

論文 合成短繊維ならびに収縮低減剤を用いた高品質軽量コンクリートはり部材のせん断耐力

大滝 晶生^{*1}・河野 克哉^{*2}・二羽 淳一郎^{*3}

要旨：内部に独立空隙を有する低吸水性の高品質軽量骨材を用いることで、軽量かつ高強度なコンクリートが製造できるものの、自己収縮の増大や脆性的な破壊を生じやすく、これらの材料的性質が RC はりのせん断特性に与える影響も大きいと推察される。本研究では、合成短繊維ならびに収縮低減剤を用いた高品質軽量骨材コンクリートにおいて RC はりのせん断試験を行った。その結果、合成短繊維と収縮低減剤の併用によりせん断耐力が向上することを確認した。また、はりの寸法効果は従来通りの算定式で評価できることがわかった。

キーワード：高品質軽量骨材，自己収縮，合成繊維，収縮低減剤，せん断耐力，有効高さ

1. はじめに

近年、従来の膨張頁岩系の非造粒型軽量骨材に比べて吸水率がきわめて小さい独立空隙型の造粒型軽量骨材が開発されている。この種の軽量骨材は、吸水特性の改善によりコンクリートの施工性ならびに耐久性が向上できるうえ、骨材自体の強度も高いために、高性能 AE 減水剤等と併用し、低水結合材比とすることでコンクリートを高強度化できるという特長がある。しかし、これまで筆者らは、このような軽量骨材を用いた高強度コンクリートにおいて、自己収縮の増大、脆性的な破壊挙動などが生じやすいことを明らかにしている^{1), 2)}。また、これらの性能改善に対して、短繊維や混和材料の使用を検討するとともに³⁾、高品質軽量骨材を用いた RC はりの力学特性に与える自己収縮の影響を検討してきた⁴⁾。その結果、高品質軽量骨材を用いた高強度コンクリートはりのせん断耐力には自己収縮が大きく関与すること、合成短繊維とともに有機系収縮低減剤や早強型膨張材などの混和材料を併用することでコンクリートの破壊特性を大幅に改善できることなどがわかった。

本研究では高品質軽量骨材を用いた高強度コンクリート RC はりのせん断耐力に着目して、合

成短繊維と収縮低減剤の併用による耐力向上を確認するとともに、このようなコンクリートを用いた RC はりの寸法効果について検討した。

2. 試験概要

2.1 使用材料

使用した材料を表-1に示す。結合材には早強セメントとシリカフュームを用いた。細骨材には小櫃産陸砂を、粗骨材には新しく開発された中国製の高品質軽量骨材(以下、NL)を用いた。また、短繊維は軽量性を考慮して合成樹脂のポリプロピレン繊維(以下、PP)を使用した。なお、混和剤には高性能 AE 減水剤および AE 剤を用い、コンクリートに生じる自己収縮を低減させるために有機系の収縮低減剤(以下、TG)を使用した。

2.2 配合

配合条件を表-2に示す。すべての配合において単位水量を 165kg/m^3 とし、W/B が 22% の低水結合材比コンクリートとした。シリカフュームは全結合材量に対して内割で 10% 置換した。短繊維はコンクリート体積に対して外割で混入する形で 0~2% の範囲で 3 水準、収縮低減剤は水量の一部に置換する形で 0~6 kg/m^3 の範囲で 2 水準、計 6 つの配合を試験水準とした。以下、

*1 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 太平洋セメント株式会社 中央研究所 修(工) (正会員)

*3 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表－1 使用材料

材料	種類	記号	物性または成分
結合材 (B)	早強セメント	C	密度 3.14g/cm ³ , 比表面積 4490cm ² /g
	シリカフェーム	SF	密度 2.22g/cm ³ , 比表面積 200000cm ² /g
細骨材	小櫃産陸砂	S	表乾密度 2.64kg/ℓ, 吸水率 1.77%, 粗粒率 2.59
粗骨材 (G)	高品質軽量骨材	NL	絶乾密度 1.17kg/ℓ, 24 時間吸水率 ^{※1} 1.99%, 煮沸吸水率 ^{※2} 4.40%, 中国製最大寸法 15mm, 粗粒率 6.48, 黄河流域堆積粘土(黄土), 造粒型
短繊維	ポリプロピレン繊維	PP	波型, 繊維長 30mm, アスペクト比 54.2, 密度 0.91kg/ℓ 引張強度 465N/mm ² , 弾性係数 15kN/mm ²
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系, 密度 1.07g/cm ³
	AE 剤	AE	変性アルキルカルボン酸系, 密度 1.02g/cm ³
	収縮低減剤	TG	低級アルコールのアルキレンオキシド付加物, 密度 1.00g/cm ³

※1 骨材を 24 時間静水に浸漬して表乾状態にした時の含水率, ※2 骨材を 2 時間煮沸して表乾状態にした時の含水率

表－2 コンクリート配合

配合名 (記号)	配合条件									フレッシュ性状				
	W/B (%)	s/a (%)	PP ^{※3} (vol.%)	単位量(kg/m ³)						スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)		
				W	TG	B		S	G (ℓ/m ³)				SP	AE
				C	SF									
PP0TG0	22	46.1	0.0	165	0	675	75	656	300	8.25	0.038	23.5	3.8	1938
PP0TG6			0.0	159	6					8.25		23.0	4.0	1950
PP1TG0			1.0	165	0					9.00		23.0	4.5	1918
PP1TG6			1.0	159	6					9.00		22.0	3.2	1930
PP2TG0			2.0	165	0					9.38		18.5	5.0	1915
PP2TG6			2.0	159	6					9.38		19.0	4.8	1943

※3 コンクリート体積に対する短繊維の外割体積比率

これらの配合は表－2 中に示した記号にて表記する。

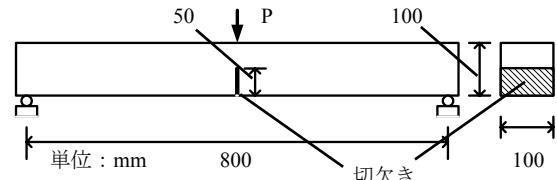
2.3 コンクリートの力学特性の測定方法

(1) 圧縮強度, 引張強度および静弾性係数

圧縮強度および引張強度は, それぞれ JIS A 1108 および JIS A 1113 に, 静弾性係数は JIS A 1149 に準じて測定した。

(2) 自己収縮の測定

自己収縮ひずみは, JCI 規格(案) JCI-SAS2-2 に準じて測定した。すなわち, 供試体は打込み時から材齢 14 日まで水分の逸散ならびに浸入がない状態で密閉した。凝結の始発から, 供試体中央部のシリコン樹脂で被覆した低弾性型埋込みひずみゲージ(弾性係数 1.5N/mm², ゲージ長 67mm)にて測長した。なお, 供試体中央部の熱電対にて, 水和による温度変化を測定し, コンクリートの線膨張係数を 10×10⁻⁶/°C と仮定して長さを補正した。



図－1 RILEMの3点曲げ試験概要図

(3) 破壊エネルギーの測定

破壊エネルギー G_F は, 図－1 に示すように RILEM が推奨する切欠きはりの 3 点曲げ試験を行い, 以下の式により算出した。

$$G_F = (W_0 + mg \cdot \delta_0) / A_{lig} \quad (1)$$

ここで, W_0 : 荷重-たわみ曲線下の面積(m²),
 m : 支点間のはり供試体質量(kg), g : 重力加速度(m/s²),
 δ_0 : 終局時のたわみ(m), A_{lig} : リガメント部の面積(m²)

なお, 短繊維を混入した配合では, 最終的に破断しなかったため, たわみが 20mm に到達した時点で破壊したものと仮定した。供試体は材齢 1 日で脱型後, ポリ塩化ビニリデン系フィルムで密封した状態で材齢 14 日まで養生した。

表-3 はり試験体の断面緒元および荷条件

試験体 記号	全長 L (mm)	高さ h (mm)	幅 b (mm)	せん断スパン a (mm)	有効高さ d (mm)	a/d	引張側軸方向鉄筋		組立鉄筋 鉄筋種類	せん断補強筋 鉄筋種類
							鉄筋種類	鉄筋比 p _w (%)		
-100	900	125	75	350	100	3.5	D13	3.38	D6	D6
-200	1800	250	150	700	200		D25		D6	D6
-300	2700	375	225	1050	300		D38		D10	D10

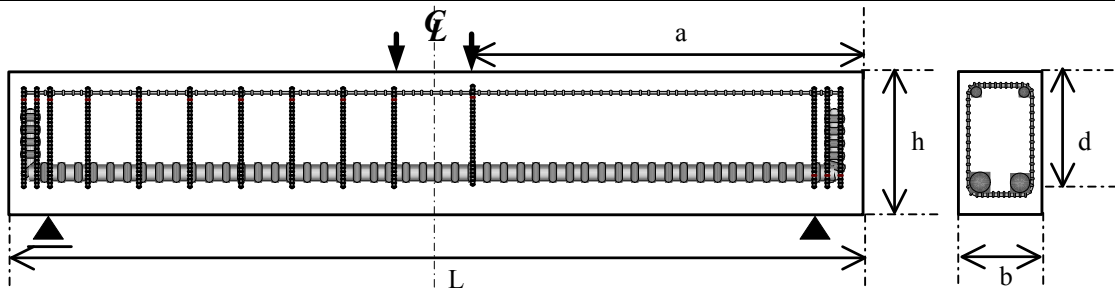


図-2 RC はり試験体

2.4 RC はりの荷試験方法

RC はり供試体の概要を表-3 ならびに図-2 に示す。有効高さを 100, 200 および 300mm の 3 水準で変化させ、いずれの供試体もせん断スパン有効高さ比 $a/d=3.5$ とし、軸方向鉄筋比 p_w が 3.38% となるように引張側の軸方向鉄筋に異形鉄筋(D13 SD345, D25 SD345 または D38 SD345, いずれも降伏強度 379N/mm^2) を 2 本配置した。また、せん断破壊を生じるスパンを限定するために、せん断補強筋(D6 SD295A または D10 SD295A, どちらも降伏強度 325N/mm^2) を片側のスパンのみに 50, 100, 150mm ピッチで、また、圧縮側に組立鉄筋(D6 SD295 または D10 SD295, どちらも降伏強度 325N/mm^2) を配置した。はり供試体はポリ塩化ビニリデン系のフィルムで密封し、主鉄筋に貼り付けたポリエステル箔ひずみゲージにて、荷試験に供する材齢 14 日までに生じるひずみを継続的に測定した。荷試験は、耐圧試験機にて静的 2 点荷を行った。

3. 結果および考察

3.1 コンクリートの力学特性

(1) 強度特性

表-4 は各配合の圧縮強度、引張強度、弾性係数および脆度係数を示したものであり、いずれも高い圧縮強度を有する軽量コンクリートとなっている。また、短繊維の混入率が増加するほど f_c'

が減少する傾向、同一の短繊維混入率では TG を添加することで f_c' が増加する傾向などが認められる。短繊維混入率の増加ならびに TG の添加によって脆度係数が低下しており、コンクリートの靱性がいくぶん向上している。

(2) 自己収縮特性

各コンクリートに生じた自己収縮ひずみの経時変化を図-3 に示す。この図より、TG を用いていない配合では、材齢 14 日でも 450×10^{-6} 程度の自己収縮ひずみが生じたのに対し、TG を用いた配合では 300×10^{-6} 程度であり、約 35% の収縮低減効果が認められた。また、PP を混入した場合と PP が無混入の場合を比較すると自己収縮の経時変化にほとんど差がなく、短繊維が収縮に与える影響は小さいことがわかった。

(3) 破壊力学特性

実測した各配合の破壊エネルギー G_F において圧縮強度の影響を考慮するため、次式⁵⁾によって補正し、 G_{F0} として評価した。

$$G_{F0} = G_F / (f_c' / f_{cm0})^{0.7} \quad (2)$$

ここで G_F : 破壊エネルギー(N/m), f_c' : 圧縮強度(N/mm²), f_{cm0} : 定数(10N/mm²)

各コンクリートの G_{F0} の値を表-4 に示す。NL を用いたコンクリートの G_{F0} は PP を無混入とした場合、15N/m 程度であり、普通コンクリートの値が 50N/m 程度であることを考えると、破壊エネルギーが非常に小さく脆的な破壊挙

表-4 コンクリートの強度特性

配合名	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	引張強度 f_t (N/mm ²)	弾性係数 E_c (kN/mm ²)	脆度係数 (f'_c/f_t)	補正された破壊エネルギー G_{F0} (N/m)
PP0TG0	77.6	3.71	28.9	20.9	15.1
PP0TG6	83.1	4.10	30.4	20.3	16.9
PP1TG0	67.5	3.37	25.0	20.0	456.5
PP1TG6	77.2	3.91	28.7	19.8	686.0
PP2TG0	62.4	3.22	25.5	19.4	959.3
PP2TG6	74.0	3.86	28.4	19.2	1097.9

動を示すことがわかる。しかし、短繊維を混入することで NL を用いたコンクリートの破壊エネルギーは大幅に改善された。また、TG を添加した配合では、TG を無添加とした配合に比べて G_{F0} が増加した。特に PP と TG を併用した場合には、その効果が大きく現れた。これは、TG による自己収縮低減作用が、短繊維と母材マトリクスとの付着の改善に寄与し、短繊維の架橋効果が向上したためではないかと考える。

3.2 RC はりのせん断特性

RC はりのせん断載荷試験より得られた結果ならびにせん断耐力の算定式により算出した計算値を表-5 に示す。いずれのはり供試体も破壊形式は斜め引張破壊であった。ここで、表中の P_{cal} は、せん断補強筋のない普通 RC はりのせん断耐力算定式を基本に舟橋らが提案した、軽量コンクリートはりのせん断耐力算定式⁶⁾から求めたものである。

$$V_c = \eta_s 0.2 f'_c{}^{1/3} p_w{}^{1/3} (10^3/d)^{1/4} (0.75 + 1.4d/a) b_w d \quad (3)$$

ここで、 η_s : $(\rho/2.3)^{3/2}$, ρ : コンクリート密度(t/m³), p_w : 軸方向鉄筋比(%), d : 有効高さ(mm), a : せん断スパン(mm), b_w : 幅(mm)

短繊維を混入していない配合では、いずれもせん断耐力の実験値(以下、 P_u)が計算値(以下、 P_{cal})の7~8割程度になったのに対して、PP を混入した配合では、表-4 に示したコンクリートの破壊エネルギーに向上効果が確認されたように、RC はりに生じた斜めひび割れ面において短繊維が架橋することによりせん断耐力が向上して、 P_u が P_{cal} を上回り、PP を 2% 混入した場合は P_u が P_{cal} の 1.6~1.9 倍程度となった。また、TG を使用した配合では、TG を使用していない

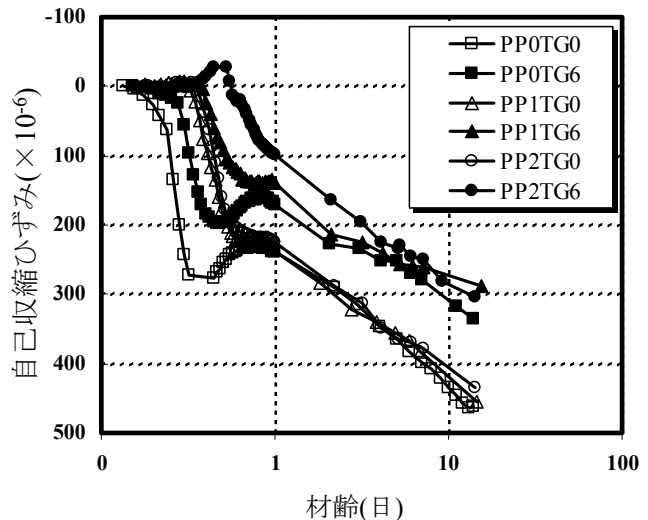


図-3 コンクリートの自己収縮

配合に比べてせん断耐力が向上する傾向が見られた。これは TG を使用することで図-3 に示したようにコンクリートに生じる自己収縮が低減し、RC はりにおいても表-5 に示すように養生中の主鉄筋のひずみ(鉄筋の初期ひずみ)が小さくなったことに起因するものと考えられる。すなわち、TG を使用することで自己収縮が低減されたはり供試体では、載荷以前に鉄筋の拘束によってコンクリート自体に生じる引張応力が小さくなるため、はりのせん断耐力の向上に寄与したものと考えられる。特に PP と TG を併用した配合では、鉄筋拘束を受けたコンクリートに生じる初期引張応力の低減に加えて、母材マトリクスの自己収縮の低減が短繊維との付着を改善し、斜めひび割れ面で架橋した短繊維を抜け出しにくくする³⁾ことで、RC はりのせん断耐力向上に寄与したものと考える。

図-4 は配合 PP2TG0 ならびに PP2TG6 のコンクリートにて有効高さを 100~300mm に変化させた RC はりの荷重-たわみ曲線を示したもの

表-5 RC はりの載荷試験結果

配合名	有効高さ d (mm)	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	終局荷重 P_u (kN)	計算値 $P_{cal}=2 \times V_c$ (kN)	P_u/P_{cal}	主鉄筋に生じた 自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)	曲げひび割れ 発生荷重 P_{cr} (kN)
PP0TG0	100	76.4	26.2	31.3	0.84	127	5.6
	200	78.8	77.6	105.5	0.74	148	21.8
	300	76.4	146.3	213.8	0.68	121	33.3
PP0TG6	100	82.4	27.4	34.5	0.79	83	6.9
	200	83.9	86.1	115.2	0.75	58	25.5
	300	82.4	166.0	236.1	0.70	70	41.8
PP1TG0	100	65.9	27.0	27.1	1.00	138	5.9
	200	69.0	105.4	93.3	1.13	133	12.4
	300	65.9	230.3	185.3	1.24	126	42.5
PP1TG6	100	81.4	42.2	32.7	1.29	91	8.3
	200	73.0	134.3	101.6	1.32	81	22.6
	300	81.4	282.9	223.4	1.27	85	50.6
PP2TG0	100	61.9	48.4	27.0	1.79	138	7.7
	200	62.9	140.2	90.5	1.55	128	16.1
	300	61.9	303.8	184.4	1.65	97	40.8
PP2TG6	100	73.7	50.1	31.4	1.60	67	11.1
	200	74.3	197.2	106.2	1.86	66	28.5
	300	73.7	405.4	214.5	1.89	76	59.5

である。この図から、いずれの有効高さにおいても RC はりの耐力は、PP のみ混入した場合よりも PP と TG を併用した場合の方が大きくなっており、有効高さが増加するほど耐力の向上効果も明確になった。また、PP と TG の併用によって、表-5 に示すように曲げひび割れ発生荷重の増大、さらに図-4 に示すように曲げひび割れ発生後の RC はりの剛性の向上が確認できる。

図-5 は PP 混入率を 0, 1 および 2% とした RC はりのせん断強度 v_c と有効高さ d の関係を示したものである。これより、いずれの配合も d の増加に伴い、 v_c が低下し、寸法効果の存在が確認できる。図-6 は(3)式において d の影響を表現する $(10^3/d)^{1/4}$ の項で図-5 中の v_c を除いた値をまとめたものである。配合によっては多少ばらつきが見られるものの、いずれの配合においても $v_c/(10^3/d)^{1/4}$ の値は d の変化に依存せずほぼ一定となっており、寸法効果はおおむね $(10^3/d)^{1/4}$ の項で評価できることがわかった。TG によって自己収縮を低減させた場合の寸法効果も本研究で実施した d の範囲であれば従来どおり評価できる結果となった。ここで、図-5 中

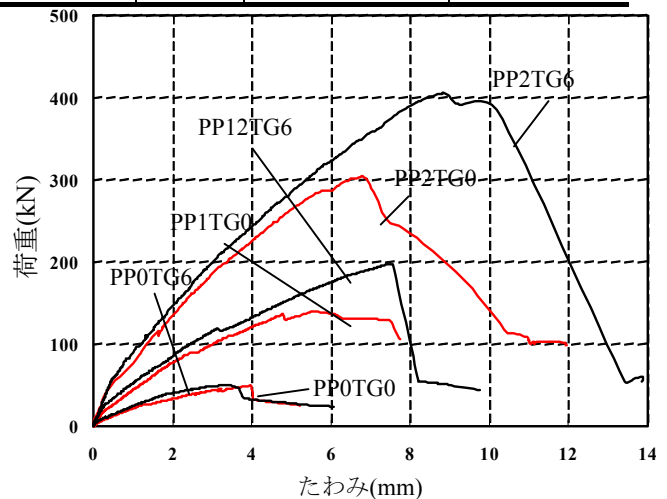


図-4 荷重-たわみ曲線

に示した曲線(A)はせん断補強筋のない普通 RC はりのせん断耐力算定式⁷⁾から算出したせん断強度(以下、 v_{cn})、曲線(B)は(3)式から算出したせん断強度(以下、 v_{cl})を示している。PP の混入率が 0% の場合、実験値 v_c はいずれの計算値 v_{cn} ならびに v_{cl} よりも下回っている。(3)式による v_{cl} は軽量コンクリートを用いた場合の耐力をコンクリート密度にもとづいて低減したものであるが(本研究における低減率は約 0.75)、評価に用いられた RC はりの f'_c は高々 40N/mm^2 程度である。このため本研究のような高強度コンクリートには適用できず、その低減率は TG 無添加の場合に

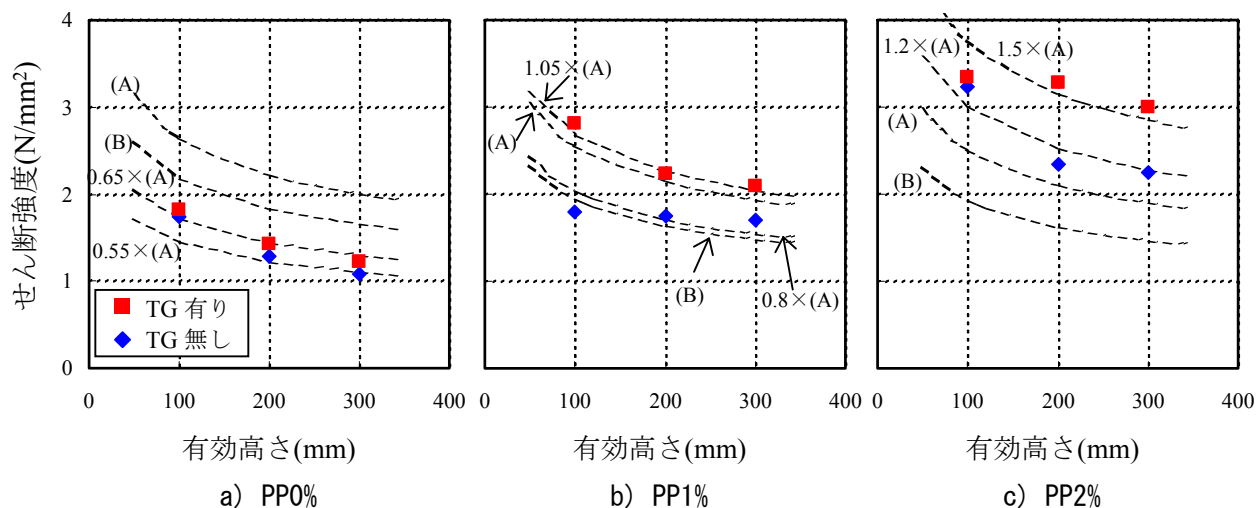


図-5 v_c-d の関係

0.55 程度, TG 添加の場合に 0.65 程度とすることが適当と思われる。また, PP 混入率が 1%ならびに 2%の場合, この低減率はおおよそ図-5 中に示した値となり, PP および収縮低減剤の効果, それらの併用効果などを考慮することでせん断強度評価式が構築できるものとする。

4. まとめ

本研究により得られた結論を以下に示す。

- 1) 収縮低減剤を用いることで, 高品質軽量骨材コンクリートの自己収縮が低減し, また同時に合成短繊維を併用することで破壊エネルギーが向上する。
- 2) 収縮低減剤と合成短繊維の併用により, それぞれを単独で用いた場合よりも RC はりのせん断耐力が大幅に増大する。
- 3) 従来の軽量コンクリートに対するせん断耐力評価式を適用する場合, 高強度コンクリートに対して, 耐力の低減率を見直す必要がある。また, 耐力に対する寸法効果は収縮低減剤や合成短繊維を使用した場合でも従来式でおおむね評価できる。

謝辞

本研究の実施に当たり, 伊藤忠商事社, 太平洋マテリアル社, ならびにポゾリス物産社からコンクリート材料を提供頂きました。ここに記して深謝致します。

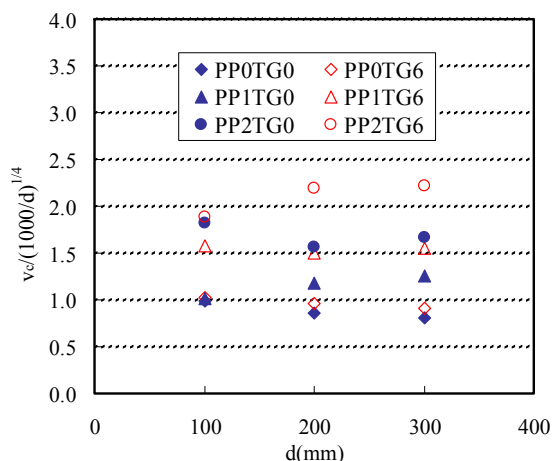


図-6 せん断強度における有効高さの影響

参考文献

- 1) 河野克哉ほか: 超軽量骨材を用いたコンクリートの自己収縮ならびに乾燥収縮, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.43-48, 1998.6
- 2) 木場美子ほか: 超軽量人工軽量骨材を用いたコンクリートの破壊力学特性値に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.49-54, 2001.6
- 3) 河野克哉ほか: 混和材料と合成繊維を併用した高強度軽量骨材コンクリートの破壊力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1369-1374, 2005.6
- 4) 大滝晶生ほか: 高品質軽量骨材を用いた RC はりの力学特性におよぼす自己収縮の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1459-1464, 2005.6
- 5) CEB: CEB-FIP Model code 1990, Bulletin d'Information, No.213/214, pp.33-43, 1993
- 6) 舟橋政司ほか: 高性能軽量コンクリートを用いた RC 部材のせん断耐力評価手法, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.211-226, 2004.8
- 7) 二羽淳一郎ほか: せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.167-176, 1986.8