

[2070] 鉄筋コンクリート造耐震壁のせん断ひびわれ性状に関する検討

○正会員 稲田泰夫（清水建設技術研究所）
 正会員 岡田恒男（東京大学生産技術研究所）
 秋野金次（(財)原子力工学試験センター）
 小池健仁（大林組技術研究所）

§ 1. 目的

原子炉建屋の一部の耐震壁には地震力を分担するという機能の他に、通常の建築物にはない機能が要求されており、そのひとつが耐漏洩機能である。曲げによるひびわれは地震終了後は自重による軸力により殆ど閉じると考えられるので、耐漏洩機能を検証するためには、耐震壁に発生した残留せん断ひびわれを通じて漏洩する空気量を評価すればよい。漏洩量評価のための実験的アプローチの方法としては、一本のひびわれからの漏洩量を評価する算定式を作成し、これとは別に残留せん断ひびわれの幅および本数を求め、これらの積和として壁の漏洩量を求めるミクロ的な方法と、せん断ひびわれの発生した壁の漏洩量を測定し、せん断応力度あるいはせん断ひびきみ度と漏洩量の関係式を導くマクロ的な方法とが考えられる。

ひびわれの発生したコンクリート壁の一面を負圧または正圧に保持し、漏洩量を測定する実験的研究としては、Rizkallaらによる引張り力をうける壁板を通じての漏洩実験(文献1)、あるいは鈴木・滝口らによる一本のひびわれを通じての漏洩量を評価するための実験(文献2)、等が行われている。また(財)原子力工学試験センターにおいても試験を実施中である。これらの実験によれば、漏洩量は、①ひびわれ幅のほぼ3乗に比例する、②両面の差圧にほぼ比例する、③壁厚にほぼ反比例する、ことがわかってきた。即ち、先に述べたミクロ的な評価方法の基礎的なデータはある程度蓄積されてきたといえる。一方、マクロ的な評価法のデータとなるせん断ひびわれを生じた壁を対象とした漏洩試験は現在実施中のものもあるが、結果はまだ公表されていない。

また、ミクロ的評価のもうひとつのデータであるひびわれ幅、あるいはひびわれ間隔に関する実験的研究は、曲げひびわれを対象としたものは多いが、せん断ひびわれを対象としたものは少ない。柳下らは柱型のある耐震壁26体の実験結果を整理し、せん断ひびわれ本数あるいはひびわれ幅の推定式を提案している(文献3)。しかし、これらの試験体は壁鉄筋としてD6鉄筋を用いた小型のものであり、また対象としたひびわれは加力サイクルのピーク時のものである。

本論はこのような現状を踏まえ、耐震壁の残留せん断ひびわれの幅、および間隔を推定するための資料を得、ミクロ的な評価方法の一助とすることを目的とし、(財)原子力工学試験センターで行われたスケール・イフェクト試験の試験データの整理・検討、および非線形FEM解析による検討を行った結果を示すものである。

§ 2. 耐震壁の実験データによる検討

(1) 検討対象

検討対象は先にも述べたスケール・イフェクト試験の試験体5体である(文献4)。表-1には試験体および材料試験結果を、また図-1にはS-2試験体の形状を示す。このシリーズは、主にせん断耐力に対するスケール効果を検討するために、粗骨材の最大寸法と配筋方法をパラメータとして実施されたものである。これらの試験体ではウェブ壁の中央高さ位置に測定線を設け、それを横ぎるひびわれの本数、幅を測定している。測定区間は大型の試験体では図-1に示すよ

うにウェブセンターから1メートルの範囲，また小型のS-1試験体ではウェブセンターからフランジ壁の際までの範囲である。ひびわれ間隔および幅の測定方法を図-2に示した。ひびわれ幅はクラックスケールにより測定した。

(2) 試験データの整理および検討

試験より得られたひびわれ幅等のデータを整理し、図-3～図-6に示す。各図の横軸は下式で示す平均せん断応力度 τ 、あるいは平均せん断ひずみ度 r である。

$$\tau = Q / A_w \qquad r = \delta_s / H_0$$

ここに、 Q は水平せん断力、 A_w はウェブ壁断面積、 δ_s は水平変形から曲げ変形を差し引いたせん断変形（曲げ変形の測定方法は文献5を参照されたい）、 H_0 は壁のクリアー高さである。

図-3の縦軸は、各加力サイクルのピーク時のひびわれ幅の総計を測定区間の長さで除したものである。図-4の縦軸は、各サイクルの荷重を零とした時の残留ひびわれ幅の総計を測定区間の長さで除したものである。図-5はひびわれ間隔の平均値を鉄筋のピッチで除したものを縦軸に、さらに図-6は残留ひびわれ幅の平均値をピーク時のひびわれ幅の平均値で除したものを縦軸として示した。これらの図より以下の事項が指摘できよう。

- i) ピーク時のひびわれによる平均ひずみは、 τ および r の増加に対しほぼ直線的に増加する（図中に回帰式を示した，なお r は回帰式の相関係数である）。
- ii) 残留ひびわれによる平均ひずみは、ピーク時のデータと比較するとばらつきが大きい τ および r の増加に対しほぼ直線的に増加する（図中に回帰式を示した）。
- iii) 平均的なひびわれ間隔は、 τ および r の増加とともに減少し、鉄筋間隔に近づく。
- iv) 平均残留ひびわれ幅と平均ピーク時ひびわれ幅の比の値は、 τ および r の増加とともに減少し、平均25%程度となる。

(3) 考察

せん断ひびわれによる水平方向の平均ひずみは、 τ あるいは r の関数として求め得る可能性がある。また平均ひびわれ間隔、および残留ひびわれ幅とピーク時ひびわれ幅の比も、 τ あるいは

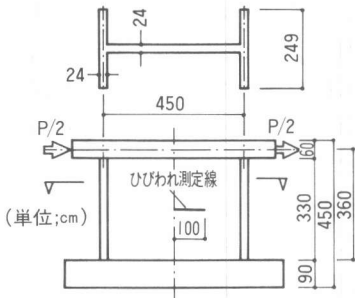


図-1 S-2試験体の形状

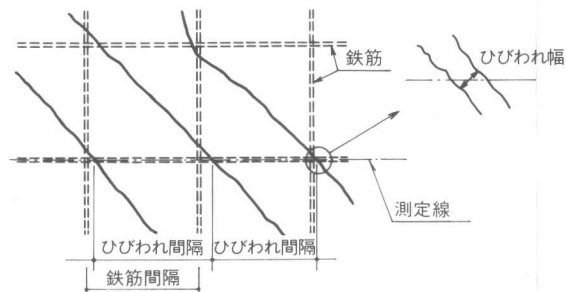


図-2 ひびわれ幅およびひびわれ間隔の測定方法

表-1 スケール・イフェクトシリーズの試験体諸元および材料試験結果

試験体	試験体諸元					壁筋材料試験結果			コンクリート材料試験結果			
	壁長さ cm	加力高さ cm	壁厚 cm	壁筋比 %	配筋 段数-径-間隔	粗骨材 径 mm	降伏点 kg/cm ²	引張強さ kg/cm ²	ヤング係数 10 ⁶ kg/cm ²	圧縮強度 kg/cm ²	ヤング係数 10 ³ kg/cm ²	割裂強度 kg/cm ²
S-1	150	120	8	1.6	2-D6-@50	10	4020	5180	1.86	304	2.56	19.6
S-2	450	360	24	1.6	2-D19-@150	25	3980	5910	1.91	234	2.08	21.4
S-3	450	360	24	1.6	4-D10-@74	25	4010	5780	1.94	263	2.27	21.6
S-4	450	360	24	1.6	2-D19-@150	10	3980	5910	1.91	231	2.26	21.6
S-5	450	360	24	1.6	4-D10-@74	10	4010	5780	1.94	253	2.10	20.3

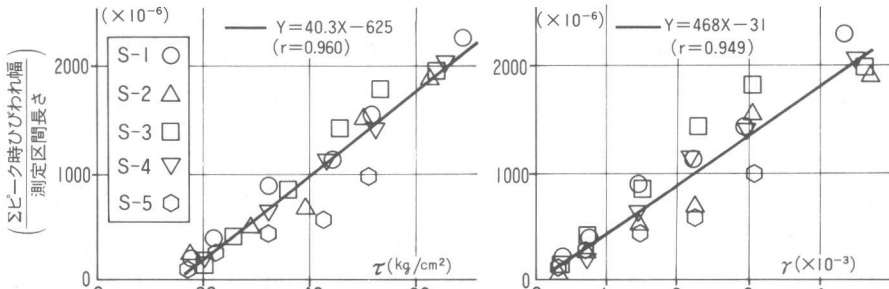


図-3 (ピーク時ひびわれ幅の総計)/(測定区間長さ)の値の推移

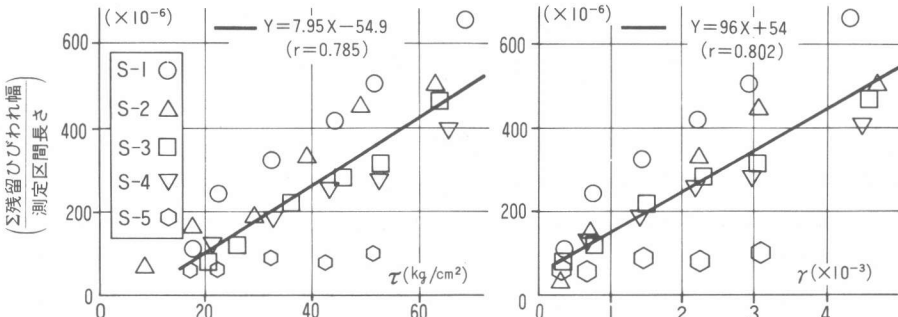


図-4 (残留ひびわれ幅の総計)/(測定区間長さ)の値の推移

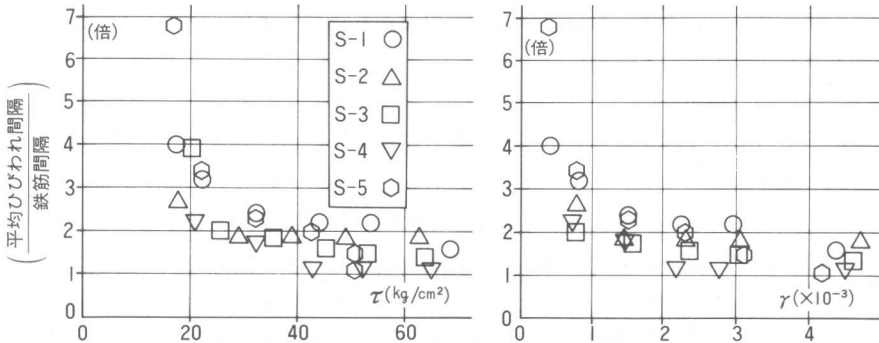


図-5 (平均ひびわれ間隔)/(鉄筋間隔)の値の推移

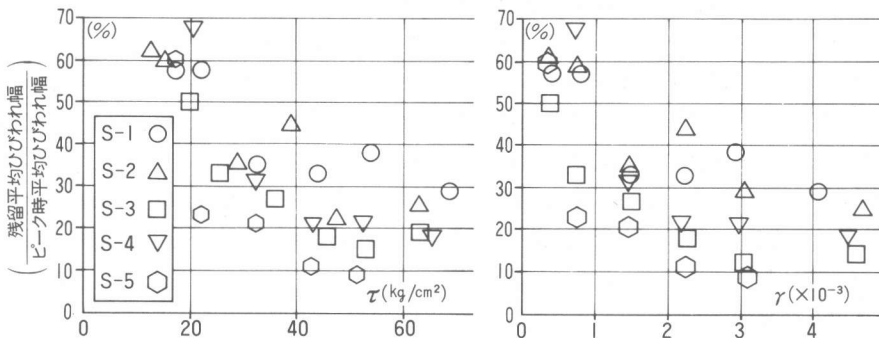


図-6 (残留平均ひびわれ幅)/(ピーク時平均ひびわれ幅)の値の推移

r の関数として表せそうである。

以上より、解析的にせん断力を受ける壁体のひずみが算定できれば、せん断応力度に応じたひびわれ間隔を仮定することによりひびわれ幅を、さらに残留ひびわれ幅をも推定できる可能性があると考えられる。次章の解析はこのような観点から行われたものである。

§ 3. 非線形FEM解析による検討

(1) 解析対象および解析モデル

解析の対象は先に示したスケール・イフェクト試験の試験体である。5体の試験体の鉄筋比は等しいので、ここではS-2試験体を解析した。試験体形状が加力方向に対して左右対称であるため半分をモデル化した。コンクリートのモデル化には積層四辺形板要素を用い、要素の厚さ方向の層の分割は、壁部で10層、加力スラブでは6層とした。鉄筋は、縦筋・横筋それぞれ一方剛性を有する膜要素とし、厚さ方向に関して試験体と同じ位置に配置し、鉄筋とコンクリートは完全付着とした。要素の分割図は省略するが、総要素数は184、総節点数は211である。試験体の壁を図-7に示すようにウェブゾーンとフランジゾーンとに分け、各々に対し図-8に示すようなコンクリートの $\sigma \sim \epsilon$ 関係を適用した。鉄筋の $\sigma \sim \epsilon$ 関係を図-9に示した。コンクリートのヤング係数および鉄筋の降伏応力度とヤング係数は表-1に示した値を用いた。以上述べた解析手法および解析に用いた仮定の妥当性については、文献6で論じているためここでは割愛する。

(2) 解析結果と実験値の比較

解析結果と実験値の比較を示す。図-10には荷重変形関係を、図-11には変形部材角1/1000の時のひびわれパターンを比較示した。荷重変形関係では、初期の剛性低下点近傍の挙動、第2勾配域での接線剛性に多少の差異は認められるが、全体としては実験値と解析値は一致しているといえる。またひびわれパターンについても、ひびわれの発生領域、方向とも、実験結果と解析値は比較的良く一致している。

(3) ひびわれ幅の検討

面内せん断応力度が作用するコンクリート壁板の斜めひびわれ発生後の変形モードを模式図で表すと、図-12のようになる。この図で、 ϵ_x 、 ϵ_y は、それぞれX方向、Y方向の鉄筋ひずみに相当する。これらのひずみとせん断ひずみ r_{xy} より引張り主ひずみ ϵ_0 が求まる。一方、これに対応する実験値は、ひびわれ幅をひびわれと直交方向のひびわれ間隔で割った値として求めることができる。ところで図-11にも示したように、解析および実験ともに、ひびわれの発生方向は45度に近いので、ここでは簡易的にひびわれ幅をひびわれ間隔で割りさらに $\sqrt{2}$ を乗じた値を実験値とすることとした。

今回実施した解析は、S-2試験体をモデルとしたものである。しかし、表-1にも示したようにスケール・イフェクトシリーズの5体の試験体はすべて壁鉄筋比が1.6%であり、鉄筋およびコンクリートの材料定数がやや異なるものの、FEM非線形解析より得られる要素の応力、ひずみについての結果はS-2試験体の結果と大差ないものと思われる。従ってS-2試験体の解析結果をすべての試験体の実験結果と比較検討することとした。

比較する解析値は、ウェブ壁の中央要素のひずみである。一方、実験値は、①最大ひびわれ幅を平均ひびわれ間隔で除し $\sqrt{2}$ を乗じた値、②平均ひびわれ幅を平均ひびわれ間隔で除し $\sqrt{2}$ を乗じた値、の2ケースを考え、比較の結果を各々図-13および図-14に示した。これらの図より以下の事項が指摘できる。

i) 図-13では、同一せん断応力度における実験値と解析値の比率は0.38~1.31(平均値 $x =$

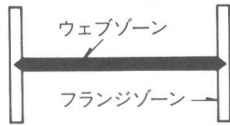


図-7
フランジゾーンと
ウェブゾーンの区別

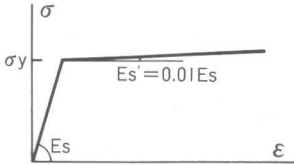


図-9
鉄筋の応力ひずみ関係

$=0.78$, 標準偏差 $\sqrt{v} = 0.23$, データ数 $n=24$) であり解析値がやや大きい。また傾向として、せん断応力度 τ が 40kg/cm^2 付近までは解析値に比べて実験値がかなり小さくこれを越えた範囲では両者の値は比較的良く一致している。

ii) 図-14では、同一せん断応力度における実験値と解析値の比率は $0.23 \sim 0.75$ ($x=0.50$, $\sqrt{v} = 0.24$, $n=24$) であり解析値がかなり大きい。また比の値は、図-13と異なり、 τ の変化によりそれほど変化しない。

(4) 考察

以上の解析的検討より、最大ひびわれ幅に相当するひずみは非線形解析で得られる主ひずみを用いて巨視的には予測できそうなのがわかった。

§4. まとめ

せん断ひびわれからの空気の漏洩量をミク

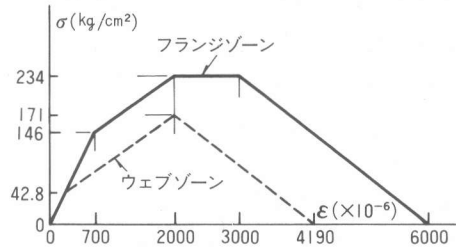


図-8 コンクリートの応力ひずみ関係

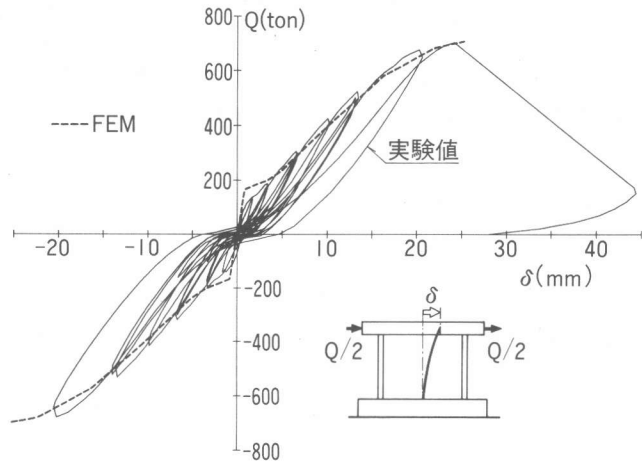


図-10 S-2 試験体の荷重変形関係の比較

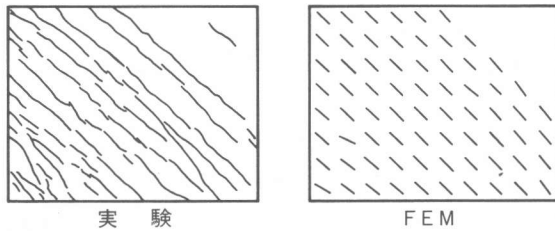


図-11 $R=1/1000$ の時のひびわれパターンの比較

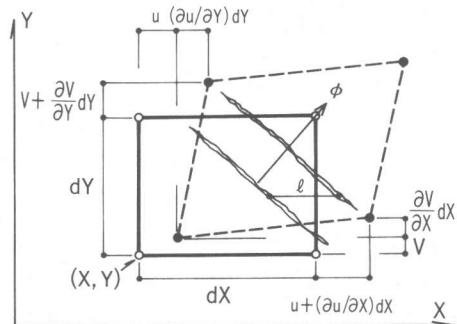


図-12
斜めひびわれ発生後の変形モード模式図

口に評価するために必要なデータのひとつである残留ひびわれについて、実験データおよび非線形FEM解析結果に基づき検討した。その結果、実験データにより作用せん断応力度あるいはせん断ひずみ度から残留ひびわれ幅とその間隔を推定することができそうなこと、また解析によるひびわれと直交方向のひずみは、実験によるひびわれ幅の総計と関係のあることがわかった。

§5. 今後の検討課題

既往の漏洩に関する実験データおよび本論で示したひびわれ幅等に関する実験データはいずれもばらつきがかなり大きい。しかし、漏洩量とひびわれ幅との関係はある程度明らかになってきており、かなりの安全率を見込めば実用的な設計式を提案することは可能であると思われる。さらに、マクロ評価に係わる実験データも公表されると期待されており、この方向からの設計式の提案もあり得よう。

せん断ひびわれ幅・間隔等のデータ、特に残留時に注目したデータは少なく、今後のデータの蓄積を期待するとともに、さらに検討を続けたいと考える。

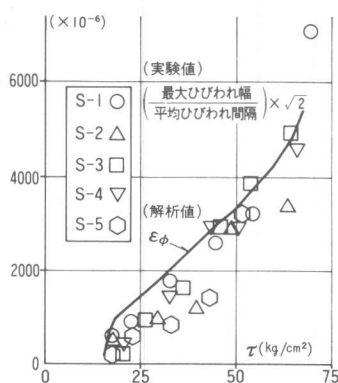


図-13 最大ひびわれ幅による平均ひずみ
実験値と、解析による主ひずみの
比較

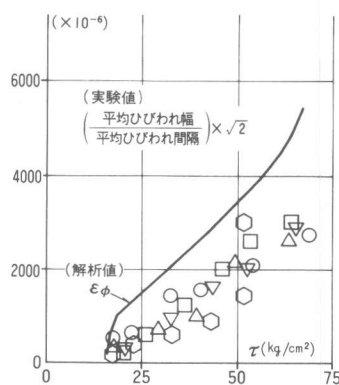


図-14 平均ひびわれ幅による平均ひずみ
実験値と、解析による主ひずみの
比較

【謝辞】 本報告で用いた試験値および解析値は、耐震安全解析コード改良試験事業の一環として、(財)原子力工学試験センターが通商産業省から委託を受けて実施したものの一部である。実施にあたっては、センター内に耐震コード改良試験実施委員会(委員長 渡部丹)およびその下部組織である弾塑性試験分科会が設置され、審議・検討を行った。ここに上記委員会、分科会の関係者各位に深謝いたします。

【文献】

1. S.H.Rizkallaほか: Leakage of Pressurized Gases Through Cracks in Reinforced Concrete Structures, Structural Engineering Report, Dept. of Civ. Engrg., Univ. of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, 1982
2. 鈴木敏昭ほか: ひびわれの生じたコンクリート壁の酸素ガス漏洩に関する実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(以下「大会」と略す), 昭和61年8月
3. 柳下和男ほか: 建屋の復元力特性に関する研究(その61), 大会, 昭和61年8月
4. 岡田恒男ほか: 原子炉建屋の復元力特性試験(その6), 大会, 昭和61年8月
5. 岡田恒男ほか: 原子炉建屋の復元力特性試験(小型および部分模型試験), 大会, 昭和61年8月
6. 武田寿一ほか: 地震荷重および温度荷重を受ける原子炉建屋の挙動に関する研究(その2), (その3), 大会, 昭和61年8月