

合戸トンネル JH磐越自動車道交差部 2次元FEM解析について

Two dimensional finite element analysis on crossing between Godo tunnel
and JH Ban-etsu Highway

毛利祐二¹・田村博邦²・吉田良勝³

Yuuji Mouri, Hirokuni Tamura and Yoshikatsu Yoshida

¹株式会社 竹中土木東北支店 工事部技術GL (〒980-0803 仙台市青葉区国分町三丁目4-33)

E-mail:mouri-y@takenaka-dobou.co.jp

²正会員 株式会社 竹中土木 技術本部技術GL (〒104-8234 東京都中央区銀座八丁目21-1)

³正会員 国土交通省磐城国道事務所 (〒970-8026 福島県いわき市平字五色町8-1)

合戸トンネルは、終点側坑口付近でJH磐越自動車道と交差する。高速道路直下には土砂化した熱水変質帯が存在し、これが計画トンネル断面内に出現するため、トンネル掘削時の走行安全性を確保する目的でパイプルーフが計画されている。この土砂化した地層の物性値を、起点側掘削完了区間の計測データに基づく2次元逆FEM解析により再評価し、再度順解析を実施することで、パイプルーフの経済性追求と安全性確認を行うものである。

キーワード: 2次元逆FEM解析, パイプルーフ, 高速道路交差部

1. 目的

合戸トンネルは、終点側坑口部付近で供用中の既存重要構造物である「JH磐越自動車道」と交差する。高速道路直下の地質は、C～DH級の比較的堅硬な岩盤が支配的になっているものの、断層状に数条の熱水変質帯が存在し、計画トンネル断面内に鉛直方向に出現する。トンネル掘削に先立ち、トンネル上方4m (0.3D)を対象に追加水平ボーリング調査を実施したところ、この熱水変質帯は風化・変質による土砂化が著しく、いわゆる「マサ土」化していることが判明した。このことから、トンネル掘削時にこの弱点部分が崩落することで地表面沈下を誘発し、高速道路の走行安全性を低下させることが懸念された。当初計画では、この地表面沈下を防止するための補助工法としてパイプルーフが計画され、安全性を確認するために2次元FEMによる安定解析が実施されていた。

しかしながら、解析のために実際の地盤をモデル化(理想化)していることや、限られた調査データをもとに解析に使用する材料物性値を決定している

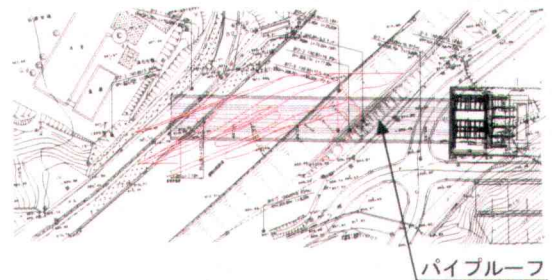


図-1 計画平面図

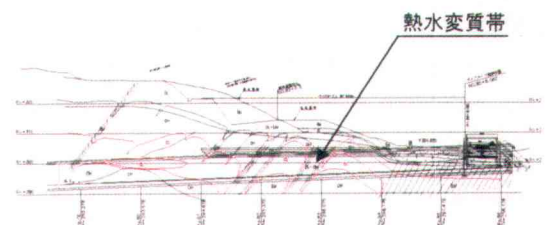


図-2 計画縦断面図

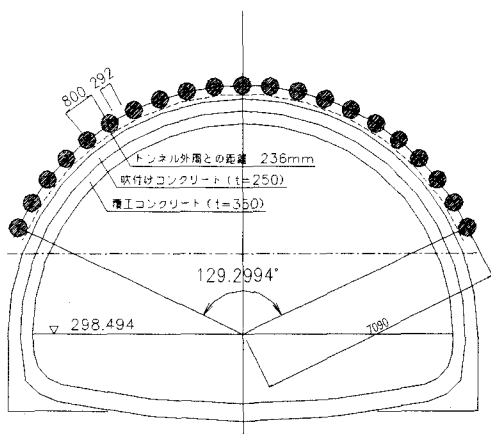


図-3 パイプルーフ断面図

ことなどの理由から、事前に行われる解析の予測値と施工時に計測される変位・応力・ひずみ等の値は必ずしも一致しないことが多い。

そこで、地表面沈下に強い影響力を持つ「マサ土」の物性値を掘削完了区間の計測データに基づく逆解析により再評価し、この値を用いて再度順解析を実施することで、パイプルーフの仕様を再検討し、経済性の追求と安全性の確認を実施することを目的とする。

2. 検討方法

(1) 検討フロー

パイプルーフの検討は、掘削完了区間の計測データに基づく逆解析結果から地山の物性値を再評価し、再度順解析を実施するという手順で行う。検討フローを図-4に示す。

(2) 逆解析

終点側交差部に出現する脆弱な「マサ土」は、起点側坑口付近においても、トンネル切羽から地表面にかけて分布している。起点側坑口については既に掘削が完了しており、トンネル天端沈下量や内空変位等の計測データが得られている。この起点側計測データを基に逆解析を実施し、特殊土である「マサ土」の物性値を実際の挙動に即した値として再評価した。

a) 解析方法

今回解析対象となる地層は、熱水変質帯がトンネル縦断方向及び断面方向に複雑に入り組んだ構造となっている。これに対し、解析上必要とする入手可

能なデータには限りがあり、3次元的地層モデルの構築や地山物性値の設定は困難である。また、逆解析ではパラメータの同定を行うために繰り返し計算を必要とし、決められた期間内に結果を出すためには計算スピードも要求された。以上の理由から、逆解析方法として2次元FEMモデルを用いた平面ひずみ線形弾性解析による「直接法」を適用した。

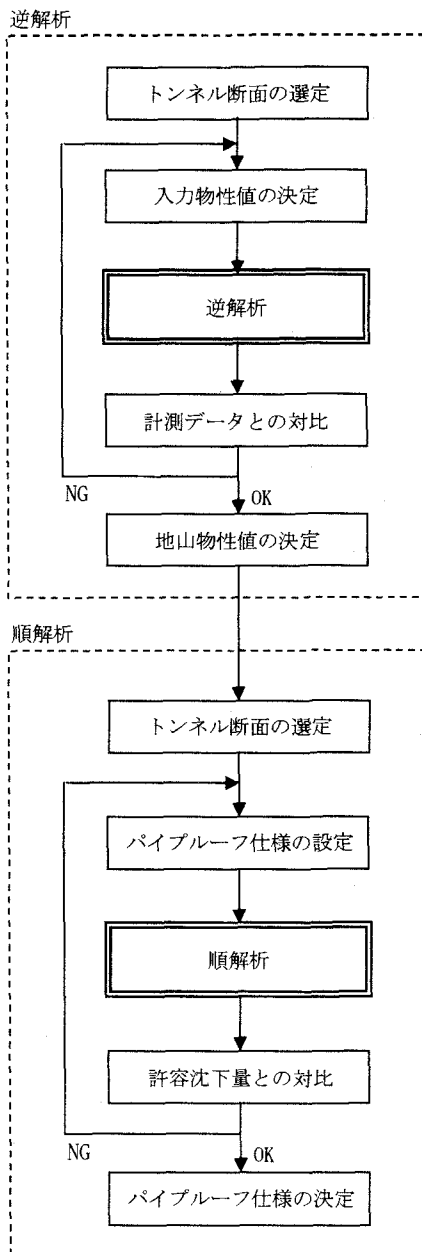
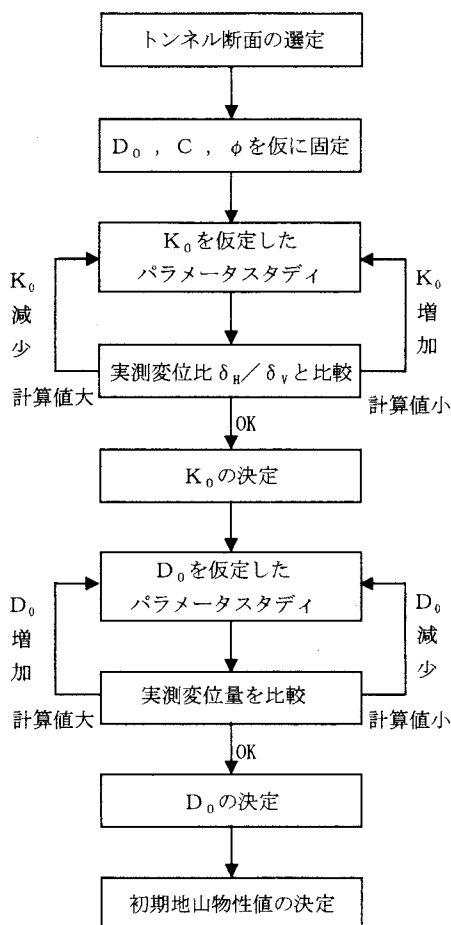


図-4 パイプルーフ検討フロー



D_0 : 初期変形係数 K_0 : 初期側圧係数
 C : 粘着力 δ_H : 内空変位
 ϕ : 内部摩擦角 δ_v : 天端沈下

図-5 逆解析実施フロー

b) 解析モデル

解析領域を図-6の様に設定し、境界条件は表-1に示すとおりとした。地山部分は平面要素（一角形及び四角形の有限要素）に分割してモデル化し、ロックボルトは曲げを考慮しない線状部材、吹付コンクリート、鋼製支保工は曲げと軸力を考慮する合成梁部材としてモデル化した。長尺鋼管先受け工については等価弾性係数を導入し、先受け鋼管と改良地山範囲を等価な剛性を持つものとしてモデル化した。なお、地表の上載荷重または解析領域上方の地山重量は境界面に荷重として作用させた。また、初期側圧係数が1.0を上回る場合は、初期応力解析で側面の水平方向変位は固定させず、水平土圧を荷重として作用させた。

c) 解析ステップ

表-2に示すように、トンネル施工サイクルにあわせたステップ解析を実施した。ここで、2次元解析で切羽進行に伴う地山応力状態の変化を考慮するために、応力解放率を導入した。

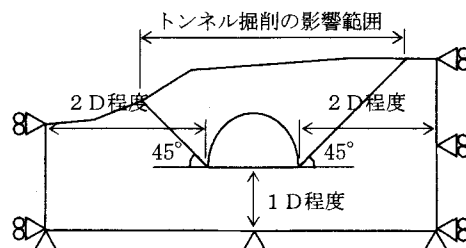


図-6 解析対象領域

表-1 逆解析における境界条件

境界の種類	水平方向変位	鉛直方向変位
解析領域上面	自由	自由
解析領域側面	固定	自由
解析領域底面	固定	固定

表-2 解析ステップ

STEP	施工図	備考
1		- 初期応力 - 側圧係数 K_0 設定 - 変形係数 D_0 設定
2		- 上半掘削 - 応力解放率 $\alpha = 40\%$
3		- 上半支保 - 応力解放率 $\alpha = 100\%$
4		- 下半掘削 - 応力解放率 $\alpha = 40\%$
5		- 下半支保 - 応力解放率 $\alpha = 100\%$
6		- インバート - 応力解放率 $\alpha = 100\%$

α : 掘削時の応力解放率（各掘削断面における累積率）

表-3 逆解析検討断面の諸元

測 点 名	No. 19+7. 0m
土 被 り	10. 5m
地 質	トンネル天端～上方＝DL層 トンネル切羽面＝DM層
支保パターン	DⅢ a
吹付コンクリート	2 5 0mm
ロックボルト	D 2 5, L = 4 m, 8 本
鋼製支保工	H - 2 0 0
覆工コンクリート	3 5 0mm
補 助 工 法	長尺鋼管先受け工 (AGF 工, ϕ 101. 6mm, L=12. 5m, 31 本, 450mm と っ ち, シカレジソ)
計 測 工 A	内空変位・天端沈下測定

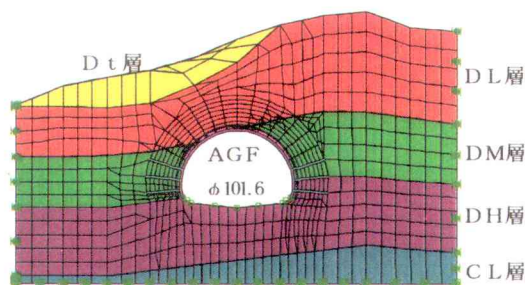


図-7 逆解析検討断面図

d) 逆解析検討断面

逆解析の対象断面は、解析結果を終点側交差部の順解析に反映させることをふまえ、終点側交差部と地質が類似し、土被り厚さも近いNo. 19+7. 0m断面を選定した。検討断面の諸元を表-3に、断面図を図-7に示す。終点側に再び現れる脆弱なマサ土層はDL層に相当する。

e) 逆解析入力データ

No. 19+7. 0m断面で得られた計測データは、最終天端沈下量 $\delta_v = 34. 5\text{mm}$ 、水平変位量 $\delta_H = 30. 0\text{mm}$ であった。この数値から鉛直変位と水平変位の比率を算出し、 $K_0 = \delta_H / \delta_v = 0. 87$ を初期側圧係数として入力した。その他の地山物性値については、計画設計時の入力データをもとに表-4のように定めた。また、支保部材の物性値は表-5の値を使用した。

f) 逆解析結果

逆解析により求めた地山物性値を表-6に示す。今回の解析では、トンネル上方の地盤(DL層、Dt層)の変形係数は、計画設計時の値に比べて3～10倍と大きい値を示すが、トンネル切羽を占めるDM層の変形係数は計画設計時の7割程度と小さい。

表-4 逆解析入力データ(地山物性値)

地層	単位体積重量 (kN/m^3)	変形係数 (MN/m^2)	ポアソン比	粘着力 (kN/m^2)	内部摩擦角 ($^\circ$)
Dt層	16. 7	*	0. 35	39. 2	30
DL層	17. 6	*	0. 35	39. 2	20
DM層	19. 6	*	0. 35	127. 4	25
DH層	22. 5	98. 00	0. 35	274. 4	25
CL層	24. 5	294. 00	0. 35	470. 4	30

* 逆解析で求める物性値

表-5 逆解析入力データ(支保部材物性値)

支保部材	弾性係数 (kN/m^2)	断面積 (cm^2)	断面二次係数 (cm^4)	備考
ロックボルト	$2. 06 \times 10^8$	5. 067		D25
鋼製支保工	$2. 06 \times 10^8$	63. 53	4720	H-200
吹付コンクリート	$1. 96 \times 10^6$	2500		t=250
合成梁	$2. 06 \times 10^8$	87. 34	4720	
AGF工	$1. 30 \times 10^6$	45 cm^2/m		

(AGF工は等価弾性係数として評価)

表-6 逆解析結果

地層	変形係数(MN/m^2)	
	逆解析値	計画設計使用値
DL層	26. 46	9. 80
DM層	35. 28	49. 00
Dt層	9. 80	0. 98

側圧係数 $K_0 = 0. 9 9$

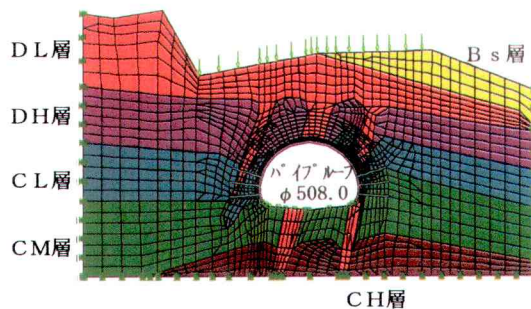
これは、計測データにおいて、水平変位が鉛直変位と同程度の大きい値を示すことと対応している。この現象は、当該断面のみの特異事例では無く、同様な地盤構成を示す区間において同じ傾向を示すことから、合戸トンネルの地盤特性として捉えて良いと考える。

(3) 順解析

起点側の計測データに基づく逆解析で求められた変形係数及び側圧係数を使用し、終点側高速道路交差部の順解析を実施した。解析方法は逆解析と同様に2次元FEM平面ひずみ線形解析とし、解析モデルや解析ステップについても逆解析と同じ条件とした。

表－7 順解析検討断面の諸元

測 点 名	No. 82+5.5m
土 被 り	9～11m
支保パターン	DⅢa－P
吹付コンクリート	250mm
ロックボルト	D25, L=4m, 6本
鋼製支保工	H－200
覆工コンクリート	350mm
補 助 工 法	パイプルーフ工 (φ508.0mm, t=12.7mm, 800mmピッチ)



図－8 順解析検討断面図

a) 順解析検討断面

順解析の対象断面は、計画設計段階の2次元FEM解析で最大変位量を示した、高速道路中心断面(No. 82+5.50)を選定した。この断面の地質は、トンネル天端から上方にかけてDH層、DL層、Bs層が分布し、トンネル切羽面はCL層及びDH層に熱水変質帯(DL層)が鉛直に貫入しているという特徴を持っている。検討断面の諸元を表－7に、断面図を図－8に示す。逆解析の結果、DL層の変形係数を当初計画に使用した値の3倍程度大きく評価できることから、順解析に当たってはパイプルーフの本数を当初計画時の23本より少なくし、

Case 1 : パイプルーフ21本(改良範囲130°)

Case 2 : パイプルーフ19本(改良範囲120°)

の2ケースについて補助工法の再検討を行った。

b) 順解析入力データ

地山物性値のうち、側圧係数 K_0 と脆弱なマサ土層であるDL層の変形係数は、逆解析により得られた値を用いた。それ以外の地山物性値については、計画設計時の値を使用した。入力した地山物性値を

表－8に示す。また、支保部材の物性値は表－9の値を使用した。パイプルーフ工の補強効果については、鋼管と周辺地山が一体となって荷重に抵抗する要素ものとしてモデル化し、鋼管の弾性係数と地山の弾性係数をそれぞれの面積比で配分した等価弾性係数により評価した。計算式を式(1)に示す¹⁾。

$$E' = \frac{A_1 \cdot E_1 + A_2 \cdot E_2}{A_1 + A_2} \quad (1)$$

ここに、

E' …… 補強部の等価弾性係数(kN/m²)

A_1 …… 鋼管の断面積(m²)

E_1 …… 鋼管の弾性係数(kN/m²)

A_2 …… パイプルーフ工対象断面積(m²)

= (鋼管ピッチ) × (鋼管外径)

E_2 …… 地山変形係数(kN/m²)

である。

表－8 順解析入力データ(地山物性値)

地層	単位体積重量 (kN/m ³)	変形係数 (MN/m ²)	ポアソン比	粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (°)
Bs層	16.7	9.80	0.35	39.2	20
DL層	17.6	26.46	0.35	39.2	20
DH層	22.5	98.00	0.35	274.4	25
CL層	24.5	294.00	0.30	470.4	30
CM層	25.5	490.00	0.30	529.2	35
CH層	26.5	980.00	0.30	627.2	40

表－9 順解析入力データ(支保部材物性値)

支保部材	弾性係数 (kN/m ²)	断面積 (cm ²)	断面二次係数 (cm ⁴)	備考
ロックボルト	2.06×10^8	5.067		D25
鋼製支保工	2.06×10^8	63.53	4720	H-200
吹付コンクリート	1.96×10^6	2500		t=250
合成梁	2.06×10^8	87.34	4720	
パイプルーフ工	9.83×10^6			

3. 解析結果

(1) Case 1 の検討結果

パイプルーフ 2 1 本（改良範囲130°）の場合について順解析を行い、補助工法の妥当性を検討した。結果として、最終ステップであるインバート掘削完了時において、高速道路の最大地表面沈下量が 29.1mm となり、許容沈下量30mm以内に収まった。したがって、本ケースは補助工法として適当である。

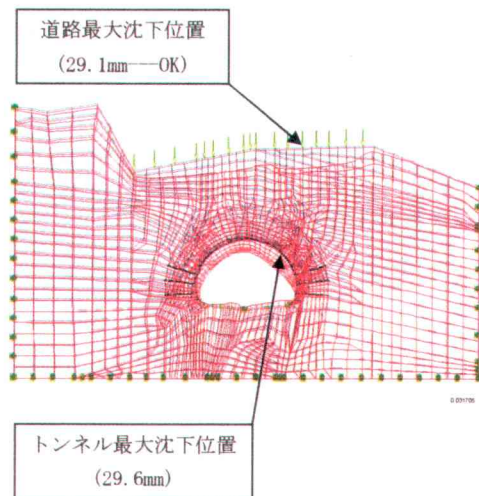


図-9 変形図 (Case 1 インバート完了時)

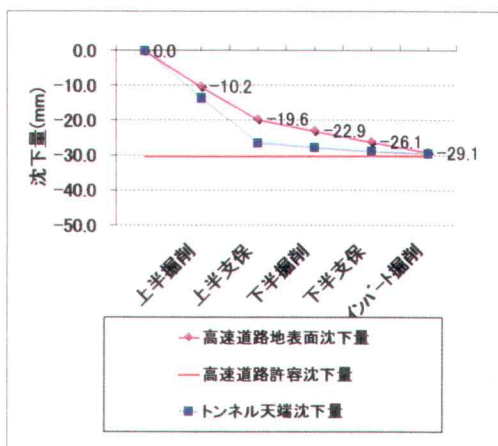


図-10 沈下量 (Case 1 インバート完了時)

(2) Case 2 の検討結果

パイプルーフ 1 9 本（改良範囲120°）の場合について順解析を行い、補助工法の妥当性を検討した。結果として、最終ステップであるインバート掘削完了時において、高速道路の最大地表面沈下量が 31.6mm となり、許容沈下量30mmを超える結果となった。したがって、本ケースは補助工法として不適当である。

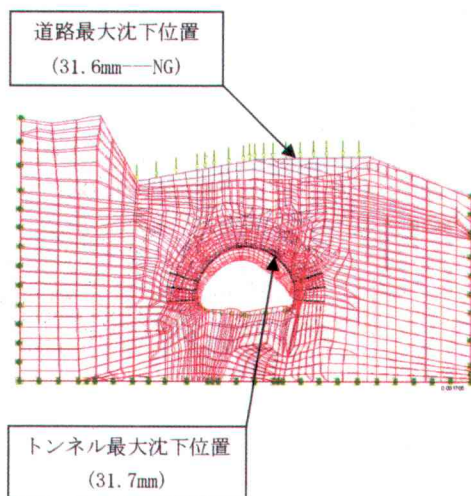


図-11 変形図 (Case 2 インバート完了時)

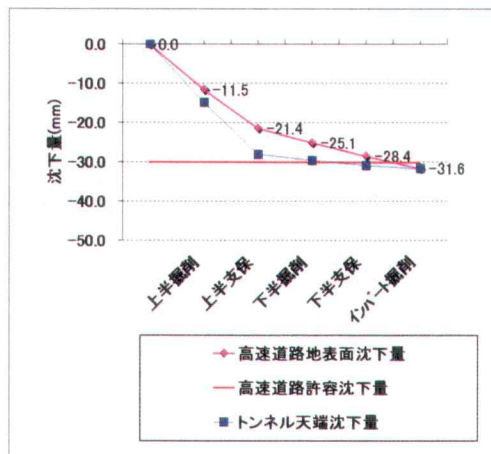


図-12 沈下量 (Case 2 インバート完了時)

4. 考察

(1) 解析結果に対する考察

変形図を見ると、トンネル天端最大沈下位置のほぼ真上の位置で、地表面の最大沈下が算出されている。また、沈下量のグラフでは、施工ステップの進行に伴い地表面沈下量がほぼ直線的に増加している。さらに、トンネル天端沈下と地表面沈下がほぼ同じ傾向を示している。これは、本件のように脆弱地盤がトンネル断面に鉛直に数条貫入し、周囲の地盤が比較的硬質なケースでは、トンネル掘削による変形が脆弱部に集中し、これがトンネル上部の地表面沈下に直接的に影響を与えている結果と考えられる。また、今回の解析では、補助工法と地盤の剛比が近づいたことから、応力の再配分がより地盤側に移行したものと判断される。

(2) 本検討の特殊性

山岳トンネルにおける逆解析では、土被りや天端沈下あるいは内空変位の計測値から、均一な弾性地山を仮定してゆるみ領域等を推定し、その結果を吹付けコンクリートの変状発生を抑制するための対策方法の検討や、二次覆工の設計に利用されるケースが多い。今回の検討は、断層状に熱水変質帯が分布し、硬軟の地質が混在する複雑な条件を考慮しながら、大規模なパイプルーフという地表面沈下対策に逆解析を適用したところが特徴である。

(3) 計測値との比較

実際の施工に当たっては、高速道路の許容沈下量30mmに対し、表-10のような管理レベルを設定して施工中の地表面沈下量を計測した。解析で検討対象とした断面において、最大地表面沈下の発生が予測された位置の測定結果を、表-11に示す。

表-10 地表面沈下に対する管理レベル

管理レベル	沈下量 (mm)	管理体制	対応
I	0～10	通常管理体制	通常の測定と報告頻度
II	11～20	警戒管理体制	測定と報告頻度を増加
III	21～30	緊急管理体制	要因を追求し、対策工の検討及び実施など、厳重に注意を払う

表-11 地表面沈下量測定結果

施工ステップ	実測沈下量 (mm)	解析沈下量 (mm)
3 ステップ (上半支保完了時)	11	19.6
5 ステップ (下半支保完了時)	12	26.1

表-11から、解析で得られた沈下量よりも実測沈下量の方が小さいことがわかる。これは、最も厳しい条件の断面を選定して2次元解析を行った場合に、3次元解析に比べて安全側の結果になるという一般的な傾向の現れであると考えられる。

(4) 今後の課題

今回の検討では、解析方法として2次元FEMを採用した。このため、解析断面に対して縦断方向に連続して打設されているパイプルーフの補助効果を評価するために、解析断面内では本来不連続な構造であるものを、等価な剛性をもつ連続した要素としてモデル化している。2次元解析の範囲内で、このような条件をもつ部材の物性値を現状に即した形で評価するためには、どのようにモデル化するべきかが今後の課題である。また、山岳トンネルにおいては、限界ひずみを管理基準値として使用しているが、限界ひずみと管理基準値の注意レベルとの関係をどのようにリンクすればよいかという問題も残っている。特に本トンネルのような場合は、地層構成が通常の水平堆積層ではなく鉛直に貫入しているため、トンネル掘削による地表面沈下形態は土砂山のような単純な弾性体挙動では無くなる。すなわち、局部破壊が引き金となって崩壊に至る可能性を秘めており、実施工にあたっては、挙動の特殊性を考慮して注意を払う必要がある。

参考文献

- 1) 日本道路公団試験研究所道路研究部トンネル研究室：試験研究所技術資料第359号 トンネル数値解析マニュアル（都市部トンネル解析留意事項編），pp.12-16，2002。