

# 論文 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

山本 俊彦\*1

**要旨:** 鉄筋コンクリート造スラブを鋼材により軸方向拘束し、乾燥収縮により生じる引張力の影響を調べた。試験体は、一方向スラブ4体で、拘束の有無(拘束率0.75)、一体打ちとHPCaスラブとの違いを要因とした。材令1047日までの長期載荷実験により、拘束スラブは短期剛性が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。拘束のないスラブの剛性はほぼ1.0で長期たわみのそれは約9倍であった。HPCaスラブは一体打ちスラブよりやや性能低下が小さかった。拘束により、主筋降伏が生じ、ひび割れも0.6mm~0.85mmに達し、乾燥収縮の影響が著しく、設計に配慮が必要と考えられる。

**キーワード:** 乾燥収縮, スラブ, 長期挙動, 外部拘束, 長期たわみ, 固有振動数

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート部材における乾燥収縮は、それが拘束されることによって部材に応力を生じ、構造物の長期性能に種々な影響を及ぼすことが知られている。それらの影響について、これまで多くの研究がなされており、その評価も一部行われている<sup>1)</sup>。ここでは、鉄筋コンクリート造スラブの長期性能に及ぼす乾燥収縮の影響を実験的に検討した。鉄筋コンクリート造スラブは、柱・梁に比べて部材厚が薄く、鉄筋量も少ないことから、コンクリートの乾燥収縮の影響を受けやすく、また、周辺支持部材により乾燥収縮が拘束されると、荷重による曲げ応力と相まって、ひび割れが発生し易くなる。ひび割れの発生は、スラブの剛性を低下させ、過大な長期変形や振動性状の低下をきたす恐れがある。

鉄筋コンクリート造壁やスラブについては、ひび割れ対策として、鉄筋量の下限を0.4%とし、一方向に近いスラブの配筋方向では、0.3%とすることが推奨されている<sup>2)</sup>。一方、鉄筋コンクリート造スラブの構造設計規準類<sup>3)~7)</sup>では、乾燥収縮の拘束により生ずるコンクリートの引張を要因に直接考慮していない。

本研究では、スラブの乾燥収縮が周辺部材によって拘束されることを想定し、コンクリートの乾燥収縮を鋼材により軸方向に拘束し、スラブの長期性状に関する実験研究を行った。試験体の配筋量は端部で0.6%、中央で0.3%とし、曲げ応力と乾燥収縮応力の相互作用の影響を調べた。

## 2. 試験体

### 2.1 試験体の種類

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。

### 2.2 試験体の諸元

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

Table 1 Specimens

Specimen	Span (mm)	Thickness (mm)	Width (mm)	External Restraint		Steel Bar			w (kN/m)	
				Material	Ratio*	End	Center	$P_t$ (%)	D.L.	L.L.
HPCa-1	3600	120(60+60)	400	-	0	2-D10	2-D10	0.375	1.13	1.13
HPCa-2	3600	120(60+60)	400	4-□100×100×3.2	0.752	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
RC-2	3600	120	400	4-□100×100×3.2	0.752	2-D10	2-D10	0.375	1.13	1.13
HPCa	3660	60	400	-	-	2-D10		-	-	-

\* $R=A_s \cdot E_s / (A_s \cdot E_s + A_c \cdot E_c) / \phi$ ,  $E_s/E_c=10$ ,  $\phi=3.0$ ,  $A_s=4,852\text{mm}^2$ ,  $A_c=48,000\text{mm}^2$

\*1 大同大学名誉教授 工博 (正会員)

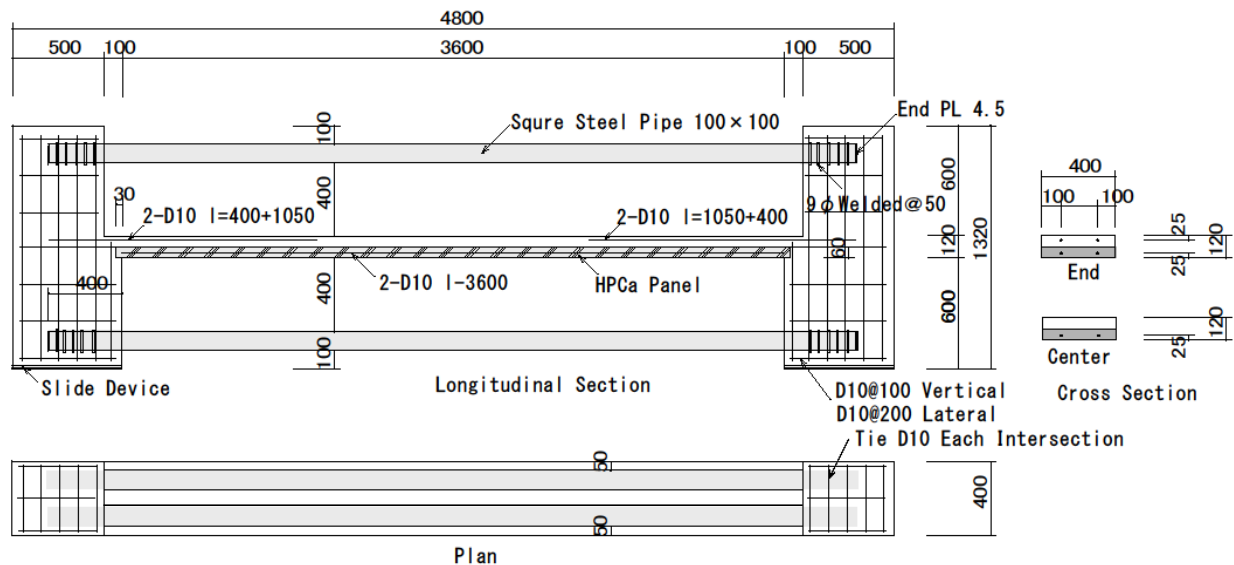


Figure 1 Specimen HPCa-2

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。

### 2.3 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。拘束率はかなり大きな値 0.752 とした。拘束率計算では、鋼材とコンクリートのヤング係数比を 10、クリープ係数を 3.0 と仮定した。なお、すべての試験体と床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。

### 2.4 試験体の弾性的な性質

Table 2 に試験体の弾性的な性質を示す。自重(D.L.)は 1.13kN/m、積載荷重は自重と同じ 1.13kN/m としコンクリートブロックにより等分布に載荷した。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、振動障害が起こらないとされる 15Hz 以上である。

## 3. 使用材料

### 3.1 コンクリート

Table 3 にコンクリートの調合を示す。試験体 (HPCa-1,2 および RC-1) 打設日を基準に、各コンクリートの打設日を Table 4 に、また、Table 5 にコンクリートの各材令での強度と静弾性係数を示した。コンクリートは、調合は同一であるが、HPCa 版、試験体(HPCa-1,2 および

Table 2 Elastic Properties of the Specimen

Bending Stress* (MPa)		Deflection (mm)	Natural Frequency (Hz)	
Concrete	Steel	DL+LL	D.L.	DL+LL
25.4	205	0.832	28.2	19.9

\*Load: DL+LL

Table 3 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 4 Concrete Casting Relative Date

HPCa	HPCa-1,2	RC-1	RC-2
56 days before	0	0	7 days after

Table 5 Concrete Strength and Young's Modulus

Concrete	Age (days)	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_b$ (MPa)	$E_c$ (GPa)
HPC	28	24.5	2.13	4.05	22.5
	365	28.7	2.79	5.64	26.7
RC1	28	26.9	2.28	3.31	22.7
	365	28.1	2.66	5.21	24.4
RC2	28	26.4	2.39	3.72	24.2
	365	31.1	2.99	5.97	28.2

RC-1)、試験体(RC-2)の 3 回に分けて打設した。4 週圧縮強度は 24.5MPa~26.9MPa、材令 1 年では 28.1MPa~31.1MPa となった。

### 3.2 鉄筋

Table 6 に使用鉄筋の機械的性質を示す。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、SD30材である。

Table 6 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

### 4. 載荷・除荷の工程

Table 7 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。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 日迄行った。

Table 7 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

### 5. 実験結果

#### 5.1 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。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。

Table 8 Change in Slab Deflection Ratios

Age*	Load	HPCa-1	HPCa-2	RC-1	RC-2
30	+L.L	1.04	0.97	1.13	1.06
177	0	1.13	1.75	1.00	1.94
	+L.L	1.13	1.73	0.94	1.96
365	0	1.19	1.86	0.93	6.12
	+L.L	1.10	1.86	0.92	4.99
1047	0	1.10	1.63	0.96	5.63

\*Age(days) From Concreting of the Specimen

#### 5.2 コンクリートの乾燥収縮

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。実際の HPCa コンクリートは、後打ちコンクリートに先行して乾燥収縮が始まり、後打ちコンクリート打設時に吸水により乾燥収縮が一旦回復したと考えられる。

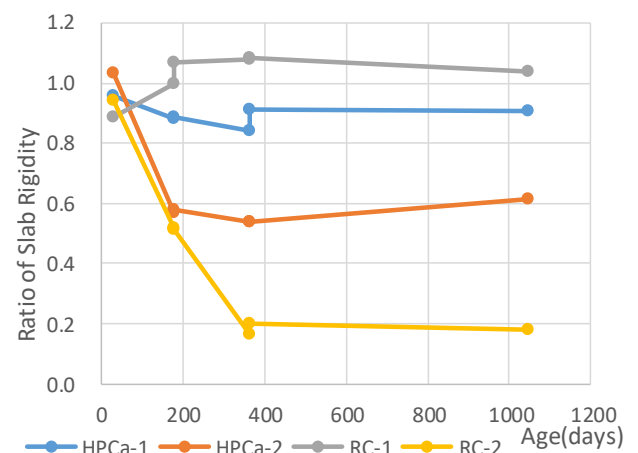


Figure 2 Change in Slab Rigidity Decrement

#### 5.3 コンクリートのクリープ

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 86 日載荷開始し、材令 240 日までの 156 日間で 2.7 であった。

日以降 0.2 程度となった。

#### 5.4 載荷・除荷によるたわみと剛性変化

試験体は、材令 1 週間湿潤養生され、その後シート掛け養生された。材令 30 日まで支保工で支持され自重も含め無載荷の状態 で 存置され、同日支保工撤去と同時に積載荷重を加えられた。Table 8 に材令 30 日から 1047 日までの除荷・載荷時のたわみの弾性計算値 (Table 2) に対する倍率を示す。Figure 2 にスラブの剛性低下率を示す。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った。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かった。RC-1 では逆に、長期的に剛性が上昇した。これは、Table 5 に示されるように、長期的にコンクリートの強度増進による影響が考えられる。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

#### 5.5 長期変形挙動

Figure 3 および Table 9 に各試験体の長期変形を示す。基準たわみは、計測された初期載荷時のたわみに自重たわみ計算値を加えた値とした。長期たわみは、外気の温湿度の影響を受けていくらかの変動を繰り返す。材令 177 日までは急速にたわみが増大し、材令 365 日(1年)を経過するとたわみの増大は緩慢になった。たわみは、軸方向に乾燥収縮を拘束した試験体 HPCa-2 および RC-2 では、拘束のない試験体に比べほぼ 2 倍の大きなたわみ

を示した。積載荷重除荷後のたわみは、長期的にやや減少する傾向を示した。材令 1002 日でのたわみ倍率は、軸方向に拘束のない試験体で 8.8~9.2, 拘束試験体で 17.2~18.4 となった。HPCa 試験体の方がいずれも若干小さなたわみ倍率を示した。

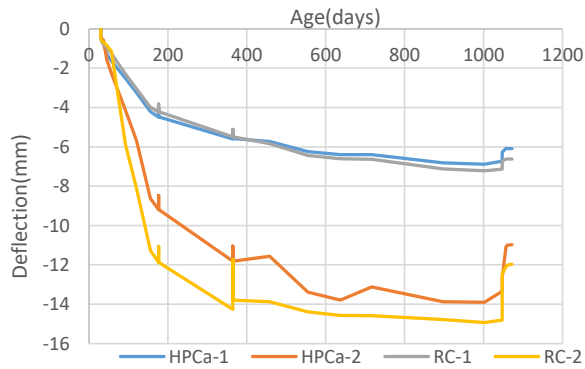


Figure 3 Change in Long-term Deflection

Table 9 Long-term Deflection

	Age*	HPCa-1	HPCa-2	RC-1	RC-2
$\delta$ (mm)	30	-0.85	-0.82	-0.89	-0.86
	177	-4.90	-9.61	-4.65	-12.28
	365	-6.02	-12.23	-5.91	-14.68
	1002	-7.29	-14.32	-7.64	-15.35
	1047	-7.15	-13.75	-7.55	-15.22
Ratio	30	-1.02	-0.98	-1.06	-1.03
	177	-5.89	-11.6	-5.59	-14.8
	365	-7.24	-14.7	-7.10	-17.6
	1002	-8.76	-17.2	-9.18	-18.4
	1047	-8.59	-16.5	-9.07	-18.3

\*days

## 5.6 軸方向変形

Figure 4 および Table 10 に試験体の軸方向変形を示す。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った。拘束試験体は材令 177 日で最も縮み、試験体スパンに対するひずみとして、 $60\mu$  程度の値を示した。これは、コンクリート全断面に対して  $1.2\text{MPa}$  程度の引張力を生じさせる。コンクリートの引張強度の約半分程度の値である。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、軸方向の収縮は緩和されていった。一方、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、 $291\sim 369\mu$  となった。 $100\times 100\times 400\text{mm}$

コンクリートプリズムの乾燥収縮量  $664\mu$  に対して、50%程度の値を示した。拘束試験体のそれは、10%程度であり、両者の比から計算すると拘束率は、0.8 程度となった。

Table 11 に、拘束鋼材に生じた合力 ( $F_s$ ) と、それに対応するスラブに生じる応力を全断面に対する値として示す。拘束試験体では、最大値で  $1.14\text{MPa}\sim 1.31\text{MPa}$  であった。最終的には、スラブに生じる引張力は最大値の 1/2 程度以下に減少した。特に剛性低下の著しい RC-2 では、最終的に最大値の 25%まで減少した。

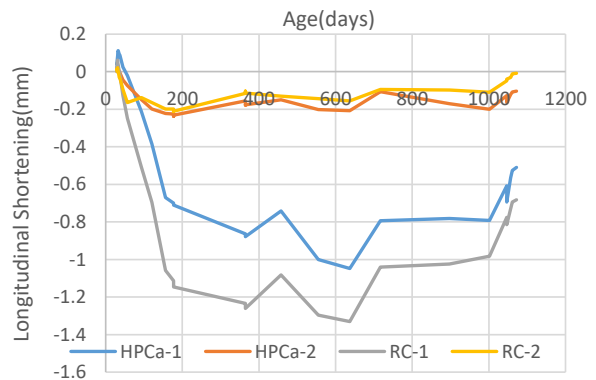


Figure 4 Change in Longitudinal Shortening

Table 10 Longitudinal Shortening

	Age*	HPCa-1	HPCa-2	RC-1	RC-2
$S_h$ (mm)	30	0.056	0.024	0.046	0.010
	177	-0.700	-0.226	-1.11	-0.198
	365	-0.864	-0.156	-1.23	-0.116
	637	-1.05	-0.208	-1.33	-0.156
	1047	-0.608	-0.128	-0.776	-0.048
$\epsilon$ ( $\mu$ )	30	16	7	13	3
	177	-194	-63	-309	-55
	365	-240	-43	-343	-32
	637	-291	-58	-369	-43
	1047	-169	-36	-216	-13

\*days

## 5.7 固有振動数の変化

Table 11 に固有振動数の変化を示す。材令 30 日での自重および積載荷重時の固有振動数は、計算値よりやや高めめの  $1.03\sim 1.10$  であった。材令 177 日での固有振動数は、拘束のない試験体に比べ、拘束のある試験体では計算値に対して  $0.74\sim 0.81$  と大幅な低下がみられた。静的な剛性に換算すると、 $0.55\sim 0.66$  となる。たわみによる剛性低下と同様な性状を示した。

**Table 11 Longitudinal Force**

	Age*	HPCa-2	RC-2
Fs(kN)	30	6.7	2.8
	177	-62.7	-54.9
	365	-43.3	-32.2
	637	-57.7	-43.3
	1047	-35.5	-13.3
$\sigma_t$ (MPa)	30	-0.14	-0.06
	177	1.31	1.14
	365	0.90	0.67
	637	1.20	0.90
	1047	0.74	0.28

\*days

**Table 12 Natural Frequency**

	Age*	Load	HPCa-1	HPCa-2	RC-1	RC-2
$f$ (Hz)	30	D.L.	30.4	30.7	29.8	29.5
		+L.L	21.0	21.8	20.5	21.0
	177	+L.L	19.2	16.2	20.1	15.8
		D.L.	26.8	21.5	29.0	20.8
Ratio	30	D.L.	1.08	1.09	1.06	1.05
		+L.L	1.06	1.10	1.03	1.05
	177	+L.L	0.97	0.81	1.01	0.79
		D.L.	0.95	0.76	1.03	0.74

\*days

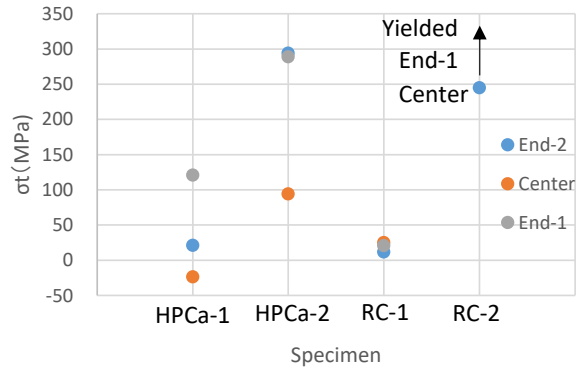
### 5.8 鉄筋応力

試験体両スタブ端部の上筋 (End-1,End-2) 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。試験体スラブのたわみに急激な変化を生じた、材令 177 日の鉄筋応力を **Figure 5**, **Table 13** に示す。無拘束試験体スラブに生じた応力は、弾性計算応力値に対して 60%以下で HPCa-1 の中央下端筋では圧縮応力が生じている。ほとんど全断面有効な弾性的な挙動を示しているとみられる。一方、拘束試験体スラブは、HPCa-2 では端部では弾性計算値の 1.5 倍、中央で同程度の値を示した。RC-2 では、収縮応力の影響は極めて大きく、端部・中央で降伏し、中央では弾性計算値に対して 3 倍以上となった。

### 5.9 ひび割れ状況

**Table 14** に試験体スラブのひび割れ本数と最大ひび割れ幅を示す。拘束のない試験体は、両端部にひび割れ幅 0.04mm から 0.15mm のひび割れ 1~2 本、中央にひび割れ幅 0.04mm のひび割れ 1 本が生じた。いずれも軽微なひび割れであった。

一方、拘束試験体は、端部にひび割れ幅 0.60mm から



**Figure 5 Steel Stress**

**Table 13 Steel Stress (MPa)**

Position	HPCa-1	HPCa-2	RC-1	RC-2
End-1	121	289	20.6	Yielded
Center	-23.5	94.2	25.0	Yielded
End-2	21.0	294	11.8	245

**Table 14 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

\*days

0.85mm の各 1 本、中央にひび割れ幅 0.04mm から 0.55mm のひび割れ多数が生じた。特に RC-2 は、鉄筋降伏もあり、中央部下端に数多くのひび割れを生じた。

### 6. 考察

拘束試験体スラブの乾燥収縮により発生する引張力と耐力の模式図を **Figure 6** に示す。スラブの構造設計では、一般的に長期荷重に対して行われ、鉄筋応力は降伏強度 ( $F_y$ ) の 2/3 以下とされる。今回のスラブ試験体でも、端部鉄筋応力は  $F_y$  の 2/3、中央では 1/3 程度となっている。実験では、拘束試験体 RC-2 は乾燥収縮による引張応力により端部並びに中央で完全に降伏しており、**Figure 6** に示す経路を辿ったものと考えられる。両端部の一方と中央が降伏し、他端で弾性範囲となっており全体での耐力の釣り合いが保たれたと考えられる。更なる

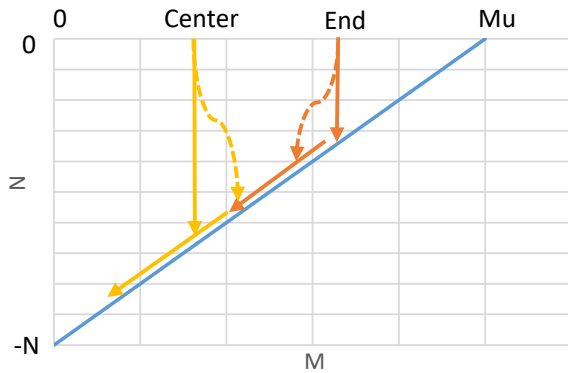


Figure 6 Schematic M-N Diagram

収縮による引張応力が生じた場合は、塑性域に入るか、今回のように拘束の緩和が生じるか、または、過大変形や破壊に至る可能性も無ではないと考えられる。

HPCa-2 では両端部で鉄筋応力が 1.5 倍に増大し降伏直前であった。

## 7. まとめ

鉄筋コンクリート造スラブを鋼材により軸方向拘束した長期載荷実験により、乾燥収縮により生じる引張力の影響を調べた結果、以下のことが明らかになった。

1. 乾燥収縮を拘束することによって、試験体に引張応力が生じ、コンクリートの引張強度の 1/2 程度の応力となった。
2. 滑り支承を設けた乾燥収縮を拘束しない試験体は、ひび割れも軽微で、全期間を通してほぼ弾性状態であった。
3. 拘束のない試験体の軸方向収縮量は、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  コンクリートプリズムの乾燥収縮量の 1/2 程度であった。また、拘束試験体の外部拘束率は、最大 0.8 程度で、材令の経過とともに大きく減少した。
4. 載荷・除荷時のたわみによる試験体剛性は、無拘束試験体ではほとんど低下はなかった。一方、乾燥収縮を拘束した試験体は、初期載荷時に比し 1/2 程度以下に著しく剛性が低下した。
5. 固有振動数は、拘束試験体で低下し、剛性低下は静的なたわみと同一な傾向を示した。
6. 長期たわみは、無拘束試験体で弾性たわみの約 9 倍、拘束試験体で約 17 倍となった。HPCa 試験体はやや

小さな値を示した。

7. 鉄筋ひずみの増大は拘束試験体で著しく、RC-2 では、片側端部と中央で鉄筋降伏を生じた。乾燥収縮による引張力による影響が著しかった。
8. ひび割れは、無拘束試験体では 0.15mm 以下で問題はなかった。拘束試験体は、最大 0.85mm に達し、本数も多数見られた。
9. 本実験では、スラブ中央下端鉄筋 ( $1/3F_y$ ) においても降伏が見られた。鉄筋コンクリート造スラブの設計に当たっては、乾燥収縮の拘束が大きいと考えられる場合には、鉄筋に余裕を持たせることや、応力緩和措置をとるようになることが必要と考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、東急建設(株)技術研究所のご協力を得ました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 佐藤良一ほか：委員会報告 耐久性力学に基づく収縮影響評価研究委員会、コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.43-51, 2012
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006
- 3) CEB-FIP: Model Code1990, London, Thomas Telford, 1990
- 4) European Committee for Standardization: Eurocode 2, Design of concrete structures-Part 1-1, General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1,2004), 2004
- 5) ACI 318: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, 2008
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 2010
- 7) CIB, Model Code 2010 - First complete draft, Federation International du Beton, 2010