

阪神高速大和川線シールドトンネルの耐震検討

阪神高速道路（株）建設事業本部建設技術課（堺設計担当） 藤原 勝也
阪神高速道路（株）計画部事業計画課 仲 義史
阪神高速道路（株）建設事業本部建設技術課（堺設計担当） 志村 敦

要 旨

阪神高速大和川線のシールドトンネルは、上下線 2 本の断面トンネルの大部分が、超近接・併設となる既往事例の少ない特殊なシールドトンネルである。一般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上記特徴を有することから、横断方向および縦断方向の耐震検討を行った。その結果、横断方向耐震設計については、レベル 1 地震動、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に満足することを確認した。また、縦断方向耐震設計については、最大級シナリオ地震動に対してセグメントのコンクリート軸ひずみが終局ひずみを超えてしまう結果となり、可とうセグメントによる対策工が有効であることを確認した。本稿では、これらの耐震検討結果について報告する。

キーワード: 超近接・併設シールドトンネル, 併設影響, 最大級シナリオ地震動

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¹⁾。

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)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、横断方向および縦断方向の耐震設計について検討を行ったので報告する。

1. 大和川線シールドトンネル

1-1 大和川線シールドトンネルの構造

大和川線シールドトンネルの位置図を図-1に示

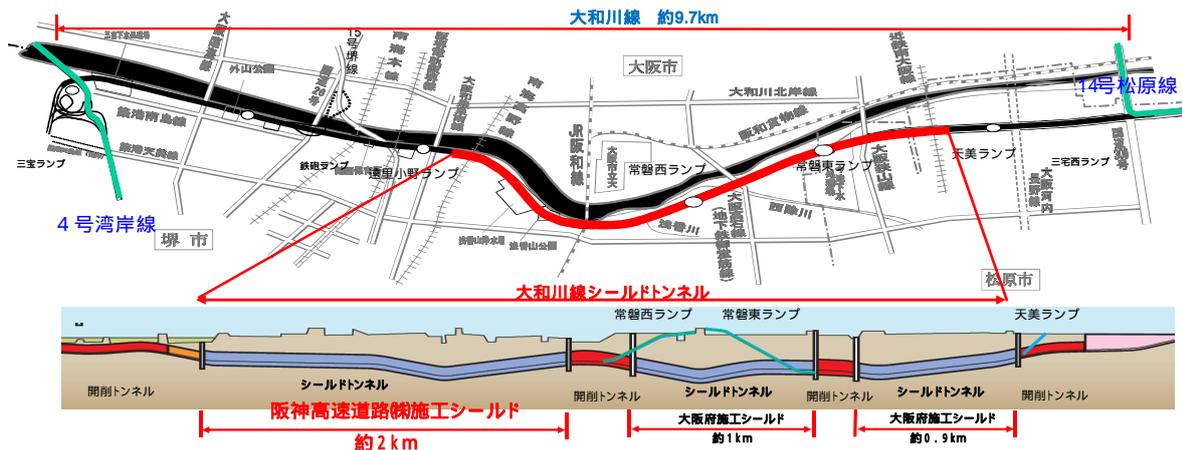


図-1 大和川線シールドトンネル位置図

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	断面図(併設状況)
コンクリート系セグメント			
合成セグメント			

す。阪神高速道路株が施工するシールドトンネルは、大和川線のほぼ中央に位置する片道約 2 km のトンネルである。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²⁾。また、断面縮小によるコスト縮減を目的として、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。

さらに、トンネル間の併設離隔は、過去の類似地盤での実績をもとに、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。

以上の考え方を基本として、非常駐車帯および曲線部における視距拡幅等の線形条件等から、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。

1-2 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-2 に示す。シールド区間西端で上町断層による撓曲が見られる。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 $V_s=292 \sim 310\text{m/s}$ 程度の比較的硬い粘性土の互層状の地盤である。

2. 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

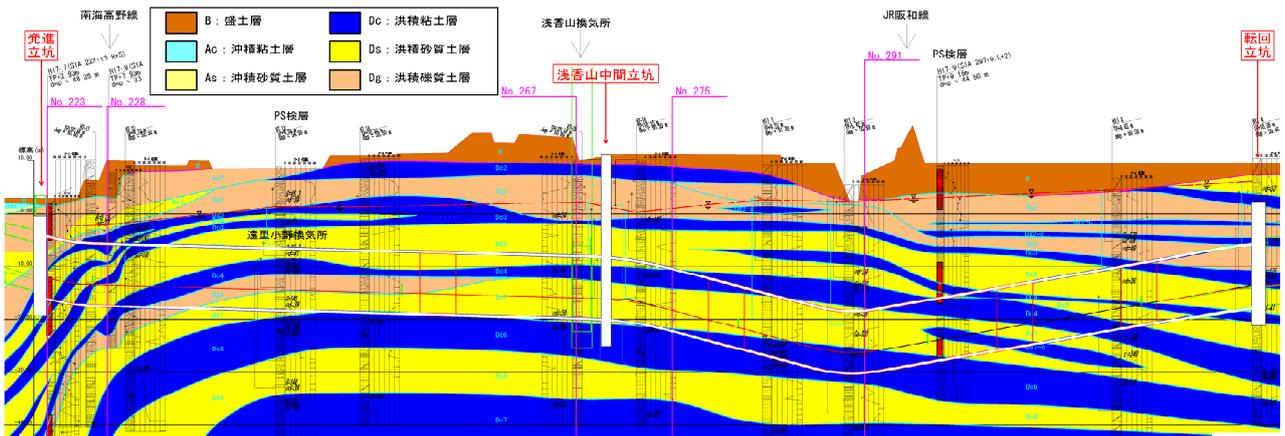


図-2 地質縦断面図

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、「シールドトンネル設計マニュアル」²⁾にしたがい、併設影響を考慮した詳細な検討を行った。以下にその検討方法を示す。

2-1 常時設計

常時の覆工設計フローを図-3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 - ばねモデルを用いた。

常時検討

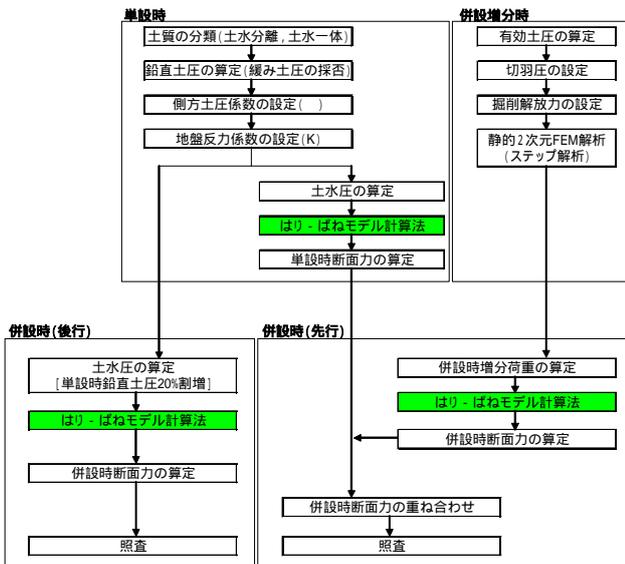


図-3 常時の覆工設計フロー

(1) 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-4に示す。トンネル掘削解析には、従来一般的に使用される応力解放率による手法ではなく、シールドトンネルが掘進する実際の地山状況を加味した影響評価を行った。よって、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。

(2) 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。後行トンネルには併設時の影響として設計鉛直土圧を20%割増しし、先行トンネル同様にはり - ばねモデルに作用させて断面力を算定した。

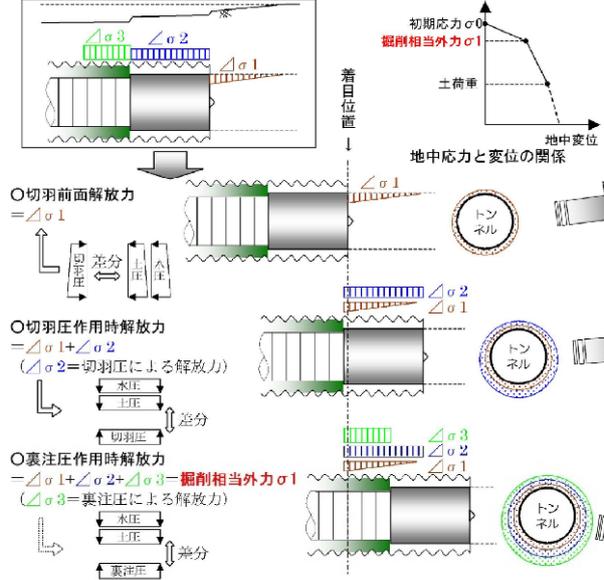
2-2 耐震設計

(1) 耐震性能と入力地震動

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が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

■ 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)

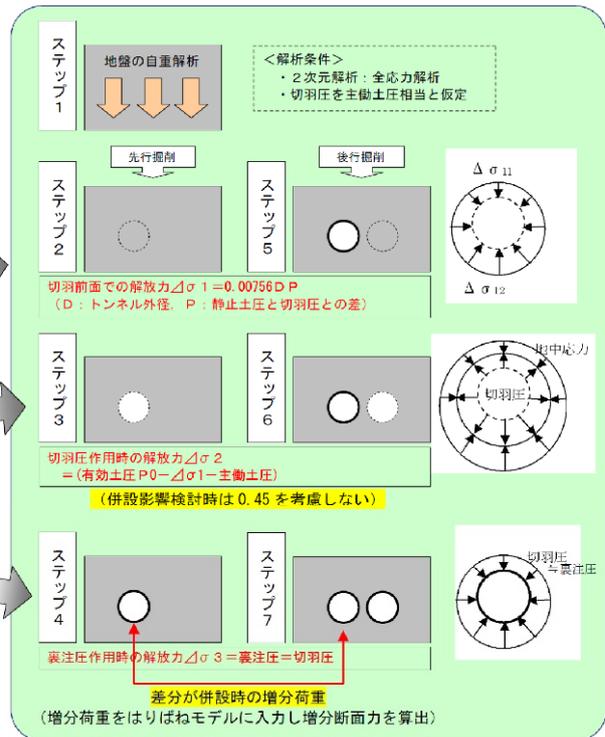


図-4 施工過程を考慮した掘削相当応力およびFEM解析ステップ

とも構造物全体系が崩壊しないことを目標とした。立坑部はトンネルが立坑から抜け出さないことを目標とした。耐震性能と入力地震動を表-2に示す。

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	道路橋示方書 種地盤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振動記録より作成した、基礎での平均的なスペクトル特性を有する地震動(タイプ)および、南海トラフ沿いを震源とする南海・東南海地震(タイプ)	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		

(2) 耐震設計上の基盤面

耐震設計上の基盤面は、横断方向の耐震設計では、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。ただし、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。

縦断方向の耐震設計では、せん断弾性波速度550m/s、GL-200mの深度に設定した。

(3) 横断方向耐震検討方法

横断方向の耐震設計は併設影響を考慮するために、2次元動的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。設計のフローを図-5に示す。

地盤応答解析および併設割増係数の算定

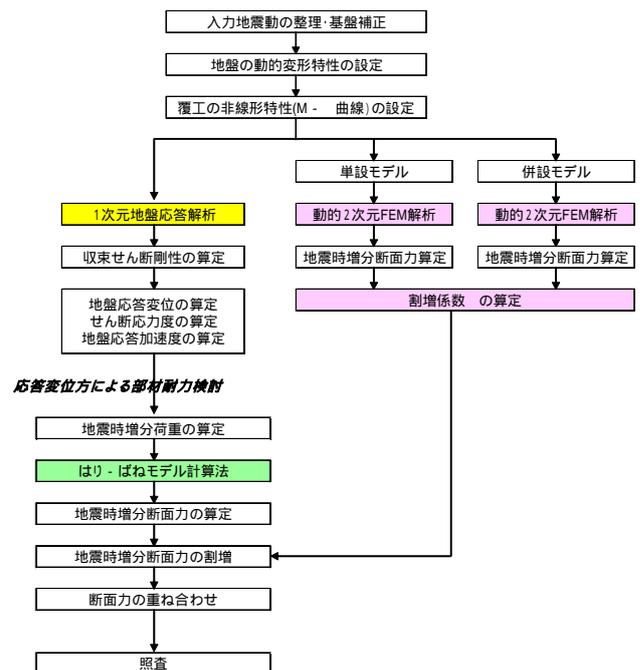


図-5 横断方向耐震設計フロー

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、動的2次元FEM解析により割り増し係数を算出し、割り増し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。

(4) 縦断方向耐震検討方法

縦断方向の耐震設計は、応答変位法によりトンネル軸方向および軸直角方向(水平・鉛直)の地震外力(地盤変位)をはり-ばねモデルに動的に載荷させて行った。設計のフローを図-6に示す。

地震時の地盤変位は、3次元動的FEM解析により抽出した。セグメントリングの縦断方向の構造解析モデルは、リング継手による剛性低下を考慮した等価剛性のはりに置換し、地盤は地盤ばねでモデル化した。また、立坑接合部はトンネル覆工と立坑躯体を一体化(剛結)せず、軸方向(X方向)は充填材(裏込め注入材)の付着による拘束を考慮したスライド結合、軸直角方向(YZ方向)は剛結で回転は自由としたピン結合としてモデル化した(図-7)。

以上により、地盤応答解析から得られた地盤応答変位を地震時外力として地盤ばねを介して部材に動的に作用させて部材断面力を算定し、縦断方向の耐震性能の照査を行った。

3. 設計結果

3-1 横断方向耐震設計

(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

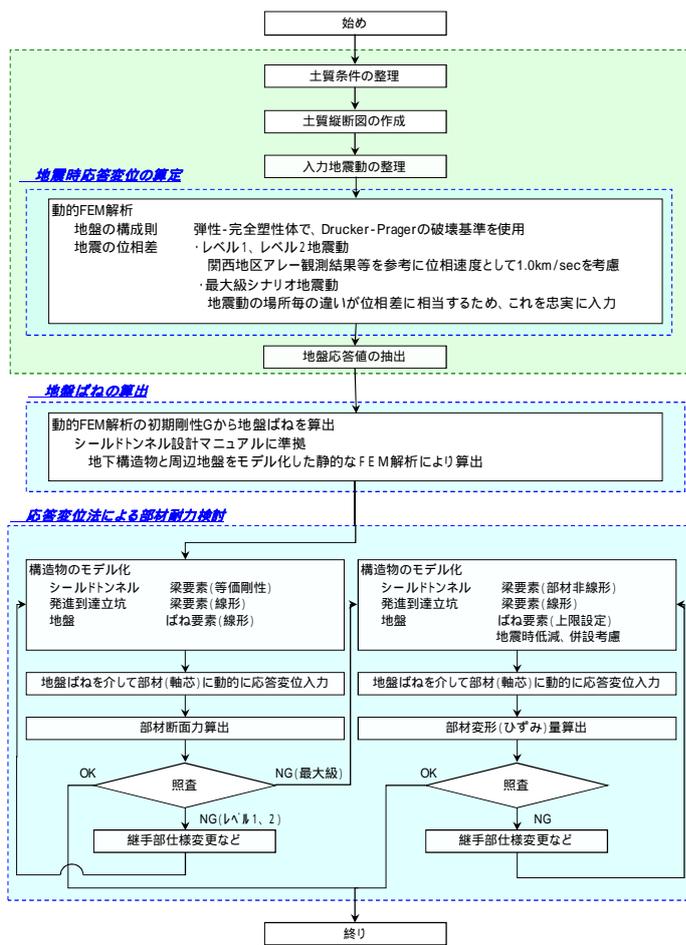


図-6 縦断方向耐震設計フロー

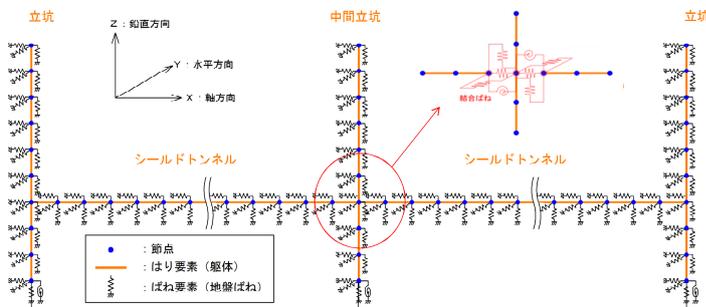


図-7 縦断方向耐震設計モデル図

は大きいですが、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。

地盤応答解析を実施した断面のうち、No.275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。地震時の地盤応答変位の算定結果を表-3に示す。

表-3 地盤応答解析結果(横断方向)

検討断面	No275			
	L1	L2TYPE	L2TYPE	最大級
入力地震動				
トンネル上下端相対変位 Uh(cm)	0.36	0.93	2.12	4.53
発生時刻(sec)	2.08	100.09	3.62	13.48

本稿では、上記断面（No.275）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（タイプ ）および最大級シナリオ地震動の結果について紹介する。

(2) 本体セグメントの設計結果

1) 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-4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-4 常時の覆工設計結果一覧

先行 / 後行			先行	後行		
検討断面 / セグメント種別			275	275		
			コンクリート	コンクリート		
本体部	正曲げ	曲げモーメント	M	kN・m	347.7	474
		軸力	N	kN	3272.5	2932.7
	コンクリート圧縮応力度		c	N/mm ²	7.5	9.3
	鉄筋の圧縮応力度（+が圧縮）		s	N/mm ²	94.5	109.8
	鉄筋の引張応力度（-が引張）		s	N/mm ²	-6.6	-49.8
	負曲げ	曲げモーメント	M	kN・m	-566.2	-369.7
	最大点	軸力	N	kN	5753.9	3616.9
	コンクリート圧縮応力度		c	N/mm ²	12.3	7.9
	鉄筋の圧縮応力度（+が圧縮）		s	N/mm ²	161.5	103.7
	鉄筋の引張応力度（-が引張）		s	N/mm ²	圧縮	-0.1
	許容応力度		ca	N/mm ²	20	20
			sa	N/mm ²	220	220
継手部	曲げひび割れ幅		w	mm	0.076	0.106
	許容ひび割れ幅		w _g	mm	0.332	0.332
	正曲げ	曲げモーメント	M	kN・m	331.8	395.6
	最大点	軸力	N	kN	3332.3	2953.2
	コンクリート圧縮応力度		c	N/mm ²	11.1	14.9
	鋼材（鉄筋）引張応力度		b	N/mm ²	圧縮	6.5
	負曲げ	曲げモーメント	M	kN・m	-369.1	-298.6
	最大点	軸力	N	kN	5055	3687.8
	コンクリート圧縮応力度		c	N/mm ²	13.1	10.2
	鋼材（鉄筋）引張応力度		b	N/mm ²	圧縮	圧縮
	許容応力度		ca	N/mm ²	20	20
			ba	N/mm ²	200	200
判定				OK	OK	

2) 耐震設計

地震時の横断方向の部材照査結果を表-5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（タイプ ）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については、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、坑内への出水はなく、耐震性能を十分に満足すると判断した。

表-5 横断方向耐震照査結果

検討断面	No.275								
	先行トンネル（コンクリート系セグメント）				後行トンネル（コンクリート系セグメント）				
	レベル2タイプ		最大級シナリオ地震動		レベル2タイプ		最大級シナリオ地震動		
加振方向	右	左	右	左	右	左	右	左	
Uh(cm)	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 × 10 ⁻³ (1/m)	2.5	1.3	5.3	2.3	1.5	2	3.9	5.8
	許容曲率 × 10 ⁻³ (1/m)	20.4	22.1	48.3	38	23.8	30.2	28.6	43
	安全率 i ×	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)	-	-	-	-	-	-	-	
	目 主シール位置(mm)	0.55	0.27	2.88	0.74	0.48	1.33	3.34	3.92
	量 補助シール位置(mm)	0	0	0.17	0	0	0.04	0	0.58
	き 許容値(mm)	2.0							
	安全率 i × Vd/Vyd	0.54	0.71	0.43	0.29	0.73	0.73	0.67	0.53
リング	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							

3-2 縦断方向耐震設計

(1) 地盤応答解析

地盤応答解析の結果の一例を図-8に示す。最大級シナリオ地震動での地盤変位は、レベル2地震動に比べて水平方向（Y方向）および鉛直方向（Z方向）では2～4倍程度、軸方向（X方向）では5倍程度の大きな応答結果となった。

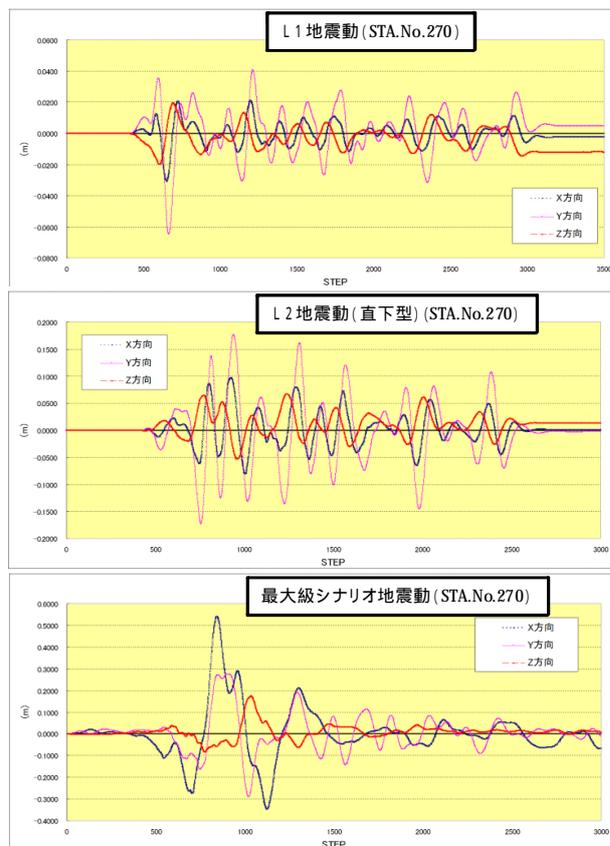


図-8 地盤応答解析結果（縦断方向）

(2) 本体セグメントおよび立坑部の設計結果

1) シールドトンネル部

線形解析に対する照査結果を表-6に示す。照

表-6 線形解析に対する縦断方向耐震照査結果

先行/後行トンネル 入力地震動	先行トンネル						後行トンネル						
	レベル1		レベル2		最大級		レベル1		レベル2		最大級		
	合成	RC	合成	RC	合成	RC	合成	RC	合成	RC	合成	RC	
セグメントタイプ													
発生断面力													
軸圧縮力	KN	59797	82912	227933	326687	1179179	2487412	61158	84743	232595	326687	1074996	2542556
軸引張力	KN	-224	-772	-906	-2702	-41665	-225	-772	-906	-2702	-41665	-5922	-41665
水平面内のモーメント	KN・m	365	959	1382	4188	10777	19407	363	959	1382	4188	4020	31663
鉛直面内のモーメント	KN・m	407	4910	1627	6512	7034	4910	407	4910	1627	6512	7034	4910
水平面内のせん断力	KN	22	58	69	209	947	1733	22	58	69	209	260	2774
鉛直面内のせん断力	KN	30	316	112	423	414	543	30	316	112	423	414	543
セグメントの軸圧縮応力度に対する照査													
コンクリート発生圧縮応力度	KN/mm2	4.93	5.69	18.8	22.12	97.31	167.76	5.04	5.81	19.18	22.12	88.63	171.75
コンクリートの許容応力度	KN/mm2	24	30	42	54	42	54	24	30	42	54	42	54
リング継手の引張応力度に対する照査													
リング継手発生引張力	KN	19.82	76.33	79.82	168.38	523.72	1846.28	19.84	76.33	79.82	168.38	470.38	1959.76
許容引張力	KN	252	197	382	308	382	308	252	197	382	308	382	308
リング継手目開き量	mm	0.3	0.64	1.2	1.4	7.86	15.39	0.3	0.64	1.2	1.4	7.06	16.33
許容目開き量	mm	2	2	2	2	-	-	2	2	2	2	-	-
せん断に対する照査													
本体部発生せん断応力度	KN/mm2	0	0.02	0.01	0.03	0.08	0.12	0	0.02	0.01	0.03	0.03	0.19
本体部許容せん断応力度	KN/mm2	0.71	0.74	0.71	0.74	0.71	0.74	0.71	0.74	0.71	0.74	0.71	0.74
継手部発生せん断力	KN	1.89	12.63	6.97	16.94	59.18	69.32	1.89	12.63	6.97	16.94	25.9	110.95
継手部許容せん断力	KN	146	239	217	313	217	313	146	239	217	313	217	313

査結果より、レベル1地震動およびレベル2地震動については、セグメント部および継手部ともに耐震性能上の問題はないことを確認した。一方、最大級シナリオ地震動については、セグメントの軸圧縮応力度およびリング継手の引張応力度が許容値を大幅に超える結果となった。

2)立坑部

立坑部は最大級シナリオ地震動に対し、中間立坑部において最大 355mm 抜け出す方向にトンネルが移動する結果となった。しかし、立坑部はトンネルのセグメントを立坑側壁部(2m程度)の中にまで挿入して構築することから、抜け出す恐れはないものと判断した。

(3)最大級シナリオ地震時の非線形解析結果

最大級シナリオ地震動における線形解析では、耐震性能を満足しない結果となったため、別途、部材について非線形性を考慮した非線形解析を実施した。あわせて、地盤ばねについて、併設トンネルによる影響および地震時の地盤のせん断剛性低下を考慮して、地盤ばね定数を低減させた。また、最大級シナリオ地震動のような大地震では、地盤変位が大きくなり、地盤と構造物の剛性の差により、地盤と構造物との間に剥離が生じると考えられる。そこで、接触面におけるせん断力が地盤と構造物との間のせん断強度を上回った場合に、すべりが生じることを想定し、地盤ばねモデルにすべり開始限界せん断力(上限値)を設定した。

しかしながら、上記を考慮した非線形解析においても、セグメントの構造変化点(合成セグメント-コンクリート系セグメント変化部)では、セグメントのコンクリート軸ひずみが終局ひずみ

($\epsilon_{cu}=0.0035$)を大きく上回る結果となった(図-10の青線)。

(4)最大級シナリオ地震動に対する対策工の検討

最大級シナリオ地震動に対し、大きなひずみが生じる結果となったセグメントの構造変化点において、可とう吸収構造をモデル化して非線形解析を行った。可とう吸収構造は、地震発生応力が集中する個所に設置する免震部材であり(図-9)、本検討では、圧縮側の变形性能をそれぞれのひずみの大きさに応じて50mm~100mm吸収するように設定し、これを超える变形に対しては軸圧縮力を伝達する構造としてモデル化した。

可とう吸収構造による対策工を考慮する前後の非線形解析結果を図-10に示す。可とう吸収構造の配置により、コンクリートの軸ひずみは終局ひずみ以内に収まることを確認した。

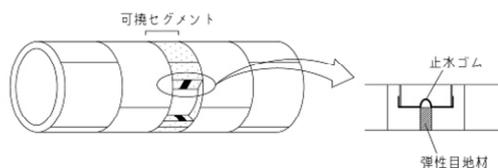


図-9 可とう吸収構造設置イメージ

4.まとめ

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、耐震検討を行った。

横断方向の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。一方、縦断方向の耐震設計においては、レベル

1 およびレベル2地震動に対し耐震性能を十分満足する結果となったが、最大級シナリオ地震動に対し、対策工が必要であると判断した。このため、可とう吸収構造をセグメント構造変化点に配置することにより対応可能であることを確認した。

参考文献

- 1)トンネル標準仕方書 シールド工法・同解説，土木学会，2006.
- 2)シールドトンネル設計マニュアル，阪神高速道路（株），2007.

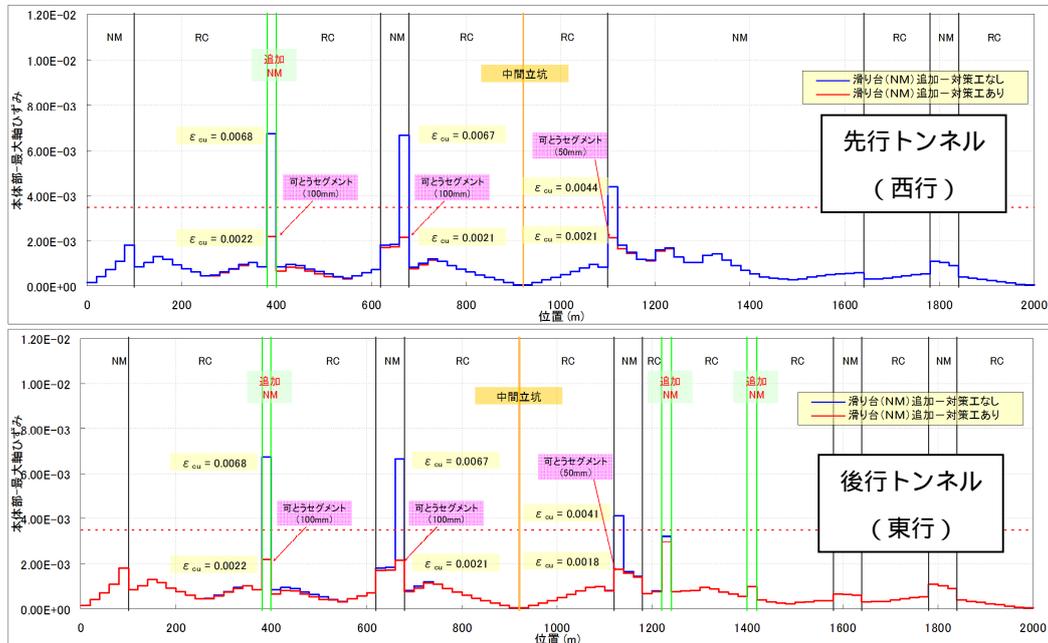


図-10 非線形解析結果（縦断方向）

SEISMIC STUDY ON THE YAMATOGAWA ROUTE SHIELD TUNNEL OF THE HANSHIN EXPRESSWAY

Katsuya FUJIWARA, Yoshifumi NAKA and Atsushi SHIMURA

The shield tunnel section of the Hanshin Expressway Yamatogawa Route has a rare and unique structure in which two tunnels with large cross sections are located in parallel at an extremely close distance. With this situation taken into account, seismic analysis was made on this tunnel section in transverse and longitudinal directions. The analysis results showed that seismic performance in the transverse direction would be sufficient under L 1, 2 and the largest scenario earthquake motions. It was also revealed that axial strain in concrete segments would exceed the ultimate strain in the longitudinal direction under the largest scenario earthquake motion, and that the problem may be solved by using flexible segments.

藤原 勝也



阪神高速道路株式会社
建設事業本部建設技術課(堺)
Katsuya Fujiwara

仲 義史



阪神高速道路株式会社
計画部事業計画課
Yoshifumi Naka

志村 敦



阪神高速道路株式会社
建設事業本部建設技術課(堺)
Atsushi Shimura