論文　せん断補強筋のない高強度RCはりのせん断特性に及ぼす収縮の影響

牛尾　亮太[*1]・河金　甲[*2]・丸山一平[*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 のせん断補強筋のない RC はりを製作し，せん断特性に及ぼす収縮の影響を実験的に検討した。そして，破壊エネルギーの観点からせん断強度に及ぼす寸法効果の収縮影響を検討し，収縮量によるコンクリート材料特性と寸法効果の違いを考慮したせん断耐力評価を行なった。その結果，載荷以前に下縁に発生する収縮応力の影響によりひび割れ性状，破壊モード，せん断強度，寸法効果に収縮の影響が認められた。また，コンクリート材料特性を考慮することでせん断強度算定式の推定精度は向上した。

キーワード：高強度コンクリート，収縮，せん断強度，破壊エネルギー，寸法効果

1. はじめに

近年，構造物の断面縮小や耐久性の向上が期待できる高強度コンクリートへの関心が高まり，極めて水セメント比の小さい，圧縮強度が100N/mm^{2}を超えるようなコンクリートの研究，とりわけ脆性的な破壊を伴うせん断特性に関する研究は精力的に行われている。

しかし，高強度コンクリートは若材齢時において非常に大きな自己収縮が生じ，それをRC構造物に適用する場合，収縮が鉄筋により拘束され，コンクリートに無視できないほどの引張応力が生じることが知られている。そして，それがせん断補強筋のないRC部材においても，せん断破壊の形態やせん断強度に影響を及ぼす可能性が，有効高さ 250mm程度の実験によって確認されている[1)]。また，藤田ら[2)]の研究により，コンクリートの高強度化により，寸法効果の影響が大きくなることも確認されている[2)]。そこで，本研究では収縮量の異なる 2 種類の高強度コンクリートを用いて，有効高さを 500mmと大きくしたせん断補強筋のないRCはりの載荷試験を行い，せん断特性に及ぼす収縮の影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

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。最大粗骨材寸法は 20mm であった。

2.2 供試体緒元および製作

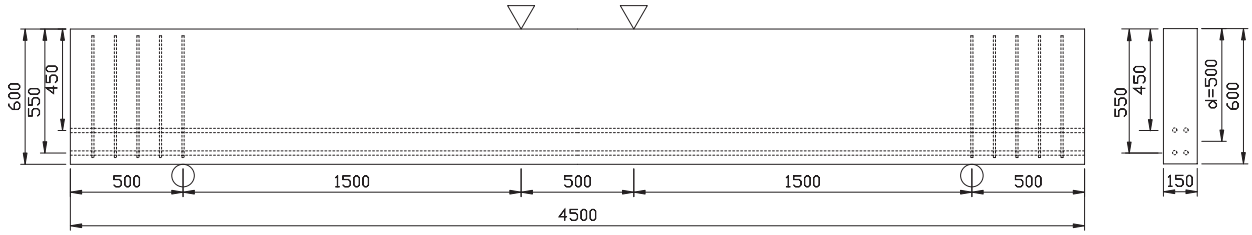
RC はりの供試体諸元を**図-1** に示す。2 種類の配合を使用し供試体を各 3 体（供試体名：HAS-1，2，3 LAS-1，2，3）製作した。供試体製作にあたり，型枠の底面にはテフロンシート，

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	C	S	G	SF	EX	SRA	SP
HAS	NC	23	10	41	161	630	640	949	70	0	0	14
LAS	LC	23	10	41	161	600	643	954	70	30	6	11.2

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：膨張剤，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）　技術本部　(正会員)
*3 広島大学大学院　工学研究科助手　工博　（正会員）
*4 広島大学大学院　工学研究科教授　工博　（正会員）



有効高さd=500mm，a/d=3，**引張鉄筋比**p_w=1.53%（D19，SD345，σ_{sy}=350.7N/mm^2）　**(unit;mm)**

図－1　供試体図

側面にはビニールシートを 2 重に貼付し，材齢初期に生じる自己収縮の型枠による拘束の影響を極力低減させた。また，乾燥収縮を起こさせないよう，コンクリート打設終了後，直ちに打設面をラップフィルムおよび湿布で覆い，封緘状態を保つようにした。そして，約 1 日後上面は，アルミ箔粘着テープでシールし，載荷試験時まで脱枠を行なわず封緘養生とした。RC はりに及ぼす載荷以前における自己収縮の影響を把握するため，引張鉄筋のひずみ及びコンクリート温度を打設直後から経時的に計測した。また，はり供試体と同断面(150mm×600mm)の長さ 1m の無拘束供試体を作製し，収縮ひずみを測定した。

2.3 載荷方法および計測項目

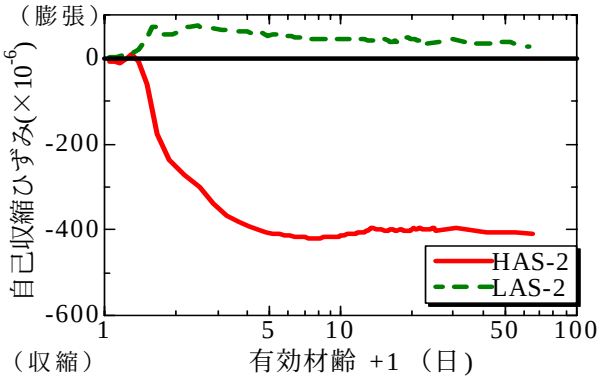
静的載荷試験は, 2 点集中荷重の単調載荷で行った。載荷試験中は，はり中央部のたわみとひび割れ性状についての観察を行った。

3. 実験結果および考察

結果一覧を**表－2** に示す。

3.1 載荷直前の RC はりに及ぼす収縮の影響

無拘束供試体より測定した収縮ひずみ経時変化を**図-2** に示す。ここでは一例としてHAS-2, LAS-2 の結果を示す。また，引張鉄筋ひずみの実測値から平面保持を仮定し力の釣合いから算出したRCはりの下縁における載荷直前の収縮応力を**表-2** に示す。HASは載荷直前において約 400 **μ** 収縮し，それによりRCはり下縁に 1.7N/mm^{2}の大きな引張応力が発生していることがわかる。一方LASは，高ビーライト系セメント，膨張材，収縮低減剤の効果により載荷直前のRCはり下縁



図－2　収縮ひずみの経時変化

に応力はほとんど生じていない。

3.2 ひび割れ性状

図-3 に終局時におけるHAS-2 とLAS-2 のひび割れ図を示す。図より，HAS-2 は斜めひび割れが 1 本に局所化したのに対し，LAS-2 は斜めひび割れが 2 本に分散しており，収縮によって終局時のひび割れ性状に違いがみられた。これらは他の同一配合供試体において，ほぼ同様の傾向であった。せん断スパンのひび割れが，HAS-2 はLAS-2 に比べ，下縁から中立軸付近まで垂直に進展しており，斜めひび割れが発生する時に，局所化しやすくなったものと推測できる。なお，収縮が大きい場合に曲げひび割れ幅が増大するという報告があり[3)]，それによって，HAS-2 の鉛直方向へのひび割れ進展が，LAS-2 より大きくなったと考えられる。

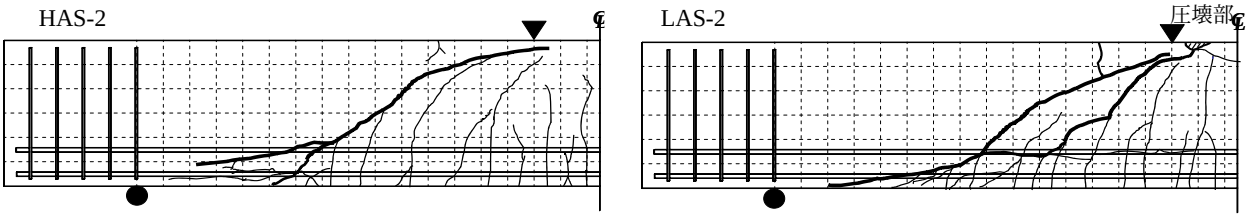
3.3 荷重－たわみ関係

支間中央における荷重-たわみ関係を**図-4** に示す。今後は急激な荷重低下に至ったひび割れを斜めひび割れとし，この時のせん断応力をせん断強度(τ_c)と呼ぶ。斜めひび割れ発生後HAS は荷重が伸びることなく終局に至ったのに対し

表－2　実験結果

配合	供試体名	コンクリート 圧縮強度 f_c (N/mm²)	ヤング係数 E_c (kN/mm²)	引張強度 f_t (N/mm²)	破壊エネルギー G_f (N/mm)	特性長さ l_{ch} mm	実験値 下縁応力 σ_c (N/mm²)	斜めひび割れ発生時 $V_{c,mea}$ (kN)	$\tau_{c,mea}$ (N/mm²)	終局時 $V_{u,mea}$ (kN)	$\tau_{u,mea}$ (N/mm²)	計算値 藤田式 $V_{c,cal}$ (kN)	$\tau_{c,cal}$ (kN)	破壊モード
HAS	HAS-1	124.0	48.8	7.1	0.206	191.0	1.6	116.0	1.55	116.0	1.55	76.0	1.01	斜め引張破壊
	HAS-2	121.2	49.9	7.0	0.202	181.0	1.7	114.0	1.52	114.0	1.52	76.9	1.03	斜め引張破壊
	HAS-3	128.0	49.1	7.3	0.226	253.0	1.7	113.3	1.51	126.5	1.69	74.8	1.00	斜め引張破壊
LAS	LAS-1	119.7	49.8	7.1	0.247	313.0	0.3	116.2	1.55	137.1	1.83注)	77.3	1.03	せん断圧縮破壊
	LAS-2	120.8	48.9	7.2	0.253	202.0	0.0	120.1	1.60	135.2	1.80注)	77.0	1.03	せん断圧縮破壊
	LAS-3	117.1	49.8	7.0	0.237	173.0	0.2	130.6	1.74	142.0	1.89注)	78.2	1.04	せん断圧縮破壊

注)引張鉄筋が降伏したため参考値とする



図－3　ひび割れ図

て，LASの方はその後も荷重が増大し，引張鉄筋が降伏した後，等曲げ区間で圧縮破壊を生じた。また，斜めひび割れ発生荷重は，LASの方がHASより 3 体の平均で約 5%大きくなった。

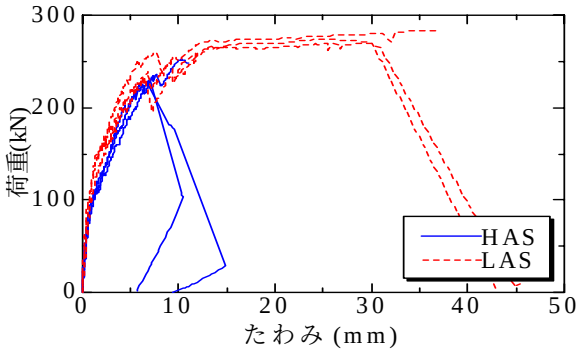
3.4 破壊モード

高強度RCはりのせん断スパン比における，斜め引張破壊とせん断圧縮破壊との遷移帯は2.5～3.0 という報告がある[4]。せん断スパン比 3.0 である本実験において，HASは斜め引張破壊したのに対し，LASは等曲げ区間でせん断圧縮破壊しており明確な差がみられた．これは，前述した収縮が小さくなることにより，局所化が緩和され，LASには載荷点側にも主たる斜めひび割れが発生することに起因すると思われる。

4. 寸法効果の検討

寸法効果の検討をこれまで行った有効高さが250mm程度の実験[1]と藤田らの実験[2]のせん断スパン比 3 のデータを用いて行った。ここで，高強度コンクリートのせん断強度に対する引張鉄筋比及びせん断スパン比の影響は，普通強度コンクリートと同等であるという報告がある[5]。そこでせん断強度について，文献[5]の検討時に用いている二羽式[6]を基に，式(1)により引張鉄筋比及びせん断スパン比の影響を排除し検討した。

$$\tau_c{}^* = \tau_c \Big/ \left[(100 p_s)^{1/3} \{0.75 + 1.4/(a/d)\} \right] \qquad (1)$$



図－4　荷重－たわみ関係

ここで p_s ；引張鉄筋比(%)，a/d ；せん断スパン比

ここで，高強度コンクリートのせん断強度への寸法効果は，普通強度コンクリートの-1/4 乗則より寸法依存性は顕著になり，大きなものでは-1/2 乗に従うとの報告[2]もある。

藤田らは，Gustafssonら[7]の破壊力学的な観点から，特性長さを用いて寸法効果を検討する手法により，高収縮高強度コンクリートを対象に寸法効果を検討している[2]。本研究でも，破壊力学的アプローチを用いた。破壊エネルギーは，日本コンクリート工学協会の「プレーンコンクリートの破壊エネルギー試験法（案）」[8]に準拠した。破壊エネルギーの測定結果及びそれを用いて計算した特性長さの値を**表-2** に示す特性長さは，式(2)によって求めた。

$$l_{ch} = 1000 E_c \cdot G_f / f_t^2 \qquad (2)$$

ここで，G_f ；破壊エネルギー(N/mm)　E_c ；ヤン

グ係数(kN/mm^2)　f_t ；引張強度(N/mm^2)

有効高さ 250mm程度の実験[1)]において破壊エネルギーは測定していないため，今回の実験により測定された平均値(HAS:0.211N/mm LAS:0.246N/mm)を用いて検討を行った。

τ_c*/f_tとd/l_{ch}の関係を**図-5** に示す。また，寸法効果の検討のため，HAS，LAS毎に最小二乗法を用いて計算した場合の相関係数を**表-3** に記す。ここでは，τ_c*/f_tはd/l_{ch}の-1/4乗，-1/3乗または-1/2乗に比例するとして，回帰分析を行った。なお，**図-5** に示してある回帰曲線は最も相関係数が高かった回帰曲線である。

その結果，**表-3** よりわずかな差ではあるが，HASは-1/2 乗に，LASは-1/3 乗に比例する傾向にあった。このことより，収縮を低減させることで，寸法効果が鈍くなる可能性がある。しかしながら，d/l_{ch}が 2.0 を超えた場合，HASのτ_c*/f_tはばらつきが大きく，特に本研究のHASは-1/3 乗則に従っているようにもみえる。このように，寸法効果に及ぼす収縮の影響について不明な点も多く，今後も検討を続けていく必要がある。なお，**図-5** 中の回帰曲線を以下に示す。

$$HAS;\tau_c{}^*/f_t = 0.195\left(d/l_{ch}\right)^{-1/2} = 0.195\left(d/\left(1000E_c\cdot G_f/f_t^2\right)\right)^{-1/2} \quad (3)$$

$$LAS;\tau_c{}^*/f_t = 0.200\left(d/l_{ch}\right)^{-1/3} = 0.200\left(d/\left(1000E_c\cdot G_f/f_t^2\right)\right)^{-1/3} \quad (4)$$

5. せん断強度算定式の検討

5.1 コンクリート材料特性の検討

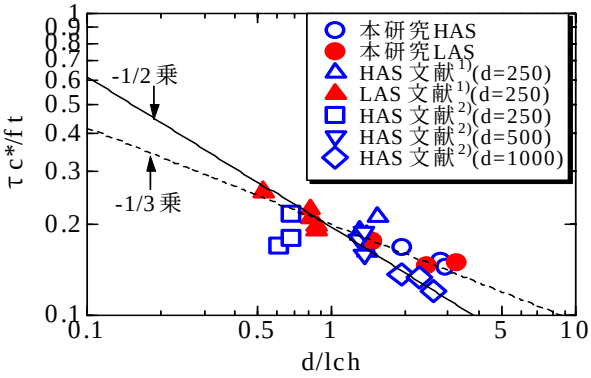
表-2 中の計算値は，藤田らの高収縮高強度コンクリートを対象とした式(5)に示すせん断強度算定式[2)]を用いた。**図-6** に実験値と計算値の比較を示す。

$$\tau_c = 180 f_c'^{-1/2} d^{-1/2} \left(100 p_s\right)^{1/3}\left(0.75+\frac{1.4}{a/d}\right) \quad (5)$$

ただし，80< f_c' ≤125　ここで，f_c' ；圧縮強度(N/mm^2)，d ；有効高さ(mm)，

p_s ；引張鉄筋比(%)，a/d ；せん断スパン比

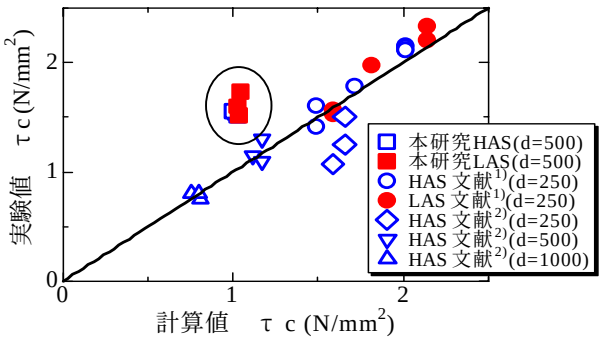
図-6 より，本研究データについてみると，収縮によらず実験値は，計算値より大きな値となっている(図中，円部分)。ここで，式(5)は引張強度，破壊エネルギー，ヤング係数といった材料特性を圧縮強度で一括回帰し，$f_c'^{-1/2}$ で評価している。しかし，高強度RCはりのせん断強度は，引張強度のばらつきの大きさ等から計算値に対する実験値の変動係数は大きいことが知られており[4)]，本研究のように，圧縮強度の-1/2 乗だけでは十分にせん断特性に及ぼすコンクリート材料特性の影響を評価しきれない可能性がある。そこで本研究では，破壊エネルギー・引張強度・ヤング係数といった材料特性をHAS, LAS毎に圧縮強度で回帰し，式(3)，(4)と組み合わせることで材料特性を考慮したせん断強度算定式を検討した。



図－5　寸法効果の検討

表－3　相関係数

相関係数			
	-1/4乗	-1/3乗	-1/2乗
HAS	0.69	0.75	0.78
LAS	0.91	0.96	0.93



図－6　実験値と計算値の比較

5.1 材料特性の回帰

(1) **破壊エネルギー**

図-7 に破壊エネルギーと圧縮強度関係を示す。

回帰には，土木学会標準示方書[9]（以下，示方書）の式(6)を参考にし，破壊エネルギーは圧縮強度の 1/3 乗に比例すると仮定し(式(7))回帰した。

$$G_f = 10 d_{\max}^{1/3} f_c^{1/3} \quad (6)$$

ただし， $f_c' \leq 80$ (N/mm^2)　$d_{\max}$ ；最大骨材寸法

$$G_f = \alpha_{G_f} f_c^{\beta_{G_f}} = \alpha_{G_f} f_c^{1/3} \quad (7)$$

回帰結果を以下に示す。($|r|$ ；相関係数)

$$HAS; G_f = 4.2 \times 10^{-2} f_c'^{1/3} \left(|r| = 0.18\right) \quad (8)$$

$$LAS; G_f = 0.48 \times 10^{-2} f_c'^{1/3} \left(|r| = 0.21\right) \quad (9)$$

HAS に比べ LAS は収縮による内部欠損が少ないため大きくなったものと考えられる。

(2) 引張強度

図-8 に引張強度と圧縮強度関係を示す.回帰には，示方書[9]の式(10)を参考にし，圧縮強度の 2/3 乗に比例すると仮定し(式(11))回帰した。

$$f_t = 0.23 f_c'^{2/3} \quad (10)$$

ただし， $f_c' \leq 80$ (N/mm^2)

$$f_t = \alpha_{f_t} f_c^{\beta_{f_t}} = \alpha_{f_t} f_c^{2/3} \quad (11)$$

文献[1) 2)]は，式(10)でおおよそ評価できるが，本研究データは式(10)と大きく異なっている。回帰結果を以下に示す.($|r|$ ；相関係数)

$$HAS; f_t = 0.29 f_c'^{2/3} \left(|r| = 0.29\right) \quad (12)$$

$$LAS; f_t = 0.31 f_c'^{2/3} \left(|r| = 0.19\right) \quad (13)$$

破壊エネルギー同様，HAS に比べ LAS は収縮による内部欠損が少ないため大きくなったものと考えられる。

(3) ヤング係数

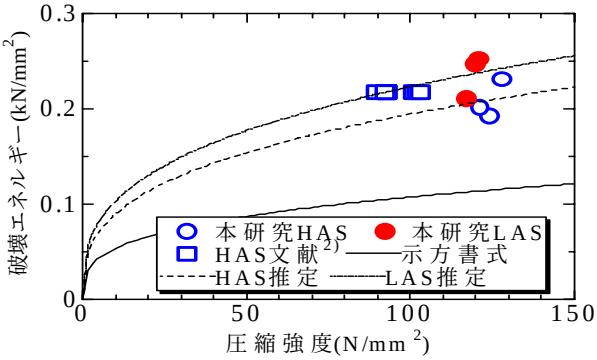
図-9 にコンクリートヤング係数と圧縮強度関係を示す。本研究データは，文献[1) 2)]と大きく異なっていることが分かる。回帰には高強度コンクリートを対象とした友澤式[10](式(14))を参考にし，ヤング係数は圧縮強度の 0.3 乗に比例すると仮定し(式(15))回帰を行なった。

$$Ec = 9.2\left(100 f_c'/9.8\right)^{0.3} \left(\gamma/1000\right)^2 9.8/100 \quad (14)$$

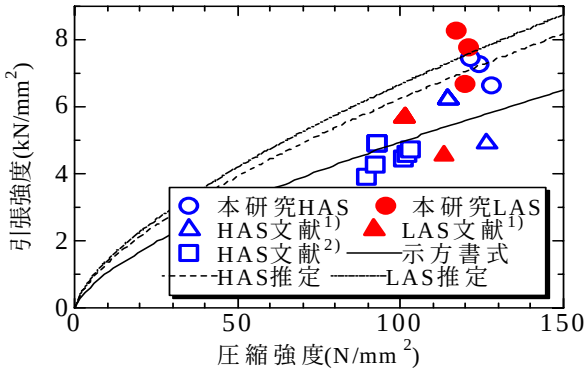
ここで,コンクリート密度 $\gamma = 2346$ (kg/m^3)[2)]とする。

$$Ec = \alpha_{EC} f_c^{\beta_{Ec}} = \alpha_{EC} f_c^{0.3} \quad (15)$$

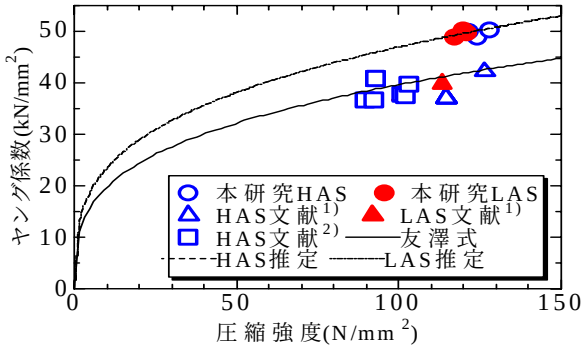
文献[1) 2)]は，式(14)で評価できるが，本研究データは式(14)と大きく異なっている。
回帰結果を以下に示す。($|r|$ ；相関係数)



図－7　破壊エネルギーの回帰



図－8　引張強度の回帰



図－9　ヤング係数の回帰

$$HAS; Ec = 11.7 f_c'^{0.3} \left(|r| = 0.42\right) \quad (16)$$

$$LAS; Ec = 11.8 f_c'^{0.3} \left(|r| = 0.47\right) \quad (17)$$

ヤング係数に対し，収縮の影響は認められない。

5.2 材料特性を考慮したせん断強度算定式

せん断強度における寸法効果については，前項で求めた結果である，HAS は-1/2 乗則，LAS は-1/3 乗則を用いた。

前項の破壊力学を用いた寸法効果回帰式(3),(4)に材料特性回帰式(8)，(9)，(12)，(13)，(16)，(17)を代入すると，

$$HAS; \tau_c^* = 4.65 f_c^{0.32} d^{-1/2} \quad (18)$$

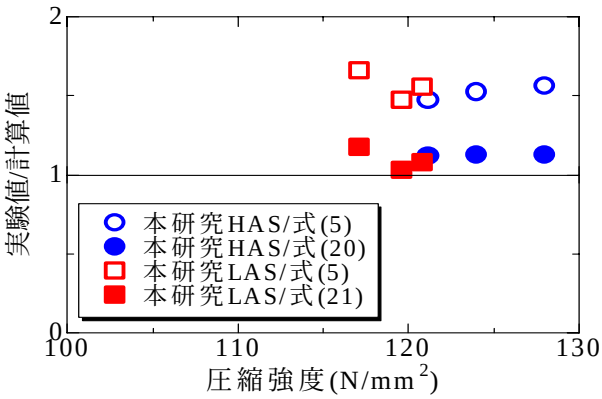
$$LAS; \tau_c^* = 1.12 f_c^{0.42} d^{-1/3} \quad (19)$$

となり，式(1)よりコンクリートの材料特性を考慮したせん断強度算定式は次のようになる。

$$HAS;\tau_c = 4.65 f_c^{0.32} d^{-1/2} (100 p_w)^{1/3} \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d}\right) \quad (20)$$

$$LAS;\tau_c = 1.12 f_c^{0.42} d^{-1/3} (100 p_w)^{1/3} \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d}\right) \quad (21)$$

式(20)，(21)を用いた実験値と計算値の比較を**図-10** に示す。式(5)では，計算値は実験値を約50%程度過小評価していたが，引張強度・破壊エネルギー・ヤング係数といった材料特性をそれぞれ回帰して取り込むことにより，近い値を示すようになった。よって，せん断強度算定精度向上のためには，圧縮強度以外の材料特性パラメータを盛り込む必要があると考えられる。また，今回は HAS と LAS で異なった式で評価しており収縮量をパラメータとした統一式で評価できるようにしたい。



図－10　実験値と計算値比較

6. まとめ

本研究により得られた結論を以下に示す。

(1)収縮がある場合は，斜めひび割れは 1 本に局所化し斜め引張破壊したのに対し，収縮がない場合は，斜めひび割れは 2 本に分散し鉄筋降伏後にせん断圧縮破壊に至った。収縮の影響は，破壊モードが変化する現象で認められた。

(2)収縮がない場合のせん断強度は，収縮がある場合に比較して，3 体平均で約 5%向上し，収縮の影響がみられた。

(3)せん断強度への寸法効果に対して破壊力学的観点から検討を行った結果，収縮を小さくすることによって，-1/2 乗則よりも-1/3 乗則の相関性が高くなる傾向がみられ，寸法効果が緩和される可能性があった。

(4)高強度 RC 部材のせん断強度算定式に，引張強度・破壊エネルギー・ヤング係数といった圧縮強度以外の材料特性を考慮することにより，推定精度向上を図ることができた。

参考文献

1)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

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)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

4) 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

5)(社)土木学会：2002 年版コンクリート標準示方書改訂資料，2002.3

6)二羽淳一郎ほか：せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度算定式の再評価，土木学会論文集，第 372 号/V-5，1986

7)Gustafsson，P.J. and Hillerborg，A.：Sensitivity in shear strength of Longitudinally Reinforced Concrete Beams to Fracture Energy of Concrete，ACI Structual Journal，May-June，pp.286-294，1988

8)（社）日本コンクリート工学協会：コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書，2001

9)（社）土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕

10)友澤史紀ほか：高強度・超高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する調査，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.497-498，1990