

# 二次覆工一体型 4 分割 3 ヒンジセグメント の開発と設計手法の提案

前田 正博<sup>1</sup>・串山 宏太郎<sup>2</sup>・松浦 将行<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京都下水道局 流域下水道本部長(〒190-0022 東京都立川市錦町 1-7-26)

E-mail : m\_maeda01@gesui.metro.tokyo.jp

<sup>2</sup>東京都下水道局 建設部長(〒163-8001 東京都新宿区西新宿 2-8-1)

E-mail : k\_kushiyama01@gesui.metro.tokyo.jp

<sup>3</sup>正会員 東京都下水道局 建設部設計調整課長(〒163-8001 東京都新宿区西新宿 2-8-1)

E-mail : m\_matsuura01@gesui.metro.tokyo.jp

東京都では、下水道再構築事業の中核をなす主要枝線整備に適した、「二次覆工一体型 4 分割 3 ヒンジセグメント」を用いるシールド工法を開発し、実用化するに至った。このセグメントは従来のセグメントと全く異なる構造であるため、種々の設計法について検討を進め、新しい構造系に適した設計法を提案する必要があった。そこで、実物大の供試体を用いた載荷試験を実施し、提案する設計法の妥当性を検証した。その結果、はりばねモデル計算法により、ヒンジ部の回転ばね定数をゼロ、剛結合部は本体と同等の曲げ剛性とし、リング継手のせん断ばね定数に試験結果を用いる本設計法は概ね妥当であることが確認された。

**Key Words** : compact shield tunneling method, 4-part 3-hinge structure, combined secondary linings

## 1. はじめに

東京都では管渠の老朽化や汚水量・雨水流出量の増大に対応するため、下水道再構築事業の推進が急務となっている。幹線に導くために新設される主要枝線は下水道再構築事業の中核をなすものであり、対象流域より汚水・雨水を集めることから、比較的浅い深度に設置され、さらにカバーする流域面積から小中口径のものが多く、

主要枝線の新設方法は、地下埋設物の幅転や路上交通への影響を考慮すると、非開削工法が前提となる。また、長距離施工や急曲線施工が多いことから、シールド工法による場合が多い。

東京都では、厳しい財政状況下において下水道再構築事業を進めるにあたり、「建設費の縮減」「環境への影響低減」「維持管理の効率化」という課題を設け、検討を進めてきた。検討の結果、「4分割3ヒンジ構造のインバート溝付き二次覆工一体型セグメント(以下、コンパクトセグメントと称す、写真-1)」を提案するとともに、従来のシールド施工システムを根本から見直すこととし、「コンパクトシールド工法」として開発し、実用化するに至った。

下水道トンネルに用いるシールド工用標準セグメント<sup>1)</sup>は、セグメント継手の性能として、単体の抵抗モーメントに対して 60%以上の抵抗モーメントを有することが規定されている。これに対して、コンパクトセグメントは、セグメント継手にヒンジ構造を導入し、静的に安定なトンネル構造(3ヒンジ静定構造)を提案している。

このように、コンパクトセグメントは従来のセグメン

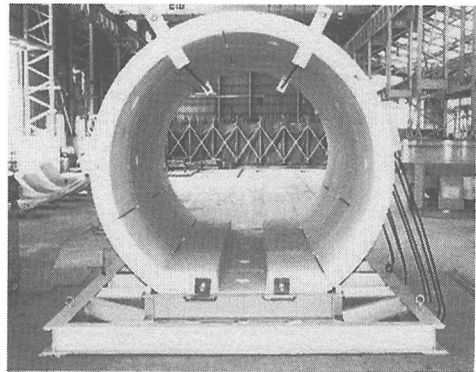


写真-1 コンパクトセグメント

トと全く異なる構造を提案しているため、この構造系に適した設計法を確立する必要がある。筆者らは、種々の設計法について検討を進め、新しい構造系に適した設計法を提案するとともに、実物大の供試体を用いた载荷試験を実施し、提案する設計法の妥当性を検証した。

本文は、新しい構造系を有する「コンパクトセグメント」の開発背景、提案する設計法、および载荷試験による検証結果について論ずるものである。

## 2. コンパクトシールドの開発

主要枝線整備に適した新工法の開発にあたり、「建設費の縮減」「環境への影響低減」「維持管理への配慮」という課題を設けて検討を進めてきた。以下に、各課題とそれを解決するための対応策について述べる。

なお、本工法の主な適用範囲を主要枝線とすることから、対象仕上り内径を $\phi 2,000 \sim \phi 2,600\text{mm}$ 程度に限定して検討を実施した。

### (1) 建設費の縮減

シールド工事費の構成を分析することにより、建設費縮減の方策を以下のように検討した。

#### a) 掘削断面の縮小

掘削断面の縮小は、工事規模の縮小につながり、直接的な建設費の縮減効果を期待できる。

下水道シールドトンネルの覆工は、従来、耐食性を考え、構造部材である一次覆工（セグメント）と防食層である二次覆工（一般に現場打ちコンクリート）とから構成されている。主要枝線は汚水と雨水を収容する合流管であるため、二次覆工を省略することはできない<sup>1)</sup>こと

から、二次覆工厚さの縮小について検討を行った。

本工法が対象とする口径における二次覆工厚さは200～250mmであり、コンクリートの現場打設の施工性や一次覆工の蛇行修正余裕等を考慮して定められている。そこで、二次覆工をセグメントに一体化させることにより、二次覆工厚さを縮小し、掘削断面の縮小を図ることとした（図-1）。

これにより、二次覆工工程を省略することができ、工期短縮効果も得られることとなる。

#### b) セグメント構造の見直し

主要枝線の埋設位置は比較的浅く、対象とする地盤条件は、軟弱粘性土あるいは緩い砂質土が主体となる。さらに、密集した市街地に建設されることから、近接施工による影響を避けることはできない。

これらのことを考慮して、トンネルの構造的な安定性とコスト縮減の立場から、安定で静定な「3ヒンジ静定構造」を導入することとした（図-2）。この結果、セグメント継手はヒンジ構造の継手となり、力学的には発生断面力が増える（曲げモーメント；約10%、軸力；約30%）こととなるが、本工法の対象とする口径では断面力の絶対値が小さく、圧縮応力度で約10%増加する一方、引っ張り応力度は約3%減少し、設計上の影響は少ない。さらに、継手は軸圧縮力だけ伝達する突合せ構造にできるため、継手の止水処理も容易（図-4）で、コストの低減効果も期待できる。総合的には、合理性が得られるものと判断した。

なお、3ヒンジ構造とする場合、セグメントの分割数は3が理想的である。しかし、本工法では二次覆工を一体化するため覆工厚さを極端に薄くすることができず、シールドテール内でリングを閉合する施工上の問題に対処するために4分割とし、剛結部を1カ所設けることと

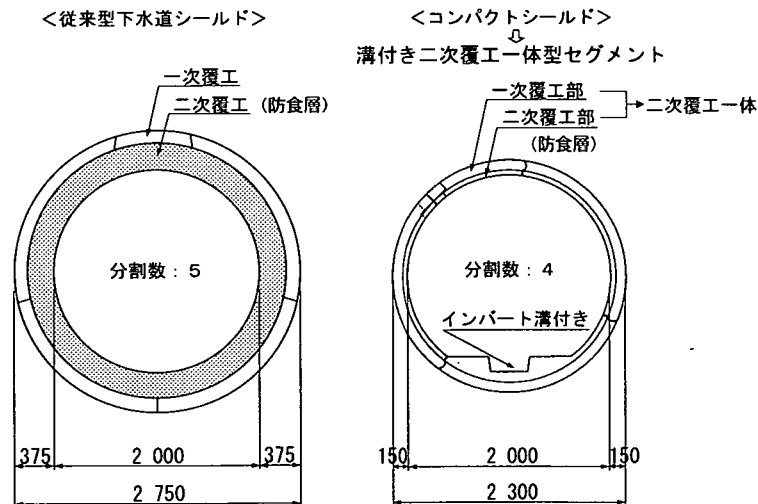
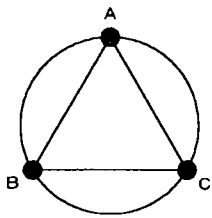
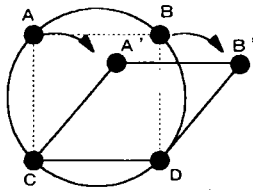


図-1 従前型下水道シールドとコンパクトシールドの断面（仕上り内径2,000mm）



3 ヒンジ (内的静定)



多ヒンジ (内的不安定)

図-2 3 ヒンジ静定構造

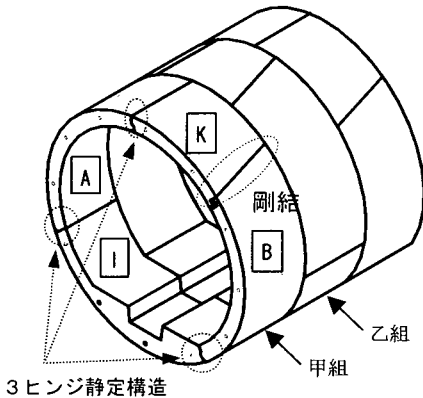


図-3 4分割3ヒンジ構造 (千鳥組)

した。

以上より、セグメントは4分割3ヒンジ構造となり、セグメント継手は、ヒンジ3カ所にナックル継手を、1カ所の剛結部は新しく開発したC形嵌合継手構造を採用することとした(図-3)。リング継手については、ピン挿入型を採用することとし、全体として、内面の平滑性が得られる継手構成とした。

### c) シールドの転用

一現場ごとにシールドを償却する従来の考え方を見直し、複数回(2~3回)転用することにより、建設費の低減を図ることとした。シールドの転用を促進するためには、より一層の標準化を図ることにより転用機会を確保すること、土質条件・施工環境等の適用条件からの制約を受けないこと、さらには、小さな立坑でシールドを回収できること等の要件を満たす必要がある。

標準化については、例えば、流域を設定してから必要管径を決定する手順から、管径を設定してから流域を決

定する手順を採用する等により、採用の拡大を図っていく計画である。

適用範囲については、主要枝線が施工される条件をある程度限定することにより転用性を確保することとした。土質条件については、前述のように軟弱粘性土あるいは緩い砂質土を主体として考え、施工環境としては、R-15mの急曲線に対応できることを基本としている。

シールドを回収する立坑(到達立坑)について<sup>2)</sup>は、シールドを分割して回収できるようにユニット化することにより、立坑サイズの縮小化を図った。

### d) 施工性の向上

シールドの施工システム全体を見直し、施工性の向上を図ることにより、建設費の抑制を図った。

セグメントは、分割数を削減するとともに、ボルト接合に替えて、ワンタッチで締結できる継手を採用することにより、組立施工性の向上を図っている。さらに、分割数の少ない、言い換えると大きなブロックのセグメントを限られた空間で取り扱えるよう、シールドの後続設備をシールド機内に内包<sup>2)</sup>して、シールド後方の作業空間を確保している。

また、これまでのシールド坑内の資機材運搬は、軌条方式が一般に用いられてきたが、新たに開発したタイヤ式の運搬システムに変更することにより、枕木・レールの敷設・撤去作業を廃止した。

## (2) 環境への影響低減

下水道再構築事業における主要枝線の工事は、周辺家屋の密集した市街地で行われることから、周辺住民への影響を極力低減しなければならない。

二次覆工工程の省略により、工期を大幅に短縮し、周辺への影響の時間的な低減を図っている。また、作業基地および発進立坑・到達立坑の省面積化により、空間的な低減を図っている。

さらに、地球環境問題に配慮して、掘削断面の縮小による建設残土量の低減のほか、覆工厚の削減およびシールドの転用などにより資機材の製造・運搬工程の縮減によるCO<sub>2</sub>発生量の抑制を行う。さらには今後セグメント材料に下水道焼却灰を再利用するなどの対応をしていく。

## (3) 維持管理への配慮

新設する管路は、今後、継続される維持管理作業の効率性向上に配慮したものとした。

セグメントの耐久性を確保するため、セグメント内側に防食層(二次覆工部)を設けることとした。この防食層は、構造計算上考慮されていないため、劣化が進行した場合には、この防食層を削り取って補修できるように配慮している。

表-1 得られる効果

	コンパクト	在来シールド	削減率
掘削土量	4.7 <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	6.3 <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	25%減
工期	160日	292日	45%短縮
コンクリート使用量	1.17 <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	2.8 <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	58%減
経済性：(東京都下水道局の概算基準による試算結果)			8%減

維持・点検作業を安全かつ容易に行えるように、仕上面に平坦なインパートを設置した。さらに、自然流下を原則とする下水道トンネルに対して、インパート部には必要に応じて勾配調整が行えるように溝を設けている<sup>3)</sup>。この溝を利用することにより、施工時におけるタイヤ式搬送システム<sup>4)</sup>を実現しており、将来の点検作業や補修工事の機械化・自動化の導入も容易になるものと考える。

#### (4) 新しいシールド工法の提案

以上のような種々の検討をもとに提案するものが、新しいシールドシステムである「コンパクトシールド工法」であり、以下のような要素技術から構成されている。

- ・インパート溝付き二次覆工一体型セグメント（4分割3ヒンジ静定構造、二次覆工工程の省略）
- ・後方設備内包型3分割シールド（転用可）
- ・発進・到達立坑の縮小（シールドの分割発進・回収）
- ・ガイドローラー付きタイヤ式搬送設備（レール・枕木の廃止）

本工法を適用することにより得られる効果は、 $\phi 2,000\text{mm}$ の仕上り内径の従来工法との比較で、表-1に示すような試算結果が得られている。

### 3. セグメント設計手法の提案

本章では、新しく提案したセグメントの詳細構造・仕様について、その選定根拠を示すとともに、本セグメントの構造系に適した設計法の提案について述べる。

#### (1) セグメント構造

##### a) 本体構造

セグメントリングはインパート付きのI型と、A型、B型およびK型で構成される4分割3ヒンジ構造である。K型セグメントには片側にヒンジ機能を持たせ、剛結合側のB-K間のみテープをもつ軸方向挿入型としている。

##### b) 覆工厚さ

一次覆工本体部の厚さは、主要枝線を対象とする仕上り内径 $\phi 2,000 \sim \phi 2,600\text{mm}$ クラスに対して、 $100\text{mm} \sim 125\text{mm}$ を基本とした。

防食層としての二次覆工部分の厚さは、 $50\text{mm}$ とした。その根拠は、各種中性化推定式による中性化深さ<sup>5)</sup>、および東京都の下水道施設の劣化進行状況調査実測値の最大値( $47\text{mm}$ )<sup>6)</sup>と、コンクリートを打替える場合の施工性（最大骨材径の2倍程度）を考慮して定めた。

#### c) セグメント継手

ヒンジ部の継手は、回転を許し、かつ、十分なせん断抵抗力および止水性を有した構造とする必要がある。そこで、プレキャスト部材のヒンジ構造として実績がある突合せ継手の「ナックル継手」を適用することとした(図-4)。図に示すように、円弧と直線形状からなる凹面側と、これより曲率の小さい円弧と直線形状の凸面側が突き合わされており、回転性能を確保すると同時に、接合面の圧縮応力によって止水性を確保する。

止水材は、ナックル接触部近傍を通過する水膨張性シール材のほか、内縁側二次覆工部の非膨張シールと目地コーキングにより、回転に追従して確保できる構造としている。さらに、ナックル部外縁側には隙間形状に成型した硬質のスポンジシール材を設け、外縁隙間への裏込め材や土砂の目詰まりに対処している。

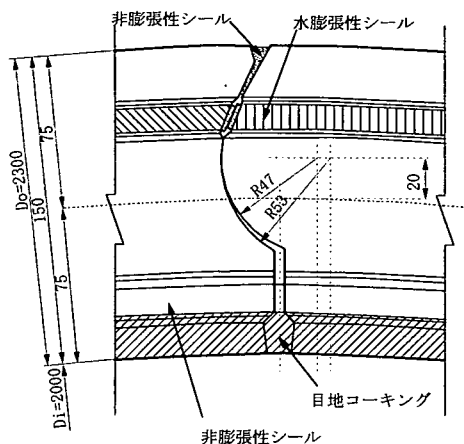


図-4 ナックル継手

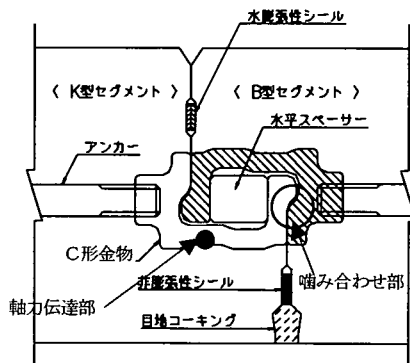


図-5 C形嵌合継手

剛結合とするB-K間継手は、図-5に示すように相対するC形の金具を嵌合させ、水平スペーサを挿入することにより結合する構造とした。上下方向の位置合わせが容易であり、かつK型セグメントの軸方向挿入により自動的に嵌合する機構を採用し、組立施工性を確保している。

この継手は外荷重によって軸力が作用することを前提とし、それ自身による締付け力を期待しない構造としている。曲げモーメントは継手部に軸力が作用している状態において平面ひずみ保持の仮定が成立するものとして、コンクリートの圧縮力とC形金物の引張力により伝達される構造としている。C形金物の引張力は水平スペーサからの反力によって生じ、金物の軸力伝達部を迂回して左右のアンカー筋に伝達される。また、せん断力についても同様に、軸力が作用している状態において、左右両側の金物の噛み合わせ部により金物全体に伝達される構造としている。

なお、C形金物は高い製作精度を要求しないため、「熱押形鋼」として製造が可能であり、製作コストの低減を図っている。

#### d) リング継手

リング継手は、内面平滑型セグメントに用いられるピン挿入型継手を基本としている。リング継手に要求される性能としては、組立時のセグメントの安定性、止水性の確保、および曲線施工の安全性が確保される引張り抵抗と、千鳥組によって生じるせん断力に対抗できる抵抗力を有すること等である。要求性能はリング継手の剛性によっても変化するが、仕上り内径 $\phi 2,000\text{mm}$ のリング継手に要求される性能の試算結果を表-2に示す。表中の「千鳥組解析時のせん断力」については、後述するリング継手のせん断試験結果より得られたせん断ばね定数を用いて算出したものである。

本工法では、これまでに実績があるもののうち、前述の性能が確保され、かつ本セグメントへの設置に支障のない、ノブ型継手<sup>8)</sup>とカブラ型継手<sup>7), 9)</sup>を採用可能としている。ノブ型継手は、ドアのノブのような形状の雄金具と爪を内蔵した筒状の頭部を持つ雌金具から構成されている。雌金具の円筒状の頭部には、爪と円錐バネが4個ずつ内蔵されており、組立時に目開きが発生した場合でも最低2個の爪で継手間の引張力に抵抗できる構造としている(図-6)。カブラ型継手は、ソケット・プラグと称する凹・凸金物から構成されており、プラグをソケットに挿入するとプラグ頭部がソケット内部のチャックにかみ込み締結する構造としている(図-7)。

これらの継手は、施工実績を有しているものの、構造が複雑でコスト負担が大きいという欠点を有している。このため、リング継手のコスト削減の観点から、市販品の埋込みインサートを応用したホークカットアンカー式

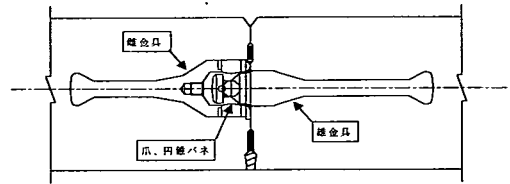


図-6 ノブ型継手

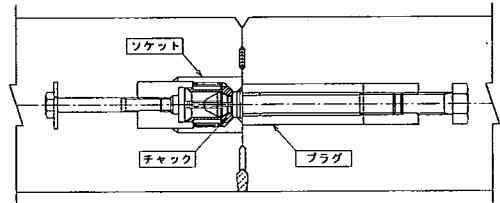


図-7 カブラ型継手

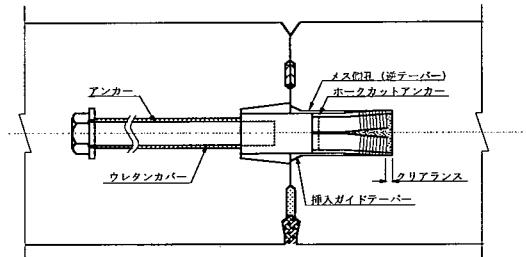


図-8 ホークカットアンカー式継手

表-2 リング継手に要求される性能の試算結果

項目	要求性能
組立時のピース安定性	21 kN 以上
止水シールの反発力	21 kN 以上
推力ジャッキ片押し時の引張力	5.5 kN 以上
千鳥組解析時のせん断力	1.1~4.7kN 以上

継手を開発中である(図-8)。

#### (2) セグメントリングの組立形態

ボルト等で接合する標準セグメントでは、継手部の剛性低下を隣接セグメントの添接効果で補うことを期待するため、千鳥組を原則としている。

本セグメントは、3ヒンジ静定構造であるため、各リングが独立して安定したトンネル構造を形成している。このため、セグメント継手がトンネル軸方向に連続する「いも継ぎ」としても、トンネル構造系からの制約は発生しない。

しかしながら、ヒンジ部は引張りに抵抗できない構造であるため、完成後の近接施工に伴う荷重変化や異常時の内水圧作用などへの対応を図る必要がある。さらに、

組立直後に、シールドテール内でジャッキ推力を受ける時点でのリング安定性の向上を図るため、リング間拘束効果が得られる千鳥組を採用することとした。

### (3) 設計手法の検討課題

以上のように、コンパクトセグメントは4分割3ヒンジの静定構造物を、千鳥組に組立てることを基本方針とした。トンネル構造の安定性確保の観点から、静定構造を導入したが、近接施工等や施工時への対応等から千鳥組を選択したことにより、静定構造物としての取り扱いが可能かについての検証が必要となった。そこで、このような構造系に対して合理的な設計法を提案することとした。

設計法の検討にあたり、これまで一般に用いられているセグメントの設計法について、コンパクトセグメントの構造系を踏まえて検討を加えた。

なお、設計法の検討には、セグメントに作用する荷重の算定および断面力を算定する構造モデルの設定を組み合わせる必要がある。しかし、その相互作用が複雑であることから、本文では、切り離して扱うこととし、作用土圧の算定は、「トンネル標準示方書（シールド工法編）・同解説」<sup>10)</sup>に基づくものとし、構造モデルの設定について論ずることとする。

従来より行われているセグメント設計法は、以下の3つに大別される。

#### a) セグメントリングを曲げ剛性一様なリングと考える方法

いわゆる慣用計算法といわれ、通常用いられている方法で、次のように分けられる。

- ① セグメントの継手部分の曲げ剛性の低下を考慮せず、セグメントリングをセグメント単体と同一の曲げ剛性をもつ、曲げ剛性一様なリングと考える方法。
- ② 継手部分の曲げ剛性の低下に伴う変形の増加をリング全体の曲げ剛性を低下（曲げ剛性の有効率）させて

評価し、さらに千鳥組による継手部の曲げモーメントの配分を曲げモーメントの割増率として考慮する設計方法。

本コンパクトセグメントのヒンジ部の曲げ剛性はゼロであるため、本設計法を適用することはできない。

b) セグメントリングを多ヒンジ系リングと考える方法  
セグメント継手を積極的にヒンジ構造として評価するものである。英国やロシアにおいて良好な地山の場合に用いられている方法である。

本セグメントは3ヒンジの静定構造であること、またリング継手の評価ができないことから、採用できないものと判断した。

#### c) セグメントリングを回転ばねを持つリングと考え、千鳥組による添接効果をせん断ばねで評価する方法

いわゆる「はりばねモデルによる計算法」であり、図-9に示すように、セグメント本体を円弧ばりまたは直線ばりに置換し、セグメント継手を曲げモーメントに対する回転ばねで評価するとともに、リング継手をせん断ばねに評価して千鳥組による添接効果を考慮するものである。

本設計法によれば、ヒンジ部の回転ばねをゼロとし、リング継手のせん断ばねを考慮することにより、本セグメントの特徴である「千鳥組された4分割3ヒンジ構造」を適切に評価できるものと判断した。

### (4) 設計手法の提案

以上の検討より、コンパクトセグメントの設計法として、3ヒンジおよびリング継手の添接効果を積極的に評価するものとして、以下の設計法を提案することとした。

- ・ 構造計算モデル：「はりばねモデルによる計算法」を適用する。
- ・ ヒンジ部：I-A、I-BおよびA-K間のナックル継手をヒンジと見なし、回転ばね定数はゼロとする。
- ・ 剛結合部：B-K間の継手（C形勘合継手）は本体と同等の曲げ剛性を持つものと評価し、回転ばね定数は無限大とする。
- ・ リング継手：せん断ばね定数は、使用するリング継手のせん断試験により得られた値を基本として用いることとする。

## 4. コンパクトセグメントに関する実験的研究

提案した設計法は、1剛結合3ヒンジ構造としてセグメント継手を理想的に評価したものである。また、リング継手のせん断剛性については試験により求めることとしている。そこで、要素試験ならびに実物大の供試体を

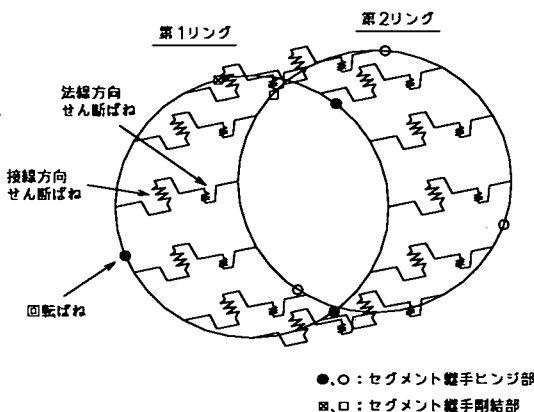


図-9 はりばねモデル

用いた載荷試験を実施し、継手剛性およびリング挙動を確認した。さらに、得られた結果を基にシミュレーション解析を行い、本設計法の妥当性を検証することとした。検証手順を表-3に示す。

表-3 検証手順

目的	確認および検証方法
リング継手のせん断剛性の確認	リング継手せん断試験
B-K間継手の曲げ剛性の確認	B-K間継手曲げ試験
リング挙動の確認	2リング載荷試験
ヒンジ部の回転ばねの影響	シミュレーション解析 (ヒンジ部の回転剛性)
B-K間の継手剛性の影響	シミュレーション解析 (剛結部の回転剛性)
リング継手のせん断剛性の影響	シミュレーション解析 (リング継手のせん断剛性)

(1) 継手剛性およびリング挙動の確認 (載荷試験)

a) リング継手のせん断剛性

リング継手のせん断剛性およびせん断耐力を確認することを目的として、ホークカットアンカー式、ノブおよびカブラ型の3種類のリング継手に対してせん断試験を実施した。供試体は高さ150mmの平板形で、その長さおよび幅については破壊面の大きさを考慮してそれぞれ600mm, 888mmとした。コンクリートの設計基準強度は $42\text{N/mm}^2$ である。試験概要は図-10に示すように、3つの供試体間を各1つのリング継手で接合し、中央の供試体に載荷するものである。なお、導入軸力はゼロとした。

図-11にせん断力とリング間相対変位の結果を示す。このうち、カブラ型の結果に着目すると、載荷初期においてせん断力がほぼ一定の状態では相対変位のみが増加する範囲がみられる。カブラ型継手は組立施工誤差( $\pm 1\text{mm}$ )に対して、雄金物軸部の弾・塑性変形で吸収する機構を有しており、これはその影響が現れたものと想定される。

「はりばねモデル」においては、せん断ばね定数を一般に小さめに見積ると、発生する曲げモーメントが小さく評価されることが知られている<sup>11)</sup>。本「3ヒンジ千鳥組」の構造系に対して同様のことが言えるかについては後で検証することとして、図-11から各継手に対するせん断ばね定数( $k_s$ )を暫定的に以下のように評価することとした。

- ホークカットアンカー式 ;  $5,000\text{kN/m}$
- ノブ型 ;  $60,000\text{kN/m}$
- カブラ型 ;  $50,000\text{kN/m}$

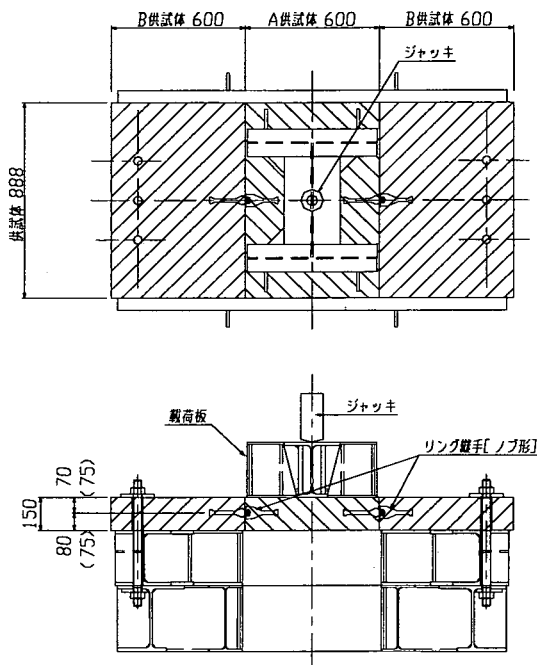
ここで、カブラ型のせん断ばね定数は、図-11に示すように、最も急な勾配部分をとり、安全側の評価をした。

千鳥組に対するせん断ばね定数の影響については、「4-(2)C) リング継手のせん断剛性の影響」で詳述する。

せん断耐力は、ホークカットアンカー式が12.8~16.2kNであり、雄雌の両側にアンカー筋を有するカブラおよびノブ型はそれぞれ85.8kN, 86.4kNであった。これらの結果は表-2に示したリング継手の要求性能をいずれも満足することが確認された。

b) B-K間の継手剛性

B-K間継手は、剛結合部として仮定している。そこで、実際の曲げ剛性および強度を確認するため、継手曲げ試験を実施した。試験は、継手部に軸力を導入した後に2点載荷による方法とした(図-12)。供試体は長さ1,350mm, 幅1,000mm, 高さ150mmの平板形で、コンクリ



( ) 内寸法はカブラ、ホークカットアンカー継手を示す。

図-10 リング継手せん断試験概要

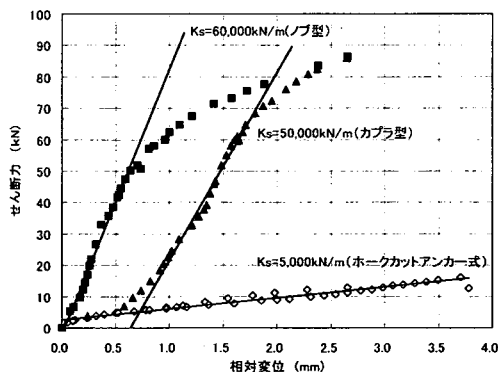


図-11 せん断力とリング間相対変位

ートの設計基準強度は  $42\text{N/mm}^2$  である。載荷ケースは軸力  $200\text{kN}$ ,  $100\text{kN}$ ,  $0\text{kN}$  (軸力なし) の3ケースで、軸力なしのケースについては破壊まで載荷した。

図-13 に曲げモーメントと継手回転角の関係を示す。継手回転角は供試体内外面の目開き量より算定している。これによると、継手回転角は曲げモーメントに比例して大きくなり、線形の関係を示すことがわかる。そこで、原点と最大曲げモーメント時の継手回転角を通る直線の勾配から回転ばね定数を算定することとした。図-13 に示すように、B-K間継手の回転ばね定数は軸力レベルに応じて大きくなる傾向がみられる。

また、破壊性状はC形金物の降伏に伴う圧縮側コンクリートの圧壊であり、破壊時の曲げモーメントは  $17.5\text{kN}\cdot\text{m}$  であった。この値は正曲げ方向の単体曲げ試験で得たセグメント本体部の破壊耐力  $20.5\text{kN}\cdot\text{m}$  の約85%に相当することから、B-K間継手は強度も十分に有していることが確認された。

### c) リング挙動

千鳥組された4分割3ヒンジ構造において、セグメントの各継手がリングの挙動に与える影響について確認するため、2リング載荷試験を実施した。試験の概要を図-14 に示す。試験装置は上下2段に千鳥組したセグメント (外径  $2,300\text{mm}$ , 厚さ  $150\text{mm}$ , 幅  $1,000\text{mm}$ ) と圧力載荷装置から構成されている。セグメントは「台東区三筋二丁目、鳥越二丁目付近再構築工事 (以下、本工事と称す)」に使用するものと同じ寸法とし、リング継手はホークカットアンカー式とした。供試体コンクリートの設計基準強度は  $42\text{N/mm}^2$  で、その断面は図-15 に示すとおりである。軸力は各リングの円周方向に4本配置したアンボンドPC鋼より線により導入し、鉛直および水平荷重はPC鋼棒とセンターホールジャッキを用いて2リング全体に荷重を加えた。なお、鉛直および水平荷重によって導入軸力が変動するため、各載荷段階毎に軸力調整を行った。

載荷ケースは軸力および鉛直 (Pv)・水平荷重 (Ph) を表-4 の組合せにより6ケースとし、荷重は5~10m程度の土被り条件においてセグメント本体部の鉄筋が許容応力度に達するときの値を基に設定した。破壊まで鉛直荷重を加えたCASE6の載荷ステップを図-16 に示す。初期ひび割れは鉛直荷重が  $55\text{kN/m}$  のときにインバート平坦部

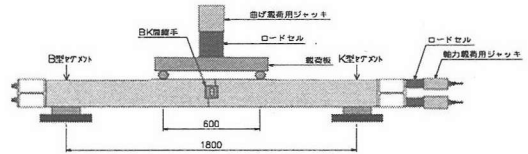


図-12 継手曲げ試験概要

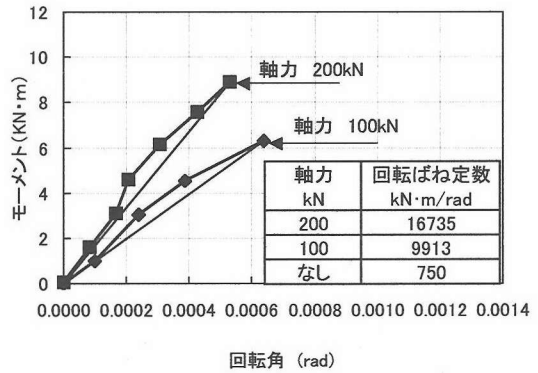


図-13 曲げモーメントと継手回転角

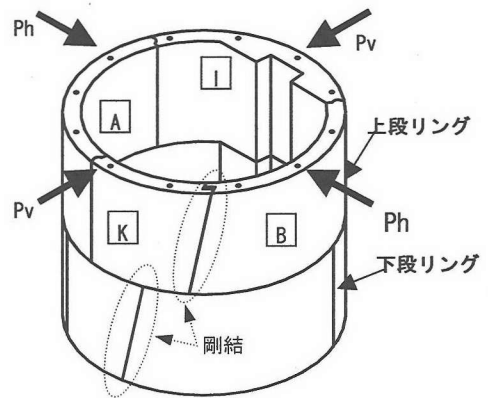


図-14 2リング載荷試験概要

表-4 載荷ケース

CASE	軸力 (kN/m)	Pv	Ph	Pv:Ph
		(kN/m)	(kN/m)	
1	200	33.5	27.0	1:0.8
2	200	26.5	16.0	1:0.6
3	100	26.0	21.0	1:0.8
4	100	20.5	12.5	1:0.6
5	100	12.5	0.0	1:0.0
6	50	破壊まで	0.0	1:0.0

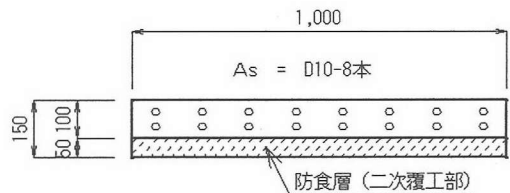


図-15 供試体断面



の付根部に発生し、リングの破壊は荷点近傍にある上段リングのB-K間継手で発生した。破壊時の鉛直荷重は103kN/mで、ナックル継手には異常は認められなかった。

図-17にCASE2で得られた鉛直荷重とA-K間継手回転角の関係を示す。継手回転角はセグメント内外面において得られた目開き量とナックル継手の中心位置より求めている。図中の解析値は提案した設計法に基づいて計算したものである。上段リングの継手は内面側が閉じる方向へ、下段リングでは内面側が開く方向へそれぞれ回転が生じている。この挙動は荷点と継手の位置関係により、継手の回転方向は異なることを意味しており、解析値も同様の傾向がみられる。また、ナックル継手の回転角は鉛直荷重の増加に伴って大きくなり、その量は内外面でほぼ等しく、解析値とも概ね一致している。これらの結果から、ナックル継手は正常に回転作動していることが確認できる。

図-18にCASE6の主鉄筋ひずみから推定した、上・下段リングの曲げモーメントを示す。同図は鉄筋応力が許容値に達する鉛直荷重 $P_v=10.5\text{kN/m}$ とその約3倍に当たる荷重 $P_v=31.6\text{kN/m}$ の荷重段階で得られた計測値を表したものである。これによると、上・下段リングともに、セグメント本体部の曲げモーメントは鉛直荷重の増加に伴って大きくなっているのに対し、ヒンジ部(○部)のナックル継手はほぼゼロのまま一定である。また、上段リングの剛結合部(□部)に着目すると、曲げモーメントが作用していることがわかる。

以上のことからリング挙動についてまとめると、ナックル継手は曲げ荷重に対して正常に回転作動するとともに、荷重変化に対しても発生曲げモーメントはほぼゼロのまま一定であることから、ヒンジと見なすことができ

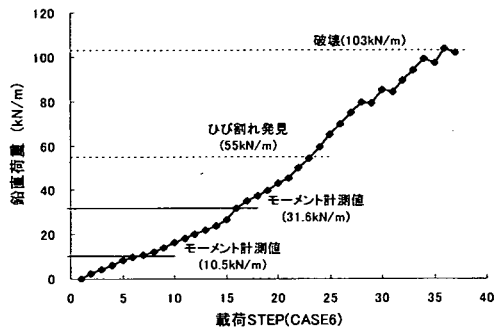


図-16 載荷ステップ(リング載荷試験 CASE6)

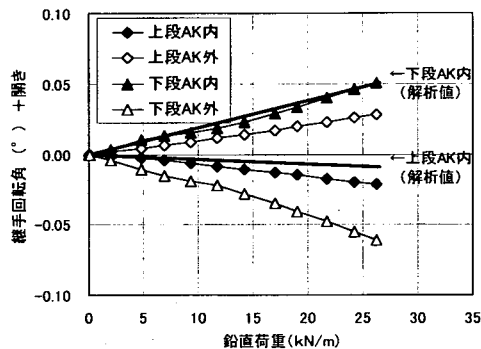


図-17 鉛直荷重と継手回転角  
(リング載荷試験 CASE2, A-K間)

曲げモーメント(kNm/m)上段リング

曲げモーメント(kNm/m)下段リング

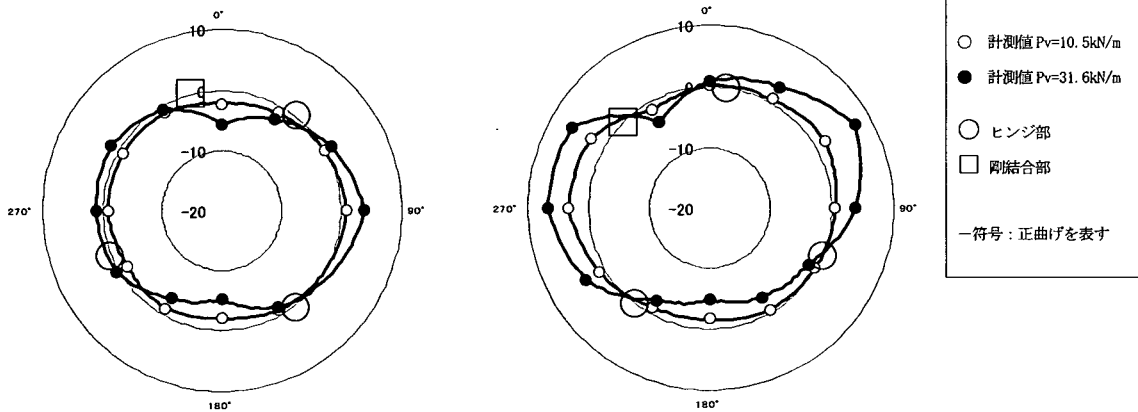


図-18 曲げモーメント(リング載荷試験 CASE6)

る。一方、剛結合部は曲げモーメントが作用することから曲げ剛性を考慮する必要がある。

## (2) 設計法の検証 (解析)

提案した設計法の妥当性を検証するため、リング載荷試験の結果に対してセグメントおよびリング継手の剛性をパラメータとしたシミュレーション解析を実施した。

### a) ヒンジ部の回転ばねの影響

ナックル継手はヒンジ挙動を示すことが確認された。しかしながら、ヒンジ部では軸力の作用位置 (偏心量) によって回転性能への影響が考えられる。そこで、この程度を確認するため、導入軸力の大きいリング載荷試験のCASE1の曲げモーメント計測値に対してヒンジ部の回転ばね定数をパラメータとした解析を実施した。ここでは、B-K間の継手剛性は本体と同等の曲げ剛性とし、リング間のせん断ばね定数は正負各々の方向の曲げが最大となるように設定している。解析に用いた荷重はCASE1の試験荷重に合わせて、軸力 200kN/m、鉛直荷重 33.5kN/m、水平荷重 27.0kN/m とし、回転ばね定数は以下の2ケースを考慮することとした。

- ・ ケース a : ヒンジと見なした値 ( $k_{\theta}=0\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ )
- ・ ケース b : レオンハルトら<sup>12)</sup>によるコンクリート継手(Betongelenke)に関する理論式(1)により荷重偏心率  $m$  を 0.24 としたときの算定値[ほぞ付きセグメントではこのときの値を設計上の最大回転ばね定数として扱う]

$$k_{\theta} = M / \alpha = 9a^2 b E_o / 8 \times m (1-2m)^2 \quad (1)$$

ここに、 $k_{\theta}$ : 継手の回転ばね定数 ( $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ )、 $\alpha$ : 回転角 (rad)、 $m$ : 荷重偏心率  $m=e/a=M/(N \cdot a)$ 、 $M$ : 曲げモーメント ( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )、 $N$ : 軸力 ( $\text{kN}$ )、 $a$ : ほぞ幅 ( $=0.100\text{m}$ : 一次覆工厚さ)、 $b$ : ほぞ長さ ( $=1.000\text{m}$ )、 $E_o$ : コンクリートのヤング係数 ( $=33\text{ kN}/\text{mm}^2$ )

セグメントの設計は通常、最大曲げモーメントに対して行うため、回転性能の影響確認はそれに着目することとした。図-19に計測値ならびに解析値の最大曲げモーメントを示す。これによると、計測値はケース a の解析値に近いこと、またケース b は計測値およびケース a に比べて小さな曲げモーメントが算定されることがわかる。ケース b で、最大曲げモーメントが小さく算定されるのは、ヒンジ部も曲げモーメントを負担するためである。

以上より、ヒンジ部ナックル継手の設計上の取り扱い、ヒンジ ( $0\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ ) として良いことを確認した。

### b) B-K間の継手剛性の影響

B-K間の継手剛性の影響を把握するため、リング載荷試験のCASE6の結果に対してシミュレーション解析を実施した。B-K間の継手剛性として以下の2ケースを考慮

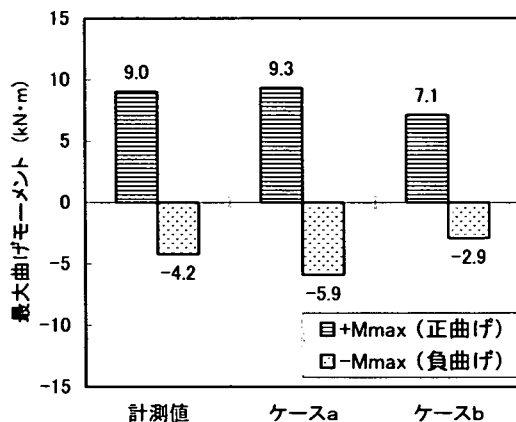


図-19 ヒンジ部の回転ばねの影響 (リング載荷試験 CASE1)

した。

- ・ ケース A : 継手曲げ試験の結果に基づく回転ばね定数 ( $k_{\theta} \approx 10,000\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ )
- ・ ケース B : 本体部と同等の曲げ剛性 (回転ばね定数  $k_{\theta} \approx \infty$ )

なお、リング間のせん断ばね定数は、ホークカットアンカー式のせん断試験結果から  $5,000\text{kN}/\text{m}$  とした。

図-20に曲げモーメントの計測値ならびに解析結果を示す。計測値は主鉄筋のひずみから推定しており、鉛直荷重  $P_v$  が  $10.5\text{kN}/\text{m}$  のときの値を表している。図より、両解析値は上・下段リングともに曲げモーメント計測値の最大値だけでなく、分布形状についてもよい一致が見られている。また、両解析値による曲げモーメントはB-K間継手付近でわずかに差がみられるのみである。

以上より、B-K間継手の曲げ剛性が曲げモーメントに与える影響は小さいことから、B-K間継手の設計上の曲げ剛性は、無限大として取り扱えるものと判断した。

### c) リング継手のせん断剛性の影響

千鳥組による添接効果の影響を把握するため、リング載荷試験CASE6の  $P_v=10.5\text{kN}/\text{m}$  の結果に対してリング継手のせん断剛性をパラメータとしたシミュレーション解析を実施した。これまでの検証結果を踏まえ、ヒンジ部の回転ばね定数は  $0\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$  (ヒンジ)、B-K間継手の曲げ剛性は無限大とし、リング継手のせん断剛性として以下の3ケースを考慮した。

- ・ ケース i : 添接効果を最大限評価した場合 ( $k_s \approx \infty\text{ kN}/\text{m}$ )
- ・ ケース ii : 継手せん断試験の結果に基づくせん断ばね定数 ( $k_s=5,000\text{kN}/\text{m}$ )
- ・ ケース iii : 添接効果を評価しない、すなわち「いも継ぎ」相当とした場合 ( $k_s=0\text{kN}/\text{m}$ )

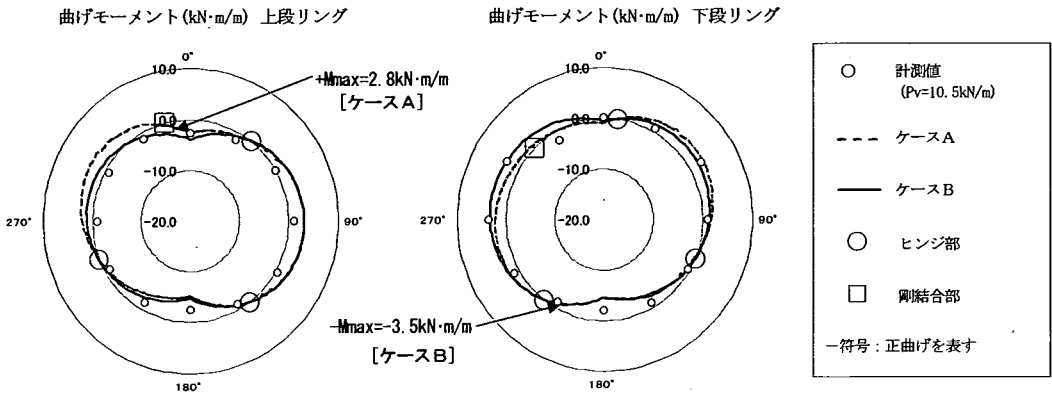


図-20 B-K間の継手剛性の影響(リング載荷試験 CASE6)

図-21 に曲げモーメントの計測値ならびに解析結果を示す。計測値は図-20 と同じものである。試験結果に基づくせん断ばね定数を用いたケース ii は上・下段リングともに曲げモーメントの最大値だけでなく、分布形状についても計測値をよく表現していることがわかる。

ここで、解析値の最大値に着目すると、正の曲げモーメントはケース i で、負の曲げモーメントはケース iii で発生していることがわかる。そこで、せん断ばね定数が最大曲げモーメントに与える影響について確認するため、それをパラメータとした試算を行った。なお、試算にあたっての条件は本工事と同じとした。試算結果を図-22 に示す。最大曲げモーメントの発生傾向について以下のことがわかる。

・甲乙非対称の千鳥組リングであるため、甲組・乙組で

正曲げ、負曲げ各々の最大曲げモーメントの大きさは異なる。甲組・乙組でヒンジ部の継手位置が異なるため、せん断ばね定数が無限大のときは甲組リングにおいて正の曲げモーメント(11.84kN·m)が、せん断ばね定数がゼロのときは乙組リングで負の曲げモーメント(-12.29kN·m)が卓越する試算結果が得られた。

・前述した3種類のリング継手のせん断ばね定数は5,000~60,000kN/m であり、この範囲においては正負の最大曲げモーメントはいずれも甲組で生じ、顕著な差はみられない。絶対値について着目すると、正曲げはせん断ばね定数を無限大としたときの64~74%、負曲げはせん断ばね定数をゼロとしたときの70~76%である。

次に、鉛直荷重と内空変位の関係を図-23 に示す。図中の解析値はケース ii (試験結果に基づくせん断ばね定

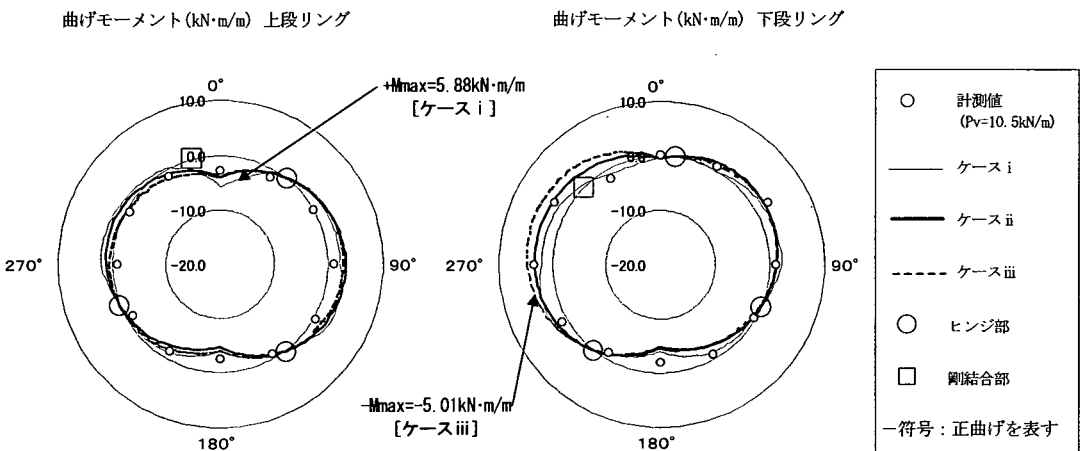


図-21 リング継手のせん断剛性の影響(リング載荷試験 CASE6)

数)の結果を示したものである。上下段リングとも鉛直荷重と内空変位の関係は、ひび割れが発生する前までよい一致を示していることがわかる。

以上のことから、設計に用いるせん断ばね定数には使用するリング継手のせん断試験により得られた値を用いることで合理的な設計となることが確認できた。

## 5. 内圧が作用した場合のリング挙動

下水道管渠では異常降雨時に短期的に内圧が作用する状態や、近接施工の影響によって一時的に荷重のバランスが崩れる状態が想定される。コンパクトセグメントは外圧に対しては安定した構造であるが、これらの荷重状態におけるリング挙動については不明である。そこで、これらの影響を把握するため、外荷重および内圧を作用させたリング載荷試験を実施した。

供試体は前述した本工事のセグメント(外径2,300mm,厚さ150mm,幅1,000mm)と同じもので、それを2リング千鳥組にした。図-24に試験装置の概要を示す。試験装置は、軸力、鉛直荷重および内圧載荷装置から構成されている。内圧はセグメントの内側に設置した反力リングの間に直接注水し、加圧することにより作用させた。

載荷ケースは表-5に示す7ケースとした。軸力と鉛直荷重を加え、本工事の試設計条件による正および負の最大曲げモーメントを発生させた状態で、内圧レベルを変化させた。内圧レベルは以下の2種類とした。

- ・ ケース①, ③: 本工事の管頂高の水頭差相当の内圧  $17.5\text{kN/m}^2$
- ・ ケース②, ④: 土被り相当の内圧(異常降雨により地表面まで冠水した状態を想定)  $66.8\text{kN/m}^2$

載荷ケース⑤はケース②の状態から内圧のみを土被りの1.5倍相当まで増加させ、載荷ケース⑥, ⑦はケース②の状態から鉛直荷重および内圧を一定に保持し、軸力のみを徐々に除荷している。なお、これら載荷重の値は、モーメント分布を再現する鉛直荷重および軸力分布を再現する導入軸力の組合せとして、事前のシミュレーション解析により求めている。

図-25に試設計荷重作用時(載荷ケース①~⑤)のリング変位量を示す。計測値は各ケースともに解析値に比べ小さい値(最大0.3mm程度)となっており、変位の分布傾向は解析値とよく一致している。

図-26に載荷ケース④における鉛直荷重とナックル継手の回転角の一例を示す。載荷ケース④では249kNの軸力を導入後、鉛直荷重を69.0kNまで載荷し、その状態で内水圧を静水圧から土被り相当荷重まで加圧している。ナックル継手回転角は鉛直荷重に比例して増加し、最終的には載荷ケース④の解析値と同程度の値を示している。

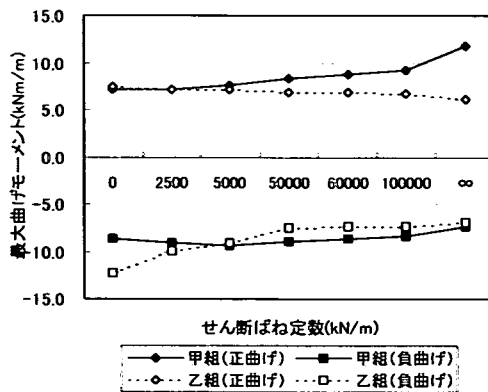


図-22 最大曲げモーメントの試算結果

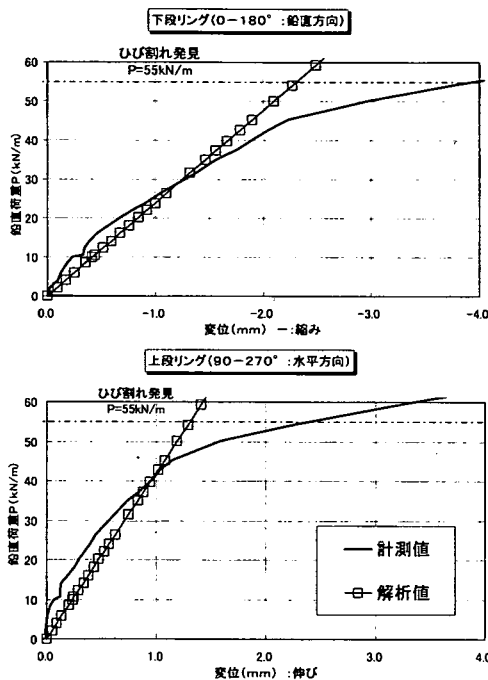


図-23 鉛直荷重と内空変位の関係(リング載荷試験 CASE6)

表-5 内圧載荷試験: 載荷ケース

CASE	導入軸力	鉛直荷重	内圧	内圧による軸引張力	備考
	(kN/m)			(kN/m)	
①	86.5	27.75	17.5	18.8	試設計の正の最大曲げモーメント発生時相当
②	86.5	27.75	66.8	71.8	試設計の負の最大曲げモーメント発生時相当
③	124.5	34.50	17.5	18.8	試設計の負の最大曲げモーメント発生時相当
④	124.5	34.50	66.8	71.8	
⑤	86.5	27.75	90.0	96.8	土被りの1.5倍相当の内圧
⑥	77.5	27.75	66.8	71.8	クラウン部の軸力がゼロ
⑦	63.5	27.75	66.8	71.8	AK間ヒンジ部の軸力がゼロ

試設計条件 土被り: 5.53m (全土被り圧考慮)  
 地下水位: QL-1.35m  
 土水分離地盤  $\gamma = 18\text{kN/m}^3$ ,  $\gamma' = 8\text{kN/m}^3$ ,  $\lambda = 0.5$ ,  $k = 10\text{N/cm}^3$

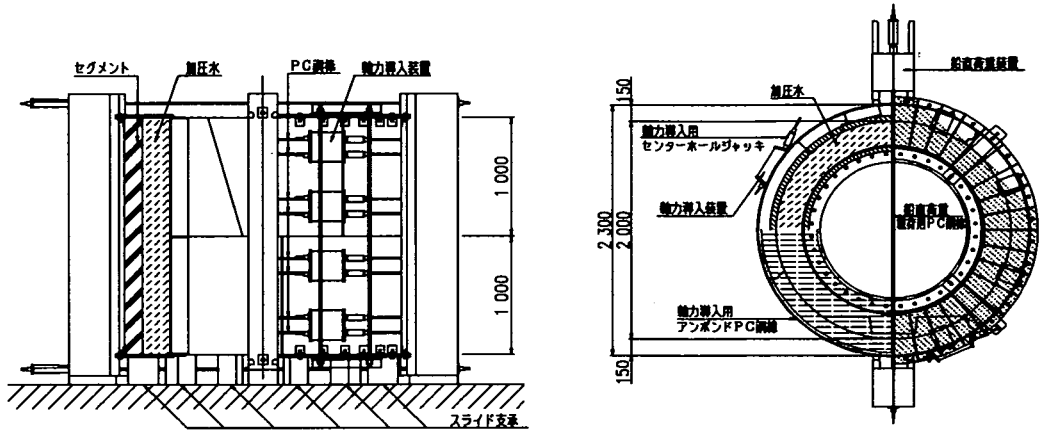
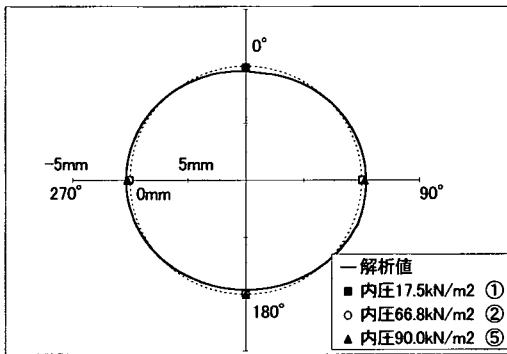


図-24 内圧載荷試験概要



(正曲げ, 下段)

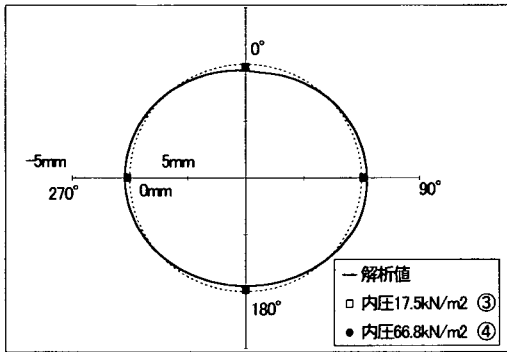


図-25 リング変位量 (負曲げ, 下段)

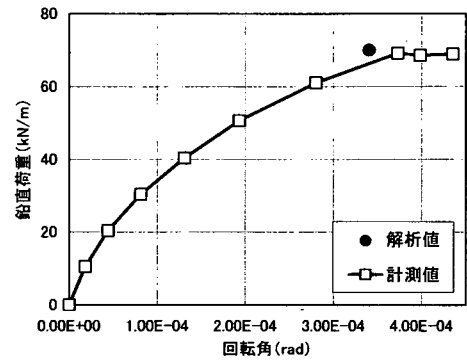


図-26 ナックル継手回転角 (AK間, 下段)

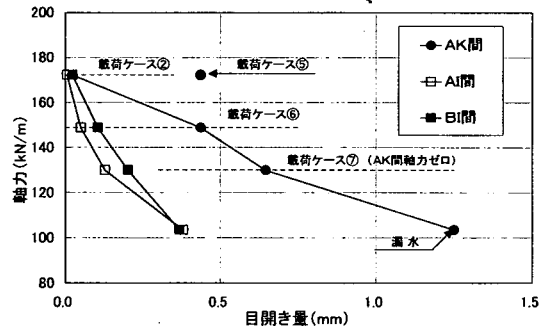


図-27 各ナックル継手目開き

図-25, 26 より, 内圧作用時においてもナックル継手は正常なヒンジとして挙動することがわかる。

図-27 に軸力と各継手部の目開き量を示す。試設計荷重が作用する荷重ケース②(軸力が最小, 土被り相当)から鉛直荷重を一定として軸力のみを除荷していき, クラウン部の軸力ゼロの状態(荷重ケース⑥)を経て, 管頂部AK間のヒンジ部軸力がゼロ(荷重ケース⑦)を下回った後, ナックル継手部から漏水が確認された。また,

荷重ケース⑤(軸力が最小, 土被りの1.5倍相当の内圧)が作用しても漏水は確認されなかった。表-6に, 各荷重ケースにおける主な着目点の曲げモーメント・軸力の値を示す。これらの結果から, ナックル継手は十分な止水性能を有すると考えられる。

外荷重および内圧を作用させたリング載荷試験により, 以下のことが確認された。

表-6 各載荷ケースにおけるM・Nの分布(下段リング)

	クラウン部		A-K 間継手 (ヒンジ)		B-K 間継手 (脚)		A-I 間継手 (ヒンジ)		B-I 間継手 (ヒンジ)	
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N
ケース②	1.23	22.10	0.00	25.83	-2.69	23.51	0.00	21.43	0.00	23.29
ケース⑤	1.23	-2.84	0.00	0.90	-2.69	-1.43	0.00	-3.50	0.00	-1.64
ケース⑥	1.23	0.00	0.00	3.73	-2.69	1.41	0.00	-0.67	0.00	1.19
ケース⑦	1.23	-3.73	0.00	0.00	-2.69	-2.32	0.00	-4.40	0.00	-2.54

単位 M:kN・m/m N:kN/m

- ・ 通常想定されないような厳しい荷重状態（土被り相当の内圧が作用する管路において土被りの約6割が近接施工により掘削された状態に相当）においても3ヒンジ構造としての挙動を示す。
- ・ 土被りの1.5倍相当の内圧が作用した状態（試設計の土被りは6mであるから、地表から3m水位が上昇した状態）や管頂部の軸力がゼロになった場合においても、ナックル継手の止水性は確保される。

## 6. C形嵌合継手の設計

ここでは、新しく開発したC形嵌合継手の設計法について述べる。

図-28 は前述のB-K間継手曲げ試験の軸力なしのケースにおいて得られたC形嵌合継手のアンカー筋応力度を示したものである。図中の設計荷重はアンカー筋を引張り材とするRC断面において、アンカー筋が許容引張応力度（強度区分10.9： $\sigma_{sa}=380\text{ N/mm}^2$ ）に達するときの抵抗モーメントに相当する荷重を表している。これによると、アンカー筋には引張応力が作用しており、その大きさはB型とK型側でほぼ等しいことがわかる。発生応力度はRC理論より算定した値よりも小さくなっているが、ひびわれ発生前であることから、コンクリートも引張力を負担しているためと考えられる。

図-29 はC形金物の軸力伝達部外縁側で計測された応

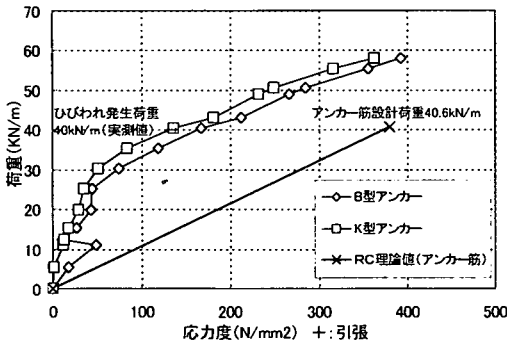


図-28 C形嵌合継手のアンカー筋応力度

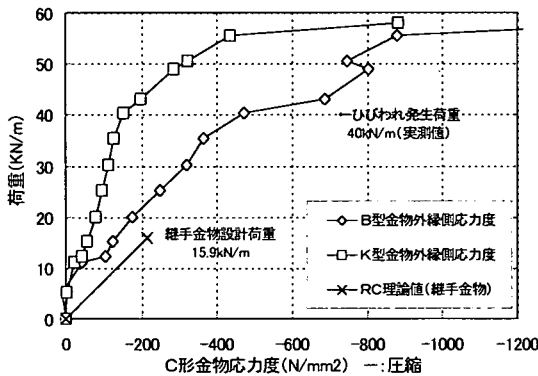


図-29 C形金物軸力伝達部の外縁側応力度

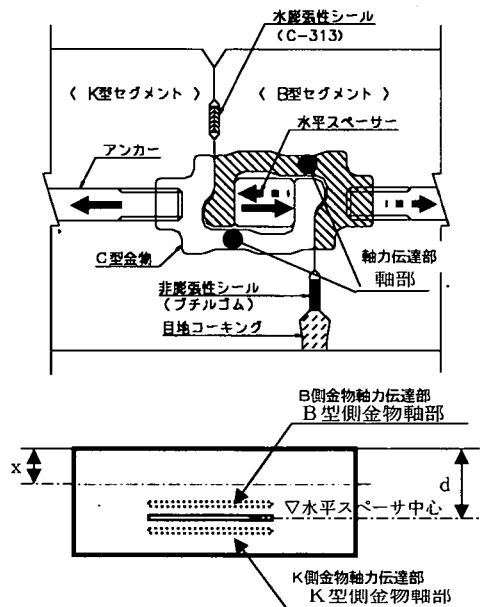


図-30 継手部の設計断面

力度を示したものである（内縁側にはひずみゲージ設置不可）。図中の設計荷重は図-30のC形金物の軸力伝達部を引張り材とするRC断面で引張合力を求め、その合力により軸力伝達部の外縁側が許容圧縮応力度（SM490A： $\sigma_{sa} = -215 \text{ N/mm}^2$ ）に達するときの抵抗モーメントに相当する荷重を表しており、そのときの外縁側応力度は引張合力による軸引張と合力作用位置の偏心による曲げ圧縮を考慮して算定している。図-29によると、C形金物と水平スペーサが完全に接触していない荷初期の段階ではある荷重レベルまでC形金物には応力は生じていないが、その後は荷重に比例して圧縮応力が増加していることがわかる。よって、曲げモーメントを確実に伝達しているものと考えられる。

以上の結果から、継手部はRC理論に基づいてC形金物の軸力伝達部を引張り材とするRC断面で引張合力を求め、その合力による軸引張と合力作用位置の偏心による曲げ成分を考慮することで設計を行うことが可能と判断できる。なお、荷側に近いB型金物の方がK型側よりも大きな圧縮応力度が計測されているが、これはひずみ測定位置が圧縮域に近いためにその影響を受けたものと考えられる。

## 7. 適用範囲の検討

3ヒンジ静定構造を有する新しいセグメントに対する合理的な設計法を提案し、設計法の妥当性を確認することができた。本工法の適用にあたり、より一層のコスト削減を図るためには、セグメントを標準化するとともに、その適用範囲を明らかにすることが重要である。それにより、対象工事への本工法適用の可否を容易に判断でき、円滑な事業推進を図ることができる。さらに、従来ではプロジェクトに合わせてオーダーメイド的にセグメントの製造を行っていたのに対して、レディーメイド的にセグメントを製造することが可能となり、この面からのコスト削減を期待することも可能となる。

ここでは、提案した設計法に基づいて、仕上がり内径2,000mmのコンパクトセグメントの適用範囲の検討結果について示す。

### (1) セグメントの仕様

適用範囲の検討にあたり、セグメントの仕様を標準化する必要がある。

本文では、セグメントの桁高を150mm（有効厚さ：100mm+防食層：50mm）として議論を進めてきた。これは、本工法の開発着手時点では、二次覆工一体型セグメントの概念が明確になっていなかったこと、および施工システムを検討する上で桁高が非常に大きな制約条件と

なることから、上記のように桁高を150mmに設定して開発を進めることとした。それにともない、関連する荷重試験等も桁高150mmで実施してきた。

一方、東京都下水道局では、本「コンパクトシールド工法」の開発に並行し、コスト削減の一方策として、合流や汚水管渠に適用する「二次覆工一体型セグメントの導入」について検討を進め、このほど『二次覆工一体型セグメント設計・施工指針（案）』<sup>9)</sup>を策定した。本指針（案）では、“二次覆工一体型セグメントの基本構造となるセグメントの形状寸法は、「下水道シールド工用標準セグメント」<sup>1)</sup>に準ずる”と規定している。

コンパクトシールド工法のセグメントは「二次覆工一体型セグメント」に分類されることから、上記指針案の規定を適用することとした。これにより、セグメントの桁高は、下水道シールド工用標準セグメントの当該径に対する、有効厚さ125mmに防食層50mmを加えた175mmで標準化を図ることとした。なお、セグメント桁高が150mmから175mmに増えることによる施工システムへの影響については、セグメント分割の見直し等を要するものの、施工システムが成立することを確認している。

以上より、適用範囲の検討にあたり、セグメントは使用する材料により次の2タイプを設定した。なお、セグメント幅は1,000mmとした。

- ・タイプⅠ（標準仕様）：コンクリートの設計基準強度は $42 \text{ N/mm}^2$ で、主鉄筋はD13-8本。
  - ・タイプⅡ（高強度仕様）：コンクリートの設計基準強度は $54 \text{ N/mm}^2$ で、主鉄筋はD16-10本。
- タイプⅠセグメントの標準断面を図-31に示す。

### (2) 検討条件

地盤および荷重条件はシールド工用標準セグメントに準じて設定し、これらの主荷重に対して検討する。検討条件を表-7に示す。

### (3) 検討方法

検討方法を以下に示す。

- ・提案した設計法により断面力を算定する。
- ・リング継手には前述した3種類の継手（ホークカット

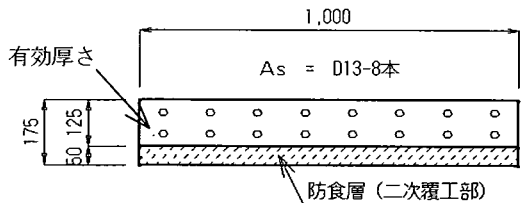


図-31 タイプⅠセグメントの標準断面

表-7 検討条件

		ケース a	ケース b	ケース c	ケース d	ケース e
土質		非常に締まった砂質土、固結した粘性土	締まった砂質土、固い粘性土	緩い砂質土、中位の粘性土	軟らかい粘性土	非常に軟らかい粘性土
N 値	砂質土	30 ≤ N	15 ≤ N < 30	N < 15	—	—
	粘性土	25 ≤ N	8 ≤ N < 25	4 ≤ N < 8	2 ≤ N < 4	N < 2
土圧の考え方		緩み土圧			全土圧	
地盤の種類		土水分層地盤			土水一体地盤	
土の単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )		18				
土被り比(Ho/Do)		2.0, 3.0, 4.0				
地下水位		G.L. -0.0 m (高位) G.L. -土被り/2 m (中位)			—	
側方土圧係数		0.35	0.45	0.55	0.7	0.8
地盤反力係数 (MN/m <sup>2</sup> )		50	30	10	2.5	0
上載荷重 (kN/m <sup>2</sup> )		10 ただし、緩み土圧の場合は 0				
土の内部摩擦角 (°)		30		20	—	—
土の粘着力 (kn/m <sup>2</sup> )		0		0	—	—

注) 最小緩み高さは 2Do とする。 Do: トンネル外径(m), Ho: 土被り(m)

表-8 検討結果

土被り比	地下水位	ケース a	ケース b	ケース c	ケース d	ケース e
		緩み土圧			全土圧	
2.0	高位	○	○	○	○	○
	中位	○	○	○		
3.0	高位	○	○	○	タイプⅡ	○
	中位	○	○	○		
4.0	高位	○	○	○	タイプⅡ	○
	中位	○	○	○		

注) ○; 標準仕様(タイプⅠ)の適用可, タイプⅡ; 高強度仕様(タイプⅡ)の適用を要する

トアンカー式、ノブ型、カプラ型)を想定し、リング継手のせん断ばね定数は 60,000kN/m とする。前述の 3 種類の継手に対しては、図-22 に示す試算結果より、正曲げについての最大値を与えるせん断ばね定数を採用したものである。負曲げについては、せん断ばね定数を小さく設定した場合に大きな値を示すことになるが、図-22 より、絶対値がほぼ同程度であること、および後述のようにひび割れ照査でより厳しい条件となる正曲げ側の最大値を与えるせん断ばね定数を用いることとした。

- 断面力の算定では防食層(50mmの無筋コンクリート層)を構造部材の一部として考慮する。ただし、防食層は供用期間中に生じる劣化や磨耗によって消失することが考えられるため、主断面の応力度算定にあたってはこれを無視することとする。
- 二次覆工一体型であることから曲げひび割れについ

ても照査する。ひび割れの照査はコンクリート標準示方書<sup>13)</sup>を参考にし、トンネル内面の照査位置は防食層と本体構造部の境界とする。

#### (4) 検討結果

検討結果を表-8 に示す。表中の「ケース d; 軟らかい粘性土における土被り比(Ho/Do)が 3.0 および 4.0」において、高強度仕様(タイプⅡ)の適用となるが、それ以外は標準仕様(タイプⅠ)の適用が可能との試算結果が得られた。

なお、トンネルの重要度に応じて地震の影響を別途検討する必要がある。



## 8. 結論

### (1) 継手剛性およびリング挙動について

継手剛性およびリング挙動を確認するために実施した各種要素試験および性能確認試験から、以下のことが確認された。

- ・ リング継手のせん断ばね定数はホークカットアンカー式が5,000kN/mであり、ノブ、カブラ式はそれより1オーダー大きな値である。また、これらのリング継手は十分なせん断耐力を有している。
- ・ 剛結合部のB-K間継手は十分な強度を有し、土水圧等の外圧により軸力が作用した場合は十分な曲げ剛性を期待できる。
- ・ ナックル継手は、曲げ荷重に対して正常に回転動作するとともに、荷重変化に対しても発生曲げモーメントはほぼゼロのまま一定であることから、ヒンジと見なすことができる。
- ・ リング載荷試験より、各リングが3ヒンジ構造（静定構造）として挙動することが確認でき、千鳥組の影響は小さい。一方、シールドテール内のセグメントの組立に際しては、千鳥組による効果を実施工より確認している。
- ・ 通常想定されないような厳しい荷重状態でも3ヒンジ構造としての挙動を示す。これらの荷重状態は、土被り相当の内圧が作用する管路において土被りの約6割が近接施工により掘削された状態に相当するものである。また、土被りの1.5倍相当の内圧が作用した状態や管頂部の軸力がゼロとなった場合においても、ナックル継手の止水性は確保される。

### (2) 設計法について

コンパクトセグメントの設計には、3ヒンジ構造モデルの採用が可能であり、リング継手の添接効果を積極的に利用することでより合理的な覆工設計が可能となる。これらを考慮して、以下の設計法を提案した。また、その設計法がシミュレーション解析により概ね妥当であることを検証した。

- ・ 構造計算モデル：「はり-ばねモデルによる計算法」を適用する。
- ・ ヒンジ部：I-A、I-BおよびA-K間のナックル継手はヒンジと見なし、回転ばね定数はゼロとする。
- ・ 剛結合部：B-K間の継手（C形嵌合継手）は本体と同等の剛性を持つものと評価し、回転ばね定数は無限大とする。
- ・ リング継手：せん断ばね定数は、使用するリング継手のせん断試験により得られた値を用いることを基本とする。本文で提案した3種類の継手については、60,000kN/mを採用してよい。

また、剛結合部のB-K間継手はRC理論に基づいてC形金物の軸力伝達部を引張り材とするRC断面で引張合力を求め、その合力による軸引張と合力作用位置の偏心による曲げ成分を考慮することで設計を行うことが可能である。

### (3) 適用範囲について

有効厚さを125mmとする仕上り内径2,000mmのコンパクトセグメントの適用範囲を、提案した設計法に基づいて検討した。その結果、前述のように一部の地盤条件で高強度仕様のタイプIIの適用となるが、それ以外はすべて標準仕様のタイプIの適用が可能であることが確認できた。

## 9. おわりに

コンパクトシールド工法は、東京都が実施している下水道管渠の再構築事業を効率的かつ効果的に推進するために、新たに開発したシールド工法である。本文は、新しい構造系を有する「コンパクトセグメント」の開発背景、提案する設計法、載荷試験による検証結果および適用範囲について論じた。今後、実際の現場施工をとおしてセグメントおよびシールドの計測、その他施工に関する実績データの蓄積を行い、その結果を設計にフィードバックし、本工法の完成度をさらに高めたいと考えている。

謝辞：本研究の実施にあたって、多大なる協力を頂いた関係各位に深く謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 土木学会・日本下水道協会共編：シールド工用標準セグメント、2001。
- 2) 守屋洋一、勝沼清、関本昇、前田正博、串山宏太郎：後方設備内包型3分割シールドの開発、第56回土木学会年次学術講演会講演概要集、VI-005、2001.10。
- 3) 金崎伸夫、前田正博、串山宏太郎、出口敏行、北原陽一：下水道シールドトンネルにおける二次覆工工程の省略、第56回土木学会年次学術講演会講演概要集、VI-004、2001.10。
- 4) 勝沼清、守屋洋一、山本征彦、前田正博、串山宏太郎：ガイドローラ付きタイヤ式無操舵搬送システムの開発、第56回土木学会年次学術講演会講演概要集、VI-004、2001.10。
- 5) 東京都下水道局：二次覆工一体型セグメント設計・施工指針（案）、2002.5。
- 6) 大長唯宏、田代博海、大塚弘己、岡本達也：締結力を有す

- る内面平滑セグメント（オートチェックセグメント）の開発（その3）ーリング継手（ノブ形継手）の性能実験ー，第54回土木学会年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-B78，1999. 9.
- 7) 矢郷隆浩，秋田谷聡，津田達也，槇島礼智，野田朋貴：二次覆工省路に適したシンプロセグメントの開発（2）ー継手実物試験ー，第55回土木学会年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-B123，2000. 9.
- 8) 藤堂憲幸，鈴木昭彦，菅野孝之，射場康平，木村定雄：二次覆工省路に適したシンプロセグメントの開発（3）ー現場試験施工ー，第55回土木学会年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-B124，2000. 9.
- 9) 木村定雄，矢郷隆浩，射場康平，槇島礼智，野田朋貴：挿入締結型ジョイントを用いたセグメントリング間継手の開発，トンネル工学研究論文・報告集第9巻，pp. 337-342，1999. 11.
- 10) 土木学会：トンネル標準示方書〔シールド工法編〕・同解説，1996.
- 11) 土木学会：トンネル・ライブラリー第6号セグメントの設計，pp. 39-40，1994. 6.
- 12) ほぞ付きセグメント工法研究会：ほぞ付きセグメント工法技術資料，1995. 4.
- 13) 土木学会：平成8年制定・コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp. 86-92，1996.
- 14) 前田正博，串山宏太郎：コンパクトなシールドシステムの開発と実用化-東京都下水道局 三筋：鳥越付近再構築工事-，トンネルと地下，pp. 55-63，2001. 8.
- 15) 山森規安，武田邦夫，横田正和，前田正博，串山宏太郎：内面が平滑な溝付き二次覆工一体型セグメントの継手構造，第56回土木学会年次学術講演会講演概要集，VI-003，2001. 10.
- 16) 田中秀樹，焼田真二，柴田祐亮，前田正博，串山宏太郎：溝付き二次覆工一体型セグメントの載荷試験，第56回土木学会年次学術講演会講演概要集，VI-002，2001. 10.
- 17) 寺田武彦，前田正博，松浦将行，武田邦夫，宇田川徳彦：4分割3ヒンジ構造セグメントのリング載荷試験に関する一考察，第57回土木学会年次学術講演会講演概要集，VI-039，2002. 9.
- 18) 宇田川徳彦，前田正博，串山宏太郎，北野良典，桐谷祥治：内圧を作用させたリング載荷試験時における4分割3ヒンジ構造セグメントの挙動について，第57回土木学会年次学術講演会講演概要集，VI-041，2002. 9.

(2002. 10. 15 受付)

## A PROPOSAL OF DESIGN METHOD FOR COMBINED SECONDARY LININGS WITH 4-PART 3-HINGE SEGMENT STRUCTURE

Masahiro MAEDA, Koutarou KUSHIYAMA and Masayuki MATSUURA

We have developed and introduced new Shield Tunneling Method, 'Combined Secondary Lining with 4-part 3-hinge Structure' for construction of major branch sewer that is a main part of re-construction plan for sewerage system in Tokyo District. It is necessary to propose the design method to introduce the new structure because the segment is completely different from conventional system. We have conducted the load test using full-size model to verify the adequacy of our design. The test result concluded that our design method, using beam-spring model which is adopting 0 as rotating spring coefficient at hinge joint, same flexural rigidity as main body at rigid joint and the test result value as shearing spring coefficient at ring joint, is adequate.