

論文 繰返し荷重下における炭素繊維シートの局部付着特性に関する実験的研究

本田 陵二*1・長友 克寛*2・角 徹三*3・松原 三郎*4

要旨：本研究は、両引試験体に繰返し引張力を加えることにより、その両側面に貼付した炭素繊維シートの局部付着特性を調べたものである。実験変数は、最小引張力、引張力振幅および部材軸直交方向に貼付した炭素繊維シートの間隔である。実験結果より、破壊に要する繰返し回数への最小引張力と引張力振幅の影響は鋼材等の疲労試験で観察されるものと定性的に同じであること等を明らかにすると共に、引張力の繰返しに伴う局部付着応力度－相対変位関係の推移について直交方向炭素繊維シートの影響を含めて考察を加えた。

キーワード：炭素繊維シート、付着応力度、相対変位、疲労、鉄筋コンクリート

1. はじめに

炭素繊維シート（以下、CFSと略記）は、軽量で、強く、取扱い易い等の理由から、鋼材の代替材として柱、はり、スラブ等の補修・補強材料として広く用いられるようになってきた¹⁾。そして、これと併行してCFS補強部材の曲げ、せん断および付着割裂耐力についての定量化の試みがなされ、現在では設計指針²⁾が出されるまでになっている。また、CFSとコンクリート間の付着特性は、補強部材の構造的性能を支配するものであるが、この力学モデルについても多くの提案がなされてきている³⁾。

繰返し載荷時におけるCFSとコンクリート間の付着特性についても、部材レベルでのCFS補強床版の疲労試験⁴⁾、要素レベルでの疲労付着試験⁵⁾等がなされ、貴重な知見が得られているが、最小荷重レベルの影響、主補強方向に対して直交方向に貼付したCFSの拘束効果等、未だ十分検討されていない事項も多い。

本研究では、最小引張力、引張力振幅、主補強方向に対して直交方向に貼付したCFSの補強量を実験変数とし、相対する2つの側面にCFS

を貼付した両引試験体の繰返し載荷試験を実施した。そして、得られた結果に基づき、CFSとコンクリート間の付着疲労寿命および局部付着応力度－相対変位関係について検討した。

2. 実験概要

表-1 に今回の実験概要を示す。

表-2 に今回使用したCFSの力学的特性を示す。CFSは目付量 300 g/m²、設計厚 0.167 mm の一方向強化シートである。コンクリートとの接着剤としては、低温硬化性および速硬化性に優れたMMA樹脂を採用し、これをプライマーおよび含浸接着剤として用いた。

図-1 に本研究で使用した試験体の形状・寸法を示す。試験体は幅100 mm、高さ100 mm、長さ600 mmのコンクリートプリズムの断面中央にねじ切り鋼棒を埋込んだ両引試験体²⁾である。試験体の長さ方向中央位置では、予めねじ切り鋼棒を切断しておくと共に、コンクリート部分には両側面から深さ20 mmの切り欠きをまず設けた。次に、その場合の引張耐力を参考にし、低引張力振幅での載荷時において早期に中央位

*1 高松工業高等専門学校専攻科学生 建設工学専攻（正会員）

*2 高松工業高等専門学校教授 建設環境工学科 博士（工学）（正会員）

*3 豊橋技術科学大学教授 建設工学系 工博（正会員）

*4 高松工業高等専門学校助手 建設環境工学科

表-1 実験概要

試験体名	切り欠き 深さ (mm)	最小引張力 Pmin (kN)	最大引張力 Pmax (kN)	引張力振幅	疲労寿命 N (回)	コンクリート 圧縮強度 fc' (MPa)	備考
M-0-1	20	0	23.9	単調載荷	1	26.9	平均値 M-0-av =23.1kN
M-0-2	20	0	22.3	単調載荷	1	27.2	
M-0-3	40	0	14.5	単調載荷	1	24.6	載荷前に切り 欠きが貫通
M-1-4	40	0	29.8	単調載荷	1	27.7	直交CFS貼付
M-1-5	40	0	24.6	単調載荷	1	24.5	直交CFS貼付
M-1-6	40	0	15.2	単調載荷	1	26.8	直交CFS貼付
M-1-7	40	0	20.4	単調載荷	1	26.9	直交CFS貼付
C-0-1	20	2.0	18.5	M-0-avのPmax の10-80%	2259	26.7	
C-0-2	20	2.0	14.0	M-0-avのPmax の10-60%	12402	26.8	
C-0-3	20	7.0	14.0	M-0-avのPmax の30-60%	122382	27.6	
C-0-4	20	11.5	18.5	M-0-avのPmax の50-80%	5501	25.8	
C-0-5	40	1.0	3.5	M-0-3のPmax の10-30%	2×10 ⁶ 以上	26.3	単調載荷にて 20.8kNで破壊
C-0-6	40	1.0	7.0	M-0-3のPmax の10-50%	1×10 ⁶ 以上	27	載荷装置 トラブル
C-1-7	40	2.0	18.0	M-1-4のPmax の10-60%	3920	25	直交CFS貼付
C-1-8	40	2.0	9.0	M-1-6のPmax の20-60%	2×10 ⁶ 以上	27	直交CFS貼付 21.1kNで破壊

表-2 使用炭素繊維シートの性質

CFSの特性値	規格値
目付量(g/m ²)	300
平均引張強度 (MPa)	4200
保証引張強度 (MPa)	3400
引張弾性係数 (GPa)	230
設計厚 (mm)	0.167

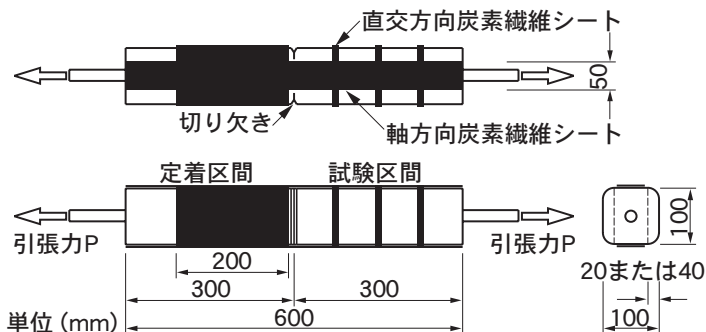


図-1 試験体の形状・寸法の一例
(試験体M-1-6)

置の断面にひび割れを貫通させるため、切り欠き深さを40 mmに増加した。

CFSの貼付は、コンクリート材齢1週間において、表面を平滑かつ清浄に処理した後に実施した。まず、幅50 mmのCFSを試験体の長さ方向に貼付した。次に、CFSとコンクリート間の付着破壊を試験体片側部分（以下、試験区間と表記）に先行して生じさせるため、それとは反対側部分（以下、定着区間と表記）を幅200 mmのCFSによって補強した。

図-2 に、試験区間において、引張力方向に貼付したCFS（以下、軸方向CFSと表記）に対

して直交方向に貼付した幅11 mmのCFS（以下、直交方向CFSと表記）の貼付位置を示す。直交方向CFSは、中心間隔30, 37.5, 60または75 mm間隔で3または4箇所貼付し、これらによる軸方向CFSの付着破壊抑制効果を調べた。

計測事項は、引張力Pおよび軸方向CFSの歪み ϵ_{cf} である。歪み ϵ_{cf} は、2枚の軸方向CFSそれぞれについて、中央の切り欠き位置から15 mm間隔で貼付した14枚の歪みゲージから求めた。

試験体は、コンクリート打設後、養生室内の

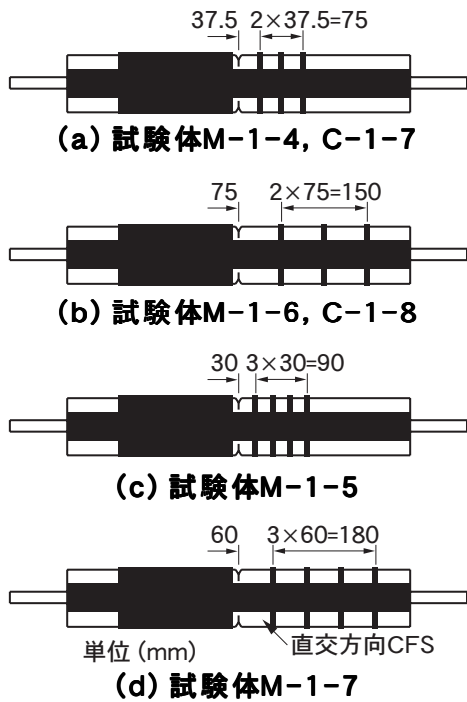


図-2 直交方向CFSの貼付位置

通路において気中養生し、実験に用いた。なお、表-1中のコンクリート圧縮強度 f_c' は、繰返し載荷試験の初日、中間日および最終日における圧縮試験より得られた強度の平均値を表しているが、各試験期間内における f_c' の変動は小さかった。

載荷は、油圧サーボアクチュエータを用いて行った。繰返し載荷時の引張力振幅は、同一の切り欠き深さおよび直交方向CFSをもつ試験体の単調載荷時における引張耐力に基づいて表-1に示したように決定し、周波数3 Hzの正弦波として作用させた。また、200万回に達しても破壊しない試験体については、引き続き単調載荷を行って破壊に至らせた。

3. 実験結果およびその考察

3.1 破壊性状

試験体は全て、軸方向CFSの剥離による急激な破壊を生じた。この剥離は、MMA樹脂層とコンクリート間の界面破壊によるものであった。ただし、直交方向CFSを貼付した試験体では、軸方向CFSの剥離の進展が若干緩やかであり、写真-1に示したように直交方向CFSが中央方向に引張られた後に全体的破壊に至った。



写真-1 直交方向CFS貼付試験体の破壊状況の一例 (M-1-4)

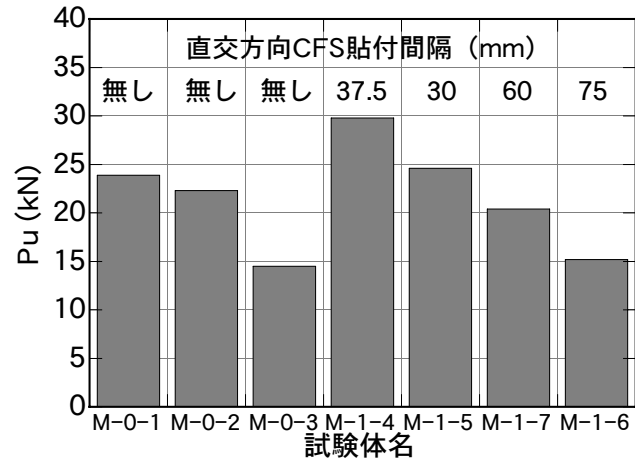


図-3 単調載荷時の引張耐力 P_u

3.2 単調載荷時の引張耐力 P_u

図-3に単調載荷した試験体の引張耐力 P_u の比較を示す。図中において、左端の2つの試験体M-0-1、M-0-2は中央断面に設けた切り欠きの深さが20 mm、残りの5つの試験体は切り欠き深さが40 mmである。また、試験体名M-1-(通し番号)で表した右側4つの試験体は直交方向CFSを貼付した試験体である。同図より、切り欠き深さが20 mmの試験体の方が切り欠き深さ40 mmの試験体M-0-3よりも引張耐力 P_u は大きいことが分かる。これは、前者では切り欠き断面でのコンクリートのひび割れの貫通が遅く、その分だけCFS剥離に近い荷重までコンクリートとCFSとが共同して引張力を負担するためであると考えられる。そのため、前者の試験体は、ひび割れ発生後、小さな荷重増加で破壊に至った。同じ切り欠き深さ40 mmの場合については、直交方向CFSをより広い間隔で貼付するほど引張耐力 P_u は低下し、貼付間隔が75 mmの試験体M-1-6の場合には、その補強効果は非常に小さい。

3.3 疲労寿命

図-4(a),(b)に載荷した引張力 P の最小値 P_{min} ~最大値 P_{max} (以下では引張力振幅を $P_r =$

$P_{max}-P_{min}$ と表記)と疲労寿命 N (破壊までに要する繰返し回数)との関係を示す。図(a)より、(1) 同じ P_{min} であれば P_r の大きい方が N は小さいこと、(2) 同じ P_r であれば P_{min} の大きい方が N は小さいこと、(3) 同じ P_{max} であれば P_r の大きい方が N は小さいこと、(4) P_{min} と P_r が小さい場合には実用上疲労破壊の生じない疲労限界が存在する可能性のあること、および(5) その疲労限界となる P_r は、 P_{min} が単調荷重時の破壊荷重 P_u の10%の場合、同引張耐力 P_u の50%程度であること等が分かる。これら(1)~(4)は、材料学で一般的にいられている疲労性状と同じものである。

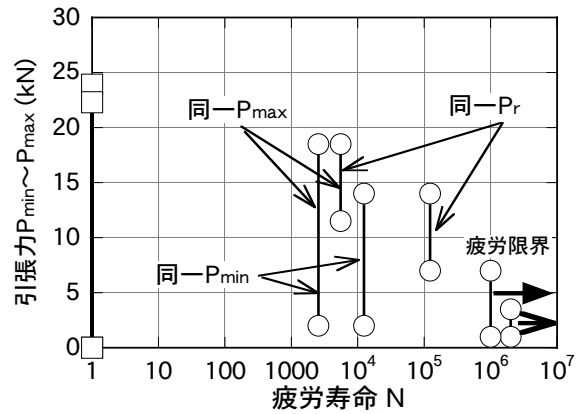
図(a)と図(b)の比較より、繰返し引張力を荷重した場合の N は、直交方向CFSを貼付することで増加するが、その効果は対数目盛表示で見れば大きくないことが分かる。

3.4 局部付着応力度 τ 分布の推移

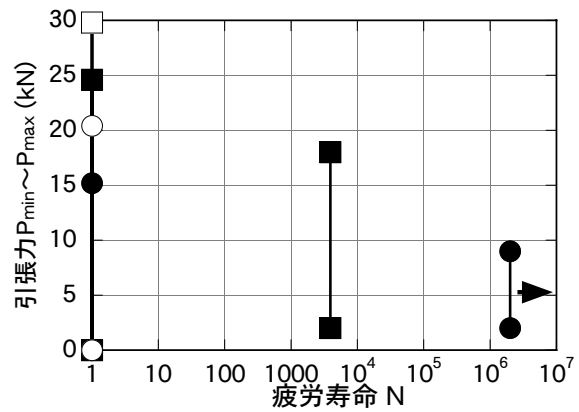
図-5に疲労破壊した試験体C-0-2(直交方向CFS無し)について、荷重 P の繰返しに伴う局部付着応力度 τ 分布の推移を示す。ここに縦軸は予め設定した繰返し回数 n における最大荷重 P_{max} 時の付着応力 τ の値、横軸 x は試験体中央の切り欠き位置より端部へと軸方向に測った距離である。なお τ は、隣接する歪みゲージの読みより計算した付着応力度を、さらに2つずつ平均し、その両者の中間位置での値として評価した。同図より、荷重 P の繰返しに伴って付着劣化が進行し、付着応力 τ のピークは試験体端部へと移動することが分かる。

図-6に疲労破壊しなかった試験体C-0-5(直交方向CFS無し)について、付着応力 τ 分布の推移を示す。同図より、疲労破壊しない試験体でも荷重 P の繰返しに伴って試験体中央付近において付着劣化が生じ、 $n=100$ 万回の時点で付着応力 τ のピークは $x=75$ mmの位置に移動していること、 $n=200$ 万回到達後の単調荷重時における付着応力 τ のピークはこの $x=75$ mmの位置に生じること等が分かる。

図-7に疲労破壊した試験体C-1-7(直交方向CFS有り)について、荷重 P の繰返しに伴う付



(a) 直交方向CFS無し場合



(b) 直交方向CFS有りの場合

図-4 引張力 $P_{min} \sim P_{max}$ -疲労寿命 N 関係

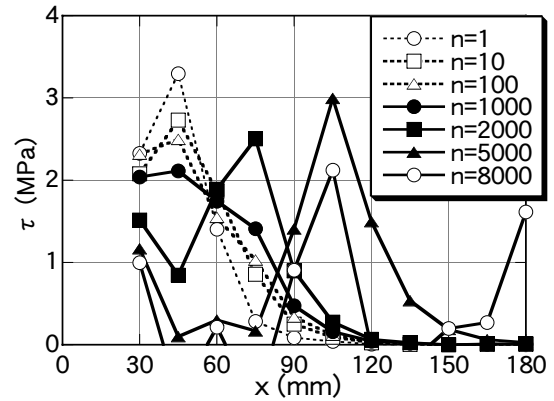


図-5 付着応力度 τ 分布の推移 (試験体C-0-2の場合、ピーク引張力時)

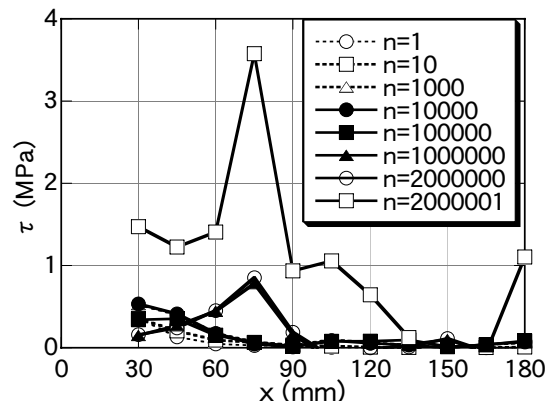


図-6 付着応力度 τ 分布の推移 (試験体C-0-5の場合、ピーク引張力時)

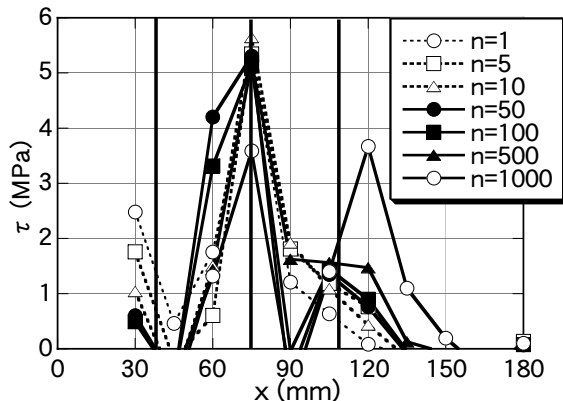


図-7 付着応力度 τ 分布の推移 (試験体C-1-7の場合、ピーク引張力時)

着応力 τ 分布の推移を示す。図中の太縦線は直交方向CFSの貼付位置を表しているが、付着応力 τ のピークはこの貼付位置近傍に生じており、直交方向CFSによる剥離に対する抑制効果が明確に現れている。

3.5 最大局部付着応力度 τ 分布

図-8 に疲労破壊した試験体C-0-1 (直交方向CFS無し) の各 x 軸方向の位置において到達した付着応力度の最大値 τ_{max} の分布を示す。同図より、試験体中央付近においては荷重 P の繰返しによる付着劣化の影響が大きく τ_{max} はそれより端部側と比較して若干小さくなっていること、 $x = 45 \text{ mm} \sim 105 \text{ mm}$ 付近ではほぼ一定の τ_{max} が生じること等が分かる。 $x = 120 \text{ mm}$ よりも大きい領域において τ_{max} が小さいのは、破壊直前における付着応力 τ の分布を計測できていないためである。なお、疲労破壊した他の試験体の各 x 軸方向の位置における τ_{max} は、载荷した P_{max} の小さな試験体ほど到達する τ_{max} も小さいまま、すなわち十分な付着性能を発揮しないまま破壊に至る傾向が見られた。

図-9 に疲労破壊しなかった試験体C-1-8 (直交方向CFS有り、貼付間隔75 mm、太縦線で示す) の各 x 軸方向の位置において到達した τ_{max} の分布を示す。同図より、付着応力 τ のピークは直交方向CFS貼付位置に挟まれた領域において生じていることが分かる。なお、直交方向CFSを狭い間隔で貼付した試験体の場合、その貼付領域での τ_{max} は比較的一様分布に近かった。

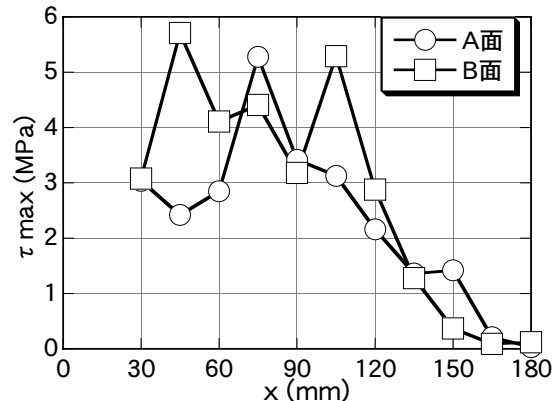


図-8 最大付着応力度 τ_{max} 分布 (試験体C-0-1の場合)

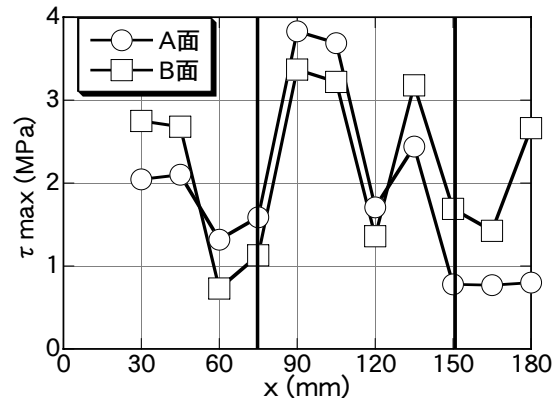


図-9 最大付着応力度 τ_{max} 分布 (試験体C-1-8の場合)

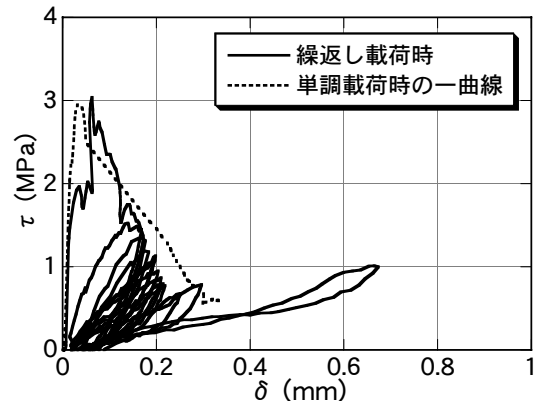
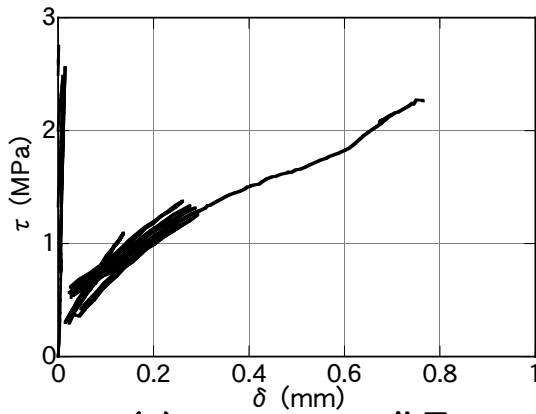


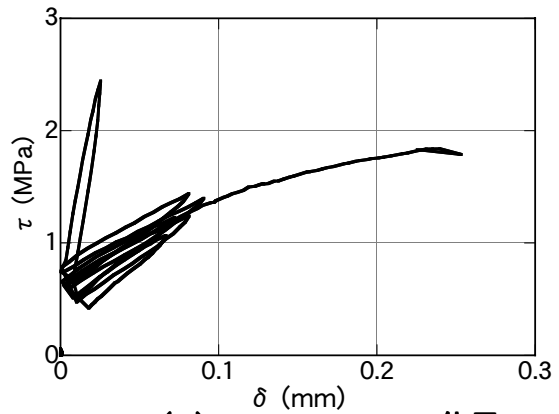
図-10 付着応力度 τ - 相対変位 δ 関係の推移 (試験体C-0-1, $X=30 \text{ mm}$ の場合)

3.6 局部付着応力度 τ - 相対変位 δ 関係

図-10 に疲労破壊した試験体C-0-1 (直交方向CFS無し) の $x = 30 \text{ mm}$ の位置について、局部付着応力度 τ - 相対変位 δ 関係の推移を示す。同図より、荷重 P の繰返しに伴い付着劣化が進行し、 $\tau - \delta$ 関係は次第に扁平な形状へと移行することが分かる。また、巨視的には $\tau - \delta$ 関係の包絡線は単調载荷時におけるものとほぼ一致し、かつ繰返し载荷時の挙動は原点指向曲線としてモデル化可能であると考えられる。



(a) $x = 30$ mmの位置



(b) $x = 135$ mmの位置

図-11 付着応力度 τ 分布の推移 (試験体C-1-8の場合)

図-11(a), (b)に疲労破壊しなかった試験体C-1-8(直交方向CFS有り)の $x = 30$ mmおよび135 mmの位置について、 $\tau - \delta$ 関係の推移を示す。なお、疲労破壊した試験体C-1-7(直交方向CFS有り)の $\tau - \delta$ 関係も、全体的には図-11の $\tau - \delta$ 関係とほぼ同様の傾向を示した。図(a)より、 $x = 30$ mmの位置においては、Pの繰返しに伴って $\tau - \delta$ 関係は次第に扁平な形状へと移行するが、そのうちに一つの曲線に収束すること、および200万回の繰返しの後の単調荷時にはこの収束曲線に沿って τ は増加すること等が分かる。

図(b)より、 $x = 135$ mmの位置においても図(a)と同様の傾向を示すが、付着劣化の度合いが小さいため、同じ τ での δ が小さいこと等がわかる。

なお、直交方向CFS無しの試験体では、疲労破壊したか否かに関わらず τ のピークは $\delta = 0.1$ mm弱の付近に生じ(図-10参照)、この値は既往の研究³⁾とほぼ一致するものであった。一方、直交方向CFS有りの試験体では、 τ のピークは0.1 mmよりも大きな δ で生じた(図-11参照)。

6. 結論

- (1) 繰返し引張力を受ける炭素繊維シート補強両引試験体について、その疲労寿命への最小引張力、引張力振幅の影響は、鋼材等で観察されるものと定性的には同じである。
- (2) 幅の狭い炭素繊維シートを試験体軸直交方向に貼付することの疲労寿命への影響は、繰返

し荷時にはそれほど大きくはない。

- (3) 試験体軸直交方向の炭素繊維シートの無い場合、引張力の繰返しに伴い局部付着応力度-相対変位関係は次第に扁平な形状へと移行し、一方、直交方向シートの有る場合にはその移行速度が緩やかである。

謝辞

本研究に使用した炭素繊維シートおよびMM A樹脂は株式会社菱光よりご提供頂きました。ここに、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書(2)，日本コンクリート工学協会，1998.3
- 2) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，コンクリートライブラリー101，土木学会，2000
- 3) 佐藤靖彦，浅野靖幸，上田多門：炭素繊維シートの付着機構に関する基礎研究，土木学会論文報告集，No.648/V-47，pp.71-78，2002
- 4) 酒井芳文ほか：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.2，pp.1445-1450，1996
- 5) 森脇 渉ほか：炭素繊維シートの付着疲労性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.3，pp.271-276，2000