

8.2 Los Llanos地点における最大加速度の推定と設計震度

8.2.1 Los Llanos地点周辺域の歴史地震

Los Llanos水力地点から半径200km以内で発生したマグニチュード5.5以上の地震の一覧を Table 8-2 に示す。この表は、米国の国立地球物理データセンターの NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) 地震データファイル等より、該当する過去の地震事象を抽出して作成したものである。

これによれば、Los Llanos計画地点の周辺域で、これまでに発生した地震の最大のマグニチュードは、1904年12月20日 5時44分18秒に発生した $M_B:7.7$ (実体波マグニチュード) (震源深さ60km、震央距離164km) である。また、マグニチュード5.5以上の地震の中で計画地点の最も近くで発生した地震は、1990年3月25日13時22分54秒に発震した震央距離14km (震央：北緯9.6度、西経83.9度、 $M_B:6.5$) であった。

なお、Table 8-3 および Fig. 8-3 に示したのは、Costa Rica国の Instituto Costarricense Electricidad (ICE)により調査された、Los Llanos水力地点周辺域で発生した歴史地震である。

この調査では、概ね、計画地点から震央距離90km以内で発生した地震がピックアップされている。この調査結果によれば、Los Llanos水力地点の近傍で発生した地震の最大のマグニチュードは1916年4月24日 (震央距離191km) および1939年12月21日 (震央距離81km) の $M_s:7.3$ (表面波マグニチュード) である。

Table 8-3 では、地震の形態を、プレートの沈み込み境界で発生したプレート境界地震と、内陸の地震断層で発生した内陸地震とに分類している。表よりマグニチュード7.0を越える地震は、いずれもプレート境界地震 (記号：S) であることが理解できる。

8.2.2 確率論的手法に基づく地震危険度解析

(1) 解析概要

地震危険度解析の評価手法は、Fig. 8-4 に示すように、確率論的手法と確定論的手法とに大別される。

確率論的手法は、過去に発生した歴史地震資料に基づき、アッテネーションモデルと統計確率モデルを用いて、任意の再来期間に期待される最大地震動を推定する方法である。この手法は、地震資料が多い場合には、信頼性も向上し、現在の最も

一般的な方法である。なお、この手法は地震断層の位置と長さが既知の場合、断層の長さからマグニチュードを推定することにより、断層に基づく地震危険度にも適用することができる。

一方、確定論的手法は、地震活動度（余震域、周期性）・活断層の分布・地殻変動等に基づき、将来発生するであろう地震の断層モデルを設定し、地下構造を考慮した上で、評価対象地点で想定される地震動を数値解析的に推定する方法である。この方法は、解析に必要な条件設定が適確にできる場合に合理的な結果を得ることが可能であるが、一般的には、断層パラメータの推定、地下構造の推定等が難しい場合が多く、また、現時点では、短周期成分（概ね1秒以下）の周期領域の推定が十分にはできないことから、研究目的で適用される例はあるが、実用的な目的では必ずしも一般的な方法ではない。

以上のような解析手法の長所短所を踏まえ、Los Llanos水力地点に関しては、過去の地震資料が豊富であることから、ここでは確率論的手法による地震危険度解析を実施することとした。

(2) 解析方法

(i) Gumbelの極値理論

確率変数 X が確率関数 $G(X)$ に従うと仮定すれば、

$$G(X) = Q(X \leq x)$$

x が X_1, X_2, \dots, X_n のいずれよりも大きい確率は次のように定義される。

$$P_n(x) = Q(X_1 \leq X, X_2 \leq X, \dots, X_n \leq X) = G_n(X)$$

この時、再来周期： $T(x)$ と変換変数： Z は次式のように表される。

$$P(x) = 1 / \{1 - P_n(x)\}$$

$$Z = -\ln\{-\ln P_n(x)\}$$

Gumbelの極値理論(1958)は、確率変数の原分布が既知できなくても適用できるが、地震事象に対して極値理論を適用する場合は、次のような仮定条件が満足されることを前提に、地震の発生頻度、および再来周期を予測評価することができる。

仮定① 過去における地震の発生状況は将来も確実に継続する。

仮定② 与えられた時間間隔の中で観測された最大地震事象は、独立事象である。

仮定③ 与えられた時間間隔の中の将来における最大地震の発生動向は、過去における発生動向と同様である。

Gumbelの極値理論では、確率変数の最大値の挙動特性に応じて3種類の極値漸近分布が提案されている。

第一漸近分布 $P_n(x) = \exp\{-\exp(-\alpha n)(x-V)\}$

第二漸近分布 $P_n(x) = \exp\{-\{(V-\varepsilon)/(x-\varepsilon)\}^k\}$

第三漸近分布 $P_n(x) = \exp\{-\{(W-x)/(W-V)\}^k\}$

第1漸近分布では、確率変数に対する上限も下限も設定されてない。第2漸近分布では、確率変数に対する下限があると仮定されており、第3漸近分布では上限があると仮定されている。

ところで、ここで検討しているプロジェクト計画地点で想定される最大加速度の確率関数は未知である。しかし、任意の地点における地震動の最大振幅には上限があると考えられる事から、第3漸近分布を適用するのが合理的であると判断される。第3漸近分布式の中で、 W は最大振幅の上限、 k は形状係数、 V は特性最大値、そして x はランダムな確率変数を示す。ある地点の単位期間の最大地震振幅を A_{max} とすれば x は次式で表される。

$$x = \log A_{max}$$

また、単位期間の最大地震振幅のプロット位置は、次式で求められる。

$$P(m) = (N-m+1)/(N+1)$$

N は解析対象とした単位期間の個数、 m は最大値からの序列順を示す。

(ii) 地震データ

ここでの地震危険度評価では、米国の国立地球物理データセンターのNOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 地震データファイルにより提供された地震データを利用した。

Los Llanos計画地点から半径1,000km以内に発生した地震は、1900年から1992年までの期間に3,886回を数えた。

評価対象としてここでは半径1,000kmを設定したが、この設定は地震動の最大加速度の減衰特性を考慮すれば、十分な評価対象範囲である。1900年から1992年までの期間の各年の地震発生数は Table 8-4 に示したとおりである。また、統計確率解析に使用した地震のマグニチュード、震央距離の分布概要はTable 8-5 に示したとおりである。

(iii) 距離減衰モデル

最大加速度の予測評価に適用した距離減衰式は、すでに提案されているものの中から次の4つの式を用いた。

なお、式中の“A”は最大加速度 (gal)、“M”は地震のマグニチュード、“R”は震源距離 (km) を示す。

$$\text{Log } A = 3.090 + 0.347 M - 2 \text{ Log } (R + 25) \quad \dots\dots\dots (1)$$

Proposed by C. Oliveira

$$\text{Log } A = 2.647 + 0.278 M - 1.301 \text{ Log } (R + 25) \quad \dots\dots\dots (2)$$

Proposed by R.K. McGuire

$$\text{Log } A = 2.041 + 0.347 M - 1.6 \text{ Log } R \quad \dots\dots\dots (3)$$

Proposed by L. Esteva and B. Rosenblueth

$$\text{Log } A = 2.308 + 0.411 M - 1.637 \text{ Log } (R + 30) \quad \dots\dots\dots (4)$$

Proposed by T. Katayama

(3) 解析結果

統計確率解析による最大加速度の予測評価では、1900年から1992年までの93年間に発生した3,886回の地震データを使用した。ここではGumbelの“極値理論”に基づく確率モデルの等時間間隔を一年にとることにより設定した。ダム計画地点において予想される最大加速度の確率関係は未知であるが、前述のように、ある地点における最大加速度の値には上限があると考えるのが合理的であることから、第3漸近分布を仮定した。

Oliveiraの式、McGuireの式、Esteva-Rosenbluethの式、片山の式を用いて評価

したLos Llanos水力地点の最大加速度に関して、1900年から1992年までの93年の各年における最も大きな最大の最大加速度値を Table 8-6 に示す。

そして、再来周期に対する最大加速度の解析結果を、Fig. 8-5 (Oliveira式) Fig. 8-6 (McGuire式)、Fig. 8-7 (Esteva-Rosenblueth式) およびFig. 8-8 (Katayama式) に示す。

8.2.3 Los Llanosダム地点で想定される最大加速度値

歴史地震に基づき、Oliveira式、McGuire式、Esteva-Rosenblueth式、片山式を適用して、再来周期50年、100年、200年、500年、1000年、そして10000年に対するLos Llanos水力地点における最大加速度を統計確率的に推定した結果を Table 8-7 に示す。

McGuire式と片山式に基づく評価結果は、Oliveira式、Esteva-Rosenblueth式に基づく評価結果に比して、大きな最大加速度を与えている。こうした差異はアッテネーションモデルが導き出される基礎となった地震データが得られた地点の地盤条件に依存していると考えられる。

すなわち、Oliveira式は、堅硬な岩盤表面で得られた地震データに基づき提案されている。また、Esteva-Rosenblueth式は、硬質地盤表面の式を岩盤表面の式に修正して提案されている。

一方、McGuire式および片山式は、硬質から軟質までのさまざまな地盤表面で得られた地震データに基づき提案されている。こうした理由から、McGuire式、片山式は、Oliveira式、Esteva-Rosenblueth式に比して大きい値の最大加速度を与える傾向がある。

このように適用するアッテネーションモデルにより、計画地点で想定される最大加速度の値は異なった結果になるが、Los Llanos計画地点に関しては、Costa Rica国の地震活動度が基本的に高いことから、今回得られた結果を包括するような値、すなわち、「300gal」を想定するほうが適切であろうと判断した。

なお、この300galという値は、統計確率解析の結果の上では、概ね再来周期10000年に対応する。

8.2.4 設計水平震度

(1) 計画地点における地盤の設計水平震度

地震動の水平最大加速度と設計水平震度との関係については、一般に次式が成り立つ。

$$K_h = R \frac{A_{\max}}{980} \dots\dots\dots (5)$$

ここに K_h : 設計水平震度
 R : 変換係数
 A_{\max} : 地震動の水平最大加速度 (gal)

上式の設計水平震度は、実効震度あるいは等価震度と呼ばれるもので、日本における研究では、つぎのような提案がなされている。

① $K_h = (0.35 \sim 0.42) A_{\max} / 980$ (定常正弦波の実効値) $\dots\dots\dots (6)$

② $K_h = 0.33 (A_{\max} / 980)$ (野田⁴⁾, 1975) $\dots\dots\dots (7)$

③ $K_h = 0.072 + 0.332 (A_{\max} / 980)$ (松尾⁵⁾, 1984) $\dots\dots\dots (8)$

④ $K_h = (0.13 \sim 0.34) A_{\max} / 980$ (伯野⁶⁾, 1984) $\dots\dots\dots (9)$

⑤ $K_h = (0.50 \sim 0.60) A_{\max} / 980$ (渡辺⁷⁾, 1984) $\dots\dots\dots (10)$

1987年に公表された日本の原子力発電所耐震設計技術指針⁸⁾では、これらの研究事例を踏まえた上で、総括的な評価考察を加えた結果として、次式が提案されている。

$$K_H = (0.40 \sim 0.60) A_{\max} / 980 \dots\dots\dots (11)$$

実効震度(等価震度)という概念は、地震動によって励起される地盤・構造物内の応力の大きさが、動的な取扱い(地震動入力による動的解析)をした場合と静的な取扱い(設計震度を用いた静的解析)をした場合とで等価になるようにするために考案されたものである。実効震度(等価震度)を算出するために必要となる変換係数は、入力地震動の周波数特性および基礎地盤の波動インピーダンス(剪断波速度×密度)に大きく依存するものである。すなわち、長周期成分が卓越する地震動に対しては、変換係数の値は大きく(例えば0.6)とるべきであり、また、短周期

成分が卓越する地震動に対しては変換係数の値は小さく（例えば0.4）することができる。

基礎地盤の波動インピーダンスが小さい場合は変換係数の値を小さく（例えば0.4）とするべきであり、基礎地盤の波動インピーダンスが大きい場合は変換係数の値を大きく（例えば0.6）とするべきである。

Los Llanos水力地点の設計水平震度は、(5)式において $R=0.5$ として算出してみると、計画地点において想定される最大加速度が300galであることから、地盤の設計水平震度は $K_H=0.15$ を一つの目安と考えることができる。

(2) ダムの設計水平震度

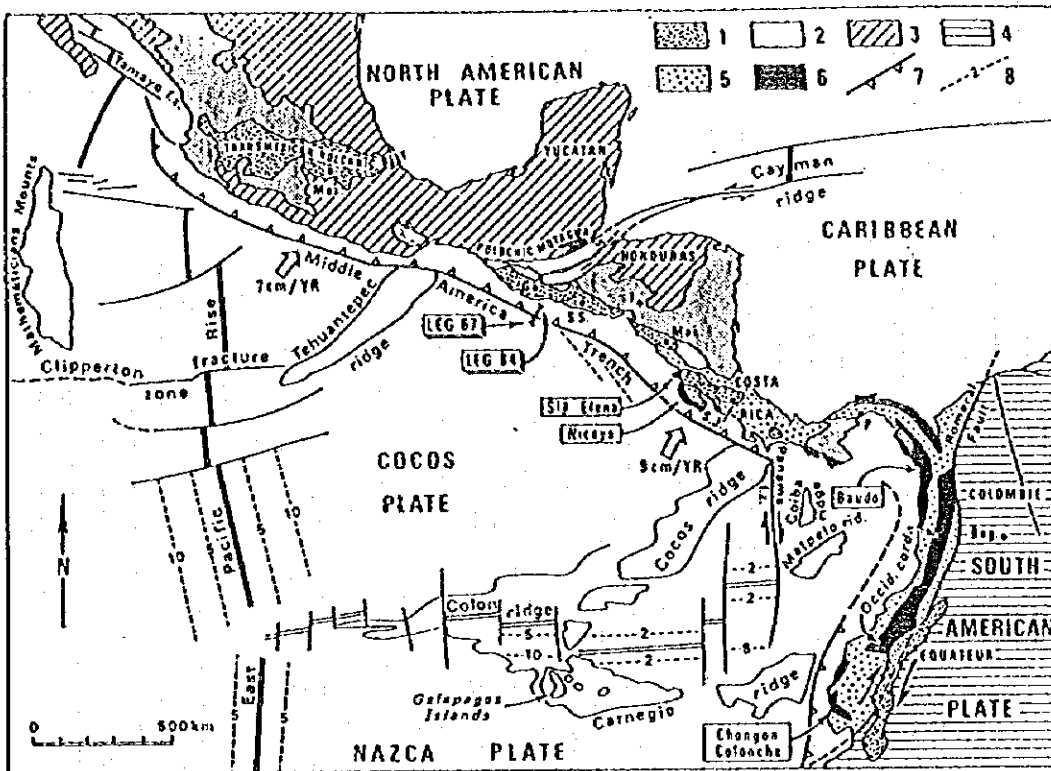
ダムの設計水平震度については、以下に示したように、フィルダム、重力式ダムに関しては地盤の設計水平震度と同じ値を採用する。アーチダムに対しては地盤の設計水平震度の2倍の値を採用する。

ダム型式	ダムの設計水平震度
フィルダム	0.15
重力式ダム	0.15
アーチダム	0.30

8.3 あとがき

ダムの最適形状・最適断面の決定、および、ダムの地震時安定性に関する基本的評価検討は、通常、震度法により実施される。震度法で用いるべき設計震度は、前述のように、計画地点で想定される地震動の最大加速度に変換係数を考慮して評価する。しかし、変換係数の大きさは、想定される地震動の周波数特性、耐震設計の対象となる地盤およびダムの動的特性に依存するため、詳細設計のステップで、動的解析によるダムの耐震安定性の確認を実施することが望まれる。動的解析と静的解析の比較により、設計震度の妥当性を評価することができる。

参考に、ダムの耐震設計の基本フローを Fig. 8-9 に示す。



Tectonic setting of the Santa Elena and Nicoya Peninsulas (Costa Rica) and of Legs 67 and 84 off Guatemala. Present-day plate motions from Minster and Jordan (1978). 1 = Pliocene and Pleistocene volcanism; 2 = Oligocene and Miocene volcanism; 3 = North American plate; 4 = South American plate; 5 = Cenozoic formations of ophiolitic Andes and southern Central America; 6 = Mesozoic and Cenozoic ophiolitic complexes; 7 = subduction zones; 8 = magnetic anomalies.

Fig. 8-1. Seismo-tectonics in Central-South America

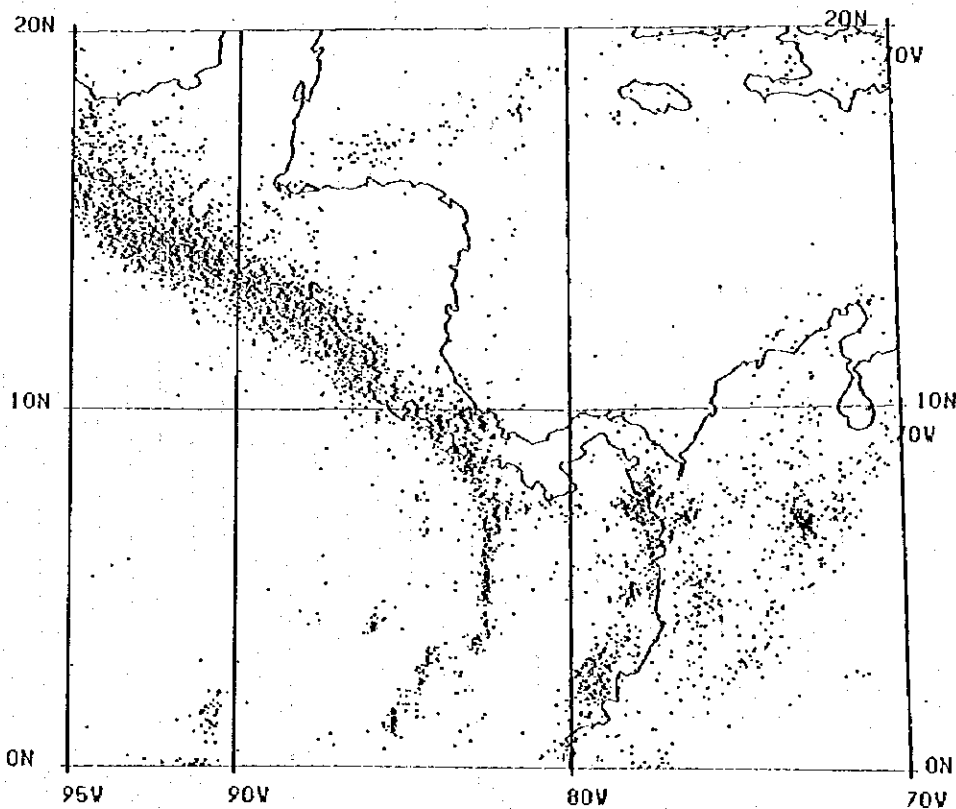


Fig. 8-2 Seismicity around Costa Rica during 1900-1992

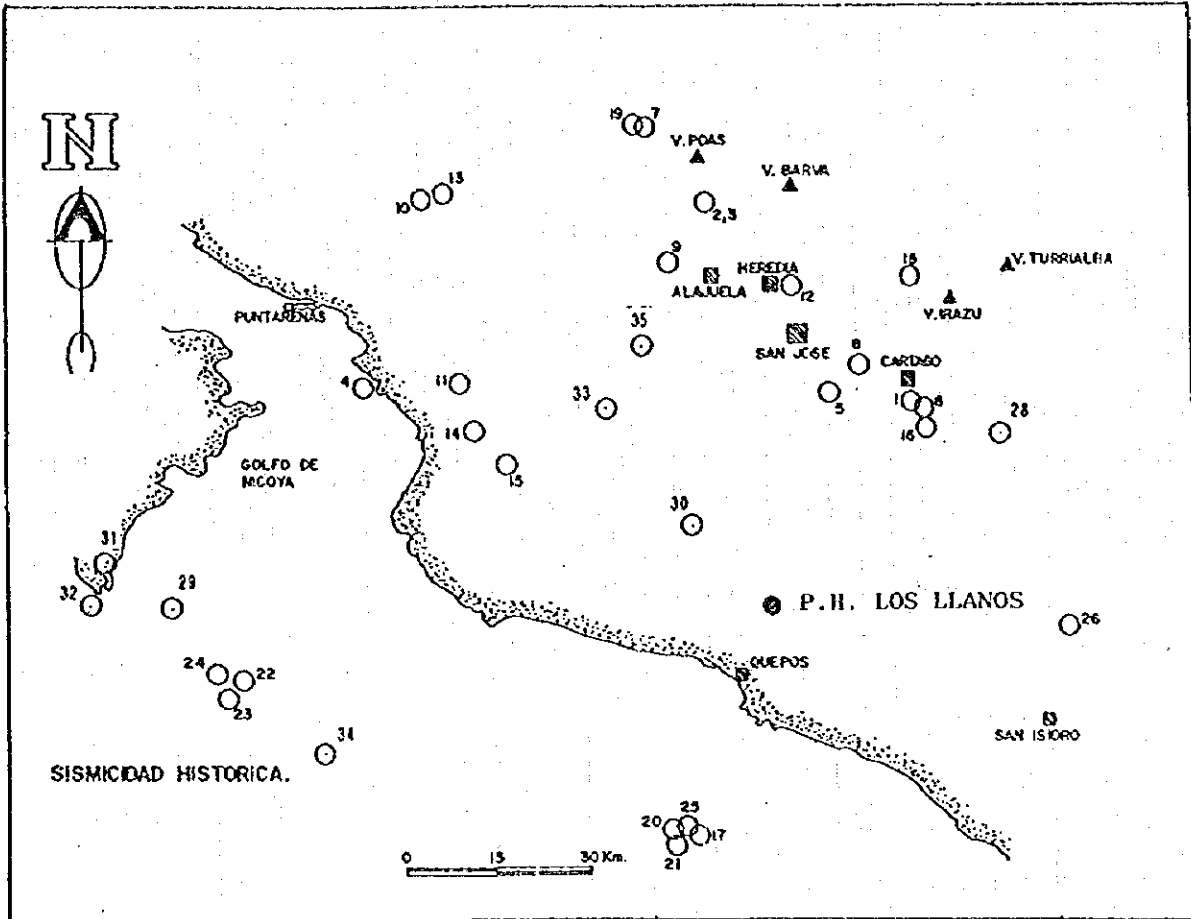


Fig. 8-3 Historical Earthquakes In the Vicinity of Los Llanos Project Site

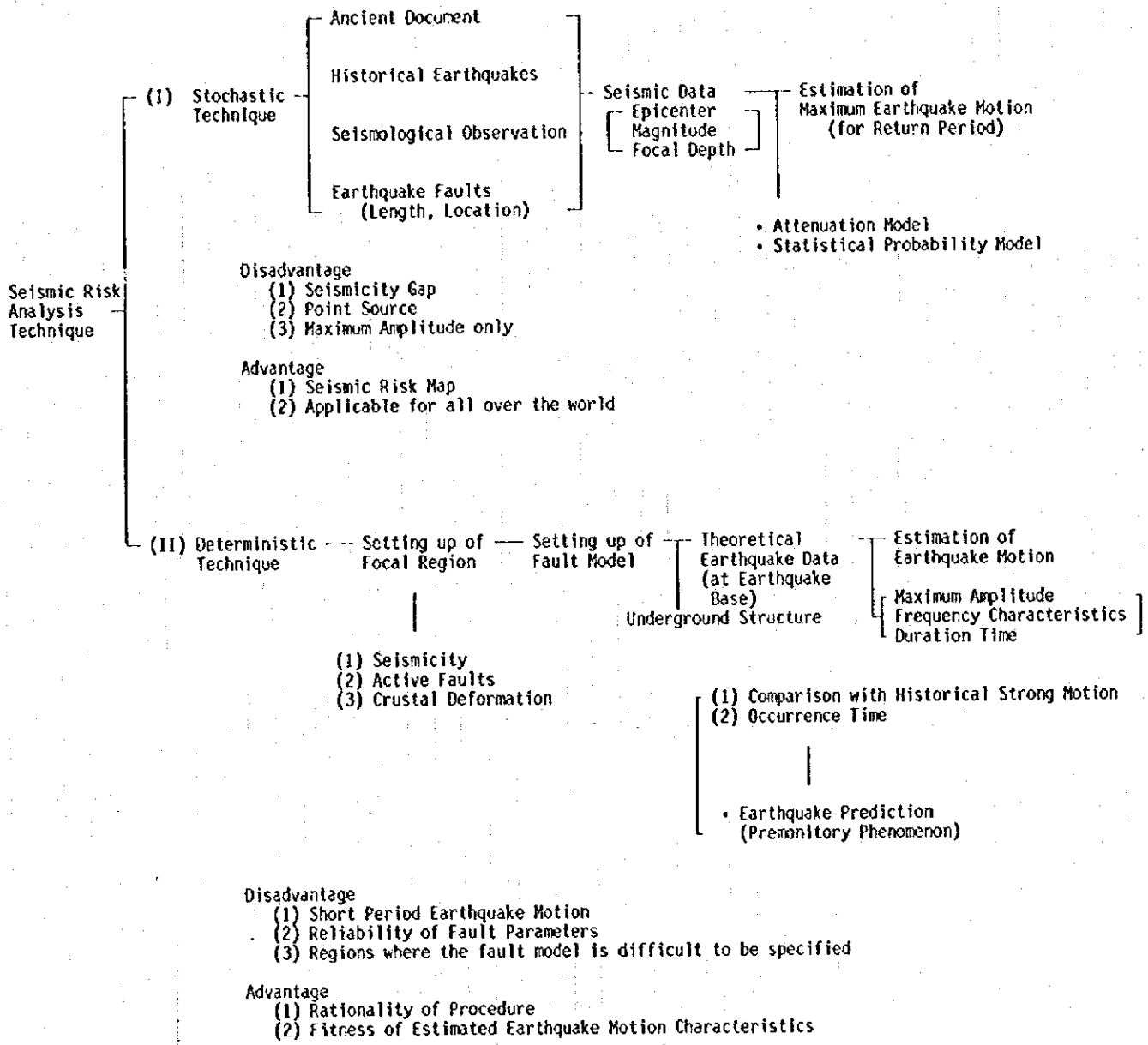
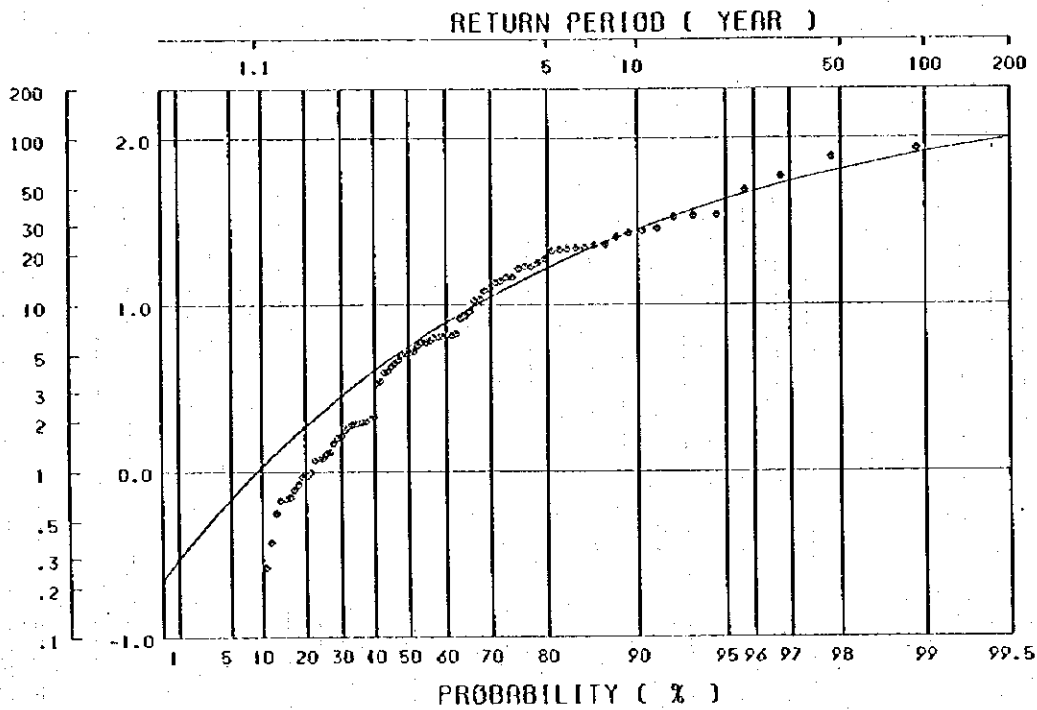


Fig. 8-4 Seismic Risk Analysis Techniques (Stochastic Technique and Deterministic Technique)

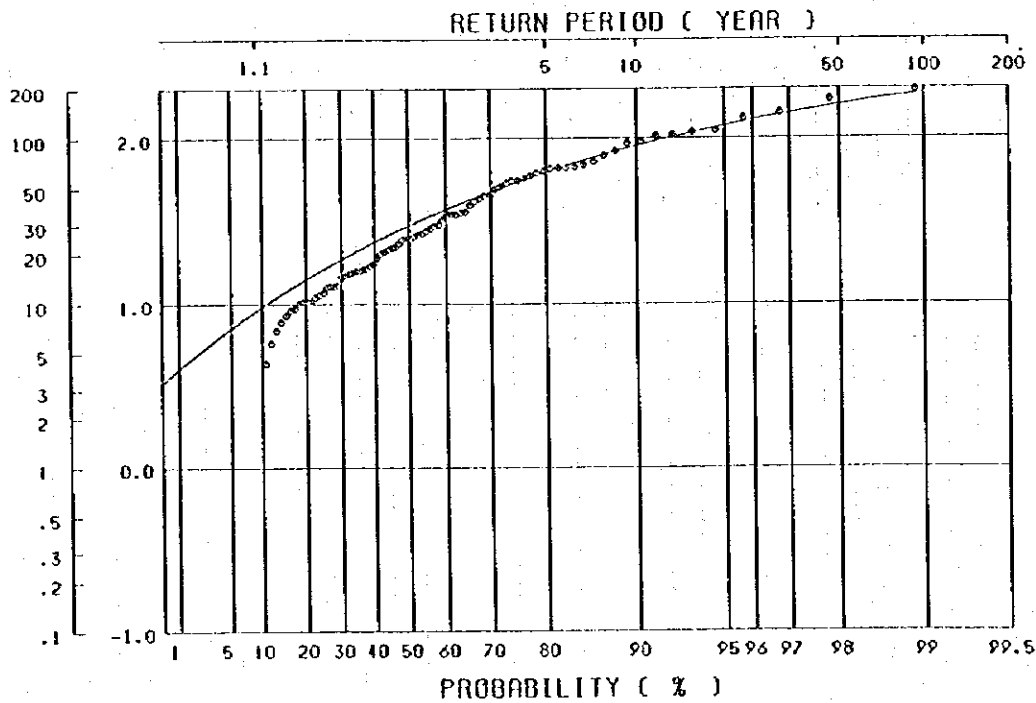
COSTA RICA
LOS LLANOS



1: $\text{LOG } A = 3.09 + 0.347M - 2\text{LOG}(R+25)$ (C. OLIVEIRA)

Fig. 8-5 Return Period for Maximum Acceleration calculated by Eq. (1)

COSTA RICA
LOS LLANOS

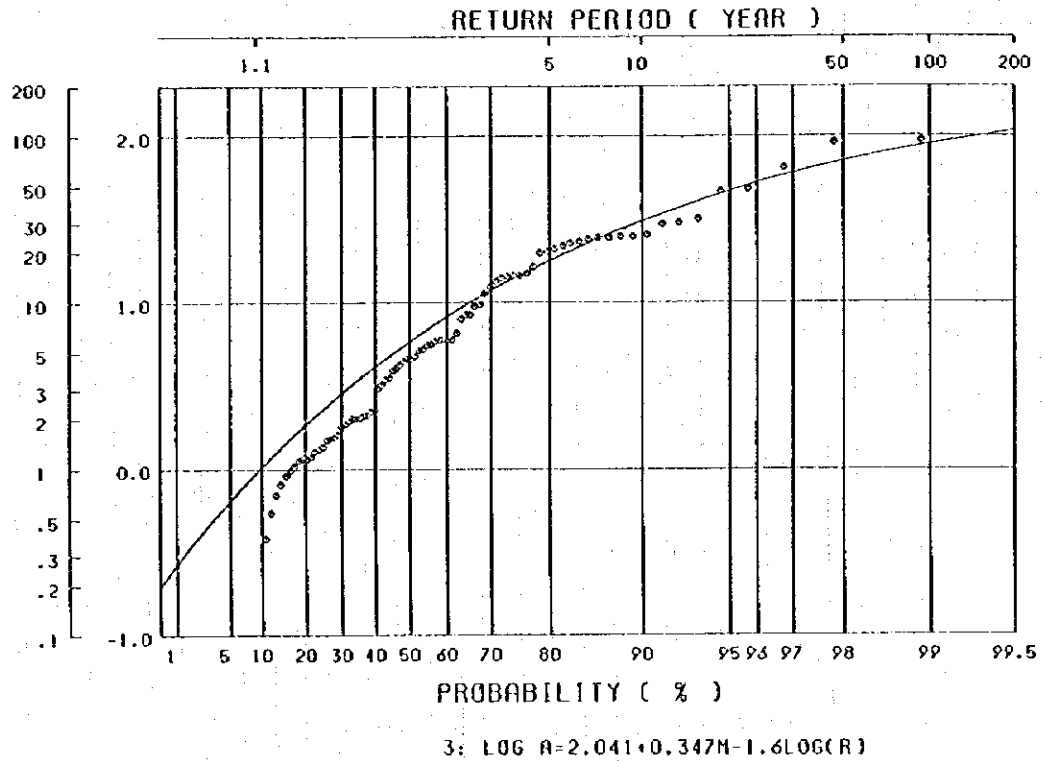


2: $\text{LOG } A = 2.674 + 0.278M - 1.301\text{LOG}(R+25)$

(R. K. MCGUIRE)

Fig. 8-6 Return Period for Maximum Acceleration calculated by Eq. (2)

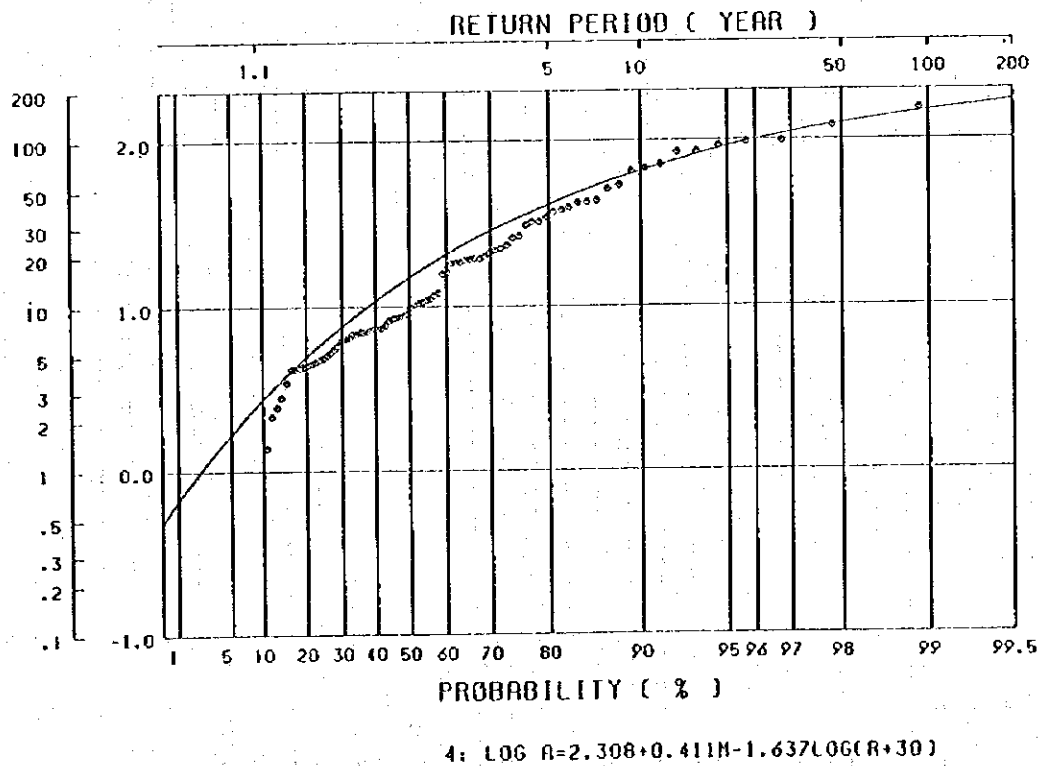
COSTA RICA
LOS LLANOS



(L. ESTEVA & E. ROSENBLUETH)

Fig. 8-7 Return Period for Maximum Acceleration calculated by Eq. (3)

COSTA RICA
LOS LLANOS



(T. KATAYANA)

Fig. 8-8 Return Period for Maximum Acceleration calculated by Eq. (4)

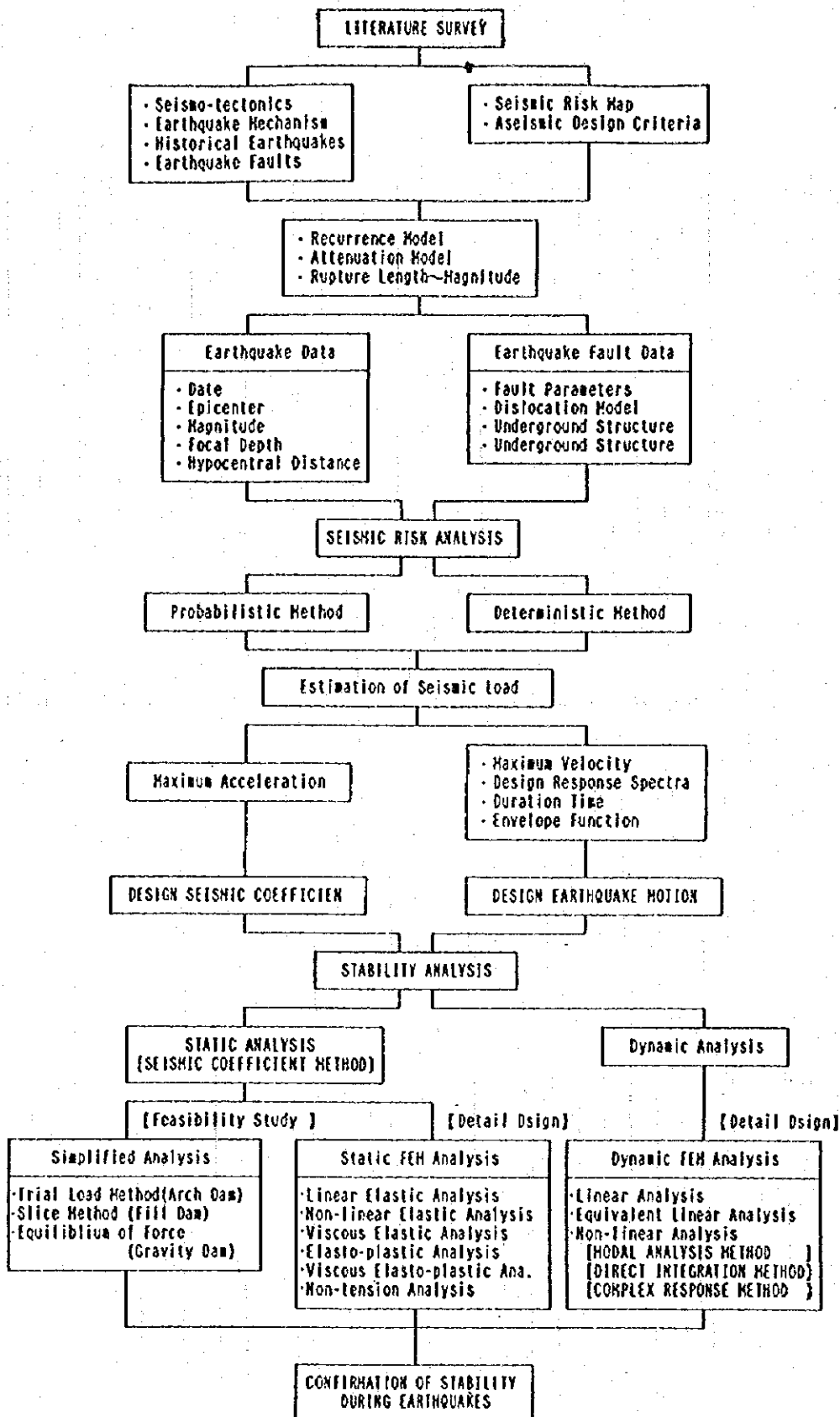


Fig. 8-9 General Procedure of Earthquake Resistant Design for Dam

Table 8-1 Recent Earthquake Disasters in Costa Rica

Earthquake Disaster		Damage			
Date	Type	Location	Killed	Affected	Homeless
04-14-73	Earthquake	S. of Laguna Arenal	21	3,563	84
			Comments: 98 Injured		
04-02-83	Earthquake	SE of San Jose	1	475	475
			Comments: 200 Injured		
07-03-83	Lands lides (due to earthquake)	San Jose Province	1	5,000	0
04-22-91	Earthquake (M=7.0)	SW of Limon (9°36.88'N, 83°9.48'E)	48	6,840	6,752
			Comments: 585 Injured		

Source: OFDA Disaster History on file at the Office of U.S. Foreign Disaster Assistance in Washington, DC. Covers 1900 to the present.

**Table 8-2 Seismicity in Pirris Project Area
M ≥ 5.5, D ≤ 200 km**

SITE	LONG. = -84.050	LATI. = 9.550						
DATE	TIME	LONGITUDE	LATITUDE	MB	EPD	HPD	DEPTH	
18410902	123000	-82.900	9.833	5.8	129.907	133.326	30.000	
18510328	131500	-83.183	10.133	5.5	114.855	118.709	30.000	
18881230	101200	-83.183	10.133	5.8	114.855	118.709	30.000	
19041220	054418	-83.000	8.500	7.7	163.758	174.404	60.000	
19050120	182308	-83.667	9.850	6.7	53.542	61.374	30.000	
19090816	0658	-84.300	10.000	7.0	56.824	82.638	60.000	
19100504	184700	-82.900	9.833	5.5	129.907	133.326	30.000	
19110829	40600	-83.300	10.233	5.5	111.685	115.644	30.000	
19120606	64000	-83.267	10.017	5.5	100.186	104.581	30.000	
19160424	080208	-85.000	11.000	7.3	191.236	200.427	60.000	
19160426	22130	-83.617	10.133	7.3	80.124	85.557	30.000	
19240304	100742	-83.550	9.850	7.0	64.076	70.751	30.000	
19311220	145942	-84.500	11.000	6.1	167.799	326.430	280.000	
19360320	184628	-84.000	11.000	6.0	160.476	163.256	30.000	
19370309	154020	-83.500	9.000	6.5	85.778	90.873	30.000	
19390618	164605	-83.000	10.000	6.6	125.421	143.633	70.000	
19390718	164605	-83.100	10.000	6.5	115.430	119.265	30.000	
19391221	205447	-83.600	10.133	7.3	81.217	86.580	30.000	
19391222	44358	-83.517	9.800	6.7	64.666	71.286	30.000	
19401005	143843	-84.200	9.500	6.4	17.371	34.666	30.000	
19401027	53537	-83.500	9.750	6.7	64.232	70.892	30.000	
19411205	204658	-83.000	8.500	7.2	163.758	166.484	30.000	
19411206	012501	-85.200	10.500	6.3	164.147	166.866	30.000	
19411206	212440	-84.000	8.500	6.8	116.262	120.070	30.000	
19450603	130536	-82.600	8.600	6.9	190.939	193.281	30.000	
19481119	10424	-82.500	10.000	7.0	177.081	179.604	30.000	
19490818	133325	-83.000	8.500	6.6	163.758	166.484	30.000	
19501005	1609	-84.000	11.000	7.7	160.476	163.256	30.000	
19520425	0602	-83.200	8.100	6.5	185.610	188.019	30.000	
19520513	193145	-85.300	10.300	6.8	160.205	172.516	64.000	
19520909	125442	-83.200	9.200	7.0	101.144	105.500	30.000	
19521230	120703	-82.900	10.017	5.5	136.228	139.492	30.000	
19550901	173303	-83.317	10.233	5.8	110.332	114.338	30.000	
19580415	035235	-84.500	8.000	6.8	178.431	180.935	30.000	
19560719	232625	-84.500	9.500	6.3	49.647	58.007	30.000	
19570408	201809	-83.000	8.500	6.6	163.758	166.484	30.000	
19580606	091114	-84.500	8.000	6.7	178.431	180.935	30.000	
19610523	0340245	-84.000	9.800	5.9	28.190	97.179	93.000	
19660327	1853413	-83.500	8.800	5.9	102.657	110.542	41.000	
19660409	24205	-83.167	9.183	5.7	105.248	107.732	23.000	
19720207	1914476	-83.884	8.550	5.5	112.106	112.977	14.000	
19730414	83400	-83.900	10.450	6.5	100.894	105.260	30.000	
19740228	2020102	-84.067	9.350	5.8	22.198	51.076	46.000	
19761220	1018568	-83.933	9.283	5.5	32.163	73.420	66.000	
19780823	38	-84.300	10.100	7.0	66.726	82.197	48.000	
19790824	426	-82.400	9.000	6.5	191.343	194.168	33.000	
19830403	0250011	-83.134	8.733	6.5	135.328	140.295	37.000	
19830509	155303	-82.967	8.233	5.5	188.132	192.132	39.000	
19830703	171423	-82.667	9.500	6.2	151.761	154.697	30.000	
19830923	2344302	-83.400	8.433	5.6	142.688	148.741	42.000	
19900325	132254	-83.933	9.600	6.5	13.934	28.621	25.000	
19900428	123	-82.500	8.883	6.3	185.702	187.121	23.000	
19901222	172754	-83.300	9.900	5.7	90.882	90.970	4.000	
19910422	100	-83.150	9.617	6.5	98.935	99.439	10.000	
19910422	200	-83.150	9.617	7.0	98.935	99.439	10.000	
19910424	191258	-82.500	9.433	5.5	170.924	171.344	12.000	
19920307	153	-83.317	10.200	6.2	107.840	133.681	79.000	

Table 8-3 Historical Earthquakes in the Vicinity of Los Llanos Project Site

No.	Fecha	Lat. N	Long. W.	Mag.	Fuente
01	02/09/1841	09 50.50	83 54.60	M=5.8	F
02	18/03/1851	10 08.00	84 11.70	M=5.5	F
03	30/12/1888	10 08.00	84 11.70	M=5.2	F
04	20/01/1905	09 51.00	84 40.80	Ms=6.7	S
05	13/04/1910	09 50.10	84 01.60	M=5.2	F
06	04/05/1910	09 50.50	83 54.60	M=5.5	F
07	29/08/1911	10 14.00	84 18.00	M=5.5	F
08	21/02/1912	09 52.00	84 00.00	M=5.0	F
09	06/06/1912	10 01.50	84 16.50	M=5.5	F
10	24/04/1916	10 08.40	84 37.80	Ms=7.3	S
11	04/03/1924	09 51.00	84 33.60	Ms=7.0	S
12	18/06/1939	10 00.00	84 06.00	Ms=6.5	F
13	21/12/1939	10 08.40	84 36.00	Ms=7.3	S
14	22/12/1939	09 48.00	84 31.80	Ms=6.7	S
15	27/10/1940	09 45.00	84 30.00	Ms=6.7	S
16	21/08/1951	09 48.05	83 52.90	M=5.0	F
17	09/09/1952	09 12.00	84 12.00	Ms=7.0	S
18	30/12/1952	10 01.50	83 54.50	M=5.5	F
19	01/09/1955	10 14.00	84 19.60	M=5.8	F
20	09/04/1966	09 12.00	84 14.40	Mb=5.3	S
21	05/08/1971	09 12.60	84 15.00	Mb=5.0	S
22	04/08/1973	09 27.60	84 51.60	Mb=5.1	S
23	25/11/1976	09 25.80	84 52.80	Mb=5.1	S
24	01/12/1976	09 27.00	84 55.90	Mb=5.3	S
25	17/08/1982	09 12.60	84 14.40	Mb=5.4	S
26	03/07/1983	09 30.60	83 40.02	Ms=6.2	F
27	25/09/1985	09 02.63	84 02.57	Mb=5.2	
28	31/01/1988	09 47.24	83 47.68	Mb=5.4	
29	02/03/1988	09 31.77	84 52.30	Mb=5.5	
30	26/02/1989	09 38.97	84 13.26	Mb=5.4	
31	25/03/1990	09 35.17	84 56.26	Mb=6.5	
32	25/03/1990	09 32.53	84 56.66	Mb=5.7	
33	30/06/1990	09 49.50	84 22.86	Mb=5.4	
34	23/07/1990	09 20.24	84 47.61	Mb=5.5	
35	22/12/1990	09 54.66	84 18.77	Mb=5.9	

* Fuentes: F = Falla, S = Proceso de subduccion

Table 8-4 Annual Number of Earthquakes during 1900-1992

$D \leq 1,000$ km (D = Epicentral Distance)

Year	N	Sum of N	Year	N	Sum of N
1902	2	2	1952	17	216
1904	5	7	1953	5	221
1905	1	8	1954	11	232
1906	2	10	1955	8	240
1907	1	11	1956	12	252
1909	1	12	1957	9	261
1910	4	16	1958	7	268
1911	1	17	1959	9	277
1912	3	20	1960	10	287
1913	1	21	1961	11	298
1914	2	23	1962	11	309
1915	2	25	1963	98	407
1916	6	31	1964	170	577
1919	3	34	1965	164	741
1920	2	36	1966	147	888
1921	4	40	1967	140	1028
1924	7	47	1968	80	1108
1925	5	52	1969	95	1203
1926	6	58	1970	113	1316
1927	2	60	1971	75	1391
1929	2	62	1972	87	1478
1930	1	63	1973	132	1610
1931	10	73	1974	187	1797
1932	5	78	1975	115	1912
1933	11	89	1976	239	2151
1934	14	103	1977	106	2257
1935	5	108	1978	114	2371
1936	2	110	1979	214	2585
1937	6	116	1980	141	2726
1939	13	129	1981	112	2838
1940	5	134	1982	169	3007
1941	12	146	1983	139	3146
1942	7	153	1984	128	3274
1943	5	158	1985	140	3414
1944	3	161	1986	123	3537
1945	5	166	1987	203	3740
1946	3	169	1988	11	3751
1947	2	171	1989	9	3760
1948	3	174	1990	58	3818
1949	2	176	1991	54	3872
1950	9	185	1992	14	3886
1951	14	199			

Table 8-5 Distribution of Magnitude and Epicentral Distance of Earthquakes during 1900-1992

DISTRIBUTION OF MAGNITUDE AND EPICENTRAL DISTANCE OF THE SEISMICITY DATA

	10<=D<50	50<100	100<200	200<300	300<400	400<500	500<600	600<700	700<800	800<1000	1000<=1	TOTAL
10<M<3.0	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
1 <3.5	01	01	01	01	01	11	01	01	01	01	01	11
1 <4.0	01	21	81	21	71	51	171	121	161	771	01	1461
1 <4.5	201	521	1011	591	741	631	1001	1101	1701	3511	01	11001
1 <5.0	291	501	1151	891	1381	1011	1361	1831	2171	5401	01	15981
1 <5.5	171	181	481	301	571	441	441	641	731	2001	01	5951
1 <6.0	51	51	211	91	151	131	81	91	101	461	01	1411
1 <6.5	21	11	81	161	171	141	121	121	121	411	01	1351
1 <7.0	41	101	141	91	131	131	91	71	71	291	01	1151
1 <7.5	21	51	111	31	31	51	01	41	61	41	01	431
1 <8.0	01	01	41	11	01	01	01	01	01	41	01	91
1 8.0<=1	01	01	11	01	01	01	01	01	01	21	01	31
UNKNOWN	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
1 TOTAL 1	791	1431	3311	2181	3241	2591	3261	4011	5111	12941	01	38861

D : EPICENTRAL DISTANCE (KM)
M : MAGNITUDE

Table 8-6 (1) Annual Maximum Accelerations during 1900-1992

YEAR	ATTENUATION MODEL			
	OLIVEIRA	MCGUIRE	ESTEVA & ROSENBLUETH	KATAYAMA
1900	0.0	0.0	0.0	0.0
1901	0.0	0.0	0.0	0.0
1902	0.69	9.16	0.99	4.20
1903	0.0	0.0	0.0	0.0
1904	25.46	102.89	23.28	92.29
1905	34.85	104.09	32.00	71.10
1906	0.78	10.44	1.16	5.23
1907	2.09	17.39	2.28	8.43
1908	0.0	0.0	0.0	0.0
1909	27.84	92.91	24.67	65.17
1910	3.98	21.95	3.54	8.82
1911	5.04	25.60	4.45	10.65
1912	5.94	28.48	5.23	12.12
1913	1.20	11.31	1.33	4.54
1914	0.70	8.56	0.91	3.49
1915	0.84	10.14	1.12	4.60
1916	34.35	110.84	30.37	85.41
1917	0.0	0.0	0.0	0.0
1918	0.0	0.0	0.0	0.0
1919	1.94	15.71	2.04	6.96
1920	1.49	12.71	1.56	5.09
1921	1.30	12.86	1.54	5.85
1922	0.0	0.0	0.0	0.0
1923	0.0	0.0	0.0	0.0
1924	86.20	192.42	94.15	152.52
1925	1.96	16.11	2.09	7.35
1926	1.87	15.80	2.03	7.32
1927	0.99	10.53	1.19	4.43
1928	0.0	0.0	0.0	0.0
1929	1.93	15.05	1.95	6.28
1930	0.56	6.89	0.70	2.44
1931	2.01	15.45	2.02	6.49
1932	1.97	16.18	2.10	7.38
1933	3.40	21.77	3.22	9.91
1934	6.06	36.06	5.93	21.84
1935	0.67	7.75	0.81	2.82
1936	4.29	24.60	3.92	11.06
1937	16.90	63.70	14.91	38.29
1938	0.0	0.0	0.0	0.0
1939	33.72	109.52	29.80	84.19
1940	59.32	142.58	64.83	97.89
1941	13.92	61.65	12.33	43.28
1942	0.93	9.40	1.05	4.20
1943	0.94	10.26	1.15	4.33
1944	1.18	10.93	1.28	4.22
1945	6.45	35.64	6.04	20.09
1946	0.27	4.31	0.38	1.39
1947	1.60	14.62	1.82	6.80
1948	16.41	65.42	14.48	42.21
1949	6.55	34.65	5.98	18.47
1950	12.10	58.99	11.32	42.34
1951	1.31	12.60	1.51	5.54
1952	49.05	132.06	46.74	96.60
1953	0.38	5.76	0.55	2.16
1954	1.21	11.65	1.37	4.86

Table 8-6 (2) Annual Maximum Accelerations during 1900-1992

YEAR	ATTENUATION MODEL			
	OLIVBIRA	MCGUIRE	ESTEVA & ROSENBLUETH	KATAYAMA
1955	10.71	43.35	9.48	21.19
1956	26.97	83.76	25.04	50.80
1957	6.55	34.65	5.98	18.47
1958	6.38	34.70	5.90	18.95
1959	1.78	14.73	1.87	6.34
1960	2.14	16.89	2.23	7.70
1961	9.12	39.47	8.03	19.22
1962	5.05	29.82	4.78	15.72
1963	4.68	21.38	4.22	7.07
1964	8.24	30.14	8.46	10.22
1965	6.70	26.35	6.53	8.97
1966	21.00	66.38	20.22	34.57
1967	1.64	12.80	1.62	4.77
1968	3.47	19.14	3.07	6.99
1969	17.80	50.97	24.12	19.54
1970	5.96	24.71	5.59	8.24
1971	22.01	66.02	22.78	32.40
1972	5.23	26.25	4.62	10.97
1973	14.67	53.66	14.52	30.96
1974	21.88	69.00	20.91	36.89
1975	4.46	20.72	4.01	6.81
1976	22.82	66.77	24.54	32.18
1977	6.33	27.63	5.66	10.51
1978	28.75	95.22	25.48	67.48
1979	10.60	44.66	9.63	23.15
1980	8.64	32.23	8.44	11.72
1981	5.69	24.58	5.20	8.50
1982	16.93	55.66	16.39	26.52
1983	23.01	72.15	21.87	39.64
1984	13.60	44.90	14.07	18.33
1985	14.66	49.47	14.24	22.21
1986	3.92	20.19	3.45	7.18
1987	12.52	41.54	13.27	16.09
1988	16.75	57.37	19.91	25.91
1989	5.15	23.32	4.62	8.58
1990	77.06	170.27	92.43	121.68
1991	21.33	78.43	25.05	53.40
1992	21.62	55.13	48.50	19.49

Table 8-7 Maximum Accelerations for Six Return Periods

(Unit: gal)

Attenuation Model	Return Period (Year)					
	50	100	200	500	1000	10000
(1) C. Oliveira	64.5	81.9	99.2	120.8	135.6	173.6
(2) R.K. McGuire	157.8	185.8	211.7	242.3	262.2	310.3
(3) Esteva & Rosenblueth	70.6	89.6	108.4	131.5	147.2	186.6
(4) T. Katayama	125.3	148.7	169.2	191.8	205.4	234.3

第9章 開発計画

第9章 開発計画

目次

	頁
9.1 既開発計画のレビュー	9-1
9.1.1 計画概要	9-1
9.1.2 電力量計算	9-3
9.1.3 計画地点の選定	9-4
9.2 基本的開発計画	9-5
9.2.1 基本的条件	9-5
9.2.2 開発計画の比較検討	9-6
9.2.3 基本的開発計画	9-8
9.3 最適開発計画	9-9
9.3.1 開発計画によるNaranjo 川下流域の影響	9-9
9.3.2 最大使用水量の検討	9-9
9.3.3 主要構造物	9-10
9.3.4 最適開発計画	9-13

List of Figures

- Fig. 9-1** Naranjo River Master Plan Layout
- Fig. 9-2** Los Llanos Alternative Layout
- Fig. 9-3** Reservoir Operation at Los Llanos (2)
- Fig. 9-4** Study on Reservoir Storage Volume at Los Llanos
- Fig. 9-5** Los Llanos Dam (Case II-2) Plan and Sections
- Fig. 9-6** Tocori Supply Water Facilities Plan and Sections
- Fig. 9-7 (1)** Area - Capacity Curve 1/2
- Fig. 9-7 (2)** Area - Capacity Curve 2/2
- Fig. 9-8** Los Llanos Dam Cross Section of Alternative Dam Site
- Fig. 9-9** Cross Section ~ Dam Height
- Fig. 9-10** Headrace Tunnel Layout
- Fig. 9-11** Penstock Alternative Layout
- Fig. 9-12 (1)** Profile of Penstock Open Type
- Fig. 9-12 (2)** Profile of Penstock Tunnel Type
- Fig. 9-13** General Plan
- Fig. 9-14** Los Llanos Dam Plan and Section
- Fig. 9-15** Study on Maximum Discharge

List of Tables

Table 9-1	Project Outline of Naranjo River Basin
Table 9-2	Estimation of Electric Energy Generation
Table 9-3 (1)	Energy Production of Los Reyes Scheme
Table 9-3 (2)	Energy Production of Milagro Scheme
Table 9-3 (3)	Energy Production of Los Llanos Scheme
Table 9-3 (4)	Energy Production of Los Llanos Scheme (A)
Table 9-3 (5)	Energy Production of Nara Scheme
Table 9-4	Study of Project Site
Table 9-5	Project Outline of Los Llanos Scheme
Table 9-6	Basic Development Plan of Los Llanos Project
Table 9-7	Project Outline of Los Llanos Projects
Table 9-8 (1)	Energy Production of Los Llanos Scheme (1)
Table 9-8 (2)	Energy Production of Los Llanos Scheme (2)
Table 9-8 (3)	Energy Production of Los Llanos Scheme (3)
Table 9-8 (4)	Energy Production of Los Llanos Scheme (4)
Table 9-9	Investment Cost
Table 9-10	Basic Development of Los Llanos Project
Table 9-11	Monthly Average Inflow at the Intake Channel Site (without Project)
Table 9-12	Monthly Average Inflow at the Intake Channel Site (with Project)
Table 9-13 (1)	Outline of Los Llanos Project (I)
Table 9-13 (2)	Outline of Los Llanos Project (II)
Table 9-14	Development Plan of Los Llanos Project
Table 9-15	Study on Turbine Type
Table 9-16	Standard Alternative Thermal Power Plant
Table 9-17	Result of Optimum Development Plan

第9章 開発計画

9.1 既開発計画のレビュー

9.1.1 計画概要

Naranjo川は、その源をSan Jose県の標高 2,984mのCruce Chinchilla山に発し、上流部でNaranjillo川、中流部でBrujo川を合流させ、Puntarenas県との県境まで急流河川をなして流下し、その後、平坦地域を流下して太平洋に注ぐ、流域面積 332km²、延長41kmの河川である。

Naranjo川の流域は、熱帯多雨地帯であり、上流山岳地帯は、年間降雨量が 6,000 mm以上、下流平坦地域でも 4,000mm以上に達する。また河川勾配も 1/20程度あり、水力発電に絶好の条件を備えている。

Naranjo川流域には、既に実施された“Plan Maestro de la Cuenca Hidrografia Rio Naranjo”で Fig.9-1 に示すようにReyes計画、Milagro計画、Los Llanos計画、Los Llanos-A計画、Nara計画がある。各計画諸元は Table 9-1 の通りであり、計画概要は以下の通りである。

(1) Reyes Project

Reyes Projectは、Naranjo川の支流Naranjillo川の流域面積 68.0km²の地点に高さ 113mのロックフィルダムを築造し、H.W.L 880mとL.W.L 840mとの間の水深40mを利用し、有効容量 23.8×10⁶ m³を貯水する。貯水した水はダム左岸側に設ける取水口から最大 10.8m³/sを取水し、内径 2.4m、延長 3,600mの導水路トンネルと内径 1.5m、延長 600mの水圧管路を通してNaranjillo川下流左岸に設置する発電所に導き、有効落差 255mで最大出力 23.3MWを発電したのち、放水口よりNaranjillo川に放水する。

(2) Milagro Project

Milagro Projectは、Naranjo川の上流、流域面積 27.0km²の地点に高さ10mの取水ダムを築造し、取水ダム右岸側に設ける取水口から最大 6.3m³/sを取水し、内径 2.4m、延長 4,000mの導水路トンネルと内径 1.2m、延長 1,100mの水圧管路

を通じてNaranjo川下流右岸に設置する発電所に導き、有効落差 577mで最大出力 30.8MWを発電したのち、放水口よりNaranjo川に放水する。

(3) Los Llanos Project

Los Llanos ProjectはNaranjo川とNaranjillo川との合流点の下流、流域面積 143.7km²の地点に高さ53mのコンクリート重力式ダムを築造し、H.W.L 485mとL.W.L 475mとの間の水深10mを利用し、有効落差 1.5×10⁶ m³を貯水する。貯水した水は、ダム右岸側に設ける取水口から最大 31.0m³/sを取水し、内径 3.2m、延長 5,900mの導水路トンネルと、内径 2.75m、延長 1,465mの水圧管路を通じて、Paquita川左岸に設置する発電所に導き、有効落差 365mで、最大出力 95.8MWを発電したのち放水口よりPaquita川に放水する。

(4) Los Llanos-A Project

Los Llanos-A ProjectはLos Llanos Projectと同じく、Naranjo川とNaranjillo川との合流点の下流、流域面積 143.7km²の地点に高さ53mのコンクリート重力式ダムを築造し、H.W.L 485mとL.W.L 475mとの間の水深10mを利用し、有効容量 1.5×10⁶ m³を貯水する。貯水した水はダム右岸側に設ける取水口から最大 31.0 m³/sを取水し、内径 3.2m、延長 2,400mの導水路トンネルと、内径 2.75m、延長 1,160mの水圧管路を通じて、Naranjo川右岸に設置する発電所に導き、有効落差 167mで、最大出力 43.7MWを発電したのち放水口よりNaranjo川に放水する。

(5) Nara Project

Nara ProjectはNaranjo川の支流Brujo川の流域面積 28.0km²の地点に高さ10mの取水ダムを築造し、取水ダム左岸に設ける取水口から最大 6.2m³/sを取水し、内径 2.4m、延長 2,800mの導水路トンネルと、内径 1.2m、延長 1,550mの水圧管路を通してSavegre川左岸に設置する発電所に導き、有効落差 432mで最大出力 22.7MWを発電したのち放水口よりSavegre川に放水する。

9.1.2 電力量計算

前述の第2章で算定された各地点流量を基に有効出力並びに有効電力量を算定する。マスタープランのレビューで用いる有効出力および有効電力量の算定基準は以下の通りとした。

(1) 有効出力

一年間を通じ、355日以上毎日原則として6時間以上連続して発電出来る出力とする。計算期間は1971年から1993年の23年間で値はその期間の平均値とする。

(a) 流れ込み式 (MilagroおよびNara計画)

355日流量時での平均出力とする。

- 発電効率は 0.84
- 有効落差は最大出力時の値

(b) 日間調整池式 (Los Llanos および Los Llanos-A 計画)

355日流量時での尖頭出力とする。

- 発電効率は 0.84
- 有効落差は最大出力時の値

(c) 貯水池式 (Los Reyes)

豊水期に有効貯水容量を上限で貯留された水量を渇水期 (主に12月から4月) に補給する。補給量の配分は日平均発電使用水量が最大且つ一定となる様にする。有効出力はその時の尖頭出力とする。

- 発電効率は 0.84
- 有効落差は取水位を満水位から利用水深の1/3差し引いた時の値とした場合の落差

(2) 有効電力量

一年間に発生出来る平均電力量とし、発電効率および有効落差は上述と同じとした。

(a) 流れ込み式および日間調整池式

最大使用水量を上限とした河川流入量の積に発電効率並びに有効落差を乗じた値とする。

(b) 貯水池式

豊水期に有効貯水容量を上限で貯留された水量を上記(a)の値に加え、発電効率並びに有効落差を乗じた値とする。

9.1.3 計画地点の選定

Reyes計画、Milagro計画、Los Llanos計画、Los Llanos-A計画、Nara計画の概算のプロジェクトコストを算出した。工事数量はこれまで完成した多くのプロジェクトの実績を基に算出し、工事単価はPirris Feasibility Study(1991年時点)を参考に決めた。なお、補償費および送電線建設費は含まれていない。

各計画地点のプロジェクトコストおよびFirm Power, Annual Available Energyを基に、Benefit Cost ratio (B/C)およびUnit Cost for Energy (ϕ /kWh)を算出し、各計画地点を比較すると Table 9-4 の通りとなる。

5つの計画地点の中では、Los Llanos Project が B/C, ϕ /kWhとも優れており、Master Planでの検討結果と同じ結果となった。なおBenefitはPirris Feasibility Studyで算出されたkW Cost 119.57 \$/kW, kWh Cost 0.03 \$/kWhを用いた。

9.2 基本的開発計画

9.2.1 基本的条件

検討に用いる有効出力と有効電力量は以下の条件で決める。

(1) 有効出力

一年間を通じ、332日以上毎日原則として6時間以上連続して発電出来る出力とする。計算期間は1971年から1993年の23年間で値はその期間の平均値とする。

(a) 日間調整池式 (Los Llanos (1)および(A)計画, (B)計画)

322日流量時での尖頭出力とする。

- 発電効率は 0.84
- 有効落差は最大出力時の値

(b) 貯水池式 (Los Llanos (2), Los Llanos (3), Los Llanos (4))

豊水期に有効貯水容量を上限で貯留された水量を渇水期(主に12月4月)に補給する。補給量の配分は日平均発電使用水量が最大且つ一定となる様にする。

有効出力はその時の尖頭出力とする。

- 発電効率は 0.84
- 有効落差は取水位を満水位から利用水深の1/3差し引いたとき値とした場合の落差

(2) 有効電力量

一年間に発生出来る平均電力量とし、発電効率および有効落差は上述と同じとした。

(a) 最大使用水量を上限とした河川流入量の積に発電効率並びに有効落差を乗じた値とする。

(b) 貯水池式

豊水期に有効貯水容量を上限で貯留された水量を上記(a)の値に加え、発電効率並びに有効落差を乗じた値とする。

9.2.2 開発計画の比較検討

Los Llanos水力開発計画について、Fig. 9-2 に示すようにLos Llanos (I), Loa Llanos (A), Los Llanos (B)の3つのプロジェクトがある。

3つのプロジェクトの諸元は Table 9-5 のとおりであり、その概要は以下のとおりである。

Los Llanos (I) Project

Los Llanos (I) ProjectはNaranjo川とNaranjillo川との合流点の下流、流域面積 143.7km²の地点に高さ53mのコンクリート重力式ダムを築造し、H.W.L 485mとL.W.L 475mとの間の水深10mを利用し、有効容量 1.5×10^6 m³を貯水する。貯水した水は、ダム右岸側に設ける取水口から最大 31.0m³/sを取水し、内径 3.2m、延長 5,900mの導水路トンネルと、内径 2.75m、延長 1,465mの水圧管路を通じて、Paquita川左岸に設置する発電所に導き、有効落差 365mで、最大出力 95.8MWを発電したのち放水口よりPaquita川に放流する。

Los Llanos (A) Project

Los Llanos (A) ProjectはLos Llanos Projectと同じく、Naranjo川とNaranjillo川との合流点の下流、流域面積 143.7km²の地点に高さ53mのコンクリート重力式ダムを築造し、H.W.L 485mとL.W.L 475mとの間の水深10mを利用し、有効容量 1.5×10^6 m³を貯水する。貯水した水はダム右岸側に設ける取水口から最大 31.0m³/sを取水し、内径 3.2m、延長 2,400mの導水路トンネルと、内径 2.75m、延長 1,160mの水圧管路を通じて、Naranjo川右岸に設置する発電所に導き、有効落差 167m、最大出力 43.7MWを発電したのち放水口よりNaranjoに放水する。

Los Llanos (B) Project

Los Llanos (B) ProjectはLos Llanos Projectと同じく、Naranjo川とNaranjillo川との合流点の下流、流域面積 143.7km²の地点に高さ53mのコンクリート重力式ダムを築造し、H.W.L 485mとL.W.L 475mとの間の水深10mを利用し、有効容量 1.5×10^6 m³を貯水する。貯水した水はダム左岸側に設ける取水口から最大 31.0m³/sとBrujo川に設ける取水ダムから 9.0m³/sを取水し、内径 3.2、延長 5,300mと内径

6m、延長 2,400mの導水路トンネルと内径 3.0m、延長 2,100mの水圧管路を通じて、Naranjo川左岸に設置する発電所に導き、有効落差 242m、最大出力 82MWを発電したのち放水口からNaranjo川に放水する。

(1) プロジェクトの選定

各プロジェクトの工事費、Firm Power, Annual Available Energy を基に、Benefit Cost Ratio (B/C) および発電単価 (¢/kWh) を算出し、各プロジェクトを比較すると Table 9-6 のとおりとなる。

3つのプロジェクトの中でLos Llanos ProjectがB/C, ¢/kWhとも優れている。なおBenefitはPirris Feasibility Studyで算出したkW Cost 119.57 \$/kW, Firm Energy kWh Cost 0.0373 \$/kWh, Secondary Energy kWh Cost 0.0235 \$/kWhを用いた。

(2) 開発規模の検討

Los Llanos (1), Los Llanos (A), Los Llanos (B)の3つの開発プロジェクトの比較において、Los Llanos (1) Projectが最も経済性が高い。

このプロジェクトについてダム高を53m、138m、108m、93mの4ケースで最適なダムの大きさを決めるために検討を行った。

これらのケースの主要諸元は Table 9-7 のとおりである。

Los Llanos (1) Projectは有効貯水量 1.5×10^6 m³の日調整型のプロジェクトである。Los Llanos (2), (3), (4) Projects は有効貯水量がそれぞれ 22.5×10^6 , 9.5×10^6 , 5.0×10^6 m³あり、雨期に貯水した水を乾期に使い、有効出力、発電量を増加させる (Fig. 9-3 参照)。

Los Llanosの流量に基づき、月間の発電量を計算すると Table 9-8 (1) から Table 9-8 (4) のとおりとなる。

各々のプロジェクトコストは Table 9-9 のとおりである。

Project Cost, Firm Power, Annual Available Energy に基づき、B/Cおよび ¢/kWhを比較すると Table 9-10, Fig. 9-4 のとおりとなる。

Los Llanos (1) ProjectがB/C, ¢/kWhで最も良い結果となる。

9.2.3 基本的開発計画

Naranjo川流域の6つのプロジェクト (Reyes, Milagro, Los Llanos (1), Los Llanos (A), Los Llanos (B), Nara) のうち比較検討でLos Llanos (1)が最も良いプロジェクトである結果となった。

Los Llanos Projectサイトにおいて更に有効貯水量を 1.5×10^6 , 5.0×10^6 , 9.5×10^6 , $22.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ の4ケースについて検討した。その中で有効貯水量 $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ のケースが最も経済性の高い結果となった。このためNaranjo川の基本的開発プロジェクトはLos Llanos地点に日間調整ができる貯水量をもつ50m程度のダム作り、ダムから $31 \text{ m}^3/\text{s}$ の水を取水しPaquita川に放水する有効落差 400m、最大出力 96MWの発電計画となる。