

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月30日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360205

研究課題名（和文）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

研究課題名（英文）Study on pipe jacking mechanism considering whole pipeline for long distance jacking at sharp curve

研究代表者

杉本 光隆 (SUGIMOTO MITSUTAKA)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：50196755

研究成果の概要（和文）：本研究では、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解明することにより、推進管に作用する荷重分布や所要推進力の算定手法を提案し、安全で経済的な長距離・急曲線推進を実現することを目的とし、管路解析モデルの開発、推進管継手曲げ実大実験、推進工法現場計測、パラメータスタディを行った。その結果、管路解析モデルは、管路の挙動を適切に表現できることがわかった。

研究成果の概要（英文）：This study aims to make clear pipe jacking mechanism, taking account of the whole pipe line and the interaction between ground and pipe surface, and propose a method to evaluate acting load on pipe surface and required thrust force, to realize long distance jacking at sharp curve safely and economically. A prototype test on joints, site measurement, and parametric study were carried out to validate the developed model. As a result, it was confirmed that the developed model can simulate pipe line behavior reasonably well.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2010年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2011年度	1,900,000	570,000	2,470,000
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：推進工法，地盤工学，シミュレーション工学，都市整備，コスト縮減

## 1. 研究開始当初の背景

本研究で対象とする**推進工法**にあつては、公共事業コスト縮減のために、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。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。

## 2. 研究の目的

本研究では、**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解明**することにより、推進管に作用する荷重分布や所要推進力の算定手法を提案し、安全で経済的な長距離・急曲線推進を実現することを目的とし、以下の研究を行う。

(1)管路解析モデルの開発

①推進管に作用する荷重のモデル化：地盤反力モデル、推進管継手モデルを開発する。

②管路の全体系を対象とした推進メカニズムの理論的説明：上記の地盤反力モデルを個々の推進管に適用するとともに、推進管継手モデルにより推進管を結合し、管路全体を対象とした管路解析モデルを開発する。

(2)推進管継手曲げ実大実験

推進管の継手曲げ実大実験により、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説明するとともに、実験結果に基づき、推進管継手モデルの妥当性を検証する。

(3)推進工法現場計測

推進工法の現場計測により、掘進機の挙動や推進管に作用する荷重を把握し、これらの実測値と、管路解析モデルによる解析値を比較することにより、同モデルの合理性を検証し、管路の全体系を対象とした推進メカニズムを理論的に説明する。

(4)パラメータスタディ

上記の管路解析モデルを用いて、地盤・構造・施工条件に関するパラメータスタディを行い、推進管設計荷重・所要推進力の実用的な算定手法を提案する。

3. 研究の方法

(1)推進管継手曲げ実大実験

①実験設備

図-1に示すように、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個を厚さ



図-1 実験状況

1cmのゴム板を介して設置し、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間を固定した。

推進管は管長2.43m、呼び径800mm、厚さ80mm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、曲線内側のひずみを重点的に計測した。これらの計測により、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した。

③実験ケース

実験ケースを表-2に示す。推進力が推進力伝達材を介して伝達されるときに推進管に対する影響を、曲線部と直線部で比較できるように実験ケースを設定した。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）

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	推進管	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

表-2 実験ケース

Case	線形	曲げ角度	軸方向最大載荷荷重
1	曲線	3.61°	1000kN
2	直線	0.00°	2700kN

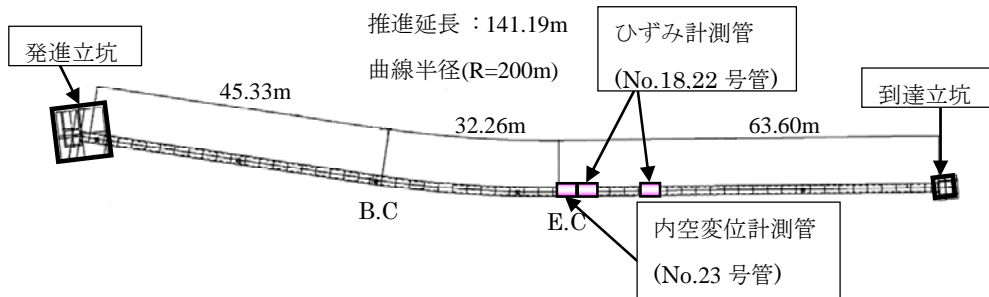


図-2 現場平面図（到達時）

とした。

#### ④実験方法

Case1 (曲線) では、推進力伝達材の特性から定まる推進管の許容推進力を基に 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、載荷することとし、載荷・除荷を 2 度繰り返した。

#### (2)推進工法現場計測

##### ①現場概要

本工事は、呼び径 1500mm、曲線半径 200m、推進延長 141.19m の管路を、泥土圧式推進工法で、地下水位 GL-1.0m~-5.0m の砂質地盤に、土被り 2.09~3.19m で構築する工事である。計測用推進管は No.18 と No.22 号管である。図-2 に到達時の現場平面図を示す。

##### ②現場計測項目

現場計測項目は、通常計測する掘進データの他に、掘進機の位置・方位角、推進管の位置・方位角、推進管ひずみ、推進管の内空変位、計測管後端継手部の目開きである。なお、推進管のひずみについては、推進管 1 本につき軸方向に 3 断面、周方向に 45°間隔に 8 ヶ所、管内外周面で、管軸方向、周方向ひずみを計測した。

##### (3)パラメータスタディ

##### ①解析条件

推進管は管長  $L=2.43\text{m}$ 、呼び径 3250mm、厚さ 250mm とした。解析延長は推進管 28 管分で、曲線部 (曲線半径  $R=50\text{m}$ ) を含め 19.2m で、曲線始点は Pipe6 の近傍、曲線終点は Pipe18 の近傍である。地盤条件は、地盤反力係数  $15\text{MN/m}^3$ 、側方土圧係数 0.50、土被り  $2D$  ( $D$ =推進管外径)、砂質土地盤で、土水分離として、解析を行った。

パラメータスタディの対象としたのは、表-3 のパラメータである。

### 4. 研究成果

#### (1)管路解析モデル

図-3 に開発した管路解析モデルを示す。推進管を半径方向の地盤ばね(図-4)によって支

えられる曲面シェル、推進管継手部と先端抵抗を圧縮ばねとせん断ばねでモデル化した。また、管周面抵抗を表現するために、管と地

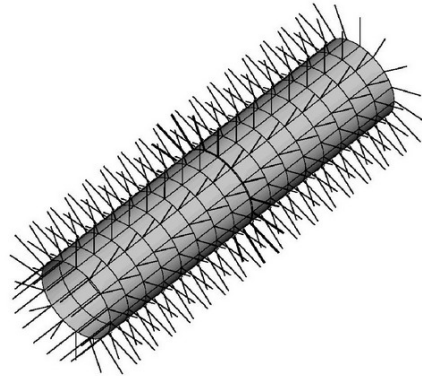


図-3 管路解析モデル

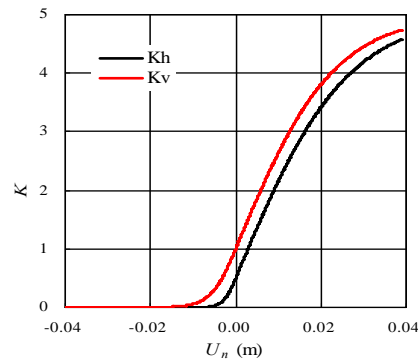


図-4 地盤反力曲線

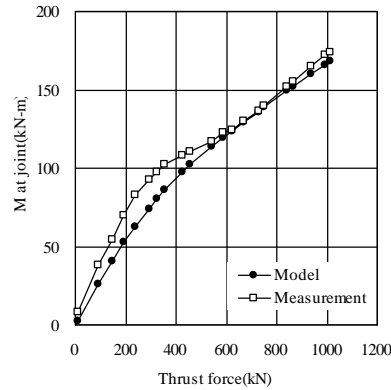


図-5 継手部水平モーメント

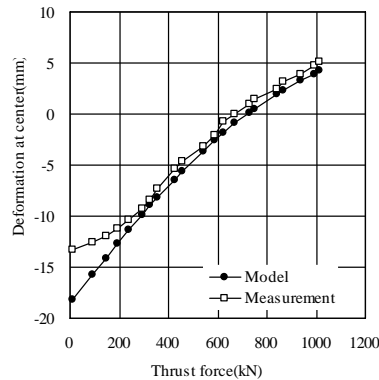


図-6 継手部軸方向変位

表-3 解析条件

条件	パラメータ	値
地盤条件	地盤反力係数 $k$ ( $\text{MN/m}^3$ )	15
	側方土圧係数 $K_{Ho}$	0.5
	土被り $h$ (m)	$2D$
推進条件	余掘り $U_{n0}$ (m)	0.005 0.010, 0.015
	管周面摩擦係数 $m$	0.1
構造物条件	EPS発泡倍率 $F_J$	2.0
	推進力伝達材 $\theta$ (deg)	90
管路条件	直進部の長さ $L_s$ (m)	5
	曲線中心角 $\alpha$ (deg)	10
	平面曲線半径 $R_H$ (m)	50
推進管条件	推進管長さ $L_P$ (mm)	800
	推進管厚さ $t_a$ (mm)	250

注：D = 推進管外径

盤の間にインターフェイス要素 (Mohr-coulomb モデル)を設定した。

(2)推進管継手曲げ実大実験

①推進管継手モデル

図-5、図-6 に、計測結果と推進管継手モデルから求めた継手部に発生する水平モーメント・軸方向変位を示す。両者は良く一致していることから、推進管継手モデルの妥当性を確認できた。

②管路解析モデル

Case1 の軸方向ひずみ分布の実験結果と解析結果を図-7 に示す。両者は同様の傾向を示し、以下のことがわかる。

1)接合部近傍の a 断面では、曲線内側の推進力伝達材が設置されている範囲 (165-180, 0-45 度) で軸方向ひずみは大きく、157.5, 22.5 度近傍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 (270 度) で最小値を取る。

2)接合部から離れるにしたがい、曲線内側の軸方向ひずみの集中は、若干緩和され、推進力伝達材が設置されていない範囲でひずみが若干増加する。

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。

4)実験結果では、接合部近傍の a 断面より b 断面の軸方向ひずみが大きくなっている。これは、a 断面が鋼製の埋込カラーの内側にあるため、コンクリートの軸方向ひずみが減少したと考えられる。

管路解析モデルを用いて軸方向ひずみの傾向を適切に再現できることから、推進管継手

モデルの妥当性を確認できた。

(3)推進工法現場計測

①計測結果

計測管 No.18 の掘進機中胴後端軌跡からの水平・鉛直偏差を図-8、図-9 に示す。これら図から以下のことがわかる。

1)水平偏差は、推進距離 45m で掘進機より 35mm 曲線外側を通過し、曲線始点(BC)通過後約 25mm 曲線内側となり、その後、推進距離 60m で 20mm 曲線外側、62~65m で 17mm 曲線内側、70m~80m で約 20mm 曲線外側を通過する。曲線終点(EC)で 5mm 曲線内側を通過した後、25mm 曲線外側に移動する。

2)鉛直偏差は、曲線始点(BC)付近で 18mm 上側となり、その後減少し、距離 58m で 10mm 下側となった後、約 10mm 上側となりほぼ一定となる。

これらは、余掘り 15mm を有するトンネル掘削面内の推進管のマクロな挙動と、曲線前後を含む曲線部での中折れ操作による掘進機軌跡のミクロな挙動が複合した結果である。

②数値解析

現場の条件を用いて、数値解析を行った。図-10 に推進管のトンネル中心からの偏差を示す。この図から以下のことがわかる。

1)水平偏差は、推進距離 35m 位まで変形前のトンネル掘削面のほぼ中心となっているが、曲線始点(BC)より 5m 位手前で曲線外側 7mm に、曲線始点直後で曲線内側 15mm に、曲線部では曲線外側 7mm となり、曲線終点(EC)直前で曲線内側 12mm に、曲線終点通過後 5m 位で曲線外側 7mm となり、その後、変形前のトンネル掘削面の中心に漸近する。これは、

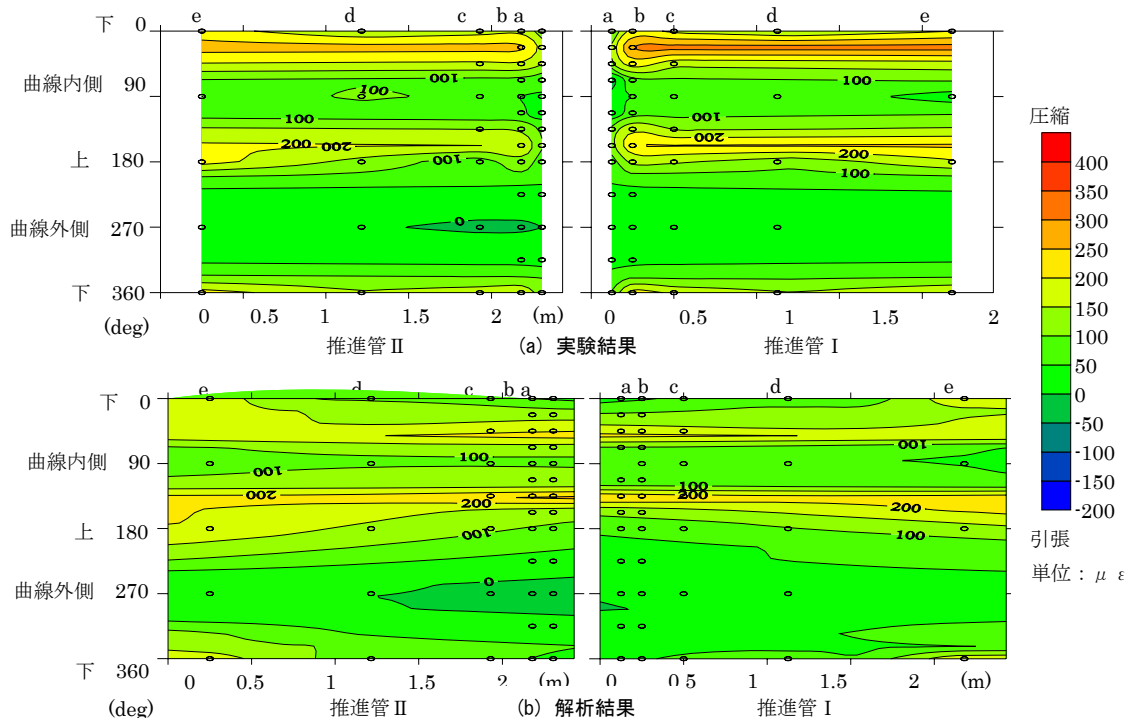


図-7 推進管内面の軸方向ひずみ分布 (Case 1, 曲線, 載荷荷重 1,000kN)

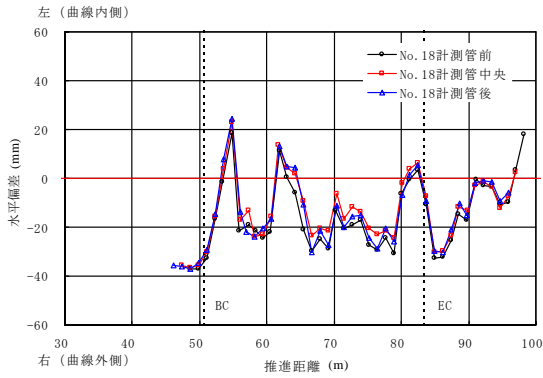


図-8 推進管の水平偏差 (計測値)

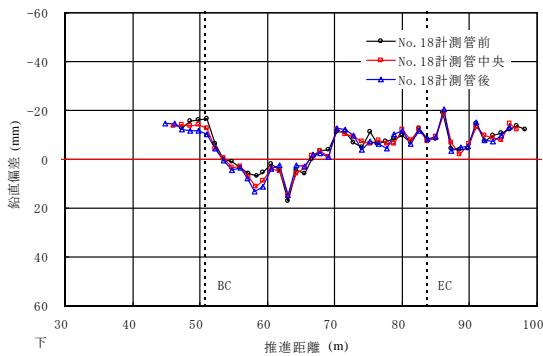


図-9 推進管の鉛直偏差 (計測値)

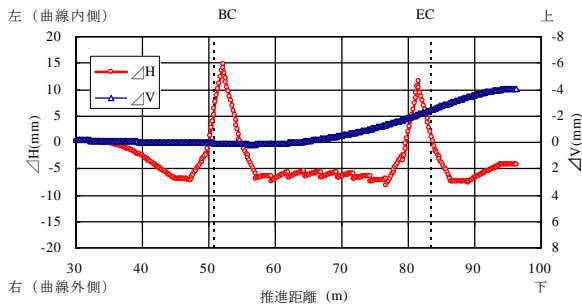


図-10 推進管偏差 (解析値)

推進力伝達材によって継手部が曲げ剛性を有しているためと考えられる。

2)鉛直偏差は、推進距離 0m から 40m までトンネル掘削面の中心より約 0.2mm 上となっている。曲線始点近傍ではほぼ中心となり、その後、推進距離 60m から上に移動し、推進距離 90m では、約 4mm 上となる。これらは、推進距離 60m 位までは、地下水位面が推進管より下であること、推進管の自重が掘削土砂の自重より小さいことから、推進管が上に若干移動した、曲線始点近傍では、直線より幾何学的制約が厳しくなることから中心に移動した、また、推進距離 60m 位から、水圧が推進管に作用しだし、推進距離 95m 付近で、推進管は地下水位面の下となることから、浮力のために、推進管が上に移動した、と考えられる。

管路解析モデルを用いて管路の挙動を適切に再現できることから、管路解析モデルの妥

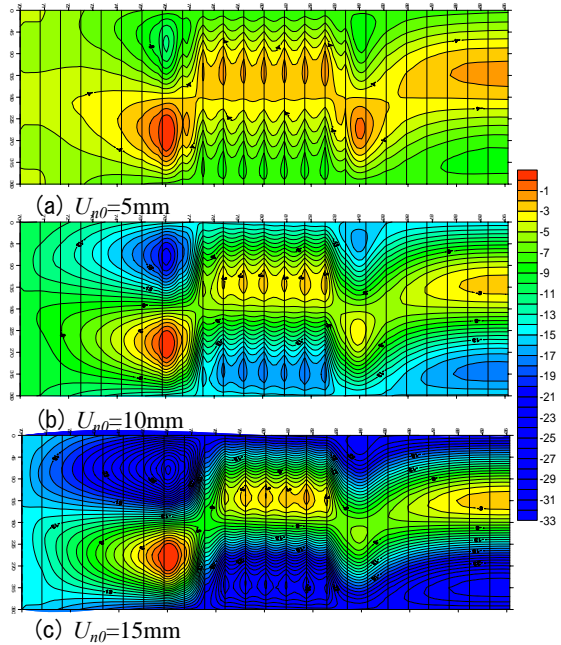


図-11 推進管周面地盤変位分布

表-4 推進力一覧

余掘り量 m	ジャッキ力 $F_J$ kN	先端抵抗 $F_f$ kN	推進管周面 抵抗 $F_R$ kN	$F_R/L$ kN/m	$F_R/A$ kN/m <sup>2</sup>
0.005	1457.02	1142.72	314.30	16.37	1.60
0.010	1265.18	1145.28	119.90	6.25	0.61
0.015	1227.07	1147.84	79.23	4.13	0.40

当性を確認できた。

#### (4)パラメータスタディ

余掘り量  $U_{n0}$  を 5, 10, 15mm とした推進管周面地盤変位分布  $U_n$  を図-11 に、推進力を表-4 に示す。図-11 の  $U_n$  から以下のことがわかる。①曲線部の始点と終点では、推進管は曲線内側に変位している。②曲線中央部では、推進管は曲線外側に変位している。③曲線部では、曲線内側では推進管の中央部、曲線外側では推進管の端部で推進管はトンネル外側に変位している。④推進管が切羽側に近づくにつれて外側に押し込む変位が減少している。⑤推進管は、全体的に上に変位し、上部で受働状態に、下部で主動状態となっている。なお、発進立坑では、推進管の軸直角方向変位を拘束しているので、変位は 0 になっている。⑥推進管は、横長に変形している。また、先端では、円形を保持している。

これらは以下のように考えられる。①、②は、推進力伝達材の剛性が高いため、推進管が掘削面内で曲がりにくいこと、推進力が作用していることのためである。③は、推進管の剛性が高いため、曲線内側では推進管中央部が、曲線外側では推進管端部が地山に近づくからである。④は、推進管の周面摩擦により推力が切羽に近づくにつれて減少するため、推進管を曲線外側へ押し込む力が弱くなるた

めである。⑤は、浮力のためである。⑥は、側方土圧係数 0.5 のためである。

また、これらの図表より余掘り量  $U_{n0}$  の影響について、以下のことがわかる。①  $U_n$  :  $U_{n0}$  が大きくなると、上部  $U_n$  が増加し、その他の所で  $U_n$  が小さくなる。これは、 $U_{n0}$  が増大すれば、幾何学的に  $U_n$  が減少するからである。②  $F_R, F_J$  :  $U_{n0}$  が大きくなると、推進管周面抵抗  $F_R$ 、ジャッキ力  $F_J$  が減少する。これは、図-4 に示す地盤反力曲線からわかるように、 $U_n$  が減少すれば、地盤反力が減少し、その結果、 $F_R, F_J$  も減少するからである。

管路解析モデルは、推進管周面変位分布、推進力、推進管周面抵抗力を合理的に表現できることを確認した。また、余掘り量は推進管周面抵抗に大きく影響することがわかった。

#### (5)本研究の位置づけと今後の展望

本研究では、管路の全体系を対象とした推進メカニズムを理論的に解明するとともに、地盤と推進管の相互作用を考慮に入れ、管路全体を一度に解析できる管路解析モデルを開発した。今後は、この管路解析モデルを種々の条件の現場データに適用することにより、モデルの妥当性を検証していくとともに、長距離・急曲線推進のための設計・施工の技術開発に繋げたいと考えている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Le Gia Lam, Huynh Ngoc Thi, K. Nakamura, and M. Sugimoto: Experiment Study on Influence of Joint to Pipes in Pipe Jacking Method, WTC2012, Bangkok, Thailand, ITA, 2012. (査読有り)
- ② 瀧瀬真輝, 桜井俊裕, Le Gia Lam, 杉本光隆, 中村勝則: Study on Influence of Cushion Ring on Pipe by Prototype Test, Proc. of the 6th Japan-China conference on shield driven tunnelling, pp.169-176, 2011. (査読有り)
- ③ 東川正和, C. Thanongdeth, Le Gia Lam, Huynh Ngoc Thi, 杉本光隆, 石塚千司: Site measurement on stress change in pipe during jacking due to pipe alignment, Proc. of the 6th Japan-China conference on shield driven tunnelling, pp.73-78, 2011. (査読有り)
- ④ A. Asanprakit, M. Sugimoto, J. Chen: Influence of overcut length on jack force and acting earth pressure during pipe jacking, Proc. of 7th Int. Symp. on Geotechnical aspects of underground construction in soft ground, (IS-Roma), TC28, ISSMGE, No. 269, 2011. (査読有り)
- ⑤ 桜井俊裕, 杉本光隆, 中村勝則, 陳劍, Le Gia Lam: 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, トンネル工学報告集, 土木学会, Vol.20, pp.387-393, 2010. (査読無し)

- ⑥ M. Sugimoto, A. Asanprakit: Stack pipe model for pipe jacking method, J. of construction engineering and management, Vol.136, No.6, ASCE, pp.683-692, 2010. (査読有り)

[学会発表] (計 6 件)

- ① 岩田諒介, 東川正和, Le Gia Lam, 杉本光隆, 石塚千司: 推進管挙動に関する現場計測結果の数値解析, 第 67 回土木学会年次学術講演会講演概要集VI, 2012.9. (印刷中)
- ② 大森絵美, 瀧瀬真輝, Huynh Ngoc Thi, 杉本光隆, 中村勝則: 推進管の継手実大曲げ実験の数値解析, 第 67 回土木学会年次学術講演会講演概要集VI, 2012.9. (印刷中)
- ③ 東川正和, C. Thanongdeth, 石塚千司, 杉本光隆: 推進時に推進管に発生する軸方向ひずみ, 応力の現場計測, 第 66 回土木学会年次学術講演会講演概要集VI, VI-054, 2011.9.9.
- ④ 瀧瀬真輝, 桜井俊裕, 杉本光隆, 中村勝則: 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, 第 66 回土木学会年次学術講演会講演概要集III, III-118, 2011.9.8.
- ⑤ C. Thanongdeth, 品田悟, A. Asanprakit, 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 27 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, pp.192-196, 2009.11.10.
- ⑥ 品田悟, A. 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, 2009.9.2.

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

杉本 光隆 (SUGIMOTO MITSUTAKA)  
長岡技術科学大学・工学部・教授  
研究者番号: 50196755

##### (2)研究分担者

豊田 浩史 (TOYOTA HIROFUMI)  
長岡技術科学大学・工学部・准教授  
研究者番号: 90272864

##### (3)研究協力者

石塚 千司  
榊福田組, 土木事業本部技術部シールド・推進グループ, グループ長  
中村 勝則  
藤村ヒューム管(株), 開発部課長  
長岡技術科学大学エネルギー環境工学専攻  
博士課程学生, 建設工学専攻修士課程学生