

MIDAS
CONSTRUCTION
TECHNICAL
DOCUMENT
COLLECTION

地盤変形・トンネル分野 6



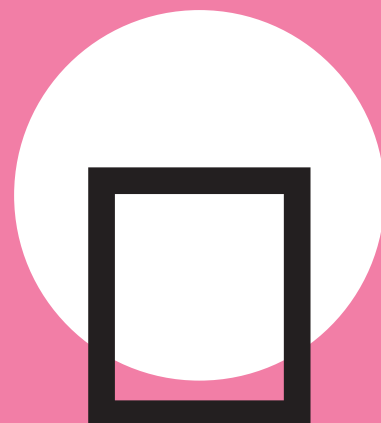
MIDAS CONSTRUCTION TECHNICAL DOCUMENT COLLECTION

地盤変形・トンネル分野

6.

トンネル・地下構造物における
数値解析-除荷挙動が与える
影響

首都大学東京大学院 西村 和夫 教授



トンネル・地下構造物における数値解析

— 除荷挙動が与える影響 —

首都大学東京 西村 和夫

概要

地盤の掘削解析において、解析領域の大きさは変位に大きな影響を与える。同様に、掘削過程において支保部材等の部材応力もその影響を大きく受けている。それらの影響は地盤の载荷、除荷挙動を解析に反映することで実務的には簡便に除くことができる。

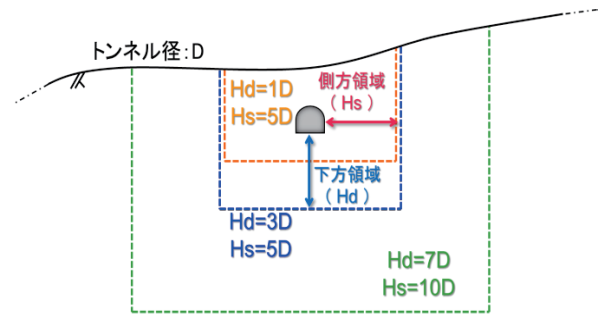


図-1 解析領域の設定

1. 背景

1) 解析領域の大きさの設定によって地表面沈下が大きく変わる。→ 正解はなんぞや？

2) 田村・足立 (2002*) に代表される多くの検討がなされているが、有限要素解析における実務的な検討は行われていない。

3) 地表面沈下に限らず解析領域の変形はすべて解析領域の広さに依存する (図-1~3)。

結果としてトンネル周辺の応力・変形、トンネルそのものの変形モードも解析領域に依存する。また、弾塑性解析であっても同様の問題が生ずる。

4) 数値解析に関するマニュアル等には、

下方領域 3~4D 側方領域 4~5D,

下方領域 2~3D 側方領域 4~5D

など、リバウンド抑制のための解析領域の推奨範囲が記述されているが、本来、地盤特性に依存して決まる地盤変形を意図的に制御していることになり、避けるべき。

5) 地盤本来の特性にしたがってリバウンドの過多が決まるのならば、地盤本来の特性 (構成則) を反映させて解析すべき。

→ 掘削は载荷と除荷の合成挙動であることに着目し、単純な構成則でも良いから除荷剛性を反映することが必要。

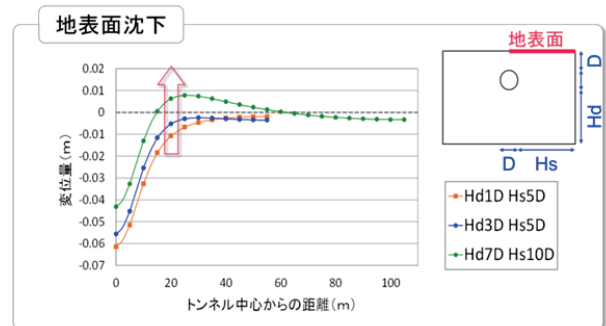


図-2 地表面沈下

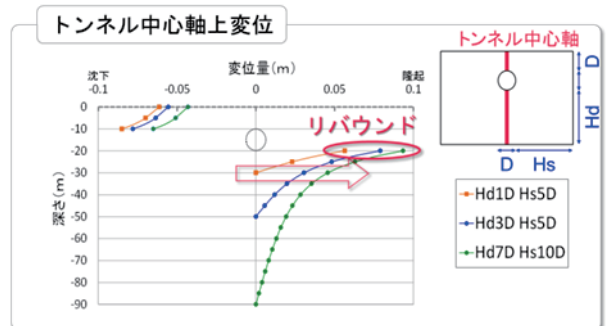


図-3 地中変位

*田村武・足立紀尚：トンネル掘削解析における領域設定について：土木学会論文集 701-III-58

2. トンネルにおける除荷領域 (Mohr-Coulomb 則, 地盤物性は均一, 除荷剛性考慮無し)

1) 除荷領域はトンネル形状だけではなく, 土被り, 地盤物性によっても大きく異なる.

2) 図-4 は, 均一地盤における土被りの違いによる円形トンネルの解析例. 土被りは上図が 1D, 中図が 2D, 下図が 3D (D:トンネル直径).

→ 除荷の程度 (値) には場所によって大きな差があるが特徴的なパターンを描いている.

→ トンネル下部の広がりと比較して, 側部とトンネル上部の除荷領域の広がりが土被りによってかなり異なる.

3) 図-5 は同一土被り (1D) における円形トンネルと馬蹄形トンネルの除荷領域の違いの解析例 (物性は図-4 と異なる).

→ 馬蹄形トンネルではトンネル側部に除荷領域が生じていないが, 元々距離が遠いうえ, 値は小さいので大きな問題ではない.

→ トンネルインバート部直近で違いがある.

4) 図-6 は同一地盤物性, 領域, トンネル形状 (馬蹄形) で, メッシュサイズの違いの解析例 (物性は図-4, 図-5 と異なる).

→ 除荷領域の広がりには大差はない. トンネル側部の除荷領域は形状が異なるが, トンネル及び周辺地盤変形には大きな影響は与えない程度の除荷量である.

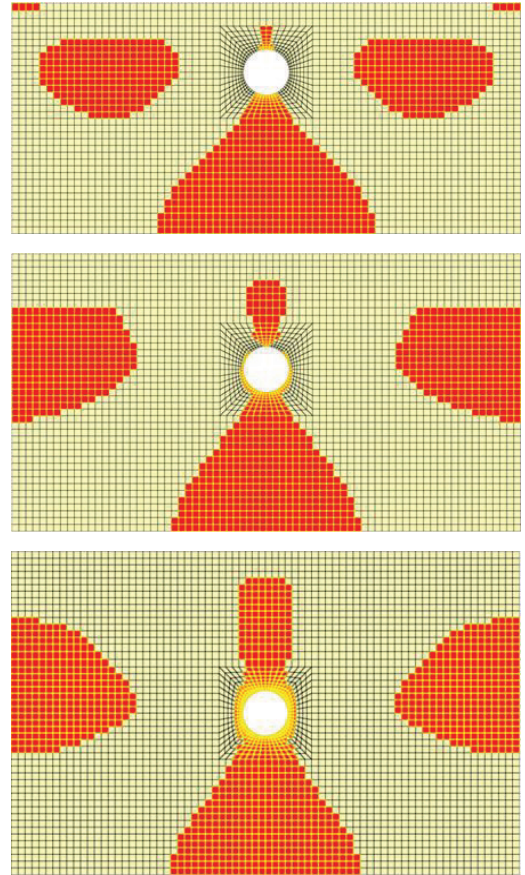


図-4 掘削による除荷領域(円形)

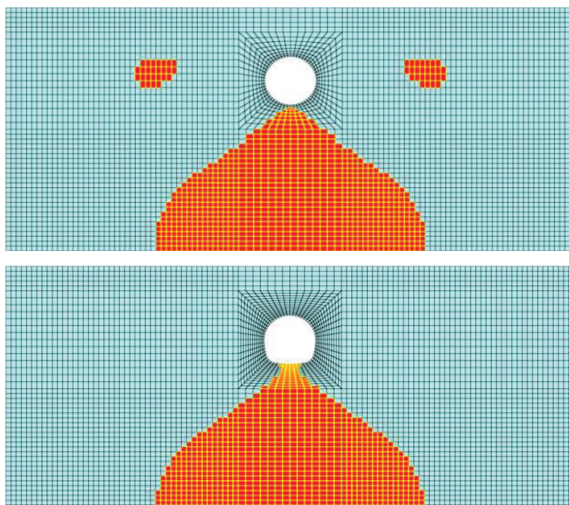


図-5 トンネル形状による違い

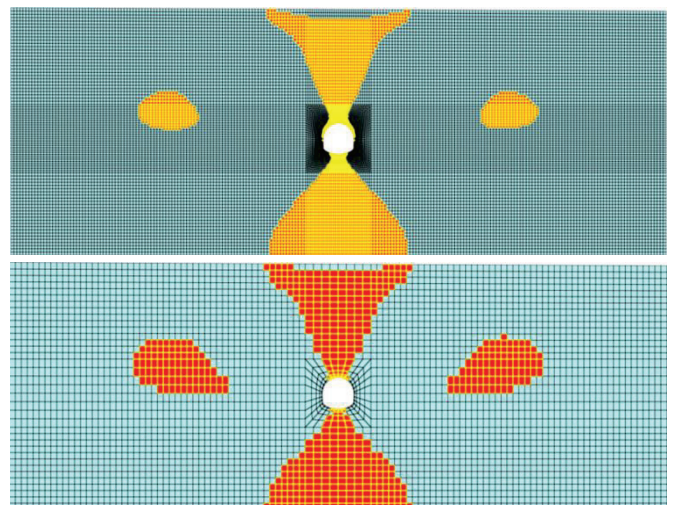


図-6 メッシュの粗さによる違い (馬蹄形)

3. 地盤の除荷挙動の数値解析への反映

- 1) 地盤はもともと除荷挙動と載荷挙動が異なる。
 - 図-7 上図は軟岩の孔内載荷試験の繰り返し載荷試験結果の例。下図は除荷剛性のひずみ依存度。
 - ひずみレベルで異なるが，除荷剛性は初期剛性の10倍を超える。
 - ただし，解析において除荷剛性は通常では初期剛性の3~5倍程度でよいのではないか。
- 2) 初期剛性の3倍の除荷剛性を与えて図-2, 3と同様の解析を行った。
 - 地表面沈下(図-8)は解析領域の大きさに関係なくほぼ一定となる。地中変位(図-9)は，インバートのリバウンドが，下部解析領域が少ない場合(Hd=1D)，他のケースとかなり異なる。
 - この結果から，図-1のように意図的に解析領域の大きさを制御するのではなく，除荷剛性を考慮して十分な大きさの解析領域を設定することがよい。
- 3) トンネル周辺の変形挙動を確認した(図-10)。
 - 除荷剛性を考慮する(右図)ことによってインバートのリバウンドが抑制されている。
- 4) 図-3, 図-9 トンネル上部の深さに対する変形勾配の比較と，図-10左図と比較して右図の天端上部地山の黄色部分の分布幅の拡大，隣接緑部分の幅の減少から，天端上方地山の地山に緩み領域のようなゾーンが形成されていることがわかる。

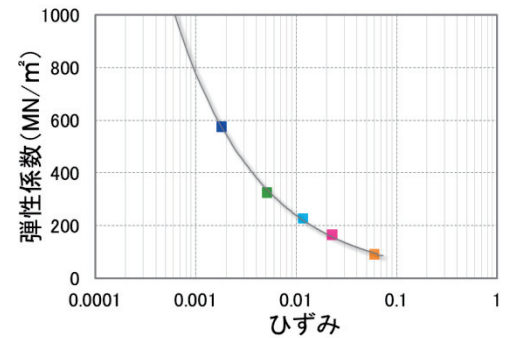
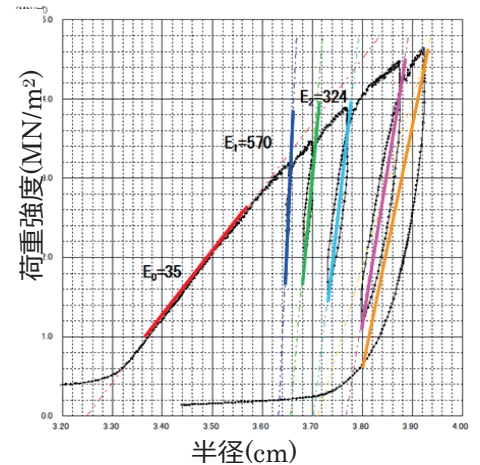


図-7 孔内載荷試験の例

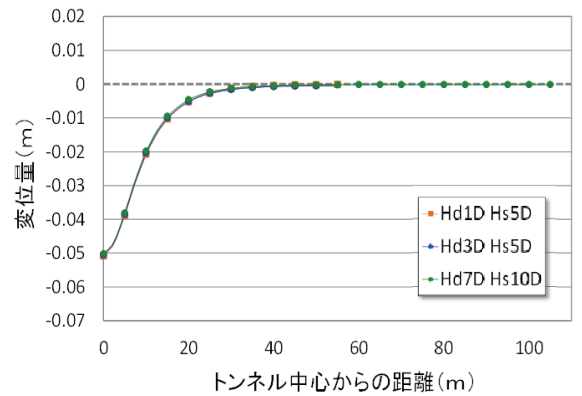


図-8 地表面変位

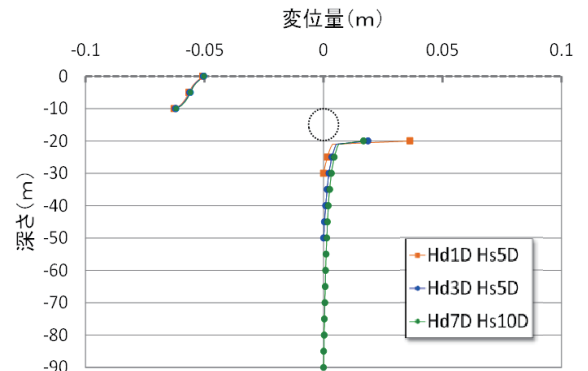


図-9 地中変位

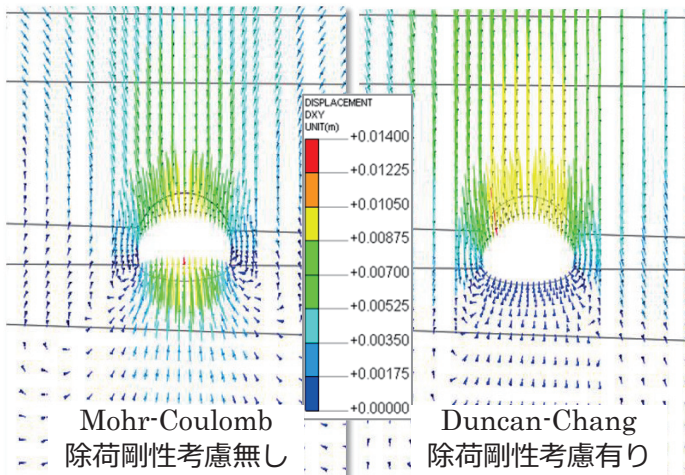


図-10 トンネル周辺の地中変位ベクトル

4. 地中構造物に与える除荷剛性の影響の解析事例

1) トンネル周辺の地山変位挙動が除荷剛性の影響を受けていれば、当然、支保部材応力も除荷剛性の影響を受ける。特に、逐次掘削が顕著な場合にはその影響が大きいと推測される。

→ 逐次掘削が顕著である、供用中トンネルのインバート新設補強工事を事例に示す。

2) 盤膨れ対策はインバート設置 (図-11 下図) が本手であるが、全面通行止めを伴うため、通常はアンカーやパイル (図 11-上図) を用いることが多い。

→ 片側施工で閉合インバート構造が施工できる工法として、鋼管複合インバート工法を考え、数値解析でその可能性を確認した。

3) この工法は、片側通行を確保した上で、もう片方の路盤を掘削、水平に鋼管を削孔打設し、コンクリートを中詰めする。路盤をインバートアバット状にコンクリートで固める。埋め戻して通行車線を切り替え、反対車線の路盤を掘削、先行打設してある鋼管の先を掘り出し、コンクリートで巻き込んで、図-12 のようなインバート構造とする。

→ 一気に掘削を行うと既設覆工に大きな応力、変形が生ずることから、部分施工を繰り返して構造体を構築する。

→ 地山の部分掘削に伴って地山は載荷部、除荷部が複雑に入れ替わり、覆工、インバートアバット、鋼管に部分掘削に伴う応力が導入される。

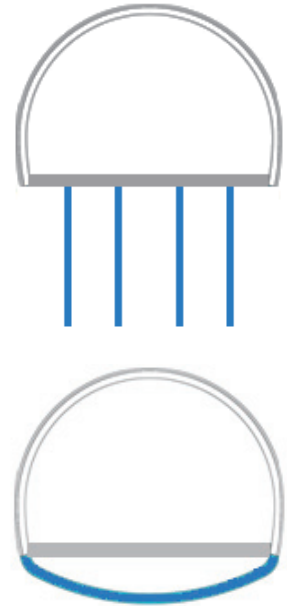


図-11 盤膨れ対策例

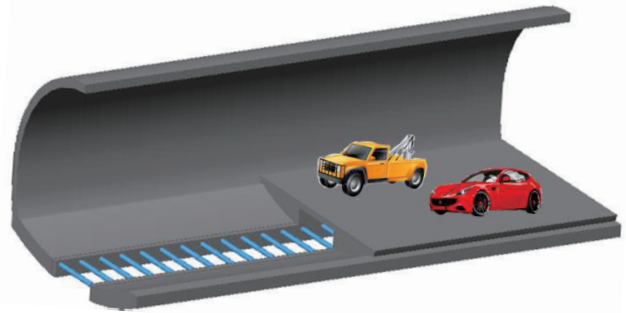


図-12 鋼管複合インバート

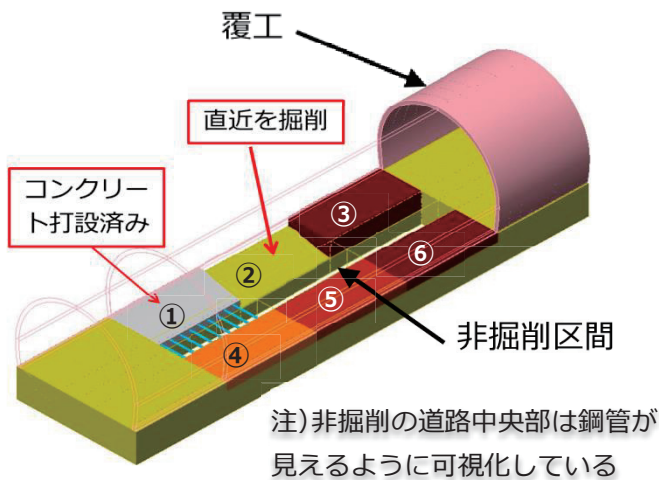


図-13 鋼管複合インバート施工手順

step	掘削先行・足付け打設
1	覆工脚部掘削
2	足付けコンクリート打設
3	① 地盤掘削
4	② 地盤掘削
5	① 鋼管中詰コンクリート打設
6	① インバート打設
7	③ 地盤掘削
8	② 鋼管中詰コンクリート打設
9	② インバート打設
10	③ 鋼管中詰コンクリート打設
11	③ インバート打設

5. 部分掘削が与える影響（除荷剛性の考慮無し）

1) 解析モデル（図-14～16）.

- 地山は Mohr-Coulomb の弾塑性のソリッド要素.
- コンクリート覆工は線形のソリッド要素
- 鋼管は外径が 8 角形でシェル要素(図-16 左上赤要素).
- 鋼管中詰めコンクリートは引張強度設定, 鋼管断面あたり 9 要素のソリッド要素（図-16 左上青要素）.

2) ステップ解析の結果.

- 路盤 3 分割施工（図-13）によって既設覆工には, 分割掘削中央部分で引張力が発生（図-17 上図）し, 分割施工境界部で圧縮応力が発生（図-17 下図）する. 変形は覆工脚下が掘削されて支持を失うために地山変形に伴って内空へ押し出される（図-18）.
- 値は図示しないが, 路盤の部分掘削に伴い, 図-19 下図の赤破線部の鋼管付け根に部分掘削の影響による応力が集中的に生ずる.

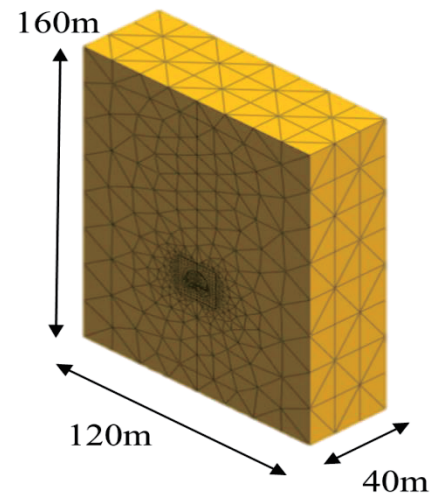


図-14 解析モデル

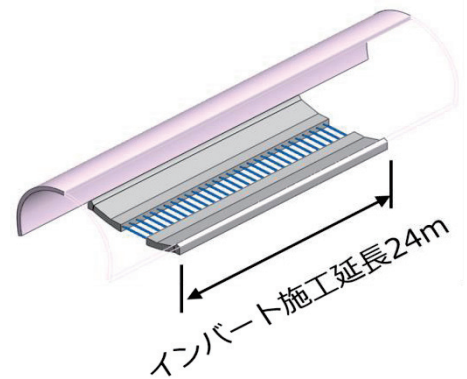


図-15 インバート施工区間

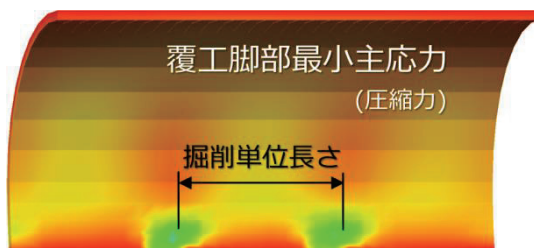
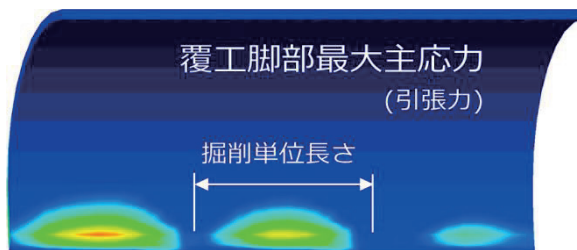


図-17 インバート施工区間

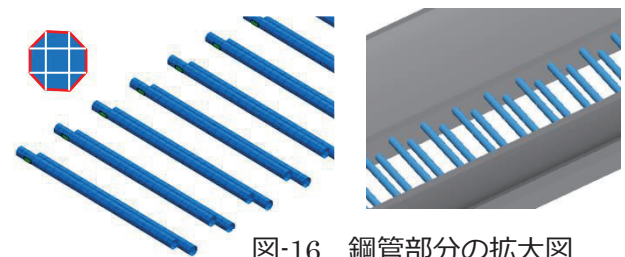


図-16 鋼管部分の拡大図

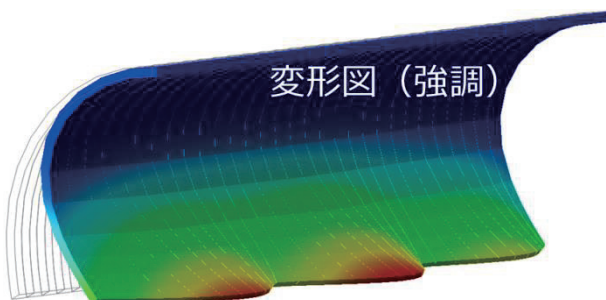


図-18 インバート施工区間

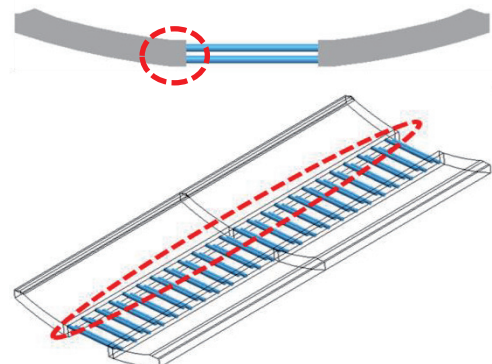


図-19 鋼管部分の応力集中部

6. 除荷剛性を考慮した解析結果

1) 図-14 のモデルを用いた, 除荷剛性を考慮できる Duncan-Chang の構成則による非線形解析は, モデルの要素数や解析ステップ (25step) の多さのために, 解析が回らなかった.

→ 除荷剛性を考慮した解析は, 計算に非常に大きな負荷を与える.

→ 解析ソフトの組み込み構成則のアルゴリズムに工夫が求められる.

2) 路盤の部分掘削による変形は, ほぼ路盤水平面内の掘削の影響が主となっている.

→ 要素数, ステップ数を減らすために, 図-20 のような, ある程度の厚みを持たせた路盤部のみをモデル化し, 除荷剛性の有無による結果の相对比较で除荷の影響を評価した.

→ 解析ステップは図-21 (上図は平面図).

→ 除荷剛性は初期剛性の 5 倍.

→ 地山も含めて部材応力, 変形は減少した.

- 鋼管応力は最大引張力 14%減
最大圧縮力 22%減
- 中詰めコンクリート最大引張力 17%減
最大圧縮力 57%減

→ 除荷剛性は部材応力にも大きく影響する.

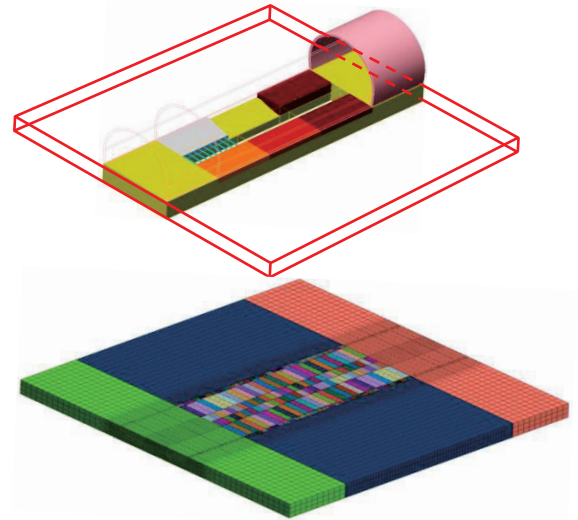


図-20 簡易モデルによる検証

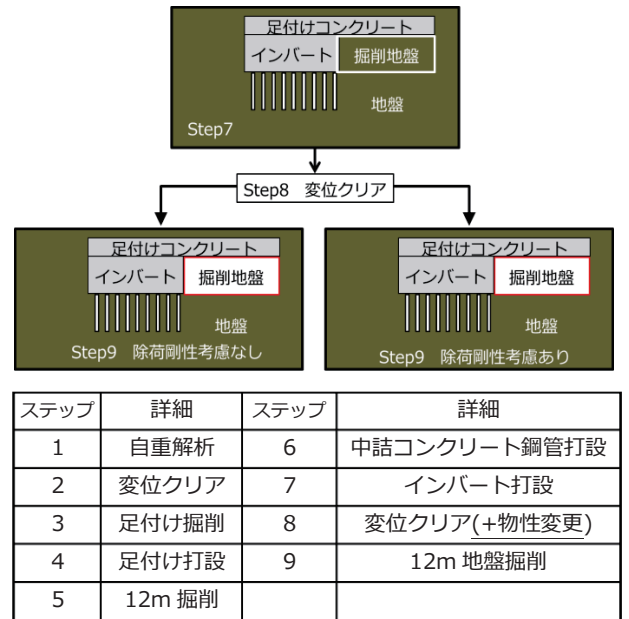


図-21 簡易モデルによる検証ステップ

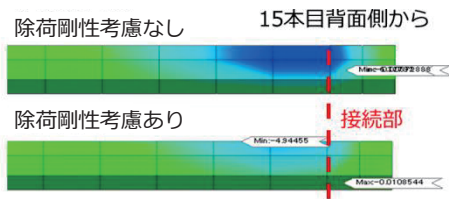


図-22 鋼管部応力

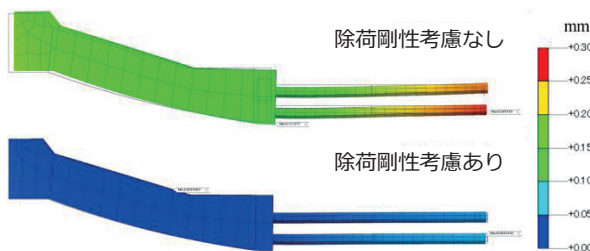


図-23 インバート部の変形

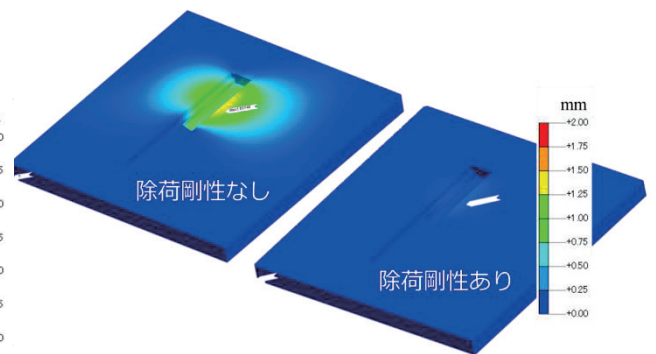


図-21 路盤部の地盤変位

地盤変形・トンネル分野

MIDAS CONSTRUCTION TECHNICAL DOCUMENT COLLECTION



株式会社マイダスイテジヤパン

〒101-0021 東京都千代田区外神田5-3-1 秋葉原OSビル7F

TEL 03-5817-0787 | FAX 03-5817-0784 | e-mail g.support@midasit.com | URL <http://jp.midasuser.com/geotech>

Copyright © Since 1989 MIDAS Information Technology Co., Ltd. All rights reserved.