

地理情報システムを用いた確率論的耐震性能評価システム

Probabilistic estimation system of structural seismic performance with GIS

北原武嗣*, 伊藤義人**

Takeshi Kitahara and Yoshito Itoh

*博(工), 群馬工業高等専門学校講師, 環境都市工学科 (〒371-8530 前橋市鳥羽町 580)

** 工博, 名古屋大学教授, 理工科学総合研究センター (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Recently, the importance of dynamic analyses has increased in the design of structures. The need to perform analysis using simulated waves based on seismicity and amplification characteristics near the site is now emphasized. However, great efforts and rich experiences are required for the preparation of simulated waves. Further, dynamic behavior of a structure is under the influence of non-stationary nature of seismic waves. Therefore, it is necessary to perform probabilistic evaluation with a number of seismic waves. In this study, an attempt has been made to develop a dynamic analysis integration system with databases of seismic motions and surface grounds, utilizing GUI and GIS. By the present system, it is possible to estimate the design seismic load matching the level of seismic design, and to evaluate probabilistic dynamic performance of structures in easy manner.

Key Words: seismic performance, probability, earthquake load, integrated system

キーワード: 耐震性能, 確率論, 地震荷重, 統合システム

1. はじめに

近年, 仕様規定型の設計法から性能照査型の設計法への移行の必要性が認識されるようになってきている。性能照査形の設計法では, 目標とする性能を厳密に設定し, 実際に保有する性能が目標性能を満たすことを示すこととなる。したがって, 耐震設計においては, 建造物の持つ耐震性能をより精度良く評価する必要がある, 動的解析の重要性はますます高まると考えられる。

動的解析により耐震性能を評価する際, 入力地震動の設定が重要である。入力地震動の特性は, 建設地点周辺における地震活動度や表層地盤による増幅特性の影響を強く受けることが指摘されており¹⁾, これらの影響を考慮した模擬地震波による動的解析の必要性が指摘されるようになってきている。

そこで著者らは, 一般の構造設計者が, 自分自身で簡便かつ迅速に模擬地震波の作成(もしくは観測記録の利用)から動的解析の実行, および解析結果の統計的処理までを一連の流れで行える対話・可視化型支援システムを構築し, 文献2)に報告した。

本研究では, 文献2)で示したシステムの利用を通し明らかとなった課題を解決するため, システムの再構築を行った。ここでの改良点は以下の通りである。(1)歴史地震

や活断層, および表層地盤のデータベースの充実, (2)データベースを効率的に活用するため, 地理情報システムを利用(3)設計業務において, 計画段階から実施段階まで幅広い対応を可能とするため, 地震荷重の評価として, 模擬地震波作成だけでなく地表最大速度(加速度)算定に対応, の3点である。

米国では, 震源情報(地震発生時間, 震央位置, 震源深さ, マグニチュード)を放送型のポケットベル(pager)により配信するシステム³⁾や, 震源情報をインターネットなどを用いて迅速に交換することを目指し, CNSS(Council of the National Seismic System)という全国地震機構が作られたりしている。

日本は, 詳細な地震情報, 特に, 地震観測記録の公開に対して消極的な土壌を持っていた。しかしながら, 兵庫県南部地震を契機に, 科学技術庁防災科学技術研究所のKyoshin-Net(http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net_docs/kyoshin.html)のような地震観測網の整備が進み, 福和ら⁴⁾によりJAVAを用いたシステムや前述のK-Netにより地震情報が公開されるようになってきた。そこで本システムは, 今後, 公開される地震情報を積極的に取り入れるシステムを目指した。

建造物の動的挙動は, 入力地震波の非定常性の影響を受け, 同一の弾性応答スペクトルを有する地震波間の応答結果は異なることが指摘されている^{10),19)}。したがって, 構

造物の動的挙動を照査するためには、多数の地震波による解析を行い、確率・統計的に耐震性能を評価することが一つの方法として考えられる²⁻⁴⁾。例えば、文献3)では3波による平均応答で照査することが、文献4)では3波による検討では最大応答で、7波による検討では平均応答で耐震性を評価することが示されている。そこで、本システムでは、複数の入力地震波の発生から動的解析の実行、さらには、解析結果の確率・統計的処理までを一連の流れで行えるシステムとすることにした。

地理情報システムを活用した地震関係のシステムは既にいくつか報告されているが⁵⁻¹⁵⁾、これらは広域的な強震動分布や地震被害予測分布⁵⁻¹³⁾、液状化分布¹⁴⁾、および地滑り分布¹⁵⁾を評価することが目的であり、構造物個々の耐震設計に対応したシステムではない。また、模擬地震波の作成システムに関しても類似のシステムが既にいくつか開発されている^{16,17)}が、これらは、模擬地震波の作成のみに着目したシステムである。

一方、本システムは、個々の構造物に対する耐震設計や耐震診断を行うことが目的であり、耐震設計のレベルに応じた入力地震荷重の設定から、動的解析の実行、さらに解析結果の確率・統計的処理による確率論的耐震性能評価を行うことが可能な統合システムである。すなわち、入力地震荷重に対するシステムの柔軟さと、確率論的な耐震性能の評価手法が本研究のユニークな点であると考えられる。

本論文では、開発システムの内容、特に、地理情報システムの活用、データベースの整備について詳述する。さらに、2種類の適用例を示し、本システムが、耐震設計レベルに応じた地震荷重評価と、構造物の確率論的耐震性能評価に有効であることを示す。

2. システム概要

2.1 システム構成

図-1に本システムの基本構成を示す。本システムは、データベースモジュール、地震動・動的解析処理モジュールおよび表示モジュールから構成されている。表示モジュールとして利用している地理情報システムが、本システムのメインモジュールとなる。

データベースモジュールは、歴史地震データベース、活断層データベースおよび表層地盤データベースからなっている。これらデータベースの詳細は、3. で述べる。

地震動・動的解析処理モジュールは、地震動に関する部分と動的解析に関する部分とからなっている。地震動に関する部分は、地震動の最大速度(もしくは最大加速度)のみを算出する機能と、構造物建設地点における想定地震による模擬地震波を複数波作成する機能を有している。

動的解析に関する部分は、質点系モデルによる弾塑性動的解析実行機能と、動的解析結果を確率・統計的に処理する機能を有している。

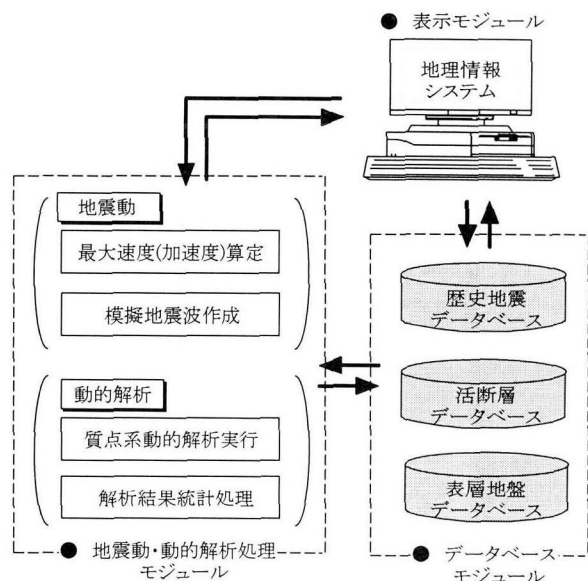


図-1 システム構成

2.2 システム開発環境

本システムは、パーソナルコンピュータ(パソコン)上に、以下の環境で開発した。

- CPU : Intel Pentium III,
- メモリ : 128Mbyte,
- OS : Microsoft Windows98,
- GIS : 日立ソフト MapFolder Ver. 3.5,
- 言語 : Compaq Visual Fortran Ver. 6.1<解析部>,
Microsoft Visual C++ 6.0<制御部>.

最新のパソコン環境の発展は目覚ましく、一昔前のEWSをCPU処理速度、主記憶容量、外部記憶装置容量等の性能で上回るパソコンも出現してきていることから、本システムで想定している大規模な計算を実行する環境にも十分適応できると判断した。また、操作性においてはEWSよりパソコンの方が優れていると判断した。

各モジュールは、それぞれ独立したシステムとしてモジュール化し、地理情報システムから各モジュールを呼び出すことで実行する構成としている。さらに、各モジュールは、内部で複数の独立したサブモジュールから構成されている。したがって、システム内に新規の知見を導入しバージョンアップする場合にも、システム全体に変更を加えることなく、各機能、もしくは各モジュール内のみの変更によって対応することを可能とした。

3. 各機能の詳細

3.1 表示モジュール

本システムでは、表示モジュールとして地理情報システムを用いた。ここでは、図-2のようなレイヤー構造を採

用し、地理情報システムの有する機能のうち、特に空間解析機能と地図表示機能を主に利用した。

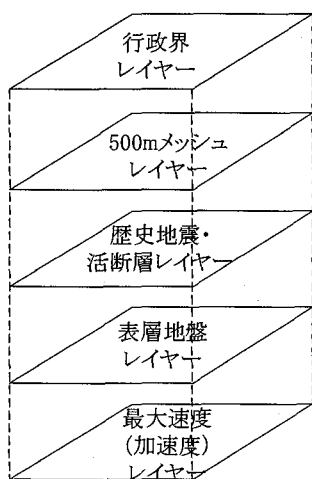


図-2 レイヤー構造

歴史地震・活断層レイヤーには、歴史地震データベースもしくは活断層データベースから選択されたデータが表示される。これら歴史地震・活断層データベースは地理情報システムで表示された地図画面上で、データを追加・修正することも可能である。通常、模擬地震波作成の際、これらのデータを収集・整理する事に多大な労力が必要であるが、地理情報システムを利用したデータベースを構築することで、この作業の高率化を図ることが可能となる。

表層地盤レイヤーには、各メッシュに対応する位置での地盤物性番号が表示され、表層地盤データベースと、この地盤物性番号で対応づけられる。

歴史地震データベース・活断層データベースと表層地盤データベースは、地理情報システムの地図画面上から選択することで、インプットデータとして計算モジュールに引き渡される。これらのデータと建設地点の位置情報から、地理情報システムの持つ空間解析機能を利用して、最大加速度もしくは最大速度を計算することができる。また、計算された最大速度(加速度)は、最大速度(加速度)レイヤーに表示される。地理情報システムにより、広域的な最大値分布を視覚的に表示する事が可能となり、面的な広がり認識がしやすくなる。

500mメッシュレイヤーは、国土数値情報の第3次メッシュを用いている。行政界レイヤーでは、市町村レベルでの行政界をポリゴンデータとして有しており、メッシュデータと行政界ポリゴンの間では、地理情報システムの空間解析機能によりデータ変換が可能となっている。この機能により、地表面での最大速度(加速度)分布を、メッシュデータおよびポリゴンデータの両形式にて表示することができる。

3.2 データベースモジュール

模擬地震波作成の手順を図-3に示す。図-3の手順の中

で、震源モデルの設定および地盤モデルの設定において、専門知識や経験が必要である。そこで、本システムでは、一般の構造設計者がこれらの設定を簡単に行えるように、震源モデル設定のために歴史地震データベースおよび活断層データベースを、地盤モデル設定のために表層地盤データベースを構築した。

日本においては、個人所有である建築物に付随する地震計により得られたデータは、所有権等の問題もあり、情報公開が進んでいるとは言い難い状況であった。しかしながら、兵庫県南部地震を契機に、Kyoshin-Net(http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net_docs/kyoshin.html)のような地震観測網の整備が進み、地震情報が公開されるようになってきた。そこで本システムも、今後公開される地震情報を積極的に取り入れられるシステムを目指した。

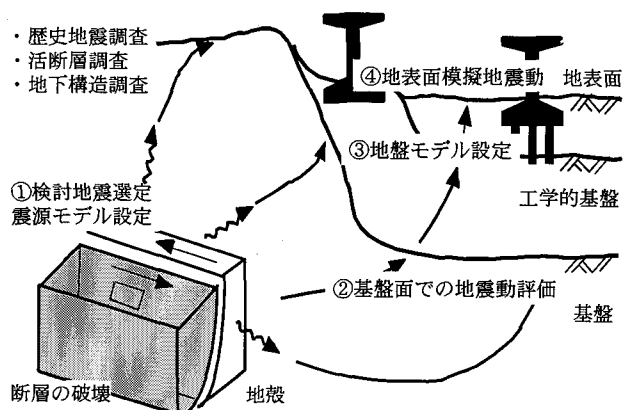


図-3 模擬地震波作成の手順

(1) 歴史地震データベース、活断層データベース

震源モデルとして、点震源モデル、線震源モデル、面震源モデル等が存在するが²⁰⁾、本システムでは、比較的扱いが単純な点震源モデルおよび線震源モデルを採用した。点震源モデルのデータベースとして歴史地震データベースを、また線震源モデルのデータベースとして活断層データベースを構築した。

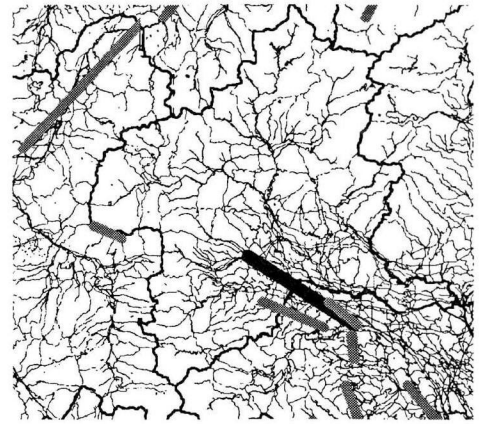
点震源モデルにおいては、震源位置、震源深さとマグニチュードを、線震源モデルでは、震源位置(断層位置)、震源深さ(断層深さ)と震源長さ(断層長さ)をデータとして格納した。歴史地震は文献21)を参考にし、さらに、文献21)収録以降の地震として鳥取県西部地震、芸予地震等も含め約700強のデータを、活断層は文献22)を用いて約240のデータを、それぞれデータベース化した。

震源に関するデータは、地理情報システムから呼び出され、地震動処理モジュールのインプットデータとして用いられる。また、データベースを拡張・更新する機能も地理情報システムから利用することが可能である。

データベース更新機能の画面例を図-4に示す。図-4(a)に更新ウィンドウ画面例を、図-4(b)には活断層表示画面例を示す。本機能により、最新の歴史地震データや、新たに発見された活断層データを容易に追加登録することが

断層名称	断層位置						断層の長さ (km)
	始点経度 (度)	始点緯度 (度)	始点深さ (km)	終点経度 (度)	終点緯度 (度)	終点深さ (km)	
十日町断層群	138.75220	37.10870	5.00	138.66120	37.01820	5.00	13.00
信濃川断層群	138.99660	37.00670	5.00	138.17830	36.64150	5.00	60.00
戸隠断層群	137.99720	36.72510	5.00	138.09490	36.79200	5.00	12.00
越川地盤帯北断層	140.14750	35.11460	5.00	139.82380	35.15200	5.00	29.00
越川地盤帯南断層	140.09680	35.08100	5.00	139.82910	35.07090	5.00	26.00
深谷断層	139.32250	36.14890	5.00	139.24080	36.20940	5.00	10.00
千井-豊後断層群	139.22860	36.14800	5.00	139.01290	36.22070	5.00	20.00
江湾-今市-吾谷断層群	139.30340	36.12450	5.00	139.31430	36.05160	5.00	16.00
荒川断層	139.64650	35.83190	5.00	139.50490	35.96690	5.00	20.00
越生断層	139.31200	35.89030	5.00	139.26550	35.99880	5.00	13.00
立川断層群	139.19120	35.87530	5.00	139.44130	35.68150	5.00	30.00
越川断層	139.33320	35.47660	5.00	138.63330	35.80620	5.00	30.00
碓氷断層	139.09590	35.84520	5.00	138.88320	35.99610	5.00	18.00
長者寄断層	139.08220	35.49090	5.00	139.12240	35.52520	5.00	10.00
道志川断層	139.02980	35.51610	5.00	139.11400	35.53430	5.00	10.00
伊勢原断層	139.30320	35.36500	5.00	139.22140	35.53740	5.00	20.00
玄室断層	139.04990	35.39970	5.00	139.13490	35.43590	5.00	10.00
神橋-国向津-松田断層群	138.88490	35.36600	5.00	139.21650	35.27220	5.00	25.00
北玄断層群	139.59600	35.24380	5.00	139.68210	35.19980	5.00	12.00
大宮-碓氷谷間断層	138.79360	35.69080	5.00	138.80390	35.61970	5.00	14.00
曾根丘陵断層群	138.64520	35.60180	5.00	138.93340	35.96290	5.00	15.00

(a) データベース更新ウィンドウ画面



(b) 活断層表示画面

図4 活断層データベース画面

できる。図-4(a)において、断層長さは断層位置を入力することにより自動的に計算される。これらのデータベースは取り扱いの容易さ、および汎用性を考慮しテキスト形式のリレーショナルデータベース形式で保存するものとした。

(2) 表層地盤データベース

表層地盤の増幅度を厳密に評価するためには、深度方向の地盤物性分布のデータが必要である。しかしながら、日本全国にわたる地盤物性データは現存しない。また、これらを調査し、今後整備することも容易ではない。

したがって、本システムでは、表層地盤のデータベースとして、データの情報量により2種類のデータベースに分類して整備するものとした。すなわち、詳細なボーリングデータが存在する地域では、深度方向の地盤物性を忠実にデータベース化し、詳細なデータが存在しない地域では、次善の策として、国土数値情報による微地形データを用い、簡便に表層地盤による増幅度を評価するものとした。

地盤物性値としては、土質種別、層厚、せん断波速度、単位体積重量、減衰、せん断剛性-ひずみ曲線、減衰定数-ひずみ曲線をデータベース化した。

3.3 地震動・動的解析処理モジュール

(1) 地表面での最大速度算出方法

表層地盤データベースとして、国土数値情報しか利用できない場合、模擬地震波を作成することは困難である。このような場合、次善の策として、ある想定地震に対して期待される地表最大速度(加速度)を算出し、震度法のように静的に耐震性のチェックを行うものとする。

地表面での最大速度算定手法には、国土数値情報の微地形データを利用する松岡・翠川の手法²³⁾を用いた。ただし、松岡・翠川の手法では表層地盤の平均せん断波速度を国土数値情報の微地形データを用いて、式(1)から求めるが、本システムでは、詳細な地盤物性データがある場合には、式(2)により平均せん断波速度を求めることとした。

$$\log V_s = a + b \cdot \log h + c \cdot \log D \quad (1)$$

ただし、 V_s : 表層地盤の平均せん断波速度(m/s),
 h : 標高(m), D : 河川からの距離(km),
 a, b, c : 定数。

$$V_s = \sum V_{si} \cdot H_i / \sum H_i \quad (2)$$

ただし、 V_{si} : 第 i 層のせん断波速度(m/s),
 H_i : 第 i 層の層厚(m)。

(2) 地表面での最大加速度算出方法

地表面での最大加速度は文献 24) に示された、地震動の最大振幅比(最大加速度/最大速度)と表層地盤の卓越振動数との関係を参考に、3.3(1) で求めた最大速度を用いて次式で算定する。

$$A_{\max} = V_{\max} \cdot (7/T_g) \quad (3a)$$

$$T_g = 4 \cdot H/V_s \quad (3b)$$

ただし、 A_{\max} : 地表最大加速度(cm/s²),

V_{\max} : 地表最大速度(cm/s),

T_g : 地盤の卓越周期(s),

H : 表層地盤の総厚(m)。

(3) 模擬地震波作成手法

3.3(3)~3.3(9) に述べる模擬地震波作成から動的解析実行に至る流れは、文献 2) に詳述している。ここでは、開発システムの全体像を示すため、重要な部分を再掲する。また、文献 2) からの追加点も示す。

模擬地震波作成の方法は、大別すると3種類に分類することができる²⁰⁾。これら3つの手法の特徴を比較したものを表-1 に示す。それぞれの手法の詳細に関しては、文献 20) に詳しい。

表-1 模擬地震動作成手法の比較

手法の名称	解析パラメータ数	理論的合理性
理論的手法	多	高
半経験的手法	中	中
経験的手法	少	低

模擬地震波作成の手法として、理論的に合理性が高くて、解析に用いられるパラメータ数が多数必要であることや、パラメータの精度の問題もあるため、理論的手法が最善の方法とは限らない。

本システムでは、構造設計者等の地震動の専門家でない者が、簡便に使えることを目標としているため、最も解析パラメータ数の少ない経験的手法を採用した。さらに、最も単純と考えられる点震源モデルを用いたので、震源に関するデータとして、震源位置、震源深さおよびマグニチュードを入力すればよい。経験的手法の採用により、操作性の向上とともに、結果の解釈においても使用者の負担軽減につながると考えられる。

(4) ターゲットスペクトル算定モジュール

地震基盤面 ($V_s=3,000\text{m/s}$ 程度)での速度応答スペクトルを、模擬地震波作成時のターゲットスペクトルとする。ターゲットスペクトルは、式(4)~(6)に示す点震源モデルによる小林・翠川式²⁰⁾を用いる。

$$\log S_{v,0} = a(T)(\log M_0 - 26.6) - b(T) \log X + 2.36 \quad (4)$$

$$a(T) = 0.318 + 0.128 \log T \quad (5)$$

$$b(T) = 0.509 \log^2 T + 0.483 \log T + 1.124 \quad (6a)$$

$$(0.1\text{sec} \leq T \leq 0.3\text{sec})$$

$$= 0.985 - 0.05 \log T \quad (6b)$$

$$(0.3\text{sec} < T \leq 5.0\text{sec})$$

ただし、

- $S_{v,0}$: 入射波の速度応答スペクトル(cm/sec),
- M_0 : 地震モーメント(dyn·cm) ($\log M_0 = 1.5M + 16.2$),
- X : 震源距離(km), M : マグニチュード, T : 周期(s).

本システムでは、地理情報システムにより表示された地図上(例えば、図-4(b))で、建設地点および想定地震の震源位置をクリックすれば、建設地点の緯度、経度および想定地震の震源位置が入力される。また、入力画面において建設地点や震源位置の緯度・経度を直接入力してもよい。

(5) 基盤面での地震動作成モジュール

3.3(4)で計算されたターゲットスペクトルを目標として、正弦波合成法により、基盤面における模擬地震動作成する。

本モジュールでは、ターゲットスペクトル算定モジュールで計算された値が、デフォルト値として入力されている。したがって、システム利用者は乱数初期値を入力すればよい。この際、同一のターゲットスペクトルに対して、乱数初期値を変化させることにより、複数の模擬地震波を発生させることも容易である。

位相は $0 \sim 2\pi$ の乱数とし、式(7)、(8)に示す Jennings 型の包絡関数を設定している²⁰⁾。

$$T_a = \{0.16 - 0.04(M - 6)\} \cdot T_c \quad (7a)$$

$$T_b = \{0.54 - 0.04(M - 6)\} \cdot T_c \quad (7b)$$

$$T_c = 10^{(M-2.5)/3.23} \quad (7c)$$

$$0 \sim T_a \quad g(t) = \left(\frac{t}{T_a}\right)^2 \quad (8a)$$

$$T_a \sim T_b \quad g(t) = 1.0 \quad (8b)$$

$$T_b \sim T_c \quad g(t) = e^{-(t-T_b)/(T_c-T_b)} \quad (8c)$$

$$T_c \sim T_{end} \quad g(t) = 0.05 + \frac{0.05(T_{end} - t)^2}{(T_{end} - T_c)^2} \quad (8d)$$

作成した模擬地震波の加速度および速度時刻歴波形、また、加速度および速度応答スペクトルは、可視化システムにより画面上で瞬時に確認することができる。

(6) 地表面地震動作成モジュール

3.3(5)で作成された基盤面模擬地震波から、一次元重複反射理論²⁰⁾により、表層地盤の増幅特性を考慮し地表面地震動作成する。

本モジュールにおいて、地盤物性値等は、表層地盤データベースから隣接地点のデータが呼び出され入力される。もしくは、当該地点での最新の地盤データが存在する場合、入力画面において直接入力することもできる。

模擬地震波作成に必要な詳細な表層地盤データベースが整備できているのは、東京都および神奈川県のみである。今後、本システムを複数の地点で活用することにより、地盤データを整備していくことが課題である。また現状では、詳細な地盤データのない地点においては、国土数値情報による簡易評価(地震動最大速度の最大値のみ)に頼らざるをえない。

(7) 質点系弾塑性動的解析モジュール

3.3(6)のモジュールにより作成された地表面模擬地震波、もしくは、既存の観測波を入力地震波として動的解析を実行する。

本モジュールでは、バネ-質点系モデルによる動的解析を行う。構造解析モデルの諸データは、データ量が多くなることや、過去に使用した構造解析モデルのデータを再利用すること等を考慮し、テキスト形式の入力データファイルを用いることとした。

(8) 統計処理モジュール

質点系弾塑性動的解析モジュールで計算した複数の解析結果から、応答計算値の最大値、平均値および標準偏差を計算する。また、結果を重ね合わせて画面上で可視化することもできる。

同一の設計スペクトルを有し、位相特性の異なる地震波は複数設定することが可能であり、これらの地震波による動的応答は大きく変動することが知られている^{18),19)}。したがって、構造物の耐震性能を動的解析により評価する場合、複数の地震波により確率的に評価する手法が望ましいと考えられる^{3),4)}。

この観点から、解析結果統計処理モジュールの存在が本システムの大きな特徴であり、構造物の確率論的耐震性能評価に貢献する部分であると考えられる。

(9) システム操作フロー

図-5に本システムの一般的な操作フローを示す。

まず、入力地震波として用いる模擬地震波の数だけ①のフローを繰り返し実行する。作成した模擬地震波を用いて、②のフローにより動的解析を繰り返し、解析結果の確率・統計的処理を行う。また、観測波を用いて動的解析を実行する場合は、②の部分のみ実行すれば良いことになる。

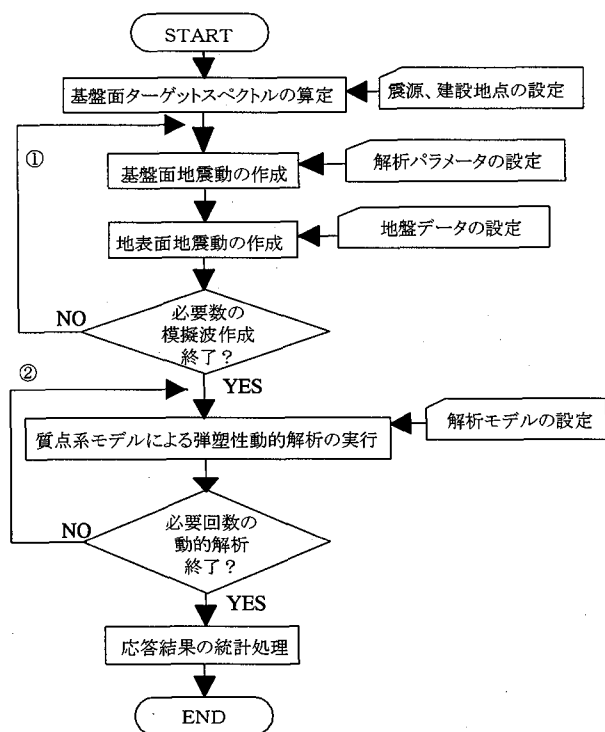


図-5 システムの操作フロー

4. 適用例

本システムを適用した事例として、1923年関東地震を想定地震とした場合の、南関東一円における最大加速度

(速度)分布を算定した事例、および東京都に建つ鉄筋コンクリート造34階建集合住宅の確率論的耐震性評価を行った事例を報告する。

4.1 最大加速度分布算定への適用事例

南関東一円(東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県の一部)に対して、1923年関東地震を想定地震とした場合の地表最大加速度(速度)分布の解析結果例を示し、最大加速度算定機能の妥当性を検証する。関東地震に対して点震源モデルと線震源モデルを設定した。表-2(a)には、点震源モデルとした場合の、表-2(b)には線震源モデルとした場合の諸元を示す。

表-2 想定地震地震諸元

(a)点震源モデル

震源位置		マグニチュード
緯度	経度	
139.5°	35.1°	7.9

(b)線震源モデル

断層位置				長さ(km)
始点緯度	始点経度	終点緯度	終点経度	
35.4°	139°	34.9°	139.7°	85

計算例として、図-6(a)には点震源モデルによる推定最大加速度を、図-6(b)には線震源モデルによる推定最大加速度を、図-6(c)には線震源モデルによる推定最大速度の結果を示す。また、図-6(a)には、小田原付近の相模湾に丸印で点震源の位置を、図-6(b),(c)には、神奈川県南西端から房総半島先端に至る直線で線震源の位置を表している。

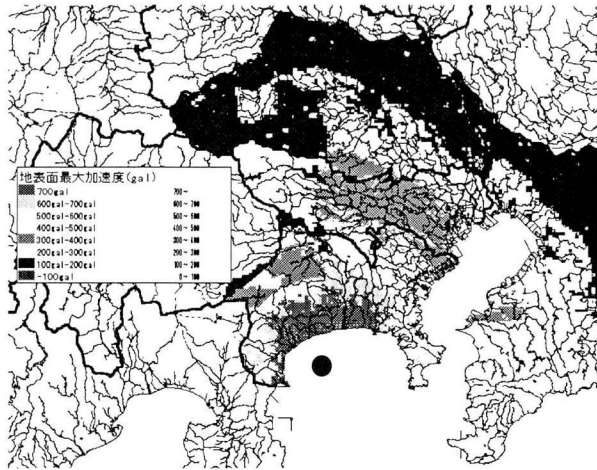
図-6(a), (b), (c)ともに、断層から距離が短い小田原や鎌倉付近で、最大加速度750cm/s²以上、もしくは最大速度75cm/s以上が生じており、被害が大きかった地域と比較的良く対応している。東京中心部の最大加速度は250~350cm/s²となっており、一般的に想定されている最大加速度値300cm/s²程度とほぼ同等の値となった。

また、図-6(a)と図-6(b)を見比べると、点震源モデルでは、同心円上に最大加速度が小さくなっているのに対し、線震源モデルでは、震源からの距離を断層からの最短距離で計算するため、小判型に最大加速度が小さくなっていることが分かる。

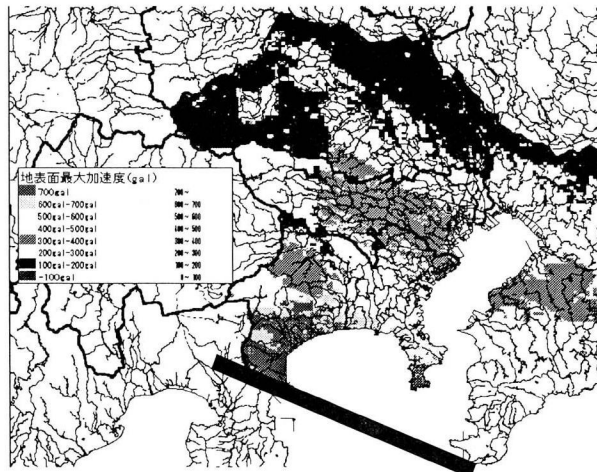
図-6(b)と図-6(c)の比較より、表層地盤の周期特性の影響を受け、地表最大加速度と地表最大速度では分布状況が異なっていることが分かる。耐震性を検討する対象構造物により、両者を使い分ける必要があるといえる。

本計算例では、表層地盤データとして、東京都と神奈川県に対しては詳細な地盤物性値を、埼玉県と千葉県に対しては国土数値情報を用いているが、図-6より、東京都と埼玉県の県境において、最大加速度分布に不連続な部分は

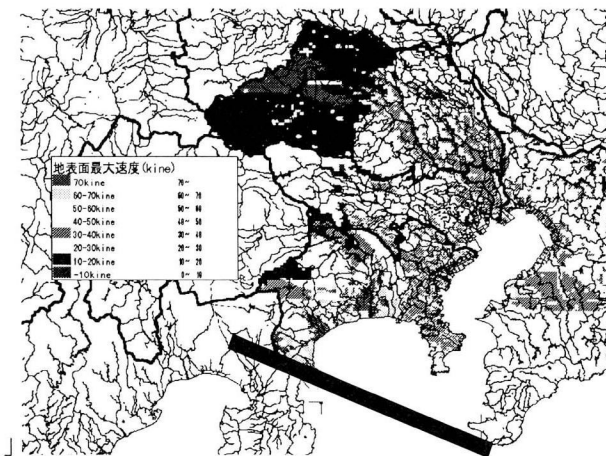
生じていない。したがって、表層地盤データの情報量の違いによる増幅度の評価の精粗は、地表面での最大加速度算定に対してはあまり影響しないものと考えられる。



(a)点震源モデルによる推定最大加速度



(b)線震源モデルによる推定最大加速度



(c)線震源モデルによる最大速度

図-6 1923年関東地震に対する推定結果

4.2 確率論的耐震性評価への適用例

(1)適用建物と想定地震

東京都の都区部に建つ RC 造 34 階建ビルの耐震性評価に本システムを適用した例を示す。ここでは本システムを、模擬地震波作成、動的解析の実行、および解析結果統計処理の支援に用いた。

RC 造 34 階建ビルを、34 質点のパネー質点系モデルに置換し、各層の復元力特性は、静的漸増解析結果をトリリニア型の復元力として設定した。本建物は、沖積層の厚い東京低地と呼ばれる三角州性の海岸平野に立地している。

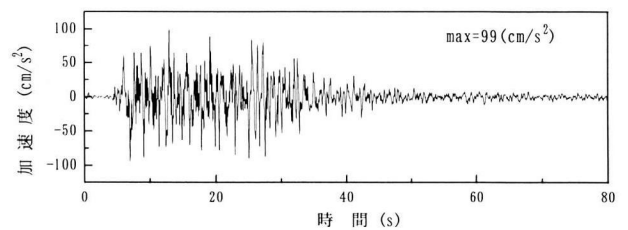
想定地震として、関東地震(1923)、安政地震(1855)、神奈川県西部地震(1924)、文献 29)に示される(仮想)駿河湾地震を考えた。想定地震の諸元を表-3 に示す。

表-3 想定地震の諸元

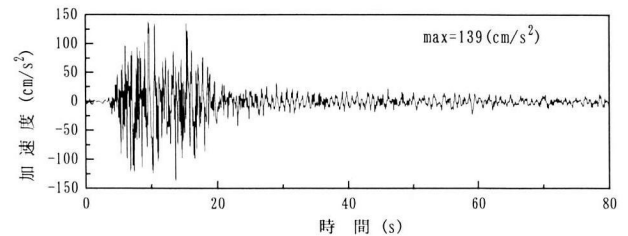
想定地震	震源位置(°)		震源深さ(km)	マグニチュード
	北緯	東経		
関東	35.1	139.5	40	7.9
安政	35.6	139.8	20	6.9
神奈川	35.5	139.2	20	7.3
駿河湾	34.4	137.8	20	8.0

(2)地表面地震波

4.2(1)で想定した地震に対して、本システムを用いて建物位置地表面での模擬地震波を作成した。それぞれの想定地震に対し 5 波ずつ模擬地震波を作成した。作成した模擬地震波の加速度時刻歴の例を図-7 に示す。図-7(a)、図-7(b)、図-7(c)、および図-7(d)は、それぞれ関東地震、安政地震、神奈川県西部地震、および駿河湾地震の一例を表している。各地震波ともに最大速度を 50cm/s に基準化して入力に用いた。



(a)関東地震



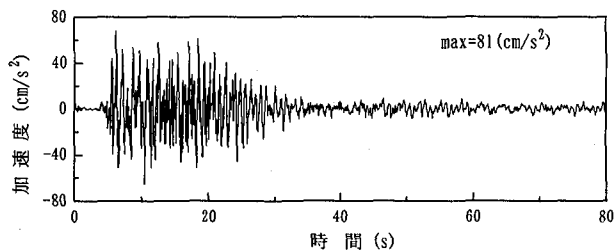
(b)安政地震

図-7 加速度時刻歴波形

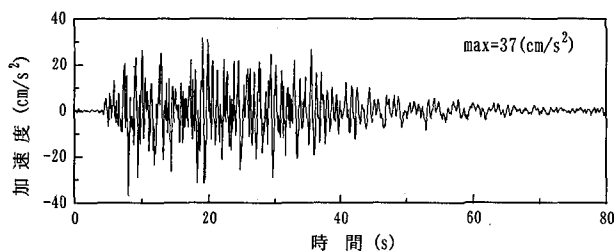
表-4 破壊基準

	小破	中破	大破
最大層間変形角	1/200	1/125	1/100

4.2(2)で作成した全20波による動的解析結果を用い、地表最大加速度と最大応答層間変形角、地表最大速度と最大応答層間変形角との関係を、それぞれ図-9、図-10に示す。これらの図において、横軸はそれぞれ地表最大加速度と地表最大速度を、縦軸は最大応答変形角を対数軸にて表している。また、図中、実線で線形回帰直線を、破線で回帰線±対数標準偏差を示している。



(c) 神奈川県西部地震



(d) 駿河湾地震

図-7 加速度時刻歴波形(続き)

(3) 解析結果

各想定地震5波による応答結果を平均し、想定地震毎の応答変形角の高さ方向分布(5波の平均値)を図-8に示す。

図-8より、入力地震が異なれば、高さ方向の応答性状が異なることが分かる。関東地震と神奈川県西部地震では、25階付近で最大応答変形角4/1000程度が生じているが、安政地震と駿河湾地震では10階付近で最大応答変形角6/1000程度となっていることが分かる。特に、安政地震は、6/1000程度の最大層間変形角の生じているのは5~10回程度までの範囲にわたっており、本建物にとってシビアな地震波であることが分かる。

つぎに、表-4に示す破壊基準³⁰⁾を用いることにより、確率・統計的に評価することとした。

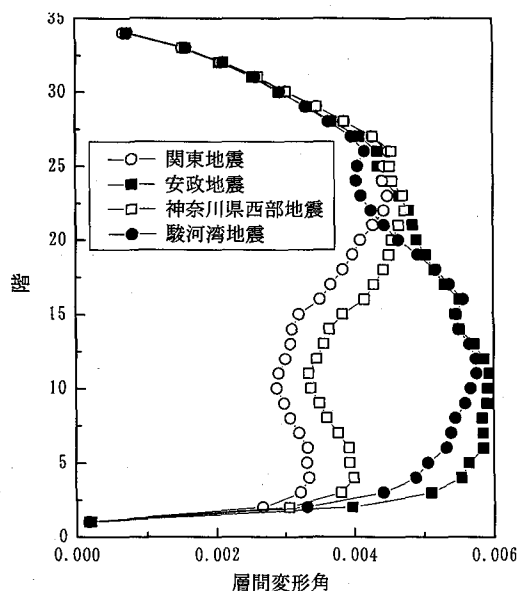


図-8 応答変形角の高さ方向分布

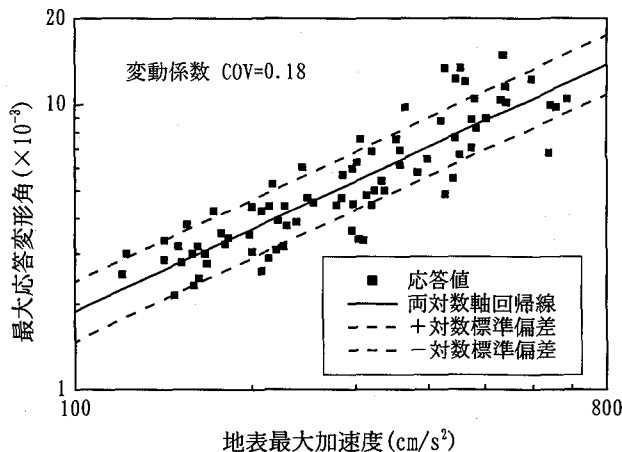


図-9 地表最大加速度と最大応答変形角の関係

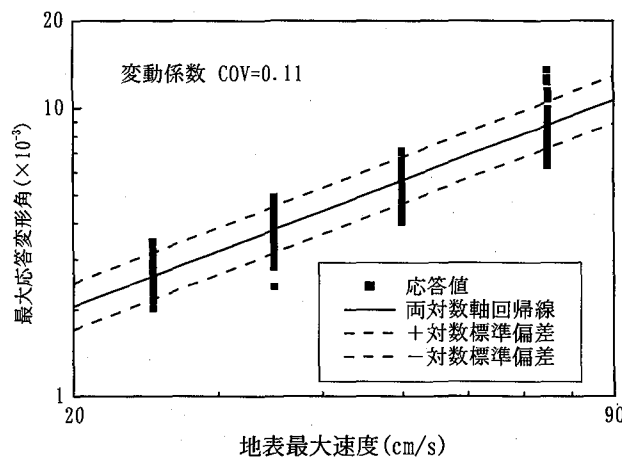


図-10 地表最大速度と最大応答変形角の関係

表-5 破壊レベル(単位: 加速度 cm/s², 速度 cm/s)

	小破		中破		大破	
	M	COV	M	COV	M	COV
地表最大加速度	298	0.18	492	0.18	505	0.18
地面最大速度	43	0.11	62	0.11	79	0.11

図-9と図-10において、地表最大加速度と最大応答変形角との間の変動係数は18%であるのに対し、地表最大速度

と最大応答変形角との間の変動係数は 11%であった。このことから、地表最大速度の方が、地表最大加速度よりも、最大応答変形角と相関性が強いと判断できる。

次に、図-9 と図-10 より、表-4 に示した破壊基準に対応するときの加速度レベルおよび速度レベルを算定した。算定結果の平均値(M)と変動係数(COV)を表-5 に示す。表-5 より、小破は加速度で 300cm/s²、速度で 40cm/s、中破は加速度で 500cm/s²、速度で 60cm/s、大破は加速度で 600cm/s²、速度で 80cm/s 程度となることが分かる。ただし、加速度の変動係数は 0.18、速度の変動係数は 0.11 であることから、速度を指標として破壊レベルを判断するとよいと考えられる。

5. システムの活用方法および利用効果

5.1 システムの活用方法

耐震設計においては、予備設計、詳細設計、実施設計の順に詳細な検討が行われていくことになる。表-6 に耐震設計の詳細度合いによるレベルを示す。

表-6 耐震設計のレベル

レベル	内容
I	震度法による 1 次設計
II	静的照査による 2 次設計
III	動的照査による 2 次設計

本システム構成は、図-1 に示した通りであるが、耐震設計レベル I の段階では、地表面の最大速度(加速度)のみを算出しておけば、震度法に用いる外力の大きさを設定することができる。耐震設計レベル III の段階においては、本システムを活用し、模擬地震波を数波作成し、確率・統計的に耐震性能を評価すればよい。また、歴史地震データベースの中には、数種の地震波の時刻歴波形もデータとして持っているので、観測波を用いた動的解析を行うことも容易である。

以上のように、耐震設計もしくは耐震診断のレベルに応じて、本システムで使用するモジュールを種々選択すれば効率的に活用することが可能である。

ただし、現在のシステムでは、表層地盤データベースとして、模擬地震波を作成することができる地盤物性データベースは東京都と神奈川県が整備されているのみである。本データベースを全国規模に拡大することが今後の課題であると考えられる。

5.2 システム利用による効果

本システムの開発により、耐震診断や耐震設計を行う構造設計者が、従来困難であった模擬地震波の作成業務に自ら携わることが可能となった。さらに、複数の地震応答解析を短時間に実行し、その解析結果の確率・統計的处理ま

で行えるため、建造物の耐震性能を確率論的に評価することが可能となった。すなわち、耐震設計や耐震診断業務の高度化およびコストと時間の大幅な短縮がはかれたといえる。

ただし、本システムにおける確率論的耐震性能評価とは、地震危険度や地震動の発生確率等は考慮していない。

なお、作成した模擬地震波を歴史地震データベースに登録することも可能なため、類似地点・条件での業務に、過去に登録した地震波データを援用することもできる。すなわち、本システムを活用すればするほど、地震データベースの充実を図ることも可能であると考えられる。

6. 結論および今後の課題

本研究は、建造物の設計において動的解析の重要性が高まっている状況の下、模擬地震波の作成から動的解析の実行および解析結果の統計処理までを行う、建造物の確率論的耐震性能評価システムの再構築を行った。本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 対話型・可視化型のシステムに、地震動(歴史地震および活断層)データベース、および表層地盤データベースを追加した。データベース機能を活用することにより、模擬地震波の発生から動的解析までを、より効率的に実行することができるようになった。
- (2) システムの表示モジュールとして地理情報システムを組み入れたため、今回追加したデータベース機能との連動を効果的にはかることができる。
- (3) 耐震設計や耐震診断業務のレベルに応じた地震荷重の設定が可能なシステム構成としたため、予備設計の段階から実施設計まで、幅広い業務段階にわたって効率的に業務を行うことが可能となった。
- (4) 確率論的耐震性能評価の適用事例を通し、本システムが建造物の確率論的耐震性能評価に有効であることを確認した。
- (5) 地震動データベースには、本システムにより作成した地震波を追加登録することができるため、本システムを活用することにより、地震データベースの充実を図ることが可能である。

なお、表層地盤の詳細な地盤物性データは、まだまだ不足しており、全国規模で、これら詳細な地盤物性データを整備することが今後の課題である。また、本システムでは、建造物の動的挙動に関して確率論的評価を行った。地震危険度や地震動の発生確率等、地震荷重の確率論的評価が行えるシステムへの拡張も今後の課題である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、一部、(財)日本建設情報総合センターの研究助成を受けた。また、システム開発に関し、(株)竹中工務店の阿部康彦氏、長能正武氏、瀬谷均氏、佐藤吉之氏にはご助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) (社)日本建築学会編：地震荷重—地震動の予測と建築物の応答—，日本建築学会，1992.
- 2) 北原武嗣，瀬谷 均，伊藤義人：模擬地震波による動的解析統合システムの開発と耐震診断への適用，土木情報システム論文集，Vol. 7, pp. 145-152, 1998.
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，丸善，1996.
- 4) Federal Emergency Management Agency: Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-356, 2000.
- 5) Kanamori, H., Hauksson, E. and Heaton, K.: TERRAScope and CUBE Project at Caltech, EOS, Vol.72, No.50, 1991.
- 6) 石田栄介，福和伸夫：JAVAによる都市地震防災情報統合 GIS のインターネットへの展開，日本建築学会技術報告集，第5号，pp. 287-291, 1997.
- 7) 石田栄介，福和伸夫：都市地震防災に関わる情報活用のための GIS 構築に関する研究—名古屋市への適用事例，GIS-理論と応用，地理情報システム学会，Vol. 4, No. 1, pp. 1-10, 1996.
- 8) 小檜山雅之他：GISを活用した広域地震被害評価システムの構築，鹿島技術研究所年報，第46号，pp. 51-56, 1998.
- 9) 奈良岡浩二他：GISを利用した広域における地震動と地震被害予測システムの構築，清水建設研究報告，第68号，pp. 59-68, 1998.
- 10) Lind, S. G., Neuhauser, D. S., Dreger, D. S., Pasyanos, M. E., Uhrhammer, R. A. and Romanowicz, B.: Real-time Seismology at UC Berkley: The Rapid Earthquake Data Integration Project, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.86, No.4, pp.936-945, 1996.
- 11) Schneider, P. and Drury, C.: Earthquake Loss Estimation Methodology Study, National Institute of Building Sciences, 1996.
- 12) Federal Emergency Management Agency: Assessment of the State-of-the-Art Earthquake Loss Estimation Methodologies, FEMA-249, 1994.
- 13) Borcherdt, R., Wentworth, C. M., Janssen, A., Fumal, T. and Gibbs, J.: Methodology for Predictive GIS Mapping of Special Study Zones for Strong Ground Shaking in the San Francisco Bay Region, CA, Proc. of 4th International Conf. on Seismic Zonation, Vol.3, pp.545-552, 1991.
- 14) Luna, R. and Frost, J. D.: Spatial Liquefaction Analysis System, Journal of Computing in Civil Engineering, Vol.12, No.1, pp.48-56, 1998.
- 15) Mankelov, J. M. and M., Murphy, W.: Using GIS in the probabilistic Assessment of Earthquake Triggered Landslide Hazards, Journal of Earthquake Engineering, Vol.2, No.4, pp.593-623, 1998.
- 16) 本間俊雄，高崎芳夫，村山秀幸，寺岡勝，吉野広一：地理情報システム(GIS)を活用した地震動評価システムの開発，日本建築学会技術報告集，第5号，pp. 275-280, 1997.
- 17) 岡本 晋，富田純弘：設計用入力地震動設定システムの開発，大成建設技術研究所報，第30号，pp. 115-120, 1997.
- 18) 北原武嗣，伊藤義人：同一設計スペクトルを有する模擬地震波群による弾塑性応答の変動性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23, No. 3, pp. 1237-1242, 2001.
- 19) 北原武嗣，伊藤義人：鋼製橋脚の最大応答変位に与える地震波の非正常性の影響，第4回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，pp. 107-112, 2002.
- 20) 例えば，理論地震動研究会編：地震動 その合成と波形処理，鹿島出版会，1994.
- 21) 宇佐美龍夫：新編日本被害地震総覧[増補改訂版 416-1995]，東京大学出版会，1996.
- 22) 活断層研究会編：新編日本の活断層—分布図と資料，東京大学出版会，1991.
- 23) 松岡昌志，翠川三郎：国土数値情報を利用した地盤の平均S波速度の推定，日本建築学会構造系論文集，No. 443, pp. 65-71, 1993.
- 24) 沢田 努，平尾 潔，山本英史，川手 訓：地震動の最大振幅比(a/v , ad/v^2)とスペクトル特性及び継続時間の関係，第21回地震工学研究発表会講演概要，pp. 41-44, 1991.
- 25) Fukushima, Y., Watanabe, T., Uetake, T. and Matsumoto, H.: A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.80, No.4, pp.747-783, 1990.
- 26) Midorikawa, S.: Preliminary Analysis for Attenuation of Peak Ground Velocity on Stiff Site, Proc. of the Inter. Workshop on Strong Motion Data, Vol.2, pp.39-48, 1993.
- 27) Kobayashi, H. and Midorikawa, S.: A Semi-Empirical Method for Estimating Response Spectra of Near-Field Ground Motions with regard to Fault Rupture, Proc. of 7th ECEE, pp.161-168, 1982.
- 28) Jennings, P. C., Housner, G. W. and Tsai, N. C.: Simulated Earthquake Motions for Design Purpose, Proc. of 4th WCEE, pp.145-160, 1969.
- 29) 石橋克彦：東海地方に予想される大地震の再検討—駿河湾大地震について—，地震学会秋季大会，No. 2, pp. 30-34, 1976.
- 30) 日本建築学会：建築設計における保有水平耐力と変形性能，1990.

(2001年9月14日受付)