未固結・小土被り地山でのトンネル掘削における適切な改良深さに関する解析的検討

名城大学 正会員 ○ 崔 瑛
京都大学工学研究科 正会員 岸田 潔
京都大学工学研究科 正会員 木村 亮
(株)レールウェイエンジニアリング 正会員 野々村政一
(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 正会員 井浦智実

1. はじめに 東北新幹線の延伸工事では，未固結地山において小土被りトンネルが多数建設された [1]．トンネル天端と切羽の安定性確保や地山の変形抑制を目的として，地上部の制約が少ない区間では，地上からトンネル周辺地盤を改良してから NATM で掘削が行われている．現場では，試行錯誤的に天端のみ，脚部下部までなど様々な改良パターンが適用されたが，その適切な改良範囲および改良強度に関する検討は不十分である．崔ら [2]は，実際のトンネル掘削を模擬する有限要素解析を行い，改良幅を広くすることで地盤・トンネル沈下抑制効果が得られるという知見を得ている．本稿では，**表-1** に示す計 8 ケースについて数値解析を行い，改良深さが地山改良工の効果に及ぼす影響について検討を行う．改良幅はいずれも 7.0 m であり，トンネル天端から改良地盤の上部境界までの距離は 1.8 m である．

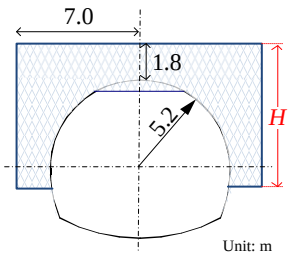
2. 数値解析の概要 本稿では，弾塑性有限要素解析コード DBLEAVES[3]を用いて，二次元弾塑性有限要素解析を行った．**図-1** に解析領域および境界条件を示す．地盤の力学特性は，弾塑性構成モデル subloading t_{ij} model[4]を用いてモデル化した．**表-2** に地盤材料の入力パラメータを示す．簡単のため本解析では一種類の地盤材料を設定しているが，subloading t_{ij} model は中間主応力と拘束応力が地盤の強度・変形特性に及ぼす影響が考慮できるため，深さ方向に地盤の剛性が高くなる．改良体部分は弾性体としてモデル化し，ヤング率 E は一軸圧縮強さ q_u（0.5 N/mm^2）に基づいて計算し [5]，1.12×10^4 kN/m^2 と設定した．

吹付けコンクリートおよび鋼製支保工は，便宜上一体化させて合成梁（弾性 Beam）としてモデル化した．合成梁のヤング率は，曲げ剛性 EI が支保工と吹付けコンクリートの曲げ剛性の和と一致するように定め，6.65×10^6 kN/m^2 と設定した．

実際の現場では，ベンチカット工法を用いてトンネル掘削が行われている．トンネル掘削による切羽の進行は，掘削相当外力を徐々に解放することにより表現し，切羽到達時点での応力解放率は上半・下半ともに 40 %と設定した．

3. 解析結果 **図-3** に，上半脚部まで改良したケースと，下半脚部まで改良を施したケースでの地表面とトンネルの沈下量の経時変化を示す．地表面沈下量は上半切羽到達前の先行沈下を含んでいる．地山改良を施さず未固結地盤に直接トンネルを掘削する Case_0 では，地表面と脚部で 400 mm 以上，天端で 300 mm 以上と，大きい沈下が確認できる．上半脚部まで地山改良を施した Case_4 はいずれも 100 mm 以下，下半まで改良を施した Case_7 では，いずれも 20 mm 以下に収まり，地山改良工に沈下抑制効果が確認できる．

表-1 解析パターン



	H (m)
Case_0	—
Case_1	4.40
Case_2	5.39
Case_3	6.46
Case_4	7.00
Case_5	8.18
Case_6	9.34
Case_7	9.90

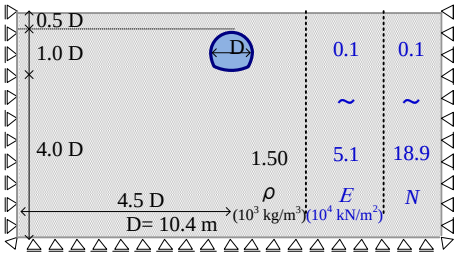


図-1 解析領域と境界条件

表-2 地盤材料および材料定数

単位体積重量 [kN/m^3]	14.70
破壊時の主応力比 M_f	2.60
ポアソン比 ν	0.36
静止土圧係数 K_0	0.56
間隙比 e_0	1.27
β (stress-dilatancy)	2.0
a (ANN)parameter	500
OCR	5
圧密指数 λ	0.1154
膨潤指数 κ	0.02

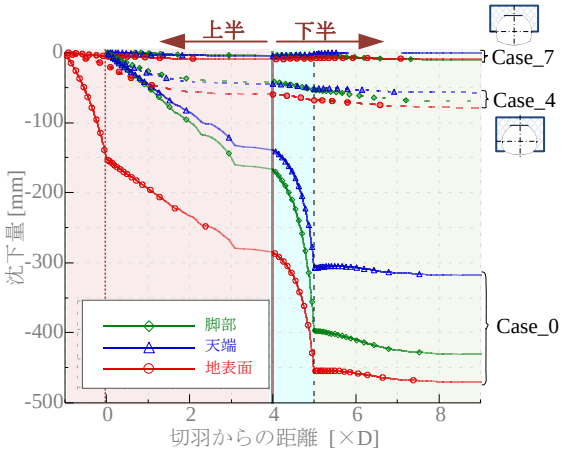


図-2 地表面とトンネルの沈下量の経時変化

キーワード 地山改良，トンネル掘削，有限要素解析
連絡先 〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501 名城大学理工学部建設システム工学科 ＴＥＬ 052-838-2346

図-3 に，改良深さが地盤とトンネルの沈下抑制率に及ぼす影響を示す．各沈下抑制率は，地盤改良を施していない Case_0 に対する，各ケースでの沈下の減少量を百分率で示す．改良深さが 7 m 以下のケースは，上半まで改良したものを示し，改良深さが 7 m 以上のケースは下半まで改良を施したものを示している．図より，改良範囲が深くなるほど地表面およびトンネルの天端と脚部の沈下抑制率が大きくなる．さらに，改良深さが 7 m を超えると，僅ではあるが，沈下抑制率の曲線の勾配が急になる傾向が見られる．これにより，地山改良を下半まで施すほうがより効率的であると考えられる．

図-4 に，トンネル掘削完了時にトンネル下部地盤（図中点線部分）に作用する鉛直土圧の分布を示す．図中の黒点線は初期鉛直土圧を示す．トンネル掘削により，トンネル直下地盤に作用する鉛直土圧は解放され，小さくなる．同時にトンネル周辺地盤に作用する鉛直土圧は，それを受け持つような形で大きくなる．トンネル直下地盤に作用する鉛直土圧はすべてのケースでほぼ同じ値を示し，地山改良および改良深さによる影響は見られない．これに対してトンネル周辺地山に作用する鉛直土圧は，地山改良を施すことにより，分布形状および最大値ともに大きく変化する．肩部付近まで改良を施した Case_1 では，土圧が変化する領域，すなわちトンネル掘削により影響される地盤領域が広くなる結果が見られる．改良範囲が Case_4 より深くなると，鉛直土圧が狭い地盤領域に集中し，トンネル掘削により影響される地盤領域が狭くなる．以上により，下半まで改良を施したケースでは，トンネル掘削が周辺地盤に及ぼす影響を低減させる効果が得られる．

図-5 に，各施工段階でのせん断ひずみ分布を示す．それぞれの図は，前段階からの増分値を示している．上半掘削時は，トンネル肩部と上半脚部から上方向に，脚部から斜めしたに大きいせん断ひずみが発生している．いずれの改良パターンにおいても，改良を施すことにより脚部より上方向に発生するせん断ひずみは大きく抑制され，改良深さが深くなるほどその効果が高くなる．また，下半掘削時には，改良を施さない場合，下半脚部から斜め上方向に大きいせん断ひずみが発達する．改良を施すことによりこのせん断ひずみも大きく抑制され，改良深さが深くなるほどその効果が高くなる．なお，いずれの施工段階においても，改良体と周辺地盤の境界部分で小さいせん断ひずみが発生する現象が見られる．これは，改良地盤の剛性が周辺地盤に比べ極端に大きいため，ひずみが境界部分に集中したためであると考えられる．

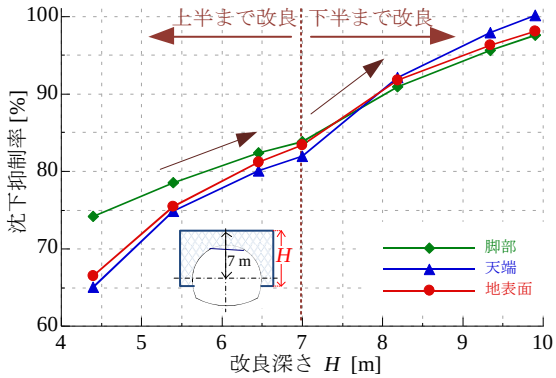


図-3 改良深さが沈下抑制効果に及ぼす影響

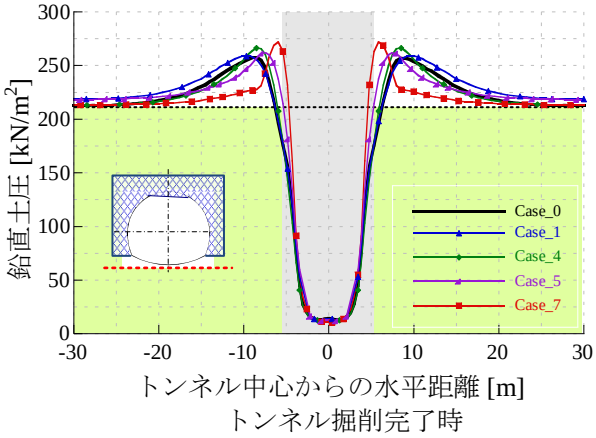


図-4 鉛直土圧分布

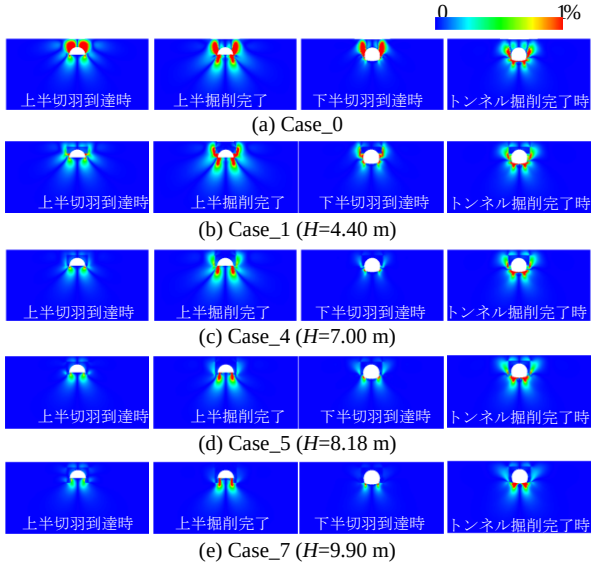


図-5 せん断ひずみ分布

4. まとめ　地山改良を施すことにより，地表面，天端および脚部の沈下を大幅に抑制することができ，改良範囲が深くなるほど高い沈下抑制効果が得られる．

以上の結果により，地山改良による沈下抑制効果は，主に地盤剛性の増加によるせん断補強により得られると考えられる．また，下半部まで改良を施す場合は，荷重を狭い範囲に再配分し，トンネル掘削による影響を狭い範囲に留める効果があることも考えられる．

本研究の一部は，科研費（No. 21360223）の助成を受けたものである．

参考文献　1) 社団法人日本トンネル技術協会：東北新幹線における未固結小土被りトンネルの設計施工対策評価報告書(別冊)，八戸・七戸間における小土被り未固結地山のトンネル施工に関する検討成果のまとめ，2008.　2) 崔 瑛，他：未固結・小土被り地山でのトンネル掘削における適切な地山改良幅に関する解析的検討，第 46 回地盤工学研究発表会，2011. (投稿中)　3) Ye, B. et al. : Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.3, 547-558. 2007.　4) Nakai, T. and Hinokio, M. : A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, *Soils and Foundations*, Vol. 44, No. 2, pp. 53-70, 2004.　5) 社団法人セメント協会：セメント固化材による地盤改良マニュアル，p73, 2007.