

論文 CFRP シートでせん断補強した鉄筋コンクリートはりのせん断挙動

宮内克之*¹・井上正一*²・西林新蔵*³・田中良典*⁴

要旨：炭素繊維シートのみ、あるいは炭素繊維シートとスターラップの併用によってせん断補強した鉄筋コンクリートはりの静的載荷試験を実施し、せん断補強材の種類や補強法、せん断スパン比の相違がせん断耐力やせん断力分担割合に及ぼす影響について検討している。また、炭素繊維シートの破断によってせん断破壊する場合の、せん断補強耐力式を提示している。

キーワード：せん断補強、炭素繊維シート、CFRPシート、せん断耐力

1. はじめに

炭素繊維シート（以後、CFRPシート）貼付けによる補強工法は、鋼板接着による補強工法と比較して、腐食しない、軽量である、狭い空間内でも容易に施工できる、等の利点があり、コスト面での課題はあるものの、今後ますます増加してくるものと考えられる。CFRPシートをせん断補強用として、コンクリート構造に有効利用するためには、補強設計において材料としてCFRPシートが有している引張強度のどの程度の値が考慮できるのか、既設スターラップや帯鉄筋と補強CFRPシートとのせん断分担力の解明を含め、どのような機構でせん断抵抗をするのか、等を明らかにしていく必要がある。しかしながら、現在までにいくつかの研究（例えば、[1],[2]）がなされているが、必ずしもCFRPシート貼付けによる補強設計方法が確立されているとはいえない。そこで本研究においては、CFRPシート貼付けによる補強設計方法の基礎的資料を得ることを目的に、CFRPシートのみ、あるいはCFRPシートとスターラップの併用によってせん断補強したRCはりの静的載荷試験を行い、せん断力分担挙動を考察し、併せてCFRPシートの破断によってせん断破壊する場合のせん断補強耐力式を提示する。

2. 実験概要

2.1 実験計画および使用材料

実験計画を一括して表-1に、供試はりの形状寸法を図-1に示す。はりは、幅 $b = 12.5\text{cm}$ 、高さ $h = 20\text{cm}$ 、有効高さ $d = 16.5\text{cm}$ の一定横断面を有する単鉄筋矩形はりである。シートの貼付け位置およびスターラップ位置の一例を図-1に示す。シートのみによるせん断補強の場合、例えば、せん断スパンを100mm間隔で等分し、その中心位置に所要量（1/5ゼブラの場合20mm幅、1/2ゼブラの場

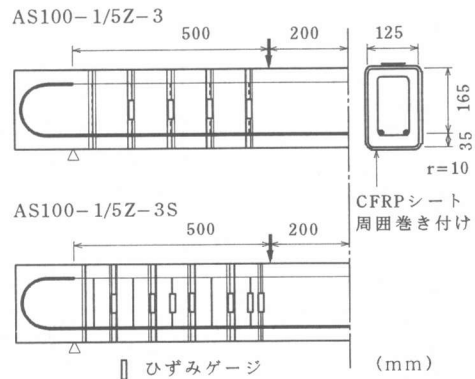


図-1 はりの形状寸法（単位：mm）

- * 1 岡山職業能力開発短期大学校講師 工修（正会員）
- * 2 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 工博（正会員）
- * 3 鳥取大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）
- * 4 東燃(株)技術グループ技術主幹

合50mm幅)のシートを貼付けた。シートとスターラップとを併用するはり(以後、併用はりと呼ぶ)においては、シートの中心をスターラップの中心に一致するように貼付けたはり、シートをスターラップの中間位置に貼付けたはり(供試体記号の最後の添え字:S)を作製した。

使用したCFRPシートは、目付量が200g/m²(設計厚さ 0.11mm, 引張強度 35,500kgf/cm², 弾性係数 2.35×10⁶kgf/cm²)のもので、主鉄筋(D25:f_{s,y}=3692kgf/cm², D22:f_{s,y}=4038 kgf/cm², D19:f_{s,y}=4150 kgf/cm²)およびスターラップ(D10:f_{s,y}=3850 kgf/cm², D6:f_{s,y}=4261 kgf/cm²)には、それぞれSD345の異形棒鋼を使用した。なお、使用したコンクリートの試験時材齢(原則として、材齢 35日以上)における圧縮強度は330~399kgf/cm²である。

2. 2 供試体の作製および実験方法

供試体は材齢14日まで水中養生を施した。シートの貼付けは材齢28日において行い、貼付け面にエポキシプライマーを塗布含浸させ、シートの繊維方向がはり軸方向と直角になるようにし、緊張していない状態で周囲に巻き付け、接着用含浸樹脂によって接着した。なお、シートの重ね合わせ長さは6cmとした。また、折曲げによるシートの強度減少を小さくするために、はり横断面の隅角部には半径 r = 1.0cmの面取りを施した。

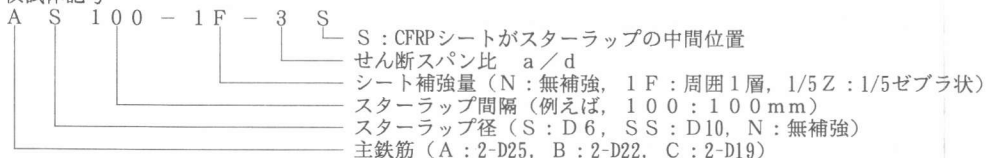
載荷試験は材齢35日以上で実施し、2点集中対称載荷とした。試験中の荷重の測定は、ロードセルによって行い、たわみは、スパン中央、載荷点および支点位置に設置した電気抵抗線型変位計により測定した。また、主鉄筋、スターラップおよびシートのひずみは、図-1に示す位置に貼付した電気抵抗線ひずみ計によって測定した。

表-1 実験計画および実験結果一覧表

シリーズ	供試体記号	コンクリート強度 kgf/cm ²	せん断補強		斜めひび割れ発生荷重 (tonf)	曲げ耐力計算値 P ₀ (tonf)	せん断耐力計算値 2V ₀ (tonf)	最大荷重 (実験値) P (tonf)	破壊形式 (実験)
			スターラップ	CFRPシート					
A	AN-N-3	358	-	-	9.92	16.42	8.90	11.51	せん断
	AN-1/5Z-3	358	-	1/5ゼブラ	10.23	16.42	13.06	15.34	せん断
	AN-1/2Z-3	330	-	1/2ゼブラ	9.09	15.32	19.04	17.53	せん断
	AS150-1/5Z-2.7	357	D6-150	1/5ゼブラ	9.40	18.21	18.58	18.56	曲げ圧縮
	AS150-1/5Z-2.7S	357	D6-150	1/5ゼブラ	9.56	18.21	18.58	18.68	せん断
	AS100-1/5Z-3	357	D6-100	1/5ゼブラ	8.93	16.38	20.80	17.02	曲げ圧縮
	AS100-1/5Z-3S	357	D6-100	1/5ゼブラ	9.53	16.38	20.80	17.29	曲げ圧縮
	AN-1/5Z-2.4	330	-	1/5ゼブラ	9.59	19.14	12.80	22.11	せん断
	AN-1/5Z-1.8	330	-	1/5ゼブラ	10.29	25.53	15.02	26.31	せん断
B	CSS55-N-2	399	D10-55	-	9.10	19.64	38.80	21.00	曲げ引張
	CN-N-2	391	-	-	9.20	19.56	10.02	11.94	せん断
	CN-1/2Z-2	399	-	1/2ゼブラ	9.59	19.64	17.00	18.99	せん断
	CN-1F-2	399	-	周囲1層	-	19.64	23.86	20.75	曲げ引張
	CN-2F-2	391	-	周囲2層	-	19.56	37.46	20.04	曲げ引張
	BN-1F-2	399	-	周囲1層	-	24.10	24.90	25.70	曲げ引張
	CS110-1/3Z-2	391	D6-110	1/3ゼブラ	9.40	19.56	21.64	20.84	曲げ引張
	CS110-1/2Z-2	391	D6-110	1/2ゼブラ	9.30	19.56	23.92	19.80	曲げ引張

P₀: 土木学会コンクリート標準示方書(平成8年度版:設計編)に示す鉄筋、コンクリートの応力-ひずみ関係を用い、各係数を1.0とした曲げ耐力の算定値。

供試体記号



3. 実験結果および考察

実験結果を一括して表-1に示す。なお、表-1におけるせん断耐力の計算値は次式(1)より求めたものである。

$$V_u = V_{cu} + V_{sy} + V_{CFU} \quad (1)$$

ここに、 V_{cu} ：コンクリートが受け持つせん断耐力で、式(2)[3]と式(3)（ディープビームのせん断耐力式[4]）による V_{cu} の値の大きい方の値、 V_{sy} ：スターラップが受け持つせん断耐力で、式(4)により求まる値、 V_{CFU} ：CFRPシートが受け持つせん断耐力で、式(5)により求める。

$$V_{cu} = \{0.94(f'_c)^{1/3} \beta_p \beta_d (0.75 + 1.4/(a/d))\} b_w d \quad (2)$$

$$V_{cu} = 0.53(f'_c)^{2/3} \frac{(1 + 3.33r/d)(1 + (p_w)^{1/2})}{(1 + (a/d)^2)} b_w d \quad (3)$$

$$V_{sy} = A_w \cdot f_{wy} \cdot z \cdot \cot \theta / s \quad (4)$$

$$V_{CFU} = 2 \cdot t \cdot f_{CF} \cdot z \cdot \cot \theta \cdot n \cdot k_e \quad (5)$$

ここに、 f'_c ：コンクリート圧縮強度(kgf/cm²)、 $\beta_p = (p_w)^{1/3}$ 、 $p_w = 100 A_s / b_w d$ 、 $\beta_d = (1/d)^{1/4}$ （ d ：(m)）、 A_s ：引張鉄筋の断面積(cm²)、 d ：有効高さ(cm)、 a/d ：せん断スパン比、 b_w ：はり幅、 r ：載荷板の幅(cm)、 f_{wy} ：スターラップの降伏点強度(kgf/cm²)、 A_w ：一組のスターラップの断面積(cm²)、 s ：スターラップの配置間隔(cm)、 f_{CF} ：CFRPシートの引張強度(kgf/cm²)、 t ：CFRPシートの一枚の厚さ(cm)、 z ：せん断耐力算定用のモーメントのアーム長($z = d/1.15$)、 θ ：圧縮斜材が部材軸となす角度（以後、圧縮斜材の角度）、 n ：CFRPシートの貼付け枚数（例えば、1/2ゼブラの場合、 $n = 0.5$)、 k_e ：CFRPシートのせん断補強に対する有効係数で、後述の式(11)より求まる値を用いる。

3. 1 CFRPシートでせん断補強したRCはりの破壊性状

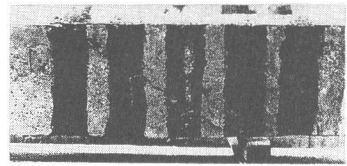
写真-1にせん断破壊したはりの典型例を、図-2に載荷試験終了後のひび割れ状況の一例を示す。シートを貼付けた供試体では、試験終了後シートを剥ぎ取ってひび割れを観察した。ゼブラ状のCFRPシートのみによってせん断補強したはりは、シート補強量、せん断スパン比によらず全てがせん断破壊をした。破壊に至る状況は、斜めひび割れが発生した後、荷重の増加に伴い斜めひび割れが伸展し、複数の組のシートが斜めひび割れとの交差点で破断して、急激なせん断破壊を示した。ただ、シートを1/2ゼブラ状に貼付けたはり（AN-1/2Z-3）は、一組のシートのみが腹部で破断してせん断破壊を生じた。一方、せん断スパン全面にシートを1層あるいは2層貼付けたはりでは、斜めひび割れは発生したが、せん断破壊ではなく、曲げスパン上部のコンクリートが圧潰する曲げ引張破壊をした。

併用はりについてみると、1/5ゼブラ状のシートを、15cm間隔のスターラップの中間位置に配置したはり（AS150-1/5Z-2.7S）は、斜めひび割れが伸展し、最終的にシートが破断して、せん断破壊したが、他のはりでは、斜めひび割れは発生するものの、せん断破壊には至らなかった。

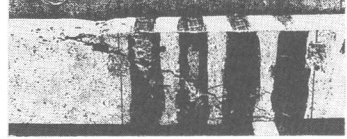
3. 2 CFRPシートのせん断力分担割合

(1) CFRPシートのひずみとスターラップのひずみの関係

図-3に併用はりにおけるせん断補強筋（シートあるいはスターラップ）のひずみと作用せん断力



AN-1/5Z-3



AN-1/5Z-2.4

写真-1 破壊状況の一例

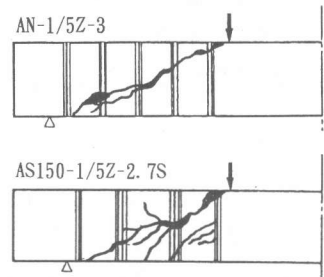


図-2 ひび割れ状況の一例

との関係の一例を示す。なお、シートおよびスターラップのひずみの測定値には、平均値（2～4点の平均値：支点直近のシートに貼付したひずみゲージを除く）を用いている。図より、せん断補強筋としてシートとスターラップとを併用した場合、シートをスターラップと同一場所に貼付けた場合でも、スターラップ間の中心位置に貼付けた場合でも、同一作用せん断力に対するシートひずみおよびスターラップひずみに差がなく、シートの貼付け位置はせん断補強効果に影響しないことが伺われる。つぎに、同一作用せん断力に対するシートとスターラップのひずみについてみると、同一作用せん断力において、これらのひずみは同じ値を示さず、斜めひび割れ発生後のある作用せん断力から、シートのひずみが増加してスターラップひずみよりも大きくなるのがわかる。図-4に、併用はりにおけるシートひずみ ϵ_{CF} とスターラップひずみ ϵ_s との関係を示す。せん断剛性や斜めひび割れ角度が異なるこれらのはりにおける ϵ_{CF} と ϵ_s との関係は、それほど差異がなく、いずれもシートひずみが下に凸の形で増加していることを考慮して、スターラップ

$$\epsilon_{CF} = 0.0126 \epsilon_s^{1.72} \quad (6)$$

(2) シートのせん断力分担割合

圧縮斜材の角度を $\theta = 45^\circ$ としたトラスモデル（以後、 45° トラスモデルと称す）を仮定した場合、CFRPシートとスターラップを併用したはりの分担せん断力は、次式で表される。

$$V = V_c + V_s + V_{CF} \quad (7)$$

$$V_s = A_w \cdot E_s \cdot \epsilon_s \cdot z_e / s \quad (8)$$

$$V_{CF} = 2 \cdot t \cdot z_e \cdot n \cdot E_{CF} \cdot \epsilon_{CF} \quad (9)$$

ここに、 V ：部材が受け持つせん断力、 V_c ：コンクリートが受け持つせん断力、 V_s ：スターラップが受け持つせん断力、 V_{CF} ：CFRPシートが受け持つせん断力、 E_{CF} ：CFRPシートの弾性係数(kgf/cm²)、 z_e ：せん断耐力算定以外のモーメントのアーム長 ($z_e = d \times 7/8$) である。

せん断補強筋が受け持つせん断力 ($V_s + V_{CF}$) に対する、シート、またはスターラップが受け持つせん断力の割合の一例を、斜めひび割れ発生以降について図-5に示す。図中の計算値は、式(6)で表されるシートのひずみとスターラップのひずみの関係を用いて、式(8)、(9)より求めたものである。図より、実験値には多少の変動が見られるものの、作用せん断力が増加するにつれて、シートの分担割合が徐々に増加している現象を含め、計算値は、シートとスターラップが受け持つせん断力の分担割合を、概ね表現しているといえる。

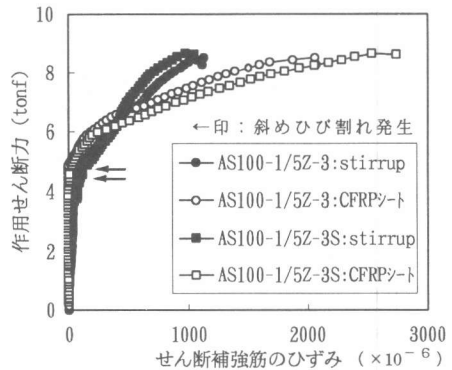


図-3 作用せん断力-補強筋ひずみ関係

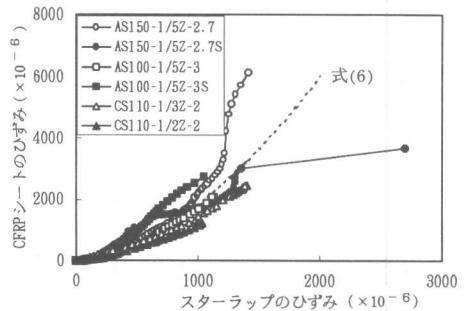


図-4 シートとスターラップのひずみ関係

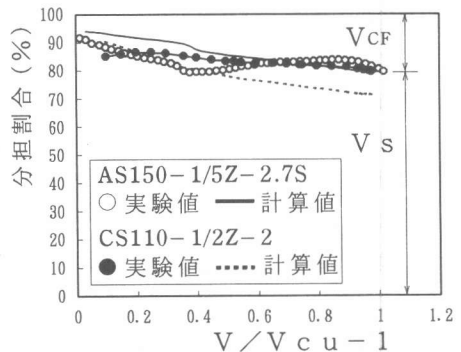


図-5 せん断力分担割合

図-6は、作用せん断力中に占める、シートが受け持つせん断力 V_{CF} （実験値）、およびスターラップが受け持つせん断力 V_s （実験値）とスターラップひずみとの関係の一例を示したもので、 $V_{CFcal.}$ （計算値）も併せて示す。なお、 $V_{CFcal.}$ は、式(6)で表されるシートのひずみとスターラップのひずみの関係を用いて式(9)より求めたものである。図より、式(6)の関係を用いた計算値は、実験値とよく一致していることがわかる。このことは、せん断補強筋としてシートとスターラップを併用した部材において、スターラップが降伏せず弾性範囲にある場合には、式(6)に示す $\epsilon_{CF} - \epsilon_s$ 関係を用いて部材の分担せん断力を予測できることを示している。

3.3 終局時におけるCFRPシートの有効係数

一般に、コンクリート部材に貼付けられたシートの強度は、素材の引張強度よりも低下するといわれている。そこで、シートの破断によってせん断破壊を示したはりを対象に、シートの強度がどの程度有効に利用されているかを検討した。式(1)、(5)より、CFRPシートの有効係数 k_e は式(10)で与えられる。

$$k_e = \frac{V_u - (V_{cu} + V_{sy})}{2 \cdot t \cdot f_{CF} \cdot z \cdot n \cdot \cot \theta} \quad (10)$$

CFRPシートの有効係数 k_e を求めるとき、 V_u はシートを貼付けたはりの最大荷重 ($P/2$) を、 $(V_{cu} + V_{sy})$ に関しては、シートを貼付けない（シート貼付け以外の条件が等しい）はりの最大荷重 ($P/2$) を用いた。なお、シートのみによってせん断補強した場合には、 $V_{sy} = 0$ であり、本研究でせん断破壊した併用はりにおいては、破壊時にスターラップは降伏していた。圧縮斜材の角度 θ としては、破壊面を形成した斜めひび割れと部材軸とのなす角度（斜めひび割れ角度）を用いた。

図-7は、CFRPシートの有効係数 k_e と終局時における斜めひび割れ角度 θ との関係を示したものである。図中には、シートの破断によってせん断破壊をし、終局時におけるひび割れ状況の明確な既往の研究結果[5]についても示してある。図より、終局時における斜めひび割れ角度（圧縮斜材の角度）を考慮したトラスモデルによって求まるCFRPシートの有効係数は、ほぼ一定で、本研究における3体の平均値は $k_e = 0.57$ であった。

斜めひび割れ角度、すなわちせん断スパンでの主圧縮応力の方向に影響を及ぼすせん断スパン比と、式(10)において圧縮斜材の角度を $\theta = 45^\circ$ として求めたCFRPシートの有効係数 k_e との関係を、既往

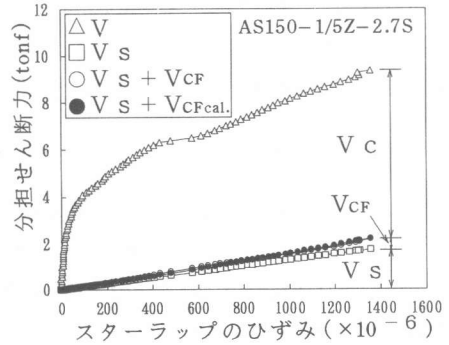


図-6 分担せん断力

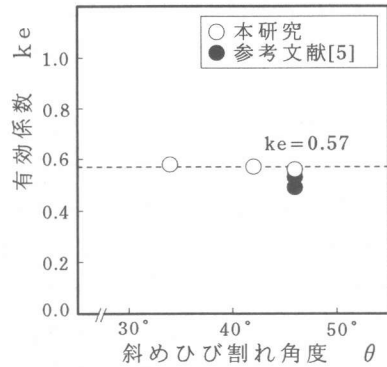


図-7 $k_e - \theta$ 関係

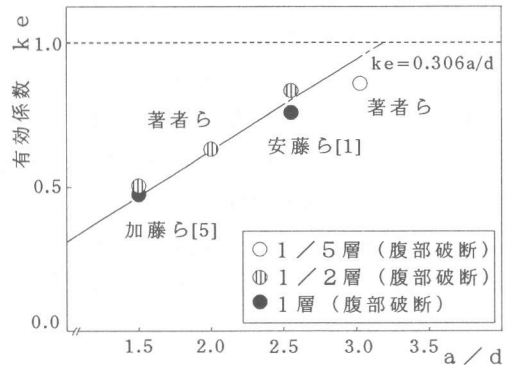


図-8 $k_e - a/d$ 関係

の研究[1, 5]も含めて図-8に示す。図より、45°トラスモデルで評価した場合のCFRPシートの有効係数は、せん断スパン比 ($a/d = 1.5 \sim 3.03$) の増加に伴ってほぼ直線的に増加することがわかる。ちなみに、最小自乗法によって求めた関係式は、次式で表される。

$$k_e = 0.306 \cdot a/d \quad (k_e \leq 1.0) \quad (11)$$

図-9は、シートの破断によってせん断破壊をしたはりに対する、せん断耐力の計算値と実験値との比較を示したものである。せん断耐力の実験値 $V_{u,exp}$ としては、表-1に示す最大荷重の1/2、 $V_{u,exp} = P/2$ を用い、せん断耐力の計算値 $V_{u,cal}$ には、式(11)によって求まるCFRPシートの有効係数 k_e を用い、式(1)~(5)によって求めた値を用いている。図より、シートのみによってせん断補強したはり、スターラップとの併用によってせん断補強したはりともに、一体を除き、計算値は実験値よりもやや小さめの値となっているが、両者はかなり一致していることがわかる。これらの結果より、実際のせん断補強設計において、 a/d の異なる部材のせん断耐力は、式(11)から求まるようなシートの有効係数を用いて算定する必要があるものと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に列挙する。

- (1) CFRPシートのひずみとスターラップのひずみは同一位置においても異なり、作用せん断力の増加に伴って、CFRPシートのひずみ増加が顕著になる。
- (2) CFRPシートとスターラップとを併用した場合、CFRPシートをスターラップと同一場所に貼付けた場合でも、スターラップの中間位置に貼付けた場合でも、CFRPシートのせん断補強効果に差はない。
- (3) CFRPシートを貼付したRCはりのせん断耐力を、45°トラスモデルによって予測する場合には、式(11)で表されるように a/d の値によってCFRPシートの有効係数を変えなければならない。
- (4) CFRPシートを貼付したRCはりのせん断耐力は、斜めひび割れ角度を合理的に予測できる場合には、その角度を導入したトラスモデルを用い、CFRPシートの有効係数を一定 ($k_e = 0.57$) として求めることができる。

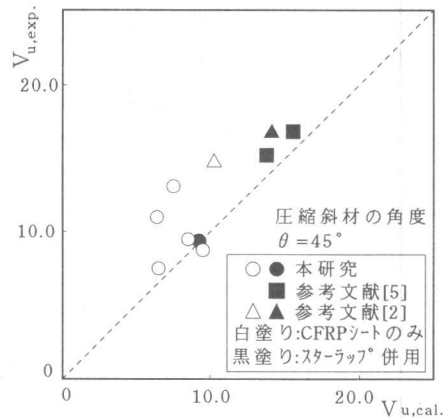


図-9 せん断耐力の比較

【参考文献】

- [1] 安藤博文ほか：炭素繊維によるせん断補強効果に関する研究，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集V，pp. 934-935，1994. 9
- [2] 加藤博文ほか：炭素繊維シートによる鉄筋コンクリートはりのせん断補強に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18，No. 2，pp. 101-106，1996
- [3] 二羽淳一郎ほか：せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，第372号/V-5，pp. 167-176，1986. 8
- [4] 二羽淳一郎ほか：FEM解析に基づくディープビームのせん断耐力算定式，第2回RC構造物のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp. 119-126，1983. 10
- [5] 加藤博文ほか：炭素繊維シートによるコンクリート部材の補強に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17，No. 2，pp. 899-904，1995