

連続繊維補強材を用いたPC部材の曲げ靶性改善に関する研究

睦好宏史*・谷口裕史**・喜多達夫***・
町田篤彦****

本研究は、FRPで補強したPC部材の曲げ靶性を改善することを目的として行われたものである。まず、FRPでコンクリートを拘束することにより、コンクリートの圧縮応力—ひずみ性状が鋼材のように靶性的な性状になることを実験的に確かめた。次に、通常のRCにおける曲げ降伏型の考え方とは逆に、FRPで拘束されたコンクリートの塑性変形性能に期待して、部材に靶性を付与できるかどうかを実験的に明らかにするとともに、解析的にも検討を加えた。

Keywords : FRP, PC, confined concrete, ductility

1. はじめに

近年、連続繊維補強材（以下FRP）を鉄筋あるいはPC鋼材の代替材料として用いる試みが盛んに行われ、その研究成果も多く公表されてきている^{1)~3)}。FRPを従来の鋼材と比較すると、①PC鋼棒と同等以上の引張強度を有する、②強度低下を伴う腐食をしない、③磁化しない、④軽量である等の優れた性質を持つ反面、⑤応力—変形関係において塑性域がなく、伸びが小さい、⑥曲げ成形した部分の強度が低下する等の欠点が挙げられる。さらに、⑦ヤング係数が一般に小さい、⑧線膨張係数が小さい事等は場合によっては、利点あるいは欠点ともなり、特別な配慮が必要である。FRPを実構造物に適用する場合、上で述べたFRP特有の力学的性質により、幾つかの問題点が指摘されている。この中で、終局状態における破壊形式についての問題が提起されている。FRPで補強した部材の終局曲げ破壊性状は、FRPの破断もしくはコンクリートの圧壊のいずれかとなるが、いずれの破壊性状も脆的であり、RCあるいはPCの曲げ降伏型の破壊性状と大きく異なることが知られている。このようなことから、終局状態をどのように設定するかが問題となる。荷重の大きさ、形式等が明瞭であるならば、構造物に必ずしも最大耐力以降の塑性性状、すなわち靶性が必要であるとは限らない。また、新しい構造材料が開発されて、これをコンクリート部材に適用し設計する場合、必ずしも従来のRCの考え方によらわれる必要はなく、材料の特性を生かした設計法を独自に開発していくことが望ましい。しかし、①これま

での経験により、破壊に至る前兆がある程度予知できる破壊形式が一般にRC構造物の設計概念として受け入れられている。②構造物の崩壊を防ぐためにモーメントの再分配が必要となる場合があること。また耐震構造物ではある程度の靶性がある方が安全かつ合理的である等のように、可能ならば部材に靶性が付与できる方が望ましいと言える。このようなことを背景として、FRPで補強したコンクリート部材の靶性能改善に関する研究が行われてきた。睦好ら⁴⁾は終局破壊形式をコンクリートの圧壊とすることによって、安全かつ合理的な設計ができるなどを提案している。秋山ら⁵⁾はボンドタイプとアンボンドタイプのFRPを組み合わせたり、あるいはプレストレスを導入したFRPと導入しないFRPを併用することにより、靶性を改善できることを示した。しかし、これまでのいずれの方法においても、曲げ降伏型のRCあるいはPC部材のような力学的性状は得られるに至っていない。

本研究は、FRPで補強したPC部材の曲げ靶性を改善することを目的として行われたものである。すなわち、FRPでコンクリートを拘束することにより、コンクリートの圧縮応力—ひずみ性状が鋼材のように靶性的な性状になることを実験的に確かめた。次に、通常のRCにおける曲げ降伏型の考え方とは逆に、FRPで拘束されたコンクリートの塑性変形性能に期待して、部材に靶性を付与できるかどうかを実験的に明らかにするとともに、解析的にも検討を加えた。

2. FRPで拘束したコンクリートの圧縮性状

(1) 概要

鋼材でコンクリートを拘束することによって、その圧縮—変形性状は拘束しない場合に比べて大きく異なることが知られている^{6),7)}。ここでは、材料の力学的性質が異なるFRPを拘束筋に用いた場合のコンクリートの圧

* 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設工学科
(〒338 浦和市下大久保 255)

** 正会員 工修 ハザマ技術研究所 研究第2部第2研究室

*** 正会員 工修 ハザマ技術研究所 研究第2部第2研究室
室長

**** 正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科

Table 1 Experimental variables

Specimen No.	Cover	Compressive strength (kgf/cm ²)	Shape of specimen	Type of reinforcement	Pitch (cm)	Shape of reinforcement
1	Cover	300	Cylinder	Strand	3	Circle
2					5	Rectangle
3					5	Circle
4					7	Circle
5				Single	5	Rectangle
6					5	Circle
7			Prism	Strand	3	Rectangle
8					3	Circle
9					5	Rectangle
10					5	Circle
11					7	Circle
12				Single	5	Rectangle
13					5	Circle
14					5	Circle
15			500	Prism	*	Circle
16					5	Rectangle
17					5	Circle
18					5	Circle
19	Non Cover	300	Cylinder	Strand	3	
20					5	
21					5	Circle
22			Prism	Single	3	
23			5	Rectangle		

※ High-strength steel

Table 2 Characteristics of FRP

Reinforcement	Diameter (mm)	Area (mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Young's Modulus (kgf/mm ²)	Elongation (%)
Strand	5.0	10.1	188	14000	1.5
Single	5.3	15.2	216	14200	1.5
High-strength steel	5.4	31.0	148	20000	11.0

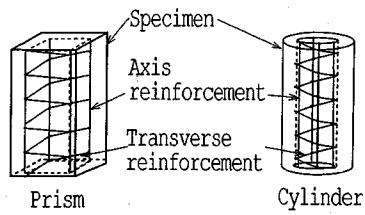
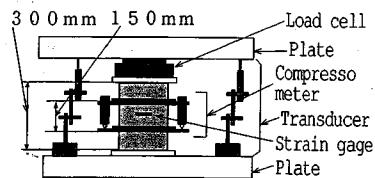
縮性状を実験的に調べた。

(2) 実験概要

供試体の形状は、Fig.1に示すように、断面が15×15 cmの矩形および直径15 cmの円形で、高さが30 cmである。拘束筋として使用した材料は、炭素繊維から成る連続繊維補強材（以下CFRP）と高張力鋼で、CFRPは7本よりストランドタイプとシングルタイプの2種類である。拘束筋の形状は、矩形及び円形のスパイラル状のものであり、かぶりの有無に拘らず、角柱供試体には、11 cm×11 cmの矩形及び直径11 cmの円形のものを、円柱供試体には7.8×7.8 cmの矩形および直径11 cmの円形のものを用いた。実験要因はTable 1に示すように、拘束筋のピッチ、拘束筋の形状、コンクリートの圧縮強度、拘束筋種、かぶりの有無の5種類とした。拘束筋の諸特性をTable 2に示す。なお、同一要因の供試体を2体ずつ作製し、実験を行った。

コンクリートは最大骨材寸法12.5 mmで、目標スランプを10±2 cm、空気量を3%とし、所定の強度が得られる様に試験練りにより配合を決定した。

実験方法は、Fig.2に示すように、載荷装置として200 t万能試験機を使用し、上面をピン支持とした単純

**Fig.1** Dimension of specimen**Fig.2** Test setup

一軸圧縮試験である。供試体の軸変形は、検長区間15 cmのコンプレッソメーターにより中央部変位を測定することによって求め、供試体の破壊または軸方向のひずみが3%程度になるまで載荷を行った。

(3) 実験結果および考察

a) 拘束筋のピッチが応力—ひずみ関係に及ぼす影響

Fig.3は実験から得られた応力—ひずみ曲線の代表的な例を示したものである。図ではかぶりがある供試体について、円形のFRP拘束筋を用い、拘束筋のピッチによる影響を示している。最大耐力はプレーンコンクリートの方がやや大きくなる傾向が認められた。最大耐力以後の性状について見てみると、FRPで拘束した場合には、かぶり部のコンクリートの剥離及び軸方向の組み立て筋の破断により耐力は一旦低下するが、軸ひずみが1%程度からは拘束効果が顕著に現われ、かぶり部のコンクリートは完全に剥離しているものの、耐力の低下は緩やかになる。すなわち、FRPで拘束することによって、コンクリートの最大耐力以後の変形性状が著しく改善できることが明らかとなった。FRP拘束筋のピッチを変化させた場合、ピッチが小さい供試体ほど耐力の低減する割合が小さく、特にピッチが3 cmの場合では耐力は下がらず、2.5%のひずみにおいても上昇し続ける現象が見られた。

b) 拘束筋の形状の影響

同一形状の供試体に対し、拘束筋の形状が応力—ひずみ関係に及ぼす影響をFig.4に示す。かぶり部が剥離し拘束効果が明確に現れる約0.7%以降のひずみについて見てみると、円形の拘束筋を用いた供試体の方が、矩形の拘束筋を用いた場合よりも耐力の低減する割合が小さいことが分かる。これは、円形の拘束筋には軸圧縮力載荷時に引張力のみが一様に作用するが、矩形の拘束筋では、隅角部において引張力と同時に曲げが作用すること、

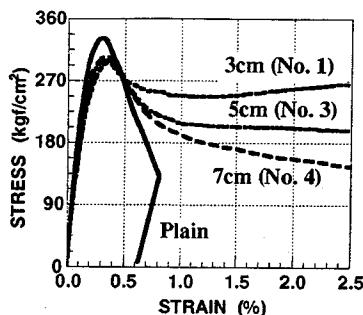


Fig.3 Stress-strain relationship (Pitch of FRP)

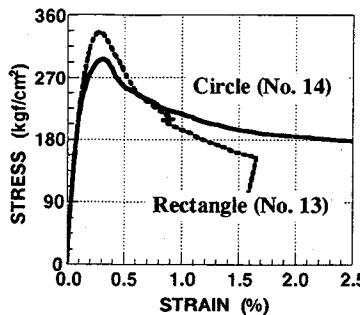


Fig.4 Stress-strain relationship (Shape of FRP)

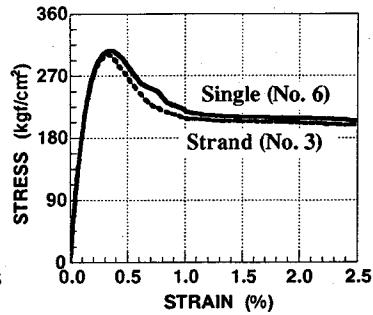


Fig.5 Stress-strain relationship (Type of FRP)

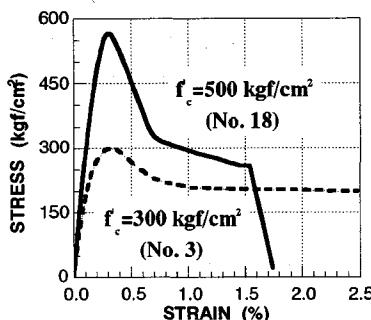


Fig.6 Stress-strain relationship (Concrete strength)

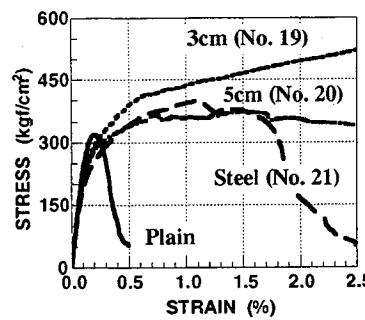


Fig.7 Stress-strain relationship (Non-Cover)

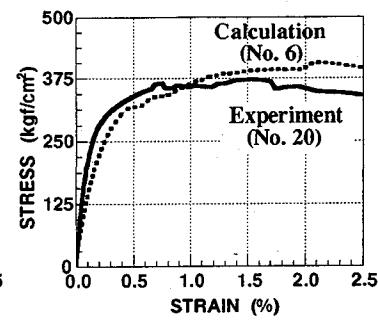


Fig.8 Stress-strain relationship of core concrete

さらに、曲げ成形部において引張耐力が低下することが主な原因であると考えられる⁸⁾。

c) 拘束筋の種類の影響

ほぼ同じ径を有するストランドタイプとシングルタイプの拘束筋が応力—ひずみ関係に及ぼす影響を Fig.5 に示す。有効断面積および繊維の配向度が異なるにも拘らず、本実験に関する限りでは明確な差はみられなかった。

d) コンクリートの圧縮強度の影響

Fig.6 はコンクリートの圧縮強度が応力—ひずみ関係に及ぼす影響を示したものである。図より低強度のコンクリートを拘束した供試体の方が最大耐力以降の耐力の低減の割合は小さいといえる。これは、鋼材で拘束した場合と同じ傾向を示している。

e) かぶりの影響

かぶりの有無が最大耐力以降の変形性状に及ぼす影響を検討した。Fig.7 はかぶりの無い供試体の応力—ひずみ関係を示している。Fig.3 と比較してみると、塑性域においてかぶりの剥離による耐力の低減がなく、耐力は直線的に増加もしくは保持する傾向を示し、特に拘束筋のピッチが 3 cm の供試体では、ひずみが 3% に至っても耐力は増加し続けた。高張力鋼を用いた場合には、同一ピッチの FRP と同様な性状を示した。このことは、鋼と FRP では力学的特性が異なるにも拘らず、コンクリートの拘束効果は同程度であるといえる。かぶりの影

響を評価するために、かぶり部のコンクリートはプレーンコンクリートとし、その応力—ひずみ関係は e 関数に従うものとして、拘束コンクリートのコア部が受け持つ圧縮力は、全圧縮力からかぶり部が受け持つ圧縮力を引いたものとして推定してみた。Fig.8 は上で述べた方法により、かぶりがある供試体から推定したコア部の応力—ひずみ関係と、実験より得られたかぶりが無い場合の応力—ひずみ関係を示したものである。図より、両者はよく一致しており、このことからかぶりがある拘束コンクリートは、拘束筋で囲まれたコア部のコンクリートとかぶり部のプレーンコンクリートとの複合体であるといえる。

(4) FRP 拘束筋を用いたコンクリートの応力—ひずみのモデル化

鋼材を用いた拘束コンクリートの応力—ひずみ関係のモデル式はこれまでにいくつか提案されている。しかし、既往の提案式では、FRP を拘束筋に用いた場合の応力—ひずみ性状を十分に推定することはできない。これは、鋼材を用いたモデル式では拘束コンクリートの塑性域において鋼材は降伏していると考えていること、FRP の弾性係数が鋼材と異なることが主な原因であると考えられる。そこで、ここでは新たに FRP を拘束筋に用いた拘束コンクリートの応力—ひずみ関係の定式化を試みた。モデル化にはスパイラル状の鋼材により拘束した場

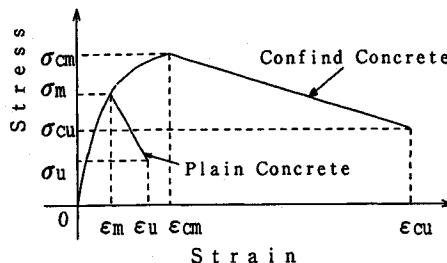


Fig.9 Modeling of confined concrete

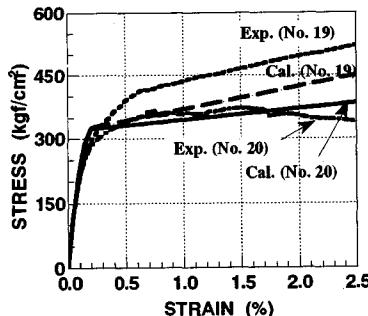


Fig.10 Evaluation of model for confined concrete

合に対して提案している境ら⁹⁾の考え方を基本にした。境らは横拘束剛性の考え方を採用しており、FRPを拘束筋に用いた場合にもこの考え方を適応できると判断したからである。ここでは、円形拘束筋を用いたモデル式を以下に示す。また、Fig.9は拘束コンクリートの応力一ひずみモデルを示したものであり、原点から最大応力時の応力およびひずみまでの曲線式は六車らの提案している曲線式を用いた¹⁰⁾。

以上のようにして求まるFRPで拘束したコンクリートの応力一ひずみ関係のモデルと実験値の一例をFig.10に示す。提案したモデルは実測値をよく推定しているといえる。

$$\sigma_r = \frac{0.015 \times (\varepsilon_z - \varepsilon_{zs})}{0.024 \times \exp(E_r \times 6 \times 10^{-5})} \times E_r \quad (1)$$

$$\sigma_{cm} = \left(1 + 4 \frac{\sigma_{rm}}{\sigma_m}\right)^{0.6} \times \sigma_m \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cm} = \left(1 + 65 \frac{\sigma_{rm}}{\sigma_m}\right) \times \varepsilon_m \quad (3)$$

$$\sigma_{cu} = \left(1 + 6 \frac{\sigma_{ru}}{\sigma_m}\right)^{0.6} \times \sigma_u \quad (4)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.024 \times \exp(E_r \times 6 \times 10^{-5}) \quad (5)$$

$$E_r = (1 - S/D) \times (2 \times Aw) / (S/D) \times Es \quad (6)$$

ここに

σ_r : 横拘束応力,

ε_z : 軸方向歪,

σ_{cm} : 拘束コンクリートの最大応力,

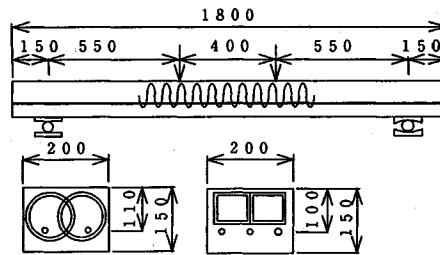


Fig.11 Dimension of beam (mm)

Table 3 Characteristics of FRP

Type of CFRP	Φ 5	Φ 12.5	Φ 15.2
Diameter (mm)	5.0	12.5	15.2
Area (mm ²)	10.1	76.0	113.6
Nominal Breaking Load(kgf)	1800	14500	20300
Unit mass (g/m)	24.0	151.0	226.0
Young's Modulus(kgf/mm ²)	14000	14000	14000

σ_m : プレーンコンクリートの最大応力,

ε_{cm} : 拘束コンクリートの最大応力時の軸ひずみ,

ε_m : プレーンコンクリートの最大応力時のひずみ (0.002),

σ_r : 最大軸応力時の横応力度,

σ_{ru} : 終局軸応力時の横応力度,

σ_{cu} : 拘束コンクリートの終局応力,

σ_u : プレーンコンクリートの終局応力,

E_r : 横拘束剛性,

Es : 拘束筋のヤング率,

Aw : 拘束筋の断面積,

S : 拘束筋のピッチ,

D : 拘束されたコア部の直径

3. FRPを緊張材および拘束筋に用いたPC部材の曲げ性状

(1) 概要

一般に、曲げを受けるRCあるいはPCでは、鋼材の降伏変形により構造物の急激な破壊は生じることはなく、破壊に至る前兆が予期できるという認識がある。いま、このような靶性的な性状をFRPで補強した部材に持たせようとする試みた。すなわち、従来のRCやPCとは逆の発想で、コンクリートの変形能によって部材に靶性を与えるものである。前章で述べたように、コンクリートをFRPで拘束することにより、その圧縮変形性状は大きく改善できることが明らかとなった。ここでは、FRPを主補強材と拘束筋に用いたPC部材の靶性能を改善することを主な目的とした。

(2) 実験概要

a) 供試体の形状および使用材料

Table 4 Experimental variables

Specimen No.	Shape of Section	CFRP	Length* (cm)	Pitch (cm)	Concrete Strength (kgf/cm ²)	Introduced Prestress (tonf)	Transverse reinforcement ratio (Pw)	Mechanical reinforcement ratio(P)
1	○○	φ15.2×2	10.8	5	300	24.44(60)	0.0037	0.615
2	○○	φ15.2×2	10.8	3	300	24.20(60)	0.0062	0.615
3	○○	φ15.2×2	9.0	5	300	26.36(60)	0.0045	0.615
4	---	φ12.5×3	14.0	5	300	25.98(60)	0.0029	0.725
5	---	φ12.5×3	7.8	5	300	25.93(60)	0.0052	0.725
6	..	φ15.2×2	-	-	300	24.33(60)	-	0.615

() : Introduced Prestress/Nominal breaking load (%)

*: Diameter or side length of transverse reinforcement

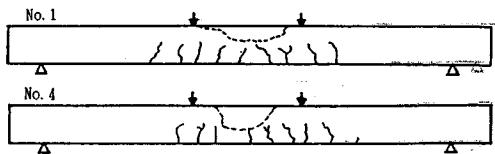


Fig.12 Crack pattern

実験に使用した供試体は Fig.11 に示すように、高さ 15 cm、幅 20 cm、長さ 180 cm のはり部材である。緊張材には CFRP を使用し、圧縮縁から 10 cm および 11 cm の位置に 2 本あるいは 3 本を配筋した。緊張材の量、導入プレストレス等は、終局破壊形式がコンクリートの圧壊となるように定めた。本実験に使用した CFRP の特性を Table 3 に示す。CFRP はより線状のものであり、緊張材には φ12.5 mm および φ15.2 mm のものを、拘束筋には φ5.0 mm のものを使用した。拘束筋の形状は矩形および円形で、ピッチは各々 3 cm および 5 cm とし、スパイラル状に成形したものである。拘束筋は等モーメント区間を含む 70 cm の区間に配置し、せん断区間には D 6 の異形鉄筋をせん断補強筋として所定量配筋した。

導入プレストレス量は CFRP の保証切斷荷重の 60% とし、コンクリート打設後 14 日（圧縮強度 300 kgf/cm²以上）でプレストレスを導入した。プレストレスは、プレテンション方式により 2 本あるいは 3 本の緊張材を治具を介して 1 つのジャッキで同時に導入した。

b) 実験要因および実験方法

実験要因を Table 4 に示す。載荷は、スパン 150 cm、純曲げ区間 40 cm の 2 点一方向載荷とし、荷重、たわみ、ひびわれなどを測定した。

(3) 実験結果および考察

a) ひびわれ状況および破壊性状

供試体のひびわれ発生状況の一例を Fig.12 に示す。載荷にともない先ず引張側コンクリートにひびわれが発生する。その後、荷重の増大にともないひびわれが進展

し、最大荷重に近づいてくると圧縮部コンクリートにひびわれが発生し、さらに載荷を継続すると圧縮側拘束筋のかぶりコンクリートは剥離する現象が認められた。その後、拘束筋を固定するために配筋した圧縮筋（φ5.0 mm の CFRP ロッド）が破断し、最終的には、中立軸よりも上部のかぶりコンクリートはすべて剥離した。No. 5 供試体ではさらに載荷を継続したため引張側のコンクリートもすべて剥離し、圧縮側の拘束筋で拘束されたコンクリートと引張側の緊張材のみでつり合う状況となつた。

以上のように、圧縮部コンクリートを FRP で拘束することにより、曲げ圧縮破壊で見られるような急激な破壊性状は全く示さず、その破壊形式を大きく改善できることが明らかとなつた。

b) 荷重一変位関係

実験から得られた荷重一変位関係を Fig.13 に示す。拘束筋を配筋した供試体（No. 1～5）と配筋しないもの（No. 6）を比較してみると、拘束筋を使用した場合の最大耐力は拘束筋を用いない場合と同等か若干低下する傾向が認められた。最大耐力以降では、拘束筋を配筋しないものは最大耐力に達するとともに耐力が低下し、典型的な曲げ圧縮破壊の性状を示した。一方、拘束筋を配筋したものは、最大耐力到達後かぶりコンクリートの剥離によって耐力は一旦は減少するものの、その後は耐力を維持するか、あるいは非常に緩やかな勾配で耐力が低下していく現象が見られた。すなわち、FRP で拘束されたコンクリートの塑性変形性状により、あたかも曲げ降伏型の破壊形式とよく似た変形性状を示すことが明らかとなつた。最大耐力以降の挙動は、拘束筋の形状、ピッチ等によって異なり、以下に各要因が部材の荷重一変形性状に及ぼす影響を述べることにする。

c) 拘束筋の各要因が荷重一変形性状に及ぼす影響

拘束筋のピッチによる影響を Fig.13(a) に示す。最大耐力はピッチの大きさに拘らず同程度であり、本実験に使用したピッチの範囲では、ピッチが最大耐力に及ぼ

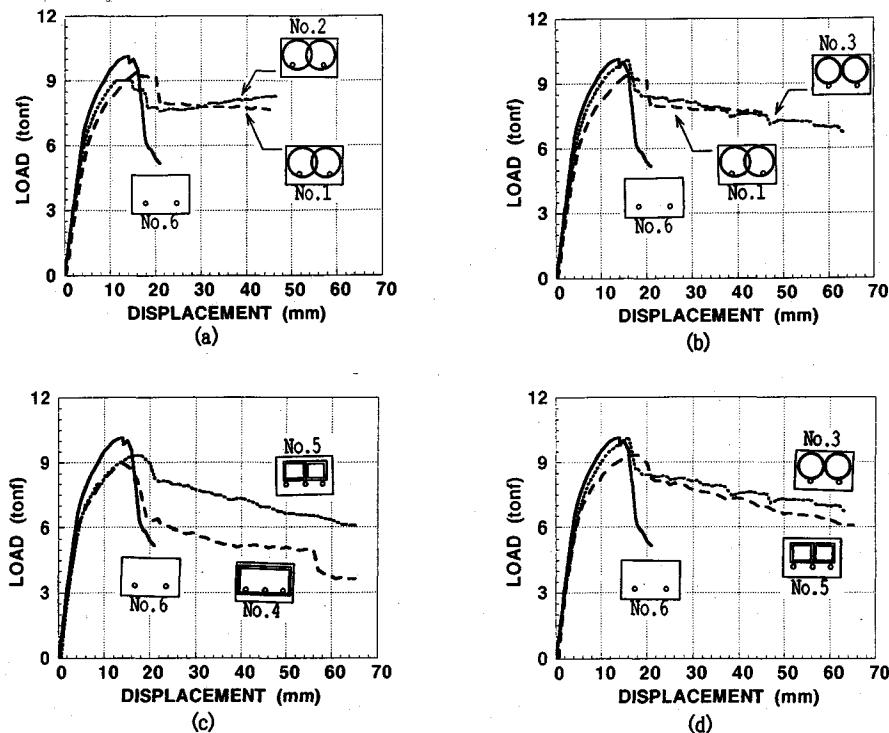


Fig.13 Load-displacement curve

す影響は小さいと思われる。最大耐力直後に耐力が低下する現象もほぼ同様である。これは、拘束筋の形状が等しいため、断面に対するかぶりコンクリートの占める割合が等しく、また、十分な拘束効果を有していることから拘束筋間にあるコンクリートが剥離していないことによると考えられる。しかし、最大耐力以降の荷重一変形性状を見てみると、ピッチが5cmのNo.1供試体は緩やかな下降勾配を示しているのに対し、ピッチが3cmであるNo.2供試体では耐力が上昇する傾向を示しており、圧縮試験結果と同様ピッチが小さくなるほど拘束効果は大きくなる。

拘束面積が荷重一変形性状に及ぼす影響をFig.13(b)に示す。いずれの供試体も円形拘束筋を使用しているが、No.1供試体は引張域をも含む比較的広範囲のコンクリートを拘束しているのに対し、No.3供試体は圧縮部のコンクリートを中心とした範囲を拘束している。図に見られるように、耐力が低下する割合はNo.1供試体の方が若干小さくなっている。圧縮部コンクリートの拘束面積が大きいものほど拘束効果が大きくなり、靶性改善に寄与できるといえる。また、主筋を巻き込んだ引張部コンクリートを拘束することによる拘束効果の低下はほとんどないことから、せん断補強筋を兼ねた拘束筋の適用が有効であると考えられる。

拘束筋比が荷重一変形性状に及ぼす影響をFig.13(c)

に示す。同一強度の拘束筋を使用した場合、1本の拘束筋で拘束される面積が小さいほど拘束効果は大きい。本実験においても矩形を2つ組み合わせたNo.5供試体の方が改善効果が大きくなっている。拘束域を小さく分割する程、すなわち拘束筋比を大きくする程高い拘束効果が得られる。

拘束筋の形状が荷重一変形性状に及ぼす影響をFig.13(d)に示す。図中には、今回の実験の中で、円形拘束筋の中で最も拘束効果が小さかったものと、矩形拘束筋の中で最も拘束効果が大きかったものを比較している。円形拘束筋を使用した方が最大耐力以降の耐力低減度は緩やかであり、拘束効果が大きいと言える。また、円形の拘束筋が破断する現象は認められなかったが、矩形のものは隅角部で破断する現象が観察された。この現象は、CFRPで拘束したコンクリートの圧縮試験においても認められている。すなわち、矩形における曲げ成形部の強度低下が拘束効果の低減に影響していると考えられる。

以上述べたように、FRPで拘束したコンクリートを使用し、かつ、破壊形式をコンクリートの圧壊とすることにより、部材の最大耐力以降の変形性状を大きく改善できることが明らかとなった。すなわち、従来の曲げ降伏型のRCあるいはPCとは逆の発想により、これらと同等の性状をFRPで補強した部材に持たせることができ

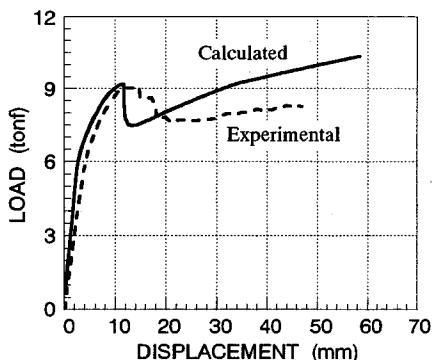


Fig.14 Calculated load-displacement curve (No.2)

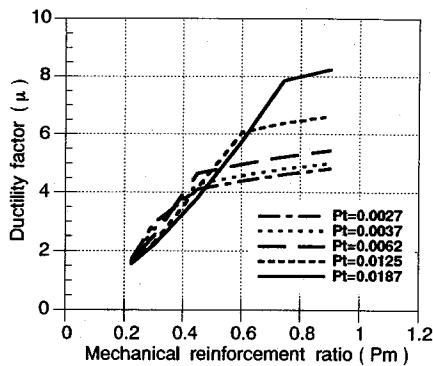


Fig.15 Evaluation of ductility

可能となつた。

(4) 解析方法

はり部材の実験結果より、圧縮部コンクリートをFRP拘束筋で拘束することにより、部材の変形性能および破壊性状を大きく改善できることが明らかとなった。ここでは、これらの挙動を解析的に検討した。

FRPを緊張材に使用したPC部材の曲げ挙動は通常の曲げ理論により解析可能であることがすでに報告されている¹¹⁾。ここでは、ファイバーモデルを用いて以下のようにして解析を行った。

a) 解析モデル

ファイバーモデルを適用するにあたり以下の事項を仮定した。

①コンクリートの応力—ひずみ曲線は以下のようにした。すなわち、かぶりコンクリートはプレーンコンクリート（拘束されていないコンクリート）の応力—ひずみ関係に、拘束コンクリートは2章で提案した、FRPで拘束したコンクリートの応力—ひずみ関係のモデル式に従う。

②かぶりコンクリートはその終局ひずみ ($\epsilon_{cu}=0.0035$) に達すると剥離し、応力を受け持たない。この時、かぶりコンクリートが剥離することにより部材断面は減少する。

以上のようにして、荷重一変位関係を求めた。

b) 解析結果の検討

実験及び計算から得られた荷重一変位関係の一例を Fig.14 に示す。最大耐力以降において実験値と計算値を比較してみると、計算値では耐力が低下する割合が実験値と比べて大きくなる傾向があるものの、概して、両者はよく一致していると言える。このことは、使用する拘束筋の形状、配筋間隔、コンクリート強度等を考慮した拘束コンクリートの応力一ひずみのモデルを使用することにより、拘束コンクリートを用いた PC 部材の荷重一変形性状をかなり精度よく求めることが可能となることを示している。

4. FRP を緊張材および拘束筋に用いた PC 部材の変形能の推定

FRP 緊張材に FRP 拘束筋を組み合わせ、曲げ圧縮破壊とすることによって部材の韌性および破壊性状を改善できること、それらの挙動は上述した手法により解析が可能となることを明らかにした。拘束筋を実構造物に適用する場合には、対象構造物に要求される韌性が定量的に得られるように緊張材量および拘束筋量を選定する必要がある。

ここでは、本実験に使用した供試体断面において、靱性率の定量化を行った。すなわち、上述した手法を用いて、靱性率を補強材係数および横拘束筋比の関数として解析的に検討した。靱性率 μ 、補強材係数 Pm および横拘束筋比 Pt は各々以下の式で表される。

ここに、 ϕu ：終局モーメント時の曲率（拘束コンクリートが終局軸ひずみに達するか、あるいは緊張材が破断ひずみに達したときの曲率）。

ϕy : プレーンコンクリートが終局ひずみ ($\epsilon_{cu} = 0.0035$) に達する時の曲率

ここに、As:FRP 緊張材の公称断面積、

f_s : FRP 緊張材の保証破断強度,

b:断面幅,

d : 有効高さ,

f'c：コンクリート強度

ここに、 Aw ：FRP 拘束筋の公称断面積、

S : 拘束筋のピッチ,

D：拘束筋の直径または一边の長さ

計算より得られた非性率、補強材係数および横拘束筋比の関係を Fig.15 に示す。一般の PC 部材（曲げ引張破壊が生じる場合で、補強材係数が 0.4 程度以下）の場

合には、横拘束筋比に拘らず大きな差が認められない。一方、今回の実験のように、曲げ圧縮破壊が先行し、この時の補強材係数が0.4以上の範囲では、横拘束筋比の増大に伴い、靶性率が大きくなる傾向が顕著に認められる。また、いずれの横拘束筋比の場合にも、補強材係数が大きくなるに伴い靶性率が大きくなる傾向が認められ、この傾向は特に補強材係数が小さい範囲で明瞭である。

以上のような関係から、部材に要求される靶性率が分かれれば、これを満足する補強材係数および横拘束筋比の組み合わせが求まる。この組み合わせが複数存在する場合には、部材形状などを考慮して、最適な緊張材量および拘束筋量を選定することが可能となる。

5. まとめ

本研究は、FRPで補強したPC部材の曲げ靶性を改善することを目的に行ったものである。すなわち、FRPで拘束したコンクリートの圧縮性状およびFRPで拘束したコンクリートを有する部材の変形性能を実験的、解析的に検討した結果以下のことが明らかとなった。

(1) FRPでコンクリートを拘束することにより、コンクリートの応力—ひずみ関係は大きく改善され、鋼材のような靶性的な性状を持たせることが可能である。また、この改善効果は、使用する拘束筋のピッチ、形状およびコンクリート強度に大きく依存する。

(2) かぶりを有する拘束コンクリートの応力—ひずみ関係は、FRP拘束筋で囲まれたコア部の拘束コンクリートとかぶり部のプレーンコンクリートの複合体と考えることができる。また、FRPで拘束したコンクリートの圧縮—応力ひずみモデルを提案し、その妥当性を検証した。

(3) 曲げ圧縮部コンクリートをFRPで拘束し、緊張材にFRPを使用したPC部材を曲げ圧縮破壊させることにより、部材の変形性能を顕著に改善できることが明らかとなった。すなわち、従来の曲げ降伏型のRCあるいはPCとは逆の発想により、これらと同等の性状をFRPで補強した部材に持たせることが可能となつた。

(4) FRPを緊張材および拘束筋に使用したPCはりの挙動は、拘束コンクリートおよびかぶりコンクリートにそれぞれ対応した応力—ひずみ関係を適用することによって、通常のファイバーモデルで解析可能である。

(5) 対象とする部材に要求される靶性率の大きさが分かれれば、靶性率、横拘束筋比および補強材係数の関係

から、最適な緊張材量および拘束筋量を選定することが可能である。

(6) 以上のように、FRPを拘束筋に適用する本手法は、FRPを緊張材に使用したPCはり部材の変形性能を改善するための有望な手法であることが明らかとなつた。今後は、実構造物に適用すべく、種々の拘束条件に対する設計法、適用条件、構造細目などについて詳細に検討する必要がある。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、元埼玉大学技官佐藤昭七郎氏および佐藤幸作氏、埼玉大学大学院生細井良二君、土田一輝君、さらには当時埼玉大学学生であった秋田輝和君、藤森総一君には多大な協力を頂いた。また、エー・エム・エンジニアリング(株)ならびに高周波熱練(株)から材料の提供を頂いた。ここに記して厚く御礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 土木学会：連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集、1992.
- 2) 土木学会：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号、1992.
- 3) コンクリート工学、Vol. 29, No. 11, 1991.
- 4) 睦好宏史・町田篤彦・上原啓生：CFRPで補強したコンクリート部材の力学的性状および設計手法、第12回コンクリート工学年次論文報告集、pp. 1117～1122、1990.
- 5) 秋山暉・天野玲子・奥村一正：板状のFRPロッドを用いたコンクリート梁の曲げ性状、第12回コンクリート工学年次論文報告集、pp. 1099～1104、1990.
- 6) たとえば、靶性部材配筋詳細研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、1990.
- 7) 鈴木計夫・中塚信・平松一夫：コンファインドコンクリート(横拘束コンクリート)を曲げ圧縮部に適用したPRC梁の高靶性挙動、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、pp. 485～488、1985.
- 8) 丸山武彦：炭素繊維を中心とする繊維強化プラスチック(FRP)ロッドのコンクリート補強材としての利用に関する実験的研究、東京大学博士論文、1991.
- 9) 境有紀：横拘束された高強度コンクリートの構成則、第13回コンクリート工学年次論文報告集、pp. 43～48、1991.
- 10) 六車熙・渡辺史夫・勝田庄二・田中仁史：横拘束コンクリートの応力—ひずみ曲線のモデル化、セメント技術年報34、pp. 429～432、1980.
- 11) 岡本直・遠藤克彦・松原澄行・谷垣正治：アラミド繊維による組紐状棒材を用いたPRCはりの曲げ性状、第10回コンクリート工学年次論文報告集、pp. 671～676、1988.

(1992.6.16受付)

IMPROVEMENT IN DUCTILITY OF PC MEMBERS REINFORCED WITH FRP

Hiroshi MUTSUYOSHI, Hirofumi TANIGUCHI, Tatsuo KITA and Atsuhiko MACHIDA

It is known that PC members reinforced with FRP as tendons show brittle failure in spite of the failure modes. The objective of this paper is to improve ductility of PC members reinforced with FRP as tendons. Compressive behavior of concrete confined with CFRP was investigated. It was confirmed that compressive stress-strain of confined concrete was greatly improved to ductile manner. PC members using CFRP as tendons and transverse CFRP to confine concrete were newly developed. Ductility of the PC members was greatly improved.