

1. はじめに

近年発生が危惧されている東海地震、東南海地震およびそれらが連動する地震では、想定マグニチュード 8.0 と非常に大きな地震であるとともに、想定震源域の広さや断層規模の大きさから地震動継続時間が非常に長く、現在用いられている計測震度による被害予測を上回る被害が出る可能性がある。そこで、本研究では、既往の研究で、RC 構造物に関する結果を元に算出された、RC 構造物がどのような地震波でどの程度損傷してしまうのかを示す損傷指標 D の値と、塑性率などの他の損傷指標と比較・検討し、損傷指標 D の値の妥当性を模索するため、1995 年に発生した阪神・淡路大地震によって実際に被害を受けた 5 つの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、固有値解析、静的解析、動的解析を行い損傷指標 D の値を求め、実際の被災程度と比較した。

2. 解析対象とする高架橋とモデル化

阪神・淡路大地震により実際に被害を受けた一層のラーメン高架橋（第一野間 R7、甲東園 R4）と 2 層のラーメン高架橋（下食満 R5、第二段上 R4、阪水 R5）の 5 橋をそれぞれ橋軸方向と橋軸直角方向とに分けた 10 ケースを解析対象とした。各高架橋の概要を表 1 に、構造物形式の一例として下食満 R5 を図 1 に示す。5 橋脚は橋軸方向、橋軸直角方向ともに図 2 に示すように全橋の 1/4 をモデル化し、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。なお、外側の柱（図中の P1、P2）と内側の柱（P3、P4）とでは甲東園 R4 を除きその断面構成に差があるが、そこで、橋軸直角方向の解析においては、外側、内側それぞれの断面特性による解析を行うこととした。解析モデルの例として下食満 R5 を図 3 に示す。柱、はりともに材料非線形性を考慮した非弾性要素としてモデル化した。ただし、橋脚とはりの接合部分周辺は剛体要素（図中の太線で示す要素）としている。要素長は断面高さを基本とした。基礎工は考慮していない。なお、地震応答解析にはニューマーク β 法を用いた。

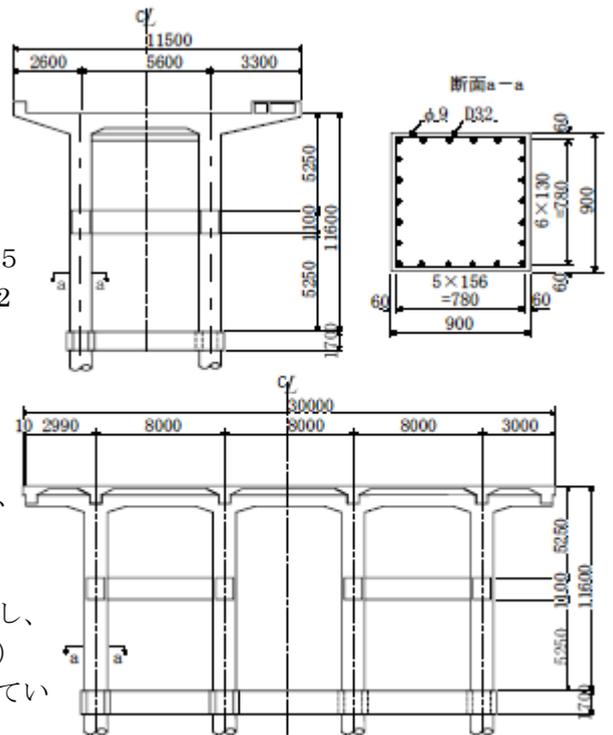


図-1 構造形式(下食満 R5)

橋軸直角モデル
外側

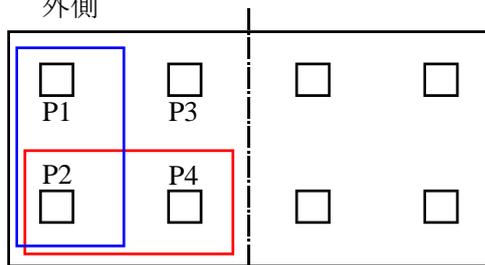


図-2 鉄道高架橋のモデル化

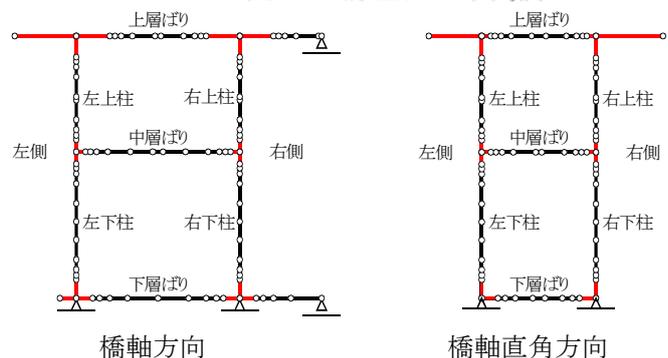


図-3 モデル化例 (下食満 R5)

3. 入力地震波

本研究では入力地震波として、実際の阪神・淡路大地震の観測結果から推定された、それぞれの橋脚の地点での地震波を使用した。

4. Park and Ang の損傷指標 D¹⁾

本研究では Park and Ang の損傷指標 D を用いた。D は構造物の損傷を代表とする塑性率と履歴吸収エネルギー

表-1 各高架橋の概要

高架橋名	層数	高さ	基礎形式
下食満高架橋 R5	2	11.6m	杭基礎
第一野間高架橋 R7	1	8.0m	直接基礎
第二段上高架橋 R4	2	13.2m	杭基礎
阪水高架橋 R5	2	11.1m	杭基礎
甲東園高架橋 R4	1	10.0m	杭基礎

ギーの線形結合として定義されており、次式によって与えられる。

$$D = \frac{\delta_M}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} \int dE \dots \textcircled{1} \quad \text{ここで、} \delta_M : \text{最大変位、} \delta_u : \text{終局変位、} \int dE : \text{履歴吸収エネルギー}$$

$$Q_y : \text{降伏強度、} \beta : \text{正の係数} 0.15 (\text{参考文献} 2)$$

5. 解析結果

解析結果と実際の被災程度、被災形態を表-2に示す。表-2より、曲げ損傷の被害を受けた、第二段上 R4 と甲東園 R4 について比較すると、被災程度は中、小とあるのに対して損傷指標Dの値の差はわずかとなった、しかし、塑性率を見ると、被災程度と対応していることが読み取れる。続いて、せん断損傷の被害を受けた、下食満 R5、第一野間 R7、阪水 R5 について比較する。二層高架橋橋である下食満 R5 と阪水 R5 は被災程度に対応するように損傷指標Dの値も差が出たが、第一野間 R7 は被災程度大であるが、被災程度

表-2 解析結果

高架橋名	方向	塑性率	$\frac{\delta_M}{\delta_u}$	$\frac{\beta}{Q_y \delta_u} \int dE$	損傷指標 D	被災形態と程度
下食満 R5	橋軸	1.732	1.000	0.536	1.536	せん断小
	橋軸直角	1.105	0.656	0.368	1.024	
第一野間 R7	橋軸	1.356	0.718	0.470	1.188	せん断大
	橋軸直角	1.396	0.713	0.408	1.121	
第二段上 R4	橋軸	0.959	0.412	0.133	0.545	曲げ小
	橋軸直角	1.587	0.952	0.403	1.355	
阪水 R5	橋軸	1.474	1.024	0.405	1.429	せん断大
	橋軸直角	1.880	1.306	0.582	1.888	
甲東園 R4	橋軸	2.032	0.881	0.358	1.239	曲げ中
	橋軸直角	1.435	0.600	0.159	0.759	

小の下食満 R5 の損傷指標 D の値より小さくなった。これは、第一野間 R7 は一層高架橋であり高さも高いことなどから、本来なら曲げ損傷を受けやすいけれど、せん断損傷した特殊なケースであるからだと考えられる。また、全体の特徴として、①式の第1項の値と第2項の値の比は大体2:1になっていることが読み取れる。

6. せん断損傷に関する検討

表-3 せん断損傷に関する数値

本解析ではせん断損傷を直接評価できない。そこで最大せん断力、せん断耐力、最大せん断力とせん断耐力の比、の値を表-3に示す。まず、(最大せん断力/耐力)の値が1を上回らなければ解析的にはせん断損傷は起きない。表-3から、甲東園 R4 はせん断損傷に至っていないことがわかる。また、表-2では被災程度と損傷指標Dの値が対応していなかった第一野間 R7 を含む3つのせん断損傷した高架橋(下食満 R5、第一野間 R7、阪水 R5)について、せん断耐力に対する最大せん断力(最大せん断力/せん断耐力)の値が大きなものほど被災程度も大きくなっていることから、(最大せん断力/せん断耐力)の値は被災程度と対応していることが読み取れた。

高架橋名	方向	最大せん断力	せん断耐力	最大せん断力/せん断耐力
下食満 R5	橋軸	848.000	620.290	1.367
	橋軸直角	828.444	656.740	1.261
第一野間 R7	橋軸	740.000	525.750	1.408
	橋軸直角	697.175	510.630	1.365
第二段上 R4	橋軸	708.000	628.560	1.126
	橋軸直角	740.444	632.670	1.170
阪水 R5	橋軸	893.333	627.280	1.424
	橋軸直角	1031.111	627.280	1.644
甲東園 R4	橋軸	569.778	655.490	0.869
	橋軸直角	552.444	628.190	0.879

7. まとめ

曲げ損傷した高架橋に関しては、必ずしも損傷指標Dの値と被災程度は一致しなかった。しかし、塑性率と被災程度が対応していることは読み取れた。また、せん断損傷したものに関しては、下食満 R5 と阪水 R5 の損傷指標Dの値は被災程度と一致したが、第一野間 R7 は被災程度のわりに損傷指標Dの値は小さくなった。しかし、(最大せん断力/せん断耐力)の値は3つの高架橋全て、被災程度と対応していることが読み取れた。今後の課題としては、より多くのケースの RC 構造物の損傷指標Dを求め、比較、検討することで、損傷指標Dの値の妥当性をより正確に確かめることが出来ると考えられる。

参考文献：1) Park, Y.-J, and Ang, A.H.-S. : Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 4, pp. 722-739, 1985. 2) Y. Yamada et al : Random Response Analysis of A Nonlinear Soil-Suspension Bridge Pier, Earthq. Eng. Struct. Dyn., Vol. 7, pp. 31-47, 1979 3) 土木学会 コンクリート技術シリーズ 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—解析手法の適用と比較—