

大阪国道下シールドの沈下解析

Settlement Analyses for Shield Tunnels under a National Road in Osaka.

小山幸則¹⁾・小西真治²⁾・三輪恒久³⁾・深沢成年⁴⁾・垣見満義⁵⁾

Yukinori KOYAMA, Shinji KONISHI, Tunchisa MIWA, Narutoshi FUKAZAWA, Mituyoshi KAKIMI

To save space and avoid interference with crowded underground structures, shield tunnels shall be constructed close to one another in urban areas. Generally, settlement due to adjacent tunnels had been estimated with the ground stress release ratio by the two-dimensional plain strain finite element method. This paper proposes the appropriate method for deciding a suitable stress release ratio. From the results of analysis and sufficient field measurements of three shield tunnels under a national road in Osaka, a same stress release ratio was decided for horizontally arranged parallel shield tunnels, but not for vertically arranged closed shield tunnels.

Key Words : shield tunnel, adjacent tunnels, stress release ratio

1 はじめに

都市域において双設するシールドトンネルを建設する場合には、利用可能な道路下の地下空間が限られ、これらのトンネルを近接して設置する計画とせざるを得ないことが多い。単一のシールドトンネルの施工に伴う周辺地盤や既設構造物への影響評価の方法はいくつか提案されているが、いずれもトンネルの掘削を地山内応力の解放でモデル化した2次元FEM解析が用いられている。しかし、2本以上のトンネルを近接施工する場合については、影響予測方法に言及した論文は少なく、影響評価法は確立されていない。従来、複数のシールドトンネルを併設する場合の影響評価は、単一トンネルに対して提案された手法をそのまま適用して行われている。この場合、施工順序に応じたステップ解析を行っているが、単一トンネルで用いられる「応力解放率（覆工設置前の状態で解放される地山応力の初期地山応力に対する割合）」を適用すると実測値との間に乖離を生じるので、各トンネル施工時の応力解放率を変化させて以後の影響予測値を修正するようなことが行われている。しかし、トンネル掘削がほぼ同一の施工方法で行われることを考えると、トンネル毎に応力解放率を変化させることは合理的な根拠に乏しく、また事前予測の実用上の観点からも問題がある。

最近、大阪国道下で鉄道の双設シールドトンネルを建設した後、引き続き共同溝シールドトンネルが建設され、詳細な計測管理が行われた¹⁾。これら3本のシールドトンネルは、非常に近接している上に、掘削径もほぼ等しい。本論文では、これらの計測結果のうち、地盤条件の異なる3断面のデータに基づいて「応力解放率」の概念を用いた複数シールドトンネル掘削の影響予測手法について検討を行った結果についてのべ

-
- 1) 正会員 財団法人 鉄道総合技術研究所 技術開発事業本部
 - 2) 正会員 財団法人 鉄道総合技術研究所 技術開発事業本部 トンネル担当
 - 3) 正会員 建設省近畿地方建設局大阪国道工事事務所 共同溝課
 - 4) 正会員 鉄道公団大阪支社 計画部
 - 5) 正会員 (前) 関西高速鉄道株式会社 建設部建設課

る。解析は、山口ら²⁾が4本併設シールド工事について行った手法を参考にした。

2 解析方法

2.1 対象断面

3断面（東天満、東梅田、淀川）についての条件を、図1～3、表1に示す。図中の番号は、着目した計測点を示している。

なお、3本のシールドトンネルについて、先行鉄道トンネルを第1シールド、後行鉄道トンネルを第2シールド、共同溝トンネルを第3シールドと呼ぶことにする。

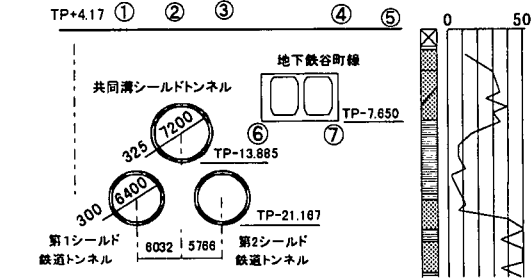
2.2 解析方法

解析は、変形に着目した解析ということで弾性有限要素法を用い施工にあわせた逐次解析で行った。現場計測結果をもとに、特に地表面付近での沈下に着目して、適切な解放率を求める逆解析を行った。

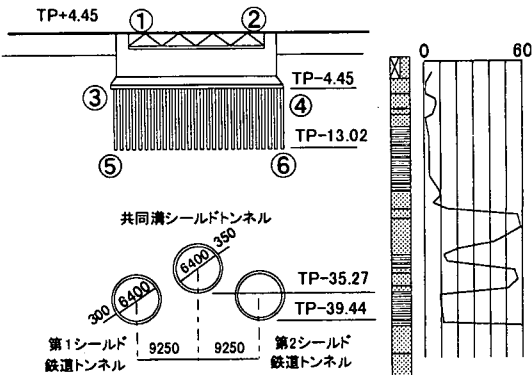
今回、工事の事前・事後に行なわれたA手法の結果¹⁾を参考に、新たにB手法による解析を行った。

A手法は従来行われている解析手法である。解析ステップを図4に示す。2ステップ目で掘削時に解放率 α ％応力解放させた後、次ぎのステップで覆工の設置と第2シールド掘削の応力解放（ α ％）を同時に行うといった手順を繰り返した。すなわち、適切な裏込め注入圧で注入すればセグメントの変形は次のシールド掘削までに完了するため、変形のみに着目する場合は残りの（100－ α ）％の解放応力は無視出来るとした解析である。また、先行したシールドの施工の影響を受けて3本のシールドで異なった緩み範囲になると考え、トンネル毎にそれぞれ異なる解放率を求めたものである。

B手法の解析ステップを図5に示す。2ステップ目で掘削時に解放率 α ％応力解放させた後、次ぎのステップで覆工の設置を行い、残りの（100－ α ）％の解放応力をこの覆工に作用させるという手順を繰り返した



図－1 解析断面（東天満）



図－2 解析断面（東梅田）

表－1 解析断面の条件

項目	東天満	東梅田	淀川
上部土質	盛土 (R _u) 冲積上部砂質土層 (A _{g1})	盛土 (F _u) 冲積上部砂質土層 (A _{g1}) 下部砂礫層 (A _{g2})	盛土 (R _u) 冲積上部砂質土層・粘性土層 (A _{g1} , A _{c1})
掘削部土質 (初期)	冲積上部砂質土層 (A _{g1}) 冲積上部粘性土層 (A _{c1})	冲積下部砂礫層・粘性土層 (A _{g2} , A _{c2})	洪積上部砂礫層・粘性土層 (U _{g1} , U _{c1})
掘削部土質 (鉄道)	冲積上部粘性土層 (A _{c1}) 洪積上部砂礫層・粘性土層 (U _{g1} , U _{c1})	冲積下部粘性土層 (A _{c2}) 洪積上部粘性土層・砂礫層 (U _{c1} , U _{g1})	洪積上部砂礫層・粘性土層 (U _{g1} , U _{c1})
近接構造物	地下鉄谷町線平部	堀川アンダーパス下部 地下鉄谷町線 阪神高速	淀川大橋護岸部 (左岸)
鉄道シールド	泥水式 (掘削径φ1150mm)	泥水式 (掘削径φ1150mm)	泥水式 (掘削径φ1150mm)
共同溝シールド	泥水式 (掘削径φ800mm)	土圧式 (掘削径φ790mm)	泥水式 (掘削径φ1250mm)

図－3 解析断面（淀川）

ものである。また、事前予測解析に用いる解放率を求めるという考えから、同一断面では、同様の地盤条件で3本のシールドが施工されると考え、各トンネルについて同一の解放率を求めることを試みた。

なお、地盤物性値算定は $E_s=15N$ 、 $E_c=210C$ を用いた。

3 解析結果

3.1 A手法の解析結果

図6～13中の、■印がA手法による解析結果である。表3に各応力解放率を示す。すべての断面で第2シールドの解放率が小さくなっている。

3.2 B手法の解析結果

東天満（図6～7）では、解放率25%で第1シールド、第2シールドの完了時は計測値（地表面）とよく一致した。しかし、第3シールドでは解析値が計測値に比べて小さな値となった。これは、第1、第2シールドは同じ深度にあるが、第3シールドは少し浅いことによると考えられる。そこで、まず第3シールド掘削前に下端の解析領域を1.5Dの位置に変更して解析した（図5 step5'）。すなわち、解析領域下端を応力解

表－2 入力諸定数

6	土質	N値	γ (t/m^3)	E (t/m^3)	ν
東天満	R_{d1}	8	1.7	1200	0.40
	A_{d1}	30	1.9	4500	0.35
	A_{d2}	5	1.7	1350	0.40
	U_{d1}	50	2.0	7500	0.30
東梅田	F_{d1}	8	1.7	1200	0.40
	A_{d1}	32	2.0	4800	0.30
	A_{d2}	35	2.0	5250	0.30
	A_{d3}	8	1.8	1700	0.35
淀川	U_{d1}	50	2.0	7500	0.30
	R_{d1}	4	1.7	600	0.40
	A_{d1}	5	1.7	750	0.40
	A_{d2}	4	1.7	1300	0.40
淀川	U_{d1}	60	2.0	7500	0.30
	U_{d2}	11	1.8	3280	0.35
	U_{d3}	50	2.0	7500	0.30

表－3 A手法による応力解放率

断 面	第1シールド	第2シールド	第3シールド
東天満	$\alpha=9.5\%$	$\alpha=2.0\%$	$\alpha=10.0\%$
東梅田	$\alpha=8.5\%$	$\alpha=5.5\%$	$\alpha=10.0\%$
淀川	$\alpha=13.0\%$	$\alpha=3.0\%$	$\alpha=26.0\%$

STEP 1 初期応力 解析

STEP 2

第1シールド掘削
応力解放 α_1



STEP 3

第1シールドセグメント
を梁要素で入力
第2シールド掘削
応力解放 α_2



STEP 4

第2シールドセグメント
を梁要素で入力
第3シールド掘削
応力解放 α_3



図－4 A手法

STEP 1 初期応力解析

STEP 2

第1シールド掘削
応力解放 $\alpha\%$



STEP 3

第1シールド覆工
応力解放 $(100-\alpha)\%$



STEP 4

第2シールド掘削
応力解放 $\alpha\%$



STEP 5

第2シールド覆工
応力解放 $(100-\alpha)\%$



STEP 6

第3シールド掘削
応力解放 $\alpha\%$



STEP 7

第3シールド覆工
応力解放 $(100-\alpha)\%$



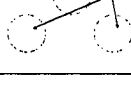
STEP 5'

下方境界を
第3シールドから
1.5Dに上げる



STEP 5''

第1、第2
シールドをもとの
地盤で埋め戻す



図－5 B手法

放するトンネル下端から 1.5D で統一した。この結果、地表面沈下量は計測値に若干近づくが、依然として小さな値であった。次に、この原因を第3シールドで応力解放が起こる前に下方に剛性の高い先行トンネルの覆工が設置されている影響と考え、①第3シールドのみ解放率を変える。②第3シールド掘削前の変位は維持しておき、第1、第2シールドの覆工を撤去し空間を元の地山で埋戻して、解析する(図5 step5")。の2種類の解析を行った。①の手法では、第3シールドの解放率を70%と下段のシールドよりかなり大きな解放率を設定しなければ計測値と一致しなかった。②の手法では、若干小さくなるがそれでも55%であった。これらのことは、図8に示すような、トンネルと互層となった地盤の位置に関係していると考えられる

東梅田(図9~11)では、計測点がすべて構造物上であり、第1シールド通過以降計測値がほとんど変化していない。これは開削工法で施工された既設構造物で地盤との境界が不連続となり剛体としての挙動をとることと3次元的效果が強いためと考えられ、2次元の連続体解析ではシミュレートが困難であった。

淀川(図12~14)は①,②が構造物上の計測値であるが、③~⑥は橋台近傍地盤中の層別沈下計の値である。計測値は第2シールドでの沈下増加量がほぼ0であるが、計測点②近傍の水盛式沈下計では約2.5mmの沈下量が見られることや、右岸では第1、第2シールド通過でほぼ水平な沈下形状となっていること³⁾から、図中に②,④,⑥の計測値に-2.5mmを加えた値を示した。これらの結果から、地盤の挙動は東天満と同様の傾向が見られ第1、第2シールドでは、解放率40%、第3シールドでは85%で計測値に近い結果となった。

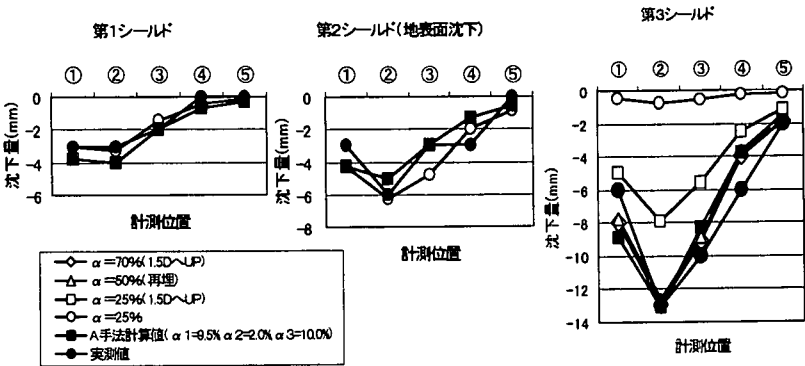


図-6 東天満断面 計測および解析結果(地表面)

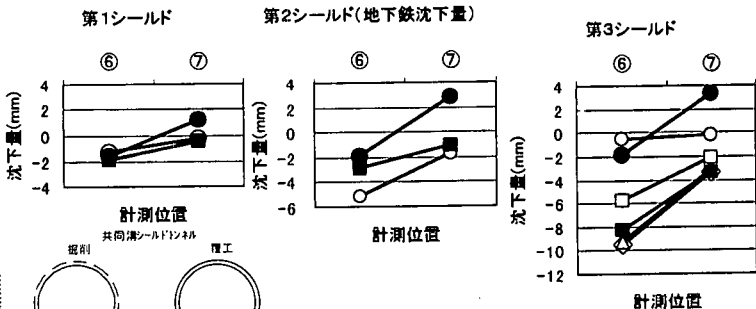


図-7 東天満断面
計測および解析結果
(地下鉄)

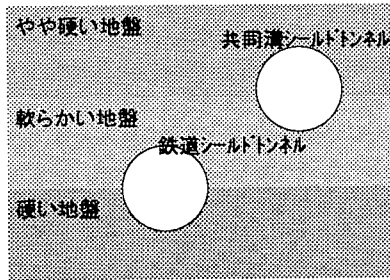


図-8 互層地盤とトンネル位置の関係(東天満)

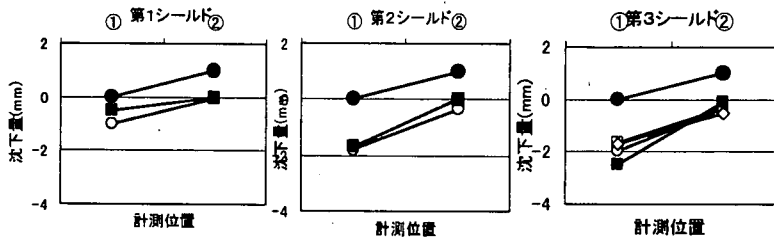


図-9 東梅田断面 計測および解析結果（高架橋）

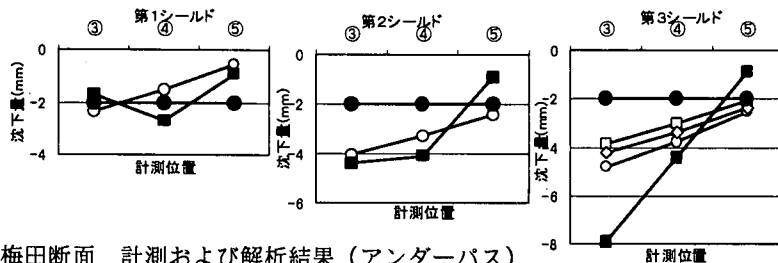


図-10 東梅田断面 計測および解析結果（アンダーパス）

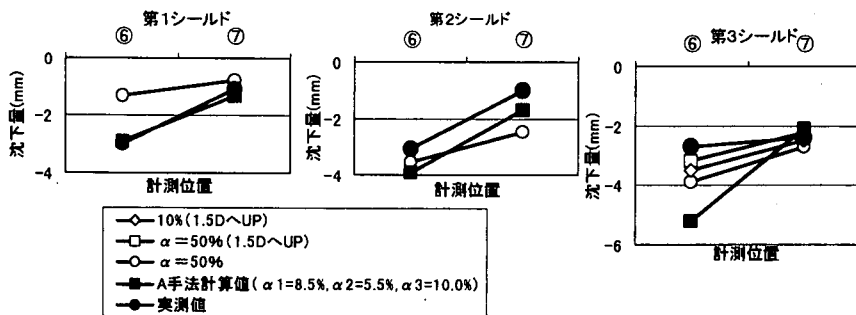


図-11 東梅田断面 計測および解析結果（地下鉄）

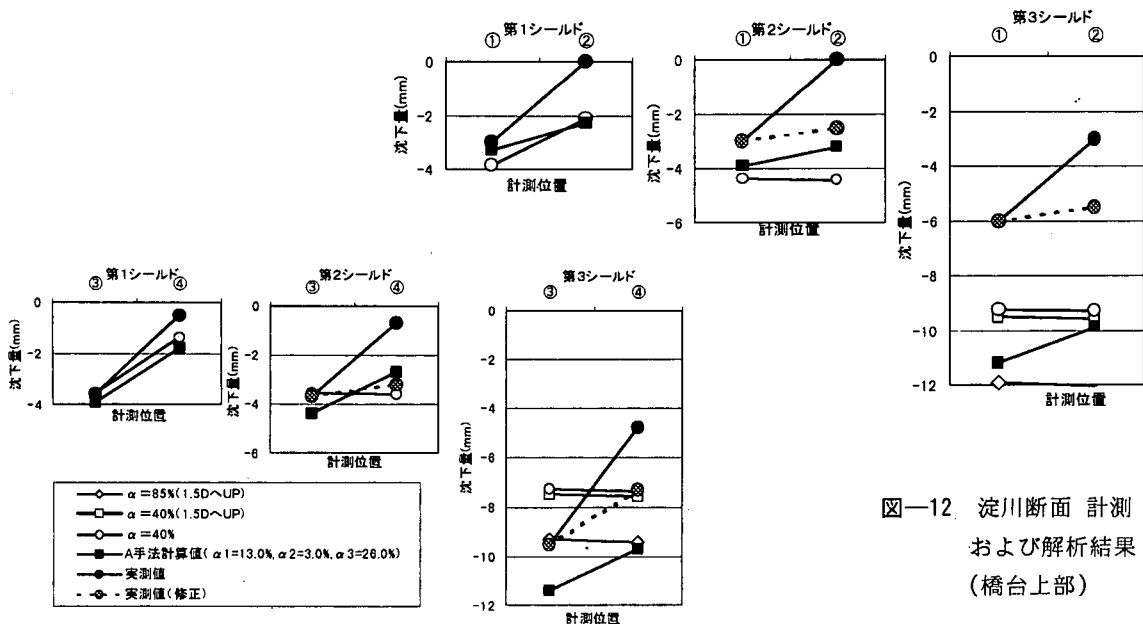
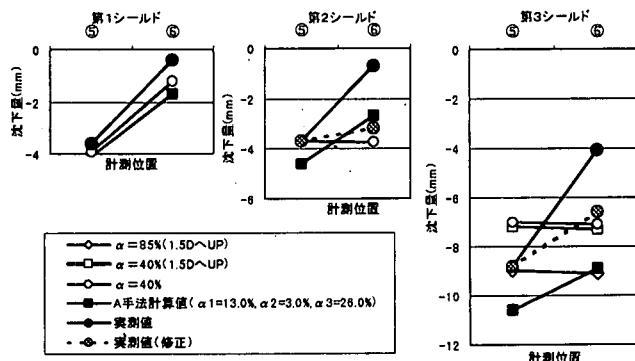


図-12 淀川断面 計測および解析結果（橋台上部）

図-13 淀川断面 計測および解析結果（橋台下端側部）



図一14 淀川断面 計測および解析結果（基礎下端側部）

4 まとめ

- ① 掘削（解放率 $\alpha\%$ ）、覆工設置（解放率 $(100-\alpha)\%$ ）という応力の収支を合わせた予測解析によって地盤の沈下については、シミュレーションすることが可能であることを確認した。
- ② 地盤の沈下についての計測結果と解析結果の比較から、最終的に 100%応力解放させる手法で、同じ深度で、左右方向に近接しているトンネルでは同一の解放率を設定出来る。
- ③ 上下方向に近接しているトンネルでは、トンネルと深さ方向に変形係数が変化する地層の位置関係、下方の既存トンネル、下部の解析領域の影響等を考慮して解放率を定める必要がある。
- ④ 地質条件の異なる場合には、それぞれ異なる解放率が必要である。
- ⑤ 地盤の変形はある程度シミュレーションが可能であるが、構造物の挙動については限界があり、三次元効果や地盤との境界条件を考慮した剛体としての挙動を評価できる手法を取り入れる必要がある。

5 おわりに

3本のシールドトンネルのうち、水平双設トンネルについては統一した応力解放率を設定し得ることがわかった。今後、今回と異なる事例についても確認していく予定である。

応力解放率は、掘削から覆工完成に至るトンネル施工過程の様々な要因を1つのパラメータで表した考え方と言える。単一のシールドトンネルの影響評価で、既設構造物の不規則な挙動を追うにはA手法のような手法が便利である。しかし、複数トンネルでは地盤変形の事前影響予測手法としてB手法のような解放応力の収支を合わせた考え方が必要となってくる。今回は解放応力を、掘削時に地山が負担し、その後覆工が負担して 100%になると割り切って解析した。現実には、裏込め注入やトンネルの3次元効果の影響も十分に考慮する必要があり、今後これらについても詳細に検討したいと考えている。

文献

- 1) 建設省近畿地方建設局大阪工事事務所，関西高速鉄道株式会社，日本鉄道建設公団大阪支社，財団法人 国土開発技術研究センター：大阪市内国道1・2号シールド施工技術検討報告書，1997.3
- 2) 山口 巖，山崎 糸治，小林 隆，松下 博次，宮田 弘之介，杉嶋 敏夫：4本併設シールドの地盤－トンネル挙動分析と併設シールドの設計・施工への応用に関する研究，土木学会論文集 No.561/III-38,47-62,1997.3
- 3) 建設省近畿地方建設局大阪工事事務所，関西高速鉄道株式会社，日本鉄道建設公団大阪支社，財団法人 国土開発技術研究センター：大阪市内国道1・2号シールド施工技術検討報告書，1995.11