

論文 長周期地震動が作用した場合の多径間連続高架橋の地震時応答解析

富 健一^{*1}・藤田 康平^{*2}・糸山 豊^{*3}・梅原 秀哲^{*4}

要旨：兵庫県南部地震以降に設計された多径間連続高架橋を対象として、将来発生すると想定される東海地震や近年発生した十勝沖地震等の長周期地震動を含む数種類の模擬地震動を用いて地震時応答解析を実施した。その結果、長周期地震動と連続高架橋の固有振動数が近似する場合に大きな応答が発生すること、地震動と連続高架橋の固有振動数の関係が構造物の挙動に大きな影響を与えること、および、橋の振動特性に大きく影響する支承条件が地震時の応答に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

キーワード：長周期地震動、多径間連続高架橋、地震応答解析、模擬地震動、ゴム支承

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震では、単純桁の落橋、鋼製支承の損傷が顕著であったため、近年において道路橋設計を行う際には、可能な限り連続化を図るとともに、ゴム支承を用いることにより地震時水平力を分散させている。また、免震支承を用いる際には、分散支承よりもさらに長周期化させることで地震時水平力の低減が図れることを期待する設計手法が用いられている。

一方、長周期成分が卓越していた十勝沖地震では、タンク内の石油がスロッシング現象（液面揺動）を起こして火災が発生する被害や、比較的固有周期の長い十勝河口橋や千代田大橋等の長大橋が損傷したことが報告されている。

近年は、連続径間数の増加により、橋梁規模で様々な固有振動数を有する橋梁が建設されており、構造物の固有周期と当該位置の地盤条件を考慮した地震動との関係を明らかにし、近以内に発生すると思われる長周期成分が卓越する東海地震や東南海地震が発生した場合の連続高架橋の地震時挙動を確認しておくことは非常に重要である。

そこで本研究では、道路橋示方書²⁾（以下、道示と記す）により設計された仮想の多径間連

続高架橋に対して、今後発生すると思われる想定地震動（東海、東南海、東海東南海複合）、近年発生した大地震（兵庫県南部地震、十勝沖地震、三陸沖地震）、および、示方書で示されている模擬地震動の地盤特性を考慮した地表面地震波を用いて動的応答解析を実施し、長周期成分を多く含む地震動と構造物の地震挙動の関係を調べ、近年発生した大地震との応答値の比較検討を行った。

2. 解析手法

解析手法として、材料非線形性を考慮した立体骨組みモデルによる地震時応答解析法を用いた。解析対象は、図-1に示すようにTB1橋（5径間連続PC箱桁橋）、TB2橋（5径間連続鋼箱桁橋）の2橋で、逆T式橋台（杭基礎）、張出式鉄筋コンクリート橋脚（杭基礎）より構成される。塑性化すると思われるすべての橋脚の柱部は図-2に示すようにファイバーモデルでモデル化し、桁部、橋台堅壁部、橋脚梁部、フーチングは弾性梁要素としてモデル化した。杭基礎は地盤特性を考慮した連成バネでモデル化し、地盤変形の影響も考慮した。

ファイバー要素には、コンクリートおよび鉄

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科 都市循環システム工学専攻（正会員）

*2 名古屋工業大学大学院 工学研究科 都市循環システム工学専攻（正会員）

*3 名古屋工業大学大学院助手 工学研究科 社会工学専攻 修(工)（正会員）

*4 名古屋工業大学大学院教授 工学研究科 社会工学専攻 Ph.D.（正会員）

筋の材料非線形履歴モデルを考慮する。鉄筋およびコンクリートの材料非線形モデルは、東京大学コンクリート研究室で開発された鉄筋コンクリートの構成則³⁾であるCOM3 モデルを用いる。減衰モデルは、Rayleigh型粘性減衰マトリックスにより評価する。

応答計算では各時刻における変位履歴と橋脚面のファイバーモデルにおける各セルの応答ひずみ、橋脚の作用断面力が得られる。橋脚の損傷度合は、各セル要素に発生する圧縮ひずみが終局ひずみに達しているかについて判定する。

せん断に対しては、橋軸方向と橋軸直角方向

の各方向に作用するせん断力と、算定式から得られるせん断耐力と比較することで、高架橋の地震時のせん断に対する安全性を評価する。橋脚のせん断耐力は、土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾に基づき、コンクリートの寄与分とせん断補強筋の寄与分の和から求めた。なお、本研究では、解析ツールとしてUC-WIN/FRAME (3D) を使用した。

3. 対象高架橋

本研究で解析対象とした高架橋の概要を表-1に示す。本研究で解析対象とした高架橋の形状や橋脚の配筋量、ゴム支承特性は、道示に基づいて設計計算を行い決定した。また、支承特性としては、一般的に用いられている鋼製支承(固定)、水平反力分散支承、免震支承の3タイプの支承形式に対して解析を行い、支承形式の違いによる応答を検証した。水平反力分散支承と免震支承の解析モデルを図-3に示すが、免震支承は道路橋支承便覧⁵⁾よりバイリニアの履

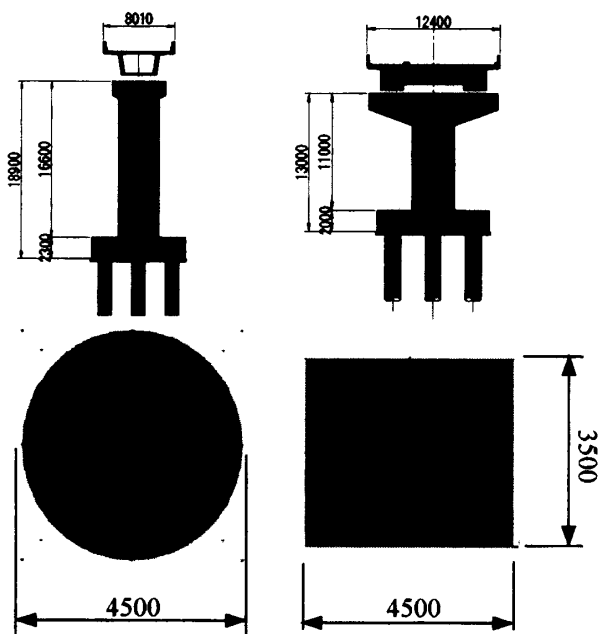


図-2 橋脚断面図

表-1 対象構造物の概要

	TB1橋	TB2橋
橋種	5径間連続PC箱桁橋	5径間連続鋼箱桁橋
橋長	50+50+55+50+50=255m	40+45+65+45+40=235m
地盤種別	Ⅲ種地盤	Ⅲ種地盤
支承形式	A 鋼製支承(固定)	鋼製支承(固定)
	B 水平反力分散ゴム支承	水平反力分散ゴム支承
	C 免震支承	免震支承
下部工	橋脚形式 円柱橋脚	矩形柱橋脚
	基礎形式 場所打ち杭φ1500	場所打ち杭φ1200
	使用材料 コンクリート $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ 鉄筋 SD345 (D35)	コンクリート $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ 鉄筋 SD345 (D32)

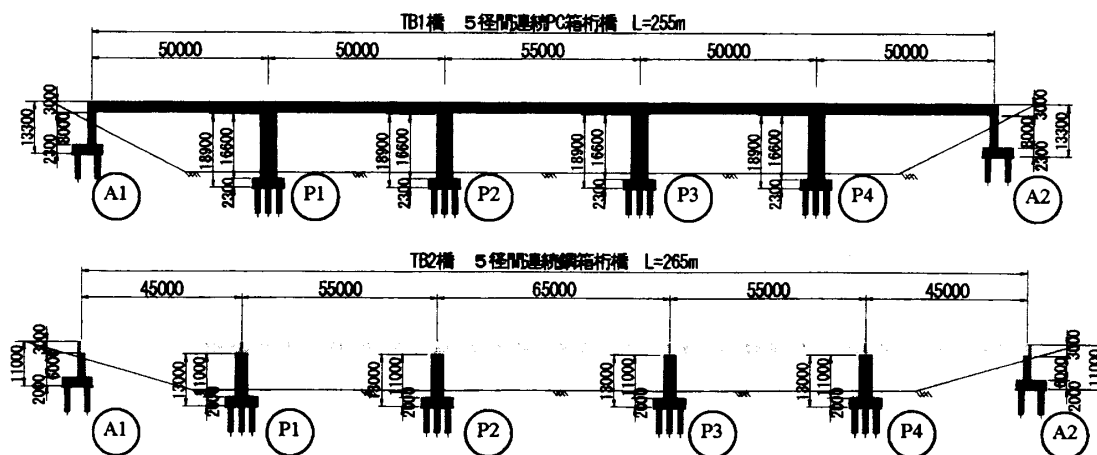


図-1 橋梁一般図

歴則でモデル化するので履歴減衰を考慮できるが、水平反力分散支承は線形モデルであり、減衰定数は道路橋支承便覧より3%とした。各支承形式における固有周期算出結果を表-2に示す。支承条件Aの場合は、TB1橋の方が、橋脚高が高く橋脚剛性も小さいため変形しやすく固有周期が長い。支承条件B、Cの場合は、ゴム支承のバネ定数の影響が大きい。上部工重量が小さいTB2橋の方がゴム支承のバネ定数が小さく固有周期が長くなる。免震支承の場合の固有周期は、橋梁形式に関わらず、固定の場合の2倍以上長周期化している。

4. 入力地震動加速度

本研究で用いた地震動加速度の概要を表-3に示す。また、便宜的に各地震動加速度を表中に示す通り1地震動～17地震動と称することとする。卓越周期は、それほど顕著に表れていないものについても表記した。

地表面相当の入力地震動加速度は、それぞれ工学的基盤面の地震動加速度を推定し、解析対象地点の地盤条件を考慮した地震応答解析⁹⁾を行うことにより求めた。工学的基盤面について、1地震動～4地震動は、これまでの国内の主要な強震記録と各地の断層パラメータを用い推定した^{7),8)}。5地震動についてはKIK-NET⁹⁾、6地震動についてはK-NET¹⁰⁾の地中データを使用し、地盤

の地震応答解析により工学的基盤面の地震動に変換したものを使用した。1～6地震動は基盤面での断層方向とその直角方向の成分から地表面の加速度を算出したため、水平2方向を同時入力して解析を行った。示方書の模擬地震動による解析は、橋軸、直角の2方向に対してそれぞれ実施した。また、本研究では地盤の影響を確認するため、地表面相当の地震動加速度を得る際に名古屋市内の地盤条件3種類を使用した。A地点は非常に軟弱な地盤、B地点は比較的軟弱な地盤、C地点は比較的良好な地盤である。

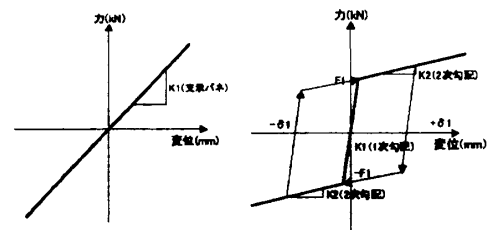
5. 解析結果および考察

解析結果の一例として、A地点での地震動により非線形動的解析を実施した際のP2橋脚に

表-2 各支承形式における固有周期

支承形式	固有周期(sec)	
	TB1橋	TB2橋
A 鋼製支承(固定)	0.601	0.432
B 水平反力分散ゴム支承	1.067	1.199
C 免震支承	1.301	1.546

※免震支承の固有周期は表示タイプII地震動作用時の値である。



(a) 水平反力分散支承

(b) 免震支承

図-3 ゴム支承のモデル化

表-3 地震動加速度の概要

地震名	発生日	最大加速度(gal)						卓越周期(sec)					
		A地点		B地点		C地点		A地点		B地点		C地点	
		LG	TR	LG	TR	LG	TR	LG	TR	LG	TR	LG	TR
1. 想定東海地震		184	184	123	123	110	110	0.79	0.79	0.83	0.83	0.24	0.24
2. 想定東南海地震		252	252	211	211	199	199	0.87	0.87	0.92	0.92	0.25	0.25
3. 東海・東南海複合地震		255	255	212	212	199	199	0.79	0.79	0.92	0.92	0.34	0.34
4. 兵庫県南部地震	1995/1/17	511	406	439	-378	-428	-285	0.88	0.69	2.05	1.19	2.05	0.69
5. 三陸南地震	2003/5/26	299	320	166	197	173	228	0.45	1.39	0.45	1.39	0.45	1.39
6. 十勝沖地震	2003/9/26	258	327	203	212	195	212	0.59	0.39	0.59	0.39	0.30	0.39
7. レベル1地震動		215	215	188	188	128	128	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67
8. レベル2地震動(海洋型1)		687	687	458	458	378	378	1.24	1.24	1.24	1.24	3.03	3.03
9. レベル2地震動(海洋型2)		671	671	401	401	-395	-395	0.83	0.83	1.26	1.26	0.50	0.50
10. レベル2地震動(内陸型1)		1303	1303	767	767	836	836	0.74	0.74	1.44	1.44	0.74	0.74
11. レベル2地震動(内陸型2)		770	770	-625	-625	-724	-724	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95
12. タイプI-1		433	433	363	363	319	319	1.76	1.76	2.65	2.65	2.98	2.98
13. タイプI-2		424	424	385	385	320	320	1.62	1.62	5.13	5.13	2.21	2.21
14. タイプI-3		439	439	365	365	323	323	2.14	2.14	2.73	2.73	4.31	4.31
15. タイプII-1		591	591	687	687	588	588	2.00	2.00	2.05	2.05	1.46	1.46
16. タイプII-2		557	557	673	673	766	766	1.67	1.67	2.16	2.16	1.08	1.08
17. タイプII-3		619	619	736	736	780	780	1.67	1.67	2.65	2.65	1.37	1.37

*: 表中のLGは橋軸、TRは橋軸直角方向を示している。1～3, 7～17に関してはLG, TR 両地震動を入力した。

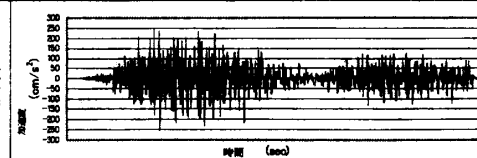
おける支承条件別の橋脚天端の変位、柱基部のせん断力、および、柱基部のコンクリート断面における最大圧縮ひずみの応答値を表-4に示す。ここで、限界値と設定したのは、せん断力についてはせん断耐力、コンクリートのひずみについてはCOM3モデルにおける圧縮強度を超える応力が発生した後に圧縮強度の0.8倍の強度に達したときのコンクリートの圧縮ひずみとした。本稿では、多径間連続橋に対して、地震動の卓越周期による影響、および、橋の支承特性による影響について考察する。

5.1 地震動の卓越周期による応答値の影響

考察例として、3地震動と14地震動（ともに海洋型地震）において、支承条件B（分散支承）におけるTB1橋とTB2橋の応答値の比較を行った。各地震動の特徴と解析結果の応答値を表-5に示すが、3地震動作用時は卓越周期が小さいTB1橋の応答値が大きく、14地震動作用時は卓越周期が大きいTB2橋の応答値が大きい結

果となった。それぞれの地震動の周波数領域における加速度を図-4～5に示すが、加速度が

表-5 橋と地震動の周期の関係

3. 東海・東南海複合地震				
地震動				
	時間 (sec)			
応答値 (P2橋脚、支承条件B)	TB1橋	TB2橋	応答値の比率	
最大加速度 (gal)	255		—	
地震動の卓越周期 (sec)	0.79		—	
橋の固有周期 (sec)	1.06	1.20	—	
橋脚天端の最大応答変位 (mm)	43	26	0.60	
柱基部のせん断力 (kN)	3517	3047	0.87	
コンクリートの最大ひずみ	728	350	0.48	

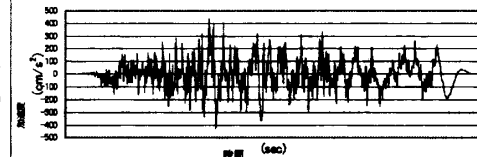
14. タイプ1-3 (山形地震)				
地震動				
	時間 (sec)			
応答値 (P2橋脚、支承条件B)	TB1橋	TB2橋	応答値の比率	
最大加速度 (gal)	439		—	
地震動の卓越周期 (sec)	2.13		—	
橋の固有周期 (sec)	1.06	1.20	—	
橋脚天端の最大応答変位 (mm)	163	195	1.20	
柱基部のせん断力 (kN)	8011	8534	1.07	
コンクリートの最大ひずみ	2912	4098	1.41	

表-4 解析結果一覧表 (P2橋脚応答値)

(a) TB1 橋

TB1 P2橋脚の解析結果	A地点		A: 固定(鉋盤)支承			B: 水平反力分散ゴム支承			C: 分散支承		
	LG	TR	最大変位 (mm)	最大せん断力 (kN)	最大コンクリートひずみ (μ)	最大変位 (mm)	最大せん断力 (kN)	最大コンクリートひずみ (μ)	最大変位 (mm)	最大せん断力 (kN)	最大コンクリートひずみ (μ)
限界値	—	—	—	13500	4382	—	13500	4382	—	13500	4382
1. 想定東海地震	184	184	31	3063	486	29	2907	417	26	2470	355
2. 想定東南海地震	252	252	51	4423	744	43	3501	721	34	3347	517
3. 東海・東南海複合地震	255	255	52	4463	749	43	3517	728	34	3332	518
4. 兵庫県南部地震	511	406	97	6544	4212	195	7493	5510	54	4930	692
5. 三陸南地震	299	320	35	3491	387	44	3992	550	33	3234	389
6. 十勝沖地震	258	327	38	3484	578	39	3711	439	27	2615	323
7. レベル1地震動	215	215	35	3484	292	47	4040	472	33	3294	268
8. レベル2地震動(海洋型1)	687	687	175	9995	2975	344	10144	11243	77	7423	801
9. レベル2地震動(海洋型2)	671	671	116	7470	1515	162	7413	2813	52	5254	531
10. レベル2地震動(内陸型1)	1303	1303	231	10303	5368	582	10318	33393	132	8827	1954
11. レベル2地震動(内陸型2)	770	770	120	8889	1595	325	9272	8858	103	7779	1196
12. タイプI-1	433	433	70	6212	706	163	7765	2749	68	5660	711
13. タイプI-2	424	424	58	5416	592	177	7963	3097	69	5917	707
14. タイプI-3	439	439	71	6308	736	163	8011	2912	71	5656	756
15. タイプII-1	591	591	115	8310	1476	405	9494	15293	116	7265	1581
16. タイプII-2	557	557	96	7739	1042	313	8769	8427	96	8065	1057
17. タイプII-3	619	619	107	7796	1321	400	9844	15106	114	8221	1482

(b) TB2 橋

TB2橋 P2橋脚の解析結果	A地点		A: 固定(鉋盤)支承			B: 水平反力分散ゴム支承			C: 分散支承		
	LG	TR	最大変位 (mm)	最大せん断力 (kN)	最大コンクリートひずみ (μ)	最大変位 (mm)	最大せん断力 (kN)	最大コンクリートひずみ (μ)	最大変位 (mm)	最大せん断力 (kN)	最大コンクリートひずみ (μ)
限界値	—	—	—	14080	4382	—	14080	4382	—	14080	4382
1. 想定東海地震	184	184	18	2246	270	18	2173	217	20	2378	268
2. 想定東南海地震	252	252	27	3238	351	26	3035	345	22	2691	307
3. 東海・東南海複合地震	255	255	27	3261	356	26	3047	350	22	2667	309
4. 兵庫県南部地震	511	406	55	5885	2245	64	5782	2167	37	4332	535
5. 三陸南地震	299	320	43	5072	486	23	2866	685	21	2522	278
6. 十勝沖地震	258	327	33	3923	350	35	4235	372	18	2328	234
7. レベル1地震動	215	215	16	1975	141	35	4001	289	21	2536	172
8. レベル2地震動(海洋型1)	687	687	69	7854	665	461	10496	44907	50	5991	424
9. レベル2地震動(海洋型2)	671	671	60	6907	583	114	8094	1681	37	4579	282
10. レベル2地震動(内陸型1)	1303	1303	120	10139	1997	485	9793	43908	80	7906	1182
11. レベル2地震動(内陸型2)	770	770	70	7502	730	295	9991	9911	163	10442	2789
12. タイプI-1	433	433	43	5095	348	145	8441	2326	50	5376	496
13. タイプI-2	424	424	37	4507	278	203	8860	3858	55	5818	551
14. タイプI-3	439	439	37	4408	271	195	8534	4098	67	6737	730
15. タイプII-1	591	591	60	6700	571	629	15308	62599	74	6765	860
16. タイプII-2	557	557	53	6159	478	461	10273	38415	93	7660	1420
17. タイプII-3	619	619	59	6707	534	573	13164	62102	73	6770	947

卓越する領域は 3 地震動で 0.9~1.5Hz (0.67~1.11sec) と大きく, 14 地震動で 0.3~0.7Hz (1.43~3.33sec) と小さくなっており, 同じ海洋型地震動でも加速度が卓越する領域が異なるのが判る。TB1 橋は固有周期が 1.06 となっており, 3 地震動の加速度が卓越する振動数領域と近似している。また, TB2 橋は固有周期が 1.20 となっており, 14 地震動の加速度が卓越する振動数領域に近似している。

これらの結果より, 地震動の加速度が卓越する振動数領域が橋の固有周期と近似する場合は大きな応答値が発生することが判った。

5.2 橋の支承特性による応答値の影響

考察例として, 最大加速度が大きく異なる 1 地震動と 13 地震動が作用した際の TB2 橋における解析結果を各支承条件別に対比して表-6 に示す。表中で示す支承条件 C の場合の橋の固有周期は, 各地震動が作用した場合の免震支承の変位量から支承の等価バネ定数を設定した上で算出している。よって, 免震支承により支持されている橋の固有周期は, 作用する地震動によって異なることとなる。

加速度が比較的小さい 1 地震動作用時は各支

承条件において応答値に差はないが, 13 地震動作用時には支承条件 B (水平反力分散ゴム支承) の場合に非常に大きな応答値が発生した。

支承条件 A については固有周期が 0.43sec と非常に小さいため, 長周期地震動である 1 地震動や 13 地震動に対しては共振現象が起こらず, 応答値が小さくなったと考えられる。

支承条件 B, C については固有周期が 1.0~1.5sec となっており, 橋自体が長周期化している。1 地震動作用時には, 支承条件 C の方が支承条件 B より大きな応答値となった。これは, 1 地震動は加速度が比較的小さく, 支承条件 C では長周期化による免震効果が発揮される前の荷重状態であったため, 橋自体の固有周期も支承条件 B よりも小さくなり, 1 地震動の卓越周期と近似し, 応答値が支承条件 B よりも大きくなったと考えられる。

一方, 13 地震動作用時には, 支承条件 B の方が支承条件 C よりかなり大きな応答値が発生している。これは, 13 地震動が比較的大きな加速度であり, 卓越周期が大きい地震動であるため, 支承条件 B の場合と 13 地震動の卓越周期が近似して共振現象が起こり, 応答値が大きくなっ

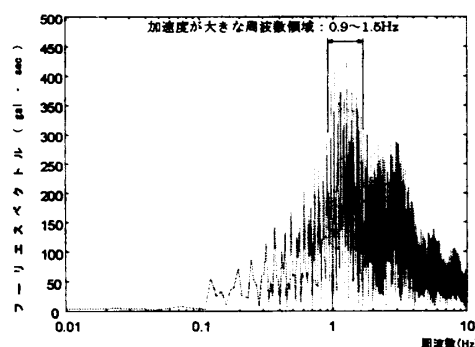


図-4 3 地震動加速度 (周波数領域)

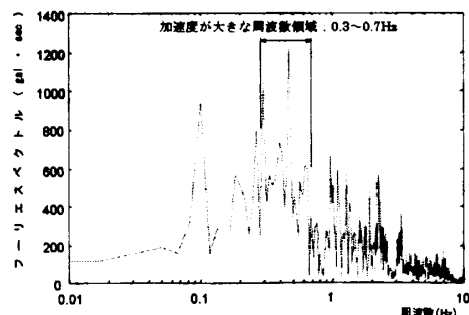


図-5 14 地震動加速度 (周波数領域)

表-6 地震動と支承特性の関係 (TB2 橋)

1. 想定東海地震				
地震動				
	時間 (sec)			
応答値 (P2橋脚)	支承条件A	支承条件B	支承条件C	
最大加速度(gal)	184			
地震動の卓越周期(sec)	0.79			
橋の固有周期(sec)	0.43	1.20	0.95	
支承部の最大変位(mm)	18	18	20	
柱基部のせん断力(kN)	2246	2173	2378	
コンクリートの最大ひずみ	270	217	268	

13. タイプ1-2地震動				
地震動				
	時間 (sec)			
応答値 (P2橋脚)	支承条件A	支承条件B	支承条件C	
最大加速度(gal)	424			
地震動の卓越周期(sec)	1.61			
橋の固有周期(sec)	0.43	1.20	1.52	
支承部の最大変位(mm)	37	203	55	
柱基部のせん断力(kN)	4507	8860	5818	
コンクリートの最大ひずみ	278	3658	551	

たとえられる。

また、13 地震動が作用した際に、支承条件 B より長周期化している支承条件 C の応答値が比較的小さくなっているのは、免震支承部のエネルギー吸収性能の影響であると考えられる。支承条件 B, C について、13 地震動作用時の支承上の上部工重心位置での応答加速度履歴を図 6 に示すが、支承条件 C の応答加速度は支承条件 B の 2/3 程度の応答値となっている。これは、免震支承部の履歴減衰により応答値が低減された結果であると考えられる。

以上より、多径間連続橋においては、支承条件により構造物の固有周期が大きく違ってくることから、同じ地震動が作用した場合でも応答値が大きく異なること、および、免震支承を用いた場合は支承部のエネルギー吸収効果により長周期地震動が作用する場合でも応答値を低減できることが確認できた。

6. まとめ

現在の道示で設計された多径間連続橋に対して、今後想定される大地震や近年発生した大地震、示方書の模擬地震動を用いて 3 次元非線形動的解析を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 多径間連続橋の固有周期と長周期地震動の加速度が卓越する領域が近似したときに大きな応答値が発生することが確認できた。
- (2) 多径間連続橋では支承条件により固有周期が大きく異なるので、同じ地震動が作用した場合でも支承条件により応答値が大きく異なることが確認できた。
- (3) ある程度大きな最大加速度を有する長周期地震動が作用した時、免震支承の場合は分散支承よりも免震効果により応答値が大きく低減できることが確認できた。

<参考文献>

- 1) 土木学会：2003 年に発生した地震によるコン

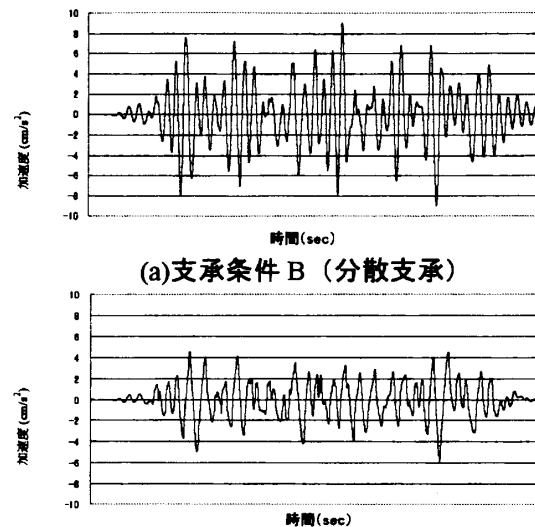


図 6 上部工位置での応答加速度履歴
(TB2 橋 13 地震動作用時)

クリート構造物の被害分析

- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I ～ V，2002.3
- 3) 岡村甫，前川宏一，鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991.5
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 耐震性能照査編，2002.4
- 5) 日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.4
- 6) 杉戸真太ほか：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察，土木学会論文集 No.493/III-27，pp.49-58，1994.6
- 7) 古本吉倫ほか：非定常スペクトル重ね合わせによる強震動予測法の再検討，土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集，I-B，pp.550-551，1998.10.
- 8) 古本吉倫ほか：兵庫県南部地震により被災したコンクリート橋脚地点における強震動シミュレーション，平成 11 年度自然災害総合研究班中部地区シンポジウム発表論文集，pp.35-44，1999.12
- 9) 防災科学技術研究所 KIK-NET ホームページ：
<http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>
- 10) 防災科学技術研究所 K-NET ホームページ：
<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>