

[118] 鉄筋コンクリート造耐震壁のせん断ひび割れ発生機構に関する研究

正会員 ○安 達 洋 (日本大学理工学部)
 正会員 小 野 新 (日本大学理工学部)
 正会員 中 西 三 和 (日本大学理工学部)
 南 陽 一 (日本大学 大学院)

1 まえがき

鉄筋コンクリート(以下、RC)部材のひび割れの発生状況を調べることは震害建物の被害度や残存する耐力を評価する上で有効な目安となる。一方、ひび割れ幅の増大は鉄筋の発錆など構造耐力の劣下の原因となる。

このようなことから、ひび割れ発生機構の解明とひび割れの制御は重要な研究課題である。RC部材の曲げひび割れに関する研究は、諸外国においてはすでに、かなり進んでいる。そして、欧米では、設計基準にその制御式が見られる。しかしながら、せん断ひび割れに関しては、そのひび割れ幅や間隔に関する実測資料が少なく、その制御に関する理論的研究も少ない。

本論文では、連層耐震壁の模型実験で観測した壁板のせん断ひび割れ幅やひび割れ間隔の実測値を詳細に検討し、壁筋の付着力による壁板のせん断ひび割れ発生機構について報告する。

2 研究資料の概要

本研究で用いた実験資料は、図1に示した形状の1スパン3層の模型無開口連層耐震壁を対象とし、一定軸力の下で多数回の正負繰返し水平力を加えた実験の結果である。模型耐震壁の大きさは実物の約 $\frac{1}{5}$ 程度を想定したものであり、試験体総数は14体である。各試験体の構造諸元と使用材料強度を表1に示す。

3 せん断ひび割れ幅および間隔の実測結果

全試験体とも、各荷重サイクルの最大変形時に、スケール・ルーペもしくはクラックゲージによって、各層壁板のせん断ひび割れ幅を測定した。測定に選んだせん断ひび割れは、各層の壁板に最初に発生したもの、または、以後大きく伸展すると予測されたものである。図2に、6体の試験体について、壁板のせん断ひび割れ幅の実測例を示す。この図は、せん断ひび割れ幅の推移を頂部水平変形(R、部材角)との関係で示したものである(図中、実線)。同図には、後述の方法で算定したせん断ひび割れ幅の

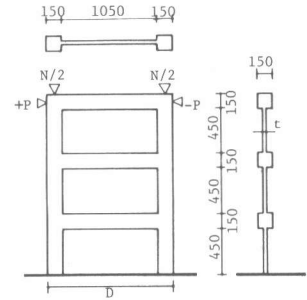


図1 試験体形状

表1 試験体一覧

試験体	M/QD	柱		はり		壁		N (ton)	σ_b	$\phi-\sigma_{sy}$	備考			
		主筋 (%)	帯筋 (%)	主筋	あばら筋 t(cm)	壁筋 (%)								
76W101	1.28	4-D10	1.27	4 ϕ -060	0.28	4-D10	4 ϕ -060	4.5	H,V,4 ϕ -0120	0.24	13.5	201	4 ϕ 4830	頂部1点集中加力
76W201	"	8-D10	2.53	"	"	"	"	"	"	"	"	319	D10 3214	"
76W401	"	8-D13	4.52	"	"	"	"	"	"	"	"	226	D13 3591	"
77W202	"	8-D10	2.53	"	"	"	"	"	H,V,4 ϕ -040	0.72	"	226	4 ϕ 5398	"
77W203	"	"	"	"	"	"	"	"	V,4 ϕ -0120	0.24	"	174	"	"
77W204	"	"	"	"	"	"	"	"	H,4 ϕ -040	0.72	"	272	"	"
77W205	"	"	"	"	"	"	"	"	45°,4 ϕ -040	0.72	"	181	D10 3761	"
77W206	"	"	"	"	"	"	"	"	H,V,4 ϕ -0120	0.24	31.5	155	"	"
78W207	"	"	"	"	"	"	"	3.0	H,V,4 ϕ -0180	0.24	13.5	194	4 ϕ 4596	"
78W208	"	"	"	"	"	"	"	6.0	H,V,4 ϕ -090	0.24	"	181	D10 3972	"
79W402	"	8-D13	4.52	"	"	4-D13	"	4.5	H,V,4 ϕ -040	0.72	"	245	4 ϕ 2337	"
79W403	"	"	"	"	"	"	"	6.0	H,V,4 ϕ -090	0.24	"	206	D13 3778	"
79W209	0.98	8-D10	2.53	"	"	4-D10	"	4.5	H,V,4 ϕ -0120	0.24	"	303	4 ϕ 2681	各層3点分布加力
79W210	"	"	"	"	"	"	"	3.0	H,V,4 ϕ -0180	0.24	"	251	D10 3201	"

σ_b : コンクリート圧縮強度 kg/cm^2 σ_{sy} : 鉄筋降伏強度 kg/cm^2 V,縦筋 H,横筋 (45°),斜め45°配筋

計算値 W_{av} (図中、破線) もあわせて示した。

壁筋の多いものほど、水平変形の増大にともなうせん断ひび割れ幅の拡大の割合が小さい。これは壁筋量の多い壁は、せん断ひび割れが分散され、ひび割れ本数が多くなるためであろう。また最終的に破壊の起る層の壁板のせん断ひび割れ幅が他層に比べ大きくなる傾向がみられる。

前述のせん断ひび割れ幅の計算値 W_{av} は、せん断ひび割れの傾きが水平軸と 45° をなすものとし、また、各層の壁板の引張の 45° 方向のひずみが、その層に発生しているせん断ひび割れの幅のみによって定まるものと仮定して、各荷重段階の引張 45° 方向のひずみ ε_{45}^+ とせん断ひび割れの本数 n_c から次式によって求めた。なお各式の記号は図 3 による。

$$W_{av} = \frac{\varepsilon_{45}^+ \cdot l \cdot \cos \alpha}{n_c} \quad (1)$$

ここで、 ε_{45}^+ は各層の柱とはりの交点の水平変位 (図 3 b) から、ひずみ - 変位関係式 ²⁾ ([B]) を用いて誘導した。ただし、変位関数は 1 次関数とし、各層壁板のひずみは一定であるとした。図 3 (b) に示すように壁板を 2 つの三角形に分割し、各三角形の x 、 y 軸方向のひずみを求める。

△ 1 2 4 に対して、

$$\{ \varepsilon' \}^T = [B_1] \{ w' \}^T \quad (2)$$

△ 1 3 4 に対して、

$$\{ \varepsilon'' \}^T = [B_2] \{ w'' \}^T \quad (3)$$

ここに

$$\{ \varepsilon' \} = \{ \varepsilon'x, \varepsilon'y, \gamma'xy \}, \{ \varepsilon'' \} = \{ \varepsilon''x, \varepsilon''y, \gamma''xy \}$$

$$\{ w' \} = \{ w_1, v_1, u_2, v_2, u_4, v_4 \}, \{ w'' \} = \{ w_1, v_1, u_3, v_3, u_4, v_4 \}$$

$$[B_1] = \frac{1}{hD'} \begin{bmatrix} -h & 0 & h & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -D' & 0 & D' \\ 0 & -h & -D' & h & D' & 0 \end{bmatrix}, \quad [B_2] = \frac{1}{hD'} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -h & 0 & h & 0 \\ 0 & -D' & 0 & D' & 0 & 0 \\ -D' & 0 & D' & -h & 0 & h \end{bmatrix}$$

壁板の x 、 y 軸方向のひずみ $\{ \varepsilon \}$ は $\{ \varepsilon' \}$ と $\{ \varepsilon'' \}$ の平均値として、次式となる。

$$\{ \varepsilon \}^T = \frac{1}{2} \{ \varepsilon' \}^T + \frac{1}{2} \{ \varepsilon'' \}^T \quad (4)$$

45° 方向のひずみ $\{ \varepsilon_{45} \}$ はひずみ変換式 ([T]) を用いて、次式より得られる。

$$\{ \varepsilon_{45} \}^T = [T] \{ \varepsilon \}^T \quad (5)$$

ここに

$$T = \begin{bmatrix} \cos^2 45^\circ & \sin^2 45^\circ & \cos 45^\circ \sin 45^\circ \\ \sin^2 45^\circ & \cos^2 45^\circ & -\cos 45^\circ \sin 45^\circ \\ -2 \cos 45^\circ \sin 45^\circ & 2 \cos 45^\circ \sin 45^\circ & \cos^2 45^\circ - \sin^2 45^\circ \end{bmatrix}$$

なお、上式から、圧縮 45° 方向のひずみ ε_{45}^- も求められる。

また、 n_c は壁板の対角線とそれを横切るせん断ひび割れの交点の数とし、対

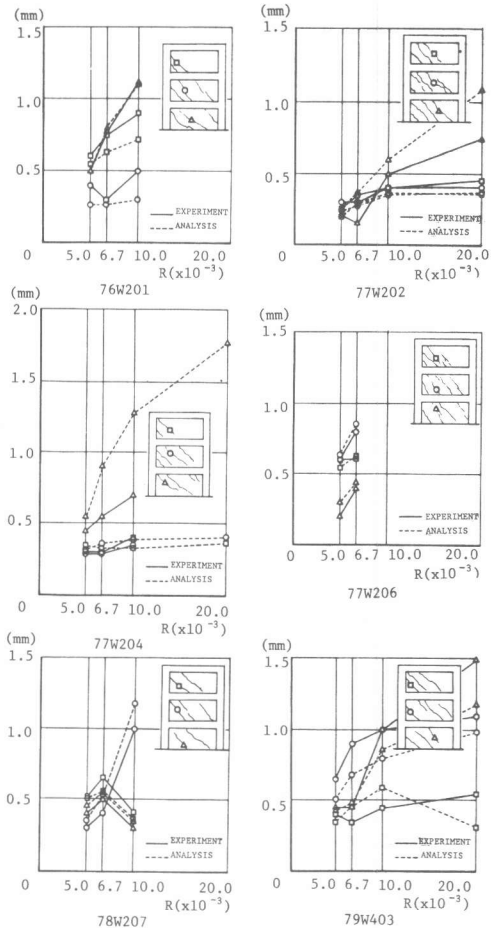
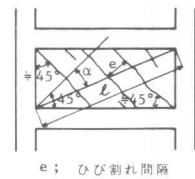
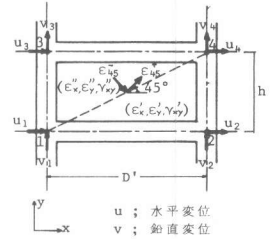


図 2 せん断ひび割れ幅



a) ひび割れ間隔



b) ひずみと変形

図 3

角線まで伸展していないひび割れは除去した。

W_{av} は各層壁のせん断ひび割れ幅の平均値を示すものと思われる。各試験体とも実測値とほぼ同傾向の値を示している。

図4に前記の引張45°方向のひずみ ϵ_{45}^+ と、次式で求めた平均せん断ひび割れ間隔 τ_{eav} の関係を全試験体の2層壁板について示した。

$$\tau_{eav} = \frac{\ell \cdot \cos \alpha}{n_c} \quad (6)$$

図4から、壁板の45°方向の引張ひずみの増加に伴って、せん断ひび割れが細分化されていくこと、 ϵ_{45}^+ が0.15~0.20%以後は、ほとんど新しいせん断ひび割れが発生しないことが分る。これらは、RC角柱の両引着試験³⁾の結果から報告されている引張鉄筋の付着力による角柱の引張ひび割れの発生と類似の現象である。

以上の検討結果から、次節では文献3の引張材のひび割れ発生機構を耐震壁に適用する。すなわち、各層の壁板をせん断ひび割れと直交する方向に引張られる引張材の集合体であると仮定するものである。

4 付着力によるせん断ひび割れ発生機構

4.1 RC引張材のひび割れ発生機構³⁾ 長いRC角柱を両引した場合、引張力の増加に伴ってひび割れが発生し、付着分布が変遷して行く状態を文献3では、図5のように模型的に示している。引張力の増加とともに(a)(b)(c)(d)の順に推移する。(c)又は(d)の段階の二本のひび割れ間の部分の付着応力分布、鉄筋およびコンクリートの応力分布を図6に示す。材長2Lのこのひび割れ間に新たにひび割れが生ずる条件は次式で表わされる。

$$P_{CO} = P_{SL} - P_{SO} = P_{max} - P_{min} = \sigma_{tB} \cdot A_c \quad (7)$$

ここに、 σ_{tB} はコンクリートの引張強度、 A_c はコンクリート断面積である。図6の材長2L間における付着応力度 τ_x の分布形と τ_{max} が与えられると、(7)式を満足するLを求めることができる。これを L_1 とすれば、もし $L_1 \leq L$ ならば、材長2L間で(7)式が成立って、ひび割れが発生し、そのひび割れ間隔はLとなる。 $L_1 > L$ ならば、ひび割れは発生しない。したがって、この時の最小ひび割れ間隔 e_{min} は L_1 、最大ひび割れ間隔 e_{max} は $2L_1$ となる。平均のひび割れ間隔 e_{av} は次式で表わされる。

$$e_{av} = \frac{e_{min} + e_{max}}{2} = \frac{3e_{min}}{2} = \frac{3}{2} L_1 \quad (8)$$

4.2 壁板のせん断ひび割れ発生機構の仮定

(仮定1) せん断ひび割れの傾きは水平軸と45°をなすものとし、壁板をせん断ひび割れに直角な方向の引張材の集合体と仮定する。(図7)

(仮定2) 各引張材の幅 b_e は、壁筋の配筋間隔を α として、縦・横配筋の場合 $\sqrt{2}\alpha$ 、斜め45°配筋の場合 α とする(図8)。壁厚を t とすれば、(7)式の $A_c = b_e \cdot t$ である。

(仮定3) 仮定した引張材のコンクリート引張強度は、材軸と直角な方向から圧縮を受ける二軸応力状態となることを考慮して、一軸引張強度 σ_{tB} に低減係数 γ を掛けたる値とする。

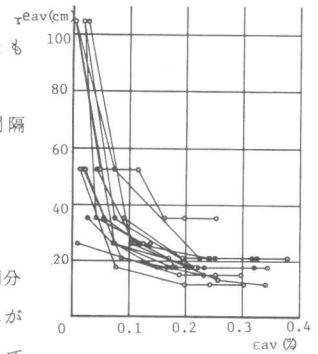


図4 $\epsilon_{45}^+ - \tau_{eav}$ 関係

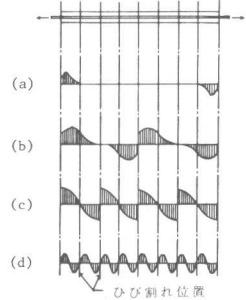


図5 引張材のひび割れ

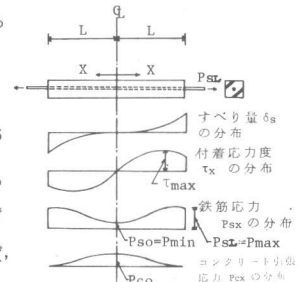


図6 付着応力度分布

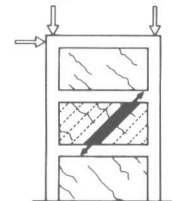
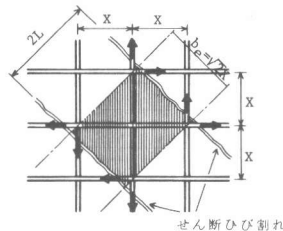
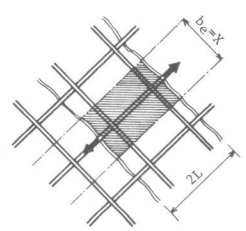


図7 モデル化



(a) 縦横配筋



(b) 斜め45度配筋

(仮定4) ひび割れ間の付着応力分布を簡単にモデル化すると、図9のような三種類が考えられる。端部の鉄筋応力の増加に伴って、おむね(a)(b)(c)の順に推移する³⁾。次項のせん断ひび割れ間隔の推定式の誘導には(c)の分布形を仮定した。

4.3 壁板のせん断ひび割れ間隔 壁板に仮定した45°方向の引張材について、4.1の引張材と同様に、二つのひび割れ間に、図9の様な応力分布を考えると、(7)式、(8)式から最小ひび割れ間隔 c^e_{min} および平均ひび割れ間隔 c^e_{av} を壁筋が斜め45°配筋と縦横配筋の場合について次のように誘導できる。

1) 斜め45°配筋の場合 引張材にひび割れが発生する条件は(7)式から

$$P_{Co} = P_{max} - P_{min} = r \cdot \sigma_{tB} \cdot be \cdot t \quad (9)$$

また、鉄筋からコンクリートに伝えられる引張力 P_{Co} は図9(c)の付着応力分布に対して、次式のように求まる。

$$P_{Co} = \int_0^L \frac{\tau_{max} \cdot \phi}{L} x \cdot dx = \frac{\tau_{max} \cdot \phi \cdot L}{2} \quad (10)$$

ここで、 τ_{max} は図9(c)に示した最大付着応力度、 ϕ は壁筋の周長である。(9)式(10)式を満足する L と(8)式から、

$$c^e_{min} = \frac{2r \cdot \sigma_{tB} \cdot x \cdot t}{\tau_{max} \cdot \phi} \quad (11) \text{ および } c^e_{av} = \frac{3r \cdot \sigma_{tB} \cdot x \cdot t}{\tau_{max} \cdot \phi} \quad (12)$$

但し、壁筋の降伏強度 σ_{sy} 、壁筋比 $Ps (= A_s/A_c; A_s$ は壁筋断面積)、ヤング係数比 n とすれば、ひび割れ部分で壁筋が降伏し、ひび割れ間で付着が完全であるとすれば、

$$P_{max} = A_s \cdot \sigma_{sy}, \quad P_{min} = \frac{nPs}{1+nPs} A_s \sigma_{sy}$$

したがって、付着力によって、ひび割れの発生する条件は次式を満足しなければならない。

$$P_{max} - P_{min} = \frac{1}{1+nPs} A_s \sigma_{sy} \geq r \cdot \sigma_{tB} \cdot A_c \quad \text{故に} \quad \frac{Ps}{1+nPs} \sigma_{sy} \geq r \cdot \sigma_{tB} \quad (13)$$

2) 縦横配筋の場合 斜め45°配筋の場合と同様であるが、 $be = \sqrt{2}x$ 、 P_{Co} は縦筋と横筋からコンクリートに伝えられる引張力の合力となること、さらに、ひび割れ間隔 $2L$ に対して壁筋の付着長さが $2\sqrt{2}L$ になることに注意すれば、 c^e_{min} 、 c^e_{av} は次式となる。

$$c^e_{min} = \frac{\sqrt{2} \cdot r \cdot \sigma_{tB} \cdot x \cdot t}{\tau_{max} \cdot \phi} \quad (14) \text{ および } c^e_{av} = \frac{3\sqrt{2} r \cdot \sigma_{tB} \cdot x \cdot t}{2 \tau_{max} \cdot \phi} \quad (15)$$

但し、 $\frac{Ps}{1+nPs} \sigma_{sy} \geq r \cdot \sigma_{tB}$ (16)

4.4 計算値と実験値の比較 図10に τ^e_{av} (6式) と c^e_{av} の関係を示す。

ここで、 τ_{max} は建築学会RC構造計算規準⁴⁾の短期許容付着応力度の2倍とし、 r は(5)式から得られた ϵ_{45} を用いて計算した引張材と直角方向の圧縮応力度と文獻5, 6の二軸応力下でのコンクリートの破壊実験結果を参考にして0.4とした。推定値は実験結果の傾向を比較的良く捉えている。

5 結び 以上、耐震壁のせん断ひび割れに関する実測資料を検討し、付着理論に基づく壁板のせん断ひび割れ発生機構を提案した。せん断ひび割れ間隔の推定式を誘導し、実験結果と適合性のあることを示した。耐震壁のせん断ひび割れの特性を調べる上で有効な手掛りを得たと考えられる。しかし、二軸応力を受ける場合の付着特性、特に τ_{max} の値の変化など不明な点も多い、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 佐藤・小野・安達「鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する研究」(その1)~(その10)昭和52年~55年建築学会大会及び昭和54年関東支部
- 2) O. C. ツイエンケーグッツ、吉謙・山田訳「マトリックス有限要素法」
- 3) 六車・森田・他「鋼とコンクリートの付着に関する研究」I-I, I-II, II, III 昭和42年1月, 2月, 4月, 9月建築学会論文報告集
- 4) 日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」
- 5) H. KUPFER et al 「Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses」ACI. Journal AUG. 1969
- 6) H. KUPFER, 大沼博志訳「二軸応力を受けるコンクリートの非線形性状」Vol. 12, 第8, AUG. 1974, コンクリートジャーナル

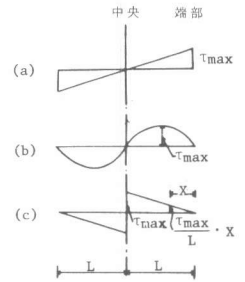


図9 付着応力の分布形

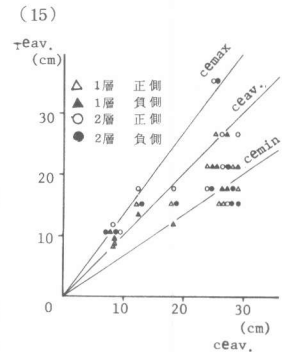


図10 τ^e_{av} と c^e_{av} の比較