

フォーラム「大深度地下利用に関する地盤工学上の課題」開催報告

大深度地下利用に関する地盤工学研究委員会

1. ま え が き

人類に与えられた貴重な未利用空間“大深度地下”を、社会基盤となす高速地下鉄道・物流・ガス・上水・下水・ごみ処理等に有効に利用しようとする機運にある。将来、全都の一極集中から多極分散、それに応じた公共地下施設の共同開発も進むだろう。

これらは地球環境の保全の理念のもとに是認されるべきもので、いたずらに技術の追究だけに走るべきものではなく、21世紀中葉にやっと花が咲くほどの大事業である。大深度地下の開発は総合的に住民が安心できるよう着実に進められるのがよい。

大深度らしい地盤工学の課題の摘出がこのフォーラムの一つの目的であった。次世代の社会を担う社会の改革意識の強い若々しいエンジニアが、例えば、大深度に伏在する不連続な溺れ谷地形の探査、高い拘束圧での軟岩の物性評価、地盤沈下をさせない機械化施工、大深度にも健全に機能する地下空間と地上の一貫した防災システム等に好奇心を燃やす機運に、このフォーラム（1992年10月6日、大成ホール、180人余参加）が役立ったものと思う。

本年秋には、一般公募を主体としたシンポジウムに発展させるよう企画している。

（委員長 林 正夫）

2. 調査・試験についての話題

2.1 首都圏大深度地盤の概況

—東京湾臨海部を中心として—

現在話題を呼んでいる大深度地下開発は、首都圏への一極集中問題に端を発している。その志向からすれば、東京都23区の内陸部の地下地質を包括して取り上げるべきであろうが、筆者の力量を超えるため、東京湾臨海部を中心にした内容となった。

大深度地下開発で対象となる G.L.-100m 以浅の東京湾臨海部の層序は、下位からいずれも第四系で、

上総層群の泥岩、下総層群では江戸川層の砂・礫、東京礫層、東京層の砂・粘土の互層、埋没段丘礫層、埋没ローム、沖積層では7号地層の砂泥地層、有楽町層粘土と砂、埋立土層となっている。

一方、大深度地下利用と地下地質の問題としては、①地質の基礎情報（地層の分布と土質特性など）と地盤構成（地層の重なり方）、②軟弱地盤と埋没地形、③礫層（特に東京礫層）の分布状態と地下水学的特性、④地下掘削に伴う残土処分、⑤断層存在の可能性、⑥地下水への影響や水溶性ガスの噴出その他、などについて検討する必要がある。

（東京都 清水恵助）

2.2 大深度掘削問題と土と岩の変形特性

原位置での土と岩の変形特性の推定法における現在の二つの課題を論じた。①異なる原位置試験法（孔内水平載荷試験・平板載荷試験・せん断弾性波速度測定）の間で、また異なる室内試験法（室内超音波パルス試験、共振法土質試験、応力とひずみを測定する静的繰返し・単調載荷試験）の間で、また原位置試験と室内試験と地盤の変形からの逆算値の間で変形係数が大きく異なることが多い（はなはだしい時、100倍も）。②孔内水平載荷試験や通常の一軸圧縮試験・三軸圧縮試験で求めた変形係数は、地盤の変形からの逆算値よりも非常に小さすぎる場合が多い。その主要因として、次の点を指摘した。①土と岩の土質力学には非線形性があり、変形係数を測定するひずみレベルが試験法により大幅に異なる。②通常の一軸圧縮試験・三軸圧縮試験では載荷ピストンや供試体キャップの変位から供試体の軸ひずみを求めているが、供試体上下端での緩みの影響により真の軸ひずみを過大評価している（変形特性を過小評価している）。単調載荷試験で軸ひずみを供試体側面で測定して求めた0.001%以下のひずみレベルでの変形特性は、動的試験（原位置せん断弾性波速度、室内動的試験）から求めた弾性的変形係数と

学会活動から

一致する。したがって、都市部大深度掘削問題のような静的問題でもひずみレベルが低い場合では、原位置せん断弾性波速度から求めたヤング率をひずみレベル依存性を考慮して軽減することにより、解析に用いるべき変形係数をかなり正確に推定できる。

(東京大学 龍岡文夫)

地盤のS波速度は、地震時における地盤や構造物の応答を知る上で重要な地盤物性情報である。また近年、S波速度から地盤の静的な変形特性を評価しようとする試みも活発に行われるようになった。従来から原位置でのS波速度測定法としてPS検層やsuspension PS検層が多用されてきた。このようなボーリング孔内での速度測定だけでなく、S波はそれを用いた地震探査法、特に浅層反射法やVSP (Vertical Seismic Profiling)によって地盤の地下構造イメージや強度情報断面を提供できる。今後、都市地盤における有用な探査法として活用されることになる。

(応用地質 大友秀夫)

2.3 大深度における地盤挙動

—変形・土圧について—

都市部の地下開発においても、地山の力学特性と水理環境を的確に把握することが大切なことになりはしない。そこで、トンネル・地下空洞の掘削の基本理念、すなわち“トンネルや地下空洞はできる限り地山で持たせる”および“地山は緩めず最大強度発揮時までに変形を留める”について、地山の応力-ひずみ関係とダイレイタンス特性との関連から論じ、とくに後者はNATMにおけるFenner-Pacher曲線そのものであることを示した。ついでトンネル掘削時の土砂地山の変形挙動が土被りと共にいかに変化するかを調べるために行った実験と、その際に地山内に生じる不連続的な変位挙動を的確に説明できる解析手法とを示した。また、地下構造物の設計において重要となる覆工・支保工土圧が、土被りに比例しては増加しないことを、落し戸問題の解析結果に基づき論述した。さらに、都市部大深度開発で忘れてはならない高圧地下水への対処方法の選択、例えば覆工の設計において完全止水覆工とするか、導水覆工とするかの決定などが重要な課題となることを指摘した。いずれにしても、都市部大深度は未知の空間であり、その開発にあたっては、地道な研

究の継続が望まれることを強調した。

(京都大学 足立紀尚)

2.4 地下掘削実験工事における上総層群泥岩の変形挙動

神奈川県 相模原市郊外で、圧縮強度 50 kgf/cm^2 程度の上総層群泥岩内に深度50mの立坑と横坑からなる大深度地下空洞を試験的に施工した。この現場挙動の数値解析結果と試掘横坑内での系統的で多様な原位置試験、およびコアサンプルの室内試験結果を総合的に比較検討することにより、堆積軟岩の変形係数の全体像を明らかにした。その結果、①原位置試験による変形係数はその試験法により異なるものの、各試験法で取り扱っているひずみレベルを考慮すれば矛盾がないこと、②従来の設計に用いられてきた変形係数は小さすぎる（特に深い場所に対して）、③ひずみレベルを合わせることで、原位置試験と室内試験および現場挙動の逆解析による変形係数は概略一致してくる。したがって、当該堆積軟岩地盤では、ジョイント・クラックの影響は小さく、室内試験・原位置試験の試験結果をそのまま用いて連続体の解析手法を適用する土質力学的な取扱いが可能であることになる。また、このような堆積軟岩では変形係数のひずみレベル依存性が顕著であるため、各種の調査や試験結果として変形係数を報告する場合には、同時にそれを測定したひずみレベルも明記することを提案している。

(東急建設 越智健三)

2.5 パネルディスカッション(第1部)のまとめ

パネルディスカッション(1)の内容は地盤の調査・解析手法全般にわたるものであった。

座 長 山 辺 正 (埼玉大学)
 パネリスト 日比野 敏 (電力中央研究所)
 清水 恵助 (東京都)
 龍岡 文夫 (東京大学)
 大友 秀夫 (応用地質)
 足立 紀尚 (京都大学)
 越智 健三 (東急建設)

大深度地下利用にかかわる調査・解析に焦点を絞っていたとは言え、限られた時間の中ではすべての話題や問題点について十分に議論を尽くせるものではないが、今後のシンポジウムにも関連する話題が豊富に展開された。パネルディスカッションに先だ

って、日比野氏から地中地震動に関する話題が提供された。この話題はパネルディスカッションの中ではなかった話題であり、参加者にとって重要な情報を提供した。それによれば東京周辺では観測された地震時の地表加速度の増幅率は、地下80mでの加速度と比較して約7倍にも達することがあり、岩盤を対象とした地表下200mの地下発電所建設地での増幅率が2倍程度であったことを考えると、地盤の構成が増幅度に与える影響の大きさがよくわかる。

パネルの開始直後には地下開発に伴う環境への影響評価をどのように進めていくかについて討議が行われた。すなわち、首都圏などの大都市において地下開発が進展した場合、地表での沈下や地下水への影響など考慮しておかねばならない問題であり、これらの対策をどのように考えておけばよいのかとの内容である。これに対して、具体的な数値は地表の構造物に応じて異なるであろうが、いずれにしても水位低下と地表沈下の許容値が必要であり、それ以上の値は一般には受け入れられないであろうことが明らかにされた。

これ以下、発表された話題ごとに討議内容を紹介する。最初の話題では、東京湾岸を中心にして関東堆積盆地の特徴について地質学的考察とボーリングデータを用いた検証を行っている。特に上総層群の上面に関する調査から古地形を反映する、いわゆるおぼれ谷の存在やそれに付随する地表下の急斜面などが地表地形からは隠されており、今後の東京湾岸での大深度開発においてはこれらの点を踏まえて長期間にわたって検討を継続していくことが期待される。そのためには少なくとも50m以深のボーリングデータを蓄積し、関西地域を中心に既にかなりの量が収集されている地盤データベースの構築などの手段をとおして、大いに有効なデータを収集する必要があると思われる。また、ボーリング柱状図に記載されている、いわゆる東京礫層のすべてが真に地質学的な意味において、同一の堆積物であるか否かはかなり疑問がある。これらの確認なしに礫層であれば、それをすぐに東京礫層であるかのように扱うきらいがあることが注意された。

第二番目の話題は、第三紀の泥岩を対象として地盤物性値のひずみレベル依存性を精緻な実験によって検証した研究である。微小ひずみの計測を通じて

原位置で実施されるせん断弾性波速度試験から得られる、いわゆる動的弾性係数の位置付けを明らかにしている。これに関連して、地盤におけるS波の計測方法としてのPS検層やVSPの利用方法に関する話題提供があった。なお、この論文で「真の、あるいは本当の、弾性係数」とは均質な線形弾性体で、ひずみ速度の影響や繰返し载荷の影響も受けない程度のひずみレベルの範囲内での弾性係数を表している。

会場からは微小ひずみ計測装置の作成方法とその取扱いの容易さに関する質疑があった。これに対して話題提供者から、現時点では既にひずみゲージのメーカーで市販している段階にあり、地盤系コンサルタントの一部では実際に計測に用いていることがコメントされた。また、地盤の特性として異方性の有無が議論されたが現段階では明確な異方性が存在するかどうかの確信は得られていないとの回答があった。さらに、この微小ひずみを計測した供試体を採取した地点での地下掘削に関する実験工事に伴う変形挙動に関する話題が提供された。

第三の話題は、「トンネルはできる限り地山でもたせる」とのトンネル掘削の理念を踏まえた変形と土圧の実験および解析結果を示している。変形問題については、実験および解析からトンネル壁面で等しい変位が生じる場合には、土被りが浅いとグラウンドアーチが形成されずに地表面まで大きな変位が伝達される。土被りが深い時にはグラウンドアーチの形成により地表面にはわずかな変位しか伝達されないと結論づけている。また、土砂地山における覆工に作用する土圧に関する実験・解析から、トンネル建設後の地表面の変化による影響評価の重要性を強調した。これらの成果から、今後、ひずみ軟化-硬化挙動を説明できる統一的な構成式を用いて議論を進めていく必要性が強調された。なお、対象地盤が土砂であろうと軟岩であろうと、均質な地山を仮定すれば、トンネルに許される許容変位は供試体の一軸圧縮試験時のピークひずみとの相対的な関係から議論できることも示された。

パネルディスカッション全体の印象から見ると、対象があまりにも広範なために、何を議論しておけば間違いないことなのかが明らかになっていない状況ではあった。しかし、今後の長期計画に当たって

学会活動から

の方向を探る上で有益な話題を提供していただいたことは確かである。なお、発表にかかわる参考キーワードとして、以下の項目が挙げられた。

大深度地盤、首都圏、地層層序、地盤タイプ、軟弱地盤、埋没地形、断層、掘削、微小ひずみ、変形特性、孔内水平載荷試験、室内超音波パルス法、CU三軸圧縮試験、局所変形測定装置 (LDT)、PS 検層、サスペンションPS 検層、反射法S波探査、VSP、サイスミックトモグラフィ、トンネル、覆工、土圧、土被り、地山挙動、平面ひずみ、模型実験、現地実験、上総層群、泥岩、初期地圧、変形解析、施工管理、逆解析、平板載荷試験。

(埼玉大学 山辺 正)

3. 設計・施工・環境・防災についての話題

3.1 大深度における施工事例

一森ヶ崎処理場シールド立坑の設計・施工一

東糞谷ポンプ所からの汚水を森ヶ崎水処理センターへ送るための送水管施設のうち、大深度地中連続壁工法により施工したシールド発進立坑の設計と施工についての報告である。施工地点は昭和30年代に東京湾を埋め立てた昭和島にあり、東京モノレール昭和島駅前の森ヶ崎水処理センター内にある。ルートは東京モノレールを横断し、JR 京葉線に近接し、処理場施設基礎杭下を横断することから、発進部の土被りは52m、切羽圧は 5.5 kgf/cm^2 とこれまでに例を見ない高圧下の工事となった。

昭和62年12月に着工し、連壁工事、内部掘削、底盤コンクリート打設を経て、平成4年3月にシールド工事西幹線を完了した。

立坑は2本のシールドを発進させるため、内径20mの円を内接する正22角形で壁厚1.2m、深度99mの多角円筒状構造である。立坑の内側には鉄筋コンクリート製のリングビームが7段設けられており、順次掘削しながら構築した。

連壁の縦方向の解析は、周囲より側圧を受ける円筒シェルにモデル化し、円周方向のリングばねで支持された弾性床上の梁として解析した。補強リングは、円筒シェル解析の各リング反力と偏圧による増加荷重をすべてリングで抵抗するものとして解析した。この立坑は深い大規模構造物であり、しかも長期間存置されるため、仮設構造物ではあるが設計には地震による影響を考慮した。

立坑形状は1ガット1エレメントの正多角形であ

り、後行エレメント掘削時の余裕が20cmと少なく、掘削精度は1/1000が要求されたため、溝壁の安定を始めとして掘削、鉄筋かご製作、建込み、コンクリート打設等の施工に細心の注意を払った。掘削溝壁は、全エレメント1/1000以上の鉛直精度を保ち、鉄筋かごの建込みには支障がなかった。本工事は大深度連壁工事であったが、連壁の壁面状況は良好で、継手部からの漏水もなく、表面を観察した結果では、止水性、水密性に優れた品質を有している。

(鹿島建設㈱ 鈴木和夫)

3.2 大深度地下空間における環境問題について

大深度地下空間にかかわる環境は、大別して、地下水を含む地山の環境、地上への環境影響、空間利用上の環境、の3者を一体として考える必要があろう。中でも工事中の地下水の低下と工事終了後の長期的な地下水環境への影響は空間深度が大きいと、問題になりやすい。この点について数値解析による検討結果が報告された。それによると、地山の地質構造、透水性、構造物深度はいうに及ばず、地下空間のライニングの透水係数が地下水の挙動と漏水に深い関係をもつ。一方、空間内の環境要素（湿度、湿気・水分、換気）が水収支の視点から論じられた。これは従来あまり問題とされなかったが、空間の利用目的に応じて検討すべきである。

大深度地下空間にかかわる環境アセスメントは従来なされてきたテクノロジーアセスメントにとどまらず、地球環境問題に根ざす資源・エネルギーの消費を最小にとどめ、かつ掘削土の搬出手段や防災を考慮してなされるべきであろう。したがって、これまで地下工事についてなされてきた環境影響評価が時代の要請に即応したものに少しずつ変わってくるものと考えられる。

(埼玉大学 佐藤邦明)

3.3 地下開発と地下構造物の耐震問題

大深度に建設される構造物に限らず、地下の構造物は一般に耐震性が高いとされている。これは地下深くなればなるほど地震動が小さくなるため、反面、静的な土圧に対する配慮が重要になってくる。しかしながら、大規模な地下空間が多機能になればなるほど地上との交通、情報のネットワークが重要になり、耐震上の弱点があるとすれば、それはこのような構造部分に集中すると考えられる。地盤と接

する構造部分は、地震時の地盤の動きに追随して移動あるいは変形するが、それには常時の地盤沈下や側方流動による変形の影響も加算されていて、このような地盤の動きは地表に近いほど大きい。また構造の一部には液状化などの地盤破壊による浮力と自重の不釣り合いによる外力、液状化した層に載って移動する表層地盤の移動の影響をも考慮しなければならない。大深度構造物ではその下部が堅固な層に埋め込まれて固定された形になるので、表層地盤の挙動の影響はより顕著に現れると考えられる。従来の構造物の地震被害も地盤の挙動、破壊に強く結びついたものが多いが、大深度地下構造物でもその構造規模を念頭において三次元的に広範な地盤の動きと構造との相互作用を考慮する必要がある。

(東京大学 小長井一男)

3.4 地下空間における消防防災対策

大深度地下において火災が発生した場合には、大深度地下空間の閉鎖性、深層性等の特殊性から、当該施設利用者等が避難行動を行う上で、また、消防隊等が避難誘導、消火、救助活動等を行う上でも、従来の浅い地下構造物に比べ大きな制約を受けることが予想される。

したがって、大深度地下施設にかかわる消防防災対策の確立を図るためには、消防用設備等の設置による対策のみでなく、空間の構造面における検討および管理運用面における対策を含めて、総合的な消防防災対策を構築することが不可欠である。

大深度地下に施設等を設ける場合には、その計画、設計段階から、当該施設の形態、規模、用途等に応じて、火災の発生を想定して利用者等の人命を守り、物的損害を最小限に食い止めるための諸対策を講じておくことが必要である。また、避難誘導、消火、救助活動等の消防活動を迅速、適切に実施するための諸対策についても、構造物の適正形態を含めて十分な措置を講じておくことが肝要である。

さらに、大深度地下利用施設に対する未経験なこともあって、個々の施設における消防防災対策にかかわる専門家等による客観的な検討・評価を受ける必要があろう。

(消防庁 鈴木和男)

3.5 パネルディスカッション(第2部)のまとめ

パネルディスカッションは次のパネリストにより

行い、討議内容を整理すると以下ようになる。

座 長 末岡 徹(大成建設)
パネリスト 大谷 圭一(防災科学技術研究所)
陶野 郁雄(国立環境研究所)
鈴木 和夫(鹿島建設)
佐藤 邦明(埼玉大学)
小長井一男(東京大学)
鈴木 和男(消防庁)

まず大深度地下利用で考慮すべき地盤のスケールについて次の討論があった。

大谷は、大深度地下利用の際、技術的検討において従来の浅層地盤だけでなく、東京地区だったら、深度3~4kmの先第三紀の地層構造まで考慮に入れ、重複反射理論でなく、基盤および基盤からの地震工学特性も考慮しなければならないことを指摘した。小長井は、耐震工学の立場から深い地盤内の大きな空間は、そのスケールと形により地盤の振動特性が異なり、大深度での振動特性が逆に地表付近に影響することを指摘した。

陶野は、さらに進めて、最近の大深度地下開発・利用で対象になった地盤は、地球のスケールから見れば、わずかに地球儀の表皮1枚分にもみたくらいのほんの表面に過ぎない事実を認識することがまず肝要であると述べた。

つぎに、長期的、総合的、地球環境の立場に立った大深度地下利用について以下の討論があった。

佐藤は、最近世の中の物の考え方が変わってきており、大深度地下利用の際も、いわばグローバルエンバイロンメンタリズムとも言うべき、個々の要素技術だけでなくトータルな視点に立って考えることの重要性を指摘した。また、今後、大深度地下利用の際は、50年、100年後の使用目的が終了したときを予見し、地下空間の現状回復をも考えるような長期的視野が欲しい、との意見が出た(陶野)。長期的かつ総合的検討の重要性に関しては、鈴木(鹿島建設)、会場から植下(名古屋大学)、清水(東京都)からも指摘があり、今後特に掘削残土に関しては、技術的課題を検討すべきとの共通認識が聞かれた。

さらに、避難等の防災を考慮した大深度地下利用について、大深度地下利用の際、最も重要になる要素に、火災防災がある。この点に関しては、大谷は、防災というより止災とも言うべきで、火災をおこさ

学会活動から

ないという態度が先行すべきであると指摘し、鈴木（消防庁）は、地下空間においては火災時の煙の拡散方向と避難方向が同じになりやすいとの指摘をした。この点に関しては、会場の吉見（清水建設）から、地下空間の隣どうしへの相互避難も考えられるのではとの提案が出た。

最後にまとめとして、今回のパネルディスカッションのテーマ、設計、施工、環境、防災は、広い意味での地盤環境の範疇に入ること、また東京23区に毎日400万人近い人が往復3時間もかけて通勤している今日、豊かでゆとりある生活を実現するため、地盤技術者の役割は大であること、加えて大深度地下空間利用の技術は、将来発展途上国の大都市問題の解決にも期待がもてるだろう、との総括がなされた。

（大成建設 末岡 徹）

4. おわりに

今回、大深度地下利用に焦点をあて、地盤工学の側面からフォーラムを開催し、かなり広範的諸問題が議論され、少しずつ研究の方向性がつかめてきたように思われる。

少なくとも、次の点はその成果に共通したことであろう。

まず、大深度地下利用に不可欠な地質情報やその力学的特性に関するデータの共通の蓄積が今後ますます重要となるであろう。これまでとかく研究者・技術者および研究機関により、また試験法により解釈も蓄積も個別的に過ぎたように感じられる。地質情報や地下情報とは必ずしも同じでないものの、土質力学の中でも基本となるべき、地盤の弾性係数がひずみレベルや試験法によって系統的解釈を見えないことは印象的であった。つぎに、やはり環境・防災に関する大深度地下利用に対する多くの見方は一致してその重要性を認識していた。今後、この方面の技術の発展に一致した方向づけを与えているものと思う。

最後に、「大深度地下利用に関する地盤工学研究委員会」は本フォーラムにおいて皆様からいただいた貴重なご意見をさらに深く研究し、今後の研究活動に反映すべく、努力を重ねる所存であります。以前にましてご指導・ご鞭撻をお願い致します。

なお、当委員会では、今後の委員会活動の資料に供するため、話題提供内容および討議内容について記録としてビデオに納めました。興味のある方は、当委員会にお問い合わせください。

（幹事長 佐藤邦明）

（原稿受理 1993. 1. 21）