

鉄道アンダーパス部におけるパイプルーフ工法の施工について

山本 歩

近畿地方整備局 姫路河川国道事務所 工務第二課 (〒670-0947 姫路市北条1-250)

姫路河川国道事務所では、兵庫県南西部の一般国道2号(65km)を管理しており、そのうち、兵庫県相生市～赤穂市の総延長8.6kmについて、安全で円滑な交通確保と環境改善を目的に、「相生有年道路事業」として、現道拡幅及びバイパス整備による4車線化事業を進めている。バイパス整備区間では、バイパスとJR山陽本線が立体交差する計画となっており、JR山陽本線と近接した施工となるため、軌道への影響を最小限にし、かつ、鉄道の運行の確保や安定性確保が必要となる。そのため、非開削工法の1つである、フロンテジャッキング工法(以下=FJ工法)を用い、アンダーパス(幅員:32.5m,線路下延長:21.6m)を新設する工事を行っている。本論文では、本工法の経緯及び現在の進捗状況について報告をする。

キーワード 相生有年道路事業, バイパス整備, アンダーパス, フロンテジャッキング工法

1. はじめに

一般国道2号は、大阪市を起点とし北九州に至る延長約671kmの道路であり、京阪神地方と中国・九州を結ぶ主要幹線道路の機能を担っている。このうち、兵庫県南西部に位置する相生市・赤穂市域では、東西方向の幹線道路として一般国道2号と山陽自動車道が通過しているが、一般国道2号においては依然として通過交通と地域内交通の混在により交通混雑が発生している。交通量は2車線で約25,000台と多く交通容量も超過しており、大型混入率も56%と多いことから、騒音についても昼夜問わず環境基準を超過している状況である。さらに、渋滞等により事故(正面衝突及び追突事故)の発生割合も高く、自転車歩行者道の未整備区間もあることから、車両と歩行者・自転車の通行が接近して危険な状態となっており、それらの解消を目的とし、姫路河川国道事務所では、兵庫県相生市～赤穂市の総延長8.6kmを、安全で円滑な交通確保と環境改善を目的に、「相生有年道路事業」として現道拡幅及びバイパス整備による4車線化事業を進めている。



【図-1 国道2号 相生有年道路新設事業位置図】

バイパス部では、JR山陽本線の交差部がアンダーパスによる立体交差構造となるため、JR山陽本線と近接した施工となる。JR山陽本線の姫路市～上郡区間は、平均通過人員約27,000(人/日)と、山陽本線全線の平均通過人員の約7割となっており、地域の移動、生活を担っているとともに物流機能としての重要な役割もあるため、通常の運行に支障がない工法を選定する必要がある。そのため、施工にあたっては、鉄道の運行を確認しながらの工法とあわせて、鉄道交通の安定性確保が必要であり、軌道への影響を最小限にする必要があるため、それらの課題を克服しながらの難工事となる。

2. 工事概要

工事名: 有年上郡有年Bv新設
 事業者: 国土交通省 近畿地方整備局 姫路河川国道事務所
 施工者: 西日本旅客鉄道(株) 近畿統括本部 神戸土木技術センター
 工事場所: 兵庫県赤穂市有年原 山陽本線 有年・上郡間
 工期: 2018年9月1日～2025年3月31日
 工事概要: 山陽本線(有年・上郡間)と一般国道2号新バイパスとの交差部において、非開削工法の1つあるFJ工法にて線路直下に地下道を新設する工事である。

3. 工法選定

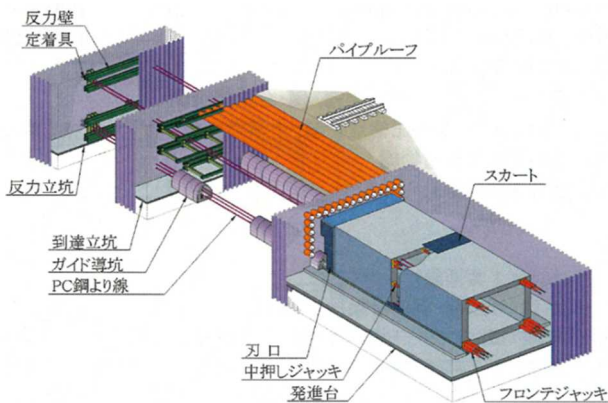
1) FJ工法の選定

当該区間は、JR山陽本線との交差点であり、鉄道運行を確保しながら、かつ、軌道への影響を最小限する安全性の高い工法の選定が必要となる。また、相生有年道路については、一部令和4年秋の開通を目指しており、当該区間についても早期開通を目指して整備を進めている。今回の立体交差点部分については令和7年3月の完成を目指して整備を進めている区間となっており、鉄道運行及び安全な施工を確保しつつ、早期開通にむけた計画的な施工ができる工法選定が必要となる。

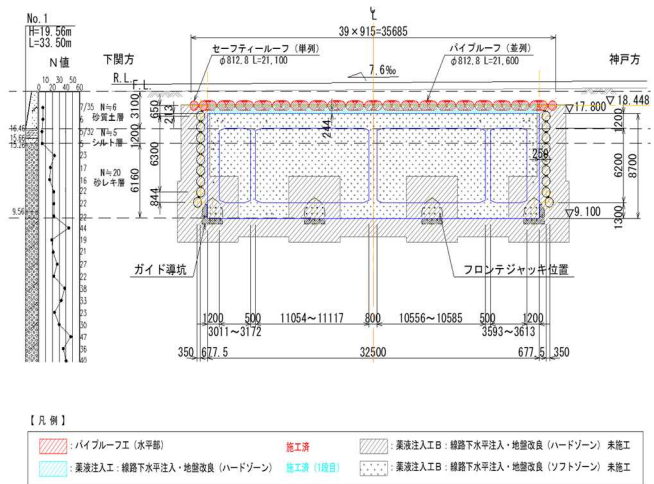
鉄道線路下にアンダーパスを構築する工事では、開削工法による工事桁工法が考えられるが、鉄道下での施工期間も長くなることから鉄道への影響期間が長くなり、リスクも高まることから、今回は採用しないこととし、鉄道運行に支障のない非開削工法で鉄道直下に巨大な函体を掘削しながら移動させる非開削での工法であるFJ工法を選定し、軌道への影響を最小限に抑えた工法を選定した。

2) FJ工法の概要

非開削工法の一つであるFJ工法とは、鉄道や道路等の直下に先行してパイプルーフ等の防護管を貫入し、その後、到達側に設けた反力体（地盤や構造物等）と発進側に築造した函体間をPC鋼線で連結し、フロンテジャッキを使用して函体をパイプルーフ防護工で囲われた範囲内の土中にけん引・推進する方法である。コンクリートの函体を土中にけん引して施工するため安全性が高く、函体断面の大きさを問わずあらゆる土質条件でも施工が可能である。また、パイプルーフ推進と函体構築を両立坑で同時施工が可能のため、施工期間を短縮することができる。



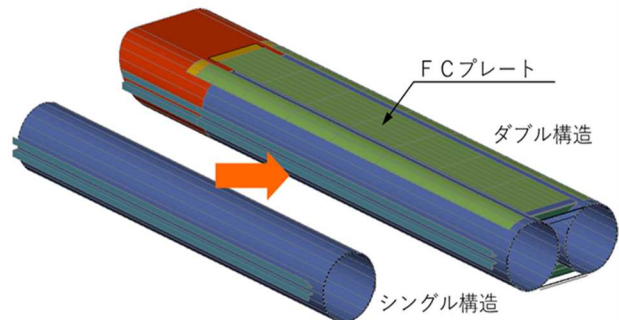
【図-2 FJ工法 片引き分割けん引方式概要図¹⁾】



【図-3 有年Bv工事 断面一般図²⁾】

3) 今回適用した手法

今回の施工区間においてはFJ工法を採用したが、鉄道への影響を最小限にするため、パイプルーフ防護管の施工期間を短縮する方法の検討を実施した。FJ工法で使用するパイプルーフについて、通常シングルパイプルーフではなくダブルパイプルーフを採用することで、推進作業が1.5倍となり、鉄道への影響期間を短縮できるとともに、鉄道への影響期間が短縮され、また保安費や計測費の削減にもつながる。



【図-4 シングル・ダブル管概要図³⁾】

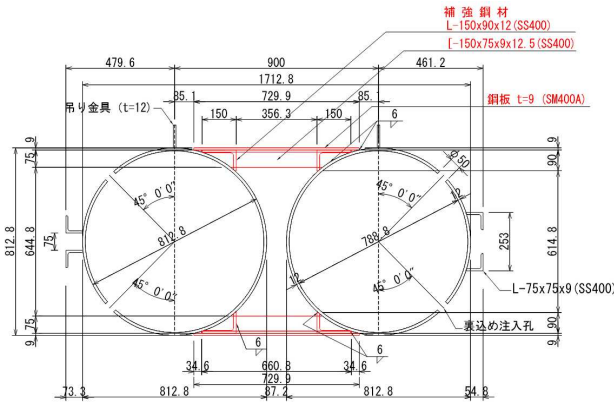
4. 発生する課題・問題点

上記手法適用の場合、工期短縮、軌道影響工事の短期間化等について一定の効果が期待できるが、切羽解放面積が大きくなることから、適用に向けては鉄道の安定性確保をするための検討が必要となる。ダブルパイプルーフ化に伴う切羽開放面積拡大が与える軌道への影響を最小限化し、かつ切羽地盤の安定性を確保することを課題とし、以下の取組みを実践した。

5. 課題・問題解決のための具体的取組

1) パイプルーフの構造改良

パイプルーフは、推進時及び推進完了時に周辺土圧に耐え得る構造であるとともに、函体けん引時に発生する下面地盤のゆるみに対し梁構造として上載設備を仮受支持できる構造としなければならない。ダブルパイプルーフを新たに制作をすると、管厚の増大等の大幅な制作コストの増加が懸念されたことから、図-5に示す部分補強を施した構造改良を実施したものを使用することで、大幅なコスト増への対策を実施した。



【図-5 ダブルパイプルーフ構造断面図⁴⁾】

2) 3次元FEM解析 (弾塑性解析)

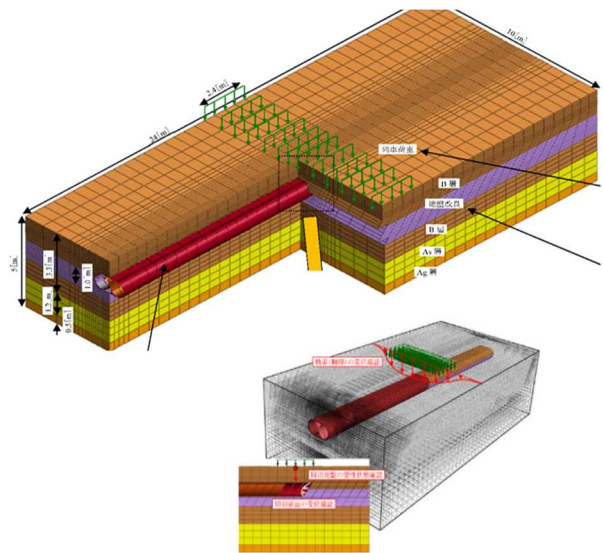
コストの観点から特殊なダブルパイプルーフを使用するが、鉄道への安全性等についてリスクも懸念されるため、施工にあたっては、推進施工時における軌道路盤と切羽安定性について数値解析 (3次元FEM解析) を用いた事前検討を行った。

従来解析手法としては円弧すべり解析手法や二次元FEM解析手法によることが一般的であるが、今回は、鉄道直下という近接施工の観点もあり、施工過程における構造系や荷重条件の変化、側方地盤の影響を考慮する必要があると考え、3次元FEM解析手法を選定した。

また、今回はダブルパイプルーフ使用による切羽開放面積拡大及び列車荷重作用の有無が与える軌道路盤や切羽地盤状態を事前解析のため、地盤構成モデルは施工過程やメッシュ毎の地盤の弾性・降伏・弾塑性・全塑性状態を表現できる弾完全塑性モデル (MCモデル) を適用した。

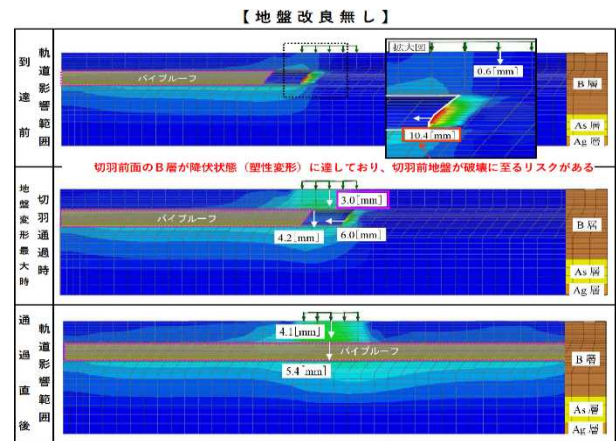
さらに、既存の解析モデル範囲設定根拠⁵⁾や列車荷重作用時の地盤影響予測⁶⁾を参照し、シングル管とダブル管双方の構造 (異なる切羽開放面積での比較) について、切羽開放 (応力解放) や列車荷重作用による地盤の変形量や降伏状態を解析した。

判定の指標としては、軌道路盤変位量が軌道整備目標値以内であることとし、許容変位量を7mm/10m (線路等級: 1級線の高低値, 通り値) とした。



【図-6 3次元FEM解析モデル図⁷⁾】

また切羽地盤については、切羽開放時の周辺地盤の塑性変形進行により地盤破壊に至らないかに着目し、解析を行った。

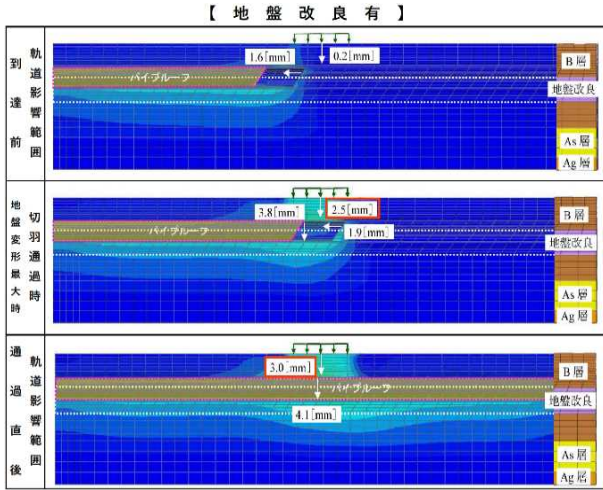


【図-7 3次元FEM解析図 (地盤改良無し)⁸⁾】

上図-7は、ダブルパイプルーフ推進過程に発生する軌道及び切羽路盤の変形量を示すものである。解析結果としては、軌道路盤変位は許容値内であるものの、列車荷重載荷により切羽前面の地盤が塑性化し、切羽面の地山崩壊が懸念された。切羽地盤の崩壊は切羽内作業員の安全性を脅かすことや上部地盤の陥没を誘発するものであるため、3)に示す地盤改良工事を補助工法として検討した。

3) 補助工法の検討 (地盤改良工)

現地の土質条件としては礫混り砂質土層であり、粒径が比較的大きく、かつ粘着力が期待できないことから軌道路盤の沈下低減や崩壊し難い自立切羽の形成、列車荷重作用による切羽地盤の変位抑制を目的とした地盤改良を行った。

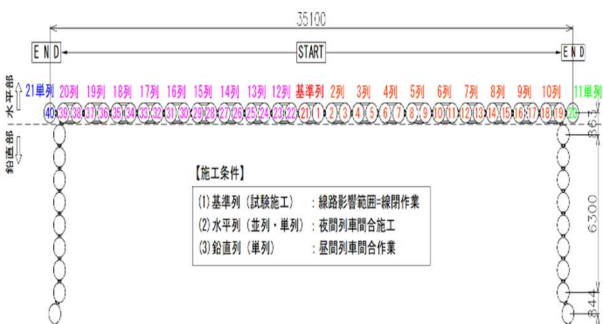


【図-8 3次元FEM解析図 (地盤改良有) 9)】

上図-8は、地盤改良効果を見込んだダブルパイプルーフ推進過程に発生する軌道及び切羽路盤の変形量を示す解析図である。地盤改良前比較では、特に切羽前面の地盤変形量が抑制された結果となった。

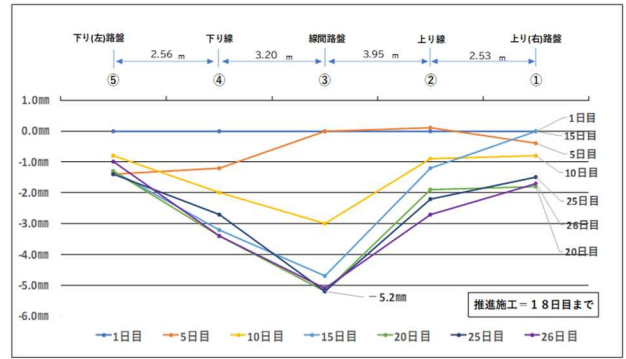
6. 実施結果

パイプルーフ推進時の路盤や軌道の沈下量、変位収束日を以下に示す。

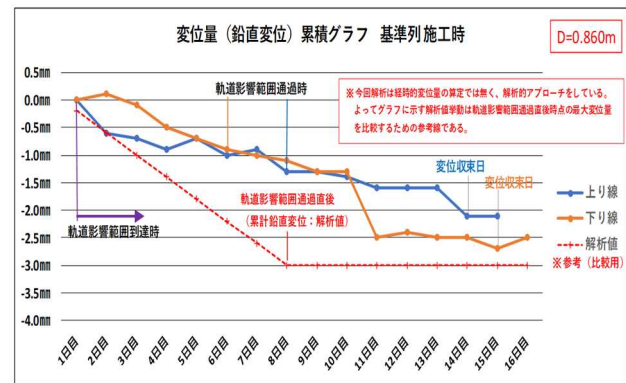


【図-9 パイプルーフ断面配置図 10)】

(1) W ルーフ推進 (基準列, 試験施工)

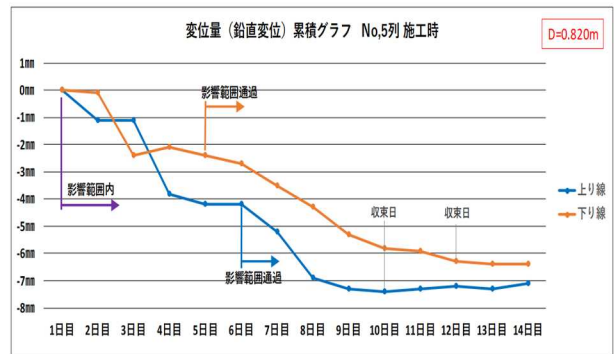


【図-10 軌道・路盤沈下量 (基準列施工時) 11)】



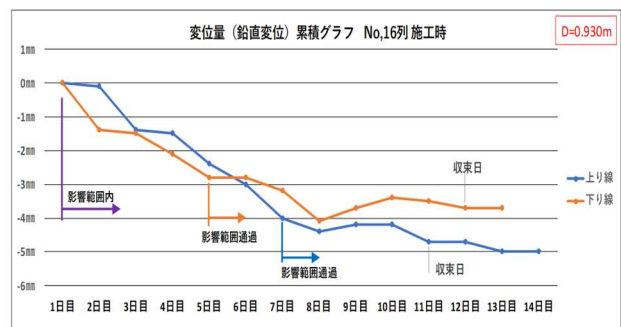
【図-11 変位量累積グラフ (Wルーフ, 基準列施工) 12)】

(2)-1 W ルーフ, 標準列施工 (No, 5 列) 支障物有



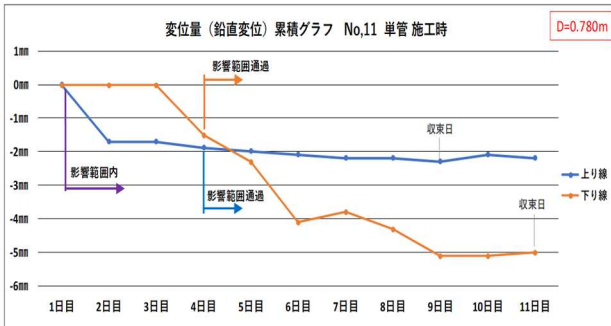
【図-12 変位量累積グラフ (Wルーフ, 標準列施工) 13)】

(2)-2 W ルーフ, 標準列施工 (No, 16 列) 支障物有



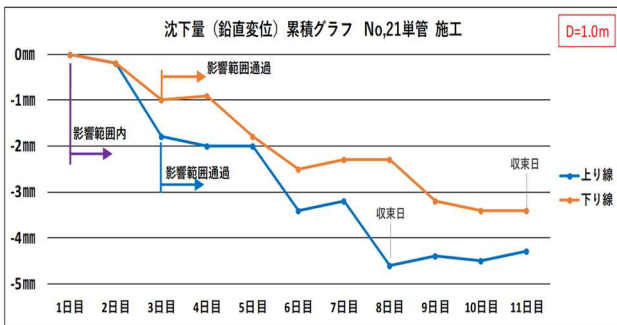
【図-13 変位量累積グラフ (Wルーフ, 標準列施工) 14)】

(3)-1 Sループ施工 (No, 11 単列) 支障物有



【図-14 変位量累積グラフ (Sループ施工) 15】

(3)-2 Sループ施工 (No, 21 単列) 支障物有



【図-15 変位量累積グラフ (Sループ施工) 16】

検討にあたっては、鉄道影響範囲通過時の影響が最も大きいため、シングルパイプルーフとダブルパイプルーフでの解析を実施した。3次元FEM解析結果においては、基準値7mmをクリアする結果となった。また、施工時点の実績は、3次元FEM解析より沈下量が多い結果となったが、基準値はクリアしている結果となった(図-16)。

	FEM解析 (mm)	実績 (mm)	基準値 (mm)
シングルルーフ	-1	-2	±7
ダブルルーフ	-2.5	-4	

【図-16 沈下量比較表 (鉄道影響範囲通過時)】

実施工の方がやや沈下量が大きかった理由としては、①支障物(玉石, 間知石, CON塊等)撤去時に発生した微小な空隙, ②パイプルーフ自体の変形量が加算されたこと, ③施工完了している隣接パイプルーフの影響については解析に反映していないことが推察される。また、最終沈下量についても、解析結果では-3mm程度(ダブルパイプルーフ適用時)であったが、実績値としてはダブルパイプルーフ及びシングルパイプルーフ適用時共に-5mm程度であり、実施工の方がやや沈下量が大きかった同様の結果となった。

以上の通り、今回得られた結果からは、ダブルパイプルーフまたは、シングルパイプルーフ適用時の最終沈下量の差は微小であることが確認できた。

7. 実施結果を踏まえた今後の取組

今回の検討段階においては、ダブルパイプルーフを採用したものの切羽安定性が確保できなかったため、地盤改良を併用した対策を検討し施工を行った。計測結果からみて、いずれの条件(ダブル or シングル)においても、基準値を十分満足しており、事前検討の想定内での施工ができたと考えている。施工時にあたっては、切羽拡大に対する崩壊し難い地盤形成や、計測による変位量の常時把握等を併用することで、ダブルパイプルーフでの施工が安全実施できる結果となっており、今後同様の工事への拡大も十分可能と考える。また、ダブルパイプルーフ施工は、工期短縮に伴い、鉄道への影響期間が短縮されることから、保安費や計測費の縮減にもつながると考えられる。鉄道への影響を小さくすることで安全かつ計画的に、またコストの観点でも優れている本工法に今後の拡大も期待をしたい。

道路事業を進めるうえで、鉄道だけに限らずアンダーパスの構造は多くあり、工法等の検討にも苦慮しており、工事実施時においても計画的な施工等課題を多く抱えているところである。今回は、鉄道の運行を確保したうえでの難工事であったが、工事条件や現場状況、リスクを把握し比較検討したうえで工法選定を行ったため、安全かつ計画的に道路事業が進められている。この取り組みが、全ての道路事業において参考になれば幸いである。

8. 現在の進捗状況

現在、水平パイプルーフの施工が完了し、函体を築造するための立坑構築を線路両側で進めているところである(写真-1)。工事全体の進捗率は29.5%であり、工事は予定どおり進んでいる。



【写真-1 有年Bv工事 空撮写真 (2021.3.31時点)】

謝辞 : 本事業にご協力を頂いております地域住民の皆様、設計コンサルタント様、施工業者様、関係機関の皆様にご心より感謝申し上げます。また、本論文の作成にあたり多大なるご協力を頂きました、西日本旅客鉄道(株)様をはじめ大鉄工業(株)様に心より感謝申し上げます。引き続き工事は続いていきますが、無事完了することを祈念いたします。

参考文献

- 1) アンダーパス技術協会 「フロンテジャッキング工法技術資料」
- 5) (財) 鉄道総合研究所 「都市鉄道構造物の近接施工対策マニュアル」
- 6) 西日本旅客鉄道(株) 「地盤掘削による影響の予測」
- 2) 3) 4) 7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 大鉄工業(株) 技術誌論文 「開放型刃口推進W化施工が与える線路影響と効果に関する研究」