

地震時挙動における静的解析法の妥当性の検討

須藤 拓馬¹・土門 剛²・西村 和夫³

¹学生会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail:takumasudo0705@yahoo.co.jp

²正会員 首都大学東京大学院 助教 都市環境科学研究科 (同上)

E-mail:dom@tmu.ac.jp

³正会員 工博 首都大学東京大学院 教授 都市環境科学研究科 (同上)

E-mail:knishi@tmu.ac.jp

トンネルの耐震評価には静的解析がよく用いられるが、その静的解析結果と動的解析の動的挙動との差異については十分には知られていない。そこで、本研究では静的解析と動的解析で得られる結果の比較をおこなうことで、静的解析法の妥当性の検討を行った。その結果、両解析手法による解析結果の差異はほとんど生じないことが明らかとなり、本研究の限りでは実務においては静的解析を行うことが効率的であるという結論に至った。また、本研究では構造物の節点力に着目して各解析手法の評価をおこなう。

Key Words : *dynamic analysis, static analysis, nodal force, FEM seismic deformation method, seismic intensity method*

1. はじめに

トンネルは構造物全体が地山に囲まれており、地震時挙動は周辺地山の挙動に追随するため、耐震性に富む構造物であるとされている。しかし、地震規模の増大、地山の不良やトンネル構造の欠陥などの条件が存在する場合、トンネルが被害を受けることが多い。トンネルの地震被害を抑えるためには、トンネルの耐震性能を正しく評価し、設計、施工、維持管理に適切に反映させることが重要である。

トンネルの耐震評価に用いる解析方法としては、大別すると静的解析および動的解析がある。静的解析としては、周囲の地盤を地盤ばねでモデル化した応答変位法を用いることが一般的である。これは、設計実務においての利便性によるところが大きい。地盤ばねの設定方法、地盤ばねの算定精度に課題を有している。

一方、周囲の地盤を FEM でモデル化した静的解析法を用いることもある。代表的な手法としては、FEM 応答変位法や応答震度法などが挙げられる。これらの手法は、地形が複雑な場合、煩雑なメッシュの構築を行わなければならないといった問題点はあるが、地盤ばねを設定する必要がないため、静的解析の中では比較的精度の高い手法であると考えられる。しかし、それぞれの耐震手法では、地震作用のモデル化の考え方が異なるため、解析した結果なども異なることが考えられる。

また、動的解析はモデルに直接地震動を与えることができ、周りの地盤の地質条件が複雑な場合でもモデル化できる。しかし、専用ソフトが必要で、動的な挙動に対する構成則が複雑であること、モデル化や物性設定も静定解析に比較すれば難しい。

静的解析はモデルに強制変位や加速度を与えて簡便化できることから、汎用的に用いられている。しかし、静的解析の地震時挙動における動的解析の動的挙動との差異については十分解明されていないまま使われている。一般に動的解析と静的解析の比較は発生断面力によって行われている。周辺地盤からの作用に対し、構造物には反作用として断面力が生ずる。作用に対して反作用は剛性や構造形状などの構造物特性に依存するが、まだ十分に明らかにされていない。

本研究では、作用-反作用の結果として生ずるこの動土圧に着目する。動土圧は反作用としての土圧と考えることができるため、トンネルの構造特性を取り込んだものであるからである。さらに、動土圧が明らかになれば、トンネル構造を地盤ばねのない単純なフレーム解析として解くことも可能となる。

なお、本研究では動土圧を節点力として捉える。

そこで、本研究では、動的解析に TDAPIII、静的解析に MIDAS GTS を用いて、両解析で地震時挙動を再現し、それらの解析結果を比較することにより地震時挙動における静的解析の妥当性を明らかにすることを目的とした。

動的解析の比較対象は、応答震度法とFEM応答変位法とし、両者の構造物にかかる節点力の評価をし、考察を行った。

2. 解析方法

(1) 解析手法の概要

本研究で取り扱う解析ケースは、動的解析、応答震度法、FEM応答変位法の3手法である。以下にそれぞれの手法を概説するとともに、静的解析で使用する応答値を算出する一次元成層地盤解析を示す。

a)時刻歴応答解析

動的解析の耐震手法としては、時刻歴応答解析法、周波数応答解析法、応答スペクトル法など、さまざまな手法が挙げられるが、本研究では、時刻歴応答解析法を用いた。

時刻歴応答解析法とは、構造物と地山をそれぞれ質量と減衰でモデル化した上で、基盤面に時間とともに変化する地震加速度を与え、構造物および地山における各標高の応答加速度、速度、変位を計算する方法である。本研究では、動的解析では、解析領域底面に正弦波を入射する。動的解析のみ、構造物の減衰定数0.05、地山の減衰定数を0.1と設定している。

b)応答震度法

応答震度法は、地山モデルをFEMモデルで再現して、各要素に地震時水平加速度を作用させ、地震動を再現する手法である。本研究では解析ソフトの制約上、地震時水平加速度相当の物体力を与えることによってせん断変形をさせることにより地震動を再現した。ここで、地震時水平加速度相当の物体力とは、動的解析による一次元成層地盤解析により求めた構造物変位が最大のときの応答加速度を次の式により換算している。

$$p = \frac{ma}{g} \quad (1)$$

ここに p : 物体力, m : 有効面積, a : 地震加速度, g : 重力加速度とする。

c)FEM応答変位法

トンネルは、周辺を地盤に囲まれているため、地盤の変位に伴う形で振動する。この地盤の変位を、地盤ばねを介して構造物へ作用させて考えるのが応答変位法であるが、地盤ばねの値によって応答値が左右されるので、地盤ばね定数の設定が重要となる。しかし、地盤と地下構造物の相互作用を表現するための地盤ばねを算出することは非常に難しい。

FEM応答変位法は、複雑な地盤ばねを用いず、地山モ

デルをFEMモデルで再現し、側方を強制変位させることによってせん断変形をさせることにより地震動を再現する手法である。本研究では、この強制変位を、一次元成層地盤解析により求めた構造物変位が最大時の応答変位とした。

d) 一次元成層地盤解析

一次元成層地盤解析とは、解析モデルを一次元地盤モデルにし、基盤面から地震波を入射し、応答値を算出する動的解析法である(図-1に示す)。本研究における応答震度法およびFEM応答変位法の応答加速度、応答変位はこの方法により算出した。なお、このとき使用した入射波は、動的解析で使用した正弦波と同じものである。物性値は地山を一次元地盤で再現しているため、解析モデルで示した地山の物性値と同値である。表-1に一次元地盤の諸物性値を示す。

(2) 解析モデル

トンネルおよび地山を含む解析モデルを図-2に示す。地山は一層構造で軟岩を対象とし、地山モデルは縦80m、横140mとした。また、トンネルは縦20m、横20mの矩形トンネルとし、構造物は梁要素、地山は平面ひずみ要素を用いた。また、構造物、地山の各諸物性値を表-2に示す。境界条件は、両解析方法ともに底面は固定とし、側面は動的解析では二次元側方境界とし、静的解析では水平ローラー支点とした。本研究では、研究の第一ステ

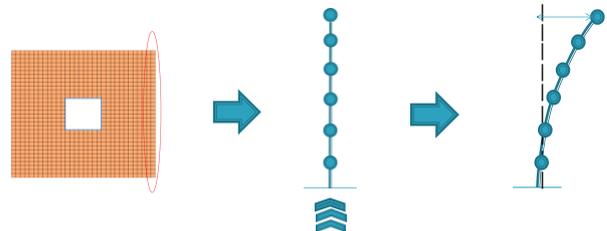


図-1 一次元成層地盤解析

表-1 一次元地盤物性値

| | 一次元地盤 |
|----------------------------|-------------------|
| ヤング率[MPa] | 2.0×10^2 |
| ポアソン比 | 0.3 |
| 単位体積重量[kN/m ³] | 21 |

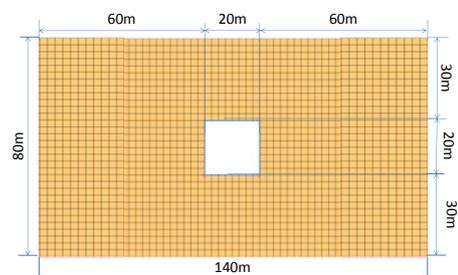


図-2 解析モデル

表-2 解析モデル諸物性値

| | 動的解析 | | 静的解析 | |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | トンネル | 地山 | トンネル | 地山 |
| ヤング率[MPa] | 2.2×10^4 | 2.0×10^2 | 2.2×10^4 | 2.0×10^2 |
| ポアソン比 | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.3 |
| 単位体積重量[kN/m ³] | 23 | 21 | 23 | 21 |
| 減衰比 | 0.05 | 0.1 | | |

ップとして構造物，地山ともに線形弾性モデルとして解析を行った。

(3) 入射波

入射波は最大加速度100gal，データ数1024，振動数0.4Hzの正弦波を使用した。本研究では，研究の第一ステップとして，基本的な地震時挙動を見るため，実波ではなく，正弦波を用いた。動的解析で用いた入射波を図-3に示す。

(4) 節点力の算定方法

FEMは解析モデルを要素に分割し，各要素において代表する点の値について方程式を導いて解く。この各要素内の値を代表させるために定義した点を節点という。本研究では，トンネルに作用する動土圧を節点力として捉え，節点力を構造物の部材に作用する軸力とせん断力から算出した。例えば，図-4左上のように，左側壁部の隅角部上部の鉛直法線方向節点力を算出するとき，①と②の要素を分解した際には①のせん断力と②の軸力が隅角部の節点に作用する鉛直法線方向の力である。これらのせん断力と軸力を足し合わせることで，隅角部における鉛直法線方向節点力が求められる。また，同図左下のように，中心部における鉛直法線方向節点力を算出するとき，③と④の要素を分解した際に鉛直法線方向に作用する力は③，④のせん断力なので，それらを足し合わせることで鉛直法線方向節点力を算出する。また，同図右上のように，隅角部の水平接線方向節点力を算出するとき

は，⑤の軸力と⑥のせん断力を足し合わせることで求められる。また，同図右下のように，中心部においては，水平接線方向には⑦と⑧の要素にはともに軸力が作用しているので，それらの軸力を足し合わせて水平接線方向節点力を算出する。他，鉛直接線，水平法線方向については同様である。

3. 解析結果

静的解析で用いる一次元成層地盤解析の応答変位，応答加速度の解析結果，動的解析，応答震度法，FEM応答変位法により算出した断面力のFEM解析結果の軸力，せん断力から算出した接線方向，法線方向の節点力の結果を示す。接線方向節点力の場合，右上隅の節点を基準として反時計回りに，トンネル上の節点力を比較した。なお，動的解析の解析結果はトンネルの水平方向変位が最大時の時間断面の結果である。これはトンネルの断面力が最大であるためである。

(1) 一次元成層地盤解析

一次元成層地盤解析の応答変位，応答加速度の結果を図-5に示す。一次元成層地盤解析の結果は，地盤モデルを一次元地盤で再現し，その一次元地盤の高さ80mを32層に分割し，一要素を2.5mとした。このときの最大応答変位は16.08cm，最大応答加速度は199.89galであった。

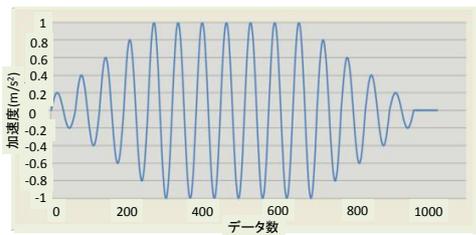


図-3 入射波

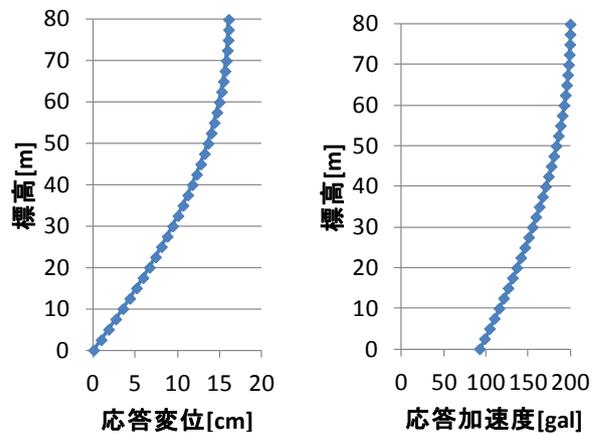


図-5 一次元成層地盤解析による応答結果

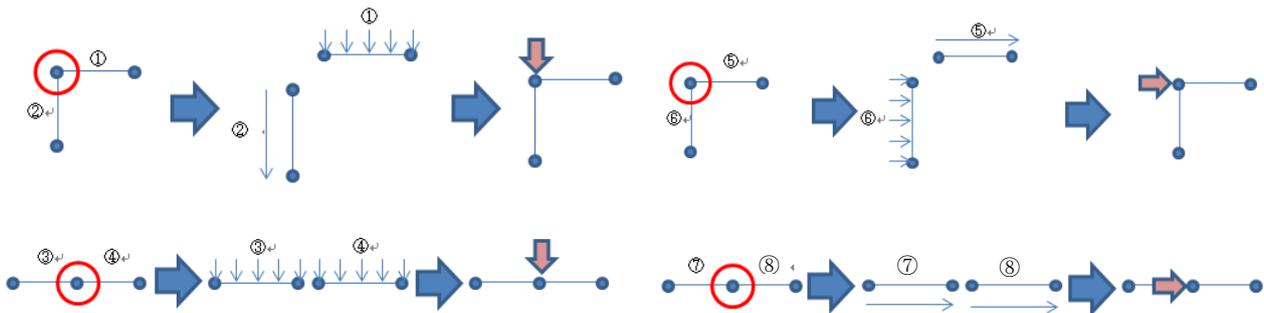


図-4 節点力の算出方法

(2) 接線方向節点力

接線方向節点力の結果を図-6に示す。構造物の反時計回り方向を正とし、その時計回りを負とする。接線方向節点力の結果を見てみると、FEM応答変位法、応答震度法、動的解析の3手法とも概ね一致する結果となった。最も顕著に違いが表れたのは隅角部であり、最大値が生じたFEM応答変位法で989.8kN、最小値が生じた応答震度法で818.7kNと、およそ170kNの差が生じた。

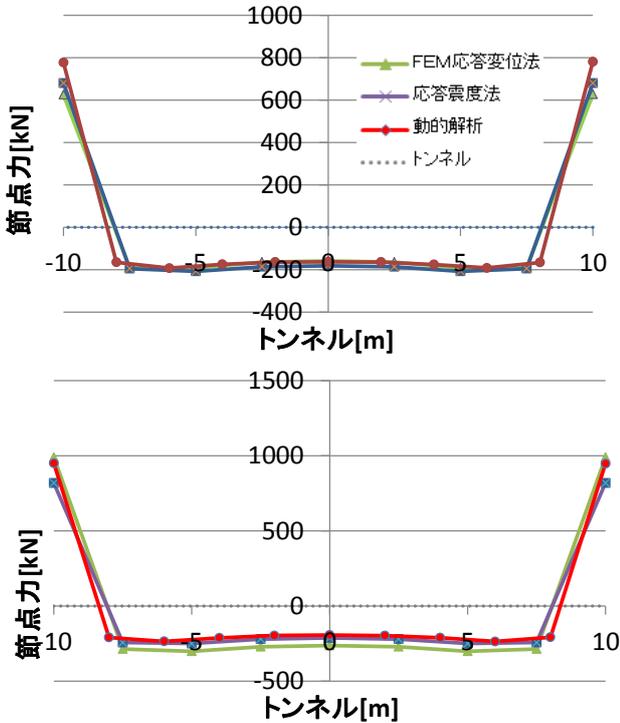


図-6 接線方向節点力(左上が天端, 右上が左側壁部, 左下が底部, 右下が右側壁)

(3) 法線方向節点力

法線方向節点力の結果を図-7に示す。トンネル内空方向を正とし、その逆を負とする。法線方向節点力の結果を見てみると動的解析の隅角部における法線方向節点力が静的解析2手法と比較して少し異なる結果となった。大きい箇所では動的解析と静的解析で100kNもの差が生じた。

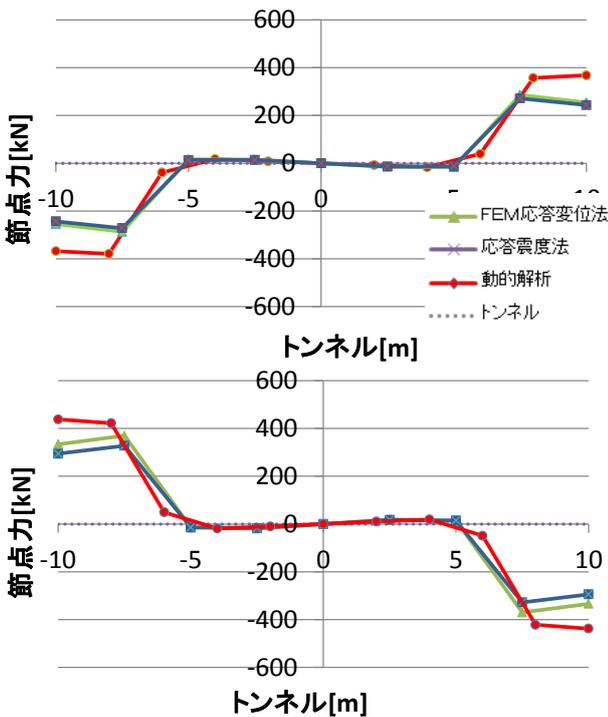
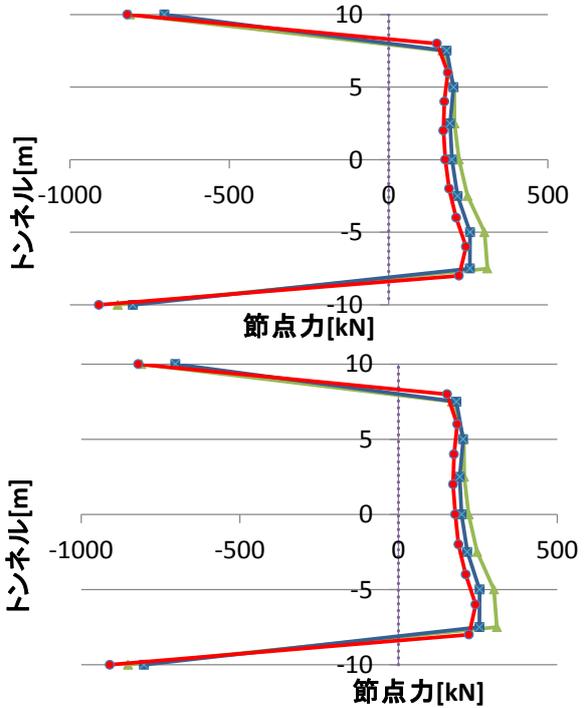


図-7 法線方向節点力(左上が天端, 右上が左側壁部, 左下が底部, 右下が右側壁部)



4. フレーム解析による考察

動土圧としての節点力の結果の確認としてフレームモデル(図-8)に各手法で得られた接線方向節点力, 法線方向節点力を作用させ, 元のFEM応答変位法, 応答震度法, 動的解析の断面力の結果と比較し, 一致していることを確認した. なお, フレームモデルに節点力を作用させて得られた断面力とFEM解析による断面力の結果を図-9, 10に示す.

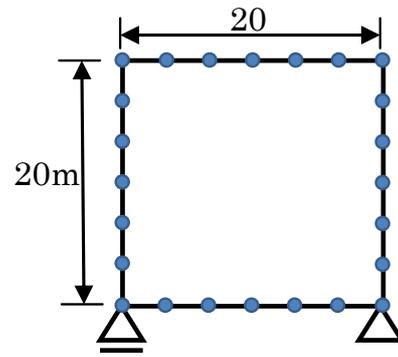


図-8 フレーム解析モデル

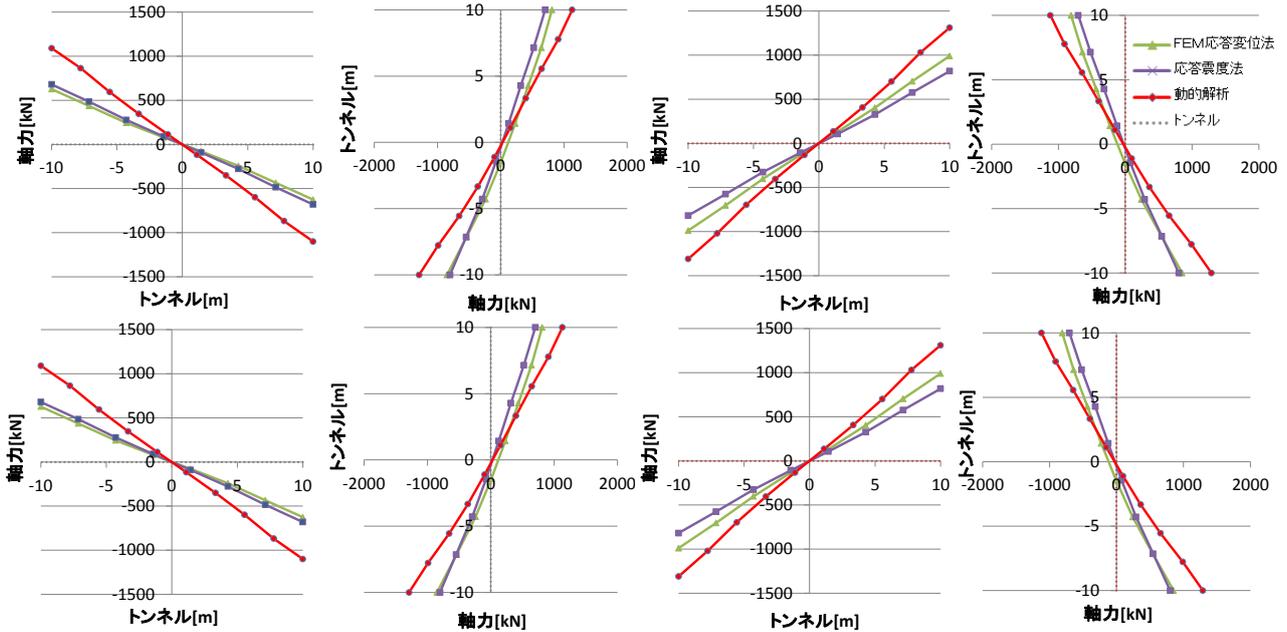


図-9 軸力(上段がFEM解析で下段がフレーム解析 左から天端, 左側壁部, 底部, 右側壁部)

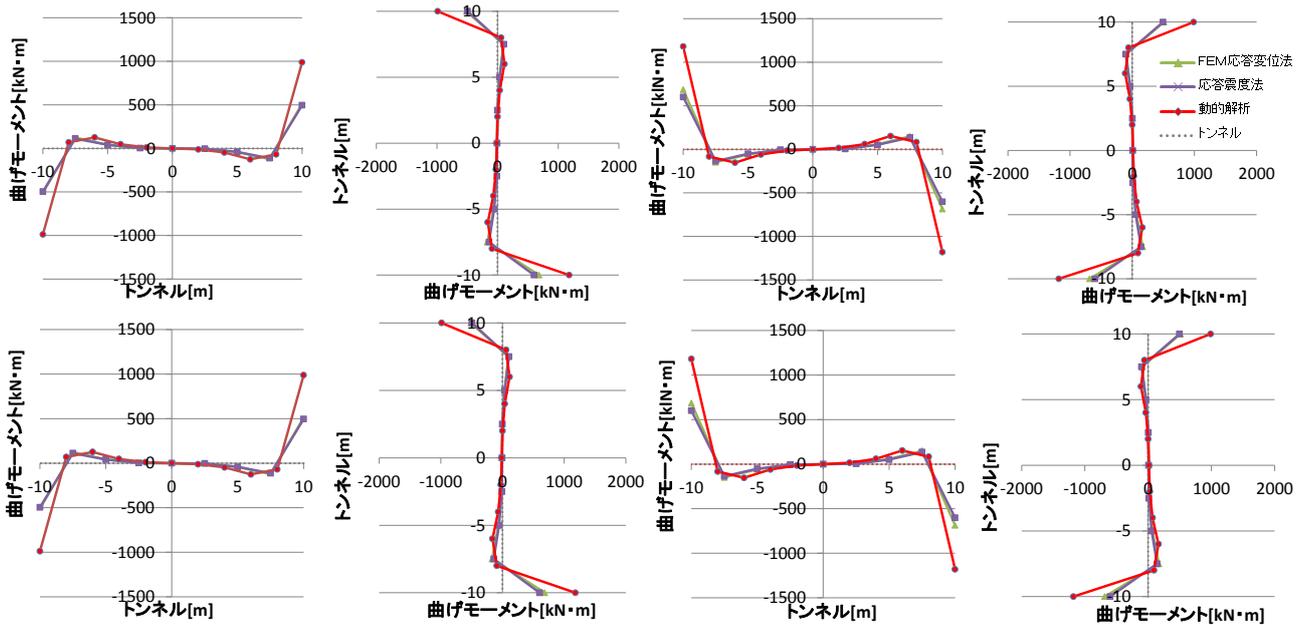


図-10 曲げモーメント(上段がFEM解析で下段がフレーム解析 左から天端, 左側壁部, 底部, 右側壁部)

5. まとめ

本研究では、地震時挙動における静的解析法の妥当性の検討を行うことを目的とし、静的解析のFEM応答変位法と応答震度法、動的解析の3手法で結果の比較を行った。その照査の作用の対象として、本研究では節点力に着目した。

FEM応答変位法と応答震度法の結果から、地震動の再現方法がそれぞれ変位と加速度で異なっても結果としてはほとんど影響がないと考えられる。さらに、静的解析と動的解析の結果から、両手法ともほとんど同じ結果となったため、単純なモデルである本研究の限りでは、

複雑な動的解析を実施しなくても、簡便な静的解析で問題ないという結論が得られた。

6. 今後の課題

本研究は、研究の第一ステップということで簡便なモデルで解析を行った。今後は、トンネルの形状や、トンネル土被り、非平坦地系、不整形地盤などの地表形状などによる結果の違いを比較する。その後、フレーム解析による応答変位法の周面せん断力や地盤ばねの反力と節点力の比較を行い、応答変位法の整合性の向上を行う。

(2014.9.15 受付)

EXAMINATION OF THE VALIDITY OF THE STATIC ANALYSIS IN AN EARTHQUAKE PERFORMANCE

Takuma SUDO, Tsuyoshi DOMON and Kazuo NISHIMURA

The static analysis is often used to evaluate the seismic of the tunnel. But the scope of static analysis is not well-known. Therefore, the authors comparing the results obtained by the static and dynamic analysis, and considering the validity of static analysis. As a result, there are few differences between the analysis results. This study uses the nodal forces of FEM model for verifying analysis results, and verify how the earth pressure affect the tunnel.