

1995年兵庫県南部地震による 阪神高速高架橋の被害分析

阿部哲子¹・藤野陽三²・阿部雅人³

¹ 学生員 工修 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

² フェロー Ph.D. 東京大学教授 同上

³ 正会員 Ph.D. 東京大学助教授 同上

1995年兵庫県南部地震により被災した阪神高速神戸線を対象とし、RC単柱における残留傾斜に着目した分析を行った。RC単柱の残留傾斜は、西方で概して小さいのに対し、東方（P50～P300のあたり）で連続的に大きくなっている。東方と西方とでRC単柱の構造特性に大きな違いはなく、傾斜量の差は地盤条件あるいは地震動特性の差によってもたらされた可能性が高いことを示した。また、外観上の損傷は軽微でありながら大きな残留傾斜の発生した橋脚を対象に、動的応答解析による残留傾斜の再現を目指した。しかし、単径間の橋脚のみを取り出した解析では再現することができず、隣接橋脚の影響を考慮することおよび入力地震波の再検討、また地盤-基礎の変形についても検討する必要があることが示唆された。

Key Words: 1995 Kobe Earthquake, Hanshin Expressway, elevated bridges, RC single piers, residual inclination

1. はじめに

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・神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傾向が得られている。

しかし、橋脚に残留傾斜をもたらした要因、特に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については明らかでない。本論ではこの問題の解明を目的とし、以下、RC単柱の残留傾斜に着目した分析を行った。

2. RC単柱の残留傾斜

図1に、阪神高速神戸線の西宮-月見山間（橋脚番号・神P1～P718）において発生した残留傾斜角をRC単柱について示す。図は、RC単柱のデータのみを取り出して示し

ており、データが抜けているところの大部分は、RC単柱以外の橋脚形式に対応する。また、RC単柱でも、損傷が大きく測定が危険などの理由により、計測されていないものに関してはプロットが抜けている。

図を見ると、傾斜量は西方で概して小さいのに対し、東方（P50～P300のあたり）で連続的に大きくなっていることが注目される。西方では、東方に比べて段落としのある橋脚の割合が高いという違いがあるが、残留傾斜が小さいという特徴は段落としの有無にはよっていない。

図2には、橋脚の偏心（左右の張り出し長の差/2）と橋軸直角方向の残留傾斜の関係を示す。図より、偏心が大きいものは概して残留傾斜が大きい傾向にあることがわかる。しかし、偏心が小さくても残留傾斜の大きなものも多くあり、東方における大きな残留傾斜をもたらした要因は偏心だけでは説明できない。

東方と西方とで、橋脚高・スパン等の構造特性に大きな違いは見られず、東方と西方における残留傾斜量の差は、地震動特性あるいは地盤条件の差によっている可能性が高いと考えられる。

また、図2を見ると、偏心量が同じでも、山側(+)へ偏心しているものは海側(-)へ偏心しているものに比べて残留傾斜量の大きいものが多い。地震動が山側への傾斜を大きくさせる特性を有していたことが推測される。

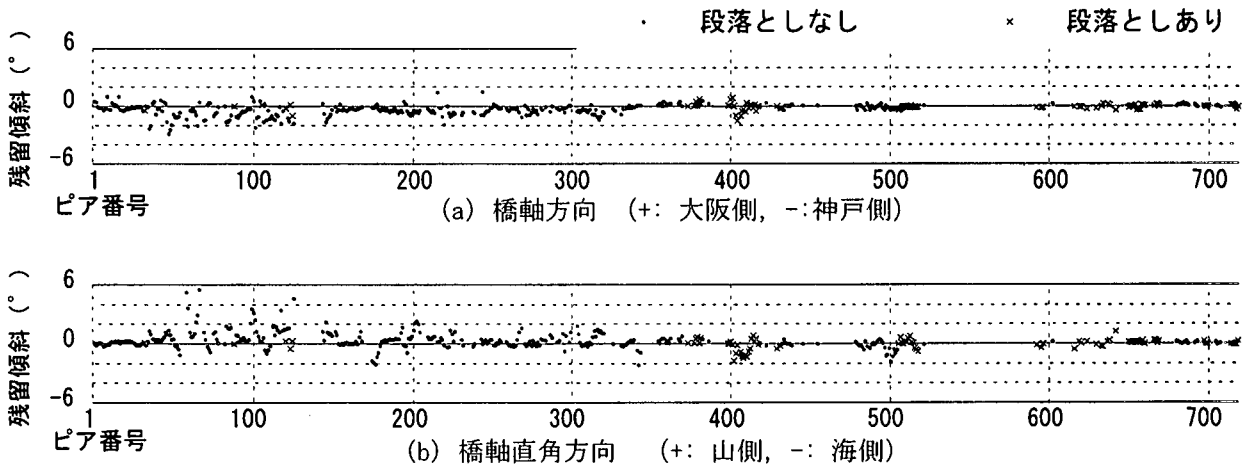


図1 RC単柱の残留傾斜

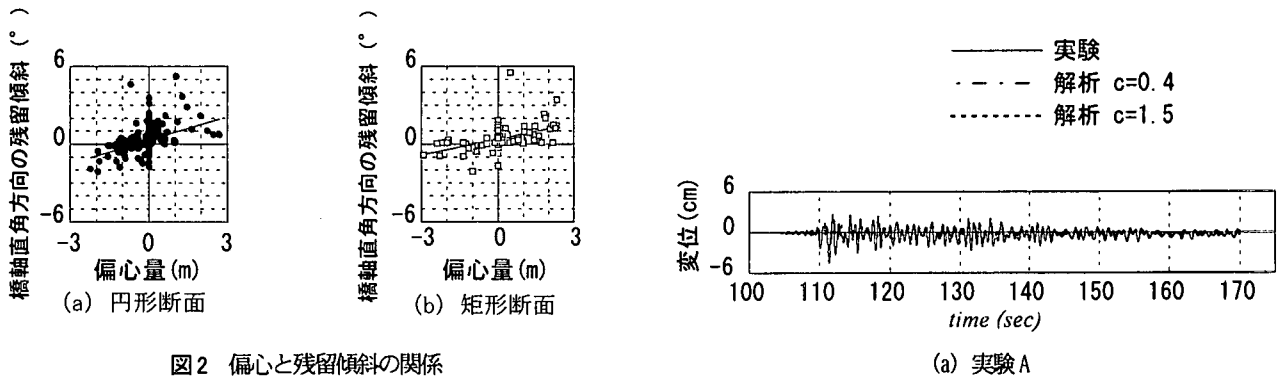


図2 偏心と残留傾斜の関係

3. 動的解析による残留傾斜の再現

本章では、外観上の損傷は軽微でありながら大きな残留傾斜の発生した橋脚を対象に動的応答解析を行う。

橋脚部に残留傾斜をもたらす要因としては、橋脚自体の塑性変形、あるいは基礎-地盤系の塑性変形が考えられるが、ここでは、橋脚の塑性変形だけで説明できるかという観点から検討を行った。

(1) 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3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

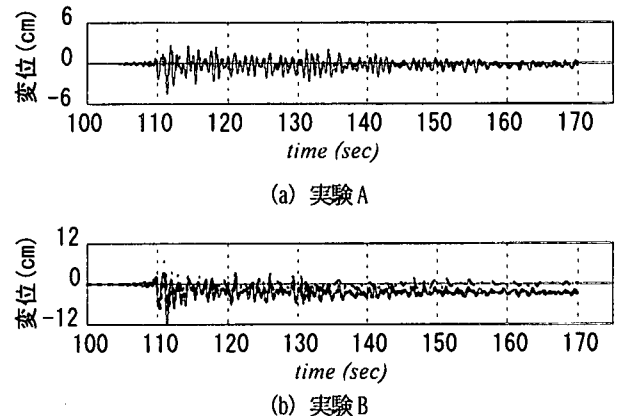


図3 振動台実験の解析による再現

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、 $c=1.5$ として付着を弱めた解析を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。

(2) 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 を対象とした。P92 は、支承の損傷が軽微であり支承の損傷による入力変化を考慮する必要がないこと、橋脚の損傷度が C2 (主鉄筋の露出なし)³⁾ であり COM3 での追跡が可能であること、

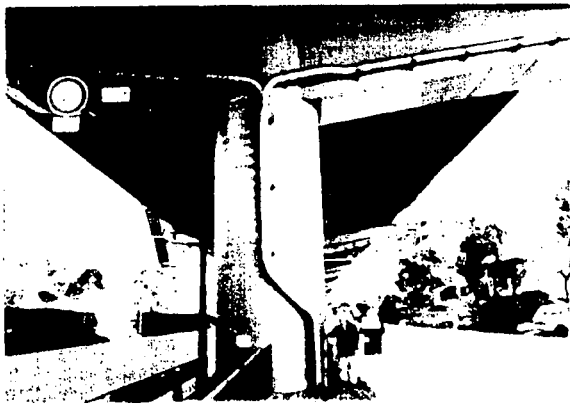


図4 P92 橋脚の地上部被害状況

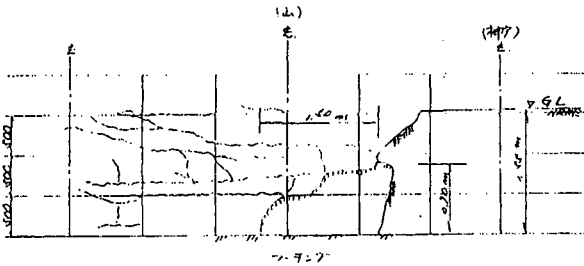


図5 P92 橋脚の地中被害状況

曲げ耐力がせん断耐力に比べて十分大きく曲げ系の損傷が支配的と考えられること等から対象として選んだ。

地上部の写真(図4)で見る限り外観上の損傷は全くみられない。地中部橋脚にコンクリートのひびわれと剥離が見られるが主鉄筋は露出していない(図5)。図5を見ると、ひび割れは主に大阪側と海側に入っており、神戸側および山側への片振りであったことが推測される。実際に発生した残留傾斜は、橋軸方向に -0.69° (神戸側)、橋軸直角方向に 0.48° (山側)であり、ひび割れ状況から推測される方向と一致している。図6に構造寸法と解析モデルを示す。この橋脚は偏心がなく、図のように鉛直梁要素でモデル化し、橋脚の張りだし部、および支承・桁については質量が等価となるように要素の密度を設定した。図7に静的解析により求めた変位-復元力関係を示す。ここでは、橋脚点端変位制御で求めた場合と、プッシュオーバー解析(各節点に質量に比例した荷重を漸増荷重した場合)の2通りの計算方法を用いた。図には、基部断面のモーメントがH2道路示方書の方法にしたがって求めた曲げ耐力に到達するときのせん断力値も付記している。両解析方法において、到達する最大耐力に大きな違いはないが、基部断面のモーメントが曲げ耐力に達する時の変位は大きく異なることが注目される。なお、対象橋脚は円形断面であり、偏心がなく、橋脚方向と橋軸直角方向の変位-復元力関係は同一である。 0.69° 、 0.48° の傾斜は橋脚点端変位に換算するとそれぞれ13.1cm、9.1cmであり、最大応答時には基部断面に

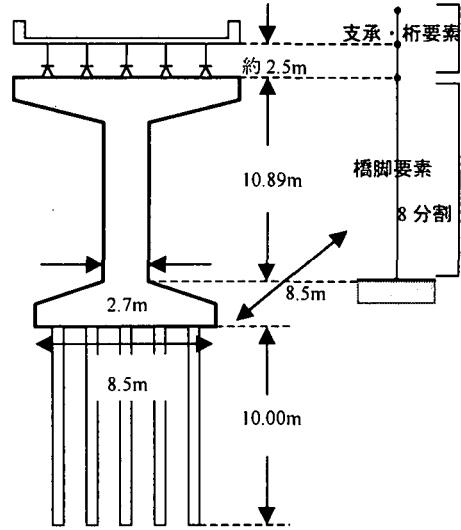


図6 P92 橋脚の構造寸法と解析モデル

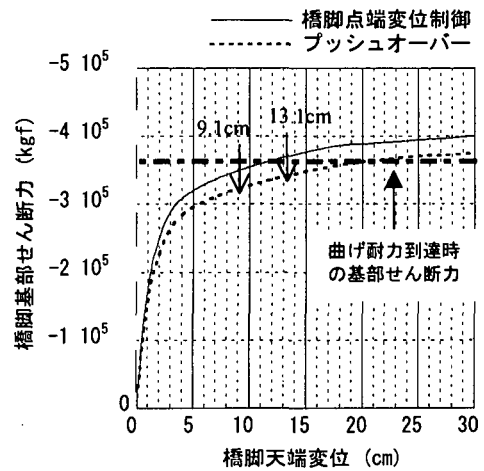


図7 P92 橋脚の静的解析結果

曲げ耐力付近あるいは曲げ耐力を上回るモーメントが発生したものと考えられる(図7)。

動的解析は、入力波としてP92付近における推定地震波⁹⁾(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方向同時入力で計算を行った。図8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。図8を見ると、最大応答時には神戸側(橋軸方向)、および山側(橋軸直角方向)にそれぞれ15cm程度の変位が発生しているが、最終的な残留変位は -0.6 cm(神戸側)、1.1cm(山側)となっている。残留変形の方法は実被害と整合しているが、値がかなり小さい。なお、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き量を島式³⁾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。引き抜き量を上記の解析による残留変位に単純に足したとしても

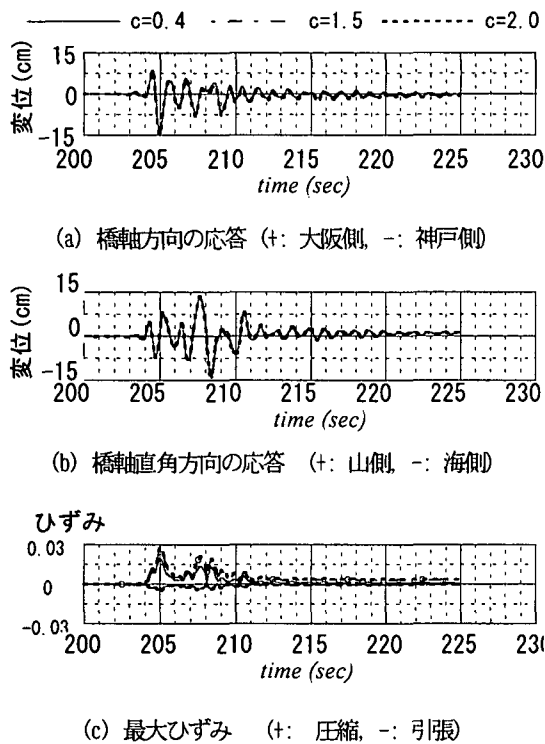


図8 P92橋脚の解析結果

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。

本解析の問題点としては、隣接橋脚の影響を考慮していない点があげられる。剛性・強度の異なる橋脚と桁を通してつながっていることで、地震力以外の付加的な力が加わった可能性も考えられる。また、入力地震波の妥当性についても検討の余地がある。現在のところ、上記と同様の解析を、神戸海洋気象台記録、JR 鷹取駅記録、東神戸大橋記録を入力としてもおこなっているが、いずれのケースにおいても解析の残留変位は実被害よりも小さな値しか得られていない。

(3) 残留傾斜の発生要因についての考察

前節では、橋脚の塑性変形のみでどの程度の残留変形が発生しうるのかを検討した。最後に、残留傾斜が基礎-地盤の塑性変形によっている可能性について若干の考察を述べる。

基礎-地盤の塑性変形によって残留傾斜が発生する場合、フーチング面に傾きが生じる。対象橋脚はフーチング幅が $8.5\text{m} \times 8.5\text{m}$ であり、フーチング面に 0.69° 、 0.48° の傾斜を発生させるフーチング両端の相対変位はそれぞれ 10.2cm 、 7.1cm である。高架下の国道上にこれだけの路面段差が発生していれば、明らかに目に見えたはずで

あるが、実際どのような状況になっていたのかはわかっていない。

さらに、対象橋脚の杭長は 10.0m であり、フーチングに上記の傾きが発生するには杭頭と杭先端の相対変位が、橋軸方向、橋軸直角方向にそれぞれ 12.0cm 、 8.4cm 発生していたことになる。杭にこれほどの塑性変形が発生した可能性があるのか、あるいは地盤の動きによって構造に剛体回転が生じたのか、今後、検討する必要があると考えている。

5. おわりに

阪神高速神戸線の RC 単柱の残留傾斜に着目した分析を行い、東方（橋脚番号 P50～P300 あたり）における大きな残留傾斜は地震動特性あるいは地盤条件によっている可能性が高いことを示した。また、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目指したが、実際に発生したような大きな残留傾斜は再現できなかった。隣接橋脚の影響を考慮することおよび入力地震波の再検討、また基礎-地盤の変形についても検討していく必要がある。

謝辞：阪神高速道路公団の林，北沢，幸左（現九州工業大学）氏他に高架橋被害についてご教示いただきました。

また、東京大学の岡村教授（現高知工科大学），前川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) 阿部他：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，第 53 回土木学会年次学術講演会にて発表予定
- 3) 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.
- 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.