

特殊地山におけるトンネル施工法の 数値解析的検討

福田 毅¹・山田 浩幸²・今井 恵史³・牛口 美信⁴・宮本 武司⁴

¹正会員 株式会社地層科学研究所(〒112-0004 東京都文京区後楽 2-2-20 井上旭門ビル 3F)

E-mail:fukuda@geolab.jp

²正会員 株式会社鴻池組 大阪本店 土木技術部(〒530-8517 大阪市北区梅田 3-4-5)

³NEXCO 東日本関東支社宇都宮工事事務所(〒321-0962 栃木県宇都宮市今泉町 1588)

⁴鴻池組・本間組・矢作建設工業特定建設工事共同企業体(〒327-0102 栃木県佐野市出流原町 429-3)

佐野東工事の出流原トンネルは、埋土（建設発生土・脱水ケーキ）と軟岩との境界部分を通過する特殊な地山条件下にある。元設計では地形・地質の特徴を踏まえ、開削カルバート、トンネル工法カルバート、山岳工法といった複数の構造形式が選定されていた。しかし、埋土の進行や土質試験の追加調査など検討条件の追加により、トンネル全線を非開削工法(NATM)により施工されることとなった。

本報告では、まず開削工法および非開削工法の比較検討を実施した。そこで、非線形弾性解析手法に基づき非開削工法の優位性を確認した。また、切羽安定のための対策工として選定された地盤改良について、経済性および施工性の観点から最適な地盤改良範囲を決定した。

Key Words : *unusual ground, non-open cut method, Calvert tunneling method, nonlinear elastic analysis*

1. はじめに

北関東自動車道は、群馬県高崎市を起点とし、茨城県ひたちなか市に至る延長約150kmの高速道路である。その内、出流原地内に位置するトンネルが出流原トンネルである。

本トンネルは、当初めがねトンネルで計画されていたが、道路線形の見直しによりトンネル離隔を30m確保した併設トンネルに計画変更された。また、当初設計では地形・地質の特徴を踏まえ「開削カルバート」「トンネル工法カルバート」「山岳工法」といった複数の構造形式が選定され、有限要素解析手法による解析検討に基づきトンネル設計が実施されていた。

しかし、トンネル設計をする上で、以下の点について検討条件が追加された。

- ① 埋土（建設発生土・脱水ケーキ）が進み、設計当初の盛土高さに比べ高くなったこと。
 - ② トンネルの解析条件（土質定数、除荷時変形係数）を追加調査により把握したこと。
 - ③ 用地収用の関連で、工程の見直しが必要となったこと。
 - ④ トンネル構造の連続性といった観点から、全線を山岳工法により施工することとなった。
 - ⑤ 地山条件および地形条件を踏まえて施工時の安定対策工としては地盤改良が選定された。
- このような変更点を踏まえて、再度数値解析によりトンネル構造の見直しを実施した。

本報告では、当初設計との比較を行うことで非開削工法の妥当性について確認する。またトンネル施工時の挙動の把握、および切羽安定のための対策工（補助工法）の効果に着目して述べる。

2. 工事概要

北関東自動車道は群馬県高崎市を起点とし、茨城県ひたちなか市に至る延長約 150km の高速道路で、平成 12 年度末までに高崎 JCT～伊勢崎 IC 間約 15km、栃木都賀 JCT～宇都宮上三川 IC 間約 19km、友部 IC～ひたちなか IC 間約 32km が供用され、その後供用区間が順次延ばされ平成 20 年 12 月に真岡 IC～桜川筑西 IC 間が開通して東北道と常磐道が繋がった。

本路線は茨城・栃木・群馬 3 県の主要都市と常陸那珂港を連結し、東京港に一極集中する物流体系を再編する機能を有するとともに、北関東の沿線地域の交流と連携を促進して新たな経済文化圏の創造に寄与する重要な幹線道路である。本トンネル工事はその内、佐野市出流原（いずるはら）地内に上下線トンネル 2 本を NATM により新設する。

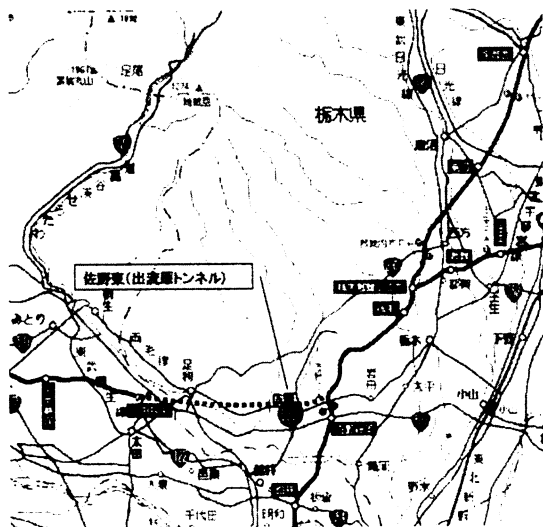


図-1 出流原トンネル位置

表-1 工事概要

工 事 名 称		北関東自動車道 佐野東工事 (仮称：出流原トンネル)
工 事 場 所		栃木県佐野市出流原町
工 期		2006.12.23～2010.10.27
発 注 者		東日本高速道路株式会社 関東支社
施 工 者		㈱鴻池組・㈱本間組・矢作建設工業㈱ 特定建設工事共同企業体
工事内容	延 長	上り線 L=279.0m
		下り線 L=188.0m
	断 面	上り線：内空 A=68.7m ² 、掘削 A=87.1m ²
		上り線：内空 A=77.7m ² 、掘削 A=98.5m ²
	施 工 法	NATM
	掘削方式	発破工法、機械掘削
	掘削工法	DⅢa,E-K ^{※1} パターン(上半先進ベンチカット工法) DⅠパターン(補助ベンチ付き全断面掘削)
補助工法	深層混合改良	

※1 E-K は耐震検討パターン

3. 開削工法と非開削工法の比較検討

(1) 非開削工法の検討

まず、検討断面の選定にあたっては、地山条件が最も厳しい（盛土が深い）断面を基本断面【STA.132+70】とした。

検討方法としては、有限要素解析手法の一つである非線形弾性解析手法（電中研式）を用いて解析を実施する。また、図-2 の第 1 フェーズに示す検討フローに従い、「開削工法（開削カルバート）」と「非開削工法（NATM）」の安定性に関して比較検討を実施し、非開削工法の妥当性について確認する。

また、地山条件および地形条件を踏まえて施工時の安定対策工として選定された地盤改良に関する効果についても評価を行う。このとき、施工の合理性および経済性の観点から、地盤改良範囲の変化によるトンネル掘削時の安定性を検討し、最も合理的な改良範囲を設定する。

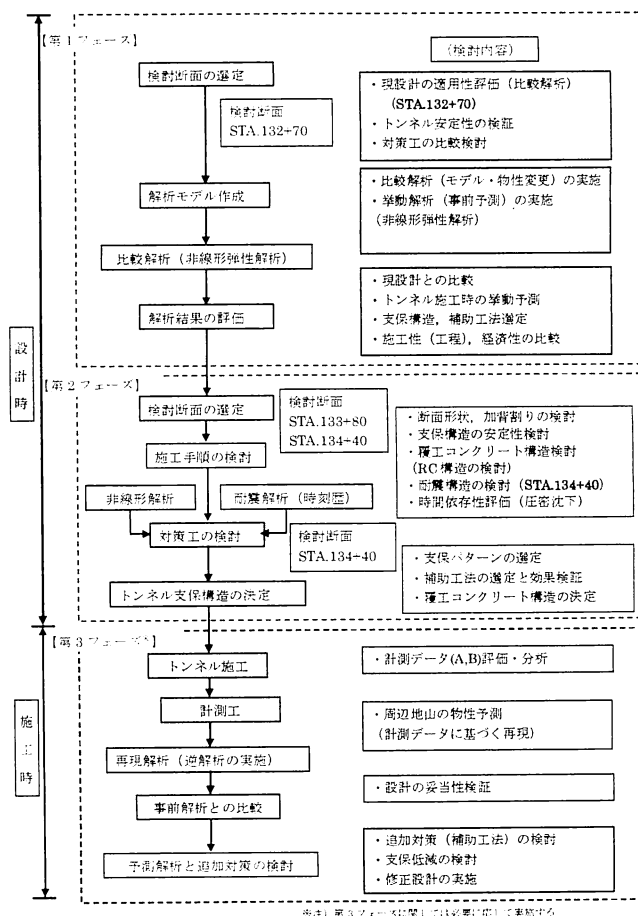


図-2 数値解析に基づく検討フロー

(2) 解析条件

a) 解析モデル

非開削工法の解析モデルを図-3に示す。今回の検討箇所は、図に示すように軟岩と埋土の境界が存在する特殊地山を呈しており、ここをトンネルが通過することとなる。

本検討では、地山のゆるみ域を把握することでトンネルの安定性を評価するため非線形弾性体とした。また、境界条件は、モデル底面を固定、モデル側面を鉛直ローラー境界と設定した¹⁾。

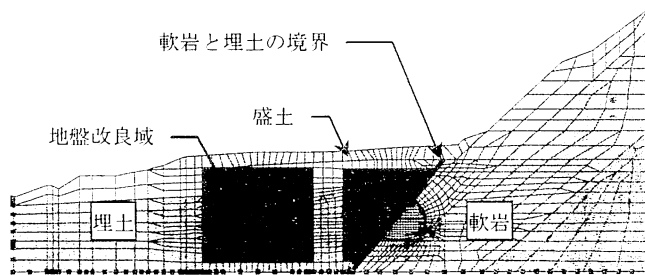


図-3 解析モデル【非開削工法】

b) 解析物性値

表-2に解析に用いた物性値を示す。地山は、比較的軟弱なbg層bc2層からなる埋土とチャート層からなる軟岩より形成されている。また支保パターンはDⅢでパターンとして、吹付けコンクリートを厚さt=25cm、鋼製支保工をH-200とした。

表-2 解析物性値

材料名	ヤング率 (kN/m ²)	ポアソン 比	単重 (kN/m ³)	C (kN/m ²)	φ (deg)
埋土bg	18,000	0.430	17.7	17	19.8
埋土bc2	20,000	0.410	20.1	41	16.3
チャート風化層	680,000	0.350	22.0	400	35.0
チャート弱風化層	1,300,000	0.300	26.0	520	25.0
チャート硬風化層	6,100,000	0.250	26.0	920	29.0
盛土	21,000	0.400	20.0	1	40.0
地盤改良部	100,000	0.400	20.0	300	3.0
吹付けコンクリート	4,000,000	0.200	23.0	-	-
インバート	22,000,000	0.200	23.0	-	-
支保工【H-200】	2.10E+08	0.300	-	-	-

c) 解析ケース

表-3に解析ケースの一覧を示す。

まず、ケース①として開削と非開削工法の比較検討を行う。ここでトンネル構造の連続性の観点から、全線を山岳工法により施工することに対する妥当性について確認する。

またケース②～④については、非開削工法を基本として、地盤改良域を変更した場合の検討を実施する。最終的に、施工の合理性や経済性を考慮して、地盤改良範囲の選定を行う。

表-3 解析ケース一覧

ケース	施工法	内容
①	開削・非開削	比較検討
②	非開削	地盤改良域 3m
③	非開削	地盤改良域 4m
④	非開削	地盤改良域 5m

(3) 検討結果

トンネル周辺の健全性を評価する方法としてゆるみ係数²⁾Rを用いる。これは式(1)のように定義されるものである。

$$R = \frac{k \cdot d_{\min}}{\sigma_t - \sigma_m} \quad \text{式(1)}$$

ここに、 k ：弾性限界パラメータ、 $d_{\min}$ ：中間応力

これは、数値解析マニュアルによると評価基準として R の値により以下に示す状態と判定している。

- ・ $R < 1.0$ ：弾性領域
- ・ $0 < R \leq 1.0$ ：非線形(ゆるみ)領域
- ・ $R \leq 0$ ：破壊領域

この指標を用いて、トンネルの健全性を評価する。

a) ケース①について

表-4に各工法におけるゆるみ係数分布を示した。上り線ではゆるみ域の範囲に顕著な違いは見られないが、下り線では非開削工法のゆるみ域が小さくなっていることがわかる。したがって、地盤改良による効果が表れている。

表-4 ゆるみ係数分布

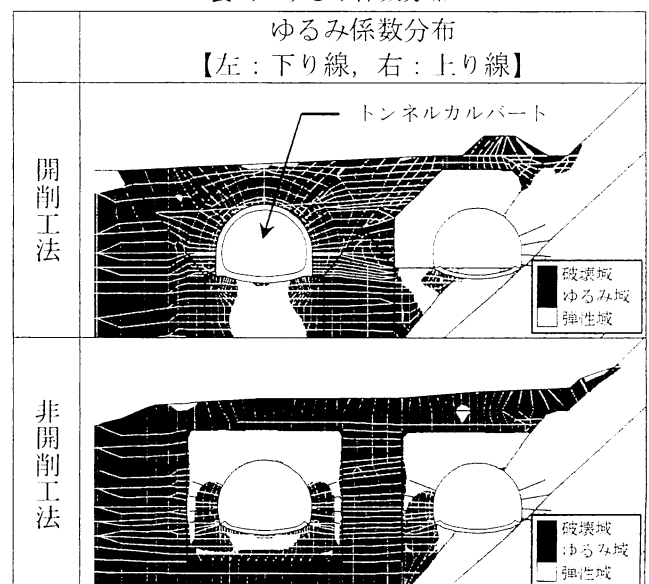
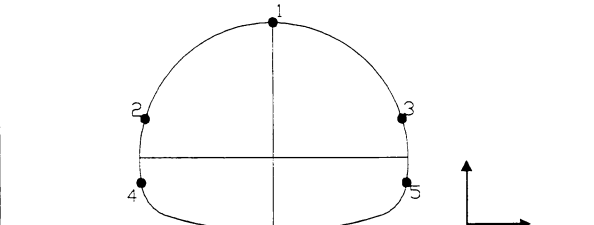


表-5 上り線変形量一覧

				
	開削工法		非開削工法	
No.	水平変位	鉛直変位	水平変位	鉛直変位
1	-32.5mm	-132.3mm	0.7mm	-26.9mm
2	-26.4mm	-64.3mm	6.8mm	-26.6mm
3	-0.8mm	-1.9mm	-0.3mm	-2.1mm
4	-16.1mm	-36.1mm	9.3mm	-12.3mm
5	-0.7mm	-0.8mm	-0.5mm	-0.6mm

注：図の矢印方向の変形を正とする

また、各施工法の上り線の変形量を比較したものを表-5に示す。天端沈下量で比較すると、開削工法が約 132mm であるのに対して、非開削工法では約 27mm とかなり変形が小さくなっている。同様に側壁部の変形量についても非開削工法が優位である結果となっている。

b) ケース②, ③, ④について

表-6 に地盤改良範囲の違いによるゆるみ域分布図を示す。

表-6 ゆるみ係数分布

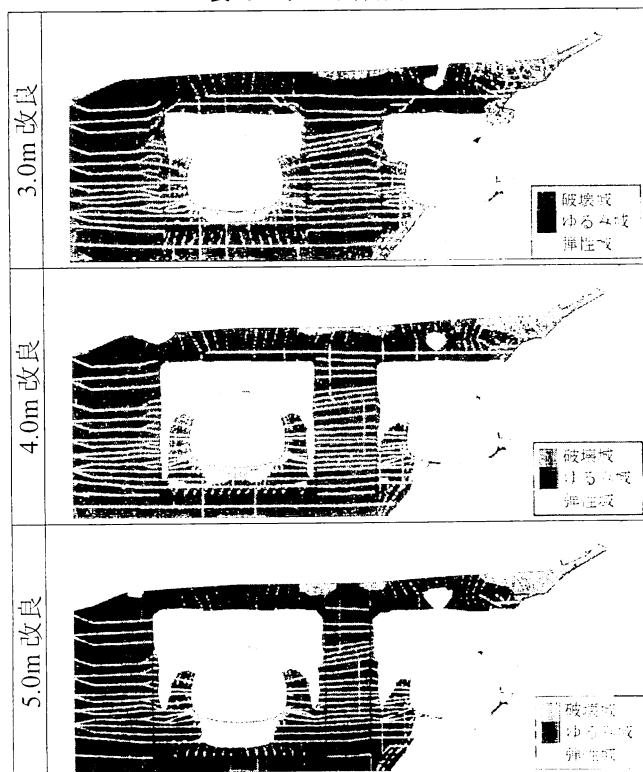
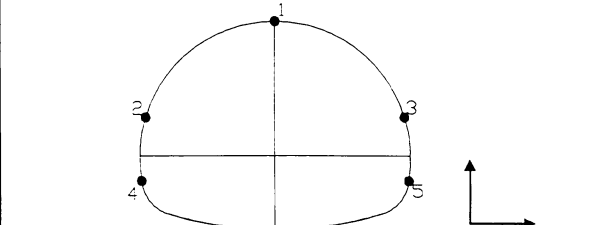


表-7 各改良範囲の変形量

				
	下り線：改良域 3.0m		上り線：改良域 3.0m	
No.	水平変位	鉛直変位	水平変位	鉛直変位
1	-6.2 mm	-109.6 mm	1.0 mm	-36.5 mm
2	-25.1 mm	-66.7 mm	8.3 mm	-39.3 mm
3	6.8 mm	-72.4 mm	-0.2 mm	-2.2 mm
4	-14.6 mm	-38.1 mm	12.8 mm	-24.2 mm
5	-17.5 mm	-49.2 mm	-0.4 mm	-0.6 mm
	下り線：改良域 4.0m		上り線：改良域 4.0m	
No.	水平変位	鉛直変位	水平変位	鉛直変位
1	-4.4 mm	-84.3 mm	0.8 mm	-30.2 mm
2	-17.5 mm	-49.9 mm	6.8 mm	-30.4 mm
3	4.4 mm	-53.6 mm	-0.2 mm	-2.1 mm
4	-7.0 mm	-42.7 mm	9.2 mm	-15.0 mm
5	-10.3 mm	-45.8 mm	-0.4 mm	-0.6 mm
	下り線：改良域 5.0m		上り線：改良域 5.0m	
No.	水平変位	鉛直変位	水平変位	鉛直変位
1	-2.3 mm	-64.9 mm	0.7 mm	-26.9 mm
2	-9.3 mm	-37.4 mm	6.8 mm	-26.6 mm
3	1.2 mm	-40.6 mm	-0.3 mm	-2.1 mm
4	8.9 mm	-20.1 mm	9.3 mm	-12.3 mm
5	-17.8 mm	-28.5 mm	-0.5 mm	-0.6 mm

注：図の矢印方向の変形を正とする

表-8 支保応力一覧

	吹付け コンクリート		鋼製 支保工		ロック ボルト	
	応力 (MPa)	許容応 力度 (MPa)	応力 (MPa)	許容応 力度 (MPa)	応力 (kN)	耐力 (kN)
3.0m 改良	0.5 1.3	9	91.8 104.6	210	238.0 130.4	180
4.0m 改良	0.5 1.2		88.3 94.8		219.4 108.4	
5.0m 改良	0.6 1.2		80.8 88.6		206.3 100.7	

注：上の値は下り線の結果，下の値は上り線の結果

ゆるみ域は、主にトンネル側面および脚部付近に卓越しており、地盤改良範囲が大きくなるとゆるみ域は小さくなる傾向となった。特にこの傾向は下り線にみられた。

表-7 には、改良域毎の変形量を示している。ゆるみ域の分布状況からも理解できるように、改良範囲の大きい場合にはトンネルの変形量が抑制されていることがわかる。この変形抑制効果は下り線に顕著に表れており、3m 改良での天端沈下量が 109.6mm であるのに対して、5m 改良での天端沈下量が 64.9mm となった。つまり、41%程度の変形抑制効果が期待できることがわかる。

表-8 には、支保工に発生する応力の一覧を示している。吹付けコンクリートおよび鋼製支保工に発生する応力値はいずれも許容値に収まる結果となった。しかし、ロックボルトについては、上り線は許容値に収まっているものの、下り線は許容値を超える結果となった。これに対する対策としては、本数の増加あるいは高規格品の採用等、施工時の計測結果を踏まえて対応可能であると考えている。

(4) 予測解析と計測結果の比較

表-9 および表-10 にそれぞれ STA.132+90 上り線と STA.134+23 下り線の計測結果を示す。また、表-11 には、予測解析結果を示す。

・ STA.132+70 上り線について

予測解析結果をみると天端沈下が 12.3mm、内空変位が 3.9mm(3.7mm+0.2mm)であり、偏圧地形の影響を受け、下り線側の沈下が大きい変形モードを示す結果となった。

一方、実際の計測結果は測点とは少しずれたが、STA.132+90 において、天端沈下量が 1.8mm、内空変位量が 1.3mm（伸び）であった。なお、偏圧傾向として山側が伸び、川側が縮む結果となった。

予測解析結果と比較すると実際の計測結果は小さな値となったが、現時点では当初の予測通り、弱層部を地盤改良することで、支保部材の発生応力が小さくでき、トンネルの安定性を確認することができたと考えられる。

・ STA.134+80 下り線について

予測解析結果では天端沈下が 10.4mm、内空変位が 4.2mm(2.9mm+1.3mm)であり、偏圧地形の影響を受けて、右脚部の沈下が大きい変形モードを示していた。実際の計測結果では、STA.134+23 において、天端沈下量が 4.6mm、内空変位量が 2.1mm（収縮）であった。STA.132+70 の傾向と同様に、予測値に対して計測値が小さくなる傾向となった。

表-9 計測結果

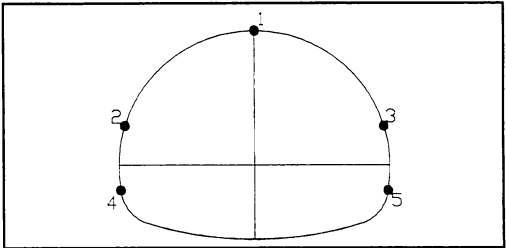
	
STA.132+90,上り線	
No.	変 位 量
1-2	11.3 mm
1-3	-8.8 mm
2-3	1.3 mm
4-5	-0.1 mm
1	-1.8 mm

表-10 計測結果

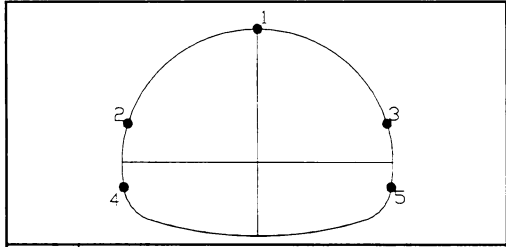
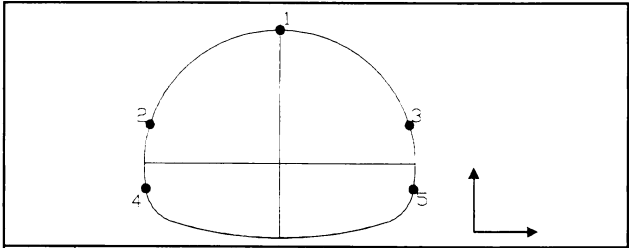
	
STA.134+23,下り線	
No.	変 位 量
1-2	-1.8 mm
1-3	-0.8 mm
2-3	-2.1 mm
4-5	—
1	-4.6 mm

表-11 予測解析結果

				
STA.134+80,下り線 改良域 4.0m+基盤まで		STA.132+70,上り線 改良域 4.0m+基盤まで		
No.	水平 変位	鉛直 変位	水平 変位	鉛直 変位
1	-3.6mm	-10.4mm	-1.6mm	-12.3mm
2	2.9mm	-13.7mm	3.7mm	-19.4mm
3	-1.3mm	-3.0mm	-0.2mm	-1.5mm
4	3.3mm	-1.3mm	7.9mm	-10.2mm
5	-0.7mm	-2.1mm	-0.4mm	-0.6mm

4. まとめ

本報告では、開削工法（開削カルバート）と非開削工法（NATM）の安定性に関して比較検討を実施し、非開削工法の妥当性について述べた。また、以下に得られた成果を列挙してまとめる。

- ・ トンネルにおける変位の影響やゆるみ分布、上り線基盤岩と盛土の境界での応力集中による影響、および経済性や工期短縮の課題を考えると非開削工法の方が有利であると判断した。
- ・ 対策工の範囲に関しては、改良厚 3m ではトンネル右側上部の基盤と改良部の境界部分において破壊領域が発生していたが、4m と 5m に関してはゆるみ領域に大差はなく、経済性を配慮して 4m 範囲と設定した。

- ・ 埋土（建設発生土・脱水ケーキ）、および軟岩との境界部分にトンネルが計画された特殊地山条件における山岳トンネルの構造及び施工法の検討を数値解析に基づき実施し、トンネル全線を非開削工法で施工する優位性を確認した。
- ・ 予測解析結果と実際の計測値では、計測値が小さくなる傾向がわかった。つまり、地盤改良によるトンネルの安定性を確認できたと考える。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネルライブラリー16 山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務，2006.2
- 2) 日本道路公団試験研究所：トンネル数値解析マニュアル，試験研究所技術資料第 358 号，1983.10

Numerical Study for Tunnel Construction in Unusual Ground

Tsuyoshi Fukuda, Hiroyuki Yamada, Keiji Imai,
Minobu Ushiguchi and Takeshi Miyamoto

The Izuruhara tunnel of Sano east construction passes the boundary of backfill soil (construction waste soil and mining waste silt) and the soft rock, and is on unusual ground conditions. In the original design, two or more structure forms such as open cut method, Calvert tunneling method, and NATM were selected based on the features of geography and geology. However, the addition of study conditions caused to construct the tunnel whole line by the non-open cut method (NATM).

In this report, we described the predominance of the non-open cut method based on numerical analysis and the selection of countermeasure construction for the face stability.