

床スラブと大梁が連成振動する場合の 重量床衝撃音性能予測に関する数値計算法による検討

騒音問題総合研究所 (担当者: 橋本典久)

〒039-1111 青森県八戸市東白山台4丁目5-3

TEL: 0178-27-7025, E-mail: noiselabo@snow.plala.or.jp

(株)鴻池組・技術研究所 (担当者: 植村友昭)

〒305-0003 茨城県つくば市桜1-20-1

TEL: 029-857-2000, E-mail: uemura_ta@konoike.co.jp

昭和テクノフォーム(株) (担当者: 近藤康之)

〒113-0024 東京都文京区西方2-17-2

TEL: 03-3868-2731, E-mail: y-kondo@shouwa-tf.co.jp

1. はじめに

国土交通省が5年に一度発表しているマンション総合調査（平成30年度版）によれば、高層マンション（20階建て以上）は全体の2.6%であり、最近では完成したマンションの10%近くを占めるようになっている。高層マンションでは、鉄筋コンクリート造（以後RC造と記す）の界壁を乾式耐火遮音壁で代替したり、床スラブに中空スラブを採用するなどして建物重量の軽減を図っている。一方、マンションの重要性能項目である重量床衝撃音の性能向上のため、床スラブは年々厚くなってきており、最近では床厚300mm程度のものも見られる。重量衝撃時の床振動を考えると、乾式耐火遮音壁はRC造の壁と較べると床スラブの拘束効果は小さくなり、床スラブの厚みの増加は大梁との相対的な剛性関係を変化させる。これらにより、従来よく見られたRC壁付きの大梁で区切られた床スラブと較べて、床衝撃時の床スラブの振動性状が変化し、床衝撃音性能にも影響が出てくる可能性がある。重量床衝撃音性能に関する簡易計算法としては、インピーダンス法や拡散度法が広く用いられているが、これらの計算方法に影響を与えることも考えられる。実際にも、今回検討した物件（後述）を拡散度法で計算した所、実測結果と計算値に大きな差が見られた。これらの原因として上記の床スラブの振動性状の変化が影響していることが考えられ、今回、原因究明の検討を行ったものである。本報では、これらの点に関して数値計算法を用いて検討を実施するとともに、簡易計算法にこれらの結果を反映する方法についても検討した。高層マンションの割合は今後とも増加してゆくことが考えられ、このような条件でも床衝撃音性能予測を正確に行えるようにすることは、良好な住環境を確保するために重要であると考える。

2. 純ラーメン構造の重量床衝撃音性能に関する検討

2.1 検討方法

検討方法に関しては、検討対象モデルの条件を種々変化させて比較結果を求める必要があるため、実験や実測による検討は困難であり、ここでは数値計算による方法を採用した。用いたのは、筆者が開発した重量床衝撃音の数値計算手法^{1), 4)}であり、面内面外変位連成型有限要素法による振動応答解析²⁾と直方体空間における波動関数法による放射音解析³⁾を組み合わせたものである。まず、面内面外変位連成型有限要素法とは、大梁や小梁付きの床スラブなど断面が急変する板の音響域振動を正確に解析するため、通常の面外変位の他に面内変位を導入して断面急変部の中立軸の変移を表現した有限要素法である。これにより、低次の固有モードが卓越する数10Hzの低周波数域から多数のモードが存在する数100Hzの周波数域までの音響域振動を統一的に解析できる方法である。また、放射音解析は、床の振動応答解析によって得られた振動加速度分布を音源として、下室の波動関数（共鳴モード）の重ね合わせにより音圧分布を計算する方法である。これらによる解析精度に関しては、均質スラブは勿論、小梁付きスラブ¹⁾やボイドスラブ^{5), 6)}などに関しても、实用上十分に予測解析に利用できることを確認している。

2.2 検討対象と解析モデル

検討対象とした床構造と間取りを図1に、およびその解析モデルを図2に示した。建物と床スラブの諸元は表1、表2に示した。対象室は9階建てマンション3階部分のリビングダイニング（測定時はスラブ素面）であり、上下同一間取りである。構造は、RC造の純ラーメン構造であり、耐震壁はない。住戸界壁には乾式耐火遮音壁が用いられている。床スラブは球形の中空部を有するボイドスラブであ

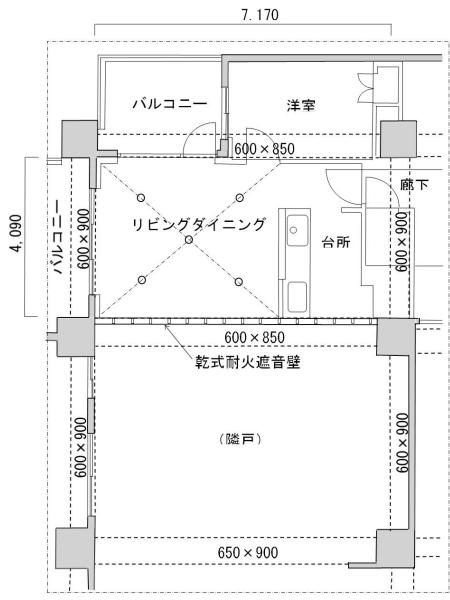


図1 検討対象の床構造と間取り
(RC造・純ラーメン構造)

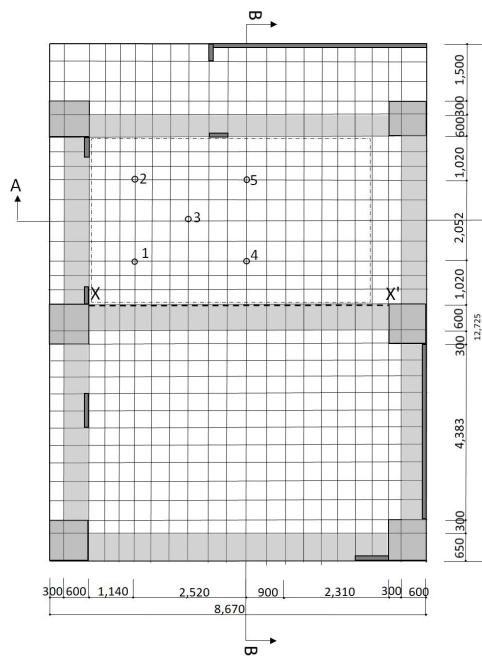


図2 FEM解析モデル

り、スラブ厚は275 mmであるが、これを曲げ剛性に関する等価な密実スラブに換算した場合のスラブ厚は269 mmとなり、これに併せて換算した単位体積重量は2.40 t/m³から1.79 t/m³となる。ボイドスラブを密実なスラブに換算して解析する方法の妥当性については既往研究⁵⁾により確認されている。

2.3 重量床衝撃音の解析結果

検討対象のリビングダイニングに関して、重量床衝撃音性能の決定周波数となる場合の多い63Hz帯域に関する解析を行った。なお、参考として数値は小数点以下一桁まで示した。

(1) 解析条件(A)の場合

解析条件(A)として、図2の解析モデル全体に関して重量床衝撃音解析を行った。振動応答解析時の境界条件は、柱部が完全固定、RC壁部は単純支持、その他は自由とした。隣戸との界壁部分は乾式耐火遮音壁となっているが、通常、間仕切壁は床振動への影響が小さいため¹⁾、この影響についても無視した。その他、加振力は40 N、減衰定数は2.5%，下室の壁面比コンダクタンスは0.0126（吸音率0.10相当）であり、加振点および受音点は図中に示す5点とした。

表1 建物条件

階 数	地上9階
構 造	鉄筋コンクリート造 純ラーメン構造
測定室	3階リビングダイニング (上下同一間取り)

表2 床スラブ条件

床スラブ	球形ボイドスラブ
スラブ厚	275 mm
換算等価板厚	269 mm
換算単位体積重量	1.79 t/m ³

解析結果と実測結果の比較を表3に示した。実測値80.8 dBに対して解析値77.9 dBと3 dB弱の差があるものの、解析モデルによる簡略化やその他の条件設定等の影響を考えれば、ほぼ妥当な結果になっていると言える。この時の床スラブの振動加速度分布（実効値、規準化済み）を求めたものが図3であるが、B-B'断面を見れば、床スラブの振動が大梁に囲まれた範囲だけではなく、大梁自身が振動し、振動範囲が隣のスパンにまで及んでいることが確認できる。一方、A-A'断面を見ると大梁は振動せず、ほぼ固定端となっている。

(2) 解析条件(B)の場合

図2の解析モデルに関して、他の条件は解析条件(A)と全く同じと

表3 63Hz 重量床衝撃音レベルの実測結果と解析結果の比較

実測結果	80.8 dB (L _r =57.8相当)
解析条件(A)	77.9 dB (L _r =54.9相当)
解析条件(B)	71.5 dB (L _r =48.5相当)

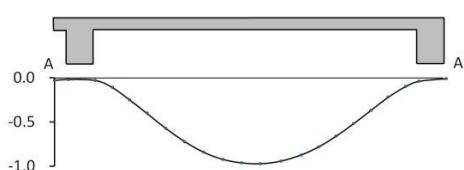


図3 解析条件(A)の場合の振動加速度分布(63Hz帯域の場合)

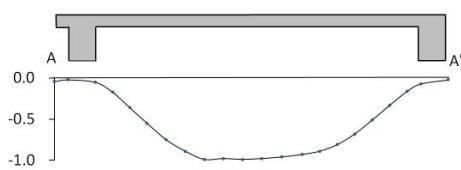
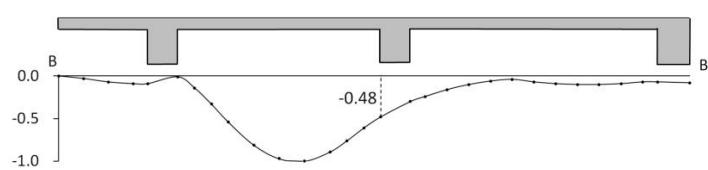
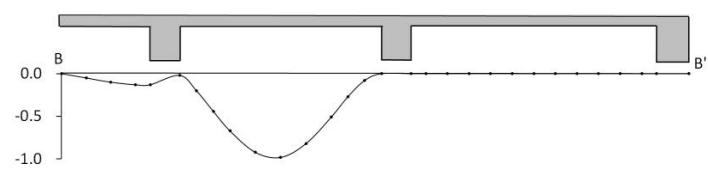


図4 解析条件(B)の場合の振動加速度分布(63Hz帯域の場合)



して、中央部の大梁端（図2のX-X'部分）を固定とした解析条件(B)で解析を行った。これは、図4の振動加速度分布に示すように、床スラブの振動を大梁間のスパン内に強制的に限定したものである。この時の63Hzの重量床衝撃音レベルは71.5 dBであり、実測値の80.8 dBと較べて2ランク近くの大きな差が生じている。すなわち、このような構造の重量床衝撃音の評価を行う場合には、床衝撃時の実際の振動範囲を対象として解析や計算を行う必要があり、大梁内の範囲のみを解析対象とすると大きな誤差を生じることになる。これは重量床衝撃音性能の簡易計算法であるインピーダンス法や拡散度法の場合でも同じである。

(3) 床スラブと大梁の連成振動について

前述したように、図3の解析条件(A)の振動加速度分布では、B-B'断面中央部の大梁の振動が確認される。大梁の梁せいは850 mmであるが、スラブ厚が275 mm（換算等価板厚では269 mm）と厚いため、大梁と床スラブの曲げ剛性の差が従来の厚みの薄いスラブよりもかなり小さくなっている。そのため、スラブの振動に引きずられて大梁も振動し、その大梁の振動により床スラブの振動が更に大きくなるという、床スラブと大梁の連成振動が生じていると考えられる。これにより重量床衝撃音レベルも板厚の割には大きな値になるものと考えられる。解析条件(B)のように、大梁部の変位を強制的に押さえて連成しないようにすると、本来の床スラブの剛性によって重量床衝撃音レベルが決定されることになる。なお、この時の重量床衝撃音レベルの性能の良化は、連成が抑えられるためであり、床スラブの面積が小さくなうことによるものではない。確認のため、図3の解析条件(A)で中央部の大梁の梁せいを段階的に小さくした場合の結果を表4に示したが、梁せいが小さくなるほど重量床衝撃音レベルも小さくなり、梁せいが床スラブの厚み269 mmと同じ場合（大梁が無い場合）には、通常の大型スラブと同等の性能に収束することになる。

今回の検討物件は純ラーメン構造であり、大梁下に耐震壁などがないため大梁が振動しやすい面があるが、大梁自体が振動しやすくなる条件は純ラーメン構造以外の場合でも生じる可能性があり、そのことにより、重量床衝撃音の性能予測値が実測値と大きく乖離する場合もあるため、十分に注意が必要である。

3. 床スラブの振動範囲を決定する等価寸法倍率の検討

図3の振動加速度分布に示されるように、大梁と床スラブが連成振動する場合には、解析対象とする床スラブの範囲を大梁で囲まれた部分よりも広げた範囲とする必要がある。これは重量床衝撃音性能の簡易計算法に関しても同様である。図3の振動加速度分布を見れば、短辺側の大梁内々寸法の1.4倍程度に広げれば、ほぼ妥当な範囲になるとを考えられるが、この値は床スラブと大梁の条件によって変化する。そこで、この床スラブの振動範囲を決定するための検討を数値計算法（面内面外変位連成型FEM）により実施した。

3.1 検討モデル、検討条件

出来るだけ一般化した条件での検討を行うため、図5に示した検討用モデルに関して解析を行った。x, y方向ともに大梁で囲まれた3スパンの床構造とし、中央部のスパン内の5点に関する重量床衝撃時の振動加速度分布を求め、振動の範囲を決定する。解析周波数は63Hz帯域とし、減衰定数は2.5%，境界条件は柱部が固定、全体の4周部は単純支持とした。

表4 梁せいを変化させた場合の重量床衝撃音レベルの変化
(解析条件(A), 63Hz帯域)

梁せい(mm)	850	650	450	269
解析値(dB) (重量床衝撃音63Hz)	77.9	73.1	70.0	70.1

検討条件は以下の通りとした。

- (1) スパン比（大梁内々寸法のXY辺長比。短辺スパンは4mに固定）
 - ・3ケース：1.0 (4m×4m), 1.5 (4m×6m), 2.0 (4m×8m)
- (2) 梁・床厚比（梁せいを床厚で割った値）,
 - ・5ケース（梁せい900mm、床厚200, 250, 300, 350, 400mm）
- (3) 端部拘束条件（図6の説明図参照）
 - ・2ケース（両側大梁ともフリーの場合、片側のみフリーの場合）

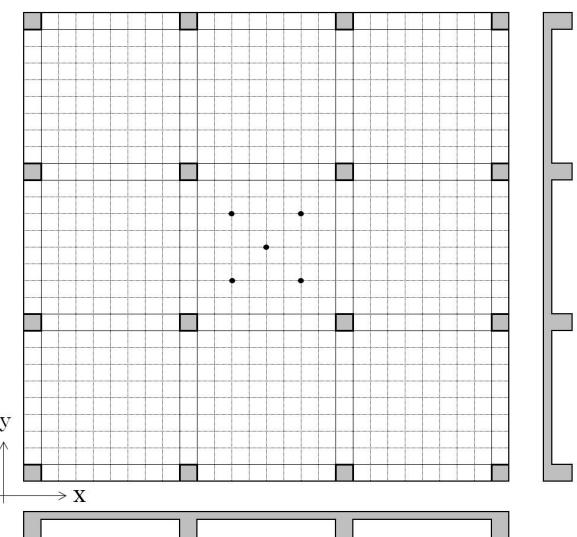
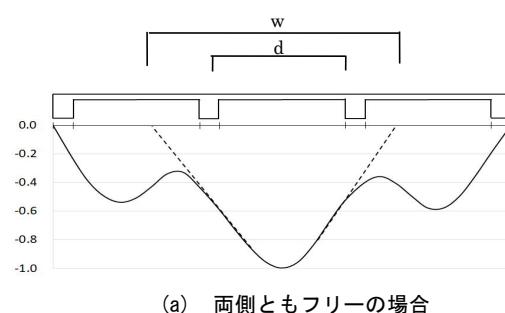
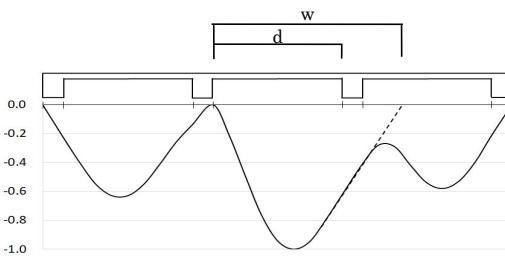


図5 検討用モデルの有限要素法分割図



(a) 両側ともフリーの場合



(b) 片側のみフリーの場合

図6 等価寸法倍率の算出方法説明図

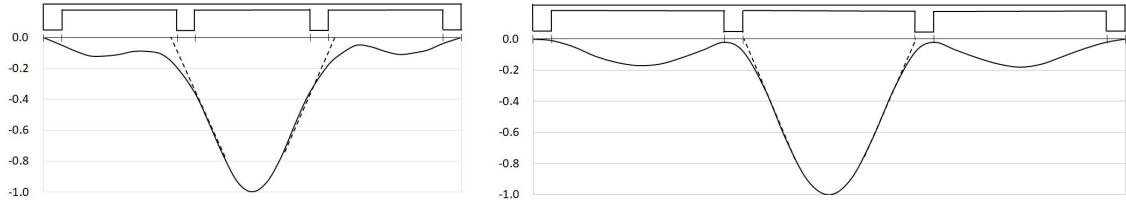


図7 解析結果の例(1)（両側ともフリー、スパン比1.5、梁・板厚比2.57の場合）

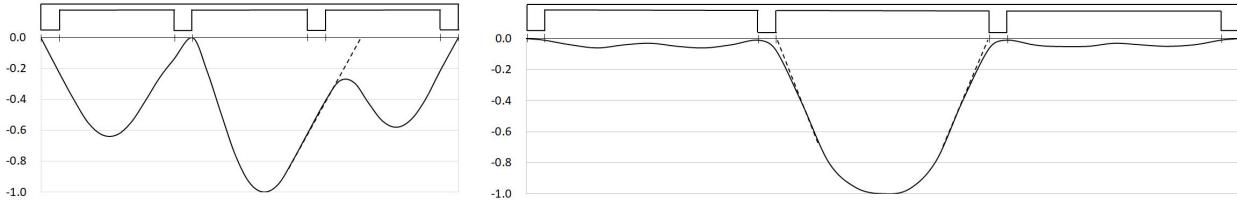


図8 解析結果の例(2)（片側のみフリー、スパン比2.0、梁・板厚比3.0の場合）

これら以外にも条件は様々あるが、全ては網羅できないため、実用的に結果を利用できる範囲として条件設定した。

3.2 等価寸法倍率の算出方法

実際に振動する範囲を表すため、大梁の内々寸法を基準とした倍率を求め、これを等価寸法倍率と呼ぶ。範囲を決める方法は、図6(a), (b)に示すように、振動加速度分布の中央部を含んだ1次モード形の幅の範囲(w)とし、これを大梁内々寸法(d)を基準として倍率を求めた。式で表すと以下の通りである。

(1) 両側ともフリーの場合（図6(a)参照）

$$x = (w-d)/2d+1$$

x ：等価寸法倍率（片側の値であるため、実際の床の寸法の算出では、倍率を2倍にする必要がある）

(2) 片側のみフリーの場合（図6(b)参照）

$$x' = (w-d)/d+1$$

なお、両側ともフリーの場合に、片側だけの倍率を算出しているのは、片側フリーの場合との比較のためである。

3.3 解析結果と等価寸法倍率図

解析結果の一例を図7、図8に示したが、大梁内々寸法の長辺側は、いずれの場合にも等価寸法倍率はほぼ1.0、すなわち振動範囲が大梁の内々に限られていた。したがって、等価寸法倍率を適用するのは、大梁内々寸法の短辺側だけとなる。

これらの解析結果を図化したものを図9、図10に示した。図中の黒丸等が解析結果であり、破線はその近似線である。片側のみフリーの方が等価寸法倍率が若干大きくなる傾向があるが、全体としては同様の傾向である。スパン比が大きくなるほど等価寸法倍率は大きくなり、最大で1.5倍程度となる。スパン比が1.0（正方形）の場合には、梁・床厚比が3.0程度までは倍率が1.0であるため、実際上は倍率を考慮する必要はないと言える。スパン比が1.0, 1.5, 2.0以外の中間値に関しては、図中の破線を用いて、スパン比に関して比例分配して値を算出して十分と考える。

4. 等価寸法倍率の重量床衝撃音簡易計算法への適用

重量床衝撃音性能の簡易計算法である拡散度法^{7)~9)}への等価寸

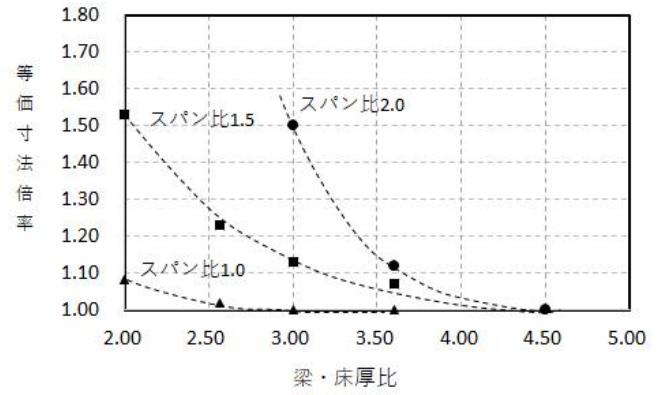


図9 等価寸法倍率図（両側ともフリーの場合）

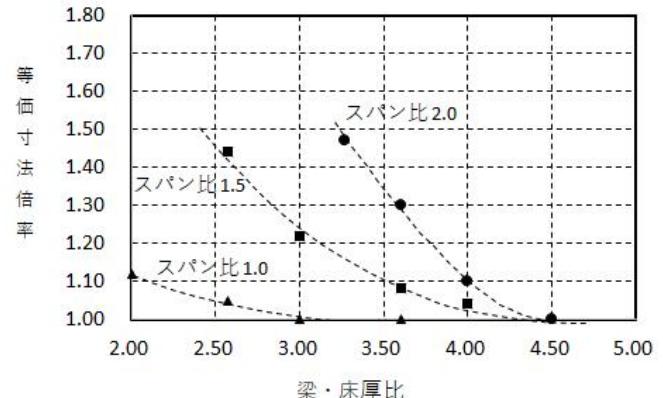


図10 等価寸法倍率図（片側のみフリーの場合）

倍率の適用可能性と精度に関する検討を行った。拡散度法は、基本的に大梁で囲まれた床スラブを対象とした計算法であるため、数値計算法での検討と同様に、等価寸法倍率を用いて実際に振動しているスラブの範囲を求めて計算するのに適した方法である。

4.1 拡散度法への適用方法

等価寸法倍率の拡散度法への適用方法は以下の通りである。

- 1) スラブ寸法は大梁内々寸法を基準とし、その短辺に等価寸法倍

率を適用する。長辺はそのままの寸法とする。

- 2) 両側の大梁ともにフリーの条件の時は、図表から算出した値(片側の値)を2倍する。
- 3) 等価寸法倍率を適用した場合には、大梁は小梁扱いとして梁せいを入力する。(ただし、拡散度法の小梁は梁巾300mmに固定されているため、同じ曲げ剛性になるよう梁せいを補正する。)
- 4) 境界条件は、通常の拡散度法の計算と同様に拘束度0.8とする。

4.2 適用物件と計算結果

計算結果と実測値の比較を行った物件の一覧を表5に示した。住戸Aは、数値計算法で検討対象とした物件である。その他、同じ建物(純ラーメン構造)内の等価寸法倍率の異なる他の2住戸についても比較を行った。室用途は何れもリビングダイニングである。

計算結果の一覧も表5に合わせて示した。拡散度法による計算結果は、大梁内々寸法でそのまま計算した場合と、等価倍率寸法を適用した場合の2ケースを比較した。また、それらの計算値および実測値の床衝撃音レベル図を図11(a)～(c)に示した。

まず住戸Aでは、等価寸法倍率を適用した場合、大梁内々寸法の場合よりLr値の差が4.5から2.6に縮まり、実測値に近づいている。

表5 検討物件の諸元と拡散度法による計算結果の一覧表

内 容		住戸A	住戸B	住戸C	備考
物件条件	室 名	リビング ダイニング	リビング ダイニング	リビング ダイニング	
	室寸法 (m)	6.49×4.15	6.62×3.93	3.18×5.91	天井高は全て2.5m
	スラブ厚 (mm)	269	269	269	換算等価板厚
	大梁断面寸法 (mm)	600×850	650×900	650×850	対象となる 長辺方向の大梁
	梁・床厚比	3.16	3.35	3.16	梁せいは 850mmおよび900mm
	大梁内々寸法 (m)	7.17×4.09	7.29×4.92	6.02×7.40	
	スパン比	1.75	1.48	1.23	大梁内々寸法の 辺長比
	等価寸法倍率 (片側、両側の別)	1.38 (片側)	1.14 (両側)	1.09 (片側)	図9、図10より算出
計算結果	実測値	Lr-57.8	Lr-50.4	Lr-48.3	
	大梁内々寸法 での計算値	Lr-53.3	Lr-47.2	Lr-42.8	
	等価寸法倍率 での計算値	Lr-55.3	Lr-53.8	Lr-48.3	

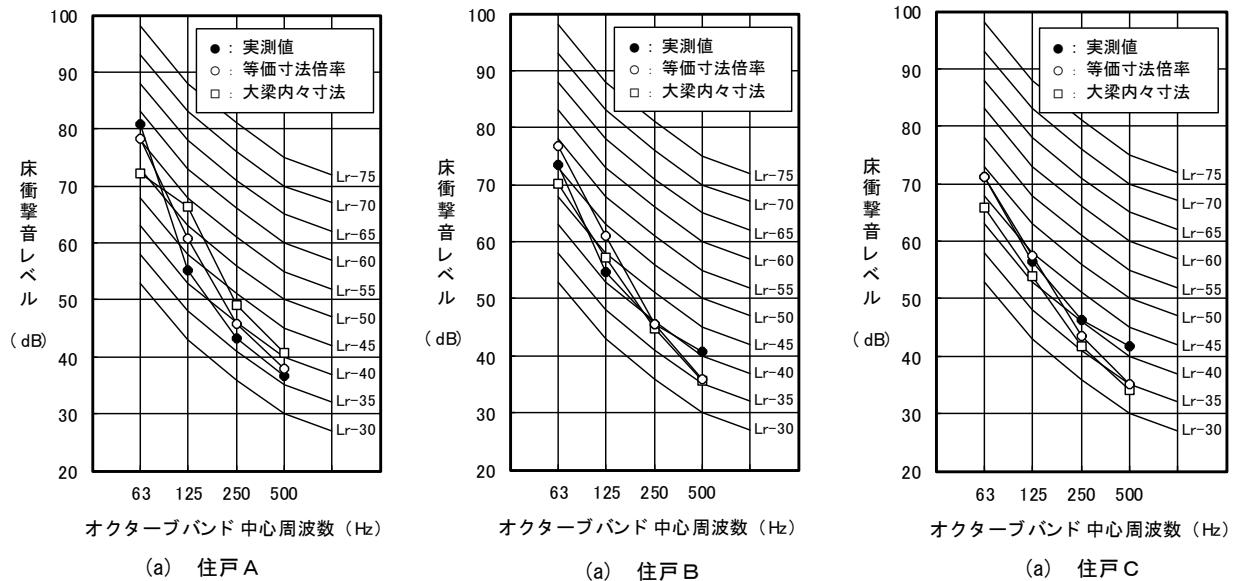


図11 拡散度法による計算結果と実測値の比較

また、図11(a)の床衝撃音レベルの63Hzの値では、実測値が80.8dBに対して、大梁内々寸法で72.3dBと大きな差が生じているが、等価寸法倍率では78.2dBとなり、これらの結果は数値計算の場合の検討結果と傾向、数値共に同様となっている。図12の説明図に示すように、この時の等価寸法倍率は片側のみに1.33であり、短辺側のスパンが4.09mから5.44mに変化するとともに、加振点1,4の拘束（端部までの距離）が固定端部から小梁端部に変わることになる。これらにより、63Hzで1ランク以上の大きな差ができることになる。

住戸Bの場合にも、大梁内々寸法の場合より等価寸法倍率の方が1ランク程度大きな値となる。実測値と較べるとやや大きな値となっているが、不利側の値であり、 L_r 値で3程度の差があるので実用的には予測法として十分に利用できると考える。また住戸Cの場合には、大梁内々寸法の場合と等価寸法倍率の計算値では大きな差が見られ、等価寸法倍率の時の計算値は実測値とよく対応する結果となっている。この場合には、等価寸法倍率の値が1.05と大きくなつたため、端部の拘束が小梁扱いになったことの影響が大きいと考えられる。

以上の結果から、検討事例は少ないものの、等価寸法倍率を適用して拡散度法により簡易計算する方法は、大梁自体が振動するような場合の床衝撃音性能評価に十分に利用できるものと考える。

5.まとめ

重量床衝撃音性能の向上のため、マンション等の床スラブの厚みは時代とともに徐々に厚くなってきた。また、軽量化のために大梁下のRC壁に変わって乾式壁が用いられることが多く、これらにより大梁がスラブ振動の区切りとはならず、床スラブと連成振動することにより床衝撃音性能が悪くなるという事例が見られた。これらの事象を数値計算法を用いた検討により確認するとともに、正確な床衝撃音性能予測を行うために実際の振動範囲を検討し、等価寸法倍率という形でこの影響を考慮する方法を提案した。等価寸法倍率を床衝撃音性能の簡易計算法である拡散度法に適用して計算を行ったところ、数例の範囲ではあるが予測の精度が改善し、実用的にも十分に利用できることが確認できた。

また、良好な重量床衝撃音性能を確保するためには、単に床スラブの厚みを厚くするだけではなく、大梁などの周囲の条件やRC壁の設置位置などを慎重に検討して設計することが必要であることも示された。

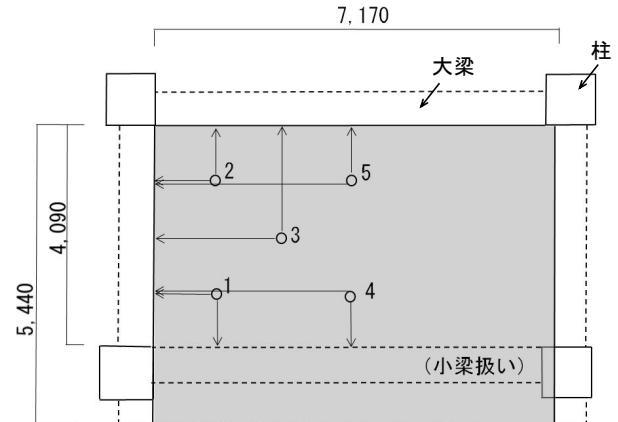


図12 拡散度法での等価寸法倍率による
計算方法説明図（住戸Aの場合）

参考文献

- 1)橋本典久：建築物床板の振動と音響放射に関する研究，東京大学学位論文，1994
- 2)橋本典久：小梁付床版の音響域振動へのFEMの適用とその振動性状について，一建築物床版の振動と音響放射に関する研究・その1－，建築学会計画系論文集，第372号，pp.1-9，1987.2
- 3)橋本典久：直方体空間の波動関数を用いた固体音放射計算に関する検討，一建築物床版の振動と音響放射に関する研究・その2－，建築学会計画系論文集，第428号，pp.1-10，1991.10
- 4)N.Hashimoto, M.Yasuoka : The development of a numerical analysis method for structure borne sound of building floor slabs, and its application to the evaluation of heavy weight floor impact sounds.J.Acoust.Soc.Japan, Vol.16,No.2,pp85-95,1995.3
- 5)橋本典久：固有値解析によるボイドスラブの床衝撃音遮断性能評価，一面内面外変位連成型有限要素法によるボイドスラブの床衝撃音解析・その1－，建築学会計画系論文集，第556号，pp9-15，2002.6
- 6)橋本典久，安部信行：数値計算法によるボイドスラブの床衝撃音解析，建築学会技術報告集，第21号，pp133-138，2005.6
- 7)橋本典久：拡散度法による重量床衝撃音の予測計算，一板振動の拡散度評価指標の構成とその利用に関する研究 その4－，建築学会計画系論文集，第537号，pp21-272，2000.11
- 8)橋本典久：拡散度法による重量床衝撃音の予測計算，一小梁付床版への拡散度法の適用－，建築学会技術報告集，第17号，pp213-216，2003.6
- 9)橋本典久：拡散度指数の推定精度向上に関する検討，一拡散度法による重量床衝撃音の予測計算法に関する研究・その1－，建築学会環境系論文集，第571号，pp9-15，2003.9