

3次元FEM解析による沈下抑制工法選定の試み —— 舞子トンネルアンブレラ工法 ——

STUDY ON GROUND DEFORMATION CONTROL METHODS BY 3D-FEM ANALYSES IN MAIKO TUNNEL

岡澤達男*

三島功裕*

倉持秀明**

伊藤邦彦***

対馬祥一****

Tatsuo Okazawa Yoshihiro Mishima Hideaki Kuramochi Kunihiro Ito Shoichi Tsushima

The excavation of Maiko Tunnel South Section must be performed under a combination of adverse conditions including large cross section, uncemented ground, urban site, shallow depth of cover, and a binocular tunnel.

As it is of greatest concern to minimize the settlement of surface structures, the excavation of the large cross section tunnel is being achieved after the execution of long forepoles installing a series of steel pipes in an arch like "umbrella" shape.

The authors, so as to grope for a better construction method to minimize surface settlements, studied on ground deformation control methods by three dimensional finite element method.

Keyword: large tunnels, umbrella method, three dimensional numerically analysis

1. はじめに

舞子トンネルは、明石海峡大橋への取付部として神戸側陸上部に設けられる延長 3.3kmの3車線の双設トンネルである。本トンネルのうち、南工事区間の大阪層群部の特徴を簡単に述べると、低土被り、未固結の砂礫層、大断面双設トンネル、住宅地直下といったことが挙げられる。

したがって、地表面沈下抑制の必要性から、切羽前方の地山に雨傘を細く広げたようなシェル状の改良体(アンブレラアーチ)を造成した後、トンネル掘削を行っている。

本報告では、低土被りで住宅の密集している区間の施工に際して、アンブレラ工法を主体としたより効果的な沈下抑制工法を模索するため、3次元FEM解析による解析上からのアプローチを行った結果について述べるものである。

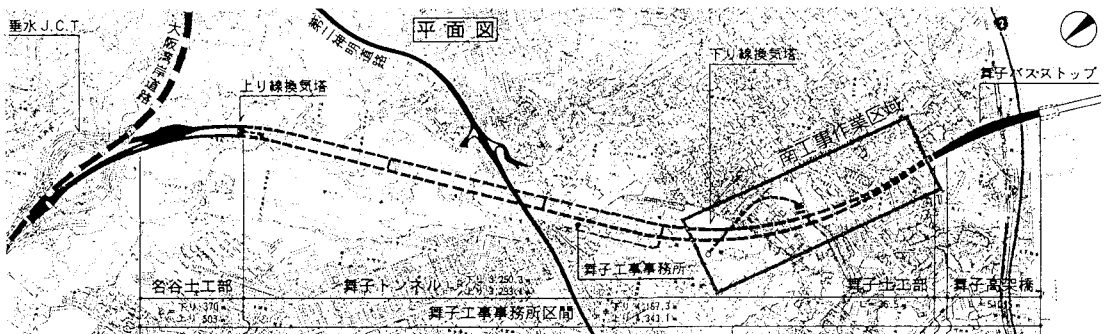


図-1 舞子トンネル位置図

*正会員 本州四国連絡橋公団 第一建設局

** ハ°シフィックコンサルタンツ(株)

*** 舞子トンネル南工事JV

****正会員 (株)大林組 土木技術本部技術部

2. 舞子トンネルの地質とアンブレラ工法の概要

舞子トンネル大阪層群部の地質は、
図-2の地質縦断面図に示すように、
未固結の砂礫層および粘土層が分布
し、N値で40～50程度である。

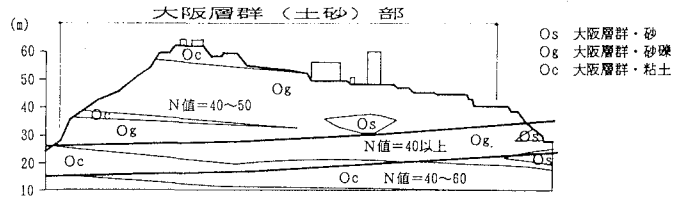


図-2 地質縦断面図（上り線）

このような地質条件下で3車線大断面トンネルを双設で掘削するため、地盤沈下抑制の必要から、図-3に示すアンブレラ工法を用いている。これは、長尺フォアパイル打設機により、掘削に先行して地中にパイプを打ち込み、アーチを構築して地山を直接支持することにより、ゆるみを抑え、変形や沈下を防止することができる。

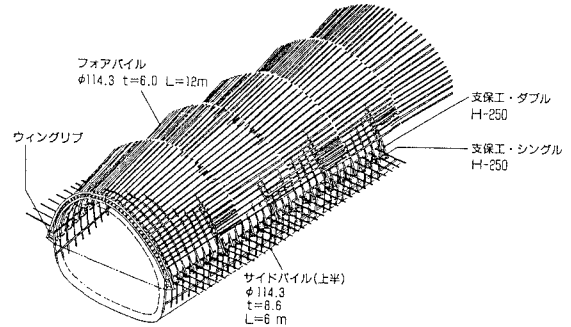


図-3 アンブレラ工法概要図

3. 沈下抑制工法模索のための考え方

アンブレラ工法を考慮した解析を行う場合、2次元FEMの場合にはアンブレラのモデル化が困難なため、3次元FEMにならざるを得ない。また、切羽での掘削に先行する地盤改良等も、2次元でのモデル化は難しい。しかし、3次元FEMの場合に、モデル作成や計算に多大な労力を要するため、ある程度簡略化した方法とする必要がある。また、実現象を反映することも解析の精度を高める上で必要なことである。

そこで、図-4に示すフローに従い、3次元FEM解析を中心に沈下抑制工法を検討した。

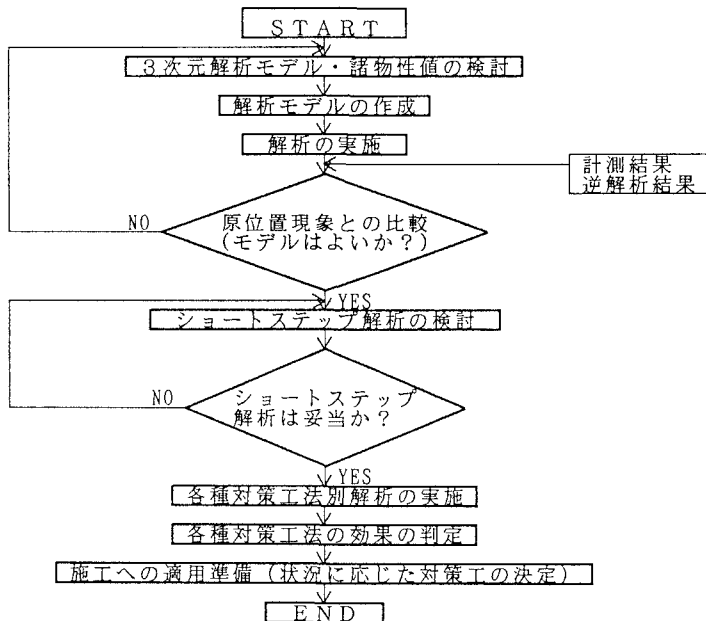


図-4 沈下抑制工法模索のための検討フロー

4. 施工過程を考慮した3次元FEM解析

4.1 解析条件

舞子トンネルは双設トンネルであるが、有効な沈下抑制工法を模索することを主たる目的としているため、ここでは上り線が掘削される時を対象にし、以下の条件のもとで解析する（図-5の解析モデル参照）。

- ①解析領域は、住宅密集区間（土被り約20m）を対象にする。
- ②地表面は水平構造とし、地層は均一とする。
- ③解析断面は半断面とする。
- ④線形弾性解析とする。

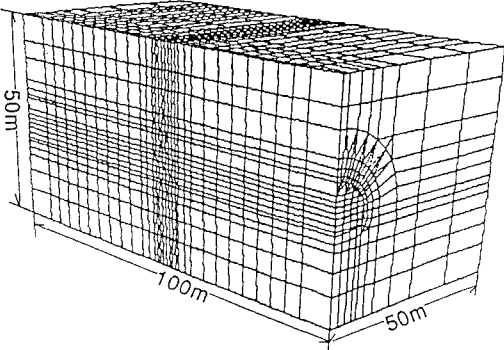


図-5 解析モデル

4.2 解析物性値と解析ステップ

解析物性については、原位置試験結果も参考に、表-1の一覧表に示すように定めた。吹付コンクリートはシェル要素で、鋼製支保工およびアンブレラの鋼管はビーム要素でモデル化した。

解析ステップは、アンブレラや上下半の切羽距離など、実施工を踏まえたものとしている。また、解析の効率化を図るため、解析境界付近では粗い掘削(2~8m/STEP)とし、ほぼ中央部には実施工と同じ間隔(1m)で掘削支保する区間(8m)を設けた。これにより、計28の解析ステップとなった。

表-1 解析物性値一覧表

地山；ソリット*要素			
	単体重量 γ tf/m ³	弾性係数 E tf/m ²	ポアソン比 ν
地 山	2.1	20,000	0.3
鋼製支保工・トレビ*チューフ*（鋼管+モルタル）；ビ*ム要素			
	弾性係数 E tf/m ²	断面積 A m ²	断面二次 I m ⁴
鋼製支保工	2.1E+7	9.2E-3	1.1E-4
トレビ*チューフ*	7.3E+6	1.0E-2	8.4E-6
吹付コンクリート；シェル要素			
	弾性係数 E tf/m ²	板 厚 t m	ポアソン比 ν
吹付コン	4.0E+5	0.25	0.20

4.3 解析結果および計測結果との比較

(1)地表面沈下および天端沈下

解析結果として変位に着目して、図-6および図-7に解析境界から48m地点（TD+48m）の天端沈下および地表面沈下を示す。

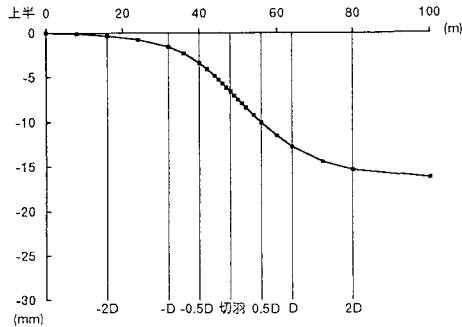


図-6 TD+48m地表面沈下

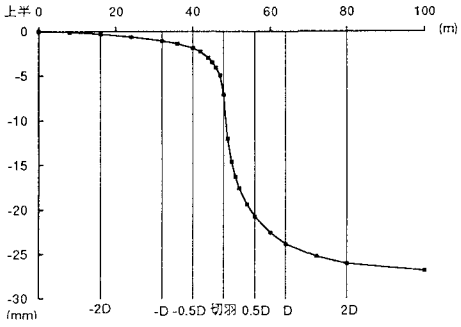


図-7 TD+48m天端沈下

(2)計測値との比較

地形や土被りおよび地山性状が変化するため、解析結果と直接比較することの妥当性に関しては議論の余地があるものの、モデル化等の解析全体の妥当性を判断する目安にはなるものと考えられる。そこで、土被りが解析に近い箇所に着目して、表－2に比較結果を示す。

特に、土被りが本解析ケースとほぼ
同じ箇所では、

地表沈下；-12mm

天端沈下；-27mm（上半）

表－2 地表・天端沈下比較表 （単位:mm）

	計測データ	解析結果
地表沈下 上半収束値	-9～-13	-16.1
天端沈下 上半収束値	-27～-43	-26.8

となっており、解析結果とかなり近い値を示している。なお、ここでの計測データの天端沈下量は、切羽到達前の変位（水平傾斜計や地表面沈下等から推定）を含んでいる。

地表・天端沈下に関する比較から、解析結果が概ね妥当であると判断できる。

(3)逆解析結果との比較

2つの計測断面における計測結果をもとに、逆解析によって地山の弾性係数を求めた。

結果については、2次元解析であること、支保を適切に評価することが困難であることおよび選択する計測値によって結果が異なることなどの問題点はある。しかし、本検討において用いた地山物性評価（地山弾性係数）の目安になるものと考えられ、逆解析結果から弾性係数として、『1,300kgf/cm²～3,000kgf/cm²』を得た。解析で用いた地山の弾性係数が、『2,000kgf/cm²』であることから、解析で用いた地山弾性係数が概ね妥当であるといえる。

5. ショートステップによる解析

5.1 解析目的と解析ステップ

先の解析で実施工に即した解析を実施したが、解析ステップが28もあり、解析に要する時間、労力が膨大である。解析の主目的を沈下抑制工法の模索におけば、定性的特性の把握が可能であればよく、ある程度の精度を有しているのであれば、より簡略化した形の解析とすることが望ましい。したがって、モデルは当初のままとし、解析ステップを簡略化して各種対策工法について検討する手法を用いることとした。

そこで、解析ステップを初期応力解析を含めて5ステップとし、上半を解析領域内において貫通させる。これを、表－3に示す。

このケースについて、先に示した28ステップの解析と比較検討する。

なお、表－3でTD+44とあるのは、解析境界から44mであることを示している。

5.2 解析結果の比較

ショートステップ解析の妥当性を検証するため、主としてトンネルCL地表面沈下、[天端+2m]沈下、天端沈下の3箇所の上半収束変位に着目して比較する。

比較結果を表－4に示す。

表－3 解析ステップ

STEP	上半掘削	上半支保	トレビ
1	初期応力解析		
2	TD+44	TD+44	TD+52
3	TD+48	TD+47	
4	TD+52	TD+51	TD+60
5	TD+100	TD+100	TD+100

表－4 解析結果比較 （単位:mm）

CASE	28STEP版	5STEP版
地表面沈下	-16.1	-16.0
[天端+2m]沈下	-23.7	-23.5
天端沈下	-26.8	-26.5

この結果から、5ステップに簡略化した解析においても、変位に関しては十分な精度が得られることが示された。したがって、沈下抑制工法の模索のための解析は、ショートステップ解析（5ステップ）により実施することとした。

6. 各種沈下抑制工法を考慮した3次元FEM解析

6.1 沈下抑制工法の種類

沈下抑制工法を模索するに際し、施工性がよく比較的小規模でも効果的な対策工を選定することが必要である。特に、舞子トンネルのような未固結の地山では、支保工脚部の沈下を抑制することが全体の沈下抑制に効果的である。したがって、現地における試験結果等を踏まえて、ウレタンによるSL盤下の脚部地山改良を対策工の第一と考え、吹付けコンクリートによる上半仮閉合、ウレタンによるアーチ改良、超微粒子セメントミルク注入によるアーチ等の改良といった対策工を組み合わせる解析ケースを作成した。

表-5に解析ケース一覧表を示す。ここでは、吹付コンクリート、鋼製支保工およびアンブレラ（トレビ鋼管）については、全ケース共通であることから記載を省略した。また、足元改良というのは、ウレタンによるもので、切羽よりも1m先行する。

表-5 解析ケース一覧表

CASE	足元改良	その他の沈下抑制工法
1	無	
2	有	
3	有	ウレタンによる切羽周辺120°の範囲の地山改良；切羽前方4mまで先行
4	有	ウレタンによる切羽周辺180°の範囲の地山改良；切羽前方4mまで先行
5	有	上半盤に吹付コンクリートによる仮インバート； $t=20\text{ cm}$
6	有	超微粒子による切羽周辺180°の範囲の地山改良；切羽前方4mまで先行
7	有	超微粒子による切羽周辺180°の範囲と切羽面の地山改良；切羽前方4mまで先行 (ケース6およびケース7はアンブレラの注入材も超微粒子を用いる。)

6.2 沈下抑制工法のモデル化と解析物性

ここで考えた沈下抑制工法は、地山改良が主体となるため、その場合、ソリッド要素でモデル化される。また、上半仮インバートについては、吹付コンクリート同様シェル要素でモデル化する。

表-6にモデル化した解析物性を示すが、物性は、すべてが、原位置試験施工結果に基づくものである。

表-6 沈下抑制工法のモデル化と解析物性

地山改良；ソリッド要素						
		単体重量 tf/m ³	C tf/m ²	φ °	弾性係数 tf/m ²	ポアソン比 ν
ウレタン改良		2.2	50.0	35	1.0E+5	0.3
超微粒子	アーチ改良	2.2	50.0	35	6.8E+4	0.3
	側壁改良	2.2	25.0	35	3.5E+4	0.3
上半仮閉合吹付コンクリート；シェル要素						
		弾性係数 tf/m ²		ポアソン比		板 厚 m
上半仮閉合吹付コン		4.0E+5		0.2		0.20

* 超微粒子の側壁改良には、切羽改良も含まれる。

6.3 解析結果と評価

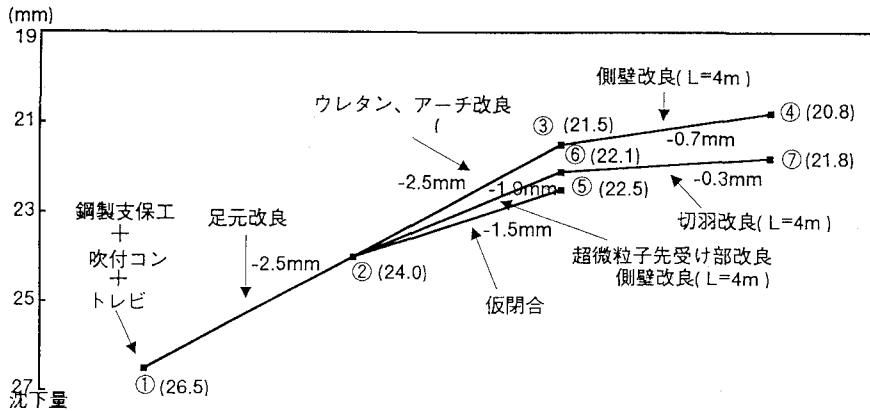
沈下抑制工法の模索という解析目的から、解析結果のうちの変位に着目し、主要な点における上半掘削時の値を、各ケースで比較して表-7に示す。

表-7 解析結果一覧表

解析ケース	1	2	3	4	5	6	7
トンネルCL地表面沈下	-16.0	-13.5	-12.9	-12.3	-12.7	-12.9	-12.7
トンネルCL天端沈下	-26.5	-24.0	-21.5	-20.8	-22.5	-22.1	-21.8
SL脚部水平変位	6.3	5.6	5.8	5.5	3.7	5.6	5.4
SL脚部鉛直変位	-7.7	-2.9	-3.1	-3.8	-2.5	-3.3	-3.0

単位；mm

また、先に示した表－7から、天端沈下に着目した比較図を図－8に示す。



図－8 沈下抑制工法別天端沈下

この結果によれば、足元の改良が沈下抑制に効果的であることが理解される。特に、支保工足元部（S L脚部鉛直変位）の沈下抑制には効果があり、これが結果的に天端、地表面の沈下を抑制している。

また、アーチ部の改良については、切羽前方での改良範囲（ $120^{\circ} \rightarrow 180^{\circ}$ ）よりも地山物性値をできるだけ高めるような改良工法を用いる方が天端沈下抑制に効果的であるといえる。

上半仮閉合は、沈下抑制、水平変位の抑制にある程度の効果は認められるが、顕著には現れていない。この理由としては、内空変位の計測結果からもわかるように、トンネル形状が偏平なため発生する水平変位が小さいことや、仮閉合が掘削後に施工されることから、掘削に先行して施工される他の地山改良工法ほど効果的でないことによるものと考えられる。

また、切羽面の改良も解析上では顕著には沈下抑制に対する効果としては現れていない。これは、弾性計算をおこなっていることも一つの理由と考えられ、非線形解析では違った結果になる可能性もあることから、今後の研究課題といえる。

7. 解析結果の実施工への利用

3次元ショートステップ解析の結果から、沈下抑制には足元改良がかなり効果的であると判断されることから、ウレタンによる足元改良を施工したところ、上り線上半施工時の地表面沈下が9～11mmという良好な結果が得られた。そこで、それ以降、これを標準的な施工サイクルの中に取り入れている。これにより、下り線施工による上り線への影響も、結果として小さくすることができた。このように、解析結果を実施工に有効に反映させることができたといえる。

8. おわりに

沈下抑制工法を模索する目的で実施した今回の3次元FEM解析は、実施工へも積極的に反映され、現在までのところ過大な地表面沈下を発生させることなく施工を行っている。したがって、この解析の目的は十分に達成され得たと考えている。本報告では、その目的から、変位を中心にとりあげ、地山応力や支保の応力およびアンブレラの有する効果等についてはふれていない。現在、これらについては、より詳細なステップによる非線形解析等を含めて実施中であり、今後は、先受工の効果も含めた切羽まわりの支保メカニズムについても研究して行く予定である。