

I-19 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

Development of an Integrated System for Dynamic Analysis with Simulated Waves and It's Application

北原武嗣*, 瀬谷 均**, 伊藤義人***

Takeshi KITAHARA, Hitoshi SEYA, Yoshito ITOH

【抄録】阪神・淡路大震災以降、土木・建築構造物の設計に動的解析の重要性が高まってきている。動的解析結果は入力に用いる地震動の周期特性により異なった結果を与えることが多いため、多数の地震波を用いて検討を行う必要がある。そのとき、観測波だけでなく、模擬地震波による解析を実行することも多い。ところが、模擬地震波の作成から解析モデルの作成、動的解析の実行、解析結果の評価には多大なる労力と多くの経験を必要とする。そこで本研究では、ユーザーフレンドリーなGUIを有する動的解析統合システムの構築を試みた。本システムにより、対話形式で模擬地震波の作成から動的解析の実行およびその確率論的評価までを、簡易に繰り返し実行することができるようになった。

【Abstract】 After the Great Hanshin-Awaji Earthquake Disaster, the importance of a dynamic analysis has been increased in the design of structures. It is likelihood that results of dynamic analysis depend on input waves. So we should evaluate the dynamic response of structure by many-sided approaches with a large number of seismic waves. In this study, we present an integrated system for dynamic analysis of structures with user-friendly GUI. With this system, we can easily repeat the dynamic analysis and obtain probabilistic performances of structures.

【キーワード】 模擬地震波, 動的解析, 統合システム, GUI

【Keywords】 *Simulated Waves, Dynamic Analysis, Integrated System, GUI*

1. はじめに

阪神・淡路大震災において、多くの土木・建築構造物が被害を受けた。その後の調査により、土木学会からは土木構造物の耐震基準に関する「第二次提言」¹⁾が、日本建築学会からは「建築および都市の防災性向上に関する提言(第三次提言)」²⁾が発表されている。これらの提言では、動的解析による耐震性能照査の重要性が示されている。また、近年性能規定型設計法への移行の必要性が認識されており、耐震設計における動的解析の位置づけは今後ますます高まるものと思われる。

一方、現状でも巨大構造物や重要構造物に関しては震度法などによって静的な一次設計を行った上で、動的解析による安全性照査も行われている。このと

き、既存の観測波であるEl Centro波、Taft波、八戸波等を入力地震動として用いられることが多かった。しかし、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いる³⁾。そのため、これらの影響を考慮した模擬地震波による動的解析も実施されるようになってきている。

このような模擬地震波の作成には地震動や地盤構造に関する専門的な知識が必要とされ、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。

そこで、本研究では、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までを行えることを目標に、EWS(エンジニアリング・ワークステーション)

* 正会員 工修 竹中工務店技術研究所(〒270-1395 印西市大塚1-5-1), 名古屋大学博士後期課程

** 工博 竹中工務店技術研究所 主任研究員

*** フェロー 工博 名古屋大学 理工科学総合研究センター 教授

による対話・可視化型支援システムの構築を試みた。

動的解析においては、入力地震波により応答結果に変動が生じることが指摘されており、多数の地震波による解析を行い、構造物の動的特性を確率論的に評価することが一つの方法として考えられる⁴⁾。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、解析結果の統計的处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。

模擬地震波の作成システムに関しては類似のシステムが既にいくつか開発されているが^{5),6)}、本システムは動的解析および解析結果の統計的处理までを含んだ統合システムとなっているところがユニークな点であると考ええる。

2. システム概要

(1) システムにおける基本理念

本システムの開発にあたり、利用者としては構造設計者を想定し以下のような基本理念の下でシステム構築を行うものとした。

- i) 対話型・可視化型のシステム
- ii) 解析システムのモジュール化

対話型のシステムとすることにより、作業内容が複雑で入力データ項目の多い作業に対して利用者の負担を軽減することができるようにした。さらに、可視化型のシステムとすることで、解析結果を瞬時に視覚的に捉えることができ、結果の迅速な判断やインプットミス等の発見に貢献することができるものとした。

解析システムのモジュール化は、利用者には実際の解析部分が見えなくすることで、システムへの親和性を高めることが狙いである。ただし、模擬地震動作成のような高度な専門知識とテクニックが必要とされる部分のすべてをモジュール化することは困難である。エキスパートシステム技術等を利用し、モジュール内に専門的な知識を取り込む方法等も考えられるが、本研究では基本的なルールをシステム内に設けるにとどめ、エキスパートシステム技術等の援用は今後の課題とした。

(2) システム構成

本システムの基本構成を図-1に示す。図中、メインとなるのがシステム制御モジュールであり、このモジュールが破線で囲った各サブモジュールの実行を制御する。システム実行中は、それぞれのサブモジュールで解析された計算結果はEWSのメモリ上に保存されており、必要な時にデータを各サブモジュール間で交換することができるように設計されている。システム制御モジュールを実行したときの画面イメージを図-2に示す。

図-1の楕円で囲った部分には、模擬地震波作成時に利用されるDBが構築されている。これらは、GISに組み込まれている。前述の制御モジュールが、このDBと各サブモジュール間のデータ交換を取り持つ機能も有している。ただし、今回開発したシステムでは、これらのDBは開発途中で完全には実装されていない。

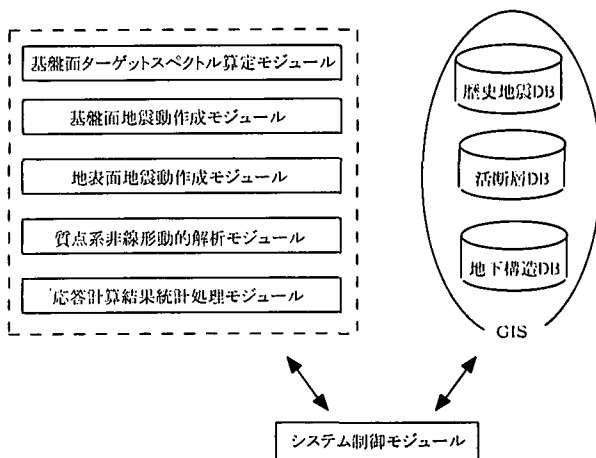


図-1 システム構成

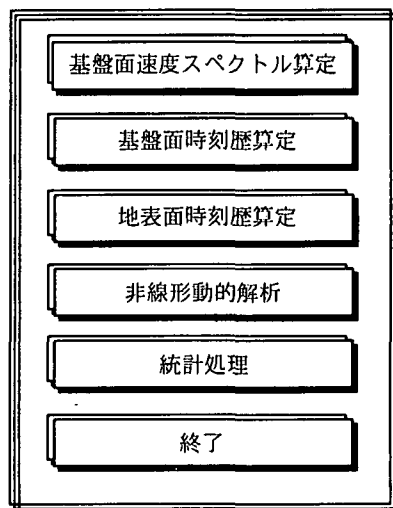


図-2 制御システムの画面イメージ

(3) システム開発環境

本システムの開発環境は以下の通りである。

機 種 : EWS (エンジニアリング・ワークステーション)
 メモリ容量 : 256Mbyte
 クロック数 : 160MHz
 OS : UNIX
 言語 : Fortran <解析部>
 C <制御部>
 X-Window <GUI部>

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ものも出現してきている。しかしながら、本システムで想定している操作環境は、複数のユーザーが同時に、大規模な計算を実行することを前提としているため、マルチユーザー、マルチタスクの性能が不可欠となる。OSとしてWindowsNTを利用したパソコン環境でも、これらの環境を提供できるようにはなっているが、まだ、EWSに一日の長があると判断し、プラットフォームにはEWSを採用した。また、構造設計者は通常、解析業務等でEWSを使用することも多く、特にパソコン環境でなくてもOS (UNIX) 等の操作において不自由はないと思われる。

解析部分には、豊富な科学技術計算関連のライブラリー等の利用を考慮し、Fortran言語を用いた。システム制御モジュールやサブモジュール間の制御には使用したOSと親和性の高いC言語を採用した。

対話・可視化部分にはUNIXシステムのウィンドウシステムの標準といえるX-Windowを用いた。

サブ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、制御システムから各モジュールを呼び出すことで実行できるようにしてあるので、サブモジュール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、モジュール内のみで容易に対応できる。

(4) システム操作フロー

本システムの操作フローを図-3に示す。

図-3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①のフローを繰り返し実行する。その後、②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、②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。

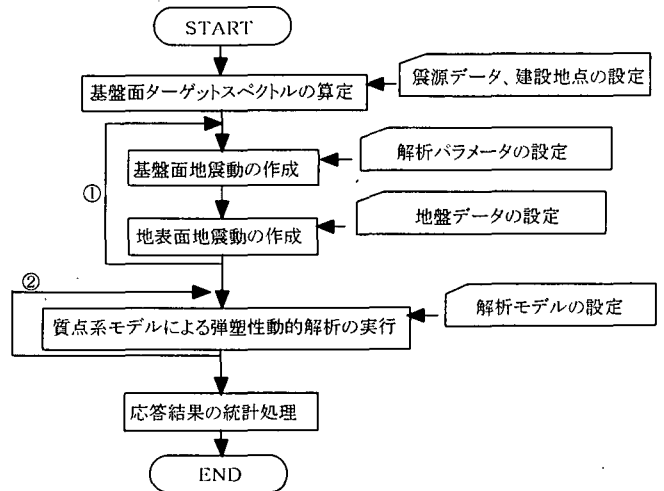


図-3 システムの操作フロー

3. 各モジュールの詳細

(1) 模擬地震波作成手法

模擬地震波作成の方法は、大きく次の3種類に分類することができる⁷⁾。

- i) 理論的手法
- ii) 半経験的手法
- iii) 経験的手法

これら3つの手法の特徴を比較したものを表-1に示す。理論的手法とは、震源モデルと地盤モデルを用いた手法であり、文字通り最も理論的に地震動を求める手法である。経験的手法とは、応答スペクトルの距離減衰式を用いる手法であり、距離減衰式は過去の地震記録から統計処理されて導かれているので経験的手法と呼ばれる。半経験的手法とは、中小の地震記録の重ね合わせにより地震波を作成する手法である。

表-1 模擬地震動作成手法の比較

手法の名称	解析に用いるパラメータ数	手法の合理性
理論的手法	多	高
半経験的手法	中	中
経験的手法	少	低

手法としての合理性が高くても、解析に用いられるパラメータ数やその精度の問題もあるため、模擬地震波作成において理論的手法によるのが最も精度がよいとは限らない。

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、マグニチュードのみを用いればよい。

(2) 模擬地震波作成手順

図-4に経験的手法による模擬地震波作成の手順を示す。図-4における「基盤面での地震動評価」が、本システムでは図-3に示した「基盤面ターゲットスペクトル算定モジュール」および「基盤面地震動作成モジュール」に、「地表面における模擬地震動」が「地表面地震動作成モジュール」に対応している。

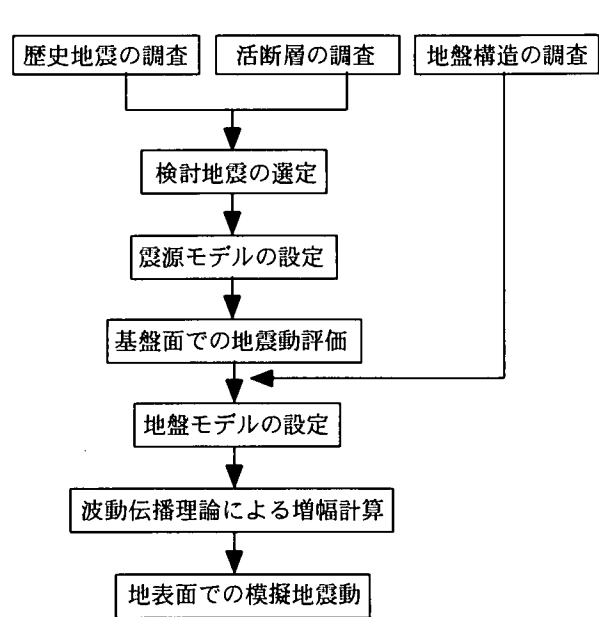


図-4 経験的手法による模擬地震波作成手順

(3) 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(1)～(3)に示す点震源モデルによる小林・翠川式⁸⁾を用いている。この式では、想定地震のマグニチュードと震源距離が与えられることで速度応答スペクトルが計算される。

$$\log S_{v0} = a(T)(\log M_0 - 26.6) - b(T) \log X + 2.36 \dots (1)$$
$$a(T) = 0.318 + 0.128 \log T \dots (2)$$

$$b(T) = 0.509 \log^2 T + 0.483 \log T + 1.124$$
$$(0.1 \text{ sec} \leq T \leq 0.3 \text{ sec}) \dots (3a)$$
$$= 0.985 - 0.05 \log T$$
$$(0.3 \text{ sec} < T \leq 5.0 \text{ sec}) \dots (3b)$$

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)

本システムでは、図-5に示す入力画面例のように建設地点の緯度、経度および想定地震の震源位置、震源深さ、マグニチュードを入力するようになっている。計算されたターゲットスペクトルはEWSのメモリ上に記憶されており、基盤面地震動作成モジュールのインプットデータとして引き渡される。

タイトル: kaiyou-gata	
解析対象サイト	震央地点
緯度 (度): 35.620	緯度 (度): 35.200
経度 (度): 139.750	経度 (度): 139.300
基盤深さ (km): 2.300	震源深さ (km): 50.000
実行 キャンセル	マグニチュード: 7.900

図-5 入力画面例

(4) 基盤面での地震動作成モジュール

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模擬地震動を発生させる。

本モジュールでは、ターゲットスペクトルポイント、位相の乱数初期値、収れん計算の判定条件がインプットデータとして必要であるが、ターゲットスペクトルポイントは、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、判定条件はデフォルト値が自動入力されている。したがって通常の利用において、システム利用者は乱数初期値のみを入力すればよい。また、乱数初期値を変化させることにより、同一ターゲットスペクトルに対して複数の模擬地震波を発生させることもできる。

位相は0～2πの乱数として与え、図-6に示す

Jenings型の包絡関数を設定している⁹⁾。Jenings型包絡関数は以下に示すようにマグニチュードの関数である。

$$T_a = \{0.16 - 0.04(M - 6)\} \cdot T_c \quad \dots (4a)$$

$$T_b = \{0.54 - 0.04(M - 6)\} \cdot T_c \quad \dots (4b)$$

$$T_c = 10^{(M-2.5)/3.23} \quad \dots (4c)$$

$$0 \sim T_a \quad g(t) = \left(\frac{t}{T_a}\right)^2 \quad \dots (5a)$$

$$T_a \sim T_b \quad g(t) = 1.0 \quad \dots (5b)$$

$$T_b \sim T_c \quad g(t) = e^{-(t-T_b)/(T_c-T_b)} \quad \dots (5c)$$

$$T_c \sim T_{end} \quad g(t) = 0.05 + \frac{0.05(T_{end}-t)^2}{(T_{end}-T_c)^2} \quad \dots (5d)$$

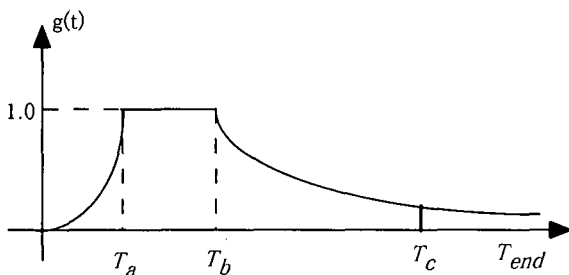


図-6 Jenings型包絡関数

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データは、EWS上のメモリに記憶されているとともに、必要であれば外部記憶装置に保存することもできる。

(5) 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は、地盤の諸条件を入力することになる。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。

(3)～(5)のモジュールにおいて、インプットデータとして、図-1に示したGIS上のDBが完成すれば、よりユーザーフレンドリーなシステムになると考えられる。

(6) 質点系弾塑性動的解析モジュール

ここでは、(5)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。

(7) 統計処理モジュール

(6)のモジュールで計算された複数の解析結果に基づき、各応答値に関して、それぞれ最大値、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。さらに、それぞれの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。

4. 適用例

本システムを、実際の耐震診断・耐震補強業務に適用した事例を以下に報告する。

(1) 建築物の耐震診断

阪神・淡路大震災以降、構造物の耐震安全性に関する一般の人々の関心が高まり、建築建物の耐震診断業務が増加している。

通常、建築建物の耐震診断は、(財)日本建築防災協会による耐震診断基準¹⁰⁾に従い行われる。RC造建築物の場合、耐震性能を耐震指標Is値により判定することになる。Is値の算定には判定の詳細度により第1次診断から第3次診断までがある。第1次診断は基本的に構造物の延床面積壁率と柱率より算定される。第2次診断では柱および壁の終局強度や破壊形式、塑性率から求まる靱性指標などにより算定される。第3次診断ではフレームの降伏形状、壁の基礎

回転なども考慮しより詳細に算定されることになっている。一般に、診断次数が高くなるほど診断結果の信頼性は向上するといわれているが、診断に要する時間と労力も増加する。

耐震診断を実施し、耐震性能に問題があった場合、耐震補強を行うことになるが、補強を実施する前に補強効果の確認が必要となる。この際、上記の耐震指標のみでなく、動的解析による耐震性評価も行うことが多くなってきている。耐震診断業務自体が増加している状況でこれらの業務を効率よくこなすことが現在の課題となっている。そこで、本システムを耐震補強の効果確認業務に適用し、精度良い耐震補強の効果確認を行うとともに、システムの有用性を検証することとした。

(2) 適用建物と想定地震

東京都に建つRC造5階建建物の耐震診断・耐震補強業務に本システムを適用した。想定地震としては、東京都防災会議によるもの¹¹⁾を参考とし、相模トラフに発生する海洋型地震と、プレート内に発生する直下型地震を考えた。図-7に建物位置(十)と想定地震震源位置(●)の関係を、表-2に想定地震の諸元を示す。



図-7 建物位置と想定地震震源位置の関係

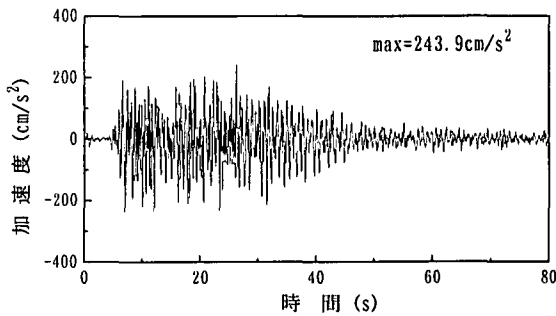
表-2 想定地震の諸元

種別	震源位置(°)		震源深さ(km)	マグニチュード
	北緯	東経		
海洋型	35.20	139.30	50	7.9
直下型	35.64	139.84	20	6.9

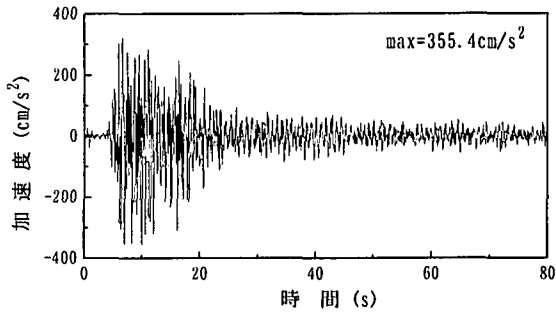
図-7において●1が海洋型地震の、●2が直下型地震の震源位置を示している。なお、本建物敷地周辺地盤は第2種地盤に属している。

(3) 地表面地震波

4. (2)で想定した地震波により、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。作成した模擬地震波の加速度時刻歴を図-8に、加速度応答スペクトルを図-9に示す。(a)は海洋型地震を、(b)は直下型地震を表している。海洋型地震および直下型地震の最大加速度はそれぞれ、 243.9cm/s^2 と 355.4cm/s^2 となった。



(a) 海洋型



(b) 直下型

図-8 加速度時刻歴波形

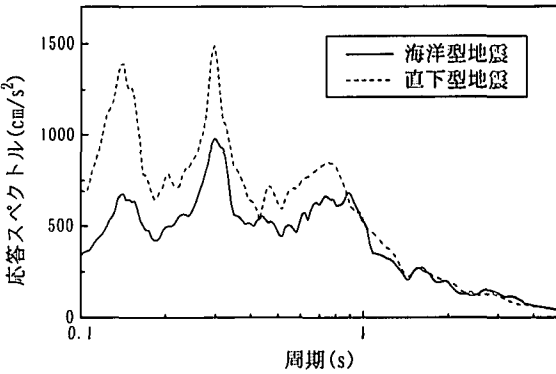


図-9 加速度応答スペクトル

(4) 解析モデル

RC造5階建建物を、図-10に示すような5質点のバ

ネー質点系モデルに置換した。本建物は純RC造であるが、耐震診断の結果耐震性能に問題のあることが分かった。そこで耐震補強法として、

- i) 耐震壁補強案
- ii) 耐震壁+ブレース補強案
- iii) 炭素繊維補強案

の3種類を考えた。それぞれの補強案により設計したモデルを検討し、図-11に示すような復元力特性を設定した。

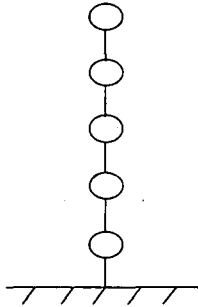


図-10 解析モデル

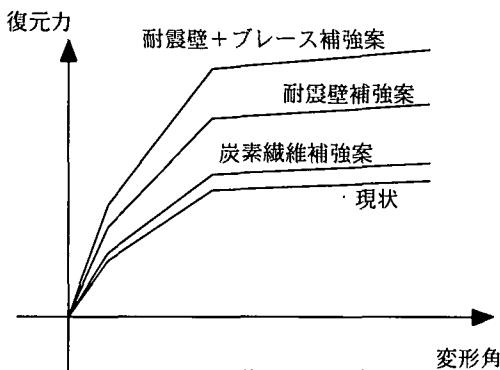


図-11 復元力特性

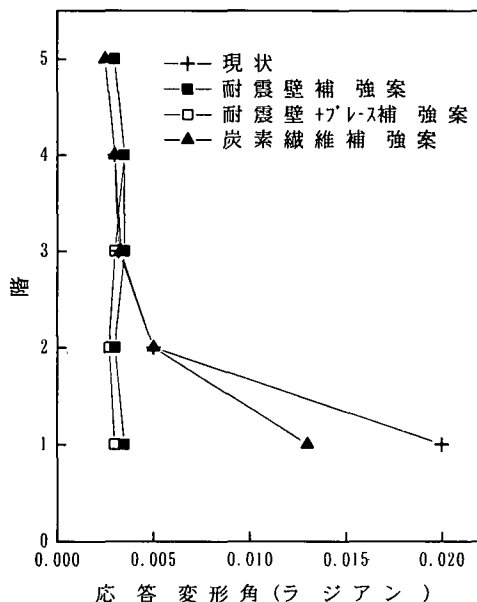


図-12 応答変形角の高さ方向分布

(5) 解析結果

海洋型地震波および直下型地震波計による動的応答解析を行い応答の平均値を算出した。図-12に応答変形角の高さ方向分布(両波の平均値)を示す。

図より、現状のままでは、1階部分において層崩壊が生じる危険性があるが、耐震補強案 i), ii), iii)により、耐震性能が向上すること、および耐震補強案 i), ii)が案 iii)よりも効果的であることが分かった。最終的にはコスト等を勘案し i)耐震壁補強案が最良であると判断した。

(6) システム利用による効果

本システムの開発前後において、業務の効率や信頼性がどのように改善されたかについて検討する。

本システム開発前には、模擬地震波の作成業務はごく一部の構造設計者を除いて、自らが行うことはほとんどなく、研究部門の地震関連の専門家に業務委託を行うのが通例であった。ここでは、担当者間の入念な打合せが必要となり、多大なコストと時間が必要とされていた。そのため、作成する模擬地震波も必要最小限に限られることが多かった。

一方、本システム開発後、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。また、本システムでは、GUIを利用することで、複数の模擬地震波を作成することが容易に行えるため、多数の入力地震波による動的解析の実行も可能となった。入力される地震波によって動的解析結果は異なることが一般的であるため、複数の地震入力による解析を行うことは、結果の信頼性の改善にも貢献している。すなわち、これは従来できなかったことをシステム化によって可能としており、業務の高度化がはかれたといえる。

本適用事例において、今回開発したシステムを用いることで従来よりも効率的に耐震補強業務を行えることを確認した。効率化の程度を定量的に評価することは業務が高度化したため難しいが、利用者からのアンケートによれば、コスト、時間ともに大幅に短縮しているとの評価を頂いている。

ただし、現状のシステムでは、想定地震を入力する際に、文献等を参照する必要がある残されており、

GISによるDB構築の必要性が再確認された。

5. 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。

(1)対話型・可視化型のシステム構成とすることで、利用者のシステムに対する親和性を高め、地震動に関する専門的知識が無くても、模擬地震波の発生から動的解析までを行うことが可能な統合システムを構築することができた。

(2)複数の地震波による動的解析に対応したシステムとしたので、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。

(3)実際の耐震診断・耐震補強業務に本システムを適用し、従来の方法と比較してコストおよび時間が大きく短縮されることを確認した。また、本システムを利用することにより、業務の高度化をはかることができた。

(4)各実行モジュールを独立して設計することにより、個々のモジュールの修正・改良に際して、システム全体の変更を必要とせず、各種機能を容易にバージョンアップができる構成が可能となった。

本システムの開発、およびその適用を通して以下のような課題も明らかとなった。

(1)GUIにより、ユーザーフレンドリーなシステムを目指したが、より利用者が簡易に使用するためにはGIS上に歴史地震DBや地下構造DB等を構築しておくことの重要性が認識された。これらのDBは現在構築中である。

(2)模擬地震動作成には、想定する地震の選定、作成の手法、および解析パラメータの設定等に専門的な知識が必要となる場面もあり、本システムだけでは対応しきれない状況も考えられる。今後、エキスパートシステム技術等を導入し、システム内部に専門家の知識ベースを構築する等の改善を行っていく

必要があると考えられる。

(3)本システムは、建築のRC構造物だけでなく土木構造物にも有効であり、今後その適用をはかりたい。

謝辞

本研究を実施するにあたり、模擬地震波作成モジュールに関して、(株)竹中工務店技術研究所阿部康彦氏に多大なるご協力を頂いた。また、4.において、同東京本店設計部藤村勝氏、若林博氏の両氏には本システムを実際の耐震診断・耐震補強業務に適用していただき、システム構築に対して有益なコメントを頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1)(社)土木学会：土木構造物の耐震基準に関する「第二次提言」，1996.
- 2)(社)日本建築学会：建築および都市の防災性向上に関する提言(第三次提言)，1998.
- 3)(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.
- 4)北原武嗣，瀬谷均他：RC造高層建物の地震波の変動による応答のばらつきに関する研究，日本建築学会大会(東京)梗概集，1993.
- 5)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.
- 6)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.
- 7)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.
- 8)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.
- 9)大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994.
- 10)(財)日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説 改訂版，1991.
- 11)東京都防災会議：東京都地域防災計画 震災編，1997.