

1. はじめに

近年、耐震設計において動的解析による照査の重要性が高まってきている。この際、入力地震動として、地域の地震活動度や表層地盤の増幅特性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。

しかしながら、模擬地震波作成には、地震動（歴史地震や活断層）や地盤構造に関する専門的な知識と多くの経験が必要とされ、かつ実際の作業では当該地点における資料収集およびその整理・検討などに多大な労力が必要とされているのが現状である。そこで本研究では、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の構築を試みた。

ここでは、対話型のシステムとして、地理情報システムを採用した。また、利用者の資料収集の作業を軽減するため、地理情報システムから利用可能な地震動（歴史地震および活断層）および表層地盤に関するデータベースを構築するものとした。

ところで、構造物の動的挙動は、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。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。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。

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。

2. システム概要

(1) システム構成

本システムの基本構成を図 - 1 に示す。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の3つの部分から構成されている。システムのメインとなるのは、表示モジュールとして利用している地理情報システムである。

データベース機能は、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。これらのデータベースの詳細に関しては、次章で述べる。地震動・動的解析処理モジュールは、地震動処理に関する部分と動的解析処理に関する部分とからなっている。地震動処理に関する部分では、単純に地震動の最大速度（もしくは最大加速度）のみを算出する機能、および構造物建設地点におけるシナリオ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。動的解析処理は、質点系の動的解析を実行する機能と、動的解析結果を確率・統計的処理をする機能を有している。

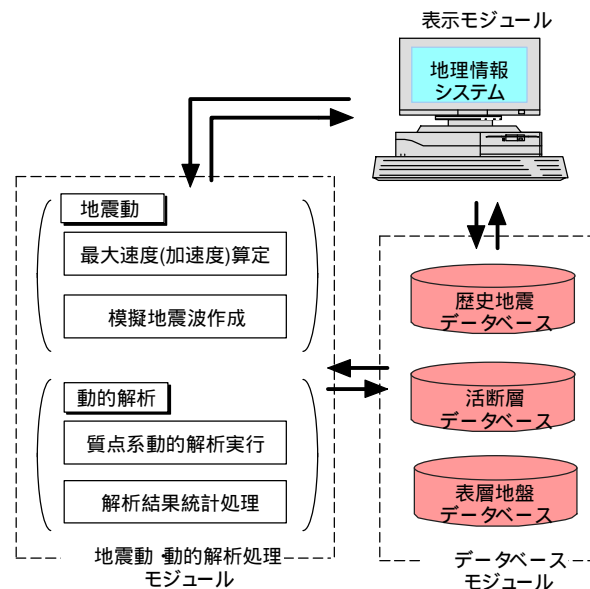


図 - 1 システム構成

(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。

メモリ容量：128Mbyte

OS：Windows98

言語：Fortran<解析部>、Visual C++<制御部>

本システムにおけるプラットフォームにはパーソナルコンピュータ（パソコン）を用いることとした。最新のパソコン環境の発展は目覚ましく、一昔前のEWSよりCPU処理速度、主記憶容量、外部記憶装置容量等の性能を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

(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。

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、この作業の簡略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・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をから、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、計算された最大加速度（速度）は、最大加速度（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、地表面での最大加速度(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。

(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。

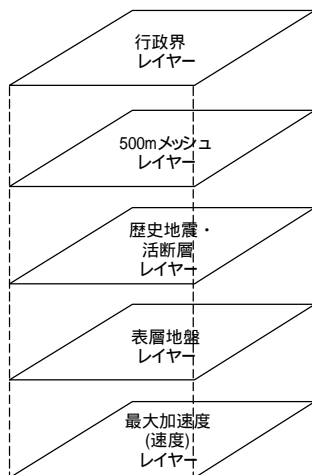


図 - 2 レイヤー構造

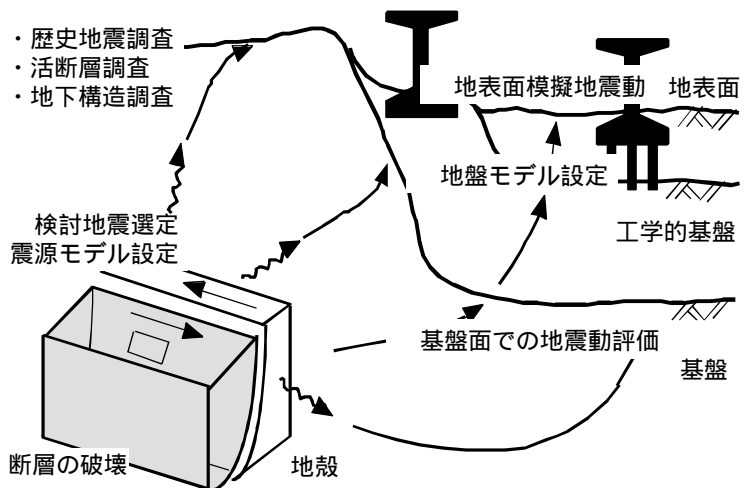


図 - 3 模擬地震波作成の手順

1) 歴史地震データベース, 活断層データベース

震源モデルには、点震源モデル, 線震源モデル, 面震原モデル等があるが、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本システムでは採用した。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。点震源モデルでは震源位置, 震源深さとマグニチュードが、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)がデータベース内にデータとして格納されている。歴史地震は、新編日本被害地震総覧[増補改訂版](宇佐美, 1996)を参考にし、文献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、活断層は新編日本の活断層 - 分布図と資料(活断層研究会, 1991)を用い約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た地震動処理モジュールに引き渡される。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としている。データベース更新機能の画面例を図 - 4 に示す。図 - 4 (a)には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。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。

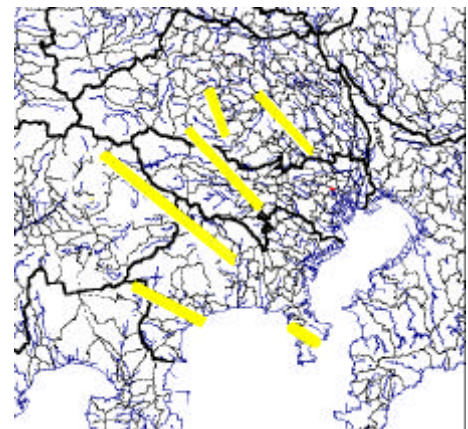
2) 表層地盤データベース

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、これらを調査し整備することも困難である。

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。

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。

断層名	断層位置						断層の長さ (km)
	北端座標 (緯度)	北端経度 (経度)	南端座標 (緯度)	南端経度 (経度)	断層長さ (km)	計算	
千日川断層等	138.79220	37.10870	5.00	138.66130	37.01930	5.00	18.00
庄通川断層等	138.59690	37.00670	5.00	138.17830	36.64150	5.00	60.00
戸田山断層等	137.99700	36.72510	5.00	138.00460	36.70200	5.00	12.00
横川地盤構造断層	140.14790	35.11400	5.00	139.82380	35.15200	5.00	29.00
横川地盤構造断層等	140.02680	35.03190	5.00	139.82310	35.07050	5.00	26.00
深谷断層	139.32280	36.14890	5.00	139.24830	36.20940	5.00	10.00
千井-柳井断層等	139.22890	36.14890	5.00	139.01290	36.22070	5.00	20.00
江前 - 中津川断層等	139.30340	36.12490	5.00	139.31430	36.09160	5.00	16.00
荒川断層	139.64690	35.83190	5.00	139.50490	35.86680	5.00	20.00
尾上断層	139.31330	35.89630	5.00	139.26790	35.86680	5.00	18.00
立川断層等	139.19120	35.87530	5.00	139.44130	35.66150	5.00	30.00
龍川断層	139.33320	35.47690	5.00	138.83330	35.80620	5.00	30.00
龍山断層	139.02940	35.64520	5.00	138.88320	35.29810	5.00	18.00
高倉断層	139.03280	35.69090	5.00	139.12240	35.52520	5.00	10.00
伊豆断層	139.02880	35.51610	5.00	139.11400	35.53430	5.00	10.00
伊豆断層等	139.30320	35.32900	5.00	139.22140	35.53740	5.00	20.00
志保断層	139.04690	35.39970	5.00	139.13490	35.42950	5.00	10.00
榑崎 - 松尾断層等	139.95490	35.36900	5.00	139.21290	35.23250	5.00	28.00
北沢断層等	139.59400	35.24380	5.00	139.68210	35.19980	5.00	12.00
大宮断層等	138.78360	35.69080	5.00	138.80390	35.81970	5.00	14.00
横正断層等	139.64520	35.60190	5.00	139.53340	35.58250	5.00	15.00



(a) データベース更新ウィンドウ

(b) 活断層表示画面

図 - 4 活断層データベース画面

(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

前節(2)でも述べたように、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には、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、期待される地表面最大速度(加速度)を算出し耐震性のチェックに用いる。地表面での最大速度算定手法には、松岡・翠川の手法を用いた。

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。

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

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

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) ,

V_{si} : 第 i 層のせん断波速度(m/s) ,

H_i : 第 i 層の層厚(m) , a, b, c : 定数 .

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、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性を参考に、前項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} : 地表面最大加速度(cm/s^2) ,

V_{\max} : 地表面最大速度(cm/s) ,

T_g : 地盤の卓越周期(s) ,

H : 表層地盤の総厚(m) ,

V_s : 表層地盤の平均せん断波速度(m/s) .

3) 模擬地震波作成手法

模擬地震波作成の手法として、理論的に合理性が高くても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、構造設計者が簡便に使えるということを重視して、最も入力パラメータの少ない経験的手法を採用した。さらに、震源として簡単な点震源モデルを用いたので、システム利用者は震源に関する入力データとして、震源位置、震源深さおよびマグニチュードのみを用いればよい。

4) ターゲットスペクトル算定モジュール

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・翠川式を用いる。
この式により、想定地震のマグニチュードと震源距離から速度応答スペクトルを計算することができる。

$$\log S_{v0} = a(T)(\log M_0 - 26.6) - b(T) \log X + 2.36 \quad (4)$$

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

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

$$\begin{aligned} & (0.1 \text{sec} < T < 0.3 \text{sec}) \\ & = 0.985 - 0.05 \log T \end{aligned} \quad (6a)$$

$$(0.3 \text{sec} < T < 5.0 \text{sec}) \quad (6b)$$

ただし、

S_{v0} : 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) .

5) 基盤面での地震動作成モジュール

前項4)で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模擬地震動を発生させる。位相は0～2π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。

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

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

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

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

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

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

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

ここで作成された模擬地震波の加速度時刻歴波形、速度時刻歴波形、加速度応答スペクトルおよび速度応答スペクトルは、可視化システムにより瞬時に画面上で確認することができる。

本モジュールで求めた時刻歴波形データはメモリ上に記憶され、また、必要であれば外部記憶装置に保存することもできる。

6) 地表面地震動作成モジュール

一次元重複反射理論により、地盤により増幅された地表面地震動を作成する。本モジュールにおいて、地盤の諸条件は表装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。ここで作成された地震波に関しても画面上で確認できるとともに外部記憶装置に保存することもできる。

7) 質点系弾塑性動的解析モジュール

ここでは、前項6)のモジュールにより求めた地表面模擬地震波もしくは、観測波による動的解析を実行する。したがって、本モジュールではまず、入力地震波の選択画面により地震波ファイル名をインプットする必要がある。

さらに、バネ - 質点系の構造解析モデルの諸データが必要となるが、これらはかなりの量のデータとなることや、他の解析システム等で使用した構造解析モデルのデータを再利用することもあることを考慮し、本システム内で唯一テキスト形式の入力データファイルを事前に用意することとした。

本モジュールでは解析結果として、最大応答加速度，最大応答せん断力，最大応答変形角，最大応答塑性率についてリスト形式のファイルとして出力される。

8) 統計処理モジュール

前項7)のモジュールで計算された複数の解析結果に基づき、応答値の最大値，平均値および標準偏差を計算し、表形式のデータとして出力することができる。また、結果を重ね合わせて画面上で可視化するとともに、PostScript形式の図形ファイルを出力することができる。

同一の設計スペクトルを有していても、位相特性の異なる地震波は複数存在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。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。この観点から、統計解析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

本システムの操作フローを図 - 5 に示す。

図 - 5 のフローは模擬地震波による動的解析を行うときの一般的な操作フローであり、発生させる模擬地震波の数だけのフローを繰り返し実行する。その後、のフローを繰り返すことになる。また、観測波を用いて動的解析を実行する場合は、の部分のみ実行すれば良いことになる。このように、必要となるサブモジュールのみ用いて、解析を実行することもできるシステム構成となっている。

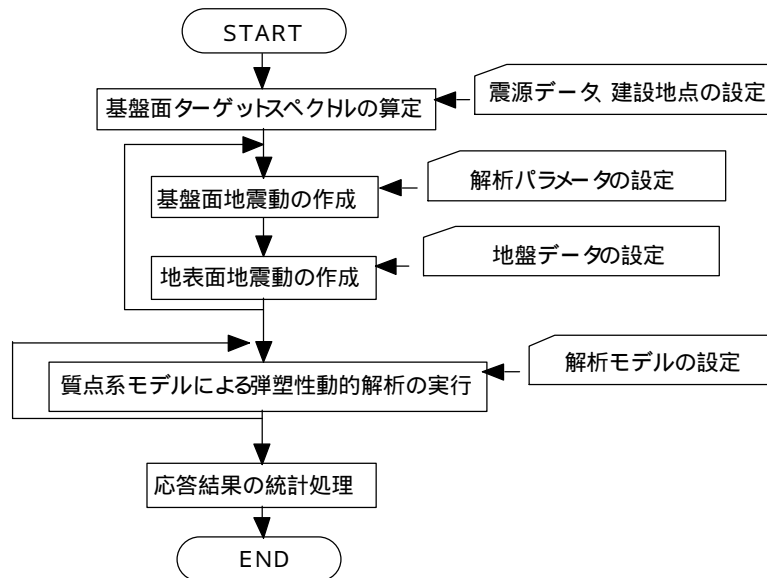


図 - 5 システムの操作フロー

4 . 適用例

開発したシステムを群馬県を対象とし、活断層を想定地震とした地震動分布評価に適用した例を以下に示す。

図 - 6 に、国土数値情報による群馬県の微地形区分を示す。群馬県周辺部は山間地帯であり、第三紀や洪積紀等の硬質地盤である。一方、利根川や烏川等の周辺に広がる平野部は、ローム台地や三角州等である。したがって、山間地帯では地震動の増幅度は小さく、平野部は増幅度が大きくなるのがわかる。

図 - 7 に群馬県周辺の活断層を示す。朱色は新編日本の活断層 - 分布図と資料（活断層研究会，1991）に示されたものであり、青色は近年の断層調査により広告された深谷断層系を表している。深谷断層系とは、深谷断層が群馬県榛名町付近まで続く一連の断層系とみなしたものである。本論文では、深谷断層系を図 - 7 に青色で示した約30kmの延長を有する断層と考えた。

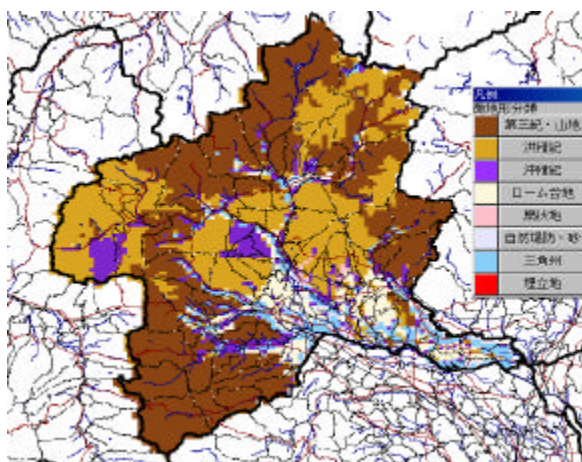


図 - 6 群馬県の微地形区分



図 - 7 群馬県周辺の活断層分布

図 - 7 に示した断層を想定地震とし最大速度分布を評価した。ここでは、群馬県に影響が大きいと考えられる信濃川断層帯，平井 - 櫛引断層帯および深谷断層系を想定地震とした場合の結果をそれぞれ図 - 8、図 - 9 および図 - 10 に示す。

ここで考慮した活断層のなかで信濃川断層帯は断層長さ60kmと最も長く、地震規模は最も大きくなる。しかしながら、図 - 8、図 - 9、図 - 10 を比較すると信濃川断層帯を想定地震とした場合、最大速度分布が最も小さくなっている。これは、信濃川断層帯から近距離の地域は山間地帯であるため、増幅度が小さいためであると考えられる。

さらに、図 - 8 から人口が集中し被害が生じやすいと考えられる平野部では、最大速度が20cm/s（震度3，4程度）以下の揺れしか生じないことがわかる。新潟県や栃木県に存在する他の活断層を想定地震とした場合も同様である。

図 - 9 より平井 - 櫛引断層帯を想定地震とすると、烏川や鍬川流域において最大速度60cm/s（震度6弱程度）以上の揺れの生じる地域が存在することがわかる。さらに図 - 10 から深谷断層系を想定地震とした場合、平野部の大部分において最大速度40cm/s（震度5弱，5強程度）以上となり、河川流域周辺部の多くは最大速度70cm/s（震度6強程度）以上の揺れが生じることがわかる。

以上の検討より、深谷断層が単独でなく群馬県榛名町付近まで延長された一連の断層系として地震が生じた場合、十分な震災対策が必要になると考えられる。

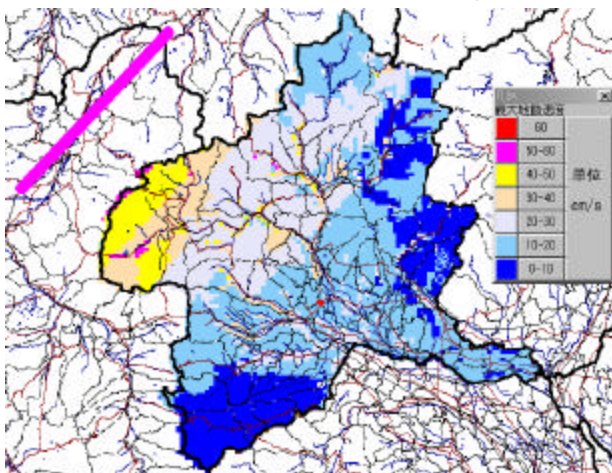


図 - 8 信濃川断層帯による最大速度分布

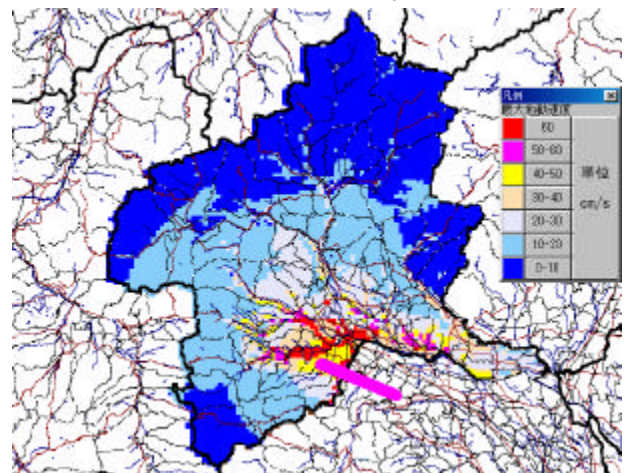


図 - 9 平井 - 櫛引断層帯による最大速度分布

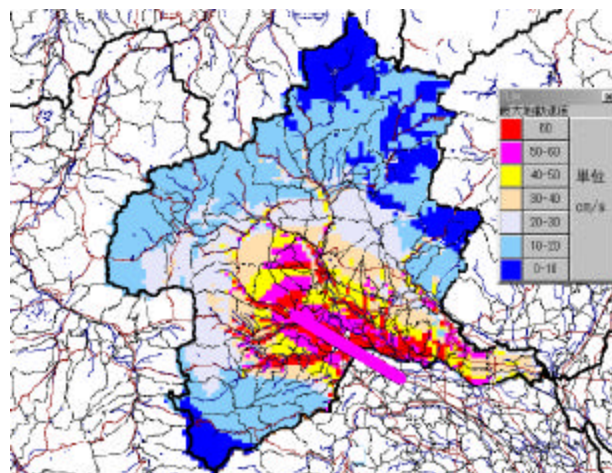


図 - 10 深谷断層系による最大速度分布

5 . システムの活用方法および利用効果

(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 - 1 に耐震設計の詳細度合いによるレベルを示す。

表 - 1 耐震設計のレベル

レベル	内容
	震度法による 1 次設計
	静的照査による 2 次設計
	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 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 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。

(2) システム利用による効果

本システムの開発により、従来行うことができなかった構造設計者自らが模擬地震波の作成業務に携わることが可能となり、コストおよび時間ともに大幅に短縮す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・統計的処理まで行えるため、構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がはかれたといえる。また、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、構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、構造設計者を利用者と想定し、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動的解析統合システムの構築を行った。本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

数の地震波による動的解析に対応したシステムとしたことにより、確率論的な耐震性能の評価を行うための道具として有用であることを確認した。また、構造物の確率論的耐震性能を評価することにより、耐震設計や耐震診断業務の高度化が図れた。

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

のため、計画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である。

地震動データベースには、本システムによる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。

表層地盤の詳細な地盤物性データはまだ不足しており、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。

開発したシステムを群馬県の広域的地震動分布評価に適用した。その結果、近年の断層調査から報告されている深谷断層系を一つの断層と見なしこれを想定地震とすると、河川流域周辺部では最大速度が70cm/s（震度6強程度）以上となる地域もかなり生じるため、十分な震災対策が必要と考えられることを示した。