

兵庫県南部地震と三陸南地震における鉄道高架橋の地震被害分析

宇野岳之

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震や2003年の三陸南地震では多くの構造物に甚大な被害をもたらした。また、近々兵庫県南部地震クラス、もしくはそれ以上の地震が東海地方で起きると予想されている。被害を最小に食い止めるためにも地震波が構造物に及ぼす影響や構造物の耐震設計、信頼度の高い耐震診断が極めて重要になってくる。本研究では実際に兵庫県南部地震、三陸南地震で被害を受けた鉄筋コンクリート橋脚を有する鉄道高架橋を解析対象とし、地震応答解析による被害分析を行う。それとともに地震波のスペクトル解析を行い、それぞれの特性をつかみ構造物に与える影響を調べる。

2. 材料非線形性を考慮した解析方法^[1]

材料非線形性を考慮した微小時間 Δt における増分形運動方程式(1)を用いる。

$$\mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{D}}_n + \mathbf{C}\Delta\dot{\mathbf{D}}_n + \mathbf{K}'\Delta\mathbf{D}_n = \Delta\mathbf{F}_n \quad \cdots (1)$$

ここで、左辺の \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K}' はそれぞれ質量マトリクス、減衰マトリクス、接線剛性マトリクスを表し、 $\Delta\ddot{\mathbf{D}}_n$ 、 $\Delta\dot{\mathbf{D}}_n$ 、 $\Delta\mathbf{D}_n$ 、 $\Delta\mathbf{F}_n$ は微小時間 Δt における加速度、速度、変位、外力の増分である。剛性マトリクスのうち、軸方向成分およびねじれ成分については線形理論を用い、曲げ剛性については材料非線形性を考慮する。減衰マトリクスはレイリー減衰とし、各マトリクスの係数は基本モードでモード減衰が極小となるように定める。式(1)の解法として *Newmark-β* 法を用い、パラメータは $\beta = 1/4$ 、 $\gamma = 1/2$ とし、時間ステップを 0.02/20 秒とする。橋脚や

梁には復元力特性として曲げモーメント-曲率関係のトリリニアモデルを採用し、鉄筋の抜け出しを考慮するために曲げモーメント-回転角関係の回転バネを橋脚端部と中層ばり両端に設けることとする。その値については鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計編を参考に求めた。なお幾何学的非線形性は考慮しないものとする。

3. 解析対象とする高架橋とモデル化

兵庫県南部地震により実際に被害を受けた1層3径間の高架橋(第1野間R7、甲東園R4)、2層3径間の高架橋(下食満R5、第2段上R4、阪水R5)と、三陸南地震により実際に被害を受けた1層4径間の高架橋(第3愛宕R2、第5猪鼻R12、R15)、1層3径間の高架橋(第3愛宕R4)の計9橋を解析対象とした。各高架橋の概要と被害状況を表-1に、構造物形式の一例として下食満R5を図-1に示す。解析モデルとして数値解析的に安定で橋脚の要素数を細かくとることのできる平面骨組みモデルを用いた。兵庫県南部地震で被害を受けた5橋脚は橋軸方向、橋軸直角方向ともに全体の1/4もモデル化した。三陸南地震で被害を受けた4橋脚は橋軸直角方向に対して桁受部、中間部をとり全体の1/5をモデル化した。橋脚、はり共に6自由度を持つはり要素とし、橋脚に要素分割は要素間隔

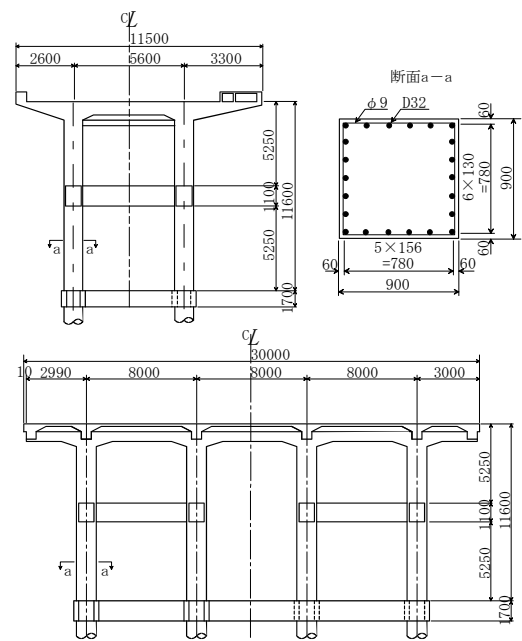


図-1 構造形式(下食満 R5)

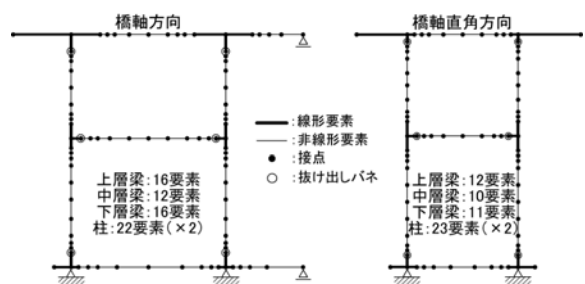


図-2 モデル化例(下食満 R5)

を最大で橋脚断面の幅とし、端部ではその2等分、その端部側ではさらに2等分した。ただし、橋脚とはりの接合部分周辺は剛体要素としている。なお基礎工は考慮していない。解析モデルの例として下食満 R5 を図-2 に示す。

4. 入力地震波のスペクトル解析

兵庫県南部地震では高架橋ごとの高架橋基礎位置における推定地震波を用いている。推定方法は基盤地震動推定手法として非定常スペクトル合成法を用い、堆積地盤推定波形への変換手法として *fdel* を使用する。データ数は 0.02 秒間隔で 30 秒分ある。三陸南地震では地震観測点と高架橋の位置が近いこと、周辺の地盤状況が相似であるため、K-NET 観測地点で得られた地震波をオリジナル波形に基づき全記録間の平均値をとり、平均値が基線となるように補正したものをを用いた。データ数は 0.01 秒間隔で約 40 秒分ある。

地震波加速度データをゼロ・クロッシング法、ピーク法、連続ウェーブレット変換、パワー・スペクトルを用いて解析を行い、地震波の特性を調べた。各入力地震波の概要を表-2 に示す。

兵庫県南部地震

マグニチュード 7.2、主要動継続時間は 10.91 秒である。入力地震波の例として下食満高架橋 R5 橋軸方向の入力地震波の時刻歴、ウェーブレット変換、パワー・スペクトルを図-3 に示す。入力地震加速度は全体的にみて、ウェーブレット変換から 2~3Hz 周辺が卓越しており、パワー・スペクトルを見ると 1.5~3Hz にわたり広範囲に卓越している。構造物に影響を与えやすい低周波域の地震が多く含まれているため、実際に構造物に与えた地震力が大きく、卓越振動数の範囲の広さゆえに固有振動数の違うさまざまな構造のものが敏感に反応していたと思われる。

三陸南地震

マグニチュード 7.1、主要動継続時間は 10.15 秒である。入力地震加速度は全体的にみて、ウェーブレット変換から 2Hz 周辺が卓越しており、パワー・スペクトルを見ると 2Hz あたりが卓越している。卓越している振動数が比較的高周波なものが多く含まれていたため剛性の高い構造物への影響は小さかったといえる。また、卓越振動数の領域が狭いため、多くの構造物が地震波に対して鈍感であったために被害は小さかったのではないと思われる。

表-1 各高架橋の概要

	高架橋名	層数	高さ	基礎形式	被災形態	被災程度
兵庫県南部	下食満R5	2	11.6m	杭基礎	S、M	小
	第1野間R7	1	8.0m	直接基礎	S	大
	第2段上R4	2	13.2m	杭基礎	M	小
	阪水R5	2	11.1m	杭基礎	S	大
	甲東園R4	1	10.0m	杭基礎	M	中
三陸南	第3愛宕R2	1	7.5m	直接基礎	S	中
	第3愛宕R4	1	9.0m	直接基礎	×	無し
	第5猪鼻R12	1	9.0m	杭基礎	×	無し
	第5猪鼻R14	1	7.5m	杭基礎	S	小

S:せん断 M:曲げ

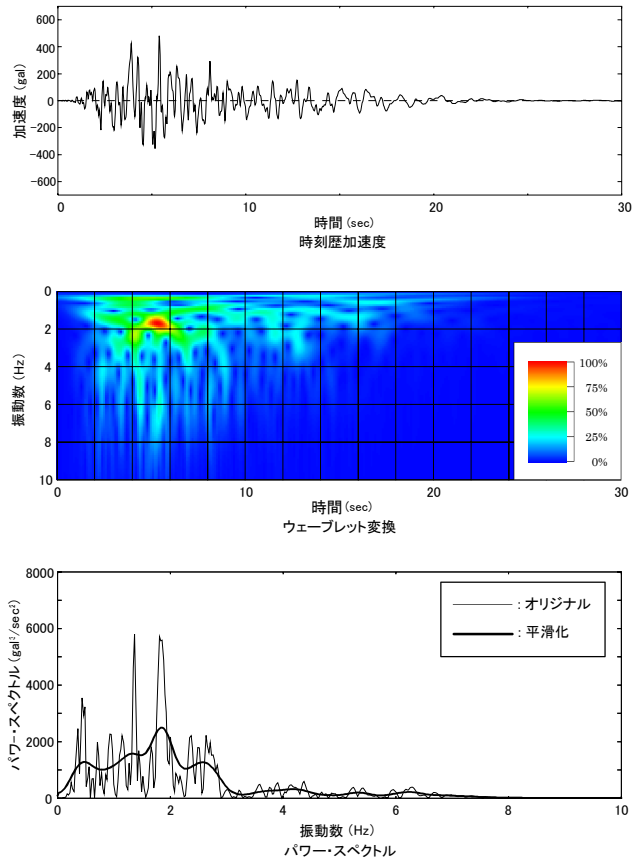


図-3 入力地震波(下食満 R5 橋軸方向)

表-2 入力地震波の概要

	高架橋名	マグニチュード	主要動継続時間	最大加速度	
兵庫県南部	下食満R5	7.2	10.91	LG	482.77
				TR	400.89
	第1野間R7			LG	518.35
				TR	404.15
	第2段上R4			LG	634.56
				TR	473.79
	阪水R5			LG	640.80
				TR	479.98
甲東園R4	LG	653.48			
	TR	479.40			
三陸	水沢観測点	7.1	10.15	317.09	
	石鳥谷観測点			195.96	

5. 地震応答解析の結果と被害分析

各高架橋に地震応答解析を行った結果を示し、実被害との比較を行った。解析結果の一例として下食満高架橋 R5 橋軸方向の、履歴曲線、せん断力図、時刻歴応答変位を図-3に示す。解析結果と実被害との比較をまとめたものを表-3に示す。

下食満 R5・解析結果は曲げによる鉄筋降伏が起き、せん断耐力を超えるせん断力が生じる結果となった。実被害では一部の柱に曲げ、せん断共にひび割れ程度の被害が観察された。したがって損傷の大きさには若干の差異はあるが、解析結果と損傷形態はほぼ一致している。

第1野間 R7・解析結果は曲げによる鉄筋降伏が起き、せん断耐力を超えるせん断力が生じる結果となった。実被害でも橋脚がせん断破壊しており、解析結果と実被害は一致したといえる。実被害では上層はりが折れ曲がる被害が出たが、橋脚の崩壊による2次的な被害であると考えれば一致している。

第2段上 R4・解析結果は曲げによる鉄筋降伏が起き、せん断耐力を超えるせん断力が生じる結果となったしかし、実被害では比較的小さなひび割れが観察された程度であるため、解析結果と実被害は一致しなかった。

阪水 R5・解析結果は曲げによる鉄筋降伏が起き、せん断耐力を超えるせん断力が生じる結果となった。実被害でも被害は甚大で橋脚が崩壊しているため解析結果と実被害は一致したといえる。

甲東園 R4・解析結果は曲げによる鉄筋降伏が起きたが、せん断による破壊はなかった。実被害でも曲げによるコンクリートの剥落や鉄筋の座屈が観察されているため、解析結果と実被害は一致したといえる。

第3愛宕 R2・解析結果は曲げによるひび割れが起き、せん断力がわずかにせん断耐力を超える結果となった。実被害ではせん断によるひび割れが観察されているため、解析結果と実被害はせん断に関しては一致したといえる。

第3愛宕 R4・解析結果は曲げによるひび割れが起きたが、せん断による破壊はなかった。実際は被害が観察されていないため曲げの損傷がやや大きく出る結果となった。

第5猪鼻 R12・解析結果は曲げによるひび割れが起きたが、せん断による破壊はなかった。実際は被害が観察されていないため曲げの損傷がやや大きく出る結果となった。

第5猪鼻 R15・解析結果は曲げによるひび割れが起き、せん断力がわずかにせん断耐力を超える結果となった。実被害ではせん断によるひび割れが観察されているため、解析結果と実被害はせん断に関しては一致したといえる。

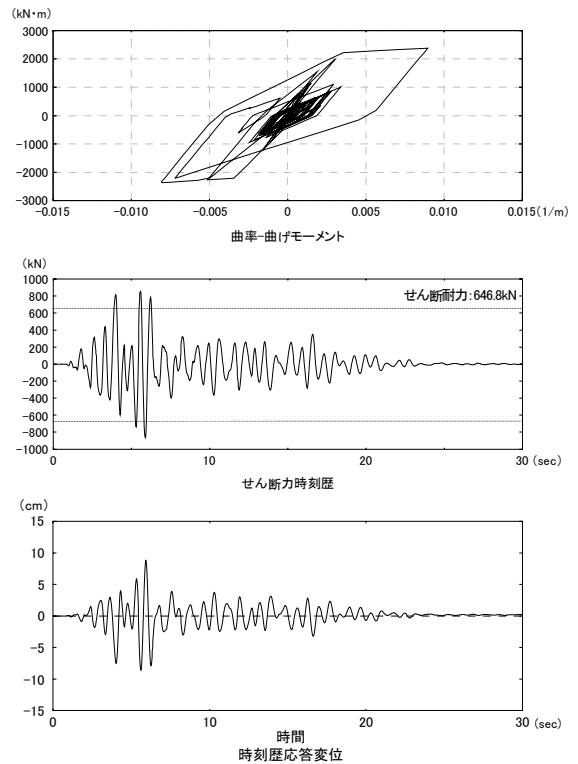


図-4 下食満 R5(橋軸)応答履歴図

表-3 実被害と解析結果の比較

		実際の被害	解析結果		
			曲げ破壊状況	せん断破壊状況	
兵庫 県南 部地 震	下食満R5	LG	S, M (ひび割れ程度)	○ (鉄筋降伏)	○
		TR		○ (鉄筋降伏)	○
	第1野間R7	LG	S	○ (鉄筋降伏)	○
		TR		○ (鉄筋降伏)	○
	第2段上R4	LG	× (ひび割れ程度)	○ (鉄筋降伏)	○
		TR		○ (鉄筋降伏)	○
阪水R5	LG	S	○ (鉄筋降伏)	○	
	TR		○ (鉄筋降伏)	○	
	LG	M	○ (鉄筋降伏)	×	
	TR		○ (鉄筋降伏)	×	
三陸 南地 震	第3愛宕R2	桁受	S	○ (ひび割れ)	○
		中間		○ (ひび割れ)	×
	第3愛宕R4	桁受	×	○ (ひび割れ)	×
		中間		○ (ひび割れ)	×
	第5猪鼻R12	桁受	×	○ (ひび割れ)	×
		中間		○ (ひび割れ)	×
第5猪鼻R15	桁受	S (ひび割れ程度)	○ (ひび割れ)	○	
	中間		○ (ひび割れ)	×	

S:せん断 M:曲げ

2層の高架橋ではせん断破壊において実際より大きな損傷がでる結果となった。しかし、実際の被災程度を比較すると第2段上R4<下食満R5<阪水R5であることに対して、解析結果も第2段上R4<下食満R5<阪水R5となっているところは評価できる。実被害との比較だけでは、不一致が見られるが、相対的に高架橋同士を比較してみると被害の傾向は上手く再現できている。わずか数パーセントの差であれば被害は一致していると言えるのではないかと思う。

6. 入力地震加速度が高架橋の応答に与える影響

入力地震波における卓越振動数と固有振動数の関係を図-4、図-5、高架橋の最大応答変位の比較を図-6に示す。

兵庫県南部地震の5つの対象高架橋はいずれも固有振動数が2Hz前後であり、各入力地震波の卓越振動数に近い値であったため、地震波に敏感に反応したために被害が甚大であったことがわかる。一方、三陸南地震の4つの対象高架橋はいずれも固有振動数が4Hz前後であり、各入力地震波の卓越振動数が2Hz前後であったため、地震波に対する反応が鈍感であったため被害が小さかったといえる。被害の甚大であった第1野間高架橋R7、阪水高架橋R5に関しては、固有振動数の頻度が高く、固有振動数と地震波の卓越振動数がかなり近い値になっており、応答加速度をみても固有振動数に近い振動数が卓越して振動している。地震波の最大加速度と最大応答変位を見ても、三陸南地震に比べて、最大加速度が約2倍程度であることに対して最大応答変位は約3倍程度になっているところをみると地震波に対して過剰に反応していることがわかる。以上より共振していた可能性が高い。また、三陸南地震は高架橋の近傍で記録された実際に地震時にかかった地震波といえるものであるのに対して、兵庫県南部地震の入力地震波は推定値である。しかし、解析結果は両地震とも概ね実被害を再現できている。つまりこれらの結果から、推定入力地震波は信頼度が高いといえる。

7. まとめ

本研究では材料非線形性を考慮した解析を用い、鉄道高架橋の被害の検証と推定された地震波が被害分析においてどのような影響を及ぼすかを検証した。本解析を用いることで破壊形態については概ね再現できると思われる。また、被害の甚大な高架橋については共振の可能性があったことが確認でき、推定地震波の信頼性は高いことが確認できた。しかし、被災程度など詳細な点については問題が存在する。その問題点を解決していくことによって、より正確な地震被害分析を行うことができるであろう。

参考文献

[1]岡本知昭：コンクリート橋脚を持つ高架橋の地震による被害分析、名古屋工業大学大学院修士論文 2003

指導教官 岩本 政巳 助教授

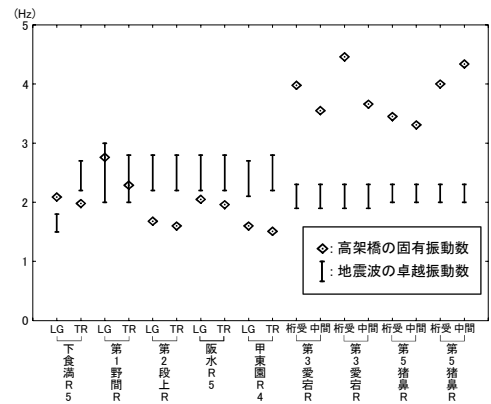


図-5 ウェーブレット変換による卓越振動数

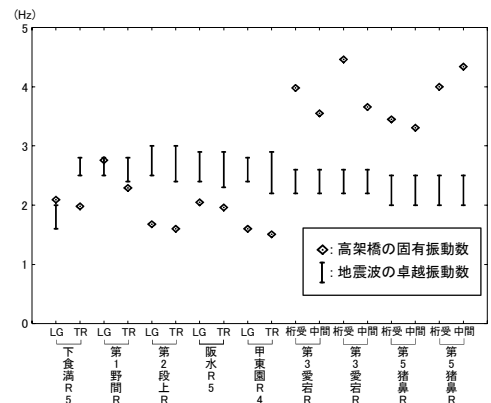


図-6 パワースペクトルによる卓越振動数

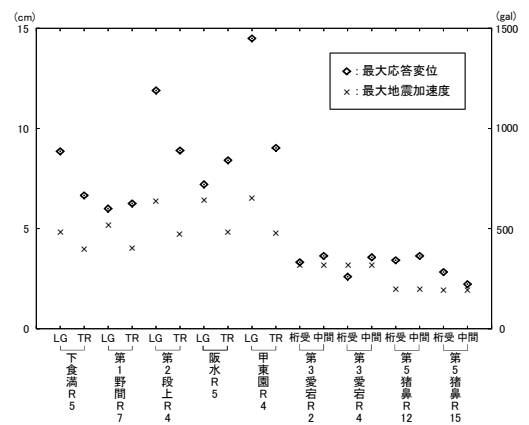


図-7 各高架橋の最大変位の比較