

シールドトンネルの現地計測シミュレーション

SIMULATION FOR IN-SITU MEASUREMENT OF SHIELD TUNNEL

小山幸則¹⁾・岡野法之¹⁾・橋本 正²⁾・長屋淳一³⁾

Yukinori KOYAMA・Noriyuki OKANO・Tadashi HASHIMOTO・Jun-ichi NAGAYA

It is important for a secure and economical designing of a shield tunnel to identify the load acting on the shield tunnel. We simulated an in-situ measurement each for 6 shield tunnels in Osaka neighborhood. The parameters are used coefficient of lateral earth pressure and coefficient of soil reaction.

The analysis employs a 2 ring beam-spring model; joint of segment and interaction between segment ring and ground are represented by springs.

Considering of the construction condition depending on the situation, we could approximately simulate them.

Key Words: shield tunnel, simulation, in-situ measurement, beam-spring model

1. はじめに

近年、大都市部では地下利用の輻輳化が進み、今後建設されるシールドトンネルはますます大深度化していくものと思われる。そのような状況下で、シールドトンネルを安全にかつ経済的に建設するためには、シールドトンネルに作用している土圧および水圧を把握することが大切である。

そこで、大阪近辺で施工されたシールドトンネルにおいて実施された現場計測結果(6箇所)について、側方土圧係数 λ および地盤反力係数 k をパラメータにシミュレーションを行い、曲げモーメントの分布形状および大きさを合わせることでシールドトンネルに作用しているであろう荷重を検証した。

解析モデルは、セグメントを梁、周方向継手および軸方向継手をそれぞれ回転ばねおよびせん断ばねで、地盤とトンネルの相互作用を地盤ばねでモデル化した2リング梁ばねモデルとし、そのモデルに与える荷重は現地計測結果(土圧および水圧)に基づいて決定した。

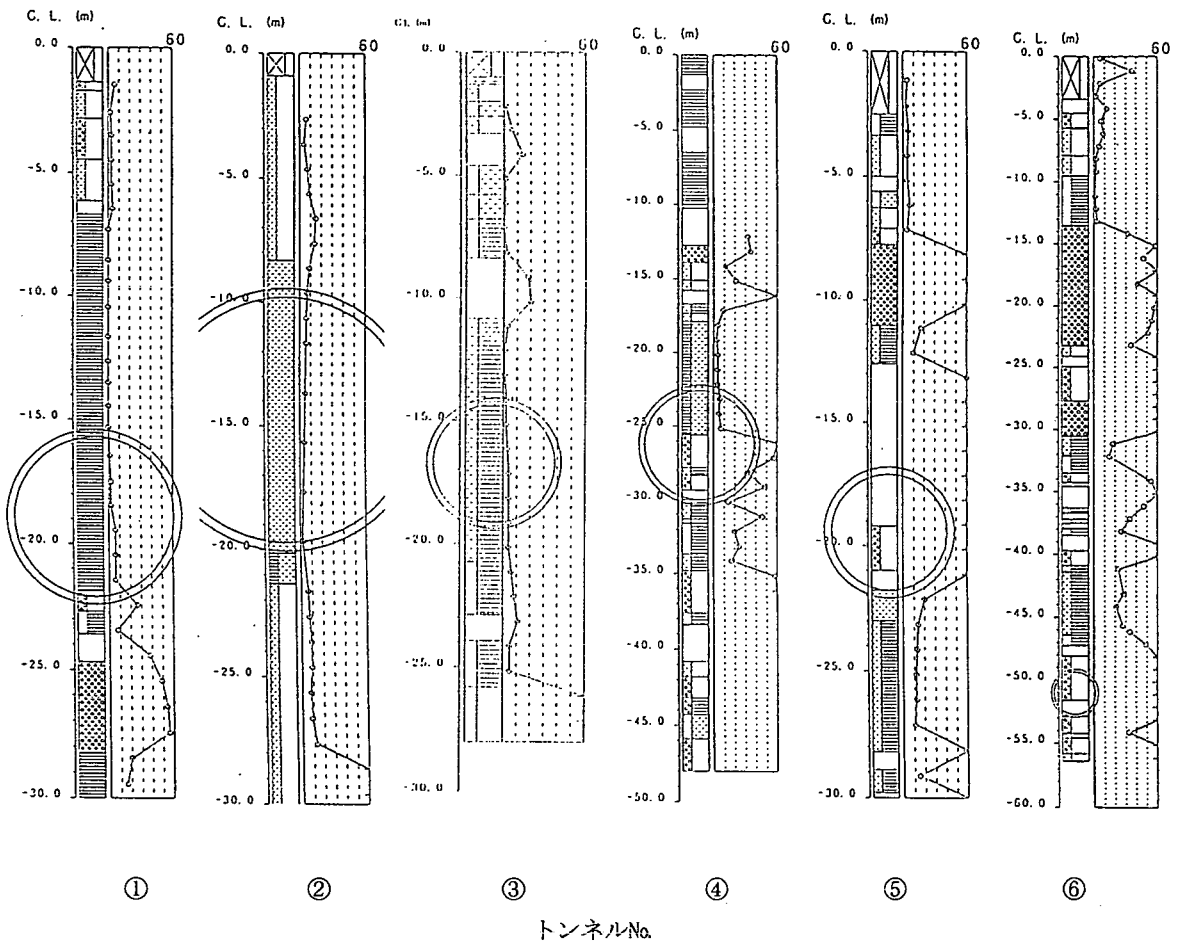
2. 対象トンネル

過去にわが国で実施されたシールドトンネルの現地計測のうち、密閉型シールドにより施工されていることと、土圧計により全土圧が計測されていること等を考慮して、表-1に示す6トンネルをシミュレーション解析の対象とした。各トンネルの計測地点における土質柱状図を図-1に示す。

1) 正会員	(財) 鉄道総合技術研究所	技術開発事業本部構造物技術開発事業部
2) 正会員	(財) 大阪土質試験所	所長代理
3) 正会員	同 上	技術3部

表－１ 解析対象トンネル

№	分類	工 法	シールド外径	セグメント形式	土 質
①	鉄 道	泥 水 式	φ 7,000	R C 平 板 形	粘 性 土
②	鉄 道	土 圧 式	φ 10,600	ダクタイル 3 主桁形	粘 性 土
③	鉄 道	泥土圧式	φ 5,300	ダクタイルコルゲート形	粘 性 土
④	下水道	泥 水 式	φ 8,150	R C 平 板 形	粘性土, 砂質土
⑤	鉄 道	土 圧 式	φ 5,300	R C 平 板 形	砂 質 土
⑥	通 信	泥 水 式	φ 3,550	スチールセグメント4主桁形	砂 礫 , 粘 土



図－１ 各トンネルの計測地点における土質柱状

3. 解析条件

3. 1 トンネルー地盤モデル

地盤反力は全周にわたり、地盤ばねとして表現する。地盤ばねは法線方向のみ考慮し、接線方向については考慮しない。地盤ばねの特性は圧縮側のみ有効とし、引張側は考慮しない。

3. 2 トンネル覆工構造モデル

セグメントリング横断面の構造については梁ばねモデルとする。セグメントのトンネル周方向継手の回転ばねはバイリニアとし、正曲げおよび負曲げについてそれぞれ設定し、セグメントのトンネル軸方向の半径方向および接線方向せん断ばねはリニアとして設定する。

3. 3 各ばね定数

地盤ばね定数およびセグメントの周方向継手および軸方向継手のばね定数の算出法は、文献 1)により算出した。

3. 4 荷重

(1) 土圧

砂質土の場合、土圧と水圧が別々に作用するもの（以後、土水分離と呼ぶ）とし、粘性土の場合、土圧と水圧が一体となって作用する（以後、土水一体と呼ぶ）ものとする。

上部鉛直荷重は、原則としてクラウン部での計測値とし、下部鉛直荷重は上部鉛直荷重と同値とする。

側方荷重については、トンネル頂部において、鉛直荷重に側方土圧係数 λ をかけたものとし、 N 値に基づき、 λ を文献 1) の表に示されている範囲で変化させることを原則とした。トンネル底部は文献 1)に従い、 N 値から判断して、 c 、 ϕ が評価できない場合は $\lambda \cdot \gamma \cdot (h+D)$ とした。

各トンネルの計測位置において、クラウン部で計測された土圧（全土圧）を表-2に示す。

表-2 各トンネルにのクラウンにおける全土圧および水圧

トンネルNo.	土圧 (tf/m ²)	水圧 (tf/m ²)
トンネル①	17.7	12.0
トンネル②	4.3	6.0
トンネル③	18.1	6.5
トンネル④	19.2	11.0
トンネル⑤	7.0	8.0
トンネル⑥	40.4	24.3

(2) 単位体積重量

地山の単位体積重量 γ は、粘性土地盤を 1.6 tf/m³、砂質地盤を 1.8 tf/m³（水中単位体積重量は 0.8tf/m³）とする。

(3) 水圧

砂質地盤の場合、間隙水圧計により計測された地下水位に基づき地下水位を算出し、静水圧をトンネル法線方向に作用させる。トンネルクラウン部付近に設置された間隙水圧計により測定された水圧を基に、トンネルクラウン部での水圧に換算した値を表-2に示す。粘性土地盤の場合、土水一体とするので水圧は考慮しない。

(4) トンネル自重

計測はセグメント組立て直後を初期値として行われていることから、セグメントの自重については考慮しない。

4. 結果および考察

ここでは、現地計測にもっともよい一致をみたし、 k におけるシミュレーション結果を示し、考察する。

(1) トンネル①

地盤反力係数を $k=160\text{tf/m}^3$ 、側方土圧係数を $\lambda=0.60$ とした時のシミュレーション結果を図-2に示す。なお、鉛直荷重 $P_v=17.7\text{tf/m}^2$ である。

インバート部で、解析値が正曲げであるのに対し、計測値は負曲げを示しているが、その他の計測点ではモードが合っており、トンネル上半では値の大きさ自体も非常によく一致している。

(2) トンネル②

軟弱粘性地盤中のトンネルであるにもかかわらず、土圧および水圧をみるとほとんど土圧がかかっている。土圧計による土圧は、間隙水圧計より算出したクラウンでの水圧とほぼ等しく、インバートにおいても、ほぼ直径の深さ分だけ水圧が増加した値を土圧計は示している。

計測結果を踏まえ、静水圧分布の水圧をかけるという解析を行った。そのときのシミュレーション結果を図-3に示す。曲げモーメントのモードおよび大きさある程度精度よくシミュレートできた。なお、このときの地盤反力係数は $k=70\text{tf/m}^3$ 、トンネルクラウンでの水圧は 4.3tf/m^2 である。

(3) トンネル③

地盤反力係数を $k=270\text{tf/m}^3$ 、側方土圧係数を $\lambda=0.70$ とした時のシミュレーション結果を図-4に示す。

計測結果はやや正曲げが卓越した曲げモーメントのモードとなっている。その一因として、シール材の偏心配置が考えられる。本トンネルでは硬めのシール材が用いられており、その配置も2段で、セグメント図心より外縁側に偏心している。このような条件のもと、軸力が作用するとシール材位置が支点となり、セグメントには正曲げが発生する。そこで、シール材の偏心配置を考慮し、シール材位置が支点になるとしてセグメントに計算された軸力を作用させると、 $2.25\text{tf}\cdot\text{m}$ の正曲げモーメントが発生することになる。

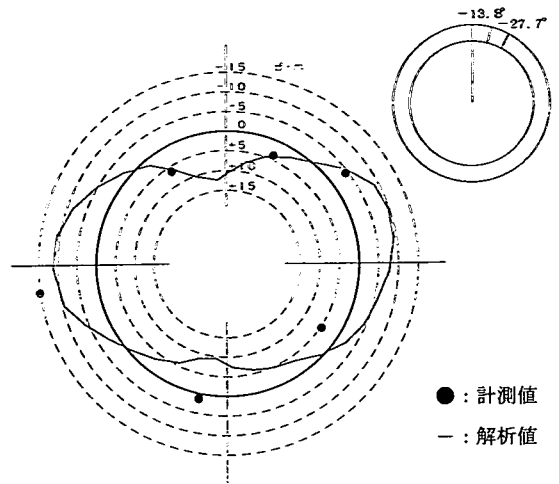


図-2 トンネル①のシミュレーション結果

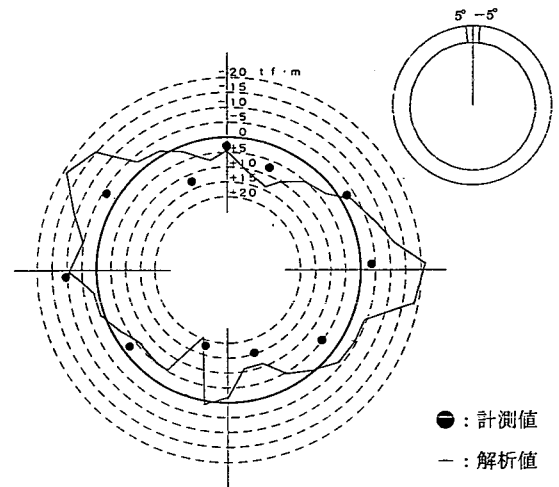


図-3 トンネル②のシミュレーション結果

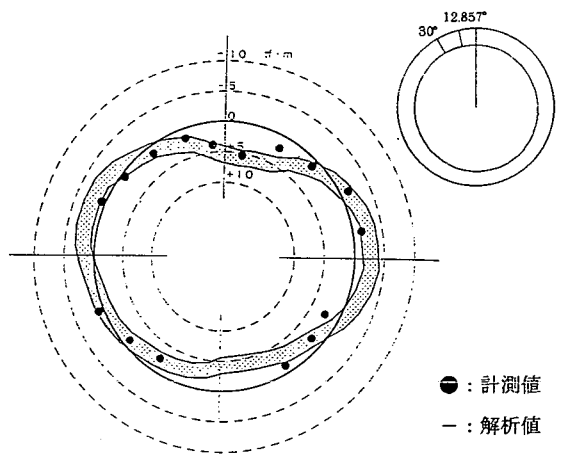


図-4 トンネル③のシミュレーション結果

解析結果の内側のラインは、補正をしていない解析結果を $2.25\text{tf}\cdot\text{m}$ 正曲げ側にシフトしたものである。計測結果はこの 2 本の線の中にほぼあり、曲げモーメントのモードを精度よく表現しており、大きさ自体も良い一致をみている。

なお、鉛直荷重 $P_v=18.1\text{tf/m}^2$ である。

(4) トンネル④

ここでの計測結果を見ると、左スプリングライン（以下、S.L.）の土圧が非常に大きく、曲げモーメントも左 S.L.付近に正曲げが発生する結果となっており、クラウンの計測土圧を用いて、通常モデルによるシミュレーションでは、このような曲げモーメントのモードは表現できない。そこで、本計測リングが左 S.L.部から裏込め注入がなされていることを考慮し、図-5(a)のようなモデルを考えた。

右側の側方荷重は、粘性土領域と砂質土領域とをそれぞれ分けて考え、粘性土領域では土水一体、砂質土領域では土水分離として算出した。左側の側方荷重については、S.L.の荷重を計測で得られた大きさとし、頂部および底部の荷重は右側と同一とし、頂部と S.L.、S.L.と底部の荷重を直線で結んだ分布とした。

底部の鉛直荷重は上部の荷重と同一とした。

また、このモデルでは、左側の側方荷重が右側より大きくなり、トンネル全体が右側に移動してしまう。しかし、実際には前後のセグメントリングに挟まれ、ジャッキ推力により拘束されるので、ここでは、クラウンおよびインパートの水平方向を拘束する境界条件を与えた。

シミュレーション結果を図-5(b)に示す。曲げモーメントの大きさは、クラウン付近等で若干計測値より大きめとなっているが、特異なモードと思われる曲げモーメント分布を比較的よく表している。

なお、側方土圧係数 λ および地盤反力係数 k は、トンネル上部の粘性土地盤において、 $\lambda=0.60$ 、 $k=70\text{tf/m}^3$ とし、トンネル下部の砂質土地盤において、 $\lambda=0.40$ 、 $k=1200\text{tf/m}^3$ とした。

(5) トンネル⑤

表-2のクラウンにおける土圧および水圧をみるとほぼ同一であり、洪積砂礫層中の本トンネルには水圧のみ作用していると考えられる。

そこで、地盤反力係数を $k=1900\text{tf/m}^3$ とし、静水圧をかけた時のシミュレーション結果を図-6に示す。シミュレーション結果は、曲げモーメントのモードおよび大きさをよく表現している。

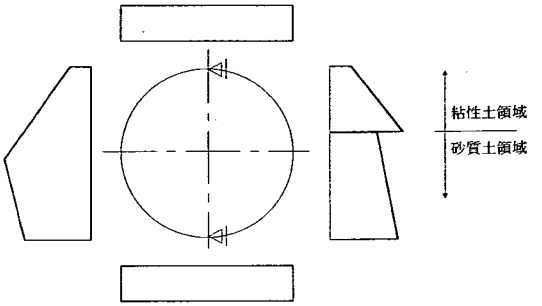


図-5(a) トンネル④の解析モデル

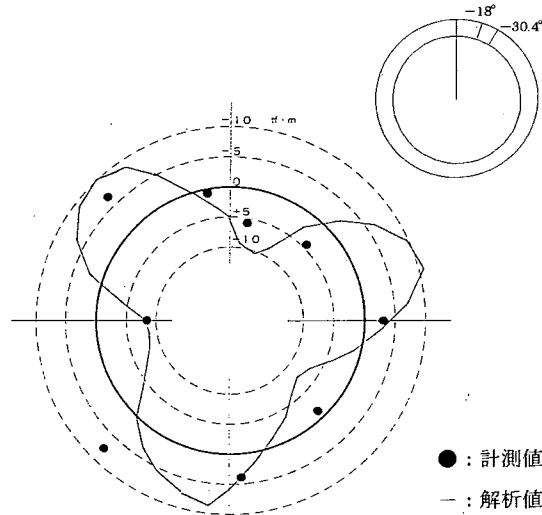


図-5(b) トンネル④のシミュレーション結果

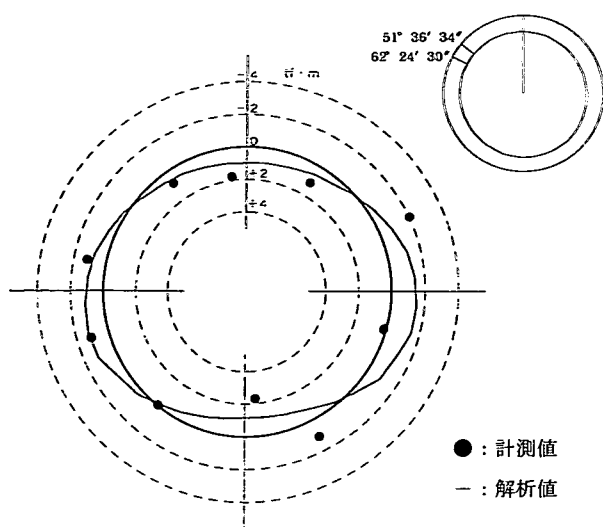


図-6 トンネル⑤のシミュレーション結果

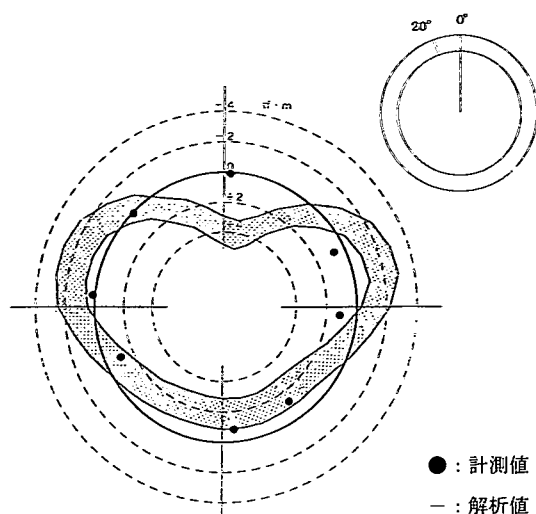


図-7 トンネル⑥のシミュレーション結果

(6) トンネル⑥

地盤反力係数をトンネル上部の砂礫土が 2700tf/m^3 、トンネル下部の粘性土が 1400tf/m^3 とし、側方土圧係数を砂質土および粘性土ともに $\lambda=0.45$ とした時のシミュレーション結果を図-7に示す。内側の線はトンネル③と同様、シール材の偏心配置を考慮した場合の解析値である。

クラウン部と右側 S.L.付近を除き、曲げモーメントのモードおよび大きさをほぼシミュレートできている。トンネルクラウンではほとんど曲げモーメントが発生していないが、これは、計測位置が K セグメントの継手部に近かったためと考えられる。

5. おわりに

今回実施した、シミュレーション結果より以下の知見が得られた。

- (1) 計測土圧および水圧を用い、施工上の影響が大きいと思われるところは、その条件等も考慮し、シミュレーションを行った結果、概ね計測結果を表現できた。
- (2) 従来、土水一体で設計がなされていた軟弱粘性土地盤中のトンネルにおいても、水圧しかセグメントに作用していないトンネルもあり、粘性土地盤においても土水分離の考え方を適用すべき場合もありうる。
- (3) 洪積砂（礫）質土中のトンネルでは、セグメントに作用する荷重は水圧が支配的となり、曲げモーメントより軸力主体の断面力となることが多い。
- (4) 硬いシール材が用いられているトンネル（③、⑤）では、正曲げが卓越した曲げモーメント分布となるが、これはシール材がセグメント図心よりトンネル外縁側に偏心して貼付されている影響と考えられ、計測値はそれを考慮した解析値と考慮しない解析値の中間となる。
- (5) セグメントに作用する荷重の分布および大きさは、施工に大きく左右され、その結果セグメントに発生する断面力にも影響を及ぼす。このことから、設計においては施工条件を十分に考慮しなければならない。

[参考文献]

- 1) 鉄道総研：鉄道構造物等設計標準・同解説 シールドトンネル、平成9年8月