FRPプレートを緊張材に用いたPC補強工法に関する研究

関島謙蔵
(技術研究所)
木暮明仁
(長岡技術科学大学大学院)
鈴木秀門
(長岡技術科学大学大学院)
大塚靖
(技術研究所)

§1. はじめに

近年，炭素繊維，アラミド繊維やガラス繊維を用いた連続繊維強化複合材（FRP）は，高耐久性，高強度，軽量等の特長が着目され，鉄筋代替の補強材として，あるいはPC鋼材代替の緊張材としての利用に関する研究・開発が活発に行われている．FRP補強材の形状は棒状，格子状，および矩形断面を有するもの等があり，管理の行き届いた工場で成形されている．これらの補強材は，新設のコンクリート構造物への適用例がほとんどであり，外ケーブル方式のPCはりへの適用[1]を除くと，既設構造物の補修・補強を目指した研究・開発は極めて少ない．

一方，煙突や橋脚の耐震補強のように炭素繊維ストランドを巻き付けたり，プリプレグの炭素繊維シートを接着する工法は，補修・補強工法として有望であり，特に前者は実績も多い[2),3)]．ただし，これらの補強材は現場で成形するので，工場での成形品と比べて品質管理やハンドリングに関しては，注意を払う必要があると思われる．

ところで，変状を生じた道路橋床版等の補強工法として，従来から鋼板接着工法が採用されているが，適切な配慮を怠った場合には腐食等の再損傷を生じた例があると言われている[4)]．最近，これに代わってFRPプレートを接着する工法も開発され，採用されているが，一般にFRPは鋼材よりも弾性係数が低いので，単に接着しただけではその補強効果は小さいと考えられる[5)]．

そこで，FRPプレートを緊張材として利用し，コンクリート部材の下面に貼り付けてプレストレスを導入すれば，補強効果が向上すると予想されるので，既設のコンクリート構造物の補強工法として有望である．筆者らは本工法の開発を進めており，実験室レベルにおける緊張・定着装置を試作し，これを用いて製作したPCはりの力学的特性を調べるために曲げ試験を行った．本報告では，この工法および実験結果の概要について述べる[6),7)]．

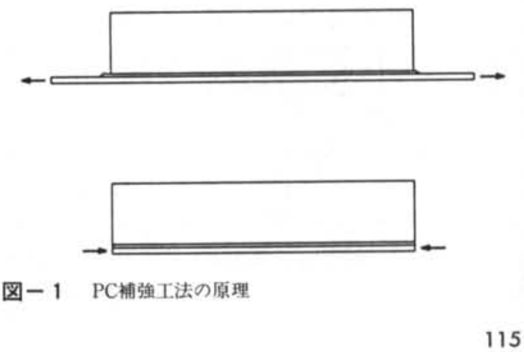
§2. 工法の概要

FRPプレートを緊張材に用いたPC補強工法の原理は，以下の通りである（図－1参照）．

①FRPプレートを緊張して，接着剤を塗布する．
②FRPプレートをコンクリート部材の下面に貼り付ける．
③接着剤が硬化した後にFRPプレートの端部を切断し，コンクリート部材に圧縮力（プレストレス）を導入する．

次に，本工法の利点をまとめると，以下のようになる．

①FRPプレートを単なる補強材としてではなく緊



図－1　PC補強工法の原理

張材として用いるので，補強効果が高い．

②FRPプレートは鋼材よりも弾性係数が低いので，コンクリートのクリープや乾燥収縮によるプレストレスの損失が小さい．

③FRPプレートは耐食性に優れ，しかも軽量である．

④FRPプレートを貼り付けた面からコンクリート内部への水分や塩分の浸透が防止される．

⑤従来のFRP緊張材は円形断面を有する棒状のものがほとんどであり，表面積が小さいために緊張・定着するのが難しいという欠点があったが，FRPプレートは表面積が大きいので容易に緊張できる．

§3．FRPプレートの特性

3.1 仕様

実験に使用したFRPプレートは，幅100mm，厚さ3mmの寸法で，内部はガラス繊維ロービング，表層部はガラス繊維のコンティニュアスストランドマット（CSM）およびヤーンクロスの5層構造から成り，不飽和ポリエステル樹脂に含浸させて，引き抜き成形したものである（**図－2**参照）．

3.2 引張試験

3.2.1 試験片

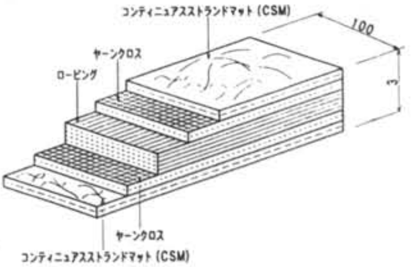
試験片の形状を**図－3**に示す．FRPプレートの長さは1mとし，両端部を挟むように厚さ5mmのアルミ板をエポキシ樹脂(A)を用いて接着した．FRPプレートの付け根部における応力の伝達が滑らかに行われるように，アルミ板を削ってテーパーを設けた．試験片の数は5体とした．なお，同図に示すような配置で，試験片の表裏に二軸ひずみゲージを貼り付けた．

3.2.2 試験方法

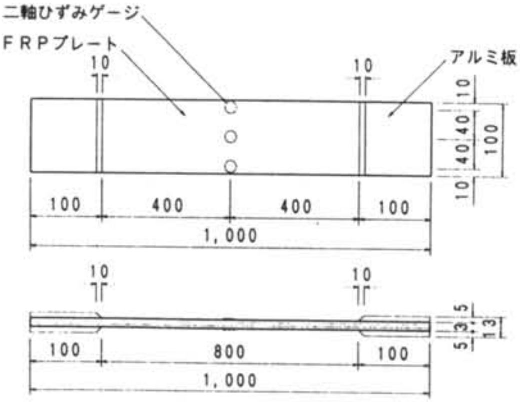
試験片の引張試験にはアムスラー試験機を使用し，両端に接着したアルミ板の部分を試験機のチャックで直接つかみ，試験部に引張力を加えた．

3.2.3 試験結果

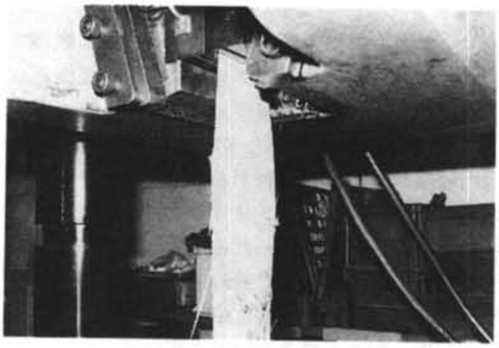
実験に使用したFRPプレートは，CSMおよびヤーンクロスから成る表層部の方が，長手方向にロービングを引き揃えた内部よりも伸び能力が小さいため，先行して破断した．試験片の破断状況を**写真－1**に示す．そのため，このような多層構造のFRPプレートは内部のロービングの引張強度を有効に活かすことはできないけれども，孔をあける等の加工が可能である利点を有している．



図－2　FRPプレートの構造



図－3　試験片の形状



写真－1　試験片の破断状況

二軸ひずみゲージを用いて測定した試験片の代表的な長手方向と横方向の荷重－ひずみ関係を**図－4**に示す．長手方向の荷重－ひずみ関係は若干上側に凸の傾向を示した．一方，横方向ひずみはほぼ直線と言えるが，ばらつきが大きかった．この原因は，表層部のCSMのガラス繊維がランダムに配向され

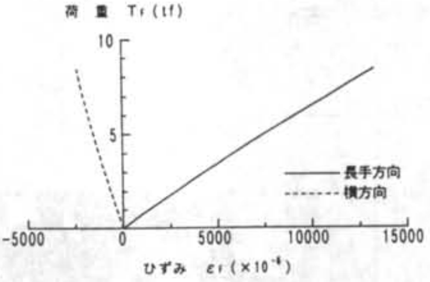
ているためと考えられる。

試験部で破断した5体の試験片の引張試験結果の平均値の一覧を**表－1**に示す。引張強度は2,880 kgf/cm²，引張強度の10%から50%の範囲の弾性係数は2.24×10^5kgf/cm²となり，ポアソン比は約0.21であった。

§4. 供試体

4.1 使用材料

FRPプレートは緊張する必要があるので，長さ3.4mのものを使用した。コンクリートは早強ポルトランドセメントを使用し，粗骨材の最大寸法は20mmとした。材令316日の圧縮強度は463kgf/cm²，弾性係数は3.19×10^5kgf/cm²であった。



図－4 FRPプレートの荷重－ひずみ関係

4.2 形状

供試体の形状を**図－5**に示す。供試体は，用心筋として2本の異形鉄筋を上部に配置し，下面にFRPプレートを接着剤で貼り付けたコンクリートはりであり，プレストレスを導入しない供試体を1体（No.1），プレストレスを導入した供試体は緊張力を変えて2体（No.2，No.3）製作した。

なお，Meierらが指摘しているように，緊張力を与えたFRPプレートを単に接着剤を用いてコンクリートに貼り付けただけでは，端部から剥離することが予想される[8]。そこで，FRPプレートの端部を鋼板を用い，ボルトで締め付け補強するという剥離防止対策を考案した。

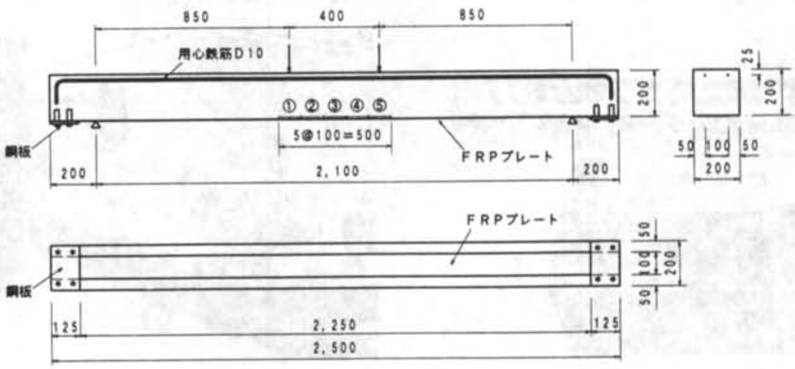
§5. 緊張およびプレストレスの導入

5.1 緊張装置

FRPプレートを緊張する装置を試作したので，**図－6**に示す。緊張装置はH形鋼－300×300（L=5.0m）の上に，ジャッキの反力台としてL形金物をボルトで締め付けた。次に，メカニカルジャッキを水平に設置して，その先にロードセルを据えた。ジャッキの押し出し力はロードセルを介して鋼板に伝わり，さらに2本の丸鋼へ引張力として伝達され，鋼板製の定着具を引張ることによってFRPプレー

断面積 A_F (cm²)	破断荷重 T_{Fu} (tf)	引張強度 σ_{Fu} (kgf/cm²)	最大ひずみ 長手方向 ε_{Fu} (%)	最大ひずみ 横方向 ε_{FL} (%)	引張剛性 E_FA_F (tf)	弾性係数 E_F (kgf/cm²)	ポアソン比 ν_F
3.00	8.65	2,880	1.34	-0.26	672	2.24×10^5	0.21

表－1 FRPプレートの引張試験結果



図－5 供試体の形状

トを緊張する（**写真－2** 参照）．

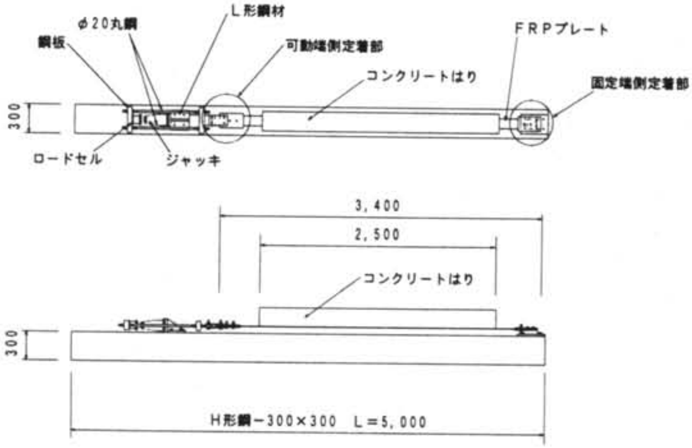
5.2 緊張およびプレストレスの導入方法

FRPプレートの緊張およびプレストレスの導入は，以下の手順で行った．

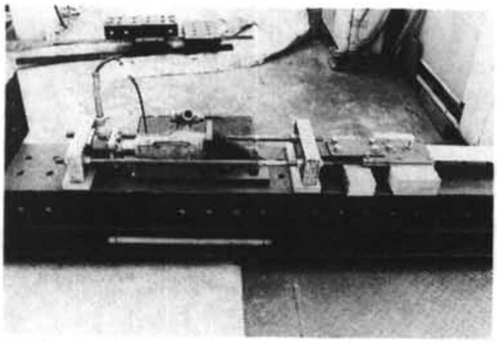
①FRPプレートの両端に，鋼板製の定着具をエポキシ樹脂(A)とボルトを併用して取り付けた（**写真－3** 参照）．

②ジャッキを用いてFRPプレートを緊張し，所定の引張力を与えた．初期緊張力は，供試体No.2が1.0tf，No.3が2.0tfとした．緊張力はすぐに若干減少するため，約3分後にもう一度所定の引張力を与えた．

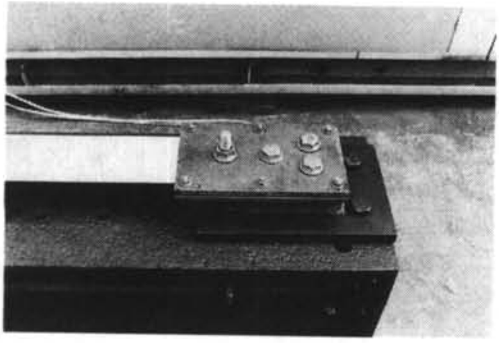
③FRPプレートの上面およびコンクリートはりの



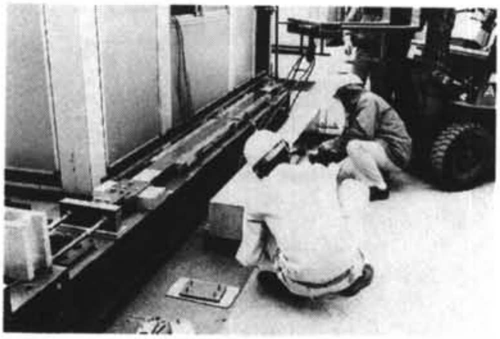
図－6 緊張装置



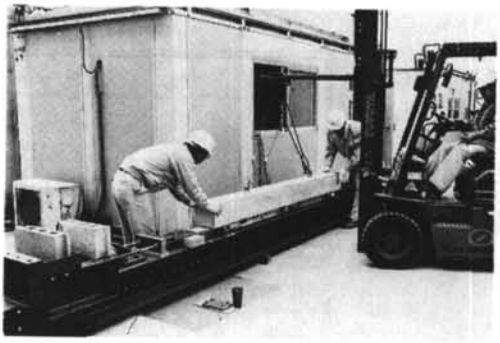
写真－2 ジャッキおよび可動端側定着部



写真－3 固定端側定着部



写真－4 接着剤の塗布



写真－5 FRPプレートの貼り付け

下面にエポキシ樹脂(B)を塗布して，FRPプレートを貼り付けた（**写真－4** および**写真－5**参照）．

④FRPプレートの端部の剥離防止対策として鋼板を用い，エポキシ樹脂(B)とボルトを併用してコンクリート下面に締め付けた．

⑤エポキシ樹脂(B)の硬化後（約5日後）に，ジャッキを緩めて除荷し，コンクリートはりにプレストレスを導入した．

⑥コンクリートはりの端部から露出しているFRPプレートを切断し，供試体を製作した．

なお，FRPプレートを緊張してからコンクリートはりにプレストレスを導入するまでの間，FRPプレートの緊張力とひずみの経時変化を測定した．

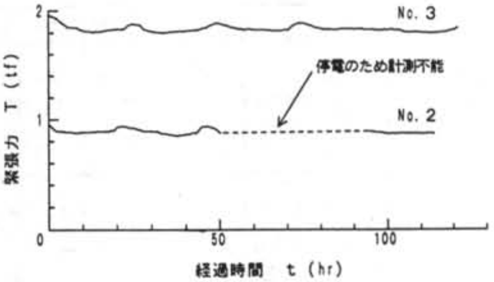
5.3 結果および考察

5.3.1 緊張力

緊張力の経時変化を**図－7**に示し，そのまとめを**表－2**に示す．FRPプレートの緊張が日中であったため，夕方になるにつれて気温が低下して，ジャッキ，ロードセルおよび各種の鋼材が収縮するので，一時的に緊張力が減少した．そして日中になると，気温の上昇とともに緊張力が再び増加した．これは24時間周期の緩やかな変化であり，除荷するまで続いた．

5.3.2 FRPプレートのひずみ

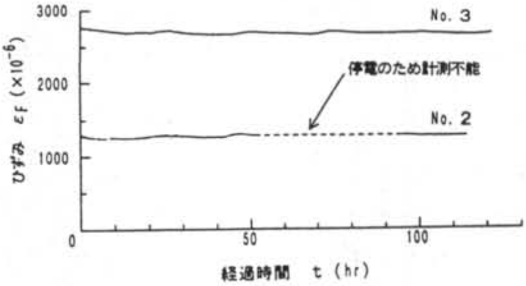
FRPプレートのひずみの経時変化を**図－8**に示し，そのまとめを**表－3**に示す．緊張力と同じ傾向にあるが，変化の大きさは小さかった．また，緊張力のみならず，ひずみも次第に減少して行くので，純粋なリラクセーションとは言えない．



図－7 緊張力の経時変化

供試体	加力直後 T_0 (tf)	24時間後 T_{24} (tf)	プレストレス導入前 T_i (tf)	T_i/T_0
No. 2	1.00	0.922	0.874	0.874
No. 3	2.00	1.878	1.854	0.927

表－2 緊張力の測定結果



図－8 FRPプレートのひずみの経時変化

供試体	加力直後 ε_0 ($\times10^{-6}$)	24時間後 ε_{24} ($\times10^{-6}$)	プレストレス導入前 ε_i ($\times10^{-6}$)	$\varepsilon_i/\varepsilon_0$
No. 2	1301	1287	1268	0.975
No. 3	2771	2712	2682	0.968

表－3 FRPプレートのひずみの測定結果

§6. 曲げ試験

6.1 試験方法

載荷方法は，**図－5**に示すようにスパン210cm，等曲げモーメント区間40cmの単純ばり対称2点載荷とした．曲げ試験においては荷重を段階的に増加させ，破壊に至るまでの荷重，変位，コンクリートおよびFRPプレートのひずみ，ひびわれ幅を測定した．なお，ひびわれ幅は，コンクリート下面から1cm上の位置における標点間距離10cmの長さの変化を，πゲージを用いて測定した．同図にπゲージの位置および番号を示す（○印）．

6.2 試験結果および考察

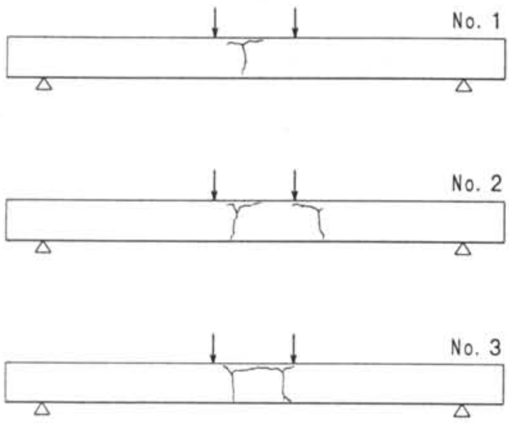
試験結果の一覧を**表－4**に示す．

6.2.1 ひびわれおよび破壊性状

各供試体のひびわれ状況を**図－9**に示す．曲げひびわれは1本または2本しか発生せず，分散性は良くなかった．荷重がさらに増加すると，コンクリートの圧縮側に配置してある用心鉄筋に沿って水平なひびわれが発生した．この時に，曲げひびわれ発生箇所から左右に向かってFRPプレートの剥離が生じていた．最終的には，すべての供試体上面のコンクリートが圧壊したが，No.3のみ左側せん断スパン

供試体	曲げひびわれ発生荷重 P_{cr} (tf)	曲げひびわれ発生引張応力 σ_{cr} (kgf/cm²)	曲げひびわれ発生応力の増加量 $\Delta\sigma_{cr}$ (kgf/cm²)	破壊荷重 P_u (tf)	破壊形式
No. 1	1.26	39.4	0	2.66	等曲げモーメント区間の圧縮側コンクリートの圧壊
No. 2	1.50	46.8	7.4	3.46	〃
No. 3	1.96	61.1	21.7	3.90	圧縮側コンクリートの圧壊に続く、せん断スパンのＦＲＰプレートの破断

表－4　曲げ試験結果



図－9　ひびわれ状況

写真－6　FRPプレートの破断（No. 3）

においてFRPプレートが破断した（**写真－6**参照）．

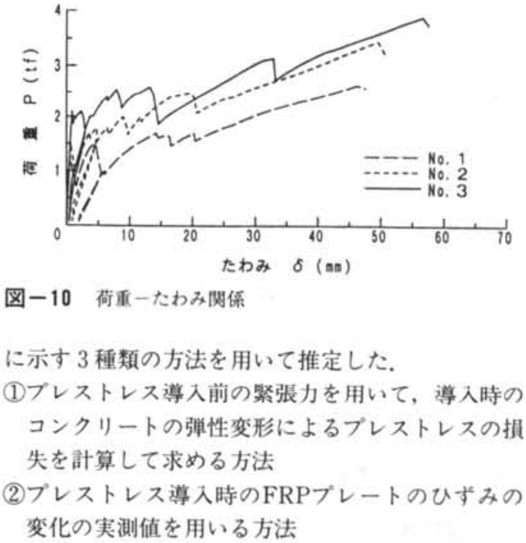
なお，FRPプレートの端部を鋼板を用い，エポキシ樹脂(B)とボルトを併用して締め付けることによって，曲げ試験中の端部からの剥離が防止され，有効な対策であることが確認された．

6.2.2　プレストレスの推定

各供試体に導入されているプレストレスを，以下

供試体	プレストレス推定量 σ_{cp}(kgf/cm²)		
	プレストレス導入前の緊張力から推定	ＦＲＰプレートのひずみの減少量から推定	曲げひびわれ発生引張応力の増加量
No. 2	8.7	7.0	7.4
No. 3	18.4	16.3	21.7

表－5　プレストレスの推定



図－10　荷重－たわみ関係

に示す３種類の方法を用いて推定した．

①プレストレス導入前の緊張力を用いて，導入時のコンクリートの弾性変形によるプレストレスの損失を計算して求める方法

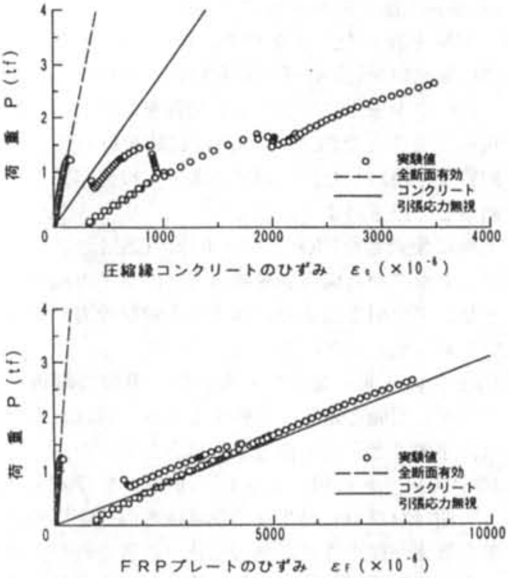
②プレストレス導入時のFRPプレートのひずみの変化の実測値を用いる方法

③プレストレスを導入していない供試体の曲げひびわれ発生引張応力からの増加量をプレストレスとする方法

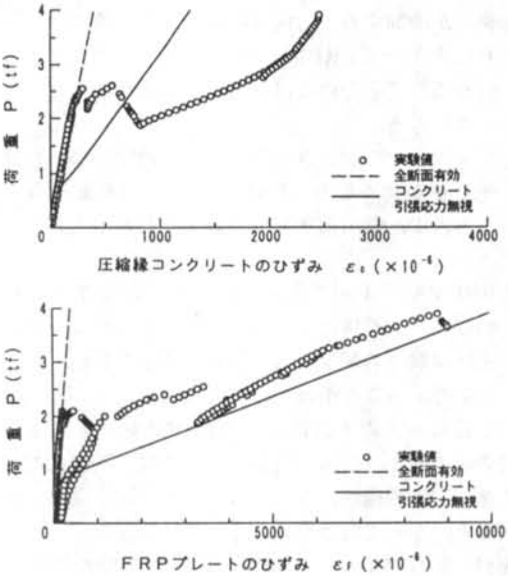
表－5に示すように，推定方法によって多少の相違はあるが，傾向は一致している．

6.2.3　荷重－たわみ関係

スパン中央のたわみと荷重の関係を**図－10**に示す．FRPプレートは鋼材と比べて弾性係数が低いので，プレストレスを導入しない場合は，曲げひびわれ発生後に中立軸がかなり上昇し，供試体の曲げ剛性が

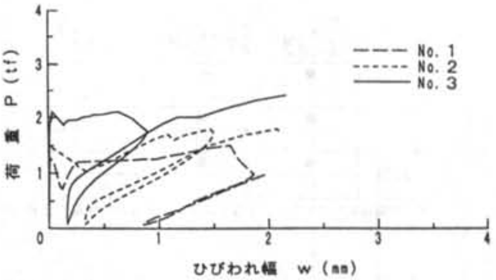


図−11(a) 荷重−ひずみ関係（No. 1）



図−11(b) 荷重−ひずみ関係（No. 3）

低下するために，たわみが急増した．ところが，プレストレスを導入すると，曲げひびわれ発生後の供試体の曲げ剛性の急激な低下が防止され，変形性状が改善された．このことは，既設構造物の補強工法として極めて補強効果が高いことを表している．なお，プレストレスが大きい供試体ほど曲げひびわれ発生荷重が高くなり，FRPプレートの剥離が遅くなるので，最大たわみが大きくなった．



図−12 荷重−ひびわれ幅関係

6.2.4 荷重−ひずみ関係

スパン中央における圧縮縁コンクリートおよびFRPプレートのひずみと荷重の関係を図−11に示す．当然のことであるが，曲げひびわれ発生前は全断面有効と仮定した弾性計算値に等しかった．

曲げひびわれ発生後は，各供試体ごとに異なった性状が見られた．すなわち，圧縮縁コンクリートのひずみは，初期の段階においては，プレストレスが大きい供試体ほどコンクリートの引張応力を無視して求めた弾性計算値よりも小さくなった．FRPプレートの剥離が生じた後は，各供試体ともに計算値よりもはるかに大きくなった．一方，FRPプレートのひずみは，プレストレスが小さい供試体では破壊に至るまで計算値とほぼ一致していた．しかし，No. 3 に関しては，FRPプレートが剥離した後は計算値よりも小さくなった．これは，あたかもアンボンドPCはりのような性状を示したためと思われる．

6.2.5 ひびわれ幅

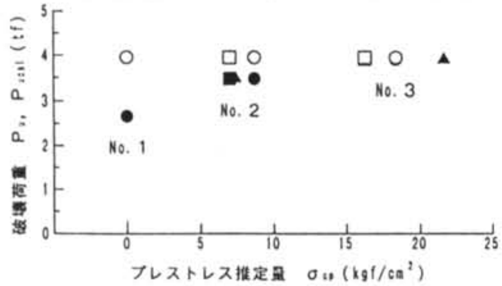
各供試体の等曲げモーメント区間に生じたひびわれ幅（No. 3 は大きい方を採用した）と荷重の関係を図−12に示す．プレストレスを導入することによって，同一荷重レベルにおけるひびわれ幅が小さくなり，また除荷した時の残留ひびわれ幅も小さくなった．

6.2.6 破壊荷重

コンクリートの応力−ひずみ関係は，土木学会のコンクリート標準示方書に従って二次放物線と直線とで表し[9]，FRPプレートについては，引張試験よって求めた引張強度と弾性係数を使用した．さらに，有効プレストレス力によるFRPプレートのひずみは，6.2.2でプレストレスを推定する時に用いた値を使用して，各供試体の破壊荷重を計算した．計算によれば，各供試体の破壊形式はFRPプレートの

供試体	プレストレスの推定方法		
	プレストレス導入前の緊張力から推定	FRPプレートのひずみの減少量から推定	曲げひびわれ発生引張応力の増加量
No. 1	●	——	——
	○	——	——
No. 2	●	■	▲
	○	□	——
No. 3	●	■	▲
	○	□	——

注）破壊荷重については、上段が実験値、下段が計算値を表す。



図－13　破壊荷重－プレストレス関係

破断による曲げ引張破壊となるため，破壊荷重はほぼ同じになった（P_{ucal}＝3.94～3.95tf）．しかし，実験ではFRPプレートの剥離が生じるために，破壊形式は等曲げモーメント区間の圧縮側コンクリートの圧壊となったため，FRPプレートが破断したNo.3を除いて，破壊荷重は計算値よりも相当小さくなった．

次に，各供試体の破壊荷重とプレストレスの関係を図－13に示す．破壊荷重の実験値はプレストレスと密接な関係があり，プレストレスが増加するほど破壊荷重も増加した．すなわち，プレストレスが大きい供試体ほど曲げひびわれ発生荷重が高くなり，FRPプレートの剥離が遅くなるので，破壊形式が曲げ引張破壊に近づくためである．

§7.　おわりに

FRPプレートを緊張材として利用し，コンクリート部材の下面に貼り付けてプレストレスを導入するPC補強工法を開発することを目的として，基礎的な実験を行った．すなわち，最初にFRPプレートの引張試験を行い，その引張特性を把握した．次に，FRPプレートの緊張・定着装置を試作し，これを用いて製作したPCはりの曲げ試験を行って，力学的特性を検討した．本研究の実験・検討結果をまとめると，以下のようになる．

①実験に使用したFRPプレートは，CSMおよびヤーンクロスから成る表層部の方が，長手方向にロービングを引き揃えた内部よりも伸び能力が小さいため，先行して破断した．

②FRPプレートを緊張する場合に，両端に鋼板をエポキシ樹脂とボルトを併用して取り付けたものは，定着具としての機能を十分有していた．

③FRPプレートを用いてプレストレスを導入すると，曲げひびわれ発生後の供試体の曲げ剛性の急激な低下が防止され，変形性状が改善された．すなわち，既設構造物の補強工法としての補強効果が高いことが確認された．

④荷重が増加すると，曲げひびわれ発生箇所から左右に向かってFRPプレートの剥離が生じた．これを防止するためには，適切な接着剤を選定する必要がある．

⑤プレストレスが大きい供試体ほど曲げひびわれ発生荷重が高くなり，FRPプレートの剥離が遅くなるので，最大荷重および最大たわみが大きくなった．

⑥FRPプレートの端部を鋼板を用い，エポキシ樹脂とボルトを併用して締め付けることによって，曲げ試験中の端部からの剥離が防止され，有効な対策であることが確認された．

今後は，この工法に適したFRPプレートおよび接着剤の選定，緊張・定着装置の改良，現場における施工方法の検討，さらにはプレキャスト部材への展開をはかって行きたいと考えている．

謝辞　FRPプレートを提供していただいた旭硝子マテックス㈱の林　耕四郎氏に感謝します．

<参考文献>

1）睦好宏史，町田篤彦：“FRPを外ケーブルに用いたPCはりの力学的性状および曲げ耐力”土木学会論文集，No.442，V-16（1992年）pp.153～159

2）木村耕三，小畠克朗，吉崎正明，野村　潤：“炭素繊維による既存煙突の耐震補強工法の開発（その1）”大林組技術研究所報，No.37（1988年）pp.73～79

3）長谷川明機，松田哲夫，東田典雅：“炭素繊維を用いたRC橋脚の耐震補強”土木技術，Vol.47，No.3（1992年）pp.43～50
4）宮川豊章：“土木コンクリート構造物の変状と補修・補強の考え方”コンクリート工学，Vol.31，No.7（1993年）pp.25～31
5）“道路橋補修便覧”日本道路協会（1979年）
6）木暮明仁，関島謙蔵，鈴木秀門，大塚　靖：“FRPプレートを緊張材に用いたPC工法の開発と曲げ試験”土木学会第49回年次学術講演会講演概要集，第5部（1994年）pp.926～927
7）関島謙蔵，木暮明仁，鈴木秀門，大塚　靖：“FRPプレートを緊張材に用いたPC補強工法の開発”コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集，コンクリート工学協会（1994年）pp.85～92
8）Mufti, A.A., Erki, M-A. and Jaeger, L.G.：Advanced Composite Materials with Application to Bridges, The Canadian Society for Civil Engineering (1991)
9）“コンクリート標準示方書　設計編（平成3年版）”土木学会（1990年）
10）関島謙蔵，二川　稔，岡村　甫：“格子状FRP緊張材を用いたプレストレストコンクリートの開発研究”コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，No.2（1988年）pp.689～694