

低土被り部における長尺鏡ボルトの支保効果

Support Effects of Long Length Face Bolting in a Small Overburden Depth

高橋浩¹・新野義昭²・大坪稔哉²・岡田憲明²・森本真吾³

Hiroshi Takahashi, Yoshiaki Shinno, Toshiya Otubo, Noriaki Okada and Shingo Morimoto

¹正会員 博士(工学) 三井住友建設(株)土木事業本部土木技術部 (〒160-0011 東京都中野区中野1-38-1)

E-mail:htaka@smcon.co.jp

²三井住友建設(株)大阪支店土木部 (〒541-0041 大阪府大阪市中央区北浜4-7-28)

³正会員 (株)ケー・エフ・シー トンネル技術部 (〒105-0014 東京都港区芝2-5-10)

This paper discusses the mitigation of displacement and stress of supports by long length face bolts. An application was made at construction site of Sano tunnel, where the ground surface subsidence, the collapse of the tunnel crown and face were apprehended since the geology of in a small overburden depth sections was unconsolidated. By simultaneously applying the patterns of long length fore-piling and long length face bolting with long length fore-piling, the excavation without deformation of in a small overburden depth sections could be made. The mitigation of displacement and stress of supports by long length face bolts was proved by 3-dimensional numerical analysis.

Key Words : *small overburden depth , long length forepiling , long length face bolting*

1. はじめに

近年、イタリア等で採用例の増えているADECO-RSは、塑性挙動を示す地山では切羽前方地山を長尺鏡ボルト等で補強・改良することで内空変が抑制され、支保工に作用する荷重が小さくなるために支保工の軽減が図れる(以下、「支保効果」という)とされている¹⁾。一方、日本国内では、長尺鏡ボルトの効果として、天端沈下量や切羽押し出し量に着目した研究・報告事例²⁾は多いものの、現時点で国内においてADECO-RSを本格的に採用した事例は見あたらない。このため、同工法の支保効果のうち、支保工への作用荷重軽減効果が確認された事例もないようである。

今回、風化泥岩層と花崗班岩(玉石・粘土化・土砂化)で構成される地質に建設する2車線道路トンネルの2箇所の低土被り部(谷部と終点側坑口部)において、長尺鏡ボルトの有無が地表面沈下、天端沈下、内空変位および支保部材発生応力に与える影響を計測結果および三次元数値解析によって確認することを試みた。その結果、長尺鏡ボルトを施工することで、変位抑制効果が向上するとともに、支保部材発生応力が減少すること、すなわち長尺鏡ボルト

の支保効果が確認された。

本稿は、実トンネルの計測結果および数値解析結果によって確認された長尺鏡ボルトの支保効果について、まとめたものである。

なお、本稿では、長尺のボルトを切羽に打設することで鏡面の安定性向上および前方地山の補強・改良を目的としたことから、「長尺鏡止めボルト」ではなく「長尺鏡ボルト」としている。

2. トンネルの地形・地質概要

図-1に長尺鏡ボルトの支保効果を確認した那智勝浦道路佐野トンネルの地質縦断面図を示す。佐野トンネルは、紀伊山地南東にあり、標高100~250mのやや急峻な山地斜面と標高20~80mのなだらかな丘陵斜面が接する北東-南東方向に位置している。トンネルは、山地尾根部と2つの段丘部を通過するが、段丘層では土被りが薄くなる。このため、土被りは最大約43mで、起点側坑口から110m付近の谷部および終点側坑口から130m区間は土被り1D(Dは掘削幅)以下の低土被り部となっている。

地質は熊野層群・泥岩が主体で、一部に砂岩の薄層を伴っている。新鮮部の泥岩はよく固結し硬質で

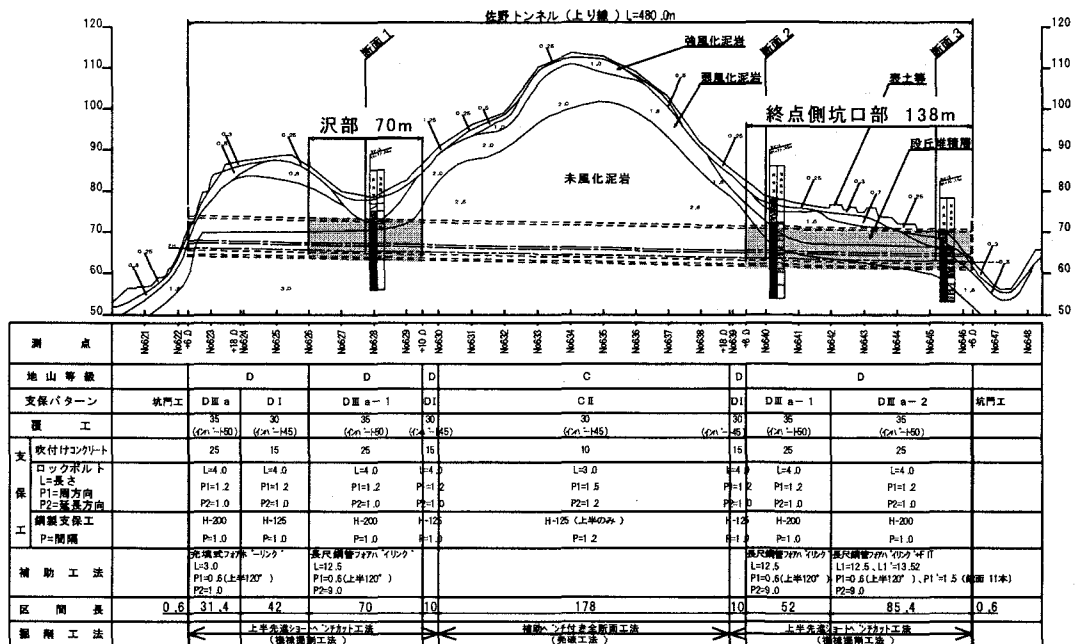


図-1 トンネル地質縦断図

あるが、潜在亀裂があり、スレーキングを起こしやすい性質を有している。谷部と終点側坑口部の段丘堆積層は層厚数mの礫質土層で、砂礫を主体としてシルトおよび砂層を伴い、花崗斑岩の硬質な玉石（φ30mm以上）が点在している。また、段丘部では地表からの浸透水と思われる湧水が認められている。

なお、実施工では、谷部および終点側坑口部の切羽状況に想定したほどの差違はなかった。このことから、2箇所の計測結果を比較するうえで、地形・地質の違いが及ぼす影響は少ないと考えた。

3. 低土被り部における補助工法の設計

(1)無拡幅 AGF

図-2 に谷部および終点側坑口部の支保パターン図、表-1 に低土被り部に採用した補助工法一覧表を示す。

天端崩落および地表面沈下対策として、2 箇所の低土被り部全区間を対象に無拡幅 AGF を設計した。一般に、天端崩落防止のための補助工法として、初期の段階ではフォアポーリング（モルタル全面接着、L=3.0m）、もしくは注入式フォアポーリング（シリカレジン注入、L=3.0m）が採用されることが多い。無拡幅 AGF は、このうち注入式フォアポーリ

表-1 補助工法一覧表

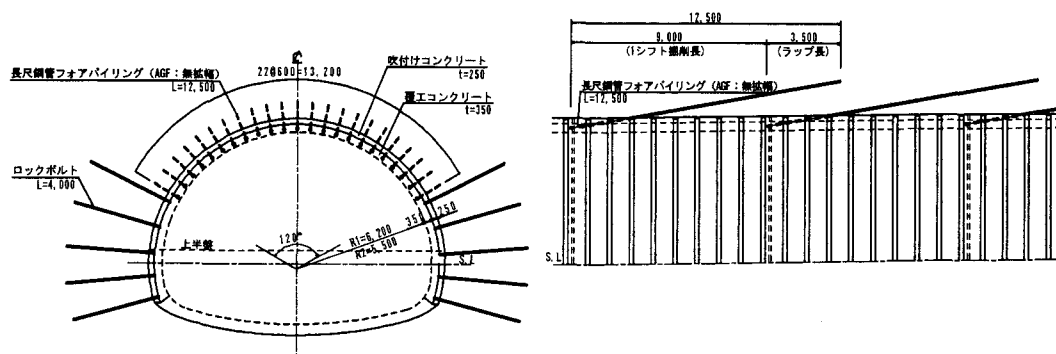
対象区間	谷 部	終点側坑口部	
	No.626+00～629+10	No.639+8～642+00	No.642+00～646+6
支保パターン	DⅢa-1	DⅢa-1	DⅢa-2
予想される現象	天端崩落 地表面沈下	天端崩落 地表面沈下	鏡面・天端崩落 地表面沈下
対策工	無拡幅AGF	無拡幅AGF	無拡幅AGF 長尺鏡ボルト

ングと比較して経済性、工期、信頼性などで優位と判断した。

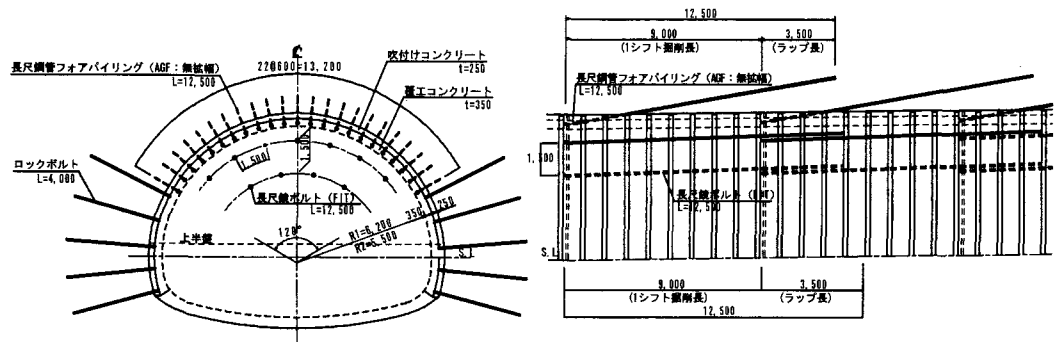
AGF 鋼管は外径 φ114.3、肉厚 6.0mm、1 シフトの打設長さ L=12.5m（掘削長 9.0m）の無拡幅タイプで、注入材はセメント系（セメントミルク注入）とした。打設範囲は、上半アーチ部 120° で、横断方向間隔 60cm とし、次シフトを横断方向に 30cm ずらす、いわゆる千鳥配置とした。また、今回設計した断面を拡幅しない無拡幅 AGF は、従来の断面を拡幅する AGF に比べて地山の緩みを抑制できると考えた。

(2)長尺鏡ボルト

終点側坑口部のうち、切羽天端以下に亀裂の発達した弱風化泥岩が出現すると予想される No.642+00～646+6.0 について、長尺鏡ボルトを設計した。これは、長尺鏡ボルトを打設することで、鏡面の安定性が向上するとともに、切羽前方地山の剛性が改良



a) DIII a-1 パターン



b) DIII a-2 パターン

図-2 支保パターン図

表-2 計測結果一覧表

項 目		単位	谷 部		終点側坑口部	
			No.627+17.5		No.642+0.3	
			天端部	側壁部	天端部	側壁部
地表面沈下		mm	9		4	
天端沈下		mm	7		4	
内空変位		mm	6		3	
鋼製支保工	応力	N/mm ²	160	80	65	40
	軸力	k N	600	250	330	115
吹付けコンクリート応力		N/mm ²	6	2	0.7	0.5

され、天端の安定性も向上すると考えたことによるものである。

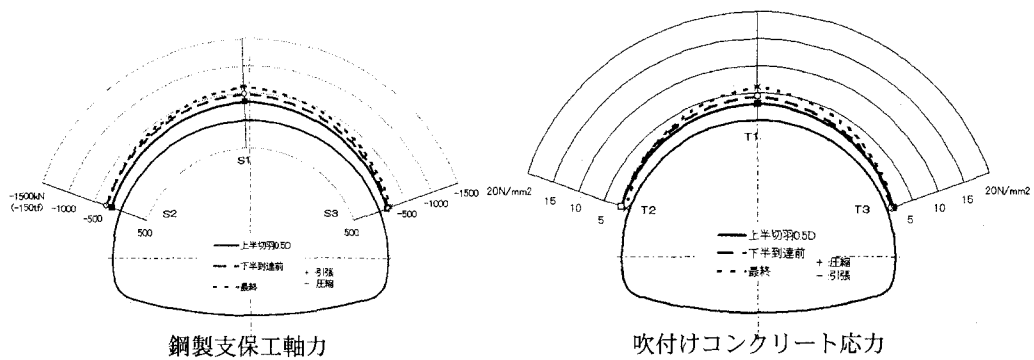
長尺鏡ボルトには、掘削時に撤去可能な長尺の GFRP ボルト (FIT 管、外径 $\phi 76$ 、肉厚 8.0mm、 $L=12.5$ m) を採用した。なお、長尺鏡ボルトは AGF と同一切羽で施工することとした。

4. 補助工法の効果

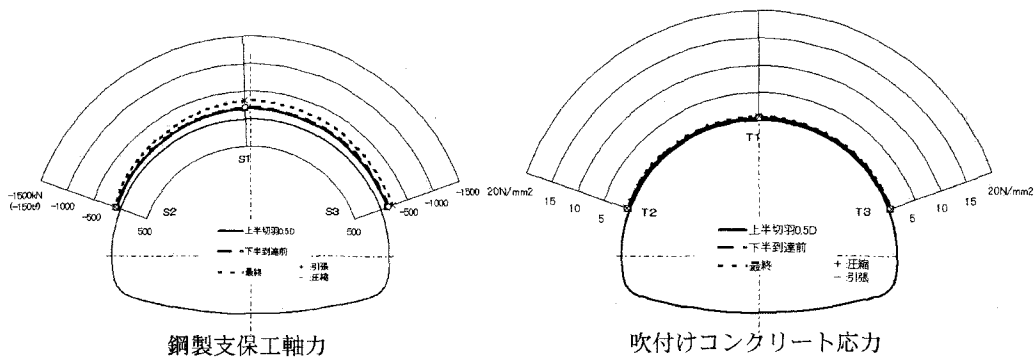
表-2 に低土被り部の計測結果一覧、表-3 に計測

結果をもとに算出した緩み高さ、図-3 に鋼製支保工軸力および吹付けコンクリート応力の分布図を示す。

表-2 および図-3 をみると、地表面沈下、天端沈下および内空変位については、無拡幅 AGF のみの谷部に対して、長尺鏡ボルトを採用した終点側坑口部の値は 1/2 程度となっている。終点側坑口部の鋼製支保工応力は最大で 65N/mm^2 (降伏強度 240N/mm^2 の約 3 割)、吹付けコンクリート応力は最大 0.7N/mm^2 (設計基準強度 18N/mm^2 の 1 割以下) となっている。



a) 谷部 (No. 627+17.5)



b) 終点側坑口部 (No. 642+03)

図-3 鋼製支保工軸力と吹付けコンクリート応力

表-3 緩み高さ算出結果

項 目	単位	谷部	終点側坑口部
軸 力	kN	750	240
作用土圧	kN/m ²	114	36
緩み高さ	m	5.7	1.8
土 被 り	m	0.95	0.2
緩み高さ/土被り		6	9

表-3 に示すように、掘削に伴う地山の緩み高さを支保部材に発生する軸力から算出すると、側壁部の鋼製支保工軸力は 115kN、コンクリート応力は 0.5N/mm² であることから、軸力は (吹付け厚 250mm×単位長さ 1000mm)×0.5N/mm²=125kN となり、合計 240kN の軸力となる。トンネル掘削半径を 6.6m、掘進長を 1m とした場合の作用土圧は、 $240 \div (6.6 \times 1.0) = 36 \text{ kN/m}^2$ となり、地山の単位体積重量を 20kN/m³ とすれば、約 2m の緩み高さとなる。この断面の土被りは約 9m 程度であることから、土被りの 1/4 以下に緩み領域が収まっていると考えら

れる。同様の計算を谷部について行くと緩み高さ約 6m となり、緩み領域が長尺鏡止めボルト区間の 3 倍程度と推定される。

以上のように、終点側坑口部では、無拡幅 AGF に加えて長尺鏡ボルトを打設したことで、切羽前方地山がさらに補強・一体化して見掛けの地山剛性が高まり、坑内変位や部材発生応力が減少した、すなわち長尺鏡ボルトによる支保効果が得られたと考えられる。

5. 三次元数値解析による検証

実施工において確認された長尺鏡ボルトの支保効果を 1 現場の特異事例とするのではなく、より一般化するために、三次元数値解析によるパラメータ解析を行った。

(1) 解析モデル

対象地山として固結程度が低く塑性挙動を示す軟弱地山を想定し、地山のモデル化を行った。表-4

表-4 解析に用いた物性値

項 目	変形係数 E (MPa)	単位 体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	内部摩擦角 ϕ (°)	粘着力 C (MPa)	断面積 A (m ²)	断面二次 モーメント I (m ⁴)	要素
地山	50	20	0.42	30	0.01	—	—	solid
吹付けコンクリート	4,000	24	0.2	—	—	0.25	—	solid
鋼製支保工	210,000	78	0.2	—	—	6.35×10^{-3}	4.72×10^{-5}	棒要素
長尺鋼管フォアパイリング	200,000	78	—	—	—	2.03×10^{-3}	3.98×10^{-6}	棒要素
長尺鏡ボルト	20,000	17.5	—	—	—	1.71×10^{-3}	1.00×10^{-6}	棒要素

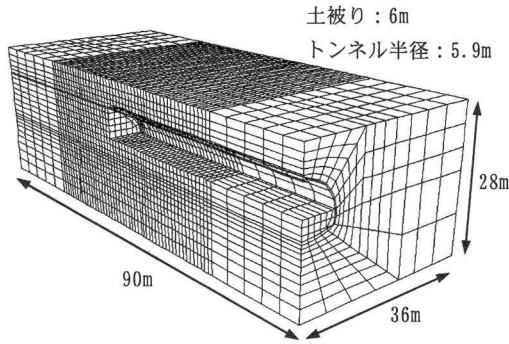


図-4 解析モデル図

に解析に用いた地山、支保工および補助工法の入力物性値を示す。一般に、長尺鋼管フォアパイリングだけでなく鏡面の安定対策工を併用するケースは、坑口部などのように、低土被り部で切羽の自立性が乏しい不安定な地山であることが多い。本解析では、坑口部などの低土被り部を想定してDⅢパターンが適用される地山の物性値³⁾を参考に入力物性値を設定した。なお、一般に低土被り部は強風化層、崖錐層などが多いため粘着力は実態に合わせて低減している。

図-4 に解析モデル図を示す。地山は Mohr-Coulomb の破壊基準に従う弾塑性体とした。土被りは低土被り部を想定して 6m とした。掘削手順は、重力解析の後、上半先進工法とし、上半部分を境界から 20m を掘削し、直後に切羽 1m 手前まで支保工を設置した。その後、上半部分を 70m 分 1m の逐次掘削を行い、同時に 9m ピッチの長尺鋼管フォアパイリング、および長尺鏡ボルトを設置した。評価した解析結果はこの逐次掘削区間の 70m とした。解析ケースは、長尺鏡ボルトの有無による支保工の安定性を検証するため、長尺鏡ボルト有り（以下、「ボルト有り」という）と無し（以下、「ボルト無し」という）の 2 ケースとした。

(2) 天端沈下量

図-5 に解析結果のうち、天端沈下量の比較を示

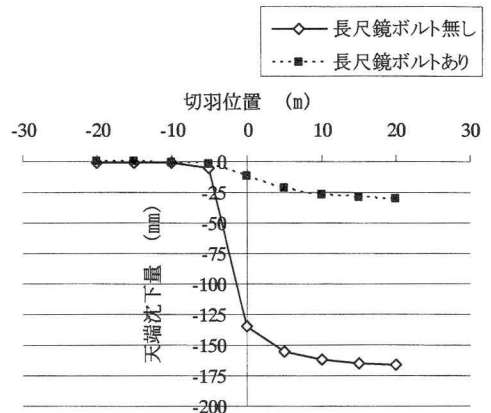


図-5 天端沈下量（解析結果）

す。先行変位を含めたトータル为天端沈下量は、ボルト無しのケースでは 160mm 発生しているのに対して、ボルト有りのケースでは 30mm 程度となっている。切羽通過後の天端沈下量は、ボルト無しのケースでは 30mm、ボルト有りのケースでは 17mm で沈下量が 1/2 に抑制されている。このことから、長尺鏡ボルトを施工することで、切羽前方に生じている先行変位が抑制されるだけでなく、切羽通過後の変位も抑制されると考えられる。

(3) 支保工に発生する軸力

図-6 に解析によって得られた吹付けコンクリート応力を示す。図は上半部のトンネル壁面を 0 とし、ボルト無しと有りのケースの応力分布を示している。図-6a) に示す切羽後方 1m 地点の吹付けコンクリート応力を見ると天端部の値が大きく、ボルト無しのケースでは 0.76N/mm^2 の応力が発生しているのに対して、ボルト有りのケースでは 0.53N/mm^2 となっており、長尺鏡ボルトを設置したケースの方が若干値が小さくなっている。図-6b) に示すように、天端沈下量が安定している切羽後方 20m の地点においては、側壁部から肩部にかけて応力が大きくなっており、ボルト無しのケースでは 2.39N/mm^2 の応力が発生しているのに対して、ボルト有りのケースでは 1.22N/mm^2 の応力となっており、2 倍近い応力

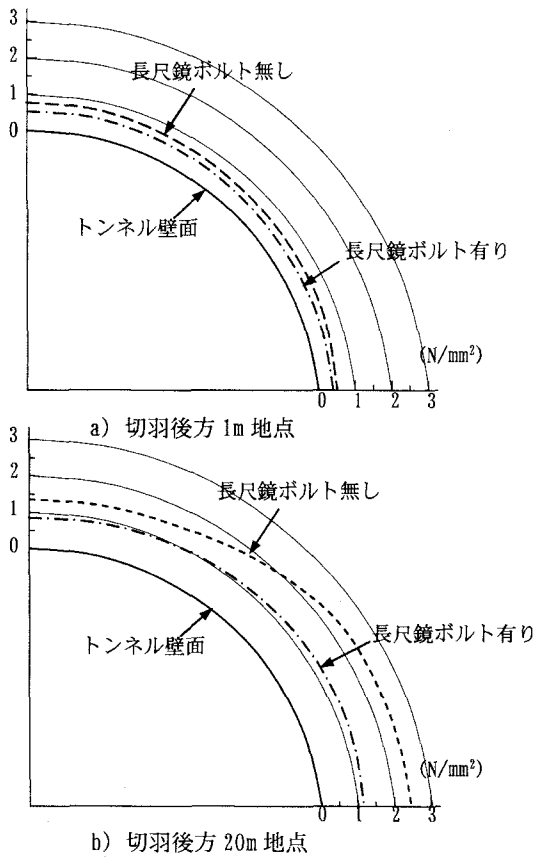


図-6 吹付けコンクリート応力

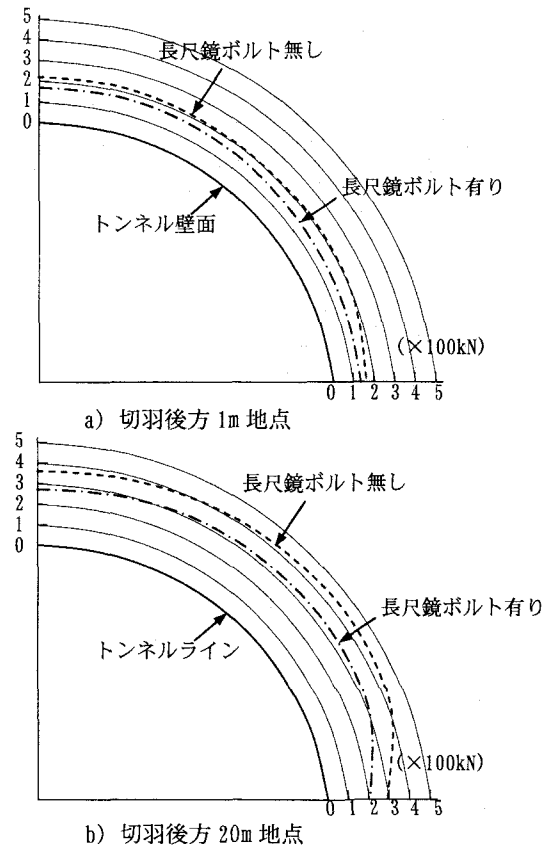


図-7 鋼製支保工軸力

差が見られた。

図-7 に解析結果のうち、鋼製支保工軸力を示す。図-7a)の切羽直近の鋼製支保工軸力を見ると、吹付けコンクリート応力と同様に天端部の値が大きく、ボルト無しのケースでは 217kN の軸力が発生しているのに対して、ボルト有りのケースでは 168kN の軸力となっており、長尺鏡ボルトを設置したケースの方が 50kN 小さい値を示している。図-7b)に示すように、切羽後方 20m の地点での軸力を見ると、肩部の軸力が大きくなっており、ボルト無しのケースでは 417kN の応力が発生しているのに対して、ボルト有りのケースでは 311kN の応力となっており、100kN ほどの軸力差が見られた。

以上のように計測結果と同様に、三次元数値解析結果においても、長尺鏡ボルトによって切羽前方の先行変位が抑制されて塑性領域の発生が減少し、支保部材に発生する応力が軽減されることが確認された。

6. まとめ

2車線道路トンネルにおける実施工結果と三次元数値解析結果により、長尺鏡ボルトを打設することで変位が抑制されるとともに支保部材発生が軽減される効果、すなわち長尺鏡ボルトの支保効果を確認することができた。本件で得られた知見は、支保工軽減の可能性を示唆していると考えている。

本報告が、低土被り部のトンネルにおける補助工法および支保構造の設計に際して、参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) ジェオフロンテ研究会 ADECO-WG：切羽前方コアに着目した新しいトンネル工法，2002。
- 2) たとえば、竹林亜夫，西崎昌士，羽場徹，岡部正：切羽安定対策工に関する解析的考察，トンネル工学研究論文・報告集第 10 巻，pp.1-8，2000。
- 3) 日本トンネル技術協会：大断面トンネルの設計・施工法に関する調査研究（その 3）報告書，平成 5 年 3 月