

論文 炭素繊維シートによりせん断補強された袖壁付 RC 柱の構造性能に関する実験的研究

磯雅人*¹・松崎育弘*²・園部泰寿*³・中村洋行*⁴

要旨: 本論文は、袖壁付 RC 柱部材表面に炭素繊維シートをせん断補強材として貼付けした時の補強効果を明らかにするため行った実験結果をまとめたものである。試験体の主な変動要因は、柱と壁との取り合い関係、シート貼付け方法と補強量である。この結果、シート貼付けにより、袖壁付 RC 柱のせん断補強に効果を発揮させることができ、その効果は、貼付方法と補強量に依存することを明らかにした。また、せん断耐力とせん断補強量との関係は、シートに生じた実応力を用いると評価できることを示した。

キーワード: せん断補強、袖壁付 RC 柱、炭素繊維シート、実応力、せん断補強筋量

1. はじめに

現在、1995年に起きた阪神大震災で新耐震以前に建てられた建築物が大きな被害を受けたことから、既存建築物の耐震診断や耐震補強の必要性が強く認識されるに至った。ところで耐震補強技術といえば、鋼板を用いた補強方法が一般的である。しかし近年、鋼板補強に比較して施工が容易な工法として、シート状連続繊維を既存 RC 部材に貼付け耐震補強する方法が注目され、すでに実用化が始まっている。しかし、そのせん断補強効果や構造性能にはまだ不明な点も多く、研究的にも矩形柱についての研究が中心であり、実施建物に多く存在する二次壁のついた柱への利用についての研究はまだほとんど行われていないのが現状である。

そこで本研究では、炭素繊維シートにより補修・補強した袖壁付 RC 柱について実験を行い、そのせん断補強効果や構造性能を把握することを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 試験体

図-1に試験体形状、表-1に試験体一覧を示す。共通要因は、断面 $b \times D = 30\text{cm} \times 30\text{cm}$ 、軸力 $N = (c \sigma B/6) \cdot b \cdot D$ 、せん断スパン比 $a/D = 1.5$ 、実験時コンクリート強度 $c \sigma B = 271 \sim 358\text{kgf/cm}^2$ 、主筋 12-D16 (SD295A)、帯筋 $\Phi 6$ (SR235) とした。変動要因は、断面形状 (矩形柱、柱芯の両脇に袖壁を設けた柱 (以下、中央袖壁付柱)、柱つらの両脇に袖壁を設けた柱 (以下、端部袖壁付柱)、袖壁上下部にスリットを設けた中央袖壁付柱 (以下、スリット入り袖壁付柱))、炭素繊維シートの貼付け方法と補強量とし、試験体総数 14 体を計画した。なお、シートのせん断補強効果は、(1)式により、シートをせん断補強筋に置き換える方法で評価した。なお No.12, 13, 14 につ

$$\begin{aligned} \Sigma p_w &= p_w + (f \sigma u / s \sigma y_w) \cdot f p_w \\ \Sigma p_{sh} &= p_{sh} + (f \sigma u / s \sigma y_h) \cdot f p_{sh} \end{aligned} \quad (1)$$

★記号の説明★

- Σp_w : 補強後の帯筋比
- Σp_{sh} : 補強後の袖壁横筋比
- p_w : 既存 RC 部の帯筋比
- p_{sh} : 既存 RC 部の袖壁横筋比
- $f p_w$: シートの帯筋比
- $f p_{sh}$: シートの袖壁横筋比
- $f \sigma u$: シートの引張強度 (表 4)
- $s \sigma y_w$: 帯筋降伏強度 (表 3)
- $s \sigma y_h$: 袖壁横筋降伏強度 (表 3)

- * 1 東急建設 (株) 技術研究所 建築研究部建築構造研究室、工修 (正会員)
- * 2 東京理科大学教授 工学部建築学科、工博 (正会員)
- * 3 足利工業大学教授 工学部建築学科、工博 (正会員)
- * 4 東急建設 (株) 技術研究所 建築研究部建築構造研究室室長、工修 (正会員)

表-1 試験体一覧

No.	試験体名	実験対象	柱-帯筋比(pw)		壁-壁横筋比(psh)		袖壁 柱頭・柱脚 スリットの有無	柱形状	備考					
			既存RC pw(%)	巻付け後 ^{*1)} Σpw(%)	既存RC psh(%)	巻付け後 ^{*1)} Σpsh(%)								
1	RC-012-N	RC	0.12			0.24	無	矩形柱	1971年以前の建物を想定 補強筋:2-Φ6@160(SR235) 帯筋フック形状:135°,90°フック併用型					
2	RC-012-W1							中央袖壁						
3	RC-012-W1S							有						
4	RC-012-W2							無		端部袖壁				
5	CF-241-N	炭素繊維 シート 補強	0.12		0.24		無	矩形柱	柱にシートを2枚貼付け補強					
6	CF-127-W1							中央袖壁	4.83	柱・袖壁部分にシートを1枚貼付け補強				
7	CF-241-W1								9.42	柱・袖壁部分にシートを2枚貼付け補強				
8	CF-127-W1S							有				有	中央袖壁	柱部分にシートを1枚貼付け補強
9	CF-241-W1S													柱部分にシートを2枚貼付け補強
10	CF-127-W2							無				無	端部袖壁	柱部分にシートを1枚貼付け補強
11	CF-241-W2	柱部分にシートを2枚貼付け補強												
12	CFR-241-N	炭素繊維 シート 補修・補強	0.12		0.24		無	矩形柱	No.1を補修・補強					
13	CFR-241-W1S							有	中央袖壁	No.2を補修・補強				
14	CFR-127-W2							無	端部袖壁	No.4を補修・補強				

★共通要因★
 柱断面: $b \times D = 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$
 軸力: $N = (c \sigma B/6) \cdot b \cdot D$
 セン断スパン比: $a/D = 1.5$
 コンクリート設計基準強度: $F_c = 18.0 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$
 主筋: 12-D16 (SD295A)
 帯筋: Φ6-SR235 (135°, 90°フック併用型)
 巻付け素材: 炭素繊維シート (目付300g/m²)

★試験体名称の説明★
 CFR-241-W1S
 1 2 3 4

1: 実験対象
 RC: RC試験体
 CF: 炭素繊維シート補強試験体
 CFR: 炭素繊維シート補修・補強試験体

2: 帯筋比
 $pw \times 100$

3: 柱形状
 N: 矩形柱
 W1: 中央部両脇に袖壁が付いた柱
 W2: 端部両脇に袖壁が付いた柱

4: 袖壁端部のスリット有無
 -: スリット無
 S: スリット有

*1) (1)式参照

いては、予めせん断破壊（以下、被災）させた No.1, 2, 4 をそれぞれ補修・補強したものである。補修は、軸力及び変位を0に戻し、コンクリート剥落部分を樹脂モルタル及びポリマーセメントモルタルで補修した後、ひび割れ部にエポキシ樹脂を注入して補修を行った。なおスリットを入れる No.13 は、軸力及び変位を0に戻し、袖壁上下部にスリットを入れた後、補修を行った。

2. 2 実験方法及び材料試験結果

図-2 に加力装置及び加力模式図を示す。Qはせん断力、 δ は相対変位である。加力は建研式加力により行い、軸力を一定に保ちながら、正負交番繰り返し載荷とした。表-2, 3, 4 に使用材料の力学的性質を示す。表-4 中の炭素繊維シートの引張強度は、検長 10cm, 11cm の2種類、幅 1.25cm, 2.5cm の2種類、炭素繊維シート積層枚数 1~3 ply と変化させた試験片、計 102 本の引張試験を行い、その破断強度の平均値とした。なお表1中の巻付け後の帯筋比、壁横筋比そして実験結果の検討では表4中の炭素繊維シートの引張強度 36900(kgf/cm²)の値を用いて計画・検討を行っている。

3. 実験結果及び検討

3. 1 破壊性状

図-3 に最終ひび割れ状況の一例を示す。RCの No.1, 2, 3, 4 は、主筋の降伏は見られず、

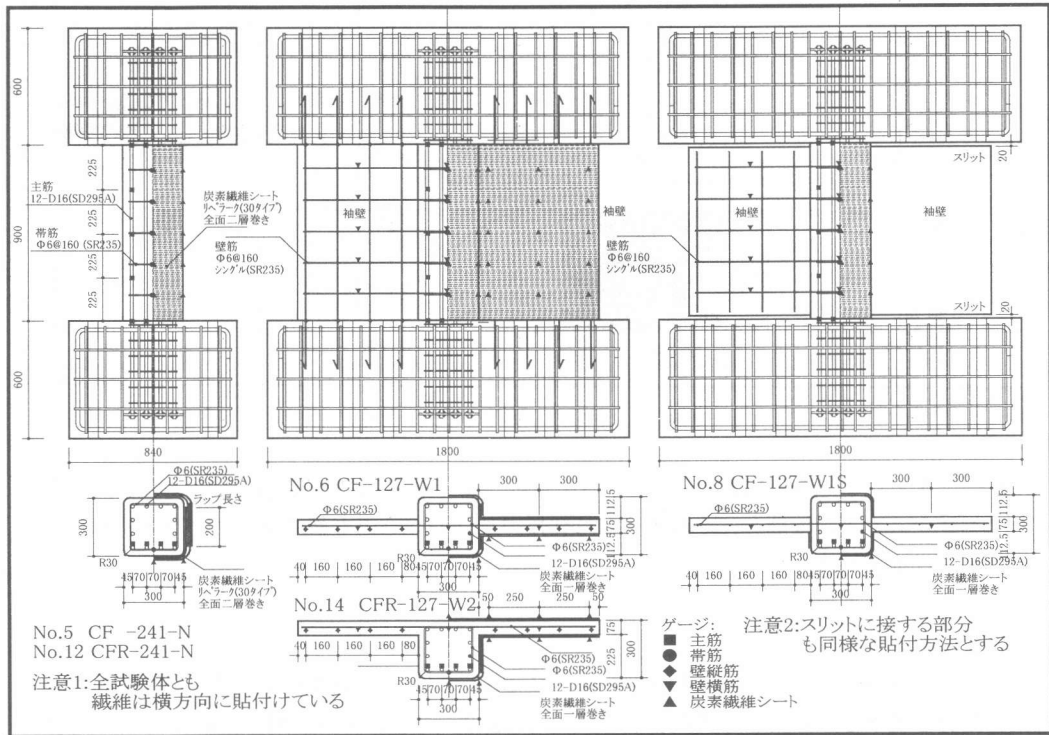


表-2 使用材料(コンクリート)

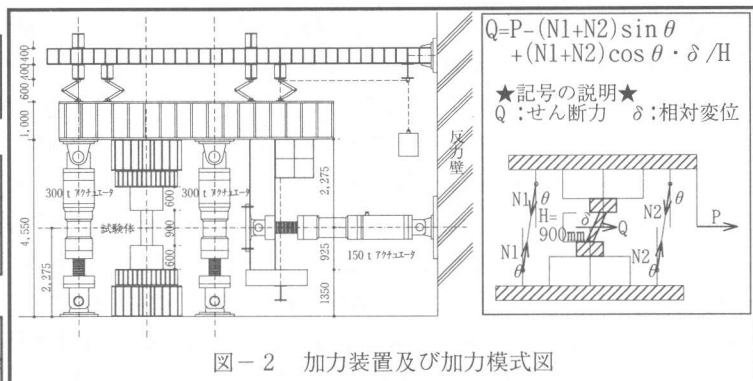
材令	圧縮強度 (封 蔵) (kgf/cm ²)	引張強度 (封 蔵) (kgf/cm ²)	ヤング係数 ×10 ⁵ (kgf/cm ²)
28-132	271-358	22.9-31.5	2.42-2.86

表-3 使用材料(鉄筋)

鉄筋の種類	降伏応力度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	
主筋	D16(SD295A)	3460	1.96 × 10 ⁶
帯筋	Φ6(SR235)	3580	2.12 × 10 ⁶
壁筋	Φ6(SR235)		

表-4 使用材料(繊維シート)

炭素繊維シート 目付:	厚さ (mm)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
300g/m ²	0.167	36900	2.58 × 10 ⁶



せん断ひび割れを横切る帯筋または壁筋が降伏することにより終局を迎え、せん断引張破壊の様相を示した。

シート補強した矩形柱の No.5, 12 は、主筋が降伏に至り曲げ破壊の様相を示した。両試験体とも+1/10 (rad.) 手前付近で柱頭・柱脚部分のシートの破断がみられ、No.5 は徐々にシートが破断したため安定した破壊性状を示したが、No.12 (No.1 を補修・補強) は、柱脚部分のシートが連続的に破断、主筋が座屈したため、急激に耐力を落とし、脆性的な破壊性状を示した。

柱芯に袖壁を設けた No.6, 7、柱つらに袖壁を設けた No.10, 11 の最終破壊状況は、せん断耐力と同時に袖壁と柱を貫くせん断ひび割れが一気に口開き、さらにその部分のシートが引き剥がされ脆性的な破壊性状を示した。一方、No.14 (No.4 を補修・補強) では、袖壁上部の補修モルタルが圧縮破壊を示したため急激な耐力低下は見られず安定した破壊性状となった。

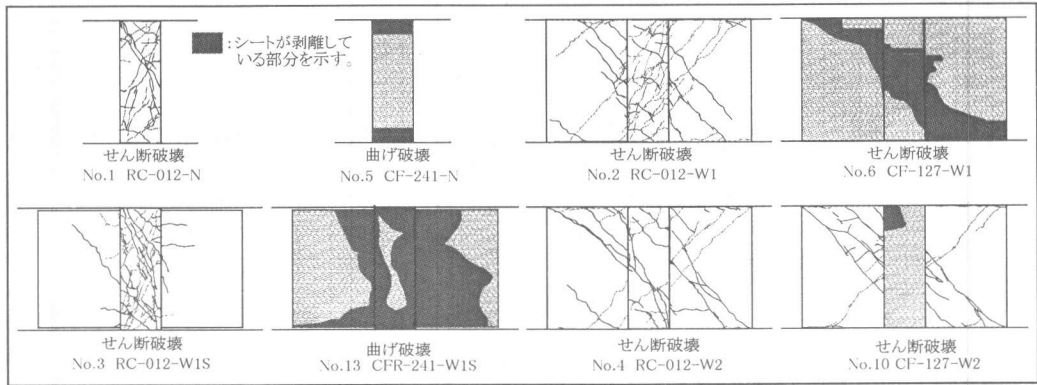


図-3 最終ひび割れ状況の一例

スリットを設けた No.8, 9, 13 は、主筋が降伏し曲げ破壊に至った。 $+1/33$ (rad.) に向かう途中で袖壁がスタブに接触し、それとともに柱側面部分のシートと被りコンクリートが剥がれていく破壊性状を示した。

3. 2 変形状

図-4 に矩形柱の $Q-\delta$ 包絡線を示す。RC の No.1 では、 $+1/100$ (rad.) 手前で帯筋が降伏し、急激に耐力を低下させる変形状を示した。シート補強した No.5 は、 $+1/100$ (rad.) 手前で主筋が降伏した。降伏後の耐力低下も少なく $+1/10$ (rad.) まで安定した変形状を示し、シートによるせん断補強効果が確認された。No.12 (No.1 を補修・補強) は、 $1/20$ (rad.) まで No.5 とほぼ同様な変形状を示し、被災したことによる影響は見られなかった。しかし、 $+1/10$ (rad.) に向かう途中で柱脚部シートの連続的な破断、主筋が座屈したため、急激に耐力を落とす変形状となった。

図-5 に中央袖壁付柱の $Q-\delta$ 包絡線を示す。No.6, 7 の最大耐力は、No.2 の RC 試験体と比較し上昇し、炭素繊維シートの補強量の増加とともに上昇することがわかった。また変形状は最大耐力を示したと同時に耐力を急激に低下させる脆性的な変形状を示した。

図-6 にスリット入り袖壁付柱の $Q-\delta$ 包絡線を示す。RC の No.3 は、主筋の降伏は見られずせん断破壊したものの、最大耐力以後は徐々に耐力を低下させていく変形状を示した。一方、柱部分をコ型にシート補強した No.8, 9 は、 $+1/100$ (rad.) 手前で主筋が降伏した。シートの補強量の増加とともに最大耐力は若干上昇し、最大耐力以後の耐力低下は少なくなる傾向がみられた。シートを全面に貼付けた No.13 (No.2 を補修・補強) も同様、 $+1/100$ (rad.) 手前で主筋が降伏した。降伏後の耐力低下は少なく安定した変形状を示し、矩形柱を補修・補強した No.5, 12 に近い変形状となり、シートの貼付方法によっても、耐力・変形状が大きく改善されることがわかった。また、スリット入り試験体の共通な挙動として、 $+1/33$ (rad.) に向かう途中で袖壁がスタブに接触し急激に耐力を増加させるスリット壁独特の変形状も見られた。

図-7 に端部袖壁付柱の $Q-\delta$ 包絡線を示す。RC の No.4 および補強した No.10, 11 は、最大耐力と同時に急激に耐力を低下させる脆性的な変形状を示した。シート補強量の増加により若干の耐力上昇がみられるが、中央袖壁付柱と比較すると顕著な耐力上昇は見られない。一方、No.14 (No.4 を補修・補強) は、No.10, 11 に比べ顕著な耐力上昇が見られた。また、耐力以後の急激な耐力低下は見られず徐々に耐力を低下させる安定した変形状を示し、スリット入り試験体と同様、シートの貼付方法により耐力・変形状が大きく改善されることがわかった。

3.3 最大耐力時のシート最大歪

図-8に中央袖壁付柱、端部袖壁付柱についての最大耐力時のシート最大歪を示す。図中の歪のゲージ位置は、せん断耐力を決定したひび割れに近い位置のものである。シート破断歪は15000 μ 程度であり、シートの能力を發揮する以前に破壊に至っていることがわかる。

3.4 せん断耐力

図-9に矩形柱のせん断耐力の比較図を示す。また図中に実験値と計算値の比較のため、図中(2)式の広沢修正式[1]及び図中(3)式の曲げ終局強度略算式[1]による計算値を示しておく。これより、せん断破壊する矩形柱をシート補強することによりせん断耐力が上昇し曲げ破壊が先行するに至ることがわかった。また被災した柱を補強することにより被災前の部材性能まで回復することがわかった。実験値と計算値との比較ではほぼ同等であった。

図-10, 11に中央袖壁付柱及び端部袖壁付柱のせん断耐力-せん断補強筋量関係を示す。●実線で示したものは、シートの応力に引張強度を使用し図中横軸の補強筋量を計算したものであり、▲点線はシート応力に図-8で示した最大耐力時のシート歪を使用して実応力を算出し、補強筋量を計算したものである。また実験値と計算値とを比較するため図中(4)式で算出した袖壁付柱せん断耐力計算値[1]と補強筋量との関係を実線で示す。シート応力に引張強度を使用した場合、せん断耐力とせん断補強量との関係は、せん断補強筋量の増加とともにせん断耐力実験値も増加している。しかし、

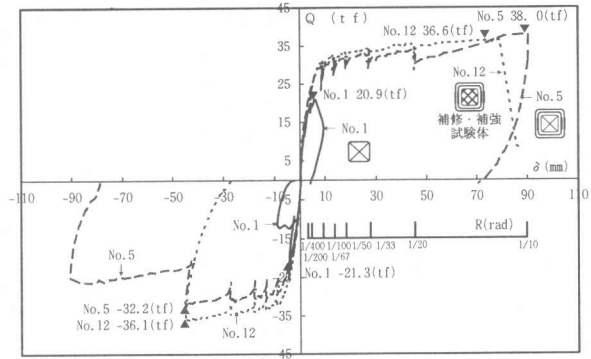


図-4 Q- δ 包絡線比較(断面形状:矩形柱)

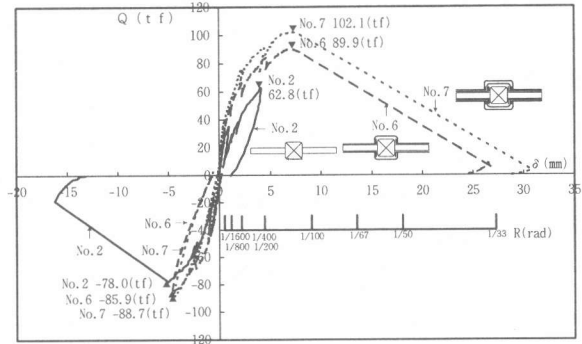


図-5 Q- δ 包絡線比較(断面形状:中央袖壁付柱)

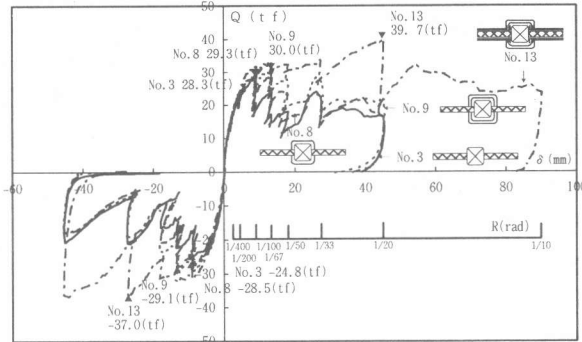


図-6 Q- δ 包絡線比較(断面形状:スリット入り袖壁付柱)

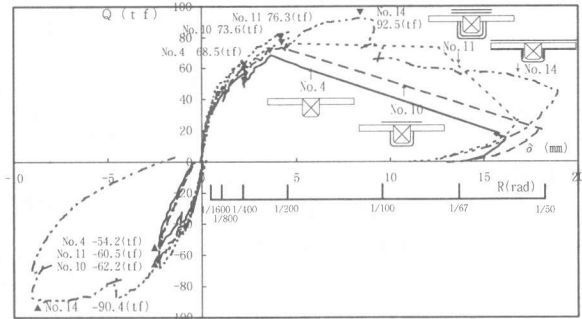


図-7 Q- δ 包絡線比較(断面形状:端部袖壁付柱)

計算上 No.11, 14 のせん断補強筋量は同等として評価されるが、せん断耐力実験値にはかなり開きがあることから、シートの貼付方法も耐力に依存する要因の一つと考えられる。一方、シート応力に実応力を使用すると、せん断耐力とせん断補強量との関係は、貼付方法による影響は見られずほぼ線形関係になることがわかる。実験値と計算値との比較では、実応力を用いた場合はかなり安全側に評価されるものの、引張強度を使用すると No.11 が危険側に評価されることがわかった。

4. まとめ

(1) シート貼付けにより、袖壁付RC柱のせん断補強に効果を発揮させることができ、その効果は、貼付方法と補強量に依存する。

(2) せん断耐力とせん断補強量との関係は、シートに生じた実応力を用いると評価できる。

(3) 被災した部材のひび割れ部分をエポキシ樹脂、コンクリート剥落部分を、樹脂モルタル及びポリマーセメントモルタルで補修することにより、被災前の部材性能まで回復することができる。

謝辞

本論文をまとめるに当って、三菱化学株式会社 谷木氏、藤田氏、初見氏、化工建設株式会社 原氏には多大な御指導・御協力を頂きました。ここに深く感謝致します。

参考文献

[1] 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料、1987

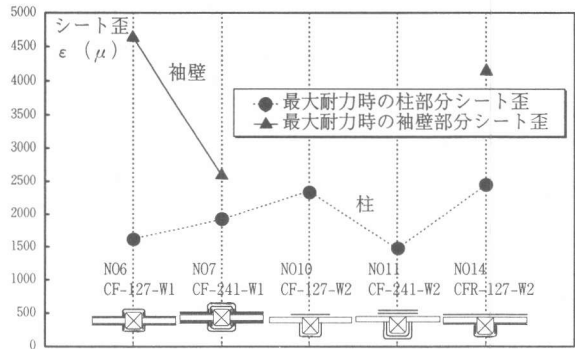


図-8 最大耐力時のシート最大歪

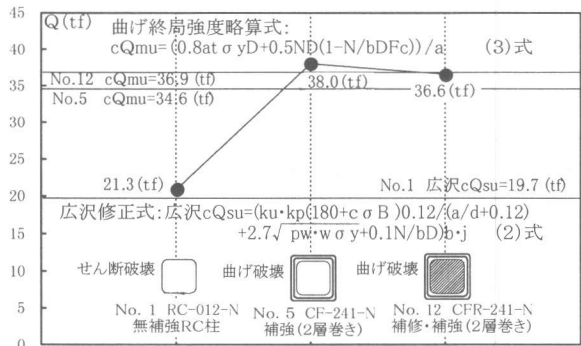


図-9 せん断耐力の比較(断面形状：矩形柱)

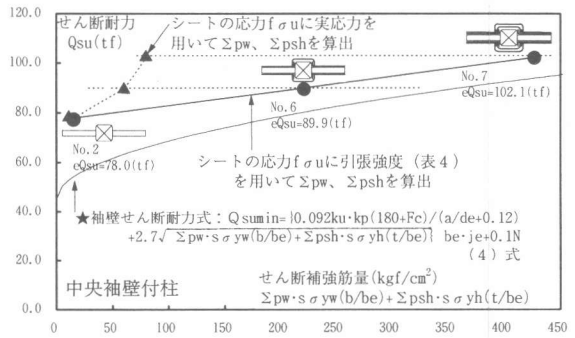


図-10 せん断耐力-せん断補強筋量関係(中央袖壁付柱)

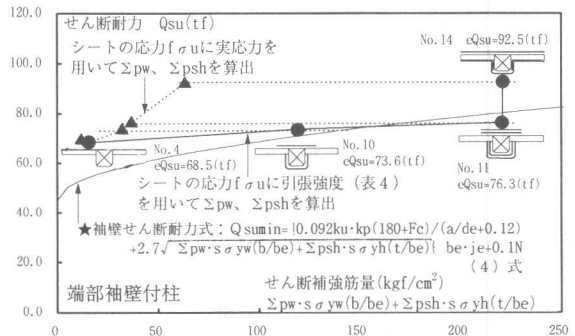


図-11 せん断耐力-せん断補強筋量関係(端部袖壁付柱)