

論文 乾燥収縮を拘束した HPCa 版と一体スラブの長期挙動と終局耐力

山本 俊彦*1

要旨: HPCa 版スラブの軸方向の伸縮挙動は、スラブ合成までは乾燥収縮が進行し、合成後は一転、HPCa 版の吸水により膨張に転じた。この膨張は、拘束鋼材に引張応力を発生させ、同時に HPCa 版スラブに軽微な圧縮応力を生じさせたが、その後早期に消失し引張に転じた。試験体の長期間の剛性は、無拘束スラブではほぼ弾性挙動を示し、拘束スラブで引張応力により著しい低下をきたした。これらの現象を鉄筋ひずみ、ひび割れ状況より解明した。終局耐力は HPCa 版スラブと一体打ちスラブとの間で大きな差は見られなかった。鋼材で拘束された試験体は膨張に伴う圧縮応力の発生により、終局耐力計算値の約 2 倍の耐力を発現した。

キーワード: 乾燥収縮, スラブ, 長期挙動, 外部拘束, ひび割れ, 終局強度

1. はじめに

鉄筋コンクリート造スラブは、通常梁・柱・壁などに支持されるが、同時にコンクリートの乾燥収縮が拘束されることとなる。このため、乾燥収縮の拘束により引張応力が生じ、長期・短期の構造性能に影響を与える。これらの影響を明らかにするため、鉄筋コンクリート造スラブの長期挙動に関する実験を行い、結果を報告している¹⁾。この長期載荷実験では、材令 1047 日までに拘束スラブでは短期剛性が弾性計算値の 0.5~0.2 に低下し、長期たわみは弾性たわみの約 17 倍に達した。一方、拘束のないスラブはほぼ弾性体を維持し、剛性比はおおよそ 1.0、長期たわみの倍率は約 9 倍であった。また、乾燥収縮の拘束により、拘束スラブでは主筋降伏が生じ、ひび割れも 0.6mm~0.85mm に達し、乾燥収縮の影響が顕著であった。ここでは、この様な差異を生じた原因を、実験結果の検討に基づき明らかにするものである。

さらに、鉄筋コンクリート造スラブの耐力を長期・短期にわたって把握するため、同じ長期載荷試験体を用い終局耐力実験を行った。長期載荷実験で、損傷の生じたスラブが、終局耐力にどのような影響を及ぼすかを把握するものである。

2. 実験概要

実験内容については、文献¹⁾に詳述されているのでここではその概要を述べる。

2.1 試験体

Table 1 に試験体一覧を、**Figure 1** に試験体 HPCa-2 を示す。試験体は 4 体で、HPCa スラブ 2 体、一体打ち RC スラブ 2 体である。それぞれ 2 体のうち 1 体を角鋼管で乾燥収縮を軸方向に拘束している。HPCa スラブは、コンクリートの打設時期の違いによる収縮差の影響を見るものである。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。スラブ断面は、厚さ 120mm、幅 400mm で、試験スラブのスパンは、3600mm 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。

スラブは、梁で支持されることを考慮して、スラブ上面を 100mm ずつ長くしている。配筋は、HPCa パネルおよび RC スラブ下筋は 2-D10、上筋は、両端部に 2-D10 を配し、引張鉄筋量(p_t)は、端部・中央とも 0.375% である。かぶり厚さは、上筋、下筋ともに 20mm である。

長期積載荷重は自重と同じで併せて 2.26kN/m で、コンクリートの曲げ応力はひび割れの生じる程度の 25.4MPa、ひび割れ後の鉄筋応力は、長期許容応力程度の 205MPa である。固有振動数は、全荷重に対して、振動障害が起これないとされる 15Hz 以上である。

2.2 軸方向拘束

乾燥収縮を拘束するため、試験体 HPCa-2 および RC-2 は、角鋼管 100×100×3.2 を両スタブ間に 4 本配した。拘束率は下式により求めた。

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

ただし、

E_s : 拘束鋼材のヤング係数

Table 1 Specimens

Specimen	Span (mm)	Thickness (mm)	Width (mm)	External Restraint Condition	
				Material	Ratio
HPCa-1	3600	120(60+60)	400	-	0
HPCa-2	3600	120(60+60)	400	4-□100×100	0.752
RC-1	3600	120	400	-	0
RC-2	3600	120	400	4-□100×100	0.752

*1 大同大学名誉教授 工博 (正会員)

E_c : コンクリートのヤング係数
 $E_s/E_c=10$
 ϕ : コンクリートのクリープ係数, 3.0
 A_s : 拘束鋼材の断面積, 4,852mm²
 A_c : コンクリートの断面積, 48,000mm²

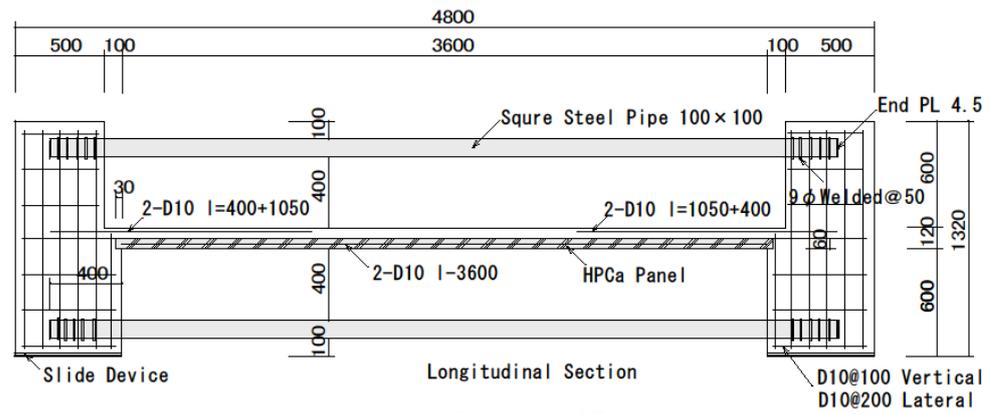


Figure 1 Specimen HPCa-2

拘束率は 0.752 とかなり大きな値である。なお、すべての試験体で床との摩擦抵抗を極力少なくするため、試験体スタブの底面に鋼板とテフロンシートによる滑り支承を設けている。

2.3 使用材料

コンクリートの4週圧縮強度は 24.5MPa~26.9MPa, 材令1年では 28.1MPa~31.1MPa である。鉄筋は直径10mmで、主筋のうち1本は普通鉄筋, 他の1本は鉄筋計で, SD295材である。

2.4 載荷・除荷の工程

Table 2 に長期実験の載荷, 除荷計画を示す。表示の材令は, 試験体 HPCa-1, 2 および RC-1 のコンクリート打設日を基準に示している。HPCa 版のコンクリート打設は, 試験体打設の 56 日前である。初期載荷の後, 材令 177 日と 365 日で一旦除荷と載荷を行い, 最終除荷を材令 1047 日で行った。除荷後, 最終測定は材令 1072 日で行った。

Table 2 Loading Time Table *

First Loading	Removal I Reloading I	Removal II Reloading II	Final Removal
30	177	365	1047

*Age(days) From Concreting of the Specimen

2.5 実験室の温湿度

HPCa 版コンクリート打設から, 載荷途中までの 240 日間の実験室内の温度は, 4℃~24℃で平均 13℃, 平均相対湿度は 45%RH~90%RH で平均 75%RH であった。また, 参考のため近隣屋外で測定された実験期間 1072 日の平均気温は 16.1℃, 平均相対湿度は 68.4%RH であった。これを, Figure 2 に示す。

2.4 コンクリートの乾燥収縮・クリープ

実験室内に置いた 100×100×400mm プリズムは, 湿潤養生後材令 7 日で乾燥開始した。乾燥収縮量は実験期間 1072 日で, HPCa コンクリートで 663μ, 後打ちコンクリートで 649μ であった。

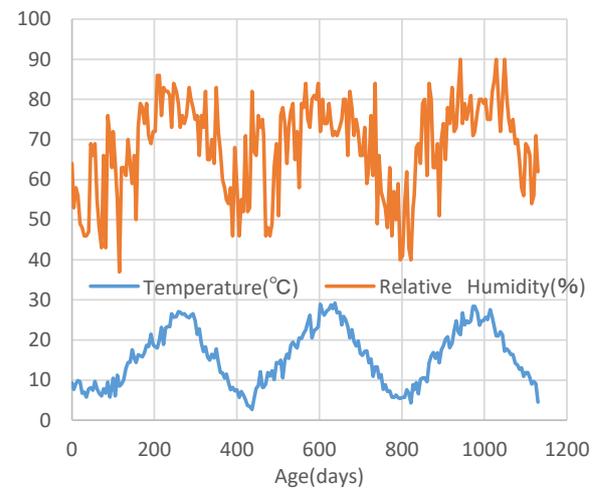


Figure 2 Temperature and Humidity

実験室内に置いた 100φ×200mm 円柱コンクリートのクリープ係数は, 材令 30 日に載荷を開始し, 材令 184 日までの 154 日間で 2.7 であった。

3. 試験体軸方向変形

3.1 軸方向伸縮の経時変化

Figure 3 に試験体の軸方向変形¹⁾を示す。初期載荷時にはいずれの試験体も軸方向にわずかに伸び, その後, 材令の増加とともに軸方向に縮んでいる。拘束試験体は拘束材の反力としてスラブ断面に応力を与える。拘束のない試験体は乾燥収縮の進展に伴い, 材令 365 日あたりまで進展し, 材令 637 日で最も縮み, 環境の温湿度の変化や乾燥収縮応力の緩和により, その後は緩和に向った。最大ひずみは, 291~369μとなった。拘束試験体は, 材令 177 日で最も縮みその後徐々に緩和されて行った。拘束試験体の最大ひずみは, 55~63μであった。両者の比から拘束率を計算すると 0.68~0.82, 平均 0.75 となった。

3.2 軸方向応力発生時の経時変化

試験体の拘束鋼材にひずみゲージを添付し, 初期の軸方向応力を計測した。HPCa 試験体は, 試験体打設時に HPCa 版が後打ちコンクリートから吸水し膨張すること

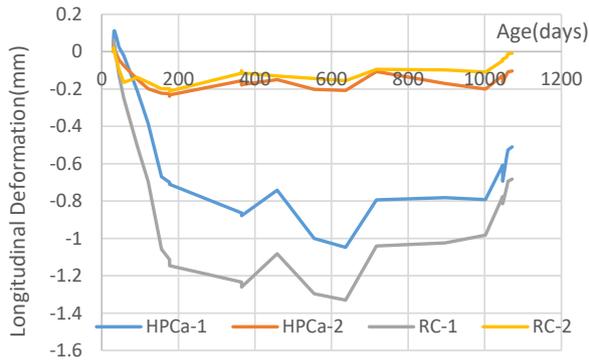


Figure 3 Change in Longitudinal Deformation

等も加わり、後打ちコンクリートの強度発現とともに、時間経過に伴い、拘束鋼材に引張ひずみを生じさせる。HPCa-2 試験体の 4 本の鋼材に生じたひずみを Figure 4 に示す。載荷時材令 30 日で鋼材に生じている引張ひずみは 20.0 μ 程度で、HPCa 版に近い下側の方が大きい。この時のコンクリートスラブに生ずる圧縮応力は、0.42MPa となる。その後、上側は材令 70 日以降、下側は 100 日以降圧縮側に移行する。



Figure 4 Change in Restraint Steel Strain
(U1, U2: upper side, L1, L2: lower side)

上記の存在鋼材応力を考慮して、下式により拘束鋼材によって試験体スラブに生ずる応力を求めた。これを Figure 5 に示す。

$$\sigma_c = F_s / a_c - \sigma_o \quad (1)$$

$$F_s = a_s \cdot E_s \cdot \varepsilon_s$$

$$\varepsilon_s = \delta_s / L$$

ここに、 σ_c : コンクリート応力 (MPa)
 σ_o : 載荷時初期コンクリート応力 (MPa)
 F_s : 拘束鋼材合応力
 a_c : スラブコンクリート全断面積 (48,000mm²)

a_s : 拘束鋼材全断面積 (4,852mm²)
 E_s : 拘束鋼材合静弾性係数
 ε_s : 拘束鋼材ひずみ
 δ_s : 拘束鋼材伸縮量
 L : 拘束鋼材全長 (3,600mm)

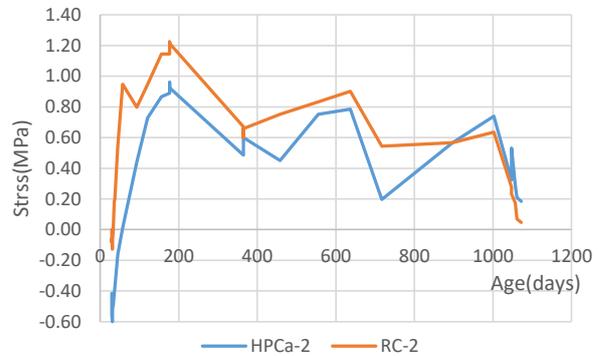


Figure 5 Change in Longitudinal Stress

拘束試験体は、材令 177 日で最大引張応力を生じ、コンクリート全断面に対して 0.96MPa~1.23MPa の引張力が生じた。コンクリートの引張強度の約半分の値である。その後は、ひび割れの進展やスラブ自体の剛性低下などにより、軸方向引張応力は緩和されていった。特に RC-2 は、最終的に拘束引張力はほぼ消失した。

3.3 軸方向伸縮の差

HPCa 試験体および RC 試験体の拘束の有無による軸方向の伸縮差を下式により求め、Figure 6 に示す。軸方向変形差は、材令 177 日までの初期に大きく広がり、365 日から 600 日余で最大の 0.80mm-1.2mm 程度となり、そ

$$D_{\delta_s}(\text{HPCa-2}) = \delta_s(\text{HPCa-2}) - \delta_s(\text{HPCa-1}) \quad (2)$$

$$D_{\delta_s}(\text{RC-2}) = \delta_s(\text{RC-2}) - \delta_s(\text{RC-1}) \quad (3)$$

ここに、 D_{δ_s} : 軸方向変形差

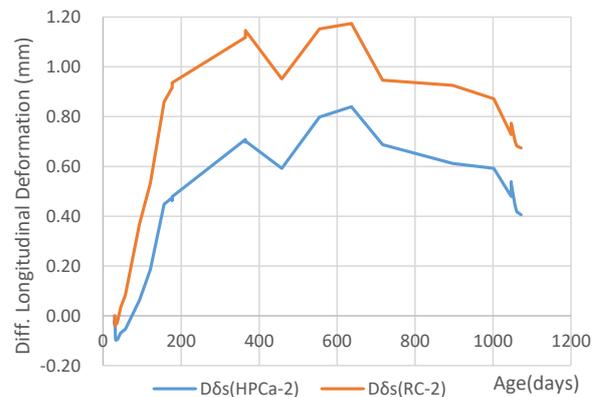


Figure 6 Change in Differential Longitudinal Deformation

の後減少していく。拘束のない場合に、乾燥収縮によって収縮するはずの軸方向の変形は、拘束試験体では、ひび割れの発生やクリープによる軸方向の伸びが生じることによって適合していると考えられる。

Table 3 に各試験体のひび割れ発生状態を示す。ひび割れによる試験体の軸方向の膨張をスラブ中央と仮定し、下式により概算し示した。ただし、ひび割れ幅 0.05mm 以下は影響が少ないとして無視した。

$$\delta_{ex} = \sum w_{cr} \cdot (60 - x_n) / (120 - x_n) \quad (4)$$

ここに、 w_{cr} ：ひび割れ幅(mm)

x_n ：中立軸位置(mm)

Table 3 Number of Cracks and Crack Width (mm)

Position	Age*	HPCa-1	HPCa-2	RC-1	RC-2
End-1		1	1	2	1
Center	177	0	3	1	6
End-2		1	1	1	1
End-1		1	1	2	1
Center	1047	2	3	1	9
End-2		1	1	1	1
End-1		0.15	0.60	0.06	0.70
Center	1047	0.04	0.35	0.04	0.55
End-2		0.10	0.85	0.04	0.85
δ_{ex}^{**} (mm)		0.09	0.71	0.02	0.93

*days **Longitudinal Expansion due to Cracks

HPCa-2 および RC-2 のひび割れによるスラブ厚さ中央位置での伸びは、0.71mm および 0.93mm となる。HPCa-1 および RC-1 のそれを引くと、0.62mm および 0.91mm となり、**Figure 6** に示される最大値の 75%程度となった。軸方向変形差は、多くは乾燥収縮による引張応力によるひび割れによって生じていると考えられる。

4. 鉄筋応力とスラブ剛性

試験体両スタブ端部の鉄筋 (End-Left, Right) と中央下筋 (Center) にひずみゲージを添付し鉄筋ひずみを測定した。試験体ひずみの測定位置を **Figure 7** に示す。

4.1 HPCa 試験体の鉄筋ひずみ

試験体軸方向変形に急激な変化を生じた、材令 177 日までの代表的な鉄筋のひずみ変化を **Figure 8, 9** に示す。HPCa 版内の中央部下端鉄筋ひずみ LC0 は、HPCa 版コンクリート打設後 1 週間の湿潤養生を経て、試験体コンクリート打設まで収縮した。その後はコンクリート打設後、吸水により膨張に転じた。これが、前述の拘束鋼材

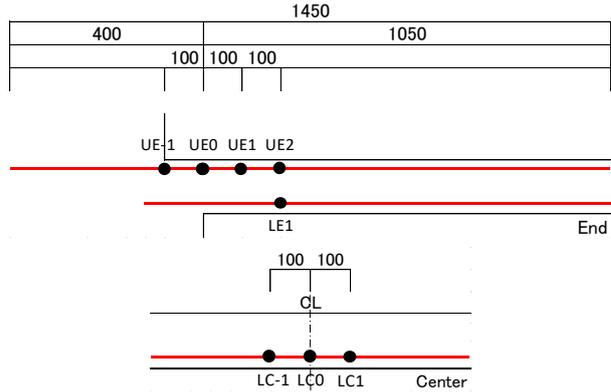


Figure 7 Location of Strain Gauges

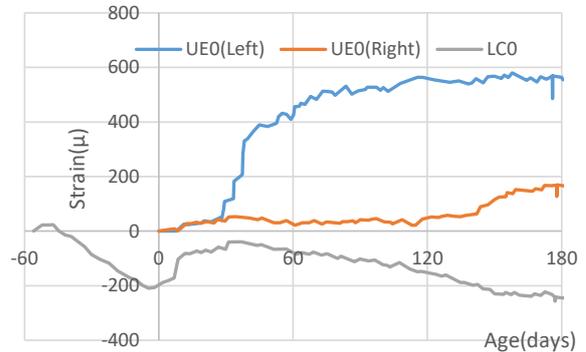


Figure 8 Change in Steel Strain (HPCa-1)

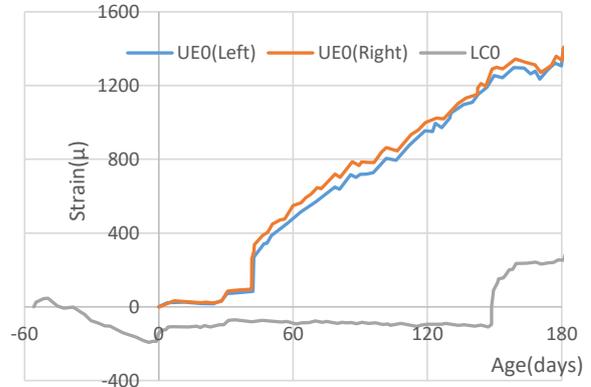


Figure 9 Change in Steel Strain (HPCa-2)

の引張ひずみの発生原因になったと考えられる。

拘束のある HPCa-2 試験体では、端部鉄筋のひずみの増大は著しく、中央下端もひび割れ発生により引張ひずみを生じた。

4.2 RC 試験体の鉄筋ひずみ

RC 試験体の代表的な鉄筋のひずみ変化を **Figure 10, 11** に示す。RC-1 は、コンクリート打設後若干引張ひずみを生じ、材令 30 日の載荷時には載荷に伴う引張ひずみが生じている。その後、材令の増加とともに圧縮側に移行しており、その後も全断面一体とした弾性挙動を示した。一方、拘束試験体スラブ RC-2 では、乾燥収縮拘束による

引張応力の影響は極めて大きく、端部で大きく降伏ひずみを超えた。中央下端筋も、材令 86 日にひび割れ発生により引張ひずみが増大し、その後も増大が続いた。

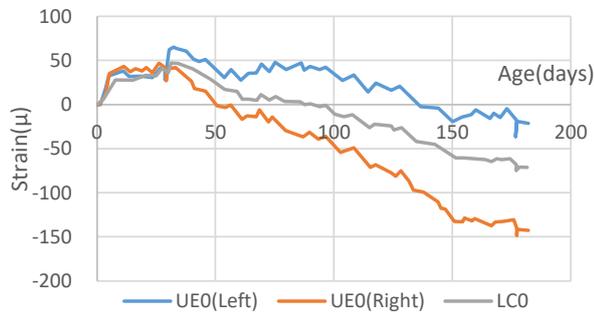


Figure 10 Change in Steel Strain (RC-1)

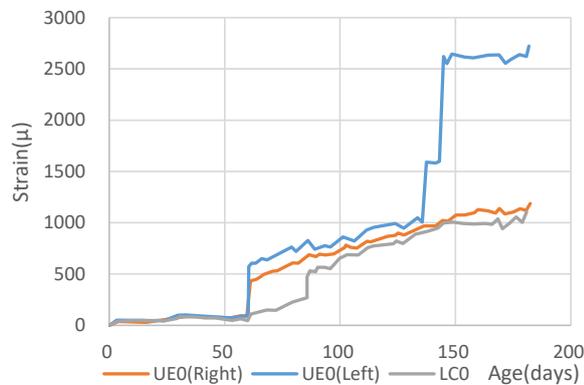


Figure 11 Change in Steel Strain (RC-2)

4.3 試験体の剛性変化

鉄筋ひずみの挙動と、試験体の全体的な剛性変化との関係を把握するため、Figure 12 に除荷・載荷時のたわみの弾性計算値に対する倍率¹⁾を示す。材令 30 日での初載荷でのたわみ比は、いずれの試験体も計算値とほぼ同程度である。材令 177 日での除荷・再載荷では、拘束のない試験体 HPCa-1 では、初載荷時とあまり差異は見られないが、RC-1 では逆に、長期的に剛性が上昇した。一方、乾燥収縮を拘束した試験体 HPCa-2 および RC-2 試験体では、初期載荷時に比し 1/2 程度に著しく剛性が低下した。RC-2 ではその後更に剛性低下し、材令 365 日以降 0.2 程度となった。これらは、鉄筋ひずみ、ひび割れ発生状況と連動している。

5. 終局耐力実験

長期載荷実験での損傷が、終局耐力にどのような影響を及ぼすかを把握するものである。

5.1 載荷方法

試験体スタブ上に鉄骨梁を設け、油圧ジャッキによりスパン 3600mm の 3 等分点に 2 点加力し、変形角 1/400、

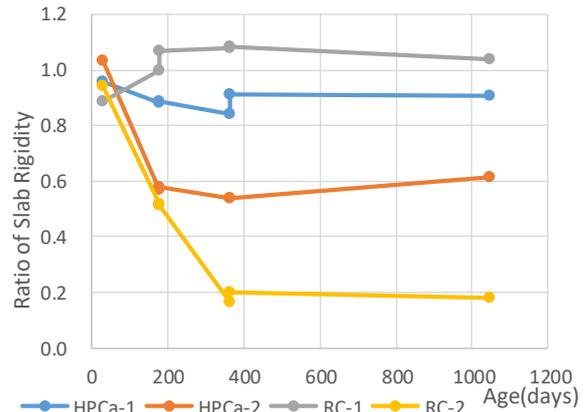


Figure 12 Change in Slab Rigidity Decrement

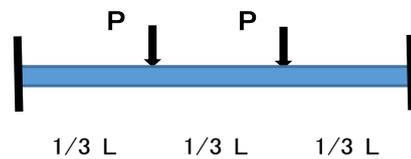


Figure 13 Loading Position

Table 4 Slab Strength

		HPCa-1	HPCa-2	RC-1	RC-2
P_{ye}	kN	5.30	-	5.10	-
P_u	kN	8.04	15.7	8.04	14.1
P_{ye}	Ratio	0.97	-	0.94	-
P_u	Ratio	1.11	2.17	1.11	1.95

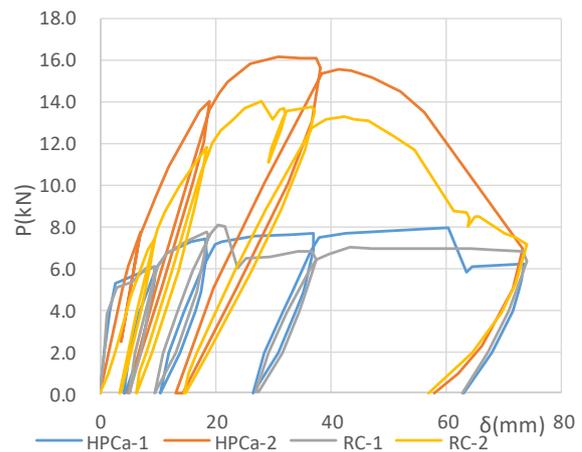


Figure 14 Load-Displacement Curve

1/200、1/100 で各一回繰り返し、変形角 1/50 まで変形させることを原則とした。Figure 13 に載荷位置を示す。

5.2 試験体の耐力・変形性状

Table 4, Figure 14 に、実験結果および荷重変形曲線を示す。軸方向に拘束のない試験体は、端部降伏が認められ、ほぼ計算値に近い値を示した。一方、軸拘束のある

試験体は、明瞭な端部降伏変形を示さなかった。終局強度は、軸方向に拘束のない試験体で、計算値よりやや高い値を示した。軸拘束のある試験体は、変形の増大に伴い、ひび割れにより膨張し、軸方向力の発生により計算値の2倍程度になった。最終状況は、いずれも、端部および中央に塑性ヒンジが生じ、コンクリートが圧壊した。計算値は下の略算式²⁾で求めた。式(6)は、軸力がある場合である。

$$M_{ye} = 0.9 a_r \cdot F_y \cdot d \quad (5)$$

$$M_{ye} = 0.8 a_r \cdot F_y \cdot D + 0.5 N \cdot D (1 - N / (b \cdot D \cdot F_c)) \quad (6)$$

ここに M_{ye} : スラブ曲げ終局モーメント
 a_r : 引張鉄筋断面積
 F_y : 鉄筋降伏強度
 d : スラブ引張鉄筋有効成
 D : スラブ厚さ
 N : スラブ軸力
 b : スラブ幅
 F_c : コンクリート圧縮強度

略算式(6)から拘束のある試験体の終局強度の軸力を推定すると、 $1.3\text{N/mm}^2 \sim 1.7\text{N/mm}^2$ 程度の軸圧縮力が生じたこととなる。

5.3 スラブ剛性の変化

Table 5 および **Figure 15** にスラブ剛性の変化を示す。無拘束試験体は、長期載荷実験においてひび割れはわずかで、ほとんど剛性低下は見られなかった。このため、終局強度実験での初期剛性は、計算値に対してかなり大きな値を示した。一方、拘束のある試験体は、長期載荷時に既に大きな剛性低下をきたしており、計算値を下回った。特に RC-2 は、両端部のひび割れ幅が大きく、かなり低い剛性を示した。しかし、荷重の増加に伴い、ひび割れ増加による軸方向の膨張により、軸力が発生し、剛性を一旦回復した。HPCa 試験体は、終局時に HPCa 版と後打ちコンクリートの界面に沿って一部に剥離ひび割れが生じた。

6. まとめ

鋼材により乾燥収縮を拘束した鉄筋コンクリート造スラブの長期短期の性状の変化を、引張応力の発生状況、鉄筋応力、剛性変化、終局強度について調べた。

1) HPCa 版の製作から、後打ちコンクリート打込みおよびその後の軸方向の伸縮挙動を明らかにした。スラブが合成されるまでは乾燥収縮が進行し、上部コン

クリート打設後は一転、HPCa 版の吸水により膨張に転じた。

- 2) HPCa 版の膨張は、拘束鋼材に引張応力を発生させ、同時に HPCa 版に軽微な圧縮応力を生じさせた。しかし、早期に圧縮応力は消失し引張に転じた。
- 3) 乾燥収縮の拘束により、スラブに引張応力がコンクリートの引張強度の1/2程度生じ、多くのひび割れ発生と顕著な剛性低下を生じさせた。しかし、引張応力は最終的にはほぼ消失した。
- 4) 拘束のある試験体では、載荷後約半年で50%に、最終的に約20%にまで剛性が低下したが、終局強度では大きな差は見られなかった。
- 5) 試験体のスラブ厚さ・スパン比は、1:30と大きいにもかかわらず、鋼材で拘束された試験体は膨張に伴う圧縮応力が発生し、軸力のない場合の計算値の2倍前後の耐力を発現した。

Table 5 Change in Slab Rigidity Ratios

δ (mm)	HPCa-1	HPCa-2	RC-1	RC-2
0.0	1.70	0.79	2.23	0.28
9.0	0.70	0.74	0.77	0.52
18	0.53	0.57	0.47	0.40
36	0.38	0.37	0.49	0.28
72	0.37	0.26	0.36	0.18

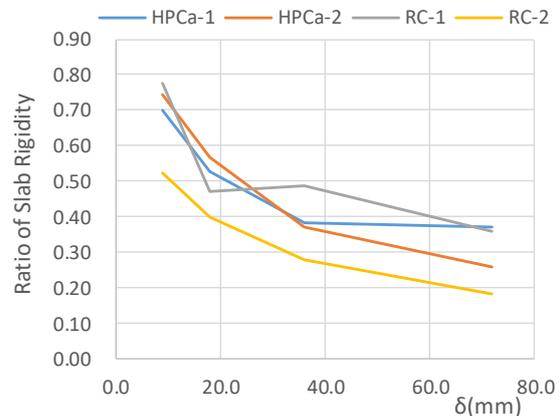


Figure 15 Change in Slab Rigidity Ratios

参考文献

- 1) 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
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説，pp.600-615，1988