広島大学	学生会員	〇川井菜緒	笹田航平	宮本和也
広島大学	正会員	半井健一郎	3 小川由有	币子
広島大学	フェロー会員	佐藤良一		

1. はじめに

近年,コンクリートの過大な収縮により構造物 に生じるひび割れが問題となっている。コンクリ ートの収縮は,骨材の岩種によっても大きく変動 し^{1),2)},コンクリートの収縮を低減するために,収 縮の小さな石灰石骨材の利用が増加している。

構造性能に及ぼす収縮の影響に関しても研究が 進められている。コンクリートの収縮によって鉄 筋コンクリート(以下, RC)はりの斜めひび割れ 発生強度(以下, せん断強度)が低下することが明 らかとなり、示方書におけるせん断強度評価式の 原式である二羽式 3の鉄筋比の算定に,等価引張 鉄筋比の概念を用いたせん断強度評価式(以下, 等価式)が佐藤らによって提案されている 4)。一 方, Gustafsson & Hillerborg によりせん断強度を引 張強度で除した τ_c/f_t と、有効高さを特性長さで除 したd/lchの対数には線形関係があるという報告が なされている 5。これに基づき、収縮だけでなく破 壊エネルギーの関数としてもせん断強度の評価も 行っているが、検証の対象としたコンクリートの 破壊エネルギーに差異がなく、実験的な検証を経 たとは言い難い。

そこで本研究では、まず材料実験として、使用 骨材の岩種の違いによるコンクリートの収縮およ び破壊エネルギーの差異の比較を行う。その上で 構造実験を行い、両者が普通強度 RC はりのせん 断強度に及ぼす影響を分析した。

2. 材料実験

使用骨材の岩種の違いによるコンクリートの収 縮ひずみおよび破壊エネルギーの差異を比較する ため,長さ変化試験,および破壊エネルギー試験 を行った。本実験に用いたコンクリートの使用骨 材および配合を表-1,2 に示す。骨材には石灰岩

(LM)および石英粗面岩(LP)を用いた。養生は, 打込みから材齢1日まで封緘養生とし,材齢7日 までの水中養生後,20℃,60%RHの環境下におい て気中暴露とした。

実験結果として収縮ひずみの経時変化を図-1 に,荷重-開口変位曲線を図-2に,収縮と破壊エ ネルギーの関係を図-3に示す。材齢 189 日での

表-1 コンクリートの使用骨材

配合名	種類	細骨材((砕砂)	粗骨材(砕石2005)		
		表乾密度	吸水率	表乾密度	吸水率	
		(g/cm^3)	(%)	(g/cm^3)	(%)	
LM	石灰岩	2.67	1.26	2.71	0.39	
LP	石英粗面岩	2.62	1.76	2.65	0.62	

表 - 2 コングリートの配名







3.一6 破壊時のひひ割れれ流 表一3 載荷試験結果

	載荷時				鉄筋比		せん断強度(斜めひび割れ発生)			最大	
44-544	お歌	工綻跆座	旋改度 热磁性反数	己 正改 庄 始め	始 箆7∖ポフ›	八新世家	空価レッ	宝殿庙	等価式		せん断強度
供訊休名	们图	圧相强度	盱 坪111/1×一致	5	<u></u>	公孙儿卒	守Ш儿竿	天厥恒	算定値	実験値/算定値	(実験値)
		fc	Ec	ft	ε _s	p _s	p _{se}	$\tau_{c,exp}$	$\tau_{c,cal}$		$\tau_{u,exp}$
	day	N/mm ²	kN/mm ²	N/mm ²	×10 ⁻⁶	%	%	N/mm ²	N/mm ²		N/mm ²
LM-1	88	36.3	31.9	3.1	-25	0.79	0.78	1.16	1.05	1.11	1.62
LM-2	84	34.6	31.5	3.0	-17	0.79	0.78	1.11	1.03	1.08	1.29
LP-1	99	36.8	28.3	2.8	-96	0.79	0.72	1.40	1.03	1.36	1.77
LP-2	101	35.2	27.0	2.8	-131	0.79	0.70	1.33	1.00	1.33	1.51

収縮ひずみは、石灰石(LM)が561×10⁻⁶、石英粗 面岩(LP)が746×10⁻⁶、材齢91日での破壊エネル ギーは LM が 0.12N/mm, LP が 0.24N/mm となっ た。LM は LP と比較し、収縮と破壊エネルギーが ともに小さかった。

3. 構造実験

3.1 実験概要

2章と同様の使用骨材および配合のコンクリートを用いて図-4のような RC はり供試体を作製し、そのせん断強度を調べた。養生方法は、材齢7日までは封緘とし、以後は両端面をシールし4面気中曝露とした。なお、1配合につき2バッチずつ打込みを行い、供試体名をおよびLM-1、2LP-1、2とした。

材齢 91 日前後に, RC はり供試体の載荷試験を 図-4 に示すように 4 点曲げ試験により行った。 試験中は,荷重,はりのたわみ,せん断変位,曲げ ひび割れ幅,および鉄筋ひずみを計測するととも に,ひび割れ進展状況についても目視で観察した。

3.2 実験結果および考察

(1) 鉄筋ひずみの経時変化

コンクリート打込み直後からの, RC はりの軸方 向引張鉄筋に生じた鉄筋ひずみを

図-5に示す。コンクリートの収縮によって鉄筋に 生じる圧縮ひずみ(負の鉄筋ひずみ)は、コンクリ ートの収縮の小さな LM の方が小さくなった。

(2) ひび割れ状況

各供試体の斜めひび割れ発生荷重と破壊時のひ び割れ状況を図-6に、載荷試験結果を表-3に示 す。全ての供試体において、発生した斜めひび割 れが載荷点下に潜り込み、斜めひび割れ発生後も アーチ機構に移行することで直ちには破壊に至ら なかった。破壊時には、全ての供試体において等 曲げモーメント区間内の圧縮縁コンクリートで圧 壊が生じ、これと同時にせん断圧縮破壊となった。



このとき, LM-1 および LP-1 では, LM-2 および LP-2 よりも斜めひび割れがより載荷点側に生じた。 また, LM-1 および LP-1 は, LM-2 および LP-2 よ りも最大荷重が大きくなった。今回の実験からは, 骨材の違いによるひび割れ性状の明確な差は確認 されなかった。以下では, 斜めひび割れ発生荷重 からせん断強度を議論する。

(3) 載荷試験結果

荷重-たわみ関係を図-7 に、荷重-鉛直変位 関係を図-8に、荷重-せん断変位関係を

図-9に示す。ここで鉛直変位は図-4において鉛 直方向に設置した変位計の値であり, せん断変位 は斜め方向に設置した 2 つの変位計を用いて計算 した値である。鉛直変位およびせん断変位は複数 個所で計測したが,図-6 において青の実線で示 したように,破壊側のせん断スパンに発生した斜 めひび割れが通過した位置での計測結果を掲載し

た。図-7~

図-9において,斜めひび割れ発生荷重を○印で示 した。斜めひび割れ発生荷重は,図-6において太 線で示した斜めひび割れが鉛直方向の変位計を通 過した場合(LM-1, LP-1)は図-8,上下に設置し た水平方向の変位計を通過した場合(LM-2, LP-2) は

図-9 により変位が急増する際の荷重として決定 した。

表-3に実験値と、等価式を用いたせん断強度の計算値を示す。等価式を式(1),(2)に示す。

$$\tau_{c,cal} = 0.20 f_c'^{\frac{1}{3}} p_{s,e}^{\frac{1}{3}} \left(\frac{d}{1000}\right)^{-\frac{1}{4}} \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d}\right)$$
(1)



$$p_{s,e} = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s - \varepsilon_{s0,def}} p_s \tag{2}$$

ここに、 $\tau_{c,cal}$: せん断強度の評価値、 f'_c : コンクリ ートの圧縮強度、 $p_{s,e}$: 等価引張鉄筋比、d: 有効高 さ、a: せん断スパン、 ε_s : 曲げ理論を用いて求め た斜めひび割れ発生時の載荷点から 1.5d の引張鉄 筋ひずみ、 $\varepsilon_{s0,def}$: コンクリート応力がゼロ状態に なる時の載荷点から 1.5d の引張鉄筋ひずみ、 p_s : 公称引張鉄筋比とする。ここでの等価式は、二羽 式³⁾に等価鉄筋比⁴⁾の概念を導入して鉄筋比 p_s を 等価鉄筋比 $p_{s,e}$ に置き換えたものであり、破壊エネ ルギーについては考慮していない。

両供試体における実験値を比較すると,LMの方 が20%程度小さくなっている。材料強度に大きな 差は見られず,また収縮ひずみはLMに比べLPの 方が大きいため,LMのせん断強度の低下は破壊エ ネルギーが小さいことによる影響が大きいと考え られる。

実験値を等価式による計算値で正規化して圧縮 強度および収縮の影響を除いた $\tau_{crexp}/\tau_{creal}$ と,特性 長さ l_{ch} を表-4に、 l_{ch} と $\tau_{crexp}/\tau_{crcal}$ の関係を図-10 に示す。ここで特性長さは,破壊エネルギー,静弾 性係数および引張強度から算出される, コンクリ ートの脆性さを表す指標であり, 脆性な破壊を生 じる材料ほど特性長さは小さくなる。 $\tau_{c,exp}/\tau_{c,cal}$ の LM と LP の比は*l_{ch}*の比の 1/2.7 乗となった。さら にデータを集積する必要はあるが、このことは RC はりのせん断強度がコンクリートの特性長さが小 さくなる骨材を用いた場合, その特性長さのおよ そ 1/3 乗に比例して低下する可能性を示唆してい る。なお, Gustafsson & Hillerborg の研究 ⁵⁾では τ_c/f_t とd/lchについての関係を示しているが、本実験で は有効高さが同一で,弾性係数や引張強度に大き な差が見られないため、 τ_c および l_{ch} の関係とした。 また Gustafsson らの研究では引張強度および有効 高さが同一であった場合, RC はりのせん断強度は 特性長さの 1/4 乗に比例して低下すると示されて おり, 佐藤らの研究において高強度 RC はりの場 合は,2/5 乗に比例して低下すると示されている4)。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた結論を以下に示す。

- (1) コンクリートの収縮ひずみの小さい石灰岩 を用いた RC はりでは、収縮ひずみの大き い石英粗面岩を用いた RC はりと比較し、 コンクリートの収縮によって生じる鉄筋の 圧縮ひずみが顕著に小さくなった。
- (2) 石灰岩を用いたコンクリートと石英粗面岩を用いたコンクリートの圧縮強度や引張強度はほぼ同じであったが、石灰岩を用いたRCはりのせん断強度は、石英粗面岩を用いたRCはりと比較して約20%低下した。等価鉄筋比の概念でコンクリートの収縮の影響を補正すると、せん断強度の低下はより大きく評価され、石灰岩を用いたコンクリートの破壊エネルギーが小さいことによる影響が考えられた。また、収縮の影響を補正したRCはりのせん断強度は、特性長さの1/3 乗に比例して低下する可能性を示唆した。
- (3) 今後はさらにデータを集積し、本結論の信

表-4 せん断強度比と特性長さ



図-10 $l_{ch} \ge \tau_{c,exp}/\tau_{c,cal}$ の関係

頼性を向上させたい。

参考文献

- 後藤幸正・藤原忠司:コンクリートの乾燥収縮
 に及ぼす骨材の影響,土木学会論文報告集,第
 286 号, pp125-137, 1979.6
- 今本啓一ほか:各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響,日本建築学会論文集,606号,9-14,2006.8
- 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
- 4) 河金甲・佐藤良一:高強度 RC はりの斜めひび 割れ発生強度に及ぼす収縮の影響,土木学会論 文集 E, Vol.65, No.2, pp.178-197, 2009.4
- Gustafsson, P.J. and Hillerborg, A. : Sensitivity in Shear Strength of Longitudinally Reinforced Concrete Beams to Fracture Energy of Concrete, ACI Structural Journal, Vol.85, Issue 3, pp.286-294, 1988