

# 論文 既存 RC 造耐震壁にあと施工する開口に対する補強方法の提案と補強効果の検証

吉田 陽葵\*1・JONATHAN MONICAL\*2・前田 匡樹\*3・相澤 直之\*4

**要旨**：RC 造耐震壁に開口を設ける場合、一般的に開口補強筋を配筋して開口を補強する必要があるが、施工が困難な場合がある。そこで本研究では、施工範囲をできるだけ開口周囲に限定する鋼管補強を提案し、静的載荷実験より構造性能を把握した。提案する補強構法に 2 つのパラメータを設定し、荷重変形関係と損傷性状を比較し、その効果を確認した。実験から、付着を確保した鋼管補強では、鋼管に伝達される力を大きくすることができ、壁の耐力が上昇することが分かった。また、曲げ剛性を確保した鋼管補強では、ひび割れ幅を抑制し、大きい変形角まで耐力を大きく保つことが分かった。

**キーワード**：RC 造耐震壁、開口補強、静的載荷実験、せん断耐力

## 1. はじめに

RC 造建築物において、出入口や窓、あるいは配管設備などの目的で、壁に開口部を設けることがある。RC 造耐震壁に開口を設ける場合には、日本建築学会の「鉄筋コンクリート構造計算規準」(以下、RC 規準) に従い開口補強筋を配筋する対策が一般的である。既存の RC 造建築物でも用途変更や設備改修などの目的で、耐震壁に新しく開口を設置する場合がある。現在の一般的な工事では、図-1 のように新たに設ける開口部分に加えてその周辺のコンクリートも大きくはつらなければならない。そこで、既往の研究<sup>2)3)4)5)</sup>では開口補強筋を追加配筋する必要がなく、はつり量を低減する鋼管による補強が提案されている。本研究は、開口周比0.33の開口を有する耐震壁を対象に、既存コンクリートの工事量を

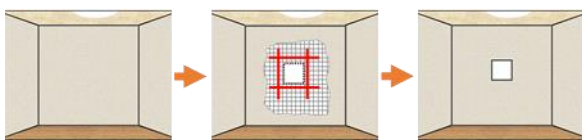


図-1 既存耐震壁へ開口を新設する場合の一般的

な開口補強工事

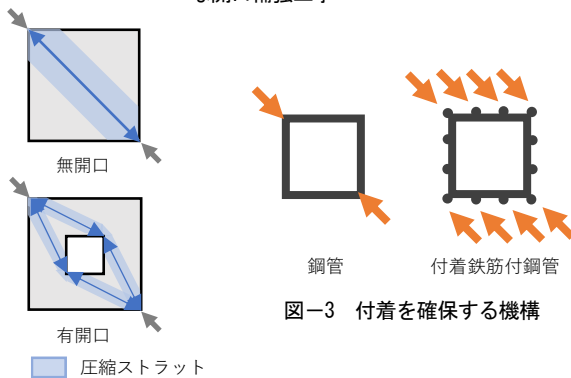


図-2 力の伝達メカニズム

低減できる鋼管補強による補強方法について、従来型の開口補強筋と同等の耐力・剛性を確保するために、鋼管とコンクリートの付着機構や鋼管の曲げ剛性を向上させる機構を考案し、壁要素の純せん断実験により構造性能を検討した。

## 2. 補強方法の提案

### 2.1 耐震壁のせん断抵抗メカニズム

図-2 に無開口壁、開口壁にせん断力伝達のメカニズムのイメージを示す。無開口壁では、対角線上のコンクリートの圧縮力によりせん断力が伝達されるが、開口壁では、開口を避けるようにコンクリートの斜め圧縮ストラットが形成されるため、無開口壁に比べて耐力が低下する。本研究では、開口耐震壁のせん断抵抗メカニズムを検討し、RC 規準の開口補強筋の効果や、これに代わる有効な開口補強法を検討し、壁要素部材実験により検証を行った。

### 2.2 鋼管による開口補強方法の提案

本研究で、検討の対象とした開口補強工法は、開口内側に設置する鋼管、鋼管とコンクリートの付着を確保する機構(図-3)、鋼管の曲げ剛性を確保する機構(図-4)、の3つの要素である。鋼管は、開口補強筋の代わりに、隅角部からのひび割れ発生を防止する開口補強筋に代わる効果と、図-2 に示した開口により分割される



図-4 曲げ剛性を確保する機構

\*1 東北大学 工学部建築・社会環境工学科 (学生会員)

\*2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 研究員 Ph.D (正会員)

\*3 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

\*4 東北電力(株) 土木建築部

対角方向の圧縮ストラットを図-5に示すように鋼管で負担することで補う効果を期待している。鋼管とコンクリートの付着は、図-3に示したようにコンクリート内の斜め圧縮力を効果的に鋼管に伝達することを期待している。また、鋼管にリブを設けることで、鋼管の4辺の板材の曲げ剛性が向上し、斜め圧縮ストラットの荷重伝達に寄与することを期待している(図-4)。具体的には、以下のように、補強効果を評価した。

(1) 耐力の補強効果

正方形の鋼管にはせん断力により図-5のように隅角部に斜め圧縮力作用することで、図-6に示すように曲げモーメントが生じ、隅角部で鋼管板材が曲げ降伏した状態を考えると、鋼管が負担するせん断力 $Q_{sby}$ は、式(1)及び式(2)で求められる。

$$Q_{sby} = 2 \times \frac{2M_y}{L} = \frac{4M_y}{L} \quad (1)$$

$$M_y = \sigma_y Z \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_y$ ：鋼管の降伏強度、 $Z$ ：鋼管板材の断面係数、 $L$ ：鋼管高さ

鋼管に補強リブを設けることで、鋼管の曲げ降伏モーメント $M_y$ が増加する。

(2) 剛性の補強効果

鋼管に図-6の曲げモーメント図が生じるときの水平剛性 $K_{sb}$ は、以下の式(3)で求める。

$$K_{sb} = 2 \times \frac{12EI}{L^3} = \frac{24EI}{L^3} \quad (3)$$

ここで、 $E$ ：ヤング係数、 $I$ ：断面二次モーメント、 $L$ ：鋼管高さ

3. 実験概要

3.1 試験体概要

2章に述べた3種類の鋼管補強の効果を調べるために、鋼管で補強した壁要素試験体、及び、比較のための無開口、有開口試験体を用意した。試験体は合計6体で、その一覧を表-1に示す。また、表-2に補強詳細を示す。

試験体の寸法及び配筋図を図-7に、鋼管補強の詳細を図-8に示す。本実験は、耐震壁の開口部周辺を600mm×600mmの正方形で取り出した要素試験体で、開口は200mm×200mmとした。試験体周囲に取り付けた載荷用鋼板に取り付けた、スタッドボルトによって試験体にせん断力が伝達される。補強鋼管には、角形鋼管(200×200×12)を使用した。試験体名のSSは無開口の試験体、S200は開口を設けた補強なしの試験体、

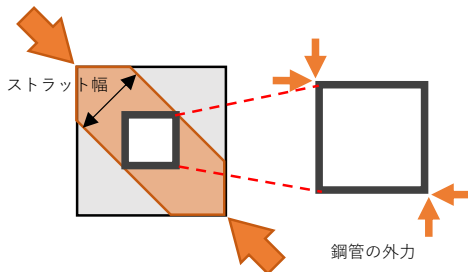


図-5 鋼管の荷重設定

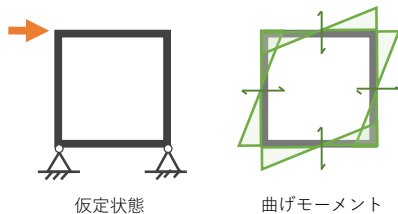


図-6 鋼管の曲げモーメント

表-1 試験体詳細

試験体名	開口	開口補強	付着
SS	なし	-	-
S200	200×200	なし	-
S200A		開口補強筋	-
S200P-B		角型鋼管	あり
S200P-R		角型鋼管+リブ	なし
S200P-R-B		角型鋼管+リブ	あり

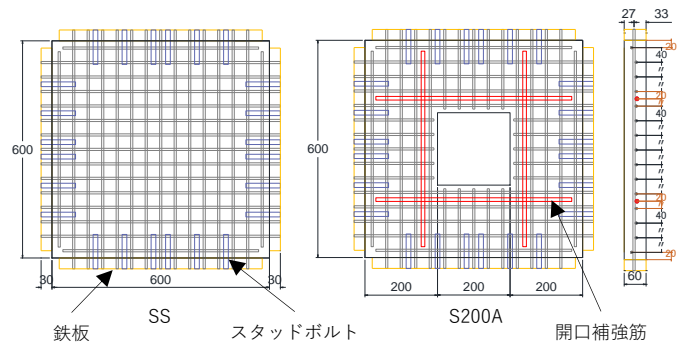


図-7 試験体配筋図(mm)

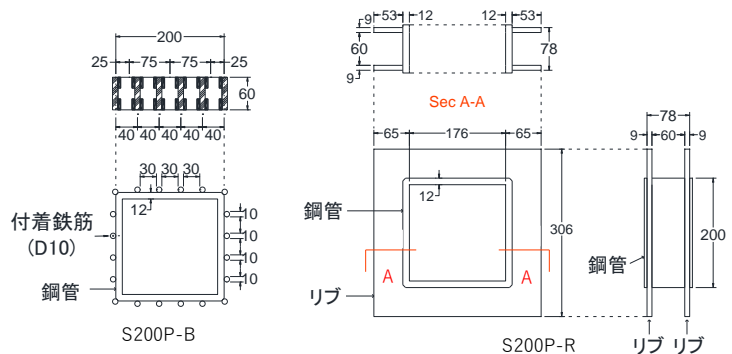


図-8 鋼管寸法(mm)

表-2 補強詳細

	S200A	S200P-R	S200P-B	S200P-R-B
補強方法	開口補強筋	リブ付鋼管	ボンド付鋼管	リブ・ボンド付鋼管
詳細	2-D10 (SD295)	鋼管：12×200×200 リブ：9×306×306	鋼管：12×200×200 付着用鉄筋：D10	鋼管：12×200×200 リブ：9×306×306 付着用鉄筋：D10

S200A は開口周辺に D10 の開口補強筋を配筋した従来型補強の試験体である。S200P-R は鋼管の曲げ剛性を高めるため図-8 に示すリブを設けたもの、S200P-B は、コンクリートと鋼管の付着を高めるため、D10 の鉄筋を溶接したもの、S200P-R-B はリブと付着用鉄筋の両方を設けたものである。使用材料について、開口補強筋は D10 鉄筋、鋼管は 12mm 厚の 200mm×200mm である。リブは、鋼管の形に切ったものを溶接してとりつけ、付着用には鉄筋 D10 を鋼管の各面に 5 つずつ計 20 本溶接した。

補強試験体 3 体の鋼管部分の剛性、耐力の計算値を表-3 に示す。鋼管のみの試験体は、鋼管の角が最初に降伏すると仮定した為、試験体にかかる荷重のうち約 10kN を鋼管が負担する設計とした。鋼管にリブを追加した試験体では、補強の強度が 20 倍近く増加することから補強材の強度負担は計算上 200kN を超える。また補強材の剛性について、鋼管のみの場合は曲げ剛性が低く 5kN/mm と推定し、鋼管にリブを加えた場合はその剛性が 100 倍近く増加することから計算上の剛性は 450kN/mm となった。

### 3.2 材料特性

コンクリートの圧縮強度は、各試験体 26.9N/mm<sup>2</sup>から 28.5N/mm<sup>2</sup>まで少しばらつきはあるが、平均は 27.8N/mm<sup>2</sup>であった。鉄筋は SD295 で壁筋を D6、開口補強筋は D10 を使用し、鋼管は STKR400 を使用した。材料試験による材料特性を表-5 に示す。

### 3.3 加力計画

図-9 に加力装置を示す。平板形状の壁試験体の 4 周の加力鉄板に押し 300kN、引き 300kN の载荷機能を有するストローク±100mm の 4 本の油圧ジャッキを接合し、正負繰返しせん断力を作用させる。ジャッキ No.1, No.4 とジャッキ No.2, No.3 に引張・圧縮の逆方向に等しい荷重を作用させることで、純せん断の応力を試験体に作用させた。加力の変位で制御し、±0.0125%、±0.025%、

±0.05%、±0.1%、±0.2%、±0.4%、±0.6%のせん断変形角をそれぞれ 2 サイクルずつ行い、その後押し切った。

### 3.4 計測計画

試験体の全体せん断変形は写真-1 に示すように試験体の表裏に変位計を設置し、せん断変形角を計測した。また、補強鋼管のせん断変形成分も図-10 に示すように対角方向に変位計を取り付け計測し、ひずみゲージは角型鋼管の各板材に対して表裏の両端、中心の 6 枚ずつ貼り、鋼管のひずみを計測した。

## 4. 実験結果

### 4.1 荷重－変形関係

鋼管補強試験体 3 体の荷重変形関係を図-11 に示す。S200P-R は 0.20% で 89.9kN 時に壁筋が降伏し、0.6% で最大耐力の 124.3kN に到達した。また、S200P-B では 0.13% で 95.4kN 時に壁筋が降伏し、0.4% で最大耐力の 125.5kN に到達した。その後、0.6% のサイクルで大きなひび割れが発生したため、2 サイクル目で急激に耐力が低下した。S200P-R-B は 0.17% で 93.6kN 時に壁筋が降伏し、0.4% で最大耐力の 140.9kN に達した。0.6% 载荷時、0.55% 付近でコンクリート同士のすべりが生じ、変形角が 0.85% まで急激に増加した。荷重の低下は 85% ほどであったが、負側の载荷で耐力低下がみられたため、2 サイクル目を行わず、载荷を終了した。それぞれの壁筋の降伏位置を図-12 に示す。

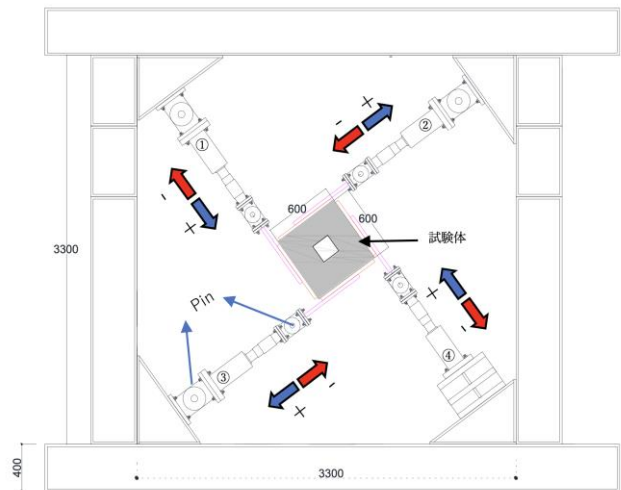


図-9 加力装置図

表-4 S200 との差分により算出した鋼管の負担

表-3 補強の計算値			表-4 S200 との差分により算出した鋼管の負担		
	耐力 (kN)	剛性 (kN/mm)	負担力 (kN)	負担剛性 (kN/mm)	
リブ	220	450	S200P-R	4.1	267
付着鉄筋	10	5	S200P-B	5.3	138
リブ+付着鉄筋	220	450	S200P-R-B	20.7	437

表-5 材料試験結果

コンクリート	圧縮強度	27.8 N/mm <sup>2</sup>			
	引張強度	2.2 N/mm <sup>2</sup>			
鉄筋	降伏強度	D6	440 N/mm <sup>2</sup>	D10	370 N/mm <sup>2</sup>
	引張強度		542 N/mm <sup>2</sup>		515 N/mm <sup>2</sup>
鋼材	降伏強度	鋼管	350 N/mm <sup>2</sup>	リブ	378 N/mm <sup>2</sup>
	引張強度		411 N/mm <sup>2</sup>		466 N/mm <sup>2</sup>

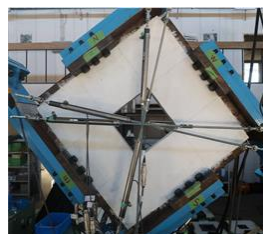


写真-1 全体変位計

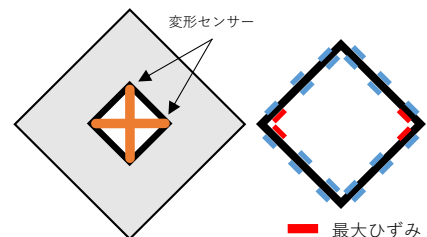


図-10 補強変位計(左)とひずみゲージ(右)

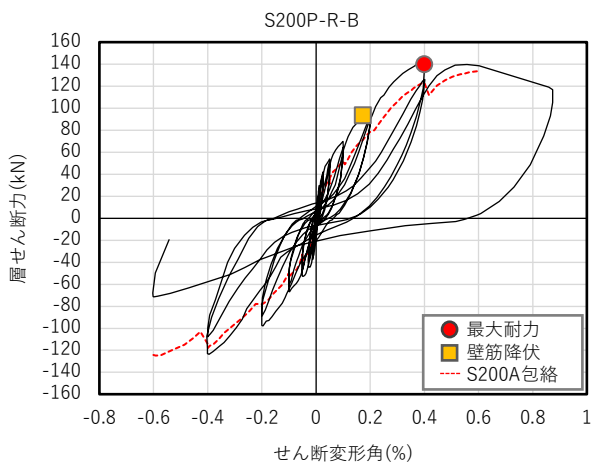
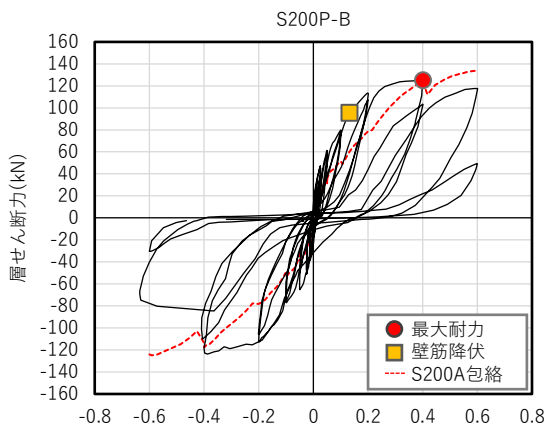
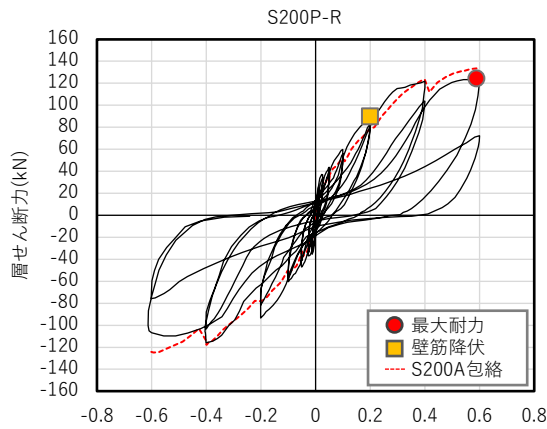


図-11 荷重変形関係

#### 4.2 試験体の損傷状況

図-12, 写真-2 に4つの補強試験体の0.2%載荷時の損傷状況を示す。S200P-RやS200P-R-Bは、S200AやS200P-Bと比較して0.2%までのサイクルでひび割れが多く発生した。付着機構のあるS200P-Bでは、鋼管とコンクリートの境界部分に沿って、細かいひび割れが多数発生しており、0.4%や0.6%で剥落も生じた。これより、境界部分でコンクリートから鋼管に効果的に応力伝達がされたと考えられる。S200AやS200P-Bでは主に対角線上に発生したのに対し、リブ付き試験体は、リブのない試験体とは異なるひび割れを示した。ひび割れはより均一であり、リブの高い剛性が開口部を強化し、対角線上

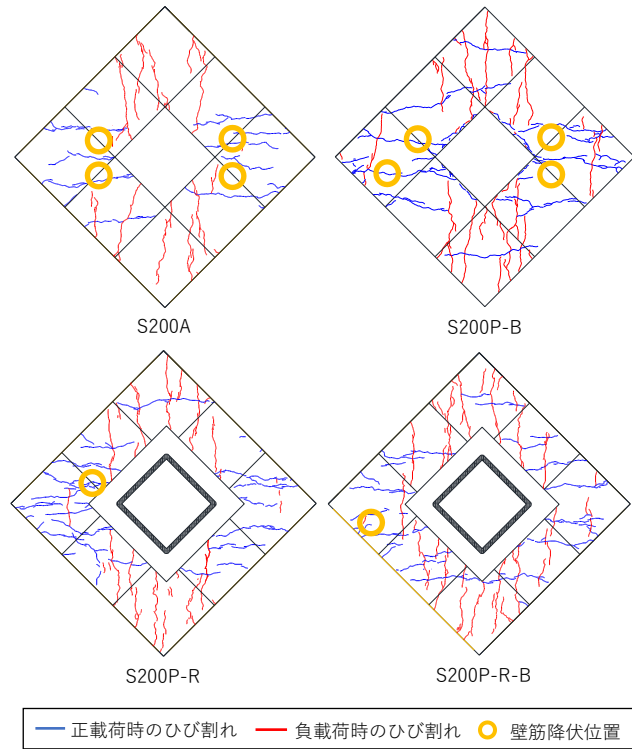


図-12 0.2%時のひび割れ図

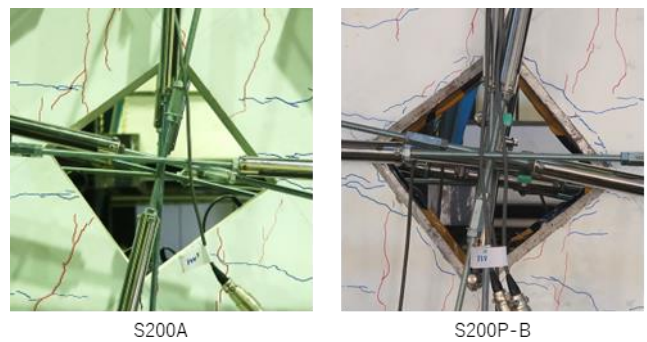


写真-2 開口周辺のひび割れ

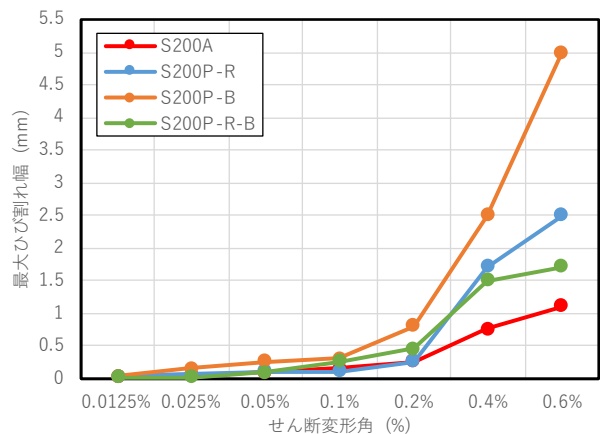


図-13 最大ひび割れ幅

だけではなく、開口部周辺の力の伝達を大きくしたと考えられる。開口補強筋と鋼管補強試験体の各サイクルでの最大ひび割れ幅の比較を図-13に示す。最大ひび割れ幅は、せん断変形角0.2%までは、0.5~1mm程度以下であったが、その後、壁筋の降伏が進展し、ひび割れ幅

は急激に拡大した。特に S200P-B は変形角の増加とともに開口隅部分のひび割れ幅が拡大した。これに対して、開口補強筋のある S200A 試験体はひび割れ幅が最も小さく、開口補強筋はひび割れ幅の拡大防止に有効であった。

#### 4.3 包絡線の比較

全6つの試験体の包絡線を図-14, 15に示す。終局耐力に達した後のサイクルを除いて、補強試験体は各サイクルの耐力が、無開口試験体 SS と開口補強無し試験体 S200 の間である。短期許容応力度に概ね相当するせん断変形角 0.2%までは、無開口壁に次いで、S200P-B, S200P-R-B, S200P-R の順に耐力が高く、従来の開口補強筋のある S200A, 補強のない S200 よりも高かった。最大耐力に達する 0.4%以降では、リブ付き鋼管の効果が発揮され、S200P-R-B の耐力が最も大きく、次いで S200A, S200P-R, S200P-B であった。以上より、鋼管で補強した3体は、いずれも在来型の開口補強筋による開口試験体より、耐力が高く、鋼管補強が開口補強筋と同

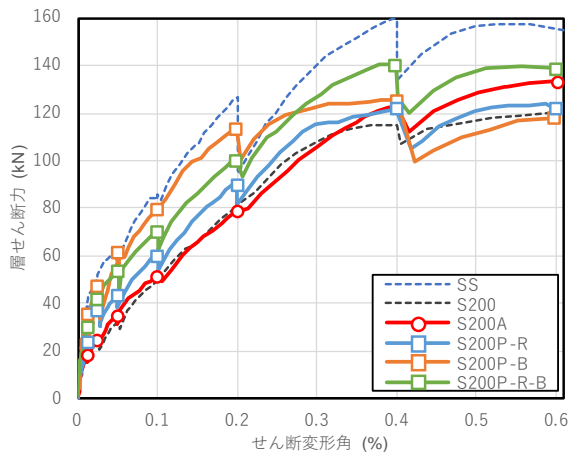


図-14 正側包絡線

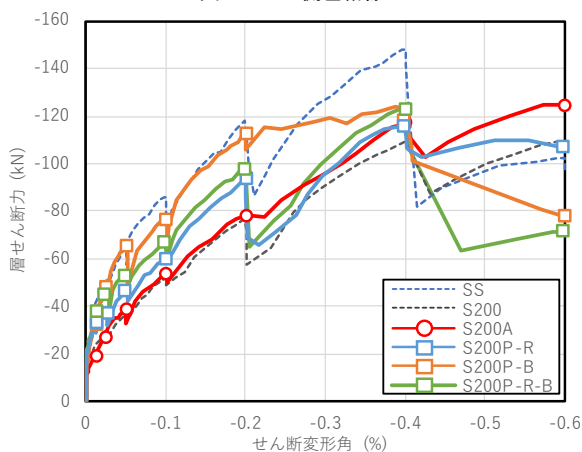


図-15 負側包絡線

表-6 鋼管の降伏割合

	平均ひずみ (μ)	鋼管のひずみから算出	耐力の差分から算出
リブ	54	$54 \times E_s / 350 = 3.2\%$	$4.1 / 220 = 2\%$
付着鉄筋	774	$774 \times E_s / 350 = 45\%$	$5.3 / 10 = 50\%$
リブ+付着鉄筋	224	$224 \times E_s / 350 = 13\%$	$20.7 / 220 = 10\%$

※ $E_s$ : 205,000N/mm<sup>2</sup>、鋼管の降伏強度:  $\sigma_y = 350\text{N/mm}^2$

等以上の効果があることが確認できた。

## 5. 開口補強効果の検討

### 5.1 補強方法の耐力

図-16に、各せん断変形時の鋼管補強試験体のせん断耐力の開口補強筋試験体に対する比率を示す。S200P-R, S200P-B, S200P-R-B どの補強方法に関しても0.2%までの小さいせん断変形角で耐力の上昇がみられる。よって、鋼管補強壁では、開口補強筋壁に対して同等以上の補強効果を確認できた。また、最も耐力上昇効果があるのは0.025%の時で、徐々にその効果は小さくなった。

表-6に示す鋼管のひずみから算出した降伏割合は、ひずみから計算した応力を鋼管の降伏応力によって割ったものである。ここで使用したひずみゲージの値は、図-10に示す鋼管補強試験体が最大耐力時に最大ひずみとなる傾向がみられた鋼管隅角部の平均ひずみである。これより、鋼管のひずみから算出した降伏割合と表-4に示す S200 との差分から算出した降伏割合は概ね傾向が一致している。よって、表-4に示す S200 との差分が鋼管の負担力とした。付着鉄筋を付けた鋼管の終局耐力は S200 より約 5kN 大きく、この値は計算による算出値の約 1/2 である。この結果から、鋼材は降伏応力に達していないことが分かる。リブのみの鋼管補強試験体は付着鉄筋のみの鋼管補強試験体と同程度の耐力に達している。この結果からリブのみの補強は、補強材が負担可能な曲げモーメントが非常に大きいにも関わらず、開口部の壁の強度を高める効果がないことが分かる。鋼管にリブと付着鉄筋を組み合わせさせた試験体は、最も高いせん断耐力に達しており、リブと付着鉄筋を組み合わせさせた補強方法が開口部の強度の向上に有効であることが分かる。また、この補強方法により鋼管が負担するせん断耐力は、計算により算出した降伏耐力の10%にしか達していないが、付着鉄筋のみまたはリブのみの鋼管補強試験体の鋼管が持つせん断耐力と比較すると約4倍大きい結果となった。

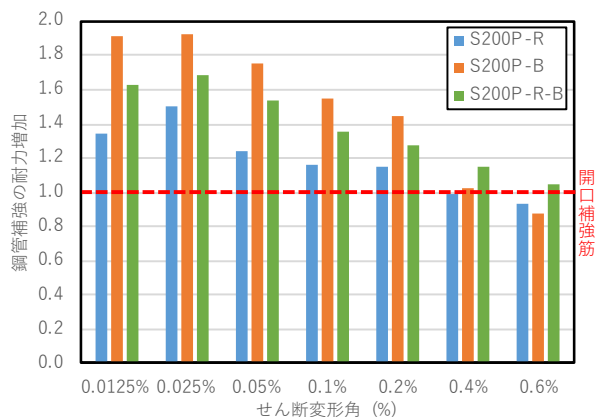


図-16 鋼管補強の耐力増加

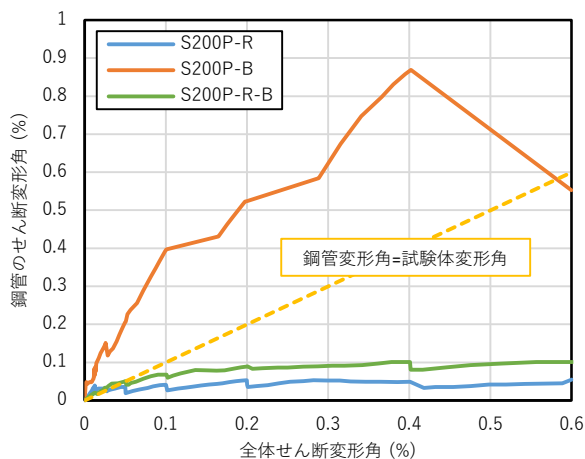


図-17 鋼管の変形

## 5.2 補強方法の剛性

図-17 に全体せん断変形角に対する鋼管のせん断変形角のグラフを示す。S200P-B では全体の変形角に対して鋼管の変形角は大きくなっているが、S200P-R や S200P-R-B では小さくなっている。これは表-3 に示した予測と同じ傾向であり、付着鉄筋のみの鋼管補強では開口部の剛性はあまり増加しないが、リブによって開口部周辺の剛性は大きく増加することを示している。図-17 に示す鋼管変形角=試験体変形角は、試験体全体の变形に対して開口部の変形角が等しいことを示している。リブの長さを短くしても効果的な補強方法を提案することは可能である。実験結果による剛性は、鋼管補強試験体と S200 の耐力の差を、鋼管補強試験体のせん断ひずみが 0.0125%の時のせん断変形角で割ることにより算出した。剛性の計算値は表-3、実験値は表-4 に示す。実験値は結果から、リブのある鋼管の剛性は鋼管のみ場合の剛性に比べ約 2 倍の剛性があると分かる。また、リブと鋼管で補強した場合の剛性は最も大きく、表-3 で計算した値である約 450 kN/mm にほぼ等しい結果を得た。

## 6. 結論

合理的な補強方法の提案と性能の比較を目的として、6 つの試験体について実験をおこない、耐力・ひび割れ・補強の効果について比較を行った。本研究によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 最大耐力に関して、開口補強筋壁と比較すると、鋼管補強壁は小さいが、せん断変形角が 0.2%まではどの鋼管補強壁も開口補強筋壁より耐力が大きいと分かった。特に S200P-B は効果が大きく、0.025%までは 90%以上の耐力増加がみられた。S200P-R-B に関してはどのサイクルでも開口補強筋壁よりも耐力が大きかった。
- (2) ひび割れに関して、開口補強筋壁と比較すると、鋼管補強壁は多い傾向がある。また、特に 0.1%以降では、ひび割れ幅も大きい傾向がある。鋼管補

強壁の中で比較すると、S200P-B はひび割れが少なく、幅が大きい、S200P-R や S200P-R-B ではひび割れが多く、幅が小さい。

- (3) せん断変形角 0.2%までは従来型の補強方法に対して、鋼管による補強により同等以上の補強効果が得られることが分かった。
- (4) 鋼管とコンクリートの付着を確保することによって、鋼管補強に伝わる力を大きくすることができると分かった。
- (5) リブをつけることで、開口の変形を抑制することができ、剛性補強に有効であると分かった。また、ひび割れ幅を抑制し、せん断変形角 0.4%以降の耐力を大きく保つことができたことが分かった。
- (6) せん断変形角 0.2%までの変形角において、リブによって剛性を大きくした S200P-R や S200P-R-B では、コンクリート部分のひび割れが多く発生し、試験体全体の剛性が S200P-B よりも低下した。これは、補強部分に伝わる力に見合った適切な補強を行うことの重要性を示しており、今後より詳細な検討を行う必要がある。

## 謝辞

本研究は、建築研究所 関松太郎氏に多大なるご支援、ご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2018年
- 2) 田邊祥平，京田隆寛，渡邊湊，氏家章宏，他：既設耐震壁のあと施工開口に対する鋼管補強効果に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1157-1158，2020.9
- 3) Hamood,A., Tafheem,Z., Maeda,M., Seki,M., 他：Experimental study on the influence of openings on strength and stiffness of RC walls Part 1: Outline of experiment plan, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.149-150, 2021.7
- 4) Hamood,A., Tafheem,Z., Maeda,M., Seki,M., 他：Experimental study on the influence of openings on strength and stiffness of RC walls Part 3: Overview of 2nd test series, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.339-340, 2022.7
- 5) 鶴飼 和也, Lai Thi Hoa, Jonathan Monical, 前田匡樹, 他：開口部が鉄筋コンクリート造壁の耐力及び剛性に及ぼす影響の検討 その5 シリーズ3の実験概要及びその結果, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.165-166, 2023.7