

# スケルトンカーブにひずみ速度の影響を考慮した 原子炉建屋耐震壁の弾塑性地震応答解析法

## NONLINEAR DYNAMIC ANALYSIS METHOD FOR REINFORCED CONCRETE SHEAR WALLS OF REACTOR BUILDINGS CONSIDERING THE STRAIN RATE EFFECTS ON SKELETON CURVES

兼近 稔\*, 五十嵐 克哉\*\*, 室井 一夫\*\*\*, 秋野 金次\*\*\*\*

Minoru KANECHIKA, Katsuya IGARASHI, Kazuo MUROI and Kinji AKINO

Nonlinear dynamic analysis methods for reinforced concrete shear walls of reactor buildings are proposed. In the methods, the strain rate effects are considered on skeleton curves of the shear walls. The effects are re-evaluated based on test results.

The proposed methods are applied to the simulation analysis of shaking table tests of the reinforced concrete shear walls. The calculation results by the proposed method show better agreement with the test results than the calculation results from the conventional method do.

**Keywords:** reinforced concrete shear wall, nonlinear dynamic analysis, strain rate, skeleton curve, restoring force characteristics, reactor building  
鉄筋コンクリート耐震壁、弾塑性応答解析、ひずみ速度、スケルトンカーブ、復元力特性、原子炉建屋

### 1. はじめに

原子炉建屋のような大規模な壁式構造物におけるせん断破壊型の鉄筋コンクリート造耐震壁を対象とした試験に関しては、「原子炉建屋の復元力特性試験」<sup>1) 2) 3)</sup>をはじめ多数の静的な水平加力試験が実施されている。これらの試験結果は、鉄筋コンクリート耐震壁の復元力特性の評価法<sup>4) 5)</sup>としてまとめられ、設計等において実用に供されている。

その後、「原子炉建屋の弾塑性試験のうち動的復元力に係わる試験」<sup>6) ~15)</sup>として、原子炉建屋を想定した鉄筋コンクリート造耐震壁を対象にダイナミックジャッキ、振動台等を用いた動的な水平加力試験が実施され、静的試験及び仮動的試験と比較することにより、ひずみ速度が復元力特性のスケルトンカーブに及ぼす影響についてまとめられている。この研究では、試験体の全体変形角のひずみ速度とスケルトンカーブの割増率の関係（以下、「関係式」と呼ぶ。）が定式化されている<sup>14) 15)</sup>。しかし、この関係式を地震応答解析に適用する方法については示されていない。

本論文においては、この関係式をもとに試験データの再評価を行うことにより、スケルトンカーブに及ぼすひずみ速度の影響を質点系モデルによる弾塑性地震応答解析に適用する方法を提案し、更にその方法を用いて振動台試験のシミュレーション解析を実施した結果を示す。

### 2. 試験と試験結果の概要

動的復元力に係わる試験のうち動的試験としては、ダイナミックジャッキによる高速載荷試験であるひずみ速度試験<sup>7) 9)</sup>並びに振動台による動的加振試験である減衰性能試験<sup>8) 10)</sup>及び終局応答試験<sup>11)</sup>が実施されている。各試験の試験体の例を図1に示す。

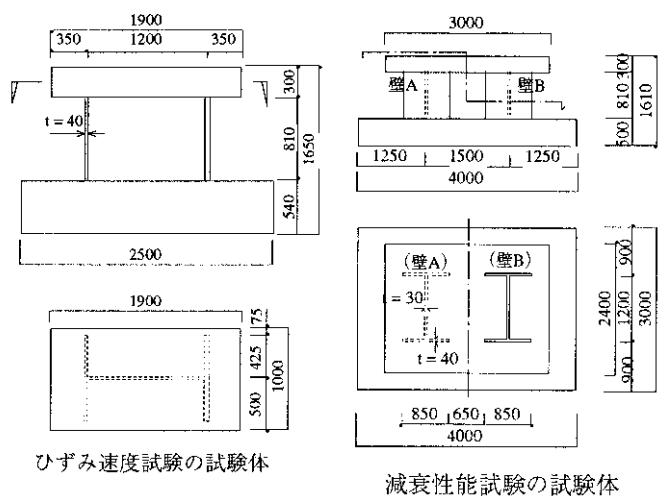


図1 動的試験の試験体 (単位: mm)

\* 鹿島建設  
\*\* 鹿島建設技術研究所 工博  
\*\*\* 清水建設  
\*\*\*\* 原子力発電技術機構 工博

Kajima Corporation  
Kajima Corporation, Dr. Eng.  
Shimizu Corporation  
Nuclear Power Engineering Corporation, Dr. Eng.

試験結果の評価により得られたひずみ速度とスケルトンカーブの割増率の関係式は全体変形角の平均ひずみ速度（全体変形角速度の時刻歴の下り1/4ループの平均速度（図2参照））の関数として、(1)式により示されている。このスケルトンカーブの割増率により図3に示すような動的スケルトンカーブを評価する<sup>14) 15)</sup>。

$$\alpha = \left( \frac{\bar{v}}{v_0} \right)^{0.02} \dots \dots \dots (1)$$

$\alpha$ : スケルトンカーブの割増率

$\bar{v}$ : 平均ひずみ速度 (rad/sec)

$v_0$ : 静的試験相当の全体変形角速度 ( $1.0 \times 10^{-6}$  rad/sec)

基準となる静的スケルトンカーブは、表1に示す鉄筋コンクリート耐震壁の復元力特性の評価法<sup>4) 5)</sup>のスケルトンカーブである。ここで、ひずみ速度とスケルトンカーブの関係を荷重方向の変化としているのは、試験結果のひずみ速度によるスケルトンカーブの変化が主に荷重方向であり、変形方向にはあまり移動していないためである<sup>14)</sup>。また、スケルトンカーブの割増率はせん断応力度-せん断ひずみ関係（以下「 $\tau-\gamma$ 関係」と呼ぶ。）にのみ考慮し、曲げモーメント-曲率関係（以下「 $M-\phi$ 関係」と呼ぶ。）には試験結果に明確なひずみ速度の影響が見られなかったためひずみ速度の影響は考慮しないこととしている<sup>15)</sup>。一方、試験において対象としたひずみ速度の範囲から適用範囲は平均ひずみ速度が0.1 (rad/sec)以下としている<sup>14)</sup>。

### 3. 解析用スケルトンカーブの設定

#### 3.1 設定方針

試験結果の評価により得られた関係式を地震応答解析に用いる場合、次の二項目が問題となる。

- (1) 関係式が全体変形角の平均ひずみ速度で評価されていること
- (2) 関係式が1/4ループの平均ひずみ速度で評価されていること

(1)については、関係式はひずみ速度の代表値として全体変形（せん断変形と曲げ変形の和）を高さを除して求まる全体変形角速度を用いている。

また、関係式は、せん断変形に係わる $\tau-\gamma$ 関係にはひずみ速度の割増があり、曲げ変形に係わる $M-\phi$ 関係にはひずみ速度の割増がないこととしている。しかし、関係式をあらゆるせん断スパン比を想定した地震応答解析に適用するにあたっては、せん断ひずみ速度とスケルトンカーブの割増率の関係を評価することが合理的である。本論文では、試験データをもとに、全体変形角速度とスケルトンカーブの割増率で評価された関係式(1)式を、せん断ひずみ速度とスケルトンカーブの割増率の関係を再評価した。(図4参照)

(2)については、弾塑性地震応答解析を実施するにあたり、1/4ループの平均ひずみ速度によりスケルトンカーブの割増率を設定すると、最大ひずみが生じる時刻まで平均ひずみ速度の計算が不可能となる。このため、平均ひずみ速度を用いてスケルトンカーブの割増率を設定して地震応答解析を実施するには、スケルトンカーブを更新する毎に何度かの反復計算を実施する必要がある、解析上煩雑である。本論文では、図5に示すように試験データから半ループにおける最大ひずみ速度と1/4ループの平均ひずみ速度の関係を求め、この

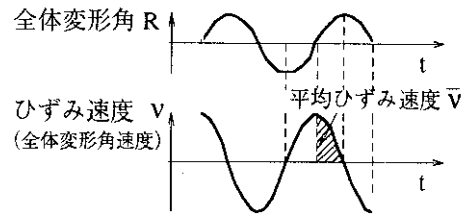


図2 平均ひずみ速度の定義

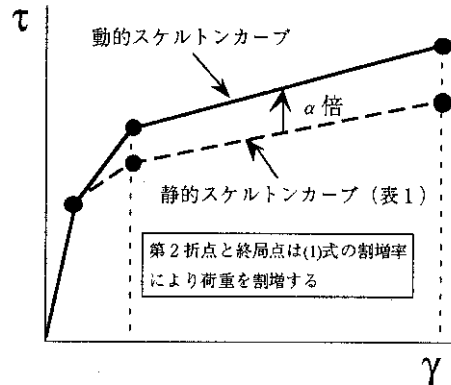


図3 動的スケルトンカーブ ( $\tau-\gamma$ 関係)

表1  $\tau-\gamma$ 関係の静的スケルトンカーブ

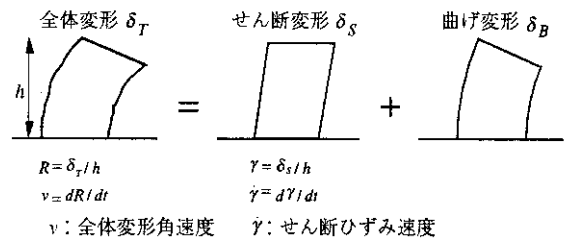
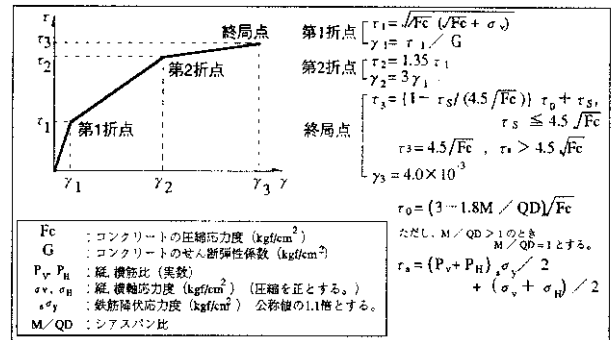


図4 変形の分離の考え方

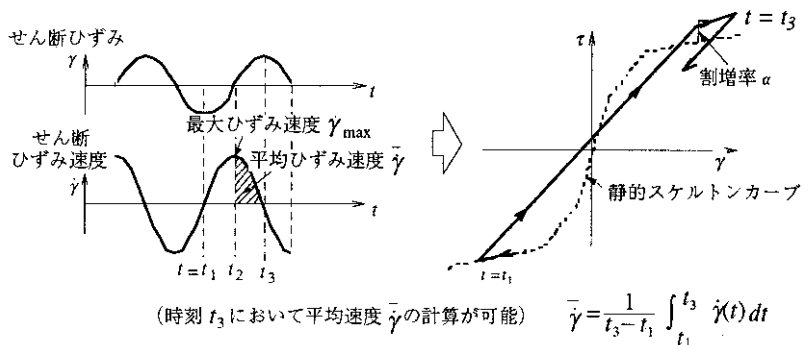


図5 平均ひずみ速度とスケルトンカーブの関係

関係を用いることにより解析に適用する場合に半ループにおける最大ひずみ速度からスケルトンカーブの割増率を算定することとして、応答解析の簡便化をはかった。

### 3.2 セン断ひずみ速度とスケルトンカーブの割増率の関係

せん断ひずみ速度とスケルトンカーブの割増率の関係を求めるにあたり、まず、全体変形角速度とせん断ひずみ速度の関係を整理する。整理の対象とする試験体は、ひずみ速度試験、減衰性能試験及び終局応答試験における動的試験の各試験体とした。

各試験体における全体変形に対するせん断変形の割合を図6に示す。全体変形に対するせん断変形の割合は70%から90%の間に分布しており、平均的なせん断変形の比率は変形の小さい場合85%程度、変形の大きい場合80%程度となっている。ここでは、各試験体のせん断変形を概括的に全体変形の80%と考えることとした。これより、平均ひずみ速度( $\bar{\dot{\gamma}}$ )と平均せん断ひずみ速度( $\bar{\dot{\gamma}}$ )の関係は次式であらわされる。

$$\bar{\dot{\gamma}} = 0.8 \cdot \bar{\dot{\gamma}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$\bar{\dot{\gamma}}$  : 平均せん断ひずみ速度(1/sec)

$\bar{\dot{\gamma}}$  : 平均ひずみ速度(rad/sec)

さらに、文献<sup>14)15)</sup>と同様に平均せん断ひずみ速度と $\tau-\gamma$ 関係のスケルトンカーブ(以下、「スケルトンカーブ」と呼ぶ。)の関係について次の式に基づき回帰分析を実施した。

$$\alpha = \left( \frac{\bar{\dot{\gamma}}}{\dot{\gamma}_0} \right)^a \quad \dots \dots \dots (3)$$

$\alpha$  : スケルトンカーブの割増率

$\bar{\dot{\gamma}}$  : 平均せん断ひずみ速度(1/sec)

$\dot{\gamma}_0$  : 静的試験時平均せん断ひずみ速度( $1.0 \times 10^{-6}$  1/sec)

$a$  : 回帰係数

平均せん断ひずみ速度とスケルトンカーブの割増率の関係についての回帰分析結果を図7に示す。ここで、回帰分析を実施したのは、図3においてひずみ速度による割増率が設定されている、最大せん断ひずみが表2及び図8に示すゾーン4～ゾーン6に属するデータとした。なお、図7中の動的効果係数とは、スケルトンカーブを更新したとみなされるループにおける動的試験の荷重値を静的試験の荷重値で除した値である<sup>14)15)</sup>。また、各ゾーンにおける回帰係数を表3に示す。回帰係数( $a$ )の値は全領域で概ね0.02となつている。これらより、平均せん断ひずみ速度とスケルトンカーブの割増率を次の式であらわすこととした。

$$\alpha = \left( \frac{\bar{\dot{\gamma}}}{\dot{\gamma}_0} \right)^{0.02} \quad \dots \dots \dots (4)$$

表2 ゾーン分割の範囲

ゾーン	試験の変形
ゾーン1	原点より第1折点の変形x0.9まで
ゾーン2	ゾーン1を超え第1折点の変形x1.1まで
ゾーン3	ゾーン2を超え第2折点の変形x0.9まで
ゾーン4	ゾーン3を超え第2折点の変形x1.1まで
ゾーン5	ゾーン4を超え終局点の変形x0.9まで
ゾーン6	ゾーン5を超え終局点の変形x1.1まで
ゾーン7	ゾーン6を超えた部分すべて

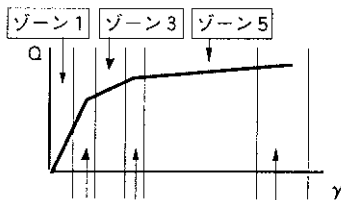


図8 ゾーン分割

表3 回帰分析結果

ゾーン	aの値
ゾーン4	0.0205
ゾーン5	0.0196
ゾーン6	0.0219

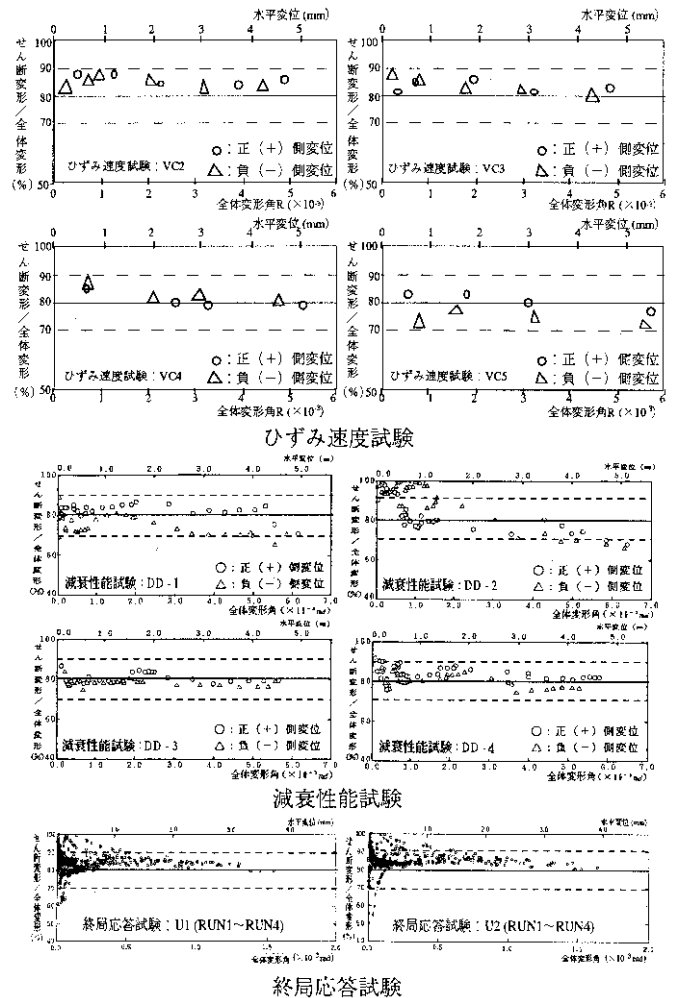


図6 全体変形に対するせん断変形の割合

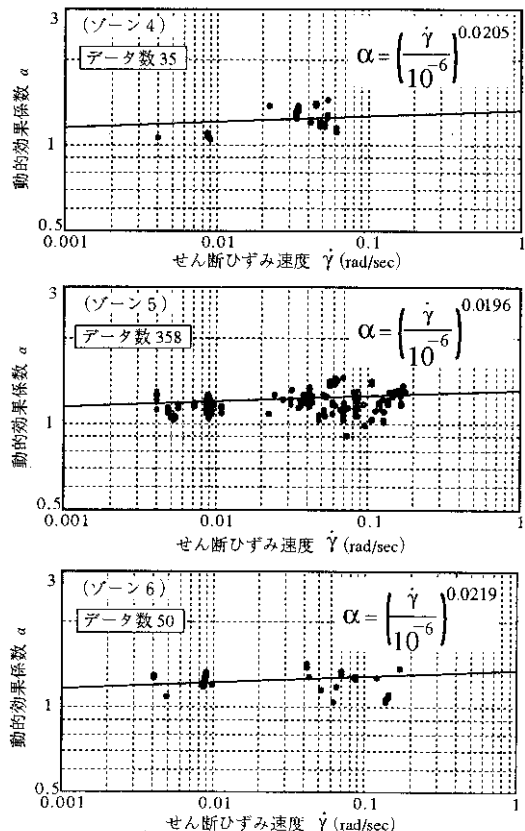


図7 セン断変形角速度と動的効果係数の関係

### 3.3 最大ひずみ速度と平均ひずみ速度の関係

試験結果の平均ひずみ速度は、荷重ゼロから荷重最大までの1/4ループの平均ひずみ速度について整理されている。ここでは、試験結果の1/4ループの平均ひずみ速度と1/2ループの最大ひずみ速度の関係について再整理する。再整理の対象とする試験体は、振動台試験である減衰性能試験及び終局応答試験の各試験体とする。

試験結果の全体変形角速度の荷重ゼロから最大までの1/4ループにおける全体変形角の平均ひずみ速度（以下、3.3項において「平均速度」と呼ぶ。）と、1/2ループにおける全体変形角の最大ひずみ速度（以下、3.3項において「最大速度」と呼ぶ。）の関係のうち、終局応答試験の結果を図9に示す。また、各試験体の各RUNにおける平均速度と最大速度の相関係数を図10に、各試験体の各

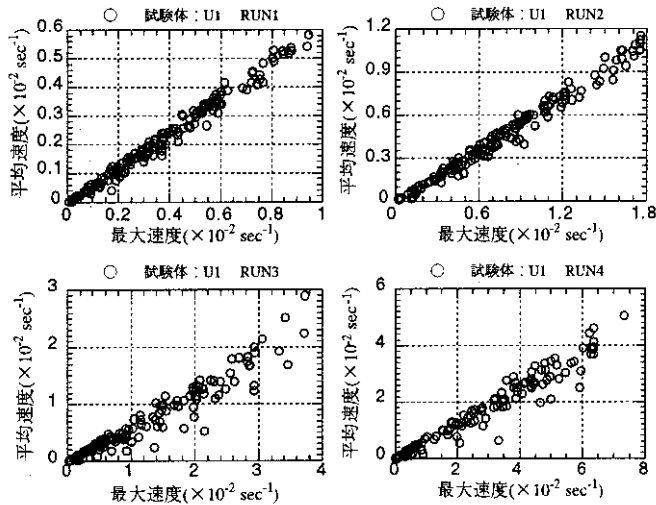


図9 平均速度と最大速度の関係（終局応答試験）

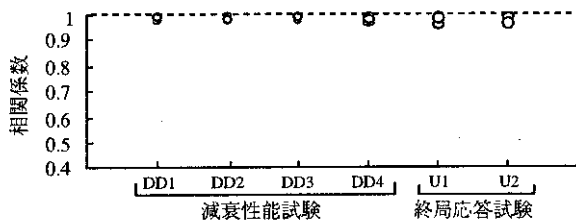


図10 RUN 毎の相関係数

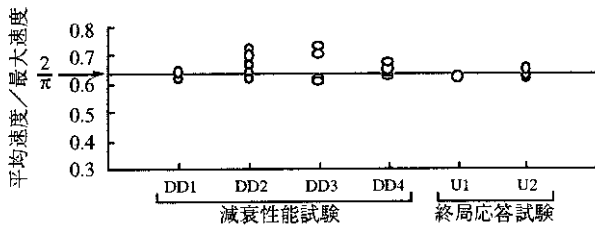


図11 最大速度と平均速度の比率（RUN 毎の回帰分析の結果）

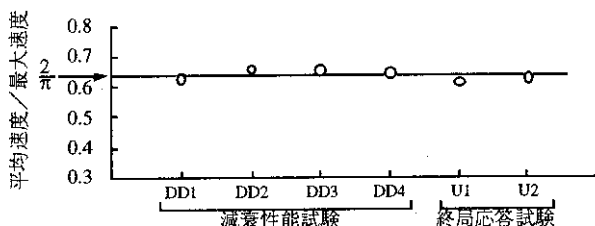


図12 最大速度と平均速度の比率（試験体毎の平均値）

RUNにおける平均速度と最大速度の比を図11に、各試験体毎の平均速度と最大速度の比を図12にそれぞれ示す。

検討結果は次のとおりである。

- ・試験結果の平均速度と最大速度の相関係数は1に近く、平均速度と最大速度の相関は強い。
- ・速度の時刻歴を正弦波と仮定すれば、平均速度と最大速度の比は  $2/\pi$  ( $=0.636\cdots$ ) となるが、図11及び図12に示されるように、試験結果の平均速度と最大速度の関係も概ね  $2/\pi$  に近い値となる。
- ・減衰性能試験の入力波は正弦波に近いログスウィープ波であり、終局応答試験の入力波はランダム波であるが、両試験による平均速度と最大速度の関係に傾向の違いは見られない。

これらより、平均速度 ( $\bar{v}$ ) と最大速度 ( $v_{max}$ ) の関係は、次式により評価することとする。

$$\bar{v} = (2/\pi) \cdot v_{max} \cdots \cdots (5)$$

さらに、(2)式に示されるようにひずみ速度とせん断ひずみ速度に線形の関係があることを仮定すれば次式となる。

$$\bar{\dot{\gamma}} = (2/\pi) \cdot \dot{\gamma}_{max} \cdots \cdots (6)$$

### 3.4 解析用スケルトンカーブの提案

地震応答解析に用いるひずみ速度の影響を考慮した解析用スケルトンカーブを表4にまとめて示す。

表4 ひずみ速度を考慮した解析用スケルトンカーブ

1.  $\tau$ - $\dot{\gamma}$  関係

- ・せん断応力度 ( $\tau$ ) の割増率 ( $\alpha$ ) はせん断ひずみ速度 ( $\dot{\gamma}$ ) に応じ次式により算定する。

$$\alpha = \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0}\right)^\beta \cdots \cdots (4)$$

ここで、 $\dot{\gamma}$  : 平均せん断ひずみ速度 (1/sec)  
 $\dot{\gamma}_0$  : 静的試験時相当の平均せん断ひずみ速度で  $1.0 \times 10^{-6}$  (1/sec) とする  
 $\beta$  : 0.02 とする。  
 ただし、 $\alpha \geq 1$  とする。

- ・平均せん断ひずみ速度 ( $\dot{\gamma}$ ) は、最大せん断ひずみ速度 ( $\dot{\gamma}_{max}$ ) より次式により算定する。

$$\dot{\gamma} = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot \dot{\gamma}_{max} \cdots \cdots (6)$$

ここで、 $\dot{\gamma}_{max}$  : 最大せん断ひずみ速度 (1/sec)

- ・ $\tau$ - $\dot{\gamma}$  関係の各折点は表1に示す静的スケルトンカーブの各折点 ( $\tau_1, \gamma_1$ ), ( $\tau_2, \gamma_2$ ), ( $\tau_3, \gamma_3$ ) をもとに次式により算定する。

第1折点 ( $\tau_1, \gamma_1$ )  
 第2折点 ( $\alpha \cdot \tau_2, \gamma_2$ )  
 第3折点 ( $\alpha \cdot \tau_3, \gamma_3$ )

ひずみ速度を考慮したスケルトンカーブ

表1に示す静的スケルトンカーブ

2. M- $\phi$  関係

- ・ひずみ速度の影響は考慮しない。

3. 適用範囲

- ・平均せん断ひずみ速度が  $0.1$  (1/sec) 以下を適用範囲とする。

#### 4. 地震応答解析法

ひずみ速度の影響を考慮した解析用スケルトンカーブを地震応答解析に適用する方法として、半ループ毎の最大せん断ひずみ速度よりスケルトンカーブの割増率を設定する詳細法と、全時刻歴における最大せん断ひずみ速度よりスケルトンカーブの割増率を設定する簡易法の2種類の方法を提案する。

##### 4.1 詳細法

詳細法による地震応答解析法の手順は次のとおりである。

地震応答解析における各部材の半ループにおける最大せん断ひずみ速度から表4中に示す(6)式により平均せん断ひずみ速度を計算し、さらに平均せん断ひずみ速度から(4)式によりスケルトンカーブの割増率を求める。半ループ内でスケルトンカーブを更新する場合には、その割増率を乗じたスケルトンカーブを用いる。この方法では、スケルトンカーブが更新される度にひずみ速度に応じて異なるスケルトンカーブを用いることになる。詳細法の概念を図13に示す。

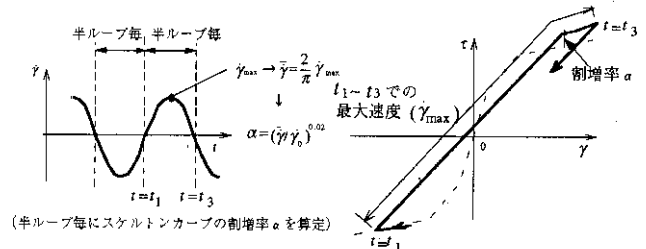


図13 詳細法の概念

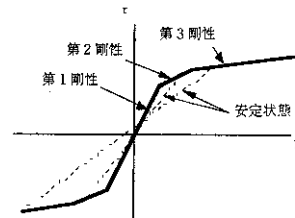


図14 τ-γ関係の凡例

詳細法の基本的な履歴ルールは、鉄筋コンクリート造耐震壁の復元力特性の評価法<sup>4)5)</sup>に示されているようにτ-γ関係は最大点指向型としている。スケルトンカーブの割増率の採用による詳細法のτ-γ関係の履歴ルールは次のとおりである。

・第1剛性上で最大せん断ひずみ速度を更新した場合

応答値が第1剛性上から第2剛性上に移行する場合に、最大せん断ひずみ速度より求まるスケルトンカーブを用いる。

・安定状態で最大せん断ひずみ速度を更新した場合

安定状態ではひずみ速度による剛性の変化はないが、スケルトンカーブを更新する場合に最大せん断ひずみ速度より求まるスケルトンカーブを用いる。

・第2剛性上で最大せん断ひずみ速度を更新した場合

その時点で用いているスケルトンカーブの第2剛性と最大せん断ひずみ速度より求まるスケルトンカーブの第3剛性の交点を指向する。

・第3剛性上で最大せん断ひずみ速度を更新した場合

第3剛性上で最大ひずみ速度が生じた場合は、スケルトンカーブを変更しない。

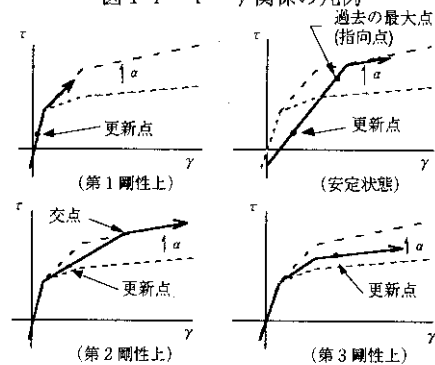
以上の、詳細モデルの履歴ルールを図14～図15に示す。

##### 4.2 簡易法

簡易法による地震応答解析の手順は次のとおりである。

まず第一ステップとして地震応答解析により各部材の全時刻歴における最大せん断ひずみ速度を求める。この最大せん断ひずみ速度の値から表4に示す(6)式により平均せん断ひずみ速度を計算し、さらに(4)式により各部材のスケルトンカーブを計算する。この計算をスケルトンカーブの割増率の変動が1%以下になるまで繰り返す。簡易モデルによる地震応答解析法のフローを図16に示す。なお、簡易法の応答解析に用いる復元力特性の履歴特性は最大点指向型とする。

ここで、簡易法による地震応答解析は非線形応答解析の反復計算になるので、演算時間が多大となるように思われるが、通常第一ステップを含めて二回の非線形応答解析で収束する。



二点：ひずみ速度の影響を考慮したスケルトンカーブ  
 一点：簡易なスケルトンカーブ  
 更新点：最大せん断ひずみ速度が生じたポイント

図15 詳細法の履歴ルール

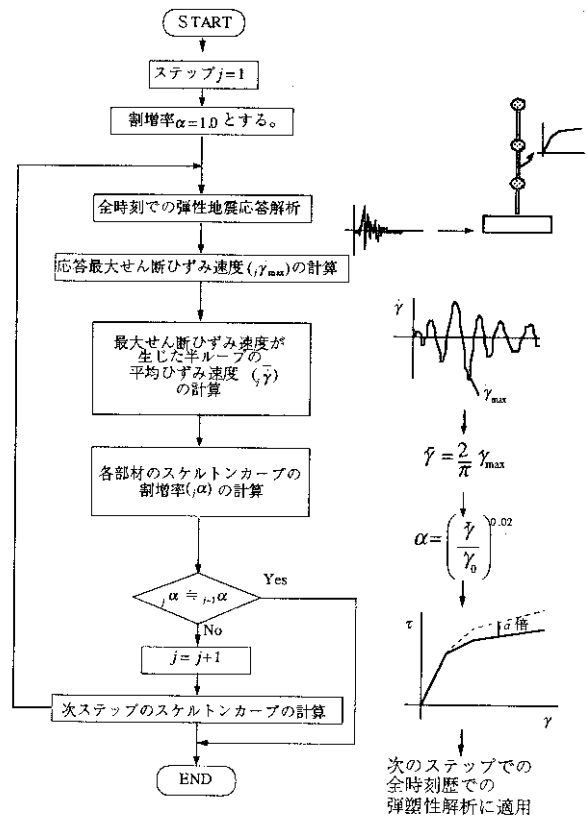


図16 簡易法の解析フロー

## 5. シミュレーション解析

### 5.1 対象試験の概要

シミュレーション解析において対象とした試験は、鉄筋コンクリート造のI型耐震壁の(財)原子力発電技術機構多度津工学試験所の大型高性能振動台による加振試験である<sup>11)</sup>。

#### (1) 試験体概要

試験体は鉄筋コンクリート造のI型耐震壁であり、試験体のウェブ壁は、壁厚75mm、壁長さ3000mm、壁内法高さ2020mmである。なお、試験体のせん断スパン比は0.8である。

試験体の壁筋比は、縦横とも $\rho_s=1.2\%$ であり、ウェブ壁の配筋はD6@70ダブルとなっている。また、トップスラブ部には重錘が配置され、試験部(ウェブ壁及びフランジ壁)の平均軸応力度は $15\text{kgf/cm}^2$ となっている。

試験体形状、試験体の基本特性、鉄筋の材料試験結果及びコンクリートの材料試験結果を図17、表5及び表6にそれぞれ示す。

#### (2) 加振方法

加振方向は水平1方向であり、入力レベルは試験体の応答に対応した次の5レベルが設定され、順次入力レベルをあげながら加振試験が実施されている。なお、括弧内に加振波の最大値を示す。

- 1.RUN1 微小振幅レベルで弾性範囲(53Gal)
- 2.RUN2 せん断ひびわれ発生時のひずみレベル(112Gal)
- 3.RUN2' せん断ひびわれ発生時のひずみレベル(304Gal)
- 4.RUN3 せん断ひびわれ発生時の3倍のひずみレベル(352Gal)
- 5.RUN4 せん断変形角が $2/1000\text{rad}$ 程度(577Gal)
- 6.RUN5 最大耐力近傍(せん断変形角が $4/1000$ 程度)(1230Gal)

加振波は試験体の初期弾性域(0.07秒)から最大耐力近傍(0.25秒)までの周期で平坦なスペクトル形状を持つ人工波である。加振波の時刻歴及び応答スペクトル(RUN1)を図18及び図19に示す。

### 5.2 解析モデル

解析モデルは、試験体を集中重量と曲げせん断棒でモデル化した多質点系のバネマスモデルとした。解析モデルを図20に解析モデルの諸元を表7に示す。試験部分の復元力特性は、ひずみ速度による割増率を乗ずる前の $\tau-\gamma$ 関係及び $M-\phi$ 関係を表1に示す式<sup>4)</sup><sup>5)</sup>によりモデル化した。ひずみ速度による割増率を乗ずる前の $\tau-\gamma$ 関係及び $M-\phi$ 関係を図21及び図22に示す。

### 5.3 解析方法

解析ケースは次の3ケースとした。

- (1) 詳細法
- (2) 簡易法
- (3) 従来法(ひずみ速度による割増率を考慮しない場合とする。)

また、減衰は初期剛性比例型の内部粘性減衰とし、減衰定数は試験体が線形範囲の試験結果を参考に一次固有振動数に対して2%とした。なお、地震応答解析法はニューマークの $\beta$ 法( $\beta=1/4$ )であり、時間刻みは原波の1/10の0.001秒とした。応答解析はRUN1からRUN5までの加振波を連続して入力する解析とした。

表5 試験体の基本特性

軸応力度	断面積	重量		
		トップスラブ部	付加重錘	合計
$15\text{kgf/cm}^2$	$8135\text{cm}^2$	29.1 tonf	92.9 tonf	122.0 tonf

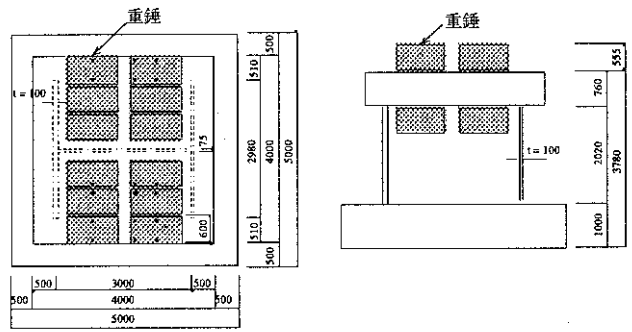


図17 終局応答試験の試験体(単位:mm)

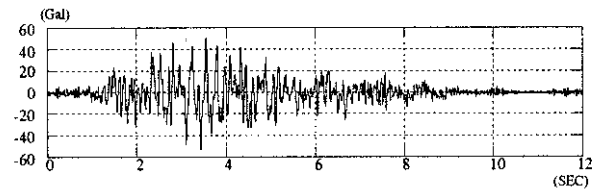


図18 加振波の時刻歴(RUN1)

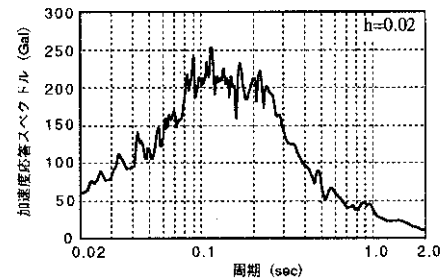


図19 加振波の加速度応答スペクトル(RUN1)

単位:cm

表7 解析モデル諸元

質点番号	重量 (ton)	回転慣性 $(I_p)$ (tonf $\cdot$ cm $^2$ )	せん断断面積 (cm $^2$ )	断面2次モーメント (cm $^4$ )
1	122	$1.378 \times 10^6$	160000	$2.133 \times 10^8$
2	0.197	$3.623 \times 10^3$	2250	$1.025 \times 10^8$
3	0.394	$8.247 \times 10^3$	2250	$1.025 \times 10^8$
4	0.394	$8.247 \times 10^3$	2250	$1.025 \times 10^8$
5	0.394	$8.247 \times 10^3$	2250	$1.025 \times 10^8$
6	0.394	$8.247 \times 10^3$	2250	$1.025 \times 10^8$
7	0.394	$8.247 \times 10^3$	2250	$1.025 \times 10^8$
8	0.394	$8.247 \times 10^3$	2250	$1.025 \times 10^8$
9	0.394	$8.247 \times 10^3$	2250	$1.025 \times 10^8$
10	0.394	$8.247 \times 10^3$	2250	$1.025 \times 10^8$
11	0.591	$1.091 \times 10^4$	2250	$1.025 \times 10^8$

図20 解析モデル

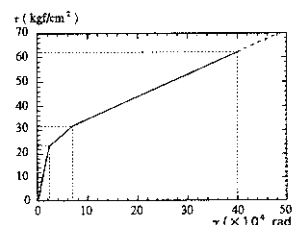


図21  $\tau-\gamma$ 関係(静的)

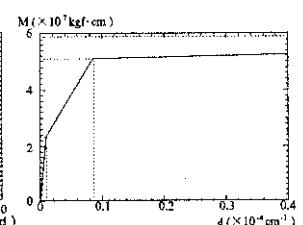


図22  $M-\phi$ 関係(静的)

表6 鉄筋及びコンクリートの材料特性

鉄筋	壁部コンクリート			
	降伏強度	圧縮強度	ヤング係数	ポアソン比
D6	3910 kgf/cm $^2$	292 kgf/cm $^2$	2340 kgf/cm $^2$	0.155

### 5.4 解析結果

解析結果の最大加速度及び最大変形を試験結果と比較して表8、表9、図23及び図24に示す。また、RUN3及びRUN4における解析結果の加速度時刻歴、加速度応答スペクトルを試験結果及び加速度-水平変位関係を試験結果と比較して図25～図28に示す。なお、表4のスケルトンカーブは終局点までを定義しているが、解析上は終局点を超えてもそのまま第三勾配が続くこととしたので、解析結果が終局点を超えているRUN5は評価の対象外とした。

シミュレーション解析結果をまとめると次のとおりである。

- ・ひずみ速度とスケルトンカーブの割増率の関係を考慮した詳細法及び簡易法による解析結果はほぼ同等である。

- ・両手法による解析結果は試験結果と概ね対応している。
- ・ひずみ速度とスケルトンカーブの割増率の関係を考慮しない従来法による解析結果の変位は試験結果より大きめの値を示した。

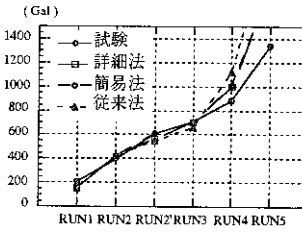


図23 最大加速度の比較

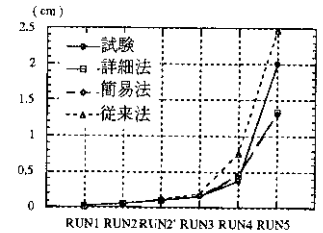


図24 最大変位の比較

表8 最大加速度の比較

	最大加速度 (Gal)				試験に対する比		
	試験	詳細法	簡易法	従来法	詳細法	簡易法	従来法
RUN1	208.3	153.1	153.1	153.1	0.73	0.73	0.73
RUN2	397.7	420.2	420.2	420.2	1.06	1.06	1.06
RUN2'	607.1	562.5	608.8	547.9	0.93	1.00	0.90
RUN3	704.4	701.9	699.1	655.4	1.00	0.99	0.93
RUN4	882.0	996.3	1007.4	1121.7	1.13	1.14	1.27
RUN5	1341.0	1806.5	1830.8	2244.0	1.35	1.37	1.67

表9 最大変位の比較

	最大変位 (cm)				試験に対する比		
	試験	詳細法	簡易法	従来法	詳細法	簡易法	従来法
RUN1	0.029	0.021	0.021	0.021	0.72	0.72	0.72
RUN2	0.058	0.058	0.058	0.058	1.00	1.00	1.00
RUN2'	0.105	0.110	0.112	0.115	1.05	1.07	1.10
RUN3	0.163	0.158	0.162	0.200	0.97	0.99	1.23
RUN4	0.372	0.448	0.457	0.759	1.20	1.23	2.04
RUN5	2.000	1.330	1.300	2.473	0.67	0.65	1.24

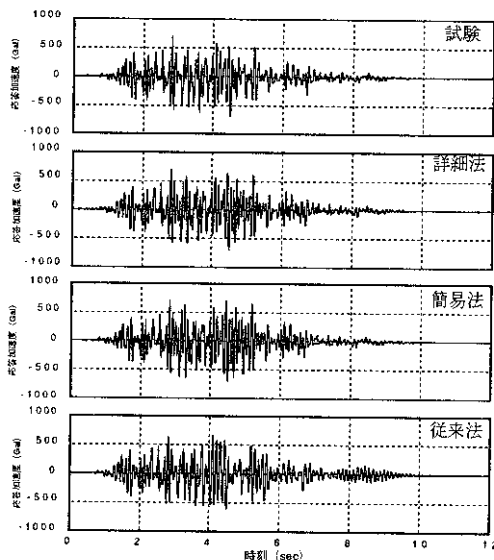


図25 加速度時刻歴の比較(RUN3)

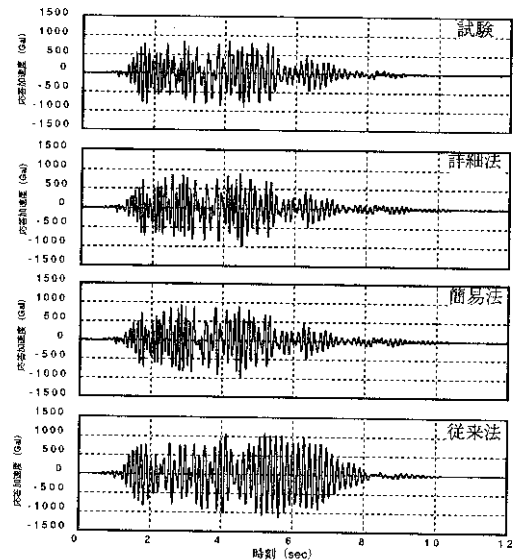


図26 加速度時刻歴の比較(RUN4)

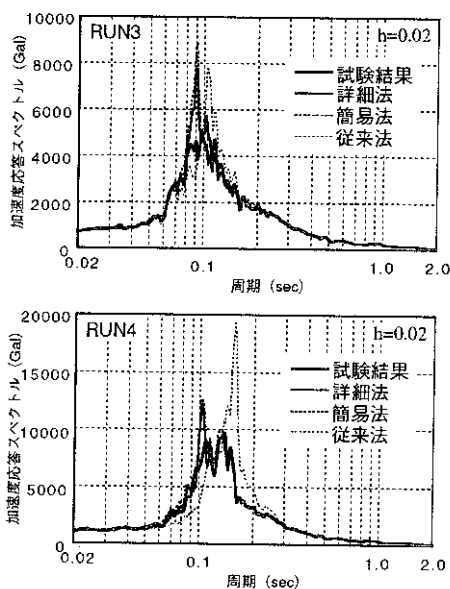


図27 加速度応答スペクトルの比較

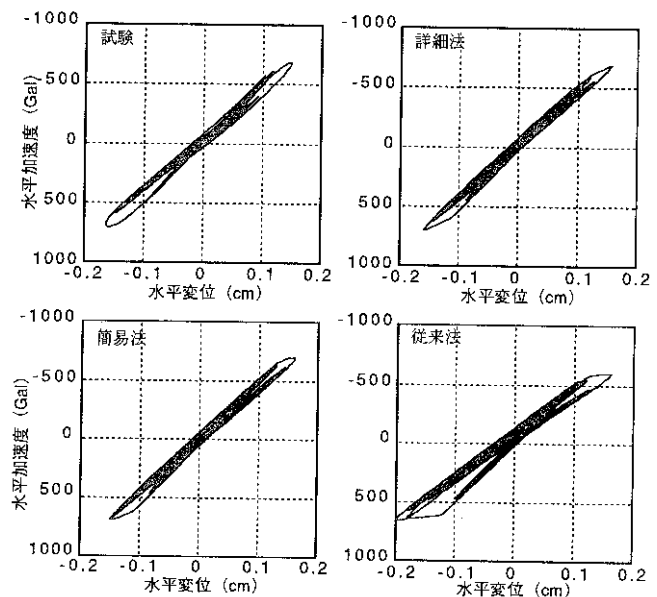


図28 加速度-水平変位関係の比較(RUN3)

なお、詳細法によるスケルトンカーブの割増率の最大値は約1.25であった。

## 6. まとめ

本論文では、文献<sup>14)15)</sup>におけるせん断破壊型鉄筋コンクリート造耐震壁の復元力特性を対象としてひずみ速度とスケルトンカーブの割増率の関係式を、地震応答解析に適用する方法について示した。これらの概要をまとめると次のとおりである。

(1) 文献<sup>14)15)</sup>によるひずみ速度とスケルトンカーブの割増率の関係式に試験データの分析を加えることにより、地震応答解析に用いる解析用スケルトンカーブを提案した。

(2) ひずみ速度とスケルトンカーブの割増率の関係を考慮した解析用スケルトンカーブを地震応答解析に適用する方法として、半ループ毎にスケルトンカーブを変化させる方法(詳細法)と、既存のプログラムを用いてひずみ速度に応じて全時刻歴で一定のスケルトンカーブを用いる方法(簡易法)の2種類を提案した。

ひずみ速度とスケルトンカーブの割増率の関係を考慮した地震応答解析法により、鉄筋コンクリート造の耐震壁の加振試験のシミュレーション解析を実施した。検討結果をまとめると次のとおりである。

(1) 減衰を初期剛性比例型で減衰定数を2%を仮定した場合、詳細法及び簡易法による解析結果は試験結果と概ね対応しており、これらの解析手法は試験結果を表現していると考えられる。

(2) 詳細法及び簡易法による解析結果はほぼ同等であり、いずれの方法でもひずみ速度とスケルトンカーブの割増率の関係を考慮した地震応答解析が可能である。

(3) ひずみ速度の影響を考慮しない従来法による解析結果は全体に大きめの変形を示しており、ひずみ速度の影響を考慮しない場合、応答値を過大に評価することがある。

本論文では、鉄筋コンクリート造耐震壁の復元力特性のスケルトンカーブについて述べた。一方、復元力特性の履歴特性及び塑性領域での減衰について検討を実施しており、今後報告する予定である。

## 謝辞

本論文に示される内容は、通商産業省から(財)原子力発電技術機構への委託事業として実施された原子力発電所施設耐震信頼性実証試験「原子炉建屋総合評価」<sup>16)17)</sup>の一部として実施された内容を再構成し加筆したものである。ご指導いただいた科学技術庁大谷圭一部長、東京工業大学滝口克巳教授、東京大学神田順助教授、名古屋工業大学久保哲夫教授、東京都立大学芳村学助教授はじめ原子炉建屋総合評価分科会委員各位に謝意を評します。また、本研究の遂行及び本論文の執筆にご協力いただいた(財)原子力発電技術機構寺田邦夫理事、北田義夫次長、太田和也主任部員に謝意を評します。

## 参考文献

- 1) 秋野金次、杉田和直ほか：原子炉建屋の復元力特性試験(小型及び部分模型)(その1~その7)、建築学会大会学術講演梗概集 No.2219~No.2225, pp957-970, 1982.10
- 2) 秋野金次、杉田和直ほか：原子炉建屋の復元力特性試験(その1~その4)、建築学会大会学術講演梗概集 No.2284~No.2287, pp1079-1090, 1984.10
- 3) 岡田恒男、秋野金次ほか：原子炉建屋の復元力特性試験(小型及

び部分模型)(その1~その6)、建築学会大会学術講演梗概集 No.2540~No.2545, pp1217-1218, 1986.10

4) 田中宏志、稲田泰夫、吉崎仁二ほか：原子炉建屋鉄筋コンクリート耐震壁の復元力特性評価式(その1~その4)、建築学会大会学術講演梗概集 No.2145~No.2148, pp289-300, 1987.10

5) 日本電気協会：原子力発電耐震設計技術指針

(JEAG4601 補-1991 追補版)「4. 建物・構築物の復元力特性の評価法」, pp. 77-97, 平成3年6月

6) 岡田恒男、神田順、秋野金次、遠藤彰：原子炉建屋耐震壁の動的性能に関する試験(その1 試験の概要)、建築学会大会学術講演梗概集 No.2609, pp1217-1218, 1988.10

7) 岡田恒男、神田順、秋野金次ほか：原子炉建屋耐震壁の動的性能に関する試験(その2~その3 ひずみ速度試験)、建築学会大会学術講演梗概集 No.2610~No.2628, pp1219-1222, 1989.10

8) 岡田恒男、秋野金次ほか：原子炉建屋耐震壁の動的性能に関する試験(その4~その5 減衰性能試験)、建築学会大会学術講演梗概集 No.2529~No.2530, pp1057-1060, 1989.10

9) 柴田明德、久保哲夫、秋野金次ほか：原子炉建屋耐震壁の動的性能に関する試験(その6~その7 ひずみ速度試験・結果の評価)、建築学会大会学術講演梗概集 No.2685~No.2686, pp1369-1372, 1990.10

10) 柴田明德、久保哲夫、秋野金次ほか：原子炉建屋耐震壁の動的性能に関する試験(その8~その10 減衰性能試験)、建築学会大会学術講演梗概集 No.2687~No.2689, pp1373-1378, 1990.10、

11) 柴田明德、神田順、久保哲夫、秋野金次ほか：原子炉建屋耐震壁の動的性能に関する試験(その11~その12 終局応答試験)、建築学会大会学術講演梗概集 No.2780~No.2781, pp1559-1562, 1993.9

12) 柴田明德、神田順、久保哲夫、秋野金次、平隆臣：原子炉建屋耐震壁の動的性能に関する試験(その13~その14 復元力特性確認試験)、建築学会大会学術講演梗概集 No.2782~No.2783, pp1563-1566, 1993.9

13) 柴田明德、神田順、久保哲夫、秋野金次、平隆臣：原子炉建屋耐震壁の動的性能に関する試験(その15~その16 復元力特性確認試験)、建築学会大会学術講演梗概集 No.21506~No.21507, pp1011-1014, 1995.9

14) 持田哲雄、柴田明德、久保哲夫、五十嵐克哉、稲田泰夫、室井一夫、平隆臣：原子炉建屋耐震壁の動的性能に関する試験(その17 スケルトンカーブの動的効果の評価方法)、建築学会大会学術講演梗概集 No.21508, pp1015-1016, 1995.8、

15) 室井一夫、柴田明德、神田順、関松太郎、五十嵐克哉、長嶋俊雄、秋野金次：原子炉建屋耐震壁の動的性能に関する試験(その18 スケルトンカーブの動的効果の評価結果)、建築学会大会学術講演梗概集 No.21509, pp1017-1018, 1995.8、

16) 原子力発電技術機構：原子力発電所施設耐震信頼性実証試験原子炉建屋総合評価建屋系評価に関する報告書 平成6年度、平成7年3月

17) 原子力発電技術機構：原子力発電所施設耐震信頼性実証試験原子炉建屋総合評価建屋基礎地盤系評価に関する報告書 平成7年度、平成8年3月

(1996年9月9日原稿受理、1997年1月21日採用決定)