

# 論文 曲げおよび乾燥収縮ひび割れを生じる鉄筋コンクリート造床スラブの動的特性の変化に関する実験研究

山本 俊彦\*<sup>1</sup>

**要旨:** 鉄筋コンクリート造床スラブは、周辺の架構により乾燥収縮ひずみの拘束を受け、乾燥収縮応力が曲げ応力に加算される形でひび割れが生じる。このため、曲げおよび乾燥収縮ひび割れを生じる鉄筋コンクリート造床スラブの動的特性に関する長期・短期の実験を行った。実験の結果、床スラブの固有振動数は、コンクリートの乾燥収縮に伴うひび割れの発生によって、早期に固有振動数の低下を生じ、約 6 年間にその低下は 20~30%を示した。また、短期載荷実験で静的な剛性との比較を行うとともに、短期、長期の床スラブの固有振動数の予測手法を検討した。

**キーワード:** 固有振動数, ひび割れ, 鉄筋コンクリート造スラブ, 乾燥収縮

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造床スラブは、ひび割れの発生等によって剛性が低下し、これに伴い固有振動数が低下する。剛性低下は、床スラブの応答変位を増大させるばかりでなく、場合によっては振動数低下によって人体内臓への共振などが生じ、その健全性が損なわれることがある。

鉄筋コンクリート構造物における床スラブは、周辺の架構によって支持されると同時に、乾燥収縮ひずみの拘束を受ける。これは、鉄筋コンクリート造床スラブの配筋量や厚さが、梁などに比べて小さく、乾燥収縮ひずみが相対的に大きいことにより、収縮ひずみの拘束が生じる。拘束された収縮ひずみは、クリープによって緩和されるが、残留ひずみは床スラブに引張応力を生じさせ、これが大きい場合には曲げ応力に加算され、コンクリート断面にひび割れを発生させる。鉄筋コンクリート造床スラブの剛性低下には、この影響を考慮する必要がある。これまで、ひび割れの影響考慮した鉄筋コンクリート部材の長期たわみに関する予測式<sup>1),2),3)</sup>は、いくつか提案されている。しかし、鉄筋コンクリート造床スラブの動的特性に関する調査・研究はいくつか行われているが<sup>4),5)</sup>、短期・長期の変化を予測するためには、十分とは言えない。このため、曲げと乾燥収縮によってひび割れが生じる場合を想定した鉄筋コンクリート造床スラブの長期

載荷実験を行い、固有振動数の変化を調べた。併せて、長期載荷実験終了後、終局載荷実験によって鉄筋コンクリート造床スラブの短期的な固有振動数の変化についても検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体は両端拘束の一方向スラブとした。試験体を図-1 および表-1 に示す。試験体は上側の実験対象スラブと拘束用の下側部分からなり、実験対象スラブの幅は 400mm、板厚を 120mm~240mm、スパンを 3600mm~7200mm とし、板厚/スパン比を一定の 30 とした。引張鉄筋比  $p_t$  は、0.29%~0.38%とした。両端部は複筋配筋とし、中央部圧縮側は無筋とした。引張主筋は、幅 450mm、突出 100mm の梁部へ  $40d_a$ (+末端  $5d_a$  は付着カット)の定着をとった。下部拘束スラブには、100mm の直線部から 200mm の 45° テーパー部を介して繋がっている。下側拘束スラブ幅は 400mm、厚さ 360mm で、配筋  $2 \times 3-D16(p_g=0.83\%)$ を共通とし、比較的軸方向に拘束が高いものとした。長期持続荷重による曲げ応力は 2.5MPa 一定とし、収縮ひずみの拘束によって長期的に曲げひび割れが生じる値とした。試験体は載荷材齢 28 日まで湿潤状態を保つためシート養生し、スラブ支柱もそのままと

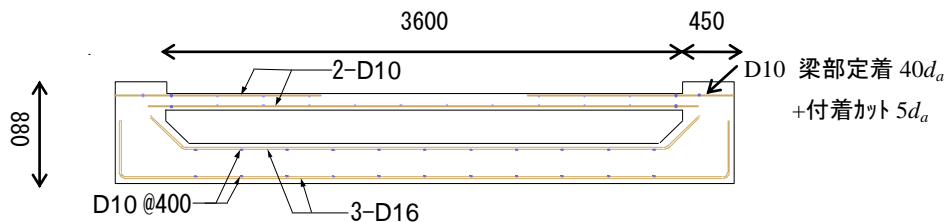


図-1 試験体の形状と配筋(試験体 S4)

\*<sup>1</sup> 大同大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

表-1 試験体一覧

試験体	スパン (mm)	板厚 (mm)	端部配筋*		中央配筋**		自重 (kN/m)	積載 (kN/m)	持続荷重 (kN/m)	d (mm)
				( $p_t$ )		( $p_t$ )				
S1	7200	240	4-D10	0.333	4-D10	0.333	2.26	0	2.26	215
S2	5400	180	3-D10	0.346	3-D10	0.346	1.70	0.545	2.25	155
S3	4500	150	2-D10	0.286	2-D10	0.286	1.41	0.872	2.28	125
S4	3600	120	2-D10	0.376	2-D10	0.376	1.13	1.09	2.22	95

\*端部上端、下端同じ \*\*中央上端配筋なし

表-2 試験体の特性計算値

試験体	持続荷重 (kN/m)	曲げ応力 (MPa)	たわみ (mm)	鉄筋応力 (MPa)	固有振動数(Hz)			降伏荷重 (kN/m)	崩壊荷重 (kN/m)
					自重	1/2 積載	持続荷重		
S1	2.26	2.54	1.45	181	14.9	-	-	4.78	6.37
S2	2.24	2.52	1.09	187	19.8	-	17.2	4.59	6.12
S3	2.28	2.57	0.918	246	23.8	20.8	18.7	3.56	4.74
S4	2.22	2.50	0.714	202	29.7	24.4	21.2	4.22	5.63

した。試験体の主な性質を表-2 に示す。スラブの固有振動数は、式(1)によって求めた。弾性たわみは、各試験体ともスパン比 1/4300 程度である。コンクリートの動的弾性係数と静的弾性係数は、同じ 23.6GPa とした。

$$f_n = \frac{k_n^2}{2\pi \cdot l^2} \sqrt{\frac{E_c I}{\rho A}} \quad (1)$$

ここに、 $f_n$  : 固有振動数、 $k_n$  : 支持条件による係数(4.73)、 $l$  : スパン長さ、 $E_c$  : コンクリートの弾性係数、 $I$  : スラブの断面二次モーメント、 $\rho$  : スラブの質量 (積載荷重を含む)、 $A$  : スラブの断面積

## 2.2 使用材料

コンクリートの調合を表-3 に、また強度特性を表-4 に示した。材齢 28 日でのコンクリート圧縮強度は 23.7MPa であった。拘束用の下スラブの圧縮強度はやや高い値を示した。鉄筋は D10, D16 共 SD295 材を用いた。D10 の降伏強度は 373MPa 引張強度は 547MPa であった。

表-3 コンクリートの調合

C (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )	混和剤 (kg/m <sup>3</sup> )	スラブ <sup>φ</sup> (mm)
302	172	818	1002	0.755	180

表-4 コンクリートの強度特性

部位	養生	材齢 (日)	比重	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_b$ (MPa)	$E_c$ (GPa)
上スラブ	湿潤	28	2.29	23.7	1.93	3.97	23.6
下スラブ	湿潤	28	2.33	26.9	2.32	4.22	27.3

## 2.3 実験条件・測定方法

材齢 28 日まで乾燥を防ぎシート養生し、翌日支柱撤去、コンクリートブロックによる等分布荷重を行った。固有振動数の測定は、乾燥収縮の進行に伴い、種々の材齢で行った。表-5 に長期荷重実験日程を示した。長期荷重実験終了後、試験体の終局荷重実験を行い、静的な剛性と固有振動数の関係を調べた。固有振動数の測定は、

表-5 長期荷重実験日程

材齢(日)	29	57	92	1213	1246	2254
初期荷重	○					
除荷		○	○	○		○
再載荷		○	○		○	

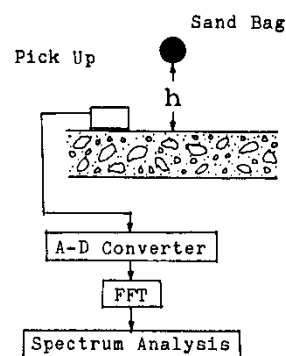


図-2 固有振動数の測定方法

表一六 載荷時の試験体特性

試験体	たわみ( $\delta$ : mm) 持続荷重	実測固有振動数 ( $f$ : Hz)			計算値比( $f/f_{cal}$ )		
		自重	1/2 積載	持続荷重	自重	1/2 積載	持続荷重
S1	1.27	15.1	-	-	1.02	-	-
S2	0.91	20.3	-	17.6	1.02	-	1.02
S3	0.87	24.4	21.4	19.3	1.03	1.03	1.03
S4	0.65	30.4	24.9	21.6	1.02	1.02	1.02

図一2 に示すように人体歩行や日常生じる程度の振動を対象に、砂袋(500g)をスラブ上 250mm から落下させ、自由振動を記録した。試験体の軸方向の収縮変形を変位計で測定し、鉄筋ひずみ、コンクリートひずみを測定した。実験は、周辺の環境の温湿度の変化を受ける実験室内で行った。季節的な変化を受け、日平均温度は 2℃~31℃で年間平均約 16℃、湿度は年間平均約 67%であった。

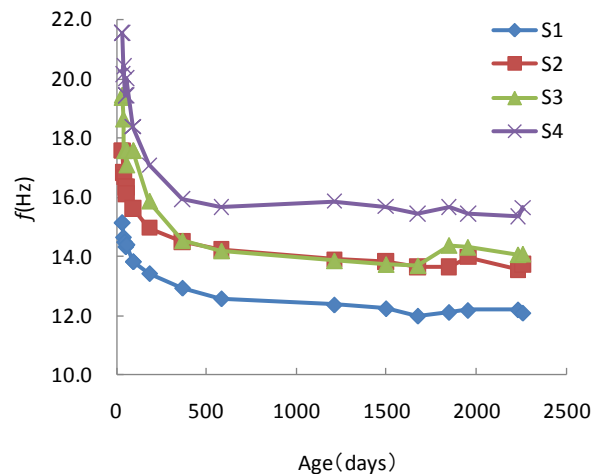
### 3. 長期載荷実験の結果

#### 3.1 載荷時の試験体の特性

表一六 に支保工撤去時の自重および初期載荷時の試験体のたわみ、固有振動数を示す。持続荷重載荷後の試験体のたわみ、固有振動数は、コンクリートの弾性係数を 23.6GPa とした計算値よりいずれも若干高い値を示した。持続荷重載荷後、いずれの試験体においても、曲げひび割れの発生は認められなかった。自重および持続荷重載荷後の固有振動数の計算値に対する比は、一定の 1.02~1.03 で変化はないことから、以後、各試験体の基準弾性固有振動数として、これらの値を用いることとする。

#### 3.2 固有振動数の変化

図一3, 4 に持続荷重時および除荷時のスラブ固有振動数の変化を示す。いずれの試験体も持続荷重載荷後、早



図一三 固有振動数の変化 (持続荷重)

期に乾燥収縮によりひび割れが生じ、固有振動数が低下した。材齢 500 日程度でほぼ一定値に収束し、その後多少の変動を伴いながら経過した。最終材齢での固有振動数は、載荷時の基準弾性固有振動数に対し、持続荷重状態で 0.72~0.80、自重で 0.69~0.80 と大きな低下を示した。固有振動数の低下を式(1)の  $E_c I$  で示される静的剛性に換算すれば、0.48~0.64 となり大きな剛性低下を示す。

表一七 固有振動数の変化 (持続荷重時)

試験体 [days]	$f$ [Hz]					$f/f_{29}$				
	29	56	373	1301	2254	29	56	373	1301	2254
S1	15.1	14.4	12.9	12.2	12.1	1.00	0.95	0.86	0.81	0.80
S2	17.6	16.4	14.5	13.6	13.7	1.00	0.93	0.82	0.77	0.78
S3	19.4	17.6	14.5	14.0	14.1	1.00	0.91	0.75	0.72	0.73
S4	21.6	19.5	16.0	15.8	15.6	1.00	0.90	0.74	0.73	0.72

表一八 固有振動数の変化 (自重)

試験体 [days]	$f$ [Hz]					$f/f_{29}$				
	29	56	373	1301	2254	29	56	373	1301	2254
S1	15.1	14.4	12.9	12.2	12.1	1.00	0.95	0.86	0.81	0.80
S2	20.3	18.6	18.1	16.1	15.6	1.00	0.92	0.89	0.80	0.77
S3	24.4	22.2	21.7	17.9	17.5	1.00	0.91	0.89	0.73	0.72
S4	30.4	26.6	24.8	21.5	20.8	1.00	0.88	0.82	0.71	0.69

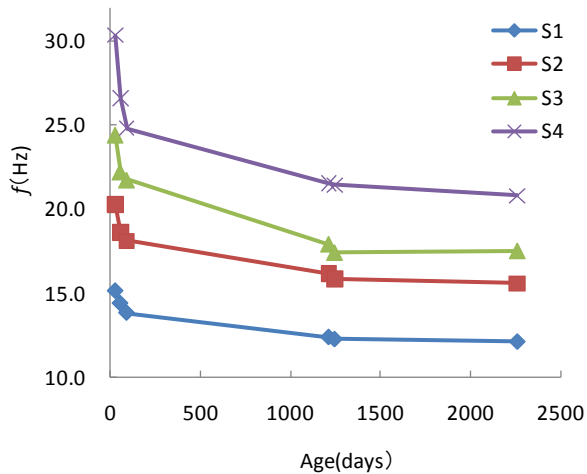


図-4 固有振動数の変化 (自重)

### 3.3 乾燥収縮ひずみ

図-5 に各試験体のスパン間の軸方向の縮みを変位計で計測した値をひずみとして示した。初期には乾燥に伴い急速に収縮し、材齢 500 日を超える頃からは、年間の湿度変化に伴って、伸び縮みの変化を繰り返しながらやや増大する傾向を示した。材齢初期は、スラブ厚の小さい試験体での収縮が大きかったが、終局時にはほとんど変わらない値になった。表-9 にスラブの収縮ひずみ変化を示した。表中には各試験体スラブの断面と同一で長さが 600mm の試験片の自由収縮ひずみを示した。最終材齢での試験体スラブの拘束収縮ひずみは約 500 $\mu$ 、

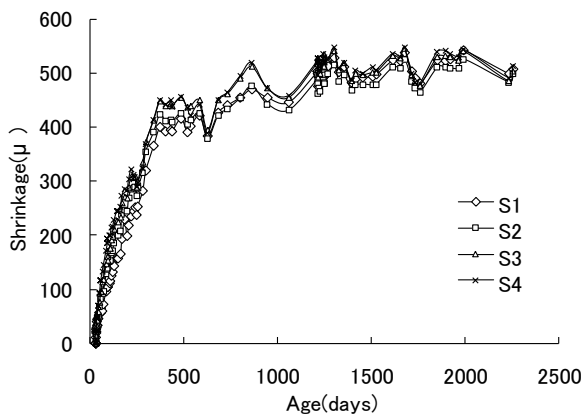


図-5 試験体の軸方向の収縮

表-9 スラブの収縮ひずみの変化

試験体 [days]	Slab shrinkage $\epsilon_{ss}$ [ $\mu$ ]				Slab model shrinkage $\epsilon_{sm}$ [ $\mu$ ]				Tensile stress $\sigma_{sh}$ [MPa]			
	373	731	1301	2254	373	731	1301	2254	373	731	1301	2254
S1	400	440	528	507	700	730	820	780	1.42	1.37	1.38	1.29
S2	424	433	515	498	750	770	840	810	1.54	1.59	1.53	1.47
S3	449	462	542	504	740	770	830	820	1.37	1.45	1.36	1.49
S4	450	464	547	514	830	830	905	830	1.79	1.73	1.69	1.49

試験片の自由収縮ひずみは、約 800 $\mu$  となった。拘束率は約 0.4 となった。

自由収縮とスラブ試験体の収縮ひずみの差を拘束ひずみとし、式(2)によりおおよその乾燥収縮応力 (引張を正) を推定した。

$$\sigma_{sh} = \frac{(\epsilon_{ss} - \epsilon_{sm})}{\chi} E_c \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_{sh}$  (+): 乾燥収縮応力、 $\epsilon_{ss}$  (-): スラブ収縮ひずみ、 $\epsilon_{sm}$  (-): モデルスラブ試験片自由収縮ひずみ、 $\chi$ : リラクゼーション係数-材齢によらず 5.0 一定と仮定<sup>6)</sup>

乾燥収縮による引張応力を正確に求めるのは困難であるが、引張クリープ限界に近いことから平均的な圧縮クリープ係数 3.0 でのリラクゼーション係数 4.0 より大きい 5.0 とした。求められた引張応力を曲げ応力に加算すると、端部で曲げ応力の 1.6 倍の 3.83~4.09MPa、中央で 2.1 倍の 2.56~2.78MPa となる。

### 3.4 ひび割れ状況

図-6 に最終材齢での各試験体のひび割れ状況を示した。図中にはひび割れ幅 0.1mm 以上のものを示した。

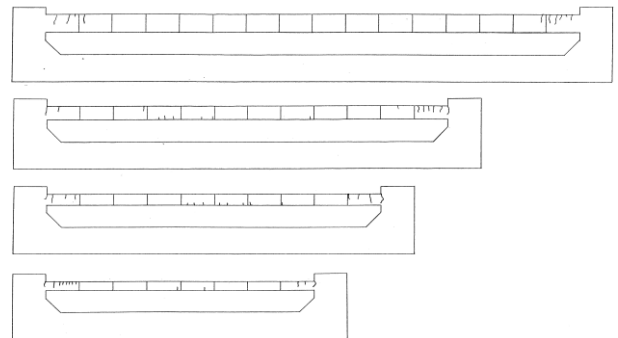


図-6 試験体ひび割れ状況 (0.1mm 以上)

### 3.5 材料特性の変化

表-10 に長期載荷終了後、各試験体から採取したコンクリートコアによる材料特性を示す。圧縮強度は 23.9MPa で初期のコンクリート供試体によるものとほぼ同じであったが、比重は 2.25 で 2%、弾性係数は 20.4GPa と 14%低い値を示した。これらは、コンクリートの乾燥による影響が大きいと考えられる。

表-10 コアコンクリートの特性

試験体	S1	S2	S3	S4	平均
比重	2.24	2.24	2.25	2.25	2.25
$\sigma_c$ (MPa)	23.8	26.4	23.1	22.5	23.9
$E_c$ (GPa)	20.2	20.4	21.2	19.8	20.4

### 3.6 動的剛性と静的剛性

除荷・載荷時のたわみから求まる静的な剛性  $D_s$  を式(1)の  $E_c I$  とし、固有振動数から求めた動的剛性  $D_d$  との平方比として図-7 に示した。動的剛性は静的剛性に対して平均 7% 高い値を示した。

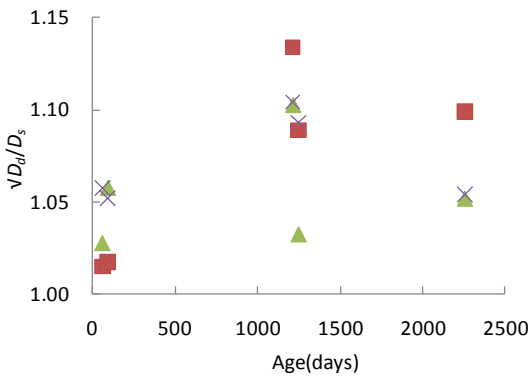


図-7 動的剛性と静的剛性比 ( $\sqrt{D_d/D_s}$ )

## 4. 短期載荷実験

### 4.1 実験方法

長期載荷実験終了後、コンクリートブロック等分布載荷による終局強度実験を行った。荷重は、表-2 に示す計算上の崩壊荷重を超えるまで載荷を行った。

### 4.2 実験結果

実験結果の例として、図-8 に試験体 S1 の荷重-変形、図-9 に固有振動数-荷重関係を示す。自重によるたわみを補正するため、図-8 に示す第 1 荷重載荷時および最終荷重除荷時の変形を直線延長して荷重ゼロの原点として示した。端部降伏時に変形が急増したが、中央降伏は生ぜず崩壊機構は形成しなかった。固有振動数は荷重の増加と共に低下し、載荷時の 12.2Hz から除荷時には 10.7Hz となった。その比は 0.87 となった。

### 4.3 動的剛性と静的剛性

図-10 に、短期載荷実験でのたわみから求まる静的な剛性  $D_s$  : 載荷段階毎の接線剛性  $D_{s,tan}$  および原点をむすぶ割線剛性  $D_{s,sec}$  を式(1)の  $E_c I$  として、固有振動数からの求まる動的剛性  $D_d$  と併せて、無ひび割れ断面剛性  $D_0$  との平方比で示した。除荷時は、除荷時荷重ゼロを原点として求めた。荷重段階初期は、動的剛性は静的剛性に対し 9% 程度高い値を示しているが、荷重増加により静的剛性は動的剛性に比べさらに大きな低下を示した。

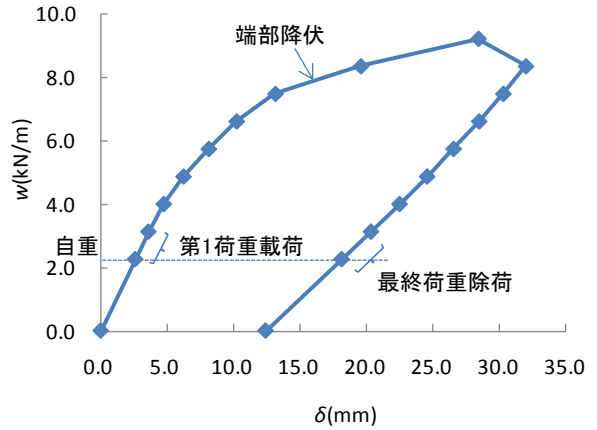


図-8 荷重-変形関係 (S1)

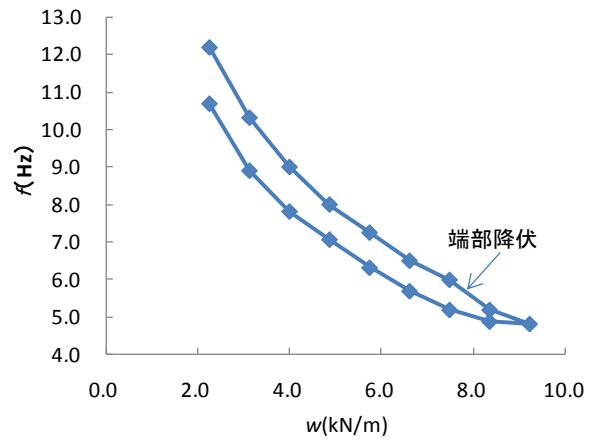


図-9 固有振動数-荷重関係 (S1)

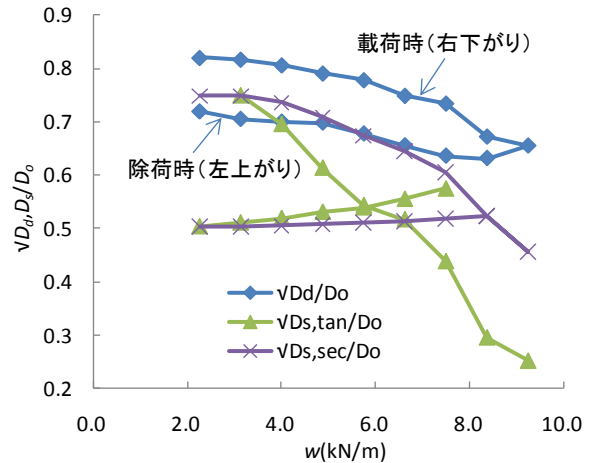


図-10 動的剛性とたわみによる剛性比較 ( $\sqrt{D_d, D_s/D_0}$ )

## 5. 固有振動数の予測

ひび割れを有する床スラブの固有振動数を式(3)によって検討する。

$$f = \nu \cdot f_0 \quad (3)$$

ここに、 $\nu$  : ひび割れによる修正係数、 $f_0$  : 無ひび割れ

表-11 実測固有振動数の計算値比

試験 体	v			Measured		Ratio-1		D.L.	Ratio-2		D.L.
	h	(d/h) <sup>3</sup>	v= $\sqrt{(d/h)^3}$	f <sub>2254</sub> [Hz]	f' <sub>2254</sub> [Hz]	(f <sub>2254</sub> /f <sub>29</sub> )	(f <sub>2254</sub> /v'f <sub>0</sub> )	(f' <sub>2254</sub> /v'f <sub>0</sub> )	(f <sub>2254</sub> /v'f <sub>0</sub> )	(f' <sub>2254</sub> /v'f <sub>0</sub> )	
S1	240	0.719	0.848	12.1	12.1	0.80	0.94	0.94	1.01	1.01	
S2	180	0.637	0.798	13.7	15.6	0.78	0.98	0.96	1.05	1.04	
S3	150	0.578	0.76	14.1	17.5	0.73	0.96	0.95	1.03	1.02	
S4	120	0.495	0.704	15.6	20.8	0.72	1.03	0.97	1.10	1.05	

f<sub>29</sub>=f<sub>0</sub>, f<sub>2254</sub>: 自重による実測固有振動数, v': E<sub>c</sub>=20.4GPaとして修正した値 =v $\sqrt{20.4/23.6}$

断面による鉄筋無視の E<sub>c</sub>I から求まる固有振動数

ひび割れ断面の剛性を求めるのに、全せい h の代わりに有効せい d を用いて修正すると、長期荷重時固有振動数の計算値に対する比 (f<sub>2254</sub>/v'f<sub>0</sub>, f'<sub>2254</sub>/v'f<sub>0</sub>) は、平均で 0.97 となる。また、コンクリートの弾性係数をコアコンクリートの値 20.4GPa で修正するとその比 (f<sub>2254</sub>/v'f<sub>0</sub>, f'<sub>2254</sub>/v'f<sub>0</sub>) は、平均 1.04 となり、いずれもほぼ良い推定を示す。各計算値 f<sub>cal</sub> に対する実測値の比を表-11, 図-11 に示す。

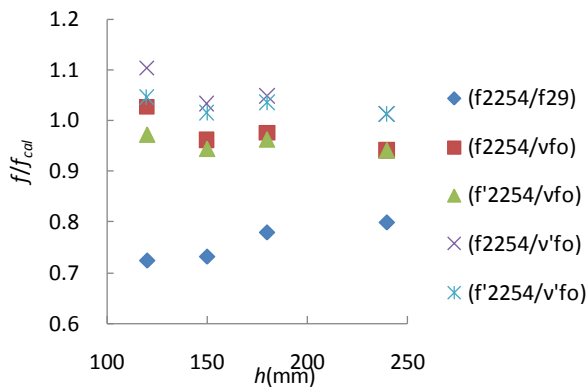


図-11 実測固有振動数の計算値比 (長期荷重)

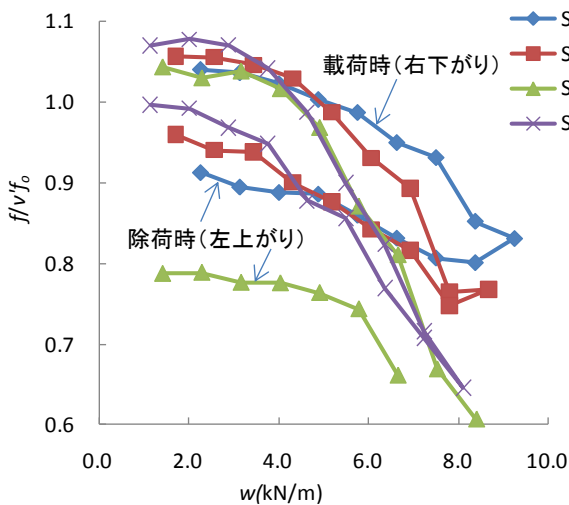


図-12 実測固有振動数の計算値比 (短期荷重)

図-12 には、短期荷重実験時の固有振動数と v'f<sub>0</sub> 計算値に対する比を示す。すべての試験体で端部降伏し、試

験体 S3 は中央も降伏した。計算降伏荷重までは、計算値比 1.05 程度を示しその後徐々に低下する。降伏後除荷により計算値比は 0.9~1.0 程度を示し、動的な剛性は静的なものとは異なった性状を示す。崩壊機構を形成した試験体 S3 は、大きく剛性低下した。

6. まとめ

乾燥収縮ひずみの拘束を受け、ひび割れを生じる鉄筋コンクリート造スラブの長期ならびに短期荷重実験から以下のことが明らかになった

- 1) 乾燥収縮ひずみの拘束により、ひび割れが発生し動的な剛性が長期的にかなり低下し、当初の値に比べ 0.72~0.80 となった。
- 2) 動的な剛性は、たわみによる静的な剛性に比べ平均で 7%程度高い値を示し、短期荷重実験でも初期は同程度の値を示した。
- 3) ひび割れを生じる長期的な固有振動数の推定には全せい h の代わりに有効せい d を用いて修正すると、比較的良い推定値が得られた。更に、実際のコンクリート弾性係数で修正すれば短期・長期を含めて降伏荷重程度までの振動数をよく予測できる。

参考文献

- 1) CEB-FIP: Model Code 1990, London, Thomas Telford, 1990
- 2) ACI 318-05: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 2005
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 1999
- 4) 井野 智他：大たわみの発生した鉄筋コンクリート床スラブの 1 次固有周期, 日本建築学会学術講演会梗概集構造系, pp.1557-1558, 1979
- 5) Yamamoto, T.: Change in Dynamic Properties of Reinforced Concrete Slabs, Transactions of JCI, pp.581-588, 1984
- 6) 山本俊彦他：高強度コンクリートのクリープ・収縮および拘束ひび割れに関する実験, セメント・コンクリート論文集, No.61, pp.420-726, 2007