論文 せん断補強筋を有する高強度 RC はりのせん断耐力に及ぼす収縮の 影響

河金 甲^{*1}·牛尾 亮太^{*2}·川本 卓人^{*3}·佐藤 良一^{*4}

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て、有効高さ500mmのせん断補 強筋を有する RC はりを製作し、せん断耐力に及ぼす収縮の影響を検討した。特に、せん断 補強筋にゲージを密に貼付け、正確なせん断補強筋応力の把握に努めている。その結果、収 縮量の違いにより鉛直方向へのひび割れの進展が異なり、収縮量を低減させることで終局耐 力が増加した。さらに、主たる斜めひび割れに跨る平均せん断補強筋応力は収縮量の増加に 伴い大きくなったが、等価引張鉄筋比の概念を取り入れたせん断強度式を、修正トラス理論 のコンクリート分担分に用いることで、せん断補強筋応力に及ぼす収縮の影響を評価できた。 キーワード:高強度 RC はり、収縮、せん断耐力、せん断補強筋応力、等価引張鉄筋比

1. はじめに

近年, 圧縮強度が 100N/mm²を超える高強度コ ンクリートを用いて耐久性向上や断面縮小を図 った鉄筋コンクリート(以下, RC)構造物も増 加している。そして, そのような高強度 RC 部材 のせん断強度式も提案されている^{1),2)}。

一方,高強度コンクリートは,極めて小さな 水結合材比やシリカフュームの併用により,若 材齢時に自己収縮が増大する。これまで,せん 断補強筋を有する高強度 RC 部材のせん断耐力 への収縮の影響を検討し,有効高さ 250mm の RC はりにおいて収縮量が大きくなるとせん断 補強筋応力が増加する可能性があることがわか ってきた³⁾。

以上のことをふまえ、本研究では供試体の有 効高さを 500mm として実物 大構造物レベルでのせん断耐 力に及ぼす収縮の影響を把握 することを目的とする。その 中で、せん断補強筋降伏後の 耐力増加を正確に評価するこ とは困難であり,便宜的にせん断補強筋の降伏 によってせん断耐力を定義するのが一般的であ ることから,せん断補強筋にゲージを密に貼付 けることでその正確な応力の把握に努めている。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

収縮量の異なる 2 種類の高強度コンクリート を用いて供試体を製作した。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, 自己収縮を低減させるため,低熱セメント,収 縮低減剤,膨張材を併用したコンクリート(記 号 LAS: Low Autogenous Shrinkage)である。そ れぞれの配合を $\mathbf{表}-1$ に示す。

表-1 配合

記号	セメント	W/B	SF/B	s/a	単位量(kg/m³)							
		(%)	(%)	(%)	W	С	G	S	SF	EX	SRA	AD
HAS	NC	23	10	45.0	155	607	894	731	67	0	0	12.1
LAS	LC	23	10	45.3	155	567	894	740	67	40	6	10.1
NC 並るポルトシ バカンオーレC 低効センオート 対合せ												

NC:普通ホルトランドセメント、LC:低熱セメント、B:結合材

SF:シリカフューム, EX:膨張材, SRA:収縮低減剤, AD:高性能AE減水剤

*1	極東工業(株)	事業開発本部開発課	(正会員)
*2	極東工業(株)	事業開発本部開発課	工修 (正会員)
*3	広島大学大学院	工学研究科社会環境シ	イステム専攻 (正会員)
*4	広島大学大学院	工学研究科社会環境シ	イステム専攻教授 工博 (正会員)

表-2 供試体諸元

	供試体寸法			軸方向鉄筋				せん断補強筋(破壊側)			
供試体名	b	d	а	p _s	p _s '	f _{sy}	Es	A_w	$\mathbf{p}_{\mathbf{w}}$	f _{wy}	E_w
	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(%)	(N/mm^2)	(kN/mm ²)	(mm^2)	(%)	(N/mm^2)	(kN/mm ²)
HAS-1,2	150	500	1500	2.06	1.03	1056	201	48.6	0.26	740	201
LAS-1,2				(D22)	(D22)				(D10)	(SD685)	
HAS-3,4	150	150 500	500 1500	2.06	1.03	1056	201	44.9	0.48	346	200
LAS-3,4		300		(D22)	(D22)	1030			(D10)	(SD295)	

b:幅, d:有効高さ, a:せん断スパン長, p_s:引張鉄筋比, p_s':圧縮鉄筋比, f_{sy}:軸方向鉄筋の降伏強度, E_s:軸方向鉄筋のヤング係数 A_w:せん断補強筋の断面積(溝切加工), p_w:せん断補強筋比, f_{sy}:せん断補強筋の降伏強度, E_w:せん断補強筋のヤング係数

2.2 供試体諸元及び製作

RC はりの供試体諸元 を表-2 に,供試体概要 を図-1 に示す。既往の 研究で,せん断補強筋比 (pw)が小さい場合,せ ん断補強筋応力へ及ぼす 収縮の影響が顕著であっ た³⁾。そのため,pwが 0.26%と0.48%と異なる2 種類の供試体を用いて実 験を行い,せん断補強筋 比の違いによるせん断耐

力への収縮の影響を検討した。ここで, 高強 度コンクリートを用いて断面を小さくした 場合,施工性確保の観点からせん断補強筋を高 強度にすることが一般的であることを考慮し, pw=0.26%の供試体には SD685 (降伏強度 740N/mm²)の高強度せん断補強筋を使用してい る。それに対し、せん断補強筋間隔を1/2にする ことで pw=0.48%とした供試体のせん断補強筋に は, 普通強度の SD295 (降伏強度 324N/mm²) を 用いることで pw=0.26%の供試体とせん断耐力が 同程度となるようにした。そして、図-1に示す ように非対称にせん断補強筋を配置することに よって破壊側を固定し,破壊側のせん断補強筋 には幅 4mm 深さ 3mm の溝切鉄筋を用い, 30mm 間隔でひずみゲージを貼付している。なお、溝 切鉄筋の断面積は、溝切加工後の鉄筋質量の測 定値から単位体積質量を7.85g/cm³として算出し た。実験は各ケース2体ずつ行った。

供試体製作時は,型枠の底面にテフロンシー



(2) $p_w=0.48\%$ (HAS-3,4 LAS-3,4)

図-1 供試体概要

ト,側面にはビニールシートを2重に貼付し, 型枠による拘束を極力低減させている。また, 打設終了後は直ちに打設面をラップフィルム及 び湿布で覆うことにより封緘状態を保ち,材齢1 日後にアルミ粘着テープを貼付した。その後, 載荷直前まで脱枠を行わないことで封緘状態を 保持した。その上で,RCはりの載荷以前におけ る収縮量を把握するため,鉄筋ひずみを打設直 後から経時的に計測した。

2.3 載荷方法及び計測項目

RC はりの載荷方法は,図-1 に示すような 2 点集中荷重による静的載荷である。載荷試験中 は,荷重,変位,鉄筋ひずみを計測するととも に,ひび割れ性状について観察した。

3. 実験結果及び考察

実験結果一覧を,表-3に示す。載荷時におけ

		載荷時コ	ンクリート		載荷直	前の鉄筋	せん断耐力		
供試体名	f _c '	f_t	Ec	$G_{\rm f}$	ε _s	ε _s '	ε _w	V _{c,cr}	Vu
	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(kN/mm^2)	(N/mm)	(×10 ⁻⁶)	(×10 ⁻⁶)	(×10 ⁻⁶)	(kN)	(kN)
HAS-1	124	6.8	48.6	0.208	-238	-327	-432	102	348
HAS-2	124	6.8	48.6	0.208	-231	-339	-450	126	366
LAS-1	116	7.1	46.9	0.202	11	3	10	140	402
LAS-2	116	7.1	46.9	0.202	-4	-16	8	150	412
HAS-3	124	6.9	49.2	0.195	-238	-366	-424	90	360
HAS-4	124	6.9	49.2	0.195	-257	-360	-406	113	387
LAS-3	108	7.2	47.1	0.210	19	-6	13	114	392
LAS-4	108	7.2	47.1	0.210	20	-16	19	107	398

表-3 結果一覧

 $f_{c}':= ンクリートの圧縮強度, f_{t}:= ンクリートの引張強度, E_{c}:= ンクリートのヤング係数, G_{f}:= ンクリートの破壊エネルギー$ $<math>\epsilon_{s}: 引張鉄筋ひずみ, \epsilon_{s}': 圧縮鉄筋ひずみ, \epsilon_{w}: せん断補強筋ひずみ, V_{c,cr}: 斜めひび割れ発生時せん断力, V_{u}: 終局時せん断力$

るコンクリート圧縮強度は HAS が 124N/mm²,

LAS が 108~116N/mm² であった。

3.1 載荷直前の RC はりに及ぼす収縮の影響

打設直後からの支間中央における引張鉄筋ひ ずみ及びせん断スパン中央のはり高さ中央にお けるせん断補強筋ひずみの経時変化の一例を図 -2に,全ての供試体の載荷直前における鉄筋ひ ずみ量を表-3に示す。

HAS 供試体において,図-2 でみられるよう に若材齢時に大きな自己収縮ひずみが生じ,載 荷直前の RC はりの引張鉄筋ひずみは-231~-257 ×10⁻⁶,せん断補強筋ひずみは-406~-450×10⁻⁶に 達する。それに対し,LAS 供試体では低熱セメ ント,膨張材,収縮低減剤の効果によって自己 収縮が低減され載荷直前にほとんど鉄筋ひずみ は生じていない。

3.2 荷重-たわみ関係

荷重と支間中央におけるたわみの関係をせん 断補強筋比ごとに図-3に示す。pwの違いによら ず,支間中央のたわみは最大荷重に至るまで HAS供試体の方がLAS供試体と比較して大きい。 この原因は,表-3よりコンクリートのヤング係 数はほぼ等しいことから,収縮を鉄筋が拘束す ることでコンクリートに生じた引張応力の影響 により,HAS供試体の方がひび割れの進展が早 くなったためと考えられる。

また、pw=0.26%の終局時における 2 体の平均 せん断力は、HAS-1,2 の 357kN に対し LAS-1,2 は 404kN となり、収縮を低減することで約 13% 耐力が増加した。そして、pw=0.48%になると、



HAS-3,4 の 373kN に対し LAS-3,4 が 395kN と収 縮低減による耐力増加の割合が約 6%と小さく なっている。これは, HAS-4 が LAS-3,4 とほぼ 同程度までせん断耐力が増加したためであり, せん断補強筋量を増加させることで,終局耐力 への収縮の影響が小さくなる可能性がある。

3.3破壊性状とひび割れの進展

図-4に供試体の破壊状況、図-5に斜めひび 割れ発生直前のひび割れ進展の一例を示す。本 研究の供試体は全て載荷点付近のコンクリート の圧縮破壊により終局に至ったが、図-4で示す ようにLAS供試体の方がHAS供試体に比べ載荷 点下にひび割れが潜り込んで破壊した。これは, 図-5 で示しているせん断力 90kN 時に, HAS-1 は供試体上縁から 13cm の高さまでひび割れが 進展しているのに対し、LAS-1は28cmまでしか ひび割れが進展しておらず、収縮量によって鉛 直方向へのひび割れの進展に違いが生じること が一因として挙げられる。そして、LAS 供試体 が HAS 供試体に比べて載荷点下にひび割れが潜 り込むことでせん断力に抵抗する圧縮部コンク リート面積が大きくなったことが、収縮を低減 することで終局耐力が向上した要因の一つであ ると考えられる。

3.4 せん断補強筋応力

破壊直前のひび割れ図とその主たる斜めひび 割れに跨る全てのせん断補強筋応力の一例を, せん断補強筋比ごとに図-6と図-7に示す。せ ん断補強筋応力は主たる斜めひび割れの中でほ ぼ同一位置に生じたひび割れにより比較する。 検討に用いた斜めひび割れは,ひび割れ図中に 太線で示している。

ここで、図中には、圧縮斜材角度を 45° とし たトラス理論値、及び既往の研究で実施した同 一諸元でせん断補強筋のない RC はりの斜めひ び割れ発生時のせん断力 ⁴⁾をコンクリート分担 分(V_c) として用いた修正トラス理論値を併記し ている。なお、V_cは、HAS 供試体が 106kN、LAS 供試体が 127kN と、収縮の有無により異なる。

図-6 より pw=0.26%における斜めひび割れに



跨る全てのせん断補強筋応力は、収縮の有無に よらず修正トラス理論値と非常によく一致して いる。せん断補強筋に高強度鉄筋を用いること で斜めひび割れ幅が増大し V_cが低下することも 考えられるが、本実験において鉄筋降伏時まで 全てのせん断補強筋応力は修正トラス理論値を 下回ることはなかった。

それに対し、図-7に示すせん断補強筋に普通 強度鉄筋を用いた pw=0.48%になると、同一せん 断力時の各せん断補強筋の応力負担が大きく異 なり、HAS-3の str5 と str-6、LAS-3の str-5のよ うに修正トラス理論値を明らかに越えるものも ある。しかし、図中に併記しているトラス理論 の斜めひび割れに跨る全てのせん断補強筋応力 は等しいという仮定に基づいた平均応力は修正



図-7 ひび割れ図とひび割れに跨るせん断補強筋応力(pw=0.48%)

トラス理論値とほぼ同等であり、せん断補強筋 比にかかわらず、平均せん断補強筋応力は修正 トラス理論を用いて評価できるといえる。

次に、平均せん断補強筋応力の評価方法について検討する。全ての供試体の平均せん断補強筋応力及び Vc に以下に示す式(1)と式(2)を用いた修正トラス理論値を図-8に示す。

$$V_{c} = 180 f_{c}^{-1/2} d^{-1/2} (100 p_{s})^{1/3} (0.75 + 1.4/(a/d)) bd$$
(1)

$$V_{c} = 0.202(E_{c}G_{f}f_{t})^{-1/3}d^{-1/3} \left\{ \frac{\varepsilon_{s,load}}{\varepsilon_{s,load} - \varepsilon_{s0,sh}} 100p_{s} \right\}^{1/3} (0.75 + 1.4/(a/d))bd$$
(2)

ここで、 $\epsilon_{s,load}$: 平面保持を用いて計算した、引 張鉄筋応力がゼロ状態から斜めひび割れ発生時 までのせん断スパン中央の鉄筋ひずみ変化量、 $\epsilon_{s0,sh}$: 引張鉄筋位置でのコンクリート応力がゼ ロ状態の時の引張鉄筋ひずみ、である。

式(1)は圧縮強度 80~125N/mm² を適用範囲と

-707-

して,藤田らにより提案されている高強度せん 断強度式で収縮の影響を考慮していない¹⁾。式(2) は筆者らが提案した高強度せん断強度式で,収 縮によって曲げひび割れ幅が増大し骨材の噛み 合い効果やダウエル作用によるせん断抵抗が低 下することと,引張鉄筋比を小さくすることは 等価であるとした等価引張鉄筋比の概念を用い て,V_cに及ぼす収縮の影響を取り入れている⁴⁾。

まず, せん断補強筋比にかかわらず, 総じて HAS供試体の方がLAS供試体より同一せん断力 時の平均せん断補強筋応力が大きくなっている。 また, その評価については, 収縮の影響を無視 した式(1)を用いた場合,特にLAS供試体の平均 せん断補強筋応力を過大評価している。それに 対して式(2)を用いた場合は, HAS供試体とLAS 供試体どちらの平均せん断補強筋応力もほぼ評 価できており, せん断補強筋応力推定に等価引 張鉄筋比の概念を用いて収縮の影響を考慮する ことで, その推定精度が向上することがわかる。

4. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。 (1) 有効高さ 500mm のせん断補強筋を有する RC はりにおいて,収縮量の違いにより鉛直方向 へのひび割れの進展が異なり,収縮量を低減さ せることで終局耐力が向上した。それは,せん 断補強筋比が小さい場合に顕著となる。

(2)高強度鉄筋をせん断補強筋に用いた場合,鉄 筋降伏までのせん断補強筋応力は修正トラス理 論を用いて評価できる。一方,普通強度の鉄筋 を用いてせん断補強筋比を大きくした場合,修 正トラス理論値を超えるせん断補強筋応力が収 縮の有無によらず生じる。

(3) 主たる斜めひび割れに跨るせん断補強筋の 平均応力は, せん断補強筋比の大きさにかかわ らず収縮量の増加に伴い大きくなる。そして, 修正トラス理論のコンクリート分担分に, 等価 引張鉄筋比の概念を用いて収縮の影響を取り入 れたせん断強度式を適用することで, せん断補 強筋応力はほぼ評価できる。



謝辞

本研究の一部は,平成16-18年度日本学術振興 会科学研究費補助金(基盤(B)(2))「超高強度膨張 コンクリートの開発と構造挙動評価の体系化」 (研究代表者:佐藤良一)を得て実施したもの である。記してここに感謝の意を表します。

参考文献

- 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
- 2) 鈴木基行ほか: コンクリート圧縮強度 130MPa までを対象とした腹鉄筋のない RC はりのせん断強度式, 土木学会論文集, V-60, pp.75-91, 2003.8
- 3) 児玉友和ほか: 収縮が異なる高強度 RC はり のせん断特性の検討, コンクリート工学年次 論文集, Vol.25, No.2, pp.1057-1062, 2003.7
- 4) 牛尾亮太ほか:せん断補強筋のない高強度 RC はりのせん断強度に及ぼす収縮の影響,第60 回セメント技術大会講演要旨,2006.5