半断面先進によるURT幅広エレメント推進時の 地盤変位抑制効果に関する解析的検討

深田 隆弘1·長山 喜則2

¹正会員 西日本旅客鉄道株式会社 大阪工事事務所 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島5-4-20) E-mail:takahiro-fukata@westjr.co.jp

²フェロー 西日本旅客鉄道株式会社 構造技術室(〒532-0011大阪市淀川区西中島5-4-20) E-mail:yoshinori-nagayama@westjr.co.jp

URT工法における幅広エレメントの使用は、掘削・排土などの作業性に優れ工期短縮につながるととも に、止水上の弱点となる継手数を減少させることができる.しかし幅広エレメントの全断面推進は、開放 断面が大きくなり、切羽の崩壊や地盤の変状などが発生するリスクが大きくなる.そこで幅広エレメント に対応した刃口の半断面を先行させて推進する方法、「半断面先進工法」を提案する.この半断面先進工 法に対して推進ステップを考慮した3次元弾塑性有限要素法を適用し、基本的な地盤モデルにおける提案 工法の地盤鉛直変位の抑制効果を解析的に検証した.また陥没事象が想定されるような局所的にゆるい地 盤領域が存在する地盤モデルにおいても提案工法が有効であることを定量的に確認した.

Key Words : URT method, wide element, elasto-plastic 3-D FEM, ground displacement restraint

1. はじめに

都市機能の高度化に伴い,鉄道と道路,河川,水路な どとの交差が計画される機会が多くなる.そして鉄道と の交差工事においては,鉄道の安全性,定時性に影響し ないように非開削工法が選択されることが多くなってい る.これまで非開削工法は,現地の地質や施工の条件, 周辺環境に対応した様々な工法が開発され,今後のさら なる改良が期待されている¹²³³.

URT 工法 PC ボックス形式 %は、交差延長の長距離化、 断面の多様性、シンプルな施工設備などの点において優れた非開削工法のひとつである.この工法は、鋼製エレ メントを地盤中に推進し、エレメントを横断方向に PC 緊張することによってボックス形式に一体化する工法で ある(写真-1).

この工法を採用する時,鉄道運行への影響を極力少な くしたいという要請から,線路下でのエレメント推進作 業を短期間で行うことが求められる.このため,標準エ レメント(幅 1.0m)に代えて,幅広エレメント(幅 2.0m)の使用が望まれる.幅広エレメントは内部の施工 空間が大きく,掘削・排土などの作業性に優れ工期短縮 につながるとともに,URT工法の止水上の弱点ともな る継手数を減少させることができる.このようなメリッ トがある一方で,幅広エレメントの全断面推進は,開放 断面が大きくなることから切羽の崩壊リスクが大きくな るというデメリットも考えられる.

幅広エレメントのメリットを活かしつつ、切羽の崩壊 リスクを抑えることのできる工法として、幅広エレメン トに対応した刃口の半断面を先行させて推進する方法 (以下「半断面先進工法」という)を提案する.半断面 先進工法は、定性的には地盤の緩みを小さくすることが 推測されるものの、このような推進工法による周辺地盤 への影響を定量的に評価した事例は少ない.

そこで本研究では、半断面先進工法による変位抑制の 効果を定量的に評価するために、基本的な地盤モデルと 陥没事象が想定されるような局所的にゆるい領域が存在 する地盤モデルを対象として、推進ステップを考慮した 3次元弾塑性有限要素法により解析的検討を行う。



写真-1 URT工法PCボックス形式



図-1 半断面先進工法のイメージ

なお、半断面先進工法を実現するための刃口の機械構 造等の詳細は未定であるが、図-1に示すとおり、幅広エ レメント先端に取り付けた刃口の半断面が先進量分だけ 突出した構造となっている。刃口の後方に接続されてい るエレメントは、一般的に使用されている幅広エレメン ト(幅2.0m)である。

2. 半断面先進工法の変位抑制効果

(1) 3次元弾塑性有限要素解析によるモデル化⁵⁾ (基本検討モデル)

標準エレメント(幅 1.0m)および幅広エレメント (幅 2.0m)の全断面推進,さらに半断面先進による推 進工程を3次元弾塑性有限要素解析により表現するため に,次のようにモデル化を行った.半断面先進工法は, 本来であれば半断面が突出した刃口がエレメントに先行 して推進していくものであるが,解析上は分割された地 盤領域が段階的に掘削とエレメント設置を繰り返してい くモデルとして考えている.

a) 地盤とエレメント

掘削する地盤は通常の鉄道盛土を想定し、物性値は標 準的な盛土の設計用値。として表-1のとおりとし、モー ル・クーロンの破壊基準による弾塑性材料とする.

地盤領域の大きさは 10m×10m×10m とし,解析上の境 界条件は,側面はそれぞれ法線方向のみ固定,底面は 3 方向(x,y,z 方向)すべて固定とする.メッシュの分割は, 地盤の外縁は 1.0m, エレメントは 0.5m ピッチとした (図-2).エレメントは,鋼製の板要素として扱い,そ

の物性値は**表-1**のとおりである.

以下,本論文ではこのモデルを「基本検討モデル」という.この基本検討モデルにおいて,まず地盤の自重による初期応力解析を行い,その後に推進ステップに相応した掘削相当外力を作用させる.掘削相当外力は,エレメントの設置前に50%,そして設置後に残りの50%を作用させ,この地盤掘削とエレメント設置を所要のステッ

	1X ¹	
地	盤	弾塑性材料,N値5相当 単位体積重量:16kN/m ³ ポアソン比:0.3 変形係数:3500kN/m ² 粘着力:3kN/m ² 内部摩擦角:30°
エレ;	メント	鋼製,板厚:19mm 単位体積重量:77 kN/m ³ 弾性係数:2×10°kN/m ²

素_1 批般とエレメントの物性値



図-2 地盤とエレメントのメッシュ

_	[Y5断面	(6)	先進重	1.0m			0.5m
Ī	(5)	(5)	(5)	(6)	(5)	0.5m	(8)	(5)
5m	(4)	(4)	(4)	(5)	(4)	(5)	(4)	(4)
@ 10 =	(3)	(3)	(3)	(4)	(3)	(4)	(3)	(3)
<u>0.5m</u>	(2)	(2)	(2)	(3)	(2)	(3)	(2)	(2)
ļ	(1)	(1)	(1)	(2)	(1)	(1)	(1)	(1)
	<mark>↓^{1m}→</mark>	<u>← 2m</u>	<mark>∢ 2</mark> m	<u>¹</u> →	< <u>2</u>	m →	<mark>∢ 2</mark> n	n →
	ケース0	ケース1	ケー	ス2	ケー (先行エル	- ス3 ペト到達)	ケー (後続エレ)	-ス3 ジト到達)



プ数繰り返すことで推進過程をモデル化する.

なお、掘削相当外力をエレメント設置前後で 50% ずつ とした理由は次のとおりである. 通常エレメントの推進 では、切羽前方上部の地盤をゆるめないよう可能な限り 先掘りを行わないようにしているが、それでも地盤の変 形を完全にゼロに抑えることはできない. そこでこのよ うな推進過程、すなわち切羽の進行とエレメントの設置 を解析的に模擬するために、掘削相当外力を段階的に作 用させることが一般的に行われる. この時、エレメント の設置前後でどれぐらいの割合で掘削相当外力を作用さ せるのがよいか、解析をする上での課題となる. 現場計 測と解析結果等の照合から決定することも考えられるが、 一般的な値としては、30-50%程度に設定する事例が多 い?.

ここで本研究の目的は、実施工や実地盤を想定した影



								(変世里	単位:mm/		
エレメント	k. 71		ケース2				ケース3				
天端からの 距離 (m)	ッース1 幅広(1)	先進E 到達	後続E 到達	平均 (2)	変位の比率 (2)/(1)	先進E 到達	後続E 到達	平均 (3)	変位の比率 (3)/(1)		
3.0	1.9	0.8	0.9	0.9	45%	1.4	1.5	1.5	76%		
2.0	2.4	0.9	1.2	1.1	44%	1.6	1.8	1.7	71%		
1.5	2.7	1.1	1.4	1.3	46%	1.8	2.1	2.0	72%		
1.0	3.5	1.5	1.7	1.6	46%	2.1	2.5	2.3	66%		
0.5	4.1	1.6	2.1	1.9	45%	2.3	3.4	2.9	70%		

響予測ではなく、半断面先進工法によれば幅広エレメン トの全断面推進の場合に比べて、地盤の変形をどれぐら いに抑えることができるか、この抑制効果を解析的に検 証することである. したがって、ある程度顕著な地盤変 位を発現させることをねらって、エレメント設置前に掘 削相当外力を50%作用させることとした.

b) 解析ケース

図-3に、4つの解析ケースとそれぞれの推進ステップ (数字は掘削順序)を示す. 解析ケースとしては、ケー ス 0:標準エレメント、ケース 1:幅広エレメント、ケ ース 2:半断面先進(先進量 1.0m)), ケース 3:半断 面先進(先進量0.5m))の4ケース(図-3)とする.

c) 地盤変位の着目点

切羽が境界条件の影響を受けないように、地盤の側面 から5mに達する箇所を地盤変位の観察断面(以下「Y5 |断面| という(図-3))とする.この断面におけるエレ メント上部 0.5m, 1.0m, 1.5m, 2.0m, 3.0m の地盤鉛直変 位量(以下「変位量」という)について各ケースの比較 を行うこととする. なおケース 2,3 は半断面先進のパ

変位量 (mm) 図-10 エレメント上の変位量 ターンであるので、先行および後続のエレメントがそれ ぞれ Y5 断面に到達する時の変位量を求め、その平均値 によって評価することとした. これはケース1~3にお いて、推進完了時の全掘削相当外力を同一とするための

2.0

先行エレメント到達時と後続エレメント到達時の差

3.0

単位:m +0.000

-0.001

-0.002

-0.003

._0.004

-0.005

-ス0 ケース1

大

4.0

ス2(後) ケース3(先) ━−ケース3(後)

5.0

(2) 解析結果

措置である.

2.0

1.0

0.00.0

ケース2: 先行・後続の 平均変位量 1.1mm

1.0

基本検討モデルにおける各ケースの Y5 断面における 変位量のコンター図を図-4 から図-9 に示す. また各ケ ースの着目点での変位量を表-2 および図-10 にまとめて 示す. コンター図において, 変位量の大きい部分の形状 (赤色または黄色着色部)は、村山・松岡 89%が降下床 模型実験で捉えた降下床幅を1辺とする正三角形に外接 するアーチ形状とした1次領域に類似していることが分 かる.

次に標準エレメント (ケース 0) と幅広エレメント (ケース 1) の結果比較 (図-4 vs 5) から, それぞれの Y5 断面着目点での変位量に大きな差 (例えば 1.0m 点で 1.3mm と 3.5mm) がみられる.幅広エレメントの推進は 標準エレメントの場合に比べて,地盤を大きく緩めるこ ととなり,切羽の崩壊リスクが大きくなると考えられる.

また半断面先進(ケース 2, 先進量 1.0m)による変位 抑制の効果を,ケース 1の幅広エレメント全断面推進と 比較する(図-5 vs 6,7).例えば,ケース 2の先行およ び後続エレメント到達時の 1.0m 点の変位量は,それぞ れ 1.5mm, 1.7mm であり,いずれもケース 1の 3.5mm よ りも小さい.また後続エレメント到達時には先行エレメ ントはすでに 1m 前方に進んでいるので,切羽の開放断 面は半分となっている.よって半断面先進工法は,全断 面推進の場合よりもエレメント上部の地盤を緩めること なく,切羽崩壊のリスクを小さくすることができる.

さらにケース2とケース3の比較(図-6,7 vs 8,9)から、半断面先進工法の先進量1.0mと0.5mの違いについてみてみる。図-10から、ケース2の先行エレメント到達時と後続エレメント到達時の2.0m点の平均変位量が1.1mmであるのに対して、ケース3は、同1.7mmとなっている。先進量1.0mに比べ、先進量0.5mは先行掘削の影響をより多く受けることから、後続掘削時の変位量も大きくなる。しかしケース1の幅広エレメントと比較した場合、先進量0.5mでもかなりの変位抑制効果が見られる。

(3) 半断面先進工法の変位抑制効果

以上の基本検討モデルにおける解析ケースの検討から, 半断面先進によるエレメント推進は,全断面推進の場合 よりも,切羽近傍の地盤の鉛直変位量を小さくすること ができる.

具体的には表-2に示したとおり、ケース1とケース2 の比較から半断面の先進量 1.0mの場合では変位量が44 ~46%に抑えられ、ケース1とケース3の比較から先進 量が0.5mの場合では66~76%に抑えられる.

陥没事象が想定される局所的にゆるい地盤 領域が存在する場合の検討

(1) 陥没想定モデルと解析ケース

線路下非開削工事においては、掘削に伴う切羽の安定 化や止水等の目的で、薬液注入等の地盤改良を実施する ことが通例となっている.地盤改良を施工してもエレメ ント推進時に発生する地盤変状およびそれに伴う軌道変 状に対しては、エレメント推進を線路閉鎖工事で行い必 要な軌道整備をすることで対処している. ところが地中支障物の存在等により地盤改良が不均一になり、線路下に局所的にゆるい地盤領域が残存しているような場合、地表面の陥没事象の発生リスクが大きくなることが考えられる.したがってこのような場合に対しても、半断面先進工法の有効性について検討しておくことが必要となる.そこで2章の基本検討モデルよりも実際に近い地盤モデルとして、土被り 20m、上載荷重

(軌道荷重) 10kN/m²とし, 掘削相当外力は基本検討時 と同様に, エレメント設置前 50%, 設置後 50%を作用さ せる地盤モデルを考える.

ここで、局所的にゆるい地盤を想定した地盤モデルを 「陥没想定モデル」ということとする. 陥没想定モデル では、エレメント底版以深は N 値 5 相当、エレメント 推進箇所以浅は N 値 2 相当とし、部分的に N 値 0 相当 の非常にゆるい地盤領域が存在するとした. なお、解析 に用いた地盤の物性値は、**表-3**のとおりである.

図-11 から図-13 に, 陥没を想定した 3 つの解析ケースの各地盤モデル示す. 図中, 黄色着色部分の範囲が N

表う 陥没想定モアルの地盤の物性

	N值5相当 地 盤	N値2相当 地 盤	N値0相当 地 盤
単位体積重量 (kN/m³)	16	16	16
ポアソン比	0.3	0.3	0.3
変形係数 (kN/m²)	3 500	1400	350
粘着力 (kN/m²)	3	0.01	0.0001
内部摩擦角 (°)	30	28	20







図-12 ケース 12



図-13 ケース13



表-4 陥没想定モデルの解析結果

(5m 推進時の最大地表面沈下量)

			(地表面	面沈下量	単位:mm)
	幅広E	7	沈下量の		
	全断面 (1)	先進E 到達	後続E 到達	平均 (2)	比率 (2)/(1)
ケース11	2.4	1.1	1.2	1.15	48%
ケース12	1.9	0.9	0.9	0.9	47%
ケース13	2.0	0.9	0.9	0.9	45%

値 0 相当の地盤で、その大きさは、ケース 11:2.0m× 6.0m×2.0m、ケース 12:2.0m×6.0m×1.0m、ケース 13: 2.0m×3.0m×1.0m である。各ケースのエレメントの先進 量は 0.5m とし、推進パターンは図-14 に示すとおり、そ れぞれのケースに対して全断面推進と半断面先進を計算 する.

陥没想定モデルにおける半断面先進工法の評価は,3 次元弾塑性有限要素解析の結果得られる地表面沈下量で 行うこととする.なお推進完了時の地表面沈下量は,基 本検討時と同様に,全掘削相当外力を同一とするために, 先行エレメント到達時と後続エレメント到達時のそれぞ れの地表面沈下量の平均値としている.

(2) 解析結果

陥没想定モデルの解析結果として,エレメント5.0m 推進時の最大地表面沈下量を表-4に示す.この結果から, 陥没想定モデルにおいても半断面先進工法は全断面推進 の場合に比べて,地表面沈下量が45~48%に抑えられて いることが認められる.

次に,ケース 13の解析結果について,図-15 に全断 面推進に伴う地表面沈下量の変化,そして図-16 に半断 面先進に伴う地表面沈下量の変化の様子を例示する.

ケース 13(全断面推進)では、エレメントの推進延 長が 2.5m となった時、すなわち切羽が N値 0 相当地盤 の端部から 1.5m に達した時点から地表面に 0.8mm の沈 下が発現している.また切羽前方の沈下影響範囲が N 値 0 相当地盤のところにまですでに達していることも分 かる.その後エレメントの推進とともに切羽前方の沈下 影響範囲が大きくなり、推進延長 5.0m では最大 2.0mm の地表面沈下量が発現している.

一方ケース 13(半断面先進)では、先行エレメントの推進延長が 2.5m の時には、切羽前方の沈下影響範囲は N 値 0 相当地盤に達していない.またその後、切羽前方の沈下影響範囲は増大していくが、先行および後続のエレメントの推進延長がそれぞれ 5.0m となる時点における最大地表面沈下量は 0.9mm で、全断面推進の場合の 45%である(表-4 ケース 13).

このように切羽前方上部に局所的にゆるい地盤が存在 するような地盤条件においても、半断面先進によるエレ メントの推進方法は、地表面沈下を抑えることができる とともに、切羽前方の沈下影響範囲、すなわち地盤のゆ るみ領域を小さく抑えることができる.

4. 結論

本論文では、基本的な地盤モデル(基本検討モデル) および陥没事象が想定される局所的に地盤領域が存在す る地盤モデル(陥没想定モデル)に対して、3次元弾塑 性有限要素法を適用し、半断面先進による URT 幅広エ レメント推進時の地盤変位抑制効果に関する解析的検討 を行った.その結果、得られた知見を以下にまとめて示 す.

1) URT 工法における幅広エレメントの使用は、エレメント内作業空間の拡大による掘削・排土作業の効率化、これによる工期短縮、止水上の弱点となる継手数の減少など、多くのメリットがある。一方、開放断面が大きくなることにより、軌道および地盤の変状、切羽崩壊のリスクが大きくなる。幅広エレメントのメリットを活かしつつ、地盤の変位を抑制する



エレメント推進 2.5m

エレメント推進 5.0m

図-15 全断面推進に伴う地表面沈下量の変化(ケース13(全断面推進)の例)



先行エレメント推進 2.5m

先行エレメント推進 5.0m

後続エレメント推進 5.0m

図-16 半断面先進に伴う地表面沈下量の変化(ケース13(半断面先進)の例)

推進方法として、半断面先進工法を提案した.

- 2) 半断面先進工法は、幅広エレメントを全断面掘削する場合に比べて地盤の鉛直変位量を抑制する効果があることを、基本検討モデルの3次元弾塑性有限要素解析により検証した。その結果、半断面の先進量を1.0mとした場合では、全断面推進とした場合と比較して鉛直変位量を約45%程度に、そして先進量を0.5mとした場合では、約70%程度に抑制できることが分かった。
- 3) エレメント前方上部に局所的にゆるい地盤領域が存

在し,推進に伴い地表面の陥没が想定される陥没想 定モデルでの解析結果においても,半断面先進工法 (先進量 0.5m)は,全断面推進とした場合と比較し て地表面沈下量を約 45%程度に抑制できることが分 かった. さらに推進に伴う切羽前方のゆるみ領域の 範囲を小さくすることもできることから,陥没事象 に対しても有効な推進方法であることが示唆される.

参考文献

1) 小山幸則:非開削アンダーパス技術の発展の経緯と今後

の課題,基礎工, p.1, 2015.2

- 2) 長山喜則:アンダーパス工事の変遷と分類そして課題, 基礎工, pp.2-9, 2015.2
- 佐藤徹,島田英樹,笹岡孝司,松井紀久男:小断面並列 施工地下空間築造に利用される推進技術の進化と今後の 動向,月刊推進技術, Vol25, No.12, pp.3-9, 2011.12
- URT協会編: URT工法PCボックス形式設計の手引き, 2009.7
- 5) 正直貴彦,深田隆弘,長山喜則:半断面先進によるURT 幅広エレメント推進時の変位抑制効果の検討,土木学会 第70回年次学術講演会(岡山),2015.9

- 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説土 構造物, p.57, 2013.5
- 1) 土木学会:トンネルライブラリー第16号,山岳トンネル における模型実験と数値解析の実務, pp.161-162, 2006.2
- 村山朔郎,松岡元:粒状土地盤の局部沈下現象について、 土木学会論文報告集,第172号,pp.31-41,1969.12
- 村山朔郎,松岡元:砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究,土木学会論文報告集,第187号, pp.95-108, 1971.3

(2015.8.7 受付)

NUMERICAL ANALYSIS FOR GROUND DISPLACEMENT RESTRAINT BY ADVANCING A HALF-SECTION OF URT WIDE ELEMENT

Takahiro FUKATA and Yoshinori NAGAYAMA

Use of wide elements in the URT method improves the work of excavation and soil removal, and reduce the number of coupling joints which require sophisticated waterproofing. But full face advancing of a wide element has high risk of collapse at the cutting face or displacement of ground, because of large and free cutting face. In contrast, the authors propose a method of advancing a half-section of URT wide element. This proposed method is superior from a viewpoint of ground displacement restraint by numerical analysis of elasto-plastic 3-D FEM. Furthermore, the proposed method is effective to localized loosen ground.