

兵庫県南部地震におけるRC橋脚の損傷度，曲げ耐力， 最大地盤加速度に関する分析

西岡 勉¹・運上 茂樹²

¹正会員 工修 独立行政法人 土木研究所 耐震研究グループ（〒305-8516 つくば市南原1番地6）

²正会員 工博 独立行政法人 土木研究所 耐震研究グループ（〒305-8516 つくば市南原1番地6）

1. はじめに

本文は，耐震補強優先度の高い既設橋梁を抽出するための耐震性判定法への反映を目的とし，兵庫県南部地震により被災したRC橋脚の損傷度，曲げ耐力，および最大地盤加速度(PGA)の関係を分析したものである．同地震によるRC橋脚の損傷度と耐力の関係を分析した既往研究¹⁾があるが，各橋脚における入力地震動の地域的な相違が考慮されていない．本文では，断層面からの最短距離に基づく距離減衰式により橋脚位置のPGAを推定することで入力地震動の地域的な相違を考慮して分析を行うこととした．具体的には，兵庫県南部地震で被災した阪神高速道路3号神戸線(以下，神戸線という)のRC橋脚を対象とし，復旧時の被災診断で判定された損傷度，曲げ耐力，および距離減衰式により推定した橋脚位置のPGAの関係を調べた．

2. 分析の条件

(1) 対象データ

対象としたデータは，神戸線の兵庫県域のRC橋脚943基²⁾の内，被害の大きい西宮市今津から神戸市須磨区までの範囲にあり，単柱型式で主鉄筋の段落としがなく，耐力算定に必要な構造図が入手可能であった318基のRC橋脚である．単柱型式に限定したのは，橋軸および橋軸直角方向の耐力算定が容易なためである．単柱型式のRC橋脚は，943基の内77.5%を占める²⁾．また，神戸線の大部分のRC橋脚が昭和39年の鋼道路橋設計示方書³⁾に基づいて設計されており，主鉄筋の段落としを行った橋脚が含まれている．主鉄筋の段落としについては，昭和55年

道路橋示方書⁴⁾より段落とし位置を従来よりも部材の有効高に等しい長さだけ高くする規定が盛り込まれ，兵庫県南部地震以降は，原則として段落としを行わない規定になっている⁵⁾．したがって，昭和55年道路橋示方書以降のRC橋脚は神戸線の段落としがある橋脚とその耐震性が大きく異なると考えられる．本文では，神戸線のRC橋脚の中から段落としない橋脚を対象とし，分析を行った．

(2) 最大地盤加速度の推定

神戸線の各橋脚位置の最大地盤加速度の推定には，式(1)に示すFukushima *et al.* の距離減衰式^{6), 7)}を用いた．

$$\log PGA = 0.42M_w - \log(R + 0.025 \times 10^{0.42M_w}) - 0.0033R + 1.22 \quad (1)$$

ここに，PGA：水平最大地盤加速度(cm/s²)，M_w：モーメントマグニチュード，R：断層面からの最短距離(km)である．式(1)は，日本の28の地震と米国，その他の国の15の地震の観測記録をもとに導かれた距離減衰式に，新しい観測記録を加え修正した式であり，震源距離が近い日本の地震に適用できるように作成されたものである．なお，式(1)は，地震動の観測位置での地盤条件の分類が考慮されておらず，日本の平均的な地盤条件でのPGAの推定式と考えられる．神戸線対象橋脚の大部分の耐震設計上の地盤種別が2種地盤であることから平均的な地盤条件に近いと仮定し，式(1)が適用可能と判断した．

兵庫県南部地震のモーメントマグニチュードは，M_w=6.9とした⁷⁾．断層面からの最短距離Rの算定は，

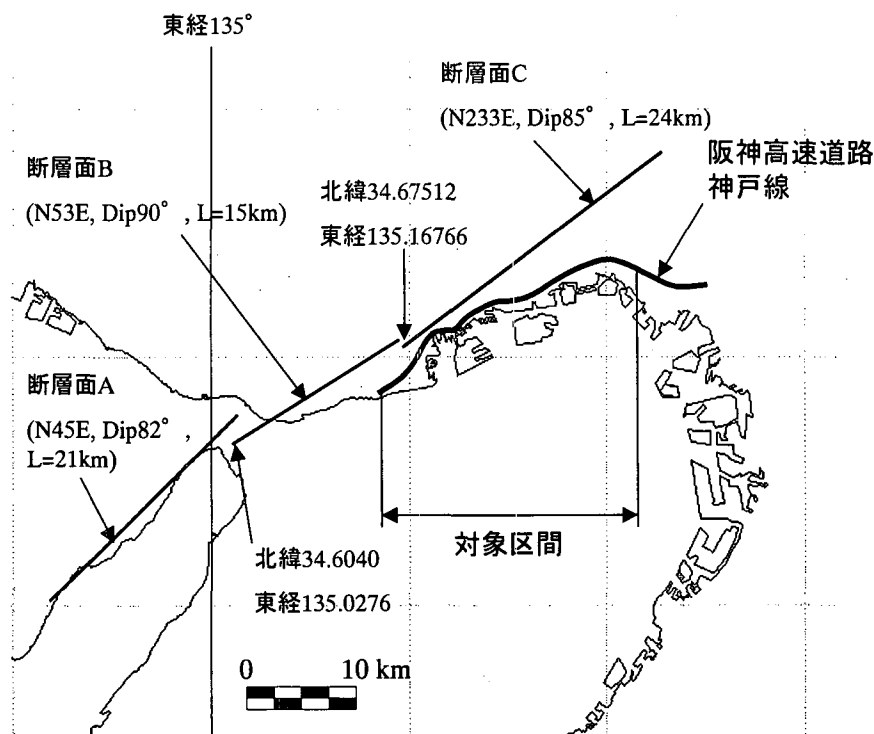


図-1 阪神高速道路神戸線と兵庫県南部地震の断層面

表-1 RC 橋脚の損傷度の判定基準

RC橋脚の 損傷度	定義
As	倒壊したもの 損傷変形が著しく大きなもの
A	亀裂、座屈、鉄筋の破断などの損傷、または、変 形が大きなもの
B	鉄筋の一部の破断やはらみだし、および部分的な かぶりコンクリートの剥離や亀裂が見られるもの
C	ひび割れの発生や局部的なかぶりコンクリートの 剥離が見られるもの
D	損傷がないか、あっても耐荷力に影響のない極め て軽微なもの

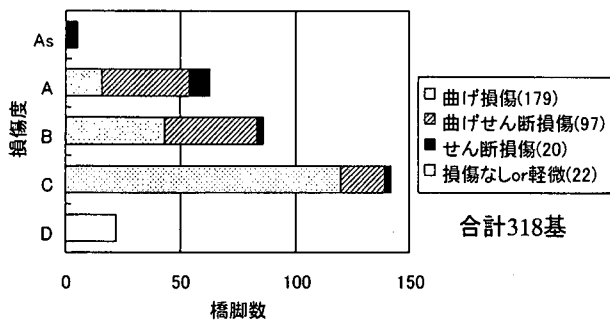
文献8)に基づき南西から北東方向に位置する3つの断層面から神戸線の橋脚位置までのRを算出した。断層面の地表上への投影線と神戸線の概略の位置関係を図-1に示す。図-1中の3つの断層面A, B, Cの注釈の括弧内には、断層面のStrike angle, Dip angle, および断層長さを示している⁸⁾。断層面の地表上の投影線から神戸線の対象橋脚までの平面距離は、約0.7~7.9kmの範囲にある。断層面B, CのDip angle がそれぞれ、90, 85° でほぼ鉛直になっていることから断層面からの最短距離Rは、断層面の上端で決まることになる。断層面の上端の深さは約1kmであり、断層面から神戸線の対象橋脚までのRは約1.3~8.0kmになる。式(1)により推定された神戸線の対象橋脚位置でのPGAは約0.45~0.63gとなる。

(3) RC橋脚の損傷度

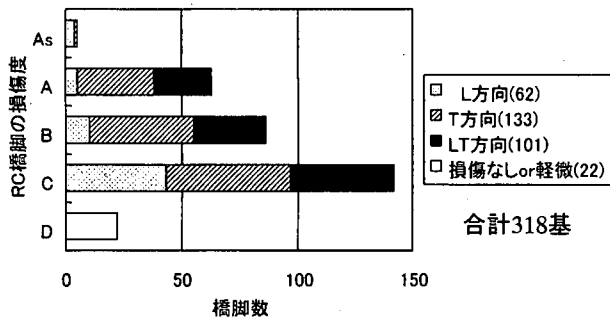
RC橋脚の損傷度は、震災直後に実施された外観調査により昭和63年の道路震災対策便覧(震災復旧編)⁹⁾に準拠し、5段階の判定が行われている。損傷度の判定基準を表-1²⁾に示す。対象とした318基のRC橋脚の各損傷度の基数を損傷形態別、損傷方向別にそれぞれ、図-2(a), (b)に示す。凡例中の括弧内の数値は、各損傷形態、各損傷方向の合計の橋脚数を表す。損傷度別の橋脚数では、Cランクが最も多く、続いてB→A→D→Asの順となっている。

図-2(a)に示すRC橋脚の損傷形態は、曲げ、曲げせん断、せん断に分類している。損傷形態の分類は文献1), 2)によるものであり、曲げせん断損傷とは、曲げとせん断の中間的な損傷状態で、明確な判定が困難な橋脚を分類したものである。損傷度A, B, Cでは、曲げおよび曲げせん断損傷の割合が多い。

図-2(b)に示すRC橋脚の損傷方向は、橋軸方向の損傷をL方向、橋軸直角方向の損傷をT方向、明確な損傷方向の判定が困難で両方向に損傷している橋脚をLT方向として分類している^{1), 2)}。損傷度A, Bでは、L方向に比べてT, LT方向に損傷した橋脚の割合が多い。

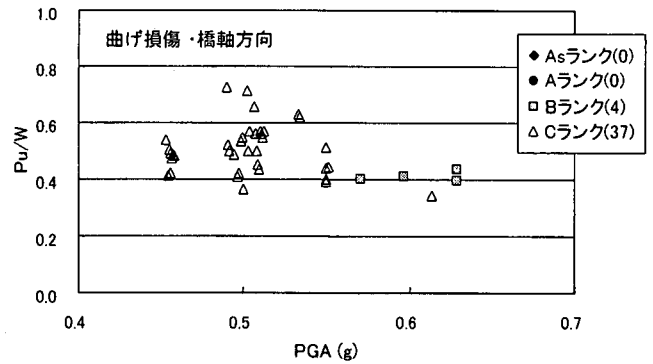


(a) 損傷形態別

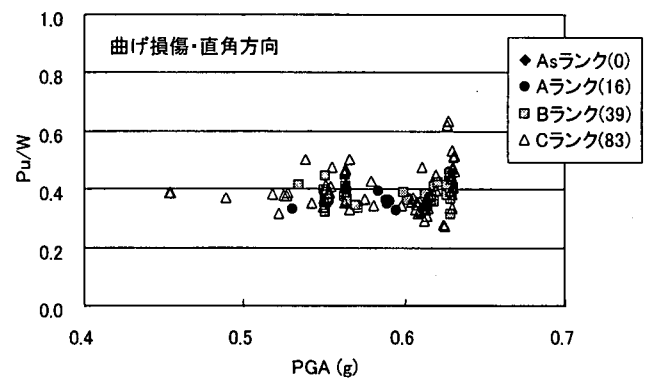


(b) 損傷方向別

図-2 RC橋脚の損傷度と橋脚数



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-3 PGAと P_u/W の関係(曲げ損傷)

(4) RC橋脚の曲げ耐力

RC橋脚の曲げ耐力は、既存のデータ^{1), 2)}を活用し、平成2年の道路橋示方書V耐震設計編¹⁰⁾に基づき算定された曲げ耐力を用いた。

3. 損傷度、曲げ耐力、およびPGAの関係

(1) 損傷形態、損傷方向別のPGAと曲げ耐力の関係

損傷形態と損傷方向別に318基の橋脚を分類し、PGAと曲げ耐力の関係を調べた。すなわち、318基の橋脚を曲げ、曲げせん断の損傷形態別に分類し、曲げ、曲げせん断損傷の橋軸方向と橋軸直角方向について調べた。また、損傷方向が橋軸方向の橋脚は橋軸方向の曲げ耐力、損傷方向が橋軸直角方向の橋脚は橋軸直角方向の曲げ耐力を用いた。図-2(b)に示すLT方向と分類された橋脚については、橋軸方向と橋軸直角方向の曲げ耐力を比較し、曲げ耐力の小さい方向を損傷方向と仮定した。なお、曲げ耐力は、終局水平耐力 P_u を地震時保有水平耐力法に用いる等価重量 $W^{10)}$ で除した曲げ耐力換算震度 P_u/W として扱うこととする。せん断損傷については、橋脚数が20

基と少ないことから分析から除外した。

曲げ損傷の橋軸および橋軸直角方向のPGAと P_u/W の関係をそれぞれ、図-3(a), (b)に示す。凡例中の括弧内の数値は、各損傷度の橋脚数を表す。橋軸方向では、Bランク4基がPGAの分布の中で大きい範囲に位置し、 P_u/W の分布の中では小さい範囲に位置していることがわかる。橋軸直角方向については、橋軸方向のような明確な傾向はないが、Aランクの P_u/W がほぼ0.4以下であること、 P_u/W が0.5以上やPGAが0.5g以下の範囲でCランクのみになる傾向が見られる。また、図-3(a), (b)を比較すると、橋軸直角方向が橋軸方向よりもPGAの大きい範囲に分布しており、断層までの最短距離が小さい範囲で橋軸直角方向の損傷が多く、最短距離が大きい範囲で橋軸方向の損傷が多くなっている。

曲げせん断損傷の橋軸および橋軸直角方向のPGAと P_u/W の関係をそれぞれ、図-4(a), (b)に示す。橋軸方向では、Cランク5基がPGAの分布の中で小さい範囲に位置している。橋軸直角方向では、0.4以下の P_u/W にAランクが多く、0.4以上の P_u/W にCランクが多い傾向が見られる。

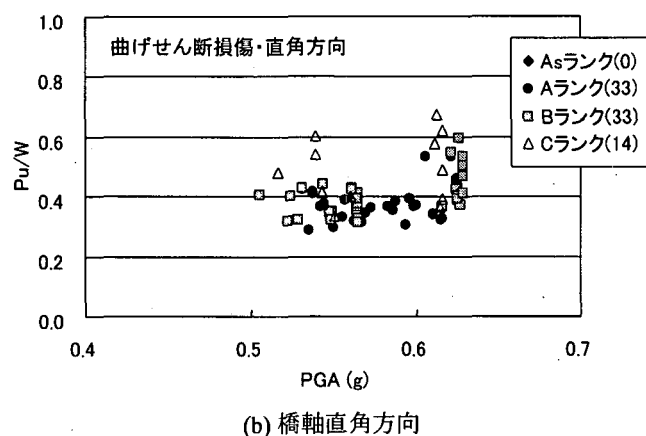
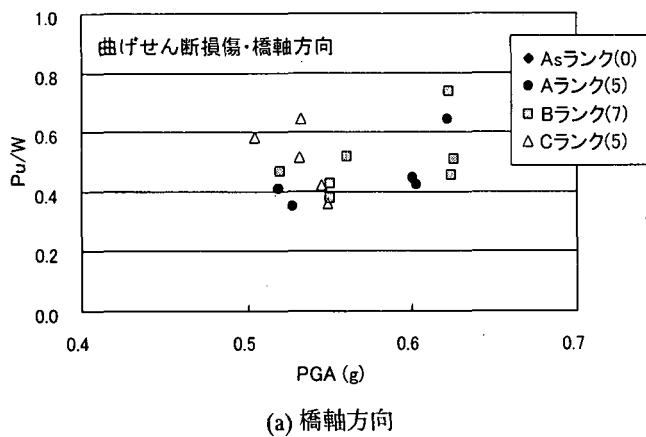


図-4 PGAと P_u/W の関係(曲げせん断損傷)

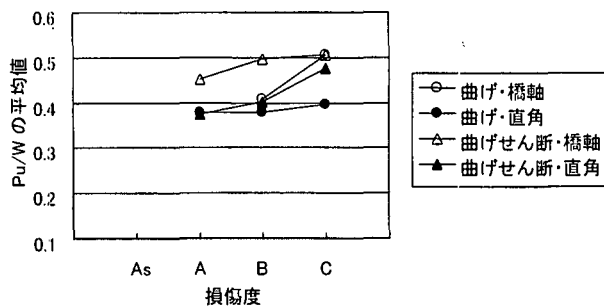


図-5 損傷度別の P_u/W の平均値(曲げ, 曲げせん断損傷)

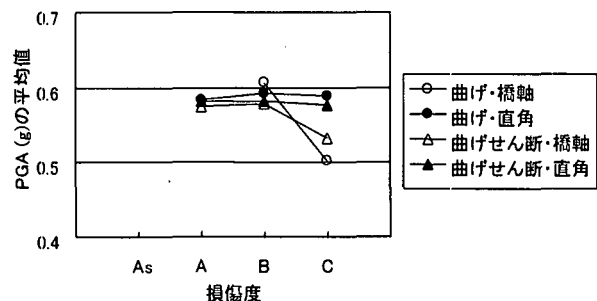


図-6 損傷度別のPGAの平均値(曲げ, 曲げせん断損傷)

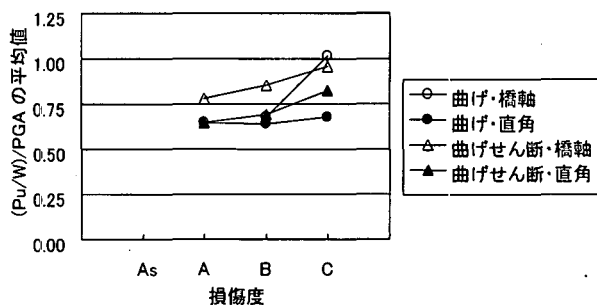


図-7 損傷度別の $(P_u/W)/PGA$ の平均値(曲げ, 曲げせん断損傷)

(2) 損傷度別の曲げ耐力およびPGAの平均値

曲げ, 曲げせん断損傷の損傷度別の P_u/W の平均値を図-5に示す。いずれの場合も損傷度が低くなると P_u/W の平均値が大きくなる。また, 曲げ, 曲げせん断損傷とも橋軸直角方向より橋軸方向の P_u/W の平均値が大きい傾向がある。

曲げ, 曲げせん断損傷の損傷度別のPGAの平均値を図-6に示す。曲げ損傷・橋軸直角方向の損傷度BでPGAが若干大きくなっているが, 損傷度が低くなるほど概ね右下がりの傾向が見られる。

損傷度が低くなるほど P_u/W が大きくなり, PGAが小さくなる傾向があることから両者の比を取り, その平均値を調べる。曲げ, 曲げせん断損傷の損傷度別の $(P_u/W)/PGA$ の平均値を図-7に示す。いずれの場合も損傷度が低いほど $(P_u/W)/PGA$ が大きくなるが, 損傷方向, 損傷形態により $(P_u/W)/PGA$ の大きさにばらつきが見られる。

(3) 損傷度の構成比

P_u/W の大きさによる被害率の変化を見るために,

P_u/W の0.2刻みの損傷度の構成比を調べる。曲げ損傷, 曲げせん断損傷の P_u/W の損傷度の構成比をそれぞれ, 図-8, 9に示す。なお, 橋軸方向と橋軸直角方向を合計したデータで示している。両ケースも P_u/W が大きくなると, 損傷度の高い橋脚の割合が小さくなる。

次に, $(P_u/W)/PGA$ の大きさによる被害率として, 曲げ損傷, 曲げせん断損傷に対する $(P_u/W)/PGA$ の0.25刻みの損傷度の構成比をそれぞれ, 図-10, 11に示す。曲げ損傷の $(P_u/W)/PGA$ が0.5-0.75の範囲に損傷度の偏りが見られるが, 曲げせん断損傷では, $(P_u/W)/PGA$ が大きくなると, 損傷度の高い橋脚の割合が小さくなる。

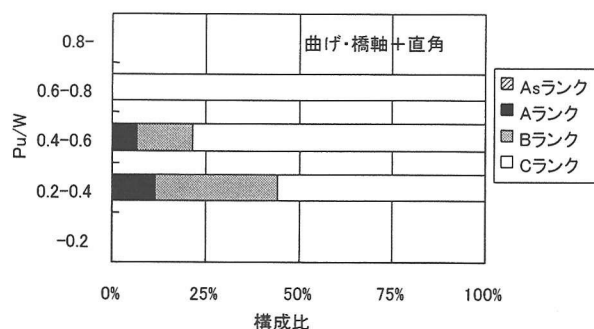


図-8 P_u/W の損傷度の構成比(曲げ損傷)

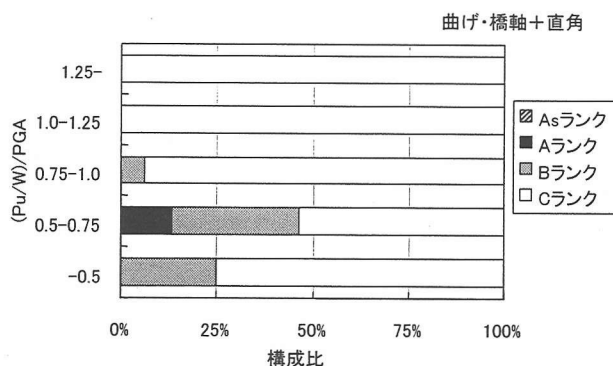


図-10 $(P_u/W)/PGA$ の損傷度の構成比(曲げ損傷)

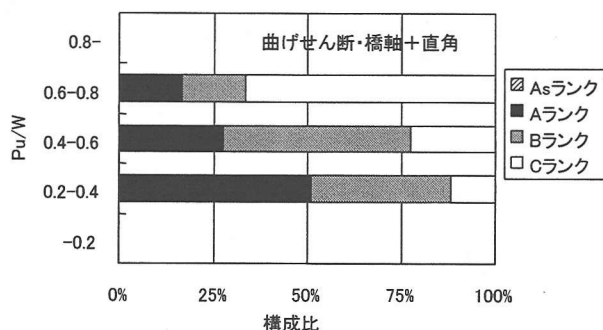


図-9 P_u/W の損傷度の構成比(曲げせん断損傷)

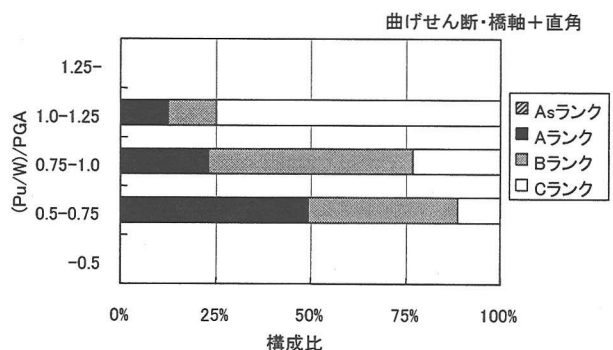


図-11 $(P_u/W)/PGA$ の損傷度の構成比(曲げせん断損傷)

4. まとめ

兵庫県南部地震で被災した阪神高速道路3号神戸線の段落としのない単柱型式のRC橋脚を対象に、損傷度、曲げ耐力、およびPGAの関係を調べた。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 兵庫県南部地震の断面から神戸線の対象橋脚までの最短距離は、約1.3～8.0kmになり、Fukushima *et al.* の距離減衰式を適用すると、最大地盤加速度PGAは、0.45～0.63gの範囲となる。
- 2) 曲げ、曲げせん断損傷におけるPGAと曲げ耐力換算震度 P_u/W の関係から、損傷度が低いほど、曲げ耐力換算震度 P_u/W が大きく、PGAが小さくなる傾向が見られる。
- 3) 曲げ、曲げせん断損傷において、損傷度が低くなるほど、損傷度別の P_u/W の平均値は大きくなり、損傷度別のPGAの平均値は小さくなる傾向がある。
- 4) 曲げ損傷、曲げせん断損傷の P_u/W 、および曲げせん断損傷の $(P_u/W)/PGA$ の損傷度の構成比では、 P_u/W 、 $(P_u/W)/PGA$ が大きくなると、損傷度の高い橋脚の割合が小さくなる傾向がある。

謝辞：兵庫県南部地震により被災した阪神高速道路3号神戸線のRC橋脚に関する貴重なデータを阪神高速道路公団からご提供いただいた。ここに深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 幸左賢二，藤井学，林秀侃，中田恒和：RC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
- 2) 阪神高速道路公団：大震災を乗り越えて－震災復旧工事誌－，1997.9
- 3) (社)日本道路協会：鋼道路橋設計示方書，1964.11
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書，IV下部構造編，1980.5
- 5) (社)日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案)，1995.6
- 6) Y. Fukushima and T. Tanaka : A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, *Bulletin of Seismological Society of America*, **80**, 4, pp. 757-783, 1990.8
- 7) Y. Fukushima, K. Irikura, T. Uetake, and H. Matsumoto :

- Characteristics of Observed Peak Amplitude for Strong Ground Motion from the 1995 Hyogoken Nanbu (Kobe) Earthquake, *Bulletin of Seismological Society of America*, **90**, 3, pp. 545-565, 2000.6
- 8) H. Sekiguchi, K. Irikura, T. Iwata, Y. Kakehi, and M. Hoshiba : Minute Locating of Faulting beneath Kobe and the Waveform Inversion of the Source Process during the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan, Earthquake Using Strong Ground Motion Records, *Journal of Physics of the Earth*, **44**, 473-487, 1996.
- 9) (社)日本道路協会：道路震災対策便覧(震災復旧編), 1988.2
- 10)(社)日本道路協会：道路橋示方書，Ⅴ耐震設計編，1990.2