

# 論文 高強度コンクリートの収縮がせん断補強筋のひずみ挙動に及ぼす影響

早川智浩<sup>\*1</sup> 藤田 学<sup>\*2</sup> 三瀬あゆこ<sup>\*3</sup> 佐藤良一<sup>\*4</sup>

**要旨:**高強度コンクリートを用いて、せん断補強された鉄筋コンクリート部材のせん断特性とそれに及ぼす収縮の影響について実験的に検討した。実験は、収縮の異なる2種類のコンクリートを用いて、せん断補強された鉄筋コンクリートはりを作製して、静的載荷試験を実施し、せん断補強筋のひずみを計測した。その結果、せん断補強筋のひずみより評価したせん断補強筋降伏時のせん断耐力は、収縮応力のある場合、コンクリート標準示方書式の値を下回る可能性を示した。

**キーワード:**高強度コンクリート、鉄筋コンクリート、せん断補強筋、収縮応力、せん断耐力

## 1.はじめに

高性能AE減水剤の開発、混和材の再利用に伴い、高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート(以下RC)構造物の研究が進められている。しかし、高強度コンクリートを用いたRC部材では、コンクリートに無視できないほどの自己収縮応力が発生する事が確認されている<sup>1)</sup>。また、高強度コンクリートを用いた場合のせん断補強しないRCはり部材においては、土木学会コンクリート標準示方書のせん断耐力算定式をそのまま適用するとせん断耐力を過大評価する危険性があることは、松井らの研究<sup>2)</sup>によって指摘されている。その原因については、骨材のかみ合わせの減少、収縮の影響<sup>3)4)</sup>等から報告・検討されている。

しかし、実際の構造物においては、必ずせん断補強筋が配置されており、より実際の構造物に近いせん断補強されたRCはりについての研究は少ないのが現状であり、収縮応力が構造部材に与える影響は未知の部分が多い。

そこで本研究では、せん断補強された高強度RC部材に及ぼす収縮の影響を明らかにするために、収縮の異なる大小二つのコンクリートを製造し、斜めひび割れ発生後のせん断補強筋のひずみ挙動およびせん断補強筋降伏時の耐力、斜めひび割れ幅について実験的に検討した。

## 2.実験概要

### 2.1 使用材料および供試体概要

使用したコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いた自己収縮の大きいコンクリート(記号HAS: High Autogenous shrinkage)と高ビーライトセメントおよび収縮低減剤、膨張材を用いた自己収縮の小さいコンクリート(記号LAS: Low Autogenous Shrinkage)である。その配合を表-1<sup>4)5)</sup>に示す。

表-1 コンクリート配合

記号	セメント	W/B (%)	SF/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							
					W	C	G	S	SF	EX	SRA	SP
HAS	NC	23	10	41	161	630	912	626	70	0	0	14
LAS	LC	23	10	41	161	600	913	630	70	30	6	15.4

SF:シリカフューム EX:膨張材 SRA:収縮低減剤

SP:高性能AE減水剤 B:結合材

\*1 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻(正会員)

\*2 住友建設(株) 技術研究所 工修(正会員)

\*3 オリエンタル建設(株) 技術研究所 工修(正会員)

\*4 広島大学教授 工学部第四類(建設系) 工博(正会員)

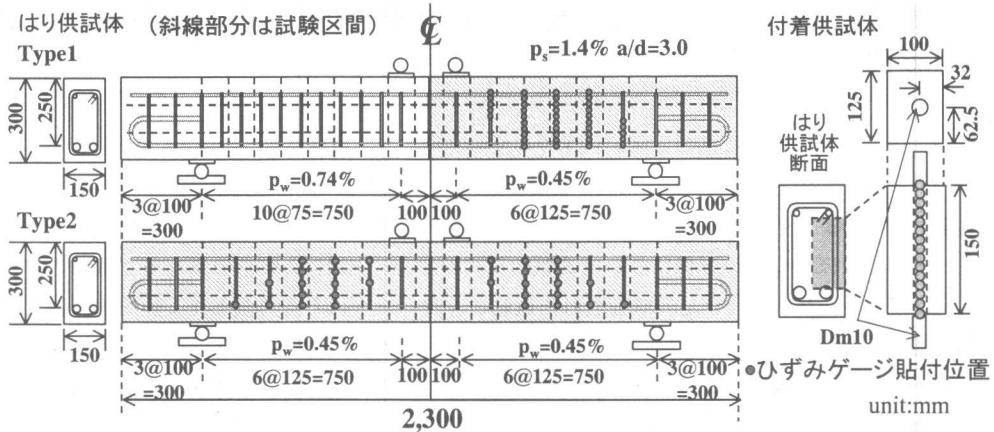


図-1 はり供試体および付着供試体概要

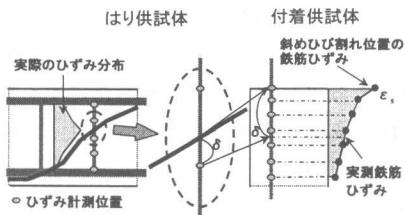


図-2 せん断補強筋ひずみの推定方法概要

作製したはり供試体について図-1に示し、使用した鋼材の材料特性を表-2に示す。はり供試体の特徴として、Type1は左右非対称にせん断補強筋を配置し、Type2は左右対称にせん断補強筋を配置して試験区間においてせん断破壊を起こさせるようにした。引張鉄筋の抜け出しを避けるために十分な定着部とスタートラップを設け、せん断破壊させるために引張鉄筋には高強度鉄筋を用いた。また、せん断補強筋には、ひずみゲージを貼付することによりひずみ分布が乱れないように、幅4mm深さ3mmの溝を切削した異形鉄筋を使用した。その溝にリード線による断面欠損がおこらないようにエナメル線のひずみゲージを図-1に示すように、Type1では20mm間隔で、Type2では45mm間隔で鉄筋両側に貼付し、打込み直後から収縮によるせん断補強筋ひずみの測定を行った。同時に引張鉄筋および圧縮鉄筋のひずみ、供試体温度を測定した。はり供試体打込みと同時に同断面(150mm×300mm)の長さ500mmの無筋供試体

表-2 供試体に使用した鋼材の材料特性

供試体名	種類	記号	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
Type1	引張鉄筋(溝切)	Dm19(高強度鉄筋)	952	187
	圧縮鉄筋	D10(SD295)	343	194
	せん断補強筋(溝切)	Dm10(SD295)	343	194
Type2	引張鉄筋(溝切)	Dm19(高強度鉄筋)	952	187
	圧縮鉄筋	D10(SD295)	382	201
	せん断補強筋(溝切)	Dm10(SD295)	382	201

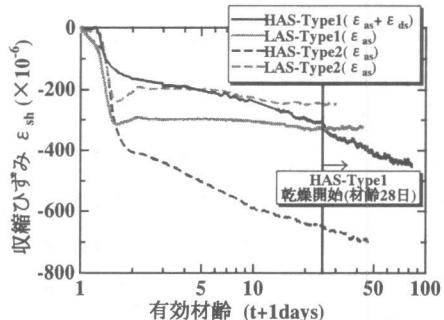


図-3 コンクリートの収縮ひずみの経時変化

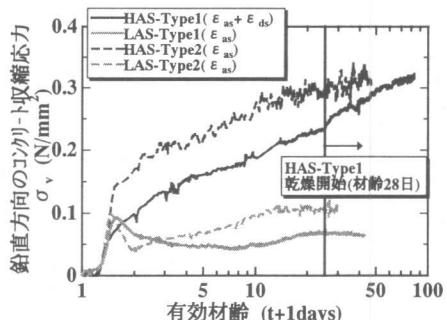


図-4 鉛直方向のコンクリート取縮応力の経時変化

を作製し、埋込型ひずみ計により収縮ひずみの測定を行った。

すべての供試体は、型枠による拘束を防止するため、型枠内面にビニールシートを2重に貼付した。さらに乾燥収縮を防ぐために打込み終了後、ラップフィルムおよび湿布で覆い、湿潤養生後、材齢約1日後に脱型し、アルミテープで全面シールした。但し、HAS-Type1に用いたコンクリートは、同配合にもかかわらず、HAS-Type2のコンクリートと同等の収縮量が得られなかつたため、はり供試体および無筋の収縮測定用供試体ともに材齢28日より端面を除く4面で乾燥を開始した。

## 2.2 載荷方法および計測方法

載荷方法は、2点集中載荷として静的載荷試験を行った。計測項目として、はり中央部のたわみ、せん断補強筋のひずみ、圧縮および引張鉄筋のひずみを計測した。また、斜めひび割れ位置でのせん断補強筋ひずみは、Type1については、斜めひび割れに最も近いひずみゲージの値とし、Type2については、ひずみゲージ間隔が広いため、図-1に示すはり供試体のせん断補強筋をモデル化した付着供試体を作製して、それより推定した。但し、付着供試体の収縮は無視した。図-1に示す付着供試体からの推定方法は次のようである。すなわち、図-2示すように、まずははり供試体のせん断補強筋の斜めひび割れに最も近いひずみ計測位置と斜めひび割れ位置までの距離 $\delta$ を計測する。次いで、付着供試体の端部を斜めひび割れ位置として、端部から距離 $\delta$ の位置のひずみがせん断補強筋ひずみと一致したときの端部のひずみを斜めひび割れ位置のせん断補強筋ひずみとした。また、Type1のみ斜めひび割れ幅を計測するため、3方向にコンタクトチップを設置して、コンタクトゲージおよびノギスで測定した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 収縮ひずみおよび収縮応力

無拘束供試体で計測した収縮ひずみの経時変化を図-3に示し、供試体のせん断補強筋ひ

ずみより力の釣り合いで求めた供試体の鉛直方向に働くコンクリートの収縮応力の経時変化を図-4に示す。ここでは、打込み温度および外気温によるコンクリートの硬化速度の影響を極力排除するため有効材齢<sup>6)</sup>を用いて表している。これを比較すると、収縮ひずみ量とコンクリート収縮応力が対応していないことがわかる。これは、若材齢時において、HASはヤング係数の発現およびクリープ係数の低下の速度が速く、LASは遅い事があげられる。さらに、LASにおいては、コンクリートの収縮応力には膨張材の効果が有効材齢0.5日程度で発揮されているのがわかる。

これら載荷前の応力状態をまとめて表-3に示す。尚、軸方向の収縮応力は鉛直方向と同様に圧縮・引張鉄筋ひずみより力の釣り合より、供試体引張縁位置での応力である。

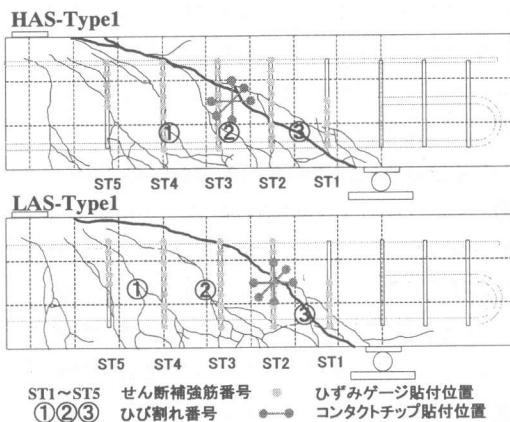


図-5 ひび割れ状況図

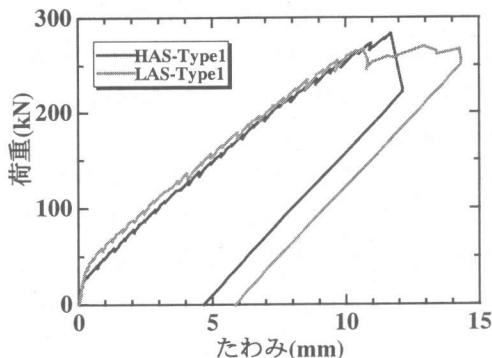


図-6 Type1 の荷重一たわみ関係

表-3 実験結果

	幅 mm	有効 高さ mm	引張 鉄筋 比 %	せん断 補強筋 比 %	圧縮 強度 $f'_c$ N/mm <sup>2</sup>	載荷時 有効 材齧 t days	収縮 ひずみ $\epsilon_{sh}$ $\times 10^{-6}$	軸方向の コンクリート 収縮応力 $\sigma_h$ N/mm <sup>2</sup>	鉛直方向の コンクリート 収縮応力 $\sigma_v$ $\times 10^{-6}$ N/mm <sup>2</sup>	せん断補強 筋に生じた 収縮ひずみ $\epsilon_{sw}$ $\times 10^{-6}$	コンクリート標準示方書 Vc kN	実験値 Vs kN	コンクリート標準示方書 Vc+Vs kN	実験値 Vmax kN	実験値/ コンクリート 標準示方書 Vmax/ (Vc+Vs)
HAS-Type1	150	250	1.4	0.45	82	82.2	-446	1.7	0.32	-364	51.6	57.5	109.1	141.9	1.3
LAS-Type1					81	41.9	-326	0.2	0.06	-72	51.4	58.3	109.7	135.2	1.2
HAS-Type2					121	46.5	-701	2.0	0.30	-356	58.6	63.2	121.8	163.0	1.3
LAS-Type2					101	28.9	-246	0.2	0.11	-127	55.2	63.9	119.1	154.1	1.3

### 3.2 荷重-たわみ関係

まず図-5にType1の曲げ・せん断域のひび割れ状況を示す。これにみられるようにHASとLASでは大きな差はみられない。いずれも、最終的に支点から載荷点に向かう斜めひび割れが支配的となり、若干圧壊を伴う突き抜けるような破壊をした。

図-6にType1の荷重-たわみ関係の1例を示す。HASのたわみは、LASと比べ荷重が小さい段階では比較的大きく、荷重の増大とともにその差は小さくなる。これは載荷前に生じた収縮によるデコンプレッション状態から所定の荷重までの鋼材ひずみの変化量の差に起因すると考えられるが、全体的にみればたわみに対する影響はそれほど大きくはない。

### 3.3 斜めひび割れ位置のせん断補強筋ひずみ

図-5にType1のひび割れ番号、せん断補強筋番号を示す。ここでは、最も早く降伏するせん断補強筋を跨ぐ斜めひび割れ、HASはひび割れ③、LASはひび割れ①に注目して斜めひび割れ位置のせん断補強筋ひずみとせん断力の関係を図-7に示す。これをみると、各荷重段階においてせん断補強筋のひずみが異なっている。トラス理論においては、斜めひび割れ位置のせん断補強筋ひずみは同じであると仮定しているが、実際には、異なっていることがわかる。

### 3.4 せん断耐力

載荷試験結果を表-3に示す。ここに示すコンクリート標準示方書のせん断耐力<sup>7)</sup>は、式(1)、式(2)、式(3)で算定した(以下、示方書式)。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} \quad (1)$$

$$V_{cd} = 0.20(f'_c)^{1/3}(1/d)^{1/4}(100p_s)^{1/3}bd \quad (2)$$

$$V_{sd} = A_w f_{wyd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) z / s_s \quad (3)$$

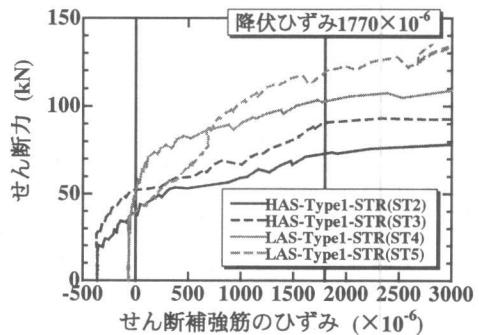


図-7 荷重と斜めひび割れ位置のせん断補強筋ひずみの関係

ここに、 $V_{yd}$ :設計せん断耐力(N),  $V_{cd}$ :せん断補強筋鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力(N),  $V_{sd}$ :せん断補強鋼材により受け持たれる設計せん断耐力(N),  $f'_c$ :コンクリート圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>),  $d$ :有効高さ(m),  $p_s$ :引張鉄筋比,  $b$ :腹部の幅(mm),  $s_s$ :せん断補強筋配置間隔(mm),  $A_w$ :区間  $s_s$  におけるせん断補強筋の総断面積(mm<sup>2</sup>),  $f_{wyd}$ :せん断補強筋降伏強度(N/mm<sup>2</sup>),  $\alpha_s$ :せん断補強筋が部材軸となす角度,  $z$ :圧縮応力の作用位置から引張鋼材団心(mm)までの距離である。

表-3をみると、実験値の最大耐力と示方書式値を比較するとHAS、LASに拘わらず、1.2~1.3と安全側にあるのがわかる。しかし、示方書式で示されるせん断耐力は、せん断補強筋降伏時の耐力としているため、ここに示す最大耐力とは異なる。従って、せん断補強筋降伏時の正確なせん断力を知るために、各斜めひび割れ位置のせん断補強筋のひずみよりそれぞれに働く張力  $V_s$  を式(4)(5)より算出して、式(6)よりせん断補強筋の負担するせん断力  $V_s$  が求めめる必要がある。

$$\text{せん断補強筋降伏前 } V'_s = A_w E_s \epsilon_s \quad (4)$$

$$\text{せん断補強筋降伏後 } V'_s = A_w f_{wyd} \quad (5)$$

$$V_s = \sum V'_s \quad (6)$$

ここで、 $V'_s$ ：着目したせん断補強筋の張力(N),  $A_w$ :1組あたりのせん断補強筋断面積( $\text{mm}^2$ ),  $E_s$ :せん断補強筋のヤング係数( $\text{N/mm}^2$ ),  $\epsilon_s$ :測定したせん断補強筋ひずみまたは付着試験結果から推定したひび割れ位置のせん断補強筋ひずみ,  $f_{wyd}$ :せん断補強筋の降伏強度( $\text{N/mm}^2$ )である。

まず、Type1について、各ひび割れ番号ごとにそれぞれ $V_s$ を算出してせん断力の変化を示したのが、図-8、図-9である。凡例の括弧内の数字が、各ひび割れが跨ぐせん断補強筋の本数である。最も早く降伏するせん断補強筋を跨ぐひび割れに注目すれば、HASにおいては、ひび割れ番号③であり、載荷前に収縮により見かけ上-10~-25kNの $V_s$ が働いているが、それは収縮によるものである。せん断力が約50kNから $V_s$ が急激に増加している。これは、示方書式 $V_c$ とほぼ一致しているが、その後、トラス理論のように $V_c$ が一定の値をとらずに、 $V_s$ が飛躍的に増加して、74kNでST2が降伏し93kNでST3が降伏して2組のせん断補強筋が降伏している。同様にLASでは、ひび割れ番号①であり、ほぼトラス理論値上に沿って、 $V_c$ が一定の値をとりながら増加し、106kNでST4が降伏し、120kNでST5が降伏して2組のせん断補強筋が降伏している。また、Type2についても同様に $V_s$ を求めたものを図-10に示す。Type2においても $V_s$ の増加段階に違いがみられ、HASでは110kN、LASは146kNで2組のせん断補強筋が降伏している。この収縮によるせん断補強筋降伏時のせん断耐力の差は、収縮によってせん断補強筋に生じた圧縮ひずみから降伏ひずみまでのひずみの変化量がLASよりHASの方が大きいため、斜めひび割れを含むコンクリートも変形量が大きくそのため、 $V_c$ が小さくなつたものと思われる。

しかし、本実験ではせん断補強筋の降伏が破

壊の原因とならず、その後もせん断力が増加している。これは、タイドアーチ機構が形成されたことによるものと考えられる。

結果をまとめると、せん断補強筋の降伏時のせん断耐力と示方書式値を比較すると、収縮応力がある場合 10~15%程度低下する可能性を示し、収縮応力のない場合、10~20%上回った値を示した。

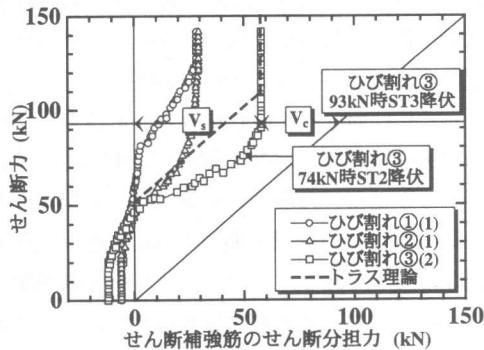


図-8 HAS-Type1 の  $V_s$  の変化

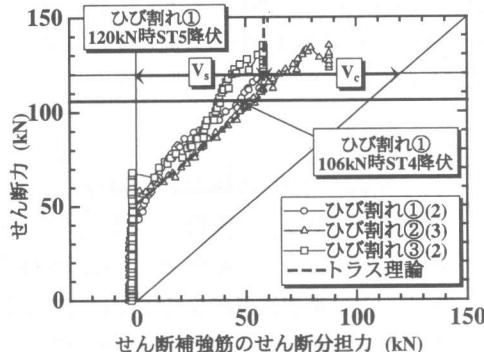


図-9 LAS-Type1 の  $V_s$  の変化

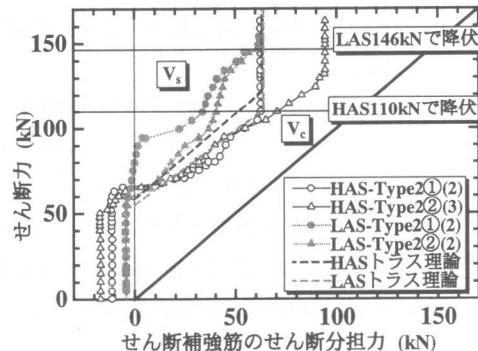


図-10 Type2 の  $V_s$  の変化

### 3.5 斜めひび割れ幅

図-6 で示した最も卓越した斜めひび割れを跨ぐ3方向のコンタクトゲージの値から算出した主ひずみに標点距離100mmを掛けた斜めひび割れ幅とせん断力の関係およびせん断補強筋降伏時のせん断力を図-11に示す。HASとLASを比較すると斜めひび割れの形成は、HASの方が早く、同じ荷重時ではLASよりHASのひび割れ幅が大きく、最大で約70%程度、破壊時ににおいては約8%大きかった。載荷前にせん断補強筋に作用している収縮ひずみの差が斜めひび割れ幅に影響していると考えられる。

さらに、同位置でのせん断力と主ひずみ方向の関係を図-12に示す。図-6のひび割れ図より斜めひび割れ角度は、HASは約42°、LASは約45°であり、せん断力が90kN時の主方向とほぼ同一である。しかし、せん断力が増加するに伴い、主ひずみ方向も増加していく、ほぼ90°付近まで変化している。これから、斜めひび割れ幅は、荷重の増大とともに、斜めひび割れ角度の垂直方向から鉛直方向に変化しつつ、卓越して開くことが明らかとなった。

### 4.まとめ

本研究の範囲内で以下の結論が得られた。

- 1) 高強度コンクリートを用いた場合、せん断補強筋降伏時のせん断耐力をせん断補強筋ひずみより適切に評価することによって得られたせん断補強筋の降伏時の耐力は、示方書式と比較すると収縮応力のある場合、10~15%低下する可能性を示し、ない場合、10~20%上回った。
- 2) 斜めひび割れ幅は、収縮応力のある場合、ない場合と比較して大きくなり、載荷方向に開いていくことが明らかになった。
- 3) 非常に限られた場合の結果であるため、断面・引張鉄筋比、せん断補強筋比を変えた更なる実験での検証を必要とする。

本論文は、筆頭著者が広島大学特別研究学生時に取りまとめたものである。

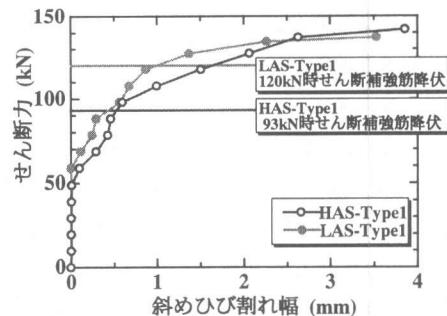


図-11 荷重-斜めひび割れ幅の関係

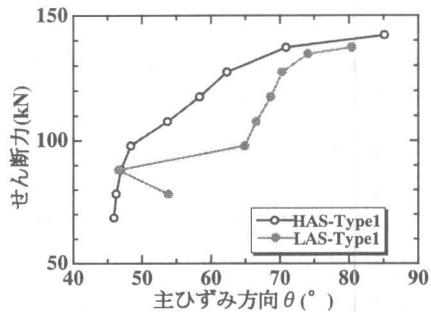


図-12 荷重-主ひずみ方向の関係

### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会:自己収縮委員会 報告書,1996.1
- 2) 松井祐一ほか:超高強度コンクリートを用いたRCはりの部材のせん断耐力に関する研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.17, No.2,pp.655-660,1995.7
- 3) 西田尚史ほか:自己収縮応力がRC梁のせん断耐力に与える影響,第54回土木学会年次講演梗概集,pp.612-613,1999.9
- 4) 三瀬あゆこ:RCはりのせん断特性に及ぼす自己収縮の影響に関する実験的研究,宇都宮大学平成9年度修士論文
- 5) 田中敏嗣ほか:高強度コンクリートの低収縮化と拘束応力に関する実験的検討,コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.1123-1128, 1999.7
- 6) CEB:CEB-FIP MODEL CODE 1990, Final Draft
- 7) 土木学会:平成8年度制定コンクリート標準示方書,設計編