

全断面早期閉合による 都市部山岳工法トンネル安定対策

Stabilizing Measure for NATM tunnel using Full Face Cutting Method

津野和宏

Kazuhiro Tsuno

正会員 工博 首都高速道路(株)技術管理室設計技術グループ(〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関 1丁目 4-1)

E-mail:k.tsuno68@shutoko.jp

Most tunnel part of the Kishiya-Namamugi line was constructed using the Urban-NATM. The tunnelling method was changed from the advanced half the above industrial method to the full face method based on the field test result of foot piles. It was confirmed using intensive analyses and field measurements that the full face method was effective to restrain the ground movement caused by the construction of the tunnel.

Key Words : NATM, full face cutting, face bolt

1. はじめに

都市計画道路岸谷生麦線は、横浜市鶴見区岸谷二丁目付近(国道1号)と生麦三丁目付近(東京大師横浜線)を結ぶ全長約 1,200mの横浜市道であり、完成後は横浜環状北線(以降、北線)の出入口の一部としても機能する関連街路である。このうち、国道1号側約 330mのトンネル区間のうち、生麦行き側(図-1, 1期施工分)については、横浜環状北線の子安台換気所や生麦側高架部の工事用道路として使用するため、首都高速道路(株)が横浜市から受託し、先行整備を行った。本工事の施工に際し、当初予定していた上半先進掘削工法から補助ベンチ付き全断

面掘削工法に変更した。本稿は、この工法変更に際して行った各種検討および工事中の計測結果について、報告するものである。

2. 掘削工法変更の経緯

(1) 現場条件

上記トンネルのうち、国道1号側約 280m部分が都市部山岳工法により施工された。当該トンネルは、土砂地山からなる洪積台地を通過する(図-2)。トンネル下半は砂質シルト(Sc2層)、上半はシルト質細砂(Ss1層)からなり、その上層がやや硬質なロームである。Ss1層は自由水面を持ち、最高水位はトンネル天端近くである。

(2) 脚部補強の現地確認試験

当初設計では、脚部補強ボルト(図-3)により脚部の安定を図りつつ、上半先進掘削工法を用いる予定であった。しかし、脚部ボルト打設の対象土層であるSc2層の鋭敏比が約10と、非常に泥濘化しやすい粘土層であることが判明し、脚部ボルトの補強効果に懸念が生じた。このため、現地試験施工および平板載荷試験を行い、改良体の形成状況、支持力、変形係数等について確認を行った(図-4)。試験ケースおよび試験結果を表-1に示す。試験施工にはボルト(φ32mm)およびAGP(φ114.3mm)の二種を用い、注入材としてシリカレジンを使用した。表中の注入率UPでは、平均で4割程度の注入率増加となった。結果として、支持力は鉛直AGPかつ群集の場合(試験番号7)のみ目標値を上回った。これは、

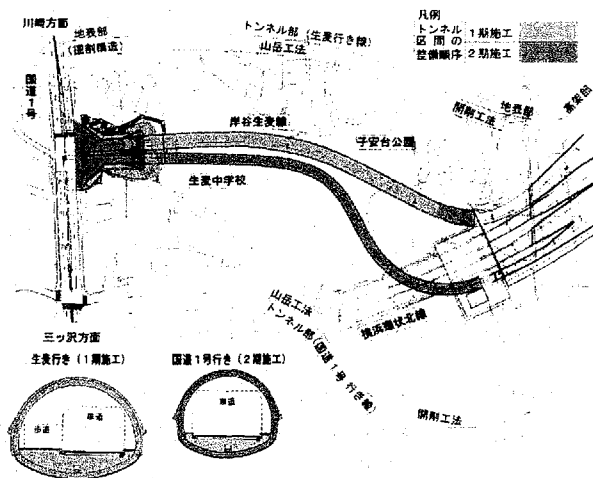


図-1 岸谷生麦線トンネル部

地質層序表

時代	地層名	主な土質	記号	凡 例
現世	層土・頁土	ローム 黒ボク		0~8 (2)
	沖積層	腐植土層	腐植土	
		粘性土層	シルト	
旧世	砂質土層	砂	As	9~42 (26)
	飯沼ローム層		ローム	lm
		ローム	lm	4~9 (6)
下米西ローム層		腐植質粘土		1~12 (3)
新世	第1砂質土層	シルト混じり細砂 シルト質細砂	Ss1	4~75 (32)
	第1粘性土層	シルト		10~17 (12)
	第2粘性土層	腐植質シルト		10~17 (12)
	第2砂質土層	砂質シルト		3~15 (7)
	第2粘性土層	シルト質細砂 砂混じり細砂	Ss2	14~58 (28)
	第3砂質土層	シルト混じり細砂 シルト質細砂	Ss3	14~88 (45)
	第3粘性土層	有腐植シルト 腐植質シルト		7~42 (14)
	第4砂質土層	細砂	Ss4	11~139 (45)
更新世	定形層	定形		37~375 (150)
	上段層	粒石混じり定形		37~375 (150)
	砂層	細砂	Es	26~375 (121)

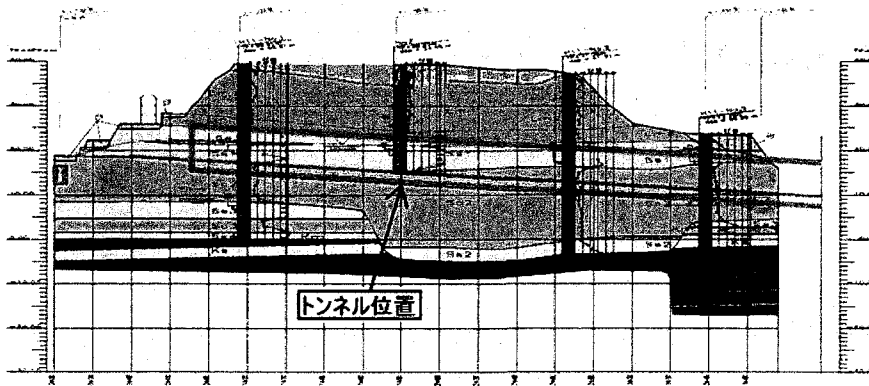


図-2 地質想定図

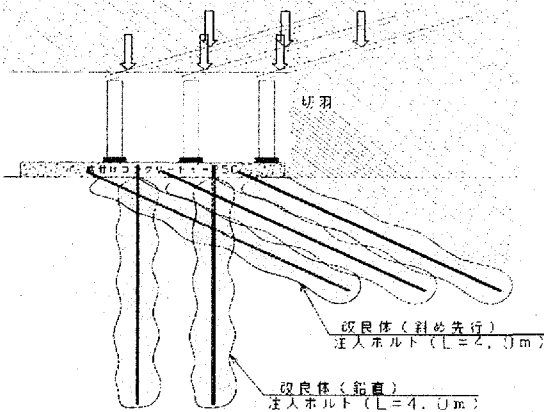


図-3 脚部補強概要

表-1 脚部補強現地試験結果

試験 Case	試験 番号	方向	形態	鋼材	注入率	極限支持力 (kN・m)	許容支持力 (kN・m)	許容支持力作用 時の変形係数 (kN・m)
テルツァーギー支持力・孔内水平載荷試験						484	329	(16,500)
FEMIによる最大目標改良強度						2,049	1,366	(300,000)
Case1	1	未改良地盤				991	661	35,000
Case2-A	2	鉛直	単独	ボルト	18%	1,700	1,133	49,000
Case2-B	3		単独			1,400	933	35,000
Case4	4		単独			1,400	933	118,000
Case3	5		単独			1,600	1,067	20,000
Case5-A	6	斜め	単独	AGP	注入量UP	1,200	800	14,000
Case5-B	7		単独			2,250	1,500	78,000
Case6-A	8		単独		18%	850	567	11,000
Case6-B	9		単独			900	600	8,100
Case8	10		単独		注入量UP	850	567	7,700
Case7	11		単独			1,600	1,067	13,000
Case9-A	12		単独		注入量UP	1,500	1,000	12,000
Case9-B	13		単独			1,150	767	18,000

注入量UP: 2倍 (36%)

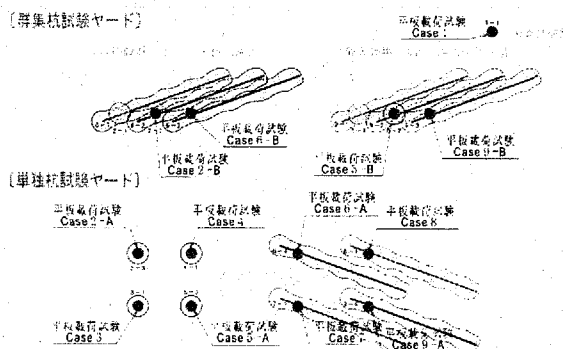


図-4 脚部補強現地試験

改良後の変形係数が未改良の場合を大きく下回っていることから、削孔時に鋭敏比の高い周辺地盤を乱してしまったものと推測される。改良体を確認した結果、径 500mm 程度、厚さ 30mm 程度の層状（割裂注入）となっており、均一な状況ではなかった。

(3) 掘削工法の変更

上記試験施工結果を鑑み、また工程重視の観点から、掘削開始時は資機材準備の通合により先行斜め

改良を省略した形での脚部補強（AGP）とした。また、当初計画されていた核残しに替わり、より積極的に切羽の保全を図るために長尺鏡ボルトを使用した。坑口より約 60m を慎重に掘進した時点で施工法変更の準備が整ったため、「補助ベンチ付き全断面掘削工法」（以下、全断面掘削）へと移行した（図-5）。なお、フォアパイリングによる先受けは掘削工法変更前後において共通である。

3. 全断面掘削による地山変状抑制効果の確認

(1) 解析による工法変更の効果の確認

この工法変更の際し、長尺ボルトおよび全断面掘削工法の効果について、各種解析により慎重に検討を行った。概要を以下に示す。

a) 長尺鏡ボルトによる変位抑制効果の確認

長尺鏡ボルトによる地山の変位抑制効果や地山改良効果について、軸対象モデルを用いた解析により検討を行った。軸対象モデルでは空洞形状（掘削断面形状）は円形断面となるため、掘削断面に相当する等価半径を算出し、等価換算円とした（図-6）。解

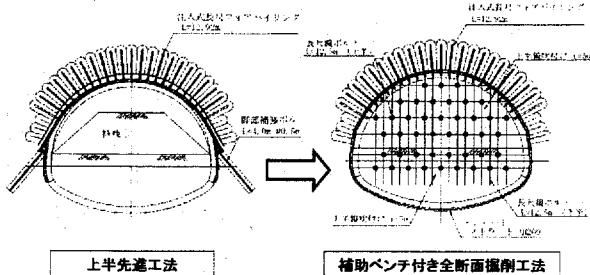
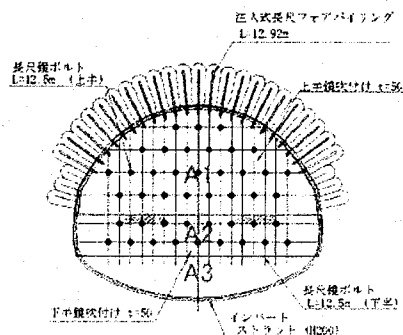


図-5 掘削工法の変更



断面	掘削面積 m ²	全面積 m ²	換算半径 m
上半 (A1)	59.62	59.62	4.36
下半 (A1+A2)	29.51	89.14	5.33
インバート (A1+A2+A3)	22.94	112.08	5.97

図-6 等価換算半径

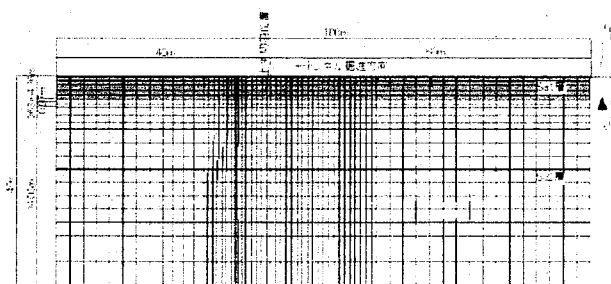


図-7 軸対象解析モデル

表-2 入力地山物性値

材料名	変形係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 φ (°)
Ss1	17000	0.4	0	35
Sc2	35000	0.4	140	0

析モデルの地質は、上半断面が Ss1 層、下半断面が Sc2 層を対象とし、物性値を表-2 に示す。トンネル側方の境界は 3D 程度離れた位置とした。長尺鏡ボルトの長さは当初打設時の 12.5m とラップ長 3.5m の平均である 8m とし、モデル化にあたっては線部材として考慮できないため、対象土層の等価変形係数として考慮した。また、下半およびインバートの掘削を対象に検討を行ったため、天端部分のフォアライニングはモデル化していない。

解析結果を、図-8、9 に示す。当該地山の限界ひずみ¹⁾は、弾性係数から $\varepsilon_0=1.7\%$ 程度と設定した(図

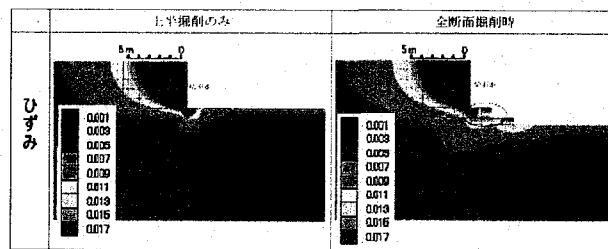


図-8 軸対象解析結果 (長尺鏡ボルトなし)

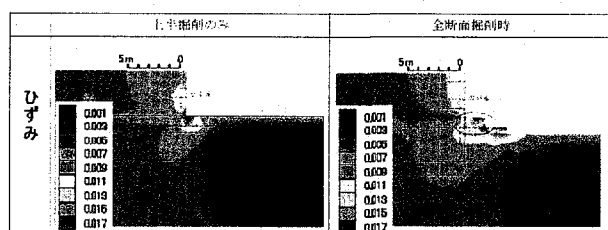


図-9 軸対象解析結果 (長尺鏡ボルトあり)

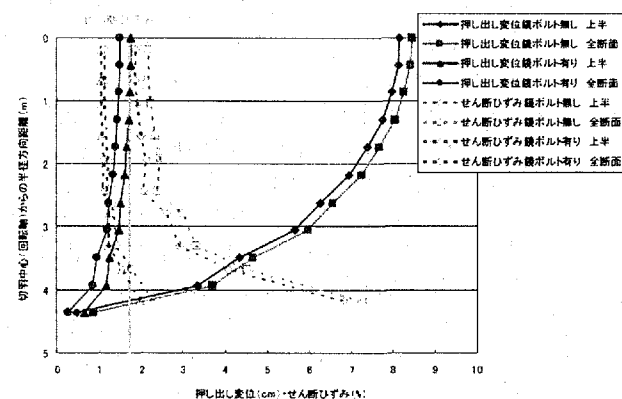


図-10 切羽における最大ひずみと押し出し変位

中の赤い部分)。長尺鏡ボルトを施工しない場合は、 1.7% 以上の範囲は切羽前方 5m 程度まで分布したが、長尺鏡ボルトを考慮したモデルではごく一部となり、その効果が示された。図-10 は切羽の各位置(回転中心からの距離)における変位とひずみを示したもので、長尺鏡ボルトにより最大変位が約 4 分の 1 (8cm $\Rightarrow$ 2cm) に抑えられ、また最大せん断ひず

みも切羽のほぼ全面で 1.7%を下回り、地山を健全に確保できる目途がたった。またあわせて、長尺鏡ボルトのラップ長である 3.5m における解析も行い、ボルトが次スパン打設直前の最も短い状態でも地山の健全性を保てることを確認した。

b) 早期閉合による変位抑制効果の確認

同様に、軸対象モデルによるステップ解析を用い、全断面掘削工法としてインバートを早期に閉合した場合の変位抑制効果の確認を行った。解析モデルを図-11に示す。FEM モデルにおけるインバート部の厚さは 0.6m とし、全断面掘削の解析においては、同じ厚さに対して断面剛性 AE が等しくなるように換算弾性係数を求めて使用した。

解析結果から求めた壁面変位および低減率を表-3に示す。この結果から、全断面掘削による早期閉合により、壁面変位が 25%程度抑えられることが予測され、地表面変位に関しても同程度の抑制効果が期待された。

(2) 計測による効果の確認

a) 長尺鏡ボルトに関する測定

全断面掘削工法に移行してまもなく、上半中央部分における長尺鏡ボルトの軸力測定を行った。長尺鏡ボルトの軸力測定システムを図-12に、軸力測定結果を図-13にそれぞれ示す。測定結果から、切羽が各測定位置の 2~3m 手前に接近した段階から張力が増加しており、切羽の押し出し抑制に寄与していることが分かる。ただし、前サイクルで施工した長尺ボルトとのラップ区間 (3.5m, B-8~B-6) に関しては圧縮力が生じている。これは、前サイクルの注入改良範囲が擬似擁壁となり、それ以深の作用土圧により一時的に生じたものと推測される。

また、夏季休暇期間一週間において、トータルステーションを用いて切羽押し出し量の計測を行った。計測は、上半 4 箇所および下半 3 箇所について行ったが、変位はほとんど見られなかった。

さらに、長尺鏡ボルトの打設およびその際のシリカレジン注入による時山の改良効果を確認するため、鏡ボルト直近と隣接する鏡ボルトの中間位置についてサンプリング (切羽から約 1m の深度) を行い、それぞれの供試体について三軸圧縮試験を用いた粘着力、内部摩擦角および変形係数の確認を行った (表-4)。この結果、鏡ボルト周辺においては見かけの粘着力が格段に向上しており、シリカレジンの注入効果が認められた。

b) A 計測

A 計測としては、地表面沈下およびトンネル内の天端沈下の測定を行った。

地表面が平坦な区間 (学校校庭部、ほぼ全区間全断面掘削) における地表面計測の位置および結果を、図-14~16に示す。図-15は、トンネルセンター位置における地表面沈下の切羽の移動に伴う推移を、計測地点と切羽の位置関係を揃えて重ね合わせたものである。地表面沈下は、切羽が約 1.3D (約 17m) 手前に近づいたところから発生し始め (先行沈下)、0.5D

(7m) 程度手前頃から変化が大きくなる。切羽が 0.5D 程度 (6m) 通過した時点でインバートまで閉合が終了した後も沈下は徐々に進行し、切羽が 1.9D (25m) 程度進んだ時点で概ね収束した。最終沈下量は 2 次元 FEM による解析結果 (27mm) とほぼ同程度であり、沈下の経過は各断面において非常に似通っている。これより、全断面掘削による施工が極めて安定していることが分かる。

また横断面方向の計測結果 (図-16) は、トンネル中心から約 36m の位置でほぼ収束しており、民地への影響は無かった。その形状はここでも各断面において非常に似通っており、施工の安定性が確認できた。

表-5に、上半先進区間と全断面掘削区間における A 計測結果の比較を示す。天端沈下量は、全断面掘削の効果により約 2 割抑制されたことが確認された。上半先進区間における地表面沈下計測結果については、学校校舎に施したアンダーピニングの仮設が近接していたことから、過小評価されているものと判断されるため、() 表示とした。

c) B 計測

上半先進区間、全断面掘削区間それぞれにおいて鋼製支保工応力および吹付けコンクリート応力等の B 計測を行った。断面毎の結果の比較を表-6に示す。全断面掘削区間においては、掘削による地山の変形が初期の段階において支保工が設置されること (早期閉合) により、支保工がより多くの土圧を負担していることが分かる。これにより、周辺地山の変動の抑制に大きく寄与していることが推測される。

また、全断面掘削区間における各支保工応力は、一時開放率を一般的な 40%とした場合の解析結果を大きく上回ったが、一時開放率を仮に 30%とすると、かなり実測値と近い値となることが確認された。この点についても、早期閉合による地山変状抑制効果の裏づけとなるものと考えられる。

4. おわりに

本稿の内容をまとめると、以下のとおりである。

- ・ 現地での脚部補強試験の結果を踏まえ、施工法を上半先進工法から全断面掘削工法に変更した。
- ・ 工法の変更に先駆け、長尺鏡ボルトおよび全断面掘削の地山変状抑制効果について、慎重に解析的検討を行った。
- ・ 上半先進、全断面掘削両区間において施工中に各種計測を行い、実際に工法の変更が有効であったことを確認した。
- ・ 解析結果は実測値と良く一致した。また沈下範囲は概ね校庭内に収まり、民地への影響は無かった。

本工事では、土砂地山における都市部山岳工法トンネルとしてほぼ全国でも初めて「補助ベンチ付き全断面掘削工法」を本格的に採用し、周辺地盤への影響を最小限に抑え、安全に施工することができ、また各種解析および計測によりその効果を裏付ける

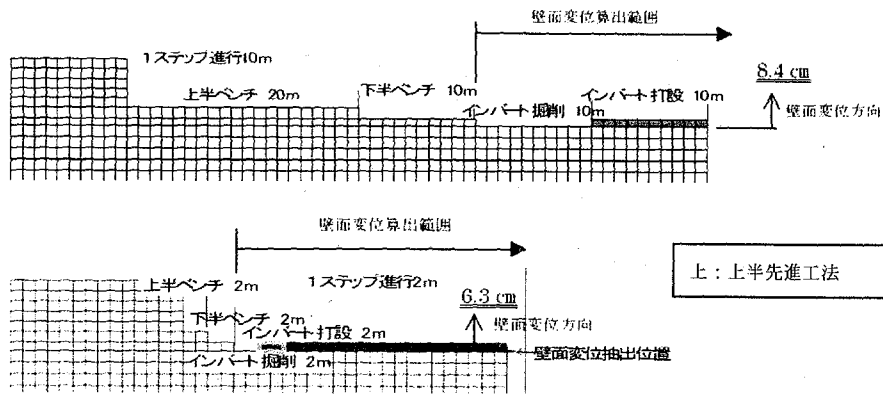


図-11 変位抑制効果解析モデル

表-3 工法変更による壁面変位量の低減

ショートベンチ工法	全断面工法	変位低減率
8.4cm	6.3cm	$(8.4 - 6.3) / 8.4 = 25\%$

表-4 長尺鏡ボルトによる地盤改良効果確認試験結果

試料名	鏡ボルト中間位置	鏡ボルト近傍	既往調査(平均)
三軸C/D 粘着力 c_d (kN/m ²)	6.0	95.8	4.0
内部摩擦角 ϕ_d (°)	35.8	24.9	36.2
平均変形係数 E_{50} (MN/m ²)	34.8	57.1	50.1

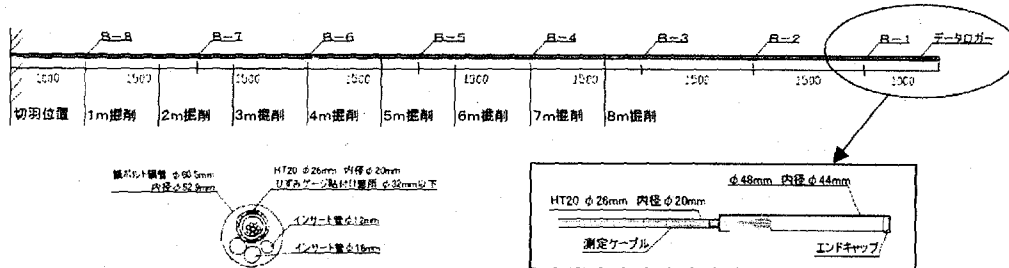


図-12 長尺鏡ボルト軸力計測システム

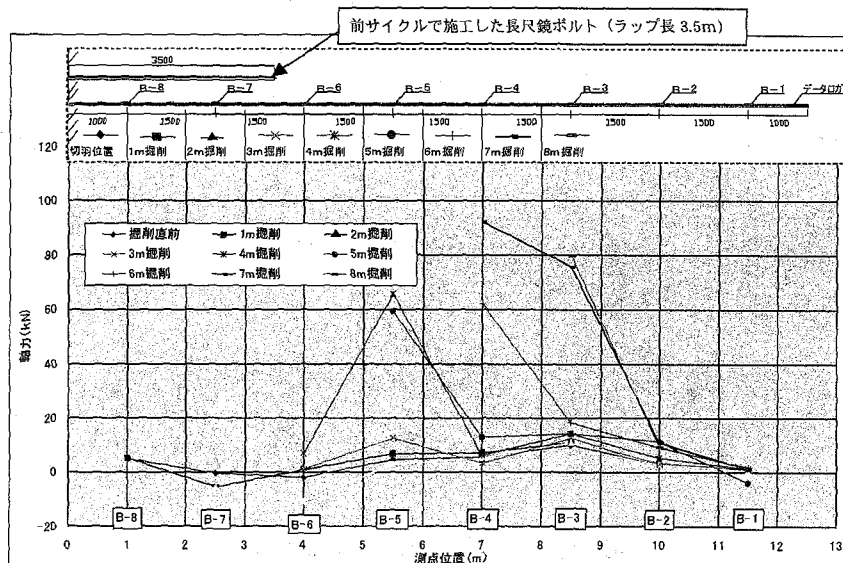


図-13 長尺鏡ボルト軸力計測結果

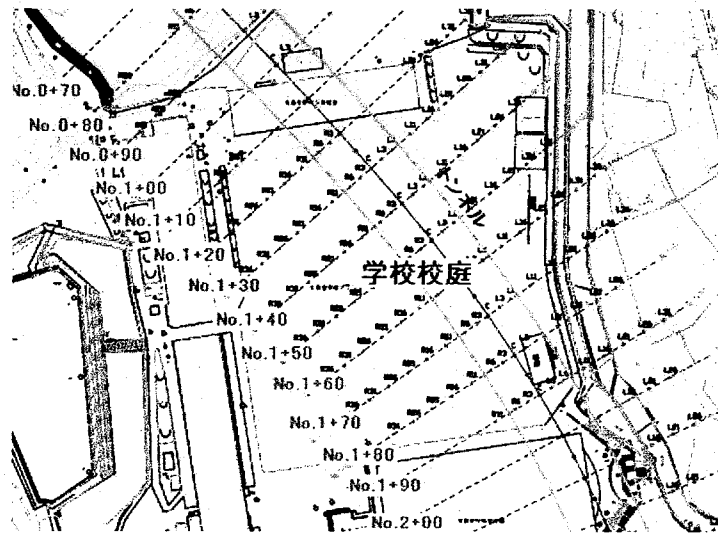


図-14 地表面沈下計測位置

平坦部(No.1+20m~No.2+70mセンター)

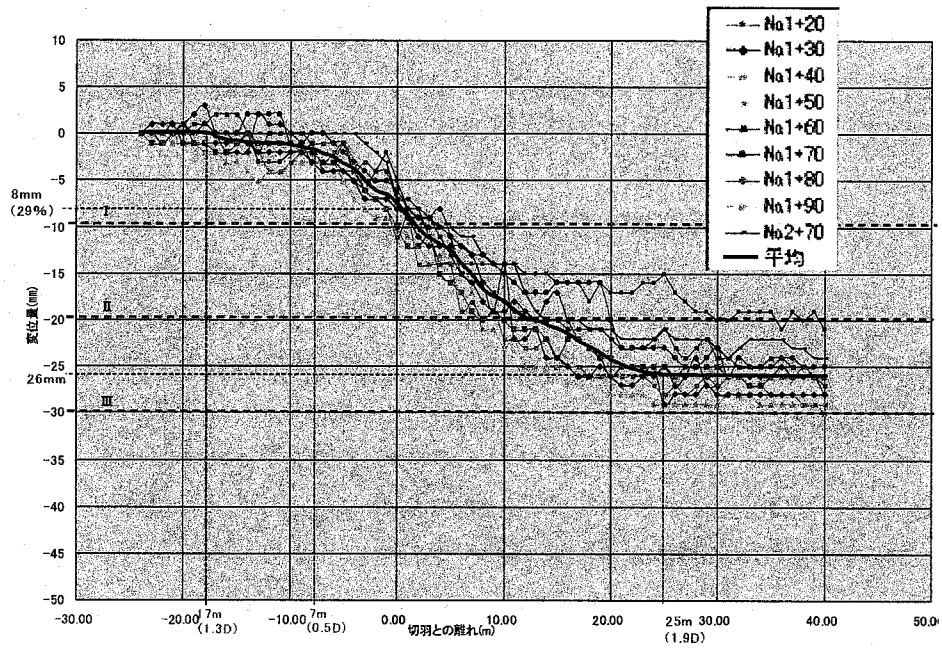


図-16 トンネル横断方向の地表面沈下形状

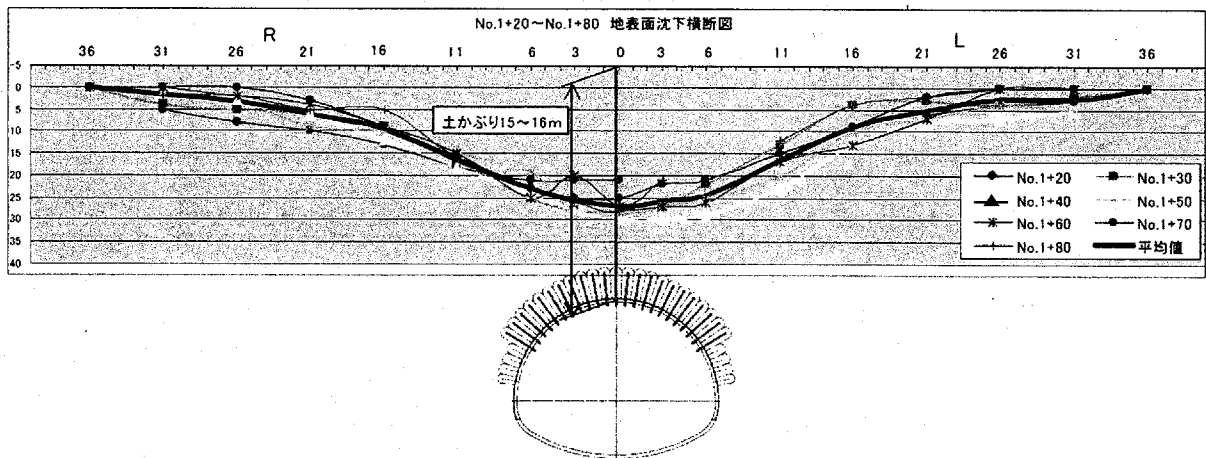


図-16 トンネル横断方向の地表面沈下形状

表-5 A 計測結果の比較

計測項目	地表面沈下(mm)				天端沈下(mm)			
掘削工法区分	上半先進掘削 (No.0+90のみ)		全断面掘削 (No.1+30~80平均)		上半先進掘削 (No.0+80~1+20平均)		全断面掘削 (No.1+30~80平均)	
数値区分	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測
数値	36	(43)	27	28	34	20	26	16
管理基準値	50		30		57			
実測値/管理基準値	86%		93%		35%		28%	
実測値/解析値	119%		104%		59%		63%	

表-6 B 計測結果の比較

計測項目	鋼製支保工応力(N/mm ²)				吹付けコンクリート応力(N/mm ²)				支保工軸力(kN)			
掘削工法区分	上半先進掘削		全断面掘削 開放率60% ()内70%		上半先進掘削		全断面掘削 開放率60% ()内70%		上半先進掘削		全断面掘削 開放率60% ()内70%	
数値区分	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測	解析	実測
数値	82.9	59.5	92.5 (108)	118	1.4	1.3	1.6 (1.9)	1.9	527	378	588 (686)	748
管理基準値	245				18				1,556			
実測値/管理基準値	24%		48%		7%		11%		24%		48%	
実測値/解析値	72%		127% (109%)		93%		119% (105%)		72%		127% (109%)	

ことができた。本稿が、今後の都市部山岳工法発展の一助となることを望む。

謝辞：本工事に際し、「岸谷生麦線トンネルの設計施工に関する小委員会（委員長：今田 徹 東京都立大学名誉教授）」を平成16年末から約2年半にわたり7回開催し、委員の皆様から貴重なご意見、ご指導を賜りました。また、各種解析や委員会資料のと

りまとめにあたっては、みらい建設工業㈱の蛭川氏をはじめとするJVのスタッフに多大なご協力を頂きました。この場を借り、深く感謝の意を表するものであります。

参考文献

- 1) 都市 NATM の設計施工マニュアル, 土木学会関西支部, 1987