

# 分割型推進管による推進時の挙動特性について

## Dynamic Motion of Halved Jacking Pipes on Plane Alignment

西川和良<sup>1</sup>・田中正樹<sup>2</sup>・須川智久<sup>3</sup>・植竹克利<sup>4</sup>・川相章<sup>5</sup>

Kazuyoshi Nishikawa, Masaki Tanaka, Tomohisa Sugawa, Katsutoshi Uetake and Akira Kawai

<sup>1</sup>正会員 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:knishikawa@smcon.co.jp

<sup>2</sup>正会員 三井住友建設株式会社 機電部 (〒164-0011 東京都中野区中央1-38-1)

<sup>3</sup>正会員 三井住友建設株式会社 技術研究所 (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)

<sup>4</sup>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)

<sup>5</sup>正会員 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)

The authors suggest that the halved jacking pipe of which the internal diameter is larger than 3.0m has two radial joints on circumference. The joints are arranged at clockwise 45degree by turns. Meanwhile, it is possible for joints to suffer from eccentric loads by pipe deformation due to friction between soil and a pipe. This state is likely to increase if the jacking pipes go forward on curve and meander alignment. Therefore, the joint specification must be determined by analyzing loads distribution to the radial joints. Then the jacking pipe test on the S shaped curve alignment was carried out with halved pipe models. And the test results have led to evaluate section forces to the halved jacking pipes accurately.

**Key Words:** halved jacking pipe, pipe jacking test, radial joint, curve alignment, section force

## 1. はじめに

近年、下水道管渠築造工法で多用される推進工法では、1kmを超える長距離施工技術<sup>1)</sup>や半径15mを超える急曲線施工技術<sup>2)</sup>が確立され、適用範囲が目覚ましく拡大している。しかしながら、適用径については、運搬の際の積載高さによる制約から、推進管内径3000mmまでが限界とされていた。こうした中、著者らは、あらかじめ、半円形に分割された推進管を工場で製作し、現地へ運搬した後、プレストレスを導入して一体化を図る分割型PC推進管を用いる工法を提案した<sup>3)</sup>。本工法によれば、運搬重量を勘案して、内径3000mmから内径5000mm程度を対象にした推進工法が可能になる。

分割型PC推進管の研究開発では、これまでに、緊張・組立試験、水密性試験、外圧試験、および軸方向強度試験などの基本性能確認試験を終え、適用性の検証を行っている<sup>4)</sup>。しかしながら、組み立てた推進管を推進設備により土中に圧入する際、推進管と地山の間に生じる摩擦や推進力の作用点が円周方向継手に与える影響については、未解明のままにな

っている。特に、単曲線推進や推進管の方向制御に必要なS字曲線推進では、これらの影響が大きく、円周方向継手の構造に配慮が必要となる。そこで、分割型推進管による曲線推進時の挙動を把握し、継手に作用する断面力を確認するため、模型推進管をS字曲線上で推進させる実験を行うことにした。

本稿では、曲線推進時、推進管に作用する荷重を想定し、継手に作用する断面力を推定する。また、模型管を用いた推進確認実験の結果と考察を紹介し、曲線推進時に必要とされる継手構造を提案する。

## 2. 推進時に継手に作用する断面力

### (1) 管軸方向の荷重によるせん断力

直線区間を推進する際は、推進力および推進管外周面と地山との摩擦力は、均等に作用し、管軸方向にせん断力は生じにくい。しかしながら、曲線区間を推進する際には、管列の座屈現象により管列が曲線の外側に膨れだし、推進管外周面と地山との摩擦による抵抗力が卓越する。よって、推進力と周面抵

抗力による分布の差は、軸方向のせん断力として推進管に作用する。

分割型推進管を扱う場合は、円周方向継手に作用するせん断力を適切に評価したうえで、継手の仕様を定める必要がある。そこで、推進力伝達材を推進管の頂部および底部に90°分布で貼り、推進力伝達材が貼られていない範囲は、推進力が低減されると仮定する。直線区間単位周長当たりの推進力を $+q$ 、曲線区間単位周長当たりの周面抵抗力を $-0.5q$ とすると、図-1のような軸方向荷重分布が与えられる<sup>5)</sup>。ただし、推進管の頂部から0°～180°を曲線外側とし、軸方向合力は、曲線推進力と周面抵抗力の和とした。いま、曲線内側は、軸圧縮力が卓越するため、剛域と考える。曲線外側の垂直投影面に仮想はりを考え、0°から180°の軸方向合力を荷重として作用させる。この単純はりモデルにより、せん断力を算定すると、任意位置でのせん断力が求められる。

継手を45°とした位置でのせん断力の算定式は、

$$Q_j = \frac{\zeta \cdot \omega \cdot l}{4} \quad (1)$$

また、最大せん断力は、頂部から30°の位置で生じ、

$$Q_{\max} = \frac{7 \cdot \zeta \cdot \omega \cdot l}{24} \quad (2)$$

ここに、 $Q_j$ : 継手45°位置の軸方向せん断力(kN)

$Q_{\max}$ : 最大せん断力(kN)

$\zeta$ : 周面抵抗力和直線区間推進力の比

$\omega$ : 単位周長当たりの直線推進力(kN/m)

$l$ : 仮想はりのスパン(半円周長;m)

となる。

曲線区間と直線区間の推進力の比を $\zeta$ とし、直線区間の推進力を1.0、仮想はりの長さを1.0とした場合のせん断力の分布を図-2に示す。

## (2) 円周方向の荷重による曲げモーメント

曲線部では管列が外側に膨れ出す座屈現象により、推進管は、地盤反力による背面からの力を受ける。日本下水道協会では、この地盤反力を管外径の90°に分布すると仮定している<sup>6)</sup>。図-3に推進力と側方荷重の状態を示す。

地盤反力による分布荷重によって、推進管は押しつぶされるような力を受け、推進管の円周方向には曲げモーメントが作用する。この曲げモーメントについては、円周方向の分布を確認したうえで、円周方向継手に対する影響を十分評価する必要がある。

図-3から、側方荷重と推進力の関係は、

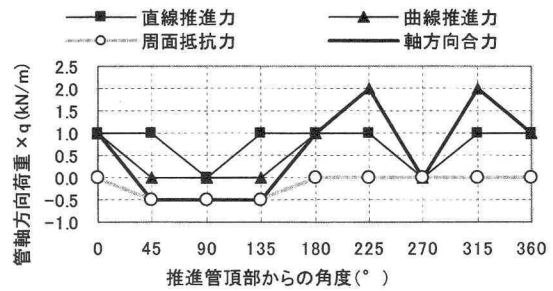


図-1 管軸方向の荷重分布 ( $\zeta=0.5$ の場合)

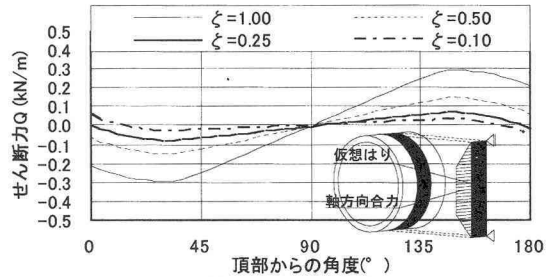


図-2 管軸方向のせん断力分布

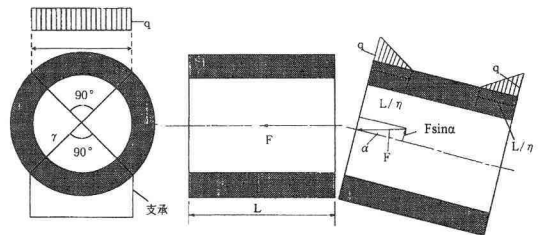


図-3 推進力と側方荷重の関係

$$F \cdot \sin \alpha = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot L \cdot \sqrt{2} \cdot r \cdot q \quad (3)$$

ここに、 $F$ : 曲線中の推進力(kN)

$\alpha$ : 管1本当たりの折れ角(°)

$L$ : 地盤反力に対する影響範囲長(m)

$r$ : 管厚中心半径(m)

$q$ : 等分布側圧(kN/m<sup>2</sup>)

で与えられる<sup>7)</sup>。

また、曲げモーメントの分布は、弾性方程式を解くことにより、水平直径点からの角度を $\theta$ とすると、 $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ の場合、

$$M = qr^2(0.239 - 0.5 \cdot \sin^2 \theta) \quad (4)$$

$45^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$ の場合、

$$M = qr^2(0.239 - 0.707(\sin \theta - 0.353)) \quad (5)$$

$135^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ の場合、

$$M = qr^2(0.239 - 0.707(\sin \theta - 0.353) - 0.5(0.707 - \sin \theta)^2) \quad (6)$$

で与えられる<sup>8)</sup>。

### 3. 模型推進確認実験

#### (1) 実験目的

模型推進管を製作して曲線推進実験を行い、円周方向継手の有無、位置の相違による推進管の挙動を確認するとともに、推進管本体および継手に生じる断面力を評価する<sup>9)</sup>。また、実験結果を用いて、継手の設計に対する指標が得られるよう検証する。

#### (2) 実験方法

##### a) 概要

推進用塩化ビニル管と鋼製カラーで模型推進管を作成する。側部および底部を拘束できる鋼製フレームを製作し、S字曲線となる平面線形で模型管を配置する。起点側（発進側）と終点側（到達側）において、油圧ジャッキにより元押し推進力および先端抵抗力を付加し、ジャッキストロークを同調させて、推進管全体を推進させる。推進時には、推進管内面ひずみおよび円周方向継手の変位を計測することで、模型推進管の挙動を確認する。

##### b) 模型推進管

外径470mm、厚さ18.1mmの推進用塩化ビニル管を加工して使用する。推進管1本の長さを200mmとし、厚さ1.6mm、幅55mmの鋼管を鋼製カラーとして用いる。推進管は、2等分割半円形とし、差し口部分は、全周2mmの深さで切削してクリアランスを確保する。

推進管の組み立ては、半円形管1組を突き合わせた状態で鋼製カラーをはめ込み、ビスを用いて一体化する。管軸方向継手には、ポリエチレン樹脂発砲体製の推進力伝達材（ $t=10\text{mm}$ ）を管の頂部と底部に90°で分布するように貼り付け、前後の管を差し込んで接合する。図-4および写真-1に模型推進管の概要を示す。

##### c) 実験装置

模型推進管が27本接続できる鋼製フレームを製作する。半径10mのS字曲線が得られるようにフレーム内面から管表面に向けて、厚さ4.5mmの鋼板をレーザー加工した支持金物を設ける。また、起点側と終点側には、油圧ジャッキが据え付けられるよう反力受けを設ける。図-5および写真-2に実験装置を示す。

##### d) 実験手順

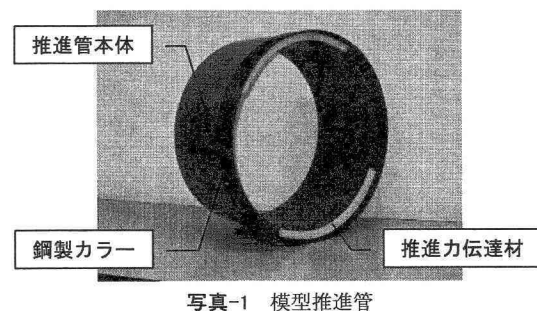
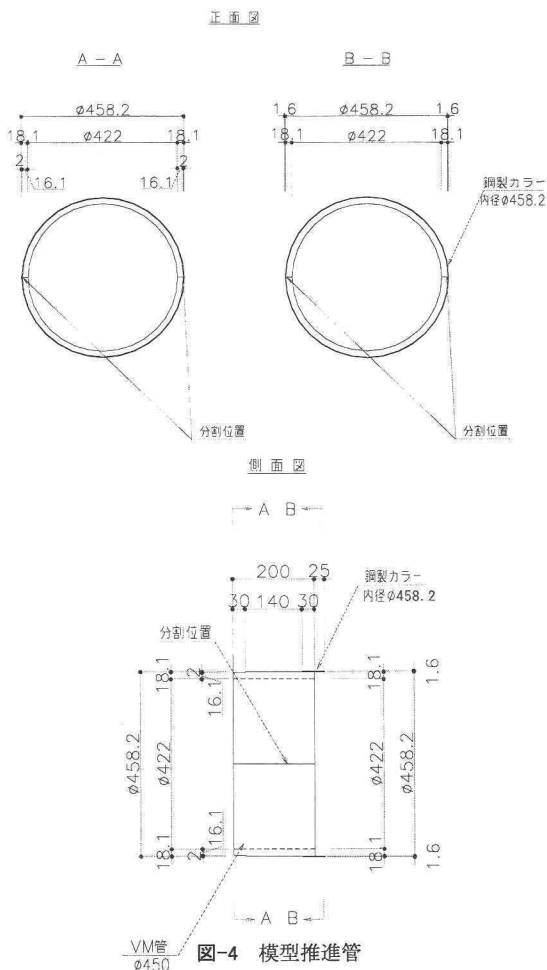
起点側と終点側の油圧ジャッキ面間に模型推進管を30本配置する。計測、管内照明およびカメラを準備した後、推進実験を開始する。管の推進は、元押しジャッキと先端抵抗ジャッキを同調させる。計測は、油圧ジャッキ作動後、初期段階は推進圧力の上昇に伴って行い、管が動き出した段階からはジャッ

キストローク長により定期的に行う。計測頻度としては、推進長40mmごとに行えるようにする。

##### e) 実験ケース

実験ケースは、以下の4ケースとする。

- ・ CASE1 : 継手を0° 180° と90° 270° 千鳥組
- ・ CASE2 : 継手を45° 225° と135° 315° 千鳥組
- ・ CASE3 : 継手なし（継手を接着）
- ・ CASE4 : 継手なし（継手を接着）＋砂で充填





#### f) 計測内容

推進力、推進長、円周方向継手の目開き、軸方向相対変位、模型管内表面ひずみ（45° ピッチ8測線）を計測する。また、管内にビデオカメラを設置して管内状況等を確認する。計測項目を表-1に、計測装置を設けた推進管の展開図を図-6に示す。なお、円周方向の角度については、発進側から到達側を見て、頂点から半時計周りの角度で示す。

### (3) 実験結果

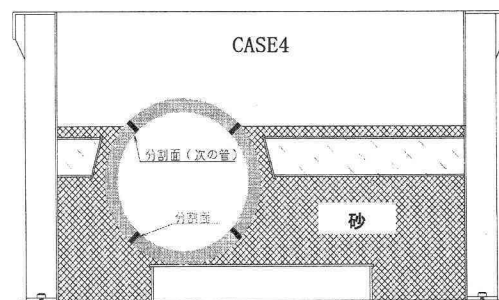
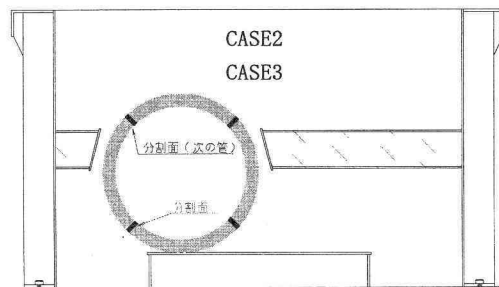
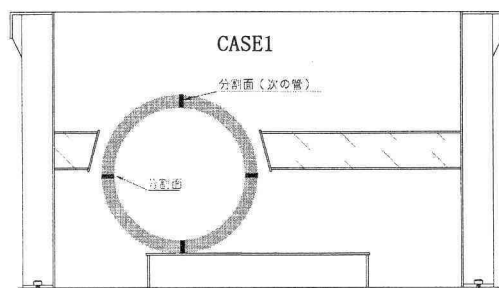
#### a) 推進延長と周面抵抗力の関係

図-7に元押し推進力から先端抵抗力を差し引いた荷重と推進延長の関係を、図-8に模型管推進時の支持条件の概要を示す。図-7に示した荷重は、推進管表面と支持金物あるいは充填した砂（乾燥密度1.7：標準的な川砂）との摩擦抵抗力とみなせる。CASE1からCASE3では、推進管の側部および底部の3点で支持しており、支持金物との接触面積が少ない。また、支持金物の先端には、推進管表面に対する摩擦低減材として、超吸水性樹脂繊維（ランシール）を貼ってあるため、鉛直または水平方向からの力を加えない限り、管表面の摩擦力は極めて小さい。

表-1 計測項目

| 項目    | 計測機器       | 計測位置           |
|-------|------------|----------------|
| 推進力   | ロードセル      | 推進始端           |
| 先端抵抗力 | ロードセル      | 推進終端           |
| 推進長   | ワイヤー式変位計   | 推進両端           |
| 軸方向変位 | 変位計        | No. 25, 20, 15 |
| 継手目開き | $\pi$ 型変位計 | No. 25, 20, 15 |
| 表面ひずみ | ひずみゲージ     | No. 24, 19, 14 |
| 管内状況  | ビデオカメラ     | No. 18, 17間    |

注) 推進管の番号は、終点側から順番とした。



注) CASE3、CASE4は継手を完全接着

図-8 模型推進管の支持条件

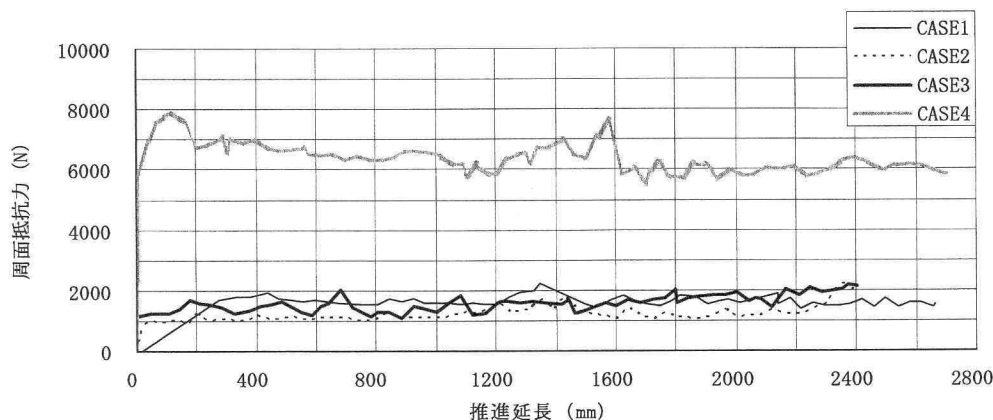


図-7 推進延長と周面抵抗力の関係

CASE4では、砂を模型管の頂部付近まで充填しているため、摩擦面が大きく、砂のせん断抵抗による摩擦力も大きくなることが想定される。実験結果では、CASE1からCASE3までと比較して、CASE4の荷重が4倍近い値となった。CASE1からCASE3については、円周方向継手の有無や継手位置の違いによる明確な差は認められなかった。

表-2に元押し推進力と先端抵抗から得られた周面抵抗力の結果を示す。表-2の右欄には、周面抵抗力の平均値を推進延長で除した単位長さ当たりの周面抵抗力を示した。これによっても、円周方向継手の存在と周面抵抗力との相関は得られなかった。

#### b) 継手目開きおよび軸方向相対変位の推移

図-9にCASE1で円周方向継手が0°と180°の位置

にある推進管の円周方向継手目開きの推移を、図-10に円周方向継手の軸方向相対変位の推移を示す。

以降の実験結果で用いる曲線要素と推進起点（元押し端部）からの位置関係は、表-3のとおりである。なお、計測値は、平面線形上で起点側から反曲点までの第1曲線を通過する管(No. 25)と、反曲点から終点までの第2曲線を通過する管(No. 15)で得られた結果をまとめて示した。反曲点で不連続性が見られるのは、計測した管が異なることによる。また、継手目開きについては、管内面側が開く方向を正とし、軸方向の相対変位については、起点側から終点側に向かい、右側および上方の分割ピースが終点側に向かってずれる方向を正とした。

表-2 周面抵抗力の計測結果

| 実験<br>ケース | 周面抵抗力(N) |       |        |
|-----------|----------|-------|--------|
|           | 最大値      | 平均値   | 1mm当たり |
| CASE1     | 2,232    | 1,653 | 0.331  |
| CASE2     | 2,175    | 1,229 | 0.246  |
| CASE3     | 2,166    | 1,584 | 0.317  |
| CASE4     | 7,924    | 6,337 | 1.267  |

表-3 平面線形と位置の関係

| 曲線要素   | 起点からの位置(mm) |
|--------|-------------|
| 曲線始点   | 0,500       |
| 第1曲線中心 | 1,500       |
| 反曲点    | 2,500       |
| 第2曲線中心 | 3,500       |
| 曲線終点   | 4,500       |

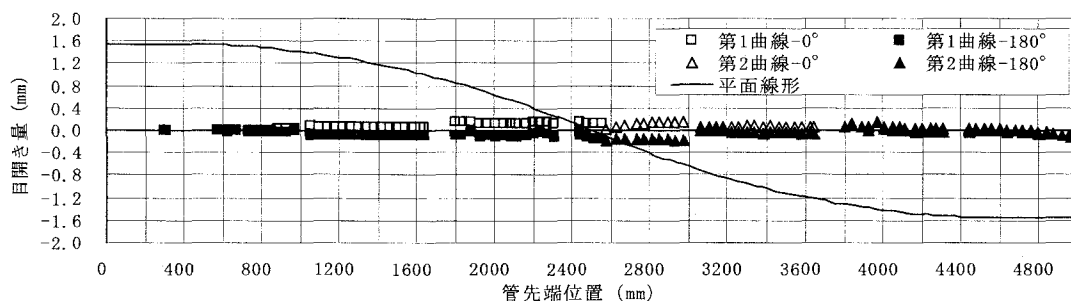


図-9 CASE1:推進時における円周方向継手目開きの推移

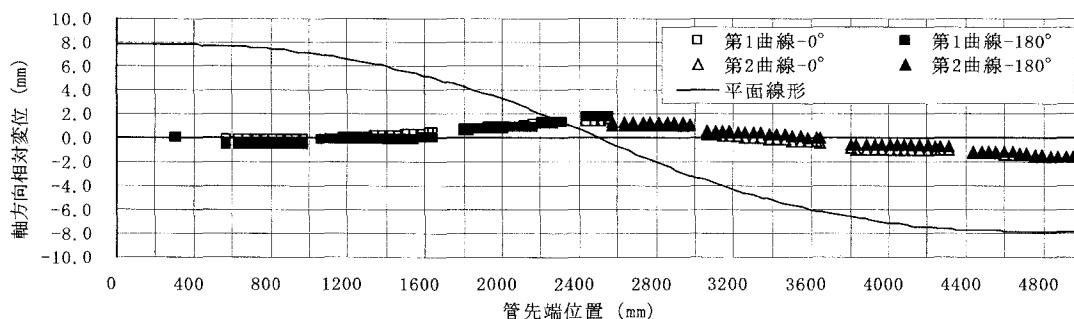


図-10 CASE1:推進時における軸方向相対変位の推移

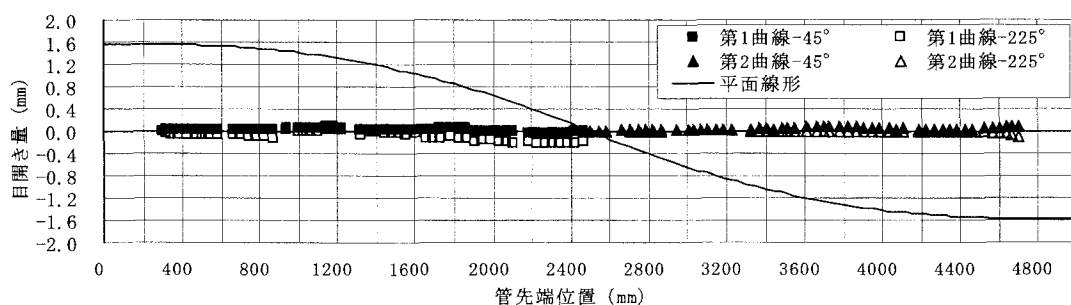


図-11 CASE2:推進時における円周方向継手目開きの推移

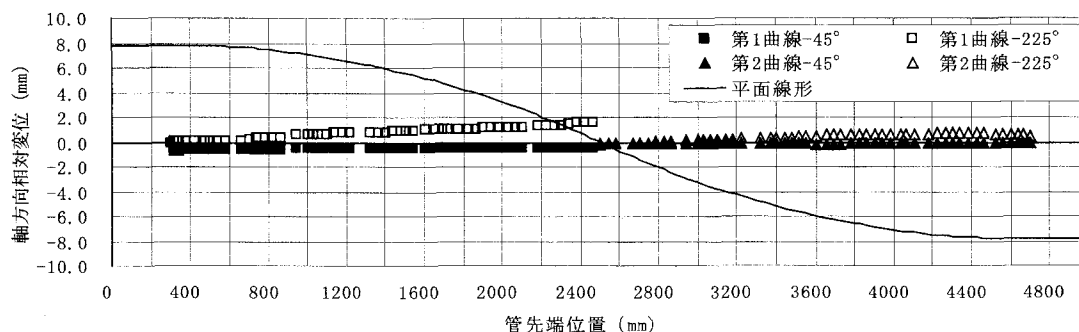


図-12 CASE2: 推進時における軸方向相対変位の推移

CASE1の円周方向継手における目開きの推移では、 $0^\circ$  の位置にある継手が第1曲線通過中から内面側に開く方向に増加し、第2曲線では収束する傾向となった。 $180^\circ$  の位置にある継手は、第1曲線通過中からやや外面側に開く傾向が見られ、反曲点付近で最大に達し、第2曲線中で元に戻る傾向となった。これにより、曲線通過中の管の形状として、縦楕円形状となることが示された。

CASE1の円周方向継手における軸方向相対変位では、 $0^\circ$   $180^\circ$  位置にある双方の継手とも、第1曲線中では、起点から終点に向かって右側のピースが終点方向にずれる傾向が漸増した。この傾向は、反曲点で最大となり、第2曲線通過中には、逆に起点から終点に向かって左側のピースが終点方向にずれる傾向となった。これにより、曲線通過中の管の動きとして、曲線外側に位置するピースは、曲線内側に位置するピースより遅れて進行する様子が示された。

次に、図-11にCASE2で円周方向継手が終点側に向かって反時計回りの方向 $45^\circ$  と $225^\circ$  の位置にある推進管の円周方向継手目開きの推移を、図-12に円周方向継手の軸方向相対変位の推移を示す。CASE2の円周方向継手における目開きの推移では、 $45^\circ$  の位置にある継手は、第1曲線および第2曲線の通過中

においても、ほとんど継手目開きが生じなかった。 $225^\circ$  の位置にある継手は、第1曲線通過中に外面側に開く方向の目開きがやや増加したが、第2曲線通過中では、ほとんど目開きが生じなかった。

CASE2の円周方向継手における軸方向相対変位では、 $45^\circ$  の位置にある継手は、全線通過中において、ほとんどずれが生じなかった。 $225^\circ$  の位置にある継手は、第1曲線通過中に、起点から終点に向かって右側上方にあるピースが終点方向にずれる傾向が顕著となった。第2曲線通過中は、軸方向のずれは、わずかなものであった。これにより、曲線通過中の管の動きでは、第1曲線通過中のみ、曲線外側に占める割合の大きいピースが、曲線内側に占める割合の大きいピースより遅れて進行する様子が示された。

表-4にCASE1およびCASE2における推進時の円周方向継手目開きの集計、表-5に円周方向継手位置での軸方向相対変位の集計を示す。円周方向継手目開きの最大値については、模型推進管の円周長に対する比を、軸方向相対変位については、模型推進管の長さに対する比も加えて示した。CASE1とCASE2について、円周方向の継手目開き量では、CASE1の方が大きな値を示した。また、円周方向継手位置における軸方向相対変位では、平均値は、CASE2の方が大き

い値を示した。最大値は、ほぼ同等の結果となった。対円周長比の平均値は、内径4000mmの推進管を想定すると、1.1mmの継手目開きを示し、対管長比の平均値は、管の長さが2000mmの推進管を想定すると、

14.2mm程度の軸方向にずれが生じることになる。

### c) 管軸方向のひずみ分布

図-13に第1曲線中心、図-14に反曲点、図-15に第2曲線中心位置における推進時の管軸方向ひずみ分

表-4 円周方向継手目開きの集計

| 継手位置       | 平均値<br>(mm) | 最大値<br>(mm) | 円周長と<br>の比 |
|------------|-------------|-------------|------------|
| CASE1-0°   | +0.07       | +0.16       | 0.00012    |
| CASE1-180° | -0.06       | -0.18       | 0.00013    |
| CASE2-45°  | +0.04       | +0.11       | 0.00008    |
| CASE2-225° | -0.05       | +0.04       | 0.00003    |

表-5 軸方向相対変位の集計

| 継手位置       | 平均値<br>(mm) | 最大値<br>(mm) | 管長さとの<br>比 |
|------------|-------------|-------------|------------|
| CASE1-0°   | -0.03       | -1.60       | 0.0080     |
| CASE1-180° | +0.29       | +1.76       | 0.0088     |
| CASE2-45°  | -0.30       | +1.60       | 0.0080     |
| CASE2-225° | +0.60       | +0.72       | 0.0036     |

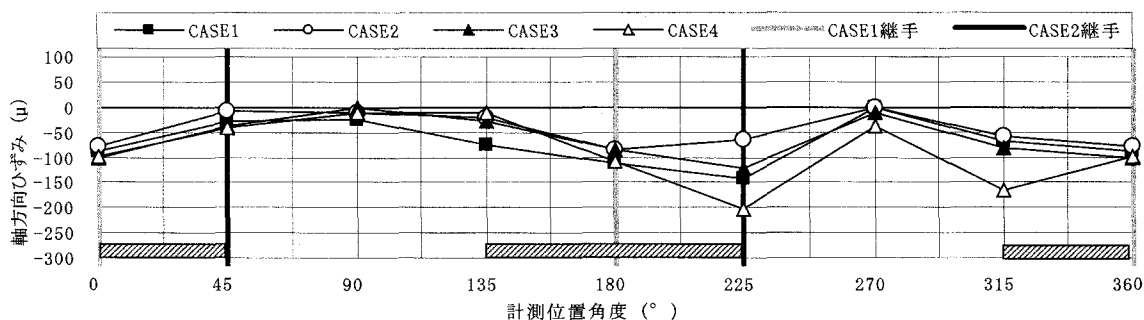


図-13 第1曲線推進時における管軸方向のひずみ分布

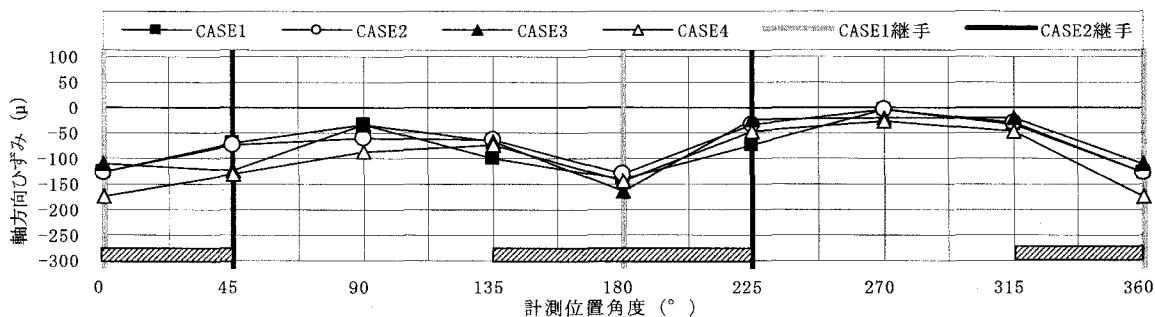


図-14 反曲点推進時における管軸方向のひずみ分布

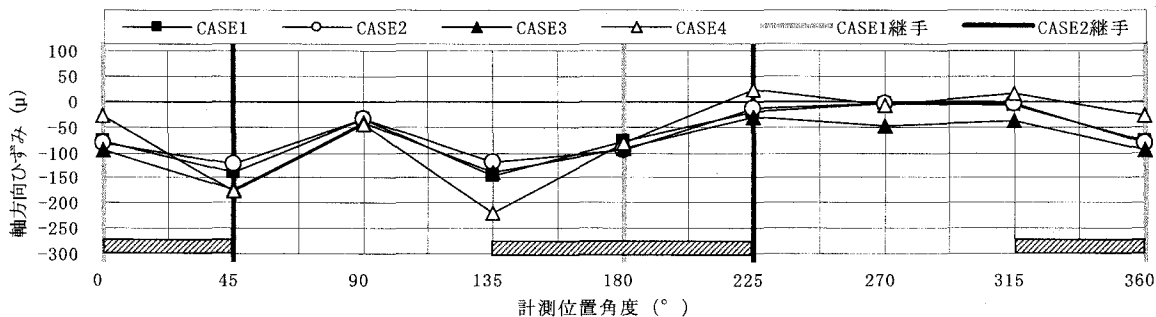


図-15 第2曲線推進時における管軸方向のひずみ分布



布を展開図で示す。図中、ハッチで記した範囲には、推進力伝達材を配置してある。CASE2の場合は、円周方向継手がずれやすい载荷状態になるが、8測線で計測される軸方向ひずみと継手位置の関係を評価しやすくするため、90°分布の配置を選定した。

第1曲線における管軸方向のひずみ分布結果では、CASE1, CASE3, CASE4の場合で、圧縮ひずみの分布が、推進力伝達材の範囲で、曲線内側(225° 315°)を最大、曲線外側(45° 135°)を最小とする三角形分布となり、推進力が偏心する状態となった。CASE4は、他のケースと比較して推進力が大きいため、圧縮ひずみも卓越している。CASE2では、曲線内側225°位置の圧縮ひずみが小さく、他のケースと異なり、継手の存在による影響が見られた。

反曲点における管軸方向のひずみ分布結果では、すべてのケースで、圧縮ひずみの分布が推進力伝達材中心を極大、推進力伝達材のない範囲の中心を極小とする分布となった。90°位置の圧縮ひずみは、270°位置の圧縮ひずみより大きく、左右対称の分布とならなかった。また、CASE1, CASE2に関して、継手位置でのひずみの乱れは認められなかった。

第2曲線における管軸方向のひずみ分布結果では、すべてのケースで、第1曲線のひずみ分布とほぼ対称的な分布となった。CASE4は、推進力伝達材範囲(135° ~ 225°)で曲線内外ひずみの差が、第1曲線同様、最大となった。また、CASE2は、曲線内側45°位置において、圧縮ひずみが他のケースと比較して最小となり、継手の存在による影響が見られた。

推進力伝達材端の軸方向ひずみを表-6に示す。曲線内側と直線区間計算値との比は、0.6~1.4とばらついた。曲線外側は、完全に0とならなかった。

表-6 軸方向ひずみの集計

| 位置   | CASE | 管上面側(μ) |        | 管下面側(μ) |        | 計算値(μ) |
|------|------|---------|--------|---------|--------|--------|
|      |      | 45°     | 315°   | 135°    | 225°   |        |
| 第1曲線 | 1    | -28.2   | -68.5  | -74.2   | -143.7 | -103   |
|      | 2    | -8.9    | -58.2  | -19.7   | -63.8  | -108   |
|      | 3    | -39.4   | -81.7  | -28.2   | -120.2 | -109   |
|      | 4    | -42.7   | -164.3 | -11.3   | -202.8 | -191   |
| 反曲点  | 1    | -68.5   | -32.9  | -98.6   | -73.2  | -103   |
|      | 2    | -74.6   | -31.0  | -62.0   | -33.8  | -108   |
|      | 3    | -123.5  | -21.6  | -67.6   | -22.1  | -109   |
|      | 4    | -129.1  | -46.0  | -73.2   | -46.9  | -191   |
| 第2曲線 | 1    | -139.0  | -8.5   | -145.5  | -22.5  | -103   |
|      | 2    | -121.1  | -5.6   | -117.4  | -13.1  | -108   |
|      | 3    | -172.3  | -37.6  | -139.0  | -32.4  | -109   |
|      | 4    | -176.5  | 15.0   | -220.7  | 23.9   | -191   |

注) 網掛け部分は曲線外側

次に、軸方向ひずみ計測結果から得られる継手位置でのせん断力を算定する。いま、継手のあるケース(CASE2)と継手のないケース(CASE3)について、継手位置と同じ位置での軸方向圧縮ひずみの差をせん断力とする。硬質塩化ビニル管の弾性係数を3400N/mm<sup>2</sup>とし、表-7に軸方向単位長さ当たりのせん断力を算定結果を示す。また、式(1)によるせん断力推定値(3.40N/mm)および単位円周長当たりの元押し推進力(6.77N/mm)との比を比較する。計測結果より求めたせん断力は、式(1)推定値の35~55%程度、元押し推進力に対しては、17~28%程度となった。

#### d) 円周方向のひずみ分布

図-16に第1曲線中心を通過する際の各ケースにおける円周方向ひずみ測定結果を示す。

CASE1では、135°位置で引張りひずみが突出した。その他のケースでは、45° ~ 135°位置で圧縮ひずみが生じ、225° ~ 315°位置で引張りひずみが生じた。円周方向全体では、変化の割合が小さかった。

図-17に反曲点を通過する際の円周方向ひずみ測定結果を示す。CASE1では、第1曲線通過時の状態から、45°位置に圧縮ひずみが生じ、CASE2では、90°位置に引張りひずみが生じた。CASE3では、90° ~ 135°位置に圧縮ひずみが生じ、180°位置に引張りひずみが生じた。CASE4では、0° 180°の位置で圧

表-7 継手位置の単位長さ当たりのせん断力

| 位置                | 45°<br>(N/mm) | 225°<br>(N/mm) | 元押し推進<br>力との比 |
|-------------------|---------------|----------------|---------------|
| 第1曲線              | 1.88          | -              | 0.28          |
| 第2曲線              | -             | 1.18           | 0.17          |
| 式(1)による<br>推定値との比 | 0.55          | 0.35           | -             |

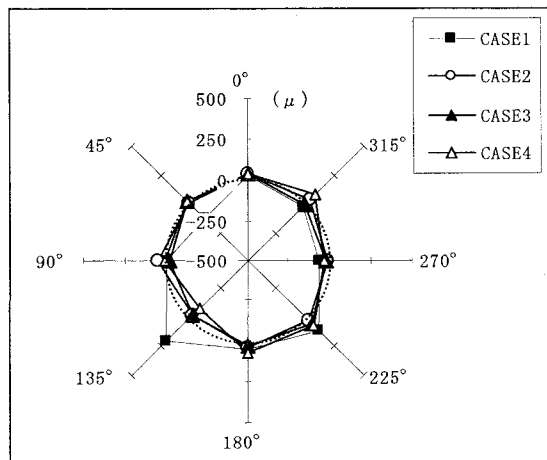


図-16 第1曲線推進時の円周方向ひずみ分布

縮ひずみ、90° 270° の位置で引張ひずみが生じた。反曲点では、全般的に、ケース毎におけるひずみのばらつきが顕著となった。

図-18に第2曲線中心を通過する際の円周方向ひずみ測定結果を示す。CASE1からCASE4まで共通して、135° 位置に引張ひずみが生じる傾向が見られた。

CASE1では、45° ～90° 位置および270° ～315° 位置となる推進管の上部で圧縮ひずみが生じた。CASE2では、180° 位置での引張ひずみが突出した。CASE3、CASE4の主な傾向としては、90° 位置で圧縮ひずみ、270° 位置で引張ひずみが生じ、第1曲線通過時より、引張ひずみが増加する分布となった。

表-8に円周方向ひずみの計測結果をまとめる。最大引張ひずみと最大圧縮ひずみの差で卓越したのは、CASE1で、平均値は、CASE4が突出した。また、平均値は、全般的に引張ひずみが生じる傾向となった。

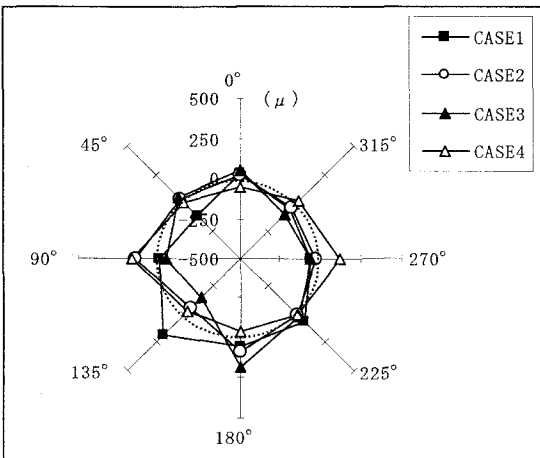


図-17 反曲点推進時の円周方向ひずみ分布

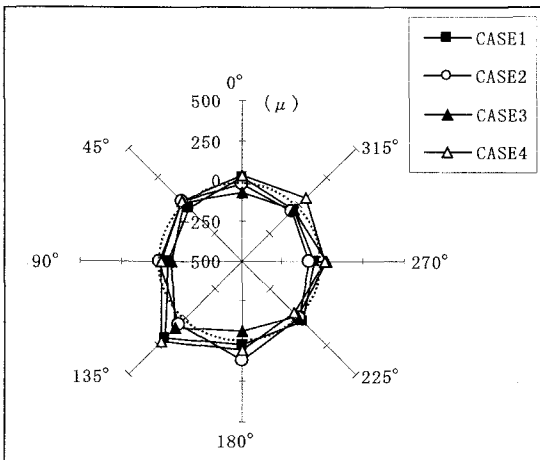


図-18 第2曲線推進時の円周方向ひずみ分布

次に、CASE2について、円周方向ひずみ分布から求められる曲げモーメントを計算し、式(3)～式(6)により得られる曲げモーメント分布と比較することで、継手に対する影響を確認する。円周方向のひずみは、推進管内縁を計測しているため、ひずみ計測結果から、直接、曲げモーメントを次式で求めることにした。ただし、計測点間は比例補間した。

$$M = Z \cdot E \cdot \varepsilon \quad (7)$$

ここに、 $M$ : 曲げモーメント (Nmm)

$Z$ : 断面係数 (mm<sup>3</sup>)

$E$ : 塩化ビニルの弾性係数 3400 (N/mm<sup>2</sup>)

$\varepsilon$ : 円周方向ひずみ

図-19に曲げモーメントの比較結果を示す。曲げモーメントは、管内面側に引張が生じる向きを正とする。計測値を用いて計算した曲げモーメントの分布は、継手位置45° 225° で、曲げモーメントがほぼ0に近く、極大、極小が明瞭でない分布となった。

表-8 円周方向ひずみの集計

| 位置    |      | 最大引張<br>( $\mu$ ) | 最大圧縮<br>( $\mu$ ) | 平均値<br>( $\mu$ ) |
|-------|------|-------------------|-------------------|------------------|
| CASE1 | 第1曲線 | 196.2             | -120.2            | 19.4             |
|       | 反曲点  | 181.2             | -112.7            | 11.3             |
|       | 第2曲線 | 180.3             | -53.5             | 7.9              |
| CASE2 | 第1曲線 | 52.6              | -28.2             | 17.3             |
|       | 反曲点  | 149.3             | -62.0             | 17.5             |
|       | 第2曲線 | 113.6             | -81.7             | 5.9              |
| CASE3 | 第1曲線 | 54.9              | -31.0             | 7.4              |
|       | 反曲点  | 182.2             | -147.4            | -9.1             |
|       | 第2曲線 | 90.1              | -74.2             | -19.7            |
| CASE4 | 第1曲線 | 74.2              | -77.0             | 20.5             |
|       | 反曲点  | 172.8             | -54.5             | 21.1             |
|       | 第2曲線 | 200.0             | -39.9             | 43.9             |

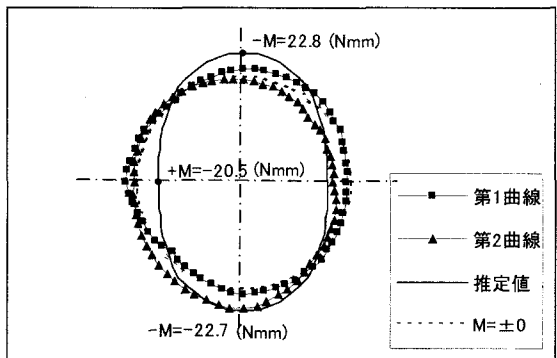


図-19 曲げモーメントの分布

第1曲線では、曲線内側で上面側ピース315°～360°位置で、第2曲線では、曲線内側で下面側ピース135°～180°位置で負の曲げモーメントが生じた。負の曲げモーメントの最大値は、式(3)～式(6)による推定値と近い値となった。推定値は、等分布荷重と支承条件より、左右対称な縦楕円形状となった。

#### (4) 考察

##### a) 推進時における周面抵抗力

今回使用した実験装置では、推進管を左右2点と下部1点で支持し、平面線形を保持する支持金物に沿って、模型管を推進させた。支持金物は、水平面から15°の位置に設け、推進管の浮き上がりを抑えた。また、推進管表面との間に摩擦が小さくなる材料をはさむことにより、かなり順調な推進挙動が得られた。本実験装置によれば、滑材注入等も含めた本格的な施工性の確認実験も可能と考える。結果として、推進時における周面抵抗力の推移で判断する限り、各ケースに顕著な差違は認められないことから、推進管の円周方向継手の存在が推進方向の抵抗になる可能性は少ないと考える。

##### b) 円周方向継手目開き

曲線を推進する際は、推進管が曲線外側に膨れだして押しつけられるため、縦楕円形状につぶれようとする。したがって、継手が0°180°位置にある場合は、曲線通過中に継手目開きが生じやすくなると考える。継手が45°225°の位置にあるケースでは、推進管が曲線外側から均等な反力を得ていれば、継手に生じる曲げの影響が小さく、継手目開きは、生じにくくなると考える。

##### c) 軸方向相対変位

継手が0°180°位置にある推進管では、曲線外側に位置するピースが、遅れて進行する挙動が確認された。これは、曲線外側の周面抵抗力が、支持金物によって、模型管半円形ピースの中心に近い位置に作用したことと起因すると考える。一方、継手が45°225°位置にある推進管では、第1曲線通過中に、継手位置45°225°から下方にあるピースが遅れて進行する傾向が顕著となった。これは、この下方ピースが、第1曲線中では、水平面から15°と底部に位置する支持材2カ所から周面抵抗力を受けたことに起因すると考える。第2曲線中では、水平面から15°の位置にある支持材からの周面抵抗力は、曲線内側の位置に変わり、解放されたため、上下2ピースに極度のずれが生じなかったと考える。周面抵抗力による推進管の挙動を精査するうえで、推進管の支持条件が、かなり重要となることがわかった。

##### d) 管軸方向のひずみ分布

曲線通過中は、推進力伝達材の範囲で推進力が偏心するが、完全な三角形分布にならない。加えて、推進力伝達材端の圧縮ひずみでは、曲線内外の比にばらつきが見られ、推進力の分布を特定するのが容易でないことがわかる。これには、管軸方向の推進管どうしの接触長、管軸方向の折れ角、周面抵抗力等の条件に応じて、数値解析等を用いて推定していく必要があると考える。また、継手が45°225°の位置にあるケースでは、第1曲線推進時、曲線内側の継手境界で軸ひずみが低下した。これは、継手が一定の限界を超えてずれると、隣接するピースへの推進力の伝達ができなくなることを示唆しており、継手境界に推進力を作用させることに問題があると考えられる。さらに、軸方向ひずみの計測値から求めたせん断力は、荷重条件から推定したせん断力に対し、平均で45%程度となった。今後、推進力の分布を確実に反映した荷重条件によるモデルを用いて、推定精度の向上をめざすことが肝要と考える。

##### e) 円周方向のひずみ分布

曲線通過中では、曲線内側かつ推進力伝達材端となる位置で、引張ひずみの発生が顕著になった。これは、推進力伝達材範囲で最大となる推進力が集中して作用しており、曲線外側に向かう水平方向の成分が円周方向に影響を及ぼしているものと推察される。反曲点は、曲線外側の周面抵抗力と方向転換のために逆方向の力も同時に作用しているため、ひずみ分布にばらつきが生じる傾向が強いと考える。

今回の実験によれば、円周方向継手には締結力がないため、継手のヒンジ的挙動により、曲げモーメントが極めて小さくなることが示唆された。曲線通過中は、曲線内側になるピースに対し、外側に膨れるような曲げが作用する。これは、曲線外側から推進管に作用する反力の半径方向成分が、半円形状のピースを押しつぶすように作用するためと推察される。なお、曲げモーメントの推定値による最大値は、ひずみ計測値から得られた値と近い値になったが、曲げモーメントの分布を精度良く表現するに至っていない。これは、推進管背面からの反力を等分布荷重とし、支承条件も90°分布と仮定したことに起因すると考える。実際は、推進力伝達材端で反力が最大になり、水平直径点で0になる荷重分布、曲線内側では、土質条件に応じた支承範囲を勘案したうえで、解析モデルを作成し、弾性方程式を解く必要がある。ただし、継手が45°および225°の位置にあり、十分な変形性能が期待できる構造であれば、継手に作用する曲げモーメントを低減できると考える。

## 4. 継手構造の提案

### (1) 管軸方向の継手

分割型PC推進管の管軸方向継手は、埋め込み鋼製カラーとコンクリート差し口による標準的な仕様としている。曲線推進の際には、軸方向継手が一定の目開きを確保できるように推進力伝達材を貼る。一般には、管の頂部、底部から $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ の範囲で用いられている。今回の実験では、推進力伝達材端部と継手位置が等しくなる $90^\circ$ の範囲を適用した。その結果、推進管と背面との摩擦増加に伴い、半円形ピースが軸方向にずれやすくなった。曲線を推進する際には、円周方向継手と推進力伝達材端を一致させないような配置を考慮する必要がある。

### (2) 円周方向の継手

分割型PC推進管の円周方向継手は、PC鋼材によるプレストレスとコンクリート面の突き合わせにより構成している。曲線推進時、継手に作用するせん断力を求める実験を行った結果、元押し推進力に対する実験値が最大で28%となった。これにより、直線推進力の30%程度のせん断力が円周方向継手に作用するものとして、せん断力に抵抗できる鋼製ピンを設ける。例えば、内径4000mm、管の厚さ300mmの推進管の総推進力を40000kN、ピンの許容せん断応力度を $200\text{N}/\text{mm}^2$ とすると、必要なピンの本数は、5本/mで、口径は35mm程度となる。また、推進時の荷重に対しては、継手に作用する断面力を低減するため、曲げに対する変形と復元に対する性能が高いアンボンドPC構造が最適と考える。なお、鋼製ピンは、継手の自由度を拘束しかねないため、継手目開きと管の円周長との比を利用し、ピンの挿入余裕量（雄雌口径差）を設定する。例えば、内径4000mmの推進管を用いる場合、円周長の0.01%は、1.2mm程度となる。よって、両側ピースの継手面にスリーブを埋め込むと、ピンの挿入余裕量は、片側0.6mm程度となる。

## 5. 結論

本研究では、分割した推進管の模型を用いた推進実験を行い、推進時の挙動および推進管に作用する断面力を検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 今回用いた実験装置によれば、模型管がS字曲線中を円滑に進行することができ、推進管の挙動を精度よく確認できる。今後、滑材を使用した地盤中の推進実験等に十分応用できる。

- (2) 継手を有する分割型推進管を曲線中で推進しても、継手部分が抵抗力とはならず、推進力に対する影響はほとんどない。通常の円管と同等の推進力で設計できる。
- (3) 曲線推進では、継手が $0^\circ$ 、 $180^\circ$ にある場合は、継手目開きが進行し、実用上問題がある。継手が $45^\circ$ 、 $225^\circ$ にある場合は、軸方向のずれを生じさせない対策を講じる必要がある。
- (4) 継手に作用するせん断力は、曲線外側に作用する周面抵抗力が支配的となる。円周方向の推進力の分布を精度良く推定できれば、せん断力は解析的に求めることができる。
- (5) 継手に作用する曲げモーメントは、管軸方向の推進力作用範囲、推進管背面の支持条件によって変化する。継手を $45^\circ$ 、 $225^\circ$ の位置に設けた場合でも、曲げの影響に対して変形性能に優れる継手を用いることが肝要である。

**謝辞：**本研究を進めるに当たり、早稲田大学理工学部小泉淳教授には、貴重な御教示を賜りました。この場を借りて、厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 田中基紀：CMT 工法（複合推進工法）による超長距離推進（1,009.6m）、日本プロジェクトリサーチ・難条件に挑む最新の泥濃式推進工法，pp. 42-50, 2000.
- 2) 六鹿敏也：SS モール工法における超急曲線（12.5R）& 急勾配施工、日本プロジェクトリサーチ・難条件に挑む最新の泥濃式推進工法，pp. 26-41, 2000.
- 3) 西川和良：解説大断面管渠用・超大口径分割型 PC 推進管、月刊推進技術，vol. 18 No. 5, 2004.
- 4) 西川和良、須川智久、植竹克利、石川眞、石橋信利：大口径推進工法に対する分割型 PC 推進管の適用性、土木学会トンネル工学研究論文・報告集，第 13 巻，pp. 105-112, 2003.
- 5) たとえば、M. Scherle, 野田典宏訳：推進工法の理論と実際，pp. 204-209, 2001.
- 6) 日本下水道協会：下水道推進工法の指針と解説，pp. 116-123, 2003.
- 7) 日本下水道管渠推進技術協会、全国ヒューム管協会：曲線部における許容推進力の算定に関する共同研究報告書，pp. 16-28, 2002.
- 8) 南野輝久：推進工法の設計と施工，pp. 161-166, 1981.
- 9) 吉田弘明、井田隆久、山口和彦、川上治：急曲線・急勾配シールドトンネルの模型実験と数値解析、土木学会第 47 回年次学術講演概要集，pp. 118-119, 1992.