

論文 面・立体新補強材を用いたコンクリート部材の曲げ挙動に関する研究

若目田 宏^{*1} 梶谷 榮次^{*2} 新藤 健太^{*1} 張 瑞中^{*1}

要旨：連続繊維補強材を用いたRC部材の曲げ実験を行い、縦方向筋に曲げによる引張力が作用するときの横方向筋が縦方向筋に及ぼす影響について調べた。横方向筋のせん断抵抗機構にダウェル作用の寄与があることが明らかとなった。圧縮ストラット-タイ作用によるモデル化を行い曲げ耐力を評価した結果、実験結果と良く対応した。

キーワード：連続繊維補強材 横方向筋 ダウェル作用 圧縮ストラット-タイ作用

1. はじめに

近年、コンクリート補強材として開発された連続繊維補強材には、棒状ではなく面格子及び立体格子の形態をとるものがある。連続繊維補強コンクリート部材の諸特性に関する研究は、鉄筋の場合と比べると十分にはなされていないため、コンクリート補強材として用いるには検討すべき点も多く残されているのが現状である。それ故、連続繊維のコンクリート補強材としての独自の設計方法及び評価方法などの確立が望まれている。

本研究は、面・立体連続繊維補強材を用いたRC部材に関して、曲げ実験を行い、縦方向筋および横方向筋が与える影響と共に、得られた実験結果に対して、圧縮ストラットモデルを用いて導かれた曲げ耐力評価式から計算された結果と比較検討を行った。

2. 実験概要

2-1 試験体

試験体は図2-1に示すように、中央部の純曲げブロックとその両端に設られた端部ブロックから構成されている。純曲げブロックは平面格子タイプについては、 150×350 の断面をもつ、これは既往の研究の断面に準じ、立体格子タイプは既製の補強材の寸法に準じ 150×220 とした、この部分に面・立体格子の連続炭素繊維補強材（面格子メッシュ間隔 50×50 、 100×100 の2タイプ

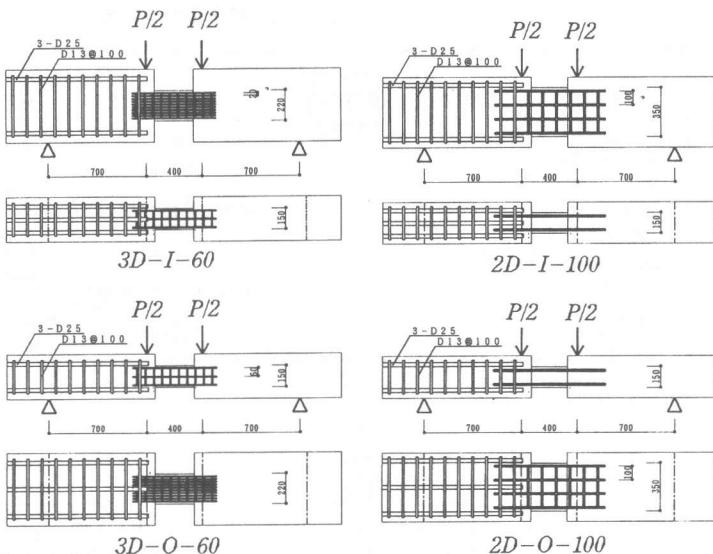


図2-1 試験体形状図

*1 関東学院大学大学院

*2 関東学院大学工学部建築学科 教授 工博

立体格子メッシュ間隔60×60×20)を配した。また、端部ブロックへの定着長さは既往の研究に準じ、交差部3箇所分の長さとした、端部ブロックは通常の鉄筋による補強とした。また横方向筋の効果を調べるために、横方向筋を削除した縦方向筋のみより構成された試験体も製作した。試験体は面内および面外加力試験用にそれぞれ8体を製作した。使用した補強材

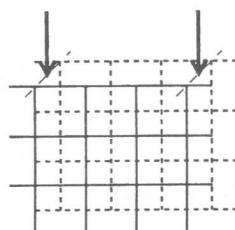
およびコンクリートの機械的性状についてはそれぞれ表2-1、2-2に示した。

2-2 加力方法と測定方法

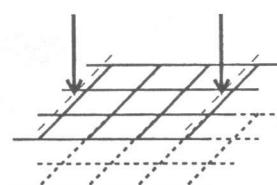
図2-1の様な梁型試験体を8体製作し、3MNの油圧式万能試験機にて、鉛直上方から載荷し、曲げ実験を行った。加力点の鉛直変位をピストン型高感度変位測定器にて測定した。炭素繊維交差部近傍にひずみゲージを貼付けひずみを測定した。

表 2-3 試験体概要一覧

試験体名	補強材	コンクリート設計基準強度 F_c (N/mm ²)	形 状	メッシュ サイズ	加力 方 向	せん断 スパン L (mm)	
2D-I-100	炭素繊維	30	面 材	@100	面 内	700	
2D-I-50				@50			
2D-I-5V			面材(横補強筋無)	@100	面 外		
2D-O-100				@50			
2D-O-50			面 材	@60 × @20			
2D-O-5V				@20 × @60			
3D-I-60			立 体 材		面 外		
3D-O-60							



面内加力



面外加力

表 2-1 炭素繊維引張特性

	断面積 (mm ²)	破断強度 (N/mm ²)	ヤング' 係数 ($\times 10^5$)	破断時ひずみ (%)
面材 @100	18.2	1167.0	0.92	1.26
		1088.5	0.91	1.16
立体材	3.1	1441.6	0.94	1.49

表 2-2 コンクリート強度試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	ヤング' 係数 ($\times 10^5$)	ボ'アン比	材令 (日)
2D-I-100	30.2	3.14	0.23	0.21	23
2D-I-50	28.3	3.09	0.26	0.28	21
2D-I-5V	32.7	3.02	0.27	0.16	31
2D-O-100	27.8	2.98	0.25	0.15	25
2D-O-50	27.8	2.98	0.25	0.15	25
2D-O-5V	31.2	3.02	0.27	0.24	32
3D-I-60	26.1	2.53	0.24	0.23	28
3D-O-60	25.0	2.08	0.24	0.16	27

3. 実験結果及び考察

表3-1に実験結果一覧を示す。面内、面外加力とも横方向筋が有るほうが耐力が増加することが認められる。

3-1ひび割れ及び破壊性状

全ての試験体について、試験区間中央に設けたスリットから初きれつが発生し、上方に進んでいった。

繊維破断もスリットにて発生した。

表 3-1 実験結果一覧

	初亀裂時荷重		最大荷重	
	荷重(kN)	変位(mm)	荷重(kN)	変位(mm)
2D-I-100	15.79	0.44	68.94	5.71
2D-I-50	24.32	1.16	115.42	8.15
2D-I-5V	30.30	0.20	98.65	4.10
2D-O-100	13.93	0.02	31.09	9.72
2D-O-50	13.24	0.81	57.07	10.52
2D-O-5V	13.73	0.21	56.98	9.41
3D-I-60	7.75	0.18	26.97	9.41
3D-O-60	2.55	0.50	18.53	13.76

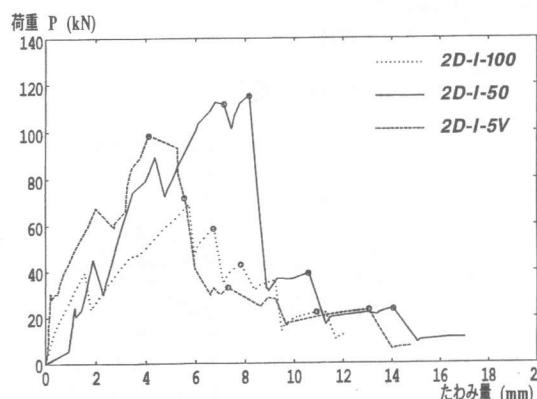


図3-1 荷重-たわみ量曲線 (面材面内加力)

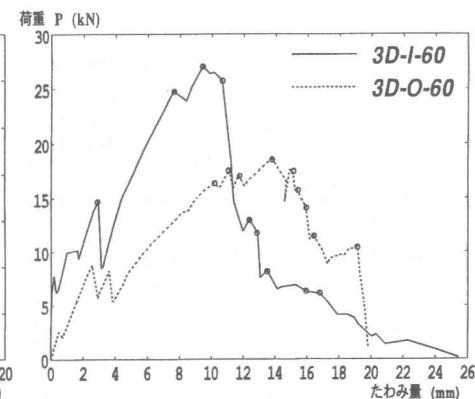


図3-3 荷重-たわみ量曲線 (立体材)

3-2荷重-たわみ量曲線

荷重-たわみ量曲線を図3-1～3に示す。図中の丸印は繊維破断を示す。面材面内加力について、最下段の縦方向筋の破断時に最大荷重を示し、その破断後、急激に荷重が低下し、縦方向筋破断が上段に進むにつれて徐々に荷重低下していくことが認められる。2D-I-50についてのみ最下段の縦方向筋破断後も一時荷重低下するものの、その後最大荷重をむかえることが認められる。面材面外加力について繊維破断後急激な荷重低下することが認められる。立体材については、面内、面外加力とも最下段の縦方向筋が破断した後、荷重低下するもののその後最大荷重を迎えた。

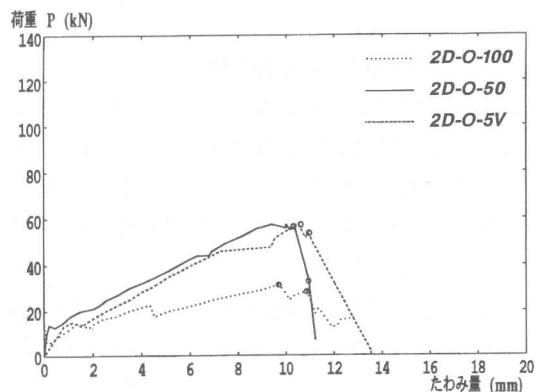


図3-2 荷重-たわみ量曲線 (面材面外加力)

3-3荷重-ひずみ曲線

荷重-ひずみ曲線を図3-3～4に示す。縦方向筋のひずみ差が生じ徐々に増加し続け、同時に横方向筋のひずみも生じ、同様に増加し続け破断に至る。

面材面外加力 $2D-O-50$ の荷重-ひずみ分布図を図3-5に示す。断面中央ほどひずみが増加していることが認められる。

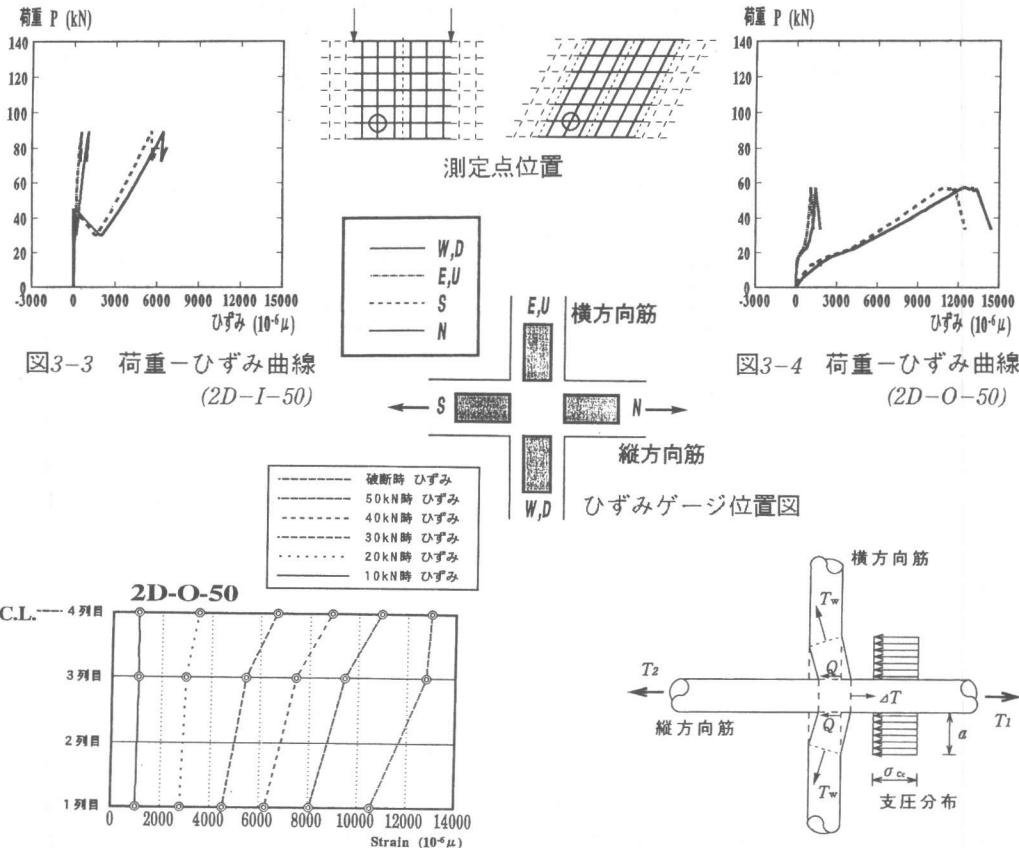


図3-3 荷重-ひずみ曲線
(2D-I-50)

図3-4 荷重-ひずみ曲線
(2D-O-50)

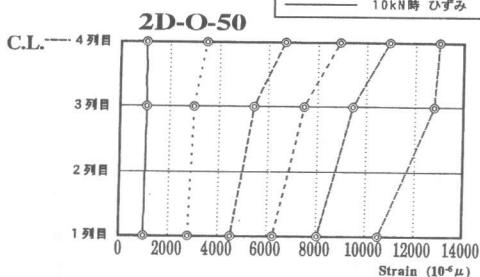


図3-5 荷重-ひずみ分布図 (2D-O-50)

図3-6 横方向筋のせん断抵抗機構

3-4 横方向筋のせん断抵抗

縦方向筋が曲げによる引張力を受けると、縦方向筋のひずみは横方向筋をはさんで差違を生じる。これは横方向筋の引張効果あるいは定着効果を示している。この縦方向筋のひずみ差から生じる引張力の増分 ΔT によって、横方向筋にダウェル作用が働き、この作用によって横方向筋にはせん断力 Q が生じる。また、このせん断力は横方向筋のダウェル作用によってコンクリートに対して生じる支圧に対応する。

いま、支圧長さ a を横方向筋径と等しく仮定すると、試験体2D-O-50の面外加力実験から得られた結果を用いて解析を行うと、コンクリートの支圧係数が概ね3.0になり、通常の鉄筋に対する支圧効果に対応していることが認められる。

4. 曲げ抵抗機構

4-1 強度算定式の算出

4-1-1 多段FRP筋の抵抗機構

プレーンコンクリートを面格子または立体格子の形状であるFRP筋によって補強された部材が曲げ、せん断を受けると、引張領域にある縦方向筋は曲げによる引張力に抵抗する。また、横方向筋はせん断力に抵抗するとともに、縦方向筋の定着効果としてその近傍に生ずる横方向筋の局

所的なせん断力が縦方向筋の軸力として寄与するため、縦方向筋と横方向筋の交点を境に、引張領域にある縦方向筋の軸方向の格子間では、軸力分布が異なる。

本論では縦方向筋の曲げ補強効果としてコンクリート部材の端部に生ずる圧縮ストラットと引張領域の縦方向筋に生ずる引張力が圧縮ストラット-タイ作用を形成するモデルを考える。ここでは、引張領域にある縦方向筋は、部材断面に存在する半分だけを評価し、その位置によって生ずる引張力は異なるものの、一様であると仮定する。

4-1-2 圧縮ストラット-タイ作用モデルによる曲げ耐力

FRP補強筋において、図4-2に示すような圧縮ストラットのモデル化を行った。この圧縮ストラットに対し、圧縮領域直下では圧縮応力 C_c が作用する。この圧縮合力は、引張領域における縦方向筋に生ずる引張力と釣り合いを保つ。部材端部に生ずる圧縮ストラットは、引張領域にある縦方向筋とタイ作用を形成し、圧縮領域の界面においてせん断伝達に寄与する。

圧縮界面に隣接し、材軸と角度 ϕ を持つ圧縮ストラットABCDにおいて作用する、垂直応力 σ_c およびせん断応力 τ_c と、圧縮界面における垂直応力 σ_x 、 σ_y および τ_{xy} の関係は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_c \sin^2 \phi - 2 \tau_c \sin \phi \cos \phi \\ \sigma_y &= \sigma_c \cos^2 \phi + 2 \tau_c \sin \phi \cos \phi \\ \tau_{xy} &= \sigma_c \sin \phi \cdot \cos \phi - \tau_c (\cos^2 \phi - \sin^2 \phi) \end{aligned} \right\} (1)$$

(1)式において、

$$\sin \phi = \frac{\tan \phi}{\sqrt{1 + \tan^2 \phi}}$$

$$\cos \phi = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \phi}}$$

を用いて $\tau_{xy} = \frac{Qum}{b \cdot k \cdot D}$ 、 $\sigma_y = \beta \cdot \sigma_B$ 、 $\tau_c = 0$ と

おくと(1)式から次式が導かれる。

$$\frac{Qum}{k \cdot b \cdot D} = \beta \cdot \sigma_B \cdot \tan \phi \quad (2)$$

つまり合式 $C_c = n \cdot T$ (n : 部材断面の半分に相当する引張領域に含まれる縦方向筋の総本数)において、 $C_c = k \cdot \beta \cdot \sigma_B \cdot b \cdot D$ 、 $T = \alpha \cdot af \cdot \sigma_{fu}$ を代入すると、次式がえられる。

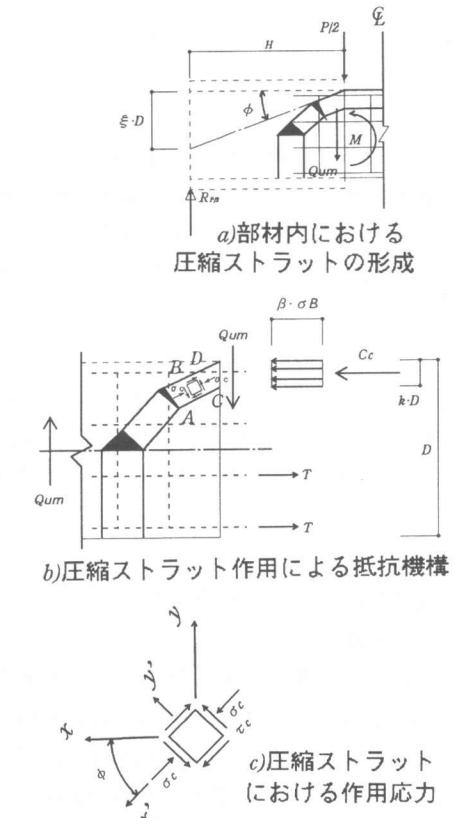


図4-1 圧縮ストラット-タイ作用によるモデル化

$$k \cdot \beta \cdot \sigma B \cdot b \cdot D = n \cdot \alpha \cdot af \cdot \sigma fu \quad (3)$$

ここで、 af 、 σfu はそれぞれ縦方向筋の断面積および引張破断強度を示す。

(2)式、(3)式および $\tan \phi = \frac{\xi \cdot D}{H}$ を用いると、タ

イ作用によるせん断伝達能力（曲げ耐力） Qum は、次のように書き表される。

$$Qum = \beta \cdot \sigma B \cdot k \cdot b \cdot D \cdot \xi \cdot D/H \\ = \xi \cdot \alpha \cdot n \cdot af \cdot \sigma fu \cdot D/H \quad (4)$$

ここで、 ξ は鉄筋コンクリート梁の降伏モーメントの略算式の係数0.9を準用した。 α は有効縦方向筋に対する補正係数で既往の実験結果より0.7と算出された。

4-1-3 算定値と実験値の比較

前項で導き出した式により算出された算定値と本実験によって得られた実験値を比較した。その結果を表4-1に、また、その比較を図4-1に示した。算定値と実験値は良く対応した。

5. まとめ

- (1)面内、面外加力とも、横補強筋が有るほうが耐力があることが認められた。
- (2)横向筋のせん断抵抗機構にダウェル作用の寄与があることが明らかになった。
- (3)面材面外加力2D-O-50の荷重－ひずみ分布図から断面中央ほどひずみが増加していることが認められる。
- (4)圧縮ストラット－タイ作用によるモデル化から導かれた曲げ耐力評価式から算出した結果と本実験の結果はよく対応する。

[参考文献]

- 1)新藤健太 梶谷栄次ほか:面・立体新補強材を用いたRC部材の力学的挙動に関する研究（その2. 多段FRP筋の抵抗機構）:日本建築学会大会学術講演梗概集:pp231-232 1995
- 2)E.MAKITANI,K.SHINDO et al.:STRUCTURAL DESIGN AND BEHAVIOR OF CONCRETE MEMBERS WITH TWO AND THREE-DIMENSIONAL FRP REINFORCEMENTS:Non-Metallic(FRP)Reinforcement for Concrete Structures:pp314-321 1995
- 3)松崎育弘 中野克彦ほか: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 NFMのコンクリートへの定着性能に関する実験:日本建築学会大会学術講演梗概集:pp135-136 1987

表 4-1 終局強度一覧

	縦筋有效 断面積 $n \cdot af (\text{mm}^2)$	炭素繊維 破断強度 $\sigma fu (\text{N/mm}^2)$	最大荷重 $R_{p0} (\text{kN})$	算定値 $TQum (\text{kN})$	実/算
2D-I-100	72.8	1167.0	34.5	26.7	1.29
2D-I-50	127.4	1088.5	57.7	43.7	1.32
2D-I-5V	127.4	1088.5	49.3	43.7	1.13
2D-O-100	72.8	1167.0	15.5	11.5	1.36
2D-O-50	127.4	1088.5	28.5	18.7	1.52
2D-O-5V	127.4	1088.5	28.5	18.7	1.52
3D-I-60	46.5	1441.6	13.5	13.3	1.02
3D-O-60	46.5	1441.6	9.27	9.05	1.02

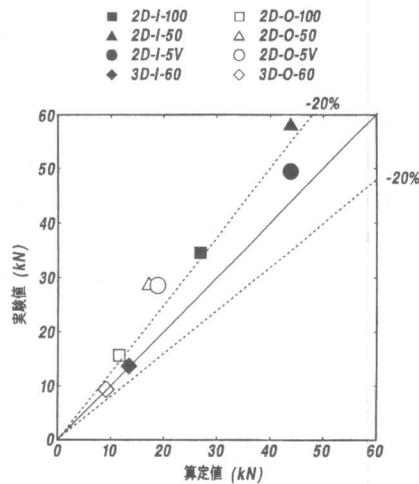


図4-2 実験値と算定値の比較