

# 幅広開削トンネルへの応答変位法の適用性および地盤ばねの検討

室谷耕輔<sup>1</sup>・西山誠治<sup>1</sup>・西村昭彦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

<sup>2</sup>フェロー 工博 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

開削トンネルの耐震設計に多く用いられる応答変位法(骨組み応答変位法, FEM 応答変位法)が幅の広い構造物にどの程度適用できるか, 2次元 FEM 動的解析と比較することで検討を行った。また, 骨組み応答変位法を用いる場合, 地盤ばねの設定方法が重要であるため, 設定方法の違いによる影響も併せて検討した。その結果, 地盤ばねを適切に設定すれば幅が変化しても骨組み応答変位法は十分適用できることが確認された。しかし, 地盤ばねの設定方法によっては幅が変化することによって, 結果が大きく異なることも確認された。また, FEM 応答変位法は幅が変化しても, 精度よい結果が得られた。

**Key Words :** cut-and-cover tunnel , seismic deformation method , spring coefficient

## 1. はじめに

筆者らは1層2径間程度の比較的幅の狭い構造物については応答変位法の適用性の検討を行っており, その適用性を確認している<sup>1)</sup>。しかし, 地下鉄道車庫や地下駐車場など幅の広い構造物に応答変位法を用いる場合, その検討例は少なく<sup>2)</sup>, どの程度適用性があるのかはあまり知られていない。そこで本報告では応答変位法として, 骨組み応答変位法<sup>3)</sup>と FEM 応答変位法<sup>4)</sup>に着目し, 2次元動的 FEM 解析(解析コード: FLUSH)と比較することで, どの程度結果に違いが現れるのかを把握し, 幅の広い開削トンネルの耐震設計に応答変位法を用いる場合の適用性を検討した。また骨組み応答変位法は地盤ばねの設定が重要であり, その設定方法が結果に大きく影響を与える。そこで, 代表的な地盤ばねの設定方法を3つ取り上げ, 地盤ばねの設定方法の違いが及ぼす影響を併せて検討した。

## 2. 検討方法

### (1) 検討断面

検討には表層厚 25m,  $V_s=187\text{m/sec}$ ,  $\gamma=16.0\text{kN/m}^3$

の一様地盤中(砂質土)にある, 土被り約 7m の地下鉄道開削トンネルの車庫を想定した断面(図-1)を対象とした。なお, 構造物および地盤は線形として解析を行った。

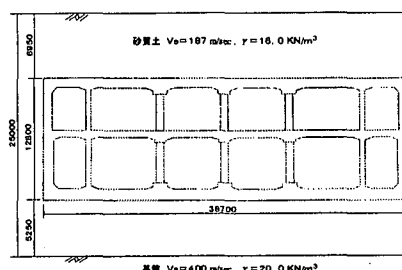


図-1 幅広開削トンネルの構造一般図

### (2) 解析手法

骨組み応答変位法および FEM 応答変位法の概略図を図-2,3 に示す。ここで, FEM 応答変位法は骨組み応答変位法の地盤ばねを FEM で表現した手法であり, 入力する地震外力は骨組み応答変位法と同様である。入力する地震外力は FLUSH の自由地盤より算出した。なお, 入力地震波は文献3)に示すスペクトルⅡ適合波を用いた。

### (3) 解析ケース

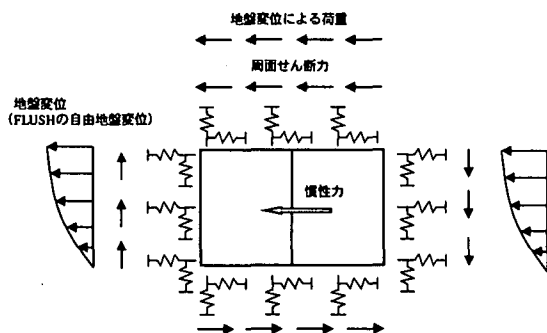


図-2 骨組み応答変位法の概略図  
FLUSHの自由地盤より算出した構造物位置の層間変位

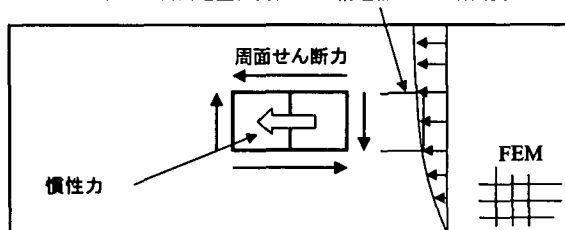


図-3 FEM応答変位法の概略図

幅の影響検討は高さを一定として構造物の幅をケース2Bを基準に0.5, 1.0, 2.0, 4.0倍に調整し、それぞれについて地盤のせん断弾性係数( $G_g$ )を一定として構造物のせん断弾性係数( $G_s$ )を0.1, 1.0, 10倍に変化させた(表-1)。ここで構造物の $G_s$ は単純支持した構造物の上面にせん断力を載荷し、得られる変形量と載荷したせん断力の関係から算出した。

表-1 幅の検討の解析ケース

| ケース   | 構造物の幅(高さ:幅)           | $G_s/G_g$          |
|-------|-----------------------|--------------------|
| ケース1B | 幅0.5倍 19.35m (1:0.5)  | 0.1<br>1.0<br>10.0 |
| ケース2B | 幅1.0倍 38.70m (1:3.0)  |                    |
| ケース3B | 幅2.0倍 77.40m (1:0.6)  |                    |
| ケース4B | 幅4.0倍 154.8m (1:12.0) |                    |

#### (4) 地盤ばねの算出方法

##### 1) 鉄道の設計標準<sup>3)</sup>

鉄道の設計標準に示されている地盤ばね(以下、鉄道ばね)の算出方法は以下に示す算出式で簡易に設定できる。

上・下床版 :  $k_v = 0.2E_oB_v^{-1/2}$  (砂質土)

側壁 :  $k_h = 0.5E_oB_h^{-3/4}$

せん断ばね :  $k_{vs} = k_v/3$   $k_{hs} = k_h/3$

$E_o$ : 地盤の変形係数,  $B_v$ : 構造物の幅,  $B_h$ : 構造物の高さ

##### 2) 地下駐車場の設計指針<sup>5)</sup>

地下駐車場の設計指針に示されている地盤ばね(以下、地下駐ばね)の算出方法は、地盤および構造物をFEMでモデル化し、構造物に単位変位を与えて得られる地盤反力から算出する方法である。

##### 3) 変形モードを考慮した地盤ばね<sup>6)</sup>

変形モードを考慮した地盤ばね(以下、変形依存

ばね)は、地盤および構造物をFEMでモデル化し、地震時外力を与えて得られる地盤と構造物間の節点力を構造物の応答変位と構造物を取り去った空洞地盤の応答変位の変位差で除して得られる地盤ばねである。

### 3. 幅の影響検討の結果

#### (1) 地盤ばねの比較

各手法によって算出された地盤ばねを図-4にまとめる。全体的にいずれのばねも幅が広くなるにつれてばね値が小さくなる傾向にあることが確認できる。鉄道ばねは、上床版のせん断・鉛直ばねおよび側壁の水平ばねで他の手法のばねよりかなり大きめの値となっていることが確認できる。また、側壁のばねは、その算出式に幅のパラメータが考慮されていないことから、幅が広くなっても同じ値を示す結果となっている。地下駐ばねは下床版鉛直ばねおよび側壁せん断ばねが幅が広くなるにつれかなり大きめの値を示す結果となっている。鉄道ばね、地下駐ばねはせん断弾性係数比( $G_s/G_g$ )をばね値に考慮できない手法である。しかし、変形依存ばねはせん断弾性係数比の影響も考慮できるため、図-4にはせん断弾性係数比を変化させた結果も併せて示す。変形依存ばねは下床版せん断ばねで他の手法より大きめの値を示す結果となった。また、せん断弾性係数比の影響は一部ばらつきがあるものの全体的にはあまり影響がないと思われる。

#### (2) 応答変位法の解析結果

FEM応答変位法、骨組み応答変位法(鉄道ばね、地下駐ばね、変形依存ばね)の解析結果を図-5に示す。図は構造物の上床版および下床版の相対変位が最大となる変形量(最大層間変形量)についてFLUSHの最大層間変形量に対する応答変位法の比をまとめたものである。

いずれの手法もせん断弾性係数比が1.0倍のケースは精度よい結果が得られている。これは、構造物のせん断弾性係数が地盤のせん断弾性係数と同じであるため、構造物は入力される自然地盤と同じ変形量しか変形しようとしなない。そのため、構造物と地盤との間に相対変位が生じず、地盤ばねに反力が働かない。従って、どのばねを設定しても構造物の応答は自然地盤の変形量と同等になると考えられる。

FEM応答変位法の結果は幅の変化に左右されず精度よい結果が得られている(図-5(a))。また、変形依存ばねによる骨組み応答変位法も精度よい結果

が得られている (図-5(d)). 鉄道ばねによる骨組み応答変位法は, せん断弾性係数比が 10 倍の場合, 幅が広くなるにつれて FLUSH より 1.4 ~ 1.8 倍程度, せん断弾性係数比が 0.1 倍の場合は 0.6 倍程度の応答値となった (図-5(b)).

地下駐ばねは全体的には比較的精度よい結果が得られているが, 幅の狭いケース 1B はせん断弾性係数比が 10 倍の場合, 応答値が 0.6 倍程度となり, せん断弾性係数比が 0.1 倍の場合, 2.0 倍程度の応答を示す結果となった (図-5(c)).

これらの結果の要因を分析するため, 精度よい結果が得られた変形依存ばねの骨組み応答変位法を用いてばね値の感度分析を行う。

### (3) ばね値の感度分析

最も応答値に影響を及ぼすばねを把握するため, ばね値の感度分析を行った。検討は精度のよい結果

が得られた変形依存ばねによる骨組み応答変位法の上床版, 下床版, 側壁の各ばね値を 0.1, 10 倍に変化させて行った。なお, 解析はケース 1B, 4B を用いて, それぞれせん断弾性係数比を 0.1, 10 倍として行った。解析結果を図-6 に示す。

解析結果から, ばね値の変化が最も応答値に影響を及ぼすのは上床版せん断ばね, 下床版せん断ばね, 側壁水平ばねの 3 つの水平方向のばねであることが確認できる。特に, せん断弾性係数比が 10 倍の幅の広いケース 4B (図-6(d)) は上床版せん断ばねの影響が最も大きいことがわかる。また, その他の鉛直方向のばねは, せん断弾性係数比 10 倍のケース 1B (図-6(b)) を除いて応答値にほとんど影響しないことが確認できる。せん断弾性係数比 10 倍のケース 1B は幅が狭く, 構造物のせん断弾性係数が大きいためロッキングを起こしやすい。そのため, 鉛直方向のばねも応答値に影響を及ぼしたと考えられる。

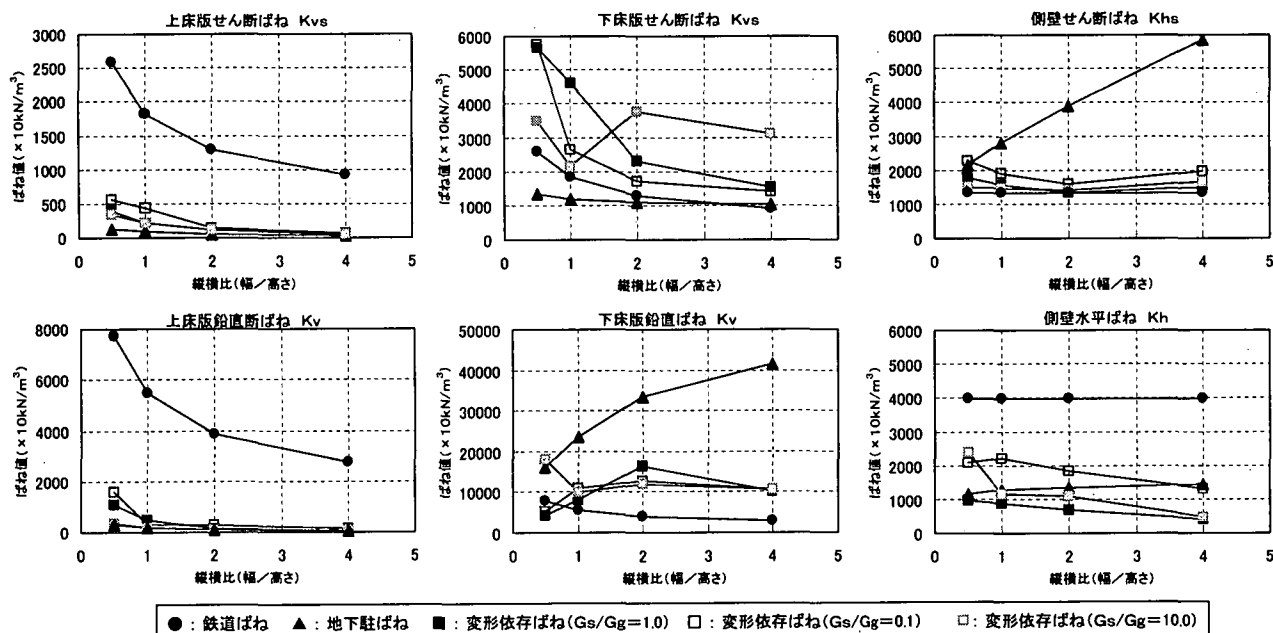


図-4 ばね値の比較

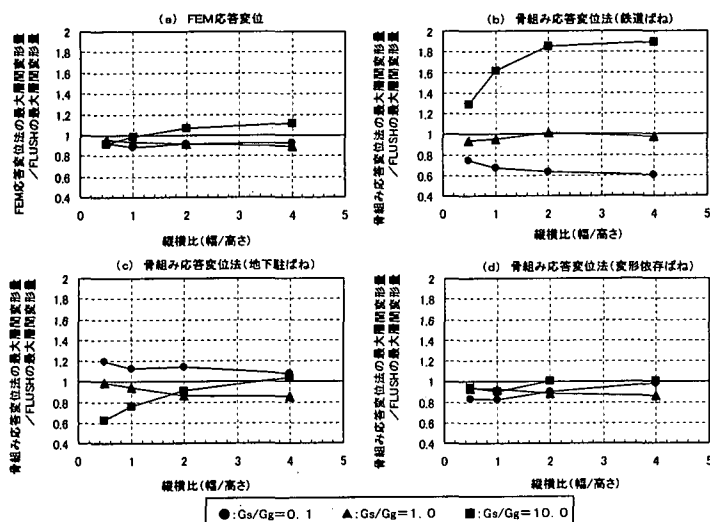


図-5 応答変位法の解析結果

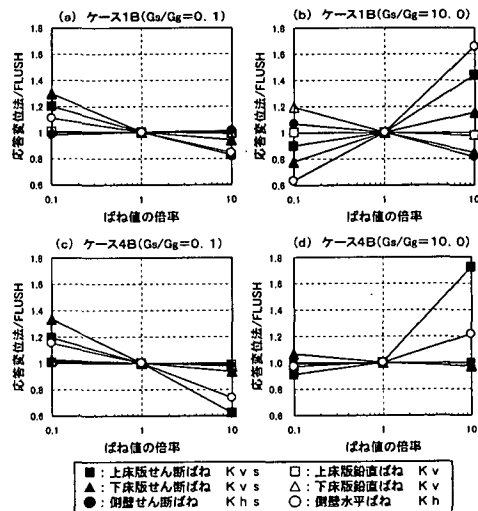


図-6 ばね値の感度分析

#### (4) 応答変位法結果の考察

図-7 に鉄道ばねおよび地下駐ばねと精度のよい結果が得られた変形依存との比を各部材、幅ごとにまとめる。この図とばね値の感度分析結果（図-6）より応答変位法の結果を分析する。

##### 1) 鉄道ばねの応答変位法結果の考察

図-7 よりせん断弾性係数比 0.1 倍のケース 4B（図-7 (a) の最右列）は上床版せん断ばね・鉛直ばねが変形依存ばねより約 15 ～ 20 倍、下床版鉛直ばねが約 0.2 倍程度となっている。これらのばねの影響を図-6 (c) より判断すると、上床版せん断ばねの影響が大きく、FLUSH に対する応答値が約 0.6 倍程度となることが分かる。しかし、上床版鉛直ばね、下床版鉛直ばねは応答値にほとんど影響しないことが分かる。従って、応答変位法の応答値が約 0.6 倍となっているのは上床版せん断ばねを大きく設定したためだと考えられる。

同様にせん断弾性係数比 10 倍のケース 4B の結果を考察する。図-7 (b) の最右列より上床版鉛直ばねが変形依存ばねより約 80 倍、上床版せん断ばねが約 15 倍、側壁水平ばねが約 8 倍、下床版せん断ばね、下床版鉛直ばねが約 0.2 倍程度となっている。図-6 (d) より、これらのばねで最も影響を及ぼすのは上床版のせん断ばねであり、応答値が 1.7 倍程度となることがわかる。また、側壁水平ばねは応答値が 1.2 倍程度となる。その他のばねについてはほとんど影響がないことがわかる。従って、応答変位法の応答値が 1.9 倍程度となったのは上床版せん断ばねおよび側壁水平ばねを大きく設定したためだと考えられる。その他のケースも同様の考察で説明できる。

##### 2) 地下駐ばねの応答変位法結果の考察

図-7 (d) の最左列より、せん断弾性係数比 10 倍のケース 1B は上床版せん断ばね、下床版せん断ばね、側壁水平ばねの 3 つの水平ばねが変形依存ばねの約 0.3 ～ 0.5 倍程度である。これらのばねは、図-7 (b) よりそれぞれ応答値が約 0.8 ～ 0.9 倍程度となることがわかる。従って、応答変位法の結果が FLUSH に対して約 0.6 倍程度となっているのはこれら 3 つの水平の影響が積み重なったものだと考えられる。一方、せん断弾性係数比 10 倍のケース 4B は図-7 (d) の最右列より各ばねが変形依存ばねと比較して 3 ～ 4 倍、0.3 ～ 0.6 倍程度であるが、いずれのばねも図-6 (d) より応答値にほとんど影響しないことが確認できる。従って、応答変位法の結果が精度よく得られたと考えられる。その他のケースについても同様の考察で説明できる。

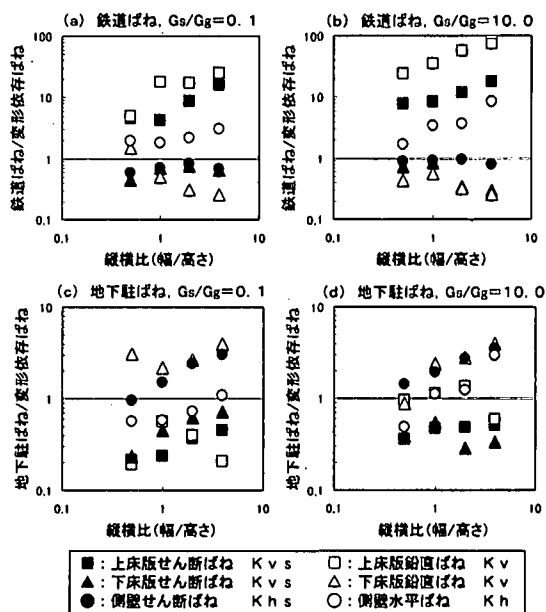


図-7 変形依存ばねとの比較

#### 4. まとめ

○ばね値の設定を必要としない FEM 応答変位法は幅の変化の影響を受けず、精度よい結果が得られた。また、変形依存ばねも精度のよい結果がえられたので、ばね値を適切に設定すれば幅の変化があっても応答変位法が十分適用できることが確認できた。○ばね値の感度分析より、骨組み応答変位法では上下床版せん断ばねおよび側壁水平ばねの 3 つの水平ばねの影響が大きく、特に幅が広くなるにつれて上床版せん断ばねの影響が大きいたことが確認された。○鉄道ばねは全体的に他のばねより大きめにばね値を設定する傾向があり、特に上床版せん断ばねの設定が大きく、このばね値が応答変位法の結果を大きく左右する可能性があることが確認できた。

今後は、部材および地盤の非線形性を考慮した検討および高さのある開削トンネルの影響検討を同様に行い、さらに検討を進めていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 室谷他：開削トンネルの耐震設計における構造解析手法の比較，第 53 回年次学術講演会 1-B，pp.750 ～ 751，1998.10
- 2) 森他：幅広地下構造物の地震時挙動と地震荷重，第 21 回地盤工学研究発表会，pp.473 ～ 476，1991.7
- 3) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計（案），1998.10
- 4) 太田他：応答変位法を用いた地下構造物の耐震検討について，第 2 回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.437 ～ 444，1997.
- 5) (社) 日本道路協会：駐車場設計・施工指針 同解説，1994.11
- 6) 渡辺他：箱形地中構造物の応答変位法による耐震計算に用いる地盤ばねの検討，第 51 回年次学術講演会 1-B，pp.834 ～ 835，1996.9