

# 論文 HPCa 版合成スラブの乾燥収縮挙動とその影響

山本 俊彦\*1

**要旨** : HPCa 版と後打ちコンクリート相互の乾燥収縮の影響を模擬試験体により明らかにした。同断面の両端固定スラブの長期実験との比較から、HPCa 版コンクリートの収縮挙動の影響を検討した。実験の結果、HPCa 版は、後打ちコンクリート打設時に大きく吸水膨張を生じた。コンクリートの乾燥収縮は、補強筋の有無にかかわらず、打設方向の上面の方が大きく、打ち込みの影響が見られた。鉄筋のひずみは下側に比べ上側が 10%ほど大きく、また、コンクリートに対しては小さめの値を示した。スラブ試験体との比較では、HPCa 版スラブと一体打ちスラブで鉄筋のひずみ挙動が異なることを示し、HPCa 版の収縮の影響を明確にした。  
**キーワード** : HPCa 版, 乾燥収縮, 合成スラブ, 長期挙動, ひび割れ, 剛性

## 1. はじめに

HPCa 版を型枠とし、後打ちコンクリートで合成される鉄筋コンクリート造合成スラブは、建設工事合理化を目的として多く用いられている。先行して製作される HPCa 版は、後打ちコンクリートが打設されるまでに乾燥収縮が進行し、その後両者が一体の構造となる。このため、HPCa 版と後打ちコンクリートの長期的なひずみ挙動は、必ずしも同じとはならない。両者の乾燥収縮挙動を明らかにするため、コンクリートの打設手順に準じて模擬 HPCa 版合成スラブを作成し、その挙動を調べた。また、同断面の両端固定スラブ<sup>1), 2)</sup>における挙動と比較検討し、HPCa 版合成スラブの乾燥収縮挙動の解明を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体を **Table 1**, **Fig. 1** に示す。試験体は幅 400mm, 長さ 600mm, 厚さ 120mm の HPCa 版合成スラブ試験体 2 体、一体打ち 2 体で、それぞれ下端筋のみのスラブ中央と上端筋および下端筋の端部を模した。また、HPCa 版自体の収縮挙動を対象とした、厚さ 60mm の有筋を 2 体、無筋を 1 体作成した。鉄筋は、2-D10 を配し、かぶり厚さを 20mm とした。

なお、各試験体の内部鉄筋による拘束率を下式により求めると、

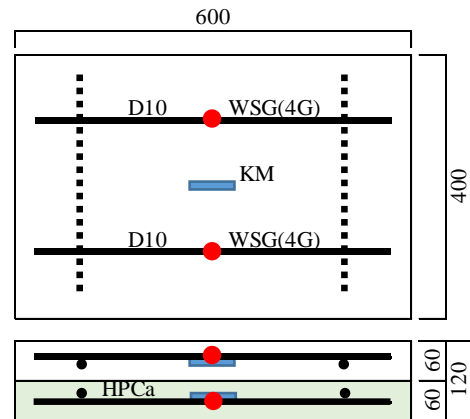
$$R = A_s \cdot E_s / (A_s \cdot E_s + A_c \cdot E_c / \phi) \quad (1)$$

ただし、

- $E_s$  : 鉄筋のヤング係数
- $E_c$  : コンクリートのヤング係数
- $\phi$  : コンクリートのクリープ係数
- $A_s$  : 鉄筋の断面積

**Table 1 Specimens**

Specimen	Thickness (mm)	Rebar			Concrete
		Top	Bottom	$p_g$ (%)	
HPCa-C	120	-	2-D10	0.30	I+II
HPCa-E	120	2-D10	2-D10	0.60	I+II
RC-C	120	-	2-D10	0.30	II
RC-E	120	2-D10	2-D10	0.60	II
P-EI	60	-	2-D10	0.60	I
P-EII	60	-	2-D10	0.60	II
P-C	60	-	-	0.00	II



**Fig. 1 Specimen**

$A_c$  : コンクリートの断面積

終局時の内部鉄筋による拘束率は、鉄筋とコンクリートのヤング係数比を  $E_s / E_c = 10$ 、クリープ係数を  $\phi = 3.0$  と仮定すると、合成スラブ中央で 0.082、端部で 0.152 となる。コンクリートの乾燥収縮を 8%ないし 15%程度減少させると推計される。

また、 $h$  比部材厚(mm)を下式<sup>3)</sup>により計算すると、

\*1 大同大学名誉教授 工博 (正会員)

$$h = 2A_c / u \quad (2)$$

ただし、

$A_c$  : コンクリートの断面積 (mm<sup>2</sup>)

$u$  : 雰囲気と接する周長 (mm)

HPCa 版で 26.1mm, 合成部材で 46.2mm となる。円柱供試体(100φ)では、12.5mm となる。それぞれ値が異なり、乾燥収縮やクリープの進行速度や最終値に影響を及ぼすが、基本的には直接得られた測定値により評価する。

## 2.2 使用材料

コンクリートの調合を **Table 2** に、その硬化後の特性を **Table 3** に示す。HPCa 版コンクリート I と後打ちコンクリート II の配合は同一で、HPCa 版打設後、材令 56 日に後打ちコンクリート II を打設した。また、使用鉄筋の特性を **Table 4** に示す。

## 2.3 ひずみ測定方法

**Fig. 1** に示すように、鉄筋中央に ●4-Gauge を添付しひずみを計測した。また、コンクリートは、■埋め込みゲージ(KM)を HPCa 版および後打ちコンクリートの中央に、鉄筋と同じ被り 20mm を取った位置に設置しひずみを計測した。

## 2.4 実験条件

実験は、外気の温湿度に影響を受ける実験室内で行った。HPCa 版は、打設後 7 日間湿潤養生し、その後実験室内に放置した。後打ちコンクリートは HPCa 版コンクリート打設後、材令 56 日で打設した。その後材令 86 日まで 28 日間、乾燥を防ぐシート養生し、その後室内に自然放置した。実験期間の温度および湿度の変化を **Fig. 2** に示す。近隣の外気の平均温湿度はそれぞれ 13.3°C, 65.2% RH であった。

## 3. 実験結果

### 3.1 円柱供試体コンクリートの乾燥収縮

実験室内に置いた φ100mm×200mm 円柱供試体コンクリートの乾燥収縮を、**Fig. 3** に示す。測定は、円柱供試体中央位置の断面中心に埋め込んだゲージ(KM)により行った。コンクリート I は、7 日間の湿潤養生の後乾燥収縮を開始し、後打ちコンクリート II 打設までに 280μ の乾燥収縮が生じた。後打ちコンクリートの打設に伴い一旦回復したのち、乾燥収縮量は材令 240 日で 584μ、後打ちコンクリート II のそれは 620μ で、違いは 6% ほど差はなかった。

### 3.2 中央部スラブの乾燥による収縮

**Fig. 4** に HPCa-C, **Fig. 5** に RC-C のひずみ変化を示す。また、コンクリートと鉄筋のひずみの一覧を **Table 5** に示す。図中添字 T は上側, B は下側を示す。HPCa-C は

**Table 2 Mix Proportions of Concrete**

Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	Gravel (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Admixture (kg/m <sup>3</sup> )
271	171	63.1	949	910	2.71

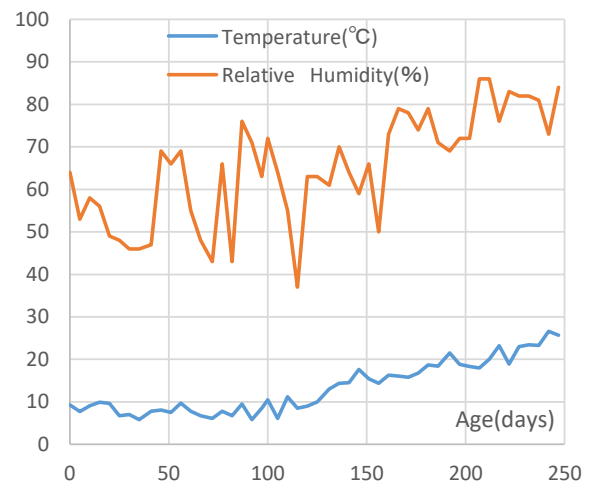
**Table 3 Concrete Strength and Young's Modulus**

Concrete	Age (days)	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_b$ (MPa)	$E_c$ (GPa)
I	28	24.5	2.13	4.05	22.5
	365	28.7	2.79	5.64	26.7
II	28	26.9	2.28	3.31	22.7
	365	28.1	2.66	5.21	24.4

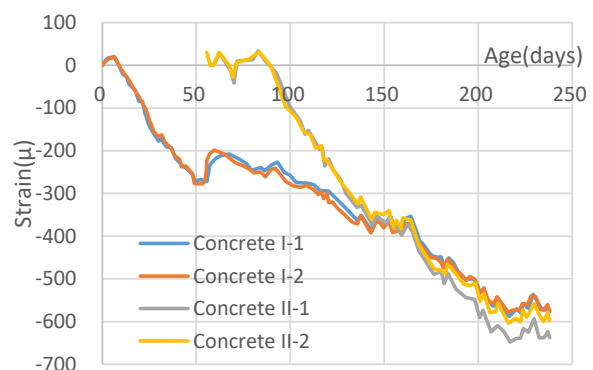
**Table 4 Mechanical Properties of Reinforcing Steel**

Diameter	$a_s$ (mm <sup>2</sup> )	$f_y$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$E_s^*$ (GPa)
D10	71.3	356	510	186

\*Measured with 4-Gauge on Steel Surface



**Fig. 2 Temperature and Humidity**



**Fig.3 Drying Shrinkage of Concrete I and II**

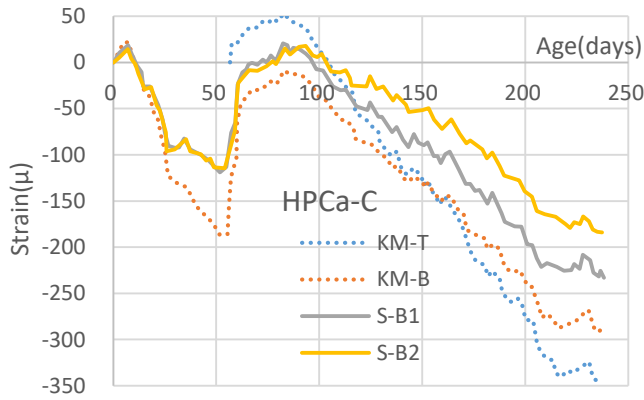


Fig.4 Drying Shrinkage of HPCa-C

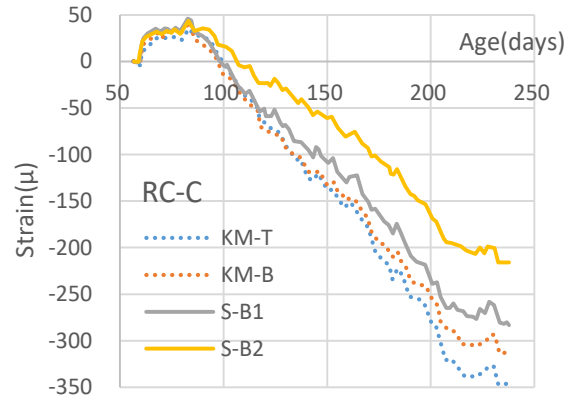


Fig.5 Drying Shrinkage of RC-C

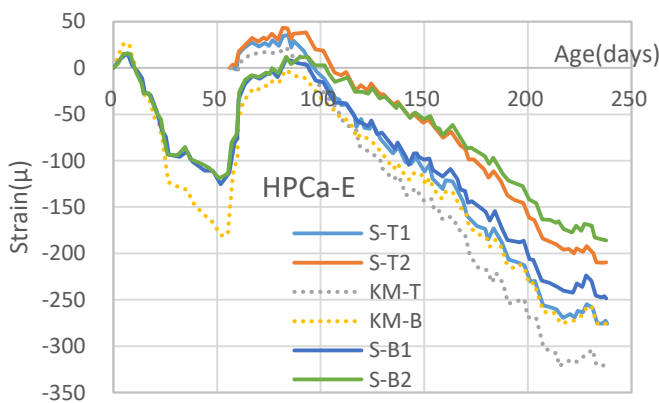


Fig.6 Drying Shrinkage of HPCa-E

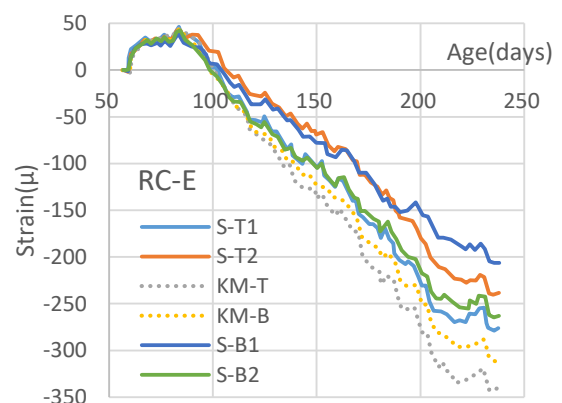


Fig.7 Drying Shrinkage of RC-E

コンクリート打設後湿潤養生によりやや膨張し、その後後打ちコンクリート打設までに $-100\mu \sim -200\mu$ に収縮した。材令 28 日程度以降で、コンクリートと鉄筋ひずみに差異が生じた。拘束鉄筋とその間のコンクリートのひずみの差異は、試験体の形状・配筋、拘束条件等の影響が考えられる。ひずみ差が大きくなれば、ひび割れの発生起因にもなりうると予測される。その後、打設に伴う吸水によりコンクリート・鉄筋共に、ほとんど収縮ゼロ程度に回復した。打設コンクリートの水和反応による温度上昇はわずかであった。材令 86 日の湿潤養生の終了後乾燥による収縮が始まり、材令 240 日で後打ちコンクリートで $-345\mu$ 、HPCa 部分で $-292\mu$ となった。鉄筋は $-211\mu$ で、コンクリートの 72%であった。

RC-C の一体打ち試験体は、コンクリート打設後の湿潤養生期間中に、 $35\mu \sim 45\mu$ の膨張を示し、その後乾燥による収縮が進行した。材令 240 日の上端コンクリートで $-347\mu$ 、下端で $-314\mu$ となった。また、鉄筋は $-252\mu$ で、コンクリートの 80%であった。

HPCa-C と一体打ち RC-C との比較では、コンクリートの収縮ひずみは下側ではほぼ同じであったが、上側では HPCa-C のほうが 10%ほど小さな値を示した。一方鉄筋では、下側のみの配筋であるが HPCa-C のほうが 20%

Table 5 Concrete and Steel Strain ( $\mu$ )

Age (days)	HPCa-C			RC-C		
	KM-B	S-B1,2	KM-T	KM-B	S-B1,2	KM-T
0	0	0	-	-	-	-
7	22	17	-	-	-	-
56	-186	-117	0	0	0	0
86	-9	14	53	43	45	35
240	-292	-211	-345	-314	-252	-347

Age (days)	HPCa-E			
	KM-B	S-B1,2	KM-T	S-T1,2
0	0	0	-	-
7	26	16	-	-
56	-181	-123	0	0
86	-2	9	22	40
240	-276	-220	-322	-245

Age (days)	RC-E			
	KM-B	S-B1,2	KM-T	S-T1,2
56	0	0	0	0
86	43	41	45	37
240	-312	-238	-343	-262

ほど小さな値を示した。収縮ひずみの抑制効果が HPCa でみられる結果となった。

### 3.3 端部試験体の乾燥収縮

Fig. 6 に HPCa-E, Fig. 7 に RC-E のひずみ変化を示す。HPCa-E, 一体打ち RC-E とともに全体の傾向は中央部試験体とほぼ同様な挙動を示し、複筋配筋のため全般的にややひずみが少ない傾向を示した。

HPCa-E のコンクリートの収縮ひずみは、下側で-276 $\mu$ , 上側で-322 $\mu$  となった。鉄筋ひずみはこの 76%~80% となった。RC-E のコンクリートの収縮ひずみは、下側で-312 $\mu$ , 上側で-343 $\mu$  となった。鉄筋ひずみはこの 76% となった。

HPCa-E と一体打ち RC-E との比較では、コンクリートの収縮ひずみは下側、上側とも HPCa-E のほうが 6%~12% 小さい値を示した。また、ひずみは HPCa-E のほうが 6%~8% 小さい値を示した。収縮ひずみの抑制効果は、中央部と同様 HPCa でみられる結果となった。

### 3.4 収縮ひずみ値

材令 56 日, 86 日, 240 日の HPCa-C および HPCa-E のひずみ変化を, Fig. 8, Fig. 9 に示す。一旦乾燥の後, 吸水により膨張し, 再度乾燥が進む<sup>4)</sup>という HPCa 版のひずみ挙動がよく示されている。

Table 6 に各試験体の収縮ひずみ値をまとめて示す。乾燥収縮はコンクリート鉄筋共にスラブ上側の方が大きく下側はその 0.85 から 0.91 であった。また、コンクリートの収縮ひずみに対する鉄筋の比率は、0.72 から 0.80 であった。

## 4. 両端固定スラブ試験体実験<sup>1), 2)</sup>

前述の乾燥収縮試験体と同断面で構成された、両端固定スラブの長期実験結果と比較検討する。前述の模擬試験体と同様の条件であるが、長さ方向に連続し端部にスタブが付いており、また曲げ応力を受けるとい違いがある。

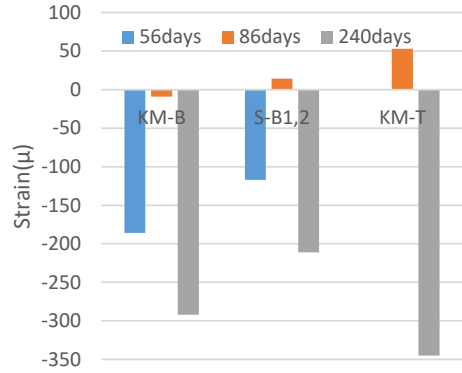


Fig. 8 Change in Shrinkage of HPCa-C

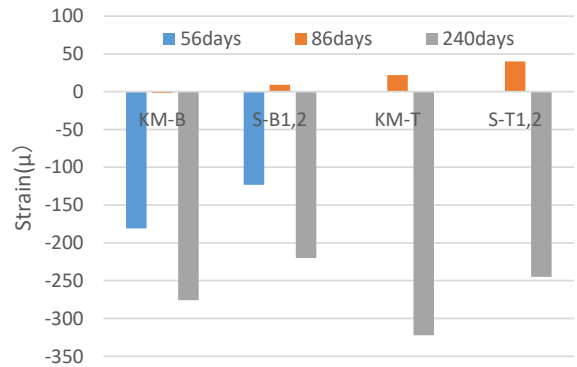


Fig. 9 Change in Shrinkage of HPCa-E

Table 6 Shrinkage ( $\mu$ )

	Concrete			Steel		
	Top	Bot.	B/T	Top	Bot.	B/T
HPCa-C	-345	-292	0.85	-	-211	-
HPCa-E	-322	-276	0.86	-245	-220	0.90
RC-C	-347	-314	0.90	-	-252	-
RC-E	-343	-312	0.91	-262	-238	0.91
P-EI	-500	-	-	-321	-	-
P-EII	-408	-	-	-320	-	-
P-C	-437	-	-	-	-	-

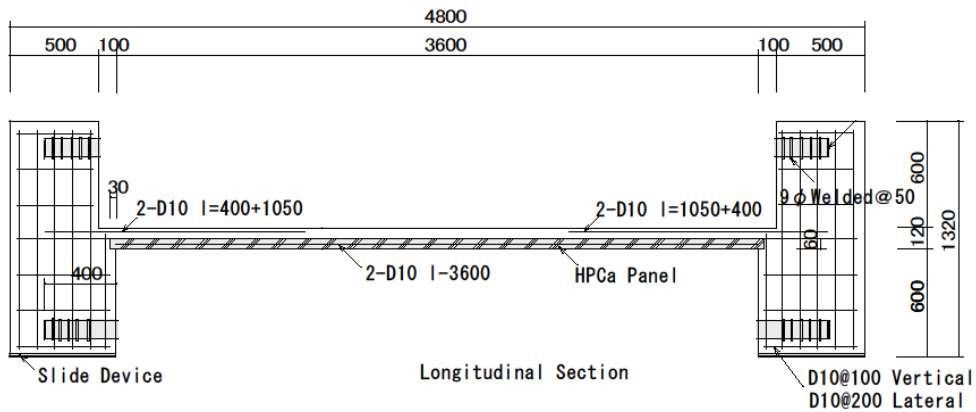


Fig. 10 Specimen HPCa-1

Table 7 Slab Specimens

Specimen	Span (mm)	Thickness (mm)	Width (mm)	Steel Bar			w (kN/m)	
				End	Center	$p_t$ (%)	D.L.	L.L.
HPCa-1	3600	120(60+60)	400	2-D10	2-D10	0.375	1.13	1.13
RC-1	3600	120	400	2-D10	2-D10	0.375	1.13	1.13

4.1 試験体

Fig. 10 に試験体 HPCa-1, Table 7 に試験体一覧を示す。試験体は 2 体で, HPCa スラブと一体打ち RC スラブである。HPCa パネルの厚さはスラブ厚の 1/2 の 60mm で, 幅 400mm, 長さ 3660mm である。試験体は, 両端固定スラブとし, 両側にスタブを設けている。このスタブにより, 端部の回転を抑止している。また, スタブ下部の Slide Device により水平方向の拘束をなくしている。材令 56 日に支保工解体と同時に積載荷重を加えた。

4.2 HPCa-1 試験体

Fig. 11 に試験体 HPCa-1 の中央部のコンクリートと鉄筋のひずみを示す。図中添え字 KM はコンクリートを, S は鉄筋ひずみを示し, T は上側, B は下側である。コンクリート打設後湿潤養生によりやや膨張し, その後, 後打ちコンクリート打設までに  $-200\mu \sim -250\mu$  収縮した。後打ちコンクリートの打設に伴う吸水によりコンクリート・鉄筋の収縮は  $-50 \sim -100\mu$  程度に回復した。鉄筋のひずみがコンクリートのひずみより小さいのは, 模擬試験体と同様である。また, 後打ちコンクリートのひずみは, 湿潤養生により初期に膨張を示した。材令 86 日の載荷で, 引張側・圧縮側それぞれ弾性ひずみ (計算値: 約  $35\mu$ ) が生じた。しかし, その後は乾燥収縮が勝り, 全般的に収縮ひずみが増大した。材令 240 日までで圧縮側コンクリートで  $-389\mu$ , HPCa 部分でコンクリート  $-284\mu$ , 鉄筋は  $-257\mu$  であった。

Fig. 12 に試験体 HPCa-1 の両端部のひずみ変化を示す。初期材令では, 複筋配筋のため全般的にややひずみが少ない傾向を示した。材令 86 日の載荷で, 引張側・圧縮側それぞれ弾性ひずみ (計算値: 約  $70\mu$ ) が生じた。その後, 引張側鉄筋は大きく引張ひずみが伸長し最大  $581\mu$  に, また圧縮側コンクリートは最小  $-504\mu$  に達した。模擬試験体と異なり大きな曲げ応力が加わりひび割れ発生の影響と考えられる。これは, 後述の RC-1 試験体との比較で, HPCa 版が後打ちコンクリート打設後吸水膨張し, 後打ちコンクリートにその強度発現に伴い引張応力を生じせしめたことが考えられる。

4.3 RC-1 試験体

Fig. 13 に試験体 RC-1 の中央部のコンクリートと鉄筋のひずみを示す。コンクリート打設後の湿潤養生期間中に膨張を示し, 材令 86 日の載荷で引張ひずみが生じるがその後は乾燥収縮が勝り, 全般的に収縮ひずみが増大

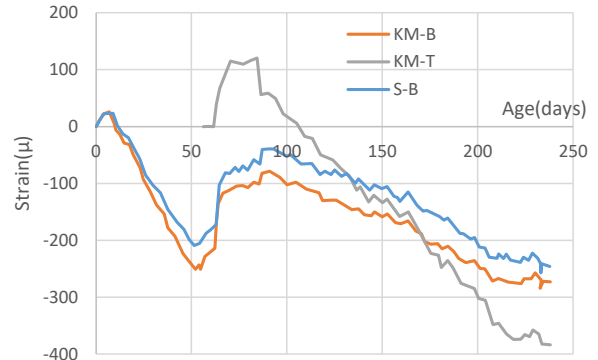


Fig. 11 Change in Strain of HPCa-1 at Center Portion

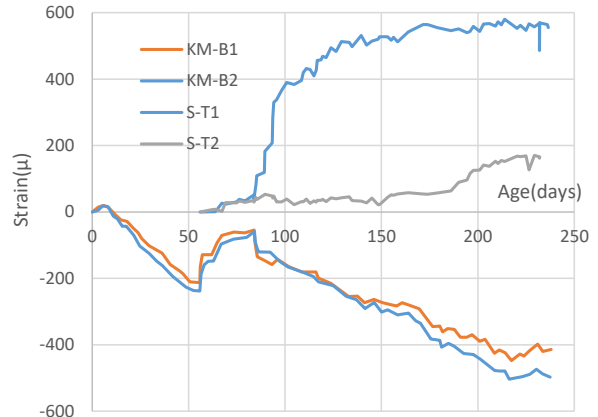


Fig. 12 Change in Strain of HPCa-1 at Both Ends

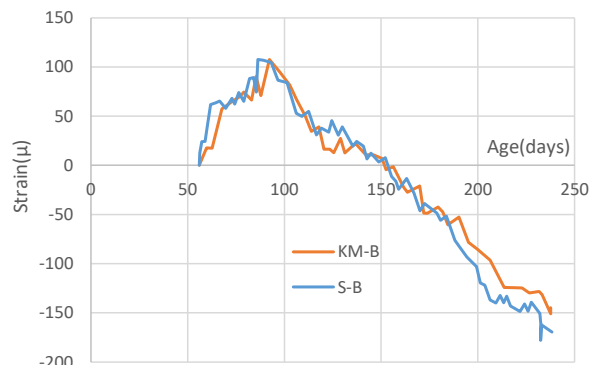


Fig. 13 Change in Strain of RC-1 at Center Portion

した。材令 240 日までで引張応力を受けるにもかかわらず, コンクリートで  $-151\mu$ , 鉄筋  $-178\mu$  であった。Fig. 14 に試験体 RC-1 の両端部のひずみ変化を示す。全体の傾向は中央部試験体とほぼ同様な挙動を示している。材令 86 日の載荷で載荷による弾性ひずみが生じるがその後は乾燥収縮が勝り, 全般的に収縮ひずみが増大した。

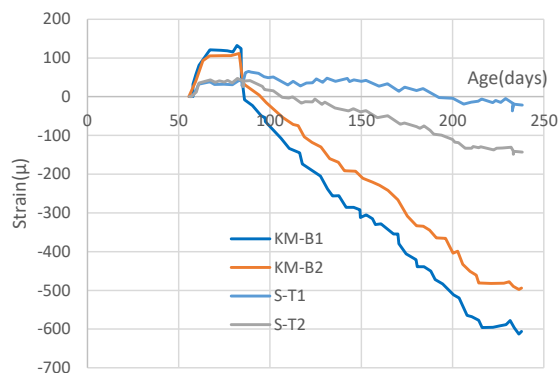


Fig. 14 Change in Strain of RC-1 at Both Ends

#### 4.4 コンクリートおよび鉄筋ひずみ値

材令 56 日, 86 日, 240 日のコンクリートと鉄筋のひずみを Table 8 に, HPCa-1 のひずみを Fig. 15 に示す。材令 56 日まで一旦乾燥の後, 吸水により膨張し, 再度乾燥が進むという HPCa 版のひずみ挙動がよく示されている。HPCa 版の吸水膨張により中央部圧縮側のコンクリートの初期の正側のひずみの増大が大きくなっている。同時に引張応力の発生も予測される。

#### 4.5 試験体の剛性変化とひび割れ状況

両端固定スラブ実験では, 長期的な剛性変化とひび割れ発生状況とを調べており, HPCa 版の乾燥収縮の影響を検討する。剛性変化では, 材令 86 日の荷重載荷時を基準とすると, 材令 233 日での比率は, HPCa-1 で 0.92, RC-1 で 1.20 となった。Table 9 に, ひび割れ発生状況を示す。いずれもひび割れの発生は見られるが, HPCa-1 端部でのひび割れ幅が大きい。一方, RC-1 および HPCa-1 中央部では, わずかに目視できる程度のひび割れである。このように, HPCa 版の乾燥収縮の影響により, 荷重による曲げ応力の大きい場合には, 剛性低下を生じさせることが考えられる。曲げ応力が端部に比べ 1/2 の試験体中央部は, HPCa 版の乾燥収縮の影響は少ないと考えられる。

#### 5. まとめ

- 1) HPCa 版コンクリートの収縮挙動が明らかになった。HPCa 版は, 後打ちコンクリート打設時に吸水膨張を生じた。
- 2) コンクリートの乾燥収縮は, 補強筋の有無にかかわらず, 打設方向の上面の方が 10%~18%大きかった。
- 3) 鉄筋のひずみは下側に比べ上側が 10%ほど大きく, また, コンクリートに比し小さめの値を示した。
- 4) スラブ試験体の場合, HPCa 版スラブと一体打ちスラブで鉄筋のひずみ挙動が異なり, HPCa 版の収縮の影響が見られた。

Table 8 Concrete and Steel Strain ( $\mu$ )

Age (days)	HPCa-1-C			HPCa-1-E		
	KM-B	SB	KM-T	KM-B	S-T1	S-T2
0	0	0	-	0	-	-
7	23	23	-	18	-	-
56	-251	-203	0	-224	0	0
86	-101	-66	120	-59	35	37
240	-273	-246	-384	-476	563	169

Age (days)	RC-1-C		RC-1-E			
	KM-B	S-B	KM-B1	KM-B2	S-T1	S-T2
56	0	0	0	0	0	0
86	74	74	132	112	41	46
240	-151	-178	-613	-494	-21	-143

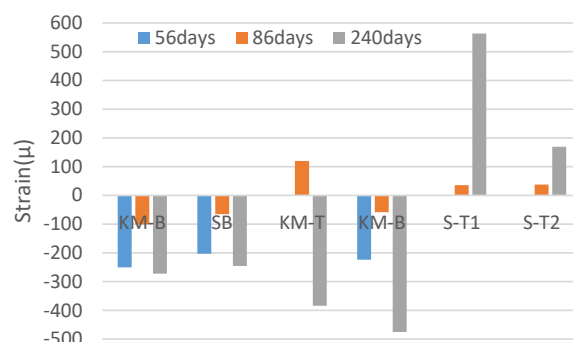


Fig. 15 Concrete and Steel Strain (Center and Ends)

Table 9 Number of Cracks and Crack Width

Number	Position	Age (days)	HPCa-1		RC-1
			Ends	Center	Ends
233	Ends	233	2	3	
	Center		0	1	
1103	Ends	1103	2	3	
	Center		2	1	
Width (mm)	Ends	1103	0.10~0.15	0.04~0.06	
	Center		0.04	0.04	

#### 参考文献

- 1) 山本俊彦: HPCa 版スラブの長期乾燥収縮挙動, 日本建築学会大会, 2019.9
- 2) 山本俊彦: 乾燥収縮により外部拘束を生じる鉄筋コンクリート造スラブの長期挙動に関する実験研究, コンクリート工学年次論文集, 2018.7
- 3) CIB, Model Code 2010 - First complete draft, Federation International du Beton, 2010
- 4) Hermite, R. L. et. al., "Nouvelle contribution a l'etude du retrait des ciments, Annales de l'Institute Tequnuque du Batiment et de Travaux Publics. No. 106. Liants Hydrauliques No.5, Dec. 1949.