

収縮がRCはり部材のせん断耐荷挙動に及ぼす影響に関する研究

中部大学
中部大学 正会員 博(工) ○栗永 季幸
伊藤 睦

Abstract : The effect of drying shrinkage of concrete on shear behavior of RC beams were investigated experimentally and analytically. In an experimental study, the relative humidity inside the specimens, steel strains and crack occurrence conditions were measured before loading test. In analytical study, the initial stress states of RC beams were modeled by introducing initial strain in the concrete element. The loading tests and analytical results show that the diagonal cracking load of beams with initial stress due to drying decreases. The analytical result shows that initial stress effect the part and angle of diagonal cracking and increase the shear capacity.

Key words : Drying shrinkage , Shear behavior , RC beam

1. はじめに

PRC7径間連続ラーメン箱桁橋である垂井高架橋では、完成後1年半が経過した供用開始以前に、上部工に多くのひび割れが確認され、上部工には設計値以上の変形が生じていることが確認された。土木学会垂井高架橋損傷対策特別委員会は、垂井高架橋の変状の原因を、使用した骨材の影響によりコンクリートの自己収縮と乾燥収縮が著しく大きくなったためと考えている¹⁾。三谷ら²⁾、兵頭ら³⁾は、コンクリートの圧縮強度や、断面幅300mmで有効高さを変数としたせん断補強筋のないRCはり部材の載荷実験により、はりの有効高さが大きい場合には、乾燥暴露した試験体のせん断強度が封緘養生した試験体に比べて17%程度低下することを確認している。また、せん断強度は、等価引張鉄筋比を既往のせん断評価式の鉄筋比の項に用いることで、コンクリートの収縮の有無によらず十分な精度で予測可能であることを提案している。

このように、収縮により部材に導入された初期応力や初期損傷が、部材の挙動に影響を及ぼすことは明らかであるが、収縮の程度や部材厚、境界条件等の違いによりその影響の度合いは異なるものと考えられる。収縮の影響が部材の挙動に及ぼす影響に関する実験データは少ないため、更なる実験データの蓄積と数値解析的な検討が必要と考えられる。この点についてGebreyouhannesら⁴⁾は、マルチスケール連成解析手法を用いて、三谷ら²⁾の実験を対象とした詳細な検討結果を報告しているが、乾燥による収縮が必ずせん断強度を低下させることを結論付けることは難しく、更なる実験データが必要であるとしている。そこで本研究では、収縮により導入された初期応力や初期損傷が、せん断補強筋のないRCはり部材のせん断挙動に及ぼす影響に関する知見を得るために、封緘・乾燥養生したはりの載荷実験を行った。また実験では、数値解析技術の検証等に資するために、養生期間中のはり内部の相対湿度やはり作製に使用したコンクリートの圧縮強度や収縮ひずみの経時変化を計測することとした。加えて、簡便な解析手法を用いて、はりに導入される初期応力が、荷重作用時のはりの挙動に及ぼす影響の検討を行った。

2. 実験概要と養生期間中の計測結果

図-1に、使用した試験体の諸元を示す。せん断スパン比は約3、引張鉄筋比約1.9%であり、既往の研究^{2)・3)}と比べて、乾燥収縮により断面上下からひび割れが発生すること、小型の上下対称断面と

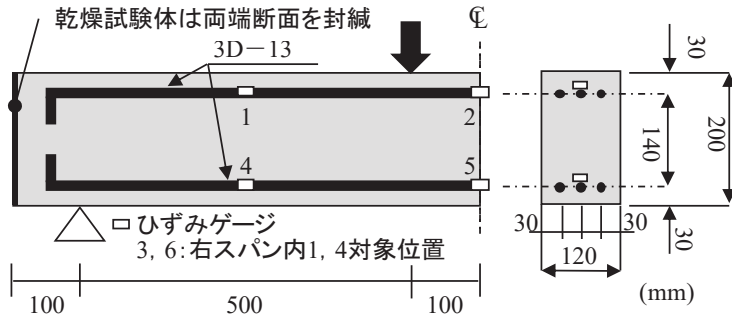


図-1 試験体諸元

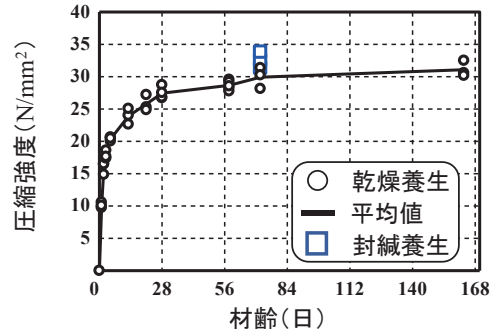


図-2 圧縮強度-材齢関係

表-1 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)			
			W	C	S	G
63	43	3	203	322	749	1027
密度 (g/cm ³)			1	3.15	2.62	2.71

することでは内部の応力状態が一様となることを期待して、圧縮・引張鉄筋を配置した。また、せん断スパン中央およびスパン中央の圧縮・引張鉄筋にひずみゲージを貼り付けた。コンクリートには、収縮が生じやすいように、表-1に示す配合を使用し、セメントには普通ポルトランドセメント、粗骨材には砂岩を使用した。

気温 30℃程度で鋼製型枠にコンクリート打込み後、乾燥を防ぐために打設面を封緘して6日間実験室内で養生し、脱型後は、気温約20℃、湿度約60%の養生室で養生した。なお、試験体を6体作製し、比較対象とするために、2体の試験体は、脱型後直ちにアルミテープで封緘し、残り4体の試験体は、試験体両端断面のみアルミテープで封緘することで、乾燥露出面がはり長手方向に同一となるようにした。また、養生期間中の幾何学的境界条件は、図-1に示す荷重試験時と同一とし、養生室内に試験体を設置後から試験体内部の鉄筋ひずみ、相対湿度や使用コンクリートの自由収縮ひずみの計測を開始した。

はり試験体と同一のコンクリートを使用して作製したテストピースの圧縮試験から得られた圧縮強度と材齢の関係を図-2に示す。図-3に4体の乾燥試験体内で計測できた全鉄筋ひずみの材齢変化を示す。なお、本試験体の自重は無視し得るので、計測位置の影響は小さいことから、図では圧縮、引張鉄筋区別のみで示している。また、荷重直前の鉄筋ひずみ、コンクリートの自由収縮ひずみの計測値を表-2に示す。なお、表中の鉄筋ひずみ計測位置は、図-1中に示した位置である。また、別途乾燥試験体の支点外の断面中央で計測した収縮ひずみは、材齢58日荷重試験直前で-362μであった。圧縮強度は材齢28日ではほぼ発現し、その後の増加はわずかであった。封緘養生したテストピースの材齢72日の圧縮強度は乾燥養生に比して1割ほど高い結果が得られた。乾燥試験体の鉄筋ひずみは、材齢84日まで圧縮側に増加し、それ以降はわずかに減少する傾向となった。材齢84日でコンクリートの収

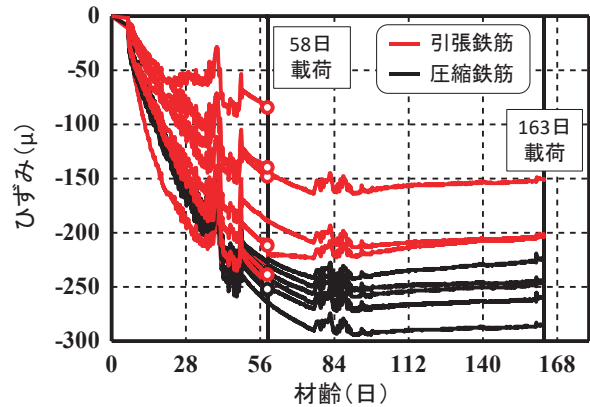


図-3 鉄筋ひずみの材齢変化

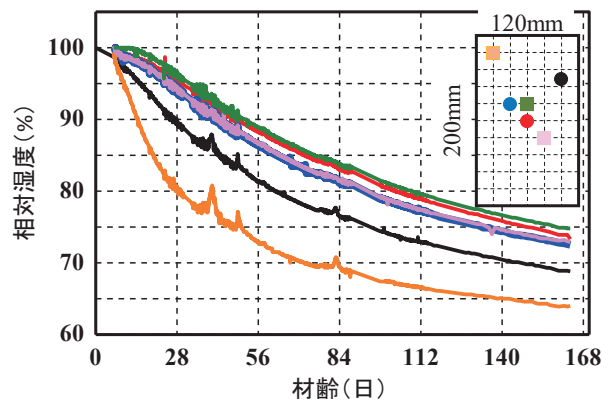


図-4 試験体内部の相対湿度変化

表-2 試験結果

養生方法 載荷材齢	試験体 No	載荷直前のひずみ値						収縮 ひずみ(μ)	斜めひび割れ 発生荷重P(kN)	$V_c/f_c^{1/3}$	耐力 (kN)
		1	2	3	4	5	6				
封緘 72日	1	-30.5	-34.3	-35.2	—	-29.5	-28.5	-821.1 (乾燥養生)	50.9	7.97	55.1
	2	-37.1	-38.1	-39.0	-19.0	-38.1	-19.0		51.6	8.08	56.1
乾燥 58日	1	—	-247.6	—	-247.6	-212.4	-148.6	-728.0	53.2	8.67	53.4
	2	—	-246.6	-252.4	-239.0	-134.0	-84.8		50.4	8.21	52.2
乾燥 163日	1	-246.7	-260.0	-223.8	—	—	-150.5	-914.4	48.2	7.66	51.3
	2	-243.8	-284.8	-256.0	-203.8	—	-201.9		48.1	7.64	53.8

備考 ー：断線他で計測不可 V_c ：斜めひび割れ発生荷重/2

縮ひずみ増分がほぼ頭打ちとなったことや、試験体表面の軽微なひび割れが内部へ進展したことにより、鉄筋周辺のコンクリート剛性が低下したためと考えられる。引張鉄筋ひずみ値は圧縮鉄筋ひずみ値に比べて値が小さい傾向にあるが、これは図-1の断面図に示すように、ひずみゲージを張付けた位置の違いによるものと考えられる。封緘試験体の鉄筋ひずみは、材齢8日で -35μ に到達後、ほぼ一定となった。なお、鉄筋ひずみ値が短期間で増減している理由は、養生室内の温度制御不具合によるものである。図-4にははり試験体支点外の断面において図中に示す位置での相対湿度の材齢変化を示す。図中の断面内の○印と□印は、別試験体での計測値を意味する。計測は、コンクリート打込み時に $\phi 10\text{mm}$ の丸鋼を端断面から深さ5cm差込むことで設けた穴に、脱型後、温湿度センサーを設置して粘土とアルミテープで封緘することで行った。本実験で採用した小型断面であっても材齢163日では、はり試験体内部の相対湿度は周囲相対湿度60%に到達しておらず、およそ65%から75%の範囲の値となった。

載荷試験を、実験室内の気温が 20°C 付近の日を選んで、乾燥試験体については鉄筋ひずみがおおよそ -250μ となった材齢58日(圧縮強度 28.6N/mm^2)と材齢163日(圧縮強度 31.1N/mm^2)に、封緘試験体については材齢72日(圧縮強度 32.6N/mm^2)にそれぞれ2体ずつ実施した。

3. 載荷試験結果

図-5に載荷試験により得られた荷重-変位関係を示す。なお、変位は、計測されたスパン中央変位から、両支点断面上縁で計測した沈下量の平均値を差し引いた値であり、図には目視で確認された斜めひび割れ発生荷重を○印で示し、表-2にその値を示す。また、図-6に、載荷試験前後のひび割れ

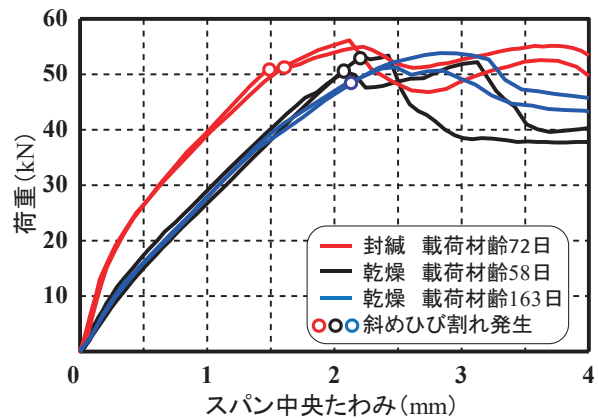


図-5 荷重-鉄筋ひずみ関係

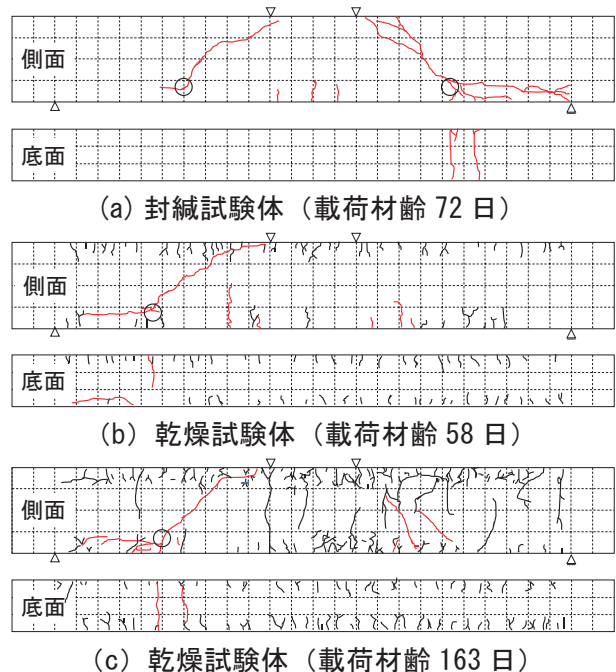


図-6 荷重載荷前後のひび割れ発生状況

れ性状の一例を示す。図では、荷重試験前に観察されたひび割れを黒線で、荷重載荷時のひび割れを赤線で示している。なお、荷重前に観察されたひび割れは全て軽微なものであり、アセトン塗布することで確認できる程度のひび割れであった。図-5より、収縮により導入された軽微なひび割れや初期ひずみ、初期応力により、初期剛性は低下し、材齢 163 日の斜めひび割れ発生荷重は、封緘試験体に比べてわずかに低下する結果が得られたが、せん断耐力に及ぼす影響は確認されなかった。荷重材齢により、コンクリートの圧縮強度が異なることから、既往のせん断強度評価式⁹⁾を用いて、斜めひび割れ発生時のせん断力を圧縮強度の 1/3 乗で除した値を表-2 に示すが、材齢 163 日荷重時は、封緘試験体と比較して 5%ほど低下しているが、58 日荷重の試験体では、わずかに高い値となっている。図-6 のひび割れ性状では、乾燥試験体に生じる引張鉄筋付近での斜めひび割れ位置 (○印位置) は、封緘試験体のそれと比べてわずかに支点側に移動する傾向となった。図-7 に、荷重-スパン中央引張鉄筋ひずみ関係を示す。図では、荷重ゼロ時のひずみを荷重前のひずみ値としている。図より、乾燥収縮により荷重前の鉄筋ひずみの値は異なるが、曲げひび割れ発生後は収縮の有無に関わらず、ほぼ同様な応答を示す結果が得られた。

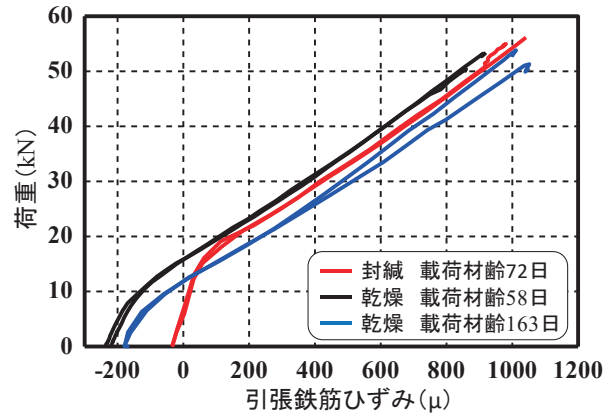


図-7 荷重-鉄筋ひずみ関係

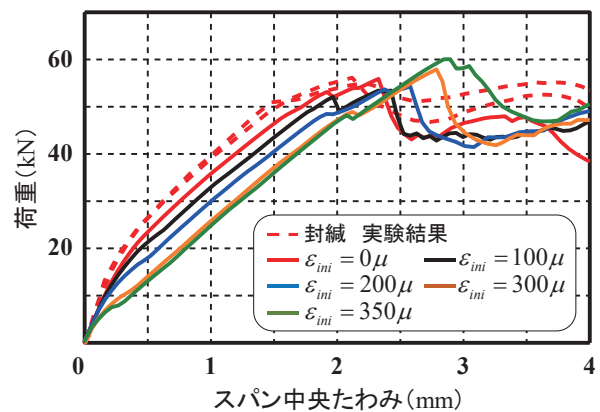


図-8 解析による荷重-変位関係

4. 解析的検討概要

実験のはり全体を2cm角の3次元アイソパラメトリック要素でモデル化し、鉄筋を埋込み鉄筋要素でモデル化した。コンクリート構成則には、材齢依存型構成則を使用せず、硬化コンクリート用の3次元格子等価連続体モデル⁶⁾を使用した。このモデルは、要素内の力の流れに沿った局所座標系に設定した3本のMain Latticeとひび割れ面を介して伝達されるせん断能力と直応力を評価するために、1ひび割れ面に対して4本設定されるShear Latticeを用いることにより、コンクリートの多軸挙動をそれぞれの格子に想定した応力-等価一軸ひずみ関係の組合せにより表現するモデルである。コンクリートの引張強度を2N/mm²とし、引張を受けるコンクリートの軟化領域には、等価長さ l を要素体積の3乗根として破壊エネルギーを導入した。なお、応力-等価一軸ひずみ関係等は参考文献⁶⁾を参照されたい。

本解析検討では、収縮によるはり部材内部の初期応力状態をコンクリート要素に部材軸方向のみ収縮の初期ひずみを導入することで模擬することとした。これは、図-4の部材内部の相対湿度変化では、部位に応じて相対湿度が65%から75%と開きはあるものの、小型の上下対称配筋断面であることから、ほぼ一様に収縮すると仮定したものである。図-8に封緘試験体の荷重-変位関係と初期ひずみ ϵ_{ini} をゼロとした解析結果の比較を示す。解析結果は、初期の剛性を過小評価しているが、後述するように斜めひび割れ発生荷重や破壊モードを良好に予測できていることから、この解析をベースとするとともに、実験で計測された-250 μ 程度の鉄筋ひずみを勘案して、コンクリート要素に与える初期ひずみの入力値を100, 200, 300, 350 μ と設定した。解析では、単純支持状態で所定の初期ひずみを10

表-3 解析結果

初期ひずみ $\epsilon_{ini}(\mu)$	鉄筋ひずみ		斜めひび割れ 発生荷重P(kN)		P_i/P_0 (-)	耐力 $P_m(kN)$		$P_{m,i}/P_{m,0}$ (-)
	$\epsilon_{圧縮}(\mu)$	$\epsilon_{引張}(\mu)$	P_0			$P_{m,0}$		
0	-2.9	2.9	P_0	53.14	1.00	$P_{m,0}$	55.90	1.00
100	-78.8	-73.1	P_1	52.08	0.98	$P_{m,1}$	53.44	0.96
200	-154.8	-149.0	P_2	48.47	0.91	$P_{m,2}$	54.33	0.97
300	-230.7	-225.0	P_3	48.88	0.92	$P_{m,3}$	57.90	1.04
350	-268.7	-262.9	P_4	48.18	0.91	$P_{m,4}$	60.07	1.07

備考 鉄筋ひずみ：載荷前のスパン中央断面の鉄筋ひずみ

μ 増分で導入したのちに自重を作用させ、変位制御にて荷重載荷を行った。

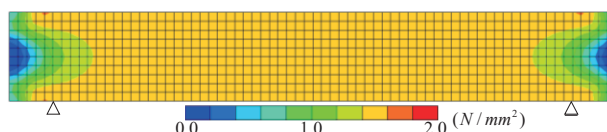


図-9 初期ひずみ導入時部材軸応力分布 (初期ひずみ 300 μ)

5. 解析結果および考察

図-9に、初期ひずみ導入後の部材軸方向の応力分布の一例を示す。コンクリート要素に一樣に初期ひずみを与えることから、部材端部で応力場が乱れるものの、スパン内の応力状態は断面幅方向についてはほぼ一様となる。初期ひずみ導入後の応力状態は弾性であり、力の釣合い後、100μの初期ひずみに対してコンクリートには約0.48N/mm²の引張応力が部材軸方向に導入される。また、初期ひずみを導入し、自重作用後の鉄筋ひずみ値を表-3に示す。コンクリートに350μの初期ひずみを導入すると、釣合い後の鉄筋ひずみは乾燥試験体の鉄筋ひずみとほぼ等しくなった。

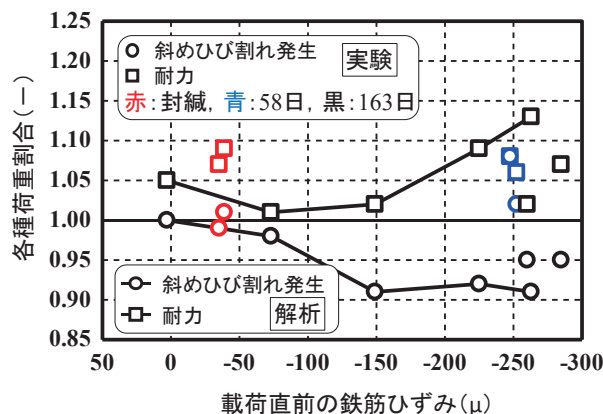


図-10 収縮が斜めひび割れ発生荷重、耐力に及ぼす影響

図-8の荷重-変位関係の比較から、初期応力の影響により曲げひび割れ発生荷重の低下が確認できる。図-5の乾燥試験体の荷重-変位関係では、初めから有意な剛性の低下が確認できることから、目視では判断できなかったが、実験では剛性を低下させるに十分なひび割れが発生していたものと考えられる。曲げひび割れ発生後の剛性に初期応力が及ぼす影響はないが、表-3にも示すように、斜めひび割れ発生荷重は、初期ひずみゼロ時の斜めひび割れ発生荷重と比較して最大で9%程度ほど低下した。なお、解析における斜めひび割れ発生荷重の評価は、荷重-変位関係において曲げひび割れ発生後の剛性が変化する点とした。図-10に、実験と解析で得られた斜めひび割れ発生荷重と耐力を、実験と解析それぞれで得られた封緘試験体や初期ひずみゼロ時の斜めひび割れ発生荷重で除した荷重割合と載荷直前の鉄筋ひずみの最大値の関係を示す。なお、鉄筋ひずみには、自重の影響を無視して、表-2、表-3中の全データを使用し、実験の荷重値は、載荷時の圧縮強度の違いによる影響を排除するために、各材齢時の圧縮強度の1/3乗で除している。図より、実験の斜めひび割れ発生荷重は、載荷材齢58日と163日で載荷直前の鉄筋ひずみはほぼ同等であるのに対して、58日では1.0を上回り、163日では下回る結果となった。この理由は定かではないが、収縮によりひび割れが発生した部位や、載荷時の気温の影響も考えられる。他方解析では、鉄筋ひずみ(コンクリートの初期応力)の増加に伴い低下する傾向が得られ、鉄筋ひずみが-150 μ以降で低下

率がほぼ一定となる結果となった。低下の理由は、**図-11**のひび割れ性状から、(c)より部材軸方向の引張初期応力の影響により斜めひび割れ角度が高くなったためと考えられる。また、ほぼ一定となった理由は、**図-7**に示したように、鉄筋ひずみの応答が作用曲げモーメントに対して初期ひずみ値によらずほぼ同等だったように、断面に作用する曲げモーメントやせん断力に抵抗するうちに、初期応力の影響が低くなったためと考えられる。また**図-11**より、初期応力の増加に伴い、曲げひび割れ本数の増加、曲げひび割れがより圧縮縁方向に進展すること、斜めひび割れがより支点側に移動することなどが確認でき、これらのはりの耐荷機構においてアーチ機構の割合を高めたことにより、耐力が増加したと考えられる。

6. まとめ

本研究では、乾燥収縮による初期応力がRCはり部材のせん断挙動に及ぼす影響について、実験および解析的検討を行った。本研究の範囲内では、実験的検討より、コンクリートの収縮により鉄筋に導入される初期ひずみが同等であっても、かぶり付近コンクリートに生じるひび割れの程度により

斜めひび割れ発生荷重が、封緘試験体のそれと比較して増減する結果が得られた。部材軸に一樣な初期応力状態を仮定した簡便な解析的検討でも、初期応力状態による曲げ・斜めひび割れ発生状況の違いがせん断耐荷機構を変化させることで、斜めひび割れ発生荷重が低下し、せん断耐力が高くなる傾向が得られたが、収縮がせん断挙動に及ぼす影響の定量化には、今後さらなる検討が必要である。

謝辞：本研究の一部に、科学研究費補助金（16K06476）および中部大学特別研究費の助成を得た。

参考文献

- 1) 垂井高架橋損傷対策特別対策委員会 中間報告書，土木学会，2005.9
- 2) 三谷昂大・兵頭彦次・太田光貴・佐藤良一：収縮による普通強度RCはりのせん断強度低下とその評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp.721-726，2011
- 3) 兵頭彦次・中山鉦紀・宮本和也・佐藤良一：乾燥収縮がRCはりのせん断強度低下に及ぼす影響評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp.643-648，2013
- 4) Gebreyouhannes, E., Yoneda, T., Ishida, T., Maekawa, K.: Multi-scale based Simulation of Shear Critical Reinforced Concrete Beams Subjected to Drying, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.12, pp. 363-377, 2014.10
- 5) 二羽淳一郎・山田一宇・横沢和夫・岡村甫：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，V-5，pp.167-176，1986
- 6) 田辺忠顕ほか：初期応力を考慮したRC構造物の非線形解析法とプログラム，技法堂出版，pp.201-314，2004.3

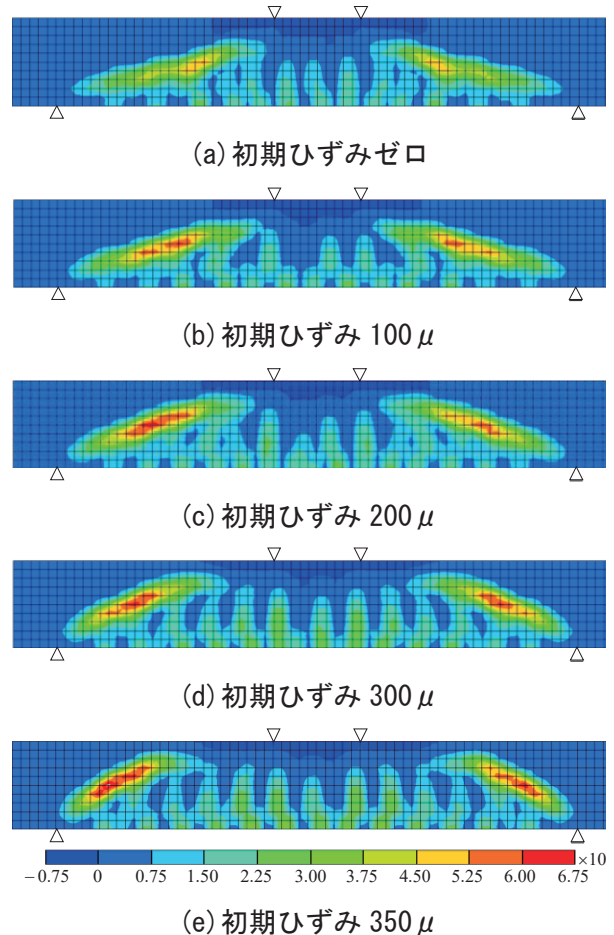


図-11 最大荷重時のひび割れ性状