

1995年兵庫県南部地震による高架道路橋被害に関する総合的分析

阿部哲子¹・阿部雅人²・藤野陽三³

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

² 正会員 Ph.D. 東京大学講師 工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)

³ フェロー Ph.D. 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)

1995年1月に発生した兵庫県南部地震では、阪神高速神戸線の高架橋にも甚大な被害が発生した。本研究は、これら的高架道路橋を対象に被害データにもとづいた定量的分析を行い、被害全体を力学的理解に基づいて統一的に解釈することを目的としている。はじめに、被害データに基づく統計分析から、全線における損傷度は実に様々であること、多くの橋脚で大きな残留傾斜が発生していることを明らかにした。また、魚崎-摩耶区間に焦点をあて、損傷と残留傾斜を同列に扱うことにより被害レベルの統一的理解が可能であること、RC単柱の損傷形態はその多くがせん断曲げ耐力比から説明可能であることを示した。さらに、RC単柱の残留傾斜について非線形動的解析により解析的説明の可能性を検討した。

Key Words: Kobe earthquake, Hanshin Expressway, RC single piers, failure mode, residual inclination

1. はじめに

1995年1月に発生した兵庫県南部地震では、阪神高速神戸線の高架橋にも甚大な被害が発生した。本研究は、広範囲の道路橋被害を力学的理解に基づいて統一的に解釈すること、すなわち、壊れたものはなぜ壊れたのか、壊れなかったものに対してはなぜ壊れなかったのかを説明できる論理を構築することを目的としている。

鉄道のラーメン高架橋に関しては、エネルギー一定則による換算弾性応答加速度を耐震性能の指標とし、設計上の耐震性能の大きなものほど損傷度が小さいことが明らかにされている¹⁾。阪神高速神戸線の道路橋に関しても、類似の分析が行われているものの²⁾、ラーメン高架橋に比べ、桁と橋脚の間に支承が介在すること、単柱式橋脚では外観上の損傷とは無関係に大きな残留傾斜が発生していることなどから、橋脚の耐震性能だけではその損傷が説明しきれない例も多い。高架橋をシステムとしてとらえた被害分析が必要である。

2. 被害データの統計分析

被害分析にあたり、阪神高速道路3号神戸線の西宮～月見山間(約25km、本線717径間)を対象とし、高架橋構成要素(桁・支承・橋脚・基礎)の構造特

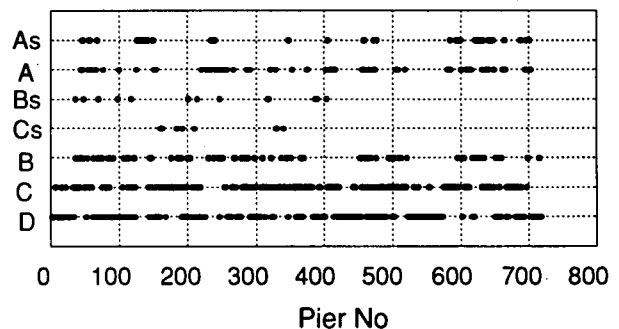


図1 3号神戸線の橋脚損傷度

性とその被害、周辺の地盤条件等についてデータの収集を行った。

(1) 橋脚損傷度の分布

図1は、各橋脚の損傷度を橋脚番号(対象区間、東端がP1、西端がP718)に対してプロットしたものである。ここに示した損傷度は、震災から約1年後の時点における阪神高速道路公団による判定結果であり、損傷度As, A, B, C, Dはそれぞれ「倒壊(もしくはそれに近い)、甚大、かなり、軽微、ほとんどなし」に対応する。これらは、地上部外観調査に基づいていることから地盤面より上の損傷レベルを表す指標と言える。一方、Bs, Csは地上部の損傷はそれぞれB, Cレベルであるが、地中部に甚大な損傷が認められたものである。As, A, Bs, Cs(計156基)は、撤去、再構築となった。図1を見ると橋脚の損傷度

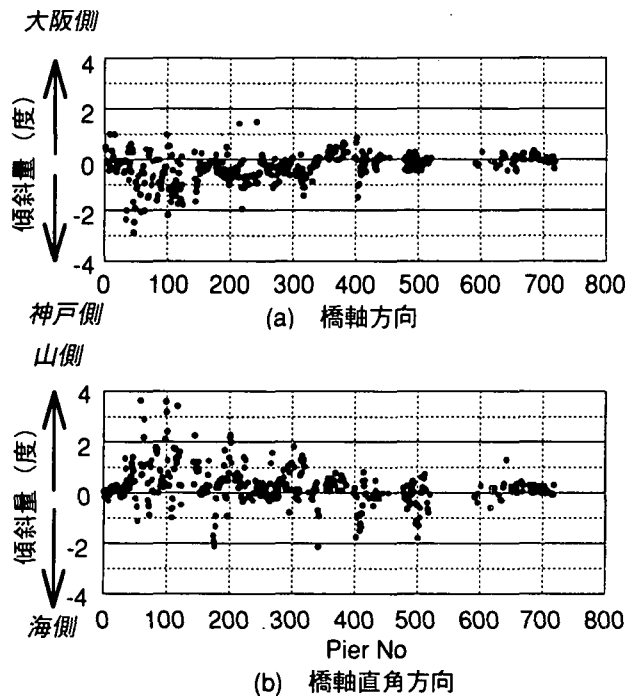


図2 RC単柱の残留傾斜

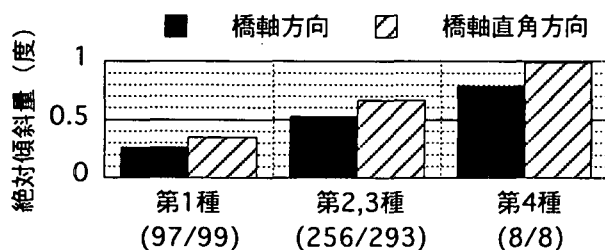


図3 地盤種別と残留傾斜量

は実に様々であり、甚大な損傷をうけた橋脚が目立つ一方で、その近傍においても軽微な損傷にとどまったものが多く存在することがわかる。

(2) RC 単柱の残留傾斜

図2に、RC単柱の残留傾斜を示した。地震動は断層直角方向（北西—東南）に卓越していたと言われるが、図を見るとほぼ断層直角方向にあたる橋軸直角方向だけでなく、橋軸方向の傾斜もかなり大きいことがわかる。また、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。傾斜の方向は、橋軸方向に関しては神戸側、橋軸直角方向に関しては山側に傾斜しているものが多い。地震動の関係と思われる。図3には、杭基礎に支持されたRC単柱のみを対象として、地盤種別ごとの残留傾斜量の平均値を示した。良好な地盤では概して傾斜が小さく、軟弱地盤では大きい傾向が見られる。ただし、図中の(97/99)等の数字は、1種地盤において杭基礎に支持された単柱が99基のうち97基に関して傾斜のデータが得られていることを表しており、各地盤種

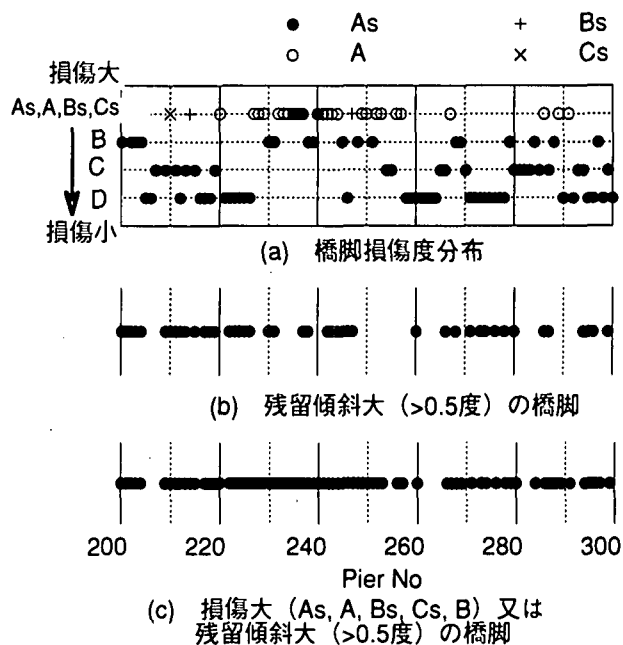


図4 被害レベル（魚崎—摩耶区間）

別でサンプル数は異なる。

神戸線の対象区間では全718基のうち、先述の損傷が大きいために撤去となった156基とは別に、残留傾斜が大きい（橋脚天端残留変位が15cm以上、または残留傾斜が1度以上³⁾）という理由で88基が撤去、再構築となった。この中には、地上部外観上はほとんど損傷のないD判定のものも31基含まれている。地上部損傷が軽微ながら残留傾斜が大きかったものについては、傾斜の発生原因として橋脚地中部の損傷、又は、基礎の損傷が考えられるが、その発生メカニズムが現時点では明らかでない。

3. 魚崎—摩耶区間の被害分析

神戸線には様々な構造形態（橋脚形式では、単柱のほかにラーメン、特殊ラーメンなど）が混在している。また、前節で対象とした全長25kmにもおよぶ区間では、地震動、地盤条件にかなりの違いがあると考えられる。地震動、地盤条件、構造形態が一つ一つ異なる中で、それぞれの被害への影響を複合的に考慮し、一度に全体を説明する論理を構築するのは極めて難しい。そこで、ここでは同一構造形態（RC単柱）の比較的連続している魚崎—摩耶区間（P200～P300、約4.5km）に焦点をあて、被害レベルの統一的理解、RC単柱の損傷形態、残留傾斜についての解析的説明を検討した。

(1) 被害レベル

図4(a)に魚崎—摩耶区間の橋脚損傷度（外観調査

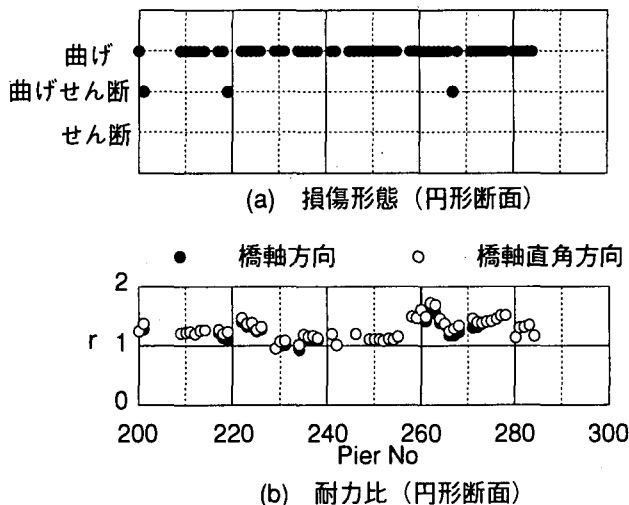


図5 損傷形態と耐力比 (円形断面)

に基づく橋脚地上部の損傷レベル)を示した。この区間ではほとんどの橋脚が同一形式 (RC 単柱) であるにもかかわらず損傷度にはかなりのばらつきが見られる。一方、同図(b)には残留傾斜の大きい橋脚を示した。(a)、(b)を比較すると外観上の損傷が軽微なものには、残留傾斜が大きいものが多いことがわかる。残留傾斜の原因は明らかではないが、橋脚地中部あるいは高架橋の他部位に何らかの損傷が発生した結果と考えられる。そこで、脚地上部の損傷と傾斜を同列に扱い、損傷の大きいもの (損傷度 As, A, Bs, Cs, B) と残留傾斜の大きいもの ($>0.5^\circ$) を一ライン上にプロットしたのが同図(c)である。この図において、ほとんど全ての橋脚が黒丸印で表されており、損傷大又は傾斜大のどちらかのタイプの被害が発生していることがわかる。よって、この区間では、外観上の橋脚損傷状況にはかなりのばらつきが見られるものの、被害レベルに大差はなく全体的に大きな被害を受けたという統一的な見方が可能である。どちらのタイプの被害をも受けていない橋脚のうち、いくつかに関しては、原因と思われる構造上の特殊性が見られる。P205～P208, P293 は特殊ラーメン構造, P285 は鋼製単柱, P300 はラーメン脚である。P258～P265, P294～P299 は曲線部であり、他に比ベスパン長が短い。また、3 径間連続構造において、固定支承が破壊し橋脚の被害が軽微になったと思われるものが 4 ケース (P216, P221, P270, P290) 見られた。このように構造的に特殊なところを除くと最後に疑問として残るのは、P254, P255, P272, P275, P277, P281～283, P292 のみとなる。入力が局部的に小さくなっていると見るべきなのか等、その原因について今後検討したいと考えている。

(2) RC 単柱の損傷形態とせん断曲げ耐力比

次に魚崎－摩耶区間の RC 単柱に関し、損傷形態

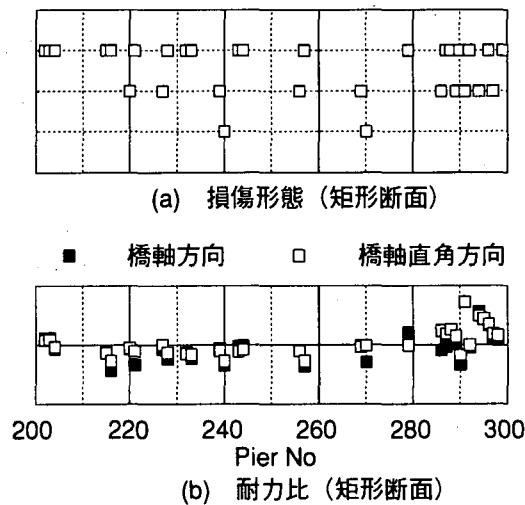


図6 損傷形態と耐力比 (矩形断面)

とせん断曲げ耐力比 ($r = (\text{せん断耐力} \times \text{橋脚高}) / (\text{曲げ耐力} - \text{偏心モーメント})$) との対応を検討した。理論上は、 $r > 1$ ならば曲げ破壊、 $r < 1$ ならばせん断破壊モードと予測される。損傷形態とせん断曲げ耐力比の対応は文献 2 でも検討されているが、ここでは統計的に相関を調べるという視点ではなく、損傷形態がせん断曲耐力比から説明可能であるか否かを一脚一脚について検討する。対象橋脚全てにおいて主鉄筋の段落としてはされておらず、耐力算定は基部について行った。コンクリート強度、鉄筋降伏強度はピルツ区間に対する材料強度試験結果³⁾の平均値を用いている。曲げ耐力は H2 道路橋示方書の方法により、せん断耐力は二羽式⁶⁾によって算定した。

図 5 に円形断面の損傷形態、せん断曲げ耐力比を示す。円形断面では、P201, P219, P267 の 3 基を除いて曲げタイプの損傷であるのに対応して、耐力比は 1 以上となっている。曲げせん断破壊となった 3 基はいずれも被害レベルが大きい (P201: 損傷度 Bs, P219: 傾斜大, P267: 損傷度 A) ことから、曲げひび割れ進展に伴うせん断耐力の低下により、損傷モードが曲げせん断に移行した可能性が考えられる。

図 6 には、矩形断面の損傷形態、せん断曲げ耐力比を示した。せん断破壊モードの p240, P270 では耐力比が 1 以下となっており両者は対応している。耐力比が 1 以上で、曲げせん断破壊モードのものに関しては、先述の円形断面同様、曲げひび割れ進展に伴うせん断耐力の低下による可能性が考えられる。また、耐力比が 1 以下にもかかわらず曲げ破壊モードとなっている橋脚には、写真より曲げせん断と思われるもの (P233)、損傷が小さくせん断破壊へ移行する手前と考えられるもの (P215, P216, P221, P290)、中間部で損傷した特殊なケース (P257) が含まれており、疑問となるのは損傷度 A の曲げ破壊

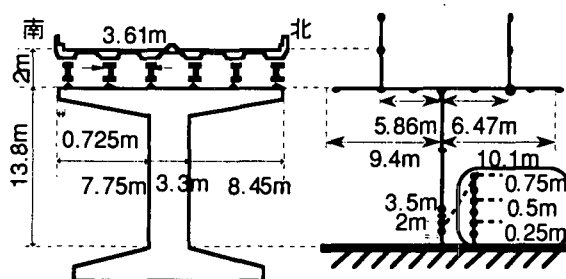


図7 動的解析モデル (P223)

が基部で発生した P228, P232, P243 の 3 基のみである。

以上から、円形断面、矩形断面ともにその損傷形態の多くはせん断曲げ耐力比から説明可能であることが判明した。

(3) 残留傾斜に着目した動的応答解析

最後に RC 単柱の残留変形について、非線形有限要素動的解析により検討を行った。解析対象としたのは P223 の橋軸直角方向 (図 7) で、橋脚地上部の損傷度は D (外観上損傷なし) でありながら、傾斜大 (1.43°) のために撤去となっている。対象橋脚が 2 種地盤上にあったことから、ここでは入力を JR 警報地震計 (鷹取駅, No.R-011)⁸⁾ の NS 成分として解析を行った。結果を図 8 に示す。図より、残留傾斜は約 0.2° と読みとれる。よって、JR 鷹取駅 NS 成分レベルの地震動では実際の残留傾斜角 1.43° を説明することはできなかった。今後、被りコンクリート剥離の効果、鉄筋の引き抜け、座屈を考慮するとともに、基礎を含めた橋梁システムモデルの構築が必要であると考えている。

また、図 9 は、P223 と張り出し長は等しく保ったまま偏心を大きくした (1.5m 偏心) モデルの応答解析結果である。偏心が 0.35m の P223 に比べ、残留傾斜が大きい結果となった。文献 2 において報告されている、偏心と橋軸直角方向の残留傾斜の相関を、解析的に説明できることを示唆している。

4. おわりに

本研究では、阪神高速道路 3 号神戸線の西宮～月見山間を対象とし、兵庫県南部地震による被害の分析を行った。現在、魚崎～摩耶区間以外の区域についても詳細データの追加収集を進めており、被害全体の解析的理解をさらに進めるとともに、構造物被害から見た地震動分布の再評価も行っていきたいと考えている。

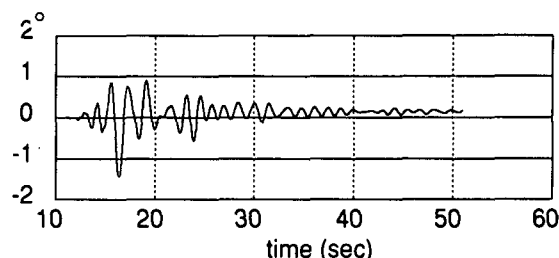


図8 変位 (傾斜量) 応答

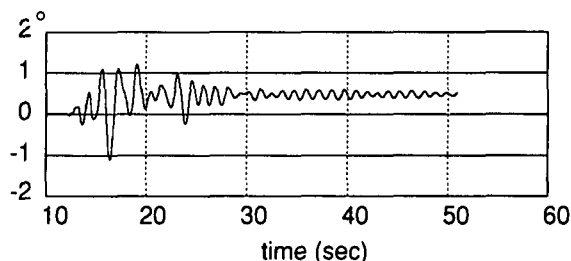


図9 変位 (傾斜) 応答 (偏心大モデル)

謝辞： 阪神高速道路公団の北沢、幸左、安田氏他に資料の提供をいただきました。また、RC 橋脚の動的解析に関しては、東京大学、前川宏一教授に解析プログラム COM3 の提供、および御指導をいただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 石橋他：鉄筋コンクリート高架橋の地震被害程度と設計上の耐震性能に関する検討，土木学会論文集 No.563/I-39, 1997.4.
- 2) 林，丸山，幸左他：RC 橋脚損傷度の評価解析，第 2 回 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，1997.1.
- 3) 林，幸左他：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，pp.69-76, 1997.4.
- 4) 藤野，阿部他：兵庫県南部地震による高架橋被害のデータベース化の試みとそれに基づく 2, 3 の分析，土木学会第 51 回年次学術講演会概要集，1996.9.
- 5) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：調査報告書，建設省，1995.12.
- 6) 二羽他：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 第 372 号/V-5, 1986.8.
- 7) 岡村，前川：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.
- 8) 中村他：1995 年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析 (II)，JR 地震情報 No.23d, 1996.3.