

I - B 192

RC 単柱の残留傾斜に着目した 1995 年兵庫県南部地震における阪神高速神戸線の被害分析

東京大学工学系研究科 学生員 阿部哲子 フェロー 藤野陽三 正会員 阿部雅人

1. まえがき 1995 年兵庫県南部地震により、阪神高速神戸線の高架橋にも甚大な被害が発生した。しかしながら、すべての高架橋の被害が大きいわけではなく、橋脚に関して言えば甚大な損傷を受けたものに隣接していながら外観上はほとんど無損傷にとどまったものも多い。著者らは、この原因を解明する鍵として橋脚の残留傾斜に着目し、西宮－摩耶区間（橋脚番号 P1～P350）における RC 単柱の被害レベルを外観上の損傷と残留傾斜の両指標で評価した¹⁾。その結果、P34 以東は概して被害が小さく P35 以西は概して被害が大きいという傾向が得られている。しかし、外観上の損傷が軽微な橋脚においてなぜ大きな残留傾斜が発生したのか、そのメカニズムについては依然として疑問であり、本論ではこの問題に着目した分析を行った。

2. 外観上の損傷度が軽微でありながら大きな残留傾斜の発生した橋脚 表 1 に、P1～P350 において外観から判断された損傷度は軽微（C1 以下）でありながら大きな残留傾斜（0.5 度以上）が発生した RC 単柱（全 31 基）の損傷度、残留傾斜、偏心量、および基礎の損傷度を示す。ここで、橋脚の損傷度は復旧時における詳細調査に基づいた判定結果であり、C1 は主鉄筋が露出しているがはらみだしはしないもの、C2 はひびわれのみのものを表す²⁾。文献 3 では、残留傾斜と偏心量との関係が示唆されているが、表より偏心していなくても残留傾斜の大きな橋脚が多くあり、残留傾斜を大きくする要因は偏心だけではないことがわかる。また、基礎の損傷度は 1mm 以上のクラック幅の累積値を示しており、基礎の損傷は全般的に軽微と言える。

3. 動的解析による残留傾斜の再現 本節では、単径間のみを取り出した橋脚の動的応答解析により残留傾斜が再現可能か否かを検討した。基礎の損傷は全般的に小さいこと（表 1）、また、地盤－基礎系の応答解析では橋脚部と同レベルの精度を期待するのが困難なことから、ここでは橋脚部のみの塑性変形でどの程度の残留傾斜が発生し得るのかを明らかにするというアプローチをとった。

FEM 解析による RC 橋脚の応答再現性 まず、はじめに解析ツールの精度を確認するため、振動台実験⁴⁾の解析による再現性を検討した。この実験では、日本海中部地震時の八郎潟干拓堤防上で観測された地震波をベースに時間軸を 1/2、大きさを 2, 3, 4 倍と 3 通り変化させたものを RC 橋脚に入力して応答を計測している（それぞれ実験 A, B, C）。解析には、東京大学コンクリート研究室で開発された解析ツール COM3 を用いた。図 1 に実験 A, B に対する測定結果と解析の応答変位比較を示す。実験 C は、主鉄筋の座屈が発生しており、COM3 による解析の適用範囲外であるためここでは対象外とした。解析における c 値（図参照）とは、コンクリートと鉄筋の付着の強さを表すパラメータであり、異形鉄筋の場合には 0.4 とするのが妥当とされている（付着が存在しない場合は $c=2.0$ ）⁵⁾。実験 A に関しては、 $c=0.4$ とした解析により測定値をかなりの精度で再現できている。一方、実験 B では、 $c=0.4$ とした解析は残留変位を小さめに評価してしまうことがわかった。そこで、 $c=1.5$ とし付着を弱めた解析を

表 1 外観上の損傷は軽微でありながら残留傾斜の大きかった橋脚

Pier No.	橋脚			基礎
	損傷度	残留傾斜(°)	偏心(m)	
		Long.	Trans.	損傷度
37	C1	0.3	0.51	0.91
42	C2	0.64	0.2	0.50
50	C1	-0.87	0.48	-1.05
51	C1	-1.12	-0.19	-1.22
61	C2	-0.47	0.73	2.70
62	C1	-0.23	0.76	2.46
72	C2	0.38	-0.5	-1.93
77	C1	-0.63	0.53	0.00
89	C1	-1.05	0.92	-0.40
92	C2	-0.69	0.48	0.00
93	C1	-0.5	0.34	0.00
94	C1	-0.57	0.63	0.00
95	C2	-0.52	0.29	0.00
104	C2	0.55	0.29	0.60
144	C1	-0.76	0.33	0.00
152	C1	-0.57	0.89	0.00
166	C1	-0.22	0.72	0.00
194	C2	0.5	-0.1	0.00
217	C1	-0.15	0.67	0.30
225	C1	-0.63	0.29	0.15
231	C1	-0.63	-0.13	-0.40
246	C1	-0.5	0.1	0.00
260	C1	-0.5	-0.1	-0.09
274	C1	-0.61	-0.19	0.00
276	C1	-0.53	0.11	0.00
278	C1	-0.88	0.15	0.00
280	C1	-0.19	0.53	0.00
294	C1	-0.23	1.07	0.00
295	C1	-0.61	-0.76	0.00
303	C1	-0.53	1.84	0.00

キーワード：兵庫県南部地震、阪神高速道路 3 号神戸線、RC 単柱、せん断曲げ耐力比、残留傾斜

連絡先：〒113-8656 文京区本郷 7-3-1, tel:03-3812-2111（内 6099）、fax:03-5689-7292）

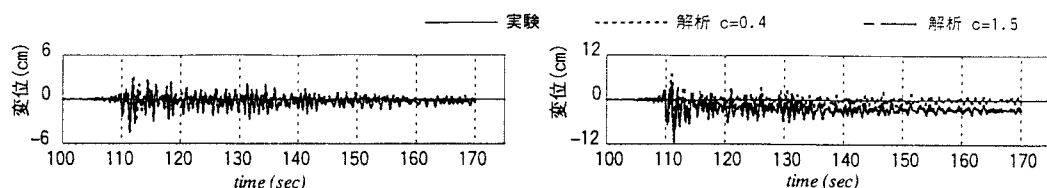


図1 振動台実験の再現

行ったところ実験結果と残留変位がほぼ一致した。実験 B の供試体はコンクリートと鉄筋の付着があまかった可能性も考えられる。以上から、COM3 は RC 橋脚の動的応答を残留変位も含めてかなりの精度で追跡可能であるが、 c 値の妥当性については検討の余地があり、以後の解析でも c 値を変化させてその影響について確認することとする。

実橋脚を対象とした解析 外観上の損傷度が軽微でありながら大きな

残留傾斜の発生した実橋脚として、ここでは P92 を対象として解析を行った。P92 は、支承の損傷が軽微なこと、橋脚の損傷度が C2 (ひびわれのみ) であり COM3 での追跡が可能であることから対象として選んだ。図 2 に解析モデルを示す。入力波には P92 付近における推定地震波⁶⁾ (最大加速度: NS-417gal, EW-432gal) を路線の橋軸・橋軸直角方向に分解したものをを用い、2 方向同時入力とした。図 3 に解析結果を示す。解析は $c=0.4, 1.5, 2.0$ の 3 通り行ったが、実橋脚では付着の影響領域が全断面に対して小さいため、応答に大きな違いは見られない。実際に発生した残留傾斜は橋軸方向に -0.69 度、橋軸直角方向に 0.48 度であり、橋脚天端変位に換算するとそれぞれ -13.1cm , 9.1cm であるが、解析による残留変位はそれぞれ -0.6cm , 1.1cm であった。引張りひずみの最大値は約 0.028 であり、この時の主鉄筋引き抜け量を鳥式⁵⁾により算定して基部の回転角を求めると約 $28/100000$ 、橋脚天端変位にして 3.1cm である。よって、引き抜け量を解析の残留変位に単純に足したとしても実際に発生した残留変位よりかなり小さな値にしかならない。P92 の残留傾斜は単径間のみを取り出した橋脚の解析では再現することができなかった。

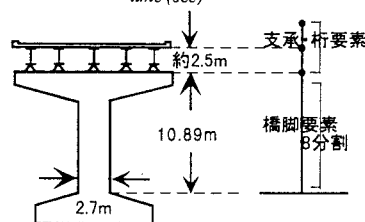


図2 解析モデル

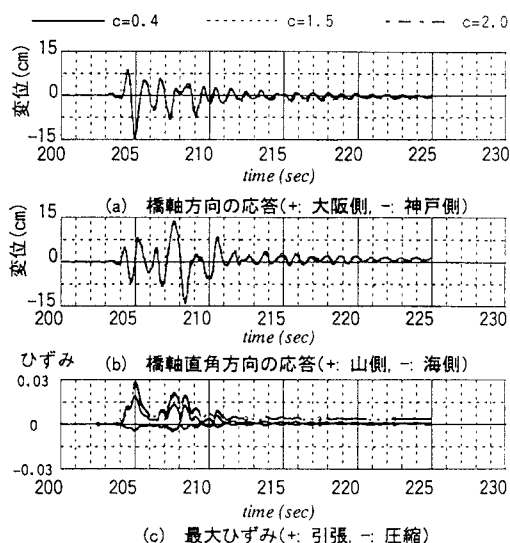


図3 解析結果

4. おわりに 単径間を取り出した橋脚の応答解析により RC 単柱の残留傾斜を再現することを検討した。しかし、解析では実際に発生したような大きな残留傾斜は再現できず、今後は、他径間の影響を考慮するとともに、基礎-地盤系の変形についても検討していく必要があると考えられる。

謝辞 阪神高速道路公団の林、北沢、幸左氏他に高架橋被害についてご教示いただきました。また、東京大学の岡村、前川岡教授にはコンクリート工学の専門的見地から有益なアドバイスを賜り、COM3 を提供いただきました。東京電力の原田氏には推定波を作成いただきました。記して謝意を表します。

参考文献 1) 阿部他: 1995 年兵庫県南部地震による阪神高速高架橋の被害と 2,3 の分析, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.181-199, 1999.1. 2) 幸左他: RC 単柱式橋脚のマクロ的損傷分析, 土木学会論文集, No.592/V-39, pp.73-82, 1998.5. 3) 林他: RC 橋脚の残留変形に関する検討, コンクリート系構造物の耐震技術に関するシンポジウム論文報告集, 日本コンクリート工学協会, pp.69-76, 1997.4. 4) 川島他: 土木研究所報告第 190 号, 1993.9. 5) 岡村他: 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) 安中他: 気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会・地震工学委員会, pp161-164, 1997.7.