

洪積砂礫地盤における縦シールド掘進時の推力伝達機構

について —合理的な縦シールド設計・施工法の提案—

JACKING FORCE TRANSMISSION MECHANISM DURING VERTICAL SHIELD CONSTRUCTION IN DILUVIAL GRAVEL-SANDY LAYER — PROPOSAL ON THE DESIGN METHOD OF THE VERTICAL SHAFT SHIELD —

横山博一¹⁾・伊東三夫¹⁾・田中 弘²⁾・池谷 正²⁾・佐藤和郎³⁾

Hirokazu YOKOYAMA, Mitsuo ITOH, Hiroshi TANAKA, Tadashi IKEYA and Kazurou SATOU

To establish a practical design and a construction implementation system for the 'Vertical-Horizontal Continuous shield tunneling method', in-situ measurement was firstly employed by the authors. They chose two typical projects located in different ground conditions. One is an alluvial layer and the other is a diluvial gravel-sandy layer. By comparing observational data obtained from the two sites, a rational way of evaluating shield drive resistance force and jacking force transmission mechanism are studied. The authors found some key factors influenced on design and construction and they proposed procedures for appropriate design and construction of the vertical shaft shield for the 'Vertical-Horizontal Continuous shield tunneling method'.

Key Words: shield, vertical shaft, design method, diluvial ground, in-situ measurement

1. はじめに

一台のシールドで立坑から横坑までを連続して施工できる縦横連続シールド工法は、通常のシールド工法の場合に必要なシールド発進時の補助工法の省略、工期の短縮、立坑用地の縮小化や騒音・振動などの低減化等、施工性・安全性・経済性の各面での効果が期待できる工法であり、特に、立坑構築に関わる周辺環境の制約条件が厳しい都市部のシールド工事に対して有効な工法である。著者らは、これまでに3カ所の都市部シールド工事において、既に本工法を採用してきた。ただし、施工実績が少ないことから、実際に設計・施工を行うに際しては従来のシールド工事などの経験や知見に頼らざるを得ない課題を有していた。こうした課題を解明するため、著者らは、地盤条件の異なる2カ所の工事で縦シールド施工時の詳細な実態調査を実施し、縦シールド掘進に必要な推進力の設定法や、その推力の伝達挙動の実態について解明し、推力伝達機構を考慮した掘進反力体設計の合理的な考え方について検討した。

本報文は、N値が0～2の軟弱な沖積粘性土地盤を掘進したA現場¹⁾と、N値が30～50以上の洪積砂礫地盤を掘進したB現場²⁾での2カ所の現場実態調査結果に対して比較考察を加えるとともに、縦シールド施工時の必要推進力、ならびにその推力伝達機構を考慮した合理的な縦シールドの設計・施工法の考え方について報告するものである。

1) 東京都下水道局

2) 正会員 日本工営(株) 地盤構造部

3) 大成建設(株)

2. 縦シールド掘進施工を満足させる条件

縦シールド掘進時に縦シールドに作用する力と、縦シールド後方(上方)の立坑セグメントや反力構造体に作用する力を整理すると図-1のようにモデル化できる。縦シールドに作用する力としては、鉛直下向き方向の力として「縦シールド自重 W_m 」と「必要推進力 J 」があり、鉛直上向きに作用する力としては「泥水浮力 U 」と「掘進抵抗力 F 」が作用する。一方、シールド後方の上方位置に順次組み立てられた立坑セグメント内には推進力の反力である「推力伝達力 F_i 」が作用し、この際、地盤によっては立坑セグメントの「周面摩擦力 F_{rs} 」が発揮される。立坑上端部に伝達した推力伝達力の反力は、地表に構築されているRCガイドウォールや掘進反力体(例えば、A現場ではベノト杭、B現場ではグラウンドアンカー)により確保する。

したがって、縦シールド掘進施工を可能とするには、式-1のように泥水浮力 U と掘進抵抗力 F を上回る必要推進力 J を縦シールドに装備すること、および、式-2のようにその必要推進力に対して確実に反力が得られる立坑部材あるいは掘進反力体の設計を行うことが重要なポイントとなる。

必要推進力 $J > \text{掘進抵抗力 } F + \text{泥水浮力 } U - \text{縦シールド自重 } W_m$ 式-1

掘進反力体(W_g, W_b, P_g など) $> \text{必要推進力 } J - \text{セグメント自重 } W_s - \text{周面摩擦力 } F_{rs}$ 式-2

これまでの縦横連続シールド工事では、施工実績が少ないために、図中に示す各課題に対して、通常の横シールド工や類似立坑工事での実績や経験に基づいた設計・施工を実施してきた。本文では、地盤条件の異なる2ヵ所の現場実態調査結果に基づいて、課題1, 3, 4に対する合理的な考え方を示すものである。なお、課題2に関しては遠心載荷模型実験を用いた著者らの研究成果³⁾が参考になる。

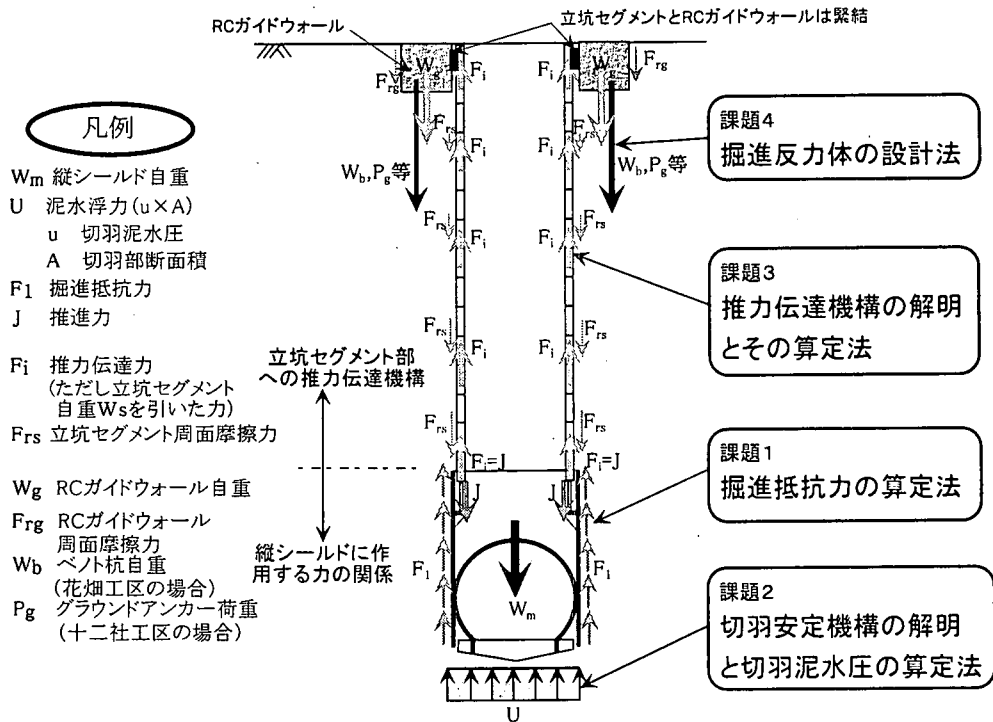
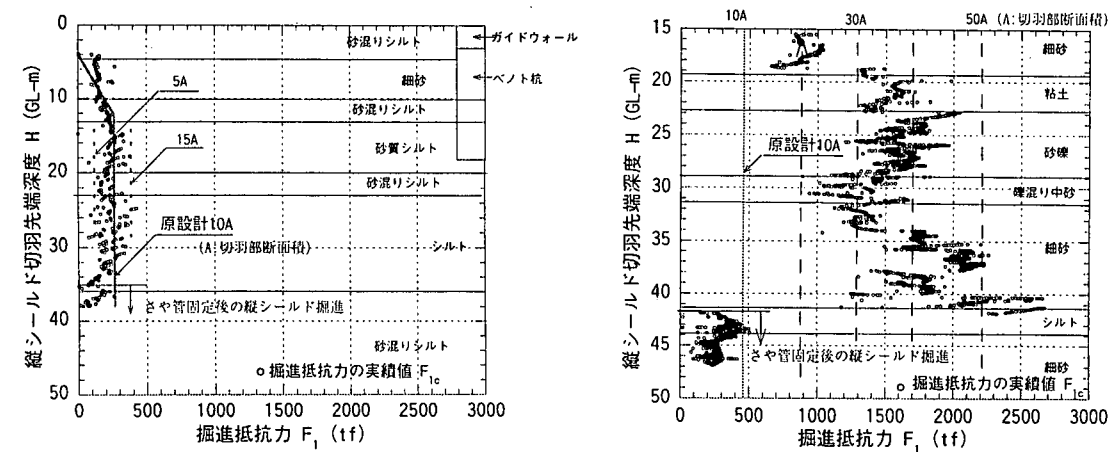


図-1 縦シールド掘進時の作用力の関係と技術的課題

3. 掘進抵抗力

図-2に現場実態調査より得られたシールド外殻に作用する掘進抵抗力の実態を示す。当初の原設計では、これま

での通常の横シールドの実績等を参考にして、どちらの現場に対しても縦シールド切羽部断面あたり 10tf/m^2 (9.8 kN/m^2) を見込んでいた。同図より、A現場の場合には掘進抵抗力の実態(平均値)は原設計値と整合している。一方、B現場の場合は原設計値の 3~5 倍を示し、しかも地盤性状に応じて掘進抵抗力が変化する実態が把握された。図中立坑床付け深度付近の「さや管固定後の縦シールド掘進」とは、それまで横シールド発進用の開口部を覆っていたシールド外周部の筒(さや管)を所定深度で固定し、その内側のシールド部分のみが掘進する状態での掘進抵抗力である。現象的にはシールド外径がやや小さくなっているため、切羽部のみに作用する掘進抵抗力の実態と解釈できる。



(1) A現場(沖積粘性土地盤) (2) B現場(洪積砂礫地盤)

図－２ 掘進抵抗力の実績値と縦シールド切羽先端深度の関係

縦シールド掘進時に必要な推進力の合理的な評価を行うためには、この掘進抵抗力が的確に算定されることが必要である。すなわち、掘進抵抗力が小さいほど必要推進力を小さくでき、掘進反力体の規模も小さくなることから経済的な設計が期待できる。一方、掘進抵抗力の算定が不正確であると、例えば、過小評価の場合には推進力不足のために縦シールド掘進に支障を生じることが懸念される。反対に過大評価の場合は不経済な掘進反力体を設計してしまうことになる。実態調査結果より、掘進抵抗力の合理的な算定に際して考慮すべき条件は次のように整理される。

条件 1)掘進抵抗力はシールドとその周辺地盤間の摩擦力に起因する成分(F 1)と、切羽断面部分に生じる成分(F 2)とで構成されると考えるのが合理的である

条件 2)摩擦力に起因する成分(F 1)はシールド外殻の面積に関係すること

条件 3)掘進地盤性状を的確に反映できること

上記の条件 1)の内、シールドとその周辺地盤間の摩擦力に起因する成分(F 1)は、条件 3)より地盤条件を砂質地盤と粘性土地盤に大別して扱うこととし、それぞれの摩擦抵抗力を考慮した条件 2)の形式による算定式として式－3を考えた。

$$F\ 1=\mu\times P_m\times(\pi D_m\cdot L)<\text{砂質地盤の場合}> \hspace{10em} \text{式－3 (1)}$$

$$F\ 1=C\times(\pi D_m\cdot L)<\text{粘性土地盤の場合}> \hspace{10em} \text{式－3 (2)}$$

- ここで、
- F 1 : シールド外殻に作用する掘進抵抗力[tf]
 - P_m : 縦シールド外殻面に垂直に作用する土圧[tf/m²]
 - D_m : 縦シールド外径[m]
 - L : 縦シールド長さ[m]、したがって(π D_m・L)は縦シールド外殻の面積
 - C : 粘着力[tf/m²]
 - μ : シールドと周辺地盤間の摩擦係数

この式は、通常の横シールド工法を対象としたトンネル標準示方書⁴⁾に示されている考え方を参考に、縦シール

ドでは不要なもの(例えば、砂質地盤の算定におけるシールド自重項)を除いて組み立てたものである。

次に、切羽部断面部分に作用するF2について言うと、この掘進抵抗力はシールド切羽での掘削土砂の取り込み方が大きく影響すると考えられ、このことは、シールドカッタータイプや実際の現場での施工性に大きく依存するものである。したがって、地盤物性値を反映させた評価式を構築して事前にこれを算定することは実際上困難であり、施工実績に基づく算定法の方がより実用的な評価を与えるものと考えられた。したがって、地盤条件の異なる現場実績値に基づいて、原設計で用いたような切羽部断面積Aに対応させた評価を行う。なお、これまでの実績ではF2は最大でも約10A [tf] (9.8A [kN]、ここで、A:切羽部断面積[m²])である。

図-3に上述の式-3で算定した縦シールド外殻に作用する掘進抵抗力(F1)と現場実績値の比較を示す。ここで現場実績値は、切羽部断面部分に作用する掘進抵抗力(F2)を除いたものである。砂質地盤の算定に必要なPmは、Jakyの式(1-sinφ')、φ':内部摩擦角)より算定した静止土圧係数を用いることで、B現場の実績値の特徴をうまく説明できている。自立性のある硬質地盤の場合、縦シールド掘進に伴う周辺地盤への影響がほとんど無く、掘削前の静止土圧状態に近い状態で施工がなされることを示すものである。また、摩擦係数μは吉田らの調査成果⁵⁾に基づいて、A現場で0.25、B現場で0.6を設定した。

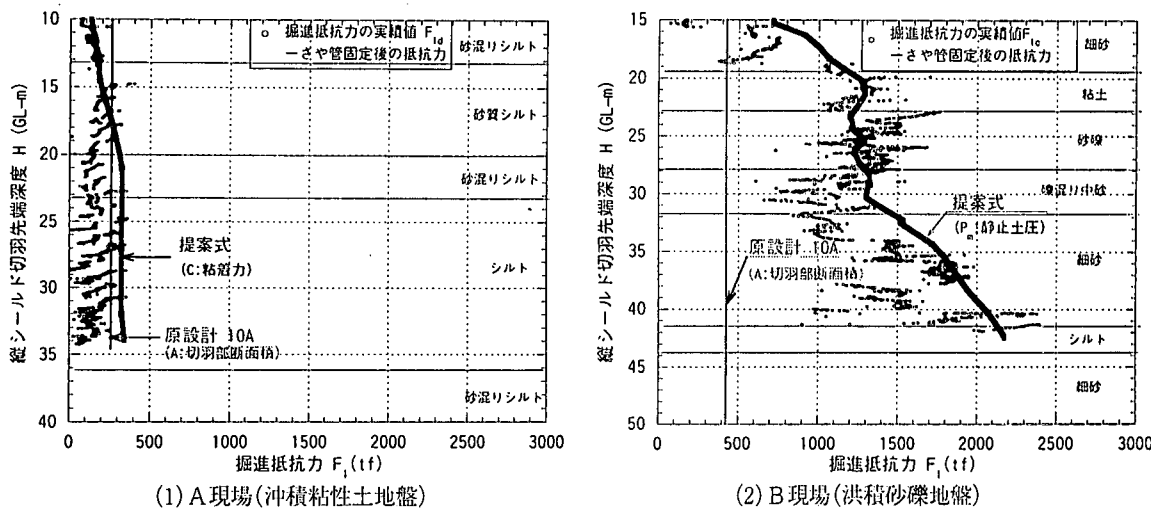


図-3 掘進抵抗力算定式の結果と実績値との比較

4. 推力伝達機構

図-4に、推進力と立坑上端部に伝達した軸力(立坑最上端位置の第1セグメントリングで計測した軸方向軸力)との比較を示す。軟弱な沖積粘性土地盤であるA現場では両者はほぼ一致している。このことは、立坑セグメントの周面摩擦抵抗が期待できないことを示す。一方、洪積砂礫地盤のB現場の場合は、縦シールドが砂礫地盤内を掘進する深度20m以深では両者に差が生じる。このことはセグメントに周面摩擦抵抗が作用し、シールド推進力が立坑途中で減衰されて立坑上端部に伝達されていることを示す。したがって、この立坑セグメント周面摩擦力を正確に評価することで、縦シールド工の設計をより合理的なものにすることができる。しかも、この効果は、1)立坑長が伸びる大深度立坑ほど増大し、2)地盤強度が大きい地盤ほど周面摩擦力が期待できるため、掘進反力体の規模の縮小につながり経済的な設計に結びつく。

推力伝達挙動のシミュレーションは、図-5に示すように立坑セグメント部材を「梁部材」に、周辺地盤から立坑セグメント外周面に作用する周面摩擦力を「せん断ばね」でモデル化した、いわゆる梁ばねモデルを用いた。図-6にシミュレーション結果を示す。これは、立坑セグメントに周面摩擦力が発揮していると考えられるB現場の縦シールドテールが礫混じり中砂層下端(GL-30m)に位置した施工状況を取り上げた場合で、モデル下端部に作用させる推

進力は施工実績より 3,400tf(33.3 MN)とした。立坑セグメントと地山間のせん断ばね定数は、ケーソン基礎の設計時に考慮する基礎側面の鉛直方向せん断地盤反力係数⁶⁾とした。Case1 と Case2 が示してあるが、前者は立坑上端部を完全固定とせずにはばね反力を配置した場合である。これは、グラウンドアンカーを掘進反力体としたB現場での施工においてRCガイドウォールの隆起現象が若干見られたことを考慮したものである。

この結果より、立坑セグメント上端部にばね反力を考慮してB現場の施工条件を忠実に反映させた Case1 は、現場計測結果と整合しており、セグメント周面摩擦力を考慮した推力伝達挙動の解析モデルとして妥当である。なお、実際の設計時には上端部境界条件のばね反力係数を事前に評価設定することは困難であるから、この場合は Case2 を用いておくことで安全側の設計が可能である。

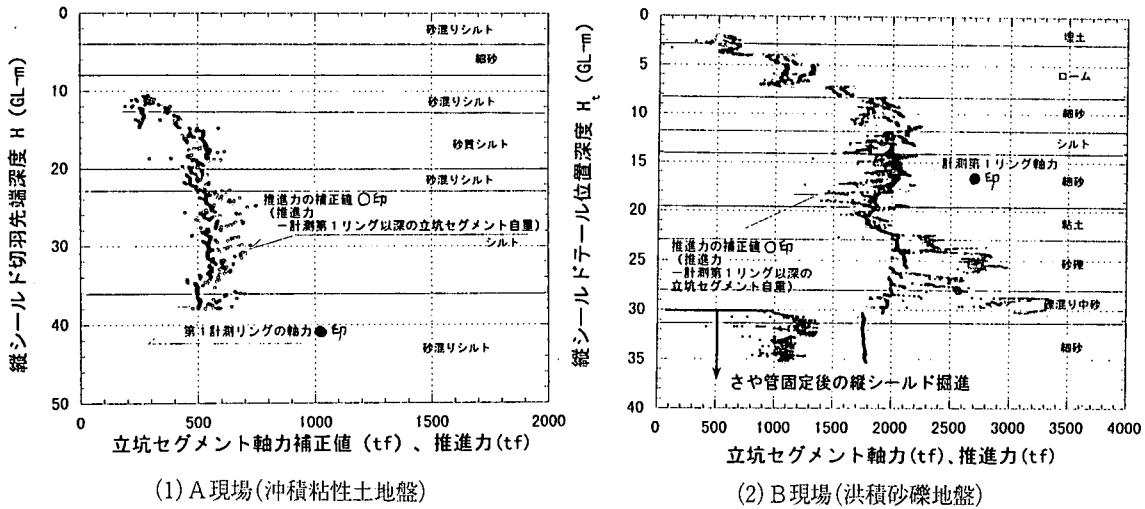


図-4 立坑上端部の軸力と推進力補正值(途中のセグメント自重を引いた値)との比較

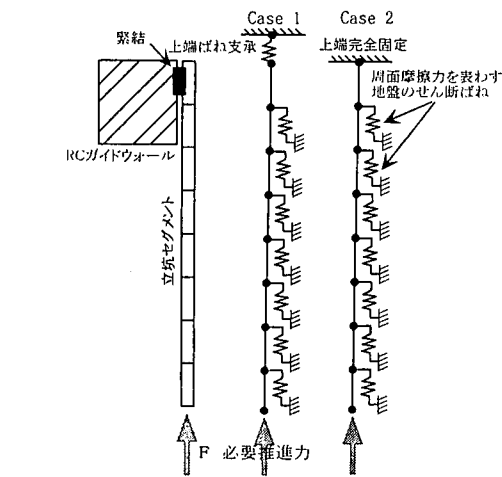


図-5 推力伝達機構の解析モデル

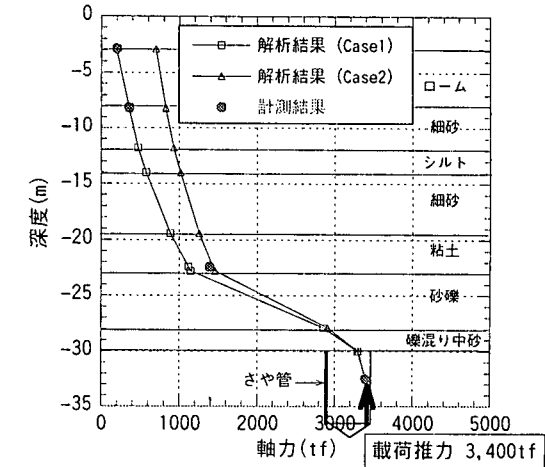
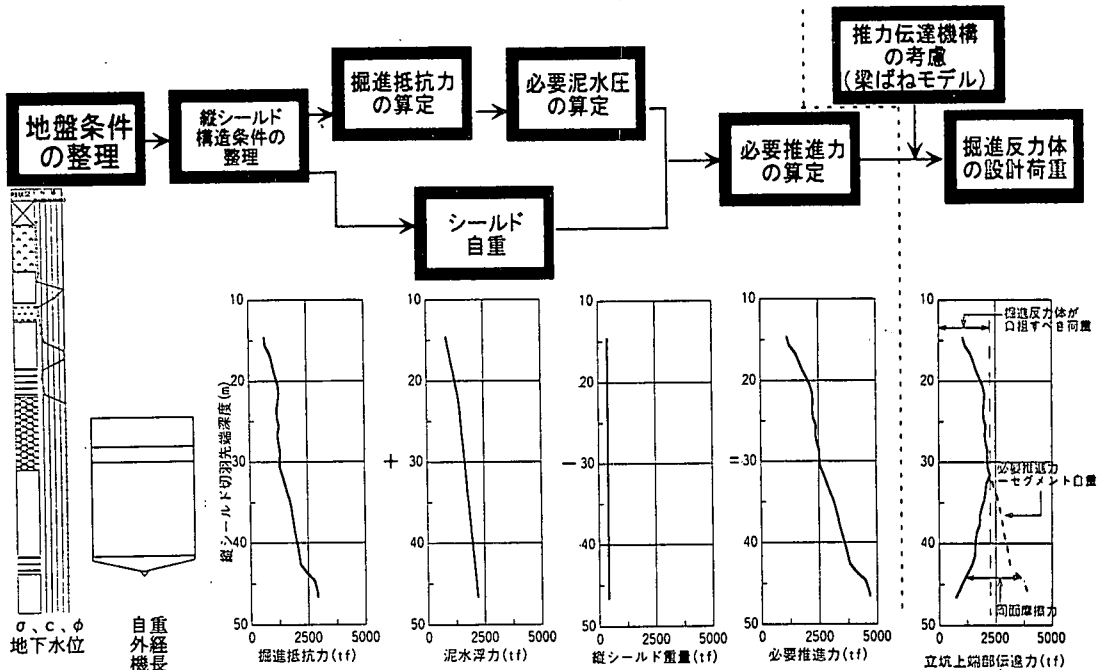


図-6 シミュレーション結果と現場計測値との比較

5. 合理的な縦シールド設計・施工法の提案

図-7に、縦シールドの必要推進力から掘進反力体までの一連の縦シールド工の設計の流れを示す。縦シールドの必要推進力は、3節で述べた算定法を用いることで、掘進地盤性状を考慮した掘進抵抗力が評価できる。また、遠心荷重模型実験を用いた著者らの研究成果³⁾を用いることで縦シールド切羽地盤の安定を考慮した切

羽泥水圧が事前に評価できるので、それらから自明の値であるシールド自重を減じることで、掘削深度毎の必要推進力が算定できる。次に、その掘削深度毎の必要推進力を作用荷重とし、周辺地盤とともにモデル化した梁ばねモデルを用いて掘進地盤性状に応じたセグメント周面摩擦力を考慮した推力伝達挙動の解析を行い、立坑上端部への伝達力を求め、その最大値に対応させた反力を確保するための掘進反力体を設計する流れである。



図ー7 地盤調査～必要推進力～掘進反力体までの縦シールド設計のフロー

6. おわりに

一般的に通常のシールド工法の場合には、建設ルートに沿ったきめの細かい設計を行うことに対しては地盤調査数の関係からある程度の限界が認められる。一方、縦シールド掘進工の場合は、立坑位置での1本の的確な地盤調査ボーリングを実施することで縦シールド掘進地盤の深さ方向に変化する地盤性状を正確に把握できる。したがって、ここで提案した掘進地盤の地盤物性値に基づく縦横連続シールド工法の合理的な設計・施工法に関する提案内容は、実際の観点からも実現場での適用が可能であり、経済的な設計を行う考え方の一つとして活用できると考えている。

なお、本報告をまとめるにあたり、適切な助言をいただいた(社)日本トンネル技術協会「第二・十二社縦横連続シールド特別委員会」(委員長:松本嘉司教授、顧問:山本 稔名誉教授)の関係各位に感謝いたします。

参考文献

1) H. Yokoyama et al.: Observational construction of a vertical shaft using the Vertical-Horizontal Continuous shield tunnelling method, Proc. Of World Tunnel Congress'97, Vienna, Austria, Vol.2, pp.665-671, 1997 2) 横山博一、伊東三夫、佐藤和郎: 洪積地盤における縦横連続シールドの縦施工, トンネルと地下, Vol. 29, No. 8, pp. 55-61, 1998 3) 横山博一、伊東三夫、阪本隆広、田中 弘、山田清臣: 縦シールド掘進時の切羽安定に関する遠心載荷実験, 第 8 回トンネル工学研究発表会, 1998, (投稿済) 4) 土木学会: トンネル標準示方書[シールド編]・同解説, p. 130, 1996 5) 吉田 保、山田孝治: 土圧式シールド掘進時の切羽土圧と周面摩擦力について, 土木学会論文集, 第 445 号/III-18, pp. 75-82, 1992 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, p. 287, 1996