

純ラーメン構造の重量床衝撃音性能に関する検討報告書
(46Hz 共振現象について)

騒音問題総合研究所

代表：橋本典久（工博、八戸工業大学名誉教授）

〒039-1111 青森県八戸市東白山台4丁目5-3

TEL(FAX)：0178-27-7025

E-mail：noiselabo@snow.plala.or.jp

本報告書の内容要約

中高層の集合住宅建物では、間取りの自由性等を確保するために純ラーメン構造が採用されることが多くなっている。集合住宅では、住環境の面から重量床衝撃音の性能確保が大変重要な要点であることは言うまでもないが、純ラーメン構造では、従来構造のように大梁下に鉄筋コンクリートの戸境壁がない構造となるため、これまで蓄積されてきた知見とは異なる状況もみられる。典型的な事例としては、床のスラブ厚が 300mm もあるのに、重量床衝撃音性能が LH-60 以下という物件がみられることなどである。

当研究所では、純ラーメン構造に関する重量床衝撃音性能に関する検討を進めてきており、既に<技術資料：J-01>に示すように、床スラブと大梁が連成振動する場合の評価法などを発表している。この連成振動は、床スラブが正方形に近い形状の場合には発生しないが、その場合でも重量床衝撃音性能が大幅に低下する事例もみられる。今回は、このような純ラーメン構造の重量床衝撃音性能に大きな影響を与える原因について検討を行い、大変興味深い知見を得ることができた。それが「46Hz 共振現象」である。

本報告で行った検討内容と結果は以下の通りである。

- ① まず、既に得られている純ラーメン構造等の実測結果を整理した。同じ建物の床スラブでも、重量床衝撃音性能が 15~20dB 近くも異なる事例などもあり、これらの物件に関する検討課題をリストアップした。
- ② 次に、数値解析法（当研究所開発の面内面外変位連成型有限要素法）を用いて、各種条件下の純ラーメン構造に関して、スパンが変化した時の振動応答解析を行い整理した。その結果、1 次の固有振動数が 46Hz（1/3 オクターブバンドの 50Hz 帯域）となる条件において、重量床衝撃時の振動が極端に大きくなることが分かった。在来構造の床スラブの 1 次固有振動数は 20Hz 程度が多いため、このような現象はみられないが、純ラーメン構造の小面積の床スラブでは、このような条件となる場合がある。
- ③ この数値解析で得られた結果が、実際に成立するかどうかを、重量床衝撃音の実測結果を用いて検討したところ、実測結果の重量床衝撃音の傾向が、数値解析結果で得られた 46Hz 共振現象とよく対応することが確認できた。
- ④ 最後に、この現象を設計業務等で事前にチェックできるようにするため、純ラーメン構造の固有振動数の簡易な計算方法を新たに開発し、提示した。

純ラーメン構造では、床スラブのスパンが僅か 1 m 程度変化するだけで、63Hz 帯域の重量床衝撃音性能が 2 ランク程度（LH-50 と LH-60 の差）も変化することがあり、これは性能的にも建築経済的にも大変に大きな問題である。大梁で囲まれた床スラブの面積が 30m² 程度以下となるような条件では特に注意して構造設計を行うことが必要であり、本報告の結果が十分に利用されることを望む。

なお、本報告<技術資料：J-02>の内容、および<技術資料：J-01>の内容は、新・拡散度法ソフト（純ラーメン構造対応版）に反映されている。

目 次

1. 測定物件性能の整理と検討課題	3
2. 数値解析法による純ラーメン構造の重量床衝撃音性能に関する検討	5
2.1 検討内容	
2.2 解析結果	
(a) 正方形スラブのスラブ厚に関する解析結果	
(b) ボイドスラブに関する解析結果	
(c) 正方形と長方形の違いに関する解析結果	
(d) 四周大梁の条件変化に関する解析結果	
2.3 数値解析法による検討結果のまとめ	
(a) ピーク・ディップ時のスパン、床面積について	
(b) ピーク・ディップ時の固有振動数	
3. 数値解析結果の实在物件による検証	15
3.1 実測値および解析値による 46Hz 共振現象の確認	
(a) 建物物件（1）に関する検討	
(b) 建物物件（4）に関する検討	
(c) 建物物件（2）に関する検討	
(d) 建物物件（3）、建物物件（5）について	
3.2 46Hz 共振現象による重量床衝撃音レベルの増幅量	
4. 純ラーメン構造の固有振動数の計算方法	21
4.1 基本モデルの固有振動数計算式の検討方法	
4.2 大梁・床スラブの連成振動時の固有振動数評価	
4.3 計算手順と計算式	
4.4 計算結果と実測値またはFEM解析値との比較結果	
5. まとめ	27

1. 測定物件性能の整理と検討課題

最初に、実際の床構造に関して、実測された重量床衝撃音レベル（63Hzのみ）、およびその床構造の条件を一覧表にまとめて表-1に示した。建物(1)～(4)は純ラーメン構造およびそれに類する構造であり、建物(5)は従来の大型スラブである。具体的な図面等は物件秘匿の観点から明示していない。

これらの物件に関して、床構造と重量床衝撃音性能の関係を検討する。なお、表中の63Hzの重量床衝撃音レベルとLH値の関係は、73dB:LH-50、78dB:LH-55、83dB:LH-60である。また、表中の赤の枠で囲まれた数値は、LH-55以上の値を示している。

各物件の重量床衝撃音性能の特徴と検討課題を整理すると以下の通りである。

- ・ 建物物件(1)では、同じ床構造（ハーフPCボイドスラブ、厚300mm）であるにも拘らず、性能に15～20dB近くの大きな差が生じている。特に、A住戸・洋室、B住戸・LDのレベルが他と較べて特に大きくなっており、これらの原因究明が必要である。
- ・ 建物物件(2)の床スラブはハーフPCボイドスラブ、厚300mmであり、建物物件(1)と同じである。しかし、建物物件(1)と比較して重量床衝撃音レベルは大きくはなく、また各室のバラツキも殆どない。これらの差の理由について、検討が必要である。
- ・ 建物物件(3)ではA住戸・LDでのレベルが大きくなっている。これは辺長比（スパン比）の値が大きいため連成振動の影響があると考えられるが、その他の要因の有無についても検討が必要である。
- ・ 建物物件(4)は、正方形に近い物件であるため連成振動の影響は小さいと考えられるが、実測値がかなり大きなレベルとなっており、この原因の究明が必要である。
- ・ 建物物件(5)では、同じ床スラブ、同じ住戸であるがLDのレベルが大きく、洋室はレベルが小さく、10dBの差になっている。この差の原因究明が必要である。

これらの原因究明を目的として、数値解析法による検討を実施した。次頁以後に、その結果を報告する。

建物 物件 番号	住戸 記号	室名	床スラブ		大梁内々寸法		大梁内々 床面積(m ²)	大梁条件		室寸法		63Hz重量床衝 撃音レベル実 測値(dB)		
			種別	スラブ厚 (mm)	x(m)	y(m)		梁巾(mm)	梁せい(mm)	x(mm)	y(mm)			
(1)	A	L D	ハーフPC ボイドスラブ	300 (292) (1671)	5.59	5.00	28.0	850	925	5.82	2.40	73.7		
		洋室											5.59	5.00
	B	L D			6.69	5.00	33.5	850	925	3.53	3.60	81.8		
		洋室			6.69	5.00	33.5	850	925	2.56	4.20	66.0		
	C	L D			5.41	6.89	37.3	850	925	2.83	3.83	69.7		
		洋室			5.41	6.89	37.3	850	925	2.48	3.54	72.6		
(2)	A	L D	ハーフPC ボイドスラブ	300 (292) (1671)	6.38	5.55	35.3	750	850	3.72	4.34	70.4		
		洋室											6.38	5.55
	B	L D			7.65	5.55	42.4	850	850	2.91	5.14	69.8		
		洋室			7.65	5.55	42.4	850	850	2.52	3.37	73.6		
	A	L D			ボイド スラブ	275 (269) (1792)	7.24	3.95	28.6	600	850	6.46	3.86	80.8
		洋室												
B	L D	5.84	7.29	42.6			800	850	3.40	5.38	71.3			
	L D	5.48	5.02	27.5			920	850	5.30	2.60	84.0			
A	洋室	ハーフPC ボイドスラブ	300 (292) (1671)	5.57			11.64	64.8	810	920	2.64	2.99	87.4	
	L D													5.56

(注1) スラブ厚の()内数値は、上から等価板厚(mm)、等価単位体積重量(kg/m³)

(注2) 63Hz重量床衝撃音レベルの赤字は、LH-55以上の値)

表-1 純ラーメン構造、その他の重量床衝撃音実測物件

2. 数値解析法による純ラーメン構造の重量床衝撃音性能に関する検討

2.1 検討内容

純ラーメン構造の重量床衝撃音性能の特徴を究明するため、数値解析法（面内面外変位連成型 F E M）による検討を行った。純ラーメン構造の解析モデルを図-1 に示した。重量床衝撃音の評価対象としたのは中央部の薄墨部のスパンであり、この部分の分割数は 8×8 である。このモデルに関して、x 方向および y 方向のスパン長（大梁内々の寸法）、スラブ厚を様々に変化させて検討を行った。解析は、63H z 帯域オクターブバンドランダムノイズによる振動応答解析であり、床衝撃音の解析は行っていない。解析モデルの条件、および解析関係の物理条件は以下の通りである。

<物理条件> 動的ヤング率： 2.9×10^5 (kg/cm²)、単位体積重量：2.4 (t/m³)
ポアソン比：0.16、減衰定数：2.5%相当 ($\alpha=9.33$ 、 $\beta=0.00006$)

<加振力> 加振力：63H z 帯域オクターブバンドランダムノイズ（5波）
加振力実効値：40dB（10.2kg）、解析時間ピッチ：0.7813 (msec)

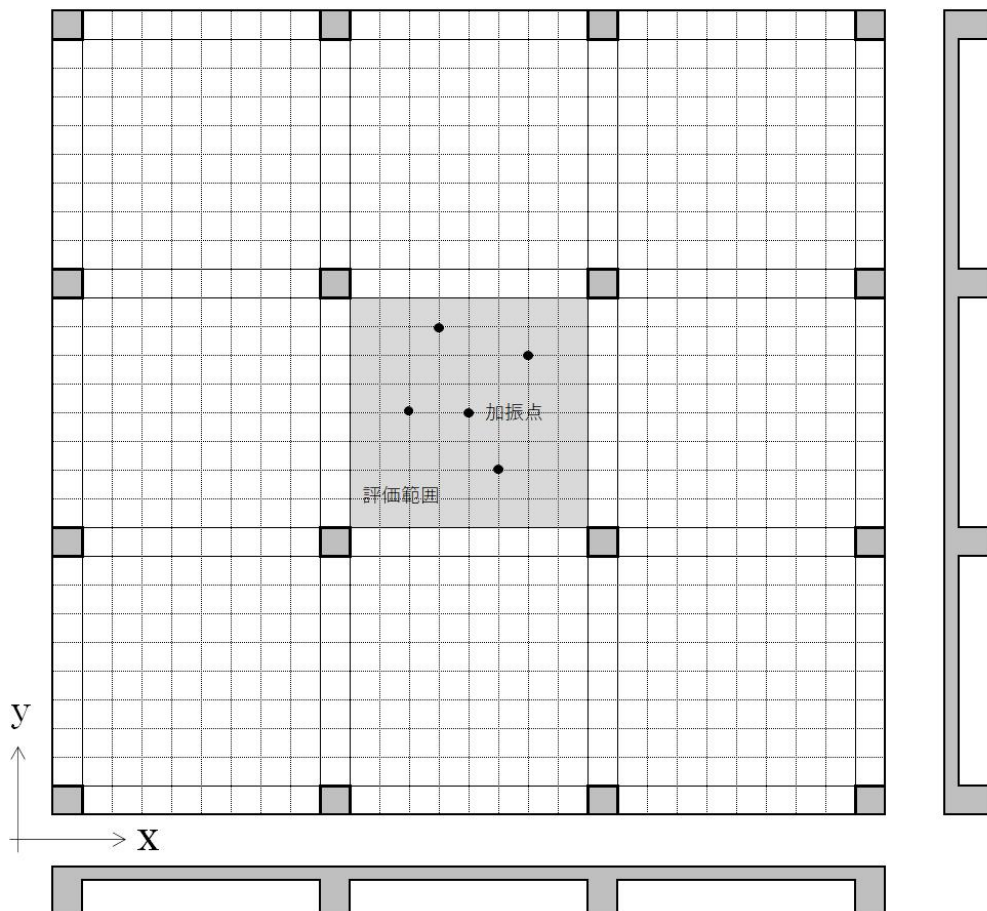


図-1 純ラーメン構造の解析モデル

解析条件は表-2の通りである。床スラブは、均質スラブが200mm、300mmの2ケースとボイドスラブ300mmの計3種であり、四周大梁は梁巾650mm、梁せいは700mmと900mmの2ケース、スラブ形状は正方形と長方形の2種とした。これらの条件に関して、スパン長（大梁内々寸法）を概ね3m～10mの範囲で変化させて解析した。なお、長方形の場合には、スパン寸法は短辺寸法を表している。

解析結果としての採用値は、加振時の振動加速度レベルの最大値（実効値）である。

表-2 解析条件の一覧表

No.	スラブ条件	四周大梁条件(mm)	スラブ形状	スパン変化範囲	備考
1	均質スラブ・厚200mm	650×900	正方形	3m～10m	
2			長方形		辺長比1.72
3		650×700	正方形		
4	均質スラブ・厚300mm	650×900	正方形		
5			長方形		辺長比1.72
6	ボイドスラブ・厚300mm ($\gamma=1.751$ 、 $t=292$)	650×900	正方形		

2.2 解析結果

解析結果を以下に順次示す。解析では、床スラブの跨度（大梁内々寸法）を変化させ、振動応答値（振動加速度レベルの最大記録値）の変化、および振動分布等を調べた。

(a) 正方形床スラブのスラブ厚に関する解析結果

形状が正方形の床スラブでスラブ厚 200mm、大梁条件 650×900（表-2、No. 1）と、同じくスラブ厚 300mm（No. 4）に関して、跨度寸法を変化させた時の解析結果を図-2に示した。

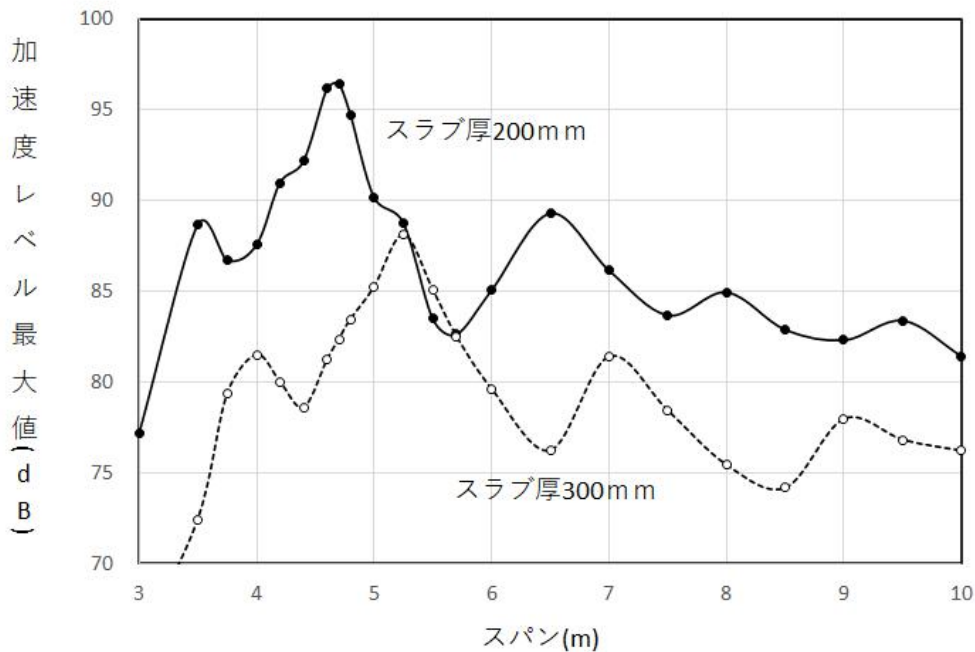


図-2 スパン変化による均質スラブの振動応答の変化

跨度が変化した時の全体の特性は、厚 200mm と厚 300mm とほぼ同様であり、大きなピークとディップを示しながら、全体的には跨度が大きくなるにしたがって少しずつレベルが小さくなる傾向を示している。これは通常の花の面積と重量床衝撃音レベルの関係と同じである。

各スラブのピーク値と近接するディップ値を示す跨度（大梁内々寸法）の値とそのレベルは、

- ・スラブ厚 200mm の場合 ピーク : スパン 4.7m (96.4 dB)
 ディップ : スパン 5.7m (82.6 dB)
 <レベル差 13.8 dB>
- ・スラブ厚 300mm の場合 ピーク : スパン 5.25m (88.1 dB)
 ディップ : スパン 6.5m (76.2 dB)
 <レベル差 11.9 dB>

であり、スパンが1 m程度違うだけでレベル差で10 dB以上の差が生じている。この特性の傾向が事実であるなら、設計を少し変えるだけで重量床衝撃音性能が2 ランク以上前後する可能性があることになり、これは大変に重要な内容であるといえる。

ピーク値の変化には固有振動数が関係していると考えられるが、スラブ厚が200mmから300mmへと1.5倍になると、ピーク値を示すスパンは1.12倍になっており、スラブ厚とスパンの関係は約4乗となっている。以下に示す単純支持板の固有振動数の関係では、スラブ厚とスパンの関係は2乗となるので、単純支持板の性状とは若干異なるものであると言える。

$$\left[\begin{array}{l} \text{参考：単純支持板の固有振動数} \\ f = \frac{h}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \left\{ \frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_y^2} \right\} \right], \quad h: \text{板厚}, l_x, l_y: \text{辺長} \end{array} \right]$$

(b) ボイドスラブの解析結果

正方形のスラブ厚300mmに関して、ボイドスラブ(No. 6)の解析を行い、既に解析した均質スラブ(No. 4)と比較した結果を図-3に示した。ボイドスラブの場合には、等価板厚を292mm、等価単位体積重量を1.751 (t/m³)として計算した。

全体的な特性は均質スラブとほぼ同様であり、ボイドスラブの方がスパンの長い方に少しシフトした形になっている。ピークとディップのスパン長は以下の通りであり、レベル差も均質スラブとほぼ同様となっている。

- ・ボイドスラブの場合 ピーク : スパン 5.7m (89.2 dB)
 ディップ : スパン 7.0m (78.3 dB)
 <レベル差 10.9 dB>

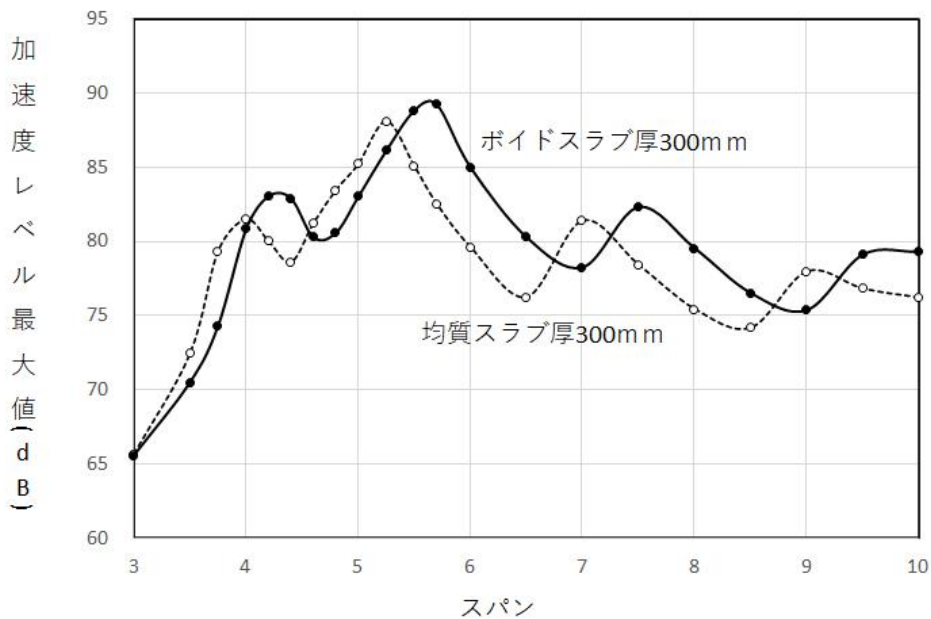


図-3 ボイドスラブ・厚300mm(No. 6)のスパン変化による解析結果

レベル値は、ボイドスラブの方が若干大きくなっているが、これは等価板厚などの条件の差によるものと考えられる。

(c) 正方形と長方形の形状の違いに関する解析結果

これまではスパン形状が正方形の場合の解析であるが、長方形の場合にも同様の解析を行った。図-4は、スラブ厚 200mm の場合 (No. 2)、図-5はスラブ厚 300mm (No. 5) の場合である。比較となる正方形の結果は図-2 に示した通りである。

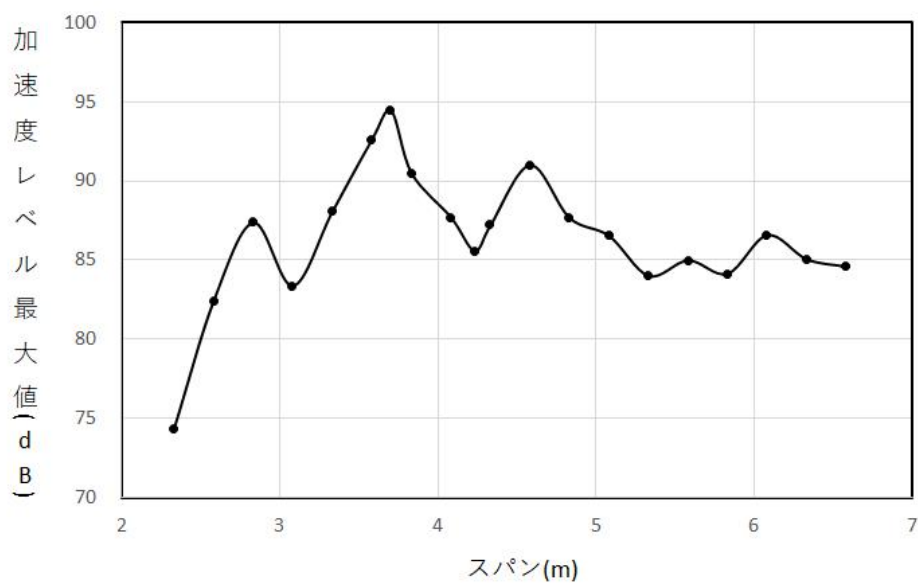


図-4 長方形スラブ・厚 200mm (No. 2) のスパン変化による解析結果

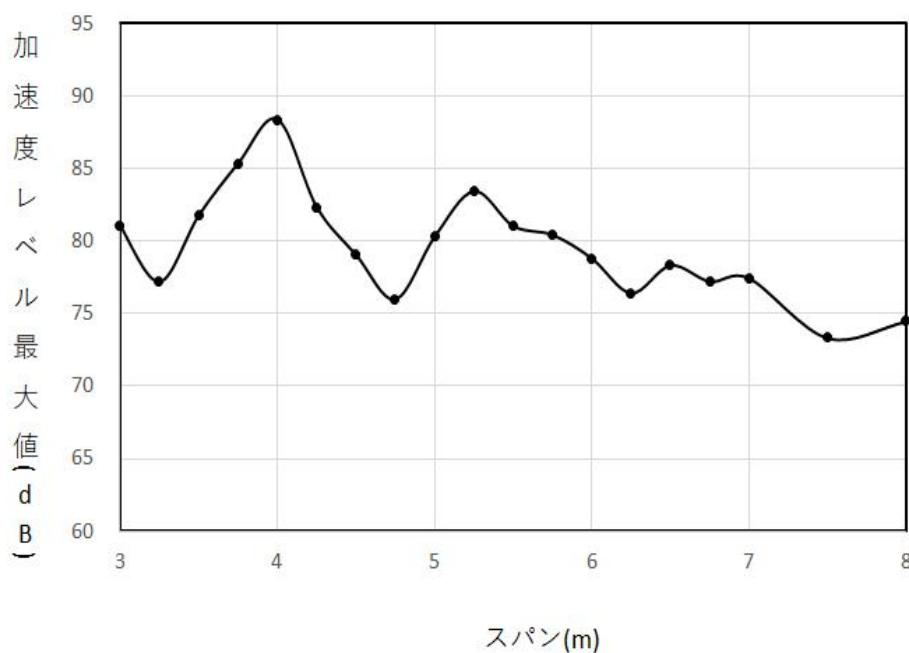


図-5 長方形スラブ・厚 300mm (No. 5) のスパン変化による解析結果

両スラブのスパン変化におけるピーク、ディップのスパンとレベルは以下の通りである。

- ・ 長方形 200mmの場合 ピーク : スパン 3.7m (94.5 dB)
 ディップ : スパン 4.23m (85.6 dB)
 <レベル差 8.9 dB>
- ・ 長方形 300mmの場合 ピーク : スパン 4.0m (88.4 dB)
 ディップ : スパン 4.75m (76.0 dB)
 <レベル差 12.4 dB>

全体的な特性は正方形の場合と比べて大きな差はなく、加速度レベル最大値も 200m mの場合に 94.5dB（正方形の場合 96.4dB）、300mmの場合に 88.4 dB（正方形の場合 88.1 dB）と殆ど変わらない。したがって、これまで考えてきたような、正方形の場合には共振の影響が強く現れるというような現象は特になく考えられる。ただ、スラブ厚 200mmの場合には、ピーク・ディップのレベル差が、正方形の場合が 13.8dB、長方形の場合で 8.9dB と、正方形の方がかなり大きくなっている。このようなことが正方形のピークを際立たせているだけと考えられる。

正方形の場合には、大梁の振動が殆ど生じないが、長方形の場合には図-6 に示すように長辺側の大梁は変位が生じる。したがって、長方形の場合には梁とスラブの連成振動の影響が含まれているものと考えられる。

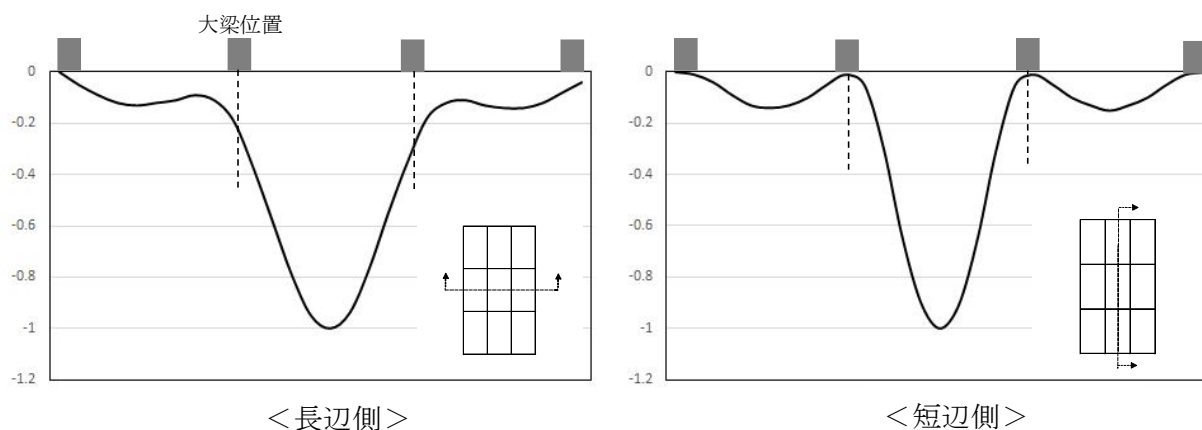


図-6 長方形スラブの振動加速度分布（スラブ厚 300mm）

(d) 四周大梁の条件変化に関する解析結果

大梁の条件を変化させた場合の解析結果を図-7 に示した。これまでの大梁条件は梁巾 650mm、梁せい 900mmであったが、梁せいを 700mmとした条件（No. 3）での解析を行った。スラブ厚は 200mm、形状は正方形である。

梁せい 900mmの結果（No. 1）と比べて、全体的にややスパンが短い側にシフトした形であり全体的な特性に大きな変化はない。ピーク・ディップについても、以下の通り

であり、ほぼ同様の値となっている。

- ・ 梁せい700mmの場合 ピーク : スパン 4.5m (95.2 dB)
 ディップ : スパン 5.5m (82.8 dB)
 <レベル差 12.4 dB>

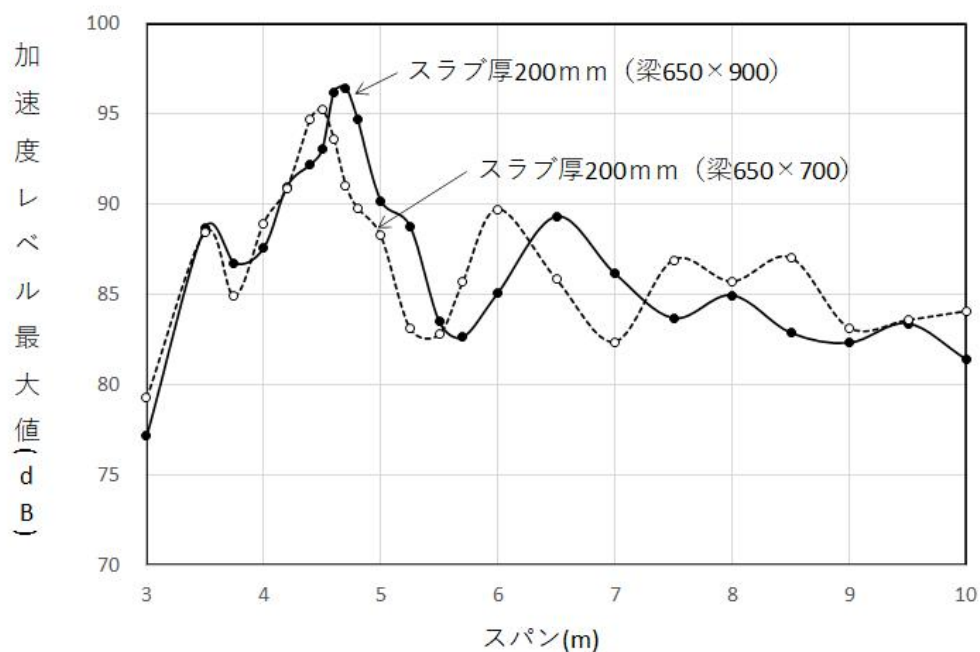


図-7 梁せい変化時の解析結果

2.3 数値解析法による検討結果のまとめ

(a) ピーク・ディップ時のスパン、床面積について

スパン変化時の解析結果の一覧を表-3に示した。表では、スパン変化により振動加速度レベルがピークを示した時のスパン長とその面積、および振動加速度レベルがディップとなった時の同じくスパン長と面積を纏めて示した。

ピーク時の面積は、20.3~32.5m²の範囲となっており、大梁で囲まれた部分が小面積の時に生じていることが分かる。一方、ディップ時の面積は30.3~49.0m²であり、ピーク時よりやや面積が大きくなっているものの、30m²台に関しては、どちらにも重なっており、床面積やスパン長だけでは振動応答のピーク・ディップを説明することは出来ない。

表-3 解析結果一覧（ピーク・ディップ時の床面積（大梁内々面積））

No.	スラブ条件	大梁条件 (mm)	スラブ形状	振動応答加速度レベルのピーク時		振動応答加速度レベルのディップ時	
				スパン長 (m)	床面積 (m ²)	スパン長 (m)	床面積 (m ²)
1	均質スラブ 厚200mm	650×900	正方形	4.70×4.70	22.1	5.70×5.70	32.5
2			長方形	3.70×6.37	23.6	4.23×7.28	30.8
3		650×700	正方形	4.50×4.50	20.3	5.50×5.50	30.3
4	均質スラブ 厚300mm	650×900	正方形	5.25×5.25	27.6	6.50×6.50	42.3
5			長方形	4.00×6.89	27.6	4.75×8.18	38.9
6	ポイドスラブ 厚300mm	650×900	正方形	5.70×5.70	32.5	7.00×7.00	49.0

(b) ピーク・ディップ時の固有振動数

図-2のところでふれたように、ピークに関しては固有振動数が関係していることが考えられるため、ピーク・ディップの全ての条件に関して固有振動数を算出した。算出方法は固有値解析ではなく、重量床衝撃力に相当する正弦半波をスラブ中央に入力した時の自由減衰振動から算出した。固有値解析では、大梁で分割された9つの床スラブ分の固有モードが夫々現れるため分かりづらいので、より現実的な振動応答解析により卓越振動数を算出したものである。床スラブの物理条件は、これまでの解析時と同様であり、正弦半波の解析条件は、半周期 20msec、最大値 250kg、計算時間ピッチ 0.2msec、計算回数 1024 である。正弦半波加振時の減衰波形の例を図-8に示したが、後半の自由減衰振動波形より1周期の値を複数読み取り、その平均から固有振動数（卓越振動数）を算出した。なお、これにより算出した卓越振動数は、確認のため固有値解析で求めた

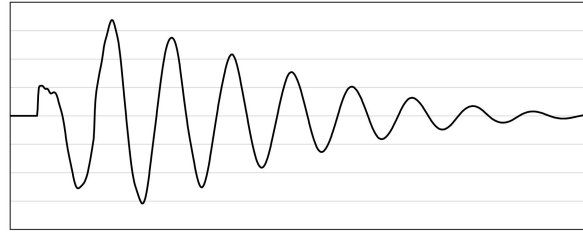


図-8 正弦半波加振時の減衰波形の例

固有振動数と比較したが、両者はほぼ一致している。

固有値算出結果の一覧を表-4に示した。この結果をみると、スラブ厚や形状、大梁の条件、ボイドスラブ、スパン長、面積等の条件が様々であるにも拘わらず、ピーク時の固有振動数は全て約46Hzである。また、ディップ時の固有振動数についても、様々な条件に拘わらずほぼ30～35Hzとなっている。

これが実際の現象を反映しているなら、この結果は重量床衝撃音に関して極めて重要な知見であるといえる。すなわち、床スラブの条件に拘わらず、次の条件に留意が必要となるためである。

1) 46Hz 共振の影響

1次の固有振動数が46Hz前後となるような設計では、重量床衝撃音性能が大幅に悪くなるため、危険範囲として避ける必要がある。

2) 30Hz 反共振の影響

1次の固有振動数が30～35Hzになるように設計すれば、良好な重量床衝撃音性能を確保することができる。上記の結果と併せ、概ね、40Hz以下であれば極端な性能悪化は防げるものと考えられる。

表-4 解析結果一覧（ピーク・ディップ時の固有振動数）

No.	スラブ条件	大梁条件 (mm)	スラブ形状	振動応答加速度レベルのピーク時		振動応答加速度レベルのディップ時	
				スパン長(m) (面積: m ²)	固有振動数 (Hz)	スパン長(m) (面積: m ²)	固有振動数 (Hz)
1	均質スラブ 厚200mm	650×900	正方形	4.70×4.70 (22.1)	46.3	5.70×5.70 (32.5)	30.9
2			長方形	3.70×6.37 (23.6)	46.3	4.23×7.28 (30.8)	34.7
3		650×700	正方形	4.50×4.50 (20.3)	46.3	5.50×5.50 (30.3)	30.5
4	均質スラブ 厚300mm	650×900	正方形	5.25×5.25 (27.6)	46.7	6.50×6.50 (42.3)	30.5
5			長方形	4.00×6.89 (27.6)	45.9	4.75×8.18 (38.9)	32.3
6	ボイドスラブ 厚300mm	650×900	正方形	5.70×5.70 (32.5)	46.3	7.00×7.00 (49.0)	30.1

このような結果になる理由としては、重量床衝撃音の加振力特性があると考えられる。図-9は、重量床衝撃音の衝撃力（実測値）をスペクトル分析した結果であるが、衝撃力は63Hz帯域の下側遮断周波数である44.5Hz付近が一番大きく、中心周波数の63Hzや上側遮断周波数89.1Hzより10dB以上大きい。46Hz前後では、衝撃力が最も大きくなる条件と、固有振動数による共振が一致することになり、床スラブの振動が極端に大きくなると考えられる。1/3オクターブバンドで見れば50Hz帯域が大きくなることになる。

また、固有振動数が31.5Hz帯域の場合には、63Hzの重量床衝撃音レベルでの共振の影響がなくなり、反共振の周波数範囲となるため比較的良好な性能になるものと考えられる。

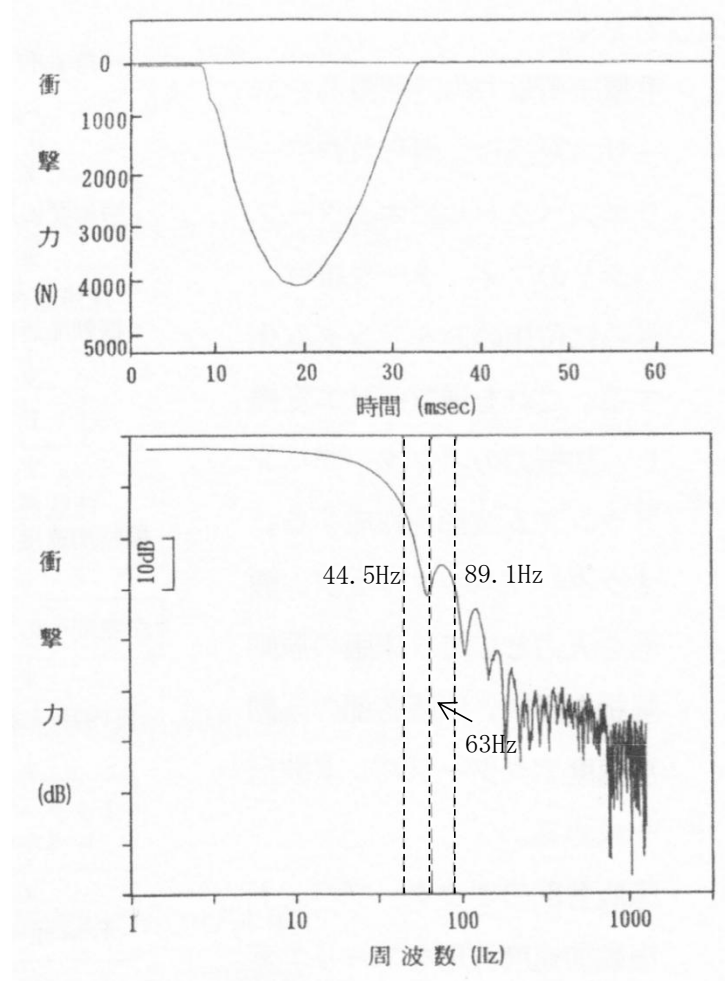


図-9 重量衝撃力のスペクトル特性（実測値）

3. 数値解析検討結果の实在物件による検証

3.1 実測値および解析値による 46Hz 共振現象の確認

数値解析結果によって得られた知見が、実際の建物で成立しているかどうかを第1章で示した实在の測定物件により検証した。

(a) 建物物件（1）に関する検討

建物物件（1）に関しては、床スラブの振動測定結果が存在する。これは、重量床衝撃音性能が予想より悪かったため、追加的に行われたものである。その結果を性能とともに表-5に示した。性能の悪かったA住戸とB住戸は、固有振動数の実測値が49.8Hzと45.1Hzであり、何れも46Hz前後の値となっている。また、性能の良いC住戸では37.7Hzと、35Hzに近い値となっている。これらの結果は、ほぼ数値解析による検討結果に対応している。なお、A住戸・LDやB住戸・洋室は73.7dB、66.0Hzと極端に小さな値となっているが、これは加振点が大梁に極端に近くなる室条件によることを別途の数値解析検討で確認している。また、A住戸洋室が極端に大きな数値となっている原因としては、固有振動数が46Hzに近いことに合わせ、壁の固有振動数が床と同じであることの影響である事も、やはり数値解析検討から推定されている。

以上のように、建物物件（1）に関しては固有振動数による共振現象（46Hz共振現象）が確認できる。なお、実際の重量床衝撃音の実測値は図-10の通りであるが、63Hzの重量床衝撃音レベルは125Hzの値より25dB近く大きく、明らかに共振的な性状を示していることが確認できる。

表-5 建物物件（1）の固有振動数実測値と重量床衝撃音レベル性能

内容	A 住戸	B 住戸	C 住戸
スパン(m)	5.59×5.00	6.69×5.00	6.89×5.41
床面積(m ²)	28.0	33.5	37.3
固有振動数 実測値(Hz)	49.8	45.1	37.7
63Hz重量床衝撃音 レベル(dB)	洋室：85.3 (LD：73.7)	LD：81.8 (洋室：66.0)	LD：69.7 洋室：72.6

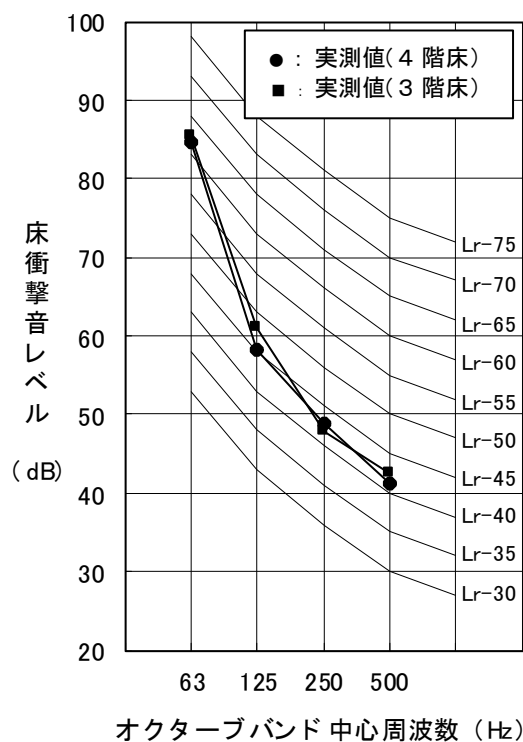


図-10 建物物件（1）（A住戸・洋室）の重量床衝撃音レベル実測値
 (* 性能が悪かったため、確認のため階を変えて測定している)

(b) 建物物件（4）に関する検討

建物物件（4）は、LDでの63Hz重量床衝撃音レベルが84dBと極端に悪くなっている。建物物件（1）以外には固有振動数の実測値がないため、数値解析法により固有振動数を推定した。この時の解析モデルは図-11の通りであり、第2章の数値解析検討と同様に、スラブ中央に正弦半波加振を行い、その自由減衰波形から固有振動数を読み取った。大梁内々寸法、大梁の条件等は表-1に示す通りであり、その他の解析条件は以下の通りである。

- <物理条件> ボイドスラブ・厚250mm
 (等価板厚246mm、等価単位体積重量1.840(t/m³))
 動的ヤング率：2.9×10⁵(kg/cm²)、ポアソン比：0.16、
 減衰定数：2.5%相当 ($\alpha=9.33$ 、 $\beta=0.00006$)

解析結果の固有振動数は45.8Hzであり、やはり46Hz前後の値となっている。また、重量床衝撃音の実測値も図-12の通りであり、建物物件（1）と同様に、63Hzの重量床衝撃音レベルが125Hzに較べて25dB程度大きくなっており、共振的な性状を示している。

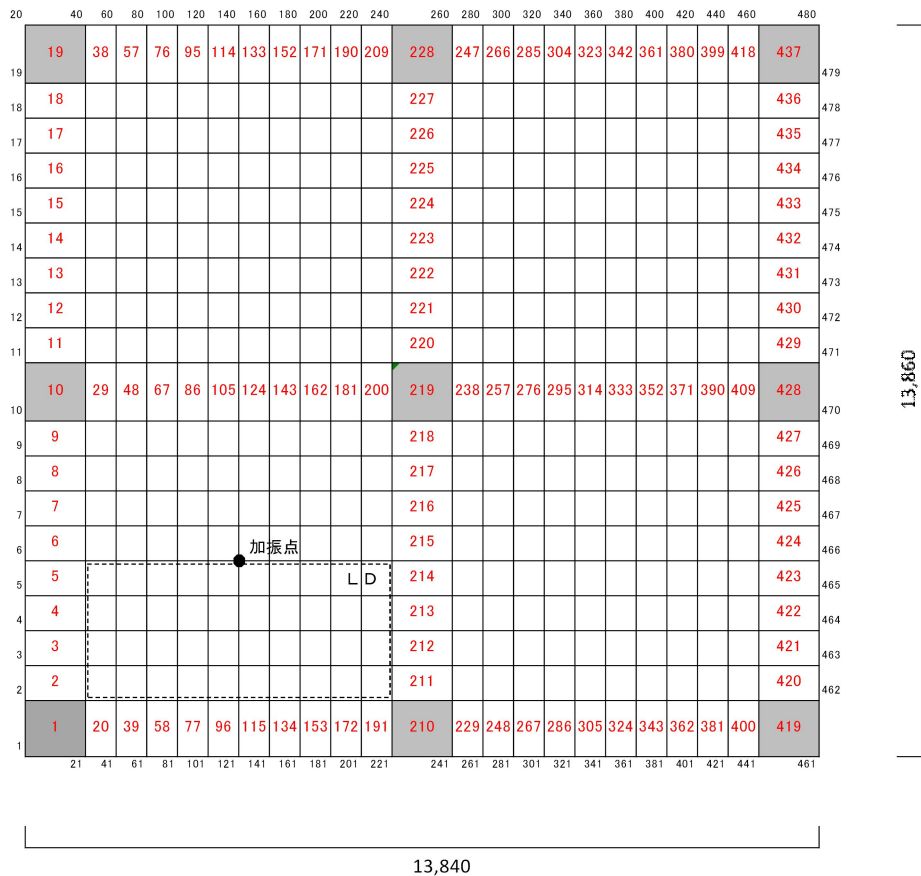


図-11 建物物件（4）の解析モデル

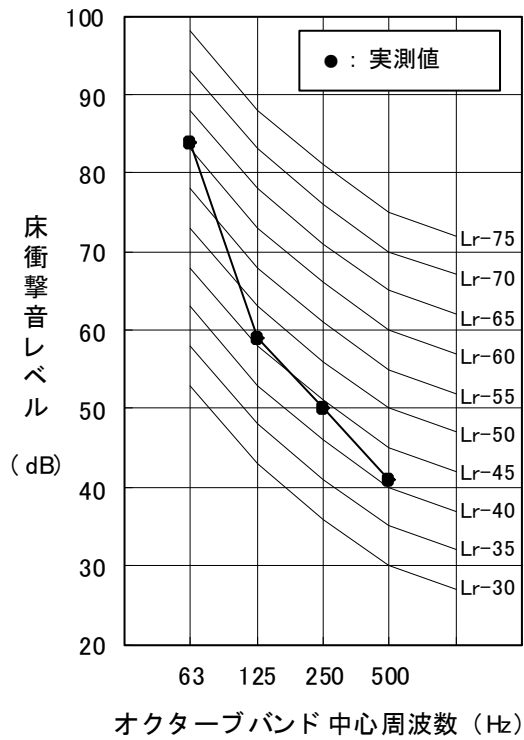


図-12 建物物件（4）の重量床衝撃音レベル実測値

(c) 建物物件（2）に関する検討

建物物件（1）と建物物件（4）は、何れも重量床衝撃音性能が悪い事例である。そこで逆に、性能の良好な物件として建物物件（2）に関する解析検討を実施した。

解析対象は建物物件（2）のA住戸である。実測結果の63Hz重量床衝撃音レベルはLDが70.4dB、洋室が68.9dBであり、ほぼスラブ厚に応じた性能となっている。

解析方法はこれまでと同様であり、床スラブ条件は以下の通りである。解析モデルは図-13である。図の上側部分はバルコニーであり、左側はエレベーターシャフトとなっているため床はない状態である。床スラブ、大梁等の条件は表-1に示す通りである。

- <物理条件> ボイドスラブ・厚300mm
 （等価板厚292mm、等価単位体積重量1.671(t/m³)）
 動的ヤング率：2.9×10⁵(kg/cm²)、ポアソン比：0.16、
 減衰定数：2.5%相当（ $\alpha=9.33$ 、 $\beta=0.00006$ ）

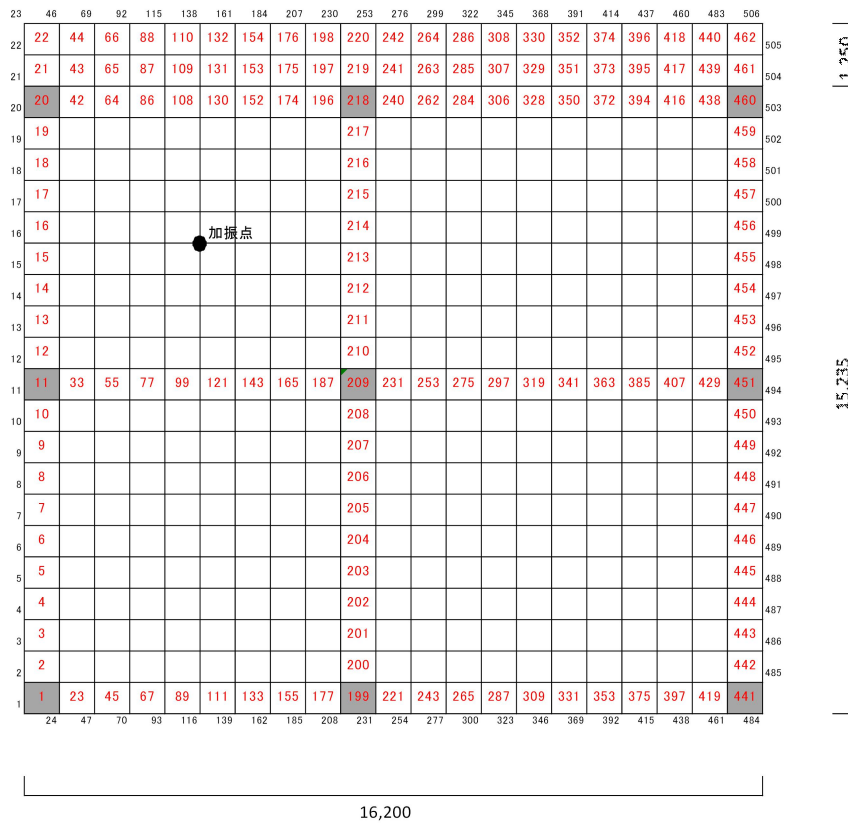


図-13 建物物件（2）の解析モデル

解析結果の固有振動数は39.4Hzである。35Hzよりはやや大きくなっているが、40Hzは下回っている。床スラブ面積（大梁内々寸法）は35.3m²と小さいが、固有振動数が40Hzを越えないことにより、良好な性能が得られているものと考えられる。

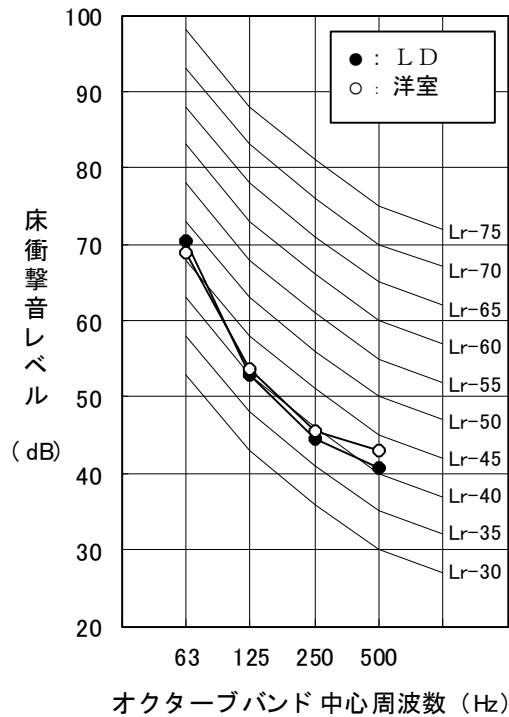


図-14 建物物件（2）の重量床衝撃音レベル実測値

重量床衝撃音の実測値は図-14 であり、建物物件（1）や建物物件（4）とは異なり、63Hz のレベルが 125Hz に較べて極端に大きくなる共振性状は見られない結果となっている。

また、建物物件（2）の他の住戸は、A住戸と同等の大きさ、またはやや大きい床スラブである事から、何れも 35Hz 前後の固有振動数になっているものと考えられる。

(d) 建物物件（3）、物件建物（5）について

建物物件（3）に関しては、既に検討済み（技術資料：J-01 参照）のように床スラブと大梁の連成振動の影響が考えられる。併せて、同資料に示す解析モデルに関する固有振動数の解析値は **44.5Hz** であり、46Hz 共振現象の範囲内となっている。重量床衝撃音レベルの実測値は、やはり 63Hz の値が 125Hz の値に較べて 25 dB 程度大きくなっており、共振現象の性状を示している。

建物物件（5）は在来の RC 壁付大梁のスラブである事から性能が大きく劣化することはないが、A住戸では、同じ床スラブであるものの、LD が 77.4dB、洋室が 67.4dB と 10dB もの差がついている。これは、加振点位置の関係も幾分かはあるものの、LD 部分には壁の途中に RC 造の間柱があり、これにより床振動が分割されて小面積スラブと近い振動条件になっていることの影響ではないかと考えられる。実際に重量床衝撃音レベルの実測値を見ると、図-15 に示すように、LD の実測結果では 63Hz のみがかかなり大きな値となっており、共振性状の様相を呈している。このように、RC 壁の途中に間柱があり、これによって振動性状が分割されるような床スラブに関しても、同様の現象として注意が必要である。

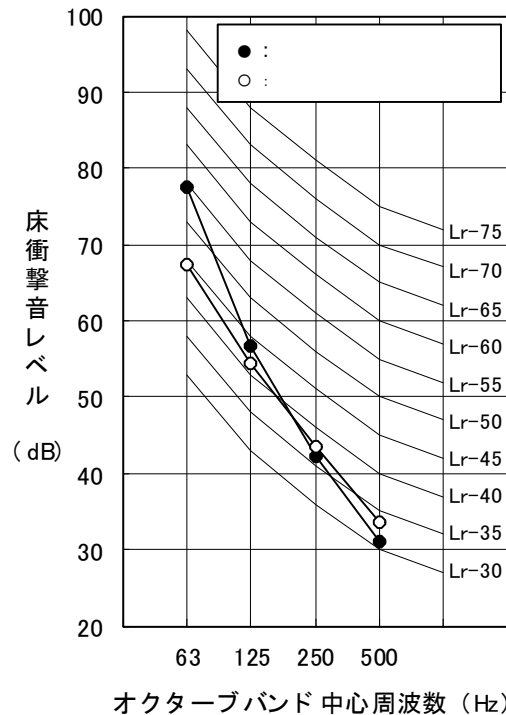


図-15 建物物件（5）の重量床衝撃音レベル実測値

3.2 46Hz 共振現象による重量床衝撃音レベルの増幅量

以上のように、実在物件においても数値解析検討により得られた結果が検証でき、46Hz 共振と 30Hz 反共振の重量床衝撃音への影響が確認できたと言える。次に、46Hz 共振現象によってどの程度の増幅量が生じるかということであるが、これは理論的な究明は困難である。そこで便宜的な方法として、純ラーメン構造を中心とした実測値と拡散度法の計算値との比較による推定を行った。拡散度法の計算値には 46Hz 共振現象は考慮されていないので、この差を増幅量として参考利用しようというものである。この比較図を図-16 に示した。対象は 63Hz 帯域の重量床衝撃音レベルで 70 dB 以上とした。

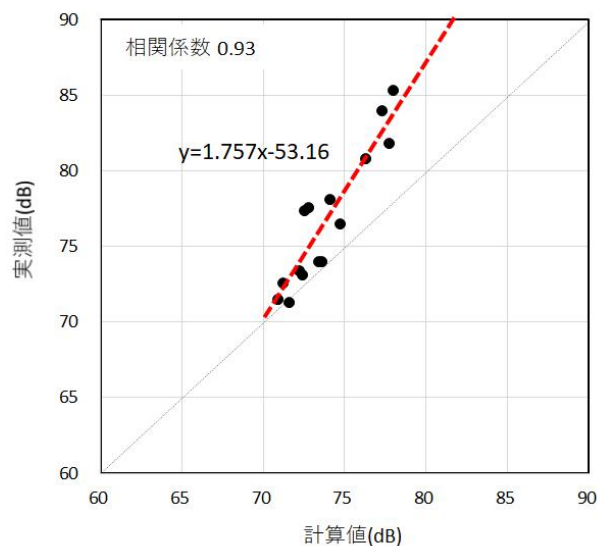


図-16 46Hz 共振現象による増幅量の推定

4. 純ラーメン構造の固有振動数の計算方法

46Hz 共振現象の影響を考慮した性能評価や防止設計を行うためには、純ラーメン構造の固有振動数を求める必要がある。FEM等による数値計算も可能であるが、作業的には若干大変であり、実務での利用には不便である。そこで、手計算あるいはエクセル計算で固有振動数が簡単に計算できる方法を検討した。

4.1 基本モデルの固有振動数計算式の検討方法

まず、図-17 に示す純ラーメン構造の基本モデルに対する固有振動数の算出方法を示す。図-17 は4本の柱とそれをつなぐ大梁、および床スラブで構成された構造であり、柱部を固定とした時の床スラブの固有振動数を算出する。

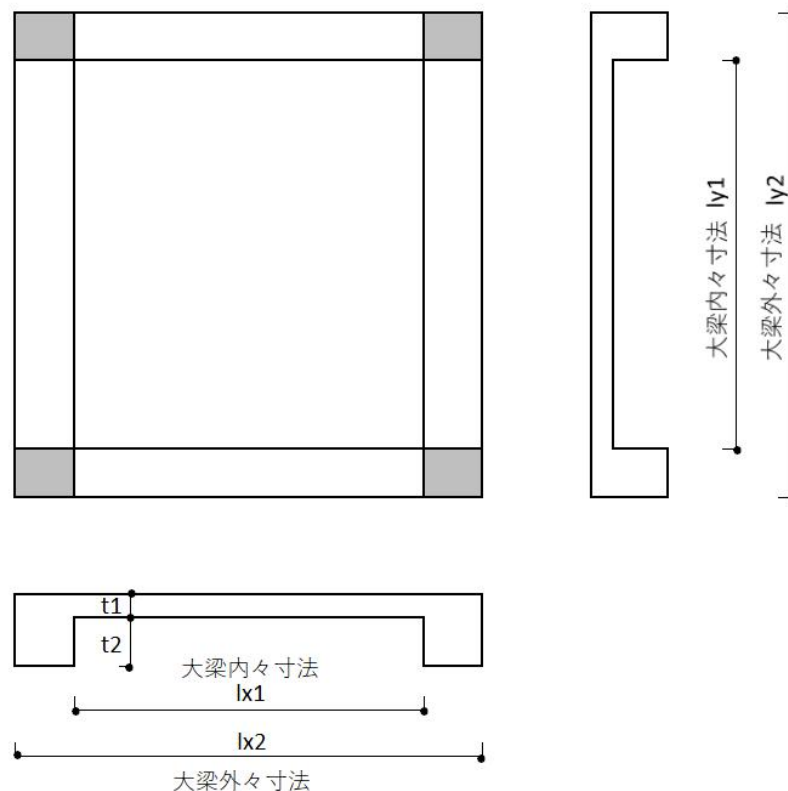


図-17 純ラーメン構造の固有振動数算出基本モデル

算出方法は以下の通りである。まず、この構造の固有振動数は、近似的に大梁外々寸法の平板スラブで境界条件が単純支持の場合が下限値となる。この条件から大梁の梁せいが徐々に大きくなった場合の最終的な固有振動数の上限値は、大梁内々寸法の平板スラブで境界条件が周辺固定の時の値となる。これら下限値、上限値の固有振動数は計算式で与えられている。

次に、F E Mによる数値解析手法により、図-17 の基本モデルの大梁の梁せいを順次変化させた時の固有値解析を行い、梁せいと上記下限値、上限値との関係を求める。具体的には、下限値を0、上限値を1として、その中間値の比率と梁せい（ここでは梁せいからスラブ厚を引いた図-17の t_2 を指す）の関係を求め、その近似曲線の回帰式を求めた。

図-18 は、幾つかの条件における梁せいと固有振動数の関係をF E Mによる固有値解析により求めたものである。これを下限値0、上限値1の比率として表したものが図-19 であり、更に、梁せい部分 (t_2) とスラブ厚(t_1)の比で整理し、実用的な範囲を示したものが図-20 である。回帰式が適用できる程度の範囲に収束していることが分かる。

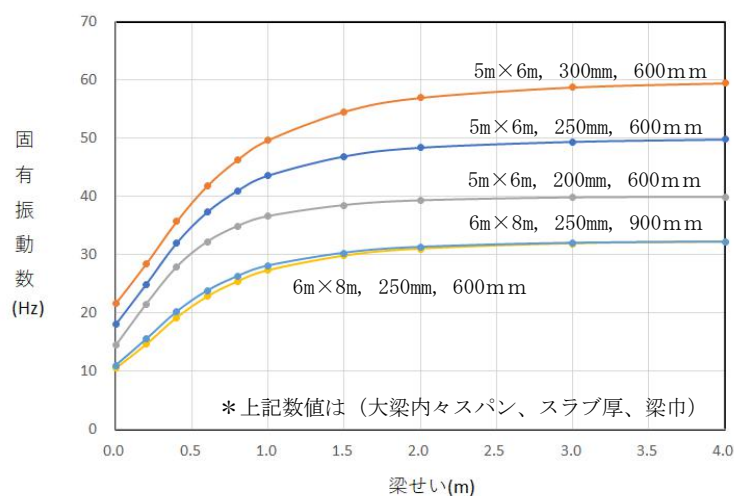


図-18 梁せい (t_2) と固有振動数の関係 (F E M解析値)

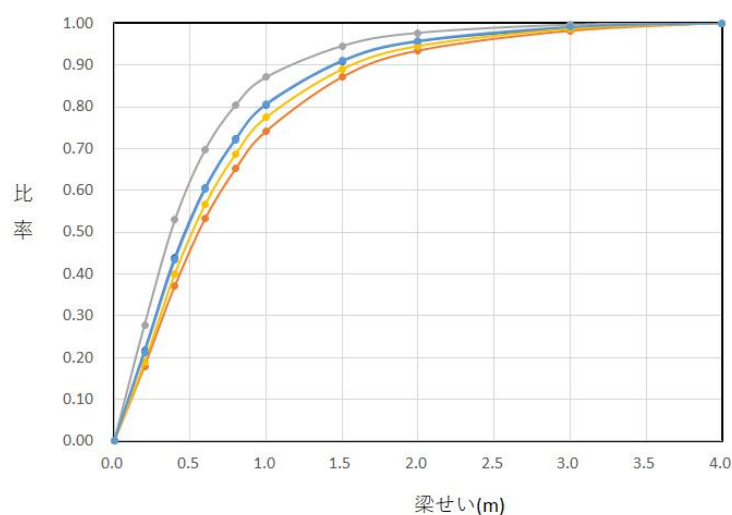


図-19 梁せい (t_2) と比率の関係 (F E M解析値)

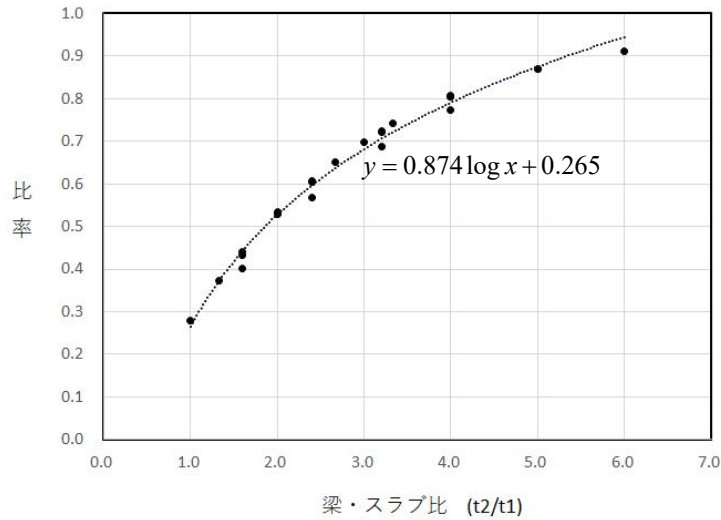
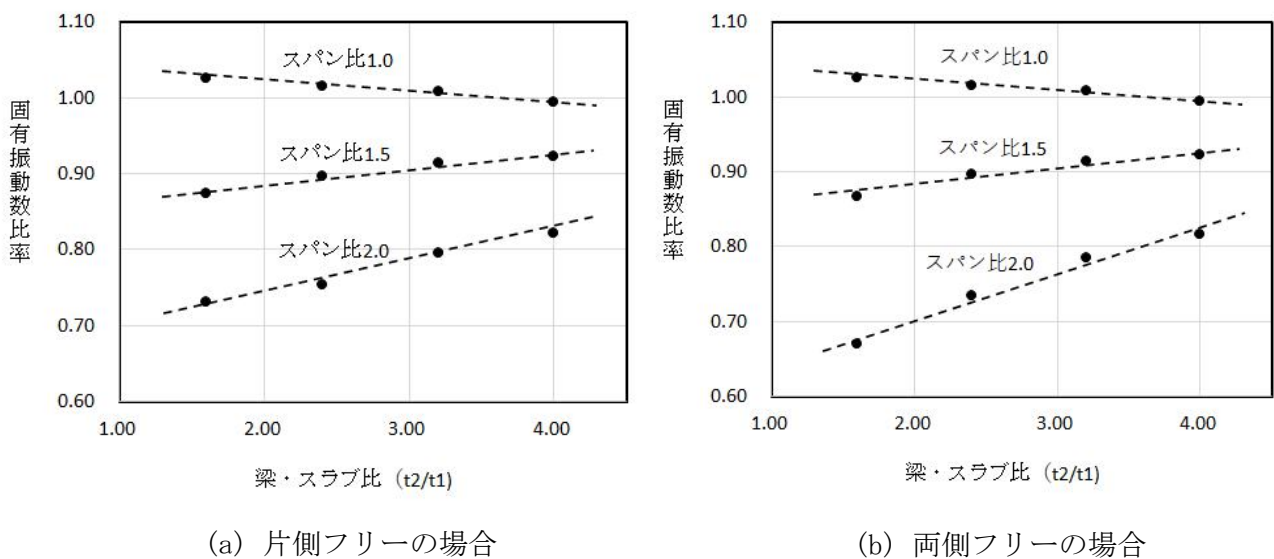


図-20 梁・スラブ比 (t_2/t_1) と比率の関係 (FEM解析値)

4.2 大梁・床スラブの連成振動時の固有振動数評価

図-17の基本モデルの場合は、大梁周囲の床スラブは存在しないものとして計算している。スパン比が1.0に近い場合には概ねこの前提が成立するが、スパン比が1.0より大きい場合には、隣接スラブを含めた大梁と床スラブの連成振動を考慮する必要がある。この時、床スラブの面積が大梁外にまで広がるため、この時の固有振動数は基本モデルの場合より小さくなる。この小さくなる比率を、連成振動状態のFEM解析値と基本モデルの計算値について算出した (FEM解析モデルは省略)。この結果が図-21であり、片側がフリーの場合のモデルと両側ともフリーの場合について示した。スパン比については1.0~2.0まで算出したが、スパン比1.0の場合には概ね固有振動数比率が1.0に



(a) 片側フリーの場合

(b) 両側フリーの場合

図-21 FEM解析値と基本モデル計算値との比率

近くなり、スパン比が大きくなるほど固有振動数比率が小さくなる（両者の数値の差が大きくなる）結果となる。

図-21 の結果を数式で表現できれば、連成振動時の純ラーメン構造の固有振動数をエクセルなどで簡単に計算でき、殆どの純ラーメン構造に適用できることになる。ただし、これらの方法はあくまで近似的な計算法であり、純ラーメンの構造の条件によっては誤差を生じる場合もある。

4.3 計算手順と計算式

これまでの内容について、計算の手順と計算式を整理すると以下の通りである。これらはエクセルで計算表を造っておけば便利である。

- (1) 大梁外々寸法の単純支持板の固有振動数を計算する。

$$f_{s_2} = \frac{t_1 \pi}{2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \left\{ \frac{1}{lx_2^2} + \frac{1}{ly_2^2} \right\}$$

記号は図-17 の通り、他は、 ρ : 単位体積重量 (kg/m³)、 ν : ポアソン比

- (2) 大梁内々寸法の周辺固定板の固有振動数を計算する。

$$f_{c_1} = \frac{2t_1 \pi}{3} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \sqrt{\left(\frac{1}{lx_1^2} + \frac{1}{ly_1^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{lx_1^4} + \frac{1}{ly_1^4} \right)}$$

- (3) 図-20 の回帰式より比率を求める。

$$y = 0.874 \log(t_2 / t_1) + 0.265$$

t_2 、 t_1 は図-17 の通り (t_2 は梁せいからスラブ厚を引いた値である事に注意)

- (4) この比率より基本モデルの固有振動数を計算する。

$$f_0 = f_{s_2} + (f_{c_1} - f_{s_2}) \times y$$

- (5) 連成振動を考慮した場合と基本モデルとの固有振動数比率を計算する。

$$z = a \cdot w + b$$

z : 固有振動数比率 (近似値)、 w : 梁・スラブ比 (t_2/t_1)

a, b : 以下に示す係数 (式内の x はスパン比)

(片側フリーの場合)

$$a = 0.1183(\log x)^{0.65} - 0.0167$$

$$b = -0.39x + 1.44$$

(両側フリーの場合)

$$a = 0.0792x - 0.0959$$

$$b = -0.485x + 1.550$$

- (6) 基本モデルの固有振動数に固有振動数比率を掛けて、連成振動時の固有振動数を算出する。

$$f = z \cdot f_0$$

4.4 計算結果と実測値またはFEM解析値との比較結果

確認のため、第3章の表-5で示した物件の実測結果やFEM解析値の固有振動数と、上記で示した計算方法による結果の比較を以下の表-6に示した。件数は少ないが、概ね1割以下の差となっており、また、図-22に示すように計算値と実測値等がほぼ順当に対応している。したがって、ここで示した計算方法により十分に純ラーメン構造の固有振動数の推定が可能であると考えられる。

表-6 実測値又はFEM解析値と計算結果の比較表

物件	スパン比 (大梁内々寸法)	梁・スラブ比 (t2/t1)	実測値(実)、又は FEM解析値(解)	本法による計算値 (片側、両側の別)	倍率
建物物件(1)、住戸A	1.12	2.17	49.8 Hz(実)	52.2 Hz(両側)	1.05
建物物件(1)、住戸B	1.34	2.17	45.1 Hz(実)	42.8 Hz(両側)	0.95
建物物件(1)、住戸C	1.27	2.17	37.7 Hz(実)	38.8 Hz(両側)	1.03
建物物件(2)、住戸A	1.15	1.91	39.4 Hz(解)	40.0Hz(両側)	1.02
建物物件(3)、住戸A	1.83	2.16	44.5 Hz(解)	45.9 Hz(片側)	1.03
建物物件(4)、住戸A	1.09	2.46	45.8 Hz(解)	44.9 Hz(片側)	0.98

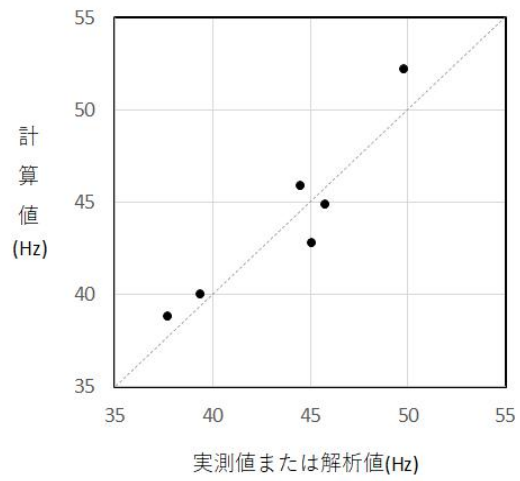


図-22 実測値又はFEM解析値と計算結果の比較図

5. まとめ

純ラーメン構造やそれに類する構造に関する重量床衝撃音性能の特徴について、数値解析法を用いて検討を行った。その結果、床スラブの固有振動数が46Hz前後になると重量床衝撃音性能が大きく低下する現象（46Hz共振現象）が生じることが明らかとなり、構造設計に関して、これらの点に十分に配慮することが必要であることが分かった。床スラブのスペンが僅か1 m程度変化するだけで、63Hz帯域の重量床衝撃音性能が2ランク（LH-50とLH-60の差）、重量床衝撃音レベルで10 dB程度も変化することもあり、性能的にも建築経済的にもこれは大変に重要な問題である。

従来の小梁付きスラブや大型スラブでは固有振動数が20～30Hz前後であることが多いため、このような現象は特に見られなかったが、純ラーメン構造では十分に在りうる条件であり、大梁で囲まれた床スラブの面積が30m²程度以下となるような条件では特に注意が必要である。本報告で示した純ラーメン構造の固有振動数の計算方法を用いて、以下に示す項目に関して十分にチェックを行うことが求められる。

・ 46Hz 共振

1次の固有振動数が46Hz前後（1/3オクターブバンドでは50Hz帯域）となるような設計では、重量床衝撃音性能が大幅に悪くなるため、危険範囲として避ける必要がある。

・ 30Hz 反共振

1次の固有振動数が30～35Hzになるように設計すれば、良好な重量床衝撃音性能を確保することができる。上記の結果と併せ、概ね、40Hz以下であれば極端な性能悪化は防げるものと考えられる。