

# 論文 2次元格子状炭素繊維補強材の格子点交差部に着目した付着挙動

長濱 貴志<sup>\*1</sup>・黒田 一郎<sup>\*2</sup>・日野 伸一<sup>\*3</sup>・太田 俊昭<sup>\*4</sup>

**要旨:** 2次元格子状炭素繊維補強材の格子点交差部による機械的な付着挙動を考慮して部材レベルのFEM解析に組み込める簡易な付着モデルを提案した。既往の試験結果も含め、付着モデルのバネ係数の算定に用いる格子点交差部の付着応力-すべり量関係について定式化した。無次元化した付着応力-すべり量関係をもとに設定された付着モデルを導入したFEM解析を行ない、試験結果と比較することにより、本モデルの有用性について検証した。

**キーワード:** 2次元格子状炭素繊維補強材, 格子点交差部, 付着挙動, 付着モデル

## 1. はじめに

近年、2次元格子状に成形加工した2次元格子状炭素繊維補強材（以下、CFRP ネットと称する。）のコンクリート構造物への適用が試みられている。土木学会による設計指針<sup>1)</sup>では、連続繊維補強材を用いたコンクリート部材の終局曲げ耐力やせん断耐力の算定は、コンクリートと補強材との付着は完全であるという仮定のもとに行っている。

しかし、CFRP ネットは主に付着を格子点交差部による機械的付着によってコンクリートとの一体化が図られており、CFRP ネットの付着-すべり特性については未だ十分に検討されていない状況にある。

そこで、本研究では、CFRP ネットの付着特性を部材レベルの2次元FEM解析に組み込むことのできる簡易な付着モデルを構築し、付着特性の定量的評価を試みる。そして、本モデルの有用性を実験結果との比較によって検証する。

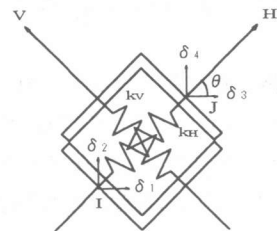


図-1 ボンドリンク要素

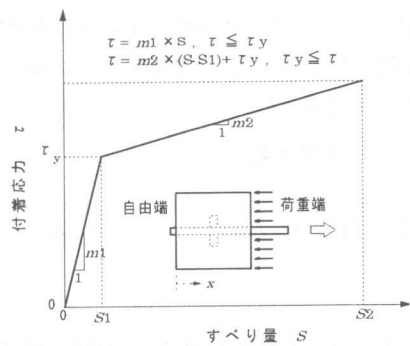


図-2 CFRP ネット格子点交差部の付着応力-すべり量関係

## 2. 付着モデルの設定と解析方法の概要

### 2.1 CFRP ネットの付着モデル

CFRP ネット格子点交差部の付着挙動については、これまでいくつかの実験および解析的

\*1 九州大学大学院 工学研究科 都市システム工学専攻 工修 (正会員)

\*2 防衛大学校講師 土木工学科 工博 (正会員)

\*3 九州大学大学院助教授 工学研究科 都市環境システム工学専攻 工博 (正会員)

\*4 九州大学大学院教授 工学研究科 都市環境システム工学専攻 工博 (正会員)

研究<sup>2)</sup>が報告されている。しかし、未だ部材レベルの解析へ適用可能な格子点交差部の付着モデルについては示されていない。

本研究では、はりやスラブ解析等部材レベルへ適用可能な付着モデルとして、CFRP ネット軸筋そのものを棒要素で、格子点交差部における付着応力-すべり量関係をボンドリンク要素で表現する図-1に示すような簡易な2次元モデルを提案する。

このボンドリンク要素は、水平方向と垂直方向の直角方向に配置した二つのバネからなり、それぞれのバネ係数  $k_H$  および  $k_V$  は次のように設定した。

すなわち、格子点交差部の水平方向バネ係数  $k_H$  は、格子点交差部での付着応力-すべり量関係をバイリニアで近似したモデルを用い(図-2)、交差部の抵抗力は補強筋の断面積に比例するとした。一方、垂直バネ係数  $k_V$  は、格子点交差部での縦筋と横筋が分離していくずれを表わしており、その初期剛性としては、CFRP ネットのヤング係数を用いることとする(図-3)。したがって、バネ係数  $k_H$  および  $k_V$  は次式で表される。

$$k_H = m \cdot l_H \cdot A_{cf} \quad (1)$$

$$k_V = E_{cf} \cdot A_{cf} / l_V \quad (2)$$

ここに、

$k_H, k_V$ : 水平方向(せん断)および垂直方向バネ係数 [N/mm]

$l_H, l_V$ : 水平方向および垂直方向バネの単位長さ [mm]

$m$ : バイリニアで近似した付着応力-すべり量関係の勾配 [N/mm<sup>3</sup>]

$A_{cf}$ : CFRP ネットの断面積 [mm<sup>2</sup>]

$E_{cf}$ : CFRP ネットのヤング係数 [N/mm<sup>2</sup>]

$f_{cfu}$ : CFRP ネットの引張強度 [N/mm<sup>2</sup>]

$f'_c$ : コンクリート圧縮強度 [N/mm<sup>2</sup>]

$\epsilon_{cu}$ : コンクリートの終局圧縮ひずみ

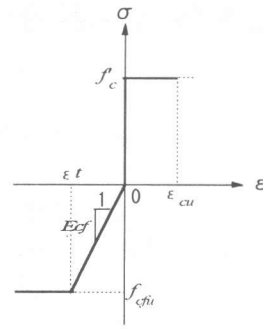


図-3 垂直バネに用いるCFRP ネット

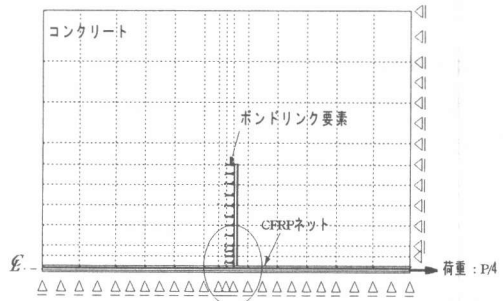


図-4 引抜き試験の要素分割図

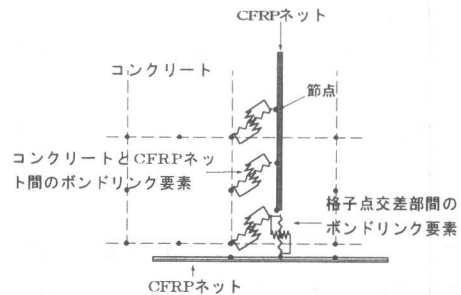


図-5 格子点交差部の要素分割図

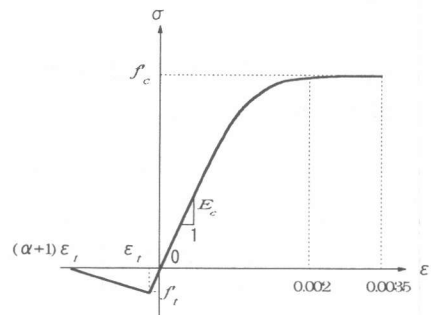


図-6 コンクリートの応力-ひずみ関係

## 2.2 FEM 解析の概要

既往の引抜き実験の FEM 解析による追跡を試みた。たとえば、関島ら<sup>3)</sup>が行った引抜き実験について、2次元 FEM 解析の要素分割図を図-4 に示す。図-4 の円内に示す格子点交差部の要素分割の詳細を図-5 に示す。点線で示した四角部分のコンクリート要素には、2次元四角形高次要素を用いた。CFRP ネットは、2次元棒要素を用いた。コンクリートと CFRP ネットの直線部および格子点交差部に各節点毎、ボンドリンク要素を配置した。図では、ボンドリンク要素の存在を示すため、節点を故意にずらして示してあるが、リンクされた2個節点は同じ座標値を与えた。

この際、解析上、CFRP ネットの軸筋と横筋を分離し、格子点交差部間のボンドリンク要素に、2.1 節で示したバネ係数を与えた。さらに、バネ係数中の  $m$  を4章で示すように、引抜き実験結果の荷重-すべり量関係をもとに付着応力-すべり量関係をコンクリート強度や補強筋径の影響を排除できる、無次元の関係式の形で定式化した(式(5))。無次元化した付着応力-すべり量関係をさらに、バイリニア直線で近似する(式(6,7))。バイリニア直線の第一勾配、第二勾配をそれぞれ、 $m1, m2$  に代入した。

コンクリートの材料特性は、図-6 に示すようにひび割れ発生後は、直線引張軟化とした。

また、CFRP ネットの材料特性は、引張側で完全弾性挙動するものとした。

## 3. CFRP ネット格子点交差部の引抜き実験

2.1 節で説明したバネモデルの式(1)中の係数の根拠となる無次元化した付着応力-すべり量関係を実験結果をもとに定式化した。

既往の実験結果は筋番 C16 以上の比較的径が大きな CFRP ネットのみを対象にしている<sup>3)</sup>。そこで、筋番 C6~C13 の CFRP ネットを対象とし、以下の引抜き実験を行なった。

### 3.1 供試体

使用した CFRP ネットの仕様を表-1 に示す。

引抜き実験用の供試体は、「引抜き試験による連続繊維補強材とコンクリートとの付着強度試験方法(案)<sup>1)</sup>」を参考に、交差部が埋め込まれる部分を  $10 \times 10 \times 10(\text{cm})$  となるように設計した(図-7)。筋番1種類につき、2体ずつ製作した。供試体上部中央に交差部が来るように、垂直方向に配置し、コンクリートを打設した。この時、軸筋とコンクリートとの付着を切るため表面をラップフィルムで被覆した。供試体下部との仕切には、発砲ウレタンを用いた。打設後14日間水中養生した。実験時のコンクリート圧縮強度は、筋番 C6 供試体上部は  $62.4\text{N/mm}^2$ 、C10 および C13 は  $70.0\text{N/mm}^2$  であった。

## 3.2 載荷実験方法

図-7, 8 に示すように、上部供試体をスパン 200mm で単純支持し、仕切の発砲ウレタンをアセトンで溶かし、上部と下部とを切り離した後、供試体下部を左右の両ジャッキにより、同荷重増分で、供試体下部に設置した左右の変位計の変位量が等しくなるように載荷した。実験中は、両ジャッキの荷重(L1,L2)、補強筋 CFRP ネットの上端部の抜け出し量(D1)、供試体上部の上縁中央点変位(D2)、供試体下部左右の変位量(D2,D3)を計測した。

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 付着応力-すべり量関係

すべり量を変位 D1 と D2 の差より求めた。

供試体の荷重-すべり量関係を図-9 に示す。補強筋径が大きい程、交差部の機械的抵抗力も増し、最大荷重も増している。

また、関島らが報告しているように<sup>3)</sup>、荷重を加え始めてから、補強筋の自由端変位が  $0 \sim 0.5\text{mm}$  程度までの傾きと、そこからの交差部の破壊に至るまでの傾きとは大きく異なる。

次に、以上の結果より、CFRP ネットの付着応力-すべり量関係の定式化を試みる。

付着特性は、補強筋径や母材コンクリートの材料特性の影響を受けることが明らかにされて

表-1 2次元格子状炭素繊維補強材の仕様

筋番	繊維	樹脂	繊維体積混入率 (%)	公称径 (mm)	公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
C6	PAN系 高強度 炭素繊維	ビニル エステル	43	4.7	17.5	1200	100
C10				7.1	39.2		
C13				9.1	65.0		

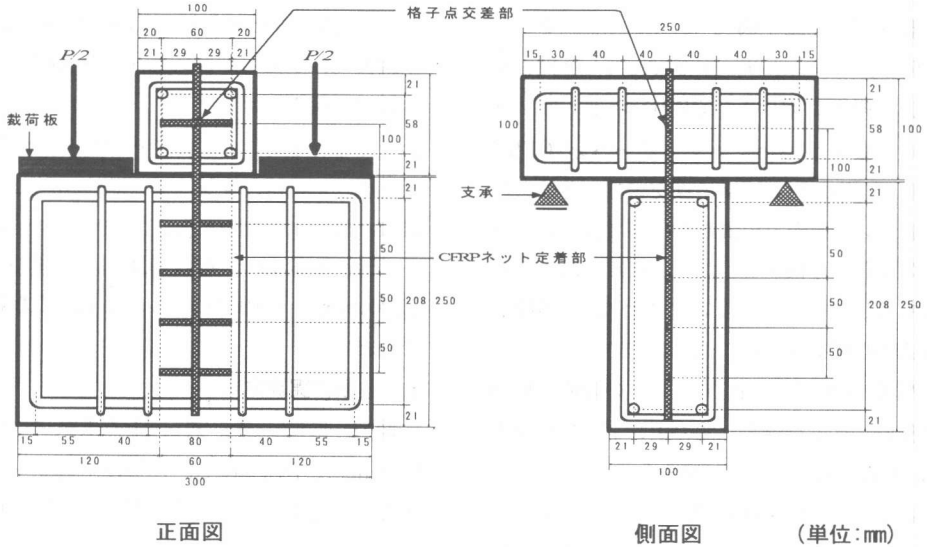


図-7 引抜き試験供試体

いる<sup>4)</sup>。鉄筋の付着特性のRC部材への適用する際には、鉄筋径やコンクリートの圧縮強度といった影響因子の影響を、これらの因子で付着応力 $\tau$ すべり量関係を除することで無次元化し、一般化あるいは統一的な表現を用いている<sup>5)</sup>。山尾ら<sup>6)</sup>が報告しているように、付着応力とコンクリートの圧縮強度の関係について、最大付着応力 $\tau_{max}$  および任意の付着応力 $\tau$ に対してコンクリート圧縮強度の $f_c^{2/3}$ で除して正規化できることから、本研究においても、荷重を補強筋面積で除して付着応力を求め、コンクリート圧縮強度 $f_c^{2/3}$ で除し、無次元化した。

補強筋 CFRP ネット径の影響についても、すべり量 $S$ を公称径 $D$ で除し、無次元化することで補強筋径の影響を排除した。無次元化した付着応力 $\tau$ すべり量関係は、関数 $F(S/D)$ を用いて次式となる。

$$\frac{\tau}{f_c^{2/3}} = F\left(\frac{S}{D}\right) \quad (3)$$

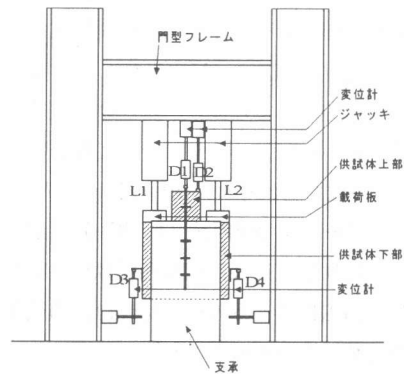


図-8 引抜き試験載荷装置図

ここに、

$\tau$  : コンクリートと CFRP ネットとの  
付着応力 [N/mm<sup>2</sup>]

$f_c'$  : コンクリート圧縮強度 [N/mm<sup>2</sup>]

$S$  : すべり量 [mm]

$D$  : CFRP ネットの公称径 [mm]

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} b \cdot h} \quad (4)$$

$b$  : CFRP ネット筋の幅 [mm]

$h$  : CFRP ネット筋の高さ [mm]

また、定着長については、鉄筋径  $D$  が大きく  $S/D$  が  $2.5 \times 10^{-3}$  で、定着長が  $24D$  以上の場合は、付着応力は定着長によらず一定であるとしている。

このような鉄筋の付着応力-すべり量挙動に対してのアプローチを CFRP ネットの格子点交差部を有する場合の付着挙動に適用し検討した。実験データとしては、宇田川ら<sup>2)</sup>および関島ら<sup>3)</sup>の研究から引用した。

本実験結果も含め、付着応力-滑り量関係を無次元化した  $\tau/f_c' - S/D$  関係を図-10 に示す。凡例中「No.2」は、宇田川らの実験結果である。関島らが引抜き実験を行った CFRP ネット C16 を除いては、各実験データプロットの軌跡は、分散も少なく、同じ指数関数型の傾向を示している。無次元化した付着応力の最大値およびすべり量とも、散らばりが小さい。特に C13 から C32 までの付着応力の最大値は約  $3.0[(N/mm^2)/(N/mm^2)]$  であることがわかる。

これら全実験値を、最小二乗法を用いて指数関数形に定式化すると、次式で表現される。

$$\tau/f_c'^{2/3} = 4.4\{1 - \exp(-1.59s^{0.6})\} \quad (5)$$

ここに、

$s$  : CFRP ネット径によって無次元化されたすべり量 (=  $S/D$ )

これにより、異なる CFRP ネット径やコンクリート強度における CFRP ネットの付着応力-すべり量関係を予測することができる。

## 4.2 実験および解析結果の比較

4.1 節の無次元化した付着応力-すべり量関係をバイリニア直線で近似し、バネモデルの水平バネの係数が算定できるようにする。

この無次元化された付着応力-すべり量関係をもとに、バイリニア直線で近似すると次式のようになる。

$$\tau/f_c'^{2/3} = 22.7 \cdot s \quad (s < 0.047) \quad (6)$$

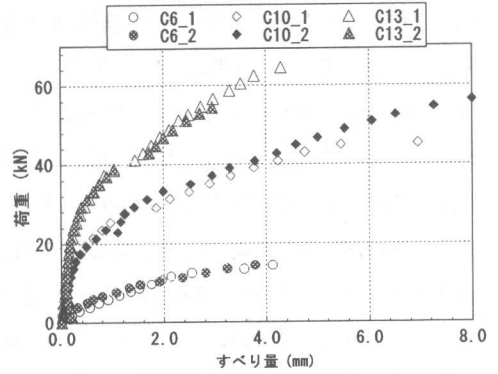


図-9 荷重-すべり量関係(本実験)

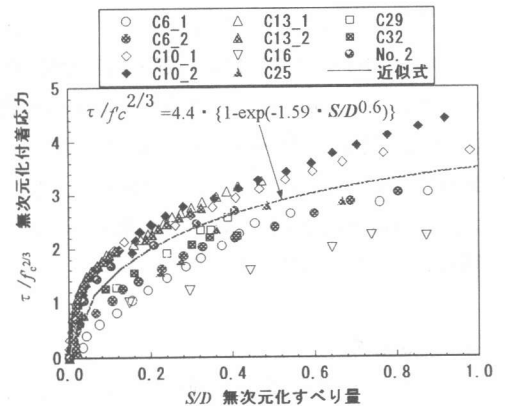


図-10 付着応力-すべり量関係の定式化

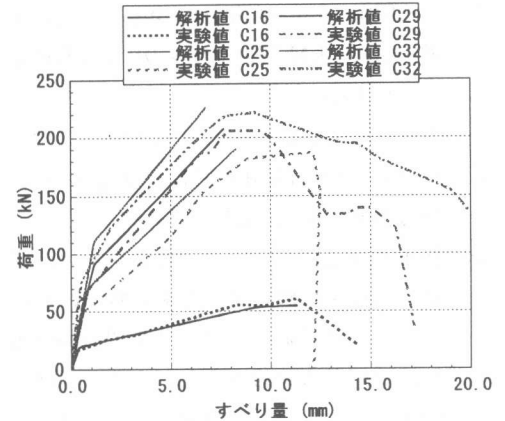


図-11 荷重-すべり量関係  
(関島らの実験結果との比較)<sup>3)</sup>

$$\tau/f_c'^{2/3} = 4.24 \cdot s + 0.876 \quad (0.047 < s) \quad (7)$$

このバネモデルを用いて、関島らおよび宇田川らの実験結果<sup>2, 3)</sup>と比較した結果を、それぞれ図-11 および図-12 に示す。関島らの実験

結果との比較した場合、解析値が実験値をかなり良く追跡している。宇田川らの FRP ネットは径の断面が 6 mm×3mm と小さい場合にも、初期すべりのずれはあるものの解析値が実験値を良く追跡している。宇田川らの実験値が、初期すべりの部分で解析値と大きく異なる理由は、実験では、スリット面にひび割れが生じ、応力再配分によって、補強材に急激に引き抜け荷重が加わるまで、コンクリートが荷重を負担しているためである。

参考に、宇田川らの実験結果に対して、各荷重点におけるすべり分布の解析結果を図-13 に示す。荷重点から格子点交差部まですべり量が徐々に低減し、格子点交差部以降は、すべり量がほとんど変化がないことがわかる。すなわち、この荷重範囲では、格子点交差部で十分な機械的な定着を保持していることがわかる。

## 5. まとめ

コンクリート構造部材の補強材として、2次元格子状に成形した CFRP ネットの適用を念頭に、CFRP ネットの格子点交差部の付着挙動に着目した FEM 解析モデルの構築を目的として、研究を行なった。

得られた成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 部材レベルの FEM 解析に組み込める簡易な付着モデルを提案した。
- (2) 格子点交差部の引抜き実験を行ない、既往の引抜き実験の結果とも比較し、無次元化した付着応力-すべり量関係の妥当性についても確認された。また、これらの実験結果をもとに無次元化した付着応力-すべり量関係を定式化することができた。
- (3) 無次元化した付着応力-すべり量関係をもとに CFRP ネットの付着モデルを設定し、それを適用した FEM 解析を行い、実験結果と比較して、そのモデルの有効性を検証した。

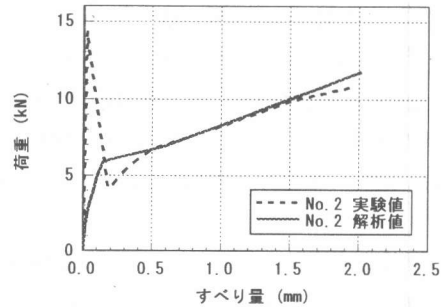


図-12 荷重-すべり量関係  
(宇田川らの実験結果との比較)<sup>2)</sup>

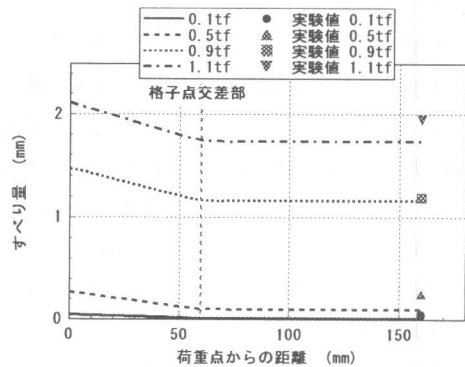


図-13 すべり分布(宇田川らの実験結果との比較)<sup>2)</sup>

## 参考文献

- 1) 土木学会：連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー，No. 88，1996。
- 2) たとえば，宇田川貴章他：二次元格子状連続繊維補強材の付着・定着について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16，No. 2，pp. 1141-1146，1994。
- 3) 関島謙蔵他：格子状連続炭素繊維補強材の引張強度と交差部強度に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18，No. 1，pp. 1167-1172，1996年
- 4) たとえば，六車他：綱とコンクリートの付着に関する基礎的研究。(I. 付着応力分布について) - (II)，日本建築学会論文報告集，第132号，pp. 1-6，1967。
- 5) たとえば，長友克寛他：横ふし1個のみを持つ異形鉄筋の付着特性に関する研究，土木学会論文集，第402号/V-5 1989. 8。
- 6) 山尾芳秀他：付着応力-すべり関係に関する実験的研究，土木学会論文集，No. 343，pp. 219~228，1994. 3。