

## 論文 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

大滝 晶生<sup>\*1</sup>・河野 克哉<sup>\*2</sup>・二羽 淳一郎<sup>\*3</sup>

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、軽量骨材コンクリートの高強度化が可能となる。しかし、高強度化にともないコンクリートの自己収縮が増加するため、RC はりの力学特性に対する影響も大きいと考えられる。そこで、収縮低減剤や高含水状態の骨材を使用することで、自己収縮量を変化させ、RC はりの曲げおよびせん断特性におよぼす影響を検討した。コンクリートの自己収縮は RC はりの曲げ耐力に与える影響は小さいものの、せん断耐力に影響を及ぼすことが確認された。

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，曲げ特性，せん断特性

## 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<sup>1)</sup>。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低水セメント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，この軽量骨材を用いて高強度コンクリートとした場合，骨材の低吸水性化にともなって自己収縮が増大すること<sup>2)</sup>，引張強度は増加しないために脆性的な破壊挙動を示すことを明らかにしている<sup>3)</sup>。また，これらの改善には短繊維の混入が有効であることも検討している<sup>4)</sup>。

高強度コンクリートの RC 部材への適用に関しては，自己収縮が RC はりの力学特性に与える影響が指摘されており<sup>5)</sup>，十分な配慮が必要となる。とくに本研究で対象とする高品質軽量骨材を用いた低水セメント比コンクリートは脆性的な材料であり，自己収縮の増大が RC はりの破壊性状に与える影響は大きいものと推察される。

本研究では高品質軽量骨材を用いた低水セメント比コンクリートを RC はり部材に適用する目的で，収縮低減剤，含水率の異なる軽量粗骨材およ

び合成短繊維を用いて自己収縮量を変化させ，RC はりの力学特性に与える影響を検討した。

## 2. 実験概要

## 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を用いた。細骨材には小櫃産陸砂，粗骨材には新しく開発された中国製の高品質人工軽量骨材(以下，NL)を用いた。なお，NL は，黄河の堆積粘土を主原料とする低吸水性の造粒型骨材である。また，短繊維は軽量性を考慮し合成繊維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 減水剤ならびに AE 剤を用いた。

## 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  $175\text{kg/m}^3$  とし，W/C が 25% の低水セメント比コンクリートとした。また，コンクリートの脆性破壊防止のために短繊維を，コンクリートの自己収縮低減のために有機系収縮低減剤ならびに含水率を変化させた軽量粗骨材を使用した。なお，実験に供した配合は，表 - 2 に示す 5 水準とし，以下，それぞれ表中の記号で表すこととする。スランプならびに空気量は，それぞれ  $21 \pm 1.5\text{cm}$ ， $4.0 \pm 1.5\%$  となるように混和剤の添加量にて調整した。

\*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 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻助手 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	早強セメント	C	密度 3.14g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4490cm <sup>2</sup> /g
細骨材	小櫃産陸砂	S	表乾密度2.60kg/ , 吸水率1.57%, 粗粒率2.63
粗骨材 (G)	高品質軽量骨材	NL	絶乾密度 1.17kg/ , 24 時間吸水率 <sup>1</sup> 1.77%, 煮沸吸水率 <sup>2</sup> 4.40%, 最大寸法 15mm, 粗粒率 6.48, 黄河流域堆積粘土(黄土), 造粒型, 中国製
短繊維 (F)	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/ , 引張強度 465N/mm <sup>2</sup> , 弾性係数 15kN/mm <sup>2</sup>
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系, 密度 1.05g/cm <sup>3</sup>
	AE 剤	AE	変性アルキルカルボン酸系, 密度 1.02g/cm <sup>3</sup>
	収縮低減剤	TG	低級アルコールのアルキレンオキッド付加物, 密度 1.00g/cm <sup>3</sup>

<sup>1</sup> 骨材を 24 時間静水に浸漬して表乾状態にしたときの含水率, <sup>2</sup> 骨材を 2 時間煮沸して表乾状態にしたときの含水率

表 - 2 コンクリート配合

配合名	配合条件											フレッシュ性状		
	W/C (%)	s/a (%)	F	G			単体量(kg/m <sup>3</sup> )						スランブ (cm)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )
			混入率 <sup>3</sup> (Vol.%)	含水率 (%)	吸水状態	単体量 (/ m <sup>3</sup> )	W	TG <sup>4</sup>	S	SP	AE	C		
NL-PP00	25	46.1	0.0	1.77	24h 吸水	300	175	0	668	14.4	0.035	700	20.0	1930
NL-PP15			1.5				169	0		15.4		22.0	1900	
TG-PP00			0.0				175	6		14.4		21.0	1950	
TG-PP15			1.5				169	6		15.4		20.5	1920	
BA-PP00			0.0	175	0		14.4	20.0	1920					
					4.40		煮沸吸水							

<sup>3</sup> コンクリートの体積に対する体積比率(外割), <sup>4</sup> 単体量の一部に置換して使用

### 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<sup>6)</sup> 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, 供試体の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/mm<sup>2</sup>, 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  $10 \times 10^{-6}/$  と仮定して長さを補正した。

#### (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(m<sup>2</sup>),

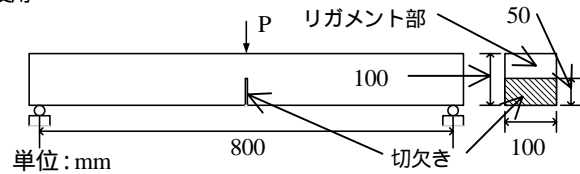


図 - 1 RILEM の 3 点曲げ試験概要

$m$ : 支点間のはり供試体質量(kg),  $g$ : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>),  $\delta_0$ : 破断時のたわみ(m),  $A_{lig}$ : リガメント部の面積(m<sup>2</sup>)

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,  $\delta_0$  を 20mm とした。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。

#### 2.4 RC はりの載荷試験方法

RC はり供試体の概要を図 - 2 に示す。供試体は, 全長  $L=1800$ (mm), 高さ  $h=250$ (mm), 有効高さ  $d=200$ (mm), せん断スパン  $a=700$ (mm), 幅  $b=150$ (mm)とし, 引張側の軸方向鉄筋に異形鉄筋(D16 SD345 降伏強度 380N/mm<sup>2</sup>)を 2 本配置した。ただし, 本実験でははりの曲げ特性ならびにせん断特性に関する検討を実施しており, 短繊維を用

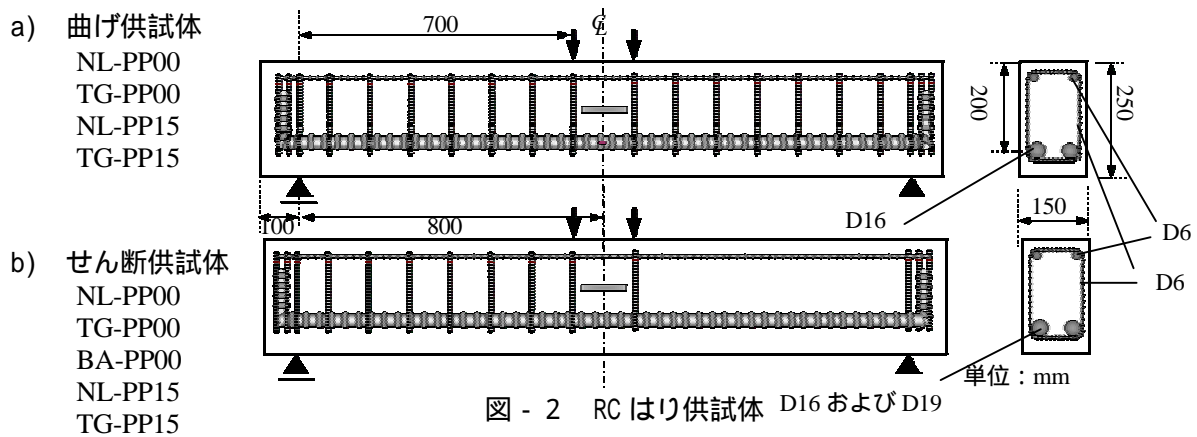


表 - 3 コンクリートの強度の関係

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 ( $kN/mm^2$ )	脆度係数 ( $f_c'/f_t$ )	補正された破壊 エネルギー $G_{F0}$ (N/m)
NL-PP00	67.4	3.04	23.7	22.2	22
TG-PP00	73.9	3.45	27.8	21.4	17
BA-PP00	70.0	3.15	26.5	22.2	24
NL-PP15	64.7	3.52	25.7	18.4	884
TG-PP15	65.8	3.63	28.3	18.1	906

いたはり供試体ではせん断破壊を生じさせるために D19(SD345, 降伏強度  $380N/mm^2$ )の主鉄筋を用いた。また, せん断補強筋は, 曲げ破壊を生じさせる供試体の場合, 両側のスパンに, せん断破壊を生じさせる供試体の場合には片側のスパンのみに, 補強筋(D6 SD295, 降伏強度  $310N/mm^2$ )を 100mm ピッチで, また, 圧縮側に組立鉄筋(D6 SD295, 降伏強度  $310N/mm^2$ )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, 中央部に取り付けた低弾性型埋込みひずみゲージにて, 凝結始発から荷重試験に供する材齢 14 日まで自己収縮ひずみを測定した。また, 同時に主鉄筋ならびにせん断補強筋に貼り付けたポリエステル箔ひずみゲージにて, 荷重試験に供するまでに生じるひずみを継続的に測定した。荷重試験は, 耐圧試験機(容量 2000kN)にて静的 2 点荷重を行った。

### 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

各配合の圧縮強度, 引張強度, 弾性係数および脆度係数を表 - 3 に示す。繊維を混入せず, 収縮低減を図った供試体 TG-PP00 ならびに BA-PP00

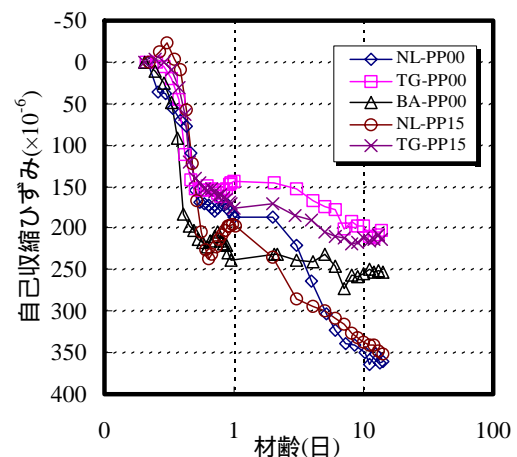


図 - 3 コンクリートの自己収縮

では,  $f_c'$  が若干増加した。一方, 短繊維を混入した供試体 NL-PP15 ならびに TG-PP15 では  $f_c'$  がやや低下するものの,  $f_t$  は増加傾向を示した。そのため, 脆度係数が低下し, コンクリートの靱性が向上しているものと思われる。

##### (2) 自己収縮特性

図 - 3 は各コンクリートに生じた自己収縮の経時変化を示したものである。この図より, 収縮低減剤や煮沸した NL を使用することで材齢 14 日における自己収縮が約 3~5 割低減されること, 一方, PP 繊維の混入が自己収縮の低減に与える影響は比較的小さいことがわかった。

### (3) 破壊力学特性

実測され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、CEB-FIP Model Code1990 によって与えられている次式によって補正し、 $G_{F0}$ として評価した。

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

ここで  $G_F$ ：破壊エネルギー(N/m)、 $f_c'$ ：圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $f_{cmo}$ ：定数(10N/mm<sup>2</sup>)

各コンクリートの  $G_{F0}$  の値は表 - 3 に併記した。NL を用いたコンクリートの  $G_{F0}$  は PP 無混入の場合、いずれも 20N/m 程度であり、普通コンクリートにおける値が 50N/m 程度であることを考えると、破壊エネルギーが小さいことがわかる。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ることが明らかになった。

### 3.2 RC はりの力学特性

#### (1) RC はりの曲げに対する自己収縮の影響

表 - 4 に RC はりの曲げ試験の結果を示す。この表から、収縮低減剤の添加により自己収縮を低減させることでひび割れ発生荷重が増加する傾向にあるものの、曲げ耐力の向上には大きく関与しないことが確認された。表 - 5 に示すように、養生期間中に生じた主鉄筋のひずみは、収縮が小さい TG-PP00 および TG-PP15 に比べて、収縮が大きい NL-PP00 および NL-PP15 の方が大きくなっており、載荷試験に供する以前から主鉄筋による拘束応力がコンクリート自体に生じやすい状態であったと推察できる。このため、TG を添加していない供試体では、荷重レベルが小さい段階からひび割れが生じたものと考えられる。表 - 6 は、載荷中に主鉄筋の応力が 200N/mm<sup>2</sup> および 400N/mm<sup>2</sup> となった時点で、各供試体の引張縁中央部 500mm 区間の曲げひび割れ幅の平均値を示したものである。この表から、収縮が小さい TG-PP00 の曲げひび割れ幅は NL-PP00 に比べて、約 20%減少していることがわかる。なお、曲げひび割れ本数は、自己収縮が増加するほどわずかに増加する程度であった。以上から、NL コンクリートの自己収縮の低減が RC はりの曲げ特性に与

表 - 4 RC はりの曲げ試験結果

供試体名	圧縮強度 $f_c'$ (N/mm <sup>2</sup> )	ひび割れ発生 荷重 $P_{cr}$ (kN)	終局荷重 $P_u$ (kN)
NL-PP00	59.4	12.5	94.5
TG-PP00	57.4	17.1	81.3
NL-PP15	60.2	16.0	98.7
TG-PP15	58.1	21.9	97.7

表 - 5 養生中に生じた主鉄筋のひずみ

	NL-PP00	TG-PP00	NL-PP15	TG-PP15
主鉄筋に生じたひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	117	75	109	50

表 - 6 曲げひび割れ幅の平均値

配合名	鉄筋の応力(N/mm <sup>2</sup> )		自己収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )
	200	400	
NL-PP00	0.117 (1.00)	0.285 (1.00)	247
TG-PP00	0.094 (0.80)	0.239 (0.84)	165

( )：NL-PP00 を 1 としたときの TG-PP00 の場合の比率

える影響は、主として曲げひび割れの発生状態にあり、曲げ耐力にはほとんど寄与しないことが明らかになった。

#### (2) RC はりのせん断に対する自己収縮の影響

RC はりの載荷試験の結果ならびにせん断耐力の計算値を表 - 7 に示す。ここで、表中の  $P_{cal}$  は、次式に示すせん断補強筋のない普通 RC はりのせん断耐力算定式<sup>7)</sup>により算出したせん断耐力から求めたものである。

$$V_c=0.2f_c^{1/3}p_w^{1/3}(10^3/d)(0.75+1.4d/a)b_wd \quad (3)$$

ここで、 $p_w$ ：軸方向鉄筋(%),  $d$ ：有効高さ(mm),  $a$ ：せん断スパン(mm),  $b_w$ ：幅(mm)

各供試体の破壊エネルギーに大きな違いは見られなかったが、自己収縮が大きい NL-PP00 では、せん断耐力の実験値(以下、 $P_u$ )が  $P_{cal}$  の 6 割程度であるのに対し、自己収縮が小さい TG-PP00 ならびに BA-PP00 の  $P_u$  は、 $P_{cal}$  の 7~8 割程度となった。これは、コンクリートの自己収縮の低減が RC はりのせん断耐力を向上させることを示唆している。このような耐力向上は短繊維を混入した配合においても確認でき、NL-PP15 は  $P_u/P_{cal}$  が約 1.25 となってせん断破壊を生じたが、TG-PP15 ではせん断破壊を生じず、最終的な破壊モードは曲げ破壊となったことから明らかである。表 - 8 に養生期

表 - 7 RC はりのせん断試験結果

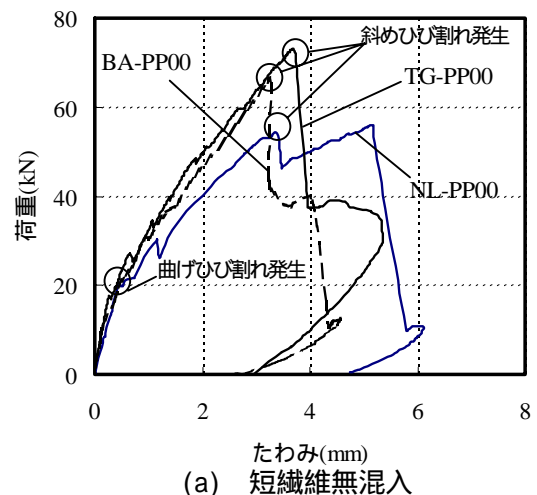
供試体名	圧縮強度 $f_c'$ ( $N/mm^2$ )	終局荷重 $P_u$ (kN)	計算値 $P_{cal}=2 \times V_c$ (kN)	$P_u/P_{cal}$	自己収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	破壊モード
NL-PP00	67.4	56.1	92.2	0.608	361	斜め引張破壊
TG-PP00	73.9	73.2	95.1	0.770	202	斜め引張破壊
BA-PP00	70.0	66.5	93.4	0.712	249	斜め引張破壊
NL-PP15	64.7	128.7	102.8	1.252	337	斜め引張破壊
TG-PP15	65.8	141.6	103.4	-	213	曲げ引張破壊

間中に主鉄筋ならびにせん断補強筋に生じたひずみを示す。この表から、いずれのはり供試体の場合でも、主鉄筋ならびにせん断補強筋に自己収縮に起因したひずみが生じているものの、NL-PP00の場合に比べて収縮低減剤や煮沸吸水した NL を使用した供試体では、鉄筋に発生するひずみが減少していることがわかる。これらの自己収縮を低減したはり供試体では、鉄筋拘束によってコンクリート自体に生じる引張応力も小さく、収縮低減剤によるペースト細孔中の毛細管張力の緩和や NL 中の含水によるペーストの自己乾燥の抑制によって、コンクリートの自己収縮が低減し、はりのせん断耐力向上に寄与したものと考えられる。

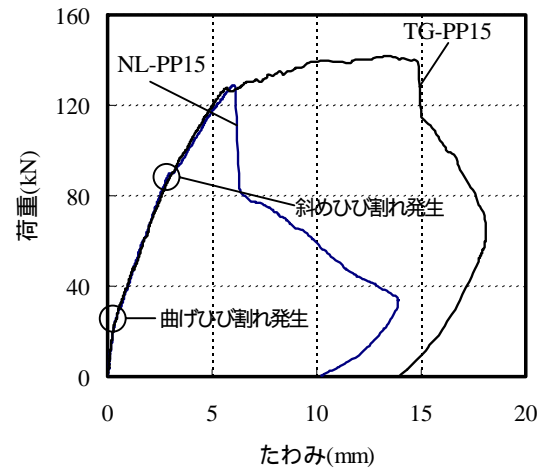
図 - 5 は各はり供試体の荷重 - たわみ曲線を示したものである。前述したように、RC はりのせん断耐力はコンクリートの自己収縮が低減されるほど増加するものの、ひび割れが生じる以前の初期剛性はいずれの供試体においてもほぼ同等であった。短繊維を混入していない供試体は、斜めひび割れ発生とほぼ同時に急激な荷重低下を生じ、脆性的な破壊挙動を示した。また、ひび割れ発生後、NL-PP00 は、TG-PP00 および BA-PP00 に比べて、同一荷重レベルにおけるたわみが大きくなった。これは 3.2(1)の曲げひび割れ幅の検討でも述べたように、養生中にコンクリートの自己収縮によって生じた主鉄筋の初期応力が大きいため、はりの変形量も大きくなったものと考えられる。一方、短繊維を混入した供試体では斜めひび割れ発生後も荷重が増加し、徐々にひび割れ幅が増大する形で破壊に至った。これはひび割れ面において繊維の架橋効果が発揮され、3.1(3)で述べたように破壊エネルギーが増大し、主鉄筋以外に架橋繊維でも引張応力を分担できるため、養生中に生じ

表 - 8 養生期間中に生じた鉄筋のひずみ

配合名	主鉄筋	せん断補強筋
	( $\times 10^{-6}$ )	
NL-PP00	212	242
TG-PP00	74	141
BA-PP00	101	169
NL-PP15	104	228
TG-PP15	80	141



(a) 短繊維無混入



(b) 短繊維混入

図 - 5 荷重 - たわみ曲線

た主鉄筋の初期応力の影響をあまり受けなかったものと考えられる。また、TG を添加した場合には、自己収縮の低減により母材マトリクスと繊維の付着特性が改善されることで、斜めひび割れ発

生後も十分な架橋効果が得られたため、最終的にせん断破壊しなかったものと思われる。

図 - 6 に、はり供試体の終局状態におけるひび割れ性状の一例を示す。これらは、いずれも斜めひび割れが卓越して破壊に至ったものである。この図より、NL-PP00 は、収縮が低減されている他の供試体に比べて、曲げひび割れの発生本数が若干多いことがわかる。また、発生した斜めひび割れがはり上縁部ならびに主鉄筋位置と一致する点を結んだ直線の傾きを斜めひび割れ角度(以下、 $\beta$ )とすると、 $\beta$ は NL-PP00 の場合にもっとも大きく、BA-PP00、TG-PP00 の順で自己収縮が低減されるほど小さくなり、斜めひび割れの発生角度が緩やかになることが観察できる。これは自己収縮の低減に伴い、主鉄筋との付着が改善され、主鉄筋に沿ったひび割れが入りにくくなったためではないかと考えられる。以上より、NL コンクリートの自己収縮は、曲げひび割れならびに斜めひび割れの発生状況にも関与していることが明らかになった。

#### 4. まとめ

本研究により得られた結論を以下に示す。

- 1) 高品質軽量骨材を用いた低水セメント比コンクリートの自己収縮は、収縮低減剤や高含水状態とした骨材を使用することで低減できる。
- 2) 高品質軽量骨材コンクリートの自己収縮が RC はりの曲げ耐力に与える影響は小さいものの、曲げひび割れ発生荷重の低下ならびに曲げひび割れ幅の増大を生じる。
- 3) 高品質軽量骨材コンクリートの自己収縮の低減によって RC はりのせん断耐力が向上し、斜めひび割れの角度も緩やかになった。
- 4) 合成短繊維で補強した高品質軽量骨材コンクリートでは、収縮低減剤を添加することで自己収縮が低減し、ひび割れ面における繊維の架橋効果が向上するため、RC はりのせん断特性を改善できる。

#### 謝辞

本研究は、平成 16 年度科学研究費補助金(若手

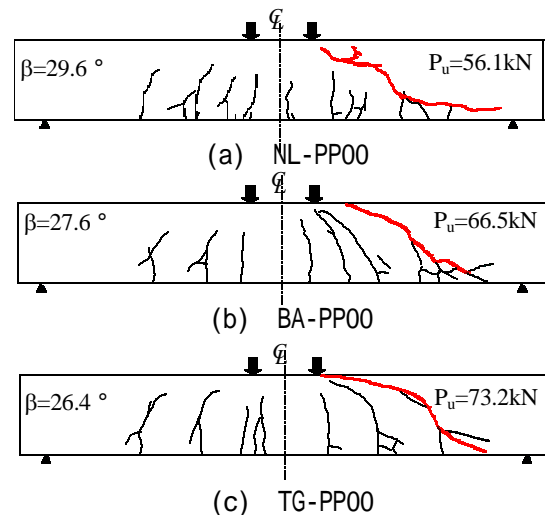


図 - 6 ひび割れ性状

研究(B) 課題番号 16760359)により行ったものである。また、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、ならびにポポ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。

#### 参考文献

- 1) 岡本享久ほか：高性能軽量コンクリート，コンクリート工学，Vol.37，No.4，pp.12-18，1999.4
- 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：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報告集，Vol.20，No.2，pp.43-48，1998.6
- 4) 河野克哉ほか：高品質軽量骨材を用いたコンクリートの破壊力学特性ならびに自己収縮におよぼす短繊維の効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1587-1592，2004.7
- 5) 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.763-768，2001.6
- 6) 日本コンクリート工学協会：JCI 規準集，pp.568-571，2004.4
- 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/ -5，pp.167-176，1986.8