

3 6 協力対象事業実施に当たっての留意事項

3 6 1 環境配慮

(1) 開発予定地の埋没遺跡

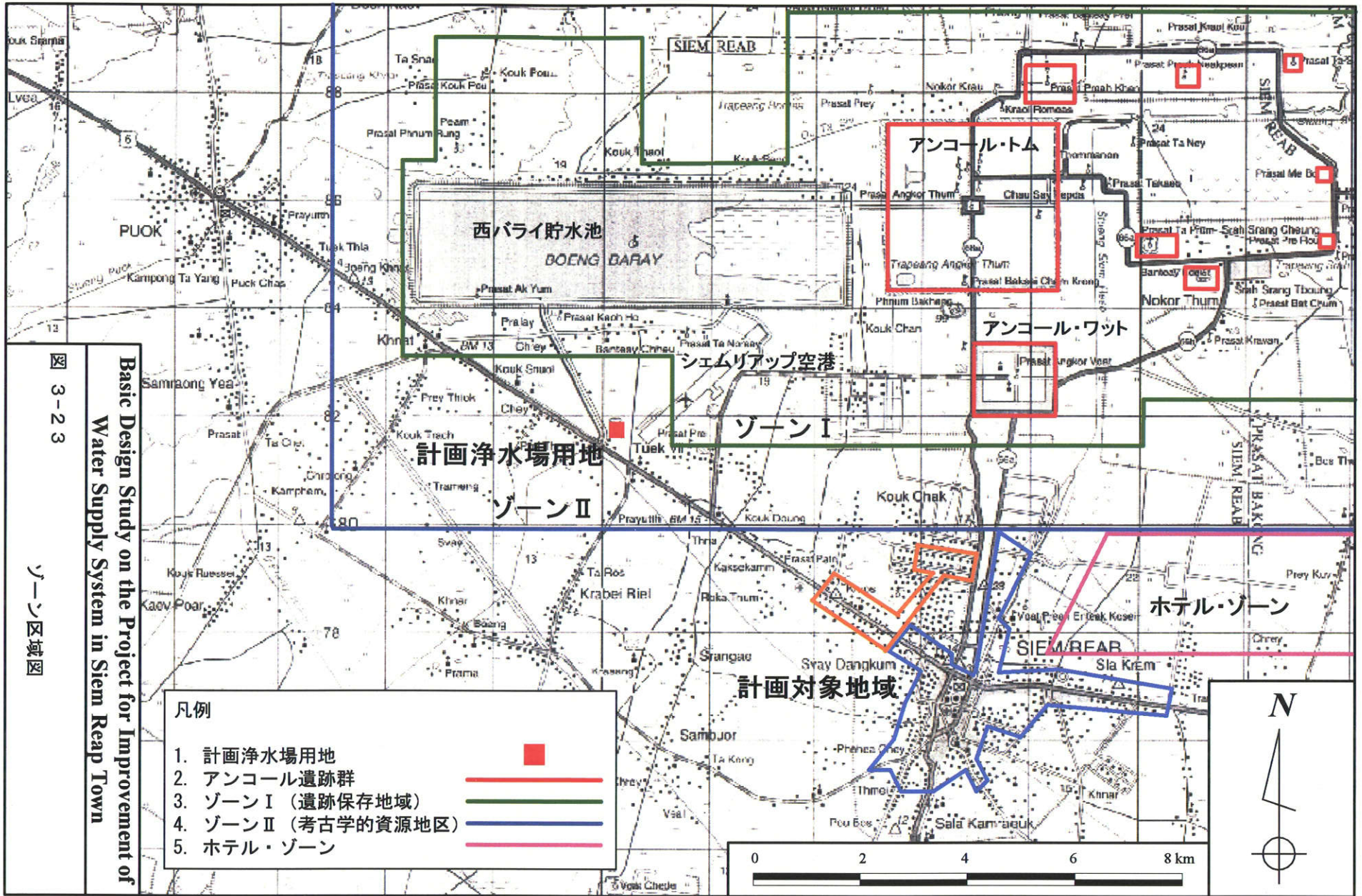
本計画の開発予定地域は、APSARA が遺跡保存のために定めた図 3-23 に示す 5 ゾーンのうち、ゾーン I (遺跡保存地区) の外側、ゾーン II (考古学的資源地区) に入っている。ゾーン II は重要遺跡の保存のための緩衝地帯として設定されている。現在、水源開発予定地や浄水場建設予定地においては、埋没遺跡は確認されていない。しかしながら、西バライ貯水池の西側地区は、8 世紀に最初の首都 (Banteay Chhoeu) が設けられたところであり、多数の遺跡が埋まっている可能性がある (フランス極東学院 (EFEO) が作成した遺跡調査図 3-24 参照)。

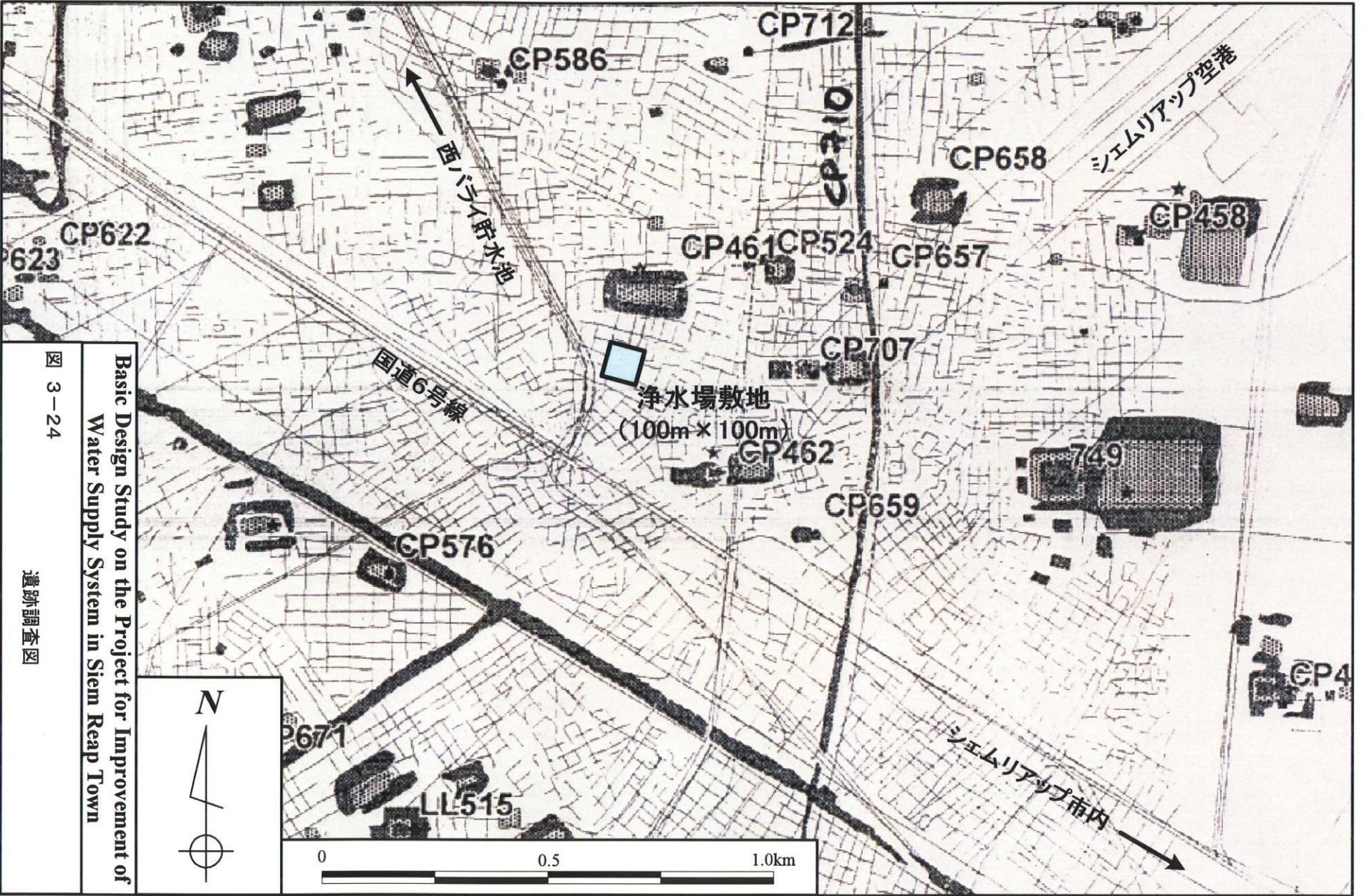
(2) 地下水開発による遺跡周辺部の地盤変動への影響

F/S における地下水シミュレーション結果によれば、アンコール遺跡群地域での地下水揚水による地下水位低下は約 10cm 程度である。アンコールワット遺跡近傍の地盤沈下観測井による観測調査(1999 年 1 月～12 月)では、自然状態における乾期と雨期の地下水位変動と地盤変動が観測されている。これによれば、深度 40m の浅層地下水で約 3.5m の水位変動、地盤変動 1.5mm 程度、深度 80m の深層地下水で約 1.5m の水位変動、地盤変動 1.0mm 程度などが認められている。したがって、地下水開発における水位変動は、自然状態での水位変動に比べて僅かであり、本計画の揚水の影響による地盤変動は、1.0mm 以下となり、問題にならないとしている。

第 1 次現地調査において、ホテルの私設井戸ならびに本計画開発による地下水揚水による地盤沈下への影響を再評価するため、開発調査実施時設置された市内およびアンコールワット遺跡前等の記録計による地盤沈下データが活用できるものと期待されていた。しかしながら、観測設備の多くの部分を取り外され、あるいは破損するなどして、これらの観測データ収集は不可能となった。このため、本計画を変更し、2003 年 8 月中旬に観測施設を改修した。なお、第 1 次現地調査においては、ホテルによる地下水利用の影響の実態を調査するため、比較的大規模なホテルの中から 7 ホテルを選び、マネージャや管理技術者からの聞き取りやホテル内調査を行なった。係る調査においては、地盤沈下による建物基礎のひび割れや浮き上がり等は、現時点においては観察されていない。

遺跡群に関しては日本国政府アンコール遺跡救済チーム (Japanese Government Team For Safeguarding Angkor : JSA) 専門家との意見交換の機会を得た。JSA 専門家によれば、プラサット遺跡では同一基礎地盤上で、重量構造物が分布している部分は沈み、比較的軽量構造物の部分は沈まないという、不等沈下が既に発生しているとの示唆があった。現地における目視調査によれば、不等沈下は多くの遺跡において見受けられ、遺跡自体の自重と地盤の脆弱さにより生じているものと思われる。





Basic Design Study on the Project for Improvement of
Water Supply System in Siem Reap Town

図 3-24

遺跡調査図

2003年10月、調査団は改修された観測施設を巡回し、8月中旬から10月初旬までのデータを収集した。以下に、水源開発計画の条件設定に基く、地下水揚水によって生じると推定される地下水降下とそれらによって引き起こされるとの懸念があるアンコール遺跡への地盤沈下の影響を i)理論的解析と ii)地下水水位・地盤変動観測施設のモニタリングデータの解析結果を用い解析する。

i)理論的解析

本計画は等間隔の直列配列井戸群により、各井戸で同じ水量を揚水する計画であるから、群井理論を適用し、設定された水源開発計画条件に基き、井戸群の揚水による水位降下の及び影響圏の距離を検討する。遺跡群は井戸群の東北の方角に立地し、揚水井戸群とアンコール遺跡まで7.5 kmの距離がある。設定された水源開発計画条件は以下の通り。

国道6号線に沿って7本の井戸を直列に配列し、その井戸配列間隔は450mである。加えて、残る1本を直列井戸配置線から約470m離れた東方に建設する計画である(図3-25 計画井戸群配置概念図を参照)。これらの各井戸から1,100m³/日を揚水し、合計8,800m³/日を取水する計画である。井戸口径は、200mmで、井戸深度は、60mである。帯水層は第四紀層と第三紀鮮新統の地層より構成され、揚水試験結果によれば、全層から取水可能である。

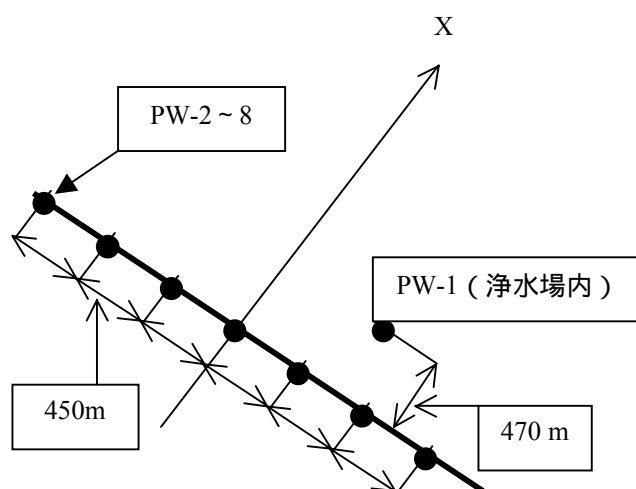


図 3-25 計画井戸群配置概念図

直線配列の井戸群に直角な方向に、X軸を想定し、Xmの距離における水位降下を計算する。1本東方に離れた井戸(PW-1)は、直線配列の井戸群による井戸群全体での影響圏を計算した後、当該井戸が前面に移動したものととして処理する。PW-1井戸の西側に位置する井戸の東方向への影響は、遮蔽効果により背後の井戸の影響を考慮しなくてよい。

有限個の井戸群が直列に配置し、上位の不圧地下水から漏水による補給を受け、等しいQの揚水をするX方向での任意点での水位降下を表す基礎式は以下のとおり。

$$s = \frac{Q_0}{2 k m} K_0 \left(\frac{x^2 + (y - nb)^2}{b^2} \right) \dots\dots\dots (式 1)$$

ここに、 s : 漏水因子 (m)、 K_0 : ベッセル関数、 b : 井戸間距離 (m)、 n : 井戸の個数、 s : 水位降下量 (m)、 Q_0 : 井戸揚水量 (m^3/s)、 k : 透水係数 (m/s)、 m : 地層層厚 (m)

水源開発計画条件に基づき、透水量係数 $T = 235 \sim 250 m^3/d/m$ であるので、中間値として、 $T = 242.5 m^3/d/m$ を採用した。 $Q_0 = 1,100 m^3/日$ である。ここで、 $c = (Tc)$ 、 c : 漏水抵抗 (s) である。

上記の (式 1) を近似式で解く。

$$s = \frac{Q_0}{2 k m} \left\{ \frac{1}{b} e^{-x/b} - \frac{1}{2} \ln (1 - 2e^{-2x/b} \cos \frac{2y}{b} + e^{-4x/b}) \right\} \dots\dots (式 2)$$

(式 2) により、水源開発予定地域から約 7.5 km 東方にあるアンコールワット遺跡周辺において、水源井戸群による地下水の揚水によりどの程度の地下水位降下が生じるかについて検討する。揚水による水位降下は、逆円錐形を描きながら連続し、井戸元で最も大きく、井戸からの距離が離れるに従って小さくなる。この井戸により水位降下の生じる範囲を影響圏と呼ぶ。

最初に、約 7.5 km 離れた距離において、どの程度の水位降下が発生するかを検討した。その結果、アンコール遺跡周辺では、0.16 mm の水位降下が発生することが計算された。この水位降下は、開発調査(1996-2000) 時に、アンコール遺跡前の観測井 (LTb-1&2)において観測された年間自然地下水位変動量 2.3 m と比べれば極めて小さな地下水位降下量であり、ほとんど影響が生じない量である。

次に、水源井戸群の揚水による影響圏がどの程度の距離まで及んでいるかを求めるために、地下水位変動において、測定可能であり有意な最小単位である地下水位の水位降下量 ($s=1cm$)における群井の影響圏の距離 x m を求めた。この水位降下量は、後述する地盤沈下理論による水位降下と地盤沈下量の関係によれば、地盤沈下障害を引き起こすには問題にならないほど、僅かな水位降下量である。

| 水位降下量(s) | 群井の影響圏距離 |
|----------|----------|
| 1 cm | 4,442 m |
| 0.16 mm | 7,500 m |

図 3-26 に地下水位降下が生じる影響圏の範囲を示す。地下水位降下量 1cm の影響範囲は、水源開発予定地からアンコールワットやアンコールトム遺跡群には達していない。従って、本計画による地下水開発は、群井理論の計算結果によれば、アンコールワットへの影響がないものと考えられる。

この結果は、「シムリアップ市上水道整備計画調査」(1996年～2000年)でコンピュータシミュレーションにより、井戸群全体揚水量 $Q=12,000 m^3/日$ で、5年間揚水してもアンコール遺跡への水位低下の影響が及ばないとした結果と同様な結果を得た。ただし、上記解析とは異なり、本解析に利用している群井理論は、定常状態での井戸揚水式であるので、時間関数とは関係なく、定位置での影響圏を算出している。

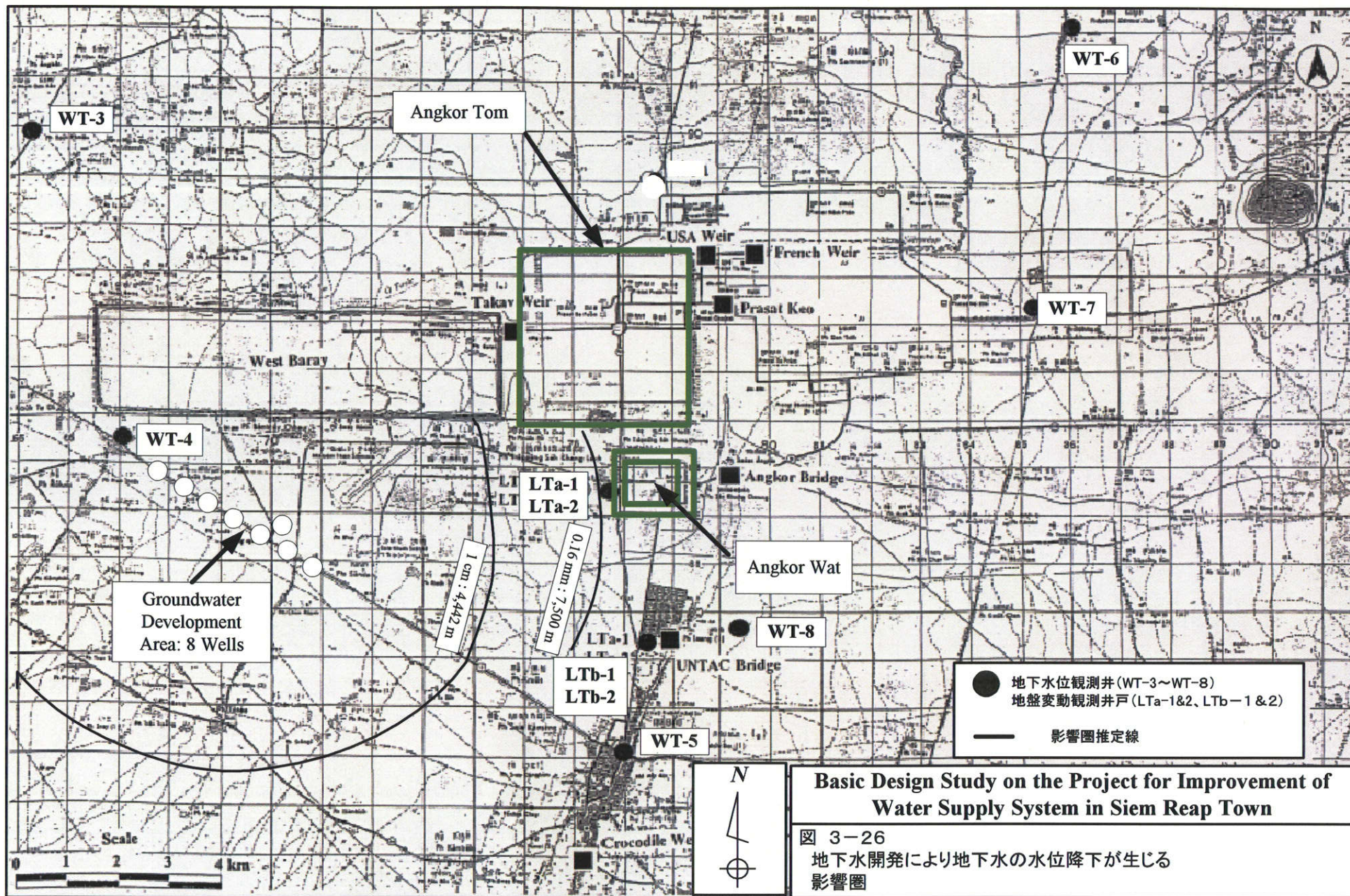
ii) モニタリング井戸のデータ解析

観測施設復旧後(2003年8月中旬)～基本設計概要説明時(2003年10月初旬)までのモニタリングデータに基づき、観測データの解析を行った。その結果、WT-3とWT-5の井戸では、地下水位が近隣の揚水井戸の影響を受けていること、WT-4、WT-6、WT-7の井戸では近隣の揚水井戸の影響はないが、灌漑水路・河川・降雨等の影響が見られると想定されること、WT-8の井戸は、帯水層が深い独立した水体であり、水位変化が殆どみられないこと、LTa-1&2, LTb-1&2は、極めて小さい水位変化や地盤変動が観察されるが、アンコール遺跡への影響を考慮する場合、問題となるほどのレンジではないこと等が明らかになった(資料8-7:地下水水位・地盤変動モニタリングデータ解析図参照)。これらの解析結果は、将来における解析結果と比較検討することにより、アンコール遺跡への影響評価に有用な資料となりうる。

以下に各観測施設のモニタリングデータに基づく、地下水・地盤変動の現況解析を示す。データを、数日、約1月、約1.5ヶ月に亘る期間に区切って解析し、地下水位の変動の傾向を検討した。各井戸の諸元は以下の通りである。なお、以下斜体字にて示す図番(Fig.)は資料8-7:地下水水位・地盤変動モニタリングデータ解析図を参照する。

表 3-36 観測施設の井戸諸元

| No. | 井戸番号 | スクリーン深度(mbgs) | 観測項目 |
|-----|-------|---------------|-----------|
| 1 | WT-3 | 20.38-32.20 | 地下水位 |
| 2 | WT-4 | 13.38-25.20 | 地下水位 |
| 3 | WT-5 | 42.38-54.20 | 地下水位 |
| 4 | WT-6 | 13.38-25.20 | 地下水位 |
| 5 | WT-7 | 44.38-56.20 | 地下水位 |
| 6 | WT-8 | 67.38-79.20 | 地下水位 |
| 7 | LTa-1 | 63.62-71.90 | 地下水位・地盤変動 |
| | LTa-2 | 26.61-34.90 | 地下水位・地盤変動 |
| 8 | LTb-1 | 64.61-72.90 | 地下水位・地盤変動 |
| | LTb-2 | 31.61-39.90 | 地下水位・地盤変動 |



1) WT-3 地下水位観測施設データ

Fig.1-1 地下水位変動状況図(8月12日~8月15日)は、地下水位が、毎日決まって同じパターンで地下水位低下を生じ、回復している様子を示している。水位低下量は、5cm~8cm程度である。これは、近隣に毎日一定時間揚水する井戸があり、その影響が現れていることによる。長期的にみれば、毎日地下水位の低下と上昇を繰り返しながら、全体として水位が上昇していく傾向にある(Fig.1-2 参照)。雨季のために地下水位は上昇する傾向にある。

2) WT-4 地下水位観測施設データ

近隣の揚水井戸によるような決まったパターンの水位変動はみられない。しかし、水位低下が20cmにも及ぶような大きな日変動が見られる(Fig.2-2 参照)。変動パターンは不規則で、小さな日変動を繰り返しながら、約1週間ごとの不規則な大きな変動を生じているのが観測される。近隣に西バライ貯水池からの灌漑用水路が走っているため、これによる影響と降雨による地下水涵養の影響による地下水位変動が考えられる。雨季のために地下水位は上昇する傾向にある。

3) WT-5 地下水位観測施設データ

観測施設は、水道局敷地内にあり、同じ敷地内で水道水源として、地下水を毎日揚水している。Fig.3-1の短期地下水位変動解析図によれば、50cm-70cm 水位低下して、回復しているパターンを毎日繰り返している。これは、長期的にみても同じである(Fig.3-2 参照)。ただし、今回の観測期間である雨季においては水位が毎日一定幅をもちながら変動し、全体としては水位が変化せず、一定水位を保っているため過剰揚水にはなっていないことが窺える。

4) WT-6 地下水位観測施設データ

Fig.4-1 に示した短期データによれば、近隣の揚水井戸による揚水の影響は現れていない。ただし、長期のデータ(Fig.4-2)によれば、水位が数日ごとに10cm以上大きく変動し、変動の仕方も規則性が無い。これは、近くの灌漑用水による水位変動若しくは河川・降雨等の地下水への涵養により、その水位の影響を受けているものと想定される。井戸の立地している場所は、農村部の家屋がまばらな学校にあり、揚水井の影響は無い。

5) WT-7 地下水位観測施設データ

Fig.5-1、Fig.5-2 に示されているように、本観測井戸も WT-6 と同様に、近隣の揚水井戸の影響はみられない。WT-6 と同様に、数日ごとの水位変動が著しく、その水位変動は、15cm 以上にも達する。この原因として、WT-6 と同様に、近くの灌漑用水による水位変動若しくは河川・降雨等の地下水への涵養により、その水位の影響を受けているものと想定される。井戸の立地している場所は、農村部の家屋がまばらな学校にあり、揚水井の影響は無い。

6) WT-8 地下水位観測施設データ

Fig.6-1 に示した短期での地下水位変動の結果は、全く他の揚水井戸や降雨による影響がなく安定し

ている。これは、長期的にみても全く同じである(Fig.6-2)。これは、本観測井のストレーナ深度が67.38-79.20mと深いために、他の井戸と違って、浅層地下水と連動せず、深い地下水体であることによると想定される。

7) LTa-1&2 地盤変動・地下水位観測データ

a) 地下水位観測データ

表 3-36 によれば、LTa-1 の井戸スクリーン位置は 63.62m ~ 71.90m に、LTa-2 のそれは、26.61m ~ 34.90m に設定されており、LTa-1 の方が LTa-2 よりも深い。したがって、LTa-1 の方が深井戸であり、LTa-2 の方は浅井戸である。Fig.7-1 の短期期間での水位変化図によれば、各井戸の水位は、LTa-1 の方が深く、LTa-2 の方が浅く、その差は約 1m である。両井戸の地下水位ともに、近隣の揚水井戸の影響を受けていない。全体として、両深度の井戸の水位ともに安定しているが、浅井戸(LTa-2)の地下水の方が数 cm の範囲で日水位降下が生じている (Fig.7-2 を参照)。

b) 地盤変動観測データ

数 $\text{mm} \times 10^{-1}$ 程度の範囲で深井戸、浅井戸ともに変動している。地盤は回復したり、低下したりしており、地層が弾性体であると判断されるが、変化量が少ないため、測定誤差も含まれる可能性があり、長期的な観測が必要である。

8) LTb-1&2 地盤変動・地下水位観測データ

a) 地下水位観測データ

表 3-36 によれば、LT b-1 の井戸スクリーン位置は 64.61m ~ 72.90m に、LT b-2 のそれは、31.61m ~ 39.90m に設定されており、LT b-1 の方が LT b-2 よりも深い。したがって、LTa-1 の方が深井戸であり、LTa-2 の方は浅井戸である。井戸はアンコールワット堀の西南隅に、遺跡に隣接して立地している。地下水位は、LTb-2 の方が深く、LTb-1 の方が約 50cm 浅く被圧されている。浅井戸の地下水位は、数 cm の範囲で変動し、波打っている。図.8-1 に示すように、短期での地下水位変化が滑らかであることから、約 2km 南に立地する大規模ホテルの揚水井戸による明瞭な影響はを受けていない。しかし、Fig 8-2 に示すように長期で見た場合、日変動として数 cm の範囲内で波を打っているため、今後この波動の原因が、降雨の影響によるのか、2km 離れたホテル群の影響によるのかを見極める必要がある。

b) 地盤変動観測データ

深井戸、浅井戸ともに地盤変動している。特に、Fig.8-3 に示したように、短期的に見た場合、浅井戸(LTb-2)で数 $\text{mm} \times 10^{-1}$ の周期変動が観察される。これは、地層が弾性体であり、地下水位の変動により、地盤が変動しているものと考えられる。

iii) 将来におけるモニタリングデータの活用とシェムリアップ水道局による解析の必要性

モニタリングデータの解析の結果、近隣の揚水井戸によって観測井戸の地下水位が影響を受けてい

る観測地点や全く影響を受けていない観測地点が存在する。アンコール遺跡等、地盤変動施設での地下水位及び地盤変動量は、現在、殆ど影響を無視できる程度の変動量でしかない。今後、当地域での地下水の開発は、何らかの規制を行わない限りますます増大すると思われる。将来に亘って観測を継続し、現状の水位変動や地盤変動に影響を及ぼすような新しい水位変動の傾向が観測されたときに、その原因を究明し、対策を講じることが必要となる。観測データは、その際の基礎資料となる。

シムリアップ水道局は、継続的にモニタリングデータの解析を行い、地域的に地下水過剰揚水が発生しているかどうか、どの井戸の揚水がアンコール遺跡へ影響を与えているかを解析することが必要となる。その際の着眼点は以下のとおりである。

- 地域的に地下水の過剰揚水が発生しているかどうかは、観測井の長期間にわたる水位変動において、過去の水位よりも大きな水位低下が季節にかかわらず発生しているかどうかにより判定する。これは、長期的周期の水位低下現象を把握することにより解明する。
- 一部の観測施設の観測データには、近隣井戸による揚水の影響が既に観察される。特に、アンコールワット傍に配置された LTb-1&2 と市内に配置された LTa-1&2 の地下水位・地盤変動に注目する。これらの井戸の水位観測データを数日単位のスケールで図化した場合、毎日同じような水位低下パターンが観察された場合は、近隣の揚水井戸の影響により水位低下が発生していると考えられる。さらに、時間単位でグラフ解析し、近隣井戸の揚水時間との関連を調べて、影響を及ぼしている揚水井戸を特定する。その井戸に揚水量の絞込み等の揚水規制を依頼すべきである。また、地下水位変動と降雨量との関係も検討し、その影響度合いを調べる。
- 2 観測井戸 (LTa-1&2、LTb-1&2) の地下水位変動と地盤変動の関連を調べる。地下水位変動が地盤変動と関連があり、なおかつ、地盤変動が許容沈下量に近くなっていれば、地下水揚水規制を行うべきである。
- 広域的な地下水過剰揚水が発生している場合には、大規模な新規地下水調査が必要となる。

iv) 地盤沈下理論による水位低下と地盤沈下量の関係の検討

地盤沈下は、地下地質の状況によって沈下のメカニズムが異なる。地盤沈下メカニズムは以下のように2つに区分される。

1) 圧密沈下

地下に粘土層が水平分布して連続し、その上部・下部層の帯水層から地下水を取水し揚水した場合、その取水量に水平方向からの地下水の補給が間に合わない時は、粘土層からの地下水の搾り出しが生じて、この粘土層の収縮により圧密沈下が生じる。この搾り出しは、長期にわたり、ゆっくりと生じる。

2) 即時沈下

帯水層が弾性体で、地上に建築物等の重量物が乗った場合、即時に沈下するが、重量物が取り除か

れば、沈下は、直ぐに回復する。これが即時沈下と呼ばれる現象である。

開発調査時に実施されたコアボーリングデータを参考にして、シェムリアップ地域での地層状況を検討する。本調査地域には、圧密沈下を生じるような不透水性の粘土層は存在しない。そのため、圧密沈下理論は適用されない。その地層は、大部分は、砂層、シルト質砂層、粘土質砂層であり、地下水基盤として、下部に存在するのは粘土岩等である。地下水取水を考慮する場合、主に対象となるのは、地下水基盤より上部層となる。

これらの上部層は、通常、弾性体として扱われており、地下水を揚水した場合、地下水位低下に伴う即時沈下量を求めることになる。この計算を行うに当たっての条件として、開発調査では WT-4 と WT-7 において、約 60m までの地層の深度別比重を測定している。その結果に基き、測定結果から地下水位低下にかかわる最上部層（沖積層）の比重を平均 $Sp=2.60$ とする。

地下水を揚水した場合、不圧地下水の地下水面の低下が生じる。この地下水位の低下が生じるまでは、地下水中に砂層が浮いている状態で浮力により軽減されていた土圧荷重が、地下水が低下し、浮力がなくなることにより、下方にかかる荷重の増加となり、即時沈下が生じる。この概念を図 3-27 および図 3-28 に示す。

堆積層 A での土質にかかる水の浮力が地下水位低下により消失する。その時の単位面積下面での増加荷重(W_{add})は次の通り。

$$W_{add}=(W_{first}-W_{second}) \times L_1 \times L_2 \times (Sp - (Sp-1))$$

ここに、 W_{first} ：最初の地下水位 (m)、 W_{second} ：水位が低下した地下水位 (m)、 L_1 、 L_2 ：立方体の辺の長さ (m)、 Sp ：比重、 $Sp-1$ ：土壌中に水が浸水していた時の浮力による重さ (kg)

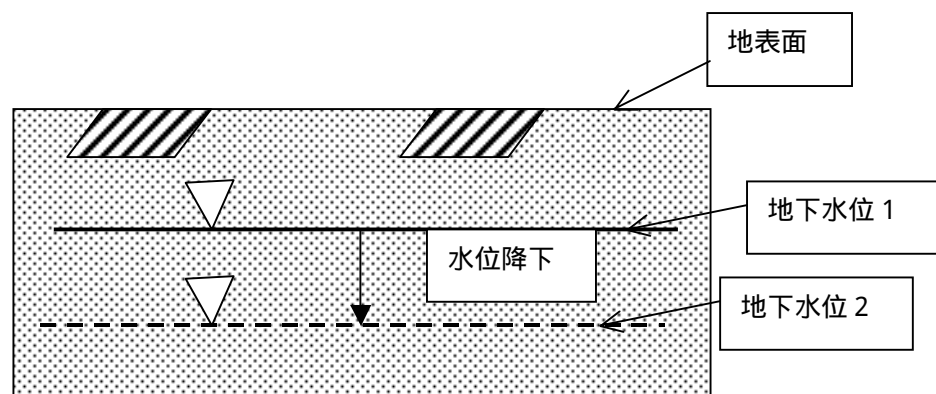


図 3-27 即時沈下の発生メカニズム概念図

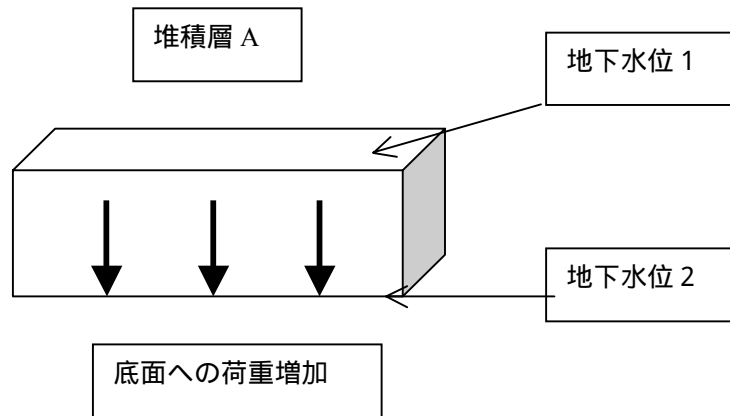


図 3-28 地下水水位の低下による底面への土圧増加概念図

1) 沈下量の計算

アンコールワット周辺の地下水水位が近隣の揚水井戸により、例として、近隣の揚水井戸の影響を受けているモニタリング井戸のうち、WT-5 井戸で観測された最も大きい水位降下量 (50cm) における沈下量を検討する。このときの単位面積(m²)あたりの浮力消失による荷重増加量を計算すると、 $W_{add}=500\text{kg/m}^2$ の増加となる。

開発調査における一軸圧縮試験データを利用し、この荷重増加に対する沈下量を計算する。一軸圧縮試験データを表 3-37 に示す。これは、垂直方向に荷重をかけた場合の圧縮量を測定したものである。当地域の幾つかのサンプル試験データにおいて、その結果はほとんど変わらないが、ここでは、水源開発予定地付近の WT-4 観測井戸の試験データを参考にする。

表 3-37 WT-4観測井戸の一軸圧縮試験データ結果

| Vertical Strain (%) | Vertical Stress (ton/m ²) |
|---------------------|---------------------------------------|
| 0.00 | 0.00 |
| 0.09 | 1.20 |
| 0.17 | 1.54 |
| 0.26 | 2.06 |
| 0.34 | 2.49 |

注記：試験結果の一部を表示

シェムリアップ地域の地層状況は、比較的一様であり、細砂層・シルト混じり細砂層や粘土混じり細砂層によって構成されている。そのため、水源開発地域に近い WT-4 観測井戸のコアボーリング資料に基づく地層状況により地盤沈下量を検討する。地下水低下による地盤への荷重増加の影響を受けるのは、沖積層である。地盤沈下の 500kg/m^2 の荷重増加に対する圧縮率、つまり地盤沈下量は、WT-4 付近の沖積層が 14 m であり、次のように計算される。

500kg/m^2 に対する垂直圧縮率 = 0.0375 % であり、
 地盤沈下量 = 0.525 cm
 = 5.25 mm の沈下量となる。

この沈下量に対しての許容の度合いを次に検討する。

2) 許容沈下量と計算沈下量との比較

日本建築学会(1988)、建築基礎構造設計指針によれば、許容総沈下量(即時沈下の場合)次のような基準値が設定されている。

表 3-38 許容総沈下量(即時沈下の場合)(単位: cm)

| 構造種別 | コンクリート ブロック造 | 鉄筋コンクリート造 | | |
|------|-----------------|-----------|------|-------------|
| | 基礎形式 | 連続(布)基礎 | 独立基礎 | 連続(布)基礎 |
| 標準値 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 - (4.0) |
| 最大値 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 6.0 - (8.0) |

注記: ()は2重スラブ等で十分剛性が大きい場合

アンコール遺跡は石積みであり、現在の建築基準条件と全く同じではないが、表 3-38 の基準を当てはめてみれば、コンクリートブロック造に近く、最大値で 2.0cm の沈下量が許容できるものと考えられる。

上記 50cm の地下水位降下を生じた場合の地盤沈下量は、5.25mm であり、この程度の沈下量では十分許容値の範囲内となる。標準値及び最大値での水位降下量がどのくらいとなるか計算した。その結果を以下に示す。

表 3-39 許容沈下量を生じる場合の地下水位降下量

| 構造種別 | コンクリート ブロック造 | 地下水位降下量 |
|------|-----------------|----------|
| 標準値 | 1.5 cm | 96.9 cm |
| 最大値 | 2.0 cm | 129.0 cm |

注記: コンクリートブロック造と石積みアンコール遺跡とは同じ条件ではないので、参考値である。

モニタリング井戸の観測データによれば、近隣の揚水井の影響により、WT-3 観測井で 7cm、WT-5 観測井で 50~70cm の日水位変動が観測されている。しかし、そのために、地盤沈下が生じている証拠は観察されていない。これは、近隣井戸の揚水による水位低下がこの程度あっても、地盤沈下に影響するほどに至っていないとの証拠であると考えられ、また、これらの数値は、表 3-38 の許容沈下量を生じる地下水位低下量の範囲内に収まっている。LTb-2 の浅い帯水層の地下水を観測している井戸では、日地下水位変化が約 10cm 上下しており、それに伴って、地盤も 0.2mm 程度上下している。開発調査によれば、1998 年~1999 年の一年間に LTb-1&2 の観測井で、2.3m の地下水位変動と 1.3mm の地盤変動があり、両現象とも可逆的であることが明らかになっている。今回の調査で判明した可逆的地盤日変動は開発調査の結果をさらに詳細に短期間で観察した結果に相当する。地下水位は、降雨による涵養により変動しているものと考えられるが、地盤も日上下変動を繰り返しているのは、地盤が剛体であり、即時沈下の状況にあることを示していると考えられる。

v) 結論

水源開発によるアンコール遺跡への影響を考慮するために、群井理論及び地盤沈下理論を利用して、その影響を検討した。その結果、開発調査のコンピュータシミュレーション結果によって明らかにな

ったように、本検討においても適正な揚水量の範囲内では地盤沈下の影響を回避できるとの結論となった。

本基本設計調査において、開発調査時に建設され、消失・損傷を受けていた地下水・地盤変動観測施設を復旧した。今回、短期間の観測データであるが、その結果を解析した。水源開発地域は、アンコール遺跡の西方約 7.5 km の遠距離にある。観光開発に伴って多数の大規模ホテル群が建設されている。これらのホテル群は、地下水を水源として利用しており、アンコールワットの南方約 2 km まで迫ってきており、将来的には、ホテル群の増設による地下水過剰揚水によるアンコール遺跡への悪影響も十分予想される。観測データによれば、現在、アンコール遺跡への地下水揚水の影響はほぼ生じていないと考えられるが、モニタリング井戸の継続観測と解析を続けることが重要である。そのためには、実施機関である MIME およびビシムリアップ水道局のモニタリング井戸に対する十分な維持管理が必要である。

vi) 提言

調査内容の検討結果に基づき、以下に提言をまとめる。

- 将来、広域的な地下水過剰揚水が発生した場合には、大規模な新規地下水調査を実施することが必要となる。広域的な地下水過剰揚水の発生は、経年的な長期の地下水水位変動を把握することにより解明する。
- 将来的にアンコールワット観測施設等のモニタリングデータに他の揚水井の影響や地盤沈下の影響が現れた場合には、十分に検討し、影響を及ぼしている揚水井戸所有者に警告を発するとともに、地下水揚水規制も検討すべきである。
- モニタリングデータを検討し、地下水水位変動と降雨量との関係を検討し、その影響度合いを調べる必要がある。
- 観測施設の設備のうち、鉛蓄電池の寿命は約 3 年であるので、取り替えが必要である。その他取り替えが必要な設備は、動作状況を常に監視し、不具合が認められた場合は、順次取り替えるべきである。
- シェムリアップ水道局は、将来的には、予算措置とともに、観測施設体制を拡充し、専門の担当職員を配置すべきである。
- 観測施設を毎月見回りし、施設の保全に関し注意すべきである。観測施設の必要性に関し、シェムリアップ州、APSARA 等関係部局に宣伝すべきである。
- 毎年定期的に観測データをまとめ、本報告書を参考として評価し、報告書にまとめるべきである。

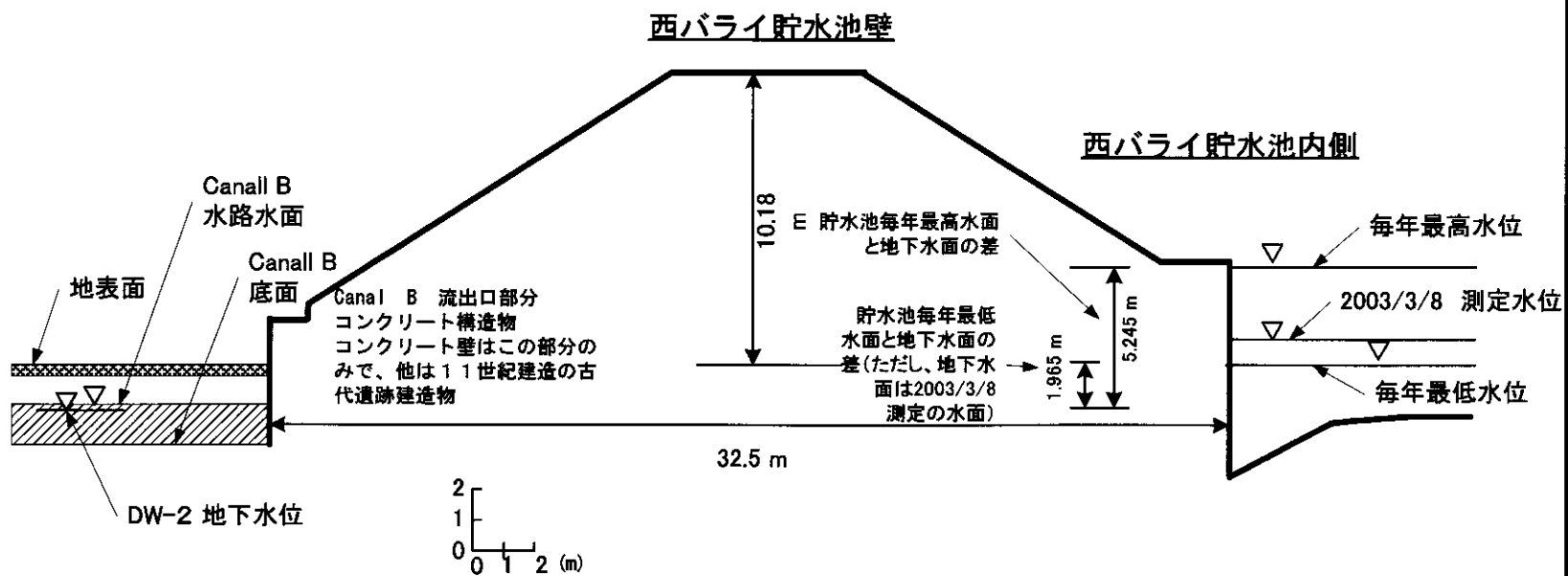
(3) 地下水開発による西バライ貯水池の漏水への影響

西バライ貯水池は、11世紀にウダヤーディチャバルマン2世が建造した農業灌漑用貯水池である。今回の調査の結果、西バライ貯水池構造は、貯水池周壁土塁の高さは約10m、土塁基部長が約32mであることを確認した。土塁内壁の崖線調査の結果では、この周壁土塁は貯水池基部から直径3~15cmの角レキを含んだ灰青色粘土（東部では黄土色粘土）により築造されていることが確認されている。係る粘土は人工的に角礫を混ぜてつき固められたものと考えられる。周壁法面には保護のため草木が植栽されている。湖岸は、さらに大量の褐色の細砂により厚く被覆されている。図3-29に西バライ貯水池の構造と湖面水位と地下水位等関係図を示す。

貯水池周壁は粘土を付き固めた構造のため、貯水池土塁を通過する漏水は殆どないものと考えられる。今回貯水池近傍の既存浅井戸地下水面と貯水池水面の水位差を測定してみたところ、その差は2.6mであった。雨季の貯水池の高水位時期には、この差は最大5.2m（図3-29参照：地下水位面が一定とした場合、地下水最高水位は現地住民より確認）となる。もし、貯水池底部が漏水するような構造であれば、貯水池水位と貯水池外の地下水との水位差により、短期間で両水位は均衡を保つよう移動するものと考えられるがその事実はない。したがって、貯水池底部構造は十分に透水を妨げる構造となっているものと推察され、現状では西バライ貯水池からの漏水は考えにくい。

以上のことから、将来水源開発予定地域で地下水を取水した場合でも、西バライ貯水池からの漏水は少ないものと予測される。F/S時、西バライ貯水池付近の水位観測井戸(WT-4)においては自然地下水の変動が約4m観測されているが、4m以内の水位低下では西バライ貯水池の漏水には大きな変動はないものと考えられる。F/Sの地下水シミュレーション結果では、約1m程度の水位低下が局部的に揚水時に及ぶことが予測されている。この水位低下は、自然の水位変動量の範囲に入り貯水池の漏水に対しては大きな影響を与えないものと考えられる。しかしながら、局部的な地下水水位低下は全く生じないとは言えず、貯水池の地盤構造の一部が影響を受け低下する恐れは否定できない。本計画施設が完成した後、地盤構造の異常低下等が認められた場合は、季節的に揚水量を調節する等の対策を講じることにも考慮しなければならない。

《注》 断面図: 本調査による簡易測量による。その他: 各水面、Canall Bへの流出口、貯水池底面深度は実測による。(DW-2)井戸は、貯水池から外側に約400m離れた浅井戸



Basic Design Study on the Project for Improvement of Water Supply System in Siem Reap Town

図 3-29

西バライ貯水池構造図

(4) 周辺浅層地下水への影響

計画井戸群は、揚水量を確保するために、深い帯水層とともに浅層地下水からも取水することを予定している。浅層地下水は、開発予定地域周辺に散在する農村家庭保有の多数の浅井戸とも地下水脈が連絡していることが考えられ、本計画実施に伴い、既存浅井戸の水位が低下する恐れがある。水源開発地域においては、表 3-40 に示す既存浅井戸があり、周辺民家により利用されている。ここでは、本計画による水源開発が周辺既存井に与える影響について検討する。

掘抜井は口径 900mm のコンクリート管を埋め込み、井戸深度は 2～5m、水深は 0.5～1.5m 程度の構造であり、本計画水源井開発による水位干渉を最も受け易い。打込井や管井は手押しポンプまたは水中ポンプにて取水しており、0.5m 程度の水位低下による影響は少ない。

表 3-40 水源井候補地点周辺 (350m 範囲) の住宅・水源数

| 水源井番号 | 住宅数 | 水源の種類 | | | 備考 |
|-------|-----|-------|-----|----|-------------|
| | | 掘抜井 | 打込井 | 管井 | |
| DW-01 | 4 | 1 | 4 | 0 | 浄水場内 |
| DW-02 | 27 | 2 | 18 | 0 | 試験井 PP-3 |
| DW-03 | 10 | 3 | 6 | 0 | |
| DW-04 | 13 | 6 | 2 | 1 | |
| DW-05 | 13 | 3 | 5 | 0 | |
| DW-06 | 14 | 9 | 2 | 0 | 試験井 PP-1 周辺 |
| DW-07 | 13 | 3 | 6 | 0 | |
| DW-08 | 11 | 2 | 3 | 0 | |
| 計 | 105 | 29 | 46 | 1 | |

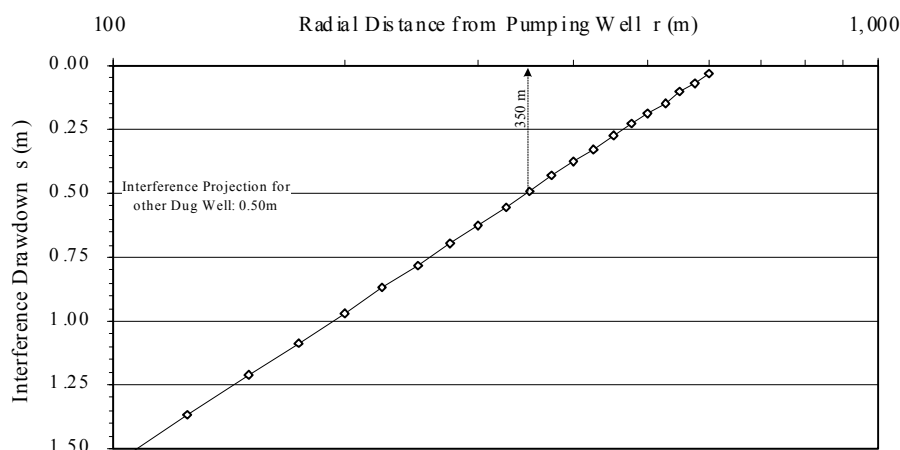


図 3-30 水源井からの距離と干渉量

図 3-14 に示した水源井配置にて計画取水量を長期揚水した場合、周辺の地下水位を 0.5m 降下させて既存水源に影響を及ぼす範囲は、図 3-30 から各井戸周辺の半径 350m の地域である。水源井周辺の水位干渉量は、それぞれの水源井からの水位干渉量の合算値であり、概念を図 3-31 に、影響する範囲 (水源地東西 3.4km × 南北 0.7km) を図 3-32 に示す。本計画により影響を受ける掘抜井は 29 で、各掘抜井は概ね 2 世帯で共同利用している。よって、本計画により約 60 世帯が影響を受けることになる。

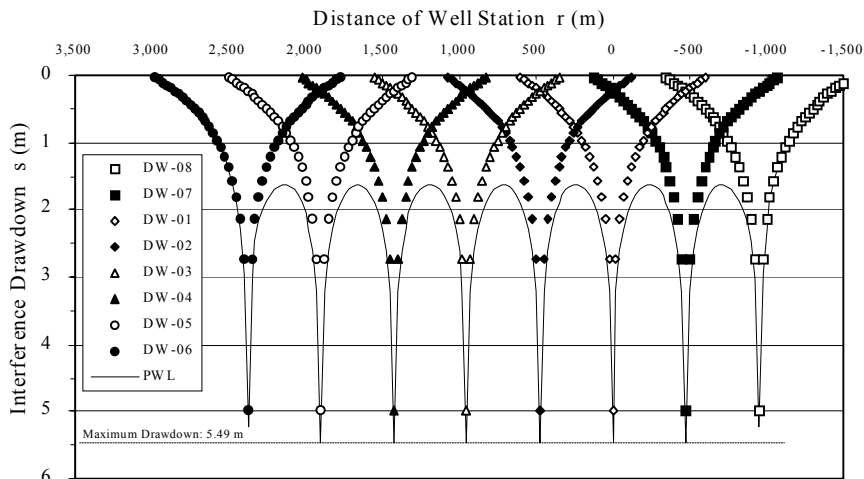


図 3-31 水源井周辺での水位干渉量・範囲

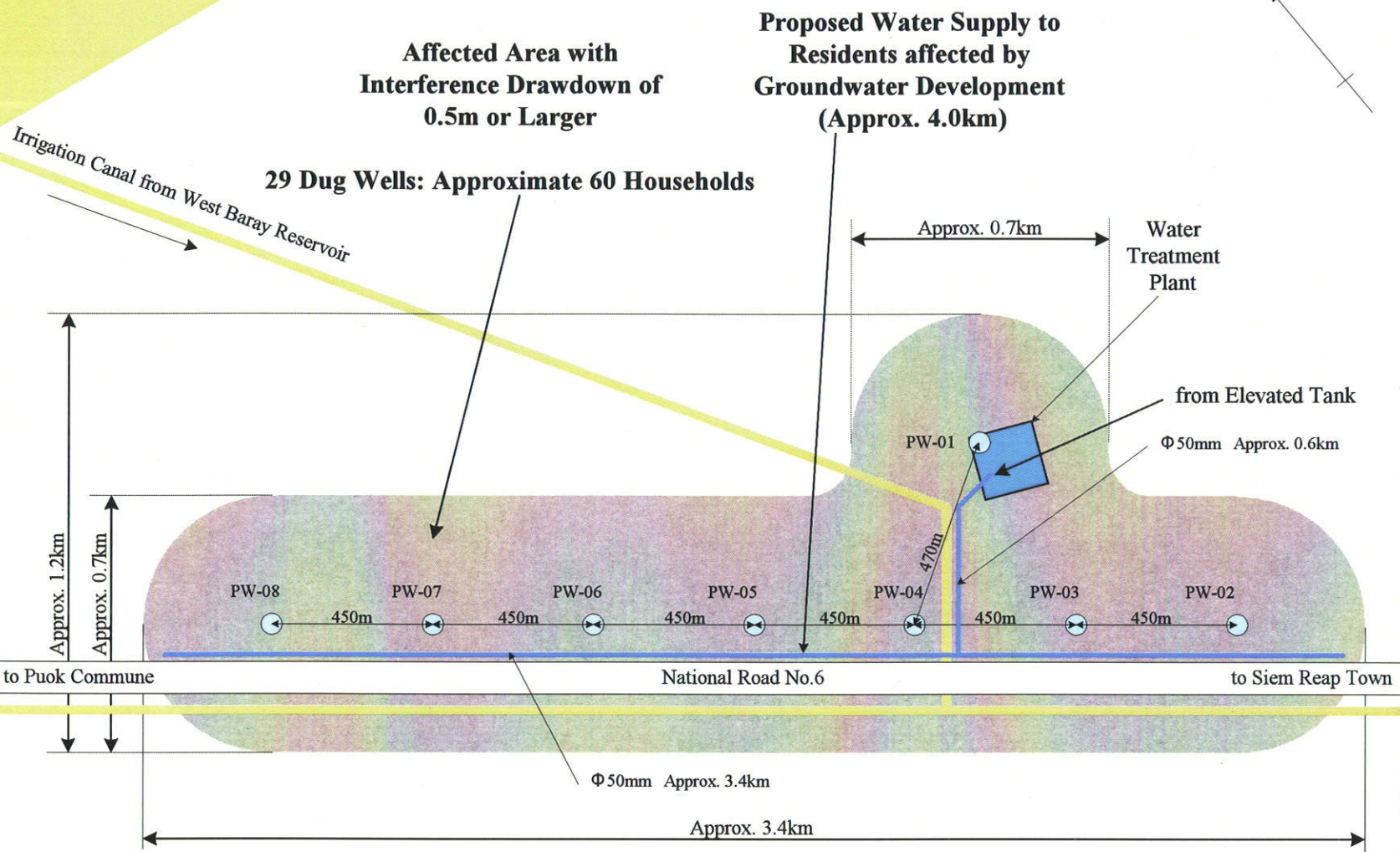
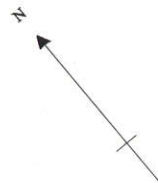
これらの影響範囲の住民に対しては何らかの補償が必要であるが、基本設計概要書説明調査時の協議において、「カ」国側は以下の措置をとることで合意した（資料 5-2 討議議事録（概要説明時））。

- ◆ 「カ」国側は本計画実施前に、関係住民に対して本計画実施に関する説明（次項のとおり水道料金を徴収することを含む）を行い、本計画実施に係る関係住民の合意を得る。
- ◆ 本計画にて関係住民居住地域に配水管（図 3-32 参照）を施工する。ただし、給水の接続については、本計画の他の対象地域住民と同様に接続料金・水道料金を適用し料金を徴収する。
- ◆ 配水管布設（4km、材料費と布設費を含む）は「カ」国側の負担能力が低いことから本計画に含める。給水管（量水器含む）の取り付けは「カ」国側負担とする。ただし、量水器は本計画にて調達されるものを活用する。

（5）灌漑水路への影響

西バライ貯水池周辺における既存浅井戸地下水位は、西バライ貯水池からの灌漑水路カナル B 周辺において高く、カナル B から距離が離れるに従って低くなっている。このことから、西バライ周辺の浅層地下水は西バライ貯水池からの灌漑用水により涵養されていることが予測される。乾期後半（2003 年 3 月 9 日）における灌漑用水量は、簡易測定によれば約 240,000 m³/日であった。

この灌漑用水量が地下水を涵養しているとした場合、本計画における 8,800m³/日の取水は、西バライ貯水池からの灌漑用水の 3.7%に過ぎず、全体灌漑水量に比して極めて僅かな量である。灌漑用水量は広い地域に亘り灌漑されていることを考慮すれば、灌漑用水から水源地下水へ面的に供給している水量は僅かで、地下水取水による灌漑用水への影響は少ないものと推測できる。



Basic Design Study on the Project for Improvement of Water Supply System in Siem Reap Town

図 3-32

周辺浅層地下水への影響範囲

(6) APSARA・UNESCO との遺跡保護の観点に関する協議

APSARA の遺跡・考古学局局長に対して聞き取り調査を実施した。開発対象地域においては図 3-24 に示すとおり遺跡群は認められないものの、埋没遺跡が存在する可能性は否定できず、施設を建設する場合は必ず発掘調査を実施すべきとの要望があった。UNESCO の世界遺産担当者からも開発に先立って、埋没施設遺跡調査を実施すべきとの要望があった。詳細設計においては、MIME に協力して遺跡確認調査を推進する。

(7) シェムリアップにおける地下水取水規制の策定

本計画では、開発調査時の代替水源案をレビューしたうえで、i) 建設費（維持管理費含む）が低いこと、ii) 運転管理が容易であること、iii) アンコール遺跡群への影響を始めとする環境影響が少ないこと等について検討し、地下水（8,800m³/日）を水源とする上水道システムを構築することとした。一方、シェムリアップ市への観光客数はここ2～3年で急増（年率約30%）しており、これに伴い観光ホテルで独自に開発する地下水取水量も増加している。加えて、遺跡群に近接して計画されているホテルゾーン開発に伴い地下水が開発されるとすれば、大量の地下水揚水が予想され、遺跡群地域での地盤変動量の増加が危惧される。

このため、開発調査では、観光業等による地下水の乱開発を抑制し、かつ既存井の過度な使用を制限する等法的規制の必要性が提唱された。さらに、本計画においては、地下水の水位変動と地盤変動の関連性を確認し、遺跡群への環境影響について再検証するため、水位・地盤変動観測施設を改修し、現在「カ」国側が観測データ収集に努めているところである。今後は、「カ」国側は観測データを注意深く解析・検討すると共に、新規井戸建設の規制ならびに既存井からの揚水を制限するなど、地下水開発に係る包括的な法規制を検討する必要がある。

(8) 建設用地収用問題と不法占拠者

現在、水源開発予定地ならびに浄水場建設予定地には、不法占拠者は存在しない。地下水開発予定地は公有地であり、浄水場建設予定地の土地所有権者は1名とのことである。これらの建設予定地における土地収用は、「カ」国の法手続き規則により、MIME が実施しなければならない。

(9) 建設予定地における貴重動植物

州および環境局に対して聞き取りにより、法制度や過去の調査報告等について調査した。建設予定地においては、環境関係規制ならびに過去の調査報告等はなく、貴重種として特定されているものもなく問題ない。

(10) 環境影響評価手続き

「カ」国法令(Sub-Decree on EIA, Aug. 11, 1999)により、全ての開発計画は、初期環境影響評価報告書(Initial Environment Impact Assessment : IEIA)又は環境影響評価書(Environment Impact Assessment)、或いはその両方を、プロジェクト規模に応じて、「カ」国開発委員会・環境省・州都市環境局によって、事業建設前に承認を受けることが決められている。図 3-33 に EIA 手続きを示す。

本計画は MIME 所管プロジェクトであるので、MIME が IEIA および EIA 報告書を環境省（MOE）に提出し、承認を受けることが必要である。一般的に提出から承認までに手続き期間としておよそ 2 ヶ月を要する。

「カ」国側は既にこれらの手続きは完了し、正式な許可を取得済みである。

3 6 2 下水道整備

3 6 2 1 既存施設の現状

計画対象地域における下水道事業は、シムリアップ州、公共事業・運輸局、下水・公共権利課 (Sewerage and Public Right Unit) が所管している。職員は 4 名で、うち技術職員 (Technician) は 2 名配属されているものの専門的知識は皆無に等しい。下水道事業に係る実務は簡単な計画策定のみである。下水道施設の状況は担当員の経験的記憶に依存するのみで、コンピュータなどの補助的機材を用いた系統的管理はなされていない。

既存下水管の概要を図 3-34 および図 3-35 に示す。シムリアップ川左岸では、国道 6 号線沿いに東西方向に約 2km（口径 1m）に渡り道路の両側に敷設されている。その他の左岸地域においては、シムリアップ川沿いに南北方向に約 0.5km（口径 1m）および約 1.2km（口径 0.6m）に渡り敷設されているのみで、管網整備は立ち遅れている。シムリアップ川右岸では、オールドマーケットおよびその近辺の僅かな街路に下水管が敷設されている。北部周辺に立地するホテルもこれらの下水管に接続している。下水管はいずれも南北方向に流下するカナル（排水溝）に接続されている。

大規模ホテルが立地する市街地から西方国道 6 号線に沿って空港取り付け道路付近までは、道路に沿ったカナルが下水路の役割を果たしている。カナルは公有地ではあるが、カナル沿いの民家は自家の敷地の拡張のため埋め立てられ、悪臭を発生するホテルからの排水をふさいで流れないようにするなど、さらには、カナルにごみを投棄し道路下の連絡管が詰まり、雨季ともなると道路面上に下水排水が流れるなど、極めて不衛生な状況にある。カナルの末端は水田へと接続しており、雨季には排水が水田へと流入する仕組みとなっており、水田が自然のラグーンの機能を果たしている。

開発調査においては、市内を流れるカナルの末端がラグーンに接続され下水処理施設として機能しているとされているが、現状では、周辺の都市化に伴いラグーンは埋め立てられ処理施設としての機能を失っている。カナルには水生植物が多数繁茂し、排水はかろうじて浸み出す程度で下水排水溝としての機能も損ないつつある。

シムリアップ川沿いの比較的裕福な住宅においては地下浸透式の浄化槽が使われている。郊外では水田が広がっており高床式の農家が分布する。これらの農家には常設トイレがなく、家屋の周辺に小さな浅い穴をほり、満杯になると掘り変えているようである。

ホテルにおいては、施設建設に先立ち州の土地管理に係る部署から建設許可を受けることが定められており、浄化槽が例外なく設置されることとなっている。