

論文 鉄筋コンクリート構造物における乾燥収縮拘束応力の影響

山本 俊彦*1

要旨：乾燥収縮を拘束することによって発生するコンクリートの引張応力が、鉄筋コンクリート構造物に及ぼす影響について検討した。拘束度が高い場合の拘束応力は 3MPa 程度に達し、ひび割れの発生は避けられない。また、拘束応力の時間変化では、初期に急速な応力の増大が生じる。FEM モデルによる鉄筋コンクリート造スラブの解析では、拘束応力による剛性変化、ひび割れ幅の増大、鉄筋応力・曲げ応力の変化を明らかにした。実験値との比較では、FEM 解析モデルでよくその性状を表すことが確認された。解析では、拘束応力によりスラブの特性は、剛性が弾性値に比し 0.26、ひび割れ幅は 0.8mm、鉄筋は降伏応力にも達することが示され、これらは実際の実験値ともよく対応した。

キーワード：拘束応力、乾燥収縮、鉄筋コンクリート造スラブ、剛性低下、ひび割れ

1. はじめに

コンクリートは必然的に乾燥収縮を伴い、それが拘束されることによって鉄筋コンクリート部材に応力を生じ、ひび割れ発生など、構造物の長期性能に様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は、これまで多くの研究がなされており、その評価も行われている¹⁾。またその対応として、日本建築学会では乾燥収縮ひずみの規定値²⁾を設け、土木学会では収縮ひずみに対して構造物が求められる要求性能を満たすかどうかを確認すること³⁾が示されている。

乾燥収縮で問題になるのは、構造物の要求性能を阻害する、有害なひび割れの発生である。建築学会では、収縮ひび割れに対して、設計・施工指針⁴⁾が示されているが、鉄筋コンクリート造スラブに関しては、必ずしも十分ではないのが現状である。ここでは、鉄筋コンクリート造スラブの剛性低下や、長期たわみの増大などに影響を及ぼす、コンクリートの乾燥収縮の影響について、既往の実験結果⁵⁾を踏まえて解析的な検討を行うものである。

コンクリートの乾燥収縮・クリープの進行速度、寸法効果を、既往の予測式から推定し、拘束応力の発生状況を検討する。また、収縮ひび割れの発生条件を明らかにし、ひび割れ幅・ひび割れ間隔などを調べる。スラブの剛性低下についても収縮ひび割れの影響を検討する。

2. コンクリート乾燥収縮と拘束応力

2.1 コンクリートの乾燥収縮

コンクリートの乾燥収縮は、構造物周辺の相対湿度、部材断面の形状・寸法、コンクリートの材料・調合や材齢などの影響を受けるが、ここでは日本建築学会での収縮ひずみの標準仕様の

制限値 $800 \mu^2$) を検討対象値として採用する。この収縮ひずみ 800μ は一般に、100mm×100mm 長さ 400mm のプリズムで、20°C・湿度 60%の恒温室に材令 7 日から乾燥開始し、6 か月間放置された値と解される。解析的に検討するため、乾燥収縮の進行速度のみを便宜的に CEB/FIP-90⁶⁾ の下式とする。終局値は同じとなるが、途中の乾燥収縮の進行には部材断面の影響を考慮している。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)⁴⁾ と式の基本的な構成は同じである。

$$\beta_s(t - t_s) = \left[\frac{(t - t_s)/t_1}{350 \left(\frac{h}{h_0}\right)^2 + (t - t_s)/t_1} \right]^{0.5} \quad (1)$$

ただし、

t : コンクリートの材令 (日)

t_s : 乾燥開始材令 (日)

t_1 : 1 日

$h = 2Ac/u$: 仮想部材厚さ (mm)

Ac : 断面積, u : 乾燥する周長

h_0 : 100mm

対象とする断面は、100mm 角のプリズム、120mm 厚のスラブ、400mm×800mm の梁の 3 種類とし、乾燥開始材令を 7 日と 28 日とした。Table 1 に計算結果を示す。乾燥収縮は、乾燥開始後早期に進行し、乾燥開始材令 7

Table 1 Shrinkage Strain(μ) RH=60%

Member	A_c mm ²	u mm	h mm	Shrinkage : Age(days)					
				28*	183*	365*	56**	183**	365**
Prism	10000	400	50.0	431	800	877	482	783	872
Slab	48000	1080	92.3	251	596	723	287	572	713
Beam	320000	2400	267	90	252	347	103	237	338

* $t_s=7$ days, ** $t_s=28$ days

*1 大同大学名誉教授 工博 (正会員)

日で見ると、Prismでは材令1年で70年値の82%、Slabでは74%に達する。しかし、部材断面の大きいBeamでは、70年値の37%で小さな値となっている。大断面の長期材令での乾燥収縮の値は、不確定であるが、乾燥収縮ひび割れを検討する上では、乾燥初期から材令1年程度までの挙動が重要となる。

なお、CEB/FIP-90⁶⁾式では、RH=70%の場合も進行速度は同一で、乾燥収縮ひずみの値はRH=60%に対して0.838となる。

2.2 コンクリートのクリープ

乾燥収縮が拘束され、応力が発生する場合、一般にはコンクリートのクリープによって応力緩和が起こる。コンクリートのクリープは、乾燥収縮と同様 CEB/FIP-90⁶⁾式を用いる。クリープには、乾燥収縮と同様種々の要因が影響する。CEB/FIP-90⁶⁾のクリープ式は、進行速度を示す下式を示す。

$$\beta_c(t-t_0) = \left[\frac{(t-t_0)/t_1}{\beta_H + (t-t_0)/t_1} \right]^{0.3} \quad (2)$$

ただし、

$$\beta_H = 150 \left\{ 1 + \left(1.2 \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right\} \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500 \quad (3)$$

t : コンクリートの材令 (日)

t_0 : 載荷開始材令 (日)

t_1 : 1日

RH: 雰囲気相対湿度 (%)

RH₀: 100%

基本クリープ係数 ϕ_0 は、仮想部材厚さ、相対湿度および載荷開始材令によって異なる。 ϕ_0 を、相対湿度60%および70%、材令28日コンクリート圧縮強度 $F_c = 24\text{MPa}$ 、載荷開始材令7日および28日の場合について求めTable 2に示す。この基本クリープ係数を(2)式にかけ合わせることによって、クリープ係数の経時変化が表される。

2.3 拘束度の定義

乾燥収縮ひずみの拘束により、応力が発生する。乾燥収縮ひずみの拘束度は、下式のように拘束ひずみ(ε_c)と自由収縮ひずみ(ε_f)との比によって定義される²⁾。

$$\lambda = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_c}{\varepsilon_f} \quad (4)$$

ただし、

λ : 拘束度 (0: 拘束なし, 1: 完全拘束)

ε_f : 自由収縮ひずみ

ε_c : 実測ひずみ

また、拘束ひずみによって生じる応力は、下式によ

Table 2 Basic Creep Coefficient ϕ_0 .

Member	RH=60%		RH=70%	
	$t_0=7\text{days}$	$t_0=28\text{days}$	$t_0=7\text{days}$	$t_0=28\text{days}$
Prism	4.55	3.50	3.95	3.04
Slab	4.11	3.16	3.63	2.78
Beam	3.53	2.71	3.19	2.45

って求められる⁴⁾。

$$\sigma_c = \frac{E_c}{1+\phi} \lambda \cdot \varepsilon_f \quad (5)$$

ただし、

σ_c : コンクリートの収縮拘束応力

ϕ : コンクリートのクリープ係数

E_c : コンクリートのヤング係数

拘束部材が鉄骨など、乾燥収縮・クリープを生じないか、あるいは無視できる場合には、終局の拘束度は下式によって求められる。

$$\lambda = \frac{A_s \cdot E_s}{A_s \cdot E_s + \frac{A_c \cdot E_c}{1+\phi}} \quad (6)$$

ただし、

A_s, A_c : 拘束鋼材およびコンクリートの断面積

E_s, E_c : 拘束鋼材およびコンクリートのヤング係数

2.4 拘束応力

乾燥収縮ひび割れを考慮する場合、乾燥収縮の進行は初期に大きく、比較的部材厚の小さいスラブを対象とすれば、コンクリート材令1~2年以内のひび割れ発生がほとんどと考えられる。このため、材令3年(1095days)時点での拘束応力を略算として式(5)により求めた。材令3年の時点では、収縮ひずみおよびクリープの進行はわずかになっているため、その後の変化は極めて小さいと考えられる。乾燥開始材令、環境湿度および拘束度と拘束応力の関係をTable 3およびFig. 1に示す。

拘束度 $\lambda=0.7$ は、基礎から立ち上がる壁など、かなり高い拘束度の場合で、コンクリートの引張強度を $0.1F_c = 2.4\text{MPa}$ 程度と考えれば、厚さの薄い壁やスラブなどの部材は、ひび割れの発生は避けがたいと考えられる。

また、軸鉄筋比が1.0%程度に相当する拘束度 $\lambda=0.3$ の場合では、コンクリートの引張応力は 1.5MPa 程度となり、スラブ等積載荷重による曲げ応力が加算されれば、ひび割れの発生要因になる。更に、ひび割れの発生は短い期間の日射や温湿度の変化の影響もあり、この応力が付加されひび割れ発生要因になる。

2.5 拘束応力の時間変化

コンクリートの収縮ひずみやクリープ，さらにはヤング係数も時間とともに変化する。コンクリートの乾燥収縮初期の応力は，拘束応力の時間変化を考慮し，式(5)に基づいた下式によって推定される。

$$\sigma_c(t) = \int \frac{E_c(t')}{1 + \varphi(t, t')} \lambda(t') d\varepsilon_f(t') \quad (7)$$

ただし，

$$\lambda(t') = \frac{d\varepsilon_f(t') - d\varepsilon_c(t')}{d\varepsilon_f(t')} \quad (8)$$

t' : 自由ひずみ変化が生じる材齢

$\varphi(t, t')$: 材令 t' で荷重された材令 t でのクリープ係数

$E_c(t')$: 材令 t' におけるコンクリートのヤング係数

$\lambda(t')$: 材 齢 t' における拘束度

$d\varepsilon_f(t')$: 材 齢 t' における自由収縮ひずみの変化率

$d\varepsilon_c(t')$: 材 齢 t' における実ひずみの変化率

実際に拘束応力の時間変化を予測するのは，種々の要因がからみなかなか困難である。ここでは，計算を簡単にするためいくつかの仮定をおいて，一つの計算例として拘束応力の時間変化を示す。

以下に計算例の仮定条件を示す。

- ・計算ステップを1日単位とする。
- ・乾燥収縮およびクリープは，各ステップの中間に同時に発生する。
- ・乾燥収縮とクリープは，前述の CEB/FIP-90⁶⁾ のモデルとする。
- ・ $E_c(t')$: 材令にかかわらず 24GPa 一定とする。
- ・ $\lambda(t')$: 式(6)を参照して，クリープ係数 $\phi = 3.0$ で拘束度 0.7 および 0.3 となるような拘束体を想定し拘束度を算定する。
- ・ $\sigma_c(t)$: 重ね合わせが成り立つとして，各ステップの拘束応力の和とするが，各ステップでの応力は漸次クリープによって緩和される。

また，拘束応力の時間変化を概略求める方法として，式(5)に基づき，下式を想定する。拘束度の変化に対して平均拘束度を用いる。

$$\sigma_c(t) = \frac{E_c(t)}{1 + \varphi(t)} \lambda'(t) \cdot \varepsilon_f(t) \quad (9)$$

ただし，

$\lambda'(t)$: 乾燥開始から材 齢 t までの拘束度の変化を織り込むための平均拘束度。遅れ弾性変形 η 相当分の $\phi = 0.4$ とした初期拘束度と材 齢 t における拘束

Table 3 Concrete Stress $t=1095$ days (MPa)

Member	h (mm)	$\lambda=0.3$				$\lambda=0.7$			
		RH=60%		RH=70%		RH=60%		RH=70%	
		$t_s=7$	$t_s=28$	$t_s=7$	$t_s=28$	$t_s=7$	$t_s=28$	$t_s=7$	$t_s=28$
Prism	50	1.30	1.60	1.22	1.49	3.04	3.74	2.85	3.48
Slab	92	1.32	1.61	1.22	1.48	3.07	3.75	2.84	3.44
Beam	263	0.96	1.16	0.87	0.96	2.23	2.70	2.02	2.23

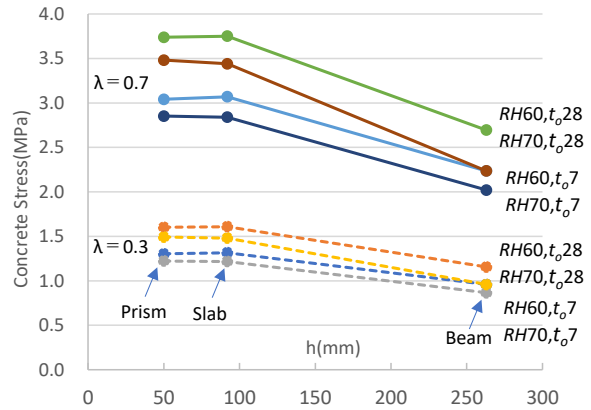


Fig. 1 Restrained Concrete Stress $t=1095$ days (MPa)

Table 4 Comparison of Concrete Stress (MPa)

Member	h (mm)	Calculated				Eq. (9)			
		$\lambda=0.3$		$\lambda=0.7$		$\lambda=0.7$			
		Age(days)				Age(days)			
		91	183	91	183	91	183	365	1095
Prism(P)	50	0.82	0.87	2.72	2.92	2.73	3.02	3.10	3.10
Slab(S)	92	0.56	0.69	1.91	2.37	1.90	2.39	2.74	3.06
Beam(B)	263	0.23	0.32	0.81	1.13	0.82	1.14	1.49	2.14

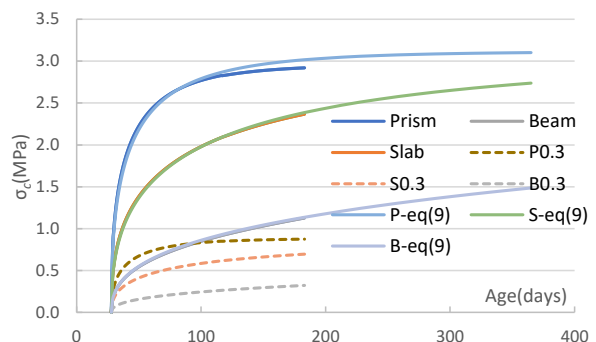


Fig. 2 Change in Restrained Concrete Stress (MPa)

度の単純平均値

計算結果を Table 4 および Fig. 2 に示す。計算値と略算値にそれほど大きな違いはなく，初期材令ではほとんど同じである。計算による拘束応力は，乾燥開始初期に増大するが，その後増大割合は小さくなる。材令 183 日の時点では，拘束度が高い場合スラブの拘束応力は 2.4MPa 程度に達し，ひび割れの発生の可能性が生じる。乾燥収縮の進行が速いプリズムはこれより大きく，仮想部材厚の大きい梁は，スラブの半分以下となっている。

一方、拘束度が低い場合は 1.0MPa 以下でこれだけではひび割れ発生の可能性は小さい。

なお、材令 1095 日での略算値と Table 3 の値を比較すると、略算値はいずれもその 8 割程度である。

3. スラブの FEM 解析

3.1 解析概要

乾燥収縮が拘束された場合、ひび割れが発生するような、大きな拘束応力が生じる。鉄筋コンクリート造スラブにひび割れが発生した場合、部材全体の剛性低下をきたし、また、端部固定スラブでは固定度の低下によってモーメント分布が変化する。ここでは、スラブのひび割れ発生による剛性低下等を FEM 解析により検討する。解析には FEM 汎用コードを使用した。

3.2 解析対象スラブ

解析対象スラブは、既往の実験例⁵⁾とした。Table 5 に解析対象スラブの諸元と負担荷重を示す。補強鉄筋は、固定端部で上下 2-D10、中央下端で 2-D10、引張鉄筋比 0.376% である。負担荷重は、自重と積載荷重それぞれ 1.13kN/m である。Table 6 にスラブの弾性計算値を示す。コンクリートの弾性係数 $E_c=20.6\text{GPa}$ 、鉄筋の弾性係数 $E_s=206\text{GPa}$ として求めた。コンクリートの曲げ応力は、コンクリートの引張強度程度、鉄筋の引張応力は長期許容応力程度である。Table 7 に、断面の特性を示す。中立軸比 k は 0.24 で、ひび割れ断面での剛性 I_{cr} は、全断面有効剛性 I_g に比べ 0.15 程度となる。スラブ補強筋比を 2 倍にした場合についても解析用に示した。

3.3 要素分割と解析条件

Fig. 3 に、スラブの FEM 解析に用いた要素分割を示す。X-Y 平面上で、厚さ 120mm、幅 400mm、スパン 3600mm の一方向両端固定スラブの中央対称 1/2 モデルである。解析は 2 次元平面応力とし、コンクリートは 9 節点アイソパラメトリック要素、鉄筋はビーム要素とした。鉄筋とコンクリートは、各節点で結合している。荷重は、実験例スラブと同様 2.26kN/m(DL+LL)とした。なお、固定端最下部 1 要素は、更に 4 分割した。解析に使用する材料を Table 8 に示す。応力ひずみ関係は、コンクリート、鉄筋ともに線形弾性である。

解析モデルを Table 9 に示す。解析条件は、コンクリートのひび割れを固定端および中央部それぞれ 1 か所に

Table 5 Details of Slab⁵⁾

Span (mm)	D (mm)	W (mm)	Steel Bar			w (kN/m)	
			End	Center	p_t (%)	D.L.	L.L.
3600	120	400	2-D10	2-D10	0.376	1.13	1.13

Table 6 Elastic Properties of Slab⁵⁾

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 7 Section Properties of Slab

p_t (%)	Portion	k	I_g^*	I_{cr}^*	I_{cr}/I_g
0.376	End	0.242	6.08	0.904	0.149
	Center	0.239	5.92	0.903	0.153
0.752	End	0.304	6.39	1.58	0.247
	Center	0.319	6.06	1.57	0.259

* $\times 10^7\text{mm}^4$

Table 8 Material Properties for FEM Analysis

	Young's Modulus (GPa)	Poisson's ratio	a_s (mm ²)	Thickness (mm)
Concrete	20.6	0.167	-	400
Steel	206	0.300	143	-

Table 9 FEM Analysis Models

Model	p_t (%)	Cracking		Non-bond Length (mm)		Axial Stress (MPa)
		End	Center	End	Center	
E0	0.375	-	-	-	-	-
C1-e25	0.375	○	-	25.0	-	1.20
C2-e25	0.750	○	-	25.0	-	1.20
C1-e50	0.375	○	-	50.0	-	1.20
C1-ec50	0.375	○	○	50.0	50.0	1.20
C2-ec50	0.750	○	○	50.0	50.0	1.20

限定し、スラブ反対側に定着鉄筋を延長し X 方向所定の位置で固定、また、中立軸位置以下のコンクリートの圧縮位置を固定とした。鉄筋を各節点でのコンクリートとの結合を解除することにより、固定端上端筋および中央下端筋の鉄筋の付着を喪失させた。付着喪失長さは、定着域およびスラブ内に 25mm または 50mm とした。また、下端筋も条件によっては引張となるため、同様スラブ反

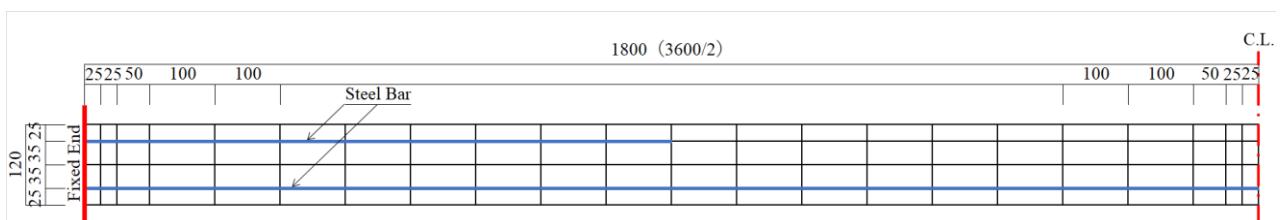


Fig. 3 FEM Model of the Slab (X-Y Plane)

Table 10 Calculation Results

Model	Deflection		Axial Elong.		Crack Width (mm)***				f_i (MPa)			σ_b (MPa)	
	(mm)	Ratio*	(mm)	Ratio*	End		Center		End		Center	End	Center
					Short t.	Long t.	Short t.	Long t.	Top	Bottom	Bottom		
E0	0.805	1.03	0.0997	1.05	-	-	-	-	205**	-	103**	2.67	1.20
C1-e25	1.67	0.498	0.153	0.687	0.117	0.434	-	-	360	77.6	-	2.59	3.01
C2-e25	1.22	0.681	0.123	0.856	0.0653	0.242	-	-	192	36.7	-	2.66	2.58
C1-e50	2.28	0.364	0.189	0.555	0.195	0.724	-	-	310	129	-	2.31	3.47
C2-e50	1.59	0.523	0.143	0.733	0.112	0.415	-	-	174	63.6	-	2.6	2.9
C1-ec50	3.26	0.255	0.238	0.440	0.218	0.808	0.105	0.389	343	136	307	2.81	3.28
C2-ec50	2.05	0.406	0.167	0.629	0.119	0.442	0.0544	0.202	185	64.8	162	2.89	2.85

*Ratio to calculated elasticity value **Design value ***Long-term values take into account creep

対側に 25mm 延長し X 方向固定とした。なお喪失長さは、鉄筋伸びを考えると完全定着長さの半分に相当し、定着長は、5d~10d に相当すると考えられる。中央部ひび割れは、鉄筋の付着喪失長を 50mm とした。拘束応力はコンクリートの引張強度の 1/2 程度の 1.2MPa とし、スラブ中央に引張力として加えた。

3.4 解析結果

Table 10 に計算結果を示す。表中時間経過後のひび割れ幅は、クリープを考慮した下式⁶⁾により求めた。経過時間は、乾燥開始後 3 年(1095 日=26,280 時間)とした。

$$s_t = s(1 + k_t) \tag{10}$$

ただし

$$k_t = (1 + 10t)^{0.080} - 1 \tag{11}$$

t : 荷重継続時間 (時間)

3.4.1 剛性の変化

Fig. 4 に全付着喪失長ささとスラブ全体の剛性 (D) および軸剛性 (A) の関係を、引張鉄筋比 (C1 : $p_f=0.376$, C2 : $p_f=0.752$) 別に示す。なお、付着喪失長さは、定着部および中央部対称条件を加算すれば、実際の付着喪失長さはこれの 2 倍になる。拘束応力による曲げひび割れの進展と固定端部の固定度の低下により、たわみ剛性が大きく低下した。既往の実験例⁵⁾を Fig. 5 に示す。4 体の試験体のうち、HPCa-2 と RC-2 が乾燥収縮拘束試験体で、大きな剛性低下を示している。RC-2 ($\sigma_c=1.31\text{MPa}$) の剛性は、計算例の C1-ec50 の値に近い。

また、引張力を負担するのがすべて鉄筋となるため、軸剛性も大きく低下している。

3.4.2 ひび割れ幅

ひび割れ幅は、弾性計算値では 0.2mm 程度以下であるが、クリープを考慮するといずれも大きく増大し、C1-e50, C1-ec50 では 0.8mm 程度と耐久性上問題にな

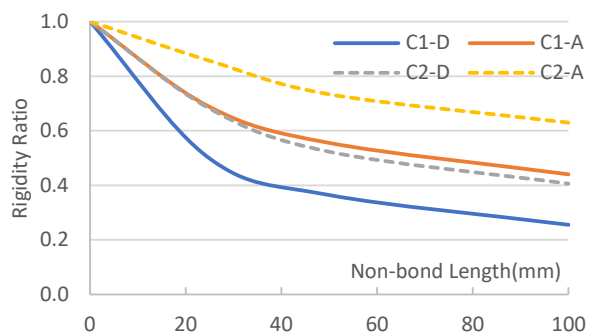


Fig. 4 Change in Rigidity Ratio

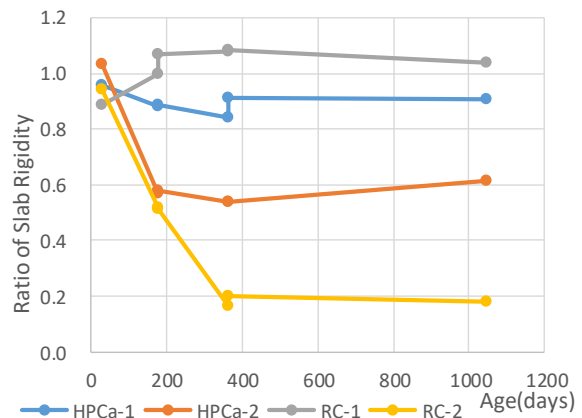


Fig. 5 Change in Slab Rigidity⁵⁾

Table 11 Number of Cracks and Crack Width (mm)⁵⁾

Position	Age*	HPCa-1	HPCa-2	RC-1	RC-2
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

る値となっている。Table 11 に実験例⁵⁾におけるひび割れ状況を示す。拘束の無い試験体のひび割れ幅は、0.20mm 以下であるが、拘束試験体は端部で最大 0.85mm,

中央で 0.55mm と大きな値を示している。Fig. 6 に拘束試験体のひび割れ幅実測値と C1-ec50 計算値との比較を示す。これらは、比較的良好な相関を示している。

3.4.2 鉄筋応力

鉄筋応力は、拘束応力のため中立軸が低下し、固定端下端筋にも引張応力が生じている。引張鉄筋比 0.376% のモデルでは、SD30 の実降伏応力に近い値になっている。また、中央部下端鉄筋応力も SD30 の降伏値となっている。Fig. 7 に実験例⁵⁾における鉄筋応力を示す。拘束試験体では、大略計算値に近い鉄筋応力を示している。

3.4.3 コンクリート曲げ応力

Fig. 8 に付着喪失長さと同コンクリートの曲げによる引張応力の関係を示す。固定端 (-E) 応力は、ひび割れ発生により引張応力はすべて鉄筋に負担され、固定端部からやや離れた位置に最大応力が現れる。引張拘束応力が加わっても弾性計算値に比べ大きな変化は見られない。一方、中央部 (-C) は、端部固定度の低下による中央部曲げモーメントの増大と引張拘束応力が加算され、弾性計算値の 2~3 倍と大きく増大する。新たなひび割れの発生が予測される。

6. まとめ

乾燥収縮拘束応力が、鉄筋コンクリート構造物へ及ぼす影響について検討した。

- 1) 拘束度が高い場合 ($\lambda=0.7$)、拘束応力は 3MPa 程度に達し、ひび割れの発生は避けられない。
- 2) 拘束度が低い場合 ($\lambda=0.3$, $p_g=1\%$)、拘束応力は 1.0~1.5MPa 程度以下で、これだけではひび割れの発生は生じないと考えられる。
- 3) 精算式による拘束応力の時間変化は、初期に急速な応力の増大が認められる。拘束度とクリープ係数のみによる計算値に対しては、その 8 割程度となった。
- 4) FEM モデルによる鉄筋コンクリートスラブ解析では、拘束応力による剛性変化、ひび割れ幅の増大、鉄筋応力・曲げ応力の変化が明らかになった。
- 5) スラブ解析では、実験例での収縮拘束応力による著しい剛性低下や、最大 0.8mm に達する過大なひび割れ、また長期設計値を大幅に超える鉄筋応力の発生等の現象をよく表すことができた。

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，

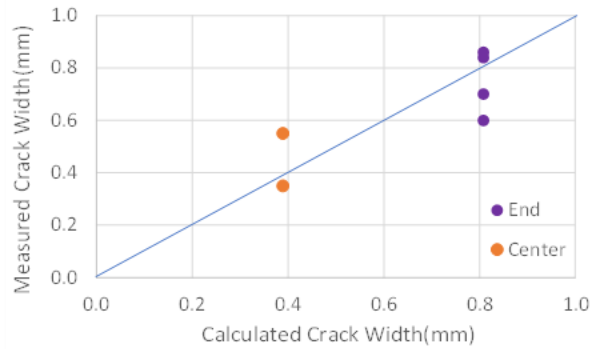


Fig. 6 Comparison of Measured⁵⁾ and Calculated Crack Width

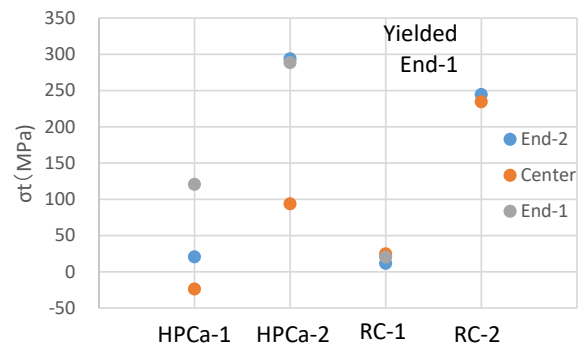


Fig. 7 Measured Steel Stress⁵⁾

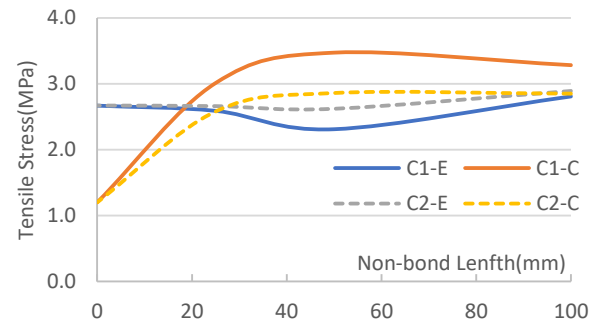


Fig. 8 Change in Tensile Stress

2012

- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2022
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書，2012
- 4) 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
- 5) 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，Vol.40，No.2，pp.385-390，2018
- 6) CEB-FIP: Model Code 1990, London, Thomas Telford, 1990
- 7) CEB-FIP: Model Code 1978, Paris, 1978