

土被りの薄い双設大断面トンネルにおける 地盤挙動測定について

MEASUREMENT OF LARGE CROSS-SECTION TWIN TUNNELS WITH THIN OVERBURDEN BENEATH POPULATED AREAS

水野英紀*・平野逸雄**

Eiki Mizuno, Itsuo Hirano

The Konan Tunnel, under construction in a densely populated area of Yokohama City, is a twin tunnels designed to carry three lanes and a sidewalk in each direction. Its specifications are a 16.2m width, a separation of 8.7m between the tunnels, a cross-sectional area of 143 m² and an overburden of 5 to 24 m.

When excavating a tunnel with a thin overburden, it is important to ensure stability of tunnel itself and to obtain the earliest possible indications of ground subsidence. This paper reports on how total ground subsidence was measured and predicted the behavior of the bedrock ahead of the face.

Keyword : large cross-section tunnel, thin overburden tunnel, ground subsidence, measurements method, measurement control

1. まえがき

横浜市環状2号線で施工中である港南トンネルは、歩道付3車線、延長530mのトンネルであり、その環境条件から次に示すような厳しい条件下にある。①トンネル断面は、掘削幅は、16.2m、掘削断面積が143m²の双設となり、トンネル間離隔距離も8.7mと近接している。②土被りは、全区間にわたり5～24mと薄く、地上部には、住宅が密集している。③地質状況は、洪積砂層およびシルト層が主体で、中央部には沖積粘土層が介在する。洪積砂層は、地下水位が高く、流砂を起こしやすい。

本トンネルは、上記の条件より、地表の沈下を出来る限り制御する設計、施工を実施している。また、計測管理も地盤沈下量を早期に確実に把握する事を目的として、掘削に対して切羽前方地山の挙動予測ができる測定方法を採用した。固結度の低い地盤では、切羽前方の先行変位の比率が堅固な地盤に対して高く、しかも変化する経過も早い事が知られている。このような場合、坑内から実施する計測では、測定される量が全変位量の50%以下となる事も多く、地上の構造物への影響が全体として把握できず判断を誤る恐れがある。本トンネルで使用した地中沈下測定方法は、連通管の原理を応用し、電気的に沈下量を検出し、任意の時間に自動測定で沈下の経時変化や分布状況をとらえるものである。

本報告では、地中沈下測定によって得られた、地表面沈下と地中沈下の発生割合、先行沈下率の割合など、いままでとは異なった沈下管理の計測結果から得られた知見を述べる。

* 正会員 横浜市 道路局特定街路課

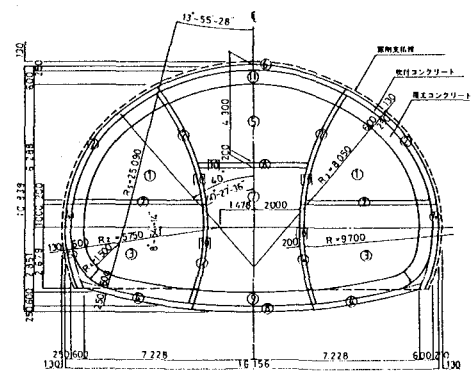
** 正会員 大成建設株式会社 環状2号線作業所

2. トンネルの概要

港南トンネルは、掘削断面積が143㎡、延長530mの双設トンネルである。内空断面は、自歩道付き3車線総幅員13.7mと広いことから上半3心円断面とし、偏平率は、0.6以上を基準に設定した。

本トンネルは、地表部に家屋が密集していることから、地表沈下の抑制を目的として掘削工法を採用した。加背割は、断面の大きさからCD工法とサイロット工法の比較を行い、サイロットにより地質の確認ができ水位低下にも有効であるサイロット工法を基本とし、FEM解析結果をもとに決定した。その結果、加背割断面は、サイロット工法に対して導坑が大きく、中央坑スパンが短く中壁が2本となるため、その形態より、D. D. (Double Diaphragm) NATMと呼ぶ事にした。図-1に加背割図を示す。

支保構造は、剛性を高くする必要がある、外側アーチ部は、鋼製支保工-200に吹付コンクリート25cm、中壁は、H-150に吹付コンクリート20cmとし、インバート部にもH-150吹付コンクリート25cmの支保を設定した。



名	称	備 考
①	側坑上半掘削	
②	側坑上半吹付コンクリート	仮インバート含む
③	側坑下半掘削	
④	側坑下半吹付コンクリート	
⑤	中央坑上半掘削	
⑥	中央坑上半吹付コンクリート	仮インバート含む
⑦	中央坑下半掘削	
⑧	中央坑下半吹付コンクリート	
⑨	インバートコンクリート	
⑩	中壁掘削	仮インバート含む
⑪	アーチコンクリート	

図-1 加背割図

3. 地形・地質概要

地形は、多摩丘陵の南東端に位置し、標高40～60mの丘陵地形を示している。ただし、トンネル直上部は、造成による宅地化が進み家屋が密集し、旧地形の面影はほとんど認められない。

地質は、洪積世の相模層群最下位の長沼層である。当該地区の長沼層は、トンネル中央部の旧河川による河谷性低地を形成する沖積層を境に、始点側東半分は、黄灰色をした細砂層(Ds2)が主体である。また、終点側西半分は、この細砂層が浸食を受けた上位に堆積した暗褐色をしたシルト層(Ds2)である。

細砂層(Ds2)は粒子が均一で、均等係数として2～4であり、10%粒径0.1mm以下、60%粒径0.3mm以下が多い。N値は、19～50以上の範囲にあるが、細粒子分の混合率が20%以下であるため、流砂を起こしやすい。透水係数は、10⁻³cm/secオーダーと透水性は良い。

シルト層(Ds2)は、有機物を多量に混入し、局部的な沼地の堆積物と推定される。また、細砂が所々に介在し、N値は、30以上で固結状を呈し、一軸圧縮強度は平均で11kgf/cm²程度となっている。

図-2に地質縦断面図を示す。

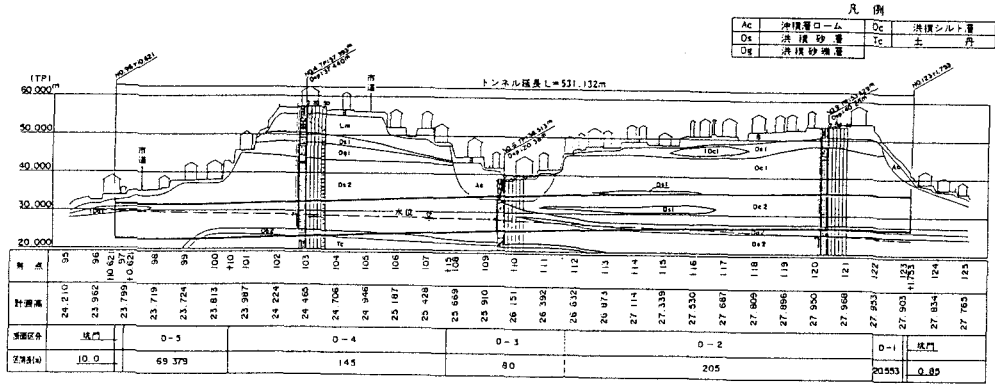


図-2 地質縦断面図(内廻り線)

4. 計測計画・計測管理

本トンネルのように、ルート上に民家が密集している場合は、トンネル自体の安定性を確保すること、地表面沈下量を早期に的確に把握する事が重要となる。従って、トンネル自体の変位測定のみでなく、掘削に対して切羽前方地山の挙動予測ができるような計測計画を立てた。代表的な計測工断面図を図-3に示す。なお主計測断面数は、530mで6断面設定した。

計測管理基準値は、地表面の変形、特に構造的障害に関係する不等沈下（地盤変位角度）を基本に設定した。日本建築学会「建築基礎構造設計基準・同解説16条」によれば、木造家屋基礎の基準は、 $\delta = (1 \sim 2) \times 10^{-3} \text{rad}$ となっており、本トンネルの場合は、限界値として $\delta = 2 \times 10^{-3} \text{rad}$ を設定した。基準値は、この限界値とFEM解析結果の地表面傾斜角度から、地表面沈下量とトンネル天端沈下に置き換え、さらに各加背の掘削順序における計測時期を考慮して定めた。

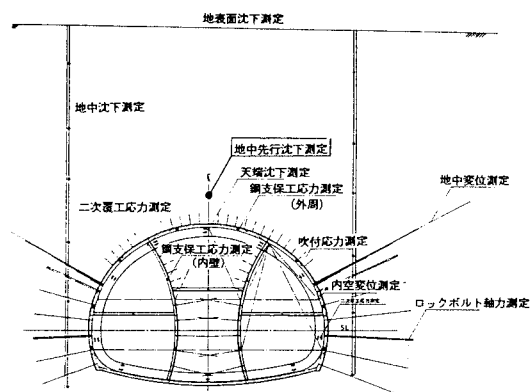


図-3 計測工代表断面図

地表沈下は、本トンネルの様に、地表部に民家が密集しており、道路も舗装されている部分がほとんどのため、直接的に地表沈下を正確的に計測することは困難である。そのためにトンネル全線にわたる地盤沈下を測定するために「先行沈下計」を採用し、計測管理の指標として使用した。「先行沈下計」を使用することにより、図-4の模式図に示すように、切羽近接に伴う前方地山の影響範囲、大きさ等が判断できる。先行沈下の形態が把握できれば、切羽到達以前に最大沈下の予測も可能であり、さらに全体沈下量が測定できるためFEM解析結果を用いた逆解析にもこの結果が利用できる。

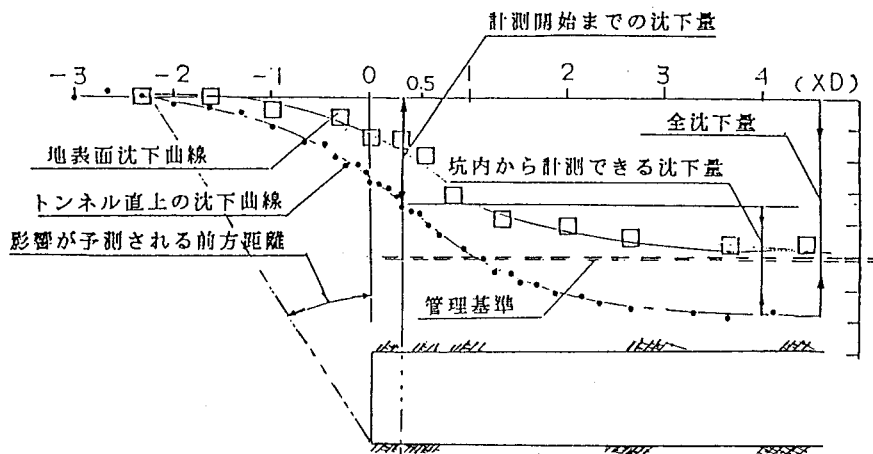


図-4 切羽付近における沈下模式図

5. 先行沈下計

現在、地盤や構造物の鉛直変位を測定する測定器は、古くから用いられてきた水の平面性を利用したものと、新しい技術であるレーザ光を用いたものが主に使用されている。レーザ光を用いたものは、設置工事の簡単さやメンテナンスが楽な事などから、短期の測定には適しているが、見通しのきく所でないと使用でき

ない。また、雨や雪および陽炎などの外因に弱く、価格が高い等の欠点がある。従って、長期間の自動測定では水を用いた測定器の方が有効である。今回使用した先行沈下計は、連通管式沈下量測定装置を応用して作成したものである。

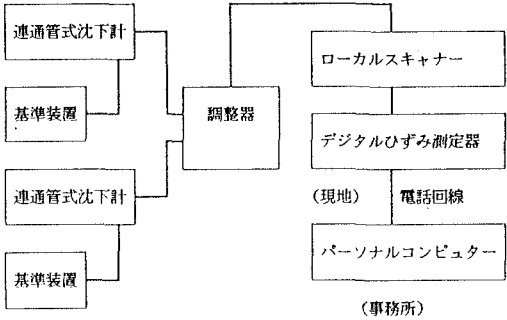
測定原理は、基準点と各測定点の間を水を入れた連通管を引き回し、各点の水圧が鉛直変位に比例して変化する事を利用している。基準水槽の上部から絶えず水を滴下し、内部に設けられた堰からオーバーフローさせて一定水面を保っており、ここから連通管が各測定点に配置されている。測定点に変位が発生すると、基準水槽と測点との間に水位差が発生する。水位差は、沈下計内の差動トランスに接続され電圧差で測定することができる。表－１に先行沈下計の仕様を示す。また、図－５に自動測定方法の流れ図を示す。

設置方法は、トンネル直上 2.5 m に $\phi 275$ mm で水平ボーリングを 100 ～ 120 m の長さで行い、その中に VU200 の塩ビパイプを挿入後、測定器を 5 ～ 10 m 毎に設置した。基本的には、トンネル全線に渡って測定を行なっている。ただし、水平度を確保しながらの水平ボーリングが 120 m 程度が限界であると判断し、坑口からボーリング出来ない中間部には、設置用の深礎を掘り計測機器の設置を行なった。

530 m の双設トンネルに対しての測定線総延長は外廻り線直上、内廻り線直上、ピラー部直上、地質不良箇所等を考慮した結果、総延長 760 m、測点数 95 点となった。

表－１ 先行沈下計仕様

基準水槽	給水ポンプ吐出量	0 ～ 1900 cc/min
	電源、消費電力	AC 100V ± 10 v, 10VA
	寸法	500 × 250 × 400 mm
連通管式沈下計	測定範囲	± 50 mm (最大 100mm)
	測定精度	測定範囲の $\pm 1\%$ 以内
	許容過負荷	測定範囲の 120% 以内
	連通管	内径 25mm, 外径 33mm



図－５ 先行沈下計測定システム

6. 計測結果

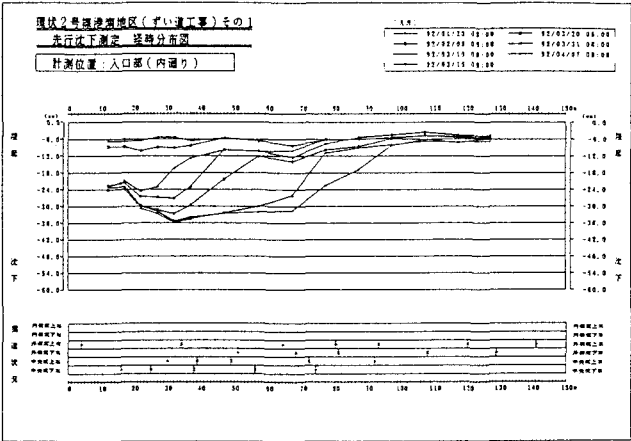
シルト区間において、中央坑掘削終了時までには発生した地表面沈下量は平均 10 mm であり、最大値として 22 mm が測定された。図－６に先行沈下計の測定結果例であるトンネル縦断方向沈下分布図を示す。また、図－７にこの付近の先行沈下計の経時変化図を示す。

先行沈下計（トンネル直上 2.5 m 地点に設置）の測定値と地表面沈下の割合は、最大沈下量の発生した地点の先行沈下計の値が 36 mm である事から、先行沈下計の約 50 ～ 60 % が地表に現れている事がわかる。また、先行沈下の発生は、各切羽とも切羽前方 1.5 D（D はトンネル掘削直径）とかなり早い段階で発生し始め、切羽通過時直前に急激に大きくなり、切羽後方 3 D 程度で収束する。

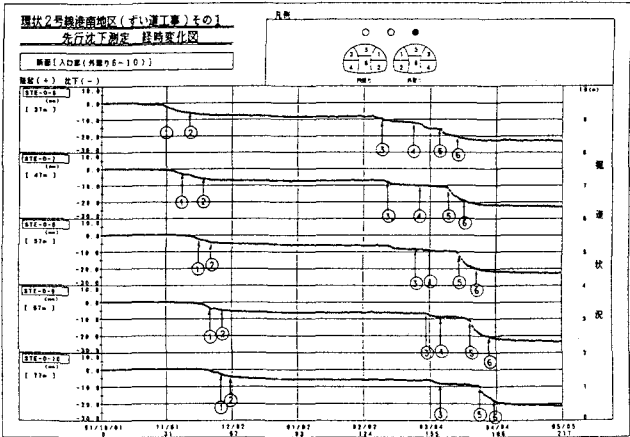
なお、トンネル天端沈下の測定値は、上記の点で最大 12 mm であり、測定開始からの先行沈下計の値と良く一致している。この事から、港南トンネルのような土被りの薄い土砂トンネルでは、切羽前方での沈下量は全体の 70 % にもなった。ただし、この割合は、支保の剛性にも関係する。支保の剛性が高ければ、支保後の沈下量が制御されるため、全体の沈下に対する切羽前方の沈下の割合は大きくなる。

以上の事から、地表面の沈下を防ぐためには、支保の剛性を高める事と、切羽前方の支保（先受け工法）

を的確に行なう事が最も重要である事が判明した。当トンネルの場合も、加背断面から、大型機械による大規模な先受けを行なう事が出来なかったが、増しフォアパイリング、鏡止めボルト、ウレタン注入式ミニパイプルーフ等を先行沈下計の測定値を参考にしながら施工を行なった。



図－6 先行沈下計・計測結果（トンネル縦断方向分布図）



図－7 先行沈下計・計測結果（経時変化図）

7. 先行沈下計測定結果を用いたFEM逆解析

先行沈下計計測結果をFEM解析結果に利用した例（応力開放率の算定に利用）を示す。図－8は、終点側坑口から57m地点の内側坑掘削時における先行変位計測から得られた沈下と事前に行なったFEM解析結果を比較したものである。図より、上半支保工建込時期での沈下量は、解析結果と良い一致を示していることが分かるが、上半支保工建込み以降に関しては、FEM解析結果が計測値よりも大きな沈下となっている。この事は、FEM解析を行なう時の応力開放率の算定が現地と異なっていたために発生した差異であると判断される。

内側坑の上半掘削時の変位率に着目した場合、FEM解析では先行変位率は56％となっていたが、先行沈下計の計測結果では先行変位率は87％となっている。図－9は、港南トンネル解析結果から得られた応力開放率と変位率の関係を表したものである。この図より、測定結果の先行変位率を満足する解析結果を得るためには、支保工建込前の応力開放率を30％から70％に変更する必要がある。

図-10は、土被り1Dにおける3次元弾性素堀り解析結果におけるトンネル天端直上の特性曲線を示したものである。この図からも判断できるように、港南トンネルのように土被りの薄い土砂トンネルをFEM解析する場合の支保工建込前の応力開放率は、切羽近傍のゆるみ、支保効果の発揮時期を考慮して50～70%程度に設定した方が、全体の変形モード、変形量をよりの確に把握できると思われる。

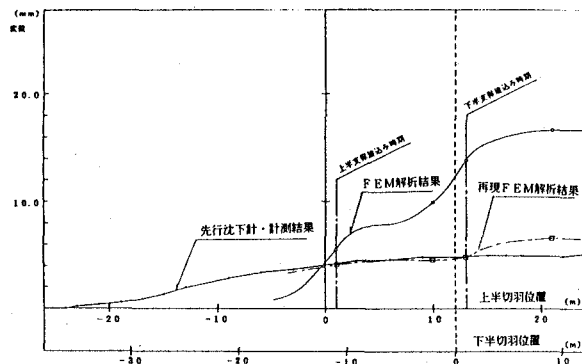


図-8 先行沈下計測定値とFEM解析結果との比較

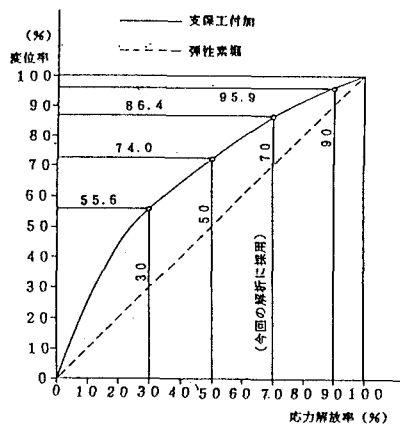


図-9 応力開放率と先行変位率の関係

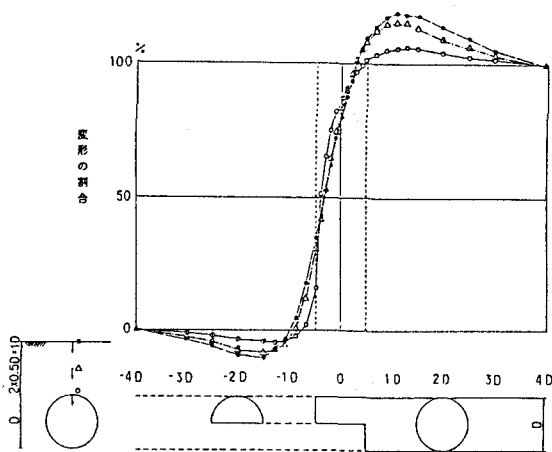


図-10 3次元弾性解析トンネル天端直上の特性曲線（土被り1D、ショートベンチ素堀り掘削）

8・まとめ

土被りの薄い都市トンネルで地表面沈下を制御しなければならないトンネルでは、先行沈下計のような切羽前方の沈下を自動測定できる計測方法での管理が有効であることが判明した。また、土被りの薄いトンネルでは、主たる地山の変形が重力方向であることと、切羽前方の変形が顕著に出るため先受け工法を的確に施工することが重要であり、さらに、大規模先受け工法を積極的に採用することが今後求められるものと思われる。

9. 参考文献

- 1) 亀村勝美・平野逸雄・竹田直樹・里優：切羽進行を考慮したトンネルの解析と実際、第27回土質工学シンポジウム発表論文集 PP.55～60