

地震動特性値分布の即時予測手法に関する研究

濱田 禎¹⁾・杉田 秀樹²⁾・金子 正洋³⁾

1)正会員 建設省土木研究所防災技術課研究員 (〒305 つくば市旭 1)

2)正会員 工博 建設省土木研究所防災技術課長 (同上)

3)正会員 工修 建設省土木研究所振動研究室主任研究員 (同上)

離散的に配置された強震計ネットワークの観測記録から、震後即時に地震動特性値(最大加速度及びSI値)の分布を予測する簡易な手法について紹介する。本手法は、構造物の被害を予測するために必要な構造物位置での地震動特性値を、構造物位置以外で観測された地震動特性値から予測するために用いられる。地震動特性値の予測は、まず地表面で観測された値から地盤の増幅特性を考慮して工学的基盤における値を算出し、次に構造物位置の工学的基盤における値を空間補間により求め、この値を地盤の応答特性を考慮して地表の値に戻す手順により行う。地盤の増幅特性はSHAKEによる計算を基本とし、空間補間は推定値の空間分布のなめらかさに配慮した手法を用いている。

Key Words : Seismograph Network ,Ground Motion Characteristic ,Ground Motion Estimation, Maximum Acceleration ,Seismic Intensity Value

1. はじめに

兵庫県南部地震において、地震直後の初動体制の重要性が再認識された。これをうけ、建設省では震災直後の情報の少ない段階において管理施設の被災状況を大まかに予測し、管理者の意志決定をサポートする即時震害予測システム(SATURN-Seismic Assessment Tool for Urgent Response and Notification)の開発を実施している。本文では、本システムの役割・機能を簡単に紹介するとともに、被害予測の重要なモジュールである地震動予測を報告する。

2. 即時震害予測システムの概要

即時震害予測システムのシステム構成を図1に示す。本システムは関東地域を対象に研究開発を進めているもので、東京、神奈川、千葉、埼玉、茨城、栃木、群馬、山梨、長野の1都8県を対象としている。本システムのベースとなる地震計ネットワークは、管理施設に沿って20~40km間隔で離散的に配置した約100箇所の強震計をマイクロ回線でネットワーク化するものであり、平成7年より整備が進められている。本システムでは、地震計ネットワークから得られる最大加速度及びSI値(以下、地震動特性値と呼ぶ)に基づき、橋梁等の構造物位置の地震動強度を推定し、さらに構造物の被災危険度を概略予測する。地震発生から全ての予測計算終了までの

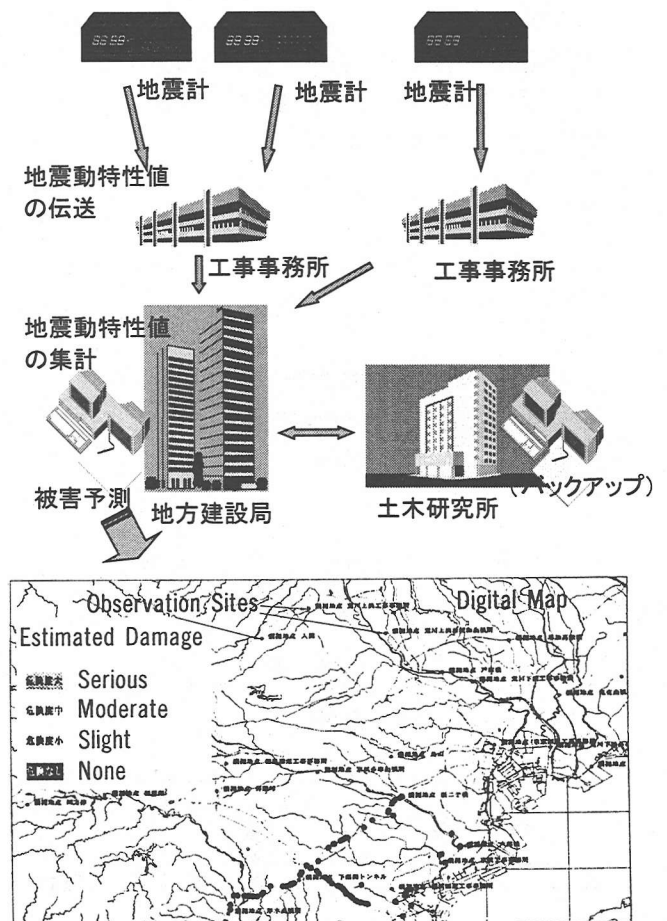


図1 即時被害予測システムの構成

目標時間は 15 分である。予測計算はワークステーションで行われ、予測結果の表示には JIS ソフト Genasys を使用している。

3. 地震動特性値の予測手法

(1) 即時震害予測に必要な地震動特性値

本システムでは、路線沿いの液状化危険度、路線外の面的な液状化危険度、及び、橋梁被害の 3 項目について危険度の予測を行う。ここに、路線液状化危険度は、管理道路を地盤構成が同一とみなされる区間（約 500m 平均）に、また面的液状化危険度は関東地方を 1km 四方のメッシュに細分化して、それぞれの区間及びメッシュの液状化危険度を予測するものである。また、橋梁被害予測では、管理道路にある全ての橋梁を対象としている。

危険度予測の基本的な考え方と、予測に必要な地震動特性値は以下の通りである。

- ① 路線沿いの液状化危険度予測は FL 法によって行う。これは、橋梁等土木施設の多くは、液状化に関して FL 法に基づいて耐震設計がなされており、地盤データの収集が他の方法と比較して容易であるためである。
- ② 面的な液状化危険度の予測では、微地形分類により地盤の応答倍率や液状化抵抗率を考慮する松岡ら¹⁾の方法によることとした。
- ③ 橋梁被害予測には SI 値を用いる。これは構造物に及ぼす地震動の繰り返し特性の影響を考慮するためである。なお、本文における SI 値は、式 (3.1) により独自に定義したものである。

$$SI = \frac{1}{2.5} \sum_{i=0.1}^{2.5} S_{vi} \dots (3.1)$$

ここに、 S_{vi} は最大速度応答スペクトルの i 秒成分の値である。

(2) 予測手法の基本方針

予測地点における地震動特性値の予測は、図 2 に示すように、以下の手順で行う。

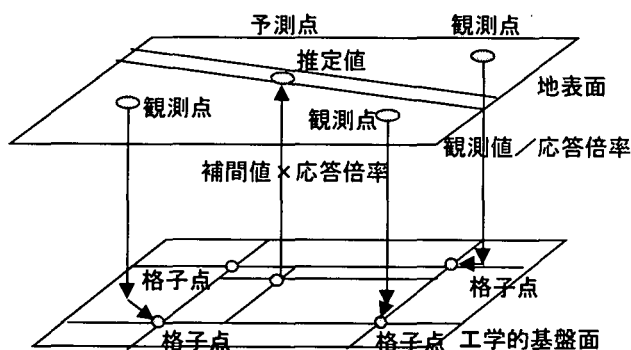


図 2 地震動特性値の予測

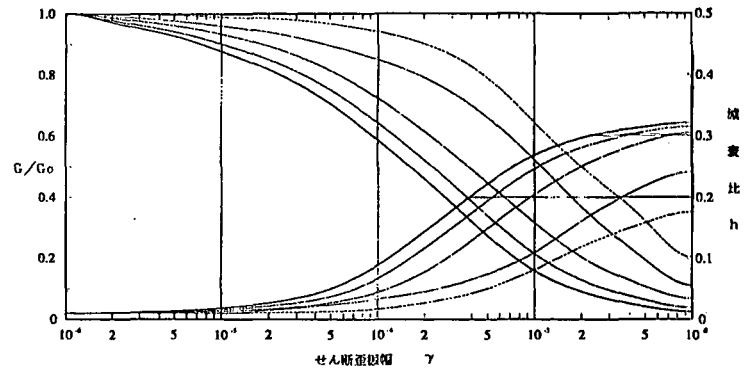


図 3 土の動的変形特性

- ① 観測地点（約 100 箇所）の地盤データに基づき、工学的基盤位置での地震動特性値を予測する。
- ② 予測地点下の地震動特性値を空間補間により予測する。
- ③ 予測地点の地表面位置における地震動特性値を予測地点の地盤データから予測する。

ただし、面的な液状化危険度の予測では、松岡らが提案する微地形分類によって応答倍率を設定する方法を用いるため、面的な液状化危険度の予測のために応答倍率を新たに設定する必要はない。また橋梁の被害予測には、その橋梁を含む区間に対して路線液状化危険度の予測用に推定された地震動特性値を用いる。

ここに、観測地点及び予測地点における地震動特性値の応答倍率は SHAKE の計算結果から設定する。本来、地震動特性値の応答倍率は地盤条件や地震動によって変化するため、観測された地震動に基づき地点ごとに計算するのが望ましい。しかし、本システムでは、地点ごとの標準的な応答倍率をあらかじめ計算しておき、被害予測の迅速化を図ることとした。

上記の方針で特性値を推定するには、基盤—地表面間の地震動特性値の応答倍率の設定、及び、工学的基盤位置における地震動特性値の補間方法の設定が必要となる。

4. 及び 5. にこの 2 項目の設定方法について述べる。

4. 地震動特性値の応答倍率の設定

(1) 設定条件

応答倍率の設定法を検討するため、観測地点のうち 29 箇所を抽出して SHAKE による応答計算を行った。計算条件は、以下の通りである。

- ① 入力波形… 応答に及ぼす波形の繰り返し特性及び地盤の非線形性を考慮するため、日向灘地震板島橋、宮城県沖地震開北橋、日本海中部地震七峰橋、釧路沖地震広尾橋、兵庫県南部地震猪名川の 5 記録の最大加速度を 50、100、200、500gal に調整した計 20 波形を基盤 2E として用いた。なお、猪名川の波形は地表で観測された記録を別途 SHAKE で基盤に引き戻したものである。

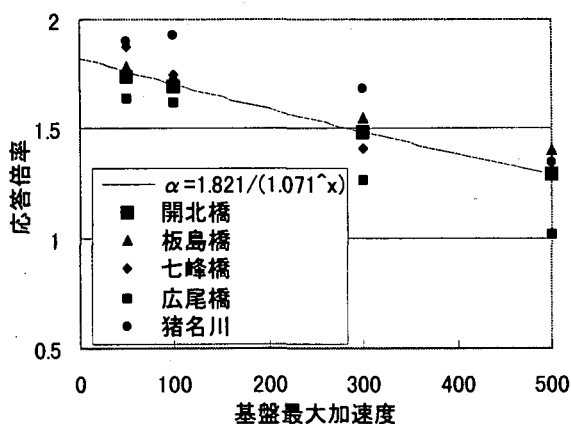


図4 最大加速度の応答倍率

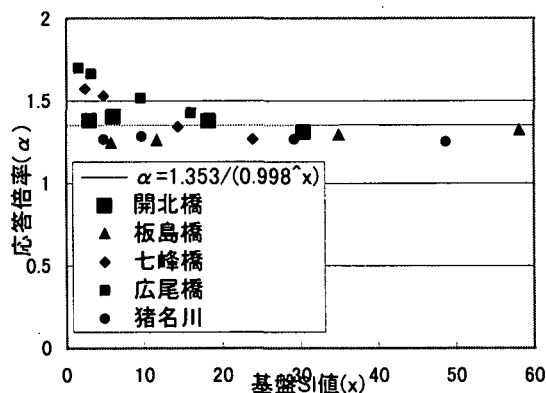


図5 SI 値の応答倍率

表1 各波形による応答加速度と平均値との差の自乗和

MaxAcc	板島	開北	七峰	広尾	猪名川
50gal	2289	2082	3354	3777	3329
100gal	7655	4242	8906	11475	10281
300gal	55936	34813	47063	112402	46874
500gal	14053	137157	181890	362636	103122

②土の動的変形特性…土研式²⁾を基本に図3のように設定した。ただし、減衰比が30%を超える領域においては、地盤の非線形性を過度に評価することを防ぐため、減衰比が30%のときの歪みが与えるせん断剛性比で頭打ちとすることにした。

(2) 計算結果

図4、5に、ある地点で計算された最大加速度及びSI値の応答倍率をそれぞれ示す。図4に見られるように、最大加速度の応答倍率は、波形の繰り返し特性によって大きくばらつく。SI値も最大加速度ほどではないが、ある程度のばらつきを有している。

また、表1は、各波形による最大応答加速度とその平均値との差の2乗を、全29地点分足し合わせたものである。これより、宮城県沖地震の開北橋記録が5波の中でもっとも平均的な結果を与えると言える。

(3) 応答倍率の設定法

計算結果を踏まえ、本システムでは地震動の繰り返し特性及び地盤の非線形性を以下のように取り扱うこととした。

①地震動の繰り返し特性…本システムでは地震動波形が即時には得られないため、繰り返し特性を地震ごとに評価することができない。よって、平均的と考えられる波形を入力とした場合の地震動特性値の応答倍率をあらかじめ計算しておき、これをその地盤の応答倍率とすることとした。入力波形としては(2)により、宮城県沖地震の開北橋記録を用いることとした。

②地盤の非線形性…これについては、式(4.1)により応答倍率を与える関数によって考慮する。

$$\alpha = a \times b^{-x} \dots (4.1)$$

ここに、 α は応答倍率、 x は基盤(入力)最大加速度又はSI値、 a 及び b は地盤による非線形性の違いを表す係数である。 a 及び b は、開北橋記録の最大加速度をそれぞれ50、100、300、500galに調整して得られる4波形を入力とした場合の特性値の応答倍率から、回帰分析を行うことによって、観測地点及び予測地点ごとに定めた。

5. 基盤面における地震動特性値の補間法の設定³⁾

観測地点数計100箇所に対して、予測地点数は路線液状化危険度が6028箇所、面的液状化危険度が75000箇所の計約80000箇所である(橋梁の被害予測には路線液状化危険度のために推定した特性値を用いる)。4.において提案された応答倍率関数によって基盤に引き戻された地震動特性値を用いて、80000箇所の基盤面における特性値を補間して推定を行うが、この際の補間方法を以下に述べる。

①対象地域(約300×250km)を10km四方の格子に分割する。

②観測点の値より格子点の値を空間補間による方法で

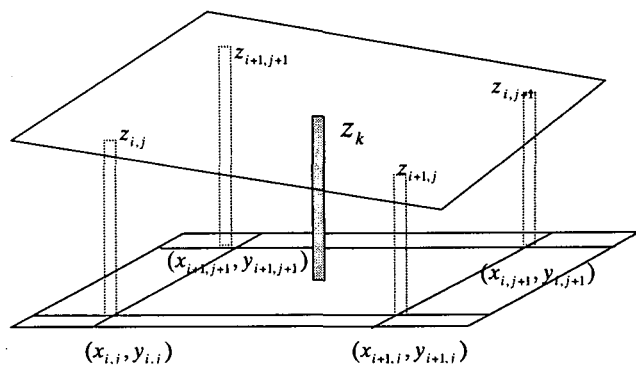


図6 空間補間のイメージ図

補間する。

③予測点の近隣の4格子点の値から予測点の値を距離を重みとして推定する。

本手法の利点をまとめると以下ようになる。

- ・傾きのなめらかさまで考慮しているため、距離のべき乗分の1を重みとする補間法と比較して精度が高い。
- ・格子点から予測点の特性値を推定するための重みが事前に計算されているため、観測値が欠測されても重みの再計算が不要。

③において4格子点の推定値から予測地点の値を推定する方法は式(5.1)による。

$$z = \frac{z_{i,j}(x_{i+1}-x)(y_{j+1}-y) - z_{i+1,j}(x_i-x)(y_{j+1}-y) - z_{i+1,j+1}(x_i-x)(y_j-y) + z_{i,j+1}(x_{i+1}-x)(y_j-y)}{(x_i-x_{i+1})(y_j-y_{j+1})} \dots (5.1)$$

ここに、4格子点の座標及び推定値をそれぞれ (x_1, y_1) , z_1 , (x_2, y_1) , z_2 , (x_2, y_2) , z_3 , (x_1, y_2) , z_4 としている。

空間補間による方法とは、(5.2)式によって与えられる関数を(5.3)式の制約条件のもとで最小にする $z(z_{ij}, i=1 \dots N_x, j=1 \dots N_y)$ を求めることによって推定を行う方法である。

$$J(z) = \sum_{i=1}^{M_x-1} \sum_{j=1}^{M_y-1} (z_{i+1,j} - z_{i,j})^2 + \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y-1} (z_{i,j+1} - z_{i,j})^2 + \sum_{i=1}^{M_x-1} \sum_{j=1}^{M_y} (z_{i+1,j} - 2z_{i,j} + z_{i-1,j})^2 + \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y-1} (z_{i,j+1} - 2z_{i,j} + z_{i,j-1})^2$$

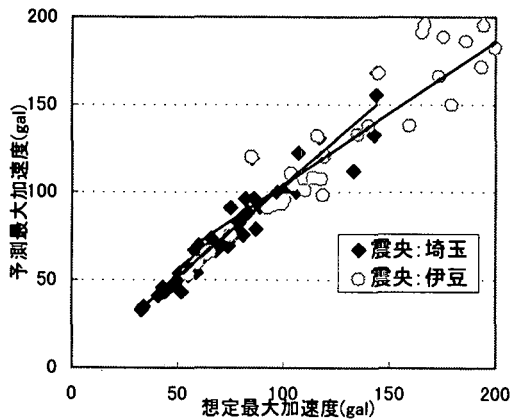


図7 距離減衰式との比較 (最大加速度)

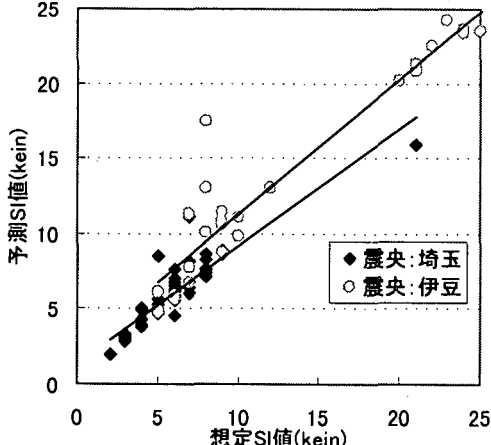


図8 距離減衰式との比較 (SI 値)

$$+ 2 \sum_{i=1}^{M_x-1} \sum_{j=1}^{M_y-1} (z_{i+1,j+1} - z_{i+1,j} - z_{i,j+1} + z_{i,j})^2 \dots (5.2)$$

$$z_k = \frac{z_{i,j}(x_{i+1}-x)(y_{j+1}-y) - z_{i+1,j}(x_i-x)(y_{j+1}-y) - z_{i+1,j+1}(x_i-x)(y_j-y) + z_{i,j+1}(x_{i+1}-x)(y_j-y)}{(x_i-x_{i+1})(y_j-y_{j+1})}$$

$$k = 1, \dots, N \dots (5.3)$$

ここで(5.3)式は制約条件で、観測点 k における観測値 z_k とそれを含む格子の4点における推定値 z_{ij} , $z_{i+1,j}$, $z_{i,j+1}$, $z_{i+1,j+1}$ は(5.1)式の関係を満たさなければならないことを意味している。(5.2)式の最初の2項は隣り合う格子点の推定値の差の総和を、また残りの項は隣り合う格子点の差の差の総和である。(5.2)式を最小化することは、隣り合う予測地点の推定値をできるだけなめらかに含む曲面を求めていることに等しい。

6. 予測精度に関するケーススタディ

4. 及び5. で設定した推定法により、地震動特性値の推定を行った。本来、実際に観測された地震動特性値を与えて、観測値と想定値との相関について検討するのが望ましいが、本システムは運用後まだまもなく、97年5月現在作動レベルを超えるような地震動を観測していない。そこで、観測地点のうち最大地表面加速度と地表面SI値を想定し、想定値自身を他の箇所の想定値群から推定して精度の検討を行った。ここで、観測値点数は47地点とし、最大加速度の想定は道路橋示方書V・耐震設計編の距離減衰式、またSI値は吉見らの距離減衰式⁴⁾によって、それぞれに2種類ずつ行った。一方は震央を伊豆(観測網外)に設定し、マグニチュードを7とした場合、もう一方は埼玉(観測網内)に想定し、マグニチュードを6とした場合である。推定結果を想定値との相関図として示したものが図7及び8である。図7は最大加速度、図8はSI値の相関図で、相関係数は、それぞれ0.957・0.953及び0.907・0.947である。図7では最大加速度が大きい領域で、ばらつきが大きくなっている。これは地盤の非線形性によるものである。

7. まとめ

本文では、強震観測記録から、震後即時に地震動特性値の分布を推定する簡易な手法について紹介した。今後、実地震観測記録の蓄積を通じて、予測精度の検証・高度化を図る予定である。

参考文献

- 1) 松岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング, 第22回地盤震動シンポジウム, pp.23-34, 1994
- 2) 岩崎敏男, 龍岡文夫他: 地盤の動的変形特性に関する実験的研究(II), 土木研究所報告, 第153号の2, 昭和55年3月
- 3) 塩野清治他: BASICによるコンターマップII応用編, 共立出版, 1988.
- 4) 吉見精太郎他: 地震動強さSIの距離減衰特性に関する検討, 第20回地盤工学研究発表会, 1989