

## 鉄筋コンクリート壁体のFEMによる正負繰返し及び動的解析

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE WALLS  
SUBJECTED TO REVERSED CYCLIC AND DYNAMIC LOADS

長沼一洋\*, 栗本修, 江戸宏彰\*\*

Kazuhiko NAGANUMA, Osamu KURIMOTO and Hiroaki ETO

Nonlinear finite element analyses have been performed for reinforced concrete wall specimens subjected to reversed cyclic loads or dynamic loads. The analyses employed previously proposed stress - strain hysteretic model of concrete incorporated with a multi-directional smeared crack model that can take account of six crack directions. It is found that the analyses reproduce experimental load - displacement hysteresis loops with relatively good correspondence not only for the statically loaded specimens but for the specimen failed by the shaking table test. Time histories of acceleration and displacement responses are also simulated reasonably well by the analyses.

**Keywords:** Seismic load, Dynamic response analysis, Hysteresis loop, Eigenvalue, Equivalent viscous damping factor  
地震力, 動的応答解析, 履歴ループ, 固有値, 等価粘性減衰定数

## 1. はじめに

地震時における鉄筋コンクリート耐震壁の挙動を把握する手法として、有限要素法(FEM)による解析は有力なツールになり得るが、解析結果が実験と同レベルの信頼性を得るために、基本的な材料構成モデルの適用性から、計算手法の妥当性に至るまで、数多くの実験結果との照合を通して、十分な検証を行っておく必要がある。

既に、地震力を静的な単調増加荷重として与える方法では、かなり良い精度で耐震壁の耐力や変形性状の予測が可能な段階にあり<sup>1), 2)</sup>、設計業務でも利用されるようになってきた。一方、実際の地震力を模擬して、正負交番の静的繰返し荷重を与える解析は、Darwinら<sup>3)</sup>がコンクリートを等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルで表現して鉄筋コンクリート耐震壁を解析したのを始め、岡村・前川<sup>4)</sup>は材料レベルの基礎的な実験を積み重ねることで、繰返し載荷解析に適用できる材料モデルを開発し、その精度と適用性を様々な実験の解析を通して検証している。宮下ら<sup>5)</sup>は鉄筋コンクリート平板の繰返し載荷実験の結果に基づいて開発したコンクリートの履歴特性モデルを用いて、立体耐震壁の解析を行っている。この他に最近では、榎本ら<sup>6)</sup>、大宮ら<sup>7)</sup>、Elmorsiら<sup>8)</sup>による耐震壁の解析例が報告されている。

1996年には経済開発協力機構(OECD)の原子力庁(NEA)の主催による耐震壁国際標準問題(SSWISP)として、日本の原子力発電技術機構(NUPEC)によるH型断面耐震壁の振動台実験<sup>9)</sup>の国際解析コンペが行われ、世界各国から様々な解析結果が報告された<sup>10)</sup>。これを機に、耐震壁を対象とした動的FEM解析が行われるようになり、

上述のH型断面耐震壁の振動台実験を対象として、Uedaら<sup>11)</sup>、福島ら<sup>12)</sup>、小磯ら<sup>13)</sup>の解析などが報告されている。

これらの正負繰返し載荷解析、及び動的解析では、荷重～変形関係や時刻歴応答など、実験と良好な対応性が得られているものもあるが、各材料モデルの基礎的な検証や適用性の確認が不十分なものもあり、解析精度の面で、未だ改良の余地が多いと言える。特に、既往の解析例の中には、コンクリートのひびわれの開閉や2方向ひびわれの扱いに関して、簡単な仮定を導入しているものが多く、実現象と異なる結果を生じる恐れがある。例えば、2本目のひびわれは常に1本目に直交するものと限定してしまうと、正負で非対称な結果を与える場合がある。一例として、正方向の水平加力によって壁の中央付近の要素に最初に生じるひびわれの方向が、鉛直軸力の影響で水平面より60度だったとすると、負方向加力の場合には、前述の仮定を用いると、150度の方向に限定されてしまう。しかし、実験では正方向と負方向のひびわれはほぼ対称に生じるため、水平面より120度付近の方向に生じることになり、非直交ひびわれを許容する必要性があることが分かる。

本論文は、筆者らが既に提案した繰返し応力下におけるコンクリートの履歴特性モデル<sup>14)</sup>を直交異方性理論による材料構成則に組込み、さらに、分散ひびわれモデルを改良して、面内で最大6方向のひびわれが考慮できるようにした上で、正負繰返し荷重を受ける様々なタイプの鉄筋コンクリート壁体の静的繰返し載荷解析、及び前述のH型断面耐震壁の振動台実験を対象とした動的解析を実施し、解析の精度と適用性を明らかにしたものである。

本論文の一部は文献26)にて発表している。

\* 勝利大林組技術研究所 主任研究員・博士(工学)

\*\* 勝利大林組技術研究所 室長・工博

Chief Research Engineer, Technical Research Institute, Obayashi Corporation,  
Dr. Eng.  
General Manager, Technical Research Institute, Obayashi Corporation, Dr. Eng.

## 2. 材料構成モデルの概要

筆者らはコンクリートを直交異方性モデルで表現し、分散ひびわれモデルを用いた単調載荷解析により、既往の様々なタイプの鉄筋コンクリート平板や耐震壁の耐力や変形性状を良好に再現できることを示した<sup>1), 2)</sup>。さらに、これらのモデルに繰返し応力下の履歴特性モデルを組合わせることで、繰返し面内せん断力を受ける鉄筋コンクリート平板の履歴性状を再現できることを示した<sup>14)</sup>。それらのモデルの概要について以下に述べる。詳細については参考文献<sup>1), 2), 14), 15)</sup>を参照されたい。

コンクリートは等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルにより、二軸応力下の破壊条件は Kupfer ら<sup>16)</sup>の提案に従う。ひびわれ発生後は圧縮特性の劣化を考慮して、強度と強度時のひずみを低減する<sup>15)</sup>。低減係数はコンクリートの一軸圧縮強度と作用圧縮応力の関数で与える。応力～ひずみ関係を図 1 に示す。引張側ではひびわれ発生まで線形弾性とする。ひびわれ発生後の tension stiffening 特性（軟化域包絡線）はコンクリートの一軸圧縮強度、鉄筋比、ひびわれ方向の圧縮剛性低下率の関数として定義する。圧縮側包絡線は修正 Ahmad 式<sup>17)</sup>で表現する。除荷・再載荷曲線は引張側、圧縮側共に、2 次曲線で表現する<sup>14)</sup>。図 2 に示すように、引張側から圧縮側への移行、及び圧縮側から引張側への移行は対数曲線を用いて滑らかに連結する。

ひびわれ後のせん断伝達特性は、図 3 に示すひびわれ方向のせん断応力～せん断ひずみ関係で表現する。包絡線はコンクリートの一軸圧縮強度、鉄筋量、ひびわれ直交方向ひずみ、及び、ひびわれ方向のせん断ひずみの関数で表現する<sup>15)</sup>。除荷・再載荷曲線は 4 次曲線で表現する<sup>14)</sup>。

鉄筋は図 4 に示す Ciampi らの修正 Menegotto-Pinto モデル<sup>18)</sup>で表現する。このモデルではひずみの関数として応力が一義的に求められる点が特徴で、Ramberg-Osgood モデルのように応力からひずみを求めるための反復計算が不要である。

## 3. コンクリートの主軸の回転とひびわれのモデル化

直交異方性モデルを繰返し載荷解析に適用する場合、主軸をどう設定して、荷重の反転などによる主軸の回転をどう扱うか、また、分散ひびわれモデルで互いに直交しないひびわれをどう表現するかが重要なポイントとなる。宮下ら<sup>5)</sup>はひびわれ方向とその直交方向に近い方向に主軸を設定し、以後は主応力方向が変化しても主軸を固定している。大宮ら<sup>7)</sup>や Elmorsi ら<sup>8)</sup>も同様の仮定を導入している。この仮定では履歴データの扱いが容易である反面、主応力方向における剛性低下の考慮や、破壊の判定ができなくなるという問題がある。

ひびわれのモデル化に関しては、岡村・前川<sup>4)</sup>が直交しないひびわれの発生を許容しており、榎本ら<sup>6)</sup>も同様の仮定を用いている。また、最近では福浦・前川<sup>19)</sup>が独立 4 方向ひびわれモデルを開発している。その他の多くの解析では、1 方向、あるいは互いに直交する 2 方向のひびわれのみが許容されているのが現状であるが、既に述べたように、正負繰返し荷重を受ける場合のひびわれは、必ずしも互いに直交しない場合があるため、非直交ひびわれモデルが必要である。

筆者らの従来の単調載荷解析では、コンクリートの主軸に関しては、Darwin ら<sup>3)</sup>の解析に従い、主軸方向を主応力方向に一致させ、初期の主軸方向より ±45 度以上回転した場合は、2 つの主軸方向の履歴

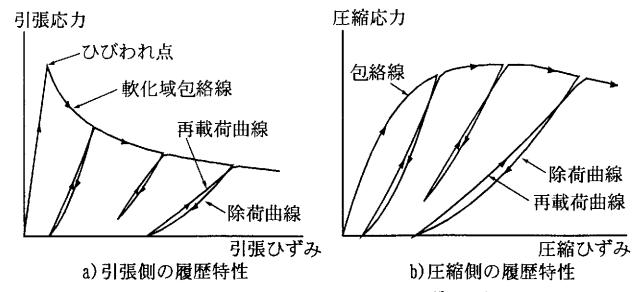


図 1 コンクリートの応力～ひずみ関係

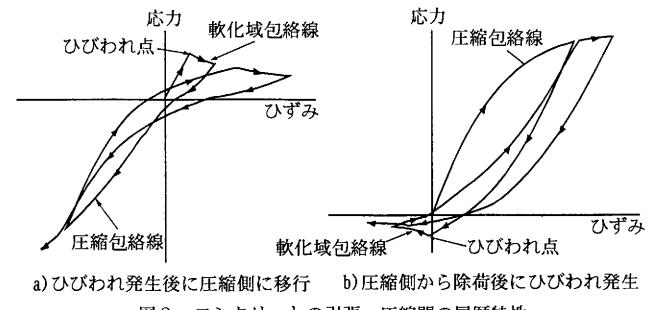


図 2 コンクリートの引張～圧縮間の履歴特性

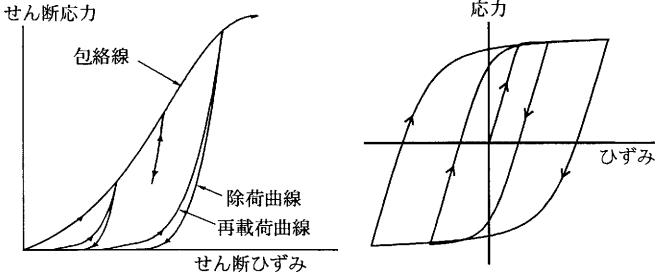


図 3 ひびわれ方向のせん断応力～せん断ひずみ関係  
(Ciampi らのモデル)

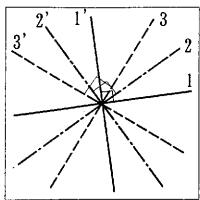
ータを入れ替える方法を採用している。ひびわれ発生後は、ひびわれ方向のせん断剛性を定義するため、主軸方向をひびわれ方向に固定しているが、ひびわれ方向とは異なる方向に主応力が生じるため、主応力方向における新たなひびわれの発生、圧縮破壊、ひびわれ方向の滑り破壊をチェックしている<sup>15)</sup>。これによって、既存のひびわれと直交しない方向に新たなひびわれの発生が許容されている。

本研究では、従来のモデルを繰返し載荷解析に適用できるように拡張するため、以下の改良を加えた。

- 1) 主軸の回転に伴う履歴データの入れ替えを出来るだけ少なくするため、応力レベルが低い段階では等方弾性材料として扱い、主引張応力が引張強度以上（ひびわれ発生後）、あるいは、主圧縮応力が一軸圧縮強度の 0.3 倍に達した後に、直交異方性体として扱う。
- 2) 一つのひびわれ方向と、それに直交する方向を基準とする座標系の軸をひびわれ軸と定義し、一つのひびわれ軸で互いに直交する 2 方向のひびわれを表現し、ひびわれ軸を 3 つまで許容することで、最大で 6 方向（直交 2 方向 × 3 組）のひびわれを考慮する。

主軸の方向は、全てのひびわれが閉じている場合には主応力方向とし、それ以外の場合には、既存のひびわれ軸の内、ひびわれ直交方向の引張ひずみが最も大きい軸に一致させる。

図 5 にひびわれ軸の概念を示す。各ひびわれ軸の最小交差角は、既往の実験結果などを参考に、便宜的に 20 度と設定した。



1と1'：第1ひびわれ軸（直交2方向）  
2と2'：第2ひびわれ軸（直交2方向）  
3と3'：第3ひびわれ軸（直交2方向）  
各ひびわれ軸の最小交差角：20度

図5 3つのひびわれ軸による6方向のひびわれ

本モデルにより直交しないひびわれが生じる場合を表現した例を図6に示す。正方形の鉄筋コンクリート板を想定した1要素の下辺を固定して、上辺に一様な鉛直力と水平力を与えた場合のひびわれ方向を示したもので、図6のa)は鉛直圧縮力を与えた後に正負繰返し水平力を与えた場合、図6のb)は鉛直引張力を与えて水平ひびわれが生じた後に正負繰返し水平力を与えた場合の結果である。いずれも非直交ひびわれが生じており、図6のb)では互いに直交しない3方向にひびわれが生じている。

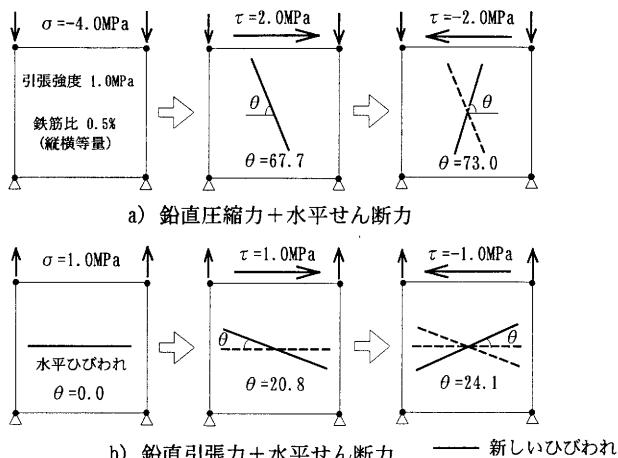


図6 鉛直力+水平力による解析のひびわれパターン

表1 解析対象試験体の概要

試験体	断面	シアスパン比	軸力レベル	備考
P4012	I型	0.55	柱に1.47MPa	JCI選定試験体#1 <sup>21)</sup>
B1-4	BOX型	0.80	無し	JCI選定試験体#2 <sup>22)</sup>
DS-1	H型	0.80	1.65MPa	文献23)
H1	円形	1.00	無し	文献24)

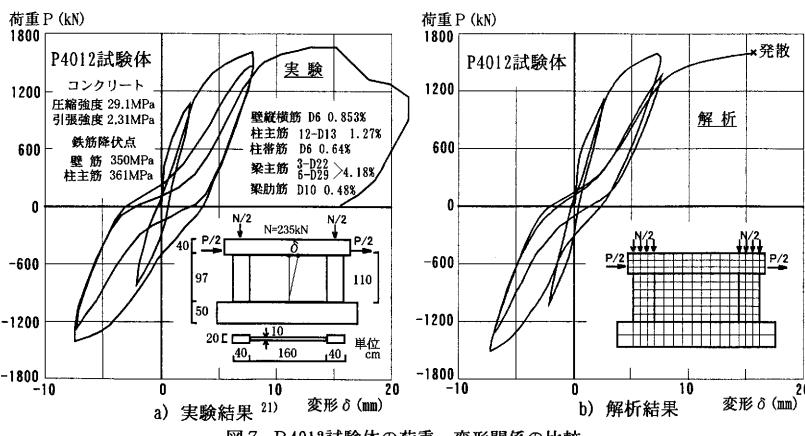


図7 P4012試験体の荷重～変形関係の比較

#### 4. 静的繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート壁体の解析

これまでに述べたモデルを、主軸の回転や応力の再配分が起こる一般的な条件下的解析に用いた場合の適用性を調べるために、先ず、静的な正負繰返し水平力を受ける鉄筋コンクリート壁体の実験を対象とした解析を実施した。試験体は断面形状、シアスパン比、軸力の有無などが異なる4体である。それらの試験体の概要を表1に示す。解析対象には1983年に日本コンクリート工学協会の「鉄筋コンクリート構造のせん断強度研究委員会」が選定した解析モデル検証用試験体（JCI選定試験体）の耐震壁選定試験体<sup>20)</sup>4体の内、正負繰返し載荷が行われたP4012試験体<sup>21)</sup>とB1-4試験体<sup>22)</sup>を含めた。

P4012試験体はI型断面であることから、4節点平面応力要素でモデル化した。但し、側柱部分は帶筋によるコンファインド効果を考慮するため、面外筋の拘束効果を考慮できる平面要素<sup>25)</sup>を用いた。鉄筋は軸方向剛性のみを有する等価な鉄筋層に置換して、平面応力要素に重ね合せた。

図7にP4012試験体の荷重～変形関係の比較を示す。履歴ループの面積は解析の方がやや小さいが、ループ形状は実験と解析で対応しており、特に第3サイクルの正負のピーク荷重が第2サイクルより低下する度合いなど、良好に再現されている。図8にP4012試験体の各履歴ループの半サイクル毎の等価粘性減衰定数と最大変形量の関係を示す。本来、等価粘性減衰定数は定常共振振動する場合に意味を持つものであるが、本論文では履歴エネルギー消費能を比較するための一つの指標として用いる。実験に比べると解析の方が等価粘性減衰定数は小さいが、変形の増大に伴う等価粘性減衰定数の変化は実験と解析で対応している。図9にP4012試験体の最終ひびわれ状況の比較を示す。解析結果は第4サイクルの正加力で壁板部コンクリートの圧壊が顕著になり、変形が15mmを超えて解が発散する直前の状況を示している。実線はひびわれ方向を表しており、線の太さはひびわれ直交方向のひずみの大きさに対応している。その他の既存のひびわれは破線で示した。またコンクリートが圧縮強度に到達した要素は圧縮破壊と定義し、図中にハッチで示した。ひびわれ方向に関しては、実験で破壊時に生じた壁板対角線方向の大きなひびわれを除くと、実験と解析はほぼ対応しており、破壊モードについても、実験では壁板部コンクリートの圧壊が生じたが、解析においても同様の破壊が生じている。

次に、B1-4試験体はBOX型断面であることから、4節点平面シェル要素でモデル化した。基礎スラブと加力スラブは壁体部に比較して十分大きな剛性を有していることから、シェル要素を増厚することで

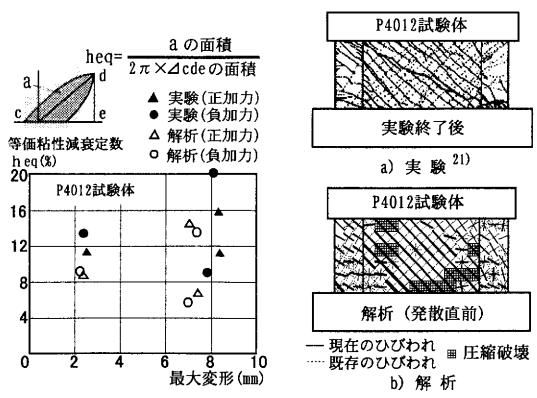


図8 P4012試験体の等価粘性減衰定数の比較

図9 P4012試験体の最終ひびわれ状況の比較

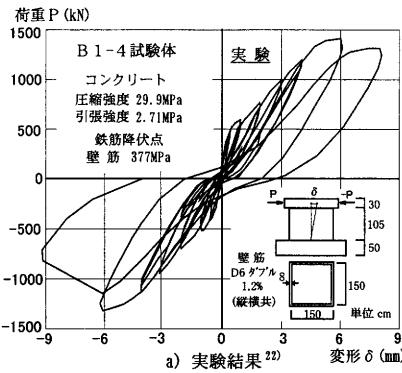


図10 B1-4 試験体の荷重～変形関係の比較

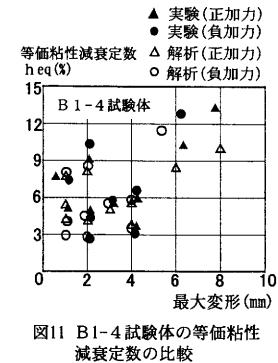
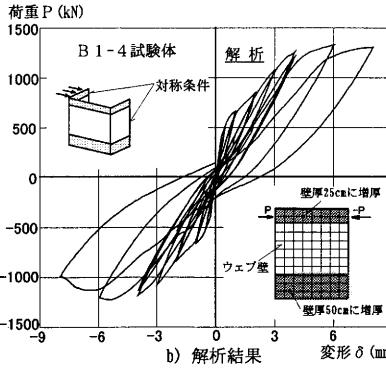


図11 B1-4 試験体の等価粘性減衰定数の比較

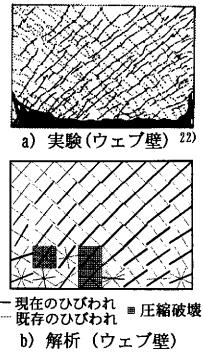


図12 B1-4 試験体の最終ひびわれ状況の比較

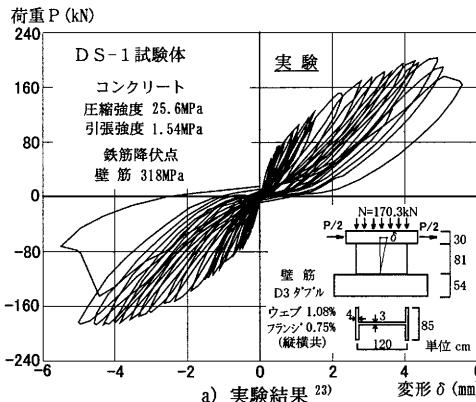


図13 DS-1 試験体の荷重～変形関係の比較

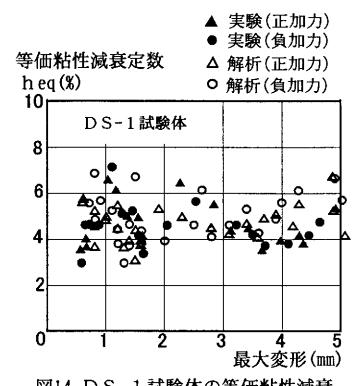
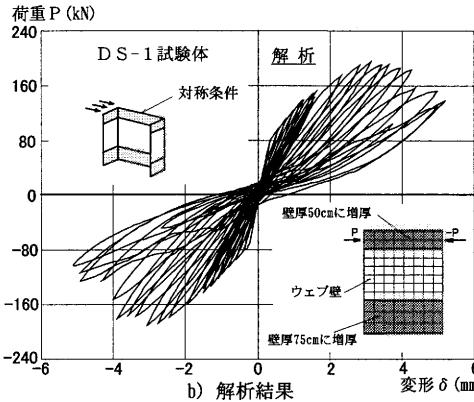


図14 DS-1 試験体の等価粘性減衰定数の比較

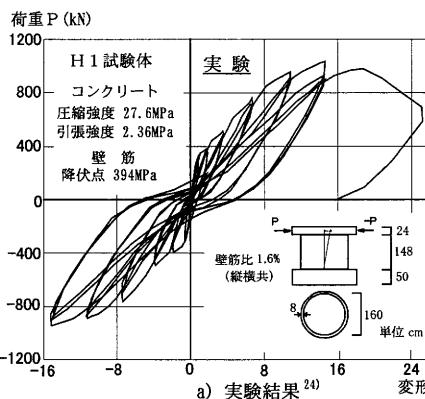


図15 H1 試験体の荷重～変形関係の比較

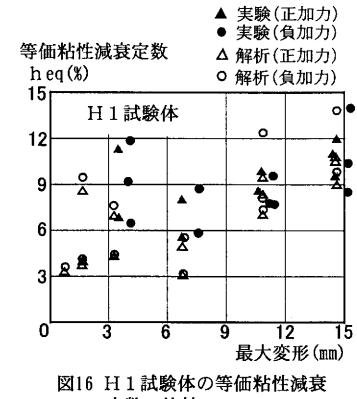
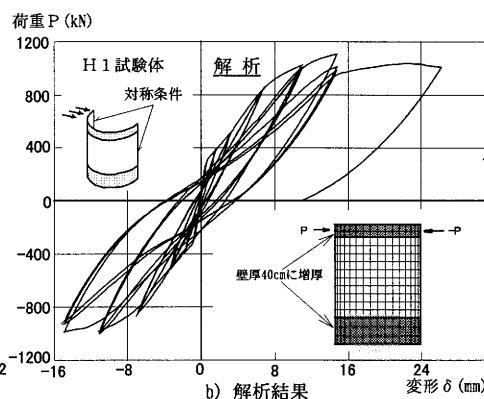


図16 H1 試験体の等価粘性減衰定数の比較

表現した。壁体部は厚さ方向に10層に分割した積層要素として、鉄筋は等価な鉄筋層に置換して、断面内の対応する位置に配置した。

図10～図12にB1-4試験体の荷重～変形関係、等価粘性減衰定数、ひびわれ状況の比較をそれぞれ示す。履歴ループの形状は最終サイクルの負方向で耐力低下が生じるまで、実験と解析で良好に対応しており、変形の増大により、等価粘性減衰定数が徐々に大きくなる傾向も解析で再現されている。実験ではウェブ壁の脚部でコンクリートのすべり破壊が生じているが、解析でも脚部においてコンクリートの圧壊が生じた。ひびわれ方向に関しても実験と解析の対応性は良好である。

DS-1試験体<sup>23)</sup>はH型断面であることから、B1-4試験体と同様のモデル化を行った。図13にDS-1試験体の荷重～変形関係の比較を示す。実験では地震力を模擬して振幅を増減させた多数回の繰返し載荷が行われ、最終的にウェブ壁のせん断すべり破壊を生じた。解析におい

ても実験と同様の変位振幅を与えた。実験と解析では最大荷重はほぼ等しいが、解析の方が全般にやや剛性が高く、最大荷重到達点の変形も小さい。しかし、履歴ループの形状は実験と同様に原点付近を目指すなど、定性的には対応している。図14にDS-1試験体の最大変形が0.5mm以上のループに関する等価粘性減衰定数の比較を示す。等価粘性減衰定数は実験と同様に解析でも変形が1mmを越えると等価粘性減衰定数はほぼ5%前後で推移している。

H1試験体<sup>24)</sup>は円形断面であるため、B1-4試験体、DS-1試験体と同様にシェル要素を用いてモデル化した。図15にH1試験体の荷重～変形関係の比較を示す。実験では脚部の縦筋が降伏後、圧縮側脚部を中心としたせん断圧縮破壊を生じた。実験と解析の最大荷重と包絡線はほぼ良好に対応しているが、実験の正側最終ループに見られる耐力低下が解析では現れていない。このことは、曲げ降伏後の繰返し載

荷によるせん断破壊を解析では十分再現できていないことを示唆している。また、履歴ループの形状は、実験では原点付近で剛性が低下する傾向が見られるが、解析では剛性低下があまり顕著ではない。これらの相違点は今後の課題である。載荷は変位を漸増させて同一変位で3回づつ繰返しているが、最大変位15mmの変位振幅においてピーク荷重が徐々に低下する様子は実験と解析で良く一致している。図16にH1試験体の等価粘性減衰定数と最大変形の関係を示す。実験値は最大変形が3mm以上のループについて算定した。変形が増大するにつれて、等価粘性減衰定数も大きくなる傾向が実験と同様に解析でも再現されている。

## 5. 動的荷重を受ける鉄筋コンクリート壁体の解析

本モデルによる動的解析の精度を調べるために、(財)原子力発電技術機構による鉄筋コンクリートH型断面耐震壁の振動台実験<sup>9)</sup>を対象としたシミュレーション解析<sup>26)</sup>を行った。図17に試験体の概要を示す。試験体は加振直交方向に関してウェブ壁厚さの中心面で対称である。

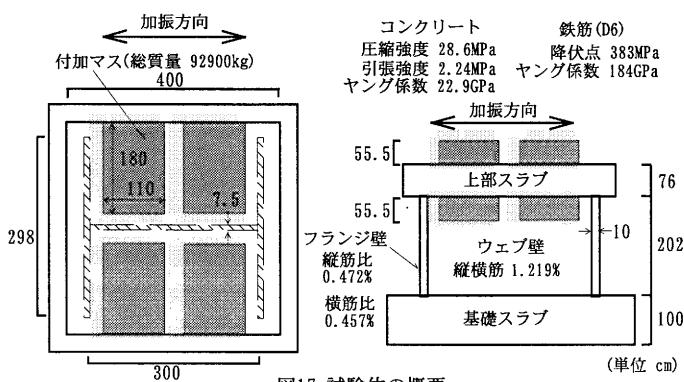


図17 試験体の概要

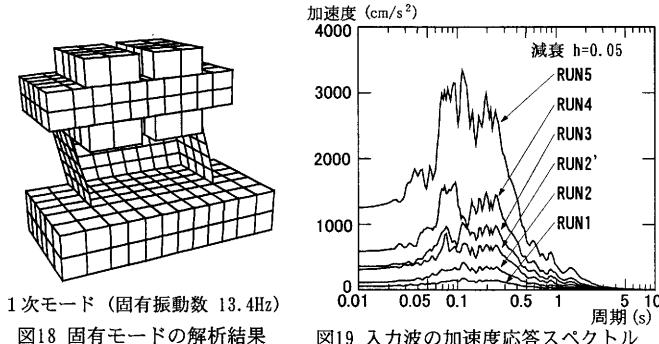


図18 固有モードの解析結果

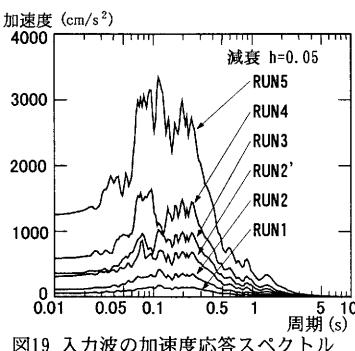


図19 入力波の加速度応答スペクトル

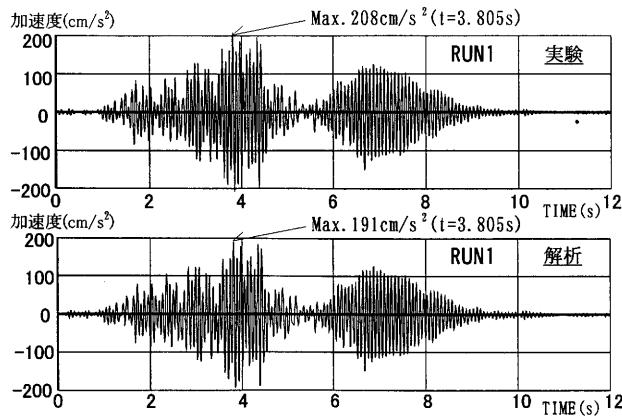


図20 RUN1による上部スラブの水平応答加速度の時刻歴

ことから、1/2をモデル化した。壁体部は静的繰返し載荷のDS-1試験体と同様にシェル要素でモデル化し、基礎スラブ、上部スラブ、及び付加マスは8節点6面体要素で置換した。フランジ部のシェル要素はスラブ内部まで伸ばすことでフランジ壁とスラブの間の曲げモーメントの伝達を考慮した。質量分布は弾性範囲の応答解析結果を集中質量(Lumped Mass)と分布質量(Consistent Mass)で比較した結果、ほとんど差が見られなかったことから、集中質量とした。時間積分はNewmarkのβ法により、係数β=0.25, γ=0.5とした。減衰は初期剛性比例型の内部粘性減衰とし、後述する固有値解析での1次固有周期に対して1%を仮定し、全てのRUNで同一とした。

加振に先立ち、サブスペース法を用いて固有値解析を実施した。固有振動数は、実験の13.2Hzに対して13.4Hzと、僅かに高めである。図18に1次の固有モードを示す。1次モードではウェブ壁のせん断変形が卓越している。

時刻歴応答解析は、先ず自重解析を静的に実施した後、基礎スラブ底面に実験で計測された加速度を入力した。加振はRUN1からRUN5まで(RUN2'含む)の6つで、解析ではこれら6つのRUNによる加速度を連続的に与えた。図19に減衰定数を5%とした場合の入力波の加速度応答スペクトルを示す。実験ではRUN5の加振でウェブ壁下部にせん断すべり破壊を生じている。

解析における時間増分の大きさは、弹性域でのRUN1を対象として、時間増分を0.001秒、0.002秒、0.005秒、0.01秒と変化させた解析を実施した結果、0.01秒の場合のみ応答がやや大きく、波形が他の3ケースと顕著に異なったことから、時間増分の基準値は0.005秒とした。時間増分の目安としては少なくとも固有周期(1/13.4=0.075秒)の1/10以下とする必要があると考えられる。

一方、破壊に至るような大きなレベルの加振では、解析の1増分の0.005秒間における入力加速度の変化が大きくなり、材料の応力～ひずみ関係上の各種分岐点の飛び越えが生じるなど、不釣り合い応力が過大になり、解析が不安定化することが判明した。そこで、1増分における入力加速度の変化量に上限値を設定して、それに収まるように自動的に時間増分を小さくする方法を用いた。入力加速度増分の上限値の大きさは10cm/s<sup>2</sup>とし、時間増分の最小値を0.0001秒することで、前述の不安定化現象がほぼ防止できることが分かった。

図20～図24に各RUNごとの実験と解析の上部スラブの加速度応答波形の比較を、図25にRUN5の変位応答波形の比較を示す。弹性挙動をしていると考えられるRUN1では実験と解析で良好な対

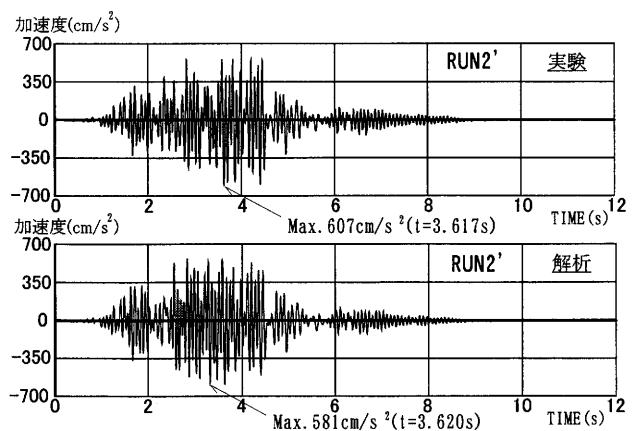


図21 RUN2'による上部スラブの水平応答加速度の時刻歴

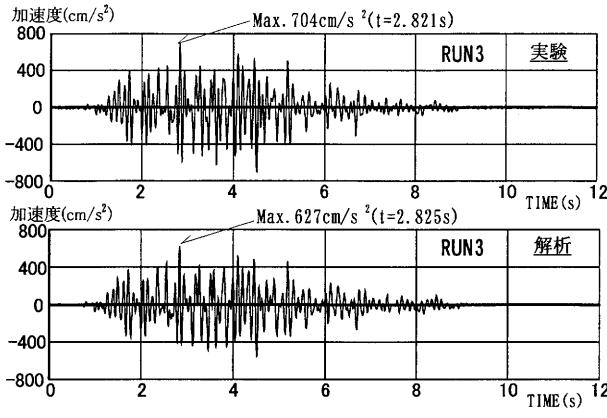


図22 RUN 3による上部スラブの水平応答加速度の時刻歴

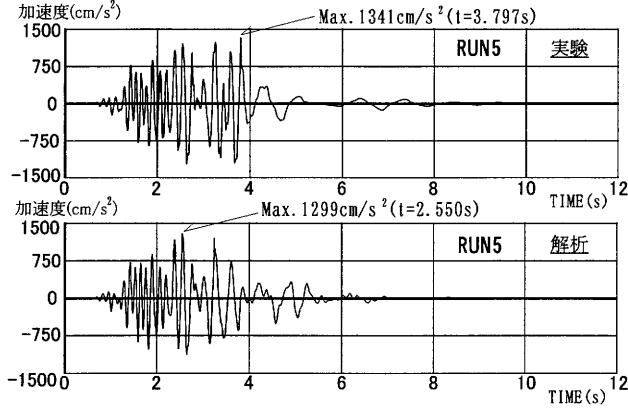


図24 RUN 5による上部スラブの水平応答加速度の時刻歴

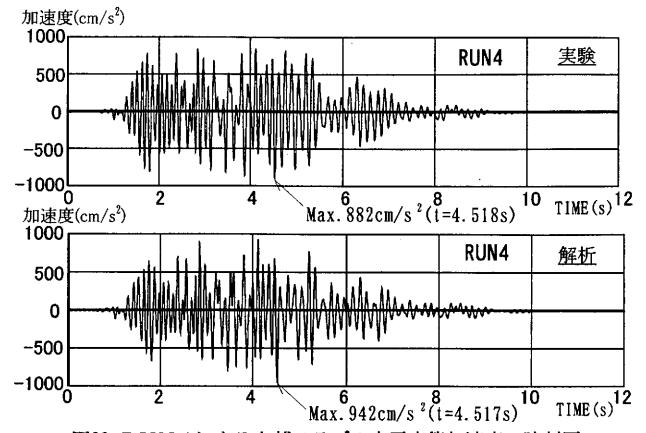


図23 RUN 4による上部スラブの水平応答加速度の時刻歴

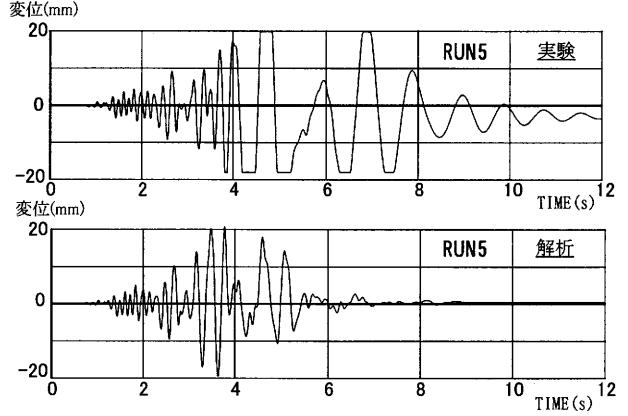


図25 RUN 5による上部スラブの水平応答変位の時刻歴

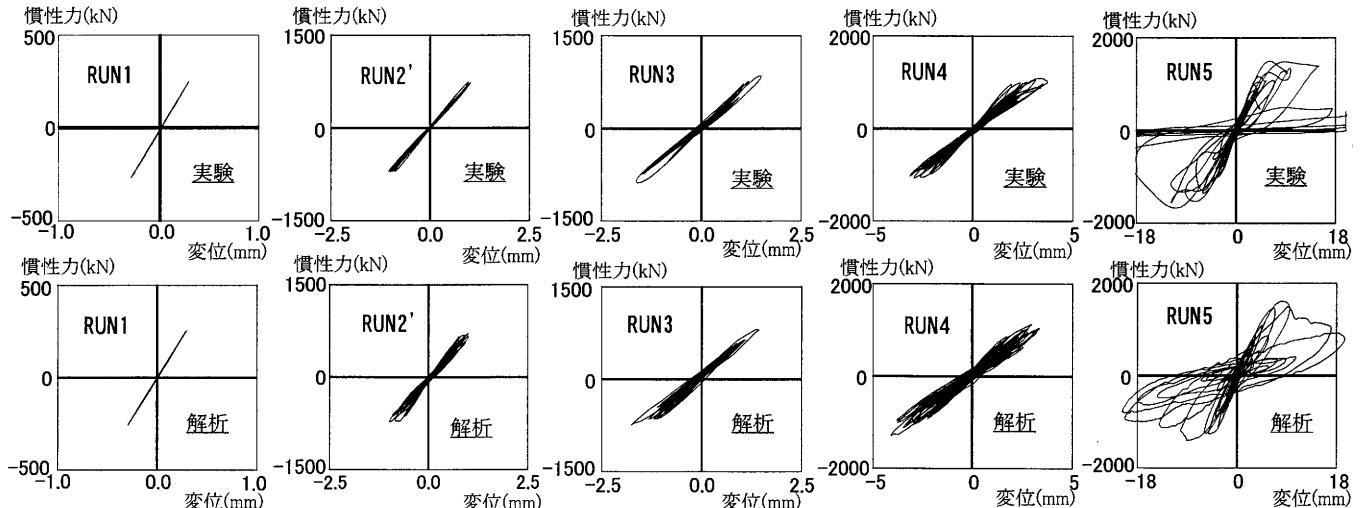


図26 慣性力～水平変位関係の比較

応を示している。最大値とその発生時刻も一致しており、波形の包絡形状や位相特性も良く一致している。RUN 2'ではひび割れの進展により非線形性が現れるが、実験と解析の対応性は良好である。特に、実験で 4.5 秒付近において急激に応答が小さくなる現象も良く再現されている。RUN 3 および RUN 4 では非線形性がかなり進行してくるため、波形の長周期化が見られるようになるが、その傾向は解析においても再現されている。但し、RUN 4 の後半部分、すなわち 5 秒以後の応答では実験と解析で差違が見られる。これは、その直前の最大応答加速度が解析の方が実験より大きいことから、塑性化がより

進行して、以後の応答が小さくなったものと考えられる。RUN 5 では実験は約 4 秒で試験体の破壊が生じ、以後の加速度応答は非常に小さくなっている。変位応答では計測限界の 20mm に達し、波形が飽和している。また、破壊の進展とともに長周期化が加速度および変位のいずれにも現れている。これらの傾向を解析でも良く再現していると言える。

図 26 に各 RUN の最大加速度に上部スラブと付加マスの質量を乗じて求めた慣性力と上部スラブの水平変位の関係を示す。RUN 1 は実験、解析共に線形で、RUN 2' では僅かに非線形化がみられ、実

験より解析の方が履歴ループの膨らみがやや大きい。RUN 3 と RUN 4 では非線形化が徐々に進行しており、履歴ループの膨らみが顕著になっている。RUN 5 では最大耐力に達した後、大きな履歴ループを描くようになる。これらの段階を追った非線形性の進行過程は解析でも再現されており、各 RUN の最大荷重、最大変位も実験結果と良好に対応している。

図 27 に RUN 4 および RUN 5 終了後のウェブ壁のひびわれ状況の比較を示す。RUN 4 終了後に解析では壁全域に亘ってひびわれが生じているが、実験では上部が付加マスに隠れて観察されていないこともあり、ひびわれがやや少なく見えるものの、ひびわれの方向は良く対応している。特に鉛直軸力の影響などで、ひびわれ角度は水平線から 45 度以上になっており、交差するひびわれが直交していない点が解析でも再現されている。

RUN 5 終了時には、実験では壁の中腹より下部ですべり破壊が生じてコンクリートが剥落している。解析では壁のほぼ中腹付近のコンクリートの破壊が水平方向につながっており、破壊位置がやや異なるものの、破壊モードはほぼ対応していると言える。

各 RUN の前に RUN 1 の 0.2 倍の微小入力波に対する上部スラブの応答の伝達関数より求めた固有振動数および等価粘性減衰定数を表 2 に示す。実験値は文献 10) より引用した。各加振前の固有値は解析の方が実験に比べ高めの値を示し、等価粘性減衰定数に関しては大きめに評価されている。これらは解析の方が塑性化の進行が遅いと考えられること、RUN が進むにつれ伝達関数の形状が乱れてくることにより、固有値や減衰定数の推定精度が低下することなどが原因と考えられる。しかし、RUN の進行に伴い固有値が低下し、減衰定数が増大するという実験結果と同様な傾向を見出すことができる。

図 28 は上部スラブの加速度応答スペクトルを比較したものである。応答波形の比較でも見られたように、RUN 1 および RUN 2' は応答スペクトルでも非常に良い一致を示している。RUN 3 および RUN 4 ではピークとなる周期が若干ずれているが、周期特性の対応は良

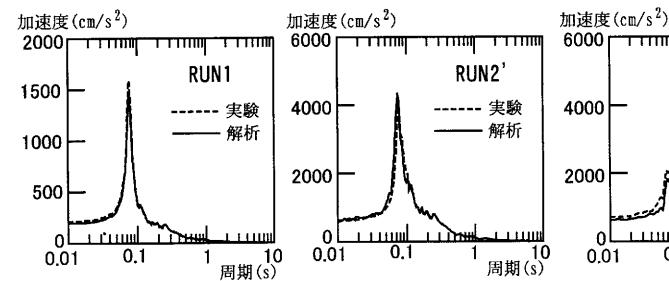


図28 加速度応答スペクトルの比較 (減衰  $h=0.05$ )

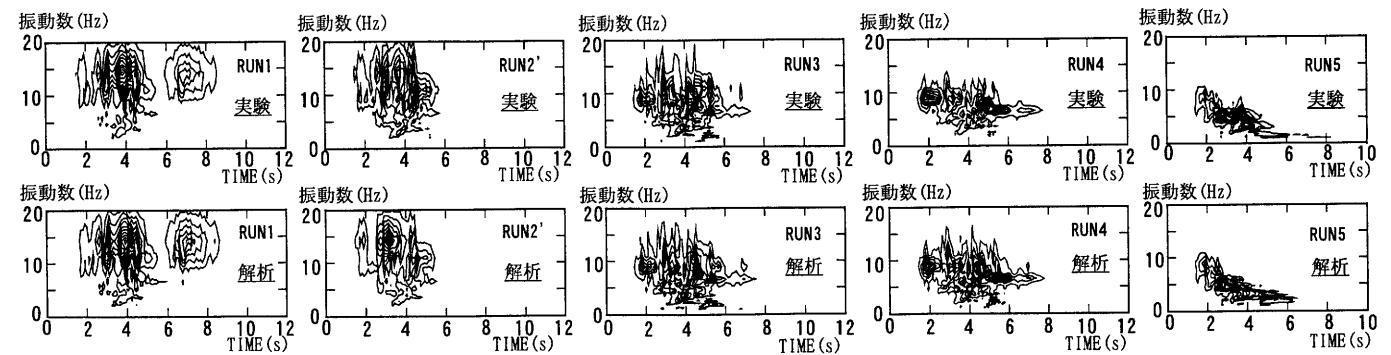


図29 非定常スペクトルの比較

好である。RUN 1 ~ RUN 4 までは概ね単峰のピークを有するが、RUN 5 では複数のピークに分割され、非線形化の進行を裏付けている。解析でも同様にピークが分割され、各々のピーク周期も実験結果に対応している。

試験体の動特性の時間変化を見るために、各 RUN の非定常スペクトル<sup>27)</sup>の変化を比較したものを図 29 に示す。等高線の密になっている部分の振動数、即ち固有振動数の変化を見ることができる。RUN 1 ~ RUN 3 では卓越する振動数と、その時刻歴変化も実験と解析で

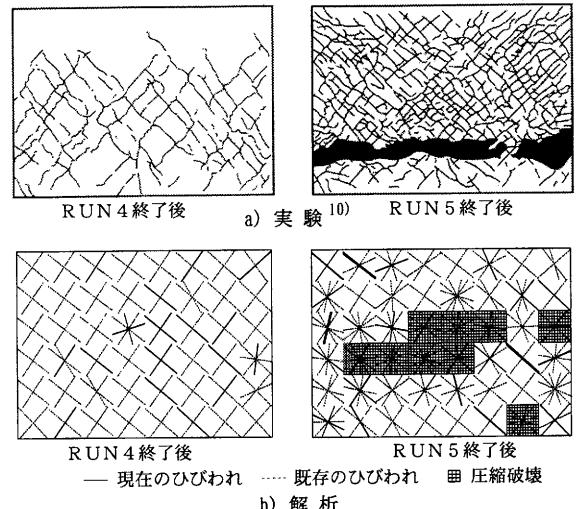


図27 ウェブ壁のひび割れ状況の比較

表 2 固有振動数と等価粘性減衰定数の変化

	固有振動数		等価粘性減衰定数	
	実験	解析	実験	解析
RUN 1 の前	13.2Hz	13.2Hz	1.1%	1.1%
RUN 3 の前	11.3Hz	12.0Hz	2.5%	3.5%
RUN 4 の前	9.0Hz	10.2Hz	3.0%	4.5%
RUN 5 の前	7.7Hz	8.3Hz	4.0%	6.0%

良い対応を示している。RUN 4 では全体の変化の対応は良く、2 秒から 6 秒にかけて卓越する振動数が低下する傾向を読み取ることができる。仔細に見れば解析では振動数に対してやや広がりの大きな分布を示しているが、図 28 の応答スペクトルのピークが解析では若干つぶれていることと整合した結果と考えられる。RUN 5 では実験結果に現れている 2 秒から 4 秒における振動数の急激な低下を解析でも良く再現している。この時刻毎の振動数の変化は応答スペクトルに現れている 3 つのピークに対応して、試験体の破壊に伴う固有振動数の低下と捉えることができる。

## 6.まとめ

繰返し応力下のコンクリートの履歴特性モデルに、面内で最大 6 方向（直交 2 方向 × 3 組）のひびわれを考慮できる分散ひびわれモデルを組合せて、既往の鉄筋コンクリート壁体の実験を対象とした FEM 解析を実施した結果、以下の結論を得た。

- 1) 断面形状などが異なる 4 体の試験体の正負繰返し載荷解析の結果は、履歴ループの形状や等価粘性減衰定数の変化など、実験結果と比較的良好に対応した。
- 2) H 型断面立体耐震壁の振動台破壊実験の時刻歴応答解析では、弹性域から破壊に至るまでの試験体の動特性の変化を概ね再現することができた。
- 3) 時刻歴応答解析では、入力で与える減衰定数を弾性から破壊に至る RUN まで変化させることなく、材料の履歴特性のみで試験体の塑性化に伴う減衰の増大を再現可能であることが分かった。

なお、考慮するひびわれを 4 方向（直交 2 方向 × 2 組）と、2 方向（直交 2 方向のみ）とした場合の解析結果は、紙面の都合で割愛したが、本論文で示した 5 体の解析に関する限り、4 方向と 6 方向では顕著な差異は見られず、2 方向の場合のみ、正負で履歴ループがやや非対称となるものが多かった。6 方向のひびわれモデルは、温度や内圧などにより、予め縦横にひびわれが生じた後に地震力を受けるような場合に効果があるものと予想されるが、本論文では限られた数体の解析しか行っておらず、本手法の解析精度や適用性を検討するためには、さらに多くのシミュレーション解析が必要であると考えている。

## 謝辞

本研究では(財)原子力発電技術機構により実施された実験のデータを使用させていただきました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 長沼一洋：鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究（その 2）鉄筋コンクリート耐震壁の非線形解析手法と適用性、日本建築学会構造系論文報告集、第 431 号、pp.7～16、1992.1
- 2) 長沼一洋：鉄筋コンクリート耐震壁のせん断強度に関する解析的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第 447 号、pp.107～117、1993.5
- 3) Darwin, D. and Pecknold, D. A.: Analysis of RC Shear Panels Under Cyclic Loading, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.102, No.ST2, pp.355-369, Feb. 1976.
- 4) 岡村 甫、前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂出版、1991.5
- 5) 宮下 丘、他 3 名：せん断破壊する RC 造立体耐震壁の FEM による解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV, pp.655～656, 2000.9
- 6) 榎本勝則、野口 博、柏崎隆志：繰り返しを考慮した RC 耐震壁のせん断性状に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No.2,

pp.517～522, 1995

- 7) 大宮幸男、他 4 名：鉄筋コンクリート耐震壁の静的繰返し解析（その 1），日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV, pp.835～836, 1995.8
- 8) Elmorsi, M., et al. : Nonlinear Analysis of Cyclically Loaded Reinforced Concrete Structures, ACI Structural Journal, Vol.95, No.6, pp.725-739, 1998
- 9) Nagashima, T., 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, pp.199-204, 1995
- 10) Seismic Shear Wall ISP, NUPEC's Seismic Ultimate Dynamic Response Test, Comparison Report, Committee on the Safety of Nuclear Installations, OECD Nuclear Energy Agency, OECD/GD(96)188, 1996, 412p.
- 11) Ueda, M., et al. : Nonlinear Analysis on RC Shear Wall Shaking Table Test, Transactions of the 14th International Conference of Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol. V, pp.433-440, 1997
- 12) 福島寛二、寺本尚史、井上範夫：非線形有限要素法を用いたせん断破壊型 RC 造耐震壁の擬似立体動的解析、日本建築学会構造工学論文集、Vol.45B, pp.305-312, 1999.3
- 13) 小磯利博、森川博司、石田雅利：RC 構造物の三次元地震応答解析手法の開発、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 IV, pp.593～594, 1999.9
- 14) 長沼一洋、大久保雅章：繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル、日本建築学会構造系論文集、第 536 号、pp.135～142, 2000.10
- 15) 長沼一洋：鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究（その 1）平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル、日本建築学会構造系論文報告集、第 421 号、pp.39～48, 1991.3
- 16) Kupfer, H. B. and Gerstle, K. H. : Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.99, No.EM4, pp.853-866, Aug., 1973
- 17) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係、日本建築学会構造系論文集、第 474 号、pp.163～170, 1995.8
- 18) Ciampi, V., et al. : Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No.EERC-82/23, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Nov. 1982
- 19) 福浦尚之、前川宏一：非直交する独立 4 方向ひび割れ群を有する平面 RC 要素の空間平均化構成則、土木学会論文集、No.634, V-45, pp.177～195, 1999.11
- 20) 菅野俊介：「耐震壁選定試験体」選定理由および実験データの概要、第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム、解析モデル検証用試験体の実験データ集、日本コンクリート工学協会、JCI-C6, pp.43～54, 1983.10
- 21) 青山博之、加藤大介、勝俣英雄：増設 RC 耐震壁の耐力と変形能の評価に関する実験的研究（その 1, その 2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1407～1410, 1982.10
- 22) 秋野金次、杉田和直、稻田泰夫：原子炉建屋の復元力特性試験（小型および部分模型）（その 4）B 1 シリーズ試験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.963～964, 1982.10
- 23) 丸田 誠、他 3 名：原子炉建屋耐震壁の動的性能に関する試験（その 5 減衰性能試験のうち静的強制変位試験）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1059～1060, 1989.10
- 24) 建屋の復元力特性に関する研究、その 2：円筒耐震壁に関する実験（概要および実験結果）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1497～1498, 1983.9
- 25) 長沼一洋：外面方向の補強筋の拘束効果を考慮した平面要素による鉄筋コンクリート部材の解析手法、日本建築学会構造系論文集、第 524 号、pp.119～124, 1999.10
- 26) 長沼一洋、栗本 修、江戸宏彰：鉄筋コンクリート立体耐震壁の動的 FEM 解析（その 1）解析概要、（その 2）時刻歴応答解析結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II, pp.1137～1140, 2000.9
- 27) 亀田弘行：強震地動の非定常パワースペクトルの算出法に関する一考察、土木学会論文報告集、第 235 号、pp.55-62, 1975.3

(2000年11月8日原稿受理、2001年1月29日採用決定)