

二次覆工省略型小口径RCセグメントの開発

福居雅也* 荒川賢治*
柳原純夫** 奥野三郎**

1. まえがき

仕上り内径 3000 mm以下のシールドトンネルでは、通常、鋼製セグメント+二次覆工コンクリートでトンネル構築が行われている。これは、仕上り内径 3000 mm以下のシールドトンネルでは鋼製セグメントがRCセグメントに比べ廉価であること、小口径トンネル内のセグメント搬送や組立て時の施工性が良好でセグメントの割れ・欠けの懸念がないこと等のためである。

一方、小口径トンネルにおいてトンネル施工費の低減を図るために、二次覆工を省略すればトンネル径が縮小できる(図-1)。二次覆工を省略する場合、鋼製セグメントでは防錆上の問題から適用が困難であるため、RCセグメントの適用が前提となる。しかも覆工内面に継手用のボルトボックス等がなく平滑であるRCセグメントが望まれている。

これらを背景に、内面が平滑で二次覆工省略に適したRCセグメントとしてすでに実用化している『ハニカムセグメント¹⁾(写真-1)』を基本に、新しいピン式継手を用いた『二次覆工省略型小口径ハニカムセグメント』の開発を行った。このセグメントは経済性を考慮して分割数を4に限定し、仕上り内径 3000 mm以下(適用最小内径 2000 mm)を対象としている。



写真-1 ハニカムセグメント出来形状況

2. 二次覆工省略型小口径ハニカムセグメントの概要

小口径用ハニカムセグメントは図-2、3に示すよ

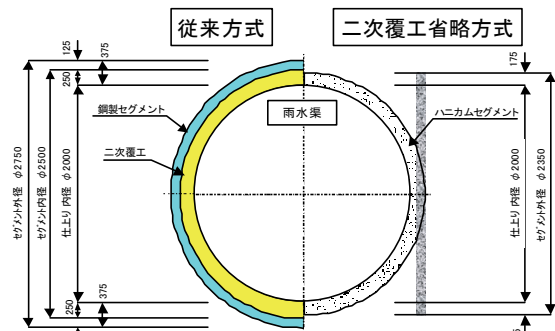


図-1 従来方式と二次覆工省略方式との比較

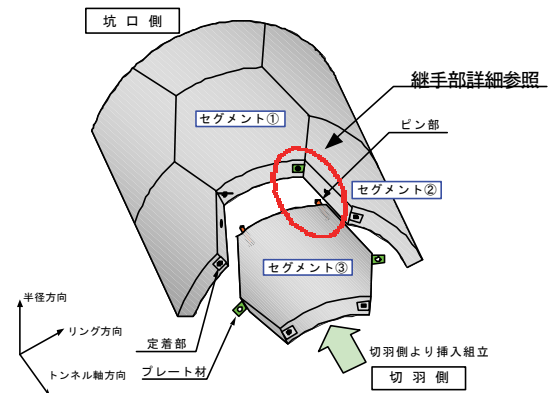


図-2 二次覆工省略型小口径ハニカムセグメント組立概念

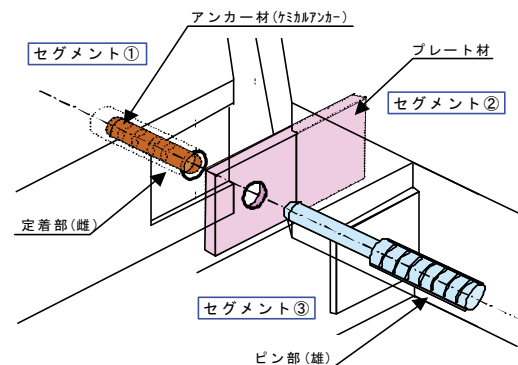


図-3 継手部詳細

*技術本部技術開発部 **技術本部土木部

うにセグメントを軸方向に挿入して組立てられ、六角形の頂部に取付けたプレートを軸方向にピン継手で挟込む連結構造(図-3)である。

ピン継手は定着部にアンカー材(エポキシ樹脂系ケミカルアンカー)をあらかじめ挿入し、ピンでアンカー材を押潰して定着させ、継手に曲げモーメントが作用してもピンで連結されたプレートが、曲げ引張り作用による継手の目開き変形を抑制する。

3. 新継手方式(ピン式継手)の開発

3.1 ピン式継手要素試験

a. 試験概要

ケミカルアンカーを用いたセグメント用のピン継手は、我が国でも初めての試みであり、基本的な引抜き耐力や地震時の検討に必要なばね定数を検証する目的で、写真-2に示す試験用の供試体を万能試験機を用いて、低荷重レベルから徐々に荷重を増加させ、荷重載荷と除荷を繰り返す引抜き試験を行った。

供試体にはM18(定着長約10cm、20cm)のねじ切りピンを用い、定着部は径φ22mmの鋼管を用いた。また、ピンの形式には耐震性を考慮し、ピン継手のばね定数が小さいと考えられる図-4に示す二重管タイプのピン継手の繰り返し引抜き試験もあわせて実施した。

b. 試験結果

引抜き耐力は定着面積と図-5に示すように高い相関があり、定着面積あたり9N/mm²である結果が得られた。ピン継手1箇所あたり(定着長10cmの場合)の最大引抜き耐力は約100kN/本であり、この値は計算上のコンクリートの極限引抜き耐力に相当している。

図-6に示すようにピンの繰り返し载荷により残留変位はあるものの、最大引抜き荷重の低下は小さい。また、図-4に示した二重管タイプのピン継手はねじ切りピン継手に対して、50%以下のばね定数となった。

c. トンネル軸方向の耐震性能評価

前項の試験結果よりセグメントリング間の継手ばね定数を設定し、レベル2地震動に対する安全性について確認した。また、従来の標準的な継手(鋼板+短ボルト)を用いたRCセグメントとの相違を把握した。

(a) 計算方法

下記の指針および計算例に拠った。

i. 「下水道施設の耐震対策指針と解説-1997年

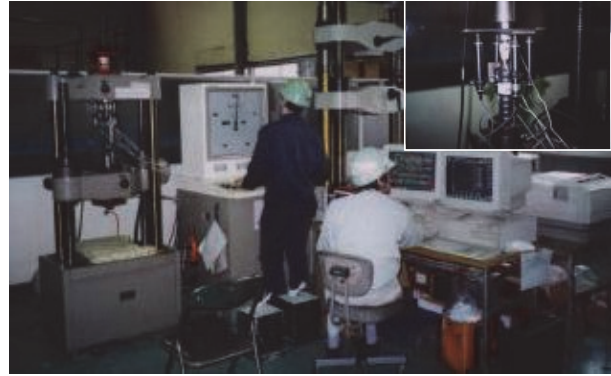


写真-2 継手要素試験状況 (右上:近景)

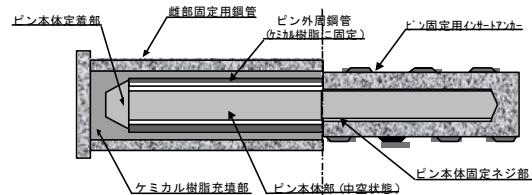


図-4 二重管タイプ継手の概念

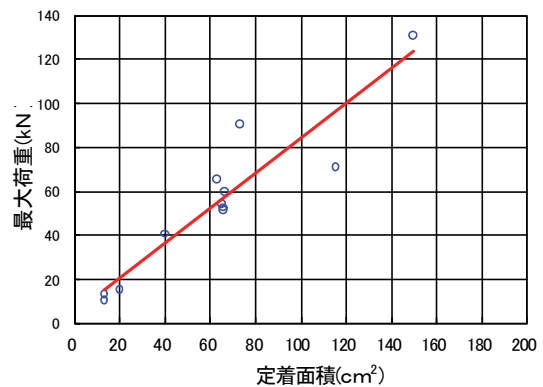


図-5 定着面積-最大荷重の相関

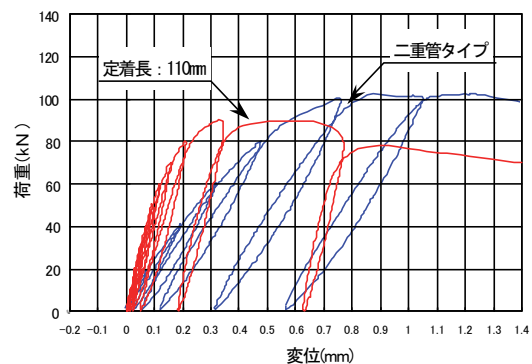


図-6 荷重-変位の相関

版)、(社)日本下水道協会

ii. 「下水道施設耐震計算例-管路施設編-平成13年4月」、(社)日本下水道協会

(b) 計算条件

トンネル位置および地盤条件を図-7に示す。地盤は「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」(平成8年

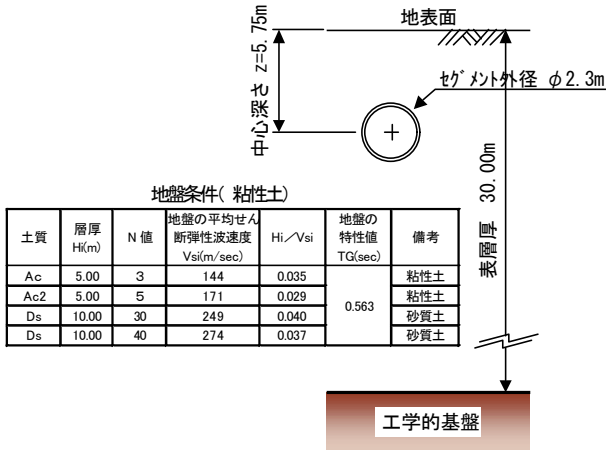


図-7 トンネル位置および地盤条件

12月、(社)日本道路協会)で示される地盤種別II種を目安として多層地盤を設定した。なお、検討対象地盤は粘性土および砂質土について実施した。本稿では粘性土について以下に報告する。

セグメントは外径 2.3m、内径 2.0m、幅 1.0m とし、ピン式継手の定着長は 110mm、225mm および 130mm (二重管タイプ) とした。

(c) 地盤変位の設定

応答変位法の外力として入力される地盤変位は、一次元地盤応答解析プログラム「shake」により算定した。地盤のせん断弾性係数、減衰定数の歪み依存特性(非線形性)は、等価線形化法により考慮している。入力地震動は、減衰定数 15%における速度応答スペクトルが「下水道施設の耐震対策指針と解説」で示されるL2地震用設計用速度応答スペクトルに一致するように振幅特性を繰返し計算により調整した模擬地震波を用いた。位相特性(波形特性)は1985年兵庫県南部地震においてポートアイランドのGL-83mで観測されたNS成分波を使用した。目標応答スペクトル(日本下水道協会、設計用速度応答スペクトル)と入力地震動(shake入力)の速度応答スペクトルを図-8に示す。また、入力地震動の加速度波形(最大加速度 465Gal、継続時間 20秒)および解析に用いたせん断弾性係数、減衰定数の歪み依存特性をそれぞれ図-9、図-10に示す。

(d) 計算結果

「shake」により算定した地盤の水平変位分布を図-11に示す。ここに示される変位分布は動的応答解析により求まる各時刻の変位分布結果のうち、管路中心における変位が最大となる時刻における水平変位を

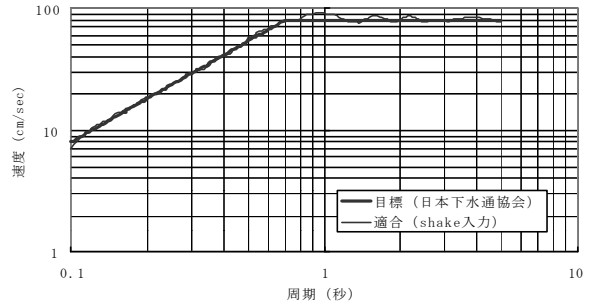


図-8 入力地震動速度応答スペクトル

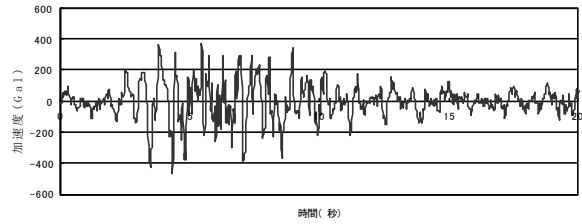


図-9 入力地震動加速度波形

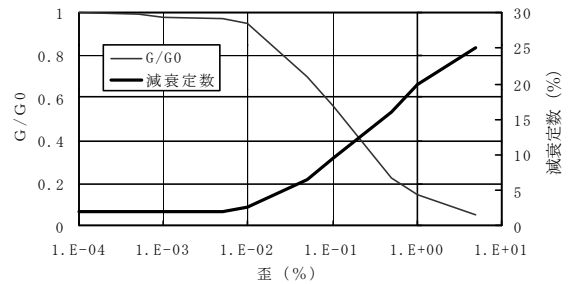


図-10 地盤歪み依存特性

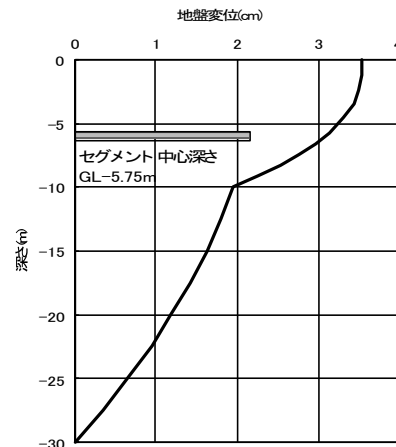


図-11 地盤水平変位分布

抽出したものである。地中管路構造物の軸方向応答は管路中心位置における地盤変位に大きな影響を受ける。計算の結果、地表変位が 3.5cm、管路中心位置における変位が 3.1cm となった。

図-12 に粘性土におけるアンカー定着長 110mm および二重管タイプのケースの応答解析結果を示す。計算の結果、以下のことを確認した。

- i. アンカー定着長 100mm の場合、L2地震動に対する応答値は実験最大荷重（コンクリート圧縮破壊荷重）の 80%程度となる
- ii. 二重管タイプの場合、L2地震動に対する応答値は実験最大荷重の 20%程度となる
- iii. 継手部の変位は 0.1mm 程度と微小であり、今回設定した地盤条件よりさらに軟弱な地盤への適用も可能である
- iv. 鋼板+短ボルトのばね定数は二重管タイプとほぼ同様であるが、発生軸力は二重管タイプに比べ大きい

以上より、標準的な沖積地盤ではアンカー定着長 100mm 程度の継手が、また、超軟弱地盤あるいは地層境界の局所的に地盤歪みが急増する箇所等では二重管タイプの継手がそれぞれ適しているものと考えられる。

3.2 継手曲げ試験

a. 試験目的

試験では、変形特性の把握、継手部の目開き量や回転ばね定数の把握および継手の破壊荷重や破壊形態の把握を目的とした。

b. 試験方法

試験は軸力（リングあたり 50kN、100kN、135kN）を導入した継手曲げ試験および軸力を解除した破壊曲げ試験を実施した。また、供試体は平板形状で 2リング幅分とし、桁厚は 150mm とした（写真-3）。

荷重導入は図-13 に示すようにトンネル軸方向の変位を拘束した状態で、所定の軸力を導入した後、ローディングビームを介し 2点载荷により曲げモーメントを導入した。計測項目を表-1 に示す。

c. 試験結果

(a) 変形特性

図-14 に継手部曲げモーメント M_j と本体中央部の変位量 d の相関を示す。同図には各軸力レベルの許容曲げモーメント (Ma) および剛性一様と仮定した場合

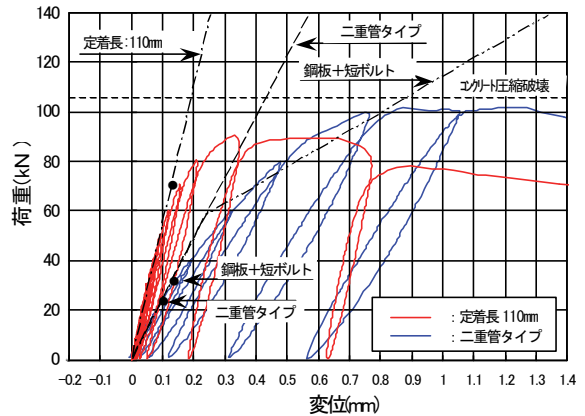


図-12 計算結果

合の計算上の変位量をあわせて示している。図-14 から、許容曲げモーメント付近を変曲点としてバイリニア的な挙動を示し、許容曲げモーメントレベルでの変位量は各軸力とも 4mm 以下であった。また、曲げ剛性有効率（剛性一様と仮定した場合の計算変位量/測定変位量）は各軸力とも 0.7 程度であった。

(b) 継手部の目開き量および回転ばね定数

図-15 に継手部曲げモーメント M_j と継手目開き量 δ の相関を示す。同図から、許容曲げモーメント作用時の継手の目開き量は各軸力とも 0.2mm 以下と微小であり、その際の継手回転ばね定数は軸力 100kN、135kN で 22000kN・m/rad/ring 程度であった。

(c) 継手の破壊荷重および破壊形態

継手の破壊時の曲げモーメントは許容曲げモーメント ($Ma = 9.8\text{kN}\cdot\text{m}/\text{ring}$) の 3.12 倍であり、シールド工事用標準セグメント（桁厚 150mm の鋼板+短ボルト

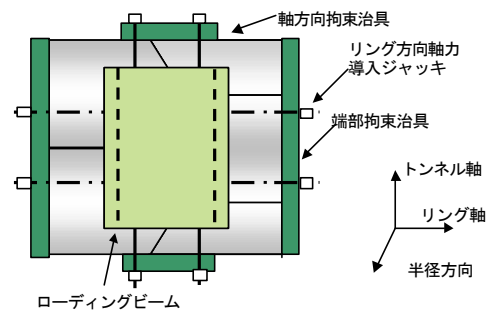


図-13 平板载荷継手曲げ試験装置概念



写真-3 継手曲げ試験状況

表-1 計測項目一覧

計測項目	使用計器	計測点数
継手目開き	クリップ型変位計	リング方向 3x2=6 点
変位	高感度変位計	内空鉛直変位 1 点
	CDPタイプ ストローク50~100mm	支承鉛直変位 4 点 計 5 点
コンクリート歪み	歪みゲージPL-60	リング方向 5 点 斜辺面桁高方向 2 点 計 7 点
プレート歪み	歪みゲージKGF-1	9 点

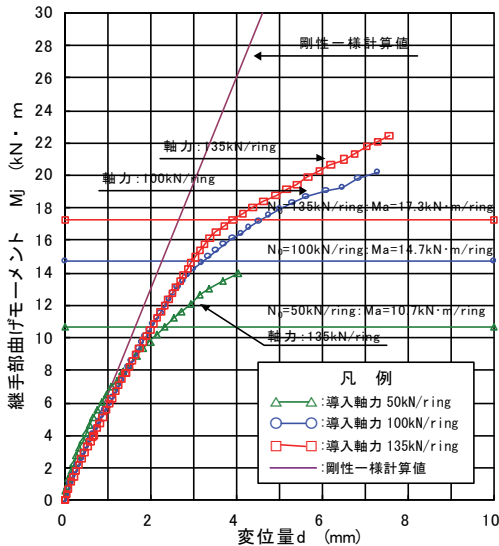


図-14 曲げモーメント-本体中央部変位量の相関

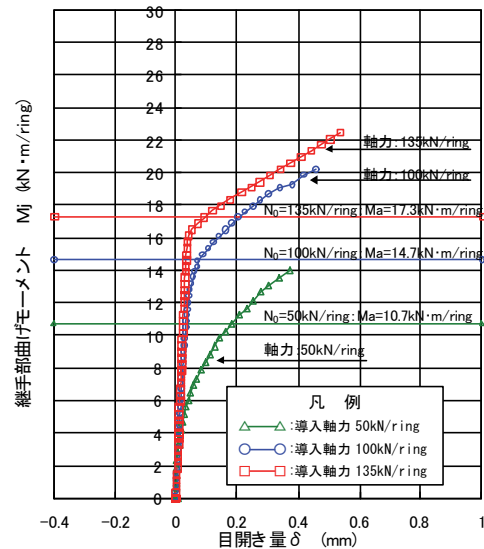


図-15 曲げモーメント-継手目開き量の相関

のRCセグメント)の継手破壊曲げモーメント 21kN·m/ring~27kN·m/ring と比べても同程度の強度を有していること、また、写真-4に示すように破壊形態は本体コンクリートのプレート定着部の引張り、せん断破壊が複合した状態であることがわかった。

4. シールド機械設備

小口径シールドトンネルの内空断面は図-16に示すように非常に狭隘なスペースとなる。

RCセグメントの割れ欠けを考慮し、シールド機械設備についても検討を実施した。検討にあたっては、作業スペースに制約の多い泥土圧シールドを対象に、仕上り内径φ2000mm、桁厚175mmで4分割のハニカムセグメントの条件でシールド機の試設計を行った。

4.1 基本的な考え方

試設計における基本的な考え方を以下に示す。

- i. セグメント分割数：4分割（経済性を考慮）
- ii. 止水シール：セグメント内外面の2条貼付
- iii. セグメント組立時の機械設備との離隔：50mm
- iv. 曲線施工を考慮

4.2 ハニカムセグメントの特長

六角形の同一形状をしたハニカムセグメントは通常の矩形セグメント（継手形式：鋼板+短ボルト）と比較して以下のような特長を有している。

- i. 腐食性環境下での二次覆工省略を考慮してセグメント内面の鉄筋かぶり 35mm²を確保した場合においても、最小桁厚 150mm まで適用可能



写真-4 継手部の破壊状況

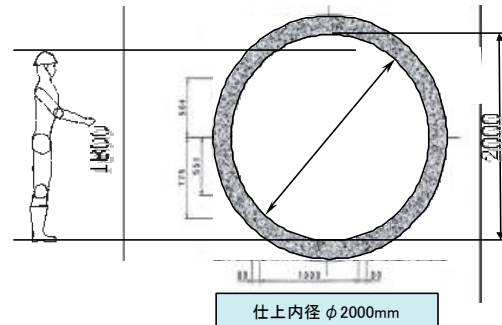


図-16 小口径シールドトンネルにおける内空断面概念

- ii. セグメント組立の際に六角形の斜辺角度に応じセグメントを回転し、見かけ上の弦長を小さくする（約10%減）ことにより挿入時のシールドジャッキとの離隔確保が可能（図-17）

4.3 シールド機の試設計

小口径ハニカムセグメント対応型シールド機の試設計を行い以下のことを確認した（図-18参照）。

- i. 22.5° 回転・挿入により、仕上り内径2000mmで4分割セグメントの搬入と組立が可能
- ii. スクリュコンベアを屈曲方式とすることで泥土圧シールドでも施工可能

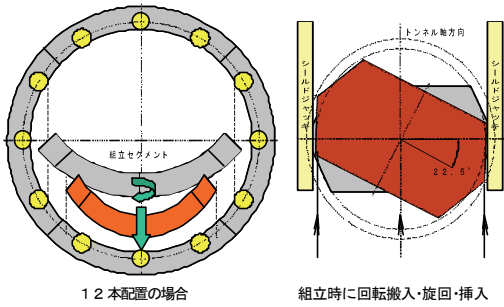


図-17 4分割ハニカムセグメントの組立概念

- iii. セグメント搬入はインバート部にオートキャリアを採用することによりエレクタまで搬送可能
- iv. 中折れ装置により半径30mまで曲線施工が可能

5. 適用範囲

通常の斜ボルト方式のハニカムセグメント、内水圧対抗型ハニカムセグメントおよび二次覆工省略型小口径ハニカムセグメントの適用範囲を整理したものを表-2に示す。

シールド工用標準セグメント²⁾の規定によれば、二次覆工を前提にセグメント外径3350mm(仕上り内径2600mm)までがセグメント分割数5であり、外径3550mm(同2800mm)以上では6分割とされている。

ハニカムセグメントにおいては分割数が偶数分割となることから、通常型ハニカムセグメント(内水圧対抗型を含む)の最小分割数はセグメント外径3350mm

表-2 小口径シールドトンネルにおけるハニカムセグメントの適用一覧

	継手形式	分割数	幅(m)	最小折厚(mm)	適用仕上り内径 [※] (m)						組立方式	
					~2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0~		
通常型ハニカムセグメント	斜辺継手ボルト(2本/ピース)	4, 6, 8, 10	1.0~1.5	175		2400~∞	2800~∞					ボルト自動締結装置標準装備
内水圧対抗型ハニカムセグメント	斜辺継手ボルト(2本/ピース)+内圧対抗嵌合継手(ハニカムロックポイント)	4, 6, 8, 10	1.0~1.5	175		2400~∞	2800~∞					ボルト自動締結装置標準装備
二次覆工省略型小口径ハニカムセグメント	ピン式継手	4分割のみ	1.0~1.2	150			2000~2400					回転挿入方式
					同時施工適用せず							

※: 適用仕上り内径の下限は『同時施工』の適用範囲を示す。

(仕上り内径2600mm)以下で4分割とした。また、最小仕上り内径は鉄筋と継手ボルトシース管との離隔を十分に確保するために2400mmとした。

一方、二次覆工省略型小口径ハニカムセグメントは4分割に限定して考え、通常型ハニカムセグメントとの適用区分から、適用範囲は仕上り内径2000mm~2400mmとした。

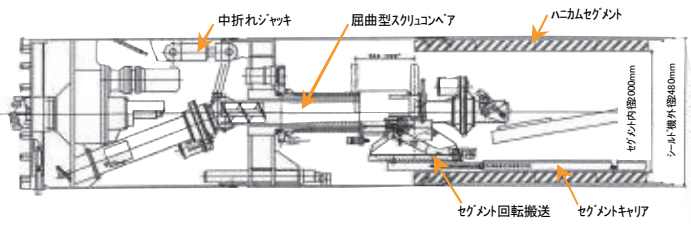


図-18 小口径ハニカムセグメント対応型シールド機(試設計)

6. あとがき

小口径シールドトンネルを対象に、二次覆工省略型RCセグメントを開発した。小口径トンネルに対応して従来の長ボルトの継手に替えてボルト締結が不要なピン式継手を考案し、継手曲げ試験等を行い実用性と強度を確認した。また、レベル2地震動を対象とした耐震検討においても、二重管タイプのピン継手を併用することによりトンネル縦断方向の引張り力に対して柔軟に対応可能であることを確認した。

さらに、狭隘な小口径トンネルでのセグメントの円滑な搬入や組立てを可能とするシールド機械設備についても六角形状に対応した独自の搬入・組立て方式を開発し、実用化への目処がついた。試算の結果、経済性については通常の鋼製セグメント+二次覆工コンクリートと比較して径別に数%~10%程度のコスト低減が可能であることがわかった。

なお、本研究開発のうちセグメント関係は石川島建材工業㈱との共同開発であり、シールド機械設備については奥村機械製作㈱に協力願った。また、開発全般にわたり早稲田大学理工学部小泉淳教授に技術指導をいただいた。最後に、本研究開発にあたりご指導、ご協力いただいた関係各位に感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 株奥村組・石川島建材工業㈱、「先端建設技術・技術審査証明報告書 ハニカムセグメント」、(財)先端建設技術センター、1997.3
- 2) (社)土木学会・(社)日本下水道協会共編、「シールド工用標準セグメント-下水道シールド工用セグメント-(JSWAS A-3, 4-2001)」、(社)日本下水道協会、2001.7