

論文 地震動特性と連続高架橋 RC 橋脚の挙動の関係に関する一考察

富 健一^{*1}・糸山 豊^{*2}・梅原 秀哲^{*3}

要旨：兵庫県南部地震以降に設計された RC 橋脚を有する多径間連続高架橋を対象として、想定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、地震動特性と連続高架橋における RC 橋脚の挙動に関して考察した。その結果、同じ地震動でも地盤条件や震央までの距離による周期特性の違いが RC 橋脚の応答値に大きな影響を及ぼすこと、および、連続高架橋の規模によっては、同様の地震動が作用した場合でも RC 橋脚に作用する応答値の傾向が異なることが明らかとなった。

キーワード：多径間連続高架橋, RC 橋脚, 卓越周期, 長周期地震動, ファイバーモデル

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。

近年は、連続径間数の増加により、橋梁規模で様々な固有周期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することは非常に重要である。2003 年に発生した長周期成分が卓越する十勝沖地震では、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で損傷したこと¹⁾が報告されており、近い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も含めた様々な地震動が作用した場合の連続高架橋における RC 橋脚の地震時挙動を確認しておくことは非

常に重要である。

著者らは、これまでの研究²⁾により、地震動と連続高架橋の固有周期の関係が構造物の挙動に大きな影響を及ぼすこと、および、橋の振動特性に大きく影響する支承条件が RC 橋脚の地震時の応答に大きな影響をおよぼすことを確認している。

そこで本研究では、道路橋示方書³⁾(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(免震支承を採用)に対して、近年発生した大地震、および、道示で示されている模擬地震動を用いて地震時応答解析を実施し、地震動の卓越周期と RC 橋脚の地震時挙動の関係や連続高架橋の規模と RC 橋脚の地震時挙動の関係について考察する。

2. 対象高架橋

本研究で解析対象とした高架橋の橋梁一般図を図-1 に、概要を表-1 に示す。解析対象は、3・5・7 径間連続鋼桁橋で、逆 T 式橋台(杭基礎)、張出式 RC 橋脚(杭基礎)より構成される。本研究では、橋梁規模と地震時の応答値の比較を行うために、3 径間、5 径間、7 径間の高架橋について解析を実施した。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

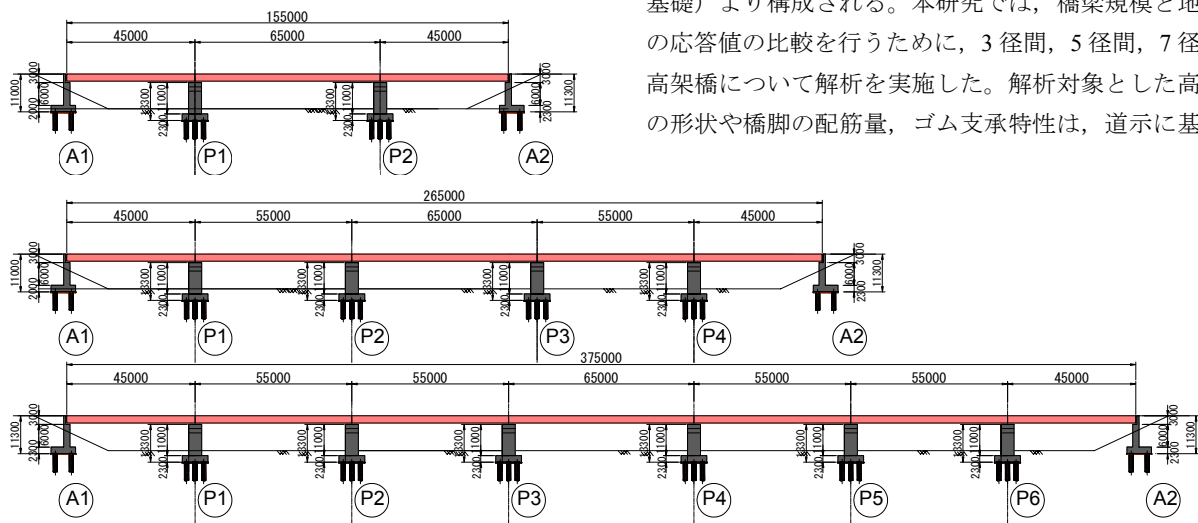


図-1 橋梁一般図(3 径間・5 径間・7 径間)

*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助教 工学研究科 社会工学専攻 修(工) (正会員)
 *3 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)

て設計計算を行い決定した。考察を行う中間 RC 橋脚が支持する桁のスパン長は各橋とも同じとしている。

3. 解析手法

解析手法として、材料非線形性を考慮した 3 次元立体骨組みモデルによる地震時応答解析法を用いた。本研究では、解析ツールとして UC-WIN/FRAME (3D) を使用する。解析モデルにおける損傷評価は、2005 年に発生した十勝沖地震により損傷した橋脚を対象に、当該橋脚付近の地盤条件を考慮した地震動を作用させたときの解析上の損傷状況を確認し、その妥当性を検証している。⁴⁾

塑性化するとと思われるすべての RC 橋脚柱の塑性ヒンジ部は図-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、柱の一般部、フーチングは弾性梁要素としてモデル化した。塑性ヒンジ長は道示の考え方により算出した。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。

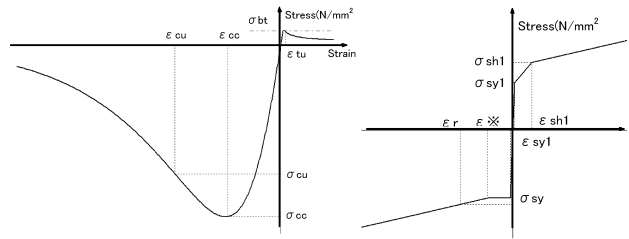
ファイバー要素には、コンクリートおよび鉄筋の材料非線形履歴モデルを考慮する。鉄筋およびコンクリートの材料非線形モデルは、図-3 に示すような東京大学コンクリート研究室で開発された鉄筋コンクリートの構成則⁵⁾である COM3 モデルを用いる。減衰モデルは、Rayleigh 型粘性減衰マトリックスにより評価する。

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⁶⁾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。

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振動特性の変化を検証した。水平反力分散支承と免震支承の解析モデルを図-4 に、支承モデルの数値諸元を表-2 に示すが、免震支承は道路橋支承便覧⁷⁾よりバイリニアの履歴図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。

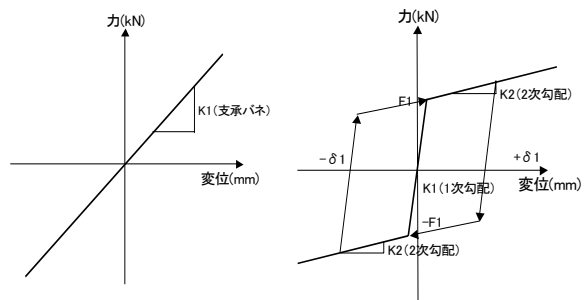
各支承形式における固有周期算出結果を表-3 に示す。支承条件 A (鋼性支承) の場合は、橋軸方向は径間数に関係なく、ほぼ同じ固有周期になる傾向となったが、直角方向は径間数が多くなるほど固有周期が長くなる傾向



(a)コンクリート

(b)鉄筋

図-3 ファイバーモデルに用いる材料構成則



(a)水平反力分散支承

(b)免震支承

図-4 ゴム支承のモデル化

表-1 対象構造物の概要

		テストブリッジ橋
橋種		3, 5, 7 径間連続鋼箱桁橋
橋長	3 径間	45+55+45=145m
	5 径間	45+55+65+55+45=265m
	7 径間	45+55+55+65+55+55+45=375m
地盤種別		III 種地盤
支承形式	A	鋼製支承(固定)
	B	水平反力分散ゴム支承
	C	免震支承
下部工	橋脚形式	矩形橋脚
	基礎形式	場所打ち杭 φ1500
	使用材料	コンクリート σ _{ck} =24N/mm ² 鉄筋 SD345 (柱主鉄筋D35)

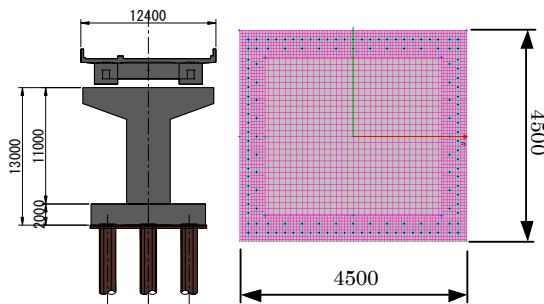


図-2 橋脚断面図 (ファイバーモデル)

表-2 支承モデルの数値諸元

		数値諸元					
		A1	P1	P2	P3	P4	A2
支承条件A (鋼製支承(固定))	水平剛性 (kN/m)	M	F	F	F	F	M
	水平剛性 (kN/m)	18600	26000	29200	29200	26000	18600
支承条件B (水平反力分散ゴム支承)	許容変位 (mm)	250.0	295.0	250.0	250.0	295.0	250.0
	1 次剛性 (kN/m)	38162	58677	59820	59820	58677	38162
支承条件C (免震支承)	降伏変位 (mm)	19.6	16.5	21.8	21.8	16.5	19.6
	2 次剛性 (kN/m)	5871	9027	9203	9203	9027	5871
	許容変位 (mm)	250.0	295.0	250.0	250.0	295.0	250.0

となった。支承条件 B (水平反力分散ゴム支承) は、橋軸方向、直角方向ともに径間数が多くなるに従って固有周期が若干長くなる傾向となった。また、すべての径間数で橋軸方向より直角方向の固有周期が長くなる傾向となった。これは、上部工重量の作用位置は、橋軸方向では支承下端であるのに対し、直角方向は上部工重心位置となるので、本橋脚のような正方形に近い矩形断面だと橋軸方向と直角方向の剛性に差がなく、直角方向の固有周期が長くなる、すなわち、ゆれやすい高架橋の振動特性を有することとなる。

表中で示す支承条件 C (免震支承) の場合の橋の固有周期は、道示の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。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倍程度長周期化している。また、支承条件 B と同様に、直角方向のほうが橋軸方向より固有周期が長くなる傾向であった。

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-4 に示す。

表-3 各支承形式における固有周期

支承形式	径間数	固有周期(sec)	
		橋軸	直角
A 鋼製支承(固定)	3径間	0.635	0.601
	5径間	0.632	0.801
	7径間	0.638	0.855
B 水平反力分散ゴム支承	3径間	0.979	1.049
	5径間	1.053	1.214
	7径間	1.126	1.344
C 免震支承	3径間	1.177	1.245
	5径間	1.230	1.297
	7径間	1.243	1.322

※免震支承の固有周期は道示地震動作用時の値である。

表-4 地震動加速度の概要

地震名	発生日	地点番号	震央までの距離	最大加速度(gal)			卓越周期(sec)	
				LG	TR	合成	LG	TR
1. 想定東海地震				368	368	521	0.39	0.39
2. 想定東南海地震				503	503	712	0.44	0.44
3. 東海・東南海複合地震				511	511	722	0.39	0.39
4. 兵庫県南部地震	1995/1/17			511	406	652	0.88	0.69
5. 鳥取県西部地震	2000/10/6	OKY004	38km	817	528	973	0.22	0.17
6. 三陸南地震	2003/3/26	MYG011	59km	1112	1103	1566	0.14	0.29
7. 十勝沖地震	2003/9/26	HKD100	84km	810	973	1266	0.26	0.24
8. 新潟県中越地震	2004/10/23	NIG021	21km	850	1716	1915	0.23	0.22
9. 福岡県西方沖地震	2005/3/20	NGS001	72km	356	232	425	0.38	0.23
10. 宮城県沖地震	2005/8/16	MYG004	127km	382	514	640	0.14	0.16
11. 能登半島地震	2007/3/25	ISK006	7km	849	717	1111	0.17	0.17
12. 新潟県中越沖地震	2007/7/16	NIG018	21km	514	667	842	2.17	2.33
13. タイプI-III-1 (橋軸)				433	-	433	1.76	-
14. タイプI-III-2 (橋軸)				424	-	424	1.62	-
15. タイプI-III-3 (橋軸)				439	-	439	2.14	-
16. タイプII-III-1 (橋軸)				591	-	591	2.00	-
17. タイプII-III-2 (橋軸)				557	-	557	1.67	-
18. タイプII-III-3 (橋軸)				619	-	619	1.67	-
19. タイプI-III-1 (直角)				-	433	433	-	1.76
20. タイプI-III-2 (直角)				-	424	424	-	1.62
21. タイプI-III-3 (直角)				-	439	439	-	2.14
22. タイプII-III-1 (直角)				-	591	591	-	2.00
23. タイプII-III-2 (直角)				-	557	557	-	1.67
24. タイプII-III-3 (直角)				-	619	619	-	1.67

※観測地点は、K-NET観測地点番号

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~24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。

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^{8),9)}工学的基盤面の地震動加速度に対して、解析対象地点の地盤条件を考慮した地震応答解析¹⁰⁾を行うことにより求めた地表面相当の入力地震動加速度である。地盤条件としては、名古屋市内の比較的軟弱な地盤で、道示の地盤種別におけるIII種地盤に相当する地盤条件とした。5~12地震動については、近年発生した大規模地震道に関するK-NET¹¹⁾の地表面加速度データを使用した。13~24については、道示のIII種地盤に関する模擬地震動を使用した。1~12地震動は各地点の断層方向とその直角方向の地表面加速度を有しているため、水平2方向を同時入力して解析を行った。道示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。

5. 解析結果および考察

解析結果の一例として、支承条件 B において解析した際の中間 RC 橋脚 (3径間ではP1橋脚, 5径間ではP2橋脚, 7径間ではP3橋脚) における柱基部のせん断力、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図-6 に、最大応答値を示す7径間の場合における支承条件別の中間 RC 橋脚の最大圧縮ひずみの応答値を図-7 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、図-5 に示す終局IIの状態とした。解析結果の考察を中間 RC 橋脚に着目したのは、対象橋梁のパン割から分担重量が最も大きくなり、他の橋脚より最大応答値が大きくなるからである。

解析結果を考察すると、対象高架橋は支承条件 C (免震支承) で設計された RC 橋脚なので、支承条件 A, B の場合で終局ひずみを大きく超えるコンクリートひずみが発生する場合があった。また、橋梁の径間数によって

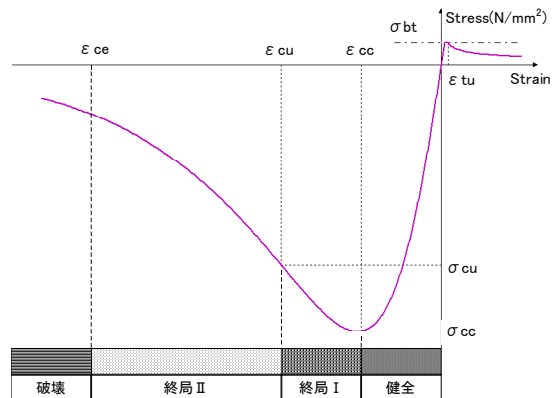


図-5 コンクリートの発生ひずみと損傷度合の関係

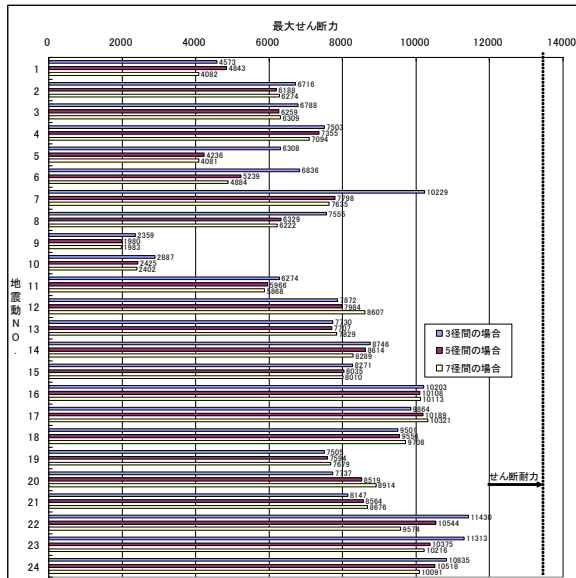
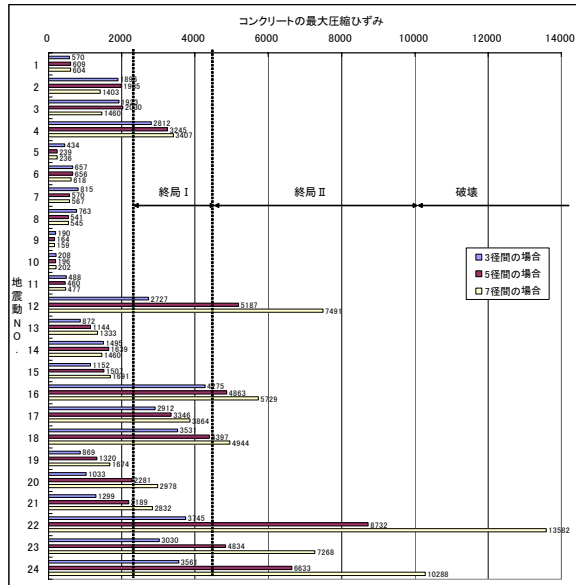


図-6 径間別解析結果 (中間橋脚, 支承条件 B)

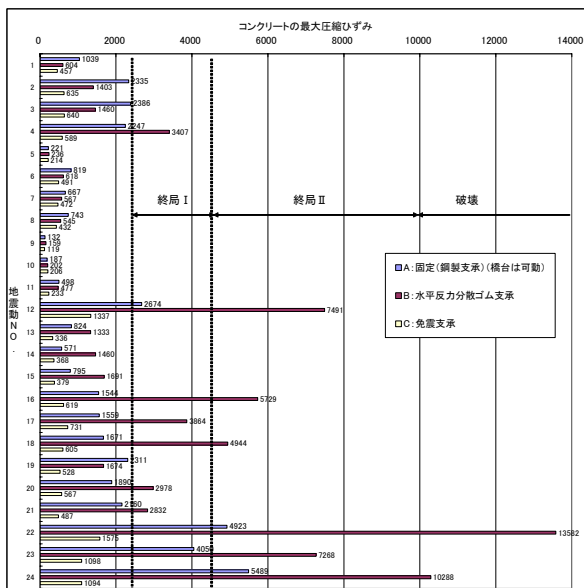


図-7 支承条件別解析結果 (中間橋脚, 7 径間)

は、ほぼ同じ分担重量を有する橋脚でも応答値に大きな差異が生じることが確認できた。せん断力に対しては、すべての場合でせん断耐力を下回る結果となり、道示における設計思想通り、せん断破壊は発生しない橋脚となっている。

ここでは、多径間連続橋に対して、地震動の卓越周期による RC 橋脚の応答値へ影響、および、多径間連続高架橋の規模による RC 橋脚の応答値への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への影響

図-6 に示す径間別解析結果を考察すると、卓越周期が約 1sec 程度以上で、比較的最大加速度が大きい地震動が作用した場合に応答値が大きくなり、それ以外の地震動では応答値が小さくなっている。支承条件 B における 3~7 径間の連続高架橋の固有周期が 0.979~1.344sec 程度であることを考慮すると、地震動と高架橋の振動特性が近似する場合は応答値が大きくなり、近似しない場合は応答値が大きくならないという、これまでの研究結果と同様の傾向を示している。

ただし、対象高架橋に作用する地震動は、震央までの距離や地盤条件により振動特性が大きく異なるので、それらに対する検証を行うために、7 地震動 (十勝沖地震) において、表-5 に示すような震央からの距離を 3 地点抽出し、地震時応答解析を実施した。その結果、最大加速度発生地点である HKD100 より震央までの距離が離れており、最大加速度も小さい HKD086 地点の地震動発生時の応答値が大きくなり、RC 橋脚が破壊するような圧縮ひずみが発生する結果となった。2 つの地震動の地震波形および加速度 (周波数領域) の比較一覧表を表-6、各地震動作用時の上部工重心位置における時刻暦応答加速度の比較一覧表を表-7 に示す。2 つの地震動波形はほぼ同じような波の形であるが、フーリエ解析結果における卓越周期は、HKD100 地震動が 0.2~0.3sec であったのに対し、HKD086 地震動は約 1.3~1.4sec となっている。よって、HKD086 の方が HKD100 地震動よりも長周期成分を有する地震動であり、2 つの地震動は地震動特性が著しく異なる地震動であった。

表-7 に示す上部工重心位置における時刻暦応答加速

表-5 地震動一覧表 (追加解析対象, 5 径間)

地震名	発生日	地点番号	震央までの距離	最大加速度 (gal)			卓越周期 (sec)		
				LG	TR	合成	LG	TR	
7・十勝沖地震	2003/9/26	HKD100	84km	810	973	1266	0.26	0.24	
		HKD086	120km	739	785	1078	1.41	1.32	
		HKD066	226km	430	491	653	0.61	0.65	
		解析結果			B: 水平反力分散ゴム支承				
		限界値 (参考値)			最大せん断力 (kN) 最大コンクリートひずみ (μ)				
				13500			4380		
HKD100作用時				7798			570		
HKD086作用時				7950			20770		
HKD066作用時				6270			1251		

度のフーリエ解析結果によると、対象高架橋である5径間の場合の卓越周期は1sec以上であるので、HKD086地震動の卓越周期と非常に近似し、応答値が大きくなったと考えられる。

これらの結果により、地震動の振動特性は、地震動発生箇所の地盤特性や震央までの距離によって大きく異なるので、それらを評価した地震動を想定して解析を行うことの重要性が認識できる結果となった。

5.2 連続高架橋の規模による応答値への影響

図-6に示す径間別解析結果でコンクリートの圧縮ひずみについての道示の結果を考察すると、3径間では橋軸方向と直角方向の応答値はほぼ同じであるが、5径間、

7径間では直角方向のほうが非常に大きな応答値となっている。また、2軸に作用させている地震動について考察すると、橋軸方向の加速度が大きい4地震動（兵庫県南部地震）の時は径間数が多くなるほどに応答値が1.3倍程度大きくなっているが、直角方向に卓越している12地震動（新潟県中越沖地震）では径間数が多くなるほど応答値が3倍以上大きくなっている。これは、径間数が増加するほど橋梁全体の固有周期が長くなった影響と考えられる。

表-6 十勝沖地震比較一覧表

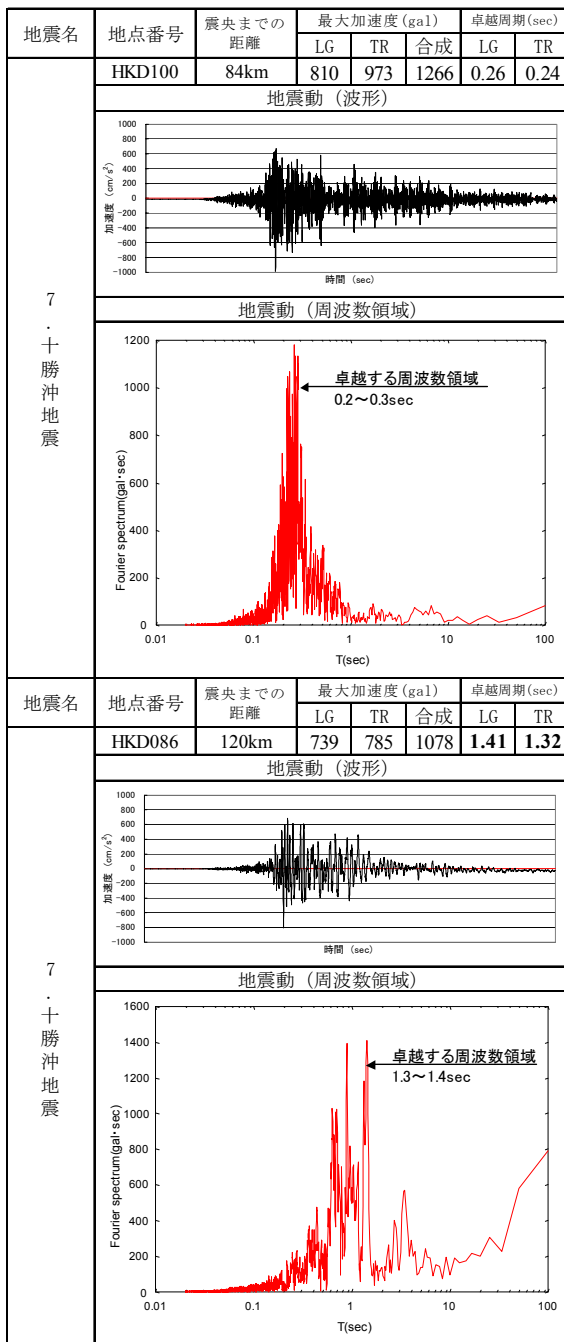
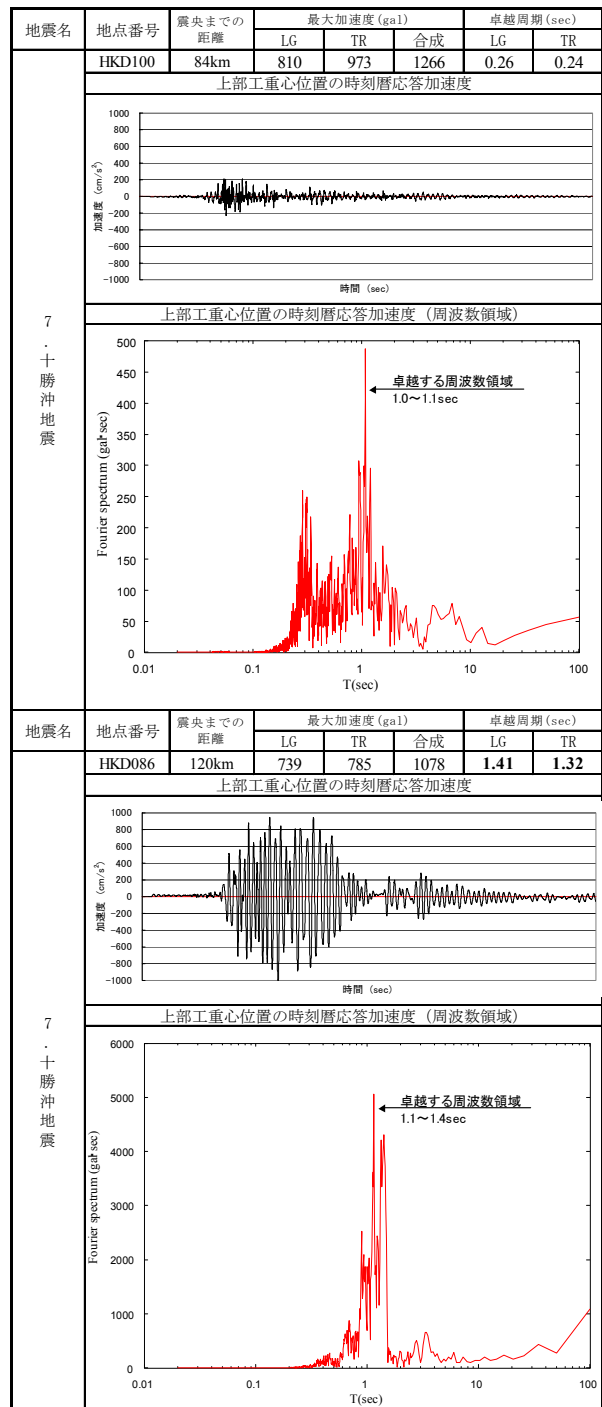


表-7 十勝沖地震作用時の上部工重心位置の時刻歴応答加速度比較一覧表



そこで、12 地震動（新潟県中越沖地震）、16 地震動（道示Ⅱ－Ⅲ－1）の周波数領域における加速度を図－8～9に示すが、2つの地震動はともに1secを越えたあたりから急激に加速度が大きくなる傾向となっている。直角方向の固有周期は、3径間は1sec程度であったのに対し、5径間、7径間と径間数が多くなるに従って固有周期が1.214sec、1.344secと非常に長くなり、地震動加速度が卓越する領域に近づいていくことで応答値が大きくなることが分かった。それに対して、橋軸方向の固有周期は、径間数が大きくなるにつれて大きくなる程度が直角方向より小さいので、応答値が大きくなる程度も同様に小さい傾向となったと考えられる。

以上より、多径間連続橋においては、径間数が異なることで固有周期が変化するので、同じ地震動が発生しても、地震動の卓越周期と高架橋の振動特性の関係により応答値に大きな違いがあることが判った。

6. まとめ

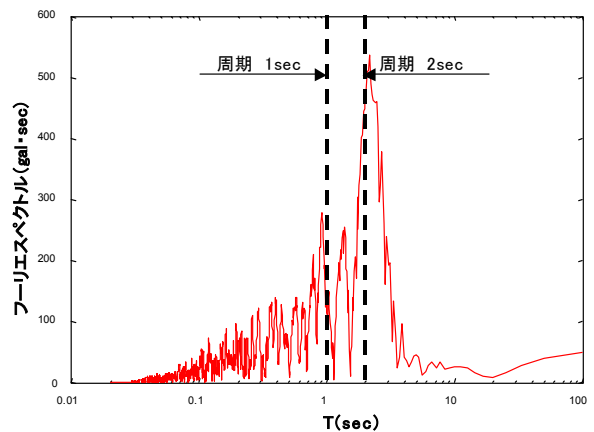
現在の道示で設計された多径間連続橋に対して、今後想定される大地震や近年発生した大地震、示方書の模擬地震動を用いて3次元非線形動的解析を行った。その結果、本研究で対象とした3～7径間連続鋼箱桁橋では、以下の結論が得られた。

- (1) 発生地震動によっては震央からの距離や地盤条件により地震動特性である卓越周期にばらつきがある。十勝沖地震の場合で約0.3～1.4secと大きくばらつきがあるので、同じ地震動でも対象高架橋の地盤条件や震央からの距離によってRC橋脚の応答値が大きく異なることが確認できた。
- (2) 本研究対象の連続高架橋では、規模（径間数）によって固有周期が水平反力分散支承の場合で約1.0～1.3secと変化するので、地震動の卓越周期との関係から応答値に非常にばらつきがある。また、径間数が多いことで固有周期が長くなり、地震動が卓越する周期に近づくことで応答値が大きくなるケースがあることが確認できた。

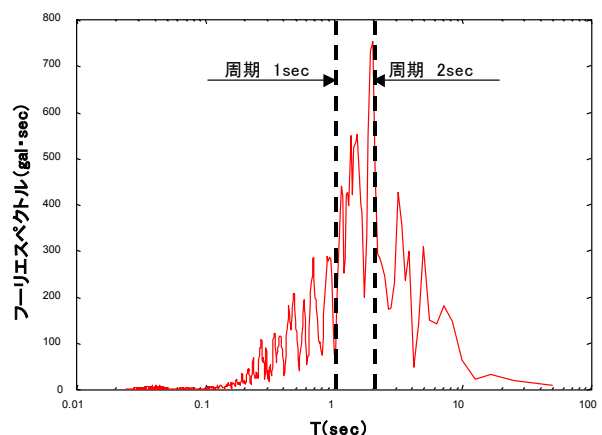
謝辞：防災科学技術研究所K-NETの記録を使わせて頂きました。関係諸氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会：2003年に発生した地震によるコンクリート構造物の被害分析
- 2) 富健一ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，NO.3，pp.817-822，2007
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ～Ⅴ，2002.3



図－8 新潟県中越沖地震加速度（周波数領域）



図－9 道示Ⅱ－Ⅲ－1地震加速度（周波数領域）

- 4) 藤田康平ほか：十勝沖地震で被災した鉄筋コンクリート橋脚の地震時応答解析による被害分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，NO.3，pp.823-828，2007
- 5) 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
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 耐震性能照査編，2002.4
- 7) 日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.4
- 8) 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.
- 9) 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
- 10) 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時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
- 11) 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/>