第８回建設マネジメント問題に関する
研究発表・討論会講演集　1990年12月

（Ⅲ－５）

既設トンネル直上の掘削に伴う影響の予測と対策，およびその結果について

Prediction and prevention of influence by excavating soils over the existing tunnel

東京急行電鉄㈱　中曽根　敬典 *
東急建設㈱　降矢　良男 **
東急建設㈱　○酒井　邦登 ***

By Norimichi Nakasone, Yoshio Furuya and Kunito Sakai

昭和40年代中頃に山岳トンネル工法で構築された既設下水路（多摩幹線）の直上で開削工事が行われた。掘削工事では程度の差はあるものの，通常土留壁のはらみ出しや掘削底面のリバウンドが発生することが知られている。本工事においては，掘削底面から既設下水路天端まで，0.55mと極めて近いことから，掘削に伴うリバウンドによる影響が懸念された。

そこで，有限要素法（FEM）を用いて，地盤の変形，応力，既設下水路覆工の断面力等を解析することで開削工事の影響予測を行い，綿密な検討を基に対策工を実施した。しかし，事前解析には不確定要素が含まれており，地盤条件や施工にも種々のばらつきを有している。しかも近接する既設下水路は社会的にも重要なライフラインであることから，各種のセンサを設置し，計測結果に基づき既設下水路の安全性を確認しながら慎重に施工した。

本報告は，掘削に伴う既設下水路周辺地盤の挙動予測と対策，およびその計測結果に関して述べるものである。

【キーワード】近接施工，リバウンド，FEM，開削

1. はじめに

東横線田園都市第１架道橋付近軌道下横断下水道工事に伴い，昭和40年代中頃に山岳トンネル工法で構築された既設下水路（多摩幹線）の直上で開削工事が行われた。

掘削工事においては，程度の差はあるものの，通常土留壁のはらみ出しや掘削底面のリバウンドが発生することが知られている。本工事においては，掘削底面から既設下水路天端まで，0.55mと極めて近いことから，掘削に伴うリバウンドによる影響が懸念された。また，開削の形状が溝型であり，既設下水路の直上だけが除荷されて，側面は比較的除荷されないという現象が生じる。したがって，既設下水路に作用する荷重のバランスを崩すため，覆工自体の安全性も懸念された。

そこで，有限要素法（FEM）を用いて，地盤の変形，応力，既設下水路覆工の断面力等を解析することで開削工事の影響予測を行い，綿密な検討を基に対策工を実施した。

しかし，事前解析には不確定要素が含まれているだけでなく，地盤条件や施工にも種々のばらつきを有している。しかも近接する既設下水路は社会的にも重要なライフライン構造物であることから，現場計測を採用し，その計測結果に基づき既設下水路の安全性を確認しながら慎重に施工を進めた。

*　交通事業本部工務部土木課
〒150 渋谷区桜丘町26-20
**　東京支社土木部田園調布作業所主任
***　施工本部土木技術部
〒150 渋谷区渋谷1-11-8 ☎03-406-5111（ex4109）

本報告は，掘削に伴う既設下水路周辺地盤の挙動予測と対策，およびその計測結果に関して述べるものである。

2. 工事概要

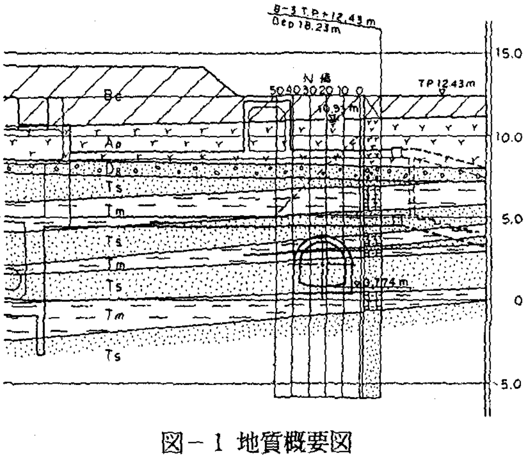
2.1 工事概要

本工事は，調布雨水幹線上流部において，東横線側より目蒲線側へ雨水管を敷設し，下流の既設ボックスカルバートと接続するものである。

2.2 地質概要

地盤の構成状況は，上部から現世の盛土および埋土層，沖積世の腐植土層，鮮新世の固結シルトおよび細砂層と続いている。

検討地点においては，上部より，埋戻した砂層盛土部，次に分解が進んだ腐植土層が存在し，N値は0～3で非常に含水に富んで軟弱である。次に，上総層群に相当する土丹と細砂の互層が存在し，土丹層のN値は例外なく50以上を示す程堅硬であるが，かなりの頻度で細砂を混入している。



図－1 地質概要図

各土層の物性値を表－1に示す。

表－1 土の物性値

	盛土部(砂質)	腐植土層	固結シルト層	細砂層
単位体積重量γ(tf/m³)	1.90	1.12	1.90	2.00
粘着力C(tf/m²)	0	7.0	93.9	0
内部まさつ角φ(°)	25	0	25.2	35
土の変形係数E_s(kgf/cm²)	100	7.0	5057	472
N値	15	2	50	50
ポアソン比ν	0.35	0.45	0.35	0.35

3. 掘削時の挙動解析

3.1 はじめに

横断下水道工事の開削に伴って，地盤の変形として土留壁のはらみ出し，掘削底面のリバウンド等が発生する。前者については弾塑性の拡張法等，比較的現実に合致するものが実用化されているが，後者については，確立された手法が見当たらない。しかし，最近では地盤問題に関して有限要素法のステップ解析が有効に用いられるようになってきた。

そこで，本検討では有限要素法の弾性解析を用いて掘削相当外力の開放に伴う応力の再配分，トンネル覆工の断面力変化について調査するものとした。

ただし，今回の検討断面においては，掘削底面の直下に既設下水路が位置しており，上方に発生する土留壁のはらみ出しの影響は，根入れ部の地盤状況からもほとんど無いものと考えられる。したがって，リバウンドのみを考慮するものとした。

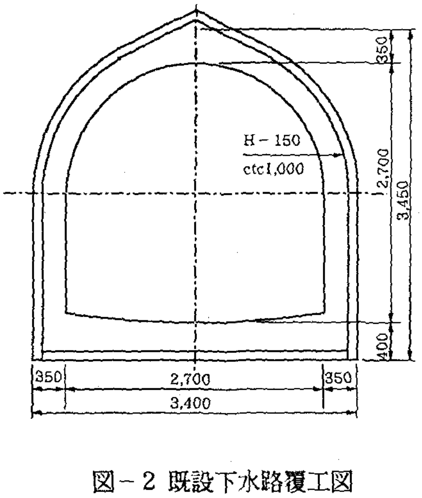
解析ケースは，偏圧による既設下水路の影響を調査するために，部分掘削も同時に考慮した。

FEM解析を行うには，複雑な実現象を簡単にモデル化し，計算の簡略化を図る必要がある。

土丹と細砂は細かく互層を成し，層厚が大体等しいので，均一層とみなし弾性係数を平均して使う。

・既設下水路覆工

既設下水路の覆工部材は，H鋼支保工を考慮に入れないで，無筋コンクリートの梁要素としてモデル化する。



図－2 既設下水路覆工図

3.2 解析方法

解析は，有限要素法による2次元平面歪状態弾性解析を使用した。

〈解析手順〉

[STEP.1]

全要素に自重を作用させて，初期応力状態を作成する。開削前の応力分布を把握するため，応力，ひずみ，変形を計算し，変形だけゼロクリアしておく。

[STEP.2]

部分掘削を仮定し，既設下水路から遠い方から，掘削部の要素を削除し，掘削相当外力を解放する。

[STEP.3]

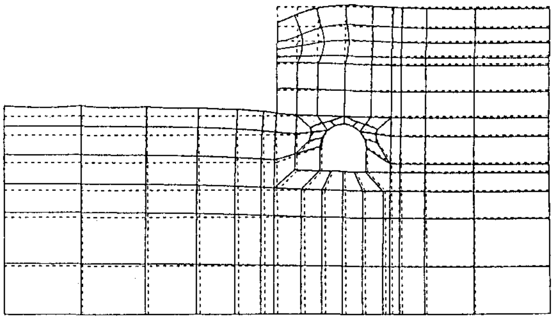
既設下水路直上を部分掘削するものとし，掘削要素を削除し，掘削相当外力を解放する。

[STEP.4]

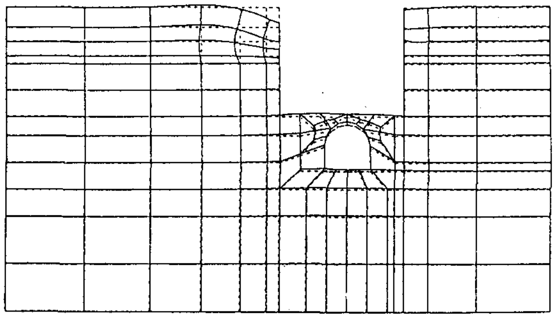
開削部の掘削土に相当する要素を削除し，掘削相当外力を解放する。

3.3 解析結果

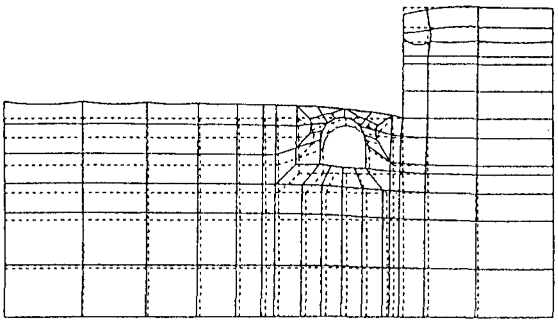
FEM解析では，変形，応力，ひずみの分布が出力されるが，紙面の都合から，[STEP.2] ～ [STEP.4] の掘削相当外力解放後の変形図のみを示す。



図－3 変形分布図 [STEP.2]



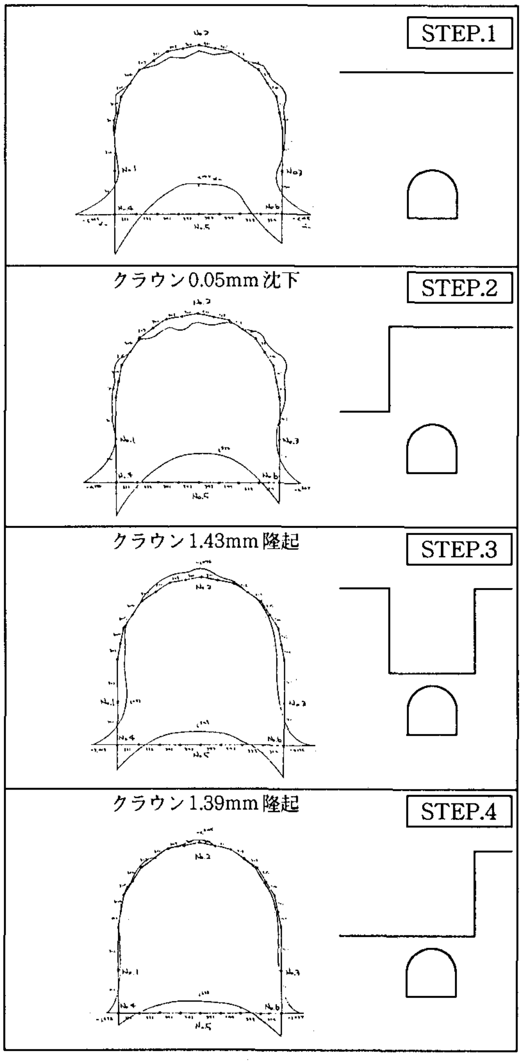
図－4 変形分布図 [STEP.3]



図－5 変形分布図 [STEP.4]

3.4 既設下水路の検討

FEMにより得られた [STEP.1] ～ [STEP.4] における既設下水路覆工の発生断面力を示す。



図－6 モーメント比較図

引き続いて，覆工部材を無筋コンクリートと仮定し，応力度を算定する。

算出したコンクリートの圧縮応力度および曲げ引張り応力度については，以下に示す基準値に従って照査するものとする。

- 設計基準強度　$\sigma_{ck}=210$ kgf／cm^2
- 許容圧縮応力度　$\sigma_{ca}=55$ kgf／cm^2
- 許容曲げ引張応力度　$\sigma_{ta}=3$ kgf／cm^2

表－2 応力度の算定結果

（単位：kgf／cm²，正：圧縮，負：引張り）

No	応力	STEP.1	STEP.2	STEP.3	STEP.4
1	σ_{max}	7.8	5.5	6.7	3.2
	σ_{min}	2.8	4.7	－3.8	－0.5
	τ_{max}	0.3	－0.2	－0.1	0.1
2	σ_{max}	9.3	10.5	6.5	1.7
	σ_{min}	－3.6	－5.8	－4.1	0.7
	τ_{max}	0.4	－0.4	0.3	0.2
3	σ_{max}	8.7	7.2	5.8	3.7
	σ_{min}	1.4	2.8	－1.5	0.7
	τ_{max}	1.6	－1.1	－1.6	1.1
4	σ_{max}	4.1	2.9	1.0	0.8
	σ_{min}	－1.2	－1.4	－0.8	0.7
	τ_{max}	1.5	－1.4	1.6	0.5
5	σ_{max}	16.4	14.6	9.1	7.1
	σ_{min}	－13.8	－13.9	－4.7	－5.2
	τ_{max}	0.1	0.0	0.2	0.1
6	σ_{max}	1.3	3.3	4.9	2.8
	σ_{min}	0.6	0.1	－1.0	－0.9
	τ_{max}	1.9	－0.7	1.5	1.1

STEP.1～4 では，曲げ圧縮およびせん断に関しては充分に余裕をもっている。問題となるのは，曲げ引張応力度に関するもので，STEP.1，2，3では，トンネルクラウン部と底版中央部の２ヶ所で許容応力度を越えている。また，STEP.4でも，底版中央部で許容を上回っている。

ただし，現状の構造物は安全に機能しており，しかも，実際には覆工コンクリート中にH鋼支保工が組み込まれていることから，初期応力状態のSTEP.1では，問題ないことが明らかである。しかも，本工事の掘削による除荷は，全部の曲げモーメントを低減する方向，また，曲げ引張応力を減少させる方向に移行しているため，覆工構造物にとっては，有利な施工といえる。

また，部分掘削について考察してみると，STEP.2の部分掘削を行った場合，トンネルクラウン部，底版中央部の現状で許容を上回っている地点で，曲げ引張応力が増加しており，不利な施工となってしまう。

STEP.3の部分掘削を行った場合，底版中央部の曲げ引張応力は約1／3に低減することができるが，トンネルクラウン部では曲げ引張応力が増大，また，NO.1側壁は曲げ圧縮から，曲げ引張に移行してしまう。したがって，STEP.3も有利な施工とは言えない。

これらのことより，STEP.1からSTEP.4に移行するのが最善と思われるため，施工にあたっては，出来るだけ均等に掘削を進めた方が良いと考えられる。

3.5 対策工

既設下水路は，昭和40年代中頃に山岳トンネル工法で構築されたもので，当時としては地盤条件が悪かったと予想されることからも，多少，構造的な信頼性が薄い。また，既設下水路の位置する土丹と細砂の互層は，地盤状況から被圧している可能性が強く，掘削による除荷で周辺の地山を緩めてしまう恐れがあった。

したがって，周辺地山を緩めないように地盤改良を行い，砂層の固化を図るのが良いと考えられる。地盤改良工法としては，周辺地山の細砂と同程度の圧縮強度を確保できる程度のもので良いので，瞬結タイプの薬液注入工法を採用した。ただし，施工にあたっては，注入圧を既設下水路に作用させないように慎重に施工した。

4. 計測結果

4.1 はじめに

掘削工事において，変形および応力等の予測値と現象値との間に差異が生じることは，現状では当然のこととされている。

この差異は，予測計算に用いる地盤や土質の資料および解析手法等に不確実性を有しているにもかかわらず，確定論的に定量化することに起因するもので，設計の段階で現象を過不足なく算出することは

不可能であり，幾分かの誤差は避けられない。

今回の線路下横断下水道工事においても，不確定要素が多い。しかも，直下に近接して埋設されている多摩幹線の下水路トンネルに掘削工事の与える影響の有無・程度等を把握し，合理的な対策を講じなければならないという背景を有していた。

したがって，本工事においても，より客観的に施工管理するために，計測管理を実施した。

4.2 予測された問題点

掘削工事におけるリバウンド問題は，比較的古くから研究の対象とされてきたが，その力学的挙動を定量的に把握することは，現在でも難しい。

本工事においても，事前解析を行ったが，地盤条件計算モデル，手法等に不確実要因を有しているため，以下に挙げる問題点が予想された。

①事前の弾性FEM解析は，土質条件より適宜，弾性係数，ポアソン比を決定したが，実際とは異なる可能性がある。

②掘削に伴い，土丹の細砂の互層から，被圧地下水を噴出する可能性がある。

③リバウンドにより，既設下水路に浮き上がりを生じる可能性がある。

④非対称掘削により，既設下水路に偏圧が発生するため，覆工に悪影響を与える可能性がある。

4.3 計測管理

(1) 計測項目

建設工事においては，対象とするもののあらゆる破壊モードを想定し，その状態を未然に防ぐよう計測管理を行い，施工を進めなければならない。

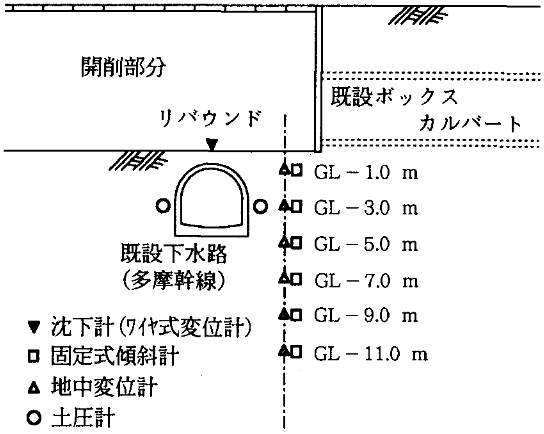
本工事で考えられる破壊モードはトンネル覆工の破壊であるが，既設下水路の流量が多いことから，直接，トンネル覆工に計測機器を設置することが不可能である。したがって，トンネル覆工に悪影響を与える地中変位および応力を計測して，トンネル覆工に作用する外力の変化を把握することにした。

(2) 計測位置

計器設置位置は，傾斜計とワイヤ式変位計は，既設下水路の片側に設置した。なお，深度方向には，2m ピッチに6台ずつ設置した。

既設下水路の天端地盤の鉛直変位測定に用いる沈下計は，傾斜計やワイヤ式変位計と同様に，ボーリング孔内に埋設した。

土圧計は，既設下水路の側壁の両側に1台ずつ設置した。

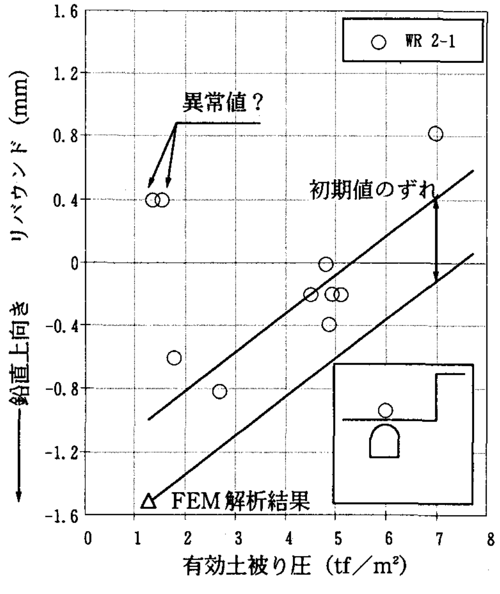


図－7 計測機器設置位置

4.4 計測結果と考察

(1) 掘削底面のリバウンド

掘削底面の鉛直変位（既設下水路直上）と有効土被り圧との関係を図－8に示す。



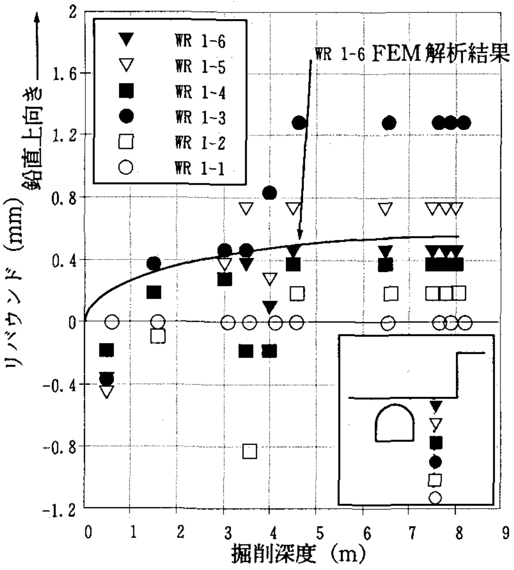
図－8 掘削底面のリバウンド

計測結果は非常にばらつきが大きいものの，掘削終了時の2点を除いて考え，初期値のずれがあるも

のとみなすと，プロットにより1.5mm程度の掘削前後の鉛直変位差が求まる。掘削底面の鉛直変位計測結果は，事前FEM解析により予測された1.52mmのリバウンドに良い対応を示していると思われる。

(2) 周辺地盤の鉛直変位

周辺地盤の鉛直変位と掘削深度との関係を図－9に示す。



図－9 周辺地盤の鉛直変位

鉛直変位の計測にあたっては，不動点の設置が困難で，リバウンドの計測と同様に，ばらつきが大きく，今後，センサの設置や掘削に対する防護に留意する必要があろう。

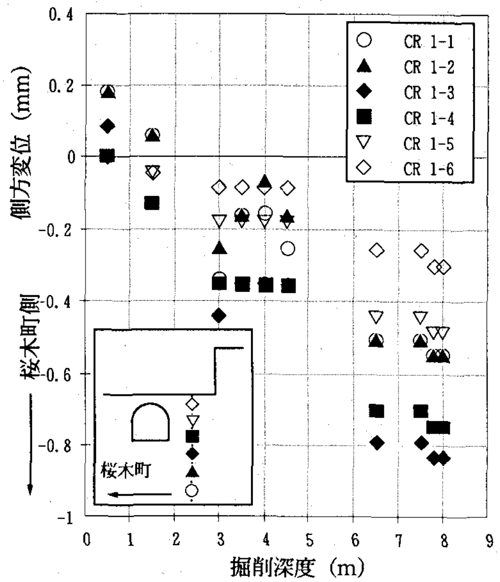
掘削の進行に応じて，鉛直変位が増大することは明らかであるが，それぞれの設置位置に対応できていない。

(3) 周辺地盤の側方変位

周辺地盤の側方変位と掘削深度との関係を図－10に示す。

各々の計測データ中のばらつきは非常に大きいものの掘削の進行に比例して，側方変位が大きくなる傾向が顕著に現れている。

事前FEM解析による予測結果と，最終掘削時の実測側方変位を比較すると，表－3になる。



図－10 周辺地盤の側方変位

表－3 側方変位比較表

(単位：mm　正：渋谷側)

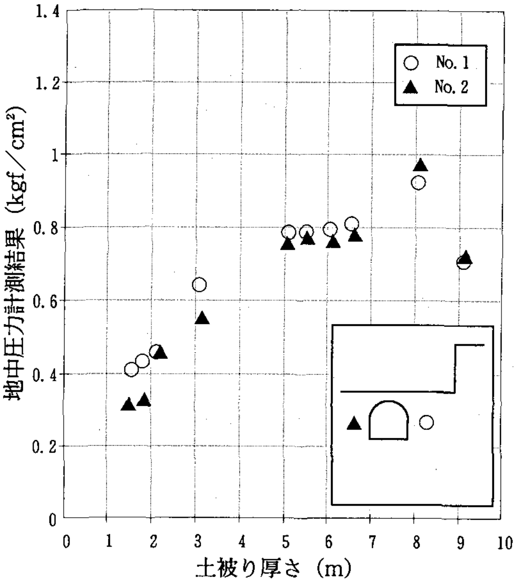
	事前FEM解析	実測側方変位
FL－1.0 m	－0.27	－0.300
FL－3.0 m	－0.54	－0.486
FL－5.0 m	－0.66	－0.746
FL－7.0 m	－0.73	－0.833
FL－9.0 m	－0.76	－0.549
FL－11.0 m	－0.79	－0.549

FEM解析は掘削底面より上の土留め杭の水平変位を固定して行ったところ，変位のモードとして，杭先がはねるような現象が解析されたが，実際には杭根入れ部に作用する主働側圧により，根入れ部がはらみ出したような変位を示した。しかし，絶対量としては，大体，側方変位量は事前解析程度に落ち着いたものと考える。

ただし，今後，同様の近接施工にあたっては，土留め壁のたわみ性を考慮した，FEMとの結合解法を用いるなど，より慎重な事前解析が必要と考えられる。

(4) 既設下水路脇の側圧

土圧計による地中圧力計測結果と土被りの関係を図－11に示す。



図－11 既設下水路脇側圧

土被りが9mから8mに減少したにもかかわらず，土圧は急激に上がっているが，これは土圧計の設置時には計器と周辺地盤が良く馴染んでいなかったためと思われる。したがって，その後は，No.1（渋谷側・土留め側），No.2（桜木町側）共に土被りに応じて減少している。

事前FEM解析によると，掘削前はNo.1で1.216kgf／cm^2，No.2で1.233kgf／cm^{2}と，No.1よりもNo.2のほうが大きくなっている。これは，本工事に先行して行なわれた雨水のボックスカルバート工事により，渋谷側の初期地中応力が小さかったものと考えられる。実測値においても良い対応を見せている。

しかし，掘削が進行するにつれて，No.1の土圧のほうがNo.2より大きくなっている。土留め壁に遠いほうが上載荷重の除荷程度が大きく，近いところは土留め壁や既設ボックスカルバートに拘束されて除荷程度が小さいものと考えられる。

事前FEM解析によると，側圧の予測値は掘削終了時において，

$$\text{No.1}: Pa = P_{SOIL} + P_{WATER} = 1.82 + 1.5 = 3.32 \ \text{tf}/\text{m}^2$$

$$\text{No.2}: Pa = 1.37 + 1.5 = 2.87 \ \text{tf}/\text{m}^2$$

であった。

ここに，P_{SOIL}：有効応力の解析結果，P_{WATER}：静水圧計算結果，である。

これに対して，計測値は，

$$\text{No.1}: Pa = 4.10 \ \text{tf}/\text{m}^2$$

$$\text{No.2}: Pa = 3.14 \ \text{tf}/\text{m}^2$$

であり，側圧の変化状況も数値的にも良く把握できたものと考えられる。

なお，若干計測値のほうが全体において大きいのは土丹層に挟まれた砂層が多少被圧されていたことが原因と考えられる。

5. おわりに

本工事は，通常の近接工事とは位置関係が逆で，既設構造物の直上を開削するものであり，除荷によるリバウンドとそれに伴う応力の再配分による覆工への影響が問題となる。

そこで，計測管理により種々の問題点に対処することにした。施工中の安全管理を目的として計測を実施する時，施工中の安全性の確認と次段階以降の安全性予測の２通りの意義を持つと考えられる。

既設下水路の流量が多く，覆工構造物に計測機器を取付けることができず，直接的に覆工の変形および応力状況を把握することができなかったため，計測データの管理基準値を明確に設定できなかった。そこで，既設下水路直上のリバウンド，側方地盤の水平変位，鉛直変位，既設下水路両側の側圧の計測結果をもとに，周辺地盤の変形および応力の分布状況を把握することで，覆工の安全性を判断しながら施工を進めた。その結果，既設下水路に大きな影響を与えることなく，無事，掘削を終了することができた。

ただし，施工途中の計測データに関しては，事前FEM解析が掘削終了時しか行われておらず，充分な安全管理ができなかった。今後，同種工事の際には，逐次掘削ステップを考慮した事前FEM解析を行うべきと思われる。

掘削終了時の周辺地盤の変形および応力の分布状況は事前解析に比較的良く整合しており，FEM解析の手法やモデル化は妥当であったと考えられる。検討にあたっては，有限要素法の２次元弾性解析を用いたが，検討する既設下水路はボックスカルバー

トと直角に交差しており，本来は，3次元問題として扱うのが妥当と考えられる。

【謝辞】

工事の推進，対策工の検討および計測管理にあたり，ご理解，ご協力をいただいた東京都下水道局の方々，並びに東京急行電鉄㈱鉄道事業本部工務部建設課西山課長，第2工事事務所浅野係長を始め関係各位に深く感謝致します。

【参考文献】

1) 小山幸則・長山喜則：近接施工における影響解析の注意点，鉄道土木，27-11，1985.11
2) 相原功・吉瀬久男：有限要素法の土留め解析への適用，土と基礎，28-3，1980.3
3) 青山一郎：掘削における計測施工，鹿島出版会
4) 酒井邦登：大規模開削工事における情報化施工，第15回建設業情報システム研究会，建設業生産性論文集，1987
5) 池上達雄：大規模開削工事における情報化施工，営団8号線豊洲一土区土木工事，(社) 日本トンネル技術協会，第19回施工体験発表会，1986.11
6) 情報化施工とマイコンの利用，(社) 土質工学会
7) 梶ヶ谷勝・尾崎純一・坂本佳一・深田和志：軟弱地盤における大規模土留め掘削の挙動と解析，土と基礎，37-5，1989.5