

論文 鉄筋腐食をモデル化した RC 梁における炭素繊維シートのせん断補強効果

鹿毛忠継*¹・梶田佳寛*²・阿部道彦*³・李翰承*⁴

要旨：RC梁のあばら筋が塩害によって腐食した場合を想定したモデル試験体を炭素繊維シートによってせん断補強した後、大野式逆対称曲げせん断載荷実験を行った。その結果、炭素繊維シートの補強量を増やすことで、せん断耐力が向上する、シートの定着は変形能力を向上させる、貼り方で補強効果が違う、せん断耐力はシートの補強量、貼り方及び定着長さによる炭素繊維シートの補強効果を適切に評価することによって既存の式で評価できることがわかった。

キーワード：炭素繊維シート、せん断耐力補強、塩害、鉄筋腐食

1. はじめに

塩害によって劣化したRC造建物の現地調査によると、梁や柱のせん断補強筋が主筋より著しく腐食し、大きな断面欠損や切断していることが報告されている[1]。このようなRC構造部材は、一般的に塩害補修を行ってその使用限界を伸ばしているが、地震のような大きなせん断力が作用する場合、脆性的なせん断破壊を起こす恐れがあり、適切な補強が必要である。最近、炭素繊維シートを構造部材の表面に貼り付け補強し、RC建築物の耐震性能を向上させようとする研究が多くなされ、一部の現場ではすでに実施されている[2]。炭素繊維シート工法は、耐震補強においては施工の容易さ、部材の耐力及び靱性の向上等の利点がある程度確認されているが[3]、あばら筋が腐食したRC構造部材のせん断補強として炭素繊維シートを用いる場合は、想定される被害の形態が耐震補強とは異なりまだ不明な部分が多く、炭素繊維シート工法によって鉄筋が腐食したRC構造部材のせん断補強設計を行うためには、施工方法及び補強後の力学的挙動を明らかにする必要がある。

本研究では、塩害によってあばら筋が腐食したRC梁のせん断補強工法として、炭素繊維シート補強工法を用い、その有効性を把握するために、塩害によってあばら筋が腐食した状況を想定したあばら筋欠損モデル試験体を製作し、炭素繊維シートの補強量、補強方法及び定着長さを実験因子として補強したRC梁の曲げせん断耐力実験を行い、せん断補強効果について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体の種類および実験方法

予めあばら筋を細くしたモデル試験体を製作し、あばら筋量はその耐力等に及ぼす影響を健全試験体と比較するとともに、モデル試験体を炭素繊維シートでせん断補強し、その補強効果を実験的に検討した。表-1に実験要因による試験体の種類を、図-1に試験体の形状を示す。また、図-2は表-1に示した想定した腐食形態に応じた炭素繊維シートの補強方法を示しており、図-3に大野式逆対称曲げせん断載荷による実験方法を示す。

*1 建設省建築研究所 第2研究部，学術博士（正会員）

*2 宇都宮大学教授 工学部建設工学科，工博（正会員）

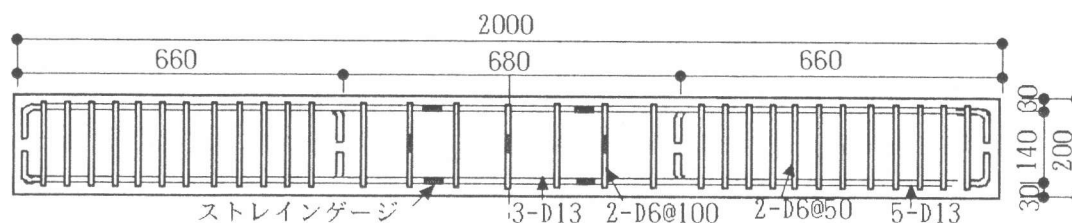
*3 建設省建築研究所 第2研究部，工博（正会員）

*4 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻，工修（正会員）

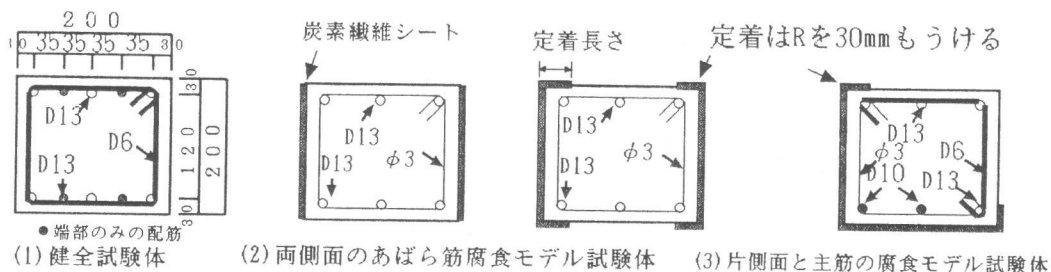
表一 試験体の種類

試験体名	想定した腐食形態	曲げ補強筋	せん断補強筋					
			あばら筋			炭素繊維シート		
			種類	P_s	$P_s \cdot \sigma_{sy}$	補強方法	$P_f(\%)$	$P_{ef} \cdot \sigma_{efy}$
SA	健全試験体	3-D13	D6@100	0.32	10.88	補強なし	0.0	0.0
SB	両側面のあばら筋腐食	3-D13 ($P_f:1.12$)	$\phi 3@100$	0.07	2.38	補強なし	0.0	0.0
SB1110						1枚横貼り	0.097	24.25
SB1130						3枚横貼り	0.291	72.75
SB1310						十字貼り	0.194	48.5
SB1210						1枚縦(定着0cm)	0.097	24.25
SB1214						1枚縦(定着4cm)	0.097	24.25
SB1218	1枚縦(定着8cm)	0.097	24.25					
SC	片側面あばら筋と引張主筋腐食	1-D13と2-D10 ($P_f:0.79$)	D6と $\phi 3@100$	0.20	6.63	補強なし	0.0	0.0
SC1111	1枚横貼り	0.049	12.125					
SC1211	1枚縦貼り	0.049	12.125					
SC1311	十字貼り	0.097	24.25					

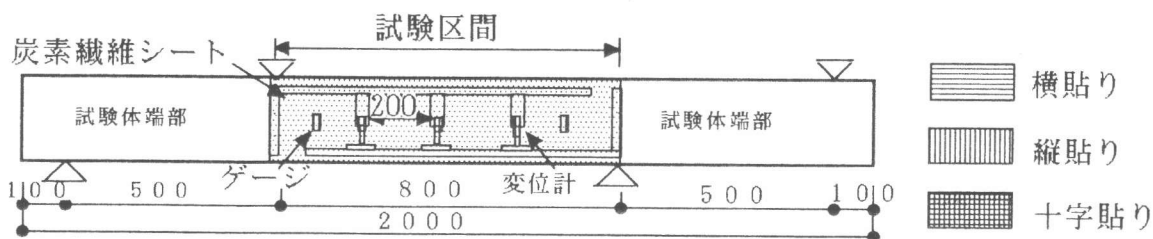
P_s :あばら筋比, σ_{sy} :あばら筋降伏強度, P_{ef} :シートの補強筋比, σ_{efy} :シートの引張強度



図一 試験体の形状



図二 炭素繊維シートの補強方法



図三 荷重方法

2.2 使用材料

コンクリートの調合及び、荷重実験時(材齢:46日)のコンクリートの力学的特性を表一2及び表3に示す。炭素繊維シートは、エポキシ樹脂を用いてコンクリート表面に接着し硬化させたもので、材料特性を表一4に示す。また、主筋とあばら筋の機械的性質(実験値)を表一5に示す。

表一2 コンクリートの調合

W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	単位重量 (kg/m ³)			
			水	セメント	砂	砂利
65	45	18	185	285	776	1007

表一3 コンクリートの材料特性

圧縮強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
334	2.54×10^5	0.189

表一 4 炭素繊維シート の材料特性

CF重量 (g/m ²)	CF断面積 (cm ² /m幅)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
175 (1層)	0.97	35000	2.9 × 10 ⁶

表一 5 鉄筋 の材料特性

種類	降伏点 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
D13	3500	4860	1.86 × 10 ⁶
D10	2947	4377	1.91 × 10 ⁶
D6	2300	4230	1.98 × 10 ⁶
φ3	1350	1754	1.82 × 10 ⁶

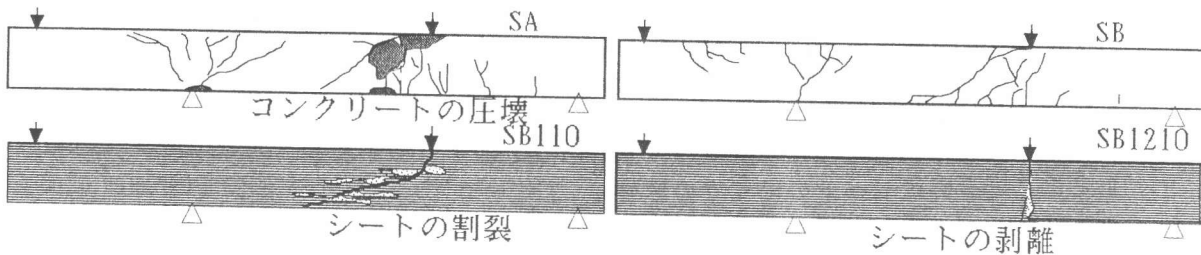
2. 4 載荷方法及び測定項目

載荷は、単調漸増静載荷の方法で図一 3 に示すように大野式逆対称曲げせん断載荷とし、載荷は試験体が破壊するまで行った。試験中は、載荷荷重をロードセルで、せん断スパンの相対変形を変位計で測定した。また、試験区間の主筋、あばら筋及びコンクリート表面に貼った炭素繊維シート のひずみをストレインゲージを用いて測定した。

3. 実験結果および考察

3. 1 試験体のひびわれ形状及び実験結果の一覧

破壊後のひび割れ状況を図一 4 に示す。SA試験体はコンクリートの圧壊が見られるが、SB試験体はせん断ひび割れの進展が目立つ。特に、シートを横貼りしたSB1110とSB1130試験体は、せん断ひび割れに沿ってシートが破断しているが、十字貼りであるSB1310及び縦貼りであるSB1210試験体、定着部分があるSB1214、SB1218試験体は、シートの剥離があった。試験体は、SBを除いてまず曲げ降伏が生じてから、コンクリートの圧壊あるいはせん断破壊に至った。また、最大耐力は炭素繊維シートで補強することにより向上するが、変形能力は炭素繊維シート の補強方法によって異なる結果となった。表一 7 に実験結果を示す。



図一 4 ひび割れ形状

表一 7 実験結果の一覧

試験体名	ΣPw・σw (kgf/cm ²)	計算値 (ton)		実験耐力 Q _u (ton)	最大耐力時変位		破壊時変位 λ _{ud} (rad.)	破壊モード
		mQ _u	sQ _u		δ _u (mm)	λ _u (rad.)		
SA	7.36	5.94	7.18	7.69	28.4	1/28	1/28	F→C
SB	0.91		5.77	7.02	15.6	1/51	1/47	F→S
SB1110	17.07	5.94	8.32	7.60	7.1	1/112	1/109	F→C→S
SB1130	49.41		10.65	9.04	7.5	1/106	1/29	F→C→S
SB1310	33.24		9.63	8.64	7.8	1/102	1/21	F→C→S
SB1210	7.07		8.32	7.75	34.5	1/23	1/20	F→C→S
SB1214	17.07		8.32	7.98	54.6	1/15	1/15	F→C→S
SB1218	17.07		8.32	8.08	48.5	1/17	1/17	F→C→S
SC	4.14		4.05	6.29	6.58	47.8	1/16	-
SC1110	12.21	5.63	7.50	7.05	62.1	1/13	-	F→C
SC1210	12.21		7.50	6.99	62.3	1/13	-	F→C
SC1310	20.30		8.31	7.43	68.0	1/12	-	F→C

mQ_u = M_u/L、M_u = 0.9 · At · σ_y · d、(F: 曲げ降伏 C: コンクリート圧壊 S: せん断破壊)

sQ_u = {0.068 P t^{0.23} · (F_c + 180) / (M/Qd + 0.12) + 2.7√(P_wσ_wy)} b j

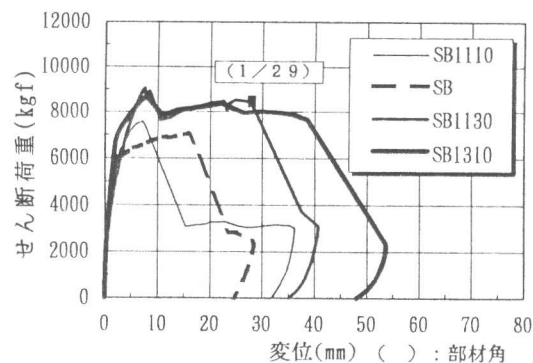
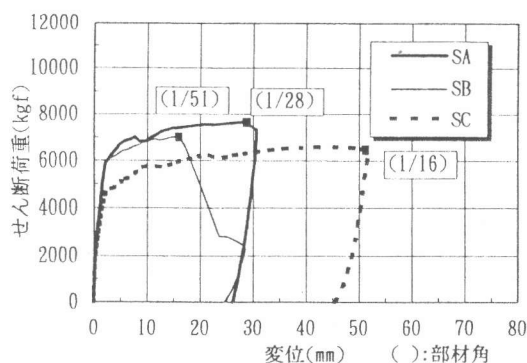
3.2 せん断荷重—変位関係

3.2.1 無補強試験体

図一五に示すようにSA試験体は1/28の部材角で最大耐力を示した後、すぐコンクリートの圧壊によって終局状態になった。しかし、SB試験体は1/51部材角で、あばら筋の降伏による脆性的なせん断破壊を起こしたため、最大耐力はSA試験体の0.9倍程度であった。一方、主筋も細くしたSC試験体の最大耐力は、SB試験体の0.85倍で、その時の部材角は1/16で靱性的傾向を示した。

3.2.2 炭素繊維シートの補強量の影響

図一六は、せん断荷重—変位関係に及ぼすシート補強量の影響を表す。1枚横貼りしたSB1110試験体の最大耐力は、SB試験体の1.08倍であるが、せん断ひび割れによるシートの割裂破断によって脆性的なせん断破壊を示した。一方、3枚横貼りしたSB1130試験体の最大耐力はSB試験体の1.27倍で高かったが、最大耐力直後にシートの付着切れ及びシートの割裂による耐力の急激な低下が生じ、その後、耐力が徐々に上昇しながら急速に変形が進み、部材角1/29でせん断破壊した。この結果、シート補強量の増加によってせん断耐力は向上するが、最大耐力時の変形量は小さくなった。また、横貼りした場合はせん断力によって、繊維方向の斜め方向でシートが割裂し、せん断力の負担能力がなくなることになった。



図一五 無補強試験体のせん断荷重—変位関係 図一六 せん断補強量によるせん断荷重—変位関係

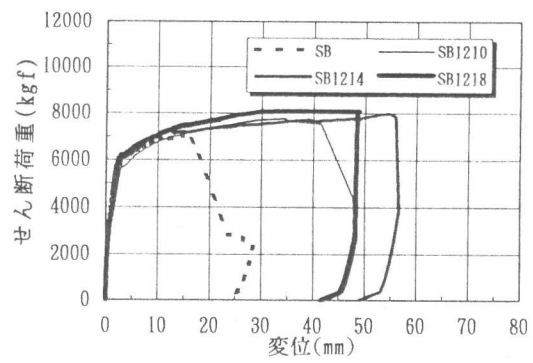
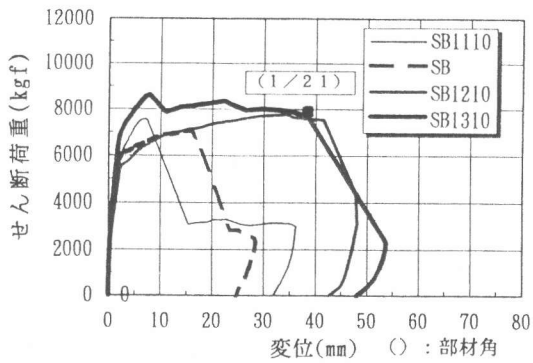
3.2.3 炭素繊維シートの貼り方の影響

図一七は、シートの貼り方によるせん断荷重—変位関係である。1枚補強した場合は、貼り方によるせん断耐力の差はほとんどないが、縦貼りしたSB1210の最大耐力時の部材角はSB1110に比べ約5倍を示し、靱性的な挙動を示した。また、十字貼り補強したSB1310試験体は、耐力がSB試験体の1.23倍となり、シートが剥離しながらもせん断破壊時の部材角は1/21と非常に大きかった。従って、せん断補強材として炭素繊維シートの貼り方は、一方向性を持つ炭素繊維シートの弱点を補完できる十字貼りが最も有効であると考えられる。

3.2.4 炭素繊維シートの定着の影響

図一八に炭素繊維シートの定着効果によるせん断荷重—変位関係を示す。定着を設けた補強試験体の耐力は、モデル試験体であるSB試験体の約1.1倍として最大耐力に及ぼす定着長さの影響は確認されなかった。しかし、最大耐力時の部材角はSB試験体の2.2～3.3倍で非常に大きく、その変形能力が大幅に増加した。

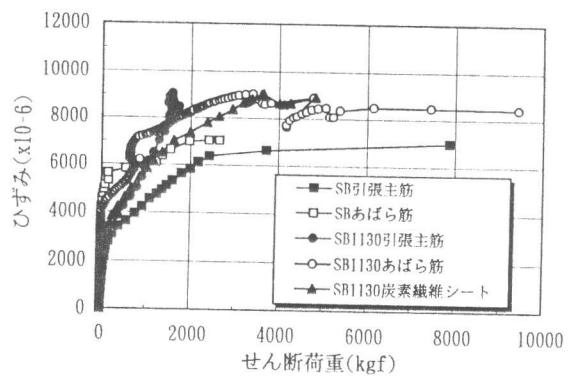
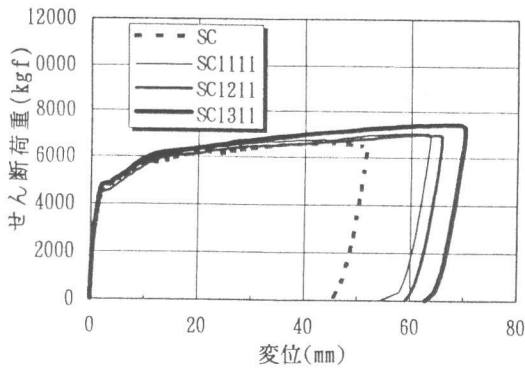
また、図一九にCシリーズのせん断荷重—変位関係を示す。試験体は曲げ破壊のモードを示し部材角が1/12になっても破壊せず、試験を途中で終了した。しかし、SC1110及びSC1210試験体の最大耐力はSC試験体の耐力に比べ約1.07倍で、その補強の効果が現れている。また、SC1310試験体は、SC試験体に比べ耐力が約1.13倍、変位が1.33倍増加しており、最もその効果があった。



図一七 せん断荷重—変位関係（貼り方の影響） 図一八 せん断荷重—変位曲線（定着の影響）

3.3 あばら筋と炭素繊維シートのひずみ

図一10は、モデル試験体であるSBと3枚横貼りしたSB1130の各荷重における引張主筋、あばら筋及びあばら筋方向の炭素繊維シートのひずみを表している。SB試験体は荷重の増加によって引張主筋が先に降伏した後、あばら筋の降伏によるひずみの増加が見られる。一方、SB1130試験体は、引張主筋のひずみが増加するが、降伏せず、炭素繊維シート及びあばら筋のひずみが一緒に増加し、せん断力による応力をあばら筋と炭素繊維シートと一緒に分担しており、炭素繊維シートもあばら筋と同等のせん断補強材として用いることができると考えられる。



図一九 せん断荷重—変位関係(Cシリーズ) 図一10 あばら筋及び炭素繊維シートのひずみ

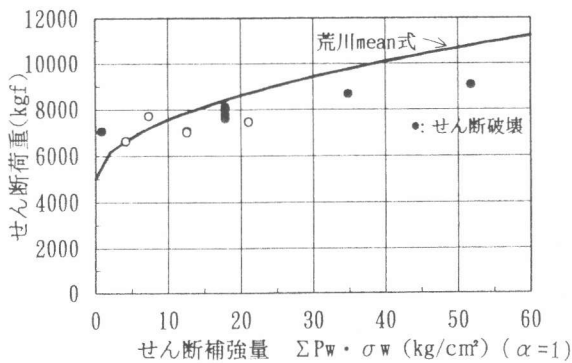
4. せん断補強効果の評価

4.1 せん断耐力の検討

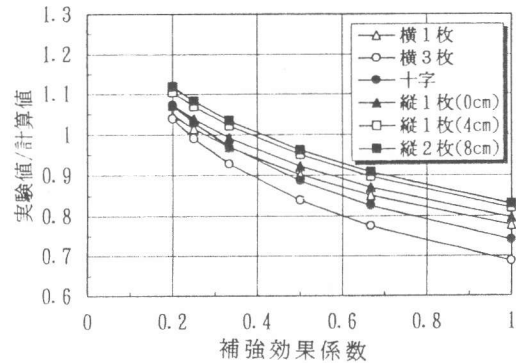
図一11にせん断補強量とせん断荷重の関係を示す。せん断補強量の増加によってせん断力は線形的に増加しており、炭素繊維シートがせん断補強筋としてあばら筋と同等に評価できると考えられる。また、曲線はせん断耐力を荒川mean式で表したものである。炭素繊維シートのひずみは5000~6000 μ の範囲で剥離し、これは材料の破断ひずみ(12000 μ)の半分であり、結局、シートの引張強度は半分しか発揮できず、せん断破壊した試験体の最大耐力は炭素繊維シートの剥離によって決まる。ここで、せん断耐力を既往の荒川mean式で評価するために式(1)のせん断補強量($\Sigma Pw \cdot \sigma w$)の算定において”補強効果係数(α)”導入した。図一12は、補強効果係数を用いた場合の荒川mean式で求めた計算値と実験値を比較したものである。本実験ではシートの補強量、貼り方及び定着長さによって異なるシートの引張強度の補強効果係数(0.3~0.5程度)を用いれば、既往の荒川mean式で炭素繊維シートでせん断補強した試験体のせん断耐力を求めることができると考えられる。

$$\Sigma P_w \cdot \sigma_w = P_s \cdot \sigma_{sy} + P_{cf} \cdot \alpha \cdot \sigma_{cfy} \quad (1)$$

P_s : あばら筋比, σ_{sy} : あばら筋降伏強度, P_{cf} : シートの補強筋比, σ_{cfy} : シートの引張強度
 α : 炭素繊維シート補強効果係数



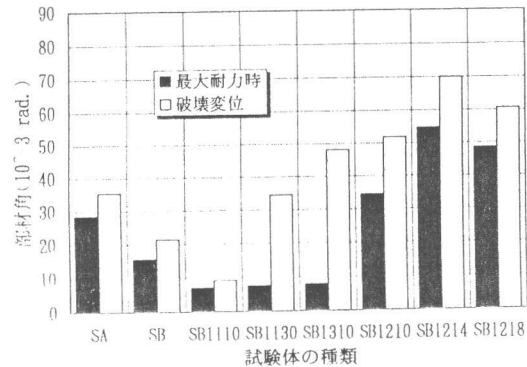
図一 1 1 せん断補強量とせん断耐力との関係



図一 1 2 シートによる補強効果

4. 2 変形能力の評価

図一 1 3 は、各試験体の変形能力を部材角で示したものである。補強試験体は、シートの割裂や剥離を生じて、最大耐力時その変形能力が落ちるが、定着を設けた試験体はシートの剥離を遅延させるため破壊時の変形が大きくなっている。また、破壊時の部材角は、炭素繊維シートが割裂したSB1110試験体を除いて、SB試験体の1.6~3.3倍程度大きくなり、炭素繊維シートによって変形能力が改善されるといえる。



図一 1 3 各試験体の部材角

5. まとめ

せん断補強筋の腐食をモデル化したRC梁を炭素繊維シートで補強し、せん断載荷実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 炭素繊維シートはあばら筋と同様にせん断応力を負担し、その補強量を増加させることにより補強効果が上がる。
- (2) 炭素繊維シートの定着を設けることによって、変形能力を向上させることができる。
- (3) 炭素繊維シートの貼り方は、一方向性を持つ炭素繊維シートの弱点を補完できる十字貼りが最も有効であると考えられる。
- (4) 炭素繊維シートによってせん断補強したRC梁のせん断耐力は、最大耐力がシートの剥離によって決まることから、シートの補強量、貼り方及び定着長さによって異なる炭素繊維シートの補強効果係数を適切に評価することにより、既往の荒川mean式で評価することができる。

謝辞：本研究を行うにあたって(社)建築研究振興協会に設置された「CFによる建築構造物の耐震補強・補修工法開発推進協議会」より、ご協力を得ました。また、実験には建設省建築研究所第2研究所の長谷川拓也氏及び(株)三菱化学からご協力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- [1]建設省：建設省総合技術開発プロジェクト、コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書(第一編), pp.4 26-437, 1988.11
- [2]齊藤弘志、江口和雄：最近の樹脂系材料による補修・補強工法の現状、コンクリート工学、Vol.33, No.12, pp.25-32, 1995.12
- [3]小島克朗ほか：炭素繊維の巻付けによる既存鉄筋コンクリート部材の耐震補強、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11, pp.861-866, 1989.6