

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 曲げ補強効果

野口貴文*¹・友澤史紀*²・李翰承*³・庄司広和*⁴

要旨：腐食に起因する引張主筋の断面欠損をモデル化した RC 梁を炭素繊維シートで補強し、静的載荷による曲げ試験を行った結果、炭素繊維シートの曲げ補強材として有効性が確認された。補強試験体の最大耐力はシートの剥離で定まり、シートの定着を十分に設けることで変形能力を向上させることができた。実験で得られたシートの引張応力を用いることにより、補強試験体の曲げ耐力を既往の算定式から求めることができた。

キーワード：炭素繊維シート、曲げ耐力補強、塩害、鉄筋腐食

1. はじめに

塩害によって劣化した RC 構造物を調査すると、梁の引張主筋が著しく腐食してその曲げ耐力が低下し、補強を必要とする場合がある [1]。また、既往の研究でも引張主筋が著しく腐食した場合は、鉄筋の有効断面積の減少および付着強度の低下によって曲げ耐力が急激に低下することが指摘されている [2][3]。従って、塩害により鉄筋が著しく腐食した RC 構造物の安全性を確保するためには、適切な補修のみならず腐食程度に応じた適切な補強を施す必要がある。鉄筋が腐食した場合の補強方法としては、鉄板巻き工法およびコンクリート増打ち工法などがあるが、その施工にはかなりの手間がかかる。最近、炭素繊維シートをコンクリート表面に貼付することによって曲げ耐力を向上させる炭素繊維シート補強工法が注目されているが [4][5]、鉄筋が腐食した梁に適用した場合の構造特性およびその貼付方法の補強効果への影響に関してはまだ不明な部分が多く、炭素繊維シートによる補強設計方法を確立するためには、データの蓄積が必要である。

本研究では、塩害によって鉄筋が腐食した梁の曲げ補強材としての炭素繊維シートの効果を把握するために、引張主筋の腐食を想定したモデル試験体を製作し、貼付方法および定着の有無を因子として、炭素繊維シートによる補強を施した梁の静的載荷実験を行い、その曲げ補強効果について検討した。

2. 実験概要

2.1 実験の組み合わせ

試験体は、健全試験体 (BS) と引張主筋を予め細くした引張主筋欠損試験体 (BD)、引張主筋欠損試験体を貼付方法および定着の有無を因子として炭素繊維シートにより補強した補強試験体 (BDC1, BDC3, BDC1A) の総 5 体である。表 1 に試験体の諸元を示す。

2.2 使用材料の力学特性

実験に用いたコンクリートの調合およびコンクリートの力学特性を表 2 および表 3 に示す。また、鉄筋の材質は SD295A で表 4 にその力学特性を示す。炭素繊維シートは繊維糸を一方向に配

*1 東京大学助手	工学系研究科建築学専攻, 工博	(正会員)
*2 東京大学教授	工学系研究科建築学専攻, 工博	(正会員)
*3 東京大学大学院生	工学系研究科建築学専攻, 工修	(正会員)
*4 建設省建築研究所部外研究員	第 2 研究部	(正会員)

列したシート状のものであり、その材料特性を表5に示す。

2.3 試験体の形状およびシート貼付方法

試験体の形状と炭素繊維シートの貼付方法を図1に示す。試験体の寸法は200×250×2400mmであり、主筋として上端および下端にそれぞれ異形鉄筋を3本配筋した。また、せん断補強筋としてD6の異形鉄筋をせん断スパンには50mm間隔、曲げスパンには100mm間隔で配筋した。BDC1A試験体は、試験体底面のコンクリート両隅角部をR30mmで面取りした後、底面から40mmの高さまで炭素繊維シートを貼付して定着を設けた。炭素繊維シートによる補強は、補強面をグラインダで研磨してプライマを塗布した後、プライマが硬化してからエポキシ樹脂を塗り、その上に炭素繊維シートを貼った。さらにシートの上にエポキシ樹脂を塗り、常温で硬化させた。

表1 試験体の諸元

記号	試験体名	引張主筋	引張主筋比	シートの補強方法	共通事項
BS	健全試験体	3-D13	0.87%	補強なし	断面：bxD=200x250mm せん断スパン比 = 3.4 あばら筋比 = D6-@50 (0.64%)
BD	引張主筋欠損試験体	3-D10	0.49%	補強なし	
BDC1	補強試験体			1枚横貼り	
BDC3	補強試験体			3枚横貼り	
BDC1A	補強試験体			1枚横貼りと定着	

表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	細骨材	粗骨材
65	45	18	185	285	776	1007

表3 コンクリートの力学特性

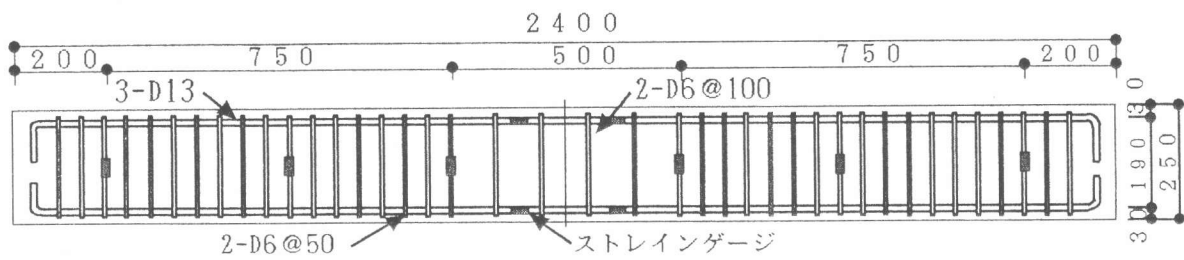
圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
334	2.54×10^5	1.89

表4 鉄筋の力学特性

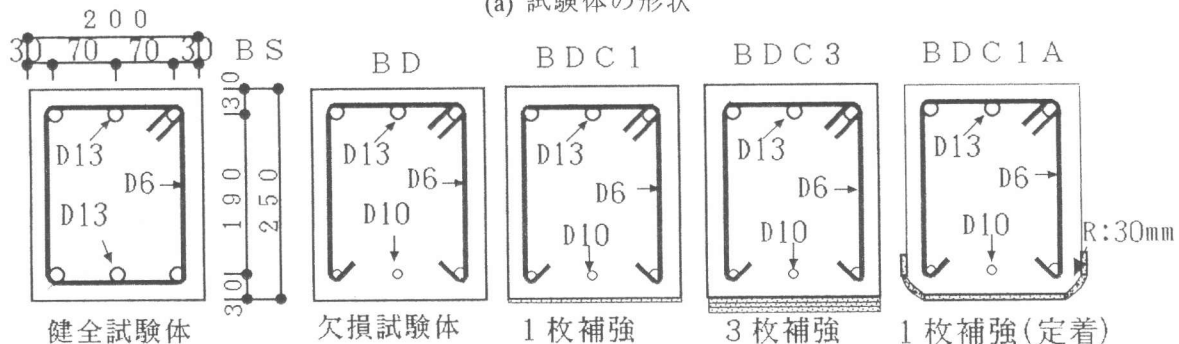
種類	降伏点 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
D13	3500	4860	1.86×10^6
D10	2947	4377	1.91×10^6
D6	2300	4230	1.98×10^6

表5 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	0.97	35000	2.90×10^6



(a) 試験体の形状



(b) 炭素繊維シートの貼付方法

図1 試験体の形状および貼付方法

2. 4 載荷方法および測定項目

試験体の載荷は、図2に示すように2点集中の一方向単調載荷とし、試験体が破壊するまで載荷した。試験中には、各載荷点での曲げスパンのたわみ、引張主筋および圧縮主筋の歪み、炭素繊維シートの歪みならびにひび割れ幅を測定し、ひび割れの進展およびコンクリートの圧壊状況を記録した。

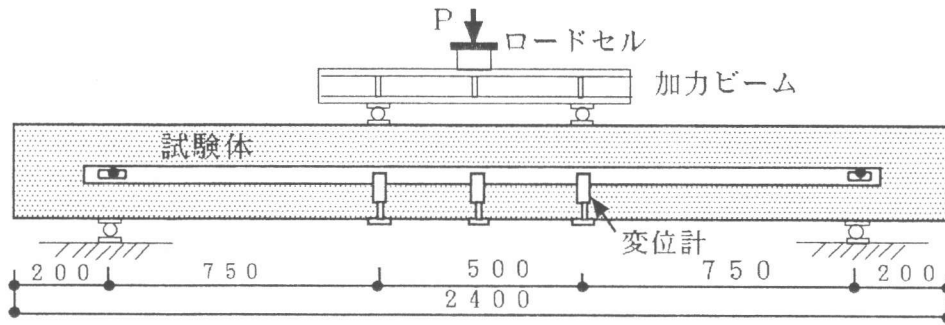


図2 載荷試験方法

3. 実験結果および考察

3. 1 実験結果および試験体の破壊状況

表6に曲げ試験結果を図3に破壊後のひびわれ状況を示す。本実験の範囲では、引張主筋欠損試験体を炭素繊維により補強することによって、その耐力は15%～77%向上し、その補強効果が確認された。また、健全試験体であるBSおよび引張主筋欠損試験体であるBDは、多数の曲げひび割れが生じた後、コンクリートの圧壊によって崩壊したが、BDC1及びBDC1Aは、炭素繊維シートがコンクリートとシートの界面で剥離し、鉄筋が降伏した後、コンクリートの圧壊によって崩壊に至った。3枚補強したBDC3は、炭素繊維シートの端部から剥離し、かぶりコンクリートが炭素繊維シートとの付着によって割裂しながら圧縮コンクリートの圧壊によって崩壊した。

表6 実験結果の一覧

試験体名	ひび割れ荷重 (ton)	降伏荷重 (ton)	最大荷重 (ton)	破壊形式
BS	3.40	7.80 (1.56)	9.50 (1.49)	コンクリートの圧壊による曲げ破壊
BD	2.60	5.00 (1.00)	6.38 (1.00)	コンクリートの圧壊による曲げ破壊
BDC1	3.30	6.26 (1.25)	7.35 (1.15)	シート剥離後、曲げ破壊
BDC3	2.80	7.50 (1.50)	11.30 (1.77)	シート・コンクリート剥離後、曲げ圧壊
BDC1A	4.70	6.70 (1.34)	8.90 (1.40)	シート剥離後、曲げ圧壊

()内の数値は、BDの結果を1とした場合の各試験体の結果の比率を表す。

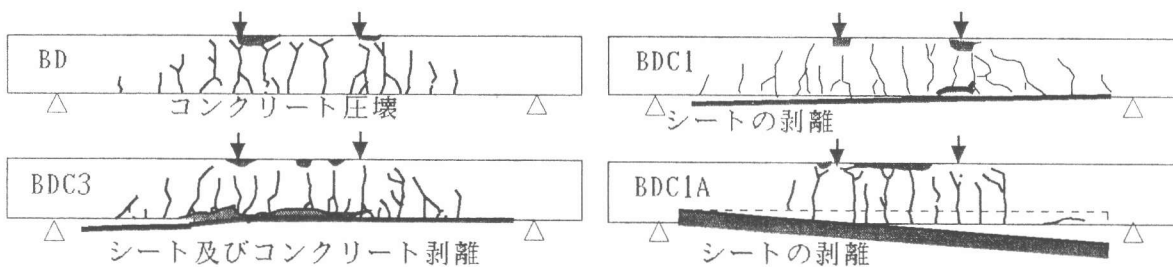


図3 試験体の破壊状況

3. 2 荷重-たわみ関係

各試験体の荷重とたわみの関係を図4に示す。BDの最大耐力はBSの67%であり、鉄筋の断面欠損量に比べ耐力の低下率は小さかった。補強試験体(BDC1,BDC3,BDC1A)の曲げ剛性は、炭素繊維シートへの貼付によって約2倍に増大し、耐力も15~77%向上したが、いずれもシートの剥離によって急激な耐力の低下を示し、その後はBDと同程度の耐力で崩壊に至った。図5に示すように、BDの最大耐力時のたわみを1とした場合、BDC1、BDC3,BDC1Aではそれぞれ0.18, 0.22,0.29と非常に小さな値を示した。これはシートの剥離で最大耐力が決まったためである。補強試験体に限って比較した場合、最大耐力時のたわみは定着を施したBDC1Aが最も大きいことから、定着処理はシートの剥離に対して有効な手法となる。一方、破壊時のたわみについては、炭素繊維シートを1枚貼付したBDC1,BDC1Aのたわみが、それぞれBDの1.5、1.2倍に増加したのに対して、3枚貼付したBDC3のたわみは0.91倍とBDよりも減少した。これは最大耐力の増大により圧縮コンクリート部分が過大な応力履歴を受けたことに起因すると考えられる。

3. 3 引張主筋および炭素繊維シートのひずみ

図6に荷重と引張主筋ひずみの関係を示す。BDでは、荷重の増加に伴いひずみが増大し、最大荷重時に降伏に至る。一方、補強試験体(BDC1,BDC3)では同一荷重時のひずみはBDよりも小さく、鉄筋応力が減少している。これは、引張応力を炭素繊維シートが分担したため、シートの曲げ補強材としての効果が確認された。また、貼付量の増大に伴い鉄筋の応力が減少することから、貼付量の増大は補強効果の向上に繋がると推測される。補強試験体(BDC1,BDC3)の荷重と炭素繊維シートのひずみの関係を図7に示す。炭素繊維シートが剥離したため、BDC3の最大耐力はBDC1の1.53倍しかなく、貼付量から期待される最大耐力の増大率(3倍)よりも小さな値を示した。このように、炭素繊維シートの剥離によって最大耐力が決まることから、繊維シートとコンクリートの付着を十分に保つことが補強効果の成否を決定するといえる。

3. 4 コンクリート断面および炭素繊維シートのひずみ分布

図8にBDC3表面でのコンクリートおよび炭素繊維シートのひずみ分布を示す。載荷初期の段階から炭素繊維シートは荷重を負担し、シートが剥離した最大耐力時においてもシート以外の部分では平面保持状態が成立していることがわかる。また、図9にBDC3底面における炭素繊維シートのひずみ分布を示す。ひび割れ発生時から炭素繊維シートのひずみは増加しており、シートの剥離直前には等曲げ区間で約5000~6000 μ の引張ひずみが生じている。この結果から、最大耐力時に炭素繊維シートに作用している引張応力は約16000kgf/cm²であると考えられる。

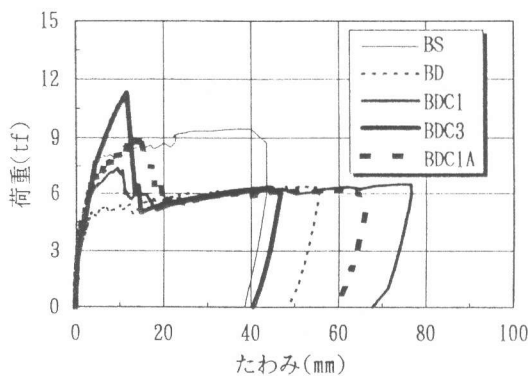


図4 荷重たわみ曲線

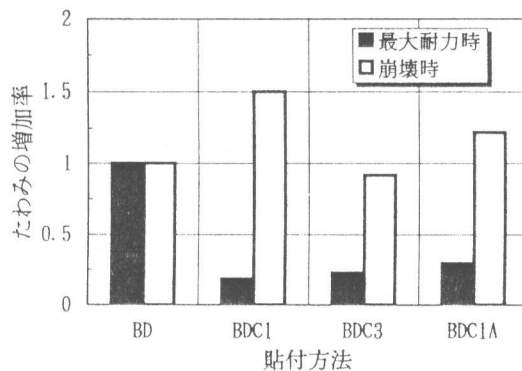


図5 最大耐力および破壊時のたわみ

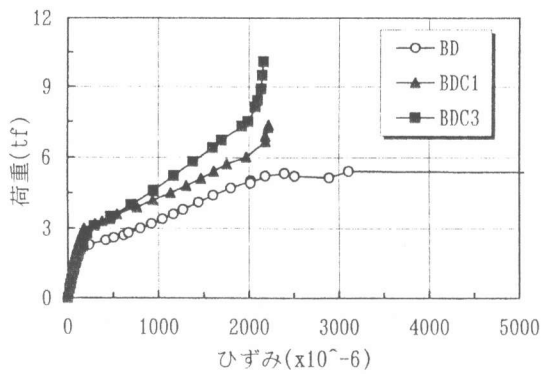


図6 引張主筋の荷重ひずみ曲線

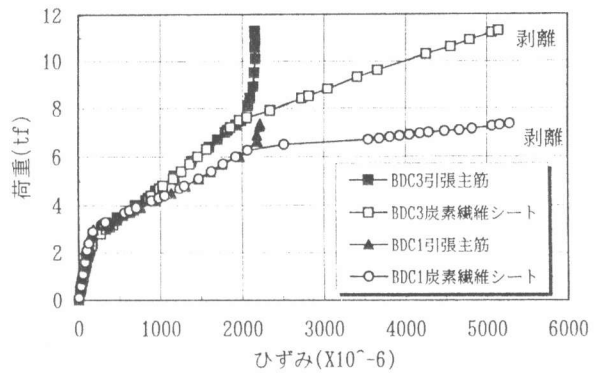


図7 炭素繊維シートの荷重ひずみ曲線

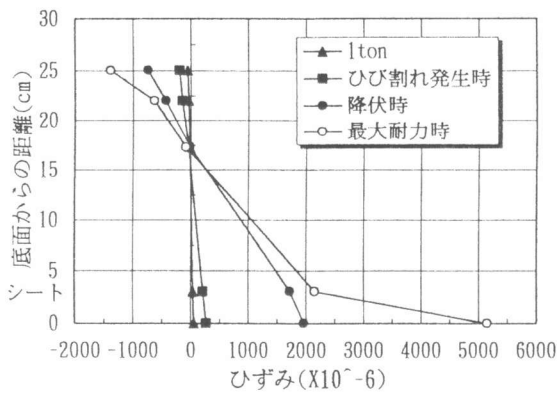


図8 試験体断面のひずみ分布

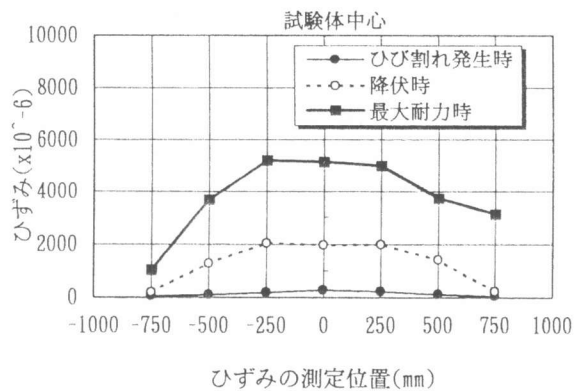


図9 炭素繊維シートのひずみ分布

4. 曲げ補強効果の評価

図10に炭素繊維シートによる補強量と最大耐力との関係を示す。ここで、補強量 ($P_t \times \sigma_y$) とは鉄筋と炭素繊維シートの曲げ補強効果の総和を表す指標であり、(1)式により算出した。ただし、炭素繊維シートの引張強度には、上記3.4のシート剥離時の作用応力が本来の材料強度の約1/2であるという結果に基づき、低減係数1/2を乗じることとした。補強量と実験結果には線形関係があり、(1)式を用いて炭素繊維シート補強による耐力増加を推測できると考えられる。また、図11に(2)式より求めた終局耐力の計算結果 (P_{cal}) と実験結果との比較を示す。

無補強試験体であるBSとBDは、(2)式より得られた終局耐力の計算値よりも実験結果の方が大きい。これは、BSとBDの複筋比は1以上あり、圧縮補強筋の効果が現れたものと考えられる。一方、補強試験体については計算結果と実験結果に多少の差が認められるものの、炭素繊維シートの引張強度を正確に評価することで、(2)式は実用上十分に炭素繊維シートで補強したRC梁の最大耐力を推測できると考えられる。

$$P_t \times \sigma_y = P_{st} \times \sigma_{sy} + P_{cf} \times \sigma_{cf} \times 1/2 \quad (1)$$

$$P_{cal} = 2M/L, M = (0.9 \times a_t \times \sigma_{sy} \times d_s) + (0.9 \times a_f \times E_f/E_s \times \sigma_{cf} \times 1/2 \times D) \quad (2)$$

P_{st} : 引張鉄筋比, σ_{sy} : 鉄筋降伏点, $P_{cf} = A_{cf}/BD$, A_{cf} : 炭素繊維シート断面積
 B : 梁幅, D : 梁せい, σ_{cf} : 炭素繊維シートの引張強度, L : せん断区間の長さ
 a_t : 鉄筋断面積, a_f : シート断面積, d_s : 梁の有効せい

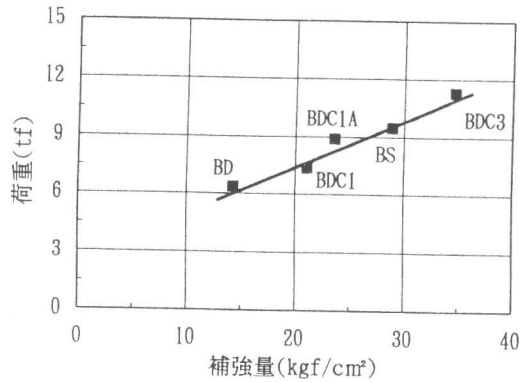


図 10 補強量と荷重との関係

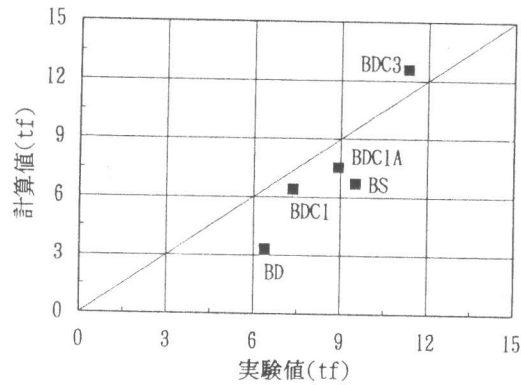


図 11 実験結果と計算結果の比較

5. まとめ

鉄筋腐食による引張主筋の断面欠損をモデル化したRC梁を炭素繊維シートで補強した試験体の曲げ耐力試験を行った結果、以下に示す知見が得られた。

- (1) 引張主筋の断面欠損をモデル化した試験体の曲げ耐力は、炭素繊維シートで補強することにより向上し、炭素繊維シートが鉄筋と同様な曲げ補強材として有効であることが確認された。
- (2) 炭素繊維シートで補強した試験体はシートの剥離時点で最大耐力を示し、耐力の急激な低下後は、炭素繊維シートによる補強が施されていない試験体と同程度の耐力で崩壊に至った。
- (3) 炭素繊維シートの貼付量を増大させることによって、引張主筋の負担応力を減少させ、曲げ耐力の向上を図ることができたが、シートの剥離によって最大耐力が決まるため、貼付量の増加に見合う曲げ補強効果は得られなかった。
- (4) 炭素繊維シートの定着を設けることによって、梁の曲げ耐力および最大耐力時の変形能力が向上した。また、剥離時点の炭素繊維シートの最大ひずみは約 5000 ~ 6000 μ と材料本来の破断ひずみの約半分しかなく、本来の強度を 100% 発揮することができなかった。
- (5) 炭素繊維シートの剥離が生じるまでは、コンクリート断面およびシート面のひずみはほぼ平面保持状態にあり、剥離時に作用している炭素繊維シートの引張応力を用いることにより、炭素繊維シートによる曲げ補強効果を既往の曲げ耐力算定式から求めることができた。

謝辞：本研究は文部省科研費一般研究(A) (課題番号：06402045, 研究代表者：友澤史紀教授)の一部として行ったものである。また、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。材料は三菱化学(株)からご提供頂いたものであり、坂井廣道および久部修弘氏に深く感謝致します。また実験に際しては、建設省建築研究所第2研究部の方々および黄光律氏をはじめとする東京大学友澤研究室の諸氏にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補修事例集、1994.10
- [2] T. Miyagawa ほか：Influence of Longitudinal Cracking Due to Reinforcement Corrosion on Characteristics of Reinforced Concrete Members, *ACI Structural Journal*, pp.134-140, 1988.3
- [3] 李翰承、友澤史紀、野口貴文：鉄筋腐食がRC単筋梁の耐力性能低下に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、No.49
- [4] 宇治公隆ほか：シート状炭素繊維による既設構造物の耐荷性能構造機構、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.2、pp695-700、1992.6
- [5] 加藤博文ほか：炭素繊維シートによるコンクリート部材の補強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.17、No.2、pp899-904、1995.6