

大深度地下空間利用における地盤環境保全の  
評価手法に関する調査報告書

環境庁 国立公害研究所

正誤表

p. 65

誤

---

図 5 - 1 軸対称回転体に近い大深度地下空間利用想定図

図 5 - 2 鉛直 2 次元断面に近い大深度地下空間利用想定図

---

正

図 5 - 1 軸対称回転体に近い大深度地下空間利用想定図 (岡田 [38])

図 5 - 2 鉛直 2 次元断面に近い大深度地下空間利用想定図 (内藤 [39])

---

## まえがき

最近、「ニュー・フロンティア」という言葉をしばしば耳にする。「ニュー・フロンティア」とは、「宇宙」、「海洋」、「地下」の3つの空間を主なターゲットとして、近い将来に開発を進めようというものである。とりわけ、地下空間の開発の可能性を探ろうという動きが急速にでてきた。地下空間の開発に対し、「ジオフロント」という言葉も生まれている。

「ニュー・フロンティア」の中でも、「地下」が特に脚光を集めるようになった背景に、近年の大都市を中心とした地価の高騰が挙げられ、これまで利用されていない大深度地下空間を利用しようという動きが活発になってきた。

このような状況を踏まえて、各省庁において大深度地下空間の利用を促進させるための法案を準備するとともに、技術的な検討も具体的に進められている。現在、大深度地下空間を開発しようとしているのは、大都市圏の建築物の支持基盤より下で、土地所有者の通常の土地利用を阻害しない領域とされており、概ね地下50～100mの空間が想定されている。

本調査は、科学技術庁の昭和63年度科学技術振興調整費による「快適で安全な大深度地下空間利用に関する緊急調査」のうち、「安全・快適な利用に係る共通基盤技術の調査」の一環として、環境庁国立公害研究所が実施した「環境保全の評価手法に関する調査」を中心にとりまとめたものである。

大深度地下空間は、環境保全の観点に立って開発・利用が行われる必要がある。そこで、本調査は主として、大深度地下空間利用の際に懸念される地盤環境問題を予め抽出しておくことと、開発によって影響が及ぼされる地下水挙動の予測手法を開発することを目的に調査を行った。なお、本報告書は、快適で安全な大深度地下空間利用に関する緊急調査推進委員会の別記に示した分科会の意見を踏まえてまとめたものである。

とりまとめに当たっては、分科会の諸先生方等関係機関の方々に多大な御指導、御協力をいただいた。ここに、感謝の意を表する次第である。

平成元年3月

環境庁国立公害研究所長

不破 敬一郎

# 目 次

## 第1章 調査の概要

|                 |   |
|-----------------|---|
| 1. 1 要 約        | 1 |
| 1. 2 大深度地下開発の背景 | 1 |
| 1. 3 調査の目的      | 2 |
| 1. 4 調査方法       | 2 |
| 1. 5 分科会の構成     | 3 |

## 第2章 首都圏の地盤

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 2. 1 地盤情報の現況                 | 4  |
| 2. 2 地質構造の概要                 | 7  |
| 2. 3 大深度地下開発の対象となる主な地層とその特徴  | 11 |
| 2. 3. 1 有楽町層（低地部）            | 11 |
| 2. 3. 2 七号地層（低地部）            | 11 |
| 2. 3. 3 関東ローム層（台地・丘陵部）       | 12 |
| 2. 3. 4 下総層群                 | 12 |
| 2. 3. 5 上総層群                 | 12 |
| 2. 4 大深度地下開発の対象となる地層の土質工学的性質 | 13 |
| 2. 4. 1 地層の物理的性質             | 13 |
| 2. 4. 2 地層の圧密特性              | 15 |
| 2. 5 地質学的な地層と建設工学的な地層        | 18 |

## 第3章 首都圏の地盤沈下と地下水

|                 |    |
|-----------------|----|
| 3. 1 地盤沈下の原因    | 21 |
| 3. 2 地盤沈下の歴史と現状 | 22 |
| 3. 3 地下水位の経年変化  | 28 |
| 3. 4 地盤沈下の防止対策  | 34 |
| 3. 5 地盤沈下の監視体制  | 35 |

## 第4章 大深度地下空間利用に伴う地盤環境に関する問題

|                     |    |
|---------------------|----|
| 4. 1 地質学的課題         | 38 |
| 4. 1. 1 資料の蓄積に関する問題 | 38 |
| 4. 1. 2 海成粘土層に関する問題 | 38 |

|                          |                           |     |
|--------------------------|---------------------------|-----|
| 4. 1. 3                  | 礫層に関する問題                  | 39  |
| 4. 1. 4                  | 鋭敏粘土・関東ローム層に関する問題         | 40  |
| 4. 1. 5                  | 沖積層に関する問題                 | 40  |
| 4. 1. 6                  | 生物的化学的過程に関する問題            | 40  |
| 4. 1. 7                  | テクトニクスに関する問題              | 41  |
| 4. 1. 8                  | 地層に重なり方による地盤形式の重要性        | 42  |
| 4. 2                     | 地下水学的課題                   | 43  |
| 4. 2. 1                  | 地下水環境への影響                 | 43  |
| 4. 2. 2                  | 地下水情報把握に関する問題             | 43  |
| 4. 3                     | 土質工学的課題                   | 46  |
| 4. 3. 1                  | 大深度地下利用が周辺地盤に与える影響        | 46  |
| 4. 3. 2                  | 土質工学上の問題                  | 47  |
| 4. 3. 3                  | 地盤調査に関する問題                | 48  |
| 4. 4                     | 建設工学的課題                   | 50  |
| 4. 4. 1                  | 地下空間の分類および各空間の設計・施工上の問題   | 50  |
| 4. 4. 2                  | 大深度地下空間の耐用年数              | 53  |
| 4. 4. 3                  | 地下空間の建設が地下水に与える影響         | 54  |
| 第5章 大深度地下空間利用に伴う地下水の挙動予測 |                           |     |
| 5. 1                     | 地下水流動のシミュレーション手法の調査       | 56  |
| 5. 1. 1                  | シミュレーション手法の概要             | 56  |
| 5. 1. 2                  | 浸透流解析手法                   | 56  |
| 5. 1. 3                  | 3次元解析の現状                  | 59  |
| 5. 1. 4                  | 応力-浸透流連成解析の現状             | 60  |
| 5. 1. 5                  | 地下水挙動に関するシミュレーションの必要性と問題点 | 63  |
| 5. 2                     | 地下水挙動予測の事例解析              | 64  |
| 5. 2. 1                  | 事例解析の概要                   | 64  |
| 5. 2. 2                  | 大深度地下空間と地盤の仮想モデル          | 64  |
| 5. 2. 3                  | 解析方法と条件                   | 64  |
| 5. 2. 4                  | 解析結果と考察                   | 73  |
| 第6章 考 察                  |                           |     |
|                          |                           | 101 |

## 第1章 調査の概要

本調査は、科学技術庁の昭和63年度科学技術振興調整費による「快適で安全な大深度地下空間利用に関する緊急調査」のうち、「安全・快適な利用に係る共通基盤技術の調査」の一環として、環境庁・国立公害研究所・地盤沈下研究室・陶野郁雄が担当し、実施した「環境保全の評価手法に関する調査」を中心としてとりまとめたものである。なお、本報告書をまとめるに際し、分科会を設置した。

### 1. 1 要約

本調査は、大深度地下空間利用の対象となる地域を東京を中心とする首都圏に的を絞って検討を行った。地下50～100mは、第四紀更新統からなっており、良好な帯水層であるとともに、地盤沈下の対象層ともなっている。そこで、大深度地下空間利用の際に懸念される地盤環境への影響評価手法の開発を目的として調査を行った。

大深度地下開発の対象となる地下50m以深の地盤は、その地質学的、土質工学的情報が記されているものが少なく、十分な情報が得られているとはいえず、解明されていない点が多岐にわたる。開発に際しては、数10m以深の地盤情報を表層と同じレベルまで解明しておく必要がある。

定常状態におけるシミュレーション解析を行うことに関しては余り問題はないが、解析に必要な情報の密度や、精度に問題がある。予測精度を向上させるには、解析に必要な様々な情報の蓄積が必要であり、しかも情報の精度向上が重要となる。

### 1. 2 大深度地下開発の背景

宇宙・海洋・地下の3つの空間を主なターゲットとして、近未来に開発を進めようというニュー・フロンティア構想の動きがでてきた。とりわけ、地下空間の開発の可能性を探ろうという動きが活発化してきた。

近年、大都市を中心として地価の高騰が急激に進み、新たに大型土木建築プロジェクトを展開するための土地の確保が困難な情勢となり、これまで利用されていない大深度地下空間の利用が脚光を浴びるようになった。大深度地下空間を国土利用体系の

中に組み入れようというものである。このような地下開発に対し、ジオフロントという言葉も生まれている。東京への一極集中、過密化する都市問題の解消と、21世紀へ向けての都市機能の向上を大深度地下空間に委ねようとしていることが、それに追い打ちをかけている。そういう意味では、ほぼ軌を一にして現われたウォーターフロント（水辺の開発）構想も同様である。

地下は、地表に比べ、恒温性、恒湿性、断熱性、遮光性、遮音性、気密性、防振性、耐震性などの特長がある。

### 1. 3 調査の目的

大深度地下空間を利用しようとしているのは、大都市圏であり、東京が主体である。大深度地下空間とは、現在存在している建設構造物の支持基盤より下で、土地所有者の通常の土地利用を阻害しない地下空間と言われている。東京都区内では、建築物の支持地盤である東京礫層より深いところであり、山の手地区（台地部）では、地表面下 30m 以深、下町地区（低地部）では、70m 以深ということになる。首都圏においては、概ね地下 50～100 m の空間が想定されている。

首都圏におけるこのような深さは、第四紀更新世に堆積した地層からなっており、良好な帯水層であるとともに、地盤沈下の対象層ともなっている。

このようなことから、大深度地下空間は、地盤環境保全の観点に立って開発・利用が行われる必要がある。そこで、大深度地下空間利用の際に懸念される地盤環境への影響評価手法の開発を行うことを本調査の目的とした。

### 1. 4 調査方法

本調査は、大深度地下空間利用の対象となる地域を東京を中心とする首都圏に絞って検討を行った。主として、首都圏の概ね地表面下 50～100m に存在している地層の地質学的・土質工学的性質を把握すること、大深度地下空間利用の際に懸念される地盤環境問題を予め抽出すること、および開発によって影響が及ぼされる地盤変形と地下水挙動の予測手法を開発することに関する調査を行った。特に、地盤環境に関する問題では、地質学的・地下水学的・土質工学的・建設工学的観点に立って検討を行った。また、予測手法に関しては、地下水の流動阻害や地盤沈下への影響の予測に要するシミュレーション手法に関する調査を行い、地下水挙動の事例解析を実施した。

## 1. 5 分科会の構成

### ・委員

|       |           |         |          |         |
|-------|-----------|---------|----------|---------|
| 伊藤 洋  | : ㈱熊谷組    | 原子力開発室  | 土木技術部    | 研究員*    |
| 岩田 敏  | : 国立公害研究所 | 水質土壌環境部 | 地盤沈下研究室  | 研究員*    |
| 遠藤 邦彦 | : 日本大学    | 文理学部    | 応用地学科    | 教授*     |
| 桑原 文夫 | : 日本工業大学  | 工学部     | 建築学科     | 助教授     |
| 国生 剛治 | : 電力中央研究所 | 我孫子研究所  | 立地部土質研究室 | 室長      |
| 清水 恵助 | : 東京都     | 港・湾局    | 技術管理課    | 主事      |
| 社本 康広 | : 清水建設㈱   | 技術研究所   |          | 研究員*    |
| 新藤 静夫 | : 千葉大学    | 理学部     | 地学科      | 教授      |
| 須賀 伸介 | : 国立公害研究所 | 環境情報部   | 情報システム室  | 研究員     |
| 千葉 達朗 | : 日本大学    | 文理学部    | 応用地学科    | 副手      |
| 茶谷 文雄 | : ㈱大林組    | 技術研究所   |          | 副主任研究員* |
| 陶野 郁雄 | : 国立公害研究所 | 水質土壌環境部 | 地盤沈下研究室  | 室長**    |
| 畑中 宗憲 | : ㈱竹中工務店  | 技術研究所   |          | 研究員*    |

### ・オブザーバー

|       |           |         |       |       |
|-------|-----------|---------|-------|-------|
| 海野 英明 | : 国立公害研究所 | 研究企画官室  |       | 研究企画官 |
| 久保 朝雄 | : 環境庁     | 水質保全局   | 企画課   | 係長    |
| 中村 裕昭 | : 中央開発㈱   | 総務部     | 技術調査室 | 室長*   |
| 堀井 克己 | : 中央開発㈱   | 電算事業部   |       | 部長*   |
| 村岡 浩爾 | : 国立公害研究所 | 水質土壌環境部 |       | 部長    |

但し、\*\* : 委員長

\* : 報告書原案作成者



## 第2章 首都圏の地盤

本調査は、大深度地下空間利用の対象となる地域を東京を中心とする首都圏に的を絞って検討を行った。本章では、首都圏の概ね地表面下 50～100m に存在している地層の地質学的・土質工学的性質を把握することに主眼をおいた。

関東平野は第四系の堆積物が未固結な状態で非常に厚く堆積している。しかも、その大半が均等粒度の砂からなっている。新第三紀中新世以降、顕著な堆積盆の沈降が生じ、南関東では、未固結あるいは固結度の低い堆積層の層厚が 3 000 m にも及んでいるところがある。

### 2. 1 地盤情報の現況

首都圏の範囲に関する明確な定義がないようなので、ここでは検討対象地域を東京都区内とその外縁部とした。そこで、東京の水準原点を中心として半径 28km 内を首都圏とした。すなわち、横浜市、多摩市、東村山市、大宮市、越谷市、流山市、および船橋市の都市群を結ぶ線と東京湾とで囲まれた地域である。検討対象地域の範囲を図 2-1 に示した。

首都圏の大深度地下空間開発の対象となる地層は、次節(2. 2)で述べるが、主として下総層群(相模層群、東京層・江戸川層)と上総層群である。これらの地層は、工学的には、いわゆる“土質地盤”であり、“岩盤”ではない。土質地盤と岩盤では、応力-変形特性などの物性がかなり異なっている。土質地盤はその間隙(地下水)が全方向的に連続しているが、岩盤はその間隙(地下水)が必ずしも連続していないという違いもある。以後、本報告書における地盤は、土質地盤のことである。

首都圏の地盤に関する総合的な情報としては、復興局建築部 [1] が関東大地震後に数 100 本のボーリング資料に基づいて地層区分を行ったのが最初である。その後も、東京地盤図 [2]、東京都総合地盤図 [3] が発行されている。その他、官公庁、大学、研究団体等によっても地盤に関する多くの発表がなされている。しかし、大深度地下空間開発の対象となる地下 50 m 以深となると、その地質学的、土質工学的情報が記されているものは、表 2-1 に示したものの以外あまりなく、十分な情報が得られているとはいえず、むしろきわめて不足しているといっても過言ではない。



図 2 - 1 大深度地下空間開発に伴う地盤環境問題の検討範囲

表 2 - 1 首都圏における主要大深度地盤資料

| 著者・編者名         | 文献<br>番号        | ボーリング調査   |       | 調査事項 |             |                       |
|----------------|-----------------|-----------|-------|------|-------------|-----------------------|
|                |                 | 深度<br>(m) | 本数    | N値   | 物理・力<br>学試験 | その他                   |
| 建設省計画局         | [4]             | 50～100    | 100以上 |      | ○           | PS検層                  |
| 東京都港湾局         | [5]<br>～<br>[8] | 70～280    | 6     | ○    | ○           | 電気検層<br>微化石分析<br>揚水試験 |
| 建設省土木研究所       | [9]             | 170       | 1     | ○    | ○           | 音波探査                  |
| 千葉県公害研究所       | [10]            | 2010      | 1     |      | ○           | 電気検層<br>微化石分析         |
| 東京都土木技術<br>研究所 | [3]             | 50～70     | 100以上 | ○    | ○           | PS検層                  |
| 陶野 郁雄          | [11]            | 50～1000   | 8     | ○    | ○           | 開削露頭<br>観察            |
| 松島 義章編         | [12]            | 50～70     | 11    |      |             | 微化石分析                 |
| 松島 義章          | [13]            | 50～60     | 5     |      |             | 貝化石分析                 |

## 2. 2 地質構造の概要

首都圏の地下 100m 以浅に分布する地層は、図 2-2 の東京低地-武蔵野台地の模式地質断面図、および表 2-2 の関東地方の地質層序対比表に示したように、概略、次の各層となる。

- ・完新世 : 有楽町層
- ・更新世 : 七号地層・関東ローム層
  - 下総層群上部・相模層群上部・東京層
  - 下総層群下部・相模層群下部・江戸川層
- 上総層群

これらの地層の特徴については、次節(2.3)で述べる。

次に、大深度地下空間開発の対象となる地下 50m 付近に分布する地層の概念を把握するため、図 2-3 に標高 T.P.-50m 面の地質水平断面図を示した。この図は、地盤沈下観測井や表 2-1 に示したボーリング資料などを基として作成したものである。なお、“沖積層(完新世および更新世末期、七号地層を含む)”と“下総層群、相模層群、東京層・江戸川層(更新世中・後期)”との境界は、図 2-4 を参考にして作成した。

これ以降、本報告書における沖積層は、有楽町層と七号地層の両層をさす。また、洪積層は、関東ローム層と下総層群と上総層群をさす。なお、更新世中・後期に堆積した下総層群、相模層群、東京層・江戸川層は、下総層群で代表させる。

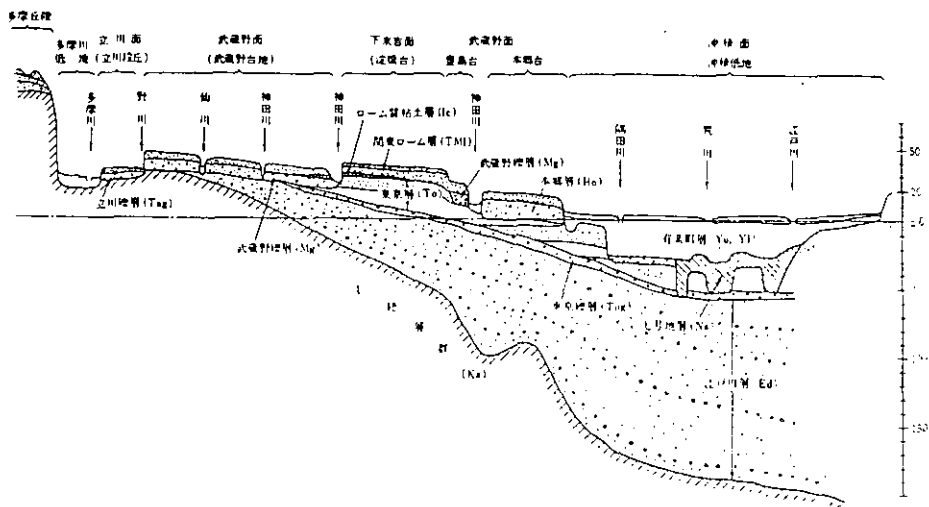
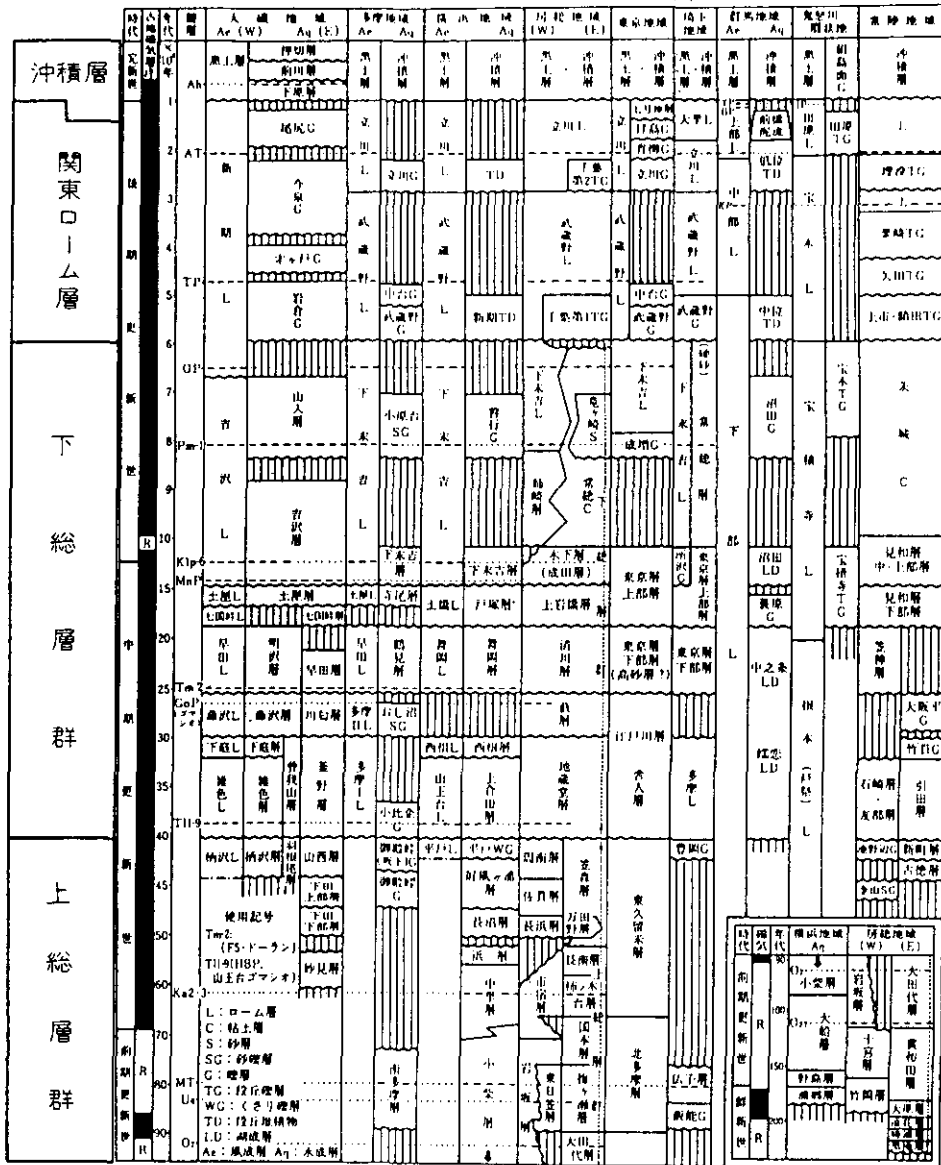


図 2-2 東京低地-武蔵野台地の模式地質断面図(東京都土木技術研究所 [3])

表2-2 関東地方の第四系層序対比表 (菊池編集[14]に加筆)



↑  
本報告書で用いた地層名

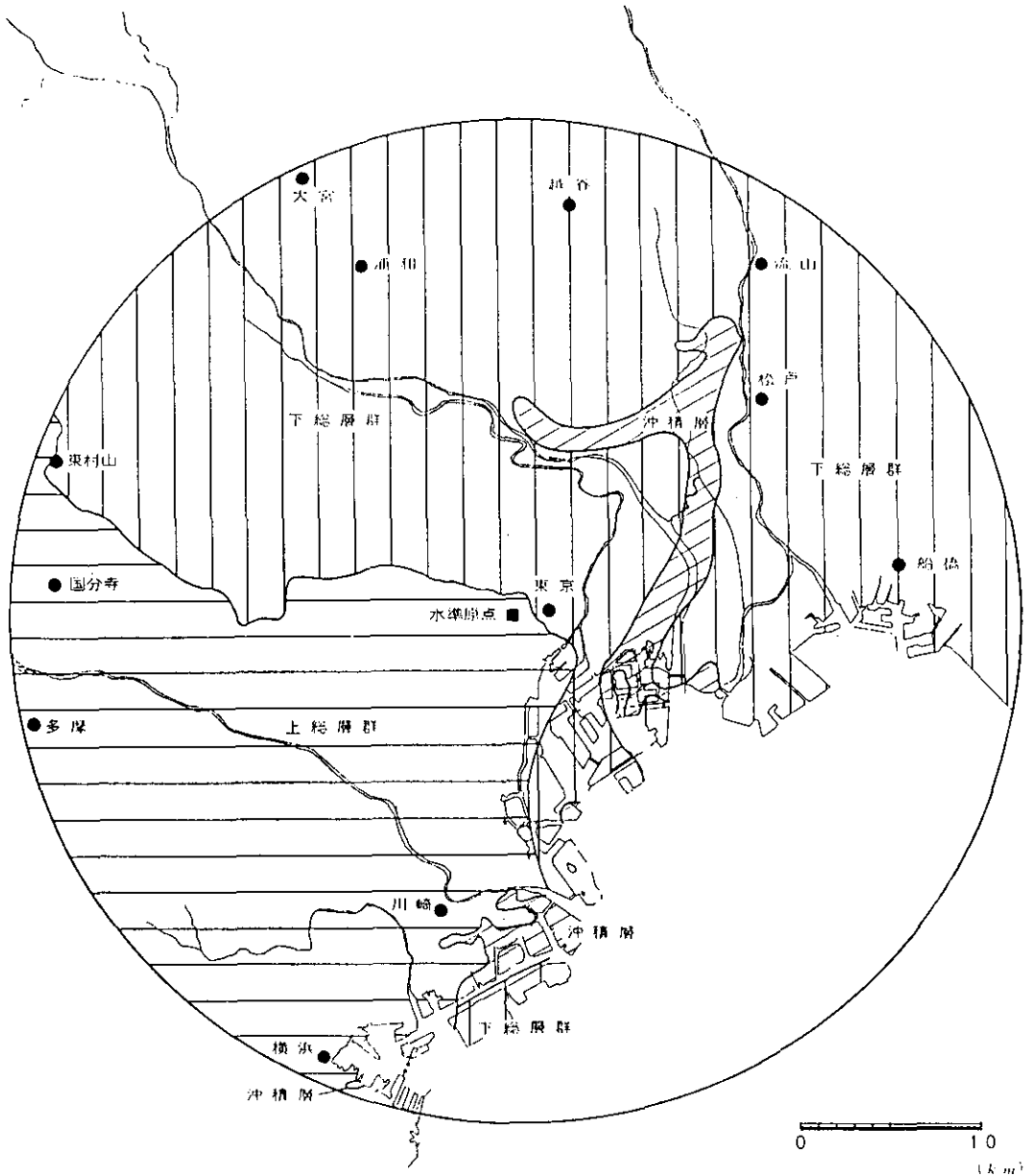


図 2 - 3 首都圏における標高 - 50 m 面の地質水平断面図

図 2 - 3 によると、沖積層は夢の島から荒川流域に沿って北上し、金町付近で分かれ、川口市と三郷市付近まで分布している。さらに、川崎市の浮島から扇町にかけてと、横浜港付近にも分布している。また、下総層群と上総層群の境界は、東村山から小金井、高井戸、晴海とほぼ東へ進み、晴海から南下し、羽田にいたっている。この境界の南西側が上総層群の分布する地域である。

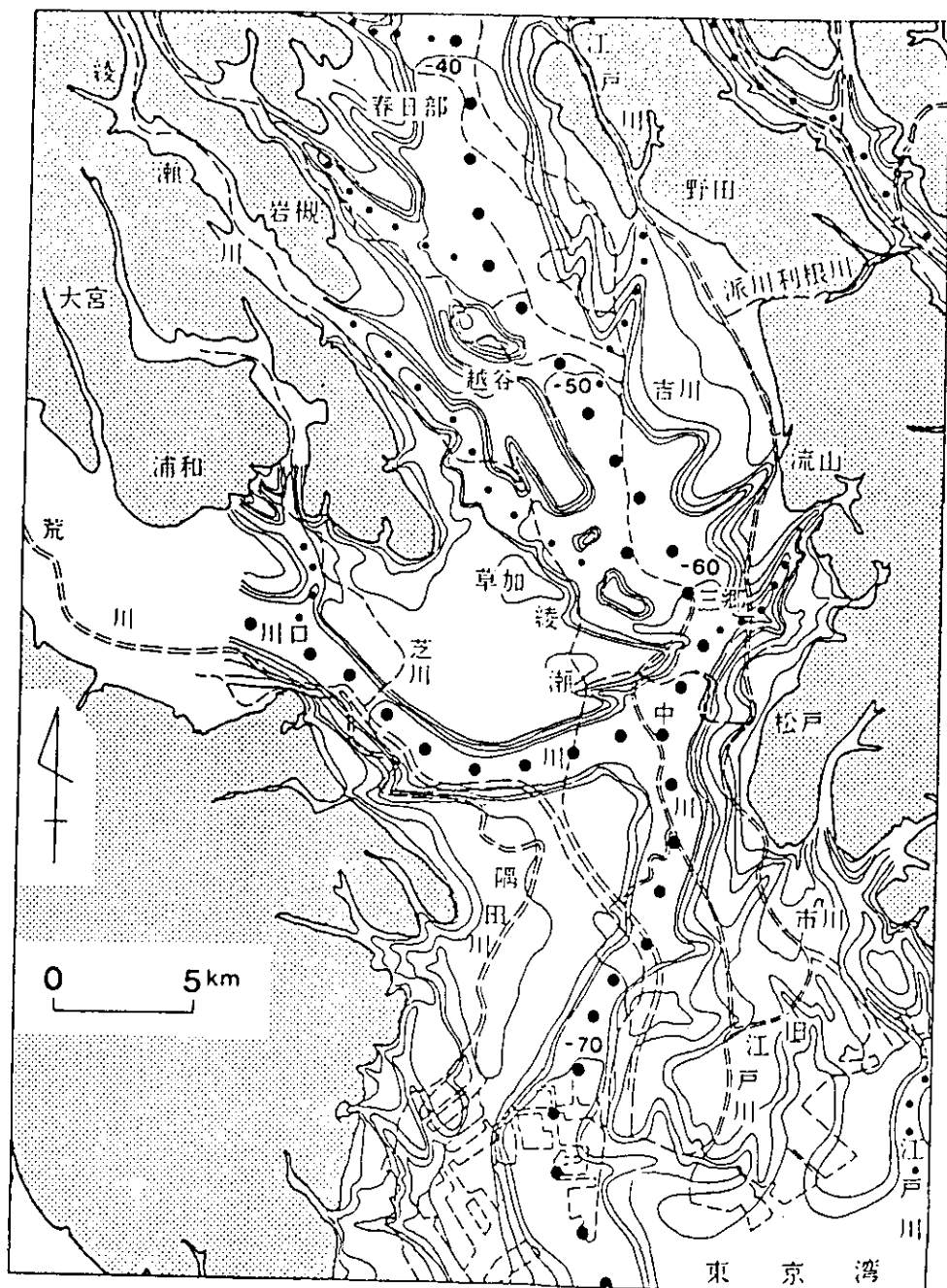


図2-4 沖積層(七号地層を含む)の基底等深線図(遠藤[15])

## 2. 3 大深度地下開発の対象となる主な地層とその特徴

前節(2. 2)で述べたように、首都圏の大深度地下開発で対象となる地下 100 m 以浅の主な地層は、上位より、有楽町層、七号地層、下総層群、上総層群である。遠藤[16]を参考にして、各地層の特徴を以下に述べる。

### 2. 3. 1 有楽町層(低地部)

有楽町層は、東京地区における完新世堆積物からなる地層の呼称である。今から約 1 万年前までに堆積した地層であり、主として海成層である。また、東京低地の沖積層の主体となっている。有楽町層は下町低地および多摩川低地に広く分布し、さらに台地・丘陵地内の開析谷中に細長く分布している。なお、開析谷とは、河川の侵食作用によって出来た谷のことである。

沖積層の厚さは場所により著しく変化するが、その厚さは無秩序に決定されるのではなく、一定の規則をもっている。それは、沖積層が埋積する地形、すなわち沖積層の基底地形によっている。層厚は、平坦部で10~30 m、埋没谷で約 40 m である。厚い沖積層で埋積された埋積谷は、海水面が現在よりも 100m 以上も低下していた最終氷期・最寒冷期の河川地形であり、古東京川と呼ばれている。この古東京川の流れを見ると、葛飾区と足立区の境界に当たる亀有付近で、三郷方面から南下する古中川の谷と合流する。そこから幅 2~3km の狭谷状に東京低地を南南西方向に横切り、江東区の砂町、夢の島を経て東京湾に入り、その西側を通過して羽田沖に向かっている。

上部層は、緩い砂が主体であるが、層相の変化が激しい。標準貫入試験による N 値は、5~10 程度であり、地震時に液状化が発生する恐れのある地層でもある。下部層は、貝殻を含む非常に軟らかい粘性土層であり、著しい地盤沈下の対象層でもある。N 値は、0~2 程度である。また、基底部には砂礫層を伴うことが多い。

### 2. 3. 2 七号地層(低地部)

七号地層は、更新世末期に堆積した沖積層であり、その上位を有楽町層が覆っている。主に、内湾奥部の汽水~淡水環境で堆積した砂とシルトの互層であり、その層厚は 10~20 m 程度である。N 値は、10 程度のことが多いが、砂が卓越すると 30 以上に達することもある。埋没谷の基底部には沖積層の基底礫層が存在する。図 2-3 の標高 T.P. -50 m 面の地質水平断面に現われた沖積層は七号地層である。

七号地層は、地盤沈下観測井設置のための調査を七号地埋立地(現在の江東区辰巳)で行った時[6]のボーリングコアを基に、青木[17]が名付けた地層名である[図 2-11 参照]。七号地層は、自然の露頭がない地層であり、しかもその上部層が普通有楽町層の基底礫層によって侵食され、欠如しているため、地層の全体を把握できたと



いえない面がある。

なお、沖積層の基底等深線図を図2-4に示してある。

### 2. 3. 3 関東ローム層（台地・丘陵部）

関東ローム層は、新しい方から立川ローム層、武蔵野ローム層、下末吉ローム層、および多摩ローム層の4つに区分され、更新世中期から末期にかけて堆積した火山性の風成層である。東京都区内では、立川ローム層と武蔵野ローム層のみを関東ローム層とすることが普通である。下末吉ローム層は、ローム質粘土層、渋谷粘土層、あるいは板橋粘土層と呼ばれている地層にほぼ相当する。多摩ローム層の相当層は、東京層や江戸川層内に含まれる。

これ以降、本報告書における関東ローム層は立川ローム層と武蔵野ローム層の両層をさす。

関東ローム層は、古富士火山のスコリア・火山灰に由来している。東京都区内における関東ローム層は、武蔵野礫層などの段丘礫層の上に存在し、その層厚は6~8 mであり、N値は3~8程度である。

### 2. 3. 4 下総層群

更新世中・後期に堆積した地層は、東京都区内では、東京層や江戸川層と呼ばれている。東京層の基底礫層は、東京礫層と呼ばれ、建設構造物の最も重要な支持層となっている。なお、大深度地下空間の開発は、この東京礫層より下位の地層が対象となっている。

また、千葉県では下総層群と呼ばれ、船橋付近で最も厚く堆積しており、その層厚は数100mにも及び、主として内湾性の礫・砂・シルトの互層からなっている。神奈川県や東京の多摩地区では、相模層群と呼ばれており、川崎・横浜両市の台地・丘陵地では、上総層群を不整合に覆っており、主に砂とシルトの互層からなっている。

### 2. 3. 5 上総層群

第三紀鮮新世末期から更新世前期にかけて堆積した地層を上総層群と呼んでおり、首都圏では、多摩丘陵で露出している。上総層群は、多摩川より北側では台地構成層の下に埋没している[18]。主としてシルト層、砂層、およびシルトと砂の互層からなる海成の地層であり、下位の三浦層群とは不整合関係にある。

上総層群のN値は普通50以上ある。このシルト層は比較的硬質で、土丹、泥岩、あるいは軟岩などとも呼ばれている。

## 2. 4 大深度地下開発の対象となる地層の土質工学的性質

### 2. 4. 1 地層の物理的性質

図2-5は、東京都区内における各地層の細粒分含有率と乾燥単位体積重量との関係を示したものである[19]。この図を見ると、何れの地層もその乾燥単位体積重量は、細粒分を多く含むものほど小さくなる傾向を示している。また、細粒分含有率が同じならば、古い地層ほど乾燥単位体積重量が増大することが分かる。なお、細粒分含有率とは、粒径が $75\mu\text{m}$ より細かい粒子の重量含有率のことである。

この図を用いて細粒分含有率と乾燥単位体積重量との関係を統計的に処理すると、大深度地下開発の対象となる江戸川層（上部層と下部層の合計）および上総層群（上部層と下部層の合計）の相関係数は、それぞれ0.864、0.743となる。これらの地層より上位の地層である有楽町層、七号地層、東京層の相関係数がほぼ0.9であることに比べると、やや相関性が悪いようである。

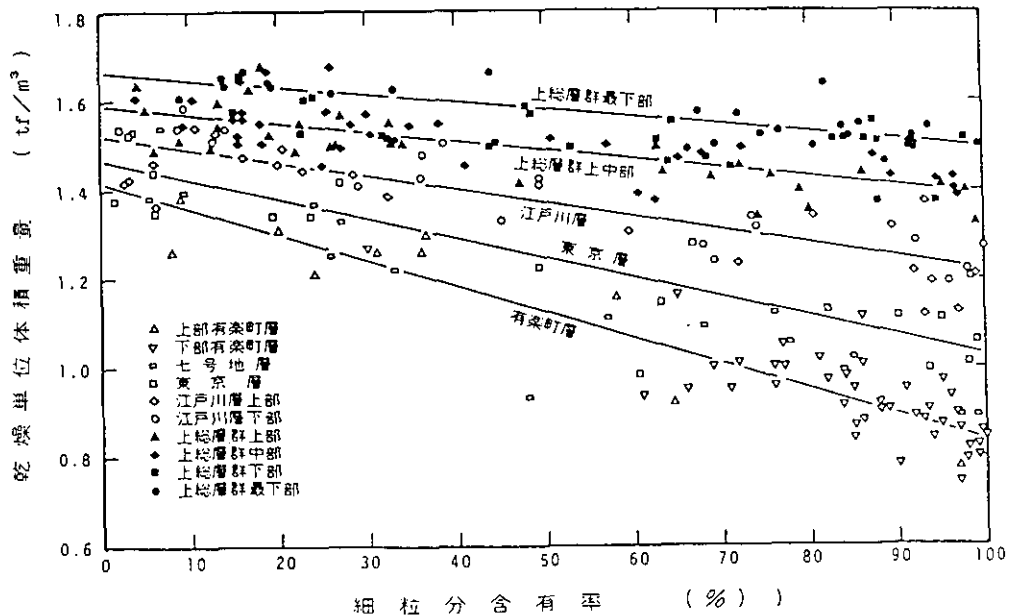


図2-5 東京における各堆積層の細粒分含有率と乾燥単位体積重量との関係（陶野[19]）

図2-6は、東京都区内における細粒分が90%以上含まれる粘性土堆積物の一軸圧縮強さと乾燥単位体積重量との関係を示したものである[20]。この図によると、大深度地下空間開発の対象となる粘性土層の一軸圧縮強さは10 kgf/cm<sup>2</sup>程度期待できそうである。

また、乾燥単位体積重量が高いものほど一軸圧縮強さもが大きくなる傾向を示している。しかも、堆積年代が古いものほど、一軸圧縮強さ、乾燥単位体積重量とも増大している。つまり、古い地層ほど、密度が高くなり、しかも地盤の強さも増すということである。

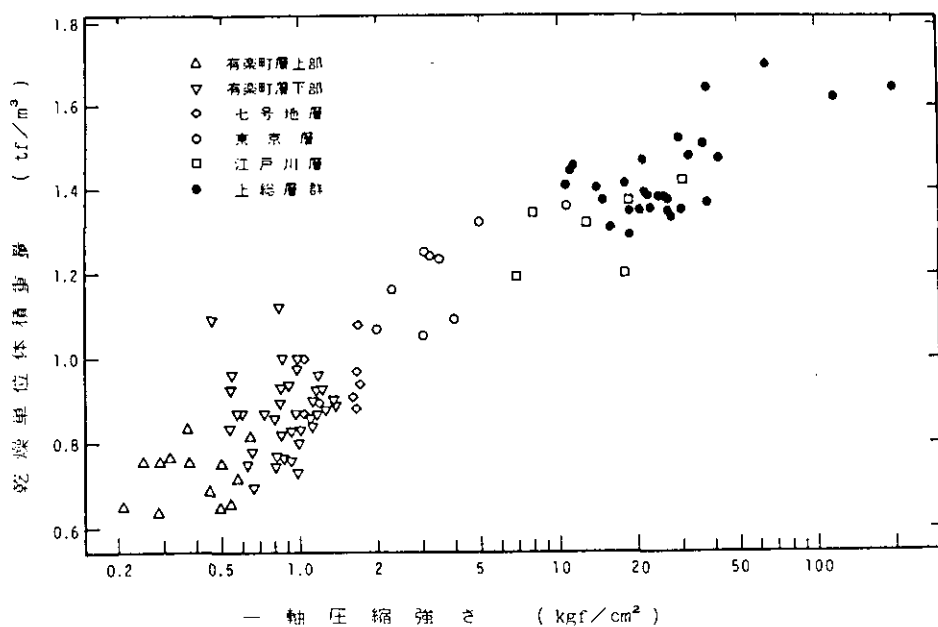


図2-6 東京における粘性土堆積物の一軸圧縮強さと乾燥単位体積重量との関係(陶野[20])

図2-7は、堆積物の間隙比が各地質時代によって、どのように変化するかを示した図である[19]。この図は、各層準ごとに集計した値の平均値で作成したものであり、陶野[20]を若干加筆修正したものである。この図によると、砂層の自然間隙比は第四紀の範囲ではあまり変化をしていない。このことは、第四系中の砂層において、砂粒子は互いに接触しているので、堆積してから現在にいたるまでに受けた程度の応力では、圧密による密度の増加がほとんど進行していないためであり、しかも続成作用が

働く期間も短く、砂粒子間の空隙にあまりこう結物が沈澱していないためでもあると考えられる。また、粘土層は地質年代と自然空隙比との間にきれいな相関関係が認められる。このような関係を生じているのは、第四系や第三系の粘性土堆積物は堆積してから現在にいたるまでに受けた程度の応力で、圧密作用が進行しているためと考えられている[19]。

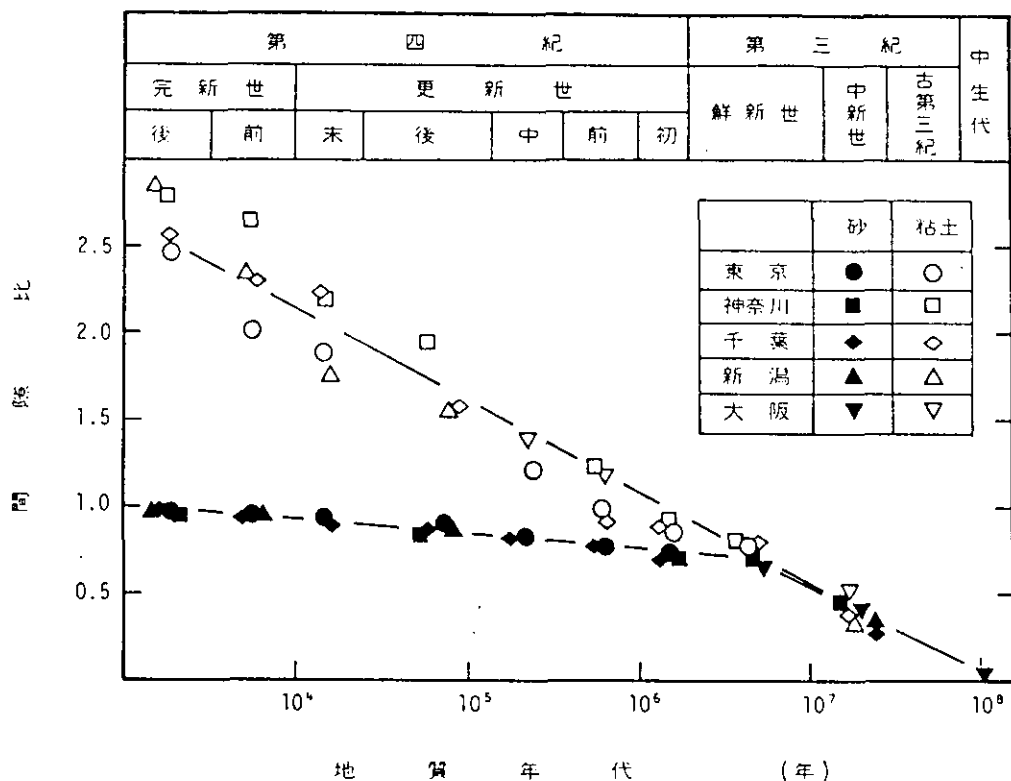


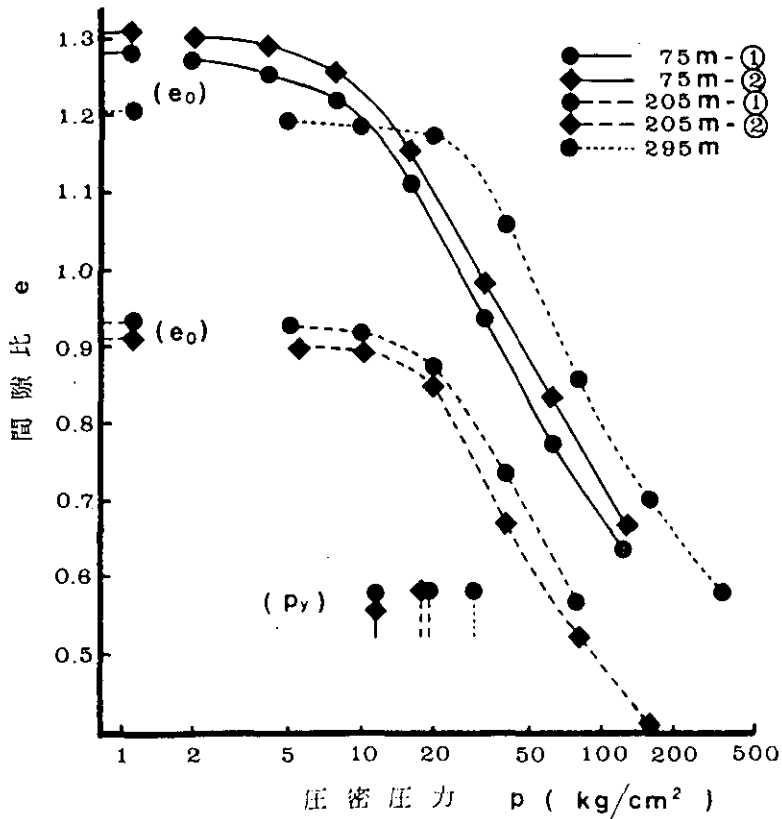
図 2 - 7 各地質時代における堆積物の空隙比  
(陶野[20]を一部改訂)

#### 2. 4. 2 地層の圧密特性

図 2 - 8 は、江戸川区西篠崎町において江戸川層中から採取した乱さない粘性土試料による高圧圧密試験結果である[21]。この図を見ると、大深度地下から採取した試料の圧密試験結果は、通常の圧密試験結果と同様な曲線を示しており、このような深さの地盤も土質地盤であることが分かる。軟弱な粘性土に比べると、空隙比が小さいこと、降伏応力より小さな圧密段階でほとんど圧縮していないこと、折り曲がり点が見られることなどに特徴がある。

図2-9は、江戸川区西篠崎町で実施したボーリング柱状図である〔21〕。この地点は、図2-8に示した試験試料の採取地点であり、圧密試験から求めた圧密降伏応力は、図中○印で示してある。なお、深度8~318mが江戸川層であり、東京礫層は存在しない。

大深度地下空間開発の可能性がある深度75mの圧密降伏応力は、ほぼ全応力線上にあり、過圧密状態になっている。昭和48年頃の篠崎第1観測井〔表3-5参照〕の地下水頭は地下22m付近にあり、明らかに水位が低下していた。この水位低下が過圧密になった一因と考えられる。深度200m以深は正規圧密状態になっている。



ただし、 $e_0$  は自然間隙比、 $p_v$  は圧密降伏応力

図2-8 江戸川区西篠崎における圧密試験結果  
(陶野〔21〕に基づく)

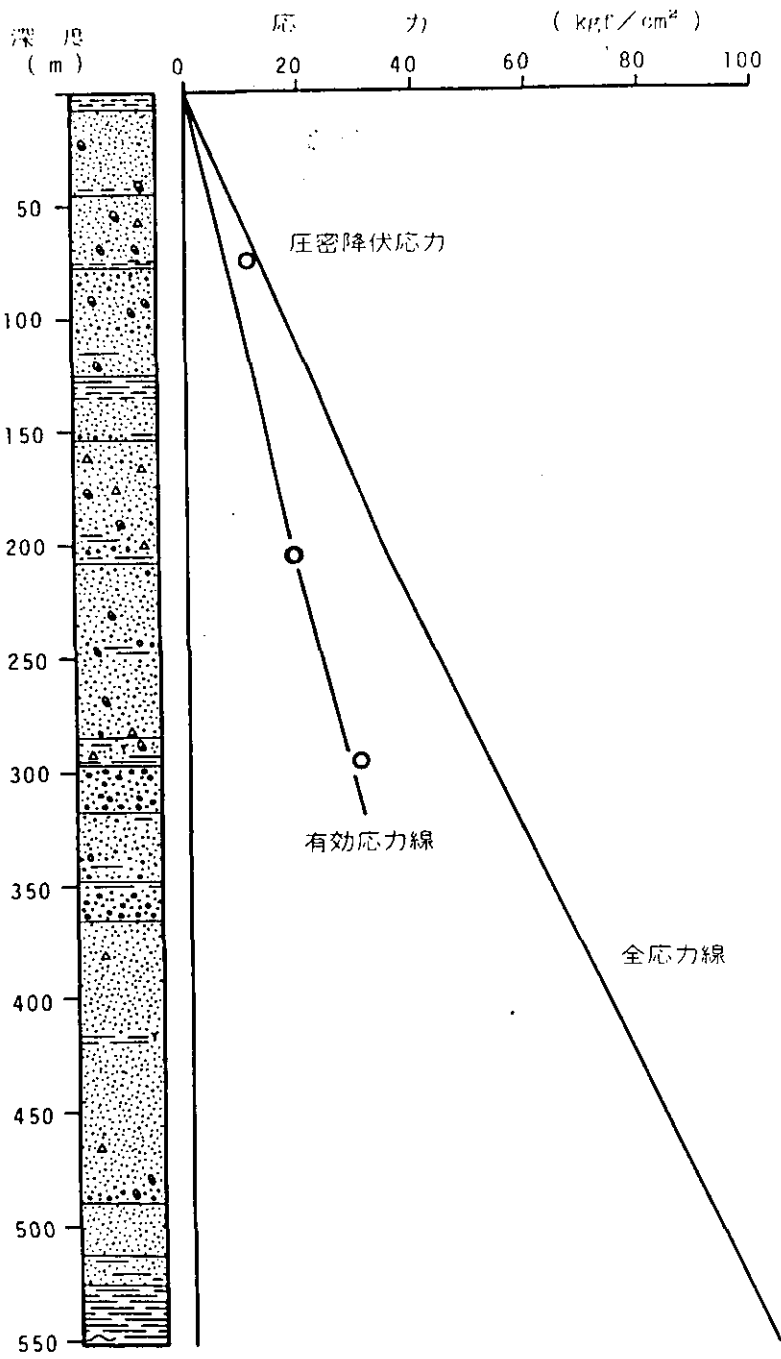


図 2 - 9 江戸川区西篠崎における土質柱状図 (陶野[21])

## 2. 5 地質学的な地層と建設工学的な地層

東京都区内における地層は、淀橋台地などの洪積台地の縁辺部に僅かに露頭しているだけで、そのほとんどは地表に顔を出していない。このため、地上での踏査による地質調査では、詳細な地質層序を知ることは不可能に近い。したがって、東京都区内における地質調査は、ボーリング調査のみによって行われるのが普通である。

図2-10は、千代田区永田町の地質断面図である[22]。これは、都心部における典型的な地質断面図である。2. 3節で述べたように、関東ローム層は立川ローム層と武蔵野ローム層を意味し、渋谷粘土層は下末吉ローム層にほぼ相当する。

ボーリング試料を観察する場合、一次堆積物と二次堆積物の区別が出来にくいことや地層の境界を誤認することがしばしばある。例えば、凝灰質泥岩や硬質粘性土からなる大きな礫がある場合、固結したシルト層あるいは泥岩（土丹）を挟むと記してあることが多い。また、七号地層が有楽町層の下部層として、江戸川層の下部層が上総層群として記されていることもある。

特に、東京礫層に問題が多い。普通、工学の分野でいわれている東京礫層は、高層建築物などの支持層としてみた場合の砂礫層をさしている。したがって、工学におけるいわゆる東京礫層は、地質学で言う東京礫層（東京層の基底礫層）のみであることは稀であり、普通上位の七号地層の基底礫層、立川礫層、武蔵野礫層、東京層中の礫層、および下位の江戸川層中の砂・礫層の何れかを含んでおり、複数の地層（単層）からなっている場合が多い。

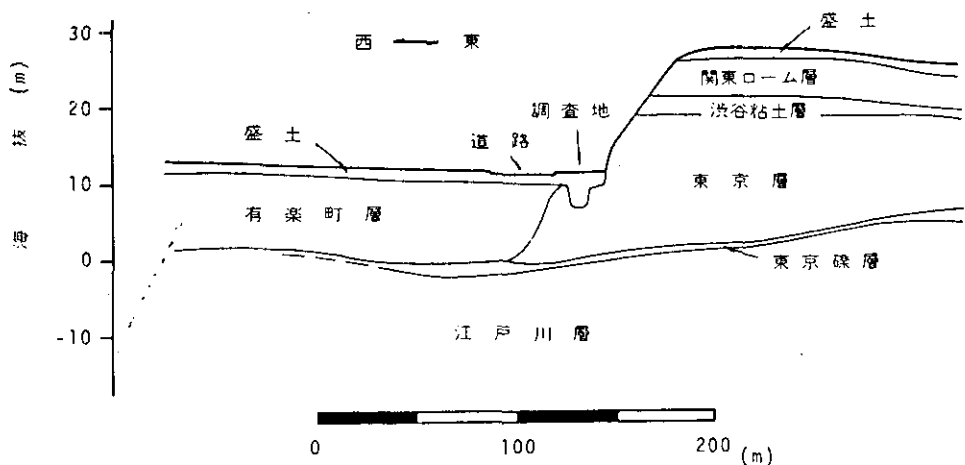
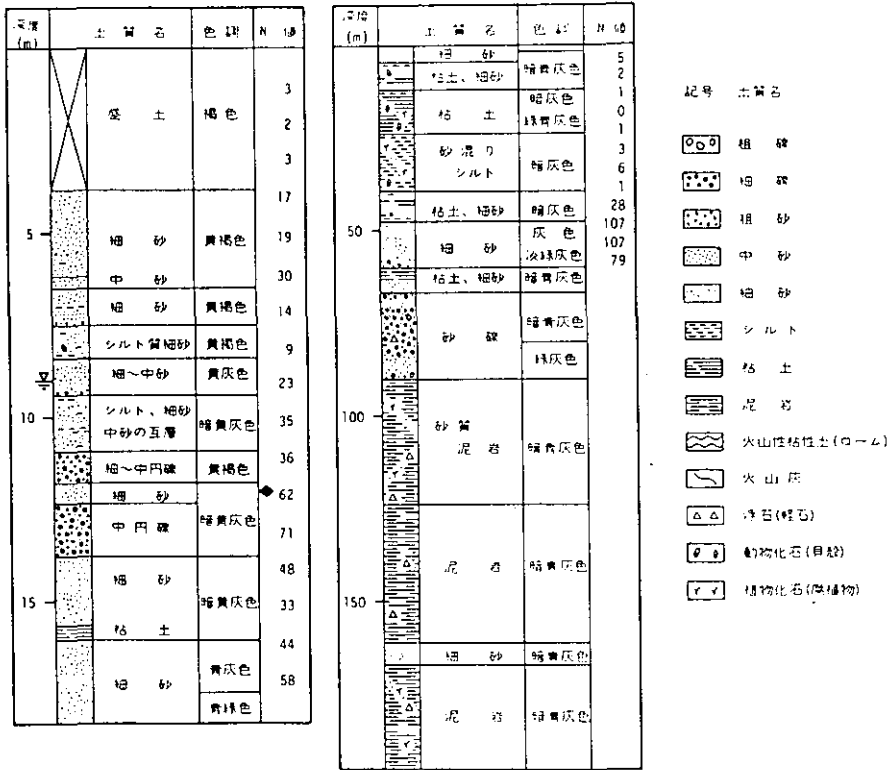


図2-10 千代田区永田町における地質断面図（陶野[22]）

また、低地部ではしばしば地質学で言う東京礫層が欠けている。それにもかかわらず、土質工学の分野で用いられているいわゆる東京礫層は、広範囲に存在するという矛盾が生じている。

図2-11に地質柱状図を示す。図左は千代田区永田町であり、図2-10の調査地に当たる。図右は江東区辰巳であり、資料[6]を基に作成した。永田町では地表からの深度3.85~10.95mが東京層、10.95~11.80mが東京礫層、11.80m以深が江戸川層であるが、ボーリングによる工学的な東京礫層は、10.95~13.80mとなる。辰巳では、地表からの深度4.2~12.1mが上部有楽町層、12.1~39.6mが下部有楽町層、39.6~47.5mが七号地層、47.5~90.1mが江戸川層、90.1m以深が上総層群であり、東京礫層は存在しない。



[千代田区永田町]

[江東区辰巳]

図2-11 地質柱状図 (陶野[22]より)



## 参考文献

- 1) 復興局建築部；東京及横浜地質調査報告，(1929)
- 2) 東京地盤調査研究会編；東京地盤図，技報堂出版，(1959)
- 3) 東京都土木技術研究所編；東京都総合地盤図 I，技報堂出版，(1977)
- 4) 建設省計画局・東京湾総合開発協議会編；東京湾周辺地帯の地盤，都市地盤調査報告書，17，(1969)
- 5) 東京都港湾局；昭和44年度地盤沈下観測井設置に伴う地質調査報告書，(1970)
- 6) 東京都港湾局；昭和45年度地盤沈下観測井設置に伴う地質調査報告書，(1970)
- 7) 東京都港湾局；昭和46年度地盤沈下観測井設置に伴う地質調査委託報告書，(1972)
- 8) 東京都港湾局；昭和49年度地盤沈下観測井設置に伴う地質調査報告書，(1975)
- 9) 建設省土木研究所地質研究室編；東京湾口の地盤，土木研究所資料，730，(1972)
- 10) 楡井 久，他；船橋市地域の地下地質と地盤沈下観測井，千葉県公害研究所報告，(1972)
- 11) 陶野 郁雄；本邦砂質堆積物の物理的力学的性質に関する地質工学的研究，(1979)
- 12) 松島 義章編；川崎市内沖積層の総合研究，川崎市博物館資料収集委員会，(1987)
- 13) 松島 義章；横浜市内の沖積層の貝化石群集（予報），神奈川県立博物館，(1973)
- 14) 大森 昌衛，他；日本の地質③・関東地方，共立出版，(1986)
- 15) 遠藤 邦彦・小杉 正人・菱田 量；関東平野の沖積層とその基底地形，日本大学文理学部自然研「研究紀要」，(1988)
- 16) 遠藤 邦彦；東京都の地盤特性，基礎工，17，2，(1989)
- 17) 青木 滋，他；東京都23区内の地下地質と地盤の区分について，昭和45年度東京都土木技術研究所年報，(1966)
- 18) 新藤 静夫；武蔵野台地の水文地質，地学雑誌，77，(1968)
- 19) 陶野 郁雄；堆積物の年代と土質力学的性質，土と基礎，28，7，(1980)
- 20) 陶野 郁雄；力学的立場からみた続成作用，地団研専報，17，(1971)
- 21) 陶野 郁雄・中山 哲；軟岩の高压圧密，土と基礎，22，6，(1974)
- 22) 陶野 郁雄；堆積物の続成作用と力学性状，地質学雑誌，81，9，(1975)

### 第3章 首都圏の地盤沈下と地下水

地盤沈下は公害対策基本法により、いわゆる典型七公害の一つとされている（1970年の公害対策基本法の改正による）。公害としての地盤沈下は、人為的なものであり、造盆地運動などの地殻変動による沈下現象とは区別される。したがって、1983年日本海中部地震などの大地震の際に生じるきわめて急激な地盤の沈下に伴う様々な災害は公害としてではなく、自然災害として扱われる。

#### 3. 1 地盤沈下の原因

地盤沈下は、主に地下水の過剰な揚水によって地下水位が低下することに起因して、地盤が圧縮・圧密されるために生じる現象である。

すなわち、地下水位が1m低下すると、1m<sup>2</sup>当り、1tfの荷重を加えたことになり、地盤の有効応力が増大し、収縮する。特に、粘性土層の厚く堆積している地盤では、粘性土の圧密現象によって、長期的に継続して地盤沈下が進行する。したがって、土質地盤内で地下水揚水などの開発を行えば、多かれ少なかれどこでも地盤沈下を引き起こすことになる。

地質学的にみれば、地盤沈下は人為的な脱水作用によってきわめて短期間に地層が収縮し、そのため地表面が急速に下がる現象といえる。

地下水揚水による地盤の収縮は、井戸の基底部分がある帯水層（砂層または礫層）のすぐ下の連続性のよい粘性土層から地表まで生じるのが普通である。したがって、地盤の土質力学的性質が極端に変わらない限り、井戸が深ければ深いほど、地盤沈下に与える影響は大きくなる。このことは、地下空洞においても同様である。

井戸の中に存在する地下水頭がほぼ一定になっていれば、間隙水圧に換算することが可能となる。また、浸透流によって動水傾度が生じても有効応力に変化が生じ、地層の収縮に影響を及ぼす。

地下水は、工業用、農業用、養魚用、上水道用、冷房などの建築物用、消雪用、温泉用、地熱開発用、および天然ガス採取のためなど様々な目的で利用されている。その他、必ずしも地下水を利用するのが目的ではないが、トンネルの掘削、ウエルポイントを用いた建設工事および泥炭地盤の開発に伴う排水などの地下水の消費もある。

なお、本節は、陶野 [1]を参考にして作成した。

### 3. 2 地盤沈下の歴史と現状

日本の地盤沈下がいつ頃から始まったかは正確には分からないが、大正の初期に東京都で、昭和の初期には大阪市で地盤沈下が注目され始め、社会的問題となってきた。これは、大正年代に入って近代的なさく井技術が発達してきたことにより、深井戸が掘られるようになり、多量の地下水が汲み上げられるようになってきたことによる。

大正12(1923)年の関東大地震の直後に行われた水準測量によって、東京下町の江東地区(荒川放水路に沿ったところ)で沈降地帯が形成されていることが明らかになった。その最大沈下量は、1923~1926年の間で63cm、1926~1930年の間で56cmであった[2]。

昭和10年代には、東京と大阪の地盤沈下をめぐる、種々の説が輩出した。これに対し、深井戸鉄管による地下水頭の変動と地盤沈下の実測結果から地盤沈下の主たる原因が地下水の過剰揚水であると最初に唱えたのは和達清夫博士[3, 4]であった。

第二次世界大戦が始まると、しだいに地下水の採取量が減少し始め、大戦末期には工場が壊滅状態になったのに伴って汲み上げがほとんど止まり、昭和20年頃には、地盤沈下はほとんど生じなくなった。しかし、昭和25年頃から経済の復興に伴って、地下水の需要が急増し、再び地盤沈下が激しくなり、地盤沈下が認められる地域の面積も拡大していった。なお、地盤沈下の詳細は文献[5]を参照されたい。

また、昭和20年代までの地盤沈下は、沖積層の収縮が大部分を占めていた。しかし、地下水の開発がより深層の帯水層を対象とするにつれ、第四紀更新世や第三紀鮮新世に堆積した地層も激しく収縮するようになってきた。昭和48~49年に東京都清瀬市や埼玉県所沢市などで年間沈下量が20cmを越す値が観測され、更新世に堆積した地層によって構成され、一般には地盤が良いとされていた台地でもきわめて激しい地盤沈下が生じることが明らかになった。昭和48年以降、東京都における年間沈下量の最大値を示す地点は、沖積低地に位置する江東地区から洪積層の発達する台地に位置する清瀬市にほぼ移行している。

昭和46年以降、地下水の汲み上げ規制がなされるようになり、それに伴って地下水位が少しづつ回復している。地下水位の回復に伴って、地表面が若干であるが上昇(膨脹)する地域の存在が報告されるようになった。昭和50年代前半、川崎市では地盤の膨脹が地震の前兆現象であるか否か問題となった。

図3-1は、昭和53年から58年にかけて5年間の首都圏における地盤沈下量累積図である。この図によると、所沢市で首都圏最大の20cm以上の累積沈下量を示し、越谷市・松戸市栄西・習志野市・市川市福栄・横浜市新横浜で10cm以上の累積沈下が見られる。

最近の主要な地盤沈下は、図3-2に示すように36都道府県60地域でみられるが、

昭和40年代のような激しい沈下を起こしている地域が少なくなった。全国的にみれば昭和54年以降、鈍化する様相を呈しているが、著しい沈下が進行し続けている地域もある〔表3-1参照〕。また、昭和59年には冬期が豪雪、夏期が渇水ということもあり、再び著しい地盤沈下地域が増大した〔表3-2参照〕。特に、年間4cm以上沈下した地域の総面積は、昭和58年の45km<sup>2</sup>から昭和59年には161km<sup>2</sup>と実に3.5倍も増大した。このことから、地盤沈下は現在も決して油断の出来ない状態にあると言える。何れにせよ、依然として世界の代表的な地盤沈下国であることには変りはない。

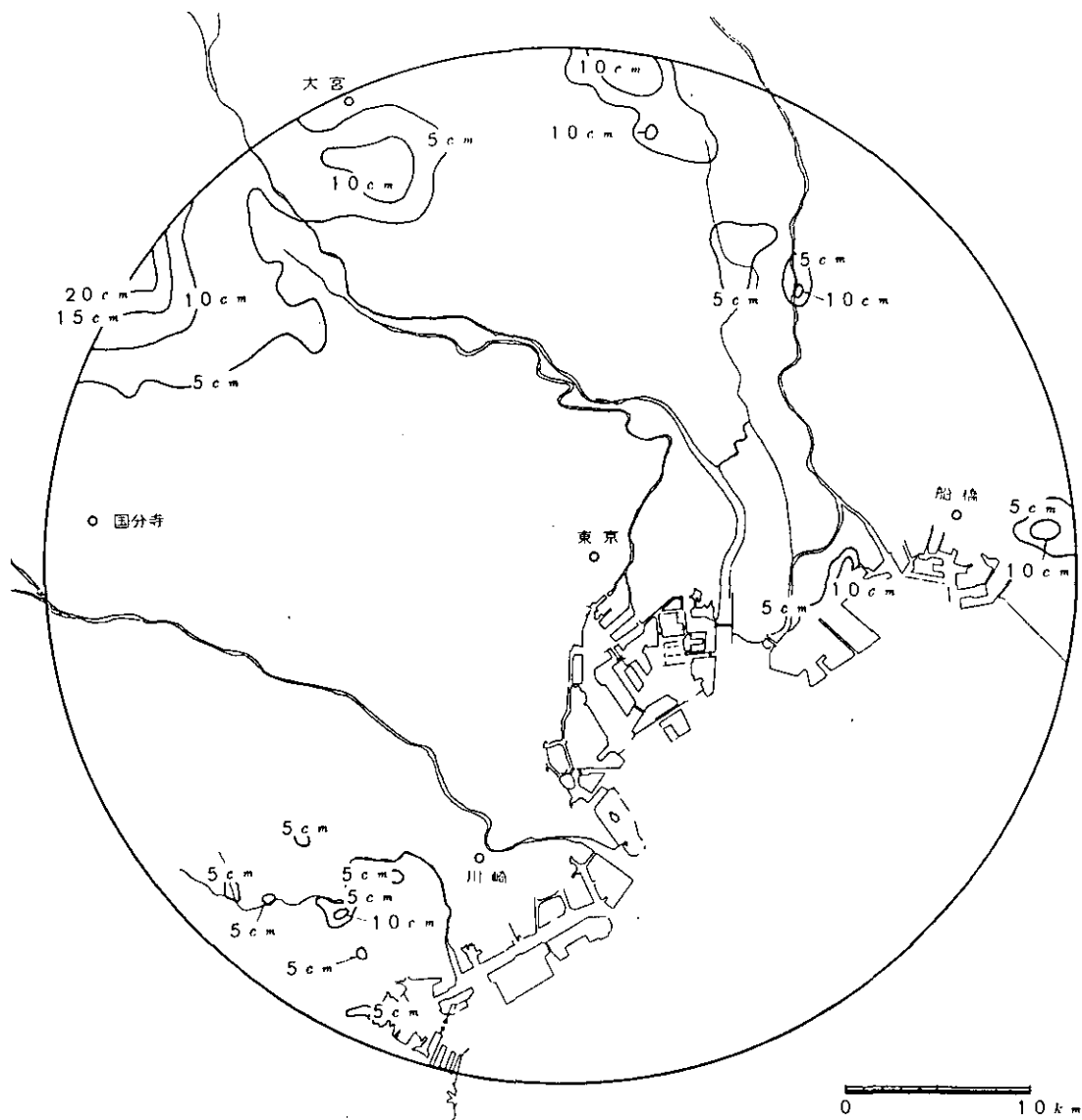


図3-1 首都圏における累積地盤沈下量図（昭和53年～58年）  
ただし、昭和35年以降に造成した海岸埋立地は除く

全国の地盤沈下の状況

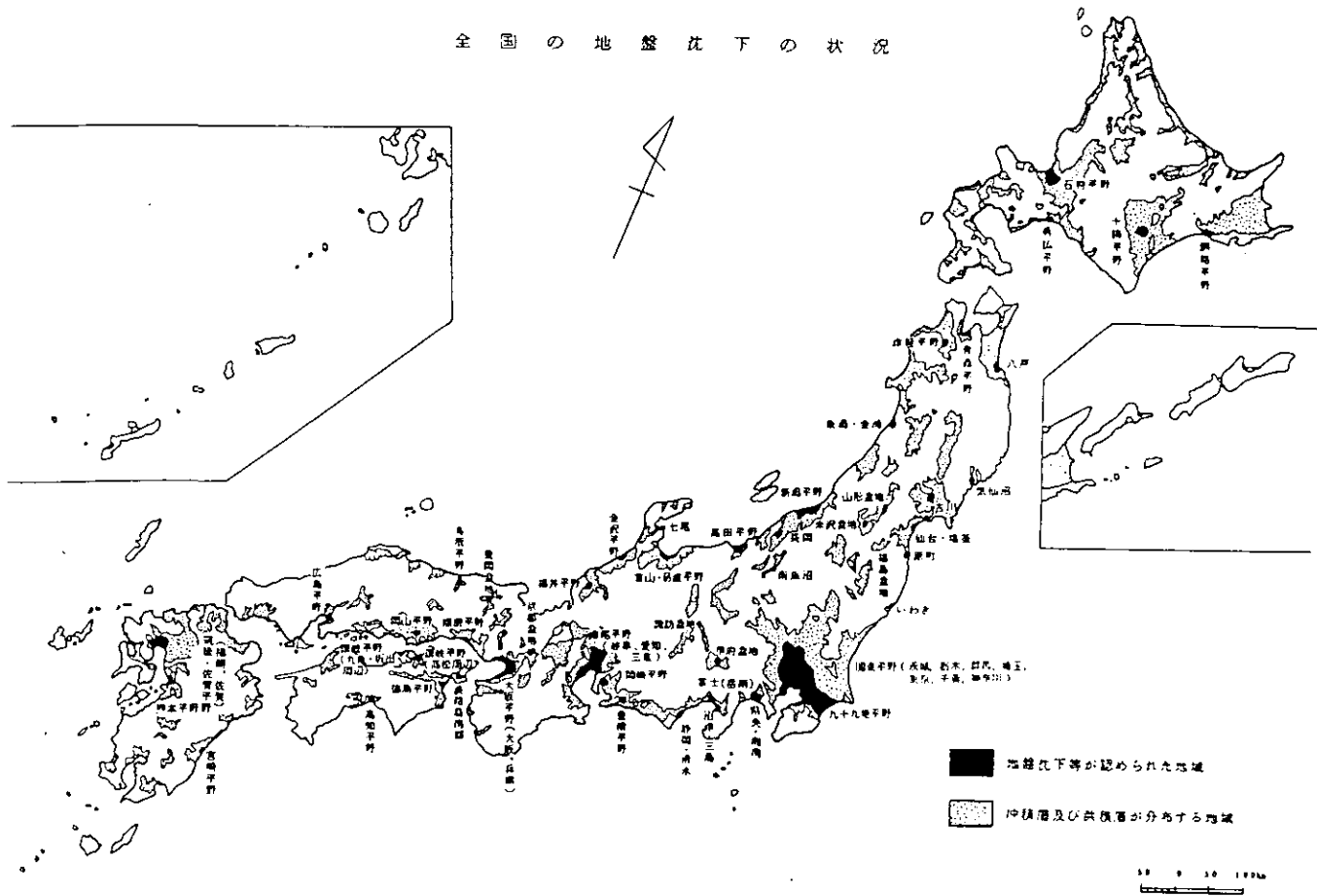


図 3-2 全国の地盤沈下の状況 (環境庁資料(6))

表3-1 全国主要地域における最近の水準点測量による年間  
地盤沈下量の最大値 (環境庁資料[6]に基づく)

| 都道<br>府県 | 地 域 名 | 地域内における年間沈下量の最大値 (mm) |      |       |       |       |       |      |      |
|----------|-------|-----------------------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|
|          |       | 1979                  | 1980 | 1981  | 1982  | 1983  | 1984  | 1985 | 1986 |
| 北海道      | 石狩平野  | ② 86                  | ⑦ 44 | 32    | ② 59  | ③ 52  | ③ 84  | ① 67 | ③ 48 |
| 宮 城      | 仙台平野  | ⑤ 56                  | ④ 54 | ⑨ 37  | ⑦ 43  | ⑨ 33  | ⑤ 66  | ⑥ 51 | ⑤ 42 |
| 茨 城      | 関東平野  | ④ 81                  | ④ 54 | ④ 49  | ⑥ 48  | ⑥ 44  | ⑨ 56  | ⑦ 46 | ⑥ 41 |
| 栃 木      | 関東平野  | 31                    | 29   | 31    | 18    | ⑩ 27  | ⑩ 55  | 30   | 27   |
| 千 葉      | 九十九里  | 45                    | 36   | ③ 56  | ③ 54  | ⑦ 43  | ⑤ 51  | 30   | 32   |
| 千 葉      | 関東平野  | ② 86                  | ⑥ 53 | ⑥ 45  | ⑩ 35  | ⑧ 34  | 53    | 29   | ⑩ 32 |
| 埼 玉      | 関東平野  | ① 96                  | ① 79 | ② 67  | ④ 53  | ③ 52  | ⑦ 60  | ④ 56 | ④ 47 |
| 東 京      | 関東平野  | 22                    | 18   | 25    | 11    | 13    | 32    | 18   | 13   |
| 神奈川      | 関東平野  | ⑦ 48                  | ⑧ 41 | ① 107 | ① 263 | ① 168 | ⑥ 64  | ⑤ 52 | ⑨ 33 |
| 神奈川      | 県央湘南  | 33                    | 20   | 16    | 21    | 22    | ④ 73  | 23   | 20   |
| 新 潟      | 高田平野  | 4                     | 20   | ⑨ 37  | 23    | 22    | ① 101 | ③ 66 | ② 54 |
| 新 潟      | 南魚沼   | 14                    | 30   | ⑧ 44  | 18    | 16    | ② 92  | ⑤ 37 | ⑧ 35 |
| 長 野      | 諏訪盆地  | ⑨ 41                  | ⑩ 36 | 33    | ④ 53  | ② 54  | 47    | 25   | ① 67 |
| 愛 知      | 濃尾平野  | 35                    | 22   | 32    | 24    | 26    | 23    | 15   | 10   |
| 三 重      | 濃尾平野  | ⑧ 45                  | 31   | 22    | 33    | 22    | 27    | 15   | 9    |
| 大 阪      | 大阪平野  | 23                    | 17   | 20    | 25    | 18    | 25    | 25   | 13   |
| 佐 賀      | 佐賀平野  | ⑥ 49                  | 35   | ⑤ 46  | ③ 54  | ⑦ 38  | ⑧ 59  | ① 67 | ⑦ 39 |

ただし、○内の数字は全国地域別最大年間沈下量の順位

表3-2 全国の年間2cm以上沈下した地域の総面積  
(環境庁資料[6]より)

| 年 度                    | 1978 | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 面 積 (km <sup>2</sup> ) | 1946 | 624  | 467  | 689  | 616  | 594  | 814  | 499  | 396  |

それでは、最近の地盤沈下はどのような所で生じているかと言えば、その第一は、大都市近郊に見られるような急速に都市化が進んでいる地域（例、関東平野北部地域）である。次に、消雪用や農業用に地下水を利用している所のように、一時的に多量の地下水を揚水している地域（例、高田平野・佐賀平野）である。そして、水溶性天然ガスの採取のように比較的深い所から地下水を揚水している地域（例、九十九里平野）である。その他、必ずしも地下水を利用しているとはいえないが、泥炭層や腐植土層が厚く堆積した所での開発地域（石狩平野・諏訪盆地）などが挙げられる〔表3-1参照〕。

関東平野では、地盤沈下が認められた地域の面積が実に5000km<sup>2</sup>以上に達しており、しかも最大累積沈下量が東京都江東区で4.6mにも達している〔表3-3参照〕。地下水採取規制を行うなどした結果、東京都では昭和54年以降、年間沈下量は3cmを越えることがほとんどなくなった〔表3-1参照〕。しかし、地盤沈下が停止したわけではない。

近年急速に発展している横浜市港北区では、昭和55年から4→11→26cmと年間沈下量が急激に増加した。これは、地下鉄をはじめとする各種建設工事が次々に進められ、それに伴って地下水の揚・排水量が増大したためと考えらる。このことから、建設工事などに伴う環境アセスメントの必要性がうかがえる。また、住宅団地などが次々と建設され、人口が急増している埼玉県北東部を中心とした関東平野北部地域では、毎年4～10cmも沈下している。この地域は、上水道用や工業用の適当な水源が少ないため、地下水に多く依存しており、しかも井戸が深いことに加え、農業用に大量の地下水を利用していることなどが、激しい地盤沈下を引き起こしている最大の原因と考えられている。その結果、埼玉県の松伏町を中心とする古利根川流域では、地盤沈下のため水路の上流が下流より低くなるという逆転現象が生じており、大雨に見舞われると常に洪水の危険にさらされている。

なお、本節は、陶野〔1〕を参考にして作成した。

表 3 - 3 全国主要地域において地盤沈下が認められた面積  
(環境庁資料[6]に基づく)

| 都道府県 | 地域名  | 地盤沈下が認められた地域の総面積 (km <sup>2</sup> ) | 地域内の累積沈下量の最大値 (cm) |       |           |
|------|------|-------------------------------------|--------------------|-------|-----------|
|      |      |                                     | 累積沈下量              | 測量開始年 | 水準点設置場所   |
| 北海道  | 石狩平野 | 250                                 | 45                 | 1975  | 札幌市白石区東米里 |
| 宮城   | 仙台平野 | 290                                 | 66                 | 1974  | 塩釜市新浜町3丁目 |
| 茨城   | 関東平野 | 160                                 | 66                 | 1974  | 猿島郡五霞村川妻  |
| 栃木   | 関東平野 | 470                                 | 33                 | 1967  | 下都賀郡野木町友沼 |
| 千葉   | 九十九里 | 770                                 | 69                 | 1968  | 長生郡睦沢町小滝  |
| 千葉   | 関東平野 | 1980                                | 212                | 1962  | 市川市福栄4丁目  |
| 埼玉   | 関東平野 | 1650                                | 157                | 1961  | 越谷市弥栄町    |
| 東京   | 関東平野 | 955                                 | 455                | 1918  | 江東区南砂2丁目  |
| 神奈川  | 関東平野 | 225                                 | 139                | 1931  | 川崎市川崎区渡田  |
| 神奈川  | 県央湘南 | 130                                 | 33                 | 1967  | 平塚市馬入     |
| 新潟   | 高田平野 | 240                                 | 29                 | 1968  | 上越市福橋     |
| 新潟   | 南魚沼  | 60                                  | 37                 | 1975  | 南魚沼郡六日町余川 |
| 長野   | 諏訪盆地 | 20                                  | 26                 | 1977  | 諏訪市四賀     |
| 愛知   | 濃尾平野 | 735                                 | 146                | 1962  | 海部郡十四山村神戸 |
| 三重   | 濃尾平野 | 120                                 | 158                | 1961  | 桑名郡長島町浦安  |
| 大阪   | 大阪平野 | 635                                 | 287                | 1935  | 大阪市此花区西島  |
| 佐賀   | 佐賀平野 | 320                                 | 107                | 1957  | 杵島郡白石町横手  |



### 3. 3 地下水位の経年変化

大正年代に入って近代的なさく井技術が発達してきたことにより、深井戸が掘られるようになった。その結果として、大正10年頃から多量の地下水が汲み上げられるようになった。

図3-3は、その当時の地下水面を復元したものである〔7〕。この図を見ると、大正年代からすでに墨田区を中心とする江東地区で、地下水頭が低下していたことが分かる。

図3-4は、大正年代に地下水頭が最も低下していた地域を中心として、東西に切った地下水面断面図である〔7〕。この図を見ると、地下水面の低下は最初墨田区を中心とする地域に著しく、次にその周辺、さらにその次はその周辺というようにいわば蚕食するかたちで、地下水面の低下が周辺地区へ波及して行った様子がよく分かる。

図3-5は、首都圏における被圧地下水の昭和53年1月の平均等地下水頭図である。なお、図中の数字は海水準（標高0m）からの深度を示したものであり、また○印は等地下水頭線を引くために用いた観測井の位置を示したもので、そのストレナー深度の大半は50～150mである。この図をみると、首都圏の東北部で地下水頭が低下している。最も地下水頭が低下しているのは、墨田区向島付近であり、標高-40mにも達している。

昭和46年以降、地下水の汲み上げ規制がなされるようになり、それに伴って揚水量が減少し始め、地下水位が少しずつ回復するようになった。

図3-6は、千葉県内にある主要観測井の地下水頭の変動を示したものである〔8〕。この図を見ると、地下水頭は昭和46年頃最も低下し、その後少しずつ水位が回復しているのが分かる。昭和46年頃の船橋の深度約900mの観測井の地下水頭が、海水面下約90mまで下がっていたことは、まさに驚異である。この地下水位低下の主たる原因は当時盛んに行われていた天然ガスの採取である。

図3-7は、東京港埋立地にある地盤沈下観測施設の内、辰巳観測所における昭和46年～62年の地層別沈下量と江戸川層（ストレナー深度65～70m）の地下水頭の変動を示したものである〔9〕。この図を見ると、江戸川層の地下水頭が昭和46年に海水面下23mまで下がっていたものが、その後少しずつ上昇し、昭和62年には7mまで回復してきたのが分かる。地下水頭の回復に応じ、江戸川層は17mm程度上昇（膨張）している。しかし、有楽町層は、年々地盤沈下が促進されており、昭和46年から62年にかけて計77mm沈下している。

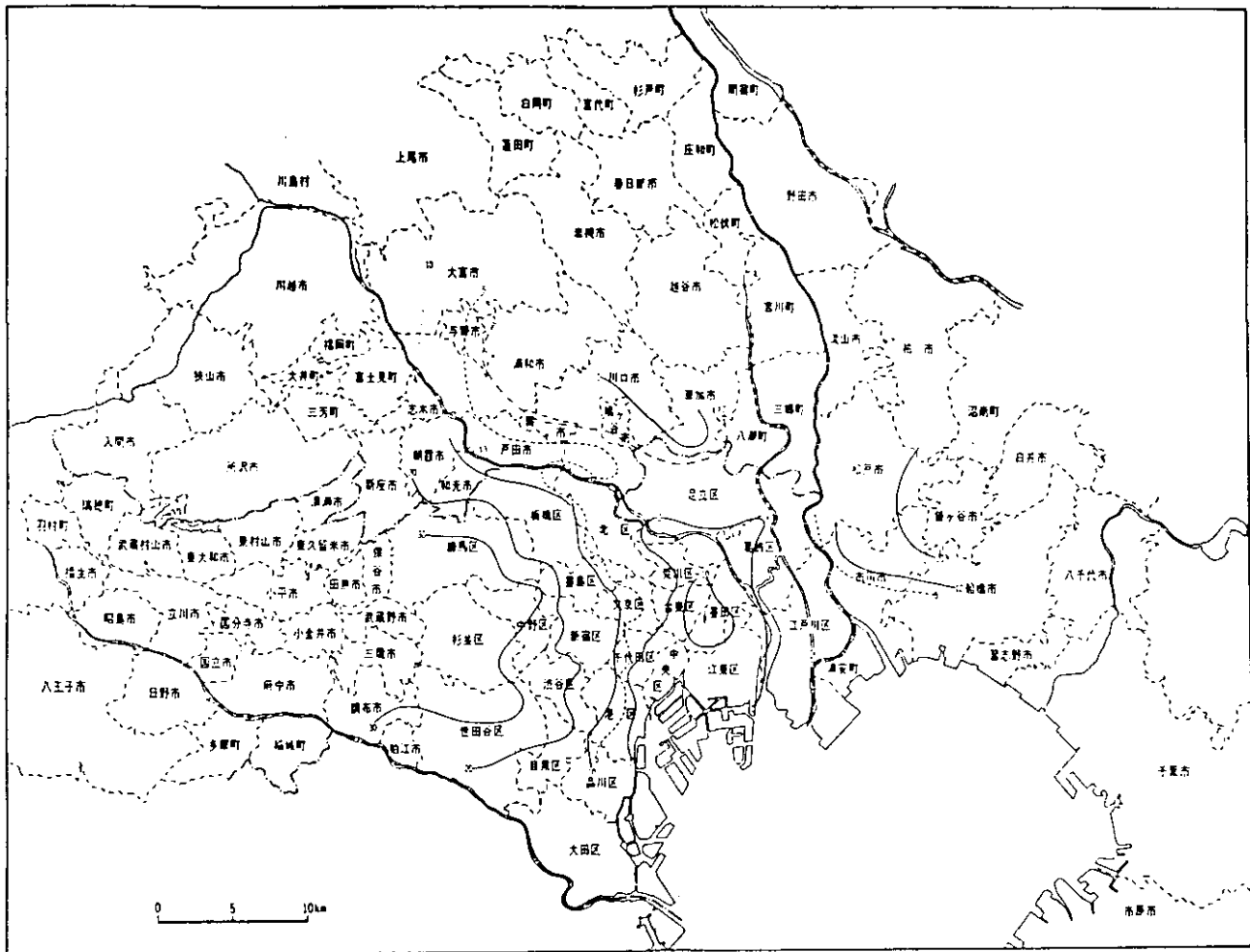


図 3 - 3 首都圏における1920年前後の地下水断面図 (新藤 (7))

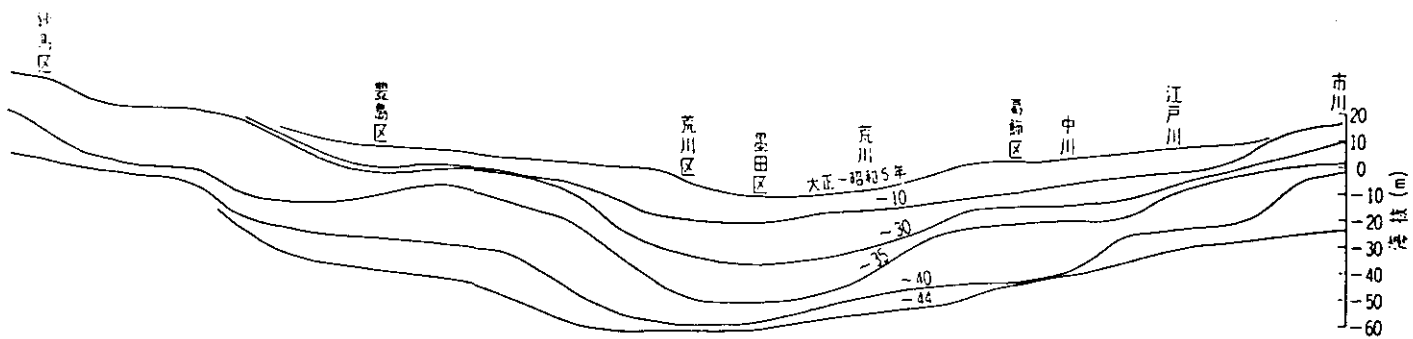


図 3 - 4 地下水経年変化の断面図 (新藤 (7))



なお、図中の数字は海水準（標高 0 m）からの深度を示したものである。

図 3 - 5 首都圏における昭和53年 1月の平均地下水頭

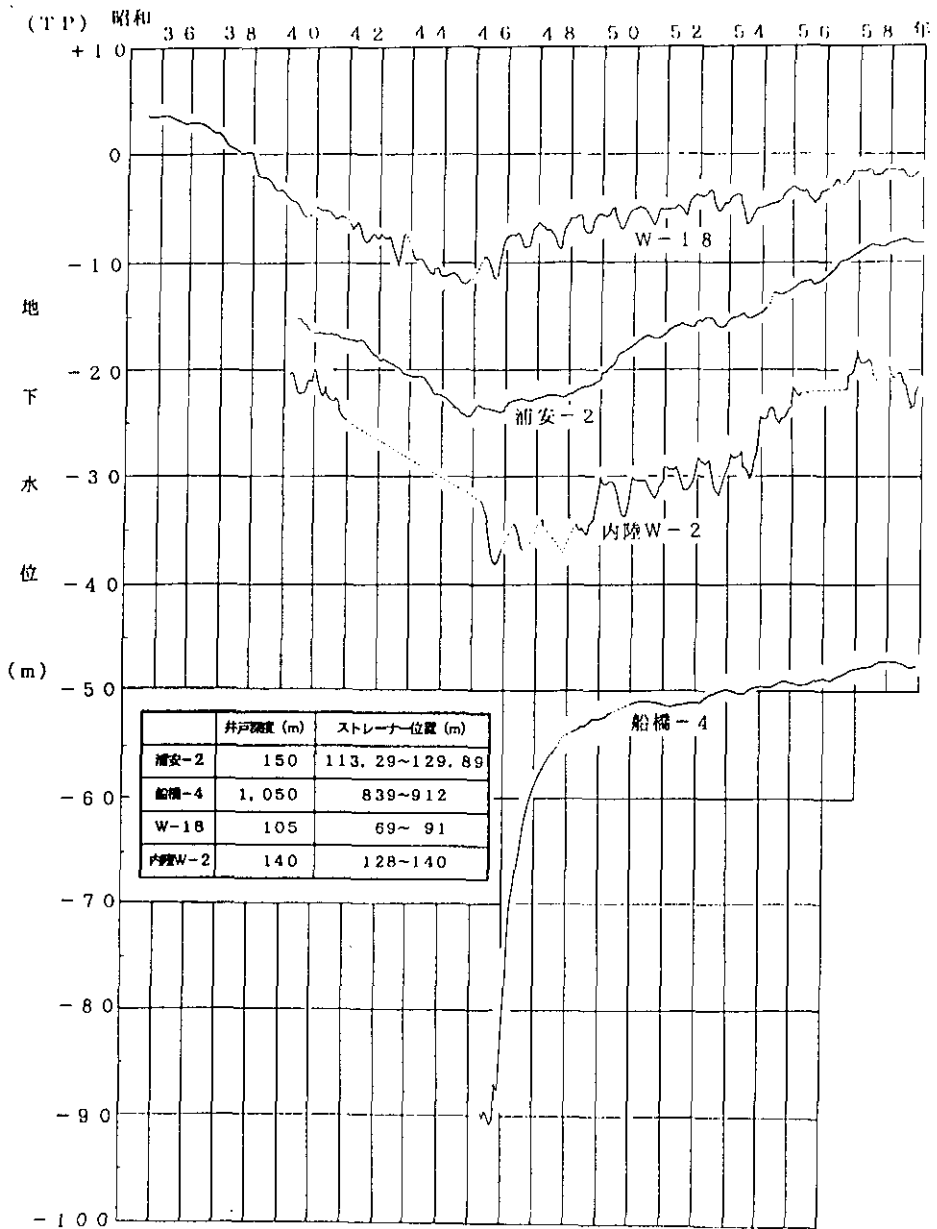
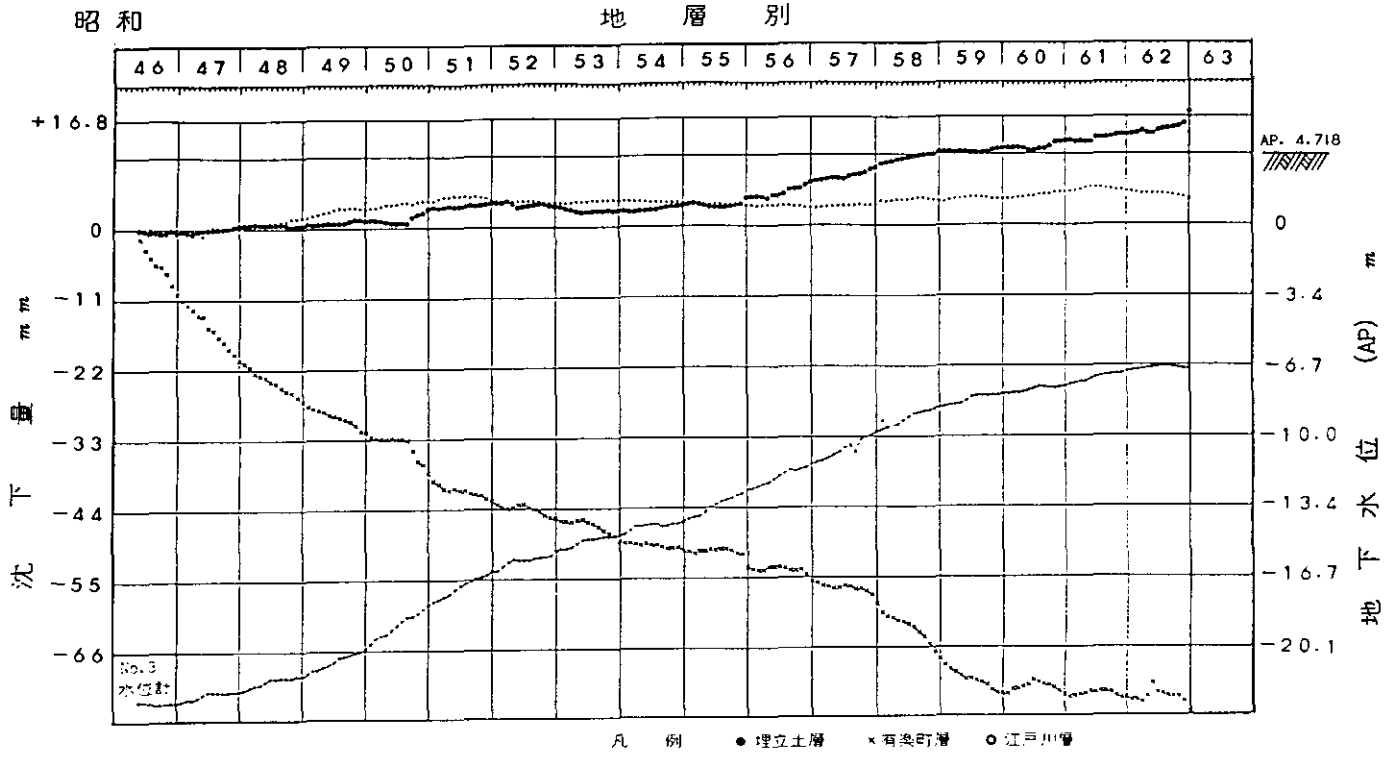


図 3 - 6 千葉県内の主要観測井の地下水頭変動図  
(千葉県資料 [8]より)

図 3-7 辰巳観測井の地下水頭および地層別沈下量の変動図  
 (昭和46年~62年) (東京都資料 [9] より)



### 3. 4 地盤沈下の防止対策

地盤沈下は、一旦発生すればほとんど回復が不可能な公害であるという特殊性を有し、これによって引き起こされる高潮、河川の氾濫などの災害による社会的損失は莫大なものとなることから、既に進行している地盤沈下を終息させるべき努力をすることはいうまでもないことであるが、また将来その可能性のある地域についても沈下を未然に防止することが必要である。

地盤沈下防止対策には、現在生じている地盤沈下を防止する対策と地盤沈下が生じた地域に対する災害の脅威から守るための対策に分けることができる。

地盤沈下を防止するため、行政府は地盤沈下量・地下水位の監視測定、地下水揚水量の実態調査、シミュレーションを用いた沈下予測や適正揚水量の調査などを行うと共に、これらの結果をもとに地下水揚水規制、表流水へ水源転換を図るための代替水の確保・供給事業、地下水を合理的に使用するための融資・指導を行っている。現在の法制のもとで規制の対象とされるのは、工業用に供する地下水（昭和31年制定の「工業用水法」）と冷暖房用などの建築物用に供する地下水（昭和37年制定の「建築物用地下水の採取の規制に関する法律」）に限定されており、それ以外の用途に供する地下水の採取は規制できないこと、規制地域が既に地盤沈下が進んでいる地域や異常に地下水位が低下している地域などに限定されていることなどの問題がある。一方、各都道府県においては、条例等によって地下水揚水量の削減を図っている。また、国においても昭和60年4月に地盤沈下防止等対策関係閣僚会議において、濃尾平野、筑後・佐賀平野についての地盤沈下防止等対策要綱が決定され、これに基づく各種施策が推進されている。これらの施策により、現在は年間沈下量2cm以上の著しい地盤沈下地域が減少してきている。さらに、関東平野北部地域についても、現在地盤沈下防止等対策要綱を策定しているところである。

地盤沈下に起因する災害防止対策としては、高潮・津波対策、水害および内水氾濫対策などがあり、堤防のかさ上げ、内水排除施設整備、海岸施設整備、土地改良などの事業が実施されている。さらに、地震対策が必要な場合もある。また、既に著しい地盤沈下が進行している地域については、建築物、港湾施設、治水施設、農業用施設などの被害の復旧事業が実施されている。このために莫大な経費がつき込まれている。

地盤沈下は通常長時間にわたってゆっくりと生じる。このため、適宜対策工事を行うことができるので、災害にいたらないことが多い。また、災害は他の災害事象（地震、豪雨など）と複合的に生じることが普通である。しかし、時として、大災害に变身することがある。特に、大地震が発生した場合、メキシコ地震や宮城県沖地震の場合でも明らかのように、地盤沈下が生じていた地区とそうでない地区とでは建設構造物の倒壊数などに極端な違いが見られる。文献[10]を参照されたい。

### 3. 5 地盤沈下の監視体制

地盤沈下の現状を監視、把握するため、通常水準測量調査と地盤沈下観測井による方法を用いている。

水準測量調査による方法とは、ある基準水準点を不動点とし、各水準点の標高を測量し、前回との差から変動量を算定し、地盤沈下の状況を把握する方法である。

地盤沈下観測井による方法とは、地層の収縮による井戸管の抜け上がり量を測定記録し、この量を井戸管基底部から地表面までの収縮量と見なす方法である。また、同時に地下水頭も測定記録するのが普通である。なお、地下水頭のみを観測する井戸もある。

観測井を1つ設置するには、1千万円から1億円程度の経費がかかるにもかかわらず、1つの帯水層の地下水頭しか観測できない。このようなことから、東京でも観測井の設置場所は少なく、測定精度を生かすにはほど遠く、およその分布を把握できる程度である。表3-4に関東地方全域の地下水観測井の設置個所と井戸本数を示したが、決して多い数字とは言えない。特に、首都圏における大深度地下開発に直接関係がある地下水位観測井の数は、表3-5を見ても分かるように僅か31の観測井しかない。

表3-4 関東地方における観測井の数  
(昭和62年4月現在)

| 都県名  | 地域名  | 設置個所 | 井戸本数 |
|------|------|------|------|
| 茨城県  | 関東平野 | 7    | 12   |
| 栃木県  | "    | 37   | 44   |
| 群馬県  | "    | 26   | 26   |
| 千葉県  | 九十九里 | 4    | 4    |
| "    | 関東平野 | 64   | 111  |
| 埼玉県  | "    | 23   | 36   |
| 東京都  | "    | 40   | 92   |
| "    | 埋立地  | 6    | 11   |
| 神奈川県 | 関東平野 | 21   | 24   |
| "    | 湘南   | 6    | 6    |
| 合計   |      | 234  | 366  |



表 3 - 5 首都圏における大深度地下開発に  
直接関係がある地下水位観測井

| 観測井の名称     | 所在地         | ストレーナー深度      |
|------------|-------------|---------------|
| 船橋 - 1     | 船橋市湊町       | 4 4 - 5 5 m   |
| 市川 - 5     | 市川市押切       | 4 2 - 4 7 m   |
| 市川 - 6     | 市川市南行徳      | 5 3 - 5 9 m   |
| 川口 1 号     | 川口市東領家      | 8 9 - 9 5 m   |
| 南砂町第 1     | 江東区南砂 3     | 6 5 - 7 0 m   |
| 亀戸第 1      | 江東区亀戸 9     | 5 6 - 6 1 m   |
| 両国第 2      | 墨田区両国 1     | 7 6 - 8 7 m   |
| 新江戸川第 1    | 江戸川区松島 2    | 6 0 - 7 0 m   |
| 小 岩        | 江戸川区上一色町    | 4 7 - 5 5 m   |
| 江戸川東部第 1   | 江戸川区江戸川 3   | 6 2 - 6 7 m   |
| 小島第 2      | 江戸川区西葛西 2   | 7 0 - 7 7 m   |
| 篠崎第 1      | 江戸川区西篠崎町    | 5 5 - 6 0 m   |
| 戸田橋第 3     | 板橋区舟渡 4     | 5 1 - 5 9 m   |
| 練馬第 1      | 練馬区谷原 4     | 8 7 - 9 7 m   |
| 調布第 2      | 調布市調布ヶ丘 3   | 4 3 - 5 3 m   |
| 砂町 - 2     | 江東区新砂 3 地先  | 5 2 - 6 1 m   |
| 砂町 - 3     | 江東区新砂 3 地先  | 8 1 - 1 0 9 m |
| 有明 - 4     | 江東区有明 2 地先  | 6 3 - 6 9 m   |
| 辰巳 - 3     | 江東区辰巳 1     | 6 5 - 7 0 m   |
| 大井その 1 - 3 | 品川区八潮 1     | 4 3 - 4 9 m   |
| 大井その 2 - 2 | 大田区城南島 1 地先 | 6 8 - 7 2 m   |
| 大井その 2 - 3 | 大田区城南島 1 地先 | 8 8 - 9 3 m   |
| 千鳥町        | 川崎市川崎区千鳥町   | 6 2 - 7 0 m   |
| 観音川        | 川崎市川崎区塩浜 2  | 6 7 - 7 7 m   |
| 田 島        | 川崎市川崎区綱管通 2 | 5 3 - 5 9 m   |
| 小 向        | 川崎市幸区小向西町   | 3 8 - 4 3 m   |
| 市 場        | 横浜市鶴見区元宮 1  | 3 5 - 3 9 m   |
| 横浜公園       | 横浜市中区横浜公園   | 4 4 - 4 7 m   |
| 新羽公園       | 横浜市港北区新羽町   | 6 3 - 7 7 m   |
| 新横浜公園      | 横浜市港北区新横浜 3 | 5 1 - 5 7 m   |
| 緑          | 横浜市緑区佐江戸町   | 4 3 - 1 0 4 m |

## 参考文献

- 1) 陶野 郁雄；わが国の地盤沈下の現状，第3回地下水問題研究会，(1986)
- 2) 今村 明恒；昭和3年5月21日東京強震当時と其以前とに現われたる地塊運動に就いて - 東京市街を縦貫せる活断層，地震，3，3，(1931)
- 3) 広野 卓蔵・和達 清夫；西大阪の地盤沈下に就いて（第1報），災害科学研究所報告，2，(1939)
- 4) 和達 清夫；西大阪の地盤沈下に就いて（第2報），災害科学研究所報告，3，(1940)
- 5) 南関東地方地盤沈下調査会；南関東地域地盤沈下調査対策誌，(1974)
- 6) 環境庁水質保全局；全国の地盤沈下地域の概況，昭和61年度ほか，(1987)
- 7) 新藤 静夫；南関東の地下水，土と基礎，20，5，(1972)
- 8) 千葉県環境部；千葉県の地盤沈下現況，(1985)
- 9) 東京都港湾局；昭和62年東京港地盤沈下観測調査報告書，(1988)
- 10) 陶野 郁雄；地盤沈下，土質工学会東北支部設立三十周年記念誌，(1985)

## 第4章 大深度地下空間利用に伴う地盤環境に関する問題

首都圏における地下 50～100m の地盤は、第四紀更新世に堆積した地層からなっており、良好な帯水層であるとともに、地盤沈下の対象層ともなっている。

このようなことから、大深度地下空間は、地盤環境保全の観点に立って開発・利用が行われる必要がある。

そこで、大深度地下空間利用の際に懸念される地盤環境問題を予め抽出することにした。特に、地質学的・地下水学的・土質工学的・建設工学的観点に立って検討を行った。

### 4. 1 地質学的課題

#### 4. 1. 1 資料の蓄積に関する問題

首都圏の平野部の地下地質は、長年にわたる研究とボーリング資料の蓄積により、地表下数10m までについては、詳細に解明されている。しかし、深度数 10m以下についての情報は極端に貧弱となる。ここでいう貧弱さとは、1つには、地質認定・対比の根拠が鍵層 1枚 1枚の追跡によってなされているものではないこと、2つには、層相、土質工学的性質、堆積年代、堆積環境、垂直的・水平的分布などが明らかでないこと、3つには、データの密度（ボーリング地点の密度）が希薄なことなどを意味する。台地部や丘陵部の地下地質は、平野部以上に情報が貧弱となる。このようなことが問題になるのは、表層では各地層の特徴が詳細に分かっているため、それに伴う問題を未然に防ぐことができるのに対し、深層ではそれが難しいということに加え、一般に深層には表層にない問題が種々考えられ、表層の理解から類推することのできない面があるからである。

したがって、大深度地下開発に際しては、数 10m以深の地質情報を表層と同じレベルまで解明しておくことが不可避である。

#### 4. 1. 2 海成粘土層に関する問題

東京低地の地下には、砂層・泥層からなる下総層群（東京層などと呼ばれる）の基盤として、一般に上総層群が広く厚く発達している。上総層群は、房総半島や多摩丘

陵などでは地表に露出しており、硬質な泥層（土丹）だけでなく、密な砂層や礫層も認められる。

この上総層群の硬質な泥層も問題がない訳ではない。ほとんどが海底下で堆積した上総層群の泥層（海成粘土層）には、黄鉄鉱などの形で硫黄分が多く含まれている。これが空気にさらされると、急激に酸化される。泥層の酸化によって、硫酸が生成され、地下水は強酸性を呈することになる。造成地では重機の腐食が問題になっているが、地下でも強酸性地下水の生成は、埋設された鉄管・鋼管杭の腐食などを促進させる。

海成粘土層に伴う問題が典型的に現れたケースは大阪の地下鉄工事であった[1]。ここでは、黄鉄鉱などの硫化物に富む粘土層（上総層群と同じ時代の大阪層群）を、シールド工法で大量の空気を圧入して掘進（圧気工法）した結果、黄鉄鉱（ $\text{FeS}_2$ ）が圧入された空気により急激に酸化され、発熱現象を伴いながら（最高  $80^\circ\text{C}$  以上）、硫酸の生成をもたらした過程が明らかにされている。水素イオン濃度（pH）2.4という強酸性の地下水はこのような過程で生じ、シールド内の圧気用パイプを腐食させた。大阪層群中には、0.4～1.7%の硫黄分が様々な硫黄化合物の形で含まれている。これら硫黄分は、自然状態でも空気にさらされると酸化され硫酸を発生させる。また、このような粘土の懸濁液のpHが2.4～4.3と強酸性を示すことは、硫酸の存在を証明する。自然の過程では、硫酸は粘土層中の粘土鉱物を破壊し、粘土鉱物から溶脱されたカルシウムと結びつき、硫酸カルシウム（石膏）となって、結晶を作り安定すると考えられている[2]。丘陵地の造成地で重機の腐食などの被害がでるのは、この石膏が生じていく自然の過程の速度をはるかに凌ぐ速度で、土木工事という人為的過程が進行する結果起こる現象といえる。

このような現象に対する工法の検討が必要となるが、予め粘土層の堆積時の環境・硫黄含有量などを十分チェックしておくことも必要である。同時に硫酸生成のメカニズムを始めとする化学的過程をさらに詳細に解明することも必要である。

#### 4. 1. 3 礫層に関する問題

東京低地の地下には色々な時代に堆積した礫層がある。沖積層基底礫層、埋没立川段丘礫層、東京礫層、江戸川層や上総層群中の礫層などが代表的なものである。地下水の過剰揚水によって水の抜けた空隙に富む礫層が、圧入された空気によって急速に酸化される。このため、礫層が酸欠層となり、酸素欠乏空気が噴出して事故を招いたことはよく知られている。大深度の工事により地下水位が低下すれば、同様の事が生じる可能性が高い。したがって、礫層の分布や性質を予め調査しておくことが肝要である。

なお、現在土質工学の分野で、“東京礫層”として広く使われているものは、必ず

しも本来の地層名のみならず、江戸川層中の礫層をさしていることも多く、従来の上部東京層と下部東京層、または東京層と江戸川層とを分ける各境界としての“東京礫層”という定義に帰るとすれば、東京下町低地で言われている東京礫層は、江戸川層中の礫層の可能性が強い。同様に、上位の沖積層基底礫層、埋没立川段丘礫層と東京礫層との区別もつきにくい。いずれにしろ、土質工学的な支持層としての安定性からみた場合の礫層を、すべて“東京礫層”として扱われているのが現状である。

#### 4. 1. 4 鋭敏粘土・関東ローム層に関する問題

大阪平野では鋭敏粘土の存在が問題となっているが、東京でも沖積層だけでなく、関東ローム層の下位にある渋谷粘土層、板橋粘土層、あるいは常総粘土層など軟弱な粘土層にも類似の問題が発生する可能性がある。大深度地下開発をめぐるには、地下に埋没した多摩ローム層が特に問題となる。また、これらのローム層は何れも繰り返すことによって著しく強度が失われる性質（鋭敏比が高い）があることに留意する必要がある。

台地・丘陵部を覆うこれらのローム層は、過去数10万年間に降下した火山灰が風化作用を被って生成されたもので、アロフェンから加水ハロイサイト、ハロイサイト、モンモリロナイトにいたる、結晶度を異にする多くの粘土鉱物を含んでいる。また、これらのローム層は粘土化の度合いを異にするいくつかの層序単位に区分される。地形面の時代により、分布する層序単位および関東ローム層の厚さは異なるので、地形面の判定が重要な意味を持つ。

#### 4. 1. 5 沖積層に関する問題

軟弱地盤としての沖積層については、過去の地震時の地盤災害履歴からも明らかのように、十分な対策が必要である。沖積層の形成過程から、一般に、地下10mから地表にいたる間には、縄文海進最盛期の海成砂層および同海進後の砂質河川堆積物が発達することが多い。また表層の盛土地盤、埋立て地盤には砂質物質が使われることが少なくない。したがって、地下水位のきわめて浅い、表層に砂質地盤を持つ広範な地域で液状化現象の発生を警戒しなければならない。さらに、沖積層の厚さ、埋没谷の谷壁の位置（層厚急変部）、軟弱層を取り巻く器と、地盤災害発生との関係なども検討する必要がある。特に、埋立地の多くはこのような条件を満たしていることに注意しなければならない。

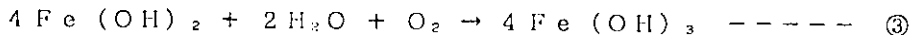
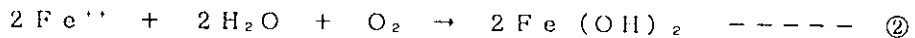
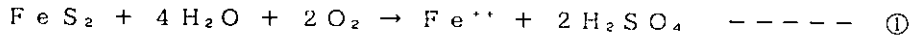
#### 4. 1. 6 生物的化学的過程に関する問題

大深度地下開発の対象となる下総層群と上総層群の間隙は、すべて水で満たされて（飽和して）おり、これらの地層を掘削した場合には、次のような問題が生じるもの

と考えられる。

まず、掘削することによって、水溶性天然ガスが発生する可能性がある。さらに、4. 1. 2項でも取り上げたが、黄鉄鉱などの硫化物が酸化されることによってガスが発生する。このようなガスは、通常の空気よりも極端に酸素が欠乏した、いわゆる酸欠ガスである。酸欠ガスが井戸とか地下室などから噴出して、かつて沖積層内のシールド工事現場で生じたと同じような事故を起こす可能性がある。

酸欠を引き起こす主な原因は、2価の鉄イオンであり、下式のように鉄イオンは水と酸素を吸収する。



また、式①をみて分かるように、黄鉄鉱が酸化されることによって、硫酸が生成され、地下水が酸性化することも注意しなければならない。

次に、地層の中には嫌気性の微生物が生息している。この微生物は、開発に伴う環境変化によってどのような影響を受けるのか不明であり、至急研究を開始する必要がある。また、地上や表層に生息する微生物が、開発に伴って地下に侵入し、地下水などによって拡散する場合も検討しなければならない。地表と同様に、大深度地下空間にも、ねずみ・ごきぶり・はえなどが入り込む可能性は高く、これらの生物によって、微生物が運搬・培養されることが十分予想される。特に、地下空間は高温になりやすく、かびが発生するのに好条件の環境下にある。これら生物汚染の発生防止・管理体制を確立する必要がある。

#### 4. 1. 7 テクトニクスに関する問題

東京低地を含めた東京湾および湾を取り囲む低地域には、周囲の下総台地や武蔵野台地と同じ段丘が地下に埋没しているのが認められている。すなわち、下総台地・武蔵野台地と東京低地・東京湾との境界部に撓曲崖があり、後者が沈んでいるに違いない。そのうち東京湾の北部から北西に走る断層が指摘されている。このような地下に埋もれた構造線については、検出・確認することが大変難しく、既に指摘されているものはごく一部に過ぎないものと思われる。また、その中には立川断層のような活断層が含まれる可能性が十分にあり、直下型地震との関係が心配される。地下に埋没している活断層の位置（長さ）、性格、活動時期、活動度の評価などを明らかにしておく必要がある。その場合、埋没段丘面や沖積層基底地形、上総層群上面の侵食地形面など、垂直的変位を検出する基準面、あるいは水平変位を検出する埋没谷や谷を埋める

礫層などの識別区分、さらに活動期を知る埋没ローム層や凝灰質鍵層の認定が重要となる。また、今後の活動の可能性の存否にかかわらず、このような境界面、断層粘土、断層破碎帯などが、一般に均質な地層・岩石に異方性をもたらし、このような境界面に沿って地下水の通路ができ、風化作用を促進し、部分的には固い地層・岩石の強度を弱める働きをすることにも留意しなければならない。

また、近年の地下水揚水規制によって、地下水位の回復・上昇が認められるようになった。これに伴い、断層境界面に沿って著しい地下水・水溶性ガスの湧出・噴出が懸念されており、地下構造物の施工時および完成後におけるそれぞれの万全な対策をおろそかにすることはできない。

#### 4. 1. 8 地層の重なり方による地盤形式の重要性

地下開発に際しての周辺地盤環境に及ぼす影響を極力少なくするためには、地下の地質・地盤情報をできるだけ多く把握する必要があるが、その中でも、各地層の重なり方による形式や埋没地形の深度などによって分類される地盤形式を十分考慮に入れる必要がある。それは、地盤環境に及ぼす影響が各地層によって、感度が異なるからである。ことに、“沖積層”をはじめ、比較的地質時代の新しい地層は、地下水などの地盤環境の変化から受ける地盤沈下や変形などの影響を最も強く被る可能性があるからである。また、単なる地層の重なり方の種類による違いのほか、地下空間開発予定区域における地層分布の急変点を知ることにも重要であり、そのためには前もって埋没地形の状況などを十分に把握しておく必要がある。

以上のように、表層を除く地下の地層の実体は、解明されていない点がきわめて多い。このような部分の利用に先立って、先ず必要なことは、大深度地下の情報を質・量共に増やし、地層区分の精度を表層のレベルに近づけることである。例えば、東京低地では、下総層群・上総層群に対し、主要凝灰質鍵層の対比に基づく程度の精度で地層を把握することである。このような地層の認定・対比に基づいて、層相変化、堆積環境、地質構造、鉱物学的・化学的性質、土質工学的性質などの的確な把握を図る必要がある。下総層群については、直接的には、最も大深度地下開発と関連が深い地層と思われるが、多数の不整合により、きわめて複雑な層序関係を示すものと思われる。このため比較的連続的に堆積している地点でのボーリングコアを詳細に分析・解析し、この層準のスタンダードを確立することが重要となる。スタンダードとなるボーリングコアと、テフラ（凝灰質鍵層）対比、微化石分析などにより、正確な地層の認定とその対比を図り、複雑な層序関係を解きほぐしていくことが要求される。

## 4. 2 地下水学的課題

### 4. 2. 1 地下水環境への影響

大深度地下空間開発に伴う地盤環境に関する問題の内、ここでは周辺地下水環境への影響・問題について述べる。

我が国のように、良好な帯水層が大半を占めるような地盤において、地下工事を安全に行うためには、地下水位低下工や止水・集水工などの地下水対策工が必要となる。これまで、このような地下構造物建設時に地下水から受ける影響への対策に関しては、数多くの研究・開発がなされ技術的な進歩を遂げている。反面、そのような対策工あるいは地下構造物そのものが周辺の地下水環境に与える影響に関する研究は、遅れをとっており、最近になってようやく関心が高まってきたように思える。

大深度地下の建設工事による地下水障害は、地下水の水圧や水量の変化と、地下水の水質の変化の2つに大きく分けられる。

前者に関する問題としては、地下水低下による井戸（水資源）の枯渇、地盤沈下、あるいは止水工実施に伴う地下水位上昇による土地の湿潤化や構造物基礎の支持力低下などがある。一方、地下水流動の停滞による水質の悪化、地盤注入工法などによる地下水汚染、さらに海岸付近での地下水の圧力低下による塩水化などは後者に属する問題である。特に、塩水化は水資源としての地下水の価値を奪うばかりでなく、土壤に塩素イオンが吸着され植生に悪影響を及ぼし、なおかつ一旦塩素イオンが土壤に吸着されると洗浄除去が困難であるため長期間障害が継続する。また、直接地下水が汚染されなくても地下深部のシールド工事の際、圧気中の酸素と地中の硫化物などとの化学反応による硫酸の生成により酸性化が生じ、地中構造物や埋設物の腐食が促進されることも考え得る。

このように、地下空間開発による地下水障害は無視できないものがあるが、特に数10～100mといった大深度の開発では、難透水性基盤層からの地下水流入による水質への影響、および酸欠ガスなど新たな問題も顕在化してくる可能性もある。そのような意味から、大深度地下開発における地下水開発の適切な予測・評価を行うためには、広域的な地下水変動の予測や長期的な観測のみならず局所的な現象にも目を向ける必要があり、基礎的データの収集・研究が急務となる。

### 4. 2. 2 地下水情報把握に関する問題

地下水の圧力は、観測井を設置して測定するのが普通である。観測井の地下水頭は、1 cm程度の精度で普通測定されているが、1 mm程度の精度で測定することも可能である。しかし、例えば、海に面していない東京都の17区で大深度地下開発に直接関係がある地下水観測井は僅か3つであり、測定値の精度を生かすにはほど遠く、地下水位



の分布はおおよそしか分からないのが現状である。

表4-1は、東京都港湾局地盤沈下観測井において実施した揚水試験結果である。これらは、地下水位が最も低下していた頃の昭和45年～昭和50年にかけて、地盤沈下観測井を設置する際に、実施したものである。なお、透水係数は、Jacobの式（回復法）を用いて算定した。この表によると、大深度地下開発の対象となる江戸川層中の礫層の透水係数は、 $10^{-2} \sim 10^{-4}$  cm/s オーダーの範囲にあることが分かる。

井戸における透水係数は、1桁程度の精度では測定可能である。また、乱さない土試料を用いた室内試験でも透水係数を求めることが出来るが、100倍程度の誤差が生じることもある。このようにして求めた透水係数は、1地点1地層（単層）の値であり、しかも同一層においても場所ごとにその値が異なることが普通であるので、その地層が分布する全域の値とするのには問題が多い。したがって、多くの地点で観測することが肝要であり、しかも出来れば数年に1回程度測定し直すことが望ましい。

井戸の揚水量は、時々一斉調査を行って測っている。しかしながら、井戸の実態把握が十分なされていないこともあり、実際の揚水量よりかなり小さ目になることが普通である。

その他の地下水挙動の予測に必要な定数（貯留係数等）は、調査方法が確立していないこともあり、ほとんど求められていない。

地下水の水質（溶存ガス・微生物も含む）は、地下水を地盤の中と同じ状態で採取し、それを分析すれば分かる。しかし、現在の地下水の採取方法は、地盤の中にあるときと同じ状態で地下水を採取しているとはいい難く、改良する余地が十分に残されている。

大深度地下空間の開発に伴う地下水障害は無視できないものがある。したがって、開発が始まる前に、地下水の挙動を予測するために必要な情報を集めておく必要がある。そのためには、新たな調査・測定方法の開発、試験・測定精度の向上を計らねばならない。そして、定期的にしかも広範囲に数多くの地点で調査・測定を行う必要がある。特に、開発されようとしている大深度地下空間建設現場近傍では、施工前・施工時・施工後とも、逐次綿密な調査・測定を行わなければならない。さらに、広範囲かつ密度の濃い情報を把握するための手法の開発を行う必要がある。

表 4-1 東京都の地盤沈下観測井における揚水試験結果  
(東京都港湾局資料による)

| 地点名         | 番号 | ストレーナー深度<br>(AP. m) | 地層名  | 土質名    | 層厚<br>(cm) | 初期水位<br>(AP. m) | 透水量係数<br>T<br>(cm <sup>2</sup> /s) | 透水係数<br>k<br>(cm/s)   |
|-------------|----|---------------------|------|--------|------------|-----------------|------------------------------------|-----------------------|
| 大井その1       | 2  | -18.62 ~ -24.14     | 東京礫層 | 砂 礫    | 200        | -5.90           | $7.68 \times 10^{-1}$              | $3.84 \times 10^{-3}$ |
|             | 3  | -38.25 ~ -43.80     | 江戸川層 | 礫混細砂   | 950        | -5.88           | $1.13 \times 10^{-1}$              | $1.19 \times 10^{-4}$ |
| 大井その2       | 2  | -60.58 ~ -64.58     | 東京礫層 | 砂 礫    | 400        | -7.14           | $1.88 \times 10^{-1}$              | $4.70 \times 10^{-4}$ |
|             | 3  | -80.58 ~ -84.58     | 江戸川層 | 砂 礫    | 200        | -8.25           | $2.37 \times 10^{-1}$              | $1.18 \times 10^{-3}$ |
| 辰 巳         | 3  | -55.96 ~ -60.96     | 江戸川層 | 中 ~ 細砂 | 500        | -22.44          | $4.88 \times 10^{-1}$              | $9.76 \times 10^{-4}$ |
| 10号地<br>その1 | 3  | -20.42 ~ -25.96     | 東京礫層 | 砂 礫    | 200        | -6.93           | $5.42 \times 10^{-2}$              | $2.71 \times 10^{-4}$ |
|             | 4  | -55.86 ~ -62.20     | 江戸川層 | 砂 礫    | 1100       | -6.04           | $1.01 \times 10^1$                 | $9.18 \times 10^{-3}$ |
| 14号地<br>その1 | 2  | -44.58 ~ -53.58     | 江戸川層 | 砂 礫    | 800        | -19.20          | $2.75 \times 10^{-1}$              | $3.44 \times 10^{-4}$ |
|             | 3  | -73.70 ~ -101.30    | 江戸川層 | 砂 礫    | 2400       | -22.98          | $1.60 \times 10^2$                 | $6.67 \times 10^{-2}$ |
| 15号地<br>その2 | 2  | -1.15 ~ -6.68       | 有楽町層 | 細 砂    | 950        | 1.66            | $1.71 \times 10^0$                 | $1.80 \times 10^{-3}$ |
|             | 3  | -33.92 ~ -39.58     | 七号地層 | 細 砂    | 1580       | -14.93          | $1.04 \times 10^{-1}$              | $6.58 \times 10^{-5}$ |
|             | 4  | -98.90 ~ -110.60    | 江戸川層 | 砂 礫    | 4000       | -17.05          | $4.74 \times 10^1$                 | $1.19 \times 10^{-2}$ |
|             | 5  | -150.72 ~ -161.84   | 江戸川層 | 細 砂    | 4370       | -21.03          | $5.09 \times 10^{-1}$              | $1.16 \times 10^{-4}$ |

#### 4. 3 土質工学的課題

##### 4. 3. 1 大深度地下利用が周辺地盤に与える影響

大深度地下空間建設による環境問題を検討する上で、対象となる地盤の力学的な性質を把握しておく必要がある。首都圏における地下 50～100m の地盤は、今から30万年～100万年前に堆積した更新世の砂質土層、粘性土層、砂礫層が中心である。これらの地層は、通常の構造物の支持地盤としている東京礫層の下位にあり、力学性状や地層の分布状況に関する研究や情報が非常に少ない地盤である。このため、圧密現象、地盤の変形挙動を推測するための地盤定数などの情報が欠けており、今後の蓄積が望まれる。

大深度地下空間の存在が周辺の地盤に与える影響を大別すると、構造物からの漏水による地盤沈下と、地下空間を造ったことによる地盤の変形、および主として開口部付近の地震に対する応答性の問題となる。これらの問題に関する検討事項と、関連する研究対象をまとめると表4-2のように表わせる。以下、項目ごとに説明を加える。

表4-2 大深度地下空間構造物が地盤環境に与える影響と土質工学からみた検討課題

| 環境問題     | 検討課題   | 関連する研究対象  |
|----------|--|---|
| 地盤沈下     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地下構造物からの揚水による周辺地盤の圧密予測</li> <li>・ 施工時の揚水による周辺地盤の圧密予測</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 繰返し圧密解析手法の確立</li> <li>・ 洪積粘性土、砂質土層の圧密係数の推定</li> <li>・ 地下壁と地盤とのネガティブ・フリクション</li> <li>・ 地下の地形（地層）評価手法</li> </ul>                       |
| 地盤変形と耐震性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 空洞の存在による周辺地盤の変形</li> <li>・ 周辺地盤の振動性状</li> </ul>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 洪積粘性土、砂質土層の変形特性の評価</li> <li>・ 浮力を考慮した変形解析手法</li> <li>・ 洪積粘性土、砂質土層の透水係数の算定</li> <li>・ 2、3次元非線形解析</li> <li>・ 有効応力モデル、構成式の確立</li> </ul> |

## (1) 地盤沈下

地盤沈下は、主に地下構造物からの漏水による地下水位の低下が原因として考えられる。一般の構造物では、周辺の環境に大きな影響を与えない程度の漏水でも、地下空間の規模が大きくなると、影響を及ぼす範囲が大きくなり、環境に影響を与えないとは言い切れない場合がある。したがって、圧密沈下の予測のためのシミュレーションを行う必要があるが、影響範囲が広いため、対象となる地盤全体の透水係数や圧密係数などの地盤定数の分布を推定することが現状では困難である。

地下空間の施工方法によって、施工時の程度は異なるが、全く漏水させることなく施工することは困難である。この場合、周辺に与える影響も定常的なものでなく、施工過程の変化につれて、非定常な圧密現象となる。このような現象は、“繰返し圧密”の特殊な場合に該当するが、“繰返し圧密”研究はまだ研究の途についたばかりであり、今後の発展が望まれる。

## (2) 地盤の変形と耐震性の変化

地下空間の存在がどのような地盤の変形を与えるかについて、過去の研究例は少ない。特に大深度地下空間は、周囲から非常に大きな浮力を受けるが、このような状況での、地盤の安全性や変形についてはほとんど検討されていない。

一般に杭やトンネルのような細長い地下構造物で、上部からの慣性力を受けない場合は、地震時の構造物の挙動は地盤の挙動とほぼ等しく、構造物が地盤に与える影響はほとんどない。しかし地下に巨大な構造物を造った場合には、地震時に周辺地盤にどのような影響を与えるか不明である。特に、地表に開口している地下空間の場合は、地表付近で周辺地盤の振動性状を変える可能性がある。

## 4. 3. 2 土質工学上の問題

我が国ではこれまで特に戦後膨大な建設工事が行われてきたが、特殊なものを除いてほとんどの場合、地盤の土質工学的性質で最も注目し、また設計や施工で問題にしたのは、せん断強度であった。すなわち掘削、盛土あるいは一般構造物の基礎にしてもその設計はまず地盤のせん断破壊に対する荷重その他の条件を定め、それに適当な安全率を適用し対処してきた。

次は、荷重による地盤の変形（主として沈下）のチェックであるが、ここで最も問題にしてきたのは粘性土の圧密沈下である。これらの量および時間的評価を正確に行うため、乱さない土質試料の採取から、土質試験、さらに計算方法などの向上に多大な努力がはらわれてきた。砂地盤の沈下については、地震など動的原因によるものは別として、標準貫入試験によるN値と経験則によって判断してきた。

最近構造物の規模が大型化するにつれて、またコンピュータの発達によって、数値解析が容易になったことにより、設計時に応力と変形の関係を吟味して採り入れられ

るようになって来たが、未だ充分行われてはいない。

次節(4.4)で触れるように、大深度の地下空間の掘削では、応力と変形の関係を充分吟味して設計施工を行う必要があるが、さらに時間の要素も加えたレオロジー的な解析が必要となる。この場合、計算の理論や方法については、有限要素法など数値解析法によって充分対処出来るが、問題はそれに用いる地盤の条件、すなわち地質構造とその土質工学的特性を正確に決定することである。計算手法が如何に優れていても入力データが不正確ではよい結果は得られない。地質構造が均一単純であれば比較的容易であるが、複雑になると、これらの情報を高い精度で得ることは非常に難しくなる。対象地盤の地質構造は決して単純ではないので、この問題を克服することが土質工学的な最大の課題となる。

#### 4.3.3 地盤調査に関する問題

大深度地下開発で対象とする首都圏の地下50~100mの地盤は、更新世に堆積した地層からなっている。この地層に関する工学的物性そのものの情報は、きわめて不足しているのが現状である。

これらの深い深度、かつ硬い地層、特に礫層などの情報を得るためには、新たな技術開発が期待される。最近、地質調査技術の進歩は著しいものがあり、それらをさらに改良発展させることにより、かなり対応出来るようにも思われる。

軟弱粘性土の乱さない試料採取は古くから行われており、採取方法は完成に近い域まで達していると言える。しかし、砂質土については最近かなりの進歩が見られるものの、未だ幾つかの課題を抱えている。硬質粘性土は、一応試料採取はされているが、その品質の点ではまだまだ不満足なことが多い。また、礫層については、従来ほとんど採取不可能とされてきたが、近年になって凍結サンプリング法などの優れた手法が開発・実用化され注目されている。

ボーリング孔を利用した水平載荷試験は、試験方法の開発がなされてから既にかかなりの時間を経たが、最近新たな開発が進められ、測定機器の性能が著しく向上している。測定精度が向上したと共に、数100 kgf/cm<sup>2</sup>の載荷も可能な機械も開発され始め、地盤の塑性領域まで測定出来るようになってきた。

従来、我が国の地盤調査では、標準貫入試験がきわめて多用されてきたことは周知の通りである。砂地盤のせん断強度および沈下特性はほとんどの場合、標準貫入試験によるN値によって評価されている。また、他の色々な力学特性も蓄積された膨大なデータからN値との相関関係が求められており、N値から設計用の採用値を定めることが多かった。

しかし、大深度の調査では、この方法が従来通りには用いられなくなる。標準貫入試験の信頼性の高い範囲は、ロッドによるエネルギーの減衰などから、深度30m程度

であり、これに加え、N値が50以上になると、力学特性との相関性が悪くなることとその大きな理由である。

最近コーンを静荷重で貫入する試験方法が能力・精度共に著しく進歩しており、コーンの先端貫入抵抗、周面に働く摩擦抵抗、貫入によって生ずる過剰間隙水圧の3者を同時に測定出来る測定器が開発され、既に実用化されている。これは試験器の先端で貫入抵抗その他を直接測定するので測定深さは測定値と無関係になる。大深度調査では標準貫入試験の代りになる可能性があり、今後データの蓄積が望まれる。

これまで検討してきた調査法は、すべてボーリング孔を利用するものであり、平面的に見ると、ある一点における調査である。したがって、ある領域内における地質構造およびその土質工学的特性を定めるためには、きわめて多くの地点での調査が必要となる。

物理探査法は、領域内の地質構造を面的、立体的に調査するもので大深度空間開発においては上述のボーリング孔による点的な調査とともに、車の両輪のように使われる可能性が高い。これには、S波を利用する浅層反射法、電磁波を用いる地下レーダー、あるいは対象領域を取り囲む形で弾性波や電磁波の情報を得て内部構造を3次元的に知ろうとするジオトモグラフィーなどがある。これらも最近急速に進歩しているが、未だ充分実用化されていない。

土質試験の技術は、コンピューターその他のいわゆるハイテクを利用することにより、高い水準に達しており、良質の土質試料が与えられれば、前述のような土質情報は得られるようである。しかし、レオロジー的な土質力学特性を求める試験は、これまで余り行われていない。例えば、長時間の連続測定を必要とするクリープ試験では、測定期間中一定温度を維持する必要があるが、そのような恒温室を備えた試験室は未だ少ないようである。すなわちこれらの設備の拡充、技術者の養成が必要となる。

## 4. 4 建設工学的課題

### 4. 4. 1 地下空間の分類および各空間の設計・施工上の問題

大深度地下空間は、恒温性、恒湿性、断熱性、気密性、防振性、防音性などの長所を有する反面、一般的には短所と考えられる遮光性、閉塞性という性質を有している。現在、これらの性質を認識したうえで、大深度地下空間を有効に利用すべく、様々な観点から検討が行われている。

地下空間は、その形状および施工環境によって、鉄道、道路、上下水道トンネル、通信ケーブル用管路、その他いわゆるトンネル構造の“線的な空間”と、地下発電所、浄水場、下水処理場、食品貯蔵施設、駐車場、シェルター、オフィス、さらにはコンサートホールや美術館を含む地下街、その他の“立体的な空間”とに大別される。これらの地下空間を建設するには、一般的に、地盤調査・設計・施工、および維持管理の各技術が必要であることはいうまでもないが、密度の高い市街地が発達した首都圏における地下空間であるので、環境保全という観点から、これらの地下空間の建設が周辺地盤に有害な影響を与えないよう、設計・施工上の配慮をしておくことがきわめて重要である。このような観点から、ここでは線的空間、および立体的空間それぞれについて建設上の問題点、現在ある技術の適応性、開発が望まれる新技術などについて、ごく概略の考察を試みる。

#### (1) 線的空間

線的空間としてのトンネルを建設する際、既存構造物の保全、および地表付近における将来的な建設計画への配慮をすることが必要となる。

現在、首都圏では、深さ10～30 mの地下室を有する重量の重い高層ビルが多数林立しており、将来的にも市街地再開発計画により、このようなビルがますます増える傾向にある。大深度のトンネルは、大きな地圧や水圧に加え、これらのビル群、その他の構造物群の荷重を受けるため、これらの荷重によって壊れたり、有害な沈下や変形を起こさないよう設計する必要がある。また、地震時において、このような地下空間の存在が、地表付近の構造物群に与える影響についても検討しておく必要がある。このような広範囲の地盤や構造物を対象とした地震応答解析に関し、既往の解析手法の適用性の検討、新たな解析手法の開発、それらの手法の妥当性の検証が今後の課題となる。

トンネルの施工にあたっては、地盤沈下を防止するため、大きな地圧や水圧の作用下で、周辺地盤の地位水位を低下させず、かつ、掘削による地盤の緩みを極力押さえるような工法をとる必要がある。

トンネルの施工法としては、現在、切羽が自立するような硬質の岩盤を対象とした山岳トンネル工法と、切羽が自立しないような軟弱地盤から比較的やわらかい軟

岩程度の地盤を対象としたシールド工法とがある。首都圏の深さ 100m 付近の典型的な地層を下総層群下部（江戸川層）、または上総層群と想定し、豊富な地下水の存在を考慮に入れると、工事中に周辺地盤の地下水位を低下させてはならないことから、一般的には、密閉型シールド工法による施工が適切であるケースが多いと考えられる。しかし、地盤や地下水の状況によっては、山岳トンネル工法の適用も考えられる。

既往の調査資料によると、密閉型シールド工法によって施工した最も深いトンネルは、深さ 135m、最大水頭 110m に相当する水圧の作用下で施工した直径 4m の導水トンネルである。また、山岳トンネル工法の施工実績としては、土被り 100m、最大水頭 240m に相当する水圧の作用下で、約 80m<sup>2</sup> の断面積を有する鉄道トンネルを断層破砕帯中に建設した青函トンネルの例がある。

上記の施工実績から考えて、現行技術でも施工は可能であると考えられるが、大断面のトンネルをより安全かつ効率よく施工するためには、切羽前方の地層の急変、豊富な地下水を含む帯水層の存在などを確認しつつ掘進する技術、高い地圧や水圧に耐え、かつ掘削効率の高い大口径シールド機、大断面の切羽安定技術、掘削土砂の効率的な運搬・処理システム、合理的な覆工構造などを開発することが今後の課題となる。特に、覆工については、覆工に作用する水圧自体を減少させる構造やシステムの開発が望まれる。

## (2) 立体的空間

大深度に建設される立体的空間の外壁や底版には、土圧・水圧や地盤反力、特にきわめて大きな水圧が作用すると考えられている。したがって、地下構造物は、これらの土圧・水圧や地盤反力によって、壊れたり、過大な変形を起こしたり、地下水による浮力によって浮き上がることをないように設計する必要がある。一般的に、円筒状の地下構造物の外壁は、土圧・水圧に対してリングコンプレッションで抵抗するので、大スパン構造物であっても高強度コンクリートを使用するなどして壁厚を比較的薄くできるが、平面的な壁体でこれに抵抗させるためには、きわめて大きな壁厚が必要となる。グラウンドアンカーを設置し、壁体や底版が負担する土水圧の軽減を図る方法も考えられるが、トンネルの覆工と同様、水圧自体を減少させる構造やシステムの開発が今後の課題となる。なお、大深度の地盤は地表付近の地盤と比較して一般的に良好であるので土圧は小さく、水圧が卓越すると考えられている。しかしながら、実測例がないので、これらの土圧・水圧の大きさや分布形状の把握は今後の課題である。

立体的空間を施工するに当たっては、周辺地盤や周辺構造物に有害な沈下や変形を与えないよう、周辺地盤の地下水位を低下させず、かつ山留め壁の変形をさせないような工法を採用する必要がある。具体的には、現行の工法では、連続地中壁の



ように止水性が高く、かつ土・水圧によって変形を生じにくい剛性の高い山留め壁を予め地下構造物の周囲に施工しておき、地下水を遮断したうえで山留め壁の内部を掘削する方法がある。

既往の調査資料によると、深さ 96m の連続地中壁によって、内径 64m、深さ 40m の LNG 備蓄タンクを施工した実績や、試験施工であるが、厚さ 2.6 m、深さ 160 m の連続地中壁の施工実績もあることから、深さ 100m 程度の地下構造物の施工は現行技術でも可能であると考えられる。なお、このような地中壁は、山留め壁や地下壁として、また構造物を支持する杭として現在まで多数施工されており、その先端深さは、首都圏であれば 10~40 m 程度のものが大部分であるが、上記のように止水壁として深さ 100m 程度まで施工された例もある。首都圏は、地下水位が回復する傾向にあるので、構造物の基礎底部の深さが 10~40 m 程度であっても、今後止水壁を深さ 100m 程度まで施工することが多くなることが予想される。

一般的に、地下水を遮断するためには、地下構造物の底部からさらに不透水層まで地中壁を根入れすることが必要であるので、通常の建設構造物の地中壁の先端が深さ 50m 以上に、大深度地下構造物を施工する際は、地中壁の先端が 100m よりかなり深い部分に達することも有り得る。したがって、既述のトンネルを計画する場合は、上記のような既存の地中壁や杭の存在、大深度地下構造物の将来計画を十分考慮に入れておく必要がある。

上記の工法による施工が、周辺地盤に与える影響については、深さ 30~40 m 程度までの施工であれば、実測例やシミュレーション解析手法がある。このような解析手法を深さ 100m 程度までの解析に拡大適用することは可能であるが、その場合の問題点は解析手法に入力すべき地盤や地下水に関する情報が少ないこと、実測がないので、解析の妥当性の検証が困難なことである。

上記の施工に当たっては、大きな土圧によって地中壁に生ずる応力や変形を許容値以下に保つ必要があり、掘削底面のリバウンドやボイリングなどを絶対に防止しなければならない。これに対しては、設計時におけるシミュレーション解析とともに、計測管理を行い、山留め壁や周辺構造物の安全性を確認しつつ施工を行い、不測の事態にも即応できるような体勢で工事を進める、いわゆる情報化施工の推進が不可欠である。その際、現行の計測管理技術の大深度地盤への適用性の検討を行い、計測機器の開発を含む新たな施工管理技術の開発が必要となる。

地下空間の開発で先ず必要なのは、深さ 50~100m に及ぶ深い立坑の掘削である。地盤内でこのような立坑の実績はいまだかってない。現場が首都圏内という都会地であり、重要な諸施設に取り囲まれており、周辺地盤の沈下その他の変形は絶対に許されないといい厳しい環境にあること、および地盤が軟弱で地下水の豊富な帯水層を持つところというところに難しさがある。最近、掘削からコンクリート打設まで水中

で施工する工法の研究も始まっており、これが実用になれば、この問題を解決するための有力な手段となる。早期の開発が望まれる。

次に、この立体的空間の中で、地上に施設が密集し地上からの施工が困難（例えば、地中連続壁が利用出来ない）な場合がある。いわゆる土質地盤における地下空洞の構築である。このようなケースについては、先ず立坑を設置してその底部から水平に半円方向へ放射状に切り開いて行く方法と、トンネルを何本か掘り、次にそのトンネル間を切り崩し空間を繋げる方法などが考えられる。何れの場合も小部分ずつ仕上げて行くことになる。問題は地山の崩壊や落盤を絶対に防止しなければならないことと共に地山を緩めることも極力避けなければならないことである。地山を緩めることは、構造物自体に過大な荷重を加えるばかりでなく、付近の既設構造物にきわめて重大な影響を与えることになる。

第三系の軟岩のような地山であれば比較的掘削も容易であり、諸外国などで実績も散見されるが、下総層群（江戸川層）のような未固結地盤では実績もなく、新しい施工技術の開発が必要である。軟岩の場合は比較的容易であるとはいうものの、地質構造は前述のように決して均一でなく砂岩や砂層あるいは礫層を挟んでいる。したがって、工事に当たってはきわめて慎重な対応を要する。このためには、事前に高度にして十分な地質調査を行い、計画地およびその周辺の地質構造を完全に把握し、設計時には掘削に伴う地山内の応力変化、変形挙動などについてシミュレーション解析を行って予測しておき、施工に当たっては、常に十分な計測管理、および逆解析を行い、その結果は直ちに設計にフィードバックして、地盤性状および設計の見直しを行いながら工事を進める必要がある。

大深度地下空間の場合、その中に存在する構造物には耐用年数があっても、空間自体は半永久的に陥没などの変形を生じさせてはならない。最近、宇都宮市で大谷石の採掘跡地で大きな陥没が生じたが、採石という立場では、採石が終了してからかなりの年月も経過しており、耐用年数がそれほど問題にならないかも知れないが、地上に住む人達にとっては、大問題である。これから行われようとしている大深度地下空間開発も同様である。いままで経験をしたことのない大深度地下空間の開発であるので、先ず地盤情報解析と建設技術を飛躍的に発展させることと、半無限的な耐用年数の保障を得ることが重要である。同時に、開発に携わる者は、半永久的にその責任を持つ覚悟が必要である。また、地下空間の利用が終了したら、その空間を塞ぐため、元（施工前）の地盤と全く同じ地盤を造るというような技術開発が将来必要となる可能性がある。

#### 4. 4. 2 大深度地下空間の耐用年数

大深度地下空間の場合、その中に存在する構造物には耐用年数があっても、空間自

体は半永久的に陥没などの変形を生じさせてはならない。平成元年 2月10日、宇都宮市で大谷石の採掘跡地で大きな陥没事故が発生した。このようなことは、採石という立場では、採石が終了してからかなりの年月も経過しており、耐用年数がそれほど問題にならないかも知れないが、地上に住む人達にとっては、大問題である。これから行われようとしている大深度地下空間開発も同様である。いままで経験をしたことのない大深度地下空間の開発であるので、先ず地盤情報解析と建設技術を飛躍的に発展させることと、半無限的な耐用年数の保障を得ることが重要である。同時に、開発に携わる者は、半永久的にその責任を持つ覚悟が必要である。また、地下空間の利用が終了したら、その空間を塞ぐため、元（施工前）の地盤と全く同じ地盤を造るというような技術開発が将来必要となるかも知れない。

#### 4. 4. 3 地下空間の建設が地下水に与える影響

各地下空間の建設に当たっては、周辺地盤の沈下を防止するために、周辺地盤の地下水位を低下させないような工法を取るべきことは既に述べた。しかしながら、地下構造物の施工中のみならず、竣工後も、壁面からの地下水の漏水や突発的な事故などによって、構造物周辺の地下水位が低下し、地盤沈下を引き起こす可能性もある。また、構造物の建設に当たっては、このような施工中、竣工後の地下水位に及ぼす影響を予測することが必要となる。地下水に関する解析手法は、5. 1節に詳述されているが、何れの手法を用いるにせよ、既述の地下空間の施工が周辺地盤に与える影響評価と同様、解析手法に入力すべき地盤や地下水に関する情報が少ないこと、実測結果がないので解析の妥当性を検証するのが難しいことなどの問題がある。このような問題の解決は、今後の最重要課題の1つとなる。

なお、上記のような、地下空間の施工中、および竣工後における漏水対策の一つとして、薬液注入による地盤改良工法があるが、より有効で高水圧下でも施工可能な地盤改良工法の開発が望まれる。

地下水に関してもう一つ重要な問題は、地下空間の建設によって地下水の汚染および流れなどの環境を変化しないようにすることである。線的空間の場合、構造物が長いので、これが地下水流の方向に交叉して建設される場合は、慎重な注意が必要である。例えば、地下水流が遮断されるとその上流側では地下水面は上昇し、下流側では低下することになり、低下した側では地盤沈下、あるいは地下水の塩水化その他の重大な環境問題を生ずる。このような場合には、そのための対策工事が新たに必要となる。起こりうる汚染の種類や、汚染の範囲などの予測法についても、今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 林 久人：地中の還元状態の物質と地下掘削工事・海成粘土と硫化物をめぐって・特集＝海成粘土と硫化物，アーバンクボタ，23，(1984)
- 2) 市原優子：海成粘土の風化と粘土鉱物・海成粘土と硫化物をめぐって・特集＝海成粘土と硫化物，アーバンクボタ，23，(1984)

## 第5章 大深度地下空間利用に伴う地下水の挙動予測

大深度地下空間開発によって影響が及ぼされる地盤変形と地下水挙動の予測手法に関する調査を行った。特に、地下水の流動障害や地盤沈下への影響の予測に要するシミュレーション手法に関する調査を行い、地下水挙動の事例解析を実施した。

### 5. 1 地下水流動のシミュレーション手法の調査

#### 5. 1. 1 シミュレーション手法の概要

大深度地下空間利用に係わる地盤・地下水の評価手法として、数学モデルの数値シミュレーションが最も有望である。ここでは、地下水シミュレーション手法の現状技術レベルを、その基本的役割を果たすと考えられる浸透流解析手法と地盤沈下予測に有効な応力-浸透流連成解析について調査し、その結果をまとめた。この成果は、今後の大深度地下空間利用に係わる地下水評価手法の開発を行う上で参考になる。

#### 5. 1. 2 浸透流解析手法

自由水面を有する地盤を対象とした浸透流解析、つまり飽和-不飽和浸透流解析については、近年の大型計算機の発達に伴い種々の数値解析手法が開発されている。ここでは、まず飽和-不飽和浸透流の基礎式について述べ、続いて一般によく用いられている差分法、有限要素法、境界要素法などについて、その概要を示す。

##### (1) 基礎式(1,2)

2次元鉛直問題における水分移動の基礎式は、連続の式とダルシーの方程式より式①のように表わされる。

$$\partial \theta / \partial t = \partial / \partial x (k(\theta) \partial \phi / \partial x) + \partial / \partial z (k(\theta) \partial \phi / \partial z + k(\theta)) \quad \text{--- ①}$$

ここに、 $k$ ：不飽和透水係数、 $\theta$ ：体積含水率、 $\phi$ ：圧力水頭、である。

式①は $\theta$ と $\phi$ の2変数をもつ方程式であるから、これを解くためには1つの変数を基準にした式に直す必要がある。1952年に Kluteは $\theta$ のみの方程式②を表わした。

$$\begin{aligned} \partial \theta / \partial t &= \partial / \partial x (D(\theta) \cdot \partial \theta / \partial x) + \partial / \partial z (D(\theta) \cdot \partial \theta / \partial z + k(\theta)) \\ D(\theta) &= k(\theta) \cdot \partial \phi / \partial \theta \quad \text{----- ②} \end{aligned}$$

ここに、 $D$ ：水分拡散係数である。

式②は、 $\theta$ を変数としているため飽和領域においては $\partial \phi / \partial \theta$ が無限大となり、飽和-不飽和域を同時に解析する場合に実用的でない。そこで、

$$\theta = nS_w \quad (n: \text{間隙率}, S_w: \text{飽和度}) \quad \text{-----} \quad \text{③}$$

の関係から、式①、③を用いて  $\phi$  が独立変数となる式に直すと、次式④を得る。

$$\begin{aligned} & \partial / \partial x (k(\phi) \partial \phi / \partial x) + \partial / \partial z (k(\phi) \partial \phi / \partial z + k(\phi)) \\ & = \partial \phi / \partial \theta \cdot \partial \theta / \partial t = d(nS_w) / d\phi \cdot \partial \phi / \partial t \\ & = (S_w \cdot dn/d\phi + n \cdot dS_w/d\phi) \partial \phi / \partial t \quad \text{-----} \quad \text{④} \end{aligned}$$

ここで、式④の右辺第1項は圧力水頭の変化による土の間隙率の変化を表わす項であり、特にこの項を考慮することにより、Biotの方程式などで表わされる土の変形と水の流れの相互作用、つまり圧密-浸透流連成解析を解くことができる。

通常の浸透流の基礎式としては、式④で不飽和域においては  $\phi$  の変化による  $n$  の変化が生じないと仮定することにより、次式⑤のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} & \partial / \partial x (k(\phi) \partial \phi / \partial x) + \partial / \partial z (k(\phi) \partial \phi / \partial z + k(\phi)) \\ & = (C(\phi) + \alpha S_w) \cdot \partial \phi / \partial t \quad \text{-----} \quad \text{⑤} \end{aligned}$$

ここに、 $\alpha = 0$  : 不飽和領域、 $\alpha = 1$  : 飽和領域、であり、

$S_w = dn/d\phi$  : 比貯留係数、 $C(\phi) = d\theta/d\phi$  : 比水分容量、である。

飽和域では  $C = 0$  となり、式⑤は飽和領域内の支配方程式となる。つまり、式⑤は飽和-不飽和領域の浸透流の基礎方程式と考えてよい。

## (2) 差分法[1]

差分法は古くから用いられてきた数値解析法で、微分方程式のテイラー展開近似に基づいている。不飽和流の浸透解析に差分法が用いられた歴史は古く、1952年に Klute が水平1次元浸透問題の解析を、1956年には Dayと Luthin が初期に飽和状態の土柱からの鉛直1次元排水のそれを発表している。代表的な手法としては、前進差分法、後退差分法などの陽解法や中央差分、あるいはクランク・ニコルソン法などの陰解法がある。また、陰解法の連立1次方程式の解を求める方法としては、ガウスの消去法や反復計算法であるガウス・ザイデル法、またその収束を加速する過剰緩和法あるいはSOR法などがある。高次元の浸透解析としては、1968年に Rubin がADI法により2次元の浸透問題に拡張し [3]、また Freeze は1971年にLSOR法を用いた3次元解法を発表している [4]。

Freezeの手法は  $\phi$  と  $\theta$  のヒステリシスも考慮でき、水の圧縮性、浸透領域の圧縮性も考慮して、異方性や不均質性にも十分対処できる解析法である。

## (3) 有限要素法[1]

有限要素法は、差分法とともに数値解析法として近年めざましい発展をとげた。本来構造解析として開発された手法で、浸透問題には1965年に Zienkiewiczらによって初めて導入され、その後定常の自由水面をもつ浸透問題、さらに非定常浸透流、そして2次元解析から3次元解析へと拡張されていった。不飽和浸透流解析としては、1973年 Neuman らが自由水面を有するダルシー流れの解析に応用した [5]。表

5-1には、有限要素法による飽和浸透解析と飽和-不飽和浸透解析の比較を示している。有限要素法は、不飽和浸透解析に有利な方法で、 $\phi = 0$ の点を結ぶことにより、自由水面を簡単に求めることができるが、入力データとして $k \sim \theta$ 、 $\phi \sim \theta$ の関係式が必要になる。解法には汎関数法、重み付き残差法など何種類かの方法があるが、その汎用性により重み付き残差法の一つである Galerkin 法が一般に良く用いられている[6]。

表 5-1 有限要素法による飽和浸透解析と飽和-不飽和浸透解析の比較[1]

|              | 飽和浸透流解析   | 不飽和浸透流解析  |
|--------------|---|---|
| 基礎方程式        | $\frac{\partial}{\partial x} \cdot (k \frac{\partial h}{\partial x})$ $+ \frac{\partial}{\partial z} \cdot (k \frac{\partial h}{\partial z})$ $= S_v \frac{\partial h}{\partial t}$ | $\frac{\partial}{\partial x} \cdot (K(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial x})$ $+ \frac{\partial}{\partial z} \cdot (K(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial z})$ $+ K(\phi) = (C + \alpha S_v) \frac{\partial \phi}{\partial t}$ |
| 自由水面上で満足する条件 | $h = z \quad (\phi = 0)$ $q_{v,n} = (I - S_v \frac{\partial h}{\partial t})n$ $q_{v,n} : \text{自由水面上の鉛直流速}$ $I : \text{降雨の浸透量}$ $S_v : \text{有効空隙率}$                                | $\phi = 0$  |
| 解析の適用性       | 不圧帯水層 { <ul style="list-style-type: none"> <li>均質地盤</li> <li>境界水位降下</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・多層系の地盤</li> <li>・境界水位上昇及び降下</li> <li>・蒸発や降雨浸透</li> </ul>  |
| 入力データ        | 飽和透水係数 ( $k_0$ )<br>比貯留係数 ( $S_v$ )<br>有効空隙率 ( $S_v$ )  | 飽和透水係数 ( $k_0$ )<br>比貯留係数 ( $S_v$ )<br>有効空隙率 ( $S_v$ )<br>不飽和透水係数 ( $k$ ) - 体積含水率 ( $\theta$ ) の関係<br>圧力水頭 ( $\phi$ ) - 体積含水率 ( $\theta$ ) の関係  |

#### (4) 境界要素法 [7]

境界要素法は、境界積分方程式法の一様で、境界積分方程式の欠点である解析領域や境界条件が複雑な場合には解を得ることができないという性質を改善するため、境界を適当な要素に分割し、境界積分方程式を連立1次方程式に変換し、数値的に解を得ようとする方法であり、はじめ固体力学の問題に用いられたが、1977年 Liggett ら [8] によって自由水面を持つ地下水流の解析に初めて応用された。この方法は、領域内部を要素分割する有限要素法と異なり、境界上に未知量を集約させて離散化するため演算の次元を1つ減らすことができ、入力データや計算時間を大幅に節約できるという特長がある。

また、境界要素法は境界からの流出入量を高精度に解析できるので、ダムや堤体内の自由水面を持つ浸透流解析や塩水侵入問題などのように、未知境界の位置を求めるような場合にその威力を発揮する。しかし、解析領域が均質あるいは異方性地盤の場合には取扱いが煩雑になるといった欠点がある。最近では、詳細に検討したいところは有限要素法で解を求め、その周辺は境界要素法で解くといったハイブリッド型の解法も研究されている。

#### (5) 選点法

選点法と有限要素法の違いは重み関数としてディラックのデルタ関数を用いていることである。この手法は、有限要素法と同様に非線型問題に有効であり、エルミートの3次多項式が良く用いられる。この手法を浸透問題に最初に用いたのは、Pinder (1978) [9] であるが、その後この方法を応用した例は少ない。

#### (6) 特性曲線法

この手法は、対流が支配的な物質輸送問題に対して発達してきた。この手法は双曲型の方程式に対して有効であるが、特性曲線に沿って移動するような点を追跡するので、任意の点の解を求めたいときには、かなりの技術を要する。

### 5. 1. 3 次元解析の現状

現実の地下水流動現象は3次元であり、高精度に現象をシミュレーションするためには2次元解析では表現しきれない場合がある。したがって、3次元解析による方がよいことは明白であるが、3次元解析をそのまま行くと計算機容量、演算時間などが膨大になり実用的でないといった欠点もあるため、3次元現象を準3次元解析で表現する方法も開発されている。ここでは、3次元解析、準3次元解析についてその概要を示す。

#### (1) 3次元解析

3次元解析は3次元の支配方程式をそのまま離散化して解を求めるものであり、2次元解析よりも忠実に現象を捕らえることが可能であるが、必然的に大きな計算



機容量や計算時間が必要になる。

3次元の飽和-不飽和浸透流解析を最初に行ったのは Freeze[4]であり、解法は差分法の1つであるLSOR法である。有限要素法では Segol[10]や Frind[11]らが行っており、後者は広域地下水の挙動を解析するのに3次元有限要素法が経済的でかつ精度も良いという報告を行っている。

我が国でも有限要素法による3次元の飽和-不飽和浸透流解析は古くから行われており、駒田ら[12]によるダムの迂回浸透問題への適応や、赤井ら[13]による砂を用いた3次元模型実験との解析精度の検討などの実施例がある。

また、Gupta[14]や Huyacornら[15]によって、3次元解析において計算機容量を小さくして効率を上げる方法も研究されている。後者は、3次元領域をスライス状にメッシュ切りして数値積分を省略する方法をとっている。Narashimhanら[16]は、有限要素法と差分法を合わせたような方法を用いて3次元浸透流解析を行う例として、積分差分法(IFDM)を提案している。これは、有限要素法と異なり節点座標の他に節点をとりまく節点の番号と、節点と節点の境界の面積を入力データとするものである。

## (2) 準3次元解析

準3次元解析は、主に広域地下水の解析に用いられてきた方法で、広域の場合には平面的な広がりに対して水深が浅いので鉛直方向の流れは無視できるという、水平一様流の Dupuit の仮定を用いることにより次元を減少させている。つまり3次元で表わされた支配方程式を鉛直方向に積分することによって、解析次元を2次元にする。

準3次元解析の歴史は比較的早く、1970年に Bredehoeftら[17]は鉛直方向の浸透に理論解を用いる方法を提案している。また、我が国でも本影ら[18]による湖の水位低下が周辺の水田地帯に及ぼす影響の検討や、本島[19]によるダムの堰水に伴う下流域への浸出量の予測解析の例がある。

表-5. 2には、既往の浸透流解析手法の一覧を示している。

## 5. 1. 4 応力-浸透流連成解析の現状

地下水の流動は、本来それのみの支配方程式で表わされるものではなく、他の要因つまり外的応力や圧密現象などと相互に影響し合うものであるが、その影響の大小や計算機容量・時間の関係から他の現象の影響を無視することが多かった。しかし、問題が複雑になり、かつ高度な予測解析が必要になると、そのような連成効果の影響を無視できなくなる。連成解析としては、応力、熱、物質移行などが考えられるが、ここでは問題の焦点を地盤内応力の影響に絞り、応力-浸透流連成解析の現状についてその概要を述べることにする。

表-5. 2 既往の浸透流解析手法の一覧[1,4,5,8-19]

| 著者名              | 次 元 |    |     |     |      | 地 盤   |    |     | 解 析 手 法 |      |     |     |
|------------------|-----|----|-----|-----|------|-------|----|-----|---------|------|-----|-----|
|                  | 1次元 |    | 2次元 | 3次元 | 準3次元 | 等 方 性 |    |     | 異方性     | 差分   | FEM | その他 |
|                  | 水平  | 鉛直 |     |     |      | 均質    | 層状 | 不均質 |         |      |     |     |
| Klute '52        | ○   |    |     |     |      | ○     |    |     |         | ○    |     |     |
| Day & Luthin '56 |     | ○  |     |     |      | ○     |    |     |         | ○    |     |     |
| Youngs '57       |     | ○  |     |     |      | ○     |    |     |         | ○    |     |     |
| Philip '57       | ○   | ○  |     |     |      | ○     |    |     |         | ○    |     |     |
| Hanks ら '62      | ○   | ○  |     |     |      |       | ○  |     |         | ○    |     |     |
| Whisler ら '65    |     | ○  |     |     |      | ○     |    |     |         | ○    |     |     |
| Remsonら '65      |     | ○  |     |     |      | ○     |    |     |         | ○    |     |     |
| Rubin '67        |     | ○  |     |     |      | ○     |    |     |         | ○    |     |     |
| Rubin '68        |     | ○  |     |     |      | ○     |    |     |         | ○    |     |     |
| Freeze '69       |     |    | ○   |     |      | ○     | ○  |     |         | ○    |     |     |
| Verma ら '70      |     |    | ○   |     |      | ○     | ○  |     |         | ○    |     |     |
| Bredejeft '70    |     |    |     | ○   |      | ○     |    |     |         | ADI  |     |     |
| Guitjensら '71    |     |    | ○   |     |      | ○     |    |     |         | ○    |     |     |
| Freeze '71       |     |    | ○   | ○   |      | ○     | ○  | ○   | ○       | LSOR |     |     |
| Gieselら '73      |     | ○  |     |     |      | ○     |    |     |         | ○    |     |     |
| Neuman '73       |     |    | ○   |     |      | ○     |    | ○   |         |      | ○   |     |
| 鎌田ら '74          |     |    |     | ○   |      | ○     |    |     |         | ○    |     |     |
| Luthinら '75      |     |    | ○   |     |      | ○     |    |     |         | ADI  |     |     |
| 本影ら '75          |     |    |     | ○   |      | ○     |    |     |         | ○    |     |     |
| Segal '76        |     |    |     | ○   |      | ○     |    |     |         |      | ○   |     |
| 赤井ら '77          |     |    | ○   |     |      | ○     |    |     |         |      | ○   |     |
| Hoa ら '77        |     | ○  |     |     |      | ○     |    |     |         |      | ○   |     |
| Liggett '77      |     |    | ○   |     |      | ○     |    |     |         |      |     |     |
| Pinderら '78      |     |    | ○   |     |      | ○     |    |     |         |      |     |     |
| 駒田ら '78          |     |    | ○   |     |      | ○     |    | ○   | ○       |      | ○   |     |
| Frind ら '78      |     |    |     | ○   |      | ○     | ○  |     |         |      | ○   |     |
| 駒田・大町 '78        |     |    |     | ○   |      | ○     |    | ○   |         |      | ○   |     |
| Vauclin ら '79    |     |    | ○   |     |      | ○     |    |     |         | ADI  |     |     |
| 赤井ら '79          |     |    |     | ○   |      | ○     |    |     |         |      | ○   |     |
| Stephensら '80    |     |    | ○   |     |      | ○     |    |     |         |      | ○   |     |
| 本島 '81           |     |    |     | ○   |      | ○     | ○  |     |         |      | ○   |     |
| Gupta ら '84      |     |    |     | ○   |      | ○     |    |     |         |      | ○   |     |
| Huyacorn '86     |     |    |     | ○   |      | ○     |    |     |         |      | ○   |     |

(1) 理論の概要[20]

応力と浸透現象の連成では、力の釣合い式と水の質量保存則を連立させた形で解を得ることとなる。力の釣合い式は以下のように表わせる。

$$(\sigma'_{ij} + \delta_{ij} \rho_f \phi)_{,j} + \rho b_i = 0 \quad \text{-----} \textcircled{6}$$

ここに、 $\sigma'_{ij}$  : 有効応力、 $\rho_f$  : 水の密度、 $\delta_{ij}$  : クロネッカデルタ、 $\rho$  : 地盤の密度、 $\phi$  : 圧力水頭、 $b_i$  : 物体力、である。式⑥は、変形は有効応力の変化によって起こるという有効応力の原理に基づいている。

流れの連続式は⑦式のように導かれる。

$$\partial \varepsilon_{xx} / \partial t = K \partial^2 h / \partial x_1^2 \quad \text{-----} \text{⑦}$$

ここに、 $\varepsilon_{xx}$ ：体積ひずみ、 $K$ ：透水係数、 $h$ ：全水頭、である。体積ひずみは変位の関数である。

上式が飽和地盤の圧密方程式である。この方程式を有限要素法などで離散化して適当な初期値と境界条件の下で解くことにより、任意の地点での変位と水頭を求めることができる。

応力-ひずみの構成則としては、弾性、弾塑性、粘弾塑性など対象地盤の挙動をよく表現し得るものを選ぶ。また、不飽和浸透をも扱う場合には、飽和度の低下による透水性の低下や比水分容量の変化、そして有効応力の原理を不飽和部にまで拡張して解釈することにより可能となる。しかし、不飽和部での有効応力の定義については未だ確立した知見が無いのが現状である。

## (2) 既往の研究

粘性地盤の多次元圧密挙動に関する理論は、1940～50年にかけて Biot[21] によって確立された。しかし、計算機を用いることによるこのような連成挙動の解析は、1970年前後に Christian[22] や Sandhu[23] によってなされたものが最初である。何れも有限要素法により離散化されているが、前者の方法は、間隙水圧を要素内で一定として扱っており、未知数は要素間隙水圧と節点変位である。一方、後者のそれは変分原理に基づいており、未知数は節点間隙水圧と節点変位である。これらは現在でも圧密解析の2つの大きな流れになっており、“Christian 流”、“Sandhu 流”と呼称されている。また、荒井[24]は両者の解析手法の比較を行っており、Christian 流の方が Sandhu 流よりも安定した解が求められることを示している。しかし、Sandhu 流は間隙水圧も変位も同時に扱うことができ、理論的な統一性を持ち、任意の補間係数が選択できるなどプログラミング上の簡便さがある。

その後の飽和地盤における弾性圧密挙動に関する研究としては、横尾ら(1971)[25] や Ghaboussiら(1973)[26] によるものが見られ、非線型な構成則を用いたものとしては、Simpson(1973)[27]、太田ら(1975)[28]、Smallら(1975)[29]、Lewisら(1976)[30]、赤井ら(1978)[31]、Carterら(1979)[32]、柴田ら(1980)[33]、松井ら(1981)[34]、中井ら(1983)[35]など多数の研究がある。

一方、不飽和領域を含めた応力-浸透連成解析としては、Narashimhan[16] による積分差分法 (IFDM) を用いた方法がある。有限要素法を用いた方法としては、大西ら(1980)[36]、駒田ら(1982)[37]によって開発されたものがある。大西らは、不飽和部での有効応力を便宜上間隙圧係数が飽和度と同じと仮定することにより表わしているのに対し、駒田らは、不飽和部では有効応力は全応力と同じになると仮定している。

表5-3には、既往の応力-浸透連成解析の一覧を示している。

表 5 - 3 既往の応力-浸透流連成解析の一覧(22-37)

| 著者名            | 弾 性 | 非弾性 | 飽 和 | 不飽和 |
|----------------|-----|-----|-----|-----|
| Sandhuら '69    | ○   |     | ○   |     |
| Christianら '70 | ○   |     | ○   |     |
| 横尾ら '71        | ○   |     | ○   |     |
| Ghaboussiら '73 | ○   |     | ○   |     |
| Simpson '73    |     | ○   | ○   |     |
| 太田ら '75        |     | ○   | ○   |     |
| Smallら '75     |     | ○   | ○   |     |
| Lewisら '76     |     | ○   | ○   |     |
| 赤井ら '78        |     | ○   | ○   |     |
| Carterら '79    |     | ○   | ○   |     |
| 柴田ら '80        |     | ○   | ○   |     |
| 大西ら '80        | ○   |     | ○   | ○   |
| 松井ら '81        |     | ○   | ○   |     |
| 中川ら '82        | ○   |     | ○   | ○   |
| 中井ら '83        |     | ○   | ○   |     |

### 5. 1. 5 地下水挙動に関するシミュレーションの必要性和問題点

大深度地下空間の開発が始まると、地下水の挙動などに重大な影響を及ぼすことが予想される。したがって、開発を行う前に地下水流動に関するシミュレーション解析を行って、影響の度合いを予測しておく必要がある。

前述のように、定常状態におけるシミュレーション解析手法はある程度確立しており、解析を行うこと事態にはあまり問題はない。しかし、解析に必要な情報の密度や、得られた情報の精度となると、問題が生じてくる。地下水の予測モデルに用いられる地層の貯留係数を関東平野で実測したという話を聞いたことがない。貯留係数は、しばしば合わせるための係数として解析に用いられている。それに、第四紀前・中期に堆積した地層の実態把握（地質構造や層相の変化など地質学的情報も含む）が十分なされていない点にも問題がある。それに加え、基盤（岩盤）からの地下水流入や水みちを通る地下水の問題など未解明なものが多い。

予測精度を向上させるには、解析に必要な様々な情報の蓄積が必要であり、しかも情報の精度向上が必要不可欠となる。大深度地下空間の開発が始まる前に、集中的にこれらの調査・研究を行う必要がある。もちろん、現在の解析手法の改良や新たな解析手法の開発を進めていくことも重要である。

## 5. 2 地下水挙動予測の事例解析

### 5. 2. 1 事例解析の概要

大深度地下空間の利用が急速に進むことが予想される今日、その利用が適切に行われるためには、地盤沈下・地下水障害などに対する地盤環境保全が重要な課題となってくる。そこで、大深度地下空間の建設・利用に伴う地盤沈下・地下水障害を予測・評価する手法を確立するための一環として、その仮想モデルを設定し、それを対象にして地下水流動のシミュレーション解析を行って、大深度地下空間利用に伴う影響がどのような形で発生するかを検討した。

### 5. 2. 2 大深度地下空間と地盤の仮想モデル

図5-1, 2に、大深度地下空間を開発する際のイメージを示す。図5-1は、大深度地下空間が、スポット的に設置された構造物であり、地表から地下に縦に伸びた形状をしている。それに対し、図5-2に示す地下空間は、地下街や地下駐車場などの構造物であり、水平奥行方向に長く伸びた形状をしている。これらより、大深度地下空間のモデルは、縦長の構造物と奥行方向に長く伸びた構造物との2つのタイプを考えることにした。これら2つのタイプに対し、解析ではそれぞれ軸対称回転体モデルと鉛直断面モデルに設定した。両モデルとも地下空間の外形寸法は深さ100m、幅50mのものを考え、壁厚は側壁を4m、底版を6mとした〔図5-3参照〕。

一方、地盤モデルは、東京低地の典型的な地盤を想定したものであり、上位より緩い砂よりなる沖積砂層(①層)、軟弱な沖積粘土層(②層)および砂泥互層(③層)、砂礫層(④層)、砂質土と粘性土より構成される洪積層(⑤, ⑥, ⑦層)、硬質粘性土より構成される不透水基盤(⑧層)からなる仮想の地盤モデルを設定した〔図5-3参照〕。表5-4にその地盤条件を示す。なお、このモデルは東京低地の典型的な地盤を解析のために想定したものであるが、実際にはこのような地層が一様にしかも広範囲に連続しているところはない。また、各地層の層厚、透水係数、地下水の自然水頭などの諸数値は、過去の資料を参考にして推定したものであるが、各地層を代表する数値とは言えない。

### 5. 2. 3 解析方法と条件

#### (1) 解析条件

表5-5に、大深度地下空間の利用に伴う地下水流動シミュレーション解析の解析ケースと条件を示す。ケース0~2は、鉛直断面モデルで、地下空間は断面の奥行方向に無限に続く構造物を想定したものであり、ケース3~5は軸対称回転体モデルである。

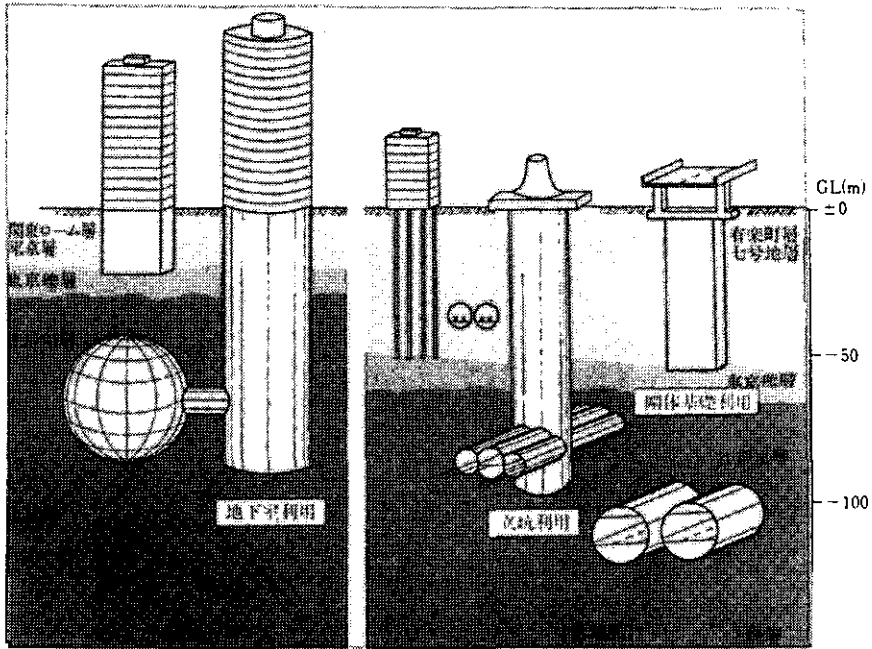


図 5 - 1 軸対称回転体に近い大深度地下空間利用想定図

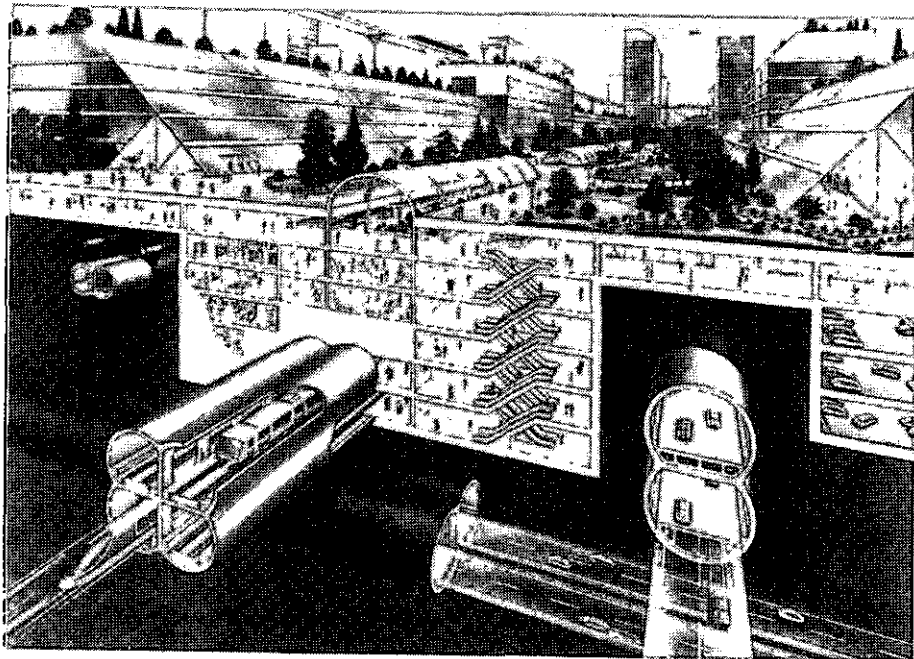


図 5 - 2 鉛直 2 次元断面に近い大深度地下空間利用想定図

図 5 - 3 大深度地下空間と地盤の仮想モデル

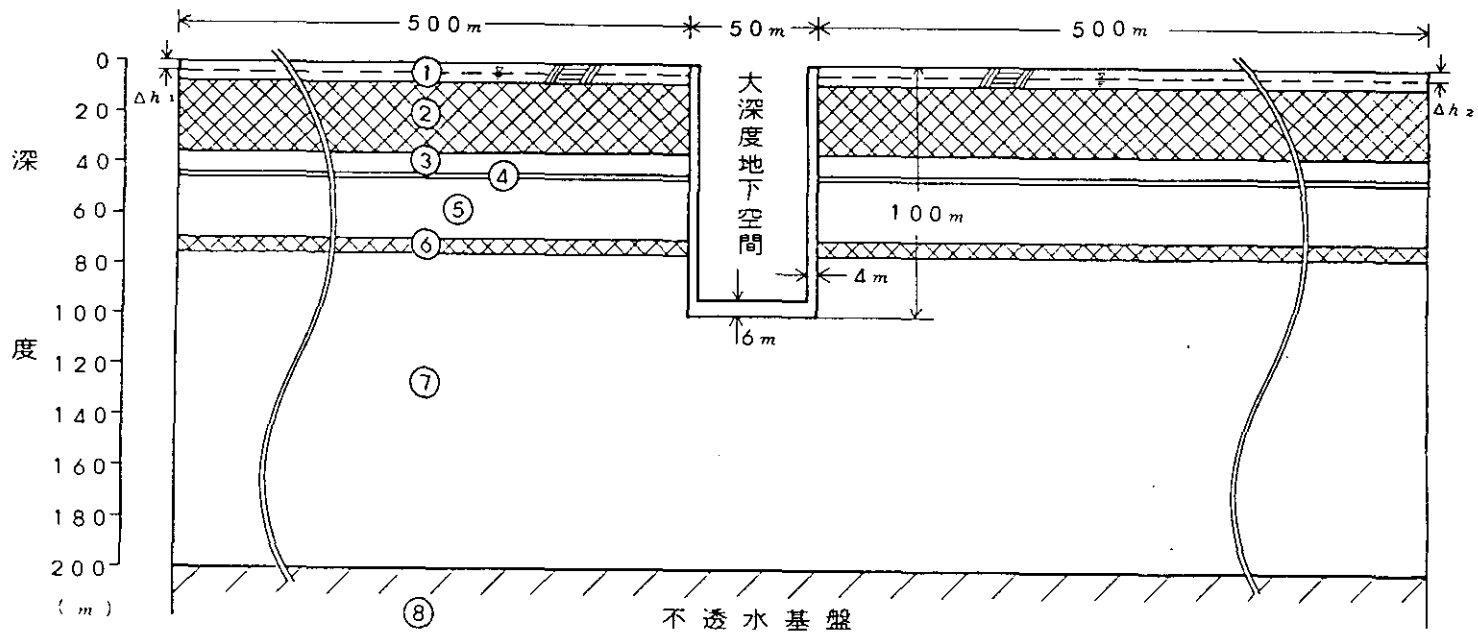


表 5 - 4 地盤条件

| 地層<br>番号 | 地 層    | 深 度<br>(m) | 透水係数<br>(cm/s)       | 地下水の水頭<br>(GL.m) |
|----------|--------|------------|----------------------|------------------|
| ①        | 砂質土層   | 0 ~ 9      | $1.0 \times 10^{-4}$ | -2               |
| ②        | 粘性土層   | 9 ~ 36     | $1.0 \times 10^{-7}$ | -2 ~ -14.6       |
| ③        | 砂泥互層   | 36 ~ 44    | $1.0 \times 10^{-6}$ | -14.6 ~ -15      |
| ④        | 砂 礫 層  | 44 ~ 46    | $1.0 \times 10^{-2}$ | -15              |
| ⑤        | 砂質土層   | 46 ~ 70    | $1.0 \times 10^{-3}$ | -15              |
| ⑥        | 粘性土層   | 70 ~ 75    | $1.0 \times 10^{-6}$ | -15              |
| ⑦        | 砂質土層   | 75 ~ 200   | $1.0 \times 10^{-3}$ | -15              |
| ⑧        | 硬質粘性土層 | 200 ~      | $1.0 \times 10^{-6}$ | -15              |

表 5 - 5 解析ケースと条件

| モデル               | 自然地下水 (m)    |              | 解析<br>ケース | 想定状況 | 壁体の透水係数<br>(cm/s)    |
|-------------------|--------------|--------------|-----------|------|----------------------|
|                   | $\Delta h_1$ | $\Delta h_2$ |           |      |                      |
| 鉛 直<br>断 面<br>モデル | 2.0          | 3.05         | 0         | A    | -                    |
|                   | 2.0          | 3.05         | 1         | B    | $1.0 \times 10^{-6}$ |
|                   | 2.0          | 3.05         | 2         | C    | $1.0 \times 10^{-4}$ |
| 軸対称<br>回転体<br>モデル | 2.0          | 2.0          | 3         | A    | -                    |
|                   | 2.0          | 2.0          | 4         | B    | $1.0 \times 10^{-6}$ |
|                   | 2.0          | 2.0          | 5         | C    | $1.0 \times 10^{-4}$ |

想定状況 A - 壁体は完全不透水  
 B - コンクリート壁のひびわれからの漏水  
 C - 壁体への水圧を低減するため、壁体あるいはその中に排水機構を持たせる場合



地下水の自然水頭は、①層で地下 2 m、④層以深で地下 15mとし、その間の②層および③層は、①層から④層まで鉛直下向きの定常浸透状態であるとし、両層で流量が連続するという条件で地下水の自然水頭分布を設定した。

なお、断面モデルのケース 0～2 では、動水勾配 1/1000 で左から右への水平方向の自然流があり、軸対称モデルのケース 3～5 は、水平方向の自然流はないと仮定した。このモデルは解析上便宜的に想定したもので、実際にはこのような地層が一様に広範囲に連続していることはない。

また、各モデルにおけるパラメータは壁体の透水係数であり、その想定状況は表 5-5 に示した通りである。

## (2) 解析方法

解析方法としては、このような問題に最も多用され、適用性の広い有限要素法を用いることとした。解析対象は自由水面を有する地下水流であるので飽和-不飽和浸透流解析法[40]を採用した。

飽和-不飽和浸透流の支配方程式は、全水頭を用いて次のように表わされる。

$$\beta \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \frac{\partial h}{\partial z} \right] \quad \text{-----} \textcircled{8}$$

ここに、h：全水頭 (=  $\psi + z$ )

$\psi$ ：圧力水頭

x, z：座標

t：時間

$\beta$ ：貯留係数 (=  $C(\psi) + \alpha S_s$ )

$C(\psi)$ ：比水分容量 (圧力水頭の増分に対する体積含水率の変化の割合)

$S_s$ ：比貯留係数 (圧力水頭の増分に対する間隙率の変化の割合)

$\alpha$ ：飽和・不飽和パラメータ (= 1：不飽和状態, = 0：飽和状態)

k：透水係数

式⑧を解くための初期条件および境界条件は、次のように与えられる。

### a) 初期条件

$$h(x, z, 0) = h_0(x, z) \quad \text{-----} \textcircled{9}$$

### b) 境界条件

#### 1 水頭が既知の境界

$$h(x, z, t) = h_b(x, z, t) \quad \text{-----} \textcircled{10}$$

#### 2 流量が既知の境界

$$v = -v_b(x, z, t) \quad \text{-----} \textcircled{11}$$

ここに、 $h_0$  は初期水頭、 $h_b$  は境界水頭、 $v$  は境界面に垂直な外向きの流速、

$v_b$  は境界面に流入する流速である。なお、本解析は定常浸透流を対象にするので、

飽和－不飽和浸透流の基本式は、式⑧で水頭の時間微分項は0になる。ただし、ここでの地下水流動のシミュレーション計算には、プログラム‘SIGNAS’を使用した。

### (3) 有限要素モデル

図5-4および図5-5に、それぞれ鉛直断面モデルと軸対称回転体モデルの有限要素モデルを示す。鉛直断面モデルと軸対称回転体モデルの節点数と要素数は、それぞれ1358、1264および686、632である。

境界条件は、鉛直断面モデルの場合には両側面を水頭固定境界、底面を不透水境界、地下空間を浸出面境界とし、軸対称回転体モデルの場合には、側面を水頭固定境界、対称軸上および底面を不透水境界、地下空間面を浸出面境界とした。

なお、水頭固定境界は以下の理由から、図5-6に示すように設定した。すなわち、地下水の自然水位は、①層を地下2m、④層以深を地下15mとし、その間の地層を地下2mから地下15mまで連続して変化することにした。けれども、軸対称回転体モデルで地下空間の壁体が不透水の場合には、地下水は①層の右境界から流入し左向きに流れ、難透水性の②層・③層で下向きに流れ、④層以深で右境界に向かう右向きの流れになるいわば循環流となるため、初期状態の地下水流が不自然な流れになり、大深度地下空間による影響が不明確となる。そこで、大深度地下空間による地下水流の解析では、初期水頭を全層で地下2mとして、大深度地下空間による変化量を計算し、これを当初設定した自然水位から差し引いて大深度地下空間による影響をみるという方法で検討した。

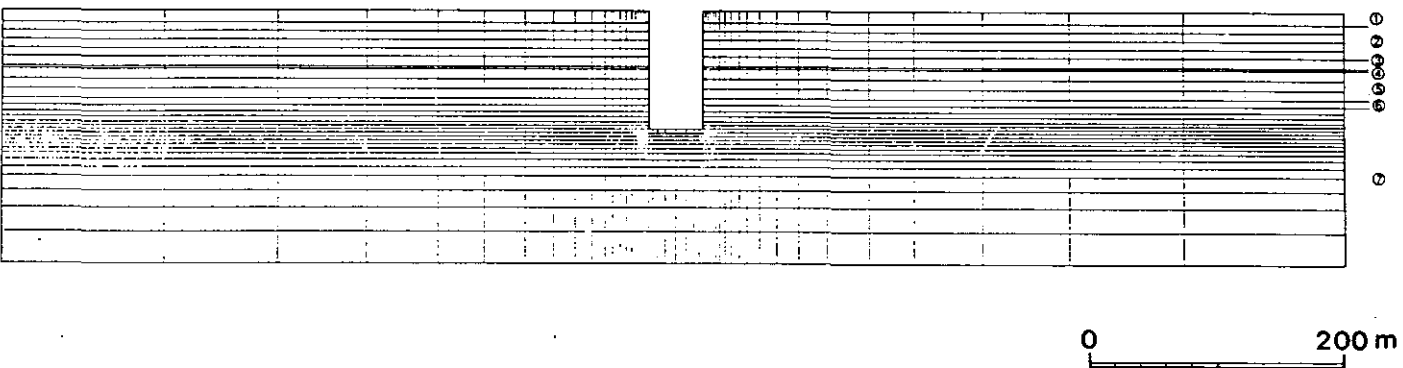
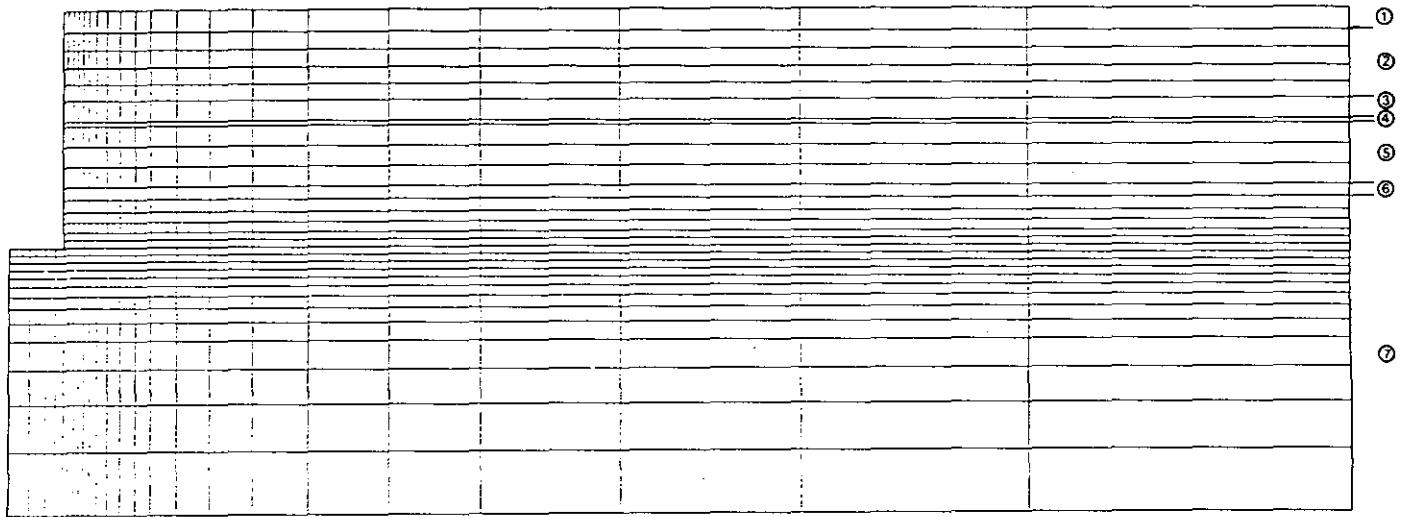


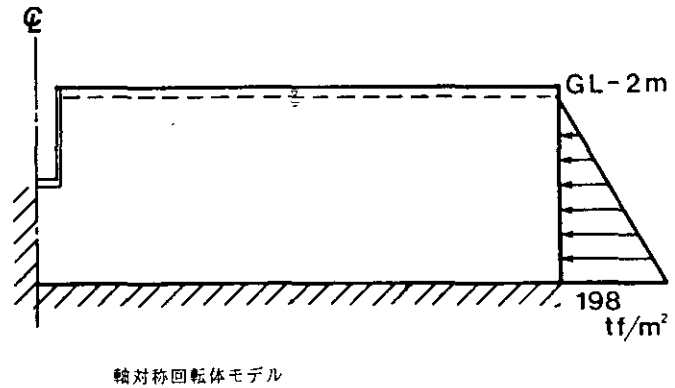
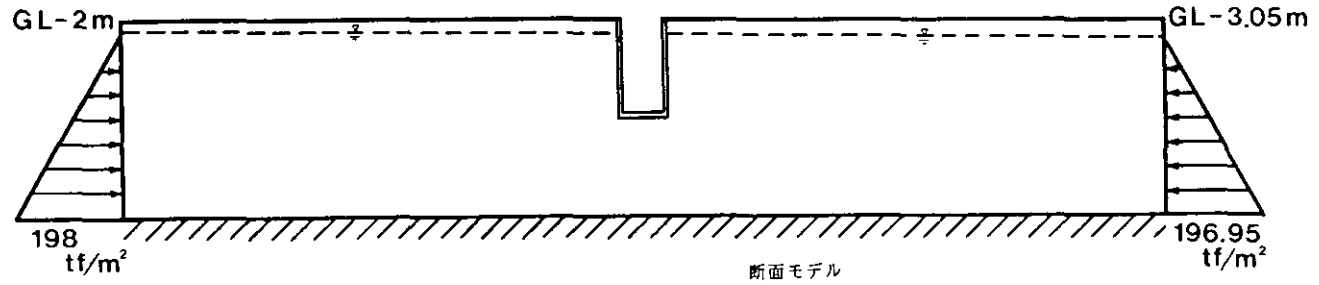
図 5 - 4 要素分割図 (船直断面モデル)



0 100 m

图 5-5 要素分割图 (轴对称回转体モデル)

図 5-6 水頭固定境界の条件



## 5. 2. 4 解析結果と考察

### (1) 流速ベクトル

図5-7～11に、有限要素解析により求められた流速ベクトルを示す。流速ベクトルは、各要素で計算された流速（ダルシー流速）をベクトル図示したものであり、微小な流速は図示を省いている。ただし、これらは、初期水頭が全層で、地下2mである場合からの変化を表わしている。なお、ケース3は、水頭が変化しないので計算は省略した。

断面モデルにおいて壁体が不透水の場合（ケース0）、大深度地下空間は左から右への地下水の流れに対して障害物になるので、地下水は大深度地下空間の下部を回り込む流れになっている〔図5-7参照〕。このため、大深度地下空間の外周に地下水の浸透流速が最大になり、水みちができやすくなり、そのために壁体と地盤の間に隙間が生じる可能性がある。これに対して、壁体からの漏水を考慮したケース1および2では、大深度地下空間は集水井の役割を果たし、左右の境界から大深度地下空間に地下水が流れ込むかっこうになっている〔図5-8, 9参照〕。このように、大深度地下空間の壁体の透水性は、地下水の低下に大きく影響することが分かる。

軸対称回転体モデル（ケース4, 5）においても、断面モデルのケース1および2と同様に、壁体からの漏水による水位低下で左側の境界から大深度地下空間に向かう地下水の流れが生じており、流速は大深度地下空間近傍で大きくなる傾向にある〔図5-10, 11参照〕。

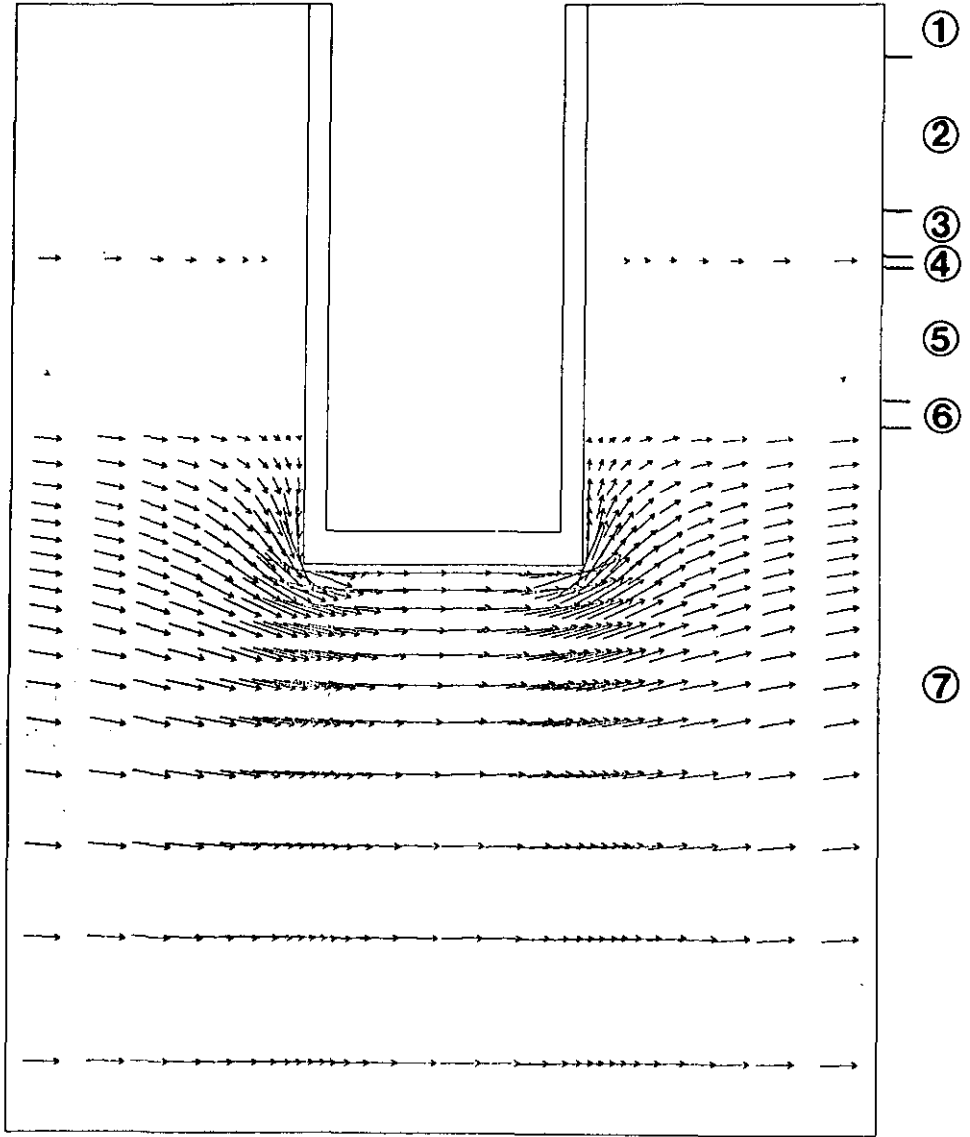


図 5 - 7 流速ベクトル (ケース 0)

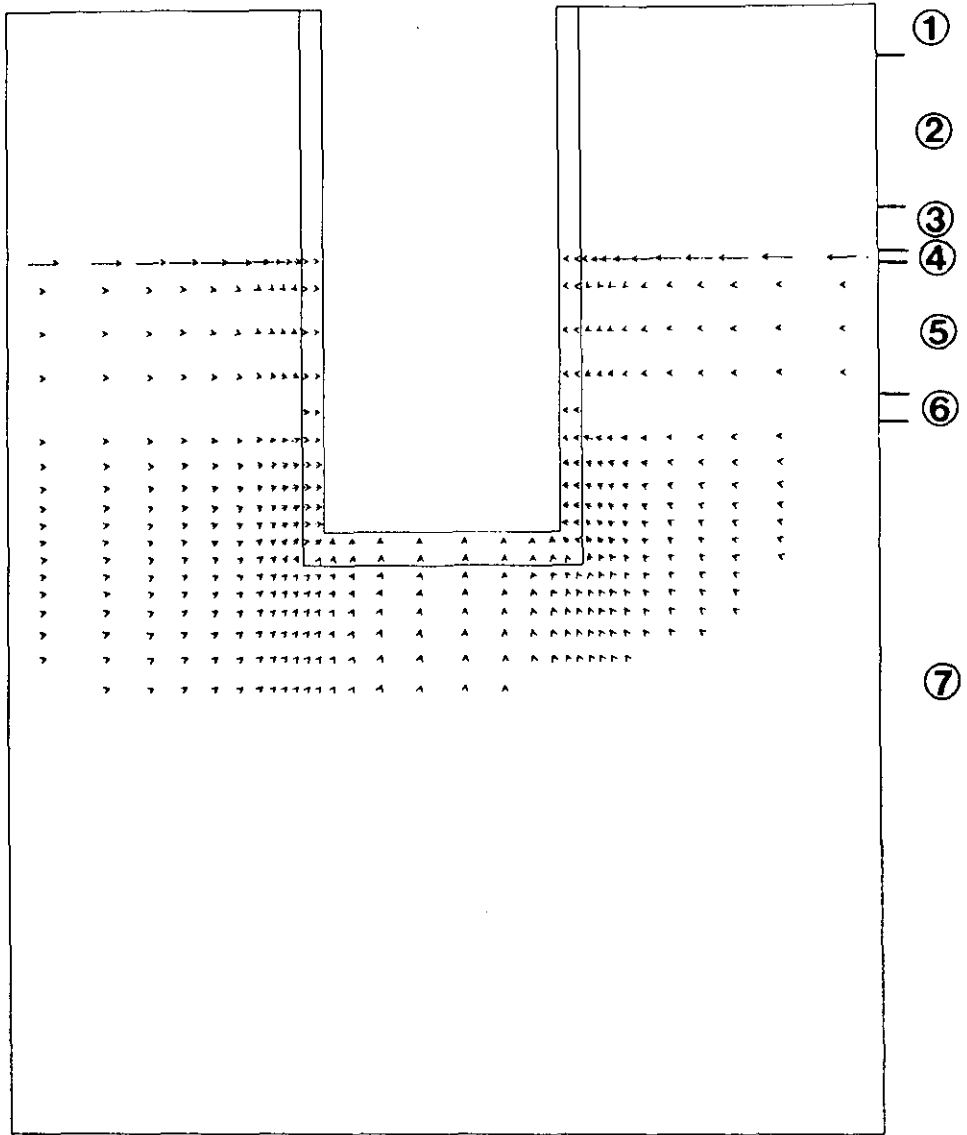
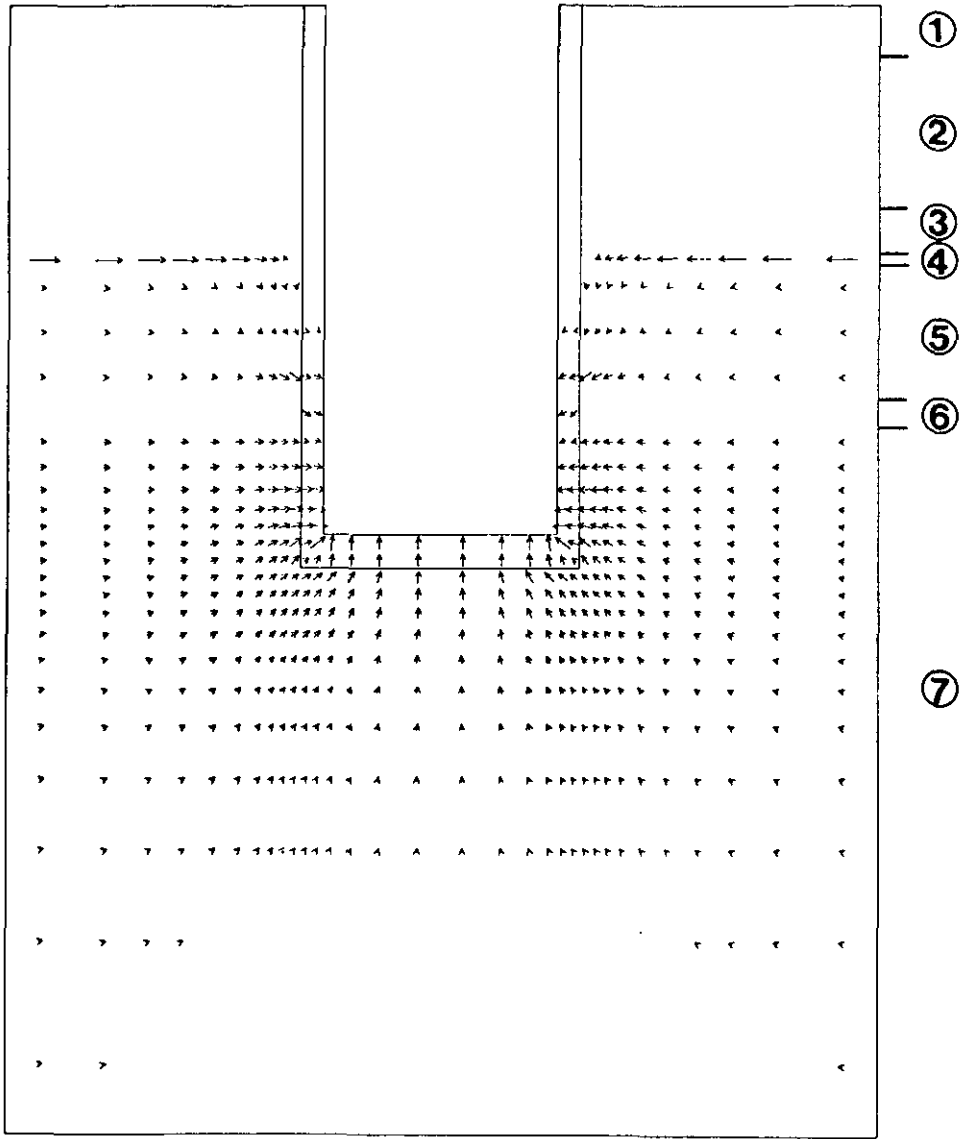


図 5-8 流速ベクトル (ケース 1)





0 50 m

図 5 - 9 流速ベクトル (ケース 2)

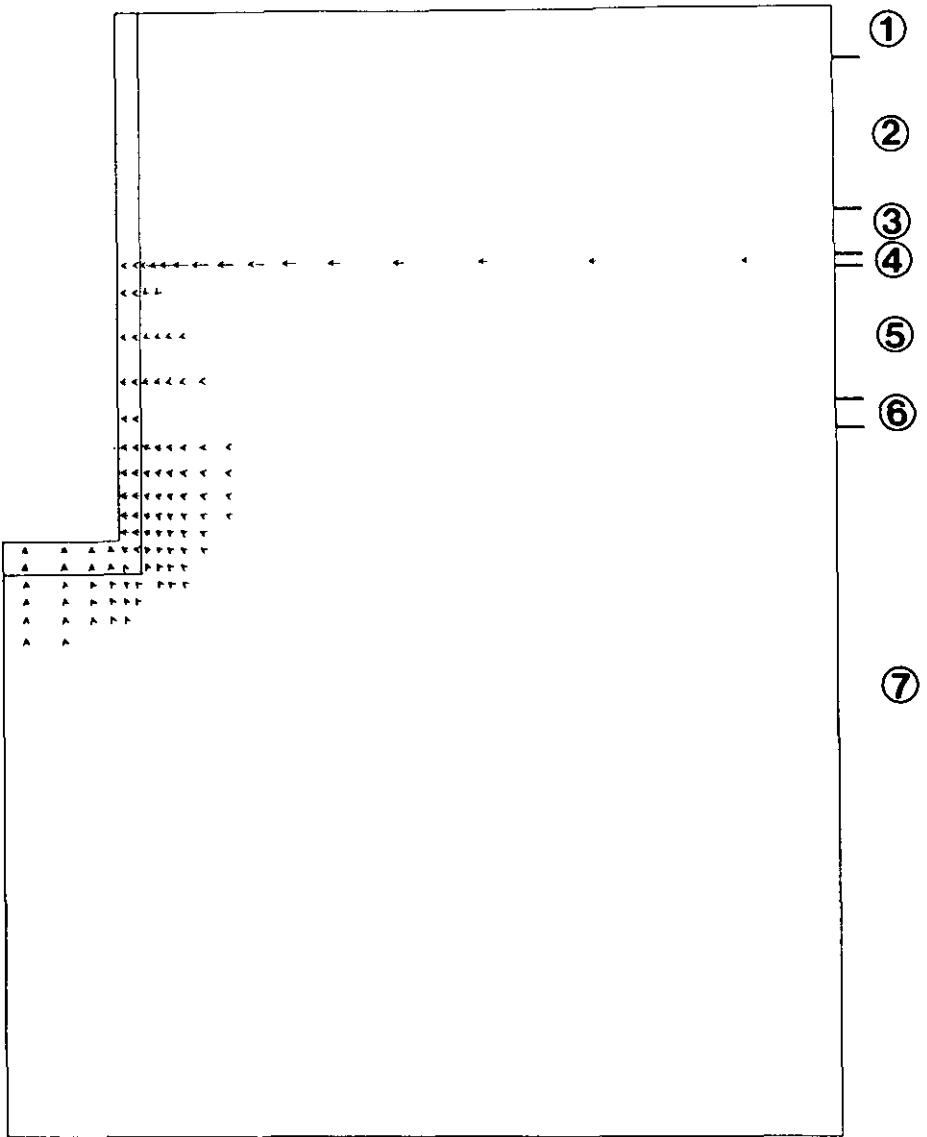
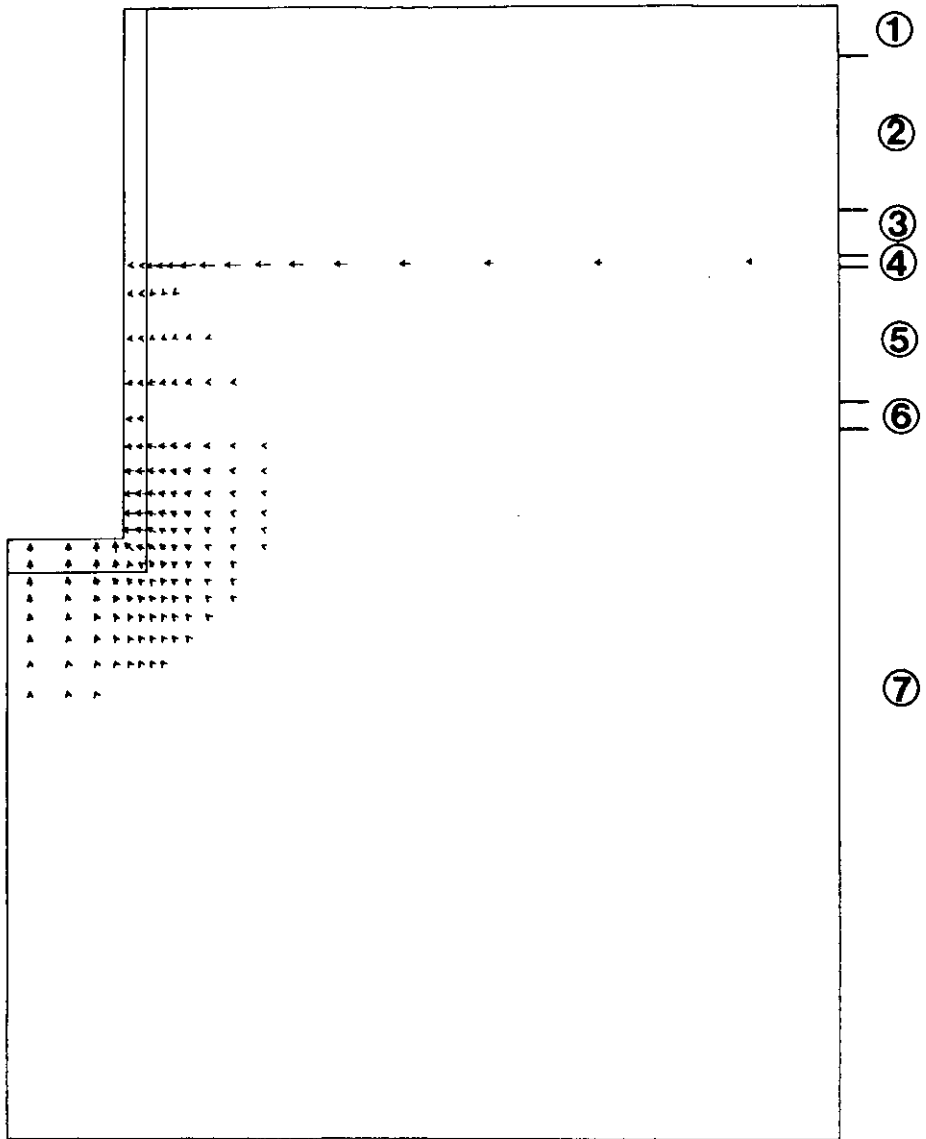


図 5 - 1 0 流速ベクトル ( ケース 4 )



0 50m

図 5 - 1 1 流速ベクトル (ケース 5)

## (2) 圧力水頭コンター

図5-12～16に、圧力水頭のコンターを示す。断面モデルで壁体が不透水の場合(ケース0)は、水位低下はほとんど生じないが、大深度地下空間の遮断効果により左側と右側の地下水位に若干の差が生じていることが分かる[図5-12参照]。しかし、大深度地下空間の壁体が透水性を有するケース1では、地下水位の低下は余り大きくならないものの、②層や③層の難透水層で圧力水頭が低下することが分かる[図5-13参照]。大深度地下空間の壁体の透水性がさらに大きくなるケース2では、地下水位は⑦層まで低下し、圧力水頭の低下が④層よりも下位の地層にまで及ぶことが分かる[図5-14参照]。このことから、地下水位の低下が④層の上位で留まるか、あるいは下位の地層にまで及ぶかは、地下空間の壁体の透水性に支配されると言える。また、圧力水頭の低下は難透水層で著しく、顕著な地盤沈下が生じることを示唆している。

軸対称回転体モデル(ケース4, 5)についても、鉛直断面モデルと同様な傾向を示すことが分かる[図5-15, 16参照]。ここで、壁体の透水係数が同じ鉛直断面モデル(ケース2)と軸対称回転体モデル(ケース5)を比較すると、軸対称回転体モデルは、鉛直断面モデルほど水位低下が生じないことが分かる。これは、軸対称回転体モデルでは、大深度地下空間が直径50mの掘り抜き井戸として地下水が円周方向から供給されるのに対し、鉛直断面モデルでは大深度地下空間が溝状になるため、地下水頭がより低下することによるものである。

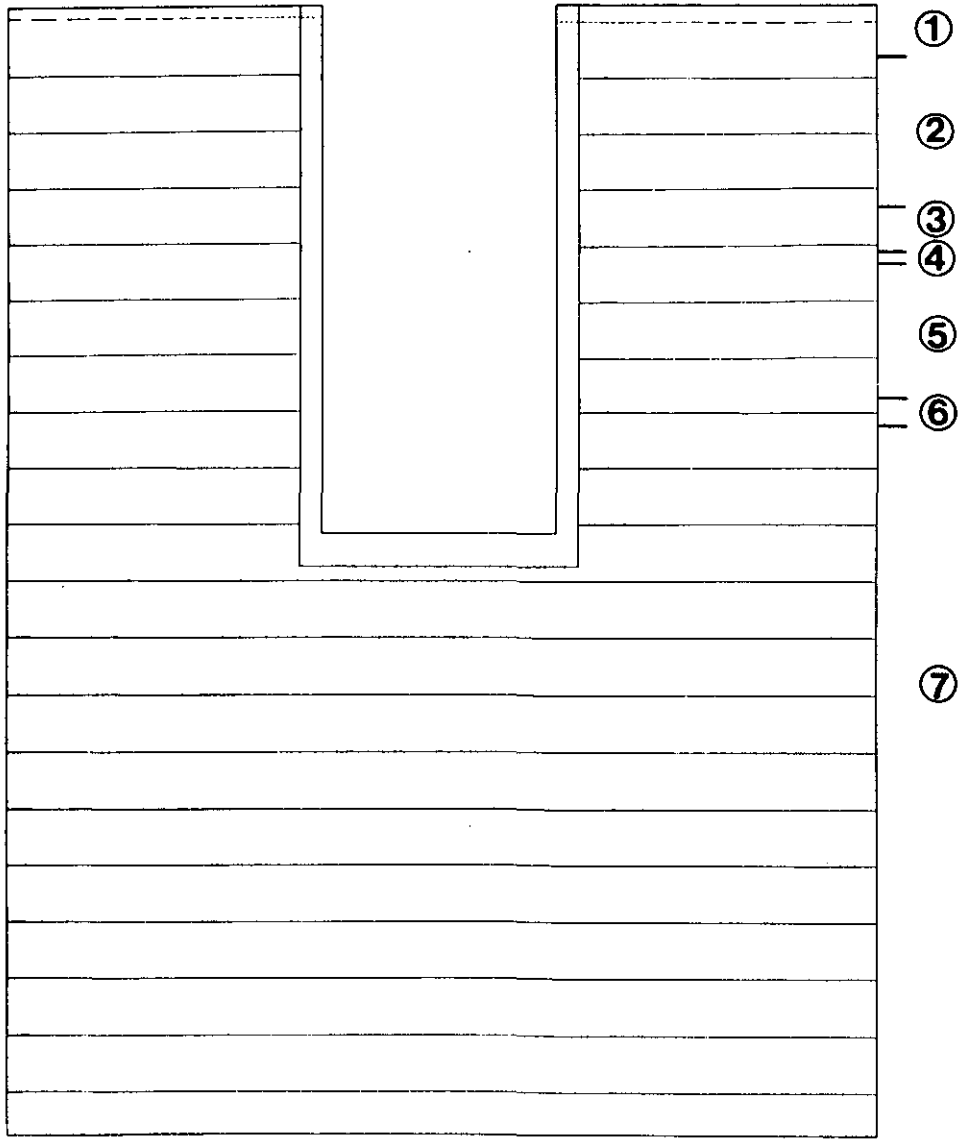


図 5 - 1 2 圧力水頭コンター (ケース 0)

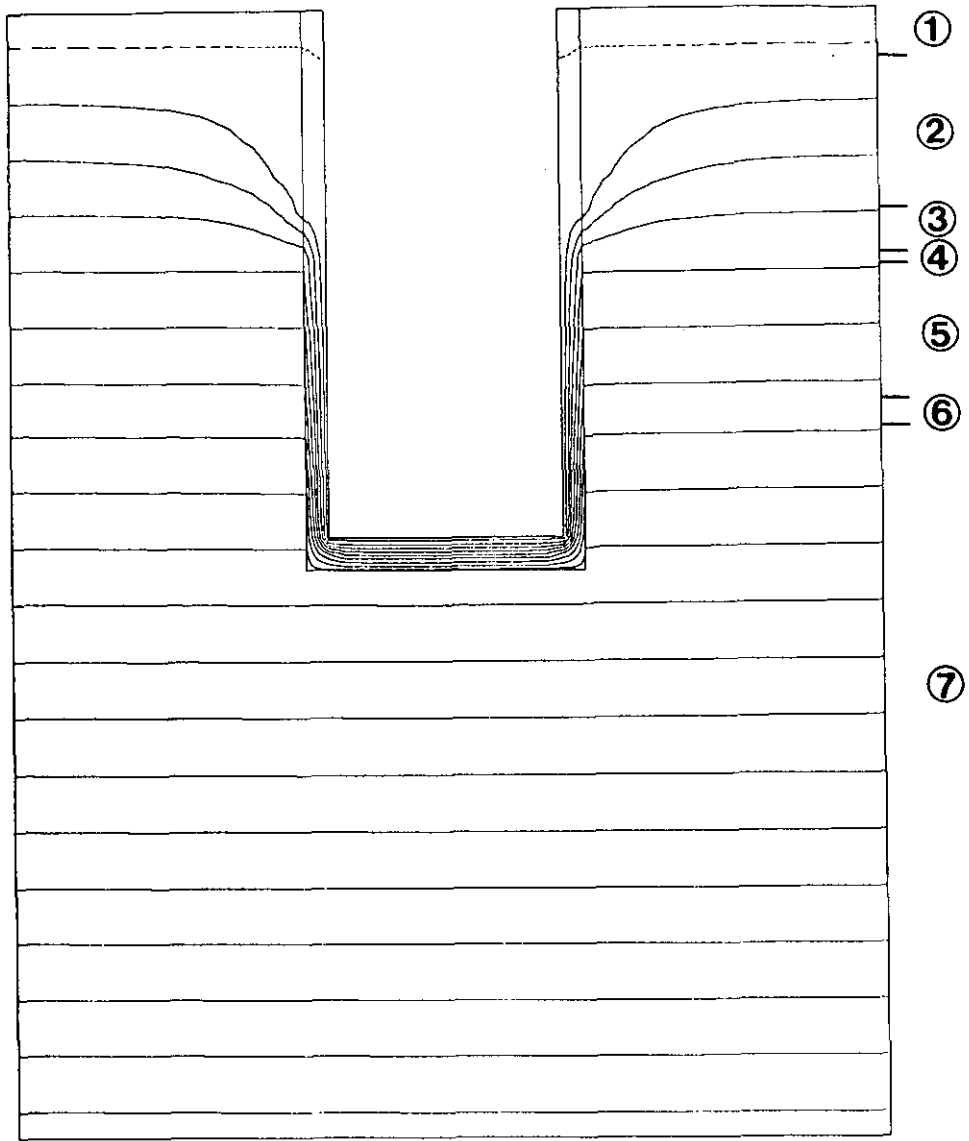
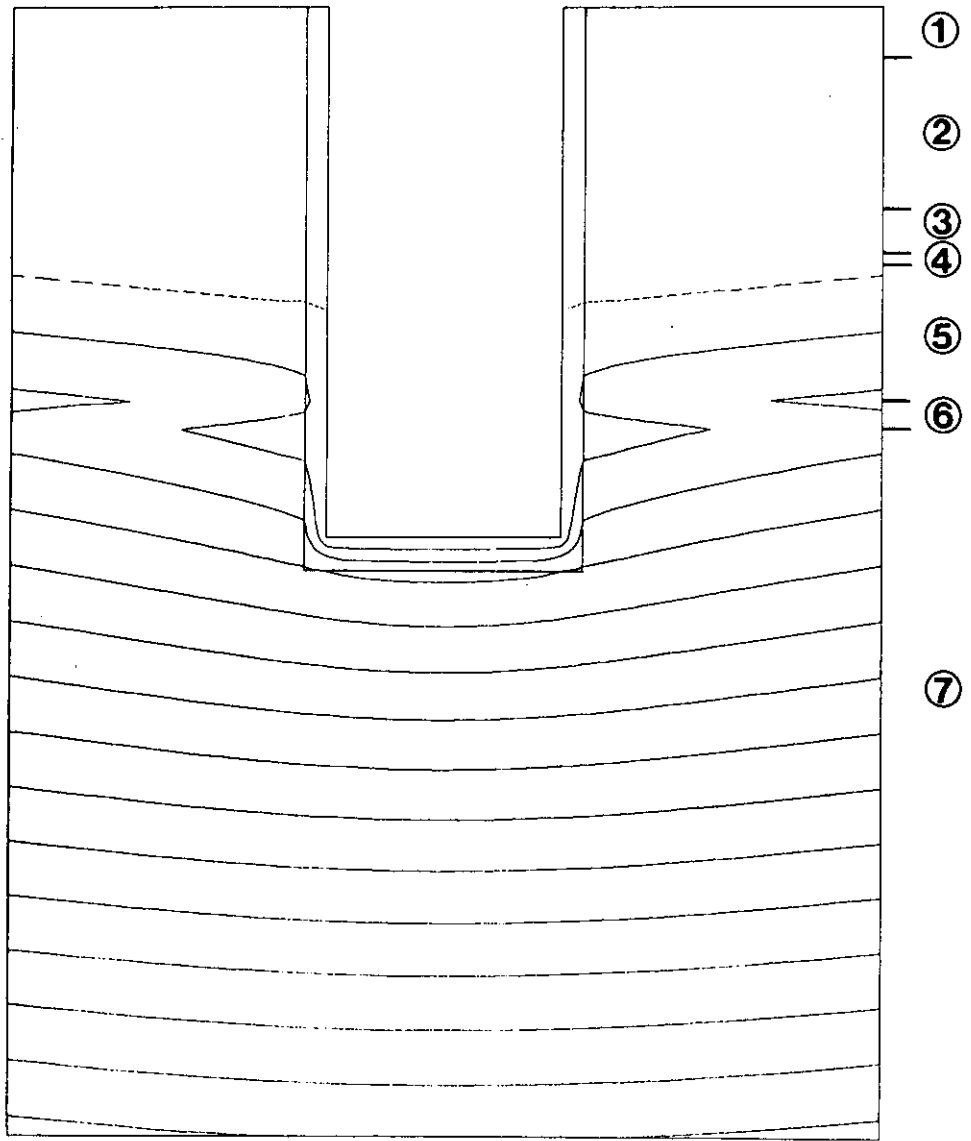
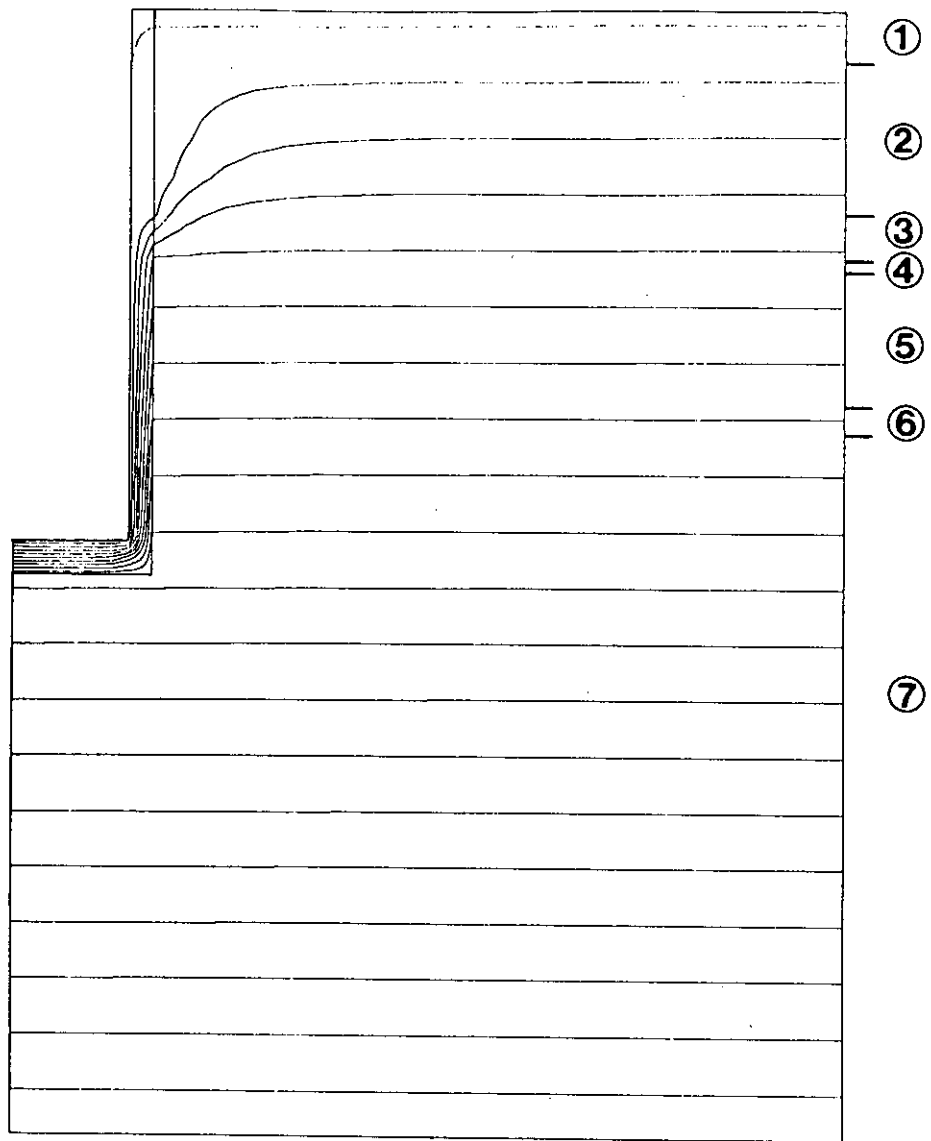


図 5 - 1 3 圧力水頭コンター (ケース 1)



0 50m

図 5 - 1 4 圧力水頭コンター (ケース 2)



0 50m

図 5 - 1 5 圧力水頭コンター (ケース 4)



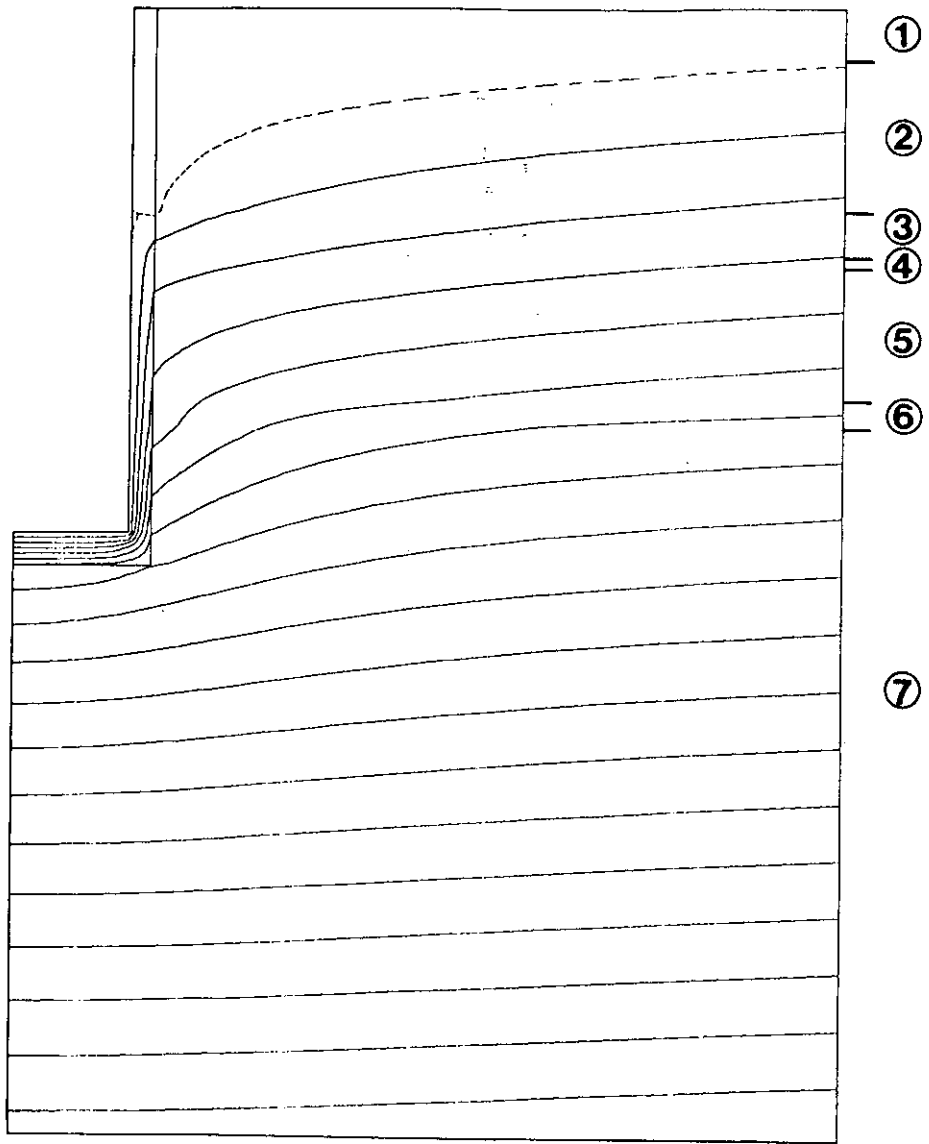


図 5 - 1 6 圧力水頭コンター (ケース 5)

### (3) 圧力水頭の低下量

図5-17～19に、大深度地下空間の壁面における圧力水頭の低下量の分布を示す。ただし、圧力水頭の低下後の地下水面より下方の分布のみ図示している。

断面モデルのケース0は、上流側（図の左側）では圧力水頭が大きくなるのに対し、下流側（図の右側）では圧力水頭が小さくなるのが分かる。しかし、圧力水頭の変化量は微小である。これに対して、壁体に透水性があると、壁体からの漏水により圧力水頭が大きく低下し、壁体の透水性によって低下域の分布も著しく変化することが分かる。軸対称回転体モデルのケース4、5でも同様の傾向を示すが、断面モデルに比べると小さいことが分かる。

圧力水頭の低下は、大深度地下空間に対しては外力が小さくなることを意味し、大深度地下空間の構造物としては壁厚を小さくできるなどの有利さはあるが、地盤環境の点からは、圧力水頭の低下は地盤内の有効応力の増大を意味し、地盤沈下の直接的原因となるので、壁体からの漏水は防がなければならない。したがって、大深度地下空間の壁体の透水性は、重要な設計ファクターとなる。

図5-20～21に、本解析から得られた地下水位の断面図を示したものである。図の左側が地下壁との境界であり、右側が解析上の境界である。これらの図によると、地下水位が低下する範囲は、解析境界付近まで及んでおり、地下水環境に及ぼす範囲は、かなり広範囲に及ぶものと思われる。

本解析モデルでは、大深度地下空間の両側500mを解析範囲にとり、境界条件を設定したが、この範囲では明らかに不十分であり、地下水位低下の影響範囲はかなり遠方まで及ぶものと考えられる。恐らく、解析範囲は両側5km程度とる必要があるように思える。

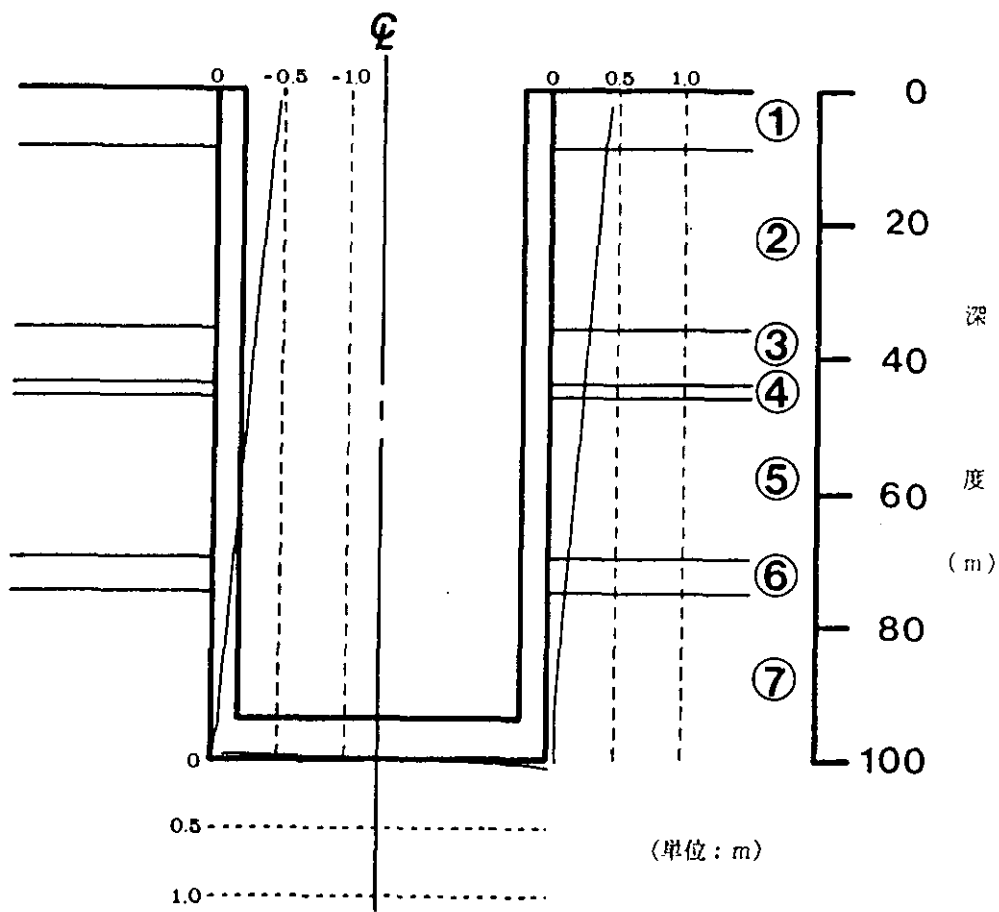


図 5-17 圧力水頭の低下量 (ケース 0)

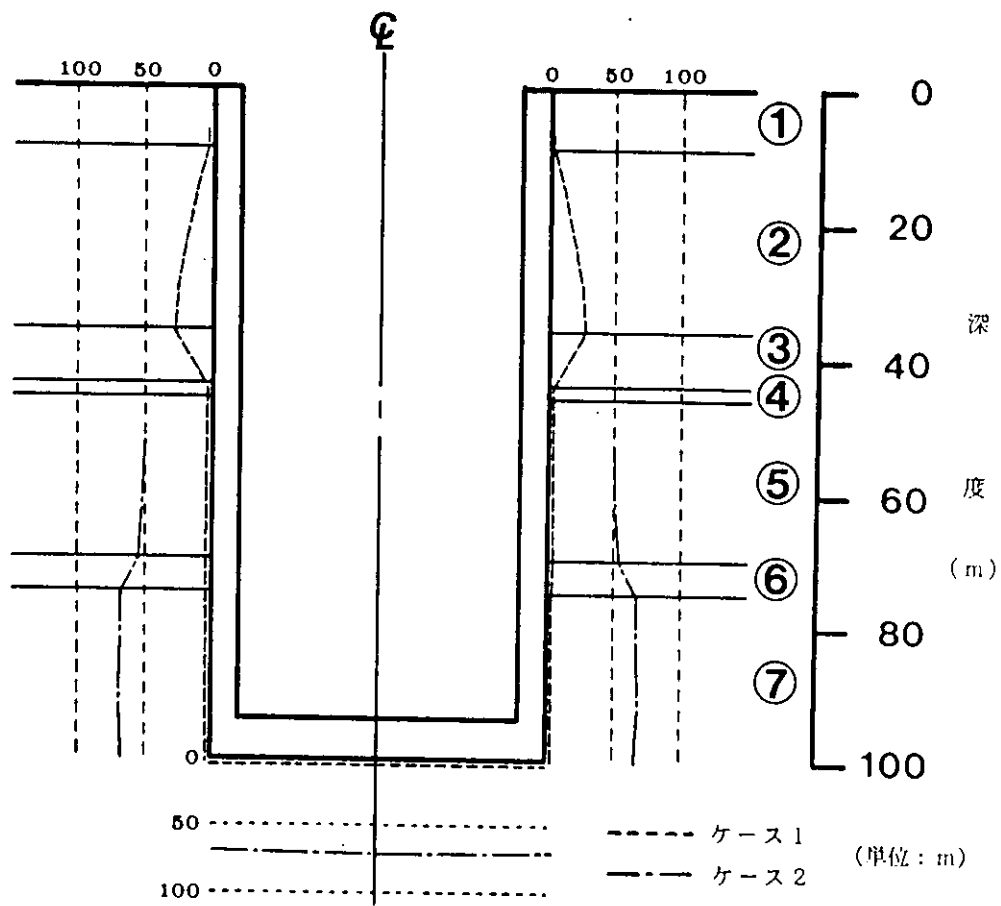


図 5 - 1 8 圧力水頭の低下量 (ケース 1, 2)

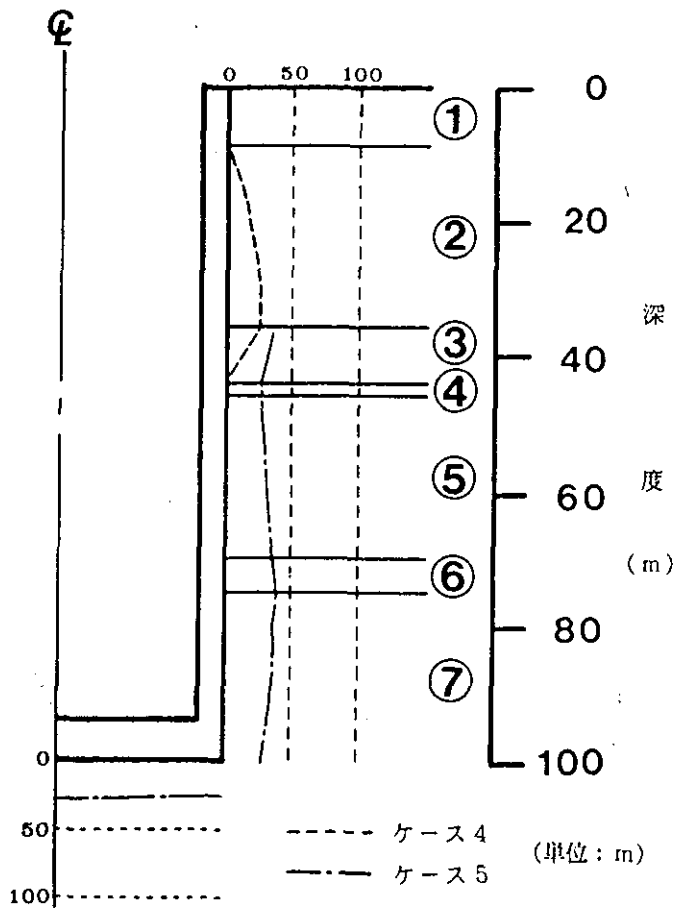


図 5 - 1 9 圧力水頭の低下量 (ケース 4, 5)

図 5-20 鉛直断面モデルにおける地下水位断面図

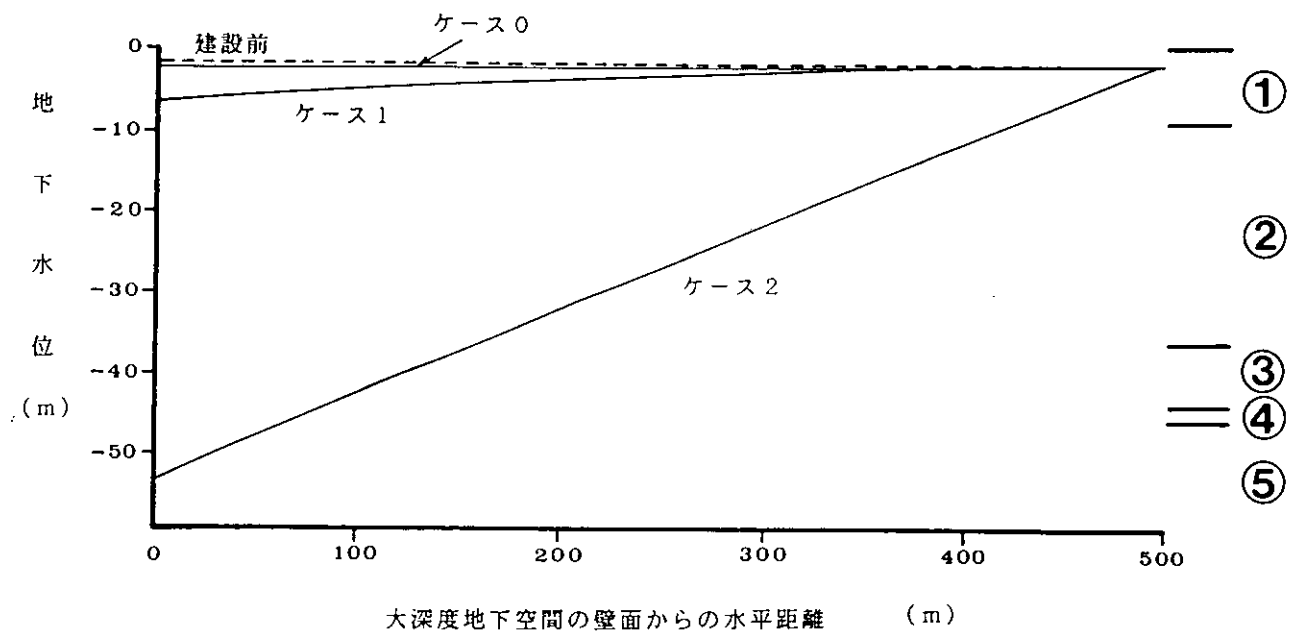
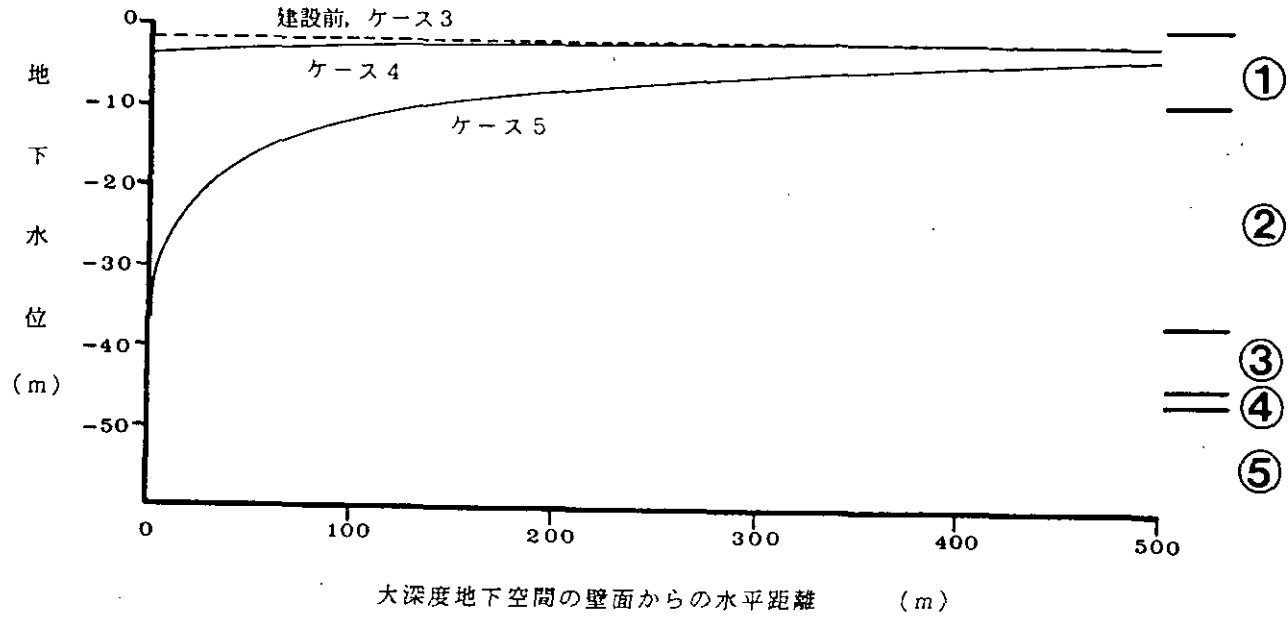


図 5-21 軸対称回転体モデルにおける地下水位断面図



#### (4) 壁体からの漏水量

図5-22～25に、大深度地下空間の壁面における漏水量分布を示す。ただし、漏水量は単位面積当たりの漏水量である。これより、漏水量分布は地下水低下後の地下水面から深度方向に徐々に大きくなる傾向を示している。これは、大深度地下空間の壁面における圧力分布に対応している。また、漏水量は大深度地下空間の壁体の透水性に依存して、壁体の透水性が大きくなれば、漏水量も大きくなることが分かる。壁体の透水性が同じ断面モデルと軸対称回転体モデルを比較すると、漏水量は軸対称回転体モデルの方が大きいことが分かる。これは、大深度地下空間の壁面における圧力水頭が、軸対称回転体モデルでは断面モデルほど変化しないことによる。



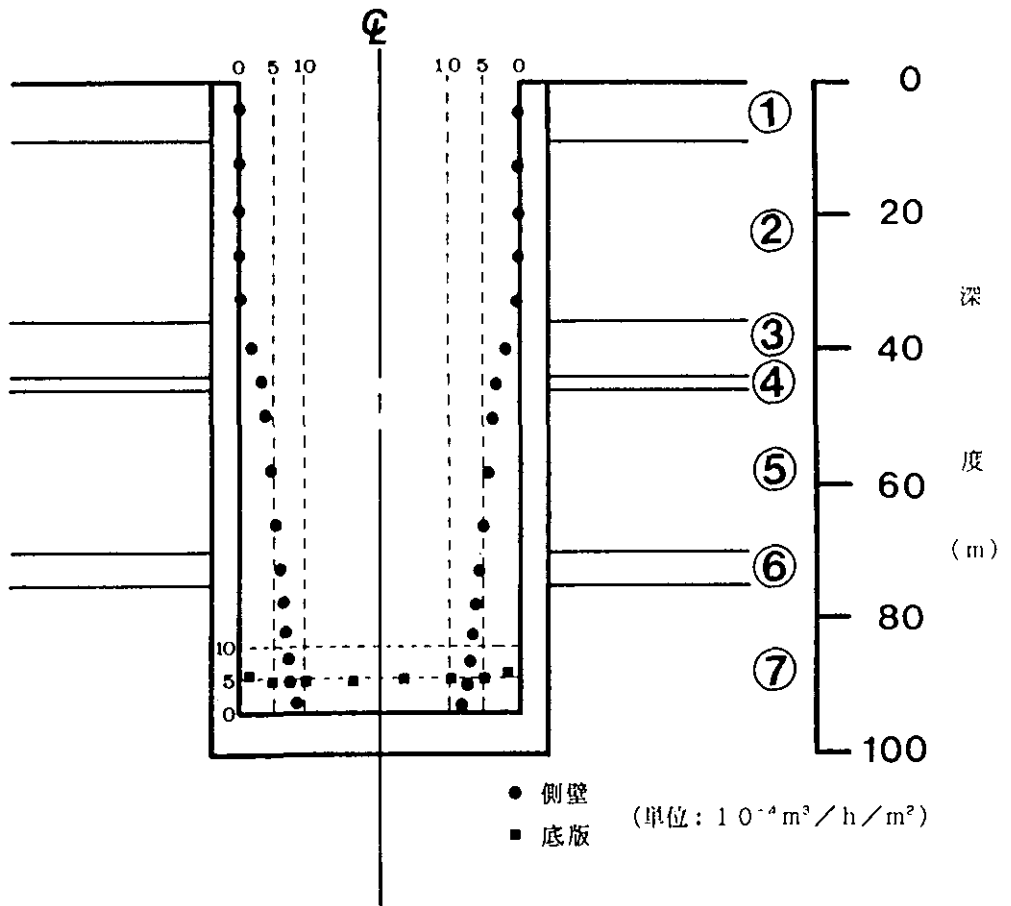


図 5 - 2 2 単位面積当たりの漏水量の分布 (ケース 1)

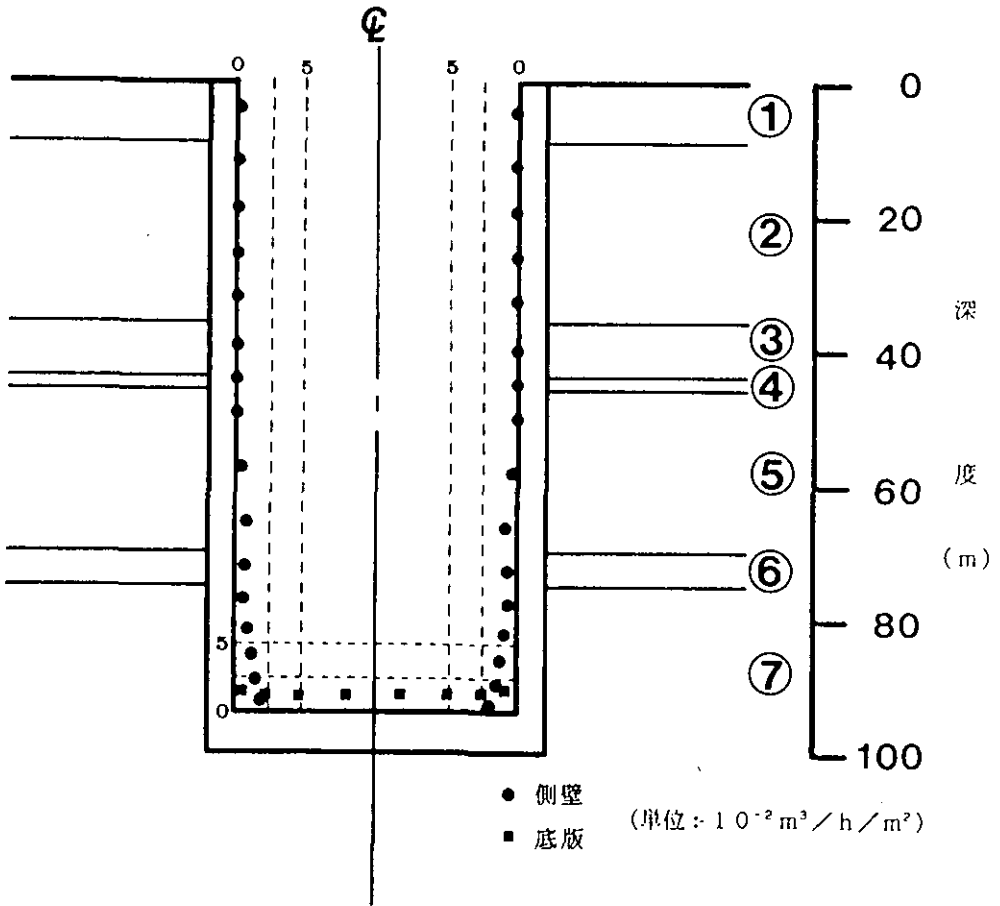


図5-23 単位面積当たりの漏水量の分布 (ケース2)

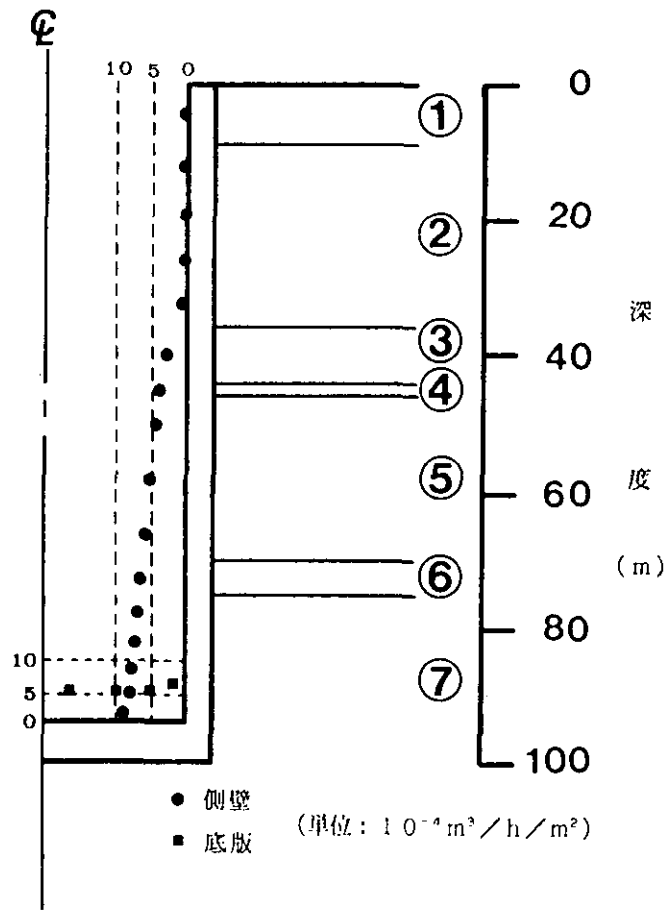


図 5 - 2 4 単位面積当たりの漏水量の分布 (ケース 4)

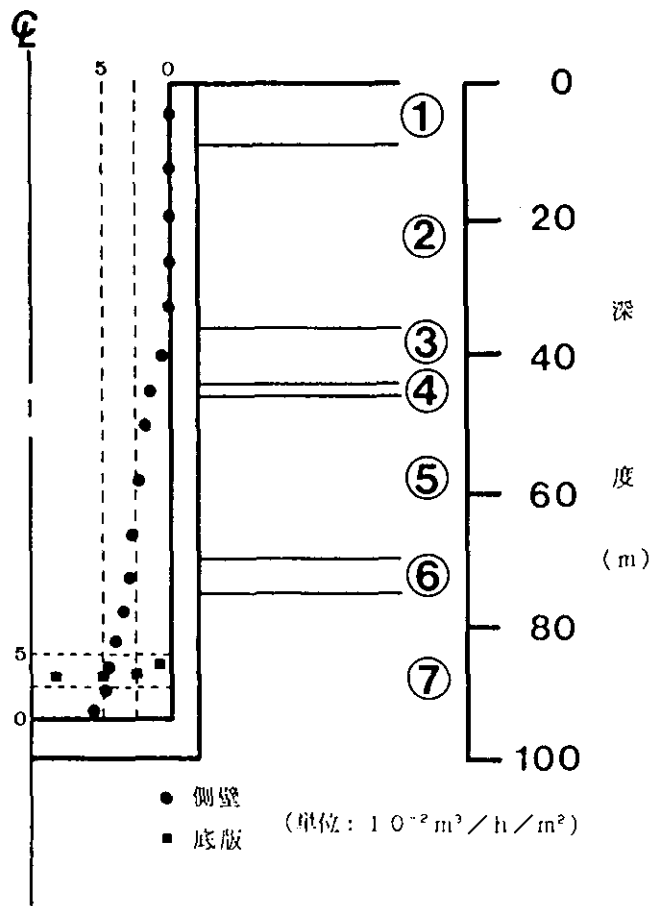


図 5 - 2 5 単位面積当たりの漏水量の分布 (ケース 5)

解析結果を表5-6に、解析条件、代表的な地層における圧力水頭の低下量ならびに単位奥行き長さ当たりの漏水量として示したものである。

この表によると、壁体が完全不透水であれば圧力水頭の低下量は極く僅かであるが、透水係数  $1 \times 10^{-9}$  cm/s では、両モデルとも難透水性の②層で圧力水頭が約 20m も低下し、透水係数  $1 \times 10^{-4}$  cm/s では、鉛直断面モデルと軸対称回転体モデルでそれぞれ約 61m、38m もの極めて大きな低下量が③層で生じている。圧力水頭の低下は、地盤の応力条件からは有効応力の増大につながり地盤沈下が生じるので、大深度地下空間の壁体に用いる材料の透水性をできる限り悪くすることが重要となる。

また、壁体の底版および側壁を通して漏出してくる漏水量を奥行き 1m 当たりでみると、壁体の透水係数  $1 \times 10^{-9}$  cm/s の場合は、両モデルとも約  $2 \text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$  であるが、透水係数  $1 \times 10^{-4}$  cm/s の場合は、両モデルに大きな開きが生じ、鉛直断面モデルで、約  $34 \text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$ 、軸対称回転体モデルで約  $106 \text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$  となる。

さらに、大深度地下空間を完全不透水性材料で構築した場合、大深度地下空間は自然の地下水の流れを阻害し、もともとの流れ場を大きく変え、躯体の外壁周面では浸透流速が大きくなり、水みちができやすく、躯体と地盤の間に隙間が生じることが考えられるので、大深度地下空間の躯体にはそれに起因した有害な二次応力を引き起こすことが予想される。これに対し、躯体が完全遮水性でなければ、大深度地下空間は集水井に似た役割を果たすので、地下水の圧力水頭の低下に伴い地盤沈下が生じる。さらに、壁面において強制的に地下水を排除する方法を採用した場合には、地下水位は一層低下するので、地盤沈下への影響がきわめて大きくなる。

以上の結果からも明らかなように、大深度地下空間の透水性は周辺地下水の流動に大きな影響を与え、壁体の透水係数に応じて大きな地盤沈下を引き起こすので大深度地下空間の透水性の評価は重要な設計ファクターになる。ただし、本解析結果は、仮想モデルによる数少ない事例計算によるものであるので、今後、地盤構造・物性・地下水条件等の精査とともに地下空間の適切なモデル化の上、所要の精度に合わせた解析が必要である。

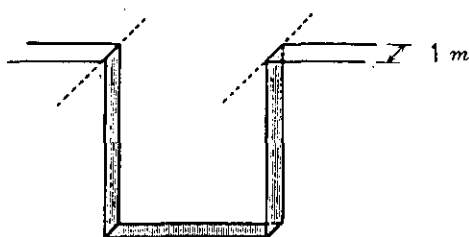
表 5 - 6 解析結果の一覧表

| モデル区分     | 自然水位 (m)        |                 | 解析ケース | *) 想定状況 | 壁体の透水係数 (cm/s)       | **) 圧力水頭の低下量 (m)              | ***) 漏水量 (m <sup>3</sup> /day/m) |       |        |
|-----------|-----------------|-----------------|-------|---------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------|--------|
|           | Δh <sub>1</sub> | Δh <sub>2</sub> |       |         |                      |                               | 底版                               | 側壁    | 合計     |
| 鉛直断面モデル   | 2.0             | 3.05            | 0     | A       | —                    | ② 0.35<br>③ 0.28<br>⑥ 0.14    | 0.0                              | 0.0   | 0.0    |
|           | 2.0             | 3.05            | 1     | B       | 1.0×10 <sup>-6</sup> | ② 20.00<br>③ 16.54<br>⑥ 4.31  | 0.59                             | 1.57  | 2.16   |
|           | 2.0             | 3.05            | 2     | C       | 1.0×10 <sup>-4</sup> | ② 45.26<br>③ 48.33<br>⑥ 61.13 | 15.14                            | 19.15 | 34.39  |
| 軸対称回転体モデル | 2.0             | 2.0             | 3     | A       | —                    | ② 0.0<br>③ 0.0<br>⑥ 0.0       | 0.0                              | 0.0   | 0.0    |
|           | 2.0             | 2.0             | 4     | B       | 1.0×10 <sup>-6</sup> | ② 20.18<br>③ 13.62<br>⑥ 0.77  | 0.35                             | 1.73  | 2.08   |
|           | 2.0             | 2.0             | 5     | C       | 1.0×10 <sup>-4</sup> | ② 14.42<br>③ 29.20<br>⑥ 37.56 | 22.49                            | 83.89 | 106.38 |

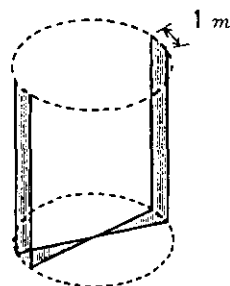
\*) 表 5 - 5 参照

\*\*) ○印の番号は地層を表し、個々の地層の中心位置における自然水頭からの低下量を表す

\*\*\*) 断面モデルは奥行き1m当たりの値、軸対称モデルは (周長1m当たりの値)×2の値を示す (下図参照)



鉛直断面モデル



軸対称回転体モデル

## 参考文献

- 1) 大西有三・西垣誠；不飽和流の解析，土と基礎，29，7と8，(1981)
- 2) Freeze, R. A. ; The Mechanism of Natural Groundwater Recharge and Discharge, 1, One-Dimensional, Vertical, Unsteady, Unsaturated Flow above a Recharging or Discharging Groundwater Flow in a Groundwater System, Water Resour. Res., 5, 1, (1969)
- 3) Rubin, J. ; Theoretical Analysis of Two-Dimensional Transient Flow of Water in Unsaturated Soils, Soil. Am. Proc., 32, (1968)
- 4) Freeze, R. A. ; Three-Dimensional, Transient, Saturated-Unsaturated Flow in a Groundwater Basin, Water Resour. Res., 7, 2, (1971)
- 5) Neuman, S.P. and Witherspoon, P.A. ; Finite Element Method of Analyzing Steady Seepage with a Free Surface, Water Resour. Res., 6, (1970)
- 6) 例えば, Price, H. S., Cavendish, J. C. and Varga, R. A. ; Numerical Method of Higher Order Accuracy for Diffusion Convection Equations, Soc. Pet. Eng. J., (1968)
- 7) 藤縄克之・藤崎克博 ; 地下水のシミュレーション, 農業土木学会誌, 55, 12, (1987)
- 8) Liggett, J. A. ; Location of Free Surface in Porous Media, ASCE J. Hydraul. Div., 103(HY4), (1977)
- 9) Pinder, G. F., Frind, E. O. and Celia, M.A. ; Groundwater Flow Simulation Using Collocation Finite Elements, In "Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Finite Elements in Water Resources.", C. A. Brebbia, W. G. Gray and G. F. Pinder, eds., Pentech Press, Plymouth, England; (1978)
- 10) Segol, G. ; A Three-Dimensional Galerkin-Finite Element Model for the Analysis of Contaminant Transport in Saturated-Unsaturated Porous Media, In "Proceedings of the 1st Int. Conference on Finite Elements in Water Resources.", Pentech Press, Plymouth, England, (1977)
- 11) Frind, E. O. and Verge, M. J. ; Three-Dimensional Modeling of Groundwater Flow Systems, Water Resour. Res., 14, 5, (1978)
- 12) 駒田広也・大町達夫；フィルダムの三次元浸透解析，大ダム，86，(1978)
- 13) Akai, K., Ohnishi, Y. and Nishigaki, M. ; Finite Element Analysis of Three-Dimensional Flow in Saturated-Unsaturated Soil, 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Gemech., Aachen (1979)

- 14) Gupta, S. K., Cole, C. R. and Pinder, G. F. ; Finite-Element Three-Dimensional Groundwater (FE3DGW) Model for a Multiaquifer System, Water Resour. Res., 20, 5, (1984)
- 15) Huyakorn, P. S. and Springer, E. P. ; A Three-Dimensional Finite-Element Model for Simulation Water Flow in Variably Saturated Porous Media, Water Resour. Res., 22, 13, (1986)
- 16) Narasimhan, T. N. and Witherspoon, P. A. ; An Integrated Finite Difference Method for Analyzing Fluid Flow in Porous Media, Water Resour. Res., 12, 1, (1976)
- 17) Bredehoeft, J. D. and Pinder, G. F. ; Digital Analysis of Areal Flow in Multiaquifer Groundwater Systems : A Quasi Three-Dimensional Model, Water Resour. Res., 6, 3, (1970)
- 18) 本影一郎・南 勲；愛知川デルタ地帯における広域地下水位変化の数値シミュレーション, 農業土木学会論文集, 58, (1975)
- 19) 本島 勲；砂礫層を基礎とするフィルダムの堤体および基礎における浸透流の解析, 電力中央研究所報告, 381011, (1981)
- 20) 例えば, 大西有三・大津宏康；有限要素法による不連続性体の応力・変形・浸透流解析, 土木学会論文報告集, 322 (1982)
- 21) Biot, M. A. ; General Theory of Three-Dimensional Consolidation, J. Appl. Phys., 12 (1943)
- 22) Christian, J. T. and Boehmer, J. W. ; Plane Strain Consolidation by Finite Elements, Proc. ASCE, 96, SM4, (1970)
- 23) Sandhu, R. S. and Wilson, E. L. ; Finite Element Analysis of Seepage in Elastic Media, J. Eng. Mech. Div. ASCE, 95, EM3 (1969)
- 24) 荒井克彦・渡辺知幸・田行啓一；多次元圧密数値解析手法の比較, 土質工学会論文報告集, 23, 3, (1983)
- 25) Yokoo, Y., Yamagata, K. and Nagaoka, H. ; Finite Element Analysis of Consolidation Following Undrained Deformation, Soils and Foundations, 11, 4, (1971)
- 26) Ghaboussi, J. and Wilson, E. L. ; Flow of Compressible Fluid in Porous Elastic Media, Int. Jour. Numerical Methods in Engineering, 5, (1973)
- 27) Simpson, B. ; Finite Element Applied to Problem of Plane Strain Deformation in Soiles, Ph. D. Thesis, University of Cambridge (1973)



- 28) Ohta, H., Yoshitani, S. and Hata, S. ; Anisotropic Stress-Strain Relationship of Clay and Its Application to Finite Element Analysis, Soils and Foundations, 15, 4, (1975)
- 29) Small, J. C., Booker, J. R. and Davis, E. H. ; Elasto-Plastic Consolidation of Soil, Int. Jour. Solids and Structures, 12, (1976)
- 30) Lewis, R. W., Roberts, G. W. and Zienkiewicz, O. C. ; A Non-Linear Flow and Deformation Analysis of Consolidation Problem, Proc. 2nd Int. Conf. on Numerical Method in Geomechanics, Blacksburg, Virginia (1976)
- 31) Akai, K. and Tamura, T. ; Numerical Analysis of Multi-Dimensional Consolidation Accompanied with Elasto-Plastic Constitutive Equation, Proc. JSCE, 269, (1978)
- 32) Carter, J. P., Booker, J. R. and Small, J. C. ; The Analysis of Finite Elasto-Plastic Consolidation, Int. Jour. for Numerical and Analytical Method in Geomechanics, 3, (1979)
- 33) Shibata, T. and Sekiguchi, H. ; A Method of Predicting Failurs of Embankment Foundation Based on Elasto-Viscoplastic Analysis, Proc. JSCE, 301, (1980)
- 34) Matsui, T. and Abe, N. ; Multi-Dimensional Elasto-Plastic Consolidation Analysis by Finite Element Method, Soils and Foundations, 21, 1, (1981)
- 35) Nakai, T. and Matsuoka, H. ; Constitutive Equation for Soils Based on the Extended Concept of "Special Mobilized Plane" and its application to Finite Element Analysis, Soils and Foundations, 23, 4, (1983)
- 36) 大西有三・村上毅；有限要素法による地盤の応力・変形を考慮した浸透流解析，土木学会論文報告集，298，(1980)
- 37) 中川加明一郎・駒田広也；地盤の変形と間隙水挙動との相互作用の解析法，電力中央研究所報告，381031 (1982)
- 38) 岡田知己；大深度地下連続壁技術，土木学会誌，74，(1989)
- 39) 内藤和章ほか；多連形泥土圧シールド工法，土木学会誌，74，(1989)
- 40) 赤井浩一・大西有三・西垣誠；有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析，土木学会論文報告集，264，(1977)

## 第6章 考 察

大深度地下開発の対象となる地層は、主として下総層群（相模層群、東京層・江戸川層）と上総層群である。これらの地層は、工学的には、土質地盤であり、岩盤ではない。

標高 -50m 面では、沖積層は夢の島から荒川流域に沿って、川口市や三郷市にかけてと川崎市の浮島から扇町にかけて分布している。また、下総層群と上総層群の境界は、東村山から晴海へとほぼ東へ進み、晴海から南下し、羽田にいたっており、この境界の南西側が上総層群の分布する地域である。

大深度地下空間開発の対象となる地下 50m以深の地盤は、その地質学的情報がきわめて不足しており、ほとんど分かっていない。地層の認定・対比に基づいて、層相変化、堆積環境、地質構造、鉱物学的・化学的性質の的確な把握を図る必要がある。また、地盤の変形挙動や圧密現象を推測するための地盤定数等の情報もはなはだ不十分である。さらに、地層中には嫌気性の微生物が生息しており、開発に伴う環境変化によってどのような影響を受けるか不明である。また、地表や表層に生息する微生物が、開発に伴って地下に侵入し、地下水等によって拡散する場合も検討しなければならない。

以上のように、大深度地下の地盤の実態は、解明されていない点がきわめて多いので、開発に際しては、予め数 10m以深の地盤情報を表層と同じレベルまで向上させ、実態を解明しておくことが不可避である。

大深度地下空間は、大きな地圧や水圧に加え、地上の構造物群の荷重によって、壊れたり、大きな変形を起こさないよう設計する必要がある。さらに、地表から連続する立体的空間は、地下水の浮力によって浮き上がらないよう設計する必要もある。また、地震時において、大深度地下空間の存在が、地表付近の構造物群に与える影響についても検討しておく必要がある。特に、大深度地下空間の場合、その中に存在する構造物には耐用年数があっても、空間に接している地盤には半永久的に大きな変形を生じさせてはならない。

大深度地下空間を利用すると、地下水の挙動や水質等に重大な影響を及ぼすことが予想される。したがって、地下水挙動を予測するための定数を予め把握し、シミュレーション解析を行う必要がある。定常状態におけるシミュレーション解析を行うこと

に関しては余り問題にはならないが、解析に必要な情報の密度や、得られた情報の精度に問題がある。それに加え、基盤からの地下水流入や水みちを通る地下水の問題等未解明なものが多い。このようなことから、地下水挙動を精度良く詳細に評価することは難しく、現状では定常状態における大凡の評価しかできない。予測精度を向上させるためには、解析に必要な様々な情報の蓄積が必要であり、しかも情報の精度向上が重要となる。

有限要素法による飽和-不飽和定常浸透流解析を行った結果、次のことが言えた。

壁体が完全不透水であれば圧力水頭の低下量は極く僅かである。しかし、大深度地下空間は自然の地下水の流れを阻害し、躯体の外壁周面では浸透流速が大きくなり、水みちができやすくなる。これに対し、壁体から漏水がある場合、その透水係数に応じて圧力水頭の低下が生じる。しかも、大深度地下空間は集水井に似た役割を果たすので、地下水の圧力水頭の低下に伴い著しい地盤沈下が生じる。また、地下水位低下の影響範囲は、壁体から500m以上遠方（恐らく数 km 程度）まで及ぶ。

[平成元年7月31日編集委員会受理]

[国立公害研究所資料 F-13-'89/NIES]

大深度地下空間利用における地盤環境保全の  
評価手法に関する調査報告書

問い合わせ先：水質土壌環境部地盤沈下研究室 陶野郁雄

---

平成元年8月31日発行

発行 環境庁 国立公害研究所  
〒305 茨城県つくば市小野川16番2

---

印刷 谷田部印刷株式会社  
住所 つくば市大字谷田部1779-1