

論文 炭素繊維シートにより補強したRCはりのせん断性状

佐藤靖彦^{*1}・田中高行^{*2}・上田多門^{*3}・小野定^{*4}

要旨：本研究において、炭素繊維シートで補強した鉄筋コンクリートはりのせん断性状を実験的検討により明らかにした。すなわち、炭素繊維シートを側面に補強した鉄筋コンクリートはりのせん断力は、コンクリートが受け持つせん断力と斜めひび割れ域での炭素繊維シート及びスターラップにより受け持たれるせん断力の和として表されることを明らかにするとともに、炭素繊維シート及びスターラップが受け持つせん断力の算定方法の考え方を提示した。

キーワード：炭素繊維シート、せん断補強、鉄筋コンクリートはり、せん断性状

1. はじめに

既存構造物の補強を行う上で重要なことは、曲げ及びせん断力に対して十分な補強効果を有していることとともに、その施工性に優れていることであり、連続繊維シートはこのような要求を十分に満たす補強材料である。

現在、連続繊維シート、特に炭素繊維シート（以下「CFS」）を既存構造物の補強材に用いた事例が増えつつある。しかしながら、合理的な補強設計方法が確立されていない現時点では、適切な補強が行われているといえないものも多い。CFSにより桁や橋脚の補強を適切に行うためには、CFSを用いた既存コンクリート構造物の補強設計方法の構築が急務である。そこで本研究は、今後、補強設計方法を構築する上で必要とされる基礎資料を得ることを目的とし、炭素繊維シートを鉄筋コンクリート（以下「RC」）はりの側面に補強した場合のせん断補強効果を実験的に明らかにする。

2. 実験概要

本研究で用いたCFSは、一方向に炭素繊維が配列されており、その目付量は200g/m²である。CFSの力学的特性値を本研究で使用した鉄筋の力学的特性値と併せて表1に示す。

本研究で作製した供試体は5体である。各供試体の諸元を表2に、主筋及びスターラップの配置を図1に示す。また、CFSの補強方法を図2に示す。

供試体S1は、CFSを張り付けていないせん断補強筋を持たないRCはりである。供試体S2及びS3は、幅30mmのCFSを60mm間隔でゼブラ状に補強した供試体であり、供試体S2においてはCFSを側面に張り付け、供試体S3では側面及び下面（以下

表1 使用材料の力学的特性値

	Type	Cross sectional area (mm ²)	Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
Steel	D6	61.7	183	355	not measured
	D10	71.3	197	390	not measured
	D19	286.5	180	371	570
CFS	FTS-C1-20	1.11 ¹⁾	230	—	3480

1) Cross sectional area in width of 100 mm

- *1 北海道大学助手 工学部土木工学科、工博（正会員）
- *2 東急建設（株） 横浜支店
- *3 北海道大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）
- *4 清水建設（株） 土木本部技術第一部副部長、工博（正会員）

「U字」)に巻き付けている(図2参照)。供試体S4は、せん断スパン全域にCFSをU字に巻き付けたものであり、供試体S5は、せん断スパン全域にCFSを張り付けたものである。供試体S2、S3及びS4は、CFSのせん断補強効果を確認することを目的としたものであり、せん断補強筋が配置されていないせん断スパンが試験区間である。供試体S5は、CFSとスターラップを併用した場合の両者のせん断補強効果を確認することを目的としたものであり、左右のせん断スパンのせん断補強筋比が異なる(表2参照)。

本実験では、供試体の2点に集中荷重を作用させており、約10kNづつ荷重を単調に増加させ供試体を破壊にいたらしめた。コンクリートの目標強度は40MPaであり、各供試体の圧縮強度は表2に示すとおりである。なお、測定は、載荷点の変位、CFS及びスターラップの歪みである。スターラップに貼付した歪みゲージ位置は図1に、CFSに貼付した歪みゲージ位置の一例は図2に示されている。使用した歪みゲージは、測定長5mmの汎用箔ゲージである。なお、本実験においては、ディスクサンダーでコンクリート表面を研磨し、プライマー塗布後、下塗り樹脂を塗布しCFSを張り付け、さらに上塗り樹脂を塗布し、一週間後に歪みゲージの貼付及び実験を行った。

表2 実験供試体の諸元

Specimen	$f_c^{1)}$ (MPa)	$p_s^{2)}$ (%)	$p_w^{3)}$ (%)		CFS		Ultimate shear force (kN)	Failure mode ⁴⁾
			left	right	shape ⁵⁾	pitch		
S1	37.6	3.31	—	—	—	—	92.1	DT
S2	45.2	3.31	—	0.60	I	60	160.5	P
S3	41.3	3.31	—	0.60	U	60	202.1	P
S4	39.7	3.31	—	0.60	U	—	198.2	P
S5	37.3	3.31	0.26	0.60	I	—	211.2	FT

1) compressive strength, 2) tension reinforcement ratio, 3) shear reinforcement ratio, 4) I: CFS at side, U: CFS at side and bottom face 5) DT: Diagonal tension failure, P: Peeling of CFS, FT: Flexural tension failure

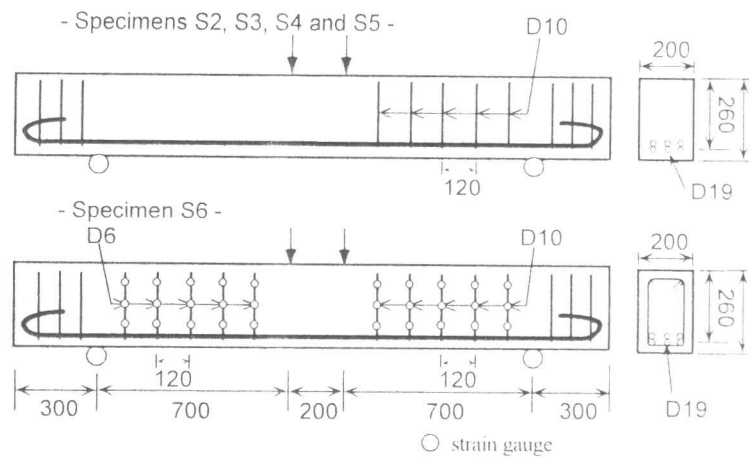


図1 実験供試体

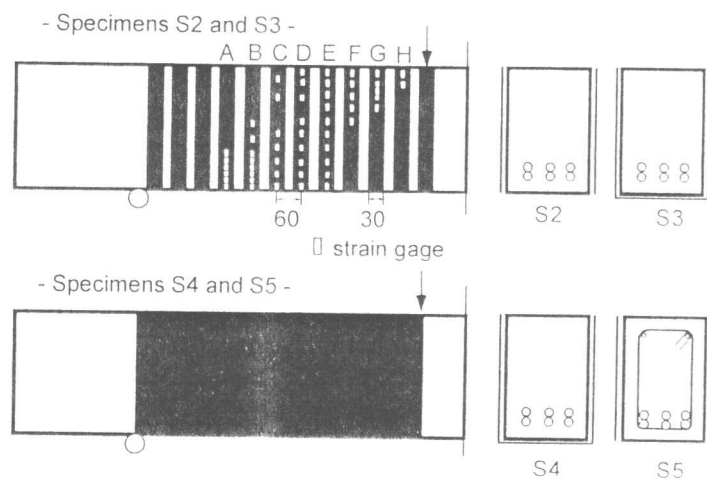


図2 CFSの張り付け方法

3. せん断耐荷性状

3.1 終局荷重及び破壊性状

本実験供試体の破壊荷重を表2に示す。供試体S1の破壊形式は、斜め引張破壊である。供試体S2、S3及びS4の破壊形式は、CFSが剥離することに伴い斜めひび割れが圧縮域を突き抜ける斜め引張的な破

壊である。また、供試体S5の破壊形式は曲げ降伏破壊である。図3は、CFSをゼブラ状に張り付けた供試体S2とS3の実験終了後に観察された斜めひび割れ性状及びCFSの剥離状況を示す。CFSを側面に張り付けた供試体S2においては、せん断スパン中央付近を境に剥離位置が異なる。すなわち、せん断スパン中央付近より支点側では、斜めひび割れの下側のCFSが剥離し、荷重点側では斜めひび割れより上側のCFSが剥離している。一方、CFSをU字に巻き付けた供試体S3においては、せん断スパン中央付近より支点側ではCFSが完全に剥離し、荷重点側では斜めひび割れより上側のCFSが剥離している。CFSをすき間無くせん断スパン全域にU字に巻き付けた供試体S4においても、供試体S3と同様な剥離破壊状況が観察されている。

表1より、CFSによりせん断補強することにより、せん断耐力が大きくなることが明らかであり、特にCFSをU字に巻き付けた場合には、張り付けた場合に比べさらに26%程度せん断耐力が大きい。

図4は、供試体S2とS3の荷重点から480mmの位置(図3中のB)のCFSの斜めひび割れより下側の歪み分布を示す。供試体S3において、作用せん断力が184.8kN以降でCFSの歪みが高さ方向で概ね一定となっている。これは、この区間で付着切れ(剥離)を起こしていることを示しているものと思われる。剥離後も引張力を受け持つことができるのは、はりの下面で定着されているためであり、その結果、CFSを側面のみに張り付けた供試体S2よりもせん断耐力が大きくなったものと考えられる。よって、CFSのせん断補強効果を考える上で、その定着性状を把握することが重要であると言える。

供試体S4の補強量は、供試体S3の2倍である。よって、せん断耐力が供試体S3よりも大きくなることが予想されたが、両者のせん断耐力は概ね等しい結果となった。本研究では、この理由を明らかにすることができない。

3.2 CFSのみ有するはりのせん断性状

図5は、供試体S2、S3及びS4の作用せん断力とCFSが受け持つせん断力との関係を示す。CFSが受け持つせん断力は、図3に示す斜めひび割れ近傍の歪みの平均値を用いて計算している。100kN付近よりCFSが受け持つ分担力が増加し始めている。供試体S4では、同じ作用せん断力時のCFSが受け持つせん断力は供試体S2及びS3より小さめであるが、これは、供試体S4においては、貼付した歪みゲージの位置が斜めひび割れから離れており、斜めひび割れ近傍の歪みよりも小さいことが原因と考えられる。本実験供試体のせん断耐力を圧縮強度を40MPaとして二羽式 [1] により計算すると94kNとなり、CFSの分担力

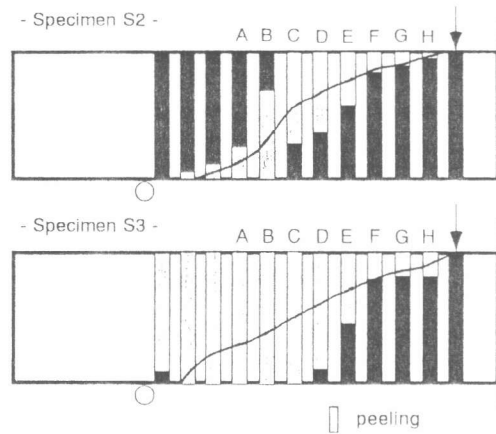
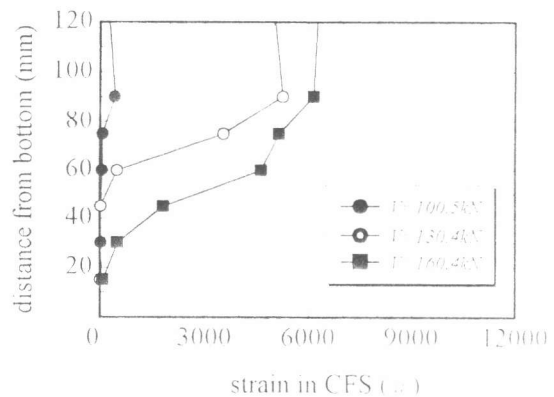
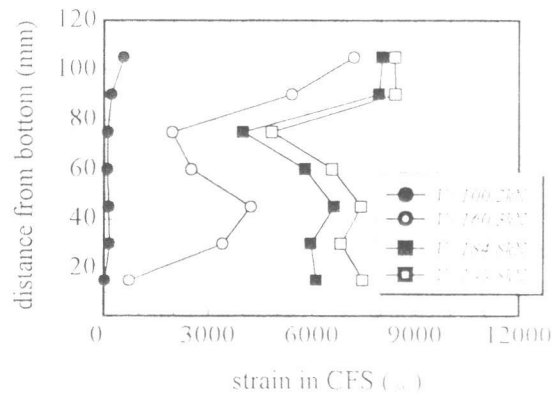


図3 斜めひび割れ性状及び剥離状況



(a) 供試体S2



(b) 供試体S3

図4 CFSの歪み性状

が増加し始める荷重に概ね一致する。

一般に、鉄筋コンクリートはりにおいて、コンクリートが受け持つせん断力は斜めひび割れ発生荷重で一定 [2] とされているが、本実験結果は、過去に著者らが報告 [3] したように、コンクリートが受け持つせん断力は、作用せん断力の増加に対し一定とは言えない。ここで、著者らが提案しているRCはりに対するモデル [4] を用いると、せん断補強筋としてCFSのみ有するRCはりのせん断耐力は次式により表すことができる。

$$V = V_{cpz} + V_{str} + V_{CFS} \quad (1)$$

ここで、 V_{cpz} はコンクリートの曲げ圧縮域が受け持つせん断力、 V_{str} は斜めひび割れ域でのせん断補強筋以外が受け持つせん断力であり、 V_{cpz} と V_{str} を足し合わせたせん断力がコンクリートが受け持つせん断力である。また、 V_{CFS} はCFSが受け持つせん断力であり、次式により得られる。

$$V_{CFS} = A_{CFS} E_{CFS} \overline{\varepsilon}_{CFS} \quad (2)$$

ここで、 A_{CFS} ：斜めひび割れとの交差部のCFSの総断面積、 E_{CFS} ：CFSの弾性係数、 $\overline{\varepsilon}_{CFS}$ ：斜めひび割れとの交差部のCFSの平均歪み。

図6は、斜めひび割れとの交差部のCFSの歪み分布を示す。CFSの歪みは、せん断スパン中央付近で最も大きく、載荷点及び支点に近づくにつれ小さくなる傾向にある。これは、RCはりのスターラップの歪み分布性状と類似しており、その分布形状はスターラップと同様に考えることができるものと思われる。図中の点線は、過去に提案されている支点及び載荷点近傍のスターラップの歪みに対する低減係数 [4] を用いて計算した値を示す。なお、計算値が一定区間の歪み値は、支点から240、300及び360mmの位置における実測歪みの平均値で示してある。斜めひび割れ内でのCFSの最大歪みを求めることができれば、スターラップに対して提案されている歪みの低減係数を用いその分布形状を求めることができると言えそうである。さらに、斜めひび割れ域を定義することができれば、式(2)に用いるCFSの平均歪みを算出することができる。なお、CFSの最大歪みの算定方法を具体的に示すためには、側面のみ張り付けた場合、U字に巻き付けた場合などの張り方の影響を考慮した上で、CFSがどの位置でいかなる条件で剥離破壊を起こすかを明らかにする必要がある、この点に関する検討は今後の課題である。

3.3 CFS及びスターラップを有するはりのせん断性状

図7は、スターラップとCFSを併用した供試体S5の左右両スパンにおける作用せん断力と分担せん断力との関係を示す。なお、本実験ではスターラップに高さ方向に3カ所歪みゲージを貼付しており、その平均値をその位置でのスターラップの歪みとし、斜めひび割れを跨いでいたと思われる3組のスターラップの平均歪みを用いスターラップの分担せん断力を計算している。ただし、スターラップが降伏した場合には、降伏応力で一定とし計算している。

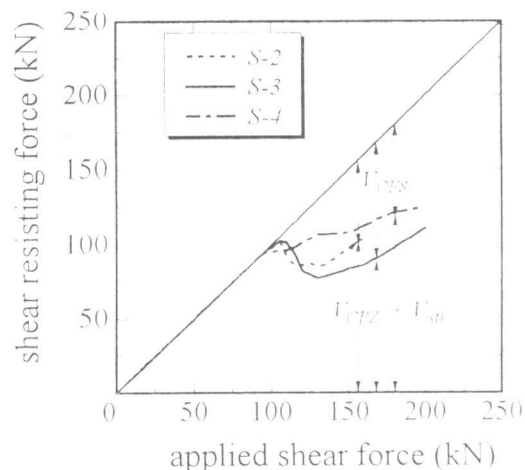


図5 作用せん断力と分担せん断力との関係

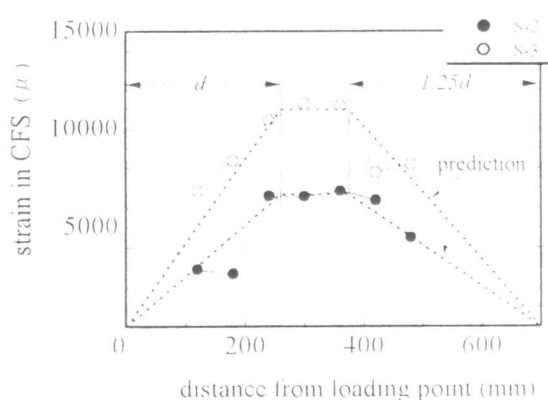


図6 CFSの歪み分布性状

図7より作用せん断力が100kN付近よりCFS及びスターラップが受け持つせん断力が増加し始めることが明らかである。CFSが受け持つせん断力は、スターラップのせん断補強筋比が小さい方が大きい。CFSとスターラップの受け持つせん断力を足し合わせた値は、スターラップのせん断補強筋比によらず同じ作用せん断力時には概ね等しい。

CFSとスターラップを有するRCはりのせん断耐力を、CFSのみでせん断補強した場合と同様に考えると次式で表される。

$$V = V_{CPZ} + V_{str} + V_s + V_{CFS} \quad (3)$$

ここで、 V_s ：スターラップが受け持つせん断力で次式で表される。

$$V_s = A_w \overline{\sigma_w} \quad (4)$$

ここで、 A_w は斜めひび割れと交差するスターラップの総断面積、 $\overline{\sigma_w}$ は斜めひび割れと交差するスターラップの平均応力、 V_{CFS} はCFSが受け持つせん断力であり式(2)で求められる。

スターラップが降伏しなければ斜めひび割れ域でのスターラップ及びCFSが受け持つせん断力は次式で表される。

$$V_s + V_{CFS} = A_w E_w \overline{\varepsilon_w} \left(1 + \frac{A_{CFS} E_{CFS} \overline{\varepsilon_{CFS}}}{A_w E_w \overline{\varepsilon_w}} \right) \quad (5)$$

ここに、 E_w ：スターラップの弾性係数、 $\overline{\varepsilon_w}$ ：斜めひび割れと交差するスターラップの平均歪み。

スターラップが降伏する時点を考えた場合、式(5)の括弧内の第2項目が、CFSを張り付けることによりスターラップが降伏強度に達する時のせん断力の増加分を表しており、CFSとスターラップの平均歪み関係を求めることができれば、両者のせん断力を計算できることとなる。

図8は、分担せん断力を算出した斜めひび割れと交差するCFSとスターラップの平均歪みの斜めひび割れ発生以降における関係を示す。スターラップのせん断補強筋比の大きさによらず、CFSの歪みが約1000 μ 程度までCFSとスターラップの平均歪みの比は概ね等しい。CFSの歪みが約1500 μ を越えた付近から、CFSの歪みが1000 μ までの傾向とは異なるが、平均歪み比はスターラップのせん断補強筋比によらず概ね等しいと言える。なお、スターラップのせん断補強筋比が0.26%の場合において、CFSが約2500 μ 以降にCFSとスターラップの平均歪み比が変化しているのは、スターラップが降伏していることによる。CFSとスターラップの平均歪みの関係が変化していくことは、作用せん断力の増加に対し、CFSが受け持つ分担力が増加することを示しており、過去の実験結果 [5] と一致する。本実験において斜めひび割れ発生直後は、斜めひび割れのごく近傍のみでCFSに引張歪みが発生しているが、荷重の増加（歪みの増加）につれ大きな引張歪みを示す位置が徐々に広がることが確認されており、この非付着領域の範囲がCFSの歪みレベルとともに変化するため、CFSとスターラップの平均歪み関係はその歪みレベルにより異

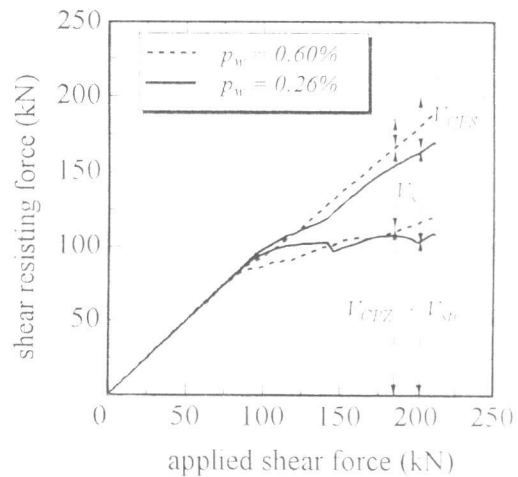


図7 作用せん断力と分担せん断力との関係

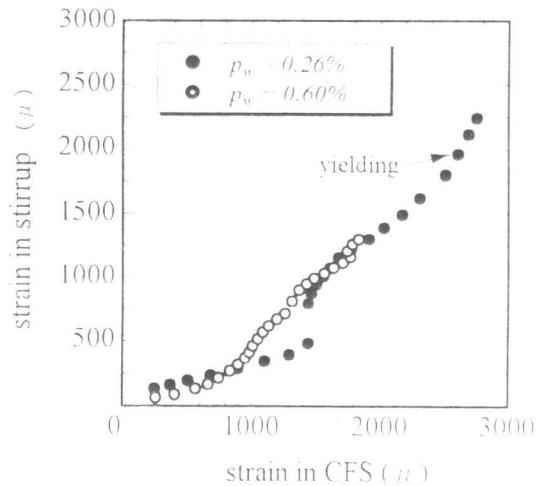


図8 スターラップとCFSの平均歪み関係

なるものと考えることができる。

仮に、CFSの歪みが 1000μ より小さい範囲及びCFSの歪みが 1500μ より大きくスターラップが降伏するまでの各範囲に対して、最小2乗法により平均歪み比（CFSの歪み/スターラップの歪み）を求めると、それぞれ3.65、1.47となった。CFSとスターラップの平均歪み関係を定量化するにあたっては、CFSとスターラップの付着特性の差異を明らかにする必要があり、その定量化は今後の課題である。

3.4 セン断耐力算定方法の考え方

CFSを側面にせん断補強した場合、そのせん断破壊モードとして、(a)せん断補強筋の降伏もCFSの剥離も伴わないせん断圧縮破壊、(b)せん断補強筋の降伏以前にCFSが剥離することによるせん断破壊、(c)せん断補強筋の降伏後にCFSが剥離することによるせん断破壊、(d)せん断補強筋の降伏後にCFSの剥離を伴わないせん断圧縮破壊、が挙げられる。スターラップを有効に使用することを考えると、破壊モードとしては、(c)及び(d)が望ましい。実際の補強において、スターラップが降伏する時をもって限界状態と考え、この場合、せん断補強筋が降伏歪みに達するときのCFSの平均歪みを明らかにした上で、斜めひび割れと交差するスターラップ及びCFSの歪み分布及び斜めひび割れ位置を定義することができれば、終局せん断耐力を算定できる。この時、スターラップが降伏歪みに達した時点でCFSの剥離破壊が起こらないことを確認しておく必要がある。供試体S5におけるせん断スパン内のCFSとスターラップの歪み分布は、3.2に述べた方法により評価できることが確認されており、今後は、スターラップとCFSの平均歪み関係、斜めひび割れ位置の定義方法及びCFSが剥離するかどうかの照査方法に関する検討を進めていく予定である。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1)炭素繊維シートによりせん断補強したRCはりのせん断耐力は、補強しないものに比べ増加する。特に、炭素繊維シートをU字に巻き付けた場合のせん断補強効果は、側面のみに張り付けた場合に比べ大きい。
- (2)炭素繊維シートの斜めひび割れに沿った歪み分布性状は、スターラップの歪み性状と類似している。すなわち、せん断スパン中央部で歪みが大きく、端部で小さい。
- (3)RCはりを炭素繊維シートにより補強した場合、その耐力は、コンクリートが受け持つせん断力を斜めひび割れ域での炭素繊維シートとスターラップが受け持つせん断力の和として表される。この場合、炭素繊維シートが受け持つせん断力は、スターラップのせん断補強筋比が炭素繊維シートのせん断補強筋比と比較し相対的に小さいほど大きい。

【謝辞】

本実験を行うに当たり東燃(株)の小林朗氏に多大な助力を得ました。ここに深く感謝の意を表します。

【参考論文】

- [1] 二羽淳一郎・山田一宇・横沢和夫・岡村甫、せん断補強筋を持たない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年
- [2] コンクリート標準示方書（平成3年版）設計編、1991年
- [3] 佐藤靖彦・上田多門・角田與史雄、せん断補強筋を有する連続繊維補強コンクリートはりのせん断耐力の定量的評価、土木学会論文集、No.520/V-28、pp.157-169、1995年
- [4] 上田多門・岡村甫、疲労荷重下のスターラップの挙動、コンクリート工学、第19巻、第5号、pp.101-116、1981年
- [5] 加藤博文・児島孝之・高木宜章・足立幸郎、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、第17巻、第2号、pp.899-904、1995年