

[181] 拘束及び収縮クラック効果を考慮した鉄筋コンクリート造床スラブの振動性状

正会員 望 月 重 (武蔵工業大学工学部)
正会員 ○入 江 元 章 (三菱地所)

1. はじめに

健全な実在鉄筋コンクリート造床スラブの振動計測を行い、その実測値と周辺単純支持または固定支持矩形板の理論式による計算値を比較するとかなりの差異を生ずる場合が多い。その主な原因として、A. 床スラブ周辺の拘束条件の不適合、B. 収縮クラック等のひびわれが発生したことによる床スラブの剛性低下が考えられる。従って、本研究では標準的な鉄筋コンクリート壁式構造建築物の床スラブに着目し、1. 壁体による床スラブの周辺拘束度の相違が、床スラブの振動性状へ及ぼす影響、2. 収縮クラックの発生進展量に伴う床スラブの振動性状への影響に関して解析及び実験より考察し、以上の結果を実在の床スラブに適用して本結果の実際の床スラブへの妥当性を検討した。なお、床スラブの振動性状は1次固有振動数で表わすものとし、また、①床スラブの辺比は1.0とする、②クリープ等の床スラブの長期的たわみによる影響を考慮しないの条件を設定した。

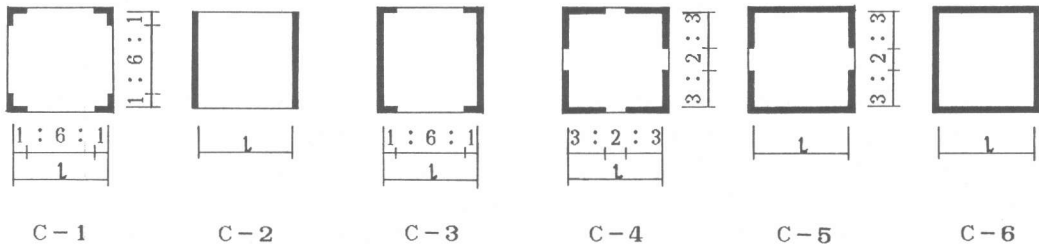
2. 壁体による拘束効果に関する考察

2-1. 解析概要

①解析方法・・・壁体の拘束を考慮した床板の固有周期をFEM弾性振動解析法により求めた。その要素は等方性長方形要素〔1節点($W, \theta_x, \theta_y, \theta_{xy}$)の4自由度〕とし、質量マトリックスは分布質量系、固有値の解法はヤコビ法により行った。また、壁体部分の剛性は平板の曲げ剛性に置換(壁体部分の階高を平板の厚さと考える)し、分割数は 9×9 (C-2は 9×8)に均等分割して解析を行った。なお、コンクリートの材料定数は、ヤング係数: $2.10 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ・ポアソン比:0.17・密度: $2.45 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{cm}^4$ とした。

②解析モデル・・・壁体の配置は対称な連続型のものに限定し、解析モデルは図1に示したようなC-1～6の6種類とした。そして、壁体による拘束効果は拘束量で表すものとし、その拘束量は、床スラブの周辺を拘束している壁体部分の内法長さの合計を床スラブの内法面積で割ったものとした。

③解析種類・・・最初に、C-1～6の床スラブの内法面積を 16.0 m^2 に固定し、床スラブ厚を $0.10 \text{ m} \cdot 0.15 \text{ m} \cdot 0.20 \text{ m}$ 、階高を $1.30 \text{ m} \cdot 2.60 \text{ m}$ 、壁厚を $0.15 \text{ m} \cdot 0.20 \text{ m} \cdot 0.25 \text{ m}$ に各々変化させて合計108通り解析を行ない、床スラブ厚・階高・壁厚・拘束量の相違が、床スラブの振動性状へ及ぼす影響を調べた。その結果、階高・壁厚の相違が、床スラブの振動性状へ及ぼす影響はほとんどないが、床スラブ厚・拘束量の相違が、床スラブの振動性状へ及ぼす影響が大きいことがわかった。この結果は図2に示した。次に、C-1～6の床スラブ厚を 0.15 m 、階高を 2.60 m 、壁厚を 0.20 m に固定し、床スラブの内法面積を $25.0 \text{ m}^2 \cdot 36.0 \text{ m}^2 \cdot 64.0 \text{ m}^2 \cdot 100.0 \text{ m}^2$ の4通り変化させて合計24通り解析を行ない、床スラブの内法面積の相違が、床スラブの振動性状へ及ぼす影響を調べた。この結果は図3に示した。



数字は、床スラブを拘束している壁体部分の内法長さ
壁体により拘束されていない床スラブの内法長さとの比を表す

床スラブの辺比:1
1:床スラブの内法寸法
■ 壁体部分

図1. 解析モデル

2-2. 解析結果

標準的な鉄筋コンクリート壁式構造建築物の床スラブならば、その振動性状は、図2より拘束量及び床スラブ厚に比例し、そして、図3より拘束量及び床スラブの内法面積に比例することがわかる。また、図2、3よりC-5の床スラブの振動性状は、その周辺を固定支持とした場合の振動性状と近似的に等しく、そして、C-6の床スラブの振動性状は、その周辺を固定支持とした場合の振動性状と等しいものと評価出来ることわかる。従って、C-1~5の結果を最小2乗法により分析した結果、床スラブの振動性状 $f_w(\text{Hz})$ は、その拘束量 $R_w(\text{m/m}^2)$ ・厚さ $t(\text{m})$ ・内法面積 $A(\text{m}^2)$ ・周辺を単純支持とした場合の振動性状 $f_s(\text{Hz})$ により

$$R_s \leq R_w \leq R_c \text{ の場合 } f_w = 180 \cdot t \cdot b \cdot (R_w - 0.13 \cdot a) + f_s \quad \dots (1)$$

$$a: 16/A, \quad b: a^4$$

で表されることがわかった。

ただし、 $R_s = 0.13 \cdot a$

$$R_c = 0.13 \cdot a + (f_c - f_s) / (180 \cdot t \cdot b)$$

$f_c(\text{Hz})$: 周辺を固定支持とした場合の床スラブの振動性状

であり、上記の床スラブの振動性状 $f_w(\text{Hz})$ は

$$R_w \leq R_s \text{ の場合 } f_w = f_s$$

$$R_c \leq R_w \text{ の場合 } f_w = f_c$$

となる。

なお、 $f_s(\text{Hz})$ ・ $f_c(\text{Hz})$ は、各々周辺単純支持・固定支持矩形板の理論式により求めればよい。

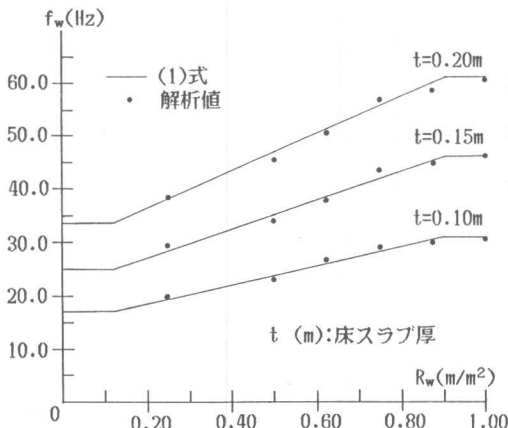


図2. 壁体の拘束効果による床スラブの振動性状
(床スラブの内法面積: 16.0m²)

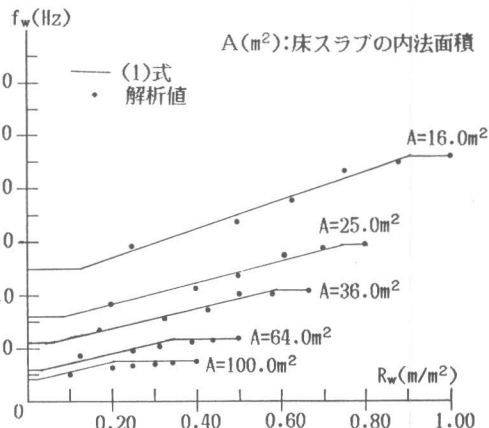


図3. 壁体の拘束効果による床スラブの振動性状
(床スラブ厚: 0.15m)

2-3. 解析結果の妥当性

①実験概要・・・解析結果の妥当性を示すため、C-3・C-5(床スラブの内法面積: 16.0m², 床スラブ厚: 0.15m, 階高: 2.60m, 壁厚: 0.20mの場合)を各々1/5に縮小(辺長比)したRSW1・RSW2の2体の試験体を作成した。試験体の材料はモルタル及び鉄線とした。その材料性状は表2に示した。なお、試験体の配筋は標準型鉄筋コンクリート壁式構造物の床スラブを参考にし、壁筋・スラブ筋(ダブル配筋)は呼び径2.0mm(φ40mm)の鉄線を使用し、壁主筋・スラブ止め筋は各々呼び径2.6mm・3.2mmの鉄線を使用した。

②実験結果・・・実測した結果、RSW1・RSW2の床スラブの振動性状は、各々193.8Hz・231.5Hzとなった。また、解析と同様の条件でFEM弾性振動解析法により解析した結果、RSW1・RSW2の床スラブの振動性状は、各々193.5Hz・231.1Hzとなった。従って、実測値と解析値の差異は、解析値に対する割合で表すと、RSW1・RSW2両者共に0.2%であることがわかった。

従って、本解析結果の妥当性が確認された。

3. 収縮クラック効果に関する考察

3-1. 実験概要

①試験体概要・・・収縮クラックの発生進展量と床スラブの振動性状の低下量の関係を把握するため、試験体を作成してそれに収縮クラックを発生進展させ、その経時変化で試験体の振動性状を実測した。その試験体はRS70A～Cの3体である。RS70Bの縮小率はモデル（床スラブの内法面積：16.0m²、床スラブ厚：0.15m）の1/5（辺長比）とした。さらに、縮小効果による影響を確認するため、RS70Bの辺長を基準にしたRS70A・Cの辺長比は各々0.75・1.25とした。試験体の材料はモルタル及び鉄線とし、その配筋は標準型鉄筋コンクリート造床スラブを参考にした。また、収縮クラックの進展速度を高めるため鉄板及びL形鋼により試験体を拘束した。試験体の概略は図4、概要は表1、材料性状は表2に示した。なお、試験体は恒温・恒湿室に入れ、電気ストーブを使用し温度・湿度を一定（24.0±2.0℃・55.0±5.0%）にして乾燥した。

表1. 試験体概要

単位:mm

試験体名	l × t A(cm ²)	スラブ筋 スラブ止め筋	鉄板断面 L形鋼断面	A _s A _c	K (%) n=10	辺長比 (面積比)
RS70A	600×22.5 (3600)	1.6 Ø30 2.0	12×75 5×40×40	51.02 135.00	79.1	0.75 (0.56)
RS70B	800×30.0 (6400)	2.0 Ø40 2.6	16×100 6×65×65	94.11 240.00	79.7	1.00 (1.00)
RS70C	1000×37.5 (10000)	2.6 Ø50 3.2	25×100 7×90×90	150.76 375.00	80.1	1.25 (1.56)

l(mm):試験体の内法の辺長 t(mm):試験体の厚さ A(cm²):試験体の内法面積
 ・スラブ筋はダブル配筋とし、表中の数字は鉄線の呼び径
 ・A_s(cm²), A_c(cm²):各々試験体の鉄、コンクリートの総断面積
 ・K(%):拘束率 $K=100 \cdot (n \cdot A_s) / (A_c + n \cdot A_s)$ $n=E_s/E_c$ $E_s=2.1 \times 10^5$ (kg/cm²)
 $E_c=2.1 \times 10^5$ (kg/cm²)
 ・辺長比はRS70Bのl(mm)を基準とし、面積比はRS70BのA(cm²)を基準とした比

②収縮クラックの発生進展量の定量化・・・本研究では、収縮クラックの発生進展量を定量化するにあたり、ひびわれ面積率という無次元化した変数を用いた。そのひびわれ面積率は、床スラブの表面全体に発生進展したひびわれの面積量を床スラブの面積で割り百分率で表したものである。

③試験体の振動性状の低下量の算定方法・・・最初に、収縮クラックの発生進展に伴って試験体の振動性状の実測を行う。次に、試験体と同時に作成した円柱供試体による圧縮強度試験（載荷速度は一定）を行ってモルタルのヤング係数（セカントモデュラス）を算定し、そして、その値を用いてFEM弾性振動解析（試験体周辺の拘束条件は固定支持）を行い、試験体に収縮クラックが全く発生しなかった場合の試験体の振動性状を計算する。本研究では、その解析値と実測値の差を収縮クラックの発生進展に伴う試験体の振動性状の低下量とした。

3-2. 実験結果

実験結果は図5に示した。図5より本結果において縮小効果による影響はないものとし、RS70A～Cの実験結果を最小2乗法により分析した。その結果、収縮クラックの発生進展量がひびわれ面積率にして2.35×10⁻³%増加すると、床スラブの振動性状は1.0Hz低下するという関係が得られた。従って、収縮クラックが発生進展したことにより低下した鉄筋コンクリート造床スラブの1次固有振動数低下量f_d(Hz)は、ひびわれ面積率R_a(×10⁻³%)により

$$f_d = 1.0 \cdot (R_a / 2.35) \quad \dots (2)$$

で表されることがわかった。なお、本研究において、ひびわれは収縮クラックのみであるため、その発生進展した位置・方向の相違による影響は、ほとんどないことを相関分析を行い確認した。

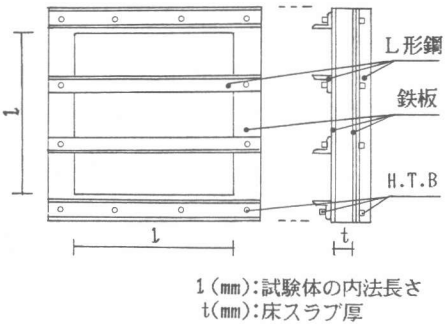


図4. 試験体概略図

表2. 材料性状

細骨材	粒度, F _M 値, 吸水率	2.5mm以下, 2.37, 5.40%			
モルタル	試験体名	RSW1~2		RS70A~C	
	重量調合比 C:S	1:2.85		1:2.48	
	水セメント比 W/C (%)	60.0		70.0	
	圧縮強度 (kg/cm ²)	284		—	
	ヤング係数(x10 ⁵ kg/cm ²)	1.91		—	
鉄線	呼び径 (mm)	1.6	2.0	2.6	3.2
	降伏点 (kg/mm ²)	21.0	24.4	20.1	22.1
	引張強度 (kg/mm ²)	31.8	35.5	33.2	33.5
	伸び率 (%)	19.5	28.8	27.0	27.2
	ヤング係数(x10 ⁶ kg/cm ²)	1.66	1.81	2.00	2.01

・セメントの品質は普通ポルトランドセメント
 ・RSW1~2の養生、乾燥方法は28日間塗布養生後室内放置し、RS70A~Cの養生、乾燥方法は5日間塗布養生後恒温・恒湿室内で電気ストーブにより乾燥した
 ・ヤング係数はセカントモデュラス

4. 本結果の実験建物への適用性

実測した床スラブは、建設後約5年を経過し軀体の状態で管理された鉄筋コンクリート壁式構造の集合住宅の床スラブであり、その辺比が1.0に比較的近いB棟（8階建）の2・4・6・8階のB S_{1E}、B S_{2E}及びJ棟（5階建）の2・3・4・5階のJ S_{2C}、J S_{2E}床スラブの合計16枚の健全な床スラブの振動調査データ¹⁾を本結果との比較検討に用いた。また、これらの床スラブは等方性であるものとみなし、本結果を加算的〔(1)式による結果－(2)式による結果〕に適用してこれらの床スラブの振動性状を算定した。これらの結果は表3、図6に示した。これらの結果より実測値と本結果を加算的に適用して求めた値の差異は、実測値を基準にすれば平均で約9%以内であることがわかった。その差異が生じる原因として、実測値におけるひびわれの評価はその床スラブに設定した仮想線上のものであり、正確なひびわれの面積量を把握することは出来なかったことが考えられる。特に差異が大きな床スラブについてその傾向が顕著である。しかしながらその評価を正確に行うならば、収縮クラックのみが発生したような健全といえる鉄筋コンクリート壁式構造の床スラブ（近似的に辺比が1.0）の振動性状を把握するための目安として、本結果は十分に適用性があるものと考えられる。

5. 結論

収縮クラックのみが発生したような健全といえる鉄筋コンクリート壁式構造の床スラブ（近似的に辺比が1.0）の振動性状は、この床スラブが等方性であるものとみなし、壁体による拘束効果〔(1)式〕及び収縮クラック効果〔(2)式〕を考慮してそれらの結果を累加〔(1)式による結果－(2)式による結果〕すれば求めることが出来る。

表3. 本結果と実測結果（床スラブ厚:0.13m）

床スラブ名	B S _{1E}				B S _{2E}				J S _{2C}				J S _{2E}			
辺 比	1.19		1.18		1.37		1.35		1.44				1.46			
階 数	2F	4F	6F	8F	2F	4F	6F	8F	2F	3F	4F	5F	2F	3F	4F	5F
A	23.83		24.09		21.33		21.60		18.72				18.90			
f _s , f _c	13.03, 25.66		12.64, 24.35		17.43, 33.56		17.01, 32.24		19.46, 36.71				19.50, 36.71			
R _w	0.55		0.58		0.58				0.58				0.58			
R _a	3.40	1.34	8.14	10.96	4.03	0.28	4.07	6.85	23.71	3.95	6.46	2.35	13.23	2.75	—	—
f _w	22.59		22.80		26.53		26.07		29.05				29.05			
f _d	1.45	0.57	3.46	4.66	1.71	0.12	1.73	2.91	10.09	1.68	2.75	1.00	5.63	1.17	—	—
f _w - f _d	21.14	22.02	19.34	18.14	24.82	26.41	24.34	23.16	18.96	27.37	26.30	28.05	23.42	27.88	29.05	29.05
f _e	22.00	24.50	22.00	17.00	26.50	30.00	24.00	22.00	29.50	28.50	28.00	30.00	27.50	30.00	29.00	30.00
	22.00	24.00	18.00	16.50	27.00	30.00	24.00	23.00	26.00	28.00	28.00	30.00	25.00	28.00	30.00	30.00

A (m²): 床スラブの内法面積 f_s (Hz), f_c (Hz): 周辺を各々単純、固定支持とした場合の床スラブの振動性状 R_w (m/m²): 拘束率 R_a (x10⁻³%): ひびわれ面積率 f_w (Hz): 壁体による拘束効果を考慮した床スラブの振動性状で(1)式から求めた値 f_d (Hz): 収縮クラック効果による床スラブの振動低下率で(2)式から求めた値 f_w - f_d (Hz): 本結果により求めた床スラブの振動性状 f_e (Hz): 実測による床スラブの振動性状 (上段-砂袋を使用, 下段-バンクマシンを使用して実測した床スラブの振動性状)

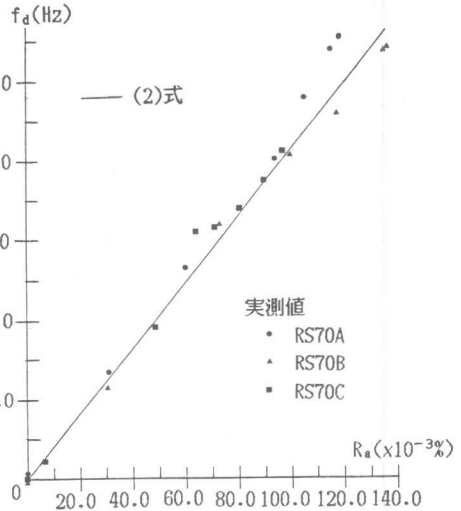


図5. 収縮クラック効果による床スラブの振動低下率

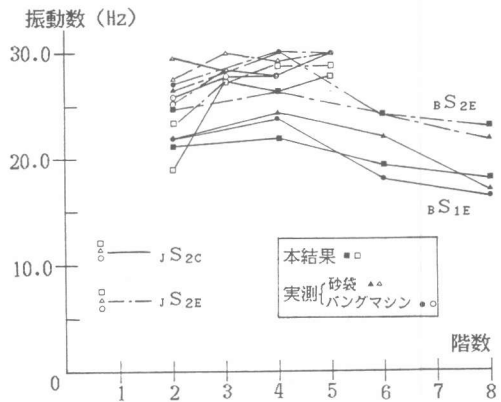


図6. 本結果と実測結果の差異