

縦2連分岐式シールド工法（H&Vシールド工法）

姿勢制御に関する施工報告

A Constructing Report about Posture Control of Horizontal Variation and Vertical Variation Shield Tunnel

北本 正弘*

Masahiro Kitamoto

要 約

東京都下水道局発注の南台幹線工事において、仕上り内径 ϕ 2,400mmと ϕ 2,000mmの2本の集水管を発進から160.4m区間で上下に並列し、その後別方向に布設するため、縦2連分岐式泥水シールド工法（H&Vシールド工法）により築造を行った。

H&Vシールド工法は、円形断面を接合した複円断面としたシールドをらせん状に移行したり、2連形トンネルから円形単独トンネルへの分岐が可能で、占有幅の低減や中間立坑の省略による工期短縮、コスト低減を図る工法である。

本工事では、縦2連での曲線半径 $R=15m$ の急曲線施工、機械式地中分岐など前例のない施工を行った。

本報は、縦2連分岐式泥水シールド工法の概要および急曲線施工における姿勢制御に関して報告するものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要および土質概要
- § 3. 縦2連分岐式泥水シールド
- § 4. 縦2連シールド姿勢制御結果について
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

東京都下水道局では、中野区本町付近から杉並区堀之内付近までの善福寺川および神田川沿いの地域における都市型浸水被害を解消するため、豪雨時に降った雨の一部を一時的に溜める大深度雨水貯留システム（和田弥生幹線関連事業）の建設を行っている。

この事業の一環である南台幹線は、豪雨時に雨水の一部を和田弥生幹線に集水貯留する集水管と、和田弥生幹線に貯留した雨水を排除する連絡管の役割を持っている。

南台幹線その2工事は、吐出施設となる発進立坑から約160mの区間を上下に並行した後、別方向に分かれる集水管2本（南台幹線と主要枝線）を縦2連分岐式泥水シールド工法（H&Vシールド工法）で築造するものである。

本報は、縦2連分岐式シールド工法の概要と曲線施工（最小曲線半径 $R=15m$ ）における姿勢制御について報告する。

§ 2. 工事概要および土質概要

2-1 工事概要¹⁾

南台幹線その2工事は、杉並区和田二丁目から中野区南台五丁目までの幹線流域を集水する南台幹線（仕上がり内径2,400mm）と、杉並区和田二丁目から方南二丁目までの周辺流域の雨水を集水する主要幹線（仕上がり内径2,000mm）の2本の集水管を外径 ϕ 3,290mmおよび外径 ϕ 2,890mmの泥水シールド工法で築造する。

発進立坑から2本のシールドが並行する約160mの区間の施工方法について、縦2連分岐シールドと上下単独シールドとの比較検討が行われた。その結果、縦2連分岐シールドは、2機のシールドが接合した状態で掘進し、分岐位置で地中分離することが可能であることから工期の短縮が図れ、かつ工事費の低減が図れるなどの理由により、縦2連分岐式シールド工法（H&Vシールド工法）が採用された。

南台幹線および主要幹線の平面線形を図-1に示す。縦2連時の平面線形は、曲線半径 $R=15m$ が2箇所、 $R=20m$ 、 $R=100m$ が1箇所ある。分岐後、南台幹線は、区

*関東（支）南台（出）

表-1 工事概要

工事件名	南台幹線工事, 南台幹線その2工事
工事場所	東京都杉並区方南一・二丁目, 中野区弥生町六丁目, 南台五丁目
企業先	東京都下水道局
工事期間	南台幹線工事（発進立坑築造, 管路の一部） 平成10年1月5日～平成11年3月31日 南台幹線その2工事 平成11年4月1日～平成12年5月11日
工事内容 （管路関係）	<p>円形管内径φ2,400mm：南台幹線 シールド外径 φ3,290mm セグメント外径 φ3,150mm 最小曲線半径 R=15m 最大土被り 24.1m 掘削延長 730.45m 勾配 4.5‰上り, 2.5‰上り</p> <p>円形管内径φ2,000mm：主要枝線 シールド外径 φ2,890mm セグメント外径 φ2,750mm 最小曲線半径 R=15m 最大土被り 27.3m 掘削延長 923.50m 勾配 4.5‰上り, 3.2‰上り</p>

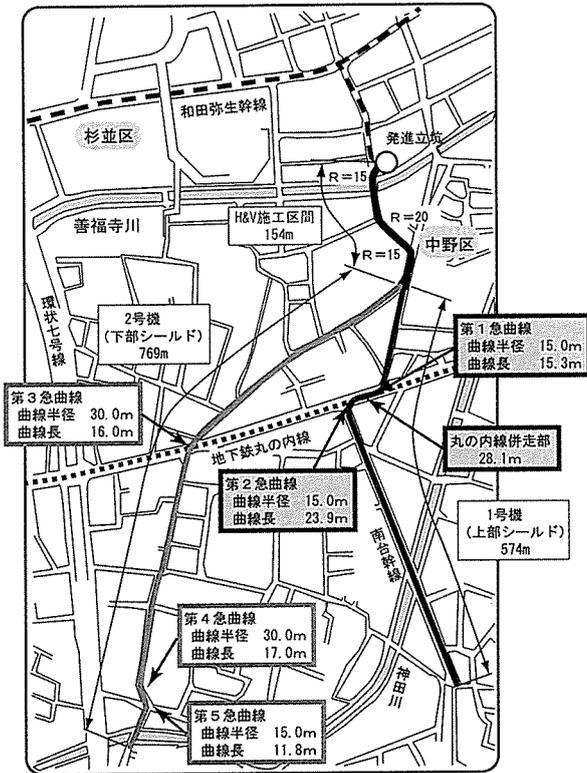


図-1 路線平面図

道の下を通り、方南通りに入り営団丸ノ内線の下を離隔約10mで約50m併走し、神田川を横断し到達立坑に至る総延長728mの区間である。

一方、主要枝線は、区道の下を通り、営団丸ノ内線の下を離隔約15mで横断し、神田川を横断して到達部に至る総延長923mの区間である。

2-2 土質概要

南台幹線の土被りは15~24mで、掘進対象土質は発進部からN=14~50と非常に締まった細砂、礫混じり細砂、シルト質細砂である。図-2に南台幹線の地質縦断面図を

示す。

主要枝線の土被りは18~27mで、掘進対象土質は、発進部から礫混じり細砂、シルト質細砂（N=25~50）である。

間隙水圧は、ほぼ静水圧分布に近く150~190kN/m²である。また、透水係数は、細砂で10⁻³cm/sのオーダー、砂礫で10⁻²cm/sのオーダーを示している。

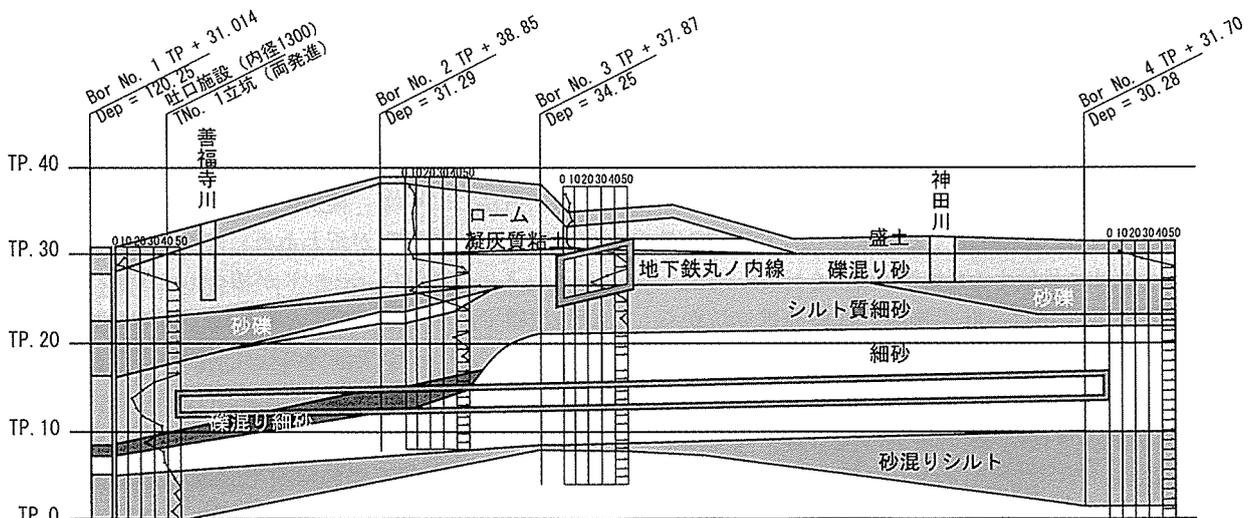


図-2 南台幹線ルート地質縦断面図

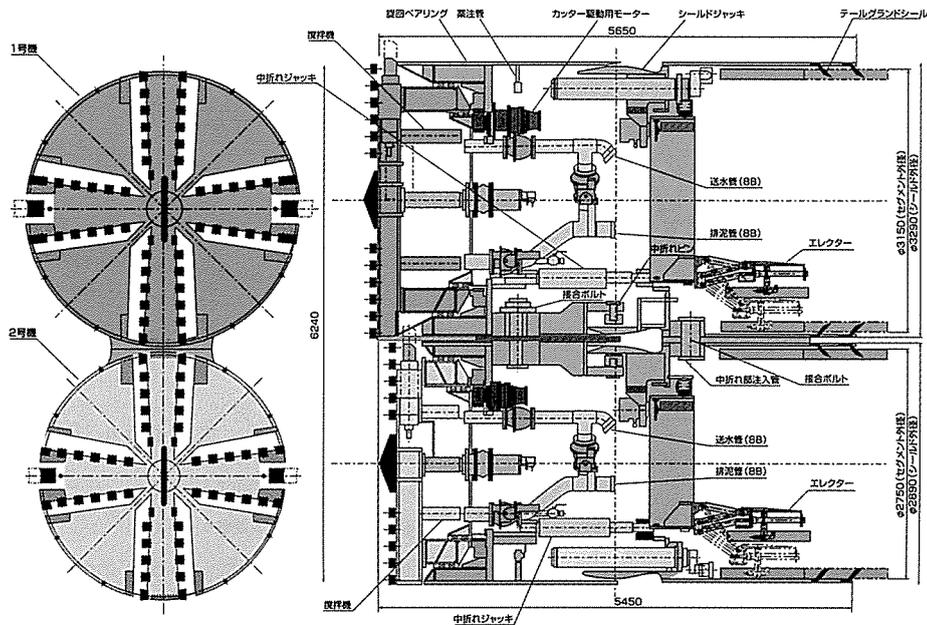


図-3 縦2連分岐式泥水シールド機の構造図

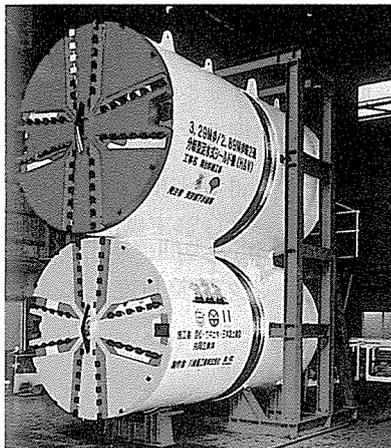


写真-1 シールド機全景

表-2 縦2連分岐式泥水シールド機仕様

	上段シールド	下段シールド
外径	φ 3,290mm	φ 2,890mm
機長	5,650mm	5,450mm
シールドジャッキ	100T×1,150mm×10本	80T×1,150mm×10本
中折れジャッキ	100T×585mm×8本	80T×500mm×8本
中折れ角	左右 13.0° 上下 1.0°	
カッター回転数	0~1.8rpm	0~2.0rpm
装備トルク (トルク係数)	常用 37T-M (α=1.04) 最高 56T-M	常用 25T-M (α=1.04) 最高 38T-M
スリット幅 (開口率)	200mm (23%)	200mm (25%)
コピーカッター	15.8T×150mm×2台	15.8T×210mm×2台
テールシールド	ワイヤーブラシ+板バネ×2段	

§ 3. 縦2連分岐式泥水シールド

3-1 H&Vシールド工法の特徴

H&Vシールド工法は、2つの円形断面シールドを接合した複断面シールドをらせん状に掘進することや、分岐したりすることを可能としたシールド工法である。H&Vシールド工法の主な特長を以下に示す。

- ①独特のローリング機構 (アーティキュレート機構) により、縦2連、横2連で安定したシールド掘進ができる。
- ②横並列から縦並列へと断面形態の変化するスパイラルトンネルの構築ができる。
- ③シールドを地中で分岐することにより、立孔を設けずに分岐トンネルの構築ができる。

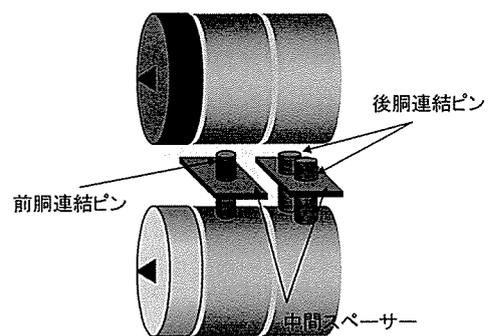


図-4 マシン接合部構造図

3-2 縦2連分岐式泥水シールド機

縦2連分岐式泥水シールド機の構造を図-3に、シールド機全景を写真-1に、仕様を表-2に示す。縦2連分岐式泥水シールドは、φ 3,290mmの上部シールド (南台幹線) と φ 2,890mmの下部シールド (主要枝線) を図-4に示すようにスペーサを挟んで、前胴・後胴それぞれを連結ピンで連結している。

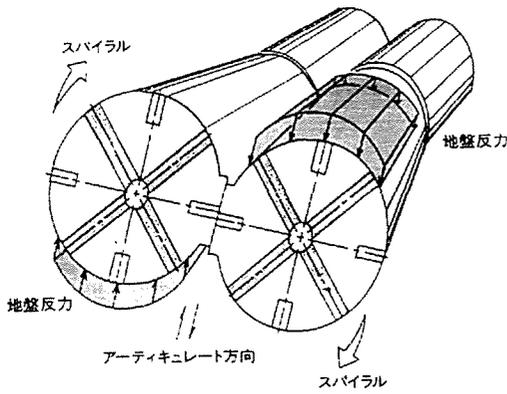


図-5 クロスアーティキュレート機構

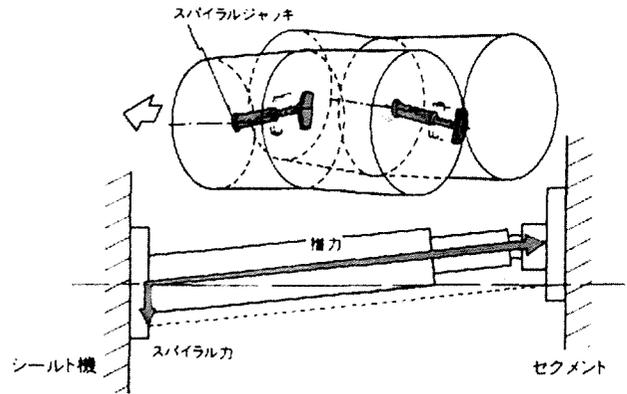


図-6 スパイラルジャッキ機構

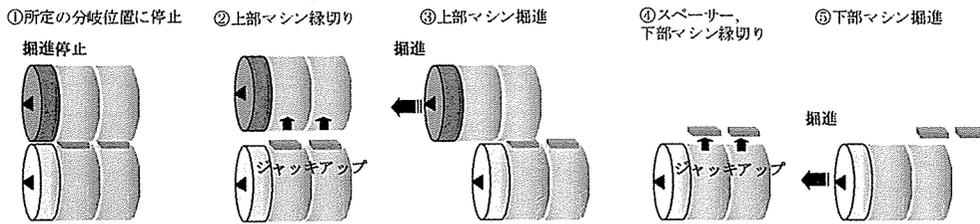


図-7 分岐手順

(1)姿勢制御（H&V機構）

①クロスアーティキュレート（相対中折れ）機構

クロスアーティキュレート機構とは、2つの前胴が相反する方向へ中折れする機構である。これにより各々の前胴に相反する方向の地盤反力が作用し、発生する回転力によりローリング制御を行う。機構概念図を図-5に示す。

なお、2つの前胴間の連結ピンはスライド可能とし、2つの前胴が分離することを防止している。

②スパイラルジャッキ

スパイラルジャッキは、シールドジャッキをシールドの進行方向に対し円周方向へ偏心させたもので、ジャッキ推力の回転する方向への分力により、シールドローリング力を発生させるものである。図-6に概要を示す。

クロスアーティキュレート機構に比べ回転力は小さく、相対位置等の細かい姿勢制御に使用する。上下シールドともに4本のスパイラルジャッキを装備した。

(2)カッターディスク

中間スペーサ部分の切削は、下部シールドのコピーカッター（ストローク210mm）で行う。このため、下部シールドのコピーカッターと上部シールドのカッタービットが接触しないように上下シールドの面盤は200mmの段差をつけ、さらに、上部シールドのチャンパの下は、下部シールドのコピーカッターを収納するために切り欠きを設けた。

(3)分離機構

地中分岐の手順は、連結ピンを取り外し、その穴にシールドのスキンプレートとスペーサの付着を取るためジャッキボルトを挿入し、上部シールドが先に分岐発進す

る。その後、下部シールドとスペーサを分離し、スペーサを地中に残置し下部シールドが掘進する。分岐概要を図-7に示す。

(4)急曲線対応

縦2連掘進時に最小曲線半径15mの急曲線施工があるため、装備中折れ角はローリング調整角度を加えた13degと通常よりも大きくした。

3-3 セグメント

縦2連区間におけるセグメントは、一般部と同様に上下全く分離したスチールセグメントを使用した。

上下のセグメントには、設計上300mmの離隔がある。この間の地山はすでにコピーカッターにより切削されているので、浮力により下部のセグメントが持ち上がる恐れがあるため、上部セグメントリングの底部に袋付きセグメントを採用し、上下のセグメントリングの離隔を確保することとした。

§ 4. 縦2連シールド姿勢制御結果について

今回の縦2連シールド区間では、急曲線が3ヶ所（ $R=15m:2ヶ所, R=20m:1ヶ所$ ）あり、シールドの姿勢、特にローリング制御が重要な課題であった。

4-1 ピッチング、ヨーイング

上部シールドの径が下部シールドより大きな縦2連という形状から急激なピッチング変化が懸念されたため、上下中折れ機構を装備した。

ヨーイング制御は、単円シールドと同様の左右中折れ

機構とジャッキ選択による制御を行った。

急曲線R=15m施工時のピッチング角の状況を図-8に、上部セグメントの計画線からの変位量（上下，左右）を図-9に示す。

セグメントの上下変位量が、35リングで30mm変化し、50リングまで+30~+52mmの間で推移している。この変化は、25~35リングにおいて、ピッチング角が0.2degと大きく変化したことが、その地点でのセグメント組立てに直接影響していることを示している。急曲線区間のセグメント幅は300mmであり、シールド先端（前胴長2,800mm）位置での組立ては9リング後となる。

発進からR=15m区間では、セグメントの左右変位量は急激な変化はなく、±0~-49mmの間で推移している。

急曲線R=15m施工でのピッチング、ヨーイング変位管理値はともに±50mmであり、ほぼ満足できる結果であった。

4-2 ローリング

ローリング制御方法は、施工性を考慮し、カッター回転方向選択を優先し、制御が困難となった場合に、H&V機構のクロスアティキュレートを使用し、次にスパイラルジャッキを使用することとした。

図-10（I）（II）（III）に急曲線R=15m施工時のローリング角，相対中折れ角，平均中折れ角を示す。

R=15m施工時のローリング角の管理目標値を±0.5 degとした。これは、上下シールドがローリング1.0degでは、セグメントとマシンテール部のクリアランスが設計上0mmとなり、セグメント組立に支障となることを考慮して設定した。

急曲線が開始する15リング掘進時にローリング角が0.27deg変化し、平均中折れ角を変えることなく2リングで0.77 degの相対中折れ角とし、ローリングの進行を抑制した。その後は、シールド機の変化が中折れ操作より数リング遅れる実験結果⁹⁾を参考に、制御はローリング角の変化を確認しながら相対中折れ角の調整を行った。40リング以降は、線形が曲線区間から直線へ移行するため、掘進の方向性とテールクリアランス管理に重点を置き、急激な姿勢変化をさせないようにクロスアティキュレートの使用には慎重を期し、極力使用を控えるように、面盤回転制御のみによりローリング修正することが可能であった。

22リングにおいてローリング角に大きな変化はないが相対中折れ角を急激に小さくしているのは、前胴連結ピンに過大な荷重が作用したためである。

前胴連結ピンには、クロスアティキュレート，かつヨーイング，ピッチング制御により，大きな荷重が作用することが想定された。そのため歪ゲージを取り付け，ピンに作用する荷重を常に監視し，管理値以上の作用荷重が作用した場合に，即座に掘進停止するようインターロック機能を装備した。

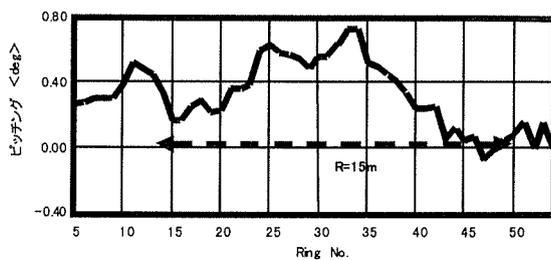


図-8 ピッチング角状況

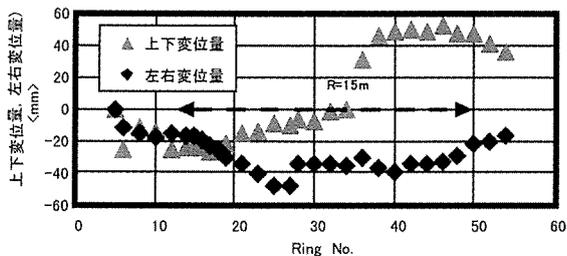


図-9 上部セグメントの計画線からの変位量

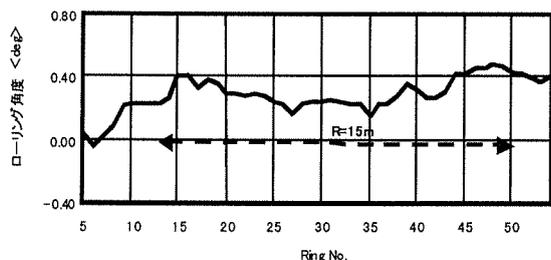


図-10（I） ローリング角

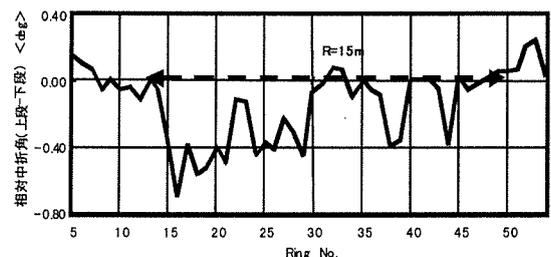


図-10（II） 相対中折れ角
（上部中折角-下部中折角）

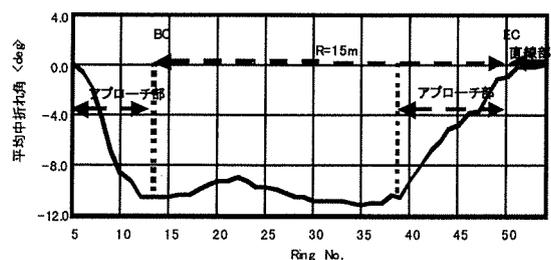


図-10（III） 平均中折れ角

当初は管理値を許容荷重の50%以下に設定したが、停止することが多く著しく施工に影響がでたため、管理値を80%に上げた。特に平均中折れ角が10.0度以上となる急曲線区間では、クロスアーティキュレートの使用により、ピンに作用する荷重が増大し、掘進に影響することがたびたびあった。

次に、曲線施工部（ $R=100$, $R=15$ ）におけるローリング変化量 $R(n) - R(n-1)$ と相対中折れ角差 $\theta_U(n) - \theta_L(n-1)$ の関係を図-11に示す。

直線でのローリング施工実験結果⁹⁾によると、ローリング角変化量と中折れ角度差にほぼ相関関係が成立するとのことであったが、曲線施工においてはばらつきが大きく良好な相関性はみられなかった。

$R=100$ mに比べて $R=15$ mにおいてばらつきが大きい理由としては以下のことが考えられる。

- ①急曲線施工時のテールクリアランスの低減によりシールドスキンプレートとセグメント間の摩擦抵抗が増大し、回転力の発生への影響が大きい。
- ②シールドが平面的に屈曲した中折れ状態が、回転力の効果へ影響を与える。
- ③中折れ状態でのピッチング変化やヨーイング制御のジャッキ選択操作などが、ローリング修正に影響を与える。
- ④急曲線では余掘りを大きくしているため、面盤回転方向反転によるローリング修正効果が大きくなり、その影響が考えられる。

6. おわりに

今回の施工における大きな特長の一つは、縦2連形状での急曲線施工（ $R=15$ m）であり、過去に経験がないため、手探り状態での試行錯誤となった。姿勢方向制御では、ピッチング、ヨーイング、ローリング、上下シールドのテールクリアランスなどパラメータが非常に多い中で、常にバランスをとりながら、クロスアーティキュレート、中折れ角、セグメントテーパ量などの設定の方向性を探らなければならなかった。特にローリング制御に関しては、クロスアーティキュレートのタイムラグ特性を考慮した施工を求められるなど、留意すべき点が多く、発進直後の急曲線（ $R=15$ m）については非常に苦労をしたが、その後の $R=15$ m, $R=20$ mの施工においては、その経験を生かし無事に施工を終えることができた。

また、世界初の2連からの地中分岐や、分岐後の単円シールドでの地下鉄構築への近接施工など、厳しい条件での施工であったが、両シールドとも無事到達することができた。

最後に、本工事の施工にあたりご指導、ご協力をいただいた関係者各位に深く感謝致します。

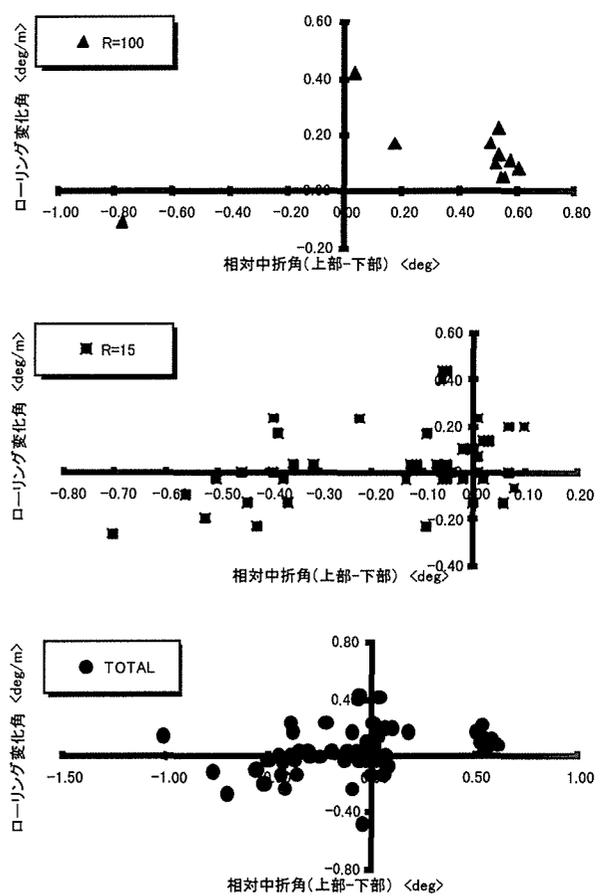


図-11 相対中折れ角度差とローリング角変化角

参考文献

- 1) 高橋文行, 増田光, 西松好郎: 世界初縦2連分岐式泥水シールド—東京都下水道局南台幹線工事—, トンネルと地下, Vol.30, No.7, pp.37-43
- 2) 田中秀明, 久原高志, 尾崎仁, 野口隆, 中村稔: H&Vシールド工法実証実験工事, 土木学会, トンネル工学研究発表会論文・報告集第1巻, pp.249-254, 1991.
- 3) 松本清治郎, 永澤幸彦, 上田昭郎, 大友充, 京力裕文, 内田博茂: 縦二連シールド機のローリング施工について, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集 (IV-102), pp.204-205, 1997.