

高架橋システムの最適損傷配分評価に関する試み

東京大学大学院工学系研究科 藤野陽三*

東京大学大学院工学系研究科 庄司学**

東京大学大学院工学系研究科 阿部雅人***

阪神・淡路大震災級の地震力に対して「高架橋にはある程度の損傷を許す」という前提に立った時、上部工-支承-橋脚-基礎に損傷をどのように配分するかは重要なテーマである。本研究では、高架橋をそれらの構造エレメントで構成される一つのシステムと捉え、そのシステムが一定レベル以上の耐震安全性を確保するために各構造エレメントに配分すべき最適な損傷量の評価法について、一つの考え方を提言する。具体的には、損傷を前提にする以上、被災後の補修形態(補修コストや補修期間)を耐震設計時に考慮することは不可欠であると考え、各構造エレメントの損傷を適切に表現しうる物理量と補修コストや補修期間を結び付けた関係曲線図という概念を提案した。また、典型的な都市内高架橋を多質点系でモデル化し、線形と非線形の動的解析により、高架橋システムの損傷分布の特性の一例を考察した。

1. はじめに

阪神・淡路大震災では、阪神高速道路3号神戸線や5号湾岸線などの都市内高架橋に甚大かつ多様な破壊が発生した。

これらの高架橋は設計、建設された時代の耐震設計基準の産物である。3号神戸線の約80%は、昭和39年以前の設計示方書に基づき0.2Gの震度に準じて設計されている。一方、5号湾岸線の場合は平成2年の道路橋示方書改定後に設計されたRC橋脚について地震時保有水平耐力照査が行われており、終局状態を靱性で規定するという2段階の照査法が採用されている。地盤種別や断層からの距離の違いはあるものの、5号湾岸線は3号神戸線に比べて被害は少なかった。

この二例に示されるように高架橋の耐震設計法は時代とともに積み上げられてきたことがわかる。だが、5号湾岸線における西宮港大橋甲子園浜側隣接桁の落橋などの被害は、現行の耐震設計法に見直す余地があることを示唆している。事実、建設省は今回の地震における地震動の大きさと被害を鑑み、終局状態照査用の応答スペクトル値の引き上げ、落橋防止構造の強化、免震支承の推奨、動的解析の活用などを暫定的に打ち出している¹⁾。

2. 本研究の背景・目的

これまでの道路橋の耐震設計は、各構造エレメント(上部工、支承、橋脚、基礎)の耐震性を個別に照査し積み上げることによって、高架橋全体の耐震性を保証するという考え方が基本になっていた(図-1(a)参照)。これは設計作業の簡便性を考慮してのことである。しかし、終局状態における高架橋の耐震安全性が今回の震災で強く認識され、一つの構造システムとして高架橋の耐震安全性を捉えるべきだという考え方が提示されている^{2,3)}(図-1(b)参照)。しかし、定性的な議論はなされるものの、設計への具体的な対応策は明確に示されていない。

その原因は、損傷を評価する尺度が確立されていないことにあると考える。つまり、各構造エレメントの損傷を高架橋全体の損傷の中でどのように評価するのか、換言すれば全体の損傷を各構造エレメントの損傷のどのような重み付けで表すのが、という点についてあまり議論されなかったためであろう。

このような中で、土岐らは先駆的な試みとして橋脚と基礎の損傷配分について地震時応答解析に基づいて考察を行ってきた⁴⁾。

本研究は土岐らの研究と立場を同じくするものであるが、橋脚と基礎に上部工、支承を加えて高架橋の損傷分布を求め、各構造エレメントの損傷度関数と組み合わせ、より総合的に高架橋の損傷配分のあり方を探ろうとするものである。

Key words : 損傷配分, 補修コスト(期間), 弾塑性解析

* 土木工学専攻教授, 03-3812-2111

** 土木工学専攻修士2年, 03-3812-2111

*** 土木工学専攻講師, 03-3812-2111

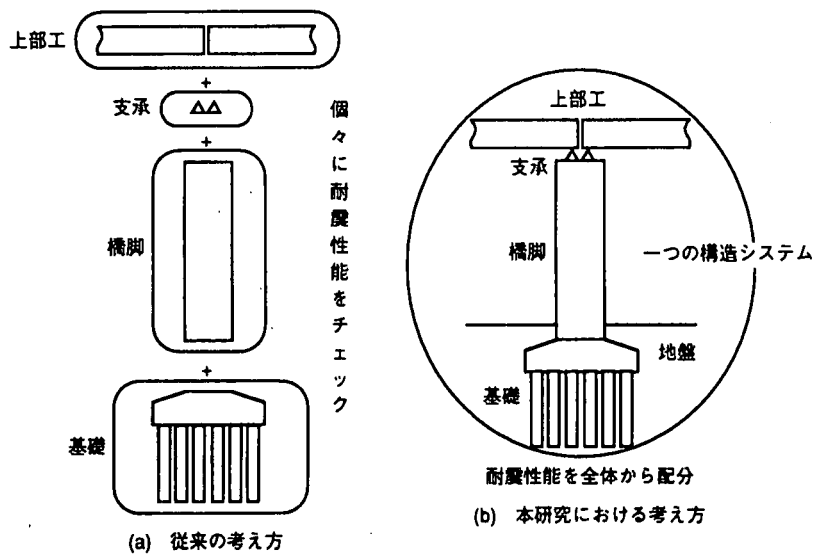


図-1 耐震設計の基本的な考え方

3. 本研究における高架橋の耐震設計への考え方

次に、今後的高架橋の耐震設計法について、本研究で前提とする考え方を述べる。

第一に、極めて強く、しかも稀にしか起こらない阪神・淡路大震災級の地震力に対しては、高架橋に「ある程度の損傷」を許してもかまわないとする。

ここで言う「ある程度の損傷」とは、倒壊を意味するのではなく、震災直後に応急的な処置を施せば、緊急車両が通行でき、避難者や物資の輸送ができる状態を考えている。しかし、同じ高架橋でも線状ネットワークの一部のものと立体交差的なものとは、通行不能の影響度には違いがある。個々の高架橋の有すべき耐震レベルについては、それに要する費用と機能・役割との関係を考慮して今後議論していくべきであり、その合理的かつ説得力のある決定法は土木技術者が考えていくべき課題であると認識している⁵⁾。本研究では、直下型地震が面的に大きなインパクトを与え、その中での都市内高架橋の役割と、500年から1000年に一度の低い確率でしか起こらない地震であることを考慮して「ある程度の損傷」は許すという立場をとることとする。

このような考え方をもとにすると、高架橋システムとして許容できる損傷度と各構造エレメントへの損傷配分に幾通りかの組み合わせが生じる。支承や橋脚に損傷を負担させるシステムや各構造エレメントに等しく損傷を負担させるシステムが考えられる。地震動の不確定性を認識した上で、好ましい損傷配分が期待できる高架橋システムを設計する必要がある。その際、評価尺度がなければ高架橋を構造システムと捉える耐震設計への最初の一步が踏み出せないことになる。同時に、その尺度は、各構造エレメントの損傷の関数として「高架橋システム全体の損

傷」を表現できるものでなければならない。

そこで第二に、高架橋の被災後の補修(改築)コストと補修期間を「高架橋システム全体の損傷」を規定する尺度にする。損傷を前提にする以上、それらを耐震設計時に考慮することは不可欠だからである⁶⁾。さらに、今回の震災で得られた膨大な高架橋の被害データから激震時に許容できる損傷の箇所や最良の補修形態が浮かび上がるのではないかと考えるからである。

4. 損傷度評価曲線の提案

前章で述べた考え方をもとに、各構造エレメントの損傷度とそれに対応する損失との関係図という指標をここで提案する。暫定的にこの関係図を損傷度評価曲線と呼ぶ。この曲線に対する基本的な考え方、適用方法、作成方法について、順に説明を加える。

(1) 損傷度評価曲線の基本的な考え方

損傷度評価曲線は、横軸に損傷の物理的尺度を、縦軸に対応する損失の尺度を定め、各構造エレメントに対して得られるそれらの関係を一つの図としてまとめたものである。

まず第一のポイントは、横軸にあたる損傷の物理的尺度を各構造エレメントでどのように評価するかである。土岐ら⁵⁾は靱性率と履歴消費エネルギーを評価尺度として用いているが、ここでは最大靱性率を損傷の尺度とすることとする。

だが、支承部が既存の可動沓や固定沓の場合、その靱性率は物理的に想定しづらい。つまり、構造部材の材料特性によっては靱性の定義が難しいため、損傷の物理的尺度を靱性率で統一する場合は、想定する構造・材料種別を明確にしておく必要がある。

第二のポイントは、損傷に対応する損失の尺度と

して何を選ぶかである。曲線図の縦軸の問題である。前章で述べたように、最もわかりやすい評価尺度は損傷レベルに応じた補修コストであろう。

ただ、震災復興という異常時には、いかに早くスムーズな社会・経済活動を復活させるかということが、補修コストと並んで重要な尺度だと考えられる。橋脚の補修に要する時間と支承の補修に要する時間を比べた場合、前者は現場作業が主体であるのに対し、後者は現場では工場製作されたものを取り替える作業になるだけで補修期間は短い。つまり、縦軸の尺度として補修コストだけでなく、補修期間も考慮すべきであろう。

また、補修コストは現場における補修方法を反映した値である。復旧作業は高架橋の路下条件によって補修方法が異なるため、補修時に必要となるモノのコスト(交換する部材のコスト)より社会的制約に起因するコスト(道路閉鎖に必要なコストなど)のほうがむしろ大きい。本研究で扱う補修コストのデータが、あくまで大都市直下の大地震時のものであることを念頭に置かなければならない。

補修コスト(補修期間)

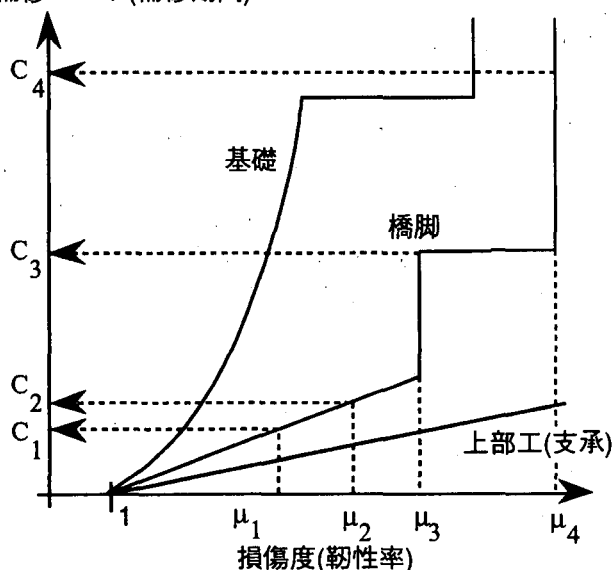


図-2 損傷度評価曲線の一例(概念図)

ここで、図-2に損傷度評価曲線の一例を示す。RC橋脚を例に、図-2の見方を説明する。靱性率 μ_1 付近(3~4)では被りコンクリートの剥離が起き、平均的に C_1 程度の補修コストが必要になる。靱性率 μ_2 付近(5~6)では主鉄筋の面外座屈が発生し、 C_2 程度の補修コストがかかる。靱性率が μ_2 付近までは、補修コストは靱性率におよそ比例した関係で増

えていくと考えられる。その後、靱性率 μ_3 付近(8以上)ではせん断破壊や曲げせん断破壊を起し、ほとんどの橋脚は撤去になるので C_3 程度の補修コストが必要になる。撤去時の補修コストは基本的に一定であろう。倒壊した場合(靱性率 μ_4 以上)は落橋し、人命を失う可能性があるので補修コストは急増する。なお、RC橋脚と鋼製橋脚では補修に要する費用や期間は異なるであろう。

その他の構造エレメントに対する見方は、RC橋脚の場合と同様である。

(2) 損傷度評価曲線の適用方法

次に損傷度評価曲線の適用方法について述べる。

まず、基礎まで含めた適切な動的解析モデルを設定し、地震応答解析により各構造エレメントの損傷度(靱性率など)を算出する。そして、得られた解析結果を損傷度評価曲線に対応づけ、各構造エレメントの補修コスト(補修期間)を算出する。最終的に、それぞれの補修コストの総和を取り、さらに建設時の投資コストとの和を取って、その値が最小となる各構造エレメントの損傷配分を決定する。すなわち、補修が極めて困難なところは損傷を少なく、比較的容易なところは損傷を大きくすることになる。なお、支承部が免震支承などの時に、桁どうしの衝突を避けたいならば損傷度に制約をつける必要が生じる(桁の橋軸方向の衝突を激震時に避けるべきかどうかは議論の必要なところである)。損傷度の最適配分決定までのフローを図-3に示す。

勿論、入力地震動、地盤特性、基礎の諸元(杭本数、フーチングサイズなど)、橋脚高さ、そして橋脚種別などによって各構造エレメントへの最適な損傷配分は変わってくることになる。しかし、これらが幾つかのパラメータで回帰できれば、設計において簡便な形で反映させることができる。設計コストの制約はあるが、重要度の高い橋梁については直接的にこの方法を用いることも考えられる。

(3) 損傷度評価曲線の作成方法

以上、損傷度評価曲線の基本的な考え方とその適用方法について述べた。図-3の過程を経て求められた最適な損傷配分が本当に工学的に意味のあるものかどうかは、動的解析モデルの信頼性と図-2に模式的に示した損傷度曲線の妥当性による。後者の損傷度曲線については積算することも不可能ではないが、

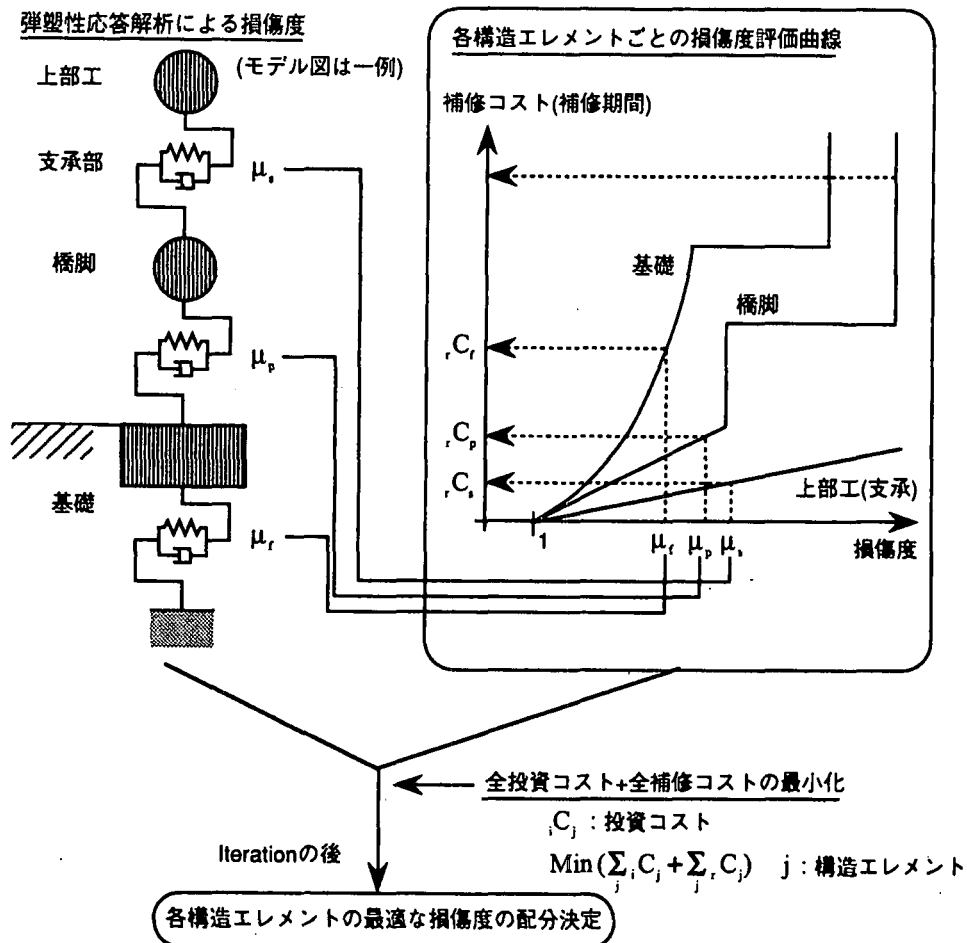


図-3 損傷度の最適配分決定までの流れ

本研究では今回の高架橋被害データから直接求めることを考える。

すなわち、まず被災した高架橋の被害状況を調査する。具体的には、構造諸元、破壊形態に対する被災度、被災状況、選択した補修方法、補修コスト、補修期間などが一覧できるデータシートを各構造エレメントごとに作成し、そのデータシートを携え阪神高速道路公団や施工業者を訪ね、ヒアリング調査やデータ収集を行う。

調査対象は阪神高速道路3号神戸線と5号湾岸線に絞る。この2線で、高架橋を代表する構造種別と被害形態をほとんど網羅すると考えるからである。

こうして収集したデータを分析し、構造エレメントごとに損傷を適切に表現する物理量と補修コスト(補修期間)との関係を表す曲線を作成する。

5. 弾性・弾塑性応答解析による試算例

図-3に示したように損傷度評価曲線を活用するためには、数値計算によって解析的に損傷度を与えなければならない。ここでは、その際の目安を与える

意味で、高架橋システムの損傷度の配分について数値計算例を通じて考察する。

ここでは、高架橋の上部工、支承、橋脚、基礎を図-3のような3質点のせん断型振動系にモデル化した。弾塑性応答解析時には各復元力特性をバイ・リニア型に仮定する。その場合の支承部は免震支承、橋脚は中詰めコンクリートを打設した鋼橋脚を想定している。なお今後、基礎についてはロッキングを考慮した非線形モデル^{4,7)}とし、橋脚の復元力特性はRC橋脚を想定したトリ・リニアモデルの採用を検討している。また、地盤の液状化や基礎の側方流動をモデルの中に勘案することは現段階では行わない。

そこでまず、支承部の構造減衰のみを2%から100%まで変化させ、弾性応答解析を行った。その結果を図-4と図-5に示す。各構造エレメントの重量、構造減衰、バネ定数は文献1),8),9)の値を参考にして、表-1から表-3のように設定した。なお、地震動波形については神戸海洋気象台のNS成分と東神戸大橋のN168E成分(GL-1.5m)の2つの記録をフルスケールで入力した。

表-1 構造物の重量(tonf) 表-2 構造物の構造減衰

上部工	1200
橋脚	170
基礎	880

橋脚	0.01
基礎	0.10

表-3 構造物のバネ定数(tonf/m)

支承部	7414
橋脚	7663
基礎	31601

図-4の神戸海洋気象台の記録を入力した場合は、支承部の構造減衰を2%から20%に上げていくと、橋脚と基礎の最大層間変位はともに2%減衰時の約6割程度に落ちる。支承部に適度な減衰を付加することによって、橋脚と基礎の負担は大きく軽減される。しかし、20%を越えた付近から橋脚の負担が増加し始める。つまり、支承部の減衰の改善だけでは限界があることも事実で、各構造エレメントへの損傷の分担が必要になることを図-4は示している。

図-5には東神戸大橋の記録を入力した場合を示すが、最大層間変位の低下率は低いものの、上に述べたことを支持する結果となっている。

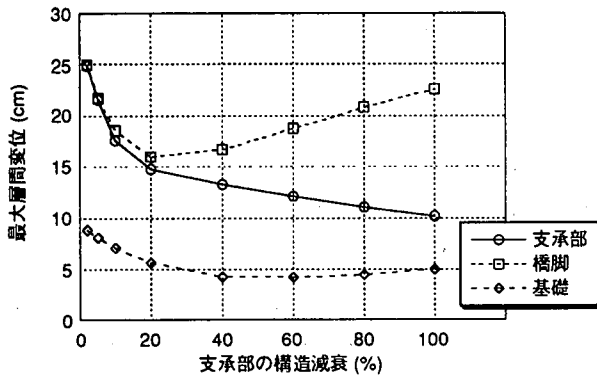


図-4 支承部の構造減衰を変化させた時の各構造エレメント間の最大層間変位の変化 (入力波形：神戸海洋気象台NS成分)

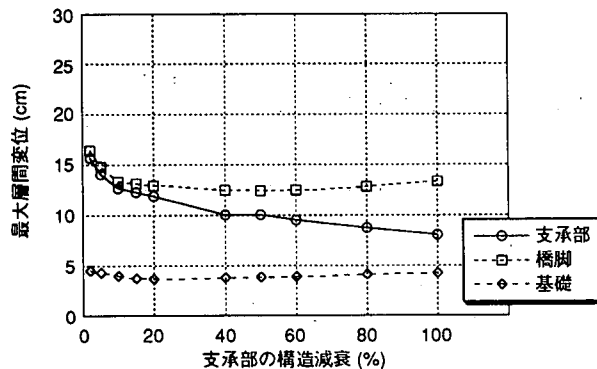


図-5 支承部の構造減衰を変化させた時の各構造エレメント間の最大層間変位の変化 (入力波形：東神戸大橋 GL-1.5m N168E)

次に、支承部の復元力特性のみをバイ・リニア型

に設定し、支承部の弾性限界震度を変化させ、弾塑性応答解析を行った。弾性限界震度を上げていくことは復元力の一次勾配値と二次勾配値をそのままにして降伏変位のみを変化させることに相当し、支承部の高強度化を意味する。その際の支承部の靱性率の変化、橋脚と基礎の層間変位の最大値の変化を図-6、図-7に示した。なお、靱性率は最大層間変位を降伏変位で除した値と定義している。構造物の重量は表-1、橋脚と基礎の構造減衰は表-2と同じ値を用いた。支承部の構造減衰は履歴減衰を考慮して0%としている。さらにバネ定数は表-4のように設定した。これらの値も文献(1),(8),(9)を参考に定めている。

表-4 構造物のバネ定数(tonf/m)

	一次勾配	二次勾配
支承部	7414	1428
橋脚	7663	
基礎	31601	

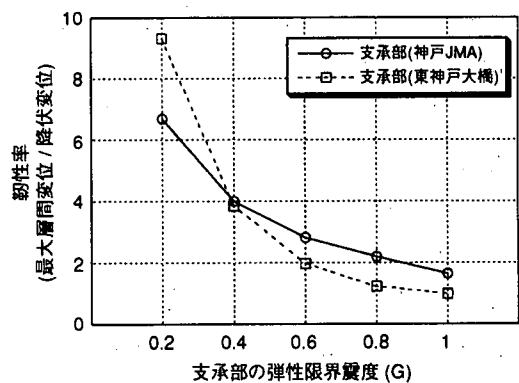


図-6 支承部の弾性限界震度を変化させた時の支承部の靱性率の変化

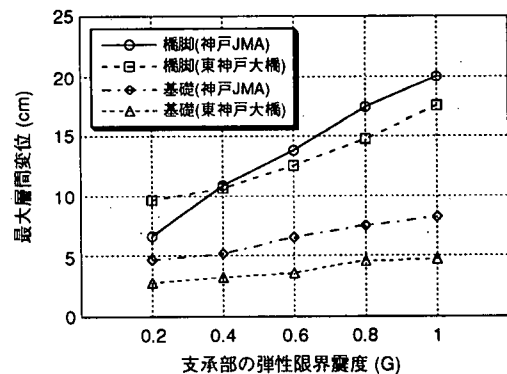


図-7 支承部の弾性限界震度を変化させた時の橋脚と基礎の最大層間変位の変化

図-6と図-7より、2つの地震記録を入力した2ケースとも、支承部の弾性限界震度を0.2Gから1.0Gに変化させると、支承部の靱性率は減少し、橋脚と基礎の最大層間変位は増加する。支承部の高強度化は支

承部の靱性率を抑える一方、橋脚と基礎の負担を増やしている。つまり、図-6と図-7は各構造エレメントの損傷度をどこかでバランスさせる必要があることを示している。

以上の2つの試算例から、支承部に減衰を付加するだけであつたり、あるいは支承部を高強度化するだけではなく、高架橋全体として構造エレメント相互間で損傷度のバランスに配慮することが必要であることが示唆された。

6. まとめ

本研究では、高架橋を一つの構造システムと捉え、全体システムで耐震安全性を満足するように損傷を各構造エレメントに最適に配分するという耐震設計の考え方を示した。その際、高架橋の被災後の補修コストや補修期間を「高架橋システム全体の損傷」を規定する尺度にし、損傷度と補修コストや補修期間との関係曲線図を提案した。この尺度が得られると、弾塑性応答解析などの解析結果をこの関係曲線図に対応づけ、構造エレメントごとの補修コストが算出でき、その総和と投資コストとの和が最小となる高架橋システムが決められる。

さらに、数値計算例として、支承部の構造減衰と弾性限界震度を変化させた場合の靱性率や最大層間変位の変化を調べた。これらの結果から、支承部のみの高減衰化や高強度化ではなく、構造エレメント相互間で損傷度のバランスに配慮する必要があることが示された。

なお、被害調査からの損傷度評価曲線(図-2)の構築、ならびに橋脚と基礎の塑性変形まで含めた試算結果は当日発表する予定である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、貴重な御意見をいただいた東京工業大学土木工学科の川島一彦教授に深く御礼を申し上げます。さらに、貴重な資料や助言を幾度となくいただいた阪神高速道路公団の石崎浩氏、川北司郎氏、並びに関係各位に厚く御礼を申し上げます。

[参考文献]

- 1) 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わる仕様」の準用に関する参考資料(案), 1995.6.
- 2) 藤野陽三：「耐震都市づくりへの提言」構造工学, 土木が遭遇した阪神大震災, 日経コンストラクション編, pp.186-187, 1995.7.
- 3) 渡邊英一, 前川義男, 杉浦邦征, 北根安雄：鋼橋の被害と耐震性, 土木学会誌, Vol.80, pp.54-62, 1995.7.
- 4) 土岐憲三, 白井孝治：RC橋脚と基礎における耐震安全性の配分について, 第19回地震工学研究発表会講演概要, pp.317-320, 1987.
- 5) 佐藤次郎, 篠崎之雄, 佐伯光昭, 磯山龍二：大都市における既設道路橋の地震防災上の重度度の評価手法, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.213-223, 1995.4.
- 6) 川島一彦：免震設計技術の発展と今後の展望, 土木学会論文集, No.398/I-10, 1988.10.
- 7) 竹内廣高, 土岐憲三, 佐藤忠信：杭基礎-地盤系の動的相互作用解析モデルの構築, 第21回地震工学研究発表会講演概要, pp.365-368, 1991.
- 8) 土木研究センター：道路橋の免震設計法マニュアル(案), 1993.12.
- 9) 平井卓, 鈴木一彦, 杉本三千雄：神戸海洋気象台観測波(1995)に対する免震橋梁の非線形応答に関する研究, 第23回地震工学研究発表会講演概要, pp.533-536, 1995.7.

PROPOSAL OF A SEISMIC DESIGN CONCEPT FOR ELEVATED BRIDGES FROM DAMAGE ASSESSMENTS OF HANSHIN-AWAJI EARTHQUAKE

Yozo FUJINO, Gaku SHOJI, Masato ABE

The purpose of this paper is to propose a seismic design concept for elevated highway bridges. We would like to focus attention on Hanshin-Awaji earthquake levels and our concern is to identify the optimum damage quantity, which should be divided to each structural element (superstructure, bearing plate, pier, foundation) from systematic point of view. First, this paper makes the relationship between damage quantities and retrofit costs (the span of retrofit) clear by collecting data and conducting damage assessments. Secondly, the results of inelastic response analysis for the lumped mass model are applied to the diagram of damage quantities versus retrofit costs. Finally, it is possible to identify the division of optimum damage quantity for each element to minimize the summation of total retrofit costs and total initial costs.