

論文 支承特性を考慮した道路橋の地震応答解析

青山 浩之^{*1}・糸山 豊^{*2}・梅原 秀哲^{*3}

要旨：支承特性が RC 橋脚の地震応答に及ぼす影響を把握するため、道路橋を対象として、数種類の地震動加速度を用いて 3 次元非線形動的解析を行った。その結果、大きな変形性能や緩衝性を有するために耐震性に優れているゴム支承を用いた道路橋は、鋼製支承の場合と比較して、橋脚に作用するせん断力が低減された。その中で、周期 1 秒～数秒程度のやや長周期成分を多く含む地震動を作用させた場合、他の地震動と比較してゴム支承を用いることによる作用せん断力の低減効果が小さくなることが明らかとなった。

キーワード：長周期成分，鋼製支承，ゴム支承，地震応答解析

1. はじめに

兵庫県南部地震では、道路橋を含め、土木・建築構造物に甚大な被害をもたらした。この中で道路橋橋脚における被害状況を見ると、支承部が損傷し、橋脚に作用するせん断力を低減する役割を果たすことができず被害が拡大した事例が多く見られた。鋼製支承はゴム支承に比べ、鉛直剛性が高く、回転吸収量を大きくできるという特徴があるが、兵庫県南部地震では鋼製支承の損傷がゴム支承に比べ圧倒的に多く見られた。

そのため、平成 16 年 4 月には道路橋示方書の改訂に合わせて道路橋支承便覧¹⁾も改訂されることとなった。改訂においては、ゴムの弾性によって大きな変形性能や緩衝性を有し、耐震性に優れているため近年採用される機会が増えてきたゴム支承についてもより詳細な記述がなされている。しかし、ゴム支承を使用した橋の耐震設計の歴史は浅く、変形性能や耐久性など十分に検証されていない点もある。

そこで、本研究では構造形式の異なる 2 種類の道路橋を対象として、想定地震動、実際に生じた地震動、示方書²⁾の模擬地震動を用いて 3 次元非線形動的解析を行い、解析結果を比較することにより、支承特性の違いが構造物に与え

る影響について検討を行うとともに、入力した地震動が与える影響についても考察した。なお、地盤の影響を確認するため、3 種類の地盤条件を考慮した地震動加速度を入力する。

2. 解析手法

本研究では、解析ツールとして *COM3-fiber* を使用した。道路橋のモデルは、橋脚と支承とスラブからなるものとして簡略化し、橋脚には線材要素を、支承部には鉛直ばね、水平ばね、回転ばね、粘性減衰を考慮した支承ばね要素を用いた。床板スラブには損傷を受けないと仮定した弾性立体要素を適用している。フーチング、地中梁等の基礎構造物と地盤のモデル化は行っていない。そのため、解析では基礎構造物と地盤の相互作用の影響は考慮していない。このように簡略化したモデルは、計算時間を短縮するためのものである。また、線材要素にはファイバーモデルに基づき、経路依存型の材料非線形モデルが適用されており、軸力変動を含む 3 次元応答が時々刻々算出される³⁾。解析に用いた減衰モデルについては岡村らのモデルを参考にした⁴⁾。地震動加速度は、固定点とした各橋脚基部に同位相で入力する。

応答計算では各時刻における変位履歴と橋脚

*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 社会工学専攻 修(工) (正会員)

*3 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 Ph.D. (正会員)

表 1 橋梁概要

橋梁名	構造形式	橋長 (m)	上部工質量 (t)
橋	2径間連続非合成鋼板桁	50.6	750
橋	3径間連続鋼板桁	197.1	2913.5

に作用するせん断力が得られる。橋軸方向と橋軸直角方向のせん断力の平方和を作用せん断力とし、この値の最大値を比較することで、支承特性が地震時における道路橋の挙動に及ぼす影響を考察する。

3. 解析対象およびその支承特性

本研究で解析対象とした道路橋は、2径間連続非合成鋼板桁橋（以下 橋とする）と、3径間連続鋼板桁橋（以下 橋とする）の2橋とし、その概要を表-1に示す。また、図-1、図-2にそれぞれの構造図の詳細を示す。解析は径間が連続する部分について行い、橋では中央橋脚を対象とし、

橋ではP8橋脚に着目して検討を行った。

次に、支承特性を表-2に示す。支承はね要素のモデル化の際に、鋼製支承の鉛直剛性、ねじり剛性は最大にし、損傷を受けないものと仮定した。可動支承の水平剛性については、ローラーの摩擦による影響を考慮した⁵⁾。可動、固定支承ともに橋軸方向の回転は自由とし、減衰は考慮していない。ゴム支承の特性については鉛直剛性、水平剛性は道路橋支承便覧より求め、回転剛性についてはゴム支承の鉛直剛性と辺長から近似的に求めた。ねじり剛性はゴム支承のせん断弾性係数とねじり定数より求め、

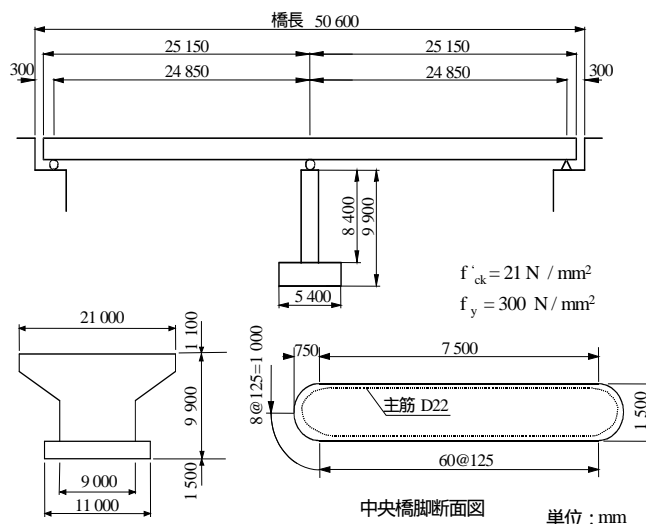


図 - 1 橋構造図

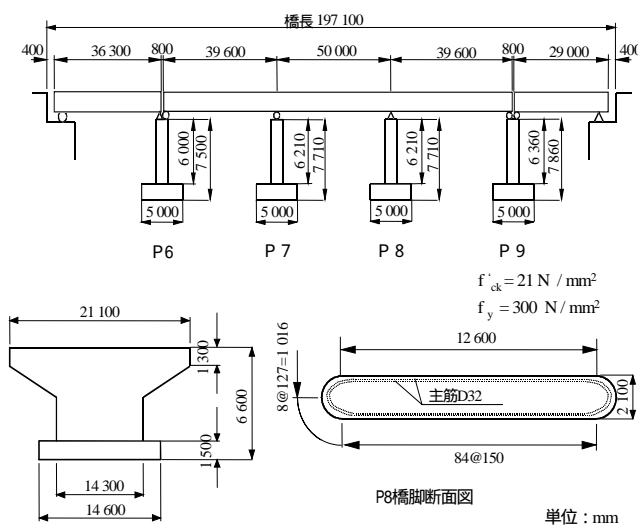


図 - 2 橋構造図

表 - 2 支承特性

	鉛直剛性 ($\times 10^3 \text{ kN/mm}$)	水平剛性 ($\times 10^3 \text{ kN/mm}$)	橋軸方向 回転剛性 ($\times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{mm/rad}$)	橋軸直角方向 回転剛性 ($\times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{mm/rad}$)	ねじり剛性 ($\times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{mm/rad}$)	減衰定数 (%)
鋼製可動支承		摩擦考慮	0			0
鋼製固定支承			0			0
橋積層ゴム支承	1740	6.0	52200	52200	21900	5
橋積層ゴム支承	1390	4.8	41700	41700	17500	5
橋リングタイプゴム支承	2300	10.1	69000	69000	25500	5
橋リングタイプゴム支承	1840	8.1	55200	55200	20400	5

表 - 3 地震動加速度の概要

地震名	発生日	最大加速度(gal)						卓越振動数(Hz)					
		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
想定東海地震		149	149	124	124	102	102	1.21	1.21	2.05	2.05	1.81	1.81
想定東南海地震		-256	-256	-178	-178	165	165	1.15	1.15	2.35	2.35	2.11	2.11
兵庫県南部地震	1995/1/17	-544	-406	-425	302	-368	-260	1.13	0.83	0.50	1.43	0.50	1.43
2003年十勝沖地震	2003/9/26	220	215	214	-203	195	-162	5.10	3.20	5.10	6.75	5.10	6.75
レベル1地震動		215	215	145	145	132	132	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60

* ; 表中の LG は橋軸，TR は橋軸直角方向を示している。

， ， に関しては LG,TR 同じ地震動を入力した。

ゴム支承を採用した場合の減衰定数は 5%とした。また，ゴム支承適用時には，橋，橋のすべての橋脚で同じ性質のゴム支承を用いた。

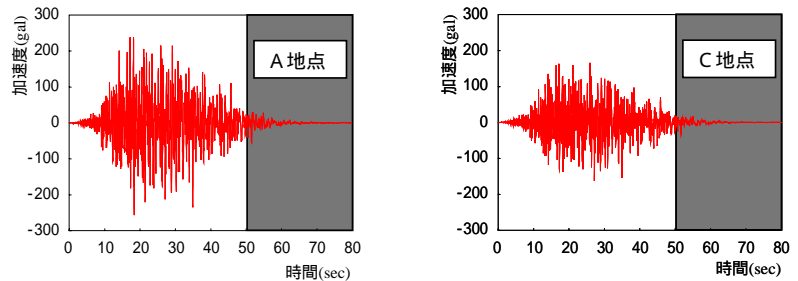


図 3 地震の地震動加速度

4. 入力地震動

本研究で用いた地震動の加速度の概要を表 - 3 に示す。なお，地震動は水平 2 方向にのみ入力した。また，便宜的に各地震動加速度を表中に示す通り ~ と称することとする。卓越振動数は解析に用いた時間中における数値である。それほど顕著に表れていないものについても表記した。

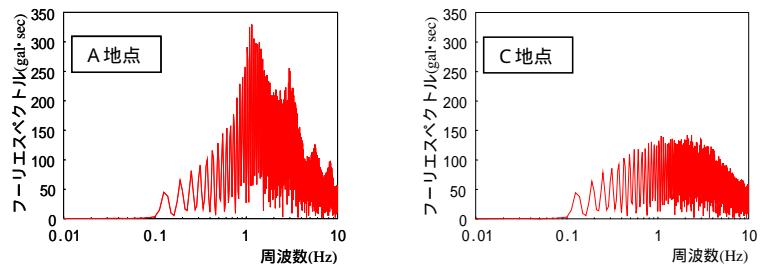


図 4 地震の地震動加速度（周波数領域）

地表面相当の地震動加速度は，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盤応答解析⁶⁾を行うことにより求めた。工学的基盤面について，~ 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)}。については KIK-NET⁹⁾の地中データを使用し，地盤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。については，示方書の模擬地震動を用いた。

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，A は地層の大部分が粘土で構成された軟弱地盤，B は沖積平野等に存在する，粘土や砂で構成された悪い地盤，C は洪積平野に見られる砂礫を多く含む良好な地盤とし，特徴的な 3 種類の地盤を設定した。

地震動加速度の例として，想定東南海地震の A，C 地点での地表面地震動加速度とその地震動をフーリエ変換により周波数成分に分解したものを図 - 3，図 - 4 に示す。網掛け部分は主要部分に対し加速度が極端に小さいため解析

対象外とした。

図 - 3 より地盤の状態が良好な C 地点に比べて、軟弱地盤上である A 地点の最大地震動加速度が大きくなっていることが分かる。また、固有振動数に着目すると、軟弱地盤上にある A 地点の地震動の方が、良好な地盤上にある C 地点よりも低周波領域で卓越していることが分かった。これらのことから、地盤の状態によって、最大地震動加速度や卓越振動数に影響があるこ

とが確認された。

5. 解析結果および考察

鋼製、積層、リングタイプの支承を適用した場合のそれぞれの解析結果を表 - 4 に示す。表中の最大 S は、各地点における解析対象橋脚基部に作用するせん断力の最大値を示す。また、それぞれの支承の特性を明らかにするため、鋼製支承適用時の最大せん断力を S_0 、積層ゴム支

表 4 解析結果

・ 橋

地震波	鋼製支承		ゴム支承		リングタイプゴム支承	
	最大変位(cm)	最大 S_0 (kN)	最大変位(cm)	最大 S_1 (kN)	最大変位(cm)	最大 S_2 (kN)
A地点						
想定東海地震	1.09	3380.02	0.33	2849.89	0.57	2989.50
想定東南海地震	1.09	3380.02	0.45	2850.89	1.08	3158.44
兵庫県南部地震	1.09	3326.12	2.40	3560.53	1.96	3152.28
2003年十勝沖地震	1.09	3330.04	0.29	3012.87	0.37	2941.25
レベル1地震動	1.09	3379.04	1.53	2940.52	1.74	3090.78
B地点						
想定東海地震	1.09	3380.02	0.34	2848.89	0.54	2933.84
想定東南海地震	1.09	3381.00	0.38	2854.75	0.94	3061.72
兵庫県南部地震	1.24	3378.08	1.95	3347.47	1.75	3083.26
2003年十勝沖地震	1.09	3364.08	0.29	2998.17	0.36	2925.13
レベル1地震動	1.09	3378.06	1.17	2877.13	1.45	2964.00
C地点						
想定東海地震	1.09	3380.02	0.34	2849.87	0.53	2880.81
想定東南海地震	1.09	3380.02	0.37	2855.87	0.93	3036.74
兵庫県南部地震	1.26	3381.01	1.93	3321.83	1.72	3043.55
2003年十勝沖地震	1.09	3360.62	0.29	3012.20	0.36	2875.12
レベル1地震動	1.09	3377.08	1.15	2869.49	1.42	2951.57

・ 橋

地震波	鋼製支承		ゴム支承		リングタイプゴム支承	
	最大変位(cm)	最大 S_0 (kN)	最大変位(cm)	最大 S_1 (kN)	最大変位(cm)	最大 S_2 (kN)
A地点						
想定東海地震	0.52	12697.61	0.20	2185.88	0.22	2550.84
想定東南海地震	1.22	13064.17	0.30	3230.82	0.43	3673.50
兵庫県南部地震	3.89	14639.19	4.83	6261.75	5.18	5280.95
2003年十勝沖地震	0.84	13112.37	0.25	2821.23	0.24	2868.47
レベル1地震動	0.33	13424.58	0.20	2308.54	0.11	2556.95
B地点						
想定東海地震	0.33	13733.46	0.22	2253.04	0.26	2261.17
想定東南海地震	0.75	13234.38	0.28	2868.66	0.45	2798.63
兵庫県南部地震	2.40	14928.72	1.14	4705.61	1.14	3520.12
2003年十勝沖地震	0.77	12776.16	0.25	2826.94	0.23	3581.30
レベル1地震動	0.32	12864.89	0.17	1878.90	0.18	2182.82
C地点						
想定東海地震	0.38	14690.93	0.19	2046.17	0.22	2107.55
想定東南海地震	0.64	13030.68	0.23	2527.77	0.43	2604.93
兵庫県南部地震	1.87	14025.81	0.48	6530.52	0.50	3433.15
2003年十勝沖地震	0.69	12519.60	0.20	2471.76	0.22	3562.55
レベル1地震動	0.31	12589.49	0.16	1783.44	0.18	2124.43

承適用時を S_1 , リングタイプゴム支承適用時を S_2 とした。

5.1 地震動加速度波形の与える影響

解析例として 橋の 想定南海地震の結果について述べる。解析結果を図 - 5 に示す。図 - 5 は A , C 地点における P8 橋脚基部に作用するせん断力 S の経時変化である。

解析結果では , A 地点における最大作用せん断力が最も大きくなっている。最大加速度が最も大きな地震波が A 地点であることから , 最大地震動加速度の大きさが , 道路橋橋脚の挙動に影響を及ぼすことが確認された。

この結果より , 地盤条件が構造物の挙動に大きな影響を与えることが確認された。

5.2 支承特性の影響

支承特性が , 橋脚の挙動にどのような影響を及ぼすかを考察するため , 橋において鋼製支承適用時の最大作用せん断力 S_1 を積層ゴム支承適用時の最大作用せん断力 S_0 で除した値を表 - 5 に示す。各地点において , 最大作用せん断力を比較した S_1/S_0 に着目してみると , A 地点

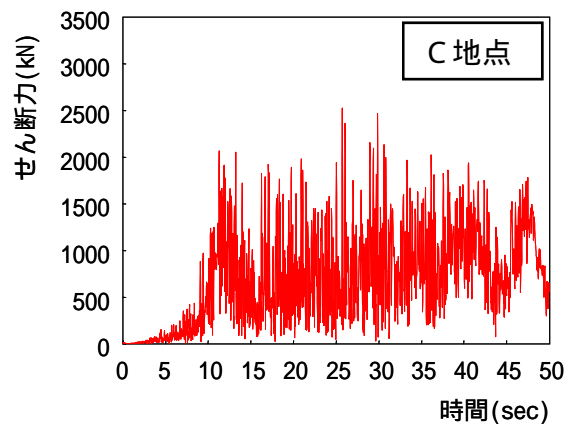
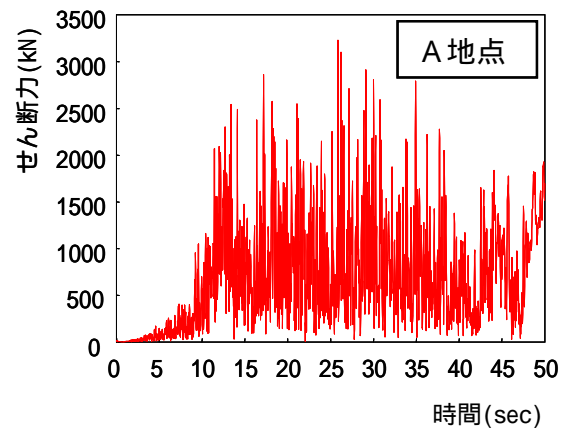


図 5 橋 地震作用せん断力経時変化

表 5 S_0, S_1 最大作用せん断力比較

地震	S_1/S_0^{*1}		
	橋		
	A地点	B地点	C地点
	0.84	0.84	0.84
	0.84	0.84	0.84
	1.07	0.99	0.98
	0.90	0.89	0.90
	0.87	0.85	0.85

表 - 6 S_1, S_2 最大作用せん断力比較

地震	S_1/S_2^{*1}		
	橋		
	A地点	B地点	C地点
	0.95	0.97	0.99
	0.90	0.93	0.94
	1.13	1.09	1.09
	1.02	1.02	1.05
	0.95	0.97	0.97

*1 ; S_0 は鋼製 , S_1 は積層 , S_2 はリングタイプ支承適用時の最大せん断力を表す。

の 地震以外の全てで 1 を下回っており , ゴム支承を適用した場合 , 作用せん断力が低減していることが分かる。

次に , ゴム支承の性能の違いが橋脚の挙動にどのような影響を及ぼすかを考察するため , 積層ゴム支承よりも剛性が高いリングタイプのゴム支承を適用し , 各地点での最大せん断力を比較した値を表 - 6 に示す。表中の値より ,

地震以外は S_1/S_2 の値が 1 を下回っており , 剛性が高いリングタイプゴム支承を適用した場合 , 最大作用せん断力 , 最大変位ともに大きくなる傾向が見られた。

このことから , ゴム支承の特性の違いにより , 橋脚の挙動に影響が見られることが分かった。

5.3 卓越振動数の影響

表 - 5 の値を比較してみると , 地震の場合においては S_1/S_0 の値が他の地震動よりも比較的大きくなっていることが分かる。

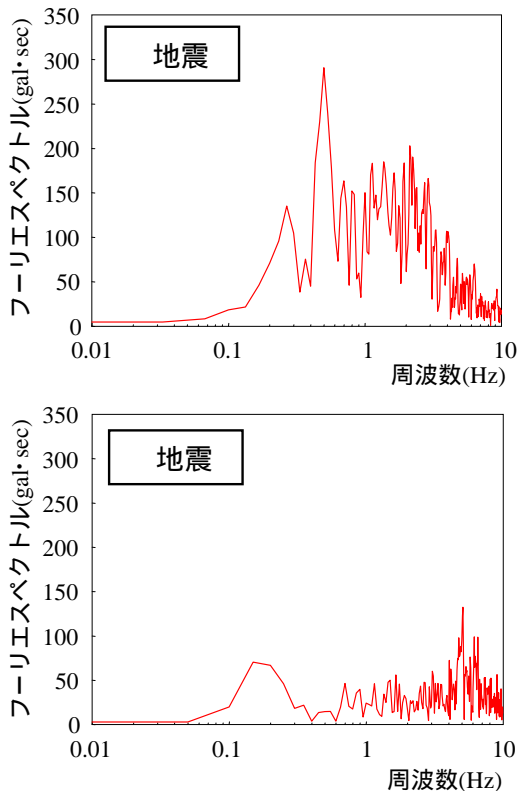


図 6 B地点地震動加速度（周波数領域）

そこで、地震それぞれのLG方向の地震動加速度をフーリエ変換により周波数成分に分解したものを図-6に示す。図-2に示した地震と比較すると、地震波は周期1秒～数秒程度のやや長周期成分が卓越していることが分かる。これは、免震支承を用いた構造物の一般的な固有周期である1秒から2秒程度の周期に一致する。そのため、構造物と地震波が共振し、ゴム支承の効果が小さくなったと推測される。

この結果より、周期1秒～数秒程度のやや長周期成分を多く含む地震波の場合、免震支承の効果が小さくなることが明らかとなった。

6. まとめ

形式の異なる2種類の道路橋を対象に、鋼製支承、積層ゴム支承、リングタイプゴム支承の性質の異なる3つの支承を考慮して3次元非線形動的解析を行った。その結果、本研究で用いた地震波と支承特性値を使用した場合、以下の結論が得られた。

- (1) 軟弱地盤においては、地震動加速度が大きくなり、その結果、橋脚に作用するせん断力が大きくなることが明らかとなった。
- (2) ゴム支承を適用した場合、橋脚に作用するせん断力を低減できることが明らかとなった。
- (3) ゴム支承を適用した場合においても、周期1秒～数秒程度のやや長周期成分を多く含む地震波の場合は、その効果が小さくなることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.4
- 2) 平成14年制定コンクリート標準示方書耐震性能照査編，2002
- 3) Tsuchiya, S. et al. : Seismic Performance Evaluation of RC Frames in Railroad Viaducts Using Three-Dimensional Nonlinear Dynamic Analysis ,Concrete Library International ,No.38 , pp.105-120 , JSCE , Dec.2001
- 4) 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
- 5) 阿部雅人ほか：1995年兵庫県南部地震における3径間連続高架橋の被害分析,土木学会論文集 No.612/I-46pp181～199,土木学会,1999
- 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/