

# 地震時における橋梁構造システムの損傷度 および耐震性評価に関する研究

金好昭彦<sup>1</sup>・宮本文穂<sup>2</sup>・古家武士<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 株式会社鴻池組 土木本部技術部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町3-6-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

<sup>3</sup>工学士 株式会社鴻池組 土木本部技術部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町3-6-1)

本研究では兵庫県南部地震で被災したRC道路高架橋を対象として、対象高架橋を上部工、下部工および基礎等で構成される橋梁システムとして捉え、各部位部材の損傷程度の経時変化を状態遷移確率行列でモデル化し、多段階に分類された損傷状態確率を求め、その結果をもとに部位部材の損傷度およびシステム全体系の機能的・社会的損傷度を評価する手法を提案する。また、本手法を実橋に適用するとともに橋脚補強等の耐震対策を施した場合の耐震性についても検討した。

*Key Words* : reinforced concrete structure, seismic design, structural system, damage probability matrix, damage index, consumed energy

## 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震を機に道路橋示方書の改訂<sup>1)</sup>が行われ、ある程度の損傷を許容することによって道路橋全体の所要の耐震性能を保証するという耐震設計体系の方向で見直されている。しかしながら、道路橋全体系の耐震性能を概念的、定性的に論じられることはあっても、具体的な評価方法を提示するまでには至っていないのが現状である。このような概念を耐震設計に導入するには1回の地震が作用した時の道路橋を構成する部位部材の損傷状態、さらに全体系の総合的な損傷状態を定量的に評価する手法、また供用中に数回の地震により累積される損傷の程度を予測する手法等を明確にすることが必要になると考えられる。このような観点に立って、道路橋の機能に致命的な影響を与えない程度の損傷を許容して、道路橋の構成部位部材の損傷を補修コストで、また耐震設計レベルを建設コストでそれぞれ定量化することによって両者から最適な解を見出すという道路橋の地震時損傷配分問題の検討<sup>2)</sup>、RC構造物が耐用期間中に経験する地震により損傷が累積する過程を損傷遷移マトリックスで表現し、地震危険度解析と合わせてRC構造物のライフタイムリスク評価の検討<sup>3)</sup>、実被災データに基づいた損傷連関メカニズムの推定を行い、損傷連関マトリックスという概念を導入し橋梁構造系の信頼性を評

価する検討<sup>4)</sup>、また構造全体系の耐震性能向上という観点から高架橋の制震装置を体系的に最適化する方法の検討<sup>5)</sup>等も行われている。しかしながら、ほとんどの場合入力地震動や構造条件が確定論的に取扱われており不確定性要因については明確な取扱いがなされておらず、構造物やその構成部位部材の安全性、機能性などを不確定性の条件の下で評価されるため、破壊や機能損失などの不都合な結果を引き起こす可能性が常に存在することになる。したがって、構造物の耐震安全性や機能性を確率論的に評価することが重要であるという観点から、筆者らは既に、RC道路高架橋に着目し、構造全体系を上部工、落橋防止構造、下部工および基礎等の部位で構成されるシステムとして捉え、地震力の作用によって各部位部材の損傷が相互に影響し合い進行するメカニズムを状態遷移確率行列によってモデル化し、部位部材の損傷状態確率を算出する手法を提案した<sup>6)</sup>。いずれにしても重要なことは想定する地震の作用による構造物の構成部位部材および全体系の損傷程度を評価し、それに基づいて構造物の安全性や機能性、復旧・復興に費やすコストや時間等の社会的損失、人命に関わる救急活動への影響などを定量的に評価することであると考えられる。具体的には橋梁システムの構成部位部材および全体系の損傷度が評価されれば、

・既存構造物の耐震対策の優先順位設定や工法選定

- ・新設構造物のトータルコストによる最適化設計
- ・地域の地震被害予測
- ・危機管理システム

などへの応用が可能になると考えられる。

本研究では、RC製橋脚を有する高架橋に着目し、橋梁構造全体系を桁、支承、橋脚、基礎などの部位部材で構成されるシステムと捉え、地震時の部位部材の損傷状態確率を状態遷移確率行列によるモデル化に基づいて算出し、その結果を用いて部位部材の損傷度、さらにシステム全体系の損傷度を評価する手法を提案する。そのために、兵庫県南部地震で被災しRC単柱橋脚の柱部が曲げ損傷した道路高架橋を対象として構成部位部材の損傷状態確率を算出した。ここで、構成部位部材の損傷度は、損傷状態確率とその損傷状態分類を代表する物理量との積の和である期待値と破壊までに許容出来る容量との比として評価した。特に、RC製橋脚のように破壊に至るまで非線形挙動する部位部材は、地震力作用により損傷する程度が地震動作用期間中に部位部材に累積される損傷エネルギーで表されるという観点から評価した。また、損傷エネルギーを用いて繰返し特性の異なる地震動に対応した橋脚の変形性能についても検討した。橋梁システム全体系の損傷度は全体系の損傷として機能損失という概念を導入し、機能損失レベルの発生確率を損傷度(以下、機能的損傷度)として評価する方法、また地震の社会的影響は多方面にわたるが、ここでは地震直後の復旧費用や復旧工期の期待値の橋梁システム全体での合計を損傷度(以下、社会的損傷度)として評価する方法の2方法について検討した。さらに、耐震対策を施した場合の損傷低減効果について評価検討した。本研究の構成を図-1に示した。

## 2. 橋梁システムの損傷度の定義

### (1) 構成部位部材の損傷度

橋梁システムを構成する部位部材の地震力作用による損傷状態を多段階に分類し、各損傷状態となる確率を損傷状態確率として表現する。その損傷状態確率と各損傷状態分類を代表する物理量との積の和である期待値と部位部材が破壊までに許容出来る容量との比を部位部材の損傷度と定義する。たとえば、橋脚柱部の曲げ損傷は作用力と変位との関係が線形から非線形に至った後に破壊するが、このような非線形挙動する部位部材の場合、地震時に破壊に至るまでに吸収できるエネルギー(以下、限界損傷エネルギー)は地震動の種類や載荷履歴に関わらず部位部材固有の値であると仮定し、そのエネルギーと地震動により部位部材に入力され損傷を生じさせるエネ

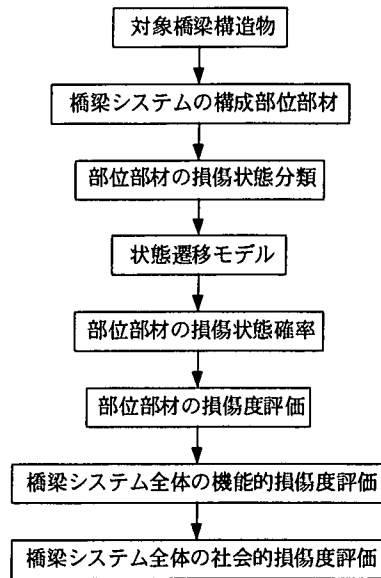


図-1 本研究の構成

ルギー(以下、損傷エネルギー)を比較することによって、部位部材の損傷の度合を次式で示す損傷度(D)で定義する。

$$D = \sum_{i=1}^n (P_i \cdot E_i) / E_{\max} \quad (1)$$

ここに、 $n$ :損傷状態の分類数、 $P_i$ :地震作用期間中の任意時刻での損傷状態*i*の損傷状態確率、 $E_i$ :損傷状態*i*になるために必要な損傷エネルギー、 $E_{\max}$ :限界損傷エネルギーであり、 $E_i, E_{\max}$ については後述する。損傷度は $D=0.0$ で健全な状態、 $D=1.0$ で終局状態とし、 $0.0 \leq D \leq 1.0$ の範囲をとる。また、機能喪失するまでは挙動が概ね線形挙動で限界以上の荷重や変位が加わると突発的に破壊すると考えられる部位部材は上式の $E_{\max}$ を部位部材の限界耐力・変位、 $E_i$ を各損傷状態を代表する耐力・変位に置き換えて耐力・変位に基づく損傷度として定義する。

### (2) 橋梁システムの損傷度

#### a) 機能的損傷度

地震によって橋梁を構成する部位部材が損傷し、その程度に応じて橋梁全体の損傷程度が決定される。各部位部材の損傷程度を統合することによって全体系の損傷程度を表す指標として、橋梁が本来有している機能、たとえば道路橋や鉄道橋であれば車両通行機能が損失する確率を損傷度と定義する。なお、機能損失のレベルは橋梁が耐震設計上目標としている耐震性と見合うものとする。

## b) 社会的損傷度

地震が社会に影響を及ぼすものとして、構造物の損傷が人命に与える影響、避難・救助・救急活動と二次災害防止活動に与える影響、地域の生活機能と経済活動に与える影響、復旧の難易度と工事費など他にも種々あるが、ここでは社会的損傷度として、地震後の復旧という観点から橋梁全体の復旧工事費用や復旧工期を定量化し実際の値として表現することとした。定量化は橋梁の各構成部位部材の損傷状態確率と各損傷状態に対応した復旧工事費用または復旧工期との期待値( $d$ )として次式のように定義した。なお、工期は工程のクリティカルパスで決まるが、標準的な高架橋の部位部材は直列的構造システムになっているため基礎から上部工に向かって構築することとした。

$$d = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (P_i \cdot S_i) \quad (2)$$

ここに、 $m$  : 構成部位部材の数、 $n$  : 各部位部材の損傷状態の分類数、 $P_i$  : 各部位部材の地震作用期間中の任意時刻での損傷状態 $i$ の損傷状態確率、 $S_i$  : 各部位部材の損傷状態 $i$ に対応した復旧工事費用または復旧工期。

## 3. 構成部位部材の損傷度評価方法

質点振動系で表現できる構造系に水平地震動が作用した場合の運動方程式からエネルギーの釣り合いは次式のように表される<sup>7)</sup>。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (3)$$

ここに、 $[M]$  : 質量行列、 $[C]$  : 減衰行列、 $[K]$  : 剛性行列、 $\{u\}$  : 変位ベクトル、 $\{F\}$  : 地震外力ベクトル。

式(3)に $du = \{\dot{u}\}dt$ を乗じて積分すれば次式が得られる。

$$\int \{\dot{u}\}^T [M] \{\dot{u}\} dt + \int \{\dot{u}\}^T [C] \{\dot{u}\} dt + \int \{\dot{u}\}^T [K] \{u\} dt = \int \{\dot{u}\}^T \{F\} dt \quad (4)$$

式(4)の左辺は運動エネルギー、減衰エネルギーおよび歪エネルギーの三者から構成される。そこで、式(4)をさらに次式のように表すことができる。

$$E_m + E_h + E_s = E_g \quad (5)$$

ここに、 $E_m$  : 運動エネルギー、 $E_h$  : 減衰エネルギー、 $E_s$  : 歪エネルギー、 $E_g$  : 地震力による入力エネルギー総量。また、この歪エネルギーは弾性歪エネルギー( $E_e$ )と塑性歪エネルギー( $E_p$ )との和で次のように表される。

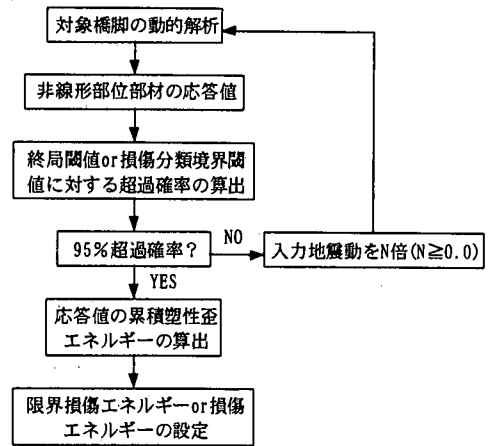


図-2 損傷エネルギーの設定手順

$$E_s = E_e + E_p \quad (6)$$

ここでは非線形挙動する部位部材の損傷が累積される塑性歪エネルギーと直接結びつくとは仮定し<sup>8),9)</sup>、地震動作用中の累積塑性歪エネルギー総量を部位部材の損傷エネルギーと定義する。そのエネルギーは動的解析結果から応答として得られる部位部材の荷重～変位曲線の履歴ループで囲まれる面積の総和と仮定した。

部位部材が破壊に至るまでに累積される損傷エネルギーを限界損傷エネルギーとし、それ以上のエネルギーは累積しないと仮定した。このエネルギーはいわゆる部位部材のエネルギー吸収能力(または容量)であり、供試体レベルでの交番繰返し載荷実験に基づき定式化がなされている研究もある<sup>10),11)</sup>が、実構造物にそのまま適用できるかは未だ不明確な点もある。したがって、ここでは動的解析の応答値が振幅非定常性を有する正規不規則過程として取扱うことによって不規則振動論を適用し、終局閾値を95%の確率で超過する状態を破壊と考え、その時の応答値から得られる累積塑性歪エネルギーを限界損傷エネルギーと設定した。また、同様に各損傷分類の損傷エネルギーは各分類境界レベルを閾値として95%超過確率となる応答値の累積塑性歪エネルギーとして設定し、限界損傷エネルギーおよび損傷エネルギーは部位部材の固有の特性値と仮定した。設定手順は図-2のフローに示す通りである。

## 4. 橋梁システムの損傷度評価方法

### (1) 機能的損傷度評価

橋梁の保有する機能のうち車両通行機能を対象として機能損失レベルを次のように設定した。

表-1 部位部材の被災度判定と被害状況、復旧方法の関係<sup>2), 13)</sup>

被災度ランク	As	A	B	C	
桁	被害状況	落橋	桁の折れ曲がり	過大な変形・座屈	小規模な変形・座屈
	方法		再構築	切断・交換	変形修正
	工期		32~39日	14日	4~5日
R C 橋脚	被害状況	崩壊	倒壊・半倒壊	中破壊	小破壊
	方法		再構築	R C巻き立て	樹脂注入
	工期		73日	22~24日	4~5日
杭基礎	被害状況		損壊	杭頭、中間部クラック	軽微なクラック
	方法		12本増し杭	9本増し杭	樹脂注入
	工期		50~51日	40日	3日
	費用		13,000万円	1,300万円	370万円
	費用		3,965万円	800万円	100万円
	費用		2,200万円	1,730万円	270万円

- ・ 損傷状態A：桁の落下、橋脚の崩壊・倒壊、基礎の残留変位などの損傷状況により車両通行が不可能な状態。
- ・ 損傷状態B：桁や橋脚を仮受等応急処置を施すことにより制限付きではあるが車両通行が可能な状態。
- ・ 損傷状態C：大掛かりな応急処置がなくても車両通行が可能な状態。

これらの損傷状態の要因となる橋梁の構成部位部材の損傷状態を同定し、その因果関係から全体の損傷度を解析する方法としてFTA (Failure Tree Analysis)<sup>12)</sup>を適用した。図-3は一例として橋軸直角方向地震動に対する橋梁のFTAを構築した例を示したものである。

## (2) 社会的損傷度評価

社会的損傷度評価に必要な復旧工事費用や復旧工期は地震被災の規模、地域性、危機管理能力等、種々多様な条件によって復旧作業効率に影響を受けるため、一概に設定することは難しいと考えられる。ここでは、復旧工事費用および復旧工期を文献<sup>2), 13)</sup>から引用して表-1のように設定した。同表は阪神高速道路公団3号神戸線の典型的なT型単柱橋脚を対象に調査された結果であり、被災度判定ランクは阪神高速道路公団が部位部材の被害状況に応じて定めたものである。なお、支承は被災の有無に関わらず基本的にゴム系支承に交換する作業が行われ、被災度に応じて復旧費用および工期は変化せず一律であった。

## 5. 実構造物への適用

### (1) 非線形動的解析

#### a) 対象構造物

解析対象構造物は、図-4に示すように、兵庫県南部地震において橋脚の柱基部で曲げ損傷を受けた代表的な高架橋として、単純桁を有する張出し式T型丸単柱橋脚2基を選定した。各高架橋の諸元を表-2に示した。

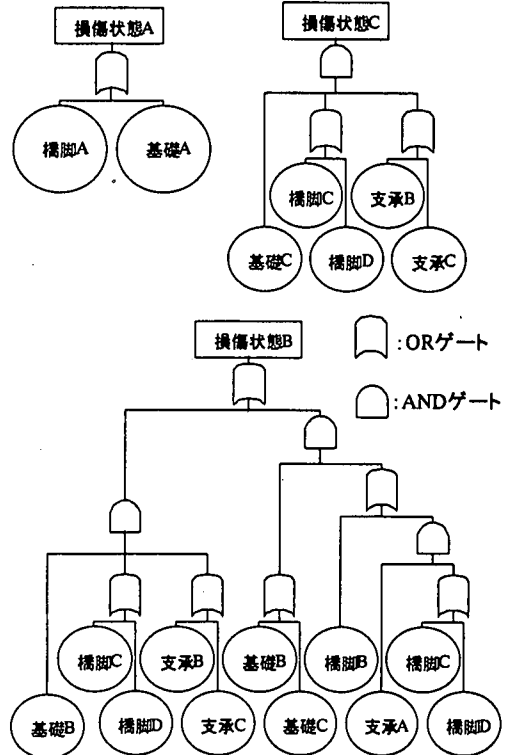


図-3 橋軸直角方向地震動に対する橋梁のFTAの例

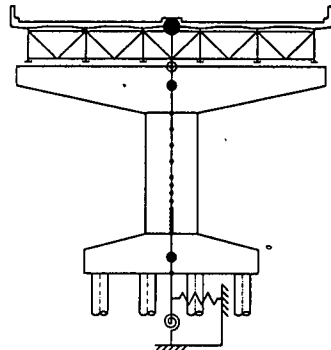


図-4 解析対象構造物および解析モデル

表-2 解析に用いた高架橋の諸元

	P-1	P-2
柱高さ(m)	10.5	15.4
柱径(m)	3.3	3.3
上部工重量(kN)	6110	6463
梁部重量(kN)	2618	1814
フーチング部重量(kN)	5345	6443
降伏変位, 内陸直下型(m)	0.045	0.087
終局変位, 内陸直下型(m)	0.126	0.191
終局水平耐力, 内陸直下型(kN)	4011	3266
杭長(m)	17	8
杭径(m)	1	1
杭本数(本)	16	16
地盤平均N値	32	36

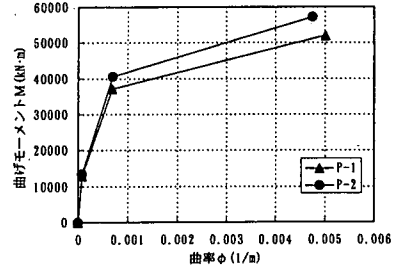


図-5 M~φ関係(内陸直下型)

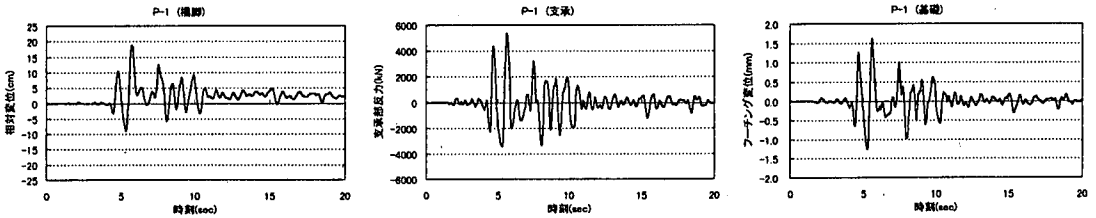


図-6 内陸直下型地震動におけるP-1の応答値

b) 解析条件

解析方法はNewmark β法(β=0.25, 平均加速度法)を用いた直接積分法による弾塑性地震応答解析で, 積分時間間隔は0.002秒とした。また, 各構造要素は剛性比例型減衰とし, 減衰定数は橋脚躯体2%, 基礎構造20%とした。

解析モデルは図-4に示すように多質点系骨組モデルとし, 橋脚の梁およびフーチングは剛体要素とした。上部構造, 橋脚梁部およびフーチングを集中質量, 橋脚柱部は分布質量として扱った。支承は二重節点化し, 節点間を剛なバネで連結した。柱の非線形特性は, 道路橋示方書<sup>1)</sup>に準拠して図-5に示すトリリニア型モデルを用い, コンクリートのひび割れ発生と鉄筋の降伏による剛性低下を考慮した武田モデルを用いた。杭基礎と地盤は杭, フーチング, 地盤バネからなる非線形骨組解析を行い, そこから得られた荷重~変位曲線およびモーメント~曲率曲線の履歴特性を用いて, パイリニア型でモデル化した。

入力地震動は内陸直下型地震動に兵庫県南部地震(1995年)の神戸海洋気象台波形(NS成分, 最大加速度818gal)を, またプレート境界型地震動に宮城沖地震(1978年)の開北橋波形(LG成分, 最大加速度319gal)を用い, 入力方向は橋軸直角方向とした。

c) 解析結果

図-6に内陸直下型地震動におけるP-1の応答値を示した。同図の応答値は橋脚柱部の下端に対する上部工の慣性力作用位置の相対変位, 支承に生じる反力およびフーチングの水平変位である。

表-3 部位部材の各損傷状態の境界設定

損傷状態	橋脚	支承	基礎
A	—	—	—
B	$\delta u$ (終局変位)	$N_y$ (降伏耐力)	$\delta y$ (降伏変位)
C	$\frac{\delta u + \delta y}{2}$	$N_a$ (許容耐力)	$\delta c$ (ひび割れ発生変位)
D	$\delta y$ (降伏変位)	—	—

(2) 損傷状態の分類

橋梁システムを構成する部位部材の損傷分類および分類境界閾値を文献(14), (15), (16)を参考に道路橋示方書<sup>1)</sup>やコンクリート標準示方書<sup>17)</sup>と照らし合わせて損傷程度の尺度を便宜的につぎのように仮定した。なお, 本論文では橋軸直角方向の挙動に限定しており, 桁は他の部位部材に対して慣性力として作用するだけと仮定する。また, 兵庫県南部地震のような強震時においても解析対象としている路線では橋脚の損傷による落橋を除けば支承の損傷による桁の損傷は軽微であり, 上部工自身の損傷が全体系の機能に影響を及ぼしていないと考えられるため損傷状態の遷移から除外した。表-3に部位部材の損傷分類を示した。

a) 橋脚

橋脚は梁部, 柱部, フーチング等の部材で構成されるが, 地震時の損傷は柱部に集中することがほとんどであったため, ここでは橋脚柱部の損傷分類をおこなった。損傷程度の尺度は上部工慣性力作用位置と柱下端との相

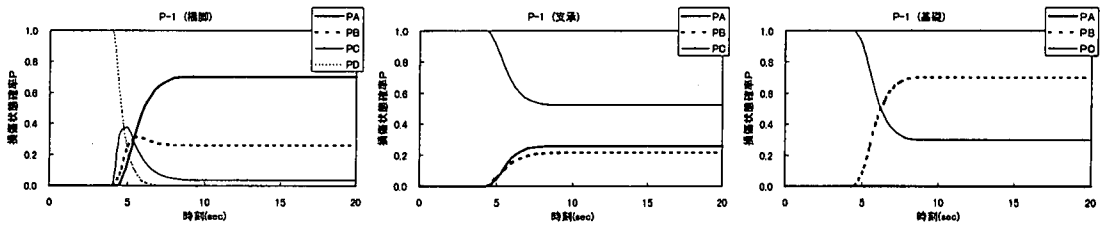


図-7 内陸直下型地震動におけるP-1の損傷状態確率の経時変化

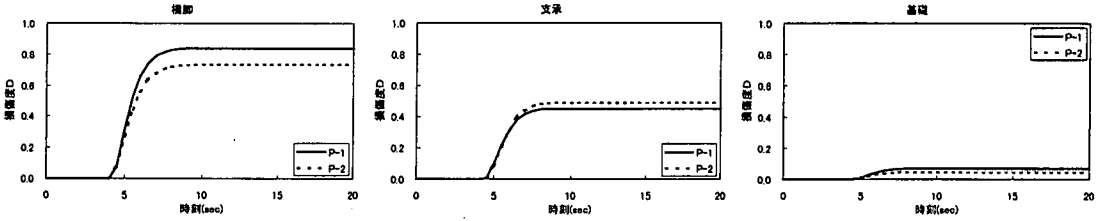


図-8 内陸直下型地震動におけるP-1, 2の損傷度の経時変化

対変位とし、終局変位を超え崩壊や倒壊するような損傷状況になる状態を損傷状態A、降伏変位を超えない範囲で曲げひび割れは生じるがほぼ線形挙動する損傷状況になる状態を損傷状態Dとし、その間の中間的な状態を損傷状態B、Cとする4段階の損傷状態に分類した。

b) 支承

支承の損傷を工学的に説明するには未だ不明確な点が多くあるが、ここでは支承は従来型の鋼製支承を対象として損傷を分類した。支承は可動方向以外の移動は制限されておりセットボルトやアンカーボルトの破断や抜け出しにより突発的に移動の解放がなされた時点で支承としての機能が喪失し、その時点まではほぼ線形挙動をすると仮定する。すなわち、支承への作用荷重が保有する降伏耐力を超え機能を喪失した状況になる状態を損傷状態A、許容耐力までであれば機能は十分あるとする状況とし損傷状態C、その間を損傷状態Bとする3段階の損傷状態に分類した。

c) 基礎

基礎は非線形挙動するRC杭と地盤で構成されているが、道路橋示方書<sup>11)</sup>では上部工への影響を考慮して基礎の残留変位が過大にならないよう全ての杭が降伏した時点を終局状態としているため、基礎への作用荷重と変位は終局状態に至るまではほぼ線形挙動範囲にあると考えられる。したがって、ここではこの終局状態に相当する杭頭変位を超え基礎に過大な残留変位が生じる状況を損傷状態A、全ての杭にひび割れが生じた状況を損傷状態C、その間を損傷状態Bとする3段階の損傷状態に分類した。

表-4 部位部材の損傷状態分類の代表値(内陸直下型)

損傷状態	P-1			P-2		
	橋脚(kJ)	支承(kN)	基礎(mm)	橋脚(kJ)	支承(kN)	基礎(mm)
A	2195	5762	14.5	2323	4351	10.4
B	1107	5086	1.4	1186	3842	1.4
C	225	—	—	539	—	—

(3) 内陸直下型地震動に対する損傷度

a) 部位部材の損傷度評価

各部位部材の損傷が進行していく状況を状態遷移確率行列でモデル化し、部位部材の損傷状態確率を算出した<sup>6)</sup>。損傷状態確率の算出方法は文献6)に詳しいが、部位部材の損傷状態をA、B、Cとし、表-3に示すような境界レベルをa、bとすると、損傷状態Aの損傷状態確率は地震動作用による応答値のレベルaに対する初通過破壊確率、損傷状態Bの損傷状態確率は応答値がレベルbを初通過し損傷するがレベルaを一度も超過しない確率、損傷状態Cの損傷状態確率は応答値がレベルbを一度も超過しない確率である。図-7はP-1の構成部位部材の損傷状態確率の経時変化を示したものである。また、表-4は部位部材の損傷状態分類の代表値を示したものであり、橋脚では前出図-2に従って算出した損傷エネルギーとし、支承および基礎は損傷状態分類の境界閾値を用いた。図-7および表-4から部位部材の損傷度を式(1)により算出した結果を図-8および図-9に示した。各部位部材の損傷度と阪神高速3号神戸線の実被害<sup>13), 16)</sup>の対応は次のとおりである。

前出表-1の被災度判定でP-1の橋脚はA、P-2の橋脚はBと判定されており、実際にはいずれも撤去再構築されている。P-1, 2の橋脚の損傷度は0.84, 0.74と評価され、橋脚の損傷はP-2よりP-1の方が大き

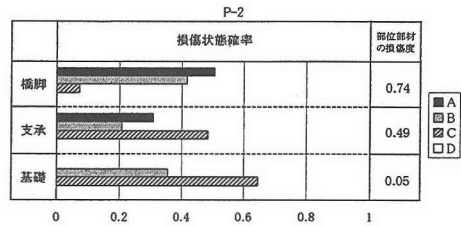
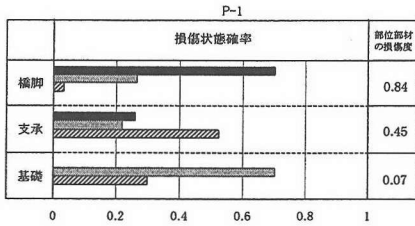


図-9 内陸直下型地震動におけるP-1, 2の損傷状態確率および損傷度の最終値

く実被害の傾向を示している。また、橋脚の損傷度が0.8程度であれば、補強で再生できない損傷相当となるようである。

P-1, P-2の基礎の損傷度は0.07, 0.05であり、基礎杭の実被害は曲げひび割れが発生した程度の軽微な損傷で残留変形が生じることはなかったこと、またP-1, P-2の支承の損傷度は0.45, 0.49であり、支承の実被害は支承構成部品のいずれかが降伏または破断する損傷以上となる割合がほぼ40%である<sup>6)13)</sup>こととほぼ対応しているようである。

b) 全体系の損傷度評価

構成部位部材の損傷状態確率を用い、図-3に従ってFTAを行ない、機能的損傷度を算定した結果を図-10に示した。

社会的損傷度評価に必要な復旧工事費用および復旧工期は表-1に基づいて、本論文の損傷状態分類との対応を表-5のように想定した。同表から全体系の損傷度を式(2)により算出した結果を表-6に示した。

機能的損傷度は車両通行が不可能な状態である損傷状態AがP-1で0.70, P-2で0.51と評価され、実際にはP-1およびP-2は基礎以外を撤去再構築されるほど被災しており車両通行が不可能であったと考えられることから、機能的損傷度が概ね0.5を越えると高架橋としての機能は失うようである。

(4) プレート境界型地震動に対する損傷度

a) 橋脚のM~φ曲線

RC製橋脚の変形性能は載荷繰返し回数の影響を受けるため道路橋示方書<sup>1)</sup>では内陸直下型およびプレート境界型地震で地震動の繰返し特性を考慮した終局変位によって橋脚の非線形性に差別化を行っている。ここでは、地震動作用によって橋脚が破壊に至るまでに吸収できるエネルギーすなわち限界損傷エネルギーは、地震波の種類や載荷履歴によらず橋脚固有の値であると仮定し、プレート境界型地震動に対する橋脚の終局変位を内陸直下型地震動に対する橋脚の終局変位に基づいて次のように設定した。なお、M~φ曲線はトリリニア型としひび割れ発生点、降伏点および終局曲げモーメントは共通の値

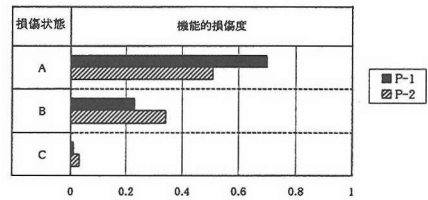


図-10 内陸直下型地震動におけるP-1, 2の全体系機能的損傷度

表-5 損傷状態と復旧費用・工期の対応

部位部材	損傷状態		
	A	B	C
橋脚	再構築 4000万円 73日	RC巻立て 800万円 24日	樹脂注入 100万円 5日
基礎	増し杭 2000万円 45日	樹脂注入 270万円 3日	
支承	免震沓 600万円 5日	—	

表-6 復旧工事費および復旧工期(内陸直下型)

		橋脚	基礎	支承	合計
		P-1	工事費(万円)	3020	189
	工期(日)	58	2	1	61
P-2	工事費(万円)	2370	96	185	2651
	工期(日)	47	1	2	50

とした。

- ① 前節(3)の内陸直下型地震動作用による限界損傷エネルギーを算出する。
- ② 任意の終局変位に対応するM~φ曲線を設定する。
- ③ N倍したプレート境界型地震動作用時の塑性歪エネルギーが①の限界損傷エネルギーに等しくなるまで繰り返す。
- ④ 橋脚の応答相対変位が任意の終局変位を閾値として超過する確率を算出する。
- ⑤ 超過確率が95%になるまで②~④を繰り返し終局変位を特定してM~φ曲線を確定する。

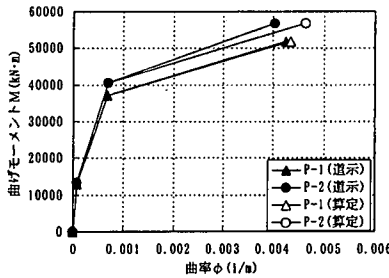


図-11 M~φ曲線(プレート境界型)

表-7 終局変位(cm)

方法	道路橋示方書 <sup>1)</sup>		本方法
	内陸直下型	プレート境界型	
地震動			
P-1	12.6	11.1	11.3
P-2	19.1	17.1	18.8

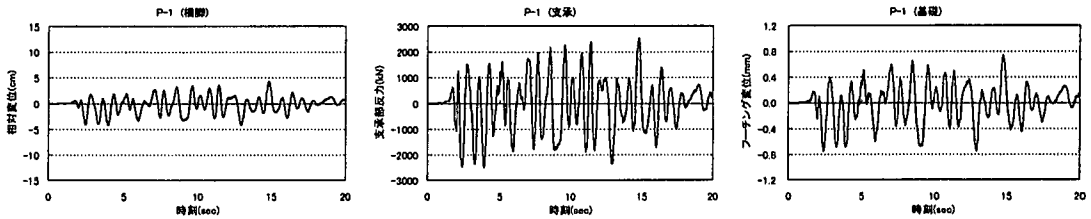


図-12 プレート境界型地震動におけるP-1の応答値

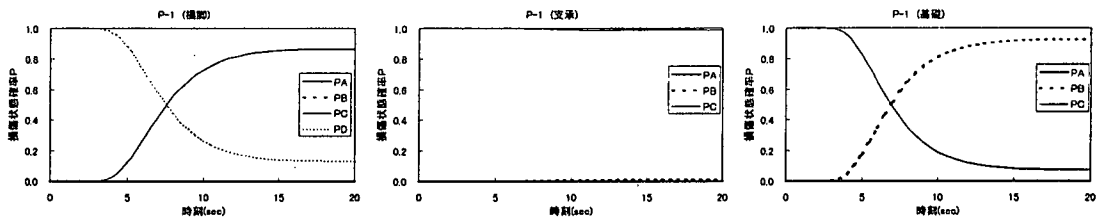


図-13 プレート境界型地震動におけるP-1の損傷状態確率の経時変化

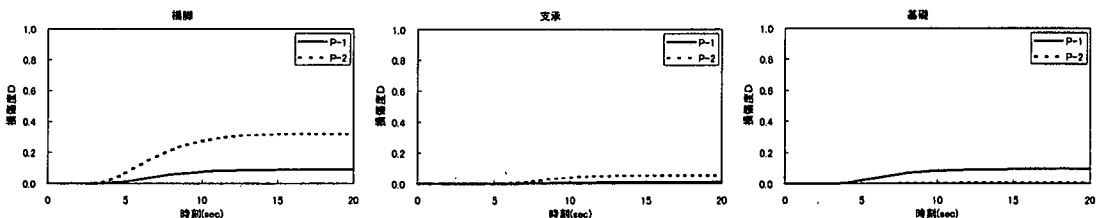


図-14 プレート境界型地震動におけるP-1, 2の損傷度の経時変化

図-11は①～⑤で得られたM~φ曲線を示したものである。表-7は図-5および図-11に基づいて地震動の繰返し特性を損傷エネルギーの観点から評価した終局変位と道路橋示方書<sup>1)</sup>に従って算定した終局変位を比較したものであり、プレート境界型地震動に対する値は示方書と本方法で概ね同値であり内陸直下型地震動に対する値より小さくなっており、本条件のもとで終局変位に地震動の繰返し特性が表現された結果となった。

b) 部位部材の損傷度評価

前節と同様の手法を適用して算出したP-1の構成部位部材の応答値、損傷状態確率の経時変化を図-12および図-13に、損傷度を図-14および図-15にそれぞれ示した。なお、損傷状態の代表値は部位部材の固有の特性値と仮

定し表-4に従った。部位部材の損傷度は内陸直下型地震動の場合をかなり下回っているが、P-2の橋脚の損傷度はP-1に比べ大きくなり内陸直下型地震動と逆の傾向になっている。これは、表-8に示すように地震動の卓越周波数と構造系の1次固有周波数との対応に起因するものと考えられる。

c) 全体系の損傷度評価

前節と同様に機能的および社会的損傷度を算定した結果を図-16および表-9に示した。内陸直下型地震動に比べ損傷はかなり小さくなるが、機能的にはP-1はP-2より損失は大きい結果となった。しかしながら、車両通行が不可能になることはほとんどなく地震直後の緊急活動への影響はないと考えられる。



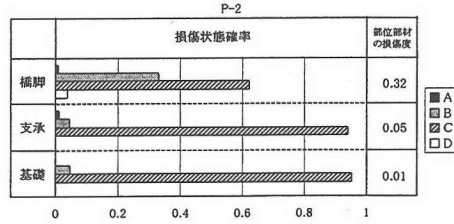
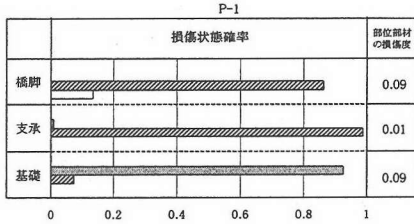


図-15 プレート境界型地震動におけるP-1, 2の損傷状態確率および損傷度の最終値

(5) 耐震対策の損傷低減効果

a) 耐震対策の適用

道路橋の耐震対策として通常橋脚柱部に曲げ耐力やせん断耐力の向上および変形性能向上を目的とした鉄筋コンクリート、鋼板、炭素繊維などを巻立てて補強する工法、自重の低減を目的とした橋脚梁部の鋼殻化、上部工の慣性力を低減することを目的とした支承の改善たとえば単純桁の連続化と免震支承、すべりゴム支承と免震支承の併用など免震支承を基本とした対策が実施されている。本節では地震時の橋軸直角方向挙動に着目し、一般に適用されている対策として橋脚柱部の曲げ耐力制御式鋼板巻立て工法による補強(以下、鋼板巻立て補強)を施した場合およびまだ確立された手法ではないがヒューズ効果を有する支承(以下、ヒューズ支承)を適用した場合について本手法を適用して評価を行った。

・鋼板巻立て補強

橋脚の円柱柱部のフーチング天端から梁下部までを厚み12mmの鋼板で巻立て、鋼板柱基部はフーチングに埋め込んだアンカー筋(D35@D250)と結合した工法を想定した。

・ヒューズ支承

鋼製支承は通常短期設計耐力で設計されているが、その耐力を下回る長期設計耐力相当の支承反力が作用した時点で降伏状態になるように設定した支承を想定した。

b) 損傷低減効果

図-17～図-22はP-1, 2の橋脚に鋼板巻立て補強、ヒューズ支承およびその併用を適用し、内陸直下型地震動が作用した時の部位部材の損傷状態確率の最終値と損傷度および全体系の機能的損傷度を前述と同様の方法で算出した結果を示したものである。これらの図を前出図-9, 10と比較することによって以下のことが判明した。

鋼板巻立て補強によってP-1, 2の橋脚の損傷度はP-1で0.84から0.17に、P-2で0.74から0.14にそれぞれ低減され耐震対策の効果が十分発揮された反面、支承および基礎の損傷度はそれぞれP-1で0.45から0.64, 0.07から0.10に、P-2で0.49から0.68, 0.05から0.08に若干ではあるが増加する結果となっている。しかしながら、全体系の損傷状態AはP-1で0.70から0.00に、P-2で0.51から0.00に低減しており、鋼板巻立て補強

表-8 地震動の卓越周波数および構造系の1次固有周波数

地震動	卓越周波数	高架橋	1次固有周波数
内陸直下型	1.46Hz	P-1	1.49Hz
プレート境界型	0.73Hz	P-2	0.93Hz

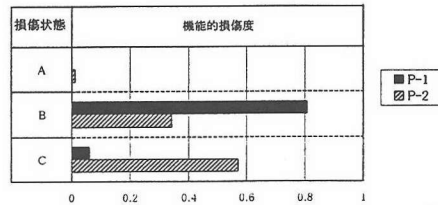


図-16 プレート境界型地震動におけるP-1, 2の全体系機能的損傷度

表-9 復旧工事費および復旧工期(プレート境界型)

		橋脚	基礎	支承	合計
		P-1	工事費(万円)	87	250
	工期(日)	4	3	0	7
P-2	工事費(万円)	366	13	8	387
	工期(日)	12	0	0	12

によって橋梁全体系として耐震性能が向上したことを示している。

一方、ヒューズ支承は従来型支承に比べ早期に損傷するため、上部工の慣性力が低減し橋脚の損傷が抑制されることによって、P-1, 2の橋脚の損傷度はP-1で0.84から0.65へ、P-2で0.74から0.66へ若干低減されるが、基礎は逆にP-1で0.07から0.08へ、P-2で0.05から0.05へほぼ変化しない傾向となり、全体系の損傷状態AはP-1で0.70から0.31に、P-2で0.51から0.39に低減される程度である。また、鋼板巻立て補強とヒューズ支承の併用でもヒューズ支承の効果は顕著に現れず、ヒューズ支承によって橋梁全体系の耐震性能向上はさほど期待できないようであり、ヒューズ効果単独ではなく免震機能をも兼ね備えた支承にする方向で検討する必要があると考えられる。

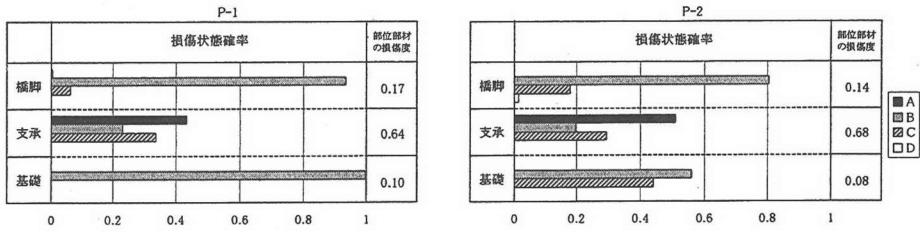


図-17 内陸直下型地震動における鋼板巻立て補強を施したP-1, 2の損傷状態確率および損傷度の最終値

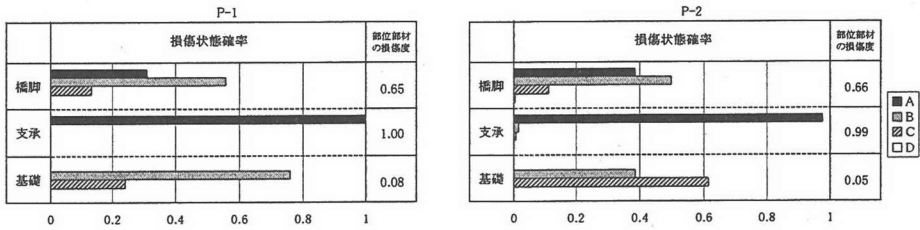


図-18 内陸直下型地震動におけるヒューズ支承を適用したP-1, 2の損傷状態確率および損傷度の最終値

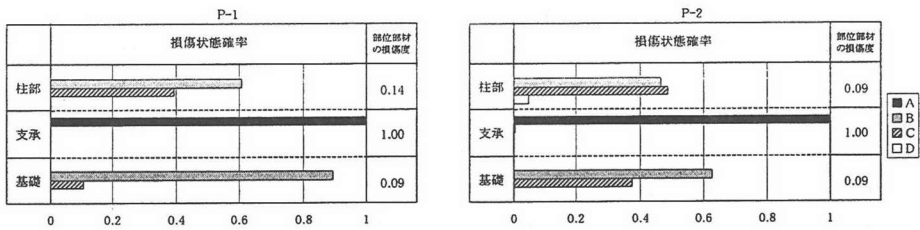


図-19 内陸直下型地震動における鋼板巻立て補強およびヒューズ支承を適用したP-1, 2の損傷状態確率および損傷度の最終値

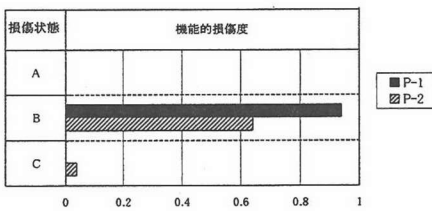


図-20 内陸直下型地震動における鋼板巻立て補強を施したP-1, 2の全体系機能的損傷度

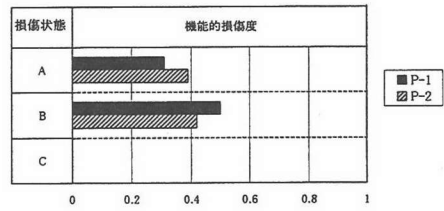


図-21 内陸直下型地震動におけるヒューズ支承を適用したP-1, 2の全体系機能的損傷度

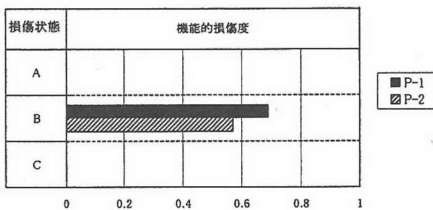


図-22 内陸直下型地震動における鋼板巻立て補強およびヒューズ支承を適用したP-1, 2の全体系機能的損傷度

## 6. まとめ

本研究では兵庫県南部地震で曲げ損傷した単純桁を有する道路高架橋を標本として、高架橋を桁、支承、橋脚および基礎等の部位部材で構成される橋梁システムとして捉え、地震が作用した時の構成部位部材の損傷状態を状態遷移確率行列を用いた状態遷移モデルにより損傷状態確率として求め、その結果から各部位部材の損傷度およびシステム全体系の損傷度を評価する方法を提案した。以下に本研究で得られた知見および課題を示した。

- ①橋梁システムを構成する部位部材の損傷度を損傷状態確率と損傷エネルギー、耐力、変形性能等との期待値に基づいて評価し、構造安全性の観点から損傷の尺度となることを示した。また、このように定義した損傷度と兵庫県南部地震での実被害の程度とは概ね対応関係があることが明らかになった。
- ②橋梁システム全体系の機能的損傷度は橋梁の機能のうち車両通行機能を対象として機能損失レベルを3段階に設定し、橋梁の構成部位部材の損傷状態確率に基づいてFTAを適用して評価することができることを示した。
- ③橋梁システム全体系の社会的損傷度を、一例として復旧工事費用および復旧工期を指標に取り上げ評価することができることを示した。
- ④橋脚の終局変位の地震動の繰り返し特性を損傷エネルギーに基づいて評価する方法を示した。なお、この評価は限定された条件下でのものであり今後検討する必要があると考えられる。
- ⑤橋梁システムを構成する部位部材の損傷度およびシステム全体系の損傷度をもとに、地震による構造物の被害が地域の生活機能と経済活動に与える影響、避難・救助・救急活動と2次災害防止活動に与える影響、構造物の損傷が人命に与える影響等を評価することにより地震被害予測や危機管理システム等多方面での応用が可能であると考えられる。

謝辞：本研究を進めるに際しては、(社)日本コンクリート工学協会近畿支部「土木コンクリート構造物の耐震対策に関する研究委員会(委員長:小野紘一京都大学教授)」においては貴重な意見を頂き、ここに記して深く感謝します。また論文作成に当たり終始協力頂いた山口大学工学部知能情報システム工学科の安元 隆君(現(株)NTTコミュニケーションウェア)、中山英志君に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 1996. 12.
- 2) 庄司 学, 藤野陽三, 阿部雅人: 高架道路橋システムにおける地震時損傷配分の最適化の試み, 土木学会論文集, No. 563/1-39, pp. 79-94, 1997. 4.
- 3) 鈴木基行, 井林 康, 赤倉康寛, 藤原 稔, 尾坂芳夫: RC構造

- の耐用期間にわたる耐震信頼性評価手法, 土木学会論文集, No. 564/V-35, pp. 253-263, 1997. 5.
- 4) 高田至郎, 森川英明, 花川和彦: 被災データに基づく橋梁構造物系の損傷連関メカニズムの評価と耐震診断法の構築, 日本地震工学シンポジウム論文集, Vol. 3, pp. 3267-3272, 1998. 11
- 5) 阿部雅人, 藤野陽三: 高架橋構造全体系の耐震性能の向上を考えたパッシブ制震装置の最適化, 土木学会論文集, No. 605/1-45, pp. 241-252, 1998. 10.
- 6) 金好昭彦, 宮本文徳, 古家武士, 中島 募: 橋梁構造システムの耐震性能評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 613/V-42, pp. 31-42, 1999. 2.
- 7) 永田和寿, 渡邊英一, 杉浦邦征: 基礎-構造物系の非線形動的相互作用に関する研究, 構造工学論文集, No. 42A, pp. 593-602, 1996. 3.
- 8) 矢島哲司, 本郷和徳, 魚本健人: 繰り返し載荷されたRC梁の累積損傷および破壊特性評価, 土木学会論文集, No. 490/V-23, pp. 31-39, 1994. 5.
- 9) 大野友則, 西岡 隆, 藤野陽三: 構造物が地震時に受ける塑性ひずみエネルギー量の定量的評価, 土木学会論文集, No. 333, pp. 91-99, 1983. 5.
- 10) 鈴木基行, 赤倉康寛, 足立英明, 尾坂芳夫: RC構造の損傷度評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 490/V-23, pp. 121-129, 1994. 5.
- 11) 滝本和志, 川島一彦: 基部で曲げ破壊するRC橋脚のエネルギー吸収容量の定式化, 土木学会論文集, No. 532/V-30, pp. 5-13, 1996. 2.
- 12) 藤野陽三, 黒田勝彦, 亀田弘行, 伊藤 學共訳: 土木・建築のための確率統計の応用, 丸善, 1998. 1.
- 13) 阪神高速道路公団: 阪神高速道路震災復旧対策技術委員会報告書, 1996. 12.
- 14) (社)土木学会関西支部: 阪神・淡路大震災調査研究委員会報告書-大震災に学ぶ-, 1998. 6.
- 15) (社)日本コンクリート工学協会近畿支部: 土木コンクリート構造物の震災対策に関する研究委員会中間報告, 1995. 12.
- 16) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会: 兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書, 1995. 12.
- 17) (社)土木学会: コンクリート標準示方書 耐震設計編, 1996. 7.
- 18) 神田昌幸: 道路橋における支承および落橋防止構造物の被災の総括, 橋梁と基礎, Vol. 30, NO. 8, pp. 156-162, 1996. 8.

(1999. 5. 12 受付)

## EVALUATION OF SEISMIC DAMAGE STATES AND SEISMIC RETROFITTING EFFECTS FOR BRIDGE STRUCTURE SYSTEM BASED ON DAMAGE INDICES

Akihiko KANEYOSHI , Ayaho MIYAMOTO and Takehito KOGE

This study focuses on reinforced concrete viaducts damaged by the 1995 Hyogoken-nambu earthquake and estimation of their multiple damage state probabilities by using damage probability matrix for the structural elements, e.g., superstructure, substructure and foundation. Based on the resulting damage probabilities, the authors propose an integrated method for evaluating both functional and social damage states of viaducts damaged by earthquakes. In addition, the proposed method is applied for prototype viaducts damaged by the earthquake and viaducts seismically reinforced to estimate the effects of the reinforcement.