

論文 連続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・渡邊征幸*⁴

要旨: 本論文は、連続繊維シートにより補強された袖壁付 RC 柱、計 16 体の実験結果およびその補強効果に関する評価方法について報告するものである。補強される試験体は、1971 年以前に設計された既存不適格柱を想定したものである。試験体の主な変動要因は、袖壁の張出し長さ、袖壁の柱に対する取り合わせ方法、連続繊維シートの種類、連続繊維シートの補強量である。実験の結果、補強された袖壁付 RC 柱試験体のせん断終局耐力は、連続繊維シートの補強量の増加とともに上昇することが確認された。また、それらの効果については、シート実歪を用いた補強効果式が提案される。
キーワード: 耐震補強、連続繊維シート、袖壁付 RC 柱、シート歪、補強効果

1. はじめに

筆者らは、RC 構造物に、二次壁付柱が多く存在することから、袖壁付 RC 柱に着目、それらを連続繊維シートで補強する耐震補強工法について提案してきた¹⁾。そして文献 1) : シリーズ I では、連続繊維シート補強により既存袖壁付柱の耐震性能を向上できることを報告し、

その補強効果について概略を述べた。しかしながら、その効果を定量的に評価できていないのが現状である。本論文では、それらを定量的に評価するため、新たに追加実験 : シリーズ II を実施したので、それらの結果を報告、さらに連続繊維シートにより補強された袖壁付 RC 柱の補強効果について定量的に評価するものである。

表-1 試験体一覧

シリーズ	No.	試験体名	実験対象	繊維の種類 (目付量 g/m ²)	柱一帯筋比		壁一帯筋筋比		断面形状	σ _B (N/mm ²)	備考		
					既存RC pw(%)	補強後 Σpw(%)	既存RC psh(%)	補強後 Σpsh(%)					
シリーズ I	1	RC-012-W1	無補強	炭素繊維 (300)	0.12		0.24		中央袖壁	26.6	1971年以前に設計された建物を想定 帯筋: 2-φ6@160(SR235)		
	2	RC-012-W2							端部袖壁	26.6			
	3	CF-127-W1							中央袖壁	4.83		27.5	柱・袖壁全面にシートを1枚貼付け補強
	4	CF-241-W1	中央袖壁						2.41	9.42		28.2	柱・袖壁全面にシートを2枚貼付け補強
	5	CF-127-W2	中央袖壁						1.27	26.8		柱のみにシートを1枚貼付け補強	
	6	CF-241-W2	中央袖壁						2.41	26.6		柱のみにシートを2枚貼付け補強	
	7	CFR-127-W2	補修後シート補強						1.27	28.2		4.83	26.6
シリーズ II	8	RC-012-w1	無補強	炭素繊維 (200)	0.12	0.24		中央袖壁	26.6	1971年以前に設計された建物を想定 帯筋: 2-φ6@160(SR235)			
	9	RC-012-w1							端部袖壁		23.7		
	10	CF-239-W2							端部袖壁		9.34	27.8	柱・袖壁全面にシートを2枚貼付け補強
	11	CF-083-w1	端部袖壁						3.10		28.2	柱・袖壁全面にシートを1枚貼付け補強	
	12	CF-155-w1	端部袖壁						5.96		29.5	柱・袖壁全面にシートを2枚貼付け補強	
	13	AF-123-W1	端部袖壁						4.69		24.0	柱・袖壁全面にシートを1枚貼付け補強	
	14	AF-235-W1	中央袖壁						2.35		9.15	32.6	柱・袖壁全面にシートを2枚貼付け補強
	15	AF-428-W1	中央袖壁						4.28		16.89	32.4	柱・袖壁全面にシートを3枚貼付け補強
	16	AF-567-W1	中央袖壁						5.67		22.44	32.4	柱・袖壁全面にシートを4枚貼付け補強

■共通要因■
 柱断面: b×D=30cm×30cm
 せん断スパン比: a/D=1.5
 主筋: 12-D16(SD295A)
 帯筋: φ6-@160(SR235, 135°, 90° フック併用型)
 軸力: N=1/6・σ_B・b・D
 ここに、σ_B: 実験時コンクリート圧縮強度(N/mm²)

■試験体記号の説明■
 RC-012-W1
 1 2 3
 1. 実験対象
 RC: RC 試験体
 CF: 炭素繊維シート補強試験体
 AF: フライ繊維シート補強試験体
 RCF: 炭素繊維シート補修・補強試験体
 2. 帯筋比
 Σpw×100

■補強後の補強筋比■
 $\Sigma p_w = p_w + (\sigma_s / \sigma_{ys}) \cdot \rho_w$
 $\Sigma p_{sh} = p_{sh} + (\sigma_s / \sigma_{ys}) \cdot \rho_{sh}$
 ここに、p_w: 既存RC部の帯筋比
 ρ_w: 既存RC部の袖壁筋筋比
 ρ_{sh}: シートの帯筋比
 ρ_{sh}: シートの袖壁筋筋比
 σ_s: 帯筋の降伏点(表-3)
 σ_{ys}: 袖壁筋筋の降伏点(表-3)
 σ_s: シートの引張強度(表-4)

- * 1 東急建設 (株) 技術研究所 建築研究室建築構造グループ 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) 東関東支店第二建築部 工修 (正会員)

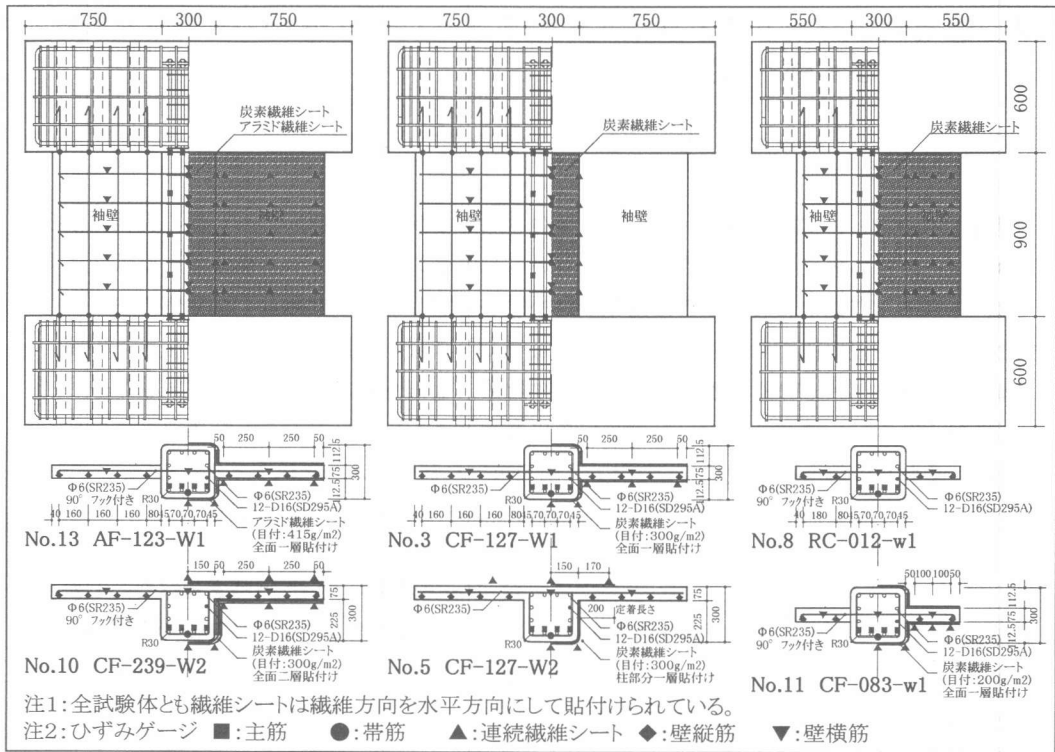


図-1 試験体形状およびゲージ位置図

表-2 使用材料 (コンクリート)

シリーズ	調合強度 F _c (N/mm ²)	材令 (日)	圧縮強度 (封 緘) (N/mm ²)	割裂強度 (封 緘) (N/mm ²)	ヤング係数 × 10 ⁵ (N/mm ²)
I	18普通	46~132	26.6~28.2	2.25~2.81	0.237~0.273
II	21早強	7~107	23.7~32.6	1.93~3.23	0.204~0.284

表-3 使用材料 (鉄筋)

シリーズ	鉄筋の種類	試験体	降伏応力度 (N/mm ²)	ヤング係数 × 10 ⁵ (N/mm ²)
I	主筋 D16(SD295A)	No.1~7	339	0.192
	帯筋・壁筋 Φ6(SR235)		351	0.208
II	主筋 D16(SD295A)	No.8~14	400	0.190
		No.15,16	366	0.191
	帯筋・壁筋 Φ6(SR235)	No.8~14	359	0.212
		No.15,16	288	0.207

表-4 使用材料 (連続繊維シート)

シリーズ	繊維シート の種類	目付量 (g/m ²)	厚さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 × 10 ⁵ (N/mm ²)
I	炭素繊維	300	0.167	3620	0.253
	アラミド繊維	415	0.286	2100	0.084
II	炭素繊維	200	0.111	3470	0.263
	炭素繊維	300	0.167	3670	0.252

2. 実験概要

表-1に試験体一覧, 図-1に試験体形状およびゲージ位置図を示す。使用したコンクリート, 鉄筋, 連続繊維シートの材料試験結果を表-2, 3, 4, 加力装置および加力模式図を図-2に示す。試験体は, 袖壁付 RC 柱で, 無補強および連続繊維シートによる補強試験体を含め

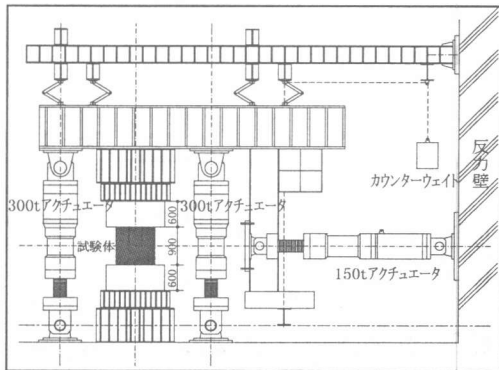


図-2 加力装置および加力模式図

$$Q = P - (N_1 + N_2) \sin \theta + (N_1 + N_2) \cos \theta \cdot \delta / H$$

ここに
 Q: セン断力
 δ : 相対変位
 N1: アクチュエータの引張力
 N2: 柱の内高高さ
 H: 柱の内高高さ

た合計16体である。変動要因は, 連続繊維シートによる補強の有無, 繊維の種類, セン断補強としての補強量および袖壁の柱からの張出し長さと袖壁の柱に対する取り付け方法である。柱部分のみを補強した端部袖壁付柱 No.5, No.6

のシート貼付け方法は、柱型が出ている部分には丈方向と幅方向にコの字型に、面合わせの箇所では袖壁部分へ 200mm の定着をとって貼付けた。他の試験体の貼付け方法は、まず、袖壁から柱側面にかけて貼付け、ついで柱型部分に端部袖壁付柱と同じ要領で行った。

3. 実験結果

せん断力(Q) - 相対変位(δ)包絡線を図-3に示す。補修した No.7 を除き全ての試験体でせん断破壊した。シートは、剥離・折れ曲がりを生じたものの、破断は観察されていない。

せん断終局耐力は、連続繊維シートの補強量の増加とともに上昇する。しかし、アラミド繊維シート補強された3層貼り、4層貼り試験体の最大耐力は、ほぼ同程度となっており、補強限界も確認された。

炭素繊維シートで補強し、袖壁の張出し長さが1D、2Dの比較では、2Dの試験体が最大耐力後、急激に耐力を低下させるのに対し、1Dの試験体はそれほど急激な耐力低下は見られない。一方、アラミド繊維シート補強され、補強量の少ない1層貼り、2層貼り試験体は、最大耐力後、徐々に耐力を低下させるのに対し、補強量の多い、3層貼り、4層貼り試験体は急激に耐力を低下させる変形状を示している。

中央袖壁付柱、端部袖壁付柱の比較では、端部袖壁付柱の補強量増加による耐力上昇割合は、中央袖壁付柱のそれよりも低く、袖壁が偏心することの影響が見られる。

端部袖壁付柱 No.2 をせん断破壊させた後、補修・補強した No.7 は、事前に载荷した影響は見られず、耐力・変形状とも優れた部材性能を有し、補修・補強効果が確認された。

4. 連続繊維シートの補強効果

4.1 最大耐力時のシート歪

最大耐力時のシート歪(f_ϵ) - シートの厚さ(t) 関係を図-4に示す。 f_ϵ は、最大耐力時を決定したひび割れを横切るシート歪を平均

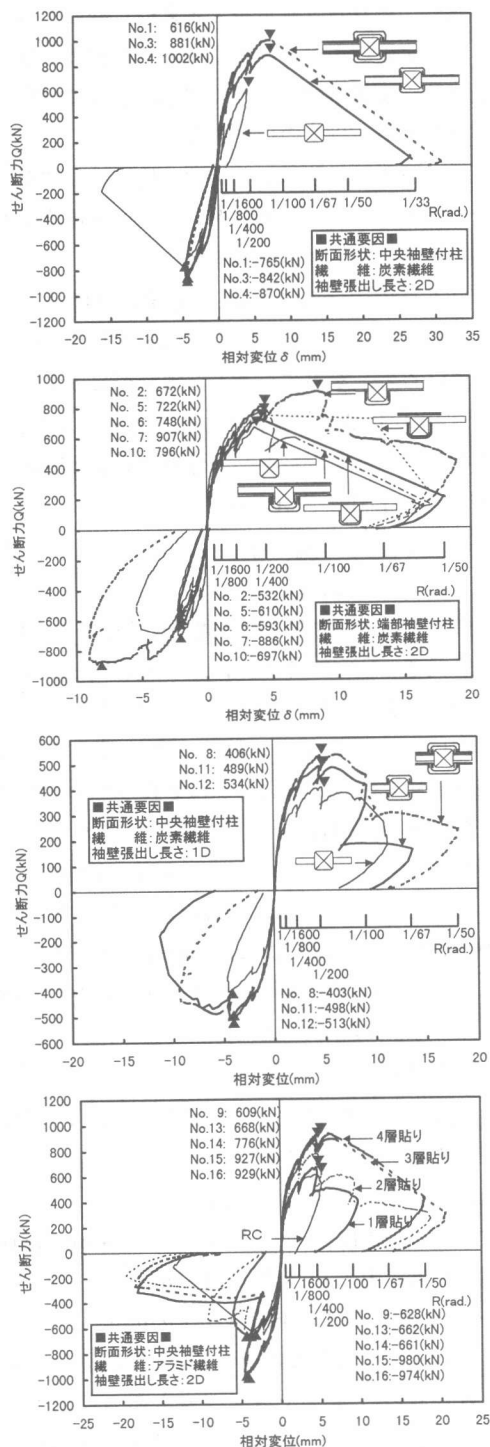


図-3 せん断力(Q) - 相対変位(δ)包絡線

したものである。シート平均歪は、シート厚さの増加とともに減少する傾向が見られた。

次に、それらシート歪を定量的に評価するため、まず破壊条件を設定する。本試験体の最大耐力は、連続繊維シートの剥離によって決定しているため、以下の仮定を設けた。

・ひび割れ近傍のシートは、樹脂・躯体間相互の付着力とシート張力が釣り合い抵抗するものとする（図-5上段参照）。

以上の仮定より式(1)が成立する（図-5中段参照）。また、式(1)は、シートの厚さを減少していくと、やがてシートは破断歪に達するため、 f_{ϵ} の上限を破断歪とした。以後、式(1)で得られるシート歪をシート付着限界歪と呼ぶ。

$$\tau \cdot l \cdot b = f_{\epsilon} \cdot E \cdot t \cdot b$$

$$f_{\epsilon} = \tau \cdot l / (E \cdot t) \quad (1)$$

ただし、 $f_{\epsilon} \leq f_{\epsilon u}$

ここに、 τ ：樹脂・躯体間の付着応力度 l ：付着長さ b ：シートの幅 f_{ϵ} ：シート歪 $f_{\epsilon u}$ ：シート破断歪 E ：シートのヤング係数 t ：シート厚さ

次に、式(1)より未知数の $\tau \cdot l$ を求めるため線形回帰を行った。図-4にそれら回帰より得られた式(1)の曲線を示しておく。また比較のため、文献2)で提案されている式(2)もあわせて示しておく。なお、式(2)は、プリズム型のコンクリート試験体に連続繊維シートを接着したシート付着実験により得られたものである。

$$\epsilon_{\max} = P_{\max} / (t_f E \cdot b) \quad (2)$$

ここに、

ϵ_{\max} ：シートの最大歪 t ：シートの厚さ E ：シートのヤング係数 b ：シートの幅

最大荷重： $P_{\max} = L_{e\text{-cal}} \cdot b \cdot \tau_{bu}$

有効付着長： $L_{e\text{-cal}} = \exp [6.134 - 0.580 \ln(t_f E)]$

平均付着応力： $\tau_{bu} = f \cdot E \cdot t \cdot (d \epsilon / dx)_0$

シート歪の傾き： $(d \epsilon / dx)_0 = 110.2 \mu / \text{mm}$

これより、最大耐力時のシート平均歪は、おおむね式(1)で評価でき、シート厚さの上昇とともにシート歪が減少する傾向も良くとらえている。 $\tau \cdot l$ の意味については、今後検討の余地があるが、樹脂および繊維の種類、シートを接着する躯体の状態、シートの剛性、補強量等が大きく関与しているものと思われる。本実験

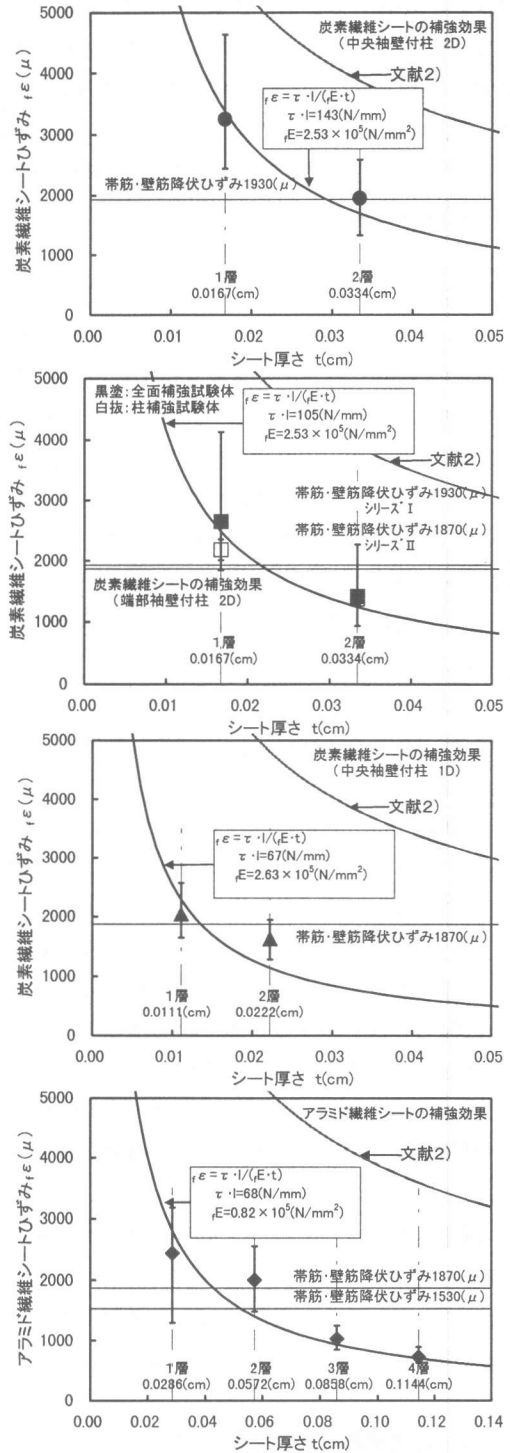


図-4 シート歪-シート厚さ関係

で得られた $\tau \cdot l$ の範囲は、67~143N/mm、平均で 96 N/mm となった。

一方、式(2)は、式(1)と同様、シート厚さの

上昇とともにシート歪が減少する傾向はよくとらえている。しかし、実験のシート平均歪は、式(2)の評価値の 0.20~0.56 倍であった。この理由として、シート補強した部材は、荷重の増加とともにひび割れが分散するためシートの付着長が一定でなく、その効果は不均等であること、弾性材料のため応力の再配分に難があること、さらに部材の耐力は、シートがある伸び量に達することにより耐力が決定されることなども考えられる。つまり、シートと躯体間の最大付着能力を発揮できずに終局に至っていると考えられる。

4.2 連続繊維シートの補強効果

次に、連続繊維シートによる補強効果を評価するため、以下の仮定を設け検討を行った。

- ・最大耐力を決定したひび割れの角度を 45° に設定。そのひび割れを横切るシートが耐力に寄与するものとする。ただし、柱部分のシートは、最外主筋間距離の範囲が耐力に寄与するものとする (図-5 下段参照)。
- ・ひび割れを横切るシートの歪は、式(1)で評価し、その分布は一定とする (図-5 下段参照)。

以下にそれら仮定から導いたシートの補強効果式を示す。

$$f_c Q = 2(f_c \epsilon_u \cdot f_c E \cdot t \cdot j_t) + 4(f_c \epsilon_u \cdot f_c E \cdot t \cdot L_{we}) \quad (3)$$

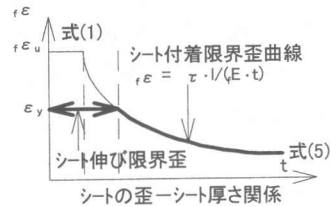
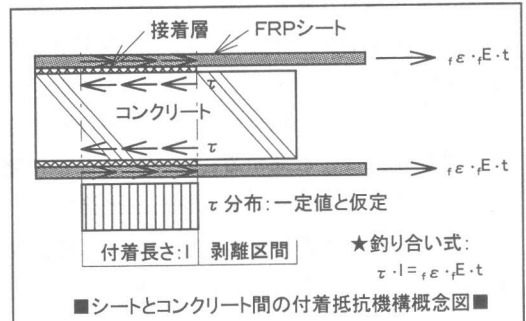
ここに、 $f_c Q$: シート補強による耐力上昇分 j_t : 柱部のシート寄与幅 (= 最外主筋間距離) L_{we} : 袖壁部のシート寄与幅 その他の記号は式(1)を参照
式(1)を式(3)に代入すると、以下の(4)式を得る。

$$f_c Q = 2(\tau \cdot l \cdot j_t) + 4(\tau \cdot l \cdot L_{we}) \quad \text{--- 補強限界}$$

ただし、 $t \leq \tau \cdot l / (f_c E \cdot \epsilon_u)$ の時

$$f_c Q = 2(f_c \epsilon_u \cdot f_c E \cdot t \cdot j_t) + 4(f_c \epsilon_u \cdot f_c E \cdot t \cdot L_{we}) \quad (4)$$

そこで図-6 にシート補強による耐力増分 ($f_c Q$) - シート厚さ (t) 関係を示す。実験値のシート補強による耐力増分は、シート補強試験体の最大耐力 (Q_u) から無補強試験体の最大耐力 ($Q_{u, 無補強}$) を差し引き算出した。実験値との比較のため図中に式(4)の直線もあわせて示しておく。



$$f_c Q = 2(f_c \epsilon_u \cdot E \cdot t \cdot j_t) + 4(f_c \epsilon_u \cdot E \cdot t \cdot L_{we})$$

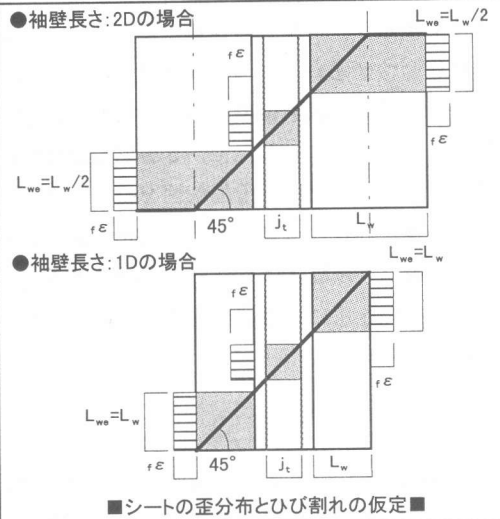
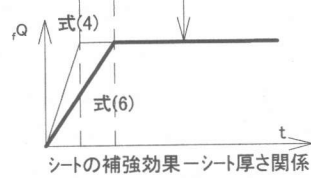


図-5 連続繊維シートの補強効果モデル

実験値は、シートの厚さの増加とともに耐力も上昇する領域となるものの、式(4)では、シートの補強限界領域となり、実験値と式(4)の評価はへだたりがある。

そこで、式(1)の効果をもつシートを部材

に適用した場合の補強効果を考える。ここで、同位置の補強筋とシートは、同様な歪挙動を示すと仮定すると、式(1)より、シート厚さが薄い領域では、シートの付着限界歪に先行して帯筋、壁筋が降伏歪に達することがおおよそ想像できる。さらに、部材の終局を鉄筋の降伏ととらえると、シートの付着限界歪に達する前に部材は終局に至ってしまうと考えられる。

以上のことを考慮し、最大耐力時に発揮されるシート歪の上限を補強筋降伏歪ととらえ、シート歪を式(5)、シートの補強効果を式(6)に修正することにした(図-5中段参照)。以後、シートの上限界歪を伸び限界歪と呼ぶことにする。

$$f_e = \tau \cdot l / (f \cdot E \cdot t) \quad (5)$$

ただし、 $f_e \leq \epsilon_y$

ここに、 ϵ_y : 帯筋、袖壁横筋の降伏歪

$$fQ = 2(\tau \cdot l \cdot j_d) + 4(\tau \cdot l \cdot L_{we}) \text{--- 補強限界}$$

ただし、 $t \leq \tau \cdot l / (f \cdot E \cdot \epsilon_y)$ の時

$$fQ = 2(\epsilon_y \cdot f \cdot E \cdot t \cdot j_d) + 4(\epsilon_y \cdot f \cdot E \cdot t \cdot L_{we}) \quad (6)$$

図-6に式(6)の直線を示すが、計算値は、実験値をおおむね評価できている。しかし、アラミド繊維シート補強試験体で、実験値と計算値の適合性が悪い。これは試験時の観察において3、4層貼り試験体のエポキシ樹脂が、完全硬化しているのに対し、1、2層貼り試験体の樹脂は、それに比べ若干、粘性を持っていたことが観察された。つまり樹脂の硬化不良により1、2層貼り試験体は、シートの補強効果を十分に発揮できずに破壊に至っているのではないかと考えられる。

5. まとめ

連続繊維シートにより補強された袖壁付 RC 柱の補強効果を定量的に評価し、その評価式を提案した。

参考文献

- 磯雅人, 松崎育弘, 園部泰寿, 中村洋行: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.225~230, 1997.6

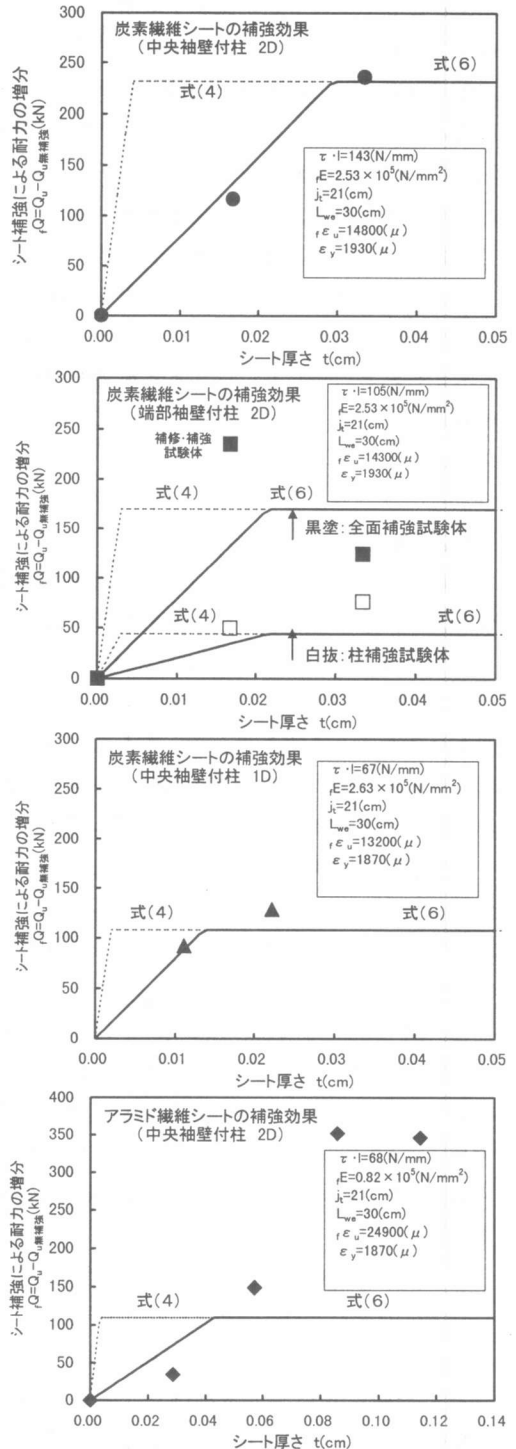


図-6 シート補強による耐力の増分
—シート厚さ関係

- Maeda, T., Asano, Y., et al.: A Study on Bond Mechanism of Carbon Fiber Sheet, FRPRCS-3, Vol.1, pp.279-286, Oct. 1997