

論文 炭素繊維シートを用いて曲げ補強を行った RC 床版の力学的特性

酒井 芳文*¹・宇賀田 康男*²・秋山 吉弘*³・牛島 栄*⁴

要旨：炭素繊維シートを用いて曲げ補強を行った RC 床版の力学的特性を明らかにするため、特に、炭素繊維シートとコンクリート表面の付着特性に着目して静的曲げ試験および疲労試験を行った。その結果、炭素繊維シートで RC 床版を補強することにより、その剛性および終局曲げ耐力が増加すること、ひび割れが分散されること、補強試験体の 200 万回疲労強度は静的終局耐力の 50～60% となること、炭素繊維シートの貼付け枚数や繰返し荷重値がシートの付着強度に影響を及ぼすこと等がわかった。

キーワード：連続繊維補強材、炭素繊維シート、曲げ補強、付着強度、疲労試験

1. はじめに

近年の急速な社会資本整備に伴って建設された鉄筋コンクリート構造物は、そのストック量の増加や先の阪神大震災による教訓等により、建設後の維持管理に対する重要性が高まってきている。この様な背景の下、塩害、中性化、経年劣化等の各種要因による劣化の顕在化、交通量の増加、交通荷重制限の引き上げや耐震基準の見直しに伴い、構造物の延命化技術の確立が必要となり、各種の補修・補強工法が試みられている。その中で炭素繊維やアラミド繊維等の連続繊維補強材はその軽量、高強度、高耐久性といった優れた材料特性が注目され、構造物の補修・補強分野への利用に関する研究開発が盛んに行われている。

本研究では、連続繊維補強材の中でも施工性に優れた炭素繊維シートを取り上げ、RC 床版の曲げ補強材として適用した場合の補強効果および繰返し荷重下における特性を把握するため、静的曲げ試験および疲労試験を実施した。以下にその結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 使用材料

試験体の作製に用いた使用材料とその物理的性質を表-1 および表-2 に示す。

表-1 使用材料

材 料 名	仕 様
コンクリート	レディミクストコンクリート:呼び強度24MPa, Gmax=20mm, スラング8cm, 空気量4% セメント:普通ポルトランドセメント(比重3.16) 粗骨材:つくば産砕石(実積率60.8%, 表乾比重2.70) 細骨材:霞ヶ浦産陸砂(F.N=2.60, 表乾比重2.59)
鉄 筋	SD295A D10mm
炭素繊維シート	繊維目付量300g/m ² , 設計厚さ0.165mm, 引張強度2940MPa
接着樹脂	エポキシプライマー(0.25kg/m ² 使用), エポキシ樹脂(0.8kg/m ² 使用)

表-2 使用した材料の物理的性質(試験結果)

材料名	仕 様	降伏点 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	破断伸び (%)
コンクリート	24-8-20	—	25.8~29.9	2.29	20.4~23.4	—
鉄筋	SD295A D10mm	3.57	—	495	194	28.2
炭素繊維シート	t=0.165mm	—	—	3080	378	0.77
接着樹脂	エポキシ樹脂	—	—	510	3.1	2.9

- *1 (株) 青木建設 研究所 材料研究室 副主任研究員 (正会員)
- *2 東京電力(株) 電力技術研究所 構造研究室 主任研究員、工修
- *3 東京電力(株) 原子力建設部 土木建築課付外向 日本原燃(株) 土木建築部土木課課長
- *4 (株) 青木建設 研究所 材料研究室室長、工博 (正会員)

2.2 試験体の作製

試験体の形状寸法および配筋図を図-1、図-2に示す。コンクリート打ち込み後、湿潤養生を2週間実施し、材齢3週間後に炭素繊維シート（以下CFシートと称す）の貼付けを行った。CFシートを貼付けるコンクリート表面は、サンドペーパーによりケレンを行い、プライマー塗布後、エポキシ樹脂系接着剤を用いてCFシートを貼付けた。プライマーおよび接着樹脂の使用量は、表-1に示す標準使用量とした。

2.3 静的曲げ試験方法

2.3.1 荷重方法

静的曲げ試験は、2線支持、2線荷重、曲げスパン1500mmの3等分点曲げ荷重とし、試験体下側主鉄筋のひずみを計測しながら許容応力の127MPaに達するまでは4.9kN刻みで荷重、その後、降伏点に達するまでは、9.8~19.6kN刻みの漸増荷重を行った。鉄筋の降伏後、破壊に到るまでは変位制御に切り替え、スパン中央のたわみが0.5 mmずつ増加するように荷重を行った。

2.3.2 試験ケースおよび計測項目

静的曲げ試験ケースを表-3に示す。通常CFシートによる補強は繊維方向を主鉄筋軸方向と同一とするが、本実験では、床版試験体を用いたため、軸直角方向の変形も梁試験体に比べて大きくなることが予想された。そこで、軸直角方向の補強有無が耐力に及ぼす影響についても検討を行うため、主鉄筋軸と直角方向に貼付けたケースについても検討を行った。試験の計測項目を以下に示す。①荷重：ロードセルによる荷重計測、②たわみ：支点とスパン中央に変位計を設置し、試験体のたわみを測定、③ひずみ：ひずみゲージを主鉄筋、コンクリート表面およびCFシートに貼付け、各ひずみを測定。主鉄筋ひずみは上下筋のスパン・断面の中央部、コンクリート表面ひずみは、床版上面および側面の中央部、CFシートひずみはスパン中央から30cm間隔で5点について測定、④ひび割れ：各荷重段階毎にひび割れの進展状況を記録

2.4 疲労試験方法

2.4.1 荷重方法

疲労試験の荷重方法は、2.3の静的曲げ試験で得られた終局荷重値に対して下限荷重値と上限荷重値（以下、下限荷重比と上限荷重比と称す）を設定し、荷重と時間の関係を正弦波形とし、荷重速度3Hzで繰返し回数200万回を目標に実施した。また、 $N=1, 10^4, 5 \times 10^5, 10^6, 2 \times 10^7$ 回の繰返し荷重回数毎に、繰返し荷重を一旦中断し、その都度、中央値→下限値→中央値→上限値→中央値といったサイクルを0.5~1tfピッチで静的に荷重し、荷重、たわみ、各ひずみの測定を行った。200万回の荷重終了時においても破壊に至らなかった試験体については、2.3と同様な静的曲げ試験を実施した。

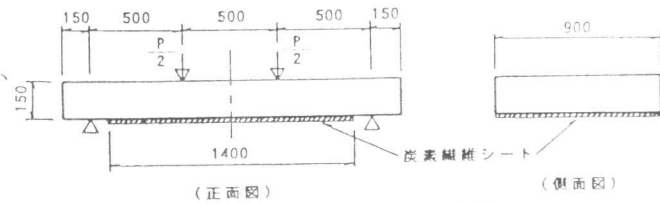


図-1 試験体の形状

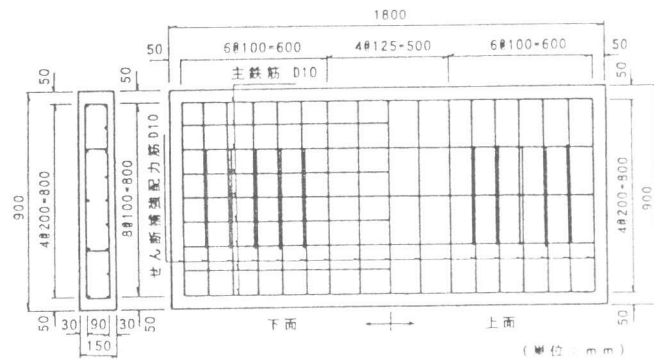


図-2 試験体の配筋図

表-3 静的曲げ試験ケース

試験体 No.	補強ケース ()内シート枚数
S-1	無補強 (0)
S-2	軸方向補強 (1)
S-3	軸+直角方向補強 (2)
S-4	軸方向補強 (2)
S-5	軸+直角+軸方向補強 (3)

コンクリート表面からの貼付け順に示す。

2.4.2 試験ケースおよび計測項目

疲労試験の試験ケースを表-4に示す。補強ケースは、静的曲げ試験の結果と実施工における実用性、経済性を考慮して、主鉄筋方向とその直交方向の2積層とした。試験の計測項目は、静的曲げ試験と同様とし、前述の繰返し载荷回数毎に下限～上限荷重値までの荷重、たわみ、各ひずみを測定するとともにひび割れの進展状況を記録した。

表-5 疲労試験のケース

試験体 No.	補強ケース	荷重比(%)		荷重(KN)	
		下限値	上限値	下限値	上限値
F _N -60	無補強		60	10.8	63.7
F _R -40	軸+直角方向補強	10	40	29.4	119
F _R -50			50	29.4	149
F _R -60			60	29.4	178
F _R -70			70	29.4	212

表-6 静的曲げ試験結果

試験体 No.	補強方法 ()内シート補強枚数	終局荷重 (KN)		破壊時のたわみ(mm)	破壊モード
		計算値	実験値		
S-1	無補強	112	107	4.44	B
S-2	軸方向(1)	340	277	11.52	PB
S-3	軸方向(1)直角方向(1)	340	297	11.92	PB
S-4	軸方向(2)	472	342	8.74	PB
S-5	軸方向(2)直角方向(1)	472	298	7.33	PB

破壊モード：B;曲げ破壊, PB;シートの剥離後曲げ破壊

3. 実験結果および考察

3.1 静的曲げ試験結果

(1)終局荷重と破壊形態

静的曲げ試験の試験結果を表-5に、破壊時の試験体のひび割れ形態および破壊状況を図-3に示す。無補強試験体の場合は、荷重107KNで主鉄筋の降伏による曲げ破壊の形態を呈した。CFシート補強試験体は、全てシート端部でコンクリートとの付着が切れて急激に荷重が低下し、一部下側主鉄筋に沿ったひび割れとせん断ひび割れを伴った曲げ破壊の形態を呈した。終局荷重は、CFシートの剥離により破壊に至ったため、CFシートの貼付け枚数による顕著な差異は認められなかった。また、ひび割れ形態から無補強試験体に比較してCFシートで補強した試験体の方はひび割れ本数が多いものの、ひび割れ発生間隔が小さく、ひび割れ分散効果が高いことがわかる。終局荷重に達する前のひび割れ幅は、無補強試験体が最大で0.3mm程度、補強試験体は全て0.05mm以下であった。

(2)荷重とたわみの関係

図-4に各ケースにおける荷重と曲げスパン中央のたわみの関係を示す。荷重0~39KN程度までは各ケースとも荷重の増加に伴うたわみ量はほぼ等しいが、それ以上の荷重では軸方向のシート枚数が多いもの程たわみ量が小さく、剛性が高くなっていることがわかる。一方、直角方向に貼付けたシートについては、その補強効果は認められなかった。CFシートの剥離により破壊に達した後は、荷重が急激に低下してシートの補強効果がなくなり、無補強試験体の荷重-たわみ曲線と同様な傾向を示した。

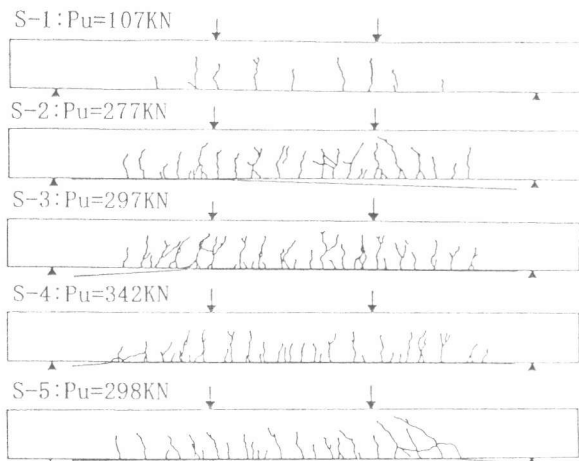


図-3 ひび割れ形態および破壊状況

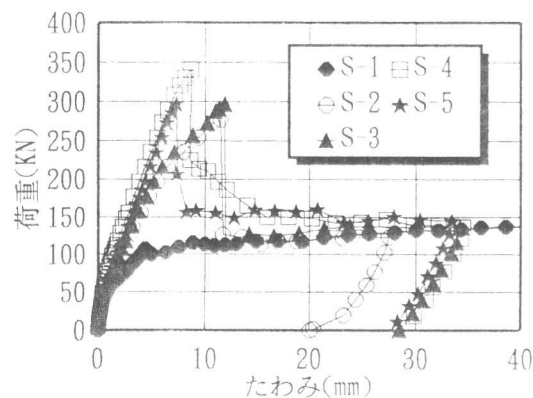


図-4 荷重とたわみの関係

(3)荷重と鉄筋ひずみの関係

各ケースにおける荷重とスパン中央の下側主鉄筋ひずみの関係を図-5に示す。鉄筋ひずみは、コンクリートにひび割れが発生する前の荷重39KN(鉄筋ひずみで100 μ 付近)までは、各ケースとも同じ傾向であるが、それ以降は軸方向に貼付けたシートの枚数により傾きが異なり、シート貼付け枚数が多いものほど鉄筋ひずみは小さく、CFシートが鉄筋にかかる応力を分担していることが伺われる。

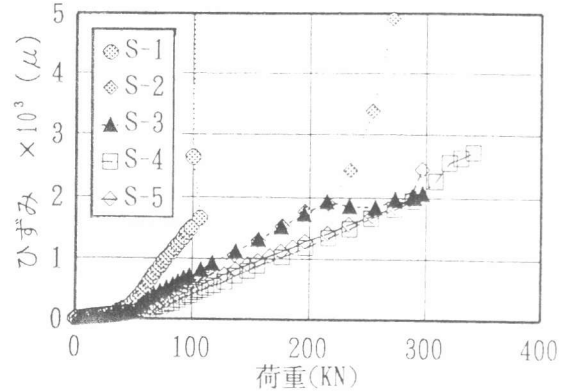


図-5 荷重と鉄筋ひずみの関係

(4)鉄筋、CFシートのひずみ分布

S-3試験体のスパン中央断面の鉄筋、コンクリート表面およびCFシート表面に貼付けたひずみゲージより測定した各荷重時におけるひずみ分布図を図-6に示す。CFシートを貼付けて補強した場合も、断面ひずみ分布はほぼ直線形状となり、平面保持の仮定が成り立つものと考えられる。S-2、S-4試験体下面の各荷重時におけるCFシート表面のひずみ分布を図-7に示す。CFシートによる補強試験体の場合は、一般には、S-2試験体のように曲げスパン中央部を最大とした放物線状の分布を示したが、S-4試験体のひずみ分布に示されるように、曲げスパン内でもひずみの分布に規則性が認められないものもあった。これは荷重が大きくなるに従って、CFシートの付着が部分的に切れてくることに起因するものと考えられる。CFシートの付着破壊直前には、CFシートの定着部の一部分においてこのような付着切れが生じることによって、応力集中が生じ、それが瞬間的に定着部全体に伝播していき破壊に到るものと考えられる。

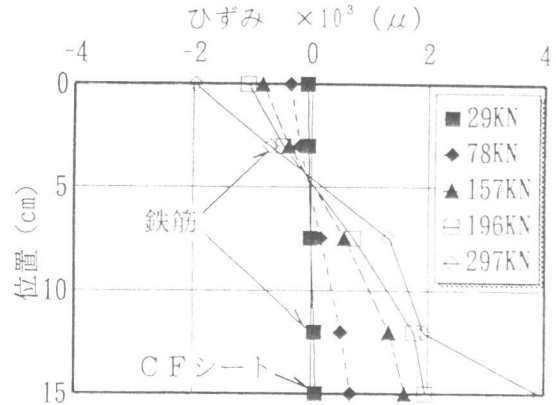


図-6 断面ひずみ分布

示したが、S-4試験体のひずみ分布に示されるように、曲げスパン内でもひずみの分布に規則性が認められないものもあった。これは荷重が大きくなるに従って、CFシートの付着が部分的に切れてくることに起因するものと考えられる。CFシートの付着破壊直前には、CFシートの定着部の一部分においてこのような付着切れが生じることによって、応力集中が生じ、それが瞬間的に定着部全体に伝播していき破壊に到るものと考えられる。

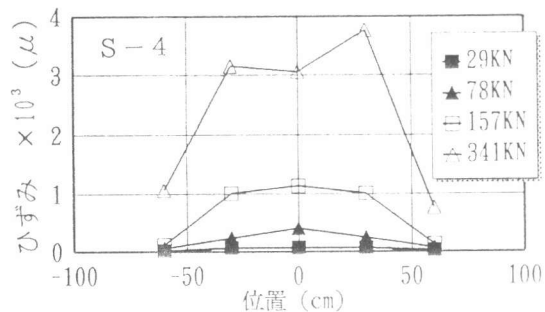
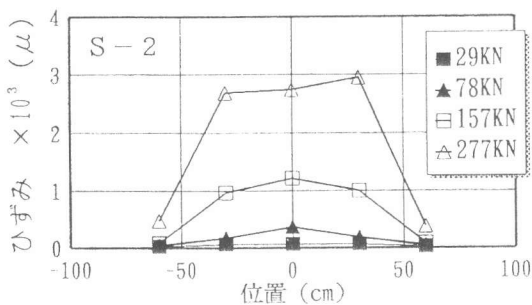


図-7 CFシートのひずみ分布

3.2 疲労試験結果

(1)破壊状況および形態

各ケースの破壊状況と破壊モードを表-6に示す。無補強の試験体は、上限荷重比60%において、200万回の繰返し載荷で破壊は認められず、その後の静的曲げ試験においても、終局荷重、たわみとも3.1の静的曲げ試験結果とほぼ同等な結果を示した。CFシート補強を行った試験体は、上限荷重比40%では200万回の繰返し載荷による破壊は認められず、その後の静的曲げ試験においても、終局荷重、たわみとも3.1の静的曲げ試験で得られた結果とほぼ同等な結果であった。し

かし、上限荷重比を50%とした場合は、200万回の繰返し載荷に対しては破壊しなかったものの、その後の静的曲げ試験では、終局荷重が248kNと3.1の静的曲げ試験の終局荷重値の約80%に低下していた。上限荷重比を60%および70%とした場合は、それぞれ17559回および71207回の繰返し載荷でCFシートが剥離して破壊に到った。今回の実験範囲では、200万回疲労強度は上限荷重比50~60%の間に存在し、鉄筋応力が235MPa（降伏値の約65%）を越えると繰返し荷重による耐力低下が見られることがわかった。

表-6 疲労試験結果（200万回繰返し後の静的曲げ試験結果含む）

試験体 No.	補強有無	上限荷重値(KN) ()内荷重比(%)	上限荷重比における 鉄筋応力 (MPa)	終局荷重 (KN)	破壊時の たわみ(mm)	破壊モード ()内繰返し数
F _N -60	無補強	63.7(60)	174	114	5.32	B
F _R -40	補強	119 (40)	165	325	13.18	PB
F _R -50		149 (50)	238	248	8.96	PB
F _R -60		178 (60)	322	[178]	[6.07]	FPB (17559回)
F _R -70		208 (70)	382	[212]	[6.96]	FPB (71207回)

注) 破壊モード: B; 曲げ破壊, PB; シートの剥離後曲げ破壊, FPB; 疲労破壊(シート剥離後曲げ破壊)、[]の数字は繰返し載荷中に破壊したため、破壊前の静的載荷サイクル時における上限荷重値を示す。

(2) 繰返し荷重とたわみの関係

図-8にCFシート補強試験体で上限荷重比50%および60%として繰返し載荷を行ったケースについて、途中繰返し載荷を中断して静的載荷を行った各段階における荷重とスパン中央のたわみの関係を重ねて示す。上限荷重比50%の場合、200万回の繰返し載荷後に終局荷重の低下は認められたが、3.1の静的曲げ試験と比較して剛性の低下は認められなかった。また、上限荷重比60%の場合は、50%の場合と比較してたわみ量は大きいものの、破壊前の10⁴回の載荷サイクルでは破壊の前兆は認められなかった。

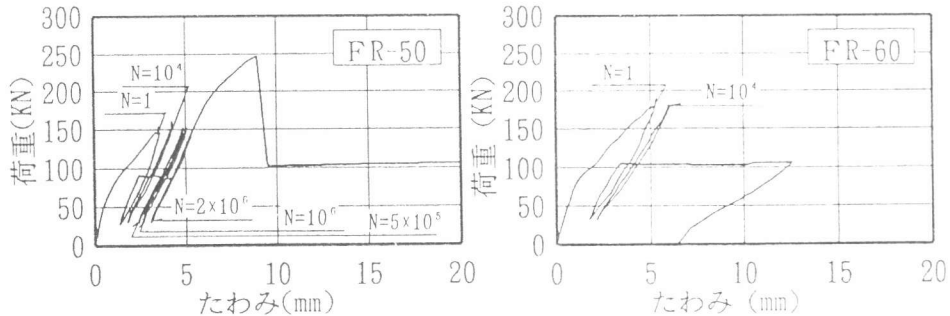


図-8 繰返し荷重とたわみの関係

(3) 鉄筋、CFシートのひずみ分布

上限荷重比50%の場合の各繰返し回数における中央断面ひずみ分布を図-9に示す。10⁴回の繰返し載荷では下限荷重比付近におけるひずみの増加が認められ、200万回では下限~上限比全ての荷重時において全体的にひずみが増加していた。一方、上限荷重比40%の場合は、このようなひずみの増加は認められなかった。

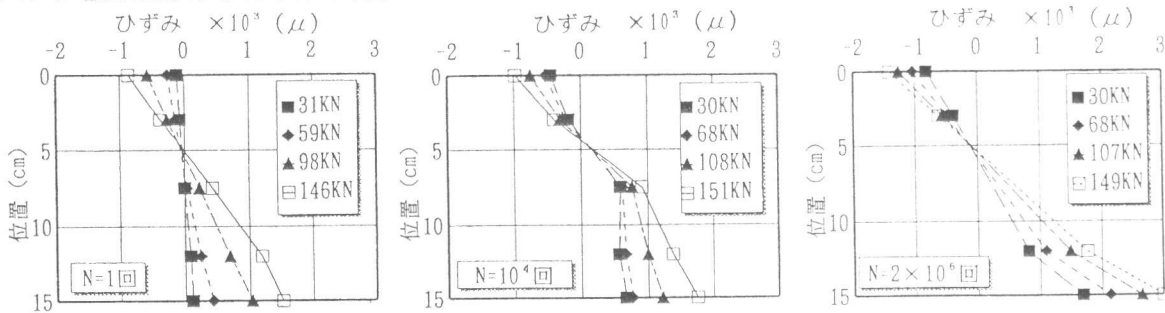


図-9 繰返し載荷による断面ひずみ分布の推移 (F_R-50試験体)

(4) 上限荷重比と繰返し載荷回数の関係

上限荷重比と繰返し载荷回数の関係を図-10に示す。図中の実線は、土木学会示方書の鉄筋疲労強度算定式(1)を用い、無補強試験体の鉄筋応力振幅実測値をその時の上限荷重比に置き換えて算出したものである。

$$S_r = 1900(1 - \sigma_{sp}/f_u)(10^\alpha/N^{0.12})/\gamma_s \quad (1)$$

ただし、N:疲労寿命(回), S_r :鉄筋応力振幅, f_u :鉄筋引張強度, σ_{sp} :鉄筋下限応力(以上単位はMPa), $\alpha=0.82-0.003\phi$, ϕ :鉄筋直径(mm), $\gamma_s=1.05$ である。

図より、CFシート補強試験体の疲労寿命は上限荷重比が50%程度より大きくなると、土木学会式より算出したRC試験体の疲労寿命より低下していた。

(5)平均付着強度

CFシートによる曲げ補強は、コンクリート表面に貼付けたCFシートに曲げモーメントによる引張力を負担させるものであり、今回のような付着破壊で耐力が決定される場合は、付着性状について検討を行って曲げ耐力を算定しなければならない。

そこで、一般には(2)式で表される「平均付着強度 τ 」[1][2]が算出され、検討に用いられている。本実験結果から算出される平均付着強度と終局荷重値との比較を行った結果を図-11に示す。図より、繰返し载荷を受ける場合は、繰返しの上限荷重比が大きいほど平均付着強度は減少する傾向が伺える。また、シートの積層枚数の多い方が平均付着強度も増加する傾向であった。

$$\tau = T/(W \times L) = \sigma \times A/(W \times L) = E \times \varepsilon \times A/(W \times L) \quad (2)$$

T: 曲げモーメント最大位置におけるシートの引張力(N), W: シートの貼付け幅(cm)
 L: 曲げモーメント最大位置からのシート貼付け長さ(cm), A: シートの有効断面積(cm²)
 σ : 曲げモーメント最大位置のシートの引張応力(MPa), E: シートのヤング係数(MPa)
 ε : 曲げモーメント最大位置におけるシートのひずみ

4. まとめ

- (1)炭素繊維シートによる補強を行った場合、部材の剛性が高くなり、耐荷力も著しく増加する。
- (2)炭素繊維シートの貼付けにより、曲げひび割れが分散され、ひび割れ幅が抑制される。抑制されたひび割れ幅は、0.05mm以下で鉄筋コンクリート構造物の耐久性向上が期待できる。
- (3)今回の実験範囲内では炭素繊維シートによる補強を行った場合、上限荷重比40%以下の場合(主鉄筋応力が降伏値の約45%以下)では、繰返し载荷による曲げ耐力低下は生じない。しかし、上限荷重比が50%以上の場合(主鉄筋応力が降伏値の65%程度以上)では、繰返し载荷により曲げ耐力が低下するか、200万回に満たない繰返し数で疲労破壊を生じる。
- (4)炭素繊維シートで曲げ補強を行う場合の耐力計算に用いられる平均付着強度は、シートの積層枚数が多くなると増加し、繰返し荷重が大きい場合は疲労により低下する傾向を示す。

(参考文献)

- [1]井上正一, 西林新蔵他: CFRP板を接着・補強したRCはりの破壊様式と静的および疲労強度、土木学会第50回年次学術講演会、pp.716-717、1995.9
- [2]大野了, 安藤他: 曲げを受けるシート状CFRPとコンクリートとの付着性状、土木学会第49回年次学術講演会、pp.914-915、1995.9

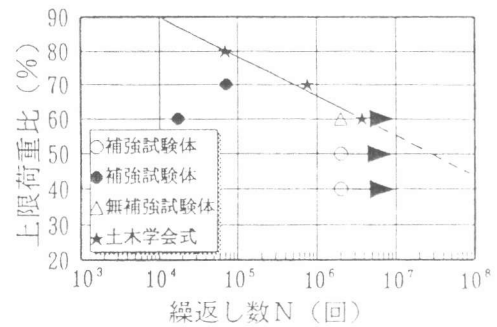


図-10 上限荷重比と繰返し数の関係

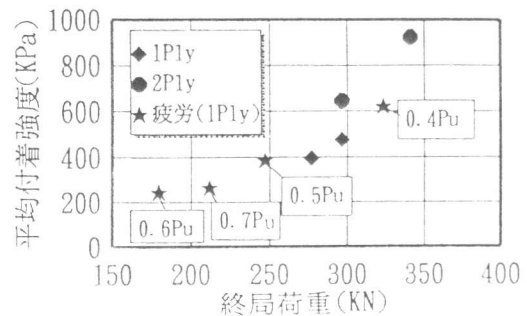


図-11 平均付着強度と終局荷重の関係