

# 論文 石灰石骨材を用いた RC はりのせん断強度に及ぼす寸法, 収縮および特性長さの影響

佐々木 優\*1・川井 菜緒\*1・半井 健一郎\*2・佐藤 良一\*3

**要旨:** 近年, 収縮低減を目的に, 石灰石骨材の利用が増加している。一方で, 石灰石骨材を用いたコンクリートは破壊エネルギーが低く, RCはりのせん断強度を低下させることが報告されている。本研究では, 石灰石骨材を用いたRCはりのせん断強度について, 乾燥期間を延長するとともに, より寸法の大きな供試体を追加した載荷試験により検討した。一般的な骨材として流紋岩を用いたRCはりと比較し, せん断強度は2割程度低下した。低下した要因は, 特性長さの影響が支配的であった。また, 寸法にかかわらず同程度のせん断強度の低下が確認された。

**キーワード:** 鉄筋コンクリートはり, せん断強度, 石灰石, 乾燥収縮, 破壊エネルギー

## 1. はじめに

実構造物においてコンクリートの収縮に起因したひび割れが発生した事例を契機に, コンクリートの乾燥収縮に関する研究・議論が精力的に行われてきた。構造的な性能に及ぼす影響としては, コンクリートの収縮が RC はりの斜めひび割れ発生強度 (以下, せん断強度) を低下させることが報告されている<sup>1)</sup>。収縮が RC はりのせん断強度へ及ぼす影響の評価手法として, 等価鉄筋比が提案されている<sup>2)</sup>。この手法を土木学会示方書式の原式である二羽式<sup>3)</sup>に組み込むことにより, 収縮がせん断強度へ及ぼす影響を精度良く評価すると報告されている<sup>3)</sup>。

コンクリートの収縮はセメントペーストのみならず, 骨材自体の収縮にも依存しており, 岩種の違いにより, コンクリートの乾燥収縮が大きく変動することが報告されている<sup>4) 5)</sup>。近年では, コンクリートの収縮を低減させることを目的に, 石灰石骨材の利用が増加している。

一方で, 岩種の違いはコンクリートの破壊特性にも影響を及ぼす。石灰石骨材を用いた場合, コンクリートの圧縮強度, および引張強度は他の骨材を用いた場合と同等かそれ以上との報告<sup>6)</sup>がある一方, 破砕値の大きな石灰石骨材を用いることによってコンクリートの破壊エネルギーが低下することも報告されている<sup>7)</sup>。川井らは破壊エネルギーが低下することにより, RC はりのせん断強度は一般的なコンクリートを用いた場合と比較して低下すると報告している<sup>7)</sup>。

川井らの既往の報告は, 有効高さ 250mm という寸法の小さいはり供試体での検討のみである。そのため, より実構造物に近い寸法の大きな RC はりによる検討が必要である。また, 乾燥期間が短期であったため, 収縮進行途上にあり, 収縮の程度が小さい段階の検討であった。

そこで本研究は, 長期乾燥により収縮が収束した状態において, 石灰石骨材を用いた場合と流紋岩骨材を用いた一般的なコンクリートの場合での有効高さ 250, 500mm の RC はりのせん断耐力を比較し, その相違をコンクリートの収縮と破壊特性を関連付けて分析する。

## 2. 実験概要

### 2.1 コンクリートの使用材料と配合

本研究では, 流紋岩を用いた RC はり (以下, RY) および, 石灰石を用いた RC はり (以下, LM) の 2 配合を作製した。表-1 に, 使用した骨材岩種について示す。両配合において, セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。混和材料には AE 減水剤を用いた。表-2 に, コンクリートの配合を示す。水結合材比を 50%, 単位水量は 175kg/m<sup>3</sup>とした。なお, スランプの目標値は, 15±2.5cm, 空気量の目標値は 4.5±1.5%とし, すべての供試体で同一となるようにした

表-1 使用骨材の岩種および物理特性

配合名	岩種	材料	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	破砕値 (%)
LM	石灰石	粗骨材	2.71	0.39	20.0
		細骨材	2.67	1.26	
RY	流紋岩	粗骨材	2.65	0.62	12.0
		細骨材	2.62	1.76	

表-2 コンクリートの配合

配合名	W/C	s/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
LM	50	45.0	175	350	833	968
RY		46.6			789	976

\*1 広島大学 大学院工学研究科社会基盤環境工学専攻 (学生会員)

\*2 広島大学 大学院工学研究院社会環境空間部門准教授 博士(工学)(正会員)

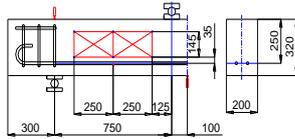
\*3 広島大学 大学院工学研究院名誉教授 工博(正会員)

表-3 RC はり供試体の寸法および鉄筋

供試体名	寸法				軸方向鉄筋			
	$d$ mm	$a$ mm	$b$ mm	$a/d$	呼び名	$p_s$ %	$f_y$ N/mm <sup>2</sup>	$E_s$ kN/mm <sup>2</sup>
RY_250- A,B,C,D LM_250- A,B,C,D	250	750	200	3	D16	0.794	1062	186
RY_500- A,B, LM_500- A,B	500	1500			D22	0.760	1197	201

※ここで、 $d$ ：有効高さ、 $a$ ：せん断スパン、 $b$ ：はり幅、 $p_s$ ：引張鉄筋比、 $f_y$ ：軸方向鉄筋の降伏強度、 $E_s$ ：弾性係数を示す。

(1)250mm



(1)500mm

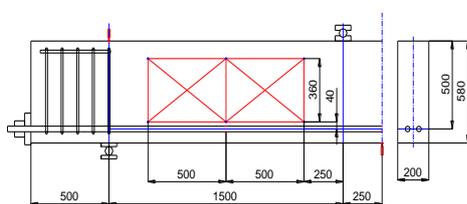


図-1 RC はり供試体の形状と寸法(単位:mm)

## 2.2 供試体概要

### (1) RC はり供試体

RC はり供試体の寸法および鉄筋を表-3に、概要を図-1に示す。主鉄筋は引張鉄筋のみ使用し、スパン内には圧縮鉄筋やせん断補強鉄筋を用いていない。荷重時の主鉄筋の定着を確保するため、スパン外域にスターラップを設けた。寸法は有効高さ 250mm, 500mm の 2 水準とした。両配合において有効高さ 250mm において 4 体、500mm において 2 体作製した。また、乾燥収縮を促進させることを目的とし、供試体幅は 200mm と薄くした。材齢 7 日までは封緘養生して脱型後、乾燥の状態がはり長手方向で変化しないよう、両端部のみアルミ粘着テープを貼り付け、4 面からの乾燥とした。

### (2) 自由収縮供試体

コンクリートの無拘束の状態における収縮を測定するため、RC はり供試体と同断面の自由収縮供試体を RC はりと同時に作製した。供試体長さは 1m とした。なお、RC はりと同様に 4 面からの乾燥とし、RC はりと同環境のもとで養生した。

## 2.3 試験方法

### (1) 材料試験

コンクリートの材料試験は、圧縮強度試験、割裂引張強度試験および静弾性係数試験について行った。各試験では、それぞれ JIS A 1108, JIS A 1113 および JIS A 1149 に準じた。また、破壊エネルギー試験を、JCI-S-001-2003 「切欠きはりを有したコンクリートの破壊エネルギー試験方法」を参考に行った。本研究においては、100×100×400mm の角柱供試体の中央に 50mm の切欠きを設け、3 点曲げ試験によりコンクリートの荷重-ひび割れ開口変位を測定し、破壊エネルギーを求めた。石灰石を用いたコンクリートの開口変位は、動ひずみ計を用いて計測を行った。また、これらの材料試験結果を基に、特性長さ  $l_{ch}$  を式(1)により算出した。

$$l_{ch} = E_c \cdot G_f / f_t^2 \quad (1)$$

ここで、 $l_{ch}$ ：特性長さ、 $E_c$ ：ヤング係数、 $G_f$ ：破壊エネルギー、 $f_t$ ：割裂引張強度

特性長さは、コンクリートの脆性を長さ単位で示す指標であり、特性長さが短いほど脆的な破壊を生じる材料である。なお、各材料試験時の材齢はRCはりの荷重材齢と同材齢程度とし、強度および弾性係数は3体、破壊エネルギーは7体の試験体による平均値とした。

### (2) 収縮ひずみの経時変化測定

RCはりの鉄筋および自由収縮供試体において、打設直後から荷重試験直前まで収縮ひずみを経時的に測定した。鉄筋ひずみは温度補償型のひずみゲージにより測定した。自由収縮供試体においては、供試体中心部に設置した熱電対内蔵型の埋込みひずみゲージを設置し、計測した。

### (3) RCはりの荷重試験

両配合において、短期材齢（材齢90日程度）で有効高さ250mmのRCはり各2体<sup>7)</sup>、長期材齢（材齢600～700日程度）において有効高さ250mmおよび500mmのはり各2体の荷重試験を行った。試験は2点集中荷重による静的荷重とした。荷重試験中は、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. 試験結果

### 3.1 材料試験

各材料試験の結果を表-4に示す。なお、短期材齢の結果については、既往のデータ<sup>7)</sup>を再掲する。両配合において、圧縮強度および引張強度に差異は見受けられず、静弾性係数はLMがRYに対して平均で6%増加した。一方で、破壊エネルギーにおいては、平均でLMにおいてRYと比較して37%低下した。特性長さについては、平均でRYにおいて708mm、LMにおいて500mmとなり、

表-4 コンクリートの強度特性

供試体名	$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$G_f$ (N/mm)	$l_{ch}$ (mm)
RY_250-A	36.8	2.80	28.3	0.235	848
RY_250-B	35.2	2.80	27.0	0.235	809
RY_250-C	34.7	2.84	28.9	0.220	788
RY_250-D	32.1	2.62	25.8	0.182	682
RY_500-A	35.8	2.84	28.1	0.205	715
RY_500-B	32.6	2.62	26.4	0.168	647
LM_250-A	36.3	3.10	31.9	0.117	388
LM_250-B	34.6	3.00	31.5	0.117	409
LM_250-C	34.7	2.70	30.0	0.119	490
LM_250-D	32.1	2.60	28.1	0.123	511
LM_500-A	34.7	2.70	30.0	0.119	490
LM_500-B	32.1	2.60	28.1	0.123	511

$f'_c$ : 圧縮強度,  $E_c$ : ヤング係数,  $f_t$ : 割裂引張強度,  $G_f$ : 破壊エネルギー,  $l_{ch}$  特性長さ

表-5 RC はりのせん断強度一覧

供試体名	荷重 材齢 (日)	鉄筋比	鉄筋ひずみ	等価鉄筋比	斜めひび割れ発生時		算定式	
		$P_s$ (%)	$\epsilon_{s,def}$ ( $\times 10^{-6}$ )	$P_{s,e}$ (%)	$P_c$ (kN)	$\tau_{c,exp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	二羽式 (N/mm <sup>2</sup> )	等価式 (N/mm <sup>2</sup> )
RY_250-A	99	0.79	-96	0.74	140.6	1.40	1.06	1.03
RY_250-B	101	0.79	-131	0.71	133.0	1.33	1.04	1.00
RY_250-C	674	0.79	-375	0.58	136.0	1.36	1.05	0.77
RY_250-D	672	0.79	-366	0.58	120.9	1.21	0.97	0.71
RY_500-A	727	0.77	-343	0.52	150.1	0.75	0.89	0.60
RY_500-B	721	0.77	-377	0.49	188.4	0.94	0.79	0.52
LM_250-A	88	0.79	-25	0.79	116.0	1.16	1.06	1.05
LM_250-B	84	0.79	-17	0.79	111.0	1.11	1.04	1.03
LM_250-C	667	0.79	-273	0.63	108.6	1.09	1.05	0.84
LM_250-D	665	0.79	-246	0.64	91.9	0.92	0.98	0.79
LM_500-A	657	0.77	-274	0.56	140.3	0.70	0.86	0.62
LM_500-B	661	0.77	-245	0.57	121.7	0.61	0.80	0.59

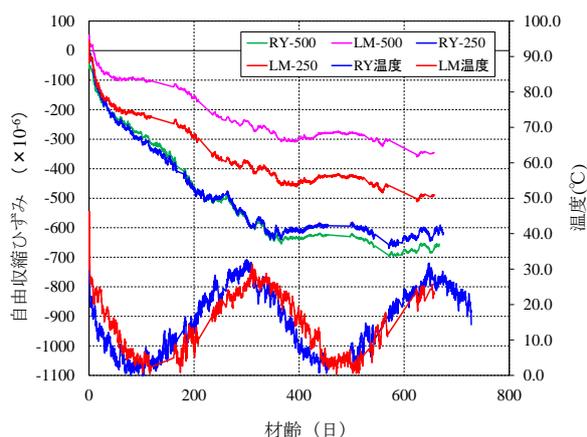


図-2 無拘束供試体の自由収縮ひずみ

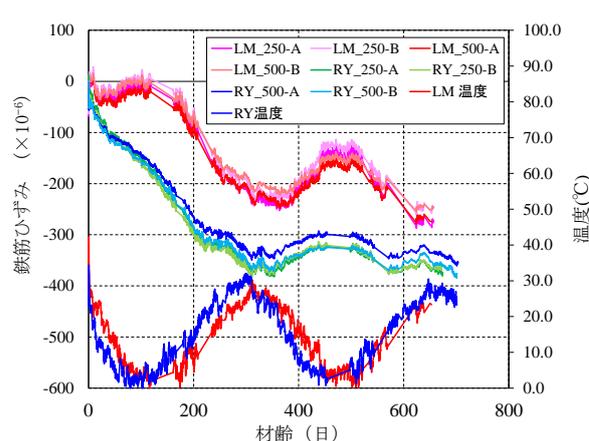


図-3 RC はり供試体の鉄筋ひずみ

脆性的な破壊を引き起こす材料であることがわかる。なお、材齢の進行に伴い、圧縮強度は両配合ともわずかに低下した。破壊エネルギーや引張強度にも多少の変動はあったものの両配合における材齢の長期化に伴う共通の傾向は得られなかった。

### 3.2 収縮ひずみの経時変化

コンクリートの収縮ひずみの経時変化および温度変化を図-2 に示す。収縮ひずみについては、実測ひずみから熱ひずみを差し引いた。ここで、温度ひずみを計算するための線膨張係数は、収縮の影響が小さい材齢 400 日以降の無拘束供試体における温度変化に対する実ひず

みの変化の関係から求め、LM では  $7.2, 7.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、RY では  $9.5, 10.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  を有効高さごとに用いた。また、RC はりの軸方向引張鉄筋に生じた鉄筋ひずみを図-3 に示す。なお、この鉄筋ひずみは温度補償の補正を行ったものである。図-2 より、収縮は両配合ともに材齢約 350 日程度で収束していると考えられるが、材齢 350 日程度から特に LM において RC はりの鉄筋圧縮ひずみが減少し、鉄筋ひずみが大きく変動していることが分かる。

これはコンクリートと鉄筋の線膨張係数の差異により、鉄筋およびコンクリートそれぞれの温度ひずみの差異によるものと考えられる。鉄筋の線膨張係数  $11.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  と比較して両配合でのコンクリートの線膨張係数が小さく、特に LM の場合両者の差が  $4.0, 4.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  と大きい。また、材齢 50 日程度から材齢 100 日程度においても LM における鉄筋ひずみがやや減少しているが、上述した線膨張係数の差によるものと考えられる。無拘束供試体の

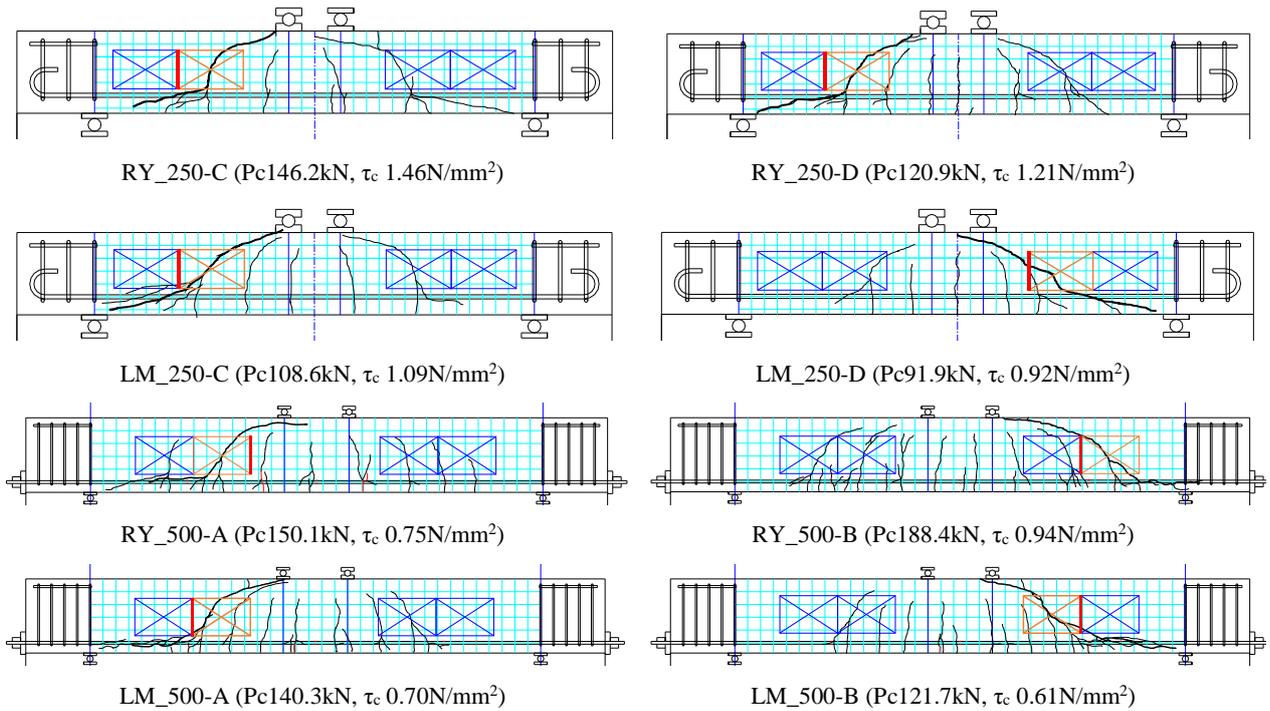


図-4 ひび割れ図面(斜めひび割れ発生時)

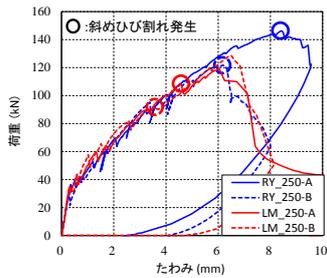


図-5 荷重-たわみ関係 (d=250mm)

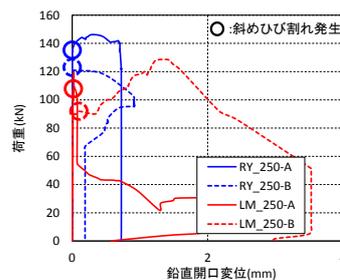


図-6 荷重-鉛直変位関係 (d=250mm)

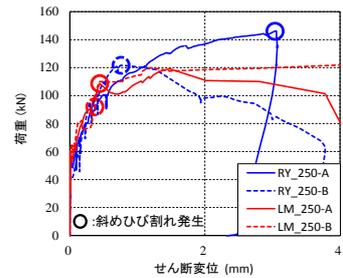


図-7 荷重-せん断変位関係 (d=250mm)

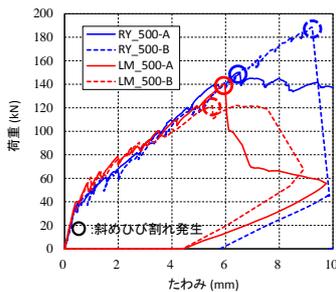


図-8 荷重-たわみ関係 (d=500mm)

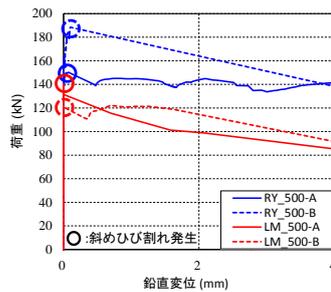


図-9 荷重-鉛直変位関係 (d=500mm)

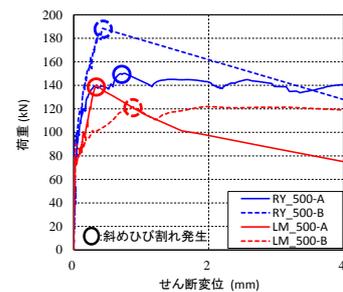


図-10 荷重-せん断変位関係 (d=500mm)

ひずみや鉄筋ひずみは、寸法によらず、LMの方がRYと比較して $100 \times 10^{-6}$ 程度小さかった。

### 3.3 RC はりの載荷試験

載荷試験結果として、荷重と支間中央たわみの関係を図-5, 8に、荷重と鉛直開口変位の関係を図-6, 9に、荷重とせん断変位の関係を図-7, 10に、それぞれを有効高さ別に示す。ここで鉛直開口変位は、図-1において鉛直方向に設置した変位計の値であり、斜めひび割れ発生とともに急増する。せん断変位は鉛直・水平方向に設置した4つの変位計とその内部に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。本研究においては、ひび割れ観察、支間中央たわみ、鉛直開口方向変位、せん断変位により斜めひび割れ発生荷重を決定した。図-5~10において、観察に基づく斜めひび割れ発生荷重付近で変形の急増あるいは荷重低下が生じた荷重を斜めひび割れ発生とした。図-6, 7, 9, 10に示す各荷重-変位関係に用いた1組の変位計は橙色で、鉛直変位計は赤色で図-4上に強調した。斜めひび割れ発生点を図-5~10において○印で示した。これらの結果に基づき決定した実測せん断強度 $\tau_{c,exp}$ と、二羽式<sup>2)</sup>および二羽式に等価鉄筋比<sup>1)</sup>の概念を導入して公称鉄筋比 $p_s$ を等価鉄筋比 $p_{s,e}$ に置き換えた算定式(以下、等価式)を用いたせん断強度の計算値を表-5に示す。各供試体における破壊状況は図-4に示す。今回の実験からは、両配合におけるひび割れ性状の差は明確に確認されなかった。等価式を式(2)に示す。等価鉄筋比は式(3)に示す方法<sup>1)</sup>で計算した。

$$\tau_{c,cal*} = 0.2 f_c^{1/3} p_{s,e}^{1/3} \left( \frac{d}{1000} \right)^{-1/4} \left( 0.75 + \frac{1.4}{a/d} \right) \quad (2)$$

$$p_{s,e} = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s - \varepsilon_{s0,def}} p_s \quad (3)$$

ここで、 $p_{s,e}$ : 等価引張鉄筋比、 $p_s$ : 引張鉄筋比、 $d$ : 有効高さ (mm)、 $a$ : せん断スパン (mm)、 $\varepsilon_s$ : 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の時の載荷点から $1.5d$ の引張鉄筋ひずみ。

二羽式での計算値を比較した場合は両配合における差異は見受けられず、等価式で比較した場合の計算値は10%程度の差異があった。各供試体におけるせん断強度を比較するため、図-11に各供試体の実測せん断強度 $\tau_{c,exp}$ を示す。なお、供試体材齢を()内に表記した。RYとLMにおけるせん断強度を比較したところ、 $d=250\text{mm}$ において25%、 $d=500\text{mm}$ において23%、LMがRYに対して低下した。これは両配合での等価式の計算値における差よりも大きい。いずれの寸法においても、同程度のせん断強度の低下が確認された。また、 $d=250\text{mm}$ において、両配合における長期材齢の供試体

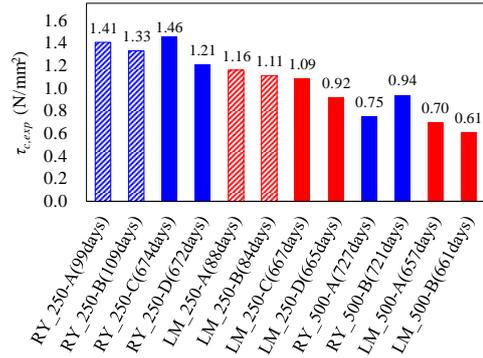


図-11 実測せん断強度  $\tau_{c,exp}$

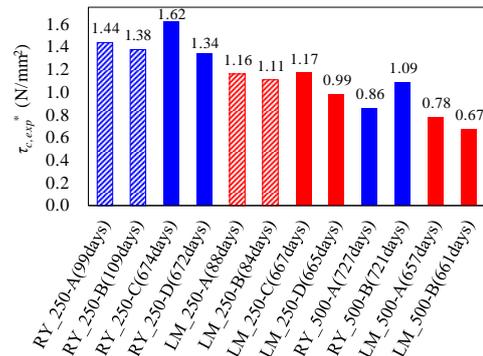


図-12 収縮の影響を補償したせん断強度  $\tau_{c,exp}^*$

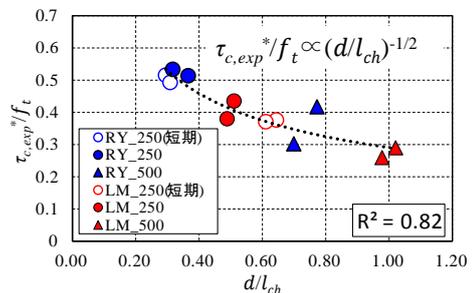


図-13  $\tau_{c,exp}^*/f_t$ と $d/l_{ch}$ の関係

は短期材齢の供試体に対してせん断強度が低下した。その低下率は平均してRYで2%、LMで12%であり、LMの方が、低下率が大きい結果となった。これは、後述のGustafsson&Hillerborgの提案式<sup>8)</sup>によれば、コンクリートの引張強度の相違によると思われる。すなわち表-4に示すように、短期材齢における引張強度は、長期材齢のそれに比べ、RYの場合ほとんど等しいに対し、LMでは13%程度低下しており、このことが前述のせん断強度の相違をもたらしたと思われる。

## 4. せん断強度に及ぼす影響の分析

### 4.1 等価鉄筋比を用いた収縮の影響評価

等価鉄筋比を用いることにより、収縮がせん断強度に及ぼす影響を補償した。二羽式<sup>2)</sup>でのRCはりのせん断強度は引張鉄筋比の1/3乗に比例する定式化を参考

に、RCはりの引張鉄筋比と等価鉄筋比の比率を実測せん断強度に乗じた式(4)により換算した、収縮の影響を補償した場合のせん断強度 $\tau_{c,exp}^*$ を図-12に示す。

$$\tau_{c,exp}^* = \tau_{c,exp} \times (p_{s,e}/p_s)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$\tau_{c,exp}^*$ をLMとRYで比較したところ、d=250mmにおいて27%、d=500mmにおいて25%、LMがRYに対して収縮以外の影響によりせん断強度が低下したことが分かる。また、RYとLMにおける等価鉄筋比の1/3乗を比較したところ、収縮低減によりd=250mmにおいて2%、d=500mmにおいて3%せん断強度が向上したことが分かる。 $\tau_{c,exp}^*$ 、 $\tau_{c,exp}$ および $p_{s,e}^{1/3}$ におけるRYからLMへの変化率を表-6に示す。すなわち、LMのせん断強度の実測値がRYに対して約25%の低下を示した理由は、収縮以外の影響が支配的であったことが分かる。

表-6 RYからLMへの変化率

有効高さ	LM/R Y		
	$\tau_{c,exp}$	$p_{s,e}^{1/3}$	$\tau_{c,exp}^*$
d=250(mm)	-25%	+2%	-27%
d=500(mm)	-23%	+3%	-25%

#### 4.2 骨材がせん断強度に及ぼす影響

4.1においてLMのせん断強度は収縮以外の影響によって大きく低下したことが示唆された。前稿<sup>7)</sup>にて、特性長さとの関連性が示唆されたことから、本稿においても、Gustafsson&Hillerborgの研究<sup>8)</sup>を参考とした分析を行う。なお、表-4に示すよう、コンクリートの圧縮強度、引張強度、ヤング係数に関して両配合での差異が小さく、今回のせん断強度の違いを説明しない。

Gustafsson&Hillerborg<sup>8)</sup>は、せん断強度を引張強度で除した $\tau_c/f_t$ と有効高さを特性長さで除した $d/l_{ch}$ における線形関係を示すことにより、せん断強度の寸法効果について検討している。本実験の範囲において収縮の影響を補償した、 $\tau_{c,exp}^*/f_t$ と $d/l_{ch}$ の関係について図-13に示す。その結果、 $\tau_{c,exp}^*/f_t$ は $d/l_{ch}$ の1/2乗に比例して低下する結果となった。また高強度RCはりにおいては、 $\tau_{c,exp}^*/f_t$ は $d/l_{ch}$ の2/5乗に比例して低下することが示されている<sup>4)</sup>。以上のことから、前稿<sup>7)</sup>から寸法の大きなRCはりのデータを追加することにより、寸法に及ぼす影響を含めた検討を行うことが出来た。ここで、得られた係数には大きな差はなかった。なお、今回は2水準の寸法のみでの検討であるため、今後はさらにデータを集積し、検討を継続したい。

#### 5. まとめ

本研究の範囲内で得られた結論を以下に示す。

(1) 収縮がほぼ収束した材齢約2年において、RCは

りにおける引張鉄筋ひずみは流紋岩を用いた場合と比較して、石灰石骨材を用いた場合の方が約30%低下した。

- (2) 石灰石骨材を用いたRCはりは流紋岩を用いたRCはりと比較してせん断強度が22~25%低下した。そのうち、収縮の低減により石灰石骨材を用いたRCはりの方がせん断強度は約3%向上したが、特性長さの低下によりせん断強度は25~28%低下したと考えられた。すなわち、石灰石骨材の使用は、収縮低減によるせん断強度向上よりも特性長さ低下による強度低下の影響の方が大きい結果となった。
- (3) 上記の傾向は、有効高さ250mmおよび500mmのRCはりにおいて、同様に確認された。

#### 謝辞

本研究は、科学研究費(基盤研究(A)、課題番号:24246077、代表:佐藤良一)の補助を受けて実施したものであり、紙面を借りて厚くお礼申しあげたい。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 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, 1968.8
- 3) 森戸重光, 半井健一郎:乾燥収縮ひび割れがRCはりのせん断耐力に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.751-756, 2009, 7
- 4) 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, pp.125-137, 1979.6
- 5) 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
- 6) 小島明ほか:石灰石砕石を用いたコンクリートの強度特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.93-98, 2004.6
- 7) 川井菜緒ほか:RCはりのせん断強度に及ぼす収縮および破壊エネルギーの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.451-456, 2014.7
- 8) 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. 5, 6