

(50) 鋼製エレメントを用いた新しい線路下横断工法の開発

Development of new underpass structure of railway used by steel elements

森山 智明*, 桑原 清**, 茂木 聡**, 三島 大輔

Tomoaki moriyama, Syuuji Tomita, Kiyoshi Kuwabara, Satoru Motegi, Daisuke Mishima

*工修, JR 東日本 東京工事事務所 工事管理室 (〒151-84512 東京都渋谷区代々木 2-2-6)

** JR 東日本 東京工事事務所 工事管理室 (〒151-84512 東京都渋谷区代々木 2-2-6)

In construction of underpass structure of railway, it is to be desired the methods applied to construction of a long structure 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.

Key Words: steel element, joint, underpass, railway

キーワード: 鋼製エレメント, 継ぎ手, 線路下横断, 鉄道

1. はじめに

近年、鉄道営業線と道路の交差部では、踏切りによる交通渋滞、踏み切り事故の解消のため、鉄道営業線下を道路が横断交差する線路下構造物の計画・施工されるケースが増大している。

線路下横断構造物を施工する際に以下の事柄が要求される。

- ① 鉄道軌道に与える影響が少ないこと。
- ② 鉄道施工基面と線路下構造物の間隔（土被り）が小さいこと
- ③ 工期、工事費の縮減

①については、都市部では列車の徐行が行なえないなど、列車運行の安全を考えた場合、軌道の影響は極力少ない事が望ましい。一方、土被りが小さい場合は、鉄道営業線に与える影響も大きく、取り付け道路の制約や土被りが大きくなるとアプローチ部が長くなるため工事費増となるため、土被りが小さいことが要求される。

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 Jointed Element Structure 工法^{1) 2)}
³⁾ (図-1 参照) 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た。

今回、JES 工法の開発にあたり行われた新型エレメントの検討と施工試験を主として報告を行う。

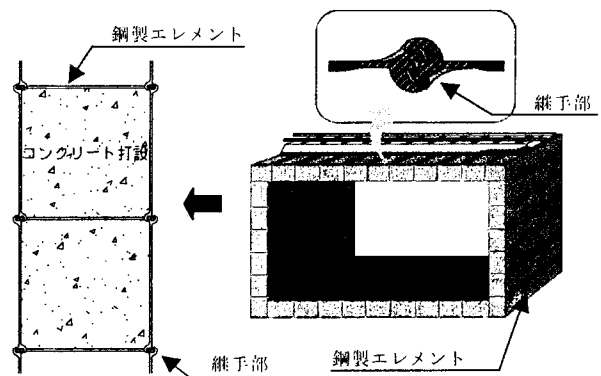


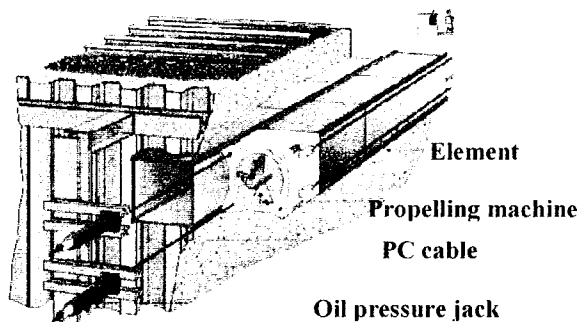
図-1 JES 工法の概要

2. 新工法の特徴

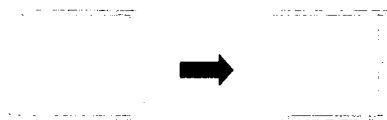
本工法は、地中に挿入するエレメントの軸直角方向に力を伝達可能な継手を有するエレメントを用いることにより、箱型ラーメン形式または円形のトンネル構造物を容易に構築できることを特長としている。本工法の特徴は以下のとおりとなる。

- ① 線路防護工と本体構築工を同時に行うことができ、軌道面や舗装面に与える影響が小さい。
- ② 継手は、挿入時にはガイドの役目をし、完成時には引張り力を負担できる。
- ③ 箱型ラーメン形式で線路横断方向の制約を受けない。

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 Element Pull Method、図－2 参照）⁴⁾ により行うことを基本とした。これにより、一般部のエレメントの形状をコの字形（図－3）とすることが可能となり、エレメントの鋼材量、製作費の低減とともにエレメントの挿入作業や連結作業が短期間に精度よくできることとなった。本工法の施工順序を図－4 に示す。



図－2 HEP 工法の概要



図－3 エレメントの形状

3. 新型エレメントの開発

3.1 エレメントの検討

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（疲労）の影響を考慮して設計することが重要である。特に本工法は、エレメントの継手を介して引張力を伝達する構造のため、この継手部の疲労に対する検討が本工法の開発における課題のひとつであった。

エレメントの検討として、下記の実験を行っており、以下に概要を報告する。

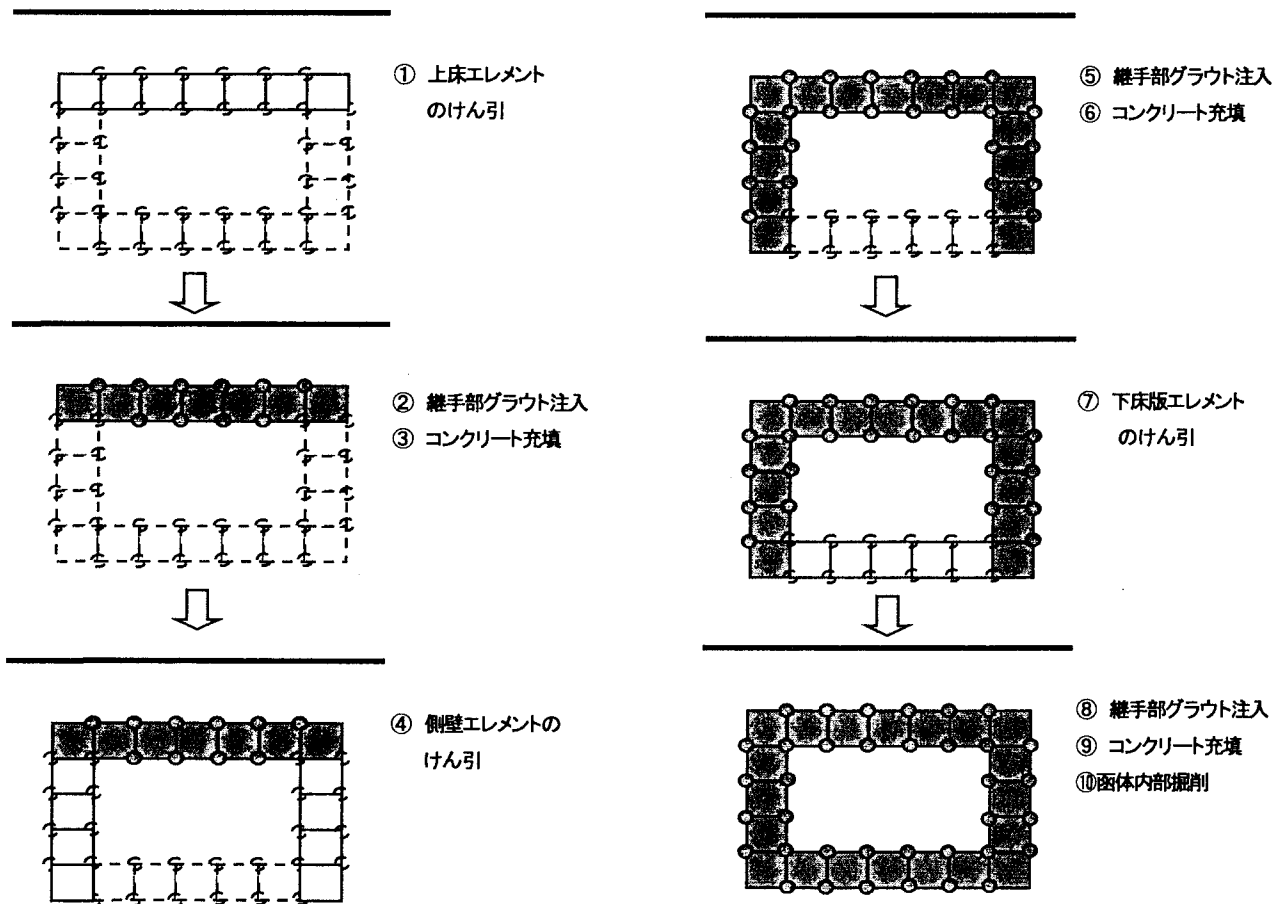
- 1) 継ぎ手単体による疲労試験
- 2) エレメントを用いた梁試験体の疲労試験
- 3) エレメントのせん断試験

3.2 継ぎ手単体による疲労試験

開発期間短縮のため、施工性、静的耐力に実績のある直線鋼矢板をベースに開発を行った。既存の直線鋼矢板では、継ぎ手の静的引張試験より鋼材厚さ $t=13\text{mm}$ 以上の静的強度が確認されており、静的耐力として問題はない。

しかし、1組の噛み合わせた継手の余裕部にグラウトを充填し疲労試験を行なった結果、スパン 10m 以上の箱型ラーメン構造物に対して疲労強度が不足する事が明らかとなった。

5)



図－4 JES 工法の施工順序

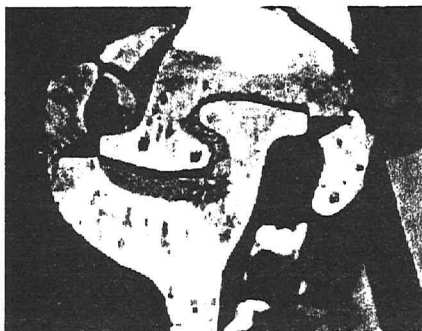


写真-1 継手破壊状況（疲労試験）

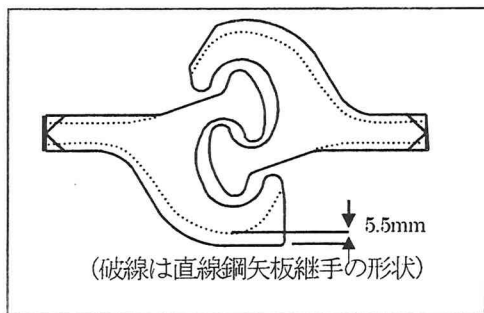


図-5 改良継手形状

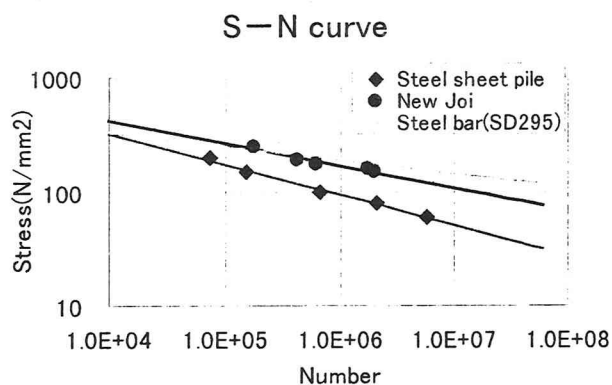


図-6 S-N曲線

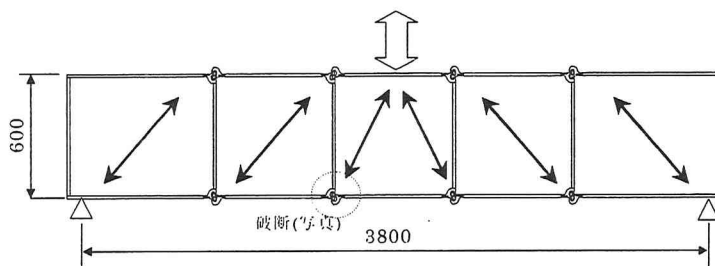
そのため、直線鋼矢板に改良を加えることとした。改良継ぎ手は、直線鋼矢板の疲労試験において疲労破壊（写真-1 参照）した継手外側爪を改良（5.5mm 増厚、図-5 参照）することで発生応力を低減して疲労強度の向上を図った。

疲労試験のS-N曲線を図-6に示す。グラフY軸の応力度は、今回用いた改良型の継ぎ手は、静的引張耐力としては板厚 $t=13\text{mm}$ 以上あり、設計において板厚 $t=13\text{mm}$ に換算した応力度である。疲労曲線は、直線鋼矢板を上回っており、疲労強度の向上が確認された。これにより、現在想定される規模の線路下構造物にほぼ適用可能となっている。⁶⁾

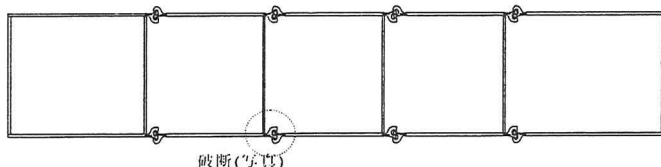
3.3 エレメントを用いた梁試験体の疲労試験

改良継ぎ手をエレメントに用いた梁試験体の疲労試験を行った。疲労試験は、エレメント高さ $H=600\text{mm}$ 、幅 $B=200\text{mm}$ 、スパン 3.8m と5つのエレメントを組み合わせられている。使用している継ぎ手、鋼材は実物大であるが、高さは7/10モデルとなっている。

載荷は、梁中心への1点載荷とし、曲げとせん断が作用す



(1) No.1 疲労試験体



(2) No.2 疲労試験体

図-7 エレメント疲労試験体概要

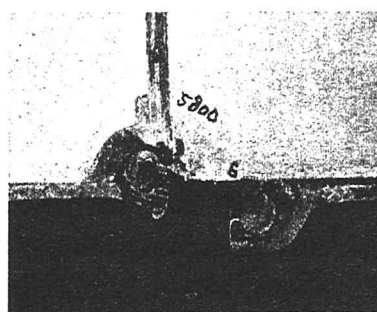


写真-2 No.1 疲労試験体

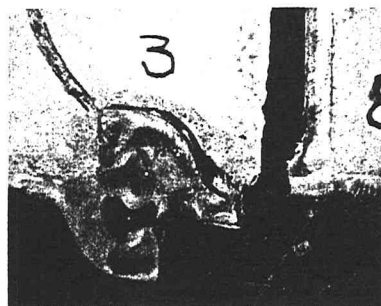


写真-3 No.1 疲労試験体

るようにしている。

当初、エレメントの形状は、図-7(1)に示すようにせん断補強材を継ぎ手部に溶接している。これは、エレメントを地中に挿入する際、継ぎ手部の張り出しを極力少なくしようとしたためである。

しかし、試験結果は、継ぎ手の中爪部が破断し、継ぎ手単体の疲労強度を確認することが出来なかった（写真-2 参照）。これは、継ぎ手部には、曲げによる引張り力と図-7(1)の矢印が示すようなコンクリートを圧縮斜め材としたせん断力が作用するためである。

そこで、図-7(2) No.2 試験体のように継ぎ手部をエレメントから 100mm 外すこととした。No.2 試験体は継ぎ手を縦材位置で溶接したため、溶接部で破断し（写真-3 参照）、継ぎ手単体までの疲労強度が確認できなかったが、継ぎ手位置では破断せず No.1 試験体より疲労強度は伸びている。

現在、縦材部に溶接位置がこないように幅の広い継ぎ手(直線鋼矢板と同じ)を製作し、疲労試験を行なうところである。

3.4 エレメントのせん断試験⁷⁾

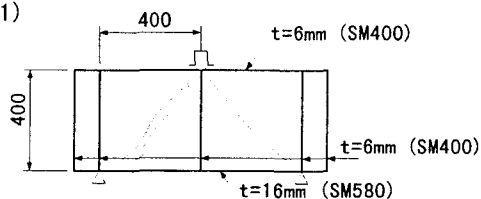
(1)試験概要

鋼製エレメントにコンクリート充填される複合構造として供用されるため、その力学性状を明らかにし、設計法を確立する必要がある。今回、コンクリート充填されたエレメントのせん断耐力を確認するため、およそ 1/2 モデルでせん断試験を行った。

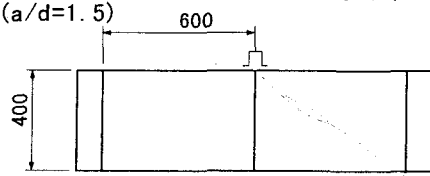
試験体は、図-8に示す5体で、エレメント高さ $h=400\text{mm}$ 、奥行き $B=200\text{mm}$ を一定としている。せん断耐力への継手の影響は、広沢らの実験³⁾により少ないと考えられることから継手を設けず、上下鋼板にせん断補強板の両端を溶接しエレメントを模擬している。S-1~3 は、載荷点距離 a (せん断補強板ピッチ s と同じ) と有効高さ d の比 a/d を 1, 1.5, 2 とパラメータとしている。S-4 については、S-1 を基本とし、せん断区間にせん断補強板 ($s/d=1$) を挟んだ形としている。S-5 は、S-4 と同様な形状で、せん断補強板の厚さを 3mm としてせん断補強板が先行降伏する形状となっている。

使用材料諸元を表-1 に示す。試験は、支間中央に集中荷重として静的に載荷を行った。

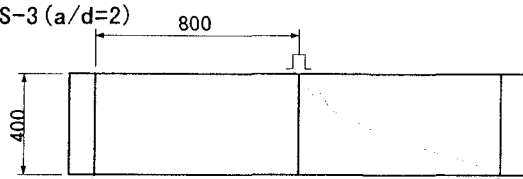
S-1 ($a/d=1$)



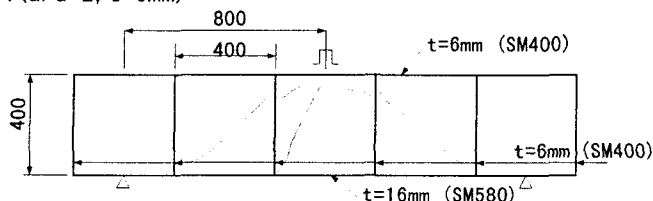
S-2 ($a/d=1.5$)



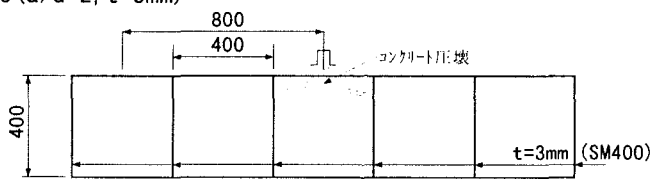
S-3 ($a/d=2$)



S-4 ($a/d=2, t=6\text{mm}$)



S-5 ($a/d=2, t=3\text{mm}$)



図中の数字はひび割れ発生荷重 (t_f)

図-8 試験体形状および試験後のひび割れ性状

表-1 試験体諸元および試験結果

Specimen	b _w (cm)	h (cm)	f _c ' (N/mm ²)	A _s (cm ²)	f _{sy} (N/mm ²)	A _w (cm ²)	f _{wy} (N/mm ²)	s (cm)	a (cm)	V _{u,exp} (kN)	Crack,exp (kN)	V _{u1,cal} 式(1)	V _{u2,cal} 式(2)	exp/cal	Yield
S-1	20	40	25.58	32	478.2	12	348.3	40	40	370.4	279.3 319.5	357.6	417.9	1.10	—
S-2	20	40	25.58	32	478.2	12	348.3	60	60	322.4	←	216.7	417.9	1.54	—
S-3	20	40	25.58	32	478.2	12	348.3	80	80	290.8	←	139.6	417.9	1.94	—
S-4	20	40	28.22	32	478.2	12	348.3	40	80	409.2	377.3 394.9	375.7	417.9	1.18	—
S-5	20	40	28.22	32	478.2	6	362	40	80	338.1	254.8 *	375.7	217.2	1.56	-S

*: measured applied shear force at first yielding of shear reinforcement

(2)試験結果

S-1 試験体の破壊状況を写真-4にを示す。S-1 は、279kN(せん断力=載荷荷重/2)で右側、319kN で左側のコンクリートにせん断ひび割れが発生し、さらに載荷を行うと 370kN で載荷点付近の圧縮側の鋼板が大きく座屈し耐力は低下している。

試験結果と土木学会：「鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針 (案)」に基づき算出した計算結果を表-1 に示す。同指針では、トラス機構と考えコンクリートの圧縮斜材としての耐力[式(1)]とせん断補強鋼材の強度[式(2)]の小さい値(表-1 網掛け部)で求まるものとしている。コンクリートの圧



写真-4 せん断試験破壊状況(S-1)

縮斜材としてのせん断耐力は、せん断補強のされていない鉄筋コンクリートのせん断耐力式を用いている。

本工法で用いるエレメント高さ $H=850\text{mm}$ 程度、鋼材厚さ $t=16\text{mm}$ のプロポーシオンでは、終局せん断耐力は、トラス機構としてコンクリートの圧縮斜材とせん断耐力で決まり、せん断補強のされていない鉄筋コンクリートのせん断耐力に基づき算出することで、安全側に評価できることが確認できた。

4. 施工試験

4.1 エレメントけん引貫入試験

(1) 試験概要

基準管を延長 28.2m にわたり土被り 1m の位置に HEP 工法によりけん引し、引き続き隣接する一般管を同様に 2 本けん引した (図-9)。エレメント長は、4.68m と 2.33m の 2 種類で、連結本数を 8 本と多くすることで施工条件を厳しくしている。延長方向のエレメント間の連結は、継手板を用いたボルト接合とした。各継手には、潤滑剤を塗布した。

(2) 施工状況

エレメント施工時に継手内部に土砂が入り込まないための防護として、FRP 製のダミー継手と板ばね (写真-5) を用いている。

一般部エレメントのけん引状況を写真-5に示す。エレメントをコの字としたことで、排土管、油圧ホース、ケーブル等の盛替えが容易であり、作業効率が向上している。コの字、ボルト接合としたことで、エレメント連結のための時間短縮が可能となった。なお、コの字の開口側にあるプレート (幅 150mm) は、運搬時のための補強であり、エレメント挿入時には取外される。

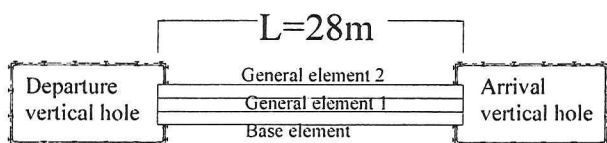


図-9 施工試験平面図

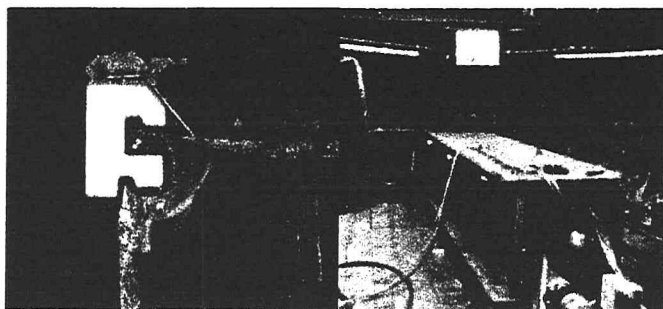


写真-5 ダミー継手、施工状況

エレメントのけん引速度は、最大で 150mm/min であり、HEP 工法の開発目標であった 2 時間 20m 程度 (夜間の線路閉鎖間に複々線分を完了) が可能であると考えられる。

(3) エレメントけん引貫入試験のまとめ

従来の継手よりあそびの少ない新型継手では、その嵌合部の摺動抵抗はわずかな曲がり・ねじれ等で非常に大きなものになることが懸念されたが、コの字形のエレメントで支点より 850mm の片持ち構造としたことで、継手の嵌合はスムーズに行われ、十分けん引施工可能であることを確認した。

また、先に挿入されたエレメントへの追従性が高いことが確認できたが、このことは、基準管の施工精度を向上することにより構造物全体の施工精度の向上がはかれることを示している。

4.2 継手のグラウト注入試験

(1) 使用材料

継手部に注入するグラウト材は、ブリージングが生じない早強度無収縮材を用いることとした。グラウト材は、狭い空間への注入であるためフロー値が小さいこと、継手部分の引張強度を確保するうえからある程度の強度が必要 (目標強度を 30N/mm^2 とした) であること等を考慮する必要がある。最終的には、継手部を模擬した塩ビ管や噛み合わせた直線鋼矢板の継手を用いたグラウト予備試験により、市販のセメント系グラウト材を $W/C=50\%$ として使用した。

(2) 試験概要

先述のけん引貫入試験により土中に施設した鋼製エレ

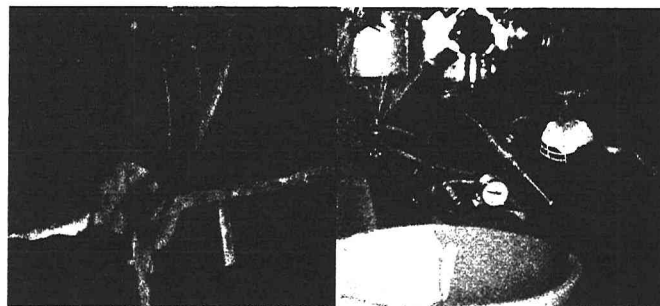


写真-6 グラウト注入状況



図-10 グラウト注入口

ント（基準管1本、一般管2本）の継手部4ヶ所においてグラウト注入を行った。グラウトは、エレメント内部に設けた注入孔（φ14mm）より小型グラウトポンプを使用して注入した（図-10）。継手には、グラウトを空隙全体に充填させることを目的として切欠き（長さ50mm）を設けた。注入区間の端部には、エア抜きホースを3ヶ所（上・中・下）取付け空気溜まりが発生しないように対処し、エア抜きホースよりエア及び先端での不良部分をオーバーフローさせ（写真-6）、1リットル程度漏出させて注入前の状態と同等と思われるところで、比重測定を実施し注入前とほぼ同じ比重であることを確認した後にホースを閉じた。

（3）試験結果

①注入時

エレメント端部のエア抜きから回収したグラウト材の圧縮強度試験を行った結果 $30\text{N}/\text{mm}^2$ を超える強度を確認した。これにより、エア抜きから漏出するグラウト材の比重を確認する方法で施工管理を行えば所要のグラウト強度が得られることが確認できた。

グラウト材の硬化後、エレメントの10断面を切断し継手40ヶ所において充填状況を確認した。その結果、グラウトは、継手噛合せ部に均一に充填されていた（写真-7）。

（4）グラウト注入試験のまとめ

施工時の品質管理は、エア抜きホースからオーバーフローさせたグラウト材の比重を測定することで管理出来ることが確認出来た。

新工法における継手部へのグラウトは、約20m区間において充填可能であり、施工延長が長い場合などは、20m程度毎に注入孔を設けることで対応出来ることが確認された。



写真-7 グラウト注入状況

5. おわりに

今回開発した工法（JES工法）は、小さい土被りでも線路への影響が少ないと考えられること、その構造のシンプルさにより在来工法に比べコスト縮減、工期短縮が期待できることなどから今後JR東日本における線路下横断構造物の標準工法と位

置付けている。

また、社外の関心も高く、道路下横断構造物への適用についての問合せも多く寄せられており、現在も開発を継続し、工法の完成度をあげるとともに適用範囲の拡大などを進めている。

今後多くの線路下・道路下横断工事に採用され、また、貴重なデータが数多く得られるよう各位にご協力をお願いする次第である。

なお、今回の施工試験に関しては、鉄建建設(株)と共同で開発を行っている。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)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
- 3)清水、森山他:鋼製エレメントを用いた線路下横断トンネルの設計、第8回トンネル工学研究発表会、'98年
- 4)東日本旅客鉄道:エレメントけん引工法(HEP工法)計画の手引き、1998.9
- 5)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
- 6)森山他:鋼製エレメント継手の力学的性能、土木学会第26回関東支部技術研究発表会講演集、1999.3
- 7)森山他:鋼とコンクリートの複合構造のせん断実験、土木学会第54回年次学術講演会、1999.9