

切羽安定における注入式長尺鏡ボルトの効果とその評価

Analytical evaluations of long reinforcing facebolt on tunnel stabilization

堂場直樹¹・青柳隆浩²・畝田篤志¹・岡部正³

Naoki Doba, Takahiro Aoyagi, Atsushi Uneda and Tadashi Okabe

¹正会員 鹿島建設(株) 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

E-mail: doba@kajima.com

²正会員 鹿島建設(株) 九州支店 筑紫トンネルJV工事事務所 (〒811-1233 福岡県筑紫郡那珂川町市ノ瀬211-4)

³正会員 (株) ケー・エフ・シー 土木資材事業部 (〒135-8073 東京都江東区青海2-45タイム24ビル11階)

This report demonstrates analytical evaluations for effects of long facebolting on ground stability. In Minamihata site of Chikushi Tunnel, the long facebolting has been adopted for the face stabilization on the weathered granite caused by large fault zone. In order to estimate the effects of long facebolting, measurements of the tunnel and surrounding ground have been applied in this zone. Identified with the measured and analytical results, three dimensional analytical models have been established and performed the excavation analysis. As a result, the reduction of face displacement and restrain of plastic failure ahead of the face have been clarified.

Key Words : long facebolting, face reinforcement, Numerical simulation, FLAC-3D

1. はじめに

九州新幹線筑紫トンネルは博多～新鳥栖駅間の背振山地に位置し、全長 11935m の長大山岳トンネルを 4 工区に分割して施工を進めている。その内、南畑工区は博多側から 2 番目の工区であり、佐賀県境までの 3385m を担当している。当該工区は図-1 に示す 2 つの断層が事前に確認されており、そのうち土被

り約 300m の地点で、想定された断層（以下大谷断層と称す）に起因する深層風化した脆弱地山に遭遇した。

本文では脆弱断層区間において切羽安定対策として実施した注入式長尺鏡ボルト工の効果に着目し、各種計測結果と再現解析結果の考察から、その効果について定量的な評価を行う。

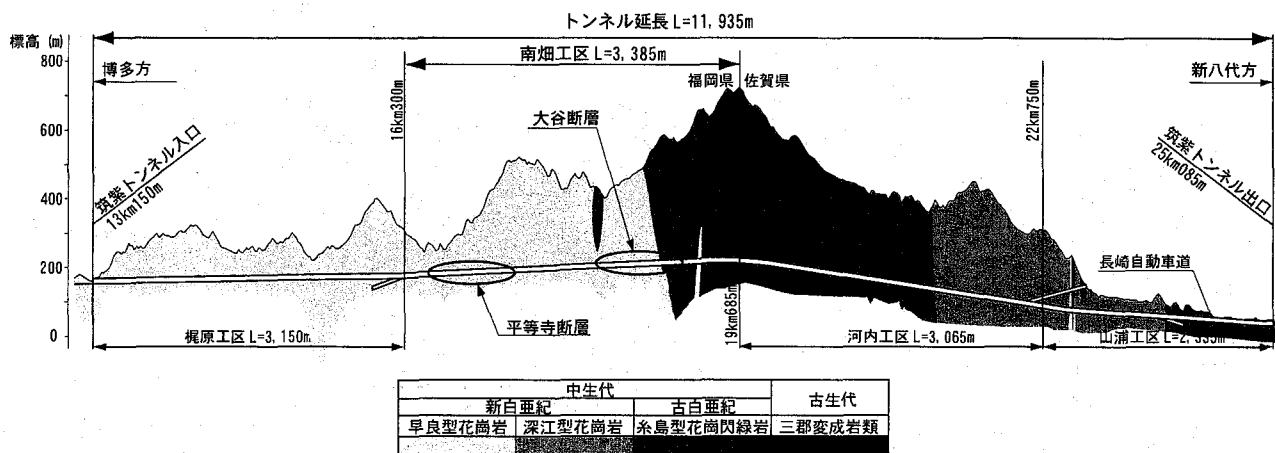


図-1 筑紫トンネル縦断図

2. 大谷断層部の施工状況

断層部の地質は深層部まで風化が進行した極風化花崗岩（マサ土）である。劣化した断層部がトンネルとほぼ並走して右土平から左土平側へ抜けていくため、大きな片押し変形が生じた。また、亀裂に沿って粘土化やマサ化した土砂が挟在し、さらに湧水を伴うため、切羽の自立が困難な状況となった。そのため、上半盤を中心に注入式長尺鏡ボルト（GFRP、 $\phi 76\text{mm}$ 、 $L=12.5\text{m}$ 、34本）を施工し、鏡面の安定を図った後、上半掘削が1シフト分（9m）進む毎に下半掘削を上半切羽から5m手前まで進め、同時にインバートストラットを設置して断面の早期閉合による変位抑制を図った。採用した支保パターンを図-2に示す。

断層部のA計測結果を図-3に示す。断層影響領域に入り18k650m～18k720m付近までは、支保剛性を向上することで内空変位量を200mm程度に抑えることができていた。しかし18k720m以降については、地質の劣化に伴い250mmを超える上半内空変位が発生し、吹付けコンクリートのクラックや、支保工の座屈が発生している。

今回、長尺鏡ボルト工の効果検証として、切羽前方挙動の把握を目的に、18k710m位置から切羽前方変位計（ $L=20\text{m}$ 、8測点、1箇所）と長尺鏡ボルト軸力計（ $L=12.5\text{m}$ 、8測点、2箇所）を設置した。それぞれの結果を図-4、5に示す。切羽前方からの押出変位量は最大90mm程度と大きく、切羽前方4～6m付近から顕著な押出し挙動を示している。長尺鏡ボルト工の軸力は、切羽前方3～5m付近でピーク値を示しており、掘削切羽の接近に併せて引張り軸力が急増していることが確認できる。

以上の断層部の挙動を三次元解析により再現し、長尺鏡ボルト工の効果について検証する。

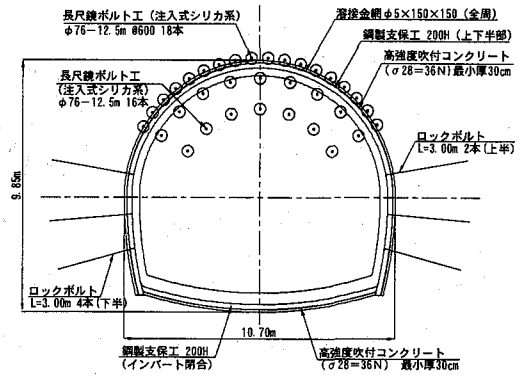


図-2 支保パターン図（断層部）

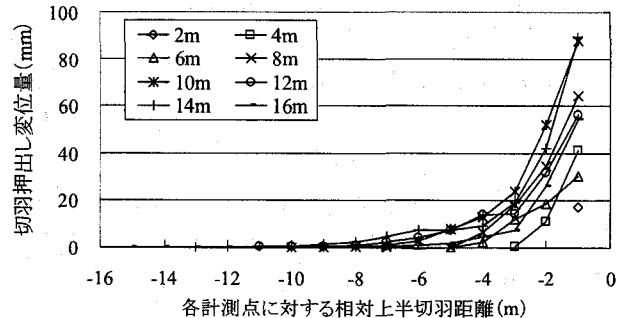
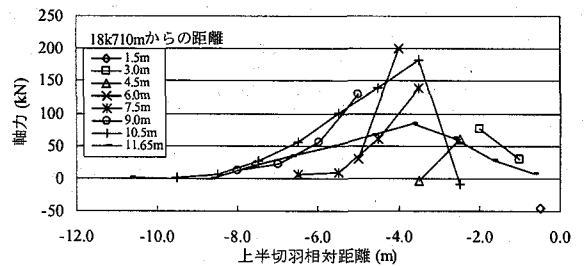
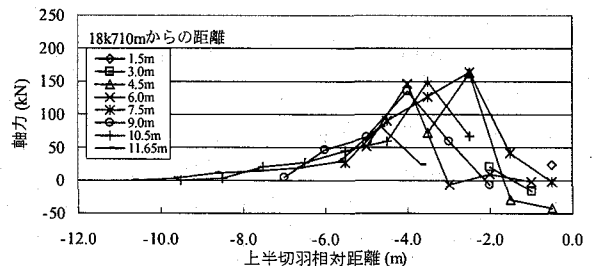


図-4 切羽前方変位測定結果



(a) 計器1



(b) 計器2

図-5 長尺鏡ボルト工軸力測定結果

大谷断層

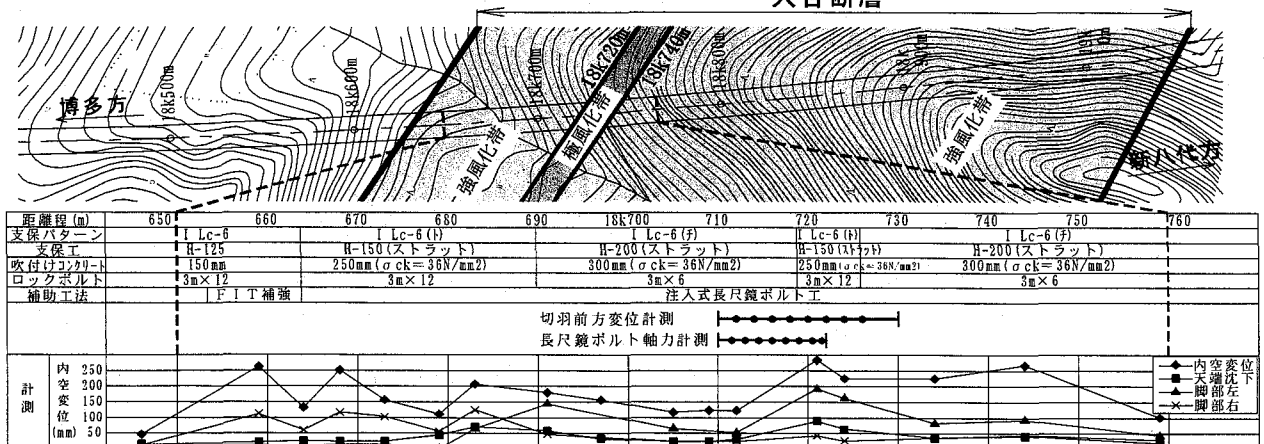


図-3 A計測結果

3. 大谷断層部の同定解析

(1) 長尺鏡ボルト工の付着特性の設定

当該断層部で実施した現場引抜試験の再現解析にもとづいて、長尺鏡ボルト工の地山付着特性を設定する。

a) 現場引抜試験概要

表-1に現場引抜試験に用いたボルトの物性値を示す。現場引抜試験は図-6に示す供試体（4本作成）を用い、地山に500mm定着しているボルトを頭部変位および引抜荷重を測定しながら引抜いた。

試験から得られた荷重～変位曲線を図-7に、引抜試験結果一覧を表-2に示す。結果が得られているNo.2, 3, 4のうち、No.4を特異値と判断し、No.2, 3の平均値を試験結果として採用することとした。

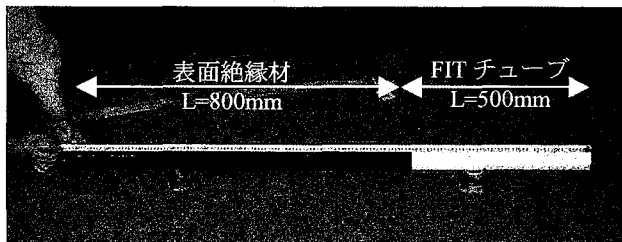


図-6 引抜試験供試体概要

b) 引抜試験再現解析

解析は、FLAC-3Dを用い、ボルト頂部の引抜方向に強制変位を与え、グラウトの付着剛性と付着強度をパラメータとして引抜試験を再現する。

表-3に示すグラウト付着特性を用いた再現解析で得られた荷重～変位曲線を図-8に示す。ピークまでの荷重・変位量を良く再現できており、この設定を用いてトンネル掘削時の解析を実施する。

表-3 グラウト付着特性

グラウト付着剛性: k_{bond}	120×10^6 N/m/m
グラウト付着強度: s_{bond}	200×10^3 N/m

(2) 地盤の均質モデルによる同定解析

a) 解析概要

解析にはFLAC-3Dを用い、切羽前方計測を実施している18k710m～18k730m区間に着目してトンネル掘削時の挙動を再現する。解析は実施工にあわせて早期閉合を実施した掘削工程を正確にモデル化する。また、実挙動の同定が完了した後で、長尺鏡ボルト工の効果を把握するために、長尺鏡ボルト工を打設しなかった場合の予測解析を行う。解析モデルを図-9に、再現する計測値を表-4に、解析に用いた支保および補助工法の物性値を表-5, 6に示す。

表-1 ボルト物性値一覧

規格	素材	引張強度	せん断強度	単位重量
FIT76	GFRP	1 000 kN	170 kN	3.0 kg/m

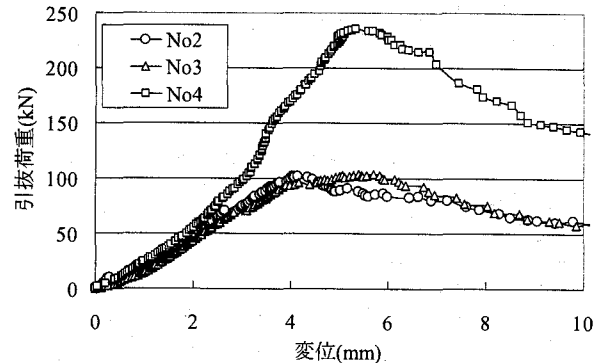


図-7 引抜試験結果（荷重～変位曲線）

表-2 引抜試験結果一覧

供試体 No.	1	2	3	4	2, 3 平均
最大荷重(kN)	-	100.7	103.8	233.4	100
最大変位(mm)	-	4.4	5.7	5.7	5.1
引抜き状況	破損				

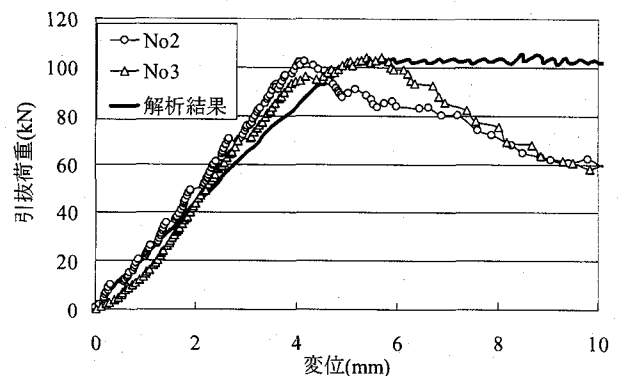


図-8 荷重～変位曲線（試験と解析の比較）

土被り 250m 分を考慮した等分布荷重

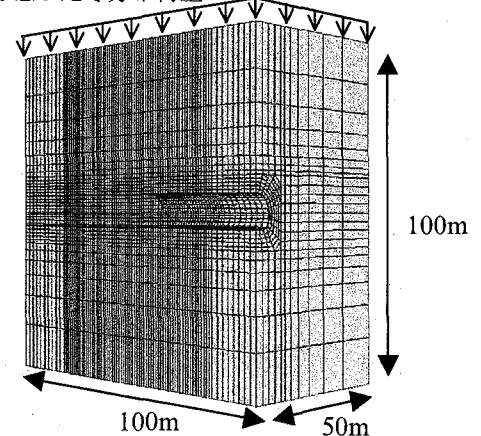


図-9 解析モデル図

表-4 計測値一覧

計測項目		単位	18k712m (強風化帯部)	18k724m (極風化帯部)
A計測	天端沈下	(mm)	23	65
	内空変位	(mm)	112	225
	脚部沈下	(mm)	29	95
切羽前方変位 (最大)		(mm)	88	
長尺鏡ボルト軸力 (最大)		(kN)	200	

表-5 支保部材の物性値

	構造要素	等価弾性係数	ポアソン比
鋼製支保工 吹付けコンクリート	Shell	8 600(MPa)	0.2

表-6 補助工法物性値

項目	長尺先受け工 (FIT 管φ76)	長尺鏡補強工 (FIT 管φ76)
構造要素	Cable	Cable
単位体積重量 (kN/m ³)	17.5	17.5
弾性係数 (MPa)	20 000	20 000
断面積 (m ²)	1.71×10 ⁻³	1.71×10 ⁻³
グラウト付着剛性 (N/m/m)	120×10 ⁶	120×10 ⁶
グラウト付着強度 (N/m)	200×10 ³	200×10 ³

b) 解析結果

それぞれの計測値を再現し得る、周辺地山の地盤物性値は表-7のとおりとなった。鉄道トンネルの地山分類¹⁾に照らし合わせてみると、それぞれ極風化帯部でR3級相当、強風化帯部でR4級相当の地山であることがわかった。

表-7 同定解析結果 (地盤物性値)

	18k712m断面 (強風化帯部)	18k724m断面 (極風化帯部)
単位体積重量 (kN/m ³)	20.0	20.0
弾性係数 (MPa)	500	200
粘着力 (MPa)	0.50	0.35
内部摩擦角 (°)	40	35
ポアソン比	0.30	0.30
初期側圧係数	1.20	
備考	R4級相当	R3級相当

計測値と解析値の発生変位量の比較を図-10, 11に、切羽押出し変位量分布の比較を図-12, 13に、長尺鏡ボルト軸力分布の比較を図-14, 15に、切羽面直方向の応力分布コンターの比較を図-16, 17に示す。

トンネル坑内変位については、計測値と解析値が

非常に良く一致しており、強風化帯部 (18k712m) および極風化帯部 (18k724m) のトンネル坑内変形を精度良く再現できている。

切羽前方挙動については切羽押出し変位量、長尺鏡ボルト軸力分布とともに解析値が計測値と異なる結果となった。これは、前述したとおり切羽前方計測を実施している区間 (18k710m～18k730m) の途中 (18k720m付近) で強風化帯から極風化帯に大きく地山状況が変化しており、計測されている切羽前方挙動が強風化帯および極風化帯両方の地質の影響を受けた結果となっているためである。したがって、表-8に切羽押出し変位量の計測値と解析値の比較を示すが、計測値が両地質 (強風化帯、極風化帯) を均質にモデル化した解析結果の中間値となっているのは妥当な結果であると言える。切羽前方挙動をより正確に再現するには地質の不均質性を考慮したモデル化が必要となる。簡易的に地質の不均質性をモデル化した解析は次節に示す。

実挙動を精度良く再現できているものと判断できることから、解析モデル (地盤・支保・長尺鏡ボルト工) の妥当性が確認できたと言える。

表-8 切羽押出し変位量比較 (最大値)

計測値		88 mm
解析値	強風化帯(18k712m)	44 mm
	極風化帯(18k724m)	179 mm

次に、この解析結果から長尺鏡ボルト工の効果について定量的に評価した。その結果として以下の知見が得られた。

- トンネル坑内変位量については、長尺鏡ボルト工の有無による違いは見られない。
- 切羽押出し変位量については、強風化帯部 (18k712m) での解析結果では長尺鏡ボルト工の有無による違いは見られないが、極風化帯部 (18k724m) での解析結果では、20mm (10%) の変位抑制効果が見られる。また、切羽を1m掘削した瞬間の切羽面の増分押出し変位量を現場で計測することは難しいが、解析の結果、極風化帯部では長尺鏡ボルト工を打設することにより26mm (26%) の変位抑制効果が示された。＜図-13参照＞
- 切羽面垂直応力コンター (図-16, 17) を見ると、長尺鏡ボルト工を打設したケースでは打設していないケースに比べて、上半切羽面で0.5 (MPa) および1.0 (MPa) 以下の領域が小さくなっており、

掘削解放に伴う切羽面垂直方向応力の解放を抑制していることが確認出来る。

以上より、長尺鏡ボルト工を打設することでその剛性により切羽変形を抑制し、切羽前方地山を三軸状態に近づけることで地山の塑性化を抑制していることが確認できた。ただし、強風化帯部（R4級相当

地盤）では長尺鏡ボルト工の効果は小さく、極風化帯部（R3級相当地盤）では切羽変形抑制効果が大きいことから、その効果発揮には周辺地質の影響を大きく受け、地盤の剛性（強度）が低い程、大きな効果が得られることが分かった。

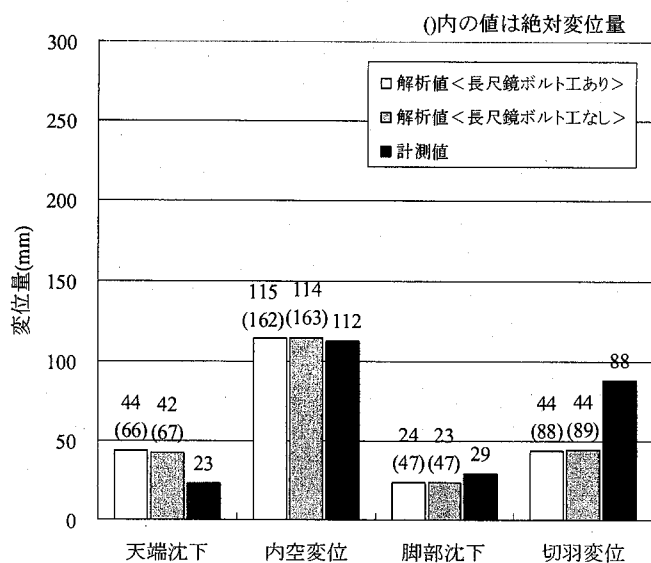


図-10 発生変位比較図 (18k712m)

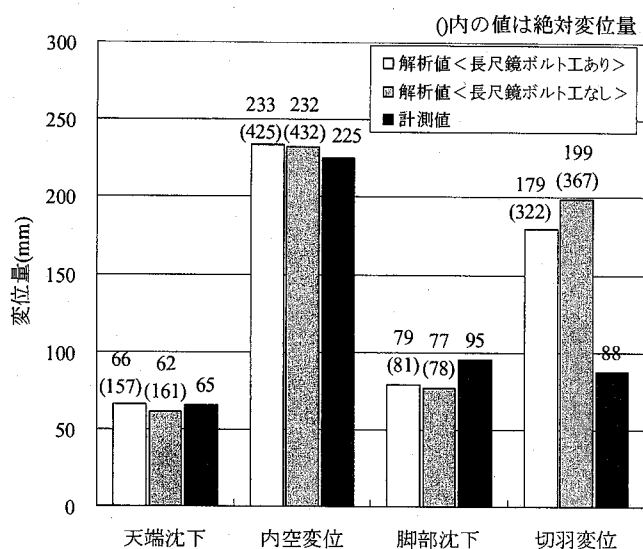


図-11 発生変位比較図 (18k724m)

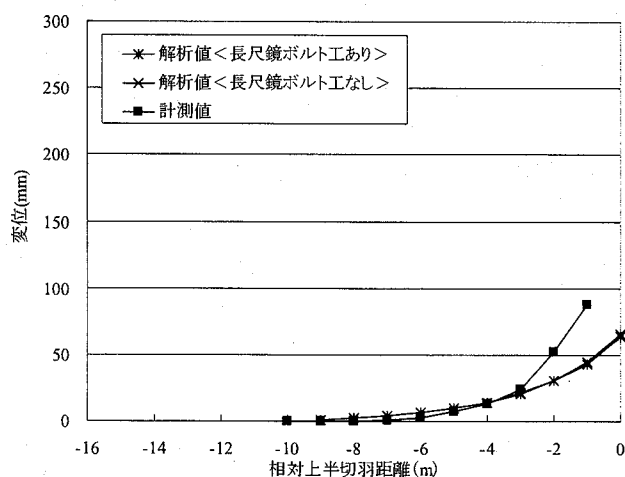


図-12 切羽押し変位量比較図 (18k712m)

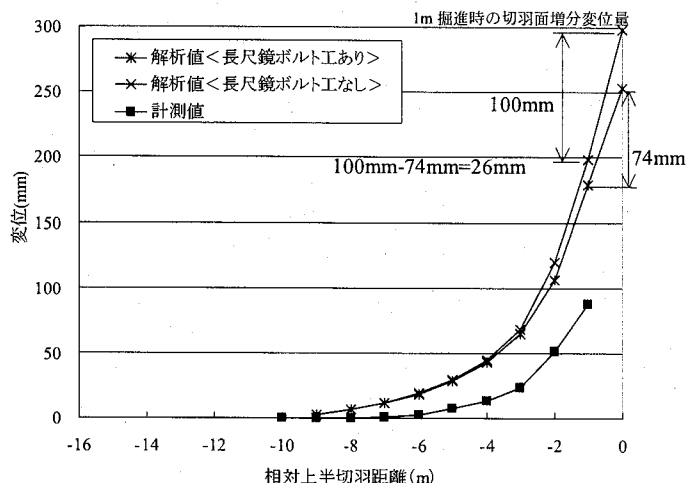


図-13 切羽押し変位量比較図 (18k724m)

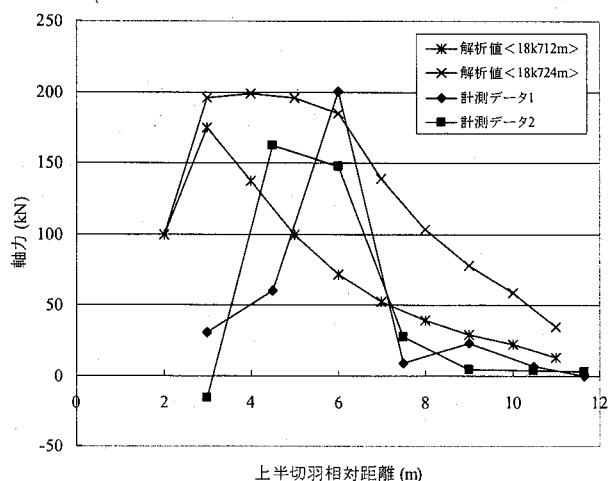


図-14 長尺鏡ボルト工軸力分布比較図 (2m掘進時)

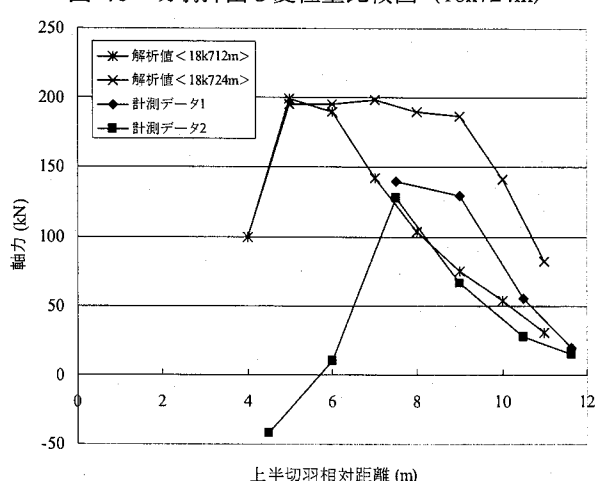


図-15 長尺鏡ボルト工軸力分布比較図 (4m掘進時)

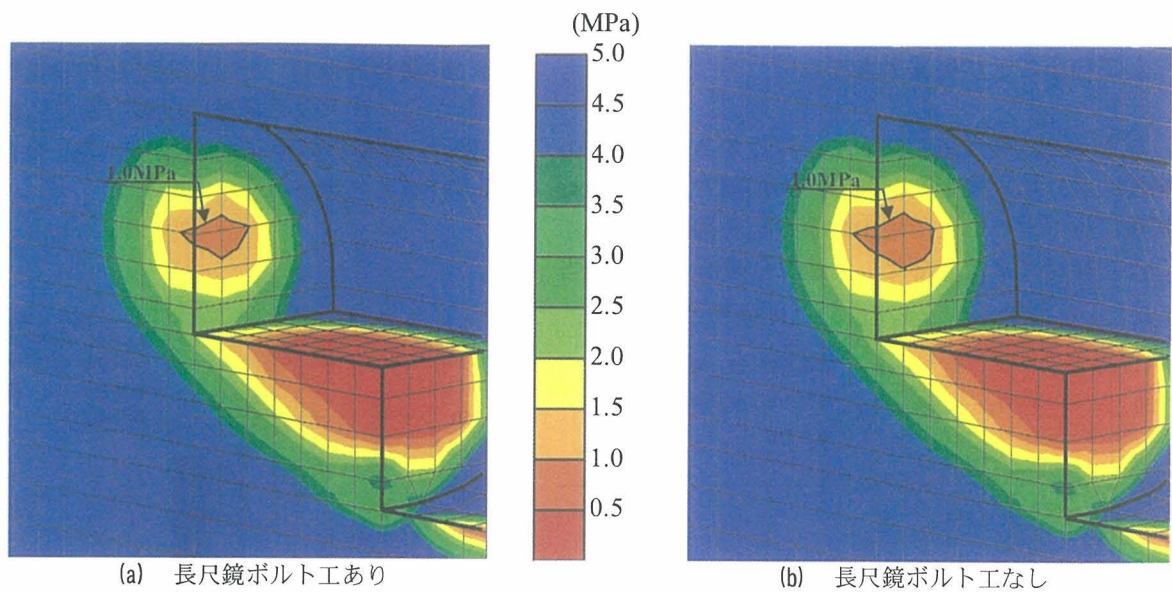


図-16 切羽面垂直圧縮応力比較図（強風化帯部＜18k712m 断面＞）

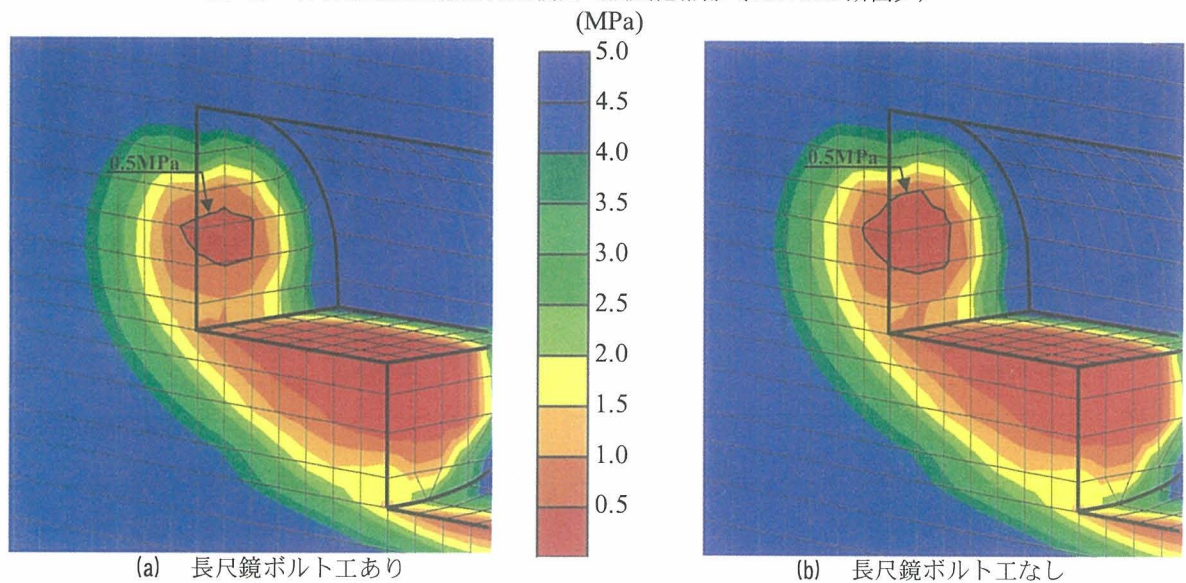


図-17 切羽面垂直圧縮応力比較図（極風化帯部＜18k724m 断面＞）

（３）地盤の不均質性を考慮した再現解析

a) 解析概要

ここでは、筑紫トンネル（南畑工区）断層部のトンネル掘削時の切羽前方挙動をより正確に再現するために、地質の不均質性を考慮した解析を実施する。

切羽観察・A計測結果から判断して18k720m付近から地質が大きく変化していることが推定されるため、18k720m～18k740m（ $L=20\text{m}$ ）を極風化帯としてモデル化する。物性値は均質モデルによる解析で同定した地盤物性値を用いることとし（表-7）、極風化帯部を18k724m断面で同定したR3級相当の物性値とし、それ以外を強風化帯部として18k712m断面で同定したR4級相当の物性値とする。

解析モデル図を図-18に示す。

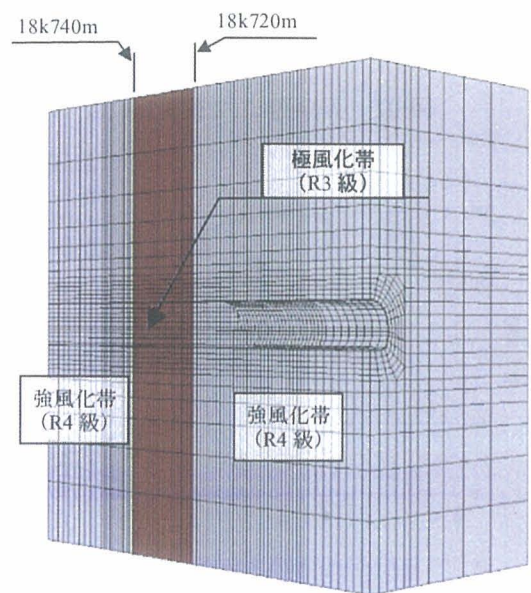


図-18 不均質モデル図

b) 解析結果

計測値と解析値の発生変位量の比較を図-19, 20に、切羽押出し変位量分布の比較を図-21に、長尺鏡ボルト軸力分布の比較を図-22に、切羽面直方向の応力分布コンターの比較を図-23, 24に示す。

各断面位置でのトンネル坑内変位および切羽押出し変位量、長尺鏡ボルト軸力は、ともに均質断面解析よりもより精度良く再現できており、モデル化の妥当性が再確認できる。以下に長尺鏡ボルト工の効果について解析結果から得られる知見を示す。

- ・切羽押出し変位量については、長尺鏡ボルト工を打設することにより8mm (10%) の変位抑制効果が見られる。また、切羽を1m掘削した瞬間の切羽面の増分押出し変位量は長尺鏡ボルト工を打設す

ることにより27mm (22%) の変位抑制効果が見られる。〈図-21参照〉

- ・切羽面垂直応力コンター (図-23, 24) を見ると、長尺鏡ボルト工を打設することにより、上半切羽面で0.5 (MPa) および1.0 (MPa) 以下の領域が小さくなっており、掘削解放に伴う切羽面垂直方向応力の解放を抑制していることが確認出来る。したがって、均質モデルでの解析結果と同様に地山の塑性化の低減効果が確認された。

以上より、筑紫トンネル (南畑工区) 断層部において長尺鏡ボルト工を打設することにより、トンネル坑内変位抑制には寄与が少ないものの、切羽押出変位を抑制し、切羽前方地山の塑性化の低減に寄与していることが推察される。

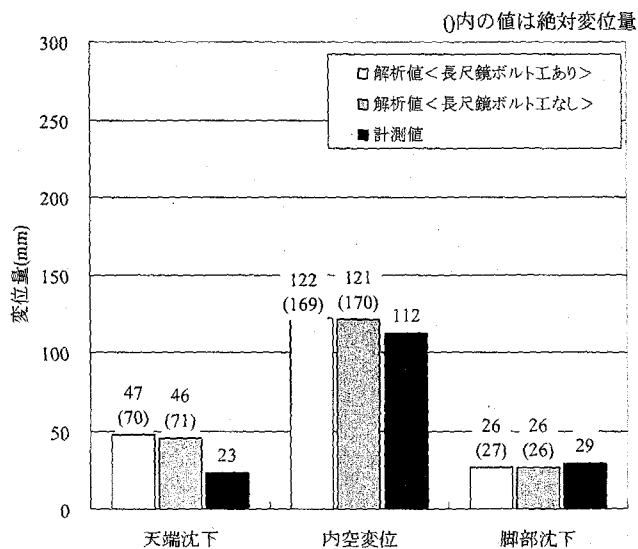


図-19 坑内変位比較図 (18k712m 位置)

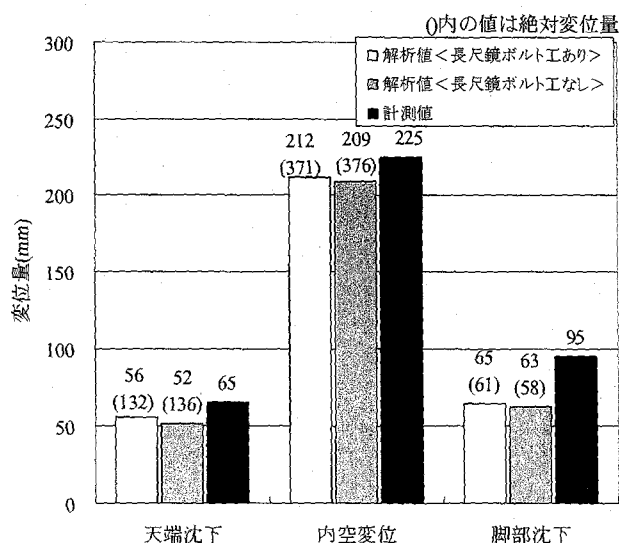


図-20 坑内変位比較図 (18k724m 位置)

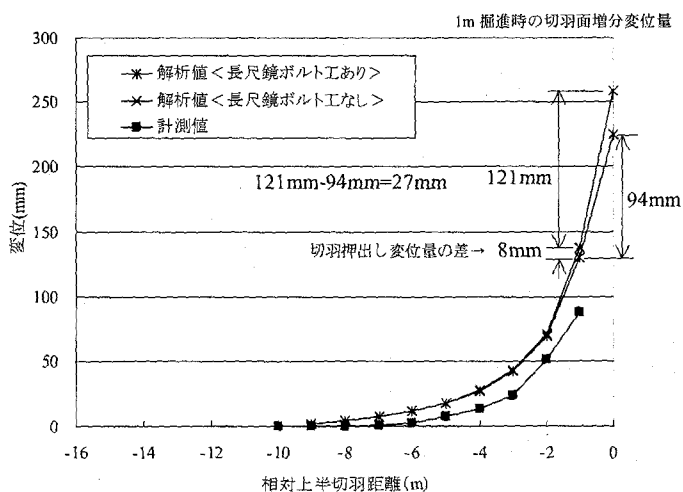


図-21 切羽押出し変位量比較図

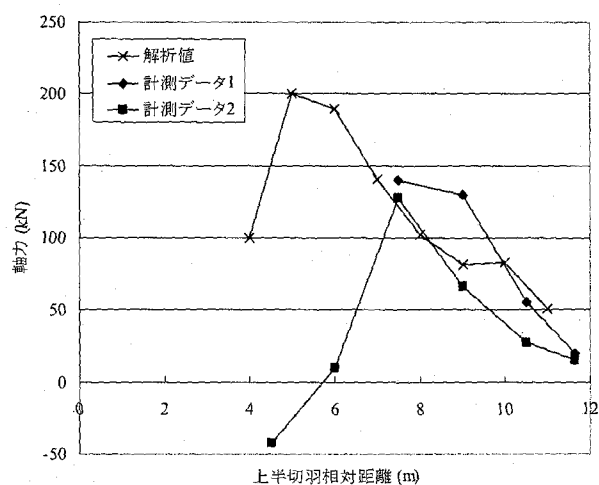


図-22 長尺鏡ボルト工軸力分布比較図 (4m 掘進時)

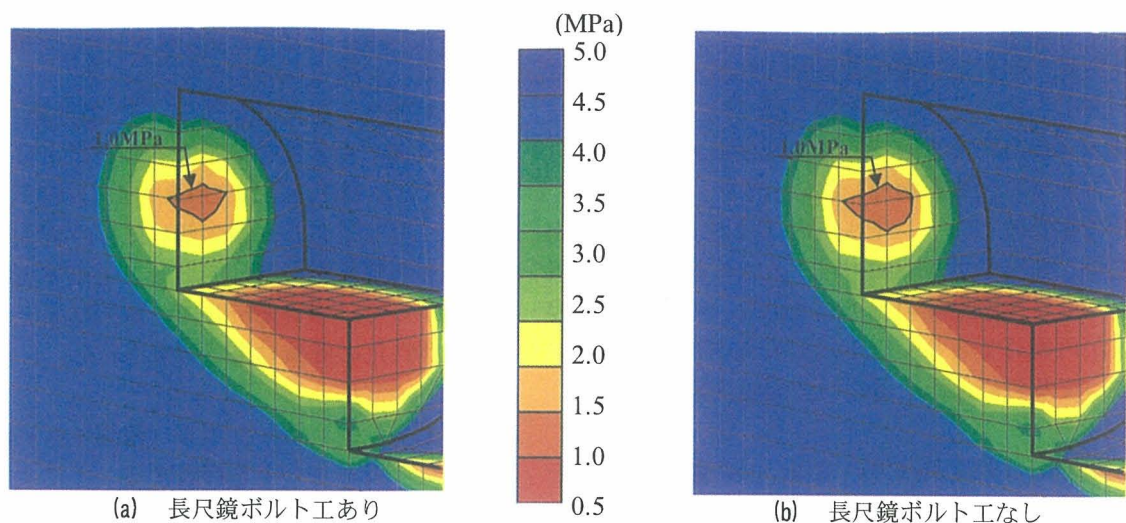


図-23 切羽面垂直圧縮応力比較図 (18k712m 断面位置)

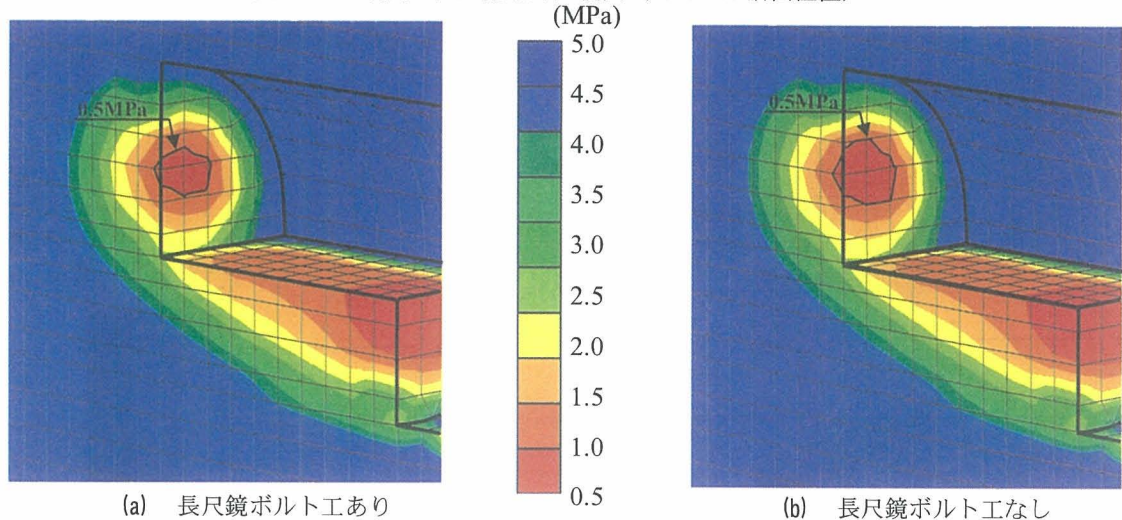


図-24 切羽面垂直圧縮応力比較図 (18k724m 断面位置)

4. まとめ

今回、筑紫トンネル（南畑工区）断層部の計測データをもとに同定解析を実施した。以下に示すように、より正確にモデル化を行うことで実挙動を精度良く再現することができた。

- ①長尺鏡ボルト工引抜試験を実施し、付着特性を正確に設定。
- ②トンネル掘削工程を正確に再現。
- ③地盤物性値を同定解析により設定。

また、長尺鏡ボルト工の効果について得られた知見を以下に示す。

- ・長尺鏡ボルト工を打設することで、その剛性により切羽押出し変位を抑制する効果がある。
- ・切羽変形を抑制することで切羽前方の地山応力を三軸状態に近づけることになり、前方地山の塑性化を抑制している。
- ・長尺鏡ボルト工の効果発揮は、地質の影響を大

きく受け、地盤の剛性（強度）が低い程相対的に大きな効果が得られる。

したがって、長尺鏡ボルト工の効果はその剛性と周辺地山の剛性（強度）とのバランスによって、切羽前方地山の変形（塑性化）を抑制する効果であることが今回の解析的検討で示された。ただし本知見は、切羽前方地山の変形・応力に着目した長尺鏡ボルト工の効果の一つであることに留意が必要である。実際の施工現場では、ボルトと注入材が一体となって肌落ち・小崩落を防止しているという目に見える大きな効果もある。今回の連続体力学を基礎とした解析的検討では定量的に評価することは難しいが、これらの効果も踏まえて、今回得られた知見が長尺鏡ボルト工の適切な採用の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) NATM設計施工指針，日本鉄道建設公団，1996。