

# リアルタイム地震防災で活用される 被害推定技術の現状

石田 栄介<sup>1</sup>・石井 晃<sup>2</sup>・中村 孝明<sup>3</sup>・磯山 龍二<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 正会員 日本技術開発(株)環境防災事業部地震防災部 (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

<sup>2</sup> 正会員 鹿島建設(株)土木設計本部設計技術部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

<sup>3</sup> 正会員 (株)篠塚研究所 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿4-5-1 幸伸ビル新宿3F)

リアルタイム地震防災では、地震による物的被災要因の解明から、社会的あるいは経済的な復旧・復興に至るまでの総合的な被害対策が求められている。この中では、地震動と物的被害の関係の解明も重要な課題であり、これまで多くの研究成果が報告されている。また、これらの研究成果に基づき、地震動強さから物的被害を推定する手法も数多く提案されている。

本論は、リアルタイム地震防災システムへの適用を考慮した場合の震災対応の意思決定を支援する物的被害推定技術について整理するものである。特に、兵庫県南部地震以後の研究成果に的を絞り、地盤、供給処理施設、建物、交通施設、人的被害等について報告する。

**Key Words** : fragility curve, realtime, earthquake disaster prediction

## 1. はじめに

リアルタイム地震防災では、地震発生後の被害状況から復旧・復興情報に至るまで、現状をできる限り正確・迅速に把握し、これに基づいて的確な判断・意思決定を行うことにより、被害の軽減を図ることが目標とされている。地震発生直後の直接的な情報把握対象は、被害状況そのものであるが、現状においては、各地に設置した強震計で地震動をモニタリングすることによって、被害状況を推定する手法が普及している。これは、地面が揺れてものが壊れるといった、地震被害の現象の流れにそった自然な考え方に基づいているため適用範囲が広いことが大きな理由と言える。この中では、地震動と被害との関連性を解明することが重要であり、地震が起こる度に、各種被害調査結果と地震動分布との関連性が研究されてきた。

これらの成果を被害推定手法として整備することにより、懸念される想定地震に対して地震動分布が予測できれば、各種被害も概略予測できることになる。このようなアプローチにより、各自治体では、地震被害想定が盛んに行われている。さらに実際の地震時には、観測値に基づく地震動分布に取り替えて自動的に再計算するように設定しておくことにより、早期地震被害予測システムを構築することも可能である。この場合、地震発生直後、なるべく早く推定結果を出す必要があるた

め、被害推定手法は、推定精度と計算速度・簡易性のバランスの良いものが求められる。

本論では、リアルタイム地震防災の現状において、各種被害推定でよく用いられる手法についてまとめる。特に、兵庫県南部地震以後の研究成果に的を絞り、地盤、供給処理施設、建物、交通施設、人的被害に分けて、各々の最新の被害予測手法の動向について報告する。

## 2. 地震動指標と被害

実際に発生した被害を精度良く推定するためには、対象構造物地点の地震動波形を用いて、地盤及び構造物の地震時挙動を解明することが望ましい。しかし、広域を対象としたリアルタイムの被害把握には、大量の情報を短時間で処理する必要があり、一般には最大加速度や最大速度、SI値、計測震度などの地震動強さの指標が活用される。

最大加速度は最も馴染みの深い指標であり、最大加速度の推定式や構造物の地震時挙動に関する研究も数多く実施され、構造物が弾性挙動を示す地震動強さの範囲においては、適切な地震動指標といえる。しかし、被害の発生する大振幅時には、構造物が弾塑性挙動を示す場合が多く、最大加速度が地盤や構造条件の違いで敏感に変動するため、その取扱いには注意が必要である。

最大速度は最大加速度に比べて地盤や構造条件

による影響が小さく、振動エネルギーとの相関が強いので、被害との対応も比較的良いが、強震領域では被害を過大評価することもある。図-1に Koyamada *et al.*<sup>1)</sup>による地震動と建物被害の比較図の一例を示す。図には兵庫県南部地震による鷹取付近の建物被害調査結果<sup>2), 3)</sup>を山側から海側に向かってプロットしている。また、実線は最大加速度、破線は最大速度から各々推定した建物被害率を示している。

SI値は構造物の被害との相関を高めるために提案された指標であり、構造物の周期特性を考慮した周期範囲で速度応答スペクトルを積分することによって与えられる<sup>4)</sup>。都市ガス施設の地震防災システムに利用されるなど、現在最も活用されている地震動指標の一つである。

計測震度は兵庫県南部地震後に気象庁より提示された指標であり、既往の被害地震による被害規模と対応した指標となっている<sup>5)</sup>。これまでの気象庁震度は被害調査によって決定されていたため、地震発生後から震度発表までのタイムラグが発生していたが、物理的背景の整った計測震度への移行により早期情報提供が可能となった。近年、計測震度に関する研究も多くなり<sup>6)</sup>、今後のリアルタイム地震防災への活用が期待される。

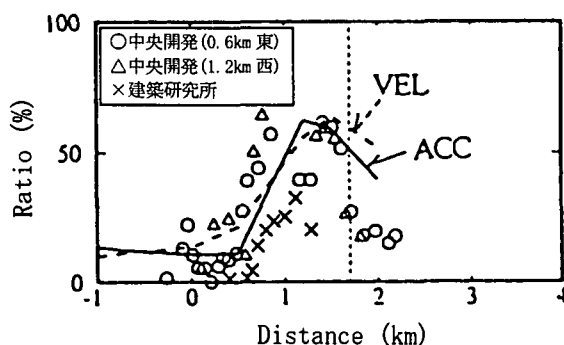


図-1 地震動指標と建物被害率の比較図の一例<sup>1)</sup>

### 3. 地盤の被害評価

地盤の被害は、道路構造物の被害評価として後述する斜面被害の他に、液状化に関する評価方法が数多く提案されている。

安田<sup>7)</sup>によれば、液状化の予測方法はその精度の面から大別すると次のように分けられる。①地形・地質や液状化履歴をもとにした概略の予測方法、②一般の土質調査・試験結果をもとにした簡易な予測方法、③室内液状化試験や地震応答解析を行う詳細な予測方法、④模型振動台実験や原位液状化試験を行う特殊な予測方法。広い地域の液状化危険度分布を予測する場合には、まず事前に①によって液状化の危険地域を絞り込み、続い

て②によって液状化危険度を予測する手順を踏むことが多い。③や④の方法は予測精度が良い反面、費用が高くなるため、現状で防災システムへの活用は現実的であるとは言い難い。今後の情報整備を待って、適用性を検討すべきであろう。以下に①及び②の予測方法について補足する。

①の概略予測方法は地形的な特徴を考慮するものであり、その代表的な予測方法を地震動指標別に表-1に整理する<sup>8)-10)</sup>。国土数値情報を利用する方法は、全国でデータが整備されているため最も簡単に活用できる方法である。詳細な微地形を利用する方法は、電子地図の作成に労力がかかるが、既に電子化されている地域もあり、より精度のよい液状化予測が可能となる。

②の簡易予測方法としては、表-2に示す限界N値を用いる方法や $F_L$ 値を用いる方法などが挙げられる。これらは多くの耐震設計基準に導入されているが、限界N値法は地震動強さによる液状化程度の違いを考慮できないため、防災システムへの活用は $F_L$ 値法の方が適している。しかし、 $F_L$ 値法による簡易予測には土質柱状図や粒度試験結果などが必要となり、データ整備に莫大な費用がかかるため、これまで広域の液状化危険度の予測に適用されることは少なかった。しかし、最近の地盤データの電子化の進行にともない、自治体の地震被害想定や公益事業者の防災システムなどへの適用例が増えつつある<sup>11)</sup>。

表-1 液状化の概略予測方法の例

予測方法	地震動指標	使用データ
松岡ら(1993)	最大速度	国土数値情報 地形分類 標高、河川流路 海岸線位置
三浦ら(1994)	最大加速度	微地形 河川からの距離、標高差
若松(1997)	気象庁震度	微地形

表-2 液状化の簡易予測方法の例

予測方法	使用データ	判定基準
限界N値法	N値 粒度分布	既往の調査結果から液状化する限界N値を規定
$F_L$ 値法	最大加速度 N値 粒度分布 密度など	地盤の液状化強度比と地震による繰返しせん断力比で判定

①と②を組み合わせた方法として、例えば東京都の方法<sup>12)</sup>がある。液状化履歴図や地形・地質図に基づく概略予測と $F_L$ 値を用いた簡易予測の組み合わせにより、様々な液状化要因を考慮した予測を実施している。また、地盤の非線形性を考慮した応答スペクトルを用いた方法<sup>13)</sup>や最大加速度とSI値を組み合わせた方法<sup>14)</sup>、液状化に伴う地盤流動の予測方法<sup>15)</sup>など、新たな簡易予測方法も提案

されている。防災システムの構築にあたっては、電子地図の作成状況と防災システムの目的に応じて、適切な予測方法を選定する必要がある。

#### 4. 供給処理施設の被害推定

供給処理施設としては、上水道、都市ガス、電力、電話施設、下水道などがあり、一般的には、管路及び主要施設の物的被害推定と、これに基づく機能支障推定の二段階に分かれる。特に、水道、都市ガスでは、これまでの地震で埋設管が多大な被害を受けており、供給処理施設の中でも、埋設管の被害推定が大きな課題となっている。

埋設管の被害要因としては、地震動の強さ、管種、管径、地盤特性、地盤変状(液状化程度、側方流動等)、埋設深さ等が挙げられる。そこで、リアルタイム地震防災を想定した場合には、既往地震による被害データの統計分析に基づき、これら被害要因の影響を補正係数として付加した下式のような地震動強さと被害率の関係式で埋設管被害を表すことが多い<sup>16)-19)</sup>。

$$R = C_p \cdot C_d \cdot C_g \cdot C_l \cdot f(\alpha) \quad (1)$$

ここで、 $R$ は埋設管の被害率(被害箇所数/延長km、被害延長km/延長km、等)、 $C_p$ は管種、管径等による補正係数、 $\alpha$ は地震動指標(最大加速度、最大速度、SI値等)、 $f(\alpha)$ は標準被害率(被害率 $R$ と同じ単位)である。標準被害率は、通常、地震動指標の関数として表されることが多く、初期は、下式のような指数関数で表現された<sup>17)</sup>。

$$f(\alpha) = a \cdot \alpha^b \quad (2)$$

ここで、 $a$ 、 $b$ は回帰のためのパラメータである。上式をベースに、様々な見解を盛り込んだ被害推定式も多い。例えば、ある程度以上地震動が大きくならなければ、被害は発生しないとといった見解から、被害発生地震動下限値 $\alpha_0$ を設け、下式のように改良した被害推定式<sup>(例えば、18)、19)</sup>の例は多く、自治体の被害想定などでもよく使われている。下式の被害推定式の一例を図-2に示す。

$$\begin{cases} f(\alpha) = 0 & (\alpha \leq \alpha_0) \\ f(\alpha) = a \cdot (\alpha - \alpha_0)^b & (\alpha > \alpha_0) \end{cases} \quad (3)$$

また、ある程度以上地震動が大きくなると、被害率は指数関数的には増加しなくなるといった見解から、ある地震動で被害率を頭打ちにして用いられることもある<sup>(例えば、20)</sup>。

自治体やガス事業者では、このような考え方に従い、震災時の意思決定支援のために地震防災システムを構築する試みを実施され、一部では実運用化されている<sup>20)-26)</sup>。

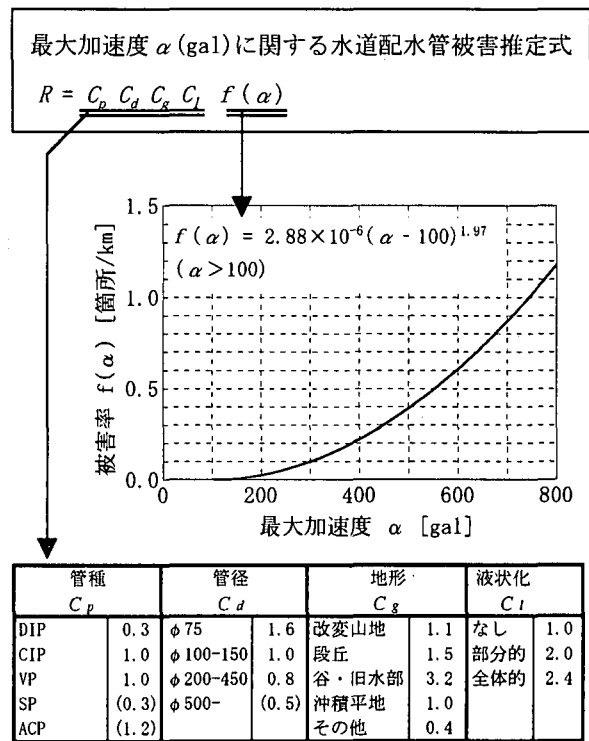


図-2 埋設管の被害推定式の例<sup>19)</sup>

#### 5. 建物の被害評価

建物被害に関しては、既往地震による被害データから地震動と家屋被害が関連付けられ、マクロな被害評価式が提案されている<sup>27)</sup>。その後、1995年兵庫県南部地震による建物被害データ<sup>(例えば、3)、28)</sup>を活用して、建物の用途や階数、構造形式、建設年代などを考慮した被害推定式が構築されている<sup>21)、29)-33)</sup>。初期の被害関数は、式(3)と同じような指数関数による回帰も行われていたが、現在では、対数正規分布関数を利用した下式による被害推定式が定着しつつある。

$$P(\alpha) = \Phi((\ln(\alpha) - \lambda) / \zeta) \quad (4)$$

ここで、 $\alpha$ は地震動指標(最大加速度、最大速度、SI値等)、 $P(\alpha)$ は地震動 $\alpha$ における建物の被害確率、 $\Phi(x)$ は $x$ に関する標準正規分布の累積確率分布関数、 $\lambda$ 、 $\zeta$ は特性パラメータである。この特性パラメータを上記の建物属性の組合せ毎に求めるのが一般的である。また、建物特性を回帰パラメータとして上式との線形結合で表現し、被害推定式を一本化する試みもある<sup>32)</sup>。

集計値として提供されている建物被害データを用いる場合、集計時の建物属性区分の制約を受けることになる。一方、課税台帳等、一軒毎の建物属性が利用可能な場合は、各建物属性について、被害との関連性を表現する上で、どのような区分が最適かを見極める必要がある。例えば、建築年代区分に関して言えば、耐震基準改正の影響によ

り改正年の前後で被害率が大きく異なることが知られており、これに合わせて年代区分を行う場合が多い。各建物属性及び区分の例を表-3に示す。

被害程度の表現に関しては、基となる建物被害調査データにより被害尺度の定義が異なる場合があるので、異種の建物被害推定式の比較、統合においては、各々の被害尺度間の関係に留意する必要がある<sup>34)</sup>。

表-3 建物属性と区分の例<sup>30), 33)</sup>

建物属性	区分例
構造種別 <sup>33)</sup>	木造、RC造、S造、軽量S造
年代区分 <sup>33)</sup>	-1951、1952-61、1962-71、 1972-1981、1982-
建築用途 <sup>30)</sup>	独立、集合、商業、工業
階数 <sup>30)</sup>	低層(2階建て以下)、 中高層(3階建て以上)

## 6. 交通施設の被害評価

交通施設の被害としては、橋梁・高架橋の落脱、橋脚の被害、斜面崩壊等の直接的な被害と、道路周辺の建物が倒壊した場合の道路閉塞など、間接的な被害が挙げられる。自治体の被害想定では、直接的な被害を対象に、以下の考え方にに基づき被害推定が実施されている<sup>21), 23), 35)-36)</sup>。斜面被害は、地盤種別や斜面高さ、勾配をパラメータとして、通行支障の程度が段階的に評価され、橋梁・高架橋被害は、設置地盤と構造形式、建設年代などをパラメータとして、被害程度が評価される。これらは既往地震による被害データをもとに設定されたものである。斜面崩壊については、斜面勾配や水系密度をパラメータとして、統計的手法により崩壊危険度を評価する試みもある<sup>37)</sup>。

近年、建設省土木研究所や日本道路公団では、構造物の地震時挙動を動的解析によって求め、任意の地震動強さに応じた残存耐力や変形量を考慮した防災システムの構築が試みられている<sup>38)-39)</sup>。このようなシステムは、構造物の詳細構造をデータベースとして保有しているため、緊急時だけでなく平常時の維持管理にも活用できる利点がある。一方、道路施設は、不特定多数の人々が利用する公益施設であり、人命の安全に重点を置いた防災施策が重要となる。このため、被害発生前の車両通行の規制値に関する研究<sup>40)</sup>が進められる一方、人命に関わるような甚大な被害を防ぐ目的から、橋脚の靱性を向上させる補強工事が随所で行われている。また、地震発生直後の道路規制や早期地震被害予測システム構築へ向けての要素技術として、道路・橋梁等の地震被害推定のためのフラジリティ曲線が統計的に評価されている<sup>41)-42)</sup>。

道路橋脚のフラジリティ曲線の例を図-3に示す。図-3の例では、前節の建物被害推定の式(4)と同様の対数正規分布関数を利用してフラジリティ曲線を作成しており、被災程度の表現としては、表-4のような被災度ランク<sup>43)</sup>で分類している。また、このような研究の一方で、米国では地震発生後の二次被害の低減を目的とした、想定地震に基づく道路網の機能損傷についての研究がある<sup>44)</sup>。

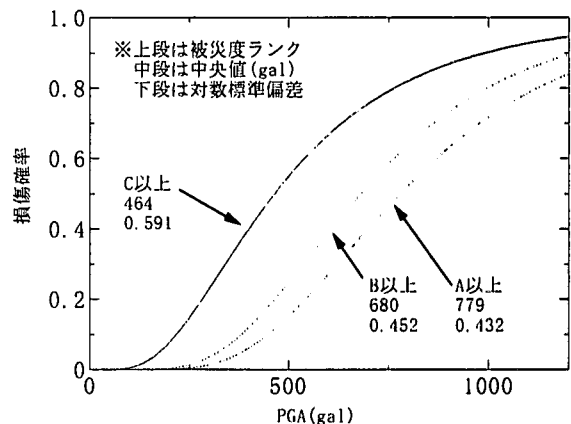


図-3 道路橋脚のフラジリティ曲線の例<sup>42)</sup>

表-4 被災度ランク<sup>43)</sup>

ランク	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いもの
B	鋼材の座屈や部材の変形が部分的に見られるもの 鉄筋の一部の破断やはらみだし及び部分的なかぶりコンクリートの剥離や亀裂が見られるもの
C	鋼材の座屈や変形が局部的かつ軽微なもの 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きわめて軽微なもの

鉄道については、リアルタイム地震防災の先駆となったJRのユレダスが代表的な防災システムとして挙げられる<sup>45)</sup>。ユレダスはリアルタイム地震観測網による情報をもとに、できるだけ早い段階で被害地震を認識して、列車を停止させるためのシステムであり、人命尊重の立場からも重要なものである。また、ユレダスで得られたリアルタイム地震動情報を収集して早期被害予測を行うシステム「ヘラス」も並列して開発されている<sup>46)</sup>。

## 7. 人的被害推定

地震による人的被害は、建物被害、火災延焼、崖崩れ等、様々な原因によってもたらされる。この中で、最も被害が大きくかつ一般的に定量化が可能なものは建物倒壊によるもので、これまでの人的被害推定に関する研究は建物被害によるものが殆どである(火災延焼を考慮したものも多い)。

ここでは、建物被害による死者数の推定について主に兵庫県南部地震以降の研究をベースに述べることとする。

死者数の被害推定法としては、河角が提案した、次式が最も一般的である<sup>47)</sup>。

$$F = a \cdot D^b \quad (5)$$

ここで、 $D$ は建物被害数(全壊棟数が一般的)、それによる死者数が $F$ である。係数 $a$ 、 $b$ は過去の地震の統計から求められ、様々な数値が提案されている(例えば、<sup>48)</sup>。 $b$ についてはおおむね1.0程度の値となることが知られている。 $b$ を1.0とすると、 $a$ は全壊一軒当たりの死者数を表すことになる。例えば、塩野らは兵庫県南部地震以前の研究において $a = 0.0676$ という数値を与えている<sup>49)</sup>。これは、全壊家屋が15棟程度であれば、死者が一人出る計算になる。

上式に従った兵庫県南部地震の分析が幾つか発表されている。杉本ら<sup>50)</sup>は芦屋市について木造建物及び死者に関する詳細な調査・分析に基づき、町毎の棟数、死者数から $a = 0.077$ を得ている。梅村ら<sup>51)</sup>は同様の検討を神戸市灘区で行い(ただし、建物被害データは建設省建築研究所のもので大破数)、 $a = 0.096$ を得ている。これらの研究では、いずれも $b = 1.0$ としている。ここで、建物被害数 $D$ は全壊数(芦屋市)あるいは大破数(灘区)であるが、全壊・大破の定義は、かなり広いことに注意を要する。芦屋市、灘区ともに全壊率は高いが、特に倒壊に近い被害が多かったことに留意する必要がある。

諸井らは神戸(東灘等の6区)、芦屋、西宮について建築研究所の建物被害データ、朝日新聞による死者データに基づき以下の結果を得ている<sup>48)</sup>。

$$F = 0.53 + 0.036 \cdot D_d + 0.017 \cdot D_s \quad (6)$$

ここで、 $D_d$ は戸建住宅の大破数、 $D_s$ は集合住宅の大破数である。戸建住宅では大破一棟辺り0.036人が亡くなり、集合住宅はその半分であった。

上記の方法は全壊ないしは大破した建物一棟当たりの死者数を推定するものであるが、全壊等の定義の幅がやや広いこと、一棟当たりの居住者数を平均値で仮定していることなどに注意が必要である。そこで、建物全壊率と死亡率を直接比較するという方法も考えられる。糸魚川<sup>52)</sup>は阪神地区の建物被災度(全壊、半壊等の率)及び死亡率を、区、市単位で整理し、図にプロットしている。図-4に糸魚川の整理結果を図示するが、回帰は著者らが試みに行ったものである。神戸各区の人口は10万人程度、尼崎市は約50万人、最も小さい芦屋市で8.8万人で、これらをひとつの単位(プロット)としている。横軸は全壊率であるが、これは地震動の強さと見ることができ、フラジリティ

と見ることもできる。区、市程度の大きさの街で全壊率が40%に達すると人口の0.7%程度の死者が出ることになる。

なお、本節執筆に際し、大阪市立大学宮野道雄氏から資料の提供を頂いた。また、東京大学生産技術研究所山崎文雄氏には有益な討議を頂いた。

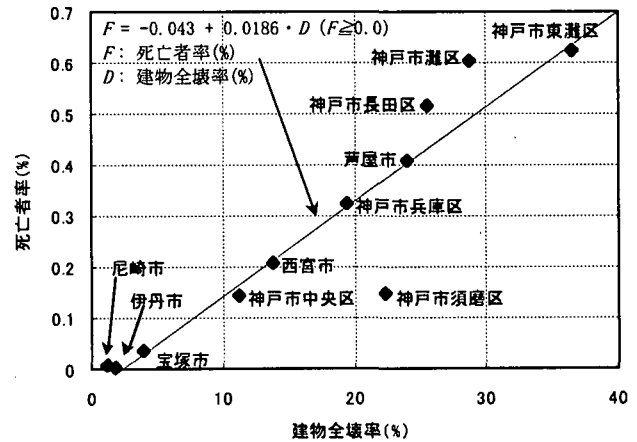


図-4 市区単位的全壊率と死亡率の関係<sup>52)</sup>

## 8. まとめ

本論では、主に地震動強さと被害との関係を統計的に処理した各種被害推定式の現状についてまとめた。兵庫県南部地震以後、全国各地で、さらに密に強震計が設置されており、大地震における地震動分布と被害との関連は、今後、より精度高く解明されていくものと思われる。また、地震動からの被害推定以外にも、直接リアルタイムに被害を把握するような手法も開発されていくものと思われる<sup>53)</sup>。これらは、排他的に考えず、各種情報を相互に補完しながら、整合性のとれた解釈・判断を行っていきけるような枠組みを構築していくことが望ましい。

## 参考文献

- 1) Koyamada, K., Nagano, M., Kato, K. and Ohno, S.: Simulation of Strong Ground Motions During the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake Using 2-D Seismic Profiles at Six Sections in Kobe City, Proc. of 2nd Int. Symp. on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Vol. 3, pp.1457-1464, 1998.12.
- 2) 中央開発株式会社: 1995年兵庫県南部地震・阪神大震災災害調査報告書, 1995.
- 3) 建設省建築研究所: 平成七年兵庫県南部地震被害調査最終報告書, 1996.3.
- 4) Housner, G.W.: Vibration of Structures Induced by Seismic Wave, Shock and Vibration Handbook, Vol. 3, pp.1-32, 1961.
- 5) 関田康雄: 新しい気象庁震度階級について, 財団法人震災予防協会, 地震工学振興会ニュース, No.147, pp.21-26, 1996.3.
- 6) 例えば、清野純史, 藤江恵悟, 太田裕: 組合せ震度の提案・定式化とその活用について, 土木学会論文集,

- No. 612, 1-46, pp. 143-151, 1999. 1.
- 7) 安田進: 液状化の調査から対策工まで, 鹿島出版会, 1988. 11.
  - 8) 松岡昌志, 翠川三郎, 若松加寿江: 国土数値情報を利用した広域液状化危険度予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第425号, pp. 39-45, 1993. 10.
  - 9) 三浦房紀, 杉山武, 坪井利弘, 幸原淳: 液状化危険地域の簡易推定法, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp. 1015-1020, 1994. 12.
  - 10) 若松加寿江: L2地震動を考慮した微地形による液状化判定法の検討, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 445-448, 1997. 7.
  - 11) 山本明夫, 瀬川秀恭, 篠原秀明: リアルタイム地震防災における地盤および地震動データについて, 第1回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, pp. 77-82, 1999. 1.
  - 12) 東京都土木技術研究所: 東京低地の液状化予測, 1987.
  - 13) 澤田純男, 土岐憲三, 中村純二: 応答スペクトルを用いた液状化判定方法, 第23回地震工学研究発表会講演概要集, pp. 675-678, 1995. 7.
  - 14) Towhata, I., Park, J. K., Orense, R. P., and Kano, H.: Use of Spectrum Intensity in Immediate Detection of Subsoil Liquefaction, *Soils and Foundations*, Vol. 36, No. 2, pp. 29-44, 1996. 6.
  - 15) 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾, 増田民夫: 液状化に伴う流動の簡易評価, 土木学会論文集, NO. 638/III-49, pp. 71-89, 1999. 12.
  - 16) 久保慶三郎, 片山恒雄: 川崎市上水道管網の地震時供給信頼性に関する研究, 川崎市の震災予防に関する調査報告書, 川崎市防災会議地震専門部会, 1981.
  - 17) 磯山龍二, 片山恒雄: 大規模水道システムの地震時信頼度評価法, 土木学会論文報告集, 第321号, 1982. 5.
  - 18) 高栖正洋, 鈴木崇伸, 磯山龍二, 吉川洋一: 埋設管被害と地震強度の関係について, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp. 2083-2088, 1994. 12.
  - 19) 磯山龍二, 石田栄介, 湯根清二, 白水暢: 1995年兵庫県南部地震に基づく水道管路の地震被害推定式, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 3175-3180, 1998. 11. 26
  - 20) 高坂政道, 小島清嗣, 大保直人: 都市ガス導管の地震被害推定システム, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 3507-3512, 1998. 11.
  - 21) 東京都: 東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書, 1997. 8.
  - 22) 神奈川県: 神奈川地震被害想定調査報告書(ライフライン), 1986. 3.
  - 23) 埼玉県: 埼玉県地震被害想定調査報告書, 1998. 3.
  - 24) 川崎市: 川崎市地震被害想定調査報告書, 1997. 3.
  - 25) 山崎文雄, 片山恒雄, 野田茂, 吉川洋一, 大谷泰昭: 大規模都市ガス導管網の地震被害警報システムの開発, 土木学会論文集, No. 525/I-33, pp. 331-340, 1995. 10.
  - 26) 高田至郎, 高谷富也, 小川安雄, 福井真二: 地震動モニタリングとライフラインのリアルタイム被害推定, 構造工学論文集, Vol. 40A, pp. 1139-1149, 1994. 3.
  - 27) 董華南, 山崎文雄, 佐々木裕明, 松本省吾: 被害事例に基づく地震動強さと家屋被害率の関係, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp. 2299-2304, 1994. 12.
  - 28) 震災復興都市づくり特別委員会: 阪神・淡路大震災被災実態緊急調査 被災度別建物分布状況図集, 1995. 3.
  - 29) 静岡県: 第2次地震被害想定結果報告書(人的・物的被害編), 1997. 6.
  - 30) 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫: 1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく最大地震動分布に関する考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第502号, pp. 61-68, 1997.
  - 31) 石田寛, 水越薫: 建物フラジリティ関数の評価手法に関する検討, 1998年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 65-68, 1999. 3.
  - 32) 中村孝明・飯塚崇文・藤井俊二・高山正春: 兵庫県南部地震の被災データに基づく建築被害関数の推定 その1 建物のフラジリティー曲線の評価, 建築学会大会学術講演梗概集B-II, pp. 33, 1999. 9.
  - 33) 村尾修, 山崎文雄: 自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, pp. 189-195, 2000. 1.
  - 34) 岡田成幸, 高井伸雄: 地震被害調査のための建物分類と破壊パターン, 建築学会構造系論文集, 第524号, pp. 65-72, 1999. 10.
  - 35) 宮城県: 宮城県地震被害想定調査, 1987.
  - 36) 大阪府: 大阪府地震被害想定調査報告書, 1997.
  - 37) 下野正人, 大矢敏雄, 中村孝明, 大津宏康: 自然斜面の地震時崩壊危険度の統計的評価, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol. 3, pp. 3541-3546, 1998. 11.
  - 38) 杉田秀樹: 道路及び河川における地震防災システムの現状, 第1回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, pp. 31-36, 1999. 1.
  - 39) 本村均, 濱田達也, 谷口雅信: 高速道路の地震防災のためのリスクマネージメントシステムについて, 第2回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, 2000. 5.
  - 40) 本村均, 濱田達也, 市岡隆興: 高速道路の被害と地震動に関する評価と考察, 土木学会第54回年次学術講演会, 1999. 9.
  - 41) 山崎文雄, 大西淳一, 田山聡, 高野辰雄: 高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol. 3, pp. 3491-3496, 1998. 11.
  - 42) 中村孝明, 長沼俊彦, 静岡俊郎, 篠塚正宜: 統計解析による道路橋脚の地震時損傷確率に関する研究, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol. 3, pp. 3165-3170, 1998. 11.
  - 43) 日本道路協会: 道路橋震災対策便覧(震災復旧編), pp. 107-112, 1988. 8.
  - 44) 篠塚正宜, 鶴沢哲史, 上田孝行, Xuejiang Dong: 確率論的手法による道路ネットワーク施設の地震被害評価, 第2回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, 2000. 5.
  - 45) 中村豊: リアルタイム地震動モニタリング, 第1回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, pp. 37-41, 1999. 1.
  - 46) 上半文昭, 佐藤新二, 井上英司, 富田健司: 災害予測・復旧支援システム"New HERAS"の開発, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol. 3, pp. 3445-3450, 1998. 11.
  - 47) Kawasumi, H.: Intensity and Magnitude of Shallow Earthquakes, *Bureau Central Seism. Intern.*, Ser., 19, 99-114, 1954.
  - 48) 諸井孝文, 宮村正光: 地震による人的被害の予測と実際, 地震ジャーナル, 23, 1997. 6.
  - 49) 塩野計司, 小坂俊吉: 地震による死者・負傷者の予測, 総合都市研究, 第38号, 1989.
  - 50) 杉本寛子, 山崎文雄, 西村明儒, 浅野進一郎: 芦屋市における兵庫県南部地震時の建物被害と人的被害の関係, 地域安全学会論文報告集, No. 8, 1998. 10.
  - 51) 梅村幸一郎, 村尾修, 山崎文雄, 西村明儒: GISを用いた灘区における人的被害と建物被害の相関分析, 地域安全学会梗概集, No. 9, 1999. 11.
  - 52) 糸魚川栄一: 建物被害状況からみた人的被害のマクロ分析, 東濃地震科学研究所報告 Seq. No. 2 地震時の人的被害に関する総合研究, (財)地震予知総合研究振興会, 1999. 3.
  - 53) 例えば, 松岡昌志, 宵木久, 山崎文雄: 人工衛星リモートセンシングを利用した地震被害分布の把握, 第1回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集-リアルタイム地震防災の現状と今後-, pp. 89-94, 1999.