

推進管の継手曲げ実大実験による 推進力伝達材が推進管に与える影響の検討

桜井 俊裕¹・杉本 光隆²・中村 勝則³・陳 剣²・Le Gia Lam¹

¹学生会員 長岡技術科学大学 建設工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡1603-1)

²正会員 長岡技術科学大学 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡1603-1)

E-mail: sugimo@vos.nagaokaut.ac.jp

³藤村ヒューム管株式会社 開発部 (〒945-0061 新潟県柏崎市栄町7-8)

管路を構築するための推進工法にあっては、近年、長距離推進技術や急曲線推進技術が求められている。推進工法では、全ての推進管が掘進機とともに前進することになるので、これら技術課題を克服するためには、掘進機と全ての推進管からなる管路の全体系を考慮した推進メカニズムに関する理論的研究やそれを基にした推進管に作用する荷重の研究が必要である。そこで、直線・曲線推進時に推進力伝達材が推進管に与える影響を解明するために、推進管の継手曲げ実大実験を実施した。本報告では、同実験から得られた、曲線部・直線部において、推進力が推進力伝達材を介して伝達されるとき、推進管接合部の動きと推進管の軸方向ひずみについて報告する。

Key Words : pipe jacking method, pipe, cushion ring, prototype test

1. はじめに

シールド工法では、シールドは組立てた先端のセグメントから推進力を得るのに対し、推進工法では、発進立坑から掘進機に推進力を与える点が異なる。このため、推進工法では、全ての推進管が掘進機とともに前進することになるので、掘進メカニズムを解明するためには、掘進機と全ての推進管からなる管路の全体系を考慮することが必要となる。

さらに、本研究で対象とする推進工法にあっては、公共事業コスト削減のために、立坑の数を減らし、1回の推進長を延ばすための長距離推進技術や、用地費が必要な民地を避け、公共道路下に管路を埋設するための急曲線推進技術が求められている。しかし、推進工法は、これまで、多くの工事実績に基づいて技術開発がなされてきたため、これら技術課題を克服するために必要な、管路の全体系を考慮した推進メカニズムに関する理論的研究やそれを基にした推進管に作用する荷重の研究は、ほとんど行われてこなかった¹⁾。このため、推進管が、過大設計となって高コストになったり、逆に過小設計となってクラックが発生する等の問題が起こることがあった。

上記を踏まえて、著者らは、管路の全体系を対象として、地盤と推進管の相互作用を考慮に入れた推進メカニ

ズムを理論的に表現できる管路解析モデルを開発してきた^{2,3,4,5)}。しかし、上記管路解析モデルのうち、新たに開発した曲げ剛性を有する推進管継手モデルは、実測データを用いて検証されていない。そこで、本研究では、推進管の継手曲げ実大実験を行うことにより、直線・曲線推進時に推進力伝達材が推進管に与える影響を解明することを目的とする。本報告では、推進管の継手曲げ実大実験の概要と、同実験から得られた、曲線部・直線部において、推進力が推進力伝達材を介して伝達されるとき、推進管接合部の動きと推進管の軸方向ひずみについて報告する。

2. 実験概要

本実験では、実大の推進管2本を推進力伝達材を介して接合し、軸方向に載荷を行うことにより、曲線部・直線部において、推進力が推進力伝達材を介して伝達されるとき、推進管に発生するひずみ・応力・断面力、推進管の変形、および、隣接する推進管の相対的な変位を把握する。

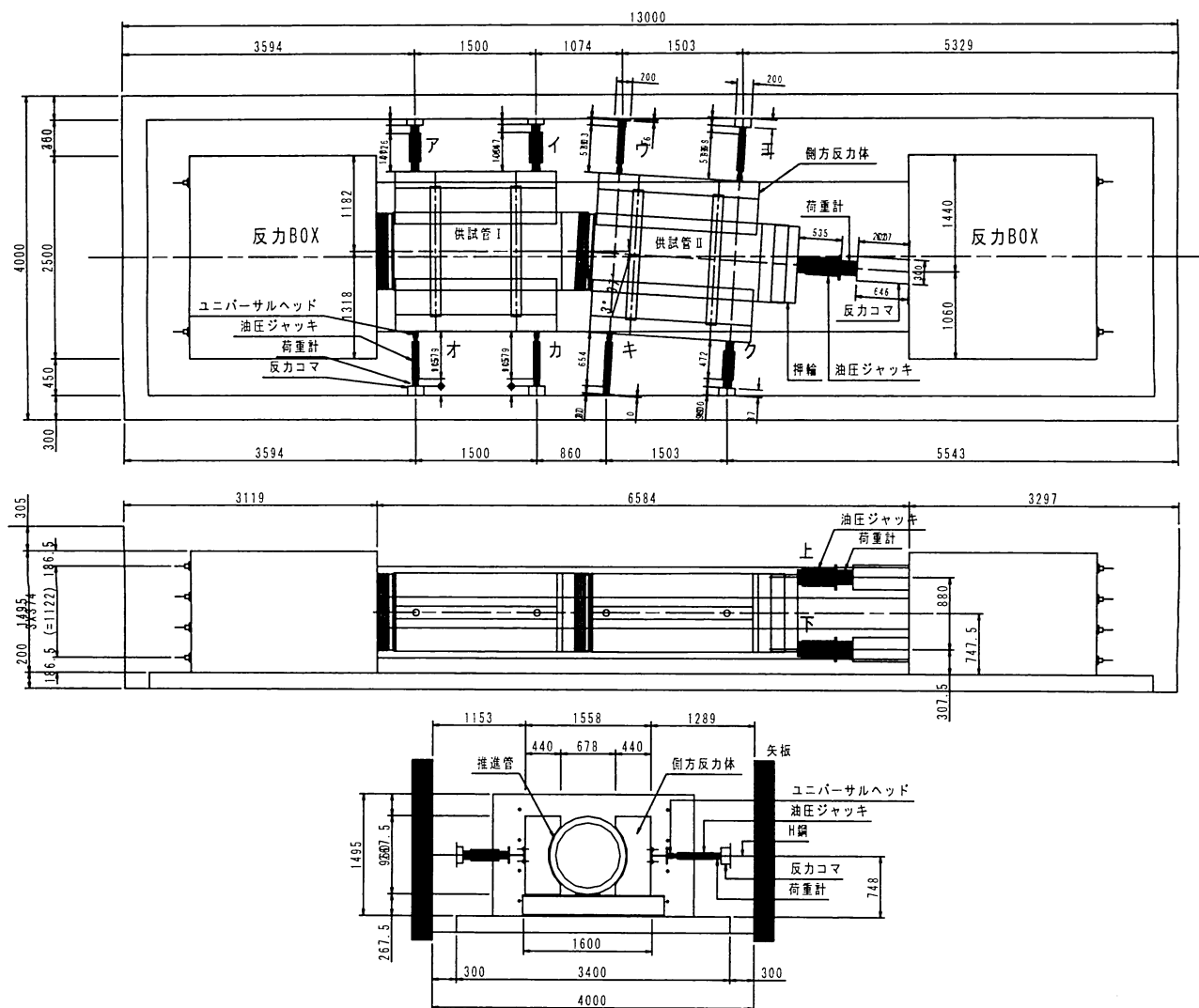


図-1 実験設備配置図（曲線部）

(1) 実験設備

実験設備配置図を図-1 に、実験状況を図-2 に示す。長手方向 13m、短手方向 4m、深さ 2m のピットの中に、反力 BOX2 個、推進管架台を設置した後、その架台の上に推進力伝達材を介して推進管 2 本、その側方にコンクリート製の側方反力体 4 個を設置し、それらを、推進管軸方向は上下 2 本のジャッキ（最大載荷荷重 1.5MN/本）で、推進管横断方向は左右 4 本ずつ合計 8 本のジャッキ（最大載荷荷重 200kN/本）で支持した。その後、左右 4 本ずつ合計 8 本の PC 鋼棒で、反力 BOX 間隔を固定した。

本実験では、推進管の軸方向変位を反力 Box で、横断方向変位を 8 本のジャッキで拘束し、軸方向の力、横断方向の反力を、それぞれ、ジャッキに設置した荷重計で計測することから、推進管周面摩擦を 0 に近づける必要がある。そこで、図-3 に示すように、テフロンシートとグリスを用いて、推進管と側方反力体・架台、および、側方反力体と架台の摩擦低減を図った。

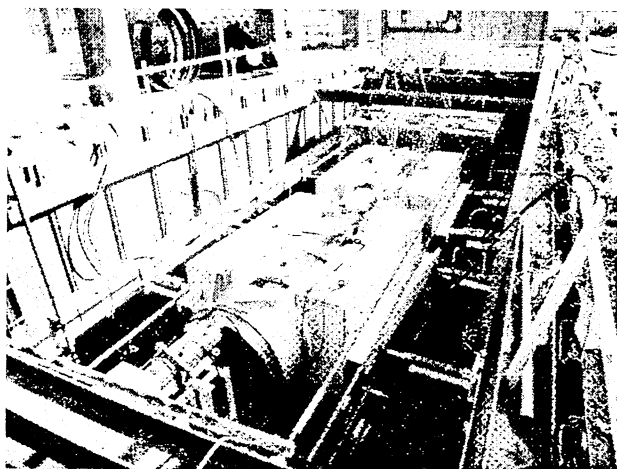


図-2 実験状況

使用した推進管は、図-4 に示すように、内径 800mm、有効長 2430mm、管厚 80mm の形状で、外圧強さ 2 種、コンクリートの圧縮強度 70N/mm^2 、許容推進力 3.091MN である。また、推進力伝達材は、発泡倍率 2 倍の発泡スチロール製で、推進管の接合部には厚さ 10mm の推進力

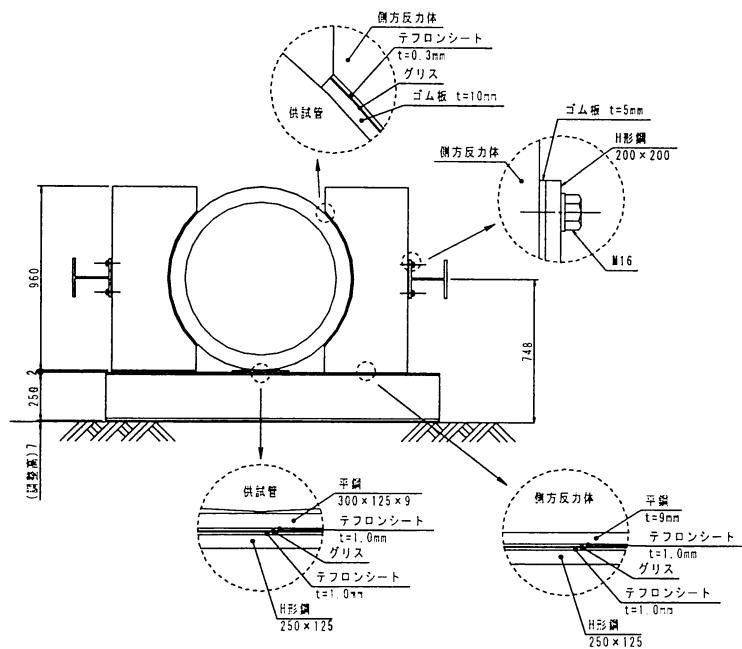


図-3 推進管周囲の摩擦低減

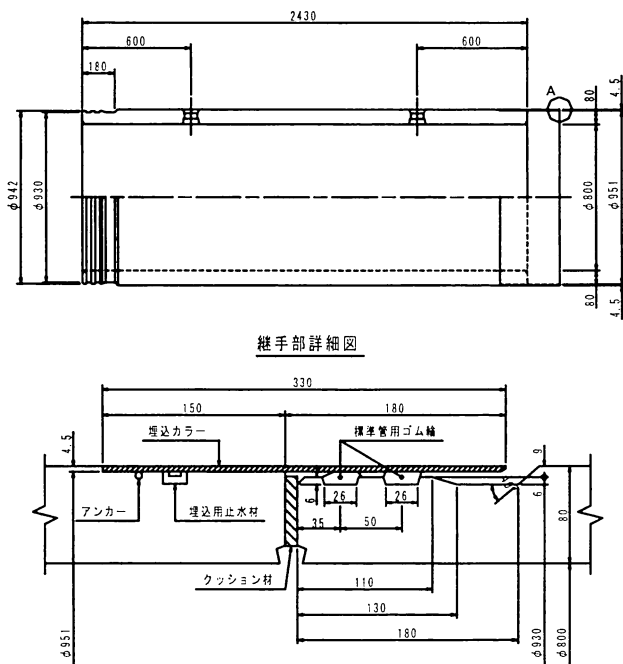


図-4 推進管

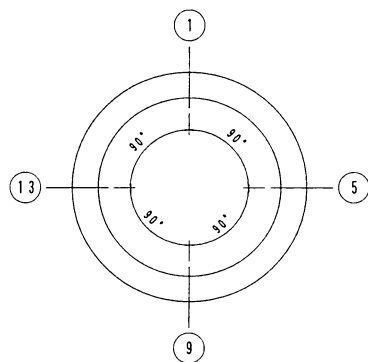


図-5 継手間隔の計測位置

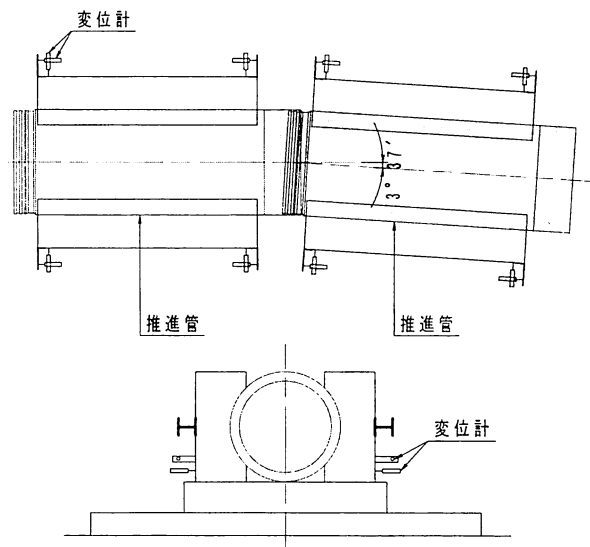
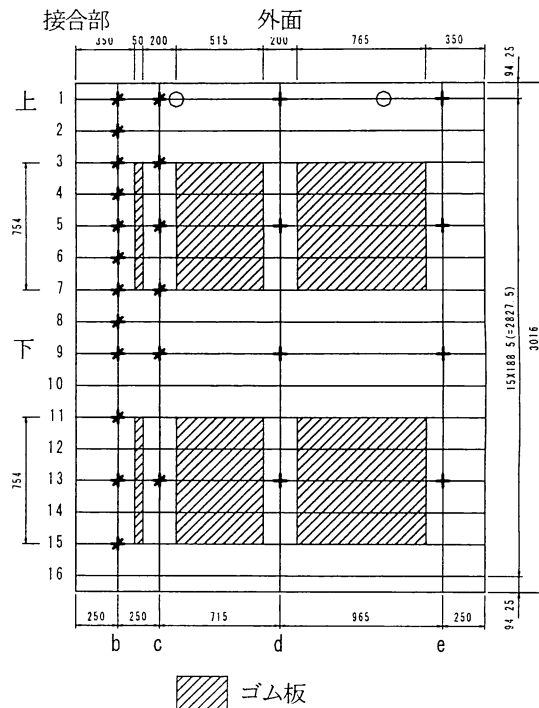
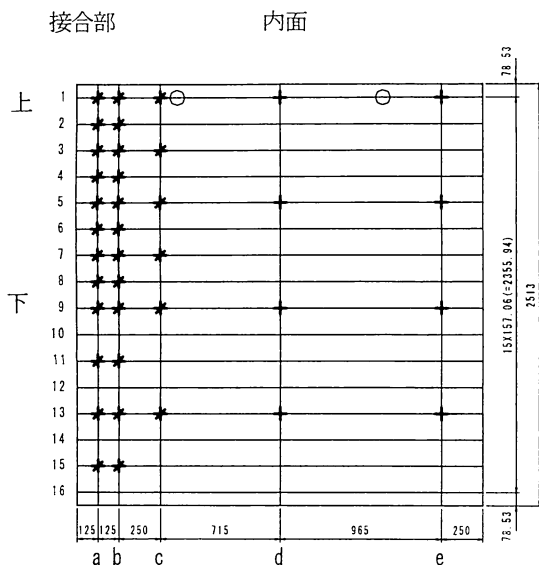


図-6 側方反力体の変位計測位置

表-1 計測項目

計測項目			計測方法	点数
A	荷重	軸方向	荷重計	2
B		側方	荷重計	8
C	供試管	角度	トランシット	—
D		継手間隔	変位計	4
E		ひずみ	ひずみゲージ	352
F		たわみ	レーザー変位計	12
G	側方反力体	変位	変位計	16
H	PC 鋼棒	ひずみ	ひずみゲージ	16
合計				410



縦軸の数字：上を1とし、22.5度間隔で配置

図-7 ひずみの計測位置

伝達材を4枚重ねて、推進管の両端部には厚さ10mmの推進力伝達材1枚を、それぞれ上下90°ずつの範囲に設置した。

(2) 計測項目

計測項目を表-1に示す。推進力と推進力伝達材によって推進管に発生するモーメントを把握するため、荷重計は、図-1に示すように、ジャッキと反力BOX、ジャッキとピット側壁の間に設置した。また、隣接する推進管の相対的な変位、接合部の曲げ角度を把握するため、トランシットで推進管の位置を計測するとともに、変位計で推進管の継手間隔、側方反力体の軸方向、横断方向変位を計測した。推進管の継手間隔の計測位置を図-5に、側方反力体の軸方向、横断方向変位の計測位置を図-6に示す。また、推進管に発生するひずみ・応力・断面力を把握するため、推進管に発生するひずみを計測した。推進力伝達材が継手部の上下90°ずつの範囲にのみ設置されていること、曲線部では曲線内側の推進力伝達材に応力集中が発生すると考えられることから、接合部近傍、曲線内側を重点的に計測した。推進管内面・外面のひずみの計測位置を図-7に示す。図の太線は、ひずみゲージの位置と方向を示している。a, b, c断面では軸方向、周方向、斜め方向に、d, e断面では軸方向、周方向にひずみゲージを配置した。また、外面にa断面がないのは、埋込カラーのために、ひずみゲージが設置できないためである。また、推進管の変形(たわみ)を把握するため、図-7に示すb, d, e断面で、水平・鉛直方向の内空変位をレーザ

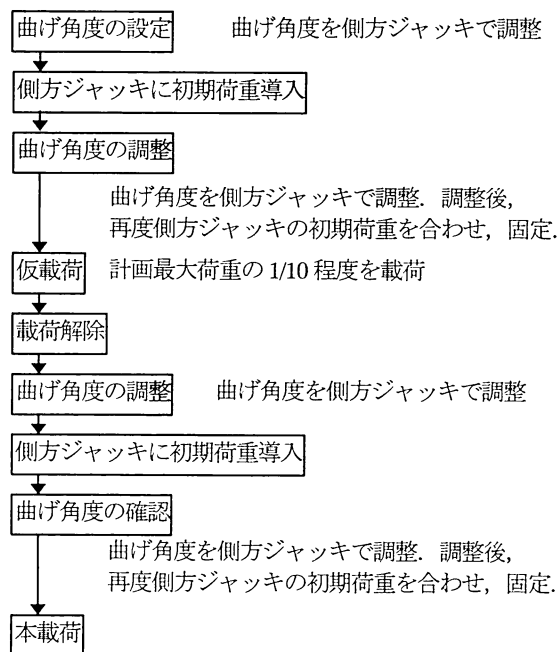


図-8 実験手順

表-2 実験ケース

Case	線形	曲げ角度
1	曲線	3.61°
2	直線	0.00°

表-3 載荷ステップ(kN)

Case	線形	最大荷重	載荷間隔	除荷間隔
1	曲線	1000	50	-250
2	直線	2700	100	-200, 以後-500

一変位計で計測した。さらに、PC 鋼棒の応力が許容応力以内であることを確認するため、PC 鋼棒のひずみを計測した。

(3) 実験ケース

推進力が継手を介して伝達されるとき、推進管に対する影響を曲線部と直線部で比較するため、推進管が曲線部と直線部にある状態を想定して、実験ケースを設定した。実験ケースを表-2 に示す。曲線の曲げ角度は、本実験で使用した推進管の開口差から定まる最大曲げ角度（曲線半径 38.6m に相当）とした。

(4) 実験方法

実験手順を図-8 に、本载荷での载荷ステップを表-3 に示す。Case 1（曲線）では、推進力伝達材の特性から規定される推進管の許容推進力をもとに 1000kN まで、Case 2（直線）では、推進管の許容推進力の 90%にあたる 2700kN まで、载荷することとし、载荷・除荷を 2 度繰り返す、载荷ステップごとに表-1 に示す計測を行った。また、実験ケースごとに、推進管の接合部の推進力伝達材を交換した。

なお、载荷打切り条件として、以下を設定した。

- 1) 曲線内側の継手間隔が 5mm 以下になった時
- 2) コンクリートの圧縮ひずみが 2000 μ 以上になった時
- 3) コンクリートの引張ひずみが 200 μ 以上になった時
- 4) PC 鋼棒の引張ひずみが 4000 μ 以上になった時
- 5) その他、設備に異常が発生した時

3. 実験結果と考察

(1) 接合部の動き

Case 1（曲線）での軸方向载荷荷重と、曲線内側・外側の継手間隔、曲げ角度の関係を、図-9 に示す。この図から、以下のことがわかる。

- 1) 载荷ステップでは、荷重の増加とともに、曲線内側・外側とも同様に継手間隔が減少し、荷重 1000kN で継手間隔が約 20mm 減少する。
- 2) 除荷ステップでは、荷重が減少しても、曲線内側・外側とも継手間隔は余り増加しない。これは、推進力伝達材が塑性変形したためと考えられる。
- 3) 曲げ角度も、継手間隔と同様の傾向を示し、荷重 1000kN で曲げ角度は約 0.4 度減少（曲線内側・外側の継手間隔の差が 5.5mm 減少）する。これは、载荷荷重の増大により推進力伝達材が圧縮されること、推進力伝達材は、ある程度ひずみが大きくなると発生応力が急増する非線形の変形特性⁹⁾を有すること、その結果、曲線内側の推進力伝達材の反力が増大し、推進管内部には曲線内

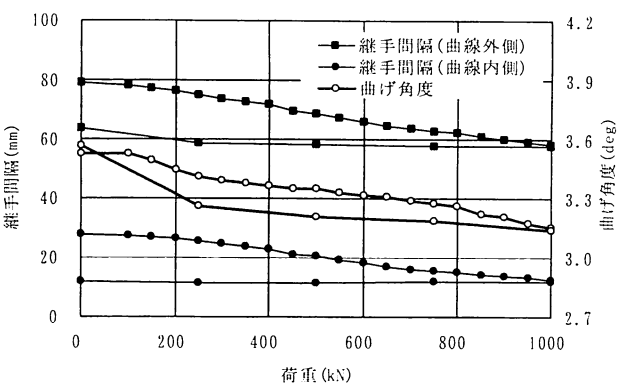


図-9 接合部の動き (Case1 曲線)

側への曲げモーメントが、推進管全体としては曲線外側への曲げモーメントが発生するためであると考えられる。

(2) 推進管の軸方向ひずみ

Case 1（曲線）と Case 2（直線）における、载荷荷重 1000kN での推進管 I の内面の軸方向ひずみ分布を図-10 に示す。接合部近傍と比較して、それ以外の範囲は、ひずみの計測位置が限られていることから、コンターの精度は劣ることに注意を要する。また、推進力伝達材は、推進管の両端部の、0~45、135~225、315~360 度の範囲に設置されている。まず、Case 1（曲線）の図から、軸方向ひずみについて、以下のことがわかる。

- 1) 接合部近傍の a 断面では、軸方向ひずみは、曲線内側の推進力伝達材が設置されている範囲 (180-225、315-360 度) で大きく、その中の 202.5、337.5 度で上下それぞれの最大値を取り、曲線外側の推進力伝達材が設置されていない位置 (90 度) で最小値を取る。これは、曲線部では、幾何学的条件により、曲線外側より曲線内側の継手間隔が小さくなること、したがって、推進力が曲線内側の推進力伝達材を介して隣接推進管に伝達され、曲線内側の推進力伝達材設置範囲で応力集中が起こるためである。
- 2) 接合部から離れるにしたがって、曲線内側の軸方向ひずみの集中は、推進力伝達材の設置範囲から推進力伝達材の未設置範囲へ分散していくが、曲線外側では軸方向ひずみはほとんど発生しない。これは、推進管の接合部で曲線内側へ偏心した推進力が作用しているため、推進管が曲線内側への曲げモーメントを受けるためである。
- 3) 接合部と反対側の推進管端部の e 断面では、再び、推進力伝達材の設置範囲で軸方向ひずみが大きくなる。これは、推進力が推進力伝達材を介して反力 BOX に伝達されるため、推進力伝達材設置範囲で応力集中が起こるためである。
- 4) 接合部近傍の a 断面より b 断面の方が、軸方向ひずみが大きくなっている。これは、図-4、図-7 からわかるように、a 断面が埋込カラーの内側にあるため、鋼製の埋

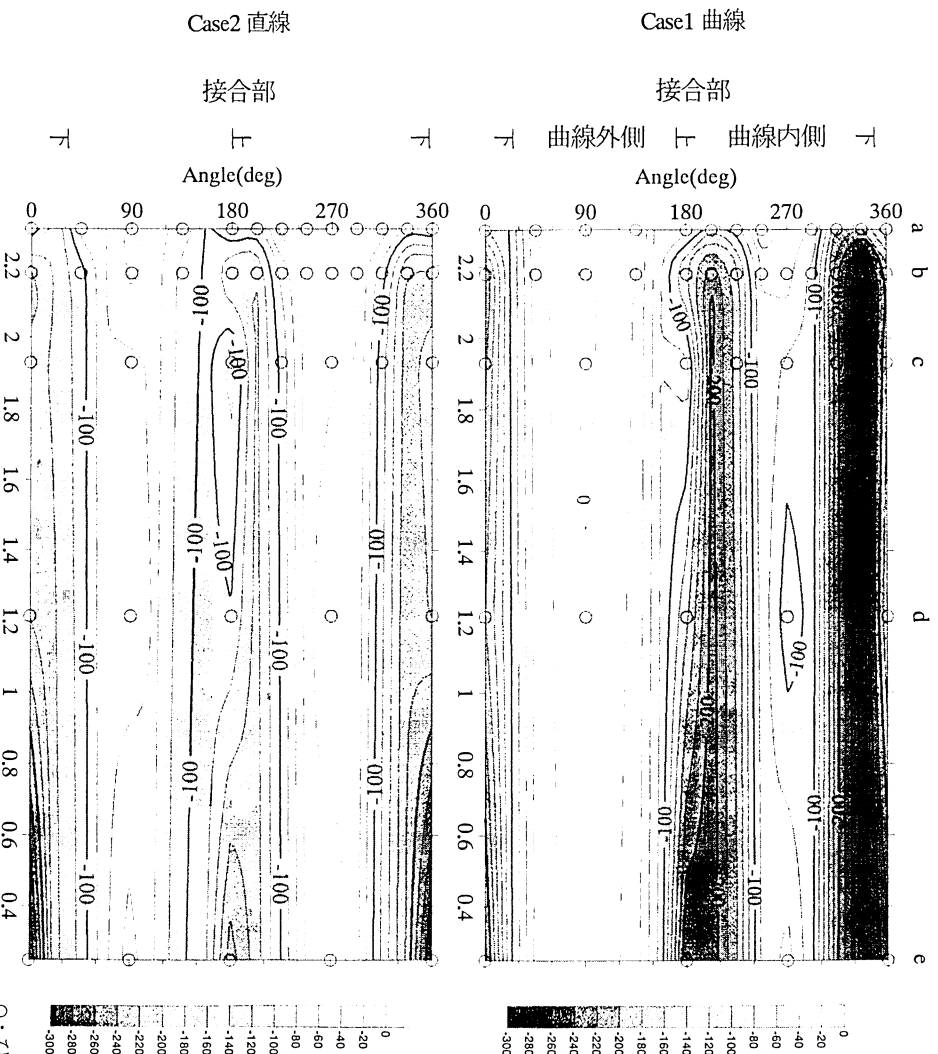


図-10 軸方向ひずみ分布 (推進管 I 内面, 1000kN)

込カラーがコンクリートの軸方向ひずみを抑制しているためと考えられる。

一方、Case 2 (直線) の図から、軸方向ひずみについて、以下のことがわかる。

- 1) 軸方向ひずみ分布は、ほぼ左右対称となっている。また、接合部近傍の a、b 断面での軸方向ひずみは、Case 1 (曲線) では 0～272 μ m であるのに対して、Case 2 (直線) では 22～178 μ m となっている。Case 2 (直線) では、ひずみの集中が緩和されている。これは、Case 2 (直線) では推進力が推進力伝達材の全断面を介して隣接推進管に伝達されるので、Case 1 (曲線) と比較して、応力集中が緩和されるためである。
- 2) その他は、Case 1 (曲線) と同様な傾向を示し、Case 1 (曲線) と同様に説明できる。

4. 結論

本報告では、直線・曲線推進時に推進力伝達材が推進管に与える影響を解明するため、推進管の継手曲げ実大実験を実施し、同実験から得られた、曲線部・直線部に

おいて、推進力が推進力伝達材を介して伝達されるときの、推進管接合部の動きと推進管の軸方向ひずみについて検討した。以下、得られた結論を列記する。

- 1) 曲線部では、推進力の増加とともに、継手間隔は曲線内側・外側ともに減少し、曲げ角度も減少する。これは、推進力の増加とともに、曲線内側の推進力伝達材の反力が增大し、推進管全体としては曲線外側への曲げモーメントが発生するためである。
- 2) 曲線部において推進管に発生する軸方向ひずみは、接合部近傍では、曲線内側の推進力伝達材設置範囲で大きい。また、接合部から離れるにしたがって、推進力伝達材の設置範囲から未設置範囲へ分散していくが、曲線外側ではほとんど発生しない。これは、曲線部では、幾何学的条件により曲線内側の推進力伝達材設置範囲で応力集中が起こること、推進力伝達材の反力により推進管内部に曲線内側への曲げモーメントが発生するためである。
- 3) 鋼製の埋込カラーの内側にあるコンクリートでは、埋込カラーの剛性のために、軸方向ひずみは抑制される。
- 4) 直線部において推進管に発生する軸方向ひずみは、ほぼ左右対称で、曲線部よりひずみの集中は緩和される。これは、直線部では、推進力が推進力伝達材の全断面を

介して隣接推進管に伝達されるためである。

今後は、本実験で得られた計測結果をさらに検討するとともに、本実験結果を用いて、著者らが開発してきた管路解析モデルの中の推進管継手モデルを検証したい。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基盤研究（B）（一般）「長距離・急曲線推進のための管路全体系を対象とした推進メカニズムの理論的解明」の一部として行ったものである。また、使用した推進力伝達材は積水化成品工業株式会社（製造元）、菱三商事株式会社（販売元）から提供していただいた。さらに、実験の計画、遂行に当たり、福田組石塚千司氏、飛島建設望月崇氏から有益なご助言をいただいた。関係者各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) たとえば、日本下水道協会：下水道推進工法の指針と解説－2003年版－，pp.116-123，日本下水道協会，2003.
- 2) 藤井良大，杉本光隆，Aphichat Sramoon：推進工法の推力算定に関する研究，第59回土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅲ，Ⅲ－382，2004.
- 3) Auttakit Asanprakit，潘少雄，杉本光隆，望月崇：実測データによる推進工法の推力算定モデルの検証，第63回土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅲ，Ⅲ－298，2008.
- 4) 品田悟，Auttakit Asanprakit，伊藤隼人，杉本光隆：管路解析モデルによる余掘りが推進力・推進管作用土圧に与える影響評価，第64回土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅲ，Ⅲ－426，2009.
- 5) Mitsutaka Sugimoto & Auttakit Asanprakit，Stack pipe model for pipe jacking method, *J. of Construction engineering and management*, ASCE, Vol. 136, No. 6, 683-692. 2010.
- 6) 積水化成品工業：FJ リング製品カタログ，2007.

STUDY ON INFLUENCE OF CUSHION RING ON PIPE BY PROTOTYPE TEST OF PIPE JOINT

Toshihiro SAKURAI, Mitsutaka SUGIMOTO, Katsunori NAKAMURA,
Jian CHEN and Le Gia Lam

Development of technology on long distance jacking and jacking at sharp curve is expected recently, in pipe jacking method. To solve these problems, it is necessary to carry out the theoretical approach to jacking mechanism taking account of the whole of pipes and TBM, since all of the pipes are advanced with the TBM in case of pipe jacking method. Furthermore, acting load on pipe should be studied, based on the above approach. Therefore, the prototype test on pipe joint was carried out to make clear the influence of cushion ring on pipe during jacking. Based on the above test, this paper reports the pipe joint behavior and the generating axial strain in the pipes due to jacking along straight and curved alignment.