バンコク都市圏における

地下水位回復に伴う構造物への影響評価

平成 22 年 2 月 23 日

京都大学工学部地球工学科 土木工学コース

大川 淳之介

要旨

タイの首都バンコクの都市圏では、1980年以降の経済発展に伴う過 剰な地下水揚水によって地盤沈下などの問題が顕在化し、構造物の不 同沈下や洪水災害の誘発など様々な社会的被害をもたらしてきた.そ うした被害を受け、行政では、地下水揚水量の増大を防ぐために、地 下水利用に対し、2000年以降課税措置の基準を厳格化した.それを契 機に、地下水揚水量は減少し、帯水層の地下水位は回復してきたため、 地盤沈下についても今後沈静化することが予想される.

しかし、その一方で、地下水位の回復に伴って、地下構造物の浮き 上がりに対する安定性、および盛土型道路の安定性、高架型道路の基 礎部分における支持力の減少等の問題が懸念される.

本研究では、まず、将来的な地下水揚水量を、確率過程を用いてモ デル化し、モンテカルロシミュレーションによる3次元地下水流解析 を行う.そして、そこから得られた地下水位変動量を用いて、1次元 圧密理論から地盤の変動量を予測し、各種の構造物への影響を評価す る.

i

第	1	章	序	"論	_
1	.1	研 究	$\mathcal{O}$	背景1	L
	1	1.1.1	概	説1	l
	1	1.1.2	研	究対象地域の地盤条件	<u>)</u>
	1	1.1.3	地	下水揚水に起因する地盤沈下とインフラ建設	;
1	.2	研 究	の	目的	5
1	.3	既往	Ø	研究との関連	7
1	.4	本論	文	の章構成	3
第	2	章	不	確実性要因の評価	)
2	2.1	地盤	に	関する不確実性の評価	)
	2	2.1.1	地	盤統計学手法について	)
	2	2.1.2	推	定結果	)
2	2.2	将来	的	な地下水揚水量の予測10	)
	2	2.2.1	近	年の地下水揚水傾向10	)
	2	2.2.2	予	測モデル	)
	2	2.2.3	地	下水揚水量の予測11	L
第	3	章	地	下水位変動量予測13	;
3	.1	地下	水	流解析	3
		3.1.1	予	測モデル13	;
	2	3.1.2	解	析領域と境界条件13	3
	3	3.1.3	揚	水井戸の分布に関して	ł

 3.1.4 初期水頭の設定
 15

 3.2 シミュレーション結果と考察
 15

第	4	章	地	下	水	位	変	動	」に	こよ	る	景	彡襸	影影	平亻	囲	•••	•••	•••		•••	• • • •	••••	•••	•••	•••	• • • •	18
4	. 1	地盤	変	動	量	予浿	IJ				• • • •	••••			•••			••••		••••			••••	••••	•••			18
	4	.1.1	地	盤	変重	助量	計	算	式			•••			•••			••••		••••			••••	••••				18
	4	.1.2	地	盤	変重	助量	と解	析	結!	果と	考	察			•••					••••			••••	••••				20
4	.2	地下	構	造	物の	り浮	き	上	が	りに	対	す	る	評値	Ш					••••			••••	••••	••••			21
	4	.2.1	バ	ン	コノ	ク批	上下	鉄	に	関 し	て	•••			•••					••••			••••					21
	4	.2.2	浮	き	上太	ぶり	評	価	手衫	去		•••			•••					••••			••••					22
	4	.2.3	結	果	とえ	岑 蔡	ž					••••			•••					••••			••••		•••			23
4	. 3	高架	型	道	路の	り 基	豪礎	と	盛 :	土型	道	路	に	对了	ナマ	5 F	平佃	6		••••			••••		•••			24
	4	.3.1	I	P	ポー	- }	、 IJ	ン	クì	首路	に	関	L	て.	•••					••••			••••	••••	•••			24
	4	.3.2	バ	ン	ナラ	チョ	レン	ブ	IJī	高 速	道	路	に	関し	-	τ.				••••			••••		•••			24
	4	.3.3	盛	土	の复	安定	ミ性	と	杭	基礎	の	支	持	力し	こう	すう	トる	;評	価	手沾	분.		••••		•••			24
	4	.3.4	結	果	とえ	ち 察	R					••••			•••					••••					••••			26

第5章	£ 結論		28
-----	------	--	----

参	考	文	献		• • •	•••		• • •		 	•••		 	••	•••	 •••	 •••		•••	•••	 •••	•••	•••		•••	 ••	•••	•••	 •••	••••	 •••			•••	.3	1
謝	辞	•••		•••			•••		••	 	•••	•••	 		•••	 	 	•••	•••	•••	 •••	•••	•••	•••	•••	 •••	•••	•••	 		 •••	•••	•••	•••	3	33

# 第1章 序論

# 1.1 研究の背景

### 1.1.1 概説

東南アジア諸国の都市は、一般的に大河の河口部に位置しており、その地質構造は河川の堆積物による粘性土と帯水砂層との互層から形成されている.従来、その帯水砂層から汲み上げられた地下水が、農業用水や生活用水として利用されてきたが、経済成長に伴う住宅、および工業団地等の建設による都市部の拡大において、地下水の利用が水道施設の付設と比べて安価であるという理由によって、都市部における地下水利用は急速に増加した.そして、この急速な地下水揚水量の増加とともに、地下水の枯渇及びそれに伴う地盤沈下、さらには生活排水・工業排水による地下水汚染等の様々な問題が顕在化し始めた.

本研究で取り上げるタイのバンコクは、東南アジア諸都市の中でも、早くから 地下水の過剰揚水による問題が顕在化した都市である.バンコク地区では、1980 年以降の経済発展に伴う大量の地下水利用により、帯水層において大幅な水位低 下が起こり、地盤沈下や帯水層への塩水流入等の問題が生じた<sup>1)</sup>.なかでも地盤 沈下は、バンコク地区に隣接しているチャオプラヤ川の堤防高の低下を招き、雨 季における洪水リスクを増大させ<sup>2)</sup>、さらに、地盤沈下はバンコク南部の海岸線 の後退も引き起こしている.過去 50 年間で、約 80 k m の距離の海岸線が、地盤 沈下が原因で、500m~1000mも後退し<sup>3)</sup>、バンコクの地表面はすでに平均海面と 同レベルであり、これ以上の地表面低下は、将来的に都市環境を甚大な危険にさ らすことになると考えられる.これに加えてバンコク粘土層の圧縮性は、深度の 異なる基礎上に構築された構造物の間の不同沈下発生を招き、建物・道路・橋梁 等に損傷を与えることで大きな社会的損失を生んでいる.

このような社会的な被害に対して, バンコクの行政機関である BMA(Bangkok Metropolitan Administration)では, 地下水管理の効果を高めるために, 2000 年以降バンコクの都市圏において, 地下水利用に対する段階的な課税措置を施した. 図 1.1 に示すように, 課税措置は, 2000 年以前の 3.5Thai Baht/m<sup>3</sup>から, 2004 年には 9.50 Thai Baht/m<sup>3</sup>, 2005 年には 12.50 Thai Baht/m<sup>3</sup>, 2006 年には 17.00 Thai Baht/m<sup>3</sup> と徐々に強められ, 地下水の揚水はその規制の強化とともに減少した.

これによって、今後帯水層の地下水位は回復し、地盤沈下等の問題は鈍化してい くことが予想されるが、一方で新たな問題が発生することが懸念される.一つは 地下水位の回復による地下構造物の浮き上がりの問題、もう一つは高架型道路の 基礎部分の有効応力の減少に関する問題である.<sup>4)</sup>この二点は、現状では問題が 顕在化していないが、今後の地下水利用の動向を考えると、検討しなければなら ない課題であるといえる.

#### 1.1.2 研究対象地域の地盤条件

図 1.2 は, バンコク地区を含むタイ中央平原南部の南北断面での水理地質形状 を示している. バンコクの地盤条件は, 基準海面からの標高が約 0~3m という極 めて低地に立地し、地表面下約 30mまではバンコク粘土として知られる青灰色を 呈する圧縮性の高い海成粘土が分布しており、その下部は約 550m まで粘土層も しくは砂質粘土層によってほぼ隔てられた八つの主要な被圧帯水層に区分される. バンコク地域で地下水揚水が初めに行われたのは,1900年代前半に遡るが,大規 模にバンコクの帯水層系から取水が行われるようになったのは,1950年代前半に なってからのことである. 第一層目の帯水層 (Bangkok 帯水層, 以下 BK と称す る.)の水は元来塩分濃度が高いことに加えて,近年では生活排水等による汚染が 顕在化してきたため,給水には不適とされてきた.このため,バンコク地域では, 地下水の利用にあたって, 第二層 (Phra Pradaeng 帯水層, PD), 第三層 (Nakhon Luang 帯水層, NL), 第四層 (Nonthaburi 帯水層, NB) の三つの帯水層に依存し てきた. また, 第五層 (Sam Khon 帯水層, SK) 及び第六層 (Phaya Thai 帯水層, PT)は、バンコク北西部のパトムーターニ地域において多く利用されつつあり、 第七層(Thon Buri 帯水層, TB)及び第八層(Paku Nam 帯水層, PN)は, 家庭用 井戸で供するには深すぎるという点で、上部に他の帯水層が存在していないバン コク 南部 · 南西部, サムットサコンの 東部の地域で工業用途に供されている. <sup>5)</sup>

図 1.2 に示したように,各帯水層がそれぞれ粘土層により区分されているよう に表記されているが,実際の計測結果からは,その地下水挙動は粘土層によって 完全には分断されていないものと推定される.これに加えて,中央平原南部全体 という広範囲を解析対象としていることから,深さ方向の解析範囲で粘土層のみ をモデル化することは解析上不経済である.これらの理由から,本論文中では, 粘土層によって分断された被圧帯水層を,帯水層と粘土層を平均化して,一つの

帯水層ユニットとして取り扱うものとする.

## 1.1.3 地下水揚水に起因する地盤沈下とインフラ建設

バンコク以外の都市部においても、地下水揚水に起因する地盤沈下が問題となった例が数多くある.ここでは、地下水揚水に起因する地盤沈下とインフラ建設の関係に着眼して、アジアの諸都市で起こった地盤沈下について 3 つの事例に分けた.(1) 大阪(日本)<sup>6)7)</sup>,(2) バンコク(タイ)<sup>8)</sup>・(3) ハノイ(ベトナム)<sup>9)</sup>の 3 都市の事例に言及する.

(1) 大阪地区では、地盤沈下が沈静化したあとにインフラ建設が行われ、(2) バ ンコク地区では、地盤沈下の顕在化する前、もしくは進行と同時期にインフラ建 設が行われ、(3) ハノイ地区では、現在地盤沈下が顕在化しておらず、これから 大規模なインフラ建設が行われる、という特徴をもつ.ただし、ここでいうイン フラ建設とは、大阪では、名神高速道路・阪神高速道路・梅田地下街等を指し、 バンコクでは、バンコク地下鉄・エアポート(スワンナプーム国際空港)リンク 道路・バンナチョンブリ道路、ハノイでは、ハノイ~ホーチミン間高速鉄道など を指すものとする.図1.3 に 3 つの事例の概念図をまとめた.各地域における地 下水揚水と地盤沈下の関係について以下に示す.

(1) 大阪

大阪盆地の地表下には、大阪城近傍から南側に走る上町台地部分を除き、沖積 層が分布している.この沖積粘土層の平均層厚は約15mで、湾岸地域に近づくに つれて厚みが増している.沖積粘土層の下には非常に厚い更新世洪積層が分布し ており、約680mまで Ma0、Ma1・・・と名付けられた海成粘土層と砂層の互層が 続く.この層構造はバンコク中央平原の層構造と比較的よく類似している.

表 1.1 は大阪における地下水揚水量を,図 1.4 は 1890 年~2000 年までの地下水 位の変動と地盤沈下の推移を示す.1928 年以前の大阪市における一年あたりの地 盤沈下量は,6mm~13mm という非常に小さかった.この僅かな沈下は,自然の 地殻変動と新しく堆積した沖積粘土層が自然に圧密した結果として生じていると 考えられていた.また,1930 年代までは大阪市の地下水位は非常に高く,自噴性 掘抜井戸すら数箇所市内に存在していたことが報告されている.1930 年以降は, 表 1.1 にまとめたように,産業の発展により地下水利用が著しく増加し,地盤沈

下量の増加が見られるようになった.地下水利用の代替として計画した地表水供 給を目的とした工業用水給水施設の整備が進められ,同時に市では、1959年に地 盤沈下防止条例などの法整備が進んだことで、地下水利用は徐々に制限されてい った.条例によって地下水の利用を制限できたというのは、諸外国にはみられな い大阪地区でみられる特徴である.こうして市が地下水利用を制限したことによ り、大阪市の地盤沈下は徐々に減少し、それ以降ほぼ停止している. 名神高速道 路(1963~1965年開通)・阪神高速道路(1967年1号環状線全線開通)・梅田地下 街(1963年開業)などが完成したのは、ちょうど地盤沈下が沈静化したこの時期 であった.図 1.4 に示すように、この当時の大阪市内の地下水位はかなり低い水 準にあったことがうかがえる.

しかし、その地盤沈下の沈静化の一方で、地下水利用の規制以降地下水位が大 きく回復に転じた.地下水位が低い時期に建造した地下構造物の中には、水位が 現状まで回復することを想定して浮力の検討設計をしていないものもあり、大阪 明治安田生命館(仮称)の建て替え工事に際しては、地下構造物の浮き上がりが 問題となった.また、地盤の良い大阪南部の泉南地方などでは、地下水位の回復 上昇にともない、最大約 10cm 程度の隆起が確認されている. 大阪地区全体の問 題には発展していないが、見逃すことのできない課題である.

(2) バンコク

図 1.1 は、1955 年から 2005 年までのバンコク及びその周辺地域における地下 水揚水量の推移を示している.バンコクで公共上水道供給のために大規模な地下 水利用が始まったのは 1954 年で、当時の揚水量は 1 日当たり約 8,000m<sup>3</sup>であっ た.その後、1982 年までには、公共上水道供給のための地下水揚水量は一日あた り 40万m<sup>3</sup>を超えるまでに増加し、民間井戸も含めた総揚水量は一日当たり約 140 万m<sup>3</sup>に上った.それにともない、図 1.5<sup>8)</sup> に示すように、1981 年にダウンタウン の中心であるバンコク地区東部で年間 100mm の地盤沈下が発生している.このよ うな事態を受け、1983 年に「バンコク首都圏における地下水・地盤沈下危機緩和」 プログラムによる規制が実施された.これにより公共井戸による揚水量は減少に 転じたが、民間井戸からの揚水量は依然として増加を続け、総揚水量はほぼ横ば い状態が継続した<sup>10)</sup>.1993 年以降に起こったタイにおいての急速な経済成長期、 いわゆるタイバブル期においては、上水道設備が不十分であり地下水に依存せざ るを得ないバンコク郊外において数多くの住宅・工業開発事業が開始された.そ

のため、地下水揚水量は再び急激に増加する傾向に転じた.こうした経緯を受け て、1.1.1 にも述べたように、2000 年以降バンコクの都市圏において、地下水利 用に対する段階的な課税措置が施された.条例ではなく課税によって地下水の利 用が制限されたというのは、大阪の地下水揚水規制とは大きく異なる点である. 図 1.5 に示すように、郊外部に位置するサムットプラカンやサムットサコンでは、 依然として沈下が続いているが、バンコク中心部での沈下はかなり小さくなって いる.

このような状況のなかで、1990 年代後半~2000 年代の前半にかけて、バンコ ク地下鉄やエアポートリンク道路の建設、バンナチョンブリ高速道路の再建が進 められた.しかし、サムットプラカンの西部に位置するバンナチョンブリ高速道 路では、建設されてまもなくバンコク粘土層の圧縮により、高速道路ランプ箇所 において不同沈下が生じるなどの被害が報告されている<sup>11)</sup>.大阪の事例でみられ るように、今後地下水位が回復することにより構造物が被害を受けるような事態 に繋がれば、バンコク地区では地盤沈下と地下水位回復による被害を二重に受け ることになる.このような最悪の事態を防ぐためにも、将来的な地下水位の回復 を予測することが重要であると考えられる.

(3) ハノイ型

ハノイは給水を完全に地下水に依存している世界でも稀な都市である. 急速な 経済・工業の発達によって給水需要が増大した結果,地下水取水に起因する地盤 沈下問題が懸念されるようになった.

ハノイにおける地下水取水量について図 1.6<sup>12)</sup>に示す.1909年に一日あたりの 取水量 4 万 m<sup>3</sup>で始まったが、ベトナム戦争後の 1975年には一日あたり 15 万 m<sup>3</sup> に増加した.その後さらに増加を続け、1997年には一日あたり 40 万 m<sup>3</sup>に達した. 2000年には一日あたり 80 万 m<sup>3</sup>を記録し、地下水利用に対する需要は高まる一方 である.ハノイで利用されている地下水の大半は深度 30m~70mの帯水層から汲み 上げられており、ハノイ全域に粘土、シルト質粘土、泥等で構成される賦圧層が 分布している性質上、圧縮、圧密性状の点で脆弱であると報告されている.しか し、今のところ、揚水井戸付近の帯水層が周辺河川と水理的に良好なつながりを 持っていることや帯水層の透水性が高いといった理由で、帯水層で起こっている 水位低下の大半はそれほど大規模になっていない.この点は、ハノイにおいて、 大阪やバンコクの例にはみられなかった、地下水取水に関する利点であるといえ

る.

ハノイでは、2007年にハノイ~ホーチミン市間の高速鉄道建設が決定されたように、これから大規模な交通インフラへの投資を迎えることになる.現在ハノイでは、地下水揚水に起因する地盤沈下は、バンコクやその他の地域に比べ初期段階にあると考えられる.しかし、地下水利用が確実に制御されない限り、遅かれ早かれバンコクのような深刻な事態にもなりかねない.ハノイでは、これからの大規模なインフラ建設に向けて、大阪やバンコクで培った地盤沈下や地下水位回復に伴う問題に対する知見を生かしていくことが求められる.

## 1.2 研究の目的

前述の大阪地区の例でもみられるように,地下水揚水の制限による地下水位の 回復は地盤沈下の沈静化をもたらす一方で,地下構造物の浮き上がり等の被害を もたらすことにも繋がる危険性がある.したがって,信頼性の高い地下水位変動 予測と将来的な構造物への影響評価する必要があると考えられる.しかし,地下 水位変動を予測する上で支配的な因子となる将来的な揚水量については不確実性 を含んでいる.さらに,帯水層ユニット性状のばらつきや地質条件の空間的なば らつき等のモデルパラメータも,地盤変動量の予測を不確実にする要因となって いる.

本研究の目的は、まず、研究対象地域において、これらのパラメータに含まれ る不確実性を考慮し、帯水層ユニットにおける地下水位変動量予測を行い、その 水位の変動量を用いて、地盤変動量予測、および将来的な構造物への影響評価を 行うことである.構造物への影響評価の対象としては、バンコク地下鉄の浮き上 がりに対する安定性評価、エアポートリンク道路の盛土の安定性評価、およびエ アポートリンク道路、バンナチョンブリ高速道路高架部の杭基礎における支持力 に対する評価を行う.

なお,研究対象地域は図 1.7 に示すように,バンコク,ノンタブリー,パトム ーターニ,サムットプラカン,サムットサコン,アユタヤ,ナコーンパトムを含 む7地域である.

# 1.3 既往の研究との関連

本節では、バンコク都市圏における地盤沈下に関する既往の研究について紹介 する.また、それらの研究と本研究との関連から、本研究で用いる具体的な手法 について述べる.

- 地盤沈下の解析においては、地下水流のシミュレーションに差分モジュール 地下水量モデル(MODFLOW)を適用することが広く行われており、帯水層系 の圧密評価には Terzaghi の一次元圧密理論に基づく応用が広く採用されてい る。
- Giao<sup>13)</sup>は、多層帯水層系内の井戸からの揚水に対する応答をモデル化するための、TZと呼ばれる圧密解析用有限要素プログラムを開発し、バンコク帯水層系内における過剰な地下水揚水に起因する硬質粘土層の圧密は、大半の揚水帯水層の下部である 250m を超える部分までには拡大していなかったことを示した。
- Duc<sup>14)</sup>は、粗粒土層の瞬間的な圧縮と比較すると、細粒土層の圧縮は静水位低下後に非常に長時間かけて進行したものであり、透水性が低く厚いバンコク粘土の場合、圧密は長時間かけて進行し、90%圧密するのに 200 年以上かかる可能性があることを示した。
- 大津ら<sup>15)</sup>は、バンコク地区における過去の地下水揚水に伴う地盤沈下の発生 状況について示すと共に、地下水揚水量の推移について確率微分方程式を用 いたモデル化手法を適用した地盤沈下予測手法を提案した。
- Noppadol ら<sup>8)</sup>は、バンコク地区において、観測井戸における水頭観測データから、地盤沈下と帯水層の水位低下との相関関係を明らかにした.さらに、地盤沈下の全体の約 25%が表層のバンコク粘土層の圧縮によるものだということを示し、構造物の基礎の支持層の違いによる不同沈下の問題を指摘した.

以上を踏まえて本研究では、地下水揚水量の推移について確率微分方程式を用 いてモデル化し、それによって得られた将来的な地下水揚水量のデータをもとに、 差分モジュール地下水量モデル(MODFLOW)を適用し、バンコク地区の地下水 流解析を行う.さらに、得られたデータを用いて Terzaghiの一次元圧密理論に基 づく帯水層ユニットの地盤変動量予測、および水位変動に伴う構造物への影響評 価を行う.なお、本研究では、帯水層の地下水位が回復傾向にあるという条件の もとで地盤変動量を予測し、各種構造物への影響を評価する.

## 1.4 本論文の章構成

本論文は, 第1章から第5章までの5つの章からなる.本論文の構成を図1.8 に示す.各章の概要は以下の通りである.

1章では、序論として研究の背景、目的、及び既往の研究との関連を述べた.

2 章では,地下水位変動量と地盤変動量を予測する上で必要な不確実性要因の 評価手法を示す.

3 章では、 2 章で得られた入力データを用いて、100 回のモンテカルロシミュ レーションにより地下水位変動の予測を行う.

4 章では,得られた解析結果から,将来的な地下水位の変動による構造物への 影響評価を行う.

最後に, 第5章では本研究により得られた知見を結論としてまとめる.

# 第2章 不確実性要因の評価

# 2.1 地盤に関する不確実性の評価

### 2.1.1 地盤統計学手法について

予測モデルを作成するにあたって、土質性状や地質条件などの地盤に関するパ ラメータをモデルに対して入力する必要がある.ここでは、現地での有限個のサ ンプルデータから対象領域全体の地盤パラメータを推定するために、地盤統計学 手法を用いて、バンコク帯水層系における帯水層深度・層厚・粘土含有量の推定 を行う.なお、ここでいう帯水層とは、1.1.2 で述べた帯水層ユニットを指すもの とする.

地盤統計手法は、未知の領域(点)における推定量を既知のデータの加重平均 とし、数学的に最適な重みを与える方法である.この方法は、サンプルの幾何学 的な配置とサンプルデータからセミバリオグラムを作成し、作成されたセミバリ オグラムを用いて、クリギングによって各サンプルデータに最適な重み与えて未 知の領域(点)における推定量を算出するという方法である.

バンコク帯水層系は、BK・PD・NL・NB・SK・PT・TB・PN という 8 層の主要 帯水層に区分され、図 2.1 に示すように地下水揚水の大部分が PD・NL・NB 帯水 層からなされている<sup>16)</sup>.地下水揚水による帯水層の地下水位変動が地盤変動、お よび構造物の基礎に対して影響を与えている主要因になっていることを考慮し、 クリギングはこれら上部 3 帯水層とその上部に存在する BK 層について行う.

本研究では、123 箇所のボーリングデータを用いたクリギングによって、帯水 層深度と帯水層厚を推定した. さらに地盤変動量の計算においては、粘土含有量 も重要なパラメータであるため、粘土含有量についても、105 箇所の試料採取箇 所から得られたデータを用いてクリギングにより分布を推定した.

#### 2.1.2 推定結果

図 2.2 に示すような A, B 側線における東西・南北方向の断面図を,図 2.3 に示 す. クリギングによる推定値は,標準偏差の範囲と共に示してある.また,各帯 水層の層厚と粘土含有量の推定値を,側線別に表したものが,図 2.4・図 2.5 であ

る.ただし,層厚と粘土含有量の推定値に関しては,地盤変動量の際に用いられる水位観測井戸の地点のみの値を示す.BK帯水層厚は20mから60mで,北・東・西の方向へ薄くなる傾向があり,PD帯水層厚は40mから80mで,明白な傾向はみられない.NL帯水層厚は40mから80mで,北・西の方向へ厚みを増し,NB帯水層厚は80mから100mで,どちらも特徴的な傾向はみられない.また,BK帯水層の粘土含有量は,他の3帯水層に比べ特に大きな推定誤差となっている.

ここで得られた帯水層の深度の最適推定値を,第3章の地下水流解析モデルの 物性値として用い,各帯水層の層厚と粘土含有量の最適推定値を第4章の地盤変 動量解析の物性値として用いる.

# 2.2 将来的な地下水揚水量の予測

### 2.2.1 近年の地下水揚水傾向

研究対象地域の将来的な地下水揚水量を予測するにあたり、揚水の地域性を考 慮するため、バンコク、サムットプラカン、パトムーターニ、アユタヤ、サムッ トサコン、ナコーンパトム、ノンタブリーの7つの地域(図 1.7)で分類した. 研究対象地域の揚水井戸の 1995~2006年の揚水量データを図 2.6<sup>15)</sup>(パトムータ ーニの 1995、1996年の地下水揚水量の空白はデータの欠損によるものである.) に示す. 1995~2006年の揚水データから近年の傾向をみると、1995年から 1990 年代の後半にかけては7つの地域すべてにおいて増加傾向がみられるが、バンコ ク・パトムーターニ・サムットプラカンでは、1990年代の後半から揚水量は減少 傾向に転じ、その他の4地域についても 2002年以降は軒並み減少を示している. これは、増え続ける地下水揚水量を制限するため、タイ政府が上水道給水ネット ワークの拡大、地下水利用料金の値上げの実施(1997年)、および 2000年度国会 制定法による地下水利用に関する厳格な対応策を実施した結果であると考えられ る. さらに、それ以降も地下水に対する課税が段階的に増加するに従い、地下水 の揚水量は減少を続けている.

## 2.2.2 予測モデル

将来的な揚水量については、不確実性を含んでいるため一意的に設定することが困難であるため、本研究では、将来的な地下水揚水量に含まれる不確実性につ

いて,非定常確率過程を表現する幾何ブラウン運動を用いたモデル化手法を行った.次式はその幾何ブラウン運動を表す確率微分方程式である<sup>17)18)</sup>.

$$dQ = \mu \cdot dt + \sigma \cdot dW \tag{2.2.1}$$

ここに、 $\mu$ はトレンド成分、 $\sigma$ はボラティリティ成分、dtは時間増分、dWはウィーナー過程の増分を表す.

ウィーナー過程の増分は時間間隔に比例して変数が大きくなる正規分布であるウィーナー過程に従うもので,次式で表される.

$$dW = \varepsilon_t \cdot \left(dt\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.2.2}$$

ここで, *ε*,は標準正規分布 N(0,1)である.

計算を単純化するために,式(2.2.1)の連続確率モデルを離散モデルに変換し, 式(2.2.1)と式(2.2.2)から,将来的な年間地下水揚水量は次式で推定すること ができる.

$$Q_t = Q_0 \cdot \exp\left\{\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)t + \sigma \cdot \varepsilon_t\right\} \qquad (t = 1, 2, ..., 24)$$

ここで、tは年単位の期間を示し、 $Q_0$ は地下水の揚量の予測を開始した 2006 年の 揚水量を示すものとする.

このモデルを用いて、2006年を基準年とした 2006~2030年の揚水量予測を行う ものとする.ただし、幾何ブラウン運動は、指数関数的な変動を示すため、地下 水の揚水量は常に正の値をとることに留意されたい.

#### 2.2.3 地下水揚水量の予測

2.2.2 に示したモデルを用いて、図 1.7 で示した 7 地域のそれぞれの地下水の揚水量を予測する.幾何ブラウン運動のトレンドとボラティリティ成分は、
2002~2006 年の地下水揚水量データの過去統計値に基づいて決定し、表 2.1 にま

とめた. この表から, サムットプラカン・サムットサコンでは, 他地域のトレン ドと比較すると1オーダー小さいが, この2地域については, 2006年時点での揚 水量が他地域と比べると大きいため, 揚水量の減少量自体は小さくないことに注 意したい. また, トレンドの絶対値が最も大きいのはバンコクで, この7地域の 中で最も都市部に位置するため,上水道給水ネットワークが他地域と比べ発達し ていることが反映されている. ボラティリティについては, ナコーンパトムで最 も大きく, 将来的な揚水量が最も不確実であることが予測される. なお, 7 地域 の総揚水量が2002年を境にして減少傾向を示し,地下水利用への課税規制の影響 を受けて今後も減少すると考えられることから, 2002~2006年までの揚水量のデ ータを用いてトレンドとボラティリティを算出した.

式(2.2.3)の予測手法に基づき,将来的な地下水の揚水量を予測するにあたり, 式(2.2.3)の右辺 & に相当する値として標準正規乱数を適用すると,揚水量予測 値の確率パスが算定される.本研究では,モンテカルロシミュレーションで算定 される確率の最小単位が1%となるように,各地域において100通りの標準正規 乱数を発生させ,100通りの揚水パターンを設定した.ここで,モンテカルロシ ミュレーションとは,確率分布に従って発生させる乱数を用いて対象とするシス テムの挙動をモデル上に再現する方法である.各地域における,2006~2030年の 期間での100通りの揚水量の予測結果を図2.7に示す.同図では,負のトレンド を反映して7地域すべてで地下水揚水量の減少が予測された.地域別の特徴とし て,沿岸部に位置するサムットプラカン・サムットサコンの予測揚水量が,2030 年の時点でも比較的高い水準を保っている点が挙げられる.これは,負のトレン ドが他の5地域と比べ1オーダー小さいことに起因するが,揚水量の減少量の大 きさは他地域よりも大きいことに留意されたい.

これらの将来的な地下水揚水量の実現値を用いて,3章で地下水流解析を行う.

# 第3章 地下水位変動量予測

## 3.1 地下水流解析

### 3.1.1 予測モデル

地盤変動量の予測,および各種構造物への影響を評価するためには,まず,各 帯水層の地下水位の変動を解析する必要がある.本研究では,バンコク首都圏と その周辺地域における地下水流を3次元モデル化する手法として,差分モジュー ル地下水流量モデル(MODFLOW)を選択した.MODFLOWは,帯水層が被圧も しくは不圧またはその組み合わせとなっている不規則形状を有する流動系内にお ける定常流・非定常流をシミュレーションすることができ<sup>19)</sup>,地下水流の支配方 程式は以下の式で表される.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial x} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R$$
(3.1.1)

ここで, x, y, zは空間座標, tは時間,  $K_x, K_y, K_z$ はそれぞれ x, y, z方向の透水係数, hは水頭,  $S_s$ は比貯留係数である. Rは吸い込みおよび注水項で,単位時間に単 位体積あたりの系に流入する体積であらわされ,流入時にプラスをとる. 比貯留 係数は貯留量の変化を表し,単位水頭変化に対して単位体積あたりに解放あるい は貯留される水量で定義される. 式 (3.1.1) は質量保存則とダルシー則を組み合 わせることで導かれる.

## **3.1.2** 解析領域と境界条件

詳細な地質調査は研究対象地域に集中して行ったが,対象地域外部の地下水流 は対象地域内に影響を与える可能性があり,モデルの地下水盆構造を反映させる ため,中央平野南部全体の地下水流のシミュレーションを行った.モデル領域を 中央平野南部全体とすることで,研究対象地域周縁部のシミュレーションの信頼 性を高めることができる.従って,図 3.1 に示すように,中央平野南部全体にモ デルグリッドを設定した.詳細な検討が必要となる研究対象地域のモデルグリッ

ド間隔は2kmとする.

モデルは水理地質学上の分類に基づいて 10 層に分割した. 中央平野南部の断面形状を図 3.2 に,バンコク帯水層系に適用した 3 次元モデルの構造を図 3.3 に示す。図 3.3 に示す最上部の層については,バンコク粘土層に存在するほぼ一定の表面水位をモデル上で表現するために,不圧帯水層 (UC) として設定した.また,各帯水層ユニットの境界条件を図 3.4 に示す.各層の境界外側にあるセルは,モデル内における非活動セルとして扱い,定水位の境界条件は,UC 層の活動セル全体,および各層のシャム湾内南端の列上の活動セルに割り当てた.さらに,降雨がもたらす地下水の涵養については,図 3.2 に示すように,湾から北へ 130kmほどは透水性の低いバンコク粘土層に覆われているため,降雨が地盤に直接浸透することは考えにくい.ただし,BK・PD・NL帯水層に関しては,これらの層が露頭している部分のセルについて涵養を施し,SK~PN帯水層は岩盤が境界となっている.

モデルへの入力パラメータに帯水層深度や土質性状などがあるが、各層の深度 については、バンコク粘土層と BK・PD・NL・NB の 4 帯水層にクリギングによ り推定された最適推定値を用いた.また、透水係数等の土質性状は試験により得 られた統計の平均値を用い、表 3.1 にモデルに用いた土質性状のパラメータをま とめた.ここで、S<sub>s</sub>は比貯留率、S<sub>y</sub>は比浸出率、nは間隙率である.なお、帯水 層ユニットとして取り扱っているため、鉛直方向の透水係数については、次式に 示すような砂質の層相と粘土質の層相の透水性の対数平均を用いた.

$$\log(K_{av}) = \frac{b_s \cdot \log(K_s) + b_c \cdot \log(K_c)}{b}$$
(3.1.2)

ここで, K<sub>av</sub>は層の鉛直方向の透水性の平均値, K<sub>s</sub>は砂質の層相の鉛直方向の透水性, K<sub>c</sub>は粘土質の層相の鉛直方向の透水性, bは各帯水層ユニットの総層厚, b<sub>s</sub>は砂質の層相の層厚, b<sub>c</sub>は粘土質の層相の層厚である.

## 3.1.3 揚水井戸の分布に関して

シミュレーションの重要なパラメータの一つである地下水揚水箇所の分布は 2006年のデータ<sup>20)</sup>に基づいている.図 2.1に示すように,バンコク都市圏におけ る地下水揚水比率は, PD, NL, NB 帯水層が全体の 95%を占めているため,本研 究では,この三つの帯水層からの揚水のみをモデル化する.図 3.5 に 2006 年の地 下水揚水箇所の分布を示し,各揚水井戸の揚水量は,各地域の総揚水量を帯水層 別の揚水比率に応じて分配し,地域ごとの揚水井戸の個数で除することによって 定めた.そのため,個々の井戸については,各地域で等分布的に与えられている ことに留意されたい.この分布に従い,予測揚水量をモデルに分布させた.

また,各地点の詳細な地下水位を観測するため,本モデルに各層ごとに水位を 記録するための観測井戸を設置させた.観測井戸の分布については図 3.6 に示す. 図 3.6(a)に示す側線はバンコク中心部を通る南北方向の側線で,二つの側線はバ ンコク中央平原南部の将来的な地盤変動の様子を観測するために設置した.図 3.6(b),(c),(d)は,各種構造物への影響を評価するため,直接影響を及ぼすと考 えられる BK 層の水位変動のみを記録するものとする.

#### **3.1.4** 初期水頭の設定

本研究では、2.2.3 で述べたように、地下水の揚水が減少傾向にあり、各帯水層 における水位の変動は回復傾向を示すことが予測されるため、各帯水層の水位は あらかじめ低下させておく必要があった.図 3.7 (a) に PD・NL・NB 帯水層の 2006 年の実測水頭のコンター図を、図 3.7 (b) に計算水頭のコンター図を示す. 計算水頭については、図 2.6 に示した各地域の 1995~2005 年の地下水揚水量に基 づき、3.1.2 で示した手法と同様に算出したため、各井戸の揚水量はそれぞれの地 域で等分布的に与えられており、計算水頭は実測水頭と比較すると、沿岸部のサ ムットサコンで局所的な水位が実測値ほど低下していないことがわかる.しかし、 その点以外は帯水層ごとに比較しても、コンター図全体としての様相は類似して いるといえる.次節では、この初期水頭に基づき、2006~2030 年の 100 パターン の地下水流のシミュレーションを行う.

# 3.2 シミュレーション結果と考察

2.2.3 で予測した 100 個の地下水 揚水パターンの実現 値を用いてモンテカルロシ ミュレーションを行った.

図 2.1 に示すように地下水揚水の大半が上部 3 つの PD・NL・NB 帯水層からの

取水である.これらの帯水層とその上部に存在する BK 帯水層の地下水位変動が, 地盤変動と4章で述べる構造物への被害をもたらす要因となりうるので,地下水 位の変動はこれら上部4層の帯水層に着目する.

図 3.8 は 2006~2015 年における各帯水層の水位変動量を表す等高線図で、図 3.9 は 2006~2030 年における等高線図である. なお、等高線図に示す正の値は水位の 低下、負の値は水位の回復を示すものとする. 2006~2015 年の期間では、沿岸部 に位置するサムットプラカン以外では水位の回復が起こっていないのに対して、 2006~2030 年の期間では、パトムーターニやサムットプラカンとパトムーターニ の間に位置するバンコクの東部でも水位の回復がみられ、また、顕著ではないが、 サムットサコンの東部でも水位回復の傾向がみられる. この水位回復の予測され る地域の大きな特徴としては、図 2.7 に示すように、地下水揚水量の絶対的な減 少量が大きいということが挙げられる. この点について、バンコクに対しては当 てはまらないが、パトムーターニとサムットプラカンに地理的に隣接しているた め、水位の回復が押し上げられたのだと考えられる.

次に、将来的な地下水揚水量の不確実性が、地下水位変動に及ぼす影響につい て検討する.図 3.10 は、A 側線の NL 帯水層の水位変動を表した図で、正の値は 水位の回復を示すものとする.NL 帯水層は、図 2.1 に示すように、地下水の揚水 比率がもっとも大きく、将来的な地下水揚水量の不確実性を最も大きく反映する と考えられたため、ここで例として取り上げた.図 3.10 から、地下水揚水の不確 実性に伴うばらつきはほとんどみられず、2015~2030 年と時間が経過するにとも ないわずかに減少を示す程度であった.この原因として負のトレンドのもつ幾何 ブラウン運動では、値が減少するにつれ、0 に限りなく収束していくという性質 が挙げられる.また、3.1.2 でも述べたように、揚水井戸を分布させる際に、等分 布で揚水井戸を割り当てたことにより、予測揚水量のばらつきも分散してしまい、 結果として水位変動量にも影響を与えなかったと推察される.

図 3.11 は A 側線における水位変動の経年変化を表したグラフである.各観測地 点の水位変動は、揚水井戸がほとんど存在しない A5~8 を中心に概ね回復傾向を 示している.図 3.12 については、B 側線における地下水位変動量は BK~NL 層に おいて、B8、9(沿岸部のサムットプラカン地域)で大きな水位回復がみられる. 図 2.7 により、サムットプラカンにおいて、2006~2030 年の間に地下水の揚水量 が約 30 万 m<sup>3</sup>/日も減少しており、この減少量の水準は他地域と比較しても高い水

準にあることがわかる.このことから,地下水位の回復は,地下水の揚水量の絶 対的な減少量に依存しているということが推察される.

図 3.13、図 3.14、図 3.15 は、構造物への影響を検討する際に用いる地下水位の 変動量である.各側線は、それぞれバンコク中心部、バンコク中心部~東部、バ ンコク南東部~サムットプラカン東部周辺部に分布している.まず、M 側線につ いては、各地点で 2006~2030年の間に回復を示しているものの、回復の程度とし ては小さい.この原因として、M 側線の位置するバンコク中心部において、地下 水の揚水量は、図 2.6より 2000~2006年の段階で約 30万 m<sup>3</sup>/日も減少しているこ とが挙げられる.本研究では、2006年以降の予測を行っているので、仮に 2000~2006年の期間に水位回復が起こっていたとしても、結果には反映されてい ない.同様の理由が R 側線にも当てはまり、バンコク中心部に位置する R1、R2 においても地下水位の回復量は小さい.最後に、T 側線については、サムットプ ラカンに含まれる T5~T9 の位置では地下水位の回復量が大きく、前述でも述べた ように、サムットプラカンにおける地下水揚水量の大幅な減少に起因している.

# 第4章 地下水位変動による影響評価

## 4.1 地盤変動量予測

### 4.1.1 地盤変動量計算式

地下水揚水による静水位低下によりバンコク粘土層の圧密は長時間かけて進 行する.Noppadol<sup>14)</sup>の研究に示されているように、帯水層からの地下水の揚水に よる全体の地盤沈下の約 25%は、最上部に存在するバンコク粘土層の圧縮から生 じるものである.したがって、本来地盤の変動量を予測するには、バンコク粘土 層の水位変動と水位変動に伴う圧密現象を考慮すべきある.しかし、3.2 でも述 べたように、研究対象地域内全域で上部4帯水層において将来的に地下水位の回 復がみられ、BK 帯水層と境界をもつバンコク粘土層においても地下水位は回復 すると予測されるので、バンコク粘土層における圧密は1次圧密過程から2次圧 密過程に移行すると考えられる.そのため、本研究においては帯水層ユニットの 瞬時変動のみを扱い、帯水層ユニットの地盤変動量を予測する.本節では、前章 より得られた4帯水層の地下水位変動の結果を用いて、一次元圧密理論に基づく 地盤変動量予測を行うものとする.

すでに述べたように、研究対象地域の地下水揚水の大半が PD・NL・NB 帯水層 からの取水である.したがって、最上部に存在する BK 帯水層を含んだ、BK・PD・ NL・NB 帯水層ユニットの圧縮が地盤変動の主要因になっていると考える.

地盤変動量を予測するうえで帯水層ユニットの粘土成分は地下水位変動による圧縮もしくはリバウンドの影響をうける主部分であるとみなした.したがって、 地盤沈下量の計算における重要なパラメータは、体積圧縮(膨潤)係数,帯水層 厚、粘土含有量である.各層の体積圧縮(膨潤)係数を表 4.1 にまとめた.各帯 水層の変動量は下式で求められる.

$$\rho = \begin{cases}
 m_v^{(+)} \gamma_w \cdot b \cdot c\Delta h & (\Delta h < 0) \\
 m_v^{(-)} \gamma_w \cdot b \cdot c\Delta h & (\Delta h > 0)
 \end{cases}$$
(4.1.1)

ここで,  $m_v^{(+)}$ は体積圧縮係数,  $m_v^{(-)}$ は体積膨潤係数,  $\gamma_w$ は水の単位体積重量, bは

層厚, cは粘土含有量, Δhは地下水位変動量である. なお,体積圧縮(膨潤)係数,粘土含有量,層厚については,帯水層ユニットとしての値を示し,体積圧縮 (膨潤)係数と粘土含有量の値については,砂層部分と粘土層部分の平均値を用 いている.

この計算式は通常の圧密沈下の計算式に粘土含有量 c が乗じてある. これは国際協力機構(JICA)のバンコク首都圏地盤沈下に関する報告書<sup>21)</sup>の中で使用されていたものを参照した.式(4.1.1)において、上式は地下水位が減少した場合に起こる帯水層の圧縮を示し、下式は地下水位が回復した場合に起こる帯水層のリバウンドを示す.ここで、地盤のリバウンドとは、図 4.1 に示すように、圧縮された帯水層において、地下水位の回復により有効応力が減少し、間隙比が不可逆的な経路で回復していく過程を表す.このとき、圧縮指数 λと膨潤指数 κの比率から、地盤のリバウンドは地盤の沈下と比較すると極めて小さいことが確認できる.

以上より,ある地点における各帯水層のあるt年の地盤変動量は下式で表される.

$$\rho_{t} = \rho_{t-1} + \begin{cases} \rho^{(+)} & (\Delta h < 0) \\ \rho^{(-)} & (\Delta h > 0) \end{cases}$$
 (t = 1,2,...,24) (4.1.2)

ここで, $ho^{(+)}$ は式 (4.1.1)の上式から得られ, $ho^{(-)}$ は同式の下式から得られる解である.

また, tについては年単位の期間を示すものとする.ある地点における地盤の 変動量は4つの帯水層における地盤変動量の和とし,以下の式で表される.

$$\rho = \rho_{BK} + \rho_{PD} + \rho_{NL} + \rho_{NB} \tag{4.1.3}$$

- ここで, *ρ<sub>BK</sub>*,*ρ<sub>PD</sub>*,*ρ<sub>NL</sub>*,*ρ<sub>NB</sub>*はそれぞれ BK 層, PD 層, NL 層, NL 層の圧縮量である. この沈下量計算は以下の仮定に基づいている.
  - 1. 水位が一単位分低下すると有効応力も一単位分増加する.
  - ・帯水層の粘土要素は地下水位低下による圧縮の影響をうける主部分とする。

- 3. 研究対象地域の地盤変動は地下水の大半が取水されている PD・NL・NB 帯水層とその上部に存在する BK 帯水層の圧縮量の和とする.
- 4. 体積圧縮係数,各層の層厚,粘土含有量は定数とし,層厚・粘土含有量

についてはクリギングによって得られた最適推定値を用いるものとする. 以上より、ある地点におけるある年の地盤変動量は、100 通りの揚水シナリオに 基づき算定されているため、100 個求められる.

#### **4.1.2** 地盤変動量解析結果と考察

まず,AおよびB側線に沿った位置での,2006年から,それぞれ2015年,2020 年,2025年,2030年までに発生する,100個の地盤変動量の期待値と標準偏差の 分布をそれぞれ図4.2,図4.3に示す.また,各側線における地盤変動量の期待値 の経年変化を図4.4に示す.なお,グラフの縦軸の正の値は地盤のリバウンドを, 負の値は地盤の沈下を表すものとする.図4.2,図4.3から,A側線,B側線とも に,100個の実現値にほとんどばらつきは見られなかった.僅かながら時間が経 過するにともない,ばらつきは小さくなっているが,これは図2.7に示すように, 将来的な地下水の揚水量の予測において,ばらつきが小さくなっていくことを反 映している.

図 4.4 に示すように、A 側線においては、A5~A8の区間でリバウンドの傾向が みられ、A2で最も大きな沈下が予測された.また、B 側線においては、全体的に リバウンド傾向がみられたが、特に B8、B9 の地域で大きなリバウンドが予測さ れた.この地域はサムットプラカンに属する沿岸地域で、2006~2030 年の地下水 揚水の減少量が特に大きかった地域でもあることから、地下水位の回復が地盤の リバウンドの支配的な要因であることが考えられ、さらに、地下水の揚水量の絶 対的な減少がリバウンドをもたらす主要因となっていることがわかる.また、粘 土含有量や層厚などの物性値の及ぼす影響については目立った傾向はみられなか ったが、A5~7 の粘土含有量や層厚が卓越していた地域では、地盤のリバウンドの 増加量が他地域よりもわずかに大きかった.

本研究では、A 側線では A5~8、B 側線では全体的に地盤のリバウンドがみられたが、一般的には地下水位の回復による地盤のリバウンドはごく稀な現象である. これは、最上部に位置するバンコク粘土層の遅延圧密を考慮していなかったことが原因であると考えられ、実際の地盤の変動量については、A、B 側線ともに下

方修正されることが予想される.このバンコク粘土層の遅延圧密と上部4帯水層の変動の双方を考慮すると、今後地下水の揚水に起因する地盤の変動によって、 重大な社会的被害をもたらす可能性は低いと推察される.

# 4.2 地下構造物の浮き上がりに対する評価

## **4.2.1** バンコク地下鉄に関して<sup>22)</sup>

図 4.5 はバンコク地下鉄の通過地域を示しており,バンコク地下鉄がバンコク 市内のほぼ中心部を通っていることがわかる.図 4.6 に示すように,バンコク都 市圏地域の地盤条件は,表層部分に軟弱粘土層が存在し,その下部に硬質粘土層 および砂礫層(BK 帯水層)が分布している.すでに述べたが,現在までに発生 している顕著な地盤沈下は,この上部の軟弱な粘土層において発生しており<sup>14)</sup>, その下部の硬質粘土層では,その剛性が高いためにほとんど沈下は観測されてい ない.このため,地下構造物においては,上部の軟弱粘土層に構築された場合に は,支持層を基礎に持つ駅舎部分とトンネル部分との連結部分に不同沈下が生じ る可能性がある上に,トンネル自体も軟弱粘土層の圧縮の影響を受ける危険性が ある.

このような観点から、バンコク地下鉄においては、地盤沈下の影響を避けるこ とが設計条件となった.また、バンコク粘土層の下部に存在する BK 層に地下構 造物を建設する場合については、透水性が非常に高く、シールドトンネル掘削お よび駅部の掘削において、湧水が施工する際に大きな支障となる.こういった条 件から、バンコク地下鉄でのトンネルおよび駅部は、主に軟弱粘土層下部の硬質 粘土層内に設計された.

このバンコク地下鉄建設は、1997~2003年にかけて行われた.地下水揚水とバ ンコク地下鉄の建設という関係に焦点を当てると、この時期は図 2.6に示すよう に、バンコク地域において地下水の揚水量が減少傾向を示した時期である.図 4.6 は間隙水圧の深度分布の概念図を示しており、1997年に粘土層と BK 帯水層の境 界部分の水圧がほぼゼロであることを考慮すると、3章でも示したように、これ 以降水位は回復方向に向かう可能性がある.すでに1章で述べたが、大阪では間 隙水圧が回復することで、その回復水圧が上部の粘土層、および地下構造物に作 用する現象が発生した.これに伴って、大阪地区では、地下鉄駅あるいは地下街

のような地下構造物に対して、アップリフト(揚圧力)による地下構造物の浮き 上がりが懸念されている.バンコクにおいては、図 4.6 に示すように、長期的に は BK 帯水層内の間隙水圧が回復し、BK 帯水層上部に建設されたバンコク地下鉄 底部にアップリフトが作用することにより、浮き上がりの問題が懸念される.

このような状況と3章からえられた結果から、本節でバンコク地下鉄の間隙水 圧回復に対する長期的な安定性について検討するに至った.

#### 4.2.2 浮き上がり評価手法

バンコク地下鉄が通過する位置に,図 3.6(b)に示したように,地下水位を観測 する観測井戸を合計 7ヵ所設置した.本検討では,バンコク地下鉄が硬質なバン コク粘土層に建設されたことを考慮に入れ,図 4.6 に示すように,バンコク粘土 層と BK 帯水層の境界部分の間隙水圧の回復分が,地下鉄の駅舎およびトンネル 部分に作用するアップリフト(揚圧力)の発生をもたらすものとする.ただし, 図 4.6 ではバンコク粘土層の深度を固定しているが,本検討では,7ヵ所の観測 地点ごとに粘土層の深度が異なることに留意されたい.アップリフトは次式を用 いて求められる.

$$F = \gamma_w (h + H) \tag{4.2.1}$$

ここに、 $\gamma_w$ は水の単位体積重量、hは BK 帯水層の地下水位、Hは地表面から躯体底面までの深度を表す.

次に,式(4.2.1)で算出されたアップリフトの値を用いてバンコク地下鉄の浮き上がりに対する安定性について検討する.図4.7 には浮き上がりの評価を行うため,地下鉄の断面図を示した.ここでは,地下鉄に使われた部材を鋼材とコンクリートに限定し,鋼材とコンクリートが1対2の割合で用いられたと仮定している.また,躯体の物性値については表4.2 に示し,以下の式を用いて浮き上がりに対する安定性を評価した.

$$\frac{W}{FB} \ge F_s \tag{4.2.2}$$

ここに、Wは躯体重量、Bは躯体底面の幅、F。は安全率を表す.

このような評価式を用いて, BK 層の 100 通りの水位変動に対して 100 パター ンの評価を行った.

### 4.2.3 結果と考察

まず,図4.8に M 側線における BK 層の地下水位を示す.図に示す地下水位の 値は,地下水位の変動量ではなく,地表面の水位を0としたときの相対的な水位 を示している.図4.8から2015~2030年時の地下水位の値は,概ね-15~-11mの範 囲に分布し,最も南部に位置する M6 で最も水位が低くなっているが,一方,水 位の回復という点でみると M6 地域で最も回復量が大きくなっており,水位のよ り低い地域で水位の回復量が大きくなっている.

次に,式(4.2.2)によって得られた,バンコク地下鉄の7地点におけるアップ リフトと安全率の関係を図 4.9 に示す.なお,アップリフトと安全率の値はすべ て 100 通りの評価結果の期待値を示している.まず,アップリフトが大きくなる にともない安全率の値が小さくなるという関係性が見いだされる.また,安全率 は 1.8~3.5 までの間に分布しており,地下構造物の浮き上がりに対する安全率が 一般に 1.1 程度に設定されていることを考慮すると,2006~2030 年の期間におい てバンコク地下鉄は浮き上がりに対して安全だと考えられる.しかし,本研究で は 2006 年を地下水位の予測開始年としたため,課税措置が厳格化する以前に揚水 量の減少を示したバンコク地区では,2006 年以前の水位回復を正確に反映してい ない可能性が十分に考えられ,安易に安全とは断言できない.また,日本の JR 上野駅は地下構造物の浮き上がりの一例として知られているが,この上野駅の掘 削底部より約 10~15m 高い地下水位であり,約 100~150kN/m<sup>2</sup>のアップリフトが発 生したことを考慮しても,バンコク地下鉄にはたらくアップリフトが,大きくは ないが決して小さいものだとは断言できない.

図 4.10 に BK 層の地下水位,地下鉄へのアップリフト,浮き上がりに対する安 全率の経年変化をまとめた.図 4.10(a)に示すように,地下水位は 2006 年から順 に回復していくのではなく,2015 年で一度低下してから再び回復しているという 傾向を示している.この原因は,2015 年の時点で,サムットプラカンにおいて は依然として 150 万 m<sup>3</sup>/日ほど取水されており,隣接するバンコク地区にも影響 を与えていることにある.同様の理由で,図 4.10 (b)のアップリフト,図 4.10 (c)

の安全率の経年変化にも影響を与えている.

# 4.3 高架型道路の基礎と盛土型道路に対する評価

### 4.3.1 エアポートリンク道路に関して

エアポートリンク道路は、バンコク第二の国際空港であるスワンナプーム国際 空港とバンコク市内とを結ぶ道路の一つで、タイの急激な経済成長と観光産業の 成長を受けて、1990年代から2006年にかけて建設された.図4.5に示すように、 バンコク第二の空港でありながら、スワンナプーム国際空港はサムットプラカン の北部に位置する.図3.6(c)は、エアポートリンク道路の位置する地点の帯水層 の水位を観測する観測井戸の位置を表し、R1~4 区間は高架型道路区間を示し、 R5~7 区間は盛土型の道路区間である.そのため、エアポートリンク道路を評価す る際には、盛土区間に対しては円弧すべりに対する安定性を評価し、高架区間に 対しては、杭基礎の支持力に対する評価を行う.

### 4.3.2 バンナチョンブリ高速道路に関して

バンナチョンブリ高速道路はバンコクとタイ湾の東岸に位置するチョンブリ を結ぶ高架型の高速道路で、東部の海岸線とバンコクを結ぶ経済的な観点から非 常に重要な高速道路の一つである.1969年に旧バンナチョンブリ高速道路は建設 されたが、この当時まだ地盤改良は行われていなかった.その後、高速道路の一 部で約 2.5m の沈下が報告されるなど、地盤沈下による問題が顕在化し<sup>10)</sup>、道路 の劣化と老朽化により、1997年に6車線を有する大規模な高速道路として再建さ れた.この新しいバンナチョンブリ高速道路に対しては、地盤改良の措置などの 対応がなされたが、まもなくして杭基礎の支持層の相違による不同沈下の被害を 受け、深刻な問題となっている.

図 3.6(d)は、帯水層の水位を観測する観測井戸の位置を表しており、T1~12 区間は全区間において高架型道路である.そのため、本研究ではバンナチョンブリ高速道路に対しては、杭基礎の支持力に対する評価を行うものとする.

### 4.3.3 盛土の安定性と杭基礎の支持力に対する評価手法

まず,盛土区間に対しては図4.11に示すように円弧すべりに対する安定性を評

価するものとしてモデル化した. なお,破壊は盛土の底部で発生すると仮定し, 計算は  $\phi_u = 0$ 法に沿った方法を採用し,盛土自体のせん断抵抗力および図の斜線部 による起動モーメントは考えないものとする. モデルに用いた盛土とバンコク粘 土層の物性値を表 4.3 に示す<sup>23)</sup>. 今,盛土が半径rなる円弧に沿ってすべるもの と仮定すると,極限のつりあい条件式は次式で与えられる.

$$W_1 e_1 - W_2 e_2 = slr \tag{4.3.1}$$

ここで、 $W_1$ は起動モーメントを生ずる重量、 $W_2$ は抵抗モーメントを生ずる重量、  $e_1$ および $e_2$ はOAから $W_1$ 、 $W_2$ の作用線までの距離、sはすべり面上に働くせん断応 力、Iはすべり円弧の長さ、である.

盛土の安全率 $F_s$ は、従来一般的に(4.3.1)を使い、次式のように定義される.

$$F_{s} = \frac{c_{u}}{s} = \frac{c_{u} lr}{W_{1}e_{1} - W_{2}e_{2}}$$
(4.3.2)

ここで, *c*<sub>u</sub>は粘土層における非排水せん断強度である. したがって, ある*s*に対して, *F*<sub>s</sub>は一義的に定まることになる. そして, 種々の*r*を仮定し, 求めた*F*<sub>s</sub>の最小値が設計安全率とされている. ここではすべり面は図 4.11 のように軟弱粘土層を通過するものとして仮定し, *r*を仮定して得られた最小安全率を本研究における安全率として取り扱う. また, *c*<sub>u</sub>は BK 層の水位回復に伴うバンコク粘土層の有効応力に起因するものと仮定する.

次に、高架型道路の杭基礎の支持力に対する評価は、鉛直有効応力のみに着目 し、計算には  $\phi_u = 0$ 法を用いた. 図 4.12 に示すように、杭基礎は一律でバンコク 粘土層の下部まで到達するものと仮定する. 杭基礎の鉛直支持力については一般 に次式で定義される.

$$Q = q_p A_p + f_s A_s \tag{4.3.3}$$

ここに、 $q_p$ は杭の先端支持力、 $A_p$ は杭先端の面積、 $f_s$ は杭周面地盤の摩擦力、 $A_s$ は杭の表面積を表す.

また, Meyerhofは深い基礎も浅い基礎同様の支持力公式が適用できると考え,

$$q_{p} = \alpha c N_{c} + \frac{1}{2} \beta \gamma_{1} B N_{\gamma} + \gamma_{2} D_{f} N_{q} \qquad (4.3.4)$$

ここに, cは粘土層の粘着力,  $\gamma_1$ は基礎荷重面下にある土の単位体積重量,  $\gamma_2$ は 基礎荷重面より上にある土の単位体積重量, Bは杭の直径,  $D_f$ は基礎の根入れ深 さ,  $\alpha$ および $\beta$ は基礎の形状による補正係数,  $N_c$ ,  $N_\gamma$ ,  $N_q$ は支持力係数である. ここで, Bは $D_f$ に比べて十分に小さいので式 (4.3.4)の第2項無視する. さら に, 飽和した軟弱な粘土地盤では,  $\phi_u = 0$ より $N_c = 10$ ,  $N_q = 1$ , またサーチャージ の効果は考慮しないものとして, 半径rの杭1本の支持力は,

$$Q = 10\pi \cdot c_{\mu}r^{2} + 2\pi \cdot rD_{f}c_{\mu} \qquad (4.3.5)$$

と表される. なお *c*<sub>u</sub>は深度に依存し,周面摩擦力は簡易的にバンコク粘土層のみ に働くものとして計算を行う. また,地盤の圧密により発生するネガティブフリ クションについても無視するものとする. 評価に用いた地盤の物性値は表 4.3 に 準ずるものとする. また,根入れ深さはバンコク粘土層の層厚に準じ,杭の半径 については *r*=1として評価を行う.

本研究では、2006年における杭基礎1本あたりの支持力を基準とし、BK層の 水位変動による支持力の変化を2015、2020、2025、2030年ごとに予測する.なお、 粘土層内の地下水位の回復による有効応力の減少は、図4.12のように近似的に表 し、非排水せん断強度もこの有効応力の減少に従うものとする.

以上のような条件で、盛土の安定性評価・杭基礎の支持力に関する評価に対して、各地点の 100 通りの BK 層の地下水位変動量を用いて、100 通りの評価を行った.以下の項で扱われる値については、すべて 100 通りの結果から得られた期待値を指すものとする.

#### 4.3.4 結果と考察

まず,図4.13は盛土区間に対する安定性を求める際に,最適な半径を決定する 方法を示している.ここでは,ある半径rを仮定して,その半径に対する最小安 全率を求めた.この図から r=13のとき安全率は極小値をとることがわかる.図 4.13 は R5 地点の 2015 年時の安全率を示しているが,その他の地点における他の 年次でも同様の結果が得られることに留意されたい.

図 4.14 は、r=13としたときの R5~R7 地域における安全率の経年変化を示して いる.各地点において、時間が経過するに伴って安全率は低下していく傾向がみ られる.その中でも、特に顕著な安全率の減少傾向がみられるのは R7 地域であ り、この地域はサムットプラカン北部に位置することから、地下揚水量の絶対的 な減少による帯水層の水位回復の影響を受けていることが考えられる.しかし、 安定性という観点では、最も小さな安全率を示している R7 地域でも 1.9 以上であ り、盛土の一般的な設計安全率が 1.3 程度であることを考えると十分に安全であ ると推察される.

次に,図4.15,図4.16を示す.二つの図はそれぞれ R 側線の R1~R4, T 側線に おける杭基礎の支持力の経年変化を示している.まず,R 側線においては時間の 経過による安全率の低下はわずかにみられるが,大きな低下はみられない.R1~R4 はバンコクの中心部よりやや北に位置し,サムットプラカン地域における地下水 位の回復の影響をあまり受けていないと考えられる.一方で,サムットプラカン 地域を横断するバンナチョンブリ高速道路を示す T 側線では T3~T9 の地域で,現 状の支持力を大きく下回る支持力の低下が予測された.本検討により,サムット プラカン地域において,地下水位の回復が及ぼす負の影響を認識できたが,同時 に支持力が今後現状の半分程度の水準までしか示さなくなる恐れがあることを考 えると,安全性に問題が生じる可能性が十分にあり,杭基礎の支持力を増加させ るような対策が必要となることが推察される.

# 第5章 結論

本研究では、将来的な地下水の揚水量の減少を考慮し、バンコク地域における 地下水位の回復に伴う構造物への影響評価を、確率論的手法を用いてモンテカル ロシミュレーションにより予測した.

第3章,第4章の各章での検討によって、それぞれ以下の結論を得た.

第3章では,第2章で得られた不確実性を含む将来的な地下水揚水量をもとに、 将来的な地下水位変動量の予測を行った.

地下水流の解析結果より、パトムーターニの西部・サムットプラカンのほぼ全 域で、広範囲でかつ大きな水位の回復がみられた.地下水位が回復した大きな要 因は、地下水の揚水量の絶対的な減少量に起因するものであることが考えられる. 本研究では、揚水井戸を等分布的に与えているため、地下水位の絶対的な回復量 という観点では、実際の回復量よりも小さいと考えられるが、研究対象地域全体 としての地下水位の回復の傾向を予測することは可能であると推察される.

次に、将来的な地下水揚水量の不確実性が地下水位変動に及ぼす影響について は、負のトレンドのもつ幾何ブラウン運動では、地下水揚水量の値が小さくなる に従い、ゼロに限りなく収束していく性質があるため、時間が経過すると不確実 性が小さくなる傾向がある.さらに、揚水井戸を分布させる際に、等分布で揚水 井戸を割り当てたことにより、揚水量のばらつきも分散してしまい、結果として 水位変動量にも影響を与えなかったと考えられる.

本研究で特に詳細な検討が必要となったバンコク中心部の水位変動については、 地下水の揚水量が 2000~2006 年の段階で約 30 万 m<sup>3</sup>/日も減少しているため、バン コク中心部においてはこの期間に水位が回復している可能性がある.

第4章では,第3章で得られた地下水位の変動量予測の結果を用いて,将来的 な地盤変動量の予測,および各種構造物への影響評価として,地下鉄の浮き上が りに対する安定性,盛土型道路の安定性,高架型道路の杭基礎における支持力へ の影響を検討した.

まず,地下水位の回復による地盤変動の過程については,膨潤指数 K が 圧縮指

数λに比べて小さいため, 圧縮された帯水層において, 地下水位の回復により有 効応力が減少し, 間隙比が不可逆的な経路で回復する. このため, あらかじめ圧 縮された帯水層において地下水位が元の水準まで回復しても, そのリバウンド量 は圧縮量と比較すると極めて小さくなるという特徴がある. 本検討は, そのよう な特徴を踏まえて行われている.

地盤変動量予測では、A5~A8 のバンコク中心部でリバウンドの傾向がみられ、 反対にバンコクの西部に位置する A2 で最も大きな沈下が予測された.また、B8、 B9 のサムットプラカン西部で約 6cm の大きなリバウンドが予測された. この地 域では、2006~2030年の地下水揚水の減少量が特に大きかった地域でもあること から、地下水位の回復が地盤のリバウンドの支配的な要因であると推察される. ここで得られた結果と、最上部のバンコク粘土層の遅延圧密を考慮に入れると、 バンコク中心部を通過する側線上では、今後地下水位の回復により地盤変動に影 響は現れない、もしくはやや沈下の傾向を示すと推察される.よって、今後地下 水の揚水に起因する地盤の変動に関しては、重大な社会的被害をもたらす可能性 は低いと推察される.

次に、バンコク地下鉄の浮き上がりに対する検討結果をまとめる.地下水位回 復に伴う浮き上がりに対する安全率は 1.8~3.5 までの間に分布し、地下構造物の 浮き上がりに対する安全率が一般に 1.1 程度であることから、2006~2030 年の期 間においてバンコク地下鉄は浮き上がりに対して安全だと考えられる.しかし、 前述のように、バンコク中心部の水位変動については 2000~2006 年の段階で水位 が回復し、より大きなアップリフトが発生している可能性があり、決して楽観視 はできない.また、本研究では揚水井戸の分布を等分布的に与えたが、この手法 は広域の地下水位の変動を予測する場合には有効であると考えられるが、バンコ ク地下鉄を対象とするような比較的狭い範囲に適用する場合にはあまり適さず、 より詳細な揚水井戸の分布データが求められる.

次に、地下水位の変動による盛土型道路の安定性と高架型道路の支持力に対す る影響評価について述べる.まず、エアポートリンク道路の東部に位置する盛土 の円弧すべりに対する安定性については、R5、6、7の各地域で時間の経過ととも に安全率は低下しており、水位の回復の影響を受けている R7 の地域で低下率が 大きい.しかし、2030年の時点でも依然として安全率は 1.9以上を示し、通常の 設計で安全率が 1.3 程度で見積もられていることを考慮すると、十分安全である

といえる.

最後に、高架型道路の支持力に対する影響評価を考える.まず、エアポートリンク道路の西部においては、時間の経過による安全率の低下はわずかにみられるが、大きな低下はみられない.一方で、サムットプラカン地域を横断するバンナチョンブリ高速道路を示す T 側線では T3~T9 の地域で大幅な支持力の低下を予測することができた.この結果は、サムットプラカンにおける地下水位回復の影響を大きく受けている.

以上を総括すると、将来的にバンナチョンブリ高速道路のバンコクとサムット プラカンの県境付近で,最も構造物に対して危険性があるいう考えに至る.特に、 この高速道路は東部の海岸線とバンコク市内を結ぶ経済的な観点から非常に重要 な高速道路の一つであるため、注意深い観察と点検が必要である.また、バンコ ク地区では、今後も地下水利用への課税措置は継続されることが予想され、地下 水の揚水量は減少していくことが確実であるため、地下水位が回復するという前 提を覆すことはできない.そのため、地下水位が回復するという条件の中で、地 盤に対して地盤改良などの何らかの方法で地盤の強度そのものを改善する必要が あると推察される. さらに、本研究で危険であると予測されたサムットプラカン には、本研究で取り扱った構造物以外にもインフラ構造物が存在するので、その ような構造物も含めて、サムットプラカン地域全体に対して監視をする必要があ ると考えられる.また、このような結果が得られたことを踏まえ、本研究が広範 囲の地域から、構造物に対する危険性の有無を評価する際には有効であると考え られる.

最後に、本研究の今後の課題として、以下のことが挙げられる.

- 局所的な地下水位の変動を予測するために,揚水井戸のより詳細なデータを収 集する必要がある.
- 将来的な地下水揚水量の不確実性をより反映させるために、揚水量の予測モデルを改善する必要がある。
- ・地盤変動量予測,および構造物への影響評価をより正確に行うために,バンコク粘土層における間隙水圧の分布を求める必要がある。
- 将来的な地下水位の回復量をより明確にするために、最適な予測基準年を設定 する必要がある。

# 参考文献

<sup>1)</sup> Chula-Unisearch: A Study for Concept Design of Artificial Recharge of Groundwater for Conservation of Environment.Final.Technical Report submitted to the Department of Mineral Resources, Bangkok, 2000.

<sup>2)</sup> Noppadol Phienwej,大津宏康,Nutthapon Supawiwat,高橋健二:バンコクにおける地下水揚水に伴う地盤沈下,土と基礎,2005.

 $^{3)}$  Sirisin Janrungautai: The Study on Uncertainty Modeling and Risk Analysis in Geotechnical Problems, 京都大学博士論文, 2003.

<sup>4)</sup> 大津宏康: Introduction on Geotechnical Infrastructure Asset Management, GCOE AIT-KU joint symposium on human Security engineering, Bangkok, Thailand, pp113-120, 2009.

<sup>5)</sup>大津宏康:東南アジア諸国における都市地下水環境保全に関する調査研究,2004.

 $^{6)}$ 山本荘毅: Case History of Land Subsidence in Osaka.Guidebook to studies of Land Subsidence due to Groundwater Withdrawal, International Hydrological Program, Working Group8.4, UNESCO, pp.185-194.

<sup>7)</sup> 橋本正:地下水 · 地盤沈下, 地盤工学会誌, Vol.57, No.10, pp.40-43, 2009.

<sup>8)</sup> Noppadol Phienwej, P.H.Giao, P.Nutalaya: Land subsidence in Bangkok, Thailand, Engineering Geology 82, pp.187-201, 2006.

<sup>9)</sup> Hanoi Water Business Company : Study on protection of water resources and Monitoring of land subsidence in Hanoi, Main Report Vol.1.1, Hanoi Water Supply Program, PhaseIV, 2000.

<sup>10)</sup> Vachi Ramnarong: Evaluation of groundwater management in Bangkok:Positive and negative, Department of Mineral Resources, Bangkok, 1999.

<sup>11)</sup> Suttisak Soralump, Rattatam Isaraoranit, Barames Vardhanabhuti, Krit Saowiang : Rehabilitation and maintenance planning of Burapawithi's approach ramp, Bangkok-Chonburi expressway, GCOE AIT-KU joint symposium on human Security engineering, Bangkok, Thailand, pp121-126, 2009.

<sup>12)</sup> Koponen, K.and Dan, N.V: Raport on landsubsidence study in Hanoi area, Hydrogeological Division No.2, Vietnam Department of Mineral Resources and Geology, 1995.

<sup>13)</sup> Giao P. H. : Artifical recharge of the Bangkok Aquifer System for the Mitigation of Land Subsidence, Dissertation, Asian Institute of Technology, Bangkok, 1997.

<sup>14)</sup> Duc N. A. : Updating and analysis of Bangkok land subsidence caused by deep well pumping with emphasis on shallow soil settlement, Master Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, 1999.

<sup>15)</sup> 大津宏康, Noppadol Phienwej, Nutthapon Supawiwat, 高橋健二,泉裕昭:バンコクにおける地下水揚水量の不確実性を考慮した地盤沈下推定,土木学会論文集 F,土木学会, Vol.62, No.1, pp25-40, 2006.

<sup>16)</sup> Department of Groundwater Resource, 2009

<sup>17)</sup> 保江邦夫:数值確率解析入門,朝倉出版,2000.

<sup>18)</sup> 谷千凰彦: よくわかるブラック・ショールズモデル,東洋経済新報社出版,2000.

<sup>19)</sup> Mary P. Anderson, William W. Woessner:地下水モデル-実践的シミュレーションの基礎-,共立出版,1994.

<sup>20)</sup> IGES: Water for growth and development, Stakeholder Meeting on Sustainable Groundwater Management in Bangkok, Thailand, 4<sup>th</sup> World Water Forum, Mexico City, 2006.

<sup>21)</sup> 国際協力機構 (JICA),タイ鉱物資源局 (DMR),公共事業局 (PWD):バンコ ク首都圏地盤沈下・地下水管理計画調査,1995.

<sup>22)</sup>大津宏康:バンコク地下鉄建設事業(1)~(5), JICA評価報告書 2008, 57, 2009.

<sup>23)</sup> By Seah, Tian Ho, Suzuki Kazumasa : Soil Cement Column Design of East Outer Bangkok Ring Road, Third Seminar on Ground Improvement in Highways, Bangkok, Thailand, pp162, 2000.
#### 謝辞

本論文を作成するにあたり、京都大学工学研究科・大津宏康教授には、研究室 という場を提供していただくと共に、研究室に配属されて一年目の私に研究に対 する心構えを教えていただきました。時には厳しく、しかし、時には暖かくご指 導いただき、心より感謝致します。

京都大学工学研究科・木元小百合准教授には、本論文を構成するにあたり、副 査として的確なアドバイスをいただきました。心から感謝致します。

京都大学工学研究科・塩谷智基准教授には、研究で行き詰った時に励ましの言 葉を掛けていただき、大変励みになりました。深く感謝致します。また、京都大 学工学研究科・稲積真哉助教には、研究面にとどまらず、研究室で生活をしてい くなかで様々なことに配慮していただき感謝致します。伊東宏美秘書には、研究 室での生活において色々と面倒をみていただき、また研究が円滑に遂行できるよ うに学生へ細かな気配りをしていただき大変感謝しております。

水文技術コンサルタント株式会社・高橋健二氏、坂本祥和氏には、本研究を行 う上で不可欠であったデータを御提供していただき、また、モデル解析の際には 的確なアドバイスをいただき大変お世話になりました。心よりお礼申し上げます。

研究室生活を共に過ごした学生、院生、留学生諸氏に、謹んで感謝の意を表し ます。特に、博士課程 Chaleiwchalard Nipawan 氏には、本研究に欠かせないバン コク現地のデータを入手する際にご尽力頂き深く感謝致します。また、修士課程 1 回生幹拓也氏には、本論文作成においての的確なアドバイスをしていただき、 円滑に論文作成が行えました。大変感謝しております。

皆様のおかげで、この一年私は多くの経験をすることができ、学部生としての 最後の一年に、大きな成長を遂げることができたと思います。

最後に、学生生活に支障がないように、終始支え続けてくれた両親には心から 感謝致します。

33

## 表1.1 大阪における地下水揚水量

年	揚水量	年	揚水量
1920	2,600	1960	394,800
1930	17,500	1961	357,300
1940	52,000	1962	338,800
1945	52,900	1963	259,700
1953	82,200	1964	217,000
1954	102,600	1965	153,800
1955	157,400	1966	94,300
1956	178,200	1967	42,200
1957	255,100	1968	12,800
1958	303,300	1974	100
1959	357,300		

(単位:m<sup>3</sup>/日)

# 表2.1 地下水揚水のトレンドとボラティリティ

地域	トレンドμ	ボラティリティσ
バンコク	-0.29706	0.29115
ノンタブリー	-0.29273	0.15329
パトムーターニ	-0.20818	0.17222
サムットプラカン	-0.085375	0.11453
サムットサコン	-0.058087	0.068147
ナコーンパトム	-0.22112	0.54497
アユタヤ	-0.26529	0.30097
	単位(m <sup>3</sup> /日/年)	単位(m <sup>3</sup> /日/(年) <sup>1/2</sup> )

# 表3.1 モデルへの入力パラメータ

Ē	透水係数(m/s)		S	S		
僧	K <sub>x</sub>	Ky	Kz	$\mathbf{S}_{\mathbf{s}}$	s <sub>y</sub>	n
UC	$1.00 \times 10^{-10}$	$1.00 \times 10^{-10}$	$1.00 \times 10^{-11}$	$5.0 \times 10^{-1}$	0.01	0.4
BC	$1.00 \times 10^{-10}$	$1.00 \times 10^{-10}$	$1.00 \times 10^{-11}$	$5.0 \times 10^{-1}$	0.01	0.4
BK	$1.50 \times 10^{-5}$	$1.50 \times 10^{-5}$	$1.50 \times 10^{-8}$	$1.0 \times 10^{-3}$	0.01	0.3
PD	$2.60 \times 10^{-5}$	$2.60 \times 10^{-5}$	$2.60 \times 10^{-8}$	$7.0 \times 10^{-4}$	0.01	0.2
NL	$3.72 \times 10^{-4}$	$3.72 \times 10^{-4}$	$1.86 \times 10^{-8}$	$7.0 \times 10^{-5}$	0.01	0.2
NB	$1.98 \times 10^{-4}$	$1.98 \times 10^{-4}$	$1.98 \times 10^{-8}$	$7.0 \times 10^{-5}$	0.01	0.2
SK	$1.86 \times 10^{-5}$	$1.86 \times 10^{-5}$	$1.86 \times 10^{-8}$	$2.5 \times 10^{-4}$	0.01	0.2
РТ	$1.23 \times 10^{-5}$	$1.23 \times 10^{-5}$	$1.23 \times 10^{-8}$	$2.5 \times 10^{-4}$	0.01	0.2
ТВ	$1.16 \times 10^{-5}$	$1.16 \times 10^{-5}$	$1.16 \times 10^{-8}$	$2.5 \times 10^{-4}$	0.01	0.2
PN	$2.03 \times 10^{-6}$	$2.03 \times 10^{-6}$	$2.03 \times 10^{-8}$	$2.5 \times 10^{-4}$	0.01	0.2

帯水層	m <sub>v</sub> <sup>(+)</sup> (m <sup>2</sup> /kN)	$m_v^{(-)}(m^2/kN)$
ВК	$7.85 \times 10^{-5}$	$2.72 \times 10^{-5}$
PD	$2.16 \times 10^{-5}$	$4.25 \times 10^{-6}$
NL	$1.28 \times 10^{-5}$	$2.94 \times 10^{-6}$
NB	$6.85 \times 10^{-6}$	$1.59 \times 10^{-6}$

# 表4.1 各帯水層の体積圧縮(膨潤)係数

# 表4.2 バンコク地下鉄の物性値

材質	単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )
鋼材	76.9
コンクリート	20

## 表4.3 盛土の安定性評価に用いた物性値

層	$\gamma_{\rm t}({\rm kN/m^3})$	$\gamma_{\rm sat}({\rm kN/m^3})$
1	20.0	21.0
2	14.5	14.5
3	16.5	16.5

 $\gamma_t: 湿潤単位体積重量 \gamma_{sat}: 飽和単位体積重量$ 



図1.1 バンコク都市圏における地下水揚水量の推移



図1.2 中央平野南部の南北断面水理地質形状







#### 図1.3 地盤沈下とインフラ建設に関わる3つの事例



図1.4 大阪地区における地下水位と地盤沈下の推移



(a)2002年

(b)1981年

図1.5 地下水位と沈下量の推移と地盤沈下の等高線図



図1.6 ハノイにおける地下水揚水量の推移



図1.7 研究対象地域図







総揚水井4549基

# 図2.1 各帯水層別の揚水比率



図2.2 研究対象地域断面側線



図2.3 帯水層深度の断面図



図2.4 A側線の帯水層厚、粘土含有量の推定結果

50



図2.5 B側線の帯水層厚、粘土含有量の推定結果



図2.6 研究対象地域の地下水の揚水量データ



#### 図2.7 各地域の揚水量の予測結果



図3.1 モデルグリッド図



図3.2 中央平野南部における帯水層系の南北断面形状



図3.3 バンコク帯水層系に適用した3次元モデルの構造





図3.4 三次元モデルの各帯水層の境界



(a) 揚水井戸の分布



(b)モデルにおける揚水井戸の分布

図3.5 揚水井戸のモデル化



(a)バンコク中心部を通る南北側線



(b)バンコク市内の地下を走るMRT側線

#### 図3.6 観測井戸の設置地域について

パトムーターニ ノンタブリー バンコク **R**1 R2 **R**3 **R**4 **R**5 ROT-BB ROS-BROS-BB PRO ROL-88 RO2-88 RO3-88 <sup>R02-98</sup> ₱ R7 サムットプラカン R1~4までが高架橋 10km R5~7が盛土区間

(c)Airport link roadを通る側線

the second second	
	バンコク
T1	
Tat-88 T2	The second second
T03-98 T4	
TOS-88	6
TOS	-88 T7 T02-88 T8
サムットプラカン	
- North -	♣ Tit-88 112 ♣ Tit2-88 ♣
10km	T1~12まで高架橋が続く

(d)Bang Na Chon Buri expresswayを通る側線

## 図3.6 観測井戸の設置地域について



(a.1) PD層

(a.2) NL層

(a.3) NB層

(a) 実測水頭



(b.1) PD層

(b.2) NL層

(b.3) NB層

(b) 計算水頭

# 図3.7 2006年の実測水頭と計算水頭の等高線図



(a) BK層



(b) PD層



(c) NL層



(d) NB層

図3.8 2006~2015年の各帯水層における水位変動量の等高線図



(a) BK層



(b) PD層



(c) NL層



(d) NB層

図3.9 2006~2030年の各帯水層における水位変動量の等高線図



#### 図3.10 A側線のNL層における水位変動図



図3.11 A側線における各帯水層の水位変動図



図3.12 B側線における各帯水層の水位変動図



図3.13 M側線におけるBK層の水位変動図



図3.14 R側線におけるBK層の水位変動図



#### 図3.15 T側線におけるBK層の水位変動図


**圧密圧力**p(kgf/cm<sup>2</sup>)

# 図4.1 圧縮指数と膨潤指数の関係



#### 図4.2 A側線における地盤変動量



図4.3 B側線における地盤変動量





### 図4.4 各測線における地盤変動量の期待値の経年変化



#### 図4.5 各種構造物の位置



図4.6 バンコク地下鉄へのアップリフトの概念図



図4.7 バンコク地下鉄の想定断面図



図4.8 M側線におけるBK層の地下水位



図4.9 バンコク地下鉄における浮き上がりに対する安定性





(a) BK層における地下水位の経年変化

(b) 地下鉄にはたらくアップリフトの経年変化



(c) 浮き上がりに対する安全率の経年変化

図4.10 地下水位・アップリフト・安全率の経年変化



# 図4.11 盛土の円弧すべり計算用の想定断面





## 図4.12 杭基礎の鉛直支持力計算用の想定断面



図4.13 R5地点における円弧半径と安全率の関係(2015年時)



図4.14 R5~R7における安全率の経年変化



図4.15 R側線における杭基礎の支持力変化



図4.16 T側線における杭基礎の支持力変化