

柱部材だけを鋼板巻き補強したRC2層ラーメン高架橋の耐震性能

東日本旅客鉄道(株) 建設工事事部 正会員○小林 薫

1. はじめに

鉄道の鉄筋コンクリート(以下「RC」という)構造のラーメン高架橋は、その機能と経済性から、鉄道の高架構造物に比較的多く用いられている構造形式である。RCラーメン高架橋では、フーチング上面から軌道階スラブまでの高さが10m以上となる場合、中層はりを設け2層構造とする場合が多い。この場合の中層はりは、主に柱部材に発生する曲げモーメントを低減する目的で設けられる。

中層はりを設け2層構造となるRCラーメン高架橋では、中層はりの存在によって、さらに高次の不静定構造物となる。このことは、柱部材がせん断破壊とならなければ、地震時において、仮に部材1本が終局回転角、あるいは終局曲率を超えるような挙動を示したとしても直ちに構造物全体の崩壊につながりにくいため、構造物の耐震性能を考えると望ましいことと言える。しかしながら、中層はりによって、柱部材のせん断スパンが小さくなるため、せん断補強鉄筋が十分でない場合はせん断破壊先行型の破壊形態に移行しやすくなる。1995年の兵庫県南部地震では、RC2層ラーメン高架橋の柱部材がせん断破壊し、落橋した事例¹⁾もある。

柱部材のせん断破壊を防止し、部材のじん性能を大幅に向上させる方法として鋼板巻き補強工法がある。鋼板巻き補強工法をRC2層ラーメン高架橋の柱部材だけに適用した場合、柱部材の剛性や耐力が変化するため、地震時の挙動も補強前とは違ったものになると思われる。さらに、RC2層ラーメン高架橋の地震応答特性には、中層はりの力学特性の影響も受ける。

以上のことから、本研究では、柱部材に鋼板巻き補強を行うRC2層ラーメン高架橋を対象に、柱部材特性の変化と中層はりの影響を考慮した部材レベルでの弾塑性時刻歴地震応答解析から、当該構造物の耐震性能について検討を行ったものである。

2. 解析対象RC2層ラーメン高架橋

図1に、解析対象とした3径間連続RC2層ラーメン高架橋の一般図を示す。本検討に用いたRC2層ラーメン高架橋は、東北新幹線に用いられている実構造物のものを選定した。本ラーメン高架橋は、フーチング上面から軌道階スラブ上面までの高さが12mで、中層はりが設けられた2層構造となっている。本ラーメン高架橋の耐震設計は、設計水平震度0.25とした震度法により地震の影響に対する検討が行われている。

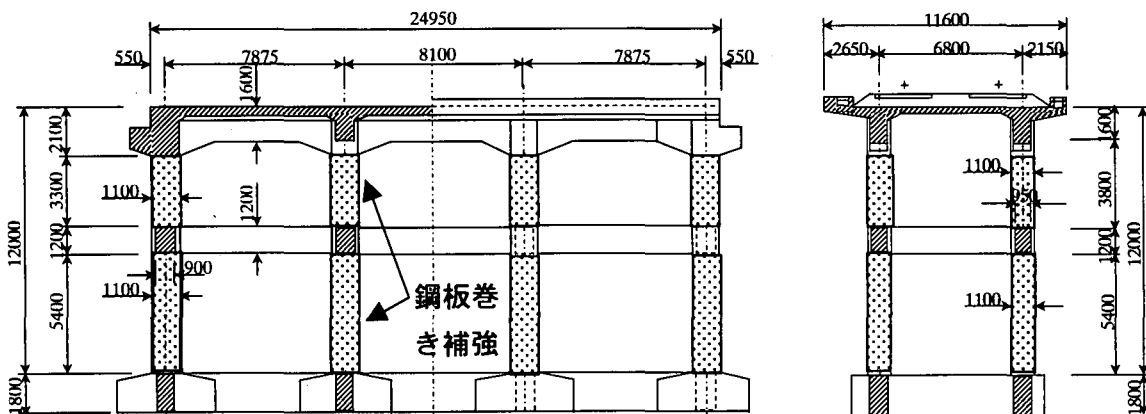


図1 解析対象RC2層ラーメン高架橋一般図(柱寸法は鋼板補強前の寸法)

キーワード：RC2層ラーメン、中層はり、鋼板巻き補強、地震応答解析

連絡先：〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-2 Tel03(5334)1288 Fax03(5334)1289

各部材の断面寸法は、鋼板巻き補強前の柱部材で上・下層ともに1.1m×1.1m、中層はりでは線路方向が0.95m×1.2m、線路直角方向で0.9m×1.2mである。図2に、各部材断面の軸方向鉄筋の配置状況を示す。なお、柱部材は、鋼板巻き補強の断面を示す。補強鋼板の厚さは9mmで、既設柱部材とは30mm程度の空隙が設けられ、鋼板設置後に無収縮モルタルにて充填される。補強鋼板の厚さは、鋼板巻き補強に関する既往の研究²⁾を参考に部材じん性率が10以上となるように定めたものである。

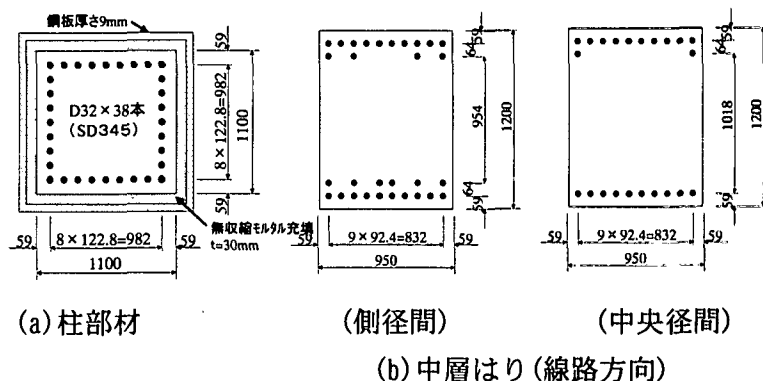


図2 各部材断面

表1 解析モデルのスケルトン

	線路方向	線路直角方向
曲げ降伏タイプ		
せん断降伏タイプ		
ピン接合タイプ		

3. 弾塑性解析

3.1 解析モデル

表1に、本解析に用いた解析モデルのスケルトンを示す。本検討では、柱部材に鋼板巻き補強を行った場合について、中層はりの力学特性に応じて以下に示す3種類の解析モデルを設定した。なお、比較検討のため鋼板巻き補強を行わない場合についても同様に解析を行った。

- ①曲げ降伏タイプ(中層はりが曲げ降伏し、曲げ降伏以降のせん断破壊とならないタイプ)
- ②せん断降伏タイプ(中層はりが曲げ降伏前にせん断補強鉄筋の降伏が先行するタイプ)
- ③ピン接合タイプ(中層はりりと柱の接合条件をピン接合としたタイプ)

これらの解析モデルは、中層はりが負担する曲げモーメントに着目しており、曲げ降伏タイプの中層はりとは十分な変形性能と安定した耐荷特性を有する部材の場合で、せん断降伏タイプの中層はりとはせん断降伏以降の曲げモーメントの負担が大きく低下する部材の場合である。ピン接合タイプの中層はりでは、最初から中層はりが曲げモーメントを負担しないとしたものである。

本検討では、構造物全体系の地震時挙動を把握するだけでなく、構造物を構成している各部材の弾塑性挙動にも着目している。このため、解析モデルには、構造物の各部材の復元力特性から構造物全体の応答を求める方法を採用した。構成部材の力学モデルとしては、比較的精度よく構造物の応答を解析できるといわれている材端弾塑性ばねモデル³⁾を用いた。

各部材の復元力特性における曲げモーメント-回転角関係は、通常の曲げ理論の仮定から曲げモーメント-曲率関係を計算し、曲率を材軸方向に沿って積分することにより回転角を求めて、これを定めた。さらに、フーチングや柱-はり接合部から軸方向鉄筋の抜け出しによる回転変形についても文献⁴⁾に示されている

方法を用いて考慮した。鋼板巻き補強を行った柱部材の復元力特性については、既往の実験結果⁵⁾を参考に曲げモーメントと軸方向力の相関 (M-N interaction) を考慮したClough型の履歴ループを用い、スケルトンカーブはトリリニア型とした。スケルトンカーブについては、鋼板をコンクリートに換算した断面から定めた。図3にClough型履歴ループを、図4に鋼板巻き補強による柱部材の降伏曲げモーメントと軸方向力の相関曲線 (My-N曲線) の違いを示す。

中層はりの復元力特性については、軸方向力の影響が小さいことから曲げ降伏タイプでは軸方向力の影響を無視したTAKEDA型の履歴ループとし、せん断降伏タイプでは、中層はりがせん断降伏耐力に達した直後からの耐力低下をスケルトンカーブの第3勾配に負勾配を考慮し、原点指向型の履歴ループを用いた。なお、第3勾配の設定は、本解析に入る前に予備解析を行い、地震応答中に下り勾配上で曲げモーメントの値がゼロとならないように初期剛性の10%程度に定めた。なお、中層はりのせん断降伏耐力は、解析対象とした構造物の中層はりに配置されているせん断補強鉄筋量から定めた。せん断降伏以降のRC部材の復元力特性については、不明確な部分もあるが、既往の文献⁶⁾を参考に決定した。図5に、解析に用いた中層はりの履歴特性を示す。上層はりの負の曲げモーメント側のスケルトンカーブについては、軌道階スラブの引張部材としての有効幅⁷⁾内に配置されている軸方向鉄筋を考慮して定めた。

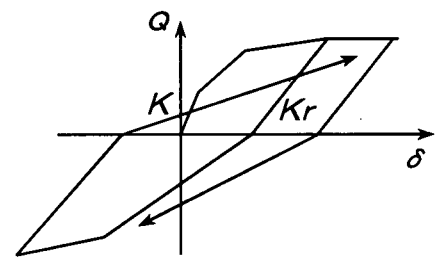


図3 Clough型履歴ループ

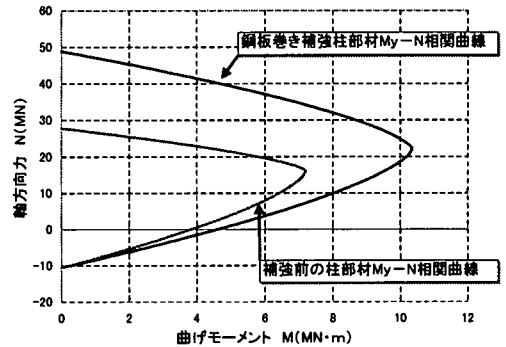
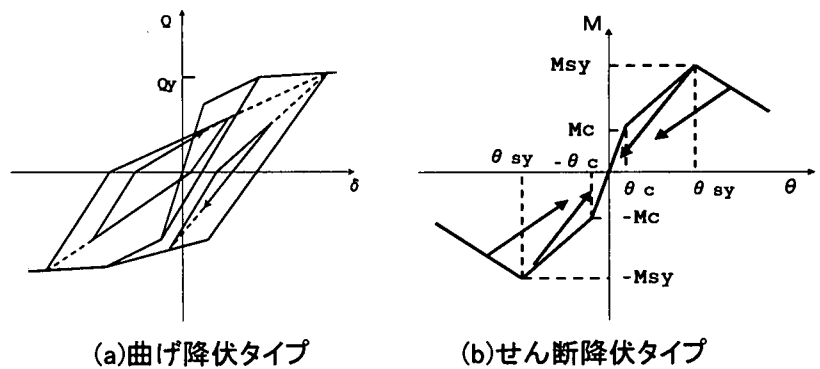


図4 柱部材のMy-N相関曲線

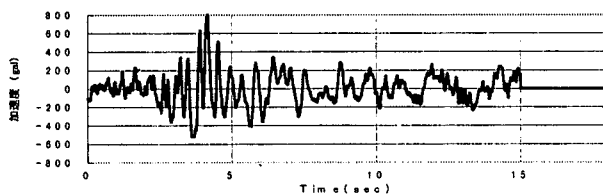


(a)曲げ降伏タイプ (b)せん断降伏タイプ

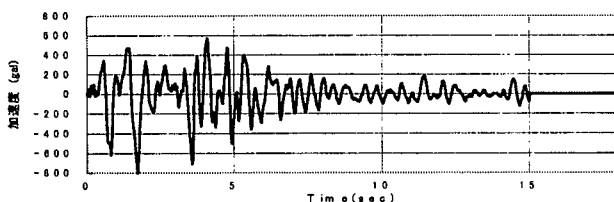
図5 中層はりの履歴特性

3.2 解析に用いた地震波

表2に、本解析に用いた地震波の諸元を示す。また、図6に、解析に用いた地震波形を示す。本検討に



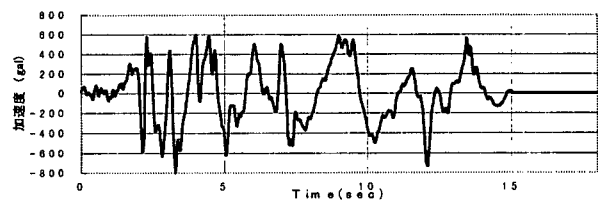
(a)八戸NS波



(b)神戸NS波

表2 解析用地震波諸元

地震波名称	元波形の最大加速度	地震名称
八戸波 NS	225 gal	1968十勝沖地震
關北橋 B	271 gal	1978宮城県沖地震
新菊川波	74 gal	1978伊豆大島近海地震
神戸海洋気象台 NS	818 gal	1995兵庫県南部地震
JR鷹取駅 EW	660 gal	1995兵庫県南部地震



(c)JR鷹取EW波

図6 解析用地震波形

は、3種類の地震波を用いた。地震波の分類は、内陸型の直下型地震に分類されるものが2種類、海洋型のプレート境界型地震として分類されるものが1種類である。内陸型の直下型地震では、1995年の兵庫県南部地震で観測された神戸海洋気象台NS成分（以下「神戸NS波」という）とJR鷹取駅での観測記録のEW成分（以下「JR鷹取EW波」という）を用いた。プレート境界型の地震では、1968年の十

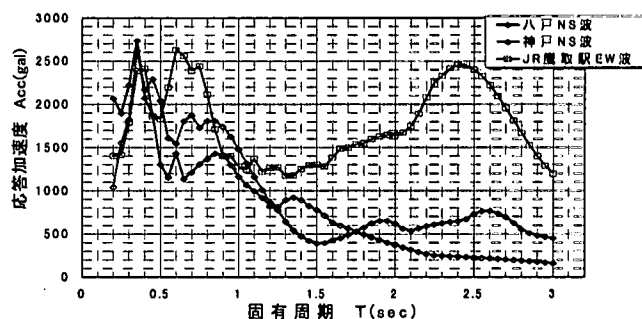


図7 解析用地震波加速度応答スペクトル

勝沖地震において八戸港で観測された記録のNS成分（以下「八戸NS波」という）を用いた。

本検討では、解析に用いた地震波の最大加速度を全て800galに振幅調整している。最大加速度を

800galに設定した理由は、構造物にとって最悪地震動として、ほぼ兵庫県南部地震規模の地震動を想定したためである。図7に、減衰定数を0.05としたときの各地震波の加速度応答スペクトルを示す。

解析で用いた各地震波の特徴としては、最大応答加速度が各地震波ともに2000galを超え、JR鷹取EW波では固有周期が2.4秒付近にも約2500gal程度となるような大きな加速度応答が発生する。プレート境界型地震である八戸NS波では、固有周期が約1.0秒以上になると加速度応答値は1000galを下回るようになる。

4. 解析結果

4.1 固有値解析結果

表3に、鋼板巻き補強前後の橋軸方向、橋軸直角方向の各解析モデルにおける1次モードの弾性固有周期を示す。

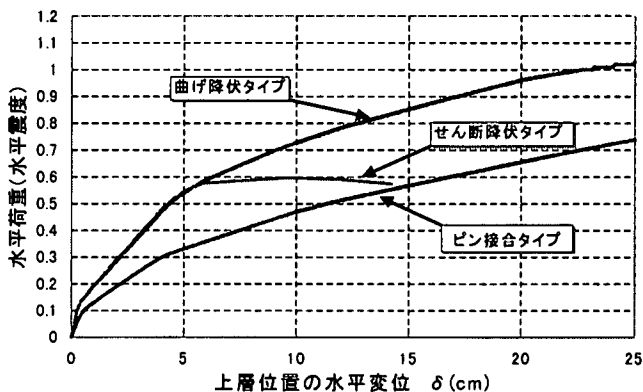
鋼板巻き補強を行うと柱部材断面が大きくなるため固有周期は短くなり、補強前の80%程度になった。各解析モデルについては、曲げ降伏タイプとせん断降伏タイプで同じ固有周期となるが、ピン接合タイプでは中層はりが剛結されている場合よりも1.5倍程度固有周期が長くなった。

4.2 静的弾塑性解析結果

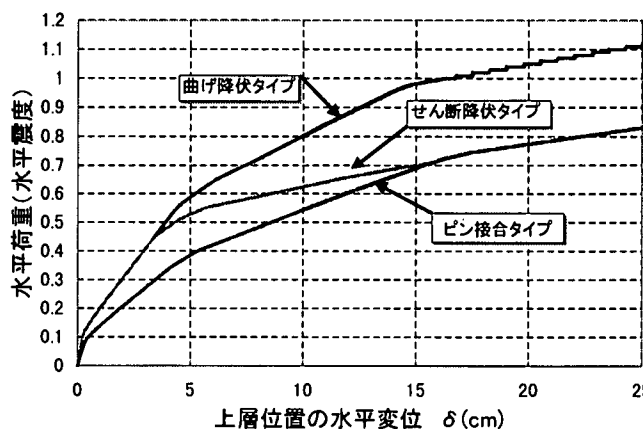
各解析モデルにおける構造系の耐荷特性を把握する目的で静的弾塑性解析を行った。解析は、上層はり位置で設定した節点の変位を逐次増加させ、それに釣り合う水平荷重を求め変位増分解法により行った。作用する水平荷重は、上層はり位置と中層はり位置の2箇所に集中荷重で与え、柱部材重量は上・下層の柱部材長の1/2を各位置に作用する水平荷重に加算した。解析結果を以下に示す。

表3 固有値解析結果

	鋼板巻き補強をした場合		補強をしていない場合	
	線路方向	線路直角方向	線路方向	線路直角方向
曲げ降伏	0.267秒	0.260秒	0.314秒	0.302秒
せん断降伏	0.267秒	0.260秒	0.314秒	0.302秒
ピン接合	0.373秒	0.353秒	0.488秒	0.457秒



(a) 線路方向



(b) 線路直角方向

図8 鋼板巻き補強を行った場合の荷重—変位曲線

(1) 構造系の荷重—変位曲線

解析結果として、線路方向・線路直角方向の上層位置での荷重—変位曲線を図8に鋼板巻き補強を行った場合について、図9に補強を行わない場合についてそれぞれ示す。荷重—変位曲線は、X軸に上層位置の水平変位、Y軸に各層に作用する水平荷重を各層の重量で除して水平震度で表している。

図8、図9から、柱部材に鋼板巻き補強を行うと構造系の耐荷特性が1.2~1.3倍程度向上することがわかる。また、傾向的には、線路方向・線路直角方向で同様な耐荷特性を示しており、曲げ降伏タイプでは各部材の降伏以降の水平変位に対しても耐力の低下はなく安定した耐荷特性となるのに対し、せん断降伏タイプでは水平変位が小さい領域では曲げ降伏タイプと同じ荷重—変位曲線上を動くが、中層はりがせん断降伏すると、柱部材のスケルトンカーブに耐力低下領域が設定されてい

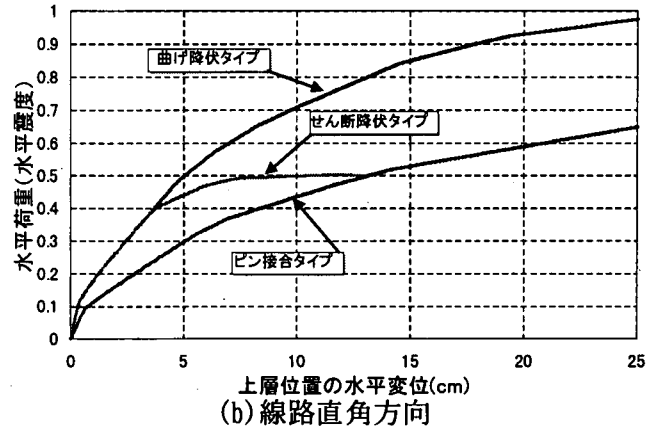
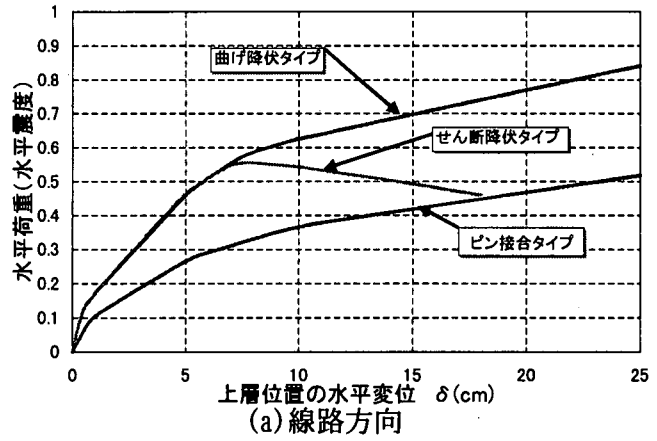


図9 鋼板巻き補強をしていない場合の荷重—変位曲線

なくても、それ以降の水平変位からは構造系の水平耐力が徐々に低下するようになる。これは、中層はりがせん断降伏したことによって、中層はりで負担する曲げモーメント、および、中層はりの剛性が徐々に小さくなり、2層構造が1層構造に変化する過程において、柱部材の曲げモーメント分布が2層構造の上層と下層の各層でそれぞれ逆対称形となっていたものが、1層構造での逆対称形の曲げモーメント分布形状になり、柱部材のせん断スパンが急激に大きくなるため、相対的に柱部材の降伏以降の曲げモーメントに対する層せん断力が小さくなるためであると考えられる。ピン接合タイプの中層はりの場合では、曲げ降伏タイプでの水平耐力の60%程度と小さくなっている。これは、ピン接合された中層はりは構造系全体の水平耐力に全く寄与しないためである。

4.3 動的弾塑性解析結果

(1) 上層位置の応答加速度・応答変位

表4-1、表4-2に、各地震波での上層位置の最大応答値を示す。図10、図11に、JR鷹取EW波で

表4-1 上層位置での最大応答値(線路方向)

(a) 鋼板巻き補強を行った場合

	八戸NS波						神戸NS波						JR鷹取EW波					
	曲げ降伏タイプ		せん断降伏タイプ		ピン接合タイプ		曲げ降伏タイプ		せん断降伏タイプ		ピン接合タイプ		曲げ降伏タイプ		せん断降伏タイプ		ピン接合タイプ	
	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側
応答加速度(gal)	901	-855	907	-871	637	-639	775	-983	701	-960	640	-933	855	-1082	897	-1081	767	-901
応答速度(kine)	50.3	-70.0	50.6	-70.6	58.9	-73.9	52.6	-64.5	53.9	-63.8	74.4	-77.2	74.3	-64.0	75.3	-64.6	80.2	-75.6
応答変位(cm)	4.91	-4.64	4.90	-4.63	6.29	-7.27	7.65	-3.82	7.83	-4.08	13.20	-4.90	8.33	-5.42	8.75	-6.66	14.66	-10.52

(b) 鋼板巻き補強をしていない場合

	八戸NS波						神戸NS波						JR鷹取EW波					
	曲げ降伏タイプ		せん断降伏タイプ		ピン接合タイプ		曲げ降伏タイプ		せん断降伏タイプ		ピン接合タイプ		曲げ降伏タイプ		せん断降伏タイプ		ピン接合タイプ	
	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側
応答加速度(gal)	806	-765	683	-594	808	-768	687	-962	603	-938	531	-871	847	-984	843	-962	789	-784
応答速度(kine)	54.3	-77.7	72.0	-79.1	55.0	-78.1	64.6	-73.7	66.3	-75.1	110.4	-85.7	86.0	-69.3	87.2	-69.9	78.2	-99.2
応答変位(cm)	5.61	-5.28	9.31	-13.00	5.57	-5.34	11.25	-3.62	11.56	-4.43	18.63	-7.90	12.39	-7.55	13.55	-9.67	21.61	-13.28

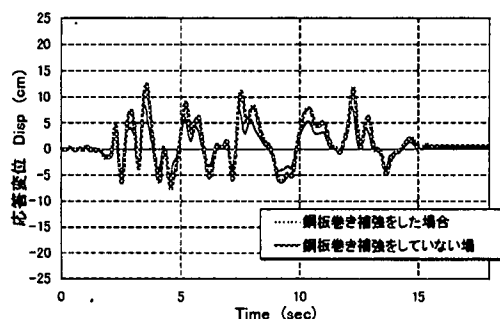
表4-2 上層位置での最大応答値(線路直角方向)

(a) 鋼板巻き補強を行った場合

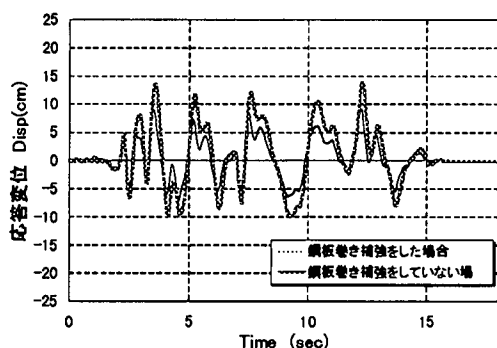
	八戸NS波						神戸NS波						JR鷹取EW波					
	曲げ降伏タイプ		せん断降伏タイプ		ピン接合タイプ		曲げ降伏タイプ		せん断降伏タイプ		ピン接合タイプ		曲げ降伏タイプ		せん断降伏タイプ		ピン接合タイプ	
	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側
応答加速度(gal)	919	-837	841	-790	706	-682	769	-1022	657	-986	674	-964	855	-1082	897	-1081	767	-901
応答速度(kine)	49.9	-70.3	51.7	-71.3	57.8	-74.2	52.5	-63.7	55.8	-62.6	69.5	-75.3	74.3	-64.0	75.3	-64.6	80.2	-75.6
応答変位(cm)	4.88	-4.73	5.07	-5.16	6.17	-6.93	7.65	-3.92	8.72	-4.42	11.80	-4.93	8.33	-5.42	8.75	-6.66	14.66	-10.52

(b) 鋼板巻き補強をしていない場合

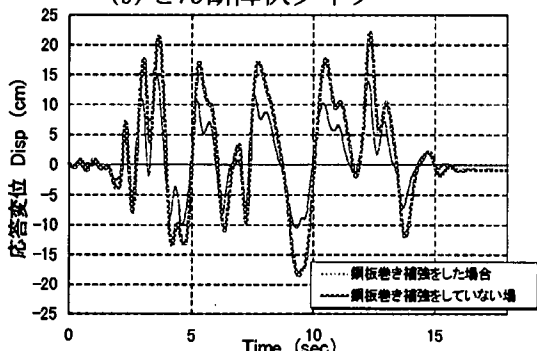
	八戸NS波						神戸NS波						JR鷹取EW波					
	曲げ降伏タイプ		せん断降伏タイプ		ピン接合タイプ		曲げ降伏タイプ		せん断降伏タイプ		ピン接合タイプ		曲げ降伏タイプ		せん断降伏タイプ		ピン接合タイプ	
	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側	(+)側	(-)側
応答加速度(gal)	844	-770	720	-714	688	-644	753	-1006	582	-925	592	-907	761	-942	794	-904	823	-862
応答速度(kine)	54.0	-76.6	59.0	-75.2	73.2	-83.0	61.3	-70.3	68.9	-70.6	95.8	-89.7	60.9	-48.8	79.0	-69.7	78.3	-91.5
応答変位(cm)	5.58	-5.39	5.75	-6.68	8.21	-10.71	9.89	-3.94	11.47	-5.18	16.96	-6.08	7.86	-5.09	12.91	-9.47	19.00	-12.90



(a) 曲げ降伏タイプ

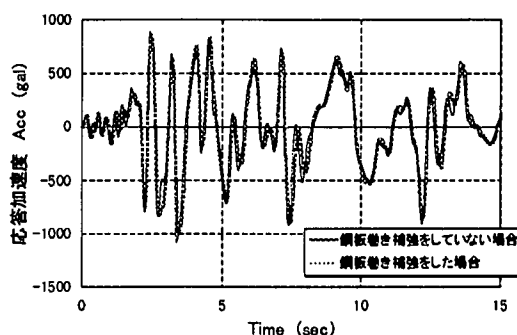


(b) せん断降伏タイプ

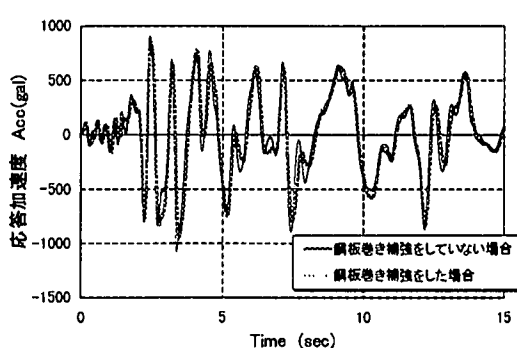


(c) ピン接合タイプ

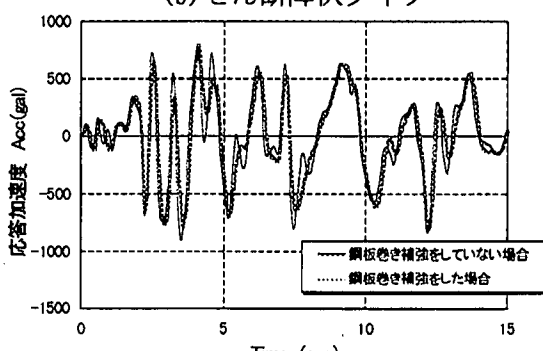
図10 上層位置での応答変位波形の比較



(a) 曲げ降伏タイプ



(b) せん断降伏タイプ



(c) ピン接合タイプ

図11 上層位置での応答加速度波形の比較

の解析結果として、鋼板巻き補強を行った場合と補強を行わない場合について、線路方向の各解析モデルの上層位置での応答変位と応答加速度の時刻歴波形をそれぞれ示す。

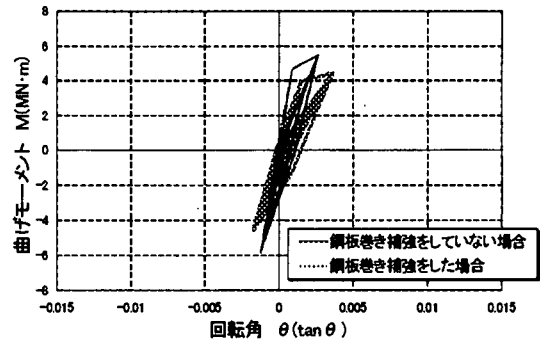
柱部材に鋼板巻き補強を行うと上層位置での応答変位が、補強をしない場合の60%程度に小さくなった。これは、鋼板巻き補強によって、剛性や水平耐力が向上したためである。応答加速度については、鋼板巻き補強を行った場合と補強を行わない場合で、大きな違いは見られなかった。

(2) 柱部材の応答塑性率

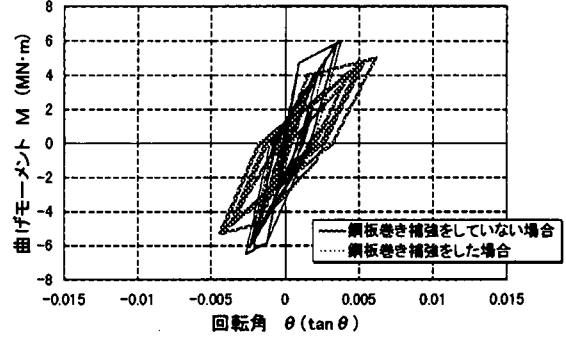
構造物の耐震性能として、柱部材の応答塑性率に着目する。柱部材の最大応答塑性率は、各部材のM- θ 履歴図から部材の最大応答回転角 θ_{max} を降伏時の部材回転角 θ_y で除して求めた。柱部材の最大応答塑性率は、鋼板巻き補強を行う場合と補強を行わない場合で、ともにピン接合タイプでJ R 鷹取 E W 波での解析結果が最大値となった。塑性率が最大となる部材は、線路方向・線路直角方向ともに上層位置の柱部材で、線路方向では最外縁の柱部材であった。

鋼板巻き補強柱部材の最大応答塑性率は、線路方向で9.57、線路直角方向7.24であった。この値は、補強を行わない場合の柱部材の最大応答塑性率（線路方向で9.27、線路直角方向で7.84）と大きな変化はなかった。解析結果を部材じん性率で評価すると、鋼板巻き補強柱部材のじん性率は10以上確保されていることから、中層はりがせん断破壊し、曲げモーメントの負担がゼロになっても十分な耐震性能が確保されているといえる。各解析モデルで最大応答塑性率となる柱部材のM- θ 履歴図を図12に示す。

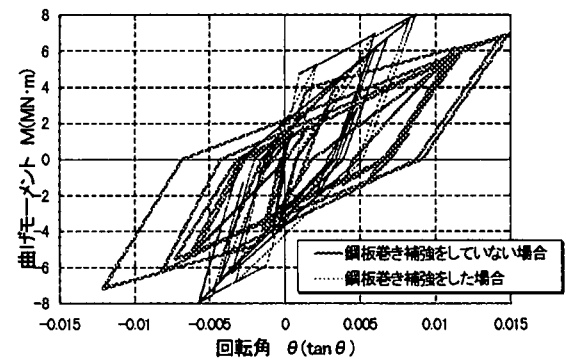
中層はりの力学特性が柱部材の応答塑性率に与える影響については、曲げ降伏タイプが一番小さな値となり、せん断降伏タイプ、ピン接合タイプの順に大きな値を示すようになる。これは、せん断降伏タイプやピン接合タイプのように中層はりが負担する曲げモーメントが低下する、あるいは最初から負担しない場合では、地震動による入力エネルギーを柱部材だけの履歴ループで吸収しなければならないため、中層はりが負担しない分柱部材の負担が増加するためである。



(a) 曲げ降伏タイプ



(b) せん断降伏タイプ

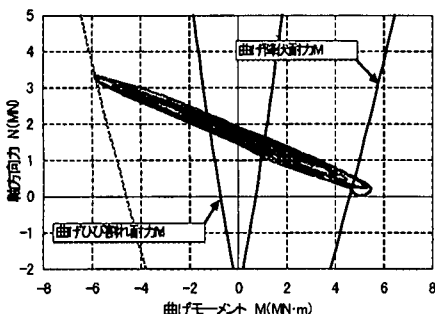


(c) ピン接合タイプ

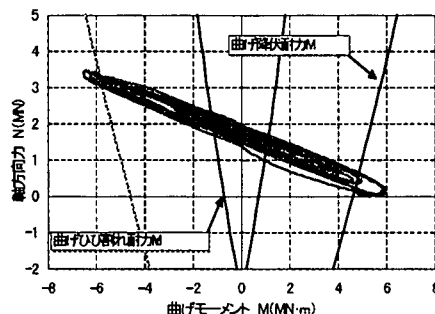
図12 最大応答塑性率となる柱部材のM- θ 履歴図の比較

(3) 柱部材のN-M関連の履歴曲線

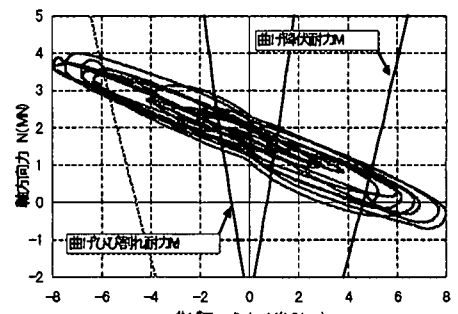
図13、図14に、鋼板巻き補強を行った場合と補強を行わない場合について、柱部材が最大応答塑性率になるところでのM-N関連の履歴曲線を示す。



(a) 曲げ降伏タイプ



(b) せん断降伏タイプ



(c) ピン接合タイプ

図13 鋼板巻き補強を行った場合のM-N履歴曲線

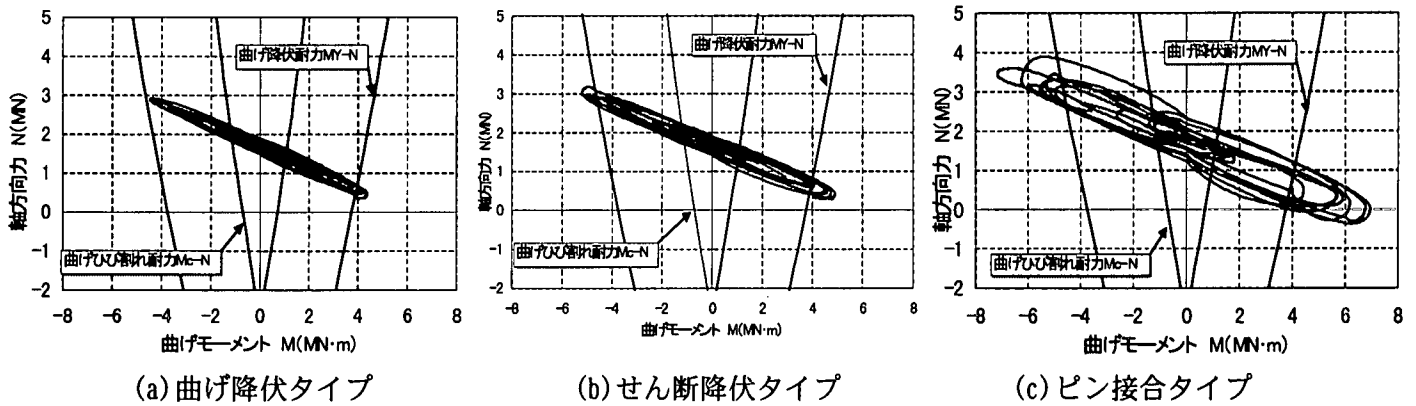


図14 鋼板巻き補強をしていない場合のM-N履歴状況

柱部材のM-N相関履歴曲線からは、上層位置の応答変位が大きくなるほど軸方向力の変動が大きくなるため、M-N相関の履歴ループの幅が広くなること、鋼板巻き補強を行うと上層位置の応答変位が小さくなるため、柱部材に生じる軸方向力の変動は小さくなるが、耐力が増加した分発生曲げモーメントが大きくなっていることがわかる。

5. まとめ

高さ12mのRC 2層ラーメン高架橋を検討対象として、柱部材だけを鋼板巻き補強した場合の耐震性能について、部材レベルでの弾塑性地震応答解析から検討を行った。本検討結果を以下にまとめる。

- (1) 柱部材に鋼板巻き補強を行うと構造物の弾性1次モードの固有周期は、補強を行わない場合の80%程度になる。
- (2) 柱部材に鋼板巻き補強を行うと構造系としての水平耐力は、補強を行わない場合の1.2~1.3倍程度向上する。
- (3) 柱部材に鋼板巻き補強を行うと構造物上層位置での応答変位は、補強を行わない場合の60%程度に減少する。
- (4) 鋼板巻き補強柱部材の最大応答塑性率は、中層はりの曲げモーメントの負担がゼロとなる場合において生じ、その値は線路方向で9.57、線路直角方向で7.24となった。本解析からは、鋼板巻き補強柱部材のじん性率が10以上確保されているので、中層はりがせん断破壊した場合においても十分な耐震性能を有している。

【参考文献】

- 1) 阪神淡路大震災調査報告書、土木構造物の被害原因の分析、コンクリート構造物、鋼構造物、土木学会、1997.12
- 2) 宮本、石橋、斎藤：既設橋脚の鋼板巻き補強方法に関する実験的研究、コンクリート工学年次報告集、9-2、1987
- 3) 柴田明德著：最新建築学シリーズ9 最新耐震構造解析、森北出版、1995.4
- 4) 石橋忠良、吉野伸一：鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形性能に関する研究、土木学会論文集、第390号/V-8、PP57~66
- 5) 在田、鎌田、下山：鋼板巻き補強を行った既設RC柱の変形性能における鋼板の効果、コンクリート年次論文報告集、vol19, No2, 1997
- 6) 土木学会コンクリート技術シリーズ：コンクリート構造物の耐震技術（現状と将来展望）、平成9年7月
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書、Ⅲコンクリート橋編、平成8年12月

土木施工研究委員会 第7施工小委員会報告

耐震設計、耐震補強基準類の調査

はじめに

土木施工研究委員会は、土木施工技術に関する問題の研究・調査およびこれらの推進を図ることを目的として、1984年10月に建設会社の技術者を中心に設立された委員会である。

1995年1月17日の未明に発生した兵庫県南部地震は、近代都市に多くの犠牲者と構造物に多大な被害をもたらした。これを契機に、土木施工研究委員会では、被災構造物・既設構造物の耐震診断技術・耐震補強補修技術、高度化する耐震構造技術に関して、施工の立場からの調査・研究を目的とした第7施工小委員会を1996年4月に発足させた。当小委員会は橋梁・基礎分科会、地盤・土構造物分科会および地中構造物分科会の3分科会で構成され、これまで被災構造物の復旧仕様、震災後に見直しされた耐震設計・耐震補強基準類、耐震補強・補修事例および耐震診断技術の調査研究を実施している。その成果として、昨年開催された「耐震補強・補修技術および耐震診断技術に関するシンポジウム」では、耐震補強・補修事例および耐震診断技術に関するアンケート調査結果¹⁾を報告した。

本小委員会報告は、平成8年度および9年度に実施した耐震補強や耐震設計に関する基準類の調査研究の成果をまとめたものである。各分科会における調査内容は以下のとおりである。

橋梁・基礎分科会 : 既設橋脚の耐震補強の設計施工要領、新設橋脚の耐震設計法
および被災構造物の復旧や耐震補強の工法に関する調査

地盤・土構造物分科会 : 液状化評価方法の新旧基準の比較調査
比較した項目は、以下のとおりである。

- ・液状化判定方法
- ・液状化判定に用いる地表面での標準設計水平震度
- ・液状化すると判定された地盤の取り扱い方法

地中構造物分科会 : 新しく見直しされた耐震設計基準類の内容に関する調査
調査項目は、以下のとおりである。

- ・基準の適用範囲
- ・耐震設計の考え方
- ・設計地震動
- ・耐震設計法（解析手法、地盤変位、解析モデル、材料特性）
- ・耐震性能の照査方法

1. 橋梁下部工の耐震補強および震災復旧に関する基準類調査結果（橋梁・基礎分科会担当）

橋梁・基礎分科会では、平成8、9年度の2年間にわたり、橋梁・基礎の補強と被災した橋脚の復旧の方法を把握し、施工上の問題点を明らかにすることを目的として、各事業者が発行している耐震基準類の調査研究を実施してきた。調査内容は、既存の高架橋柱や鉄筋コンクリート製橋脚の耐震補強の設計施工要領および新設構造物の設計法の改訂や新たな耐震設計法についてである。

平成8年度は、橋梁・基礎の復旧仕様および基準類19件を選定し、内容の調査研究を実施した。また、今年度は平成8年7月以降に発行された基準類10件について調査研究を行った。調査した10件の基準類を表1.1に整理方法を図1.1に示す。また、基準類に取り上げられている補強工法、復旧工法を図1.2に示す。

鉄道関係の高架橋柱の補強では、（財）鉄道総合技術研究所が中心となり、最近の約2年間に開発・実用化された新材料・新補強工法を耐震補強設計・施工指針として整理した。現在は、それら新材料・新工法の特徴を活かして試験施工や実施工がなされており、今後も耐震補強工事に採用されていくものと考えられる。

また、道路関係の基準類では、道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編が改訂された。さらに、補強方法についても新材料を利用した工法が追加され、かつ実工事への適用を念頭において各補強工法毎に採用条件（補強目的・施工環境等）の整理がなされてきている。

今後これらの基準類に従った試験施工や実工事が多数行われ、それらの結果が基準類にフィードバックされることによって、その内容がより充実していくものとする。

最後に、施工者側としては、基準類の制定に関連する情報の公開とともに、各事業者が個別に基準類を策定するのではなく、共通化の方向に進むことを望みたい。

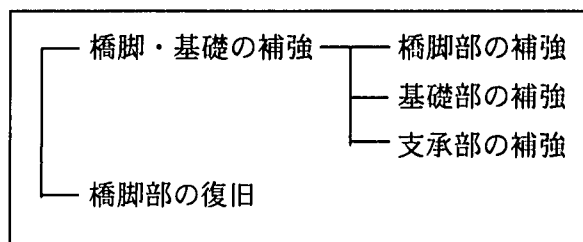
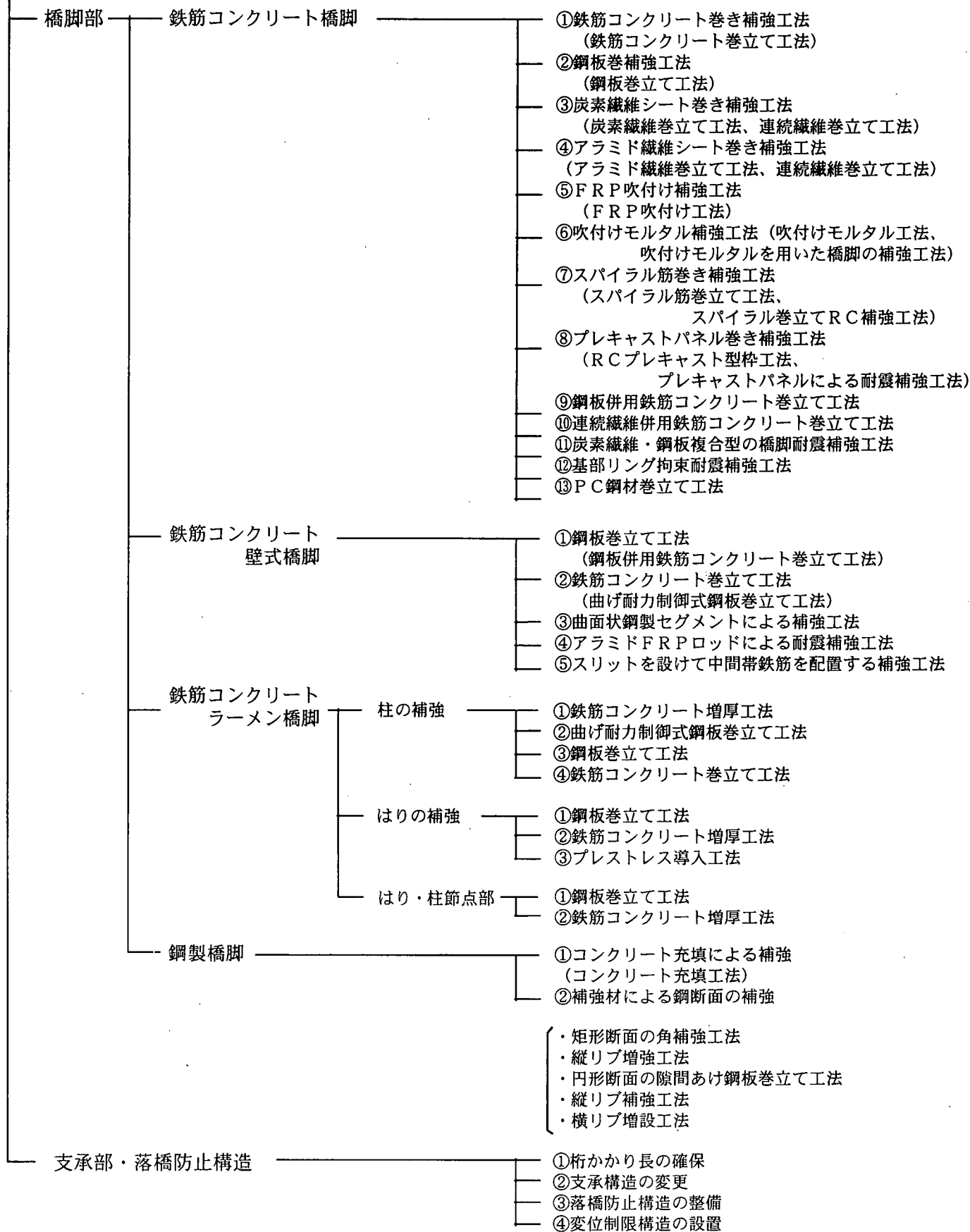


図1.1 基準類の整理方法

表 1.1 耐震設計および耐震補強 設計・施工基準等一覧表

番号	分類	事業者・発行所	資料名	発行日
1	鉄道 耐震 高架 橋補強	(財)鉄道総合技術研究所	炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針	平成8年7月
2		(財)鉄道総合技術研究所	アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針	平成8年11月
3		(財)鉄道総合技術研究所	既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針 FRP吹付け補強編	平成8年11月
4		(財)鉄道総合技術研究所	吹付けモルタルによる高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針	平成8年10月
5		(財)鉄道総合技術研究所	既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針 スパイラル筋巻立工法編	平成8年12月
6		(財)鉄道総合技術研究所	既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針 RCプレキャスト型枠工法編	平成8年12月
7	道路 耐震 橋補強	(社)日本道路協会	既設道路橋の耐震補強に関する参考資料	平成9年8月
8		日本道路公団技術部	設計要領 第二集 橋梁保全編	平成9年11月
9		アラミド補強研究会	アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法 設計・施工要領(案)	平成9年8月
10		(社)日本道路協会	道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編	平成8年12月

耐震補強・耐震設計



注) 補強工法名は企業体により名称が異なる。

図 1.2 基準類に取り上げられている補強工法

2. 地盤・土構造物に関する基準類調査結果（地盤・土構造物分科会）

地盤・土構造物分科会では、平成8、9年度に見直しされた耐震基準類の調査研究を実施した。

調査研究内容は、液状化関連基準類に焦点をあて新旧基準類の比較検討を実施した。平成8年度は、道路橋示方書のみ改訂がなされていたため、道路橋示方書についてのみ比較検討を行った。また、平成9年度は、表2.1に示した4基準類について比較検討を行った。

なお、これらの基準類の液状化判定方法の原典は、表2.2のように分類できる。

これら基準類の比較検討結果を表2.3に示す（旧基準と新基準の主な変更点の一覧として示す）。

表 2.1 比較検討した基準類一覧

事業体	基準類	発行年月日
鉄道総合技術研究所	鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物・抗土圧構造物）	平成9年 3月
日本水道協会	水道施設耐震工法指針・解説	平成9年 3月
日本下水道協会	下水道施設の耐震対策指針と解説	平成9年 8月
高圧ガス保安協会	高圧ガス設備等耐震設計指針レベル1耐震性能評価（耐震設計設備・基礎）編	平成9年11月

表 2.2 液状化の判定方法の原典

基準類	液状化の判定方法
鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物・抗土圧構造物）	①電力中央研究所の研究成果 ②東京都土木技術研究所の研究成果 ③石原の提案 ④累積損傷度理論 など独自
水道施設耐震工法指針・解説	建築基礎構造設計指針(1988)を踏襲
下水道施設の耐震対策指針と解説	道路橋示方書・同解説V耐震設計編（1996）に準じる
高圧ガス設備等耐震設計指針レベル1耐震性能評価（耐震設計設備・基礎）編	道路橋示方書・同解説V耐震設計編（1996）に準じる

3. 地中構造物の復旧仕様・基準類調査の調査結果（地中構造物分科会担当）

地中構造物分科会では、平成8、9年度の2年間にわたり、表3.1に示す基準類について調査し、その基本的考え方、設計方法、評価方法について整理し、耐震設計の動向についてまとめた。新規あるいは改訂された基準類の調査結果を表3.2、3.3に示す。

耐震設計の考え方はほとんどの基準で2段階の地震動レベルについて安全性を保つように設計するものとしており、特に兵庫県南部地震相当の地震では崩壊しないような耐震性能を保有するものとしている。

設計地震動については、中地震（レベル1地震動）に加え、大地震（レベル2地震動）における安全性の照査を行うことを規定している点で共通している。

解析手法については、開削トンネルやライフライン施設等の地中構造物の地震時挙動は、地盤変位に支配されることから、いずれも応答変位法を基本としている。

表2.3 旧基準と新基準の主な変更点

旧基準と新基準の主な変更点	
資料名	液状化判定方法
道路橋示方書・同解説 V耐震設計編	<p>液状化判定に用いる地表面での標準設計水 平震度</p> <p>液状化する」と判定された地盤の取り扱い</p>
鉄道構造物等設計標準・抗 同解説 基礎構造物・抗 土圧構造物	<p>液状化判定方法</p> <p>新基準とも、FL値法であるが、新基準は、地震時保有耐力レベルのタイプI、II地震動に対する判定法となっている。旧基準は、震度法レベルの地震動に対する判定法となっている。</p> <p>新基準では、液状化に対するFL値に 応じて土質定数を低減する取り扱いと なっているが、新基準はさらに動的せん 断強度比に対しても低減率を区分してい る。</p> <p>新基準とも、液状化に対するFL値に 応じて土質定数を低減する。</p>
水道施設耐震工法指針・ 解説	<p>液状化判定に用いる地表面での標準設計水 平震度</p> <p>新基準では、液状化に対するFL値に 応じて土質定数を低減する。</p> <p>旧基準では、液状化に対するFL値に 応じて土質定数を低減する。</p>
下水道施設の耐震対策指 針と解説	<p>液状化判定に用いる地表面での標準設計水 平震度</p> <p>新基準では、液状化に対するFL値に 応じて土質定数を低減する。</p> <p>旧基準では、液状化に対するFL値に 応じて土質定数を低減する。</p>
高圧ガス設備等耐震設計 指針レベル1耐震性能評 価(耐震設計設備・基 礎)編	<p>液状化判定に用いる地表面での標準設計水 平震度</p> <p>新基準では、液状化に対するFL値に 応じて土質定数を低減する。</p> <p>旧基準では、液状化に対するFL値に 応じて土質定数を低減する。</p>

耐震性能については、いずれも部材の断面耐力との比較や応力度の制限値との比較により照査を行う旨を示している基準が多く、さらに破壊モードの判定を行い、曲げ破壊先行型の破壊形式となるようにしている。また、ライフライン施設の下水管、水道管等については、継手構造や接続部の変位量、屈曲角に対する制限値と比較することを規定している。

なお、ガス導管については、現行基準にて高レベルの地震動に対してその耐震性が確保できると報告されている。

以上により、近年新規発刊または改訂されたほとんどの基準類では、兵庫県南部地震被害の調査研究成果を踏まえた大地震の検討があらたに折り込まれ、これによって地震時慣性力や地盤変位などの荷重の増加、部材や地盤の非線形性を考慮した材料特性、および基準類によっては限界状態レベルでの耐震性照査など、従来の耐震設計法と比べて大きく異なる内容になった。しかし、いずれもそれぞれの対象施設の地震被害が与える社会的影響度を考慮し、構造特性に対応した適切な設計法を適用することで合理的な耐震性評価ができる内容となっている。

表 3.1 調査対象基準類

	No	分類	企業体	名称	発行年月
平成 8 年度	1	新規基準	鉄道総合研究所	新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料	1996年3月
	2	新規基準	土木学会	コンクリート標準示方書 耐震設計編	1996年7月
	3	新規基準	J R 東日本	開削トンネル・地下鉄等の耐震設計の手引き(案)	1995年12月
	4	新規基準	神戸市交通局	神戸市高速鉄道 開削トンネル耐震設計指針(案)	1996年4月
	5	報告書	資源エネルギー庁 ガス地震対策検討会	ガス地震対策検討会報告書	1996年1月
	6	報告書	建設省 都市局公共下水道課	下水道の地震対策についての最終提言	1996年8月
	7	報告書	厚生省 水道耐震化 施策検討委員会	水道耐震化施策検討会報告書	1995年8月
平成 9 年度	8	改訂基準	日本水道協会	水道施設耐震工法指針・解説	1997年3月
	9	改訂基準	鉄道総合技術研究所	鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物・抗土圧構造物)	1997年3月
	10	改訂基準	鉄道総合技術研究所	鉄道構造物等設計標準・同解説(シールドトンネル)	1997年7月
	11	改訂基準	日本下水道協会	下水道施設の地震対策指針と解説 -1997年版-	1997年8月

参考文献

- 1) 土木学会土木施工研究委員会第7施工小委員会報告－耐震補強・補修事例および耐震診断技術に関するアンケート調査結果－、耐震補強・補修事例、耐震診断技術に関するシンポジウム講演論文集、pp. 233-240、1997.

表3.2 開削トンネル等の地中構造物に関する新規基準類の比較

名称	新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料	コンクリート標準示方書・耐震設計編	開削トンネル・地下駅などの耐震設計の手引き(案)	開削トンネル耐震設計指針(案)
発行企業体	(財)鉄道総合技術研究所	(社)土木学会	J R 東日本	神戸市交通局技術部計画課
発行年月	1996年3月	1996年7月	1995年12月	1996年4月
適用範囲	鉄道開削トンネルを新設する場合の耐震設計を行う場合に適用	一般のコンクリート構造物の耐震設計を行う場合に適用	東日本旅客鉄道(株)における、開削トンネル・地下駅の大規模地震時の耐震設計を行う場合に適用	神戸市高速鉄道湾岸線において開削トンネルを新設する場合の耐震設計を行う場合に適用
耐震設計の考え方	目的:新設構造物は兵庫県南部地震規模の地震が構造物の近傍で発生しても崩壊しない耐震性能を保有するように設計する。 開削トンネルの設計は、現行の設計標準により行い、さらに兵庫県南部地震規模の地震に対して安全性を確保するように検討する。	2段階の地震動レベルに対して、構造物を構成する各部分材ばかりでなく構造物全体が所要の耐震性能(耐震性能1、耐震性能2および耐震性能3)を保持できるように、耐震設計を行う	設計想定地震に対して、構造物の崩壊を避けることを目標とする。	開削トンネルの耐震設計は、中規模地震時および大規模地震時に対する耐震安全性の検討を行う。
設計地震動および設計法	①現行の設計標準による検討:各種基準に準拠 ②兵庫県南部地震規模の地震に対する検討:兵庫県南部地震で観測された地震動を考慮して設定。	①レベル1地震動:水平加速度で0.2g程度 ②レベル2地震動:プレート境界型および内陸直下型地震を想定	兵庫県南部地震において、神戸ポートアイランド地下80mで観測された地震動	①中規模地震:水平加速度で0.2g ②大規模地震:鉄道総研適合波G _{0a} 、G _{0b} (兵庫県南部地震クラス)
解析手法	開削トンネルは、原則として応答変位法による	地中構造物の場合には、応答変位法による検討を行ってもよい。	横断面の構造解析は応答変位法によることとするが、地層構成や構造物規模から必要に応じて動的解析によることとする。	応答変位法を適用する。
耐震性能の照査	①現行の設計標準による検討 各部分材断面力による応力度照査 ②兵庫県南部地震規模の地震に対する検討 □軸方向力および曲げモーメントに対する検討 □せん断力に対する安全性の検討 □破壊形式に対する検討 中柱等のコンクリート部材に対しては、せん断破壊を生じさせないために破壊形式に対する検討を行い、曲げ破壊先行の破壊形式とする。また、曲げ圧縮破壊に対しては、せん断破壊と同様にぜい性的な破壊モードとなることから、この種の破壊形式も避けるのがよい。	①レベル1地震動作用時の検討 各部分材断面力による応力度照査を行うが、コンクリートの設計圧縮強度は設計基準強度、鉄筋の設計強度は規格降伏点強度としてよい。 ②レベル2地震動作用時の検討 □破壊モードの判定 曲げ破壊モードかせん断破壊モードかを判定する □曲げ破壊モードの場合の検討 □せん断破壊モードの場合の検討 ただし部材の設計せん断力が曲げ降伏面力に達する時の各部分材断面のせん断力よりも小さい場合には、設計せん断力は線形解析により算定することとする。	①兵庫県南部地震規模の大地震に対する検討 □部材の耐力照査 ・軸方向力および曲げモーメントに対する検討 ・せん断力に対する安全性の検討 ・破壊形式に対する検討 □変形性能の照査 R C部材の変形性能の照査は、部材の終局変位量が地震による地盤変位を上回ることを確認する。	①中規模地震時の検討 各部分材断面力による応力度照査 ②大規模地震時の検討 □せん断に対する照査 □部材の安定性の検討 ・中柱、中壁 部材毎に照査し、曲げ破壊先行の破壊形式とする。曲げ破壊先行の破壊形式であっても、鉄筋の降伏が生じる前にコンクリートの圧縮破壊が生じるような曲げ圧縮破壊の形式を避けるのがよい。 ・側壁、床版等 せん断破壊に対する安全性はせん断耐力の部材係数を通常の場合の1.2倍にして照査すればせん断先行破壊形式でもよい。

表 3.3 開削トンネルおよびライフレイン施設等の地中構造物に関する改訂基準類の比較

名称	水道施設耐震工法指針・解説 (社) 日本水道協会 1997年3月	鉄道構造物等設計標準・同解説 (シールドトンネル) (財) 鉄道総合技術研究所 1997年7月	鉄道構造物等設計標準・同解説 (基礎構造物・抗土圧構造物) (財) 鉄道総合技術研究所 1997年3月	鉄道構造物等設計標準・同解説 (シールドトンネル) (財) 鉄道総合技術研究所 1997年7月	下水道施設の耐震設計と解説-1997年版 (社) 日本水道協会 1997年8月
適用範囲	水道施設の耐震設計に用いる地震動のレベルおよび施設の重要度の組み合わせに対して、地震時にそれぞれの施設が保持すべき性能を確保できるように設計しなければならない。	鉄道における基礎構造物・抗土圧構造物を限界状態設計法に基づいて設計する場合に適用する。(ここではボックスカルバートを対象とする) 設計想定地震に対して必要な安全性を確保するように設計しなければならない。一般的に地震時には地震の動きに追随していくと考えられることから地盤の動きを追跡していき、周辺地盤がボックスカルバートの上下床板間で大きな相対変位を生じる場合や中柱等を有する断面形状の場合には地震時の検討を行う。	2種類の規模の規模の設計想定地震に対して地震の影響を考慮することを原則とする。 ①中地震：構造物の設計耐用期間中に数回程度発生すると想定される規模の地震 (地震時使用限界状態) ②大地震：構造物の設計耐用期間中に1回程度発生すると想定される規模の地震 (地震時終局限界状態)	都市域の砂地山あるいは固結度の低い地山中に、鉄道トンネルを建設する場合の調査、計画および設計に適用する。 地震の影響は、当該地域の地盤条件、トンネルの線形、建設位置等から影響が大きいと考えられる場合に考慮する。	下水道施設の耐震設計のうち、下水道施設の耐震対策に適用する。
耐震設計の考え方	①レベル1：施設の供用期間中に1~2回発生する確率を有する地震動 ②レベル2：発生確率が低い大きな地震動(プレート境界地震や内陸直下型のような例) レベル2に対して限界状態を考慮し耐震設計を行う際には、解析や実験などの裏付けに基づいた限界状態を基準として検討し、脆性破壊が生じない特性をもたせ、また限界変位に対して適切な安全率を考慮する。	①レベル1地震動 施設の供用期間中に1~2度程度発生する確率を有する地震動(許容応力度設計法あるいは使用限界状態設計法等) ②レベル2地震動 陸地近傍大規模プレート境界地震や直下型地震による地震動のように施設供用期間内の発生確率は低いが大きな強度の地震動 (終局限界状態設計法)	ボックスカルバートの地震時挙動は周辺地盤の挙動に大きく影響されることから応答変位法により検討することを原則とする。	①レベル1地震動 応答変位法とする。ただしレベル2地震動の設計地震外力には応答速度に加え、以下のような地震の永久ひずみ(引張)を用いる。 ①湖岸近傍(100m以内)の液状化地震： $\epsilon = 1.5\%$ ②湖岸遠方(100m以上)の液状化地震： $\epsilon = 1.2\%$ ③非液状化の傾斜地盤： $\epsilon = 1.3\%$	管路施設は重要な幹線とその他の管路に区分する。重要な幹線等は既設、新設ともにレベル1地震動に対して設計耐下能力を確保するとともに、レベル2地震動に対して耐下機能を確保する。その他の管路は新設を対象にレベル1地震動に対して設計耐下能力を確保する。
設計地震動および設計法	①レベル1 <input type="checkbox"/> 継手構造管路 管体応力 ≤ 許容応力(耐力) 継手部伸縮量 ≤ 設計照査用最大伸縮量 <input type="checkbox"/> 一体構造管路 管体応力 ≤ 許容応力(降伏点応力) ②レベル2 <input type="checkbox"/> 継手構造管路 管体応力 ≤ 許容応力(耐力) 継手部伸縮量 ≤ 設計照査用最大伸縮量 <input type="checkbox"/> 一体構造管路 管体歪み ≤ 許容歪み	①レベル1地震動 高いたんく構造物(レベル1地震動)に対応し、基礎面における応答速度スペクトルとして与える。なお大きな変形や軸方向離手面等が大きくなるような場合には大規模地震(レベル2地震動)のトンネル全体の挙動についての検討が必要。	ボックスカルバートの地震時挙動は周辺地盤の挙動に大きく影響されることから応答変位法により検討することを原則とする。	①レベル1地震動 高いたんく構造物(レベル1地震動)に対応し、基礎面における応答速度スペクトルとして与える。なお大きな変形や軸方向離手面等が大きくなるような場合には大規模地震(レベル2地震動)のトンネル全体の挙動についての検討が必要。	①レベル1地震動 施設の供用期間中に1~2度程度発生する確率を有する地震動(許容応力度設計法あるいは使用限界状態設計法等) ②レベル2地震動 陸地近傍大規模プレート境界地震や直下型地震による地震動のように施設供用期間内の発生確率は低いが大きな強度の地震動 (終局限界状態設計法)
解析手法	地中構造物においては震度法または応答変位法によって耐震設計を行う。(地震動レベル2の耐震設計では動的解析により耐震設計結果を照査する)	高いたんく構造物(レベル1地震動)に対応し、基礎面における応答速度スペクトルとして与える。なお大きな変形や軸方向離手面等が大きくなるような場合には大規模地震(レベル2地震動)のトンネル全体の挙動についての検討が必要。	ボックスカルバートの地震時挙動は周辺地盤の挙動に大きく影響されることから応答変位法により検討することを原則とする。	①レベル1地震動 高いたんく構造物(レベル1地震動)に対応し、基礎面における応答速度スペクトルとして与える。なお大きな変形や軸方向離手面等が大きくなるような場合には大規模地震(レベル2地震動)のトンネル全体の挙動についての検討が必要。	①レベル1地震動 施設の供用期間中に1~2度程度発生する確率を有する地震動(許容応力度設計法あるいは使用限界状態設計法等) ②レベル2地震動 陸地近傍大規模プレート境界地震や直下型地震による地震動のように施設供用期間内の発生確率は低いが大きな強度の地震動 (終局限界状態設計法)
耐震性能の照査	①レベル1 <input type="checkbox"/> 継手構造管路 管体応力 ≤ 許容応力(耐力) 継手部伸縮量 ≤ 設計照査用最大伸縮量 <input type="checkbox"/> 一体構造管路 管体歪み ≤ 許容歪み ②レベル2 <input type="checkbox"/> 継手構造管路 管体応力 ≤ 許容応力(耐力) 継手部伸縮量 ≤ 設計照査用最大伸縮量 <input type="checkbox"/> 一体構造管路 管体歪み ≤ 許容歪み	高いたんく構造物(レベル1地震動)に対応し、基礎面における応答速度スペクトルとして与える。なお大きな変形や軸方向離手面等が大きくなるような場合には大規模地震(レベル2地震動)のトンネル全体の挙動についての検討が必要。	ボックスカルバートの地震時挙動は周辺地盤の挙動に大きく影響されることから応答変位法により検討することを原則とする。	①レベル1地震動 高いたんく構造物(レベル1地震動)に対応し、基礎面における応答速度スペクトルとして与える。なお大きな変形や軸方向離手面等が大きくなるような場合には大規模地震(レベル2地震動)のトンネル全体の挙動についての検討が必要。	①レベル1地震動 施設の供用期間中に1~2度程度発生する確率を有する地震動(許容応力度設計法あるいは使用限界状態設計法等) ②レベル2地震動 陸地近傍大規模プレート境界地震や直下型地震による地震動のように施設供用期間内の発生確率は低いが大きな強度の地震動 (終局限界状態設計法)