

論文 炭素繊維補強コンクリートの繊維の格子交差部に注目した FEM 解析

内村 均*1・望月 重*2

要旨：二次元の格子状に成形された炭素繊維からなる連続繊維補強材の交差部に着目し、この部分のかぶり厚が、交差部の滑り強度に与える影響を調べるため、まず第1段階として材料を弾性体とし、かぶり部分のモルタルの応力やひずみ分布を、3次元 F E M の接触表面を用いて解析し、実験結果と比較した。解析の結果、かぶり厚が薄いほど、格子交差部で縦方向繊維が横方向繊維に対してずれる際に、コンクリート表面が面外方向に大きく膨らみ、コンクリートがひび割れる可能性が高いことが分かり、実験結果の傾向をほぼシュミレートしていることが分かった。

キーワード：連続繊維補強材、格子の交差部強度、F E M 解析、接触表面、かぶり厚さ

1. はじめに

炭素繊維からなる連続繊維補強材は、耐食性に優れているので、塩害の影響を受けやすいウォーターフロントに建つ建物の、外壁パネル（厚さ150mm前後）の補強材として用いることがある。この連続繊維補強材は、50mm～150mmの間隔で格子状に成形されたものである。この理由は、格子状に成形することにより、縦方向繊維補強材のずれに対して横方向補強材が抵抗して、コンクリートへの定着力となることを狙っている。松崎らの実験的研究によれば、横方向繊維の存在が、縦方向繊維の定着を上げることが明らかにしている[1]。同じような実験を、宇田川らは行い、横方向繊維の個数が増えるほど縦方向繊維の定着力が上がることを示している[2]。さらに宇田川らは、コンクリートに埋め込まれていない格子状繊維の交差部を、加力方向に垂直な面外方向に拘束したものと、無拘束のものとの比較対照実験を行い、交差部を面外方向に拘束すると、縦方向繊維の定着力が上昇することを示している[3]。本論文では、格子状繊維交差部におけるかぶり厚が、交差部の滑り強度に与える影響を調べるため、まず第1段階として材料を弾性体とし、かぶり部分のモルタルの応力やひずみ分布を、3次元 F E M の接触表面を用いて解析し、実験結果と比較した。

2. 解析概要

2. 1 解析モデルおよび材料定数

使用した連続繊維補強材は、炭素繊維にビニルエステル樹脂を含浸させたもので、CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)と呼ばれている。用いたCFRPは、図-1に示すように、幅6mm、高さ0.75mmの板状の繊維を、縦方向と横方向に交互に4層ずつ積層させて成形したものである。

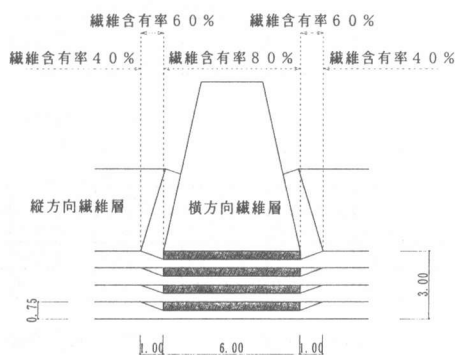


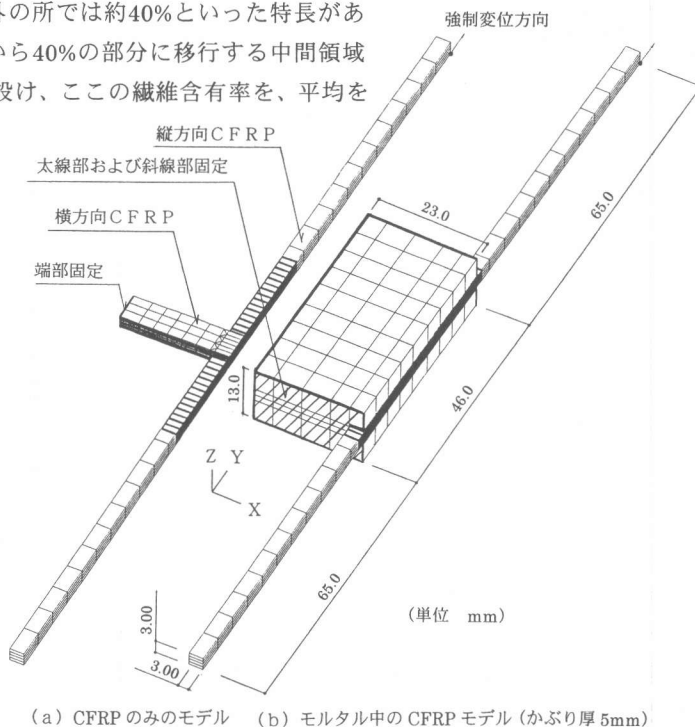
図-1 CFRP の格子交差部断面図

*1 佐藤工業(株)中央技術研究所、工修（正会員）

*2 武蔵工業大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

このCFRPの炭素繊維体積含有率（以降繊維含有率と略す）は、格子交差部で約80%、それ以外の所では約40%といった特長がある。繊維含有率が80%の部分から40%の部分に移行する中間領域として、幅1mmのスロープを設け、ここの繊維含有率を、平均を取り60%とした。

このスロープ長さは、CFRPを縦に切断し、断面を観察した結果から定めた。解析モデルを図-2に示す。解析モデルは、3次元FEMの、20節点アイソパラメトリック要素を用いている。モデルは、左右対称なので左半分のみを取り出している。外力は、縦方向CFRPを、直交座標系におけるY方向に強制変位を与えている。解析モデルは、CFRPのみを取り出したモデルと、モルタルの中にCFRPを埋め込んだモデルについて解析を行った。



(a) CFRP のみのモデル (b) モルタル中の CFRP モデル (かぶり厚 5mm)

図-2 解析モデル

モルタルの中にCFRPを埋め込んだモデルについては、かぶり厚を5mm、10mm、20mmと変化させて解析した。解析および実験に用いたモルタルおよびCFRPの材料定数を表-1に示す。解析に用いたモルタルは等方弾性体とした。CFRPは、直交異方性のある弾性体とした。それぞれの繊維含有率に対する材料定数は、既知量である炭素繊維、およびビニルエステル樹脂の材料定数を使って、文献[4]に述べられている方法を用いて算出した。

表-1 モルタルおよびCFRPの材料定数

モルタルの材料定数

E	ν	G	Fc
1.765	0.167	0.756	30.9

(EとGの単位 $\times 10^4 \text{N/mm}^2$)

(Fcの単位 N/mm^2)

CFRPの材料定数

Ef=23.045

$\nu f=0.300$

Gf=8.863

Em=0.343

$\nu m=0.350$

Gm=0.127

→ 既知量

Vf	Vm	E11	E22	E33	G12	G13	G23	$\nu 12$	$\nu 13$	$\nu 23$
0.40	0.60	9.424	0.670	0.670	0.289	0.289	0.259	0.330	0.330	0.350
0.60	0.40	13.964	1.068	1.068	0.482	0.482	0.419	0.320	0.320	0.350
0.80	0.20	18.505	2.171	2.171	1.014	1.014	0.866	0.310	0.310	0.350

(記号) Fc:圧縮強度

V:体積率

E:ヤング係数

G:せん断弾性係数

ν :ポアソン比

(添字) f:炭素繊維

m:ビニルエステル樹脂

(数字) 1:繊維方向

2:繊維直角方向(厚み方向)

3:繊維直角方向(幅方向)

2. 2 接触表面の概要

接触表面の説明図を、図-3に示す。有限要素法によってモデル化された、物体A、物体Bにそれぞれ、外力や強制変位が与えられているとする。ある荷重ステップにおいて、2つの物体が衝突したとき、それぞれの物体は、個別にモデル化されているので、重なり合う部分が生じる。そこで、各物体がどのように重なり合っているのかを解析し、重なり合う面を接触面として、分布荷重をお互い反対方向に与える。ここで、重なり合わないことを制約条件とし、分布荷重を目的関数と考え、数理計画法を用いて目的関数を最小にすれば、接触した平衡状態が得られる。これが接触表面といわれる[5]。接触面における摩擦力は、クーロン摩擦が適用できる。解析モデルにおいては、CFRPの縦方向繊維層と横方向繊維層の接触およびCFRPとコンクリートの接触を表現した。但し今回のモデルでは、接触面におけるクーロン摩擦係数はゼロとした。なお使用したプログラムは、汎用FEM解析ソフトAdina(ver6.1)である。

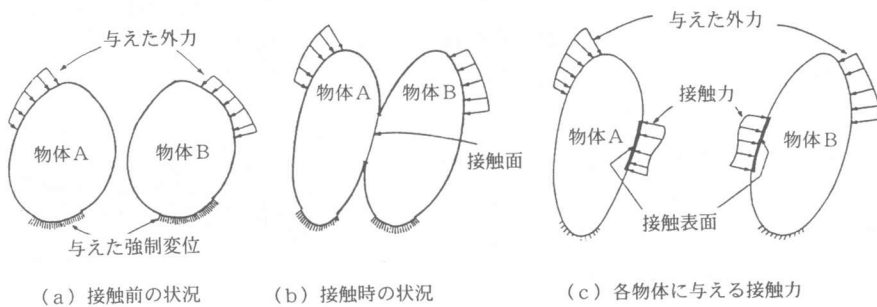
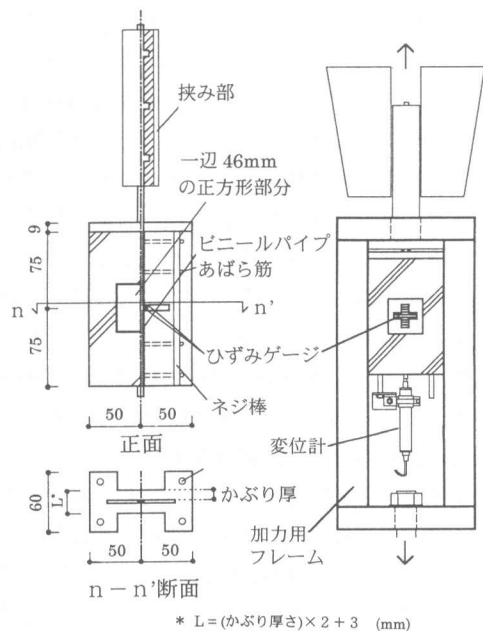


図-3 接触表面

3. 実験概要

実験装置を図-4に示す。試験体は、1組格子状の連続炭素繊維を、繊維の格子交差部が試験体の中央に位置するように、モルタルの中に埋め込んだ。加力は、挟み部を介して、縦方向繊維を矢印の方向に加力する実験を行った。格子交差部のみの耐力を調べるため、縦方向繊維の周囲は全面にビニールパイプを用いてモルタルと絶縁した。ただし、横方向繊維および格子交差部は、モルタルに接触させた。試験の対象となるのは、図-4に示した1辺46mmの正方形部分でその周囲は、厚さ60mmのスタップより固定される。実験は、1辺46mmの正方形部分の繊維に対するかぶり厚を5mm、10mm、20mmと変化させている。試験体数は、各かぶり厚で2体ずつ計6体行った。計測は、縦方向繊維の引き抜き荷重とその変位量、モルタル表面のひずみ値を測定した。



$$* L = (\text{かぶり厚}) \times 2 + 3 \quad (\text{mm})$$

図-4 実験装置

4. 解析結果と実験結果の比較

4. 1 CFRPのみの解析結果

CFRPのみを取り出し、縦方向CFRPに強制変位を与えたときの、縦方向繊維層と横方向繊維層の接触状況を解析した。図-5に、強制変位を1mm、3mm、5mm、7mm与えたときの、繊維の格子交差部付近の変形状態を示す。変形状態をながめると、横方向繊維層が縦方向繊維層にのめり込み、格子交差部で面外方向に膨らむ過程が分かる。強制変位1mmで、横方向繊維層が縦方向繊維層の幅1mmスロープの頂部に接触した後、強制変位が3mm、5mmと進むにつれ徐々にスロープを乗り越えて行き、強制変位が7mmのとき、横方向繊維層が縦方向繊維層のスロープを完全に乗り越えることになる。図-6に示した加力荷重の荷重-強制変位関係を見ると、強制変位1mmで荷重が最大値に達し、その後徐々に荷重が落ち、変位が7mmでほぼゼロになっていることが分かる。さらに図-6には、同じグラフ上に、図-5に示してある最上層スロープ面に生じる、Y方向（強制変位方向）の接触圧力の合計値を示した。これを見ると、強制変位1~3mmのときの接触力が大きく、その後変位が進むにつれ、徐々に荷重が落ちてき、変位が7mmでゼロになっていることが分かる。これらより、強制変位によって生じる加力荷重は、スロープ面からの抵抗力により得られ、各接触表面間のクーロン摩擦係数をゼロとしたために、横方向繊維層が縦方向繊維層のスロープを完全に乗り越えたと加力荷重値がほぼゼロになるものと解釈できる。図-7に、図-5に示したA~C地点のX方向引張応力と強制変位関係を示す。スロープに一番近いA地点がまず膨らむので、強制変位が1~3mmの区間は、各地点の応力に差が見られるが、その後横方向繊維層が徐々にスロープを乗り越えると差は縮まり、一定の応力値を示している。このことより、加力荷重(Y方向)がほぼゼロとなる、強制変位7mmの地点においては、横方向繊維層は、Z方向に膨らむことによりX方向に引張られ、平衡状態を保つことが分かる。

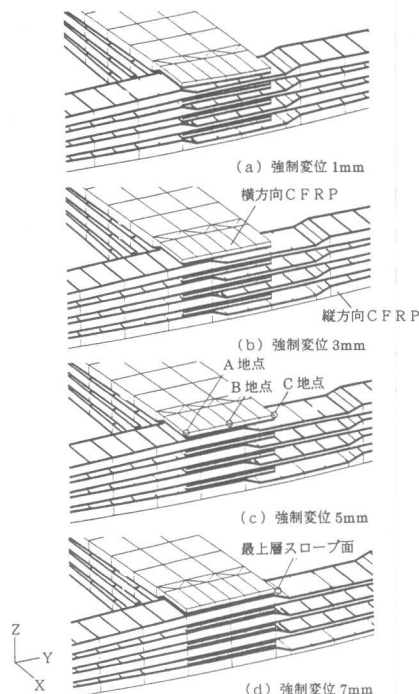


図-5 繊維の格子交差部付近の変形状態

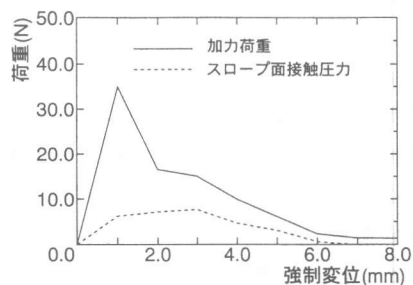


図-6 加力荷重およびスロープ面の接触圧力-強制変位関係

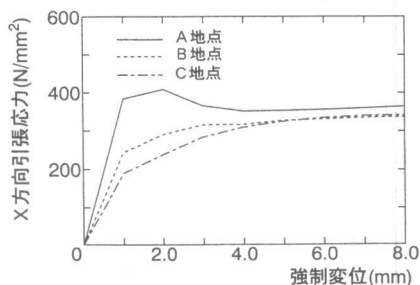


図-7 各地点のX方向引張応力-強制変位関係

4. 2 モルタル中のCFRPの解析結果

格子交差部中央モルタル表面の地点の応力状態や変形状態に着目する。かぶり厚5mmのモルタル部分の変形状態を示したものを、図-8に示す。この変形図より、モルタルが面外方向に膨らむと、モルタル表面には引張応力が生じることが推察される。そこで、図-8に示した最大Z方向変位点付近のモルタル表面部分の主応力をベクトル表示したものを図-9に示す。モルタル表面には、最大Z方向変位点に近いほど、大きな引張主応力が発生していることが分かる。ここで、図-9に示した最大引張主応力地点の引張応力を、モルタルの推定引張強度で割った値を正規化引張応力と定義し、この値を縦軸に、強制変位を横軸にプロットし、かぶり厚ごとに比較したグラフを図-10に示す。推定引張強度は、文献[6]によれば、下式で与えられ、係数は平均値の1.8を用いた。

$$\sigma_t = A\sqrt{F_c} \quad (\text{実験式})$$

σ_t : 推定引張強度 (kgf/cm²)

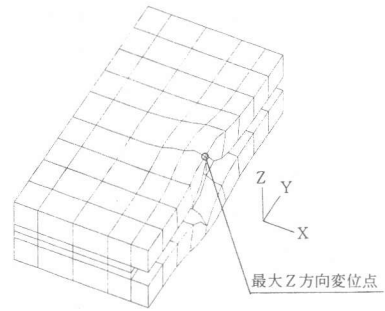
F_c : 圧縮強度 (kgf/cm²)

A : 係数 (1.2~2.4の間、平均値で1.8)

このグラフより、かぶり厚20mmでは、強制変位が約1mmでひび割れ応力に達しており、かぶり厚5mm、10mmではそれぞれ、強制変位が約0.05mm、0.2mmでひび割れ応力に達していることが分かる。今回の解析においては、材料は弾性体と設定しているので、実験結果との比較は、ひび割れ応力に到達する強制変位の範囲で行うものとする。

4. 3 解析結果と実験結果の比較

図-11に実験より得られた荷重-変位関係のグラフを示す。モルタル表面を目視により観察したところ、かぶり厚5mmの試験体では、最大荷重に達する途中でモルタル表面にひび割れが最も顕著に観察され、最大荷重付近でモルタルが剥離した後、徐々に荷重が減少していった。かぶり厚10mmでは、荷重が3000N付近からモルタル表面



かぶり厚 5mm, 強制変位 2mm (変形倍率 20 倍)

図-8 モルタルの変形状態

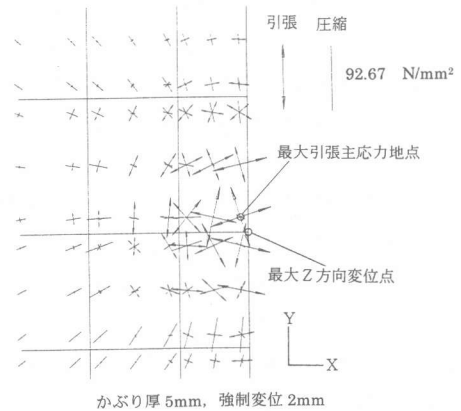


図-9 モルタル表面の主応力ベクトル

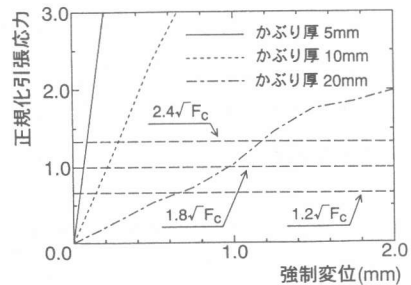


図-10 正規化応力-強制変位の関係

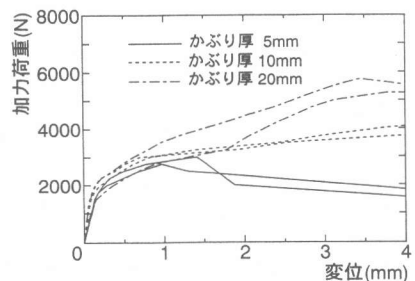


図-11 実験より得られた荷重-変位関係

にひび割れが観察されたが、剥離には至らず、変位とともに徐々に荷重が増加していった。かぶり厚20mmでは、モルタル表面のひび割れは観察されず、最大荷重に達した。図-12に、実験より得られた最大耐力とかぶり厚さの関係を示す。この図より、かぶり厚さが薄いほど最大耐力が小さいことが分かる。ここで、かぶり厚5mmと20mmの試験体中央のモルタル表面のY方向ひずみを、ひび割れ応力に到達する強制変位の範囲で実験値と解析値とで比較したものを、それぞれ、図-13、図-14に示す(かぶり厚10mmも同じ傾向を示すのでここでは割愛する)。これらの図より、モルタル表面がひび割れ応力に到達する強制変位の範囲では、解析値は実験値の傾向をほぼシュミレートしていることが分かる。計測された表面のひずみ値だけで、実験時のモルタル表面の応力状態を断定することはできないが、実験時のモルタル表面の観察結果によれば、かぶり厚が薄いほど、より早くひび割れが生じており、このことは、先に示した図-10の解析結果と同じ傾向を示しているものと解釈できる。

5. まとめ

1. 連続繊維の格子交差部が、縦方向繊維が横方向繊維に対してずれる際に、強制変位方向に垂直な、面外方向に変形が進むことを、3次元FEMの接触表面を用いることにより、シュミレートした。
2. かぶり厚が薄いほど、連続繊維の格子交差部付近のコンクリートはひび割れる可能性が高いことが解析および実験より確認できた。

参考文献

- [1]松崎育弘, 中野克彦, 中沢春生, 藤崎忠志: 繊維強化複合材料(NFM)の建築構造への利用に関する研究(その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, No.2810, pp.135-136, 1987.10
- [2]宇田川貴章, 水上雄夫, 望月重: 面・立体連続繊維補強材の付着・定着機構に関する実験的研究(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, No.21038, pp.229-230, 1993.9
- [3]宇田川貴章, 望月重, 幸村憲衛: 二次元格子状連続繊維補強材の格子接点強度に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.1001-1006, 1995
- [4]J.R.Vinson, R.L.Sierakowski 著, 福田博, 野村靖一, 武田展雄 訳: 複合材料の構造力学, 日刊工業新聞社, 1987
- [5]Bathe K.J., Chaudhary A.: A Solution Method for Planar and Axisymmetric Contact Problems, Int. J. for Numerical Methods in Engineering, Vol.21, pp.65-88, 1985
- [6]日本建築学会編: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, pp.59-61, 1988

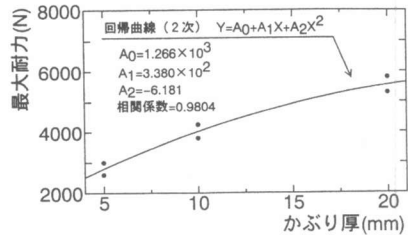


図-12 最大耐力-かぶり厚関係

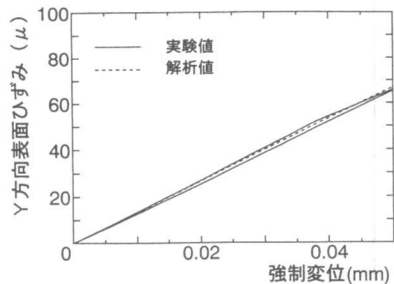


図-13 Y方向表面ひずみ-強制方向変位関係 (かぶり厚 5 mm)

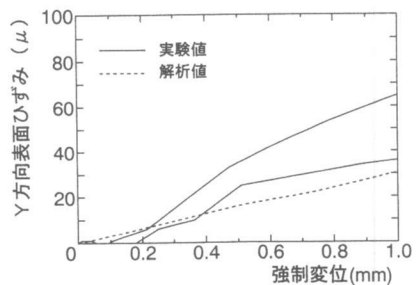


図-14 Y方向表面ひずみ-強制方向変位関係 (かぶり厚 20mm)