

阪神高速大和川線シールドトンネルの横断耐震検討

藤原勝也¹・志村敦¹・玉田康一²

¹正会員 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町2-3-20）

²正会員 工修 鹿島建設株式会社 土木設計本部（〒160-0004 東京都港区赤坂6-5-3）

1. はじめに

阪神高速大和川線のシールドトンネルは、その大部分が離隔距離約1m程度の超近接（最小離隔 セグメント外径比で0.08D程度）で計画されている大断面併設道路トンネルである。

一般に併設シールドトンネルの離隔距離が小さい場合には、後続トンネルの推進力等の影響が大きくなることが知られており、先行トンネルへの影響は後行トンネルの外径が大きいほど大きく、離隔距離が0.5D以内となる場合は、特に併設に対する詳細な検討が必要とされる。

また、シールドトンネルは、比較的深い地盤中に構築されること、構造的に安定している円形であること、また、多くの継手を有し地盤の変位に追従しやすい構造であることなどから、耐震性は有利とされるが、上記併設影響のほか、地盤や構造の急変部等では耐震検討が必要である。

本稿では、大断面かつ超近接となる大和川線シールドトンネルの阪神高速道路株式会社の施工区間において、供用中に発生する確率の高いレベル1地震動、供用中に発生する確率は低いが大きな強度を持つレベル2地震動および路線直下に存在する上町断層の破壊を想定した最大級シナリオ地震動に関して、横断方向の耐震設計について検討を行ったので報告する。

2. 大和川線の概要

(1) 事業概要

大阪都心部は既存の幹線道路の混雑が著しく、沿道環境への影響が懸念されている。大和川線は、大阪都心部の慢性的な渋滞や沿道環境の悪化等を大幅

に改善し、その整備により自動車交通の流れを抜本的に変革することで、新たな都市拠点の形成を通じた都市構造の再生を促すことを目的とした都市再生プロジェクト「大阪都心部における新たな環状道路」の一部を形成する路線である。（図-1）

大和川線は、阪神高速4号湾岸線から分岐し、同14号松原線へ連絡する全延長約9.7kmの自動車専用道路である。大和川線の整備により、大阪南部地域は臨海部と内陸部が高速道路で直結され、都心部へ流れ込む既存道路の渋滞も緩和され、関西都市圏の社会経済活動の活性化に大きく寄与するものと期待されている。

なお本事業は、平成11年に阪神高速道路公団が事業に着手したが、道路関係四公団民営化での事業見直し、ならびに堺市の政令指定都市化に伴い、平成18年度より大阪府、堺市ならびに阪神高速道路株式会社の3者が共同して整備を行うこととしている。

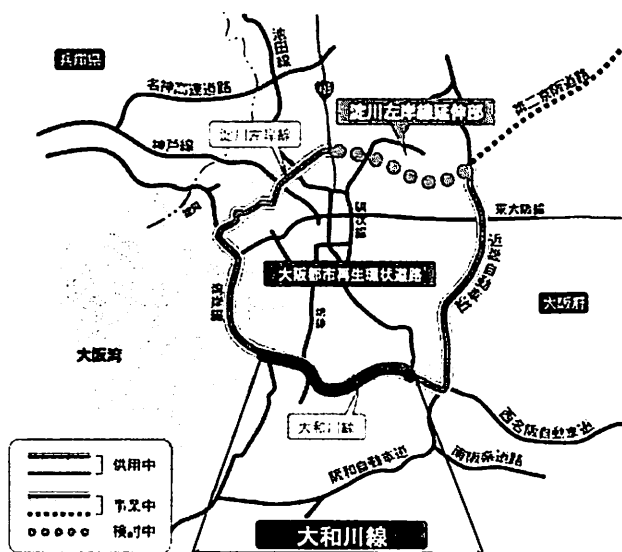


図-1 大和川線の位置図

(2) 大和川線シールドトンネル

大和川線は、大和川の景観保全、周辺市街地の環境への影響、沿道の土地利用との整合などを勘案し、4号湾岸線および14号松原線の接続部を除いて基本的に地下構造または掘削構造を採用している。

地下構造区間は当初、全線開削トンネル構造としていた。しかしながら南海高野線から近鉄南大阪線の交差部に至る約4.4kmの区間については、鉄道、浄水場等の重要施設が地表部に存在しており、シールド工法技術の向上に伴い、同工法の方が経済的かつ工期も短くなることから平成19年の都市計画変更時にシールド構造へ変更（一部ランプ分合流部は開削トンネル構造）している。

シールドトンネル区間は上下線間の離隔距離は1m程度（最小離隔は0.987m）の、長距離・超近接の併設トンネルとなっている。（図-2、3）

a) 阪神高速道路(株)施工区間の大和川線シールドトンネル構造

阪神高速道路(株)施工区間の大和川線シールドトンネルの構造諸元を表-1に示す。

近年、セグメント部材形状は、薄肉化、幅広化の傾向にあるが、極端に薄く、幅の広いセグメントを採用することは、将来的な安全性の確保への不安や、維持管理に要する労力の増大を招くことが予想される。そこでセグメント形状は、過去の道路トンネルの実績およびセグメント厚さと外径との比から、コンクリート系セグメントでは厚さ400mm以上で幅2000mm以下、合成セグメントでは厚さ300mm以上で幅1800mm以下を設計上の標準値とした。また、断面縮小によるコスト削減を目的として、二次覆工を省略し、従来二次覆工が有していた耐火性や止水性等の機能をセグメントに付加した。



図-2 大和川線シールドトンネル位置図

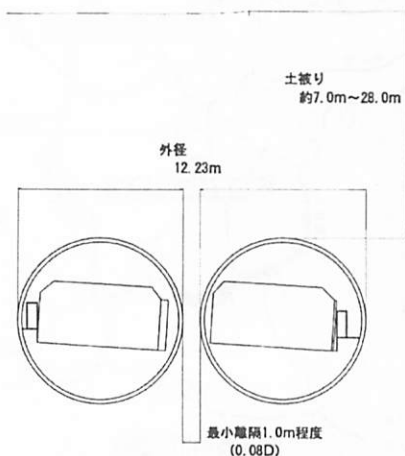
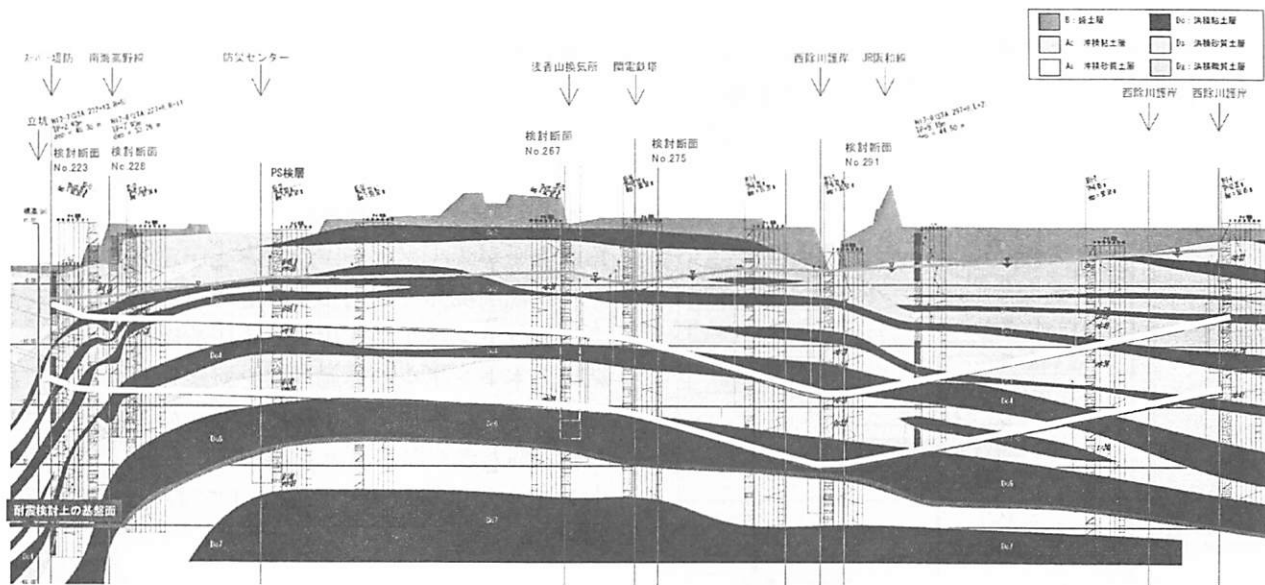


図-3 シールド断面と併設離隔

表-1 大和川線シールドトンネルの構造諸元

	断面概要図	セグメント断面図
コンクリート系セグメント		
合成セグメント		



図－4 地質縦断面図

さらに、トンネル間の併設離隔は、過去の類似地盤において、今回大和川線シールドトンネルで実施する形状寸法で妥当性を確認した距離(トンネル外径比で0.08D以上)を確保した。

以上より、非常駐車帯部および曲線部における視距拡幅等の線形条件から、内空を確保できる区間には桁高の大きなコンクリート系セグメントを、確保が困難な箇所には薄肉の合成セグメントを採用した。

b) 地盤条件

大和川線シールドトンネルが位置する区間の地質縦断面図を図－4に示す。シールド区間西端で上町断層による褶曲が見られる。一方、それより東側の区間は洪積層を主体とする良質地盤であり、シールドの位置する深さでは、N値50以上の良く締まった砂質土および礫質土と、N値14～15およびせん断弾性波速度 $V_s=292\sim310\text{m/s}$ 程度の比較的硬い粘性土の互層状の地盤である。

3. 併設影響を考慮した設計手法

本トンネルは超近接・併設で長距離を掘進するという我が国でも例を見ないシールドトンネルである。

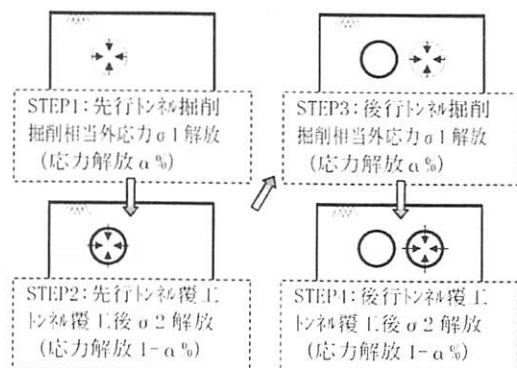
シールドトンネルが併設施工される場合、先行トンネルは後行トンネル施工時の影響を受け、狭い範囲の地盤を複数回掘削することにより、トンネル周辺地盤に応力再配分が生じ、トンネル覆工に生じる断面力は単設トンネルの場合と異なる。

以上を鑑み、併設影響を考慮して以下に示す検討を行った。

(1) 常時設計

一般に、併設トンネルの影響検討は図－5に示す応力解放率による2次元FEM解析にて行われている。実際のシールド掘進時の地山状況は、①切羽前面での応力解放、②シールド機通過時の応力解放、③裏込め注入時(テールボイド発生時)の応力解放、の大きく分けて3段階の地山の応力解放が生じる。しかしながら、従来手法では、トンネル掘削時の応力解放率のみで評価することの妥当性が明確でないこと、応力解放率の設定値で解析結果が大きく左右され、地山の状況や土圧等を明確に考慮することが困難なこと等の課題があった。

そこで、本トンネルでは掘進時の実際の地山状況を加味し、シールド掘進時の施工過程に応じた掘削相当応力を考慮した2次元FEM解析により併設影響を評価した。



図－5 一般的なFEM解析ステップ

常時の覆工設計フローを図-6に示す。覆工の設計は、先行トンネルおよび後行トンネルに対し、それぞれの併設影響を考慮した。断面力の算定は、セグメント継手部およびリング継手部の併設影響が評価可能な千鳥組の添接効果を反映したはりばねモデル（図-7）を用いた。

常時検討

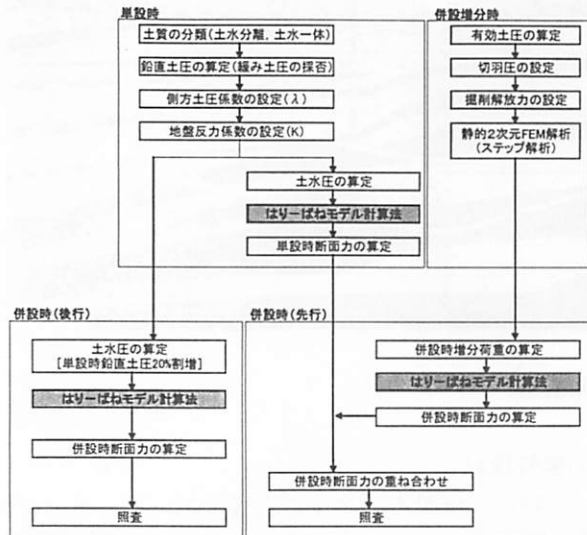


図-6 常時覆工設計フロー

a) 先行トンネル

シールド掘進時の地中応力および地表面変位の概念図を図-8に示す。後行トンネル施工による先行トンネルの併設増分断面力は2次元FEM解析によ

り得られた増分地中応力（ステップ7→ステップ4）をはりばねモデルに作用させ算定した。

b) 後行トンネル

併設トンネルの場合、地中応力の再配分の観点から、トンネルに作用する土圧は先行トンネルだけでなく、後行トンネルにも影響をおよぼすことが考えられる。そこでFEM解析により、トンネル頂部の鉛直土圧がテルツァーギの緩み土圧となるよう、トンネル掘削境界で掘削相当外応力（応力解放）を与え、後行トンネルに作用する土圧を確認した。その結果、本トンネルの通過地盤を対象とした場合、後行トンネルに作用する土圧は単設時の緩み土圧よりも約20%大きくなることを確認した。よって、後行トンネルでは併設時の影響として設計鉛直土圧を20%割増した。

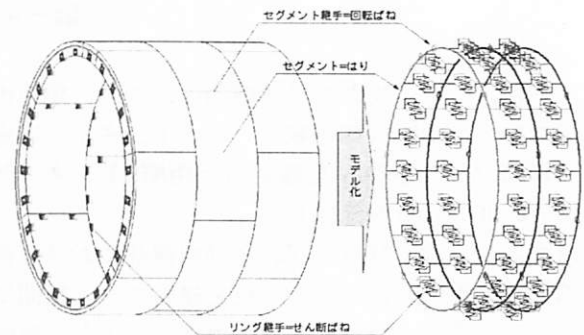
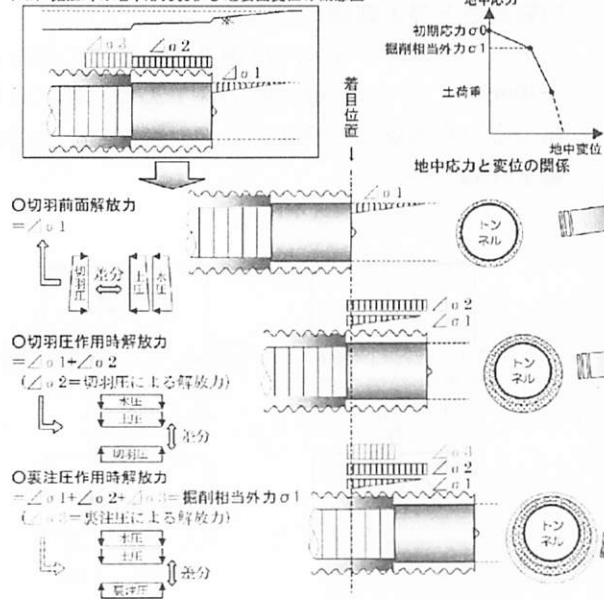


図-7 はりばねモデルの概念図

■施工過程を考慮した掘削相当外力

シールド掘進時の地中応力および地表面変位の概念図



■施工過程を考慮したFEM解析ステップ（併設影響解析）

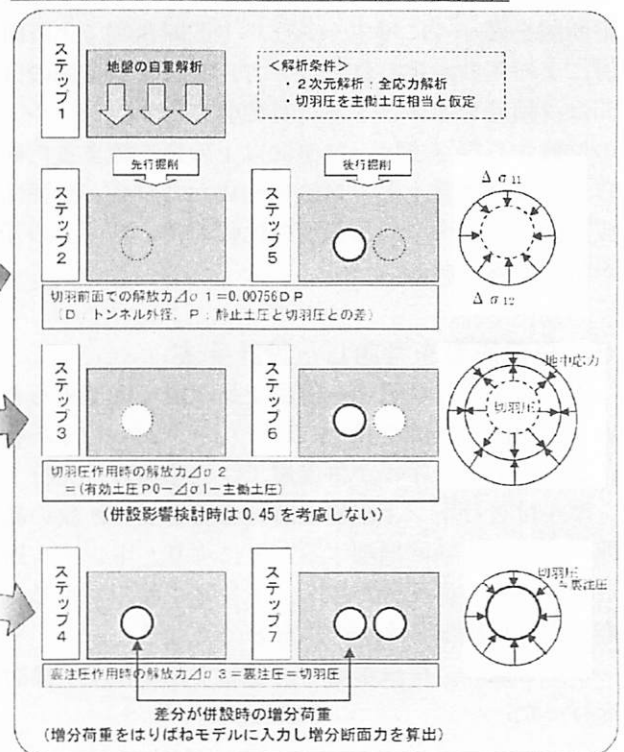


図-8 施工過程を考慮した掘削相当応力およびFEM解析ステップ

(2)耐震設計

a) 耐震性能

地中道路構造物として必要とされる耐震性能を確保するよう、供用中に発生する確率の高いレベル1地震動に対しては健全性を損なうことなく、また供用中に発生する確率は低い大きな強度をもつレベル2地震動に対しては限定された損傷にとどめることを目標とした。さらに大和川線の直下には活断層である上町断層の存在が明らかになっており、大和川線に最も大きな影響を及ぼす想定地震動を最大級シナリオ地震動とし、少なくとも構造物全体系が崩壊しないことを目標とした。(表-2)

目標とした耐震性能に応じて、耐震検討の照査項目および許容値は、レベル1、レベル2および最大級シナリオ地震動のそれぞれで個別に設定した。(表-3)

表-2 地震レベルと目標とする耐震性能

地震動レベル	対象地震動	目標とする耐震性能		
		安全性	機能性	復旧性
レベル1地震動	道路標示方書Ⅰ種地震動のスペクトル特性を有する地震動	地震時の利用者に対する安全性を確保	地震直後にも一般車両の通行が可能	通行止めを伴う補修・補強不要
レベル2地震動	兵庫県南部地震における強震記録より作成した、基礎での平均的なスペクトル特性を有する地震動および、南海トラフ沿いを震源とする南海・東南海地震	地震時の利用者に対する安全性を確保	地震直後にも緊急車両が通行可能・建築限界確保	補修・補強により当初の機能回復が可能
最大級シナリオ地震動	上町断層を震源とするシナリオ地震動	トンネルが崩壊し、人命が失われない	-	-

表-3 耐震性能に対する照査項目

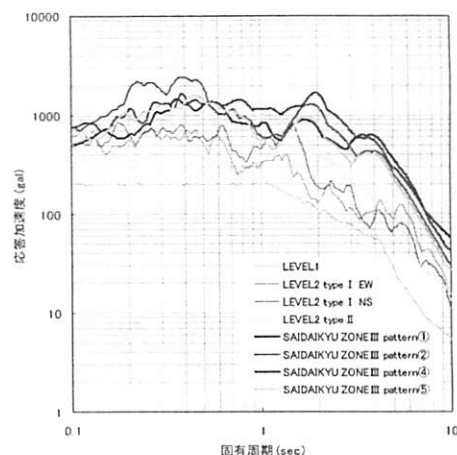
地震動レベル	安全性の照査方法		
	部位	照査内容	許容値
レベル1地震動	覆工本体	曲げ・軸力に対する照査	○曲げ・軸力 : 降伏曲率
	セグメント継手部	曲げ・軸力に対する照査	○曲げ・軸力 : 継手の降伏点
レベル2地震動および最大級シナリオ地震動	覆工本体	曲げ・軸力に対する照査	○曲げ・軸力 : 許容曲率
	セグメント継手部	せん断に対する照査	○本体せん断 : せん断耐力
	セグメント継手部	曲げ・軸力に対する照査	○継手目開き量 : 許容目開き量
	セグメント継手部	せん断に対する照査	○継手せん断 : せん断耐力
最大級シナリオ地震動	リング継手部	せん断に対する照査	○継手せん断 : せん断耐力
	リング継手部	せん断に対する照査	○継手せん断 : せん断耐力

b) 入力地震動

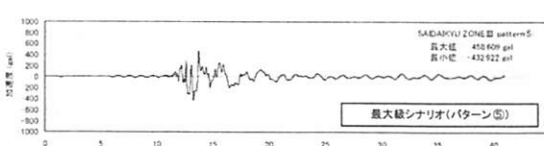
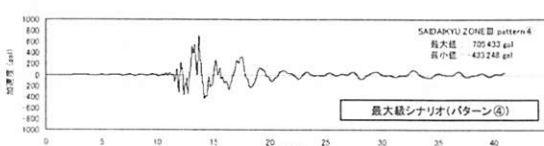
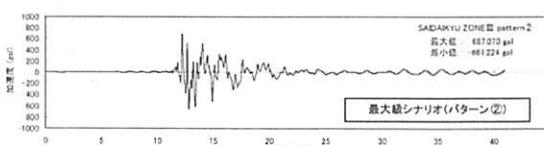
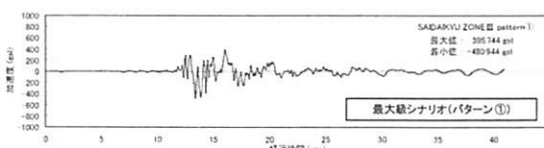
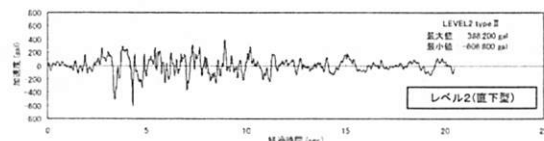
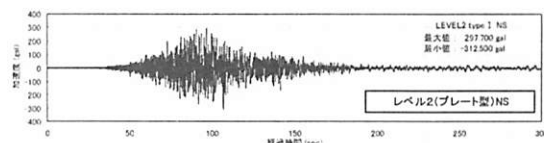
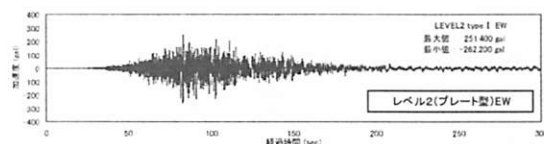
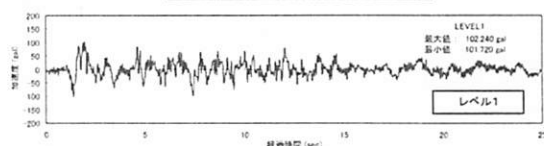
検討に用いた入力地震動波形および応答加速度スペクトルを図-9に示す。

レベル1地震動は、道路標示方書Ⅴ耐震設計編に示される地震動を用いた。

レベル2地震動の設計用入力地震動は兵庫県南部地震における強震記録をもとに規定した内陸直下型の地震動と、南海・東南海地震の断層モデルをもとに規定したプレート境界型の地震動を用い、トンネルの方向に合わせてNS成分とEW成分の波形を合



応答加速度スペクトル



入力地震動波形

図-9 設計用入力地震動

成した。

最大級シナリオ地震動は、路線直下に存在する上町断層の破壊を想定して規定した地震動を用いた。これは上町断層系の断層が破壊するモデル、アスペリティの配置や破壊開始点などを組み合わせた複数のモデルケースから大和川線地中構造物に大きな影響をおよぼす可能性のある4パターンを選定したものである。大和川線縦断方向の地質構成、構造形式、深度から区間をゾーニングし、本トンネルが位置するゾーン（区間）に対し標準加速度波形を作成している。

c) 耐震設計上の基盤面

耐震設計上の基盤面は、粘性土の場合はN値が30以上、砂質土の場合はN値が50以上、もしくはせん断弾性波速度が300m/s程度以上の地質を目安とし、良質な地盤が連続して出現する地層の上面とした。構造物が基盤面に近接している場合には、構造物下面と1.0Dの距離をおいた深度に基盤を設定した。

d) 横断方向耐震検討方法

地震時の設計フローを図-10に示す。本トンネルの横断方向の耐震設計は併設影響を考慮するために、動的FEM解析と2リングはりばねモデルによる応答変位法を組み合わせた手法に基づいて行った。

耐震検討は応答変位法に基づいて行うため、まず自然地盤の状態における地震時の地盤変位を1次元地盤応答解析（SHAKE）により求めた。次に地盤応答解析で得られた周辺地盤の応答変位を横断方向の2リングはりばねモデルに作用させ、トンネルに発生する地震時増分断面力および変位量を求めた。

一方、併設による影響は、以下の手順により動的2次元FEM解析により割り増し係数を算出し、得られた地震時の増分断面力と常時の断面力を足し合わせた断面力および変位に対し、横断方向の耐震性能の照査を行った。

- ①併設シールドトンネルの横断面をセグメントと継手の等価剛性のはりでモデル化し、地盤の非線形性を考慮したFEMモデルに組み込み、動的FEM解析により設計地震動に対する地震時増分断面力を算定する。
- ②単設シールドトンネルをモデル化した応答解析を①同様に動的FEM解析により実施し、設計地震動に対する地震時増分断面力を算定する。
- ③①による応答と②による応答の比率を併設の影響による増幅率（割増係数 α ）として算定する。
- ④単設シールドトンネルとした場合の地震時の増

分断面力を、常時設計で用いる「はりばねモデル」を用いて算定する。

- ⑤併設シールドトンネルとした場合の地震時の増分断面力を④の結果から③で算定した増幅率を乗じた断面力を算定する。
- ⑥併設シールドトンネルの常時の断面力と地震時の増分断面力⑤を重ね合わせて、地震時のトンネル安全性の照査を行う。

ここで、本トンネルは離隔が小さい併設トンネルであることから、横断方向の耐震性能の照査には以下の理由によって動的FEM解析と2リングはりばねモデルによる応答変位法を組み合わせた手法によるものとした。

- ・併設トンネルのトンネル相互の影響を表現するためにはトンネルと地盤を併せてモデル化する必要があること
- ・併設トンネルの影響による周辺地盤のせん断ひずみの増加を表現するためには地盤を非線形FEMでモデル化した動的解析が必要であること
- ・FEM動的解析モデルのトンネルモデルに常時の構造計算に用いる「はりばねモデル」を組み込むことは困難であること
- ・併設トンネルの地震時の変形モードは単独トンネルの応答と大きく異なることから、単独トンネルの同一部位の応答に応答倍率を掛け合わせることで併設トンネルとしての応答を概ね推定できると予想されること

地震時検討

地盤応答解析

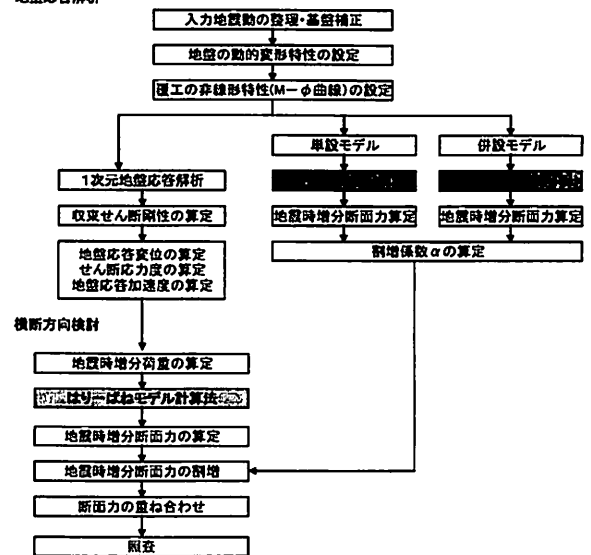


図-10 耐震設計フロー

4. 設計結果

(1) 地盤応答解析

一般に、表層地盤中のシールドトンネルおよび表層地盤の地震時の挙動は、構造特性から地盤変位に追随して変形する。地震時の地盤変位は地表面に近いほど大きく、基盤が深いほど地表面変位は大きい。トンネルに発生する断面力は、地盤の絶対変位ではなく、地盤の相対変位によりその大小が決定される。

本トンネルが位置する区間は地盤の大部分が比較的良好な洪積土層であり、耐震設計上は有利な地盤条件であるが、以下の5断面で一次元地盤応答解析を実施し、地震時における相対変位を確認した。

- ・トンネル敷設深度が最も浅い位置 (No. 223)
- ・表層地盤のN値の変化が大きな位置 (No. 228)
- ・トンネル敷設深度が概ね中間の位置 (No. 267)
- ・コンクリート系セグメント適用区間のうち敷設深度が最も深い位置 (No. 275)
- ・合成セグメント適用区間のうち敷設深度が最も深い位置 (No. 291)

地震時の地盤応答変位の算定結果を表-4に示す。地盤応答解析を実施した断面のうち、No. 275およびNo. 291の2断面ではトンネル上下端の相対変位が大きく、地震時の影響が大きいと判断された。上記2断面のトンネル上下端の相対変位最大時の深度方向の地盤変位分布を図-11に、当該箇所の詳細な設計検討断面を図-12に示す。

これにより、詳細な耐震検討は地震の影響が大きいと判断される上記2断面について行うこととした。

本稿では、上記2断面のうち、トンネル上下端の相対変位が特に大きなレベル2地震動（直下型）および最大級シナリオ地震動（パターン④）の結果について紹介する。

表-4 地盤応答解析結果

No.223						
検討断面	L1	L2(プレート型)	L2(直下型)	最大級①	最大級②	最大級④
トンネル上下端相対変位 $\Delta U_b(\text{cm})$	0.10	0.33	0.60	0.69	0.87	0.99
発生時刻(sec)	7.55	107.10	3.56	14.05	13.56	13.45
No.228						
検討断面	L1	L2TYPE I	L2TYPE II	最大級①	最大級②	最大級④
トンネル上下端相対変位 $\Delta U_b(\text{cm})$	0.19	0.42	0.79	1.00	1.23	1.53
発生時刻(sec)	2.10	101.00	3.62	14.09	13.92	13.71
No.267						
検討断面	L1	L2TYPE I	L2TYPE II	最大級①	最大級②	最大級④
トンネル上下端相対変位 $\Delta U_b(\text{cm})$	0.34	0.71	1.89	2.25	2.22	3.82
発生時刻(sec)	2.08	100.08	3.62	13.59	14.20	13.50
No.275						
検討断面	L1	L2TYPE I	L2TYPE II	最大級①	最大級②	最大級④
トンネル上下端相対変位 $\Delta U_b(\text{cm})$	0.36	0.93	2.12	2.52	2.45	4.53
発生時刻(sec)	2.08	100.09	3.62	13.59	14.21	13.48
No.291						
検討断面	L1	L2TYPE I	L2TYPE II	最大級①	最大級②	最大級④
トンネル上下端相対変位 $\Delta U_b(\text{cm})$	0.34	0.94	1.63	2.81	2.39	3.83
発生時刻(sec)	2.08	100.99	3.58	14.06	13.54	13.92

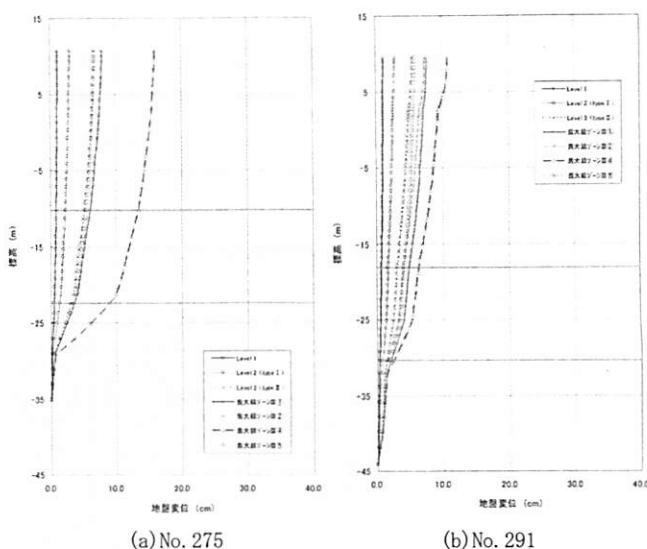


図-11 地盤変位-深度方向分布図

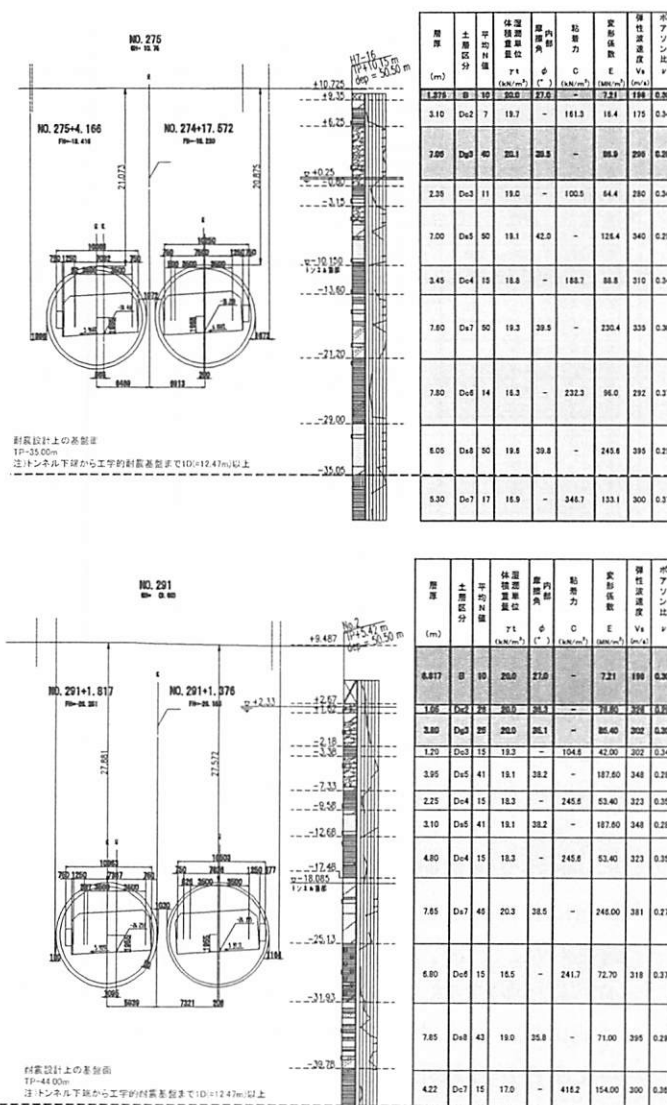


図-12 設計検討断面図

(2) 本体セグメントの設計結果

a) 常時設計

耐震設計では地震時の増分断面力を常時の断面力に重ね合わせる。ここで、常時の設計結果を表-5に示す。常時においては、本体部および継手部ともに許容値に対して十分に余裕がある結果となった。

表-5 常時設計結果一覧

先行/後行	先行				後行			
	No.275		No.291		No.275		No.291	
検討断面/セグメント種別	コンクリート		合成		コンクリート		コンクリート	
軸力図								
せん断力図								
曲げモーメント図								
変形図								
	24.6mm		20.9mm		24.9mm		23.7mm	
本体部	正曲げ	曲げモーメント	M	kN・m	347.7	256.4	474	410.9
	最大点	軸力	N	kN	3373.5	3442	2932.7	2844.6
	コンクリート圧縮応力度	σ_c	N/mm ²		7.5	7.6	9.3	8.9
	鉄筋の圧縮応力度 (+が圧縮)	σ_s	N/mm ²		94.5	112.9	109.8	111.3
	鉄筋の引張応力度 (-が引張)	σ_s	N/mm ²		-6.6	-5.7	-49.8	-8.3
	負曲げ	曲げモーメント	M	kN・m	-668.2	-343.8	-359.7	-320.7
	最大点	軸力	N	kN	5783.9	6321.7	3616.9	4431.8
	コンクリート圧縮応力度	σ_c	N/mm ²		12.3	11.1	7.9	8
	鉄筋の圧縮応力度 (+が圧縮)	σ_s	N/mm ²		161.5	184	103.7	107.5
	鉄筋の引張応力度 (-が引張)	σ_s	N/mm ²		圧縮	圧縮	-0.1	圧縮
	許容応力度	σ_{cs}	N/mm ²		20	16	20	20
	曲げひび割れ幅	w	mm		0.076	-	0.106	圧縮
	許容ひび割れ幅	w _s	mm		0.332	-	0.332	-
	正曲げ	曲げモーメント	M	kN・m	331.8	168.7	295.6	334
	最大点	軸力	N	kN	3332.3	3480.5	2953.2	3081.1
継手部	コンクリート圧縮応力度	σ_c	N/mm ²		11.1	-	14.9	11.3
	鋼材(鉄筋)引張応力度	σ_s	N/mm ²		圧縮	-	6.5	圧縮
	発生引張力	P _s	kN		-	圧縮	-	-
	負曲げ	曲げモーメント	M	kN・m	-369.1	-197.4	-298.8	-259.3
	最大点	軸力	N	kN	6055	6027.7	3587.8	4478.8
	コンクリート圧縮応力度	σ_c	N/mm ²		13.1	-	10.2	10.4
	鋼材(鉄筋)引張応力度	σ_s	N/mm ²		圧縮	-	圧縮	圧縮
	許容応力度	σ_{cs}	N/mm ²		20	-	20	20
	許容ひび割れ幅	w _s	mm		200	-	200	200
	発生引張力	P _s	kN		-	圧縮	-	-
	許容引張力	T _s	kN		-	106	-	-
判 定					OK	OK	OK	OK

b) 耐震設計

地震時の横断方向の部材照査結果を表-6に示す。地震時の荷重は右方向から加振された場合と左方向から加振された場合の2ケースを考慮した。

レベル2地震動(直下型)については、いずれの断面においても許容曲率およびせん断耐力を十分に満足した。一方、最大級シナリオ地震動(パターン④)については、No.275の継手部(主シール位置(地山側))において許容目開き量(2mm;継手部の止水性から設定)を上回る結果となった。しかし、セグメント継手部の補助シール位置(坑内側)では、許容目開き量以内に収まるため、坑内への漏水はなく、耐震性能を十分に満足すると判断した。

表-6 耐震照査結果

検討断面		No.275							
先行/後行	入力地震動	先行トンネル(コンクリート系セグ)				後行トンネル(コンクリート系セグ)			
		レベル2		最大級シナリオ地震動		レベル2		最大級シナリオ地震動	
		タイプB		パターン④		タイプB		パターン④	
	加振方向	右	左	右	左	右	左	右	左
	Δh(mm)	2.12		4.53		2.12		4.53	
	最大正曲げ(kN・m)	746	578	1240	957	557	1174	1306	1972
	最大負曲げ(kN・m)	-939	-702	-1367	-884	-1064	-933	-2058	-2499
	最大軸力(kN)	5350	7163	4943	7948	4521	5415	5214	6528
	最小軸力(kN)	2574	2878	1976	2456	2364	2502	1290	2299
	最大せん断力(kN)	489	666	553	717	370	1079	430	980
	最小せん断力(kN)	-545	-264	-674	-370	-569	-377	-826	-330
本体部	最大曲率φ×10 ⁻³ (1/m)	2.5	1.3	5.3	2.3	1.5	2	3.9	5.8
	許容曲率φ×10 ⁻³ (1/m)	20.4	22.1	48.3	38	23.8	30.2	28.6	43
	安全率γ ₁ ×10 ³	0.23	0.28	0.31	0.31	0.25	0.45	0.42	0.48
継手部	最大引張力(kN)	-	-	-	-	-	-	-	-
	主シール位置(mm)	0.55	0.27	2.88	0.74	0.48	1.33	3.34	3.92
	補助シール位置(mm)	0	0	0.17	0	0	0.04	0	0.58
	許容値(mm)	2.0							
リング	安全率γ ₁ ×10 ³ Vd/Vyd	0.54	0.71	0.43	0.29	0.73	0.73	0.67	0.53
	最大せん断力(kN)	73	81	67	87	70	82	70	87
継手部	せん断耐力(kN)	240							

検討断面		No.291							
先行/後行	入力地震動	先行トンネル(合成セグメント)				後行トンネル(コンクリート系セグ)			
		レベル2		最大級シナリオ地震動		レベル2		最大級シナリオ地震動	
		タイプB		パターン④		タイプB		パターン④	
	加振方向	右	左	右	左	右	左	右	左
	Δh(mm)	1.63		3.83		1.63		3.83	
	最大正曲げ(kN・m)	687	304	456	560	514	814	910	765
	最大負曲げ(kN・m)	-434	-312	-648	-475	-745	-1026	-936	-1317
	最大軸力(kN)	5210	7583	6374	9508	5716	6935	7528	9602
	最小軸力(kN)	3280	3150	1078	1875	2433	3536	-193	1956
	最大せん断力(kN)	241	260	350	469	310	585	450	718
	最小せん断力(kN)	-458	-303	-557	-491	-409	-383	-636	-633
本体部	最大曲率φ×10 ⁻³ (1/m)	3.1	1.2	3.9	2.6	1.3	1.5	3.7	2.9
	許容曲率φ×10 ⁻³ (1/m)	36.9	24.5	35.1	73.4	23.7	21.3	58.1	49.2
	安全率γ ₁ ×10 ³ Vd/Vyd	0.01	0.01	0.02	0.01	0.17	0.24	0.31	0.3
継手部	最大引張力(kN)	-	-	-	-	-	-	-	-
	主シール位置(mm)	1.03	1.26	2.05	2.26	0.45	0.42	1.92	0.97
	補助シール位置(mm)	0	0	0	0	0	0	0.38	0.11
	許容値(mm)	2.0							
リング	安全率γ ₁ ×10 ³	0.02	0.02	0.03	0.02	0.61	0.55	0.84	0.54
	最大せん断力(kN)	14	16	23	25	73	81	72	86
継手部	せん断耐力(kN)	391				240			

5. おわりに

シールドトンネルはその構造特性から耐震性能は有利とされるが、大和川線シールドトンネルは大部分にわたり大断面かつ超近接の併設トンネルとなることから、横断方向の耐震検討を行った。

シールドトンネルは、過去の事例等から施工時荷重による不具合の発生が多く報告されている。その経験を無視できないため、大和川線シールドトンネルではセグメントの最小部材厚および最大幅に配慮した。

以上より、常時設計では併設影響を考慮した詳細な検討を行い、自重、外荷重および併設影響による作用荷重に対し、十分な安全性を確保した。

耐震設計においては、レベル1、レベル2地震動および最大級シナリオ地震動に対し、それぞれの耐震性能を十分満足する結果となった。

シールドトンネルはフレキシブルな覆工構造をもち、縦断方向の耐震性についても有利とされるが、大和川線シールドトンネルには立坑部などの構造急変部や、断層などの地盤急変部が存在するため、引き続き縦断方向の耐震検討も行っていく予定である。

参考文献

- 1) シールドトンネル設計マニュアル、阪神高速道路(株)、2007。