

大断面を有する地中構造物縦断方向の耐震計算法に関する研究

渡辺和明¹・立石章²

¹大成建設（株）技術センター土木技術研究所（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）

E-mail:kwatanab@ce.taisei.co.jp

²大成建設（株）技術センター土木技術研究所（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）

E-mail:tateishi@ce.taisei.co.jp

筆者らは、大断面を有する線状地中構造物の縦断方向の地震時挙動を明らかにするとともに、大規模な地中構造物の耐震計算への応答変位法の適用性について検討した。地盤条件急変部を通るトンネルを対象とした3次元動的FEM解析を実施した。剛性の大きい大規模トンネルでは、地盤条件急変部の影響をより強く受け、その地震時挙動が複雑になることを明らかにした。また応答変位法との比較解析より、大断面を有する地中構造物の耐震計算へ応答変位法を適用する場合の留意点を明らかにした。

Key Words : *large-scale underground structure ,analysis method in the longitudinal direction, 3-dimensional FEM, seismic deformation method*

1. はじめに

都市トンネルのような線状地中構造物は、都市機能や土地利用の高度化に伴い、従来に比べて大規模な横断面を有するものが、より複雑な地盤条件下に計画される傾向にある。地中構造物の耐震性能は、兵庫県南部地震を契機に、被災した開削トンネルの被災原因の究明に関する研究等を通して徐々に明らかにされつつある。しかし主に地中構造物の横断方向に関する研究が中心で、地中構造物の設計上の重要な検討項目の1つである縦断（長手）方向の耐震性能については、免震材料の効果や適用性に関する研究¹⁾²⁾や軸ひずみの伝達特性に関する研究³⁾があるものの、十分に議論されているとは言い難い。

筆者らは、まず地中構造物の縦断方向の基本的な地震時挙動を明らかにする目的で、地盤とトンネルの連成モデルによる3次元動的FEM解析を実施した。また従来から縦断方向の耐震計算法として用いられている応答変位法について、3次元動的FEMとの比較解析を通して、その適用性および問題点について検討したので報告する。

2. 検討条件と検討方法

(1)検討対象

図-1に示すような軟質地盤と硬質地盤の地層境界面が傾斜構造となっている不整形地盤を対象に、地中構造物の耐震設計で最も支配的となるトンネル軸方向の地震時挙動に着目した。地盤モデルは、地層境界面付近の複雑な地震時応答をできるだけ精度良く評価するために、トンネルが地層境界面を横切る地点を中心として硬質側に250m、軟質側に750mの横幅を設定した。なお地盤モデルの層厚は50mで、トンネルの土被り厚は10mとした。

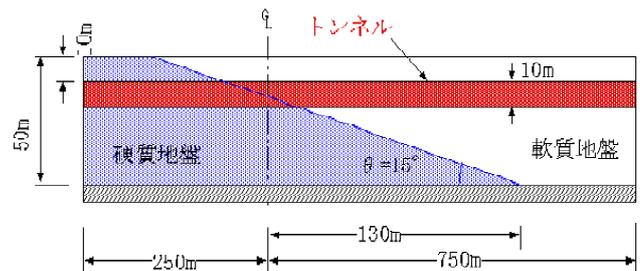


図-1 検討対象の地盤～トンネル

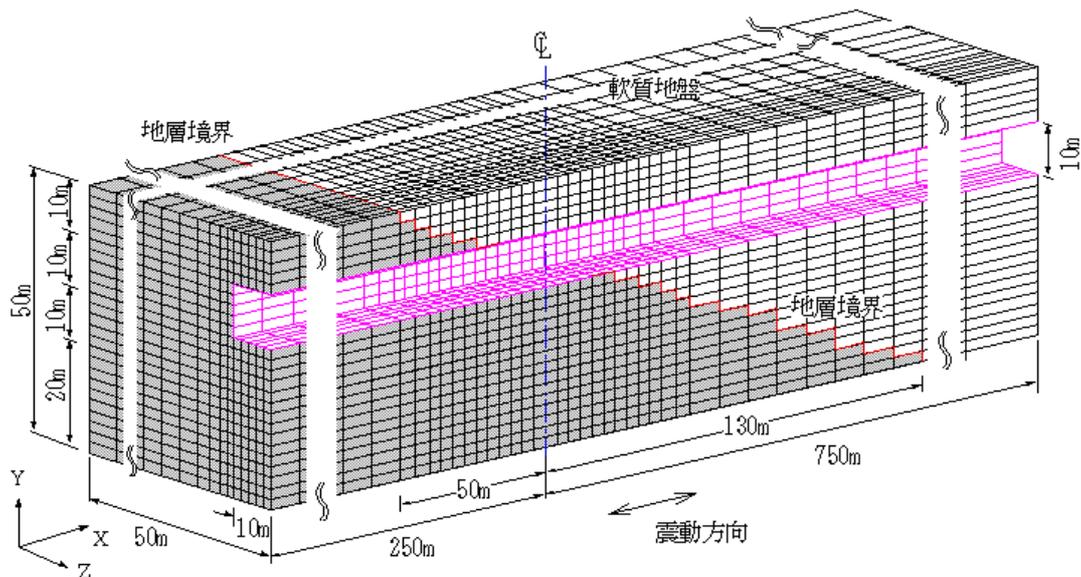


図-2 3次元FEM解析モデル

(2) 3次元FEM解析の解析条件

大規模な地中構造物の縦断方向の地震時挙動を明らかにするために、図-2に示すように地盤をソリッド要素、トンネルをシェル要素でそれぞれモデル化した。表-1に地盤物性値およびトンネルの物性値を示す。FEM解析モデルは、構造上の対象性を考慮した1/2解析モデルとし、モデル境界の影響が地層境界付近の地震時応答に影響を及ぼさないように、トンネル軸方向に1000m、トンネル横断方向に50mの幅とした。トンネルの構造諸元は、高さ10m、横幅20m、部材厚さ1.0mの1層1室の矩形断面とした。またトンネルの伸縮継手等は、FEM解析において考慮していない。

入力地震動は、「駐車場設計・施工指針」⁴⁾のスペクトル強度に1978年宮城県沖地震の開北橋(LG)の記録を振幅調整して設定した。トンネル軸方向をX、軸直角方向をZ、鉛直方向をYとし、トンネル軸方向(すなわちX方向)が震動方向である。動的FEM解析における境界条件を以下に示す。

- 底面 : 完全固定
- 震動方向両側面 : 水平ローラー (Y方向固定)
- 震動直角方向両側, 対称面 : Z方向固定

3次元動的FEM解析は、トンネル軸方向の基本的な地震時挙動を把握するために、地盤およびトンネルともに線形弾性体とした弾性応答解析とした。なおトンネルの軸剛性を検討パラメータとして、以下の2種類の検討ケースを設定した。

- ・基本ケース : 全断面有効とした軸剛性
 - ・等価剛性ケース : 基本ケースの1/100の軸剛性
- ここで等価剛性ケースは、外径10m、厚さ0.5mの

表-1 地盤と構造物の物性値

地盤物性値	軟質地盤	硬質地盤	トンネル
せん断波速度 (m/sec)	100	400	—
弾性係数 (N/mm ²)	46	830	2.5×10 ⁴
単位体積重量 (kN/m ³)	15	17	25
ポアソン比	0.49	0.49	0.2
減衰定数	0.03	0.03	0.03

RCセグメントを用いた一次覆工のみのシールドトンネルの等価引張剛性に相当する。

(3) 応答変位法の解析条件

3次元FEM解析と同一の解析条件に対して、トンネルを梁要素、トンネルと周辺地盤との相互作用をばね要素でモデル化した梁-ばねモデルによる応答変位法の解析を実施した。ここで地盤ばね値は、トンネル軸方向の地層変化を考慮して代表断面を選定し、各断面ごとに図-3に示すような単位奥行きを有するFEMモデルを作成し、静的強制変位と地盤反力の関係より算定した。

応答変位法の地震外力である入力地盤変位は、地

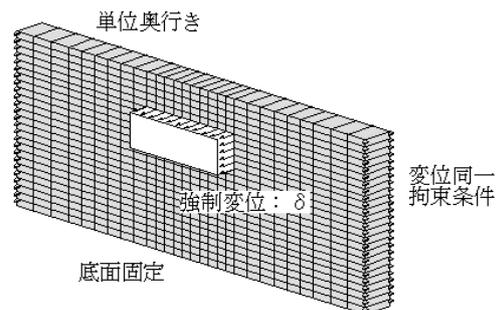


図-3 地盤ばね算定用のFEMモデル

盤のみを2次元平面ひずみ要素でモデル化し、2次元動的FEMの解析解析よりトンネル深度（側面の高さ中心）での時刻歴の地盤変位分布として設定した。本検討では、動的FEM解析より求めた入力地盤変位を梁-ばねモデルのばね端から時刻歴ステップ数だけ作用させ、梁要素の応答を時刻歴ステップ数だけ評価する時刻歴応答変位法を適用した。

3. 解析結果

(1) 3次元動的FEM解析の結果

動的FEM解析の結果のうち、側面境界近傍の遠方地盤における地盤要素（トンネル深度レベル）に発生した引張軸ひずみの最大値分布を図-4に示す。図-4の横軸のトンネル座標とは、地層境界面を起点としたトンネル位置である。なお2次元FEM解析による分布結果も参考値として示す。両ケースとも地層境界付近で急激にひずみが増加し、地層境界が底面に到達する130m付近で最大値が発生する分布傾向となっている。等価剛性ケースのひずみの値は、2次元FEMの結果とほぼ同じであるが、基本ケースでは、トンネル剛性の影響によって2次元FEM比べて全体的に軟質地盤側の軸ひずみが大きくなっている。なお境界の影響も考えられるため、震動直角方向の領域幅や波動逸散境界に適用等について今後検討する必要がある。

トンネルに発生する引張軸力の最大値分布を図-5

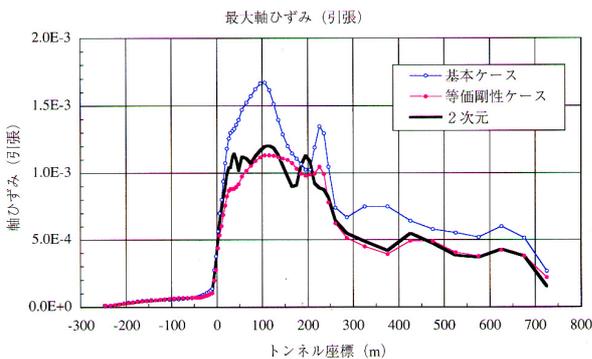


図-4 側方境界地盤の最大引張ひずみ分布

に示す。両ケースとも地層境界面付近で軸力が急激に増加する傾向となっている。トンネル軸剛性の大きい基本ケースは、等価剛性ケースに比べて、地層境界面の影響が硬質側にも軟質側にも広範囲に影響を及ぼす傾向が見られる。

次にトンネルに作用する地震外力として上面および底面の作用応力の最大値分布を図-6に示す。基本ケースでは、地層境界付近の下面で大きなせん断応

力が作用している。ただし基本ケースは、地層境界が中心から底面基盤に達する0~130mの領域で、せん断応力とほぼ同程度の直応力が作用している。これに対して等価剛性ケースでは、直応力に比べてせん断応力の作用が支配的となっている。

以上の解析結果より、地盤とトンネルの剛性差が大きい場合は、特に地層境界付近等での3次元的なトンネルの地震時挙動が顕著となり、作用する地震応力状態が複雑になる。またその影響範囲は、剛性差の小さい場合に比べて広いことが明らかになった。

(2) 応答変位法とFEMの比較結果

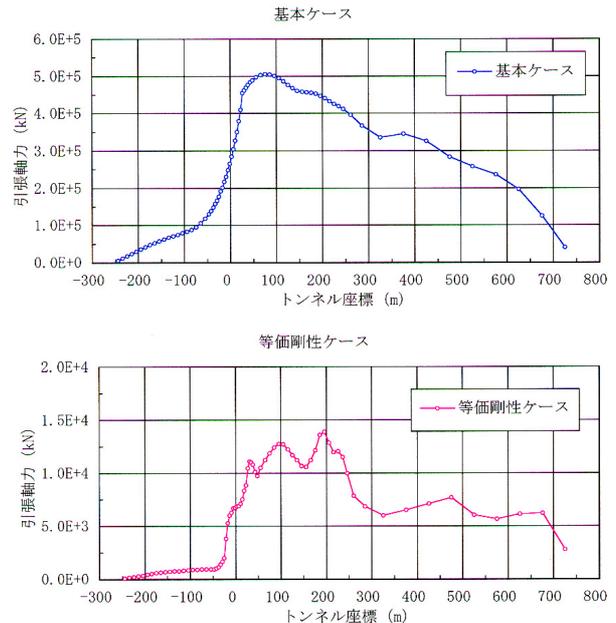


図-5 トンネルの最大引張軸力分布

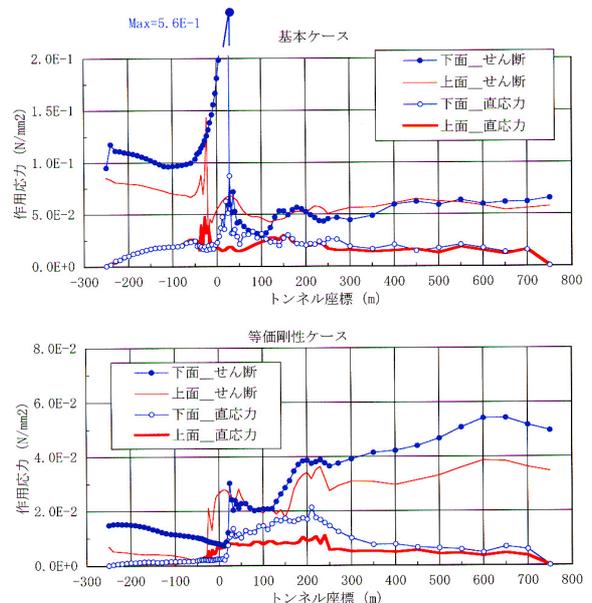


図-6 トンネル上下面の作用する地盤応力の最大値分布

図-7に応答変位法と3次元FEMの比較結果を示す。等価剛性ケースでは、分布傾向および値とも、両者の解析結果は良く一致している。これに対して

基本ケースにおける応答変位法の解析結果は、全体的な分布傾向は同じであるが、特に軟質地盤領域において3次元FEMに比べてやや小さめの評価となっている。この解析結果の違いは、トンネルの1次元挙動を対象とした応答変位法において地層境界付近の3次元地震時挙動を十分に評価できない事と、3次元FEMにおける震動直角方向の側方境界の影響によるものと考えられる。

以上の比較結果より、限られた検討ケースではあるが、大断面を有する地中構造物への応答変位法の適用性を明らかにできた。3次元動的FEM解析の精度向上を図るとともに、地盤条件急変部の地盤ばね値の評価法等についてさらに検討する必要がある。

4. 結論

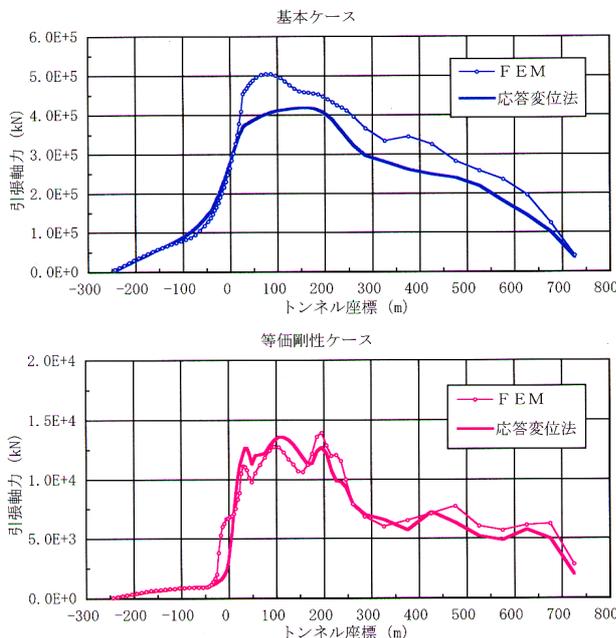


図-7 応答変位法と3次元FEMの比較結果

大断面を有する地中構造物の縦断方向の地震時挙動を基本特性を把握する目的で、地盤条件急変部を通るトンネルを対象とした3次元動的FEM解析を実施した。また3次元動的FEMと応答変位法との比較解析を行った。これらの検討結果より、以下の事が明らかになった。

1) 地層境界等の地盤条件急変部では、トンネルの3次元的地震時挙動により作用地震力や発生断面力が複雑になる。特にその傾向は地盤と構造物の剛性差が大きい場合に顕著となる。2) 応答変位法は、地盤と構造物の剛性差が大きい場合に精度的な問題があるものの、トンネル断面力の分布傾向など3次元FEMの解析結果と概ね一致しており、大断面を有する地中構造物の耐震計算における適用性はある。

今後は地盤急変部の地盤ばね値の設定法、軸直角方向加振の場合の検討を実施していく予定である。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所耐震研究室他：地下構造物の免震設計マニュアル（案），pp.222-225，1998.
- 2) 村井和彦・星隈順一・運上茂樹：3次元動的有限要素法解析に基づく地中構造物の免震メカニズムに関する研究，構造工学論文集Vol.44A，pp.621-630，1998.
- 3) 西岡勉・運上茂樹：線状地中構造物における地震時の軸ひずみ伝達特性に関する研究，構造工学論文集，Vol.49A，2003.
- 4) (社)日本道路協会：駐車場設計・施工指針 同解説，1992.

(2003. 10. 20 受付)

A STUDY ON SEISMIC ANALYSIS METHOD IN THE LONGITUDINAL DIRECTION OF LARGE-SCALE UNDERGROUND STRUCTURES

Kazuaki WATANABE and Akira TATEISHI

The authors investigated the seismic behavior in the longitudinal direction of large-scale underground structures and verified the applicability of seismic deformation method for seismic design. 3-dimensional dynamic FEM analyses are carried out for the large-scale underground structures laid through two types of soil layers that have much different rigidity. It is found that the rigidity difference has much influence on the seismic behavior of large-scale underground structures in case of the rigid structures. Furthermore, the authors compared the results of seismic deformation method with those of 3 dimensional dynamic FEM analyses and clarified the applicability of seismic deformation method.