップ建築物はたいてい1階もしくは2階建てである。壁にはドアや窓のための開口部を多く持つことが可能で、壁が耐震壁というよりはフレームに見えるようなサイズである。

**プレキャストコンクリート造 (コンクリート耐震壁) (PC2\*)**：これらの建築物は場所打ちコンクリートの topping slabs 有りまたはなしのプレキャストコンクリート要素からなる床及び屋根隔壁がある。隔壁はプレキャストコンクリートの桁や柱に支えられている。桁は受け柱の上に乗っている。プレキャスト床の要素と梁柱接合部の Closure strips はたいてい現場打ちコンクリートである。溶接網インサートはしばしばプレキャスト要素を相互に連結するのに使用される。水平力はプレキャストもしくは現場打ちコンクリート造耐震壁に抵抗する。

**鋼構造 (ラーメン構造) (S1\*)**：この種建築物は鋼鉄柱と梁のフレームを持つ。梁柱接合部の耐モーメント容量はとても小さい場合があるが、梁や柱が十分に水平力に抵抗するモーメントフレームとして作られている場合もある。たいてい、構造物は、様々な素材 (カーテン・ウォール、レンガもしくはコンクリート積み、プレキャストコンクリート板) の外壁で外から遮られ、天井や柱の下地で内部も遮られている。水平荷重は隔

壁によって耐モーメントフレームに移動する。隔壁はどのような素材でも問題ない。フレームは全部もしくは一部のモーメントコネクションによって鋼性が増す。フレームは建築物のどこにでも配置可能だ。たいてい、柱は強い指向性があるので、いくつかの柱が一つの方向に対し主要な役割を果たす一方で、他の柱が他の方向を担当している。

**鋼構造（ブレース構造）(S2\*)：** 水平力抵抗システムがモーメントフレームというより筋かいフレームである点を除き、ラーメン構造の建築物と似ている。

**鋼構造（軽構造）(S3\*)：** 横軸ラーメン構造のプレハブの建築物である。屋根と壁はたいてい波型金属製の軽量パネルで作られている。フレームは最大限に効率的にデザインされ、しばしば軽量鉄でできたテーパー梁と柱が用いられる。フレームは部分ごとに建てられ、現場でボルト継ぎ手を使って組み立てられる。横方向における水平荷重は、隔壁要素、典型的には rod-braced steel の屋根フレーミングの bay (rod-braced steel roof framing bays)、で抵抗を受ける。縦方向の荷重は耐震壁要素によって完全に抵抗を受ける。例えばそれは防護パネルの屋根や壁、張力のみ rod bracing の独立したシステム、パネルと bracing の組み合わせ、などである。

**鋼構造（現場打コンクリート耐震壁）(S4\*)：** この種の建築物の耐震壁は現場打ちコンクリートもしくは耐力壁である。耐震壁はこの構造における、水平力抵抗システムである。鋼鉄フレームは垂直荷重に対してのみデザインされている。水平荷重は、耐震壁に対するほぼ全ての素材の隔壁により移動する。鋼鉄フレームは、フレームの鋼性や梁柱接合部のモーメントキャパシティによっては、二次的な水平力抵抗システムになることも有り得る。

## 2.2 ワークショップでの議論

「強風、洪水、地震のインパクトに対する脆弱性モデル作成ワークショップ」は、案ティポロ市の the Eugenio Lopez Center (ELC)で2012年2月17日と18日の2日間に亘って実施された。本ワークショップの目的は、新しいプロジェクトのすでに固まったスコープと限界に対し、潜在的なエンドユーザーであるフィリピン側の機関のインプットを入れることを通じて、脆弱性モデルの作成に彼らを巻き込むことである。この目的は、HAZUS、オーストラリアの脆弱性カーブ、QuiverR プロジェクト等の関連する先行研究の発表を通じて果たされた。暴露データベースの構築のようなデータ収集はプロジェクトの重要な部分であるので、これも発表された。さらに、強風と洪水の二つのハザードを含む最近実施されたプロジェクトの成果が発表され、そこで提案されている調査手法も紹介された。これらの発表は初日に行われた。2日目はハザードごとに小グループでの議論が同時並行で行われた。これは脆弱性モデル作成のための建築物類型とその手法に関し合意を得る目的で行われた。本ワークショップには、様々な組織、フィリピンの関係機関のエンジニアや研究者等が参加した。具体的な団体は下記の通り。

Association of Structural Engineers of the Philippines (ASEP)、公共事業道路省 (DPWH)、マニラ首都圏開発局 (Metro Manila Development Authority (MMDA))、Philippine Institute of Civil Engineers (PICE)、フィリピン大学ディリマン校土木工学研究所 (UPD-ICE)、PAGASA、PHIVOLCS、Geoscience Australia (GA)、国土地理・資源特許庁 (NAMRIA)。

### 2.2.1 強風ハザード

「強風のインパクトに対する脆弱性モデル作成ワークショップ」では、建築物類型に関して幾つかの議題が挙げられた。

建築物類型を区別する構造物の臨界高度は10メートルに設定することで合意した。地表粗度は10メートル以上になると影響がなくなるためである。従って、典型的な1階分の高さ3メートルに屋根の高さを加える場合、1~2階の建築物は10メートル以内に納まることになり、それを「L(低層)」と分類することになった。一方で3階建て以上は「M(中層)」と分類することになった。

屋根や屋根接続 (roof connections) は強風によって最も損害の影響を受けるため、議論された。エンジニアによれば、GI、ポリカーボネート、軽い材料 (ニパやアナハウの葉など) だけが損害の影響を受ける。その他の屋根材、タイル、アスファルトシングル、スラブ (ルーフデッキ) は、強風に対して脆弱ではないと考えられる。GI屋根のルーフピッチは、0度~30度 (通常1:2もしくは1:3のスロープ) に限定された。高ピッチ屋根は主に教会で見られるため、全体の建築物数と比べると大きな数ではないため、一般的ではない。屋根接続と屋根フレーミング材の関係も議論された。エンジニアによれば、GI屋根は一般的に、ワイヤー、釘、ボルトやねじでフレームに接続している。縦けたが木でできている場合、屋根との接続には釘が使用され、鋼鉄の場合は、ねじが使われる。窓、ドア、壁の材料も重要な特性があるものの、それほど議論されなかった。最後に、脆弱性カーブに影響を及ぼす属性とは、建築物の高さ、屋根材 (ピッチ、勾配、屋根接続を含む)、壁材、窓、ドア、であるという点で合意した。

### 2.2.2 洪水ハザード

第1回ワークショップでは、洪水脆弱性カーブの作成についてPAGASA、PHIVOLCS、CSCAND agencies、GA、地方自治体 (LGUs) と議論した。

本プロジェクトにおける洪水ハザードについては、浸水深のみを検討するという点で合意した。速度、土石流、洪水の期間については、分析の際考慮に入れないだろう。

浸水深を本研究における唯一のハザードとすることで、洪水脆弱性カーブを導き出すことが、氾濫による損害の機能として考慮に入れられる。つまり氾濫による損害が金銭的価値と、対応する洪水の高さ (浸水高マイナス1階の高さ) として表される。

後に、損害は損害指標として表されることとなった。損害指標とは、浸水による損害全体の、建築物の再調達価格に対する割合である。損害の程度を算出するのに不可欠な洪水浸水深は、0、0.5m、1m、2m、4mである。これらの重要な洪水浸水深は洪水脆弱性カーブに期待する動作を元を選択された。これらの洪水浸水深はGAとの技術コンサルテーションにおいて修正された。

建築物の損害のコスト算出については、算出された損害を損害単価（㎡あたり）にかけて決定されるであろうと議論された。コスト算出の際には、コントラクター、数量調査者、保険業者、ビル管理者、入居者等の専門家の意見が集められるであろう。

Quiver Project（UPD-ICE 建築物類型）で作成した建築物分類は、構造的損害に関連した建築物類型作成の際のベースラインとなった。UPD-ICE 建築物類型のいくつかの建築物タイプは同様の洪水脆弱性カーブを持つであろうという点は合意に至った。同様の構造的フレームワークにある建築物タイプは、同様の洪水脆弱性カーブを示すであろう。例えば石積造であれば全てのタイプが同一の洪水脆弱性カーブを持つであろう。

UPD-ICE が提案した主要な建築物タイプから、洪水に対して重要な属性として高度分類が考えられた。従って、類型の中では、新しいサブカテゴリーが提示された。分類には、1階、2階、2階以上の建築物タイプを含む。3階建て以上の建物には基礎があることが前提とされた。

さらに、洪水が引き起こす損害に影響を与える建築物属性が明らかにされた。これらの建築物特性には、床材、壁材、壁仕上、1階及び2階の高さ、基礎の数が含まれる。

ワークショップの審議では、主に構造物や家財への損害に応じた建築物タイプの分類に焦点が当てられた。動産損害カテゴリーの分析には、占有者の階級に基づいた動産の損害額算定が必要であることが判明した。しかし、占有者の階級に基づく脆弱性カーブの作成は、UPD-ICE プロジェクトの目的には明言されていない。従って、建築物の損害は、明らかになった洪水に脆弱な構造的属性に基づき算出される。

PAGASA、GA へのコンサルテーションと洪水グループでの議論が行われた。議論の最中、分析の中で幾つか修正点があった。浸水深は 3m、6m、10m が追加され、それぞれ 1階建ての天井の高さが 3m、2階建ての場合 6m、そして 2階建て以上の場合、マニラ首都圏での過去最大の浸水深である 10m をあらかわす。

さらに、マニラ首都圏における住宅は通常基礎がないので、分析の中で基礎は取り扱わないことが議論された。

2012年11月28日の第2回ワークショップの後、調査手法を修正するため、GA との議論が行われた。脆弱性カーブにおける床の損害の影響を強調するため、コンピューター分析の中で、浸水深に 0.1 m が足された。0-0.5m の浸水深と比べて 0-0.1m の浸水深の場合の傾斜が異なると思われるので、この浸水深は、洪水脆弱性カーブにとって重要であると予測された。

### 2.2.3 地震ハザード

地震グループの議論では、UPD-ICE は建築物類型と大マニラ首都圏の地震脆弱性カーブ作成にあたり使われる手法を提案した。建築物類型に始まり、UPD-ICE は HAZUS と先行関連プロジェクトであるイロイロ島での QuiverR で見つかったタイプを組み合わせた建築物タイプを紹介した。続いて、GMMA の調査手法案が紹介された。本プロジェクトでは対象地域が大マニラ首都圏であるため、高層構造物を含めることは避けられない。高層構造物の最大応答をモデル化するにあたって、キャパシティ・スペクトル手法だけを用いるのは不十分である。高層構造物では必ずしも正しいとは限らない、構造の基礎

モードで最大応答が決まるという前提があるためだ。従って、高層構造物のための調査手法として、連続モーダルプッシュオーバー法が提案された。さらに、土壌タイプの違いも考慮に入れることになった。

地震コンポーネントにおける建築物類型と調査手法の提案の後、質疑応答の時間が設けられた。ほとんどの時間を、提案された建築物類型のどちらが大マニラ首都圏で一般的で、脆弱性カーブの作成に加え、考慮されるべきか、という議論に割かれた。コンクリートと鋼構造が大きく注目された。コンクリート構造物については、全建築物数に対する存在感と不確実性から、低層のコンクリート造耐震壁（C2-L）、中層コンクリート造耐震壁とラーメン構造（C4-M）、プレキャスト構造（PC-1、PC-2）が建築物類型への包含が主題であった。

ASEPの代表者である Caparros エンジニアは、現在は数が少ないものの、最近知られるようになっており、今後3~5年の間にかなりの数になる可能性のある、プレキャスト構造物に関して発言した。鋼構造の建築物タイプにおける懸念は鋼構造（ブレース構造）

（S2）である。GAが挙げたポイントは、多種多様のレベルの建築物の高さについてである。低層、中層、高層、準超高層、極高層、超高層に区分されている。調査手法については、構造物のモデリングによって変わるであろうパラメーターに関心が向けられた。

UPD-ICEは、大マニラ首都圏の建築物数の反応をモデル化する建築物データベースを作成、改善するために、実務者が使用する実際の設計パラメーターと分析手法を求めた。

GAは土壌タイプに加え、断層への近さも考慮する必要があると指摘した。

まとめると、地震グループの議論で合意された点は下記の通り：

- i. 地動パラメーターとして MMI を使用する。例えば、x 軸に損害度曲線と脆弱性カーブをとる。
- ii. URM, C2-L, C2-M, C1-H, C4-M, PC2-L, S4-L, S4-M, S3-L の建築物タイプに加え、イロイロ島で発見されたものの損害度曲線を作成すること。
- iii. 建築物タイプ PC2-M, S1-H, S2-L, S2-M, S2-H の拡張（extensiveness）についての検証を行うこと。
- iv. 感度分析／文献が7階建て以上の構造物を一括りにすることを指示しない限り、QuiveR で作成された UPD-ICE 類型を維持すること。
- v. 震源の近さの要因を考慮に入れること
- vi. 推測に基づいた損害度曲線作成のための調査実施の際、エンジニアの参考として、可能であれば損害報告書からのデータを使用すること。
- vii. 建築物データベース作成の参考として、実務家に、実際のデザインパラメーターや分析を求める。

建築物類型に関する合意事項のうち、URM, C4-M, PC2-L, S4-L, S4-M, S3-L については続行したものの、その他は除外された。ワークショップの後に実施された存在に関する批判的な評価結果、もしくは、建築物全体における広範囲な存在が支持されなかったことがその理由である。C2-L と C2-M は除去された。というのもデュアルシステムは7階建て以下の建物にはめったに使われないからである。C1-H も削除された。ラーメン構造

は、高層構造物の lateral support resisting systems としては不十分であるためだ。

建築物の高さ分類については、「高層 (high-rise)」は7階建て以上の全ての建築物を表す言葉として採用された。近接性ファクターはモデリングの際考慮に入れられ、地震係数の中に組み込まれた。損害報告書はレビューされた後、損害の内容説明の作成に利用され、推測に基づいた曲線のための調査票に組み込まれた。最後の合意事項については、UPD-ICE が実務者に複数の依頼状を送付したが、返答はなかった。プロジェクトを進めるための解決策として、プロジェクトに参加している学术界の実務者がデータベース作成を支援した。

### 2.3 現地調査及び評価データ

UPD-ICE は、UPD-ICE の建築物タイプと異なる政府機関や現地調査で得られたデータとを照合するため、PHIVOLCS の暴露データベースチームと打合せを重ねた。

2012年7月20日、UPD-ICE は暴露チームが行った現地調査から得られた建築物を分類する作業を支援した。建築物分類は、暴露チームがマニラ首都圏の様々な場所で撮影したビデオを用いて行われた。この会議を通じて、ビデオ調査は暴露調査を迅速に行う方法であると証明されたものの、UPD-ICE の建築物タイプを査定する難しさについては課題が残る。というのも、建築物の構造的特性（例えばフレーミング、ルーフトラス材料等）をビデオから判断するのは難しいためだ。

2012年8月1日、PHIVOLCS 会議室にて、QC 評価事務所の建築物タイプを UPD-ICE タイプに分類する会議を行った。同年10月5日、PHIVOLCS 長官事務所にて NSO 建築物分類を UPD-ICE タイプと照合する会議を実施した。会議の結果は表 2-2 に示した。この表は UPD-ICE 分類と、対応する NSO の建築物タイプ（最初の2列）の割合を示している。例えば、波型鉄/アルミ屋根、コンクリート・レンガ・石製の壁が使われている全ての建築物のうち、35%が CHB タイプである一方、65%は C1 タイプである。

### 2.4 UP-ICE による、大マニラ首都圏のための建築物類型の作成

それぞれのハザードの重要な属性を検討する際、大マニラ首都圏のために修正された建築物類型が作成された。表 2-3 は UPD-ICE 建築物類型をさらに強風、洪水、地震に細分化したものである。

表 2-2 UPD – ICE 建築物類型と NSO 分類の対応表

NSO ROOF	NSO WALL	UPD-ICE CLASSIFICATION
Galvanized Iron/aluminum	Concrete/brick/stone	CHB(35)/C1(65)
Galvanized Iron/aluminum	Half concrete/brick/stone and half wood	CWS(65)/MWS(35)
Galvanized Iron/aluminum	Wood	W1
Half-galvanized iron and half concrete	Half concrete/brick/stone and half wood	CWS
Wood	Wood	W1
Tile concrete/clay tile	Concrete/brick/stone	C1(95)/S1(5)
Others	Others	N
Makeshift/salvaged/improvised materials	Makeshift/salvaged/improvised materials	N
Half-galvanized iron and half concrete	Concrete/brick/stone	C1(90)/S1(5)/URM(3)/URA(2)
Half-galvanized iron and half concrete	Wood	C1(30)/CWS(70)
Galvanized Iron/aluminum	Makeshift/salvaged/improvised materials	N
Galvanized Iron/aluminum	Galvanized Iron/aluminum	S3(20)/N(80)
Galvanized Iron/aluminum	Others	N
Wood	Half concrete/brick/stone and half wood	CWS(65)/MWS(34)/URA(1)
Tile concrete/clay tile	Half concrete/brick/stone and half wood	CWS(15)/C1(60)/MWS(15)/URA(10)
Tile concrete/clay tile	Galvanized Iron/aluminum	S1(10)/C1(90)
Wood	Concrete/brick/stone	C1(90)/S1(2)/URM(4)/URA(4)
Makeshift/salvaged/improvised materials	Wood	N(90)/W1(10)

強風については、第3のコード（木造のW、鋼鉄のS）が幾つかの建築物タイプに追加されている（例えば、MWS、CHB、CWS、C1）。これらのコードはコード規定の変更によって、ルーフトラスに関連付けられている。1992年以前は、屋根トラスの材料として木がまだ使用されていた。しかし、1992年の丸太使用禁止（the log ban）により、同様のコンポーネントの材料は、鋼鉄に取って代わられた。それは、類型の中に新しい建築物タイプが二つ加わったことからよくわかる（広告板のBB、送電線のPT）。これらは、本プロジェクトにおいて、風に影響を受けやすい構造物であると考えられている。

洪水ハザードについては、追加されたコードは、建築物の階数を特定した1と2である。これは、構造物の高さに対する建築物の損害の引き起こしやすさという点で、洪水に対する脆弱性分析にとって重要である。まとめると、ハザードごとの主要な建築物タイプはそれぞれ、強風17、洪水15、地震17判明し、対応する脆弱性カーブは、本研究で作成することになる。

表 2-3 強風、洪水、地震に対する主要な建築物タイプ

Building Group	Building Type	Structural Type or Description	Building Type or Sub-Type Code (for WI)	Building Type or Sub-Type Code (for FL)	Building Type Code (for EQ)
WOOD	W1*	Wood, light frame	W1-L	W1-L-1 W1-L-2	W1-L
	W3	Bamboo	W3-L	W3-L	W3-L
	N	Makeshift	N-L	N-L-1 N-L-2	N-L
MASONRY	MWS	Concrete hollow blocks with wood or light metal	MWS-L-W MWS-L-S	MWS-L	MWS-L
	CHB	Concrete hollow blocks	CHB-L-W CHB-L-S	CHB-L-1 CHB-L-2	CHB-L
	URA	Adobe	-	-	URA-L
	URM*	Unreinforced masonry bearing walls	-	-	URM-L
CONCRETE	CWS	Reinforced concrete moment frames with wood or light metal	CWS-L-W CWS-L-S	CWS-L	CWS-L
	C1*	Reinforced concrete moment frames	C1-L-W	C1-L-1	C1-L
			C1-L-S	C1-L-2	C1-L
			C1-M	C1-M	C1-M
	C4	Concrete shear walls and frames	-	-	C4-M
			-	-	C4-H
PC2	Precast Frame	-	-	PC2-L PC2-M	
STEEL	S1*	Steel moment frame	S1-L	S1-L-1 S1-L-2	S1-L
			S1-M	S1-M	S1-M
	S3*	Light metal frame	S3-L	-	S3-L
S4*	Steel frame with cast-In-place concrete shear walls	-	-	S4-M	
SPECIAL STRUCTURES	BB	Billboards	BB	-	-
	PT	Power transmission towers	PT	-	-
Total types or sub-types for hazard component			17	15	18

\* - very similar to a HAZUS-MH Model Building Type with the same label (e.g. W1)

### 3 損害データのレビュー

#### 3.1 強風

強風に関して、PAGASA より損害データ及び推定風速が提供された。フィリピンに上陸した過去の大きな台風によるインフラに対する損害を示した写真集がある。これらは従って、強風の経験的脆弱性カーブの作成に使用された。風速はPAGASA が Tropical Cyclone Risk Model (TCRM)のシュミレーション結果を用いて推定した。写真はPAGASA の Severe Tropical Weather Disturbance Reconnaissance, Information Dissemination and Damage Evaluation (STRIDE)Team、Dr.Ronwaldo Emmanuel Aquino, Dr. Leoncio Amadore, Mr. Albert Hamor.の厚意によるものである。写真に写っている建築物の分類と損害の算定はUPD-ICE の研究者によって行われた。



### ミレニオ台風

ミレニオ台風（国際名シャンセン）は2006年9月24日に温帯低気圧としてフィリピンを通過した。2日という短い間に台風に変化し、最大風速230kphに到達して、主にビコール地方に影響をもたらした。台風はマニラ首都圏にも大きな損害を与え、その当時、過去10年間に上陸した台風のうち、最も強いものとなった。

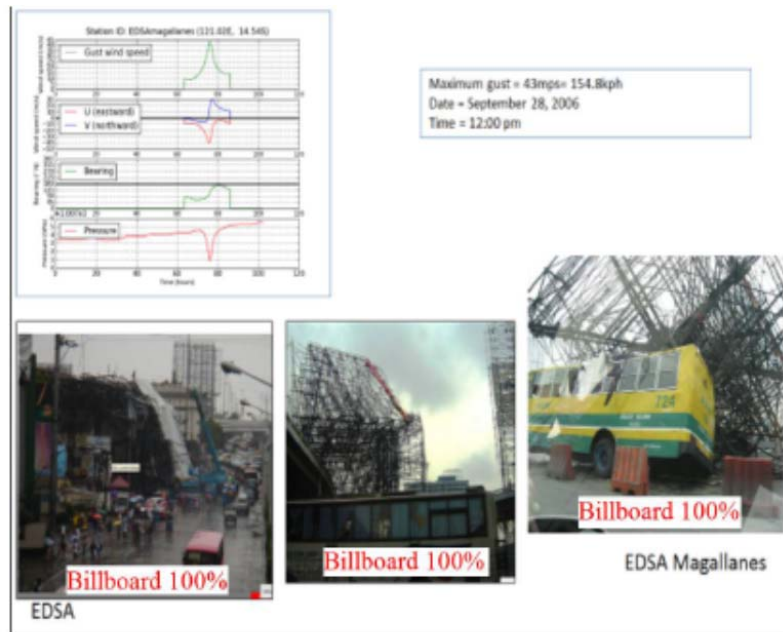


図 3-1 ミレニオ台風の際の EDSA における損傷写真

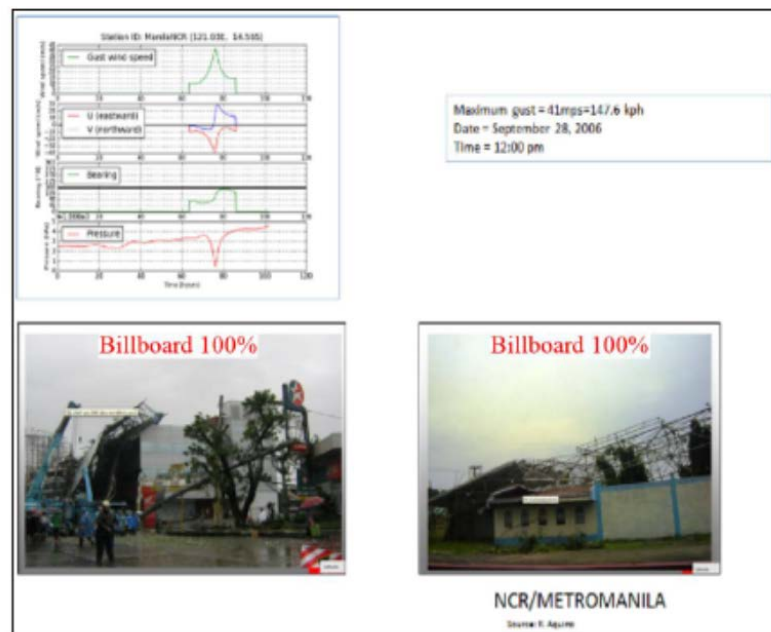


図 3-2 ミレニオ台風の際のマニラ首都圏における損傷写真



図 3-3 ミレニオ台風の際の低層構造物の損傷写真

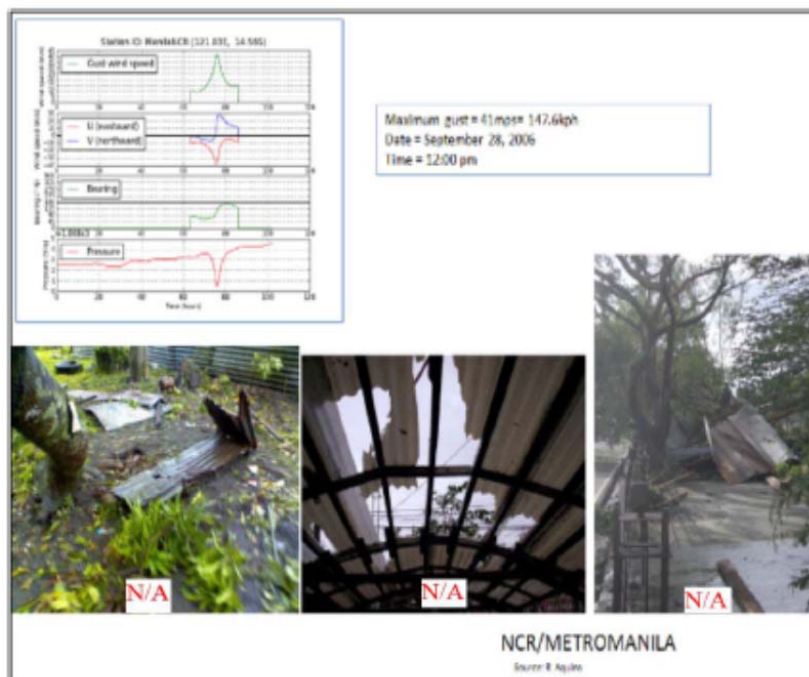


図 3-4 ミレニオ台風の際の構造物における屋根の損傷

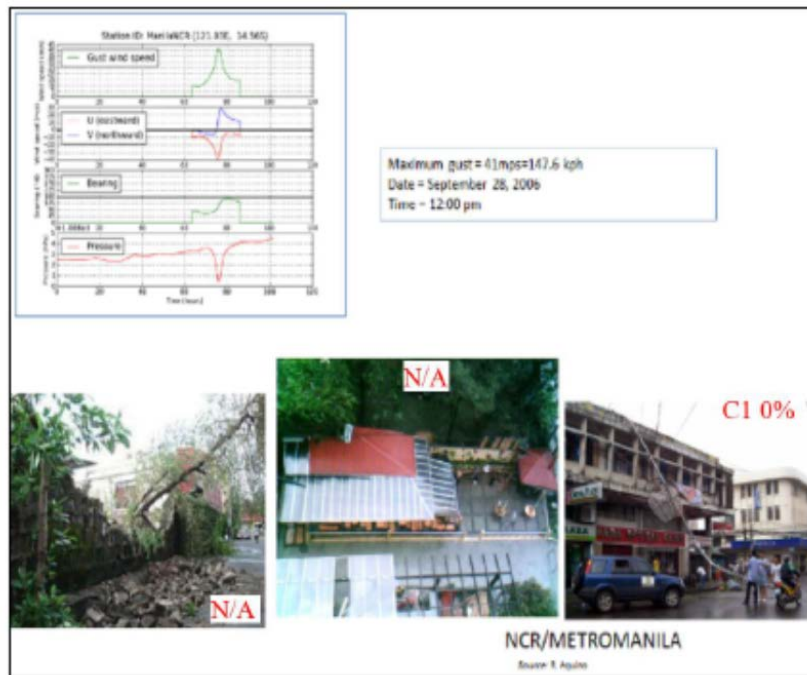


図 3-5 ミレニオ台風の際の構造物における壁と屋根の損傷

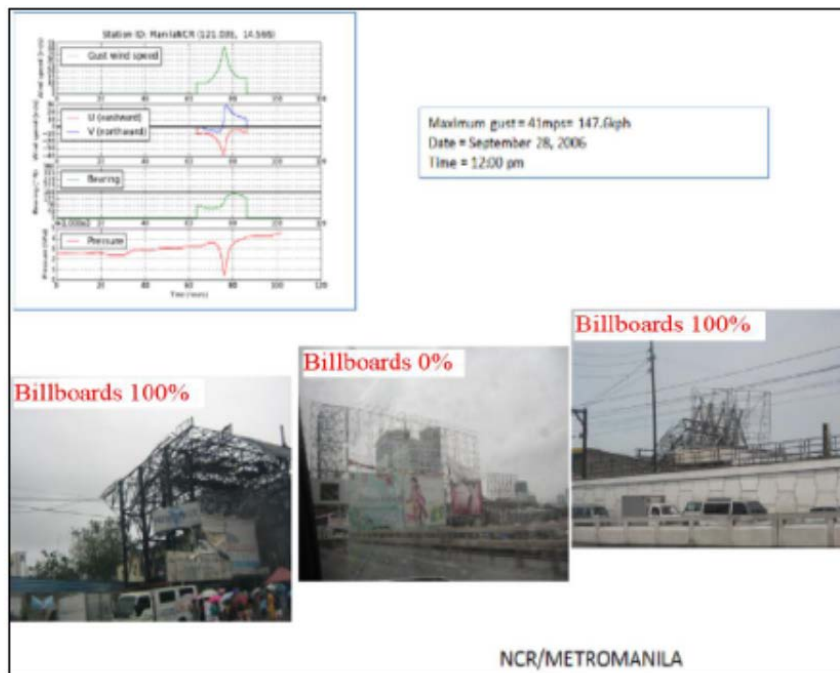


図 3-6 ミレニオ台風の際のマニラ首都圏における広告版の損傷写真



図 3-7 ミレニオ台風の際の Sorsogon City における損傷写真

### レミン台風

レミン台風（国際名ドリアン）は 2006 年 11 月 28 日に熱帯性低気圧としてフィリピン領空内に入り、その日遅くに台風となった。最大風速は 230～260kph であった。11 月 30 日から数度に亘って台風が上陸し、Catanduanes、Camarines Sur、Quezon、Marinduque、そして Oriental Mindoro を通過した。

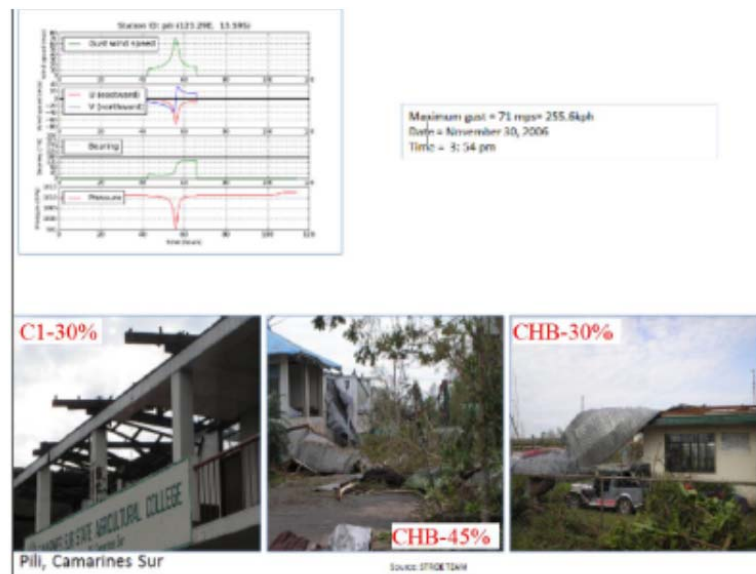


図 3-8 レミン台風の際の Pili, Camarines Sur における損害写真

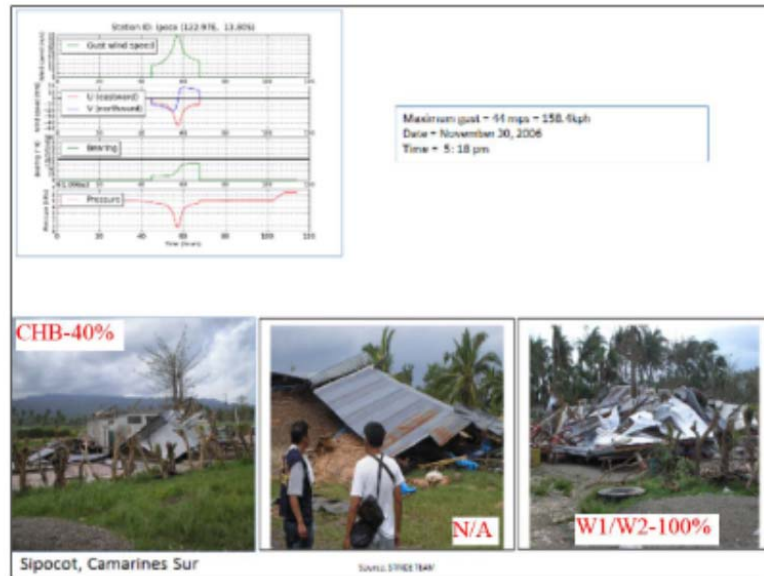


図 3-9 レミン台風の際の Sipocot, Camarines Sur における損害写真

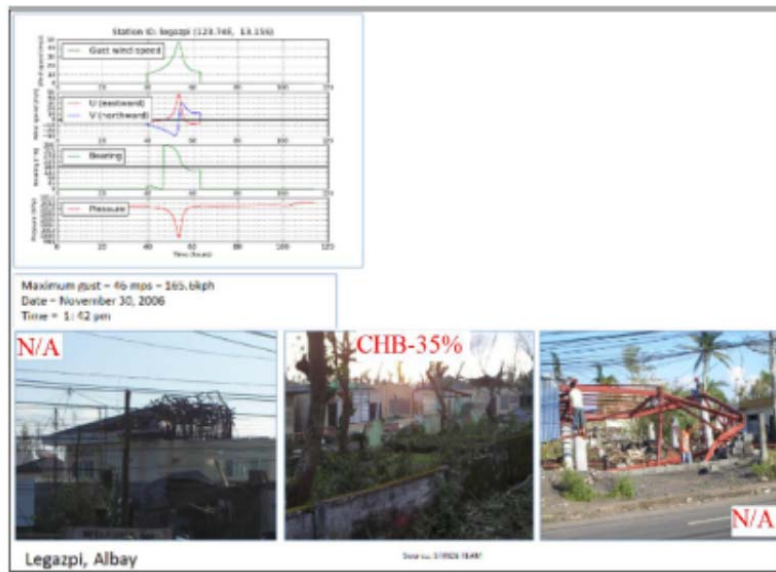


図 3-10 レミン台風の際の Legazpi, Albay における損害写真

### ジュアン台風

ジュアン台風（国際名モーギー）は熱帯擾乱として2010年10月10日にグアムの東南東で発生し、10月15日に台風としてフィリピン管轄内（Area of Responsibility）に入った。最大風速はカガヤンで230kph～320kphを記録し、2010年で唯一のスーパー台風に格上げされた。歴史上最も強烈な熱帯サイクロンであると考えられている。

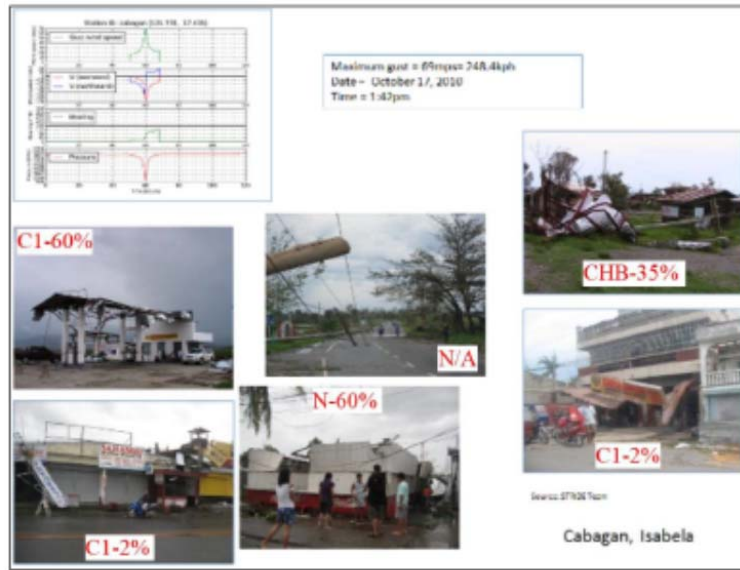


図 3-11 ジュアン台風の際の Cabagan, Isabela における損害写真



図 3-12 ジュアン台風の際の Iligan, Isabela における損害写真

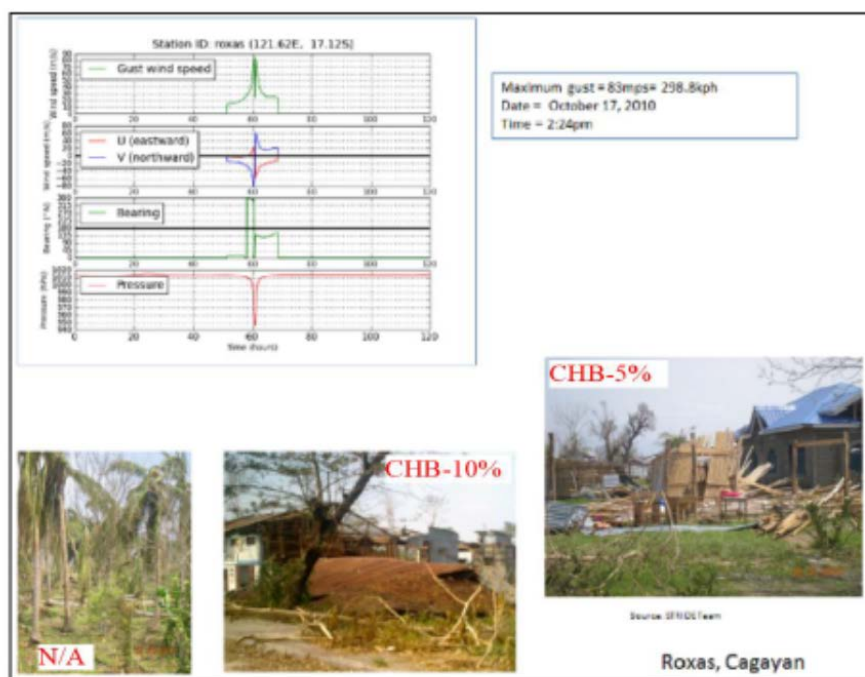


図 3-13 ジュアン台風の際の Roxas, Cagayan における損害写真

#### ペドリング台風

ペドリング台風（国際名ネサット）パラオの東南東で発生し、最大風速 200～240kph でフィリピンを直撃した。この台風はオンドイ台風（国際名ケッツァーナ）直撃のちょうど 2 年後にあたり、1 週間で直撃した 2 つの熱帯サイクロンのうちの最初の熱帯サイクロンである。Isabela と Aurora は最も大きな影響を受け、フィリピンで史上三番目に大きな被害をもたらした台風となった。

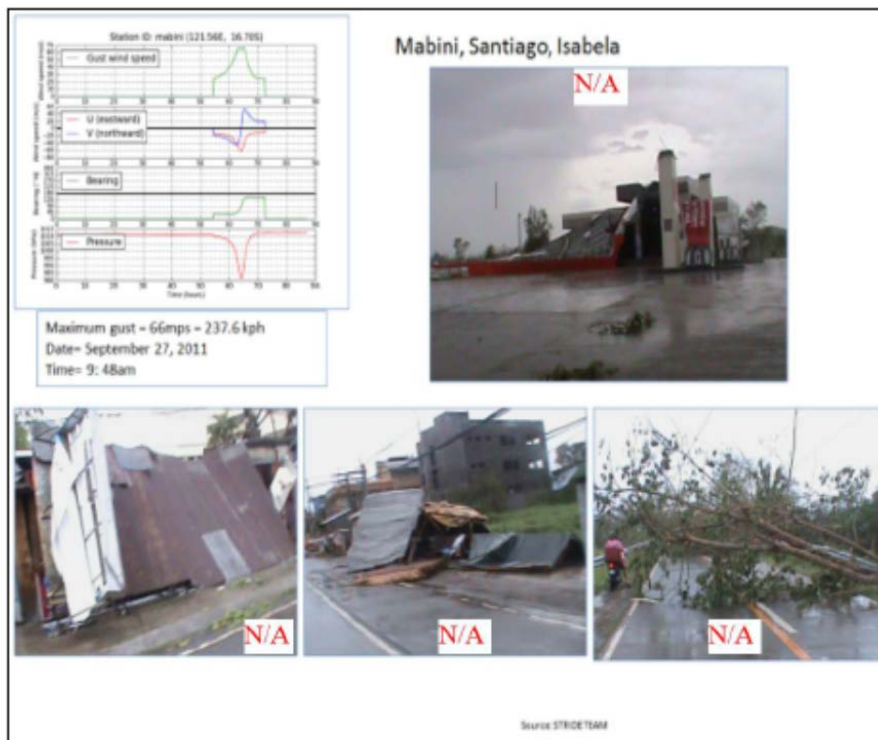


図 3-14 ペドリング台風の際の Mabini, Isabela における損害写真



図 3-15 ペドリング台風の際の Batal, Isabela における損害写真



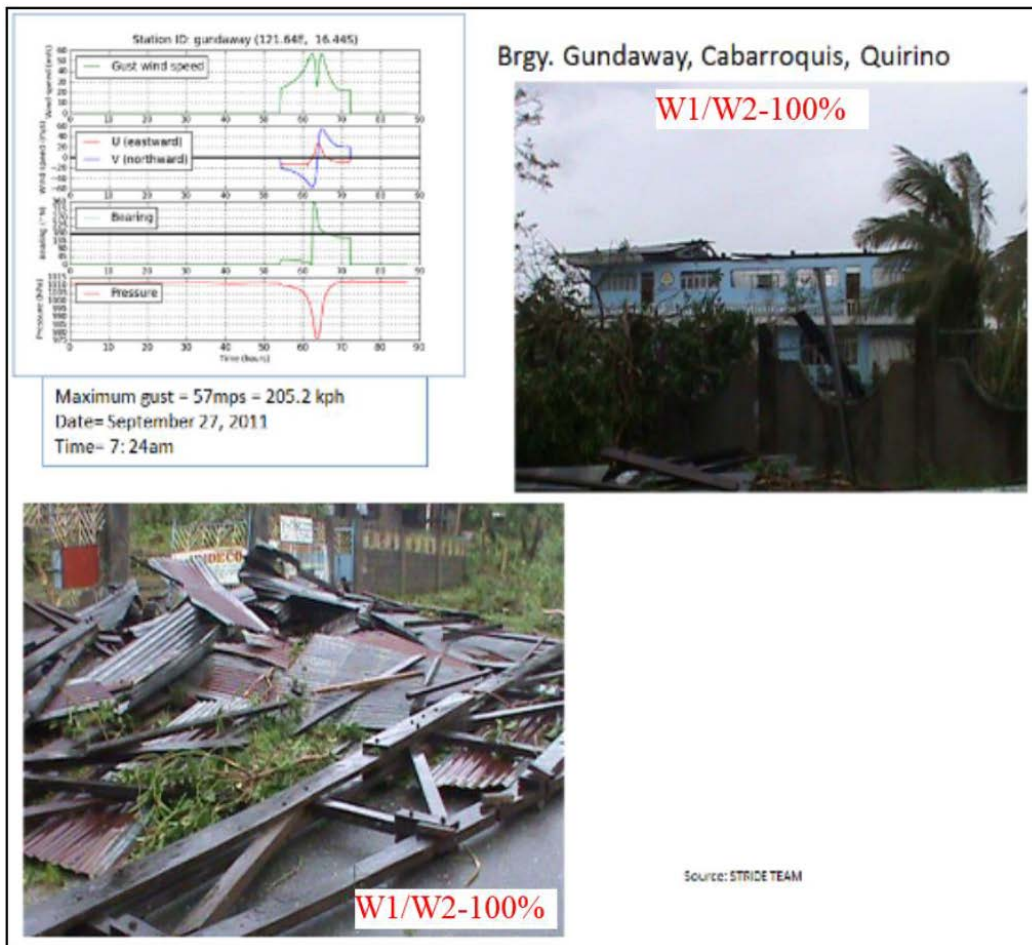


図 3-16 ペドリング台風の際の Cabarroquis, Quirino における損害写真

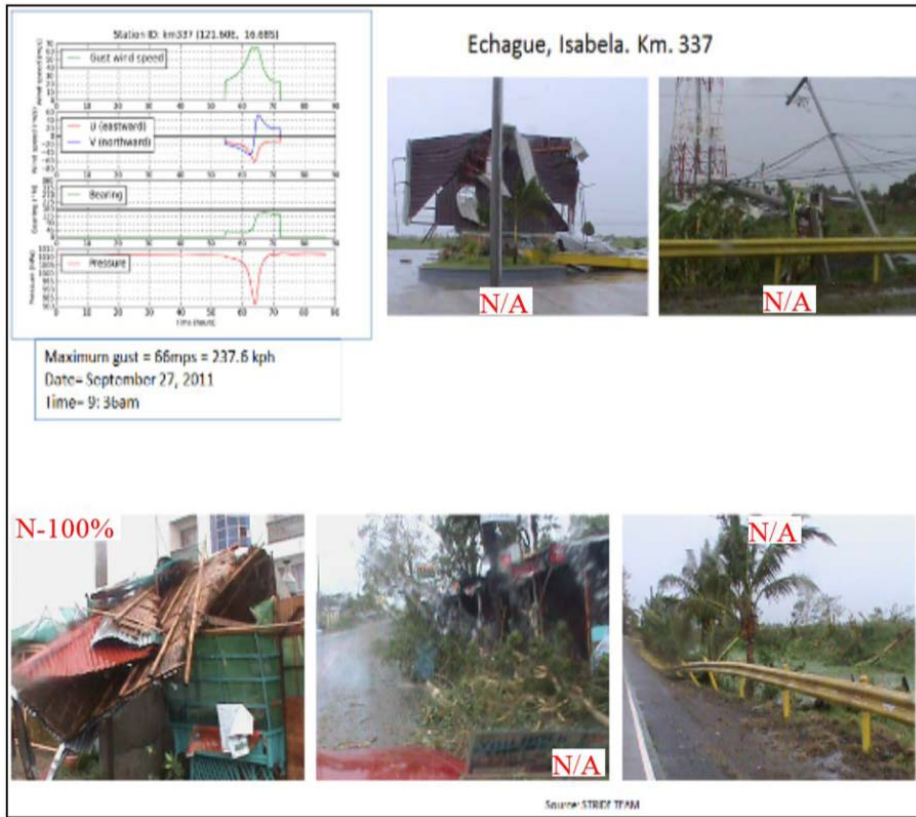


図 3-17 ペドリング台風の際の Echague, Isabela における損害写真

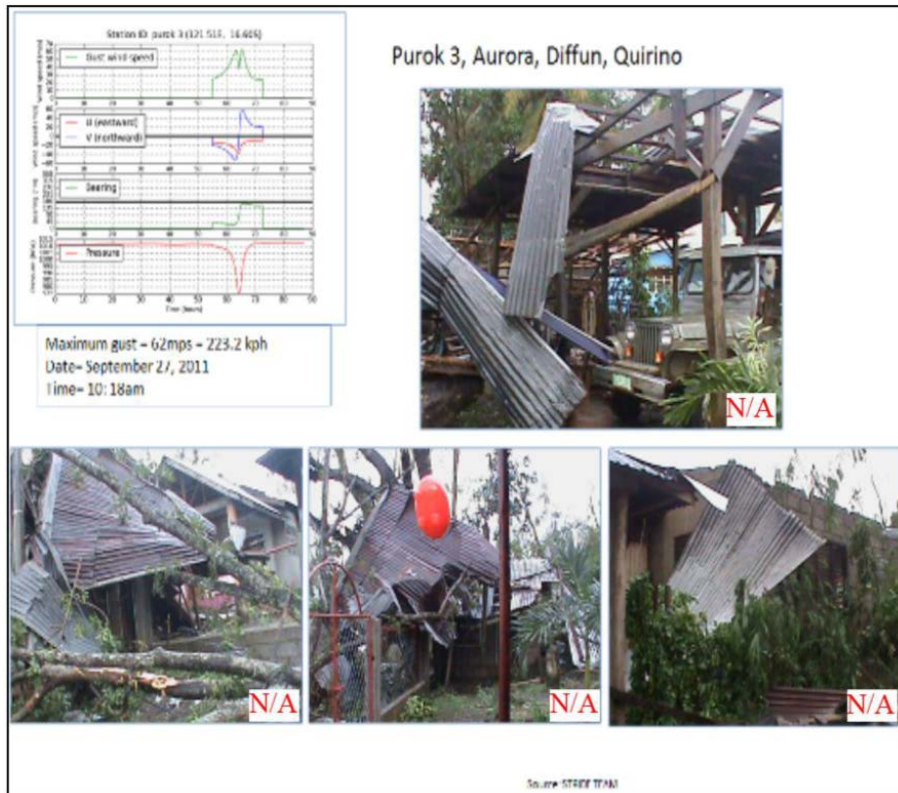


図 3-18 ペドリング台風の際の Diffun, Quirino における損害写真

## 3.2 地震

### 3.2.1 過去の地震イベントと建築物への影響評価 (BUILDING CONSEQUENCES)

フィリピンでは、強い地震の後のインフラや建築物への損害は PHIVOLCS と様々な研究者や専門家組織によって観察される。フィリピン政府は、PHIVOLCS に、将来の災害を軽減することを目的に、地震予測のための、データ収集、生成、分析を委任している。

本プロジェクトでは、入手可能な過去 15 の地震の影響に関する報告書を、PHIVOLCS と GA が共同で評価を行った。これは Rapid Earthquake Damage Assessment System (REDAS) enhancement program と、関連する脆弱性モデル作成を裏付ける形で行われた (PHIVOLCS & GA, 2012)。この報告書では、調査手法について下記のように述べている：

「本調査のアプローチは、マグニチュードと最大体感震度を得るために、過去の災害後の報告書のうち、過去のフィリピンの地震について入念に評価を行った。同時に、インターネット上で公開されているアーカイブで、対応する USGS 振動図と自動で生成される震度図を入手し、地上での最大体感震度も入手した (*In parallel, the corresponding USGS Shake Map intensity map generated by their automated processes was accessed in their web-accessible archive and the maximum felt intensity on land obtained*)。さらに、報告にある指定コミュニティについては、建築物の損害の程度に関するコメントが抽出され、住宅、商業用、公共、産業用のそれぞれの建築物のカテゴリーに使用された。この情報はイベントごとに、参考文献 (*Shake Map* 予測とは区別するために) にある、報告された体感震度と損害観察結果とともに、サマリー表に示した。最後に、最も顕著なコメントは表にまとめられた。これは *heuristic vulnerability curve* 作成の際の制約として使用する可能性がある」。

レビューから得られたコメントのうち、特に、本研究に関わる、建築物タイプに関連する主要なコメントのサマリーの例を図 3.19 に示す。レビューの結果は、15 の地震イベントごとに、4 つの建物占有タイプ (住宅、商業、古い URM、公共建築物) に対する影響とともに、別表に示す。

このフォーマットの報告書は、異なる建築物タイプの脆弱性に関する情報を提供するのに有用である。このサマリーの利用に関する PHIVOLCS と GA のコメントは次の通り：

- 地震損害調査活動の報告は損害に対する損害に対するハザードレベルの閾値を提供することが可能である。
- 損害調査の情報から、損害を受けた建築物と受けていないものの割合に関する情報がわかる場合がある。
- このサマリーは、基礎人口に基づくサンプリングがなされていないので、統計的に有用な情報を提供できない。建築物タイプに応じた建築物の暴露は不明である。
- 調査結果からは、特定の建築物タイプに対し広範囲に亘る、深刻な損害をもたらす振動強度に関する情報がわかる場合もある。
- 非住宅建築物に関する調査報告は、コミュニティでより重要な、大きな建築物に焦

点をあてる傾向にあった。

- 非住宅建築物に関する調査活動は、深刻な損害を受けた構造物に焦点があたる傾向にある。このような構造物からは、設計、建築施工、建築法規の効率性に関して多くの教訓が得られるためである。
- 時として、重度の振動の由来が、非常に貧弱に建てられた建築物への損害であると現場で観察されてバイアスがかかっている場合もある。(Sometime the attributed severity of shaking may have been biasing by the damage to very poorly constructed buildings locally observed.)
- 損害は断層や液状化のような地質工学や地盤の問題に起因する場合もある。観察された損害は津波や地震動の複合による損害の場合もあり、この二つを分けることを難しくしている。
- 建築年は重要な情報だが、一般に提供されない。

Earthquake	Date	Locality	MMI	Comment	Inference?
<b>Traditional Residential</b>					
Northern Luzon Earthquake	24/4/1985	Bokod	6	typical Igorot houses whose posts were not even buried into the ground collapsed.	Poorly constructed traditional residential vulnerable at MMI 4
Northern Luzon Earthquake	24/4/1985	Bokod	6	old Igorot huts collapsed. It was observed that posts failed at floor section.	Better constructed traditional residential vulnerable at MMI 5
Mindoro Earthquake	15/11/1994	Calapan	6	Old houses with nipa roofs collapsed due to ground shaking	Traditional construction severely damaged at MMI 7
<b>Typical Masonry Residential</b>					
Ragay Gulf Earthquake	17/3/1973	Calauag, Quezon	8	98 houses were totally destroyed and 270 others were partially destroyed.	Widespread residential damage at MMI 8
Moro Gulf Earthquake	17/8/1976		7	Many buildings, with unknown structural systems and close to the epicentre of the earthquake, collapsed or suffered severe damage after the earthquake	Severe residential damage at MMI 7 (note the large discrepancy with Pager MMI of 6. The reported isoseismals may indicate an overly large felt intensity)
North-Eastern Luzon Earthquake	22/11/1981	Magsingal	6	a few minor cracks in walls of houses made of hollow blocks	Minor damage to masonry residential buildings
North-Eastern Luzon Earthquake	22/11/1981	Bangued	6	many houses suffered cracks on the roofs and walls	Minor damage to masonry residential buildings

図 3-19 PHIVOLCS と GA による過去の災害イベント報告の例(2012)

### 3.2.2 2012 年ネグロス島沖地震によるフィリピンの公立学校校舎で発生した損害

マグニチュード 6.9 のネグロス島沖地震によって生じた、震源地そばの幾つかの公立学校に対する損害は、フィリピン人エンジニアや学校関係者と共に UPD-ICE が実施した損害調査に示される、UPD-ICE の Dr. Daniel Peckley と Dr. Fernando Germar によって実施された調査では、Rapid Visual Assessment(RVA) (図 3.20(a)) とシュミットハンマーによる検査など、単純な非破壊検査 (図 3.20(b)) が実施された。

結果は、築浅の校舎、例えば 2 階建ての C1-L 建築物 (図 3.20(c)) や 1 階建ての CHB による校長用建物 (図 3.20(d)) であっても、その多くが甚大な被害を被った。それにより、構造的・非構造的両方のコンポーネントの大改修が実施されるまで、校舎は使用できない状態となっている。損害を受けた構造部材から散見されたのは、不十分な建築の精度、柱への帯筋の欠如、せん断を防ぐ梁の中のスターラップの欠如、面外の崩壊を防

ぐ壁に対するダウエルバーの欠如、鉄筋コンクリートの中に川砂の代わりに海砂を使用している、等である。



図 3-20 2012 年ネグロス島沖地震によって損傷した公立学校建築物の評価

一般的結論と提言

- i. 多くの比較的新しい建築物、例えば地震耐性のある建築物が普及し、フィリピンの建築基準（NSCP1991）に含まれた時に建築され、甚大な被害を受け、構造的・非構造的構造部材両方の大改修、例えば隔壁、外壁のそれ、が実施されるまで使用できない状態となっている。これらの甚大な損害は低品質のコンクリートや職人の技量に帰する可能性がある。
- ii. シュミットハンマーによる計測数値が比較的低い建築物は、コンクリート強度が低いことを示していた。つまり、セメントの量が不十分であるおよび、もしくは、品質の低い骨材が使用されていたということである。構造部材のクラッキングに繋がる鉄筋のはげしい腐食は、砂（細骨材）および、もしくは、海由来の水が建設に使用されたことを示している。
- iii. 学校建設や既存学校の補修や耐震の際、学校は**必要不可欠な施設**であると、常に認識する必要がある。「学校は自然災害後、緊急援助や避難に必要不可欠である（NSCP2010）」。従って、ある地域における建築物の中で、学校建築物は、マグニチュードの大きい地震や強い台風の際、最後に損害を受ける、もしくは最後に崩れ

る建物であるように設計、建築されなければいけない。生徒を巻き込み、学校建築物に大きな損害をもたらしたネグロス島沖地震後の悲劇は、学校当局、教育省エンジニアやコントラクターに対し、設計要件が非常に重要であることを思い出させる必要がある。

- iv. 東ネグロス州の教育省のプロジェクトエンジニアや行政官はコントラクター含め、下記に関する訓練を実施することを推奨する：
  - a) 学校建築プロジェクトの品質保証と管理
  - b) 学校建築物及び施設の地震耐力に関する NSCP 条項
  - c) 学校建築物の耐震補強・補修
  - d) 建築資材の品質管理

## 4 風に対する脆弱性分析

### 4.1 メソッドロジー

脆弱性カーブを生成するには、4つのアプローチが可能である。つまり計算による方法（computational）、推測に基づく思考的手法（heuristic）、経験的手法（empirical）、そしてそれらを組み合わせた手法（hybrid）である。計算による方法には、風の構造物に対する影響をシミュレーションする数値モデルが必要である。思考的手法には、専門家に対する調査が必要である。経験的手法には、現場で観察された損害データに加え、損害を受けた構造物の場所の風速を見積もる必要がある。最後にハイブリッド手法は、上述の3つの手法の組み合わせである。適用可能な場合には、このプロジェクトで考慮された異なる構造物に対する脆弱性カーブの生成に、3つ全てのアプローチが使われた。

#### 4.1.1 計算による手法

図 4.1 は、建築物及び広告板の強風ハザードを考慮した場合の、計算による脆弱性カーブ生成の際に使用された一般的な手順を示している。損害程度（わずかな、中程度の、甚大な、完全な）に応じた損傷度カーブは、まず風の負荷化に置かれた際の構造体の振る舞いに影響を与える幾つかの属性を組み込む、構造的モデルの人口から派生した。建築物データベースで考慮されている建築物属性には、屋根の角度、床面積、1階もしくは2階建て建築物、屋根材、窓材、ひさし、防火壁が含まれる。次に、HAZUS-MHの異なる損害状態の定義が続く(Vickery et al. 2006)。さらに、3つの風向（縦、横、双方向それぞれから傾斜450度）が分析で考慮された。モデル建築物に対する風圧分配は、ANSYS CFXのcomputational fluid dynamics (CFD)を用いて、風速ごとに決められている。一方で、広告板には、非線形プッシュオーバー解析に10%の乱気流を使った。乱気流の影響は10%乱気流を用いたCFD分析に含まれている。損傷状態は、建築物表面に対する風圧と実験で求められた閾値との比較によって決定される。全てのモデルの分析後、使用した風速ごとに%超過確率と損害状態の累積超過確率が計算され、損傷度カーブのためのデータポイントを提供している。累積確率分布関数は、わずかな、中程度の、甚大な、完全な、損害状態に適合している。結果曲線（resulting curve）は建築物または広告板の損傷度カーブである。損傷度カーブの最後のステップは、脆弱性カーブを派生するための損害状態ごとに、対応する損害指標の使用が含まれる。

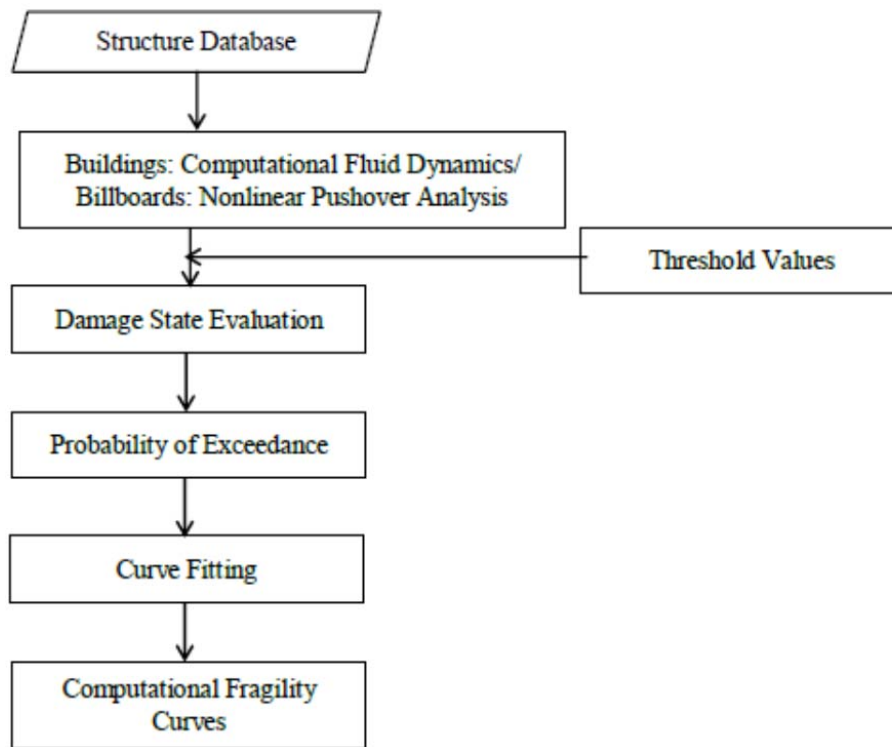


図 4-1 使用したメソドロジーの枠組み (Veron, 2012)

#### 4.1.1.1 建築物データベース

##### 建築物

台風の間、壁、ドア、窓、屋根を含む建物外面が、風圧や風で運ばれた瓦礫によって損傷の影響を受けやすいことは頻繁に観察されている。したがって、最初に、強風による風の大きさや風圧の方向に影響を与える建築物の属性を特定することが必要不可欠である。

特定の建築物タイプの脆弱性を数値化するために、建築物タイプの数量を示す、建築物モデルデータベースが作成された。風負荷のもとで構造性能に影響を与えるであろう異なる属性の可能な組み合わせに基づき、それぞれのモデルが作成された。骨組みは強風負荷の影響を受けないという仮説もあったが、陰圧は、クラディング要素に働く可能性があり、締結部やクラディング部の引抜やクラディング部の裂故障を招く。

Hernandez and Veron (2012)による先行研究では、それぞれの建築物モデルはシミュレーションと感度解析のために生成された。まず、単純な切妻屋根の構造物は、図 4.2 に示すように、通常の建築物として定義されている。凡そ 26 度の屋根傾斜 (1:2) で、天井高は 3 メートル、面積は 6×10m である。ことなる建築物モデルは従って、強風負荷による風圧配分に影響を与える建築物属性を考慮して作られた。建築物属性は通常マニラ首都圏で目にする住宅に見ることができると考えられた。つまりそれは、異なる屋根傾斜 (1:3 と 1:2)、防火壁がある、庇がある、防火壁・庇がともにある場合、である。これらは図 4.3、4.4、4.5 に、それぞれ示した。



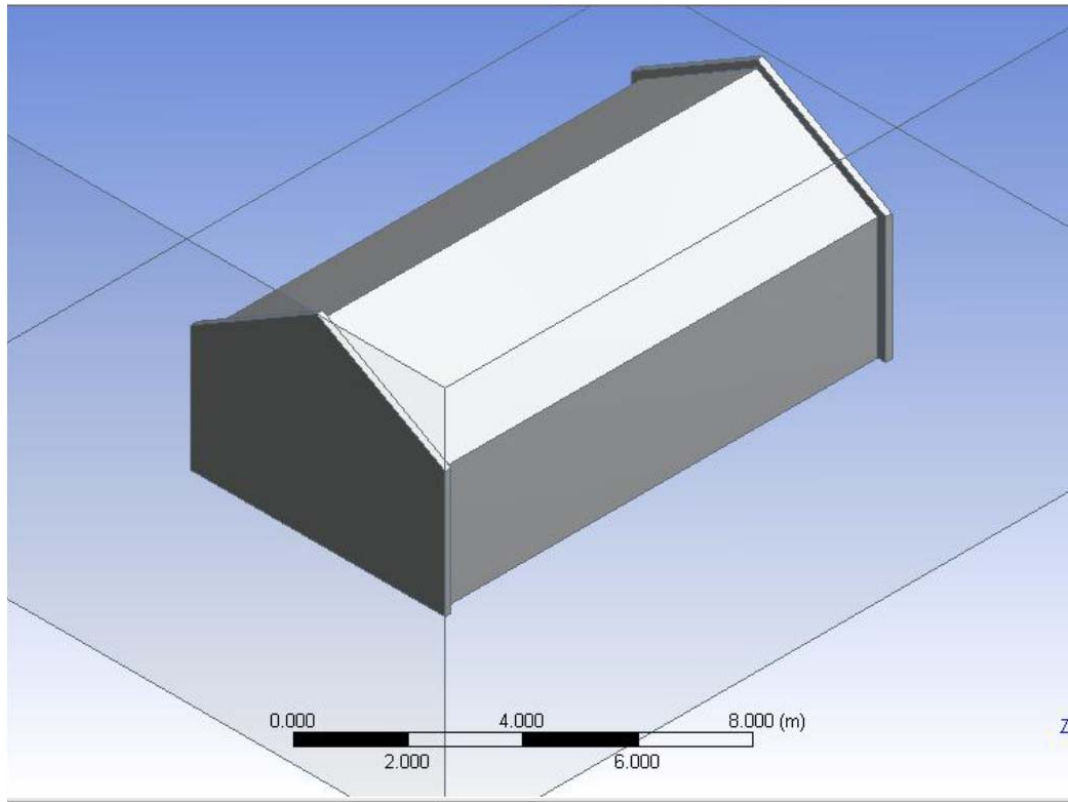


図 4-2 標準建築物モデル

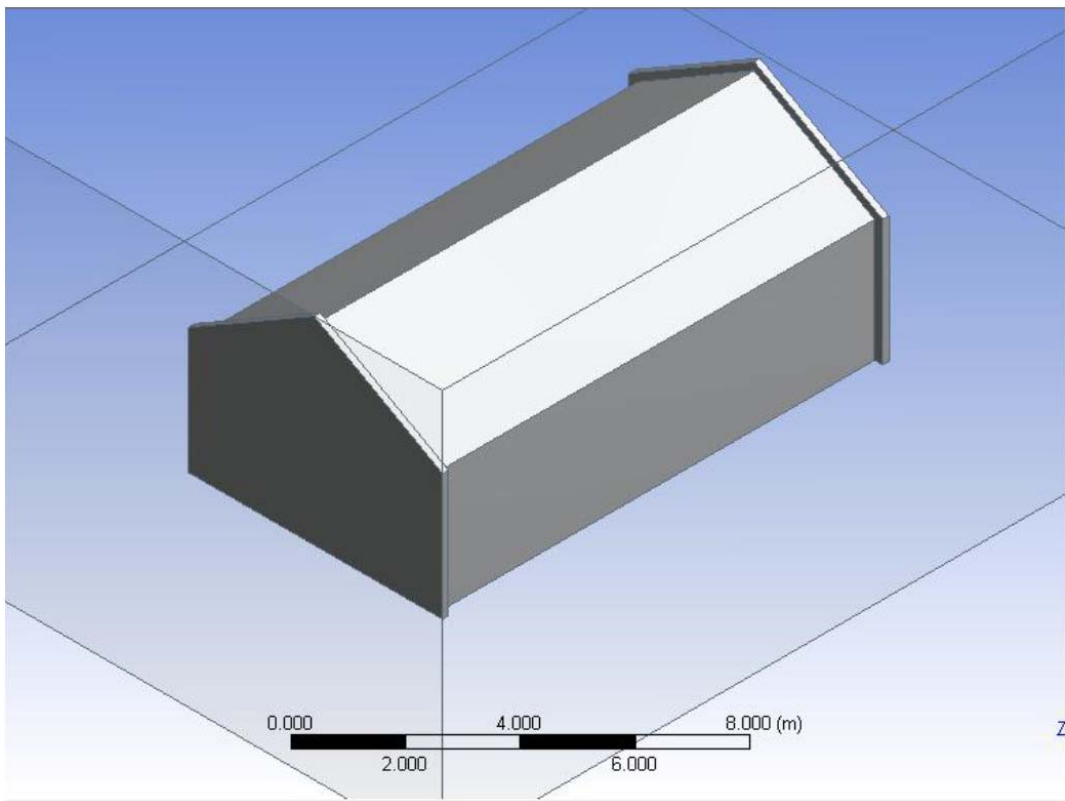


図 4-3 底のある標準建築物モデル

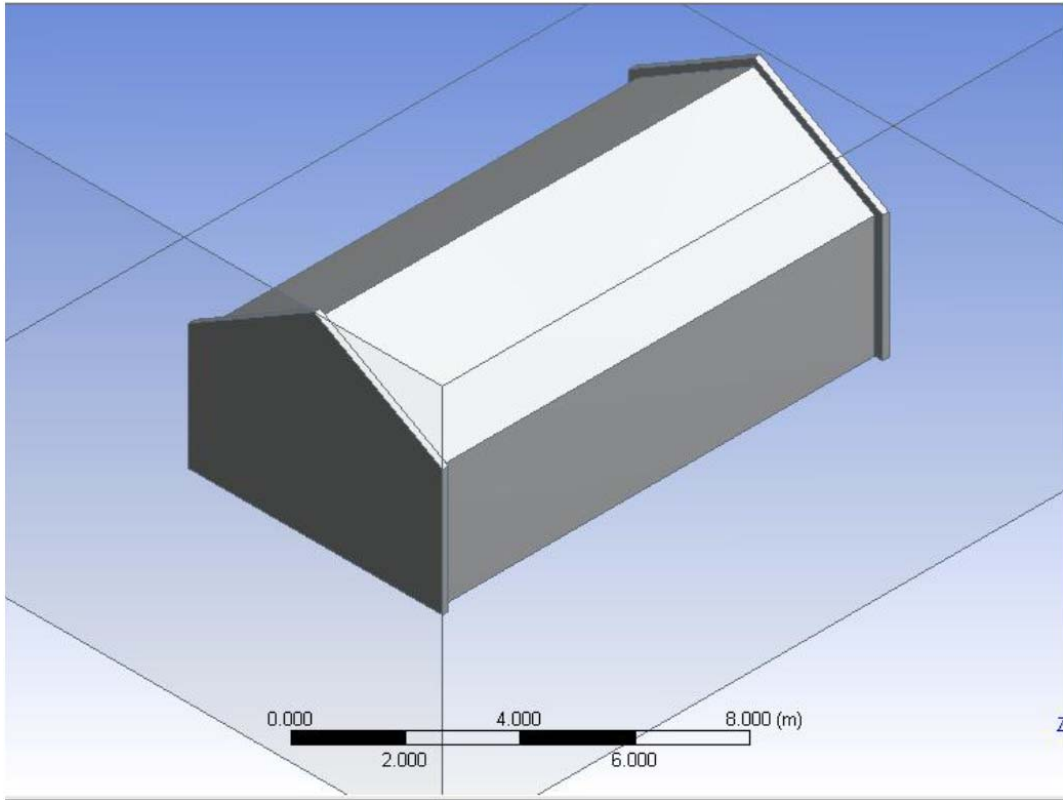


図 4-4 防火壁のある標準建築物モデル

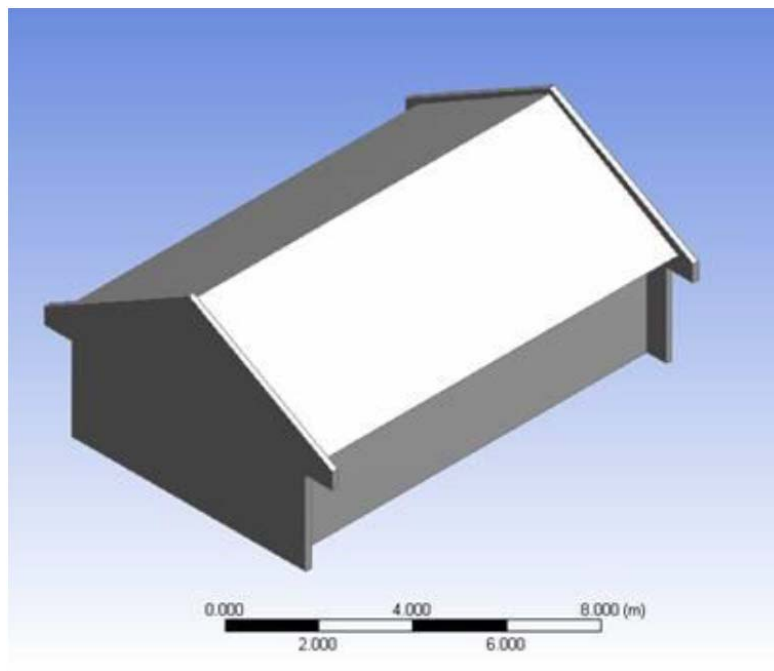


図 4-5 屋根庇と防火壁のある標準建築物モデル

最初の研究によれば、異なる非構造的属性（屋根傾斜、庇、防火壁）は流線型パターンを生み出す風速に影響を与え、建物の屋根と壁の風圧分配に変化を与える。屋根傾斜

の変化は結果として風圧に影響を与える。これは大きさや配分の点だけでなく、同じ屋根部分における方向（吸引力、圧縮）にも影響を与える。防火壁の存在は、屋根の上の防火壁と屋根のかどで、高い吸引風圧を生み出す。これは、圧力勾配の誘引に起因する。というのも、流れが、防火壁の境界層から分離し、そして防火壁から一定の距離をとって屋根に再び着流するためである。庇の存在は、建物の風上側の風圧分配に影響を与え、屋根の庇の部分から分岐する流れを生み出す。圧力の大きさの変化は軽微だが、風圧分布には、認識可能な変化がある。したがって、強風負荷を考慮した住宅用の脆弱性カーブを生成する際には、モデルに、床面積以外にも、屋根材、窓材といった非構造属性を含めることが、非常に重要である。

したがって、異なる建物データベースの開発においては、以下のパラメーターが考慮された：

- 屋根傾斜：1:3、1:2（1:1 は含まれないことを注記する。第1回ワークショップの際、エンジニアたちは、屋根傾斜が1:1の際に使用される屋根材は、強風由来の損害は受けないという点で合意したため）。
- 屋根タイプ：切妻屋根、寄棟屋根
- 建物外面部材：木製トラス上のGIシート、鋼鉄製トラス上のGIシート、木製パネル、GIシート壁パネル、中空ブロック（CHB）壁
- 接合部：屋根釘、屋根ねじ
- 防火壁の存在
- 窓タイプ：ガラス窓

### 広告板

モデルは、図4.6に示すように、プロジェクトの過程で得られた2種類の広告板設計図に基づいて生成された。さらに、2つの合成モデルは、実際の広告板設計図から生成された。広告板モデルは、高さ、設置面積とブレースによって異なる。風向は、0度、45度、90度の三方向でシミュレートした。

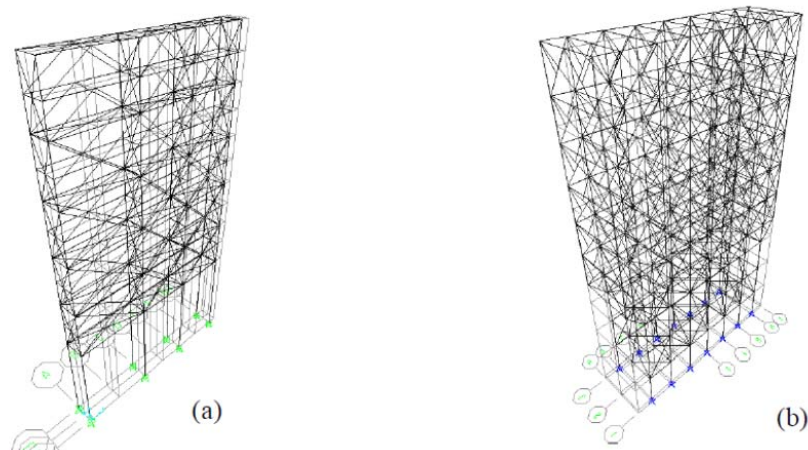


図 4-6 (a) 広告版モデル 1 (b) 広告版モデル 2

#### 4.1.1.2 分析

##### 計算流体力学

建物データベースから導き出された各構造は、計算流体力学（CFD）解析を行うことができる、ANSYS ワークベンチでモデル化された。建物データベースに基づいて、各モデルの形状が入力された。

モデルを作成した後、モデルを含むのに十分な筐体と流量が作成された。筐体の各表面は、CFD 解析に必要な境界条件を割り当てられた。次に示すのは、それぞれのモデル内で定義された 4 つの境界条件である(Veron, 2012)：

1. 風が流入する境界は、流入口として定義される。図 4.7 の緑色の部分は、モデルの流入口である。入口の向きは、シミュレートされる風の方向に依存する。

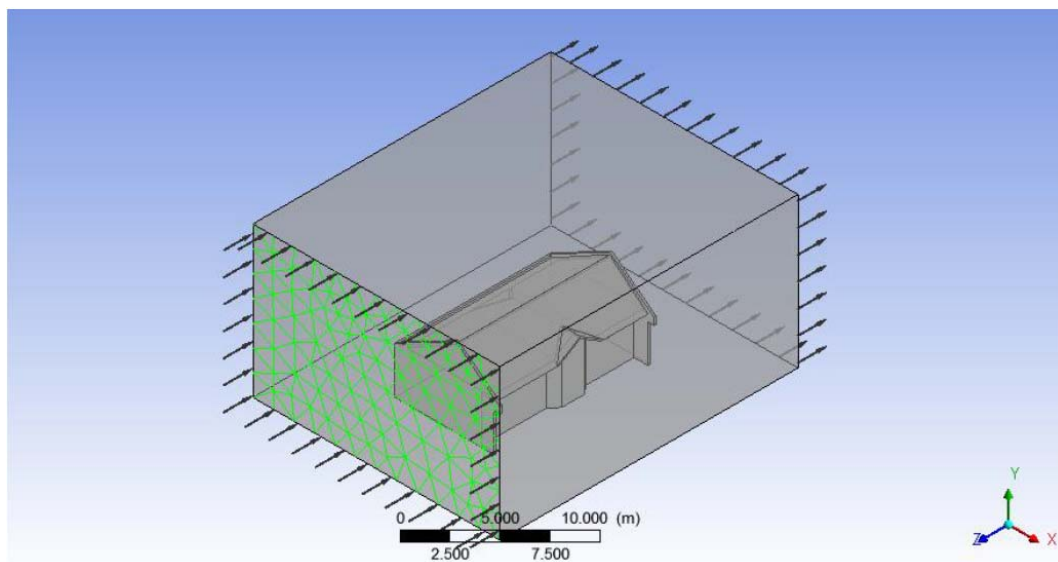


図 4-7 流入境界条件(Veron, 2012)

2. 風の流境界（図 4.8 の緑色の部分）は、筐体か流出する方向を導く。

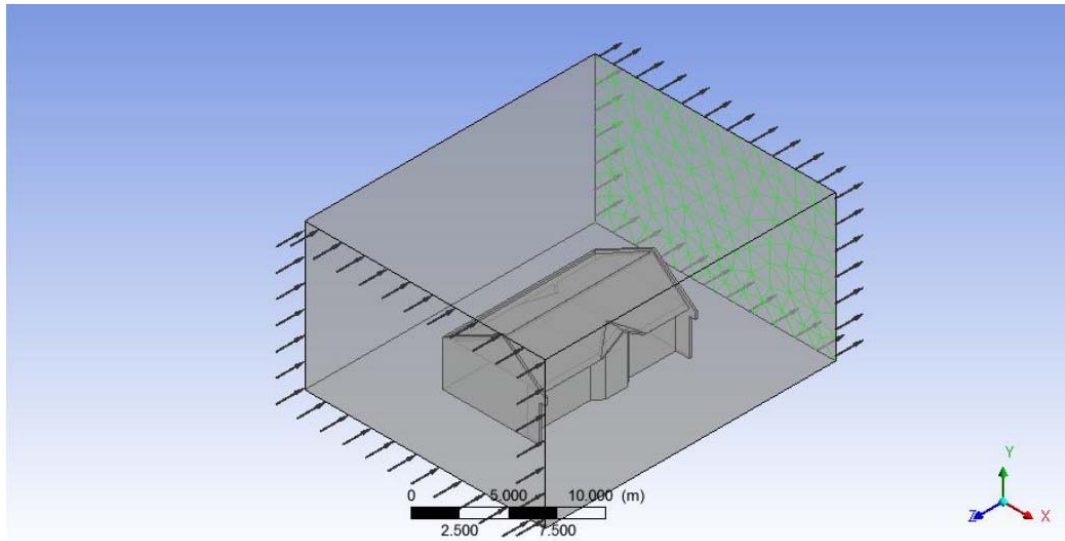


図 4-8 流出境界条件(Veron, 2012)

3. せん断応力がゼロであるべき境界を、「自由なスリップ壁 (FREE SLIP WALLS)」として定義される。図 4.9 の緑色で示した境界では、摩擦によって風速が低減することはない。

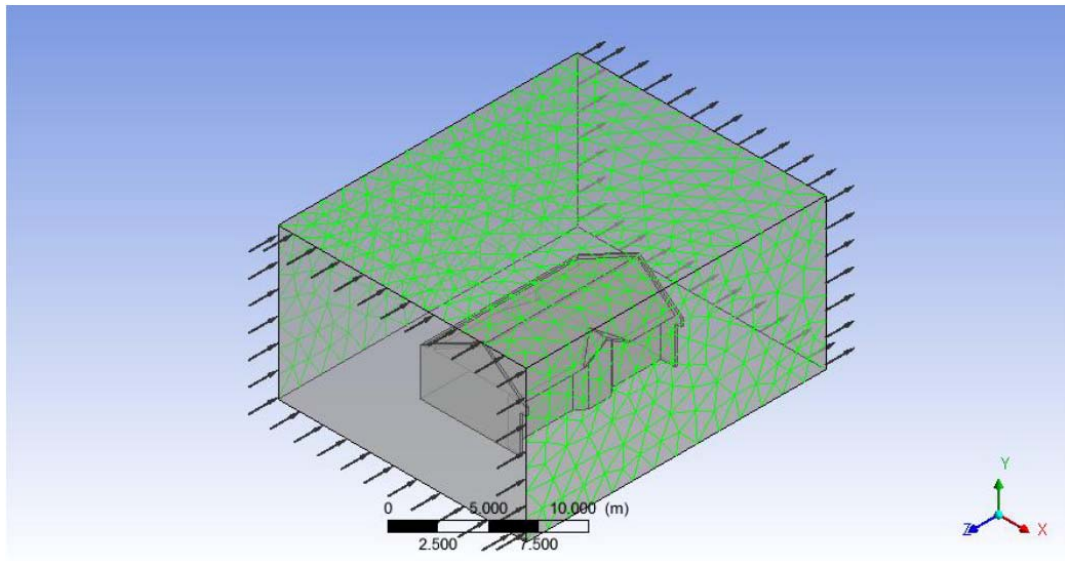


図 4-9 自由なスリップ壁境界条件(Veron, 2012)

4. 風速がゼロに等しくなるように境界で割り当てられているスリップ壁はない。このシミュレーションでは図 4.10 に示すように、地上や住宅建物での境界条件を定義するのに使用されるスリップ壁はない。

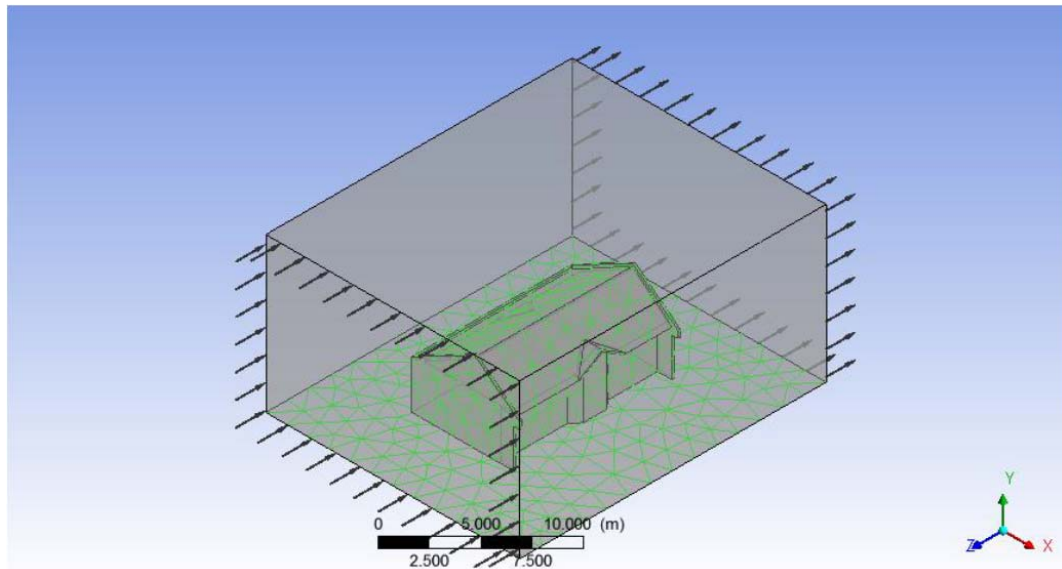


図 4-10 スリップ壁のない境界条件(Veron, 2012)

暴露の高さに沿った風速の変化を定量化するために使用された風速分布は、べき法則である。高さの平均風速を計算するために使用されるべき法則、Zは、次の数式で与えられる。

$$V_z = V \left( \frac{z}{10} \right)^a \quad 4-1$$

Vは、m/sにおける基本的な風速であり、10mの高さで測定されている。zは地上の高さ（メートル）、aは、フィリピン建築基準（NSCP2010）の表 207-5 で定義された常数で、NSCPのセクション 207.5.6.2 で定義されている、暴露カテゴリーに依存する。数式（4-1）で使用されるaは0.25である。

流入境界条件のために必要な、10mの標高風速の最初の大きさは、30kphに設定した。通常、構造が損傷し始める時の風速が決められれば、モデリングは30kphより高い風速から開始することができる。PAGASAの記録によれば、フィリピンに上陸した最強の熱帯低気圧は、2006年11月30日にCatanduanesのViracに320キロの記録ピーク突風を記録したReming台風である[PAGASA 2006]。構造がより早い風速を経験した可能性について説明するために、シミュレーションで使用される最も高い風速は350kphと設定した。

構造体の表面に関わる風の向きは、表面に発生し得る圧力に影響を与える。データベース内の建物は対照的なので、建物の横軸に3つの風向、0°、45°、90°を考慮した。

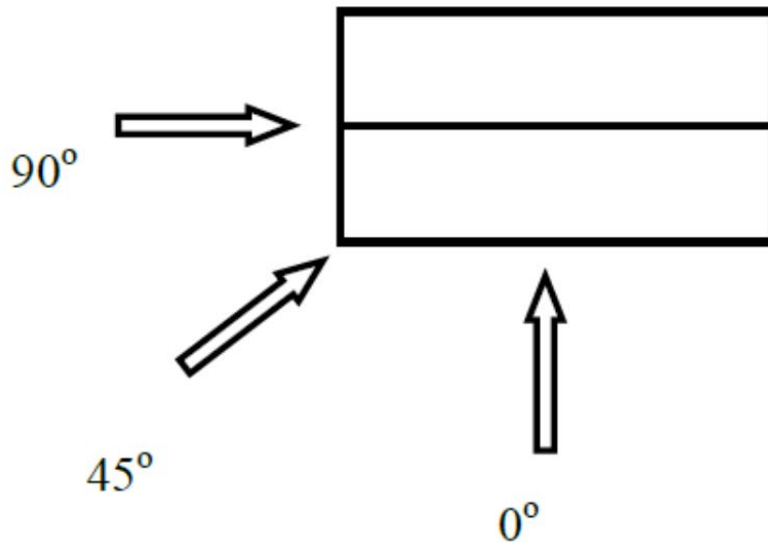


図 4-11 屋根における適用風向

図 4.12 から図 4.16 は、低層建物のモデルの風速流線は、分析の中では異なる 3 方向：縦方向、横方向、および傾斜 45 度、が考慮された。図 4.13 に示されるように、屋根のひさしの存在は、風の流れに大きく影響を与える。A large wake (大きな後流) は構造の風下側で生成される。それは風の循環がモデル側に吸引圧を発生するからである。同様の後流 (A similar wake) は図 4.15 でも見られる。

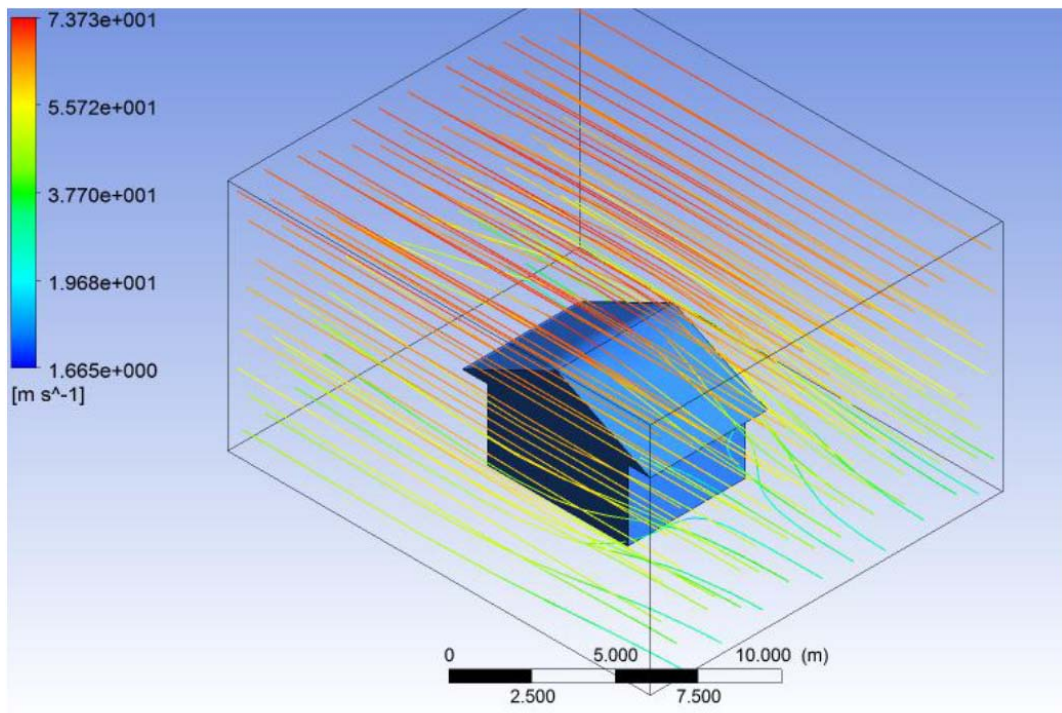


図 4-12 横からの風向(perspective)

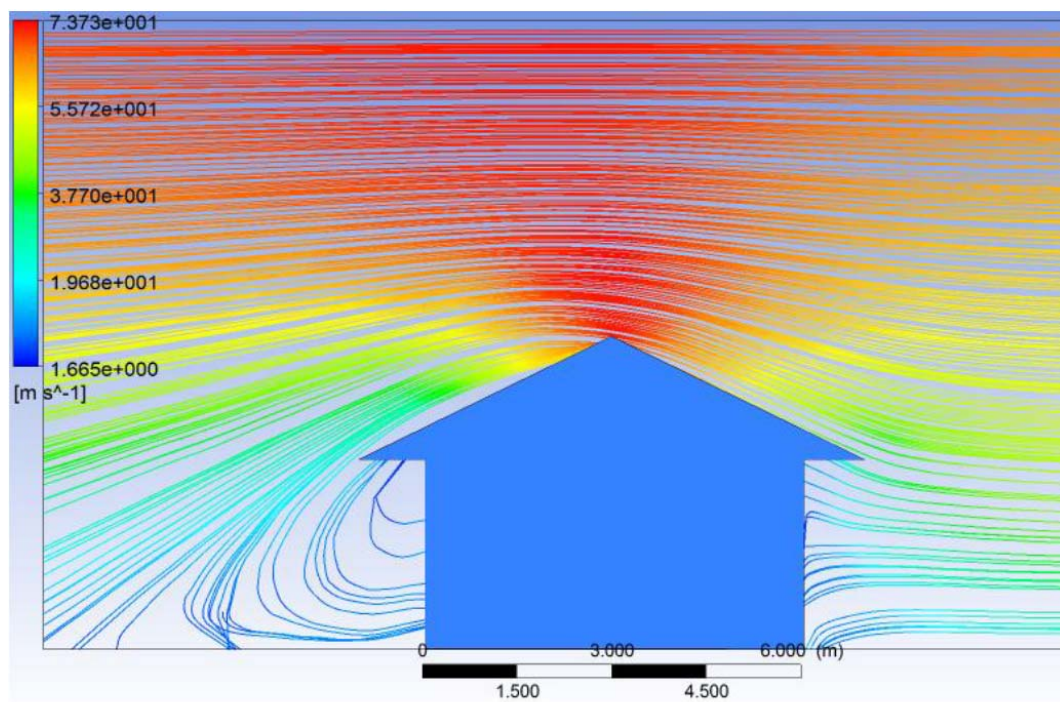


図 4-13 縦の風向(XY plane)

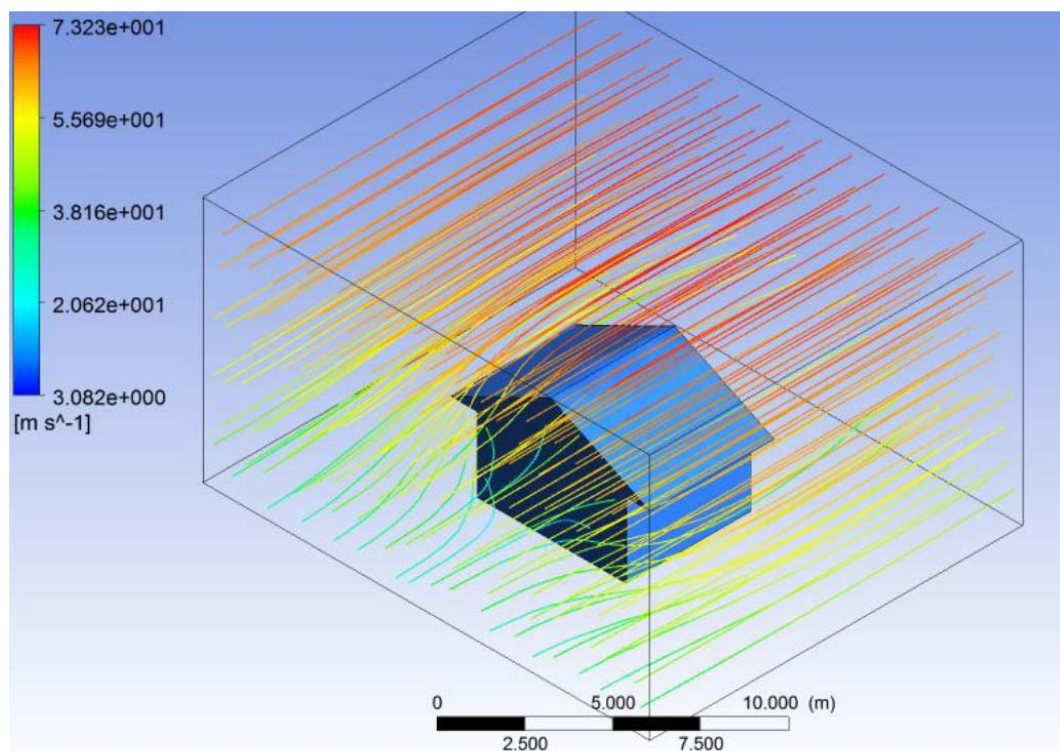


図 4-14 縦の風向 (perspective)



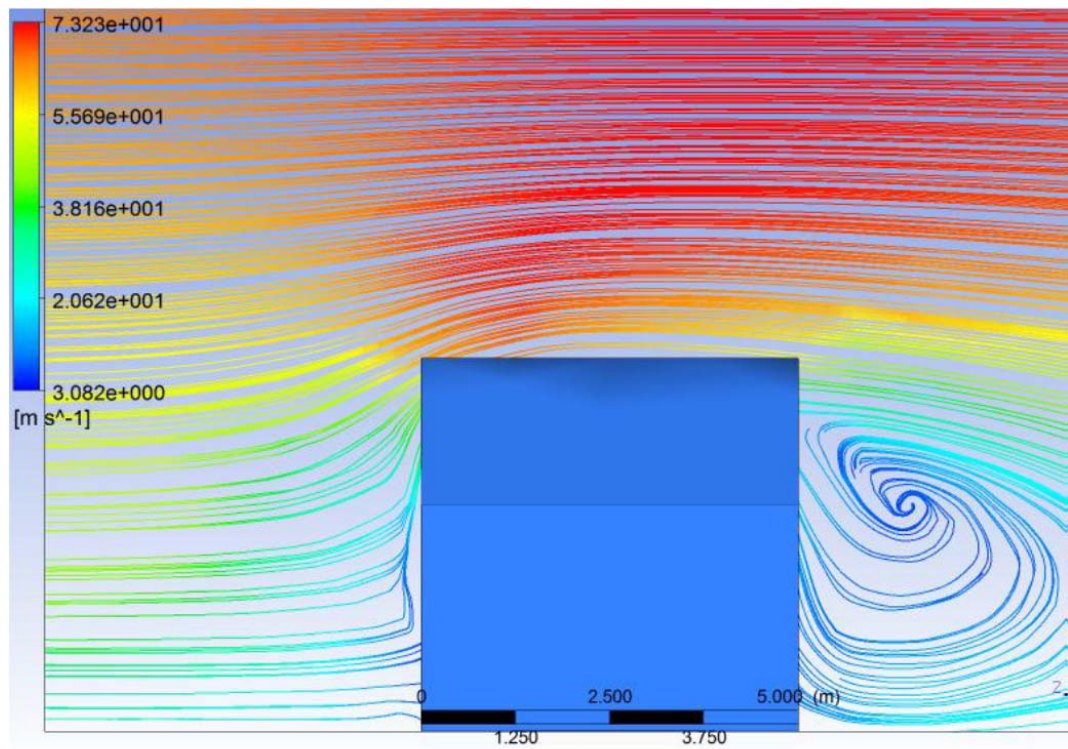


図 4-15 縦の風向 (YZ plane)

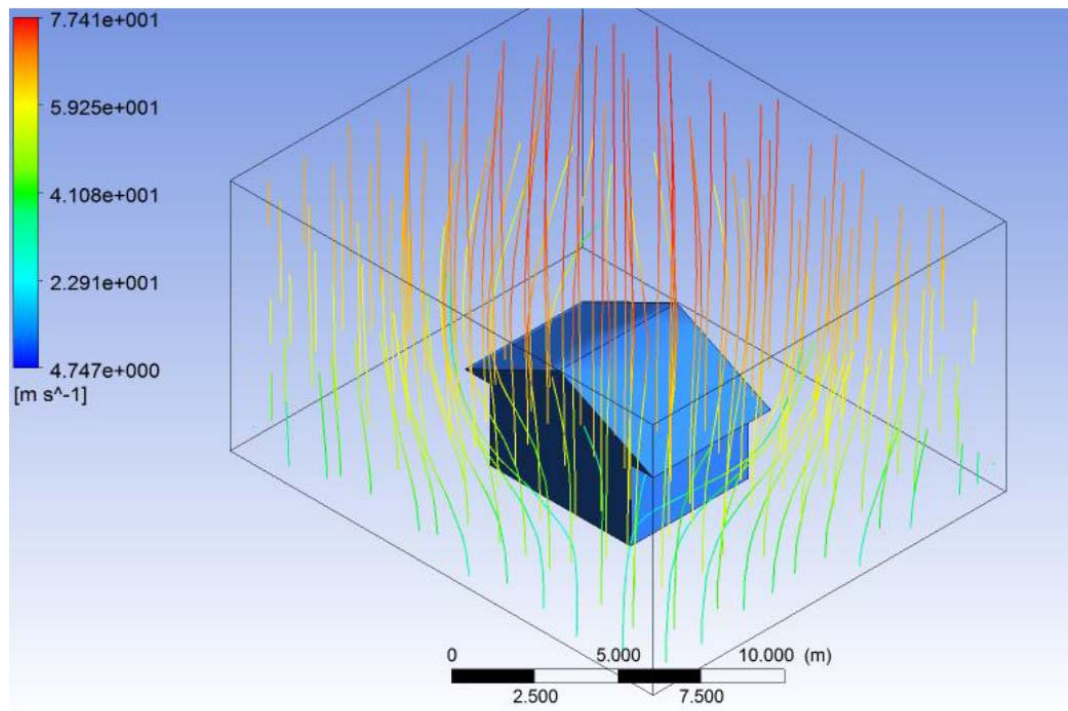


図 4-16 45度からの風向

## 非線形静的増分解析 Nonlinear Static Pushover Analysis

非線形静的増分解析には、徐々に適用される水平力を含む。この水平力は、構造体の高さに沿って構造体がもはや安定しないまでの、所定の負荷パターンが適用される。広告板の場合、負荷パターンは、NSCP2010 の開放構造風荷重の規定に基づいている。開放構造風荷重の計算は自動的に SAP2000 によって行われる。構造上の風向に応じて異なる負荷パターンを使用する。負荷パターンの例を、図 4.17 に示す。

各負荷の増大については、構造が機能しなくなるまで基礎せん断 (the base shear) が記録される。構造が経験した最も大きな変形に対する基礎せん断をプロットすると、容量曲線が得られる。

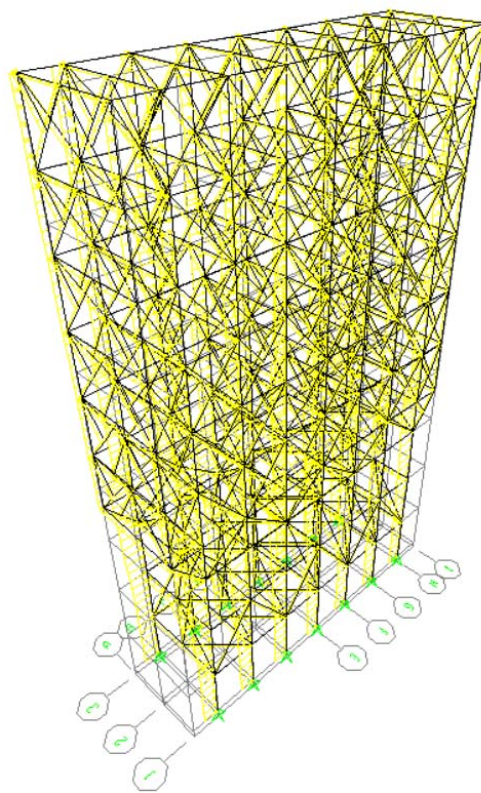


図 4-17 広告板に対する風の負荷パターンの例

### 4.1.1.3 異なる損傷状態のしきい値の定義

#### 建築物

強風に対する各建物外面の容量は、その材料とその接続に依存します。屋根は、木材の場合には釘、または鋼鉄の場合にはネジを使って固定されることが多い。窓は、木製もしくはガラス製である一方。壁は木製、軽量金属または石を使用することが多い。材料によっては他の材料に比べて強風に強いもの、弱いものがある。したがって、建物外面とその材料の閾値を決定することが重要である。建物外面の閾値は、結果として生じる風圧と比較される。風圧が浮き上がり閾値 (the uplift threshold values) を超えたとき、

損傷が生じる。建物外面への損傷度を評価するためには、クラッド材が構造から離脱するときの圧力閾値を決定する必要がある。表 4.1 に示すように、本稿では、実験から求めた閾値を採用する。

表 4-1 閾値

Material	Threshold values (Pa)	Reference
Roof nail	1200	Lee and Rosowsky, 2005
Roof screw	4300	Baskaran, Ko and Molleti, 2009
Glass windows	3332	Cope, 2004

ガラス窓の閾値は ASTM E1300-12a を用いて計算した。値の取得には、構造に対する典型的なガラスの設置に基づき、仮説を立てた。これらの仮説には、厚さ、窓のタイプ、支持の種類、典型的な寸法のタイプを含み、非因子と、結果として因子となる負荷を適切なチャートから探すのに使用された。C1-M のガラスパネルの閾値を得るのに使用した非因子負荷チャートを図 4.18 に示す。

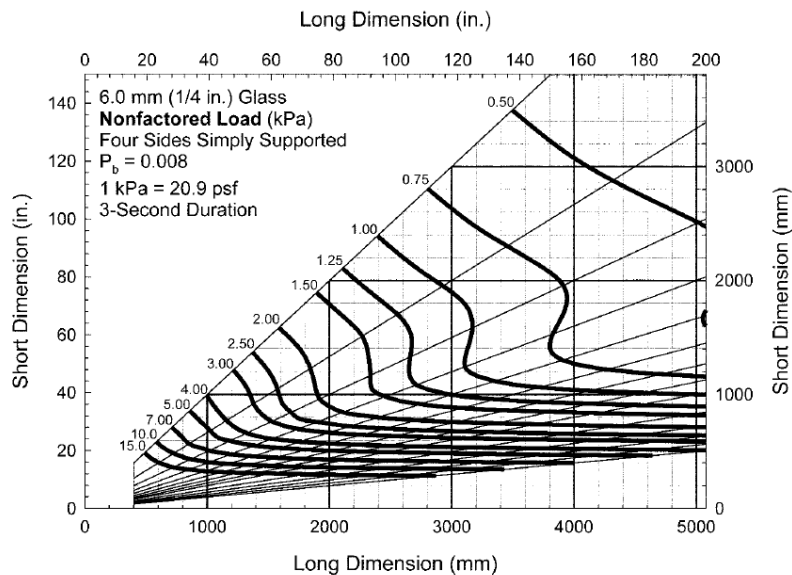


図 4-18 C1-M に使われた非因子の負荷チャート(出所:ASTM E1300 – 12a)

### 広告板

広告板の損傷状態を評価するために、異なる損傷状態の閾値が定義された。閾値は、各広告板の容量曲線をプロットすることによって得られた。広告板が完全に損傷する場合、広告板が崩壊し始める点を閾値とする一方で、わずかな損傷の閾値は、広告板がへこみ始めるのに伴い、広告板上部がずれるときと定義されている。異なる風向による各モデルの閾値を、表 4.2 に示す。

表 4-2 各広告板モデルに対する閾値

Model Number	Wind Direction	Slight	Complete
1	0	25.00	132.00
1	45	10.44	28.91
1	90	147.50	595.00
2	0	26.67	49.20
2	45	16.85	31.53
2	90	141.25	455.00
3	0	83.00	130.83
3	45	12.37	30.48
3	90	157.50	543.74
4	0	91.20	326.37
4	45	94.53	256.17
4	90	71.95	115.84

#### 4.1.1.4 損害度評価

図 4.19～4.21 は、本研究で考慮する、三つの異なる風向の風圧分布の例を示している。図から見て取れるように、高い吸引圧力が風下側の屋根に生まれ、結果として屋根板が吹き飛ばされることになる。損害の大きさは、建物外面が経験する、屋根クラッドとコネクタの引き抜き力を超える吸引圧力の大きさを確認することで、決まる。

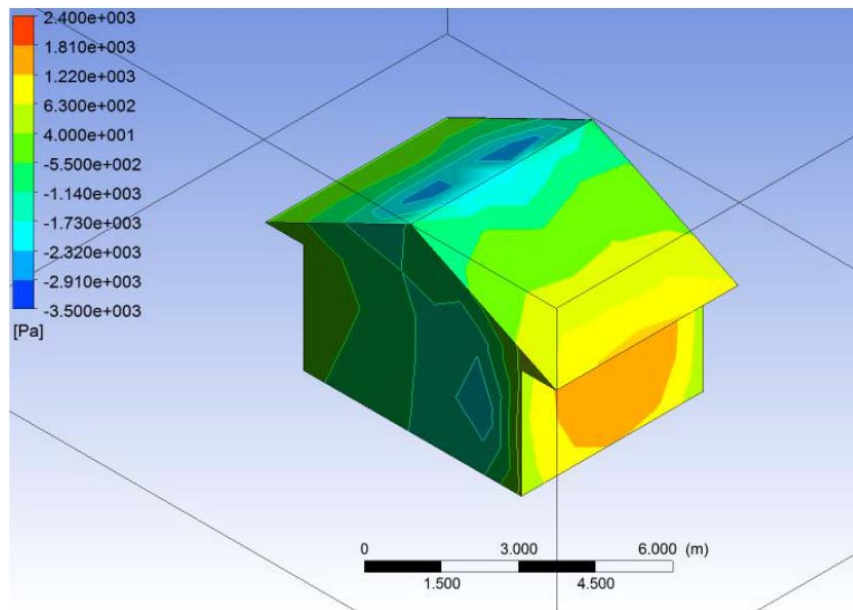


図 4-19 水平方向の風に対する風圧分布

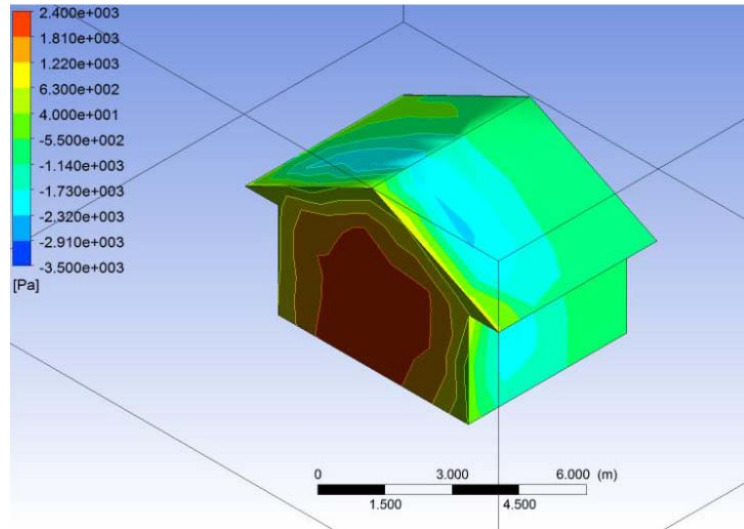


図 4-20 縦方向の風に対する風圧

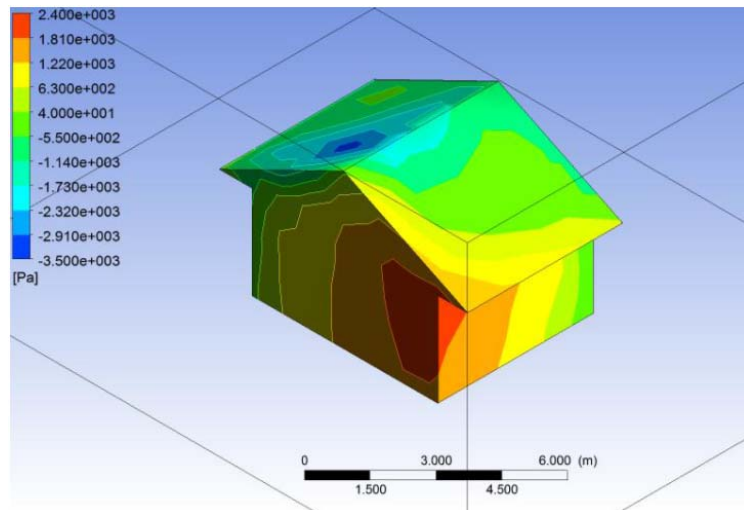


図 4-21 45度傾斜の風に対する風圧分布

風速と風向の第一の解決法が CFD 解析を用いて行われれば、建物外面に関する圧力分布が検査される。該当する建物外面素材が除去されたことで損傷閾値を超えた任意の領域については、特定の領域がそれ以前に除去されていたことを示唆している。モデルは、その後、領域ごとに再メッシュ化され、分析は同じ風速でもう一度実施される。これは、風流と圧力分布の変化に起因する損害を受けた領域があるかどうか確認するためである。閾値を越え、圧力分布を再計算した領域の除去は、隆起による損害閾値を超える領域がなくなるまで実施される。

各風速と風向について更なる損害が観察されない場合、屋根カバーの故障、窓やドアの故障が観察され、表 4.3 に示す異なる損傷状態と比較される。

損傷状態は HAZUS-MH を適用し、屋根カバーの故障、窓やドアの故障、および壁の故障のみを考慮に入れた。

## 広告板

容量曲線は、広告板上部の変位に対し、基礎せん断をプロットするものである。一定の風速における損傷状態を評価するためには、一定の風速での構造物の変位を得る必要がある。

式に示すように、一般に、構造上の流体によって及ぼされる抵抗力は、平方流体の速度の関数である。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D A \quad 4-2$$

一つの基準風速とそれに対応する基礎せん断がわかっている場合、他の風速と一致する基礎せん断は、式 4-3 から得られる。これらの基礎せん断は、一度判明すれば、構造の変位に風速を関連付けて使用可能である。

$$F_{ref}/V_{ref}^2 = F/V^2 \quad 4-3$$

本研究で用いた風速の増加は、広い範囲の風速を含むよう、15kph から始まり、45kph から 510kph までである。これらの風速に対応する広告板上部の変位は、従って、広告板の損傷状態を識別するために、閾値と比較される。

表 4-3 住宅建築クラスに対する損傷状態

Damage State	Qualitative damage description	Roof Cover Failure	Window or Door Failure	Roof Structure Failure	Wall Structure Failure
0	No damage or very minor damage	≤2%	No	No	No
1	Minor damage	>2% and ≤15%	One window, door, or garage door failure	No	No
2	Moderate damage	>15% and ≤50%	> one and ≤ the larger of 20% and 3	No	No
3	Severe damage	> 50%	> the larger of 20% and 3 and ≤ 50%	No	No
4	Destruction	Typically >50%	>50%	Yes	No

Source: "HAZUS-MH Hurricane Model Methodology II: Damage and Loss Estimation" by Vickery et al. 2006

#### 4.1.1.5 損傷度の超過確率

特定の損傷状態に該当するモデルの数は、風速ごとに記録した。各モデルの風向ごとに、損傷状態をそれぞれ別々に計算した。このことから、損傷度カーブ、脆弱性カーブを作成するために必要な損傷度の確率マトリックスを組み立てることが可能であるといえる。

損傷状態の発生頻度は、特定の風速で発生したそれぞれの損傷状態の回数に等しい。損傷状態の発生確率（percent probability）は、損害状態の発生確率を、分析したケースの総数で割った比に等しい。これらは、損傷確率マトリックスの要素を構成する。損害状態の超過確率は、構造が特定の損傷状態にあること、もしくはそれを超過する累積確率を取ることによって得られる。これらは、損傷状態ごとの損傷度カーブを当てはめるためのデータポイントとして機能する。

#### 4.1.1.6 損傷度カーブの適合

標準的な対数正規累積分布関数を、損傷状態の超過確率マトリックスからのデータポイントに適合させた。適合させた曲線は損傷度カーブになり、これは脆弱性カーブの作成に使用される。

図 4.22 に、特定の種類の構造に対する損傷度カーブの典型的なセットを示す。

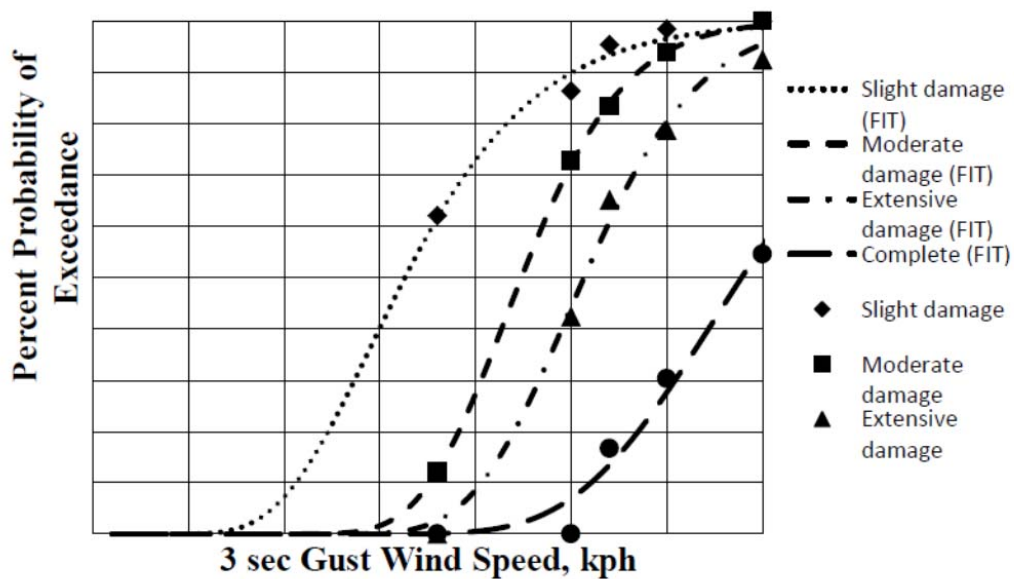


図 4-22 損傷度カーブの例

#### 4.1.1.7 脆弱性カーブの作成

各建物について、構造物の総コストに対する各構成要素（屋根、壁、および窓）の割合が推定された。次に、各コンポーネントのコストパーセンテージに、各損傷状態の損傷範囲の平均値を乗算した。この損傷乗数は、特定の損傷状態の損傷から導かれる超過確率に乗じられている。風速ごとに、すべての損傷状態に対する損傷を加えることで、損傷指数が計算された。次に、標準対数正規累積分布関数を損傷指数に当てはめ、脆弱

性カーブを作成した。図 4.23 に、特定の構造タイプの脆弱性カーブの例を示す。

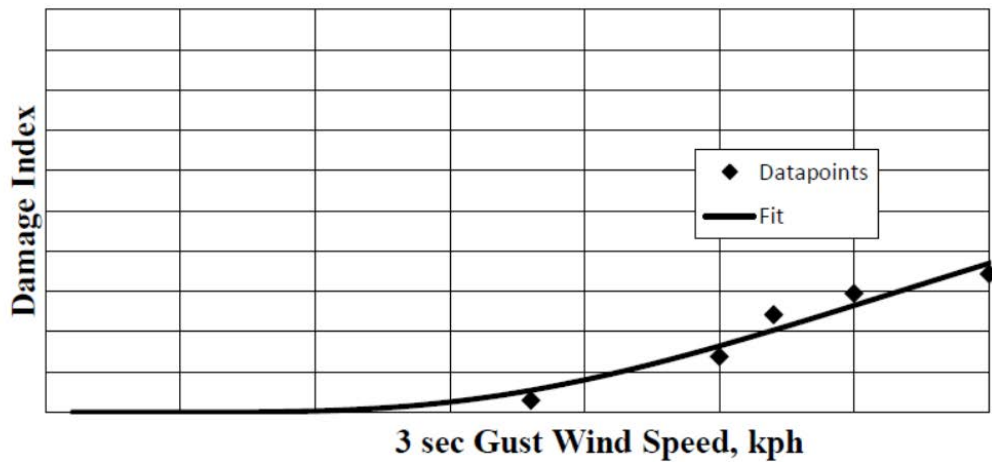


図 4-23 脆弱性カーブの例

#### 4.1.2 思考的手法

以下の方法は、Geoscience Australia (GA) の研究者がオーストラリアの住宅の脆弱性カーブを開発する際に使用している推測アプローチから採用された。

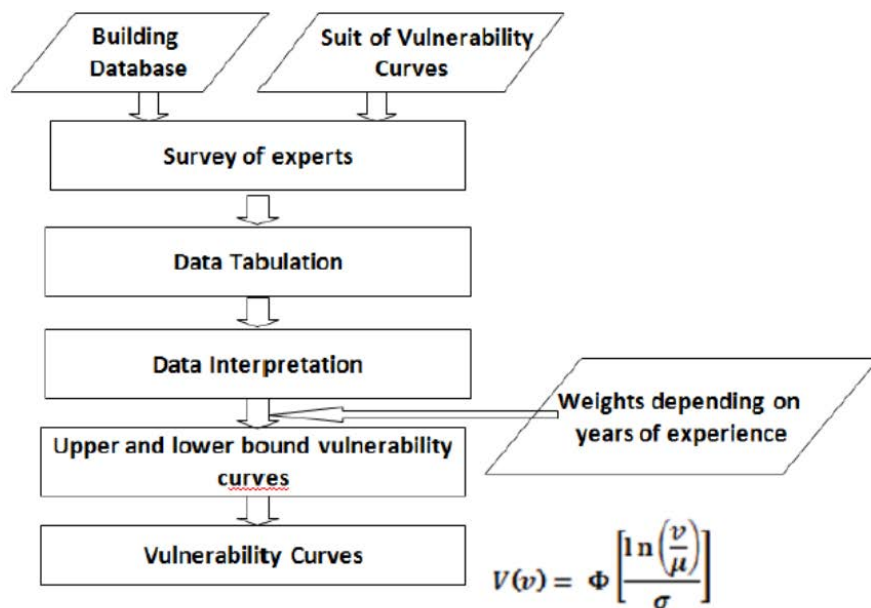


図 4-24 思考的手法のメソドロジー

##### 4.1.2.1 調査

調査票は、2012年8月13日～16日に開催された「第9回国際高度風力工学学会」及び2012年8月23日～24日に開催された「耐震に向けた建物の線形弾性挙動を超えて」というセミナーワークショップに参加した研究者に配布された。双方はフィリピン大学ディリマン校国立工学センター、Junio Hallで開催された。合計57人の回答者が以下に



ついて解答した。

1. 所属

- コンサルタント
- プロジェクト・マネージャー
- デザイナー
- 大学教員
- その他

2. 専門

- 木造
- 石造
- コンクリート
- 鋼鉄

3. 業務従事年数

4. 建築物カテゴリー毎の曲線、またはその範囲

- 単一曲線（例：A）
- 曲線の範囲（例：A/B または B/C）

5. 信頼度

- 1 から 10 (最も高い)

回答者には、調査票に加えて、図 4.25 および図 4.26 に示す建物および特殊構造の脆弱性カーブが配布された。回答者は、与えられた参照曲線から、各建物タイプに対し、最も脆弱な曲線として割り当てる可能性の高いものを選択するよう求められた。表 4.4 に、対数正規累積分布関数を使用した脆弱性カーブのパラメーターを示す。

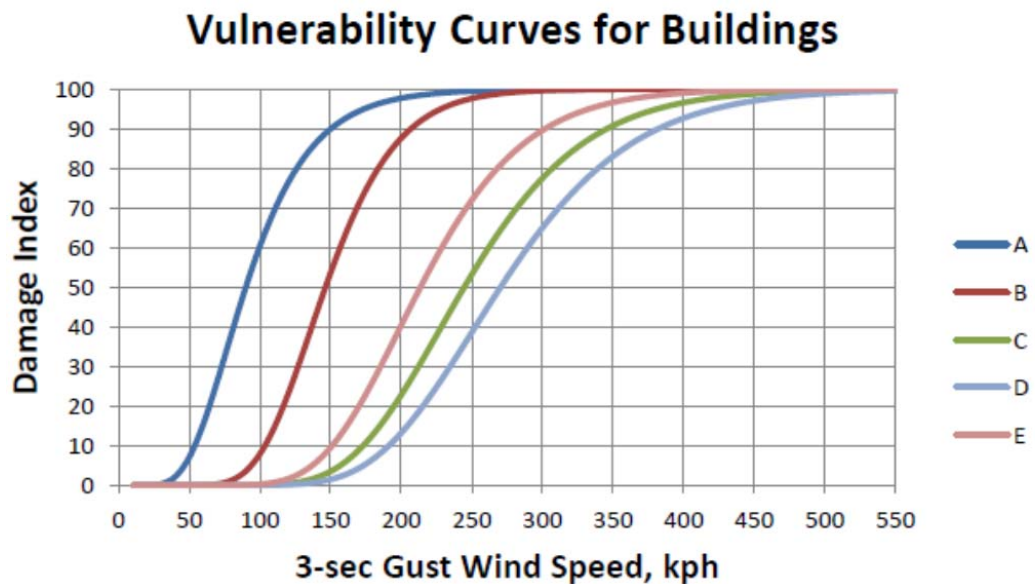


図 4-25 建築物に対する脆弱性カーブ一式

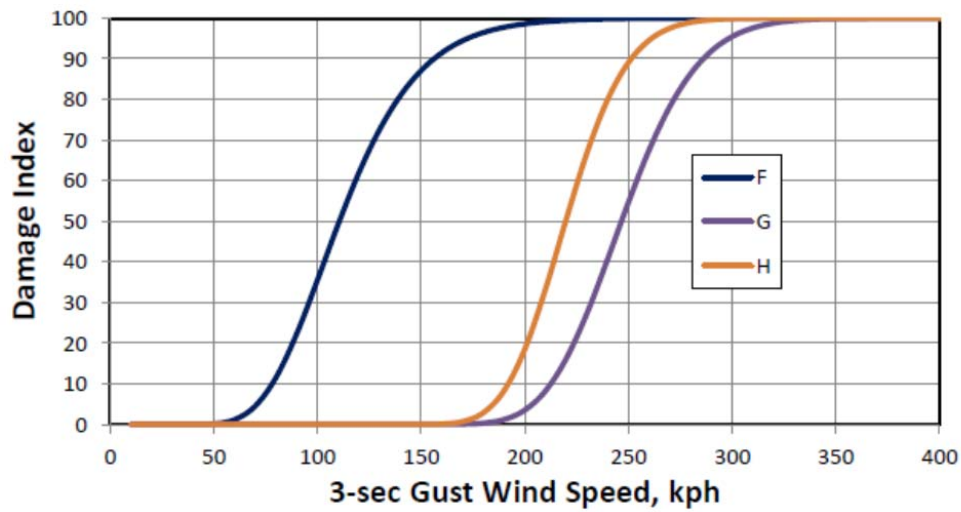


図 4-26 特殊構造物に対する脆弱性カーブ一式

表 4-4 参照脆弱性カーブのパラメーター

Curve	Mean (kph)	Lognormal Mean	Standard Deviation
A	90.02	4.50	0.40
B	146.43	4.99	0.27
C	244.69	5.50	0.27
D	270.43	5.60	0.27
E	213.68	5.36	0.27
F	110.53	4.71	0.27
G	219.70	5.39	0.10
H	246.61	5.51	0.12

両セミナーの参加者は、アンケートに先立ち、折り畳まれたターポリン/カバー付き広告板の脆弱性カーブも選択した。

#### 4.1.2.2 データ解釈

回答者は、調査票で選択した専門分野に基づいて分類された。W1 と W3、N タイプを除いて、特定の構造材料の下にある建物の設計を専門とする回答者のみが考慮された。

表 4-5 建築物類型から考えられる専門性

Building Type	Specialization Considered
W1 & W3	All
N	All
MWS	Masonry, Wood, Steel
CWS	Concrete, Wood, Steel
CHB	Masonry
C1	Concrete
S1 & S3	Steel
BB	Steel
PT	Steel

可能性のある外れ回答は、ヒストグラムによる応答の分布を表すことによって決定された。ヒストグラムの分布に基づき、外れ値を容易に識別することができる。外れた回答は、全回答の20%に固定された。特殊構造については、曲線A、B、C、D、Eまたはそれらの間の任意の曲線を割り当てた回答者も外れ値として扱われた。

#### 4.1.2.3 重み付け割当て

重み付けは、専門家として従事した年数からのみ行われた。図4.27に示されているように、信頼水準と業務年数との相関が見られないためである。

割り当てられた重みは、専門従事年数が長ければ長いほど、彼/彼女の応答が信頼できるものと仮定して、設計業務経験年数に基づく。割り当てられた重みを表4.6に示す。

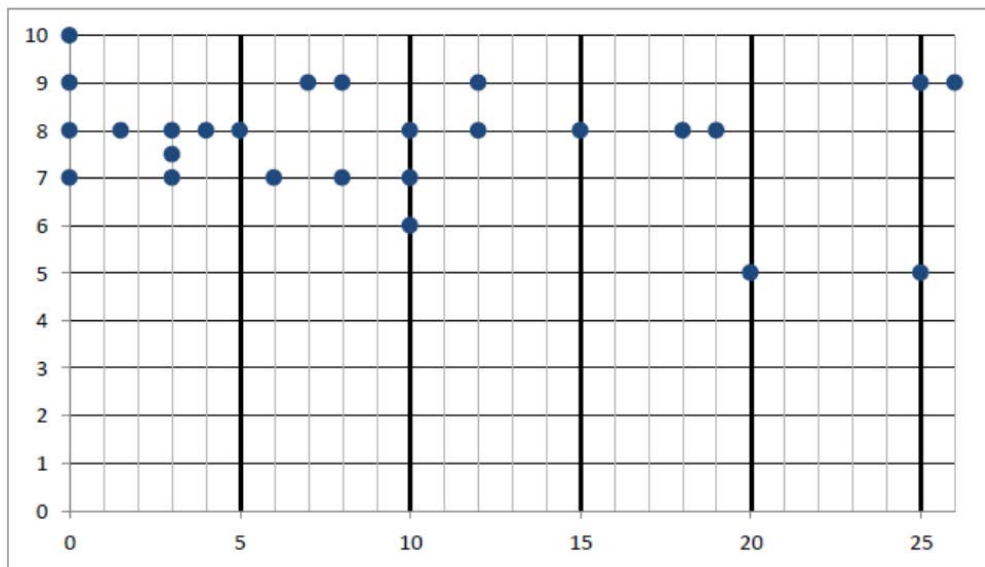


図 4-27 建築物類型 S1L に対する回答者の信頼水準と業務経験年数の相関

表 4-6 重み付け割り当て

Number of years at specialization	Weight
1 to 4	1
5 to 10	2
10 to 20	3
20 and above	4

#### 4.1.2.4 脆弱性カーブ

回答者は与えられた脆弱性カーブから最大2つの曲線を選択するオプションがあるので、各回答者の下限曲線と上限曲線が決定された。回答者が単一の曲線を選択した場合、割り当てられた曲線の上限下限は選択された曲線になる。しかし、回答者がある範囲の曲線を選択した場合、最も高い曲線が上限であり、最も低い曲線が下限となる。その後、上限下限の両方の曲線で1%、20%、90%の損傷度の風速が測定される。

1%、20%、90%の損傷時の重量と風速の積は、重量の合計で割られる。次に、3つの

点を下記の式に当てはめる。

$$V(v) = \Phi \left[ \frac{\ln\left(\frac{v}{\mu}\right)}{\sigma} \right] \quad 4-4$$

$v$  は風速、 $\Phi[]$  は標準化された正規分布関数であり、脆弱性パラメーター  $\mu$  および  $\sigma$  は平均および標準偏差である。

次に、脆弱性カーブは、上下限曲線の3つの特定の点から導かれる。式1を用いて決定され適合された3つの点は、下部曲線の1%損傷、下部曲線および上部曲線の20%損傷の平均、そして下部および上部曲線の90%損傷の平均である。最終的な推測的脆弱性カーブは、分析から得られた上限および下限曲線の平均である。

### 4.1.3 経験的手法

脆弱性カーブを作成する経験的手法は、現場で観測された損傷データを使用する。これらは、PAGASA の STRIDE（深刻な熱帯気候かく乱調査、情報共有、損傷評価）チームによって収集された。STRIDE は、既存の構造物への台風の被害を記録することを目的とした PAGASA の迅速対応チームである。

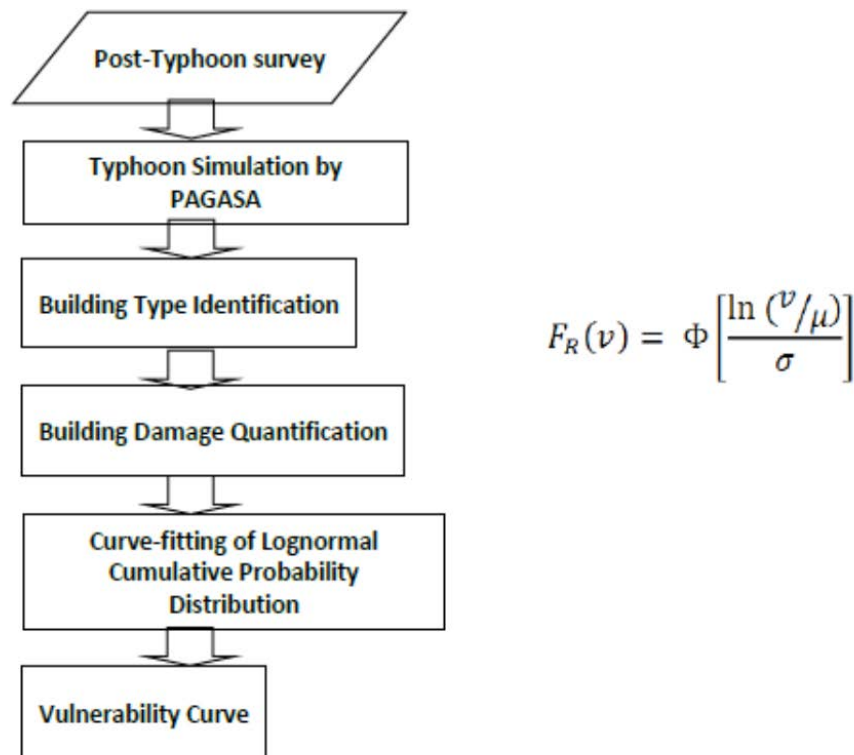


図 4-28 経験的手法のフロー

PAGASA は、暴風雨とその最大風速によって損傷した建物や損傷していない建物の写真を提供した。得られた損害は、各建物構成要素（すなわち、屋根、窓、ドア、壁、フレームおよび基礎）のコストのパーセンテージによって推定された。各建物のタイプ別

にデータポイントをプロットし、脆弱性カーブとして滑らかな曲線を当てはめた。

STRIDE チームの被害記録には風速情報が欠けているため、PAGASA は調査した構造物に損傷を引き起こす風速を出すため、Tropical Cyclone Risk Modeling (TCRM) を使用して台風のシミュレーションを行った。建物の種類の特定と被害の定量化は、フィリピン大学工学研究所の研究者によって行われた。しかし、使用できる写真の数が限られているので、被害の推定はかなり主観的である。

木造建築物 (W3 と W1) のデータポイントの大部分は風速が大きく、損傷が深刻であるため、脆弱性カーブがどこから離れるか、構造がいつから損傷を受け始めるかを特定することは難しい。これに対応して、データポイントは W3 と W1 にそれぞれ、60kph でダメージなし (0%ダメージ) と 100kph でダメージなし (0%ダメージ) に足された。これらは、過去の台風から得られた PAGASA の観測に基づいている。

## 4.2 結果

下の図は、プロジェクトで特定されたさまざまなタイプの構造に対する脆弱性カーブを示している。利用可能であれば、曲線の作成に使用される手法 (計算、推測的、経験的、またはハイブリッド) に応じて、3 種の脆弱性カーブがプロットされる。縦軸は損傷率であり、これは建物が損傷を受けた際の修復費用の、再調達価格に対する比率として定義され、横軸は 3 秒の風速である。

### 4.2.1 計算による手法

表 4-7 計算による手法を用いた脆弱性カーブのパラメーター

Bldg Type	No Vintage		Wood (~1992)		Steel (1992~)	
	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta
W1-L	176 <sup>†</sup>	0.09 <sup>†</sup>				
W3-L						
N-L	136	0.2				
MWS-L			321	0.52	398	0.16
CHB-L			456	0.59	469	0.44
CWS-L			321	0.52	398	0.16
C1-L			416	0.52	477	0.46
C1-M	221 <sup>‡</sup>	0.33 <sup>‡</sup>				
S1-L	379	0.61				
S1-M	180 <sup>‡</sup>	0.24 <sup>‡</sup>				
S3-L	387	0.37				
BB	381	0.27				
PT	369	0.15				

† 計算と経験によるデータから作成した脆弱性カーブのためのパラメーター

‡ 適した脆弱性カーブを得るためには、これらのパラメーターを使用した結果の対数正規累積確率曲線に 0.13 を掛けなければいけない。

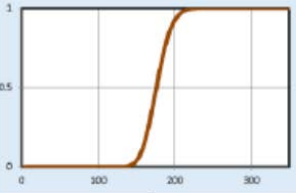
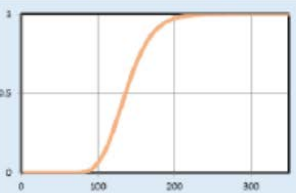
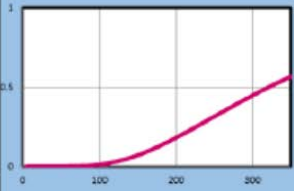
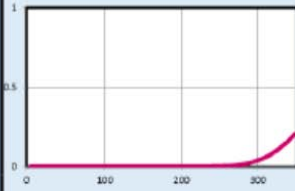
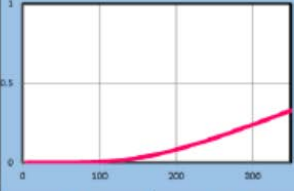
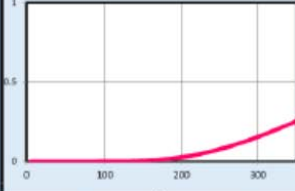
Bldg. Type		VINTAGES							
		No Vintage		Wood (~1992)		Steel (1992-)			
		Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta		
WOOD	W1-L		*The parameters are for the curve resulting from combining computational and empirical data.						
		176*							0.09*
	N-L								
			136	0.20					
MASONRY	MWS-L								
				321	0.52	398	0.16		
	CHB-L								
				455	0.59	469	0.44		

図 4-29 木造及び石積み造のための計算による風の脆弱性カーブ

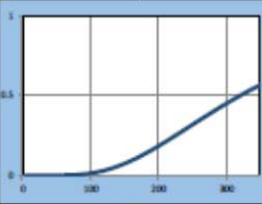
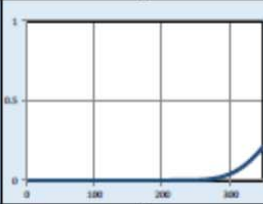
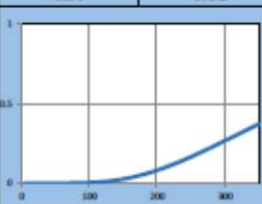
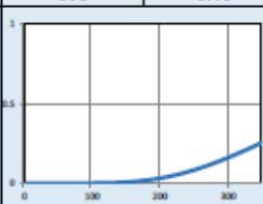
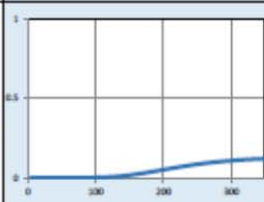
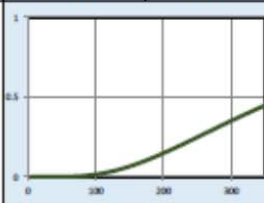
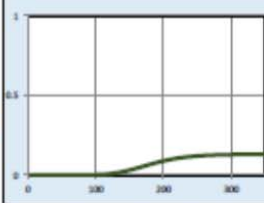
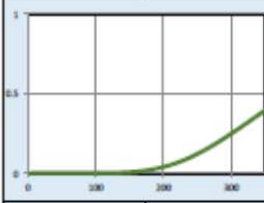
		VINTAGES						
Slip- Type		No Vintage		Wood (~1992)		Steel (1992~)		
		Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	
CONCRETE	CWS-L							
				321	0.52	398	0.16	
CONCRETE	C1-L							
				416	0.52	477	0.46	
CONCRETE	C1-M			*The curve using the given parameters was scaled by 0.13				
		221*	0.33*					
STEEL	S1-L			*The curve using the given parameters was scaled by 0.13				
		379	0.61					
STEEL	S1-M			*The curve using the given parameters was scaled by 0.13				
		180*	0.24*					
STEEL	S3-L			*The curve using the given parameters was scaled by 0.13				
		387	0.37					

図 4-30 鋼構造及びコンクリート造のための計算による風の脆弱性カーブ

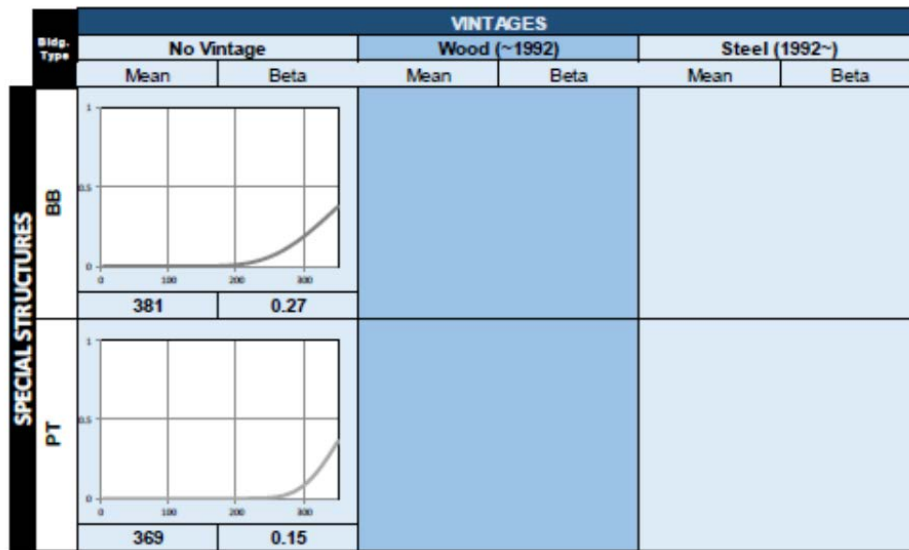


図 4-31 特殊構造物のための計算による風の脆弱性カーブ

#### 4.2.2 思考的手法

表 4-8 思考的手法を用いた脆弱性カーブのパラメーター

Bldg Type	No Vintage		Wood (~1992)		Steel (1992~)	
	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta
W1-L	136	0.27				
W3-L	95	0.25				
N-L	101	0.25				
MWS-L			193	0.27	193	0.27
CHB-L			219	0.27	219	0.27
CWS-L			215	0.27	215	0.27
C1-L			248	0.27	248	0.27
C1-M	248	0.27				
S1-L	250	0.27				
S1-M	245	0.27				
S3-L	231	0.29				
BB	268	0.03				
PT	235	0.11				



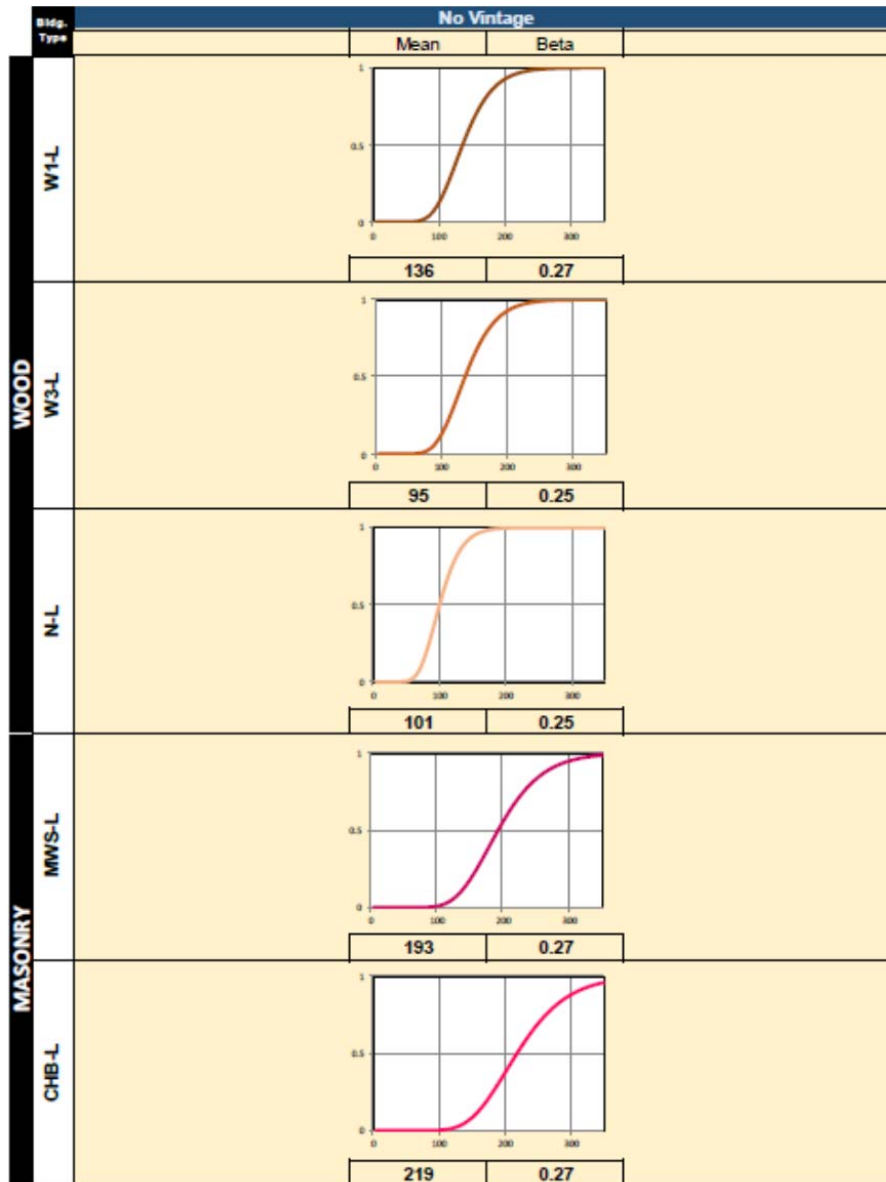


図 4-32 木造及び石積み造のための思考的手法による風の脆弱性カーブ

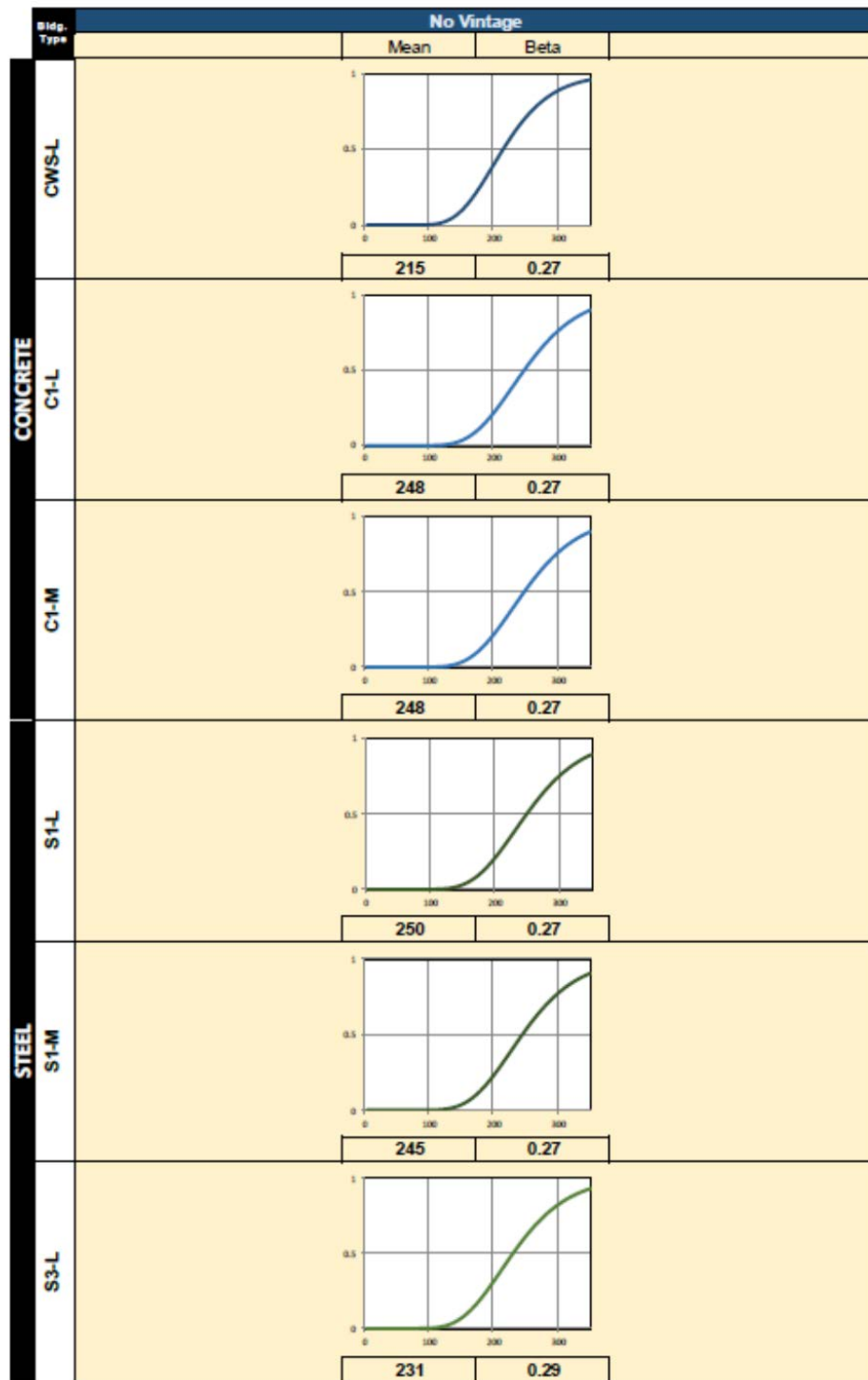


図 4-33 鋼構造及びコンクリート造のための思考的手法による風の脆弱性カーブ

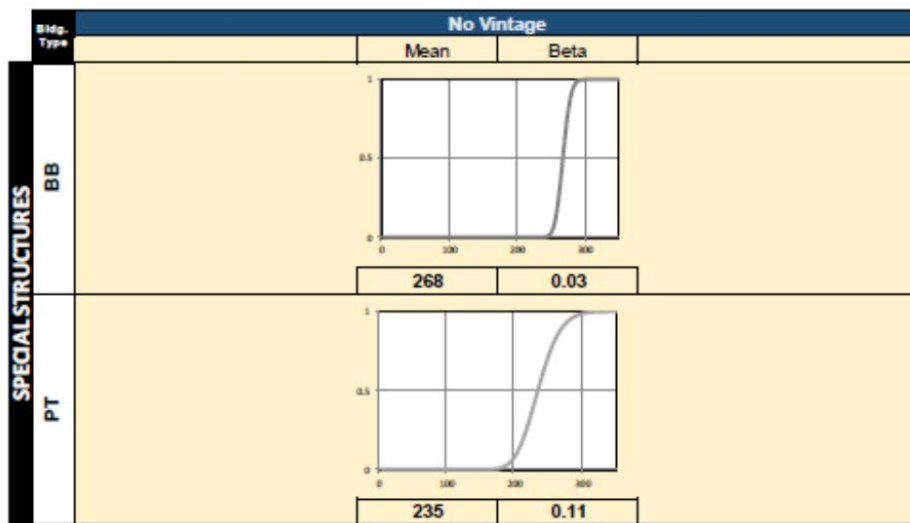


図 4-34 特殊構造物のための思考的手法による風の脆弱性カーブ

#### 4.2.3 経験的手法

表 4-9 経験的手法を用いた脆弱性カーブのパラメーター

Bldg Type	No Vintage	
	Mean	Beta
W1-L	133	0.15
W3-L	98	0.20
N-L	-	-
MWS-L	-	-
CHB-L	290	0.30
CWS-L	290	0.30
C1-L	319	0.37
C1-M	319	0.37
S1-L	214	0.27
S1-M	214	0.27
S3-L	214	0.27
BB	113	0.14
PT	233	0.11



図 4-35 木造及び石積み造のための経験的手法による風の脆弱性カーブ

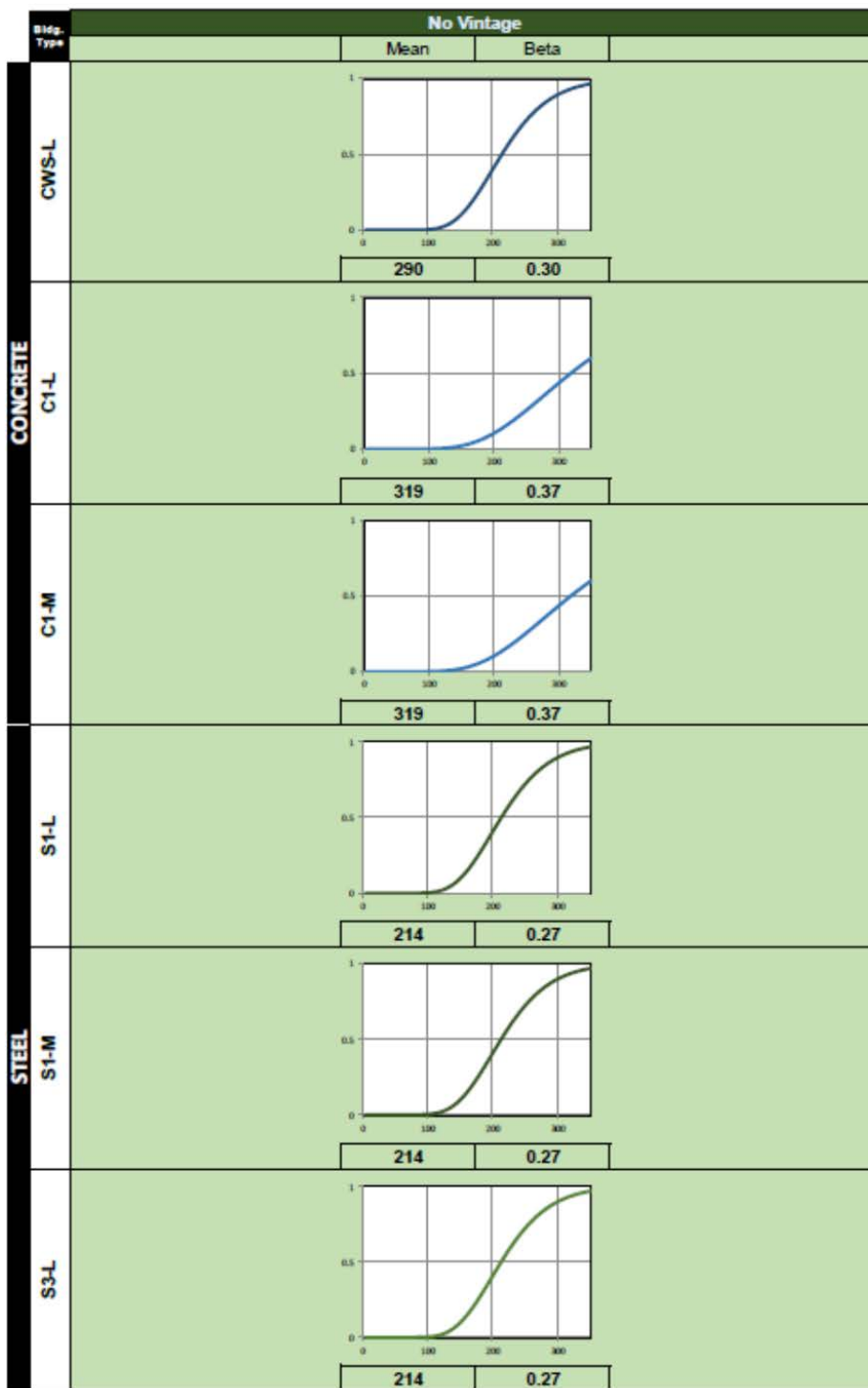


図 4-36 鋼構造及びコンクリート造のための経験的手法による風の脆弱性カーブ

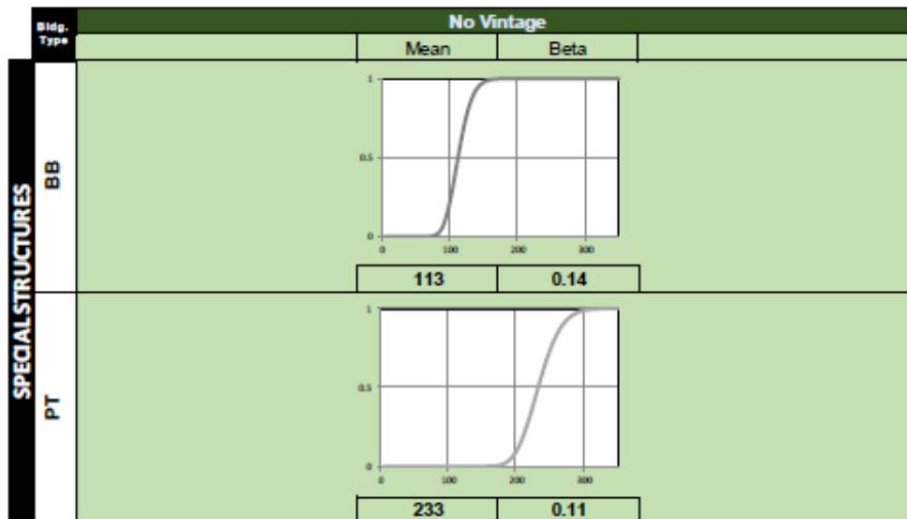


図 4-37 特殊構造のための経験的手法による風の脆弱性カーブ

#### 4.3 国際会議での議論

2013年7月18～19日にオーストラリアのマリオットブリスベンホテルにて、第16回オーストラリア風力工学学会ワークショップが開催された。このワークショップでは、風力工学に関する以下のトピックを含む研究を募集した：

- ブラフボディの空力
- 橋や建物に対する風の影響
- 一覧表と基準 (Codification & Standards)
- 気象学
- 構造ダイナミクス
- 風に起因する汚染物質や微粒子の運搬、分散または堆積
- 空調および人間の快適性
- 風損および損傷評価
- 風のハザード、脆弱性およびリスク
- 風力場 (Wind field) モデリング (数値または実験的)
- 法工学 (Forensic engineering)
- 風力エネルギーおよび風力タービン

「屋根の釘とねじ留め具を備えた RC 低層建築物の強風ハザードに対する脆弱性カーブの開発」と題した論文が発表され、技術者、科学者、学生などの参加者で議論された。

参加者のフィードバックや提案は、強風ハザードを考慮した脆弱性カーブに関する研究を改善する機会となる。12分の研究発表の後、研究内容と懸念事項について議論する時間が3分与えられた。下記の三点が挙げられた：

1. この研究では、屋根の釘、ねじ締め具および窓の閾値容量の平均値を使用した。しかし、George Walker 博士は、統計データに裏づけされている一連の値をしきい値として使用することを推奨した。
2. Steve Cochard 博士は、CFD をモデリングする際には注意が必要であると助言した。彼によれば、CFD ですぐに利用できる値と機能を使用することは非常に魅力的なので、我々の CFD モデリングを改善することが示唆された。
3. Bruce Harper 博士は、フィリピンで過去最高を記録した熱帯風速 320kph が正確であるかどうか確認した。

## 5 洪水に対する脆弱性分析

### 5.1 手法

脆弱性カーブの作成には2つのアプローチが考えられる。計算による手法と思想的な方法である。前者では浸水深ごとの構造被害額を算定するための数値モデルが必要となる。後者では専門家による調査が必要である。本プロジェクトで扱う構造種別ごとの脆弱性カーブを作成するにあたり、可能な限り両アプローチを適用した。

#### 5.1.1 計算による手法

この方法は建築物の構成要素をベースとするものである。建築物の被害は洪水に対し繊細な要素あるいは強靱な要素の集合体として解析される。解析の流れを図5.1に示す。

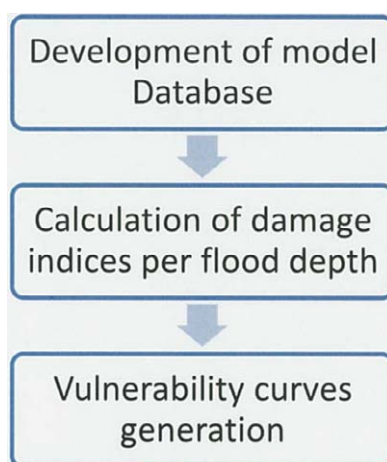


図 5-1 計算による脆弱性カーブ作成の流れ

各建築物種別に対し、対象地域である大マニラ首都圏域（Greater Metro Manila Area）内での構成、デザイン、仕上げを代表させるためのモデルデータ（各建築物種別は複数のモデルデータから構成される）を作成した。次に、各々のモデルについて浸水深ごとの被害を計算した。この手法により作成されたある建築種別の脆弱性カーブは、それを構成する各モデルデータに対する解析結果を平均したものである。以降のセクションにて解析の詳細や導入した仮定について述べる。

##### 5.1.1.1 適用範囲と仮定

建築物の要素は建物と内容物とに分けられる。建物は構造的要素、建築的要素、電気機械的要素、仕上げ、備品、固定設備を含む。内容物は建物に固定されていない動産であり、極めて広範囲な種類の物品を含む。建物と内容物の被害は別に扱うこととし、本プロジェクトでは建物被害のみを扱うこととした。

また、浸水による建物被害に限定して扱った。流速や浸水時間、土砂や塵芥の流入など被害をもたらさるその他の要因については対象外とした。



#### 5.1.1.2. 建築物の属性

建築物のモデルは以下の一般的な要素に分解した。

- 床の仕上げ/床仕上げ材
- 外壁材
- 内壁材および仕切材
- 壁面仕上げ
- ドア
- 窓
- 天井材
- 屋根材
- 電気設備
- 照明設備
- 作り付けの戸棚
- その他取り付け備品

これら要素に対する材料や構成の典型的なバリエーションを特定するとともに、浸水に対する脆弱性を評価した。各浸水深に対し、要素の水没についても「部分的に水没」「全て水没」の2段階で評価した。

建物材料については、「水に弱い」か「浸水に脆弱でない」かの2つに分類した。コンクリートや石積みは浸水に脆弱ではないと考えられる。一方、壁仕上げ、合板、電気設備は水に弱いと判断される。水に弱い要素について、洪水後に必要となる手当てについて検討した。基本的なものは、清掃（塗り換えあり/なし）と交換である。建物材料ごとに第一の手当てと第二の手当てを選択した。第一の手当ては洪水後により高い確率で選択されるであろうもの、第二の手当てはそれに比べ低い確率で選択されるであろうものである。本プロジェクトでは、第一の手当ては0.75の確率で選択され、第二の手当ては0.25の確率で選択されると仮定した。ほとんどのケースにおいて、木材による要素については交換を第一の手当てとし清掃を第二の手当てとした。木材は通常、浸水に伴い不可逆的な被害を受けるためである。

#### 5.1.1.3. 建築物のデータベース

建築物種別ごとに異なる構成、床面積および仕上げ水準のモデルを準備した。大マニラ首都圏域内の建物ストックのバラエティを考慮し、入手可能な平面図その他の情報に基づいてモデルを作成した。建物の属性は要素ごとに使用されている材料や構成に応じて変化させた。これらのモデルからなるデータベースに基づいて計算を実行し、その結

果を組み合わせたものをある建築物種別に対する計算結果とした。

#### 5.1.1.4. 被害インデックス

被害インデックスは評価被害額と建物の総費用の比として算定される。これは、建物の再調達価額（再建費用）に占める復旧費（使用できる状態までの）の割合と言い換えることもできる。

$$\text{被害インデックス} = \frac{\text{被害額}}{\text{再調達価額}}$$

ある浸水深に対する被害額は、浸水した要素ごとに修理あるいは交換に要する費用を算定し、それらを合計したものとして算定した。各要素の価格（再調達価額）に関する情報は国内の様々な事業者から入手するとともに、インターネット上で入手可能な価格データに基づき積算した。

再調達価額は建築物種別（石積み工、コンクリート、鋼、木造）ごとの単位面積あたり建設費にモデル化した建物の床面積を掛けて算定した。これが被害インデックスの分母である。単位面積当たりの建設費に関する情報についても国内事業者への調査を通じて入手した。

#### 5.1.1.5. 洪水脆弱性カーブ

被害インデックスは浸水深（メートル単位）を横軸としてプロットする。プロットした点を直線でつなぎ区分関数を生成する。このグラフが洪水脆弱性カーブであり、ある浸水深に対して発生しうる被害率を表すものである。

本プロジェクトでは、浸水深 0 m（浸水なし）と 10 m の間に 9 段階の浸水深を設定した。間に設定した浸水深は 0.1 m（床が浸水すると想定）、0.5 m、1 m、2 m、3 m、4 m および 6 m である。それぞれの浸水深に対し影響を受ける要素は異なる。

#### 5.1.1.6. ICE 洪水脆弱性計算ツール

モデルの作成や脆弱性カーブを効率的に行うため、ICE 洪水脆弱性計算ツールを開発した。同ツールにより、様々な建築物種別やコスト情報から自動的に脆弱性カーブを計算することが可能である。下図に同ツールのインターフェースを示す。

**MODEL NAME** TWO STOREY STEEL BUILDING

**MODEL PARAMETERS**

Material type: Steel S-      Dimensions

Height class: 2 Storey L2-      Floor

Type of finish: Low cost LC      L (m)      W (m)      Area (sq m)

Structural type: S-L2-LC      1/F      10      10      100

Cost / sq m: 18,000.00      2/F      5      5      25

Total floor Area: 125 sq m      3/F      0

TOTAL COST: 2,250,000.00      4/F      0

5/F      0

**FLOOR ATTRIBUTES**

**First Floor**

Area: 100 sq m

Exterior Wall: 40 m

Partition: 16 m

No. of T&B: 1

No. of Bedrooms: 1

No. of Windows: 20 pcs

Space use	Percent	Area	Side length	Perimeter	Outlet	Lighting
Living Room		25	5	20	4	5

図 5-2 ICE 洪水脆弱性計算ツールのメイン画面

**ICE FLOOD VULNERABILITY CURVE GENERATOR**

Item	Type	Unit Cost	Qty	Units	Cost	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	8.00	10.00
<b>COMMON FEATURES</b>												
Exterior Wall	Plywood	700.00	40	m	28,000.00	7,000.00	14,000.00	28,000.00	28,000.00	28,000.00	28,000.00	28,000.00
Partition	Double plyboard	2,411.57	16	m	38,601.12	19,300.56	38,601.12	38,601.12	38,601.12	38,601.12	38,601.12	38,601.12
Exterior Doors	Solid wood	1,103.44	2	pts	2,206.88	1,103.44	2,206.88	2,206.88	2,206.88	2,206.88	2,206.88	2,206.88
Interior Doors	Plywood	3,243.00	1	pts	6,486.00	3,243.00	6,486.00	6,486.00	6,486.00	6,486.00	6,486.00	6,486.00
Windows	Green (Sliding)	106.25	20	pts	2,125.00	1,062.50	2,125.00	2,125.00	2,125.00	2,125.00	2,125.00	2,125.00
Electrical fixtures	Circuit breaker	3,625.00	1	pts	3,625.00	1,812.50	3,625.00	3,625.00	3,625.00	3,625.00	3,625.00	3,625.00
Ceiling	none	0.00	100	sq m	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
					30,649.00	61,298.00	61,298.00	61,298.00	61,298.00	61,298.00	61,298.00	61,298.00

**SPACE USE: Living Room**

Floor Finish: Plain cement 21.25

Wall Finish: Painted 0.00

Electrical fixtures: Wall socket 61.00

Low-set fixtures: Lower kitchen cabinet 838.59

High-set fixtures: L & U kitchen cabinet 638.24

Full-height fixtures: Upper kitchen cabinet 839.69

Lighting fixtures: CFL 425.00

**SPACE USE: Living Room**

Floor Finish: Plain cement 21.25

Wall Finish: Vinyl tiles 0.00

Electrical fixture: Ceramic tiles 61.00

Low-set fixtures: Bathroom tiles 1,808.00

High-set fixtures: Granite/marble tiles 3,638.00

Full-height fixtures: Laminated wood 1,829.00

Lighting fixtures: Wood parquet 425.00

図 5-3 ICE 洪水脆弱性計算ツールのインターフェース

同ツールではモデルのカスタマイズも容易にできる。また、カスタマイズしたモデルに対する浸水深ごとの被害額も簡単に算定でき、脆弱性カーブも自動生成する。

## 5.1.2 思考的手法

思考的手法では脆弱性カーブを得るために「専門家」の見解を収集する。ここで言う専門家とは洪水やそれに付随する被害に関し十分な知識や経験を持つ者を指す。本プロジェクトでは、建設コンサルタント、建設業者および学識経験者の見解を活用した。したがって、思考的手法による洪水脆弱性カーブは選ばれた専門家たちによる見解の集積としてもたらされた浸水深と被害の関係である。

### 5.1.2.1 データ収集

専門家からの見解を得るために2つの手法を用いた。第1の試みは専門家のみを対象としたワークショップの開催である。洪水脆弱性のコンセプトに関するブリーフィングの後、専門家一人ひとりに対して建築物種別や浸水深を提示し建物被害のパーセンテージの推定を求めた。表5.1は同ワークショップにおいて専門家に記入を求めた様式の一例である。各建築物種別に対して典型例を写真で示しイメージを明解にした。専門家個々による評価に引き続き、オープンフォーラムを開催して参加者間のコンセンサス形成を図った。

表 5-1 専門家用評価シートの一例

建物グループ：鉄筋コンクリート（1階建て）						
浸水深	0 m	0.5 m	1 m	2 m	4 m	評価に対する自信の程度 (1～10)
被害率(%)						

第2の試みは第1の試みを拡張したものである。より有用な情報を得るため、評価シートをより包括的なものとし（Appendix B.11 参照）、手渡しや電子メールにて専門家に配布した。

### 5.1.2.2 データ処理

専門家からの回答を回収した後、思考的手法による脆弱性カーブ生成のためのデータ処理を行った。処理にあたり、専門家の経験年数に応じた重み付けを行った（表5.2 参照）。

表 5-2 専門家の経験年数に応じた重み係数

経験年数	回答に適用する重み係数
1～4年	1
5～10年	2
11～20年	3
20年超	4

専門家の回答は広範囲に散らばっていたため（例えば、2階建ての応急住宅（間に合わせの住居）に1mの浸水が発生した場合、被害率の回答は4%から90%に散らばった）、他から著しく乖離した回答は以降の解析から除外することとした。ここでの「著しく乖離した回答」とは、全サンプルによるヒストグラムを作成した際、その四分位範囲を1.5倍に広げたもののさらに外側に配置される回答サンプルとした。

データの中心傾向の測定には中間値を採用した。これにより、残存する極端な値による結果への影響をさらに抑制した。ある建築物種別に対し、離散値としての浸水深値の

中間値を結ぶことで思考的手法による脆弱性カーブを生成した。Appendix B.12 には専門家に対する調査の結果と脆弱性カーブ生成に使用した点に関する情報を要約して示した。

## 5.2 結果

下図は本プロジェクトで特定した建築物種別ごとの脆弱性カーブを示したものである。解析が可能であったものについては、計算による手法と思考的手法による2種類の脆弱性カーブを掲載している。縦軸は被害率であり、建物再調達価額に占める復旧費用の割合である。横軸は浸水深である。

### 5.2.1 計算による手法

以下の表および図は計算による手法で作成した洪水脆弱性カーブである。

表 5-3 計算による手法で作成した洪水脆弱性カーブの節点

Building Categorization		Inundation Depth (m)									Damage Ratio
Type	Sub-type	0.0	0.1	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	6.0	10.0	
W1	W1-L-1	0.00	0.20	0.61	0.62	0.66	0.80	0.80	0.80	0.80	
	W1-L-2	0.00	0.08	0.23	0.24	0.24	0.29	0.64	0.73	0.73	
W3	W3-L	0.00	0.30	0.66	0.67	0.73	0.84	0.84	0.84	0.84	
N	N-L-1	0.00	0.00	0.29	0.38	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00	
	N-L-2	0.00	0.00	0.04	0.07	0.07	0.35	1.00	1.00	1.00	
MWS	MWS-L	0.00	0.00	0.03	0.04	0.07	0.12	0.18	0.24	0.24	
CHB	CHB-L-1	0.00	0.00	0.07	0.11	0.14	0.24	0.24	0.24	0.24	
	CHB-L-2	0.00	0.00	0.03	0.04	0.07	0.12	0.13	0.19	0.19	
CWS	CWS-L	0.00	0.01	0.02	0.03	0.03	0.07	0.13	0.17	0.17	
C1	C1-L-1	0.00	0.02	0.09	0.14	0.16	0.21	0.21	0.21	0.21	
	C1-L-2	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.14	0.14	
	C1-M	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.06	
S1	S1-L-1	0.00	0.02	0.05	0.08	0.09	0.16	0.16	0.16	0.16	
	S1-L-2	0.00	0.00	0.02	0.03	0.03	0.07	0.09	0.12	0.12	
	S1-M	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.07	0.07	

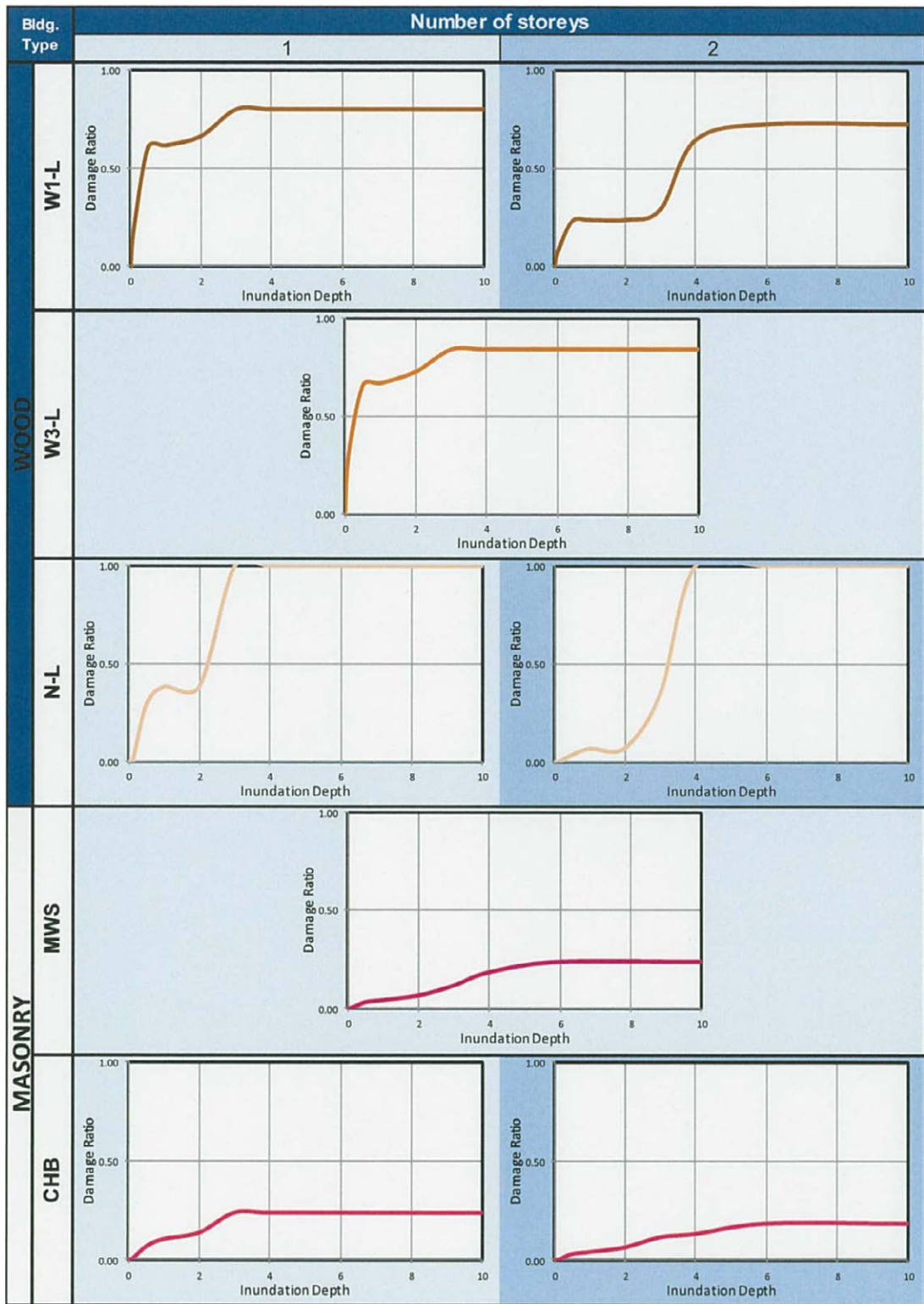


図 5-4 計算による手法で作成した洪水脆弱性カーブ(木造および石積み建築物)

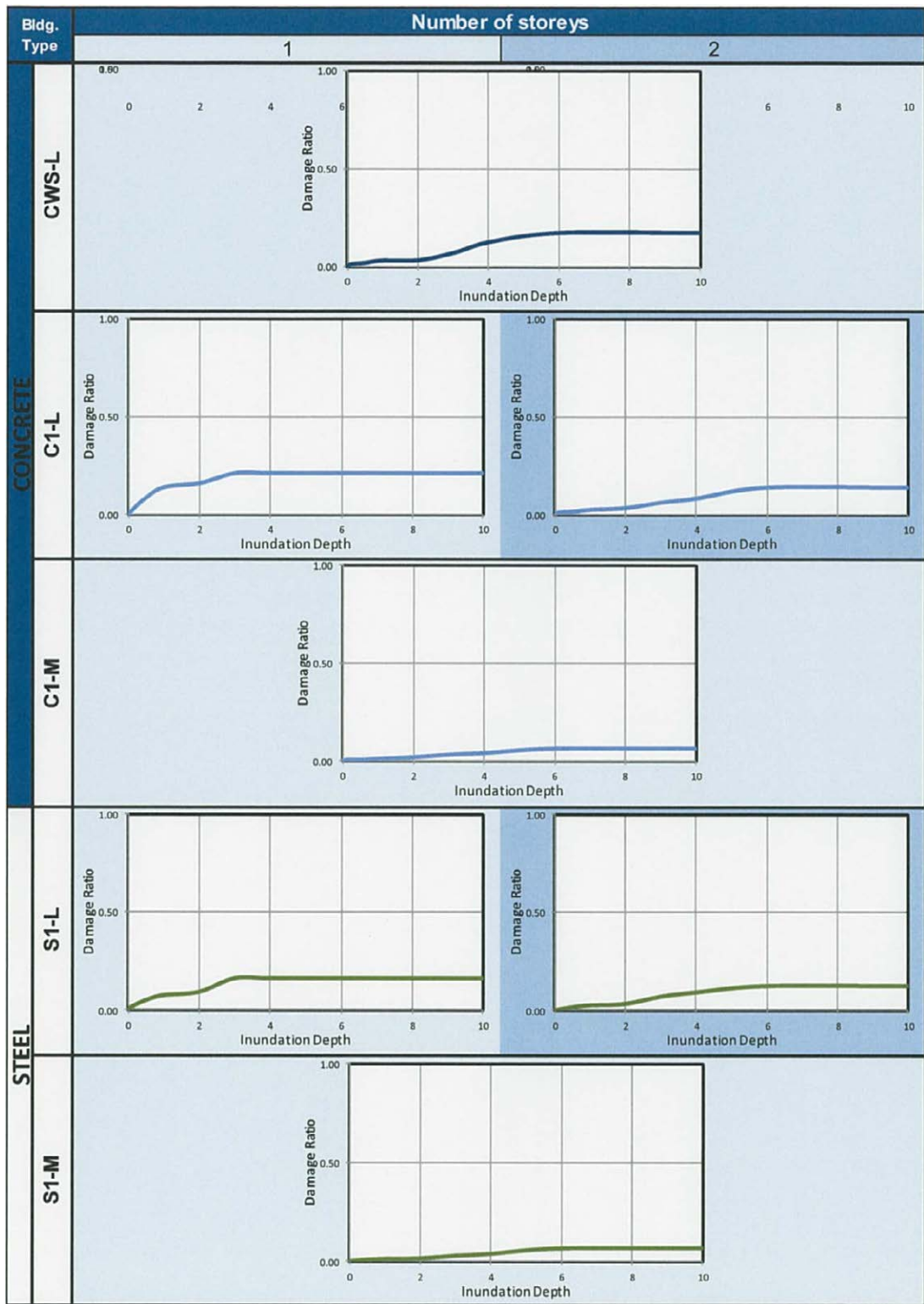


図 5-5 計算による手法で作成した洪水脆弱性カーブ(コンクリートおよび鋼構造建築物)

## 5.2.2 思考的手法

以下の表および図は思考的手法により生成した洪水脆弱性カーブである。建築物種別 MWS および CWS についてはカーブを生成していない。これらは専門家への調査時には別のグループに含まれており、個別の種別として指定していなかったためである。

表 5-4 思考的手法による洪水脆弱性カーブの節点

Building Categorization		Inundation Depth (m)									Damage Ratio
Type	Sub-Type	0.0	0.1	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	6.0	10.0	
W1	W1-L-1	0.00	0.01	0.08	0.18	0.25	0.55	0.60	0.60	0.60	
	W1-L-2	0.00	0.02	0.06	0.12	0.20	0.28	0.35	0.60	0.60	
W3	W3-L	0.00	0.02	0.10	0.20	0.40	0.60	0.90	0.90	0.90	
N	N-L-1	0.00	0.03	0.20	0.35	0.60	0.80	0.99	0.99	0.99	
	N-L-2	0.00	0.05	0.12	0.20	0.30	0.50	0.60	0.85	0.85	
MWS	MWS-L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CHB	CHB-L-1	0.00	0.01	0.03	0.07	0.13	0.18	0.20	0.20	0.20	
	CHB-L-2	0.00	0.01	0.04	0.07	0.11	0.16	0.25	0.40	0.40	
CWS	CWS-L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
C1	C1-L-1	0.00	0.01	0.03	0.07	0.13	0.18	0.20	0.20	0.20	
	C1-L-2	0.00	0.01	0.02	0.05	0.09	0.15	0.23	0.33	0.33	
	C1-M	0.00	0.01	0.02	0.04	0.08	0.10	0.15	0.31	0.45	
S1	S1-L-1	0.00	0.01	0.02	0.04	0.06	0.10	0.15	0.15	0.15	
	S1-L-2	0.00	0.01	0.03	0.05	0.07	0.15	0.20	0.35	0.35	
	S1-M	0.00	0.01	0.01	0.02	0.05	0.08	0.11	0.15	0.20	



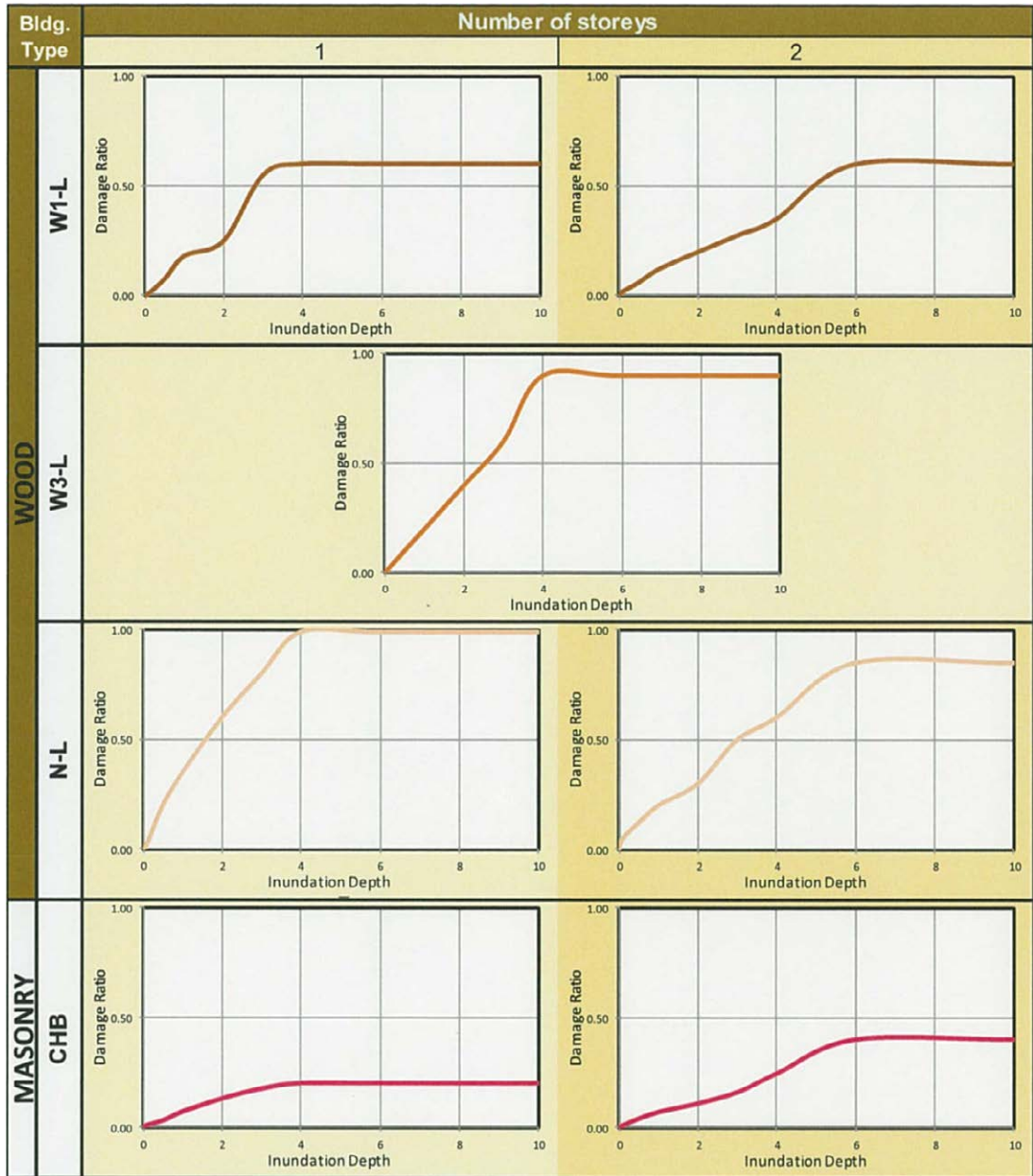


図 5-6 思考的手法による洪水脆弱性カーブ(木造および石積み建築物)

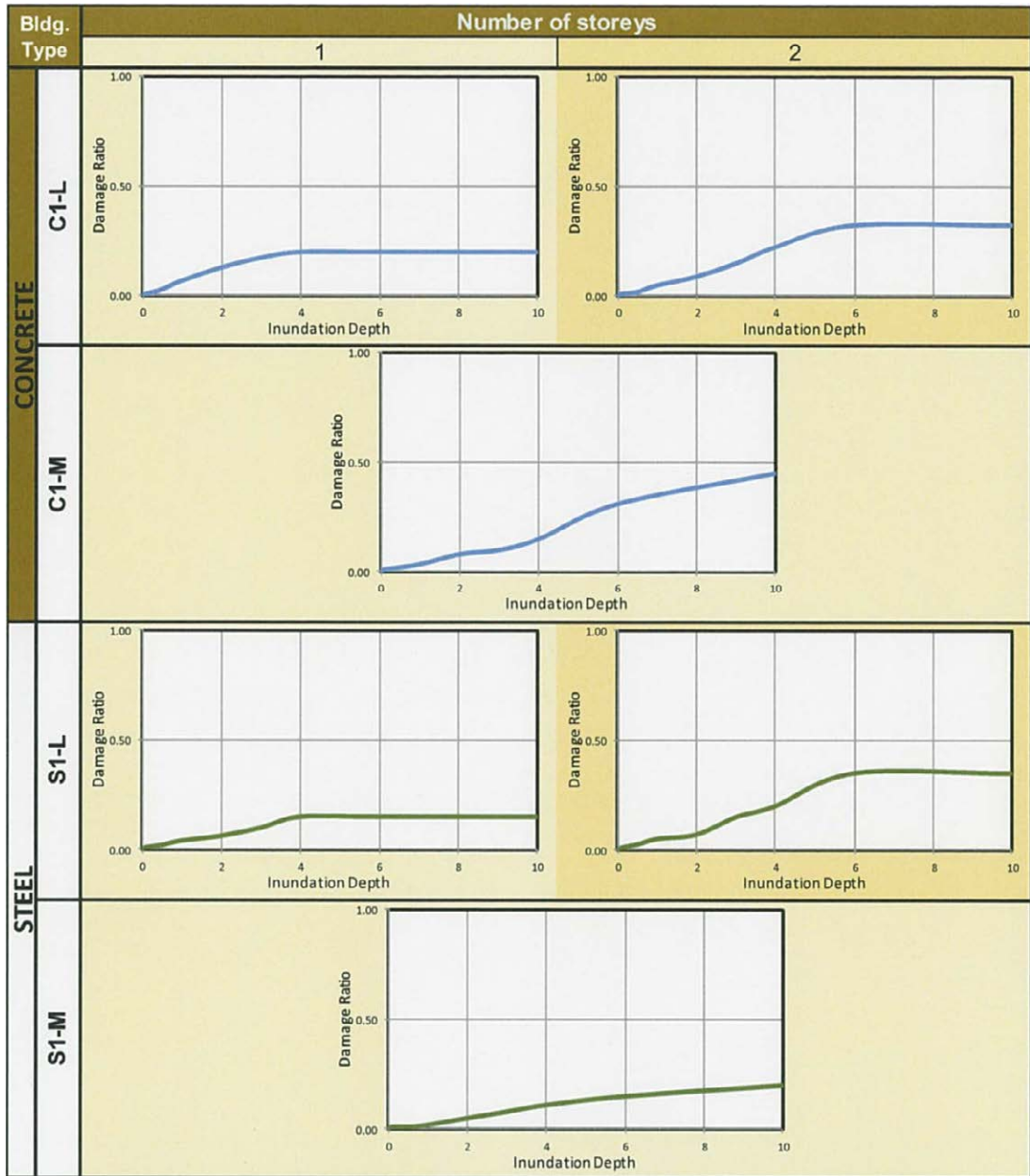


図 5-7 思考的手法による洪水脆弱性カーブ(コンクリートおよび鋼構造建築物)

### 5.3 豪州地球科学機構での研修時の議論

2012年3月14日から15日にかけて、豪州地球科学機構（Geoscience Australia; GA）はブリスベンにて洪水脆弱性に関するワークショップを開催し、豪州における洪水リスク管理に関わる様々なセクターの専門家が参加した。ワークショップではクイーンズランド州やニューサウスウェールズ州における既往洪水に対するベストプラクティスに関する情報共有も図られた。学識経験者や保険業界の代表者からも洪水脆弱性カーブ構築に関する知見が共有された。ニュージーランドの専門家および本プロジェクトチームからも各々の国における洪水リスク管理に関する最新の取り組みについて発表がなされた。また、本プロジェクトチームは住宅建築に対する脆弱性カーブの作成をテーマにした議論

にも参加した。

続く3月15日から23日にかけては、キャンベラのGA本部にて視察と議論が行われた。プロジェクトチームは気候変動適応や災害リスク管理に関するGAの取り組み状況を視察するとともに、担当者であるTariq Maqsood博士およびHyeuk Ryu博士と議論した。議論から得られた主な知見は以下の通りである。(1)脆弱性カーブ横軸の限度を設定するには既往最大浸水深の確認が必要である。(2)脆弱性カーブをより精緻にするためには想定浸水深を少なくとも5mまで考慮する必要がある。(3)洪水がもたらす構造物への被害をよりよく見積もるためには復旧・再建に関するマニュアルを研究するのが良い。

## 6 地震に対する脆弱性分析

### 6.1 手法

地震に対する脆弱性カーブの作成手法として4つ、すなわち経験的手法、思考的手法、計算による手法および混合手法、が考えられる。計算によるアプローチでは、想定地震力に対する建物群の応答解析を用いる。経験的手法は入手可能な地震後のデータに、思考的手法は構造物の応答に関する専門家の見解にそれぞれ依存するものである。これらを組み合わせたものを混合手法と呼ぶ。

計算による手法では、地震脆弱性の統計データを得るために地震時の建物の振る舞いを評価する。これは、対象地域内の既存建物インベントリーに基づいて細部や構成をモデル化したもの（建物モデル）を数値解析することでなされる。この手法は損害の程度の違いを反映することから、それによる損傷度カーブの作成が可能となる。この損傷度カーブに被害インデックスを割り振ることで脆弱性カーブが生成される。

本プロジェクトで提案した経験的手法および思考的手法は、それぞれ被害報告書、専門家に対する調査を通じて主要な建物種別の脆弱性カーブを生成するものである。必要に応じて脆弱性カーブから損傷度カーブを導出し、建物の損傷に関連する非構造的的影響（死傷者など）を評価・推定することができる。

#### 6.1.1 計算による手法

地震に対する脆弱性カーブは損傷度カーブに被害インデックスを導入して生成する。計算による手法は脆弱性カーブ作成の主要な方法のひとつであり、要求精度や利用可能なリソースによって様々な手法に細分化される。本プロジェクトでは非線形漸増載荷解析と連続モーダルプッシュオーバー解析を用いて各種建物の振る舞いと耐震性を評価した。解析の流れを図6.1に示す。

各建物種別は大マニラ首都圏域内の典型的な建築デザインや構成を代表するモデルデータベースから構成される。これらの建物モデルはキャパシティ曲線を生成するために構築した。建物モデルは、分解された設計応答スペクトルに代表される複数の地震強度に対して評価した。建物モデルの挙動はキャパシティ曲線とデマンド曲線の交点で特定され、これは最大応答と定義される。最大応答と損傷状態ごとに定義した閾値を比較して建物モデルの損傷状態を分類する。各建物モデルの損傷状態評価し蓄積することで、与えられた地震強度に対して、ある損傷状態を超える建物モデルの割合を統計的に算出することができる。損傷状態ごとに個別のデータ群を生成し、これらに対数正規累積分布曲線に当てはめることで地震損傷度カーブが作成される。これに不確実性の調整を加えた上で地震脆弱性カーブに変換する。

以下、各ステップや導入した仮定など詳細を述べる。

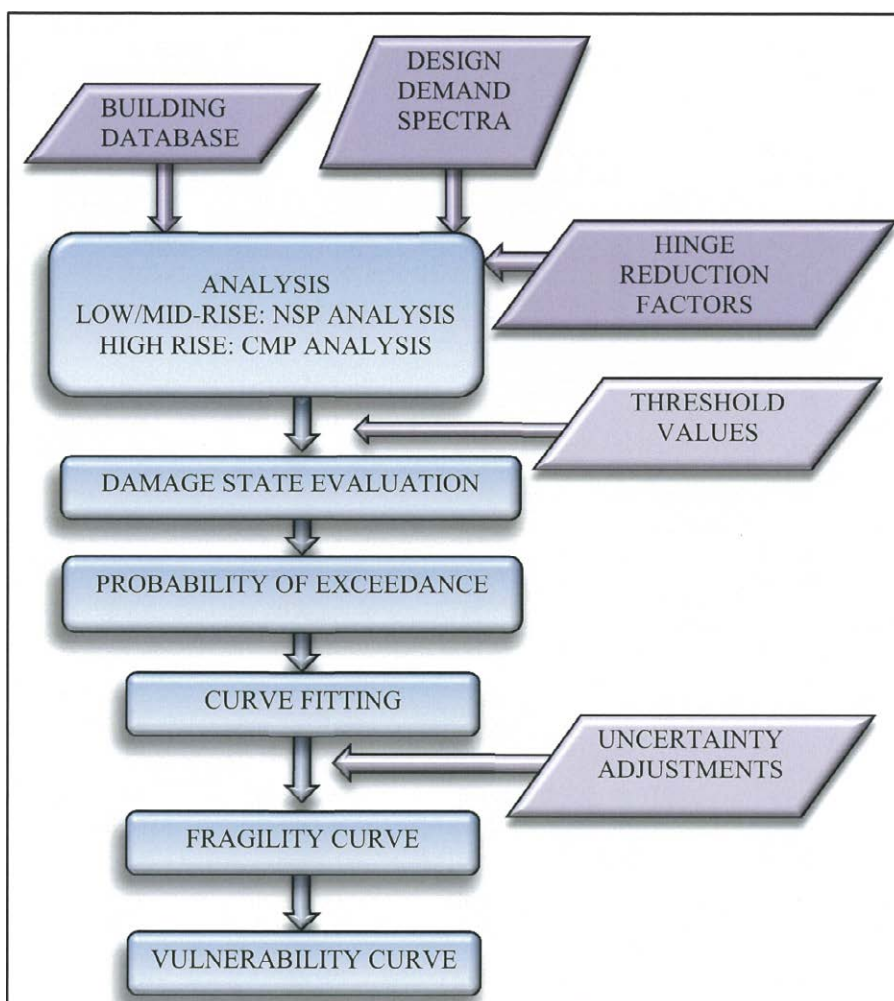


図 6-1 計算による地震脆弱性カーブ作成の概略フロー

#### 6.1.1.1. 建物データベース

建物データベースは同一の建物種別に属し、様々な構成を持つ構造物群からなる。群内個々の建物には幾何学的特性（姿形）、材料特性、荷重、接合部、補強の状況などに違いがある。ただし、これら相違点の考えられる組み合わせを全て取り上げるとモデル化作業が冗長となり時間も消費してしまう。そこで、熟練したエンジニアの協力のもと組み合わせの数を抑制することとした。

建物データベースに格納する各種パラメーターは QuiveR プロジェクトによる感度分析に基づいて決定した。採用したパラメーターはベイ（柱間）の数、ベイの長さ、階高、降伏強さ、部材諸元などである。

加えて、ほとんどの建物種別に対して建築年代による3つの分類を導入した。これは、40年前の初版以降、数回にわたり実施されたフィリピン建築基準（NSCP）の改訂を反映するためのものである。NSCPの初版は1972年に発行された。これは1968年に発生した Casiguran 地震による Ruby タワーの倒壊を受け、安全な建築物への関心の高まりを受けたものである。当時主流の設計思想は許容応力度法であり、同設計法では材料は常に弾性を保つ。その後、旧コードに則った建物での大崩壊を受け、1992年版の NSCP では構

造設計に対するパラダイムシフトが図られ、前兆なしに突然発生する脆性破壊ではなく、構造物の崩壊を伴わない延性破壊を選好する方向へ改められた。このことから、建築年代は 1972 年と 1992 年を境に分類する。Pre-code は 1972 年より前に設計・施工された建物とし、Low-code は 1972 年から 1992 年の間に設計・施工された建物とした。1992 年以降の建物は High-code に分類した。

さらに、NSCP によると大マニラ首都圏域の土壌型が C、D、E、F に分類されること、付近に活断層が存在することも考慮した。

建物種別の範囲や使用したパラメーター値等は Appendix C に詳述している。

### 6.1.1.2. 地震応答

建物挙動の解析に必要な入力情報のひとつに地震デマンドがある。これは「ハザードマップ」の分析あるいは決定論的地震動解析を経て得られるものであるが、本プロジェクトでは後者を使用した。決定論的地震動解析には 2 つのオプションがある。一つ目は標準応答スペクトル（定常加速度スペクトル、定常速度スペクトル、定常変位スペクトルで定義される）を使うものである。これはマグニチュード、表面最大加速度（PGA）、および土壌型を代表する増幅係数に基づくものであり、かつ簡易である。ただし、標準応答スペクトルは設計に使用するものであるため保守的な（安全側の）結果となりがちである。その上、この方法では立地条件、距離、深さ、断層、周波数成分といった地震動に関わる他の重要な要素を反映しきれていない（Gencturk ら、2007）。二つ目のオプションは加速度履歴をデマンドとして使用するものである。この方法は地震の周波数成分、継続時間、時変振幅を反映しているためより正確である（Gencturk ら、2007）。しかしながら、利用可能な既往地震の記録が限られていることから、本プロジェクトでは NSCP に掲載されている応答スペクトルカーブを各種の地震動に対応するよう調整して使用した。

設計応答スペクトルは地震係数  $C_a$  と  $C_v$  とで定義され、図 6.2 に示すとおり土壌型と断層からの距離に支配される。

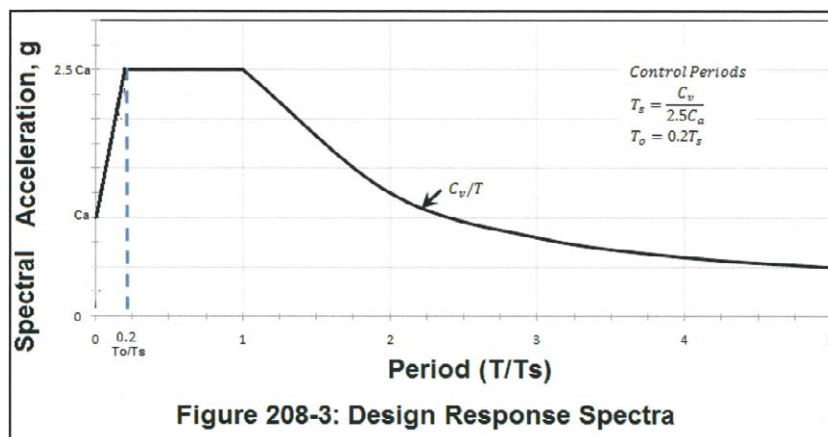


図 6-2 NSCP に掲載されている応答スペクトル

地質工学の専門家である Zarco 博士によると、土壌型 A および B はマニラ首都圏には存在しない。さらに、首都圏に存在するとされる土壌型 F についてもその確認には更なる調査が必要とされているため、今回のモデル化には含めないこととした。最終的には土壌型 C、D、E をモデルに含めた。NSCP の Table 208-7 および 208-8 によると、大マニラ首都圏域内の土壌型に対応する地震係数は表 6.1 のとおりである。

表 6-1 土壌型 C、D、E に対する地震係数

土壌型	地震係数Ca	地震係数Cv
S <sub>C</sub>	0.40 Na	0.56 Nv
S <sub>D</sub>	0.44 Na	0.64 Nv
S <sub>E</sub>	0.44 Na	0.96 Nv

Na および Nv は最も近い活断層からの距離を反映する係数である。マニラ首都圏には2本の断層帯が通っている。すなわち West Valley 断層と East Valley 断層である（図 6.3 参照）。



図 6-3 マニラ首都圏の地形・行政界および活断層 (Bautista, 2001)

PHIVOLCS は震源域ごとに発生しうる最大の地震 (MCE) のマグニチュードについてとりまとめている (表 6.2)。表中ハイライトした部分は West Valley 断層と East Valley 断層によるものであり、MCE のマグニチュードはそれぞれ 7 および 6 と推定されている。つまり、大マニラ首都圏域は NSCP の Table 208-6 における震源域型の A および C に分類

される。Na および Nv の値は 1.6 から 1 の範囲をとり、対象建物の位置に応じて線形補間できる。簡単のために建物位置は震源から「近い」「遠い」の二つの分類とした。震源からの距離に応じて線形補間をする代わりに、この 2 分類に対応する値として上限値と下限値を使用することとした。すなわち、震源域型 A では震源からの距離が 5 km 以内の建物に対する Na、Nv の値をそれぞれ 1.2、1.6 とし、それより遠い建物については Na、Nv とも 1.0 とした。一方、震源域型 C については NSCP に従って活断層からの距離に関わらず Na、Nv とも 1.0 を採用した。

表 6-2 フィリピンで震源域ごとに発生しうる最大の地震(MCE)

Maximum Credible Earthquake (MCE) Magnitude for Metro Manila			
Source Zone	Based on Earthquake Data	Based on Possible Surface Rupture Length*	References
Philippine Fault Zone (San Manuel Segment)	6.9		Acharya, 1980; Hirano et.al. 1986; Abe, 1994; Bautista and Oike, 2000
Philippine Fault Zone (Digdig segment)	7.9		Acharya, 1980; Hirano et.al. 1986; Bautista and Oike, 2000
Philippine Fault Zone (Infanta segment)	7.6		Acharya, 1980; Hirano et.al. 1986; Bautista and Oike, 2000
Philippine Fault Zone (Ragay Gulf segment)	7.4		Bautista and Oike, 2000
Casiguran Fault	7.3		PDE
E-W transform fault	7.1		PDE
East Luzon Trough		7.8-8	Wells and Coppersmith, 1994
West Valley Fault	7		Nelson et.al., 2000
East Valley Fault	6		Nelson et.al., 2000
Laguna-Banahaw Fault	7.4		Abe, 2981
West Boundary Fault		7.5	Wells and Coppersmith, 1994
Manila Trench		7.8-8	Acharya, 1980; Bautista and Oike, 2000
East Zambales Fault		7.4	Wells and Coppersmith
Lubang Fault	7.6		PDE
Aglubang River Fault	7.1		PDE
Central Mindoro Fault		7.6	Wells and Coppersmith, 1994
Tablas Fault	7.1		PDE



表 6-3 震源への近接度を考慮した地震係数(土壌型 C、D、E)

土壌型	震源からの距離5 km以内 (震源型A)		震源からの距離5 km超 (震源型A) または震源型C	
	Ca	Cv	Ca	Cv
S <sub>C</sub>	0.48	0.896	0.40	0.56
S <sub>D</sub>	0.528	1.024	0.44	0.64
S <sub>E</sub>	0.528	1.536	0.44	0.96

建物のモデル化には表 6.3 に示す地震係数を使用した。漸増载荷解析（プッシュオーバー解析）によりキャパシティ曲線を作成した。キャパシティ曲線をさらにスペクトル値に変換し、デマンドスペクトルと重ね合わせて最大応答を得た。既述のとおり、デマンドスペクトルとしては NSCP 掲載の設計応答スペクトルを使用している。地震係数については土壌型や震源域に応じて様々な組み合わせが考えられ、それに対応する複数の設計応答スペクトルが存在すると思われる。各建物種別の解析には、それに対応した設計応答スペクトルを地震規模に応じて拡大・縮小して使用した。本来、設計応答スペクトルの拡大率（あるいは縮小率）の設定数は損傷度カーブの必要節点数によって異なるものである。ここでは、想定した最大の地震、設計対象の地震、中規模地震、小規模地震をそれぞれ表現するものとして拡大率 1.5、1.0、0.5 および 0.25 をそれぞれ使用した（図 6.4 参照）。

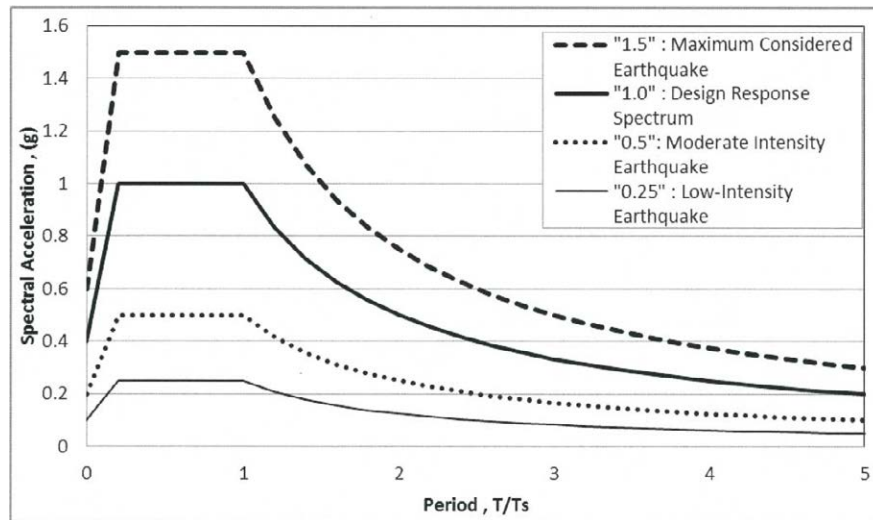


図 6-4 拡大・縮小した設計応答スペクトル

### 6.1.1.3. 解析

建物のキャパシティ評価には2つの解析手法を用いた。これは、高い建物の解析においても一定の精度を確保するためである。非線形漸増载荷法では最大応答は基本振動（モード）で発生すると仮定している。低層建物や中層建物において、崩壊は基本振動で近似しうる。しかし、高層建物ではより高次の振動モードに支配されるため、その解析には連続モーダルプッシュオーバー法を採用した。

#### 6.1.1.3.1. 非線形漸増載荷解析

非線形載荷は建物高さに沿った所定の載荷パターンにおいて、水平力を徐々に増加させていくものである。破壊を生じる部材はその剛性を低減させることで除外する。この解析では、局所破壊がフレーム要素に対する非線形的な作用としてモデル化されており、崩壊の進行過程を解析できる。これは梁と柱の両端に塑性ヒンジを配置することで実現可能である。塑性ヒンジのモデル化については次節で述べる。

水平力の載荷と破壊部材の除去は建物が安定を失うまで継続する。載荷した水平力 (V) と建物の変形 (D) をプロットしてキャパシティ曲線を作成する。このキャパシティ曲線は、基本振動が建物の支配的な応答であるという仮定から、建物の 1 次モード応答を示すものである。さらに、建物の数値モデルに改善を加え、降伏応力の低減にも対応可能とした。より詳細な説明は ATC-40 に記した。

##### ヒンジ低減係数

現在の建物ストックには、それが設計・建設された際に適用した基準によって異なる「年代」が存在する。それらは類似した構造ではあっても地震動に対する応答はかなり違ったものとなる。設計基準ごとの応答の違いは「応力-変形」および「モーメント-回転」の履歴をプロットすることで確認できる。これらは建築年代を考慮した梁や柱両端の非線形ヒンジのモデル化に利用可能である。年代としては、Pre-code (1972 年以前)、Low-code (1972 年～1992 年) および High-code (1992 年以降) の 3 つとした。

High-code の建物には標準的なヒンジの特性値を採用した。一方、Pre-code と Low-code の建物に対してはそれぞれの特性に応じて係数を乗じた応力-変形関係およびモーメント-回転関係を与えた。古い建物には低い延性を与えて塑性ヒンジのキャパシティを低減した (表 6.4 参照)。柱については軸力とモーメントに対するヒンジの特性は同じものとした。低減するための係数は梁の「せん断力-変形」関係、および「曲げモーメント-回転」関係の履歴をプロットして計算した。プロットしたデータは 1970 年代の基準と 1997 年のカナダ設計基準 (Biddah, 1997) から取得した。1997 年カナダ基準の設計思想は崩壊を伴わない延性 (塑性) 破壊である。

さらに、今回用いた設計・解析ソフトは現行の設計基準に準拠したものであり、Pre-code や Low-code の建物設計時とはベースシア係数の算定式が異なる。そこで、Pre-code や Low-code の建物を解析する際にはベースシア係数算定時の重要度係数 (I)、超過強度と通常時の塑性率 (R) を調整することとした。重要度係数 (I) として、1.0 (High-code)、0.5 (Low-code)、0.33 (Pre-code) を使用した。超過強度係数 (R) について、通常のラーメン構造で Pre-code、Low-code の建物を表現し、High-code は靱性の高いラーメン構造 (Special Moment Resisting Frame; SMRF) で表現した。

表 6-4 非線形フレームヒンジの特性

DEFAULT HINGE PROPERTIES	(a) Moment Hinge Properties for High Code.	(b) Shear Force Hinge Properties for High Code.																																																																				
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point</th> <th>Force/SF</th> <th>Disp/SF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>E-</td><td>-0.2</td><td>-7</td></tr> <tr><td>D-</td><td>-0.2</td><td>-5</td></tr> <tr><td>C-</td><td>-1.25</td><td>-5</td></tr> <tr><td>B-</td><td>-1</td><td>0</td></tr> <tr><td>A</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>B</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>C</td><td>1.25</td><td>5</td></tr> <tr><td>D</td><td>0.2</td><td>5</td></tr> <tr><td>E</td><td>0.2</td><td>7</td></tr> </tbody> </table> <table border="1" style="margin-top: 10px;"> <tr><td>Moment</td><td>Default</td></tr> <tr><td>Rotation</td><td>Default</td></tr> </table>	Point	Force/SF	Disp/SF	E-	-0.2	-7	D-	-0.2	-5	C-	-1.25	-5	B-	-1	0	A	0	0	B	1	0	C	1.25	5	D	0.2	5	E	0.2	7	Moment	Default	Rotation	Default	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point</th> <th>Moment/SF</th> <th>Rotation/SF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>E-</td><td>-0.2</td><td>-7</td></tr> <tr><td>D-</td><td>-0.2</td><td>-5</td></tr> <tr><td>C-</td><td>-1.25</td><td>-5</td></tr> <tr><td>B-</td><td>-1</td><td>0</td></tr> <tr><td>A</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>B</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>C</td><td>1.25</td><td>5</td></tr> <tr><td>D</td><td>0.2</td><td>5</td></tr> <tr><td>E</td><td>0.2</td><td>7</td></tr> </tbody> </table> <table border="1" style="margin-top: 10px;"> <tr><td>Shear Force</td><td>Default</td></tr> <tr><td>Displacement</td><td>Default</td></tr> </table>	Point	Moment/SF	Rotation/SF	E-	-0.2	-7	D-	-0.2	-5	C-	-1.25	-5	B-	-1	0	A	0	0	B	1	0	C	1.25	5	D	0.2	5	E	0.2	7	Shear Force	Default	Displacement	Default
Point	Force/SF	Disp/SF																																																																				
E-	-0.2	-7																																																																				
D-	-0.2	-5																																																																				
C-	-1.25	-5																																																																				
B-	-1	0																																																																				
A	0	0																																																																				
B	1	0																																																																				
C	1.25	5																																																																				
D	0.2	5																																																																				
E	0.2	7																																																																				
Moment	Default																																																																					
Rotation	Default																																																																					
Point	Moment/SF	Rotation/SF																																																																				
E-	-0.2	-7																																																																				
D-	-0.2	-5																																																																				
C-	-1.25	-5																																																																				
B-	-1	0																																																																				
A	0	0																																																																				
B	1	0																																																																				
C	1.25	5																																																																				
D	0.2	5																																																																				
E	0.2	7																																																																				
Shear Force	Default																																																																					
Displacement	Default																																																																					
REDUCED FRAME HINGES	(c) Moment Hinge Properties for Pre and Low Code.	(d) Shear Force Hinge Properties for Pre and Low Code.																																																																				
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point</th> <th>Moment/SF</th> <th>Rotation/SF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>E-</td><td>-0.168</td><td>-4.515</td></tr> <tr><td>D-</td><td>-0.168</td><td>-3.225</td></tr> <tr><td>C-</td><td>-1.05</td><td>-3.225</td></tr> <tr><td>B-</td><td>-0.84</td><td>0</td></tr> <tr><td>A</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>B</td><td>0.84</td><td>0</td></tr> <tr><td>C</td><td>1.05</td><td>3.225</td></tr> <tr><td>D</td><td>0.168</td><td>3.225</td></tr> <tr><td>E</td><td>0.168</td><td>4.515</td></tr> </tbody> </table> <table border="1" style="margin-top: 10px;"> <tr><td>Moment</td><td>0.84</td></tr> <tr><td>Rotation</td><td>0.645</td></tr> </table>	Point	Moment/SF	Rotation/SF	E-	-0.168	-4.515	D-	-0.168	-3.225	C-	-1.05	-3.225	B-	-0.84	0	A	0	0	B	0.84	0	C	1.05	3.225	D	0.168	3.225	E	0.168	4.515	Moment	0.84	Rotation	0.645	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point</th> <th>Force/SF</th> <th>Disp/SF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>E-</td><td>-0.1925</td><td>-3.339</td></tr> <tr><td>D-</td><td>-0.1925</td><td>-2.385</td></tr> <tr><td>C-</td><td>-1.2031</td><td>-2.385</td></tr> <tr><td>B-</td><td>-0.9625</td><td>0</td></tr> <tr><td>A</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>B</td><td>0.9625</td><td>0</td></tr> <tr><td>C</td><td>1.2031</td><td>2.385</td></tr> <tr><td>D</td><td>0.1925</td><td>2.385</td></tr> <tr><td>E</td><td>0.1925</td><td>3.339</td></tr> </tbody> </table> <table border="1" style="margin-top: 10px;"> <tr><td>Shear Force</td><td>0.9625</td></tr> <tr><td>Displacement</td><td>0.477</td></tr> </table>	Point	Force/SF	Disp/SF	E-	-0.1925	-3.339	D-	-0.1925	-2.385	C-	-1.2031	-2.385	B-	-0.9625	0	A	0	0	B	0.9625	0	C	1.2031	2.385	D	0.1925	2.385	E	0.1925	3.339	Shear Force	0.9625	Displacement	0.477
Point	Moment/SF	Rotation/SF																																																																				
E-	-0.168	-4.515																																																																				
D-	-0.168	-3.225																																																																				
C-	-1.05	-3.225																																																																				
B-	-0.84	0																																																																				
A	0	0																																																																				
B	0.84	0																																																																				
C	1.05	3.225																																																																				
D	0.168	3.225																																																																				
E	0.168	4.515																																																																				
Moment	0.84																																																																					
Rotation	0.645																																																																					
Point	Force/SF	Disp/SF																																																																				
E-	-0.1925	-3.339																																																																				
D-	-0.1925	-2.385																																																																				
C-	-1.2031	-2.385																																																																				
B-	-0.9625	0																																																																				
A	0	0																																																																				
B	0.9625	0																																																																				
C	1.2031	2.385																																																																				
D	0.1925	2.385																																																																				
E	0.1925	3.339																																																																				
Shear Force	0.9625																																																																					
Displacement	0.477																																																																					

キャパシティ・スペクトル法

キャパシティ・スペクトル法 (CSM) は建物の応答を近似するための一手法である。建物の挙動は最大応答で示され、最大応答は建物のキャパシティ (载荷曲線) と建物の応答 (応答スペクトル) の交点である。構造的特性や建物の構成は各部材の強度や変形に影響を与え、建物のキャパシティを左右するものである。一方、地震応答の方はその地域のハザードを適切に代表するよう選定しなければならない。すでに述べたとおり、ここで使用した地震応答は設計応答スペクトルを引き伸ばしたものである。

非線形载荷法は繰り返し計算であるため、非線形定常解析ソフトの活用が便利である。ソフトウェア ETABS を活用すれば、ATC-40 に掲載されたガイドラインにしたがって非線形载荷 (NSP) 解析を行うことが可能である。アジア工科大学 (AIT) 発行の ACECOMS には ETABS を活用した NSP の事例が掲載されている。

下図は ETABS を用いて最大応答を図解的に算定した例である。

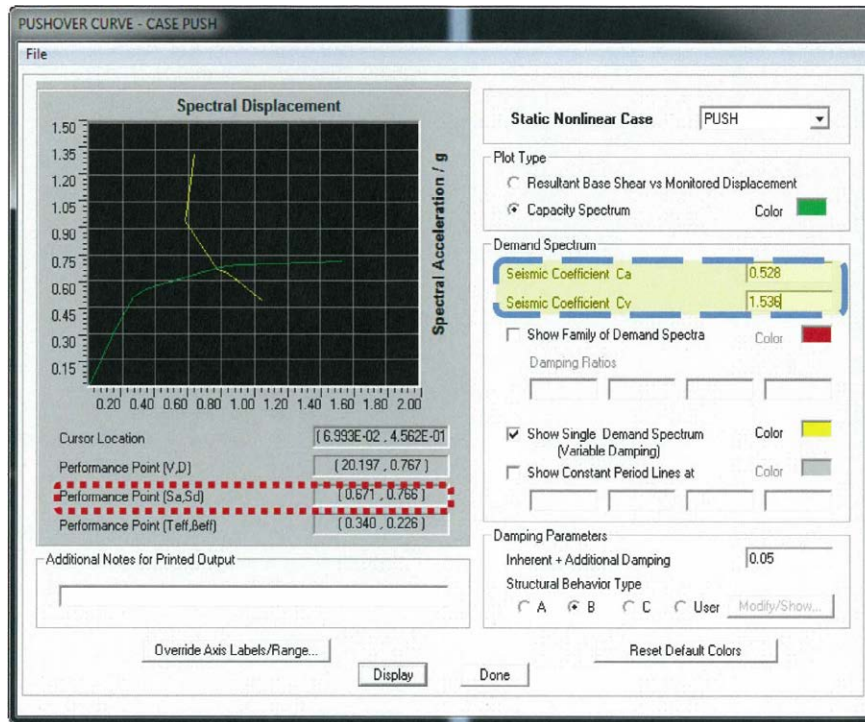


図 6-5 ETABS の画面例

算定した最大応答は入力した土壌型（Ca、Cv を変化させる（上図青色点線））に応じた地震動強さ（GMI）から導かれる設計応答スペクトルに対するものである。最大応答は赤色点線で表示しており、各 GMI について計算し記録する。

#### 閾値

建物の損傷が軽度か、中程度か、重度かあるいは完全に崩壊した状態であるかを判定するためには何らかの基準が必要である。各損傷状態区分の閾値における変形率を基準とした。HAZUS-MH では各種の設計地震レベルにおける建物種別ごとの閾値が提案されている。表 6.5 は建物種別 C1-L における閾値を示したものである。

表 6-5 建物種別 C1-L における損傷状態の層間変形率の閾値 (HAZUS, Table 5.9d)

損傷状態	損傷状態閾値での層間変形率		
	High-code	Low-code	Pre-code
軽度	0.005	0.005	0.0040
中程度	0.010	0.008	0.0064
重度	0.030	0.020	0.0160
完全崩壊	0.080	0.050	0.0400

上表にあるとおり、中程度と重度の層間変形率は軽度の層間変形率に完全崩壊と軽度の層間変形率の差分のうちの一定の割合を加えたものである。これは同一の建物種別であればどの年代でも同様である。それゆえ、軽度と完全崩壊の閾値に対する層間変形率を決めればよい。

閾値は載荷曲線から求めることができる。Bazzurro (2006)によると、軽度の損傷（または損傷の始まり）は曲線が非線形になり始める点として定義される。他方、Gencturkら (2007)によると、完全崩壊は載荷重がわずかに減少した時に生じるピーク載荷後の変形として扱うことができる。さらに、閾値は載荷曲線による層間変形を基に決める代わりに、キャパシティ・スペクトルから導かれる変形スペクトルから決めることも可能である。それはこれら閾値がスペクトル値に含まれる最大応答と比較しうるためである。

図 6.6 はキャパシティ・スペクトルの例である。軽度損傷の閾値は降伏点すなわち線形関係が終わる点に位置する。これは 0.061 m の点である。既に述べたとおり、完全崩壊の点は突然の低下点、あるいはもしそのような状況（グラフの急低下）が発生しなければグラフの終点として取得する。図の場合は 0.2 m となる。

中程度、重度の損傷状態の閾値は完全崩壊と軽度の間であり、以下の式で計算する。

$$Sd_{Moderate} = Sd_{slight} + \frac{Sd_{Complete} - Sd_{slight}}{k_1}$$

$$Sd_{Extensive} = Sd_{slight} + \frac{Sd_{Complete} - Sd_{slight}}{k_2}$$

ここに、 $k_1$  および  $k_2$  は HAZUS による変形スペクトルから算出される定数であり、以下の式で示される。

$$k_1 = \frac{(S_{d_{Complete}}^* - S_{d_{slight}}^*)}{(S_{d_{Moderate}}^* - S_{d_{slight}}^*)} \quad k_2 = \frac{(S_{d_{Complete}}^* - S_{d_{slight}}^*)}{(S_{d_{Extensive}}^* - S_{d_{slight}}^*)}$$

$k_1$  および  $k_2$  は HAZUS で示された閾値に基づき計算される。これらの係数は建物種別によって異なる。

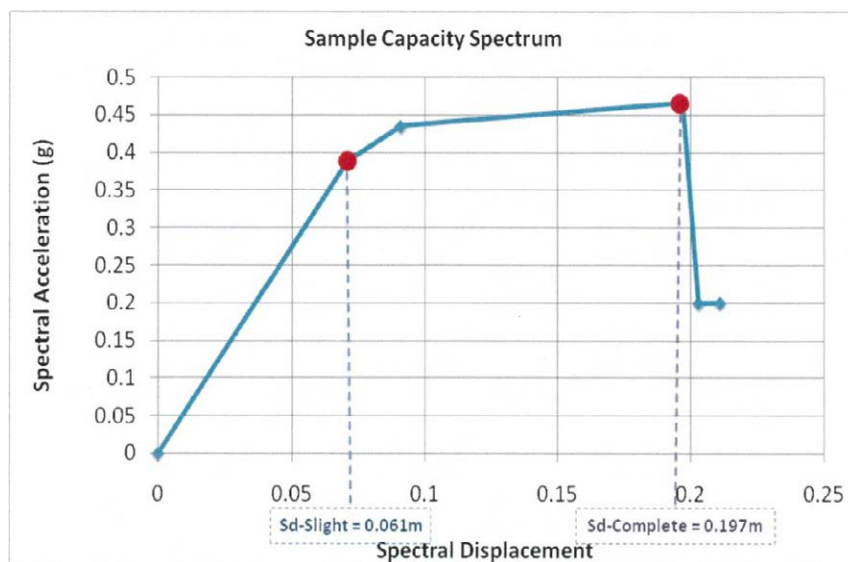


図 6-6 軽度および完全崩壊に対する閾値の設定例

この例では中程度と重度の閾値はそれぞれ 0.07 と 0.106 となる。この作業により全ての損傷状態に対する閾値が決まる。各々の構造モデルに対し最大応答を評価するための

閾値の組み合わせを設定する。

#### 6.1.1.3.2. 連続モーダルプッシュオーバー解析(CMP)

上記で述べた解析手法は低層および中層の建物についてのみ適用可能である。高層建築物に対しては高次の振動モードや塑性ヒンジの回転を考慮した解析が必要である。本プロジェクトでは、建物種別 C4-H (せん断壁付き高層コンクリートラーメン構造) の脆弱性カーブ作成のため Poursha ら (2008) が提案した手法を適用した。せん断壁のモデル化には等価フレーム法 (Fahjan, 2012) を採用した。同法はせん断壁を床レベルに配置された柱と剛性梁に見立ててフレーム構造として計算するものである。詳細は Appendix C.1.7 を参照されたい。

#### 6.1.1.4. 計算による損傷度カーブの作成

##### 6.1.1.4.1. 損傷状態評価

建物の挙動を評価するためには、事前に記録した最大応答とモデルを通じて特定した閾値とを比較しなければならない。図 6.7 はキャパシティ曲線と応答スペクトルの交点として最大応答 (赤丸) を図解した例である。これに閾値を重ね合わせることで建物の損傷状態を容易に判定できる。ある損傷状態に着目した時、その閾値を超える建物の数を合計建物数で除したものが損傷確率マトリックスである。

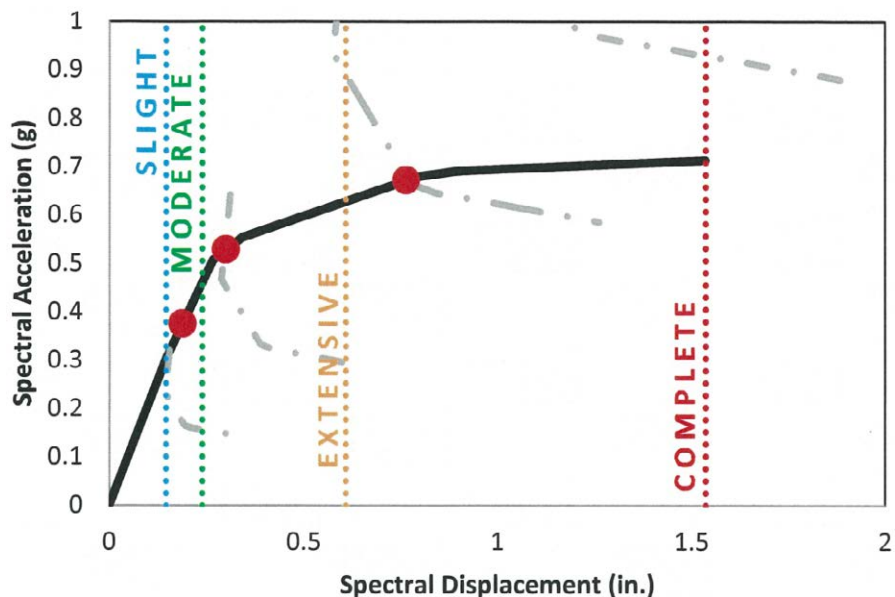


図 6-7 損傷状態評価の図解例

キャパシティ曲線と応答スペクトルが交差しない場合、ETABS は最大応答「なし」と返す。この場合、応答が建物の総キャパシティを超えているため完全崩壊と判定する。また、建物によってはキャパシティ曲線が作成できなかったり不合理な曲線が作成されたりするケースもある。このような結果は除外し、確率の分析には含めないこととした。

#### 6.1.1.4.2. 超過確率

累積確率は超過確率を意味する。これは、ある建物が与えられた地震動強さに対して特定の損傷状態に入っているかそれを超えている確率である。したがって、ある地震動強さについて重度損傷状態の超過確率を得るには、軽度、中程度、重度の損傷確率を合計するとともに、軽度にも達しない状態（無被害という）の確率も加える。地震動強さは加速度スペクトル（g）に適用する地震係数（Ca）である。損傷状態の評価はモデルごとに行う。

#### 6.1.1.4.3. カーブフィッティング

既に述べたとおり、地震損傷度カーブは以下のような対数正規累積分布関数で近似される。

$$P[d_s|GMI] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{as}} \ln \left( \frac{GMI}{GMI_{as}} \right) \right]$$

この曲線の形を決めるパラメーターは中央値と不確実性の2つである。カーブフィッティングとは取得したデータが曲線上にうまく乗るようにこれらのパラメーターを決める作業である。カーブフィッティングには様々な手法があるが、ここでは最小二乗法を用いた。決定係数が1にできるだけ近づくよう中央値と不確実性を調整した。

#### 6.1.1.4.4. 不確実性の調整

背景

認識論的不確実性の定量化することは3つの変動要因を評価することに相当する。すなわち、専門家の判断による設計要求事項、施工実態、構造物モデルの評価である。調査ツール作成および定性評価については、FEMA P695に示された手法を参照した。この手法では各々の変動要因を2つの側面、すなわち程度/精度と信頼度を「高い」「普通」「低い」の3段階で評価する。各変動要因はそれぞれ独立しているとの仮定のもと、二乗和平方根法（SRSS）を用いて不確実性（ $\beta$ ）を得た。

調査ツールの開発

FEMA P695に示された変動要因の評価にはより詳しい説明が必要である。必要な全ての要素を網羅するため、調査ツールはチェックリストの形で作成した。チェックリストは予めリストアップした項目が現場レベルでどの程度当てはまるかの確認を目的とした。これにより主観的な評価ではなく当てはまった項目の数から評価を行った。「高い」「普通」「低い」の評価は当てはまった項目の割合で割り振った（表 6.6 参照）。また、調査ツールは低層建築物用と中高層建築物用の2つに分け、どちらにも鉄筋コンクリート構造と鋼構造の評価を含めた。調査様式は Appendix C.1.8 に収録している。

表 6-6 チェックリストの該当割合と評価の関係

評価（レーティング）	該当割合
高い	> 75%
普通	50% > x ] 75%
低い	* 50%

表 6.8、6.9 および 6.10 はそれぞれ設計要求事項、試験データ、非線形モデルに関する定性評価のためのマトリックスである。設計要求事項は品質保証の観点からと完全性および堅牢性の観点から評価する必要がある。そのため表 6.7 に示す基準で評価した。

表 6-7 設計要求事項を評価するためのマトリックス

完全性/堅牢性	品質保証		
	高い	普通	低い
高い	高い	普通	低い
普通	普通	普通	低い
低い	低い	低い	低い

試験データは完全性/堅牢性および信頼度について評価した。非線形モデルについては崩壊の特徴再現性や精度、およびモデルの堅牢性を評価した。

表 6-8 設計要求事項の定性評価(出典:FEMA P695)

完全性/堅牢性	設計要求事項における信頼性		
	高い	普通	低い
<b>高い</b> ：予期せぬ破壊モードに高度な対応がとられている。全ての重要な設計品質保証に関する事項について述べてある。	(A) 優れている $\beta_{DR} = 0.10$	(B) 良い $\beta_{DR} = 0.20$	(C) 平均的 $\beta_{DR} = 0.35$
<b>普通</b> ：予期せぬ破壊モードに妥当な対応がとられている。ほとんどの重要な設計品質保証に関する事項について述べてある。	(B) 良い $\beta_{DR} = 0.20$	(C) 平均的 $\beta_{DR} = 0.35$	(D) 悪い $\beta_{DR} = 0.5$
<b>低い</b> ：予期せぬ破壊モードへの対応に疑いあり。多くの重要な設計品質保証に関する事項について述べられていない。	(C) 平均的 $\beta_{DR} = 0.35$	(D) 悪い $\beta_{DR} = 0.5$	—

表 6-9 試験データの定性評価(出典:FEMA P695)

完全性/堅牢性	試験結果の信頼性		
	高い	普通	低い
<b>高い</b> ：材料、要素、接続、組立て、システム挙動について十分理解し考慮されている。全てあるいはほとんど全ての重要試験事項が網羅されている。	(A) 優れている $\beta_{DR} = 0.10$	(B) 良い $\beta_{DR} = 0.20$	(C) 平均的 $\beta_{DR} = 0.35$
<b>普通</b> ：材料、要素、接続、組立て、システム挙動について概ね理解し考慮されている。ほとんどの重要試験事項が網羅されている。	(B) 良い $\beta_{DR} = 0.20$	(C) 平均的 $\beta_{DR} = 0.35$	(D) 悪い $\beta_{DR} = 0.5$
<b>低い</b> ：材料、要素、接続、組立て、システム挙動について平均的な程度に理解し考慮されている。重要試験事項の幾つかは網羅されている。	(C) 平均的 $\beta_{DR} = 0.35$	(D) 悪い $\beta_{DR} = 0.5$	—

表 6-10 インデックス原型モデルの定性評価(出典:FEMA P695)

完全性/堅牢性	試験結果の信頼性		
	高い	普通	低い
<b>高い</b> ：インデックスモデルは全範囲の原型 <sup>1</sup> となる設計空間および崩壊に寄与する構造的挙動を捉えている。	(A) 優れている $\beta_{DR} = 0.10$	(B) 良い $\beta_{DR} = 0.20$	(C) 平均的 $\beta_{DR} = 0.35$

<sup>1</sup> 1つの原型とは耐震システムを表現したものである。その集まりでもって、妥当な設計空間内での合理的な表現力とシステム応答に対する計測可能なインパクトを担保しうる設計パラメーターやシステム構成の範囲を反映することを意図している。(FEMA P695)



**普通**：インデックスモデルは概ね包括的で設計空間や崩壊に寄与する構造的挙動を捉えている。

**低い**：設計空間や崩壊に寄与する構造的挙動のうちの重要な要素がインデックスモデルで捉えられていない。

(B) 良い $\beta_{DR} = 0.20$	(C) 平均的 $\beta_{DR} = 0.35$	(D) 悪い $\beta_{DR} = 0.5$
(C) 平均的 $\beta_{DR} = 0.35$	(D) 悪い $\beta_{DR} = 0.5$	—

#### 認識論的不確実性の調査結果

2012年5月5日に本プロジェクトの中間発表会を実施し、各地で活躍している専門家の参加を得た。この発表会時に専門家に対し2種類（低層建築用、中高層建築用）の調査シートを配布した。シートは別途学識経験者にも配布した。調査シートは自信をもった回答を期待できる専門家に対してのみ配布した。最終的に低中層建築に対しては9人から、高層建築に対しては5人から回答があった。回答の要約を表6.11から6.14に示す。

表 6-11 低層鋼構造物に対する認識論的不確実性調査結果

		「はい」の割合	最終評価	不確実性の値
設計要求事項	完全性と堅牢性	28.60%	低い	0.5
	信頼性	66.07%	普通	
試験データ	完全性と堅牢性	44.44%	低い	0.5
	信頼性	54.32%	普通	
モデリング	強度特性	59.72%	普通	0.35
	精度	54.17%	普通	

表 6-12 低層 RC 構造物に対する認識論的不確実性調査結果

		「はい」の割合	最終評価	不確実性の値
設計要求事項	完全性と堅牢性	30.40%	低い	0.2
	信頼性	65.63%	普通	
試験データ	完全性と堅牢性	56.94%	普通	0.35
	信頼性	65.63%	普通	
モデリング	強度特性	59.72%	普通	0.35
	精度	50.00%	低い	

表 6-13 中高層鋼構造物に対する認識論的不確実性調査結果

		「はい」の割合	最終評価	不確実性の値
設計要求事項	完全性と堅牢性	80.86%	高い	0.2
	信頼性	67.50%	普通	
試験データ	完全性と堅牢性	62.22%	普通	0.35
	信頼性	53.00%	普通	
モデリング	強度特性	65.00%	普通	0.35
	精度	60.00%	普通	

表 6-14 中高層 RC 構造物に対する認識論的不確実性調査結果

		「はい」の割合	最終評価	不確実性の値
設計要求事項	完全性と堅牢性	79.77%	高い	0.2
	信頼性	67.50%	普通	
試験データ	完全性と堅牢性	68.89%	普通	0.5
	信頼性	43.67%	低い	
モデリング	強度特性	65.00%	普通	0.35
	精度	60.00%	普通	

下表は低層および中高層建築に対する鋼構造、RC 構造の不確実性に関するパラメータである。

表 6-15 認識論的不確実性の値

低層	鋼構造	0.88
	RC	0.88
中高層	鋼構造	0.67
	RC	0.76

カーブの交差を避け比較的平行な損傷度カーブを得るため、不確実性の値は建築材料ごとに一つに絞ることとした。材料ごとの不確実性の値をレビューし、中央値を推定した。その結果、RC および鋼構造における偶然による不確実性をそれぞれ 0.5、0.3 とし、認識論的不確実性を 0.8、0.7 とした。二乗和平方根法 (SSRS) を用い、最終的に 0.94、0.76 をそれぞれ RC および鋼構造に対する不確実性として一律に採用することとした。

#### 6.1.1.4.5. 修正メルカリ震度 (MMI) への変換

入手可能な被害記録は MMI に対応して整理されていることから、MMI への修正が必要である。そこで、表面最大加速度 (PGA) で整理した損傷度カーブを以下の Gutenberg and Richter (1942) の関係を用いて MMI に換算した。

$$\log(a) = \frac{I}{3} - 0.5$$

ここに、a は PGA (ガル;  $\text{cm/s}^2$ )、I は MMI である。

上式を用いて地震動強さの単位を PGA から MMI に変換したが、損傷状態の超過確率の方には何ら変換を加えていない。

#### 6.1.1.5. 計算による脆弱性カーブの作成

調整済みの損傷度カーブは、以下の式を用いて脆弱性カーブに変換した。

$$P_{v,GMI} = \sum D_i * P_{F,i}$$

ここに、

$P_{v,GMI}$ : 与えられた地震動強さ (GMI) における損傷確率

$D_i$ : 損傷状態 i に対する被害インデックス

$P_{F,i}$ : 建物が損傷状態 i となる確率

下表は各損傷状態における被害の範囲であり、その中央値として対応する被害インデックスを示している。

表 6-16 被害の範囲

損傷状態	被害の範囲 (%)	被害インデックス (%)
なし	0-2	1
軽度	2-10	6
中程度	10-50	30
重度	50-100	75
完全崩壊	100	100

ある地震動強さに対する被害確率を決定するためには、ある損傷状態における被害インデックスとその損傷状態の発生確率を掛け合わせたものの総和をとる。

### 6.1.2 思考的手法

思考的手法は地震時の構造物の挙動に関する専門家の見解を集積して行った。この中で専門家は各地震動レベルにおける建物種別ごとの被害分布を推定した。推定は経験と専門性に基づいてなされた。この手法の良い点は、専門家の経験が合理的である限りにおいて、データ不足による影響を受けにくいことである。

#### 専門家の見解調査

本プロジェクトでは紙ベースの調査票を活用した。調査票は2012年6月8～9日のフィリピン構造学会サミットや同年8月23～24日のUPD-NEC（フィリピン国立エンジニアリングセンター）セミナー開催時に配布した。合計38人の専門家が調査に参加した。

調査では、所属、専門分野、経験年数に加え、ある建物種別に対する脆弱性カーブ上の5点における被害率を回答への自信の程度とともに回答してもらった。ここで言う被害率とは、建物の再調達価額に占める損害額の割合であり、0から1（0%から100%）の範囲をとる。

調査票によると、参加した専門家の多くは低層RCや鋼構造建築の設計に携わっており、高層建築に関する経験を有する専門家もいた。研究機関からの参加者はわずかであった。経験年数は1～2年から35年までと幅広かった。

表6.17は調査票に基づく全参加者の情報である。

表 6-17 思考的手法に参加した専門家

ID	Affiliation	Designation	Years of Experience Specialization	
			Experience	Specialization
<b>Repondents from ASEP Summit (June 8-9, 2012)</b>				
A	NEUST, Cabantuan City	Faculty member	35	LRRC
B		Consultant	1°	LRRC, HRRC, LRS
C	PICE Qatar Chapter - Regular Member	Designer	10	LRRC
D	Freelance/Employee Civil/Structural Engr	Consultant/Designer	10	LRRC, LRS
E			1	
F			8	
G		Designer	27*	
H		Faculty Member	2*	
I	ASEP Member	Designer	15	LRRC, LRS
J		Consultant	2*	
K		Faculty Member	1	LRRC
L		Designer	4	LRRC, HRRC
M			1	
N	Pimentel & Associates Eng'g Consultant	Designer	2*	HRRC
O	V.B. Columna Const Corp.	Designer/Construction	10	LRRC
P	PICE		1	
Q	ASEP Member	Designer	15	LRRC, LRS
R		Designer	8	LRRC, LRS
S		Designer	6	LRRC, LRS
T			1	LRRC, LRS
U		Designer/Project Manager	4	LRRC, LRS
V	ASEP, PICE	Designer	25	LRRC, HRRC
W	ASEP, PICE	Designer	29*	LRRC
<b>Repondents from PETD Seminar (Aug. 23-24, 2012)</b>				
1	ASEP	Designer	26*	LRRC, HRRC, LRS
2	ASEP	Designer	10	LRRC
3	PICE/ASEP	Designer	8	LRRC, LRS
4		Consultant/Designer	1	LRRC, LRS
5		Designer	3	LRRC
6	PICE/ASEP	Consultant	20	
7		Designer/Proj.Manager	25	LRRC, HRRC, LRS
8		Consultant	20	HRRC
9	DCCD Engg Corp	Designer	6	LRRC, LRS
10		Designer	2.5	LRRC
11	DCCD Engg Corp	Designer	2*	
12		Designer/Faculty Member	2*	LRRC
13	R.A. Flordeliza Engg Consultancy	Consultant/Principal	32*	LRRC, LRS
14	ESCA Inc	Designer	2	LRRC, HRRC, LRS, HRS
15	ESCA Inc	Designer	2	LRRC, HRRC

Legend:

1° = Years of experience not supplied. Assigned a value of 1

#\* = Years of experience not supplied. Confirmed with ASEP/PICE

LRRC = Low-rise reinforced concrete

LRS = Low-rise steel

HRRC = High-rise reinforced concrete

HRS = High-rise steel

### 分析およびデータ調整

まず、結果の質を確保するために各回答を吟味した。その後、図 6.8 に示すとおり回答結果を MMI - 被害率平面上にプロットした。同図から、脆弱性の比較において以下のような大まかな傾向がうかがえる。

石積み < 木造 < コンクリート < 鋼

石積み工による建築物が最も脆弱とされ、鋼構造が最も強靱であるとされた。また、図では建物種別や被害率によってはデータが不完全であったり過去の地震被害とはかけ離れたトレンドを示していたり（例えば地震強さが増加しているのに被害率は低下しているなど）することからそれらを除外する必要性も認識された。

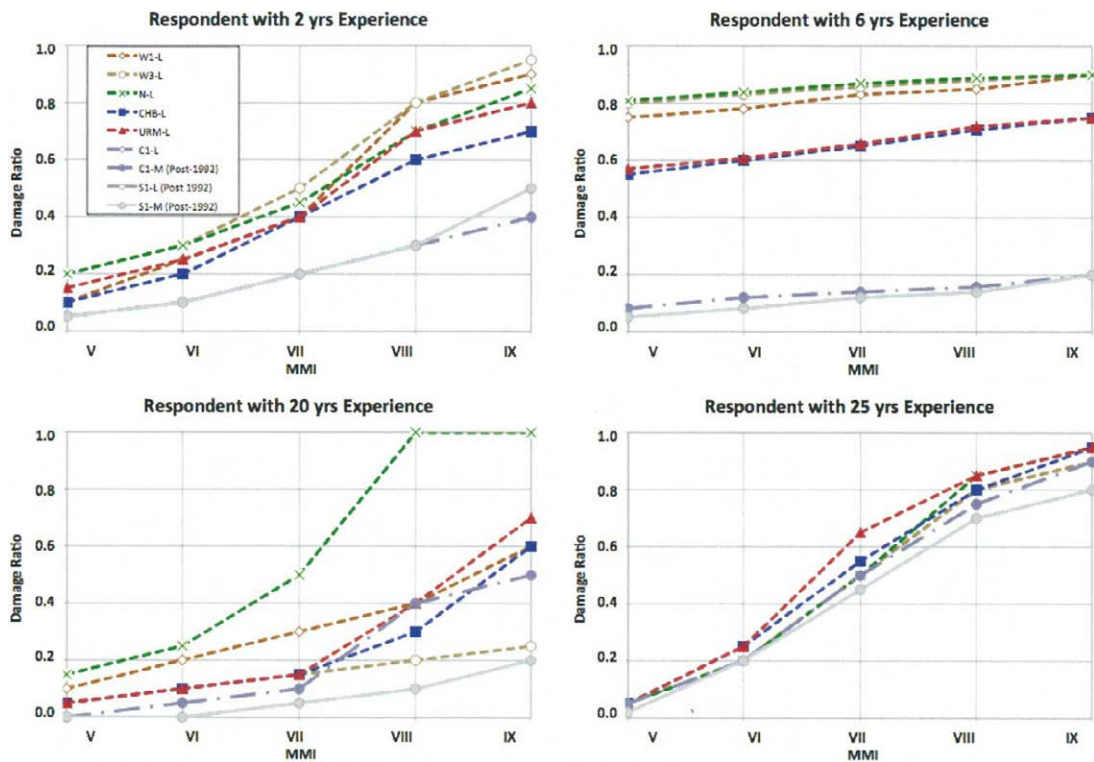


図 6-8 建物種別ごとの被害率(専門家経験年数ごとに整理)

#### 支配パラメーター

この調査においては専門性、経験年数、自信の程度に対する回答を重視した。ほとんどの回答者がコンクリートや鋼構造を専門としているが、木造や石積みといった構造に対する回答への信頼性はやや低いと考えられる。また、経験年数については、単に土木に関わった合計年数を記入している専門家もいると考えられたが、一律実際の経験を積んだ年数と仮定した。

回答に対する自信の程度(パーセント)は建物種別ごとに経験、専門性その他諸々の個人的要素に基づいて自己申告されたものである。そこで、何らかの示唆を得るために経験年数と自信の程度の相関を確認した。その結果、38人中15人のサンプルからは明瞭な相関関係が確認できなかった(図6.9)。

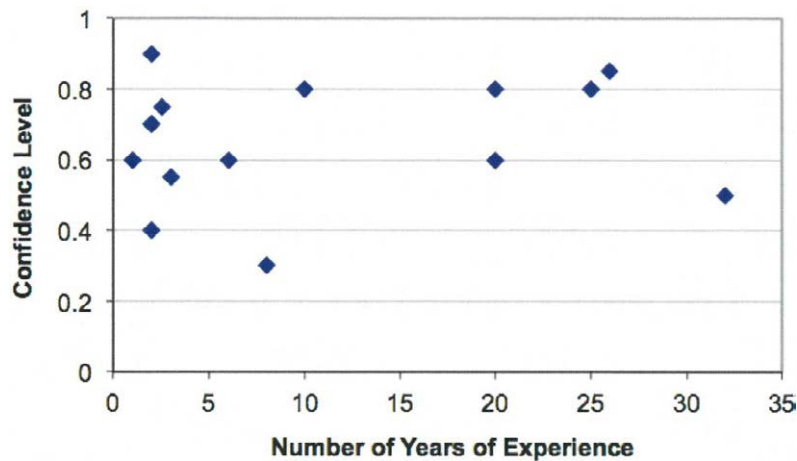


図 6-9 経験年数と回答への自信の程度の関係(建物種別 C1-L)

自信の程度は専門家個々の気質によるものであるため、建物種別ごとの脆弱性カーブ作成のための重み付けには経験年数を使用した。経験年数ごとの重み係数は下表に示すとおり設定した。

表 6-18 経験年数に応じて設定した重み係数

経験年数	重み係数
1 - 4	1
5 - 10	2
11 - 20	3
> 20	4

#### 脆弱性カーブの作成

ある建物種別に対して脆弱性カーブを作成する際、まず各地震動強さでの被害率を表 6.18 による加重平均で求めた。また、弱い地震と強い地震に対する被害率の合理性を確保するためにさらに節点を設けた。本プロジェクトでは MMI IV に対する被害率を 0 とし、MMI XI に対する被害率を 1 とした。

対数正規分布型の脆弱性カーブを作成する際のパラメーター、すなわち中央値と不確実性については、決定係数が 1 に近づくように数値を調整して決定した(6.1.1.4.3 参照)。

#### 損傷度カーブの作成

損傷度カーブが必要な場合、脆弱性カーブから作成可能である。対数正規分布のパラメーターは豪州地球科学機構 (Geoscience Australia; GA) が開発したソフトウェア ELOSS を用いて取得した。

ELOSS では必要な損傷度カーブのパラメータ (中央値、 $\beta$ ) を技術的判断に基づいて入力することができる。これらの初期値は材料、階高等が類似する建物種別のパラメーターに基づいて決めることもできる。本プロジェクトでは以下の仮定を導入した。

1. 損傷度カーブはその元となる脆弱性カーブと同じ不確実性 ( $\beta$ 値) を持つ。
2. Iloilo 市でも確認された建物種別については、中央値の初期値として QuiveR プロ

ジェクトで使用されたものを設定する。その上で、元となる脆弱性カーブに近づくよう調整する。

3. Iloilo 市で確認されなかったものの、同様の種別（例えば C4-M と C4-H など）の建物については QuiverR プロジェクトの値を初期値とし、その後調整する。
4. 新しい種別については、S、M、E、C に対応する損傷度カーブが「等距離」にありかつ同一の $\beta$ 値を持つと仮定した。

上記の仮定の下、元となる脆弱性カーブと被害インデックスが同等になるまでパラメーターの調整を行った。

### 6.1.3 経験的手法

経験的手法は過去のデータに基づくものであり、対象地域でのデータが取得できればより信頼性の高い手法である。過去のデータとは地震後の被害記録であり、地形、立地、震源の特徴、地質構造、その他複合作用などを含む建物インベントリーの詳細である。しかしながら、このようなデータは限られた地域で取得されているのみで、広範囲で実施するには莫大な費用がかかる。地震被害に関するデータや対応する地震動強さの記録がほとんどないため、統計的に有意なサンプルを蓄積し各種構成に対応した建物群おける損傷度カーブを構築することはできない。

#### 6.1.3.1. 方法の説明

1. 近年あるいは過去の地震によって生じた建物被害に関する情報を新聞や現地調査報告などから収集する。

本プロジェクトでは PHIVOLCS と GA が共同で収集・レビューした現地調査報告書（Review of Historical Philippines Earthquake Events and Building Consequences）からデータを取得した。同報告書の 3.2 節には過去に発生した 15 の地震について、住宅、商業ビル、古い URM、および公共ビルに関する被害報告書が列挙されている。

表 6.19 に示したとおり、同報告書は被害を受けた建物と受けていない建物の比率に関する情報を示している場合もあるが、同型式の建物の全体数は示されていない。同報告書はまた、ある建物種別に広範で深刻な被害を与えた地震動強さ（MMI）についての情報も掲載している。住宅以外の建物に対する調査内容は大規模コミュニティのより大きな建物に焦点を当てている。また、建築年代は重要な情報だが記載されていない。

2. 建物種別に関し、有用なデータを抽出・分類する。

構造材料や構造系（システム）に関するキーワードから報告書内のデータを抽出し分類する。CHB や MWS に対しては、「コンクリート中空ブロック」、「住宅」（鉄筋コンクリートとの記述がない限り）、「石積み」というキーワードから抽出する。URA または URM については、「教会」、「石」、「日干しレンガ」というキーワードを用いる。「木」、「ニッパ屋根」、「軽材料」は木造（W1-L など）建物のキーワードとする。

建物種別の確認はインターネット上の写真や記述も参考として行う。

3. 複数の地震に対する建物被害の記述から地震強さごとの被害率を割り振る。

ある特定の建物種別に対して、異なる地震（位置に関わらず）からのデータを用いて強度ごとの被害率を当てはめる。建築材料や施工実態が同等であるとの仮定のもと、マ

ニラ首都圏以外も含む既往地震での建物被害を利用する。

被害は地震動に起因するものに限定し、断層といった地質や基礎の条件、液状化や津波など他に起因するものは排除する。

4. カーブフィッティングを行い、建物種別ごとの脆弱性カーブを作成する。

6.1.1.4.3 で述べた手法を用いてカーブフィッティングを行い、脆弱性カーブを作成する。

表 6-19 過去の地震レポートからのサンプル抽出

Earthquake	Date	Locality	MM	Comment	Inference?
<i>Traditional Residential</i>					
Northern Luzon Earthquake	24/4/1985	Bokod	6	typical Igorot houses whose posts were not even buried into the ground collapsed.	Poorly constructed traditional residential vulnerable at MMI 4
Northern Luzon Earthquake	24/4/1985	Bokod	6	old Igorot huts collapsed. It was observed that posts failed at floor section.	Better constructed traditional residential vulnerable at MMI 5
Mindoro Earthquake	15/11/1994	Calapan	6	Old houses with nipa roofs collapsed due to ground shaking	Traditional construction severely damaged at MMI 7
<i>Typical Masonry Residential</i>					
Ragay Gulf Earthquake	17/3/1973	Calauag, Quezon	9	98 houses were totally destroyed and 270 others were partially destroyed.	Widespread residential damage at MMI 8
Moro Gulf Earthquake	17/8/1976		9	Many buildings, with unknown structural systems and close to the epicentre of the earthquake, collapsed or suffered severe damage after the earthquake	Severe residential damage at MMI 7 (note the large discrepancy with PAGER MMI of 6. The reported isoseismals may indicate an overly large felt intensity)
North-Eastern Luzon Earthquake	22/11/1981	Magsingal	6	a few minor cracks in walls of houses made of hollow blocks	Minor damage to masonry residential buildings

出典：PHIVOLCS & GA (2012). Summary of Earthquake Damage, Nov. 2012

### 6.1.3.2. 経験データの考察

住宅以外の建物についてはより甚大な被害を受けたものに焦点をあて、より良い設計や施工の方法や建築基準のための教訓とする。地震動による被害の深刻さはしばしば非常に劣悪な施工により覆い隠される。

上記の PHIVOLCS と GA による報告書 (2012) はまた、CHB 型式と MWS 型式の違いを区分していない。

被災した教会の記述において、「石の教会」という言葉は URM と URA (日干レンガ造り) の双方に用いられている。したがって、建物種別の確認が必要である。そのために建物の位置や記述を確認し、関連記事をレビューしインターネットから写真を取得した。例えば Ilocos Norte 州 Bacarra にある St. Andrew Parish 教会 (図 6.10 参照) は 1593 年にサンゴのブロックとシックいレンガでスペイン宣教師により建設された。

同報告書には建物種別 URM の脆弱性カーブ作成のために十分な情報は含まれていなかった。





図 6-10 Ilocos Norte 州 Bacarra にある St. Andrew Parish 教会

### 6.1.3.3. CHB/MWS に対する脆弱性カーブの導出

MWS 型式および CHB 型式について、PHIVOLCS/GA 報告書（2012）から抽出したサンプルを表 6.20 に示した。報告書記述に基づき、地震動強さごとの平均被害率を表 6.21 のように割り振った。図 6.11 は対数正規分布にあうように調整した脆弱性カーブである。

表 6-20 CHB/MWS 型式の脆弱性カーブ導出に用いた経験データ

Event Name	Date	Earthquake Magnitude and Max. Reported	Maximum MMI (1) from Pager Map	MMI	Damage Observations	Source	Range of Damage Ratio
Ragay Gulf Earthquake	17/03/1973	Ms 7.0 M7.3 MMI 9	MMI 8	5	Residential – The damaged houses were largely wooden and some were poorly built concrete buildings. Effects on strongly built ones were limited to the topping of concrete hollow-block walls and decorative tiles.	Morante et al, 1974	5-15
North-Eastern Luzon Earthquake	22/11/1981	Mw 6.4 Ms6.5 MMI 7	MMI 8		Public – In Vigan (MMI V), minor cracks were observed at Vigan Synoptic Weather Station. The building, made of hollow blocks, suffered cracks in its wall facing south.	Ho et al, 1985	
Eastern Bicol Earthquake	11/1/1982	Mw 7.1 MMI 7	MMI 8	6	Residential – In Calapan (MMI IV) Sand Roxas (MMI IV) 6, cracks in walls made of hollow blocks were observed in some houses. Commercial – Not applicable	Ho et al, 1985	15-35
Sogod Southern Leyte Earthquake	11/2/1998	Ms 5.9, Ms 5.5 MMI 6	Not applicable		Residential – In Barangay Libas (MMI IV)6, the earthquake caused minor damages to residential buildings particularly masonry structures not properly reinforced.	Jorgio et al, 1998	
Masbate Earthquake	15/02/2003	Mw 6.2? MMI 7	MMI 8	7	Residential – In Masbate (MMI VI), many houses were damaged by the foreshock that was manifested as visible cracks on walls and floors. Based on ocular investigation, many concrete or semi-concrete houses in Palanas (MMI VII) and Dimasalang (MMI VII) suffered severe damages 7.	PHIVOLCS, 2003	30-70
Bohol Earthquake	8/2/1990	Mw 6.8 Rossi-Forel Intensity 8	MMI 7		Most of the damaged buildings were either old/poorly-built or lacked the necessary reinforcements to resist strong ground shaking. About 3,000 units of houses, buildings and churches were affected and damaged where a total of 182 were totally collapsed including two historical churches built centuries ago.	PHIVOLCS, 2003	
Eastern Luzon Earthquake	7/4/1970	Ms 9.0 M7.0 MMI 9	Not applicable	8	Residential – Many buildings located in Baler (MMI IX) 8 and Casiguran (MMI VII) 8, with unknown structural systems and close to the epicentre of the earthquake, had suffered severe or partial damage but were safe for occupancy. Some of these buildings required general repair. It is not clear for buildings collapsed but at least 10 buildings were condemned.	Skinner et al, 1970	60-100
Eastern Luzon Earthquake	18/03/1977	Mw 7.2 M 7.0 MMI 8	MMI 8		Residential – In Palanan (MMI VIII), it was believed that at least a dozen buildings with unknown structural systems were destroyed. <sup>8</sup>	Ho et al, 1985	

表 6-21 CHB/MWS 型式の脆弱性カーブに適用した被害率

MMI	5	6	7	8
被害率	10	25	50	80

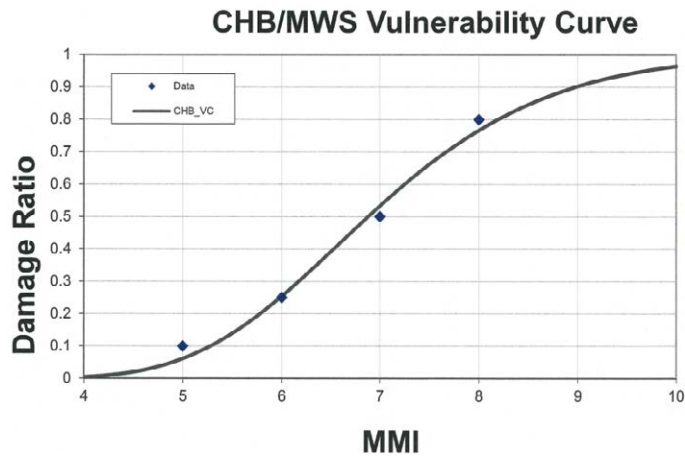


図 6-11 CHB/MWS 型式に対する経験に基づく脆弱性カーブ

#### 6.1.3.4. 損傷度カーブの作成

必要に応じて脆弱性カーブから損傷度カーブを作成できる。6.1.2.5 節で述べたのと同様の手続きで ELOSS を用いてパラメーターを取得した。

## 6.2 結果

### 6.2.1 計算による手法

脆弱性カーブのパラメーターは計算により推定した損傷確率マトリックスが対数正規累積分布関数に合うように調整して決定したが、認識論的不確実性は含まなかった。下表は計算により指定した表面最大加速度 (PGA) ごとのパラメーター概略値である。

表 6-22 計算によって推定した脆弱性カーブのパラメーター概略値

Bldg. Type Code (for EQ)	COMPUTATIONAL Fragility Curve Parameters in PGA (without epistemic uncertainty)																							
	Pre-code (~1972)								Low-code (1972-1992)								High-code (1992-)							
	Slight		Moderate		Extensive		Complete		Slight		Moderate		Extensive		Complete		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta
CWS-L	-	-	-	-	-	-	-	-	0.19	0.54	0.23	0.63	0.37	0.68	0.82	0.91	-	-	-	-	-	-	-	-
C1-L	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.80	0.1	0.70	0.22	0.75	0.4	0.45	-	-	-	-	-	-	-	-
C1-M	0.15	0.21	0.17	0.19	0.25	0.17	0.50	0.25	0.15	0.21	0.17	0.19	0.25	0.17	0.50	0.25	0.15	0.19	0.17	0.22	0.28	0.27	0.57	0.20
C4-M	0.4	0.29	0.53	0.30	0.64	0.33	0.84	0.27	0.49	0.26	0.52	0.27	0.64	0.28	0.91	0.35	0.53	0.20	0.54	0.21	0.63	0.21	0.95	0.37
C4-H	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PC2-L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC2-M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S1-L	0.26	0.39	0.31	0.42	0.43	0.39	0.61	0.25	0.28	0.49	0.35	0.42	0.51	0.39	0.71	0.23	0.22	0.24	0.28	0.26	0.41	0.31	0.61	0.22
S1-M	0.13	0.26	0.22	0.17	0.47	0.29	0.66	0.22	0.13	0.13	0.24	0.14	0.52	0.19	0.69	0.16	0.19	0.23	0.28	0.14	0.498	0.18	0.786	0.22
S3-L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S4-M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

パラメーター概略値の推定は計算によって損傷度カーブを推定することができた建物種別や建築年代に対して行った。これにより、一つの手法による推定結果間の整合性を確認した。Low-code の建物の損傷度カーブについては、異なる建物種別にわたる整合性を認めることができたが、Pre-code と High-code については整合性がなかった。よって、本プロジェクトでは Low-code の損傷度カーブに対してのみ報告することとした。さらに、

曲線の勾配に影響する不確実性に関するパラメーターが、HAZUSによる報告（損傷度カーブの標準偏差として建物種別に関わらず単一の値（0.64）を適用している）に比べて幅広かった。そこで一つの建設材料に対して一つの不確実性パラメーターを適用することとし、カーブの均一性を確保するとともに、カーブが不合理に交差することを避けることとした。全体の不確実性は偶然の不確実性と認識論的不確実性の二乗和平方根として計算した。偶然による不確実性は損傷状態、建築年代、建物種別によって異なるため、Low-codeの損傷度カーブのみに基づいて一つの建築材料に対する偶然による不確実性の平均値を算定した。認識論的不確実性の推定も同様に行った。平均値は下表に示すとおりであり、最終的な損傷度カーブは以降の図に示した。

表 6-23 最終的な損傷度カーブに適用した全体の不確実性

建築材料	偶然による不確実性の平均	認識論的不確実性の平均	全体の不確実性
コンクリート	0.5	0.8	0.94
鋼	0.3	0.7	0.76

表 6-24 最終的な対数正規累積分布関数のパラメーター

Bldg. Type Code (for EQ)	COMPUTATIONAL Fragility Curve Parameters in PGA (with Epistemic Uncertainty)																							
	Pre-code (~1972)								Low-code (1972-1992)								High-code (1992~)							
	Slight		Moderate		Extensive		Complete		Slight		Moderate		Extensive		Complete		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta
CWS-L	←								0.19	0.94	0.23	0.94	0.37	0.94	0.82	0.94	→							
C1-L	←								0.06	0.94	0.1	0.94	0.22	0.94	0.4	0.94	→							
C1-M	0.15	0.94	0.17	0.94	0.26	0.94	0.50	0.94	0.15	0.94	0.17	0.94	0.26	0.94	0.50	0.94	0.13	0.94	0.15	0.94	0.26	0.94	0.52	0.94
C4-M	0.4	0.94	0.53	0.94	0.64	0.94	0.84	0.94	0.49	0.94	0.52	0.94	0.64	0.94	0.91	0.94	0.53	0.94	0.54	0.94	0.63	0.94	0.95	0.94
C4-H	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PC2-L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC2-M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S1-L	0.26	0.76	0.31	0.76	0.43	0.76	0.61	0.76	0.28	0.76	0.35	0.76	0.51	0.76	0.71	0.76	0.22	0.76	0.28	0.76	0.41	0.76	0.61	0.76
S1-M	0.13	0.76	0.22	0.76	0.47	0.76	0.66	0.76	0.13	0.76	0.24	0.76	0.52	0.76	0.69	0.76	0.19	0.76	0.28	0.76	0.498	0.76	0.786	0.76
S3-L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S4-M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

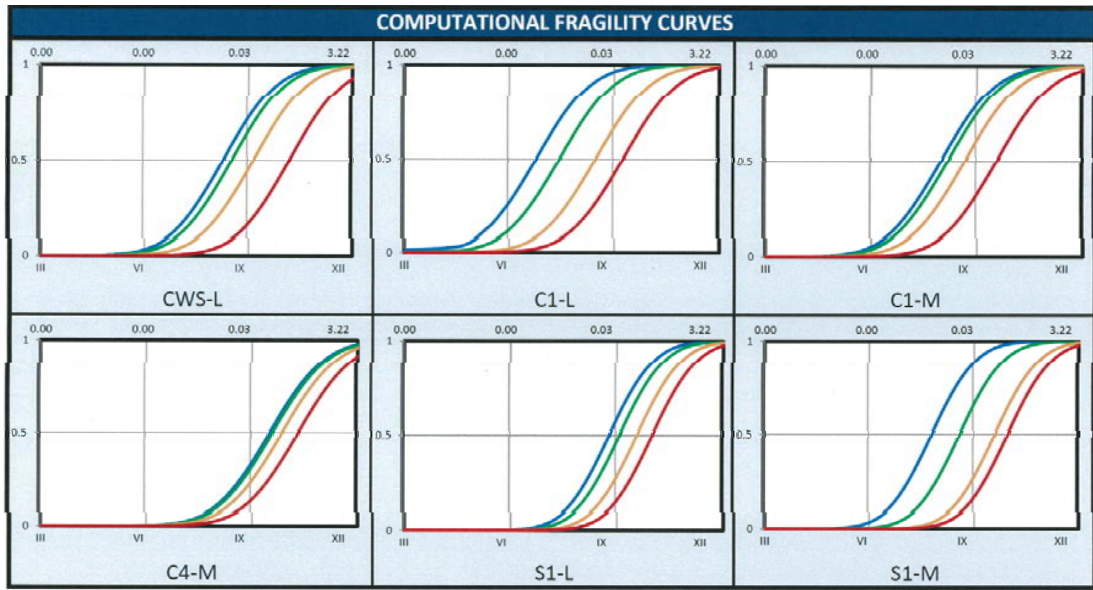


図 6-12 最終的に提案した損傷度カーブ(計算による手法)

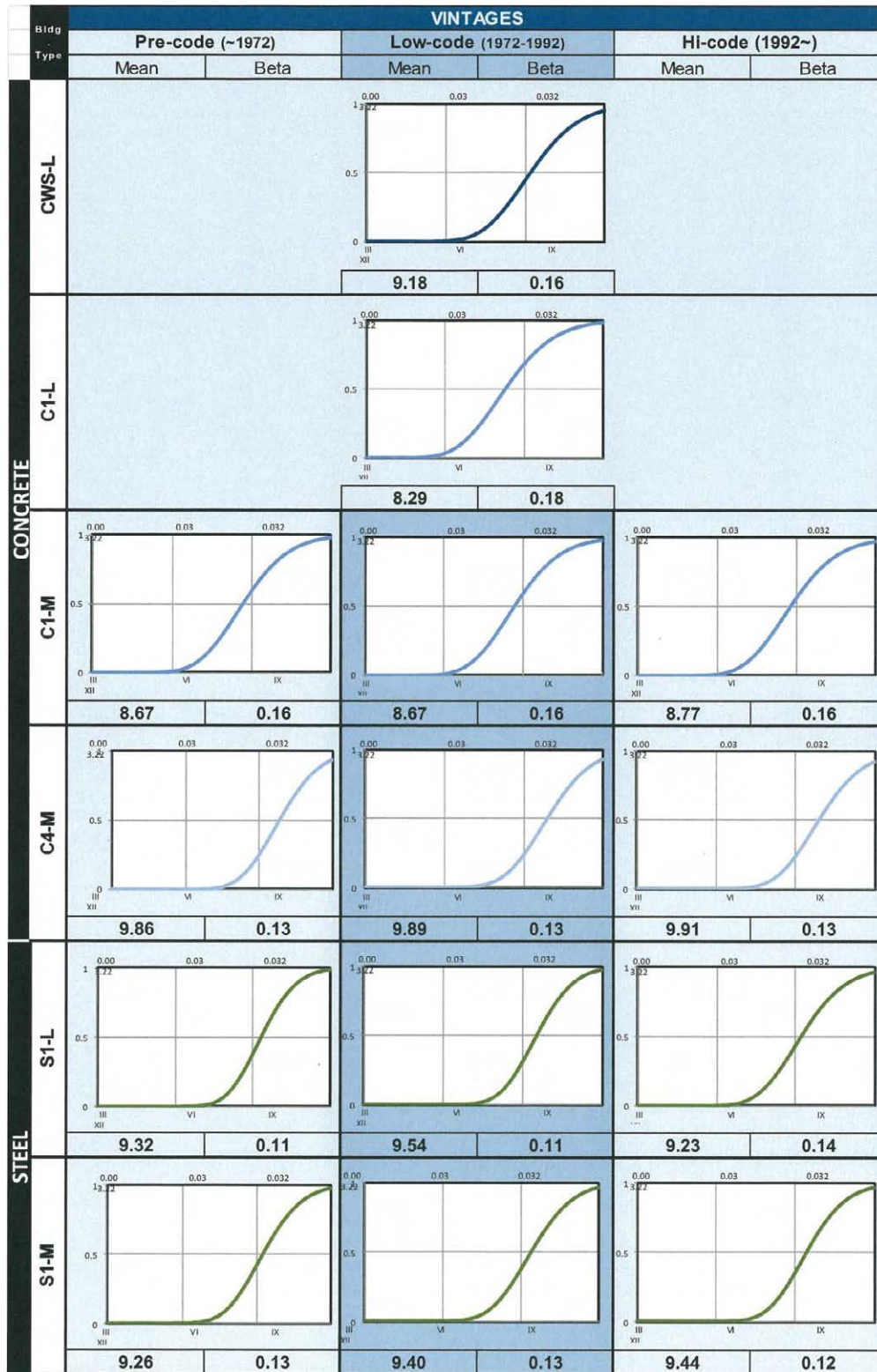


図 6-13 計算による手法で推定した地震に対する脆弱性カーブ

表 6-25 脆弱性カーブの対数正規分布のパラメーター(計算による手法)

Bldg. Type	COMPUTATIONAL VC Parameters in MMI					
	Pre-code (~1972)		Low-code (1972-1992)		Hi-code (1992~)	
	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta
CWS-L	9.18		0.16			
C1-L	8.29		0.18			
C1-M	8.67	0.16	8.67	0.16	8.77	0.16
C4-M	9.86	0.13	9.89	0.13	9.91	0.13
S1-L	9.32	0.11	9.54	0.11	9.23	0.14
S1-M	9.26	0.13	9.4	0.13	9.44	0.12

### 6.2.2 思考的手法

思考的手法による脆弱性カーブの対数正規分布のパラメーターは下表に示すとおりである。

表 6-26 脆弱性カーブの対数正規分布のパラメーター(思考的手法)

Building Group	Building Type	HEURISTIC VC Parameters in MMI					
		Pre-1972		1972-1992		Post-1992	
		Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta
WOOD	W1-L	8.15		0.25			
	W3-L	8.11		0.24			
	N-L	7.62		0.29			
MASONRY	MWS-L	7.74		0.26			
	CHB-L	7.74		0.26			
	URA-L			-			
	URM-L	7.72		0.25			
CONCRETE	CWS-L	7.75		0.25			
	C1-L	8.4		0.22			
	C1-M	-		-		8.33	0.23
	C4-M	8.03	0.26	8.43	0.24	8.89	0.23
	C4-H	7.88	0.25	8.36	0.23	8.64	0.21
	PC2-L	-	-	8.72	0.21	8.72	0.21
	PC2-M	-	-	8.22	0.25	8.22	0.25
STEEL	S1-L	8.28	0.23	8.36	0.23	8.83	0.19
	S1-M	8.15	0.23	8.52	0.22	8.75	0.2
	S3-L	-	-	9	0.16	9	0.16
	S4-M	-	-	-	-	8.9	0.17

詳細な計算過程は Appendix を参照のこと。

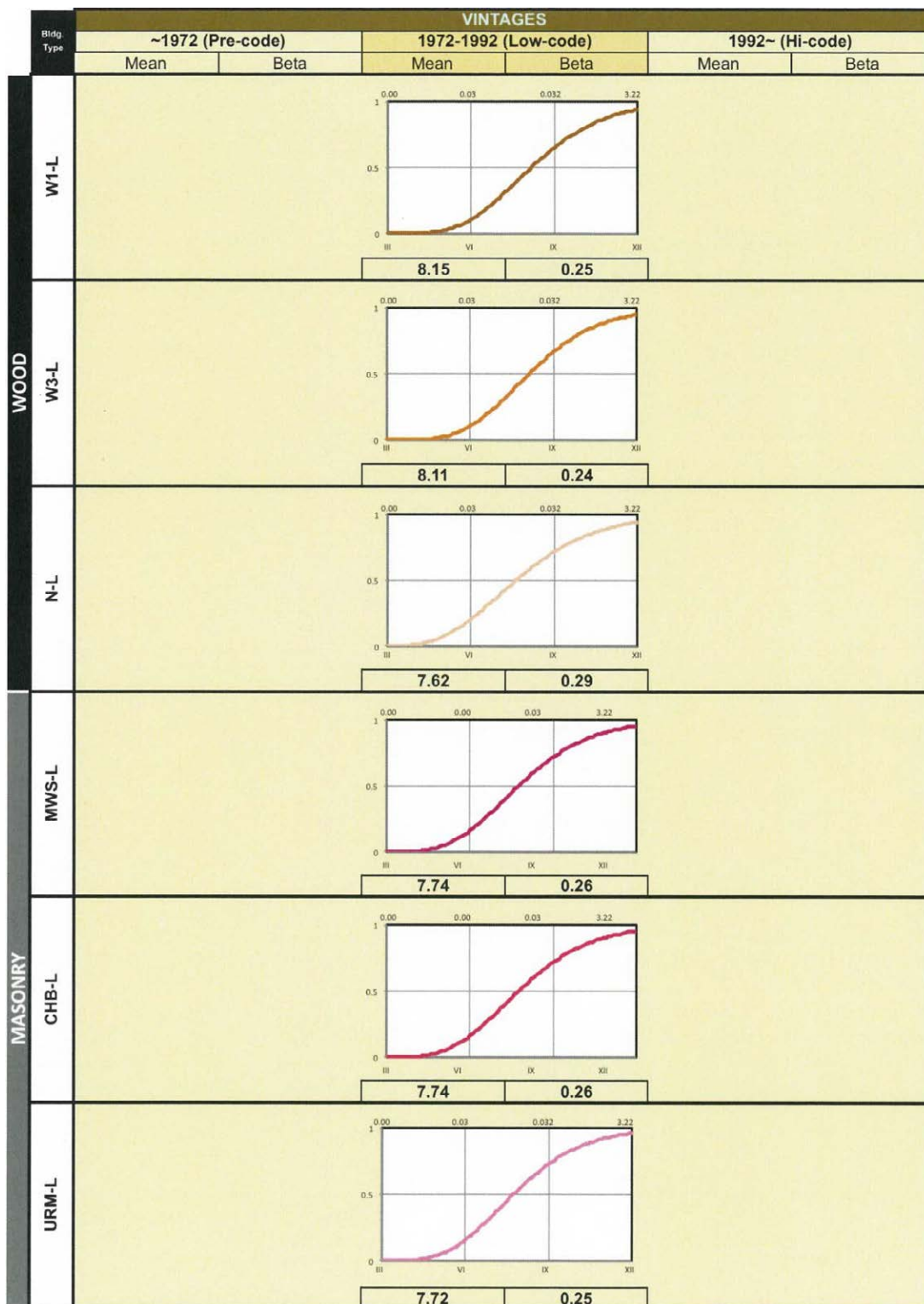


図 6-14 木造および石積み工に対する地震脆弱性カーブ(思考的手法)

Ridge Type	VINTAGES					
	~1972 (Pre-code)		1972-1992 (Low-code)		1992~ (Hi-code)	
	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta
CONCRETE	CWS-L					
	C1-L					
	C1-M					
	C4-M					
	C4-H					
	PC2-L	-				
	PC2-M	-				

図 6-15 コンクリート造に対する地震脆弱性カーブ(思考的手法)



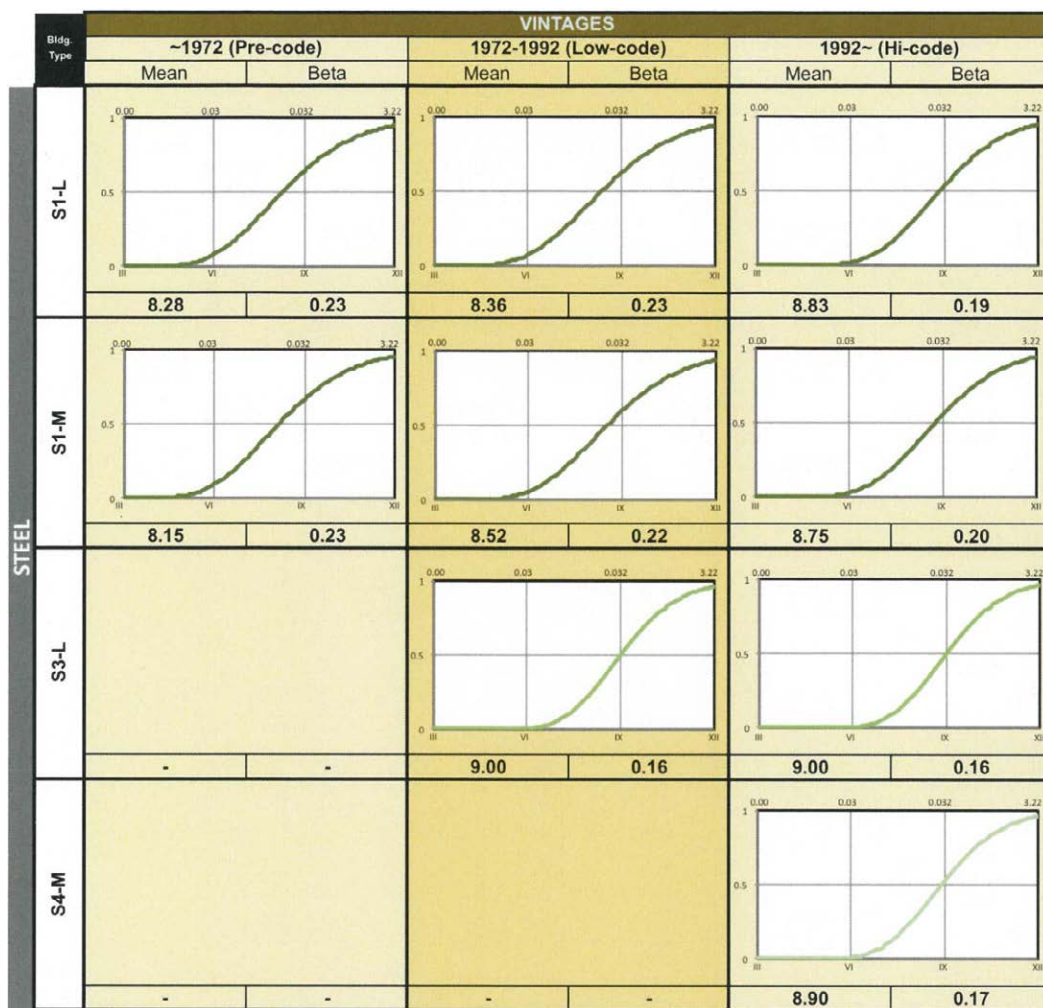


図 6-16 鋼構造に対する地震脆弱性カーブ(思考的手法)

### 6.2.3 経験的手法

6.1.3.1 節で述べた手法によって脆弱性カーブを作成する際、建物種別 W1-L、CHB-L および URA-L については近年および過去の地震による被害に関する有意なデータを得ることができた。被災した教会に関する文献記述その他の検証から、データの無い建物種別 URM に対しても推定を行った。その他の種別すなわちコンクリートおよび鋼構造に対してはデータの欠如を理由に脆弱性カーブを作成しなかった。

以下に列挙したのは、PHIVOLCS (2012)に指摘された全体的な見解である。

- 住宅以外の建物に対する調査は大きな被害を受けたものに集中する傾向がある。
- 被害の主要因はしばしば断層の動きや液状化といった地質工学や基礎の条件あるいは、津波との複合的なものに求められることがある。そのため、被害のうち振動によるものだけを抽出するのは困難である。
- 被害調査結果では建物の無被害と被害の比率が与えられることがある。この種の情報では基礎となる現地調査で十分なサンプル数が確保されているか確認できない

ため統計的に有意な情報とはならない。建築種別ごとの露出（エクスポージャ）を把握できない。

- 住宅以外の建物に対する調査はより大きな建物、より大きなコミュニティに集中する傾向がある。
- 揺れの大きさの評価はしばしば、粗雑に建てられた建物への甚大な被害を見聞きすることによるバイアスがかかっている。
- 建物の年齢（年代）に関する情報は重要だが一般に入手困難である。

結果として採用した思考的方法による脆弱性カーブのパラメーターを表 6.27 に示すとともにカーブを図 6.17 に示す。

表 6-27 地震脆弱性カーブの対数正規分布のパラメーター（経験的方法）

建物種別	脆弱性カーブのパラメーター	
	平均	β値
W1-L	6.92	0.13
MWS-L	7.09	0.21
CHB-L	7.09	0.21
URA-L	7.56	0.26
URM-L	-	-

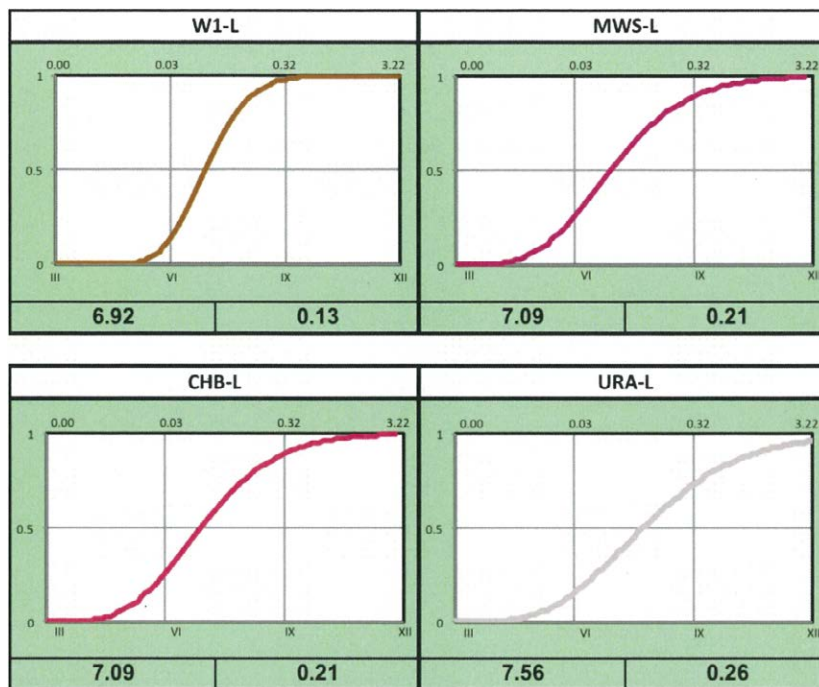


図 6-17 経験的手法による地震脆弱性カーブ（W1-L、MWS-L、CHB-L、URA-L）

### 6.3 国際会議での議論

本プロジェクトから2本の論文が作成され、2013年3月1日～2日に東京工業大学で開催された都市地震工学の第10回国際会議においてメンバー2人がプレゼンテーションした。これは世界各地の研究者からフィードバックや提案を受けるよい機会であった。

論文「Development of Fragility Curves of Mid-Rise Reinforced Concrete Moment-Resisting Frame Structure in the Greater Metro Manila Area, Philippines」では、建物種別C1-Mに対する計算による損傷度カーブの作成手法や結果が議論された。議論の中で2つの点が指摘された。

1. 複数のデマンドスペクトルを包絡するのではなく、個々のデマンドスペクトルから最大応答を特定することはできるのかという質問があった。このプロジェクトは大マニラ首都圏域の全般的なリスクの評価が目的であることから、地域ごとに異なる地震動を包絡したデマンドスペクトルを使用すべきと回答した。
2. コンクリートに対する認識論的不確実性の決定手法に対する質問があった。この値は計算手法の確定前に実施した調査結果に基づいて決められたものであると説明した。

論文「Development of Heuristic Seismic Vulnerability Curves of Key Building Types in the Philippines」では、以下のような議論が展開された。

回答した専門家の経験について。聴衆の一人は、専門家に建物被害を評価するための十分な素養があるかを質問した。質問者は「専門家は強い地震後の被害調査の経験はあるのか」であった。この質問に対しては、専門家の経験年数が1年から35年であるとの事実をもって回答した。6.1.2節で述べたとおり、重みを導入しているが、提案した手法には若い専門家の有用な意見も反映されている。

## 7 議論および提言

### 7.1 強風に対する脆弱性カーブ

以降の図は本プロジェクトで特定した各建物種別における脆弱性カーブを示したものである。建物種別によっては最大3手法（計算による手法、思考的手法、経験的手法）による脆弱性カーブを示している。縦軸は被害率であり、建物の再調達価額に占める復旧費の割合として定義した。横軸は3秒平均風速である。

3つの脆弱性カーブは比較的似ているかもしくは大きく異なっている。大きな違いは、経験的脆弱性カーブ作成時の被害推定の誤差、計算による手法を適用した際の流体力学上の仮定による累積誤差、思考的手法の限界、極端なサンプルによる影響を抑制するに十分な数のデータが得られなかったこと、思考的手法に参加した専門家の経験不足など、様々な要因から発生したものと考えられる。したがって、使用に適した脆弱性カーブを選定するため、研究者の経験と判断に基づく最終的な検討がなされた。

経験的手法によるカーブと計算によるカーブの違いはC1-L、CHB-L、CWS-LおよびMWS-L型式のノンエンジニアド建築に帰することができる。STRIDEチームのデータベースによると、このような建物の多くは相当な被害を受けており、設計基準に従わない伝統的な建物の多い地域で見られる。

送電塔に対する計算による脆弱性カーブはICEの研究者の指導の下でフィリピン送電公社(National Grid Corporation of the Philippines; NGCP)のエンジニアにより作成された。送電塔に対する思考的手法による脆弱性カーブの原型はLopezら(2006)によりメキシコで作成されたものとした。

看板の脆弱性カーブでは経験的手法と計算によるもので大きな差異が生じた。これは、経験的手法で集めた被害データが、(防水シートからなる)広告表示面を台風時に折りたたむという対策が導入される前のものだったことに起因する。その結果、多くの看板が低風速で倒壊することとなった。現在は台風接近前に広告表示面を折りたたむという対策が浸透しており、看板の倒壊数は著しく減少した。

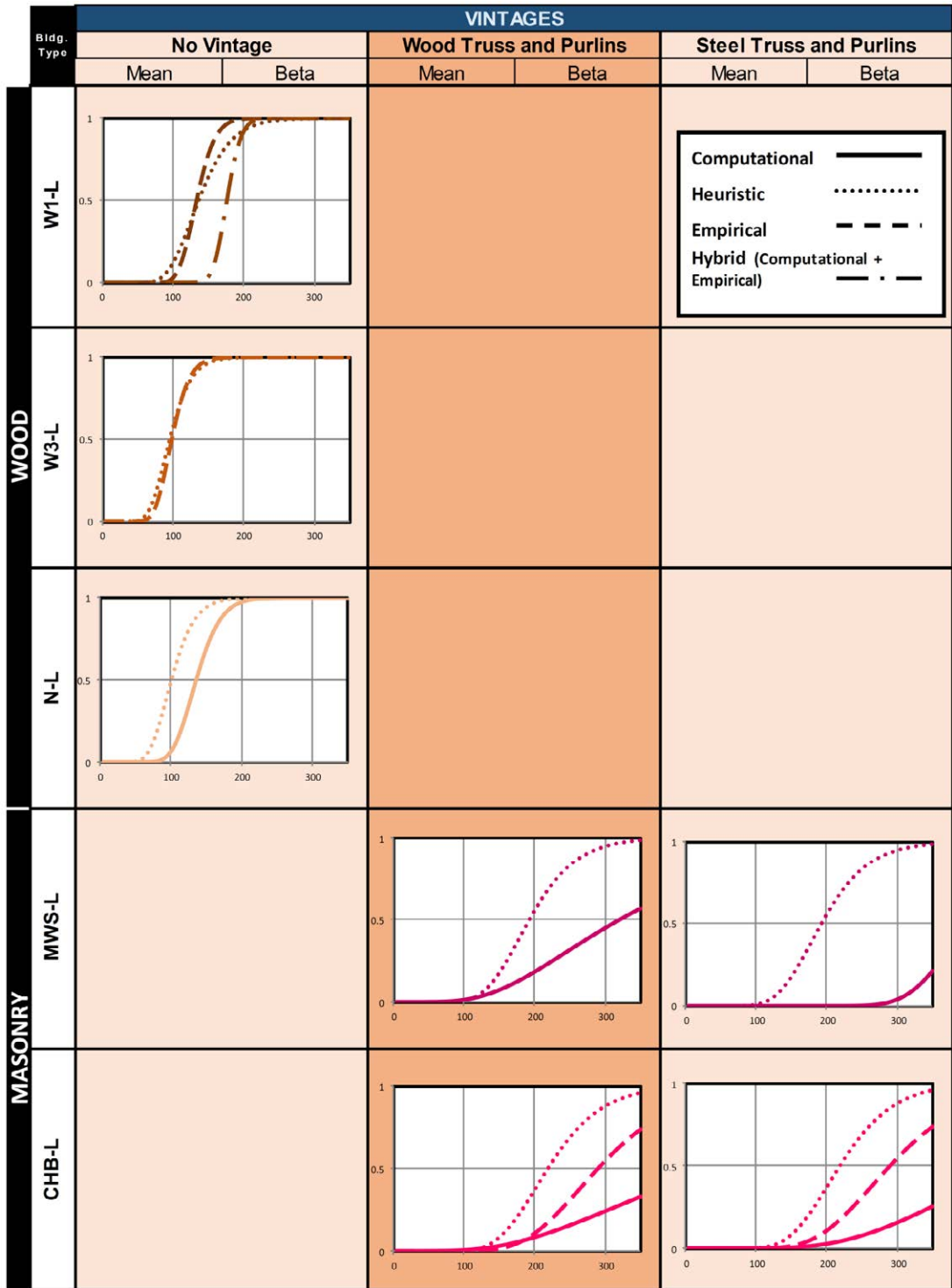


図 7-1 強風脆弱性カーブの手法による比較(木造および石積み工)

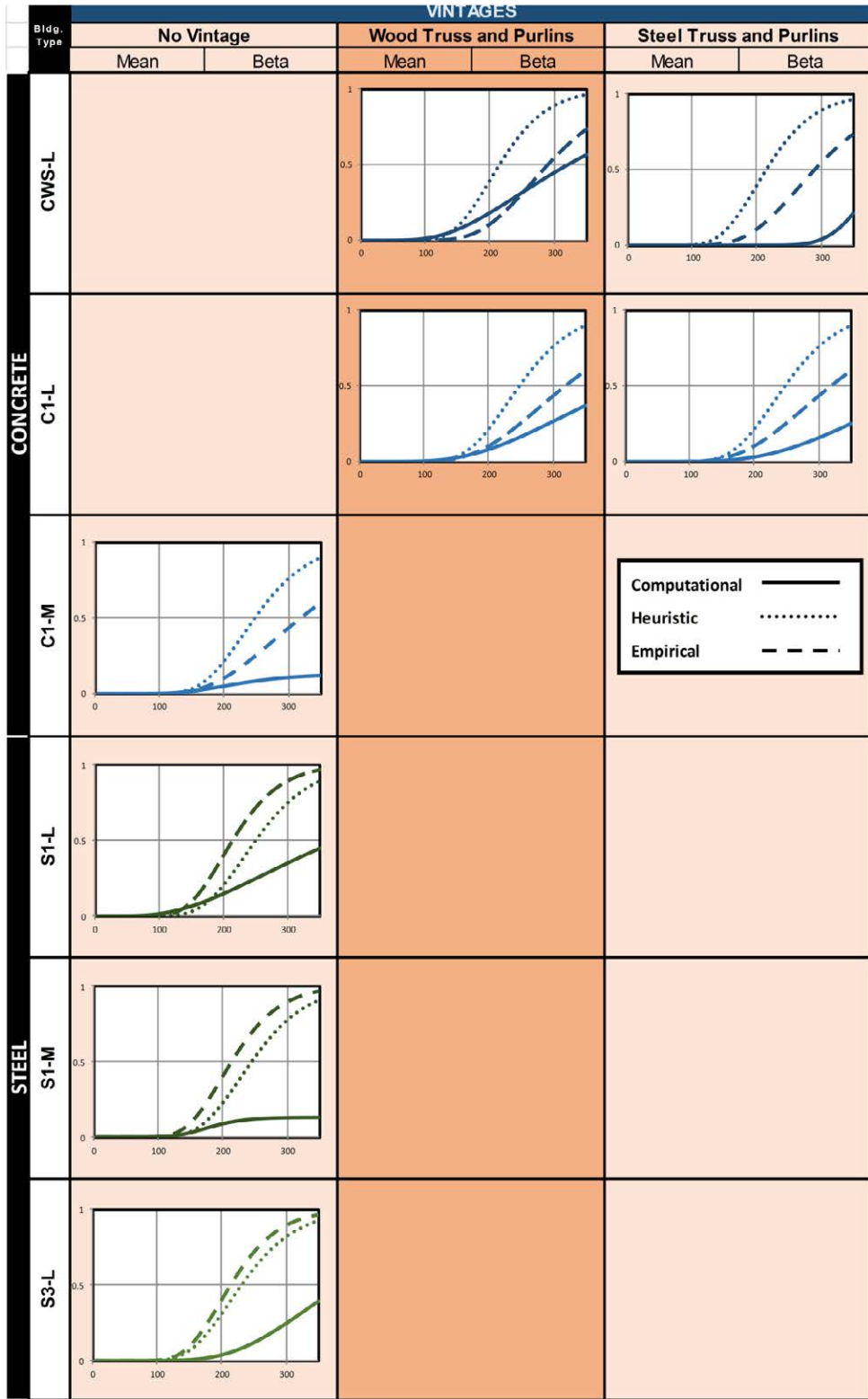


図 7-2 強風脆弱性カーブの手法による比較(コンクリート造および鋼構造)

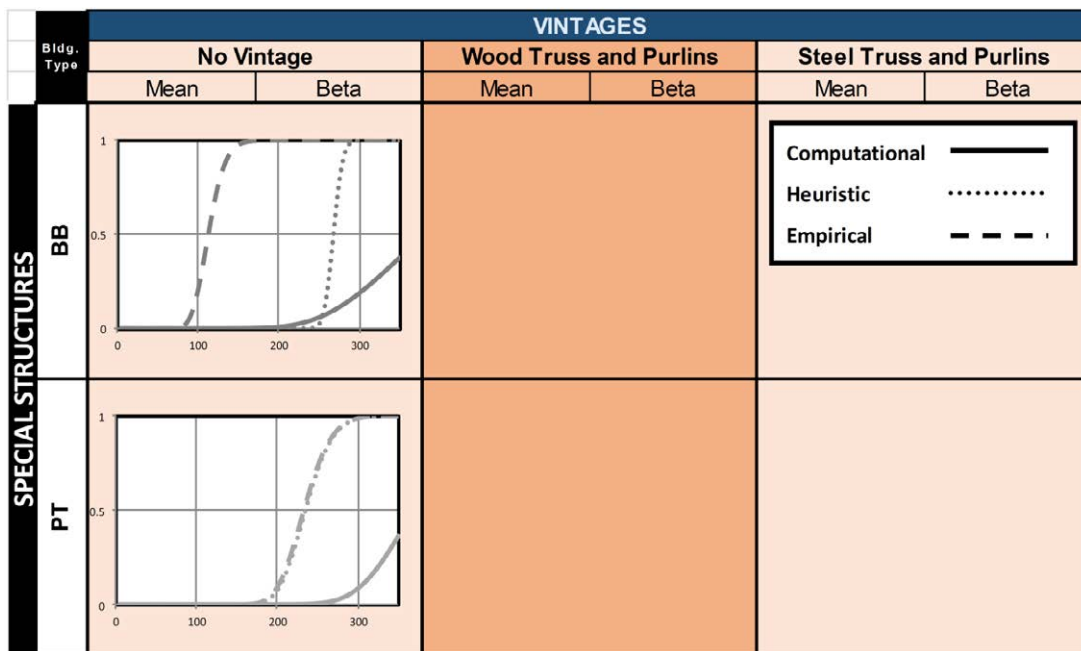


図 7-3 強風脆弱性カーブの手法による比較(特殊な構造)

本プロジェクトで特定した各建物種別に対し、初めて（第1世代）の強風脆弱性カーブとして以下を推奨する。推奨カーブは最大3種類のものから、風荷重による被害に対する経験に照らして判断し選定した。

#### 木造

W1-L に対する推奨カーブは計算によるものと過去のデータに基づく経験的手法を組み合わせたものである。低被害率の部分には計算によるカーブを適用し、高被害率の部分には経験的手法によるカーブを適用している。

W3-L については思考的手法により作成した脆弱性カーブを推奨する。

N-L の推奨カーブは計算によるものを基本とし、これを「N-L は W1-L よりも風荷重に対して脆弱である」という予想に合うように最終調整したものである。

MWS-L-W と CWS-L-W については計算によって作成した同一のカーブを推奨する。思考的手法では強風時にコンクリートや石積みの部分が破壊されることになっており、被害率が非現実的で過大評価されていると判断した。同様に、MWS-L-S と CWS-L-S の脆弱性カーブも同一で、計算による手法を採用した。

CHB-L-W と CHB-L-S の推奨カーブは計算によるものである。経験的手法や思考的手法によるカーブも作成したが、これらによると強風時に CHB（コンクリート中空ブロック）壁も被害を受けるという結果となり、被害率が過大評価されていると判断した。

#### 鉄筋コンクリート

C1-L-W と C1-L-S について、計算による脆弱性カーブを推奨する。経験的手法と思考的手法によるカーブも作成したが、これらは強風時の被害率を過大評価していると判断

した。

C1-M の推奨カーブも計算によるものである。ここでも経験的手法、思考的手法双方のカーブは強風時の被害率を過大評価していた。とりわけ、中層建物の建築基準が低層建物に比べてより高度で厳格であるという点が反映できなかった。

#### 鋼構造

S1-L、S1-M、S3-L の推奨カーブは計算により作成したものである。コンクリート構造の時と同様、経験的手法や思考的手法では強風時の被害率が過大評価されていると判断した。

#### 特殊な構造

BB に対する脆弱性カーブとしては、計算によるものを推奨する。台風襲来前に広告表示部分を折りたたむという対策により、倒壊する看板数は減少した。したがって、この対策が浸透する前のデータに基づく経験的手法は現状を表現していないとして採用しなかった。

最後に、送電塔（PT）の脆弱性カーブとして、NGCP（フィリピン送電公社）が作成したものを推奨する。



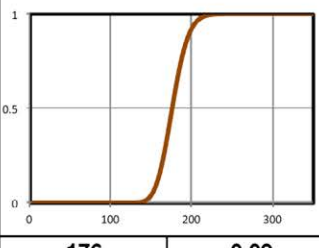
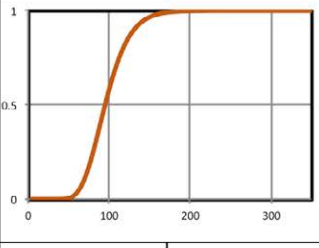
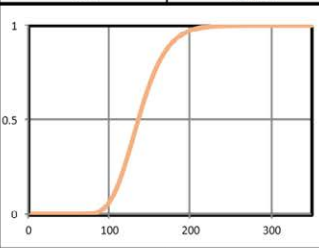
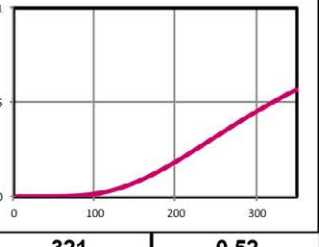
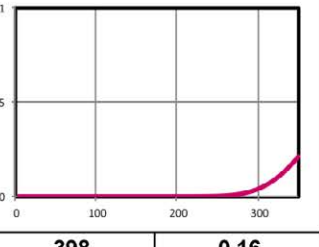
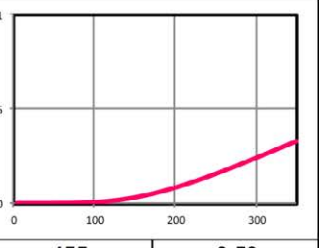
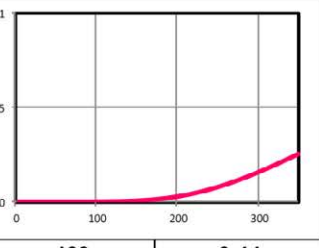
Bldg. Type	VINTAGES						
	No Vintage		Wood (~1992)		Steel (1992~)		
	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	
WOOD	W1-L						
		176	0.09				
	W3-L						
		95	0.25				
	N-L						
		136	0.20				
MASONRY	MWS-L						
			321	0.52	398	0.16	
	CHB-L						
			455	0.59	469	0.44	

図 7-4 提案する強風脆弱性カーブ(木造および石積み工)

Bldg. Type	VINTAGES					
	No Vintage		Wood (~1992)		Steel (1992~)	
	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta
CONCRETE	CWS-L					
				321	0.52	398
	C1-L					
			416	0.52	477	0.46
C1-M			*The curve using the given parameters was scaled by 0.13			
	221*	0.33*				
STEEL	S1-L					
		379	0.61			
	S1-M			*The curve using the given parameters was scaled by 0.13		
	180*	0.24*				
S3-L						
	387	0.37				

図 7-5 提案する強風脆弱性カーブ(コンクリート造および鋼構造)

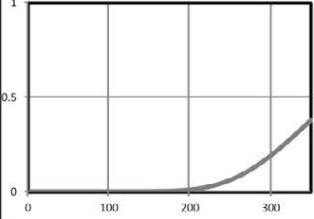
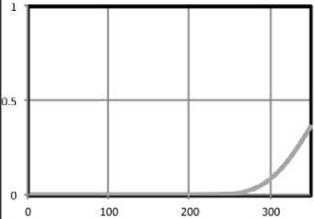
Bldg. Type		VINTAGES					
		No Vintage		Wood (~1992)		Steel (1992~)	
		Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta
SPECIAL STRUCTURES	BB						
		381	0.27				
	PT						
		369	0.15				

図 7-6 提案する強風脆弱性カーブ(特殊な構造)

## 7.2 洪水に対する脆弱性カーブ

洪水脆弱性カーブの作成にあたっては、思考的手法と計算による手法を適用した。各建物種別に対し、思考的手法からは 13 の脆弱性カーブが生成され、計算による手法からは 15 の脆弱性カーブが生成された。実際に使用するにあたり、15 の建物種別に対して思考的あるいは計算による手法から一つのカーブを提案することとした。

推奨カーブの選定プロセスは、実際の洪水被害をより良く反映する手法の比較検討や信頼度の分析などを含んだ。

計算による手法では各建物種別に対する被害インデックスをシステムティックに評価した。適用した手法は被害インデックスに大きく影響される。被害インデックスは建物再調達価額に占める復旧費の比率と定義される。そのため、この手法ではまず想定した浸水深における構造部材への被害を可視化し、同被害からの復旧にかかる費用を見積もった。

5.1.1 節で述べたとおり、計算による手法では ICE 洪水脆弱性計算ツールを活用した。同ツールは 1) 建物モデルのデータベース作成、2) 浸水深ごとの被害インデックスの計算、および 3) 脆弱性カーブ生成の 3 コンポーネントからなる。

建物モデルのデータベース生成プロセスを下図に示す。基本的にこのプロセスは各建物モデルの幾何的特徴や対応する建物属性を可視化するためのものである。

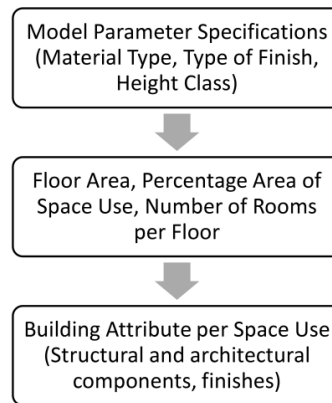


図 7-7 洪水脆弱性解析のためのモデルデータベースの生成

浸水深ごとの被害インデックスの計算には被害ごとの復旧費用の見積りが必要である。5.1.1 節で述べたとおり、各要素の価格情報は国内事業者への調査やインターネットから入手した。復旧費用については浸水深ごとに被災した要素に対する典型的な復旧活動にかかる費用を想定して見積もった。この浸水深ごとの復旧費用にかかる情報は ICE 洪水脆弱性計算ツールに含めた。したがって、ツールへの残る入力情報は建物の幾何的特徴と属性である。

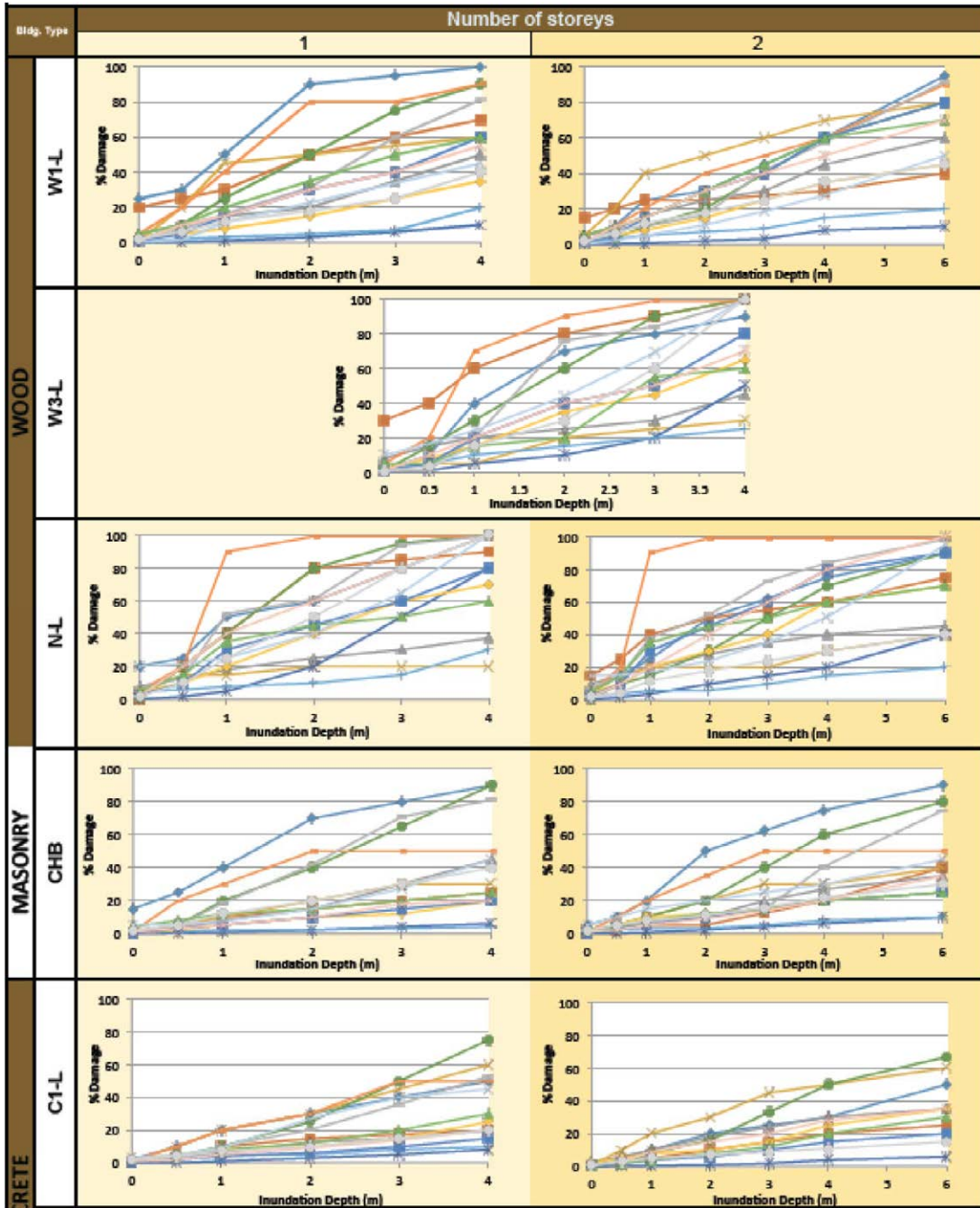
計算結果の信頼性と感度は以下の 2 点に大きな影響を受ける。すなわち、1) その建物属性の再調達価額調査結果と 2) 各建物構造種に対するモデルの幾何的特徴の変動性である。したがって、各建物種別のモデルはそれに属する大多数の建物を代表し得るものでなければならない。石積み造、コンクリート造、鋼構造については 7 から 8 のモデルを作成し、木造については 1 から 3 のモデルを作成した。

思考的手法では脆弱性カーブ作成のために「専門家」の見解を収集した。洪水専門家へ質問票 (Appendix B.11) を配布し、合計 21 人 (建設コンサルタント 10 人、建設技術者 6 人、学識経験者 5 人) から回答を得た。一部の建物種別にしか回答しない専門家もいたため、建物種別ごとの回答数は異なった。

5.1.2 節で述べたとおり、専門家の経験年数に応じた重み付けを行った。脆弱性カーブを得るため、異常な値を除外した上で中央値を算定して使用した。

思考的方法では脆弱性カーブ作成に中央値を使用した。しかしながら、中央値からだけでは関係の強さを確認することはできなかった。このことは特に各脆弱性カーブが広くばらついた場合 (図 7.8 参照) に顕著であった。同様に結果の感度は参加者の数と経験に依存した。つまり、経験豊富な専門家の参加が多いほど結果の信頼性は高いと言える。

図 7.9 および 7.10 に示したとおり、計算による石積み工、コンクリート造、鋼構造の脆弱性カーブについて、1 階建の建物の被害インデックスの値は 2 階建のそれよりも大きかった。しかしながら、思考的手法による脆弱性カーブではそうはならず、逆に 2 階建ての被害インデックスの方が高かった。



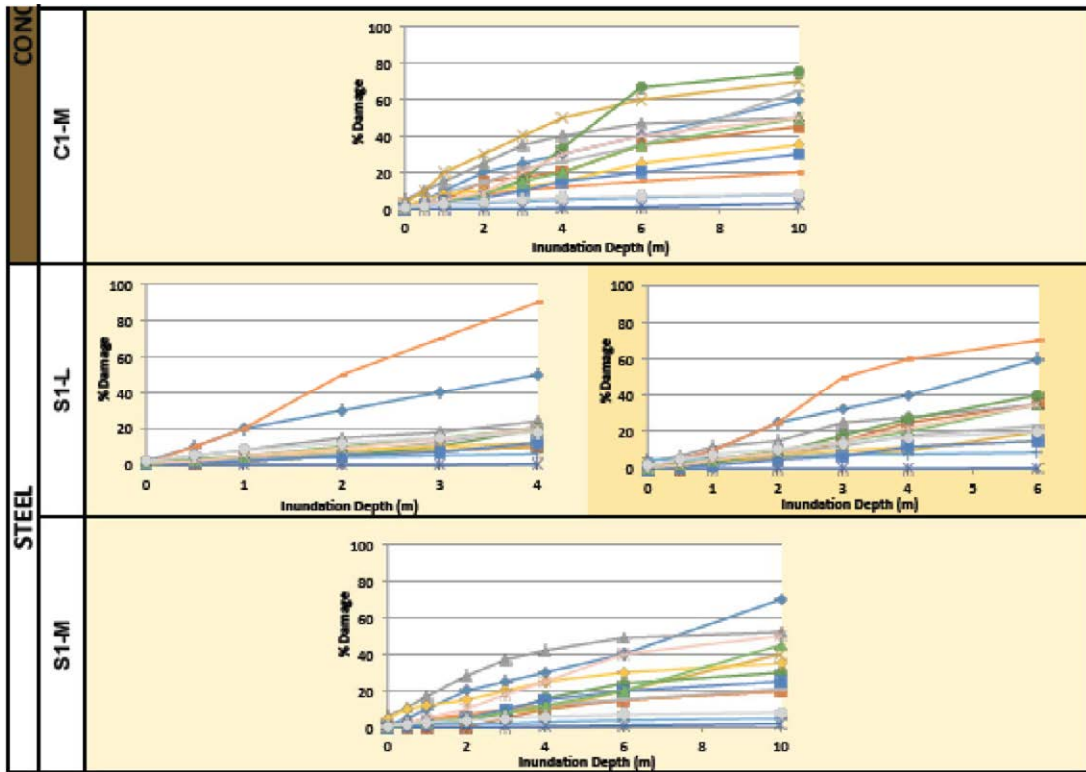


図 7-8 思考的手法で算定した個々の洪水脆弱性カーブ

図 7.8 は思考的手法による個々の洪水脆弱性カーブを示したものである。洪水脆弱性カーブは Y 軸に被害インデックスを X 軸に浸水深をプロットしたものである。図中、同じ建物種別の脆弱性カーブは同じ行に、同じ階数の建物の脆弱性カーブは同じ列に示している。異なる色で示した個々のカーブは 21 専門家の見解を個々に示したものである。グラフが一つだけ掲載されている建物種別は 1 階建てのみ検討したものである。

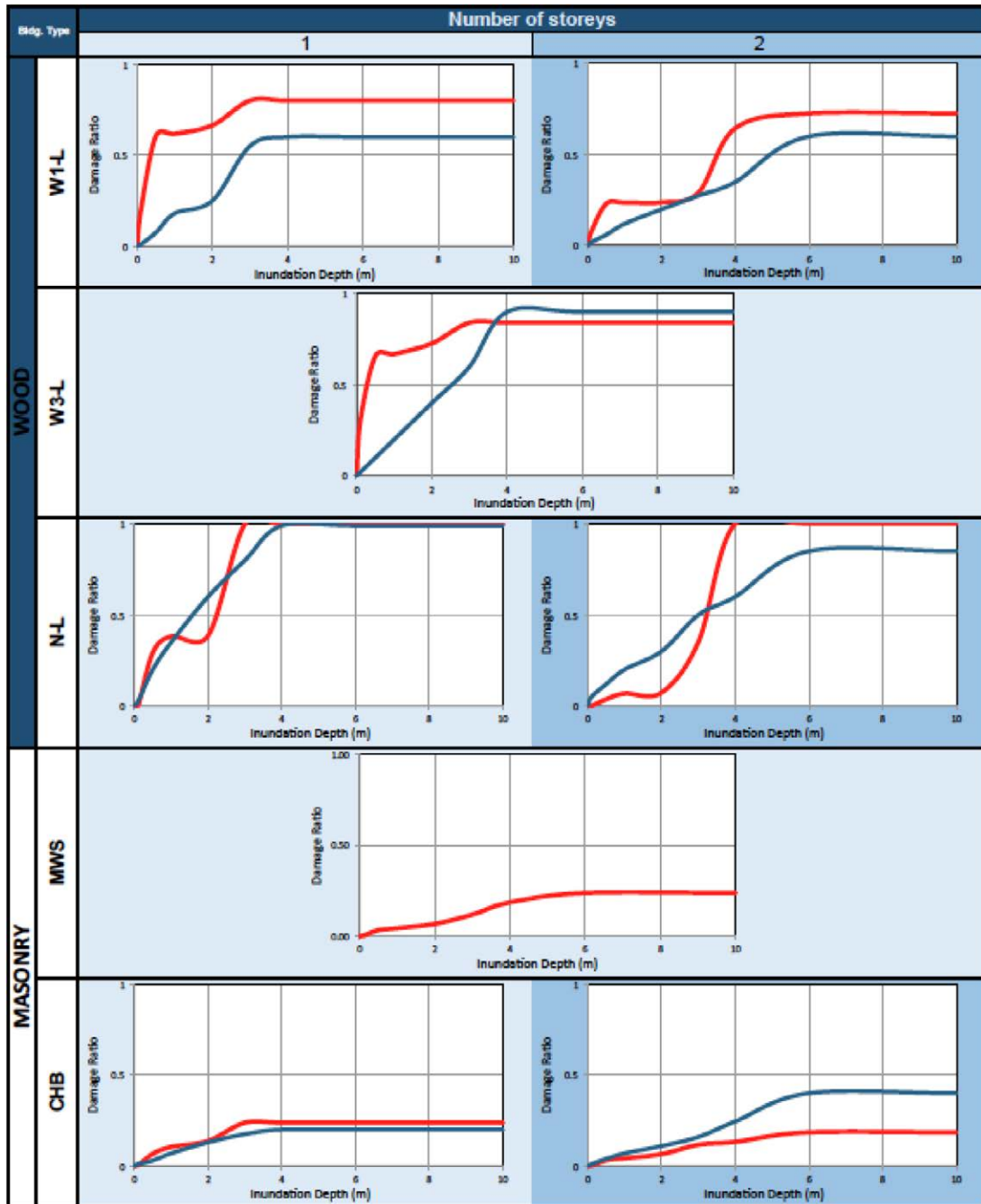


図 7-9 思考的手法(青色)と計算(赤色)による洪水脆弱性カーブ(木造・石積み工)

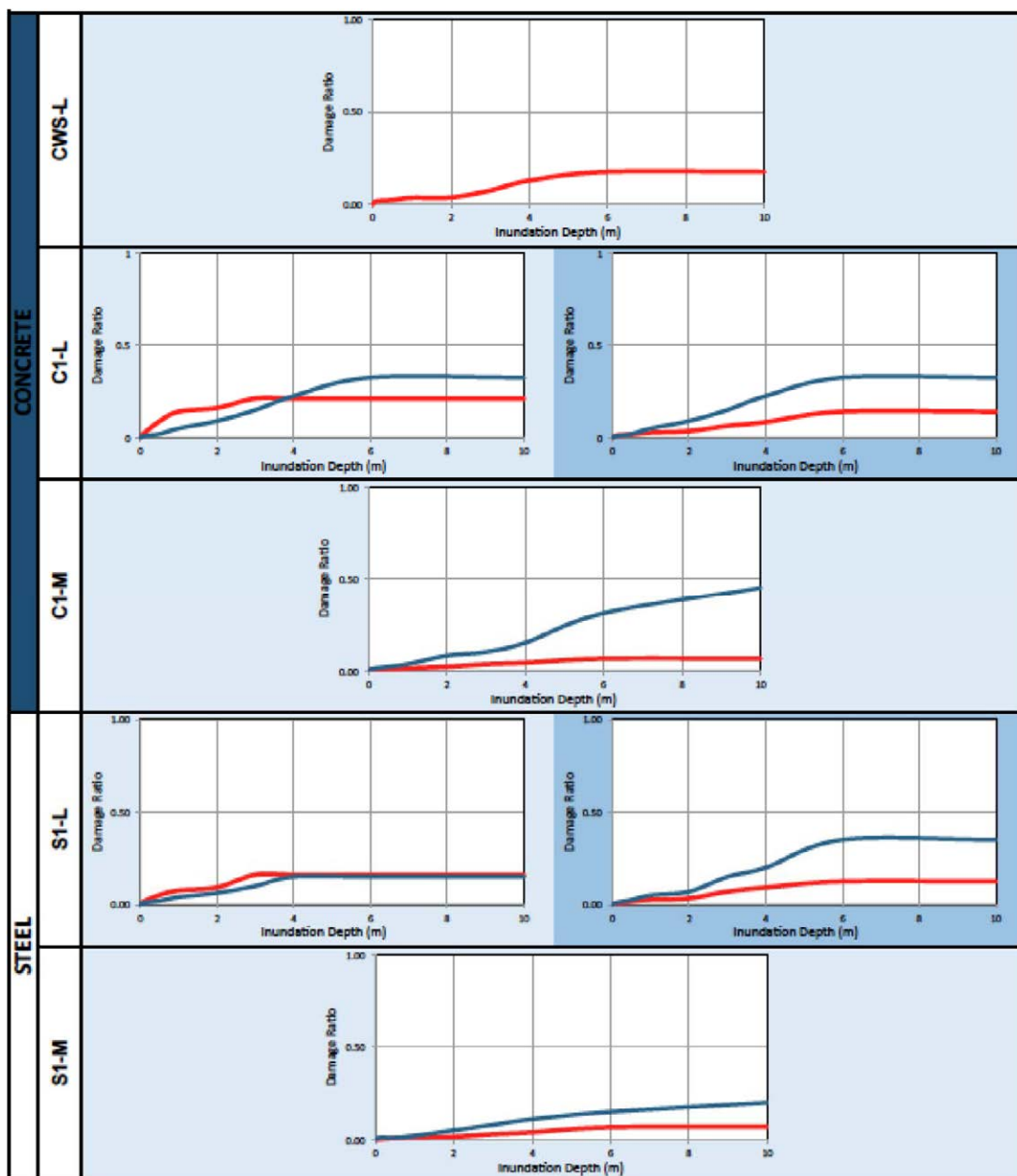


図 7-10 思考的手法(青色)と計算(赤色)による洪水脆弱性カーブ(コンクリート造・鋼構造)

図 7.9 および 7.10 は思考的手法（青色）と計算（赤色）による洪水脆弱性カーブを示したものである。洪水脆弱性カーブは Y 軸に被害インデックスを X 軸に浸水深をプロットしたものである。図中、同じ建物種別の脆弱性カーブは同じ行に、同じ階数の建物の脆弱性カーブは同じ列に示している。建物種別 MWS と CWS-L については計算による手法のみを用いた。グラフが一つだけ掲載されている建物種別は 1 階建てのみ検討したものである。

石積み工、コンクリート造、鋼構造建物については計算による手法の方がより現実に近いと考えられる。理論的には総建設費用はその階数に比例する。したがって、2 階建の方が 1 階建に比べて、同じ浸水深に対する被害インデックスが低くなると考えられる。

提案した計算による手法は機械的なプロセスで実行されるため、思考的手法に比べて



より一貫性が高い。同様に、思考的手法による結果が非常に幅広い範囲に散らばったのに比べ、計算による手法（石積み工、コンクリート造、鋼構造）の結果はより信頼性が高い。

一方で、ICE 洪水脆弱性カーブ作成ツールは石積み工、コンクリート、鋼構造建物における建築設計や典型的な構成を基に構築した。しかしながら、木造建物については、建築設計、構成、復旧作業について他の種別と大きく異なる。このため、木造に対する脆弱性カーブは想定したものと大きく乖離した。例えば、建物種別 W1-L-1 において、浸水深 50 cm で被害インデックスが 60%にのぼるということは現実的ではない。よって、木造に対しては思考的手法の方がより現実に近いという判断からこちらを採用した。

結局のところ、木造建物に対しては思考的手法による脆弱性カーブを、石積み工、コンクリート造、および鋼構造建物に対しては計算による脆弱性カーブを推奨することとした。下表は各建物種別における浸水深ごとの被害インデックスである。

表 7-1 推奨する洪水脆弱性カーブ

Recommended Flood Vulnerability Curves											
Building Categorization			Inundation Depth (m)								
Class	Type	Sub-Type	0	0.1	0.5	1	2	3	4	6	10
Wood	W1	W1-L-1	0.00	0.01	0.08	0.18	0.25	0.55	0.60	0.60	0.60
		W1-L-2	0.00	0.02	0.06	0.12	0.20	0.28	0.35	0.60	0.60
	W3	W3-L	0.00	0.02	0.10	0.20	0.40	0.60	0.90	0.90	0.90
	N	N-L-1	0.00	0.03	0.20	0.35	0.60	0.80	0.99	0.99	0.99
		N-L-2	0.00	0.05	0.12	0.20	0.30	0.50	0.60	0.85	0.85
	Masonry	MWS	MWS-L	0.00	0.00	0.03	0.04	0.07	0.12	0.18	0.24
CHB		CHB-L-1	0.00	0.00	0.07	0.11	0.14	0.24	0.24	0.24	0.24
		CHB-L-2	0.00	0.00	0.03	0.04	0.07	0.12	0.13	0.19	0.19
Concrete	CWS	CWS-L	0.00	0.01	0.02	0.03	0.03	0.07	0.13	0.17	0.17
	C1	C1-L-1	0.00	0.02	0.09	0.14	0.16	0.21	0.21	0.21	0.21
		C1-L-2	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.14	0.14
		C1-M	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.06
Steel	S1	S1-L-1	0.00	0.02	0.05	0.08	0.09	0.16	0.16	0.16	0.16
		S1-L-2	0.00	0.00	0.02	0.03	0.03	0.07	0.09	0.12	0.12
		S1-M	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.07	0.07

### 7.3 地震に対する脆弱性カーブ

表 7.2 は第 6 章で述べた計算による手法、思考的手法、および経験的手法で生成した脆弱性カーブの対数正規分布のパラメーターである。脆弱性カーブはその後のリスク解析に使用されるものではあるが、ノンエンジニアド建築物については計算によるカーブは作成しなかった。また、コンクリート造と鋼構造についても、脆弱性カーブを生成するのに必要なデータを取得できなかった。

表 7-2 異なるアプローチによる地震脆弱性カーブの対数正規分布パラメーター

Bldg Material	Bldg. Type	COMPUTATIONAL VC Parameters in MMI						HEURISTIC VC Parameters in MMI						EMPIRICAL VC Parameters	
		Pre-code (~1972)		Low-code (1972-1992)		Hi-code (1992~)		Pre-code (~1972)		Low-code (1972-1992)		Hi-code (1992~)		Mean	Beta
		Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta		
Wood	W1-L	-						8.15		0.25		-		6.92	0.13
	W3-L	-						8.11		0.24		-		-	-
	N-L	-						7.62		0.29		-		-	-
Masonry	MWS-L	-						7.74		0.26		-		7.09	0.21
	CHB-L	-						7.74		0.26		-		7.09	0.21
	URA-L	-						-		-		-		7.56	0.26
	URM-L	-						7.72		0.25		-		-	-
Concrete	CWS-L	9.18		0.16		-		7.75		0.25		-		-	-
	C1-L	8.29		0.18		-		8.40		0.22		-		-	-
	C1-M	8.67	0.16	8.67	0.16	8.77	0.16	-		-		8.33	0.23	-	-
	C4-M	9.86	0.13	9.89	0.13	9.91	0.13	8.03	0.26	8.43	0.24	8.89	0.23	-	-
	C4-H	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	7.88	0.25	8.36	0.23	8.64	0.21	-	-
	PC2-L	-	-	-	-	-	-	-	-	8.72	0.21	8.72	0.21	-	-
	PC2-M	-	-	-	-	-	-	-	-	8.22	0.25	8.22	0.25	-	-
Steel	S1-L	9.32	0.11	9.54	0.11	9.23	0.14	8.28	0.23	8.36	0.23	8.83	0.19	-	-
	S1-M	9.26	0.13	9.40	0.13	9.44	0.12	8.15	0.23	8.52	0.22	8.75	0.20	-	-
	S3-L	-	-	-	-	-	-	-	-	9.00	0.16	9.00	0.16	-	-
	S4-M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.90	0.17	-	-

### 7.3.1 推奨する脆弱性カーブ

マニラ都市圏における地震リスク解析のため、本プロジェクトでは以下のような脆弱性カーブを推奨する。

#### 木造

W1-Lについては経験的手法により脆弱性カーブを生成したものの、これは推奨しない。これは、作成のためのデータが極めて限られていたことや、W1-LおよびW3-Lにおいて思考的手法によるカーブとの違いが甚だしいことを理由とする。W1-Lの乖離は木造フレームの建築物が竹によるものに比べてより地震に対して脆弱であることを示唆している。このことから、W1-Lについては思考的手法による脆弱性カーブを推奨する。また、W3-L、N-Lについても思考的手法による脆弱性カーブを推奨する。

図 7.11 に示した推奨脆弱性カーブは比較的弱い地震と非常に強い地震に対して合理的なものとなっている (MMI VI に対して W1-L と W3-L では被害率 10%未満、N-L では 20% となっており、MMI XII ではほぼ 100%となっている)。また、推奨カーブは全体的に木造や竹による軽い建物が類似した脆弱性を示すとともに、間に合わせの建物 (仮設建物、N-L) に比べてより強靱であることから地震の脆弱性を比較的良好に表していると考えられる。また、推奨カーブは中規模な揺れに対する被害が、QuiverR プロジェクトの結果 (MMI VIII に対して被害率 50%以上) と比べて大きいのが、これは入手可能な実績データに対する整合性が増していると考えられる (W1-L に関する実績データは Appendix に収録している)。

## 石積み工

ほとんどの石積み工建物に対して、思考的方法と経験的方法を活用して脆弱性カーブを作成した。十分な数の被害調査データを活用した経験的手法は実績を反映していることから、より信頼性の高い手法と見なすことができる。したがって、MWS-L、CHB-L、URA-Lについては経験的手法による脆弱性カーブを推奨する。経験的手法によるカーブは新たなデータによってアップデートし、精度を向上させることができる。

URM-Lについては思考的手法による脆弱性カーブを使用する。

## コンクリート造

被害調査による実績データが不十分であったため、計算と思考的手法による脆弱性カーブを作成した。

C1-Lについては計算による脆弱性カーブを推奨する。思考的手法によるカーブも計算によるものに極めて類似しているが、多数の建物モデル（合計 62 モデル）を構築して計算したためこちらのカーブの信頼性が高い。

CWS-Lについても計算による脆弱性カーブを推奨する。CWS-LがC1-Lに比べてより地震に対して強靱であると考えられるためである。これは2階により軽い材料を使用しているためである。思考的手法による脆弱性カーブではCWS-Lの脆弱性がCHB-L、URM-Lあるいは間に合わせの建築と同程度となっている。

C1-Mに対しては、（Low-codeの）計算による脆弱性カーブを推奨する。計算によって、極めて類似したカーブが算出されたが、Low-codeに対する対数正規分布パラメータの使用を推奨する。同じ建物種別の思考的手法による脆弱性カーブでは、C1-MはC1-Lと同程度の脆弱性であるが、中層建築物（3～7階建）により厳格な設計要求が課されていることからこのような傾向は想定し得ない。

C4-M、C4-Hについては思考的手法による脆弱性カーブを推奨する。C4-Mの各年代に対する対数正規分布パラメータはより一貫性が高く、同じ高さのC1-Mと比較した時にもより合理的である。

PC2-L、PC2-Mについても思考的手法による脆弱性カーブを推奨する。専門家の見解に基づくカーブはRCラーメン構造のカーブと異なる（中層のPC2型式は同型式の低層建物よりも脆弱となっている）ものの、他の建物種別との比較では地震脆弱性に対してより合理的な評価となっている。

## 鋼構造

S1-Lに対する計算に基づく脆弱性カーブは3つの年代区分の違いを表現できていない。したがって、S1-Lについては思考的手法による脆弱性カーブを推奨する。

S1-Mについては思考的手法ではなく計算によるカーブを推奨する。これは年代区分やS1-Lとの比較で整合性があるためである。

S3-LとS4-Mについては思考的手法によりカーブが作成されており、これを推奨する。

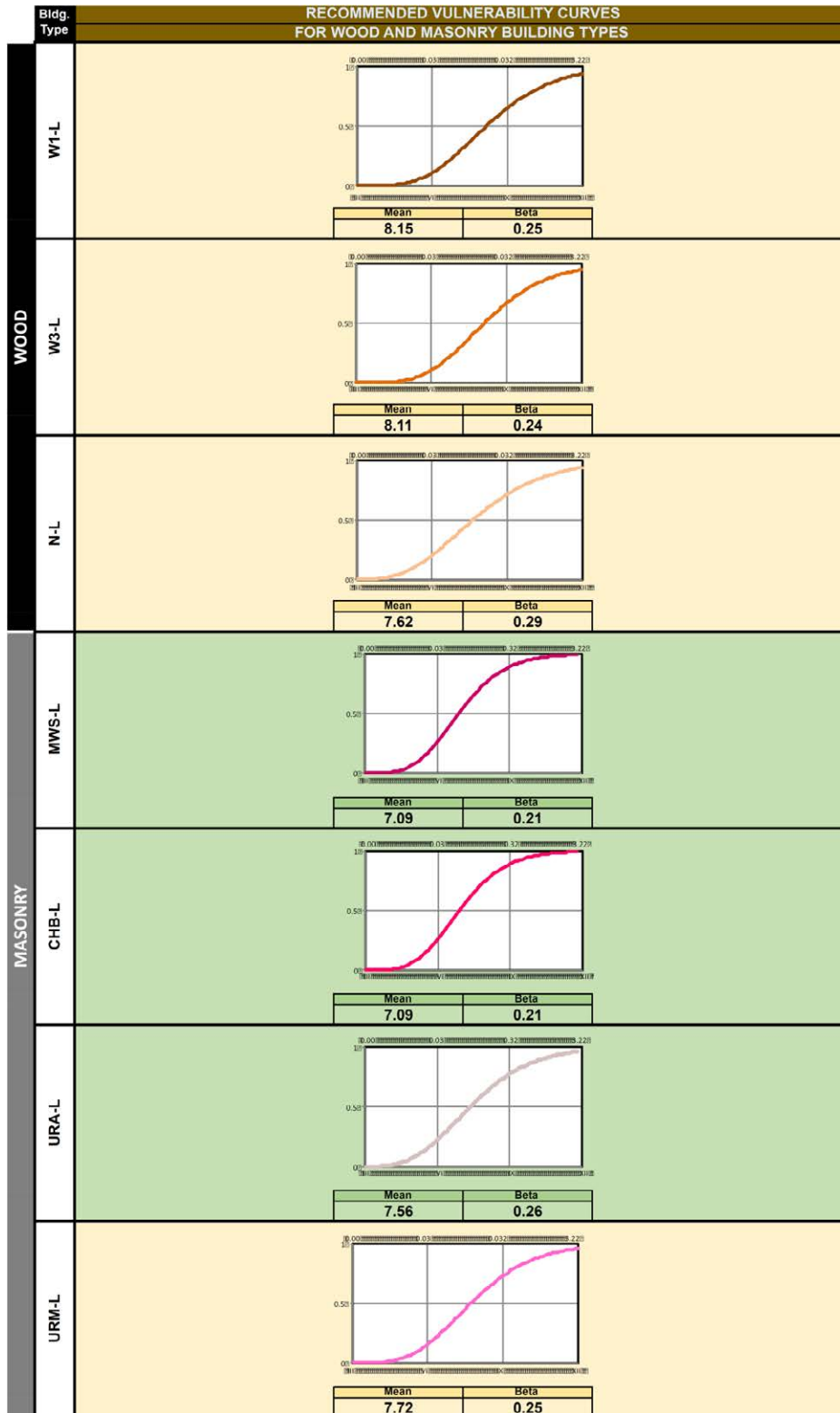


図 7-11 木造および石積み工に対する推奨地震脆弱性カーブ

		VINTAGES						
Bidg. Type		~1972 (Pre-code)		1972-1992 (Low-code)		1992~ (Hi-code)		
		Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	
CONCRETE	CWS-L							
				9.18	0.16			
	C1-L							
				8.29	0.18			
	C1-M							
		8.67	0.16	8.67	0.16	8.77	0.16	
	C4-M							
		8.03	0.26	8.43	0.24	8.89	0.23	
	C4-H							
		7.88	0.25	8.36	0.23	8.64	0.21	
PC2-L								
	-	-	8.72	0.21	8.72	0.21		
PC2-M								
	-	-	8.22	0.25	8.22	0.25		

図 7-12 コンクリート造に対する推奨地震脆弱性カーブ

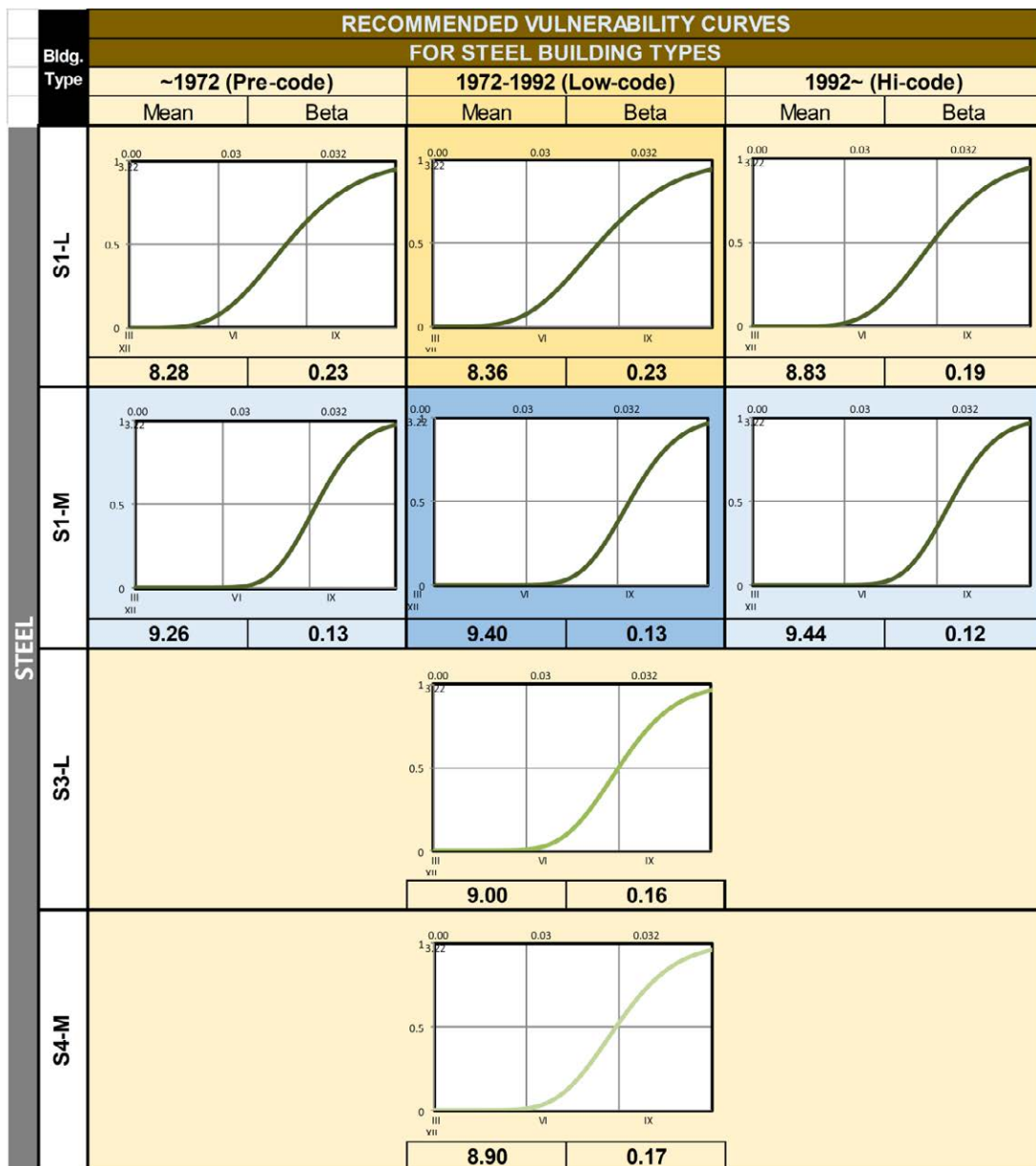


図 7-13 鋼構造に対する推奨地震脆弱性カーブ

推奨する地震脆弱性カーブに対する対数正規分布パラメーターは表 7.3 に示すとおりである。

### 7.3.2 地震に対する損傷度カーブ

マニラ都市圏の各建物種別に対して推奨する脆弱性カーブとそれらに対応する損傷度カーブの対数正規分布パラメーターを表 7.3 に示す。これらは 6.1.1.4 節および 6.1.2 節で述べた手法で算出したものである。

表 7-3 マニラ都市圏における主要建物種別の地震損傷度カーブと脆弱性カーブの対数正規分布パラメーター

Bldg Material	Bldg. Type   Vintage	Fragility Curve Parameters in MMI								Vulnerability Curves (in MMI)		
		Slight		Moderate		Extensive		Complete		Mean	Beta	
		Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta	Mean	Beta			
Wood	W1-L	7.7	0.25	8.0	0.25	8.4	0.25	8.9	0.25	8.2	0.25	
	W3-L	7.5	0.24	8.0	0.24	8.4	0.24	8.9	0.24	8.1	0.24	
	N-L	7.1	0.29	7.4	0.29	7.8	0.29	8.3	0.29	7.6	0.29	
Masonry	MWS-L	6.4	0.21	6.9	0.21	7.4	0.21	7.9	0.21	7.1	0.21	
	CHB-L	6.4	0.21	6.9	0.21	7.4	0.21	7.9	0.21	7.1	0.21	
	URA-L	6.9	0.26	7.4	0.26	7.9	0.26	8.4	0.26	7.6	0.26	
	URM-L	7.0	0.25	7.5	0.25	8.0	0.25	8.5	0.25	7.7	0.25	
Concrete	CWS-L	8.3	0.08	8.5	0.09	9.1	0.1	10.3	0.13	9.1	0.12	
	C1-L	6.8	0.18	7.5	0.16	8.4	0.14	9.2	0.13	8.3	0.17	
	C1-M	8.0	0.14	8.2	0.14	8.7	0.13	9.6	0.12	8.7	0.14	
	C4-M	Pre-1972	7.4	0.26	7.8	0.26	8.2	0.26	8.6	0.26	8.0	0.26
		1972-1992	7.7	0.24	8.0	0.24	8.5	0.24	9.3	0.24	8.4	0.24
		Post-1992	8.2	0.23	8.7	0.23	9.2	0.23	9.7	0.23	8.9	0.23
	C4-H	Pre-1972	7.3	0.25	7.5	0.25	8.1	0.25	8.7	0.25	7.9	0.25
		1972-1992	7.8	0.23	8.2	0.23	8.6	0.23	9.0	0.23	8.4	0.23
		Post-1992	7.8	0.21	8.3	0.21	8.9	0.21	9.2	0.21	8.6	0.21
	PC2-L	8.0	0.21	8.5	0.21	9.0	0.21	9.5	0.21	8.7	0.21	
	PC2-M	7.6	0.25	8.0	0.25	8.4	0.25	8.8	0.25	8.2	0.25	
Steel	S1-L	Pre-1972	7.6	0.23	8.1	0.23	8.6	0.23	9.1	0.23	8.3	0.23
		1972-1992	7.8	0.23	8.2	0.23	8.6	0.23	9.2	0.23	8.4	0.23
		Post-1992	8.2	0.19	8.6	0.19	9.0	0.19	9.4	0.19	8.8	0.19
	S1-M	Pre-1972	7.8	0.12	8.5	0.11	9.5	0.10	9.9	0.10	8.8	0.13
		1972-1992	7.8	0.11	8.6	0.10	9.6	0.10	10.0	0.09	8.9	0.12
		Post-1992	8.3	0.11	8.8	0.10	9.5	0.10	10.1	0.09	9.1	0.12
	S3-L	8.7	0.16	8.9	0.16	9.1	0.16	9.3	0.16	9.0	0.16	
	S4-M	8.6	0.17	8.8	0.17	9.0	0.17	9.2	0.17	8.9	0.17	

**ANNEX H** リスクベース保険料率算定  
ツールマニュアル



Data Collection Survey on the Insurance  
Mechanism for Incentivizing Disaster  
Resilient Public Infrastructure in Metro  
Manila  
Risk Based Premium Calculation Tool

- QGIS and Tool Installation -

March. 2016  
JICA Study Team

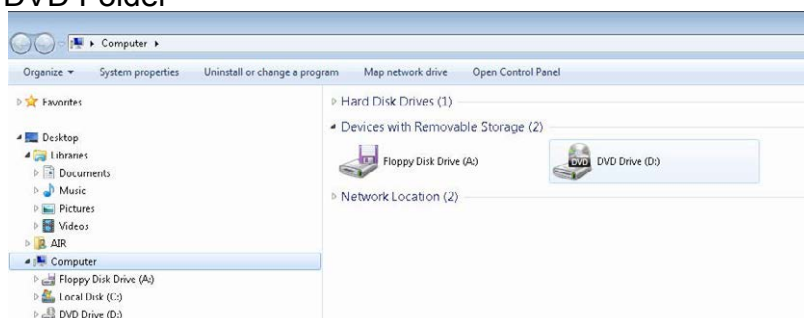
## Outline

1. Preparation for Installation
2. QGIS Installation
3. Tool Installation
4. How to Calculate Risk Based Price

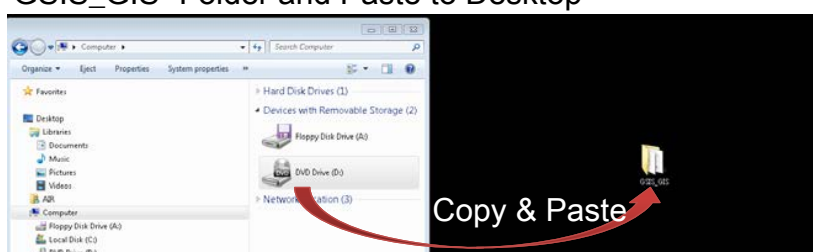
# 1. Preparation for Installation

➤ Step.1  
Insert DVD-R to your Laptop PC

➤ Step.2  
Open DVD Folder

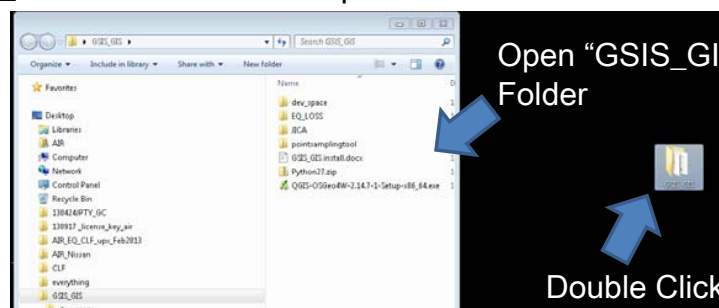


➤ Step.3  
You can see "GIS\_GIS" Folder in "D" Drive.  
Copy "GIS\_GIS" Folder and Paste to Desktop

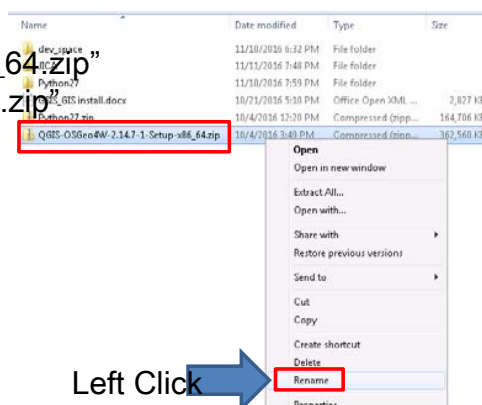


# 2. QGIS Installation

➤ Step.1  
Open "GIS\_GIS" Folder on Desktop



➤ Step.2  
Left one Click "QGIS-OSGeo4W-2.14.7-1-Setup-x86\_64.zip"  
Right Click "QGIS-OSGeo4W-2.14.7-1-Setup-x86\_64.zip"  
Left Click "Rename"  
Rename  
from "QGIS-OSGeo4W-2.14.7-1-Setup-x86\_64.zip"  
to "QGIS-OSGeo4W-2.14.7-1-Setup-x86\_64.exe"



➤ Step.3

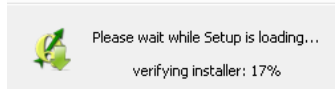
Double Click “QGIS-OSGeo4W-2.14.7-1-Setup-x86\_64.exe”

Name	Date modified	Type	Size
dev_space	11/10/2016 6:32 PM	File folder	
EQ_LOSS	11/10/2016 6:32 PM	File folder	
JICA	11/10/2016 6:32 PM	File folder	
pointsamplingtool	11/10/2016 6:32 PM	File folder	
GIS_GIS install.docx	10/21/2016 5:10 PM	Office Open XML ...	2,827 KB
Python27.zip	10/4/2016 12:20 PM	Compressed (zipp...	164,706 KB
QGIS-OSGeo4W-2.14.7-1-Setup-x86_64.exe	10/4/2016 3:49 PM	Application	362,560 KB

Double Click

➤ Step.4

Setup is loading



➤ Step.5

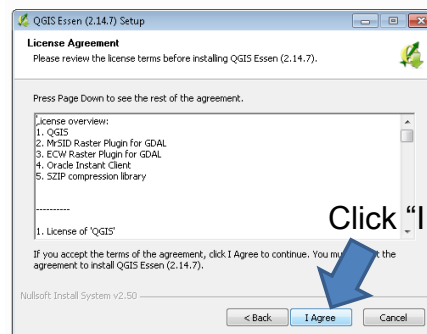
Click “Next” Button



➤ Step.6

Read License Agreement

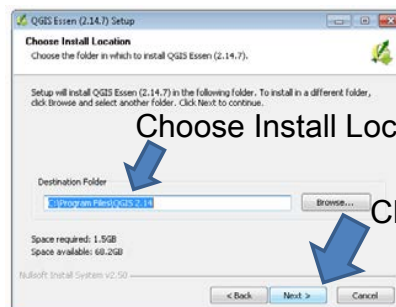
Click “I Agree” Button



➤ Step.7

Choose Install Location

Click “Next” Button

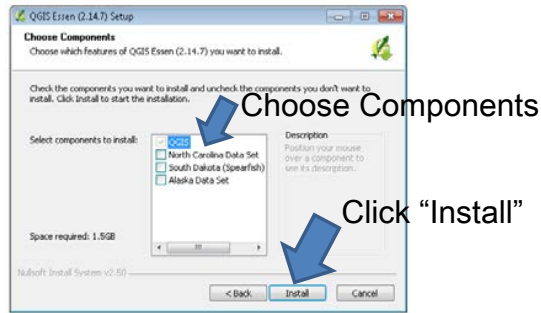


Choose Install Location

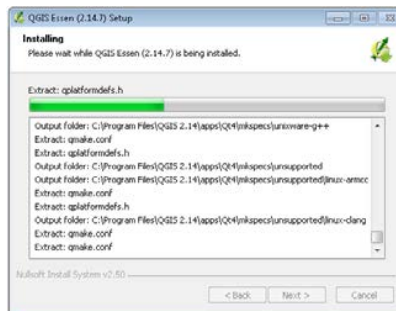
Click “Next”

In this Training, please choose “C:\Program Files\QGIS 2.14” (Default)

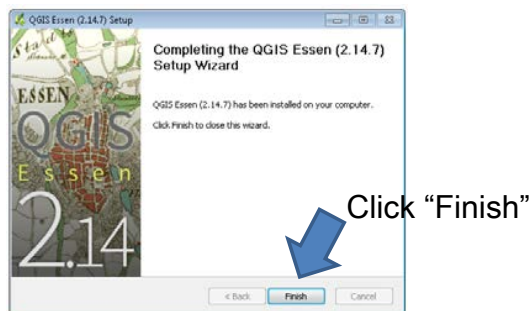
- Step.8  
Choose Components  
Click "Install" Button



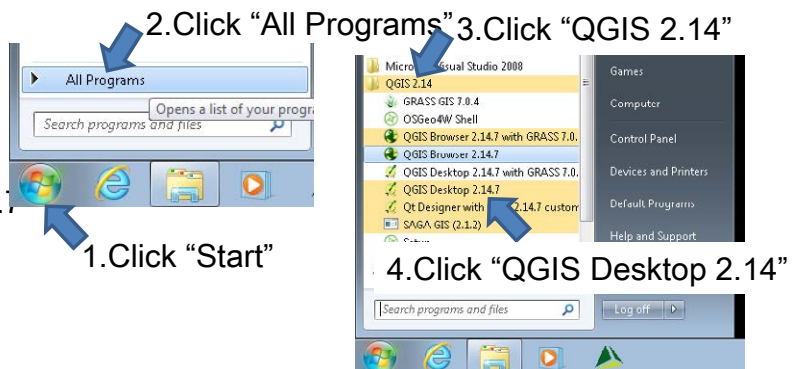
- Step.9  
Start Installation  
About 10 minutes



- Step.10  
Click "Finish" Button



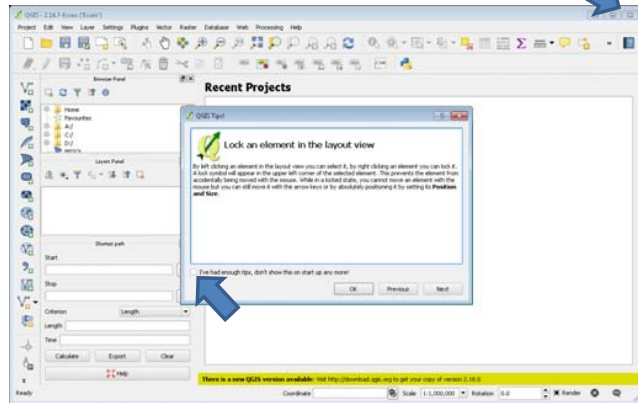
- Step.11  
1.Click "Start"  
2.Click "All Programs"  
3.Click "QGIS 2.14"  
4.Click "QGIS Desktop 2.14.7"



➤ Step.12  
Close “QGIS”



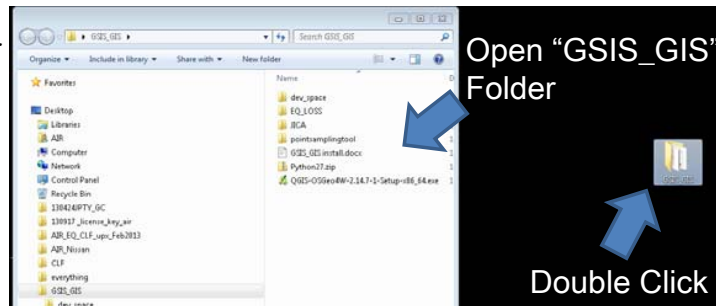
2.Close



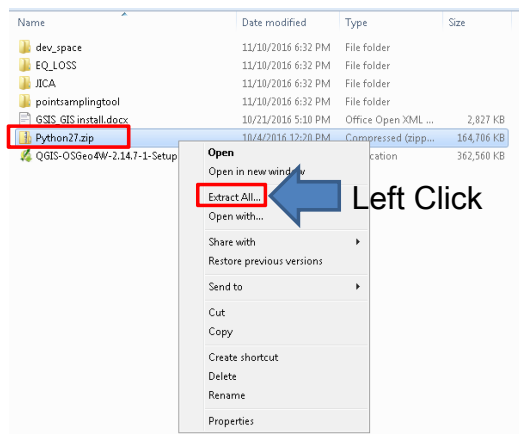
## QGIG Installation is finished!!

### 3. Tool Installation

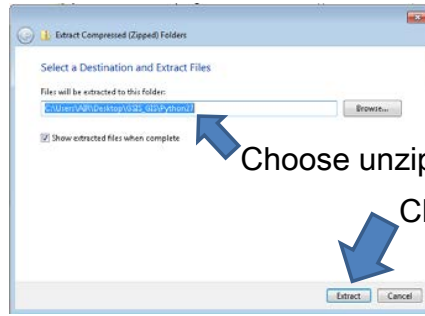
➤ Step.1  
Open “GSIS\_GIS” Folder  
on Desktop Again



➤ Step.2  
Left Click “Python27.zip”  
Right Click “Python27.zip”  
Left Click “Extract All...”

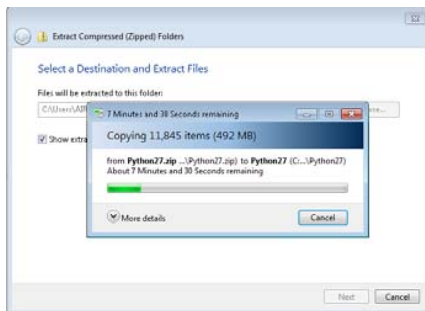


- Step.3  
Choose unzip Location  
Click "Extract" Button

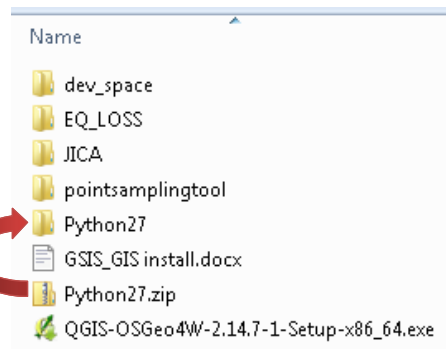


In this Training, please choose "C:\Users\%UserName%\Desktop\%GIS\_GIS%\Python27" (Default)

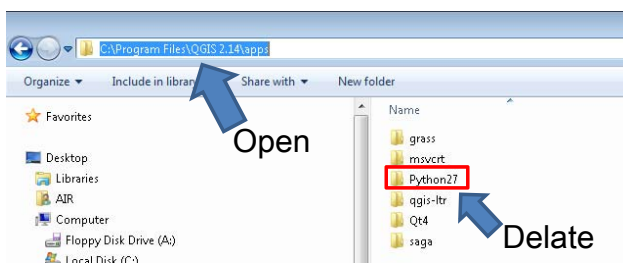
- Step.4  
Start Unzip



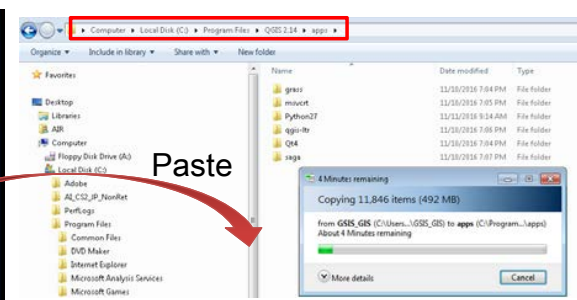
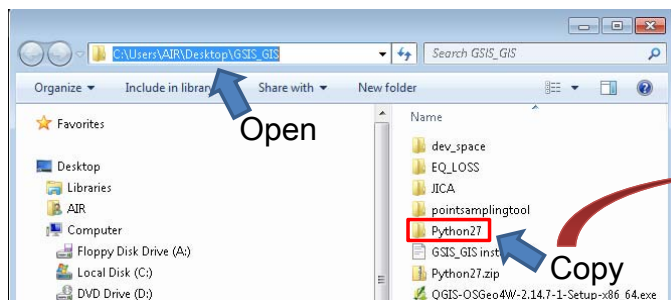
Unzipped



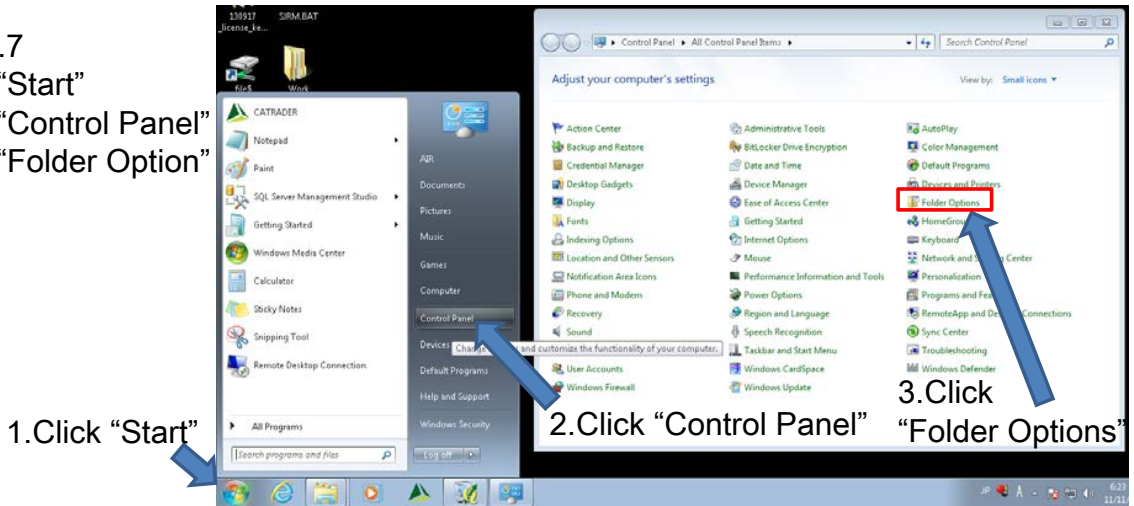
- Step.5  
Open "C:\Program Files\QGIS 2.14\apps" Folder  
Delete "Python27" Folder



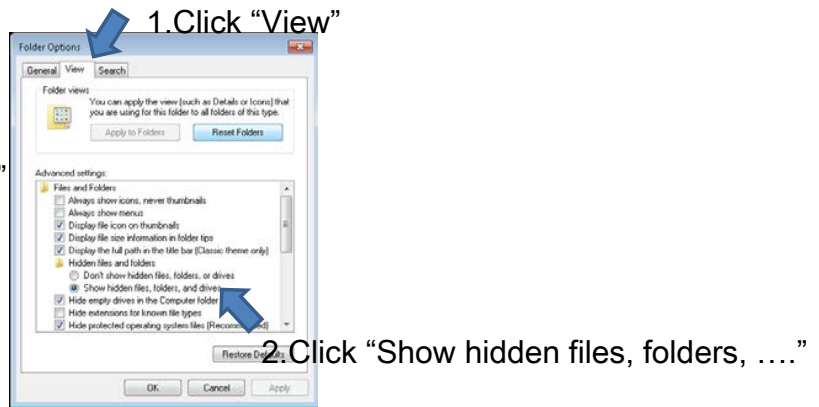
- Step.6  
Open "GIS\_GIS\Python27" Folder on Desktop and Copy "Python27" Folder  
Paste "Python27" Folder to "C:\Program Files\QGIS VER\apps"



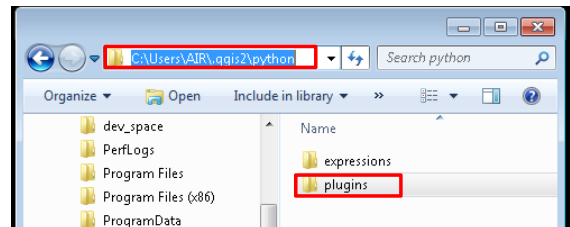
- Step.7
- 1.Click “Start”
- 2.Click “Control Panel”
- 3.Click “Folder Options”



- Step.8
- 1.Click “View”
- 2.Click “Show hidden files, folders, ....”

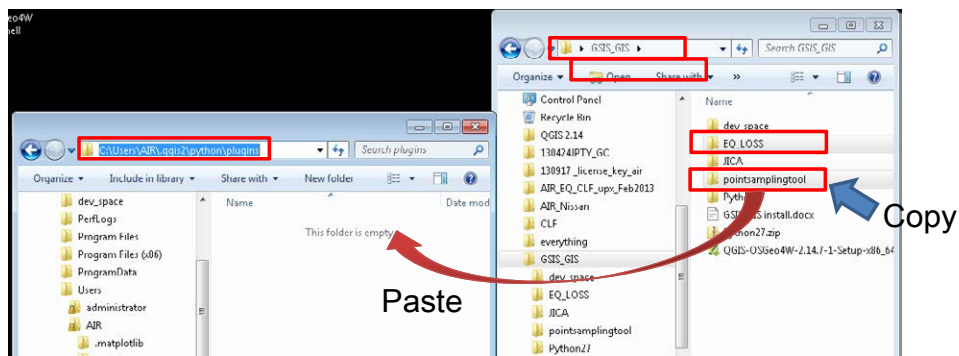


- Step.9
- Open “C:¥Users¥User Name¥.qgis2¥python”
- Make “plugins” Folder



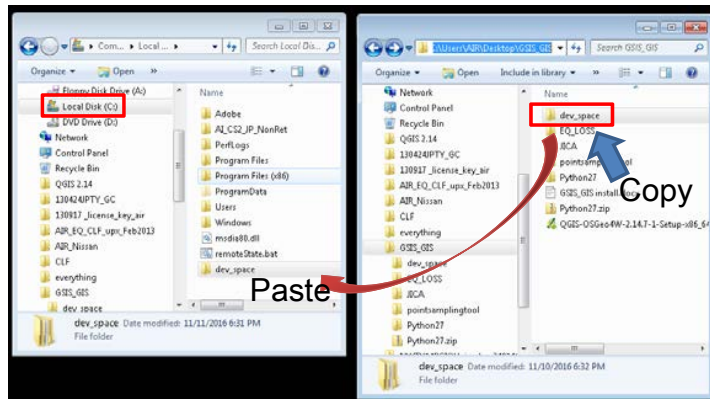
- Step.10
- Open “C:¥Users¥AIR¥.qgis2¥python¥plugins” Folder
- Open “GIS\_GIS¥” Folder on Desktop and Copy “EQ\_LOSS” and “pointsamplingtool” Folder

Paste “EQ\_LOSS” and “pointsamplingtool” Folder to “C:¥Users¥AIR¥.qgis2¥python¥plugins” Folder

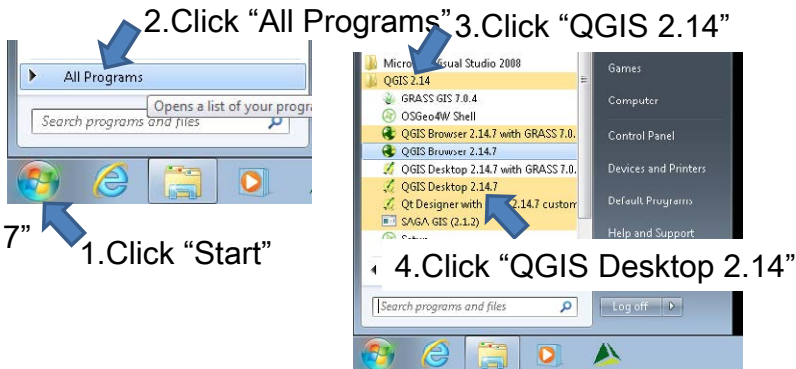


- Step.9
- Open “GSIS\_GIS” Folder on Desktop and
- Copy “dev\_space” Folder

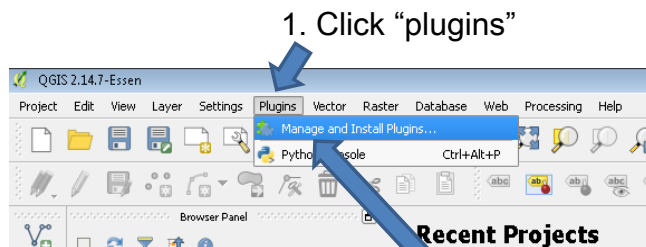
Paste “dev\_space” Folder to “C:¥”



- Step.10
- Open QGIS
- 1.Click “Start”
- 2.Click “All Programs”
- 3.Click “QGIS 2.14”
- 4.Click “QGIS Desktop 2.14.7”

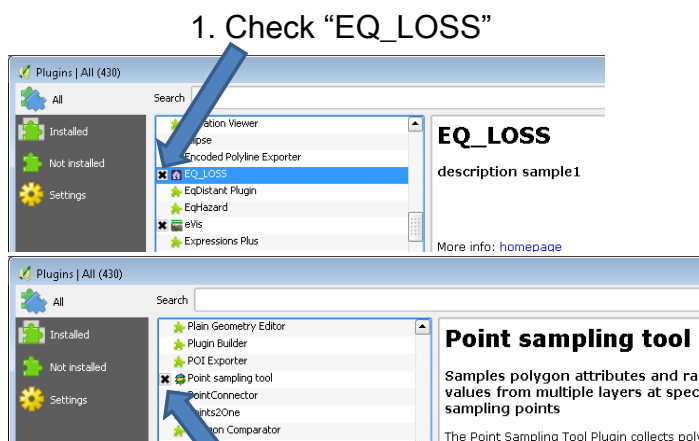


- Step.11
- Click “plugins”
- Click “Manage and Install Plugins”



2. Click “Manage and Install Plugins”

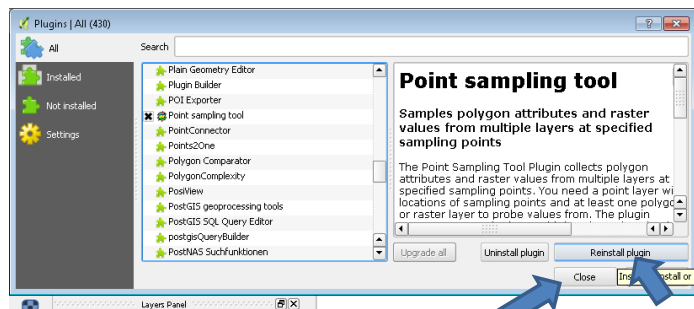
- Step.10
- 1. Check “EQ\_LOSS”
- 2. Check “pointssamplingtool”



2. Check “pointssamplingtool”

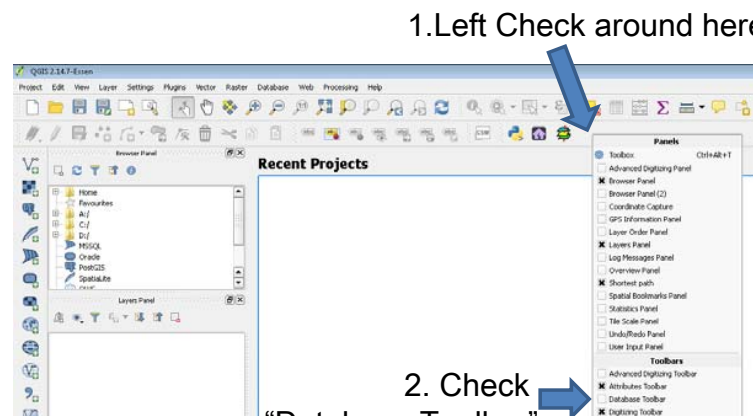


- Step.11
- 1.Click “Reinstall plugin”
- 2.Click “Close”



- 2.Click “Close”
- 1.Click “Reinstall plugin”

- Step.12
- 1. Left Check around Tool bar
- 2. Check “Database Toolbar”
- 3. Show “Database Toolbar”



- 1.Left Check around here
- 2. Check “Database Toolbar”

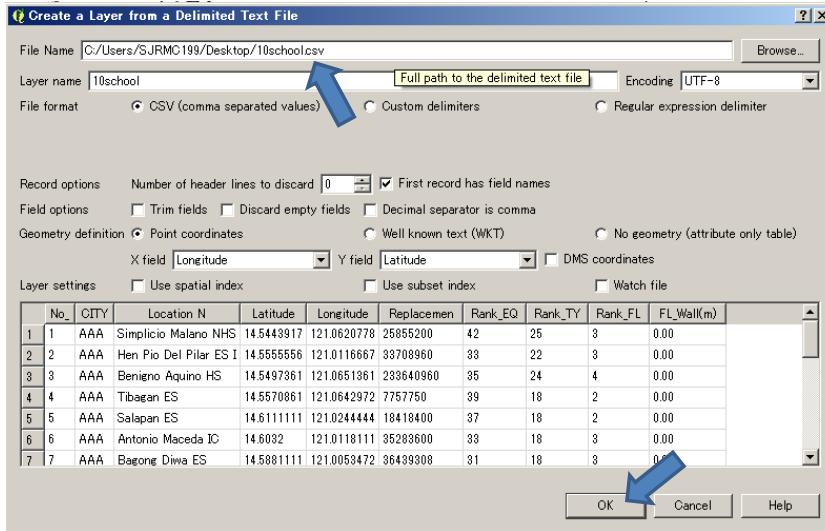
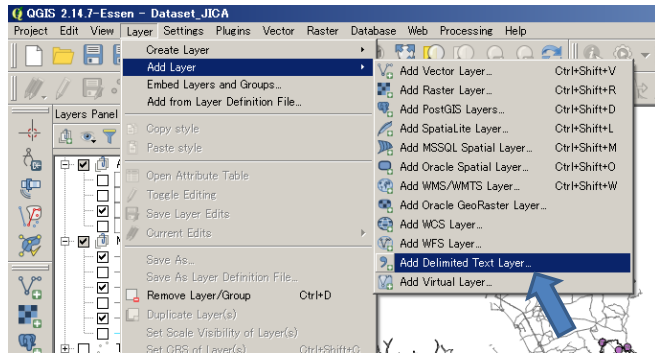
**Tool Installation is finished!!**

## 4. How to Calculate Risk Based Price

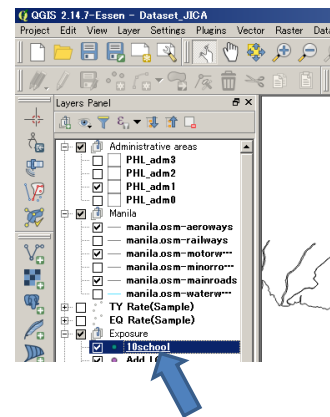
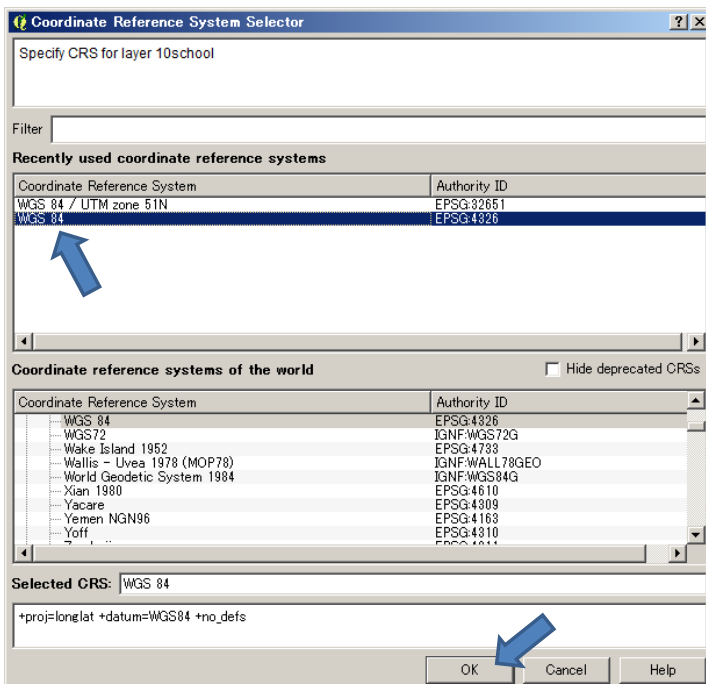
- Step.1
- 1.Make Import Data(Exposure data) using Microsoft Excel
- 2.Save the exposure data by csv format(eg:10school.csv)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	No_	CITY	Location N	Latitude	Longitude	Replaceme	Rank_EQ	Rank_TY	Rank_FL	FL_Wall(m)	
2	1	AAA	Simplicio Malano NHS	14.54439	121.0621	25855200	42	25	3	0	
3	2	AAA	Hen Pio Del Pilar ES I	14.55556	121.0117	33708960	33	22	3	0	
4	3	AAA	Benigno Aquino HS	14.54974	121.0651	2.34E+08	35	24	4	0	
5	4	AAA	Tibagan ES	14.55709	121.0643	7757750	39	18	2	0	
6	5	AAA	Salapan ES	14.61111	121.0244	18418400	37	18	2	0	
7	6	AAA	Antonio Maceda IC	14.6032	121.0118	35283600	33	18	3	0	
8	7	AAA	Bagong Diwa ES	14.58811	121.0053	36439308	31	18	3	0	
9	8	AAA	Antonio Luna ES	14.62676	120.9817	14048320	37	22	2	0	
10	9	AAA	Victoriano Mapa HS	14.59793	120.9923	1.44E+08	31	22	4	0	
11	10	AAA	A.Daeto ES	14.71139	120.9422	19937664	35	24	3	0	
12	11	BBB	Simplicio Malano NHS	14.54439	121.0621	25855200	42	25	3	1	
13	12	BBB	Hen Pio Del Pilar ES I	14.55556	121.0117	33708960	42	25	3	1	
14	13	BBB	Benigno Aquino HS	14.54974	121.0651	2.34E+08	42	25	4	1	
15	14	BBB	Tibagan ES	14.55709	121.0643	7757750	36	21	2	1	
16	15	BBB	Salapan ES	14.61111	121.0244	18418400	36	21	2	1	
17	16	BBB	Antonio Maceda IC	14.6032	121.0118	35283600	42	25	3	1	
18	17	BBB	Bagong Diwa ES	14.58811	121.0053	36439308	42	25	3	1	
19	18	BBB	Antonio Luna ES	14.62676	120.9817	14048320	36	21	2	1	
20	19	BBB	Victoriano Mapa HS	14.59793	120.9923	1.44E+08	42	25	4	1	

- Step.3
- Import Exposure data to Tool
- Open the QGIS file from JICA folder
- Click “Layer”
- Click “Add Layer”
- Click “Add Delimited Text Layer”
- Input the Exposure file Name(csv)
- Click “ok”



- Step.3(Continue)
- Select the coordinate system “WGS84”
- Click “ok”
- Exposure import is finished



➤ Step.4

Translate exposure data to calculation

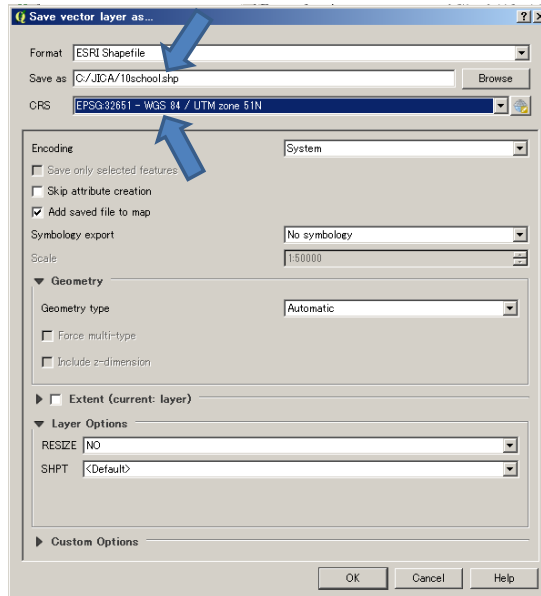
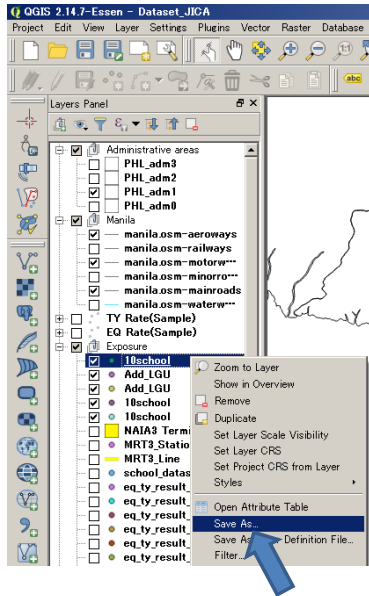
Left click imported exposure data Layer

Click “Save as”

Input the translate file name(eg:C:/JICA/10school.shp)

Choose ‘EPSG:32651 – WGS84 / UTM zone 51N’

Click “ok”



➤ Step.5

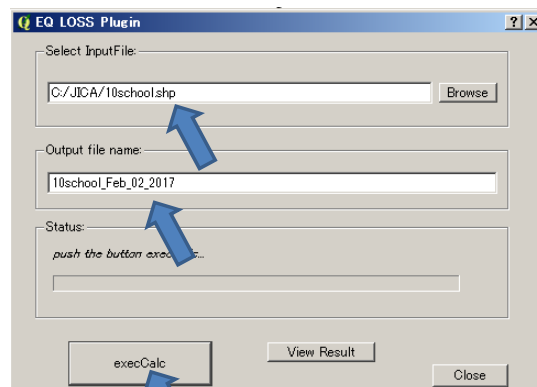
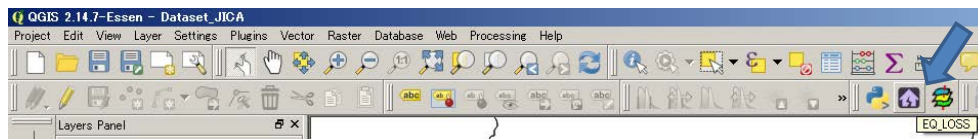
Calculate insurance premium rate

Click “EQ\_LOSS” icon

Input the exposure file name(eg:C:/JICA/10school.shp)

Input the output file name(eg:10school\_Feb\_02\_2017)

Click “execCalc”



➤ Step.5

Calculate insurance premium rate

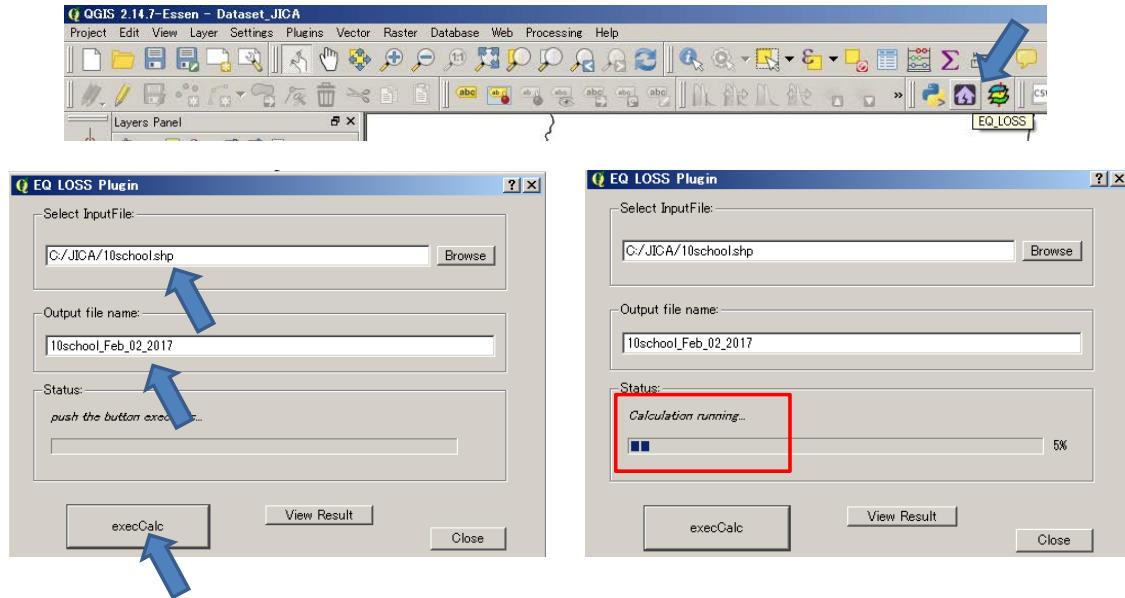
Click “EQ\_LOSS” icon

Input the exposure file name(eg:C:/JICA/10school.shp)

Input the output file name(eg:10school\_Feb\_02\_2017)

Click “execCalc”

Calculation will run



➤ Step.6

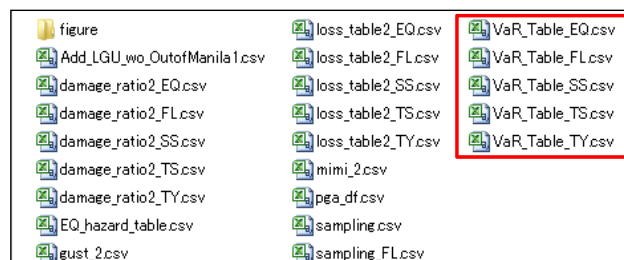
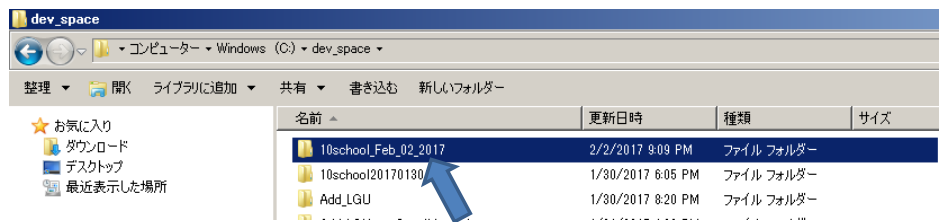
Check the results after calculation

Open the “C:¥dev\_space¥output file name” Folder

Output file name is named by the step.5

“VaR\_Table\_XX.csv” stored VaR table and insurance premium rate

EQ: Earthquake, FL: Flood, SS: Storm Surge, TS: Tsunami, TY: Typhoon



➤ Annex  
 “VaR\_Table\_XX.csv” format

	Location1	Location2	Location3	Location4	Total Portfolio		
	S00001	S00002	S00003	S00004	Total		
Exceedance of Probability (Year)	1000	9,870,690.51	12,403,994.54	20,298,558.97	13,172,388.17	52,670,733.80	VaR (Value at Risk)
	500	8,565,917.75	10,936,118.39	17,478,027.07	10,739,305.94	47,408,616.18	
	400	7,952,244.60	10,520,778.46	15,410,274.55	9,840,196.46	44,763,320.33	
	300	6,471,606.86	8,670,946.09	13,072,144.57	7,391,997.05	36,821,248.99	
	200	3,874,840.62	5,387,276.94	10,301,243.91	4,916,756.03	23,101,519.92	
	150	3,161,886.86	4,353,795.26	8,426,615.93	3,842,681.74	19,724,548.77	
	100	2,034,166.68	2,922,777.06	5,621,329.21	2,852,103.23	13,353,830.64	
50	835,745.97	1,039,517.11	2,111,780.13	972,577.11	5,100,883.47		
AAL	81,765.66	108,260.11	202,130.40	103,938.53	496,094.71	Pure Premium	
STD	591,500.49	782,610.61	1,287,465.94	773,669.61	3,399,629.20	Standard Deviation	
ReplacementCost	27,585,000.00	33,569,000.00	54,520,950.00	37,400,467.00	153,075,417.00	Replacement Cost	
Rate	0.30%	0.32%	0.37%	0.28%	0.32%	Insurance premium rate	