

軟弱シルト上に存在する高速道路直下の NATM対策工実施計画

Implementation of auxiliary method during construction
in a soft silt stratum under an expressway

藤本浩志¹・依田淳一²・山本昇³

Koji Fujimoto, Junichi Yorita and Noboru Yamaki

¹正会員 工修 鉄道・運輸機構 鉄道建設本部 北陸新幹線建設局 飯山鉄道建設所
(〒389-2253 長野県飯山市飯山1071-2)

E-mail:kuj.fujimoto@jrtt.go.jp

²正会員 工修 鉄道・運輸機構 鉄道建設本部 北陸新幹線建設局 飯山鉄道建設所 所長
(〒389-2253 長野県飯山市飯山1071-2)

³戸田建設株式会社 (〒383-0053 長野県中野市大字草間字大久保1973-1)

Pipe roofs were adopted as pre-lining based on the soil properties and in view of the ease of construction. Conventional two-dimensional FEM analysis has not covered the effectiveness of pipe roofs for supporting the tunnel longitudinally ahead of the face as beams. To compensate for such an oversight, the longitudinal effect of pipe roofs was assessed using a beam model on an elastic foundation. The results were reflected in two-dimensional FEM analysis to build a numerical analysis model that reproduced the longitudinal effect. A study was made of the range where steel pipes had to be installed, using the model.

Key Words : Pipe roof, beam model on an elastic foundation, two-dimensional FEM analysis

1. はじめに

北陸新幹線高丘トンネルは、高崎起点 131km550m～138km490m に位置し、長野県北部を流れる千曲川右岸側の長丘丘陵を縦断する全長 6,940m のトンネルである。

この長丘丘陵は、北部は標高 400m 以上の比較的

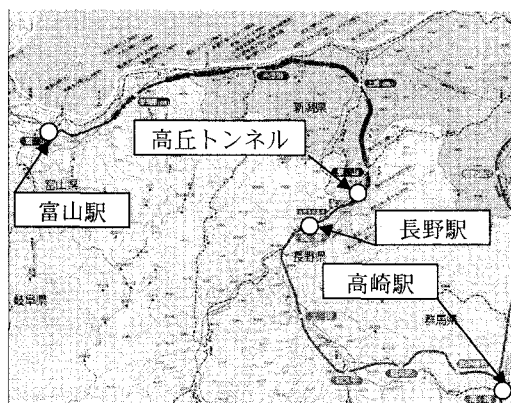
起伏の富んだ地形であり、南部は標高 380m の茶臼嶺を最高点とした起伏の緩やかな丘陵性の地形を成す。

高丘トンネル南工区は、長丘丘陵南部に位置しトンネル延長 2,948m、土被り 1D～5D 程度である。また、本線地上付近には、民家集落地のほか高速道路、送電線鉄塔など交差物件が多数存在する。

本報告は、本工区の地質的特徴を表す軟弱シルト上に存在する高速道路直下の施工計画について報告する。

2. 地質概要

長丘丘陵は長丘断層と替佐断層に挟まれた場所に位置し、形成年代の新しい第四紀更新世の非常に軟質で緩い状態の堆積岩で構成されている。地質は、古い飯綱火山を起源とする火山砕屑物、シルト、砂、礫が湖底で二次堆積したものであり、第四紀更新世前期にあたる猿丸層、中期の豊野層から構成され、



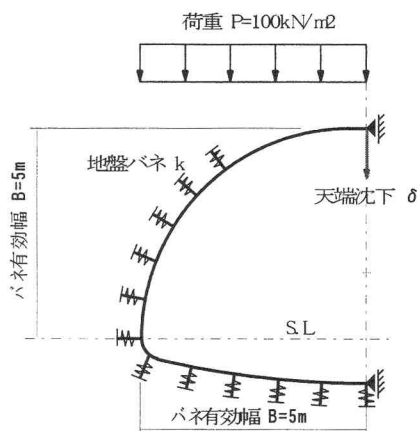


図-3 支保工バネの算出モデル

5. 2次元FEM解析による検証

パイプルーフによる天端防護及び脚部沈下抑制効果を検証するため、2次元FEM解析を行った。2次元FEM解析では、トンネル断面形状を横断的に検証する解析であるため、トンネル縦断方向の効果を取り込むことが難しい。そこで、パイプルーフの縦断的梁効果を2次元FEM解析に取り込む方法について検討した。続いて、近接構造物の健全性を確保しながら効果的に作用するパイプルーフの打設本数について検討した。

(1) 梁モデルによる沈下量予測

縦断的な効果を含ませるために、上半弾性床上の梁モデルを採用した。パイプルーフを梁、トンネル支保工と未掘削区間の地山を弾性床（バネ）にモデル化し、上半掘削段階のパイプルーフの沈下量を推定した。

トンネル支保工区間のバネ値については、トンネル横断方向（上半断面）を平面骨組モデル化し（図-3）、鋼製支保工と吹付コンクリートの合成部材に単位荷重を載荷することで得られる天端変位量よ

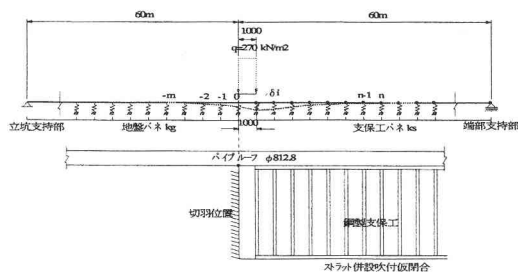


図-4 梁モデル

りトンネル支保工のバネ値を算出した。未掘削区間のバネ値については、地質データより得られた地盤バネを設定した。

パイプルーフの剛性については、中詰コンクリートを考慮した合成部材としており、150°打設時（20本）の打設本数をパイプルーフ打設幅で平均化した換算剛性とした。

以上の条件を図-4のように設定した弾性床上の梁モデルにより解析した。解析方法は、パイプルーフが最も沈下すると予測される中央部を1m掘削した状態での各点の沈下量の総和を計算した。1m掘削したことによりパイプルーフは地盤による反力を失い、パイプルーフ上部の地山荷重を受けることとなる。本解析では地山部分及び盛土部分の全荷重がかかることとした。

その結果、総沈下量（累積沈下量）は31.0mmとなった。この結果は縦断的梁効果を考慮した沈下量と考えられるので、この総沈下量をトンネル上半掘削完了時の天端沈下量にフィッティングすることとした。

(2) パイプルーフの2次元モデル化

梁モデルにより得られた上半掘削完了時の天端沈下量を2次元FEM解析で同様のステップにフィッティングした。解析に用いられた2次元FEM解析モデルは、梁モデルと同様の150°打設時とした。パイプルーフの剛性については、梁モデルにて算出した換算剛性とした。天端沈下量をフィッティングさせるために、パイプルーフと同等の変形係数を持つ要素の幅を検討した。なお、地山部分及びパイプルーフ部分の自重等の物性値は各々の値を採用した。

また、解析を実施するに当たり、力学モデルは当工区の過去の実績より非線形弾性解析を採用した。非線形の定式化は「破壊接近度による非線形モデル」

（日本鉄道建設公団 NATM 設計施工指針）によった。地質年代に伴う地山の種別は、固結度の高い豊野層を軟岩、固結度の低い南郷層を土砂の扱いとした。初期弾性係数、せん断強度等の地盤物性値は、調査ボーリングデータ・土質試料試験および原位置

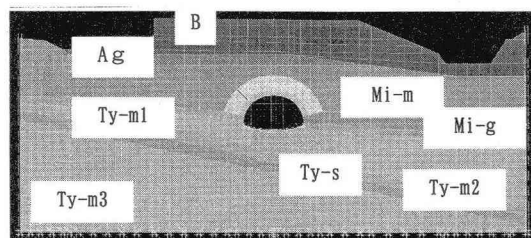


図-5 2次元FEM解析 Cモデル

試験結果の分析から、N 値をパラメータとして推定した。

これらの条件下で解析を行った結果、梁モデルでの検討結果であるパイプルーフの総沈下量 31.0mm に対し、2 次元 FEM 解析モデルのトンネル天端沈下量が 35mm でフィッティングした。

(3) 2 次元 FEM 解析によるパイプルーフ設置範囲の比較解析

解析より得られたパイプルーフの要素幅及び換算された変形係数を用いて、鋼管設置範囲の比較解析を実施した。検討モデルは、上下半モデル、180°、150° 及び 150° モデルに側壁先行改良を加えたモデルの 4 モデルであり、各モデルを A～D モデルとした（表-2）。

解析結果は表-2 となった。次に解析結果の妥当性について検討した。補助工法がパイプルーフのみである A～C モデルについて最終ステップの地表面沈下量に着目すると、地表面沈下量にモデルの差が生じた。この原因は、他の地層に比較して N 値が高い南郷層の礫層（Mi-g）の存在であると考察された。この礫層にパイプルーフ打設範囲が達する A、B 両モデルは、トンネル脚部沈下が抑制され、全体的な沈下量も抑制されることが考えられた。一方、C モデルについては、礫層に達しないため、脚部沈下が他のモデルと比べ大きくなり、結果として全体的に沈下量も大きくなると考えられた。

設定している管理基準値（50mm）より一次管理基準値として 60% の 30mm（50mm×60%=30mm）とし、この一次管理基準値を満足するモデルを比較検討した結果、A モデル（2mm）、B モデル

表-2 解析結果

解析モデル		A	B	C	D
パイプルーフ打設範囲		上下半	180°	150°	
補助工法		—	—	—	側壁改良
天端沈下量	上半	2 mm	1 4 mm	3 5 mm	3 5 mm
	最終	4 mm	3 2 mm	6 5 mm	5 2 mm
地表面沈下量	上半	1 mm	1 2 mm	3 0 mm	3 0 mm
	最終	2 mm	2 7 mm	5 6 mm	4 5 mm

（27mm）であった。パイプルーフによって側壁部が防護されるこの 2 モデルは地表面沈下抑制効果に優れることが明らかであった。一方、C モデルによっても、D モデルのように側壁先行改良を併用することによって側壁部の防護がなされるが、解析上 30mm を満足することが出来なかった。

解析結果の考察、実施工に伴う問題点、経済性を考慮した結果、沈下抑制の確実である B モデル（パイプルーフ打設範囲 180°、本数 22 本）を採用することとした。また、トンネル掘削前に想定よりも沈下が大きくなると予想された場合の追加対策工として、下半側壁先行改良、支保工ランクアップ、底盤部の改良が検討された。

6. パイプルーフ施工計画

パイプルーフは、トンネル断面アーチ部を防護するために、トンネル掘削に先立って施工しておく必要があり、その施工基地として立坑を計画した。立坑位置は、地質的の安定性が比較的高く、仮設用地が容易に確保できる高速道路を挟んだ起点方とした。パイプルーフの施工延長は、立坑位置と終点方の高速道路盛土構造の防護を勘案した結果、L=110m とした。

立坑の設置位置は、市道に隣接し、高速道路の盛土構造にも近接施工となる。従って、高速道路への影響はもとより、市道下に敷設されている天然ガスパイプラインへの影響も勘案する必要がある。そこで立坑の山留め構造として、変形や周辺地山のゆるみを抑制できる高い剛性を有するソイルセメント工法を計画した。また、立坑内でパイプルーフの施工を行うため立坑内に作業空間を確保するため、アースアンカー方式の山留めとした。

7. おわりに

本解析では、パイプルーフの縦断的梁効果を取り込むために梁モデルによる解析を採用し、2 次元 FEM 解析でのパイプルーフの等価剛性化を行なった。また、高速道路とほぼ併走するガスパイプラインの防護及び計測計画や、パイプルーフを施工するにあたり必要な立坑などの仮設設備を含めた施工計画を作成した。

現在、本工区では、民家集落地下を掘削中であるが、中部電力送電線鉄塔などの交差物件下を掘削することとなる。これまでの解析結果、施工結果及び計測により得られたデータを今後の施工に反映し、安全性の確保に留意しながら工事完了を目指したい。