

GIS データベースに基づいた橋梁耐震診断法の構築と損傷確率マトリックスの評価

Development of Seismic Diagnosis Method for Bridge Structures
Based on GIS Database and Evaluation of Damage Probability Matrix

高田至郎* 森川英典** 松本正人*** 花川和彦****

Shiro TAKADA, Hidenori MORIKAWA, Masato MATSUMOTO and Kazuhiko HANAKAWA

* 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657 兵庫県神戸市灘区六甲台町)

** 工博 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒657 兵庫県神戸市灘区六甲台町)

*** 工修 神戸大学大学院 (〒657 兵庫県神戸市灘区六甲台町)

**** 工修 東日本旅客鉄道(株) (〒100 東京都千代田区丸の内1丁目)

A lot of bridge structures have been heavily damaged during the Hyogo-Ken Nanbu Earthquake. Japan Society of Civil Engineers Published the "Proposal on Earthquake Resistance for Civil Engineering Structures" and exposed a basic concept of the seismic diagnosis and strengthening for existing civil engineering structures. According to it, seismic diagnosis must be carried out by two kinds of phases, that is, "The First Phase" which is relatively rough way, and "The Second Phase" in detail.

Under these circumstances, we have made a GIS database on damaged bridge structures and examined damage factors through a statistical analysis. This paper aims to develop a seismic diagnosis method based on those research results, which corresponds to "The First Phase" of the diagnosis.

For bridge columns, seismic diagnosis flow is proposed and various kinds of bridge columns are divided into some groups. Moreover, for RC single columns, "Damage Probability Matrix" is proposed, which is useful to determine the priority of seismic strengthening strategy.

Key Words: GIS database, Seismic Diagnosis for bridge structures, Damage Probability Matrix

1. はじめに

兵庫県南部地震による橋梁構造物の被災メカニズムについては、各研究機関で研究が行われており、これらの結果から得られた新たな知見をふまえ、橋梁の耐震設計基準の見直しが検討されている。土木学会においても、兵庫県南部地震による土木構造物の被害の重大性に鑑み、平成7年3月、「耐震基準等基本問題検討会議」を設置し、同年5月には現行耐震基準等を検討する際の基本となる方針を『土木構造物の耐震基準等に関する提言』¹⁾

(以下「第一次提言」と略記する)としてとりまとめた。さらに、平成8年1月には、「第一次提言」の内容をさらに深化させ、『土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」』²⁾(以下「第二次提言」と略記する)を発表し、今後の耐震設計法などに関する基本方針を示した。

一方、新しい耐震設計基準についての検討と同様に、既設構造物に対する耐震診断・耐震補強に関する議論も活発に行われるようになった。過去における橋梁の耐震設計基準の変遷経緯を見ても明らかなように、耐震設計技術は過去の被災経験に基づいて常に進歩していく過程にあり、その各段階で架設された橋梁に対しては、将来、

新たな耐震性に関する知見、耐震基準に基づいてその耐震性能を診断しなければならない。また、改正された設計基準に満たない旧基準によって設計されている膨大な数の既存橋梁に対する耐震安全性に関する点検・診断、ならびに耐震性に課題のある橋梁の補強という一連の検討を、構造物の重要度による優先順位付けを行って効率的に行うための耐震補強プログラムが必要とされている。まずその第一ステップとして、既存土木構造物の耐震診断のためのデータベースの整備と同時に、兵庫県南部地震による被災の特徴を様々な角度から把握することが急務であることが第二次提言²⁾でも唱われている。

このような背景のもと、本研究では、兵庫県南部地震により被災した高架橋梁のデータを収集し、これらの情報をGIS (Geographical Information Systems: 地理情報システム)³⁾を用いてデータベース化し、構造・地盤条件に加え、地震動強度も考慮して総合的に橋梁構造物の被災要因分析を行ってきた。本稿は、これらの分析結果に基づいて、既存橋梁の耐震性能を比較的簡便な手法で評価する橋梁耐震診断法を構築することを目的としたものであり、橋梁全体系の耐震性の確保を念頭に置いた

耐震診断プロセスを提案した。橋梁上部工については、支承部分の耐震性を考慮して総合的に耐震診断を行うフローを作成した。また、橋脚については、準拠示方書や概略的な構造特性を用いた耐震診断フローを作成し、さらにRC単柱橋脚を対象として、地震動強度と被災度をクロス集計して算出した「損傷確率（Damage Probability）マトリックス」を利用して耐震補強の優先順位付けを行う手法を提案した。

2. 耐震診断のコンセプト

2.1 耐震診断の位置づけと診断の流れ

土木学会耐震基準等検討会議では、「第一次提言」¹⁾、「第二次提言」²⁾をはじめとする様々な文献を通じて、既存土木構造物の耐震診断・耐震補強に関する基本方針を公表した。「第一次提言」¹⁾では、土木構造物の耐震診断は、概略的な方法による一次診断と、より詳細な方法による二次診断によって行うとしている。本研究における耐震診断は、これらの基本方針を受け、とくに道路橋に対する耐震診断を行うためのものである。既往の耐震診断が地震被害を受けていない既存の構造物の耐震補強の要否を決定することを目的としているのに対し、さらに地震被害を受けた構造物、耐震補強を施した構造物の将来の材料劣化をも考慮した総合的な維持管理対策を鑑み、データベースの設計段階からこれらの要因を組み入れている。本研究は、とくに耐震診断の一次診断に着目したものであり、兵庫県南部地震における被災橋梁に関するGISデータベースを用いた様々な統計分析結果をもとに、土木学会ではまだ具体化されていない一次診

断のプロセスを確立し、できる限り精度の高い簡易診断法の提案を当面の目的としている。図-1に、本研究での耐震診断の概念図を示す。まず、GISシステムおよびこれと有機的に結合されたリレーショナルデータベースを用いて、兵庫県南部地震により被災した橋梁構造物のデータをデータベース化する。次に、このデータベースを用いて被災要因に関する統計分析を行い、耐震診断の一次診断プロセスを構築する。なお、一次診断の段階では、多種多様な属性を有する橋梁を、簡便な方法によって、「①耐震補強の必要があるもの」、「②耐震補強の要否について、さらに詳細な検討（二次診断）が必要なもの」、「③耐震補強の必要がなく、今後耐久性を考慮した維持管理を行っていくもの」の三種類に分類する。

2.2 耐震診断で考慮する地震動強度

本研究での耐震診断は、兵庫県南部地震における被災データに関する統計分析を根拠とするものであるから、本研究における耐震診断は、レベル2地震動に対応した一次診断と位置付けることができる。しかし、道路橋の耐震設計基準が整う以前に架設された橋梁の中には、耐用年数内に数回発生する大きさの地震動（レベル1地震動）に対しても十分な耐震性能を有しないものも存在することが考えられ、本研究では考慮する地震動に段階を設けることによって、耐震診断過程をレベル1地震動にまで拡張する手法を考えている。なお、レベル1地震動を設定した耐震診断のプロセスについては、過去に建設省から提案された耐震診断法⁴⁾がある。

2.3 耐震診断の対象とする構造物

兵庫県南部地震によって多くの橋梁構造物が被災したことを受け、今回被災しなかった構造物に対する耐震補強の必要性が強く認識され、すでに一部の地域で耐震補強工事が着工されている。阪神高速道路公団では、今回大きな被害を受けた3号神戸線だけでなく、大阪市内の環状線や東大阪線などの13路線すべてを対象に、平成7年から3年間かけて、震度7でも倒壊しないよう橋脚の補強工事を実施することを決めた⁵⁾。このように、耐震診断・耐震補強の対象となる構造物の数がある程度限定されている場合には、すべての補強対象橋梁に対して、比較的短期間で一斉に補強工事を実施することができる。ところが、一般国道、県道、市町村道を構成する比較的小規模なコンクリート橋などを対象とした場合、その数が全国的にみれば膨大となるため、上述のように対象数が限定されている場合に比べて耐震補強に費やすことのできる予算面での制約が大きい。したがって、対象数が膨大である場合には、限られた予算で最も効果的に道路橋ネットワーク全体の耐震性能を向上させるために、耐震補強の優先順位付けが必要となる。優先順位付けは、構造物の地震に対する危険度と、構造物の重要度（構造物が被災した場合の社会的影響度）を総合して行う必要

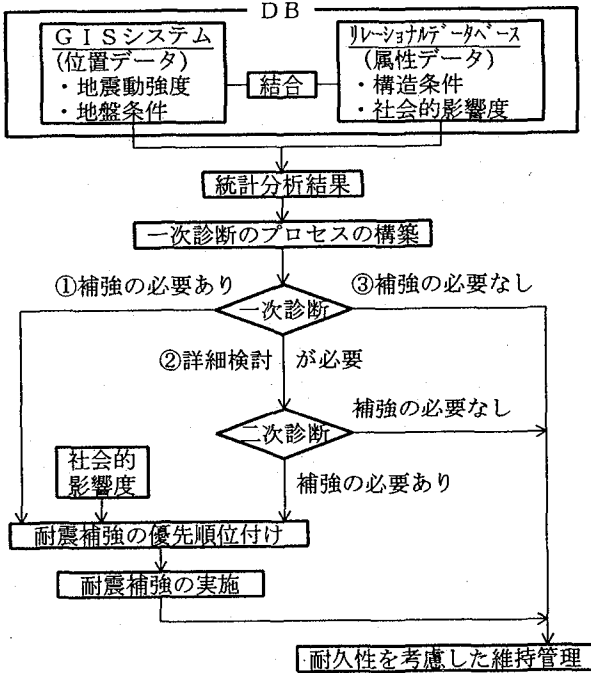


図-1 本研究の耐震診断の概念

がある。

2.4 耐震診断の枠組みと基本方針

本研究では、橋梁構造物の地震に対する危険度の診断は、(1)構造の問題、(2)入力地震動の問題、(3)耐久性の問題の三つの要因を総合して行うべきであるとする。

(1)構造の問題：構造的な観点から橋梁の耐震性能を評価する際には、橋梁が被災した場合の社会的影響、復旧に要する日数・費用を考慮して、少なくとも「上部構造の落橋」、「橋脚の崩壊」、「基礎の大きな損傷」の三種類の損傷形態を確実に避けるように、耐震補強を行うべきである。

(2)入力地震動の問題：ここでいう「入力地震動の問題」とは、「地震危険度 (Hazard)」を示すものであり、断層からの距離や地盤条件といった要因から、地域的な地震動増幅特性を考慮することにより定めるものとする。

(3)耐久性の問題：設計時に想定した橋梁の耐震性能は、長期間の供用の間に次第に損なわれていくと考えられるが、橋梁部材の強度劣化による耐震性能の低下については、あまり考慮されていないように思われる。そこで本研究では耐震性能や耐荷性能の経時変化に対する抵抗性として定義される耐久性を考慮することにする⁹⁾。戦後急ピッチで建設された橋梁が老朽化し、本格的な維持管理が必要になってくるのはあと十数年後になるといわれており、それに備えて点検データ、材料試験データの蓄積を行っていく必要がある。ところが、現段階では維持管理と耐震設計がまったく別の概念でとらえられており、これらを行う部門がそれぞれ独立して評価や診断を行っているという問題点があり⁹⁾、今後、耐震設計、耐久性設計、維持管理を総合的に考えていく必要がある。

2.5 社会的影響度の評価と補強の優先順位の決定

上記(1)～(3)を総合して求められた耐震性能は、地震に対する構造物としての危険度を評価するものであり、耐震補強の優先順位を決定するための一つの情報を提供

するものである。これに加えて、構造物の重要度を示す「社会的影響度」を加味し、最終的に補強対象橋梁間の優先順位を決定することになる。ここで「第一次提言」¹⁾では、構造物の重要度として以下の4点を考慮して決定すべきであるとしている。①構造物が損傷を受けた場合に人命、生存に与える影響の度合、②発災後の避難・救援・救急活動と二次災害防止に影響を与える度合、③地域你的生活機能と国際的視野をも含めた経済活動に与える影響の度合、④都市機能の早期復旧に与える影響の度合、および復旧の難易度、したがって本研究でも被災した場合の社会的影響度の大きさを評価するため、データベースの設計段階でこのような要因に関するデータを蓄積し、将来的には、GISシステムを利用した道路橋ネットワークとしての総合的な耐震補強プログラムの開発を目指すこととした。なお、本研究において構築したデータベースの詳細については、文献8)を参照されたい。

2.6 耐震診断の概要

図-2は、本研究で提案する耐震診断のイメージ図である。まず、データベース形式の属性データを用いて、対象橋梁の各構成部材ごとに耐震性能を評価する。構造的な耐震性能は、橋梁全体系の耐震性をもって評価するが、本研究では、ある構造部材に故意に弱点を設けることなく、それぞれの部材の耐震性能を積み重ねることによって結果的に橋梁全体系の耐震性能を確保する方法が既存橋梁の耐震診断を考えた場合には最も安全である⁹⁾という立場をとっているため、各々の構成部材について安全性を評価し、問題がある場合にはそれぞれに耐震対策を施すという形で耐震診断を行う。こうして求められた「構造的な耐震性能」に加えて、「地震動強度」、「耐久性の問題」を併せて考慮し、全体をまとめて「耐震診断プロセス」としている。さらに、橋梁が被災した場合の社会的影響度を評価し、補強対象橋梁間の優先順位を決定する。また、診断結果をGISに表示させることによって、診断結果を視覚的に表現することも考えている。

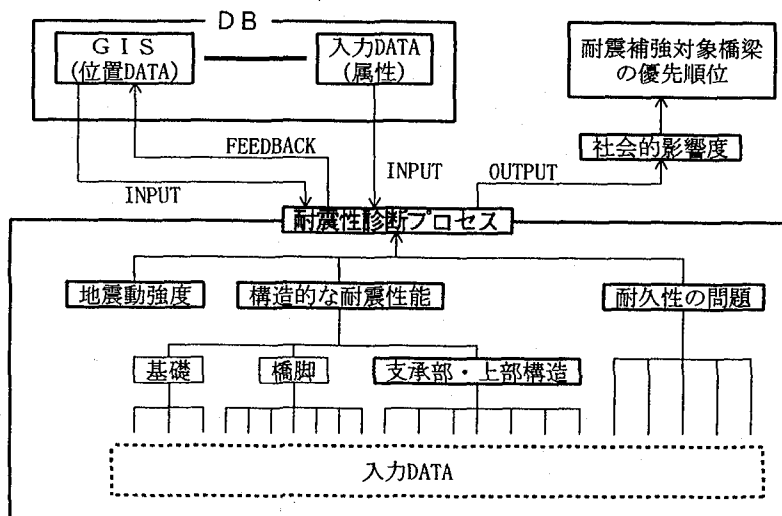


図-2 耐震診断のイメージ図

3. 上部構造・支承部の耐震診断プロセス

3.1 桁の損傷に関する分析

まずはじめに、落橋した上部構造28径間について、これを支える橋脚・支承部の被災度を調査した。この結果、落橋の大部分が橋脚の崩壊に起因していること、また、一部においては支承部の破壊が落橋につながったケースがあることが知られた。

次に、他部材の損傷状況との比較を通じて、桁の損傷原因を考察する。鋼桁においては、代表的な損傷形態はウェブの座屈、フランジの損傷・破断・変形などであるが、これらの損傷は、上部構造単独で損傷したものではなく、他の部材の損傷の影響で起こった可能性が高い¹⁰⁾。表-1は、上部構造の被災度と支承の被災度の関係を示したものであるが、前述したことを裏付けるように、被災度Aの支承に支えられていた上部構造に相対的に大被害を受けたものが多いことが判る。以上の結果より、上部構造の損傷は、橋脚あるいは支承部といった他の部材の損傷によって連鎖的に引き起こされたと考えられ、上部構造に対して効果的な耐震対策を行うためには、まず下部構造・支承部への十分な耐震対策の強化が必要であるといえる。ところが、支承が損傷したことによって桁端部の損傷を免れた例や、逆に損傷を免れた支承が桁端部の損傷の原因になった例があることから、支承部の設計をどのようにすべきかという問題については、今後の研究に待つところが大い。現時点においては、支承が破壊しても桁端部に損傷を与えないような構造にしたり、

あるいは桁を弾性的に支持するとともに、支承面積を大きくして上部構造を逸脱しにくくしたり、万一の逸脱に備え、支承高さを低くし、段差・衝撃が少なくなるようなゴム支承の採用などで対応していくべきであるとする意見¹¹⁾を支持する立場をとる。

3.2 上部構造・支承部の耐震診断フロー

以上の結果をもとに、上部構造の耐震診断プロセスを構築した結果を図-3に示す。既存橋梁の上部構造に対して耐震対策を行う場合、構造形式そのものを変更することはできないこと、上部構造の落橋・桁端部の損傷などの多くは、橋脚躯体の崩壊と支承部の損傷に起因していることから、考え得る耐震対策としては、支承が破壊した場合に桁端部の損傷を防止すること、複数の落橋防止構造を設置して確実に落橋を防止することが挙げられる。まず、データベースを用いた統計分析の結果より、昭和46年以前の道示に準拠した橋梁においては、背の高い鋼製支承（固定支承ではピン支承、可動支承ではローラー支承）の被災度が高かったことから、これらを用いているものについては、新示方書による規定¹²⁾に従って、支承破壊後に上部構造を適切な高さに支持するために、段差防止装置を設置する。また、すべての橋梁に対して、新示方書による落橋防止構造、支承部に関する耐震規定の点検を行い、規定を満足していないものについては、適切な落橋防止装置の整備、並びに支承縁端距離 S 、桁かかり長 S_e の確保を行い、確実に落橋を防止できる構造とする。

表-1 上部構造の被災度と支承の被災度の関係

被害判定	支承 A	支承 B	支承 C	支承 D	合計
上部構造 A	32 (80%)	1 (3%)	4 (10%)	3 (8%)	40 (100%)
上部構造 B	136 (59%)	50 (22%)	18 (8%)	25 (11%)	229 (100%)
上部構造 C	56 (9%)	149 (23%)	157 (24%)	293 (45%)	655 (100%)
上部構造 D	4 (3%)	17 (14%)	42 (35%)	57 (48%)	120 (100%)
合計	228 (22%)	217 (21%)	221 (21%)	378 (36%)	1,044 (100%)

※ A：大被害，B：中被害，C：小被害，D：無被害

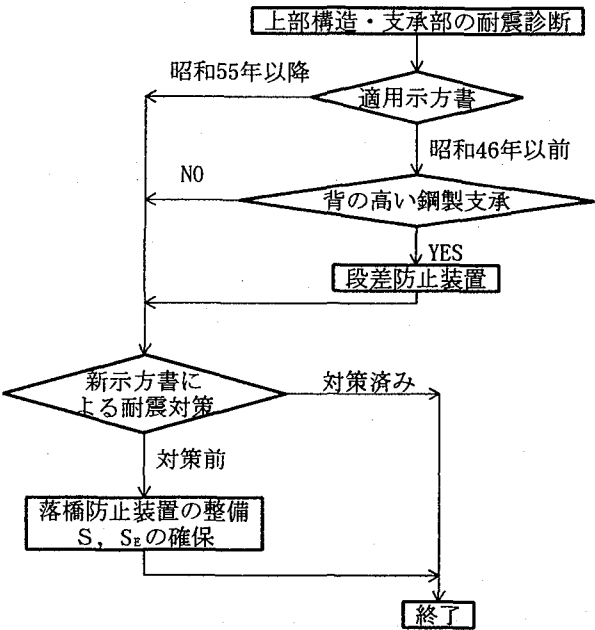


図-3 上部構造・支承部を総合した耐震診断プロセス

4. 橋脚の耐震診断プロセス

4.1 橋脚の被災特性の概観

本節では、兵庫県南部地震における橋脚の被災特性の概観を行う。表-2は、本研究においてデータベース化されている阪神高速道路3号神戸線、同5号湾岸線、中国自動車道・名神高速道路について、準拠示方書別に橋脚の被災度を集計したものである。ただし、被災度の定義は、As:崩壊、A:大被害、B:中被害、C:小被害、D:無被害である¹³⁾。この結果より、As またはA判定の被災を受けた橋脚は、昭和39年の道示に準拠した橋脚と、昭和46年の道示に準拠したRC橋脚のごく一部に限られていることが判り、橋脚の耐震性能は準拠示方書によって決定的な違いがあるといえる。これは、昭和55年の道示において、地震時変形性能の照査、段落とし部の定着長が規定され、コンクリートの許容応力度の引き下げ ($7.0\text{kg/cm}^2 \rightarrow 3.9\text{kg/cm}^2$) が行われるなど、橋脚の靱性が大幅に向上したことによると考えられる。次に、RC橋脚について形式別に被災度を集計した結果について述べる。表-3は、阪神高速3号神戸線におけるRC橋脚の橋脚形式別被災度を示したものである。倒壊によってすべてがAs判定となったピルツ区間以外では、特殊単柱橋脚の被害が顕著である。特殊単柱橋脚は、橋脚の上部・支承付近といった部分で破壊している場合が多く、一般の単柱式橋脚のように橋脚基部や主鉄筋段落とし部に対する照査だけでは十分な耐震性能評価が行えない可能性がある。一方、ラーメン橋脚は相対的に被害が軽微で

あった。その原因としては、今回の地震の揺れの方が主として橋軸直角方向であったためであると考えられる。

4.2 橋脚の被災要因についての多変量分析

本節では、橋脚の被災度に影響を与える要因の中でも、構造的な要因に着目した多変量分析を行うことによって、影響の大きい要因の抽出を行い、耐震診断項目として有益であると思われる要因の選定を行う。ここでは、要因として適用示方書、橋脚形式、橋脚材料・断面形状、橋脚の高さの各要因を用い、数量化理論Ⅱ類¹⁴⁾による多変量分析を行った。表-4に、分析結果を示す。ただし、主鉄筋段落とし部の有無などの構造細目についての要因は、構造形式などによって分類した段階で考慮することとし、この段階では考慮していない。まず、カテゴリースコアに着目すると、外的基準である橋脚の被災度において、被災度が大きくなるほど外的基準のカテゴリースコアも大きくなる傾向を示していることから、円形断面のRC橋脚、昭和39年道示を用いた橋脚、ピルツの柱、単柱、特殊単柱橋脚において、それぞれ被災度が大きくなることが判る。次に、各要因の影響の大きさを表す「範囲」に着目すると、橋脚形式、適用示方書、橋脚材料・断面形状の順に橋脚の被災度に与える影響が大きく、橋脚高さの影響はこれらに比べて小さいことが知られた。次節では、これら支配的要因を用いて、橋脚の耐震診断プロセスを構築した結果について述べる。

表-2 橋脚の準拠示方書別被災度

	示方書	As	A	B	C	D	合計
RC橋脚	～S. 39	79 (4%)	175 (8%)	176 (9%)	790 (38%)	840 (41%)	2060 (100%)
	S. 46	1 (1%)	1 (1%)	0 (0%)	56 (37%)	93 (62%)	151 (100%)
	S. 55	0 (0%)	0 (0%)	1 (1%)	22 (12%)	154 (87%)	177 (100%)
	H. 2	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	42 (100%)	42 (100%)
	RC合計	80 (3%)	176 (7%)	177 (7%)	868 (36%)	1129 (46%)	2430 (100%)
鋼製橋脚	～S. 39	3 (3%)	10 (11%)	7 (7%)	73 (77%)	2 (2%)	95 (100%)
	S. 46	0 (0%)	0 (0%)	5 (7%)	40 (59%)	23 (34%)	68 (100%)
	S. 55	0 (0%)	0 (0%)	11 (9%)	19 (15%)	97 (76%)	127 (100%)
	H. 2	0 (0%)	0 (0%)	2 (13%)	2 (13%)	12 (75%)	16 (100%)
	鋼製合計	3 (1%)	10 (3%)	25 (8%)	134 (44%)	134 (44%)	306 (100%)

表-3 RC橋脚の橋脚形式別被災度 (3号神戸線)

被災度	As	A	B	C	D	合計
単柱	34 (5%)	73 (10%)	78 (11%)	194 (27%)	330 (47%)	709 (100%)
ピルツの柱	17 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	17 (100%)
ラーメン橋脚	3 (3%)	1 (1%)	5 (5%)	4 (4%)	96 (88%)	109 (100%)
特殊単柱	12 (16%)	12 (16%)	6 (8%)	6 (8%)	38 (51%)	74 (100%)
壁式柱	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	2 (20%)	8 (80%)	10 (100%)
RC立体ラーメン	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	8 (100%)	8 (100%)
橋台	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	18 (47%)	20 (53%)	38 (100%)
合計	66 (7%)	86 (9%)	89 (9%)	224 (23%)	500 (52%)	965 (100%)

表-4 橋脚の構造条件に関する数量化の結果

要因	カテゴリ	例数	Cat. Score	範囲
橋脚材料 断面形状	鋼製、円形	33	-0.77	1.25
	鋼製、矩形	102	-0.40	
	RC脚、円形	211	0.48	
	RC、正方形	139	0.01	
	RC、長方形	146	-0.25	
適用 示方書	S.39道示	436	0.43	1.39
	S.46道示	195	-0.96	
橋脚形式	単柱式橋脚	334	0.17	1.94
	特殊単柱	74	0.16	
	ラーメン橋脚	129	-0.18	
	ビームの柱	17	1.10	
	その他	77	-0.84	
橋脚高さ	9m未満	177	-0.24	0.35
	9m～13m	273	0.11	
	13m以上	181	0.06	
外的基準 (被災度)	As	70	1.07	1.71
	A	96	0.81	
	B	97	0.68	
	C	180	-0.64	
	D	188	-0.55	

4.3 橋脚の耐震診断プロセス

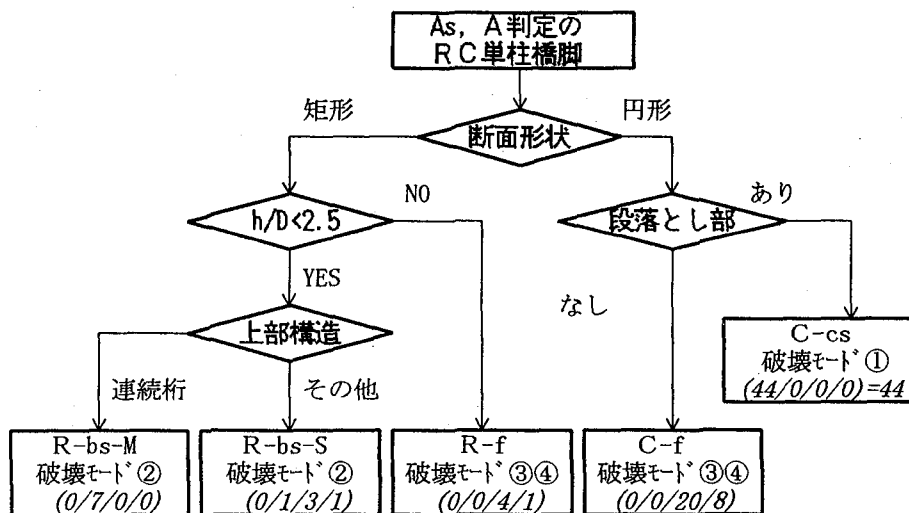
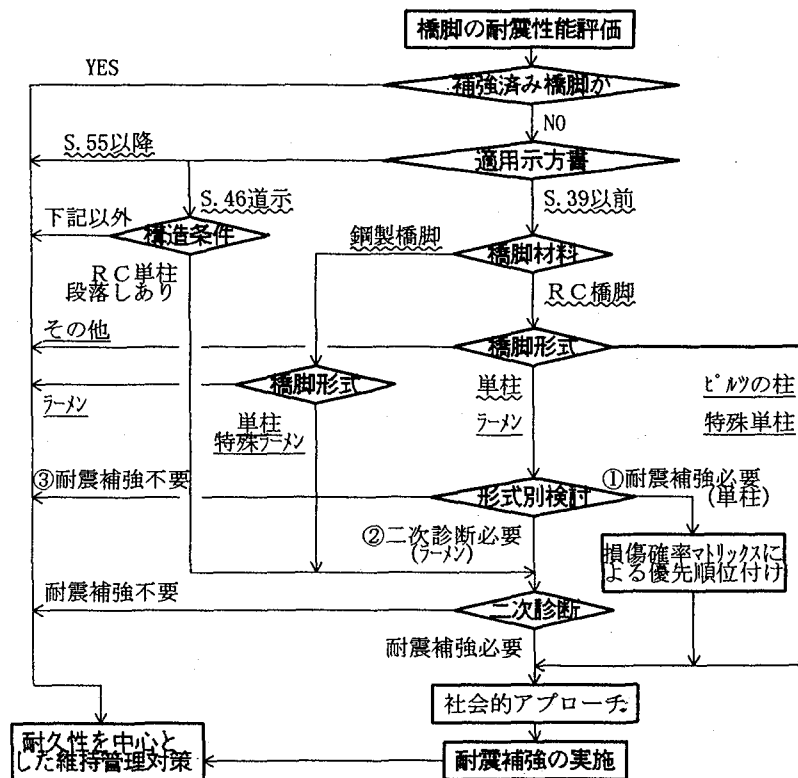
図-4に、上記の多変量分析において橋脚の被災度に大きく影響するとされた要因を用いた橋脚の耐震診断フローを示す。まず、診断の最初の段階で、補強済み橋脚と昭和55年以降の道示に準拠した橋脚については「③補強の必要なし」と判定し、また、昭和46年の道示に準拠した橋脚については、段落としを有するRC単柱橋脚のみが「②二次診断の必要あり」と判定されるようにした。さらに、昭和39年の道示に準拠したものについては、前節の多変量分析によって橋脚の被災度と有意な相関性があるとされた橋脚材料と橋脚形式の各要因によってさらに分類され、この段階において、補強の要否が決定するもの、二次診断が必要なもの、形式別検討に進むものそれぞれ分類される。図-4では、さらに形式別検討を行うものをRC単柱橋脚、RCラーメン橋脚としているが、RCラーメン橋脚については、既往の耐震診断⁴⁾では耐震性能をとくに低く評価されているにも関わらず、兵庫県南部地震においては被災度が小さく、本データ分析をもとにして構築された診断プロセスでは、危険側に評価する恐れがあるため、本研究ではRCラーメン橋脚を「②二次診断の必要あり」とすることによって安全性を確保することにした。また、昭和39年の道示に準拠したRC単柱橋脚については、さらに形式別検討を行うが、これらについては、構造・地盤条件別に設定する地震動強度に対する損傷確率を示した「損傷確率 (Damage Probability) マトリックス」を提示することによって、耐震補強の優先順位付けを行うこととした。

4.4 RC単柱橋脚の耐震診断

1) RC単柱橋脚のグループ化

本節では、RC橋脚の被災度に大きく影響を及ぼすと考えられる破壊モードに着目し、さらにRC単柱橋脚のグループ化を試みる。阪神高速3号神戸線では、RC単

柱式橋脚が最も一般的な形式であったが、その破壊の形態については、大きく以下の4種類に分類できる¹⁵⁾。すなわち、「①中間部曲げせん断破壊」、「②下部せん断破壊」、「③下部曲げ破壊」、「④下部曲げせん断破壊」である。著者らは、兵庫県南部地震において比較的大きな被害(As, A, Bのいずれか)を受けたRC単柱橋脚の損傷状況を調査し、日本道路協会、道路橋震害対策便覧(震災復旧編)¹⁶⁾を参考に、その破壊モードを、上記①～④の破壊モードに分類した。ただし、判定は被災後の橋脚の写真をもとに判定できたものについてのみ行った。次に、これらのデータを用いた統計分析結果をもとに、橋脚の属性から簡便に破壊モードを予測する手法を提案する。図-5は、橋脚の断面形状別に、主鉄筋段落とし部の有無、せん断スパン比の値、上部構造の形式をもとに、破壊モードを簡便に予測し分類するフロー図である。なお、()内には、実際に本フロー図に従って橋脚を分類した各グループごとに、破壊モード(①/②/③/④)に至った橋脚数を示している。なお、破壊モードの検証に用いたものは、A判定以上の被害を受けた橋脚で、破壊モードが明確に判定できたものとした。まず、丸単柱については、段落とし部の有無によって、グループC-cs(丸単柱・段落とし部での曲げせん断)、グループC-f(丸単柱、下部曲げ先行型)の二種類に分類した。また、角単柱については、段落とし部を有する橋脚がほとんどなかったため、せん断スパン比(h/D)の値によって、グループR-bs(角単柱・下部せん断)とグループR-f(角単柱・下部曲げ先行型)の二種類に分類した。なお、せん断スパン比(h/D)の値は、下部せん断破壊に至った橋脚のせん断スパン比の最大値が2.45であったことを受け、若干安全側に判定されるよう、h/D=2.5をしきい値として設定した。グループR-bsの中には、曲げ先行型で破壊したものも混在する結果となったため、上部構造によってさらに分類を試み、連続桁の下に位置するものをR-bs-M、その他のものをR-bs-Sとした。また、下部での曲げ先行型破壊が予想されるグループC-f、R-fにおいては、曲げ破壊で留まるか、さらに曲げせん断破壊に進展するかは簡便な手法によって区別することができないので、これらをひとつのグループにまとめて分類した。次に、各グループごとに、実際の橋脚の被災度を調査した結果を表-5に示す。被災度がとくに大きくなっているのはグループC-cs、グループR-bsであり、中でも連続桁の下に位置するR-bs-Mでは、とくに被災度が大きくなっていることが判る。一方、曲げ先行型で破壊するグループC-f、R-fにおいては、A判定以上の被害を受けた橋脚が全体の10%程度となっており、比較的危险度の低いグループであるということが出来る。これらの結果は、耐震補強の優先順位を付けるにあたって有益な情報となりうると考える。



※C-：丸単柱，R-：角単柱，
 cs：段落とし部破壊（破壊モード①）（cutoff-point, shear）
 bs：下部せん断破壊（破壊モード②）（bottom range, shear）
 f：曲げ先行型破壊（破壊モード③または④）（flexial）
 ※()内は，実際に破壊モード(①/②/③/④)に至った橋脚数

図-5 RC単柱橋脚のグループ化と実際の破壊モード

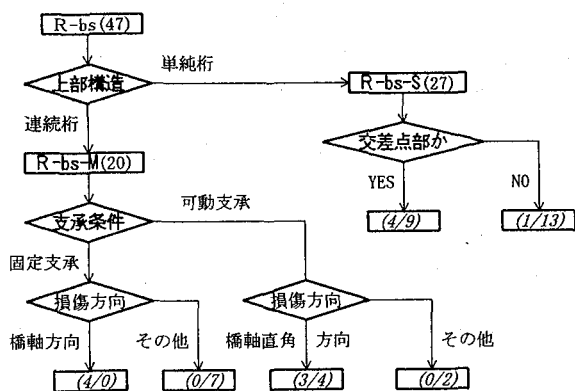
表-5 RC単柱橋脚のグループ別被災度

グループ	AS	A	B～D	合計
C-cs (①)	18(17%)	27(26%)	58(56%)	103(100%)
R-bs-M (②)	4(20%)	3(15%)	13(65%)	20(100%)
R-bs-S (②)	0(0%)	5(19%)	22(81%)	27(100%)
C-f (③④)	7(3%)	25(10%)	217(87%)	249(100%)
R-f (③④)	1(1%)	7(8%)	82(92%)	90(100%)
合計	30(6%)	67(14%)	392(80%)	489(100%)

2) グループ内での耐震診断プロセスの構築

a) グループR-bsの耐震診断

グループR-bsは、橋脚基部でのせん断破壊が予想されるグループである。一般にこのような橋脚は、連続桁を支える部分や交差点を跨ぐ部分といった比較的上部工の慣性力が大きくなる部分に用いられている場合が多く¹⁴⁾、被災度が高い理由として、地震時に作用する上部構造の慣性力が大きくなる部分を支えるために、主鉄筋の増加などによって橋脚の曲げ強度を大きくした結果、相対的にせん断耐力に対する余裕度が小さくなったことが考えられる¹⁶⁾。図-6は、グループR-bsに属する橋脚の耐震診断を、上部構造、支承条件、損傷方向、交差点部に位置するかどうかに着目して行うフロー図である。まず、連続桁の部分については、支承条件と損傷方向に着目した分類を行い、また、単純桁の下に位置する橋脚については、交差点部分に位置するかどうかによって分類した。グループR-bsに属する橋脚の被災度のばらつきは、それぞれの橋脚が置かれている構造的な条件の違いによって、結果的にせん断耐力の余裕度に差ができたことに起因していると考えることができ、耐震診断を行うにあたってこのような構造特性を利用して、耐震性能を評価することが可能であると考えられる。



※ 〇内は、(AsまたはA被害を受けた橋脚数/それ以外の橋脚数)

図-6 グループR-bs内での耐震診断フロー

b) グループC-csの耐震診断

前述したグループR-bsでは、構造的な条件の違いによりせん断強度の余裕度に差ができたことが被災度そのまま反映された形となったが、グループC-csにおいては、地盤条件に関する要因として地形分類を用い、被災度との相関性について考察を加えることにする。表-6は、各グループに属する橋脚について、地形分類別に橋脚の被災度を集計した結果である。河成平野、砂州、沿岸低地、人工天井川においては、相対的に橋脚の被災度が高くなっているが、それぞれグループ別に被災度をみると、砂州、沿岸低地、人工天井川においてはグループによって顕著な被災度の差は見られないが、河成平野においては、C-csのみにおいて被害が顕著であることが判る。これは、段落とし部を有するグループC-csは、

他のグループに比べて相対的に背の高い橋脚が多く、河成平野のような軟弱地盤の卓越周期と橋脚の固有周期が比較的一致する傾向にあり、段落とし位置での曲げひび割れの進展を助長した結果、曲げせん断破壊に至るというメカニズムが推測できる。

表-6 グループ別地形分類と橋脚の被災度の関係

地形分類	C-cs	R-bs	C-f+R-f
沿岸砂州	-	3/15 (20%)	6/51 (12%)
沿岸低地	7/18 (39%)	6/18 (33%)	13/125 (10%)
河成平野	26/51 (50%)	0/4 (0%)	3/80 (4%)
旧河道	-	-	1/13 (8%)
砂州	5/12 (42%)	2/5 (40%)	8/28 (29%)
人工天井川	1/6 (17%)	0/2 (0%)	8/25 (32%)
扇状地	-	1/2 (50%)	0/6 (0%)
埋立地	1/7 (14%)	0/1 (0%)	1/12 (8%)
合計	38/81 (47%)	11/42 (26%)	40/340 (12%)

3) 損傷確率 (Damage Probability) マトリックスの作成

本研究では、地震による構造物の破壊は、材料強度のばらつき、施工の条件、鉄筋が段落としされている位置などに起因する構造物の耐震性能のばらつき、橋脚の振動特性と入力地震動特性の関係などの要因が相互に関連し合った結果、構造物にとって不利な条件が重なった場合に発生すると考えている。ゆえに、構造物の耐震性能は、これらの要因に起因する不確定要素を考慮した上で、定量的な指標として表す必要があり、本研究では耐震性能の評価を、想定する地震動強さに対する損傷確率の形で表現することとした。本節では、上記1)、2)の結果を用いて分類された橋脚のグループごとに、気象庁震度階と橋脚の被災度をクロス集計し、この結果を用いて「損傷確率 (Damage Probability) マトリックス」を作成することによって、耐震補強の優先順位付けを行う。なお、本研究では、地震動強度の指標として、著者らが平成7年度に阪神地域 (神戸市、明石市、西宮市、尼崎市および宝塚市) と淡路島において実施したアンケート調査により算出された「アンケート震度」¹⁷⁾を用いる。ここでアンケート震度IQは、アンケートより得られる回答者ごとの震度係数Iを式(1)に示す変換式¹⁸⁾を用いて気象庁震度階に換算することによって得られる。

$$IQ = 2.958 \cdot (I - 1.456)^{0.547} \quad (1)$$

以下に、損傷確率マトリックスの概念とその利用方法について述べる。平成8年7月に公表された「コンクリート標準示方書・耐震設計編」¹⁹⁾では、「第一次提言」¹⁾、「第二次提言」²⁾の内容を受けてコンクリート構造物に対する耐震診断・耐震補強に関する記述が行われており、構造物が保有すべき耐震性能を表-7に示す三種類に分類している。耐震性能の照査においては、耐震性能1に対する照査はレベル1地震動に対して行い、耐震性能2および耐震性能3に対する照査はレベル2地震動に対して行うとされており、土木学会耐震基準等検討会議における耐震設計の考え方をそのまま耐震診断にも反映させた形となっている。これらの地震動レベルと耐震性

表-7 構造物の保有すべき耐震性能¹⁹⁾

耐震性能	定義
耐震性能1	地震後にも機能は健全で、補修をしないで使用可能
耐震性能2	地震後に機能が短期間で回復でき、補強を必要としない
耐震性能3	地震によって構造物全体が崩壊しない

表-8 地震動レベルと確保すべき耐震性能の対応表

項目	土木学会の概念 ^{21) 19)}	気象庁震度階と被災度
考慮する地震動強度	レベル1地震動 レベル2地震動	震度階5 ⁺ 以下 震度階6 ⁻ 以上
耐震性能と被災度	耐震性能1を確保する 耐震性能2を確保する 耐震性能3を確保する	被災度Dに留める 被災度C以下に留める 被災度B以下に留める

能の表現を、気象庁震度階と橋脚の被災度の関係に置き換えることによって、考慮する地震動強度と確保すべき耐震性能の関係をより具体的にすることを考える。表-8は、それぞれレベル1、レベル2地震動と気象庁震度階、耐震性能1～3¹⁹⁾と橋脚の被災度(As～D)¹⁹⁾の対応付けに関する考え方を示したものである。地震動強度については、震度階5⁺と震度階6⁻の間にしきい値を設け、震度階5⁺以下をレベル1地震動、震度階6⁻以上をレベル2地震動にそれぞれ対応させ、確保すべき耐震性能については、耐震性能1は地震後も補修を必要としない「被災度D」に、耐震性能2は補強を必要としない「被災度C以下」に、耐震性能3は構造物全体が崩壊しない「被災度B以下」に対応させることとした。次に、各橋脚グループごとに、「損傷確率マトリックス」を作成することによって、耐震補強の優先順位付けを行うことを考える。なお、設定する地震動強度の指標を、気象庁震度階のレベルで離散的に与えた根拠は、地震動強度の予測に伴う不確定要素の影響が耐震診断の精度そのものの低下につながることを避けるためである。表-9～表-11は、構造・地盤条件によってグループ化した橋脚群ごとに、「損傷確率マトリックス」を作成したものである。グループC-csにおいては、気象庁震度階の指標によって表される地震動強度のパラメータ以外に、地形分類に起因する地震動の周期特性が被災度に影響を及ぼすと考え、河成平野とその他の地形分類によって別々の損傷確率マトリックスを作成し、また、破壊モードがともに曲げ先行型破壊であるグループC-f、R-fについては、これらをひとまとめにした。表中に網掛けを施した部分は、各震度階域において耐震補強の対象とすべき損傷レベルを示しており、震度階5⁺においては被災度C以上を許容しない、震度階6⁻においては被災度B以上を許容しない、震度階6⁺においては被災度A以上を許容しない、震度階7においては被災度Asを許容しないとしており、これは、表-8に示した方針に対応して、さらに「耐震性能3」の定義を細分化し、より具体的に示したものとなっている。また、橋脚基部でのせん断破壊が予想されるグループR-bsにおいては、地震動強度よりもむしろ上部構造の条件などに起因するせん断耐力の余裕度の大小が被災度に大きく影響すると考えられるので、グループ

R-bsについては横軸に構造条件、縦軸に被災度を設定した損傷確率表を用いることにした。これを表-12に示す。ただし、震度階5⁺のデータは存在しなかったため、設定する地震動強度は震度階6⁻以上で固定した値とした。なお、網掛けは震度階6⁻に対応する被災度B以上に施しているが、他のグループと同様に、震度階6⁺では被災度A以上、震度階7では被災度Asを耐震補強の対象とすべき損傷レベルとする。表-9～表-12のマトリックス作成に用いたデータ数は必ずしも十分であるとはいえないため、表中の数値は各グループ間での相対的な値としてとらえることが必要であるが、これらを用い

表-9 C-cs 損傷確率マトリックス (河成平野)

橋脚被災度	気象庁震度階			
	5 ⁺	6 ⁻	6 ⁺	7
As	—	33%	29%	44%
A	—	33%	25%	33%
B	—	0%	14%	0%
C	—	0%	21%	11%
D	—	33%	11%	11%

表-10 C-cs 損傷確率マトリックス (河成平野以外)

橋脚被災度	気象庁震度階			
	5 ⁺	6 ⁻	6 ⁺	7
As	0%	0%	0%	29%
A	0%	14%	67%	18%
B	0%	14%	11%	18%
C	0%	57%	22%	35%
D	100%	14%	0%	0%

表-11 C-f, R-f 損傷確率マトリックス

橋脚被災度	気象庁震度階			
	5 ⁺	6 ⁻	6 ⁺	7
As	0%	2%	1%	0%
A	0%	13%	7%	23%
B	100%	26%	15%	18%
C	0%	26%	37%	18%
D	0%	33%	39%	41%

表-12 R-bs 損傷確率表 (震度階6⁻以上)

橋脚被災度	連続桁		単純桁	
	固定脊	可動脊	交差点	その他
As	75%	14%	0%	0%
A	25%	29%	31%	7%
B	0%	29%	31%	21%
C	0%	29%	23%	43%
D	0%	0%	15%	29%

表-13 耐震補強の優先順位（RC単柱橋脚，震度階6-を設定）

優先順位	グループ	橋脚の種類	破壊モード	被災確率
優先順位1	R-bs	連続桁固定支承	破壊モード②	100%
2	R-bs	連続桁可動支承	破壊モード②	72%
3	C-cs	河成平野に位置する	破壊モード①	66%
4	R-bs	単純桁・交差点部	破壊モード②	62%
5	C-f, R-f	すべて	破壊モード③④	41%
6	C-cs	河成平野以外の地形	破壊モード①	28%
6	R-bs	単純桁・交差点以外	破壊モード②	28%

ば，耐震診断において地震動強度を設定し，必要な耐震性能を確保できない確率が各グループごとに求まり，これによって耐震補強の優先順位を決定することができる。すなわち，それぞれのマトリックスにおいて，設定した地震動強度に対応する列の網掛け部分の数値をすべて加えた値を耐震診断における「被災確率」と定義し，この値が大きいものから順に，優先順位を付けていけばよいことになる。一例として，震度階6-を設定した場合の優先順位とそ

れぞれの「被災確率」の値を表-13に示す。震度階6-は，被災度B以上を許容しないという地震動レベルであるので，「被災確率」の値は震度階6-において被災度As～Bに至る確率を合計して求めた。この結果を利用して，橋脚一本の単位で補強の優先順位付けを行う場合においては，表-13に示した優先順位に従って補強を行うことができる。ところが，グループR-bsに属する橋脚は，構造上の特性からある区間に集中して存在することが少なく，交差点部や連続桁の部分に散在する形となっていることから，実際に耐震補強計画を作成する段階においては，これらの橋脚だけを選んで個々の橋脚に対して補強を行うことは施工工程という観点からいえば若干の問題があるように思われる。そこで考えられる対策として，例えば比較的同グループの橋脚が集中して存在している箇所や，橋梁を建設した際の施工区間などを基準として橋梁をいくつかの区間に分割し，その区間ごとに表-9～表-12を用いて被災確率を求め，それらを比較することによって施工区間ごとの補強優先順位を付けることが可能になると思われる。なお，図-4の耐震診断フローに示したように，補強の必要があると判定された橋脚については，損傷確率を算出することなく，最優先して耐震補強を行うことになる。つまり，全体としての補強優先順位は，「図-4によって補強が必要であるとされた橋脚」→「RC単柱橋脚の優先順位の高いもの」の順になる。

5. まとめ

本稿では，兵庫県南部地震により被災した橋梁構造物のデータベースを用いて，被災要因に関する統計分析を行い，この結果を踏まえた橋梁耐震診断プロセス構築の過程を示した。まず，上部構造の被害について分析した結果，落橋や桁の損傷は，他の部材の損傷に誘発されて起こった可能性が高いことが知られ，この結果を踏まえて上部構造と支承部分を総合した耐震診断フローを提案

した。次に，本研究においてデータベース化されている阪神高速3号神戸線，同5号湾岸線，名神高速・中国道の各路線について，橋脚の被災度を集計した結果，準拠示方書により被災度の差が顕著であり，昭和55年の道示に準拠したものについては，橋脚に大被害は生じていないことが知られた。さらに，構造的な条件で橋脚の被災度に大きく影響する要因を特定するため，多変量分析手法として数量化理論Ⅱ類を適用し，準拠示方書，橋脚形式，橋脚材料・断面形状の各要因が被災度に大きく影響していることが判った。そこで，これらを耐震診断の項目として用いた橋脚の耐震診断フローを作成し，さらに，橋脚形式別の検討として，昭和39年の道示に準拠したRC単柱橋脚について耐震診断プロセスを構築した。その際，RC橋脚の被災度を大きく左右する破壊モードに着目して，RC単柱橋脚をいくつかのグループに分類し，さらにそのグループ内で構造・地盤条件を考慮した分類を行った。こうして分類されたグループごとに，被災度と設定地震動強度をクロス集計して求めた「損傷確率（Damage Probability）マトリックス」を作成し，考慮する地震動強度ごとに耐震補強の優先順位付けを行う手法を提案した。

参考文献

- 1)土木学会耐震基準等検討会議：土木構造物の耐震基準等に関する提言，土木学会誌 vol. 80，平成7年7月
- 2)土木学会耐震基準等検討会議：土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」，土木学会誌 vol. 81，平成8年2月
- 3)神戸大学工学部建設学科土木系教室兵庫県南部地震学術調査団：神戸大学工学部兵庫県南部地震緊急被害調査報告書（第2報），PP. 200～206，平成7年3月
- 4)日本道路協会：道路橋震災対策便覧（震前対策編），PP. 93～120，昭和63年2月
- 5)朝日新聞朝刊，平成7年5月20日
- 6)土木学会：コンクリート構造物の維持管理指針（案），コンクリートライブラリー，第81号，平成7年10月
- 7)桜井宏，鮎田耕一，佐伯昇，篠塚正宣：RCの劣化と耐震を考慮した維持管理の考察，土木学会第51回年次学術講演会，PP. V-998～999，平成8年9月17日
- 8)高田至郎，森川英典，松本正人，花川和彦：GISデータベースに基づく阪神高速道路3号神戸線の被災特性分析，神戸大学建設学科土木系教室 兵庫県南部地震学

術調査団 被災メカニズム解析と復興に関する論文シリーズ, vol. 1-1(1996)Ser. No. 1, p. 18, 平成8年11月

9)松本正人, 森川英典, 高田至郎, 花川和彦:GISを用いた兵庫県南部地震における橋梁の被災要因分析と耐震診断のシステム化, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, PP. 227~234, 平成9年1月

10)渡辺英一, 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, 平成7年7月

11)北田俊之ほか:阪神・淡路大震災における支承・伸縮継手・桁間連結装置の被害と今後の設計のあり方, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, PP. 279~286, 平成8年1月

12)土木研究所耐震技術研究センター耐震研究室 運上茂樹:道路橋示方書V耐震設計編の改訂概要について, PP. 64~65, 平成8年11月

13)日本道路協会:道路橋震災対策便覧(震災復旧編), PP. 78~79, 昭和63年2月

14)田中豊, 垂水共之:統計解析ハンドブック・多変量解析, 共立出版, PP. 160~167, 平成7年5月

15)岡村甫, 前川宏一, 小沢一雅, 大内雅博:コンクリート橋脚の被害の特徴, 土木学会誌 vol. 80, PP. 11~14, 平成7年4月

16)林秀侃, 丸居保, 幸左賢二, 安田扶律, 中田恒和:RC橋脚損傷度の評価解析, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, PP. 265~272, 平成9年1月

17)高田至郎・嘉嶋崇志ら:兵庫県南部地震におけるアンケート震度分布とその特性, 平成8年関西支部年次学術講演会, PP. I-2-1~I-2-2, 平成8年5月

18)太田裕, 後藤典俊, 大橋ひとみ:アンケートによる地震時の震度の推定, 北海道大学工学部研究報告 92号, 昭和53年7月10日

19)土木学会コンクリート委員会:コンクリート標準示方書耐震設計編, 平成8年7月

(1997年9月26日受付)