

論文 鉄筋コンクリート造方立壁のせん断ひび割れ幅の算定法とその検証

松林 美樹*1・窪田 凌平*2・高瀬 裕也*3・溝口 光男*4

要旨: 近年の大規模地震では、鉄筋コンクリート造方立壁の被害が多数報告されている。そこで、この損傷評価に寄与すべく、せん断ひび割れ幅算定法の提案を目的に、鉄筋間隔および壁筋比をパラメータとする実大試験体 4 体の載荷実験を実施した。これにより、鉄筋間隔が広がるほど、また壁筋比が小さくなるほど、ひび割れ幅が増大する傾向を確認した。さらに、実験で得られた鉄筋ひずみやひび割れ間隔を、既報で提案したひび割れ幅算定式に適用し、算定式の妥当性を検証した結果、実験で測定されるひずみの値に精度が大きく影響するものの、おおむねひび割れ幅の推移を推定することができた。

キーワード: 鉄筋コンクリート造方立壁, せん断ひび割れ, ひび割れ幅, 実大実験

1. はじめに

地震大国である日本では、地震被害を経験し、建物の耐震化が発展してきた。しかし、鉄筋コンクリート造(以下、RC 造)建築物において、二次壁や天井などは非構造部材として地震発生時に損傷が生じた場合も構造上は問題ないとして、設計時に十分な考慮がなされてこなかった。そのため、近年の大地震では、非構造部材の損傷が数多く報告されている¹⁾。本研究では、非構造部材の中でも特に被害の報告が多い二次壁を対象とする。二次壁が損傷すると、隙間風や音漏れ等、使用性の低下が生じたり、使用者が安心できずに、安全性を危惧したりする問題等が起これ、建物の継続使用性に支障をきたすことが報告されている。建物の一般的な設計では、部材の耐力および変形性能が主であるため、建物の継続使用性まで配慮するためには、二次壁の損傷状況を評価した性能設計法の構築が必要と考えられる。これまでの研究^{2), 3)}では、損傷の中でもひび割れ幅に着目し、二次壁の平均ひび割れ間隔および最大せん断ひび割れ幅の算出手法を提案し、既往の実験結果を対象に検証してきた。本論文

では、RC 造方立壁を想定した計 4 体の実大の壁板の試験体を対象に載荷実験を実施し、鉄筋間隔および壁筋比をパラメータとして、配筋が最大荷重や変形性能等の力学的性質、およびひび割れ発生状況に与える影響を確認する。さらに本実験結果を、既発表の論文²⁾で提案したひび割れ間隔およびひび割れ幅算定式に適用し、算定式の妥当性を検証する。

2. 本実験の概要

2.1 試験体の諸元と実験パラメータ

本実験は、腰壁と垂れ壁で囲まれた開口部に隣接する、おおそ正方形の方立壁を想定し、4 体の試験体を製作した。表-1、表-2 および表-3 に、試験体概要およびコンクリートと鉄筋の材料特性を示す。試験体形状は、壁断面積が 750(mm)×100(mm)、壁高さが 750(mm)である。コンクリートはレディミクストコンクリートを用いて打設した。軸力比は 0.15 に設定した。図-1 に S110 の配筋および形状を示す。スタブの形状および配筋は全試験体

表-1 試験体概要

試験体名	S110	S220	S280	M200
壁厚(mm)	100			
壁長さ(mm)	750			
壁高さ(mm)	750			
かぶり厚さ(mm)	36	20	40	20
開口補強筋	D16(SD345)			
壁筋	D6@110 シングル (SD295A)	D6@220 ダブル (SD295A)	D10@280 シングル (SD295A)	D6, D10@200 ダブル (SD295A)
壁筋比(%)	0.29	0.29	0.26	0.52
$F_c(N/mm^2)$	18			
軸圧縮力(kN)	308	303	291	300
	軸応力比 0.15			

表-2 コンクリートの材料特性

試験体	$f_c(N/mm^2)$	$E_c(kN/mm^2)$	$f_t(N/mm^2)$
S110	27.5	22.2	2.15
S220	27.0	22.0	2.17
S280	25.9	21.9	2.01
M200	26.8	21.9	1.96

f_c :圧縮強度, E_c :ヤング係数, f_t :割裂引張強度

表-3 鉄筋の材料特性

部位	鋼材種	$f_y(N/mm^2)$	$f_t(N/mm^2)$	$E_s(kN/mm^2)$	$\epsilon_y(\%)$
壁筋	D6 (SD295A)	439	571	184	0.25
	D10 (SD295A)	400	549	172	0.24
開口補強筋	D16 (SD345)	387	580	175	0.24

f_y :降伏強度, f_t :引張強度, E_s :ヤング係数, ϵ_y :降伏時ひずみ

*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科 環境創生工学系専攻 学生 (学生会員)

*2 室蘭工業大学 大学院工学研究科 環境創生工学系専攻 学生

*3 室蘭工業大学 大学院工学研究科 暮らし環境系領域 准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 室蘭工業大学 大学院工学研究科 暮らし環境系領域 教授 博士 (工学) (正会員)

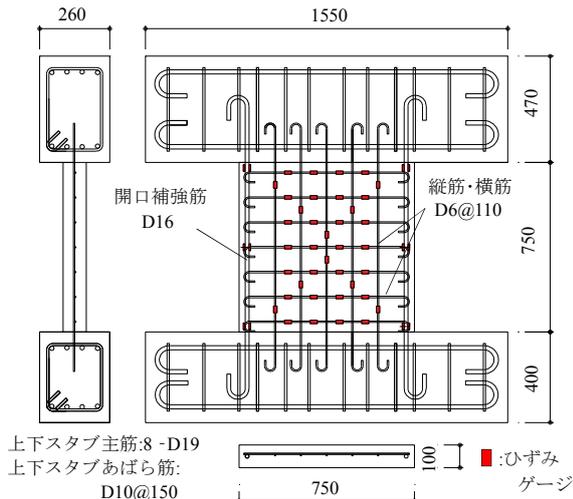


図-1 S110 試験体

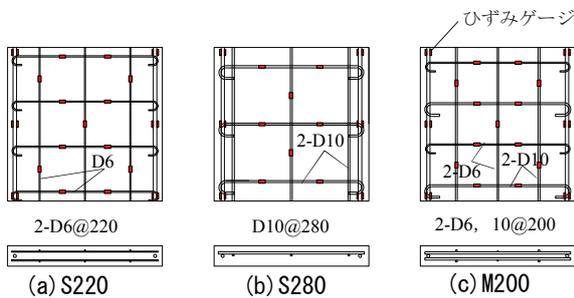


図-2 S220, S280, M200 試験体

共通とし、他 3 体の壁板の配筋のみを図-2 にそれぞれ示す。既往の実験では、鉄筋間隔をパラメータとする場合、壁筋比も同時に変動させていることが多い。しかし、本実験では鉄筋間隔および壁筋比が個々に試験体に及ぼす影響を検証するため、片方のパラメータのみが変動するような配筋とした。S220 を基準の配筋とし、壁板の配筋は D6@220 ダブルで壁筋比が 0.29(%)とした。S110 および S280 は、壁筋比が S220 と同程度であり、それぞれの鉄筋間隔を D6@110 シングル、D10@280 シングルとした。M200 は鉄筋間隔を D6, D10@200 ダブルとして S220 と同程度とするものの、壁筋比を S220 の約 2 倍の 0.52(%)とした。壁筋比 p_s は、壁横筋の鉄筋間隔 s を用いて、以下の式(1)で算出される。

$$p_s = \frac{A_s}{t \cdot s} \quad (1)$$

t は壁厚、 A_s は壁横筋 1 組当たりの断面積である。M200 の場合は、D10 と D6 が交互に 2 列ずつ並んでいるため、断面積の平均値を用いて計算する。開口補強筋は全ての試験体で D16(SD345)を用いた。スタブの寸法は、上スタブを 1550(mm)×260(mm)×470(mm)、下スタブを 1550(mm)×260(mm)×400(mm)とした。配筋は、主筋に 8-D19 を用いて、横補強筋に D10@150 を用いた。

2.2 荷重方法

荷重装置図を図-3 に示す。鉛直方向に 2 台、水平方

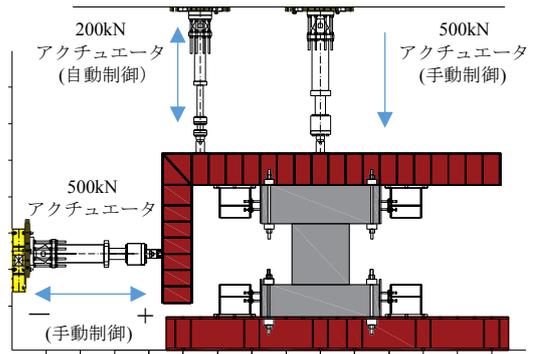


図-3 荷重装置図

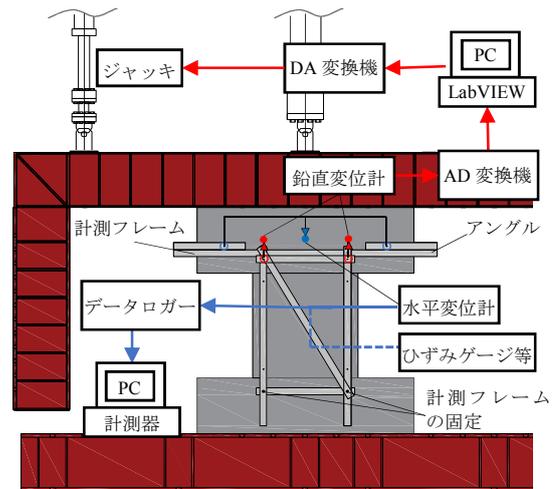


図-4 データ計測フロー図

向に 1 台のアクチュエータをそれぞれ配置し、所定の軸圧縮力を一定に保持しながら、上下スタブの平行を保持する逆対称曲げ荷重を行った。鉛直方向は、壁の中央位置のアクチュエータで鉛直方向に軸力を加えながら、もう 1 台のアクチュエータで上下スタブの平行が保たれるように自動制御し、加力した。図-4 に自動制御の流れおよびデータの計測方法を示す。上下スタブ間に取りつけた鉛直方向の変位計により、スタブの傾きを計測する。その値を AD 変換機によりアナログ信号をデジタル信号に変換し、制御プログラムソフト LabVIEW により、平行になるように出力用電圧を計算し、アナログ信号に変換して、アクチュエータを制御する。水平変位や、スタブ・壁間の目開き、試験体のねじれ、鉄筋のひずみはデータロガーにより計測する。水平方向は、壁板の中央高さ位置に設置したアクチュエータにより、正負交番繰り返し漸増荷重を行った。荷重サイクルは、上スタブの水平変位を壁高さ 750(mm)により除した部材角 $R(\text{rad.})$ により決定し、 $R=\pm 1/1000(\text{rad.}), \pm 1/500(\text{rad.}), \pm 1/333(\text{rad.}), \pm 1/250(\text{rad.}), \pm 1/200(\text{rad.})$ で 1 回ずつ繰り返し、その後の $\pm 1/167(\text{rad.})$ の正側で押し切る荷重とした。

2.3 鉄筋ひずみおよびひび割れ幅の測定方法

鉄筋ひずみは壁筋および開口補強筋に貼付したひずみゲージで測定した。本実験では、壁横筋は、全面に均等に貼付し、壁縦筋は、壁の対角線上付近にのみ貼付した。ひび割れ幅計測は各サイクルのピーク変形時および除荷(0kN)時にクラックスケールを用いて行い、目視で確認できたひび割れや剥落をスケッチにより記録した。ひび割れ幅の測定は、壁の両面で行い、スタブおよび壁側面はスケッチのみ行った。本実験では画像解析により、ひび割れ幅および試験体変位の測定も行っているが、紙幅の制約から別報にて報告する。

3. 実験結果

3.1 最大荷重および荷重変形関係の履歴性状

最大荷重 Q_{max} 、最大荷重時の変形角 R_{max} 、限界変形角 R_{ul} (最大荷重の 80%まで低下した点とした)および計算耐力を表-4 にそれぞれ示す。なお、曲げ強度計算値 Q_{mu} は、引張鉄筋として開口補強筋のみを考慮した値である。また、せん断強度計算値 Q_{su} は、文献⁴⁾に基づき二次壁に対応するよう壁の有効せいとして壁長さ 750(mm)に 0.95 を乗じた値を用いるなどの補正を行ったうえで算定した値である。式(2)および式(3)に算定式を示す。

$$Q_{mu} = 2 \left\{ 0.8\sigma_t a_t l + 0.5Nl \left(1 - \frac{N}{uF_c} \right) \right\} / h \quad (2)$$

$$Q_{su} = \gamma \left\{ \frac{0.068 p_{te}^{0.23} (18 + F_c)}{\sqrt{\frac{M}{Ql} + 0.12}} + 0.85 \sqrt{p_{se} \sigma_{wy} + 0.1 \sigma_0} t_e j_e \right\} \quad (3)$$

ここに、 σ_t は引張鉄筋降伏強度(N/mm²)、 a_t は引張鉄筋断面(mm²)、 l は壁せい(mm)、 N は軸力(kN)、 t は壁厚(mm)、 F_c はコンクリート設計強度(N/mm²)、 h は壁高さ(mm)、 γ は開口低減率、 p_{te} は引張壁筋比、 M/Ql はせん断スパン比、 p_{se} は壁横筋の等価補強筋比、 σ_{wy} は壁横筋規格降伏点(N/mm²)、 σ_0 は軸方向応力度(N/mm²)、 t_e は等価壁厚さ(mm)、 j_e は応力中心間距離(mm)である。

表-4 から S220 と S280 を比較すると、S280 の方が、コンクリート強度および鉄筋強度、壁筋比が小さいが Q_{su} に関しては、S280 の方が、値が大きくなっている。これは、文献⁴⁾での壁筋比の算出方法が一般的な壁筋比の算出方法とは異なっており、壁断面に対する実際の鉄筋量を用いて算定している。そのため S280 の方が壁筋比が大きくなり、壁筋比が Q_{su} の値に影響するため、 Q_{su} も S280 の方が大きくなっている。

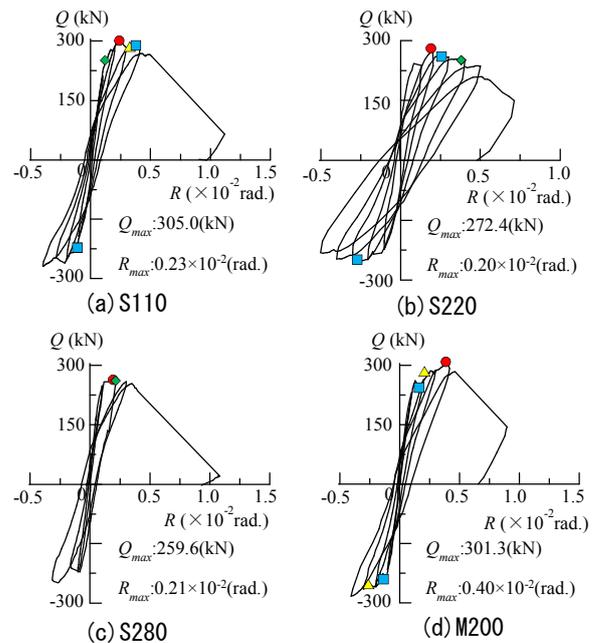
壁筋比が同程度で鉄筋間隔の異なる S110, S220, S280 の実験値を比較すると、鉄筋間隔が大きい程、最大荷重は小さくなるのがわかる。S220 と M200 から、壁筋比が小さいと最大荷重は小さくなることも確認することができる。また、S220 の試験体は、最大荷重後、緩やかに

表-4 最大荷重, 最大荷重時変形角

	S110	S220	S280	M200
Q_{max} (kN)	+ 305	272	260	301
R_{max} ($\times 10^{-2}$ rad.)	+ 0.23	0.20	0.21	0.40
R_u ($\times 10^{-2}$ rad.)	-	0.71	-	-
Q_{mu} (kN)	385	380	372	380
Q_{su} (kN)	322	311	315	338

*最大荷重の 80%まで低下した荷重まで計測できたのは S220 のみ

荷重が低下し限界変形角まで計測することができたが、



● 最大耐力点 ◆ 開口補強筋降伏点 ■ 壁横筋降伏点 ▲ 壁縦筋降伏点

図-5 荷重変形曲線

これ以外の試験体は、最大荷重の 80%まで低下する前に破壊しており、脆性的な破壊が生じたことが、このことから理解される。

図-5 に各試験体の荷重変形曲線を示す。最大荷重および壁筋と開口補強筋が降伏した点もそれぞれ示す。最も鉄筋間隔の狭い S110 では、 $R=1/333$ (rad.)のサイクルで最大荷重 305(kN)を示し、その後、 $R=1/200$ (rad.)のサイクルでひび割れが拡大し、せん断破壊した。この試験体は 4 体の試験体の中で最も耐力が大きく、S280 に対して 17(%)耐力が高い。S220 では、 $R=1/500$ (rad.)のサイクルで最大荷重 272(kN)を示し、 $R=1/167$ (rad.)のサイクルで、壁の対角線上にコンクリートの圧壊が生じた。S280 では、 $R=1/500$ (rad.)のサイクルで最大荷重 260(kN)を示し、その後、 $R=1/250$ (rad.)のサイクルでせん断破壊し、4 体の中で最も耐力が小さい試験体となった。S220 と同程度の鉄筋間隔で壁筋比が大きい M200 は、 $R=1/250$ (rad.)のサイクルで最大荷重 301(kN)を示し、その後、 $R=1/200$ (rad.)のサイクルでせん断破壊が生じた。この試験体の最大荷重時の変形角が 4 体の中で最も大きかった。

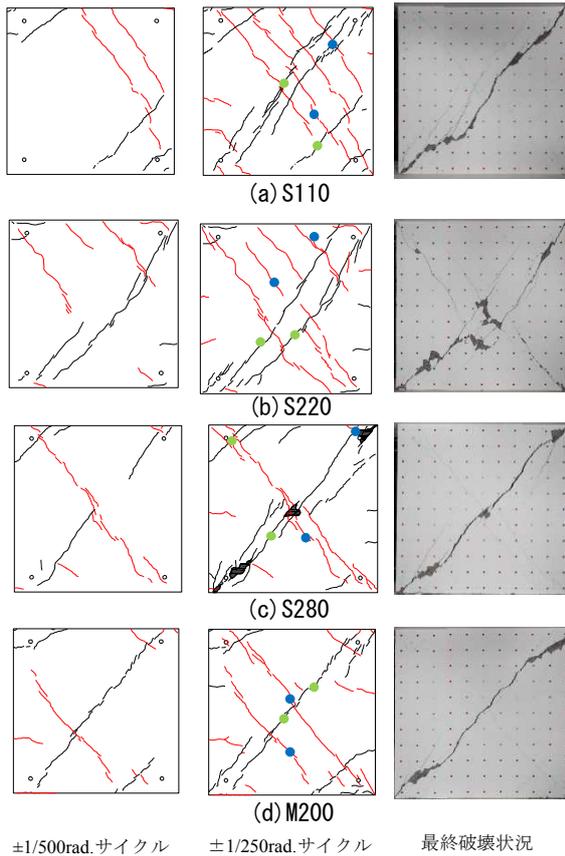


図-6 最大ひび割れ発生

3.2 ひび割れ発生状況

各試験体の $R=1/500(\text{rad.})$ および $1/250(\text{rad.})$ のサイクル時のひび割れ発生状況および最終破壊状況時の試験体写真を図-6 に示す。図中の黒線および赤線は正側荷重時、負側荷重時にそれぞれ発生したひび割れを示す。 $R=1/250(\text{rad.})$ のサイクルのひび割れ図に正側荷重時に発生した最大ひび割れ幅の測定点を緑の点で、負側荷重時に発生した最大ひび割れ幅の測定点を青の点で示す。載荷初期と最終破壊状況時の最大ひび割れ幅の測定位置が異なるため、複数の緑と青の点が存在する。基本的には全ての試験体で、載荷初期は壁の隅角部に小さなひび割れが発生し、最大荷重より前に壁中央にせん断ひび割れが発生し、そのひび割れが拡幅を続ける。以下に試験体ごとの特徴について記述する。S110 では $R=1/250(\text{rad.})$ のサイクルで壁中央に大きな対角線上のせん断ひび割れが発生した。他の試験体と比較すると、ひび割れ本数が多く、間隔が狭くなっている。S220 では、 $R=1/1000(\text{rad.})$ のサイクルで対角線上にせん断ひび割れが発生し、その後のサイクルでも、対角線上のひび割れが発生した。最終的に壁板の中央付近で圧壊が生じたため、破壊時に最もコンクリートの剥落が多く、隅角部やスタブとの境界でも損傷が目立った。これは他の試験体と比較すると、最大荷重から最終破壊状態になるまでに多くのサイクル

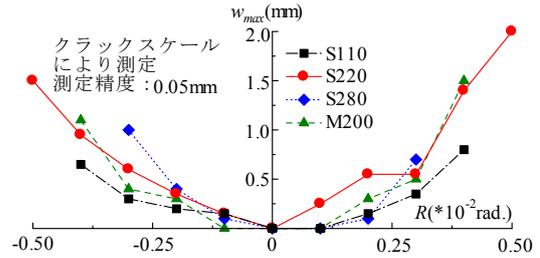


図-7 最大ひび割れ幅推移

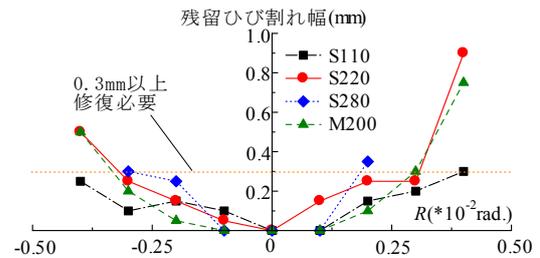


図-8 最大残留ひび割れ幅

を要したことと関連すると考えられる。S280 では、 $R=1/500(\text{rad.})$ のサイクルで対角線上のせん断ひび割れが発生した。鉄筋間隔の大きな試験体であるため、ひび割れ本数は少なかった。M200 は、 $R=1/500(\text{rad.})$ のサイクルでせん断ひび割れが発生した。

3.3 ひび割れ幅の計測結果

図-7 に各試験体の $R=\pm 1/200(\text{rad.})$ までの最大ひび割れ幅推移を示す。最大ひび割れ幅の計測は、各サイクルのピーク変位に達した後、荷重を 10%程度下げた状態で行った。正側負側ともに、最大荷重近傍では、鉄筋間隔が広い程ひび割れ幅が大きく $R=1/333(\text{rad.})$ の時、S280 のひび割れ幅は、S110 のおおよそ 4 倍になった。また、S220 と M200 を比較すると、壁筋比が大きい方がひび割れ幅は小さくなっている。ひび割れ幅の挙動としては、鉄筋間隔が狭いほど、また壁筋比が大きいほど、拡幅する割合が緩やかである。図-8 に最大残留ひび割れ幅の推移を示す。残留ひび割れ幅の計測は、各サイクルのピークから減力し、荷重が 0(kN) になったタイミングで行った。最大残留ひび割れ幅が 0.3(mm) 以上になると補修が必要とされる^りが、同図から鉄筋間隔が大きいほど残留ひび割れ幅も大きく、補修が必要になりやすい。

3.4 壁筋の最大ひずみの計測結果

詳細は 4 章で述べるが、本研究で Silva らの研究⁹⁾を参考に提案²⁾したひび割れ幅算定式のパラメータとして、実験から得られた壁筋の最大ひずみを用いるため、図-9 に壁筋の最大ひずみを示す。変形角が小さい場合、まれに壁縦筋が最大ひずみになる場合もあるが、主に壁の対角線上近傍の壁横筋で最大ひずみは生じている。また、ひずみの大小はひび割れ幅の大小とは関係ないようにみられる。ひずみゲージによる計測では、試験体の一部の

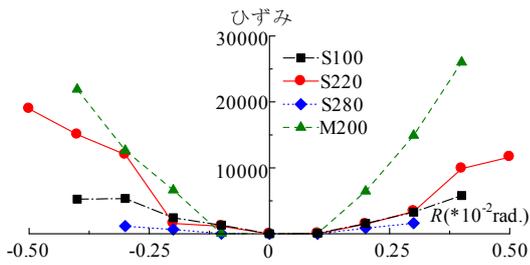


図-9 壁筋最大ひずみ

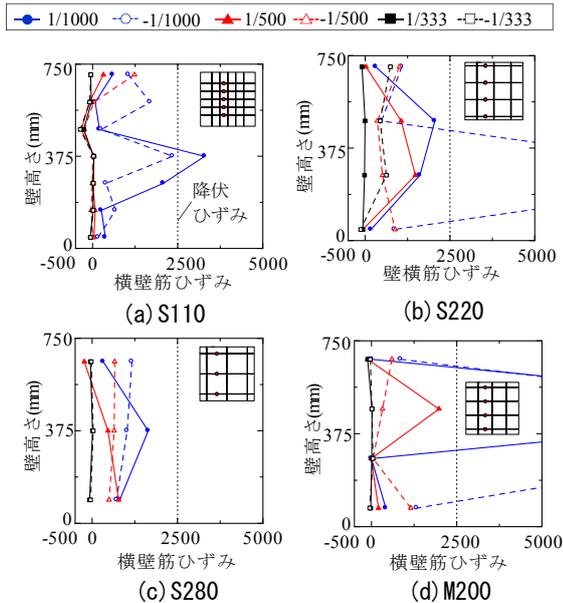


図-10 壁横筋ひずみ分布

みでしかひずみを計測できないため、このような結果になったと考えられる。図-10に各試験体中央部の壁横筋の縦方向のひずみ分布を示す。図中におおよその配筋と赤丸で取り扱っているひずみの測定位置を示す。また、表-2の材料特性より、鉄筋ひずみが2500付近で降伏すると考えられるため、その位置を示す。数値がやや乱れているが、おおよそ壁の中心高さでひずみが大きくなっていることが分かる。最大ひび割れ幅の測定においても、図-6から読み取れるように載荷初期には壁の隅角部のみひび割れが発生していたため、その点での測定をしたが、対角線上にせん断ひび割れが発生後は、おおよそ壁の中央部で最大ひび割れ幅を測定していた。これより、壁筋の最大ひずみの発生箇所と最大ひび割れ幅の発生箇所はおおよそ一致していると考えられる。

4. ひび割れ幅の推定

4.1 算定式

本研究で提案しているひび割れ間隔およびひび割れ幅算定式に、本実験の試験体パラメータと鉄筋の最大ひずみのデータを用いて算出し、実験値との比較を行った。式(4)および式(5)に、最大ひび割れ幅 w_{max} の算定式

表-5 平均ひび割れ間隔

試験体名	Exp.			Cal.	Exp./Cal.
	+	-	Ave.		
S110	233	109	171	197	0.87
S220	387	113	250	209	1.20
S280	306	249	278	315	0.88
M200	374	261	317	206	1.50

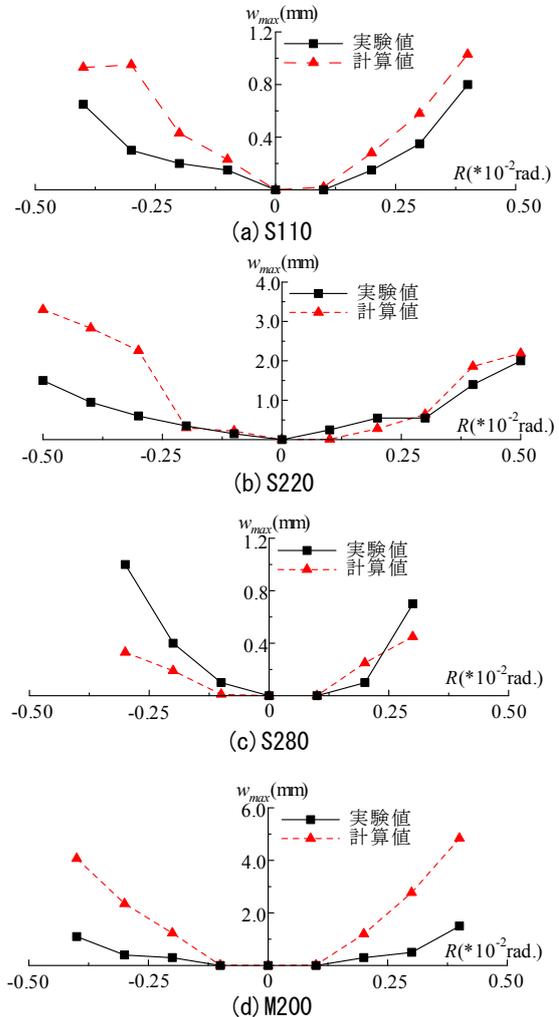


図-11 最大ひび割れ幅比較

および平均ひび割れ間隔 s_{av} の算定式を示す。

$$w_{max} = k_w s_{av} \epsilon_{max} \cos \theta \quad (4)$$

$$s_{av} = 2 \left[c + \frac{2s}{10} \right] + k_1 k_2 \frac{\phi}{\rho_r} \quad (5)$$

ここに、 k_w は壁横筋の角度による効果の係数(縦筋に対して直角の場合:1.2)、 ϵ_{max} は壁筋の最大ひずみ、 θ は水平方向に対する壁の対角線の角度(rad.)、 c はかぶり厚さ(mm)、 s は壁横筋間隔(mm)、 k_1 は異形鉄筋の場合に用いる係数(0.4)、 k_2 は0.25、 ϕ は鉄筋径(mm)、 ρ_r は壁筋比である。

Silva らの提案した式と本研究で提案した式を比較すると、Silva らは、鉄筋の平均ひずみを用いているが、離散的にひずみを計測する実験では、正確なひび割れ間の平均ひずみを測定することが難しいことから、本研究で

は試行的に最大値を用いることとする。また、ひび割れ間隔については、二次壁は、構造部材よりも鉄筋間隔が広いこと、ひび割れ間隔が大きくなることが予想される。そのため、鉄筋間隔 s に 2 を乗じて、補正を行った。M200 を例に算定式の適用方法を説明する。鉄筋径は、ダブル配筋のため、D10、D6 のそれぞれ 2 本分の等価直径 r_e ($r_e = \sqrt{2A_0/\pi}$, A_0 は 1 本の鉄筋の断面積) を計算し、D10、D6 の等価直径の平均を鉄筋径とする。その他の変数は、本論で説明した値および表-1 の値を使用する。

4.2 ひび割れ幅算定式の妥当性の検証

提案式の推定精度を検証するために、ひび割れ間隔を表-5 に、ひび割れ幅を図-11 にそれぞれ実験値(Exp.) と計算値(Cal.)で比較したものを示す。壁筋比が同程度である図-11(a)~(c)の S110、S220、S280 においては、正側載荷時のひび割れ幅計算値は実験値と 3 割程度の誤差であり、おおよその挙動を再現している。しかし、負側載荷時の挙動は精度よく再現できなかった。負側載荷時は正側載荷時に一度損傷を受けた後であり、その影響が考えられるので、今後さらに検討したい。図-11(d)より、壁筋比の大きい M200 は、ひび割れ間隔、ひび割れ幅ともに実験値と大きく異なる値が算出された。ひび割れ幅の誤差に関しては、図-10 に示すように、M200 の最大鉄筋ひずみが非常に大きな値であることが原因と考えられる。ひび割れが発生した箇所にひずみゲージを貼付しなければ、正確なひび割れ箇所のひずみを求めることが出来ない。そのため、ひずみゲージによる測定を精度よく行うことが難しい。つまり本論文では、平均ひずみの計測が難しいことから、試行的に最大ひずみを用いたが、最大ひずみの計測が難しく M200 のみ、ひび割れ近傍でひずみの大きな値が測定された可能性が考えられる。

続いて、算定手法の妥当性について、より詳細に検証するため、既往の研究結果²⁾についても簡潔に触れたい。文献 2)において、本実験とは別に 4 体の試験体のひび割れ幅推移を再現しているが、おおよそ 3 割の誤差でおおむね挙動を再現できている。しかし B-2 試験体については、実験値と計算値の差が 4 割程度ある。この試験体はひび割れ幅が極めて小さく、誤差の絶対値としては 0.15(mm)位であるが、比率としては再現性が悪い。

以上の比較結果から、実験で得られる最大ひずみを用いるほか、文献 2)で報告しているように FEM 解析による最大ひずみを用いることで、非構造壁を模擬した計 8 体の試験体のせん断ひび割れ幅の拡幅挙動を、ある程度の精度で予測することができ、工学的には有用な手段であると考えられる。

5. まとめ

本論文では、非構造部材である二次壁(方立壁を対象)

の実大実験を行い、鉄筋間隔および壁筋比と二次壁の損傷状況の関係を確認後、ひび割れ幅算定式²⁾の妥当性を検証した。以下に、本論文で得られた知見を列記する。

- (1) 本実験の試験体では、鉄筋間隔が広いほど、また壁筋比が小さいほど、ひび割れ幅が大きく、同じ壁筋比でも、4 倍近くひび割れ幅に差が生じる場合があることが分かった。
- (2) 本実験の結果、同じ壁筋比でも、鉄筋間隔を小さくすることで、S110 と S280 を比較すると、17(%)耐力が向上することが分かった。
- (3) 実験で得られた最大ひずみを用いて、正側載荷時のひび割れ幅の推移をおおむね再現することができた。しかし、負側載荷時および、ひび割れ近傍で最大ひずみが測定された場合に関しては精度良く再現できず、今後さらなる検討が必要である。

今後はさらに試験体数を増やし、ひび割れ幅算定式の精度向上を行う。また本論文では平均ひずみの代わりに、実験で得られる最大ひずみを用いたが、これには限界がある可能性があり、より容易に平均ひずみを算出できる簡易モデルの作成に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 向井智久：東日本大震災での教訓を活かした耐震設計法に関する研究成果 一庁舎・避難施設等の地震後の継続使用性確保に資する耐震性能設計・評価手法の構築一、BRI-H27 講演会テキスト、2015.3
- 2) Matsubayashi, M., Takase, Y., Mizoguchi, M. and Inoue, K.: Estimation of crack width of non-structural walls using finite-element analysis, Journal of Advanced Civil Engineering Practice and Research, Vol.6, pp.18~25, Jun.2018
- 3) 松林美樹, 高瀬裕也, 溝口光男：有限要素解析を用いた鉄筋コンクリート造二次壁のひび割れ幅算定手法の提案と検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.457-458, 2018.9
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 2010, p.292, 2010.2
- 5) Silva, S.D., Mutsuyoshi, H. and Eakarath, W. : Evaluation of Shear Crack Width in I-Shaped Reinforced Concrete Beams, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.6, No.3, pp.443-458, Aug. 2008
- 6) 谷昌典, Eko Yuniarsyah, 向井智久, 河野進：損傷低減及び構造性能改善を目指した RC 造方立壁部材の実大実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.901-906, 2015.6