

論文 高強度 RC はりのせん断挙動に及ぼす体積変化の影響に関する検討

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、せん断挙動に及ぼす体積変化の影響を実験的に検討した。そして、収縮・膨張の影響を引張鉄筋比で表現し、破壊エネルギーの観点からせん断強度に及ぼす収縮の影響を検討した。その結果、圧縮鉄筋を有する RC において、収縮の有無によって構造挙動が異なり、斜めひび割れ発生荷重に明確な違いが見られた。また、収縮・膨張の影響を引張鉄筋比で考慮した結果、収縮・膨張に関わらず、高強度コンクリートの寸法効果を統一的に検討することができた。

キーワード：高強度コンクリート、体積変化、せん断挙動、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、圧縮強度が 100N/mm²を超える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。

高強度コンクリート(以下、HSC)は若材齢時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、鉄筋拘束により、コンクリートに大きな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部材において破壊モードやせん断強度に影響を及ぼす可能性を、筆者らが過去に行った有効高さ 500mm 程度までの実験で確認したが、収縮の有無ごとに分離して行っていた¹⁾。

そこで、本研究では収縮量の異なる 2 種類の HSC を用い、有効高さ 500mm のせん断補強筋なし RC はり載荷試験からせん断挙動に及ぼす収縮の影響を検討し、統一的な評価を試みた。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び供試体緒言

使用コンクリートは、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。

RC はりの供試体諸元を図-1 に示す。TypeA は圧縮鉄筋を有さず引張鉄筋に D19SD345 を用い、TypeB は圧縮・引張鉄筋に D22 総ねじ PC 鋼棒を用いた。各はり 2 種類の配合を使用して供試体を製作した。供試体名は Type-配合名-番号とする。供試体製作では、型枠の底面にテフロンシート、側面にビニールシートを 2 重に貼付し、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に、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及び湿布で覆い、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、引張鉄筋ひずみ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

*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) 事業開発本部開発課 (正会員)

*3 名古屋大学大学院 環境学研究科助教授 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)

拘束供試体を作製し、収縮ひずみを測定した。

2.2 荷重方法および計測項目

静的荷重試験は、2点集中荷重の単調荷重で行った。荷重試験中は、はり中央部のたわみ、ひび割れ性状等について計測及び観察を行った。

3. 実験結果および考察

荷重試験結果一覧を表-2に示す。

3.1 荷重直前の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。そして、荷重直前における引張鉄筋ひずみを表-2に示す。TypeAのHASは荷重直前において約 -480μ 収縮し、それにより引張鉄筋に平均 -266μ の圧縮ひずみが生じた。TypeBにおいてHASは荷重直前において約 -500μ 収縮し引張鉄筋に平均 -243μ の圧縮ひずみが生じた。一方LASは、荷重直前においてTypeAは引張鉄筋に平均 -25μ 、TypeBは平均 -4μ の圧縮ひずみが生じた。支点間中央での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はり下縁コンクリート応力はHASが約 $1.5\sim 2.0\text{N/mm}^2$ 、LASが $0\sim 0.3\text{N/mm}^2$ であった。

3.2 破壊形態とひび割れ性状

図-3に終局時でのひび割れ図の一例を示す。

TypeA-HASは斜めひび割れが1本に局所化したのに対し、TypeA-LASは斜めひび割れが2本に分散した。これらは他の同一Type供試体において、ほぼ同様の傾向であった。一方、TypeB-HASは斜めひび割れ発生時に圧縮鉄筋に沿って斜めひび割れが荷重点下に若干潜り込み、タイドアーチ機構に移行すると思われたが、荷重点外に突き抜けた。TypeB-LASも斜めひび割れ発生時は、TypeB-HASと同様に斜めひび割れが圧縮鉄筋に沿って荷重点下に潜り込んだ。そして、TypeB-LAS1はタイドアーチ機

表-1 コンクリート配合

TypeA					単位量(kg/m ³)							
記号	セメント	W/B (%)	SF/B (%)	s/a (%)	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

TypeB					単位量(kg/m ³)							
記号	セメント	W/B (%)	SF/B (%)	s/a (%)	W	C	S	G	SF	EX	SRA	SP
HAS	NC	23	10	45	155	607	731	894	67	0	0	12.1
LAS	LC	23	10	45.3	155	567	740	894	67	40	6	10.1

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:シリカフェーム EX:膨張材 SRA:収縮低減剤 SP:高性能AE減水剤

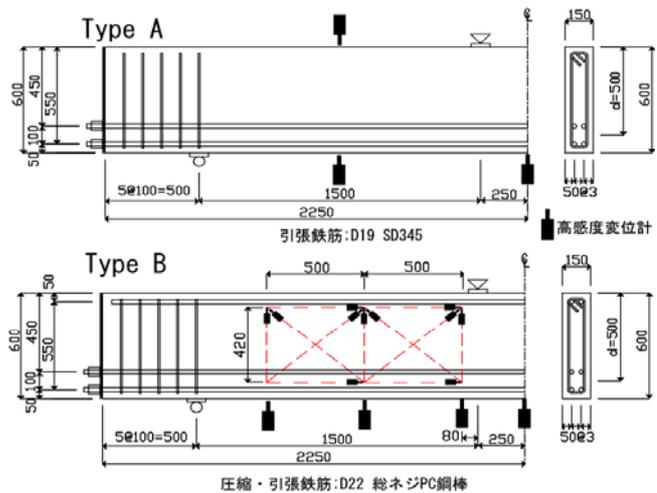


図-1 供試体図 (unit:mm)

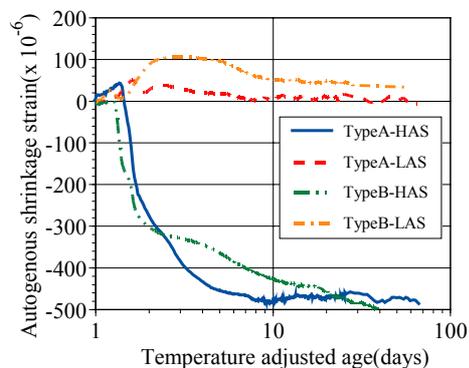


図-2 自己収縮ひずみ経時変化

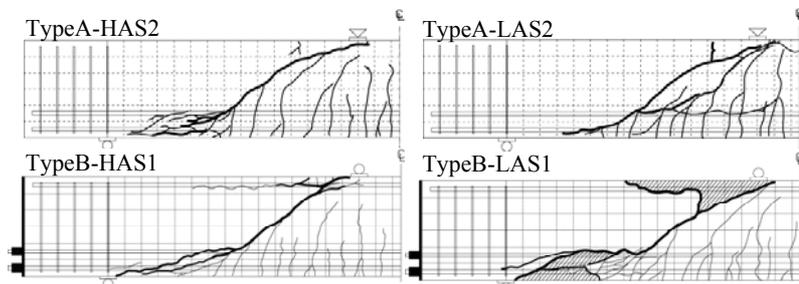


図-3 終局時ひび割れ図

構に移行した後、せん断圧縮破壊を起こし、TypeB-LAS2はTypeB-HASと同様にタイドアーチ機構を形成せずに荷重点外にひび割れが突き抜けた。以上のことより、収縮の有無によって、破壊形態が異なる可能性が見られた。

表-2 実験結果一覧

供試体名	引張鉄筋比	コンクリート					特性長さ	載荷前引張鉄筋ひずみ	実験結果				破壊モード
		圧縮強度	ヤング係数	引張強度	破壊エネルギー	破断長さ			斜めひび割れ発生時		終局時		
		ps	f _c '	E _c	f _t	G _c			l _{ch}	ε _{s,sh or ex}	V _{c,exp}	τ _{c,exp}	
%	N/mm ²	kN/mm ²	N/mm ²	N/mm	mm	μ	kN	N/mm ²	kN	N/mm ²			
TypeA HAS	HAS1	1.53	124	48.8	7.26	0.206	191	-260	116.0	1.55	116.0	1.55	斜め引張破壊
	HAS2	1.53	121	49.9	7.45	0.202	181	-274	114.0	1.52	114.0	1.52	斜め引張破壊
	HAS3	1.53	128	49.1	6.62	0.226	253	-264	113.3	1.51	126.5	1.69	斜め引張破壊
TypeA LAS	LAS1	1.53	120	49.8	6.27	0.247	313	-44	116.2	1.55	137.1	1.83	鉄筋降伏後せん断圧縮破壊
	LAS2	1.53	121	48.9	7.76	0.253	206	-6	120.1	1.60	135.2	1.80	鉄筋降伏後せん断圧縮破壊
	LAS3	1.53	117	49.8	8.26	0.237	173	-25	130.6	1.74	142.0	1.89	鉄筋降伏後せん断圧縮破壊
TypeB HAS	HAS1	2.06	115	47.6	6.70	0.216	229	-241	103.0	1.37	109.7	1.46	載荷点外突き抜け破壊
HAS2	2.06	115	47.6	6.70	0.216	229	-245	109.3	1.46	111.5	1.49	載荷点外突き抜け破壊	
TypeB LAS	LAS1	2.06	109	48.0	7.28	0.210	190	-1	125.7	1.68	242.0	3.23	せん断圧縮破壊
LAS2	2.06	109	48.0	7.28	0.210	190	-6	129.2	1.72	150.0	2.00	載荷点外突き抜け破壊	

3.3 せん断変位及び荷重-たわみ関係

TypeBにおいて、文献²⁾を参考に図-1のはり側面破線四角形部に変位計を取り付け、各辺の変位を計測しせん断変位を求めた。図-4に結果を示す。また、図-5に支間中央での荷重たわみ関係を示す。

図-5の荷重たわみ曲線、図-4のせん断変位及び図-1のせん断スパン中央付近に設置した鉛直方向の高感度変位計から求めた鉛直方向変位の3点から、測定値が明確に変化した荷重を本研究において斜めひび割れ発生荷重とした。そして、この時のせん断応力をせん断強度(τ_c)と呼ぶ。斜めひび割れ発生荷重を表-2に記す。また、図-4、図-5中のプロットは、前述した斜めひび割れ発生時を示している。

TypeAについて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て、LASはその後タイドアーチ的機構を形成し、引張鉄筋が降伏した後、等曲げ区間で圧縮破壊を生じた。次にTypeBの荷重たわみ関係を見ると明らかにHASとLASで挙動が異なることが分かる。前項に述べたように、TypeB-LAS1はタイドアーチ的機構を形成し荷重が大きく伸びたがTypeB-LAS2はタイドアーチ的機構を形成することはなく大きな荷重低下を伴って破壊した。

そして、自己収縮量の違いによる斜めひび割れ発生荷重を比較すると、TypeAは約7%倍の荷重の違いが、TypeBは約18%倍の荷重の違いが認められた。これは、載荷前の収縮によってコ

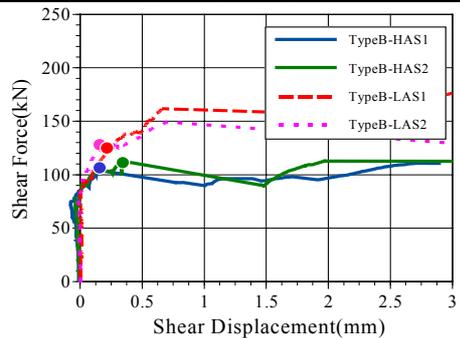


図-4 せん断力せん断変位関係

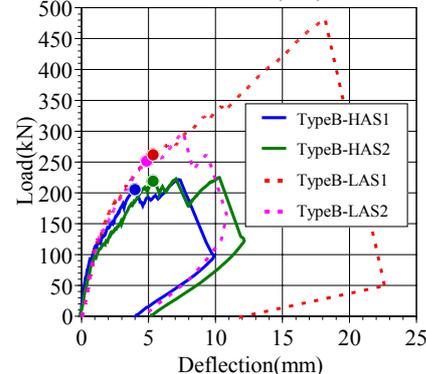
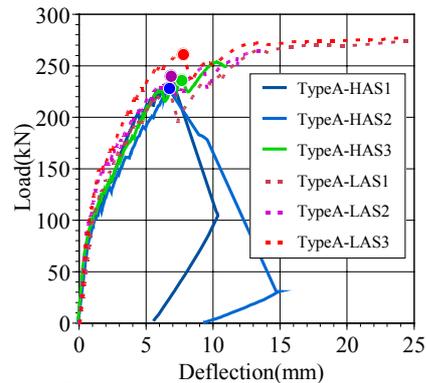


図-5 荷重たわみ関係

ンクリートに生じた引張応力が大きかったこと、及び圧縮鉄筋を配置するRCはりにおいて収縮がある場合、圧縮鉄筋がないRCはりに比べ中立軸深さが浅くなり、せん断抵抗要素である圧縮側コンクリートの抵抗負担が小さくなったこと

が一因と考えられる。

4. 実験値と計算値のせん断耐力比較検討

実験値と計算値のせん断耐力を比較する際、計算値には、藤田らの高収縮高強度コンクリートを対象とした式(1)³⁾を用いた。

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

ただし、 $80 < f_c' \leq 125$ ここで、 f_c' ; 圧縮強度 (N/mm²), d ; 有効高さ(mm), p_s ; 引張鉄筋比(%), a/d ; せん断スパン比, b ; はり幅(mm)

式(1)は高収縮高強度コンクリートを対照とし、本研究のLASには適応できない。自己収縮が無視しえない場合、載荷直前までに引張鉄筋は圧縮されている。曲げひび割れが発生すると、その圧縮応力が開放され、同一の荷重であっても鉄筋ひずみの変化量は大きくなるため、曲げひび割れ幅は大きくなり、骨材の噛み合い効果は低下することが考えられる。これは、引張鉄筋比が小さくなることと等価であると考え、式(1)が収縮・膨張の両方に適応できるようにするため、式(2)を用いて収縮・膨張の影響を引張鉄筋比で表現することとした。概念図を図-6に示す。

$$p_s^* = \frac{\epsilon_{s,load}}{\epsilon_{s,load} - \epsilon_{s0,sh or ex}} p_s \quad (2)$$

p_s^* ; 有効引張鉄筋比(%), $\epsilon_{s,load}$; 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のせん断スパン中央の鉄筋ひずみの変化量, $\epsilon_{s0,sh or ex}$; 引張鉄筋位置コンクリート応力ゼロ状態の時の引張鉄筋ひずみ

式(1), (2)より、収縮・膨張を考慮したせん断耐力算定式は式(3)のようになる。

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

筆者らがこれまでに行った有効高さ 250mm程度の実験データ⁴⁾を追加し、実験値と計算値の比較を行った。図-7 は式(1)による実験値と計算値の比較結果を、図-8 は式(3)を用いた計算値と実験値の比較結果を示す。また凡例中の d は有効高さを指す。

図-7 より、本研究供試体で HAS, LAS とともに実験値と計算値は大きく異なることが分かる。

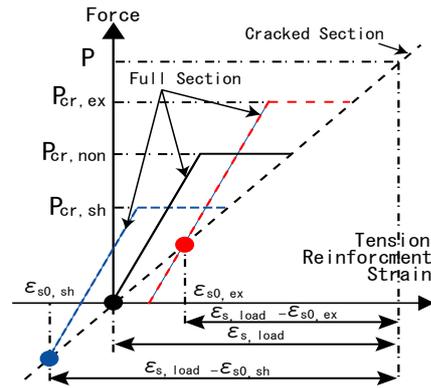


図-6 有効鉄筋比の概念図

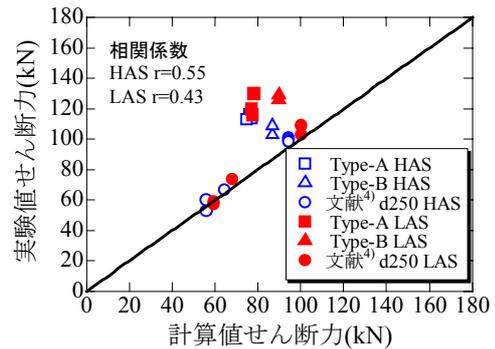


図-7 実験値と式(1)の比較

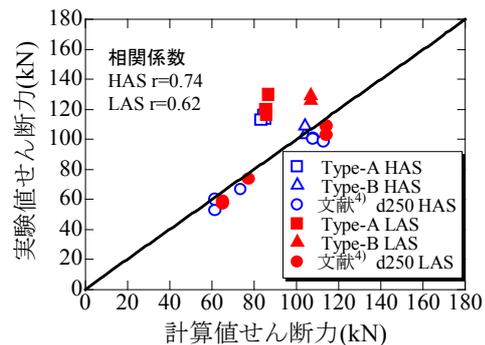


図-8 実験値と式(3)の比較

表-3 材料特性

	圧縮強度	引張強度	ヤング係数	破壊エネルギー
	N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²	N/mm
藤田ら	96	4.60	39.1	0.218
本研究HAS	121	6.95	48.6	0.213
本研究LAS	115	7.37	48.9	0.247

また、図-8 についても、LAS はわずかに改善したが、本研究供試体で HAS・LAS とともに実験値と計算値は大きく異なることが分かる。

式(1)は、破壊力学的観点から寸法効果の検討を行い、引張強度や破壊エネルギーといった材料特性を圧縮強度で一括回帰し導出されている。表-3 に藤田ら³⁾と本研究でのコンクリート材料特性を示す。表-3・既報¹⁾で示したように、藤田らと筆者らが用いたコンクリート材料特性は大きく異なり、高強度RCはりのせん断強度は、

引張強度のばらつき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いる⁵⁾。従って、実験値と計算値の大きな差はコンクリート材料特性の違いによるものと考えられる。そこで、次節で藤田ら³⁾と同様の手法を用いてコンクリート材料特性の違いを考慮し、寸法とせん断強度の関係から再検討を行った。

5. 寸法とせん断強度の関係

筆者らが過去に行った有効高さ 250mm程度の実験データ⁴⁾と文献³⁾のデータを追加した。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⁶⁾。それらの影響を式(4)により排除した³⁾。

$$\tau_c^* = (V_c/bd) / \left[(100p_s)^{1/3} \{0.75 + 1.4/(a/d)\} \right] \quad (4)$$

p_s ; 引張鉄筋比(%), a/d ; せん断スパン比

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を用いて式(1)を導出している。本研究でも、同様の手法を用いて検討を行うこととした。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(5)によって求めた。

$$l_{ch} = 1000E_c \cdot G_f / f_t^2 \quad (5)$$

G_f ; 破壊エネルギー(N/mm), E_c ; ヤング係数(kN/mm²), f_t ; 引張強度(N/mm²)

有効高さ 250mm程度の実験⁴⁾において破壊エネルギー試験を行っていないため、筆者らが行った試験結果(各 8 体)の平均値(HAS:0.213N/mm LAS:0.247N/mm)を用いて検討を行った。

τ_c^*/f_t と d/l_{ch} の関係を図-9、図-10に示す。図-9は、式(4)中の引張鉄筋比に実験値を用いた場合を示し、図-10は、式(4)中の引張鉄筋比に有効鉄筋比を用い収縮・膨張の影響を考慮したものである。そして、寸法効果の検討のため、工学的に扱いやすい様に τ_c^*/f_t は d/l_{ch} の-1/4乗、-1/3乗、-1/2乗に比例すると仮定して回帰した。

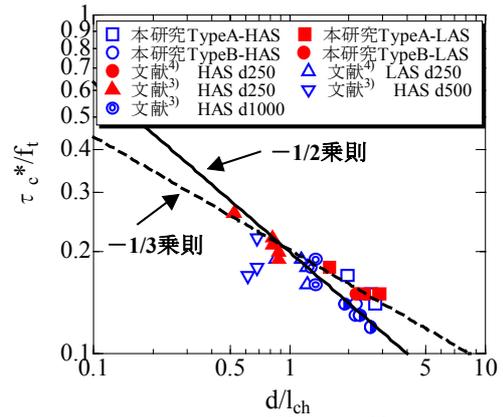


図-9 寸法効果の検討

(収縮・膨張の影響の考慮なし)

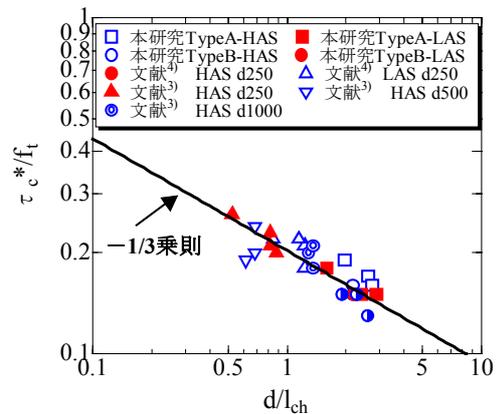


図-10 寸法効果の検討

(収縮・膨張の影響を考慮)

表-4 相関係数

収縮・膨張の影響の考慮なし			
相関係数	-1/2乗則	-1/3乗則	-1/4乗則
HAS	0.830	0.827	0.768
LAS	0.937	0.968	0.908

収縮・膨張の影響の考慮あり			
相関係数	-1/2乗則	-1/3乗則	-1/4乗則
HAS LAS	0.862	0.867	0.807

相関係数を表-4に記す。なお、図中の回帰曲線は最も相関係数が高かった回帰曲線である。

図-9より収縮・膨張の影響を考慮しない場合、相関係数からHASは-1/2乗則にLASは-1/3乗則の傾向にあった。しかしHASの-1/2、-1/3乗の相関係数に差はほとんど無く、寸法効果が-1/2乗と-1/3乗の間にある可能性があり、今後の検討課題である。一方、図-10より収縮・膨張の影響を考慮した場合、高強度コンクリートの寸法効果は、-1/3乗則に従う傾向が見られ、統一的に検討が可能となった。従って、収縮が寸法効果を見かけ上きつくさせていると考えられる。図

－10の収縮・膨張の影響を考慮した回帰曲線は、式(6)のようになった。

$$\tau_c * / f_t = 0.202 (d/l_{ch})^{-1/3} \quad (6)$$

式(6)に実験でのコンクリート材料特性値を代入し、収縮・膨張の影響を考慮した有効鉄筋比を用いた計算値の再検証を行った。図-11に実験値と計算値の比較結果を示す。収縮・膨張によらず統一的に計算値が適切に実験値を評価できていると言える。しかし、データ数は十分とは言えず、今後更なる検証を行う必要がある。

6. 結論

本研究により得られた結論を以下に示す。

- (1) 自己収縮の有無により斜めひび割れ発生荷重は異なり、圧縮鉄筋を有しない場合は約7%、圧縮鉄筋を有する場合は、収縮の有無によってRCはり構造挙動が大きく異なり、約18%と大きく異なった。
- (2) 収縮のある場合は斜め引張破壊に、収縮のない場合は、せん断圧縮破壊または載荷点外に斜めひび割れが付き抜ける破壊に至り、破壊モードに収縮が影響を及ぼす可能性がみられた。
- (3) 収縮・膨張の影響を引張鉄筋比で考慮し、寸法効果を検討した結果、高強度コンクリートRCはりの寸法効果は収縮・膨張によらず統一的に有効高さの-1/3乗則に従う傾向が得られた。そして、寸法効果検討結果とコンクリート材料特性を組合せたせん断強度算定式は収縮・膨張によらず精度良くせん断強度を算定した。

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」(課題番号：16360220、研究代表者：佐藤良一)により実施したものであり感謝の意を表す。

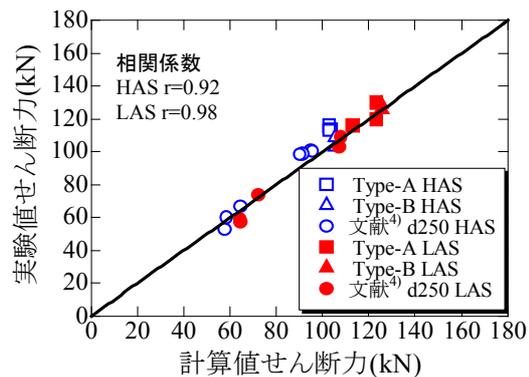


図-11 実験値と計算値の比較

参考文献

- 1) 牛尾亮太ほか、せん断補強筋のない高強度RCはりのせん断特性に及ぼす収縮の影響、コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.847-853, 2005.6
- 2) 前田匡樹ほか、鉄筋コンクリート梁部材の変形評価法に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.2, pp.861-866, 1997.6
- 3) 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
- 4) 伊藤友司ほか、高強度コンクリートを用いたRCはり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
- 5) 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
- 6) (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
- 7) Gustafsson, P.J. and Hillerborg, A.: Sensitivity in shear strength of Longitudinally Reinforced Concrete Beams to Fracture Energy of Concrete, ACI Structural Journal, May-June, pp.286-294, 1988, No.5, pp.32-100, Sep./Oct.1980
- 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