

地盤切削 J E S 工法の開発 DEVELOPMENT OF A NEW CONSTRUCTION METHOD FOR A STRUCTURE CROSSING UNDERNEATH A RAILWAY

中村 征史¹・桑原 清¹・長尾 達児²・中井 寛²
Seishi NAKAMURA・Kiyoshi KUWABARA・Tatsuji NAGAO・Hiroshi NAKAI

Increase of element width is under consideration as a way to improve ease and efficiency of work of the JES method, a technique for constructing an underpass. However, at present, it is difficult to perform excavation without any overbreak along the rectangular external circumference of the element. Especially in cases where a gravel layer or boulders exist, the ground outside the element is loosened after gravel and boulders have been entirely removed. The smaller the overburden, the higher the risk of subsidence of the rail track or road surface.

The development discussed in this paper is aimed at performing excavation without overbreak along the external circumference of the element. The new technique uses a ground cutting wire that has been successfully employed in the COMPASS method, to construct a crossing structure without affecting the railway track or the road above the structure.

This paper reports the cutting test using the edge equipped with a cutting machine.

Key Words :JES method,wire saw, construction of under the railroad,24 hours construction

1. はじめに

アンダーパス工法の 1 つである J E S 工法の施工性向上の一環としてエレメント幅を従来の約 2 倍の 2,500mm にする大型化が検討されている（図-1 参照）。しかし現況は，矩形のエレメント外周面に沿って余掘りなしに掘削することは困難である。特に，砂礫層や転石などが存在する場合は，礫や転石全体を撤去するために，エレメント外側の地山に緩みが発生して，土被りが少ないほど軌道面や道路面に沈下等の影響を及ぼすことが懸念され，これをいかに抑えるかが課題である。また，支障物に遭遇した場合に機械掘削では検知が不十分で支障物を押し込み，軌道変状リスクが増加する。支障物撤去には人力掘削に切り替えて対応するが，支障物撤去後に空洞が生じることがある。このような状況から線路下横断工法は，軌道への影響が懸念されるため，夜間の線路閉鎖時間に施工するなどの制限を受けることが多い。

本開発は地盤切削ワイヤーを用いてエレメント上面に沿って余掘りなしに掘削を行い，上部の軌道や道路に影響を与えることなく 24 時間施工で横断構造物を構築することを目的としている。本稿では工法の開発と施工性確認試験の実施とその結果について報告するものである。

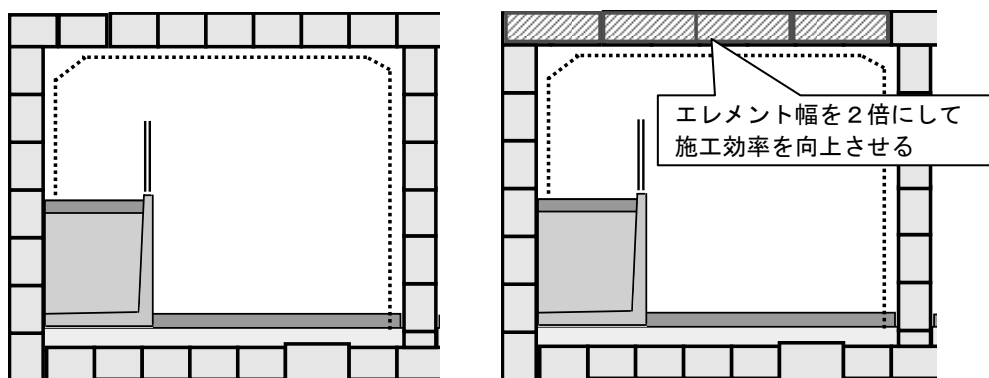


図-1 従来幅エレメント（左）と大型化エレメント（右）

キーワード：JES工法，ワイヤーソー，線路下施工，24 時間施工

¹正会員 JR 東日本 東京工事事務所 工事管理室 地下トンネル構造グループ

²正会員 鉄建建設株式会社 エンジニアリング本部 土木技術部 地下構造グループ

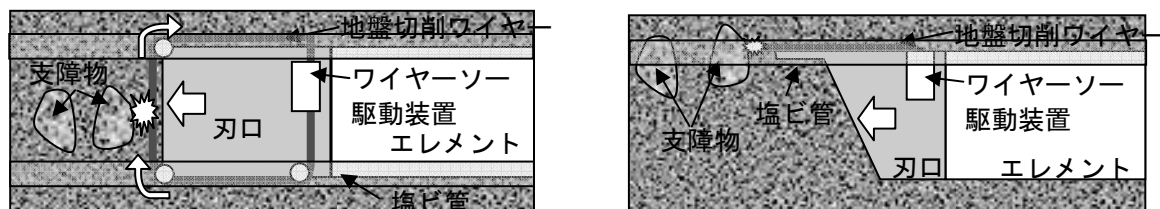


図-2 工法概要平面図（左）と縦断面図（右）

2. 工法概要

本工法は線路下横断工法として多数の実績があるH E P & J E S工法をベースに、ワイヤーソーを組み込んだ工法である。掘削を行う刃口先端の頂面前方に地盤切削ワイヤー（以後切削ワイヤー）を設置して地盤（支障物も含む）を切削する。その切削された地盤に刃口を挿入することにより、軌道変状を抑止しながらエレメントを貫入させる工法である（図-2 参照）。

ワイヤーソーは一般的に散水しながら施工するが、この場合、水によって地盤切削部の緩みが大きくなり、軌道への影響が大きくなることが懸念されたために、散水なしに切削が可能な無水タイプ切削ワイヤーを用いることとした。また、切削ワイヤーの駆動装置を小型化して地盤切削装置全体をエレメント先端の刃口内で完結させることによって、全体構造の簡素化と切削ワイヤー破断時の交換・復旧作業も容易にできるように配慮した。

切削ワイヤーを取り回すためのプーリーは刃口に固定するが、プーリーを土中に挿入しながらでは施工ができないので、あらかじめ水平ボーリングで塩ビ管（V P 300）を敷設しておき、プーリーは塩ビ管内部を走行するようにした。

3. 無水タイプ切削ワイヤー性能確認試験

(1) 試験概要

無水タイプの切削ワイヤーによる地盤と支障物の切削が可能であることを確認するために、流動化処理土内に支障物として、枕木・コンクリート塊・玉石の3種類を埋め込んだ模擬地盤を作成し、切削した（図-3、写真-1 参照）。また、実施工では塩ビ管も切削するので、模擬地盤の横に塩ビ管を配置して一緒に切削した。なお、プーリーや切削ワイヤー駆動装置は従来品を使用し、この段階では小型化や塩ビ管内部走行の確認は実施していない。

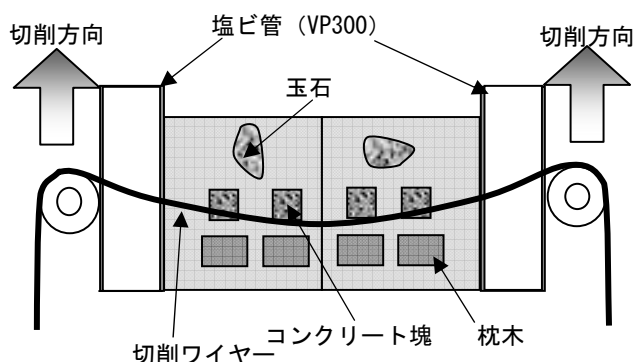


図-3 切削ワイヤー性能確認試験概要図



写真-1 切削ワイヤー性能確認試験実施状況

表-1 平均切削速度

切削対象	平均速度	切削効率
支障物なし	13.5 mm/分	100%
枕 木	5.6 mm/分	41%
コンクリート塊	13.3 mm/分	99%
玉 石	7.3 mm/分	54%

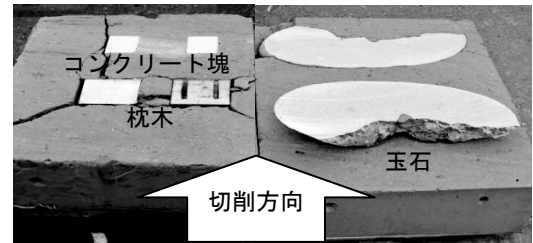


写真-2 支障物切断状況

(2) 試験結果

性能確認試験の結果、無水タイプの切削ワイヤーでの地盤と支障物の切削は、表-1 に示すように速度の差はあるが、可能である事が確認できた。また、写真-2 に示すように切削ラインは直線であり、散水タイプの切削ワイヤーで生じる玉石の縁部を切削しようとする際に散水された水によってやわらかい側に逃げて直線性を乱す現象が見られない事が確認できた。

以上により、無水タイプの切削ワイヤーは本開発に使用できると判断した。

4. 地盤切削装置の開発

(1) 刃口の形状

エレメント先端部に配置する刃口では、地山の掘削を行いながらエレメントのけん引を行う。その際に掘削が先行すると切羽前方が沈下し、逆にけん引が先行すれば地山を押し上げて地表面が隆起することとなる。これらを回避するために刃口の形状を検討し、図-4 の刃口形状にした。それぞれの対応策を以下に示す。

a) 隆起対策

支障物を含めた地盤を切削ワイヤーが切削した直後に刃口上面のルーフをワイヤーが切削した空洞に挿入することによって刃口上部の土や支障物を押し上げることなくエレメントのけん引が可能である。

b) 沈下対策

切羽前方は、掘削時に刃口前面を開放させた際に、円弧すべりによる刃口内部への地山の流入が想定される。そこで、刃口上部のルーフが常に円弧すべりライン前方の地山に貫入させた状態で、掘削をすることにより、円弧すべりを抑制することができる。

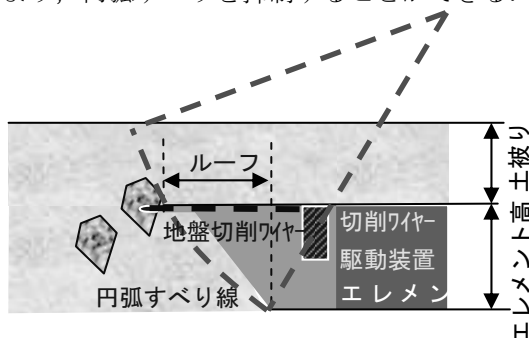


図-4 刃口形状概要図

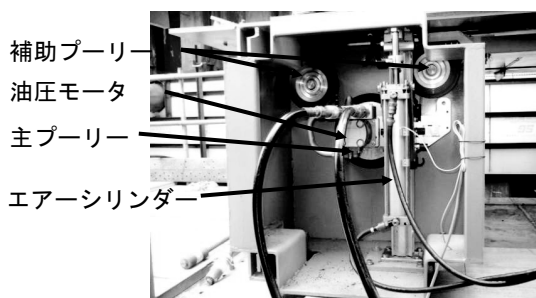


写真-3 切削ワイヤー駆動装置

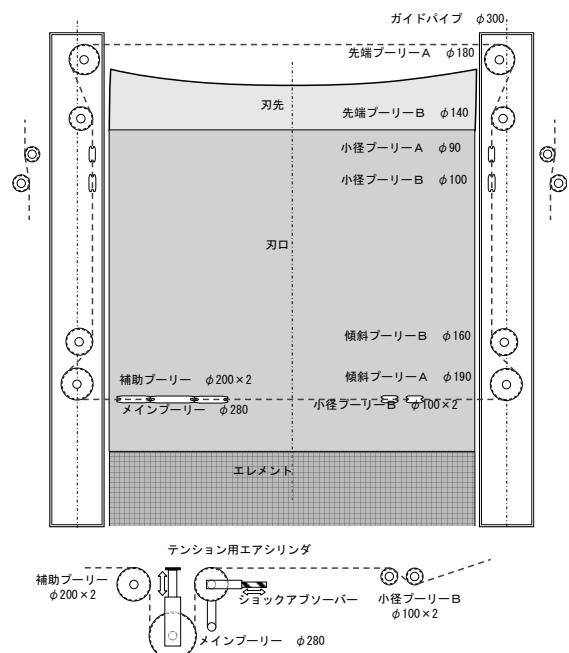


図-5 地盤切削装置概要平面図

(2) 切削ワイヤー装置の小型化

従来の切削ワイヤー装置では刃口内部には入らないため、新たな装置の開発を行った。開発は切削ワイヤーの駆動装置である油圧モータに着目し、刃口内部に装着可能な油圧モータを配置した。次に切削時のワイヤーのたわみや、切断復旧による切削ワイヤー全長の変化な吸収させるために、エアシリンダーを使用して駆動装置を刃口内部で上下させる機構を付加して切削ワイヤーにかかるテンションを均等に保つことができるようにした。

切削ワイヤーを刃口上面前方まで取り回すプーリーは走行する塩ビ管内部に納まりなおかつ切削ワイヤーへの曲げによる負担を減らすために、できるだけ個数は少なく、プーリー径は大きくなるように配置した。また、切削ワイヤー破断時の復旧性を考慮して、刃口内部から先端までメッセンジャーなしに切削ワイヤーが挿入できるようガイドも設置した。

以上により切削ワイヤー装置すべてが刃口内部で完結するものとなった（図-5、写真-3 参照）。

4. 地盤切削装置性能確認試験

地盤切削装置の性能を確認するために、実物大の模擬エレメントを使用して、基準エレメント、一般部エレメントを各 20m ずつけん引掘進し、切削性能および施工性を確認した。

(1) 試験概要

エレメント掘進状況ならびに地質および混入物の相違による地盤切削への影響を確認するために、図-6 に示すように発進～到達立坑間に支障物としてコンクリートガラ、玉石、碎石を混入した砂質土層や粘性土層（支障物なし）がある模擬路盤を作成した。表-2 に確認項目と確認事項を示す。これらの確認項目に対する計測項目を表-3 に示す。

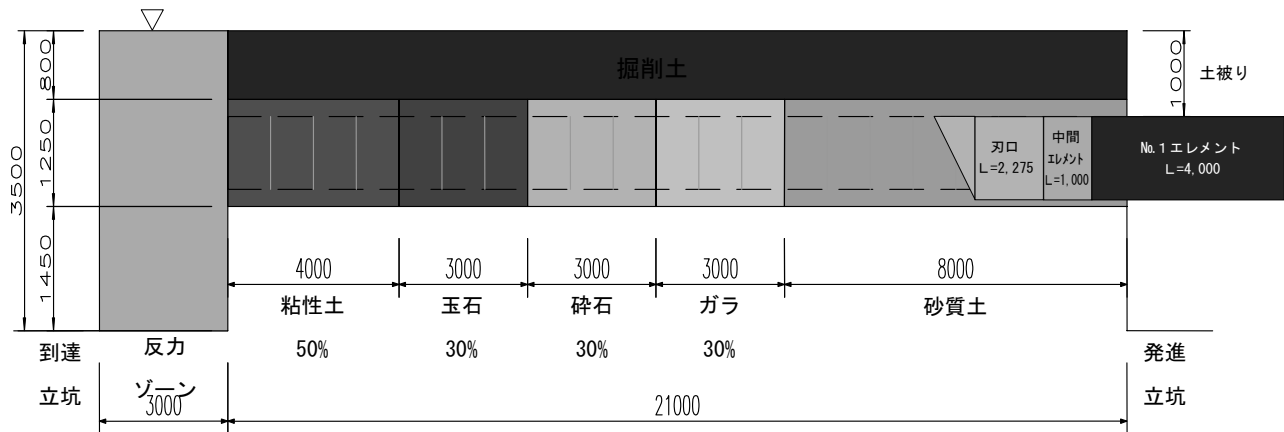


図-6 性能確認試験模擬地盤縦断面図

表-2 性能確認試験確認項目

確認項目	確認方法	確認事項
ワイヤーの切断抵抗	主プーリートルク	刃口内部に設置可能な主プーリーにより、地盤・支障物切削に十分なトルクを確保できるか。
ワイヤーソーの基本データ	主プーリー油圧、ワイヤー速度	主プーリー（油圧の場合）の張力、ワイヤーの回転速度を計測する。
掘進時の基本データ	けん引用ジャッキ圧力、ストローク、時間、掘進精度	けん引力、移動距離、時間、ピッチング、ローリングを測定する。
ワイヤーの耐久性（耐摩耗性）	ワイヤー径計測	地盤切削時のワイヤーの損耗率を計測。
地表面変位	変位計による自動計測	地表面の変位を計測する。
作業環境	切削装置運転中の騒音がどの程度かを確認する。	エレメント内部の騒音を測定する。

表-3 性能確認試験計測項目

確認項目	計測項目	計測方法	時期
基本データ	①けん引力	中央操作盤	掘進中
	②移動距離・速度	ストローク計で計測	掘進中
	③作業状況	CCDカメラによる確認	常時
地表面変位	④地表面変位計測（3測線×8点＝24点）	変位計による計測	随時
切削抵抗	⑤主プーリー油圧	圧力センサーで計測	機能・動作確認時
	⑥テンション機構の上下位置	ビデオカメラによる確認	掘進中
施工精度	⑦エレメント位置測量	レベル・トランシット測量	掘進中・後
作業環境	⑧騒音	騒音計	発進時、到達時

(2) 試験手順

試験手順を図-7 に示す。手順にしたがって、H E P & J E S 工法の手順で、発進立坑に設置した刃口およびエレメントを到達立坑のけん引ジャッキでけん引しながら、基準エレメント（延長 20 m）と一般部エレメント（延長 20m）のけん引を行った。掘削は人力掘削で行い、掘削・けん引完了後に上部の土砂を掘削して、ガイドパイプ切削状況、プーリー損耗状況、切削ワイヤーの摩耗状況、刃口の状態（変形、曲がり等）を確認した。

(3) 試験結果

a) 掘削方法と地表面変位

基準エレメント掘進時は図-8 上側に示すように刃口上部ルーフ先端まで掘削する方法で行ったところ、後方沈下が生じた。そのため、一般部では図-8 下側に示すように切削ラインを刃口上部ルーフ先端より 200mm後方の位置に修正した。また、基準エレメント掘進時に地表面がエレメントけん引方向に水平移動する現象も生じたため、一般部では刃口およびエレメントの上面摩擦の低減対策として、写真-4 に示すように、エレメントの上面にフリクションカットシートを装着した。

けん引掘進時に確認された事項について以下に記述し、地表面変位の結果を図-9 に示す。

- ・刃口先端部付近で最大+2.1 mmまで隆起を抑制できた。
- ・フリクションカットシートの効果により、地表面に与える影響を抑制できることが確認できた。
- ・玉石区間においても、刃口が通過した後で最大-2.7 mm程度と沈下が抑制できた。

b) 掘進管理

掘進管理は、切削ワイヤー駆動装置の主プーリーの油圧値をワイヤーにかかる負荷量として、



写真-4 フリクションカットシート

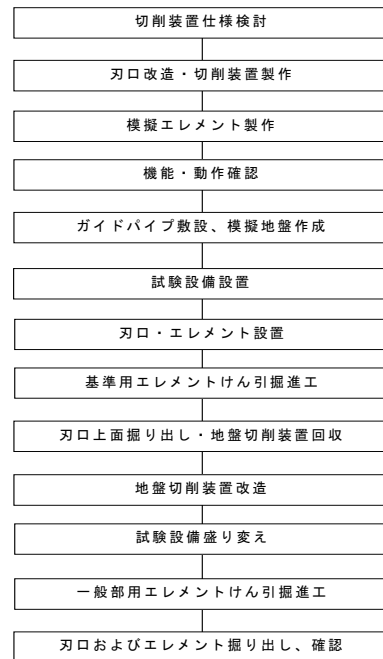


図-7 性能確認試験手順

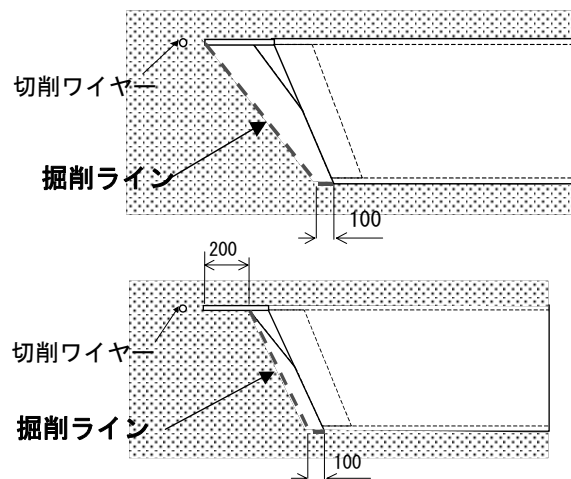


図-8 掘削位置の変更（上：変更前，下：変更後）

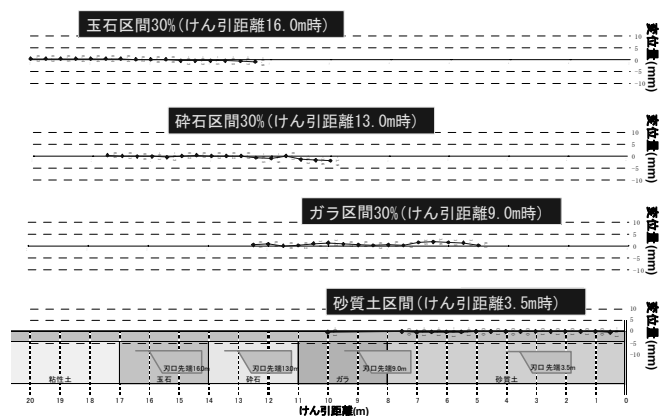


図-9 地表面変位経時変化図（一般部）

油圧の上限値（基準エレメントで 16MPa，一般部で 12MPa）を設定し，けん引中に上限値を超えたらけん引を停止し，油圧低下を待つということを繰り返す方法で行った．

その結果，ガラ，玉石等の支障物の有無にかかわらず，ワイヤー速度は，13～15m/secと一定で，主プーリー油圧は，基準エレメントけん引時では 9～18MPa，一般部エレメントけん引時では 7～17MPaの範囲に収めることができた．また，地盤条件の違いによる主プーリー油圧の変化については，図-10 に示すように特に相関は見られなかった．このことから，プーリー油圧監視によるけん引速度制御が可能であることが確認された．

c) けん引力とけん引距離

けん引力は，基準および一般部共，実施工での算定式により算出した想定けん引力を越えることはなかった．最大けん引力は，基準部施工時，けん引距離 12.5m 付近において 1,209kN であった．

実けん引力は，基準部では想定けん引力の約 70%，一般部では約 45% であった．これは，模擬地盤が埋土であったことと，特に一般部では刃口およびエレメント上部に設置したフリクションカットシートによる周面摩擦抵抗力の低減効果によるものと推定される．なお，地盤条件の違いによるけん引力の違いは見られなかった（図-11 参照）．

d) けん引速度とけん引距離

施工時のけん引速度と距離の関係を図-12 に示す．けん引速度は，平均速度 25 mm/min であった．地盤条件の違いによるけん引速度の影響については，ガラおよび玉石区間において支障物の切断・撤去時に時間を要したために速度が低下している．

e) 支障物の切断状況

本工法は，刃口上部前方のルーフ部分を地盤に貫入させながら掘進を行うため，ガラや礫などの支障物を地盤切削ワイヤーで切断した後，切断した支障物の下側は刃口内に回収し，上側はそのまま存置することにより，地盤の緩みを抑えることができた．本試験では，切断した玉石は切断状況を確認するために，上側も回収した（写真-5 参照）．切削ワイヤーは所定の性能を十分に発揮していることが確認できた．

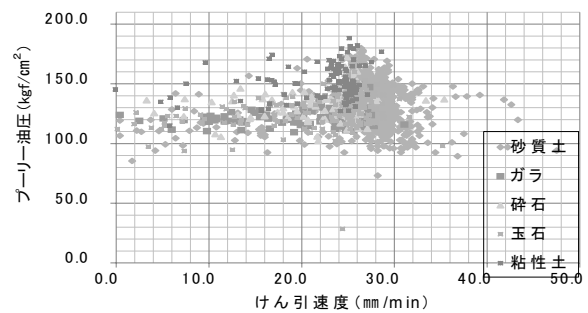


図-10 けん引速度とプーリー油圧

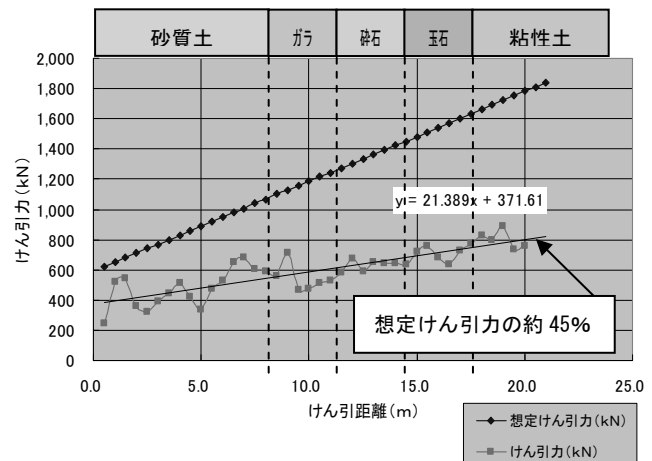


図-11 けん引力とけん引距離の関係（一般部）

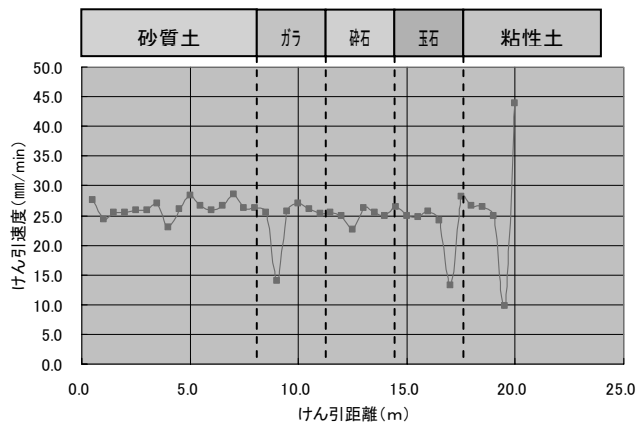


図-12 けん引速度とけん引距離の関係（一般部）



写真-5 支障物切断（左：玉石，右：砕石，ガラ）

f) 掘進精度

エレメントけん引停止中に、レベルおよびトランシットにより出来形を計測し、けん引方向を調整しながらけん引を行った。けん引完了後の最終の出来形を図-13、14に示す。図-13より左右方向は基準および一般部ともに発進直後からやや右側に曲がる傾向を示しており、基準エレメントが距離程 20mの地点で最大 29 mm、一般部エレメントが距離程 16mの地点で最大 17 mmの誤差を生じた。上下方向は、図-14に示すように全般的にやや左下がりの傾向が見られた。基準エレメントは4 m付近（砂質土区間）で最も低く-5~-15 mm下がっており、16m付近（玉石区間）で最も高く 21~24 mm上がった。一般部エレメントは、8 m付近（ガラ区間）で最も低く-24~-37 mm下がっており、0 m付近（発進側先端付近）で最も高く 11~12 mm上がった。

今回使用した 2,500 mm幅のエレメントは、従来のものに比べて左右の高さの違いが構造物全体の施工精度に与える影響が大きく、エレメント同士は継ぎ手で嵌合しているため基準エレメントの施工誤差を一般部で修正することが難しかった。そのため、基準エレメントの精度管理は厳密に行う必要がある。

g) ワイヤの耐久性

切削ワイヤーの摩耗量と使用時間を測定し、損耗率を算出した。図-15に測定位置、表-4に損耗率を示す。一般にワイヤーソー工法では、ワイヤーのダイヤモンドビーズ部分の径がスリーブ径（φ9.5 mm）より細くなったら寿命と言われている。

これより、切削ワイヤーの寿命は

$$(10.26 - 9.50) \div 11.93 \times 10^{-4} \div 637 \text{ 分} \\ = 10 \text{ 時間 } 37 \text{ 分}$$

と推定される。

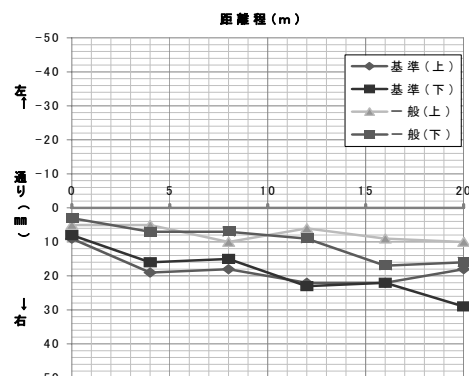


図-13 エレメント出来形（左右方向）

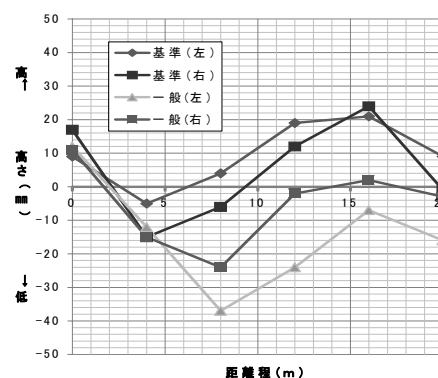


図-14 エレメント出来形（上下方向）

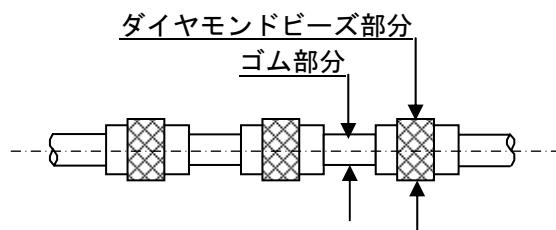


図-15 切削ワイヤー磨耗量測定位置

表-4 切削ワイヤーの損耗率

	使用箇所	使用前 (mm)	使用后 (mm)	摩耗量 (mm)	使用時間* (運転時間) (分)	損耗率 (mm/分)
ダイヤモンドビーズ部分	基準 (ジョイントNo.3-5)	10.20	9.55	0.65	875	11.93×10^{-4}
	一般部 (ジョイントNo.3-9)	10.32	8.96	1.36	800	
	平均	10.26	9.26	1.00	838	
ゴム部分	基準 (ジョイントNo.3-5)	8.55	8.30	0.25	875	4.77×10^{-4}
	一般部 (ジョイントNo.3-9)	8.43	7.88	0.55	800	
	平均	8.49	8.09	0.40	838	

5. まとめと今後の課題

(1) 性能確認試験のまとめ

今回実施した地盤切削装置性能確認試験で得られた知見を以下に示す。

a) 掘削方法と地表面変位

- ・刃口先端部付近で最大+2.1 mmまで隆起を抑制できた。
- ・摩擦低減シートの効果により、地表面に与える影響を抑制できることが確認できた。
- ・玉石区間においても、刃口が通過した後で最大－2.7 mm程度と沈下が抑制できた。

b) 掘進管理

- ・プーリー油圧を確認しながら、けん引速度を調整することで安定した施工が可能である

c) けん引力

- ・技術資料のけん引力算定式と比較して基準部で約 70%，一般部で約 45%と低い結果であった
- ・一般部ではフリクションカットシートが有効に作用したと考えられる

d) けん引速度とけん引距離

- ・平均速度（けん引時の移動速度）約 25 mm/分であった
- ・けん引距離にかかわらずけん引速度はおおむね一定であった

e) 支障物の切断状況

- ・本試験に用いた地盤切削装置により、地盤・支障物切削に十分なトルクを確保できる
- ・本切削装置により、支障物の混在する地盤およびガイドパイプ（塩ビ管）を無水で切削可能である

f) 掘進精度

- ・左右方向は、基準および一般部ともに発進直後からやや右側に曲がる傾向を示し、最終出来形は基準エレメントが距離程 20mの地点で最大 29 mm，一般部エレメントが距離程 16mの地点で最大 17 mmであった
- ・上下方向は、全般的にやや左下がりの傾向が見られた。基準エレメントは 4 m付近（砂質土区間）で最も低く－5～－15 mm下がっており、16m付近（玉石区間）で最も高く 21～24 mm上がった。一般部エレメントは、8 m付近（ガラ区間）で最も低く－24～－37 mm下がっており、0 m付近（発進側先端付近）で最も高く 11～12 mm上がった

g) ワイヤーの耐久性

- ・切削前後の切削ワイヤーの径を計測・記録した。損耗率はダイヤモンドビーズ部分で 11.93×10^{-4} mm/分，ゴム部分で 4.77×10^{-4} mm/分であった。この損耗率より算定した切削ワイヤーの寿命は約 637 分（10 時間 37 分）と推定された。

(2) 今後の課題

本試験で判明した課題を整理すると、以下のようになる。

- ・切削ワイヤーのジョイント部分の疲労によるワイヤー破断が生じたためワイヤーおよびジョイント部分の耐久性の検討
- ・ワイヤーおよびジョイント部に加わる負荷を低減するプーリーの配置検討
- ・機械掘削施工の検討

6. おわりに

営業線の直下の施工においては、線路閉鎖作業などの制約条件をなくし、作業時間を確保することが大きなコストダウンにつながる。制約条件を無くすための対応として現在ある主なものは、工事桁などの大掛かりな仮設工法によるものしかなくコストダウンにはつながりにくく、相反する条件の中で最適な工法を模索する状況にある。

本工法は施工条件の制約を受けないことを最終目標としており、切削ワイヤーによる有効性が確認できた。