

併設シールドトンネルの影響評価について

— 後続シールドの施工時荷重が先行トンネルに与える影響について —

Evaluations of the behavior of the closely constructed parallel shield tunnel

— On the influence of the execution load of a new tunnel upon the existing one —

木村 定雄*, 山下 雄一**, 清水 幸範**, 小泉 淳***

Sadao KIMURA, Yuichi YAMASHITA, Yukinori SHIMIZU, Atsushi KOIZUMI

Model tests on the closely constructed parallel shield tunnels are carried out in order to evaluate the longitudinal behavior of the existing tunnel due to the construction of new tunnel. from the tests, it is confirmed that the earth pressure acting upon the existing tunnel is changed according to not only the distance from the extreme point to the strip but also the difference of the bending rigidity of the strip. On this paper we tried to evaluate the earth pressure acting upon the existing tunnel by compared the data from the model tests with the 3-D FEM analysis for the model tests. The structural model in which ground is replaced with the suitable elastic springs is introduced. As a result, the model explained well the behavior of the existing tunnel.

Keywords: parallel shield tunnel, design of tunnel lining, closed construction, ground reaction

1. はじめに

トンネル相互の離隔距離が小さい併設シールドトンネルにおいて、後続して施工するシールド（後続シールド）が先行して施工したトンネル（先行トンネル）に与える影響評価のうち、先行トンネル周辺地盤が受働側となる影響には、ジャッキ推力、泥水圧または泥土圧、裏込め注入圧等の施工時荷重がある。従来、シールドトンネルの覆工設計では、これらの影響は必要に応じて別途考慮されてきた。しかしながら、最近の併設シールドトンネルの施工事例をみると、これら受働側の影響が顕著となっている例が多く見受けられる^{1) 2)}。これは、シールドの主流が従来の開放型から密閉型に変わってきたためと考えられる。後続シールドの施工時荷重が先行トンネルに与える影響を論ずる場合、施工時荷重の影響評価および、先行トンネルのモデル化を適切に行うことが重要となる。すなわち、先行トンネルに作用する荷重は併設トンネル相互の離隔距離のみならず、地盤や先行トンネルの剛性の影響も受けるものと考えられる³⁾。また、先行トンネルは、後続シールドの施工時荷重により横断面内変形を起こすとともに、縦断方向にも変形を生じるため、先行トンネルは3次元構造としてモデル化することが必要になる。しかしながら、セグメントリングはトンネルの横断方向や縦断方向がともに数多くの継手で連結された構造であるため、これらの継手の剛性を適切に評価することも必要となる。それらを適切にモデル化することは可能であるが⁴⁾、実務計算において現状の計算機の能力を考慮すると、それには限界がある。したがって、現状では覆工構造を巨視的に評価した”はり-ばねモデル”や”等価剛性はりモデル”を用いる場合が多い⁵⁾。

筆者らは、トンネル縦断方向の曲げ変形によって生じる土圧をはり-ばね系構造モデル中の地盤ばねで評

* 正会員 工修 佐藤工業（株） 技術本部 土木技術部

** 学生員 早稲田大学大学院 理工学研究科

*** 正会員 工博 早稲田大学 理工学部 土木工学科

3. 解析概要

3. 1 荷重評価の基本的な考え方

荷重の評価は、模型実験における後続シールドの切羽圧が模型地盤中でどのように伝播するかを把握するために行うものである。これには、模型実験を対象にした3次元弾性解析法（FEM）を用いた。この時の切羽圧（水压）は、推進方向に0.5kgf/cm²の円筒形等分布荷重とした。実験土槽モデルの端面の拘束条件はすべてローラー支持とし、後続シールド模型の挿入部分は節点を半径方向に拘束した。また、先行トンネル模型はソリッド要素でモデル化した。図2は解析モデルを示したものである。

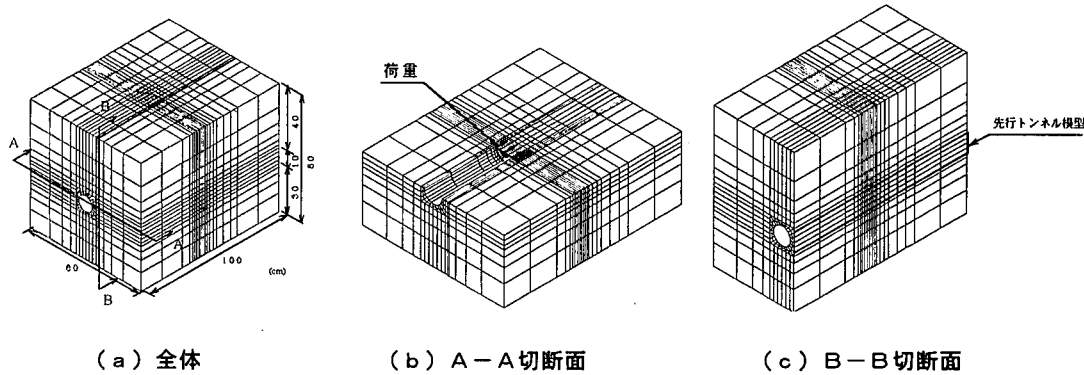


図2 解析モデル

3. 2 はりばね系構造モデルの計算に用いる荷重と地盤ばね定数について

はりばね系構造モデルによる先行トンネル模型(7列版)の挙動を解析するためには、荷重および地盤ばね定数の評価が必要である。しかし現時点でこれらを適確に評価するのは困難である。そこで、荷重および地盤ばね定数を把握するため、先行トンネルの剛性を変化させた数値実験を行った。

地盤を一様な完全弾性体と仮定すると、地盤ばね定数はトンネル縦断方向の曲げ剛性を考慮するか否かにより、以下に示した2つの式によって表される⁸⁾。これらの式で表される地盤ばね定数は、いわゆるウィンクラー(Winkler)の仮定に基づくものである。式(2)は、ブーシネスク(Boussinesq)の考え方を基本としたものであり、式(3)は、ベシック(A. B. Vesic)により示されたものである。

また、解析に用いた荷重は、曲げ剛性が大きく変形がほとんど生じないような先行トンネル模型(7列版)で計測された土圧、および変形が生じた先行トンネル模型(7列版, 厚さ: 1.5mm, 3mm)で計測された土圧を用いた。表2は、各々の解析ケースを示したものである。

$$k_1 = 0.65 \cdot \sqrt{\frac{E_s \cdot D'}{E \cdot I}} \cdot \frac{E_s}{(1 - \nu^2) \cdot D} \tag{2}$$

$$k_2 = \frac{E_s}{(1 - \nu^2) \cdot D \cdot I_p} \tag{3}$$

表2 解析ケース

ケース番号	荷重 (計測した土圧)	地盤ばね定数 (kgf/cm ³)
1	アルミ板	K ₁ : 11.87 (9.98)
2	アルミ板	K ₂ : 9.82 (9.82)
3	アクリル板	K ₁ : 11.87 (9.98)
4	アクリル板	K ₂ : 9.82 (9.82)

ここに、
E : セグメント材料のヤング係数 (kgf/cm²),
I : セグメントリングの断面2次モーメント (cm⁴),
D : セグメントリングの外径 (cm), ν : 地盤のポアソン比,
E_s : 地盤の変形係数 (kgf/cm²), I_p : 形状係数,
である。

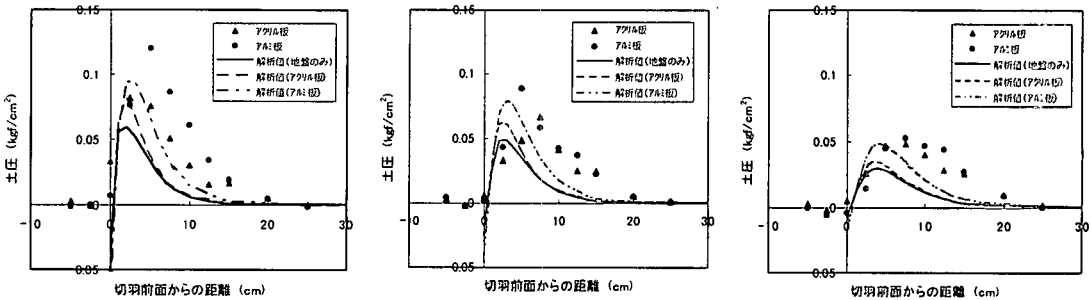
() 内は、アクリル板, 厚さ3mmにおける値を示したものである

4. 実験結果と解析結果の比較およびその考察

4. 1 先行トンネルに作用する荷重について

図3は離隔距離が0.2D, 0.3D, 0.5Dの時のトンネル模型で計測された土圧の実験値と3次元弾性解析値とを示したものである。これらの図を見ると、離隔距離に関係なくアルミ板、アクリル板で計測された土圧の最大値は、解析値よりも大きくなっていることがわかる。これは、アルミ板、アクリル板の剛性が周辺地盤のそれと比較して大きいことに起因しているためと考えられる。また、アクリル板には曲げ変形が生じていたことから、アクリル板で計測された土圧はその変形に伴う土圧の低減効果が加味された土圧であるとも考えられる。

次に、アルミ板、アクリル板に作用する解析値について見てみると、離隔距離0.2Dにおけるアクリル板の解析値が実験値とよく符号している。また、他のケースについては、土圧分布の形状は両者が類似した傾向にあると思われる。



(a) 離隔距離0.2D

(b) 離隔距離0.3D

(c) 離隔距離0.5D

図3 切羽前面からの距離と土圧の関係

図4は、土圧の最大値に着目し、それと離隔距離の関係を示したものである。離隔距離が小さくなるほど、また先行トンネル模型の剛性が大きいほど土圧の最大値は大きくなり、この傾向は、0.3D以内の離隔距離において特に顕著になる。先行トンネル模型に作用する土圧は、実験値と解析値が同様の傾向を示していることから、3次元弾性解析により定性的に評価できるものと考えられる。

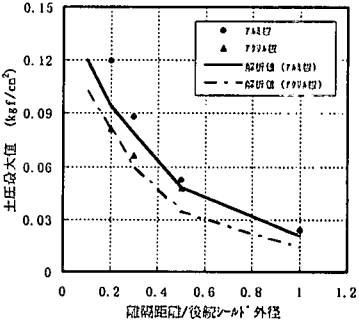
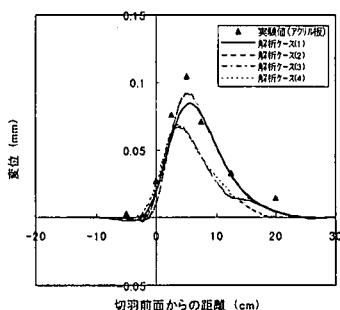


図4 土圧最大値と離隔距離の関係

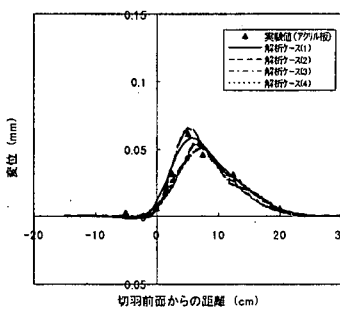
4. 2 先行トンネルの挙動を表現するための荷重と地盤ばね定数について

図5は先行トンネル模型(アクリル板、厚さ:1.5mm)に生じる変位の実験結果と解析結果を示したものである。この図を見ると、地盤ばね定数 k_1 、 k_2 に関係なく、荷重としてアルミ板で計測された土圧を用いた解析値は、実験値とよく符合している。また、アクリル板で計測された土圧を荷重として用いた場合の解析値は実験値よりも小さいことがわかる。

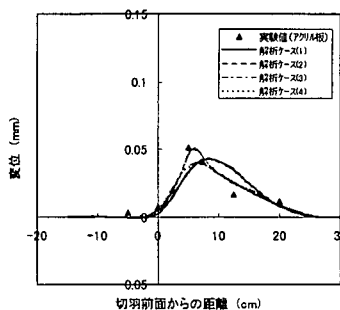
図6は同様に先行トンネル模型に生じる曲げモーメントの実験値と解析値を示したものである。この図によると、すべての解析ケースの結果は、実験結果を概ね表現しているようである。しかしながら、曲げモーメントの値は切羽前面からの距離に伴う変化率が大きく、若干の距離のずれにより曲げモーメントが大きく異なるため、この結果から適切な荷重や地盤ばね定数の評価方法を判断するのは難しいと考えられる。



(a) 離隔距離0.2D

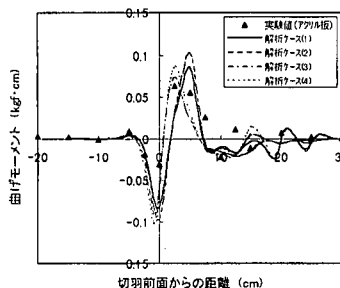


(b) 離隔距離0.3D

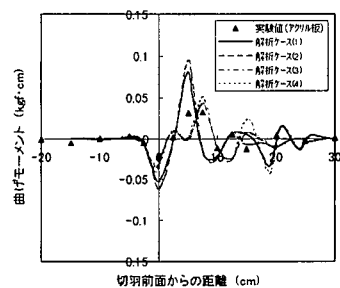


(c) 離隔距離0.5D

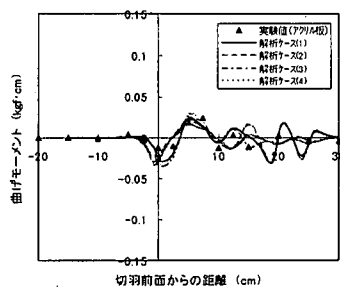
図5 切羽前面からの距離と変位の関係(7ケル1.5mm)



(a) 離隔距離0.2D



(b) 離隔距離0.3D



(c) 離隔距離0.5D

図6 切羽前面からの距離と曲げモーメントとの関係(7ケル1.5mm)

4. 3 地盤ばね定数について

今回の解析結果をみると、解析に用いた地盤のばね定数の違いは、変位や曲げモーメントの違いとして明確に表れていない(図5, 図6). k_1 , k_2 の違いはトンネルの縦断方向の曲げ剛性を考慮するか否かである. そこで、今回の実験に用いた砂地盤の変形係数と先行トンネル模型の縦断方向の曲げ剛性との関係について調べた. 図7は、地盤の変形係数と先行トンネル模型の縦断方向の曲げ剛性を変化させた時の k_1 と k_2 の値を示したものである.

図7より、今回の実験に用いた砂地盤の変形係数と先行トンネル模型の曲げ剛性との関係は、 k_1 と k_2 の値に顕著な差異を生じさせない範囲にあると考えられる.

次に、実際の地盤の変形係数とトンネル縦断方向の曲げ剛性が k_1 と k_2 に及ぼす影響を調べるために、セグメントリングの外径(トンネル縦断方向の曲げ剛性)や地盤の変形係数をパラメータとした感度解析を行った. これに用いた諸元を表3にその結果を図8に示す.

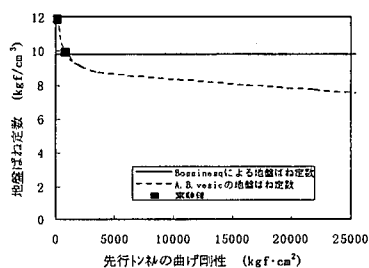
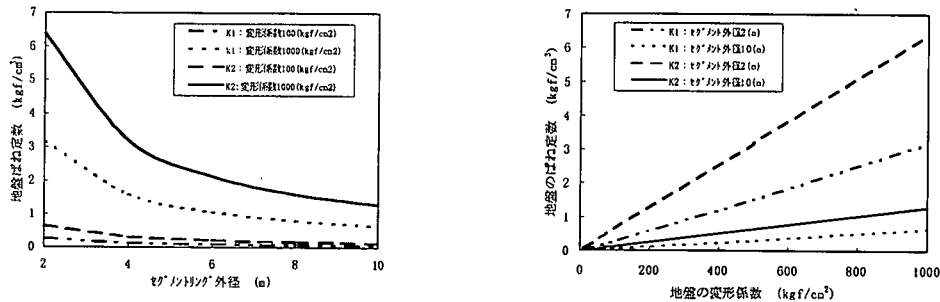


図7 先行トンネル模型の曲げ剛性と地盤ばね定数との関係

表3 感度解析に用いた諸元

セグメントリングの諸元	
セグメントリングの外径	2~10(m)
セグメントの幅	4%
ヤング係数	3.6×10^5 (kgf/cm ²)
形状係数	0.88
地盤の諸元	
地盤の変形係数	5~1000 (kgf/cm ²)
地盤のポアソン比	0.33

k_1 および k_2 はともに地盤の変形係数と線形関係にある(図8(b))。また、変形係数が大きく自立性の高い地盤においては、セグメントリングの外径が小さい程、地盤ばね定数は大きく、両式から得られる地盤ばね定数の差も大きくなることとわかる(図8(a))。一方、変形係数が小さい軟弱地盤の場合にはその傾向は見られず、セグメントリングの外径にかかわらず、地盤ばね定数はほぼ一定となり、また、 k_1 および k_2 から得られる地盤ばね定数は概ね一致している。



(a) セグメントリング外径と地盤ばね定数との関係 (b) 地盤の変形係数と地盤ばね定数との関係
図8 地盤ばね定数の感度解析

5. 結論

今回の模型実験およびその解析結果から、併設シールドトンネルにおいて、後続シールドの施工時荷重が先行トンネル縦断方向に与える影響の評価方法について以下の知見を得た。

- (1) 先行トンネルに作用する土圧の分布形状および大きさは、先行トンネルとの離隔距離や先行トンネル縦断方向の剛性により変化し、その大きさは地盤を完全弾性体として求めた場合よりも大きな値となる。
- (2) 先行トンネルの縦断方向の挙動をばね系構造モデルを用いて評価する場合、計算に用いる荷重や地盤ばね定数は、地盤の変形係数や先行トンネルの縦断方向の剛性を考慮して評価する必要がある。

以上、後続シールドの施工時荷重が先行トンネルに与える影響を定量化し、先行トンネルの挙動を把握するために必要な荷重や地盤ばね定数について検討を加えた。荷重の評価と地盤ばね定数の評価は互いに関連しているため、その評価にあたっては十分な検討を要する。今後、先行トンネルの剛性の程度が荷重や地盤ばね定数に与える影響を定量的に把握するための方法について、さらに検討を行う予定である。

【参考文献】

1) 日本鉄道建設公団 東京支社、社団法人 日本トンネル技術協会：京葉都心線トンネルの設計・施工に関する研究 研究報告書，1990. 9. 2) 橋本：軟弱地盤における上下隣接シールド施工の実態と計画結果について，土木学会論文集，第352号/Ⅲ-2，pp. 1~22，1984. 12. 3) 木村，矢田，小泉：併設して施工されるシールドトンネルの影響解析，トンネル工学研究発表論文・報告集，第1巻，pp. 89~94，1991. 12. 4) 小泉，村上，西野：シールドトンネルの軸方向特性のモデルについて，土木学会論文集，第394号/Ⅲ-9，pp. 156~165，1988. 6. 5) 堀地，平嶋，松下，石井：軟弱粘性土における併設シールドトンネルの現場計測とセグメントリングの疑似三次元構造モデル，土木学会論文集，第418号/Ⅲ-13，pp. 201~210，1990. 6. 6) 舟橋，大堀，木村，小泉：併設シールドトンネルの影響評価について(その1)，土木学会 第50回年次学術講演会，四部門，1995. 9. 7) 山下，舟橋，木村，小泉：併設シールドトンネルの影響評価について(その2)，土木学会 第50回年次学術講演会，四部門，1995. 9. 8) A. B. Vesic: Beams on Elastic Subgrade and the Winkler's hypothesis, 5th ICSMFE, Vol. 1, pp. 845~850, 1961.