

論文 高強度 RC はりのせん断補強筋応力に及ぼす収縮の影響評価について

河金 甲^{*1}・児玉 友和^{*2}・牛尾 亮太^{*3}・佐藤 良一^{*4}

要旨：高強度 RC はりのせん断補強筋応力に及ぼす収縮の影響評価方法を、載荷以前にコンクリートの収縮により引張鉄筋とせん断補強筋に蓄積された、圧縮ひずみまたは応力に着目し考察した。それに先立ち、斜めひび割れに跨る全てのせん断補強筋応力を用いることにより、再度、収縮の影響を検証した。その結果、収縮量やせん断補強筋比にかかわらず、修正トラス理論値を超えるせん断補強筋応力はみられた。しかし、その本数で比較すると、せん断補強筋比 0.5%程度の場合、収縮の影響が確認できた。また、本研究で考察した収縮の影響評価方法によって、せん断補強筋応力の推定精度が向上する可能性が示せた。

キーワード：高強度 RC はり、収縮、せん断補強筋応力、修正トラス理論

1. はじめに

圧縮強度が 100N/mm^2 を超えるような高強度コンクリートは、構造物の断面縮小や耐久性向上が期待できる反面、極めて小さな水結合材比やシリカヒュームの併用により、若材齢時の自己収縮が非常に大きいことはよく知られている。

これまで、その収縮が鉄筋コンクリート（以下、RC）部材のせん断挙動にどのような影響を及ぼすか研究を進めてきた^{1),2),3)}。その結果、せん断補強筋を有する RC 部材において、収縮の大きい場合、せん断補強筋の実測平均応力や斜めひび割れ幅が増大する可能性があることが実験的にわかってきた。そして、藤田らにより提案された高強度 RC 部材のせん断強度式⁴⁾をコンクリート負担分(V_c)として用いた修正トラス理論では、せん断補強筋比(p_w)が小さく収縮の大きい場合は、十分に評価できなかった³⁾。

ここで、既往の研究において、全ての供試体が圧縮を伴う破壊により終局に至っており、せん断補強筋の降伏は、せん断耐力の支配的要因とはなっていない³⁾。一方で、現在のコンクリート標準示方書では、せん断補強筋降伏後の耐力

評価は困難であり、実用的で安全側との観点からせん断補強筋の降伏により部材のせん断耐力を与えている⁵⁾。よって、高強度 RC 部材の研究がまだ非常に少ないことを考えると、そのせん断耐力は、当面、せん断補強筋応力の降伏により評価するのが妥当だと思われる。

以上のことから本研究では、せん断補強筋応力推定精度向上のため、修正トラス理論への収縮の影響評価方法を考察した。それに先立ち、斜めひび割れに跨る全てのせん断補強筋応力を用いて、再度、収縮の影響を検証した。

2. 検討供試体概要

本研究の検討には、既往の実験データ³⁾を用いた。供試体諸元と載荷前の収縮の影響を表-1に示す。使用したコンクリートは、水結合材比 23%で、普通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）と、低熱セメント、収縮低減剤、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）である。せん断補強筋降伏強度は $343\sim 382\text{N/mm}^2$ 、載荷時のコンクリート圧縮強度は $81\sim 127\text{N/mm}^2$ であった。

*1 極東工業（株） 技術本部（正会員）

*2 極東工業（株） 技術本部 工修（正会員）

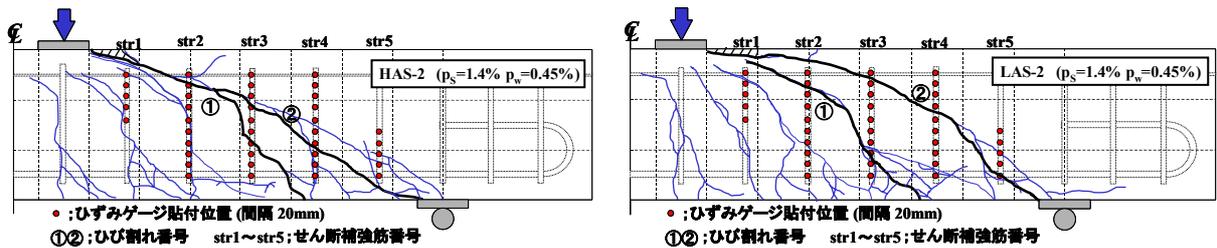
*3 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻（正会員）

*4 広島大学大学院 工学研究科教授 工博（正会員）

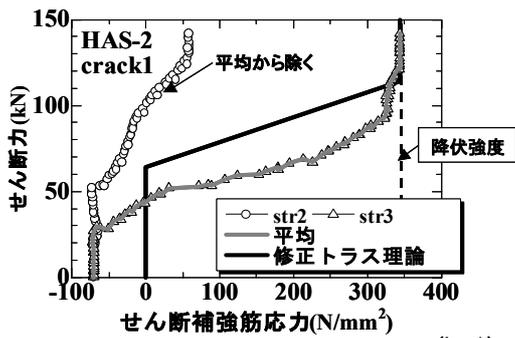
表-1 検討供試体一覧

配合	供試体名	供試体諸元											載荷直前の収縮影響 ^{注2)}						
		b (mm)	h (mm)	d (mm)	a (mm)	c (mm)	p_s (注1) (%)	p_w (注1) (%)	s (mm)	p_w (注1) (%)	f_{wy} (N/mm ²)	E_w (kN/mm ²)	f_c (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	ϵ_s ($\times 10^{-6}$)	ϵ_s' ($\times 10^{-6}$)	$\sigma_{c,ten}$ (N/mm ²)	ϵ_w ($\times 10^{-6}$)	$\sigma_{c,w}$ (N/mm ²)
HAS	HAS-1	150	300	250	750	300	1.4(Dm19)	0.4(D10)	125	0.45(Dm10)	382	201	115	6.2	-358	-552	1.74	-336	0.30
	HAS-2	150	300	250	750	300	1.4(Dm19)	0.4(D10)	125	0.45(Dm10)	343	194	82	4.7	-297	-496	1.44	-364	0.32
	HAS-3	150	300	250	750	300	2.1(D22)	0.4(D10)	125	0.49(Dm10)	353	196	98	6.7	-214	-451	1.62	-317	0.30
	HAS-4	150	300	250	750	300	2.7(D25)	0.4(D10)	62.5	0.98(Dm10)	353	196	127	4.9	-240	-538	2.48	-376	0.73
	HAS-5	150	300	250	750	300	2.7(D25)	0.4(D10)	107	1.16(Dm13)	362	198	115	6.6	-304	-637	3.18	-368	0.85
	HAS-6	200	300	234	700	400	3.4(D32)	0.3(D10)	100	0.42(Dm10)	360	202	115	6.6	-316	-701	3.38	-450	0.39
LAS	LAS-1	150	300	250	750	300	1.4(Dm19)	0.4(D10)	125	0.45(Dm10)	382	201	101	5.7	-39	-100	0.18	-127	0.11
	LAS-2	150	300	250	750	300	1.4(Dm19)	0.4(D10)	125	0.45(Dm10)	343	194	81	5.5	-37	-86	0.17	-72	0.06
	LAS-3	150	300	250	750	300	2.1(D22)	0.4(D10)	125	0.49(Dm10)	353	196	84	6.2	1	-30	-0.02	-17	0.02
	LAS-4	150	300	250	750	300	2.7(D25)	0.4(D10)	62.5	0.98(Dm10)	353	196	113	4.5	-1	-67	-0.01	-54	0.10
	LAS-5	150	300	250	750	300	2.7(D25)	0.4(D10)	107	1.16(Dm13)	362	198	100	5.9	-45	-167	0.45	-50	0.12
	LAS-6	200	300	234	700	400	3.4(D32)	0.3(D10)	100	0.42(Dm10)	360	202	100	5.9	-52	-182	0.55	-152	0.13

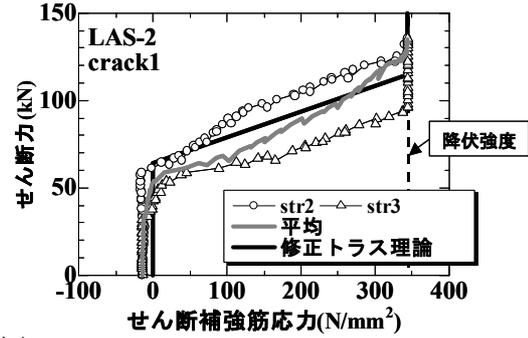
b: はり幅, h: はり高さ, d: 有効高さ, a: セン断スパン長, c: 定着長, p_s : 引張鉄筋比, p_w : 圧縮鉄筋比, s: セン断補強筋配置間隔, p_w : セン断補強筋比, f_{wy} : セン断補強筋の降伏強度, E_w : セン断補強筋のヤング係数, f_c : 圧縮強度, f_t : 引張強度, ϵ_s : 引張鉄筋ひずみ, ϵ_s' : 圧縮鉄筋ひずみ, $\sigma_{c,ten}$: 引張鉄筋位置の収縮応力, ϵ_w : セン断補強筋ひずみ, $\sigma_{c,w}$: 鉛直方向の収縮応力
 注1) ()内について, Dは異形鋼材, Dmは溝きり加工した異形鋼材, 数字は鋼材直径を示す。 注2) 引張は正, 圧縮は負として表記している。



(a) ひび割れ図



(b-1) crack1



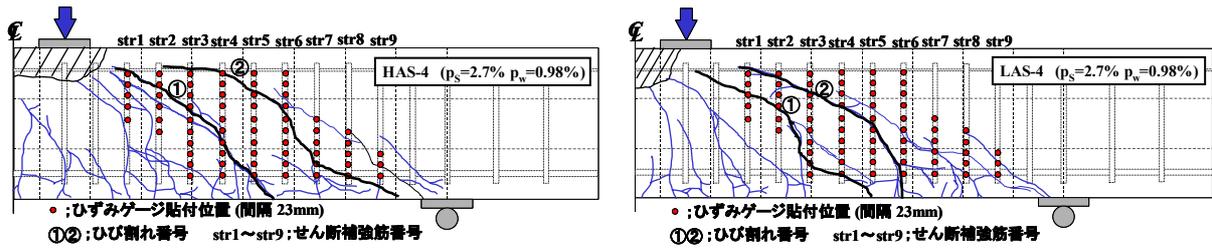
(b) セン断補強筋応力

図-1 ひび割れ図とひび割れに跨るせん断補強筋応力 ($p_s=1.4\%$, $p_w=0.45\%$)

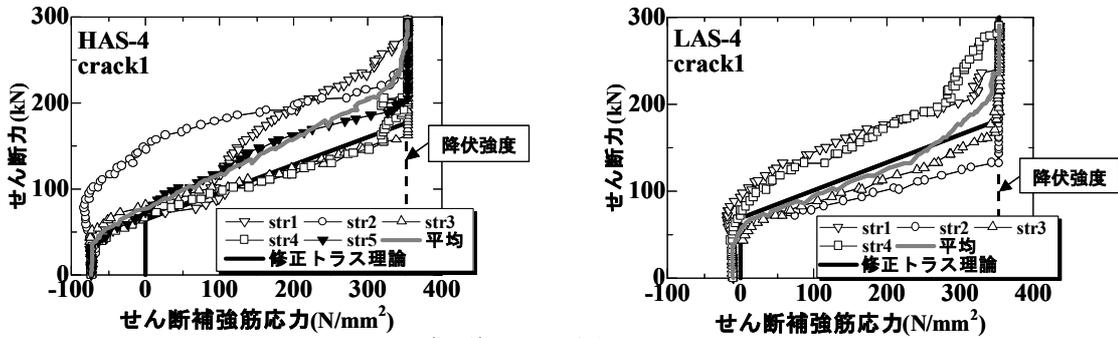
3. セン断補強筋応力に及ぼす収縮の影響検討

実測平均応力で検討した場合, 収縮の影響が p_w に関連する傾向があった³⁾。そのため, 影響がみられた p_w が 0.45%(HAS-2 と LAS-2) と, みられなかった 0.98%(HAS-4 と LAS-4) の 2 ケース

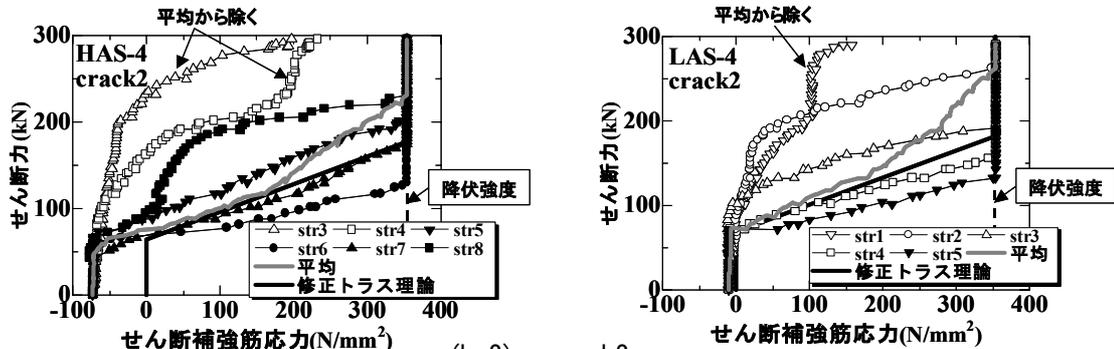
について, 収縮の影響を全てのせん断補強筋応力を用い検討した。各供試体の終局時におけるひび割れ図とその主たる斜めひび割れに跨るせん断補強筋応力を図-1, 図-2 に示す。左側が HAS, 右側が LAS の図となっている。ここで,



(a) ひび割れ図



(b-1) crack1



(b-2) crack2

(b) セン断補強筋応力

図-2 ひび割れ図とひび割れに跨るせん断補強筋応力 ($p_s=2.7\%$, $p_w=0.98\%$)

せん断補強筋応力は各組においてほぼ同一位置に生じた 2 本のひび割れにより比較しており、ひび割れ図中に示す位置に、20mm と 23mm 間隔で貼付したひずみゲージの中で、ひび割れに最も近いもので計測した鉄筋応力をそれぞれ表示している。なお、crack1,2 はひび割れ図中のひび割れ番号 1,2 に対応している。今後は、せん断補強筋応力が急激に増加し始めた値を斜めひび割れ発生時のせん断力とする。

また、図中に示す修正トラス理論値の V_c には、圧縮強度 $80\sim 125\text{N/mm}^2$ を適用範囲として、藤田らにより提案されている以下の式⁴⁾を用いた。

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

p_w が 0.45% の図-1 より、収縮量にかかわらず全てのひび割れにおいて、計算値を超えたせん

断補強筋応力が存在しているのがわかる。しかし、その本数に着目すると、crack1 では HAS-2, LAS-2 とともに 1 本ずつであるが、crack2 の方は HAS-2 が 2 本、LAS-2 が 1 本と異なる。crack2 の斜めひび割れに跨るせん断補強筋の全数はどちらも 3 本と等しいことから、既往の平均応力で検討したときと同様、せん断補強筋応力を個別にみても、 p_w が小さい場合はそれに収縮が影響を及ぼす可能性があることが確認できた。

それに対し、 p_w が 0.98% と大きい図-2 の場合、収縮量によらず計算値を超えたせん断補強筋応力はあるものの、その本数は crack1 が 2 本ずつ、crack2 も 2 本ずつと HAS-4 と LAS-4 に差はない。各ひび割れの全本数もほぼ同数であることから、収縮の影響はみられないといえる。

そして、図-1(b)と図-2(b)から、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、という仮定が明らかに成立していないことがわかる。しかし、本研究では、せん断補強筋応力推定に修正トラス理論を適用することを前提としており、その仮定に準じた平均鉄筋応力で評価することにする。ここで、本検討で用いた供試体は全て荷重点付近で圧縮を伴う破壊により終局に至っており³⁾、その時点ではタイドアーチ的機構に移行していると考えられる。そのため、せん断力負担に影響を及ぼしていたせん断補強筋は終局時には全て降伏していると仮定し、HAS-2のcrack1におけるstr2のように、最終的に降伏しなかったものは平均から除いた。

4. 収縮の影響評価方法の検討

荷重以前、コンクリートの収縮により引張鉄筋とせん断補強筋に蓄積された、圧縮ひずみまたは応力に着目し、荷重時のせん断補強筋応力に及ぼす収縮の影響評価方法を検討した。

4.1 引張鉄筋による影響評価

高強度 RC 部材において、収縮が大きい場合、曲げひび割れ幅が増大することは確認されている⁶⁾。そして、曲げひび割れ幅は、斜めひび割れに沿った骨材のかみあい効果及び引張鉄筋のダウエル作用に影響することが知られている⁷⁾。高強度コンクリートのひび割れ面は平滑になる傾向があるため⁸⁾、前者への曲げひび割れ幅増大の影響は小さいかもしれないが、少なくとも後者へは影響すると考えられる。

また、 V_c として今回の検討に用いた式(1)には、曲げひび割れ幅の影響を表す引張鉄筋比が要因として含まれている⁷⁾。そのため、引張鉄筋比を小さくすることで、前述した収縮による曲げひび割れ幅増大の影響評価を試みた。ここで、収縮がある場合の曲げひび割れ幅は、引張鉄筋位置でのコンクリート応力がゼロ状態のときの鉄筋ひずみ($\Delta\varepsilon_{s,sh}$)を考慮することにより評価できると報告がある⁶⁾。よって、本研究でも斜

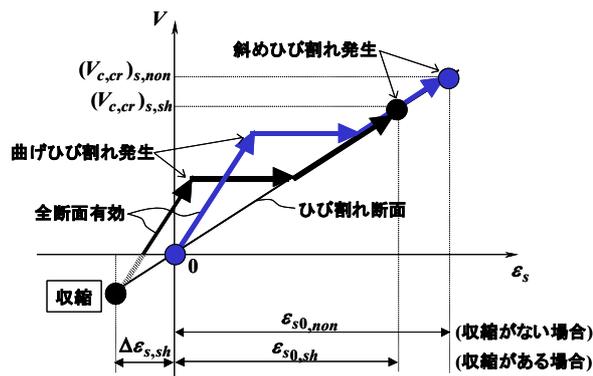


図-3 収縮の影響評価の概念図（引張鉄筋）

めひび割れ発生時までの、 $\Delta\varepsilon_{s,sh}$ を考慮した引張鉄筋ひずみ変化量を用い検討した(図-3参照)。

ところで、式(1)は自己収縮の影響を含んだ供試体のせん断強度から回帰した式である。また、その時の $\Delta\varepsilon_{s,sh}$ は、文献9)を参考に計算すると -300×10^{-6} 程度であった。そのため、まずその値を用いて、式(2)に示す収縮がない場合の斜めひび割れ発生時のせん断力を算出した。

$$(V_{c,cr})_{s,non} = 180 f_c^{-1/2} d^{-1/2} (100(1/k_0)p_s)^{1/3} (0.75 + 1.4(a/d))bd \quad (\text{N}) \quad (2)$$

ここで、 $k_0 = \varepsilon_{s0,sh} / (\varepsilon_{s0,sh} + 300 \times 10^{-6})$ ：自己収縮の影響を除外するための係数、 $\varepsilon_{s0,sh}$ ：引張鉄筋応力がゼロ状態からのせん断スパン中央の鉄筋ひずみの変化量、である。

これを基に、任意の収縮が生じる場合の斜めひび割れ発生時のせん断力は次のように表せる。

$$(V_{c,cr})_{s,sh} = 180 f_c^{-1/2} d^{-1/2} (100(k_s/k_0)p_s)^{1/3} (0.75 + 1.4(a/d))bd \quad (\text{N}) \quad (3)$$

ここで、 $k_s = \varepsilon_{s0,sh} / (\varepsilon_{s0,sh} - \Delta\varepsilon_{s,sh})$ ：収縮の影響を考慮するための係数、である。

なお、 k_0 と k_s 算出時の $\varepsilon_{s0,sh}$ は、曲げひび割れ発生後におけるコンクリートの引張応力を無視した一般的な RC 断面のせん断力と鉄筋ひずみの関係を用い、図-4に示す手順により求めた。

4.2 せん断補強筋による影響評価

せん断補強筋の収縮拘束により、コンクリートに生じる引張応力によっても、斜めひび割れ発生時せん断力は低下すると考えられる。その評価方法を、図-1, 2の平均応力から検討する。

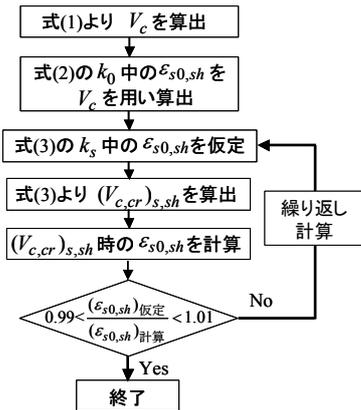


図-4 鉄筋ひずみ算出手順

それらの図の HAS における斜めひび割れ発生時のせん断力 $(V_{c,cr})_{w,sh}$ は、定性的には、せん断補強筋応力がゼロ状態の斜めひび割れ発生時のせん断力 $(V_{c,cr})_{w,non}$ を、収縮により蓄積されたせん断補強筋応力 $(\Delta\sigma_{w,sh} \leq 0, \text{圧縮を負})$ に応じて、圧縮側にもトラス理論を適用することにより減少させたもの (図-5(a)参照) となっている。

一方で、斜めひび割れ発生後、圧縮されたせん断補強筋は、応力がゼロになるまでは引張力を負担しないにもかかわらず、その応力解放に伴い、せん断力が徐々に増加している。このことは、斜めひび割れ発生時のせん断力が収縮により低下しても、その後の鉄筋応力解放時に、 V_c は増加する可能性を示している。しかし、収縮の影響が顕著にみられる HAS-2 では、その増加に従い、結局は計算値との差が大きくなる、つまり V_c が低下している。

そのため、図-5(b)に示すように、収縮により減少した $(V_{c,cr})_{w,sh}$ を増加させることなく、修正トラス理論におけるコンクリート負担分 $(V_{c,res})_{w,sh}$ として用いることにより、せん断補強筋による収縮の影響を評価することとした。その場合、任意の収縮量を考慮した修正トラス理論によるせん断力 V は、式(4)のように表すことができる。

$$V = V_c + V_s = \left\{ (V_{c,res})_{w,non} + A_w \Delta\sigma_{w,sh} z / s \right\} + A_w \sigma_w z / s \quad (4)$$

ここで、 A_w : 区間 s におけるせん断補強筋の総断面積、 z : 圧縮応力の合力作用位置から引張

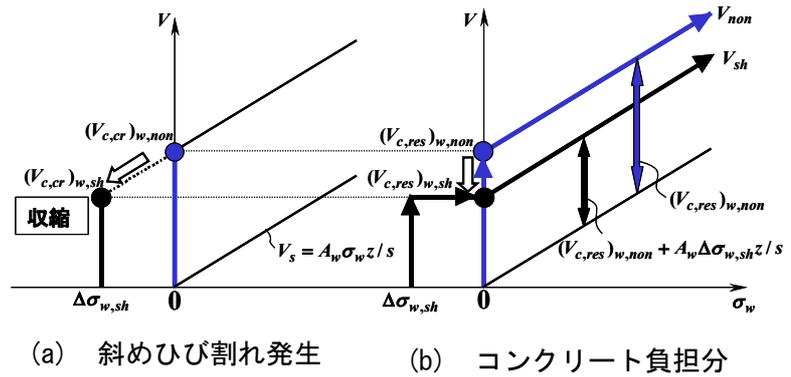


図-5 収縮の影響評価の概念図(せん断補強筋)

鋼材図心までの距離、 s : せん断補強筋の配置間隔、である。

そして、引張鉄筋による収縮の影響を考慮した式(3)で求まる $(V_{c,cr})_{s,sh}$ を、 $(V_{c,res})_{w,non}$ として用いた次式により収縮の影響評価を検討する。

$$V = \left\{ (V_{c,cr})_{s,sh} + A_w \Delta\sigma_{w,sh} z / s \right\} + A_w \sigma_w z / s \quad (5)$$

5. 収縮の影響評価結果についての考察

5.1 斜めひび割れ発生時のせん断力

ここでは、斜めひび割れ発生時せん断力を V_c としているため、まず、それへの収縮の影響評価の妥当性を考察する。図-6 に実験値と、従来の修正トラス理論 (式(1)+トラス理論, 以下, 従来法)、本研究で提案した収縮を考慮した修正トラス理論 (式(5), 以下, 提案法) の比較を示す。

従来法によると、とりわけ HAS の実験値と計算値が大きく離れているが、提案法で収縮を考慮することにより、その差は小さくなっている。しかし、まだ全体的に、計算値は実験値を過大評価する傾向はある。

5.2 せん断補強筋応力

図-7 にせん断補強筋の実測平均応力と、従来法及び提案法による修正トラス理論の比較を示す。検討は、図-1 で示した HAS-2 と LAS-2 に追加し、収縮の影響がみられた HAS-3 と LAS-3 についても行った。なお、各供試体で計測された最も大きい鉄筋平均応力を用い検討した。

これらの図から、収縮を考慮した提案法を用いることによって、従来法でもほぼ評価できて

いた LAS の推定精度を変えることなく、従来法で過小評価していた HAS の推定精度向上が認められる。それでも、HAS-2 にみられるように実験値を過小評価してしまうのは、 V_c として用いている斜めひび割れ発生時せん断力が、前述したように十分に評価しきれていないところに原因があると考えられ、今後さらに検討を続けていき、推定精度の向上に努めたい。

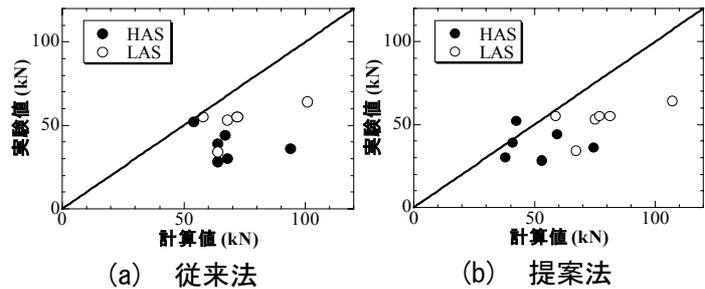
6. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

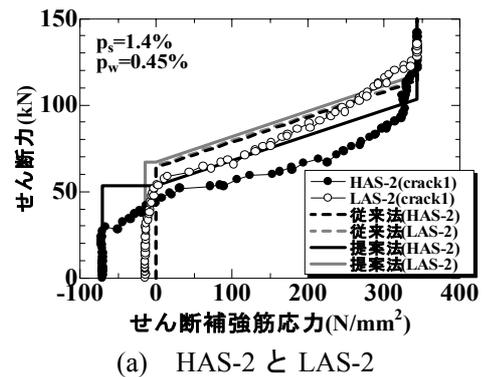
- (1)斜めひび割れに跨る全てのせん断補強筋応力でみると、収縮量やせん断補強筋比にかかわらず、修正トラス理論値を超える。しかし、その本数で比較すると、せん断補強筋比が 0.5%程度と小さい場合は、既往の実測平均応力で検討したときと同様、収縮の影響が確認できた。
- (2)収縮によって载荷以前に引張鉄筋とせん断補強筋に蓄積された圧縮ひずみまたは応力に着目し、修正トラス理論に収縮の影響を考慮することにより、载荷時のせん断補強筋応力の推定精度が向上する可能性が示せた。

参考文献

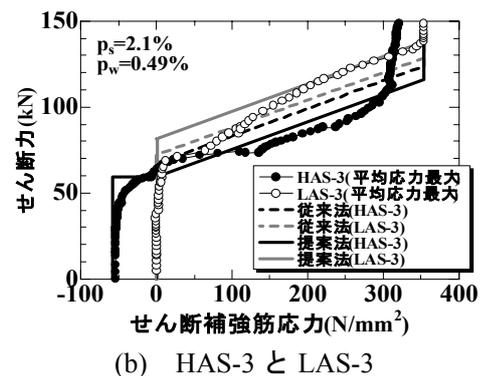
- 1)早川智浩ほか：高強度コンクリートの収縮がせん断補強筋のひずみ挙動に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.589-594，2000.6
- 2)伊藤友司ほか：高強度コンクリートを用いた RC はりのせん断挙動に及ぼす収縮の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.763-768，2001.7
- 3)児玉友和ほか：収縮が異なる高強度 RC はりのせん断特性の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1057-1062，2003.7
- 4)藤田学ほか：高強度コンクリートを用いた RC はりのせん断強度と寸法効果，土木学会論文集，V-56，pp.161-172，2002.8
- 5) (社)土木学会：2002年制定コンクリート標



図一6 斜めひび割れ発生時せん断力の検討



(a) HAS-2 と LAS-2



(b) HAS-3 と LAS-3

図一7 せん断補強筋応力の検討

準示方書〔構造性能照査編〕

- 6)正木聡ほか：コンクリートの低収縮化による RC 部材の曲げ性能の向上，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.757-762，2001.7
- 7)田辺忠頭ほか：コンクリート構造，朝倉書店，pp.113-115，1992.6
- 8)土屋智史ほか：高強度構成材料を用いた RC 梁部材のせん断破壊と数値性能評価度の影響，土木学会論文集，V-54，pp.65-84，2002.2
- 9)藤田学ほか：鉄筋コンクリートはり部材のせん断耐力におけるコンクリート強度の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.955-960，2000.6