

大口径推進工法に対する分割型 PC 推進管の適用性

APPLICATION OF HALVED PIPE USING PRESTRESSED CONCRETE TO LARGE DIAMETER PIPE JACKING

西川和良¹⁾・須川智久²⁾・植竹克利³⁾・石川 眞⁴⁾・石橋信利⁵⁾

Kazuyoshi NISHIKAWA, Tomohisa SUGAWA, Katsutoshi UETAKE, Makoto ISHIKAWA, Nobutoshi ISHIBASHI

Pipe jacking is the one of the urban tunneling methods in JAPAN. This method might be more profitable than prevalent shield tunneling when the tunnel length is extremely short. However, the large diameter jacking pipe which is more than 3.0m i.d. has not been applied so far due to transport height limitation based on the Road Traffic Control Row. Therefore, the authors suggest that halved casting pipe enables easy transportation without any restriction and it can be combined by tensioning around a launch shaft then installed underground by jacking as same as a conventional method.

This paper concludes about the application of the halved pipe using prestressed concrete as a result of the basic performance test in compliance with the Japanese sewage jacking pipe specification.

Key Words: halved pipe, pipe jacking, prestressed concrete, large diameter, transportation

1. はじめに

推進工法は、工場で製造された推進管に先導体を取り付け、立坑内よりジャッキの推進力により管を地中に圧入して管渠を敷設する工法である¹⁾。日本下水道協会規格では、内径 800mm から 3000mm の標準管が規定されているが、内径 3000mm を越える実績はほとんどない²⁾。これは、管を運搬する際、車両の積載高さに関して、道路交通法施行令に基づく制約を受けるためである。

近年、都市部の浸水対策上、需要の多い雨水貯留管などを例にとると、内径 3000mm を越えるが、管渠延長が短いために、シールドトンネルでは経済的に不利となることが考えられ、推進工法が適用できれば、推進機・推進設備の転用や推進管の標準化により、建設コストの縮減につながる可能性がある。

そこで、著者らは、内径 3000mm を越える管渠に対し、2 等分割の推進管を工場製作して現地へ運搬し、立坑付近でプレストレスを導入して一体化した後、通常の推進管として使用する工法を提案する。緊張システムについては、プレストレストコンクリート構造を特徴としたシールドトンネル用セグメント³⁾の要素技術が応用できる。しかし、推進工法用鉄筋コンクリート管では、鉛直断面方向の土水圧荷重に加え、管軸方向にも過大な推進力を受けるため、実物大の推進管を製作し、その性能を検証する必要がある。

本論文では、工法概要に触れ、プレストレスの優位性を定性的に確認すると共に、実物大の供試管を用いた基本性能試験結果に考察を加える。結論として、内径 3000mm を越える推進管では 2 等分割した管を PC 構造で一体化することで、鉄筋コンクリート管より構造的に優位なうえ、適用性が高いことを提唱する。

1) 正会員 三井住友建設株式会社 土木事業本部 P&PC プロジェクト室

2) 正会員 三井住友建設株式会社 技術研究所 土木研究開発部 地盤基礎研究室

3) 正会員 住建コンクリート工業株式会社 技術開発部

4) 正会員 工修 横浜市下水道局 管理部 保全課

5) 元社団法人 日本下水道管渠推進技術協会

2. 工法概要

あらかじめ緊張定着体、シースを埋め込んだ 2 等分割半円形の推進管を工場で製作する。接合精度を確保するため、管断面方向の継手面に仕切り版を設け、1 回のコンクリート打設で推進管 1 本分の製作を行う。十分な養生を行った後、低床トレーラー等により、施工現場まで運搬する。立坑の周辺で、分割管を卸すとともに、円形に組み立てる。アンボンド PC 鋼材を管外面に設けた切り欠き部から挿入し、円周方向に 1 周させた後、センターホールジャッキで緊張定着し、2 等分割した管を接合する。次に、埋め込まれた鋼製カラーの溶接を行うと同時に、PC 鋼材とシースの間隙に PC グラウトを注入した後、切り欠き部を無収縮モルタルなどで充填する。分割型推進管の構造を図-1 に示す。完成した推進管は、立坑上から推進架台上に吊り卸し、推進設備により地中に圧入することで管渠を築造する。現地で管体組み立てに必要な工程は増えるが、管体を直接推進する工程に与える影響は少なく、従来の施工法がそのまま適用できる。

なお、本工法では、運搬可能な重量を勘案し、内径 3000mm を越え 5000mm までの推進管を対象とする。

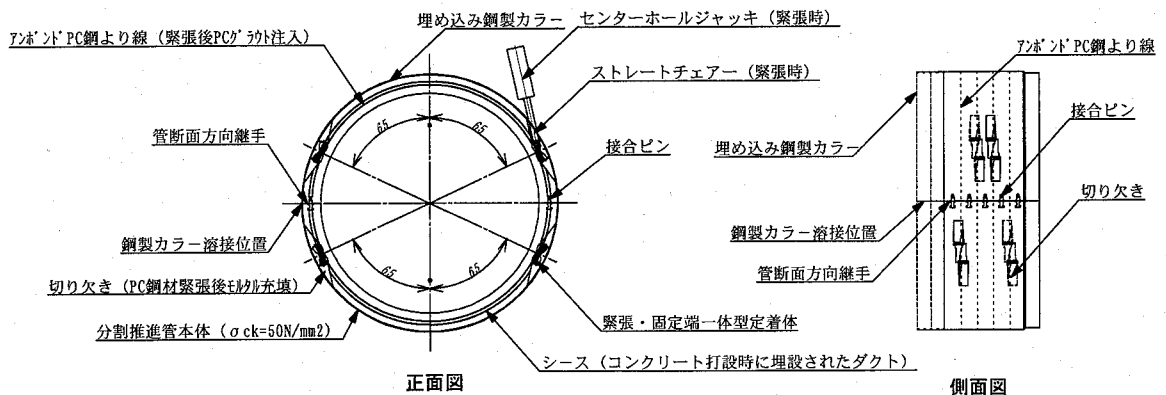


図-1 分割型 PC 推進管

3. 構造概要

3.1 管体の仕様

内径 3000mm を越える推進管の強度を試験で求めるには困難を伴う。そこで、まず、日本下水道協会標準管の内径とひび割れ荷重の関係および縁引張応力度の関係を求める。得られた近似式を内径 3500mm から 500mm 間隔で 5000mm までの管体に適用し、必要な管厚さを推定する。次に、管厚さを低減させるため、断面係数が減少しても曲げ応力度が同等となるプレストレスを導入する。内径 5000mm では、鉄筋コンクリート管と比較して、管厚さを最大 20% 低減できる（図-2）。管の外圧強さをひび割れ荷重で評価する現行の規定では、フルプレストレス構造により経済的断面が得られ、管の内径と厚さの標準化が容易となる（表-1）。

表-1 管厚さとプレストレス量

内径 (mm)	管の 厚さ (mm)	断面係数減少分の 増加応力度 (N/mm²)		所要プレストレス (kN/m)	
		1 種管	2 種管	1 種管	2 種管
3500	275	0.7	1.3	193	0330
4000	300	1.2	2.2	360	0660
4500	325	1.8	3.1	585	0975
5000	350	2.3	4.0	805	1365

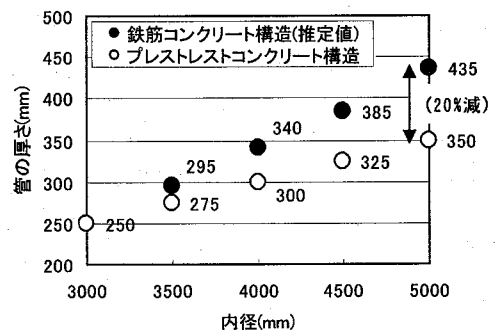


図-2 内径による管厚さの比較

3.2 継手の仕様

3.2.1 管断面方向の継手

2等分割した推進管は、接合ピンによりコンクリート面の突き合わせを調整して、プレストレスにより一体化した構造とし、曲げ剛性一様な円筒管と考える。施工時には、鉛直方向に土圧・水圧、管軸方向に推進力が作用し、2軸における複雑な荷重状態となるため⁴⁾、継手全断面を圧縮状態にして剛性を確保する。ただし、継手の最適な位置については、管の外圧試験により検証する。継手の止水方法は、継手面にシール溝を設けて、水膨張系シール材を貼付する(図-3)。シール材は、プレストレスによりシール溝に確実に封入されて密封効果が向上する。このシール材は、埋め込み鋼製カラーのリップ板背面を周回する止水シール材を折り返しラップさせる。また、差し口側は、ゴム輪とラップさせて地下水の浸入を遮断する。

また、方向制御推進時には、管体に偏向荷重が作用すると、偶力の影響により管断面方向の継手がずれる可能性がある。この管軸方向のせん断に対抗するため、管断面方向の継手にピンを設ける。この接合ピンは、推進管組立ガイドとしての機能も果たす。接合ピンの必要本数は、施工時荷重を想定したFEM解析で得られる断面力等を利用し、ピンの耐力とプレストレスによる摩擦抵抗力を考慮して定める。

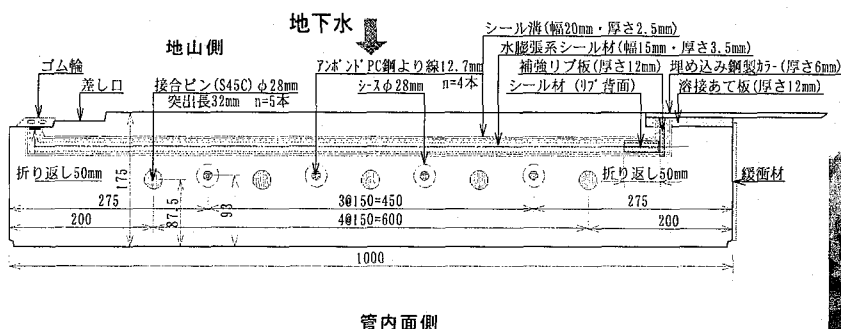


図-3 管断面方向継手(内径2000mm供試管)

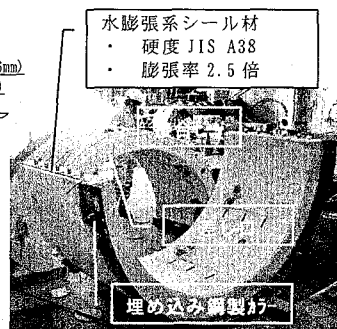


写真-1 供試管

3.2.2 管軸方向の継手

写真-1に示すように、管軸方向の継手は、日本下水道協会規定の継手構造に従い、埋め込み鋼製カラーとコンクリート差し口による構造とする。また、推進管が管軸方向に接する部分には緩衝材を設ける。

4. 基本性能試験

日本下水道協会規定の試験方法に準じた基本性能試験を実施した。供試管の形状寸法は、試験装置の規模も勘案し、内径4000mmの1/2の仕様とすると、内径2000mm、管厚さ150mm、長さ1000mmとなる。本試験では、内径2000mm標準管の性能と比較することも重要と考え、管厚さを175mmとし、プレストレスの導入効果に着目する。PC鋼材は、製作方法の検証も兼ね、内径2000mmでは配置上の限界となるφ12.7mmアンボンドPC鋼より線を4本配置することにした。主鉄筋量は、標準管と同等の主鉄筋比0.8%とした。

4.1 緊張・組み立て試験

4.1.1 概要

実際の施工に合わせ、2等分割の推進管を架台上で組み立て、PC鋼材の挿入から緊張定着までの作業を行う。継手目違い・真円度を変位計で、プレストレスの減少⁵⁾を緊張定着部に設けたロードセルで計測する。なお、組立完了後の推進管をそのまま立坑下へ吊り卸すことを想定し、供試管も横置きで組み立てる。

4.1.2 結果

① 組み立て作業性・精度

管の組み立ては、計測時間も含めて 40 分程度となり、継手の目違い、段差等は生じなかった。緊張作業は 4 列配置した PC 鋼材のうち、鋼製カラー側からロードセルを装着した 2 列目以降、3 列目、4 列目、1 列目の順番に行った。緊張定着後は、管の上下左右方向の真円度は、 $\pm 1.0\text{mm}$ 以内となった。また、継手に貼付したシール材の影響による残留目開きは、緊張前に 2.3mm あったが、PC 鋼材 1 本目の緊張により 0.5mm まで縮小した。PC 鋼材 4 本分の緊張完了後では目開きは 0mm となり、完全に継手面が接合された。

② 管断面方向 PC 鋼材 1 本当たりの緊張力分布

図-4 に PC 鋼材 1 本当たりの緊張力分布を示す。PC 鋼材を円形に配置した場合、角度変化による摩擦の影響が大きく、緊張端から固定端まで 1 周するうちに緊張力が減少する。アンボンド PC 鋼より線の角度変化による摩擦係数 μ は、カタログ値で 0.06 であるが、計測値を逆算すると、0.035 となった。

③ 緊張時の管体コンクリートひずみ分布

図-5 に緊張時、管体 45° 間隔で内外表面の平均ひずみ分布を示す。定着位置は、1 本目 25° 2 本目 205° 3 本目 335° 4 本目 155° であり、継手位置は 0° と 180° である。緊張方向は順番に千鳥方向とした。1 本目の緊張後、定着部付近でひずみが不均一となるが、4 本目に至って平均化される傾向が認められた。

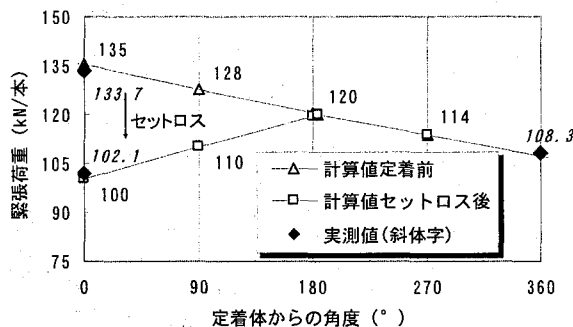


図-4 緊張力の分布 (鋼製カラー側から 2 列目)

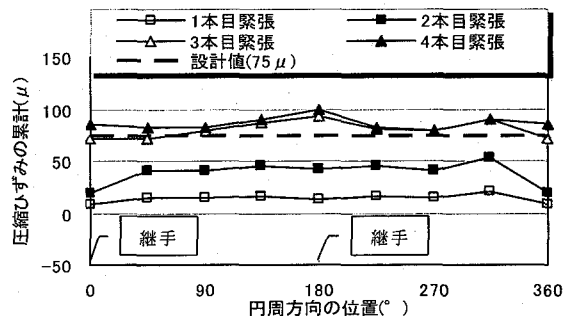


図-5 緊張時の平均ひずみ分布 (管軸方向中央)

4.1.3 考察

推進管を横置きで組み立てると、管体を吊り上げた状態で微調整を要する接合ピンの挿入が容易となる。ピンの組立余裕量は、0.2mm 程度で組み立て精度上問題ない。継手面に若干目開きが残る場合でも、プレストレスの導入により、管体を確実に接合できる。また、プレストレスの減少箇所を 1 断面に集中させず、管断面方向に一樣な設計緊張力を導入するため、定着体の対称配置と千鳥方向による緊張が有効と考える。

4.2 水密性試験

4.2.1 概要

プレストレスにより一体化した推進管を 2 本接続し、下水道推進工法用鉄筋コンクリート管の継手構造の規定に基づいた試験を行う⁶⁾。表-2 に示す継手の抜け出し長を設定し、水密試験機により封水して水圧を加えて 3 分間保持した後、漏水の有無を点検し、継手部分の水密性を確認する。継手性能としては、JA 区分を適用し、水平水密、曲げ水密、水平曲げ複合水密 (写真-2) の水密試験を行う。

表-2 水密試験ケース (JA 区分)

試験ケース	試験水圧 (MPa)	抜け出し長 (mm)
水平水密	0.15	30
曲げ水密		45
水平曲げ複合水密	0.10	67

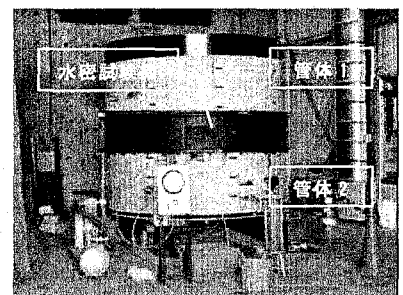


写真-2 試験状況

4.2.2 結果

各試験ケースとも漏水は確認されなかった。水平曲げ複合水密試験終了後、試験水压を 0.2MPa まで上昇させ、3 分間保持したケースも漏水は認められなかった。

4.2.3 考察

分割された推進管の継手面の止水方法としては、管断面方向と管軸方向の止水連続性をいかに確保するかが課題となる。今回、管断面方向に水膨張系シール材（硬度 JIS A38）を使用し、埋め込み鋼製カラー側と差し口側の止水材とラップさせる方法（図-3）により、規定を満足する止水性が得られた。また、プレストレスの導入により、継手面には 2.4N/mm^2 の圧縮応力が作用しており、水膨張系シール材の設計による接面応力度 1.8N/mm^2 を確実に保持できるため、シール溝内部の密封効果が高められると考える。

4.3 外圧試験

4.3.1 概要

プレストレスにより一体化した推進管を架台上に水平に置き、油圧ジャッキを用いて、一方向載荷を行う。載荷に伴い、管本体・継手等の変形量および緊張力の変化を計測し、管体の曲げ剛性、終局耐力を評価する。試験ケースは、継手位置に対して載荷点を変える。表-3 に試験ケース、写真-3 に試験状況を示す。

表-3 外圧試験ケース

試験ケース	供試管仕様	載荷点の位置
CASE1	鋼製カラーあり	継手位置から 90°
CASE2	"	継手位置から 45°
CASE3	"	継手位置
CASE4	鋼製カラーなし	継手位置

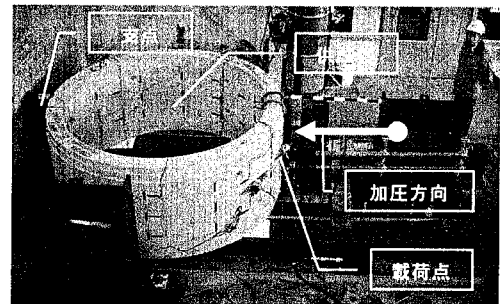


写真-3 試験状況 (CASE4)

4.3.2 結果

① 荷重と管体の変形

表-4 に外圧試験結果を、図-6、図-7 に荷重と変形の関係を示す。CASE1 では、載荷重 150kN 程度まで線形挙動を示した。220kN で鋼製カラーの溶接部分が破断し、最大荷重で継手内面側のコンクリートが圧壊した。CASE2 では、推進管本体にひび割れが均等に分散し、PC 鋼材の緊張力が徐々に増加した。最大荷重時、載荷点内面側のコンクリートが剥落し、同時に鋼製カラーが補強リブごとと抜け出した。CASE3 では、載荷重 75kN 程度まで線形挙動を示した。荷重増加に伴い、載荷点直下では、継手目開きが顕著となり、非線形的な変形が進行した。載荷重 300kN で鋼製カラーの溶接部が破断し、最大荷重で載荷点外面側コンクリートが圧壊した。CASE4 では、荷重増加に伴って、継手目開きが CASE3 よりも早く進行した。最大荷重時、載荷点外面側のコンクリートが圧壊したが、管本体の損傷は少なかった。

表-4 外圧試験結果

試験ケース	ひび割れ荷重 (kN/m)	目開き荷重 (kN/m/0.05mm)	埋め込み鋼製 カラー破断荷重 (kN/m)	最大荷重 (コンクリート破壊荷重) (kN/m)	最大変位 (mm)
CASE1	85.0	103.0	220.0	262.2	17.0
CASE2	100.0	135.0	300.5	300.5	44.5
CASE3	115.0	33.0	300.0	385.0	78.3
CASE4	65.0	50.0	なし	296.4	91.5
1 種管規定 (推定値)	80.5 (右欄①×50%)	91.5	161.0 (① 183.0)		-

日本下水道協会の下水道推進工法用鉄筋コンクリート管の規格として、呼び径 2000(1 種管)の破壊荷重は 161kN であり、供試管は、すべてのケースで規定値を上回った。また、呼び径 2000(1 種管)のひび割れ荷重は 80.5kN であり、CASE1～CASE3 で規定値を上回った。なお、標準管の規定値は、管体自重による荷重を加味している。一方、2002 年制定コンクリート標準示方書(土木学会)に基づく等価応力ブロックを用いた破壊荷重の推定値(アンボンド構造をプレストレスによる軸力のみで評価)は 183kN であり、その 50% をひび割れ荷重の推定値とすると、CASE2, CASE3 の場合で、ひび割れ荷重の実験値が推定値を上回った。

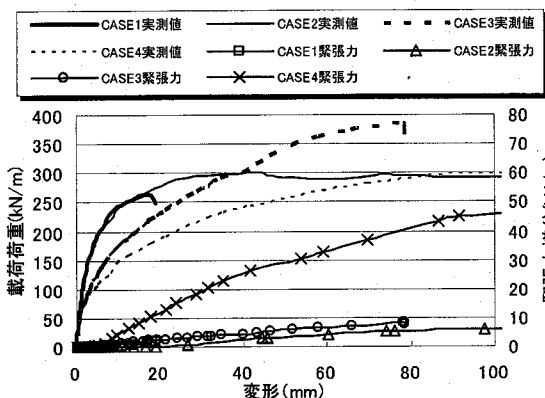


図-6 荷重と変形の関係(載荷軸方向)

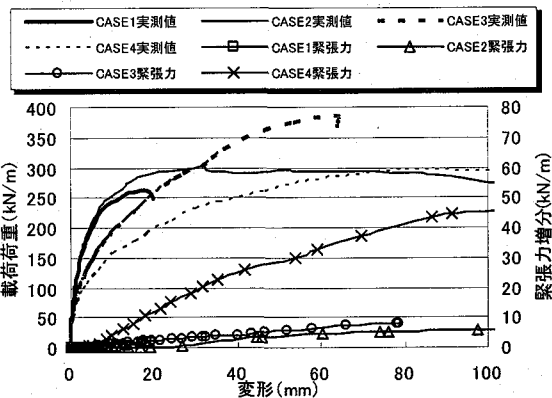


図-7 荷重と変形の関係(載荷軸直角方向)

② 荷重と継手の変形

図-8 に荷重と継手目開きの関係を示す。日本下水道協会の規定では、ひび割れ荷重時のひびわれ幅は 0.05mm である。継手目開き 0.05mm に相当する荷重は、表-4 に示す荷重であり、CASE3, CASE4 は、ひび割れ荷重の規定値より小さい荷重で、継手目開きが生じた。図-9 には、荷重と等価換算剛性(継手を管体と等価な剛性とした計算値)の関係を示す。継手変形の影響が少ない CASE1, CASE2 では剛性低下の割合が一定となった。CASE2 は、低荷重時の剛性が最も高い。CASE3, CASE4 は初期段階で急激な低下が見られた。

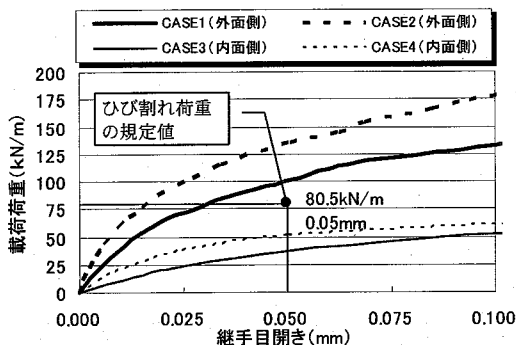


図-8 荷重と継手目開きの関係

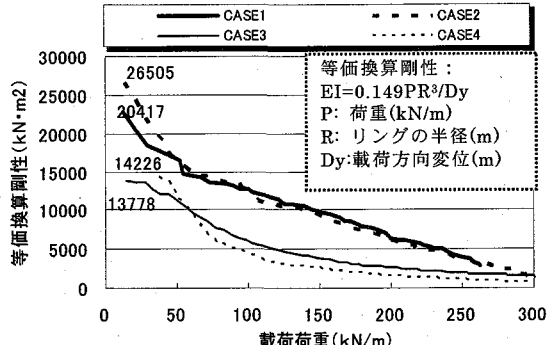


図-9 荷重と等価換算剛性の関係

4.3.3 考察

継手を載荷点から 45° および 90° ずらした場合は、初期剛性、終局耐力ともに高い。特に、45° ずらした場合は、ひび割れ荷重を推定値で求めても安全側の結果が得られる。埋め込み鋼製カラーは、補強リブとともに、管体の変形に対しては若干の拘束力を与えるが、強度を増加させる働きはないと考える。

実施工に際しては、継手を頂部から 45° および 90° ずらした位置で実施する方法が望ましく、継手が頂部になる使用法は、目開き荷重が規定のひび割れ荷重より小さくなるため、適切ではないと考える。

4.4 軸方向強度試験

4.4.1 概要

プレストレスにより一体化した推進管の上下面に厚さ 20mm の推力伝達材を配置し、2 本接続した状態で管軸方向に载荷を行う。管軸方向継手の緩衝材である推力伝達材が変形する過程で、管断面方向継手の挙動を確認する。管体の軸方向ひずみは、内外面に貼付したひずみゲージ(30° 間隔・上中下 3 測線)で、管断面方向継手の相対変位は、変位計を用いて測定する。なお、試験ケースは、推力伝達材を 60°、90° の範囲で配置した 2 ケースとする。目標最大荷重は、推力伝達材が载荷面積により塑性域に達するコンクリートの応力度をもとに、それぞれ 6MN、10MN とする。図-10 に試験装置を、写真-4 に試験状況を示す。

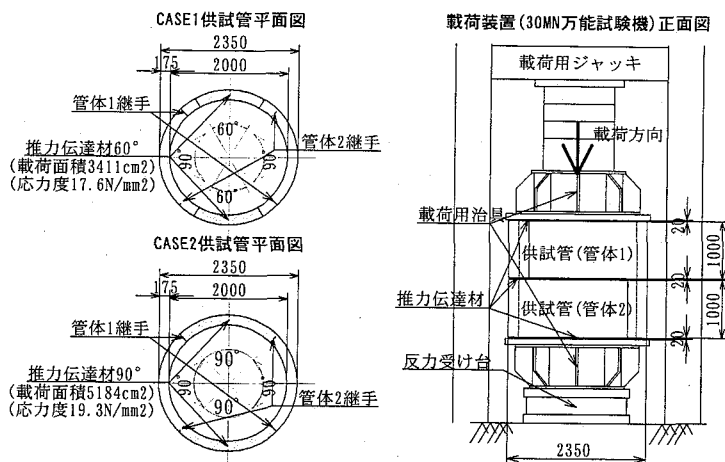


図-10 試験装置

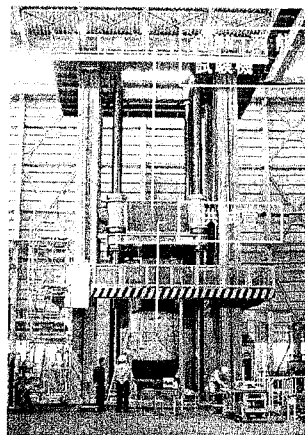


写真-4 試験状況

4.4.2 結果

① 管断面方向継手の軸方向に対するずれ

図-11 に荷重と継手面のずれの関係を示す。継手の最大相対変位は、管体 1 上面の推力伝達材が接している側の継手で生じた。最大相対変位は、図のように接合ピンの組み立て余裕量(0.2mm)以下で収まった。

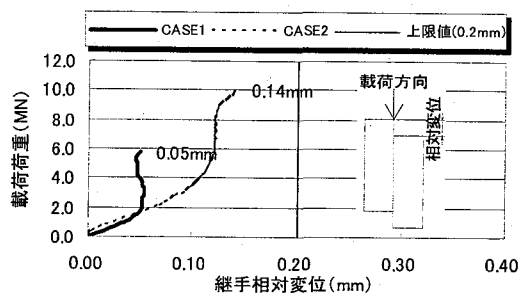


図-11 荷重と継手面のずれ

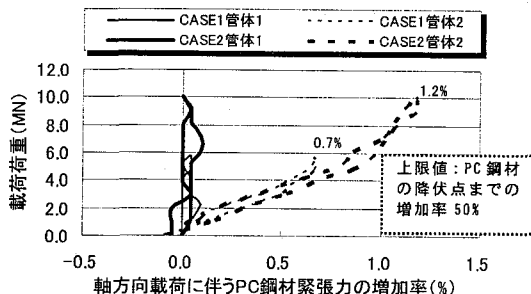


図-12 荷重と PC 鋼材緊張力増加の関係

図-12 に荷重と緊張力の増加率の関係を示す。CASE1 では、ほとんど緊張力に変化がない。CASE2 では、導入緊張力に対する増加率が 1.2% 程度であった。緊張力の増分は、除荷後、ほぼ導入緊張力まで戻った。

② 軸方向のひずみ

図-13 に最大荷重時の軸方向ひずみ分布を示す。管断面方向の継手位置は、推進管を 90° ずらして配置し、管体 1 で 0° 180°、管体 2 で 90° 270° とした。CASE1 では、継手付近でひずみがほぼ 0 に近く、一般的に応力伝達状態が良好であった。CASE2 では、管体 1 で 0° の位置で、管体 2 で 90° の位置で実測値に偏りが生じた。これらの位置では、推力伝達材の端部が管断面方向継手に接している。载荷範囲 180°

～270°では、CASE1に近いひずみ分布となった。次に、軸方向ひずみ分布の基準値を得るため、日本下水道協会規定の呼び径2000(1種管)をモデル化し、試験と同様の条件で、曲面シェル要素を用いた3次元FEM解析を実施した。その結果、最大ひずみの実測値は、両方のケースで、ほぼ解析値に近い値を示した。特に、CASE1の場合では、解析値と実測値の分布がほぼ等しく、管断面方向継手の干渉は認められなかった。

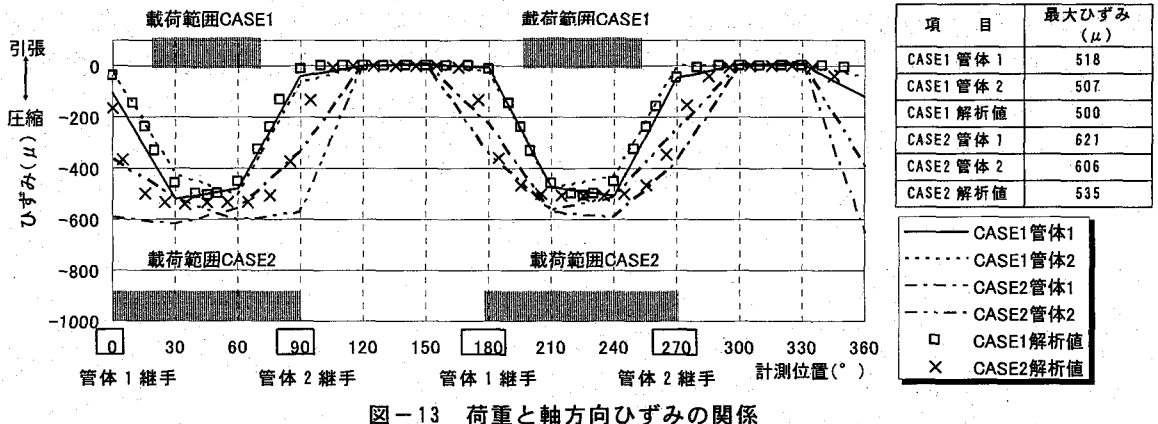


図-13 荷重と軸方向ひずみの関係

4.4.3 考察

推力伝達材の一部が管断面方向の継手と接する場合は、推力伝達材の変形過程で、継手が管軸方向に若干動き、応力の円滑な流れを阻害する傾向がある。今回の荷重レベルは、コンクリート許容応力度と同程度であったが、接合ピンにせん断力が作用する程の変形は認められなかった。しかし、接合ピンに集中的にせん断力が作用し、コンクリートの支圧強度を超える荷重が作用した場合、継手面コンクリートの割裂が問題になる。そこで、推力伝達材の適用では、管断面方向の継手付近の配置に留意することが肝要であると共に、今後、実施工を通じて継手面に生じるずれ量の許容値を解明していく必要があると考える。

5. 結論

分割推進管をPC構造により一体化し、内径3000mmを越える管渠推進工法に適用する方法を検証した。

推進管の構造では、PC構造により経済的断面が得られ、PC鋼材量の増減で、推進管の標準化が容易となる。推進管組み立てでは、接合ピンを用いる横置き方法が実際の施工に適用しやすい。管断面継手の止水性能は、水膨張系シーリングで確保できる。また、外圧試験の結果、管断面方向継手を載荷点から45°ずらした位置に設けると、継手目開きが最小限に抑えられ、鉄筋コンクリート管と比較しても、ひび割れ荷重や破壊荷重で優位性があるほか、等価応力ブロックを用いて算定した破壊荷重の50%は、ひび割れ荷重を下回り、管断面方向の設計に安全側の指標を与える。さらに、管軸方向の強度試験結果から、推力伝達材を適正に配置することで、管断面方向継手に支障なく、管軸方向の推進力伝達を良好に保つことができる。

最後に、本研究に際し、貴重な御意見を賜りました早稲田大学小泉淳教授に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本下水道協会：下水道推進工法の指針と解説，pp.1-4，2000
- 2) 日本下水道協会：下水道推進工法用鉄筋コンクリート管(A-2)，pp.1-14，1999
- 3) 先端建設技術センター：先端建設技術・技術審査証明報告書 P&PC セグメント工法，pp.5-9，1999
- 4) M.Scherle, 野田典宏訳：推進工法の理論と実際，pp.243-256，2001
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，pp.150-153，2002
- 6) 日本下水道協会：下水道推進工法用鉄筋コンクリート管(A-2)，pp.26-30，1999