

論文 兵庫県南部地震で被災した鉄道高架橋の地震応答解析

太田 智久*1・土屋 智史*2・梅原 秀哲*3

要旨：経験的手法により個々に推定した地震動加速度波形を用いた3次元非線形動的解析により、兵庫県南部地震で被災した鉄筋コンクリート鉄道高架橋の被害分析を行った。その結果、高架橋の構造形式や高架橋高さが主に耐震性能に影響を与えることを確認した。また、2層ラーメン構造の破壊形態として、中間梁下部の橋脚でせん断破壊することを解析的に明らかにした。本研究で採用した手法は、現段階では課題があるものの、せん断破壊に関して、実被害よりも安全側の評価をすることを確認した。

キーワード：兵庫県南部地震，鉄道高架橋，地震応答解析，せん断破壊，耐震性能照査

1. はじめに

土木学会コンクリート標準示方書の改訂にあわせて、コンクリート構造物の耐震設計/照査には、時刻歴加速度波形による動的応答解析を基本とする方向で検討が進められている。特に重要構造物の場合、入力地震動加速度は、地域毎に活断層を同定し、構造物位置の地盤条件に基づいて作成することが望ましいと考えられる。

このような動向を踏まえ、本研究では、経験的手法により個々に推定した地震動加速度を用いた3次元非線形動的解析により、兵庫県南部地震で被災した鉄道高架橋(鉄筋コンクリートラーメン構造)の被害分析を行う。あわせて、本研究で採用している手法について評価する。

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。高架橋のモデル化は、橋脚や中間梁は線材要素、スラブは弾性立体要素で行った。本研究では、計算時間を短縮するために簡略したモデル化を行った。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¹⁾。解析対象は、3

径間連続ラーメン高架橋1ブロックとし、基礎構造物や地盤・隣接高架橋のモデル化は行わず、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。なお、高架橋の材料特性は、震災後の抜取り試験の値を参考に、できる限り実構造物に近い値を入力している。

応答計算では、初期入力した継続時間分を行った後、各時刻における変位履歴と橋脚に作用するせん断力が得られる。破壊判定は直接には行われないので、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、この値と算定式から得られるせん断耐力を時刻歴で比較することで、高架橋の地震時のせん断に対する安全性を評価する。耐力算定式を式(1)~(6)に示す。せん断耐力は、コンクリートの寄与分²⁾とせん断補強筋の寄与分の和より算定している。

$$V_u = V_c + V_s \tag{1}$$

$$V_c = 0.2f_c^{1/3}(0.75 + 1.4d/a)b_w d \beta_p \beta_n \beta_d \tag{2}$$

$$\beta_p = (100\rho)^{1/3} \leq 1.5 \tag{3}$$

$$\beta_n = 1 + 2M_o/M_u \leq 2 (N' \geq 0) \\ = 1 + 4M_o/M_u \geq 0 (N' \leq 0) \tag{4}$$

$$\beta_d = (1000/d)^{1/4} \leq 1.5 \tag{5}$$

$$V_s = A_w f_{wy} z/s \tag{6}$$

ここに、 V_u ；せん断耐力(N)、 V_c ；コンクリー

*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 (株)コムスエンジニアリング 取締役第2事業部長 工博 (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)

トのせん断耐力(N), V_s ; せん断補強筋によるせん断耐力(N), f_c ; コンクリート圧縮強度(N/mm²), d ; 断面有効高さ(mm), a ; せん断スパン(mm), b_w ; 部材腹部幅(mm), p ; 引張鉄筋比, M_u ; 曲げ耐力, M_o ; M_u に対する引張縁において, 軸方向力によって発生する応力を打ち消すのに必要な曲げモーメント, N' ; 軸圧縮力, A_w ; せん断補強筋 2 本分の断面積(mm²), f_{wy} ; せん断補強筋の降伏強度(N/mm²), z ; 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離($z=d/1.15$), s ; せん断補強筋間隔(mm)

3. 解析対象高架橋

本研究で解析対象とした高架橋の概要を表-1に示す。また, 図-1に構造図の例を示す。なお, 各橋脚を図-1のようにC1~C8と便宜

的に示す。

解析対象は, 山陽新幹線の鉄筋コンクリートラーメン高架橋で, 基本的に, 地震によりせん断破壊した高架橋とその高架橋に隣接するせん断破壊しなかった高架橋を選択した。これは, 隣接する高架橋同士の相違点が, 直接耐震性能に影響を与えたために, 実被害が異なると考え, 耐震性能に影響を与える要因を確認するためである。隣接する高架橋の相違点は表-1に示す通りである。

表-1の耐力比は, 橋脚のせん断と曲げの耐力比を示している。耐力比から, 高架橋の破壊形態を簡易的に推定することが可能となる。各高架橋の耐力比と実被害を比較すると, 1層ラーメン構造は, 耐力比と実被害がほぼ相関しているのに対し, 2層ラーメン構造は, 全ての高

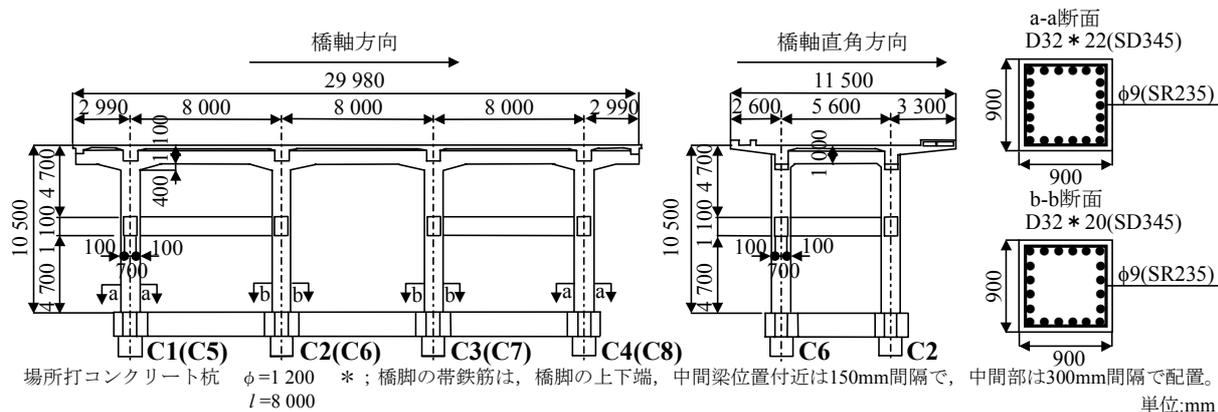
表-1 解析対象高架橋一覧

高架橋名	高架橋高さ(m)	構造形式(基礎形式)	実被害*1	耐力比*2	高架橋の相違点
SK	R4	11.6	2層(杭)	被害なし	構造形式(1層構造と2層構造) 高架橋高さ
	R10	10.0	1層(杭)	橋脚MC	
	R11	10.5	2層(杭)	中間梁上部橋脚SA	
SH	R12	8.5	1層(直接)	橋脚MC	上部工重量・高架橋高さ 橋脚断面
N1	R7	8.0		橋脚SA*3	
N2	R25	10.5	2層(直接)	被害なし	
TT	R11	12.9	2層/異径間(直接)	中間梁上部橋脚SA	
	R12	13.4	2層(直接)	橋脚MC	
HS	R4	11.4	2層(杭)	橋脚SB	高架橋高さ
	R5	11.1		中間梁下部橋脚SA	
KN	R1	8.7	1層(杭)	橋脚MC	高架橋高さ・橋脚断面
	R2	7.1	1層(杭)	橋脚SA	

*1; Sはせん断, Mは曲げによる被害。Aは破壊, Bは破損, Cは損傷。

*2; せん断と曲げの耐力比。この値が1.0より小さくなるとせん断破壊先行型と予想される。

*3; N1高架橋R7のせん断破壊した橋脚は, 8本中4本である。



場所打コンクリート杭 $\phi=1200$ *; 橋脚の帯鉄筋は, 橋脚の上下端, 中間梁位置付近は150mm間隔で, 中間部は300mm間隔で配置。単位:mm

図-1 SK高架橋R11構造図

架橋で耐力比が 1.0 を下回っており、せん断に対して危険であることは予想できるが、実被害を説明することは困難である。

4. 入力地震動加速度

入力地震動加速度は、既往の強震動記録と兵庫県南部地震の断層モデルに基づいて、高架橋地点毎に推定している。なお、隣接している高架橋には、同一の地震動加速度を入力する。

地震動加速度の推定手順は、始めに、高架橋地点と兵庫県南部地震の震源との位置関係から工学的基盤面の地震動加速度を得る。次に、水平 2 方向成分は、高架橋地点の地盤条件を考慮して地盤の地震応答解析を行い、地表面相当の地震動加速度を得る。これを入力地震動加速度とする。

本研究では、推定方法の異なる 2 種類の地震動加速度を使用し、解析結果と実被害を比較することで、推定された地震動加速度の精度を逆評価する。なお、2 種類の地震動加速度を便宜的に A 波・B 波と称する。

複数の地震動加速度を用いるのは、推定方法の異なる地震動加速度間で解析結果にどのような違いが生じるかを確認することと、1 種類の地震動加速度のみでは、高架橋の動的特性を全て明らかにすることができない可能性があると考えたためである。各高架橋地点で推定した地震動加速度の最大加速度を表-2 に示す。なお、本研究の被害分析は、主に高架橋のせん断破壊に対する安全性について行うため、入力する地震動加速度は主要動を含めた 15 秒間とする。

表-2 推定した地震動加速度の最大加速度

	A波 ^{3), 4)}			B波 ^{5), 6)}	
	LG	TR	UD	LG	TR
SK(R4)地点	-615	484	246	-273	-289
SK(R10)地点	-675	-494	247	-435	423
SH地点	-523	560	269	305	-299
N1地点	-483	604	273	-357	326
N2地点	-485	523	275	346	-321
TT地点	-544	707	285	380	-351
HS地点	-536	624	298	403	-392
KN地点	-631	827	304	-448	-455

* ; 単位は gal。表中の LG は橋軸，TR は橋軸直角，UD は上下方向を示している。

5. 解析結果および考察

5.1 2層ラーメン構造の解析例

2層ラーメン構造の解析例として SK 高架橋 R4 について述べる。SK 高架橋 R4 は、高架橋高さが 11.6m で、地震による被害が見られなかった高架橋である。

解析結果を図-2 に示す。図-2 は、中間梁下部の橋脚に作用するせん断力 S とせん断耐力 V の経時変化・せん断力の粒子軌跡であり、せん断破壊が最も早く生じた箇所の結果を示し

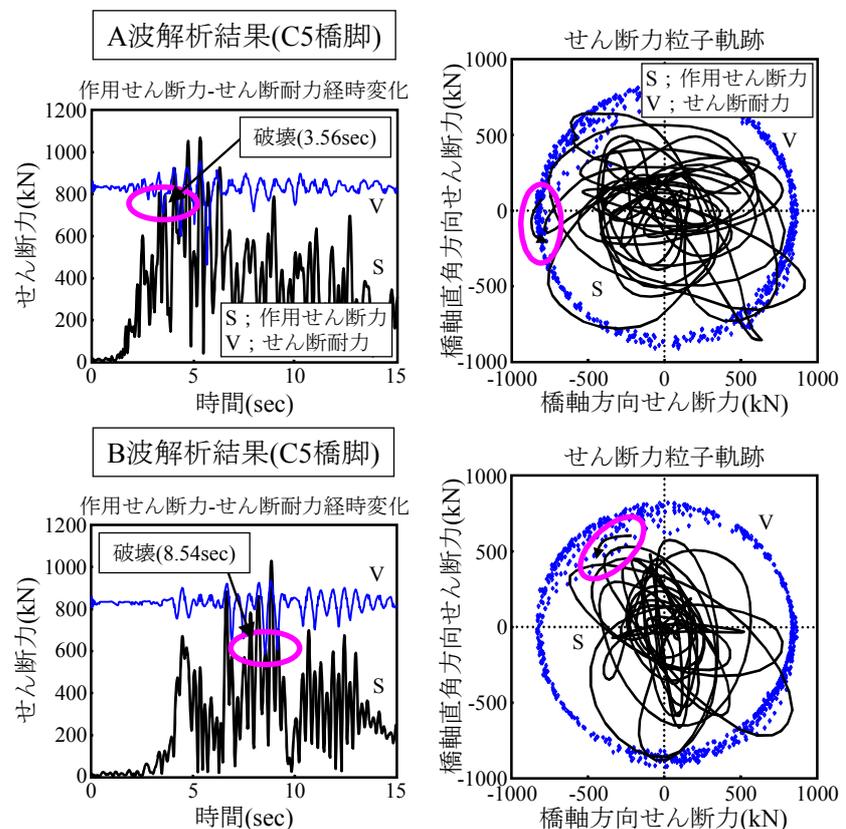


図-2 SK 高架橋 R4 解析結果

ている。作用せん断力がせん断耐力を初めて上回った時間を楕円で囲み、せん断力粒子軌跡より、橋脚の破壊方向の推定も可能となる。

A波・B波の解析結果を比較すると、作用せん断力の履歴は異なっているが、いずれの結果も中間梁下部の橋脚でせん断破壊している。図-2は、最も早くせん断破壊した箇所を示しているが、いずれの橋脚においてもほぼ同時に中間梁下部の橋脚でせん断破壊していることを確認している。この高架橋は、地震による被害は見られないので、せん断破壊に関して解析結果と実被害は一致していない。

不一致の要因として、SK 高架橋 R4 地点で推定した入力地震動加速度が過大であった可能性が考えられる。また、解析では、基礎構造物や地盤・隣接高架橋の影響を考慮せず、簡略化したモデルで解析を行っている。この高架橋は、杭基礎を有しており、実際は、基礎と地盤の相互作用の影響が無視できないと考えられる。基礎と地盤を考慮した解析結果と比較して、地盤と構造物を個別に解析する手法が妥当であるか検討する必要がある。また、隣接高架橋の影響により、高架橋の変形が拘束され、実際は、被害が見られなかった可能性も考えられる。隣接高架橋の影響についても、同様に検討を行う必要があると考えられる。

5.2 隣接高架橋の解析例

隣接高架橋の解析例として SK 高架橋 R10・R11 について述べる。SK 高架橋 R10 は、高架橋高さが 10.0m の 1 層ラーメン構造で、地震により曲げによる軽微な損傷を受けた高架橋である。一方、SK 高架橋 R11 は、高架橋高さが

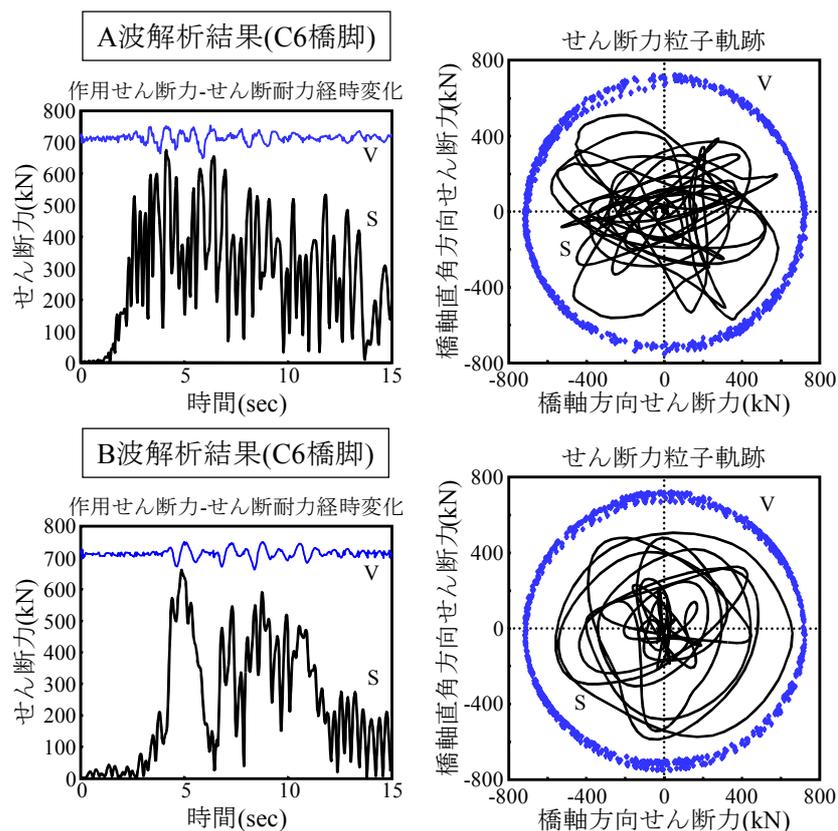


図-3 SK 高架橋 R10 解析結果

10.5m の 2 層ラーメン構造で、地震により中間梁上部の橋脚がせん断破壊している。ここでは、両高架橋間の相違点より耐震性能に影響を与える要因を確認するために同一の地震動加速度を入力する。

SK 高架橋 R10 の解析結果を図-3に、SK 高架橋 R11 の解析結果を図-4に示す。

SK 高架橋 R10 の解析結果は、A 波・B 波いずれの結果も、作用せん断力がせん断耐力を上回ることなくせん断に対して安全であることが分かる。実被害においても、せん断による損傷を受けていないことから、せん断破壊に関して、解析結果と実被害は一致している。

SK 高架橋 R11 の解析結果は、地震波形毎に挙動は異なるが、中間梁下部の橋脚がせん断破壊する結果になっている。実被害では、中間梁上部の橋脚のせん断破壊となっており、解析結果と実被害は、せん断破壊に関しては一致しているが、破壊箇所は一致していない。破壊箇所が一致しなかった主な要因として、解析では、材料強度のばらつきを考慮していないことが考

えられる。そのため、実被害では中間梁上部の橋脚でせん破壊した可能性が考えられる。また、簡略したモデル化の影響も考えられる。

SK 高架橋 R10・R11 の解析結果を比較すると、同様の地震動加速度を入力しているにもかかわらず、作用せん断力の値が異なっている。これは、構造形式が異なるためであり、SK 高架橋 R11 はSK 高架橋 R10 と比較して、中間梁の存在により、せん断耐力の値は大きくなるが、それ以上に大きなせん断力が作用し、せん断破壊に至ったと考えられる。このことから、SK

高架橋 R10・R11 間の実被害の違いは、構造形式の違いが主因であることが確認できる。

また、SK 高架橋 R10 の解析結果は、せん断破壊に関して実被害と一致し、SK 高架橋 R11 の解析結果も破壊箇所は異なるが、せん断破壊に関して実被害と一致しているので、SK 高架橋 R10・R11 地点で推定した地震動加速度は、せん断破壊に関して、妥当であったと思われる。

5.3 その他の高架橋

表-3に、解析結果についてまとめたものを

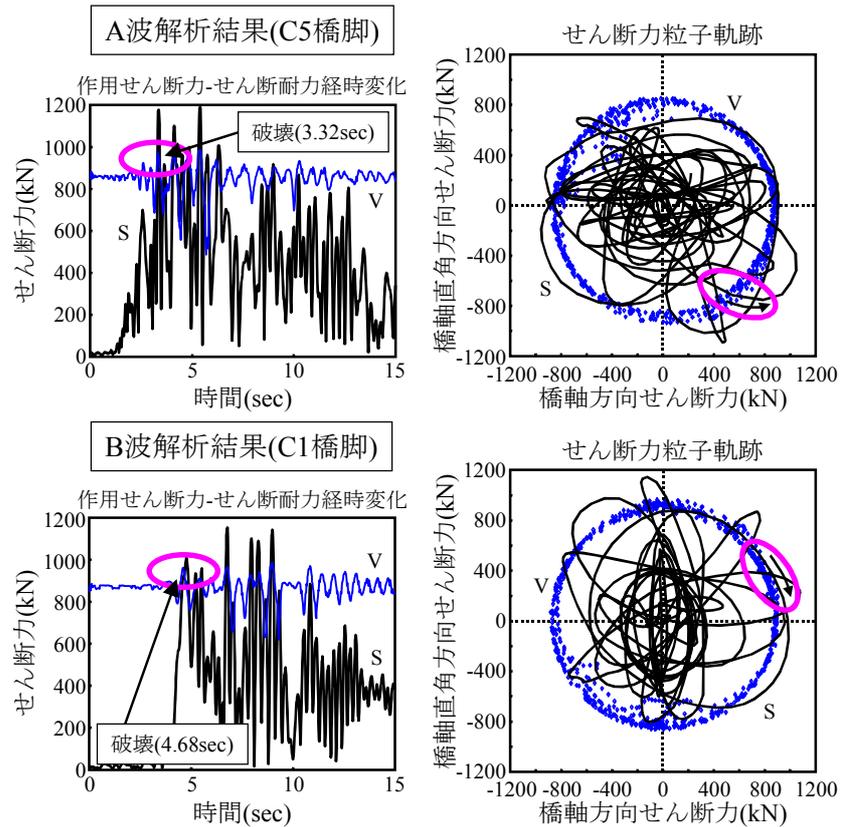


図-4 SK 高架橋 R11 解析結果

実被害・耐力比、そして、2層構造のせん断破壊時における中間梁上部、下部橋脚に作用するせん断力の差をあわせて示す。表-3より、実被害・耐力比・解析結果を比較すると、実被害より耐力比が、そして、耐力比より解析結果の方がせん断破壊に関して安全側の評価をしていることが分かる。このことから、推定した地震動加速度は全体的に過大であったと思われる。ただし、本解析手法におけるモデル化と地震動加速度の入力方法も関連する。また、推定方法

表-3 解析結果一覧

高架橋名	実被害	耐力比	解析結果 (A波, B波)	破壊時のSの差(上部-下部)(kN)		
				A波	B波	
SK	R4	被害なし	0.66	中間梁下部橋脚の破壊	3	72
	R10	橋脚MC	1.16	破壊していない		
	R11	中間梁上部橋脚SA	0.60	中間梁下部橋脚の破壊	-256	-270
SH	R12	橋脚MC	1.02	破壊		
N1	R7	橋脚SA	0.86	破壊		
N2	R25	被害なし	0.63	中間梁下部橋脚の破壊	-305	-315
TT	R11	中間梁上部橋脚SA	0.56	中間梁下部橋脚の破壊	9	-440
	R12	橋脚MC	0.67	中間梁下部橋脚の破壊	179	-166
HS	R4	橋脚SB	0.61	中間梁下部橋脚の破壊	-342	-388
	R5	中間梁下部橋脚SA	0.60	中間梁下部橋脚の破壊	-338	-338
KN	R1	橋脚MC	1.01	破壊		
	R2	橋脚SA	0.92	破壊		

の異なる地震動加速度間の結果は、せん断破壊に至るまでの挙動は異なるが、せん断破壊に関しては、解析結果に違いは生じていない。

1 層ラーメン構造の解析結果は、SK 高架橋 R10 を除いて、いずれの高架橋もせん断破壊している。解析結果と実被害を比較すると、SH 高架橋 R12・KN 高架橋 R1 は、解析結果と実被害はせん断破壊に関して一致していない。N1 高架橋 R7 の解析結果は、全ての橋脚でせん断破壊しているが、実被害では全ての橋脚でせん断破壊していない。したがって、せん断破壊に関して一致しているが、破壊箇所は一致していない。KN 高架橋 R2 は、せん断破壊に関して解析結果と実被害は一致している。

2 層ラーメン構造の解析結果は、全ての高架橋で中間梁下部の橋脚がせん断破壊している。今回の解析からは、2 層ラーメン構造の地震時における破壊形態として、中間梁下部の橋脚でせん断破壊することが明らかにされた。解析結果と実被害を比較すると、N2 高架橋 R25・TT 高架橋 R12 は、せん断破壊に関して解析結果と実被害は一致していない。TT 高架橋 R11 は、せん断破壊に関して一致しているが、破壊箇所は一致していない。HS 高架橋 R4 は、せん断破壊に関して危険である点については、解析結果と実被害は一致している。HS 高架橋 R5 は、せん断破壊に関して解析結果と実被害は一致している。

解析結果と実被害が一致しなかった高架橋は、入力地震動加速度が過大であった可能性や材料強度のばらつきを考慮していないこと、簡略したモデル化が不一致の要因として考えられる。

隣接高架橋間の解析結果は、SK 高架橋 R10・R11 の結果を除き、高架橋高さの高い高架橋が低い高架橋と比較して、せん断破壊時の橋脚天端の変形量が大きく、破壊する時間も遅くなることを確認している。この結果から、主に高架橋高さによって実被害が異なったものと考えられ、高架橋高さが、耐震性能に影響を与える要因であることが確認できる。

6. まとめ

経験的手法により個々に推定した地震動加速度波形を用いた 3 次元非線形動的解析により、兵庫県南部地震で被災した鉄筋コンクリート鉄道高架橋の被害分析を行った。その結果、高架橋の構造形式や高架橋高さが主に耐震性能に影響を与えることを確認した。また、推定方法の異なる 2 種類の地震動加速度を用いたが、いずれの解析結果もせん断破壊に関して違いは見られず、実被害と比較して全体的に過大であると思われた。

本研究で採用した手法は、現段階では課題があるものの、せん断破壊に関して、実被害よりも安全側の評価をすることを確認した。

参考文献

- 1) Satoshi, T 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
- 2) 二羽淳一郎ほか：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No372/V-5，pp.167-176，1986.8
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 阪神淡路大震災被害分析小委員会：阪神淡路大震災の被害分析に基づくコンクリート構造物の耐震性能照査方法の検証－検討課題と将来像－，土木学会，pp.19-29，2000.5
- 6) Schnabel, P.B. et al. : SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered site, EERC, 72-12, 1972.