

箱型トンネルの全断面掘削

田中 啓之¹・五十嵐 寛昌²・田中 耕一³・横尾 敦³

¹正会員 鹿島建設株式会社 関西支店国道9号線京都西JV (〒615-8085 京都市西京区桂千代原町65)

²正会員 工博 鹿島建設株式会社 土木管理本部 (〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11)

³正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

国道9号の立体交差事業として進められている9号京都市西立体千代原トンネル本体工事において、交通渋滞が激しい交差点部では地上の道路交通へ影響を与えないことが施工条件として求められた。そこで、世界最長となる延長150mのパイプルーフ工を門型に施工し、その内部を掘削（掘削高さ約10m×幅約17m）する工法を採用した。本稿では、この前例のない工法的设计手法並びに計測結果の評価について報告する。

キーワード： 地下道路トンネル, 非開削工法, パイプルーフ工, 設計手法, 計測管理

1. はじめに

国道9号は京都市内を通過する道路として重要な役割を担うものである。しかし、近年の交通量の増大により渋滞が発生するなど、幹線道路としての機能低下が生じている。この交通渋滞の緩和と沿道環境の改善等を図るため、本工事が進められている。

本工事は、延長1.0kmの立体交差化工事のうち千代原口交差点を中心とした延長370mの区間に地下構造の道路トンネルを構築するものである。

特に交通渋滞が激しい千代原口交差点付近では、地上の道路交通へ影響を与えないことが施工条件として求められた。

このような条件を満足するために、パイプルーフによる非開削工法が採用されている。本工事におけるパイプルーフ工法は延長150mであり、世界最長となる。^{1), 2), 3)}

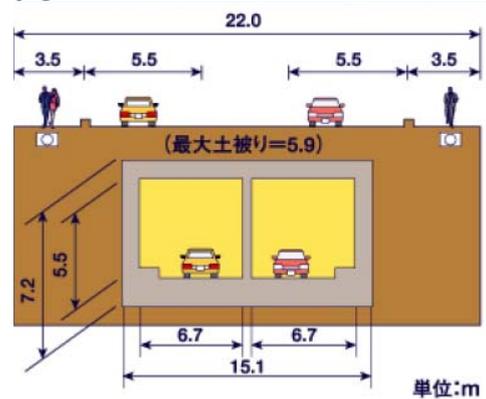


図-2 断面図

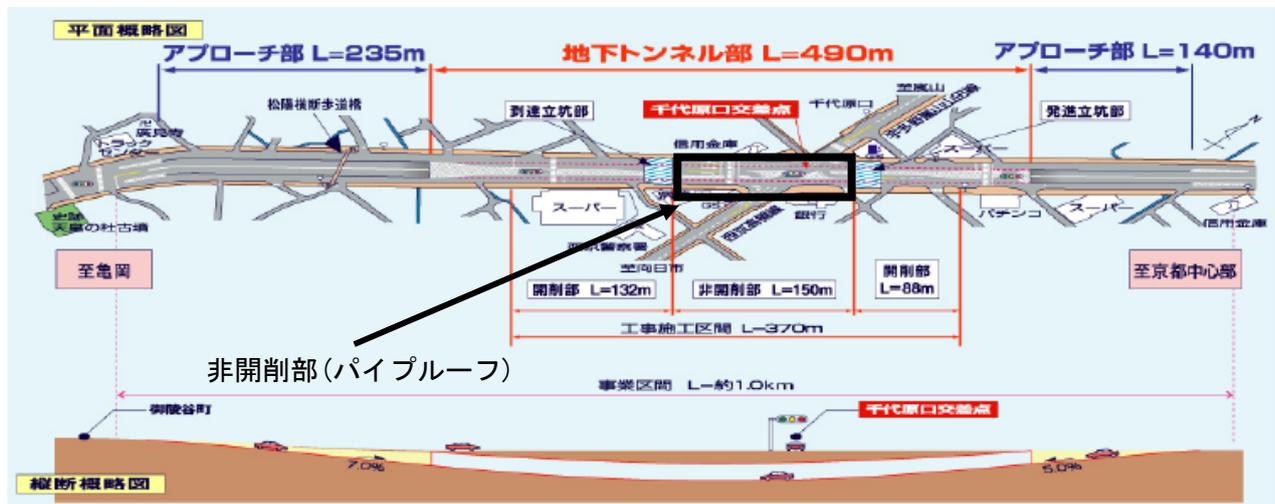


図-1 全体計画図

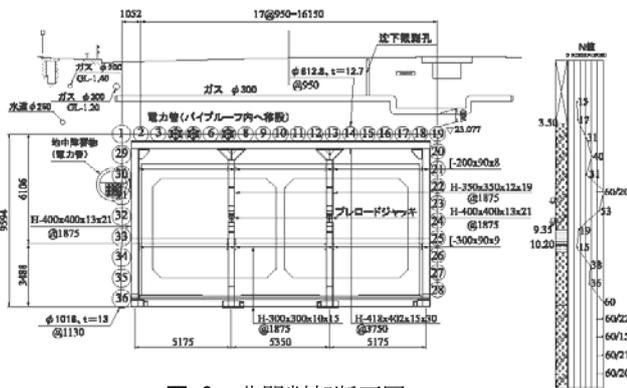
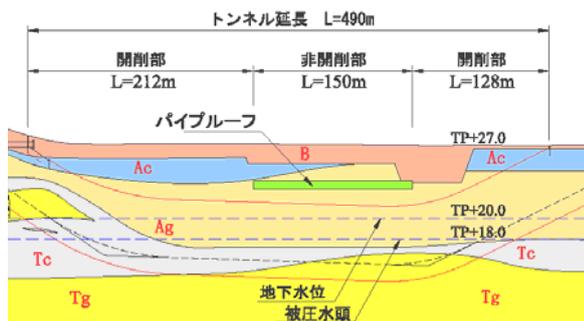


図-3 非開削部断面図



	地質	記号	c (kN/m ²)	φ (度)
沖積層	盛土	B	0	27
	粘性土層	Ac	192	0
	礫性土層	Ag	14	39
段丘堆積物	粘性土層	Tc	295	0
	礫性土層	Tg	30	44

C:粘着力 φ:内部摩擦角

図-4 土質縦断面図

2. 非開削部工事の概要

発進立坑と到達立坑の間にパイプルーフ工（水平部・垂直部 計 36 本）を施工し、トンネル支保工を架設しながら掘削した後、道路構造物を構築した（図-3）。非開削工法では、原則的に地上の道路規制が必要ないため、一般の道路交通へ影響を与えない施工が可能となった。

工事場所の地盤は、最大約30～40cm程度の玉石を含む砂礫地盤（Ag層）が、地表面から9m程度の深さまで分布（図-4）しており、掘削断面の約6割を占めた。また地下水位は地表面より約7mで、施工中はディープウェルにより施工基盤レベル以下に下げる必要があった。さらに、地表面から水平部パイプルーフの土被りは3.5mと小さいため、掘削による地表面へ影響が懸念された。

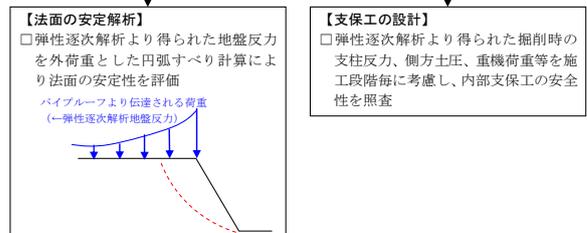
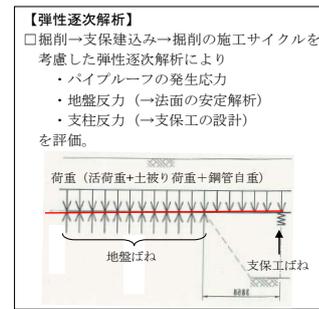
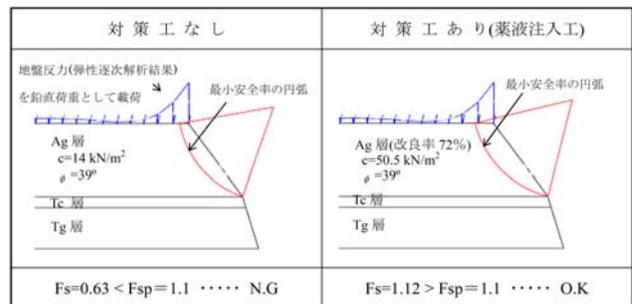


図-5 設計フロー



Fs: 計算安全率, Fsp: 設計安全率

図-6 円弧すべり計算結果

3. トンネル掘削

(1) 支保工と法面安定の設計

掘削時の法面の安定性を評価でき、またパイプルーフの変形量をより正確に評価できる手法として、図-5に示す設計手法を採用した。

支保工を建て込みながら掘削していく施工サイクルを考慮した弾性逐次解析を実施し、パイプルーフ変形および発生応力を評価した。そして、弾性逐次解析によって得られた地盤反力を外荷重とした法面の円弧すべり計算を実施し、法面の安定性を評価した。安定性が確保できない場合は、安定性を確保するために必要な地盤の粘着力、すなわち地盤改良の仕様を評価した。弾性逐次解析より得られた掘削時の支柱反力、側方土圧等を考慮し、支保工の安全性を照査した。

円弧すべり計算結果を、図-6に示す。Ag層を地盤改良することにより、掘削法面が安定することがわかった。

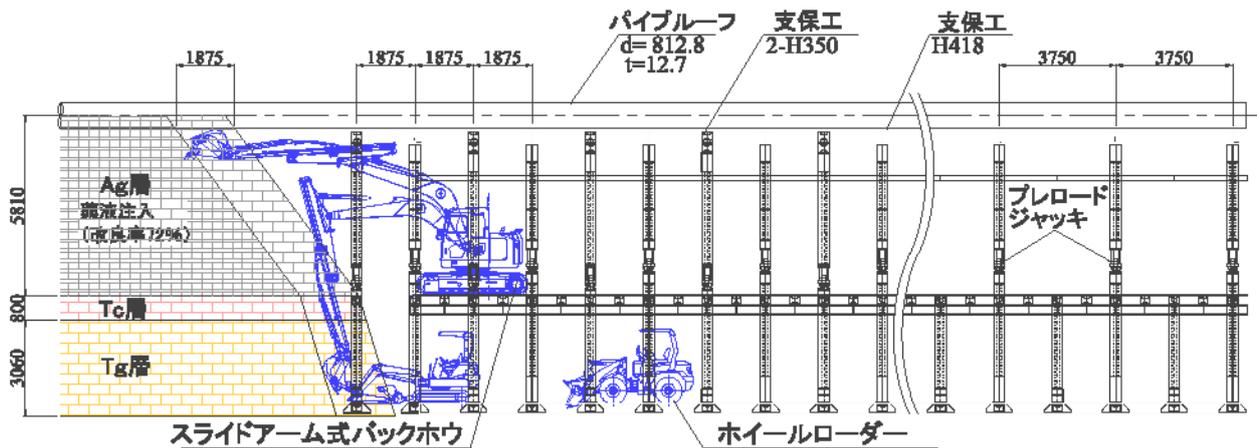


図-7 トンネル掘削施工手順

(2) 施工方法

掘削法面の安定性を確保するため、掘削断面の約6割を占める砂礫層（Ag層）に対して薬液注入工を施工した。支保工は1.875m間隔で設置し、支保工に作用する鉛直荷重が均等化して、土被り相当になった段階で1組おきに支保柱を間引き、最終的には3.75m間隔の支保工がパイプルーフを支持する構造となった（図-7）。

全断面掘削では中間位置に作業ステージを設け、ステージ上のロングアーム付の0.4m³バックホウによって掘削を行った。掘削ズリはステージ下部からホイールローダーによって搬出し、掘削作業とズリ搬出作業を個々の空間で実施することで、作業を効率化できた。

支保工はハンドリングマシン、高所作業車等を用いて設置し、中間支柱に設置したジャッキによりプレロードを行った。

掘削はトンネル両側から実施し、1.875mの掘削、ズリ出し、支保工建込みのサイクルを約2日（昼夜作業）で実施した。

地盤改良工では、大型改良体を造成することで削孔本数を少なくできる二重管ダブルパッカー工法（改良型）を選定した。本施工に先立ち、この施工方法の妥当性を確認すると同時に、施工上の基礎データを取得するため、水平薬液注入試験施工を実施した。この試験施工結果より削孔長は55mに決定した。⁴⁾

また薬液を選定するため、Ag層の現地採取土に各種薬液を混入した供試体の一軸圧縮試験を実施した。施工時の法面の安定上、最低必要とされる粘着力が50.5kN/m²であることから、この条件を満たす薬を選定した。

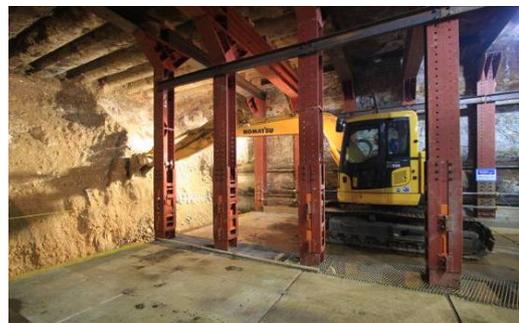


写真-1 掘削工



写真-2 支保工



写真-3 トンネル内全景

表-2 管理基準値

部材	管理値 (単位)	(設計値)	1次管理値	2次管理値	(管理限界値)
パイプルーフ	曲げ応力 (N/mm ²)	(122)	134	151	(168)
	沈下量 (mm)	(40)	40	45	—
中間支柱	軸力 (kN)	(2020)	2294	2580	(2867)
端部支柱	軸力 (kN)	(1068)	2006	2257	(2508)
中間水平桁	軸力 (kN)	(649)	686	772	(858)
(路面)	沈下量 (mm)	(40)	40	45	—

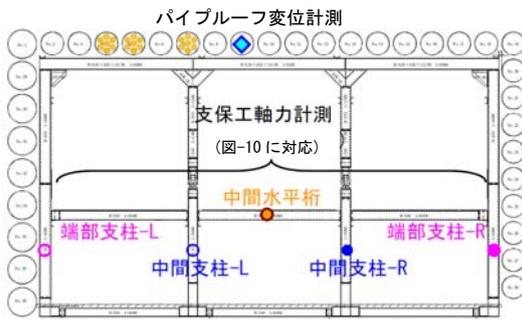


図-8 計測工断面

表-1 計測項目

計測項目	使用計器	型式	数量	備考	目的
パイプルーフ 沈下計測	E Lセンサー		63台	両立坑より2.4m ピッチで設置	パイプルーフの沈下 量・発生応力を監視
支柱 軸力計測	溶接型防水ゲージ (測温機能付)	KM-100B	80台	4箇所×20測線	支柱発生軸力の監視
中間水平桁 軸力計測	溶接型防水ゲージ (測温機能付)	KM-100B	20台	1箇所×20測線	中間水平桁の発生軸力 の確認
路面沈下レベル測量			48点	3箇所×16測線	地表面への影響を監視

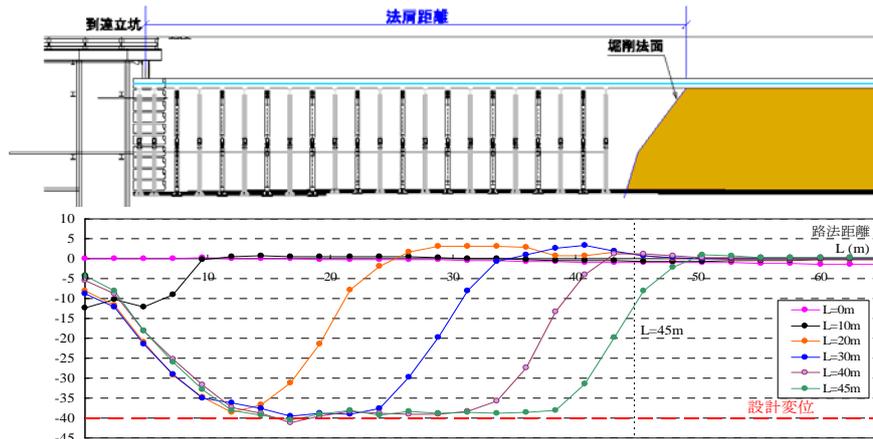


図-9 パイプルーフ変位計測結果

(3) 計測計画

実施工にあたっては、工事に伴う影響を早期に把握し、施工の安全性を確保するために、パイプルーフの変位や支保工軸力を自動計測した。また、地上道路についても10mピッチで沈下測量を実施した(図-8、表-1)。

各部材の曲げ応力、軸力の管理基準値については、短期許容応力度に基づく値を管理限界値とし、その管理限界値の8割、9割の値をそれぞれ1次管理値、2次管理値として設定した。また、パイプルーフ及び路面の沈下量の管理基準値については、明確な基準値がないため、設計時の解析結果や既往の文献に基づき、発注者との協議のもと管理値を設定した。

表-2に設定した管理値を示す。

4. 計測結果⁵⁾

(1) パイプルーフ変位量

パイプルーフの絶対変位は最大で40mm程度となり、設計値と同程度となった。また、掘削面(法肩)から3~4m手前で変位が発生し始め、約10m後方で変位が収束する傾向が見られた。掘削面よりも奥側で若干隆起している部分があるが、この原因は手前で沈下した区間のパイプルーフの反動だと考えられる。一部設計値を超過している部分もあったが、表-2に示す管理基準値以下であり、パイプルーフに発生する応力や地表への影響について問題がなかったため、施工を継続した(図-9)。

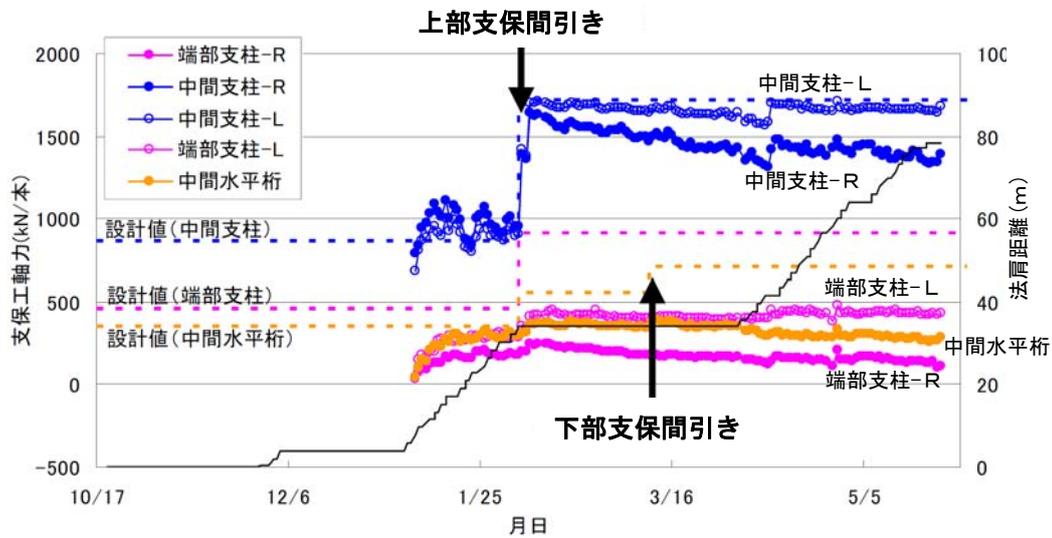
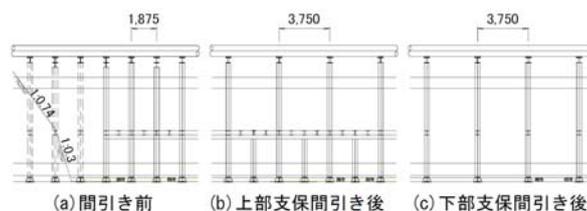


図-10 支保工軸力時系列の一例

表-3 支保工軸力計測結果 (トンネル貫通後)

	状態	設計値 (kN)	計測値(kN)		
			max	min	avr
端部支柱	(a)	460	668	117	351
	(b)	913	689	83	439
	(c)				
中間支柱	(a)	869	1529	465	881
	(b)	1724	1816	556	1502
	(c)				
中間水平桁	(a)	356	495	39	240
	(b)	553	580	176	248
	(c)	711	595	186	298



(2) 支保工軸力

トンネル貫通後の支保工軸力の経時変化の一例を図-10に、支保工軸力計測結果を表-3に示す。

a) 支保間引き前(a)

端部支柱および中間水平桁の軸力値はバラツキがあるものの、平均値は設計値を下回る値となった。また、中間支柱は全体的に設計値前後の値となっており、平均値は設計値と同等であった。

b) 上部支保間引き後(b)

中間支柱については支保を間引いたことにより、荷重が増加した。この荷重は、撤去した支保が負担していた土被り荷重に相当するものであった。一方、

端部支柱および中間水平桁については、支保を間引いたことによる荷重の増加が小さかった。矩形トンネルの中央部に位置する中間支柱には全土被り荷重が作用しているが、端部では地盤のアーチ効果により作用荷重が全土被り荷重よりも小さくなっていることが考えられる。

c) 下部支保間引き後(c)

下部支保を間引いたことにより、中間水平桁の軸力に変化が見られたが、(b)と同様に設計値を大きく下回っており、(b)の状態でもアーチ効果が十分に発揮されているものと考えられる。

5. おわりに

本工事の非開削トンネル掘削の施工実績および計測結果から得られた知見は以下の通りである。

- ①パイプルーフの変位量は設計値とほぼ同等であり、施工時の掘削面も設計勾配で安定を保っていたことから、弾性逐次解析と円弧すべり解析の組み合わせによる設計手法は妥当なものであった。
- ②中間ステージを設け、全断面掘削を実施することにより、合理的な施工が実現できた。薬液注入による地盤改良については、水平注入という技術的に困難な手法であるため、事前に試験施工を実施することにより施工上の基礎データを取得し、実施工へ反映した。
- ③計測結果から、トンネル施工の進捗に伴うパイプルーフの変位や支保への作用荷重が明らかになった。特に、端部支柱では全土被り荷重が作用しておらず、地盤のアーチ効果が確認できた。よって、支保設計においては、このアーチ効果を考慮すれば、さらに合理的な設計が可能となるだろう。

これらの施工実績並びに得られた技術的知見は、今後の同種工事へ適用可能であると考えられる。本稿が参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) Shimada,T. , Yamada,J. , Tanaka,H. , Yokoo,A. , Sahara, F.:Construction of an urban arterial road tunnel by a non-open-cut method using a long pipe roof, ITA World Tunnel Congress, 2009.5.
- 2) Tanaka,H. , Igarashi,H. , Tanaka,K. , Yokoo,A.: Design and construction of an underpass with a piperoof of 150 meters, 4th Japan-China Geotechnical Symposium, 2010.4
- 3) 島田哲博, 玉木秀幸, 山田淳一, 田中啓之:世界最長 150mのパイプルーフで道路立体交差化, (株)土木工学社 トンネルと地下, 第 40 巻第9号, pp.31~41, 2009.9.
- 4) 島田哲博, 田中啓之, 北原英樹, 松永光示:水平長距離削孔による大型薬液浸透注入工の施工実績, 土木学会第 65 回年次学術講演会論文集, 2010.9.(投稿中)
- 5) 島田哲博, 玉木秀幸, 橋本麻未, 田中啓之:長距離パイプルーフによるアンダーパス工事の設計と施工, 土木学会第 64 回年次学術講演会論文集, 2009.9.