

鉄筋コンクリート耐震壁の非線形解析手法の提案と検証

長 沼 一 洋

Proposal and Verification of Nonlinear Analysis Method for Reinforced Concrete Shear Walls

Kazuhiro Naganuma

Abstract

An analysis method to predict the behavior of reinforced concrete shear walls subjected to horizontal loads is presented using the previously-proposed constitutive laws of reinforced concrete plates under plane stress condition. The analysis method has been developed through investigations on the effects of differences in modeling methods of objects of analysis and in analytical assumptions.

The applicability of the analysis method was demonstrated by simulation analyses on 104 shear wall specimens with various characteristics. The difference between analytical strength and experimental strength is within 10% of the experimental strength for 90% of the analyzed specimens. Furthermore, there is no influence of specific factors on the accuracy of strength estimation.

概 要

筆者が既に提案した非線形有限要素解析に用いる平面応力下の鉄筋コンクリート板の材料構成則を用いて、地震時水平力を受ける鉄筋コンクリート耐震壁の挙動を予測するための解析手法を提案した。本解析手法は、解析対象のモデル化方法や解析上の仮定条件の違いが結果に及ぼす影響を検討した上で得られたものである。

本解析手法の精度と適用性を調べるため、実験が行われた様々なタイプの104体の鉄筋コンクリート耐震壁試験体の解析を実施した結果、実験と解析の耐力の対応性は良好で、両者の差異が±10%以内の精度に90%の試験体が納まった。さらに実験と解析の耐力比を、コンクリート強度、シアスパン比、曲げ耐力比、および本文で定義した壁補強度の4つの因子に関して整理した結果、各因子や試験体形状に関して特定の傾向は認められず、解析による耐力評価に偏りがないことが分かった。

1. 序論

地震時に水平力を受ける鉄筋コンクリート (RC) 耐震壁の挙動を有限要素法により精度良く解析できることは、耐震壁の終局強度や破壊モードの予測、あるいは力の伝達メカニズムに基づく合理的なせん断設計式の確立に大きく貢献し、耐震壁を含む RC フレーム構造物の設計にも大いに役立つものと思われる。

筆者らは既に RC 耐震壁の応力状態を単純化して再現した平板の面内加力実験の結果に基づいて、ひびわれを含む RC 板の解析モデルを開発し、既往の平板試験体を対象として、要素レベルの検証を実施した^{1,2)}。一方、耐震壁の解析では、試験体内部での一様応力場が前提である平板試験体と異なり、耐震壁内部の応力分布は様々で、非線形域では応力再配分が行われる。そのため、平板試験体の解析と異なり、要素種類や要素分割方法、コンクリートの圧縮強度到達後のひずみ軟化域特性などが解析結果に影響を及ぼすことになる。

本研究では、RC 耐震壁を対象とした解析に関して、解析対象のモデル化方法や解析上の仮定条件の違いが結果に及ぼす影響を検討し、RC 耐震壁の解析手法を提案した上で、既往の様々なタイプの耐震壁試験体の解析を行い、その精度と適用性を検証した。

2. 耐震壁の解析手法

2.1 要素種類と要素分割方法

有限要素法による解析に際して、適切な要素種類の選択や要素分割方法に関する統一的かつ具体的指針は現時点では得られておらず、経験的、あるいは解析コストや計算機のハード面での制約等により決定されている場合が多いのが実状である。RC 耐震壁を対象とした場合、単純な形状であれば高次の内挿関数を有する要素 (高次要素) により、比較的粗い分割としている例がある³⁾。

一般に、低次の内挿関数を有する要素 (低次要素) に比較して、高次要素では同一精度を確保する上で必要な要素数を減少させることができる。その反面、少ない要素数では、原子力関連構造物のような形状や配筋が複雑なものを表現することは困難であり、データ作成や結果の評価に際しても、低次要素の方が取り扱いが容易である。また、コンクリートのひびわれや圧壊による非線形性の急激な進行に伴い、局所的に卓越するようなひずみ分布は、少数の高次要素で追従させることが困難と思われる。そこで、本研究では一次の内挿関数を有する要素 (一次要素) を用いることを前提とした。

非線形解析においては、実際に生じるひずみや応力分布に対応できる要素分割が必要となる。そこで、要素分

割方法の違いが解析結果に及ぼす影響を把握するために、JCI耐震壁選定試験体⁴⁾より、図-1に示す基本試験体#2、および#2とシアスパン比が異なる#2"の2体⁵⁾を対象として、加力方向に平行な壁（ウェブ壁）の要素分割方法をパラメータとして解析した。実験では2体ともコンクリートの破壊が生じており、基本試験体#2では曲げ+せん断、#2"はせん断卓越型であった。

モデル化に際しては、上下のスラブは耐力に直接影響を及ぼさないものと考えられることから、図-2に示すように基礎スラブは無視し、平板シェル要素を用いてモデル化し、加力スラブは要素の厚さを壁体部の10倍として剛体に近い扱いとした。加力方向に直交する壁（フランジ壁）は面外曲げを受けるため、厚さ方向に10分割した積層シェル要素とし、要素の大きさはウェブ壁の要素に合わせた。鉄筋は一方剛性を有する等価な層に置換し、断面内の対応する位置に配置した。コンクリートの圧縮強度到達後のひずみ軟化域特性については後節にて詳述するが、最大強度点より収束点（応力 100 kgf/cm²、ひずみ 5,000 μ）までを直線とした雨宮・野口の提案モデル⁶⁾を採用した。他の解析条件は既報¹⁾における平板試験体の解析条件と等しい。解析は、低荷重域では荷重増分、高荷重域では最大荷重を把握するため変位増分を与え、荷重および変位増分量は各試験体で同一とした。

図-3は2体の最大荷重とウェブ壁の要素分割数の関係を示したものである。図中の○印と△印は、要素形状をそれぞれ壁面と相似とした場合（高さ方向分割数=水平方向分割数）、および正方形に近くした場合（高さ方向分割数<水平方向分割数）の結果である。これらの図よ

り、分割数が50以下では要素形状や分割数が耐力に及ぼす影響が大きく、耐力を過大評価しやすいこと、さらに、分割数がほぼ等しい場合は、要素形状が正方形に近い方が実験値に近い耐力を示していることが分かる。

図-4に基本試験体#2の荷重～変形関係の比較を示す。要素分割の違いによる影響は、低荷重域ではほとんど認められないが、ひびわれ進展後の変形量と最大荷重に認められる。これは、コンクリートのひびわれ発生や圧壊、鉄筋の降伏等の判定時期、および、ひびわれや圧壊に伴う解放エネルギーが、要素の形状や大きさに支配されるためである。但し、分割数が48と80の場合では、その差はかなり小さい。なお、いずれのケースもひびわれ発生荷重が実験よりかなり高いため、その後の変形を過小評価している。ひびわれ強度が割裂強度より低下しているためと考えられ、後節にて別途検討を行う。

以上より、一次要素を使用した場合の要素分割方法としては、正方形に近い要素形状で、分割数を50程度以上とすることが望ましいと言える。

2.2 コンクリートの圧縮ひずみ軟化域特性

シリンダーの一軸圧縮試験の結果に基づいてコンクリートの圧縮強度到達後のひずみ軟化域を表現した式としては、Popovics⁷⁾、Kentら⁸⁾、Tsai⁹⁾、Fafitisら¹⁰⁾などの提案がある。一般に圧縮強度が高いもの程、ひずみ軟化域の下り勾配は急激となることが知られているが、実験結果の相互比較では、圧縮強度が等しくても結果にかなり差が見られる場合もあり、試験機の剛性や載荷速度などの影響が考えられる。

一方、前川の指摘¹¹⁾にもあるが、現状では圧縮ひずみ

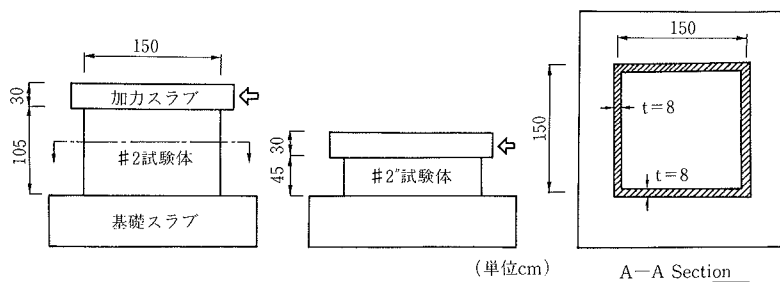


図-1 基本試験体#2および#2"の形状寸法

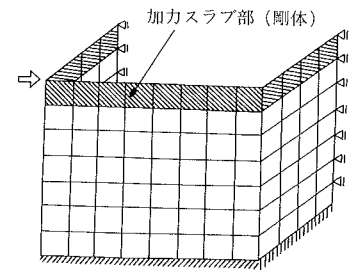


図-2 基本試験体#2および#2"のモデル化

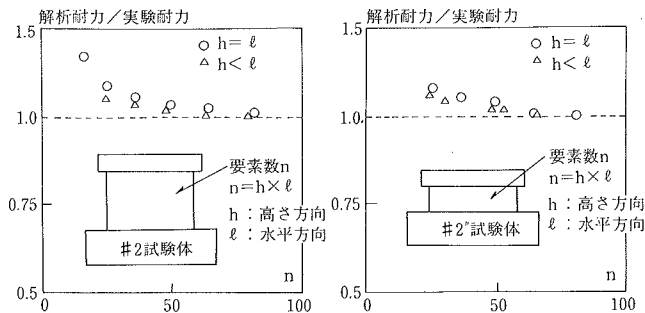


図-3 基本試験体#2および#2"のウェブ壁の要素数を変化させた場合の最大荷重解析値の変化

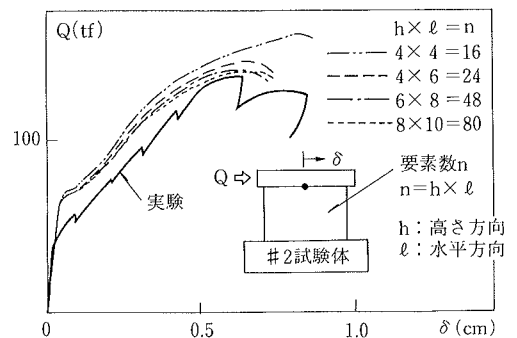


図-4 基本試験体#2の荷重～変形関係の比較

軟化現象を含む破壊過程を解析で十分追跡できる段階ではなく、筆者の経験でも、構造物全体が耐力低下を生じる領域では収束解を得にくくなる上、要素サイズの違いが結果に大きな影響を及ぼす場合が多い。現状では一部の要素が圧縮ひずみ軟化域に入り、構造物の耐力が低下し始める辺りまでが解析の限界であり、それ以降の解が得られたとしても信頼性に問題があると思われる。

以上より、コンクリートの圧縮ひずみ軟化域の形状を詳細に検討してモデル化しても、現状ではその妥当性を検証することが困難であると言える。本研究では、暫定的に比較的簡潔な表現式として、既往の実験結果より、普通強度から高強度までのひずみ軟化域を直線で表現した雨宮・野口の提案式⁶⁾を採用することにした。但し、これは無ひびわれ状態のプレーンコンクリートを対象としたものであり、せん断応力下でひびわれが生じたコンクリートへの適用性は、実験データがほとんど得られていないため明らかではない。

そこで、ひびわれたコンクリートの圧縮ひずみ軟化域の形状の違いが、耐震壁の最大荷重到達までの解析結果に及ぼす影響を調べるため、前述の基本試験体#2、および図-5に示す高強度コンクリートを使用したH型断面耐震壁試験体 W72M6¹²⁾の2体を対象とした解析を実施

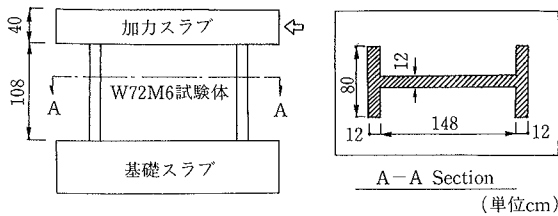


図-5 H型断面耐震壁試験体 W72M6 の形状寸法

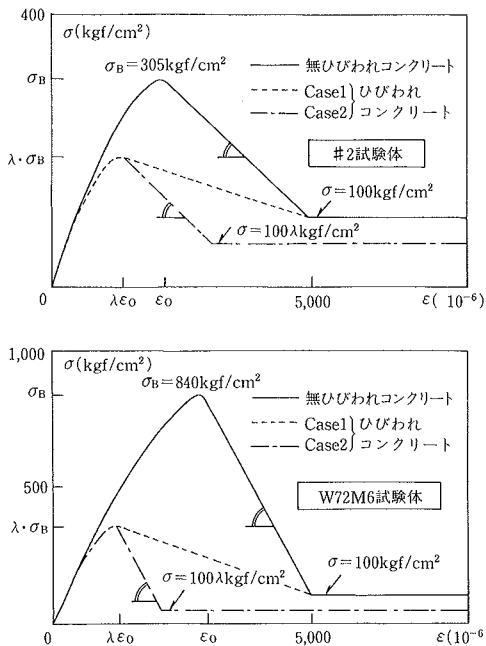


図-6 コンクリートの圧縮ひずみ軟化域のモデル化

した。解析ではひびわれたコンクリートの圧縮ひずみ軟化域として図-6に示す2種類を設定した。Case 1は、無ひびわれコンクリートと同一の点に収束すると仮定したもの、Case 2は無ひびわれコンクリートと相似形と仮定したものである。ひびわれ後のコンクリートの最大応力点、および最大応力点までの圧縮応力～ひずみ曲線は既報のモデルに従った¹⁾。ウェブ壁の要素分割は前節での検討結果に従い、正方形に近い要素形状で約50分割とした。W72M6には一定鉛直圧縮軸応力 20 kgf/cm²が載荷されている。実験では2体とも、ウェブ壁コンクリートの破壊が生じた。

図-7にそれぞれの荷重～変形関係の実験結果と解析結果の比較を示す。解析結果は2体とも同様の傾向にあり、最大荷重はCase 2でわずかに小さくなるものの、Case 1との差は1%程度である。その後はCase 2では急激な荷重低下を示し、極端に収束が悪化したため、不釣り合い力を次の変位増分ステップに持ち越して解析を進めた。前述したように、荷重低下域の解析結果は信頼性にやや問題があるが、定性的傾向の対応性と、解析の不安定化の防止という観点より、現時点ではひびわれ後のコンクリートの圧縮ひずみ軟化域は、雨宮・野口の提案による無ひびわれコンクリートと同一の点に収束するとのCase 1の仮定を採用する。

2.3 コンクリートのひびわれ強度とテンションスティフニング特性

面内せん断応力下では、コンクリートのひびわれ発生応力が割裂強度を下回ることが既往の平板実験^{13~15)}で示されている。コンクリートの圧縮強度に比べると、割裂強度自体、バラツキが大きくなる傾向にあるが、一般のRC部材の実験においても、ひびわれ発生応力と割裂

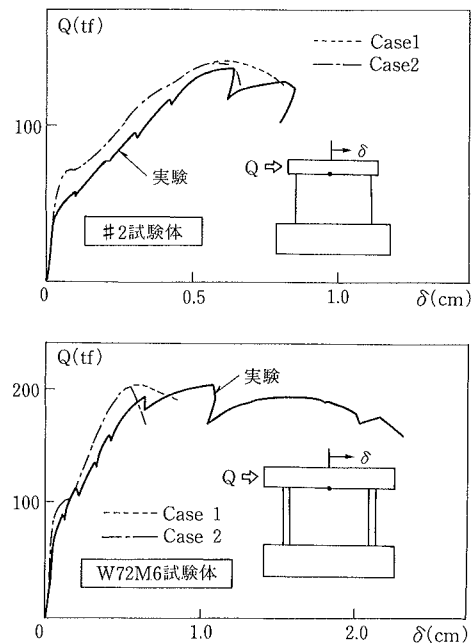


図-7 #2および W72M6 試験体の荷重～変形関係の比較

強度は良好な対応を示さないことが多い。これはコンクリートの乾燥収縮に起因する初期応力が、形状寸法、配筋方法、養生条件等、種々の因子の影響を受けるものと考えられ、現状ではコンクリートの引張強度を精度良く評価することは困難である。

テンションスティフニング特性（以下、TS 特性と呼ぶ）は、分布ひびわれモデルにより、ひびわれ間のコンクリートの引張応力を平均的に表現するもので、耐震壁のように広範囲にひびわれが分布する場合に適するものと考えられる。TS 特性の表現式は数多く提案されており、一般にひびわれ発生応力を基点とし、それに対する低下率の形で表現されている。しかし TS 特性は鉄筋径や配筋方法、あるいはかぶり厚さなど、多くの因子の影響を受けることが予想され、既往の表現式はいずれも適用性の面から十分な検討がなされているとは言い難い。

以上のように、コンクリートのひびわれ強度と TS 特性は、現時点では統一的に定量化することが困難と思われる。解析に際しては曖昧な値や特性を導入せざるを得ない。そこで、これらが解析結果に及ぼす影響度を調べるため、図-1に示した基本試験体#2を対象として、ひびわれ強度と TS 特性を変化させた解析を実施した。解析では、ひびわれ強度 (σ_{cr}) がコンクリートの割裂強度 (σ_t) と等しいとした場合と、ACI 規準のせん断ひびわれ強度の算定式¹⁶⁾の係数1.05をまるめて1.0とした次式の2種類を仮定した。

$$\sigma_{cr} = \sqrt{\sigma_B} \quad (\text{単位 kgf/cm}^2) \quad \dots\dots\dots(1)$$

式(1)では、Collins らの平板実験におけるひびわれ発生応力がほぼ評価できることが報告されており¹³⁾、原子炉建屋を対象とした耐震壁の復元力特性の評価においてもかなり良好な結果を与えている¹⁷⁾。さらに、角らも高強度材料を用いた平板実験の結果に基づいて、 σ_B が1,000 kgf/cm² 程度までの平板のひびわれ強度の評価式として、式(1)と同一の式を提案している¹⁸⁾。

パラメータにはさらに TS 特性の有無を加えた。TS 特性が無いケースは、ひびわれ直後に引張応力を全て解放するテンションカットオフを意味する。TS 特性は平板実験結果から得られたモデル¹⁹⁾を用いた。図-8に荷重～変形関係の比較を示す。 $\sigma_{cr} = c\sigma_t$ ($=27.6 \text{ kgf/cm}^2$)

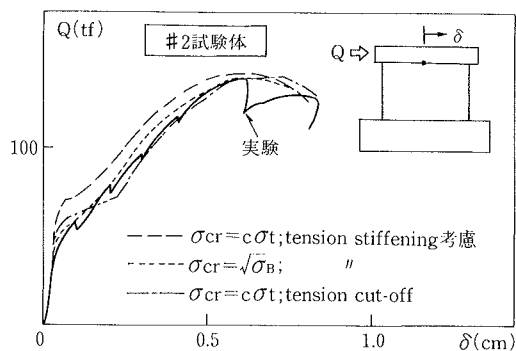


図-8 ひびわれ強度と TS 特性をパラメータとした #2試験体の荷重～変形関係の比較

とした場合には、ひびわれ発生荷重が実験値より3～4割高く、その後の変形は TS 特性を考慮した場合は小さめとなり、考慮しない場合は実験値を上回っている。しかし、最大荷重近傍ではかなり実験値に近い変形を示している。一方、 $\sigma_{cr} = \sqrt{\sigma_B}$ ($=17.5 \text{ kgf/cm}^2$) とし、TS 特性を考慮した場合は、ひびわれ発生荷重およびその後の変形量が最も実験結果に近い。

3 ケースはいずれもひびわれ発生後の変形量に差を生じているが、最大荷重とその時の変形量には顕著な差が見られない。これは、ひびわれ間のコンクリートが負担する引張応力が、ひびわれの進展や付着の喪失等によって徐々に減少するためと考えられる。また、ひびわれ強度の違いは耐震壁の耐力にほとんど影響を及ぼさないと井上²⁰⁾の指摘とも符合する。

以上のように、ひびわれ強度や TS 特性は耐震壁の耐力に及ぼす影響は小さいことが分かったが、ひびわれ発生後の変形をある程度の精度で評価するためには、出来るだけ実現象に近い扱いが必要である。よって、便宜的ではあるが、本検討結果に基づき、ひびわれ強度はコンクリートの一軸圧縮強度の平方根で与え、平板実験の結果に基づく TS 特性を用いることにする。

2.4 コンクリートのひびわれ後の圧縮劣化特性

ひびわれたコンクリートの圧縮強度の低下率は、ひびわれ面と配筋方向が成す角度により異なり、その角度がほぼ45度となる平板の純せん断実験では、ひびわれが鉄筋とほぼ直交する引張-圧縮二軸加力実験に比較して強度の低下が大きい。このことより、平板実験結果に基づく圧縮強度低減係数を耐震壁の解析に適用する場合には、ひびわれ面と配筋方向の成す角度に関する何らかの考慮が必要と言える。

図-9は、前述の基本試験体#2、#2'、および W72M6 の最大荷重の70%程度の荷重時におけるひびわれ状況を示したものである。便宜的に、配筋方向とひびわれの成す角度 (ψ) が 45 ± 15 (30～60) 度の範囲では、圧縮強度の低下が平板実験とほぼ対応するものと仮定し、その領域を図中に陰影部で示した。3体のひびわれ角度にはシアスパン比の違いや鉛直圧縮軸力の有無により、多少差が認められるが、引張側脚部を除くと、そのほとんどが水

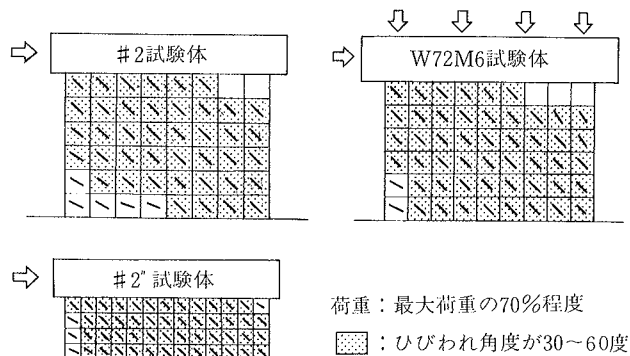


図-9 #2、#2' および W72M6 試験体のひびわれ状況の比較

平方向より30～60度の範囲にあることが分かる。

そこで、 ψ の値で区分した領域における圧縮強度の低下が耐震壁の挙動や耐力に及ぼす影響を調べるために、表-1に示すように、コンクリートの圧縮強度の低減の有無をパラメータとした解析を実施した。低減する場合には平板実験結果から得られたモデル^{1,19)}に従った。解析対象は図-9に示した3体である。

荷重～変形関係の比較を図-10に示す。3体とも同様の傾向にあり、Case 1では耐力を過大評価したが、Case 2とCase 3の解析結果にはほとんど差が認められない。

表-1 ひびわれ面と配筋方向の成す角度により圧縮強度の低減方法を変えた解析ケース

	ひびわれ面と配筋方向の成す角度 ψ	
	$30^\circ \leq \psi \leq 60^\circ$	$\psi < 30^\circ, \psi > 60^\circ$
Case 1	ひびわれ後の圧縮強度の低減無し	
Case 2	低減有り	低減無し
Case 3	ひびわれ後の圧縮強度の低減有り	

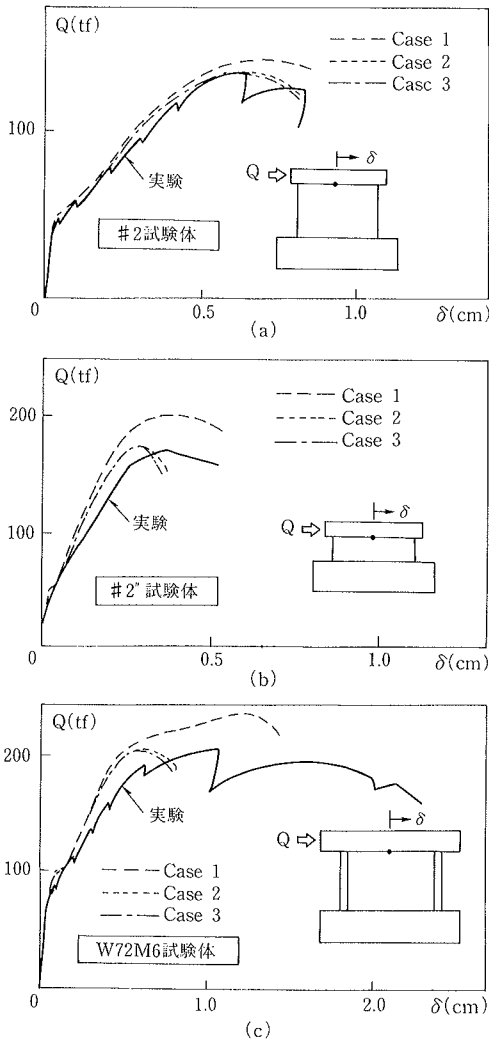


図-10 ひびわれ後の圧縮強度の低減方法をパラメータとした#2, #2''およびW72M6試験体の荷重～変形関係の比較

このことより、水平力を受ける耐震壁の耐力には、水平方向より概ね30～60度の範囲にひびわれが生じる領域での圧縮強度の低下の影響が大きいものと考えられる。水平力を受ける耐震壁の解析においては、Case 2とCase 3のいずれを用いても結果に大差はないが、平板実験においては、圧縮強度の低下は ψ の影響を受けることより、本研究ではCase 2を採用し、ひびわれが水平方向より30～60度の範囲にある場合に、ひびわれたコンクリートの圧縮特性モデルを適用する。なお、#2''とW72M6に関しては、変形量を解析で過小評価している。原因としては、基礎スラブからの縦筋の抜け出しや、正負繰り返し載荷に伴う基礎スラブ上面でのひびわれ面のすべり等が、解析で考慮されていないことなどが考えられる。

3. 解析精度と適用性の検討

3.1 解析対象試験体

解析手法の適用性を調べるためには実際の試験体を対象としたシミュレーション解析の実施が不可欠である。この場合、出来るだけ多くの試験体を対象とし、それも形状や配筋条件、材料強度などに偏りが無いように選定する必要がある。この点を考慮して、解析対象には、形状、加力方法、コンクリート強度、配筋量などの諸条件が広範なものとなるように様々なタイプの耐震壁試験体を104体選定した^{22,23)}。図-11に解析対象試験体の形状と加力方法をタイプ別に示す。試験体の水平断面で分類すると、側柱付きのI型断面が81体、H型断面が16体、箱型断面が7体である。I型断面では1層のものが26体、2層～4層の連層耐震壁が55体である。加力方法では水平加力のみ、鉛直一定軸力+水平加力、対角加力の3種類に大別され、さらに、水平力の分散加力や押し引き同時加

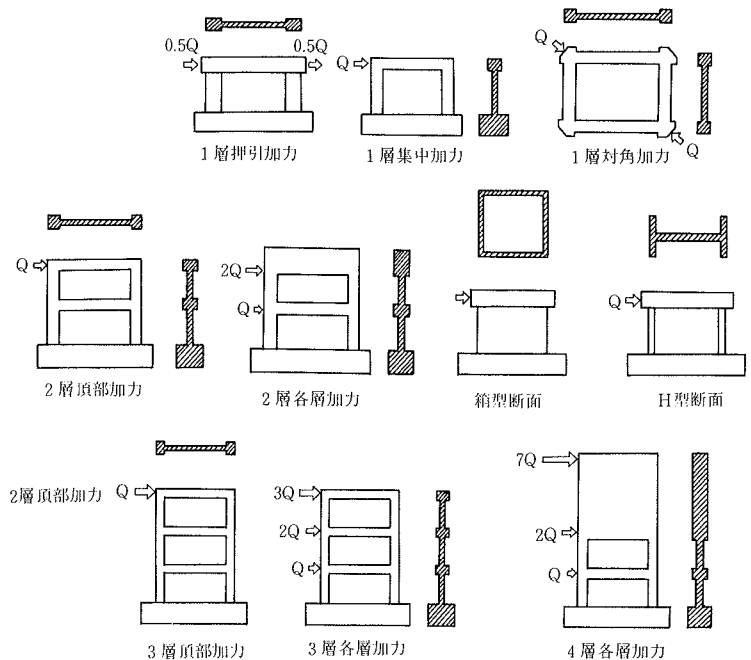


図-11 解析対象試験体の形状と加力方法による分類

力のものである。シアスパン比は0.40~2.0, コンクリート強度は170~955 kgf/cm², 壁筋比は0.12~2.0%と広範囲に分布している。

3.2 試験体のモデル化方法

試験体のモデル化に際しては, I型断面試験体については平面応力要素による2次元モデルとし, 箱型およびH型断面試験体については平板シェル要素による3次元モデルとした。要素分割は前章の検討結果に従って, I型断面試験体の各層の壁板部, あるいは箱型およびH型断面試験体のウェブ壁を50要素前後で正方形に近い要素形状で分割した。側柱, はり, フランジ壁は, 壁板あるいはウェブ壁の要素とほぼ等しい大きさの要素で分割した。基礎スラブは試験体の耐力に及ぼす影響が少ないものと考えられることから, それをモデル化せず, スラブ上面で完全固定とした。

3.3 解析方法

解析は単調荷重により, 初期は荷重制御で行い, 剛性低下が顕著となる最大荷重の近傍では変位制御に切り替え, 最大荷重点を越え耐力低下が生じ始めるまでを約40~60ステップで行った。但し, 押し引き同時分散加力が行われた試験体については, 荷重制御により解が発散するまで解析を行い, 最大荷重は解が発散が生じる直前のステップの荷重とした。

なお, 側柱がある場合, 柱内部コンクリートは, 帯筋の拘束効果により, コンクリートのひびわれ後の圧縮強度の低下率が小さくなり, 圧縮ひずみ軟化域特性も壁板部と異なる可能性が考えられる。この点を解析で考慮している例²⁴⁾もあるが, 現時点では実験データが十分とは言えず, 定量的モデル化が困難である。そこで, 側柱部ではひびわれ後のコンクリートの圧縮強度の低下は生じないものとし, 圧縮ひずみ軟化域は通常は無拘束コンクリートのモデルとする。

3.4 実験結果と解析結果の比較

実験での破壊性状は文献により表現が様々であり, 詳細な記述の無いものもあるが, 多くは側柱やフランジ壁の縦筋降伏後に壁板(ウェブ壁)にせん断破壊が生じて

いる。側柱やフランジ壁の縦筋量が多いものでは引張側縦筋の降伏以前に壁がせん断破壊しているものが多い。

解析では, 引張側縦筋の降伏の有無, および側柱あるいはフランジ壁の圧壊の有無について, 文献中に記述のある試験体に関し, いずれも対応した現象を生じた。壁のせん断破壊は, 実験ではせん断圧縮破壊, あるいはせん断すべり破壊のように表現されている場合もあるが, 解析では壁板部のコンクリートの圧壊が実験での破壊位置とほぼ対応して生じるものが多かった。

図-12~図-16に荷重~変形関係と破壊状況を実験と解析で比較したものの例を示す。いずれも荷重~変形関係は最大荷重に至るまで良好な対応を示しており, ひびわれ性状や破壊位置もほぼ対応している。

図-17は解析した104体の試験体に関して, 最大荷重の実験値と解析値の比をヒストグラムで示したものである。平均値は1.00, 変動係数が0.062と, かなり良好な対応関係にあり, 実験値との差が±5%以内のものが57%, ±10%以内に90%が納まっている。

図-18は, 最大荷重の実験値と解析値の比と, コンクリート強度, シアスパン比, 壁補強度(縦横の鉄筋比×降伏点+圧縮軸応力の平均値を $\sqrt{\sigma_0}$ で除したもの), お

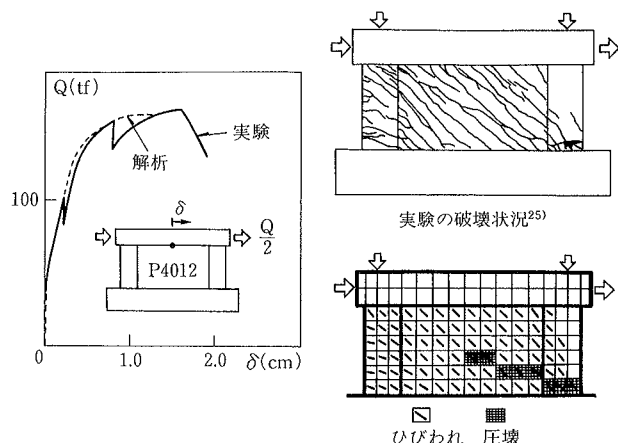


図-12 基本試験体#1⁴⁾の荷重~変形関係と破壊状況の比較

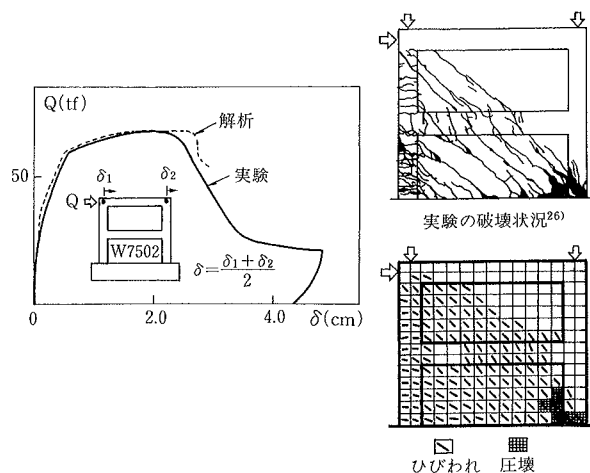


図-13 基本試験体#3⁴⁾の荷重~変形関係と破壊状況の比較

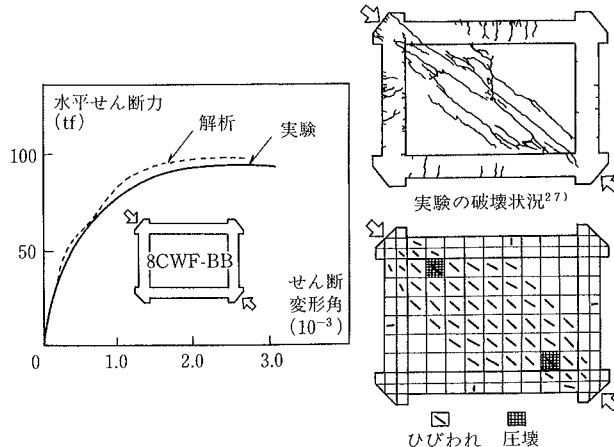


図-14 基本試験体#4⁴⁾の荷重~変形関係と破壊状況の比較

よび曲げ耐力に対する最大荷重の比の4つの因子との関係を示したものである。シアスパン比、あるいは曲げ耐力に対する最大荷重の比が小さいもの程、せん断破壊が卓越したものとして推測できる。壁補強度に関しては、その値が大きいもの程、鉄筋降伏が生じにくいと考えられる。図-18より、各因子や試験体形状に関して、特定の傾向は認められず、最大荷重の評価に偏りが無いと言える。

最大荷重時の部材角に関する実験値と解析値との比較では、104体の平均値は1.34、変動係数は0.56となり、対応性は十分とは言えない。全般に解析では変形を過小評価する傾向があり、この原因としては、試験体脚部での変形量の差が考えられる。即ち、解析では基礎スラブをモデル化していないが、実際には基礎スラブからの縦筋の抜け出しによる付加曲げ変形や、正負繰返し载荷によ

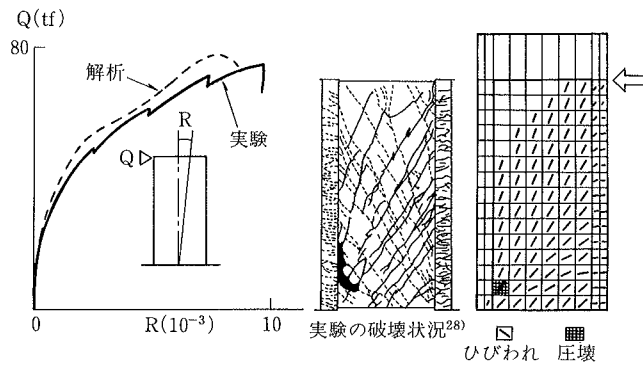


図-15 NW-3 試験体²⁷⁾の荷重～変形関係と破壊状況の比較

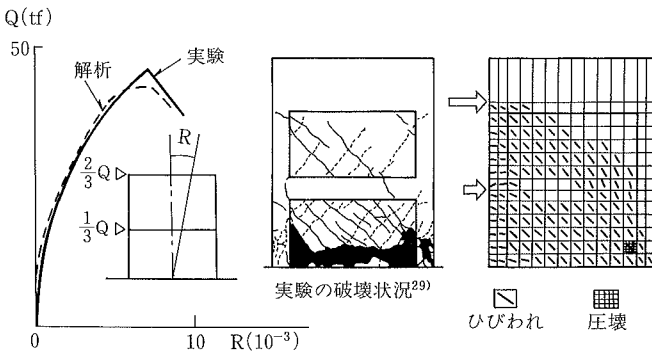


図-16 W2-SFN2 試験体²⁸⁾の荷重～変形関係と破壊状況の比較

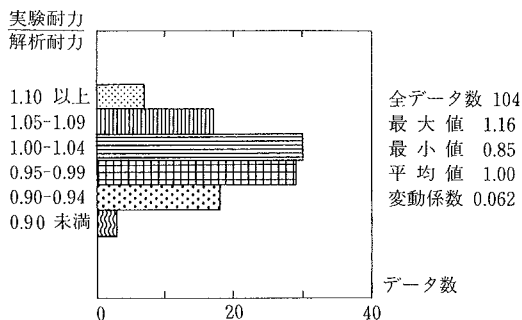


図-17 最大荷重解析値に対する実験値の比の分布状況

り、壁と基礎スラブとの境界部に生じるひびわれ面が貫通し、そこでのすべり変形等が生じているものと考えられる。これらの現象を解析でモデル化している例³⁾もあるが、本研究では、耐力評価に主眼を置いており、直接耐力に影響を及ぼさない要因は考慮していない。変形の評価に関しては今後精度向上の余地があると言える。

4. 結論

水平力を受けるRC耐震壁の解析手法を提案し、既往の104体の耐震壁試験体を対象とした解析を通して、その精度と適用性を明らかにした。以下に本研究の結論を述べる。

① 耐震壁の解析では一次の要素を用いて正方形に近い要素形状で、壁面の分割数を50程度以上とすることが耐力に関する精度を確保する上で望ましい。

② ひびわれ強度の違いやTS特性の有無は耐震壁のひびわれ後の変形量に及ぼす影響は大きいですが、耐力や耐

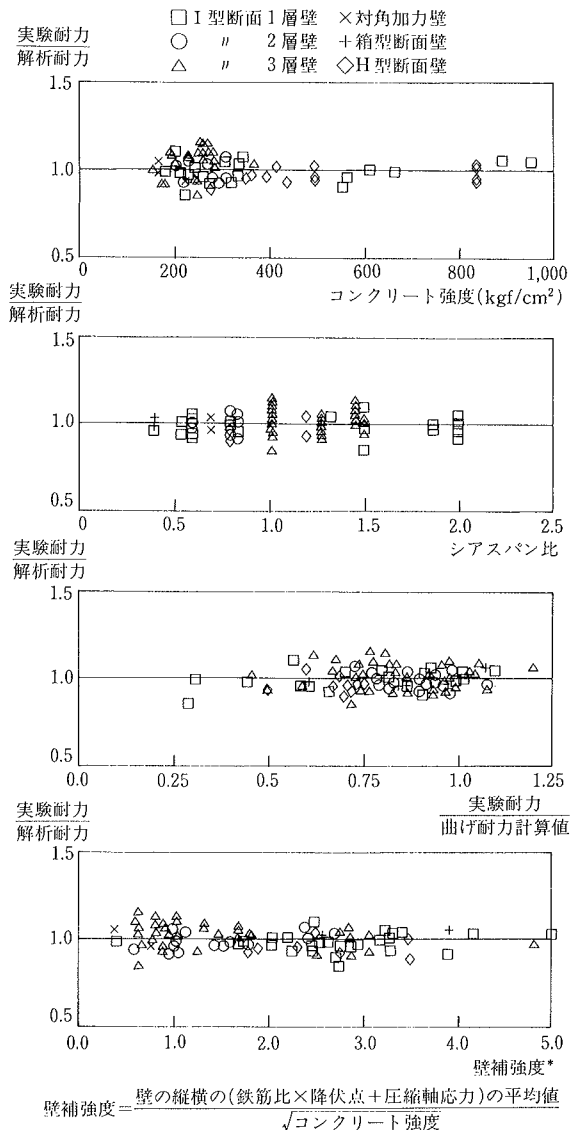


図-18 最大荷重解析値に対する実験値の比と諸因子の関係

力近傍における変形にはほとんど影響しない。

③ 耐震壁のひびわれ発生荷重の評価精度は、ひびわれ強度をコンクリートの割裂強度とするよりも、一軸圧縮強度の平方根で与えた方が良好である。

④ 耐震壁の解析では、配筋方向とひびわれの成す角度が30～60度の範囲にある要素に対して、ひびわれたコンクリートの圧縮強度の低下を考慮することで実験結果と良好に対応する耐力が得られる。

⑤ ひびわれたコンクリートの圧縮強度到達後のひずみ軟化域形状の違いは、耐震壁の耐力に僅かに影響し、急勾配の軟化域を設定すると解析が不安定化しやすい。現時点では無ひびわれコンクリートを対象としたモデルと同一の点に収束するとの仮定が適当と思われる。

⑥ 最大荷重の解析値は、全試験体の9割が実験値±10%以内に納まり、約6割は実験値±5%以内と良好であった。

⑦ 最大荷重の解析精度に特定の因子の影響は認められず、様々な条件下で偏りのない精度が得られた。

参考文献

- 1) 長沼, 他: 鉄筋コンクリート板の非線形解析モデルの提案と検証, 大林組技術研究所報, No. 42, p. 9~14 (1991)
- 2) 長沼: 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), 日本建築学会構造系論文報告集, No. 421, p. 39~48, (1991)
- 3) 申, 他: 繰返し面内力を受ける鉄筋コンクリート部材の復元力解析, コンクリート構造物の靱性と其の評価法に関するコロキウム論文集, JCI-C12, p. II-45~56, (1988)
- 4) 菅野: 「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, JCI-C6, p. 43~54, (1983)
- 5) 稲田, 他: 原子炉建屋の復元力特性試験 (その4), 日本建築学会大会梗概集, p. 963~964, (1982)
- 6) 雨宮, 野口: 超高強度鉄筋コンクリート部材の有限要素解析プログラムの開発 (その1), 日本建築学会大会梗概集, 構造II, p. 639~640, (1990)
- 7) Popovics, S.: Stress-strain Relations for Concrete under Compression, ACI Journal, Vol. 67, No. 3, p. 243~248, (1970)
- 8) Kent, D. C. et al.: Flexural Members with Confined Concrete, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 97, No. ST7, p. 1467~1487, (1972)
- 9) Tsai, W. T.: Uniaxial Compressional Stress-strain Relation of Concrete, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 114, No. ST9, p. 2133~2136, (1988)
- 10) Fafitis, A. et al.: Lateral Reinforcement for High-Strength Concrete Columns, Publ. ACI, No. SP87, p. 213~232, (1985)
- 11) 前川: 有限要素法による鉄筋コンクリート非線形解析の数値計算上の特徴, コンクリート構造物の設計にFEM解析を適用するためのガイドライン, JCI-C16, p. 127~134, (1989)
- 12) 岡本, 他: 超高強度材料を用いた原子炉建屋構造に関する研究 (その4) 日本建築学会大会梗概集, 構造I, p. 1469~1470, (1990)
- 13) Vecchio, F. J. and Collins, M. P.: The Response of Reinforced Concrete to In-Plane Shear and Normal Stresses, Pub. No. 82-03, Dep. of Civil Eng., Univ. of Toronto, (1982)
- 14) 角, 他: 面内せん断力下での鉄筋コンクリート平板におけるコンクリートの力学的特性, コンクリート工学論文, No. 88.10-1, p. 97~110, (1988)
- 15) 大森, 他: 繰返し面内せん断力を受ける鉄筋コンクリート平板の弾塑性挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 403, p. 105~118, (1989)
- 16) ACI Committee 318: Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI318-77), American Concrete Institute, (1977)
- 17) 稲田: 原子炉建屋の復元力特性に関する研究, その1, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 371, p. 61~71, (1987)
- 18) 角, 他: 高強度鉄筋コンクリート平板の面内純せん断実験 (その1~2), 日本建築学会大会梗概集, 構造II, p. 425~428, (1991)
- 19) 長沼, 他: 面内せん断応力下におけるテンションステイフニング特性のモデル化, 日本建築学会大会梗概集, 構造II, p. 649~650, (1990)
- 20) 井上: RC耐震壁の解析と破壊力学, コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム, 第1部: 委員会報告, JCIC19, p. I-96~97, (1990)
- 21) 山口, 長沼: 面内せん断力を受ける鉄筋コンクリート平板の力学的特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 419, p. 77~86, (1991)
- 22) 長沼: 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), 日本建築学会構造系論文報告集, No. 431, p. 7~16, (1992)
- 23) 長沼: 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, No. 447, p. 107~117, (1993)
- 24) 町田, 他: 鉄筋コンクリート造耐震壁の非線形解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 7, p. 417~420, (1985)
- 25) 青山, 他: 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1~2), 日本建築学会大会梗概集, p. 1407~1410, (1982)
- 26) 小野, 他: 鉄筋コンクリート造耐震壁の耐震性能に関する総合研究 (その7), 日本建築学会大会梗概集, p. 1601~1602, (1976)
- 27) 富井: 鉄筋コンクリート板のせん断抵抗に関する研究, 東京大学生産技術研究所報告, Vol. 6, No. 3, p. 83~126, (1957)
- 28) 松本, 他: シアスパン比の大きい高強度鉄筋コンクリート耐震壁の静加力実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 14, No. 2, p. 819~824, (1992)
- 29) 柴田, 他: 鉄筋コンクリート造連層耐震壁の変形挙動 (その1~3), 日本建築学会大会梗概集, 構造II, p. 573~578, (1990)