

鋼製エレメントを用いた線路下横断トンネルの設計法

A DEGSIN OF NEW METHOD FOR UNDERPASS STRUCTURE OF RAILWAY LINE USED BY STEEL ELEMENTS

清水 満¹⁾・森山 智明¹⁾・木戸 素子¹⁾・桑原 清²⁾・森山 泰明²⁾

Mitsuru SHIMIZU, Tomoaki MORIYAMA, Motoko KIDO, Kiyoshi KUWABARA, Yasuaki MORIYAMA

In construction of underpass structure of railway, it is to be desired the methods applied to construction of a long structures which cross the railway track, and have little effect on the rail track and need short period of construction. We propose the new method of the steel elements lateral jointed method. In this method, the only things propelling under the track are small section steel elements, so there is little effect on the track when the elements are put in place. The structure form on completion is box spanning in the direction of the track, so there is no restriction on the distance of the structure extended across the track. And this method has the advantage for the works and period of construction due to joining the element joint by the grouting.

Key Words : tunnel, underpass structure, steel element, elements joint

1. はじめに

近年都市交通や上下水道等の整備に伴い鉄道営業線下を横断交差する構造物が計画・施工されるケースが増大している。このような線路下横断構造物の施工法は、大きく二分すると、開削工法と非開削工法に分けられる。一般的な開削工法は工事桁工法とも呼ばれ、軌道を仮基礎と工事桁により仮受けし、仮受け後に軌道下を掘削し躯体を構築する工法である。非開削工法は、軌道上からの掘削の代わりに軌道側方から掘削し躯体を構築する工法であり、分類方法によっては十数種類もの工法が存在する。

箱型の線路下横断構造物の構築にあたり最も望ましい工法は、線路横断距離に制限を受けない箱型ラーメン形式の構造物が施工可能な工法であり、施工期間中に列車運行に影響を与えず、しかも経済的で施工が容易な工法である。このような観点から、鋼製エレメントのエレメント軸直角方向の継手を考慮した JES(Jointed Element Structure)工法と呼ぶ新しい線路下横断トンネルの構築法を考案し、各種実験を実施して開発を行ってきた。本報告では、開発にあたっての設計上の検討事項について、施工頻度の高い箱型トンネルを中心に述べる。

2. エレメントの継手を考慮したトンネルの構築方法

列車走行に与える影響が小さくかつ線路横断距離に制限を受けない工法として、すでに「エレメント横締め工法」と呼ばれる工法を開発・実施されている。この工法は、プレキャストブロックまたは鋼製エレメントを地中に連結・挿入し、このエレメントを PC ケーブルで緊張・締結する(鋼製エレメントの場合は、コンクリート充填後) ことにより、エレメント軸直角方向の部材として利用するもので、これにより線路横断距離

1) 正会員 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部 構造技術センター

2) 正会員 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所 工事管理室

に制限を受けない構造物の構築が可能となった。しかしながらこの工法は、地中に挿入したエレメントを本体として用いるため、軌道に与える影響が少ないというメリットがある反面、狭隘な地中のエレメント内において PC ケーブルを緊張・締結するという複雑な作業を伴う工法である。このため、さらにより合理的な工法を開発する必要があり、エレメントの横締め代わりに、エレメント相互の継手を有効に利用した新しい線路下横断工法を開発した。

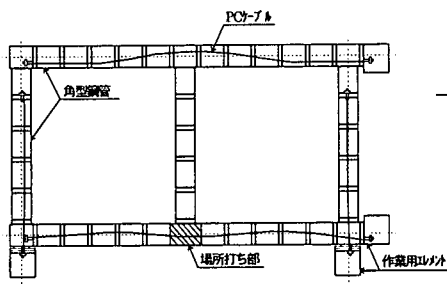


図-1 エレメント横締め工法

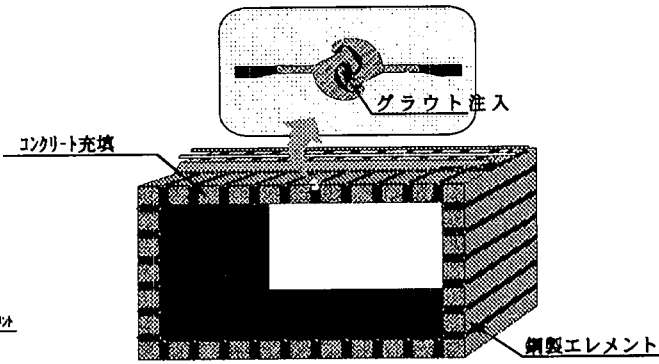


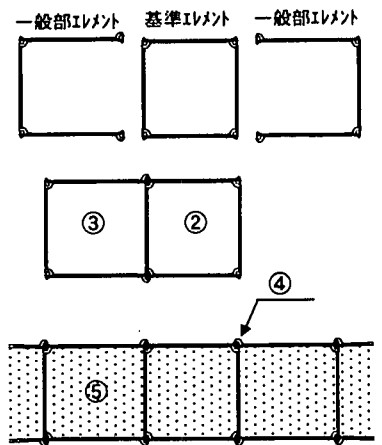
図-2 JES工法

2-1 工法の概要

本工法は、地中に挿入するエレメントの軸直角方向に力を伝達可能な継手を有するエレメントを用いることにより、箱型ラーメン形式または円形のトンネル構造物を容易に構築できることを特長としている。

本工法の施工手順は以下のとおりとなる。

- ① 横断箇所始終点に発進立坑、到達立坑を設置する。
- ② 構築ラインにあわせて最初のエレメント（基準エレメント）を挿入する。
- ③ 基準エレメントの継手をガイドに、隣接したエレメント（一般部エレメント）を挿入する。以降既挿入エレメントをガイドにエレメントを順次挿入し、構築の形状を形成する。
- ④ エレメント相互を連結している継手部にグラウト充填し、継手相互を固定することにより引張力を伝達できる構造とする。
- ⑤ 各鋼製エレメント内をコンクリートで充填し、構造体を完成させる。
- ⑥ 構築内部の土砂を掘削する。
- ⑦ トンネル内面及びトンネル出入口口の仕上げを行う。



2-2 構造部材および地盤反力のモデル化

(1) 構造モデル

本工法における構造部材は、多数のコンクリート充填エレメントが継手を介して部材に作用する応力を伝達する構造となる。このため、エレメント本体部と継手部では剛性が異なることから、トンネル構造のモデル化にあたっては継手の存在による部材の剛性低下を考慮する必要がある。

部材剛性の低下は、箱型構造のトンネルの場合、上床版においては列車の安定走行上変形量を規定値内に抑える必要があるが、側壁部や下床版部および円形トンネルにおいては地盤反力が有効に作用するため、部材設計上有利となる場合もある。設計における部材剛性の低下の評価方法には、

- ① エレメント本体部の剛性を基にこれを一様に低下させる方法
- ② 継手部を回転ばねで表現する方法

の2つが考えられるが、今回は回転ばねによる方法により部材の剛性の低下を表現することとした。

なお、本工法では、鋼製エレメントのフランジ部が部材に発生する引張力を負担し、エレメント内部に充填されたコンクリートが圧縮力を負担する構造となるため、構造部材は、単鉄筋RC構造として考えることができるものとした。

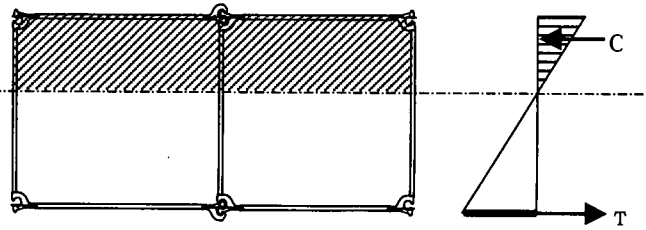


図-3 部材モデル

(2)地盤モデル

トンネル部材と地盤との相互作用を合理的に表現するため、地盤反力を地盤ばねで表現することとし、部材に対して法線方向の反力ばねと接線方向のせん断ばねを考慮することとした。

(3)荷重モデル

本工法は、エレメントを地中に挿入後にトンネル内部の掘削を行うという工法なため、従来の開削工法に比べ周辺地山を乱すおそれの少ない工法である。このため、特に側方土圧の分布形状、大きさについては従来の開削トンネルと比べ異なるものと考えられる。しかしながら、荷重については今後の施工時の計測結果により見直すこととし、当面は安全側に考え開削トンネルと同様な荷重を取扱うこととした。

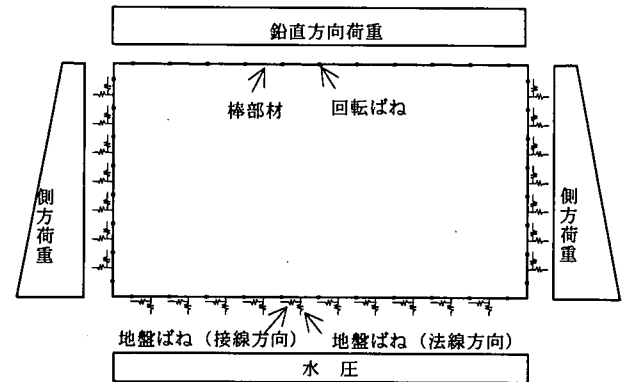


図-4 設計モデル図

2-3 継手部の設計

線路下を横断するトンネル構造物においては、一般的な地下構造物とは異なり、活荷重として作用する列車荷重の繰返し載荷の影響を考慮して設計することが重要である。この活荷重による疲労の影響は、箱型トンネルで土被りが小さく、死荷重に比べ活荷重が卓越する場合においては特に大きい。

図-5に高さ 1m、板厚 13mm のエレメントを用いた箱型トンネルに発生する応力度の一覧表を示す。この表は、軌道面までの土被りを 50cm として、1 径間の箱型トンネルを 3 ケース (スパン 6.0m、10.0m、15.0m)、スパン 12.0m×2 の 2 径間箱型トンネル 1 ケースについて計算を行ったものである。表に示すとおり、スパン 15m の 1 径間箱型トンネルにおいては 480 kgf/cm²、12.0m×2 の 2 径間箱型トンネルにおいて 580kgf/cm² の応力振幅の繰返し荷重が作用することになる。

本工法においては、部材に発生する引張力をエレメント間の継手により伝達する構造のため、この継

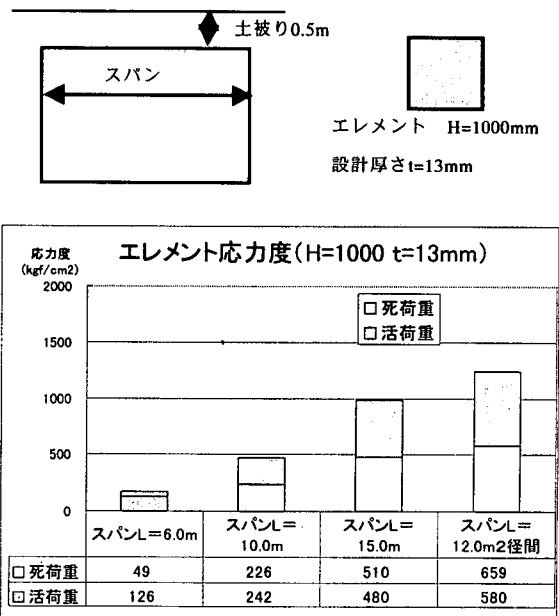


図-5 エレメント発生応力度一覧図

手が活荷重による疲労の影響に対し、十分な安全性を有するように設計する必要がある。このため、以下に述べる継手の検討を行い、本工法で用いるエレメントを開発した。

3. エレメント継手部の検討

エレメント間の継手構造の検討にあたっては、引張耐力および施工性を考慮して既存の直線鋼矢板の継手を基本にして、改良し本工法の継手構造を決定することにした。

エレメント継手の設計耐力は、使用状態では疲労強度、終局状態では引張強度で決まると考えられる。そこで、実施工にあわせ継手余裕部にグラウトを充填した直線鋼矢板の継手を用いた、静的引張試験および疲労試験を行った。

また、本工法においてはエレメントを地中に挿入する際には、エレメント相互の継手には適当な余裕が必要であり、エレメントの連結・挿入後ではこの余裕部をグラウトで充填することにより、構造物の変形を抑える必要がある。このため、地中に挿入した継手において確実にグラウトを充填するための、グラウト充填試験も実施した。以下に試験結果を示す。

3-1 エレメント継手の疲労試験

① 供試体

供試体は直線鋼矢板の継手（SM490 相当）を噛合わせ、目地部にグラウトを充填して一体化したものを使用した。グラウトはプレミックス製品として目標強度 300、500 kgf/cm² に設定したものを用了。

② 試験方法

疲労試験における載荷荷重条件は、板厚 12.7mm 換算で、最大荷重を 2000 kgf/cm² および 1500 kgf/cm² とし、応力振幅を変化させて試験を行った。荷重波形は、sin 波、荷重加振振動数は 8Hz、目標繰返し回数は 200 万回とし、部分片振り応力で行った。また、疲労載荷試験に先立ち、静的載荷を 5 回繰返し、初期の変位量の確認を行っている。

③ 試験結果

疲労試験による破壊形態は、継手部の目開きにより継手腕部分の内側が裂け、継手が拔出するような形で破壊に至った。充填したグラウトの状態は、若干のひびわれがみられたものの粉碎はされておらず、当初の形状を保持しており、グラウトの強度による差異は認められなかった。

図-6 に示す静的載荷時の荷重-変位曲線を見ると、14tf を超えた当りで変位が増大しており、この継手の弾性範囲は 1600 kgf/cm² 程度と考えられる。これは、荷重の載荷により継手勘合部の付根付近に曲げが発生したためであり、これにより継手直線部より先に継手勘合部が降伏したのと考えられる。

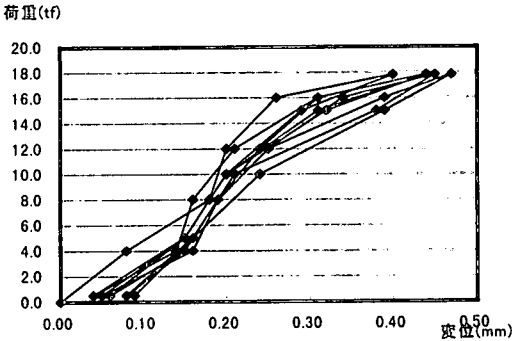


図-6 荷重-変位曲線

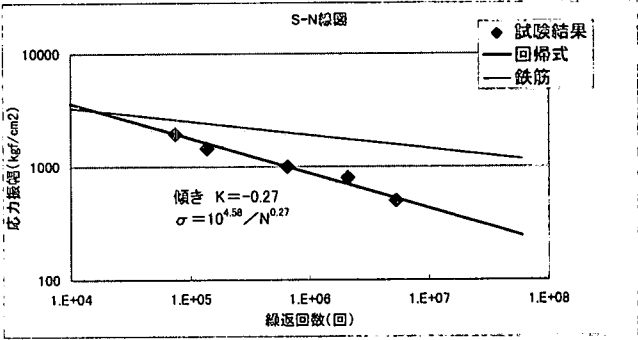


図-7 疲労試験結果

疲労試験結果より、応力振幅と繰返し回数との S-N 線図は図-7 のようになった。これより、直線鋼矢板の継手は、鉄筋と比較すると疲労強度の低下が顕著であり、このままの継手を用いたエレメントでは、応力振幅が 550 kgf/cm^2 程度の荷重条件で、許容応力度は 1500 kgf/cm^2 以下のトンネルで使用可能と考えられ、適用範囲としては、1m 高さのエレメントではスパン 15.0m 程度の 1 径間の構造物までとなる。なお、S-N 線図によってもグラウト強度による差異はみられないことから、グラウトによる疲労強度への影響は無視できうと考えられる。

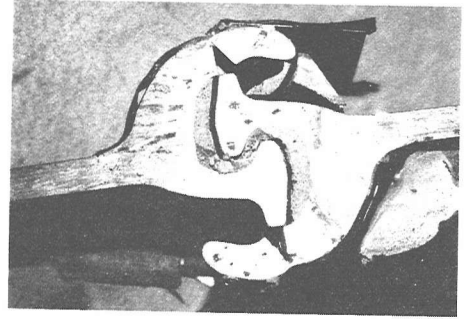


写真-1 継手の破壊状況

3-2 グラウト充填試験

本工法においては、エレメント継手部をグラウトの充填により固定し、構造物の変形を抑えることが重要である。このため、直線鋼矢板の継手を用いた各種グラウト注入試験を実施し、注入方法の検討を行った。

表-1 空中グラウト充填試験結果

	注入側圧力 (kgf/cm^2)	吐出側圧力 (kgf/cm^2)	圧力差 (kgf/cm^2)	流量 (L/min)
グラウト注入時	0.25	0.15	0.10	7.2
"	0.30	0.18	0.12	"
"	0.40	0.25	0.15	"
"	0.50	0.33	0.17	"
水送り時	0.15	0.13	0.02	"

①空中グラウト注入試験

噛み合わせた 10m 長さの直線鋼矢板の継手を用いて継手の片側より注入を行い、グラウトの注入圧力および注入速度を計測した。使用したグラウトは早強性無収縮モルタル（フィルコン R プレミックスタイプ）とし、 $W/C=50\%$ 、フロー値=14.71 秒（J ロート）のものを使用した。試験結果は表-1 に示すとおりであり、流量により注入側と吐出側の圧力差に差がでるものの、継手長 10m あたりの注入圧力損失はを 0.2 kgf/cm^2 程度であることが確認できた。

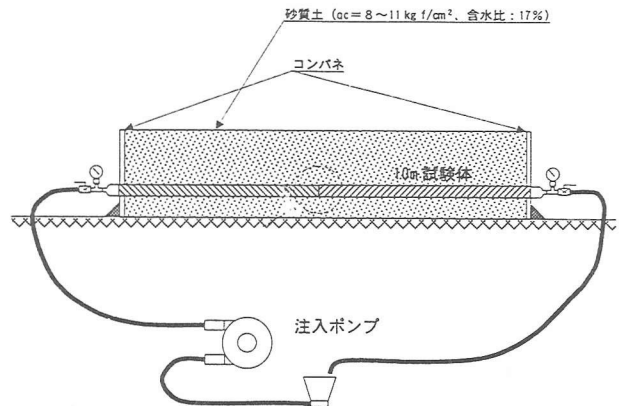


図-8 土中グラウト試験概要

②土中グラウト注入試験

噛み合わせ部に土砂浸入防止用の板ばねを付けた 10m 長さの直線鋼矢板を、土被り 50cm の砂質土で覆い、注入量、注入圧力を変化させて空中グラウト試験と同様な注入試験を行った。この試験の結果では、注入圧力を 0.78 kgf/cm^2 まで上げたところグラウト材が地表に漏出した。これより土被り 50cm の砂質土中 0.5 kgf/cm^2 程度まで加圧してもグラウトの漏出量を小さく抑えて注入が可能と考えられ、管内の圧力損失を考慮すると 1 回の注入可能距離は約 20m 程度として計画できることが確認できた。

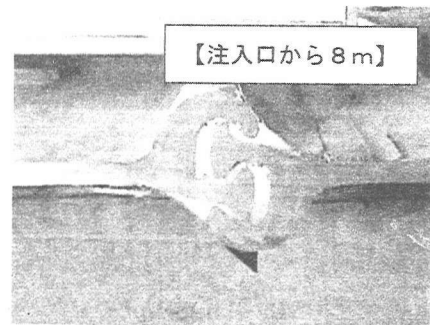


写真-2 グラウトの充填状況

また、グラウト固結後の充填状況を確認したところ、継手内部および板ばね内部までグラウトが充填されていることが確認でき、グラウトの充填により継手部は確実に固定できることが確認できた。

4. エレメントの構造

エレメント継手部の疲労試験の結果、継手余裕部に充填されたグラウトが繰返し荷重により構造体を与える影響は小さいことが確認されたが、既存の直線鋼矢板の継手を用いた鋼製エレメントでは箱型ラーメン形式トンネルの場合、径間長や土被りにより適用範囲に限界があることが確認された。そこで、一般的に計画される線路下横断トンネルに対し十分適用可能なエレメントの構造について検討を行った。

この結果、繰返し荷重に対し弱点となっている直線鋼矢板継手を改良した新しい継手を開発し、疲労に対して十分な耐力を有するエレメント構造とした。

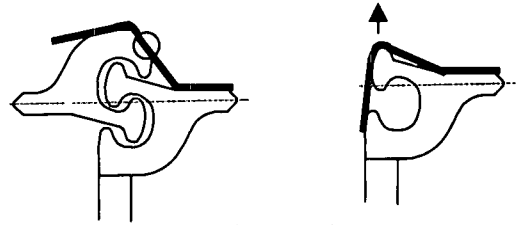


図-9 継手部詳細図

また、継手部の充填性を考慮して、エレメント挿入時に継手部を保護する板ばねを取付けることとし、より確実な継手部の充填が可能な構造とした。

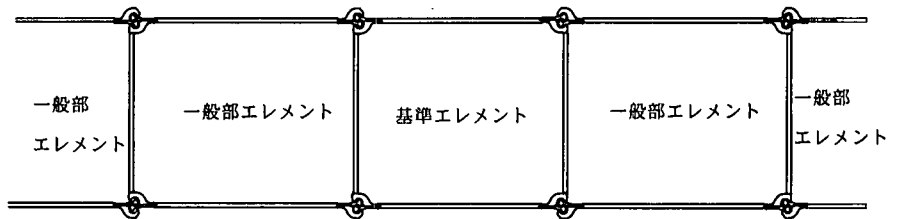


図-10 エレメント接続図

なお、本工法におけるエレメントの地中への挿入作業は、従来のエレメント推進工法ではなく、

エレメントけん引工法（HEP 工法：High Speed Pull）によることとした。これにより、一般部のエレメントの形状をコの字形することが可能となり、エレメント製作費の低減とともにエレメントの挿入作業が短期間に精度よくできることとなった。

5. おわりに

本報告では、施工事例が多く、曲げモーメントが卓越する設計条件の厳しい箱型ラーメン形式のトンネルについて中心に述べた。しかしながら本工法は箱型トンネルばかりでなく、継手の接続角度により任意形状のトンネルの施工が可能な工法でもある。特に、円形トンネル等円弧の曲線を有するトンネル構造の場合は軸力が卓越する構造のため、本工法に適した構造と考えている。

現在、本工法の開発の最終段階である施工性に関する諸試験を実施中である。これらの試験により施工法の細部について検討を行い実施工に適用していく予定である。今後の実施工にあたっては、施工時および供用開始後の現地計測を実施し、本工法の設計法を確立していく所存である。

なお、今回の各種試験においては、鉄建建設(株)エンジニアリング本部および(有)日本テクノの御協力を賜った。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 松沢、富田他:鋼製エレメントによる線路下横断構造物の合理的構築法、土木学会第 53 回年次学術講演会、'98 年
- 2) 石原、相沢他:鋼製エレメント継手としての直線鋼矢板継手の疲労試験、土木学会第 53 回年次学術講演会、'98 年
- 3) 松沢、成田:鋼製エレメントを用いた線路下横断構造物の構築法、地盤工学会第 33 回地盤工学研究発表会、'98 年