

レベル2地震動に対するトンネルの等価剛性に関する一考察

ハザマ技術研究所 正会員 浦野 和彦
 ハザマトリ統括部 正会員 鈴木 雅行
 ハザマ技術研究所 正会員 三原 正哉
 ハザマ技術研究所 正会員 足立 有史

1. はじめに

NATMトンネルの構造検討にあたり、従来地震に対する検討はほとんど実施されていなかった。しかし、近年都市NATMトンネルの施工例が増加し、土被りが小さく近接構造物などが多数存在する条件下においては、特に地震に対する安全性の検討が重要課題となってきている。また、阪神・淡路大震災以降、地中構造物に対しても地盤や構造物の非線形特性を考慮した限界状態設計法による検討が行われるようになってきている。

本報では、従来から行われているトンネル覆工を線形要素とした複素応答解析とトンネル構造および地盤を非線形要素とした逐次非線形解析を実施し比較することにより、解析手法やトンネル構造の非線形特性の考慮方法が解析結果へ与える影響について検討を行ったものである。

2. 解析概要

2.1 トンネル概要

解析対象の NATM トンネルは、図 - 1 に示すように土被りが小さい傾斜地盤中に位置する標準的な二車線道路トンネルである。覆工の仕様は、アーチ部 45cm、インパート部 55cm とし、コンクリート圧縮強度は 30N/mm²、鉄筋（SD345）は D25 を 150mm びつりの複鉄筋とした。

地盤構成は図 - 1 に示すようにマサ土と花崗岩からなる傾斜地盤であり、その地盤物性は表 - 1 に示す性状である。ここで、地盤のひずみ依存性については、マサ土についてのみ考慮し、砂質土の標準的なひずみ依存特性¹⁾を用いることとした。

2.2 解析方法

解析方法としては、図 - 2 に示す解析モデルを用いて、以下の2通りの動的有限要素法解析を実施した。実施した解析ケースの一覧を表 - 2 に示す。ここで、常時荷重は支保工が受け持ち、覆工は地震荷重のみ受け持つこととした。また、トンネルと地盤間の剥離等は考えないものとした。

(1)等価線形化手法による複素応答解析

FLUSH に代表される複素応答解析による方法では、地盤の非線形性を等価線形化手法により考慮し、解析を周波数領域で実施する。周波数領域での解析では構造物の非線形性を考慮することができないため、等価剛性²⁾により一律に構造物の曲げ剛性 EI を低下させることが行われている。本検討ではトンネルの等価剛性を全断面有効剛性（初期剛性）の 33, 50, 100% にした場合について解析を実施した。境界条件については、底面は粘性境界、側方はエネルギー伝達境界とした。

(2)逐次非線形解析

逐次非線形解析による方法では、地盤とトンネルの非線形特性を忠実に考慮し、地盤は Ramberg-Osgood モデル、トンネルはコンクリートのひびわれ、鉄筋降伏を表現できる剛性低下型トリリニアモデル（武田モデル）でモデル化した。ここで、コ

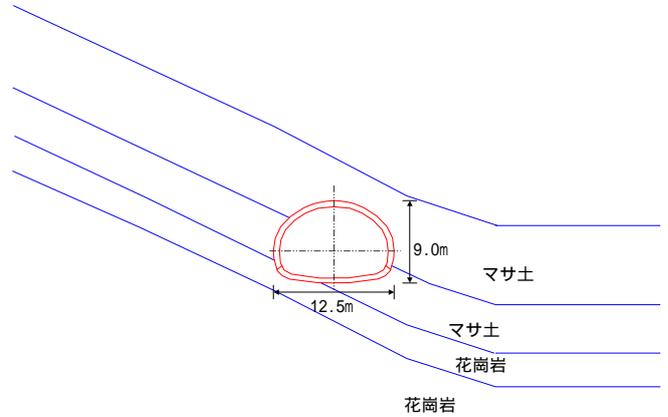


図 - 1 トンネル概要

表 - 1 地盤物性

岩盤区分	単位体積重量 t (kN/m ³)	せん断弾性係数 G (kN/m ²)	ポアソン比	減衰定数 h (%)
マサ土	19.0	17900	0.40	3.0
マサ土	21.5	35700	0.40	3.0
花崗岩	25.5	231000	0.30	3.0
花崗岩	26.0	1260000	0.29	3.0

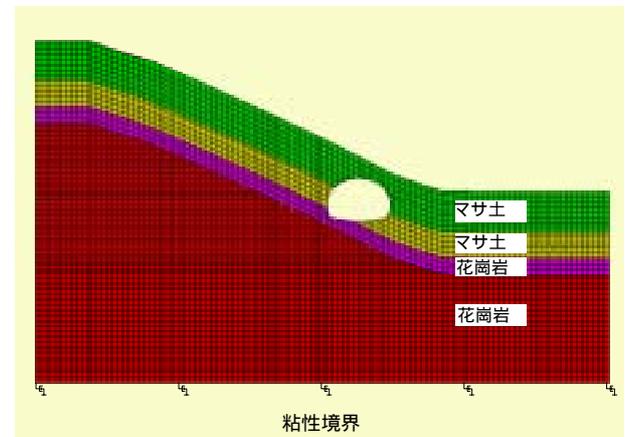


図 - 2 解析モデル

表 - 2 解析ケース

解析ケース	解析方法	トンネル曲げ剛性 (非線形考慮方法)
1	複素応答解析	全断面有効の100%
2		全断面有効の50%
3		全断面有効の33%
4	逐次非線形解析	軸力変動を無視したM - 関係 (軸力ゼロの場合のM - 関係)
5		軸力変動を考慮したM - 関係

ンクリート標準示方書³⁾に基づき設定したトンネルの非線形特性（モーメントM - 曲率 関係）を図 - 3 に示す。数値積分はNewmark- 法で、積分時間間隔は0.002 秒とした。また、減衰はレーリー減衰、境界条件として底面は粘性境界、側方は水平ローラーとした。

2.3 入力地震動

入力地震動は、道路橋示方書⁴⁾の 種地盤用のレベル2 地震動である兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の記録（最大加速度812gal，継続時間30 秒）とし、解析モデル下端より水平方向に入力した。

3. 解析結果および考察

3.1 地盤及びトンネル応答変位

図 - 4 にトンネル上下間の水平方向の相対変位が最大となる時刻のトンネル周辺部の変形図を示す。変形はほとんど剛性の小さいマサ土の部分で発生しており、斜面に沿って斜め右下方向にトンネルが潰れるような変形モードは全解析ケースとも同様である。表 - 3 にトンネル上下間の水平方向の最大相対変位量を示すが、複素応答解析で等価剛性を33%にしたケース3でも、逐次非線形解析結果と比べて小さな値となっている。これは、局所的ではあるが鉄筋降伏が発生し、断面剛性が非常に小さくなっているためであると考えられる。

3.2 トンネル断面力

図 - 5 にトンネル上下間の水平方向の相対変位が最大となる時刻のトンネル覆工のモーメント図を示す。全解析ケースでモーメント分布はほぼ同様であり、逐次非線形解析結果では数ヶ所で鉄筋降伏が発生している状態である。表 - 4 に断面1～3における発生曲げモーメントの最大値を示すが、複素応答解析で等価剛性を33%にしたケース3と逐次非線形解析結果がほぼ一致している。また、トンネル覆工と地盤間の剥離を考慮していないため、最大のモーメントが発生するインバート部（断面1）では引張軸力が発生しており、軸力変動を考慮したケース5の方が軸力変動を無視したケース4より、モーメントは小さくなっている。

4. まとめ

本報では、解析方法やトンネル非線形性の違いが解析結果に与える影響について検討を実施した。その結果、本検討のように数ヶ所で鉄筋降伏が発生するような状況では、従来の等価線形解析を用いた解析方法でトンネルの等価剛性を一律33%に低下することにより、トンネル覆工および地盤の非線形特性を考慮した詳細な解析手法とほぼ同様な発生断面力（曲げモーメント）が得られることを確認した。

本検討の解析モデルは土被りが小さく傾斜地盤という、トンネルに対して非常に厳しい条件を選定したが、今後さらに、土被りが大きい場合や水平成層に近いモデルでも検討を行っていくつもりである。また、解析コードの関係上、トンネル覆工と地盤間の剥離等を考慮しなかったが、断面力に影響を与える重要な項目であるため考慮した解析も実施していきたいと考えている。

【参考文献】

- 1) 足立紀尚、龍岡文夫：新体系土木工学 18 土の力学（ ），1981
- 2) 土木学会：LNG地下タンク躯体の構造性能照査指針，1999
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編，2002
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・解説 耐震設計編，2002

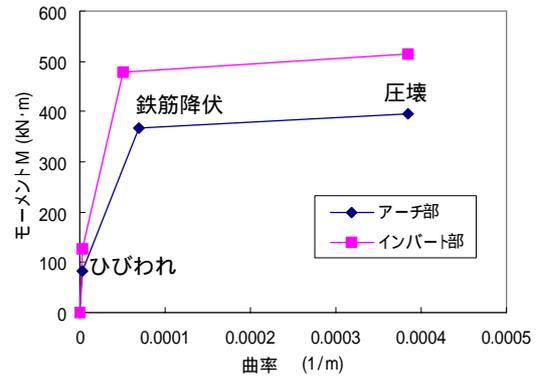


図 - 3 トンネルのM - 関係(軸力ゼロの場合)

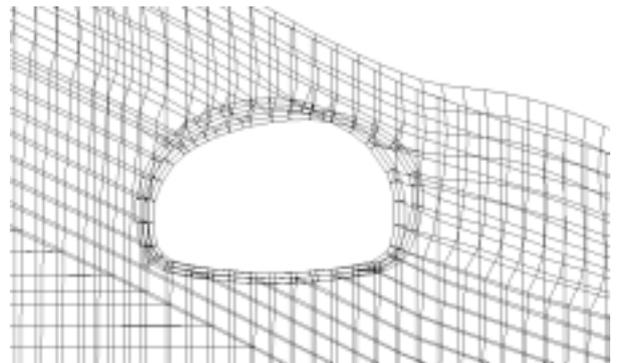


図 - 4 変形図(解析ケース1、t=5.67 秒)

表 - 3 トンネル上下間の水平方向最大相対変位量

解析ケース	相対変位 (cm)
1	2.1
2	2.6
3	3.0
4	3.7
5	3.9

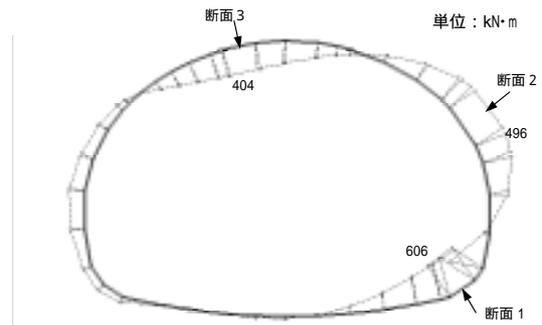


図 - 5 モーメント図(解析ケース1、t=5.67 秒)

表 - 4 モーメント最大値

解析ケース	モーメントM (kN·m)		
	断面1	断面2	断面3
1	617	521	430
2	534	452	390
3	472	412	352
4	504	391	391
5	467	436	381