

2. 1 地震動分布の予測手法

2.1.1 予測手法の概要

(1) 被害予測点の地震動の予測法

地震観測点は、約 20~40km 間隔でしか設置されておらず、被害予測点に比べて少ない。そこで、地震計による観測値より、各施設被害予測地点の地震動を求める必要が生じる。地震動は、図-2.3 に示すように、地下の硬い層である工学的基盤面までは均質に伝播し、そこから各地点の表層により地震動が増幅され地表面の地震動となる。

そのため、各地点により増幅率が異なる表層の影響を受けた地表面の地震動をそのまま用いて、

地表面上で補間を行うことは適当でない。よって、図-2.3 に示す以下の手法とした。

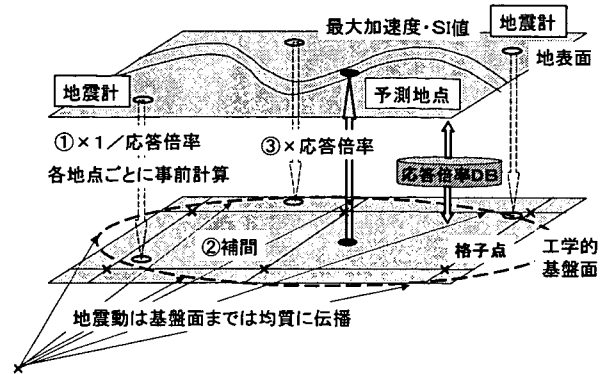


図-2.3 地震動予測の手順

- ①各観測値から、その地点の地盤の応答特性を考慮して、観測地点下の工学的基盤位置における地震動特性値を予測する。
- ②①で得られた観測地点下の特性値をもとに、予測地点下の特性値を補間により予測する。
- ③②で得られた予測地点下の特性値から、各予測地点の地盤の応答特性を考慮して、予測地点における特性値を予測する。

また、地震動特性値の予測には、迅速性と精度が要求される。精度を追求するならば、予測の対象となる地盤及び構造物をモデル化し、各地震毎に動的解析を行うのが最善であるが、この方法では目標とする 15 分以内の予測が難しい。そこで、本システムでは、15 分という制約条件のなかで最も高い精度を確保する方法として応答倍率については、事前に既存の波形データにより標準的と考えられる値を計算しておいて、データベースかしておくこととした。

2 節において応答倍率の算出方法について、3 節において工学的基盤面上の補間方法について示す。

(2) 被害予測時に用いるパラメータについて

地震計ネットワークにより送られてくる地震動観測値には、計測震度階、最大加速度、S I 値の 3 種類がある。効率的に被害予測を行うためには、被害予測のために必要な特性値を決定し、その特性値のみに予測を絞る必要がある。この際予測に用いる特性値とその選定理由は以下の通りである。詳細については、該当する章を参照いただきたい。

①液状化危険度予測

液状化危険度予測は液状化に対する抵抗率 F_L ²⁾ に基づいて算出される液状化指数 P_L によることとした。これは、橋梁等土木施設の多くは、液状化に関して F_L 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。 F_L 値及び P_L 値の算定式を示すとそれぞれ式 (2.1) 及び式 (2.2) である。

$$F_L = R/L \dots \dots \dots (2.1)$$

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5x)dx \dots \dots \dots (2.2)$$

ここで、R は動的せん断強度比、L は地震時せん断応力比、x は地表面からの深さである。簡略的に言うと、 F_L 値はある土層の液状化に対する抵抗の大きさを地震力の大きさを割って表

す安全率で、 P_L 値はそれを深さ方向に足し合わせてその地点の液化化危険度を表す指標である。この P_L 法を用いるためには、最大加速度が必要である。

②橋梁被害予測

橋梁被害予測には SI 値を用いることとした。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、本システムにおける SI 値は、式(2.3)により定義したものである。

$$SI = \frac{1}{2.5} \sum_{i=0.1}^{2.5} S_{wi} \dots \dots \dots (2.3)$$

ここに、 S_{wi} は最大速度応答スペクトルの i 秒成分である。

③河川堤防の沈下量予測

河川堤防の沈下量予測は、数値解析によって行うこととし、その地震動入力パラメータとしては、最大加速度を用いることとした。

以上より、本システムにおいては、最大加速度と S I 値を予測対象の地震動特性値とし、路線液化化予測の区間および堤防液化化予測の区間（堤防の沈下量予測区間を兼ねる）に対しては、最大加速度を、橋梁被害の予測には、その橋梁を含む国道区間に対して S I 値を予測するものとした。

2.1.2 地盤の地震動応答特性（応答倍率）の算出

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、ボーリングデータを基にして、一次元地震応答解析 SHAKE による計算結果を用いて設定する。地震応答特性解析の流れを図-2.4 に、SHAKE による一次元地震応答解析の流れを図-2.5 に示す。地震動特性値の応答倍率は入力地震動の繰り返し特性や地盤の非線形性によって変化するため、先述のように、観測された波形を用いて各地震、各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、震後即時に波形の収集を行うことが困難なため、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、これを観測された特性値に乘除することで、被害の予測地点における特性値を予測する。この際、地震動の繰り返し特性及び地盤の非線形性は次の①、②のように取り扱っている。

- 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。
- ②地盤の非線形性…これについては、式(2.4)により応答倍率を与える関数によって考慮する。

$$\alpha = a \times b^{-x} \dots \dots \dots (2.4)$$

ここに、 α は応答倍率、 x は基盤（入力）最大加速度または 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。実際の設定例を図-2.6 に示す。

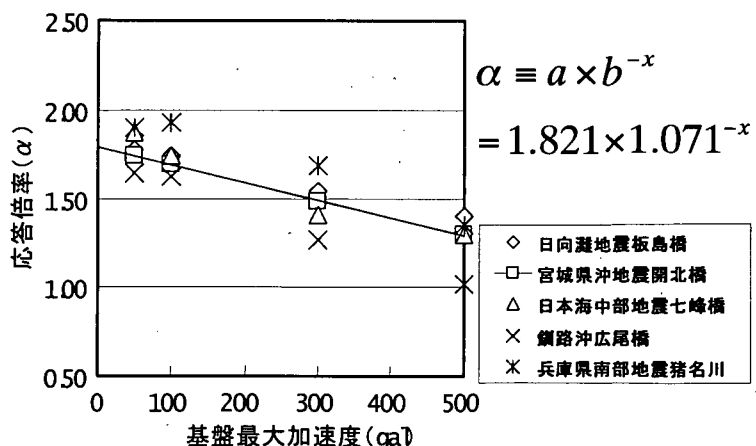


図-2.6 地盤応答倍率係数計算例

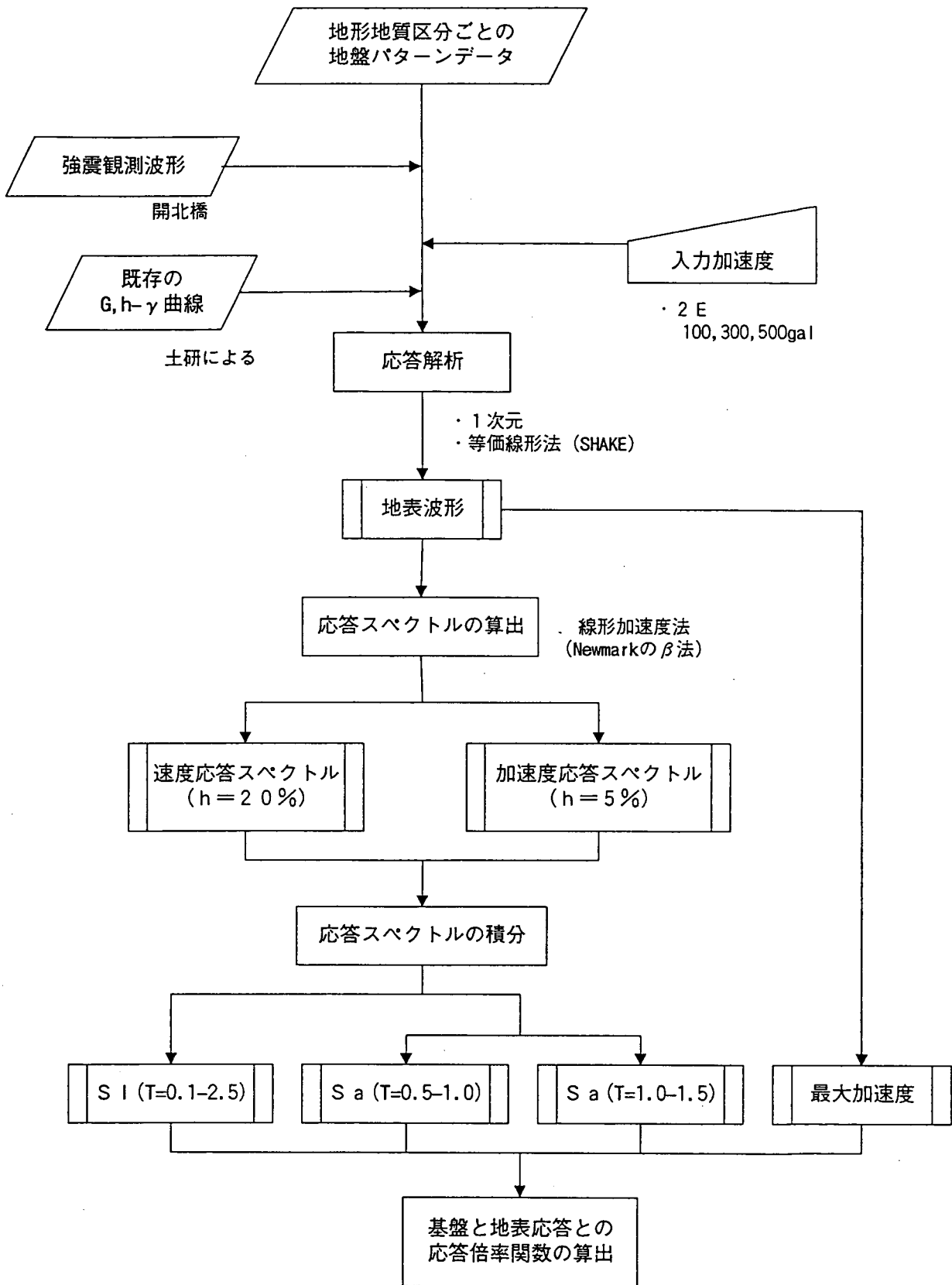


図-2.4 地震応答特性解析の流れ

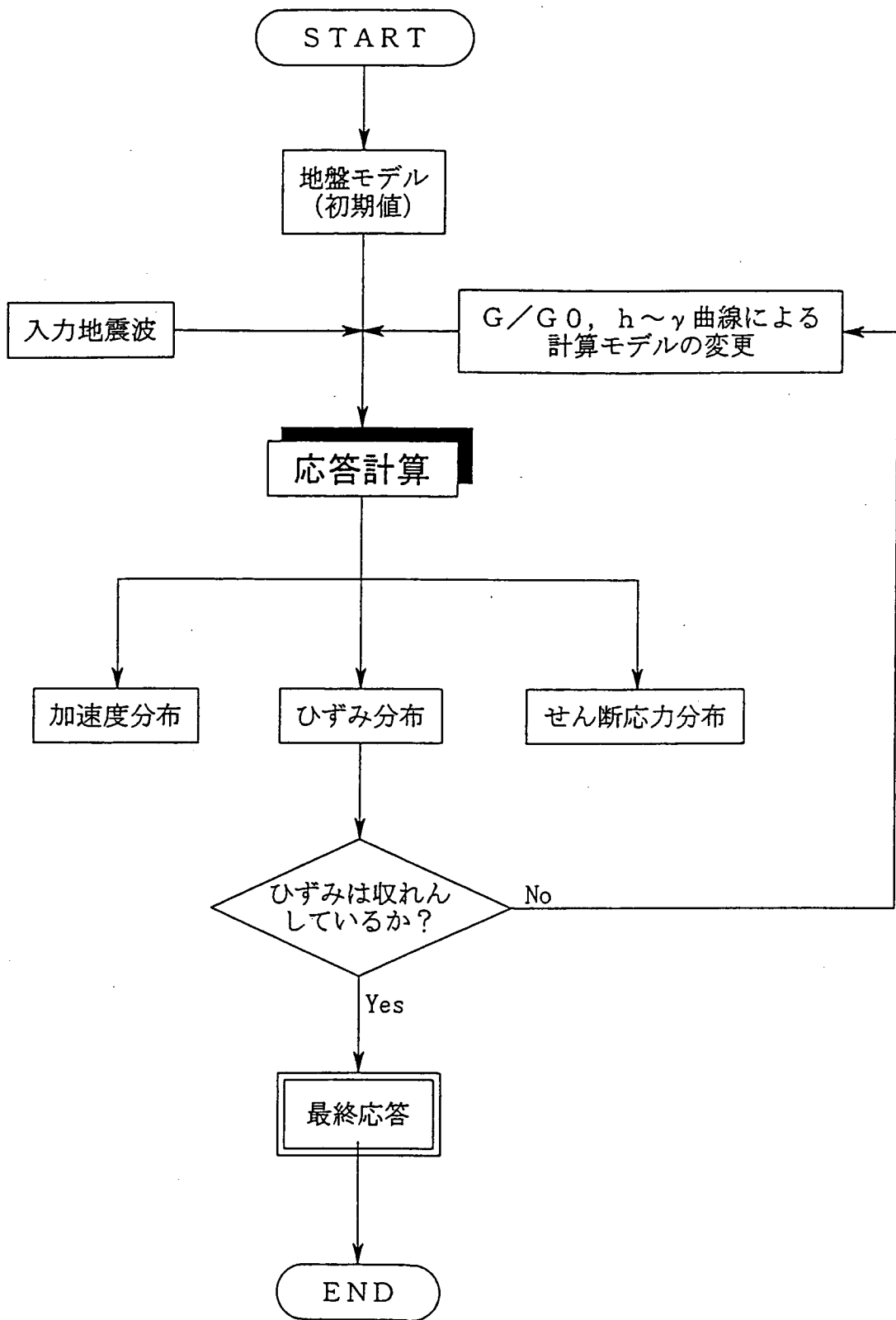
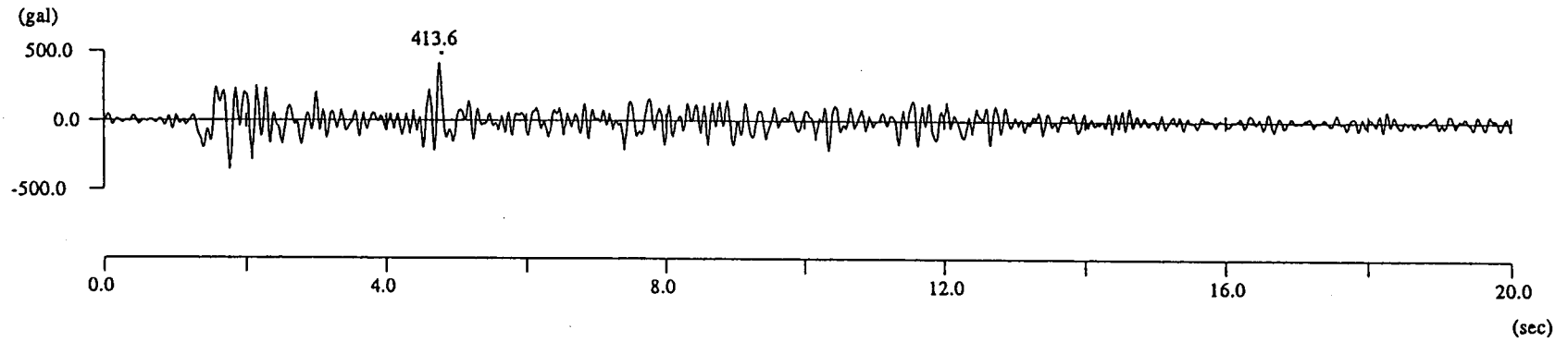


図-2.5 一次元地震応答解析の流れ

[WAVE FORM]

WAVE NAME: KAIHOKU



[FOURIER SPECTRUM]

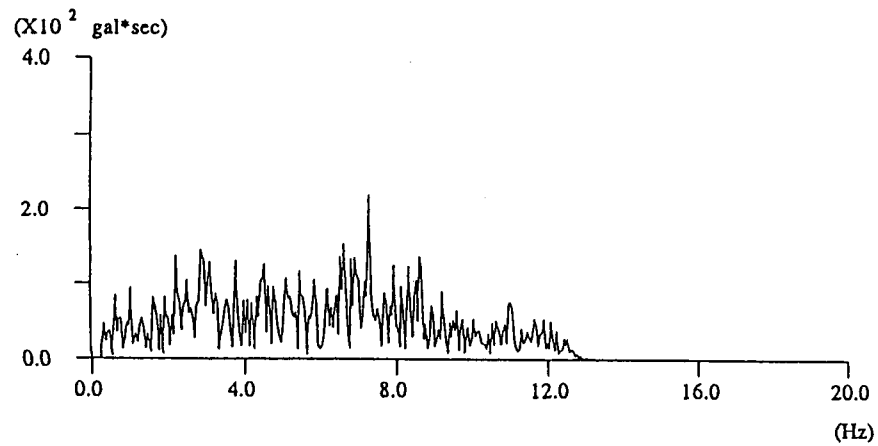


図-2.7 応答計算に用いた観測波形およびフーリエスペクトル (開北橋)

なお、開北橋記録（図-2.7 参照）を選定したのは、図-2.6 に示す既往の地震時に硬質な地盤において観測された代表的な5波形を用いた試算において、最も平均的な応答特性を示したことによる。

2.1.3 工学的基盤面上における地震動応答特性分布の予測手法

(1) 地震動特性値分布の補完手法の検討

地震動特性値の補間計算を行う範囲は関東地方整備局管内をカバーする東西方向 300km、南北方向 250km のエリアである。補間計算は、その中を 10km の格子に区切り計算を行っている。システムの開発にあたり、地震動の補間方法についての検討を行った。補間方法に求めた条件は、以下の3点である。

- ①地震発生後の初動体制に用いるシステムなので、計算時間が最大でも2分程度である。
- ②計算精度が高いこと。
- ③観測点から送られたデータが部分的に欠けても対応可能であること。

これらの条件から、以下の3種類の補間方法を検討した。

①距離係数による直接加重平均法

予測地点と観測地点との距離に基づく係数によって予測地点のデータを求める方法。

②距離係数による間接加重平均法

10km メッシュの格点のデータを観測地点との距離に基づく係数によって求め、各予測地点のデータはその予測点が含まれるメッシュを構成する4点より求める方法。

③平滑化による間接補完法

10km メッシュの格点のデータを平滑化手法で求め、各予測地点のデータはその予測点が含まれるメッシュを構成する4点をもとに求める方法。

以上の3方式で試算した結果を、表-2.1 に示す。この結果より、計算精度が高く、比較的計算時間も短い「平滑化による間接補完法」を採用した。

表-2.1 補間法の検討結果

	距離係数による直接加重平均法	距離係数による間接加重平均法	平滑化による間接補完法
計算時間	×	◎	○
計算精度	△	△	◎
欠測点对応	可能	可能	可能

評価：◎：優れている ○：やや優れている
△：やや劣る ×：劣る

(2) 平滑化による間接補完法の検討

(1) で決定した「平滑化による間接補完法」による工学的基盤面上における地震動特性値の予測は以下に記す①～③の手順とした。

- ①対象地域を 10km 四方の格子に分割する。
- ②(x, y)座標を観測点の位置、z 座標を地震動特性値と空間に、図-2.8 に示すような、観測点における特性値を含むなめらかな曲面を設定し、この曲面より格子点の値を補間により予測する。
- ③図 2.9 に示すように、予測点の近隣の4格子点の値から予測地点の地震動特性値を距離を重みとして予測する。この4格子点の予測値から予測地点 E (座標： x_E, y_E) の値 z_E を予測する方法は式(2.5)による。

$$z = \frac{z_{i,j}(x_{i+1} - x_E)(y_{j+1} - y_E) - z_{i+1,j}(x_i - x_E)(y_{j+1} - y_E) - z_{i+1,j+1}(x_i - x_E)(y_j - y_E) + z_{i,j+1}(x_{i+1} - x_E)(y_j - y_E)}{(x_i - x_{i+1})(y_j - y_{j+1})} \dots\dots (2.5)$$

$$\begin{aligned}
 J(z) &= \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{-1M_y} (z_{i+1,j} - z_{i,j})^2 + \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{M_y-1} (z_{i,j+1} - z_{i,j})^2 \\
 &+ \sum_{i=2}^{M_x} \sum_{j=1}^{-1M_y} (z_{i+1,j} - 2z_{i,j} + z_{i-1,j})^2 + \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=2}^{M_y-1} (z_{i,j+1} - 2z_{i,j} + z_{i,j-1})^2 \\
 &+ 2 \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=1}^{-1M_y-1} (z_{i+1,j+1} - z_{i+1,j} - z_{i,j+1} + z_{i,j})^2 \dots \dots (2.6)
 \end{aligned}$$

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

$k=1, \dots, N \quad \dots \dots (2.7)$

ここでは、4 格子点の座標をそれぞれ (x_i, y_j) 、 (x_{i+1}, y_j) 、 (x_i, y_{j+1}) 、 (x_{i+1}, y_{j+1}) 、また、4 格子点の予測値をそれぞれ $z_{i,j}$ 、 $z_{i+1,j}$ 、 $z_{i,j+1}$ 、 $z_{i+1,j+1}$ としている。

②における補間とは、(2.6)式によって与えられる関数を(2.7)式の制約条件のもとで最小にする $z(z_{ij}, i=1 \dots N_x, j=1 \dots N_y)$ を求めることである。

ここで(2.7)式は制約条件で、観測点 k (座標: x_k, y_k) における観測値 z_k とそれを含む格子の4点 {座標: それぞれ (x_i, y_j) 、 (x_{i+1}, y_j) 、 (x_i, y_{j+1}) 、 (x_{i+1}, y_{j+1}) } における予測値は(2.5)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。(2.6)式の最初の2項は隣り合う格子点の差の総和を、また残りの項は隣り合う格子点の差の差の総和である。これを最小にすることは、 (x, y) を位置座標、 z を特性値とする空間に、観測値を満たすできるだけなめらかな曲面を設定することを意味する。

本手法の最大の利点は、観測値の伝送に失敗した箇所が発生しても、(2.6)式の制約条件が減るだけで、予測式を立て直すことなく計算が続行できることにある。

前項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に対して、式(2.5)～(2.7)を用いて補間計算を行うことで、被害予測地点の基盤面上における特性値を予測している。

実際の観測値を用いて、基盤面上で行った最大加速度の補完を図-2.10に示す。

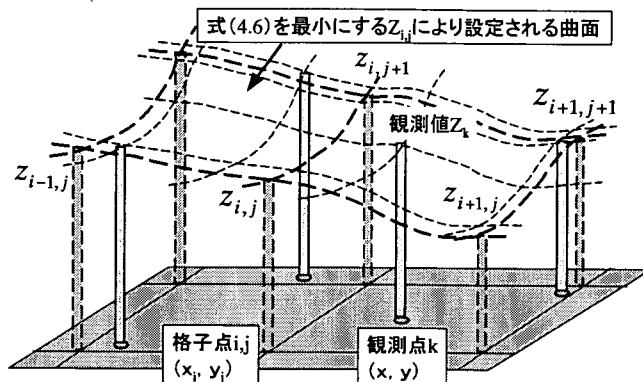


図-2.8 工学的基盤面上における補間方法

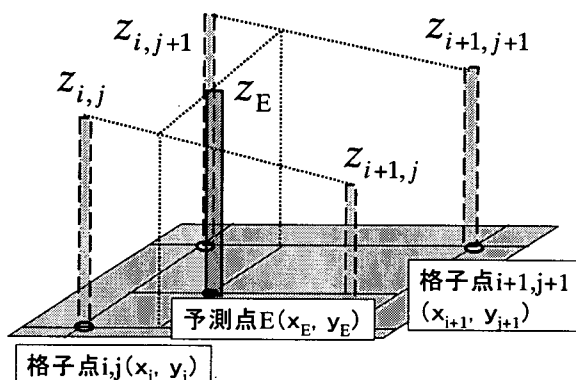


図-2.9 予測点直下の地震動の求め方

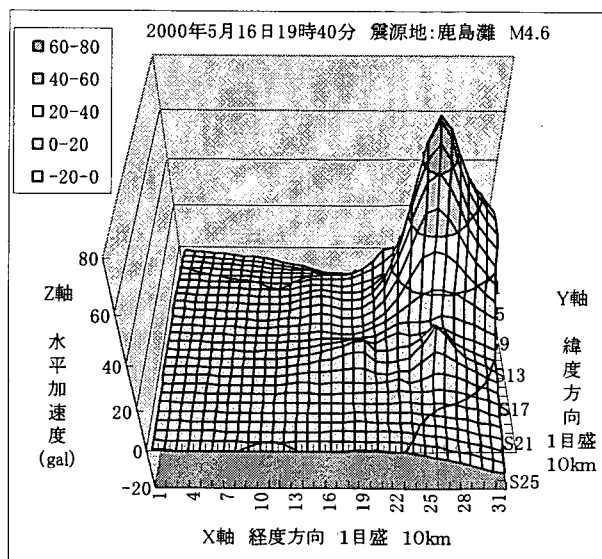


図-2.10 工学的基盤面上の最大加速度予測