函体推進時の軌道変位抑制法の開発

中村 智哉1・岡野 法之2・富樫 陽太3・近藤 政弘4・金井 雄太5

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail: nakamura.tomoya.33@rtri.or.jp

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 総務部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail: okano.noriyuki.41@rtri.or.jp

³正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail: togashi.yota.93@rtri.or.jp

4正会員 西日本旅客鉄道(株) 構造技術室(〒532-0011 大阪市淀川区西中島5-4-20)

E-mail: masahiro-kondou@westjr.co.jp

5正会員 西日本旅客鉄道(株) 大阪工事事務所(〒920-0031 石川県金沢市広岡3-1-1) E-mail: yuuta-kanai@westjr.co.jp

供用中の鉄道下における非開削の単独立体交差トンネル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代表的な施工法の一つとして函体推進・けん引工法が挙げられ、小土被りで多くの施工実績を有している。しかしながら函体推進・けん引工法に限らず他工法においても同様に、施工時の軌道(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うえで軌道(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。本報告では、函体推進を模擬した模型実験の結果から、箱形ルーフ出来形(姿勢)制御による軌道(地盤)変位抑制法を考案し、実現場での変位抑制効果を検証したことから、その結果について報告する。

Key Words: underpass tunnels, track displacements, box culvert propulsion, under railway

1. はじめに

非開削での線路下横断構造物の構築方法は多岐に渡り、これまでに様々な施工法が開発されてきた(図-1). その中で、エレメント推進・けん引工法とともに代表的な施工法の一つである函体推進・けん引工法は、供用中の線路下に小土被りで施工可能であり、これまで多くの施工実績を有している. この施工法は、線路直角方向に箱形ルーフ(矩形鋼管)を本体構造物である函体の外縁に合せて全幅、全延長に設置する. 箱形ルーフ後端で築造した函体を地山中へ推進し、箱形ルーフを到達側へ押し抜きながら、函体と置換設置する施工法である.

函体推進・けん引時(以下,函体推進時)には,掘削地盤の緩みや,列車荷重などによる箱形ルーフの経時変化に伴って,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うえで軌道(地盤)変位の予測ならびに抑制法の開発が求められていた。既存の研究として,これまでに著者¹らは本工法の特徴である箱形ルーフの出来



図-1 主な線路下横断構造物の施工法

形形状(姿勢)による軌道(地盤)の挙動に着目した現地計測により軌道(地盤)変位の傾向を分析し、軌道変位予測手法を示した.

本報告では、函体推進を模擬した模型実験の結果などから、箱形ルーフ端部の高さを調整することで箱形ルーフ出来形(姿勢)を制御し、軌道(地盤)変位を抑制する手法を提案し、実現場での変位抑制効果を検証したことから、その結果について報告する.

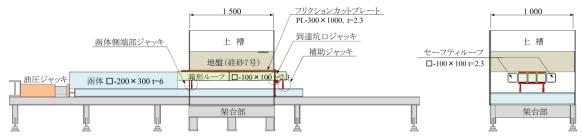


図-2 函体推進実験装置(左:側面図,右:正面図)

2. 函体推進時の軌道変位抑制法の提案

既存の研究 ²では、函体推進時の軌道変位のメカニズムについて函体推進直前の箱形ルーフ出来形の形状(姿勢)を概ね維持した状態で地山中を水平移動することで発生することが示されている。また、軌道(地盤)の鉛直変位の傾向は箱形ルーフ形状(姿勢)から予測され、推進方向に前下がり(傾斜(一))の場合では地盤を押し上げるため隆起傾向、前上がり(傾斜(+))では空隙が生じるため沈下傾向となるほか、水平では、ほぼ隆起、沈下は発生しない。なお、隆起、沈下量については箱形ルーフの傾斜の大小に依存することも示されている。本型生では、原体推進直流の符形ルーフ出来形形状态。

本報告では、函体推進直前の箱形ルーフ出来形形状から、その形状に合せた箱形ルーフ端部での高さ調整を行い、その傾斜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するとともに、模型実験による効果を確認した.

(1) 函体推進模型実験

a) 実験概要

実験は、土槽を改造した縮尺1/8スケールの実験装置 で行った(図-2,写真-1). 内幅1000mm×内長1500mm の土槽内に箱形ルーフを模擬した角形鋼管 (ロ-100×100, t=2.3mm) を長手方向に3列配置し、その形状は図-3に示 すL=900mmおよび1000mmの角形鋼管同士を溶接で接合 し, 函体推進直前の箱形ルーフ形状を考慮した, 中央が 中だるみした形状(中央方向に10%)とした. 鋼管端部 には写真-2に示す通り、鋼管端部の高さ調整を可能とす る函体側端部ジャッキ(写真-2(左))を設置し、到達 側土槽端部についても同様に到達坑口ジャッキを設置し た (写真-2 (右)). また配置した3列の鋼管両側に本 工法特有のセーフティルーフ(垂直部の箱形ルーフ施工 時緩みの蓄積による上部地山の引き込みを防止する)を 模擬した鋼管 (□-100×100, t=2.3mm) を配置するととも に函体推進時の函体上面と上部地盤との摩擦による到達 側への地盤水平移動を防止する縁切材(フリクションカ ットプレート t=2.3mm) を鋼管上部へ設置し, 函体発進

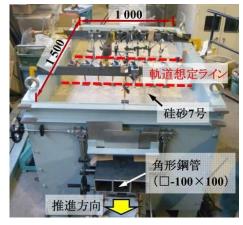


写真-1 函体推進模型実験装置



図-3 角形鋼管形状





写真-2 手動ジャッキ (函体側·左 到達·右)



写真-3 地盤形成状況

角形鋼管配置 実 験 土被り 函体側端部ジャッキ操作 到達坑口ジャッキ操作 鋼管① 鋼管② (cm) -10‰ ケース1 20 - 操作なし -**1**0‰ - 操作なし -10% -10‰ ケース2 20 1.25@7≒9mm - 操作なし --10‰ ケース3 - 操作なし -1.25@7≒9mm 20 10% -10‰ ケース4 20 $3\rightarrow 2\rightarrow 2\rightarrow 1\rightarrow 1=9$ mm - 操作なし -10% -10‰ 9mm(1回で操作) ケース5 20 - 操作なし -ケース6 $3 \rightarrow 2 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 1 = 9$ mm 10‰ 20 -10‰ 3回目の推進から、1→2→1.5→2.5→1mm

表-1 実験ケース分類とジャッキ操作方法

側土槽端部で固定した.模擬地盤は硅砂7号を土槽内に高さ30cmから空中落下法(写真-3)で相対密度Dr=40%とし、実験ケース毎に土被りD=20cmの地盤を形成した.角形鋼管の推進は、函体を模擬した角形鋼管(ロ-200×300、t=6mm)の後方に設置した油圧ジャッキにより函体を角形鋼管と共に到達側へ押し抜き、角形鋼管(箱形ルーフ)と函体とを置換可能な機構とした.

b) 地盤上の計測点

地盤上の鉛直変位計測箇所は,複線軌道を想定したA側線上(② \rightarrow 8:6@100mm),B側線上($⑩\rightarrow$ 6:6@100mm)および函体,角形鋼管推進方向中心線を想定したC側線上($①\rightarrow$ 0:4@250mm)の全17測点について接触式変位計で計測した(②-4). なお,計測は土槽長1500mmを125mm/stepずつ14stepに分けて函体推進を行い,推進後1分間のインターバルの後に計測を実施した.

c) 実験ケースおよび, 高さ調整ジャッキ操作方法

実験ケースを表-1に示す. 函体側端部ジャッキと到達 坑口ジャッキ操作の有無をパラメータとして全6ケース の実験を行った. 設置した角形鋼管は前述の通り, 10‰の勾配 (傾斜) があるため, 函体天端高さを基準 (H=100mm) として設置すると函体側鋼管端部と函体 が接する箇所にH=9mmの段差が生じる. この段差の調整方法を表-1に示すとともに各ケース順に説明する.

ケース1については、発進側端部、到達坑ロジャッキともに操作しない基本ケースとした。ケース2については函体側端部ジャッキ操作のみとし、H=9mmの段差を函体推進1回につき1.25mmずつ7回に分けて高さ調整を行った。ケース3については到達坑ロジャッキのみの操作とし、ケース2と同様に函体推進1回につき1.25mmずつ高さ調整を行った。ケース4、5についてはケース2と同様に函体側端部ジャッキのみ操作を行うが、ケース4については段差9mmを段階的にH=0mmまで高さ調整するものとし(3mm→2mm→2mm→1mm→1mm)、ケース5についは1回で段差をH=0mmとする操作を行った(

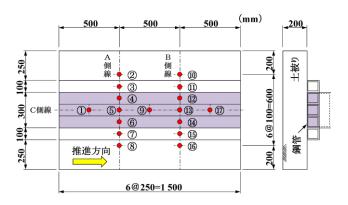


図-4 接触式変位計 設置位置

9mm→0mm). 最後にケース6ではケース1~5の実験結果を分析し、発進側端部ジャッキの操作を次節に示す良好な結果を得たケース4を踏襲するものとし、到達坑口ジャッキについては事前のトライアルから3回目の函体推進時から段階的に高さ調整行うものとした.

(2) 実験結果

複線を模擬したA, B側線と函体推進方向中心線のC側 線が交差する、測点⑤および③について地盤隆起、沈下 量の各ケースにおける変化を図-5,図-6に示す.ジャッ キによる高さ調整を行わずに函体を推進したケース1と 発進側端部ジャッキのみ操作したケース2を測点⑤で比 較すると、両ケースともに函体推進直後から隆起傾向を 示すが、ケース1の最大隆起量約4mmに対してケース2で は約2.5mmの隆起量となり隆起量が約40%抑制される結 果となった. また、測点⑬についてもともに隆起傾向を 示した(約3mm). 到達坑口ジャッキのみを操作したケ ース3では、測点⑤および測点⑬ともにケース1,2と同 様の隆起傾向となり、本実験での最大隆起量を示した (測点⑤:約4.5mm, 測点⑬:約3.5mm). 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、測点⑤ について、ともに隆起変位量の抑制効果を確認した. た だし、急激に角形鋼管の勾配を緩和したケース5と比較 してケース4では、緩やかな沈下傾向を示した。一方で 測点®の函体推進長L=750mm付近では、ケース4、5とも

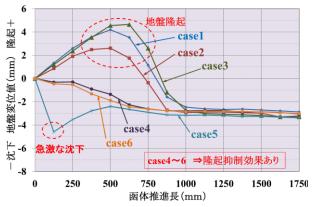


図-5 測点⑤における函体推進時の地盤変位

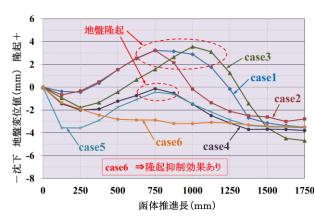
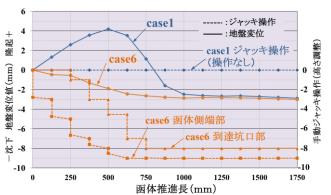


図-6 測点⑬における函体推進時の地盤変位



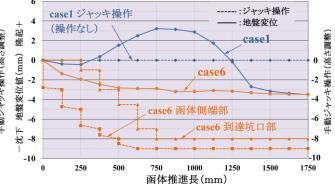


図-7 函体推進長におけるジャッキ操作および地盤変位の関係(左:測点⑤,右:測点⑥)

に僅かな隆起傾向を示した.最後に、ケース4の発進側端部ジャッキ操作を踏襲し、到達坑口ジャッキについても操作を行ったケース6では、測点⑤および測点⑬の両測点において緩やかな沈下傾向を示した.

(3) 実験まとめ

基本ケースであるケース1と測点⑤および測点③で良好な抑制効果が得られたケース6について、函体推進時の両ジャッキ操作と測点⑤および測点③の地盤変位の関係を図-7に示す。今回の実験結果から、発進側端部ジャッキ操作については、ケース6の様に段階的に下方へ高さ調整することで測点⑤(発進側軌道位置)の地盤隆起を抑制できることが示された。また、角形鋼管の形状を把握しながら、到達坑口ジャッキで坑口高さを下方へ調整することで測点③(到達側軌道位置)についても地盤隆起を抑制できることが分かった。

3. 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箱形ルーフ端部高さの 調整を行い、箱形ルーフ出来形形状(勾配)を緩和する ことで軌道変位抑制の効果を検証するため、実際の函体 推進工法(R&C工法)現場で実証試験を実施した.

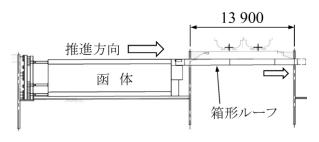


図-8 側面図

表-2 函体寸法, 土被りおよび横断部土質

函位	*形状寸法	(m)	土被り	横断部土質
幅 B	高H	長L	(m)	(函体断面内)
7.20	5.00	16.38	1.10	上半:盛土(砂質) 下半:砂礫土

(1) 現場概要

実証試験は、函体推進工法(R&C工法)で複線軌道 直角方向に車道BOXを新設する実施工現場において実施した。函体外縁に合致するように水平部8列(両側にセーフティルーフ2列)、垂直部8列(左右4列ずつ)の箱形ルーフを横断部地山に推進設置したのち、函体発進立坑内で築造した函体(単BOX)とを置換設置するものである。側面図を図-8に、函体形状寸法、土被りおよび横断部土質については、表-2にそれぞれ示す。

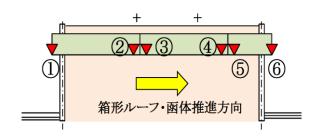


図-9 箱形ルーフ 計測箇所 (レベル測量)



写真-4 箱形ルーフ (選定)

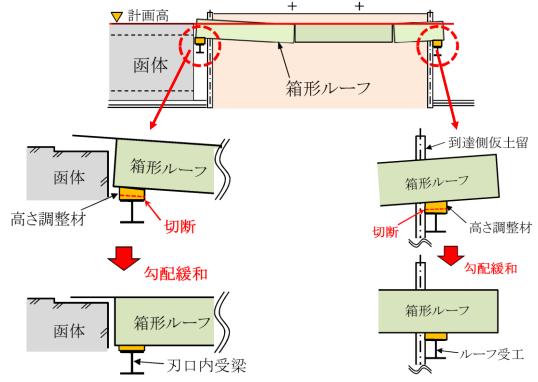


図-10 箱形ルーフ端部 高さ調整方法

(2) 試験概要

函体推進模型実験と同様の試験を実施するため, 水平 部の箱形ルーフ推進終了後から函体推進直前までの出来 形形状を継続的にレベル測量することでその姿勢を把握 した. なお、箱形ルーフの標準的な長さはL=6.0mであり、 施工延長に合せてL=3.0m管で長さ調整を行うことが一般 的であることから、本現場では箱形ルーフ1列当り L=6.0m×2本+3.0m×1本=15.0m/列となり、計測箇所は図 -9に示すようにルーフ端部および接合部前後としn=6箇 所例とした. また, 通常の箱形ルーフ施工は, 施工後 の函体製作などの期間中に列車および土荷重によって発 進,到達立坑仮土留を支点とする中央部が中だるみ形状 となる場合が多いため、あらかじめ設計計画高よりも上 方位置へ箱形ルーフを施工することが一般的となってい る. 変位抑制法は函体推進直前に箱形ルーフの端部を下 方へ調整できるルーフ中央が中だるみした形状であるこ とや高さ調整後の箱形ルーフ高さが計画位置を下回らな いことが必要であるため、条件に合致した写真-4に示す





写真-5 高さ調整材(発進:左,到達:右)

表-3 高さ調整材 切断タイミング

ルーフ No.	推進前		1m推進		2m推進		3m推進		4m推進	
	発進側	到達側	発進側	到達側	発進側	到達側	発進側	到達側	発進側	到達側
2	5	-	5	-	53	-	-	-	121	-
1	5	-	5	-	5	-	141	-	120	-
6	5	•	5	•	5	•	5	-	•	5
7	5	-	5	-	5	-	5	-	-	

No.7, 6, 1, 2の箱形ルーフを選定した. 図-10に箱形ルーフ端部での高さ調整方法の概要図を示す. 函体側ルーフ端部は、函体先頭部に設備されている刃口と呼ばれる切羽掘削スペース内の刃口内受梁と箱形ルーフ下部の間に高さ調整材を設置した(写真-5左). また、到達坑口部では、軌道側仮土留に配置されている

箱形ルーフ受工(到達した水平部の箱形ルーフを支える部材)と箱形ルーフ下部の間に高さ調整材を設置した(写真-5右).なお,この高さ調整材は,形鋼材(溝形鋼)などを組合せた構造であり,溝形鋼を切断することで下方へ高さ調整できる単純なものとした.

函体推進時の高さ調整は、選定した各箱形ルーフの出来形勾配(傾斜)に合せて函体推進直前に下方へ高さ調整し、勾配(傾斜)を緩和した後に函体を推進した. 1回の切断量は、ガス切断であることを考慮し約5mm毎、切断のタイミングは表-3に示す要領で行った. No.2, 1,7については函体側の高さ調整材のみ切断し、約10mm~20mm下方へ調整した. また、No.6については函体側の高さ調整材とともに、到達坑口部についても推進4m時に下方への調整を実施した.

(3) 箱形ルーフおよび函体推進時の変位予測

函体構造物中心線に近い位置の箱形ルーフ (No.6) を 例とした函体推進直前のルーフ出来形ならびに函体上床 版上面の高さ関係を図-11に示す。箱形ルーフの高さ計 測は図-9に示す測点①~⑥とし,函体上床版上面については先頭から順に測点a~eの5箇所について計測を行った。なお,軌道内の地盤高計測箇所は箱形ルーフ (No.6)直上の上下軌道間の施工基面 (F.L.) とし,日々の函体推進終了後にレベル測量で計測した。

箱形ルーフおよび函体推進に伴う施工基面上の測点への影響は、推進初期においては箱形ルーフ出来形形状 (勾配)から、測点③→②→①の順で影響を受け、その後函体と箱形ルーフが置換されるため、函体上床版上面の形状に合せてa→bの順で影響を受ける.

これらのことから,既存の研究成果 2 である軌道変位予測法を用いて,函体推進前に \mathbf{Z} - $\mathbf{12}$ のように変位予測を行った.この予測法は前述した函体推進模型実験でのケース1と同様で,箱形ルーフ端部での高さ調整を行わない場合であることから,測点 $\mathbf{3}$ - $\mathbf{2}$ - $\mathbf{1}$ - $\mathbf{1$

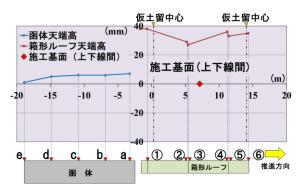


図-11 箱形ルーフおよび函体上床版上面高

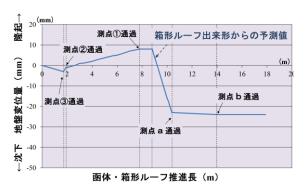


図-12 箱形ルーフ出来形からの変位予測

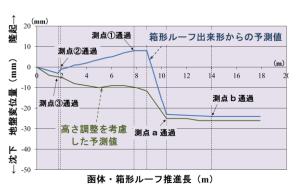


図-13 ルーフ端部高さ調整を考慮した変位予測

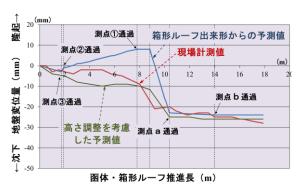


図-14 各変位予測および計測結果

(4) 試験結果

箱形ルーフ端部高さ調整を実施した箱形ルーフ (No.6) 直上の上下軌道間の施工基面の変位計測結果を図-14に示す. 箱形ルーフ端部の高さ調整を行わない変位予測と比べると,箱形ルーフ推進および函体推進直後の隆起傾

向を抑制し、緩やかな沈下傾向となるとともに、函体側 箱形ルーフ端部と函体先頭部の段差による急激な沈下に ついても抑制される結果となった.一方、箱形ルーフ端 部で高さ調整を行う場合の変位予測値と現場計測値がほ ぼ一致した.

4. まとめ

本報告では、線路下での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(地盤)変位のメカニズムを明らかにした。また、函体推進模型実験を通じて軌道(地盤)変位抑制法の提案をするとともに、実現場において検証試験を実施した。以下に得られた知見、成果を列記する。

- (1) 函体推進模型実験による地盤変位の計測結果から, 中央が中だるみした形状の角形鋼管の場合,鋼管両端部 の高さを下方へ適切に調整することで,鋼管の形状(勾 配)が緩和され,急激な地盤変位や継続的な地盤隆起を 抑制できることを示した.
- (2) 函体推進模型実験による角形鋼管端部での高さ調整の地盤変位抑制効果から、実際の函体推進・けん引現場で適用可能なシンプル(溝形鋼などの形鋼材)な高さ調整材を製作し、現場へ適用した.

(3) 実現場 (R&C 工法・推進形式) で、図-10、写真-5 に示す箱形ルーフ端部 (函体発進側: 刃口内受梁, 到達側: 箱形ルーフ受工) へ高さ調整材を設置し、適切に高さを調整することで地盤の急激な変化や継続的な隆起傾向の抑制を可能とし、緩やかな沈下傾向となる結果が得られた。

5. 今後の課題

今回の現地試験では、軌道間の施工基面上で変位計測を行い、これを軌道変位と仮定して分析した.実際は、軌道自体の剛性や路盤剛性についても考慮が必要と考えられる.このことから、同工法での函体推進・けん引時の現場計測(軌道および地盤変位)結果を多数収集、分析し、解析などを通じて軌道(地盤)変位予測法および変位抑制法の精度向上を図りたい.

参考文献

- □野, 山下, 角, 青野, 舩越, 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, 第50巻7号, pp.551-553, 2012
- 3) 中村, 岡野, 野中, 長尾: 軌道変位抑制に関する函体推進模型実験(その2), 第69回土木学会年次講演会講演概要集(CD-ROM), III-228, 2014

(2015.8.7 受付)

TRACK DISPLACEMENT FOR THE BOX CULVERT PROPULSION METHOD FOR CONSTRUCTING TUNNELS TO CROSS UNDER RAILWAYS

Tomoya NAKAMURA, Noriyuki OKANO, Yota TOGASHI, Masahiro KONDOU and Yuta KANAI

For constructing underpass tunnels by the box culvert propulsion method, firstly, square steel pipes are inserted around outer edges of box culvert to total length of crossing track in order to decrease track irregularity. Secondly, square steel pipes are pushed out to arrival vertical pit and replaced with box culvert propelled by jacks with excavating either embankments or natural grounds the inside of culvert. In this study, several experiments modeled as box culvert propulsion and field measurements are conducted. The results of these studies demonstrated that the mechanical behaviors of the box culvert are well simulated and the method by which the track irregularity are decreased in the construction phases are proposed by the authors.