

# 多層開削トンネルの耐震設計における応答変位法の 適用性および地盤ばねの検討

## STUDY ON APPLICABILITY OF SEISMIC DEFORMATION METHOD IN SEISMIC DESIGN OF MULTI LAYER CUT-AND-COVER TUNNEL AND INFLUENCE OF SPRING COEFFICIENTS

室谷耕輔<sup>1)</sup>・西山誠治<sup>2)</sup>・西村昭彦<sup>3)</sup>

Kosuke MUROYA, Seiji NISHIYAMA, Akihiko NISHIMURA

The applicability of Seismic Deformation Method(S.D.M) for multi layer cut-and-cover tunnel has been examined by comparing the results among FEM S.D.M, frame S.D.M and 2-D dynamic analysis (FLUSH). Because setting of spring coefficients is important as for the frame S.D.M, the influence of spring coefficients has been examined. As a result it is indentified that if the spring coefficients can be evaluated adequately, the frame S.D.M is able to be applied to seismic design even though the height of structure changed. And, from the sensitive analysis of spring coefficients it is understood that the effects on the results due to the horizontal springs (shear spring of top/bottom slab, normal direction spring of side wall) are great, but when the height of structure increased the effects by all spring coefficients become small. In the other way, the results with good precision can be obtained by using FEM S.D.M even if the height of structure changed.

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

### 1. はじめに

筆者らは、1層2径間程度の一般的な開削トンネルについては応答変位法の適用性を確認している<sup>1)</sup>。また、地下鉄道車庫や地下駐車場などの比較的幅の広い構造物についても骨組み応答変位法<sup>2)</sup>とFEM応答変位法<sup>3)</sup>に着目し、2次元動的FEM解析(解析コード:FLUSH)と比較することでその適用性を検証してきた<sup>4)</sup>。以上のような検討結果を踏まえて、本報告では、地下鉄道駅部などの比較的高さのある構造物への応答変位法の適用性を検討したので、ここに報告する。

### 2. 幅広構造物の検討結果

ここに、文献4)の幅広構造物の検討結果を簡単に紹介する。骨組み応答変位法では地盤ばねの設定が重要であるため、鉄道の設計標準<sup>2)</sup>(以下、鉄道ばね)によるばね、駐車場の設計指針<sup>5)</sup>(以下、駐車場ばね)によるばね、構造物の変形モードを考慮したばね<sup>6)7)</sup>(以下、変形依存ばね)の3つの地盤ばねの設定方法(設定方法の詳細は後述を参照)を取り上げ、その設定方法の違いによる影響も併せて検討してきた。図-1に地盤ばねの比較、図-2に構造物の上床版と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を示す。FEM応答変位法は幅が広

1) 正会員 修士(工学) (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部  
2) 正会員 修士(工学) (株)日建設計 土木事務所 設計技術部  
3) フェロー 工学博士 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部

い場合も、FLUSH との差は少なく、精度良い結果が得られている（図-2(a)）。鉄道ばねは幅が広くなるにつれて大きく差が現れる結果となった（図-2(b)）。これは、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が他のばねの値より大きく算出されることが原因であり、特に上床版のせん断ばねの値が大きいため結果に差が現れた。駐車場ばねは幅の狭いケースにおいて、他のばね値より小さい値を示す（図-1）。これにより、幅の狭いケースで差が現れる結果となった（図-2(c)）。変形依存ばねは幅が広がっても精度良い結果が得られている（図-2(d)）。以上のことから、変形依存ばねのように地盤ばねを適切に設定すれば幅の広い構造物についても応答変位法が十分適用できることがわかった。なお、上記検討の詳細は文献 4）を参照されたい。

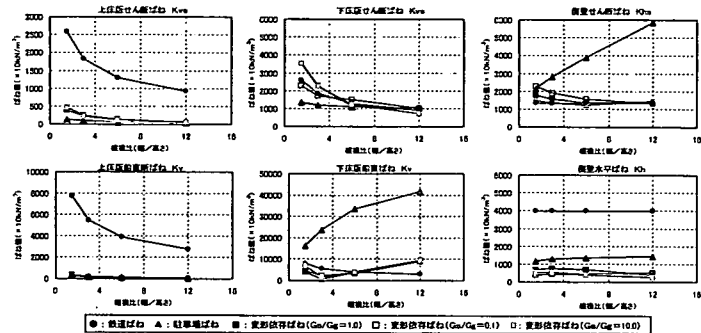


図-1 ばね値の比較（幅広構造物）

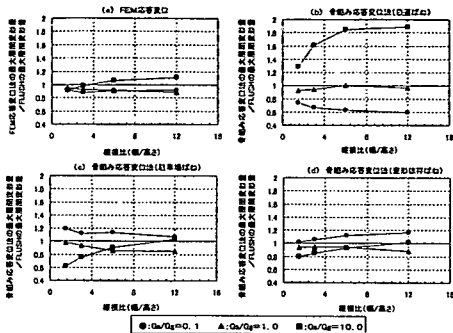


図-2 応答変位法の結果（幅広構造物）

### 3. 多層構造物の検討方法

#### (1) 検討断面

検討に用いた断面は図-3 に示すように、表層厚 46m、 $V_s = 129\text{m/sec}$ 、 $\gamma = 16.0\text{kN/m}^3$  の一様砂質土地盤中にある、土被り 7m の地下鉄道開削トンネル駅部（3 層 3 径間、RC 中柱構造）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。

#### (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-4、5 に示す。骨組み応答変位法は構造物の 4 周面に Winkler 型のばねを設置し、地震時荷重として地盤ばねを介して入力される地盤変位、周面せん断力、慣性力を载荷する手法である。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 2）に示すスペクトルⅡ適合波を用いた。

図-4 骨組み応答変位法の概略図

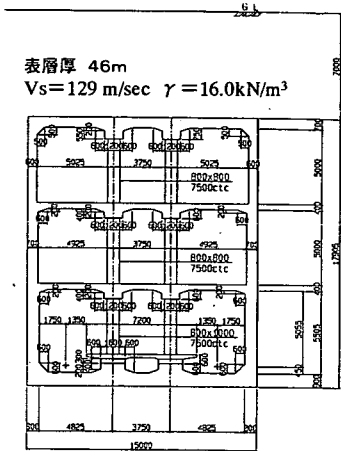


図-3 構造一般図

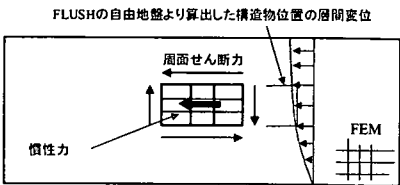


図-5 FEM 応答変位法の概略図

表-1 解析ケース

| ケース     | 構造物の高さ（幅：高さ）             | Gs/Gg |
|---------|--------------------------|-------|
| ケース 1 H | 高さ 0.5 倍 8.553m (1:0.6)  | 0.1   |
| ケース 2 H | 高さ 1.0 倍 17.105m (1:1.2) | 1.0   |
| ケース 3 H | 高さ 2.0 倍 34.210m (1:2.4) | 10.0  |
| ケース 4 H | 高さ 4.0 倍 68.420m (1:4.8) |       |

#### (3) 解析ケース

検討は、幅を一定として構造物の高さをケース 2H 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 (Gg) を一定として構造物のせん断弾性係数 (Gs) を 0.1 , 1.0 , 10.0 倍に変化させた (表-1) . ここで、構造物の Gs 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。

(4) 骨組み応答変位法に用いる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) は式-1~3に示す算出式で簡易に設定できる。

|           |                                       |       |                                      |
|-----------|---------------------------------------|-------|--------------------------------------|
| 上・下床版鉛直ばね | $K_v = 2.3E_oB_v^{-1/2}$ (砂質土)        | (式-1) | $E_o$ : 地盤の変形係数 (kN/m <sup>2</sup> ) |
|           | $= 1.3E_oB_v^{-1}$ (粘性土)              | (式-2) | $B_v$ : 構造物の幅 (m)                    |
| 側壁水平ばね    | $K_h = 1.7E_oB_h^{3/4}$               | (式-3) | $B_h$ : 構造物の高さ (m)                   |
| 各せん断ばね    | $K_{vs} = K_v/3 \quad K_{hs} = K_h/3$ |       |                                      |

2) 駐車場の設計指針<sup>5)</sup>

駐車場の設計指針に示されている地盤ばね (以下、駐車場ばね) 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) 構造物の変形モードを考慮した地盤ばね<sup>6) 7)</sup>

サブストラクチャー法より導かれる応答変位法の基本式から、地盤インピーダンスと呼ばれる [k] の算出式を導くと、式-4 のようになる。この [k] は空洞の各点に単位の変位を生じさせるために必要な力であり、応答変位法での地盤ばねに相当する。すなわち、この [k] が変形モードを考慮した地盤ばねとなる。

$$[k] = \{F_i\} / (\{u_n\} - \{u_i\}) \tag{式-4}$$

ここに、{F<sub>i</sub>} : 構造物と地盤間の節点力、{u<sub>n</sub>} : 空洞地盤の変形量、{u<sub>i</sub>} : 構造物の変形量

実際に変形依存ばねを計算するときは、空洞地盤の応答変位と構造物の応答変位および地盤と構造物間の節点力を算出し、式-4 より各面のばねを節点ごとに算出する。それら各節点で算出したばねを各面ごとに平均して求めた。なお、各節点で算出されるばねの中には負のばねが計算されることがあるが、この負のばねは負のまま評価して各面で平均値を計算し、算出された平均値の絶対値をばね値とした。

4. 多層開削トンネルの検討結果

(1) 骨組み応答変位法に用いる地盤ばねの比較

各手法によって算出された地盤ばねを図-6 にまとめる。なお、変形依存ばねは構造物と地盤のせん断弾性係数比 (Gs/Gg) を考慮できるため、Gs/Gg を変化させた結果も併せて示す。全体的にいずれのばねも高

さが高くなるにつれて面積効果の影響から側壁のばね値が小さくなっていく。上・下床版のばねは幅が一定のため、変形依存ばねの Gs/Gg が 0.1 倍のケースを除いてほぼ一定値を示している。鉄道ばねは、幅の検討の結果と同様に、上床版のせん断・鉛直ばねおよび側壁水平ばねが他のばねと比較して大きな値となっている。また、下

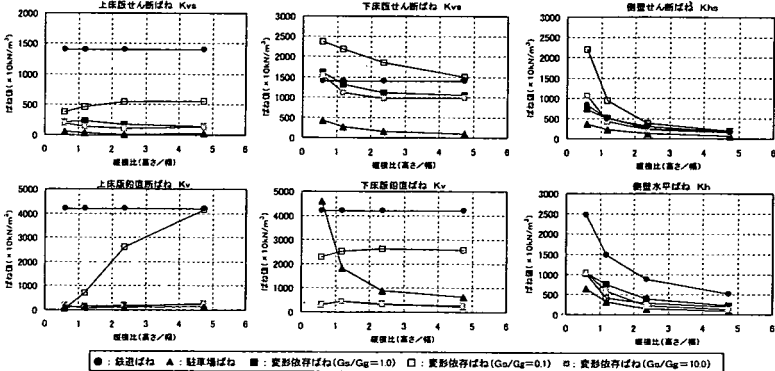


図-6 ばね値の比較

床版鉛直ばねも他のばねより大きい。駐車場ばねは下床版鉛直ばねを除いて全体的に他のばねより小さめの値を示す結果となっている。この結果も幅の検討の結果と同様である。変形依存ばねは全体的に  $G_s/G_g$  が 0.1 倍のケースのばねが他のケースより大きな値を示す結果となった。

## (2) 応答変位法の解析結果

図-2 と同様に最大層間変形量についてまとめた応答変位法の結果を図-7 に示す。いずれの手法も  $G_s/G_g$  が 1.0 倍のケースは精度良い結果が得られている。これは、 $G_s/G_g$  が 1.0 倍であるため、構造物の変形量は入力される自然地盤の変形量とほぼ同じになる。そのため、構造物と地盤との間の相対変位が小さく、地盤ばねに生ずる反力も小さい。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 (図-7(a)) は高さの変化に左右されず、精度良い結果が得られている。鉄道ばね (図-7(b)) は高さが低いケース 1H (高さ/幅 = 0.6) の  $G_s/G_g$  が 0.1 倍のケースで応答値が FLUSH に比べて 3 割程度小さい結果となった。しかし、全体的には精度が良く、高さが高くなるにつれて FLUSH の結果とほぼ等しくなる結果となった。駐車場ばね (図-7(c)) は高さが低いケース 1H の  $G_s/G_g$  が 10 倍のケースで 5 割程度小さく、 $G_s/G_g$  が 0.1 倍のケースで 3 割程度大きな応答を示した。しかし、全体的な傾向としては高さが高くなるにつれて精度が良くなっている。変形依存ばね (図-7(d)) は全体的に精度良い結果が得られており、地盤ばねの設定を適切に行えば、構造物の高さが高くなっても応答変位法が十分適用できることを示している。なお、断面力についても同様の比較を行い、最大層間変形量と同じ傾向であったことを確認している。これらの結果を分析するため、精度良い結果が得られた変形依存ばねを用いてばね値の感度分析を行う。

図-7 応答変位法の結果

## (3) ばね値の感度分析

検討は精度良い結果が得られた変形依存ばねを用いて、上床版、下床版、側壁の各ばねの値をそれぞれ 1 つずつ 0.1, 10 倍に変化させて解析を行い、得られる応答値の変化を見た。なお、解析はケース 1H、4H を用いて、それぞれ  $G_s/G_g$  を 0.1, 10 倍として行った。解析結果を図-8 に示す。図は縦軸に FLUSH に対する応答変位法の最大層間変形量、横軸にばね値の倍率を取った。ケース 1H において結果に最も影響を及ぼす地盤ばねは、上・下床版せん断ばねおよび側壁水平ばねの 3 つの水平方向のばねであることがわかる (図-8(a), (b))。また、 $G_s/G_g$  が 10 倍のケース 1H は構造物が地盤より固いためにロッキングを起こしやすい。そのため、水平方向のばねの他に、鉛直方向のばねの影響も大きく、特に側壁のせん断ばねの影響が大きくなっている (図-8(b))。  $G_s/G_g$  が 0.1 倍のケース 4H (図-8(c)) はいずれのばねもほとんど感度が小さくなる結果となった。ここで、ケース 4H の FLUSH より算出される構造物の最大層間変形量と自然地盤の最大層間変形量を比較すると、それぞれ、構造物が  $\delta s = 21.94\text{cm}$ 、自然地盤が  $\delta g = 23.94\text{cm}$  であり、ほぼ同程度の変形量である。従って、 $G_s/G_g$  が 1.0 倍のケースと同様に構造物と地盤との間の相対変位が小さく、ばねに生ずる反力も小さいために、ばねの感度が小さくなったと考えられる。  $G_s/G_g$  が 10 倍の

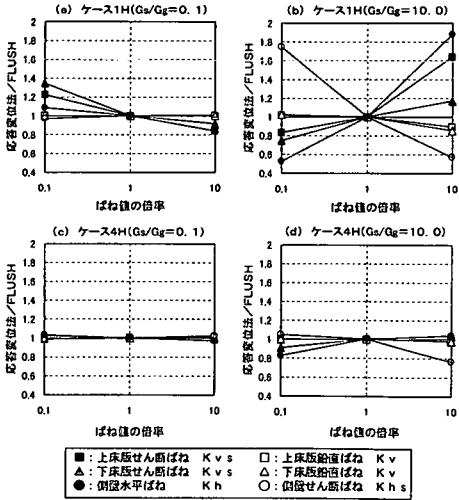


図-8 ばね値の感度分析

ケース 4H (図-8(d)) もばねの感度が小さくなっているが、構造物が地盤よりも固くロッキングを起こしやすいため、側壁のせん断ばねに多少の感度が見られた。

#### (4) 応答変位法結果の考察

図-9 に鉄道ばねおよび駐車場ばねの値と精度の良い結果が得られた変形依存ばねの値との比をまとめ、図-8 のばね値の感度分析結果と併せて、図-7 の鉄道ばねおよび駐車場ばねの結果を考察する。

##### 1) 鉄道ばねの応答変位法結果の考察

$G_s/G_g$  が 0.1 倍のケース 1H (図-9(a) の最左列) は上床版鉛直ばねが変形依存ばねの約 200 倍、上床版鉛直ばねおよび側壁水平ばねが約 3 ~ 5 倍程度大きな値であることが確認できる。これらのばねの影響を図-8(a) より判断すると、約 200 倍大きな値である上床版鉛直ばねは感度が小さく、結果に影響を及ぼさないことがわかる。一方、上床版せん断ばねおよび側壁水平ばねはばね値を大きく設定することによって FLUSH の結果より約 0.8 ~ 0.9 倍程度になることが分かる。従って、図-7(b) に示す  $G_s/G_g$  が 0.1 倍のケース 1H の結果が FLUSH より小さくなるのは上床版せん断ばねおよび側壁水平ばねの値を大きく設定したためだと考えられる。一方、高さの高いケース 4H (図-9(a), (b) の最右列) は変形依存ばねより多少大きな値であるが、図-8(c), (d) に示すように応答値に対しては感度が小さいため、図-7(b) に示す応答変位法は精度良い結果が得られている。他のケースについても同様の理由で説明できる。

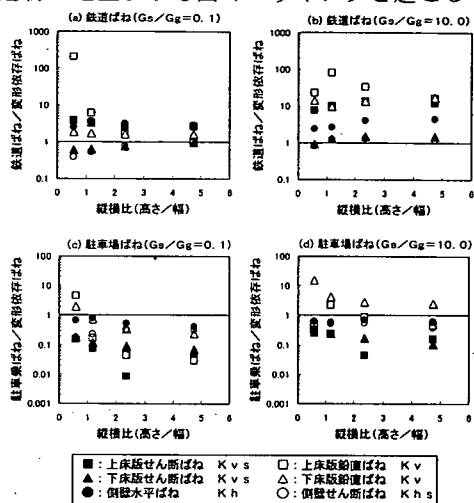


図-9 変形依存ばねとの比較

##### 2) 駐車場ばねの応答変位法結果の考察

図-9(c), (d) より駐車場のばねは全体的に変形依存ばねよりかなり小さな値であることが確認できる。図-8(a), (b) から判断すると、ケース 1H の  $G_s/G_g$  が 0.1 倍の場合、ばねの値が小さいと FLUSH に比べて大きな応答を示すことがわかる。また、 $G_s/G_g$  が 10 倍の場合は逆に小さな応答を示す。従って、図-7(c) に示すケース 1H の応答変位法の結果が FLUSH に比べて  $G_s/G_g$  が 0.1 倍の場合大きく、10 倍の場合小さくなるのは、ばねの値を小さく設定したためであると考えられる。他のケースについても同様の理由で説明できる。

#### 5. 鉄道構造物の耐震設計に用いる地盤ばね

鉄道ばねの算出式は直接基礎の平板載荷試験結果より求めた式<sup>8) 9) 10)</sup>を準用してきた。この直接基礎の式は実験結果を踏まえて、砂質土地盤に-1/2 乗、粘性土地盤に-1 乗、砂質土と粘性土の互層地盤に-3/4 乗を用いた。実地盤では砂質土と粘性土と言ったような地盤は少なく、互層地盤がほとんどであることから、上・下床版のばねの算出式に式-3 の-3/4 乗を適用して地盤ばねを算出した場合の解析を行ってみる。解析は、本報告の多層構造物と文献 4) で検討した幅広構造物について行う。上・下床版のばね値の比較をまとめたものを図-10 に示す。-3/4 乗で算出したばねは-1/2 乗で算出したばねより小さな値となる。その結果、上床版のせん断・鉛直ばね、下床版鉛直ばねは変形依存ばねの値に近づいている。しかし、下床版せん断ばねは変形依存ばねより小さな値になった。これらのばねを用いて解析を行った結果を図-11 に示す。どちらのモデルも-3/4 乗を用いることで-1/2 乗のばねより精度の良い結果が得られた。特に幅広構造物の結果はかなり精度が上がっている。これは、上床版せん断ばねの値が小さくなり、適切なばね値と考えられる変形依存ばねに近づいたためだと考えられる。以上の結果を踏まえて、鉄道の耐震設計では上・下床版のばねの算出式に-3/4 乗で比例させた側壁水平ばねの算出式である式-3 を用いることにする。しかし、適切な地盤ばねを設定

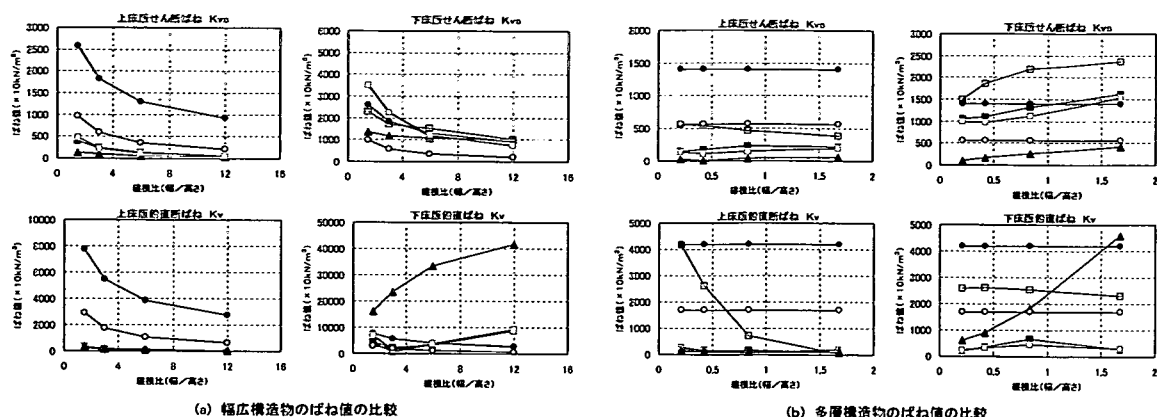


図-10 鉄道ばね（-3/4 乗式）のばね値の比較

するには、土被りの厚さや構造物と基盤までの距離、構造物の幅や高さなどの形状・寸法、構造物と地盤の変形モードなどを適切に評価する必要があるため、今後、これらを考慮した地盤ばねの補正係数を提案する予定である。

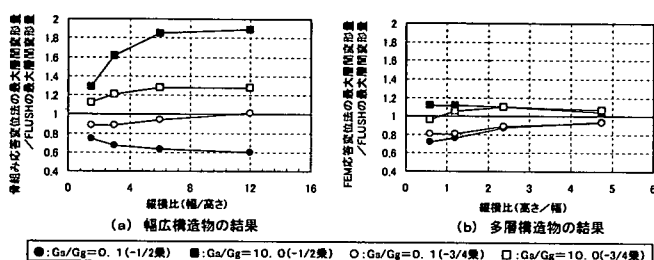


図-11 鉄道ばね（-3/4 乗式）を用いた骨組み応答変位法の結果

## 6. まとめ

- ばね値の設定を必要としない FEM 応答変位法は高さが高くなっても精度良い結果が得られた。また、変形依存ばねを用いた骨組み応答変位法も精度良い結果が得られたので、ばね値を適切に設定すれば骨組み応答変位法は高さが高くなっても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、高さの低い構造物は水平方向のばねの影響が大きいこと、高さが高くなるにつれて、構造物の変形量が自然地盤と同程度になるため、ばねの感度が小さくなっていくことがわかった。
- 鉄道ばねの上・下床版の算出式である-1/2 乗の式を-3/4 乗の式に変更し解析を行った。その結果、-1/2 乗の式より精度の良い結果が得られたので、鉄道構造物の耐震設計では上・下床版の地盤ばねの算出式に側壁水平ばねの算出式と同じ-3/4 乗の式を用いることにした。

## 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)（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），1998.11
- 3)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 ~ 476, 1997.
- 4)室谷他：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，第 25 回地震工学研究発表会，pp.653 ~ 656, 1999.7
- 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
- 7)川島一彦編著：地下構造物の耐震設計，鹿島出版会
- 8)海野他：直接基礎の地盤係数(1)，構造物設計資料 No.60, pp.21 ~ 25, 1979.12
- 9)海野他：直接基礎の地盤係数(2)，構造物設計資料 No.64, pp.18 ~ 23, 1980.12
- 10)海野他：直接基礎の地盤係数(3)，構造物設計資料 No.80, pp.21 ~ 25, 1984.12