

CFRPより線を緊張材に使用したプレテンション方式 実物非磁性梁のプレストレス伝達長測定試験および曲げ载荷試験

中田 明^{*1}・明石 兼二^{*2}・川本 幸広^{*3}

1. はじめに

最近のプレストレスコンクリート構造物の動向として、機能の多様化が求められてきている。ただ構造耐力が大きく頑丈であればよいという力学のみに支配された従来の設計思想から、景観性を重視したり、軽量化が最重点目標にあげられるなど、さまざまな要求を考慮した設計が行われるようになってきた。

このような要求に適合した構造物の建設を実現するには、従来の材料や設計・施工方法では困難な場合があるため、近年様々な技術開発が進められてきており、特に新材料の研究開発が重要な要素となってきている。

この新材料の1つであるFRP材料は、主としてPC鋼材や鉄筋の塩害対策用代替材料として、各国の研究機関において研究され、有意義な成果が発表されている。また、我が国においてもその研究開発は盛んに行われており、すでに多数の施工実績がある。

FRP材料は、高張力を有する炭素・アラミド・ガラスなどの長繊維を樹脂マトリックスで成形一体化したもので、棒状・格子状・より線状・組み紐状等、様々な種類が製造されている。この材料は、高強度であると同時に塩害などに対する耐食性に優れ、軽量、非磁性等、一般鋼材にない特性を有している。

今回、横浜防衛施設局で計画された横須賀消磁所・消磁施設整備工事において、用途上施設は低磁性構造物にする必要があり、このため磁性をほとんど有しない材料を使用してPC構造物を製作することになった。その結果、鉄筋には低磁性鋼を、緊張材には従来のPC鋼材と比べて同程度の引張力を有しコンクリートとの付着性能の良い、非磁性材料である炭素繊維系FRP(CFRPより線)を、そして骨材も低磁性のものを選別し使用した。

ここでは、FRP材料をPC鋼材代替材料として用いた場合、通常のPC部材と比較してたわみ性状や終局状

態等における力学的挙動が異なると考えられることから、各種実験を通じて部材特性を明らかにし実物の低磁性PC構造物の設計方法を考察した。

2. 使用材料の特性

主梁製作に使用したCFRPより線と低磁性鉄筋(ハイマンガ鋼)について、その材料特性を表-1に示す。

CFRPより線($\phi 12.5$)は、PC鋼より線と比べて弾性係数が小さいものの、引張強度は大きい。また、その他の特徴としては、完全弾性体で降伏点が存在しないこと、および比透磁率がほぼ1.000で非磁性材料であることがあげられる。

低磁性鉄筋は普通鉄筋とほとんど同じ性能を有しているが、降伏点強度の引張強度に対する割合が普通鉄筋のそれと比較して高く、引張強度は普通鉄筋より高い。なお、比透磁率は、1.027以下で普通鉄筋とは大きく異なる。

表-1 CFRPより線および低磁性鉄筋の材料特性

	CFRPより線 ($1 \times 7 \phi 12.5$)	低磁性鉄筋 (ハイマンガ鋼)
断面積	0.76 cm ²	1.267 cm ²
単位重量	0.151 kg/m	0.995 kg/m
降伏点強度	—	42 kgf/mm ² (412 MPa)
引張強度	191 kgf/mm ² (1 873 MPa)	86 kgf/mm ² (843 MPa)
付着強度	73.7 kgf/cm ² (7.23 MPa)	40.9 kgf/cm ² (4.17 MPa)
弾性係数	14 000 kgf/mm ² (137 292 MPa)	21 000 kgf/mm ² (205 939 MPa)
比透磁率	1.000	1.027以下

3. 構造物の概要

本工事は、磁気を測定するための設備を水中に設置することから、水中において図-1に示すPC杭の頭部に

*1 Akira NAKADA : 横浜防衛施設局 建設部土木課 課長

*2 Kenji AKASHI : 横浜防衛施設局 建設部土木課 土木第三係長

*3 Yukihiro KAWAMOTO : (株)ピー・エス 開発技術部 主任研究員

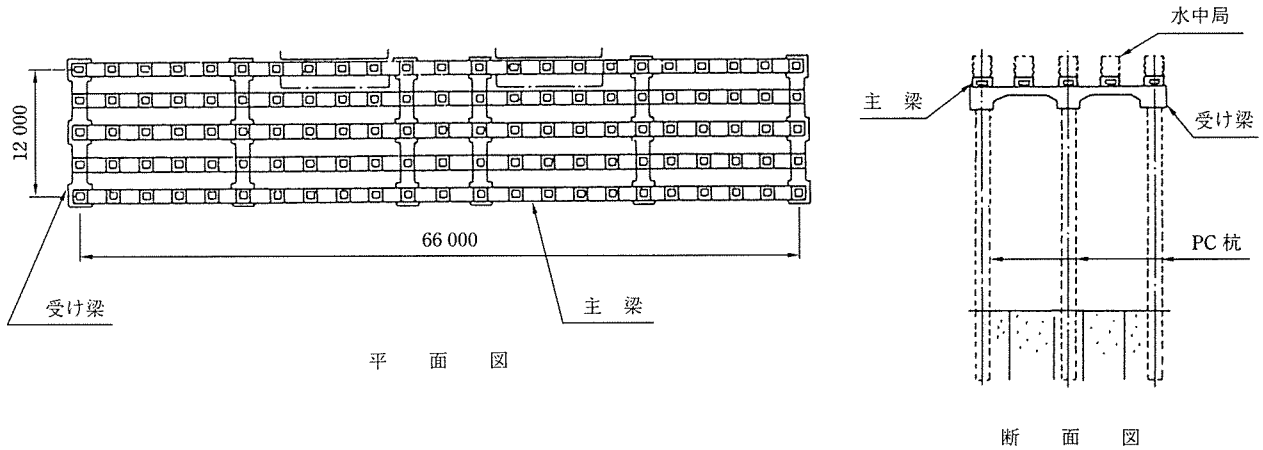


図-1 消磁施設

受け梁を据え付け、そして、その受け梁に主梁を設置後、その上部に測定設備のためのボックスを据え付けるものである。

受け梁と主梁はプレテンション方式プレキャスト PC 梁であり、ボックスは低磁性鉄筋を用いた RC プレキャストである。

4. 主梁の製作

4.1 主梁の概要

主梁は、図-2 に示す 15 m 級のもの、7.6 m 級のものの 2 種類である。主梁の構造は、図-2 に示すように CFRP より線を緊張材に使用したプレテンション方

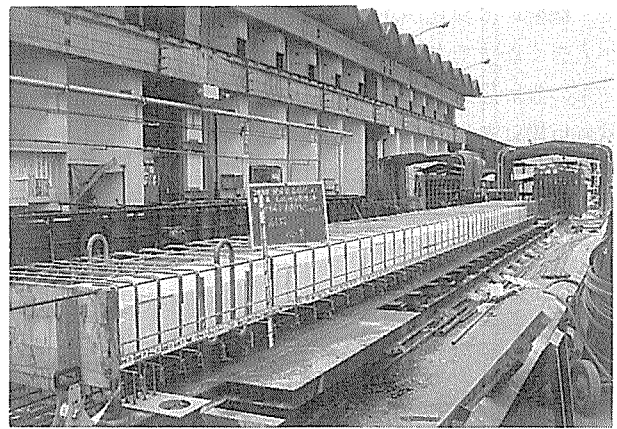
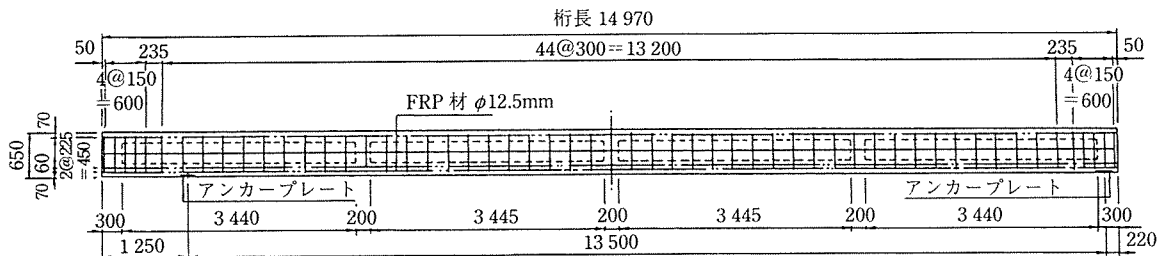
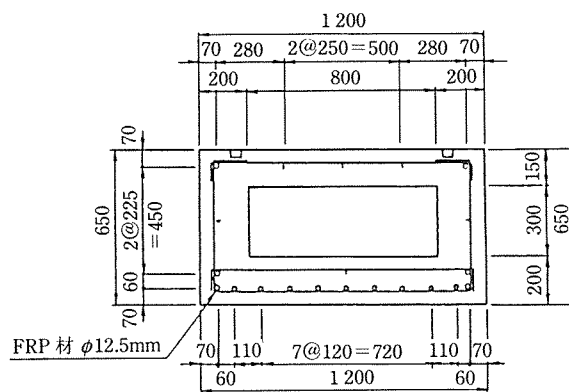


写真-1 製作状況



側面図



断面図

図-2 15 m 級の主梁の側面図および断面図

式中空断面 PC 梁とし、15 m 級の主梁の緊張材は CFRP より線、 $\phi 12.5$ を 15 本配置し、7.6 m 級のものは同じ径の CFRP より線を 8 本使用している。

本主梁は、設計荷重（自重、ボックス重量および測定設備重量）に対しひびわれを発生させない第 II 種設計法を採用した。

4.2 プレストレス伝達長測定試験

(1) 試験の目的

プレテンション方式で PC 構造物を製造する場合、最も重要な要素の一つに、プレストレスの伝達長がある。

プレストレス伝達長は、コンクリートと CFRP より線の付着強度に依存しているが、CFRP より線は、PC 鋼より線よりもかなり大きな付着強度がある。したがって、CFRP より線を緊張材に用いた場合のプレストレス伝達長は、通常の PC 鋼より線を用いるときの計算式 $L=65\phi$ （ここに、 L ：プレストレス伝達長、 ϕ ：緊張材径）よりも少なくなると推察される。また、その一方で緊張材の付着強度が大きいと、梁端部において緊張材まわりのコンクリートに割裂ひびわれが発生するおそれがある。したがって、本試験は、実際の 15 m 級主梁を用いてプレストレス伝達長を測定解析し、この構造形式における伝達長計算方法を提案すると同時に、割裂ひびわれの発生状況を調査することを目的とした。

(2) 試験方法

本試験は、図-3 の断面図に示すように、15 本の緊張材のうち、最下段の中央部と縁部、2 本の緊張材を選定し、それぞれの緊張材について図-3 の側面図に示す位

置にひずみゲージを取り付け、プレストレス導入前後における緊張材のひずみの変動状況を測定し、プレストレス伝達長を解析した。

ここで、中央部と縁部の緊張材を選定した理由は、緊張材配置位置によるプレストレス伝達長の違いの有無を確認するためである。

(3) 試験結果

表-2 に主梁の左右両端からの距離における緊張材のひずみ変化量を数値で示す。この表より、従来の方法 ($L=65\phi$) で計算したひずみ変化量よりも、実測したひずみ変化量の方が急激な減少を示しており、梁端から比較的短い距離から付着力が作用しはじめていることがわかる。また、伝達長は緊張材のひずみの変化量が引張（負の値）から圧縮（正の値）に変化する位置（梁端からの距離）をもって決定する。したがって、表-2 に見られるように、中央部・縁部とも梁端から 700 mm 付近がその変化点と考えられ、その変化点の詳細位置を直線補間によって求めると、

- 中央部緊張材左側： $L=771$ mm
- 〃 右側： $L=681$ mm となり、
- 〃 平均： $L=726$ mm となる。

また、

- 縁部緊張材左側： $L=657$ mm
- 〃 右側： $L=822$ mm であり、
- 〃 平均： $L=740$ mm となる。

緊張材の外径は、 $\phi = 12.5$ mm であるので、中央部緊張材は、

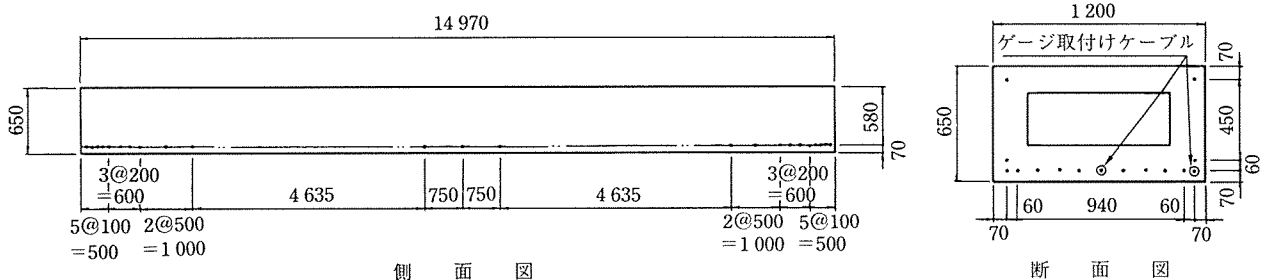


図-3 緊張材ひずみ測定位置

表-2 緊張材ひずみ変化量の測定表

中央部緊張材												
梁端からの距離 (mm)	100	200	300	400	500	700	900	1 100	1 600	2 100	6 735	7 485
計 算 値 ($\times 10^{-6}$)	-4 594	-3 566	-2 777	-2 111	-1 525	-508	0	0	0	0	0	0
左 側 測 定 値 ($\times 10^{-6}$)	-3 085	-672	-110	-44	-56	-12	22	33	58	49	10	2
右 側 測 定 値 ($\times 10^{-6}$)	-3 939	-2 200	-926	-186	-49	5	15	19	10	2	-7	-
縁部緊張材												
梁端からの距離 (mm)	100	200	300	400	500	700	900	1 100	1 600	2 100	6 735	7 485
計 算 値 ($\times 10^{-6}$)	-4 594	-3 566	-2 777	-2 111	-1 525	-508	0	0	0	0	0	0
左 側 測 定 値 ($\times 10^{-6}$)	-1 031	-900	-496	-116	-33	9	23	16	14	73	-6	-4
右 側 測 定 値 ($\times 10^{-6}$)	-3 265	-1 520	-437	-108	-45	-25	16	-9	-2	-20	-7	-

◇研究報告◇

$$L/\phi=726/12.5=58\approx 60$$

縁部緊張材は、

$$L/\phi=740/12.5=59\approx 60 \text{ となり、}$$

したがって、中央部および縁部緊張材ともプレストレス伝達長は、

$$L=60\phi$$

という式を提案することができる。

また、本主梁においては、導入時における割裂ひびわれは認められなかった。よって、図-2の主梁断面図に示すような、かぶりおよび緊張材のあきを確保し、側面図に示すような梁端部におけるスターラップ（割裂ひびわれに対する補強としても有効）を配置すれば、プレストレス導入に伴う割裂ひびわれを防止できることが実証された。

5. 曲げ載荷試験

5.1 試験の目的

本試験は、15 m 級主梁の曲げ載荷試験を実施し、主梁が計算値どおりの力学的挙動を示すかどうかを確認すると同時に、本主梁のように CFRP より線を使用した構造物においてはまだ課題の多い、ひびわれ幅およびたわみ特性を明確にすることを目的とした。

5.2 試験方法

本試験は、図-4 に示す載荷方法により、曲げひびわれ発生荷重を測定した。

その後一度除荷した後、曲げ破壊に至るまで載荷した。なお、その載荷荷重の各段階において、主梁変位、緊張材のひずみ、コンクリートひずみ、鉄筋ひずみおよび

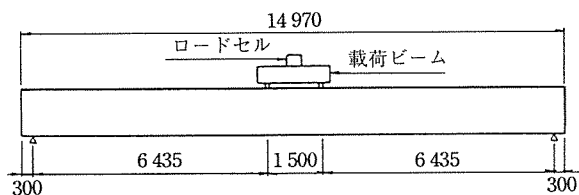


図-4 載荷荷況



写真-2 載荷荷況

ひびわれ幅を測定し、同時にひびわれ状況の調査も行った。

5.3 試験結果

(1) ひびわれ発生時の検討

ひびわれ発生時における諸数値の計算値と実測値の比較を表-3 に示す。これにより、実測値はそれぞれの計算値とよく合致していることがわかる。ひびわれ発生時における計算値は、主梁断面に対し全断面有効とした弾性理論によるもので、この手法は、現在一般の PC 構造物の設計に使用されている考え方である。本主梁においても設計荷重はひびわれ発生荷重値よりも少ないので、本工事のように緊張材に CFRP より線を用いた場合であっても、通常の PC 設計法で十分適用できることが確認された。

表-3 ひびわれ発生時諸数値の比較

項目	単位	計算値	実測値	
			平均	最大～最小
ひびわれ発生荷重	kgf	10 714	10 500	
コンクリートひずみ	上縁	($\times 10^{-6}$) 145	128	155～133
	下縁	($\times 10^{-6}$) -135	-132	-159～-113

(2) 曲げ破壊時の検討

曲げ破壊時においては、通常の PC 構造物は一般に上縁コンクリートの圧縮破壊を呈する設計となる。これは荷重の増加に従って構造物の変形が大きくなり、その結果、やがて下縁緊張材が降伏領域に入り緊張材の引張ひずみが急激に増加する。一方、上縁コンクリートひずみも、平面保持の原則により緊張材のひずみの増加に従い大きくなるが、概して緊張材が破断する前に上縁コンクリートが圧縮破壊ひずみ ($3\,500 \times 10^{-6}$) に到達し、構造物は圧壊となる。

それに対し、CFRP より線を緊張材に使用した場合は、緊張材自体に降伏点が存在せず、急激な緊張材のひずみ増加は起こらない。したがって、概して上縁コンクリートが圧縮破壊ひずみに達する前に、緊張材が破断し、構造物が破壊する。

よって、本主梁においても、緊張材の破断をもって曲げ破壊耐力とする設計法を採用している。

表-4 に、曲げ破壊時における計算値と実測値の比較

表-4 曲げ破壊時諸数値の比較

項目	単位	計算値	実測値	
			平均	最大～最小
曲げ破壊荷重	kgf	26 993	27 750	
コンクリートひずみ	上縁	($\times 10^{-6}$) 1 214	1 439	1 592～1 289
	緊張材ひずみ	($\times 10^{-6}$) 8 407	7 367	8 268～6 459

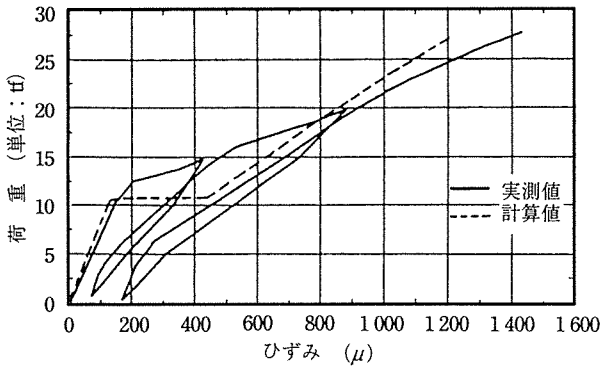


図-5 上縁コンクリートひずみ

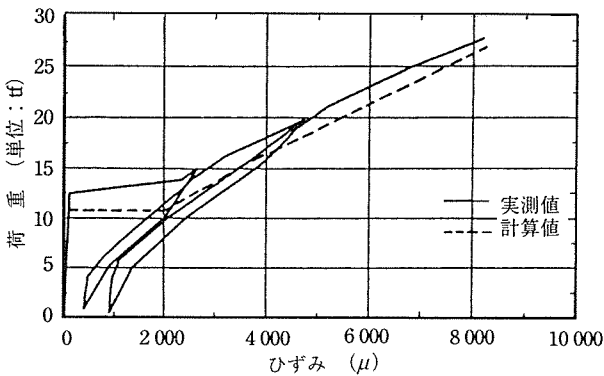


図-6 下段緊張材増加ひずみ

を、図-5 および図-6 に、載荷荷重に対する上縁コンクリートひずみと下段緊張材のひずみ変化の状況を示す。ここに、表-4 より、曲げ破壊荷重に関しては計算値と同等以上の耐力があることが確認され、図-5 と図-6 より各力学的要素においても計算値どおりに挙動することが証明された。したがって、緊張材の破断をもって曲げ破壊耐力とする設計方法でも、実構造物において十分設計できることが実証された。

(3) たわみの検討

載荷荷重による主梁たわみを算出するには、ひびわれ発生前と発生後の二つに分けて考える必要がある。

ひびわれ発生前の主梁のたわみ性状は、主梁が全断面有効として挙動するため、緊張材に CFRP より線を使用したことによる影響はない。したがって、「(1) ひびわれ発生時の検討」で述べたように、通常の PC 設計法における弾性理論に基づいた、下式により算出することができる。

$$y = \frac{P \times L}{48 \times E_c \times I} \times (3 \times L'^2 - 4 \times L^2)$$

ここに、 y : たわみ

P : 載荷荷重

L : せん断スパン

L' : 載荷点距離

E_c : コンクリートの弾性係数

I : 主梁の断面二次モーメント

一方、ひびわれ発生後の主梁たわみの挙動は、ひびわれによる剛性低下を考慮するため、上式の I を Branson 式により換算断面二次モーメント I_e に変換して下式により求めるものとした。

$$y = \frac{P \times L}{48 \times E_c \times I_e} \times (3 \times L'^2 - 4 \times L^2)$$

$$I_e = \left[\frac{M_{cr'}}{M'} \right] n \times I + \left\{ 1 - \left[\frac{M_{cr'}}{M'} \right] n \right\} \times I_{cr}$$

ここに、 I_e : 主梁の換算断面二次モーメント

$M_{cr'}$: ひびわれ発生時の曲げモーメント

M' : 載荷荷重による曲げモーメント

I_{cr} : 引張応力を受けるコンクリートを除いた断面二次モーメント

n : Branson 式の係数

この式において、一般鋼材の場合、 $n=3$ を用いるが、CFRP より線を使用する場合には、実際に即した n を選定し、本主梁のたわみを算定する式を決定する必要がある。

図-7 に示すように $n=2.5$ とした場合、計算値と実測値は非常に類似しており本主梁においては

$$n=2.5$$

を使用することにより、たわみ量を算定することとした。

また、図-7 において、PC 鋼材を用いた場合の計算たわみと比較すると、ひびわれ発生後における同一荷重時におけるたわみは、初期の段階においては相方とも同程度のたわみ量であるが、途中から PC 鋼材の方のたわみが大きくなる。その理由は、PC 鋼材を用いた主梁においては、ひびわれ幅の進展により PC 鋼材が降伏すると、PC 鋼材のひずみが急激に増加し、それと同時にコンクリート側においてもコンクリートが圧縮破壊を起こすまでひずみが増加し、その結果、たわみが大きくなる。

したがって、CFRP より線を緊張材に使用した主梁

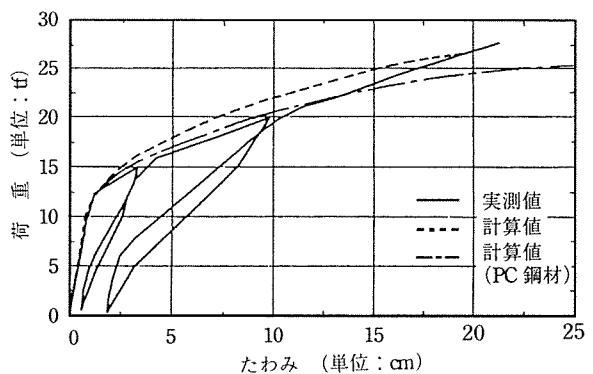


図-7 計算値と実測値のたわみ比較

◇研究報告◇

において、現設計の使用時（ひびわれ発生前）のたわみ量は通常の PC 梁と同じ値となり、ひびわれを許容した設計をする場合においても、使用時の許容ひびわれ幅を $w_a=1.0\text{ mm}$ （仮定）とした場合、図-8 に示すひびわれ幅の状況図より載荷荷重は $P=15\text{ tf}$ 付近となり、図-7 より $P=15\text{ tf}$ 付近では PC 鋼材梁と同程度のたわみ量となることがわかる。

表-5 に、ひびわれ発生時および曲げ破壊時における CFRP より線のたわみ量を示す。

表-5 ひびわれ発生時および曲げ破壊時のたわみ量
(単位：cm)

	CFRP より線	
	実測値	計算値
ひびわれ発生時	0.78	0.81
曲げ破壊時	21.43	20.38

(4) ひびわれ幅の検討

ひびわれ幅の計算値は、以下の式により算出した。

$$w = k \times \{4 \times c + 0.7 \times (C_s - \phi)\} \times \frac{\sigma_{pe}}{E_p}$$

ここに、 w ：ひびわれ幅

k ：定数

c ：かぶり

C_s ：緊張材の中心間隔

ϕ ：緊張材の外径

σ_{pe} ：緊張材の増加応力度

E_p ：緊張材の弾性係数

ここで問題となるのは k の設定である。 k は緊張材の付着に関する係数であり、一般に PC 鋼材の場合 $k=1.3$ を、異形鉄筋は $k=1.0$ を使用しているが、付着性状の良い材料は k が小さくなる ($k \geq 1.0$)。

一方、各材料を付着力の大きさで比較すると、

CFRP より線 > 異形鉄筋 > PC 鋼材¹⁷⁾

の順となり、CFRP より線は異形鉄筋よりも付着性状がよいので

$$k=1.0$$

として、計算することにした。

図-8 の、CFRP より線を使った主梁のひびわれ幅の実測値と計算値の比較より、実測値と計算値は比較的合致しているため、よって、 $k=1.0$ とすることにより、主梁のひびわれ幅をあらかじめ計算により推定することが可能である。

また、同図中の PC 鋼材を使用した梁と比較すると、PC 鋼材が降伏するまでは同一荷重のもとでのひびわれ幅は、CFRP より線を使用した梁と同程度か CFRP より線の方が $0.2 \sim 0.3\text{ mm}$ 程度大きくなるが、PC 鋼材

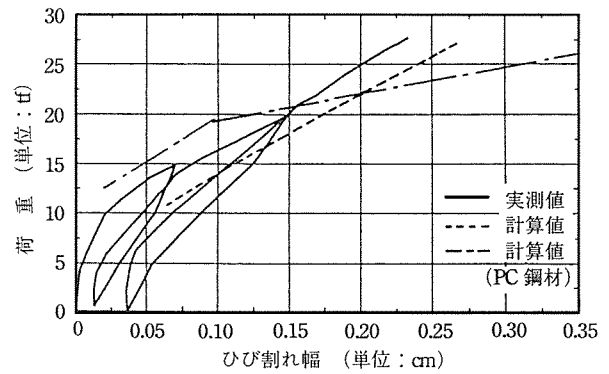


図-8 計算値と実測値のひびわれ幅の比較

の降伏後は、PC 鋼材を使用した梁のひびわれ幅が急激に増大してゆく。

表-6 に本実験における最大ひびわれ幅の値を示す。

表-6 最大ひびわれ幅
(単位：cm)

	CFRP より線	
	実測値	計算値
最大ひびわれ幅	0.24	0.27

6. 考 察

6.1 プレストレスの伝達長測定試験

CFRP より線をプレテンション方式緊張材に使用する場合、そのプレストレス伝達長は一般 PC 鋼材のそれよりも短い距離を想定できる。その値は、

$$L=60\phi$$

式で算出することができ、通常一般に用いられている構造物の緊張材配置（あき、かぶり）および鉄筋配置（スターラップ配置）をすれば緊張材位置（中央部・縁部等）にかかわらず上式が適用できる。

また、プレストレス導入に伴う主梁端部における割裂ひびわれは、端部に配置したスターラップやかぶり厚により十分防ぐことができると推察されるが、CFRP より線の緊張力が高い時あるいはコンクリート強度が小さい時等、必要に応じてスパイラル筋等により補強することが、有効であると思われる。

6.2 曲げ載荷試験

(1) ひびわれ発生時

CFRP より線を緊張材に使用した梁のひびわれ発生時の力学的特性は、PC 鋼材を用いたものと同じ挙動をする。したがって、ひびわれを許さない設計においては、通常の PC 設計法を使用して差し支えない。

(2) 曲げ破壊時

CFRP より線を緊張材に使用した梁は、一般的に緊張材の破断により破壊となり、緊張材の破断をもって構

造物の曲げ破壊とする設計ができる。

また、CFRP より線を使った梁と PC 鋼材を使った梁の曲げ破壊耐力について比較する。

表-7 に示す破壊荷重の計算値は、相方ともほとんど変わらず、PC 鋼材の代わりに CFRP より線を緊張材に用いても曲げ破壊耐力は減少しないことがわかる。

しかし、PC 鋼材を使った梁のコンクリートおよび緊

表-7 破壊モードの比較

	CFRP より線破断破壊	コンクリート圧縮破壊
破壊荷重	26 993 kgf	26 973 kgf
コンクリート上縁ひずみ	1.214×10^{-6}	3.500×10^{-6}
緊張材ひずみ	8.407×10^{-6}	48.404×10^{-6}

張材のひずみは大きくなる。これは、圧縮破壊の場合には、PC 鋼材降伏後 PC 鋼材のひずみは急激に大きくなり梁の変形が増大するからであり、その間の PC 鋼材引張力はほとんど増加せず、その結果、圧縮破壊にいたるまでの曲げ抵抗力もほとんど増加しない。一方、破断破壊の場合には、CFRP より線が破断に至るまで引張力の増加があり、梁の曲げ抵抗力は CFRP より線の破断直前まで増加する。よって、梁は大きな変形を起こす前に曲げ破壊にいたる。

(3) たわみの検討

ひびわれ発生前のたわみは、通常の PC 設計法で計算できる。

ひびわれ発生後の初期の段階（使用時付近）においては、PC 鋼材を用いた梁のたわみ量とほぼ同程度である。したがって、ひびわれを許容する設計においても、たわみ量に対しては特別な考慮を必要とせず、通常の許容たわみの規定を適用することが可能であると推察される。

また、前項で記述したように PC 鋼材が降伏した後は PC 鋼材の梁のたわみの方が大きくなる。

計算式は、Branson 式の係数 n を

$$n=2.5$$

として使用すれば、実際の値によく合致する。

(4) ひびわれ幅の検討

CFRP より線は、付着力が PC 鋼材よりも大きいので、CFRP より線を緊張材に用いた梁のひびわれ幅は、算定式の係数 k を、

$$k=1.0$$

として計算すればよい。

ひびわれを許容する設計をする場合、構造物の耐久性により決められている許容ひびわれ幅をクリアしなければならない。しかし、CFRP より線は、非磁性であると同時に耐食性に非常に優れた材料であり、スターラッ

プ等の補強材も CFRP を使用することにより、許容ひびわれ幅に制限されない構造物を設計することが可能であると考えられる。

7. おわりに

現在、FRP 系新素材をコンクリートの補強材として使用するために、各方面の研究機関において官学民共同で設計・施工の基準が作成されつつあり、FRP は今後より一層の発展が期待される新材料である。

その中でも CFRP より線は本報告書の冒頭に記述したように、錆びない、非磁性、軽量等、一般的な鋼材に無い特長を有している。その一方で、せん断に弱く、傷つきやすく、緊張定着が困難であることなど、まだまだ種々の課題の解決や研究調査しなければならない要素を十分含んでいることも事実である。

本試験において確認したように、既存の研究においても、CFRP より線を含む FRP 系新素材をコンクリート部材の引張材に使用することの妥当性は、十分証明されている。ところが、塩害対策構造物や低磁性部材の施工においては、緊張材の使用のみならずせん断補強材や水平方向鉄筋も FRP 系新素材を用いなければならない必要に迫られている。しかし、コンクリート部材のせん断補強材やねじり抵抗材としての利用についての研究はまだ不十分であり、確固たる設計法が確立されていないのが現状である。

これらの問題を解決するためのさらなる研究と、より高性能でより経済性の高い FRP の出現を期待するところである。

謝 辞

本試験を行うにあたり、多大なご指導と貴重なご助言をいただきました東京工業大学の長瀧重義教授と大即信明教授に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 土木学会連続繊維研究小委員会：連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用，コンクリートライブラリー 72
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート工学，Vol. 29, No. 11, 1991
- 3) 山下武秋，木内武夫，犬飼晴雄，岩崎達彦：新素材による PC 橋—新宮橋の建設，プレストレストコンクリート，Vol. 31, No. 2, pp. 71~78, MAY-JUN., 1989
- 4) 川本幸広：炭素繊維系緊張材を用いたポストテンション定着工法，プレストレストコンクリート，Vol. 33, No. 2, pp. 49~54, MAY-APR., 1991
- 5) 川本幸広，鈴木雅博：PC 緊張材への炭素繊維系新素材の利用実施例とその将来，橋梁，Vol. 29, No. 5, pp. 8~14, 1993
- 6) 片岡真二，清宮 理，酒井徳久，中村 修：炭素繊維で補強された CFRP 栈橋の試験施工，橋梁，Vol. 29, No. 5, pp. 19~24, 1993
- 7) 三藤紀彦，岩崎達彦，榎本 剛，黒山 薫，谷木謙介，

◇研究報告◇

- 相川 敬：カナダ・カルカリー市の Beddington Trail 橋の完成, 橋梁, Vol. 30, No. 1, pp. 99~104, 1994
- 8) Y. Kawamoto and M. Suzuki : Application of CFRP Strand to Pre-tensioned Prestressed Concrete Bridge, Modern Prestressing Techniques and Their Applications, Proc., Vol. 2, FIP Symposium '93 in Kyoto, Japan, pp. 827~834, Oct., 17-20, 1993
- 9) Y. Tsuji, Dr. Eng., M. Kanda, M. Eng. and T. Tamura, B. Sc. : Applications of FRP Materials to Prestressed Concrete Bridges and Other Structure in Japan, Journal of the Precast/Prestressed Concrete Institute, Vol. 38, No. 4, pp. 50~58, July-August 1993
- 10) 涌井 一, 鳥取誠一, 寺田年夫, 原 千里 : FRP 棒材を緊張材ならびに螺旋状せん断補強筋として用いたはりのせん断試験, コンクリート工学年次論文報告集, 第 11 巻第 1 号, pp. 835~838, 1989
- 11) 本間雅人, 丸山武彦, 榎本 剛, 島 弘 : CFCC の付着応力一すべりに関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第 13 巻第 2 号, pp. 823~826, 1991
- 12) 鳥取誠一, 涌井 一, 武居 泰, 川本幸広 : 連続繊維緊張材を用いたプレストレストコンクリートはり部材の耐火性能, コンクリート工学年次論文報告集, 第 15 巻第 1 号, pp. 999~1004, 1993
- 13) 伊東幸男, 丸山武彦, 白鳥信令, 榎本 剛 : より線型 CFRP ロッドのリラクゼーション特性, 土木学会第 45 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp. 322~323, 1993
- 14) 白鳥信令, 榎本 剛 : 炭素繊維複合材ケーブル(CFCC)の引張疲労特性, 土木学会第 45 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp. 324~325, 1990
- 15) 榎本 剛, 山藤紀彦 : CFRP ストランドの曲げ引張耐力に関する実験的研究, 土木学会第 46 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp. 232~233, 1991
- 16) 井上 哲, 満木泰郎, 山田亮志, 犬飼晴雄 : 炭素繊維強化樹脂補強コンクリートのひびわれ特性, 土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp. 214~215, 1995
- 17) 東京製鋼株式会社 : CFCC 技術資料

【1995 年 5 月 8 日受付】