## FRP ケーブルの埋め込み緊張補強技術の確立

Development of structural strengthening method with prestressed near-surface mounted CFRP tendons

吴 智深\*, 岩下健太郎\*\*, 孫 暁荷\*\*\*, 小林 朗\*\*\*\* Zhishen Wu, Kentaro Iwashita, Xiaohe Sun, Akira Kobayashi

\*工博,茨城大学教授,工学部都市システム工学科(〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)
\*\* 工博,名城大学助教,理工学部建設システム工学科(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)
\*\*\* 工修,茨城大学,大学院理工学研究科(〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)
\*\*\*\* 工修,日鉄コンポジット株式会社、技術部(〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3番8号)

Fiber reinforced polymer (FRP) composites have been widely used as externally bonded reinforcements to strengthen or rehabilitate different kinds of deteriorated concrete structures. However, premature debonding failure due to the limitation of bond at the FRP-concrete interface are often encountered under utilizing FRP material potential for strength increase. To minimize debonding failures due to environmental factors such as water intrusion, etc. and other mechanical damage such as vehicular traffic and impact, etc., near surface mounted (NSM) FRP technology has emerged as another structural strengthening method. This study aims at developing a new strengthening system for the rehabilitation of deteriorated concrete structures using prestressed NSM carbon fiber reinforced polymer (CFRP) tendons.

Key Words: Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) tendon, Prestressed near surface mounted (PNSM), Epoxy putty and resin, Polymer cement mortar キーワード: 炭素繊維複合緊張材, 埋め込み緊張, エポキシ樹脂, ポリマ ーセメントモルタル

## 1. はじめに

都市インフラ構造物の維持管理・防災能力を高めるた めに、補修・補強技術の高度化や構造施設の長寿命化が 期待されている.現在、鉄筋コンクリート(以後 RC) における鉄筋の腐食問題は深刻であり、鋼板や RC によ る増し厚や連続繊維複合材(Fiber reinforced polymers,以 後 FRP と呼称する)の表面接着により鉄筋量の増補や腐 食抵抗性の改善が図られる補修・補強方法が主流な技術 として広く用いられている.また、Blaschkoら<sup>1)</sup>,Gentile ら<sup>2)</sup>,Carolin ら<sup>3)</sup>,Lorenzis ら<sup>4)</sup>,El-Hacha ら<sup>5)</sup>,そして Hassan ら<sup>6)</sup>により,RC 構造物の表面にかぶり深さ以内 の溝を掘り、鉄筋や FRP 製のロッドや板、より線などを 埋め込むことで高度な耐腐食性を有する RC 補修技術 (Near surface mounted,以後 NSM と呼称する)における,

補強材の付着性能や補強効果に関する研究が実施され, 実用化されているものもある.しかし,構造性能の主要 部分である死荷重の補強や既存損傷を回復することは できない. また, ひひ割れ発生荷重や剛性, 鉄筋降伏荷 重、そして変形性能といった使用性の向上効果には限界 がある. そこで, Nordin ら<sup>7)</sup> は緊張補強材に FRP ロッ ド材を用いて耐腐食性や曲げ構造性能を高度化し、さら にプレストレスを加えて死荷重抵抗性や既存損傷の回 復ができる FRP 埋め込み緊張補強技術 (Prestressed near surface mounted, 以後 PNSM と呼称する)を提案し,補 強効果を初歩的に検討した. そして, 緊張材の全面付着 を確保した PC 補強技術において特長的な剛性やひび割 れ抑制といった使用性指標に対して大きな補強効果が 得られることを実験的に示した.しかし、一方では、既 設構造物に導入されたプレストレスや PNSM による補 強効果などはほとんどの場合に FRP とコンクリートの 付着強さにより決定されることがより明確になった. 以 上の背景を踏まえて、本研究では、より線形状の CFRP ケーブルを緊張補強材に用いた PNSM における埋め込 み材およびその剥離防止のためのかぶり補強材に用い る材料の選定やFRPや施工工程の構築を行う.また,両





図-2 PNSM によるコンクリート桁の補強概念と原理

引きせん断試験を実施して、埋め込み材に適した材料の 選定および付着強さの評価を行う.さらに、かぶり補強 による CFRP ケーブルの付着性能向上効果を検討して、 かぶり補強材の最適化も行う.これらの知見を踏まえて、 RC 曲げ構造梁補強構造物の2 点曲げ載荷試験を実施し て、埋め込み材およびかぶり補強材の種類、補強量、そ してプレストレス導入量を考慮した PNSM 技術による 曲げ補強効果を実験的に評価する.さらに、ひび割れ発 生荷重、引張鉄筋降伏荷重、そして最大荷重といった曲 げ構造性能指標や、ひび割れ幅に対する評価法を既往の 曲げ理論や評価式を活用して構築を行う.

## 2. FRP 埋め込み緊張補強技術 (PNSM) における曲げ補強 構造形式

PNSM の施工工程は、既設 RC あるいはプレストレス トコンクリート(以後, PC と呼称する)構造物の引張縁 かぶりに FRP ケーブルの径より深い溝を掘り, FRP ケー ブルを緊張状態で溝内に設置した上で溝を埋め込み材 を充填して固定するというものである. 概念図および補 強原理と概念をそれぞれ図-1 および図-2 にそれぞれ 示す. 大抵, 桁の両端部にはクリアランスが少ないため,

表―1 使用材料の物性値一覧			
材料	特性	特性値	
	公称博面積 (mm²)	42.8	
CEDD	最大径 (mm)	8.4	
して KP	引張単生率(kN/mm²)	94.9	
1 110	引張鍍(N/mm²)	2084.0	
	繊維含有率(%)	40.0	
アポトンパテ	引張単生率(7日)(kN/mm²)	5.4	
	引張鍍 (7日) (N/mm <sup>2</sup> )	51.0	
ておたいた相比	引張単性率(7日)(kN/mm²)	3.4	
エ小イン使用目	引張鍍 (7日) (N/mm <sup>2</sup> )	33.0	
高流動	引張単性率(7日)(kN/mm²)	4.6	
エポキシ樹脂	引張鍍 (7日) (N/mm <sup>2</sup> )	32.0	
ポリーナナン	配合比P/C (%)	20.0	
トモルタル	圧縮鍍 (7日) (N/mm <sup>2</sup> )	30.4	
	圧縮単性率 (7 日) (kN/mm <sup>2</sup> )	10.0	
<u> </u>	圧縮単性率(28日)(kN/mm <sup>2</sup> )	33.6	
	压縮敏度(28日)(N/mm <sup>2</sup> )	45.6	

ケーブルとシートを冶具で接続し、下向きに緊張するの が望ましい。PNSM による曲げ補強効果は、外ケーブル PC 補強技術の場合とは異なり FRP の全面が構造物表面 に接着されるため、ひび割れ発生荷重や鉄筋降伏荷重と いった使用性に対する大きな向上効果やひび割れ抑制 効果にも期待できる.しかし、Carolin ら<sup>3)</sup>の研究では CFRP 棒材が埋め戻し材のセメントモルタルから早期に 引き抜けたため、CFRP の引張強度を活かしきれず、補 強効果にも限界があった. そこで、本研究では埋め込み 材の種類やかぶり補強材との適した組み合わせを検討 する. Lorenzis ら<sup>4)</sup> はセメントモルタルや吹き付けコン クリートを、Carolin ら<sup>3)</sup>はエポキシ樹脂をそれぞれ埋め 込み材として採用した.本研究では、エポキシ樹脂やポ リマーセメントを埋め込み材やかぶり補強材に使用し た場合の CFRP ケーブルの付着強さを実験的に検討し、 埋め込み材やかぶり補強材に適した材料の選定や組み 合わせの究明を行い、FRP ケーブルの付着強さの高度化 を図る.

## 3. 実験方法

## 3.1 使用材料

Carolin  $6^{3}$ は、耐腐食性や高級な耐引張疲労・クリー プ特性、そして高度な比強度、比剛性を有しており、最 も実績があると言える炭素繊維を用いた FRP(以後、 CFRP と呼称する)の円形断面の棒材を緊張補強材に用 いた.本研究では、棒材形状の場合よりしなやかに曲げ られ、PC 構造物において想定される曲面に対しても追従 性の良いより線形状の CFRP ケーブルを緊張補強材に採 用することにした(引張特性と外観をそれぞれ表-1と 図-3に示す).次に、埋め込み材としては、FRP との良 好な接着が期待できるエポキシ樹脂の内、上向き作業も 可能な粘度に調整されたエポキシパテ, FRP シートの含 浸・接着に通常に使用されているエポキシ樹脂, 溝や孔 への注入工も可能な粘度を有する高流動エポキシ樹脂, そして、エポキシ樹脂に比べて低価格でコンクリートと の接着性に期待できるポリマーセメントモルタルを選 定した. なお, 桁下補強を高流動エポキシ樹脂を用いて 行う場合には、溝を覆った上で溝内に樹脂を注入するこ とが考えられる.以上の埋め込み材の物性値およびコン クリートの物性値を表-1 に示す. また, CFRP ケーブル の付着力向上を目的とした、図-4 に示すようなかぶり 補強に適した材料の選定も行う. なお, 両引きせん断試 験および RC 梁の曲げ試験におけるかぶり補強材の寸法 も同図に示す.

#### 3.2 両引きせん断試験方法

FRPより線を両側面に埋め込んだコンクリート試験体 (図-5)を500kN油圧サーボ引張試験機に設置し,両 引きせん断試験を行う.ここで、コンクリートの中央部 に完全に埋め込み十分な付着を確保した鋼ボルト(φ 24mm)と、CFRPケーブルの片側端部に膨張セメントに よって定着した鋼管を相反する方向に引っ張ることで CFRPケーブルが引っ張られ、CFRPケーブルーコンクリ ート接着界面にせん断力が生じる機構である.完全剥離 前は曲げの影響は小さく、両面のケーブルに生じるひず みは同程度となっていたが、片面が完全剥離した後は両 面のひずみバランスが崩れたため、実験を終了した.埋



め込み材とかぶり補強材はすべて7日間,常温環境下で 養生した.ここで,かぶり補強材の打設時には離型シー トで覆った型枠を設置して矩形に成形した.測定項目は, 試験機接続の 500kN ロードセルで測定される荷重と, 15mm 間隔で設置された検長 5mm のひずみゲージで測 定されるひずみである.なお,分布ひずみを積分して得 られる値をケーブルの変位として採用した.ここで,実 験に際して以下のパラメータを考慮した.

- 1) 埋め込み材:エポキシパテ,高流動エポキシ樹脂, そしてポリマーセメントの3種類
- かぶり補強材:エポキシパテおよびポリマーセメントの2種類

なお、本研究では、エポキシ系接着材として2液混合型 の常温硬化型の熱硬化型エポキシ樹脂を用いた.また、 かぶり補強材にはコンクリートおよび埋め込み材との 付着が確保できること、およびある一定の剛性が必要と









なるため、コンクリートとポリマーの間の性状を有するポリマ ーセメントモルタルを用いることにした、使用した材料の特性 値を表-1 に示す.

#### 3.3 PNSM 補強した RC 梁の2 点曲け載荷試験方法

本研究では、PNSM 補強 RC 梁を作製し、2 点曲げ載 荷試験を実施して、PNSM による RC 梁の曲げ補強の効 果や有意性の検討および埋め込み材とかぶり補強材の 最適化を行った. RC 梁は図-6 に示すように 150mm× 200mm 矩形断面で引張鉄筋比は 1.7%である. 全長は 2.1m で支点間距離は 1.8m とし、裁荷点間距離は 600mm とした. ここで、CFRP ケーブルの緊張には反力を受け 持つ鋼製フレームの両端に緊張力を導入するための油 圧ジャッキおよび荷重測定のためのロードセルを接続 した緊張装置(図-7)を用いた.また、試験体のスパ ン中央部の両側面に LVDT を設置して変位を測定し、試 験体側面の引張鉄筋高さの位置に  $\pi$ 型変位計を設置し て、曲げひび割れ幅を測定した(図-8).さらに、CFRP



(両引き試験:埋め込み材の種類を考慮,かぶり補強材 はなし)



図-10 接着界面周辺の断面図(界面(1)~(3)) (埋め込み材:エポキシパテ,界面(1),(3)でのすべり)

ケーブル表面に検長 5mm のひずみゲージを 50mm 間隔 で設置して CFRP ケーブルひずみ分布を測定した. なお, CFRP ケーブルはより線だが,より線を構成する各線に おける繊維のより角度と各線のよりの角度が相殺して, ケーブルの長手方向と繊維方向が一致するようになっ ているため,ひずみゲージをケーブルの長手方向に設置 することで,繊維方向のひずみを測定することができた. 各試験体には以下のパラメータを考慮した.

- 1)補強形式:外ケーブル PC (定着体は新たに設置), NSM,そして PNSM の3 種類
- 2) 導入緊張レベル: FRP ケーブルの引張強度 0% (NSM



写真-1 剥離破壊後の試験体の状況 (埋め込み材:ポリマーセメント,界面(2)でのすべり)



写真-2 剥離破壊後の試験体の状況 (埋め込み材:高流動エポキシ樹脂,界面(3)でのすべり)



写真-3 剥離破壊後の試験体の状況

となる), 14.5%, そして 30%の 3 種類

- 3) 埋め込み材:エポキシパテおよびポリマーセメントの 2種類
- かぶり補強材:エポキシパテおよびポリマーセメントの2種類

ここで、外ケーブル PC 補強試験体においては、両端部 に定着体を設置して、膨張剤を充填してケーブルを固定 した鋼管を定着体に設置し、鋼管に設置したで引っ張る ことにより緊張力を導入した.また、2ヶ所の載荷点直 下の両側面の引張縁、計4か所にそれぞれ鋼製の偏向具 を設置し、ケーブルを偏向させた.

#### 4. 実験結果

## 4.1両引きせん断試験結果と考察

#### (1) 埋め込み材の種類に関する検討

両引き試験の結果から、埋め込み材の種類が異なるケ ースでかぶり補強材のない場合に関する荷重-変位の 関係を図-9に示す.なお、各種類の試験体ごとに3体 の実験を行ったが、ほぼ同様の挙動を示したため、図に は内1体の挙動のみを示す.また、以後の図および写真 に対しても同様に内1体のものについて示す.まず、ポ リマーセメントを埋め込み材に用いた場合は、低荷重レ ベルにおけるグラフの傾き(接着界面のせん断剛性と同



義)は大きいが、早期に CFRP ケーブルが引き抜け始め、 図-10 に示した界面(2)での CFRP ケーブルの引き抜け 破壊に至った. CFRP ケーブル引き抜けの状況写真を写 真-1 に示す. このときの最大荷重も他のケースに比べ て20%程度低い値となっている.次に、高流動エポキシ 樹脂を用いた場合には、接着界面のせん断剛性がやや低 下する微視的な剥離が早期に生じるが、界面(3)のコンク リート表層部で剥離が生じている(図-10,写真-2参 照)こと、および最大荷重や最大変位が最も大きいこと から, 接着界面の能力を最大限に生かせたと考えられる. ここで、荷重-変位挙動の中程に傾き(せん断剛性)が やや低下している箇所が見られるが、これは微視的剥離 が発生したために生じたと推測される. この現象につい ては著者らの研究®でも記述している.一方,エポキシ パテを用いた場合についても、 微視的剥離発生と推測さ れる箇所が見られるが、その後も高い剛性を維持したま ま剥離破壊に至った. なお, エポキシパテを用いた場合 には一部は界面(1)で、その他の箇所は界面(3)で、そして 高流動エポキシ樹脂を用いた場合には界面(3)で剥離し

囲めぶったれている		最大荷重	界面剥離破壊エネル	剥離
埋め込み材	INO.	(kN)	ギー (N/mm)	界面
	1	99.9	1.910	
	2	104.7	2.098	(1)
	3	101.0	1.953	(1)
	平均值	101.9	1.987	
ポリマーセ メント	1	70.6	0.561	
	2	83.0	0.776	(2)
	3	87.2	0.856	(2)
	平均值	80.3	0.726	
高流動エポ キシ樹脂	1	104.8	2.227	
	2	100.9	2.064	(2)
	3	103.7	2.180	(3)
	平均值	103.2	2.159	

## 表-2 界面剥離破壊エネルギーの算定値 (埋め込み材に関する検討)

## 表-3 界面剥離破壊エネルギーの算定値 (かぶり補強材に関する検討: 埋め込み材はエポキシパテ)

かぶり補強	Na	最大荷重	界面剥離破壊エネル	剥離
材	INO.	(kN)	ギー (N/mm)	界面
エポキシパテ	1	110.3	0.121	
	2	120.4	0.144	(1)
	3	103.5	0.106	(4)
	平均值	111.4	0.123	
	1	129.2	0.130	
ポリマーセ	2	129.3	0.130	(2)
メント	3	129.4	0.130	(3)
	平均值	129.3	0.130	

た(図-10,写真-3参照). これは、エポキシパテとコ ンクリート間の付着強さがコンクリートのせん断強度 より若干低かったためと考えられるが、最大荷重は同程 度に到達しており、エポキシパテを用いても高流動エポ キシ樹脂を用いた場合と同程度の付着強さが得られる ことが実験的に示された.よって、CFRP-エポキシ系接 着材間およびエポキシ系接着材-コンクリート間に強 固な付着が確保されることが明確となった.

## (2) かぶり補強材の種類に関する検討

両引き試験の結果から,かぶり補強材の種類のことなるケースに関する荷重-変位の関係を図-11に示す.ま ず,エポキシパテをかぶり補強材に用いた場合について は,かぶり補強しない場合にあった微視剥離の発生に伴 う剛性低下がかなり抑えられ,最大荷重も10%程度向上 している.しかし,かぶり補強材が図-12に示した界面 (4)での早期剥離により,付着強さの向上効果には限界が あった.次に,ポリマーセメントをかぶり補強に用いた 場合については,初期の剛性がかなり向上している.ま た,微視的な剥離の発生に伴う剛性低下はあるものの,



最大荷重および最大変位がともに 30%以上向上してい ることから,ポリマーセメントを用いたかぶり補強によ り付着強さが大きく向上していることが明確になった. これは,ポリマーセメントはコンクリートと良好な付着 が得られること,通常のセメントモルタルよりエポキシ 系接着材との付着が強いこと,およびエポキシ系接着 材より大きな剛性を確保できることによりより大きな 付着性能が得られたためであると考えられる.

# (3) 界面剥離破壊エネルギー算定による付着強さの評価に関する検討

著者らは過去の研究<sup>9</sup>において連続繊維シートの付着 強さに対する評価指標として界面剥離破壊エネルギー $G_f$ を提案した.

$$P_{\max} = b\sqrt{2G_f E_f t_f} \tag{1}$$

 $G_f$ : 界面剥離破壊エネルギー (N/mm)

P<sub>max</sub>:最大荷重(N)

b:補強層の幅の平均値(mm)

E<sub>f</sub>:補強層の引張弾性率(kN/mm<sup>2</sup>)

t<sub>f</sub>:補強層の換算公称厚さ(mm)

この式(1)を式(2)に示すように $G_f$ の算定式に変形し、これらの式を用いて $G_f$ を算定し、その結果を表-2および表-3に取り纏めた.

$$G_f = \frac{P_{\max}^2}{2b^2 E_f t_f} \tag{2}$$

本研究では、図-13 (a) に示すように CFRP ケーブルと 埋め込み材が一体となって引っ張られていると考えて、 式 (2) のb,  $E_f$ および $t_f$ には CFRP ケーブルと埋め込み 材が一体となった補強層全体に対する値を入力すること にした. すなわち、エポキシパテで埋め込んだケースで は、b=50mm、 $E_f t_f = (E_{cf} A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp})/b=261.224 kN/mm を入$  $力した. なお、<math>E_{cf} \land A_{cf} + E_{cp} A_{cp}$ (b) に示すように CFRP ケーブルとポリマーセメント間 のすべりによるものであったため、CFRP ケーブルと ポリマーセメント間の界面にすべりが生じる解析モデル について  $G_{f}$ の算定式を導出し、PNSM における CFRP ケ ーブルの付着強さの評価を行う. まず、図-14 に示す



図-14 接着界面周辺の解析モデル

CFRP ケーブルとコンクリートよりなる一次元の解析モ デルを考える. u<sub>f</sub>を CFRP ケーブルの変位, u<sub>c</sub>をコンク リートの変位とすると, CFRP ケーブルとコンクリート の相対変位  $\delta$  は u<sub>f</sub>-u<sub>c</sub>である.  $\delta$  と CFRP ケーブルとコ ンクリートの界面付着応力  $\tau$  の関係として様々なモデル が提案されているが,本研究では最も単純な図-15 に示 す弾性モデルを用いることにした. 図中の  $\delta = \delta_1$ の点は, 剥離が開始する点である. 界面剥離破壊エネルギーG<sub>f</sub>は, 単位面積の剥離が開始するまでに,界面において消費さ れるエネルギーと定義される. なお,剥離破壊エネルギ -G<sub>f</sub>は  $\tau - \delta$ 曲線と  $\delta$  軸間の面積に等しく,式(3)の ように示される.

$$G_f = \int_0^\delta \tau d\delta = \int_0^\delta f(\delta) d\delta \tag{3}$$

次に、CFRP ケーブル、埋め込み材、そしてコンクリートを弾性体とするとき、CFRP ケーブルの弾性係数を $E_f$ 、 直径を $d_b$ とすれば、CFRP ケーブルの支配方程式は式(4) のように表される.

$$E_{f} \frac{d_{b}}{4} \frac{d^{2}u_{f}(x)}{dx^{2}} - \tau(x) = 0$$
 (4)

T

一方,加力端 (x=0) では,CFRP ケーブルにより作用 荷重が受け持たれているとすると,式 (5) のようにな る.

$$\frac{P}{\pi d_b^2} = \frac{4P}{\pi d_b^2} = \sigma_f(0) = E_f \frac{du_f(x)}{dx} \bigg|_{x=0}$$
(5)

また、 $\sigma_{f}(x)$ は CFRP ケーブルの応力である.加力端から 十分遠い位置 ( $x = \infty$ ) では、付着応力はもはや 0 で、 CFRP ケーブルの応力も 0 になるものとすると、式 (6) のようになる.

$$\sigma_f(\infty) = E_f \left. \frac{du_f(x)}{dx} \right|_{x=\infty} = 0 \tag{6}$$



図-15相対変位 $\delta$ と付着応力 $\tau$ の関係



図-16 補強材の断面積の考え方(かぶり補強有の場合)

さらに、コンクリートの変位は CFRP ケーブルの変位に 比べて十分に小さいと考えて、ここでは $u_c$ を無視するこ とにすると、式(7)が成り立つ.

$$\delta(x) = u_f(x) \tag{7}$$

そして、加力端 (x=0) において、CFRP ケーブルの剥 離が開始したとする ( $\delta(0) = \delta u$ ) と、界面剥離破壊エネ ルギー $G_f$ の算定式は、式 (3) ~ (7) より式 (8) のよ うに表される.

$$G_{f} = \int_{0}^{\delta} \pi d\delta = \int_{0}^{\delta} E_{f} \frac{d_{b}}{4} \frac{d^{2}u_{f}(x)}{dx^{2}} d\delta$$
$$= \int_{x=\infty}^{x=0} E_{f} \frac{d_{b}}{4} \frac{d^{2}u_{f}(x)}{dx^{2}} \frac{d^{2}u_{f}(x)}{dx} dx$$
$$= \frac{2P_{u}^{2}}{\pi^{2} E_{f} d_{b}^{3}}$$
(8)

式(8)の $d_b$ に CFRP ケーブルの最大径の2倍(2本分) を、 $P_u$ に最大荷重の実験値を2で除して片面分にしたも のをそれぞれ入力して $G_f$ を算定し、表-2に示した.さ らに、かぶり補強を行った場合には、図-16に示すよう に、かぶり補強材も含めた補強層全体に対する値を入力 することにした.すなわち、エポキシパテで埋め込み、 ポリマーセメントでかぶり補強を行ったケースでは、  $b_1=50$ mm および $b_2=200$ mm として、 $E_f t_f = (E_{cf} A_{cf} + E_{cp} A_c)/$  $b_1+E_{pem}A_{pemp}/b_2=401.224 kN/mm を入力した.なお、<math>E_{pem}$ と $A_{pemp}$ はかぶり補強ポリマーセメントの引張弾性率と 断面積を意味する.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(土木学会編)<sup>10</sup>には、 $G_f=$ 



0.5N/mm が標準の値とされており、エポキシ系接着材で 埋め込んだ場合にはかなり高い付着強度が得られるこ とが明確となった. また, 最も Grが低いレベルにあるポ リマーセメントを埋め込み材に用いた場合でもこの標 準値と同等のレベルにあるため、このケースでも連続繊 維シート接着の場合と同等のレベルの付着強さが得ら れることがわかった.一方,かぶり補強した試験体では Grがかなり低い.これはかぶり補強材の剛性も考慮し, かぶり補強材を接着した幅を接着幅として算出したた め見かけ上低い値となっているが、実際には溝の埋め込 み材の接着力の方が大きく、かぶり補強材は埋め込み材 を抑える役割が大きいため、接着幅は実際には 200mm より小さくすべきと考えられ、その場合にはGrはかなり 大きくなる.ただし、今回の研究ではかぶり補強材がい ずれの役割を果たしているのかは明確になっていない ため、かぶり補強を行った場合の Grに対して比較は行わ ないことにする.

## (4) 有効付着長の算定に関する検討

Nakaba らの研究<sup>11)</sup> においてコンクリート圧縮強度 f<sub>c</sub>'と最大付着強度 τ<sub>f</sub>の関係は式(9),式(10)のよう に示されている.

$$\tau = \tau_f \left[ \frac{\delta}{\delta_1} \cdot \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{\delta}{\delta_1}\right)^n} \right]$$
(9)  
$$\tau_f = 3.50 f_c^{(0.19)}$$
(10)

(10)

ここで、 $\tau$ : 付着応力 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\tau_{f}$ : 最大付着強度  $(N/mm^2)$ ,  $\delta$ : すべり量 (mm),  $\delta_1$ : 最大付着強度到 達時のすべり量(0.065mm), n:3 (定数), そして, f<sub>c</sub>': コンクリート圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>) である. また, コンク リート圧縮強度  $f_{c}$  は界面剥離破壊エネルギー $G_{f}$ の関係 を式(11)のように示した.



図-18 CFRP ケーブルひずみ分布状況の一例 (埋め込み材:高流動エポキシ樹脂を用いたケース)

$$G_{f} = \int_{0}^{\infty} \tau d\delta = \int_{0}^{\infty} \tau_{f} \left[ \frac{\delta}{\delta_{1}} \cdot \frac{3}{2 + \left(\frac{\delta}{\delta_{1}}\right)^{3}} \right] d\delta$$
$$\approx 0.184\tau_{f} = 0.644f_{c}^{'0.19} \tag{11}$$

また,著者らの研究<sup>12)</sup>において,L<sub>e</sub>と P<sub>max</sub>の関係式は 式(12)ように示されており、式(11)を代入して、コ ンクリート圧縮強度との関係に変換する.

$$L_{e} \approx \frac{P_{\max}}{\left(\frac{b\tau_{f}}{2}\right)} = \frac{2b\sqrt{2G_{f}E_{f}t_{f}}}{b\tau_{f}}$$
$$= \frac{0.649\sqrt{E_{f}t_{f}}}{f_{c}^{'0.095}} \qquad (12)$$

式(12)から有効付着長L。を算出すると、埋め込み材 にエポキシパテを用いた場合に230.8mm, ポリマーセメ ントを用いた場合に182.0mm,高流動エポキシ樹脂を用 いた場合に224.2mm であった. ここで, ひずみゲージに より得られたひずみ分布 (図-17~図-19に示す) にお いて、載荷端におけるひずみの3%にあたるひずみが生 じている箇所までの距離を有効付着長と考えて推定す ると、ポリマーセメントを用いた場合を除き、算定値と よく一致した、なお、埋め込み材にポリマーセメントを 用いた場合には、ケーブルとポリマーセメント間にすべ りが生じたために、見かけ上、有効付着長が長くなった ように見えていると考えられる. また, かぶり補強材に エポキシパテを用いた場合に 253.5mm, ポリマーセメン トを用いた場合に 271.4mm であり, ひずみ分布 (図-20 および図-21に示す.)から推定される有効付着長とよ





図-20 CFRP ケーブルひずみ分布状況の一例 (かぶり補強材:エポキシパテを用いたケース)

く一致した. なお,かぶり補強材にポリマーセメントを 用いた場合に最も有効付着長が長く,最大荷重も大きく なっており,理にかなっている.

## 4.2 PNSM 補強した RC 梁の 2 点曲げ載荷試験結果と考 察

#### (1) 補強形式の種類に関する検討

2 点曲げ載荷試験の結果から、補強形式の種類が異な るケースに関する荷重-変位の関係を図-22 に示す.ま ず,破壊モードについては、無補強および外ケーブル補 強試験体では、引張鉄筋降伏後に梁の圧縮縁でのコンク リート圧縮破壊が生じて荷重が増加しなくなったため、 実験を終了した. PNSM 試験体 (CFRP ケーブル破断強 度の 14.5%にあたる緊張応力を導入、以後、14.5%緊張 と呼称する)では、引張鉄筋降伏後にコンクリート表層 部(界面(3))で剥離が進展し、直後に梁の圧縮縁でのコ ンクリート圧縮破壊が生じて荷重が急激に低下して、無 補強試験体レベルまで荷重が低下したため、実験を終了 した.各種構造性能指標については、無補強試験体の場 合に比べて、NSM および外ケーブル補強(ケーブルは無 緊張)では特に引張鉄筋降伏荷重の向上効果が顕著に現 れている.また、ひび割れ発生荷重や剛性にも若干なが



図-21 CFRP ケーブルひずみ分布状況の一例 (かぶり補強材:ポリマーセメントを用いたケース)



図-22 荷重-変位の関係(補強形式)

ら向上効果が見られる. さらに、外ケーブル補強のケー スでケーブルに緊張力を導入することで、特に使用性に 関する構造性能がより高められている. 一方、PNSM で は、すべての構造性能に対して飛躍的な向上効果が得ら れており、NSM の場合に対しても、ひび割れ発生荷重が 25.4%、引張鉄筋降伏荷重が 23.9%、そして最大荷重が 10.9%向上しており、PNSM の有意性が確認された. こ れらの効果が得られたのは、PNSM では CFRP ケーブル とコンクリート間の全面付着が確保されるため、CFRP ケーブルに導入された緊張力が構造物に効率的に伝達 されたためと考えられる.

#### (2) 導入緊張力に関する検討

2 点曲げ載荷試験の結果から、導入緊張力が異なるケースに関する荷重-変位の関係を図-23 に示す.導入緊張応力比 14.5%、30%の場合に、無緊張の場合より、それぞれひび割れ発生荷重が 101.7%、163.5%、引張鉄筋





降伏荷重が 23.9%, 29.9%, そして最大荷重が 9.8%, 17.1%向上しており,緊張力導入により各種曲げ構造性 能が総合的かつ飛躍的に向上していることが実験的に明

#### (3) 埋め込み材とかぶり補強材の種類に関する検討

確となった.

2 点曲げ載荷試験の結果から、埋め込み材およびかぶ り補強材が異なるケースに関する荷重-変位の関係を図 -24 に示す.まず、破壊モードについては、ポリマーセ メントを埋め込み材に用いた試験体では、引張鉄筋降伏 後に CFRP ケーブルの引き抜けが界面(2)で生じ、直後に



梁の圧縮縁でのコンクリート圧縮破壊が生じて荷重が急 激に低下して、無補強試験体レベルまで荷重が低下した ため、実験を終了した. 各種構造性能指標については、 埋め込み材にポリマーセメントを用いた場合には、エポ キシパテを用いた場合に比べて低荷重レベルでの剛性は やや高いが、その後の剛性、鉄筋降伏荷重、そして最大 荷重はいずれも低くなっている. この挙動は、前章で検 討した、埋め込み材にポリマーセメントを用いた場合の 両引きせん断試験における荷重-変位挙動と一致してい る. すなわち、ポリマーセメントはコンクリートとの間 に良好な接着を確保できるが、エポキシ系接着材に比べ て FRP 表面との付着強さは劣るためと考えられる. 次に, エポキシパテを埋め込み材に、ポリマーセメントをかぶ り補強材にそれぞれ用いた試験体では、引張鉄筋降伏後 に圧縮破壊が生じ、変形の増加後にコンクリート表層部 (界面(3))から剥離が進展して荷重が急激に低下し、無 補強試験体レベルまで荷重が低下したため、実験を終了 した. ポリマーセメントによるかぶり補強は使用性能に 対しては梁の引張縁断面を増やすだけであり、ほとんど 向上効果が得られないが、埋め込み材の初期剥離が生じ る箇所, すなわち RC 梁の載荷試験では引張鉄筋の降伏 以降は埋め込み材の剥離が抑えられるため、剛性向上や 最大荷重の向上効果が得られている.以上の結果から, 埋め込み材にエポキシ系接着材を,かぶり補強材にポリ マーセメントを用いることの有意性が実験的により明確 となった.



#### (4) ひび割れ抑制効果に関する検討

2 点曲げ載荷試験の結果から、荷重-ひび割れ幅の関係を図-25 に示す.鋼材の腐食に対する許容ひび割れ幅は、コンクリート標準示方書[設計編](土木学会編)<sup>13</sup>において一般の環境下で異型鉄筋を用いている場合に0.005c(cはかぶり深さ)とされている.このときの荷重は、無補強を基準にして、NSM 補強で14.3%、PNSM

(14.5%緊張)補強で70.6%,そして PNSM (30%緊張) 補強で 349%向上しており,導入緊張力が大きいほど飛 躍的に大きなひび割れ抑制効果が表れていることがわ かる.

#### 5. PNSM 補強構造物の各種曲げ構造性能評価

#### 5.1 材料の特性値

コンクリートは、ひび割れ発生以前は引張りにも抵抗 するが、ひび割れ発生後は抵抗しないものと考える(図 -26 (a)).なお、土木学会編、コンクリート標準示方書 [設計編](土木学会編)<sup>13</sup>より、圧縮領域においては ひずみが0.02に達するまでは二次曲線に沿って応力は増 加するが、その後はひずみが0.0035に達するまで直線状 に一定の値を取ると仮定した.次に、鉄筋に関しては、 鉄筋降伏後は応力-定となるように仮定するのが通常 であるが、本研究では3本の鉄筋の引張試験を行い、そ



の平均値を用いて,引張鉄筋降伏荷重の算定には 420N/mm<sup>2</sup>を,最大荷重の算定には504N/mm<sup>2</sup>をそれぞれ 適用して,より実際の挙動に近い算定を行うことにした. さらに, FRP に関しては弾性体と考えることとした(図 -26 (b)).

#### 5.2 ひび割れ発生荷重の算定

ここでは、既往の曲げ理論によるひび割れ発生荷重の 算定を行う.まず、各種材料の弾性係数をコンクリート の弾性係数で除した値(弾性係数比)を各種材料の断面 積に乗じ、コンクリートに換算する.なお、弾性係数比 は異形鉄筋では  $n_s=E_s/E_c$ 、そして、CFRP ケーブルでは  $n_f=E_t/E_c$ である。次に、式(13)から中立軸位置  $h_c$ を求 める.

$$h_{c} = \frac{A_{c}d_{c} + A_{s1}d(n_{s} - 1)}{A_{total}}$$
(13)

ここで、A<sub>total</sub>は以下の式(14)から求められる.

$$A_{total} = A_c + A_{s1}(n_s - 1) + A_{s2}(n_s - 1) + A_f(n_f - 1)$$
(14)

そして, ひび割れ発生荷重 P<sub>cr</sub> は式 (15) から算出される.

$$P_{cr} = \frac{2 \cdot I_g \cdot (f_b + \sigma_{tf})}{L \cdot h_c}$$
(15)

ここで、 $I_g$ は中立軸に対する断面 2 次モーメント、 $f_b$ は コンクリートの引張強度、そして、 $\sigma_{tf}$ は CFRP ケーブル への導入緊張応力により梁の下縁に生じる圧縮応力、そ して、L は支点と載荷点の間隔を意味する. なお、CFRP ケーブルに導入された緊張力  $P_{tf}$ を用いて $\sigma_{tf}$ は式(16) のように表される.

$$\sigma_{tf} = \frac{P_{tf}}{A_c} + \frac{P_{tf}}{I_g} (d - h_c)$$
(16)

表-4 ひび割れ発生荷重の算定値

出送	ひび害れ発生荷重 (kN)		
	算定値	実験値	
無補強	11.1	11.2	
NSM(エポキシパテ埋め込 み)	11.1	11.5	
PNSM (14.5%緊張 エポキシ ハテ埋め込み)	20.2	21.3	
PNSM (30%緊張, エポキシ ハテ埋め込み)	29.8	30.3	
PNSM (30%緊張, ポリマー セメント埋め込み)	29.9	30.4	
PNSM (30%緊張、エポキシ パテ埋め込み、かぶり補強	29.7	30.2	
PNSM (30%緊張 エポキシ パテ埋め込み, ポリマーセメ ントかぶり補油)	29.6	30.9	

以上の方法により算出されたひび割れ発生荷重の算定 値と実験値を表-4 に示す.算定値は実験値とよく一致 しており, PNSM で補強された RC 梁のひび割れ発生荷 重は,従来の曲げ理論を用いて評価できることがわかっ た.

## 5.3 鉄筋降伏荷重の算定

断面諸元を図-27 に示すように仮定する. 平面保持の 仮定のもと,ひずみ分布は線形分布とした. まず,引張 鉄筋のひずみは引張降伏ひずみ  $\epsilon_y$ であるため,相似則か ら CFRP ケーブルおよび圧縮縁ひずみのひずみ  $\epsilon_f$ および  $\epsilon'_c$ は以下の式 (17),式 (18) のように算出される.

$$\varepsilon_f = \frac{d_f - h_c}{d - h_c} \varepsilon_y \tag{17}$$

$$\varepsilon_c' = \frac{h_c}{d - h_c} \varepsilon_y \tag{18}$$

また,図-27(c)における力のつり合い条件から,式(19) が成り立つ.

$$C_{c} - T_{s} - T_{f} = 0 (19)$$

さらに、 $C_l$ ,  $T_s$ , および  $T_f$ はそれぞれ式 (20) ~ (22) のように算出される.

$$C_c = \int_0^{h_c} f_c b f(\varepsilon_c') dy \qquad (20)$$

$$T_s = \varepsilon_y E_s A_s \tag{21}$$

$$T_f = \varepsilon_f E_f A_f \tag{22}$$



表-5 引張鉄筋降伏荷重の算定値

4-控	引張鉄筋降伏荷重(kN)		
江作來	算定値	実験値	
無補強	73.0	73.3	
NSM (エポキシパテ埋め込み)	84.2	85.0	
PNSM(14.5%緊張, エポキシ パテ埋め込み)	95.7	105.3	
PNSM (30%緊張, エポキシパ テ埋め込み)	107.8	110.4	
PNSM (30%緊張, ポリマーセ メント埋め込み)	112.0	117.1	
PNSM (30%緊張, エポキシパ テ埋め込み, かぶり補強)	115.9	118.9	
PNSM (30%緊張, エポキシパ テ埋め込み, ポリマーセメン トかぶり補強)	122.8	122.8	

ここで、 $\epsilon_f$ は導入緊張力によるひずみを曲げによるひず みに加算したものとする.式 (20) ~ (22) を式 (19) に 入力して中立軸位置  $h_c$ が算出される.

次に、 $C_c$ の作用位置 y を求める. コンクリートの応力分 布に対する断面一次モーメント  $G_c$ は、以下の式 (23) に 示すとおりである.

$$G_c = \int_0^{h_c} f'_c b f(\varepsilon'_c) y dy$$
 (23)

そして、下記式 (24) に示すように、T<sub>s</sub>とT<sub>f</sub>の合力で除 することで y が算出される.

$$y = \frac{G_c}{T_s + T_f} \tag{24}$$

以上の算出結果を式(25)に入力することで,引張鉄筋 降伏時の最大モーメントが算出され,荷重に換算するこ とで引張鉄筋降伏荷重が算定される.

$$M_{sy} = T_s(d - y) + T_f(d_f - y)$$
(25)

算出結果と実験値の一覧を表-5 に示す. 算定値は実験 値とよく一致した.

化战	ε <sub>f</sub> (με)	最大荷重(kN)	
		算定値	実験値
無補強	_	75.2	75.4
NSM (エポキシパテ埋	6102	112 7	125 1
め込み)	0105	115.7	123.1
PNSM(14.5%緊張,			
エポキシパテ埋め込	6003	125.1	137.3
み)			
PNSM(30%緊張, エ	5012	127.2	146.5
ポキシパテ埋め込み)	5915	157.2	140.5
PNSM (30%緊張, ポ			
リマーセメント埋め	4601	132.2	137.9
込み)			
PNSM(30%緊張, エ			
ポキシパテ埋め込み,	2539	136.1	147.8
かぶり補強)			
PNSM (30%緊張, エ			
ポキシパテ埋め込み,	2006	152.2	159 5
ポリマーセメントか	2090	132.3	138.3
ぶり補強)			

表-6 最大荷重の算定値

## 5.4 最大荷重の算定

最大荷重はポリマーセメントで埋め込みケース(ケー ブル引き抜け)およびエポキシパテ埋め込みポリマーセ メントかぶり補強のケース(圧縮破壊先行)を除いて FRP ケーブルを含む補強層の剥離時により決定している.剥 離の原因となる FRP ケーブルの接着界面に生じるせん 断応力は、図-28に示すように載荷点近傍で最大になり、 有効付着長 L。'だけ離れた箇所ではせん断応力はかなり 小さくなる. ただし、ゼロにはならないことから、著者 らの研究<sup>12)</sup>において,曲げモーメントが最大になる載荷 点近傍の微小範囲に生じる引張荷重 frから、載荷点から 有効付着長 L。さけ離れた点の近傍の微小範囲に生じる 引張荷重 faを差し引いた値が式(1) に示した FRP ケー ブルの付着試験における最大荷重 Pmax と等価できること が提唱されている. なお、これは微小範囲を対象とした 場合には単純引張と曲げ引張が概ね等価になることに基 づいている. そして, 式 (26) から & f が求められる.

$$P_{u} \Rightarrow (f_{f} - f_{f1}) = b \sqrt{2G_{f}E_{f}t_{f}}$$
$$\Rightarrow (\varepsilon_{f} - \varepsilon_{f1})E_{f}A_{f} = b \sqrt{2G_{f}E_{f}t_{f}}$$
$$\Rightarrow \varepsilon_{f} = \sqrt{\frac{2G_{f}}{E_{f}t_{f}}} + \varepsilon_{f1}$$
(26)

また,埋め込み材にポリマーセメントを用いた場合の $\epsilon_{\rm f}$ は,式(8)を用いて式(26)を変形した式(27)を用いて算定する.

#### 表-7 実験における許容ひび割れ幅到達時ひび割れ幅の算定

仕様	ひび割れ幅の算定値(mm)
無補強	0.198
NSM(エポキシパテ埋め込み)	0.182
PNSM (14.5%緊張, エポキシパ テ埋め込み)	0.175
PNSM (30%緊張, エポキシパ テ埋め込み)	0.177
PNSM(30%緊張,ポリマーセ メント埋め込み)	0.320
PNSM(30%緊張, エポキシパ テ埋め込み, かぶり補強)	0.168
PNSM(30%緊張,エポキシパ テ埋め込み,ポリマーセメント かぶり補強)	0.177

$$\varepsilon_{f} = \sqrt{\frac{G_{f}\pi^{2}d_{b}^{3}}{2E_{f}A_{f}^{2}}} + \varepsilon_{f1}$$
(27)

ここで、 $G_f$ には両引きせん断試験から得られた値(表 -2を参照)を用いることにした.また、L<sub>e</sub>には式(12) から算出した値をそれぞれ用いることにした.  $\epsilon_f$ および 最大荷重の算出過程を以下に示す.まず、 $\epsilon_{fl}$ を仮定す る( $\epsilon_f$ が算出される)  $\Rightarrow \epsilon_f$ 、 $\epsilon_{fl}$ からそれぞれの場所で の曲げモーメント M<sub>u</sub>, M<sub>ul</sub>を算出する $\Rightarrow$ M<sub>u</sub>(L<sub>1</sub>-L<sub>e</sub>)/L<sub>1</sub> = M<sub>ul</sub>であれば、このときの $\epsilon_f$ を最大荷重の算定に用い、 そうでない場合には $\epsilon_{fl}$ の仮定からやり直し、繰り返し 計算を行う.算定結果と実験値の一覧を表-6に示す. 算定値は実験値とよく一致した.

#### 5.5 ひび割れ幅の評価

土木学会編,コンクリート標準示方書[設計編]<sup>13)</sup>では、曲げひび割れ幅を求める計算式は式(28)によるものとしている。

$$W = k \{4c + 0.7(c_n - \phi)\}(\varepsilon_n + \varepsilon_{cs}')$$
(28)

ここで、kは引張鉄筋の表面形状による係数、cは引張鉄筋のかぶり、cp は引張鉄筋の中心間隔、 $\phi$ は引張鉄筋の 直径、 $\epsilon_p$ はひび割れ断面における鉄筋応力度の増加量、 そして、 $\epsilon'_{s}$ はコンクリートの収縮およびクリープなど によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値であり、 本研究ではk=1.0、c=40mm、cp=70mm、 $\phi$ =16mm、そし て、 $\epsilon'_{s}$ =150×10<sup>6</sup>とした。一方、FRPシートで補強され た RC 梁部材の曲げひび割れ幅に関する過去の研究<sup>14)</sup> では、RC 梁部材の曲げひび割れ幅は FRP の接着補強に より抑制され、低減するとしている.そして、土木学会 編、コンクリートライブラリー101「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」<sup>10)</sup>では、そ の低減係数は 0.7 としている. そこで、本研究では、式 (28)から算出されたひび割れ幅に0.7を乗ずることで、 PNSM 補強 RC 梁のひび割れ幅を算定した. 前章で説明 した許容ひび割れ幅 w<sub>a</sub> (=0.005c) 到達荷重への到達時 のひずみから算出したひび割れ幅を表-7 に示す. 算定 値は許容ひび割れとよく一致した.

## 6. まとめ

本研究では,FRP 埋め込み緊張補強技術に用いる使用 材料の選定や工程,曲げ補強効果に関する実験的検討, そして各種曲げ構造性能に関する簡易な評価法について 検討した.本研究で得られた知見を以下にまとめる.

- (1) 両引きせん断試験から、CFRP-エポキシ系接着材 界面,エポキシ系接着材-コンクリート界面,およ びポリマーセメント-コンクリート界面に特に強 固な付着が得られることが実験的に示された.
- (2) エポキシパテを埋め込み材に用いて CFRP ケーブル と埋め込み材の付着を確保し、ポリマーセメントで かぶり補強を行うことで、最高級の付着強さが確保 されることを明らかにした.また、このケースで補 強した RC 梁の最大荷重や終局時の変位が最高級の レベルになることが実験的に明確となった.
- (3) CFRP ケーブルへの導入緊張力が大きいほどひび割 れ発生荷重,引張鉄筋降伏荷重,そして剛性といっ た使用性や最大荷重が総合的に向上され,より大き なひび割れ抑制効果が得られることが実験的に示 された.
- (4) PNSM 補強 RC 梁のひび割れ発生荷重および引張鉄 筋降伏荷重は、既往の曲げ理論を用いた評価方法に より、うまく評価できることがわかった.また、剥 離モードとなったケースでの最大荷重は同様の破 壊モードとなった両引きせん断試験の結果を用い て、既提案の算定方法によってうまく算定できるこ とがわかった.さらに、ひび割れ幅は既往の算定式 を用いてうまく算定できることがわかった.

## 参考文献

- Blaschko, M., Zilch, K.: Rehabilitation of concrete structures with strips glued into slits, Proceedings of 12th International Conference on Composite Materials, Paris, CD-ROM, 1999
- Gentile, C., Rizkalla, S.: Flexural Strengthening of timber beams using FRP, Technical Reputation, ISIS Canada, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada, 1999
- 3) Carolin, A., Nordin, H., Täljsten, B.: Concrete beams strengthened with near surface mounted reinforcement of

CFRP, Proceedings of 1st International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2001), Vol. II, Editors: Teng, J.-G.., Hong Kong, China, 1059-1066, 2001

- 4) Lorenzis, L.D., Nanni, A., Tegola, A.L.: Flexural and Shear Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Near Surface Mounted FRP Rods, Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Ottawa, Canada, Editors: Humar J., Razaqpur A.G., pp. 521-528, 2000
- El-Hacha, R., Rizkalla, S.: Near Surface Mounted FRP Bars Reinforcement for Flexural Strengthening of Concrete Structures, ACI Structural Journal, Vol.101, No.5, 717-726, 2004
- Hassan, T., Rizkalla, S., Bond Mechanism of Near Surface Mounted FRP Bars for Flexural Strengthening of Concrete Structures, ACI Structural Journal, Vol.101, No.6, 830-839, 2004
- 7) Nordin, H., Taljsten, B., Carolin, A., Concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted reinforcement (NSMR), Proceedings of FRP Composites in Civil Engineering (CICE2001), Vol. II, Editor: Teng, J.G., Hong Kong, China, 1067-1075, 2001
- Wu, Z. S. and Yin, J.: Fracturing Behaviors of FRP-Strengthened Concrete Structures, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 70, No. 10, pp. 1339-1355, 2003
- Wu, Z. S., and Niu, H.: Shear Transfer Along FRP-Concerte Interface in Flexural Members, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavement, JSCE, No.662/V-49, pp.231-245, 2000
- 10) 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 101,2000
- Nakaba, K., Kanakubo, T., Furuta, T., and Yoshizawa, H., Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete, ACI Structural Journal, Vol.98, No.3, pp. 359-367, 2001
- 12) Z.S. Wu, H. Niu: Prediction of crack-induced debonding failure in R/C structures flexurally strengthened with externally bonded FRP composites, JSCE Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, Vol.63, No.4, pp.620-639, 2007
- 13) コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 1996.
- 14) 吉澤弘之,呉 智深:連続繊維シート補強コンクリ ート引張・曲げ部材のひび割れ挙動に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No.3, pp. 1519-1524, 1999

(2009年9月24日受付)