

# 論文 高強度コンクリートを用いた RC はりのせん断挙動に及ぼす収縮の影響

伊藤友司<sup>\*1</sup> 藤田 学<sup>\*2</sup> 淵脇秀晃<sup>\*3</sup> 佐藤良一<sup>\*4</sup>

**要旨:**高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材のせん断挙動とそれに及ぼす収縮の影響について実験的に検討した。実験には、収縮量の異なる2種類の高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリートはりを製造し、打設直後から載荷直前までの収縮応力を経時的に把握した上で、載荷時のせん断挙動に及ぼす収縮の影響を検討した。

コンクリート標準示方書に基づく検討をした結果、収縮の影響を受ける場合、せん断補強筋を有するRC部材のコンクリート貢献分に、せん断補強筋のないRC部材の斜めひび割れ発生荷重を用いると、過大評価になる可能性があることが示された。

**キーワード:**高強度コンクリート、収縮応力、せん断挙動

## 1. はじめに

近年のコンクリート技術の進歩により、高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート構造物(以下、RC部材)の実用化が検討されつつある。このような背景から、高強度コンクリートを用いたRC部材に関する研究が精力的に行われているが、未だ十分に解明されたとは言い難いのが現状である。

特に高強度コンクリートを用いたRC部材のせん断耐力に関しては、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>1)</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等から報告・検討されている。

一方、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自己収縮応力が発生することが確認されている<sup>2)</sup>。とりわけ、脆性破壊であるせん断破壊に関しては、十分

な安全性の確保が強く望まれ、自己収縮応力がRC部材のせん断挙動に及ぼす影響について確認することは、急務であると考えられる。

そこで本研究では、収縮量の異なる高強度コンクリートを用いたRC部材を対象として、斜めひび割れ発生荷重、せん断補強筋によるせん断力分担等のせん断挙動について、収縮の影響と関係づけ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)と高ピーライト系セメント、収縮低減剤、及び膨張

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 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻(正会員)

\*2 住友建設(株) 技術研究所 工修(正会員)

\*3 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻(正会員)

\*4 広島大学教授 大学院工学研究科 工博(正会員)

表-2 せん断補強筋の無いRC部材の供試体諸元

配合	供試体	供試体断面寸法			せん断スパン長 (mm)	引張鉄筋比 %	圧縮鉄筋比 %	せん断スパン比 $a/d$	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	定着長 (mm)
		幅(mm)	高さ(mm)	有効高さ(mm)							
HAS	HAS-1,2	150	300	250	750	1.5(D19)	0.4(D10)	3	115	6.2	300
	HAS-3	150	300	250	750	2.7(D25)		3	126	5.5	300
	HAS-4,5	200	300	234	700	3.4(D32)	0.3(D10)	3	115	6.2	400
	HAS-6,7,8,9,10	200	300	234	1050	3.4(D32)		4.5	100, 115	5.1, 6.2	400
AS	AS-1,2,3	200	300	234	1050	3.4(D32)		4.5	87	4.5	400
	LAS-1,2	150	300	250	750	1.5(D19)	0.4(D10)	3	101	5.7	300
LAS	LAS-3	150	300	250	750	2.7(D25)		3	112	4.5	300
	LAS-4,5	200	300	234	700	3.4(D32)	0.3(D10)	3	101	5.7	400
	LAS-6,7,8	200	300	234	1050	3.4(D32)		4.5	81	5.5	400

(※) HAS-6, 7, 8, 9, 10について: HAS-6, 7の圧縮、引張強度はそれぞれ 115, 6.2(kN) ;

HAS-8, 9, 10の圧縮、引張強度はそれぞれ 100, 5.1(kN)

表-3 せん断補強筋を有するRC部材の供試体諸元

配合	供試体名	供試体諸元	せん断補強筋		
			配置間隔(mm)	鉄筋比(%)	降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )
HAS	HAS-str-1	HAS-1,2と同様	125	0.45	382
	HAS-str-2	HAS-4,5と同様	100	0.42	360
AS	AS-str	HAS-1,2と同様	125	0.45	343
LAS	LAS-str-1	LAS-1,2と同様	125	0.45	382
	LAS-str-2	LAS-4,5と同様	100	0.42	360
	LAS-str-3	LAS-1,2と同様	125	0.45	343

材を併用し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>3)</sup>に示す。

すべての供試体の養生条件を封緘養生としたが、HASの一部(以下 AS)は、同配合にもかかわらず、その他の HAS と同等の収縮量が得られなかったため、材齢 28 日より端面を除く 4 面で乾燥を開始した。

本研究で作製したせん断補強筋のない RC 部材の供試体諸元を表-2 に、せん断補強筋を有する RC 部材の供試体諸元を表-3 に示す。

なお、表-3 には、せん断補強筋を有する RC 部材の実験結果として、既往の研究<sup>3)</sup>から引用した RC 部材(HAS-str-1, AS-str,LAS-str-1,3)も併せて記載している。

本研究の主たる実験パラメータを、自由収縮ひずみの大小、引張鉄筋比、及びせん断スパン比とした。

載荷直前までの計測項目として、圧縮鉄筋、引張鉄筋、せん断補強筋のひずみ、及び供試体

温度をコンクリート打設直後から測定した。

## 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、圧縮鉄筋、引張鉄筋、及びせん断補強筋のひずみを計測し、ひび割れ性状について観察を行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 載荷前の RC 部材に及ぼす収縮の影響

図-1 に RC 部材下縁での収縮応力の経時変化の一例を示す。

収縮応力は、載荷直前までの供試体の鋼材ひずみの変化より、力の釣り合いにより算出した。

なお、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>4)</sup>を用いている。

図-1、及び表-2 から、HAS-9、及び AS-1 には、各々の引張強度に対して無視出来ない程の収縮応力が発生している。一方、収縮低減

を図った LAS-8 では、非常に低いレベルにまで収縮応力を低減していることが読み取れる。他の供試体も同様の傾向が得られた。

これらの結果から、本研究においても既往の研究<sup>2)</sup>と同様に、自己収縮の影響を確認でき、せん断挙動への影響の検討が可能となる。

図-2 に RC 部材の載荷時直前のせん断補強筋ひずみ分布の一例を示す。

AS-str では、載荷直前に約  $370 \times 10^{-6}$  前後の圧縮ひずみがせん断補強筋に生じており、供試体腹部で歪む傾向が見られた。一方、LAS-str-3 では、約  $50 \times 10^{-6}$  であった。

### 3.2 ひび割れ性状に及ぼす収縮の影響

図-3 にひび割れ性状の一例として、HAS-3, LAS-3 の破壊に至るまでのひび割れ図を示す。

引張鉄筋比 2.7% である HAS-3 の曲げひび割れ発生荷重は、同一鉄筋比の LAS-3 のそれと比較して約 50% であり、収縮応力が強く影響していることが確認できた。また、図に示されているように、ひび割れ間隔も狭くなつた。

HAS-3 の場合、自己収縮応力の影響により曲げひび割れが卓越し、曲げひび割れが十分進展した後に、載荷点に向かって斜めひび割れが発達し、また引張鉄筋に沿って支点側に割裂ひび割れが生じて急激な破壊に至つた。この破壊はせん断スパン比が大きい場合の斜め引張破壊に類似するものであつた。

一方、LAS-3 では曲げひび割れは十分進展する前にせん断により傾斜し、その後急速に大きな斜めひび割れが生じて荷重が低下した。しかし、再び荷重が増大し、最終的にせん断圧縮破壊に至つた。

これらの結果から、収縮応力の有無により、せん断スパンの曲げひび割れの進展度合いが異なり、これによりせん断破壊の形態が異なる可能性があることを確認した。

### 3.3 荷重-たわみ関係

図-4 に、せん断補強筋のある場合とない場合の供試体の荷重-たわみ関係の一例を示す。

その関係の中で収縮の影響と斜めひび割れ発

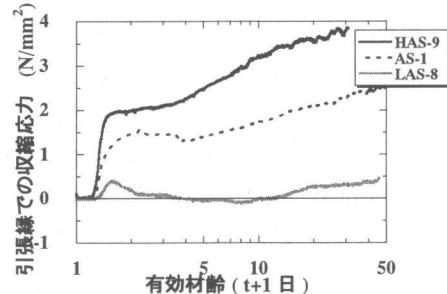


図-1 RC 部材に発生した収縮応力の経時変化

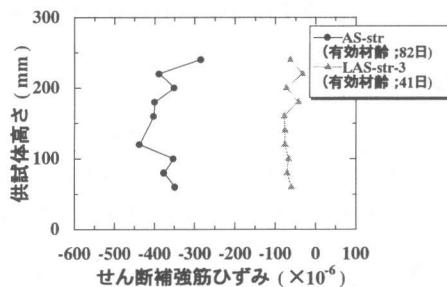
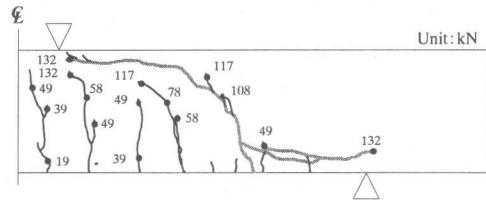


図-2 せん断補強筋ひずみ分布



HAS-3

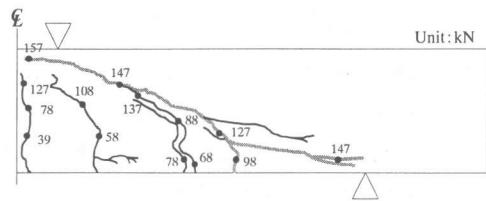


図-3 収縮の有無によるひび割れ性状の相違

生荷重を明確にするため、斜めひび割れ発生荷重を若干超える範囲のたわみを示した。なお、図中には各供試体の斜めひび割れ発生荷重を明記している。

収縮の観点からたわみを比較すると、せん断

補強筋の有無に関わらず、HAS が LAS に比べて、たわみが大きくなつた。これは、自己収縮による曲げひび割れ発生荷重の低下と、引張鉄筋ひずみの変化量が大きくなることによると思われる。また、せん断補強筋のある場合のたわみが大きいのは主鉄筋に鉄筋ひずみ測定のための溝を設けて断面積が小さくなつたためである。

### 3.4 斜めひび割れ発生荷重

高強度 RC はり部材の斜めひび割れ発生荷重について、圧縮強度、引張鉄筋比をパラメータとして収縮(配合)の影響から検討した。以下、斜めひび割れ発生荷重時の公称せん断応力度(せん断力を幅と有効高さで除した値)をせん断強度と呼ぶ。

表-4 に本研究で得られたせん断補強筋のない RC はりの斜めひび割れ発生荷重時のせん断力、せん断強度、及び載荷直前の供試体引張縁の収縮応力をまとめて記載する。

#### 3.4.1 圧縮強度の影響

図-5 に、圧縮強度とせん断強度の関係を示す。なお、図中にはせん断スパン比と断面諸元が同一である供試体の結果を示した。

圧縮強度が  $100\text{N/mm}^2$  までは、圧縮強度の増加とともにせん断強度が若干増大しているが、 $100\text{N/mm}^2$  以上になると、逆にせん断強度が低下し、既往の研究<sup>1)</sup>と同じ結果が得られた。

#### 3.4.2 引張鉄筋比の影響

図-6 にせん断強度に及ぼす引張鉄筋比の影響を、HAS と LAS について示す。

図の縦軸は LAS-1, 2 のせん断強度の平均値に対する各条件下でのせん断強度の比を示している。なお、図中には各供試体の比の平均値もあわせて示している。また各供試体のせん断スパン比と有効高さはすべて同一である。

これによれば、両配合とも引張鉄筋比が大きくなるとせん断強度が増加する傾向を示した。

図中には平成 8 年版土木学会コンクリート標準示方書[設計編] (以下示方書) 式による引張鉄筋比の影響も示しているが、実験値は収縮の大小に拘わらず、鉄筋比が大きくなると示方書式

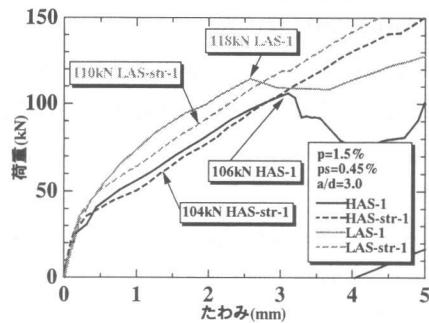


図-4 荷重-たわみ関係

表-4 実験結果 (せん断補強筋; 無)

配合	供試体	引張縁応力 (N/mm <sup>2</sup> )	斜めひび割れ時	
			せん断力 (kN)	せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> )
HAS	HAS-1	2.0	52.9	1.6
	HAS-2	2.4	60.3	1.4
	HAS-3	2.6	66.7	1.8
	HAS-4	3.2	101.1	2.2
	HAS-5	3.0	100.5	2.1
	HAS-6	3.1	78.9	1.7
	HAS-7	3.4	75.4	1.6
	HAS-8	4.1	88.4	1.9
	HAS-9	3.9	90.4	1.9
	HAS-10	3.9	98.0	2.1
AS	AS-1	2.7	89.2	1.9
	AS-2	1.8	92.0	2.0
	AS-3	2.6	83.1	1.8
LAS	LAS-1	0.2	59.2	1.5
	LAS-2	0.3	57.6	1.6
	LAS-3	0.3	74.0	2.0
	LAS-4	0.2	108.9	2.3
	LAS-5	0.3	101.9	2.2
	LAS-6	0.3	81.7	1.7
	LAS-7	0.4	87.5	1.9
	LAS-8	0.5	91.4	2.0

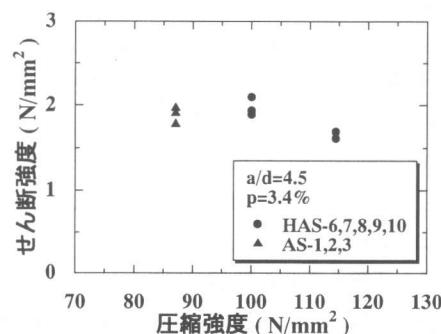


図-5 せん断強度-圧縮強度関係

より増大する傾向を示す。

この図には収縮による相違も示されているが、この場合、HAS は LAS に比べて、最大せん断強度が 10% 小さかった。

### 3.5 せん断耐力

せん断補強筋のある RC 部材のせん断耐力は、示方書によれば、トラス理論に基づくせん断補強筋とそれ以外のコンクリート等が負担するせん断力( $V_c, V_s$ )を加算して求められる。さらにせん断補強筋降伏時を以って終局時とするとされている。この場合、コンクリート等が負担するせん断力は斜めひび割れ発生時のせん断力が適用されている。しかし、高強度コンクリートの自己収縮が無視できない場合、コンクリートがゼロ応力からせん断補強筋降伏までのせん断補強筋のひずみ変化量は、収縮が小さい場合に比べ大きくなる。これはコンクリートの損傷を増大することにもつながり、上述の考え方方が必ずしも適用できるとは限らない。そこで、せん断補強筋ひずみを凝結直後から詳細に計測することにより、 $V_s$  と  $V_c$  を求めて検討した。

なお、表-5 に文献 3)と本実験で得られたせん断補強筋を有する RC はりの実験結果を示す。なお、斜めひび割れ発生時せん断力は、数本の斜めひび割れで最も早期に形成されたものの値とした。

図-7~9 は、収縮が異なる 3 組の RC 部材のせん断力とせん断補強筋のせん断分担力の関係を示したものである。図に示したせん断補強筋のせん断分担力は、斜めひび割れ周辺で測定した値の最大値であり、数本の斜めひび割れのうち、それを跨ぐ全せん断補強筋が最も早く降伏したものである。なお、図中の HAS 配合の RC はりの載荷前のせん断分担力は、載荷前の収縮により生じたせん断補強筋の圧縮ひずみにヤング係数を掛けたものであり、便宜上示したものである。

また、同図には修正トラス理論の  $V_c$  として、配合、供試体諸元が等しいせん断補強筋の無い RC 部材の斜めひび割れ発生荷重の平均値を使

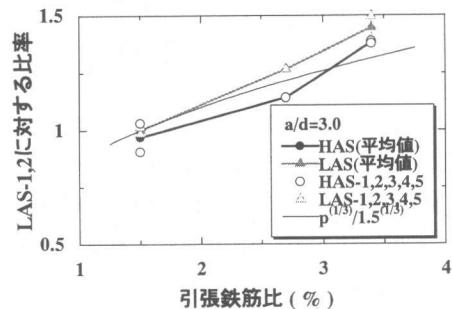


図-6 引張鉄筋比の影響

表-5 実験結果（せん断補強筋；有）

配合	供試体	せん断力 (kN)			載荷直前	
		斜めひび割れ時	せん断補強筋降伏時	最大時	引張織応力 (N/mm²)	せん断補強筋ひずみ(μ)
HAS	HAS-str-1	52	110	163	2.00	-373
	HAS-str-2	28	未降伏	201	3.96	-450
AS	AS-str	27	93	142	1.65	-364
	LAS-str-1	55	146	154	0.19	-127
LAS	LAS-str-2	55	175	199	0.79	-152
	LAS-str-3	33	120	135	0.20	-72

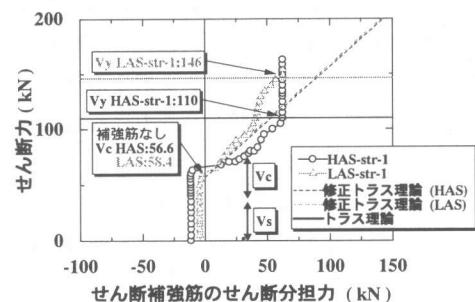


図-7 HAS-str-1, 及び LAS-str-1 の主斜めひび割れの  $V_s$  の変化<sup>3)</sup>

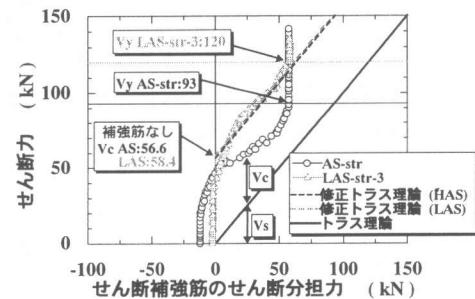


図-8 AS-str, 及び LAS-str-3 の主斜めひび割れの  $V_s$  の変化<sup>3)</sup>

用し、その値を示している。さらに、せん断補強筋のひずみ計測により算出した斜めひび割れを跨ぐ全せん断補強筋降伏時のせん断力  $V_y$  を示している。

図-7,8 の引張鉄筋比は 1.5%, せん断補強筋比は 0.45%, 図-9 のそれらは 3.4%, 0.42% である。HAS の載荷直前のせん断補強筋の圧縮ひずみは  $360 \sim 450 \times 10^{-6}$  で、拘束によるコンクリートの収縮応力はおよそ  $0.3 \text{N/mm}^2$  であった。これらの結果をみれば、いずれの場合も HAS の同一せん断力におけるせん断補強筋の分担力は LAS より大きく、コンクリート等による分担力は小さい。これは、先にも述べたように、コンクリートがゼロ応力から降伏までのせん断補強筋の、ひずみ変化が大きいことによると考えられる。すなわち大きなひずみ変化は、コンクリートをより損傷することを意味し、そのためコンクリート部のせん断抵抗を低下させていると思われる。しかしながら、表-5 に示すようにせん断補強筋の降伏が最終的な破壊の原因とならず、その後もタイドアーチ機構を形成し、せん断力が増加し、終局時せん断力に収縮の影響は確認できなかった。

一方、表-4 のせん断補強筋のない RC 部材の斜めひび割れ発生時せん断力をせん断補強筋の降伏時せん断耐力の予測に適用した場合、HAS に対しては過大評価していることが認められる。ただし、このせん断力は荷重が明確に低下した時点のものである。表-5 をみれば、ひずみ計測に基づく斜めひび割れ発生時せん断力は明らかに上記せん断力より小さい。また、表-5 に示すように、HAS の斜めひび割れ発生荷重は LAS に比べ小さくなる傾向にある。従って、収縮が大きい高強度コンクリートを用いる RC はりのせん断補強筋降伏時せん断耐力の予測に当たっては、せん断補強筋を有する RC はりのコンクリート貢献分に、せん断補強筋のない RC はりの斜めひび割れ時せん断力を用いることは適切ではなく、適切な斜めひび割れ発生時せん断力と収縮による  $V_c$  低下の予測が重要

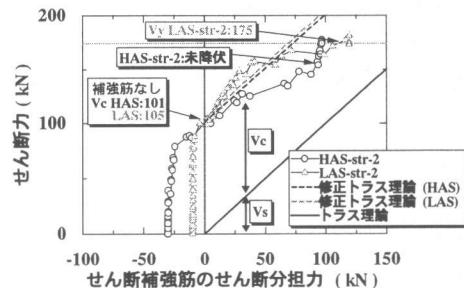


図-9 HAS-str-2 及び LAS-str-2 の  
主斜めひび割れの  $V_s$  の変化

と考えられる。

#### 4.まとめ

本研究の範囲内で以下の結論が得られた。

- 1) 収縮の影響を受ける場合、せん断補強筋を有する RC 部材のコンクリート貢献分に、同条件下のせん断補強筋のない RC 部材の斜めひび割れ発生荷重を用いると、過大評価になる可能性があることを確認した。
- 2) 1)の理由の一つとして、コンクリート応力がゼロ状態からせん断補強筋降伏までのせん断補強筋のひずみ変化量が、収縮が小さい場合に比べ、大きいことを指摘した。
- 3) 実測値に基づく引張鉄筋比の増大による斜めひび割れ発生荷重の増大は土木学会示方書式による場合より大きく、収縮の大小に拘わらず、1/3乗則に従わなかった。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 日本コンクリート工学協会:自己収縮委員会報告書, 1996.1
- 3) 早川智浩ほか: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、コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.589-594, 2000.6
- 4) CEB: CEB-FIP MODEL CODE 1990, Final Draft