

小土被り山岳トンネルに施した地盤改良の地震時における効果の検討(その1)

鉄道建設・運輸施設整備支援機構 正会員 ○吉村 直人 高橋 源太郎
中央復建コンサルタンツ 正会員 室谷 耕輔 橋 直毅

1. 概要

九州新幹線鹿児島ルート・新田原坂トンネルの終点側坑口付近は、図-1に示すように小土被りであり、地質は阿蘇の火砕流堆積物で九州地方の特殊土である軟弱な灰土が堆積していることから、地上からの地盤改良により地山の安定を図り、山岳工法による掘削工事を行っている。坑口部の覆工はRCを採用し、応答変位法により耐震設計を行っているが、実際の地震時の挙動は、地盤-改良体-覆工間の相互の影響が複雑となることが想定されるため、改良体を含めた構造物の耐震性能の確認を実施した。

本報は、地盤改良を施した小土被りトンネルの耐震性を確認することを目的に、地盤、改良体、覆工の非線形性を考慮した逐次非線形解析を実施し、未改良のケースの解析結果と比較することで、地震時の地盤改良の効果について検討した結果を報告する。

2. 土層構成と解析モデル

図-2に示すように、トンネルの土被りは2m程度の小土被りであり、インバート以浅の土層構成は $V_s=190\text{m/s}$ の灰土層A4(cI)、それ以深は $V_s=600\text{m/s}$ の非溶結層A4(n-Wt)および弱溶結層A4(w-Wt)で構成される。地盤改良の範囲は、トンネル覆工から4mの範囲である。なお、解析モデルは、灰土、基盤層、改良体については平面ひずみ要素、覆工はビーム要素によって構築し、解析領域の側方および底面に粘性境界を設けた。地震動は鉄道構造物設計標準のL2地震動(基盤面波形最大加速度 637gal)を用いた。

3. 物性値および非線形特性

(1) 地盤(灰土、非溶結層、弱溶結層)

地盤の非線形特性は安田・山口の式により平均粒径 D_{50} と平均有効拘束圧との関係から推定し、修正R0モデルでフィッティングした(図-3)。

(2) 改良体

改良体は機械攪拌併用の高圧噴射工法によるものであり、一軸強度は 500kN/m^2 である。非線形特性は、既往の実験結果¹⁾を参考に $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線を設定し、修正R0モデルまたはHDモデルでフィッティングを試みた。なお、本検討では、事前の検討において、改良体内部の最大せん断ひずみが 10^{-2} 程度にまで達することを確認したため、大ひずみ領域での適合性が高かったHDモデルを採用した(図-4)。

(3) トンネル覆工

RC構造である覆工は、常時軸力を固定として算出したトリリニアの骨格曲線(M- ϕ 曲線)を設定し(図-5)、復元力特性は修正武田モデルを適用した。なお、単位重量は 24.5kN/m^3 、初期変形係数は $2.5 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ である。

キーワード 山岳トンネル, 逐次非線形解析, 小土被り, 地盤改良

連絡先 〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4丁目11番10号 中央復建コンサルタンツ(株) TEL 06-6160-2312

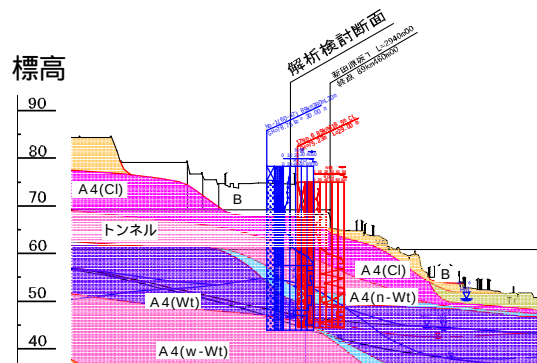


図-1 地質縦断面図とトンネル位置

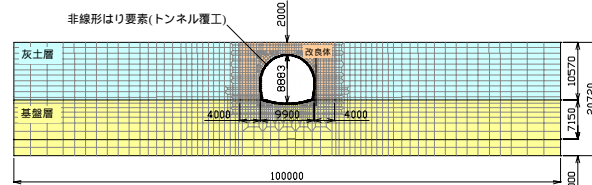


図-2 解析モデル

表-1 物性値一覧表

土層	深度 (m)	層厚 (m)	N値	単位 重量 γ (kN/m^3)	せん断 波速度 V_s (m/sec)	ポアソン 比 ν	初期せん 断弾性係 数 G_0 (kN/m^2)	せん断弾 性係数 G (kN/m^2)	最大 減衰定数 $\gamma_{f0.5}$	τ_1 (kN/m^2)	h_{max}	α	β
A4(cI)	1,000	1,000	5程度	17.5	190	0.40	64464	8.25E-04	5.317	0.25	2.78	1.47	
	2,000	1,000						9.75E-04	6.284				
	3,000	1,000						1.05E-03	6.838				
	4,000	1,000						1.12E-03	7.233				
	5,000	1,000						1.16E-03	7.458				
	6,000	1,000						1.18E-03	7.578				
	7,000	1,000						1.19E-03	7.689				
	8,000	1,000						1.21E-03	7.791				
	9,000	1,000						1.22E-03	7.888				
	10,000	1,000						1.24E-03	7.978				
A4(n-Wt)	10,570	0,570	35程度	20.0	600	0.42	734694	1.25E-03	8.045	0.30	3.44	1.78	
	11,083	0,513						7.59E-04	446.25				
	11,920	0,837						7.69E-04	451.88				
	12,720	0,800						7.80E-04	458.59				
	13,720	1,000						7.93E-04	465.83				
	14,720	1,000						8.06E-04	473.70				
A4(w-Wt)	16,220	1,500	45程度	18.1	290	0.45	172413	8.22E-04	483.33	0.35	4.06	2.02	
	17,720	1,500						8.41E-04	494.58				
	19,220	1,500						8.62E-04	508.12				
	20,720	1,500						8.83E-04	521.34				
改良体	-	-	70程度	18.1	290	0.45	172413	1.70E-03	291.78	0.25	2.45	1.29	

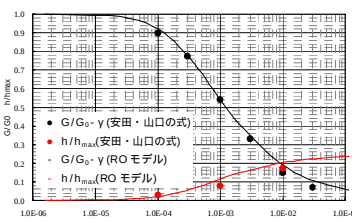


図-3 地盤の非線形特性

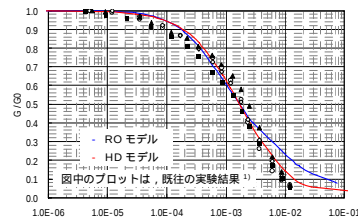


図-4 改良体の非線形特性

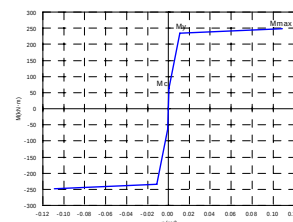


図-5 覆工の非線形特性

4. 解析結果

解析結果は図-6のように時刻 10.78 秒(改良なし), 10.76 秒(改良あり)で, 覆工上下間の相対変位, 断面力が最大となった。

改良なしの場合, 覆工上下間の相対変位が 58.6mm であるのに対し, 改良ありの場合は, 覆工上下間の相対変位は 36.9mm, 周辺の改良体の位置での相対変位が 38.4mm となり, 6~7 割程度まで減少している。これは, 周囲の地盤改良によりトンネルの見かけ上のせん断剛性が大きくなり, せん断変形を抑制したためであると考えられる。

図-7に曲げモーメント図, せん断力図, M- ϕ 履歴曲線を示す。改良ありの曲げモーメントは, 改良なしと比較して, 9 割程度の減少にとどまっているが, これは部材の非線形性を考慮したためであり, 部材の曲率で比較すると, 5 割程度まで減少している。これは, 改良体が変形を抑制することに起因するものと考えられる。このように覆工の周辺の地盤を改良することにより, 覆工に作用する変形が抑制され, 曲げ変形に対する抑制効果が期待できることを確認できた。

一方, せん断力については 9 割程度の減少にとどまっており, 改良体の効果はあまりない結果となっている。この結果を考察するため, トンネル周囲のせん断応力分布を図-8に示す。改良ありの場合は, トンネルの変形が減少しているにもかかわらず, 改良なしの場合よりも大きなせん断応力が発生している。これは, 周囲の地盤改良により, トンネルの見かけのせん断剛性が増加し, 変形は減少する一方, トンネルと改良体を含めた構造系として負担する水平力は増加するためであると考えられる。さらに, 解析モデル上, 覆工-地盤(改良体)間は結合されているため, 変形時に地盤が覆工を引っ張る現象が生じていると考えられ, この現象が断面力の減少効果に支障を及ぼしているものと考えられる。

5. まとめ

逐次非線形解析結果に基づく, 地盤改良の耐震効果についてまとめる。

改良体の曲げ変形に対するの効果は顕著であるが, せん断力への効果はあまりない結果となった。

せん断力に対する効果があまりないのは, トンネルの見かけの剛性が増加し, 変形は減少するものの, 負担するせん断応力が大きくなること, 解析モデル上, 周辺地盤が覆工を引っ張っている現象が生じていることが挙げられる。

以上より, 「その2」の報告では, 覆工と周辺地盤間に剥離・滑りを考慮できるジョイント要素を設置した解析を実施し, その影響を確認する。

参考文献

1) 中山ら: 深層混合処理工法による改良体の物性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.411-412, 2002.8

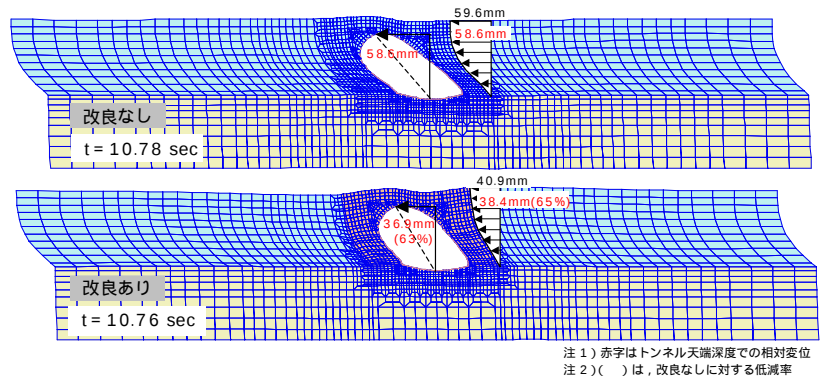
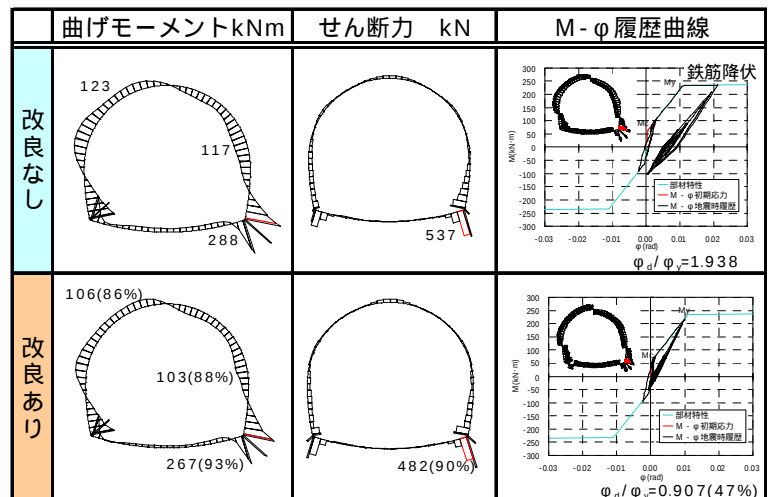


図-6 覆工の相対変位, 断面力最大時の変位応答



注) M- ϕ 履歴曲線の曲げモーメント, 曲率は, 要素中間値である。

図-7 トンネル覆工断面力結果(最大時)

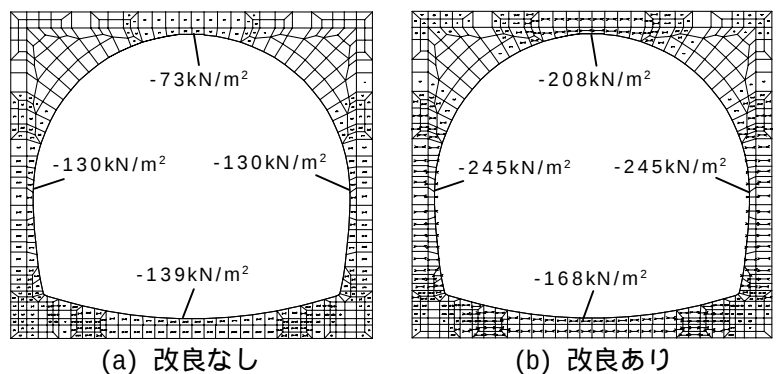


図-8 断面力最大時の覆工周辺のせん断応力分布