

併設シールドトンネルの影響評価方法に関する検討

A study on methods of evaluating the influence of a parallel shield tunnel

田嶋仁志¹⁾・岸田政彦²⁾・川田成彦³⁾・小林靖典⁴⁾・斉藤正幸⁴⁾

Hitoshi TAJIMA, Masahiko KISHIDA, Naruhiko KAWADA, Yasunori KOBAYASHI, Masayuki SAITO

In cases where a parallel shield tunnel is driven along an existing tunnel, the excavation of the new tunnel induces changes in stress occurring around the existing tunnel. In designing a parallel shield tunnel, therefore, it is necessary to examine the influence of parallel shield tunnel excavation on the adjacent tunnel. The influence of parallel shield tunneling is often analyzed by the finite element method(FEM). There is as yet no well-established method, however, of finite element analysis of large-cross-section shield tunnels, and actual tunnel behavior has not yet been elucidated, either. In this study, FEM is used for fitting to field measurement results in order to obtain basic data for establishing a design method for large-cross-section shield tunnels, whose construction is expected in the years to come.

Key Words: parallel shield tunnel, FEM stress release ratio, elastoplasticity analysis

1. はじめに

首都高速道路公団では、現在、首都高速中央環状新宿線を建設中である。そのうち平成14年にシールドトンネルの施工が終了したSJ32西新宿工区は、中央環状新宿線で初めて施工されたシールド工事であり、トンネル外径 ϕ 13.0mの大断面併設トンネルである。当該工区におけるトンネルの併設離隔は4.0m(約0.30Do(外径))以下であり、大断面シールドトンネルとしては比較的小さい。また、中央環状新宿線で今後建設が予定されているトンネルについても、類似した条件での計画である。

離隔が小さな併設シールドトンネルの場合、先行トンネルに対して後行トンネルの掘削による影響が及ぶことが予想されることから、セグメントの設計において併設時の影響検討を行う必要がある。併設の影響は、併設幅を考慮した緩み土圧の採用、FEM解析¹⁾等によって検討されることが多く、その影響度合いに関しては、これまでも検討を行っている²⁾。しかしながら、緩み土圧の算出に併設幅を考慮した場合には、離隔の増加にともない土圧が増加するといった不合理性、FEM解析では応力解放率の設定等の課題点がある。また、実際の挙動については現場計測データも少なく、その評価手法が確立されていないのが現状である。

本研究は、合理的かつ経済的となるような併設時の設計手法を確立するための基礎資料を得ることを目的とし、基本的に単設時の緩み土圧を用い、SJ32西新宿工区現場計測結果に対してFEM解析によるフィッティング解析を行った結果について報告するものである。

2. 現場計測概要

西新宿シールドトンネルは、片側延長599mの横併設トンネルで、外径13.23mの泥水式シールドにより掘削した。縦断線形はほぼ水平で、発進・到達からの直線部を曲線半径204Rの曲線部で結んだ平面線形である。現場計測は、図-1に示すように、到達立坑手前の直線部で行った。施工付近の地質状況は、地表面より表層、関東ローム層、東京層(砂層・粘土層)、東京礫層および上総層群で構成されており、このうち東京層(砂層)、東京礫層および上総砂層をシールドが通過した。表-1にセグメントの構造諸元を示す。

-
- 1) 正会員 博士(工学) 首都高速道路公団 工務部 2) 正会員 首都高速道路公団 工務部
3) 正会員 首都高速道路公団 東京建設局建設第一部 4) 正会員 日本ゼツコンコンサル株式会社 技術本部

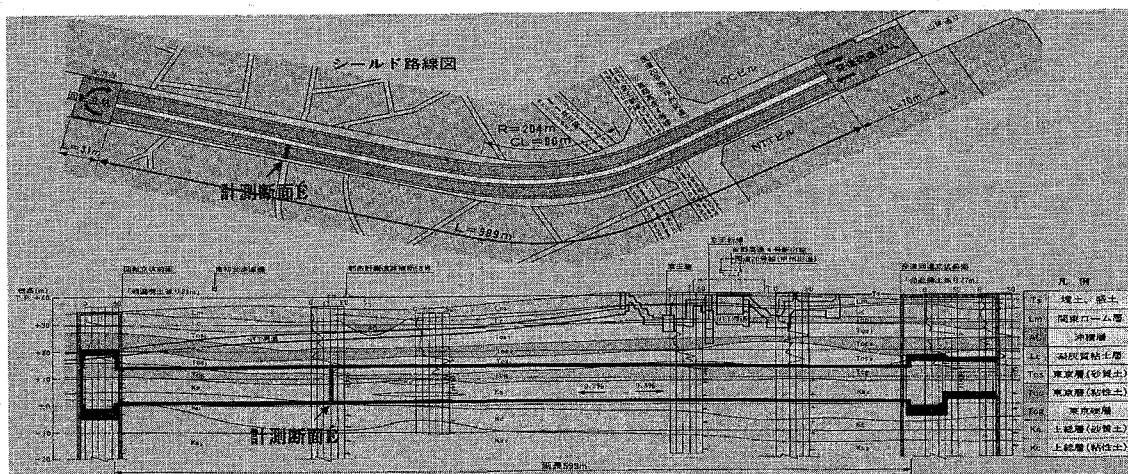
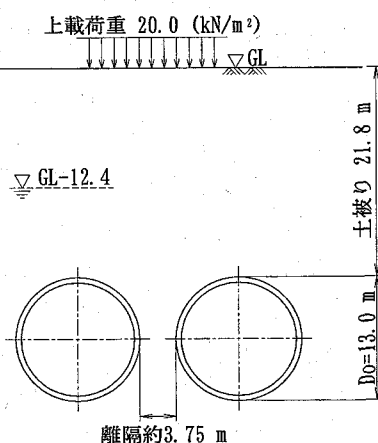


表-1 セグメント構造諸元

構造形式	RC平板型セグメント
分割数	等10分割
外径	13,000 mm
内径	11,900 mm
厚さ	550 mm
幅	1,200 mm

図-1 西新宿シールド平面・縦断面図

土質	層厚 m	N 値	γ kN/m ³	c kN/m ²	ϕ 度
B	4.7	0	13.5	(0)	84
Lc	3.4	3	15.0	(0)	38
Tos1	6.9	14	19.0	0	34
Toc2	3.7	9	18.5	48	0
Tos2	5.6	36	19.0	0	30
Tog	3.4	50	19.0	0	34
Ks1	7.0	50	18.5	0	36.9
Kc	10.7	50	19.0	110	0



※ () は設計荷重を算出する際の値

図-2 計測断面概要図

計測断面は、図-2に示すように併設離隔が約3.75mである。セグメントリングに設置した計測機器は、土圧計(4箇所)、水圧計(2箇所)および周方向の鉄筋ひずみ計(10箇所)である。このうち、切羽通過8日前を初期値として併設の影響による土水圧計測値の増分とシールド位置との関係を表したものを図-3に示すが、切羽が通過する約10m手前から土水圧が徐々に増加し、シールド機テール通過直後に最大となる。

周方向位置では、①および②の後行トンネル側の位置の増加が激しい。この土水圧の増加は裏込め注入圧と考えられ、その影響範囲はシールド機テールの前後約7~9m程度と考えられる。土水圧はその後減少し、一定の荷重に収束する傾向にあるが、その値は併設施工の影響を受ける前より大きくなっている。

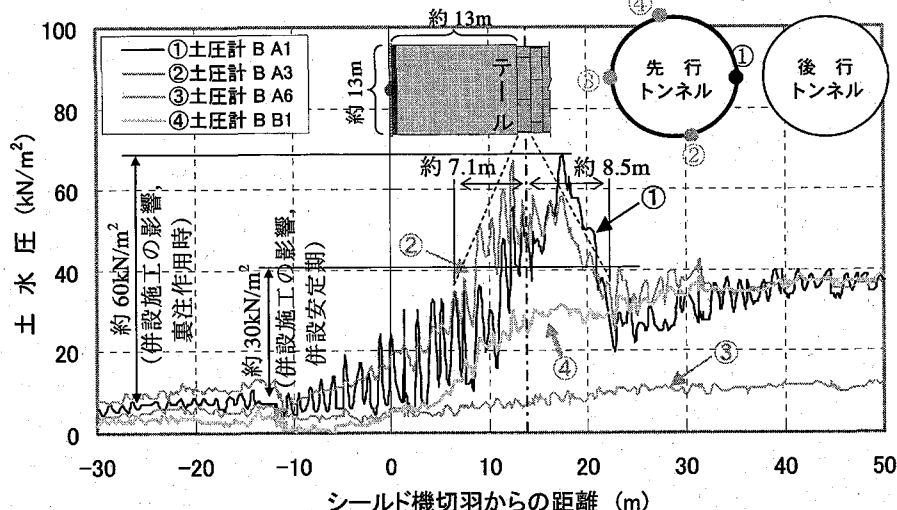


図-3 併設の影響による土水圧の増分とシールド位置の関係

次に、セグメント周方向鉄筋ひずみ計測値より換算した計測曲げモーメントの経時変化を①影響範囲外、②土圧最大（裏注作用時）、③併設安定期、の3つの代表的な時期について比較したものを図-4に示す。①の単設時における曲げモーメント分布は、横方向に広がる形状を示しているが、②の土圧が最大となる裏注作用時には、後行トンネル側の側部で正曲げが負曲げに転じており、トンネル頂部および底部の正曲げモーメントはやや減少する傾向にある。また、併設安定期である③の時期では、トンネル頂部および底部の正曲げモーメントは初期の単設時に比べて増加し、後行トンネル側の負曲げモーメントも増加傾向を示している。この結果より、裏注作用時は、先行トンネルは後行トンネルの裏込め注入圧の影響を受けて押される形となり、併設安定期では、先行トンネルは後行トンネル側に引き込まれるような応力状態になるといえる。また、①の単設時の曲げモーメントは、正曲げ最大で約 $110\text{kN}\cdot\text{m}$ 、負曲げ最大で約 $-126\text{kN}\cdot\text{m}$ であったのに対し、③の併設安定期の曲げモーメントでは、正曲げ最大で約 $150\text{kN}\cdot\text{m}$ 、負曲げ最大で約 $-221\text{kN}\cdot\text{m}$ となっており、正曲げで約 $40\text{kN}\cdot\text{m}$ （比率 1.36）、負曲げで $95\text{kN}\cdot\text{m}$ （比率 1.75）それぞれ増加する結果となった。

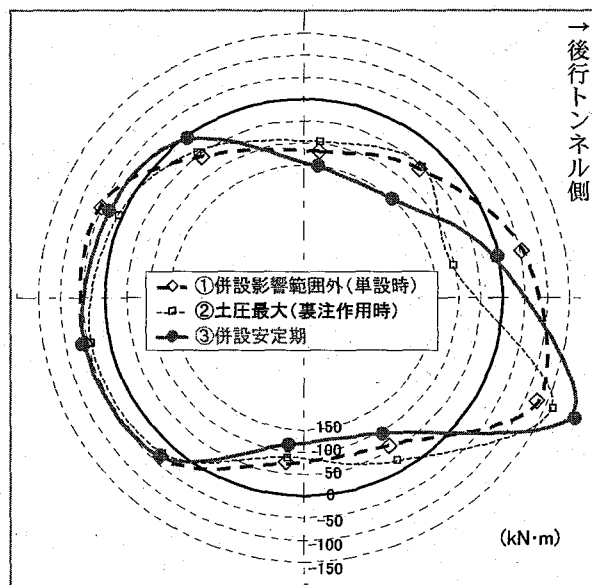


図-4 計測曲げモーメントの経時変化

3. FEM解析によるフィッティング解析

併設トンネルによる相互干渉の影響、施工時荷重の影響をFEM解析を用いて検討する場合、覆工設置前の状態で解放される地山応力の初期応力に対する割合（応力解放率）を適切に設定することは困難であり、経験的に設定している場合が多い。また、設計でFEM解析を用いる際、地盤を弾性体と仮定することが多いが、離隔が非常に小さい場合や周辺地盤に軟質地盤が存在する場合は、トンネル周辺地盤が塑性化することとも考えられ、弾性体として扱うと実態と大きな差が生じることが懸念される。そこで、本研究では、FEM解析に用いる応力解放率の算定および弾性解析と弾塑性解析との相違について着目し、現場計測結果とのフィッティングを試みた。

3.1 FEM解析方法

FEM解析を用いて現場計測結果とのフィッティングを行うにあたり、図-5に示すようなFEM解析ステップを考慮した。

(1) 解析モデル

FEM解析モデルは、地盤を弾性体としたものおよび地盤を弾塑性体としたものの2種類とした。弾塑性（非線形）による解析はMohr-Coulomb法に従った。Mohr-Coulombの破壊包絡線と主応力図の関係図を図-6に示す。また、図-6における状態量を以下に示す。

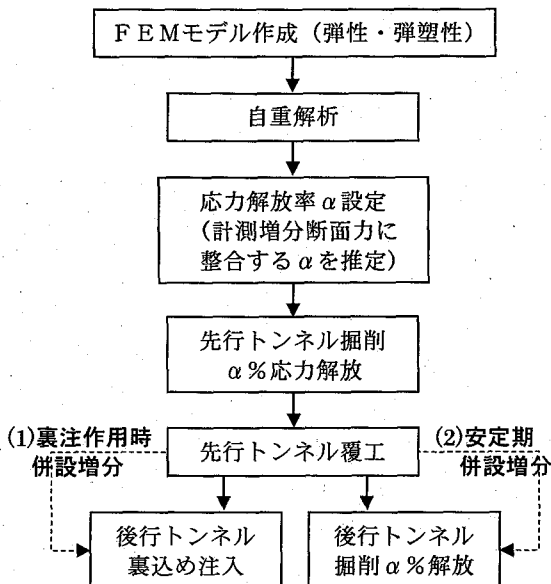


図-5 FEM解析ステップ

破壊包絡線: $\tau = C + \sigma \tan \phi$

主応力円半径: $r = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$

主応力円中心位置～破壊包絡線距離:

$\phi > 0$: $h = [C / \tan \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) / 2] \cdot \sin \phi$

$\phi = 0$: $h = C$

破壊安全率: $SF = h/r$

破壊接近度: $\eta = r/h$

弾塑性解析は、各解析ステップの応力レベルにおいて、下式のように弾性係数、ポアソン比を変化させることとした。

$$E_t = E_{\max} \cdot (1.0 - \eta) + \eta \cdot E_{\min}$$

$$\nu_t = \nu_{\min} \cdot (1.0 - \eta) + \eta \cdot \nu_{\max}$$

ここに、 E_t : 計算に用いられる弾性係数、 ν_t : 計算に用いられるポアソン比

$E_{\max}$: 最大弾性係数 (初期=設計値)、 $E_{\min}$: 最小弾性係数 (破壊時=0)

$\nu_{\max}$: 最大ポアソン比 (破壊時=0.5)、 $\nu_{\min}$: 最小ポアソン比 (初期=設計値)、

なお、弾塑性計算上の処理について、破壊接近度 η の値は $0 \leq \eta < 1$ の範囲で用いた。 η が 1 を越えた状態は、土が破壊した状態となることから、この場合は $E_t = E_{\min}$ 、 $\nu_t = \nu_{\max}$ とした。また、一度破壊した地盤要素は、その後の収束計算上も破壊状態を維持する形とした。

(2) 応力解放率

応力解放率 α については、解析増分断面力と計測増分断面力が整合する α をトライアル計算により設定した。また、応力解放率 α は、実際には泥水圧、掘削による応力解放、裏込め注入圧の作用等の種々の要因で定まると考えられるが、現時点ではこれらを明確に区分して設定することは困難であることから、ここではこれら複数の要因を加味した総合的な応力解放率として設定した。さらに、現場計測結果より、併設安定期の先行トンネル覆工に発生している曲げモーメントが後行トンネルに引き込まれる形となっているのに対し、計算上後行トンネル覆工後に応力解放を行うと、後行トンネル覆工の変形が地盤を介して先行トンネルを押し込む形となり現場計測結果との整合がとれないこととなる。この現象については先行トンネルも同様であると考えられる。以上のことを加味し、本研究では、トンネル覆工後の応力解放を行わないこととした。

(3) 裏込め注入圧作用時

裏込め注入圧作用時は、先行トンネルを覆工した時点から、後行トンネルより裏込め注入圧を作用させた時点までの断面力の増分を、増分断面力とした。なお、後行トンネルから外側に作用させる裏込め注入圧は、 0.4N/mm^2 (裏込め注入圧計測値) $- 0.276\text{N/mm}^2$ (泥水圧計測値) $= 0.124\text{N/mm}^2$ と仮定した。

(4) 併設安定期

併設安定期は、先行トンネル覆工から後行トンネル掘削による $\alpha\%$ の応力解放を行った時点での断面力の増分を併設安定期の増分断面力とした。

3. 2 弾性 FEM 解析結果

フィッティング解析において、軸力、曲げモーメントの両者を整合させることは困難であった。そこで、実設計で最も重要な要素である曲げモーメントについて着目し、整合性をとることとした。また、FEM 解析上の地盤構成は、土水一体 (全応力) とした。弾性 FEM 解析により算出した併設時の解析増分断面力と現場計測結果から得られた併設時の増分断面力を比較したものを、表-2 に示す。このときの FEM 解析に用いた応力解放率 α は 52% であった。なお、表中の数字は、それぞれの最大断面力の位置の値を示した。

後行トンネルから外側に 0.124N/mm^2 を作用させた裏込め注入圧作用時について、計測曲げモーメント分

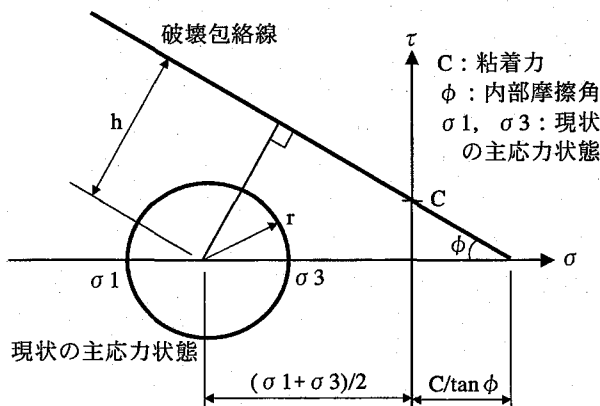


図-6 Mohr-Coulomb 法概念図

布の後行トンネル側のスプリングライン付近では正曲げモーメントが増加し、トンネル頂・底部ではやや負曲げが増加している。これに対して解析の曲げモーメント分布をみると、頂部および底部の負曲げモーメントは計測値よりもやや過大ではあるが、傾向は概ね計測値と同様であった。また、解析の軸力増分値の分布は計測の軸力増分値の分布に対して全体的に小さい。これについては、FEM解析で整合をとるうえでの課題点ではあるが、単設時の軸力を付加した合計軸力は3,000kN以上であるため、合計軸力レベルでは相違分の比率は小さいと考える。

次に併設安定期について、計測での増分曲げモーメント分布は後行トンネル側に引き込まれる形となっているが、解析増分曲げモーメント分布においても同様の分布傾向が得られた。また、解析値の正曲げモーメント最大増分値は105kN・m、負曲げモーメント最大増分値は-97kN・mであり、この絶対値は計測値の正曲げモーメント最大増分値90kN・m、負曲げモーメント最大増分値-94kN・mとほぼ等しい値となった。軸力については、裏込め注入圧作用時同様、解析増分値の分布は計測増分値の分布よりも全体的に小さいが、後行トンネル側スプリングライン付近については、解析値は計測値に近付く傾向がみられた。

3. 3 弾塑性FEM解析結果

3. 1 (1) で示した Mohr-Coulomb の考え方をを用いて、弾塑性FEM解析により算出した併設時の解析増分断面力と現場計測結果から得られた併設時の増分断面力を比較したものを、表-3に示す。このときのFEM解析に用いた応力解放率 α は18%であった。なお、表中の数字は、それぞれの最大増分断面力位置の値を示した。

裏込め注入圧作用時について、解析の曲げモーメント分布をみると、弾性FEM解析結果同様、頂部および底部の負曲げモーメントは計測値よりもやや過大となった。また、解析の軸力増分値分布についても、弾性FEM解析同様、計測の軸力増分値分布に対して全体的に小さくなっているが、合計軸力3,000kN以上に対しては、相違分の比率は小さい。

表-2 弾性FEM解析による解析増分断面力と計測増分断面力との比較（応力解放率 $\alpha=52\%$ ）

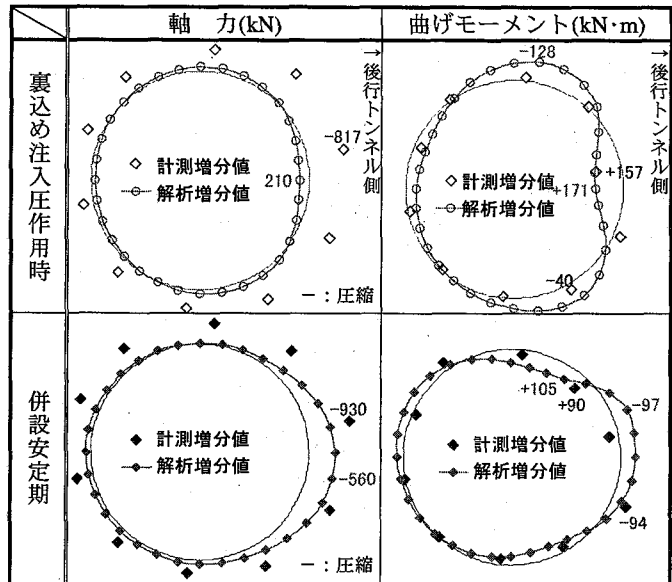
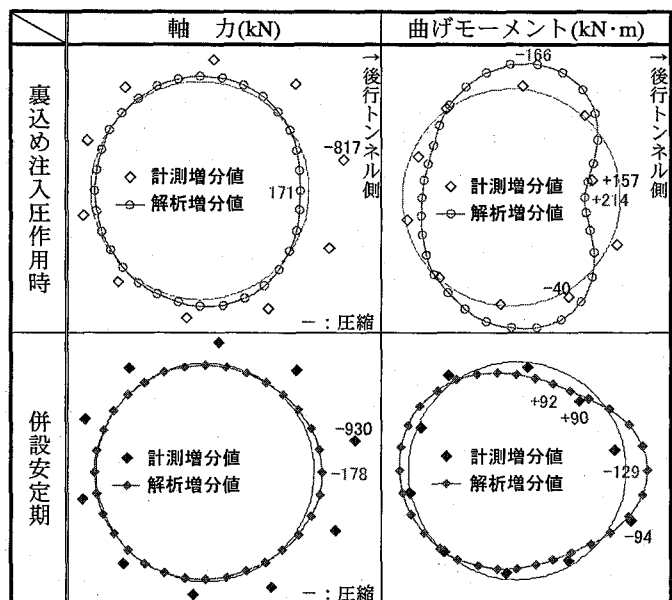


表-3 弾塑性FEM解析による解析増分断面力と計測増分断面力との比較（応力解放率 $\alpha=18\%$ ）



土層名	層厚	代表N値	単位体積重量	内部摩擦角	粘着力	弾性係数	ポアソン比
(a)			(kN/m^3)	($^\circ$)	(kN/m^2)	(kN/m^2)	
B	4.7	5	13.5	0	0	9000	0.35
Lc	3.4	3	15.0	0	0	5000	0.35
Tos1	6.9	14	19.0	34.0	0	20000	0.30
Toc2	3.7	9	18.5	0	48	23000	0.40
Tos2	5.6	36	19.0	30.0	0	36000	0.30
Tog	3.4	50	19.0	34.0	0	86000	0.30
Ks1	7.0	50	18.5	36.9	0	100000	0.30
Kc	10.7	50	19.0	0	110	140000	0.40
Ks2	-	50	18.5	36.9	0	100000	0.30

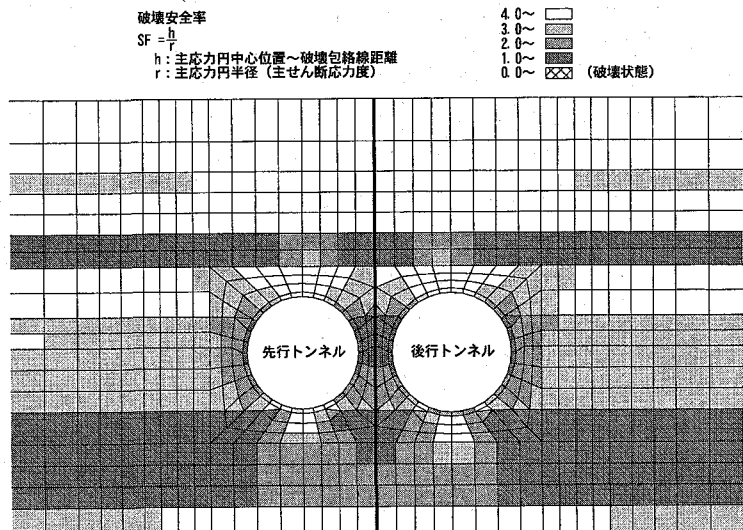


図-7 弾塑性解析結果による安全率コンター図の抜粋（併設安定期：後行トンネル掘削後）

併設安定期について、解析による増分曲げモーメントの分布は後行トンネルに引き込まれる形状を示しており、弾性FEM解析同様、計測増分値分布をほぼ再現できたと考えられる。解析値の正の曲げモーメントの最大増分値 $92\text{kN}\cdot\text{m}$ 、負の曲げモーメントの最大増分値 $-129\text{kN}\cdot\text{m}$ についても、計測増分値にほぼ等しい値となった。軸力については、弾性FEM解析での増分値よりも全体的にさらに小さくなった。この現象は、弾塑性FEM解析において弾性係数およびポアソン比の非線形性を考慮していることが原因と考えられる。

また、図-7に弾塑性解析（併設安定期）による地盤応力の安全率分布を示す。破壊状態に至った要素はないが、硬質な砂質土地盤であるにも関わらず、併設トンネル間で特に破壊安全率が小さくなっているのが読みとれる。このことより、一般的に粘性土の方が安全率の低下が大きい、離隔条件や断面条件によっては、トンネル通過土層が硬質砂質土地盤であっても、併設トンネル間の地山安全率は減少することがわかる。

4. まとめ

本検討結果より、以下のことが明らかとなった。

- (1) 現場計測結果より、併設時の先行トンネルは、裏込め注入圧作用時は後行トンネルから押される方向に、併設安定期は後行トンネルに引き込まれる方向に断面力が増減した。
- (2) 現場計測結果とのフィッティング解析を行った場合、弾性解析では応力解放率を52%、弾塑性解析では応力解放率を18%程度とすることで、曲げモーメントは計測増分値に近似した傾向を得た。
- (3) 弾塑性解析を用いた場合は、応力解放率を小さく設定する必要があることが明らかとなった。

今回得られた上記の知見のうち、応力解放率52%（弾性FEM解析）については従来考えられている値よりも大きい値と判断されるが、今回の単設幅の緩み土圧を用いる手法では、従来の併設の評価方法である併設幅の緩み土圧を用いた場合の不合理性は改善されるため、より合理的かつ経済的な設計が可能となると考えられる。しかしながら、今回得られた知見は、一つの現場計測結果との比較による一考察であり、地盤条件や施工環境による影響も考えられるため、今後、さらなる計測結果との整合を図りながら検討を進めていく考えである。

参考文献

- 1) 例えば、鉄道総合技術研究所：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7月
- 2) 石田，田嶋，小林：大断面シールドトンネルの併設施工による影響検討，土木学会第57回年次学術講演会