

招待論文
INVITED
PAPER

招待論文

地下空間利用技術の開発

TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS ON UNDERGROUND SPACE USE

水谷敏則*・猪熊 明**

Toshinori MIZUTANI and Akira INOKUMA

* 正会員 建設省土木研究所 企画部長
(〒305 つくば市大字旭1)

** 正会員 工博 建設省土木研究所 トンネル研究室長

Key Words : tunnel, underground space, NATM, shield, cut and cover

1. はじめに

わが国における国土空間の利用においては、価値観の多様化等を反映してその質的向上が求められている。

地下空間は、今後の国土基盤整備の展開にあたっての貴重な空間資源として大きな役割を期待されており、しかも、単に地上空間の代替空間としてばかりでなく、地下の持つ特性を積極的に活用した空間、技術の進歩によって創造される新しい空間としての開発利用も期待されている。

こうした状況のなかで、建設省では昭和62年度より5ヶ年計画で総合技術開発プロジェクト「地下空間の利用技術の開発」を進めてきた¹⁾。本プロジェクトは、首都圏などの大都市域における地下空間の安全で合理的な開発利用を図ることを目的としたものであり、その研究は建設省のみならず多数の民間会社との共同研究という形で実施された。また、学界の専門家等から構成される委員会で種々のご指導を頂いた。内容については、まず地下空間の利用の実態と地下特性に応じた合理的な利用形態等を総合的に調査研究し、次に、都市の高密度化等に伴い今後大規模・大深度化そして輻輳化が進む地下空間の開発利用にあたって必要となる地中情報の利用技術、土木建築などの地下構造物の設計・施工技術及び環境保全技術、さらに地下空間の防災対策技術等の開発を行った。

ここでは、本プロジェクトの中から、土木研究所が中心となって実施した土木分野における地下空間利用技術の開発に関する研究成果の概要を、その後の展開や今後の要望と併せて紹介する。

2. 地盤情報の調査・利用技術

(1) 地盤調査技術

わが国の沖積平野に立地する大都市の地盤は、一般に軟弱で複雑な構造と物性を呈する厚い沖・洪積層で構成されている。したがって都市域での大規模な地下空間施設の設計・施工計画の立案にあたっては、地下水位が高い軟質地盤における合理的な設計・施工法を適切に選定するのはもちろん、沖・洪積地盤に特徴的な問題、すなわち地盤環境の変化に伴う地盤の変形や地下水への影響を評価し、また大深度での高い拘束圧下における土圧・水圧を適切に評価し、その対策をたてることが特に重要であり、このための地盤構造の探査や地盤の力学的特性の評価、いわゆる地盤調査技術の果たす役割は以前にも増して大きくなっている。

都市域で施工された大規模地下工事において用いられる地盤調査手法としては、ボーリング調査が普遍的に用いられており、ボーリング孔を利用した各種調査が補助的に併用されているのが現状である。

ボーリング孔を利用して地盤特性を評価する手法としては、直接孔内で求める物理検層やサウンディングによる方法と不攪乱試料をサンプリングして室内試験で求める方法とに大別される。大深度の地盤調査においては、高い拘束応力、高い貫入抵抗、多様な地層(多様な土質、固結度、応力履歴)等のため、既往の調査法の改良あるいは新しい調査法の開発が必要とされる。力学試験のための不攪乱試料の採取は、特に未固結の場合困難であり、特に大深度の砂礫地盤については、有力な調査法が確立していない。既存の調査方法の中で大深度に適用し得るものとしてはPS検層等の孔内物理検層、孔内載荷試験、大型貫入試験が有望である。

これらのボーリングによる調査法は、特定の地点の地盤構造や地盤特性を直接的に確認することは可能であるが、広い範囲についての面的、立体的な地盤構造を把握するのに適切な手法であるとはいえず、その把握には極

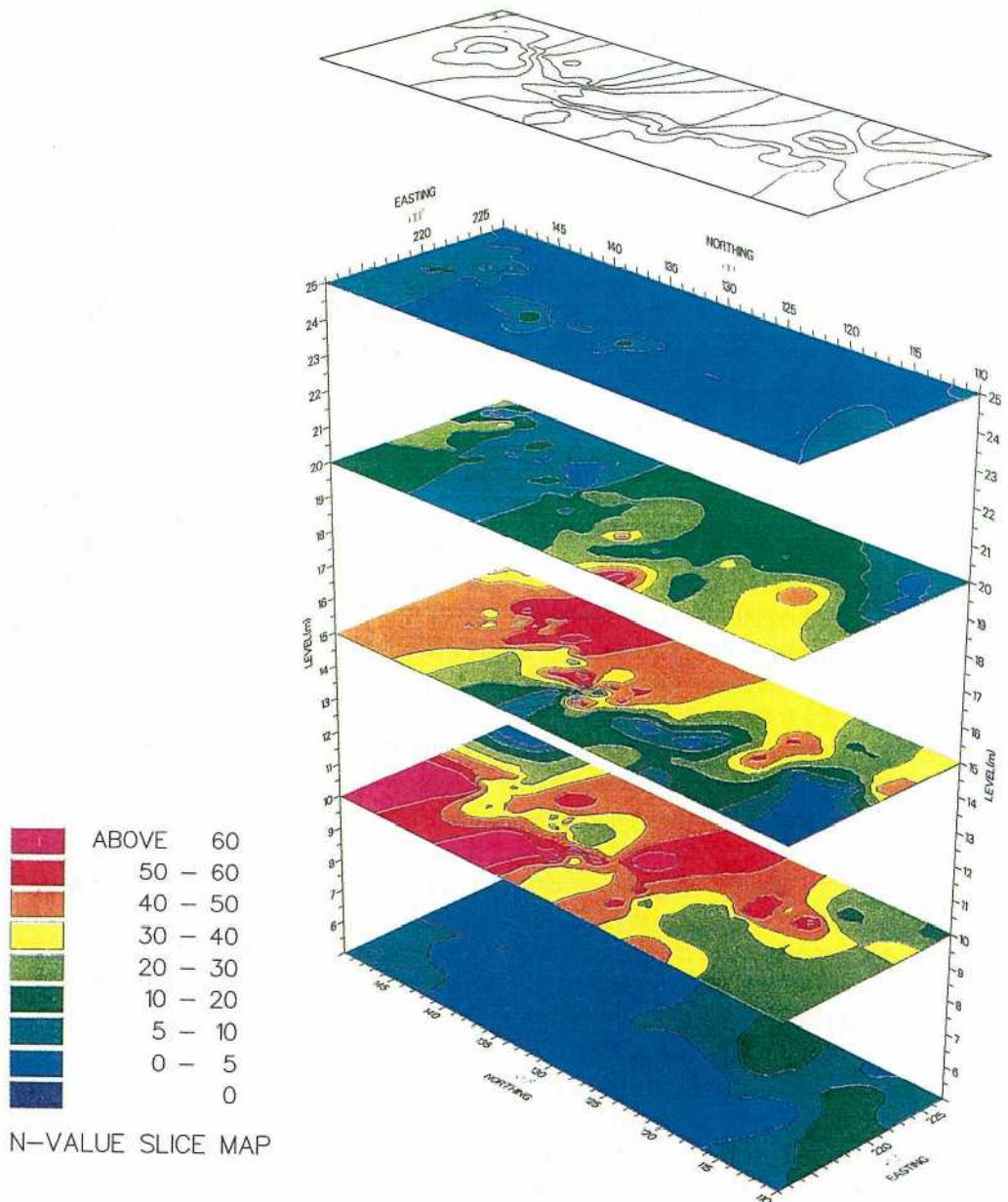


図-1 地中情報処理例 (N 値図の表示)

めて多数の調査が必要とされる。この欠点を補うものとして面的な構造の評価が可能である各種物理探査手法の適用があるが、現時点では余り利用されていない。これは、物理探査手法が都市域での調査実施上の制約をよりきびしく受けるためであり、人工的ノイズの多い都市域での適用性向上技術の開発が待たれている。

上述した地盤調査法の適用上の現状と課題から、特に適用性の高い手法と考えられ研究された幾つかの手法のうち、孔内載荷試験法について、以下に研究の概要を述べる。

孔内載荷試験は、地盤反力係数や変形係数などを求める方法として用いられてきた。孔内載荷試験結果は試験の行われるボーリング孔壁の掘削に伴う孔壁の乱れに影響されることが知られており、それを克服するために載荷試験機自体に削孔機能をつけて孔壁の乱れを極力少なくして試験機を載荷位置に挿入するセルフボーリング式の孔内載荷試験機の研究が進められている。

そこで、従来のプレボーリング方式 (PBP) とセルフボーリング方式 (SBP) の両方式による現場試験を行いその比較を行うとともに、これまでに提案されてい

る試験データの解釈法のいくつかを実際に試験結果にあてはめて検討した結果、以下のことが明らかとなった。

SBP 試験は、比較的軟弱な地層においても大深度の基盤層に相当する比較的硬質な地層においても適用可能であるといえる。また、SBP 試験は、PBP 試験に比べて現状では施工性において劣るが、その反面、得られるデータの質では、特に、初期せん断剛性率のデータに関して、勝ることがわかった。

両方式ともに、圧力-膨張量の初期カーブから得られるせん断剛性率よりも、除荷・再載荷ループから得られるせん断剛性率の方が孔壁の乱れの影響が少ないため信頼性があるといえる。また、せん断剛性率は、試験時のひずみレベル、応力レベルの影響を受けており、これらを考慮に入れて設計の際に使うことが望ましい。

(2) 地盤情報利用技術

都市域における地下空間の開発に先立ち、対象地盤のみならず広域的な地質情報を収集・解析することが必要とされる。しかし、都市域では既設構造物による障害や用地難等により、新たな地盤調査の実施には大きな困難が伴うようになってきている。

一方、都市域では各種構造物の建設に伴い膨大な量のボーリング等の地盤調査が過去に実施されてきており、そのデータが有効に利用できれば広域的な地盤評価を効率的に行うことができる。しかし、それらのデータは一括管理されておらず、また、単に資料を収集するだけでは必要とされる情報をそこから自動的に得ることはできない。そこで、既存の地盤調査データ、特にボーリングデータから地下空間開発のために有効に利用できる高度の地質情報を生み出すことができる地盤情報処理システムの開発を目指した。

開発される全体システムの根幹部分である地盤情報処理技術は、1次元のボーリングデータから2次元、3次元の高精度の地盤情報を生み出すことを可能とするものである(図-1)。これにDWM(Dynamic Waveform Matching)による自動地質対比システム、および専門的知識のプロダクションルール化に基づいた地質解釈を実行するエキスパートシステムを用いることによって、地質断面解釈をパソコン上で半自動的に行えることを明らかにした。実行結果は専門家による対比結果と概ね調和的であり、処理時間もデータ入力を除けば1分以内と短時間で結果を得ることができた。

3. トンネルの設計・施工技術

(1) シールドトンネル工法

都市部における下水道、地下鉄、共同溝等の地下施設の建設に際し、シールド工法は地下水位が高く軟質な地盤における代表的なトンネル工法として発展し、普及してきた。

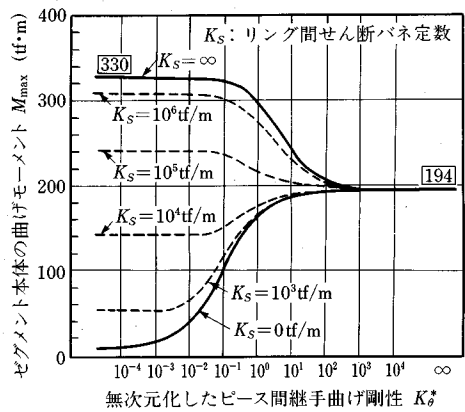


図-2 ピース間継手曲げ剛性と曲げモーメントとの関係

今後の地下空間の開発を進める場合、浅深度においては輻輳する既設の構造物等により制約を受けた中での施工を余儀なくされ、また、さらに大深度を対象とせざるを得なくなることも予想される。加えて、地下道路等では大断面で複雑な形状に対する新たな要望もでてきている。これらの新たなニーズを踏まえ、必要となるシールドトンネル工法の設計・施工技術の開発を行った。

a) 大深度・大断面シールド

3車線規模の道路トンネルを想定して直径約20mのトンネルを地下深度50mから100m程度の地下深部に建設することを目標とした技術開発を行った。まず現状の技術レベルから予想される技術的課題を抽出した後、最重要課題と考えられる各要素技術について詳細な検討を実施し、以下のような研究結果を得た。

- ① 大深度・大断面シールドにおいて掘進に伴う地盤変状を予測する際の留意事項を示すとともに、特に、切羽抵抗圧や裏込注入状態などの施工条件が地盤変状に及ぼす影響が大きいことから、これらの条件を加味した解析方法を提案した。
- ② 地下水への影響予測について、3次元の浸透流解析によりシールドトンネル構築によって生じる地下水の遮断、水みちの形成、対策工の効果について試算により上下流の圧力水頭差など状況を把握した。
- ③ 大深度・大断面シールドトンネルの設計にあたり、深度50m程度までの作用荷重の評価については、遠心力載荷実験や実績調査から現行の設計方法の考え方で概ね適用可能であることを示した。
- ④ 大深度下でのセグメント継手の構造について、梁パネモデルによるパラメータ解析を行った結果により、十分な地山反力を期待できる良好な地山条件下ではセグメントの組み方を芋継ぎ方式(図-2で $K_s=0 \text{ tf/m}^2$ の場合)とする方が構造的に曲げモーメントが小さく経済的となることを示すとともに、

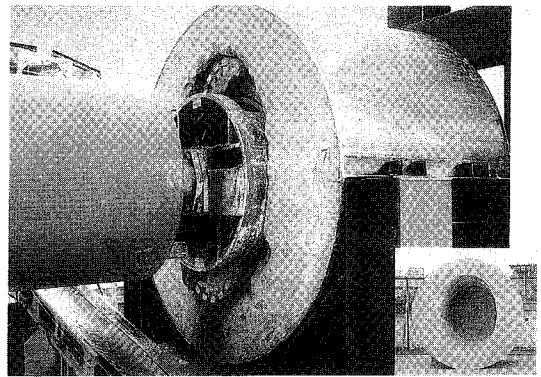
分割数、材質、止水性についての基本的な考え方を示した(図—2)。

- ⑤ 大深度・大断面下の泥水式工法の切羽の安定について、泥水圧の設定位置と泥水の比重を考慮することで現状の切羽安定の理論の安定範囲を満足する泥水が作成可能であることを示すとともに、切羽の安定が比較的困難となる礫地盤を対象とした数種の泥水実験から泥水管理の考え方や逸泥に対して注意が必要となることを示した。
- ⑥ 大深度下の泥土圧式工法の切羽の安定に大きく影響する止水及び山留めについて、高水圧下の実験からスクリーコンベアの適切な構造、運転管理のもとで掘削ブリの排出が十分安定することを示した。また、添加材についての高水圧下での実験より、対象土に応じて現在一般に使用されている材料を適切に用いることにより適正な濃度・粘性のもとで十分な止水性が得られることを示した。
- ⑦ 泥水加圧式及び土圧式おける掘削土搬出方法について、必要設備数、配置、管理制御、検出装置、泥水処理能力等に対する調査、試設計及び配置計画の検討を行い、併せて適用性の把握を行った。ケーススタディ及び要素実験をもとに検討した結果、大深度・大断面シールドトンネルのブリ運搬施設の概略を明らかにした。

b) 楕円形シールド

収容する施設の用途に適合した合理的な断面の構築と地下空間の有効利用の観点から、楕円形の断面形状を有するシールド工法の設計・施工技術の開発を実施した。検討の結果、楕円形シールドの実現性については従来の円形シールド技術の応用で可能であると判断された。具体的研究結果について、以下に述べる。

- ① 楕円形シールドは、条件により円形に比べて空間に無駄がなく有効に利用できるとともに、占有幅や掘削断面積が小さくなる点で有利である。
- ② 楕円形の断面形状は、外径が10~20mのトンネルで土被り30m・セグメント桁高1m以下という条件下ではシールド掘削機構および履工計算などの検討から短径に対する長径の比が1~0.7程度が適用可能と判断された。
- ③ 楕円形トンネルに作用する荷重は、遠心力載荷実験から土被り比(土被り高さ/トンネル幅)1~3.5程度の条件の砂質地山においてはトンネル幅を直径とする円形断面のトンネルとほぼ同程度の緩み高さだが、また、土被り比1~2.5の条件の粘性地山においてはほぼ全土被り土圧が作用することを確認した。
- ④ 履工の試設計により、正楕円形に近似しているほど構造的に有利であるとともに、従来のRCセグ



図—3 楕円形シールドトンネル模型実験

メント構造で十分履工可能であることを確認した。さらに剛性の高い高強度のセグメントを使用することで桁高のトンネル径に対する割合を円形断面と同程度まで小さくできること、高強度セグメントの設計は単体曲げ試験より従来のRC理論が適用できることを示した。

- ⑤ 楕円形シールドの掘削機構として、今回新たに提案したスイングカッター及びスライドカッターの補助掘削機構と従来の円板カッターを組み合わせることで短径に対する長径の比が1~0.5の広範囲にわたる楕円形に適用できることを示した。
- ⑥ スイングカッターのジャッキ制御および掘削性能について要素実験・掘削性能実験から確認し、制御は従来の技術で十分可能であることを示した(図—3)。また、スライドカッターのシール性能実験よりその構造特性を確認した。

c) シールドトンネルの分岐・合流

地中における構造物間の接合技術として、シールド工法を用いた分岐・合流部の新しい設計・施工技術の検討・開発を行った。検討の対象は、道路インターチェンジやジャンクションを地下に建設する場合の本線トンネルからの分岐・合流部とした。その結果、分岐・合流に関する新しい施工方式として2つの方式を考案した。

一つは、併設するシールドトンネル間を接合し、多心円形の断面を構築する「併設トンネル接合方式」で、他の一つは、複数のシールドを組み合わせた合体シールドで多心円形断面を掘削してゆき、分岐地点で各シールドを個別に発達させる「シールド分離方式」である。また、2方式の共通の主要課題である特殊部分の掘削機構として揺動カッターを選定してその掘削性能を模型実験により確認し、実機においても適用可能と判断された。また、履工構造、施工法、シールドの検討を行うとともに、新たに考案した2方式についての適用性を示した。

d) 急曲線・急勾配シールド

検討の対象としては、適用範囲が広く他にも技術の応

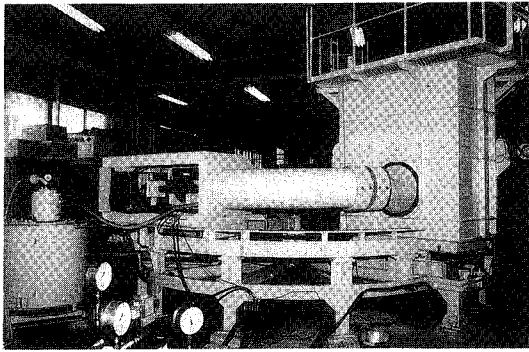


図-4 急曲線シールドトンネル模型実験

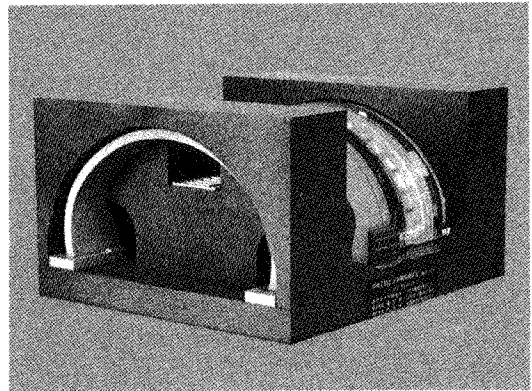


図-5 PATM工法掘削機模型

用ができると考えられる地下道路から地上へ通じるランプなどの急曲線・急勾配の条件を持つスパイラルトンネルと、地下施設からの避難坑などの急勾配の条件を持つ斜坑を対象として研究を行った。以下に研究結果の概要を記す。

- ① スパイラルトンネルのように、トンネルが互いに近接して施工される場合の作用荷重の相互影響を遠心力载荷実験により明らかにした。その結果、トンネル間隔がトンネル径の0.5～2倍程度の場合大きい影響は見られなかった。
- ② 3次元模型実験により10%勾配のスパイラルトンネルの挙動を確認した。継手を持つトンネルの挙動に関して3次元の数値解析と実験を比較することにより3次元梁バネモデルの妥当性確認した。数値解析によるパラメータスタディーにより、3次元の構造検討に関する2次元平面モデルの適用性について示した。
- ③ 3次元模型実験から急曲線施工時の中折れシールドの回転時のメカニズムについて示すとともに、検討条件下でのシールド設計の基本的な考え方について示した(図-4)。

(2) 山岳トンネル工法

地山に密着した吹付けコンクリートやロックボルトを主たる支保工とする山岳トンネル工法は、山岳部におけるトンネル施工のために開発された工法であるが、近年では都市域における地下空間建設に適用される事例もみられその適用範囲を拡大しつつある。しかし、都市内の未固結な含水地山に山岳トンネル工法で地下空間を構築することを考えたときには、地下水への影響、地表面への影響、施工中の酸欠や可燃性ガスの噴出、切羽の安定、より合理的な設計・施工手法の確立等、解決すべき課題が多い。本研究ではこれら解決すべき設計・施工上の技術的課題に対して検討を行い、都市域における山岳トンネル工法の適用性の拡大を図った。

a) 未固結含水地山のトンネルの設計・施工

山岳トンネル工法が都市域での地下空間建設に導入さ

れたのはごく最近であり、建設技術としては開発および改良の余地が数多く残されている。具体的には、切羽の安定対策、地下水対策、地盤変状対策などの課題がある。これらの課題に対処するために、土被り50～100m・3車線道路トンネル程度の断面のトンネルを想定して、補助工法に関する検討を行い、以下のような結果を得た。

- ① 排水工法については、大深度未固結含水地山を山岳トンネル工法で施工する場合特に注意して検討しなければならない。というのは、湧水処理は切羽の自立や周辺地下水等に影響を与えることと深く関係しているからである。排水工法を採用する場合であっても薬液注入工法の併用により、周辺の地下水位の低下をできるだけ抑え切羽からの湧水を処理する部分排水工法を検討した。部分排水工法を用いた補助工法により排水位置・排水量とリチャージ位置・リチャージ量のそれぞれをパラメーターとした効率の良い排水工法を行い得ることを試算により確認した。
- ② 注入工法については、大深度の未固結地盤では地下水圧の影響を考慮する必要があると考えられる。すなわち、深いと土圧や水圧が大きく、とりわけ、効果的な注入速度や注入圧力の設定において地下水圧が薬液注入に及ぼす影響は大きい。そこで実際の圧力環境を再現できる大型加圧モールドにより比較的大規模な注入実験を実施した。その結果、未固結含水地山において間隙水圧に応じた注入効率の良い注入圧を設定することができた。
- ③ 凍結工法については、確実性が高く信頼のおける工法ではあるが、他の補助工法と比較して工期・工費の面で多くの課題を有する。ここでは工期短縮・工員削減のために、長さ10m、幅3m程度の半ドーナツ状の空間をトンネル縦断方向に100～200m間隔で設置し(中間ベース)、この空間から長孔水平ボーリングを穿孔し、凍結工法を実施する方法を考案し、試算を行った。

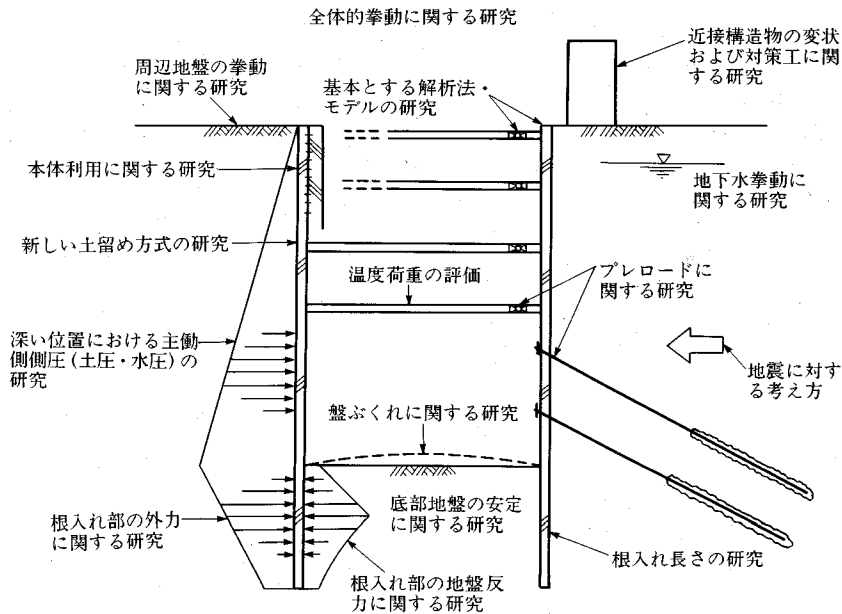


図-6 大規模開削の検討課題

b) 新工法の開発

大深度未固結合水地山では掘削地山が高水圧・高土圧の状態にありこのような地山に対し山岳トンネル工法を用いてトンネルを施工する場合には切羽の安定が不可欠な条件となる。切羽の安定を図るためには切羽の自立性を確保するとともに事前支保によって切羽前方地山を補強できる地盤補強工法を開発することが重要である。ここでは切羽前方地山を補強する地盤補強工法としてLAP (Long Arch Pre-Lining) 工法とPATM (Pre Arch Tunnelling Method) 工法を提案した。

LAP工法は、荷重と強度についての試算に基づいてトンネル掘削に先だつて切羽前方地山内に長尺シェル状のプレライニングを構築するものである。プレライニング材と材料の口元処理の実験を行い良好な結果を得たが、今後の課題も確認された。またPATM工法は、トンネル本坑を掘削する前にあらかじめ地山内に一次履工を完成させておいてから、一次履工内の土砂地山を掘削してトンネルを構築する工法である(図-5)。掘削・ズリ排出処理、プレアーチコンクリートの実験を行い良好な結果を得たが、今後の課題も確認された。

(3) 地盤変状の予測・対策

地下空間に構造物を建設する際には既存の地上・地下構造物への影響を最小限に抑制する必要がある。本研究では、トンネルの建設に伴う地表面沈下の予測を有限要素法により解析する手法について検討した。その結果、解析モデルの側方及び下方の境界領域、地山の地山物性値、応力解放率、等の設定方法について明らかにした。本研究では、特に、実際の施工現場ではトンネルの土被

りが大きくなる程地表面沈下が小さくなるが、従来の有限要素解析手法ではこれと相反する傾向があった点について、入力する掘削相当外力を見直すことにより改善された方法を提案し従来の解析手法で検証するという手法について、他の検討結果とも併せてまとめて、土木研究所資料第3232号、地盤変状の予測・対策マニュアル案を作成した。

4. 大規模開削・立坑技術

(1) 大規模開削に伴う土留めの設計・施工技術

地下構造物を地上から20~100mの深度に建設する場合、土留めの設計法および施工法の選定は、工事の安全性および経済性に著しい影響を及ぼす要因である。したがって、土留めの設計においては、精度の良い解析手法の設定や側圧のモデル化が重要であり、施工においては信頼性の高い工法の採用が必要となる。このため、技術の現状を調査し、検討課題をまとめた(図-6)。これらの課題のうち主要なものについて、現場での実測データの収集・分析および数値解析により検討を行った主な結果を以下に要約する。

a) 土留め壁への作用側圧

洪積砂層においては土圧水圧を分離し、従来どおり計算してよいことが認められた。この層においては粘着力cが存在し、設計に用いることが可能であるが、定数設定にあたっては、詳細な調査が必要である。

洪積粘性土においては、土圧・水圧一体を基本とし、ランキン・レザールの式により求めた側圧に、下限値として別途実測水圧を加えた側圧が、実測側圧を概ね表現

していることが確認された。ただし、洪積粘土の上下に砂層が広がり、それぞれが水頭の異なる被圧水を有している場合の掘削に伴う水圧の変化など、予測が簡単でないことが多いため、今後の研究が必要である。

b) 土留め壁根入れ部の地盤反力

実測データを基に水平方向地盤反力係数を求め、根入れ部の地盤反力特性について検討した。その結果、水平方向地盤反力係数は土留め壁の変形の増加に従って低下しており、ばらつきは大きいものの、その傾向は $-1/2$ 乗則におよそ合致していることが認められた。

また、このひずみ依存性について、モデル地盤を想定した試算を行い、土留めの変形量や断面力への影響について検討した。その結果、解析モデルにおいて地盤の塑性化を考慮していることから、根入れ部付近の地盤が比較的軟らかく土留め壁の変位が大きい場合には、土留め壁の変位への影響が多少あるものの、硬質地盤の場合や断面力への影響は小さいことが認められた。

(2) 地盤変状の予測・対策

今後都市内における開削工事は、過密した既設構造物の中で進める必要があり、これに伴って土留め構造物も大深度化・大規模化が進んで行くと考えられるので、環境対策としての周辺地盤変状に対する予測対策は重要な課題であると考えられる。本研究では大規模掘削による周辺地盤の変状予測手法およびプレロード工法等の対策工法について、計測データの収集・解析、実験および有限要素法に基づく検討を行い、以下の結果を得た。

- ① 土留め壁の変位による影響範囲は、実測値に対して弾性解析ではかなり大きく、弾塑性解析では比較的よい一致を示した。また、土留め壁の変形時に発生する背面土の地すべりは、弾塑性解析により推定可能であることが認められた。
- ② 掘削深さは30 m以上の大深度掘削に対する数値解析によれば、掘削に伴う背面側地盤の水圧の減少範囲は透水係数の影響を大きく受け、透水係数が高い場合には周辺地盤の沈下は顕著になる。透水係数が小さい場合は圧密が進行しにくい沈下量は少ない。

(3) 大深度土留め設計施工指針(案)

大規模土留め壁の設計における諸課題について既往の研究成果に本総プロでの成果を加えるとともに、施工上の留意点をまとめ、「大深度土留め設計施工(案)」を作成し、(財)先端建設技術センターより出版した(平成6年10月)。指針(案)の適用範囲としては、掘削深さが30 m以上50 m未満とし、土留め壁の種類は地下連続壁、鋼管矢板留め壁および柱列式地下連続壁としている。

5. 地盤補強技術および止水技術

地上の限定された作業スペースから地下深部の地盤中

に広がりのある空間を建設するという新たなニーズに対して、新たな工法の開発が望まれている。

これに対して、ロックボルト等を用いた補強土工法とグラウンドアンカー工法と併用した工法は、切り梁支保工なしの掘削が可能であり、作業性、経済性の面で有利になると考えられる。しかし、この工法を地下掘削に適用するには、地上の土構造物と荷重条件、施工条件が異なること、さらには高水圧の地下水下の未固結地盤であるため止水のための注入工法の併用が不可欠であることなど、検討すべき課題が多い。

本研究は、特に地下に広がりのある空間を掘削する際の地盤補強技術及び止水技術の開発を行うものであり、実験や数値解析の結果をもとに本工法の適用性を検討した。なお、本技術は掘削時の地盤補強・止水を考慮したものであり、永久構造物としての適用性については別途検討が必要である。

(1) 地盤補強技術

鉛直な掘削面をロックボルトとグラウンドアンカーとの併用により補強する工法について、比較的軟質な未固結地盤及び土丹のような固結地盤を対象として実験による適用性の検討を行い、固結地盤に対する適用性を確認した。

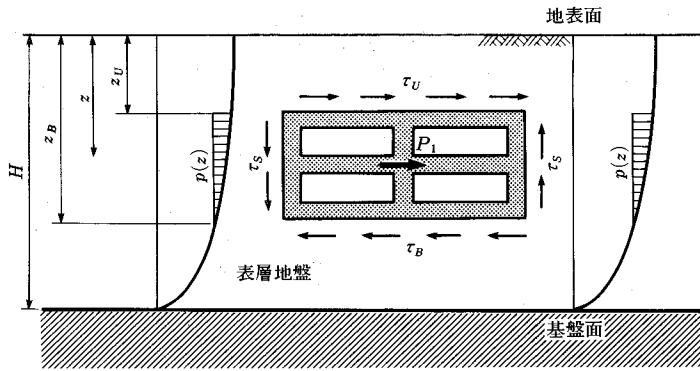
(2) 止水技術

止水工法としては、地下水の止水機能のみではなく、地盤を補強する効果も期待されている。また、地上あるいは坑内の限られた作業スペースでの施工のためには設備は小さいことが望ましい。このことから、止水工法として最も有力であると考えられる注入工法について、その機能と適用性を検討するため、代表的な数種類の注入材料について実験を行い、以下のような結果を得た。

- ① 地盤への浸透性については、超微粒子セメント、超微粒子セメントLWについては水ガラス等と比較して浸透性に若干劣る傾向が見られた。
- ② 改良強度としては、超微粒子セメントで約30~80 kgf/cm²、超微粒子LWで約20~80 kgf/cm²と高強度が得られ、これら2種類の注入材料は十分な改良強度が期待できるものと考えられる。
- ③ 止水性については、超微粒子シリカ、水ガラス、超微粒子LWは、透水係数を 1×10^{-6} cm/sec程度まで減少させ、十分な止水効果をあげている。超微粒子セメントは 1×10^{-4} 程度までしか減少していない結果であった。また超微粒子セメントミルクを実際の土丹層へ注入し、適用性を確認した。

6. 環境保全技術

地下空間の利用技術の開発とともに、地下空間利用による周辺環境への影響評価及び保全技術の開発も不可欠となっている。地下空間利用に伴う地盤環境への影響の



H : 表層地盤の厚さ
 z : 地表面からの深さ
 z_B : 地表面から構造物底面までの深さ
 z_U : 地表面から構造物上面までの深さ
 τ_S, τ_B, τ_U : 構造物側面、底面および上面に作用する地震時周面せん断力
 P_1 : 構造物の重量に起因する慣性力
 $p(z)$: 地表面からの深さ z における地震時地盤変位

図一七 応答変位法で考慮する地震時荷重

主なものとしては、掘削に伴う周辺地盤の変状と地下水環境への影響があげられる。本研究においては、これらの項目についてその予測と対策技術について検討を行った。なお、トンネルや立坑の掘削に伴う地盤環境への影響の予測とその対策技術についての検討結果は、それぞれの掘削技術の成果（前出）とともにまとめており、ここでは復水工法を中心に述べる。

(1) 復水工法

建設工事に伴う地下水環境への影響としては、地下水水位低下による地盤沈下、井戸枯渇、地下水質の変化、等が従来から発生しており、そのつど対策が施されてきたが、近年その対策工法として復水工法の採用が検討されることが多くなっている。ここでは、主に工事期間中に実施される復水工法の適用上の問題点を明らかにし、その設計法と施工法に関して適切と思われる手法を提案した。

(2) 地下水環境の保全技術マニュアル（案）

前項の復水工法に関する研究成果とともに、地下構造物構築後に生じる可能性のある地下水流阻害の対策工法について検討した結果を加えて、「地下水環境の保全技術マニュアル（案）」としてまとめた。

7. 大規模地下施設の耐震設計技術

本研究は、大規模地下道路、大規模地下河川等の全く新しい構造で、かつ、大規模な地下構造物の耐震設計技術を開発することを目的として実施したものである。

大規模地下構造物を地震時の振動特性に基づいて分類すると、深さ方向に比べて水平方向に扁平で長大な地下構造物（幅広地下構造物）、水平方向に長大な地下構造物（線状地下構造物）、水平方向に比べて深さ方向に長大な地下構造物（鉛直地下構造物）、多くの隔壁や接続物が組み合わされた構造物、の4つの構造パターンに分類される。主要な研究成果は、以下のとおりである。

(1) 応答変位法による幅広地下構造物及び鉛直地下構造物の耐震計算法の開発

構造物の規模が大きくなると、地盤の変形により構造物の周辺に作用するせん断力（以下、地震時周面せん断力と呼ぶ）の影響が大きくなり、これまでの応答変位法では地震の影響を適切に評価することができない。このため、従来の応答変位法で考慮する地震時土圧及び慣性力に、地震時周面せん断力を加えた新しい応答変位法（図一七）を開発した。

(2) 応答変位法による大断面シールドトンネルの耐震設計法の開発

シールドトンネルの地震時変形特性に関する既往の検討結果をもとに、大断面シールドトンネルの耐震設計法をとりまとめた。その要点は以下のとおりである。

- ① トンネル長手方向の耐震設計法について、耐震計算は、応答変位法によるものとし、長手方向に沿う地震時地盤変位により生じる断面力を用いて耐震性を調査する。地形・地盤条件が著しく変化する箇所、異種構造物との取付部、トンネル分岐部・曲線部に対しては、動的解析により安全性を確認する。
- ② トンネル横断方向の耐震設計法について、従来、トンネル周辺の地盤が均質でかつ土被りが大きい場合には、トンネル横断面方向に及ぼす地震の影響は一般に小さいといわれてきた。しかし、常時の断面力と地震時の増分断面力を重ね合わせた履工の応力は、ある条件下では地震時の割増しを見込んでも許容応力度を越える可能性があることが本研究により明らかにされたため、トンネル横断面方向についても耐震設計を行うこととした。

(3) 大規模地下構造物の耐震設計法・ガイドライン（案）

以上の研究成果を「大規模地下構造物の耐震設計法・ガイドライン（案）」としてとりまとめた。本ガイドライン（案）には、4つの構造パターンごとの耐震設計法、地震の影響を低減する構造、及び大規模地下道路の地震

表-1 都市部での各トンネル工法の技術課題

工法	開発項目	開発内容	備 項
山岳トンネル工法	高い地下水圧を事前に処理する技術	止水工法、地下水低下工法、圧気 NATM 等の技術開発	特に、注人工法は大深度高水圧でも止水効果の高い技術の開発が望まれる。
	機械化施工技術の開発	掘削方法、ズリ搬出方法の機械化技術の開発	TBM の利用により掘削の機械化をする可能性はある。
	周辺地山安定化技術	早期の覆土工事を可能にする技術の開発	粉塵対策等の技術開発、新しい型枠を使った一次覆工の試験施工を行う。
	切羽前方地盤調査技術の開発	高感度センサー技術等による調査技術の開発	電磁波深探査を検計中だが、現在は切羽数 m 前方までしか調査できない。
シールドトンネル工法	高水圧に対する遮水工法の開発	テールシールド、セグメントシールド材の開発	水圧 11 kgf/cm ³ に対する施工実績がある。
	無人化施工技術	掘削、ずり出し、覆工作業を無人化する施工技術の開発	シールド機姿勢制御と測定の省力化を遠隔操作によって実現し試験施工を予定している。
	超大断面シールド技術	断面形状を考慮した超大断面シールドの開発	口径 14 m は建設されている。多連式シールド工法による大断面化が検討されている。
	長距離掘削に対するシールド技術	シールド機械の耐久性、カッタービットの摩耗対策、地中でのビット交換技術の開発	現状は凍結工法、圧気工法を併用してのビット交換を行う。
開削工法	水中施工技術	地下連続壁工法等における水中掘削、水中コンクリートの打設等の技術開発	
	無人化施工技術	縦型シールド等により掘削作業を完全に無人化する施工技術の開発	縦型シールドの具体的検討例がある。

防災システムが含まれている。

研究成果のうち、大断面シールドトンネルの耐震設計法は、東京湾横断道路シールドトンネルをはじめとして、多数の下水道用、上水道用シールドトンネルの耐震設計に用いられている。また、幅広地下構造物の耐震設計法は、「駐車場設計・施工指針、(社)日本道路協会、平成4年11月」に反映され、大規模地下駐車場の耐震設計に用いられている。

8. 地下空間利用技術の今後の展望

今後の地下空間利用技術の課題についても、都市部特有の条件を前提として考える必要がある。すなわち、都市部では地質が未固結で地下水位が高く、地表部は人々の生活の場として高度に利用されている。このような条件での山岳トンネル工法、シールドトンネル工法、開削工法各々がかかえる課題についての建設技術者へのヒアリング調査を行った。その結果をまとめたものを表-1に示す。

表-1より各工法に共通しているのは、①地下水対策に関する技術、②省人化もしくは無人化に関する機械化施工技術、の2点であり、これらがトンネルの技術開発の大きい流れになっていると考えられた。

一方こうした技術開発費用をどのようにまかなうか、また新しい技術が結果的に建設費用増大を伴う場合品質の向上等との関係からそれがどこまで容認されるか等については現在一般的な判断基準は示されていない。ただ、従来、経済性と基本的な品質だけで技術評価してきたが、

近年それに耐久性、工期、施工性等他の要因も併せて、総合評価をしようとする試みがなされるようになっていく。長期的には、技術開発における経済性と他の要件とのバランスを取ることが重要と思われる。

9. おわりに

5ヶ年間にわたる研究の成果として得られた新たな開発技術及び設計・施工指針(案)、マニュアル(案)等は、従来にない大断面、大深度の地下利用を可能とするものであり、今後積極的な地下空間利用の計画、設計、施工を推進する上での礎になるものと確信している。しかし、開発した技術には、直ちに現場の参考となるものもあるが、中にはさらに多くの実測データによる裏付けが望まれるもの、要素技術の開発の段階にあるもの、等もあり、今後より一層の研鑽を重ね、現場での試験を行いながらその完成度を高めていくことが期待される。

最後に、本総合技術開発プロジェクトの実施にあたり、ご指導を頂いた地下空間利用技術開発委員会(伊吹山四郎委員長:(財)国土開発技術研究センター)の各位、共同研究として参画頂いた(財)先端建設技術センター及び民間企業の方々、並びに直接研究を担当された方々に心より感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 建設省総合開発プロジェクト「地下空間の利用技術の開発報告書」(第1~3分冊)、平成4年8月、建設省。
(1994.1.10 受付)