

# 線路下カルバート構築における小断面掘削時の地盤への影響評価

Study on the evaluation method of surface subgrade reaction during steel square pipe jacking work under railway

石原 匠<sup>1</sup>・仲山 貴司<sup>2</sup>・西岡 英俊<sup>3</sup>

Takumi ISHIHARA<sup>1</sup>, Takashi NAKAYAMA<sup>2</sup>, Hidetoshi NISHIOKA<sup>3</sup>

This paper describes the result of reduced-scale model test of railway underpass culvert in order to study the effect of steel square pipe jacking work on surface subgrade reaction and proposes a simple and reasonable design method of railway reinforcement using new distribution of subgrade reaction. The modulus of ground reaction is reduced near the jacking position and neglected above the jacking position. The reduction rate is calculated using bearing capacity calculated using limit balance method. In the analysis, it is assumed that a pipe face collapse has occurred due to excavation.

**Key Words :** railway underpass culvert, modulus of ground reaction, railway reinforcement

## 1. はじめに

鉄道では，道路との立体交差化事業や河川改修事業の一環として，盛土構造となっている線路の直下で，比較的低土被り部を横断するトンネル（以下，「線路下カルバート」という）が構築されることがある．これらは列車を運休させることなく工事（以下，「線路下横断工事」という）が行われることが1つの特徴である．線路下横断工事を施工するための工法は大きく分けて2つに分類され，1つは開削工法，もう1つは非開削工法がある．このうち，本稿では非開削工法を取り上げる．

非開削工法は線路を橋梁等で受け替えたうえで施工する，大規模な掘削を伴わない工法である．小断面の角型鋼管（以下，「エレメント」という）を線路直角方向に連続して推進，もしくはけん引しながらエレメント内を掘削し，線路下カルバートの外壁を構築，その後内空部を掘削することで完成する．非開削工法の利点は，当該箇所の線路直下を大規模に掘削する必要がないことであり，長時間の列車間合いを確保することが困難な都市部での工事において有効である．一方，非開削工法は線路直下の地盤を少なからず緩めながら横断することから，鉄道に対して様々なリスクが想定される．リスクの一つ

は，エレメントの切羽面の自立性が喪失した場合のエレメント周辺の陥没が考えられる．

万が一陥没が発生した場合においては，列車の安全・安定輸送に多大な影響を及ぼす可能性があることから，リスク対策が必須となる．安全対策の1つが簡易工事桁である．簡易工事桁とは，H形鋼を主桁とし，これをまくらぎに直結し，レール，まくらぎおよびH形鋼を一体とした桁構造(図-1)である．万が一エレメント掘進中に陥没が発生した場合においても，簡易工事桁により，列車の走行安全性を確保する機能を有している．



図-1 簡易工事桁の設置状況

キーワード：線路下カルバート，地盤反力係数，簡易工事桁

<sup>1</sup>正会員 東海旅客鉄道株式会社 建設工事事部 Construction Part, Central Japan Railway Company, (E-mail: takumi.ishihara@jr-central.co.jp)

<sup>2</sup>正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 Structures Twchnology Division, Railway Technical Research Institute

<sup>3</sup>正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 Structures Twchnology Division, Railway Technical Research Institute

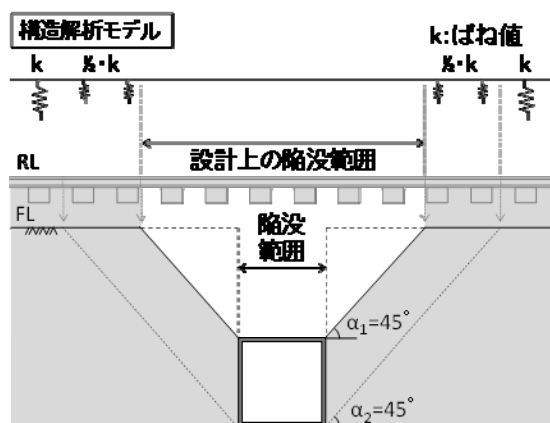


図-2 従来モデルの模式図

### (1) 簡易工事桁の設計上の課題

簡易工事桁は地盤をばねとした弾性床土上の梁とみなしており、設計を行うためには、切羽崩壊時の陥没範囲および周辺地盤の地盤反力の低下を定量的に示す必要がある。これまでに用いられてきた構造解析モデルの一例（以下、「従来モデル」という）を図-2 示す。このモデルの特徴は、エレメント上端から立ち上げた  $45^\circ$  の範囲を設計上の陥没範囲として地盤反力係数をゼロとし、エレメント下端から立ち上げた  $45^\circ$  の範囲までの地盤反力係数は健全な平地上の  $1/2$  としている。

しかし、実際の陥没は、掘削幅直上範囲で発生することが知られている。従来モデルは、安全側の設計と考えられる一方で、設計上の陥没範囲および周辺のばね値の低減率は実測結果等の定量的な根拠に基づくものではない。よって、より陥没中心に近い範囲まで高いばね値を期待することができれば、結果として従来モデルよりも合理的な設計ができる可能性が考えられる。

そこで本研究では、低土被り条件下でのエレメント掘進時に、万が一陥没が発生した場合の陥没の幅および周辺の地盤反力の低下範囲を定量的に把握し、簡易工事桁の合理的な設計を目指すこととした。なお、本研究で示す低土被りとは厚さ5m程度までを示すこととする。

## 2. 地表面陥没時の影響範囲の把握

### (1) 概要

本研究では、エレメント掘進時に万が一陥没が発生した状態において、より実現象に近い地盤反力係数の設定方法を検討するために、1/4スケールのエレメント模型を用いて実際に掘進を行い、現地盤に見立てた土槽内に陥没を発生させ、このときの陥没周囲の地表面において地盤反力係数の低下程度を測定することとした。さらに、実験の結果を設計上に反映させるため、地盤反力係数の低下量の推定方法について検討した。

## (2) エレメント模型による掘進実験

### a) 実験方法

模型実験のイメージを図-3に示す。模型は一般的な線路下横断工事のエレメント掘削・推進状況を1/4スケールで模擬した。土槽の寸法は縦1m×横1m×深さ1mで、エレメントの断面は実際の一般的なエレメントの大きさを考慮して200mm×200mmとした。土質条件は、表-1の通りである。

土被り厚は1D(D：エレメント径200mm)とした。架台上に設置したエレメントおよび掘削機は、刃口先端のロードヘッタータイプのカッタービットを用いて人力掘削を模した掘削が可能となっており、模型の切羽前方を模型断面に合わせて掘削を行った。また、推進は後方の油圧ジャッキを用いて行った。このように、掘削と推進を交互に繰り返して行い、1サイクルは実現場の標準的な掘進量を考慮して0.15Dとした。トンネル掘削時の切羽管理は、図-4に示す通りカメラおよびレーザー距離計で把握しモニターで管理した。また、掘削・推進が適切に行えているかを確認するために、実現場と同様に推進量

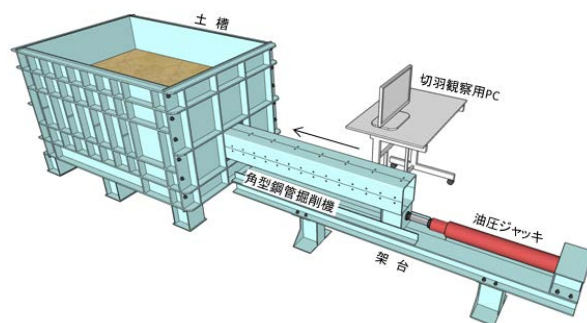


図-3 エレメント模型掘削機

表-1 土質条件

| 項目     | 内容                    | 項目            | 内容                     |
|--------|-----------------------|---------------|------------------------|
| 使用砂    | 珪砂 7 号                | 変形係数 $E_{50}$ | 41.26MN/m <sup>2</sup> |
| 含水比    | 1.0%                  | ポアソン比         | 0.317                  |
| 相対密度   | 80%                   | 内部摩擦角         | 42.4°                  |
| 最小乾燥密度 | 1.24kN/m <sup>3</sup> | 粘着力           | 5.8kN/m <sup>2</sup>   |
| 最大乾燥密度 | 1.59kN/m <sup>3</sup> |               |                        |

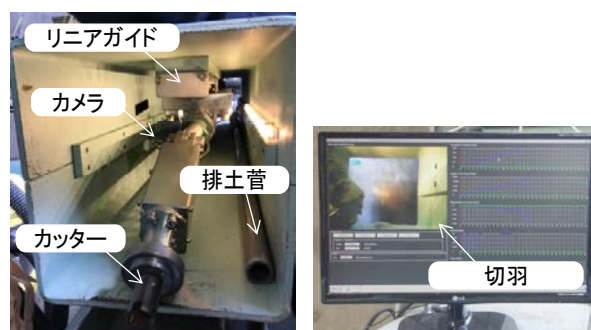


図-4 切羽装置と管理モニター

や排土量等を計測した。なお、陥没については、模型実験において、実現場に則した施工方法を遵守すれば土の拘束効果等により陥没は発生しづらいため、切羽面が土槽中心位置に到達した段階で余掘りを1.0D程度行い陥没を発生させた。

地盤反力係数の低下程度は、小型の平板载荷試験を実施し確認した。試験は掘進開始前の良好な地盤の地盤反力係数と、掘進・陥没後の陥没付近(掘進方向に対して直角方向に向かって)で実施した。载荷試験の荷重は、陥没近傍においても荷重-変位関係が線形に履歴できる大きさとし、40mm間隔で载荷を実施した。

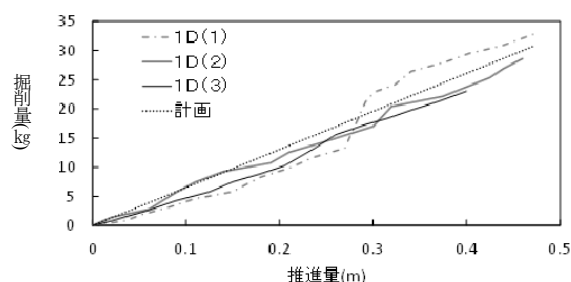


図-5 推進量と掘削量の結果



図-6 地表面陥没の発生状況[全景]

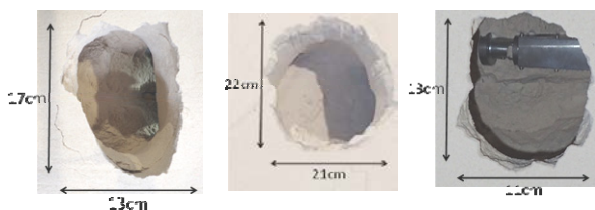


図-7 地表面陥没の発生状況[拡大]  
(左から 1D(1), 1D(2), 1D(3))

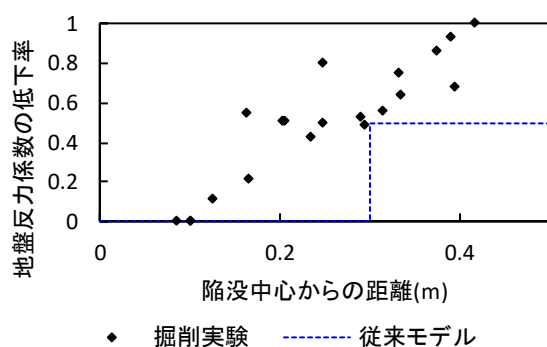


図-8 平板载荷試験結果

なお、実験は陥没範囲や形状のばらつきがあることから同様の実験を3ケース実施した。

## b) 実験結果

掘削量と推進量の計画と実績を図-5に示す。概ね計画と一致したエレメントの掘進が行われた。また、ピッチングおよびローリング角はいずれも $0.01^\circ$ 以下であり、エレメント模型の傾斜・回転は生じなかったことから、実現場に近い施工を再現した。地表面陥没の発生状況を図-6および図-7に示す。3ケースすべてにおいて、1.0D程度の余掘りを行った段階で陥没が発生し、切羽面まで円筒形状で陥没していることが確認できた。

地盤反力係数の低下程度を確認するための平板载荷試験の結果について図-8に示す。縦軸は、陥没時の地盤反力係数/良好時の地盤反力係数より算出した地盤反力係数の低下率とし、1が良好な地盤と同等の地盤反力を有していることを示す。横軸は、载荷位置を陥没中心からの距離として示している。破線は、従来モデルで算出した地盤反力係数の低下程度を示している。地盤反力係数の低下はエレメント中心からの距離に比例して、小さくなることが確認された。また、従来モデルと比較してエレメントの近傍で一定の地盤反力係数が確保できていることが確認できた。

## (3) 地盤反力係数の低下率の推定方法

### a) 陥没範囲の推定

土被りが浅いトンネル周囲においては、せん断帯の発生に伴う特有の変形挙動が現れていることが知られており、この変形挙動は図-9により説明される<sup>2)</sup>。領域Aは土塊自重の重力作用により崩落の可能性を秘めた領域であり、この周囲においては、ある程度の幅でせん断ひずみが卓越したせん断帯aが存在する。更に、領域Aの動きに追従して、領域Bが変形し、領域Cとの境界において、せん断帯bが発生する。この領域Bまでが変形影響領域の目安と考えられる。したがって、トンネル上方に陥没が生じた場合、領域Aが目視で確認される陥没範囲となり、領域Bは緩み(強度低下)が生じている領域となると考えることができる。したがって、エレメント掘進上での陥没の推定範囲については、図-9の変形挙動お

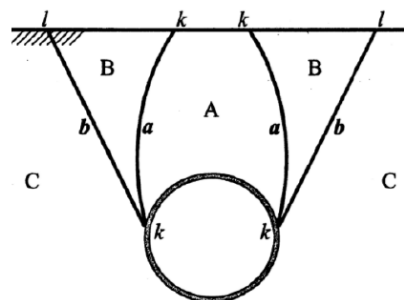


図-9 トンネル周辺特有の変形挙動メカニズム<sup>2)</sup>

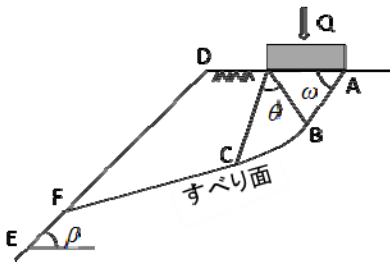


図-10 斜面近傍の基礎の極限釣合法の模式図

よび前節の実験結果より、エレメント幅の直上の範囲で発生すると推定できる。

#### b) 斜面近傍の基礎による地盤反力係数

本研究の地盤反力係数の低下に類似した既往の研究に、鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物）<sup>3)</sup>（以下、「基礎標準」という）に示されている斜面近傍の基礎が挙げられる。これは、斜面近傍地盤の極限支持力が良好な地盤上よりも小さくなることに着目し、斜面近傍の地盤の極限支持力と良好な平地上の極限支持力の比を理論式から求め、これを経験的に地盤反力係数の低下率として利用するものである。斜面近傍地盤の極限支持力が良好な地盤上よりも小さくなる現象は、図-10に示すように良好な地盤上では地表面に向かう基礎下方からのすべり線が、斜面に向かうことを要因としている。この極限支持力は、図-10中のED内の任意の点Fを通るすべり面ABCFの極限釣合い状態を解くことにより求まる。

ここで、曲線ABCFは基礎直下の角度 $\omega$ から幾何学的に定まるものであり、既往の斜面近傍の基礎を模した室内実験<sup>4) 5)</sup>から、Terzaghiの提案した地盤内の内部摩擦角 $\phi$ と $\pi/4+\phi/2$ との中間にあり、内部摩擦角および粘着力には残留強度を使用すると破壊形状が概ね一致することが知られている。今回の設計手法の提案に関しては、安全側に考えて $\omega=\pi/4+\phi/2$ とした。また、斜面角 $\beta$ については、前項の記載の通り、エレメント直上に陥没することを想定し、 $\beta=90^\circ$ とした。さらに、極限支持力が上載荷重を下回る範囲についても地盤反力係数をゼロと想定した。以上の条件により、陥没付近の地盤反力係数の低下率の設定方法を斜面近傍の地盤反力係数の低下率を用いることとした。

#### (4) 新しい構造解析モデルの提案

前節で述べた、陥没時の影響範囲推定方法について、図-2と同様に、斜面近傍の基礎の方法を用いた地盤反力係数分布による簡易工事桁の構造解析モデル（以下、「提案モデル」という）を図-11に示す。この推定方法の信頼性を確認するために、2.(2)で行ったエレメント模型による掘進実験で実施した平板載荷試験結果と比較した（図-12）。結果として、地盤抵抗係数を従来モデルよりも陥没箇所付近まで大きく見込むことが可能で、実

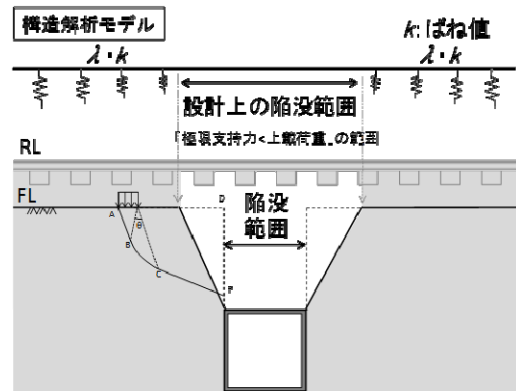


図-11 提案モデルの模式図

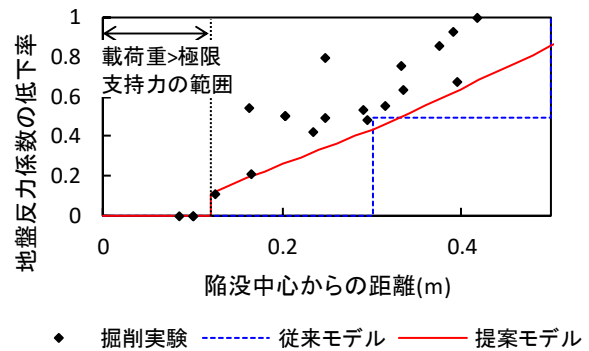


図-12 斜面近傍の基礎の極限釣合法の模式図

験結果に対しても安全側に評価できていることを確認した。したがって、斜面近傍の基礎の方法で用いられる地盤の剛性と強度が比例関係にあると仮定した経験則が、エレメント直上の陥没付近の地盤反力係数の低下程度を評価できると判断し、簡易工事桁の設計に用いる構造解析モデルに取り込むこととした。

### 3. 試計算による感度分析

前章で述べた、提案モデルを用いて簡易工事桁設計に関する感度分析を行った。

#### (1) 地盤反力係数の試算

##### a) 計算条件

エレメント寸法は1.0m×1.0m、地盤条件は単一砂質地盤とした。その他の計算条件は表-2の通りとした。内部摩擦角は35°で一定とし、粘着力は一般的な非開削工法での線路下横断工事が行えるエレメント切羽面の自立性

表-2 計算条件

| 項 目       |                             | 値             |
|-----------|-----------------------------|---------------|
| 土被り (m)   |                             | 1.0, 2.5, 5.0 |
| 地盤        | 内部摩擦角 (°)                   | 35            |
|           | 粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )    | 10, 20        |
|           | 単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> ) | 18            |
| まくらぎ幅 (m) |                             | 0.44          |

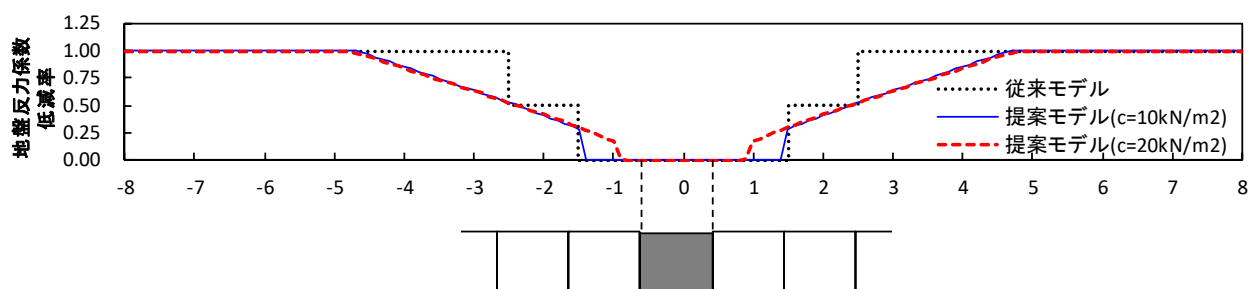


図-13 地盤反力係数の低下率（土被り 1.0m）

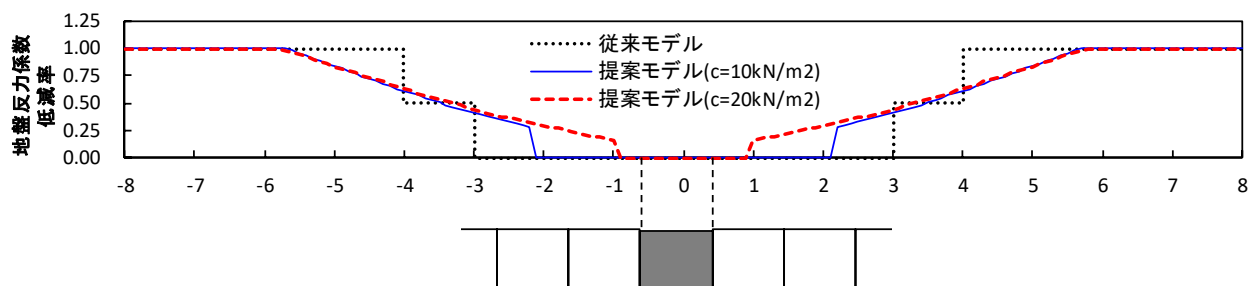


図-14 地盤反力係数の低下率（土被り 2.5m）

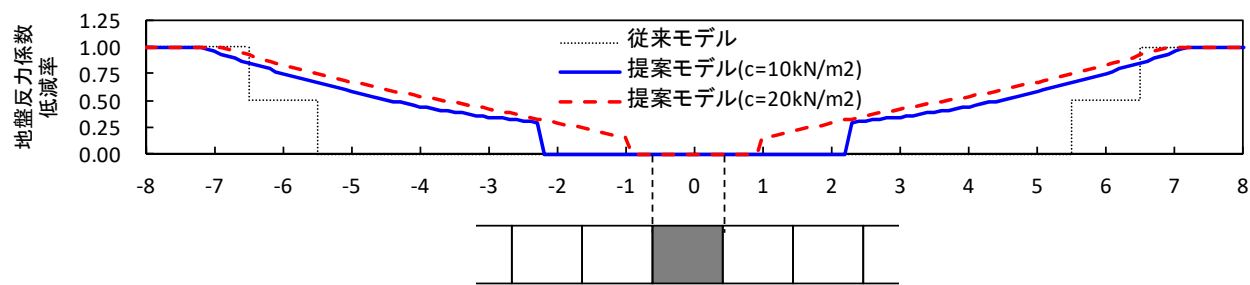


図-15 地盤反力係数の低下率（土被り 5.0m）

の指標から、10～20kN/m<sup>2</sup>程度とした。土被りは、深さ方向の影響を確認するため1.0、2.5、5.0mとした。また、列車荷重による上載圧はレール圧力をEA-17の輪重、まくらぎ寸法を0.24m×2m、道床厚を250mmとして求めた。

#### b) 計算結果

計算結果を図-13～図-15に示す。提案モデルでは、土被りが大きくなるにつれ、または、粘着力が大きくなるにつれて、従来モデルよりエレメント陥没近傍まで地盤反力を考慮できることが確認できた。

### (2) 簡易工事桁の試計算

前節の図-13～図-15に示した地盤反力の低下率を用いて、簡易工事桁の試設計を実施した。一般に簡易工事桁の主桁に用いることができるH形鋼の断面高さは、建築限界を侵さないという条件より、断面寸法が150mm程度までの規格となる。そのため、既製品のH形鋼で設計できない場合は特注規格のH形鋼（以下、「ビルトH材」という）を製作する必要がある。本項では、従来モデルと提案モデルを用いた場合での簡易工事桁の試設計について検討した。

#### a) 設計条件

本研究における簡易工事桁の設計法は、許容応力度法により検討した。主桁となるH形鋼の寸法はH-150×150×7×10とし、材質はSS400の3主桁を標準構造とした。概略断面図を図-16に示す。荷重条件は列車荷重をE-17荷重とし、列車速度は徐行手配を行うことを想定し50km/hとした。軌道構造はPCまくらぎを用いたバラスト軌道でまくらぎ配置間隔は44本/25m（レール1本あたり）とした。軌道線形は直線で縦断勾配はなしとした。

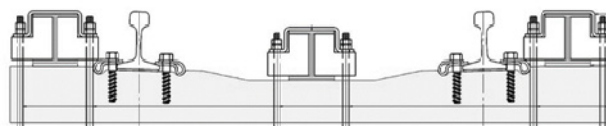


図-16 簡易工事桁の概略断面図

表-3 許容応力度表

| 項 目       | 記号         | 値                       |
|-----------|------------|-------------------------|
| 許容曲げ引張応力度 | $\sigma_t$ | 187.5 N/mm <sup>2</sup> |
| 許容圧縮応力度   | $\sigma_c$ | 187.5 N/mm <sup>2</sup> |
| 許容せん断応力度  | $\tau_a$   | 106.3 N/mm <sup>2</sup> |

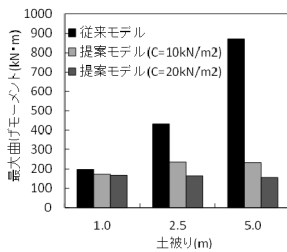


図-17 最大曲げモーメント

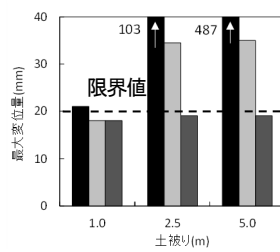


図-18 最大変位量

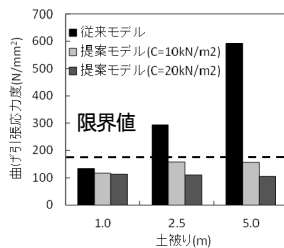


図-19 曲げ引張応力度

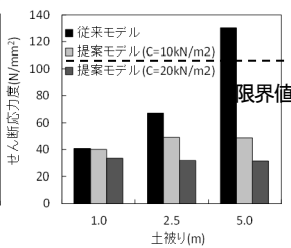


図-20 せん断応力度

設計上の地盤反力係数は、路盤面上必要な $K_{30}$ 値から変形係数 $E_0$ を求め、基礎標準における直接基礎の地盤反力係数として算出する。各種許容応力度は表-3の通りとした。許容変位量は、列車走行安全性から定まる鉛直方向の不動変位量として20mmとした。

#### b) 計算結果

スパン中央に生じた最大曲げモーメントの比較結果、変位量および許容応力度の照査結果を図-17～図-20に示す。結果より、従来モデルは土被りが大きくなると桁スパンが顕著に長くなることから、最大曲げモーメントが増加していくのに対し、提案モデルでは最大曲げモーメントはほとんど同一であることがわかる。

また、変位量および許容応力度の検討については、提案モデルの場合、変位量が設計上の決定要素となり、粘着力 $c=10\text{kN/m}^2$ では土被り1m、粘着力 $c=20\text{kN/m}^2$ ではすべての土被りで満足できることが確認できた。この結果より提案モデルを用いることで、合理的な設計を行い、汎用性の高いH形鋼を使用した設計が可能であることを確認した。

## 4. まとめ

本研究により、以下の点について確認した。

### (1) エレメント掘進による地表面陥没時の影響評価

室内実験および既往の知見を用いた評価方法により、地表面陥没時の影響範囲を確認し、合理的な地盤反力係数を定量的に把握する算出手法を提案した。

### (2) 新しい構造解析モデルによる簡易工事桁の試計算

本研究で提案した算出方法を用いて、簡易工事桁の試計算を行った。結果として、従来モデルでは主桁にビルトH材を用いる必要があった条件において、提案モデルを用いることで、H-150mm×150mmの汎用品で設計が可能であることを確認できた。

今後は、簡易工事桁の設計について、提案モデルおよびH-150mm×150mmに主桁を用いた標準設計とし、標準設計を適用するための設計フローの構築を行うことを検討したい。

## 参考文献

- 1) 鉄道 ACT 研究会：工事桁工法 技術資料，2008.
- 2) 芥川真一，松本憲，長井寛之，：土被りが浅いトンネルの非線形挙動解析に関する一考察，トンネル工学研究発表会論文・報告集，Vol.10，pp.113-118，2000.
- 3) （公財）鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物），丸善，2012.
- 4) 木村孟，藤井斉昭，斎藤邦夫，日下部治：砂中の浅基礎の支持力に関する研究，土木学会論文報告集，Vol.319，pp.97-104，1982.
- 5) 毛戸秀幸，前田良刀，上原精治，日下部治：斜面上直接基礎の実用的な支持力評価法の提案，土木学会論文集，Vol.403，pp.147-156，1989.