

# 線路下での大断面函体推進工法における 軌道変位抑制手法の開発

中村 智哉\*    岡野 法之\*\*    富樫 陽太\*  
近藤 政弘\*\*\*    木戸 智章#    入江 光広##

**Development of the Restrain Method of the Track Displacement for the Large Section Box Culvert Propulsion  
Method for Constructing Tunnels to Cross under Railways**

Tomoya NAKAMURA    Noriyuki OKANO    Yota TOGASHI  
Masahiro KONDOU    Tomoaki KIDO    Mitsuhiro IRIE

For constructing underpass tunnels by the box culvert propulsion method, firstly, square steel pipes are horizontally inserted around the end surface of box culvert along the total length to cross the track in order to restrain track displacements. Secondly the square steel pipes are pushed out to the farther retaining wall of the vertical pit and replaced with box culvert propelled by jacks while excavating either embankments or natural grounds the inside of culvert. In this study, several model experiments of box culvert propulsion and field measurements were conducted. The results of these experiments/measurements demonstrated that the behaviors of the box culvert were well simulated and the track displacement was restrained in the construction phases by the method proposed by the authors.

キーワード：線路下，函体推進工法，軌道変位抑制法，模型実験，現地計測

## 1. はじめに

非開削工法による線路下横断構造物の構築方法には様々な施工法がある。その中で、エレメント推進・けん引工法とともに非開削工法の代表的な施工法の一つである函体推進・けん引工法（図1）は、供用中の線路下に小土被りで施工でき、これまで多くの適用実績がある。この施工法は、線路直角方向に本設構造物の函体外縁に合わせ、軌道および掘削切羽防護用の鋼製エレメント（矩形鋼管）を設置し、切羽掘削と共に函体推進（または、けん引）を行って鋼製エレメントを到達側へ押し抜きながら、本設構造物の函体と置換設置する工法である。

函体推進・けん引時（以下、函体推進時）には、掘削地盤の緩みに伴う軌道（地盤）変位が生じる可能性があり、列車の安全運行を確保するためには、その発生メカニズムを解明した上で軌道（地盤）変位の予測および抑制手法の開発が求められている。これまでに、著者ら<sup>1)</sup>は函体推進時における軌道変位の現地計測結果を基にして、変位の傾向を分析し、軌道変位予測手法を示した。

本研究では、鋼製エレメント接合部の適切なボルト締

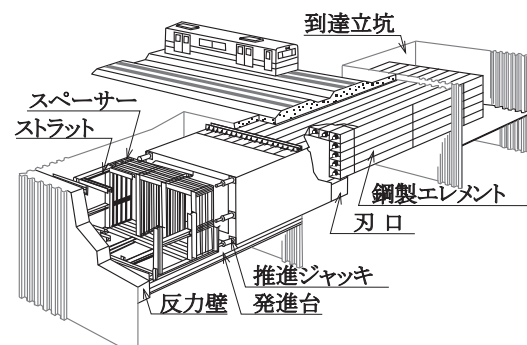


図1 函体推進・けん引工法 概要図

結トルクを設定することで、鋼製エレメントの曲げ変形を抑制する方法を提案し、実験と現場計測で検証した。

また、函体推進を模擬した模型実験や数値シミュレーション結果などから、鋼製エレメント出来形（姿勢）制御による軌道（地盤）変位抑制手法を提案した。

## 2. 函体推進時の軌道（地盤）変位発生要因

函体推進時に地山の緩みなどに伴う軌道変位は、図2に示すように、主に①～④の各要因で発生する可能性がある。このように、主に各施工段階の仮設、本設構造物の出来形の平坦性が発生要因となるため、可能な限り平坦性を確保できるように施工する必要がある。しかしながら①については、鋼製エレメント推進終了後から函体推進開始までの期間に、列車荷重を受けて鋼製エレメン

\* 構造物技術研究部 トンネル研究室  
\*\* 構造物技術研究部 トンネル研究室（現 総務部）  
\*\*\* 西日本旅客鉄道株式会社 構造技術室  
# 九州旅客鉄道株式会社 鉄道事業本部建設工事部  
## 四国旅客鉄道株式会社 工務部工事課

特集：構造物技術

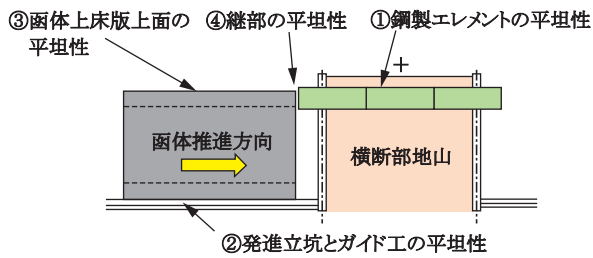


図2 函体推進時の軌道変位要因箇所

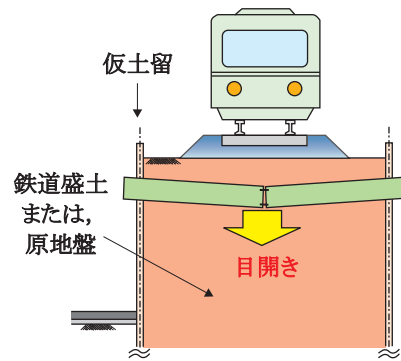


図3 エレメント管のたわみ想定図

トの中央部が沈下し、中だるみ状態となる場合がある。また、鋼製エレメント施工時の誤差も考慮し計画よりも高い位置に設置することが一般的で、函体先頭部と鋼製エレメント継部(図中④)には段差が生じることが多い。本検討では、特に①および④に着目し、函体推進開始までの鋼製エレメントのたわみや目開きの抑制と函体推進直前の鋼製エレメント出来形を把握したうえで端部の高さを調整することにより、エレメント出来形(姿勢)を緩和し、軌道(地盤)変位を抑制する方法を検討した。

### 3. 函体推進開始までの鋼製エレメントのたわみ抑制

函体推進開始までの期間に列車荷重などの影響で、鋼製エレメントが発進・到達立坑軌道側の仮土留を支点とし、鋼製エレメントのたわみが発生する場合があります。この状態で函体推進をすると軌道変位が発生する<sup>1)</sup>(図3)。そこで、本研究では、まず、ボルト接合された鋼製エレメントの曲げ挙動のメカニズムを把握するために、実物大の鋼製エレメントを使用し、ボルトの締結トルクをパラメータとした曲げ試験の他、現場計測を行った。

#### 3.1 鋼製エレメントの曲げ試験

##### 3.1.1 実験概要

試験で使用した鋼製エレメントを図4に、また主な仕様を表1に示す。この鋼製エレメントを六角ボルト(SCM, M33)4本(隅角部)で締結し、本実験の試験体とした。ボルト接合された鋼製エレメントの変形モードを検討するため、4点曲げ試験を実施した(図5)。計測項目は、図6に示すように接合部下端のたわみ量と目開き幅として接触式変位計と $\pi$ ゲージを設置した。なお、荷重の計測は、ジャッキ内に内蔵されたロードセルで行い、载荷経路については、約0.2MNまで载荷し、約0.01MN 载荷毎に1分間荷重の増分をゼロとして試験機と供試体のなじみを図ったあとに静的な計測を行った。

表2に試験ケースを示す。鋼製エレメントの4隅をボルト接合したケースを基本とし、締結トルクをパラメータとして3ケースの試験を行った。これらのトルク $T$ は、トルク係数 $K=0.15$ としたトルク法<sup>3)</sup>で軸力換算すると、それぞれ、0.06, 0.14, 0.24MNに相当する。



図4 鋼製エレメント

表1 鋼製エレメント仕様

幅 $W$ (m)	高 $H$ (m)	長 $L$ (m)	ボルト本数 $N$ (本)	部材厚 $t$ (mm)	断面係数 $Z_{x,y}$ (cm <sup>3</sup> )
0.8	0.8	3.0	4	19	14 280

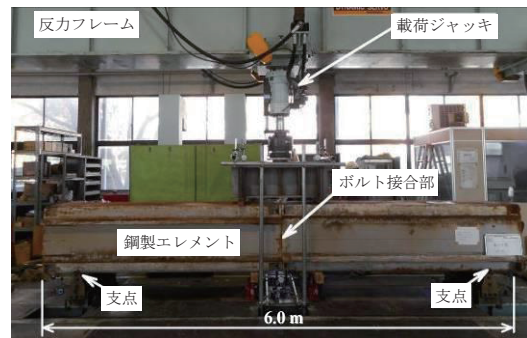


図5 大型曲げ試験装置

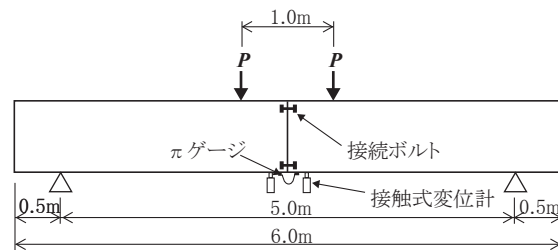
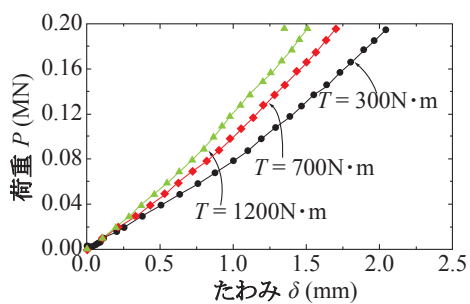


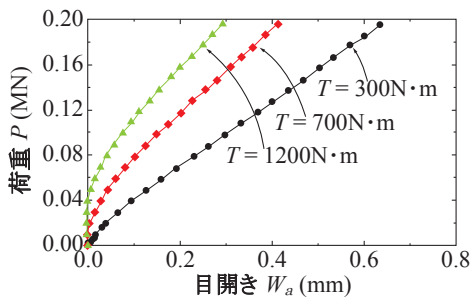
図6 曲げ試験計測項目

表2 試験ケース

ケース No.	ボルトのトルク $T$ (N・m)	外ボルトの本数
1	300	4
2	700	
3	1200	



(a) 荷重-たわみ量



(b) 荷重-目開き量

図7 曲げ試験結果

### 3.1.2 実験結果

曲げ試験の結果を図7に示す。接続ボルトに加えたトルクが大きいくほど、たわみ量も目開き幅も抑制されていることが分かる。本検討の中で最もトルクの小さい $T = 300\text{N}\cdot\text{m}$ のケースでは、 $0.2\text{MN}$  載荷時のたわみが $\delta \approx 2.0\text{mm}$ で、目開き幅 $W_a \approx 0.6\text{mm}$ である。この $T = 300\text{N}\cdot\text{m}$ のケースと $T = 1200\text{N}\cdot\text{m}$ のケースの結果を $0.2\text{MN}$  載荷時と比較すると、接合トルクを $900\text{N}\cdot\text{m}$ 増加させれば、たわみ量が約25%、目開き幅が約50%抑制できることを確認した。これらのことから、適切なボルト締結力の設定によるたわみ抑制方法を提案した。

### 3.2 現場計測

#### 3.2.1 計測概要

鋼製エレメントのトルク管理による軌道変位抑制効果を確認するために、複線区間を横断する函体推進工法の現場計測を行った。図8に示す鋼製エレメントのトルク管理実施の有無について、鋼製エレメント端部および接合部で約3ヶ月間の経時変化(図9, 図中①~⑥)を基準点測定で計測して比較検討した。また、鋼製エレメント接合部に目開き計(πゲージ) (図10)を設置して、同様に比較検討を行った。

鋼製エレメント接合部の締結不足により接合部が目開きし、中央部が中だるみ形状となる可能性を考慮し、鋼製エレメント推進時にボルトの締結トルク管理( $T = 1200\text{N}\cdot\text{m}$ )を実施した。目開き計(πゲージ)は、エレメント推進完了後、図10に示す鋼製エレメントNo.2およびNo.7(図8)について接合部上下側方に設置した。

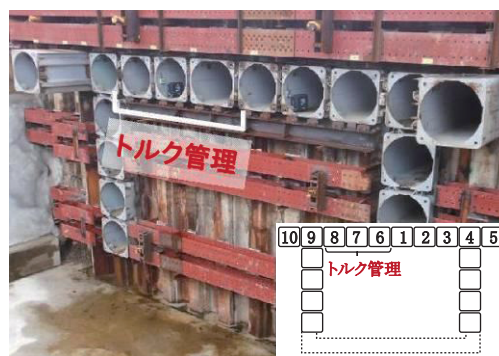


図8 トルク管理 実施エレメント

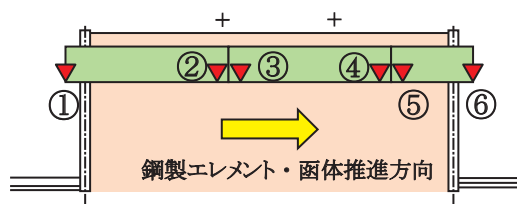


図9 計測点(経時変化)

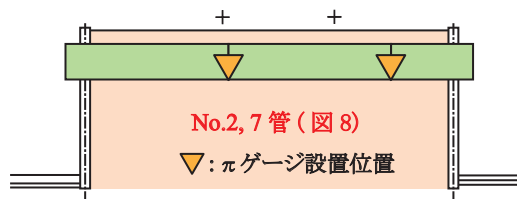


図10 πゲージ設置位置

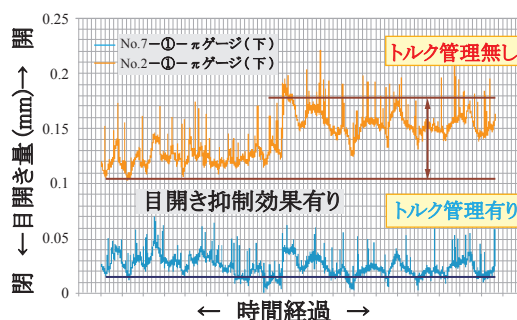


図11 目開き抑制効果

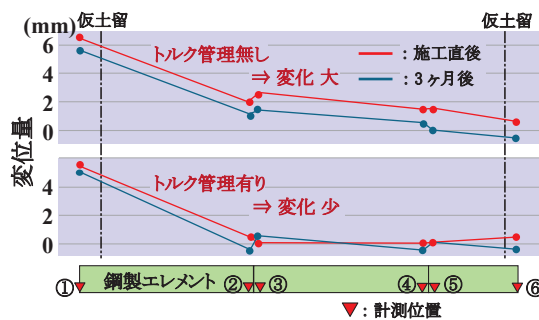


図12 鋼製エレメント経時変化

特集：構造物技術

3.2.2 計測結果

全ての鋼製エレメントをトルク管理した場合としない場合、すなわち手締め ( $T \approx 300\text{N} \cdot \text{m}$ ) の場合とトルクレンチ締め ( $T = 1200\text{N} \cdot \text{m}$ ) の場合と比較した目開き量と鋼製エレメント出来形の経時変化 (3ヶ月) を図11, 12に示す。図11ではトルク管理を行った計測結果、目開き量に変化がなく、それに比べて手締めの場合では目開きの発生が計測された。また図12においても同様にトルク管理を行った場合では、鋼製エレメントの変位が抑制されることが確認された。

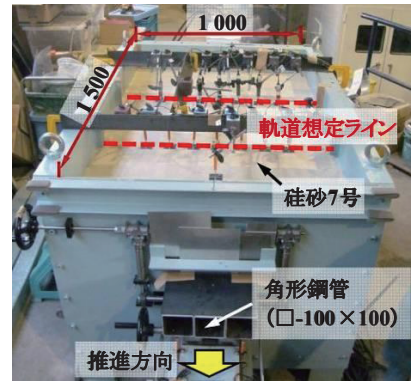


図13 函体推進模型実験装置

4. 函体推進時の軌道変位抑制法の提案

既存の研究<sup>2)</sup>では、函体推進中の軌道変位の発生メカニズムは、鋼製エレメント出来形の形状を概ね保持した状態で地山中を鋼製エレメントが平行移動することで発生することがとらえられている。軌道の鉛直変位については、鋼製エレメントが前下がり (傾斜 (-)) で隆起、前上がり (傾斜 (+)) で沈下が起き、水平ではほぼ鉛直変位は発生しない。また、隆起、沈下量は、鋼製エレメント傾斜の大小に依存することが示されている。そこで本研究では、函体推進前に鋼製エレメント端部高さを下方へ調整し鋼製エレメント出来形 (姿勢) を緩和することで函体推進時の軌道隆起を抑制する手法を提案し、模型実験と現地試験を実施してその効果を検証した。

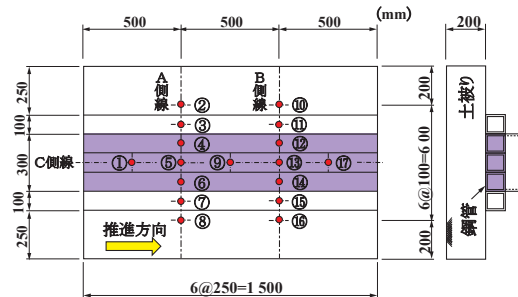


図14 接触式変位計設置位置

4.1 函体推進模型実験

4.1.1 実験概要

実験は、図13に示すように土槽を改造した縮尺1/8スケールの実験装置を使用した。幅1000mm×長1500mmの土槽内に鋼製エレメントを模擬した角形鋼管 (□-100×100) を3列配置し、その両側にセーフティエレメント (垂直部エレメント施工時の緩み蓄積による上部地山の引き込みを防止する) を模擬した同鋼管を配置した。模擬地盤とし硅砂7号で地盤形成した後、函体を模擬した角形鋼管 (□-200×300) で到達側へ押し込み、函体と置換できる機構とした。模擬地盤上には、複線軌道を想定したA・B側線および、函体推進方向中心線を想定したC側線の地盤変位量を接触式変位計で計測した (図14)。函体の推進方法には、油圧ジャッキを使用して125mm/step×14stepで推進を行い、1step毎1分間のインターバル後に計測した。

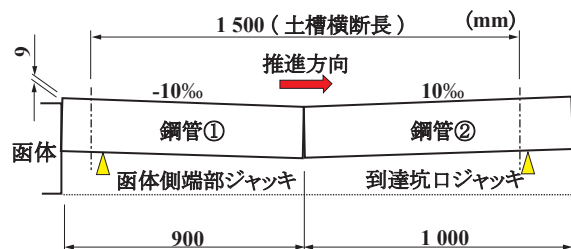


図15 角形鋼管形状

表3 実験ケース

実験ケース	土盛り (cm)	函体側端部ジャッキ操作	角形鋼管配置		到達坑口ジャッキ操作
			鋼管①	鋼管②	
ケース1	20	なし	→ -10‰	← 10‰	なし
ケース2	20	あり	→ -10‰	← 10‰	なし
ケース3	20	なし	→ -10‰	← 10‰	あり
ケース4	20	あり	→ -10‰	← 10‰	なし
ケース5	20	あり	→ -10‰	← 10‰	なし
ケース6	20	あり	→ -10‰	← 10‰	あり

表4 ジャッキ操作方法

実験ケース	函体側端部ジャッキ	到達坑口ジャッキ
ケース1	-操作なし-	-操作なし-
ケース2	1.25@7 ≒ 9mm	-操作なし-
ケース3	-操作なし-	1.25@7 ≒ 9mm
ケース4	3→2→2→1→1=9mm	-操作なし-
ケース5	9mm (1回で操作)	-操作なし-
ケース6	3→2→2→1→1=9mm	3回目の推進から、1→2→1.5→2.5→1mm

図15に示すように、本実験では、函体側と到達側土槽坑口部 (到達坑口部を想定) に配置したジャッキで下方へ高さ調整できる。実験で使用する鋼管の形状は、3.2で示した現場計測の結果から、全てのケースで角形鋼管の中央部が中だるみした形状 (中央方向へ勾配10‰) を採用した。また、多くの現場で計画よりも高い位置へ鋼製エレメントを施工することを考慮し、鋼製エレメン

ト端部と函体先頭部の継部段差については鋼管形状から、 $H = 9\text{mm}$ とした。実験ケースは函体側端部ジャッキおよび到達坑口ジャッキの操作方法をパラメータとした全6ケースとした (表3)。なお各ケースにおけるジャッキ操作は、表4に示す。

### 4.1.2 実験結果

A, B 各側線と C 側線が交差する測点⑤および⑬での隆起・沈下量の変化を図 16, 図 17 に示す。ジャッキ操作を行わずに函体を推進したケース 1 と、鋼製エレメント勾配に合わせてジャッキ操作し、勾配を緩和したケース 2 を比較すると、測点⑤での最大隆起量を 2mm 程度抑制できることが分かった。また、到達坑口ジャッキのみを操作したケース 3 では、ケース 1 と比較して、隆起・沈下量ともに増加する傾向が見られた。このケース 2 の隆起抑制の結果を考慮して、函体側端部ジャッキの操作方法を変化させたケース 4, 5 は、ともに隆起量の抑制効果が確認された。また、急激に鋼製エレメントの勾配を緩和したケース 5 と比較してケース 4 では、測点⑤において、緩やかな隆起抑制傾向を示す良好な結果が得られた。一方で測点⑬の函体推進長  $L = 750\text{mm}$  付近では、ケース 4, 5 とともに隆起傾向が見られたことから、ケース 6 については、ケース 4 での操作方法を踏襲しつつ、到達坑口ジャッキを操作した結果、軌道想定位置での測点⑤, ⑬について隆起抑制効果を示した。

### 4.2 軌道変位抑制法の実証試験

函体推進模型実験で得られた本手法の効果を検証するため、実際の施工現場で軌道変位抑制手法の実証試験を実施した。試験を行った現場は、3.2 でボルトのトルク試験を実施した現場と同様である。

#### 4.2.1 試験概要

函体推進模型実験と同様に、鋼製エレメント中央が中だるみした出来形のエレメントを選定し、端部で高さ調整を行うため、函体推進直前の鋼製エレメント出来形から、図 8 に示す No.7, 6, 1, 2 の鋼製エレメントについて変位抑制手法を実施した。

函体側の鋼製エレメント端部は、切羽掘削スペースである刃口内の鋼製エレメント受梁と鋼製エレメントとの間へ、形鋼材で製作した高さ調整材を設置した (図 18 (左))。同様に到達側の鋼製エレメント端部については、函体到達立坑軌道側仮土留に配置されている、鋼製エレメント受工と鋼製エレメントとの間に高さ調整材を設置した (図 18 (右))。なお、設置した高さ調整材は、形鋼材 (溝形鋼) を切断することで高さを下方へ調整できるシンプルな構造とした。また、高さ調整は、各鋼製エレメントの出来形勾配に合わせて函体推進直前に下方修正して鋼製エレメント勾配を緩和した後に函体の推進を行った。1 回の切断量は、ガス切断であることを考慮し 5mm ピッチとし、切断のタイミングは表 5 に示す通り、函体推進および鋼製エレメント推進前に行った。なお、鋼製エレメント No.6 については、推進 4 m 時に到達側端部の高さ調整も実施した。

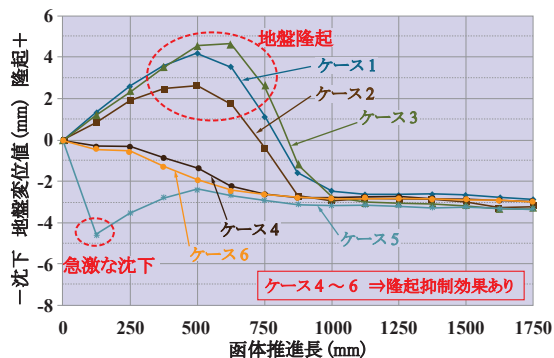


図 16 測点⑤における地盤隆起・沈下量

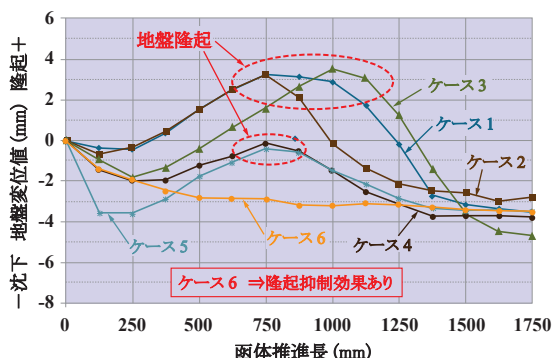


図 17 測点⑬における地盤隆起・沈下量

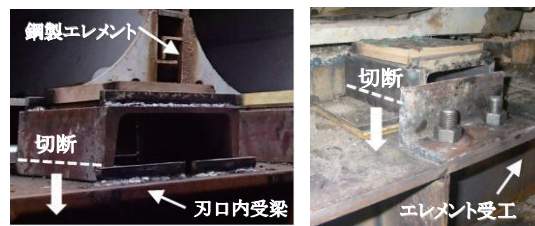


図 18 高さ調整材 (発進：左，到達：右)

表 5 高さ調整材 切断タイミング一覧

表中の数字は切断量 (単位: mm)

ルーフ No.	推進前		1m 推進		2m 推進		3m 推進		4m 推進	
	発信側	到達側	発信側	到達側	発信側	到達側	発信側	到達側	発信側	到達側
2	5	-	5	-	-	-	-	-	-	-
1	5	-	5	-	5	-	-	-	-	-
6	5	-	5	-	5	-	5	-	-	5
7	5	-	5	-	5	-	5	-	-	-

#### 4.2.2 試験結果

図 19 に函体構造物中心線に近い、鋼製エレメント (No.6) について、函体推進直前の出来形形状および函体上床版上面の高さを示す。なお、高さ計測を実施した、平面における位置は、軌道間の施工基面である。

施工基面への影響は、鋼製エレメント高さ計測位置③に続き、②→①、函体上面 a→b の順で影響を受けるが、既存の研究結果<sup>2)</sup>での軌道変位予測法を用い、函体推進直前の鋼製エレメント出来形形状 (勾配) から図 20 のように変位予測を行った。これは鋼製エレメントの勾

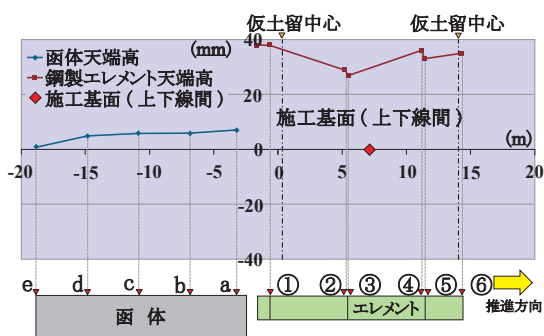


図 19 鋼製エレメントおよび函体上床版上面高

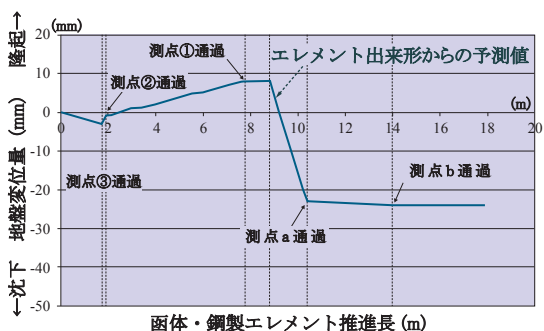


図 20 計測点における変位予測

配が主要因で地盤上の点が隆起または沈下した場合を示している。鋼製エレメント計測点③から①では、鋼製エレメント推進方向が前下がり（－）であるため隆起し、また、エレメント端部と函体先頭部の段差（①～a）で地盤は急激に沈下し、その後は、ほぼ水平形状の函体天端形状に合わせ、その高さを維持すると予測される。

鋼製エレメントおよび函体推進における施工基面上の計測結果を図 21 に示す。なお、今回の試験は、鋼製エレメント端部の高さを調整した場合の試験であり、端部高さ調整を考慮した予測も図 21 に示す。計測の結果から、鋼製エレメント端部高さを調整した場合としない場合を比較すると、隆起傾向が抑制され、また、鋼製エレメント端部と函体先頭部の段差による急激な沈下傾向を緩和し、穏やかな沈下傾向にコントロールできることが示された。また、高さ調整を考慮した予測値と現場計測値がほぼ一致し、鋼製エレメント出来形形状によっては、高さ調整による抑制効果を考慮した予測が可能になるとともに、隆起傾向を抑制できることが分かった。

## 5. まとめ

本研究では、非開削工法の代表的な施工法の一つである函体推進・けん引工法において、函体推進・けん引時の軌道変位に関するメカニズム明らかにした。また、鋼製エレメント接合部のボルト締付け管理によるエレメントの曲げ変形抑制に関する知見を示すとともに、軌道変位抑制法に関して、以下の成果が得られた。

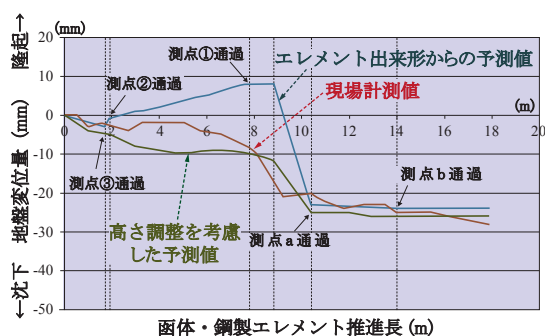


図 21 計測結果および変位予測

- (1) 鋼製エレメント設置後の出来形形状は、函体推進までの期間に列車荷重などの影響で、鋼製エレメント接合部が目開きし、曲げ変形する可能性がある。接続ボルトのトルク管理を実施した結果、目開き抑制効果が現場計測より確認できた。また、実物大の鋼製エレメントを用いた載荷試験結果においても、ボルトに加えたトルクが大きいくほど、たわみ量も目開き幅も抑制されることが分かった。
- (2) 函体推進模型実験の結果から、鋼製エレメント端部での高さ調整により、エレメントの姿勢勾配を緩和することで地盤隆起と急激な沈下を抑制できることが確認できた。これらのことから、実現場において形鋼材を用いたシンプルな高さ調整材を考案し、施工基面上地盤の隆起抑制効果を検証し、その効果を確認した。

今回の現地試験の分析では、施工基面上の地盤変位と軌道変位が等しいと仮定して分析を行った結果、高さ調整を実施した場合の予測値と現場計測値が、ほぼ一致する良好な結果が得られた。今後は、同工法での計測結果を多数収集し、軌道および路盤の剛性などの影響を考慮した解析を通じて、軌道変位抑制法の精度向上を図る予定である。

## 謝 辞

千葉工業大学の小宮一仁学長には、函体推進時の軌道（地盤）抑制手法の開発について御協力を頂いた。末筆ながら感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) 岡野, 山下, 角, 青野, 船越, 辻村: 函体推進工法における函体推進時の現地計測, 第 66 回土木学会年次講演会講演概要集 (III -133), pp.265-266, 2011
- 2) 山下, 岡野, 角: 函体推進による線路下横断施工時の地盤変位予測法, 鉄道施設協会誌, Vol.50, No.7, pp.551-553, 2012
- 3) Bickford, J.H.: An introduction to the design and behavior of bolted joints, Taylor and Francis Group, pp.226-227, 1995.