論文 収縮が異なる高強度 RC はりのせん断特性の検討

児玉 友和^{*1}·河金 甲^{*2}·佐藤 良一^{*3}

要旨: 収縮量の異なる2種類の高強度コンクリートを用いた RC 部材によって,打設直後か ら載荷直前の鉄筋ひずみの挙動を経時的に把握した上で,せん断ひび割れ特性に及ぼす収縮 の影響をせん断補強筋比の観点から実験的に検討した。

その結果, せん断補強筋比が 0.5%程度の場合では, 収縮の大きい RC 部材の斜めひび割れ 幅は収縮の小さい RC 部材のそれと比較して大きくなり, 収縮の影響が認められたが, せん 断補強筋比が約 1%となると斜めひび割れ幅に差はなく, 収縮の影響は認められなかった。 キーワード:高強度コンクリート, 収縮, せん断, ひび割れ幅, せん断補強筋比

1. はじめに

高性能 AE 減水剤の開発など,近年のコンク リート技術の進歩により,極めて小さな水セメ ント比のコンクリート,いわゆる高強度コンク リートの鉄筋コンクリート構造物(以下,RC 部材)への実用化が検討されてきている。

しかし,この高強度コンクリートは,若材齢時において自己収縮が増大するため,これをRC部材に用いると,無視できないほどの自己収縮応力が発生することが確認されている¹⁾。

高強度 RC 部材のせん断強度に関して,藤田 らは,圧縮強度が 80~125N/mm²を適用範囲と したせん断強度式²⁾を提案している。

また,これまでに高強度 RC 部材のせん断挙 動と自己収縮を関連付けた研究^{3),4)}を載荷以前 の鉄筋ひずみに蓄積された圧縮ひずみに着目し て行ってきたが,必ずしも明らかにはなってい ない。

本研究では,新たにせん断 補強筋比 0.49,0.98%の RC 部 材の実験結果を加え,高強度 RC 部材のせん断ひび割れ特 性に及ぼす自己収縮の影響に ついて,せん断補強筋比の観 点から実験的に検討を行った。 2. 実験概要

2.1 使用材料および供試体諸元

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 高ビーライト系セメント,収縮低減剤および膨 張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 に示す。

作製した RC 部材の供試体諸元を表 - 2 に示 す。なお,表 - 2 には,既往の研究^{3),4)}から引用 したものも記載している。また,供試体名の番 号によって HAS と LAS で1 組になっている。

ひび割れ位置での正確なせん断補強筋ひずみ を計測するために,せん断補強筋には,断面欠 損が起こらないように幅4mm深さ3mmの溝を 切削した溝切り鉄筋を使用し,20mm,22mm, 23mm,45mm間隔でひずみゲージを貼付した。

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 ³)								
		(%)	(%)	(%)	W	С	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	

NC:普通ポルトランドセメント,LC:高ビーライト系セメント,B:結合材 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

*1 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 (正会員)

*2 極東工業株式会社 開発室 (正会員)

*3 広島大学大学院 工学研究科 工博 (正会員)

配合	供試体名		供試体寸法					工統建なせ	せん断補強筋				コンクリート	
		幅	高さ	有効高さ	せん断スパン長	定着長	「「反政府」し	上相卖加止	配置間隔	鉄筋比	降伏強度	ヤング係数	圧縮強度	引張強度
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(%)	(mm)	(%)	(N/mm^2)	(kN/mm ²)	(N/mm^2)	(N/mm^2)
HAS	HAS-1	150	300	250	750	300	1.5(D19)	0.4(D10)	125	0.45	382	201	115	6.2
	HAS-2	150	300	250	750	300	1.5(D19)	0.4(D10)	125	0.45	343	194	115	6.2
	HAS-3	150	300	250	750	300	2.1(D22)	0.4(D10)	125	0.49	353	196	98	6.7
	HAS-4	150	300	250	750	300	2.7(D25)	0.4(D10)	62.5	0.98	353	196	126	5.5
	HAS-5	150	300	250	750	300	2.7(D25)	0.4(D10)	107	1.16	362	198	115	6.6
	HAS-6	200	300	234	700	400	3.4(D32)	0.3(D10)	100	0.42	360	202	115	6.2
	LAS-1	150	300	250	750	300	1.5(D19)	0.4(D10)	125	0.45	382	201	101	5.7
LAS	LAS-2	150	300	250	750	300	1.5(D19)	0.4(D10)	125	0.45	343	194	101	5.7
	LAS-3	150	300	250	750	300	2.1(D22)	0.4(D10)	125	0.49	353	196	84	6.2
	LAS-4	150	300	250	750	300	2.7(D25)	0.4(D10)	62.5	0.98	353	196	112	4.5
	LAS-5	150	300	250	750	300	2.7(D25)	0.4(D10)	107	1.16	362	198	100	5.9
	LAS-6	200	300	234	700	400	3.4(D32)	0.3(D10)	100	0.42	360	202	101	5.7

表 - 2 RC 部材の供試体諸元

表 - 3 載荷直前の RC 部材に及ぼす収縮の影響

ШA	#≓はタ	自己収縮ひずみ	圧縮鉄筋ひずみ	引張鉄筋ひずみ	せん断補強筋ひずみ	引張縁収縮応力	鉛直方向収縮応力	
HC -	洪武仲石	(×10 ⁻⁶)	(×10 ⁻⁶)	(×10 ⁻⁶)	(×10 ⁻⁶)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	
	HAS-1	-700	-552	-358	-336	2.05	0.30	
	HAS-2	-440	-496	-297	-364	1.69	0.32	
	HAS-3	-592	-411	-194	-277	1.73	0.26	
TIAS	HAS-4	-564	-538	-240	-376	3.02	0.73	
	HAS-5	-740	-637	-304	-368	3.92	0.85	
	HAS-6	-740	-701	-316	-450	4.46	0.39	
	LAS-1	-246	-100	-39	-127	0.20	0.11	
	LAS-2	-322	-86	-37	-72	0.195	0.06	
1 1 9	LAS-3	-17	12.7	21.1	4.7	-0.21	0.00	
LAS	LAS-4	-355	-67	-0.76	-54	-0.04	0.10	
	LAS-5	-273	-167	-45	-50	0.53	0.12	
	LAS-6	-273	-182	-52	-152	0.70	0.13	
						注)引張:正, 圧縮:負	





2.2 載荷方法および計測項目

載荷前の RC 部材に及ぼす収縮の影響を把握 するために,コンクリート打設直後から載荷直 前までの収縮ひずみ,圧縮鉄筋,引張鉄筋,せ ん断補強筋のひずみ,供試体温度を測定した。

静的載荷試験では,圧縮鉄筋,引張鉄筋,せ ん断補強筋のひずみを計測し,さらに,RC は りの側面に 3 方向に標点距離 100mm 及び 300mm でコンタクトチップを貼り付けてコン タクトゲージで斜めひび割れ幅の測定を行った。 載荷試験図を図-1に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 載荷直前の RC 部材に及ぼす収縮の影響
表 - 3 に載荷直前における RC 部材の鉄筋ひずみ,収縮応力^{3),4)}について示す。

この表から, HAS の鉄筋には LAS のそれと 比較して,より大きな圧縮ひずみが蓄積されて おり,また,収縮応力も大きい。

3.2 荷重 - たわみ関係

図 - 2 に荷重 - たわみ関係^{3),4)}の一例を示す。 この図より、収縮の大きい HAS のたわみは収 縮の小さい LAS と比較して大きいが,終局時の 荷重は大きく、収縮の影響は認められなかった。 この傾向は, HAS-6 と LAS-6 を除く5 組の RC 部材で確認された。

3.3 せん断耐力

表 - 4に RC 部材のせん断耐力の一覧⁴⁾を示す。

	供試体名	引張	圧縮	せん断袖	甫強筋	工统改变		計算値	実験値			
配合		鉄筋比	鉄筋比	配置間隔	鉄筋比「二個強反		藤田式	藤田式+トラス理論	斜めひび割れ時		終局時	
		ps	p,'	s	p _w	f _c '	Vc,cal	Vy,cal	せん断力	Vc',mea	Vu,mea	
		(%)	(%)	(mm)	(%)	(N/mm^2)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	
	HAS-1	1.5	0.4	125	0.45	115	54	110	52	107	163	
	HAS-2	1.5	0.4	125	0.45	115	64	114	28	92	142	
ЦЛС	HAS-3	2.1	0.4	125	0.49	98	67	123	44	105	202	
TA3	HAS-4	2.7	0.4	62.5	0.98	126	64	177	39	182	295	
	HAS-5	2.7	0.4	107	1.16	115	67	204	30	156	293	
	HAS-6	3.4	0.3	100	0.42	115	94	157	36	138	201	
	LAS-1	1.5	0.4	125	0.45	101	58	114	55	98	154	
	LAS-2	1.5	0.4	125	0.45	101	65	115	34	85	135	
LAS	LAS-3	2.1	0.4	125	0.49	84	72	129	55	102	200	
	LAS-4	2.7	0.4	62.5	0.98	112	68	181	53	177	290	
	LAS-5	2.7	0.4	107	1.16	100	72	209	55	116	253	
	1 4 5 - 6	3.4	0.3	100	0.42	101	100	162	64	126	100	

表-4 せん断強度一覧



図-3 斜めひび割れ発生時せん断力

表中には,藤田らによって提案されたせん断強 度式(以下,藤田式)²⁾による計算値も示して いる。以下に藤田式を示す。

 $_{c} = 180 f'_{c}^{-1/2} \cdot d^{-1/2} \cdot (100 p_{s})^{1/3} \cdot (0.75 + 1.4/(a/d))$ ここで, f'c; 圧縮強度(N/mm²)(ただし, 80<f'c

125),*d*;有効高さ(mm),*p_s*;引張鉄筋比(%), *a/d*;せん断スパン比である。

なお,斜めひび割れ発生時せん断力は斜めひ び割れに跨ったせん断補強筋が急激にひずみ始 めた時のせん断力であり,Vc',mea は終局時せ ん断力(Vu,mea)から斜めひび割れの角度を45° としたトラス理論値を引いた値で終局時せん断 力のコンクリート負担分を示す。

この表から,斜めひび割れ時せん断力は自己 収縮が大きい場合,小さい場合と比較して低下 していることがわかる。これは,載荷以前に鉄 筋による拘束によって生じた収縮応力に起因す るものと考えられる。

また,図-3 に斜めひび割れ発生時せん断力 と藤田式の比較を示す。

この図によると, HAS と LAS ともに藤田式 を下回る結果となっているが,藤田式との比は



図 - 4 終局時のコンクリート負担分

最も小さいもので , HAS が 0.38 , LAS が 0.52 であり , HAS の方がより大きく下回っている。

図 - 4 に終局時せん断力のコンクリート負担 分(Vc'.mea)と藤田式の比較を示す。

この図によると,終局時せん断力のコンクリ ートの負担分はいずれの場合においても藤田式 を上回っており,自己収縮の影響は認められな い。これは,せん断補強筋による2次的補強効 果の後にアーチを形成して荷重に対して抵抗し たため,コンクリートの負担分が増加し,藤田 式と異なった傾向を示したものと考えられる。

3.4 せん断補強筋応力の挙動

図 - 5 にせん断補強筋比(以下 p_w)が 0.45 0.49, 0.98%の RC 部材のひび割れ図を示す。図中の番 号は斜めひび割れ番号で,せん断補強筋に貼付 したひずみゲージ(貼付間隔はそれぞれ 20,22, 23mm である。)の位置も示している。

図 - 6 に図 - 5 で示した pw=0.45,0.49,0.98% の RC 部材の斜めひび割れに跨るすべてのせん 断補強筋の実測平均応力を示す。なお,図中に は,藤田式とトラス理論に基づくせん断補強筋



図-6 せん断補強筋の実測平均応力

応力の計算値も示している。

図-6 に示すように, せん断補強筋比が小さ い場合, せん断補強筋の実測平均応力は, LAS-2 では計算値とほぼ一致する結果となり, HAS-2 では計算値よりも大きくなった。また, HAS-3とLAS-3の場合も同様の結果が得られた。 この傾向は,他に,せん断補強筋比の小さい HAS-1とLAS-1でも認められた。 しかし, せん断補強筋比の大きい HAS-4 と LAS-4 のせん断補強筋の実測平均応力は, 計算 値と比較して, 同等かもしくは小さく, 自己収 縮の影響は認められなかった。

ここで,この藤田式は,収縮の影響を受けた せん断補強筋のない RC 部材の実験結果より導 かれた算定式であるため,LAS よりもむしろ HAS で一致するものと考えられたが,本実験で は逆に LAS で一致した。これは,藤田式が構造 的な破壊に至った斜めひび割れの発生時せん断 力を表しているためで,実際はその破壊に至る までの低せん断力下において他に斜めひび割れ が発生している。しかし、本研究で用いたせん 断補強筋を有する RC 部材の場合,その低せん 断力下で発生する斜めひび割れにおけるせん断 補強筋の実測平均応力の挙動も計測することが できるため, HAS のせん断補強筋の実測平均応 力が計算値よりも大きくなる場合が生じたと考 えられる。また 鉛直方向の収縮応力によって, HAS の斜めひび割れ発生荷重が低下している こともその要因の1つと考えられる。

3.5 斜めひび割れ幅

p_w=0.49,0.98%の RC 部材について,図-7 に標点距離 300mm の3方向のコ

ンタクトゲージによって測定した ひび割れ幅と主ひずみ方向を,ま た,図-8に標点距離100mmの3 方向のコンタクトゲージによって はり腹部で測定した最も卓越した 斜めひび割れ幅と主ひずみ方向³⁾ をそれぞれ示す。図中には,終局 時せん断力も示している。この斜 めひび割れ幅を測定した位置は図 -4に示している。なお,主ひず み方向は水平軸からの角度で 90°に近づくほどひび割れは鉛直 方向に開いていくことを意味する。

これらの図から,p_w=0.45%の場 合,HAS-3 の斜めひび割れ幅は LAS-3 のそれと比較して大きいことがわかる。 これは,コンクリート応力がゼロの状態から所 定のせん断力までのせん断補強筋応力の変化量 が LAS-3 よりも HAS-3 で大きいことに起因し ているものと考えられる。この傾向は, pw=0.45%の HAS-2 と LAS-2 及び pw=0.42%の HAS-6 と LAS-6 にも認められた。

しかし, pw=0.98%の HAS-4 と LAS-4 では, 斜めひび割れ幅にせん断力 100kN 前後で差は若 干生じているが,全体的に大きな差は認められ なかった。これも同様に説明することができ, コンクリート応力がゼロの状態から所定の作用 せん断力までのせん断補強筋応力の変化量から 見てみると,せん断補強筋降伏までに両者に大 きな差がないため,斜めひび割れ幅にあまり差 が生じなかったものと考えられる。この傾向は, pw=1.16%の HAS-5 と LAS-5 でも認められた。

3.6 せん断変位

図 - 9 に pw=0.49,0.98%のせん断変位を終局 時せん断力とともに示す。なお,せん断変位と は,3 方向のコンタクトゲージの測定により求 めた値であり,水平方向及び鉛直方向へのずれ 変位を示す。せん断変位を測定した位置は図-5



に示しており,標点距離は300mm である。

この図から,pw=0.49%の HAS-3 のせん断変位は,LAS-3 と比較し て若干大きくなっていることがわ かる。この要因として,HAS-3 に おけるコンクリートがゼロ応力の 状態から所定のせん断力までのせ ん断補強筋応力の変化量が LAS-3 よりも大きいため,斜めひび割れ 幅の増大とともに変形が大きくな ったことがと考えられる。

しかし ,p_w=0.98%の HAS-4 のせ ん断変位は , LAS-4 のそれと比較 して , せん断力が 100kN 前後では 大きいが , 150kN 付近で差はなく なり , 200kN を超えると逆に小さくなった。

4. まとめ

本研究において、以下の結論が得られた。

- 斜めひび割れ時せん断力は自己収縮が大きい場合,小さい場合と比較して低下した。しかし,終局時においては,コンクリートのせん断力の負担分は藤田式よりも大きく,自己収縮の影響は見られなかった。
- (2) せん断補強筋比が 0.5% 程度の場合、斜めひび割れに跨るすべてのせん断補強筋の実測平均応力は,自己収縮の大きい場合において,藤田式とトラス理論による値より大きくなる傾向を示したが,せん断補強筋比が約 1%の場合ではこの傾向は確認されなかった。
- (3) せん断補強筋比が 0.5%程度の場合,自己収縮の大きいRC部材の斜めひび割れ幅は自己収縮の小さいRC部材のそれと比較して大きく,自己収縮の影響が認められたが,せん断補強筋比が約 1%では斜めひび割れ幅に差はなく,自己収縮の影響は認められなかった。
- (4) せん断補強筋比が約 0.5%で自己収縮の大 きい RC 部材のせん断変位は,自己収縮が小 さい RC 部材のそれと比較して大きくなった。





図-9 せん断変位

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)藤田学ほか:高強度コンクリートを用いた RCはりのせん断強度と寸法効果,土木学会 論文集, V-56, pp.161-172, 2002.8
- 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) 伊藤友司ほか: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,コンクリート工学年次論文集,Vol.23,No.3,pp.763-768,2001.7