

論文 セン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はりを作成し、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/m ³)							
					W	C	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: 普通ポ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ステム専攻教授 工博（正会員）

表-2 供試体諸元

供試体名	供試体寸法			軸方向鉄筋				せん断補強筋(破壊側)			
	b (mm)	d (mm)	a (mm)	p_s (%)	p_s' (%)	f_{sy} (N/mm ²)	E_s (kN/mm ²)	A_w (mm ²)	p_w (%)	f_{wy} (N/mm ²)	E_w (kN/mm ²)
HAS-1,2	150	500	1500	2.06 (D22)	1.03 (D22)	1056	201	48.6	0.26 (D10)	740 (SD685)	201
LAS-1,2											
HAS-3,4	150	500	1500	2.06 (D22)	1.03 (D22)	1056	201	44.9	0.48 (D10)	346 (SD295)	200
LAS-3,4											

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_{wy} :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(p_w)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、 p_w 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、 $p_w=0.26\%$ 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 $p_w=0.48\%$ 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 $p_w=0.26\%$ 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

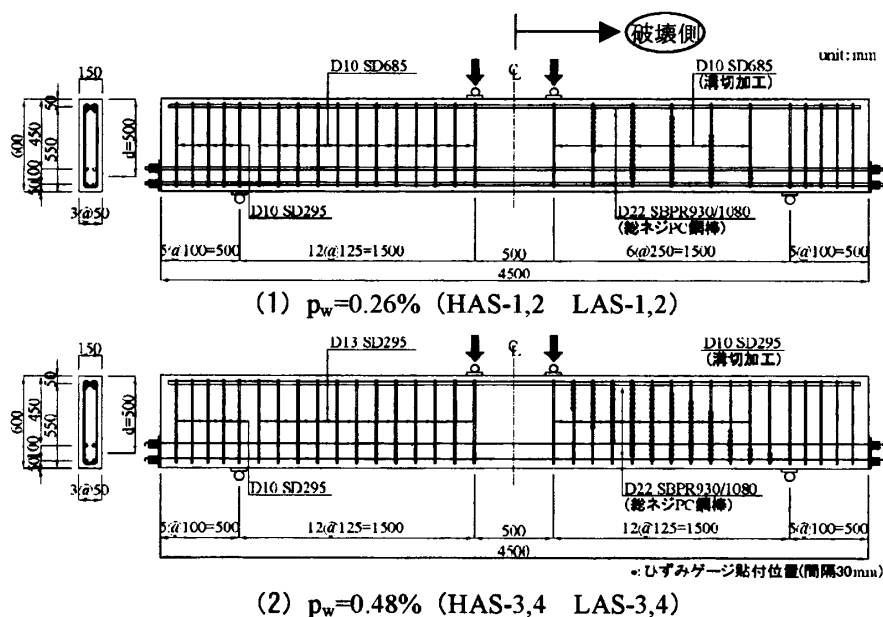


図-1 供試体概要

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

表-3 結果一覧

供試体名	載荷時コンクリート				載荷直前の鉄筋ひずみ			せん断耐力	
	f_c' (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	G_f (N/mm)	ϵ_s ($\times 10^{-6}$)	ϵ_s' ($\times 10^{-6}$)	ϵ_w ($\times 10^{-6}$)	$V_{c,cr}$ (kN)	V_u (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

f_c' :コンクリートの圧縮強度, f_t :コンクリートの引張強度, E_c :コンクリートのヤング係数, G_f :コンクリートの破壊エネルギー

ϵ_s :引張鉄筋ひずみ, ϵ_s' :圧縮鉄筋ひずみ, ϵ_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

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 $\times 10^{-6}$ 、せん断補強筋ひずみは-406~-450 $\times 10^{-6}$ 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。 p_w 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、 $p_w=0.26\%$ 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、 $p_w=0.48\%$ になると、

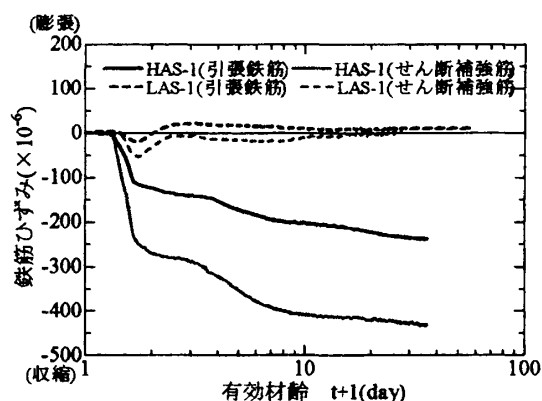


図-2 鉄筋ひずみの経時変化

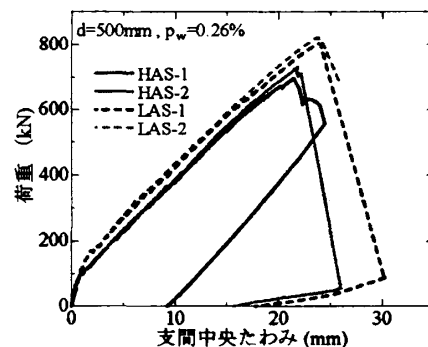
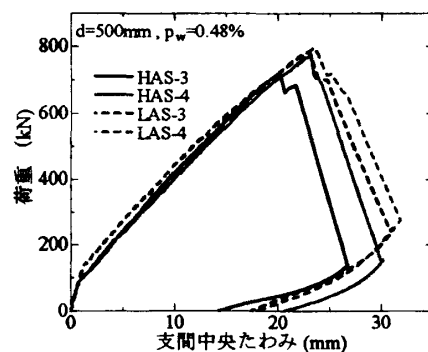
(1) $p_w=0.26\%$ (2) $p_w=0.48\%$

図-3 荷重とたわみの関係

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

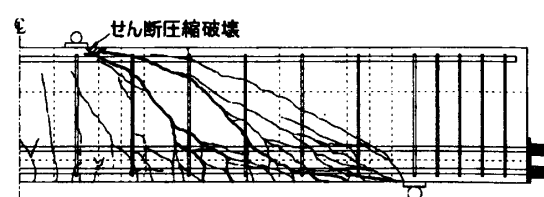
図-4 に供試体の破壊状況、図-5 に斜めひび割れ発生直前のひび割れ進展の一例を示す。本研究の供試体は全て載荷点付近のコンクリートの圧縮破壊により終局に至ったが、図-4 で示すようにLAS供試体の方がHAS供試体に比べ載荷点下にひび割れが潜り込んで破壊した。これは、図-5 で示しているせん断力 90kN 時に、HAS-1 は供試体上縁から 13cm の高さまでひび割れが進展しているのに対し、LAS-1 は 28cm までしかひび割れが進展しておらず、収縮量によって鉛直方向へのひび割れの進展に違いが生じることが一因として挙げられる。そして、LAS 供試体が HAS 供試体に比べて載荷点下にひび割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

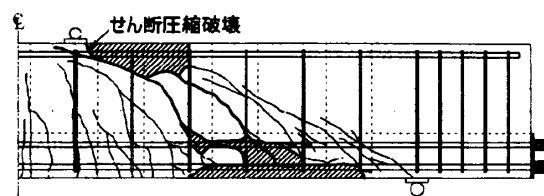
破壊直前のひび割れ図とその主たる斜めひび割れに跨る全てのせん断補強筋応力の一例を、せん断補強筋比ごとに図-6 と図-7 に示す。せん断補強筋応力は主たる斜めひび割れの中でほぼ同一位置に生じたひび割れにより比較する。検討に用いた斜めひび割れは、ひび割れ図中に太線で示している。

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 $p_w=0.26\%$ における斜めひび割れに

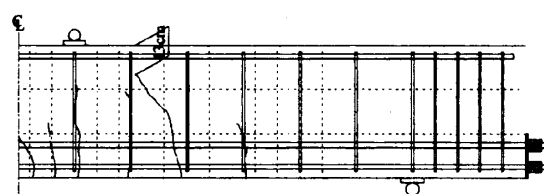


(1) HAS-1($p_w=0.26\%$)

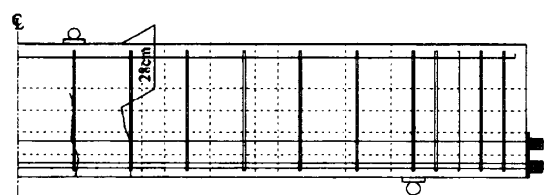


(2) LAS-1($p_w=0.26\%$)

図-4 破壊状況



(1) HAS-1($p_w=0.26\%$)

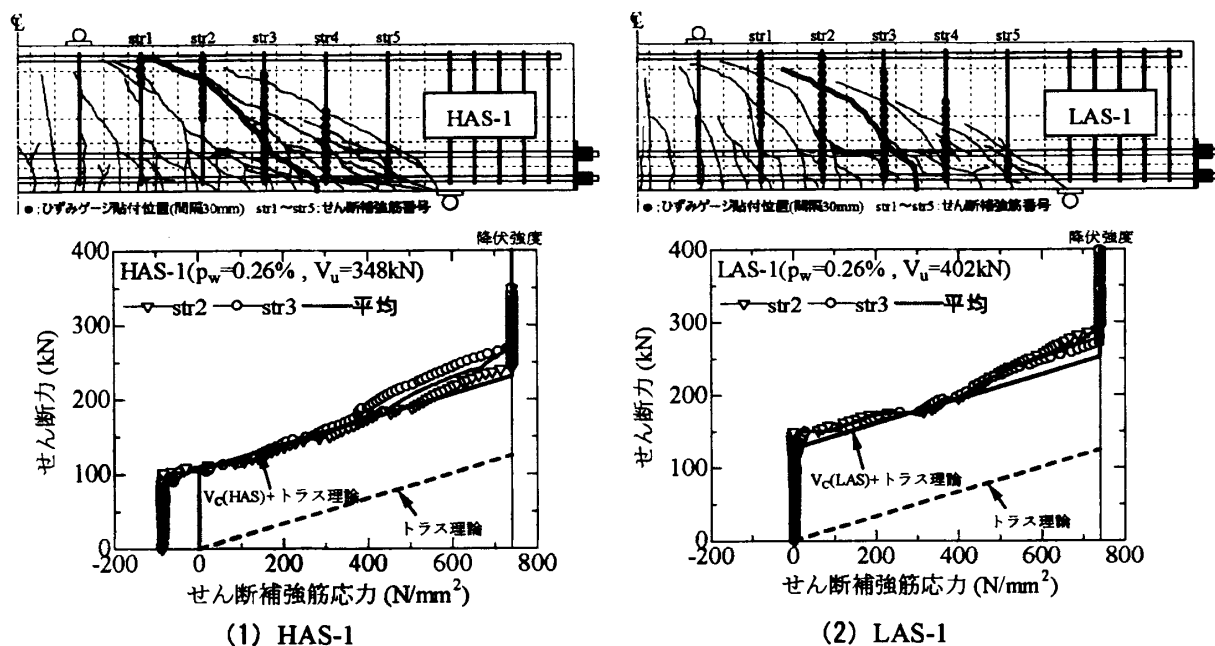
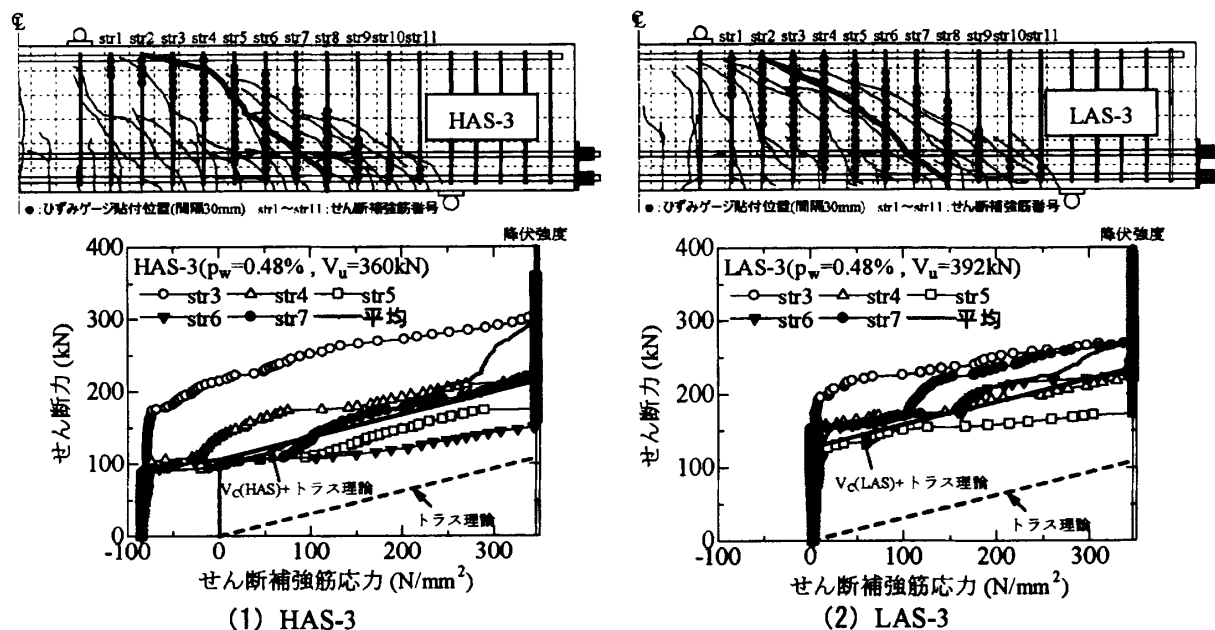


(2) LAS-1($p_w=0.26\%$)

図-5 ひび割れ進展状況 ($V=90\text{kN}$)

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 が低下することもあると考えられるが、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にはなかった。

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 $p_w=0.48\%$ 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-6 ひび割れ図とひび割れに跨るせん断補強筋応力($p_w=0.26\%$)図-7 ひび割れ図とひび割れに跨るせん断補強筋応力($p_w=0.48\%$)

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 V_c 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。

$$V_c = 180 f_c^{-1/2} d^{-1/2} (100 p_s)^{1/3} (0.75 + 1.4/(a/d)) bd \quad (1)$$

$$V_c = 0.202 (E_c G_f f_t)^{-1/3} d^{-1/3} \left\{ \frac{\epsilon_{s,load}}{\epsilon_{s,load} - \epsilon_{s0,sh}} 100 p_s \right\}^{1/3} (0.75 + 1.4/(a/d)) bd \quad (2)$$

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 80～125 N/mm² を適用範囲と

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。

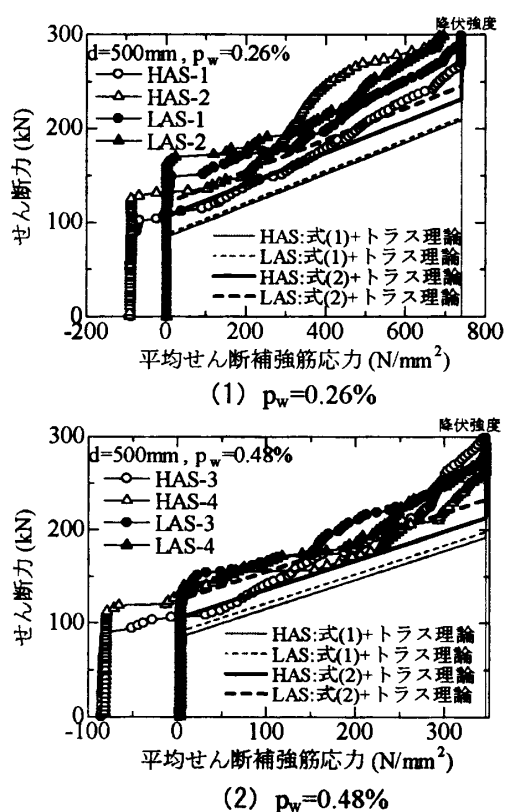


図-8 平均せん断補強筋応力

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

- 1) 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