

X線造影法による鉄筋コンクリートの せん断伝達面における変形性状に関する検討

Investigation on deformational behaviors in shear transfer section of reinforced concrete by X-ray radiography with contrast medium

子田 康弘*, 渡辺 亮史**, 岩城 一郎***, 大塚 浩司****

Yasuhiro Koda, Ryoji Watanabe, Ichiro Iwaki, Koji Otsuka

*修(工), 日本大学助手, 工学部土木工学科 (〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原 1)

**修(工), タスク(株) (〒231-0058 横浜市中区弥生町 2-15-1)

***博(工), 日本大学助教授, 工学部土木工学科 (〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原 1)

****工博, 東北学院大学教授, 工学部環境土木工学科 (〒985-8537 多賀城市中央 1-13-1)

This research aims at investigating deformational behaviors in shear transfer section of reinforced concrete by X-ray radiography with contrast medium. In this research, shear test using push-off specimens was conducted, varying the amount of reinforcing steel bars and the type of continuous fiber reinforced plastic (CFRP) sheet and so on. From the experimental results, X-ray photographs showed clearly the cracking zone of concrete and the deformation zone of reinforcing bars in reinforced concrete subjected to shear force. Further, it was revealed that the relationship between the cracking zone and the deformation zone corresponding to respective shear force level greatly depends on the amount of reinforcing bars and CFRP sheets.

Key Words: X-ray radiography with contrast medium, shear deformation, average cracking zone, deformation zone of reinforcing bars, dowel action

キーワード: X線造影法, せん断変形, 平均ひび割れ領域, 鉄筋の変形領域,
ダウエル作用

1. はじめに

鉄筋コンクリートコーベルやブラケット, はりとスラブの接合部等のせん断力が卓越する部材にひびわれが発生した場合, その力学的挙動は, ひび割れ位置, つまりそのせん断伝達面における変形性状に大きく依存することが知られている¹⁾. その結果, この様な鉄筋コンクリート構造物の終局耐力は, せん断伝達機構によって決まる場合も少なくないと言われている²⁾. このせん断伝達面における耐荷機構は, せん断補強筋, 骨材のかみ合い作用, およびダウエル作用によって支配され, これら耐荷機構に関しては, 種々の実験的・解析的研究³⁾が行われている. さらに, せん断伝達面におけるコンクリートおよび鉄筋の変形性状は, コンクリートと鉄筋の強度, 鉄筋比, 鉄筋とコンクリートの付着特性, あるいは, ひび割れ開口変位とずれ変位の変化などで異なり, これらの要因は, 骨材のかみ合い作用とダウエル作用の双方に影響を及ぼすものと思われる. こうした機構を踏まえて, せん断伝達面におけるコンクリートの損傷領域, およびそのひびわれ近傍の鉄筋の付

着低下領域を定量化することが可能となれば, FEM を用いた高度な構造解析への応用に役立つものと考えられる. しかしながら, せん断伝達面におけるコンクリートおよび鉄筋の変形領域を明らかにすることは一般に困難であり, 種々の条件により変化するこの両者の関係を定量的に評価した研究例は見当たらない.

そこで本研究では, 鉄筋コンクリートせん断伝達面における変形性状について, X線造影撮影法による可視化を行い, 得られた鉄筋コンクリート内部の情報に基づき, せん断伝達面におけるひび割れの発生と伸展, 鉄筋の変形といった現象の究明を目的とした.

本研究において, せん断力によるひび割れをPush-off型⁴⁾供試体による一面せん断試験によりモデル化し, これにX線造影撮影法を併用した載荷試験を行った. 鉄筋は, せん断伝達面と直角方向に配置して, 鉄筋径および鉄筋比を実験水準とした. また, せん断伝達面上に連続繊維シートを貼付し, シートの有無, 補強量, およびシートの種類を条件とした実験を行った. 以上の実験結果に基づき, せん断変位が卓越した場合におけるせん断伝達面のひび割れ

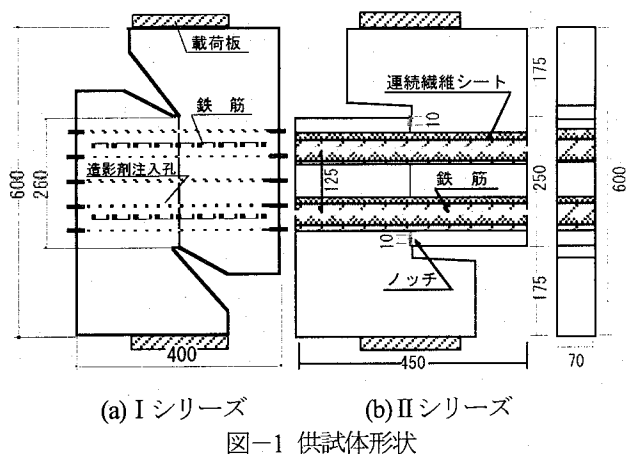


図-1 供試体形状

性状および鉄筋変形に及ぼす鉄筋および連続繊維シートの影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 概説

本実験では、鉄筋コンクリートせん断伝達面の変形状の検討を2つのシリーズに分けて行った。すなわち、鉄筋比と鉄筋径を実験水準としたIシリーズと、連続繊維シートの貼付の影響を検討したIIシリーズである。特に、IIシリーズでは、実験水準として炭素繊維とアラミド繊維の2種類のシートを用い、また、シート補強量も2条件設定した。本実験のPush-off型の一面せん断供試体の形状は、Iシリーズの場合、既往の研究⁵⁾を参考にしたもので、せん断伝達面（以下、試験面と称す）と鉄筋の交角を試験面より右回りに約50°～120°の範囲で任意に設定可能な形状である。一方、IIシリーズでは、試験面に対して特に交角90°で配置可能な供試体形状とした。このように供試体形状を変えた理由は、Iシリーズの実験において、一部、供試体の回転によると見られるひび割れが観察されたため、IIシリーズにおいては、この種のひび割れの発生を抑制しようと考えたためである。

2.2 実験水準および供試体形状

(1) 実験水準

実験水準を表-1と表-2に示した。Iシリーズは、表-1に示すように、試験面と鉄筋の交角が90°で、鉄筋本数とその径を2D10、2D13、および3D10と変化した。鉄筋配置は、試験面に150mm間隔で2本、75mm間隔で3本配置した3条件と2D10で130mm間隔とした1条件の合計4条件とした。これらの条件は、既往の文献に示される細長いはり部材を対象としたせん断補強筋量^{6,7)}、あるいはそれを上回る量を考慮して選定ものである。IIシリーズでは、表-2に示すように、鉄筋の交角90°、鉄筋本数とその径を2D10とし、試験面に対し、125mm間隔で配置した。また、試験面に貼付した連続繊維シートの幅は、40mmと80mmの2条件であり、これに、シートの種類の2条件と無貼付供試体の1条件の計5条件、供試体数6体

表-1 Iシリーズの実験水準

供試体No.	鉄筋 (SD295A)	鉄筋間隔 (mm)	鉄筋比 ρ_s (%)
I-2D10	D10 2本	@150	0.784
I-2D13	D13 2本	@150	1.392
I-3D10	D10 3本	@75	1.176
I-2D10H	D10 2本	@130	0.784

表-2 IIシリーズの実験水準

供試体No.	鉄筋	鉄筋比 ρ_s (%)	シート補強比 ρ_{ef} (%)	シートの種類	シート幅 (mm)
II-01	SD295A D10 2本	0.815	—	—	—
II-02			—	—	—
II-C1			0.153	炭素	40
II-C2			0.305		80
II-A1			0.261	アラミド	40
II-A2			0.523		80

表-3 Iシリーズの使用材料の物性

供試体: I-2D10, I-2D13, I-3D10						供試体: I-2D10H					
コンクリート (N/mm ²)			鉄筋 (N/mm ²)			コンクリート (N/mm ²)			鉄筋 (N/mm ²)		
			SD295A	D10	D13				SD295A	D10	
f'_c	25.8		f_y	354	347	f'_c	29.0		f_y	333	
f_t	2.49		f_t	502	495	f_t	3.24		f_t	489	
E_c	21.3×10^3		E_s	194×10^3	197×10^3	E_c	22.5×10^3		E_s	200×10^3	

表-4 IIシリーズの使用材料の物性

コンクリート (N/mm ²)		鉄筋 (N/mm ²)		炭素繊維シート		アラミド繊維シート	
f'_c	32.1	f_y	351	f_{cf}	3400 (N/mm ²)	f_{af}	2080 (N/mm ²)
f_t	2.61	f_{st}	530	E_{cf}	230 (kN/mm ²)	E_{af}	118 (kN/mm ²)
E_c	25.2×10^3	E_s	195×10^3	ρ_{cf}	300 (g/mm ²)	ρ_{af}	415 (g/mm ²)
				t_{cf}	0.167 (mm)	t_{af}	0.286 (mm)

ρ : 目付け量 t : シート厚さ

とした。

(2) 供試体形状

供試体形状は、図-1に示すように、Iシリーズが高さH=600mm、幅B=400mm、IIシリーズが高さH=600mm、幅B=450mmであり、各シリーズとも奥行t=70mmである。試験面の寸法は、Iシリーズの場合、高さh×奥行tが260mm×70mmである。一方、IIシリーズの場合、250mm×70mmであり、試験面上下端に長さ10mm、幅0.5mmのノッチを設けた。

なお、IIシリーズの連続繊維シートの貼付は、所定の施工マニュアル^{8,9)}に準拠して行った。また、シート貼付時は、シートを緊張することなく供試体全周に巻き付けた。そのため、コンクリートの隅角部にはR=10mmの面取りを施した。

2.3 使用材料

表-3と表-4は、本実験に使用した材料の物性値である。コンクリートには、普通セメントを用いたレディーミクストコンクリート($G_{max}=20mm$)を使用した。このうち、コンクリートの物性は、供試体の荷重日齢(I: 101日、

II: 64 日) のものである。ここで、表-3 に示す I シリーズのコンクリートは、I-2D10H が呼び強度 21N/mm^2 、他の 3 供試体が 18N/mm^2 のものである。鉄筋に関しては、各シリーズとも SD295A の鉄筋を使用した。鉄筋の降伏点応力度 f_y 、引張強度 f_t 、ヤング係数 E_s は引張試験を行い得たものである。また、連続繊維シートの物性は、メーカーの規格値である。

2.4 X線造影撮影法を用いた載荷試験の方法

図-2 は、X線造影撮影法を併用した一面せん断試験の概要を示したものである。実験は、X線透過試験室内に設置されている容量 980kN の万能アムスラーによる荷重制御方式で行なった。載荷は、漸次増加荷重とし、最大耐力以降の破壊、および鉄筋の様子を確認できるまで行った。また、精度 $1/1000\text{mm}$ 、容量 25mm の高感度変位計を用い、試験面におけるずれ変位の測定を行った。

載荷試験中の X 線造影撮影法によるひび割れ観察は、図-1(a) に示す約 50mm 間隔で設けた $\phi 2\text{mm}$ の造影剤注入孔に造影剤を注入した状態で X 線発生装置から供試体に X 線を照射し、これを X 線カメラによって CRT リアルモニターに映し出し、供試体内部の様子を観察した。これにより、試験面にひび割れの発生、および伸展が生じると造影剤がひび割れに充填され、その造影効果によって内部のひび割れ様相の変化が確認できる。X 線造影撮影は、荷重を保持し、X 線フィルムを供試体に密着させ行なった。この撮影は、初期ひび割れ発生とひび割れに変化が見られた時点、および最大荷重付近であり、また、最大荷重以後は、試験面のずれ変位が任意の変位レベルに至ったときに行なった。なお、X 線撮影前には、注射器により造影剤の圧入を行い、微細なひび割れへの充填に留意した。

X 線造影撮影¹⁰⁾は、感度 100 のフィルムを用い、管電流 2mA 、管電圧 100kV 、照射距離 70cm 、照射時間が 10 秒である。また、その撮影範囲は、試験面を中心に高さ 300mm × 幅 100mm の範囲とした。

3. 実験結果

まず、載荷試験による各シリーズのひび割れ発生荷重時 P_{cr} と最大荷重 P_{max} 時におけるせん断応力度 τ の傾向を示す。せん断応力度 τ は、荷重を試験面の面積で除して求めた。図-3 は、各シリーズのひび割れ発生時および最大荷重時のせん断応力度 τ_{cr} 、 τ_{max} と、鉄筋比 P_s およびシートの引張剛性(ヤング率 E_{cf} × シート断面積 A_{cf})との関係を比較した図である。図に示すように、I シリーズは、I-2D10H のせん断応力度が突出しているものの、使用材料が同じ他の 3 供試体は、鉄筋量が多くなるに従い τ_{cr} 、 τ_{max} とともに大きくなる傾向にある。また、II シリーズの場合、 τ_{cr} の値は、バラツキはあるものの概略シート補強量によらず、ほぼ一定値を示しており、シートの補強効果は認められない。 τ_{max} は、シート補強量の増加に伴い、大きな

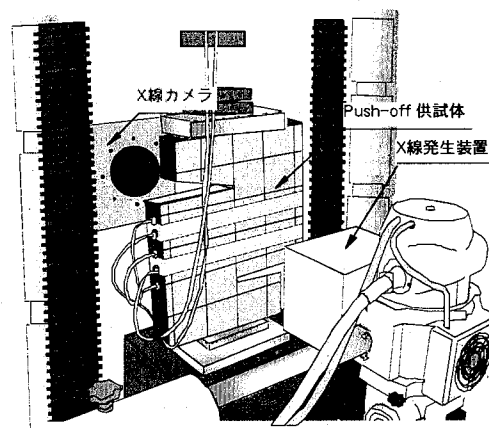


図-2 X線造影撮影法を併用した載荷試験の方法

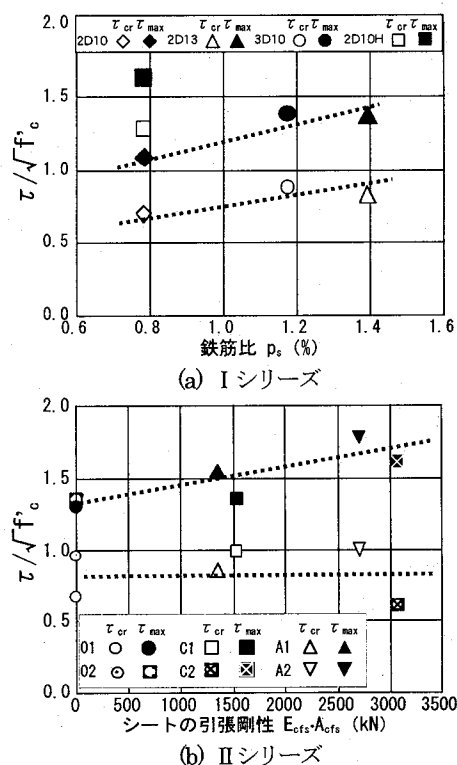


図-3 ひび割れ発生時と最大荷重時のせん断応力度

表-5 載荷試験の結果

シリーズ	供試体No.	P_{cr} (kN)	P_{max} (kN)	τ_{cr} (N/mm^2)	τ_{max} (N/mm^2)
I	I-2D10	64.9	100.6	3.57	5.53
	I-2D13	77.0	127.0	4.23	6.98
	I-3D10	80.0	127.5	4.40	7.01
	I-2D10H	118.6	151.1	6.52	8.30
II	II-01	66.8	129.5	4.15	8.04
	II-02	93.6	132.8	5.81	8.25
	II-C1	97.7	133.9	6.07	8.32
	II-C2	60.1	158.4	3.73	9.84
	II-A1	85.5	153.3	5.31	9.52
	II-A2	97.9	174.1	6.08	10.8

る傾向であった。なお、連続繊維シートの剥離は、最大荷重を過ぎてから顕著に生じる傾向であり、またシートの破壊は生じていない。表-5 は、I、II シリーズの載荷試験結果の一覧である。

図-4 は、荷重とずれ変位の測定結果である。図-4(a) の I シリーズでは、ひび割れ発生前まではほとんど変位は

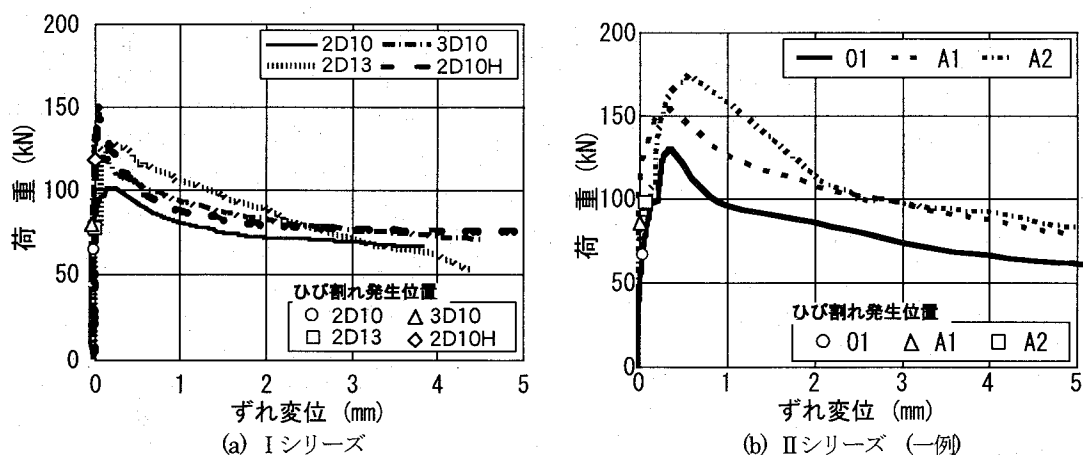


図-4 荷重-ずれ変位関係

生じず、ひび割れ発生と同時に、徐々に変位が生じ始めた。最大荷重に達した後は、荷重の低下とともにずれ変位も大きくなり、ずれ変位 2mm 以降は、概略一定の荷重で推移した。図-4(b)の II シリーズにおいては、荷重-ずれ変位の一例として、シート無貼付供試体とアラミド繊維シート貼付供試体の結果を示した。荷重-ずれ変位関係は、I シリーズ同様に、ひび割れ発生前までの変位は小さく、ひび割れ発生後に変位が生じ始めた。最大荷重後は、荷重の低下とともにずれ変位も大きくなり、荷重の低下は、シート補強量が大きい程、緩やかに推移する傾向を示した。これは、連続繊維シートが試験面直角方向の引張力を負担したため、変位進展後のせん断伝達力に影響を及ぼしたと思われる。

4. X 線画像によるせん断伝達面の変形状

4.1 ひび割れの発生とその伸展の状況

(1) I シリーズのひび割れ状況

図-5 は、I シリーズ供試体の X 線画像であり、ひび割れの発生からその後の伸展状況と最大荷重以降の状況を段階的に示したものである。なお、写真右には、試験面付近のひび割れをトレースした図を示してある。また、図中の矢印は、せん断力の方向である。

図-5 に示すように、X 線造影中に観察された最初のひび割れは、供試体中央の試験面を斜めに横切る筋状のひび割れであった。この可視化された筋状のひび割れは、白色調が強く、鉄筋が配置されたほぼ中間部で発生し、その後の荷重の増加に伴い、上下方向にひび割れ本数が増加しながら進展した。その角度は、供試体の種類に関わらず、ほぼ一定で、試験面から右に約 10° の方向に発生している。また、このひび割れは、連続したものではなく、断続的に発生したものが集まって形成されたものであり、さらにその周辺には白灰色で示されるひび割れ領域が確認される。このうち、筋状のひび割れは、白色調が強いことから、比較的大きなひび割れに造影剤が充填したことを示しており、マクロなひび割れによる造影画像と言うことができる。一方、X 線画像からは、マクロなひび割れに付随した白灰

色の領域が見られたが、これは、微細なひび割れ領域に造影剤が充填されたものである¹¹⁾と考えられる。なお、図中の(c)、(d)には、せん断伝達面以外に発生しているひび割れが確認された。このひび割れは、供試体の回転による影響を受けて発生したひび割れと考えられるため、この種のひび割れが発生しないよう II シリーズに用いる供試体形状を修正した。(2.1 参照)。

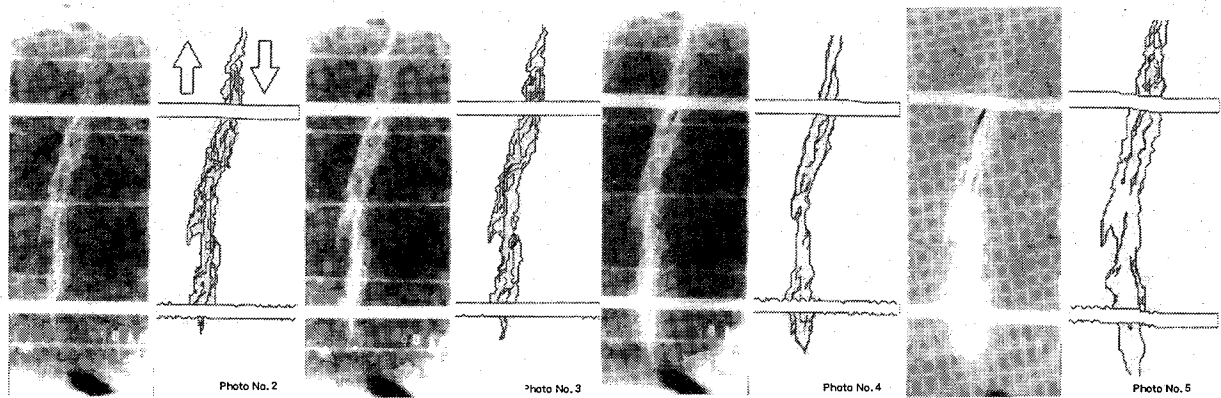
(2) II シリーズのひび割れ状況

図-6 は、II シリーズ供試体の X 線画像である。この図では、X 線画像中のひび割れ領域の周囲を実線で囲みその領域の大きさを示してある。

図-6 に示すように、白色調が強い筋状のひび割れの発生は、I シリーズ同様に鉄筋配置間の中間付近に発生し、試験面を斜めに横切るように発生した。また、筋状のひび割れ周辺に付随した微細なひび割れは、筋状のひび割れの増長に伴い領域を広げる様相を示し、その領域は、I シリーズと比較して大きい傾向にあった。さらには、この微細なひび割れ領域は、連続繊維シートの種類によらず、シート幅 80mm の場合に最も大きい結果となった。試験面に沿った付近の白灰色の領域は、ずれ変位の増加とともに濃くなり、同時に試験面付近の白色域もより濃くなった。この白色域の色調が濃くなる様相は、筋状のひび割れが試験面を貫通するひび割れへと成長したことを示している。また、ひび割れ領域は、試験面を中心にある幅を持って形成し、その一部が極端に外側に広がる傾向にはない。この微細ひび割れ領域は、外側ほど色調が薄く、これは、微細ひび割れの量が領域の外側に向かって減少していることを示唆するものである。

4.2 せん断伝達による鉄筋の変形

図-7 は、鉄筋の変形過程を示した一例である。左図はひび割れ発生時であり、右図はずれ変位が 5mm の時の状況を示している。右図に示すように、断続したひび割れが試験面上に帯状で分布し、このひび割れ近辺で鉄筋が変形している状況が分かる。この鉄筋の変形は、最大荷重以降の試験面のずれ変形が顕著に増加するところから徐々に大きくなった。すなわち、本実験の場合、ずれ変形が約 3mm



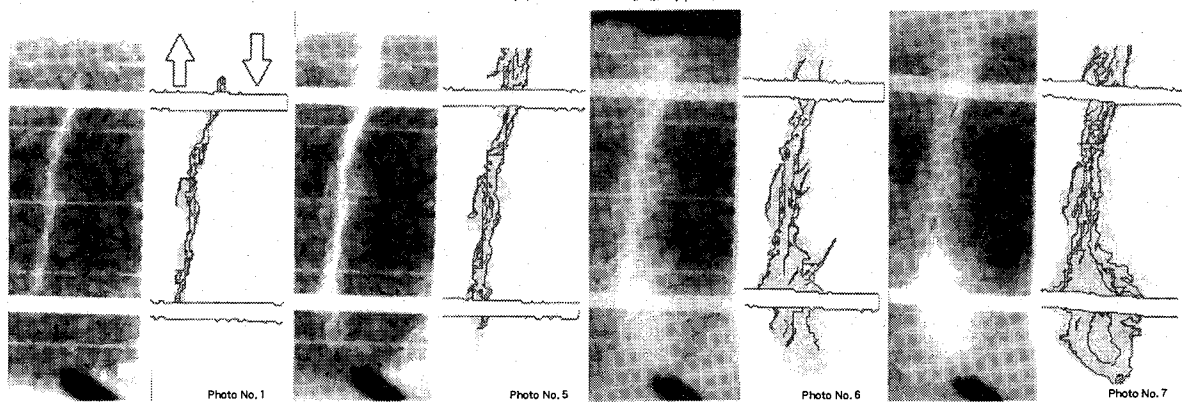
1) ひび割れ発生

2) ひび割れ伸展

3) 最大荷重

4) ずれ変位 4mm

(a) I-2D10 供試体



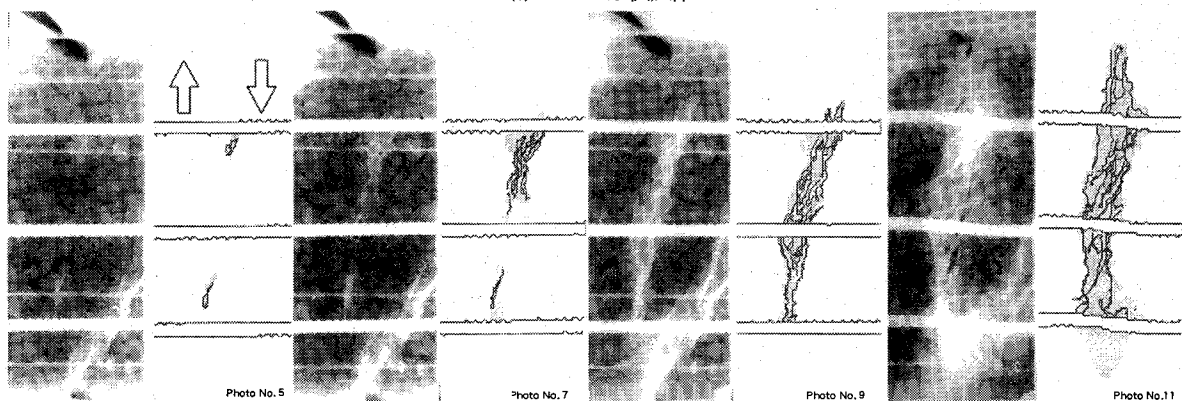
1) ひび割れ発生

2) ひび割れ伸展

3) 最大荷重

4) ずれ変位 4mm

(b) I-2D13 供試体



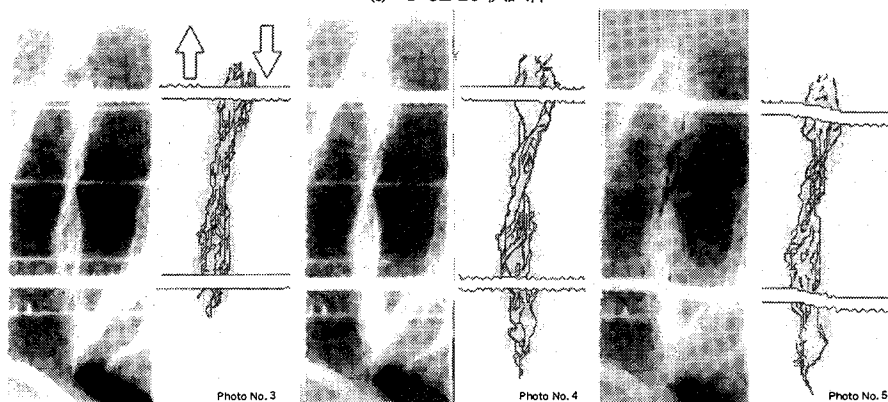
1) ひび割れ発生

2) ひび割れ伸展

3) 最大荷重

4) ずれ変位 4mm

(c) I-3D10 供試体



1) ひび割れ発生

2) 最大荷重

3) ずれ変位 5mm

(d) I-2D10H 供試体

図-5 I シリーズの X 線画像

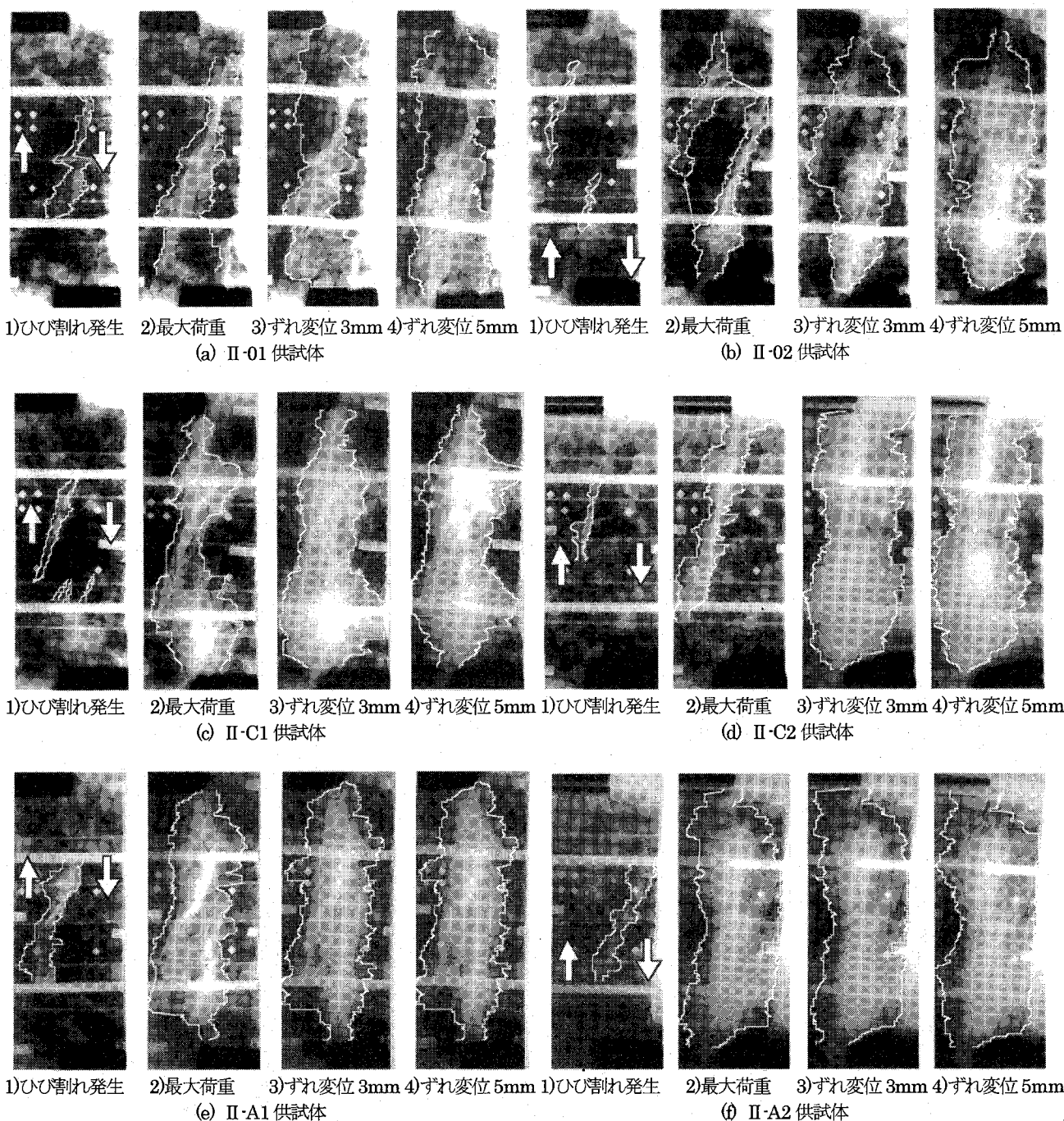


図-6 IIシリーズのX線画像

以上になった付近から、鉄筋の変形が大きくなり、X線画像上で肉眼でも観察されるようになった。この鉄筋変形の過程は、I、IIシリーズともに同様であり、また、図-5、図-6に示すように、目視で確認可能な鉄筋の変形領域は、鉄筋位置での微細ひび割れ領域よりもその範囲を大きく超えることがない傾向であった。

4.3 X線画像によるひび割れと鉄筋変形の数量化

X線造影撮影法を併用した一面せん断試験の結果、せん断におけるひび割れの領域、および試験面のずれ変位に伴う鉄筋の変形が観察された。本検討では、図-8に示すように、X線画像を元に、画像処理ソフトを用いて、ひび割れ領域と鉄筋の変形領域を求めた。なお、画像処理ソフト

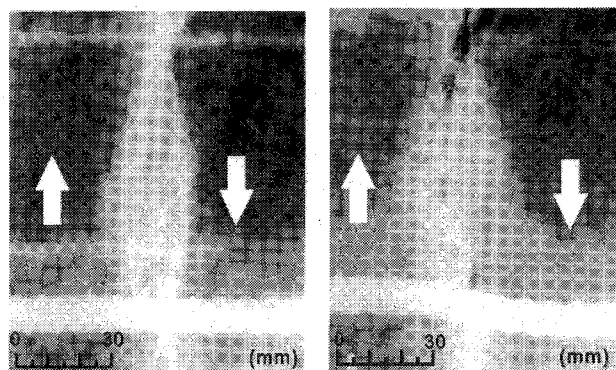


図-7 X線画像による鉄筋変形の状況(I-2D10H)

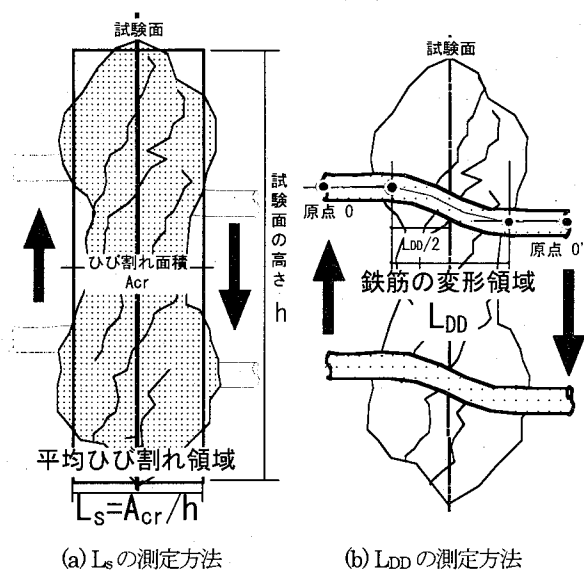


図-8 平均ひび割れ領域と鉄筋の変形領域の測定方法

の画像読み取り精度は、1/1000mmである。まず、ひび割れ領域の幅の平均値（以下、平均ひび割れ領域と記す） L_s は、画像解析により求まるひび割れ領域面積 A_{cr} を、試験面の高さ h の長方形に近似することで求めることとした。次に、鉄筋の変形領域 L_{DD} は、鉄筋の折れ曲がり開始点間の距離と定義した。その測定は、画像上で鉄筋に直線を引き、鉄筋軸とこの線のずれ始めの位置を目視で判定し、その開始点を定めることにより行なった。なお、鉄筋の変形領域に

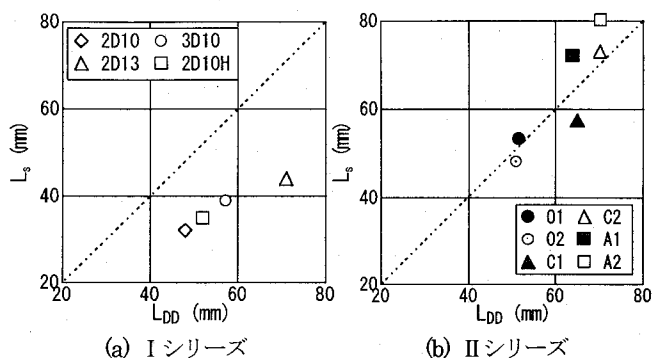


図-9 平均ひび割れ幅 L_s と鉄筋の変形領域 L_{DD} の関係

関しては、画像解析上、明らかに変形が分かる場合に限り測定を行った。

また、これらの撮影時期は、2.4 に示す通り、大略、ひび割れ発生時期、ひび割れ進展時期、最大荷重時、ずれ変位 3-5mm 時点である。

4.4 ひび割れ領域と鉄筋変形の相互関係

ここでは、X線造影撮影法によって得られた画像情報に基づき、前節の測定法で定量化したひび割れ領域と鉄筋の変形領域との相互関係について検討を行った。

図-9 にX線画像情報に基づき定量化したひび割れ領域の平均ひび割れ領域 L_s と、鉄筋の変形領域 L_{DD} の関係を示

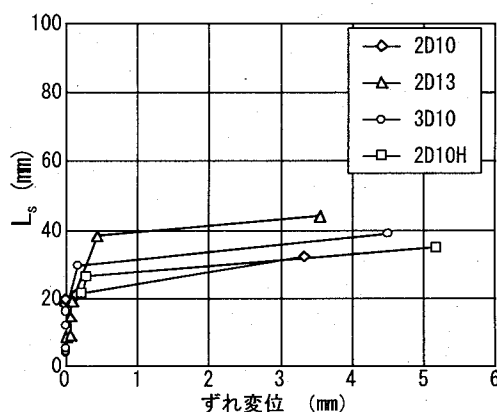
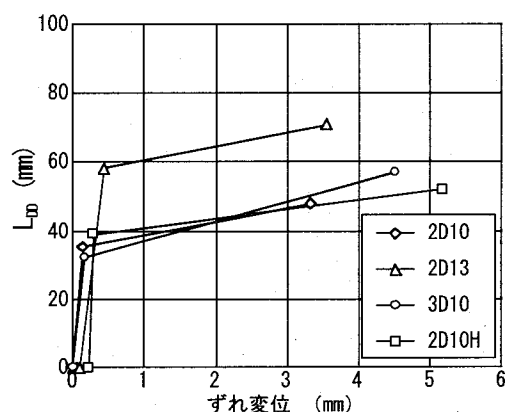


図-10 平均ひび割れ領域 L_s および鉄筋の変形領域 L_{DD} とずれ変位の関係

す。図-9の数値は、載荷終了直前のものであり、試験面のずれ変位は5mm程度である。図に示すように、 L_s と L_{DD} は概略直線関係にあることがわかる。すなわち、鉄筋の変形領域の増加に伴いひび割れ領域も増加する傾向を示した。この傾向は、図-9(a)のIシリーズの場合、鉄筋比の増加に伴い、鉄筋の変形領域と平均ひび割れ領域が増加する傾向であり、図-9(b)のIIシリーズでは、連続繊維シートを貼付し、シートによる補強量が多い程、鉄筋の変形領域、平均ひび割れ領域ともに増加する結果となった。なお、図-9に示すように、Iシリーズの場合では、鉄筋の変形領域 L_{DD} に対し、若干、平均ひび割れ領域 L_s が小さいが、これは、画像上の微細ひび割れ領域の境界における濃淡の鮮明さが曖昧なため L_s が過小評価されていることが一因と思われる。一方、IIシリーズでは、この問題が解消されており、両者はほぼ一致する傾向を示している。

4.5 セン断変形と L_{DD} および L_s の関係

図-10は、ずれ変位の増加に伴う鉄筋の変形領域 L_{DD} と平均ひび割れ領域 L_s の変化を示した図である。なお、 L_{DD} と L_s は、各荷重段階におけるX線写真を基に算出した値である。

図-10に示すように、(a)Iシリーズにおける L_{DD} と L_s は、最大荷重時付近のずれ変位0.5mm程度まではずれ変位の増加に伴い大きくなる。しかし、その後は、多少小さくなるか、ほぼ一定の値で推移する傾向であった。すなわち、鉄筋の変形領域及びひび割れ領域は最大荷重時までにその大きさが概略定まると、それ以上には増加しない傾向を示している。一方、(b)IIシリーズにおける L_s については概略同様のことが言えるが、 L_{DD} については、最大荷重時において、明確な鉄筋変形は認められなかった。また、図-10(a)のIシリーズの場合、 L_{DD} は、鉄筋量よりも鉄筋径が大きい程、増加する傾向にあり、これは、鉄筋の折れ曲がり鉄筋の曲げ剛性の影響を受けたため¹²⁾と考えられる。図-10(b)のIIシリーズの場合では、 L_{DD} 、 L_s ともシート補強量が多い程、値が大きい。これは、ひび割れ発生後、連続繊維シートによる引張力の負担が試験面のせん断剛性を高め、その結果、せん断力に対して骨材のかみ合い作用が支配的な役割を果たしたためと思われる。一方、鉄筋の変形領域については、試験面付近のひび割れ領域に追従したものである。

4.6 最大せん断応力度とせん断変形の関係

図-11に、試験面に働くせん断力とそれによるせん断変形の相互関係として、最大せん断応力度 τ_{max} と平均ひび割れ領域 L_s との関係を示した。図の L_s は、各供試体の最大ずれ変位（一部を除き、5mm程度）の値である。図より、IシリーズとIIシリーズで実験水準が異なるため、一概には言えないが、 τ_{max} は、 L_s との間に比例関係にある傾向を示している。なお、本研究において、最も大きな値を示したのは、アラミド繊維シートを施したA2であった。この

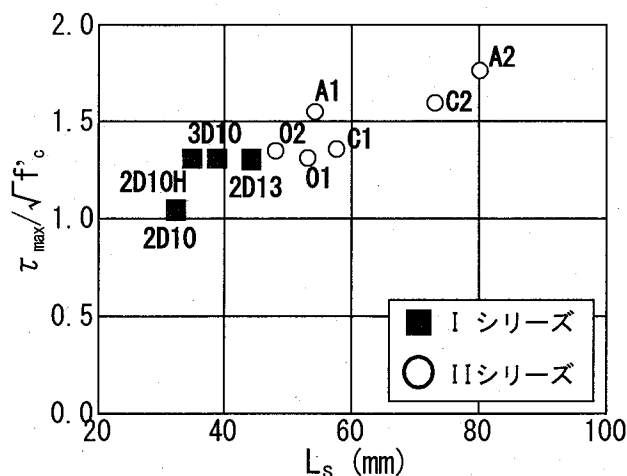


図-11 最大せん断応力度と L_s の関係

ことから、せん断応力度の増加は、鉄筋量やシート補強量の増加による試験面直角方向の圧縮応力の励起¹³⁾に起因したと思われる。この結果が、ひび割れ領域 L_s の広がりとして観察されたと考察される。また、図-4(b)に示すように、A2では、最大荷重以降の荷重低下が緩やかであり(C2も同様)、試験面を中心とした広範なひび割れ領域の形成が急激な荷重低下を抑制したように思われる。

5. まとめ

本研究において、せん断伝達面における鉄筋コンクリートのせん断変形性状に関して、X線造影撮影法による画像情報に基づき、ひび割れ領域と、鉄筋の変形領域について、検討を行った。これらの結果を要約すれば、以下のようになる。

- 1) X線造影法を併用した一面せん断試験によるX線画像情報より、せん断伝達面における、ひび割れ領域およびダウエル作用による鉄筋の変形領域を可視化することができた。
- 2) 可視化されたひび割れは、白色調の強い筋状のひび割れとこれに付随した白灰色の微細なひび割れで構成され、これらがせん断伝達面を取囲むように存在していることが明らかとなった。ひび割れの発生と伸展は、まず、鉄筋の間に筋状のひび割れが発生し、その後、断続的なひび割れが上下方向に伸展するとともに、微細ひび割れがその周囲に発生し、成長する傾向を示した。
- 3) X線画像に基づき、平均ひび割れ領域 L_s と鉄筋の変形領域 L_{DD} の定量化を行った結果、平均ひび割れ領域と鉄筋の変形領域との間には相関があり、本実験のIIシリーズにおいては両者がほぼ一致する傾向を示した。また、実験水準によらず、平均ひび割れ領域および鉄筋の変形領域は、概略ではあるが最大荷重に達するまでにその大きさが決まり、その後は大きく変化しない傾向である。
- 4) 鉄筋および連続繊維シートの補強量が増加するに伴い、平均ひび割れ領域および鉄筋の変形領域が広がる傾向

を示した。このような軟化領域の拡大は、せん断伝達面直角方向の拘束の影響が卓越したためであると考えられる。

謝 辞

本研究は、故 原 忠勝 博士が心血を注いだ研究テーマの1つでした。先生のご尽力なくして、ここに論文を完遂することはできませんでした。研究に携わった一同、先生のご冥福を心よりお祈り致します。また、論文執筆に際し、日本大学 中村 晋 教授より貴重なご助言を賜りました。実験データの整理・検討では、國分浩史氏の助力を得ました。ここに記して謝意を表します。なお、本研究の一部は文部科学省学術フロンティア推進事業（日本大学工学部）：研究課題「中山間地及び地方都市における環境共生とそれを支える情報通信技術（研究代表：小野沢元久）」の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 岡村 甫, 前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.
- 2) 李 宝緑, 前川宏一, 岡村 甫：鉄筋コンクリートのひびわれ面におけるせん断伝達特性, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.12, No.2, pp.293-298, 1990.
- 3) 例えば, 山田一字, 青柳征夫：ひびわれ面におけるせん断伝達, 第2回 RC 構造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, pp.19-28, 1983.

- 4) Mattock, A.H. and Hawkins, N.M. : Shear Transfer in Reinforced Concrete – Recent Research, PCI Journal, Vol.17, No.2, pp.55-75, March-April, 1972.
- 5) Mattock, A.H. : Shear Transfer in Reinforced Concrete Having Reinforcement at An Angle to The Shear Plane, SP42, American Concrete Institute, pp.17-42, 1974.
- 6) 國分正胤, 岡村 甫：新示方書によるコンクリート橋の設計・第1巻, 技報堂出版, 1987.
- 7) 国広哲男, 手塚 薫, 鬼丸敏男, 工藤真之助, 秋谷五郎：鉄筋コンクリート橋の設計計算例, 山海堂, 1975.
- 8) CF ルネサンス協会：CF ルネサンス工法 [説明資料]
- 9) アラミド補強研究会：アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領 (案), 1998.
- 10) 大塚浩司, 武田三弘：X 線造影撮影によるコンクリート構造物内部のひび割れ検出技術の開発に関する研究, 土木学会論文集, No.725/V-58, pp.143-156, 2003.
- 11) Otsuka, K. and Date, H.: Fracture Process Zone in Concrete Tension Specimen, Engineering Fracture Mechanics 65, Pergamon Press, pp.111-131, 2000.
- 12) Qureshi, J. and Maekawa, K.: Computational Model for Steel Bar Embedded in Concrete under Combined Axial Pullout and Transverse Shear Displacement, Proceedings of the JCI, Vol.15, No.2, pp.1249-1254, 1993.
- 13) 土木学会：コンクリートライブラリー 69 コンクリートの力学特性に関する調査研究報告, pp.25-36, 1991.

(2005年9月10日受付)