

開削工事で露出したシールドトンネルの縁切施工について

SEPARATING METHOD OF SHIELD TUNNEL LINING

EXPOSED DUE TO OPEN-CUT FROM MANHOLE

石川利明¹⁾・笠井靖浩²⁾・河村 隆³⁾・西尾誠高⁴⁾

Toshiaki ISHIKAWA, Yasuhiro KASAI, Takashi KAWAMURA and Masataka NISHIO

It was predicted that the tunnels for electric power lines would be affected by the construction works of the Metropolitan Subway Route No.12 line so close to these one. Therefore, the monitoring system were placed in order to maintain safety of these tunnels. The system consists of stress control, that is to compare the stress originating tunnel lining with an allowable stress. At Roppongi Station of the Metropolitan Subway Route No.12 line, it was predicted that the stress originating tunnel lining adjacent to manhole would exceed the allowable stress. Therefore, the shield tunnel was separated from manhole as measures.

The implementation of the separation was so effective, that the stress of lining was controlled within an allowable stress.

Key Words: shield tunnel, stress control, monitoring

1. はじめに

都心部の地下には、地中送電設備をはじめとし数多くの設備が埋設されており、非常に輻輳した状態となっている。そのため、新たに地下構造物を建設する場合、既設埋設物との近接施工が余儀なくされる。

このような状況にあつて、地下鉄12号線環状部建設工事の8駅舎部で計13本の地中送電用トンネル（以後「洞道」と称す）が近接・交差することとなった。そこで、地下鉄工事の影響を受ける洞道の安全性を確保するため、洞道内に計測器を設置し、その変位・変形量から洞道を構成する部材に生じている発生応力度を推定し、部材の許容応力度と照らし合わせ洞道の安全性を評価する「洞道計測監視システム」⁽¹⁾を構築し、現在運用中である。

これまでのところ、計測対象の13洞道には、特に大きな変状は見られず順調に工事が進められてきており、既に計測を終了している洞道もある。

しかし、六本木駅舎部の駅シールド工事では、シールド発進部直上に位置するマンホールが沈下するため、マンホールと接続している洞道部材の発生応力度が許容応力度を超過するものと予測された。よって、対策工法として、セグメントリング間ボルトを撤去する『洞道の縁切施工』を行った。

以下に、今回実施した洞道の縁切施工方法および縁切施工実施前後の洞道計測結果について報告する。

1) 正会員 東京電力 (株) 銀座支店

2) 正会員 東京電力 (株) 銀座支店

3) 正会員 東電設計 (株) 都市土木部

4) 正会員 間・青木・7147・徳倉・伊藤建設共同企業体

2. 地下鉄工事の概要

(1)地下鉄駅舎と洞道の交差状況

地下鉄12号線六本木駅舎施工区間には、重要地下埋設物が幅横しているため、図-1、2に示すように駅舎両端部の立坑を開削工法で構築し、その間をシールド工法（以降「駅シールド」と称す）で構築する計画で工事が進められている。

駅シールドの発進・到達立坑となる開削部の掘削規模は、発進部で幅20～26m、長さ47m、深さ45m、到達部で幅20m、長さ50m、深さ45mであり、土留め壁は泥水固化壁（厚さ800mm）と路下柱列杭（φ900m）で施工されている。この立坑間を、左右にφ6560、上下にφ1720の回転カッターを有する4心円泥水式シールド機（幅13m、高さ7m）を用いて、土被り27mと36mの位置を上下2段で掘進する。

当社設備との近接状況は、発進立坑部で、外径4.4mの洞道（以降「φ4400洞道」と称す）が約47mに亘って露出され、到達立坑部では、φ3350洞道およびφ4100洞道が約50mに亘って露出される。また、駅シールドは、3号マンホールの直下を上段シールドで2.5m、下段シールドで12mの離隔で掘進し、4号マンホール、φ3350、4100洞道の下部を通過することとなる。

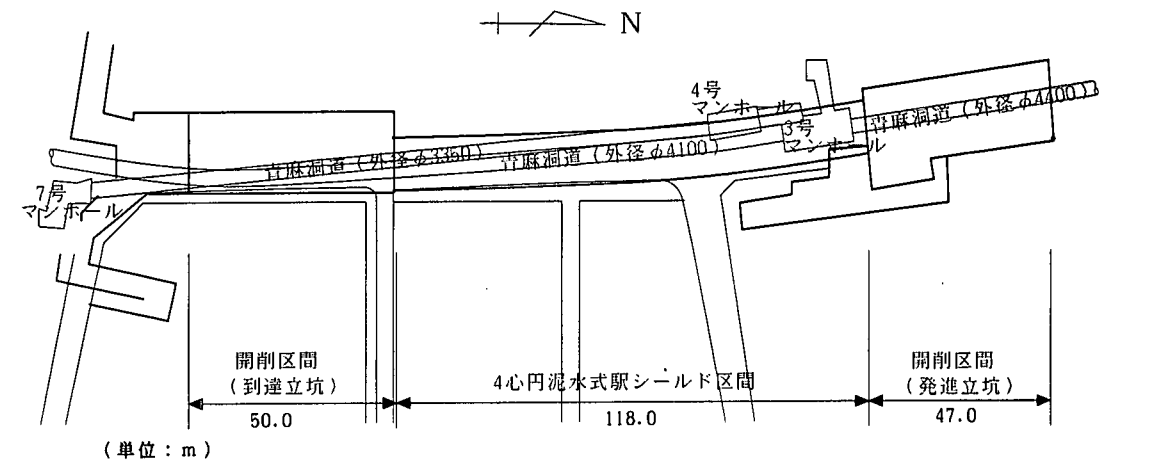


図-1 駅舎平面図

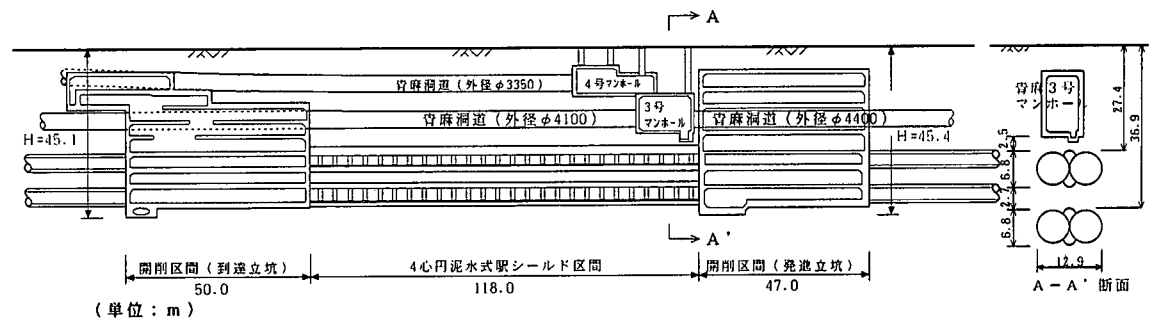


図-2 駅舎縦断面図

当工区で交差・近接する洞道、マンホールの概要を表－1に示す。

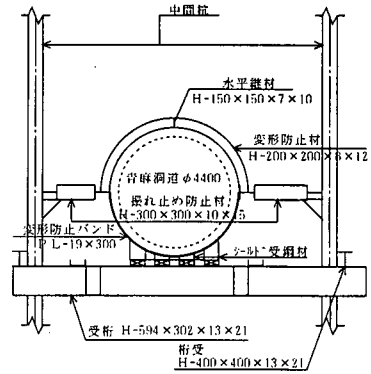
表－1 洞道、マンホールの概要

	3号マンホール	4号マンホール	φ4400洞道	φ4100洞道	φ3350洞道
竣工	昭和45年	昭和45年	昭和45年	昭和45年	昭和45年
形状	外形：(B) 8.7m (W) 17.1m (H) 12.5m	外形：(B) 6.0m (W) 12.5m (H) 8.3m	外径：φ4.4m 内径：φ3.8m (二次巻き無し)	外径：φ4.1m 内径：φ3.5m (二次巻き無し)	外径：φ3.35m 内径：φ2.7m (二次巻き有り)
壁厚	スラブ 1.2m 側壁 1.1m 妻壁 0.8m 底板 1.4m	スラブ 0.6m 側壁 0.6m 妻壁 0.5m 底板 0.7m	セメント：R C 幅 0.8m 桁高 0.3m (中子形)	セメント：R C 幅 0.8m 桁高 0.3m (中子形)	セメント：鋼製 幅 0.8m 桁高 0.125m

(2)洞道の防護状況

発進立坑部では、φ4400洞道が露出した時点で図－3に示すように鋼材を用いた仮受け防護工を行い、地下鉄の躯体となる逆巻きスラブ打設完了後、洞道下部をコンクリートで防護する本受け防護工を行った（土留め妻壁部を除き完了）。また、3号マンホールの下部には、駅シールド通過によるマンホールの沈下対策工である地盤置換工（水平高圧噴射攪拌工）を行い、その後に駅シールド発進防護の薬液注入工（二重管複相注入工）を実施した。

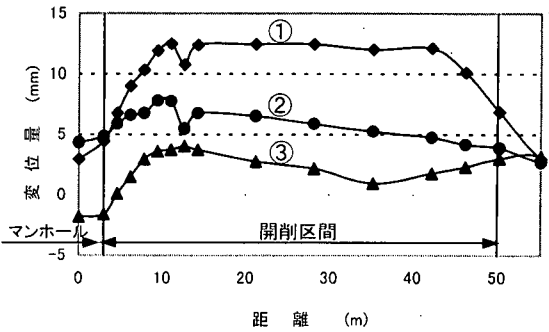
一方、到達立坑部でも、露出したφ3350、4100洞道を、φ4400洞道と同様に仮受け防護工を行い、現在床付け掘削中である。



図－3 洞道仮受け防護

(3)掘削から洞道防護までのφ4400洞道の挙動

掘削から洞道防護までのφ4400洞道の挙動を図－4に示す（計測器の設置位置については後述する）。φ4400洞道は、掘削に伴う地盤のリバウンドにより、図中①のように開削中央部で最大約12mm隆起した。その後、洞道の仮受け防護に伴う洞道下部のすかし掘りにより、洞道は徐々に沈下して受け防護完了時には②のような線形となった。さらに、マンホール下部の地盤改良によるマンホールの沈下影響を受けて、縁切施工直前では③のような線形となった。



図－4 掘削から洞道防護までのφ4400洞道の挙動

3. 洞道の縁切施工の概要

(1)洞道の影響検討

先述したように、リバウンド等の影響に伴う変位・変形により、φ4400洞道部材の応力度は大きく増加したが、今後施工される駅シールド掘進に伴う3号マンホールの沈下により、φ4400洞道とマンホールとの相対変位差が更に増加するため、洞道の安全性が損なわれることが懸念された。

そこでφ4400洞道の縦断方向に対する事前影響検討を行った。以下に影響検討の手順を示す。

はじめに、マンホールの沈下量を2次元弾性FEM解析により予測する。検討断面および地盤物性値を図-5に示す。なお、駅シールドの応力解放率は下式 (1)から算出した。(2)

$$\Delta \sigma = \alpha (\sigma_0 - P) \cdots (1)$$

Δσ：応力解放率

α：補正係数 0.35

σ₀：原地中応力

P：泥水圧

FEM解析結果を表-2に示す。

次に、図-6に示すマンホールとφ4400

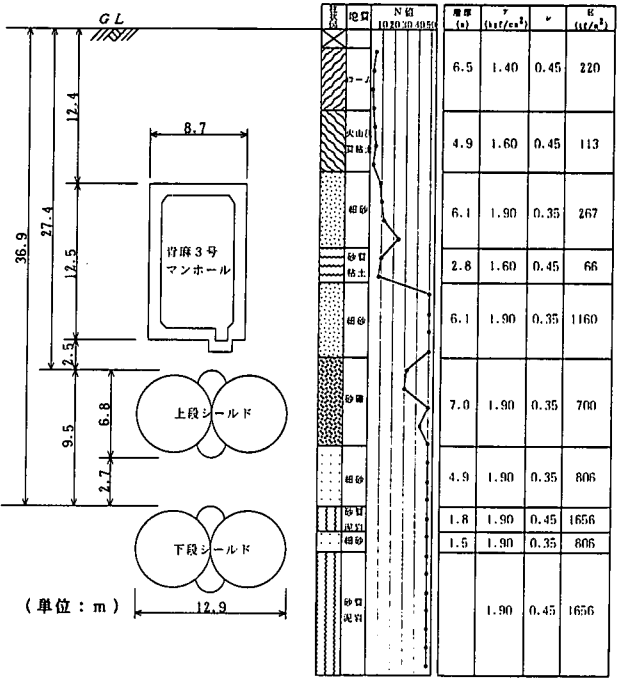


図-5 FEM検討断面および物性値

洞道の接続部を、図-7のように洞道部分を弾性床上の梁にモデル化し、FEM解析で求めたマンホールの沈下量を梁に強制変位として与え、洞道断面力の算定を行い、洞道部材の応力度を求めた。洞道部材の応力度は、リング間ボルトを鉄筋と見なした等価円環断面に洞道をモデル化して算出した。

表-2 FEM解析結果

	沈下量 (mm)
下段シールド通過時	7.8
上段シールド通過時	11.0

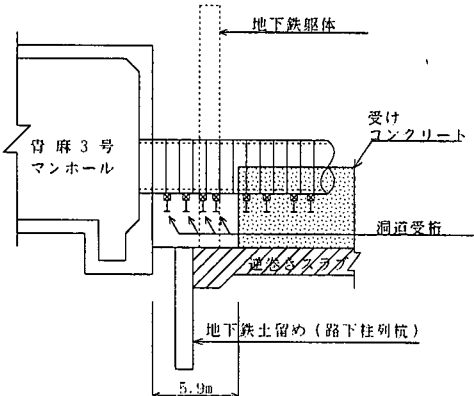


図-6 3号マンホールとφ4400洞道との接続部

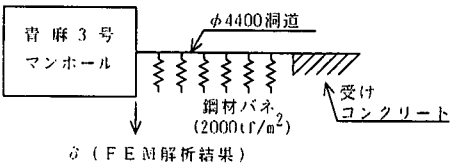


図-7 弾性床上の梁モデル化

以上の検討結果を表－３に示すが、ボルトの曲げ応力度は許容応力度を大きく超過した結果となった。そこで対策工としてマンホールと洞道との縁切施工を行うこととした。

表－３ 検討結果

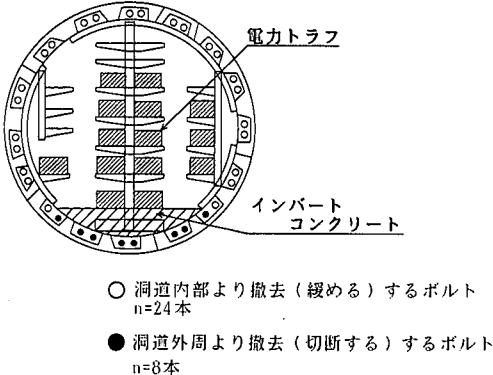
	解 析 値 (kgf/cm ²)	許 容 値 (kgf/cm ²)	判 定
セグメントの曲げ応力度	294	270	×
ボルトの曲げ応力度	24557	2400	×
ボルトのせん断応力度	589	1600	○

(2) 洞道の縁切施工の方法

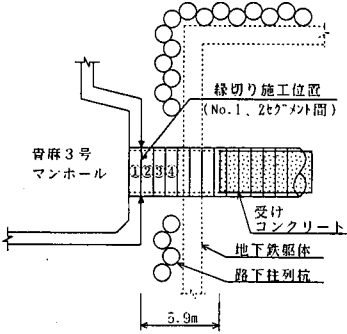
マンホールと洞道との縁切施工は、洞道の一つの断面にあるリング間ボルト32本をすべて撤去または切断する方法で行った。

ボルトの撤去は図－８に示すように、洞道内部から小型の油圧トルクレンチによりナットを緩め、手作業によりボルトを引き抜いた。インバートコンクリートに覆われているボルトについては、洞道外側（洞道が露出しているため作業可能）から、φ５cmのコアボーリングマシンによりボルトの切断を行った。更に、インバートコンクリートについても洞道内部よりφ５cmのコアボーリングマシンを用いてコア抜きし、インバートコンクリートの縁切りも併せて行った。

なお、ボルトの撤去箇所は、図－９に示すマンホール接続部から１リングと２リング目のセグメントリング間とし、縁切施工を行う際は、縁切部前後に設置した計測器の計測データを監視しながら慎重に行った。



図－８ 縁切施工位置（横断面）



図－９ 縁切施工位置（平面）

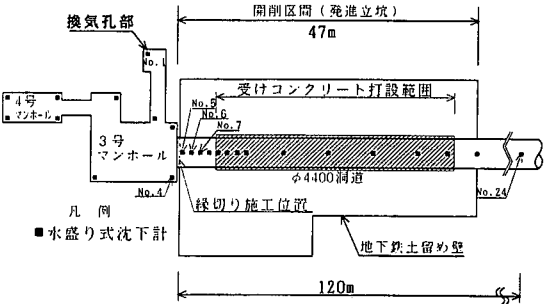
４．洞道の挙動計測

(1) 計測器設置位置

洞道縦断方向の挙動を計測するため、図－１０に示すようにφ４４００洞道および３号マンホール内に水盛り式沈下計を設置した。この沈下計の設置間隔⁽³⁾は、事前に解析を行い洞道の変形が大きく発生すると予測される箇所に密に設置した（設置間隔１．６ｍ～２０ｍ）。

洞道の縁切箇所は、図－１０に示すマンホールに設置した計測器No.４と、φ４４００洞道に設置した計測器No.５との間である。

なお、基準点は地下鉄の施工影響を受けないと考えられる３号マンホールに隣接した換気孔部に設置している計測器No.１とした。



図－１０ 計器設置位置図

(2) 計測結果

縁切施工箇所付近に設置した沈下計No. 4～7の経時変化を、縁切施工を行った日を0日として図-11に示した。No. 4はマンホール内に、No. 5～7は洞道内に位置している。

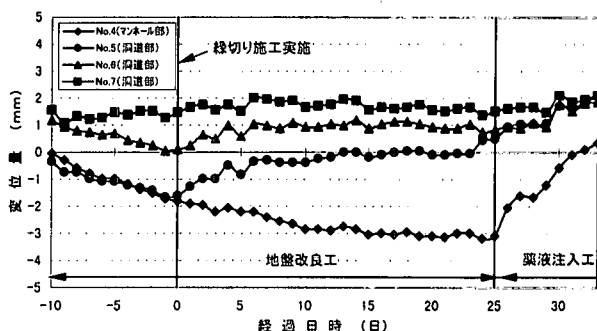


図-11 縁切施工前後の洞道とマンホールの計測結果

この期間の地下鉄工事は、3号マンホール下部の地盤改良工と、発進部の薬液注入工であり、縁切施工は地盤改良工の途中で行われた。この図から洞道とマンホールの縁切前は、地盤改良工によるマンホールの沈下に追随し、φ4400洞道内の計測器No. 5, 6も沈下する挙動を示していた。しかし、縁切施工後は、マンホール内の計測器No. 4のみが沈下し、φ4400洞道内の計測器

No. 5, 6は徐々に隆起した後に一定となる挙動が計測された。この原因としては、縁切施工を実施する前はφ4400洞道がマンホールの沈下につられて沈下していたが、縁切したことにより洞道に働く下向きの力が解放され、このような挙動を示したものと考えられる。さらに、施工後急激に洞道が隆起せず徐々に隆起した原因としては、セグメントリング間に作用する摩擦抵抗力が働いたものと考えられる。また、その後実施された3号マンホール下部におけるシールド発進部の薬液注入工において、マンホール内の計測器No. 4のみが大きく隆起したのに対し、φ4400洞道内の計測器No. 5, 6にはほとんど変化が見られなかった。なお、φ4400洞道のリング間ボルトの曲げ応力度は、縁切施工前は 2200kgf/cm^2 であったが、縁切施工後は洞道区間の曲げ変形(曲率)が緩和されたことから、曲げ応力度は 1850kgf/cm^2 と約16%減少した。

以上のことから、今後施工される駅シールドの掘進に伴い、3号マンホールが解析通り沈下しても、φ4400洞道にはその影響が及ばないものと考えられる。

5. おわりに

今回、これまで行われたことがない洞道リング間ボルトの縁切施工を、比較的簡単な方法で安全に施工できることが確認できた。また、開削工事に伴うリバウンドや地盤改良工事の影響を受けた洞道の応力を緩和する対策工として、縁切施工が有効であることを示した。今後は、シールド発進に伴うマンホールと洞道の挙動を分析し、縁切施工の適用性を評価していきたい。

最後に、本工事に際しご指導頂いた関係諸氏に感謝するとともに、本編が今後の都市土木での参考になれば幸いである。

(参考文献)

- (1) 新津・小林・河村・小室：地下鉄開削工事に近接する既設洞道の計測監視, トンネルと地下, 1997. 11
- (2) 中山・中村・中島：泥水式シールド掘進に伴う硬質地盤の変形解析について, 土木学会論文集, 1998. 9
- (3) 前川・伊藤・井出：掘削工事中に生じる近設トンネルの断面力推定のための計測配置に関する一方法, 土木学会第47回年次学術講演会, 1992. 9