

# 論文 炭素繊維ネットによる鉄筋コンクリートはりのせん断補強効果に関する研究

日野伸一\*1・李重桓\*2・黒田一郎\*3・太田俊昭\*4

要旨：本研究は、炭素繊維ネットのコンクリート構造物へのせん断補強材としての適用性を目的とし、炭素繊維ネットを用いたコンクリートはり腹部のせん断補強効果について実験的検討を行ったものである。その結果、炭素繊維ネットによるせん断耐力の向上とひび割れ分散効果を確認するとともに、トラス理論に基づく既往の設計評価式の適用の妥当性が明らかにされた。

キーワード：炭素繊維ネット、せん断補強、トラス理論

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物において鉄筋やP C鋼材に代わる補強材として、炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維等の複合新素材(F R P)が注目されている。特に、棒状加工された炭素繊維系ロッドは物性が比較的鋼材に類似していることや、耐食性、非磁性、軽量等の鋼材にない特性を持っていることなどの理由から、P C橋などの土木構造物への適用が試験的に試みられている。また、コンクリート構造物、特に曲げ部材における引張補強材として多数の実験研究も行なわれ、その研究成果が公表されている。一方、F R P連続繊維のせん断補強に関する研究もいくつかあり、その一例を挙げると、はり部材におけるせん断補強鉄筋の代替として用いたもの、らせん状せん断補強筋として用いたもの、シート状連続繊維を既設構造物のせん断耐力向上目的のために用いたものなどがある[1],[2]。しかし、予め格子状に成形加工した連続繊維ネットのコンクリート構造物のせん断補強材への適用に関する研究は著者らの知る限りほとんどみられない。

そこで、本研究は炭素繊維ネットの二方向の補強効果と配筋の省力化に着目し、橋梁やタンク、建築物等の壁、版状部材への適用を目的として行なうものである。本論文は、その基礎研究の一部として、炭素繊維ネットをせん断補強材として用いたコンクリートはりの静的せん断試験を実施し、炭素繊維ネットのせん断補強効果について検討するとともに、そのせん断耐力評価式として、既往のトラス理論に基づく鋼材のせん断耐力式[3]の適用性について考察するものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

はり腹部のせん断補強材として用いた炭素繊維ネットの形状・寸法を図-1に、また、その物性値を表-1に示す。炭素繊維ネットはメッシュ間隔15.3mmのものであり、経糸と緯糸をエポキシ樹脂で成形し、経糸にアラミド繊維を巻き付けることによって、経糸と緯糸との接着力および経糸の強度をより強くしたものである。また、本来はせん断補強材以外の軸方向補強材に対しても同様に炭素繊維ロッドを用いることが望ましいが、ここでは実験上の都合から、せん断補強材以外の補強材には鉄筋棒鋼を用

*1 九州大学助教授	工学部建設都市工学科、	工博(正会員)
*2 第一復建(株)	設計一部	工修(正会員)
*3 九州大学助手	工学部建設都市工学科、	工博(正会員)
*4 九州大学教授	工学部建設都市工学科、	工博(正会員)

いることとし、軸方向鉄筋にはSD345,D22およびD10、載荷点および支点上の補強用スターラップにはSR235,φ6を使用した。一方、コンクリートの示方配合を表-2に示す。使用したセメントは普通ポルトランドセメント、AE減水剤はサンフローKである。また、粗骨材の最大寸法およびスランブは、炭素繊維のメッシュ間隔と作業性を考慮して、それぞれ15mm、12±2cmとした。

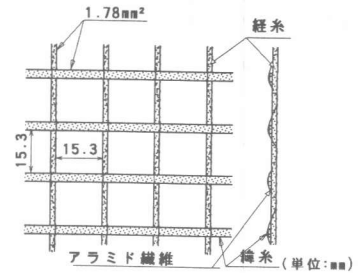


図-1 炭素繊維ネットの形状・寸法

表-1 炭素繊維ネットの物性値

	単位	経糸	緯糸
糸間隔	cm/本	1.53	1.53
引張強度	kgf/本	151	134
	kgf/mm <sup>2</sup>	169	150
引張率	tf/mm <sup>2</sup>	12.4	13.4

## 2.2 供試体

はり供試体の断面形状・寸法を図-2に示す。供試体は炭素繊維ネットによるせん断スパン内の腹部のせん断補強の有無、配置角度をパラメーターとし、各タイプについてそれぞれ2体、合計8体を作製した。はり供試体の断面諸元は、フランジ幅20cm、腹部幅4cm、全高40cm(有効高さ36.5cm)のI型断面、スパン2.24mの単純ばりである。各供試体における炭素繊維ネットの補強内容を表-3に示す。Aタイプは補強量4枚・配置角度90°、BタイプはAタイプと配置角度が等しく、補強量2枚、Cタイプは補強量2枚・配置角度45°で、それぞれせん断スパン内の腹部を補強したものである。また、Dタイプは以上の3種類と比較用の腹部無補強の供試体である。なお、炭素繊維ネットの定着は、エポキシ樹脂系接着剤を用いて、上下の軸方向鉄筋および支点、載荷点のスターラップに貼付けた。牧角らの実験研究[4]によれば供試体に用いたサイズの炭素繊維ネットの場合で、約3~4メッシュ(格点)分の定着長を確保することにより十分なネットの定着力が得られることが明らかにされている。したがって、実用レベルでは、炭素繊維ネットの腹部内への定着には接着剤を用いず、上下フランジ内に延長してネットを配置することにより可能と推定される。

表-2 コンクリート配合

W	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
40	40	174	435	662	1125	1.17

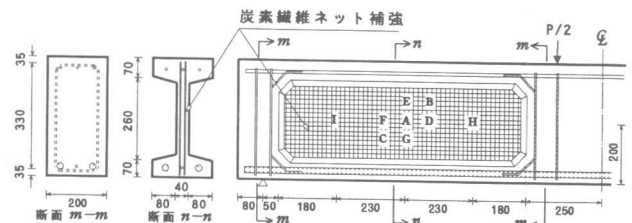


図-2 供試体の形状・寸法(単位:mm)

表-3 各供試体のネット補強の比較

供試体の種類	補強枚数	配置角度	補強筋比 $p_n^*$ (%)
Aタイプ(2体)	2層(4枚)	90°	0.58
Bタイプ(2体)	1層(2枚)	90°	0.29
Cタイプ(2体)	1層(2枚)	45°	0.29
Dタイプ(2体)	無補強	—	—

$$p_n^* = A_n / b_w \cdot a, \quad A_n : \text{腹部幅1列当たりのネット経糸の断面}(cm^2)$$

$$b_w : \text{腹部幅}(cm), \quad a : \text{ネット経糸の間隔}(cm)$$

## 2.3 載荷方法および測定項目

載荷方法は支間2.24m(せん断スパン比:2.65)、載荷幅30cmの2点線載荷とし、破壊に至るまで静的に漸増載荷した。測定項目は、終局耐力とその破壊形式のほかに、各荷重ごとに炭素繊維ネットの経・緯糸のひずみ(測定位置は図-2のA~I)、はりのたわみ、ひび割れ幅およびその分布である。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 ひび割れおよび破壊形式

各供試体の終局時におけるひび割れ分布状況の一部を図-3に示す。いずれも初期ひび割れはせん断スパン内の断面下縁より発生し、その後腹部に斜めひび割れが認められた。斜めひび割れ発生荷重の実験値と計算値の比較を表-4に示す。斜めひび割れ発生荷重の実験値は肉眼による発見時の荷重、また計算値はコンクリート標準示方書のコンクリートのせん断耐力式[3]を用いて算定した結果である。これより、計算値と実験値は比較的良く一致していること、また、炭素繊維ネットによるひび割れ発生荷重に対する影響はみられないことがわかる。

最終的なひび割れ分布状況としては、無補強のDタイプに比べ、炭素繊維ネットでせん断補強されたA, B, Cタイプは、いずれも腹部内のほぼ全域に斜めひび割れが分散し、その幅は小さくなっており、炭素繊維ネットによるせん断補強効果と良好なひび割れ分散性を示していることがわかる。このことは、図-4の荷重-ひび割れ数関係において、荷重の増加にともない、一部既成のひび割れに集中することなく、ほぼ比例的にひび割れ数が増加していることから明白である。なお、平面格子状FRPを引張補強材としたコンクリートはり部材の曲げ試験において、格子間隔がひび割れ性状に及ぼす影響について検討された既往の研究[5]でも、格子間隔が小さいほどひび割れ幅やひび割れ進展が抑えられ、ひび割れ間隔の短くなることが指摘されている。また、腹部における最大ひび割れ幅と荷重の関係を許容ひび割れ幅を付記して図-5に示す。炭素繊維ネット

で補強されたA, B, Cタイプの供試体では、終局耐力の50%相当の荷重約10tfまで許容ひび割れ幅(=0.175mm)以内に抑えられていることがわかる。以上、本実験の結果より、せん断を受けるコンクリ

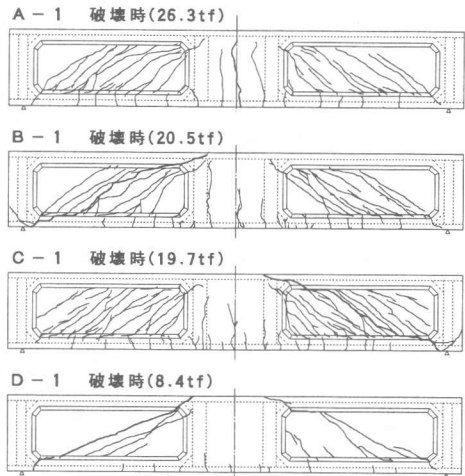


図-3 終局時におけるひび割れ状況

表-4 斜めひび割れ発生荷重

供試体	計算値 (tf)	実験値 (tf)	実験値 / 計算値
A-1	4.0	6.0	1.5
A-2	3.6	4.25	1.2
B-1	3.6	4.75	1.3
B-2	3.3	5.0	1.5
C-1	3.5	4.0	1.1
C-2	3.3	5.5	1.7
D-1	3.6	4.5	1.3
D-2	3.6	4.5	1.3

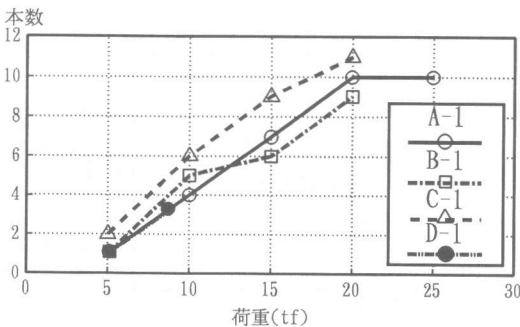


図-4 各タイプの斜めひび割れ数

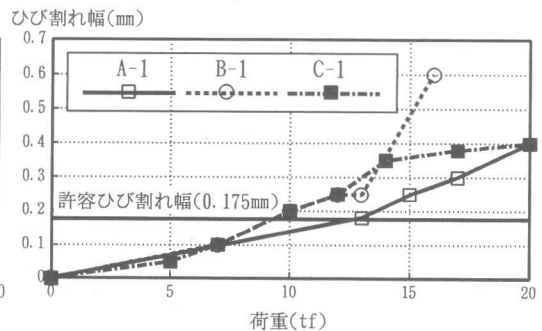


図-5 荷重-最大ひび割れ幅関係

ートはりについて炭素繊維ネットによるひび割れ抑制効果は確認されたが、ネットの配置角度の影響については顕著な差異はみられなかった。表-5に各供試体の終局耐力と破壊形式の一覧を示す。Aタイプの場合、コンクリート強度の比較的大きいA-1では、主鉄筋の降伏による曲げ破壊を、また、コンクリート強度の比較的小さいA-2では腹部コンクリートのせん断圧縮破壊を呈し、炭素繊維ネットによるせん断引張補強効果が十分であることが示された。B、Cタイプの破壊形式は、腹部内のせん断補強に用いた炭素繊維ネット素線の破断による斜引張破壊であった。また、Dタイプの破壊形式は、初期ひび割れ発生後、急激な部材のたわみの増加とともに、載荷点-支点ラインのひび割れ集中による斜引張破壊であった。これらの耐力についての詳細な検討は3.3で行う。

表-5 終局耐力一覧

供試体	コンクリート強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	計算値(tf)			実験値(tf)	実験値計算値	破壊形式
		曲げ	斜引張	せん断圧縮			
A-1	468	<b>23.3</b>	29.0	25.3	26.3	1.13	曲げ破壊
A-2	353	22.9	28.6	<b>21.9</b>	23.0	1.05	せん断圧縮破壊
B-1	357	22.9	<b>16.2</b>	22.1	20.5	1.27	斜引張破壊
B-2	262	22.8	<b>15.9</b>	18.9	19.5	1.23	//
C-1	298	22.9	<b>16.1</b>	20.2	19.7	1.22	//
C-2	262	22.8	<b>15.9</b>	18.9	18.9	1.19	//
D-1	350	22.9	<b>3.6</b>	21.9	8.4	2.33	//
D-2	361	22.9	<b>3.6</b>	22.2	8.3	2.33	//

### 3.2 炭素繊維ネットの挙動

せん断スパン中央でかつ断面中央高における炭素繊維ネットの経糸と緯糸の荷重-ひずみ曲線の一例を図-6、図-7に示す。ひずみの計測データは、ネットの経糸、緯糸に貼付したワイヤストレインゲージ(ゲージ長:1mm)によるものである。したがって、ひずみ性状は、測定点とひび割れの発生位置の相対関係に大きく関与していると考えられるが、総合的にみると、炭素繊維ネットの経糸のひずみは、斜めひび割れ発生後からひずみが増加し始め、終局時にはほぼ破断ひずみ付近に達している。このことは、図-8に示す炭素繊維ネット経糸のひずみ-最大ひび割れ幅関係からも同様にいえる。これに対して、緯糸の場合、経糸ほどの顕著なひずみ増加は破壊直前においても認められない。

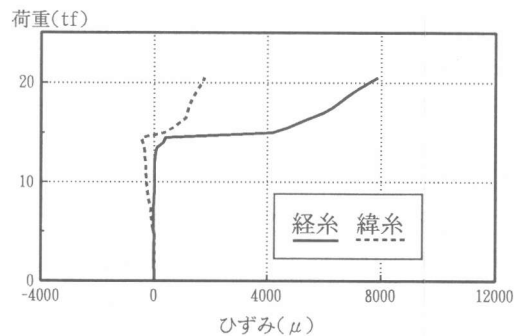


図-6 ネットの荷重-ひずみ曲線(B-1 A)

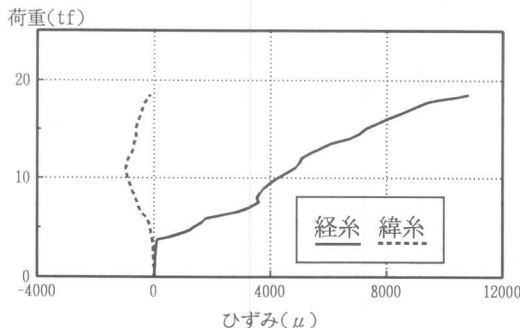


図-7 ネットの荷重-ひずみ曲線(C-1 A)

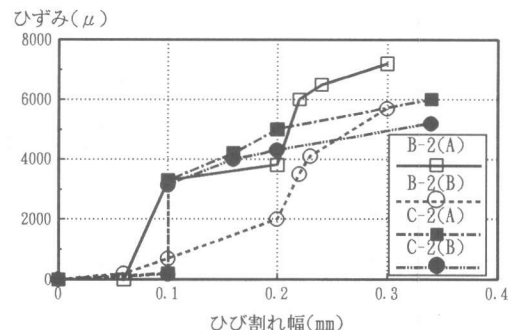


図-8 経糸のひずみ-最大ひび割れ幅関係

### 3.3 炭素繊維ネットの分担せん断耐力

前掲の表-5に示す終局耐力について考察する。図中、曲げ、斜引張およびせん断圧縮に対する計算値は、土木学会コンクリート標準示方書に規定された各設計式(安全係数1.0とする)を用いて計算したものである。特に、本研究で着目する炭素繊維ネットのせん断耐力 $V_{nd}$ はネットの経糸を鋼材に置換した式(1)で算定した。

$$V_{nd} = A_n \cdot f_{y_{nd}} \cdot (\sin\alpha + \cos\alpha) \cdot z / s_1 \quad (1)$$

ここで、 $A_n$  : 区間 $s_1$ におけるせん断補強ネットの経糸総断面積( $\text{cm}^2$ )

$f_{y_{nd}}$  : せん断補強ネットの引張強度( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )

$\alpha$  : せん断補強ネットが部材軸となす角度

$s_1$  : せん断補強ネットの配置間隔( $\text{cm}$ )

$z$  : 圧縮応力の合力の作用位置から引張材図心までの距離( $\text{cm}$ )

また、表中太字の数値は、各供試体について、3種類の終局耐力の最小値、すなわち、各供試体が支配される破壊形式とその耐力を意味している。これより、いずれの供試体も、破壊形式について実験と計算の結果は一致し、また、その耐力についてもDタイプを除いて、5~27%程度安全側に比較的よく一致しているといえる。Dタイプの終局耐力が過大に安全側に評価されている原因としては、コンクリート標準示方書のせん断耐力算定式が、矩形断面はりの実験結果に基づいたものであり、基本的には長方形断面に適用すべきものであるのに対し、本実験に用いた供試体がI型断面を有するはりであるためと考えられる。このことは、既往の実験結果でも証明されている[6]。

炭素繊維ネットの経糸の荷重-ひずみ関係の一例を図-9、図-10に示す。斜めひび割れ発生前においてはコンクリートが腹部の全せん断力を負担し、その後、炭素繊維ネットがせん断力を負担するものと仮定して、前述のコンクリート標準示方書に基づいてコンクリートのせん断耐力( $V_c$ )および炭素繊維ネットのせん断耐力( $V_n$ )を算定した結果を図中に示す。なお、 $V_n$ の算定に当たっては、式(1)において、 $f_{y_{nd}} = E_n \cdot \epsilon_n$  (ここで、 $E_n$  : 経糸のヤング係数( $=1.24 \times 10^6 \text{kgf}/\text{cm}^2$ )、 $\epsilon_n$  : 経糸のひずみ実験値)とした。図より、トラス理論に基づく示方書の算定式は、実験値の増加傾向をよく追跡しえていると考えられる。

前述したように、コンクリートの分担せん断耐力に関して、計算値が実験値よりかなり過小に評価していることから、せん断無補強のDタイプ供試体2体の終局耐力の実験値の平均を基準にして、各供試体のコンクリート強度の影響を修正したものをコンクリートの分担せん断耐力 $V_{cd}$ とする。したがって、せん断力 $V_{yd}$ から、 $V_{cd}$ を減じたものを炭素繊維ネットの真の分担せん断耐力 $V_{nd}$ の実験値として、前述の式(1)による計算値と比較したものを表-6に示す。表よ

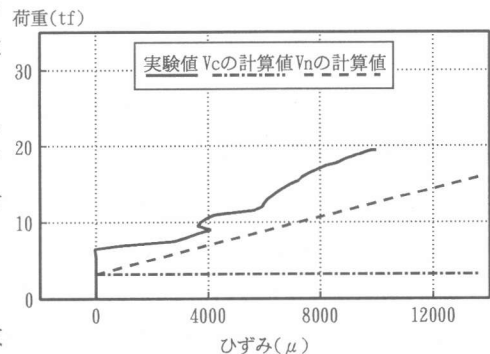


図-9 経糸の荷重-ひずみ関係(B-2 A)

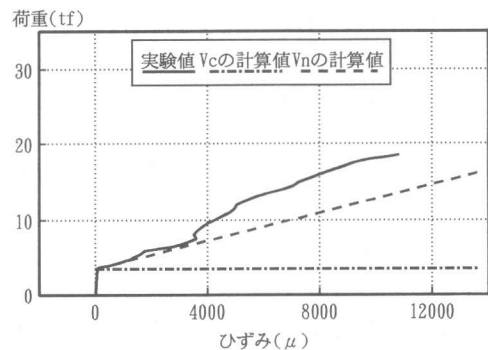


図-10 経糸の荷重-ひずみ関係(C-1 A)

り、両者の誤差は最大9%と精度良い一致がみられるものの、計算値は実験値よりやや大きく評価する傾向が認められる。これについては、連続繊維補強材をせん断補強材に用いたコンクリートはりのせん断性状に関する既往の研究によれば[7]、[8]、せん断補強材のひずみはトラス理論により評価可

表-6 炭素繊維ネットのみで受け持つせん断耐力

供試体	実験値(tf)			計算値 (tf)	実験値 計算値
	$V_{y,d}$	$V_{c,d}$	$V_{n,d}$		
B-1	20.5	8.4	12.1	12.6	0.96
B-2	19.5	7.5	12.0	12.6	0.95
C-1	19.7	7.8	11.9	12.6	0.94
C-2	18.9	7.5	11.5	12.6	0.91

能であるが、そのせん断耐力を多少過大に評価するとの報告があり、本実験の結果においても、同様の結果を示したものと考えられる。以上のことを考慮した上で、炭素繊維ネットのせん断補強効果をトラス理論に基づく鋼材の評価式を用いて定量的な評価が十分可能であるといえる。

#### 4. まとめ

炭素繊維ネットによる鉄筋コンクリートはりの、せん断補強効果について実験的検討を行い、得られた結果をまとめると、次のとおりである。

- (1)炭素繊維ネットではり腹部をせん断補強することにより、無補強のものとは比べ、著しいせん断耐力の向上とともに、ひび割れ分散効果が確認された。
- (2)炭素繊維ネットはコンクリートのせん断耐力以上のせん断力に対して補強効果を発揮することが確認された。
- (3)トラス理論に基づく既往のせん断補強鋼材を対象とした設計式を用いて、炭素繊維ネットのせん断耐力を10%程度過大側の範囲で定量的に評価できる。

#### 謝辞

本研究を実施するにあたり、九州大学大学院修士課程の山口芳範君に多大のご協力を頂いた。ここに記して、謝意を表する次第である。

#### 【参考文献】

- [1] 木村耕三・小島克朗・岡野素之:炭素繊維およびアラミド繊維を補強筋としたはり部材のせん断実験、コンクリート工学年次報告集12-1、pp.1135~1140、1990
- [2] 宇治公隆:シート状連続炭素繊維補強材を用いた既設鉄筋コンクリート部材のせん断耐力向上効果に関する研究、コンクリート工学論文集、Vol.3、No2、1992.7
- [3] 土木学会:コンクリート標準示方書(設計編)、1991
- [4] T.Makizumi, Y.Sakamoto and S.Okada:Control of Cracking by Use of Carbon Fiber Net as Reinforcement for Concrete.Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures(ACI SP-138), ACI, pp.287-300, 1993
- [5] 廣田孝夫・大即伸明・内藤英晴・浜崎勝利:格子状FRP筋を用いたRC梁の曲げ特性に関する実験的研究、コンクリート工学年次報告集13-2、pp.795~800、1991
- [6] 土木学会:コンクリート構造の限界状態設計法試案、コンクリート・ライブラリー 第48号、pp.35~43、1981
- [7] 奥村一正・斉藤宗・秋山暉・中村宏:現場加工型CFRPを用いたRC部材のせん断性状、コンクリート工学年次論文報告集15-2、pp.871-874、1993
- [8] 小林克巳・伊部宗一・藤崎忠志:せん断補強筋として連続繊維補強筋を用いたRCはりのせん断性状、コンクリート工学年次論文報告集15-2、pp.875-880、1993