

論文

[2145] 片引き試験による連続繊維補強材の局所付着応力-すべり関係

菅 哲治*1・島 弘*2・本間雅人*3

1. はじめに

連続繊維補強材をコンクリート構造物へ適用する場合、鋼材の場合と同様にコンクリートとの付着特性について研究する必要がある。連続繊維補強材の付着特性に関する研究としては、ほとんどが定着長の短い付着強度試験であり[1]、この付着試験では、ひずみが十分大きくない状態で補強材が引き抜ける。しかし、連続繊維補強材は、一般にヤング係数が小さいために、ひずみおよびすべり量が大きくなるので、部材中の挙動に近くするためには、ひずみおよびすべり量が多い時の付着応力で付着特性を判断する必要があるときが多いと考えられる。

この点についての既往の研究としては、部材実験に近い形での付着試験から定着長の相違が付着強度に与える影響[2]あるいは定着長の異なる引抜き試験におけるひずみ分布の測定による局所付着応力-すべり関係を求めたものもある[3]が、種類の異なる補強材について十分に大きいひずみとなる状態で局所付着応力-すべり関係を調査したものはない。

そこで本研究では、定着長の十分長い片引き試験を行い、連続繊維補強材のひずみ分布から局所付着応力-すべり関係を求めた。連続繊維補強材は、代表的なものとして組紐状アラミド繊維補強材、より線状炭素繊維補強材およびその比較用としてPC鋼より線を取り上げ、局所付着応力-すべり関係に対するコンクリート強度と補強材径の影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験条件

実験条件を表-1に示す。各試験材において、ひずみおよびすべり量が多いときの付着特性を調べるために、定着長を十分長くし、付着応力-すべり関係に及ぼすコンクリート強度の影響を調べた。また、アラミド繊維においては、補強材径の影響も調べた。

2.2 使用材料

試験材は、写真-1に示すように、連続繊維補強材としては、公称径12, 14, 16mmのアラミド繊維(組紐状)、公称径12.5mmの炭素繊維(より線状)、比較用として公称径15.2mmのPC鋼より線(SWPR7A)を使用した。各々の試験材の諸性質を表-2に示す。また、局所付着応力-すべり関係を求める解析における弾性係数は実測値(3本の試験結果の平均)を、径は公称値を用いた。コンクリートには、付着特性に及ぼすブリージングの影響をなくすために、ノンブリージング用混和材と高性能減水剤を併用し、ブリージングをなくしたものを用いた。粗骨材の最大寸法は25mmで、目標コンクリート圧縮強度を40, 60, 80MPaとした。

表-1 実験条件

| 供試体番号 (No.) | 試験材種類 | 公称径 (mm) | コンクリート強度 (MPa) | 定着長 (D: 公称径) |
|-------------|--------|----------|----------------|--------------|
| 1 | アラミド繊維 | 14.0 | 84 | 80D |
| 2 | | | 56 | |
| 3 | | | 40 | |
| 4 | | 16.0 | 56 | |
| 5 | | 12.0 | | |
| 6 | 炭素繊維 | 12.5 | 84 | 80D |
| 7 | | | 56 | |
| 8 | | | 38 | |
| 9 | PC鋼材 | 15.2 | 84 | 100D |
| 10 | | | 54 | |
| 11 | | | 40 | |

*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 徳島大学助教授 工学部建設工学科, 工博 (正会員)

*3 日本コンクリート工業(株)研究所研究員, 工修 (正会員)

2.3 供試体

供試体は、図-1に示すように、断面が30×30cmの直方体コンクリートブロック鉛直方向中央に、試験材を埋め込んだもので、定着長は、連続繊維の破断荷重時およびPC鋼材の降伏荷重時においても自由端ですべりが生じないように、連続繊維補強材で80D（D：公称直径）、PC鋼材で100Dと十分長くした。荷重端付近でのコンクリートの拘束条件の違いの影響をなくすために、直径20mmのシーすを用いて10cmの非定着部を設けた。

試験材の軸方向のひずみ分布を測定するために、非定着部に1カ所、定着部には、10D間隔で、表裏に長さ2mmのひずみゲージを貼付した。

2.4 荷重方法

連続繊維補強材の荷重端には、原田ら[4]の方法による静的破砕剤を用いた定着用グリップを固定して、図-1に矢印で示すような反力でセンターホール型ジャッキを用いて静的引抜き荷重を行った。荷重速度はひずみで約100μ/minとし、保証破断強度の約9割まで加力した。

2.5 解析方法

各荷重段階における試験材の軸方向のひずみ分布は、各測定点において求められる2次曲線（その測定点と両隣の3測点を結ぶもの）を連ねることにより決定した。任意の点における局所付着応力およびすべり量は、それぞれその点におけるひずみ分布曲線の傾きおよびすべりがない点からその点までの試験材のひずみの積分から求められる[5]。

3. 実験結果および考察

3.1 ひずみ分布

コンクリート強度が約55MPaであるアラミド繊維（供試体No.2）、炭素繊維（供試体No.7）、PC鋼材（供試体No.10）のひずみ分布をそれぞれ図-2、図-3、図-4に示す。各々の試験体において荷重端近傍を除いては、任意の同じひずみ量に対するひずみ分布曲線の傾きがほぼ等しい。つまり、どのひずみ分布曲線も同形で、試験材軸方向に平行移動すると重なる。このことから、荷重端近傍を除くと試験材の位置によらず同一の付着応力-すべり関係が成立することになる。

また、各試験材のひずみ分布曲線を比較すると、炭素繊維とPC鋼材は同様な形をしており、付着が伝達され始めるとひずみが小さいときにひずみが急増する。これに対しアラミド繊維は、ひずみが小さいときのひずみ増加が少なく、ねじふし鉄筋[6]のものと同様の形である。ひずみ分布曲線の形に違いが見られたのは、本実験の範囲内では、表面形状の違いの影響であり、組紐状のものより線状のものでは付着機構が異なるためと考えられる。

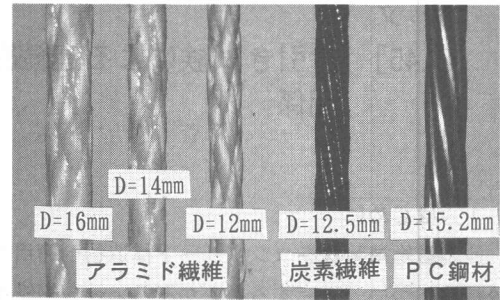


写真-1 試験材

表-2 試験材の諸性質

| 試験材 | 表面形状 | 公称径 (mm) | 公称断面積 (mm ²) | 公称弾性係数 (GPa) | 保証破断強度 (MPa) |
|--------|--------|----------|--------------------------|--------------|--------------|
| アラミド繊維 | 組紐状 | 16.0 | 200.0 | 65 (68) | 1254 |
| | | 14.0 | 150.0 | | |
| | | 12.0 | 100.0 | | |
| 炭素繊維 | 7本より線状 | 12.5 | 76.0 | 137 (139) | 1862 |
| PC鋼材 | 7本より線状 | 15.2 | 138.7 | (196) | - |

*()内は、実測値より求めたもの

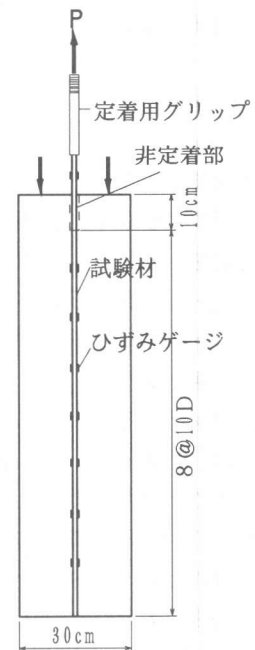


図-1 供試体

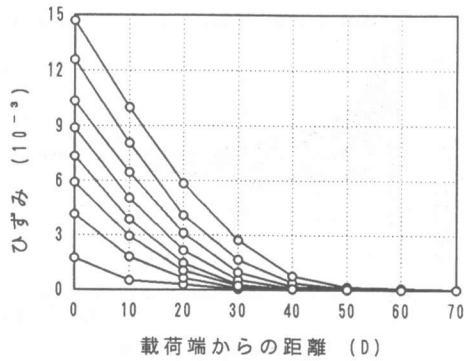


図-2 アラミド繊維のひずみ分布

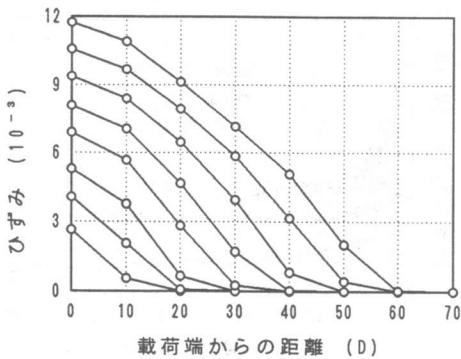


図-3 炭素繊維のひずみ分布

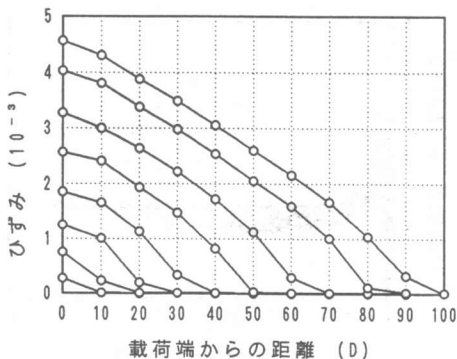


図-4 PC鋼材のひずみ分布

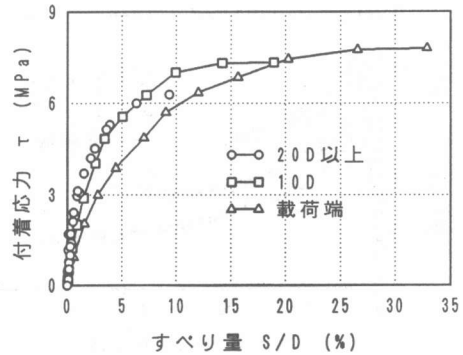


図-5 τ -S関係(アラミド繊維, $f'c=84\text{MPa}$)

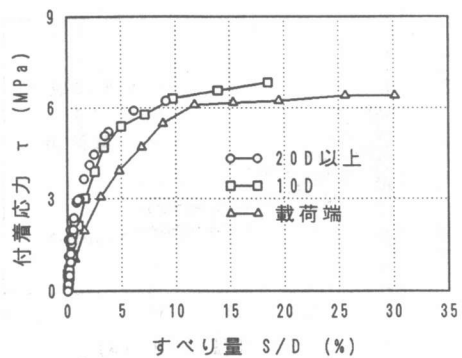


図-6 τ -S関係(アラミド繊維, $f'c=56\text{MPa}$)

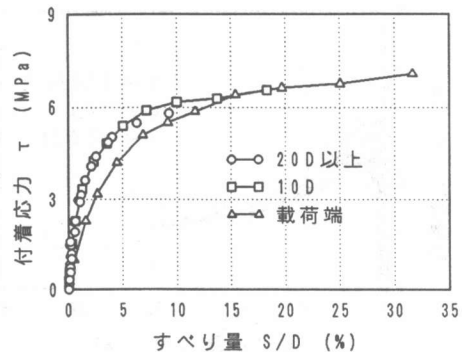


図-7 τ -S関係(アラミド繊維, $f'c=40\text{MPa}$)

3.2 付着応力-すべり関係 (τ -s 関係)

(1) 組紐状アラミド繊維

供試体No.1, No.2, No.3の τ -s関係を図-5, 図-6, 図-7に示す。すべり量は、補強材径の影響を除くために実すべり量を補強材径で除して正規化したもので表している[6]。すべり量の増加に伴い τ が増しており、最大付着応力(τ_{max})時のすべり量が、かなり大きいことがわかる。通常の異形鉄筋の弾性範囲では、最大すべり量が鉄筋径の1~2%程度であるので、アラミド繊維では1オーダー以上の違いがある。 τ -s関係に及ぼす位置の影響としては、非定着部を設けたにもかかわらず載荷端では τ が小さくなっている。載荷端から10D以上の位置では、前述のひずみ分布の考察で述べたように、位置によらず同じ関係となっている。

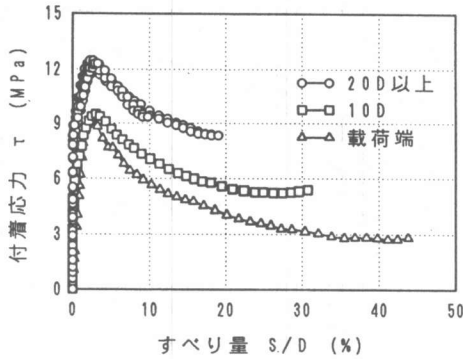


図-8 τ -S関係(炭素繊維, $f'c=84\text{MPa}$)

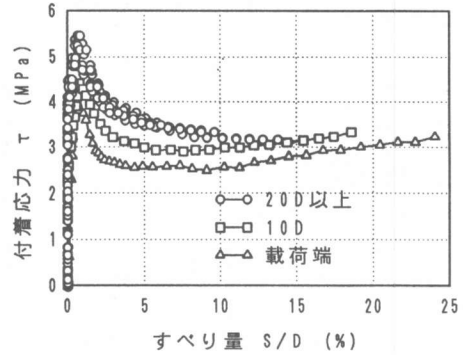


図-11 τ -S関係(PC鋼材, $f'c=84\text{MPa}$)

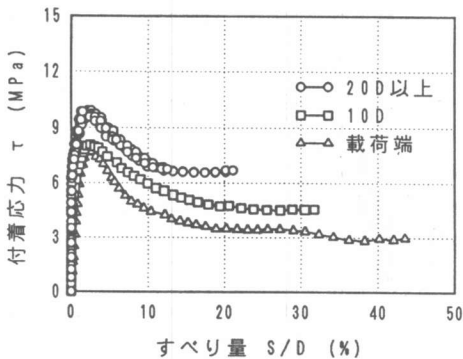


図-9 τ -S関係(炭素繊維, $f'c=56\text{MPa}$)

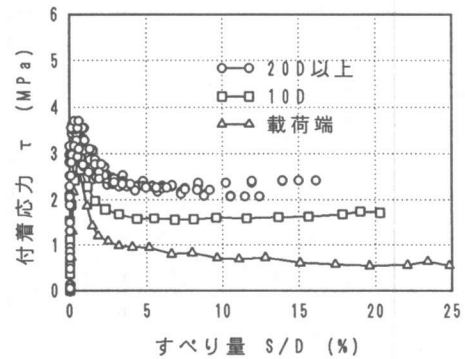


図-12 τ -S関係(PC鋼材, $f'c=54\text{MPa}$)

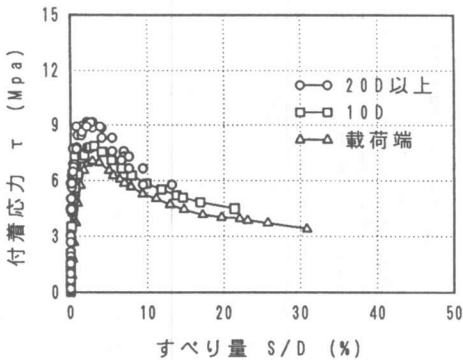


図-10 τ -S関係(炭素繊維, $f'c=38\text{MPa}$)

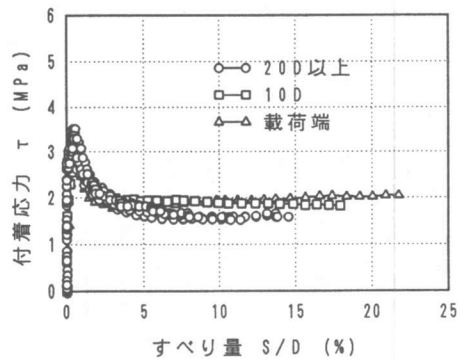


図-13 τ -S関係(PC鋼材, $f'c=40\text{MPa}$)

(2) より線状炭素繊維

供試体No.6, No.7, No.8の τ -s関係を図-8, 図-9, 図-10に示す。すべり量が3%程度のときに τ_{max} に達した後、すべり量の増加に伴い τ が低下している。また、低下の度合いは、すべり量の増加とともに小さくなり、すべり量が大いときにはすべり量に対して τ が一定の状態となる傾向がみられる。 τ -s関係に及ぼす位置の影響としては、 τ が低下する範囲がアラミド繊維よりも長く、載荷端および載荷端から10Dの位置で τ が小さくなっている。載荷端から20D以上の位置では位置によらず同じ関係となっている。

(3) PC鋼より線

供試体No.9, No.10, No.11の τ -s関係をそれぞれ図-11, 図-12, 図-13に示す。炭素繊維と同

様に、 τ_{max} 到達後に τ が低下し、 τ が一定ですべり量が増加する。また、炭素繊維に比べて、 τ_{max} 到達時のすべり量が小さい。これは、炭素繊維に較べてヤング係数が大きいためと考えられる。 $\tau-s$ 関係に及ぼす位置の影響としては、炭素繊維と同様に、載荷端から20D以上の位置では位置によらず同じ関係となっている。

(4) まとめ

以上の付着応力-すべり関係を異形鉄筋のものと比較すると、最大付着応力については、鉄筋ではコンクリート強度が55MPaのとき最大付着応力が13MPa程度となる[6]ことからすると、各試験材とも最大付着応力はやや小さい。他の部分については、鉄筋に較べてすべり量が極めて大きいため、また表面形状も異なるために、連続繊維補強材と鉄筋の付着応力-すべり関係を単純に比較することはできない。また、各供試体において非定着部を設けたにもかかわらず載荷端付近の影響が生じたので、いずれの試験材に対しても解析では載荷端から20D以上の位置を対象として以降の検討を進めた。

3.3 コンクリート強度 ($f'c$) の影響

(1) 既往の研究

各試験材において、 $f'c$ が $\tau-s$ 関係に与える影響を、あるすべり量での τ を比較することによって検討した。ねじふし鉄筋[5]の場合は最大付着応力が $f'c$ の2/3乗に比例、ACI[7]では、1/2乗に比例するとされているため、本研究においても、 $f'c$ の n 次関数で、 τ に及ぼす影響を表した。

(2) 組紐状アラミド繊維

すべり量が2.5%と5%における、 τ と $f'c$ の関係を、図-14に示す。すべり量が大きくなると、若干 $f'c$ の影響が現れるが、工学的には、ほとんど影響がないと考えられる。あえて数学的に影響を計算するとすれば、表-3に示すようなものとなる。

(3) より線状炭素繊維

すべり量が3% (τ_{max} 時)と10% (τ_{max} 後)における τ と $f'c$ の関係を図-15に示す。すべり量に関係なく、 τ は $f'c$ の1/2乗から2/3乗程度に比例していることがわかる。 $f'c$ の1/2乗あるいは2/3乗に比例するとしたときの関係式は表-3に示すものとなる。この図から、 $f'c$ にかかわらず、 τ_{max} 後 ($S/D=10\%$)における τ は、 τ_{max} に対して3割程度低下していることがわかる。

表-3 $\tau-s$ 関係式

| 種類 | 条件 | S/D(%) | τ (MPa) | |
|--------|----------------|--------|---------------------|--------------------|
| アラミド繊維 | τ_{max} 前 | 2.5 | $3.8 f'c^{(1/2.5)}$ | |
| | τ_{max} 後 | 5.0 | $3.3 f'c^{(2/1.3)}$ | |
| 炭素繊維 | τ_{max} 時 | 3.0 | $0.7 f'c^{(2/3)}$ | $1.4 f'c^{(1/2)}$ |
| | τ 一定時 | 10.0 | $0.5 f'c^{(2/3)}$ | $1.0 f'c^{(1/2)}$ |
| PC鋼材 | τ_{max} 時 | 1.0 | $0.28 f'c^{(2/3)}$ | $0.54 f'c^{(1/2)}$ |
| | τ 一定時 | 10.0 | $0.14 f'c^{(2/3)}$ | $0.28 f'c^{(1/2)}$ |

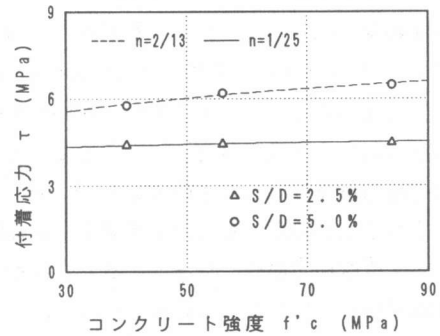


図-14 $\tau-f'c$ 関係(アラミド繊維)

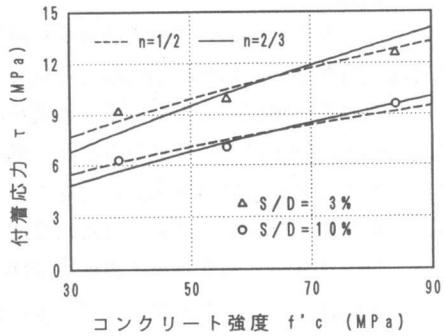


図-15 $\tau-f'c$ 関係(炭素繊維)

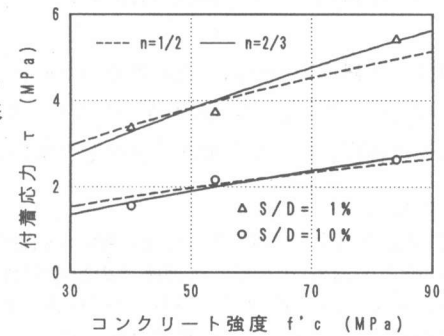


図-16 $\tau-f'c$ 関係(PC鋼材)

(4) P C鋼より線

すべり量が1% (τ_{max} 時)と10% (τ_{max} 後)における τ と $f'c$ の関係を図-16に示す。すべり量に関係なく、 τ は $f'c$ の2/3乗程度に比例する結果となっている。 $f'c$ の1/2乗あるいは2/3乗に比例するとしたときの関係式は表-3に示すものとなる。また、この図から、 $f'c$ にかかわらず、 τ_{max} 後 ($S/D=10\%$)における τ は、 τ_{max} に対して5割程度低下していることがわかり、炭素繊維の場合よりも低下の度合いは大きい。

3.4 補強材径の影響

アラミド繊維において、補強材径が $\tau-s$ 関係に及ぼす影響を調べるために、公称径が12, 14, 16mmのものについて、 $f'c$ が一定のもとで実験を行った結果について検討する。ここまで検討に用いたすべり量は、鉄筋に対する既往の研究[5]を参考にして、実すべり量を補強材径で除したもので表した。図-17は、同様にすべり量を整理したものを示すが、補強材径にかかわらずほぼ同じ曲線となっている。すなわち、すべり量は補強材径に比例しているといえる。

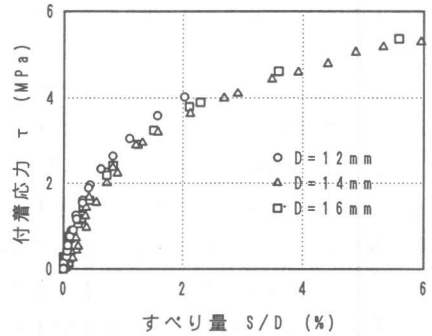


図-17 $\tau-S$ 関係 ($D=12, 14, 16\text{mm}$)

4. 結論

(1) 定着長が十分長い片引き試験から求められる連続繊維補強材の局所付着応力-すべり関係は、載荷端近傍を除いて補強材軸に沿った位置に関わらず同じである。

(2) 連続繊維補強材の集束方法(組紐状あるいはより線状)の違いにより、局所付着応力-すべり関係の形に大きな違いが見られた。組紐状のアラミド繊維においては鉄筋と同様の曲線形であり、すべり量とともに付着応力が大きくなるが、より線状の炭素繊維とP C鋼線においては最大付着応力発生後に付着応力が低下した後ほぼ一定となる。

(3) コンクリート強度が連続繊維補強材の付着応力-すべり関係に及ぼす影響としては、組紐状アラミド繊維ではほとんど見られず、より線状の炭素繊維とP C鋼線においては付着応力はコンクリート強度の1/2乗から2/3乗程度に比例する。

(4) 組紐状アラミド繊維の付着応力-すべり関係において、すべり量は補強材径に比例する。

謝辞：本研究の一部は、文部省の科学研究費補助金(総合研究(A)，課題番号04302040，代表者：角田與史雄 北海道大学教授)を受けて行ったものである。また、アラミド繊維補強材は三井建設、炭素繊維補強材は東京製綱から提供して頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1]連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用，コンクリートイテラ-No.72，土木学会，pp.56-65，1992.4.
- [2]町田・楨谷・入澤：新補強材の付着特性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.13，No.2，pp.827-830，1991. [3]本間・丸山・榎本・島，CFCCの付着応力-すべり関係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.13，No.2，pp.823-826，1991. [4]原田・山崎・出光：静的破砕剤を用いたFRP緊張材の定着方法，プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.251-256，1990.10. [5]山尾・周・二羽：付着応力-すべり関係に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No.343，pp.219-228，1984.3. [6]島・周・岡村：マシナブルなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係，土木学会論文集，No.378/V-6，pp.165-174，1987.2. [7]Building Code Requirements for Reinforced Concrete，ACI(318-77).