

分割型 PC 推進管の基本性能と適用性について

西川和良¹・新井英雄²・三上博³・近藤二郎⁴・石川 眞⁵・石川和秀⁶

¹正会員 三井住友建設株式会社 P&PCプロジェクト室 (〒164-0011 東京都中野区中央1-38-1)
E-mail:knishikawa@smcon.co.jp

²正会員 工博 三井住友建設株式会社 土木技術部 (〒164-0011 東京都中野区中央1-38-1)
E-mail:h-arai@smcon.co.jp

³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 (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)
E-mail:hmikami@smcon.co.jp

⁴正会員 住建コンクリート工業株式会社 技術開発部 (〒111-0043 東京都台東区駒形1-3-16)
E-mail:kondo@sumiken-c.co.jp

⁵工修 横浜市下水道局 管理部 (〒231-0017 神奈川県横浜市中区港町1-1)
E-mail:@ma01-ishikawa@city.yokohama.jp

⁶工修 社団法人 日本下水道管渠推進技術協会 (〒107-0052 東京都港区赤坂1-6-14)
E-mail:ishikawa@suisinkyoo.or.jp

管渠推進工法では、内径 3000mm を超える大口径管による施工実績が極めて少ない。これは、工場で製作した推進管を工事現場まで運搬する際、道路交通法施行令に基づく積載高さの規制を受けるからである。一方、推進工法は、現行の積算基準によれば、都市トンネル工法のなかでも経済性に優れている。このため、運搬上の制約を技術的に克服し、大口径に対する適用拡大を図れば、建設コストの縮減に寄与できる。本研究では、2等分割半円形の管体を工場製作して運搬し、現地でプレストレストコンクリート構造により一体化した後、通常の推進管として使用する工法を開発する。今回、基本性能確認試験を通じて、日本下水道協会が規定する標準管と同等以上の性能が確認されるとともに、適用に際しての知見が得られた。

Key Words: pipe jacking, halved pipe, prestressed concrete, large diameter, basic performance

1. はじめに

都市トンネル工法のうち、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。日本下水道協会規格の標準管では、内径 800mm から 3000mm が規定されているが、3000mm を超える仕様は定められていない¹⁾。これは、標準管を運搬する際、車両の積載高さに関して、3.8m からその自動車の積載をする場所の高さを減じたものとする、道路交通法施行令に基づく制約によるものである。

近年、都市部の浸水対策上、需要が増加している雨水貯留管を例にとると、シールド工法技術協会による過去 20 年間の実績調査では、推進工法でも可能な施

工延長 800m 以下でのシールド施工件数が全体の 40% に達している。一方、コストスタディとして、仕上がり内径 3.0m、施工延長 500m、土かぶり 10m (砂質土) を想定して直接工事費を算定した。その結果、泥土圧シールド工法 (二次覆工あり)、泥土圧シールド工法 (二次覆工なし)、泥水式推進工法の比率が 1.0:0.9:0.6 となり、推進工法がシールド工法に対し、工期や機械損料の面などで有利となることがわかった。

そこで、著者らは、経済性に優れる推進工法の適用拡大を図るため、内径 3000mm を超える管渠に対し、2等分割半円形の管体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開発することにした。プレストレス導入システムについては、プレストレス

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²⁾が、既に実用化されており、プレストレス導入技術を応用できる。しかし、シールドトンネル用セグメントと異なり、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が作用する。特に提案する推進管では、PC鋼材緊張による組立施工性、円周方向に継手を持つ管の外圧強度、管軸方向も含めた継手全体の止水性、過大な推進力に対する円周方向継手の挙動等について未解明な点も多く、実物大の推進管を製作し、基本性能を確認する必要が生じた。

本論文では、工法概要に続き、プレストレストコンクリート構造を特徴とする推進管の仕様を詳述する。また、実物大供試管による基本性能確認試験の結果に考察を加えて紹介する。結論では、2等分割管をプレストレストコンクリート構造で一体化する方法により、通常の円管と同等の性能が得られ、経済性を追求した大口徑推進管への適用が可能となることを提案する。

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等分割半円形の管体を工場で製作する。円周方向継手面の精度を確保するため、継手面に仕切り版を設け、製品が真円になるよう設計された鋼製型枠を用い、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。発進立坑の周辺で分割管を下ろすとともに、円形に組み立てる。アンボンドPC鋼より線を管外面に設けた切り欠きから順番に挿入し、センターホールジャッキにより緊張定着を行い、管体どうしを接合する。その後、あらかじめ埋め込まれた鋼製カラー(SS400)の溶接を行うと同時に、PC鋼材とシースの間にPCグラウトを注入し、切り欠き部を無収縮モルタルで充填する。こうして完成した推進管を立坑上から推進架台上に吊り下ろし、推進設備により地中に圧入することで管渠を築造する。推進管の組み立て工程は増えるが、推進工の工程に与える影響は少なく、在来施工技術の延長線上での適用が十分可能となる。

立坑周辺のスペースに制約がある場合は、搬入した管体を推進架台上に直接据え付け、立坑内部で組み立てる方法も考えられる。この場合は、管体の内面に切り欠き部を設け、アンボンドPC鋼より線を挿入・緊張定着直後、推進作業に移行できる。PCグラウト、切り欠き充填は、目地モルタル工などとともに、推進工程に支障がなくなる時点で一括して行う。

なお、推進機や施工に必要とされる設備の規模がこ

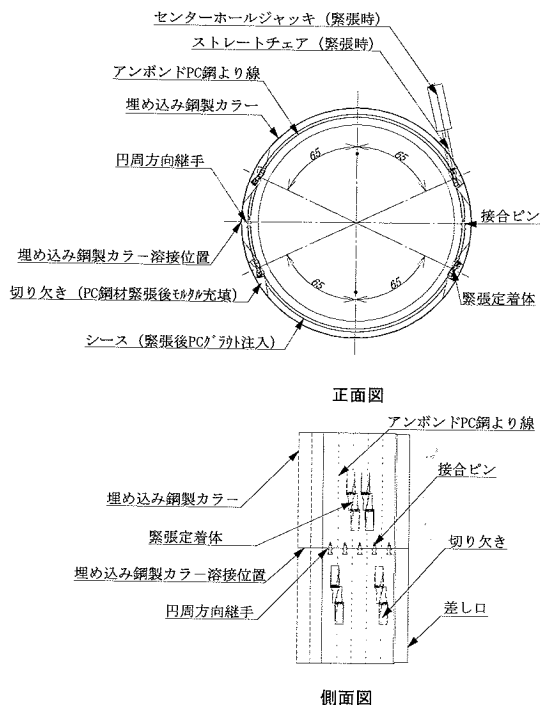


図-1 分割型PC推進管

れまでになく大きくなるため、推進機や設備の転用が容易となるよう推進管自体を管径と管厚さの関係により規格化しておく方が便利である。ただし、具体的な施工法、および積算上必要とされる設備や機器の選定については、今後、実証工事を通じて検証して行くこととする。分割型PC推進管の概要を図-1に示す。

3. 構造概要

(1) 管体の仕様

本工法では、分割された管の運搬重量を勘案し、内径3000mmを超え5000mmまでの推進管を対象とする。管本体は、継手を有しているが、円管と同等の曲げ剛性を得るため、供用時にひび割れを許容しないフルプレストレストコンクリート構造とする。鉄筋コンクリート構造と比較し、プレストレストコンクリート構造を適用した場合に得られる特徴は、以下のとおりである。

- ① プレストレスの導入により、本体の曲げ剛性が高く、ひび割れ荷重が向上する。
- ② アンボンドPC構造により、継手の剛性は高く、変形・復元性能にも優れ、破壊荷重が向上する。
- ③ 円周方向継手が全断面圧縮状態に保てるので、適切な止水材の併用により、耐水性が向上する。

④ 同一性能の鉄筋コンクリート構造と比較すれば、管の厚さを低減でき、経済的な断面が得られる。

以上の特徴を踏まえ、日本下水道協会が規定している性能評価方法に基づき、分割型推進管の仕様を検討する。ただし、内径 3000mm を超える推進管に対し、直接外圧試験により性能を確認することは、設備の面でも困難が伴う。そこで、小～中大口径管の規定厚さに基づいて、内径 3000mm を超える推進管に必要な管の厚さを外圧強さから推定してみる。

日本下水道協会によれば、外圧強さより求める管の抵抗モーメント M_r は、次式のとおりである。

$$M_r = 0.318 \cdot P \cdot r + 0.239 \cdot W \cdot r \quad (1)$$

ここに、

M_r : 外圧強さより求める管の抵抗モーメント (kN・m/m)

P : 外圧強さ (kN/m) (ひび割れ荷重による)

W : 管の質量 (kN/m)

r : 管厚中心半径 (m)

すでに、内径 800mm から 3000mm までの鉛直断面方向の外圧強さ P が規定されている。これにより、ひび割れ荷重とひび割れ発生時に生じる管の縁引張応力度を算定し、内径 3000mm を超える管に必要な厚さを推定して求める。図-2 中に示した近似式により、内径 3000mm から 5000mm までの管のひび割れ荷重と引張応力度の推定値は表-1 のとおりとなる。推定したひび割れ荷重を用いて式 (1) で求めた抵抗モーメントを断面

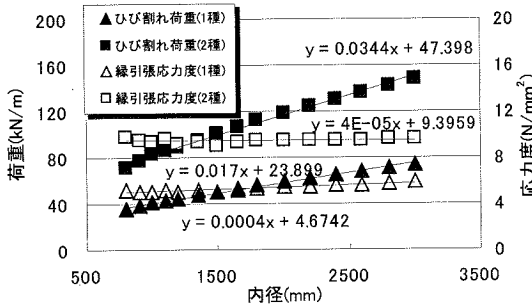


図-2 内径とひび割れ荷重・引張応力度の関係

表-1 ひび割れ荷重と引張応力度の推定値

内径 (mm)	ひび割れ荷重 (kN/m)		引張応力度 (N/mm²)		管の厚さ (mm)
	1種	2種	1種	2種	
3500	83.4	167.8	6.1	9.5	295
4000	91.9	185.0	6.3	9.6	340
4500	100.4	202.2	6.5	9.6	385
5000	108.9	219.4	6.7	9.6	435

係数で除した引張応力度が、推定した縁引張応力度と一致するよう管の厚さを求めると表-1の右欄になる。

次に、プレストレスを導入し、どの程度、管の厚さが低減できるかを検討する。管の厚さを減じた場合、ひび割れ荷重の推定値を用いて求めたコンクリートの縁引張応力度は、断面係数が低減される分だけ増加する。そこで、引張応力度の増分を打ち消すような軸力を導入するために必要なプレストレス量を求めた。プレストレス量には、PC鋼材を円形に配置する際の曲げ応力、PC鋼材とシースによる摩擦、定着具のセットロス等による減少および長期的な減少も考慮したうえで、円周方向全体で平均化した計算値を適用した。

中小口径管同様、管の規格化のため、管の厚さを 25mm ピッチとした場合に必要なプレストレス量を表-2 に示す。プレストレスを導入した管の厚さは、同一の性能を有する鉄筋コンクリート管の厚さ (表-1) より薄くなる。管径が大きくなるほど、自重による曲げの影響が増加するが、プレストレスを導入すれば、内径 5000mm の場合で約 20%程度、管の厚さを低減できる (図-3)。これは、管の外圧強さをひび割れ抵抗モーメントで評価する規定に対し、プレストレスコンクリート構造が大口徑化に有効であることを示唆している。

表-2 管の厚さと PC 鋼材の必要本数

内径 (mm)	管の厚さ (mm)	所要プレストレス (kN/m) (応力度増分 N/mm²)		設定緊張力 (kN/m) ・ PC 鋼材径 ・ 本数	
		1種	2種	1種	2種
3500	275	193 (0.7)	330 (1.3)	242 15.2mm 2本	352 12.7mm 4本
4000	300	360 (1.2)	660 (2.2)	372 17.8mm 2本	744 17.8mm 4本
4500	325	585 (1.8)	975 (3.1)	660 19.3mm 3本	1076 21.8mm 4本
5000	350	805 (2.3)	1365 (4.0)	944 28.6mm 2本	1416 28.6mm 3本

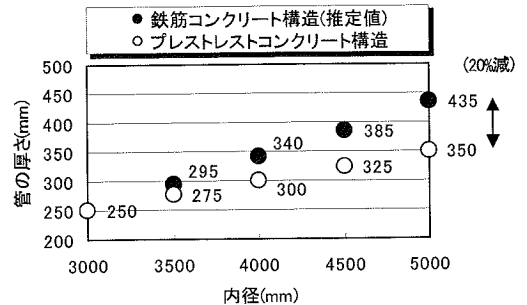


図-3 内径による管厚さの比較

ただし、式(1)は、曲げ剛性一様な弾性リングの公式から導かれたものであるため、弾性リングに近い挙動を示すように載荷点に対する円周方向継手の位置を定めておく必要がある。

次にアンボンド PC 構造を有する管体の破壊荷重を等価応力ブロックにより近似的に求めてみる³⁾。鉄筋の降伏ひずみ ϵ を 0.015 と仮定した場合、コンクリートの終局圧縮ひずみ $\epsilon'cu$ を 0.0035、有効高を d とすると、ひずみの適合条件式より、中立軸 x は、

$$x = \frac{\epsilon'cu}{\epsilon + \epsilon'cu} \cdot d \quad (2)$$

で与えられる。このとき、鉄筋の全引張力 T は、鉄筋の断面積を As 、鉄筋の降伏強度を f_y とすると、

$$T = As \cdot f_y \quad (3)$$

コンクリートの全圧縮力 C は、コンクリートの設計基準強度を $f'ck$ 、長方形断面の幅を b とすると、

$$C = 0.85 \cdot f'ck \cdot 0.8 \cdot x \cdot b \quad (4)$$

式(2)を式(4)に代入して、表-2 の諸元によれば、 $C \geq T$ 、 $\epsilon \geq 0.015$ が無条件に成り立つ。よって、緊張材の設計プレストレスを Pe とすると、アンボンド PC 構造を考慮した水平力のつり合いは、

$$Pe = C - T \quad (5)$$

となる。式(3)と式(4)を式(5)に代入し整理して、中立軸 x を再度求める。

$$x = \frac{Pe + As \cdot f_y}{0.85 f'ck \cdot 0.8 \cdot b} \quad (6)$$

終局破壊曲げモーメント Mu は、コンクリートの上縁から緊張材の位置を d' として、

$$Mu = T(d - 0.4x) + Pe(d' - 0.4x) \quad (7)$$

で求められる。式(6)を式(7)に代入し、式(1)から破壊荷重 Pu が求められる。

$$Pu = \frac{T(d - 0.4x) + Pe(d' - 0.4x) - 0.239 \cdot W \cdot r}{0.3183 \cdot r} \quad (8)$$

日本下水道協会の規定では、破壊荷重が、ひび割れ荷重の 1.5 倍以上とされている⁴⁾。そこで、ひび割れ荷重 Pc は、1/1.5(67%)以下となるように破壊荷重 Pu の 50% とする。表-2 で得られた管厚さとプレストレス量に主鉄筋量を有効断面積(有効高×管の長さ)の 1.0%程度とし、式(8)より得られた結果を表-3 にまとめる。

実際の設計では、鉛直等分布荷重により管に生じる曲げモーメント M に管のひび割れ安全率($f=1.2$)を乗じて、必要とされる管の抵抗モーメント Mr の最小値は得られる。外圧強さより求まる管の抵抗モーメントに余裕がある場合には、プレストレス量を減じると PC 鋼材量を節約することができる。以上により、提案可能な設計フローを図-4 に示す。

表-3 分剖型 PC 管の外圧強さ

呼び径	ひび割れ荷重 (kN/m)		破壊荷重 (kN/m)	
	1 種	2 種	1 種	2 種
3500	105.9	132.3	211.8	264.7
4000	119.7	149.7	239.4	299.4
4500	161.7	202.1	323.3	404.1
5000	174.8	218.4	349.5	436.8

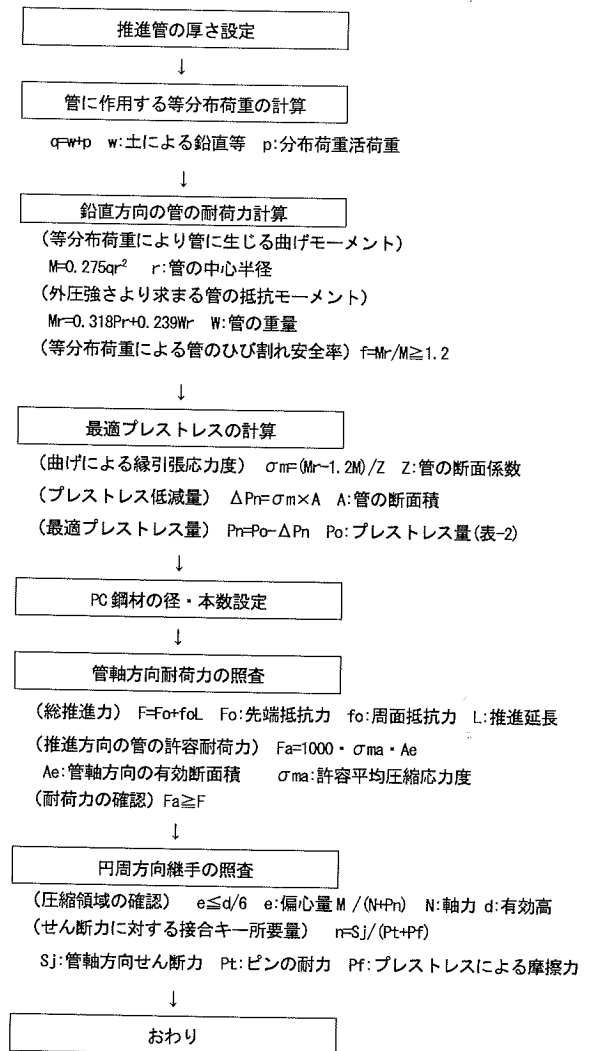


図-4 推進管の設計フロー

次に、プレストレスの導入で得られた管の厚さに基づいて、推進方向の管の耐荷力を検証する。表-4の土質条件により、内径別、工法別の推進力を計算する。なお、適用した式は、泥水式推進工法・泥土圧推進工法は修正式I、泥濃式推進工法は参考式Iとした⁵⁾。また、元押し推進延長を100mとして比較した。最近では、特殊滑材の使用により、管の周面抵抗力を低減させ、元押し推進延長を1km以上に伸ばす技術も進展している。大口径管を扱う場合、設備軽減化のため、周面摩擦に対する配慮も必要となるが、現時点では、汎用的な推進延長を仮定する。図-5に検討結果を示す。土かぶりによる違いは顕著ではなかった。土質の違いでは、硬質土の場合に推進力が最も大きい。工法別では、泥濃式推進工法の推進力が極めて小さく、長距離推進への応用が期待できる。

図-5で算定された推進力を管径別の有効断面積で除し、コンクリートに作用する平均圧縮応力度を求めた。図-6に検討結果を示す。管体コンクリートの許容平均圧縮応力度は、1種の場合、 $\sigma_{ma}=13.0\text{N}/\text{mm}^2$ である。これにより、プレストレスを導入することにより定めた管の厚さによっても、元押し推進延長100m以内であれば、推進方向の管の耐荷力をほぼ満足しているものと考えられる。

表-4 土質条件

項目	普通土	硬質土	粘性土	
N値	10	30	4	
土かぶり	(m)	2Dおよび3D(D:管の外径)		
地下水	(m)	GL-3.0m		
単位体積重量	(kN/m^3)	18	19	14
内部摩擦角	($^{\circ}$)	20	40	15
粘着力	(kN/m^2)	5	0	10
礫率	(%)	10	30	0

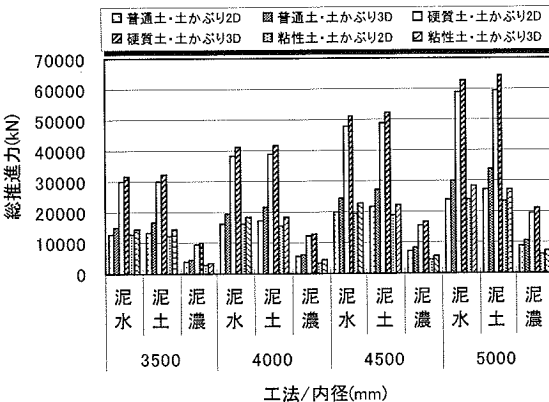


図-5 径・工法別の総推進力

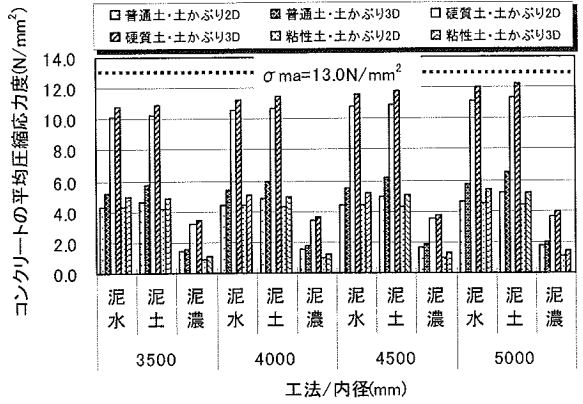


図-6 径・工法別のコンクリート平均圧縮応力度

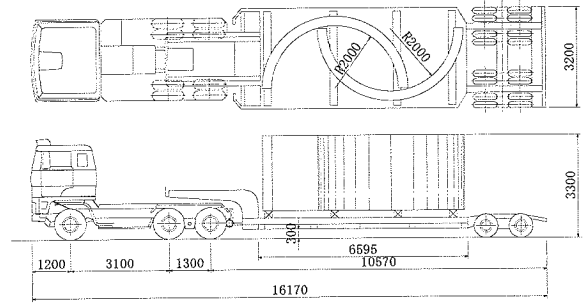


図-7 管体の運搬方法

表-5 管体の質量(長さ2.0m当たり)

呼び径	3500	4000	4500	5000
重量(ton)	16.0	19.9	24.1	28.8

管の標準長さについては、直線施工を行ううえで極力長いほうが有利となるが、運搬の際、管体の重量により制限を受ける。管体の荷姿を図-7に示す。内径5000mmまでは重量を勘案して、管の標準長さを2.0mとするのが妥当と考える。表-5に管体の質量を示す。

(2) 継手の仕様

a) 円周方向の継手

推進管の円周方向の継手構造は、コンクリート面の突き合わせとPC鋼材の緊張により得られるプレストレスの組み合わせとなる。アンボンドPC鋼より線⁶⁾を使用しているため、導入プレストレスにより初期剛性は高いが、継手は目開きの進行に伴い、ヒンジ的な挙動を示す。また、PC鋼材が降伏しなければ、変形に対する復元性は高い。シールドトンネル用セグメントでは、1リング当たりの継手数が多いため⁷⁾、一定の変位を許容し、継手の存在によるリング剛性の低下を

見込んだ設計法を適用することもある。推進工法では、施工中、鉛直断面方向に土圧・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⁸⁾。そこで、推進管の鉛直断面方向に対しては、曲げ剛性一様な円管と考える方が安全側の評価となる。したがって、外力による曲げの影響が小さい位置に継手を設け、継手全断面に十分な圧縮応力が導入されていることを確認する。継手の最適な位置については、継手位置に対して載荷点を変える外圧試験を通じて確認する。なお、継手の半径方向に生じるせん断力については、外力による軸圧縮力とプレストレスによるコンクリートの摩擦抵抗力で対抗させることができる。

接合された継手断面の止水方法については、図-8に示すとおり、コンクリート表面にシール溝を設け、水膨張系のシール材を貼付する。このシール材は、あらかじめ埋め込まれた鋼製カラーの補強リブ板背面を周回している止水用ゴムと重ね合わせる。また、差し口側は、標準管で規定されているゴム輪と重ね合わせることで、継手背面からの地下水の浸入を遮断する。

水膨張系シール材の適用に関しては、管体を組み立てる際に、シール材をシール溝に確実に封入する必要がある。そこで、導入プレストレスでシール材を十分に圧縮できることを確認しておく。一般的に用いられている厚さ2.5mm、幅20mm、クロロプレンゴム製シール材を用いて、圧縮ひずみの上限値を40%とした場合、必要なプレストレス量をゴムの硬度別にまとめた⁹⁾。検討結果を図-9に示す。

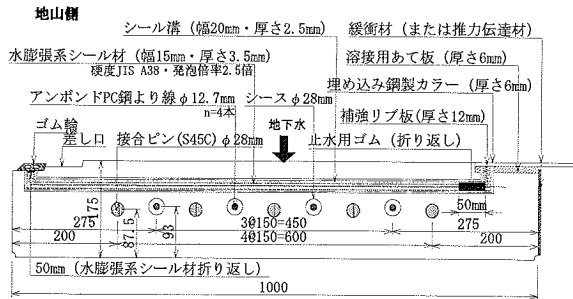


図-8 円周方向の継手 (内径 2000mm 供試管)

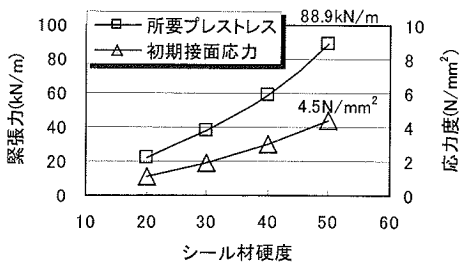


図-9 シール材硬度と緊張力および接面応力の関係

シール材硬度 50 では、接面応力 4.5N/mm^2 となり、実用上 4.5MPa の耐水性能が得られるが、このときの所要プレストレスは、 88.9kN/m である。表-2 によれば、内径 3500mm (1種相当) に必要なプレストレス量は、最小でも 193kN/m であるため、シール材の性能を保証する圧縮力は十分得られる。

一方、施工時には、推進力が管全体に作用するが、曲線あるいは方向制御推進では、推進管に偏向荷重が作用する。この場合、推進管の軸方向継手間には、緩衝材として推力伝達材を配置するが、推力伝達材の変形過程で偶力の影響により円周方向継手が滑る可能性がある。そこで、この挙動に対抗し、推進管組み立てガイドも兼ねる鋼製ピンを円周方向継手面に設ける (図-1)。この接合ピンには、引張強度 570N/mm^2 の機械構造用炭素鋼 (S45C) の加工品を用いる。接合ピンの所要本数は、推進時に管に作用する荷重によって解析的に求める。ただし、推力伝達材の変形に伴う円周方向継手の挙動については、軸方向強度試験で確認する。

b) 管軸方向の継手

管軸方向の継手構造は、日本下水道協会が規定する継手形式を適用し、埋め込み鋼製カラーとコンクリート差し口の構成とする。差し口側には、止水材としてゴム輪を設ける。鋼製カラーは、分割されているため、推進管の組み立て完了後に溶接して一体化する。溶接時には加熱により、管体コンクリートが損傷しないように断熱効果の高い溶接用あて板を埋め込む (図-8)。

(3) 事前検討

基本性能確認試験に用いる特性値を把握するため、想定した土質条件で内径 4000mm の推進管を設計した。また、推力伝達材を介した推進管を 3本接続して半径 300m の曲線中に配置し、推進力を荷重とする 3次元 FEM 解析によって、推進管に作用する断面力を求めた。

a) 設計条件

設計条件を表-6、推進管の仕様を表-7に示す。

表-6 設計条件

項目	内容	備考
工 法	泥水式推進工法	実施工想定
内 径	4000	3000~5000 の平均
推進延長 (m)	150	中押し 1段想定 (1ヶ所 100m 以下)
曲線中心付近での総推進力 (kN)	30626	下水道協会式 ¹⁰⁾ 参照
土かぶり (m)	13.8	3D (D:管外径)
地下水位 (m)	GL-3.00	実施工想定
掘削土質	硬質土	実施工想定

表-7 推進管の仕様

項目	内容	備考
管の内径(mm)	4000	-
管の厚さ(mm)	300	表-2 参照
管の長さ(mm)	2000	-
プレストン量(kN)	496	図-4 参照
推力伝達材の厚さ(mm)	18~50	弾性係数は ∞
コンクリート弾性係数(N/mm ²)	3.3×10^4	$F^2_{ck} = 50\text{N/mm}^2$
コンクリートのポアソン比	0.17	標準値

b) 解析方法

推進管は、立体的な円筒管として曲面シェル要素でモデル化した。また、接合部分の推力伝達材については、塑性変形後の状態を考慮して、引張剛性を持たない剛体でモデル化した。プレストレスは荷重で載荷し、推進管の曲線外面に一樣な地盤ばね 50MN/m^3 を設けた。推進力は、偏向荷重を想定して台形分布 $0.5:1.5$ で与え、載荷断面と反対側断面で軸方向変位を拘束した。なお、推力伝達材は、許容目開き量設定の都合上、 120° の範囲に配置するが、結果的に円周方向継手を覆う形状となった。図-10 に解析概要を示す。

c) 解析結果

① 管軸方向軸力の分布

図-11 に管軸方向軸力の解析結果例を示す。軸方向

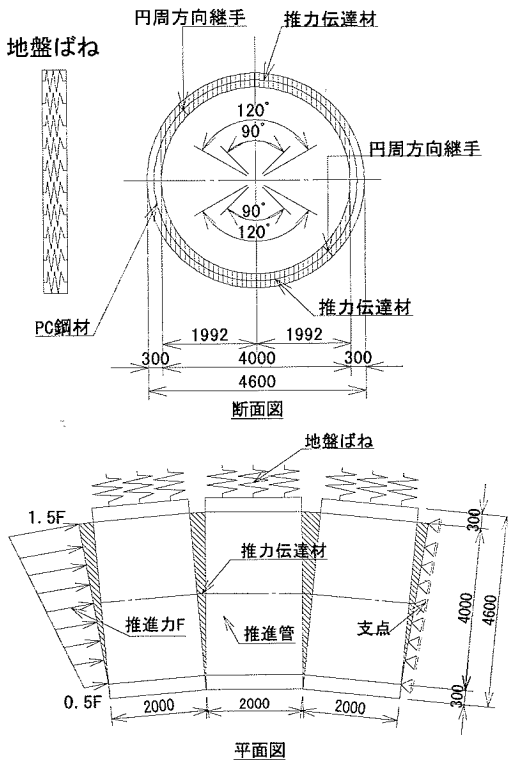


図-10 解析概要図

継手に配置された推力伝達材が管本体コンクリート面に接している領域において、推進力が一樣に分布する。偏心載荷の影響により、曲線内側と曲線外側では、台形分布荷重の割合 $0.5:1.5$ に応じた軸力分布となる。最大圧縮応力度は、局部的に 15.2N/mm^2 となる。推力伝達材のない部分は、管本体どうしが直接接触していないため、軸力が伝達されない無応力領域 (図淡色部分) がある。推力伝達材端では、応力集中による引張力が生じ、最大引張応力度は、 1.5N/mm^2 となる。

② 管軸方向の曲げモーメント

図-12 に管軸方向曲げモーメントの解析結果例を示す。管軸方向に対する曲げの影響は極めて小さい。推力伝達材が管本体コンクリート面に直接接している領域 (図濃色部分) で曲げモーメントが最大となっており、荷重方向の変化点で曲げ応力が集中する傾向が見られる。ただし、最大曲げ応力度は、 0.2N/mm^2 程度である。本解析では、推力伝達材には、変形後の剛性を用いており、曲率が一定となった状態で解析している。推進管は偏心荷重を受けているが、軸方向の曲げ変形が極めて小さい。これは、推力伝達材の機能により、平面線形や荷重状態に拘わらず、推進力が管の中心に維持され、効率良く伝達されるものと推察される。

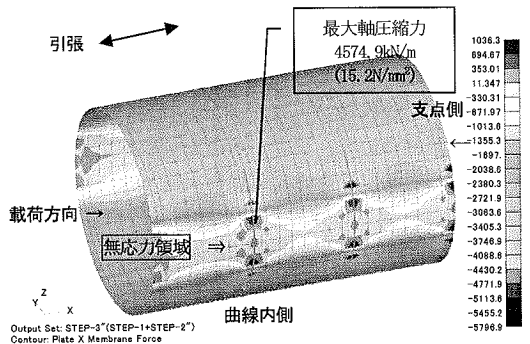


図-11 管軸方向軸力分布

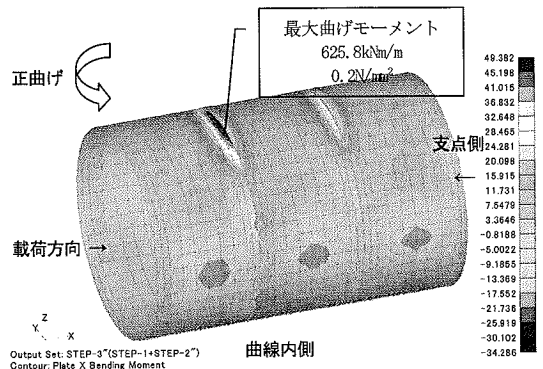


図-12 管軸方向曲げモーメント分布

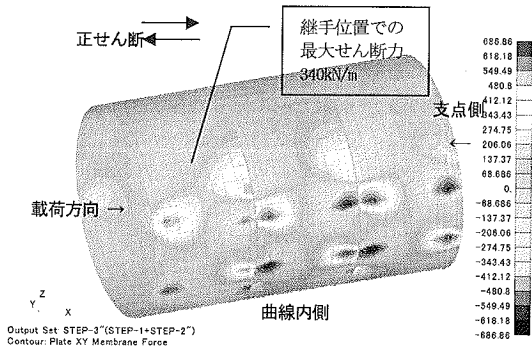


図-13 管軸方向せん断力分布

③ 管軸方向のせん断力

図-13に管軸方向せん断力の解析結果例を示す。管軸方向のせん断力は、推力伝達材端で最大となる。この位置は、載荷面との境界で応力交番が生じていると考えられる。円周方向継手は、頂部を 0° として、 $1 \cdot 3$ 本目の管で 45° 225° 2本目の管で 135° 315° の千鳥配置にある。管軸方向のせん断力分布は、円周方向継手の位置にも及んでおり、継手に作用する最大せん断力は、総推進力 2276.8 kN/m の15%程度となった。

4. 基本性能確認試験

2等分割の管体をプレストレスの導入により一体化する推進管について、日本下水道協会が規定する試験方法に準じて基本性能確認試験を実施した。供試管の形状寸法は、試験装置の規模を勘案し、内径 4000 mm の1/2の仕様とすると、内径 2000 mm 、管厚さ 150 mm 、長さ 1000 mm となる。本試験では、日本下水道協会規定の呼び径 2000 mm 標準管(1種)の性能と比較することも重要と考え、管厚さを 175 mm とし、プレストレスの効果に着目することにした。また、円周方向のPC鋼材は、製作方法の検証も兼ね、 12.7 mm のアンボンドPC鋼より線を、管の長さ 1000 mm では配置上の限界となる4本配置とし、引張鉄筋比を標準管に合わせて 0.8% とした。写真-1、写真-2に供試管の概要を示す。

(1) 供試管の製作

a) 型枠

シールドトンネル用セグメントの一部では、すでに遠心法による成形方法が開発されている¹⁰⁾。提案する分割型推進管に遠心力成形法を適用する場合は、継手面精度の確保や、PC鋼材を挿入するためのシース、定着体の確実な固定方法などに課題がある。そこで、今回の供試管については、鋼製型枠を使用し、継手面に

仕切り版を設け、1回のコンクリート打設で1本の管体を製作できる単体鋼製型枠製法を採用した。この方法によれば、内径 3000 mm を超える推進管でも製作数量や製作工程によっては、型枠材料費を節約できると考える。写真-3に今回用いた鋼製型枠を示す。

型枠にあらかじめ固定しておく埋め込み鋼製カラーでは、その取り付け前の形状保持が重要になる。そこで、カラー本体の鋼板に補強リブ板を設け、断面をT形状とした。写真-4に埋め込み鋼製カラーを示す。

b) 鉄筋・シース・定着体

鉄筋は、あらかじめ籠状に組み立て、形状寸法を検査したうえで、型枠にセットにした。鉄筋をプレハブとすることで、製作面での省力化を図ることができた。

PC鋼材を挿入するシースについては、波付き硬質ポリエチレン管を柵鉄筋で固定し、コンクリート打設時に変形が生じないようにした。また、緊張定着体は、緊張端と固定端が一体となった鋳鉄製定着体¹¹⁾を使用した。これにより、緊張時のジャッキ反力がコンクリートに直接作用しないため、定着体背面の補強鉄筋が不要で、型枠への固定も容易となった。写真-5に鉄筋籠、写真-6にシース・定着体の配置状況を示す。

c) コンクリート

内径 3000 mm を超える推進管を用いる場合、土かぶりも大きくなり、地下水圧が卓越する条件が想定され

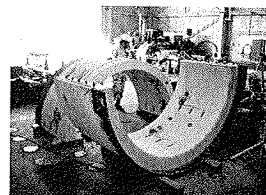


写真-1 管組み立て前

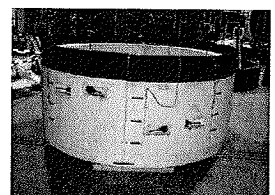


写真-2 管組み立て後

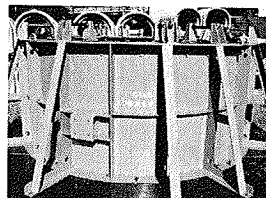


写真-3 鋼製型枠

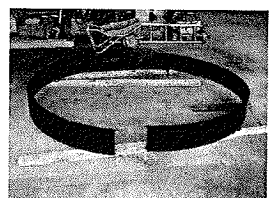


写真-4 埋め込み鋼製カラー

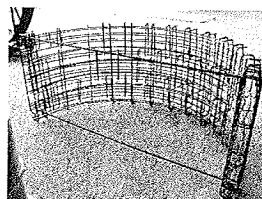


写真-5 鉄筋籠

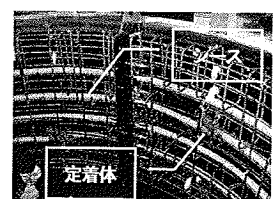


写真-6 シース・定着体

る。継手全体の止水性ととも、推進管コンクリートの水密性も極めて重要となる。今回の供試管では、コンクリートの水密性向上を目的として、通常の配合で求められるセメント量の50%を高炉スラグ微粉末4000で置換する方法を採用した¹²⁾。表-8に設計条件を、表-9に配合表を示す。

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは、初期強度は低い、潜在水硬性によって長期強度は高くなる¹³⁾。そこで、供試管製作に先立ち、表-9の配合で養生期間とコンクリートの圧縮強度の関係を調べた。図-14に試験結果を示す。工場製品におけるコンクリート強度については、材令14日の強度を基準にすることが多い。図-14では、3回の試験練りで得られた供試体3本の平均値を比較しているが、材令14日で、設計基準強度50N/mm²に近づいて達している。製品をまとめた数量で製作する際には、コンクリート強度に変動も予想されるため、材令14日の強度にある程度の余裕も必要である。今後は、脱型後の養生方法に改善を加えるなど、十分な対策を講じる必要がある。

供試管のコンクリート打設では、投入口が管の厚さ175mmに相当する狭いものとなった。そこで、専用のホッパーを新規製作した。また、締め固めは、型枠バイブレーターと棒状バイブレーターを併用した。推進

管の差し口端面は、金ごてで丁寧に仕上げた。大量生産を行う場合には、仕上げ時間が製作工程の遅延につながりかねないため、機械的な加圧成型などの方法が必要になる。ただし、今回の製作方法によっても、管の厚さで±3mm以下、管の長さで±5mm以下となる標準管と同等の製品精度は得られた。写真-7にコンクリート打設用ホッパー、写真-8に脱型直後の分割された管体を示す。

(2) 緊張・組み立て試験

a) 目的・方法

実施工を想定して、分割型推進管の組み立て作業性の確認を行うことを目的とする。試験方法としては、2等分割された推進管を鋼製架台上で組み立て、PC鋼材の挿入・緊張定着作業を行う。試験ケースとして、縦置き組み立て(CASE1)、横置き組み立て(CASE2)の2ケースを行い、適否を判断する。縦置き組み立てでは、分割された管体を縦に置き、ナイロンスリングを巻いてレバーブロックで閉合する。横置き組み立てでは、下半の管体を架台上に載せ、上半の管体をその上に吊り下ろし、自重を利用して管体どうしの閉合を行う。写真-9、写真-10に管体の組み立て状況を、写真-11、写真-12に緊張・定着状況を示す。

表-8 設計条件

設計基準強度 f' ck (N/mm ²)	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)
50	20	8.0 ±2.5	36.1	41.2

表-9 配合表

単位量(kg/m ³)					
水 W	セメント C	細骨材 材S	粗骨材 材G	高炉スラグ [*]	混和剤
165	230	707	1061	230	4.60

^{*} 水結合材比 165/(230+230) = 35.9%

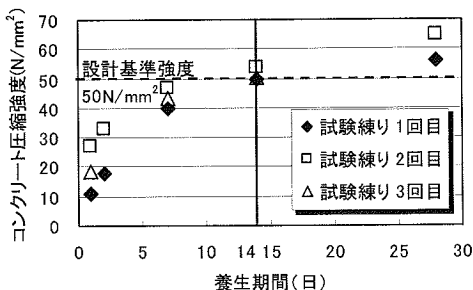


図-14 コンクリート圧縮強度試験結果



写真-7 専用ホッパー

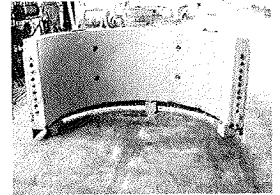


写真-8 脱型完了

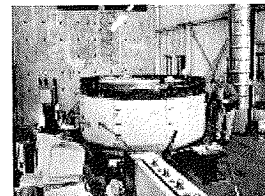


写真-9 縦置き組立(CASE1)

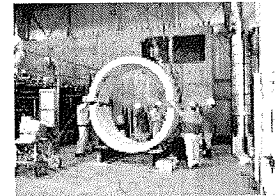


写真-10 横置き組立(CASE2)

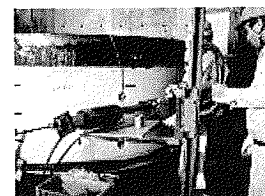


写真-11 緊張定着(CASE1)

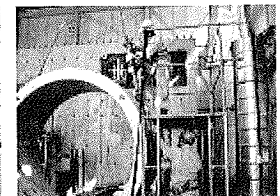


写真-12 緊張定着(CASE2)

b) 結果

組み立て作業性については、CASE1 では、レバーブロックで面を合わせながら引き寄せるのに手間取った。CASE2 では、上半管体を吊り上げた状態で、微調整が必要となる接合ピンのスリーブへの挿入が容易であった。CASE2 では、管の閉合が 10 分程度で済んだ。PC 鋼より線 4 本の挿入から緊張まで要した時間は、計測時間を除き 20 分程度であった。また、組み立て精度については、両ケース共、継手の目違い、段差等はほとんど生じなかった。PC 鋼より線の緊張定着後は、管の上下左右方向の真円度は、 $\pm 1.0\text{mm}$ 以内となった。

図-15 に横置き組み立て (CASE2) 時の緊張力と円周方向継手の目開きの関係を示す。緊張力と継手目開きを供試管の上方・下方の 2 測線で π ゲージにより計測し、プレストレスの段階的な導入に伴い、継手が密着していく状況を確認した。継手断面には水膨脹系シーラ材を貼付している。シーラ溝の深さとシーラ材の厚さの差は 2.2mm であり、管体閉合直後に目開きとして残留した。この残留目開きは、PC 鋼材 1 本目の緊張により、 0.5mm まで縮小した。その後、緊張本数が増えるにつれて、目開きは段階的に縮小し、4 本の緊張完了後には、目開きは 0mm となり、管体どうしが完全に接合された。

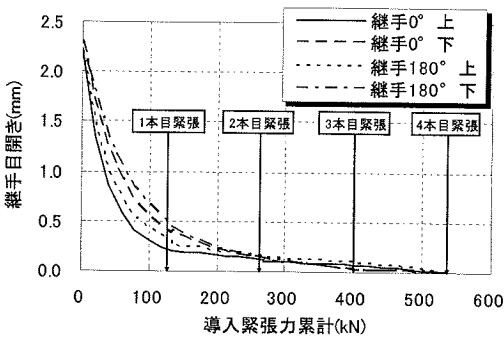


図-15 緊張力と円周方向継手目開きの関係 (CASE2)

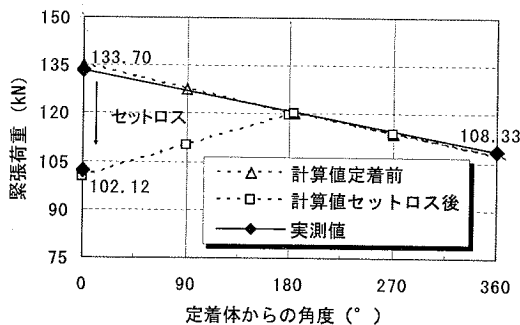


図-16 PC 鋼材 1 本当たりの緊張力分布

図-16 に PC 鋼材 1 本当たりの緊張力分布を示す。緊張端と固定端に配置したロードセルで緊張力を計測し、緊張力の円周方向分布を調べた。PC 鋼材を円形に配置した場合、片引き緊張によれば、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、製造会社のカタログ値¹⁴⁾で 0.06 であるが、計測値を逆算すると、0.04 となった。PC 鋼材を鋼製のくさびで定着する際、PC 鋼材が引き込まれることによる緊張力の減少分 (セットロス) は、カタログ値と同等の 3mm となった。同様に、導入された緊張力分布を管体のコンクリート表面ひずみで確認する。図-17 に緊張時、管軸方向中心部、円周方向 45° 間隔でひずみゲージを用いて計測したコンクリート内外表面の平均ひずみ分布結果を示す。この図では、半径方向軸にひずみをとり、緊張本数の増加に伴うひずみ分布の変化を表現している。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。継手付近では、コンクリート面の密着度によるばらつきは見られるが、図-16 の傾向により、緊張本数が少ないうちは、定着付近での圧縮ひずみは周囲に比べて小さくなる。このばらつきは、緊張本数が増えるにしたがって解消される。なお、4 本目の緊張では、設計値通りの圧縮ひずみを均一に導入することができた。

c) 考察

推進管の組み立て作業性では、横置きで組み立てる方法により、実施工への適用性が高いことがわかった。今回、円周方向継手には、接合ピンを継手 1 カ所当たり 4 本設けており、ピンの雄雌口径差も両側 0.2mm の設定で、精度良く組み立てることができた。また、継手にわずかな目開きが残っても、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、PC 鋼材を円

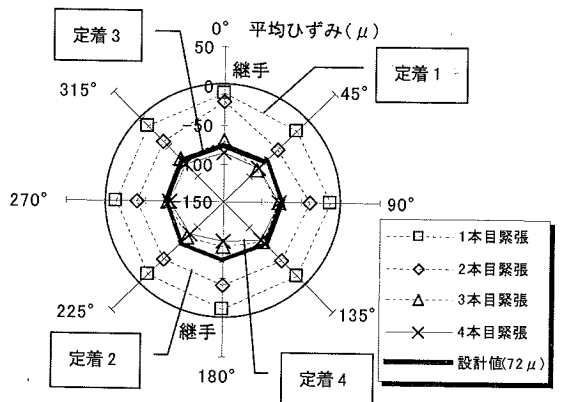


図-17 緊張時のコンクリート表面ひずみ分布

形に配置した場合、PC鋼材とシースの摩擦やセットロスにより、定着部の緊張力が小さくなる傾向がある。1本の推進管にPC鋼材を多数本配置する場合は、緊張力の減少箇所を1断面に集中させないため、定着部を対称に配置するとともに、緊張力が平均化されるよう緊張方向も順番に交互とすることが有効と考える。

(3) 水密性試験

a) 目的・方法

円周方向の一部および管軸方向継手全体の止水性を確認する。試験方法は、下水道推進工法用鉄筋コンクリート管の継手構造に基づいた方法とする¹⁵⁾。まず、プレストレスにより一体化した推進管を2本接続し、管軸方向継手部の外部より封水して、所定の水圧を加えたまま保持する。次に、一定時間(3分間)経過後、継手部分の漏水の有無を点検する。供試管は、安定性に配慮して、縦置きで試験を行う。写真-13、写真-14に試験状況を示す。試験ケースを表-10に示す。

b) 結果

各試験ケースとも漏水は確認されなかった。CASE3(複合水密試験)終了後、試験水圧を0.2MPaまで上昇させ、3分間保持したが、漏水は認められなかった。

c) 考察

本試験では、円周方向継手にシールドトンネル用セグメントで実績のある水膨張系シール材(硬度 JIS A38・発泡倍率 2.5 倍)を適用するため、シール溝を平面的にコの字状となる形状とした。これにより、カラー側と差し口側を周回する止水用ゴムにラップさせることで、管軸および円周方向の止水連続性を確保することができた。管体を組み立てる際は、継手を慎重に突き合わせる要領により、シール材を損傷することなく、シール溝に封入することができる。また、プレストレスの導入により、継手断面全体に $2.4\text{N}/\text{mm}^2$ の圧縮応力度が作用している。これにより、継手目開きが生



写真-13 水密試験器

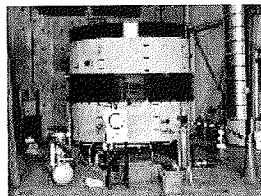


写真-14 水密試験 (CASE3)

表-10 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)
CASE1 (水平水密)	0.15	30
CASE2 (曲げ水密)		45
CASE3 (複合水密)	0.10	67

じることなく、シール材の設計値による接面応力度 $1.8\text{N}/\text{mm}^2$ を十分保持できたと考える。今後は、注入型シール材を併用するなど、管軸方向継手の止水性にも改良を加え、大口径化に伴う高水圧にも十分対応できる手法を確立していく必要があると考える。

(4) 外圧試験

a) 目的・方法

外圧に対する管体強度を規定するため、最適な継手位置を確認することを目的とする。試験方法としては、プレストレスにより一体化した推進管を架台の上に水平に置き、油圧ジャッキを用いて一方向から荷重し、管体の曲げ剛性、終局耐力を確認する。試験ケースは、荷重点に対して継手位置を 90° 45° 0° とする¹⁶⁾。また、継手面荷重となる 0° のケースでは、鋼製カラーのない供試管も用いる。写真-15、写真-16に試験状況、表-11に試験ケース、図-18に荷重位置を示す。なお、目標荷重を定めるため、荷重と変形の関係について、ファイバーモデルによる二次元弾塑性非線形解析を実施した¹⁷⁾。本解析では、管体を鉄筋コンクリート、継手を無筋コンクリートでモデル化し、PC鋼材はダミー部材で支持し、アンボンドPC構造を表現した。

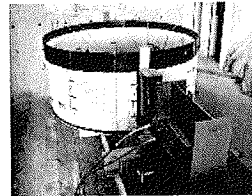


写真-15 外圧試験 (CASE1)

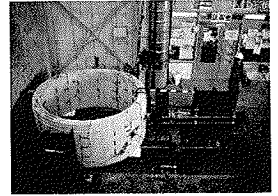


写真-16 外圧試験 (CASE4)

表-11 外圧試験ケース

試験ケース	供試管仕様	荷重点の位置
CASE1	鋼製カラーあり	継手面から 90°
CASE2	〃	継手面から 45°
CASE3	〃	継手面
CASE4	鋼製カラーなし	継手面

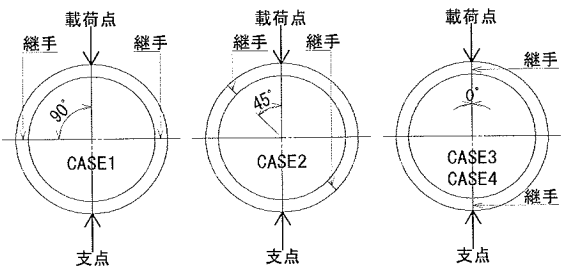


図-18 外圧試験荷重位置

プレストレスは荷重で入力し、各々の部材は、材料の非線形性を考慮した。また、材料の物性値は【2002年制定】コンクリート標準示方書(土木学会)を参照した。

b) 結果

図-19 に荷重と管体変形(載荷軸方向で最大)の関係を示す。

CASE1 では、載荷重 150kN 程度まで弾性的な変形を示した。荷重増加に伴い、220kN で鋼製カラーの溶接部分が破断し、265.6kN で継手内面側のコンクリートが圧壊した。この時の変位は、17mm であった。PC 鋼材の緊張力は、圧壊直前にやや増加した。解析値は、載荷重 240kN 程度までよい近似が得られた。

CASE2 は、CASE1 と同様の変形を示した。管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 300.5kN で載荷点の管体内面側コンクリートが大きく剥落し、鋼製カラーが補強リブ板ごと抜け出した。この時の変形量は、44.5mm で CASE1 の 2 倍以上の変形性能となった。解析値は、載荷重 200kN までよい近似が得られた。

CASE3 では、載荷重 75kN 程度まで弾性的な変形を示した。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分が破断し、さらに変形が増大した。最大荷重 385kN のとき、載荷点外面側のコンクリートが圧壊し、最大変形量は、78.3mm であった。解析値は、やや実験値より高めであったが、全体的傾向は良く捉えられた。

CASE4 では、CASE3 と同様の変形過程を示した。荷重増加に伴い、継手目開きの進行が CASE3 よりも早く、変形の進行も早かった。最大荷重 296.4kN の時、載荷点外面側のコンクリートが圧壊した。変形量は、91.5mm であり、試験ケース中の最大値を示した。なお、管本体の損傷は小さいものであった。

式(8)より、自重成分を除いて求めた破壊荷重は

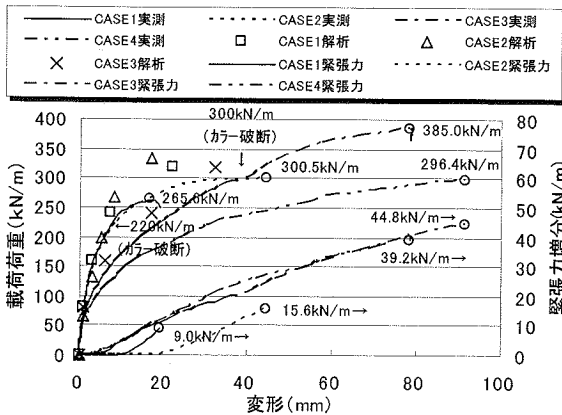


図-19 荷重と変形の関係

183kN であり、実験値は計算値の平均 1.8 倍となった。日本下水道協会規定の呼び径 2000mm 標準管(1種)の破壊荷重は、自重成分を控除すると 161kN である。アンボンド PC 構造によりヒンジ化した継手の剛性低下によって、管体の終局耐力は増加することが確認された。

図-20 に荷重と円周方向継手目開きの関係を示す。目開き量は、最大となる位置での値を抽出している。継手目開きの進行が最も遅く、目開き量の小さいのは CASE2 であった。CASE1 は、目開きの進行状態が CASE2 と似ているが、CASE2 よりも低い荷重で目開きが増大する結果となった。また、鋼製カラーの有無の違いとなる CASE3, CASE4 では、載荷重 60kN 程度までは、CASE3 の目開きの進行が早かった。荷重増加に伴い、この傾向が逆転し、CASE4 の目開きが増加した。なお、CASE3, CASE4 について、載荷重 60kN 付近で逆転現象が見られるのは、支圧治具として、CASE2 で H 形鋼、CASE4 で 2 本の鋼管を用いた載荷条件の違いに起因している。CASE4 では、継手を跨ぐように 2 本の鋼管を配置しなければならず、載荷初期では、両側の管体に対する荷重の馴染みが悪く、継手目開きが妨げられた。

以上の結果に基づき、荷重と等価換算剛性(継手を

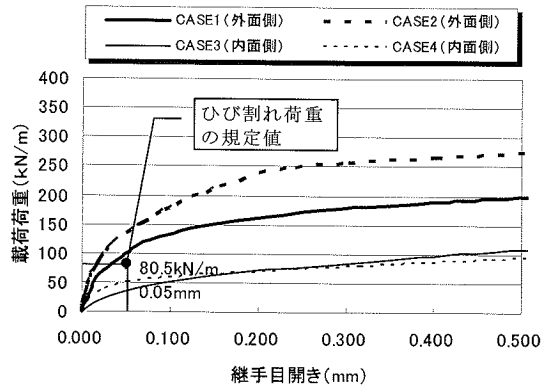


図-20 荷重と円周方向継手目開きの関係

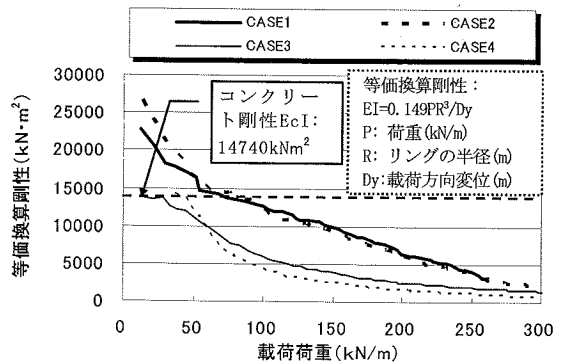


図-21 荷重と等価換算剛性の関係

管体と等価な剛性とした計算値)の関係を図-21に示す。継手の影響が少ないCASE1とCASE2では等価換算剛性が一定の割合で低下した。CASE2は、低荷重時の剛性が最も高い。CASE3、CASE4では、CASE1、CASE2に比べて初期剛性も低く、荷重増加と共に剛性が急激に低下した。

次に、管体コンクリート表面ひずみとひび割れ荷重の関係を示す。各々のケースについて、管体のひび割れは、目視により観察を行った。CASE1とCASE2では、最初のひび割れがコンクリート内面の引張縁側に明瞭に現れた。特に、CASE2については、初期ひび割れ荷重をコンクリート表面ひずみの変化からも捉えることができた。図-22にひび割れ発生位置での荷重とコンクリート表面ひずみの関係を示す。

表-12に外圧試験の結果を整理したものを示す。

c) 考察

円周方向の継手を載荷点から45°および90°ずらした場合は、プレストレスの導入により、ひび割れ荷重と目開き荷重が、標準管と比較して優位となる。特に、45°ずらした場合は、図-23に示すとおり、曲げの影響が継手に与える影響は小さく、ひび割れ荷重を等価応力ブロックによる計算値で求めても安全側の結果が得られる。また、埋め込み鋼製カラーは、管体変形に対しては若干の拘束力を与えるが、カラーが一旦

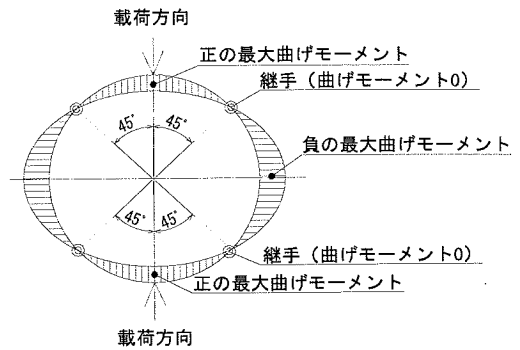


図-23 載荷方向と曲げモーメントの関係

破断すると、推進管としての機能が著しく損なわれることから、管の強度を大幅に増加させる働きはないと考える。なお、荷重と変形の関係については、非線形領域に移行する初期段階までなら、円周方向継手を無筋コンクリートでモデル化した二次元弾塑性非線形解析による推定が可能となる。

実施工の際には、変形性能まで考慮すると、継手を頂部から45°ずらして実施する方法が最も望ましく、継手を載荷点とした場合は、小さい荷重で目開きするため、実用上、利用できないと考える。

(5) 軸方向強度試験

a) 目的・方法

管軸方向に過大な推進力が作用する状態を想定し、推力伝達材が不均一に変形する過程で、円周方向継手の挙動を確認することを目的とする。試験方法は、プレストレスにより一体化した推進管の上下載荷面および軸方向継手に厚さ20mmの推力伝達材を配置し、円周方向継手を90°ずらして2本接続した状態で管軸方向上部から載荷を行う。ただし、推力伝達材が円周方向継手を完全に覆う120°範囲の場合は、解析による事前検討で継手に対する安全性を確認している。そこで、試験ケースは、推力伝達材の材端が継手に全く接触しない60°の範囲となるCASE1、推力伝達材の材端が継手に接する90°の範囲となるCASE2の2ケースを選定する。

推力伝達材は、低発砲ポリスチレンで発泡倍率2.0倍のものを使用する。目標最大荷重は、推力伝達材が塑性域に達する時のコンクリート応力度(概ね許容応力度)をもとに載荷面積に応じて、CASE1で6,000kN、CASE2で10,000kNとする。なお、コンクリートのひずみは、円周方向30°間隔で上下3測線上、管体内外面に設けたひずみゲージで計測する。管軸と円周方向の継手変位は変位計、継手目開きは ϵ ゲージで計測する。実験に先立ち、管軸方向の軸力分布の規定値を得る

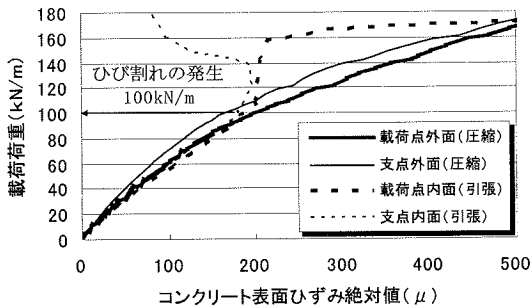


図-22 荷重とコンクリート表面ひずみの関係(CASE2)

表-12 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)	最大荷重 [カー破断] (kN/m)	最大変位 (mm)
CASE1	85.0	103.0	265.6 [220.0]	17.0
CASE2	100.0	135.0	300.5	44.5
CASE3	115.0	33.0	385.0 [300.0]	78.3
CASE4	65.0	50.0	296.4	91.5
標準管	80.5 (1種)		161.0 (1種)	
計算値	右欄①×50% = 91.5		①: 式(8) = 183.0	

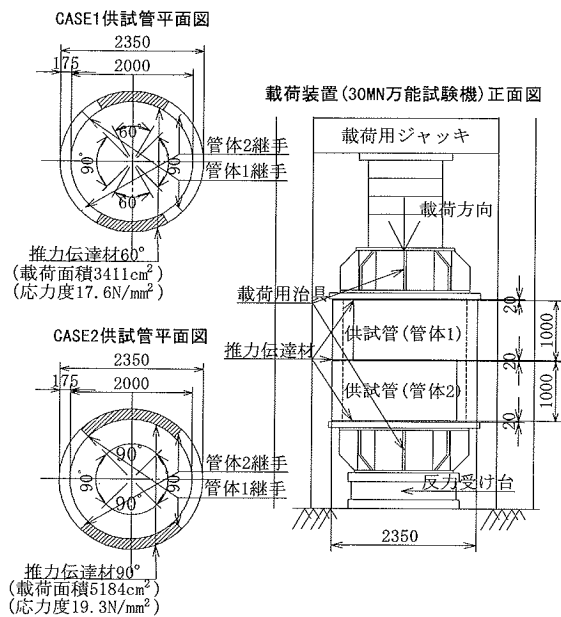


図-24 試験装置

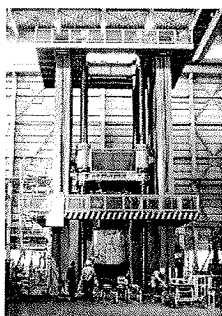


写真-17 軸方向強度試験

ため、日本下水道協会規定の呼び径 2000mm 標準管 (1 種) 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 線形解析を実施し、荷重と軸方向ひずみの関係を求めた。材料の物性値は、【2002 年制定】コンクリート標準示方書(土木学会)を参照した。図-24、写真-17 に試験装置および状況を示す。

b) 結果

図-25 に荷重と管軸方向継手変位との関係を示す。この軸方向変位は、主に上下管体間の推力伝達材の変位を表している。図-25 から CASE1 で最大応力度 16.8N/mm^2 のとき、推力伝達材のひずみ量は 16%、CASE2 で最大応力度 19.3N/mm^2 のとき、ひずみ量は 23% となった。荷重増加の段階では、推力伝達材のひずみ特性に近い傾向が見られた¹⁸⁾。なお、載荷時、CASE1、CASE2 とも、管体のすべりやひねりが生じるような挙動は認められなかった。ただし、試験装置の安全上、供試管破壊までの載荷ができなかったため、部材の降

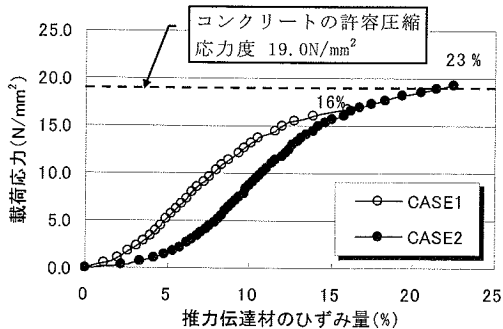


図-25 荷重と管軸方向継手の変位

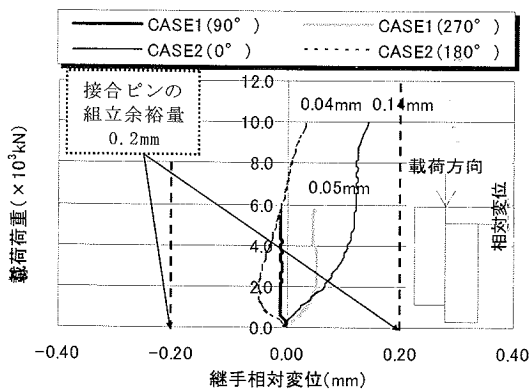


図-26 荷重と円周方向継手の滑り

伏から破壊に至る挙動の詳細は確認できなかった。

図-26 に荷重と円周方向継手の軸方向に対する滑りの関係を示す。図中には、最大変位を示した管体 1 本分の継手挙動を示してある。接合ピン雄雌口径の差(組立余裕量)は、0.20mm (片側 0.1mm) であった。両ケースとも、荷重増加とともに相対変位が一旦増加するが次第に緩和される傾向となった。CASE2 では、載荷初期段階で、双方の継手が逆向きに変位しており、推力伝達材の馴染み加減等が要因と思われる不均等な変形が見られた。継手の最大相対変位は、CASE1 で 0.05mm、CASE2 で 0.14mm であり、余裕量以内であった。

次に、管軸方向のコンクリート表面ひずみ分布結果を示す。図-27 は、CASE1 で最大荷重 6,000kN のとき、軸方向ひずみの分布である。CASE1 では、図-27 で 45° 225° を中心に 60° の推力伝達材を配置した。円周方向継手位置は、管体 1(上)で 0° 180° 、管体 2(下)で 90° 270° とした。この結果によれば、推力伝達材を貼らない範囲で無応力域が生じるが、継手位置での応力の乱れは認められなかった。コンクリートの弾性係数を $3.30 \times 10^7 \text{kN/m}^2$ としたとき、最大荷重時でのひずみの計算値 (P/EA) は 533μ となる。載荷範囲でのひずみを平均すると、計算値に近い値となった。載荷範囲中、ひずみのピーク値にずれが生じている。こ

れは、計測時間の遅れに起因している。なお、FEM による解析値は、実測値分布を程良く捉えることができた。

図-28 は、CASE2 で最大荷重 10,000kN のときの管軸方向ひずみの分布である。CASE2 では、図-28 で 45° 225° を中心に 90° の推力伝達材を配置した。円周方向の継手位置は、管体 1 (上) で 0° 180° 、管体 2 (下) で 90° 270° とした。ただし、推力伝達材の一端が、管体 1 では 0° 180° 、管体 2 では 90° 270° の位置で継手に接する配置とした。載荷範囲 $180^\circ \sim 270^\circ$ 側では、継手付近の応力伝達が比較的良好であった。しかし、載荷範囲 $0^\circ \sim 90^\circ$ 側では、加圧面直下の圧縮ひずみが相対的に大きくなった。これは、載荷時に円周方向継手が管軸方向に滑り出し、ある限界を超えると荷重分担に偏りが生じる様相を呈している。なお、最大荷重時でのひずみ計算値 (P/EA) は 585μ と

なり、載荷範囲のひずみ実測値を平均すると、実測値の方が大きくなった。FEM による解析値は、ひずみの実測値分布傾向は捉えているが、全体的に実測値より小さい値を示した。

次に、管軸方向の載荷に伴う円周方向挙動の結果を示す。図-29 は、荷重と円周方向ひずみの関係を表している。CASE1, CASE2 とも、載荷範囲内で円周方向ひずみが増加した。CASE1, CASE2 における載荷範囲の円周方向と軸方向の最大ひずみの比は、それぞれ 0.19, 0.14 となっており、コンクリートのポアソン比 (0.17) に近い値を示した。載荷範囲外では、ひずみに変化が見られなかったが、載荷範囲では、プレストレスによる圧縮ひずみを越える引張ひずみが生じた。この最大ひずみによる引張応力度は 2.5N/mm^2 であり、PC 構造に対する縁引張応力度の制限値 3.0N/mm^2 以下であった。

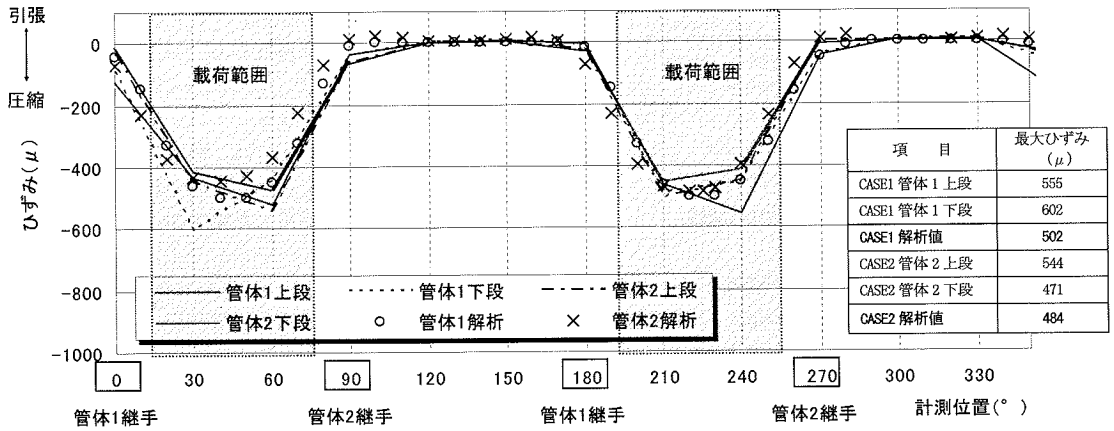


図-27 荷重と軸方向ひずみの関係 (CASE1)

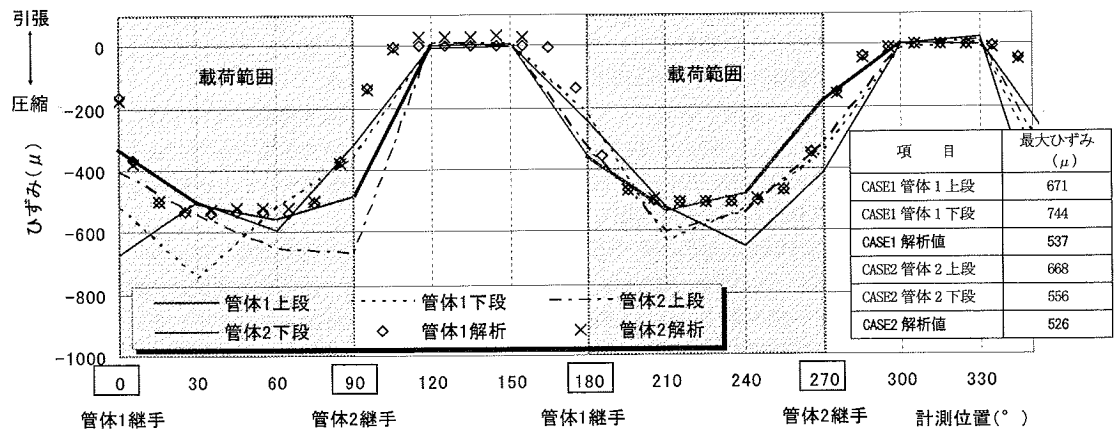


図-28 荷重と軸方向ひずみの関係 (CASE2)

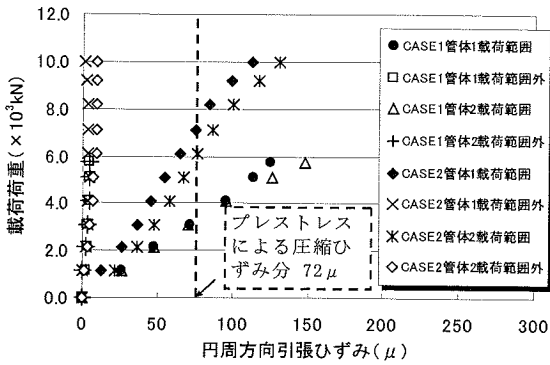


図-29 荷重と円周方向ひずみの関係

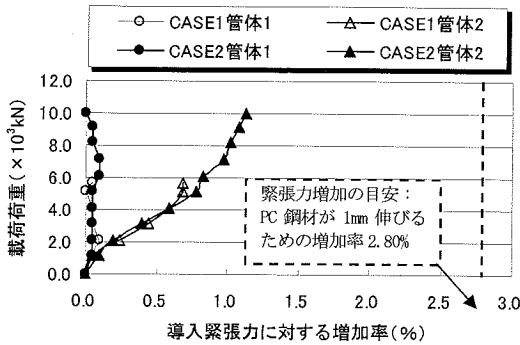


図-30 荷重と緊張力増加の関係

図-30 に荷重と緊張力増加の関係を示す。CASE1 では、緊張力に変化がなかった。CASE2 では、荷重増加に伴い、若干緊張力が増加した。これは、CASE2 の計測位置が定着部付近にあったことに起因している。導入緊張力は、PC 鋼材 1 本当たり 104kN で、最大 1.1% の増加となった。PC 鋼材が 1mm 伸びるために必要な導入緊張力に対する割合は 2.8% であり、僅かな増加だった。

c) 考察

今回の軸方向強度試験では、推力伝達材の面積をパラメーターとし、載荷面積に応じた荷重を設定して、管体の挙動を確認した。載荷範囲内に円周方向継手が存在しない場合は、荷重が継手に及ぼす影響がなく、応力伝達状態も良好となる。しかし、推力伝達材が円周方向継手に一部でも接する場合には、管軸方向に対して継手が滑り、圧縮ひずみ分布の偏りから判断して、推力伝達材の変形過程で、応力伝達に乱れが生じることが示唆された。今回の荷重レベルでは、接合ピンに直接せん断力が作用するほどの継手変位は認められなかったが、コンクリートの支圧強度を超える荷重が作用した場合、継手部コンクリートの割裂が先行する危険性がある。そこで、プレストレスで一体化した推進管に推力伝達材を適用する場合は、安全性確保のため、

円周方向継手に推力伝達材の端部が直接接するような配置を避けることが望まれる。また、管軸方向荷重の影響により、円周方向にコンクリートのポアソン比に近い引張ひずみが生じることが確認されたが、PC 構造に対するコンクリートの縁引張応力度の制限値を下回るものであった。したがって、導入プレストレスが過大となるのを避けるためにも、推進力の影響をプレストレスで制御しない方が良いものと考えられる。

5. 結論

本研究では、分割した推進管をプレストレスの導入により一体化し、内径 3000mm を超える管渠推進工法へ適用する検証を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) プレストレスコンクリート構造を適用することで、円周方向に機械式継手が不要となること、鉄筋コンクリート構造より管の厚さが低減できることなどから、経済性の向上が実現できる。また、PC 鋼材量の増減で、管の内径と厚さによる推進管の規格化が容易となる。
- (2) 推進管の組み立てでは、接合ピンを用いて横置き状態で組み立てると実用的である。また、水膨張系シール材を応用した継手の止水方法に効果がある。
- (3) 外圧に対しては、円周方向継手を載荷点から 45° ずらして、曲げの影響が最小となる位置とすると、継手目開きを最小限に抑えることができる。また、埋め込み鋼製カラーの溶接部分が、過大な曲げ引張力を受けないため、破断しにくく、推進管の構造上では有利となる。
- (4) 等価応力ブロックを用いて算定した破壊荷重の 50% を外圧強さ（ひび割れ荷重）とする規定方法によれば、円周方向継手を載荷点から 45° ずらした位置に設けた場合にのみ、設計上、安全側の指標が与えられる。
- (5) 管軸方向の強度確保については、円周方向継手に過大なせん断力が集中しないよう推力伝達材の適正な配置に留意することが肝要である。

最後に、本工法の研究開発では、シールド工法と競合できる長距離化、高速化も視野に入れ、推進工法技術の普及・発展に貢献したいと考えている。

謝辞：本研究にて、貴重な御教示を賜りました元社団法人日本下水道管渠推進技術協会顧問石橋信利氏ならびに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：下水道推進工法用鉄筋コンクリート管(A-2), pp. 1-14, 1999.
- 2) 安部弘勝, 長井信行, 西川和良, 近藤二郎: P&PC セグメントを本掘進に採用, トンネルと地下, 第 32 卷 10 号, pp. 49-56, 2001.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編], pp. 60-63, 2002.
- 4) 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. 16, 1999.
- 5) 日本下水道協会：下水道推進工法の指針と解説, pp. 38-43, 2000.
- 6) 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.
- 7) 日本下水道協会：シールド工用標準セグメント, pp. 36-37, 2001.
- 8) たとえば, M. Scherle, 野田典宏訳：推進工法の理論と実際, pp. 243-256, 2001.
- 9) 日本トンネル技術協会：セグメントシールド材による止水設計手引き, pp. 21-22, 1997.
- 10) 日本下水道協会：下水道推進工法の指針と解説, pp. 109, 2000.
- 11) 林光俊, 山田悟, 齊藤正幸, 小泉淳: 遠心力締め固めによるセグメント製造方法の開発, 土木学会論文集, No. 534/VI-30, pp. 135-152, 1996.
- 12) 宮尾博一, 鴨下由男, 江口公道, 福本勝司: 地下河川で採用した水平コッター式セグメント, トンネルと地下, 第 32 卷 7 号, pp. 43, 2001.
- 13) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧, pp. 101-102, 1996.
- 14) 住友電工スチールワイヤー株式会社：SM アンボンド工法, pp. 2, 1996.
- 15) 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.
- 16) 西川和良, 山口隆史, 安田正樹, 杉本雅人, 近藤二郎: PC セグメントの設計手法と基本性能について, トンネル工学研究論文・報告集, 第 7 卷, pp. 285-290, 1997.
- 17) 玉木一清, 新井英雄, 板井栄次, 山崎淳: 非線形解析プログラムの外ケーブル構造への適用と今後の標準化について, プレストレストコンクリート技術協会 第 3 回シンポジウム論文集, pp. 309-314, 1999.
- 18) センブラカーブ推進研究会：センブラカーブシステム設計マニュアル, pp. 11, 1994.

(2003. 10. 23 受付)

BASIC PERFORMANCE AND APPLICATION OF HALVED JACKING PIPE USING PRESTRESSED CONCRETE STRUCTURES

Kazuyoshi NISHIKAWA, Hideo ARAI, Hiroshi MIKAMI, Jiro KONDO, Makoto ISHIKAWA and Kazuhide ISHIKAWA

Sewage Water Pipe Jacking has not been used to the pipe of which internal diameter is larger than 3.0m so far. Because Road Traffic Control Law restricts the height of transportation after casting at pipe manufacturers in Japan. On the other hand, pipe jacking method is most profitable among urban tunneling methods. Therefore, if the pipe diameter restriction is overcome technically and larger pipes are applied widely, construction cost of urban tunnels can be reduced contributively.

This paper describes a developed method that halved casting pipe can make easy transportation and the segments can be combined as a perfect pipe by post tensioning around a launch shaft. And the application is examined on the structural point through basic performance tests. As a result, the capacity is obtained as the standard pipes specified by JSWA.