

GIS を活用した高速道路橋橋脚の地震被害解析

Seismic damage evaluation of expressway bridge piers using GIS

保田敬一*, 辻本栄一**, 白木 渡***, 伊藤則夫****, 堂垣正博*****

Keiichi YASUDA, Eiichi TSUJIMOTO, Wataru SHIRAKI, Norio ITO, and Masahiro DOGAKI

- * 博士(工学) (株)ニュージェック 東京本社道路グループ (〒135-0007 東京都江東区新大橋 1-12-13)
 ** 学士(工学) 大阪市交通局 (〒530-8201 大阪市北区中之島 1-3-20)
 *** 工博 香川大学教授 工学部信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)
 **** 博士(工学) (有)シー・エー・イー (〒680-8064 鳥取県岩美郡国府町 2-210)
 ***** 工博 関西大学教授 工学部都市環境工学科 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

In this study, the characteristics of expressway bridge piers damaged by the Hyogo-ken Nanbu Earthquake are evaluated using GIS (Geographic Information System) and SOM (Self Organizing Map). The relationships between the seismic damage indexes and the structural characteristics of bridge piers are estimated using the type I of quantification theory. Basing on these estimation results, the seismic damages of expressway bridge piers by the scenario earthquakes in Osaka Bay area are estimated, and an approach for mitigation of damage is proposed. The effectiveness of this proposed method is demonstrated.

Keywords : Characteristics of seismic damage, Expressway bridge pier, GIS, SOM, Quantification theory type I

キーワード : 地震被害特性, 高速道路橋橋脚, 地理情報システム, 自己組織化マップ, 数量化理論 I 類

1. まえがき

社会基盤に多大の被害を与えた 1995 年の兵庫県南部地震は、いまだ記憶に新しい。この地震では、地震による構造物の倒壊などの 1 次災害に加え、火災などの 2 次災害によって多くの人的被害が発生した。その原因として、情報通信システムの麻痺によって被害状況の把握が遅れたことや、交通網の麻痺によって消火作業や救助活動が十分に行えなかったこと、などが考えられる。これらの事実を受け、近年の防災に関わる研究は、ハード面の対策だけでなくソフト面の対策も重視されつつある。近い将来に発生が予測されている東海・東南海・南海の地震での被害拡大に対する対策に関しても、あらゆる研究機関で、耐震設計の根本的な見直しなどのハード面の対策に加え、防災システムの構築などのソフト面の対策が精力的に行われている。しかし、地震予測、被災予測、被災後のライフラインの確保および住民の防災に対する意識強化などといったソフト面の対策に関する研究では、まだ十分な成果はあがっておらず、都市防災のためのソフト面の対策に関する研究が急務である。

ソフト面における対策には、地震発生源に関する情報、地盤情報、人口や交通量などの地域情報、建物情報、公共施設・構造物の耐震性に関する情報など、さまざまな情報が必要である。そのためには、これら膨大かつ多岐にわたる情報の正確かつ迅速な収集・処理が肝要である。

たとえば、情報の正確かつ迅速な収集・処理には地理情報システム (Geographic Information System : 以後、GIS と称する)¹⁾の活用が有効である²⁾。GIS の特徴は、データベース上に蓄積された情報の視覚的な表示、地図上にレイヤー分けして表示されたさまざまな情報の関係が空間的に分析・把握できるなど、蓄積されている情報を多様な方法で活用する機能が優れている点にある。

本研究は、兵庫県南部地震により大きな被害を受けた都市高速道路高架橋を対象に、その被害情報を GIS 上に収集・蓄積し、橋脚の構造特性と地震被災度の相関関係を数量化理論 I 類で分析し、その分析結果を SOM によって分類・視覚化するものである。また、今後、阪神地域において地震発生時にその影響が大と予想される地震を対象に、都市高速道路高架橋の被害を兵庫県南部地震での地震損傷と地震規模との関係から予測することを試みる。その結果をもとに地震被害分析を行い、都市地震における 2 次災害の軽減に寄与できる方法を検討するものである。

2. 兵庫県南部地震における橋脚の被害状況

本解析で使用する説明変数の抽出に使用した 1995 年の兵庫県南部地震における道路橋橋脚の被害状況をまとめると、以下のようである³⁾。

表-1 は、阪神高速道路における路線別の橋脚、支承、

表-1 阪神高速道路の被災度

路線名	部材名	被災度					
		As	A	B	C	D	計
阪神高速 3号神戸線	橋脚	鋼製 3 (2%)	8 (5%)	12 (7%)	112 (69%)	28 (17%)	163 (100%)
	RC	64 (7%)	78 (8%)	102 (11%)	225 (24%)	474 (50%)	943 (100%)
	支床	-	371 (18%)	274 (13%)	383 (18%)	1090 (51%)	2118 (100%)
	上部構造	26 (2%)	67 (5%)	243 (19%)	215 (16%)	753 (58%)	1304 (100%)
	橋脚	鋼製 0 (0%)	0 (0%)	13 (9%)	21 (15%)	109 (76%)	143 (100%)
	RC	0 (0%)	0 (0%)	1 (0%)	22 (11%)	179 (89%)	202 (100%)
	支床	-	30 (5%)	72 (12%)	196 (34%)	286 (49%)	584 (100%)
	上部構造	1 (0%)	0 (0%)	8 (2%)	28 (6%)	425 (92%)	462 (100%)
	橋脚	鋼製 3 (1%)	8 (3%)	25 (8%)	133 (43%)	137 (45%)	306 (100%)
	RC	64 (6%)	78 (7%)	103 (9%)	247 (22%)	653 (57%)	1145 (100%)
5号湾岸線	支床	-	401 (15%)	346 (13%)	579 (21%)	1376 (51%)	2702 (100%)
	上部構造	27 (2%)	67 (4%)	251 (14%)	243 (14%)	1178 (67%)	1766 (100%)
	小計	-	-	-	-	-	-

上部構造の被災度を集計した結果である。ここに、被災度は、「道路震災対策便覧・震災復旧編」に準じて、表-2のようにAsからDのランクに分類した。被災度は、基本的に構造部材の残留耐力や変形性能に基づいて分類されている。

表-3は、適用された基準別の被災度を把握するために、阪神高速道路橋の橋脚を設計時に準拠した基準の年次ごとに集計した結果である。すなわち、①昭和39年度版「鋼道路橋設計方書」もしくはそれ以前の技術基準に基づいて設計された橋脚、②昭和46年度版「道路橋耐震設計指針」に基づいて設計された橋脚、③昭和55年度版、または④平成2年度版「道路橋示方書」に基づいて設計された橋脚に区分し、橋脚本数を数えたものである。

表-4には、阪神高速道路橋橋脚を鋼製橋脚とRC橋脚に分けて、橋脚の準拠基準別の被災度を集計した結果である。国道2号、43号、171号および176号の直轄道路、阪神高速道路の3号神戸線および5号湾岸線、名神および中国の高速道路全体において、昭和46年度版「道路橋耐震設計指針」以前の基準が適用された橋脚では、被災度B以上と判定されたものが3,048橋脚中431で、14%を占める。一方、昭和55年度版「道路橋示方書」以後の基準が適用された橋脚では、被災度Bと判定されたものは350橋脚中14で、わずか4%である。また、被災度A以上の橋脚はない。

表-2 橋脚の被災の区分

被災度	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、鉄筋の破断等の損傷、または変形が大きなもの
B	・鋼材の座屈や部材の変形が部分的にみられるもの ・鉄筋の一部の破断やはらみだし及び部分的な被りコンクリートの剥離や亀裂がみられるもの
C	・鋼材の座屈や部材の変形が部分的かつ軽微なもの ・ひび割れの発生や局部的な被りコンクリートの剥離が見られるもの
D	・損傷がない、あっても耐力に影響のない極めて軽微なもの

表-3 橋脚の準拠基準による分類（橋脚数）

路線名		準拠した設計基準等			計
		昭和39年もしくはそれ以前	昭和46年	昭和55年	
阪神高速	3号神戸線	890 (80%)	216 (63%)	0 (0%)	1106 (100%)
	5号湾岸線	0 (0%)	0 (0%)	289 (84%)	345 (100%)
	小計	890 (61%)	216 (63%)	289 (84%)	1451 (100%)

3. 橋脚の被害分析モデル

3.1 橋脚のデータベース化

阪神高速道路神戸線および湾岸線の橋脚の下部構造に関するデータベースをGIS上で構築した。このデータベースには、管理番号、路線・ランプ等、名称、路線、橋脚竣工年度、下部工構造型式、橋脚材種、橋脚・橋台形状、橋脚全体高さ、柱部材種、柱部断面形状、柱直径・橋直幅、柱橋軸幅、梁部材種、梁幅、梁長、杭基礎竣工年度、基礎数、基礎区分、基礎工法、基礎連続構造等、基礎平面形状、基礎直径・橋直幅、基礎橋軸幅、基礎材種、杭材種、杭本数、杭経、杭長、および経緯度の情報が含まれている。ただし、神戸線に関しては兵庫県南部地震以前のデータである。図-1に解析対象地域の全体図を、また同図における丸印の部分の拡大図を図-2に示す。

3.2 想定地震の震度分布

本研究で対象とする地震による大阪湾エリアの予想震度分布図を図-3～図-7に示す。これらは大阪府および兵庫県のホームページで公表されている紀伊半島沖の南海地震および種々の直下型地震に対する予測図をGIS上に作成したものである。

4. 橋脚の被害推定

本研究で行ったSOM(Self Organizing Map: 自己組織化マップ)^{4),5)}による橋脚の被災度と構造特性との関連性とその評価、数量化理論I類による予測被災度の算出について述べる。

4.1 橋脚の被災度と構造特性との関連性およびその評価

表-4 橋脚の準拠基準別損傷度（橋脚本数）

構造	準拠基準年次	橋脚の被災度					合計
		As	A	B	C	D	
鋼製橋脚	昭和39年以前	4 (4%)	11 (10%)	9 (8%)	72 (67%)	12 (11%)	108 (100%)
	昭和46年	0 (0%)	0 (0%)	14 (13%)	45 (43%)	45 (43%)	104 (100%)
	昭和55年	0 (0%)	0 (0%)	11 (9%)	19 (15%)	97 (76%)	127 (100%)
	平成2年	0 (0%)	0 (0%)	2 (13%)	2 (13%)	12 (75%)	16 (100%)
	小計	4 (1%)	11 (3%)	36 (10%)	138 (39%)	166 (47%)	355 (100%)
	鉄筋コンクリート橋脚	78 (3%)	155 (6%)	143 (5%)	672 (25%)	1600 (60%)	2648 (100%)
合計	昭和39年以前	1 (1%)	1 (1%)	15 (8%)	63 (34%)	106 (57%)	186 (100%)
	昭和46年	0 (0%)	0 (0%)	1 (1%)	22 (13%)	144 (86%)	167 (100%)
	昭和55年	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	40 (100%)	40 (100%)
	平成2年	79 (3%)	156 (5%)	159 (5%)	757 (25%)	1890 (62%)	3041 (100%)
	小計	82 (3%)	166 (6%)	152 (6%)	744 (25%)	1612 (58%)	2756 (100%)
	昭和39年以前	1 (0%)	1 (0%)	29 (10%)	108 (37%)	153 (53%)	290 (100%)
小計	昭和46年	0 (0%)	0 (0%)	12 (4%)	41 (14%)	241 (82%)	294 (100%)
	昭和55年	0 (0%)	0 (0%)	2 (4%)	2 (4%)	52 (93%)	56 (100%)
	平成2年	83 (2%)	167 (5%)	195 (6%)	895 (26%)	2056 (61%)	3396 (100%)
	小計	83 (2%)	167 (5%)	195 (6%)	895 (26%)	2056 (61%)	3396 (100%)

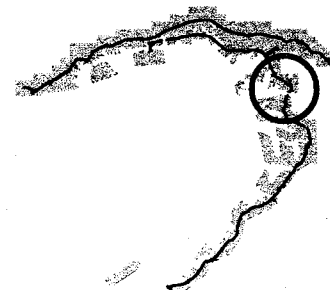


図-1 橋脚データベース1 (全 3100 橋脚)

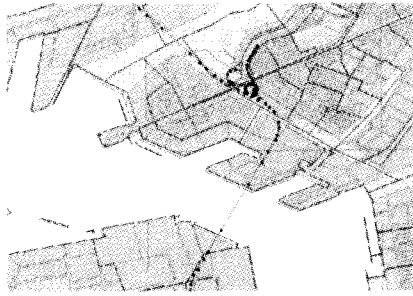


図-2 橋脚データベース 2 (4号湾岸線, 港大橋付近)

本研究では、橋脚の被災度と構造特性との関連性およびその評価を阪神高速道路神戸線と湾岸線を対象に行う。ただし、兵庫県南部地震時の被災度の情報収集が可能であった尼崎市から第二神明道路までの957基の橋脚を評価対象とした。

(1) 評価対象とする項目

表-5 に示す項目を用い、橋脚の被災度と構造特性と

の関連性およびその評価を行う。兵庫県南部地震時の推定震度には図-8⁶⁾を、兵庫県南部地震での被災度には図-9²⁾を参考に目視によって作成されたデータを用いた。

(2) 被災度の定義

本解析における橋脚の被災度の定義は、表-2 と同じである。

4.2 SOM による分析

本研究では、橋脚の被災度と構造特性との関連性を評価するため、SOM による分類を行う。

(1) SOM の概要

SOM は、ヘルシンキ工科大学の T. Kohonen によって、1981 に発表された⁵⁾。動物の神経や脳の働きを数学的にモデル化したコンピュータアルゴリズムで、ニューラルネットワークの一種である。自己組織化マップは、データ入力を行う入力層と、入力したデータをもとに形成される競合層の2次元平面マップから構成されている。ここに、入力層のニューロンと競合層のニューロンはす

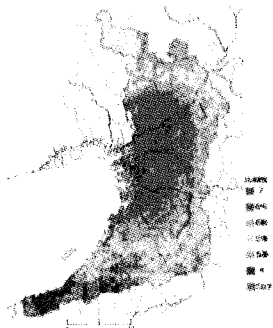


図-3(1)上町断層系



図-3(2)解析エリア(上町断層系)

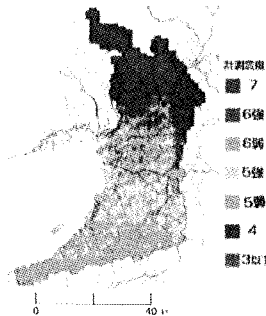


図-4(1)中央構造線



図-4(2)解析エリア(中央構造線)

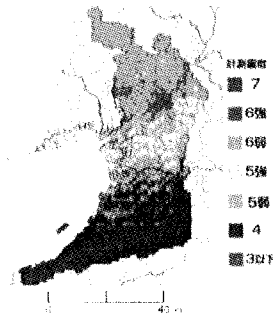


図-5(1)有馬高槻構造線

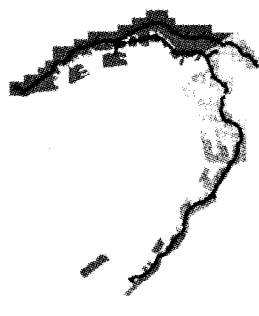


図-5(2)解析エリア(有馬高槻構造線)

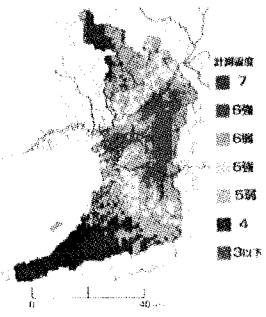


図-6(1)生駒断層系

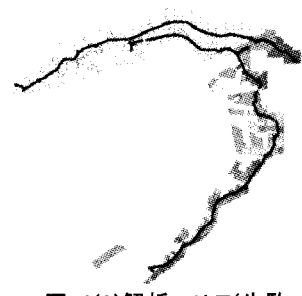


図-6(2)解析エリア(生駒断層系)

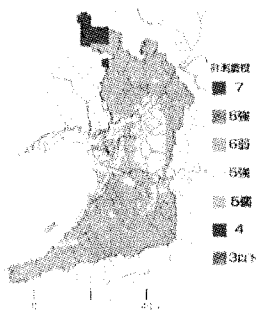


図-7(1)南海地震

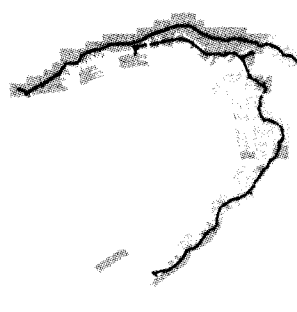


図-7(2)解析エリア(南海地震)

表-5 解析に用いるデータ項目

橋脚材種	橋脚・橋台形状	柱部断面形状	基礎竣工年度
基礎区分	基礎連続構造等	杭長	
推定震度(兵庫県南部地震時)	被災度(兵庫県南部地震時)		

べて結合されているが、同じ層のニューロン間には結合されていない。自己組織化マップには、入力層から入力されたデータ群をその類似性に応じて競合層に分類する自立的な機能があり、競合層で入力データ群の2次元平面配置付けが行われる。

本研究では、SOM を用いて橋脚の地震被害データ群のパターン分析を行うために開発されたソフトウェアシステム“SOM アナライザー”⁷⁾を用いる。

(2) SOM 分析に必要なデータの入力条件

まず、橋脚の被災度と構造特性との関連性を評価するための SOM を作成するため、与える入力条件を決定する。SOM にデータを入力する際には、数字の羅列によって条件を入力する必要がある。表-5 に示したデータを表-6 のような数値に置き換えて、SOM による分析を行った。

(3) 学習条件

1) 入力層

入力層は、橋脚材種、橋脚・橋台形状、柱部断面形状、基礎竣工年度、基礎区分、基礎連続構造等、杭長、推定震度(兵庫県南部地震時)の8つである。また、被災度は、完成した自己組織化マップのラベリングに用いる。

2) 競合層

競合層は、一般に2次元配列で、セルが格子状に存在する。入力する橋脚本数が957本であるため、競合層上のセルの個数は957個が理想的である。ただし、ここではマップの見易さなどを考慮し、30×30個に設定した。

3) 学習回数

自己組織化マップは教師なしニューラルネットワークの一種で、教師ありニューラルネットワークのような学習の進捗を示す関数が存在しない。そこで、学習結果が収束するための学習回数が必要であるが、ここでは500回に設定した。

4) 初期近傍領域

初期近傍領域は、学習開始時の近傍領域の大きさを表す。通常、競合層の大きさの1/3～1/2程度の値が使用される。ここでは、初期近傍領域を15に設定した。

5) 初期学習率

初期学習率は、学習開始時の学習率を表している。通常、0.1～0.3程度の値が用いられる。ここでは、初期学習率を0.2に設定した。

(4) SOM による分析結果およびその考察

橋脚の被災度でラベリングした自己組織化マップと、構造特性別の自己組織化マップを対比すれば、橋脚の被災度と構造特性との関連性が視覚的に評価できる。以下にSOMによって作成されたマップを図-10に示す。

図-10に示したマップから視覚的に評価できる橋脚の被災度と構造特性との関連性を以下に述べる。

1) 橋脚材種

①複合構造は、サンプル数は少ないが、被災度がDおよびCランクと被災度の低い橋脚の割合が多く、被

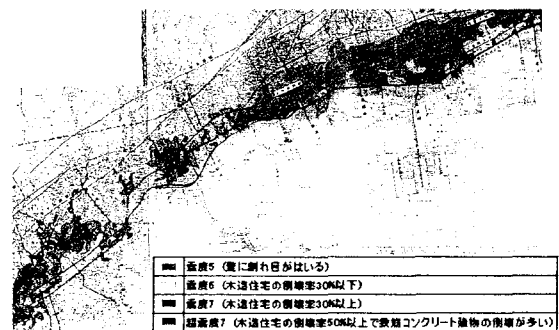


図-8 兵庫県南部地震時の推定震度(参考図)

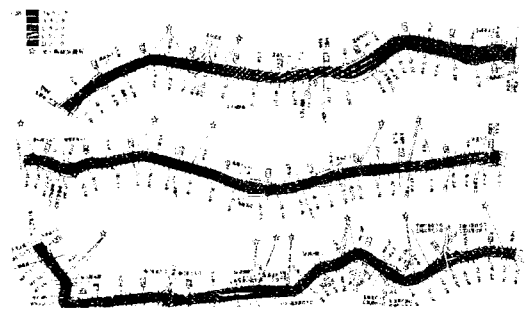


図-9 被災度(兵庫県南部地震時) 参考図

表-6 SOM 分析での入力条件

		橋脚材種				
分類		複合構造	鋼構造	PC構造	RC構造	SRC構造
数字		0	1	2	3	4

		橋脚・橋台形状		
分類		ビルツ橋、ラーメン脚以外	ラーメン脚、特殊ラーメン脚	ビルツの橋の柱
数字		1	2	3

		柱部断面形状		
分類		槽形	円形	矩形
数字		0	1	2

		基礎竣工年度			
分類		～1961年	1962～1968年	1969～1977年	1978～1987年
数字		1	2	3	4

		基礎区分			
分類		直接基礎	杭基礎	井筒基礎	ケーソン基礎
数字		1	2	3	4

		基礎連続構造等		
分類		なし	独立フーチング	連続・連結基礎
数字		0	1	2

		杭長					
分類		0m	0.1～10m	10.1～20m	20.1～30m	30.1～40m	40.1m～
数字		0	1	2	3	4	5

		推定震度		
分類		震度5	震度6	震度7
数字		5	6	7

災度が低かったことがわかる。

②鋼構造は、PC構造やRC構造と比べて、被災度がDランクの橋脚の割合が少なく、被災度がAs、AおよびCランクの割合が多いことから、被災度が比較的高かったことがわかる。

③PC構造およびRC構造は、全体的に被災度は低い、被災度AsおよびAランクの被災度の高い橋脚が一部存在し、被災度の高低は一概に判断し難い。

④SRC構造は、サンプル数が少ないが、被災度がDおよびCランクと被災度の低い橋脚の割合が多く、被災度が低かったことがわかる。

2) 橋脚・橋台形状

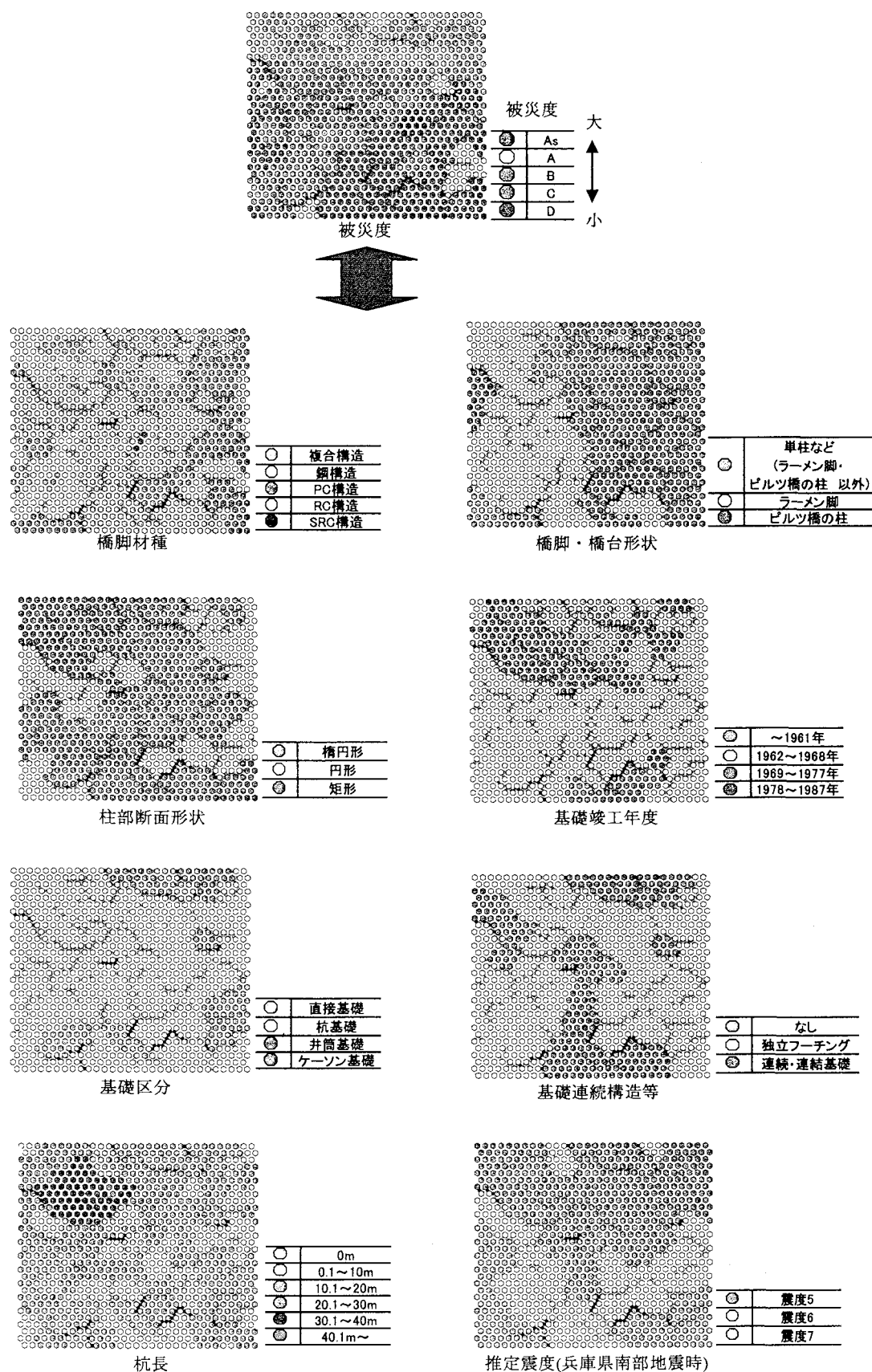


図-10 自己組織化マップの比較

①単柱など(ラーメン橋脚・ピルツ橋の柱以外)は、被災度が As および A ランクと被災度の高い橋脚が一部存在することから、ラーメン橋脚に比べて被災度が高か

ったことがわかる。

②ラーメン橋脚は、そのほとんどが被災度 D および C ランクで、被災度が低かったことがわかる。

③ピルツ橋の橋脚は、被災度が As ランクで、被災度が非常に高かったことがわかる。

3) 柱部断面形状

①楕円形および円形断面の橋脚は、矩形断面の橋脚に比べて、被災度が As および A の橋脚が多く、被災度が高かったことがわかる。

4) 基礎竣工年度

基礎竣工年度の区分は、設計基準が 1964 年(昭和 39 年)の「鋼道路橋設計示方書」、1971 年(昭和 46 年)の「道路橋耐震設計指針」、1980 年(昭和 55 年)または 1990 年(平成 2 年)の「道路橋示方書」で、基礎がそのいずれかに基づいて設計されたかを橋脚別に区別するため、設計基準の移行期間を考慮し、それぞれの年から 2 年を差し引いた、①1961 年までに基礎が竣工された橋脚、②1962 年～1968 年、③1969 年～1977 年、④1978 年～1987 年に基礎が竣工された橋脚として区分した。

①基礎竣工年度が 1961 年までの橋脚は、被災度がすべて D ランクで、被災度が非常に低いことがわかる。

②基礎竣工年度が 1962 年～1968 年の橋脚は、サンプル数が最も多いこともあるが、被災度が As ランクであった橋脚のすべてがこの期間に基礎が竣工されており、被災度が高かったことがわかる。

③基礎竣工年度が 1969 年～1977 年の橋脚は、被災度がほぼ D および C ランクで、被災度が低かったことがわかる。

④基礎竣工年度が 1978 年～1987 の橋脚は、1969 年～1977 年に比べ、被災度が C ランクの割合が多く、被災度が A ランクの橋脚も一部存在し、被災度はやや高かったことがわかる。

5) 基礎区分

①直接基礎の橋脚は、被災度が A ランクの割合が多く、被災度が比較的高かったことがわかる。

②杭基礎の橋脚は、サンプル数が最も多く、被災度が低い割合が多いが、被災度が As ランクと高い橋脚はすべて杭基礎であることから、被災度の高低は一概に判断し難い。

③井筒基礎の橋脚は、被災度が A および B ランクの割合が多く、被災度が比較的高いことがわかる。

④ケーソン基礎の橋脚は、サンプル数は少ないが、すべて被災度が D および C ランクで、被災度が低かったことがわかる。

6) 基礎連続構造等

①基礎連続構造なしの橋脚は、被災度が D ランクの割合が比較的少なく、被災度が A および B ランクの割合が比較的多いことから、被災度は比較的高かったことがわかる。

②被災度が As ランクの橋脚はすべて独立フーチングで、被災度が A ランクのものも多く存在することから、被災度は比較的高かったことがわかる。

③連続・連結基礎の橋脚は、被災度が D ランクの割合

が多く、被災度は低いことがわかる。

7) 杭長

①杭長が 0m すなわち直接基礎の橋脚の場合、被災度が A ランクの割合が多く、D ランクの割合が比較的小さいことから、被災度は高かったことがわかる。

②杭長が 0.1m～10m および 10.1m～20m の橋脚の場合、被災度が D ランクの割合は多いが、As ランクの橋脚も存在し、被災度の高低は一概に判断し難い。

③杭長が 20.1m～30m の橋梁の場合、被災が A ランクの橋脚が一部存在するが、被災度が D ランクの割合が多く、被災度は比較的lowかったことがわかる。

④杭長が 30.1m～40m の橋梁の場合、すべて被災度 D ランクの被災度の低い橋脚で、被災度は低かったことがわかる。

⑤杭長が 40.1m 以上の橋脚の場合、サンプル数が少ないが、すべて被災度は D ランクで、橋脚の被災度は低かったことがわかる。

8) 推定震度(兵庫県南部地震時)

兵庫県南部地震における推定震度が大きいほど、被災度の高い橋脚の割合が多く、D ランクのように被災度の低い橋脚の割合は減少する。

以上のように、ここで作成した自己組織化マップは、類似した構造特性を有する橋脚の中での被災度の相違などを視覚的に捉えることができる。それゆえ、自己組織化マップを GIS などと併用すれば、地盤の状況や施工ミスなどの、構造特性以外の損傷原因を発見することもできると考えられる。

4.3 数量化理論Ⅰ類による解析結果

(1) 兵庫県南部地震による橋脚の被災度と構造特性との関連性

橋脚の被災度と構造特性の関連性から予測被災度を算出するため、数量化理論Ⅰ類による解析を行った⁸⁾。解析結果を表-7 に示す。入力データは、4.1 で述べたデータである。ここに、表中の重相関係数は予測被災度がどの程度の精度で求められているかを示す数値である。また、偏相関係数は構造特性などが被災度に及ぼす影響の度合いを示す数値で、これが大きいほど構造特性などが被災度に及ぼす影響が大で、重要な要素と考えられる。スコアは、各カテゴリーが被災度に対してどの程度の影響を及ぼしているかを示すもので、各アイテムの中で該当する項目のスコアに 1 を掛け、該当しない項目のスコアにゼロを掛けて求められる。予測被災度はこれに観測値の平均値を足すことで算出できる。レンジは、各アイテムのスコアの最大値と最小値の差で、この値が大きいほど被災度に対するカテゴリーの影響がよりはっきり表れていることを示す。

表-7 からわかるように、重相関係数は 0.5088 で、橋脚の被災度と構造特性の関係が精度よく示されていると

表-7 数量化理論Ⅰ類による橋脚の被災度と構造特性との関係

橋脚数	: 957 橋			
重相関係数 R	: 0.5088			
決定係数 R^2	: 0.2588			
		観測値の平均 : 3.9760		
アイテム	カテゴリー	偏相関係数	レンジ	スコア
1. 橋脚材種	①複合構造	0.1239	0.8861	-0.0930
	②鋼構造			-0.3310
	③PC構造			0.0631
	④RC構造			0.0467
	⑤SRC構造			0.5550
2. 橋脚橋台形状	①単柱など	0.3417	3.1065	-0.0286
	②ラーメン脚			0.3293
	③ピルツ橋の柱			-2.7772
3. 柱部断面形状	①楕円形	0.0429	0.1584	-0.1109
	②円形			-0.0485
	③矩形			0.0476
4. 基礎竣工年度	①～1961年	0.1090	0.4298	0.3414
	②1961年～1968年			-0.0625
	③1969年～1977年			0.2296
	④1978年～			-0.0885
	⑤直接基礎			-13.6402
5. 基礎区分	②杭基礎	0.1472	32.6845	3.3154
	③井筒基礎			-29.3692
	④その他			-28.9382
	①なし			15.1046
6. 基礎連続構造等	②独立フーチング	0.1469	15.8112	-0.7065
	③連続・連結基礎			-0.4434
	①0m			13.8970
7. 杭長	②0.1～10m	0.1434	16.5343	-2.4496
	③10.1～20m			-2.6373
	④20.1～30m			-2.4387
	⑤30.1～40m			-2.2398
	⑥40.1m～			-2.0903
	①震度5			0.1938
8. 推定震度 (兵庫県南部地震時)	②震度6	0.1547	0.4772	-0.0099
	③震度7			-0.2835

はいえないが、両者の間の明確な関係が示されていない現状を考えれば、本結果は十分評価できる。

(2) 橋脚の予測被災度の算出結果とその考察

数量化理論Ⅰ類の解析結果を解析対象の橋脚に適用し、阪神高速道路神戸線および湾岸線の予測被災度を算出する。ただし、数量化理論Ⅰ類による分析対象外の橋脚には、数量化理論Ⅰ類による分析対象橋脚には存在しなかった構造特性の項目を含むことがありえる。それゆえ、被災度予測がうまくなされないこともある。このような場合には、予測被災度を「エラー」と表記した。なお、数量化理論Ⅰ類に用いた兵庫県南部地震における推定震度を3区分に限定したことによって、解析モデルの予想震度には表-8に示す値を設定し、橋脚の予測被災度を算出した。

兵庫県南部地震後の地震損傷を予測する場合、阪神地域では橋梁の掛け替えや改修が施されているので、新しい構造特性を用いた地震被災度が予測されるべきである。ここでは、データの公表がなされている地震前の構造特性を用いて、数量化理論Ⅰ類による分析とSOMによるパターン分類から地震被害を予測する方法を検討した。

予想地震ごとに数量化理論Ⅰ類を用い、導いた予想被災度の全体図の一例として、中央構造線による地震での予測被災度の全体図を図-11に示す。

また、被災度がBランク以上と予想被災度の高い橋脚が多く存在した淀川付近、甲子園球場付近、深江本町付近、魚崎浜出入口付近、および湊川出入口付近を対象に、予測被災度の最も高かった想定地震の拡大図を図-12～図-16に示す。以下、5カ所について考察する。

1) 淀川付近

上町断層系の直下型地震として想定されているような震度6および震度7の大地震が淀川付近に発生した場合、神崎川沿い、淀川両岸および野田阪神駅付近から中之島西入口付近にかけて予想被災度がBランクの橋脚が続出する。予想被災度どおりの損傷が起こった場合、鋼板の座屈や部材の変形が部分的に起こるため、走行性の低下による自動車事故、また、福島区などの主要道路上に存在する橋脚では、鉄筋の破断、コンクリートの剥離および亀裂による高架橋下の道路や建物および人への被害が予想される。これら高架橋下の道路や建物および人への被害は、震度5や震度6の地震が発生した場合にも十分考えられる。

2) 甲子園球場付近

震度5以上の地震が発生した場合、甲子園球場付近の橋脚に被災度がBランクの損傷が起こる。甲子園球場で野球の試合が行われる日などは、これら高架橋下に多くの人が存在する可能性がある。このような地域では、鉄筋の破断、コンクリートの剥離、および亀裂などによる甚大な人的被害が予想される。

3) 深江本町付近

深江本町付近は、兵庫県南部地震で落橋のあった地域である。入力条件から被災度の非常に高い橋脚が連続して見うけられる。

4) 魚崎出入口付近

有馬高槻構造線の地震として想定されるような震度7の大きな揺れが発生した場合、東神戸大橋から魚崎浜出入口付近にかけての埋め立て地上の橋脚に被災度がBランクの損傷が起こる。被災度どおりの損傷が起こった場合、この地域は工業地帯であることから、大規模な2次災害が想定され、橋脚の損傷に伴う災害の可能性が考えられる。

5) 湊川出入口付近

震度6や震度7の大きな揺れが発生した場合、柳原東行出口および柳原西行出口付近から湊川出入口を経て若宮出入口付近までの間に、被災度がBランクの損傷を受ける橋脚が続出する。この付近は兵庫県南部地震の際にも被災度の高い橋脚が多く見うけられたが、深江本町付近のように特異な構造特性は見られなく、構造特性の組み合わせによって予測された被災度であると考えられる。被災度どおりの損傷が生じた場合、出入口が急カーブの湊川出入口付近では、走行性の低下による自動車事故が予想され、高架橋下の国道2号でも、鉄筋の破断、コンクリートの剥離および亀裂による高架橋下の道路や建物および人への被害が予想される。また、震度5の揺れでも、湊川出入口付近に被災度がBランクの橋脚が存在し、走行性の低下による事故や高架橋下の被害が予想される。

5. 橋脚の地震損傷とその影響

4. で算出した予測被災度を用い、算出した予測被災度がとくに高い箇所を対象に、交通量の観点から橋脚の損傷が社会に及ぼす影響について考察する。その際、交通量には、「阪神高速道路 混み具合マップ(時間帯別)」⁹⁾から休日および平日の交通量の多い時間帯を抽出した図-17～図-20 を用いた。ここに、図中の注釈「各区分

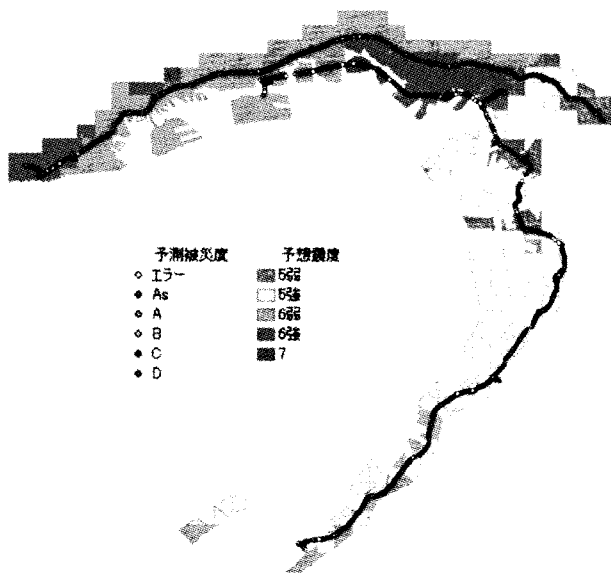


図-11 予測被災度全体図(中央構造線地震)

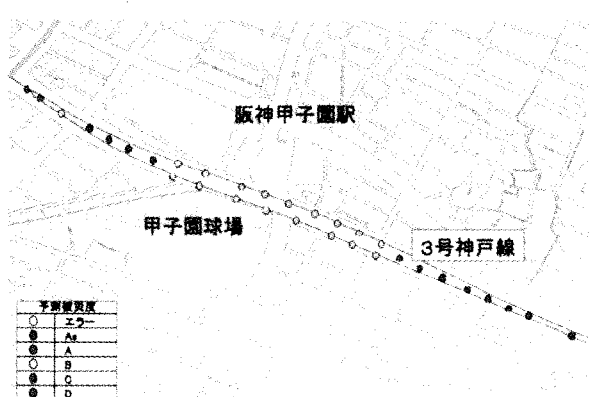


図-13 甲子園球場付近(有馬高槻構造線地震)

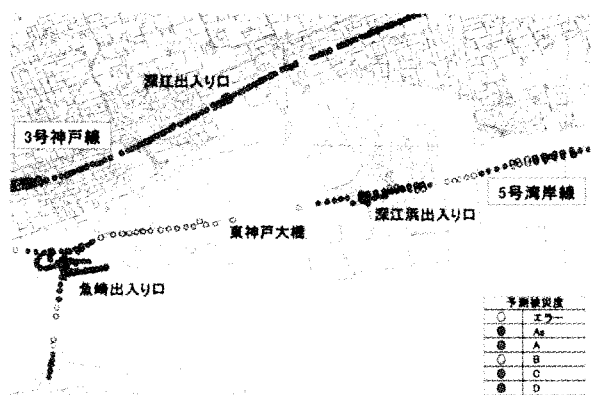


図-15 魚崎出入口付近(有馬高槻構造線地震)

において、混雑時より 5 分以上かかる」は阪神高速の HP で公表されている、阪神高速道路公団が実施した交通量調査に基づいた混雑時のある出入口からある出入口までの平常時よりもさらにかかる走行時間を示している。

解析対象地域における地震被害の大きい想定地震、箇所、および時間帯は、つぎのとおりである。

1) 淀川付近

図-12 と図-17 によれば、上町断層系の直下型地震が平日の 17:00～19:00 に発生した場合、最も地震被害が大きいと考えられる。

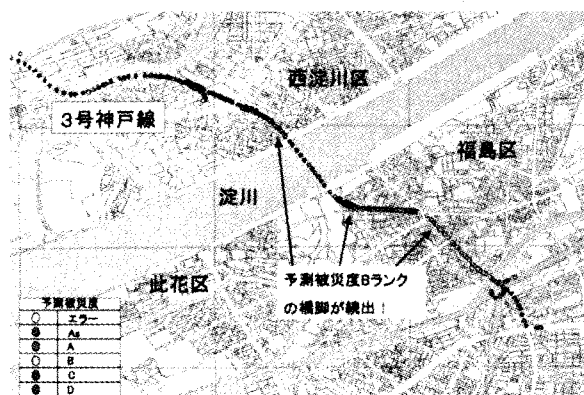


図-12 淀川付近(上町断層系地震)



図-14 深江本町付近(有馬高槻構造線地震)

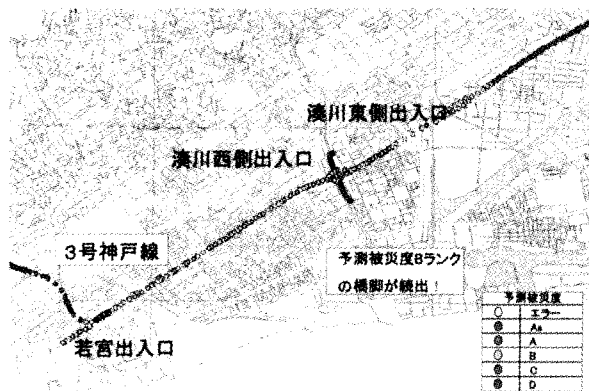


図-16 湊川出入口付近(有馬高槻構造線地震)

表-8 推定震度の入力条件

分類	推定震度(兵庫県南部地震時)		
	震度5	震度6	震度7
予想震度	震度4, 5弱, 5強	震度6弱, 6強	震度7

2) 甲子園球場付近

図-13 と図-18 によれば、有馬高槻構造線での地震が平日の 17:00～19:00 に発生した場合、最も地震被害が大きいと考えられる。

3) 深江本町付近

図-14、図-18～図-19 によれば、有馬高槻構造線での地震が平日の 10:00～12:00 もしくは休日の 10:00～12:00 に発生した場合、最も地震被害が大きいと考えられる。

4) 湊川出入口付近

図-16、図-19 および図-20 によれば、有馬高槻構造線での地震が平日の 11:00～12:00 もしくは休日の 10:00～12:00 に発生した場合が最も地震被害が大きいと考えられる。

本研究では、高速道路の渋滞状況のみを考慮した社会的影響評価に限定した。4.で得られた分析結果を用いれば、地震発生後の予測被災度をもとにさまざまな被害評価が可能となり、2 次災害の軽減を目的とした種々の対策が効果的に実施できると思われる。

6. あとがき

本研究では、都市地震における 2 次的災害の軽減を目的に、都市の主たるライフラインである高速道路網を支える高架橋橋脚を対象に、GIS を活用した阪神高速の道路橋橋脚の地震被害の予測を行った。まず、阪神高速道路の神戸線および湾岸線の橋脚に関するデータベースを GIS 上で構築した。構築したデータベースをもとに、SOM で橋脚の被災度と構造特性との関連性を評価し、数量化理論Ⅰ類による予測被災度の算出、地震損傷の高い橋脚および交通量からみた被災度の高い時間帯を明らかにした。

本研究の成果を要約すれば、以下のとおりである。

- 1) 阪神高速道路の神戸線および湾岸線の橋脚(3,100 橋)のデータベースを GIS 上で構築した。本データベースにはさまざまな属性データが含まれており、本研究以外にも活用できる。また、大阪府や兵庫県が公表している今後予測される地震別の予想震度分布を GIS 上に取り入れた。
- 2) SOM による分類によって、対象道路橋脚の橋脚材種、橋脚・橋台形状、柱部断面形状、基礎竣工年度、基礎区分、基礎連続構造等、杭長および推定震度(兵庫県南部地震時)と被災度(兵庫県南部地震時)との関連性を評価した。
- 3) 数量化理論Ⅰ類による多変量解析によって、各想定地震における阪神高速道路神戸線と湾岸線での橋脚の予想被災度を算出し、GIS 上で可視化した。
- 4) 予想被災度の高い橋脚が多く存在する箇所を対象に、交通量を考慮した地震被害の高い想定地震およびその時間帯を明らかにした。

なお、今後の課題と思われる点を列挙すれば、以下の

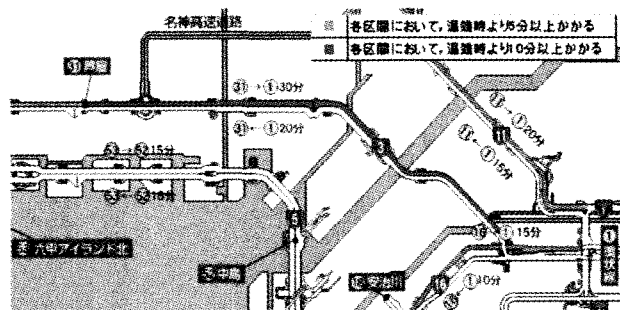


図-17 交通量(平日 17:00～19:00)

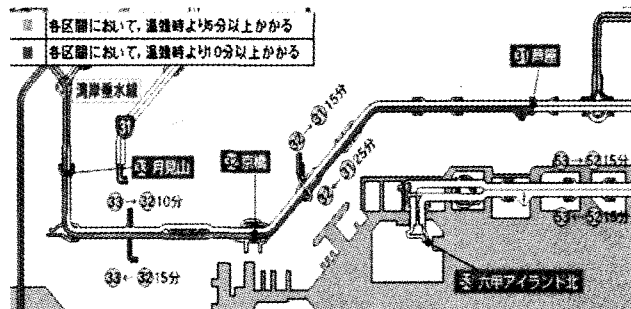


図-18 交通量(平日 10:00～11:00)

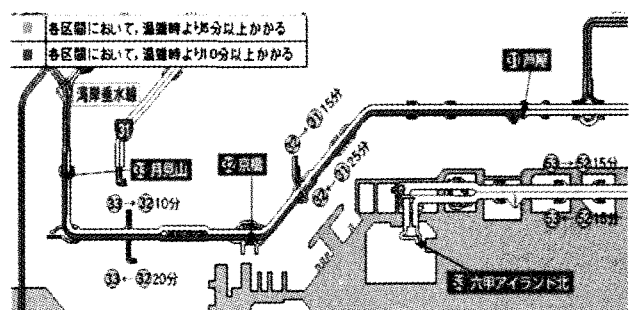


図-19 交通量(平日 11:00～12:00)

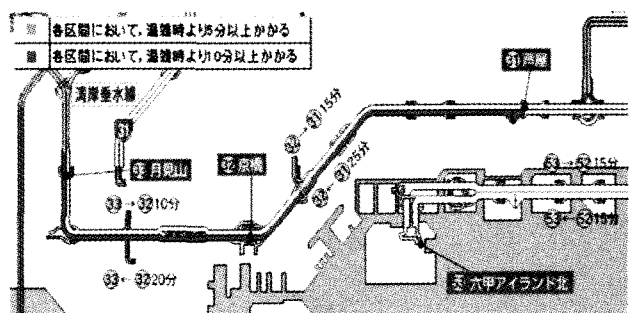


図-20 交通量(休日 10:00～12:00)

とおりである。

- 1) 阪神高速道路神戸線における橋脚の構造特性データは、兵庫県南部地震以前のものである。地震後の補修履歴などは含まれていないので、現在の状態として作成したデータベースはかなり異なる構造特性の橋脚が多く存在する。今後、橋脚の補修履歴等のデータを収集し、現在の橋脚の状態に近い入力条件で

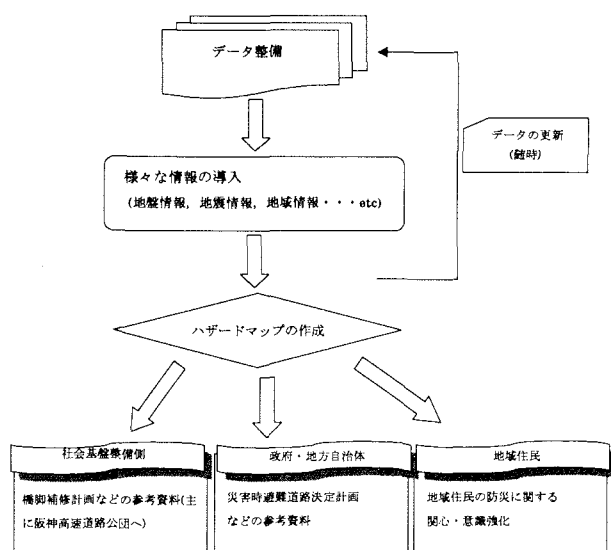


図-21 本研究と今後実施すべき実用化への展開

予測被災度の算出を行う必要がある。

- 2) 本研究で用いた構造特性以外の構造特性項目および地盤データなども考慮し，多方面からのさまざまなデータを GIS 上で管理すれば，より信頼性の高い地震被害解析が行えるものと思われる。
- 3) 詳細な交通量データ，人口密度，道路橋周辺の土地利用状況および詳細な地震予測データなどが整えば，種々の地震被害解析が可能になる。

以上のような点を考慮し，今後実施すべき実用化への展開を図-21 に示す。

なお，本研究を遂行するにあたり，貴重なデータを提供していただいた阪神高速道路公団の関係各位に感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 町田 聡：GIS 地理情報システム入門&マスター，山海堂，1994-3.
- 2) 北原武嗣，伊藤義人：地球情報システムを用いた確率論的耐震性能評価システム，構造工学論文集，土木学会，Vol48A, pp.289-298, 2002-3.
- 3) 社団法人土木学会：阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害 第1章 橋脚，1996-12.
- 4) T. Kohonen 著，徳岡平蔵・岸田 悟・藤村喜久郎 訳：自己組織化マップ，シュプリンガー・フェアラーク東京，1996.6.
- 5) 徳高平蔵・岸田 悟・藤村喜久郎：自己組織化マップの応用，海文堂出版，1999-2.
- 6) 伊藤則夫：ニューラルネットアシスタント操作説明書，(有)シー・イー・エー，2002-10.
- 7) (社)土木学会関西支部編：阪神・淡路大震災調査研究委員会報告書，1998-6.
- 8) 杉山和雄・井上勝雄：EXCEL による調査分析入門，海文堂，1996-1.
- 9) 阪神高速道路公団ホームページ.

(2004 年 9 月 17 日受付)