

論文 多方向加力を受ける RC 耐震壁の弾塑性挙動に関する検討

草間 和広^{*1}・北田 義夫^{*2}・西川 孝夫^{*3}・瀧口 克己^{*4}

要旨：多方向から地震力を受ける RC 耐震壁の弾塑性挙動の把握を目的に，平板を用いた要素試験，ボックス壁の斜め加力試験と水平 2 方向同時加力試験，3 次元振動台による加振試験を一連の試験として実施している。本報では，試験の全体計画と試験結果のうち平板要素試験とボックス壁の斜め加力試験結果の概要を報告する。平板要素試験結果からは，ひびわれを有する平板の軸力・せん断力組合せ応力下でのせん断伝達構成則を提案し，ボックス壁斜め加力試験結果からは，斜め入力時のボックス型耐震壁の復元力特性の評価法を提案した。

キーワード：RC 耐震壁，多方向加力，せん断伝達構成則，復元力特性

1. はじめに

多方向加力を受ける RC 耐震壁の弾塑性挙動の把握を目的に，平板要素試験，ボックス壁の斜め加力試験と水平 2 方向同時加力試験，3 次元振動台による加振試験を一連の試験として実施してきた。このうち，平板要素試験とボックス壁の斜め加力試験結果の概要を報告する。

2. 試験の全体計画

2.1 試験の目的

RC 耐震壁については，各種の研究・試験により，終局状態までの復元力特性の把握等，弾塑性挙動はかなり明らかにされている。しかし，これらの研究・試験は主に水平 1 方向の入力を対象としたものであり，実際の地震入力のように多方向からの同時入力を対象とした耐震壁の研究・試験の例は少ない。一方，近年の地震被害に関する知見や地震観測結果から地震動の 3 次元効果や上下動に対する動的な耐震設計の必要性が議論されつつあり，これらを踏まえ，多方向から地震力を受ける RC 耐震壁の弾塑性挙動の把握を目的に一連の試験を計画した。

2.2 試験計画

試験は，以下の 3 シリーズからなる。

(1) 平板要素試験

引張り応力及び圧縮応力下でのせん断力に対する RC 平板の基本特性を把握するため，要素試験を実施した。平板は一辺 120cm，厚さ 20cm の RC 正方形板で，引張り・圧縮の軸力を載荷させた状態で正負交番せん断力を作用させた。試験パラメータは平板の複合応力状態及び鉄筋比とし，合計 12 体の静的加力試験を実施した。

(2) 多方向試験

多方向入力下での RC 立体耐震壁の復元力特性を把握するため，水平 2 方向のベクトル方向を想定した斜め加力試験，上下方向加力及び水平 2 方向加力の影響と荷重履歴の検討を目的とした多方向試験を実施した。試験体は，壁厚 7.5cm，高さ 70cm～130cm のボックス型及び円筒型の RC 耐震壁であり，壁形状，荷重種別，載荷履歴を試験パラメータとし，合計 17 体の静的加力試験を実施した。

(3) 振動台試験

静的試験によって得られた多方向加力に対す

*1 (財)原子力発電技術機構 耐震技術センター (正会員)

*2 (財)原子力発電技術機構 耐震技術センター 工博

*3 東京都立大学大学院 建築学専攻教授 工博 (正会員)

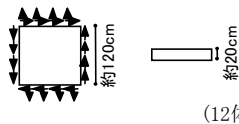
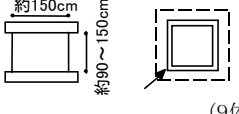
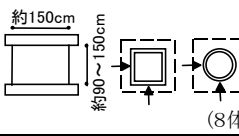
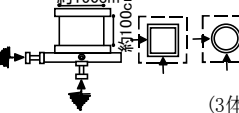
*4 東京工業大学大学院 情報環境学専攻教授 工博 (正会員)

る RC 耐震壁の耐力及び復元力特性を動的な多入力下で確認するため、3 次元振動台による RC 立体耐震壁の加振試験を計画した。試験体は、静的試験で用いた試験体と同じ試験体とし、慣性力を与えるため、試験時には上部スラブに鉛製重錘を設置した。試験パラメータは試験体形状であり、合計 3 体の試験を行う計画である。

2.3 試験の全体概要

表 - 1 に試験の全体概要を示す。試験は平成 6 年度から平成 15 年度の 10 年間にわたり計画されている。現在、振動台による加振試験と試験の総合的な評価を行っている。

表 - 1 試験の全体概要

	試験項目	目的	試験概要
静的試験	要素試験 (H7～H10)	複合応力下での RC 板のせん断力に対する基本性状の把握	 (12体)
	斜め加力試験 (H7～H10)	水平2方向加力時における耐震壁の耐力、スケルトンカーブの把握	 (9体)
	多方向同時加力試験 (H7～H14)	多方向加力時における履歴特性の把握	 (8体)
動的試験	振動台試験 (H12～H15)	静的試験より得られた結果の動的多方向入力における確認	 (3体)

3. 平板要素試験

3.1 概要

耐震壁は地震時の多方向からの入力により、軸力とせん断力を繰返し受ける。ここではこのような複合応力下での RC 平板の基本的弾塑性挙動を把握することを目的に、一定の引張りまたは圧縮軸力下での正負交番面内せん断力載荷試験を実施した。次に試験結果からひびわれ面におけるせん断伝達構成則を考案し、既往の構成則との比較検討を行うとともに非線形 FEM 解析による構成則の適用性を確認した。

3.2 試験及び試験結果

(1) 試験体

平板試験体は一辺 120cm、厚さ 20cm の RC 正方形板である。主筋は SD345 の D13, D16, D22 を 150mm ピッチでダブル配筋とし、鉄筋比を各々 0.84%, 1.32%, 2.58% とした。コンクリートの調合強度は 30MPa である。試験体は鉄筋比と軸方向力を組合せた合計 12 体である。試験体の形状を図 - 1 に示す。なお、試験体に用いた鉄筋及びコンクリートの材料試験結果は文献 1) による。

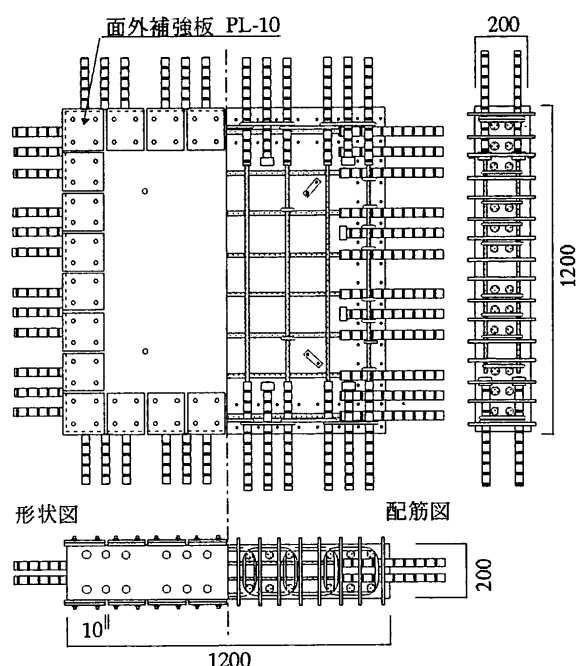


図 - 1 平板試験体概要

(2) 加力方法

加力はまず試験体に引張り軸力により初期水平ひびわれを発生させた後、一端除荷し、圧縮または引張り軸力を一定に保ちながら正負交番せん断力を荷重制御及び増分せん断変形角による変形制御で与えた。¹⁾

(3) 試験結果

図 - 2 に D16 試験体のせん断応力 - せん断ひずみ関係を示す。図中には、(1)式及び(2)式による鉄筋強度から求まる鉄筋降伏時せん断応力と最大せん断応力の計算値も併記した。

$$\tau_{ycal} = \{P_w \cdot s_{oy} \cdot (P_w \cdot s_{oy} - \sigma_0)\}^{0.5} \quad (1)$$

$$\tau_{ucal} = \{P_w \cdot s_{ot} \cdot (P_w \cdot s_{ot} - \sigma_0)\}^{0.5} \quad (2)$$

ここに、 P_w 、 s_{oy} 、 s_{ot} 、 σ_0 は、鉄筋比、材料試験より得られた鉄筋の降伏強度、引張り強度及び軸応力

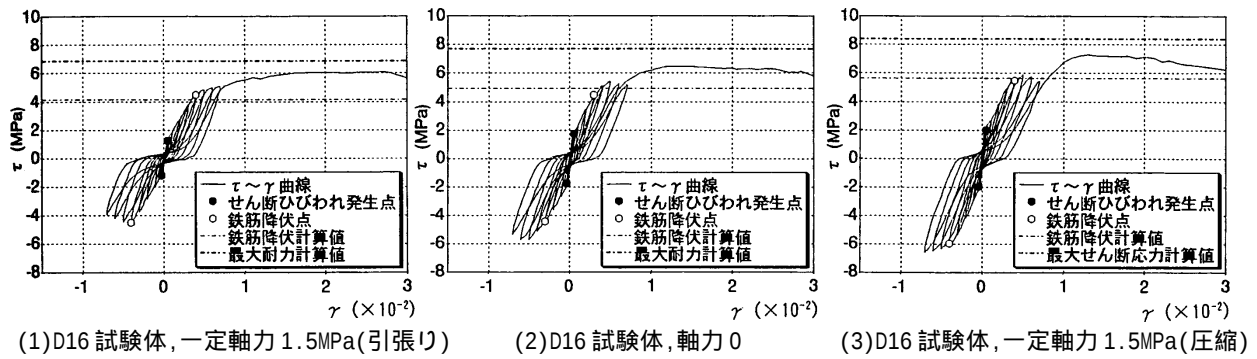


図 - 2 セン断応力 - セン断ひずみ関係 (D16 試験体)

鉄筋の降伏については計算値と試験結果は概ね対応しているが, 最大せん断応力は計算値より試験値が低い。これは, (2)式では最大せん断応力を鉄筋の引張り強度で評価しているのに対し, 試験ではそれ以前にコンクリートの破壊で最大値が決まったためである。

3.3 セン断伝達構成則の構築

(1) ひびわれ面のせん断伝達構成則

図 - 3 に, D16 試験体の $\tau - \gamma$ 包絡線のせん断ひび割れ発生前のほぼ線形と考えられる範囲の接線剛性 G_i をせん断弾性剛性 G_0 で基準化した G_i/G_0 と軸ひずみ ε_i , セン断ひずみ γ_i の関係を示す。これから, G_i/G_0 は ε_i と γ_i の両方に依存する量ととらえられるため, これらの関

係を図 - 4 のように 3 次元空間上で表した。次に $G_i/G_0 - \gamma_i - \varepsilon_i$ は空間上である曲面を形成していると考え, この関係を表すひびわれ面の G_i を式(3)で表した。

$$G_i / G_0 = \frac{A}{\sqrt{\gamma_i^2 + B \cdot \varepsilon_i^2}} \quad (3)$$

(3)式を元に試験結果の重回帰分析を行い, ひびわれ面でのせん断伝達構成則として(4)式を得た。^{2),3)}

$$G_{cr} = \frac{85 \cdot G_0}{\sqrt{\gamma_{cr}^2 + 0.06 \cdot \varepsilon_{cr}^2}} \quad (4)$$

ただし, $\gamma_{cr} (\times 10^{-6})$, $\varepsilon_{cr} (\times 10^{-6})$,
 $G_{cr}/G_0 \geq 1$, $\varepsilon_{cr} < 0$ の場合 $\varepsilon_{cr} = 0$

(4)式を模式図的に図 - 5 に示す。

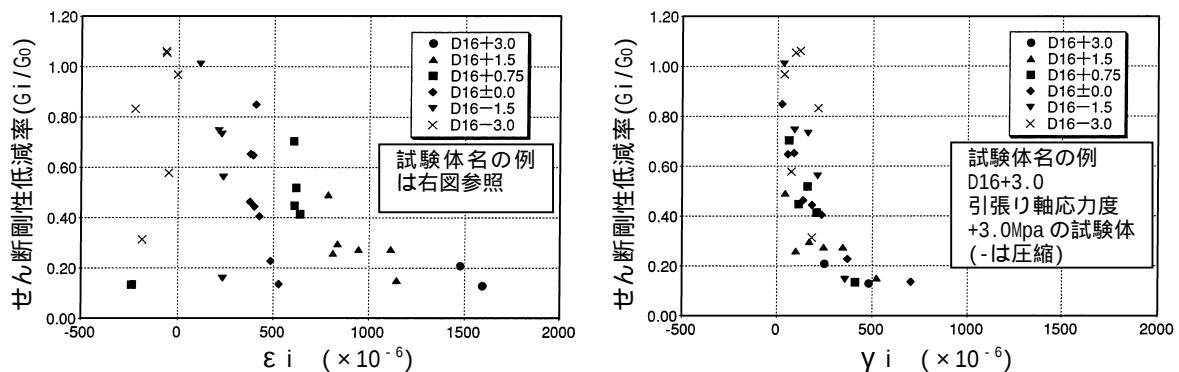


図 - 3 セン断剛性低減係数 (G_i/G_0) の傾向 (D16 試験体)

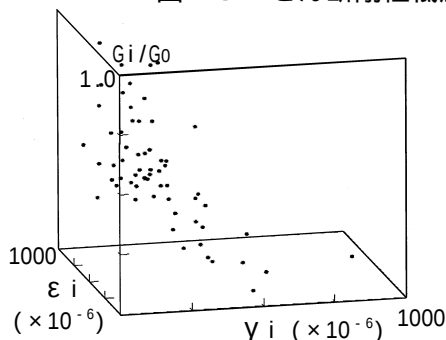


図 - 4 $G_i/G_0 - \gamma_i - \varepsilon_i$ 分布図

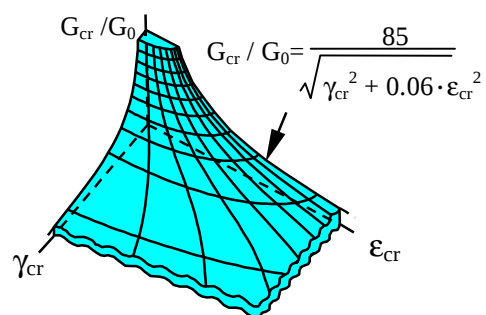


図 - 5 構成則の模式図

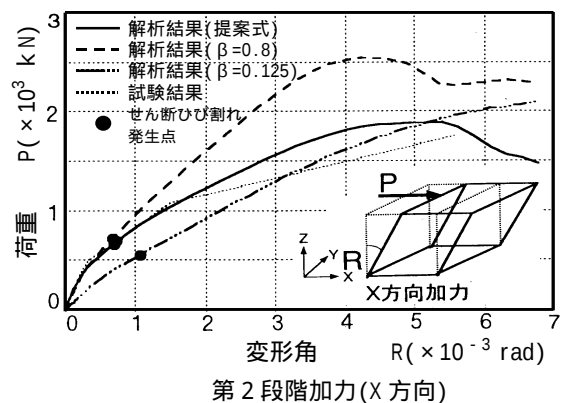
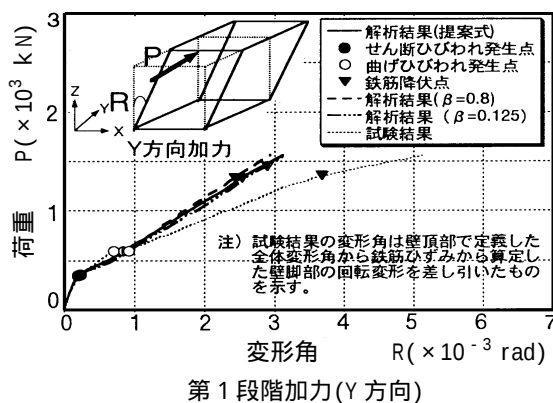


図 - 6 非線形 FEM 解析結果と試験結果の比較 (ボックス壁 2 段階加力試験)

(2) せん断伝達構成則の適用性の検討

本提案式が試験結果を概ね表現できていることを確認した後、本構成則を組込んだ非線形 FEM 解析により、既往の試験結果との適合性を検討した。対象とした試験は、ボックス型耐震壁に対し、第一段階で Y 方向に加力し全面ひび割れを発生させた後、第二段階で直交する X 方向に最大耐力まで加力したものである。試験結果と解析結果の比較を図 - 6 に示す。^{2),3)} 図には、せん断剛性低下率 β を 0.125, 0.8 と一定とした解析結果も併せて示す。非線形 FEM 解析結果から、せん断剛性低下率を一定とした既往の手法に比べ本構成則を用いた手法が試験結果との適合が良いことがわかった。

4. ボックス壁の斜め加力試験

4.1 斜め加力試験の概要

水平 2 方向加力の影響に係わる基本的弾塑性挙動の把握を目的に、水平 2 方向のベクトル方向を想定したボックス壁の斜め加力試験を実施した。試験パラメータは加力方向 (載荷角度) とシアスパン比で、合計 8 体の試験を実施した。

4.2 試験及び試験結果

(1) 試験体

試験体は壁芯間距離 150cm、壁厚 7.5cm のボックス型耐震壁で上下に基礎及び加力用スラブをもつ形状である。壁内法高さは 70cm, 100cm, 130cm とし、シアスパン比 M/Qd を各々 0.6, 0.8, 1.0 とした。また、壁部は基礎スラブに対し載荷角度の違いにより 0° , 26.6° , 45° の角度をも

って設置した。壁主筋は SD345 相当の D6 鉄筋を縦横とも 70mm ピッチでダブル配筋とし、鉄筋比は 1.2% である。壁部コンクリートは最大骨材寸法 10mm、目標調合強度は 30MPa とした。

なお、試験体に用いた鉄筋及びコンクリートの材料試験結果は文献 4) による。

図 - 7 に $M/Qd = 0.8$ 、載荷角度 45° の試験体 SD-08-45 の試験体形状を示す。

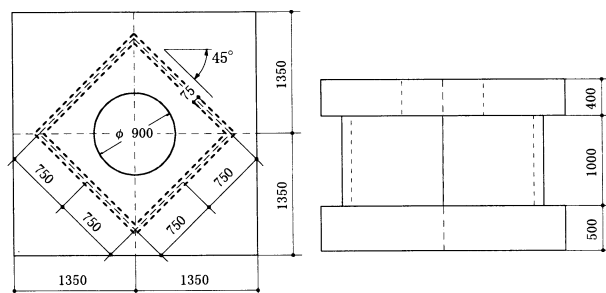


図 - 7 斜め加力耐震壁試験体形状 (SD - 08 - 45)

(2) 試験及び試験結果

加力は 1.47MPa の一定軸力を作用させた状態で加力スラブに取付けたアクチュエーターの押引きにより主に変位制御で行った。⁴⁾ 試験結果のうち、各試験体のせん断力 - せん断変形角の包絡線の比較を図 - 8 に示す。最大荷重に到達するまでは、 M/Qd が同じ試験体であれば包絡線はほぼ一致し、載荷角度による差異はない。最大荷重以降、せん断すべり破壊の兆候を示しながらも載荷角度が 45° に近い試験体ほど最大荷重を保持し変形性能が向上する。これは 26.6° , 45° の試験体ではウェブ壁のみではなく、全壁でせん断力を負担するためと考えられる。

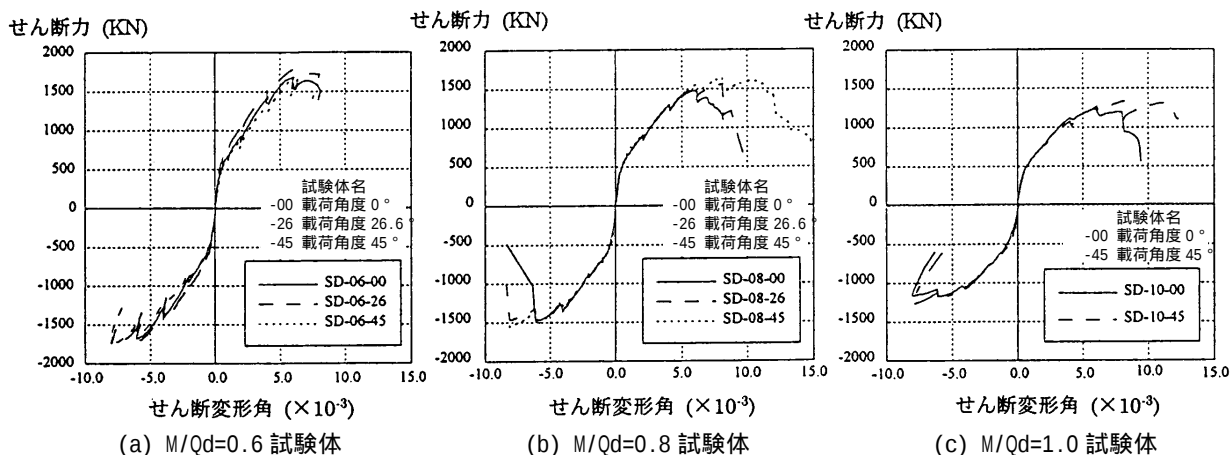


図 - 8 せん断力 - せん断変形角の包絡線

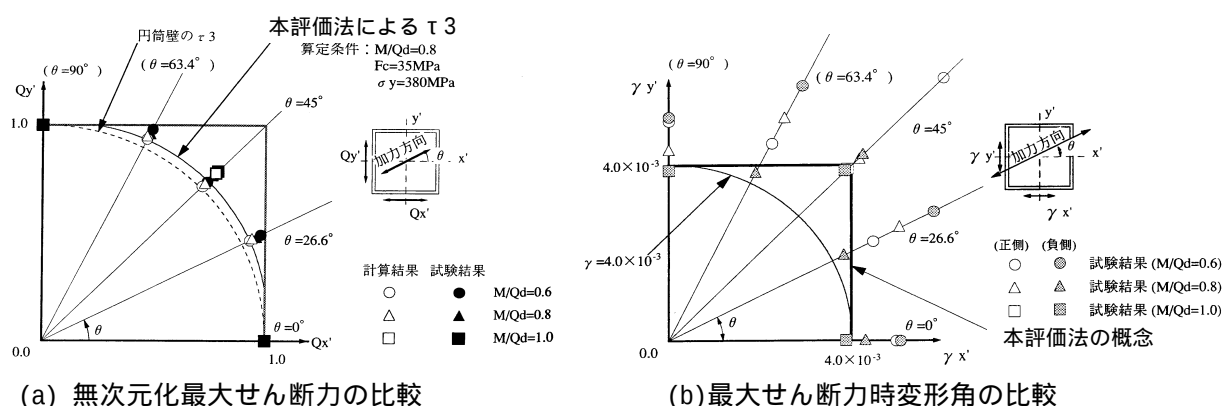


図 - 9 載荷角度と最大せん断力, 最大せん断力時変形角の関係

4.3 復元力特性の検討

(1) 最大せん断力 - せん断変形角関係

最大せん断耐力を載荷角度 0° の試験結果で割って無次元化し、また、最大せん断耐力時の変形角を2軸平面上に表したものを図 - 9 に示す。ここでは、後述する復元力特性の評価法で求めた計算値も併記する。無次元化した最大せん断力(Q_x', Q_y')は全て円弧のやや外側にあり、 M/Qd にかかわらず、載荷角度 0° の最大せん断力とほぼ同等であった。一方、最大せん断力時の変形角(γ_x', γ_y')は全て円弧の外側に位置し、載荷角度が大きくなるにしたがい大きくなる。 M/Qd の違いによる傾向については、分布はばらついており、読み取れない。

(2) 斜め方向入力時の復元力特性の評価

斜め方向入力時の耐震壁の復元力特性の評価法は、現行の耐震設計との連続性を考慮し、文献 5)の方法(以下、「JEAG モデル」という。)を基に、試験から得られた載荷角度による特性

を反映して考案した。JEAG モデルでは耐震壁のせん断、曲げの復元力特性を3折れ線でモデル化しているが、本評価法では斜め方向入力による最大せん断耐力の点でのせん断変形の増加を考慮するため、4折れ線でモデル化した。本評価法による $\tau - \gamma$ 関係を表 - 2 に示す。

(3) 本評価法の適用性の検討

試験より得られた荷重 - 変形関係と本評価法による復元力特性の比較を、 $M/Qd=0.8$ 、載荷角度 45° の試験体を例に図 - 10 に示す。試験結果と本評価法による復元力は良く対応しており、

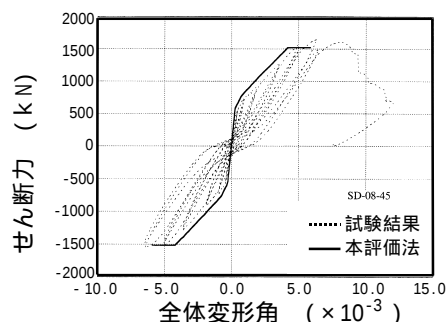
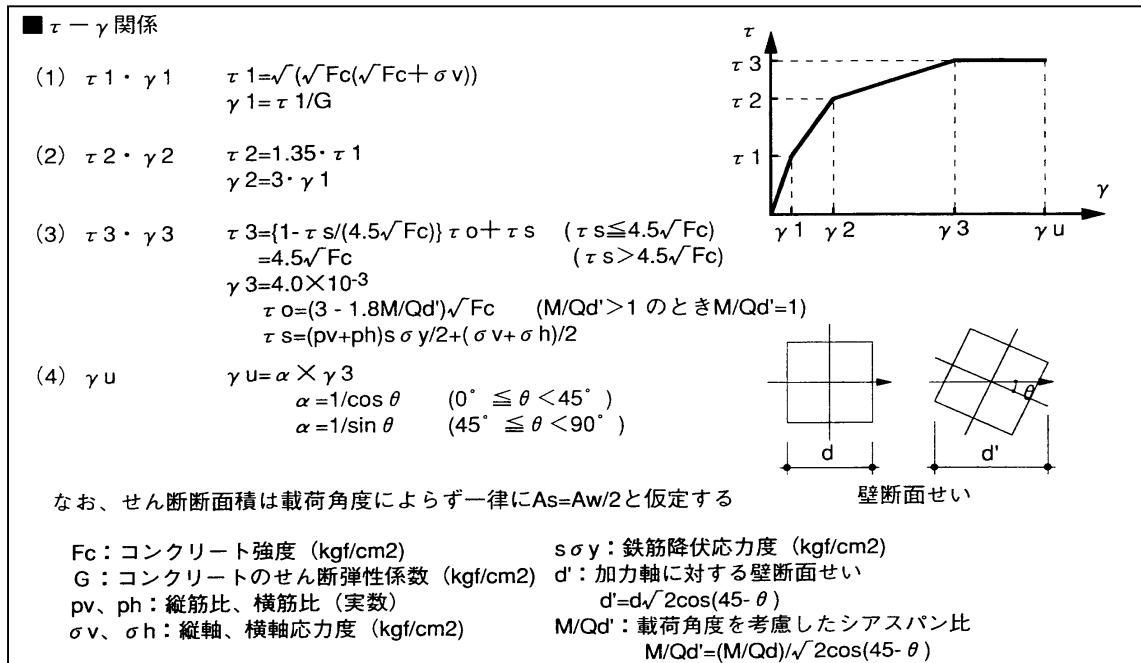


図 - 10 試験結果と本評価法の比較 ($M/Qd=0.8$, 載荷角度 45° 試験体)

表 - 2 斜め方向入力時のボックス型耐震壁の復元力特性の評価法 ($\tau - \gamma$ 関係)



本評価法により斜め方向入力時のボックス型耐震壁の復元力特性を適切に評価できることが確認された。^{6),7)}

5. まとめ

多方向加力を受ける RC 耐震壁の弾塑性挙動を検討するため一連の検討を実施した。

- (1) 平板を用いた要素試験から、ひびわれ面におけるせん断伝達構成則を考案し、その構成則の適用性を確認した。
- (2) ボックス型耐震壁の斜め加力試験を実施し、JEAG モデルを基に復元力特性について検討し、4 折れ線でモデル化したせん断復元力特性を提案した。

本試験は(財)原子力発電技術機構が経済産業省の委託による耐震安全解析コード改良試験事業の一環として「原子炉建屋の多入力試験分科会」の審議の下に実施している。

参考文献

- 1) 梅木克彦, 北田義夫ほか: ひびわれを有する RC 平板の軸・せん断組合せ応力下のせん断挙動 (その 1 試験の概要), 建築学会大会

梗概集 C-2, pp.909-910, 1998.9

- 2) 山田守, 北田義夫ほか: 同名 (その 4 ひびわれ面せん断伝達モデルの提案), 建築学会大会梗概集 C-2, pp.363-364, 1999.9
- 3) 羽場崎淳, 北田義夫ほか: ひびわれを有する RC 平板の軸・せん断応力下におけるせん断伝達構成則, 建築学会構造系論文集第 538 号, pp.139-145, 2000.12
- 4) 鳥田晴彦, 北田義夫ほか: 斜め加力による RC ボックス型耐震壁の復元力特性 (その 1 試験の概要), 建築学会大会梗概集 C-2, pp.865-868, 1998.9
- 5) 日本電気協会: 原子力発電所耐震設計技術指針, 1991 追補版
- 6) 鳥田晴彦, 羽場崎淳ほか: 斜め加力による RC ボックス型耐震壁の復元力特性 (その 7 スケルトンカーブの評価法), 建築学会大会梗概集 C-2, pp.711-712, 2000.9
- 7) 羽場崎淳, 北田義夫ほか: 斜め方向入力を受ける RC ボックス型耐震壁の復元力特性, 建築学会構造系論文集第 541 号, pp.129-136, 2001.3