

FEMによる鉄筋コンクリート造構造物の非線形地震応答解析法

Nonlinear Seismic Response Analysis Method for Reinforced-Concrete Structures Using FEM

二 村 有 則 森 川 博 司
小 磯 利 博 坂 敏 秀

要 約

FEMによる鉄筋コンクリート(以下, RC)造構造物の地震応答解析では, RC造構造物特有の強非線形挙動に対する解析精度の課題に加え, 解析モデルの大規模化や長周期地震動のように継続時間が長い地震動が対象となることから, 解析時間が膨大となるという課題がある。そこで, RC造耐震壁の振動台実験を対象に非線形地震応答解析法の検討を行い, 適切な解析精度となる時間積分法と時間刻みの検討を行った。この結果に基づき, RC造壁式構造物の東北地方太平洋沖地震(以下, 3.11地震)観測記録及び20層縮小RC造建物の震動台実験のシミュレーション解析を実施した。その結果, 解析規模や非線形性に依りて適切に非線形地震応答解析法を選択することで, 精度良く実用的な解析時間でFEMによるRC造構造物の地震応答解析が可能であることが分かった。

目 次

- I. はじめに
- II. RC非線形構成則の概要
- III. 非線形地震応答解析法の検討
- IV. 大規模モデルへの適用
- V. まとめ

I. はじめに

RC造構造物の地震時挙動を詳細に評価する解析手法の一つとしてFEMがある。外力を受けるRC構造は, コンクリートのひび割れや圧縮破壊といったひずみ軟化を伴う強非線形挙動を示すコンクリートと降伏が生じる鉄筋からなり, 破壊まで解析することは困難を伴う。これまでの研究開発により, RC部材の静的繰り返し解析については破壊に至る実験結果を追跡することが可能となり, 構工法開発^{例えば1),2)}や構造設計などの構造性能評価に適用されている。

一方, FEMによりRC造構造物の地震応答解析を行うためには, RC特有の強非線形挙動の評価に加え, 解析モデルの大規模化や長周期地震動のように継続時間の長い地震動を対象とすることから解析時間の増大が課題となる。これらの課題に対し, 筆者らは非線形地震応答解析法の高速度の研究^{3),4)}を進めている。また, 以前は地震応答結果に関する実データが静的実験結果に比べ非常に少なく解析結果の妥当性検証が難しかったが, 現在では徐々に実データが蓄積されつつあり検証が可能となってきた。

そこで本研究では, FEMによりRC造構造物の地震応答解析を精度良く実用的な解析時間で行うことを目的として検討を行った。最初に, RC造耐震壁振動台実験のシミュレーションにより, 時間

積分法及び非線形問題求解法の選択と, 時間刻みが解析時間と解析精度に及ぼす影響の検討を行った。この検討結果に基づき, RC壁式構造物の3.11地震の観測記録及び20層縮小RC造建物の震動台実験に対し, FEMによる地震応答解析を実施し, 解析精度と解析時間の検証を行ったので報告する。

II. RC非線形構成則の概要

検討には, RC非線形FEM解析プログラムCARC-ASe^{5),6)}を用いた。以下に採用しているRC構成則の概要を示す。

コンクリートは分布ひび割れモデルとし, シェル要素では, 斜めひび割れと水平ひび割れを表現できる前川らの非直交4方向ひび割れモデルを採用している。ソリッド要素では, ひび割れ発生によって3平面を規定し, 各平面で非直交4方向ひび割れモデルにより応力を算定し, その3平面の重ね合わせによって3次元応力を評価する多方向ひび割れモデルを採用している。

コンクリートの圧縮側包絡線はFafitis-shahモデルを, 引張側包絡線は出雲らのモデルを用いている。繰り返しのルールは前川らのモデルを基に, 除荷曲線を3次元曲線としている。鉄筋の繰り返し応力下の履歴モデルはZulfqar-Filippouモデルを用いている。コンクリートと鉄筋を繋ぐボンド要素の付着力-すべり関係には, 森田・藤井のモデルを劣化及び繰り返しを考慮できるように拡張したモデルを用いている。

構成則及び出典については, 文献5),6)を参照されたい。

III. 非線形地震応答解析法の検討

コンクリート構造物の非線形FEM解析では, コンクリートのひ

キーワード: 鉄筋コンクリート, FEM, 非線形, 地震応答解析, 数値解析法

Keywords: Reinforced concrete, FEM, Nonlinear, Seismic response analysis, Numerical analysis method

びわれや圧縮破壊などひずみ軟化する破壊現象などの強非線形性を時々刻々追跡する非線形問題となることから、精度の良い解を得るためには時間刻みを十分に細かくする必要がある。また、解析モデルの大規模化や、地震応答解析では解析ステップが多いことから膨大な解析時間が必要となり、高速化のために時間積分法の選択が重要となる。

一般的には、時間積分法として Newmark β 法(平均加速度法)が、非線形問題の求解法として接線剛性法(Newton 法)と初期剛性法(修正 Newton 法)が多く用いられている。

その他の時間積分法の一つとして、無条件安定陽解法²⁾(以下、Chang 法)がある。小磯らは、建物を部材単位でモデル化したフレームモデルの非線形地震応答解析に Chang 法を適用し、解析速度の向上に効果的であることを報告³⁾している。しかしながら、RC 造構造物のような強非線形挙動を示す構造物への適用事例は少ない。

ここでは非線形数値解析法の概要を示し、RC 構造の非線形問題求解法と地震応答の時間積分法について、シミュレーション解析を通して時間刻みと解析精度の検討を行う。

1. 時間積分法の概要

1 自由度系の運動方程式を式(1)に示す。ここで m は質量、 c は減衰係数、 k は剛性で、 k は復元力の非線形性に伴い変動する。 a, v, d はそれぞれ加速度、速度、変位、 f は外力を示す。地動入力の場合、外力は質量と地動加速度 α の積で表される。右下添え字は解析時間ステップを示す。

$$ma_{n+1} + cv_{n+1} + kd_{n+1} = f_{n+1} = -m\alpha_{n+1} \tag{1}$$

一般に、速度や変位は式(2)~式(3)で表すことができ、定数 $\beta_1 \sim \beta_3$ の与え方により時間積分法の特性が定まる。

$$v_{n+1} = v_n + \frac{1}{2} dt(a_n + a_{n+1}) \tag{2}$$

$$d_{n+1} = d_n + \beta_1 dt v_n + \beta_2 dt^2 a_n + \beta_3 dt^2 a_{n+1} \tag{3}$$

ここで、 dt は時間刻みである。平均加速度法の場合、定数 $\beta_1 \sim \beta_3$ は、式(4)~式(5)のようになる。 $\beta_3 \neq 0$ なので、 $(n+1)$ ステップの変位 d_{n+1} を求めるには、式(1)~式(3)を連立させて解く必要がある。

$$\beta_1 = 1.0 \tag{4}$$

$$\beta_2 = \beta_3 = \frac{1}{4} \tag{5}$$

一方、高速な時間積分法である Chang 法は各係数を式(6)~式(8)のように定める。

$$\beta_1 = \frac{1 + h\omega dt}{1 + h\omega dt + 1/4(\omega dt)^2} \tag{6}$$

$$\beta_2 = \frac{1/2}{1 + h\omega dt + 1/4(\omega dt)^2} \tag{7}$$

$$\beta_3 = 0 \tag{8}$$

ここで、 $2h\omega = c/m$ 、 $\omega^2 = k/m$ である。 $\beta_3 = 0$ より、 $(n+1)$ ステップの変位 d_{n+1} が前ステップの応答から陽に求められる。Chang 法の詳細は文献 3),4)を参照されたい。

平均加速度法では、接線剛性を用いた増分解析や収束計算が必要となり、多くの計算負荷が発生する原因となっている。一方、Chang 法では、剛性マトリックスの再構築や収束計算が不要であることか

ら、計算効率の向上が図れるが、精度の良い解を求めるためには十分に時間刻みを小さくする必要がある。

2. 非線形問題求解法の概要

前述の平均加速度法では、収束計算が必要となる。その方法として、Newton 法と修正 Newton 法が多く用いられる。簡単のため静的な釣り合い方程式を対象とした概要を Fig.1 に、釣り合い方程式を式(9)に示す。ここで $R(d)$ は内力を示す。また、変位 d_r での残差力 $\Psi(d_r)$ は(10)式より求まる。

$$f = R(d) \tag{9}$$

$$\Psi(d_r) = f - R(d_r) \neq 0 \tag{10}$$

(1) 接線剛性法(Newton 法)

非線形問題において、釣り合い方程式を満足しない残差力 Ψ から各ステップの変位により求めた接線剛性をもとに変位を改良し、条件を満足するまで反復する方法である。増分変位 Δd_{r+1} は(11)式で求まる。各反復時に剛性マトリックスの再構築・三角分解が必要である。

$$\Delta d_{r+1} = [k(d_r)]^{-1} \cdot \Psi(d_r) \tag{11}$$

(2) 初期剛性法(修正 Newton 法)

初期剛性をもとに変位を改良し、条件を満足するまで反復する方法であり、各反復時に剛性マトリックスの再構築・三角分解を必要としない。増分変位 Δd_{r+1} は(12)式で求まる。なお、初期剛性として、弾性剛性を用いる場合や、収束計算を行う前の剛性を用いる場合がある。Fig.1 の修正 Newton 法の図は収束計算を行う前の剛性を用いた場合の例である。

$$\Delta d_{r+1} = [k(d_0)]^{-1} \cdot \Psi(d_r) \tag{12}$$

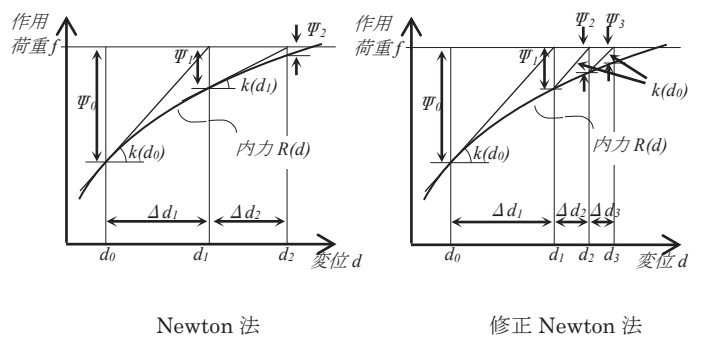


Fig.1 収束計算法 (Convergence Calculation Method)

3. RC 造耐震壁振動台実験による検討

(1) 振動台実験シミュレーション

解析対象とした実験は、(財)原子力発電技術機構で実施された RC 造 H 型耐震壁振動台実験⁴⁾であり、既報⁵⁾でシミュレーション解析を実施している。Fig.2 に解析モデルを示す。解析モデルは、試験体が加振直交方向に対称であることから 1/2 モデルとした。ウェブ

とフランジは積層シェル要素で、上部下部スラブと重錘は弾性ソリッド要素でモデル化し、下部スラブ下面はすべて固定としている。

入力には振動台上で計測された水平加速度を用いており、数値積分の時間刻みは原波の計測間隔を16分割して 6.25×10^{-3} sec とし、減衰は弾性1次固有周期に対し、1.1%の初期剛性比例型減衰を与えた。時間積分には平均加速度法を用い、Newton法で内力最大値に対する残差力が0.1%となるまでの収束計算を行った。解析ケース名をNW16と称す。

実験は、入力レベルの小さいRUN1から破壊に至ったRUN5まで加振レベルを増大させて加振している。解析でも実験同様に5波を連続して解析した。ここでは、せん断すべり破壊に至ったRUN5について解析結果をFig.3に示す。RUN5の実験時せん断すべり破壊の生じた4秒付近までは変位、加速度とも実験を捉えている。

(2) 非線形地震応答解析法の比較

時間積分法は平均加速度法とChang法、非線形問題求解法はNewton法と修正Newton法(弾性剛性と各ステップの初期剛性)、及び、それぞれの時間刻みをパラメータに解析を実施し、前節で述べた解析結果(NW16)と比較を行い解析精度と解析時間を検討した。入力地震波の時間刻みに対し、1分割(1次周期比:1/75)、2分割(1/150)、4分割(1/300)、8分割(1/600)、16分割(1/1200)と刻みを細かくした。

Table 1に検討ケースと精度の評価結果を3段階(◎○△)で表示するとともに解析時間を合わせて表示した。解析はCore i7 3.5GHzのPCを使い、1コアで実行した。精度の評価クライテリアは、慣性力と変位の正負最大値のNW16との差の平均で、◎は1%未満、○は1%以上、4%未満、△は、4%以上10%未満である。Chang法1分割は誤差が大きいため除外した。Fig.4には、代表的な検討ケースの慣性力-変位関係をNW16と比較して示している。ケース名は、NWはNewton法を、MNは修正Newton法-弾性剛性を、MNkは修正Newton法-各ステップの初期剛性を用いたケースを表しており、数字は分割数を表している。図の上段は○のケース、下段は◎のケースを示している。本例題のような強非線形時のRC造構造物の解析では、平均加速度法・Newton法では、1分割以上(周期比1/75)、平均加速度法・修正Newton法は両ケースとも1分割以上(周期比1/75)、Chang法では、4分割以上(周期比1/300)で、強非線形時のRC造構造物のシミュレーション解析が可能と思われる。なお、図には示していないが、Chang法の2分割のケースでは、最大耐力以降の変形を若干小さく評価しているが、最大耐力をとらえており、弱非線形領域の解析には、十分採用可能と思われる。

以上より、平均加速度法は時間刻みが比較的粗くても良好な精度が得られるが、収束計算が必要となるため解析時間が長くなる。今回の検討では、平均加速度法の中では剛性に収束計算前の剛性を用いた修正Newmark法が最も効率が良かった。一方、Chang法は平均加速度法よりも高速であるが十分に細かい時間刻みが必要となる。これらのことを踏まえると、比較的解析時間の短い中小規模モデルを対象とした場合には安定的に解ける平均加速度法が、解析時間が

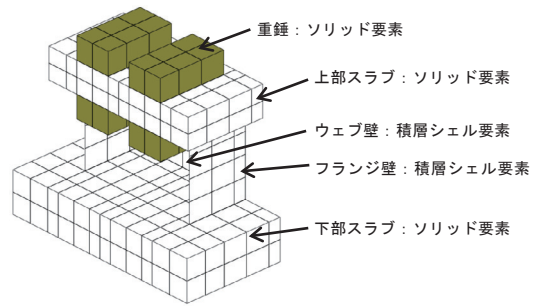


Fig.2 解析モデル (Analytical Model)

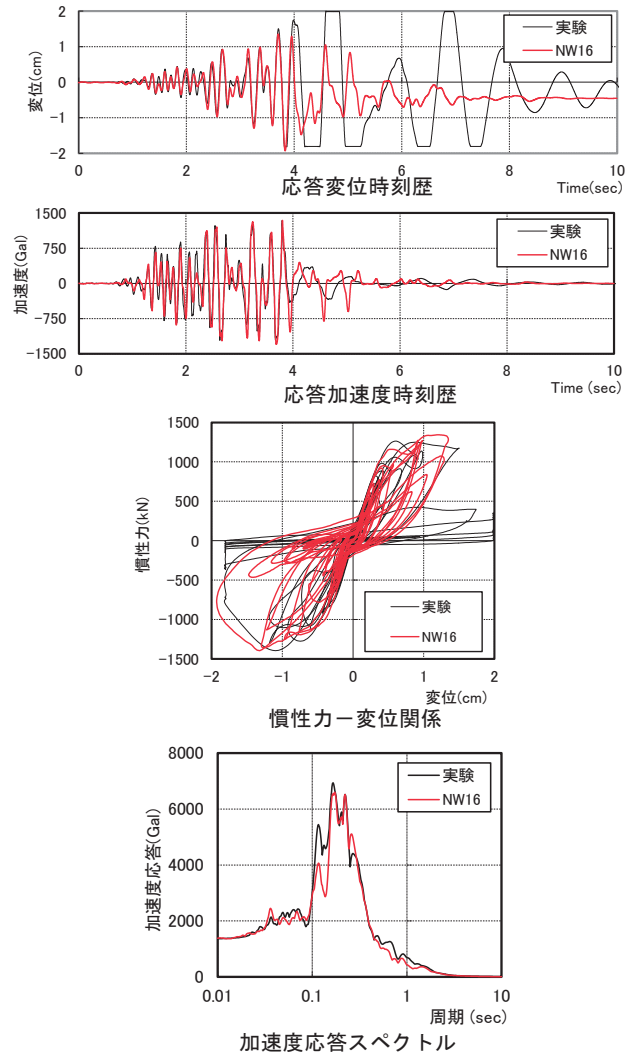


Fig.3 RUN5 解析結果 (Analysis Results in RUN5)

Table 1 各手法の比較 (Comparison of Methods)

時間積分法	非線形解法 (ケース)	時間刻み					
		1次周期比	1/75	1/150	1/300	1/600	1/1200
		分割数	1	2	4	8	16
平均加速度法	Newton法(NW)	○(2231)	◎(2779)	◎(3451)	◎(4312)	◎(5870)	
	修正Newton法-弾性(MN)	○(1357)	◎(1664)	○(1935)	○(2349)	○(2975)	
	修正Newton法-初期(MNk)	○(903)	◎(1290)	◎(1714)	◎(2253)	◎(3369)	
Chang法(CH)			△(275)	○(393)	◎(848)	◎(1463)	

評価 (解析時間: 秒)

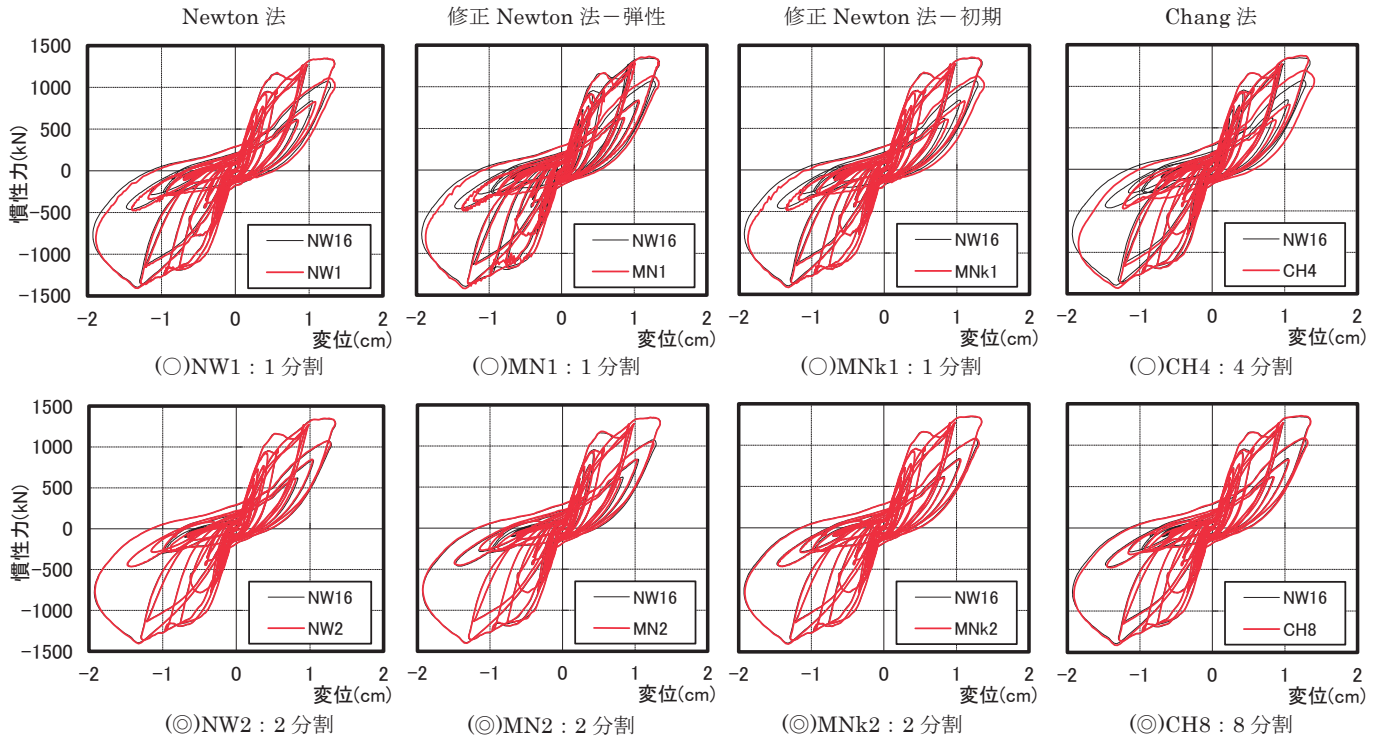


Fig.4 代表的な慣性力-変位関係(NW16 と比較)
(Representative Inertial Force - Displacement Relationship)

長くなる大規模モデルではより高速な Chang 法が適切と考えられる。

IV. 大規模モデルへの適用

RC造壁式建造物の地震観測記録及び縮小20層RC造建物の震動台実験のシミュレーションを行い、FEMによる地震応答解析の適用性を検討した。

1. RC造壁式建造物

(1) 建物及び解析概要

解析対象とした実建物は、方形なRC造壁式建造物(一部S造)である。3.11地震時の観測記録が得られており⁹⁾、シミュレーション解析を実施した。

解析対象の概要をTable 2及びFig.5に示す。平面形状は41m×40m、基礎版底面からの高さは30.65mである。図中の●は計測位置である。解析モデルをFig.6に示す。耐震壁・床を積層シェル要素、柱・梁をビーム要素、屋根トラスをロッド要素でモデル化した。地盤バネは、地下2階基礎版の各節点に3方向独立バネを支配面積に応じて配置した。節点数約2.6万、自由度数約15.4万の大規模モデルである。

入力地震波は、地下2階基礎版上の観測記録から底面ばね外の入力地震動を逆算して作成した。Fig.7に逆算して求めた入力地震波を示す。解析は水平上下3方向を入力し、地震発生30秒後から100秒間について実施した。

コンクリートの圧縮強度は実測値 53N/mm²を用い、ヤング係数・引張強度は3.11地震の直前に生じた中小地震3.9地震観測記録を元に低減して用いた。材料定数の低減方法の詳細は文献9)を参照されたい。減衰はNS方向1次及び2次周期を選定したレーリー減

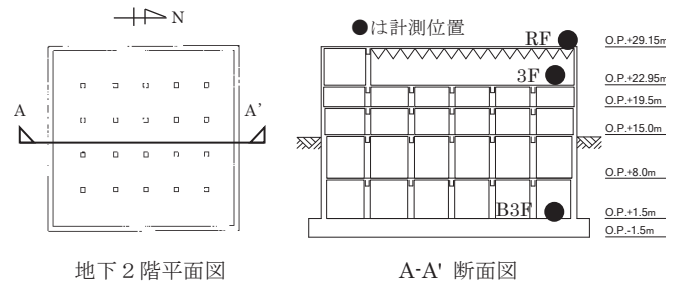


Fig.5 RC造建造物概要⁹⁾(RC Building Overview)

Table 2 RC造建造物概要(RC Building Overview)

構造	RC造(一部S造)
階数	地上3階, 地下2階
基礎	厚さ3mのべた基礎(岩盤上に設置)
平面形状	NS方向41m×EW方向40m(地上階)
高さ	基礎版底面から30.65m(地上高さ14.35m)
壁厚	1m(地下2階)~0.4m(地上3階)
床厚	0.3m

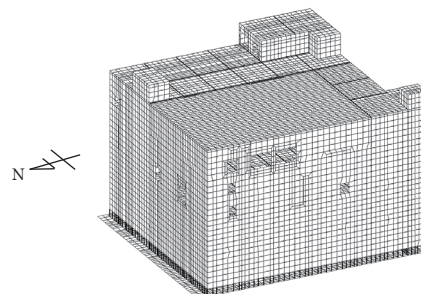


Fig.6 解析モデル(Alytical Model)

衰 3%とした。

解析対象が大規模モデルであること、地震の継続時間が長いことから Chang 法で解析検討を行った。実際の構造物の損傷が小さく、非線形性が低いことを踏まえ、弾性周期比で約 1/160 となる時間刻み 10 分割で実施した。なお、解析時間は Chang 法(10 分割)で約 60 時間に対し、修正 Newton 法(刻み 4 分割)では約 300 時間と 5 倍の解析時間がかかっており、Chang 法は解析時間の短縮に効果的であった。解析は Core i7 3.5GHz の PC を使い、4 コアで並列計算を行った。

(2) 解析結果

Fig.8 に 3.11 地震の観測記録と解析結果の加速度応答スペクトルの比較を示す。解析結果は、上下方向については対応が十分とはいえないが、水平成分については卓越周期など比較的良く対応した。このことから、直前までの地震の影響を考慮した材料定数を設定することで、概ね観測記録を再現できることが分かった。また、解析結果によれば、コンクリートにひび割れは生じているものの鉄筋は弾性範囲となっており、本 RC 造構造物の健全性を確認した。

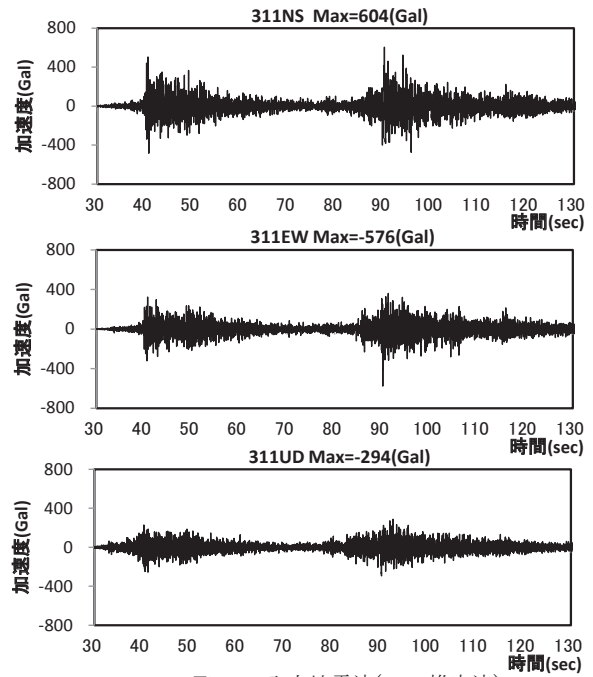


Fig.7 入力地震波(3.11 推定波)
(Input Earthquake)

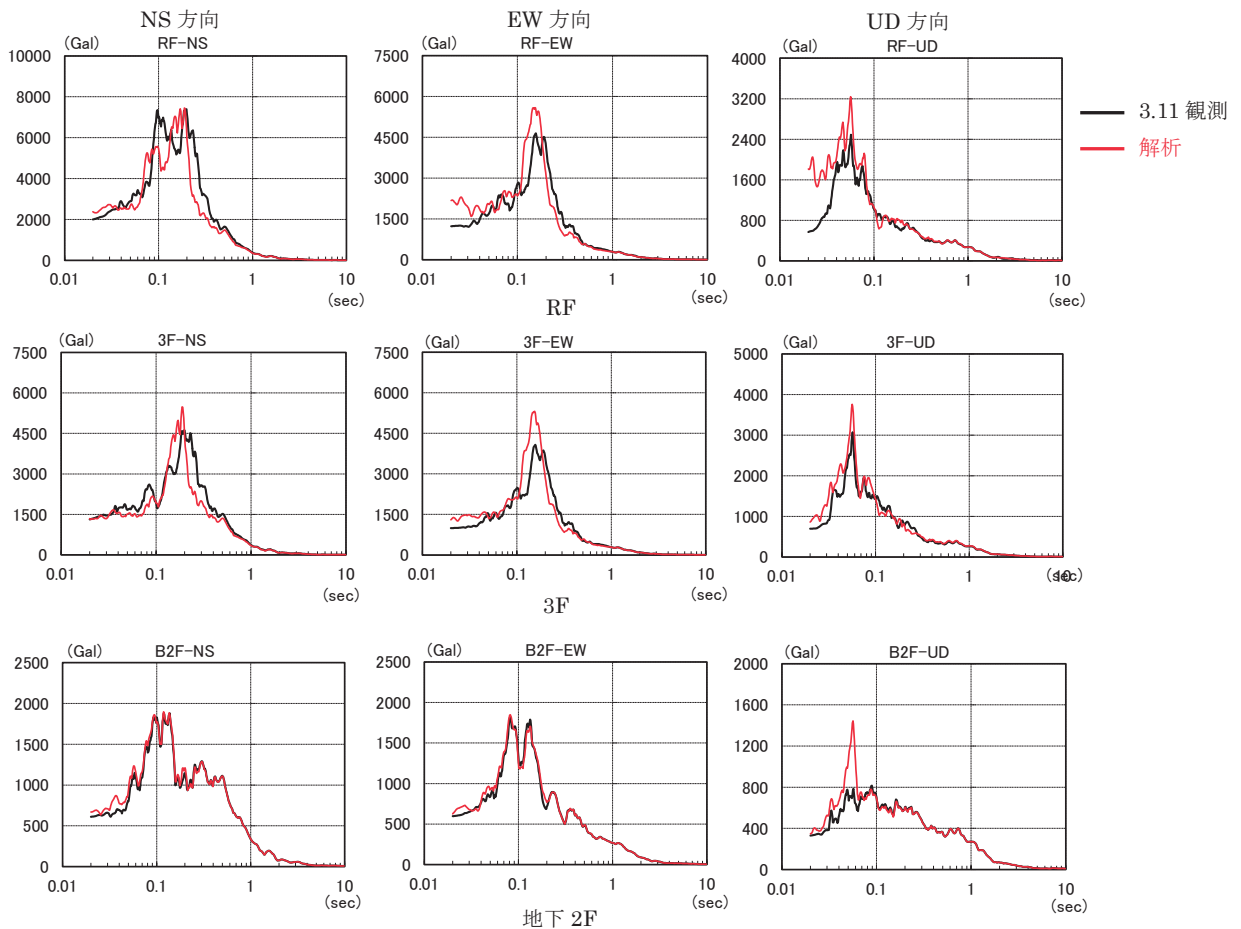


Fig.8 加速度応答スペクトルの比較
(Comparison of Acceleration Response Spectra)

2. 20層縮小RC造建物の震動台実験

(1) 実験概要

解析対象とした実験は、平成23年度及び平成24年度国土交通省建築基準整備促進事業課題27-1「長周期地震動に対する鉄筋コンクリート造建築物の安全性検証方法に関する検討」の一環として行われ、独立行政法人防災科学技術研究所の実大三次元震動破壊実験施設E-ディフェンスにて震動台実験^{17), 18)}が実施された。

試験体形状をFig.9及びPhoto1に示す。試験体縮尺は1/4とし、2×3スパンで各スパン1625mm、階高750mmの20層である。柱・梁断面はそれぞれ225×225mm、150×200mm、スラブ厚さは80mmである。スタブなどの基部を除いた試験体重量は3557kNである。

コンクリートの圧縮強度は下層階で100.4N/mm²、上層階で43.5N/mm²であった。主筋はSD390及び490、補強筋はSD295AとSHD685を用いている。

加震は、段階的に加震レベルを増大させている。主要加震ケースは、Table3の5ケースである。加震ケース1-5~2-6は東北地方太平洋沖地震による東京都での観測地震波を3方向に、加震ケース3-2及び3-5は南海トラフ地震を想定した愛知県での模擬波(島津波)をX方向に加震している。

実験の詳細は、文献10),11)を参照されたい。

(2) 解析モデル

解析モデルをFig.10に示す。コンクリートはソリッド要素でモデル化した。柱・梁主筋はロッド要素でモデル化し、コンクリートとは付着によるすべりを考慮した。なお、梁主筋は1段に3本配置された場合、2本に集約してモデル化した。スラブ筋・補強筋はソリッド要素の分布鉄筋としてモデル化した。基礎スタブは弾性とした。節点数は約48万節点、約143万自由度となった。

試験体重量は、ソリッド要素の単位体積重量で与えた。重錘重量については、基礎スタブを除いた重量が3775kNとなるように、スラブの単位体積重量に付加した。

コンクリート及び鉄筋の材料特性は材料試験結果を用いた。圧縮強度以後の圧縮軟化特性はNakamuraらによる破壊エネルギーモデル¹²⁾に近似するように設定した。鉄筋の第2剛性は初期剛性の1/1000とした。減衰は初期剛性比例型減衰0.3%とした。

地震応答解析は解析時間が膨大になることから、非線形挙動が大きくなる後半の3ケースに対し連続で解析した。なお、各ケースは主要動を含む60秒間に絞って実施した。Fig.11にケース3-5の入力地震波を示す。

解析モデルが大規模であることから、時間積分法にはChang法を用いた。時間刻みは入力地震波を4分割しており、弾性1次周期比で約1/380となっている。

(3) 解析結果

固有値解析結果をTable4に示す。解析結果は実験結果をほぼ捉えている。

加震ケース3-5の解析結果を示す。Fig.12は最上階応答変位時刻歴波形及び応答加速度時刻歴波形、Fig.13は最上階加速度応答スペクトルである。Fig.14にひび割れ・変形状態の例を示す。

変形は実験結果と比べて幾分小さめの応答となっているものの振動周期などの性状は概ね対応している。加速度応答スペクトルの比

較でも、応答は小さめながら概ね1次ピークを捉えている。

実験の損傷状態は、13階までの梁主筋の降伏と下層階の柱主筋の降伏が確認されている。解析では2~12階までの梁主筋の降伏と下層階の柱主筋の降伏が生じており、実験よりも損傷範囲は幾分小さいものの傾向は捉えている。

解析時間は、ケース3-5の最初の1000step分について1コアで修正Newton法(1分割)とChang法(4分割)の比較した場合、修正Newton法は、Chang法の約4.3倍の計算時間がかかった。Table1の精度のクライテリアでは両方とも○に相当するクライテリアの時間刻みである。シミュレーション解析ではChang法4分割で1波あたり約5日の解析時間がかかっている。シミュレーション解析では6コアで並列計算を行っており、1コアで修正Newton法と比較した結果とは単純には比較できないが、Chang法を用いていなかったら非現実的な解析時間となったことが予想できる。なお、解析はXeon E5 3.6GHzのPCを用いた。

以上より、FEMによるRC造構造物の地震応答解析について、Chang法を用いることにより高速かつ良好な精度で実施できたと

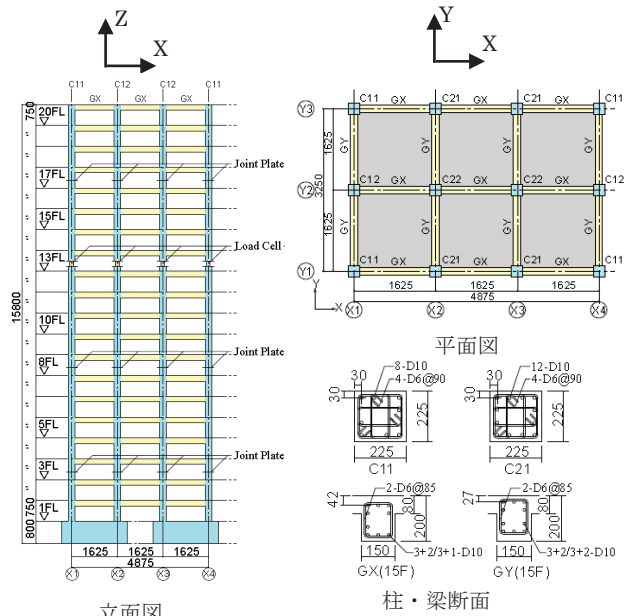


Fig.9 試験体形状¹⁷⁾
(Specimen Shape)

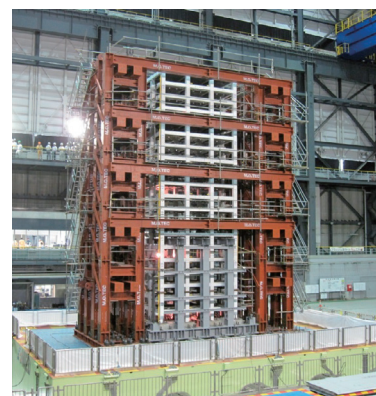
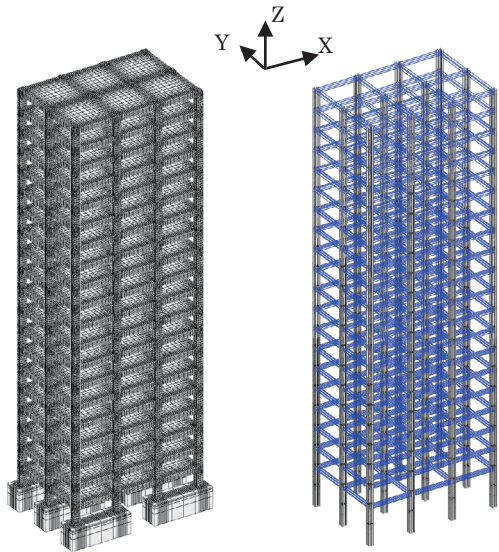


Photo 1 実験状況
(Experimental Situation)

Table 3 主要加震ケース
(Main Case)

加震ケース	波形名	倍率	方向
1-5	東京観測波	100%	3 方向
2-2	東京観測波	200%	
2-6	東京観測波	300%	
3-2	模擬波 (島津波)	150%	1 方向
3-5	模擬波 (島津波)	200%	



コンクリート(ソリッド要素) 柱・梁主筋(ロッド要素)

Fig.10 解析モデル
(Analytical Model)

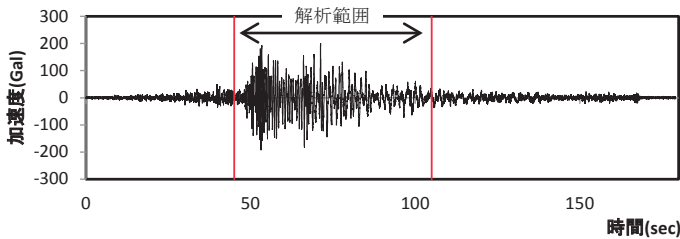


Fig.11 入力地震波(Case3-5)
(Input Earthquake)

Table 4 固有周期の比較
(Comparison of Natural Period)

	X 方向(sec)		Y 方向(sec)	
	実験	解析	実験	解析
1 次	0.51	0.48	0.56	0.53
2 次	0.16	0.16	0.17	0.17
3 次	0.09	0.09	0.09	0.09

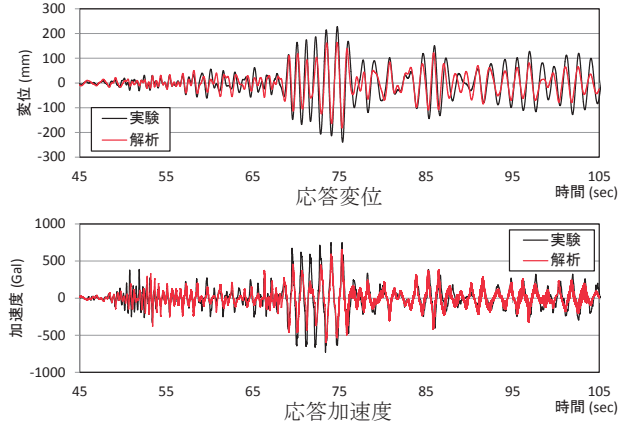


Fig.12 RF 水平変形及び加速度時刻歴波形(Case3-5)
(Time history of Horizontal Deformation and Acceleration in RF)

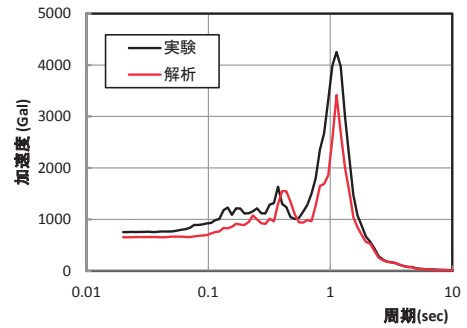


Fig.13 RF 加速度応答スペクトル(Case3-5)
(Acceleration Response Spectrum in RF)

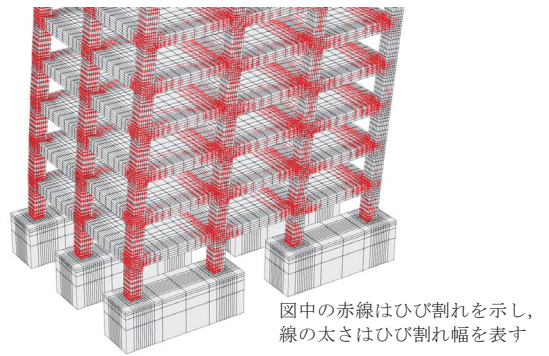


Fig.14 変形・ひび割れ状況の例
(Example of Deformed and Cracked States)

V. まとめ

- FEM による RC 造構造物の地震応答解析について、耐震壁振動台実験、壁式構造物地震観測記録、縮小 20 層建物震動台実験に対してシミュレーションを実施し、以下の結論を得た。
- ・時間積分法と非線形問題求解法に応じて、時間刻みを適切に設定することで、いずれも良好な結果が得られる。
 - ・平均加速度法は時間刻みが比較的粗くても収束結果を得られるが、収束計算を必要とするため、大規模モデルでは計算時間が増大する。
 - ・Chang 法は平均加速度法よりも時間刻みを細かくする必要がある

が、適切な時間刻みにすることで平均加速度法と同等の解析精度が得られる。収束計算を必要とせず、大規模モデルでは高速に解析が可能である。

- ・解析対象が中小規模モデルの場合には粗い時間刻みでも精度の良い平均加速度法が、解析時間が長い大規模モデルでは Chang 法が適切と考えられる。
- ・Chang 法を用いることで、大規模モデルによる RC 造構造物の地震応答解析を高速かつ良好な解析精度で実施できた。

参考文献

- 1) 二村有則, 森川博司, 丸田誠, 永井覚; RC 造 T 型合成梁の 3 次元 FEM 解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, 2008, pp.453-454.
- 2) 二村有則, 鈴木宏一, 閑田徹志, 浅岡茂; ひび割れ誘発目地付き RC 耐震壁の FEM 解析, 鹿島技術研究所年報, 第 57 号, 2009.9, pp.61-65.
- 3) 小磯利博, 石田雅利, 兵頭陽, 磯崎浩, 辻泰一; 無条件安定陽解法による高層建物の非線形地震応答解析, 鹿島技術研究所年報, 第 58 号, 2010.9, pp.63-68.
- 4) 小磯利博; 非反復型時間積分法の非線形 FEM 解析への適用性評価, 鹿島技術研究所年報, 第 63 号, 2015.11, pp.95-102.
- 5) 森川博司, 小磯利博, 福田隆介; 繰り返し荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物の非線形解析, 鹿島技術研究所年報, 第 54 号, 2006.9, pp.57-62.
- 6) 森川博司; ブラインド解析による鉄筋コンクリート造柱梁接合部の 3 次元 FEM 解析法の構築, 鹿島技術研究所年報, 第 60 号, 2012.9, pp.79-84.
- 7) Chang, S. Y. and Liao, W. I. ; An unconditionally stable explicit method for structural dynamics, Journal of Earthquake Engineering, Vol.9, No.3, 2005, pp.349-370.
- 8) T.Nagashima et al; Model test and inelastic analysis on dynamic response of RC shear walls, Transactions of the 13th International Conference of Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol.III, 1995, pp.199-204.
- 9) 森川博司ほか; 女川 2 号機制御建屋三次元非線形 FEM によるシミュレーション (その 1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, 2014.9, pp.1111-1114.
- 10) 杉本訓祥ほか; 縮小 20 層 RC 造建物試験体の長周期地震動による震動実験 (その 1~その 11), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013.8, pp.653-674.
- 11) 平成 24 年度「長周期地震動に対する RC 造建築物の安全性検証方法に関する検討」, 国立研究開発法人防災科学技術研究所「ASEBI」, (<https://www.edgrid.jp/>)
- 12) H.Nakamura, T.Higai; Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, modeling of inelastic behavior of RC structures under seismic loads, ASCE, 2001, pp.471-487.

Nonlinear Seismic Response Analysis Method for Reinforced-Concrete Structures Using FEM

Arinori Nimura, Hiroshi Morikawa, Toshihiro Koiso and Toshihide Saka

In this paper the nonlinear finite element method for reinforced-concrete structures under earthquake load is studied so as to enable such numerical analysis to be performed with adequate accuracy in an acceptable computing time. First, the efficient time integration method and the reasonable time increment were determined by numerical analysis of a shaking table test on a reinforced-concrete shear wall. Then, the responses of a reinforced-concrete structure observed in the 2011 Great East Japan Earthquake and the shaking table test of a 20-story reinforced-concrete building were simulated with the selected time integration method and the time increment. The results of these simulations demonstrate that the choice of the nonlinear earthquake response analysis method dependent on the size of numerical models and the extent of nonlinearity can yield numerical results with sufficient accuracy in an acceptable computing time.