

## 阪神高速道路大和川線開削トンネル部における縦断耐震検討

八ツ元仁<sup>1</sup>・志村敦<sup>2</sup>・李圭太<sup>3</sup>・岡嶋義行<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 阪神高速道路株式会社 建設事業本部（〒590-0075 大阪府堺市堺区南花田口町2-3-20）

<sup>2</sup>正会員 工修 阪神高速道路株式会社 建設事業本部（〒590-0075 大阪府堺市堺区南花田口町2-3-20）

<sup>3</sup>正会員 工博 株式会社建設技術研究所 大阪本社地盤構造室（〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7）

<sup>4</sup>正会員 工修 株式会社建設技術研究所 大阪本社地盤構造室（〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7）

### 1. はじめに

一般的に、トンネルが構築される地盤が弾性変形する場合、トンネルはトンネル軸方向に沿って分布する軸方向および軸直角方向の地盤変形により強制変位入力をうける。そのとき、トンネルが剛であるほど大きな断面力が発生するが、適切な間隔で構造継手を設けることにより、トンネルは地盤変形に追従し、発生する断面力は大きく減少する。このような理由から、従来の開削道路トンネルや共同溝などは10～40m程度の間隔で構造継手を設けている。一方、構造継手は止水上の弱点となる可能性があるため、耐久性等の観点からは継手間隔を伸ばすのが望ましい。また、経済性の観点から構造継手の数は少ない方がよい。これまで阪神高速においても、開削トンネルでの縦断方向の耐震検討を実施し、耐震性、維持管理性、経済性の観点から構造継手間隔を設定してきている。過去の検討では地震時地盤の変位分布を設定し、応答変位法により構造継手間隔を設定してきた。地盤の変位分布は正弦波により与えており、振幅、波長の設定には既存の技術指針<sup>1)</sup>や検討箇所をモデル化したFEM解析結果を用いている。

本検討では、外力となる地盤変位の評価について新たな手法での検討を実施し、それを用いることにより大和川線における適切な構造継手間隔の検討を行う。

### 2. 検討方針

検討フローを図-1に示す。従来の検討ではトンネル縦断方向の変位分布を正弦波で与えていたが、本検討では3次元FEM解析から得られた地盤応答変位を与えた。また、継手間隔については、トンネル構造

部をフレームモデルによりモデル化することで断面力や目開き量の算定を行い、さらには継手間隔を変化させた時の変化を、表-1に示す照査項目・照査基準により評価した。なお、照査基準については既に検討が実施されている阪神高速神戸山手線、淀川左岸線Ⅰ期での要求性能・照査基準を参考にしつつ、今回新たに検討した、地域特性を考慮した地震動（以降、シナリオ地震動）に対する照査基準を設け、整合性を図った。

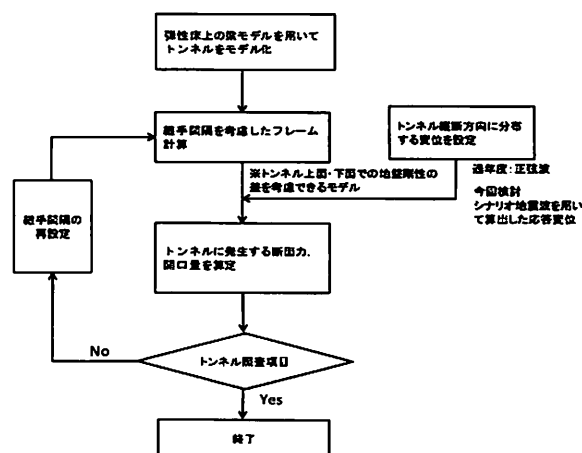


図-1 検討フロー

表-1 地震時要求性能と照査基準

| 設計地震動                | 要求性能                         | 縦断方向に関する<br>具体的目標                      | 照査照査項目                                                              |
|----------------------|------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| シナリオ地震動<br>(上可断層の破壊) | 安全性<br>トンネルが破損し、<br>人命が失われない | 断層を破壊可能な範囲に<br>とどめる（軸方向断層は<br>破断に達しない） | ・軸方向断層のひずみ $\epsilon < \epsilon_m = 10\%$ とする<br>・アンカーバーが破断しないものとする |

### 3. 入力用地盤応答変位の設定

上述のとおり、大和川線縦断耐震検討においてはFEM解析で得られる地盤応答変位を、直接外力とし

て与える手法で検討を行った。入力地震波については、シナリオ地震波を用いた。図-2に大和川線におけるシナリオ地震検討のフローを示す。

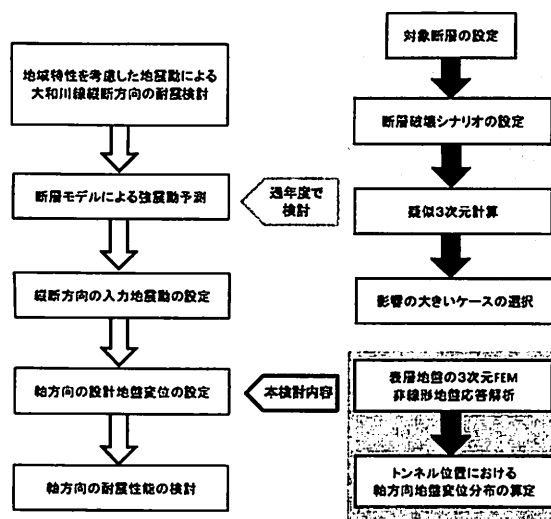


図-2 大和川線におけるシナリオ地震検討のフロー

### (1) 断層破壊シナリオ

過年度検討結果<sup>2)</sup>により、大和川線にとって大きな影響を与える上町断層系の破壊シナリオによる地震波を用いる。

### (2) 入力地震動

過年度検討から、差分法<sup>3)4)</sup>より算出されている地震動は、1kmメッシュおよび大和川線に沿った200m間隔の各計算点に対して長周期成分の時刻歴波形が得られている。また短周期成分については、統計的グリーン関数法<sup>5)</sup>により代表4点に対して算出されている。

FEM解析により地震応答を算出するにあたり、差分法で求まっている地震動を多点入力することにより地震波の位相差を考慮できる。FEM解析の入力地震動として用いる場合、メッシュの間隔に対して地震動を設定する必要がある。基盤でのメッシュ間隔を20mとすると、その位置での入力地震動が必要となる。しかし、差分法で算出されている波形は200m毎であるから、何らかの手法により補完を行う必要がある。また、短周期成分については代表4点のみの波形であることから、これらの取り扱いについても検討を要する。

本検討では、大和川線沿いに200m毎に求められている波形をベースに、2点間の位置の波形を作成することとする。地震波の作成は、各時刻歴波形をフーリエ振幅スペクトルとフーリエ位相スペクトルに変換し、周波数領域において、2点からの距離を考

慮して任意点のスペクトルと位相スペクトルを設定し、フーリエ逆変換することにより時刻歴波形を設定した。なお、短周期成分については、過年度検討ケースを代表として全ての波の短周期特性に用い、ハイブリッド合成により地震波を作成した。図-3に作成した地震動の一例を示す。解析には、水平成分と鉛直方向成分の両方向を用いる。水平成分の地震波は、NS成分とEW成分をベクトル変換することにより断層方向の地震動とした。

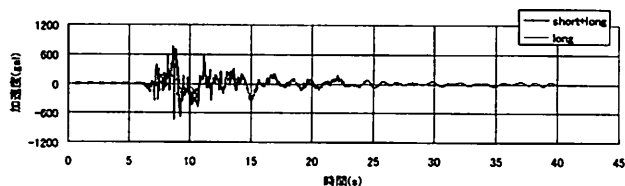


図-3 短周期波と長周期波の合成例

### (3) 解析モデル

トンネル縦断方向の耐震性能は、トンネル軸方向の変位分布が支配的になると考え、3次元FEMモデル（面外方向1要素）を用いた。図-4に断層と解析断面の関係について示す。解析断面は断層直交方向とし、トンネル位置での変位を評価する際には、断面方向とトンネル軸方向のなす角度より補正を行った。

図-5、図-6にFEM解析モデルの対象を示す。水平方向のモデル化の範囲は阪神高速大和川線全線を含む約9.5kmとし、鉛直方向は差分法による地震動算出点と同等の地表面より200mの部分とした。既往のボーリング調査結果より、表層50mの土質区分を分類している。表-2に解析に用いた地盤定数を示す。

### (4) 解析結果（地盤応答）

図-7～図-9に地盤応答結果を示す。トンネル縦断位置での応答値の違いがはっきりと現れている。

また、図-10、図-11に最大地盤ひずみの分布、図-12に地盤変位の分布を示す。地盤の変位は解析基盤面からの相対変位を示しており、水平方向で最大

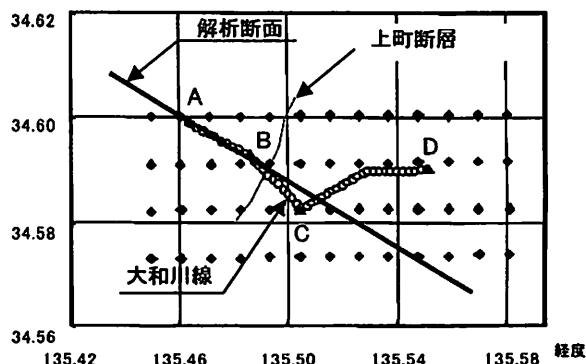


図-4 断層と解析断面

40cm程度の振幅を示している。上下方向は、比較的那の振幅は小さく、波長も全体的に長くなっている。両者のひずみの最大値分布をみると、水平方向で最大0.8%、上下方向で0.25%となっている。ひずみ分布を見ると、モデルでの $x=1000\text{m} \sim x=4500\text{m}$ の範囲で大きな値を示している。これは、図-6に示すように住之江撓曲、上町断層付近にあることから、地形の急変による影響と考えられる。

表-2 解析に用いた地盤定数

| 番号 | 土質 | $\gamma (\text{kN/m}^3)$ | $\nu$ | $V_s (\text{m/s})$ | $C (\text{kN/m}^2)$ | $\phi (^{\circ})$ |
|----|----|--------------------------|-------|--------------------|---------------------|-------------------|
| ①  | Dc | 15.4                     | 0.49  | 330                | 133.0               | 0                 |
| ②  | Ac | 17.0                     | 0.49  | 260                | 34.0                | 0                 |
| ③  | Ds | 19.0                     | 0.45  | 380                | 0.0                 | 39                |
| ④  | Dc | 17.2                     | 0.49  | 290                | 218.0               | 0                 |
| ⑤  | Ds | 19.6                     | 0.45  | 290                | 0.0                 | 39                |
| ⑥  | Dc | 15.8                     | 0.49  | 290                | 220.0               | 0                 |
| ⑦  | Ds | 19.0                     | 0.45  | 380                | 0.0                 | 39                |
| ⑧  | As | 18.0                     | 0.49  | 130                | 0                   | 36                |
| ⑨  | Dc | 17.4                     | 0.49  | 243                | 133.0               | 0                 |
| ⑩  | Dg | 20.0                     | 0.45  | 343                | 0.0                 | 35.2              |
| ⑪  | Ds | 19.4                     | 0.45  | 350                | 0.0                 | 30                |
| ⑫  | Dc | 16.5                     | 0.49  | 300                | 240.0               | 0                 |
| ⑬  | Dc | 17.0                     | 0.49  | 300                | 346.0               | 0                 |
| ⑭  | Dg | 20.0                     | 0.45  | 380                | 0.0                 | 39                |
| ⑮  | Ds | 19.0                     | 0.45  | 300                | 0.0                 | 35                |
| ⑯  | 深層 | 21.0                     | 0.45  | 400                | 0.0                 | 0                 |

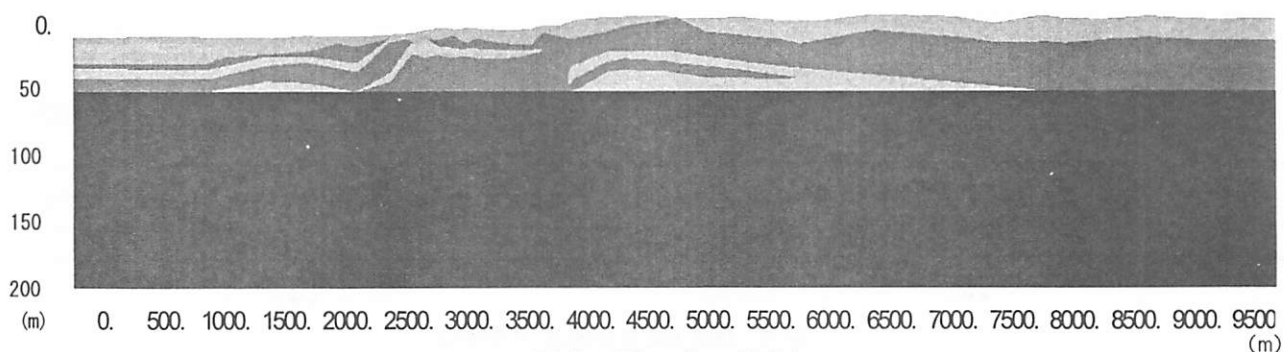


図-5 FEM モデル (全体)

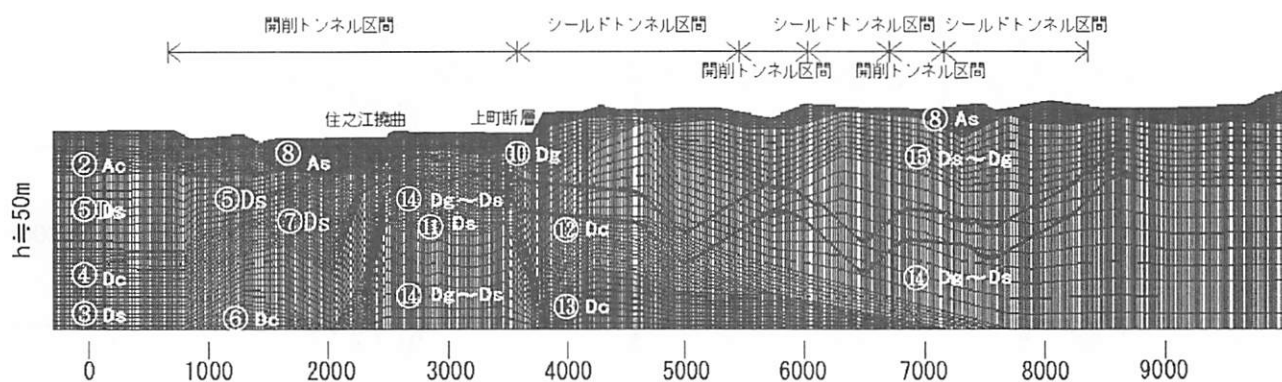


図-6 FEM モデル (表層部)

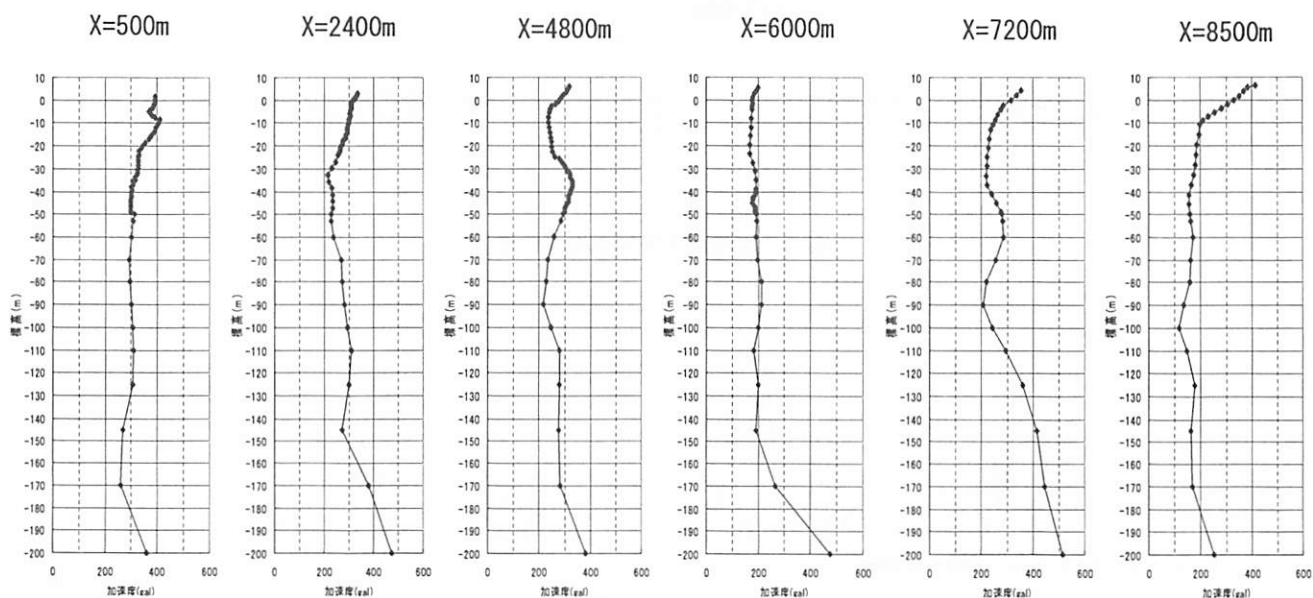


図-7 深度方向の水平最大応答加速度の分布

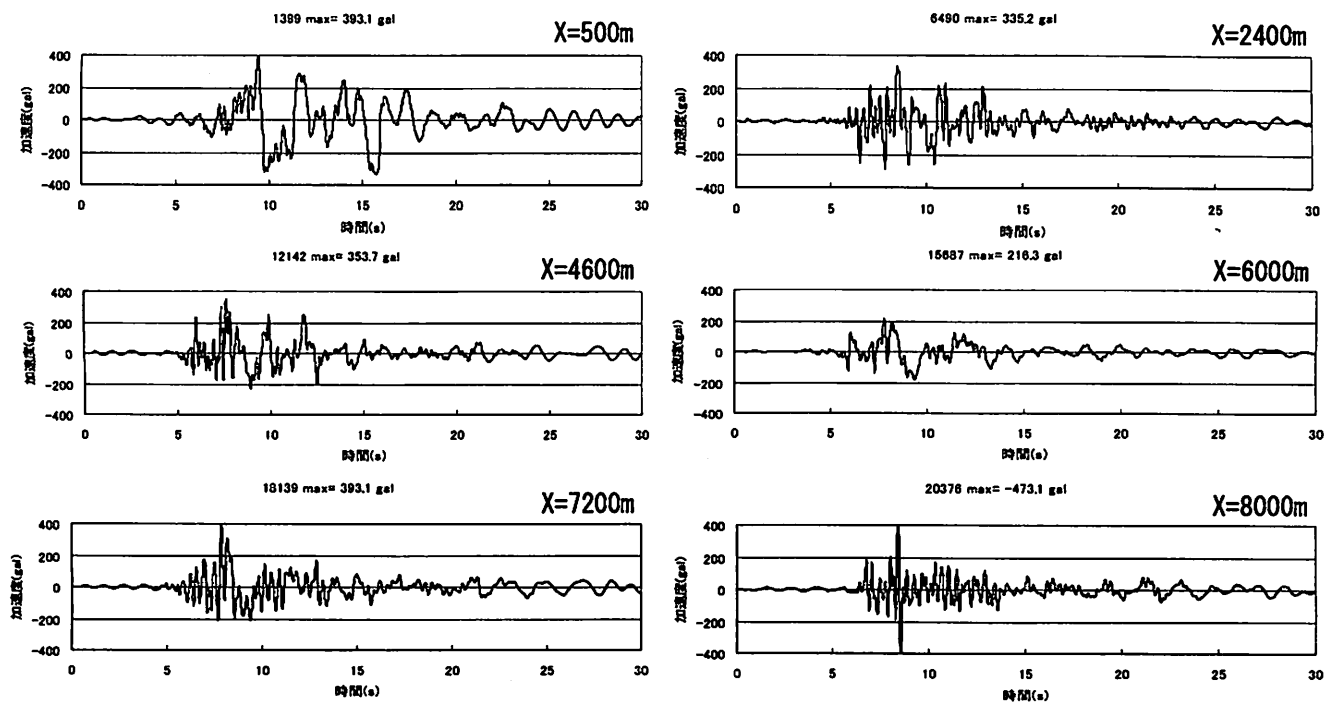


図-8 地表面応答加速度(水平成分)

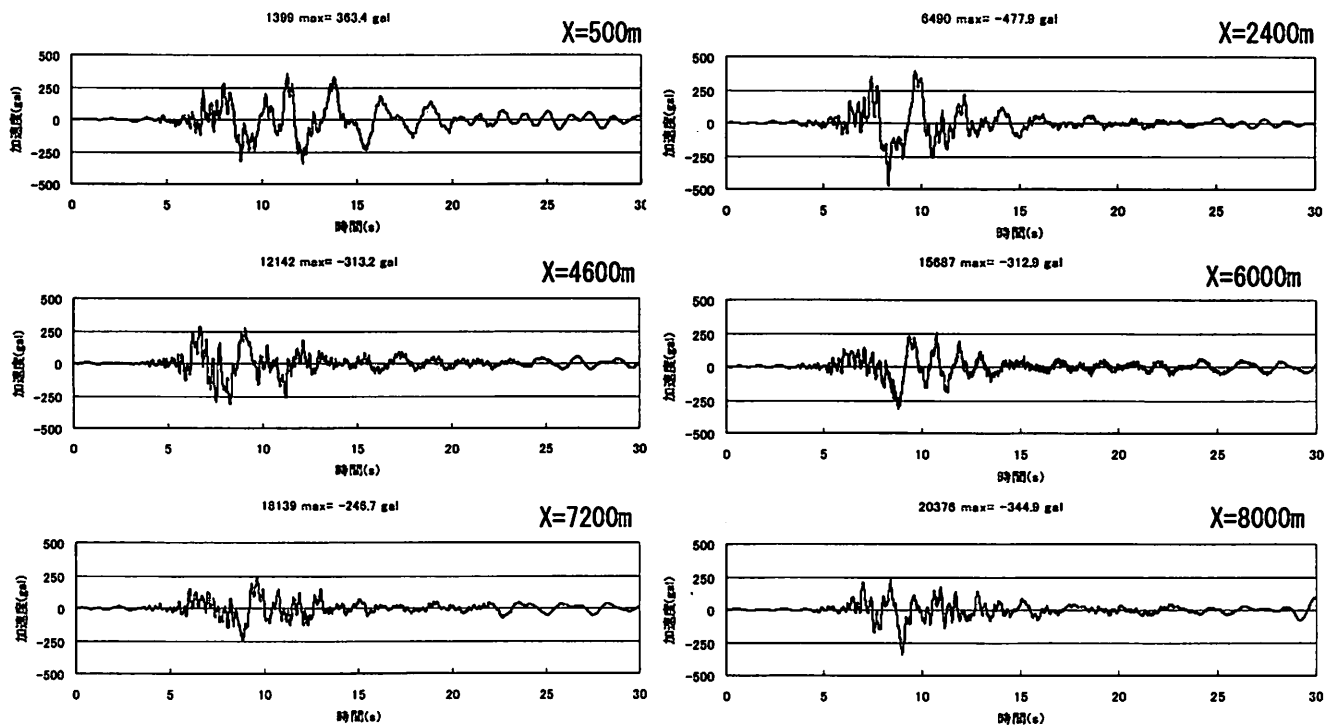


図-9 地表面応答加速度(鉛直成分)

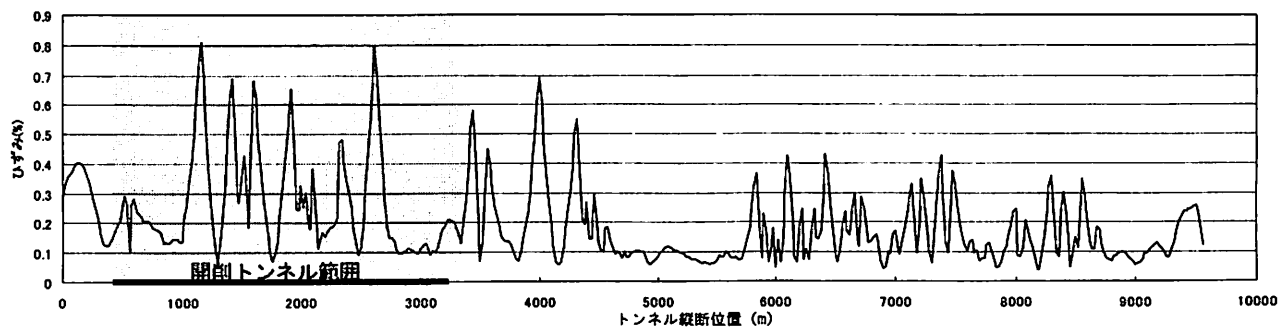


図-10 トンネル縦断方向における最大地盤ひずみ分布(水平)

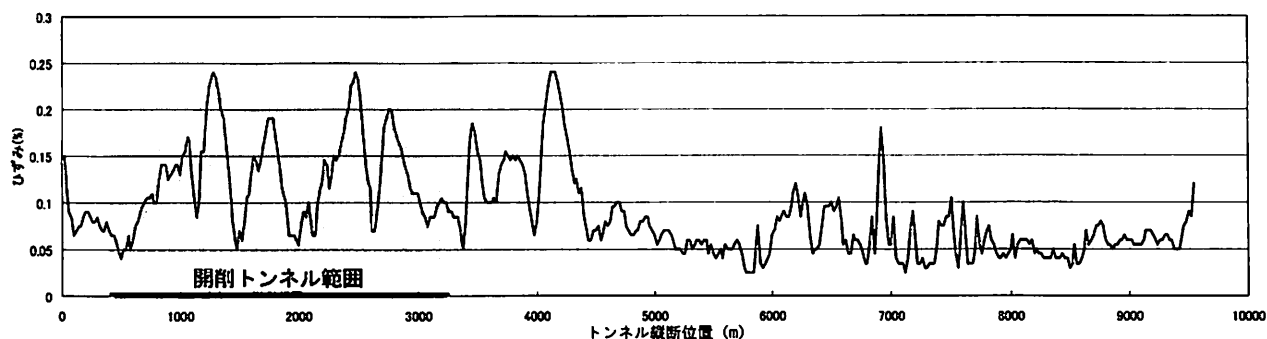


図-11 トンネル縦断方向における最大地盤ひずみ分布（鉛直）

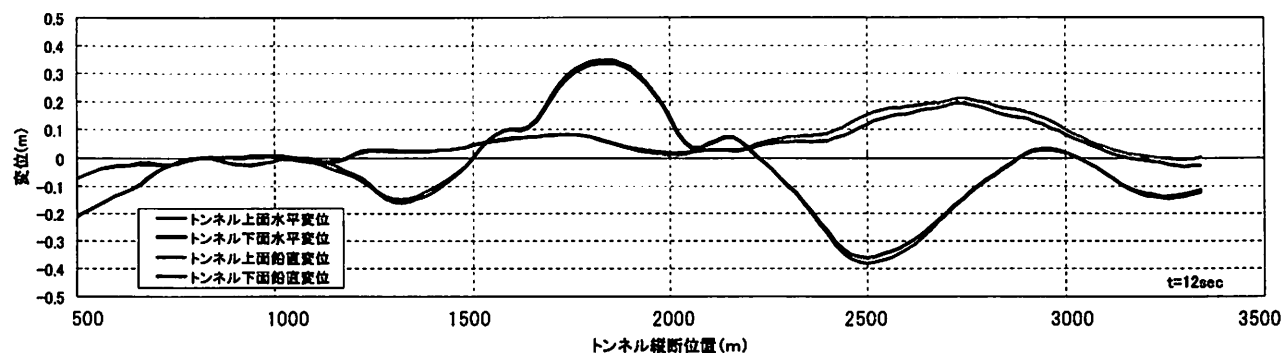


図-12 トンネル縦断方向における地盤変位分布（t=12s）

#### 4. フレーム解析による構造継手間隔検討

構造継手間隔の検討については、過年度までの検討と同様、フレーム解析により実施した。耐震性能評価のため、継手の目開き量、地盤の付着切れ等を考慮するなど多くの非線型要素をモデル化する必要がある。よって、FEMモデルの中にこれらを直接考慮するのは困難であると考えたため、フレーム解析を用いることにした。図-13にフレーム解析の概要を示す。

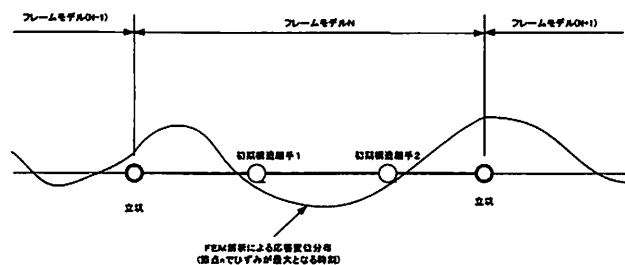


図-13 フレーム解析の概要図

フレームモデルについては、立坑位置など境界条件を適切に評価可能な位置で分割を行った。また、断面変化点などの理由から予め配置する必要がある構造継手位置（初期構造継手）をフレームに反映させた。フレームに作用させる変位については、(1)で求めた地盤応答変位を非線形地盤バネを介して、時刻歴変位波形としてフレームに入力した。そして、各変位分布により発生する鉄筋ひずみ、せん断力な

どの照査基準により耐震性能評価を行った。耐震性能を満足しない場合は構造継手を初期構造継手に追加して再計算することにより、耐震性能を満足するために必要となる構造継手箇所を決定した。

なお、当初設計における初期構造継手間隔については、神戸山手線を参考にして40m間隔とした。

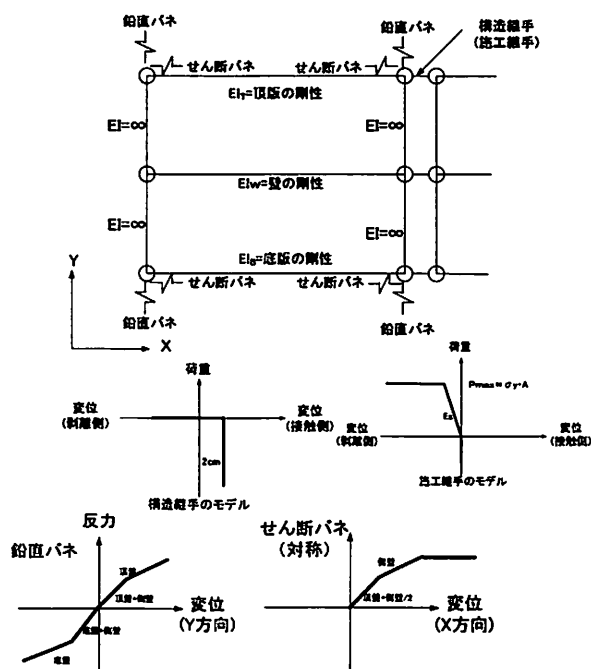


図-14 フレームモデル概要図

従来の検討で用いたフレームモデルでは、トンネル中心位置に梁要素を設けていたが、本検討では、頂版、底版、壁(中壁、側壁)をそれぞれのモデル化を行うことで、トンネルの上下面でのバネの違い、地盤変位の差を考慮できるモデルとした。図-14 にフレームモデルの概要を示す。

地盤バネ値については、強制変位法により得られた地震時地盤反力を用いて算出した。また、図-15 に示すように開削トンネル区間での縦断方向における地盤の変化が大きいので、地盤特性の変化を考慮して地盤バネ値の設定を行った。

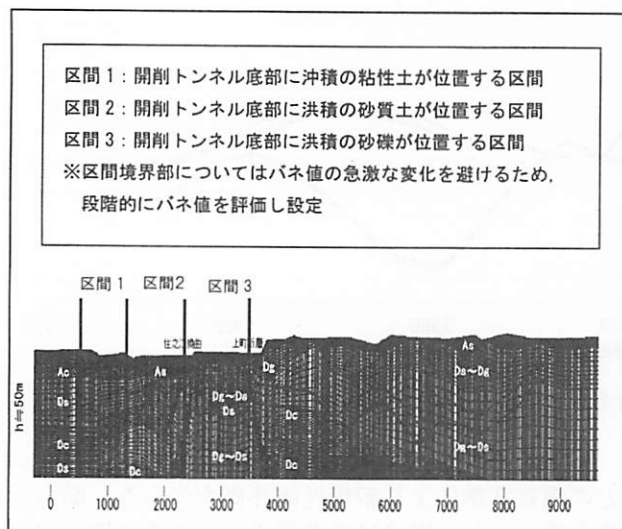
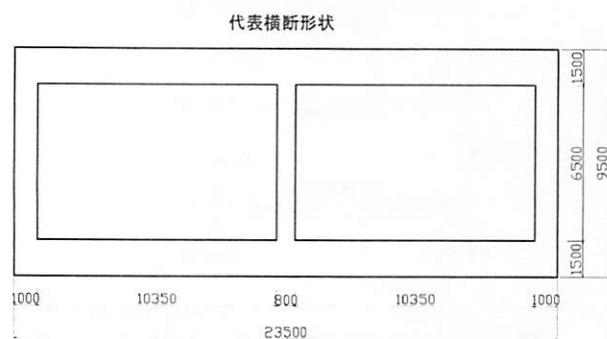


図-16 に解析対象となる大和川線開削トンネル部の代表断面寸法を示しており、フレームモデルの部材については、当初設計における縦断方向鉄筋量などを考慮して設定を行った。



## 5. 解析結果

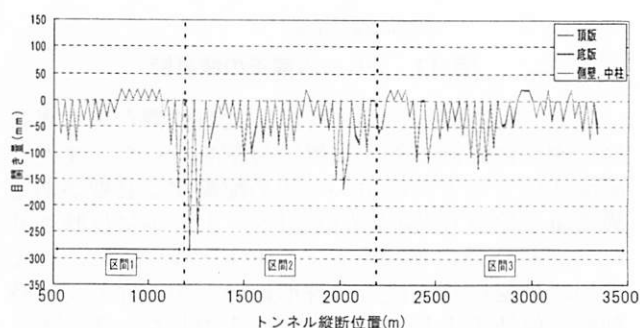
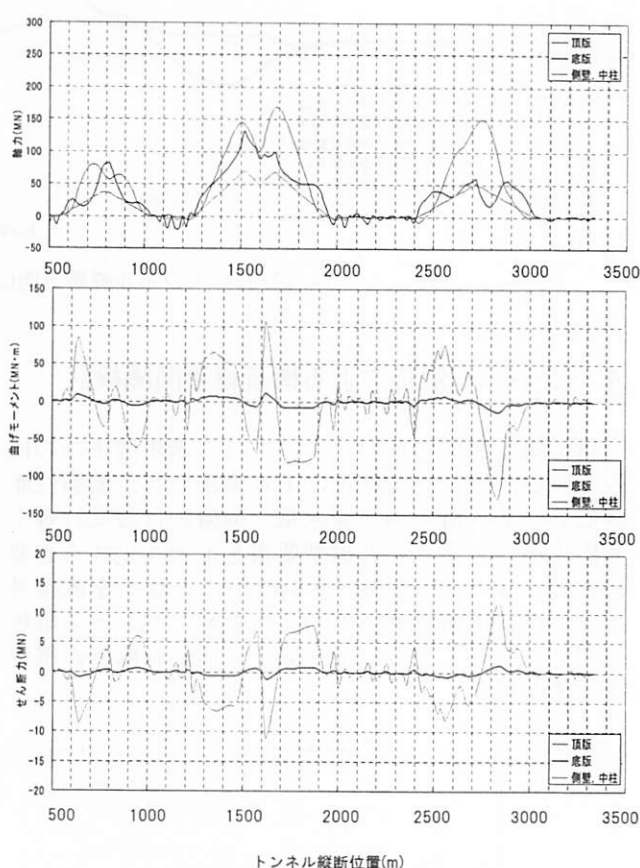
### (1) 初期構造継手間隔 (40m) における解析結果

図-17～図-21に解析結果を示す。図-18, 19には照査項目外ではあるが、構造継手の目開き量の解析結果を示す。

図-17に示すように、断面力は地盤の撓曲が大きい  $x=1500\text{m}$  付近、 $x=2800\text{m}$  付近で大きな応答値が出ており、特に軸力においては顕著な変化が見られる。

図-18に示すように、継手部の目開き量をみると最大で30cm程度に達する。図-19には水平方向の地盤ひずみ最大時の目開き量と地盤変位の相関を示しており、地盤変位の正負が入替わる箇所で見開きが発生することがわかる。

図-20に示すように、構造継手部せん断力については最大で10～16MNの断面力が発生しており、当初設計で考えているアンカーバー ( $\phi 25@500$ ) のせん断耐力 (8.9MN) を大きく超過する結果となった。この結果より、アンカーバーのランクアップ対応が必要であることがわかった。



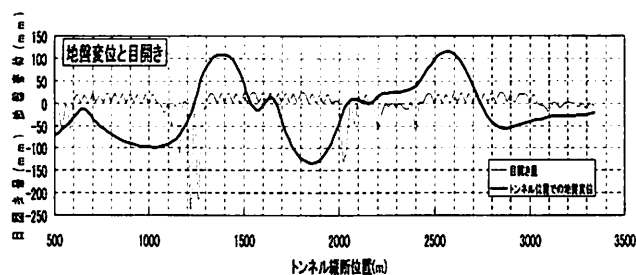


図-19 構造継手の目開き量と地盤変位の相関  
( $t=9.3\text{sec}$ )

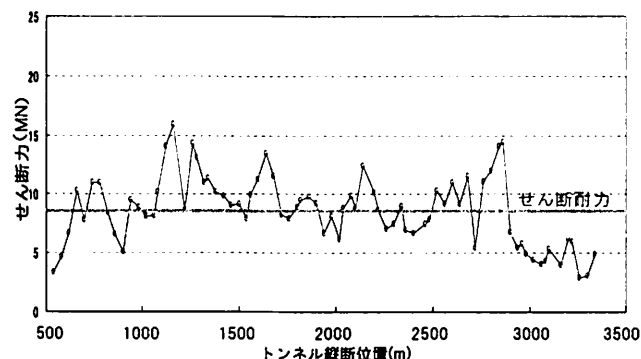


図-20 構造継手部せん断力分布 (継手間隔 40m)

図-21に示すように、施工継手部の鉄筋ひずみについては当初設計における許容値(SD345鉄筋ひずみ許容値10%)を満足している。

バネ区間に着目すると、区間1と区間2の境界において鉄筋ひずみが大きく発生している。地盤応答結果において、区間2ではそれほど大きな応答が出ていないことから、地盤とトンネルの相互間の滑りに対する抵抗値の差によるものと考えられる。

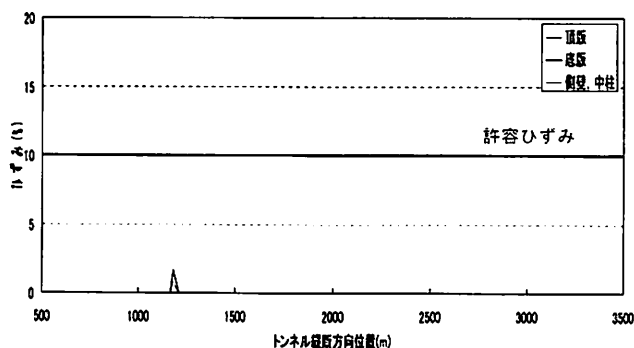


図-21 施工継手部鉄筋ひずみ分布 (継手間隔 40m)

## (2) 最適な構造継手間隔の検討

解析結果に示すように、当初設計での構造継手間隔40mでは施工継手部の鉄筋ひずみに余裕があることから、構造継手間隔を伸ばす検討を行った。図-22、図-23に結果を示す。

図-22に示すように、構造継手部におけるせん断力については、構造継手間隔を変更しても大きな変

化はなく40m間隔の時と同様に、アンカーバーのランクアップ対応が必要である。なお、 $x=1200\text{m}$ あたりで鉄筋は2ランクのアップが必要となる。

構造継手間隔と施工継手部鉄筋ひずみの感度分析を行った結果を図-23に示す。構造継手間隔を当初設計の40mから60mに伸ばしても、鉄筋ひずみはそれ程大きな変化は起こさないが、80mまで伸ばすと $x=1700\text{m}$ あたりで、許容ひずみ及び破断ひずみを超えるような大きなひずみが発生する。

これより、大和川線開削トンネル区間においては、構造継手間隔を60mまで伸ばせるということがわかった。

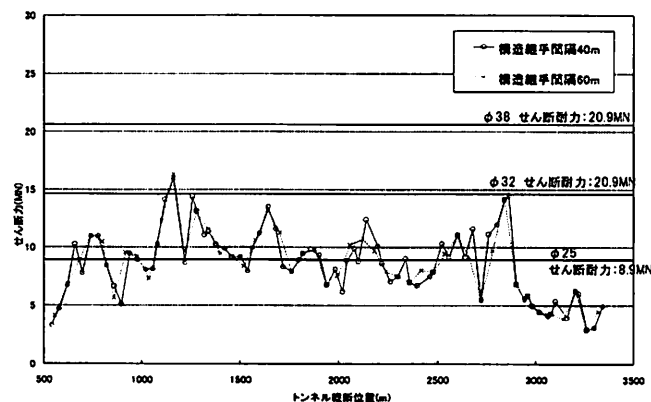


図-22 構造継手部せん断力分布比較図  
(継手間隔 40m, 60m)

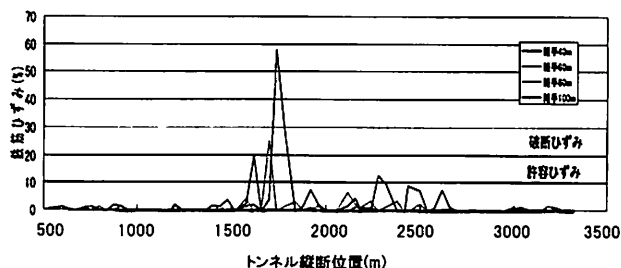


図-23 構造継手間隔と施工継手部鉄筋ひずみの感度分析結果

## 6. おわりに

本検討では、大和川線に最も影響を与えると考えられるシナリオ地震波を用い、大和川線開削トンネル部での縦断耐震検討を行った。検討手法として、従来からよく用いられる正弦波をフレームモデルに与える手法ではなく、地盤応答解析から得られた変位を直接外力として入力し、逐次解析を行った。この結果を以下に示す。

- ・大和川線直下にある住之江撓曲や上町断層といった地盤の地域特性の影響の再現することができた。
- ・フレーム解析の結果、トンネルに発生するせん断力分布が得られ、構造継手部アンカーバーのランクアップ対応が必要であることがわかった。

- ・構造継手間隔については60m程度まで伸ばすことが可能であることがわかった。これは、これまでの阪神高速での実績値（神戸山手線：40m, 淀川左岸線：80m）程度であり，断層付近の厳しい地盤条件下でも，60m程度の構造継手間隔で対応可能である。

#### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：共同溝設計指針，pp. 52-58，1986.
- 2) 岩崎好規，北田奈緒子，香川敬生：大阪域における伏在断層の調査結果と地震災害予測，第2回都市直下地震災害総合シンポジウム，文部省科学研究費補助金重点領域研究「都市直下地震」総括班，157-158，1997.
- 3) Graves, R. W. : Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media Using Staggered-Grid Finite Differences, Bull. Seism. Soc. Am. , 86, 1091-1106, 1996.
- 4) Pitarka, A. : 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered-grid with non-uniform spacing, Bull. Seism. Soc. Ame. , 89, 54-68, 1999.
- 5) Kamae, K. and K. Irikura: Prediction of site specific strong ground motion using semi-empirical methods, 10th World conference of Earthquake Engineering, 801-806, 1992.