

第3章 建築物床版の音響域振動に関する各種検討

前章では、多様な断面形状と形態を有する種々の建築物床版に適用が可能な、面内外変位連成型の有限要素法を用いた音響域振動解析理論と、その解析プログラムの構成について示した。これにより、床衝撃音をはじめとする建築物床版の音響域振動に対し、解析的に対処することが可能になったわけであるが、これだけでは必ずしも十分ではなく、実際の解析にあたっては、床版の音響域振動に係わる種々の要因（周辺要因）についてもその影響を明確にしておかなければならぬ。表-3.1は、床版振動に関する要因

を列挙したものであるが、このうち床版自体の要因、および家具や人の付加質量に関してはFEMのなかに解析条件として組み込むことができる。ところが、周辺要因の各々に関しては、解析的または定量的な評価はもとより定性的な知見さえ十分に得られていないのが現状である。当章では、これらの周辺要因の床版振動への影響を考察するとともに、解析上考慮が必要な要因については、その組み込み方法を検討する。

これらの周辺要因のうち、床版振動に最も直接的な影響を持つものが間仕切壁である。ここでは、この影響を実際の建物（RC造集合住宅）での実測結果とFEMの両面から検討を行い、これをもとに、間仕切壁の影響の物理量化と解析への組み込み方法を提示している。

振動解析の宿命的な課題の一つである境界条件の影響に関しては、床版の周囲の壁や隣接する床版が、対象床版の振動性状にどの程度の、どのような影響を与えるかを縮尺模型実験により検討している。この他、既往文献調査や当研究でのデータをもとに、床振動に対する天井の影響を考察し、固体音評価における取扱いの判断基準を提示している。また、床版の減衰に関する簡単な考察を行い、解析時の減衰定数設定値の目安を示している。

ここで示したこれらの検討項目およびその結果により、最も一般的でかつ重要なRC造の集合住宅に関しては、実際の意味での解析的評価がほぼ可能になったといえる。ただし、ここでの検討は実際の建築物床版のすべて網羅しているものではない。例えば、間仕切壁の検討は、集合住宅で一般的な木軸下地にボードを貼った程度の壁のみを対象としているし、境界条件に関する模型実験もごく一部の条件を扱ったものにすぎない。しかし、ここで示した検討方法は類似の項目に汎用的に適用できるものであり、いはば方法自体に有用性があると言える。ここでの方法を他の条件にも展開してゆけば、周辺要因の総合的な評価も将来可能になると考えられる。

<床版自体の要因>

- ヤング率、密度、ポアソン比
- 材料的等・異方性
- 面積、形状、スパン
- 板厚
- 小梁の形状、配置、変断面
- 構造的等・異方性、
- 減衰定数

<床版振動の周辺要因>

- 周辺壁・床の拘束、振動への影響
- 間仕切壁の影響
- 天井の影響
- 家具、人、その他の付加質量

3.1 間仕切壁の床版振動への影響に関する検討

床版振動に対する間仕切壁の影響について検討した報告は数少ない。このうち、井上ら¹⁾は実験用に製作された床版に対し、間仕切壁の有無について測定を実施し、その結果これを無視し得ると結論している。しかし、間仕切壁の影響は、明らかにその配置位置と量に関係するものであり、井上らの結論は、量が少ない場合には無視し得るということにすぎない。

間仕切壁は、床版振動に最も直接的な影響を持つ要因であり、当章では、その影響評価に関して実測と解析の両面から検討を行った結果について述べる。実測による検討では、建設段階の集合住宅において、間仕切壁の施工前後において床版の音響域振動測定を実施し、その影響を究明している。解析的検討では、これらの実測結果を参考として、本研究の目的である数値解析による床版振動の評価のための間仕切壁の影響の物理量化と、解析への組み込み方法について検討した。これらの検討は、いずれも過去に例を見ないものである。

3.1.1 間仕切壁の床版振動への影響に関する実測調査

建設段階の集合住宅を対象とし、各々条件の異なる床構造を持つ3つの建物を抽出して、間仕切壁の影響に関する実測調査を実施した。間仕切壁の仕様は、いずれも集合住宅で一般的な木軸下地にボードを張ったものである。測定建物の概要と床構造の特徴を表-3.2に示した。これらの床構造に対して、間仕切壁施工前〔躯体時〕と間仕切壁施工後〔内装後〕の2回にわたり音響域振動測定を行った。測定実施時の各建物の施工状態は図-3.1の通りであり、建物Cに付いては階下のモデルルームを利用

表-3.2 実測調査建物および床構造の概要

建物記号	建 物		床 構 造			
	構 造	規 模	版厚 (mm)	スパン (m)	床面積 (m ²)	小梁の配置
A	RC壁式構造	5階建	150	8.1×3.75	30.4	(平板スラブ)
B	RCラーメン構造	8階建	180	8.1×8.2	66.4	T型配置
C	RCラーメン構造	11階建	135	11.8×6.5	76.7	目型配置

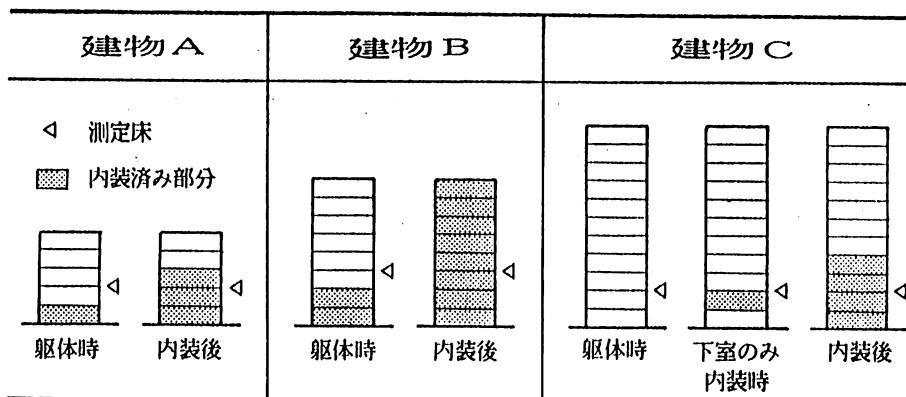


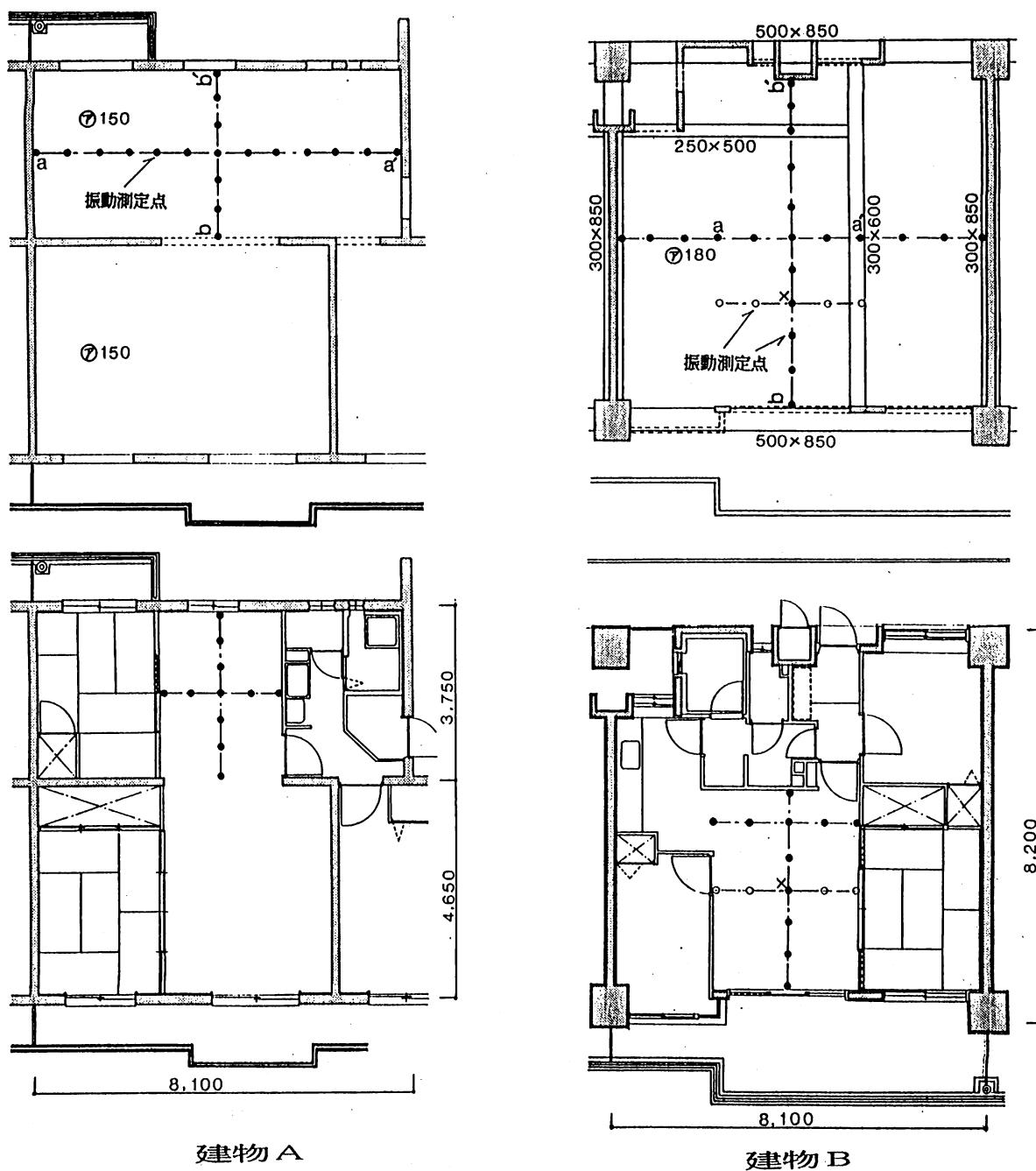
図-3.1 実測調査時の各建物の施工状態

して、下室のみ内装時の場合も測定した。各建物の床構造・間取りは図一3.2 (a), (b), (c) の通りであり、躯体時の測定状態を床伏図に、内装後の状態を平面図に示した。

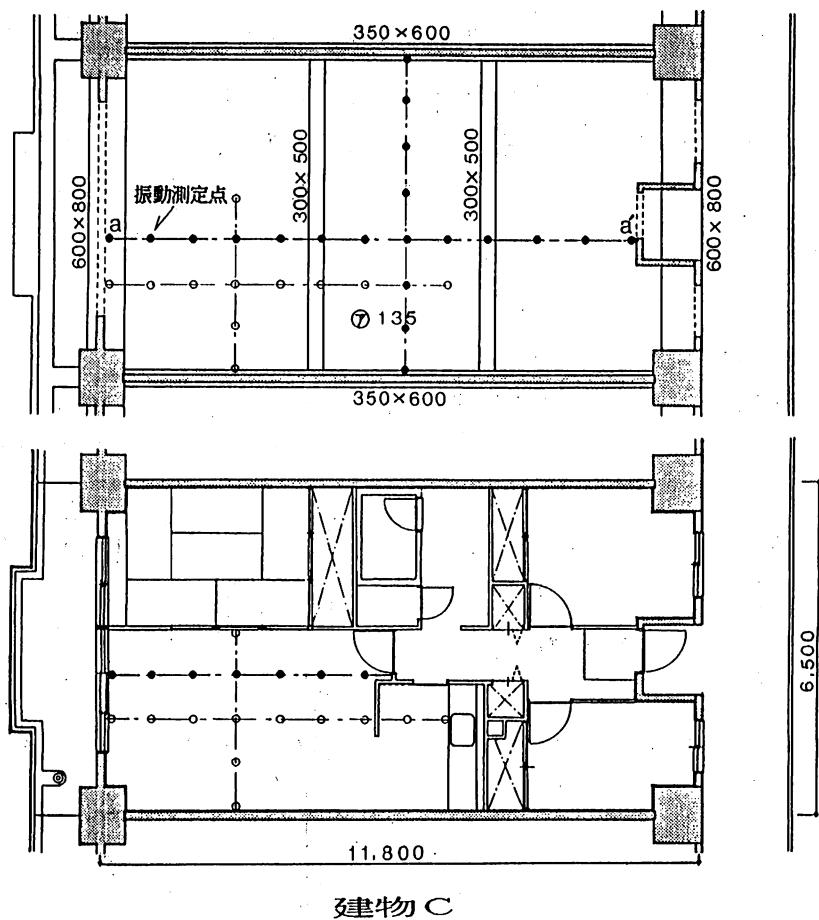
建物Aは、基本的な条件検討を目的に選んだシンプルな床構造であり、壁式構造の平板スラブである。建物Bは、床構造の条件が複雑で間仕切壁の配置量も多いもの、建物Cは集合住宅で比較的良く見られる構造と間取りを有するものという特徴を各々持っている。

1) 音響域振動測定と分析

躯体時と内装後の測定では、階下の空間構成や吸音条件が全く異なるわけであるから、音による測



図一3.2 実測調査建物の床構造、間取りおよび振動測定点



建物C

定は無意味であり、ここでは床版おの音響域振動の測定を実施した。音と振動には、音響放射に関し一義的な関係があるから、固体音に関する評価を音響域振動の評価により行うことが可能である。例えば、床衝撃音レベルの変化は、床版の板面平均加速度レベルの変化にほぼ対応すると言える。

測定・分析系統は2章に同じであり、加振力としては、重量床衝撃源（タイヤ落下衝撃）を用いた。主な検討項目とその分析方法は以下の通りである。

(a) 固有振動数、固有振動モードの変化

間仕切壁の影響は、床版振動モードに対する間仕切壁の存在位置により変化することが考えられる。また、振動モードの変化を調べれば、間仕切壁の影響の抽出が明確となるであろう。一方、固有振動数の変化は、床版に付加される剛性効果をあらわすことから、間仕切壁の定量的な評価の指標となる。これらの理由により、ここでは2chFFTを用いた実験的モーダルアナリシスを行っている。

(b) 加速度振幅分布の変化

タイヤ落下衝撃時の床版各測定点での応答加速度振幅分布を各オクターブバンド毎に求め、周波数の差による間仕切壁の影響の変化について調べた。また、これらの各測定点での結果から床版面全体での平均加速度レベルを算出し、これにより床衝撃音レベルへの影響を評価した。ここでオクターブバンドレベルの算出は、現場収録した応答加速度波形を $\Delta t = 0.5 \text{ msec}$, $N = 2048$ （データー長は約1秒となる）でA/D変換し、FFT分析を行ったのち各周波数毎にオクターブバンドのフィルターをかけてエネルギー合成している。なお、この時のナイキスト周波数は1000Hz, スペクトル間隔は1Hzとな

る。

(c) 振動減衰性状の変化

周波数領域での減衰性状の変化を調べるために、振動の残響時間分析を行った。ここでは、オクターブバンドでの現象に注目して、以下の方法を用いて分析した。まず、収録した減衰波形を1/1オクターブバンドフィルターに通し、これをシェレダーの方法^{2), 3)}を用いて残響時間を算出した。残響分析の例を図-3.3に示した。残響時間からの減衰定数の計算は式(3.1)を用いた。

$$h = \frac{1.1}{f_e T_{60}} \times 100 \quad (3.1)$$

h : 減衰定数 (%)

T_{60} : 減衰波形の残響時間 (sec)

f_e : 代表周波数 (Hz)

(1) 単独の卓越周波数 (f) が存在する場合は $f_e=f$

(2) バンド内に複数の卓越振動数が存在 ($f_1 < f_2 < f_3$) する場合は $f_e=f_1$

(3) 拡散振動状態と見なせる場合 $f_e=f_m$ (中心周波数)

2) 測定結果

(a) 建物Aの場合

測定結果を図-3.4(a)～(d)に示した。(a)のスペクトル図では、固有振動数が29.5Hzから33.5Hzに上昇し、床版の剛性が高まったことを示している。(b)の振動モード図では、間仕切壁の影響によりモード振幅はかなり小さくなっているが、モード形自体は大きくは変化していない。モード振幅の変化は、減衰の変化とも関係するから、これらが必ずしも振動エネルギーの減少を表すものではない。これらのモード形より明らかなように、間仕切壁位置を拘束点とみなすことはできず、床版の振動評価においては、室単位ではなく床版全体を対象として取り扱うことが当然必要となる。(c)はオクターブバンド毎の加速度振幅分布を示したものであり、間仕切壁の設置により各点の加速度振幅が変化（基本的には減少）することを示している。これを測定室の床版面について平均し、dB表示したものが(d)である。全周波数帯域とも内装後にレベルが低下しているが、その変化の程度は1～2dBの差と僅かである。これは間仕切壁の配置量が相対的に少ないとによる。なお、この加速度レベル差の信頼度は、モード形や振幅分布形の測定結果から推察されるように再現性は極めて高く、このレベル差も充分信頼できるものである。

(b) 建物Bの場合

この建物の場合には、図-3.5(a)に示すように、間仕切壁の設置により1次の固有振動数が22.5Hzから36.0Hzへと実に1.6倍にも増えている。この剛性増加を仮に版厚変化に換算すると、180mmの版厚が288mmに増加したことによると相当し、極めて大きな条件変化となる。またこれに応じて波形の形も大きく

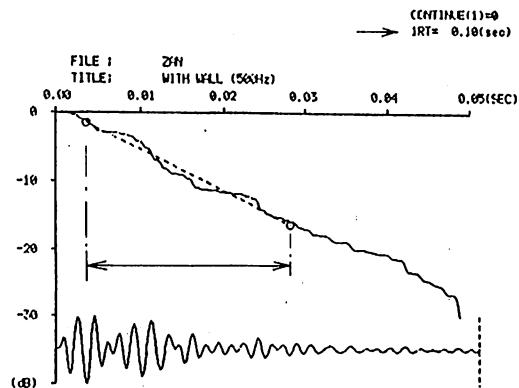
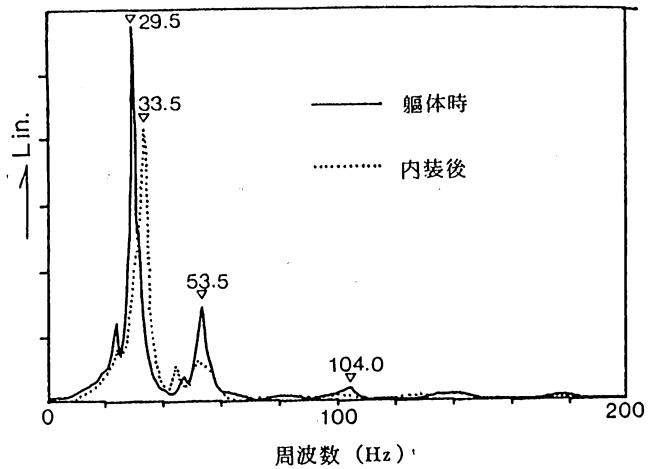
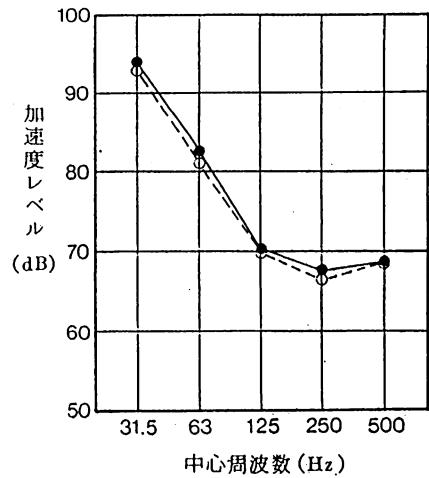


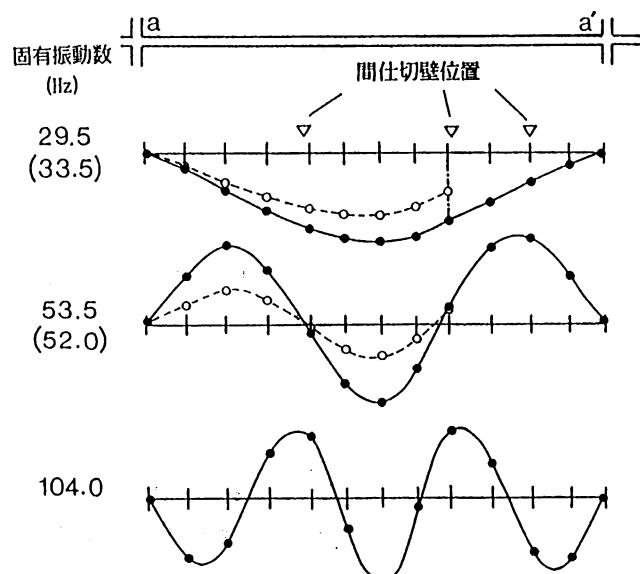
図-3.3 Schroederの方法による残響分析例



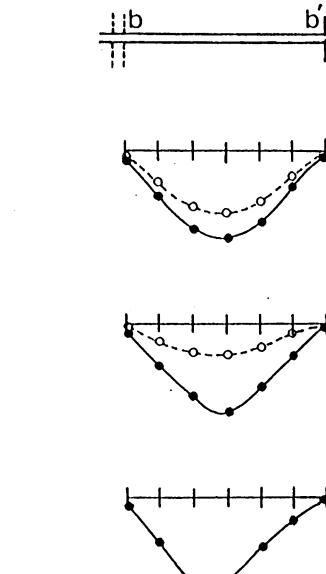
(a) タイヤ落下衝撃時のスペクトルおよび波形の変化



(d) タイヤ落下衝撃時の版面平均加速度
レベルの変化 [—●— 軀体時、---○--- 内装後]



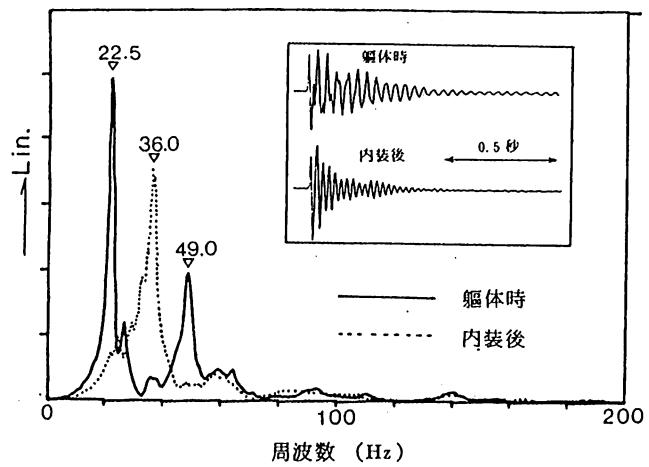
(b) 間仕切壁施工前後の固有振動モードの変化 [—●— 軀体時、---○--- 内装後]



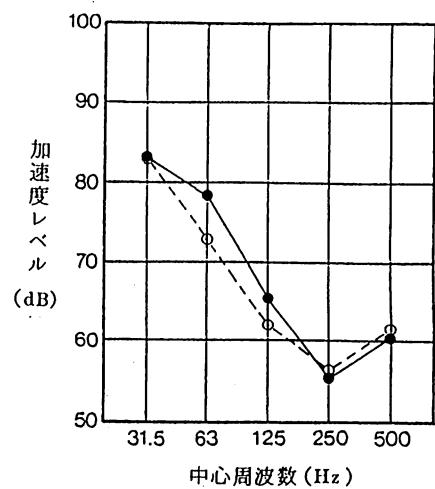
(c) タイヤ落下衝撃時の加速度振幅分布の変化 [—●— 軀体時、---○--- 内装後]

(c) タイヤ落下衝撃時の加速度振幅分布の変化 [—●— 軀体時、---○--- 内装後]

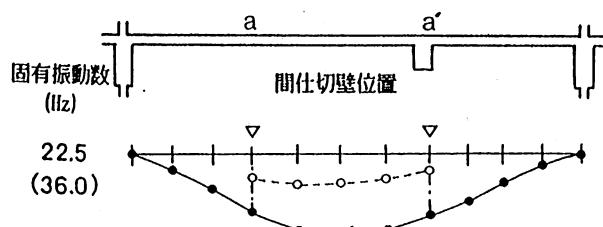
図-3.4 建物Aに関する測定結果



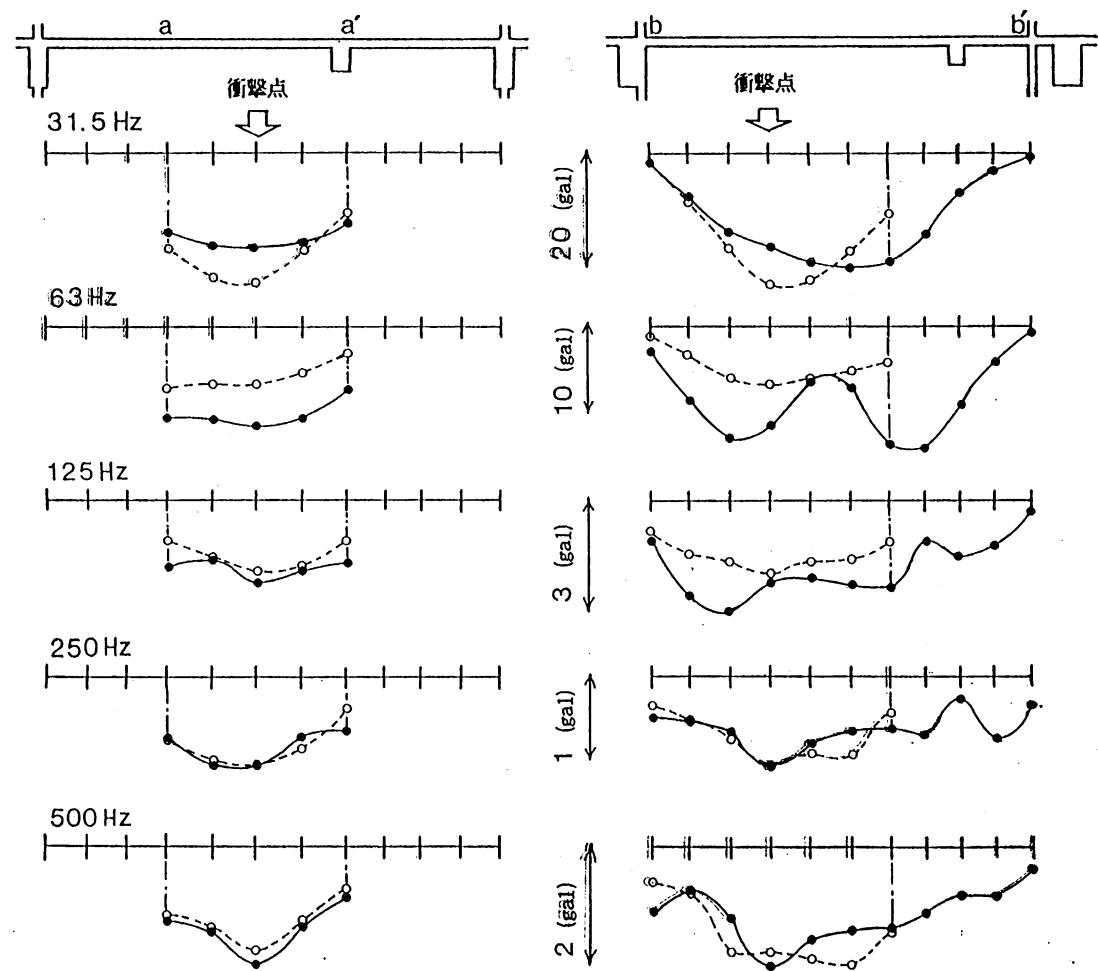
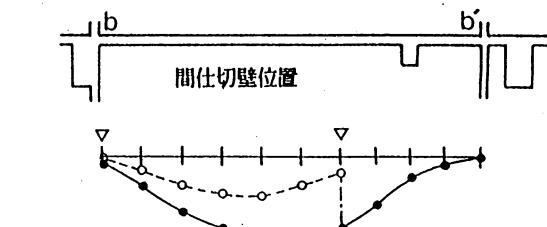
(a) タイヤ落下衝撃時のスペクトルおよび波形の変化



(d) タイヤ落下衝撃時の版面平均加速度
レベルの変化 [—●— 軀体時、---○--- 内装後]

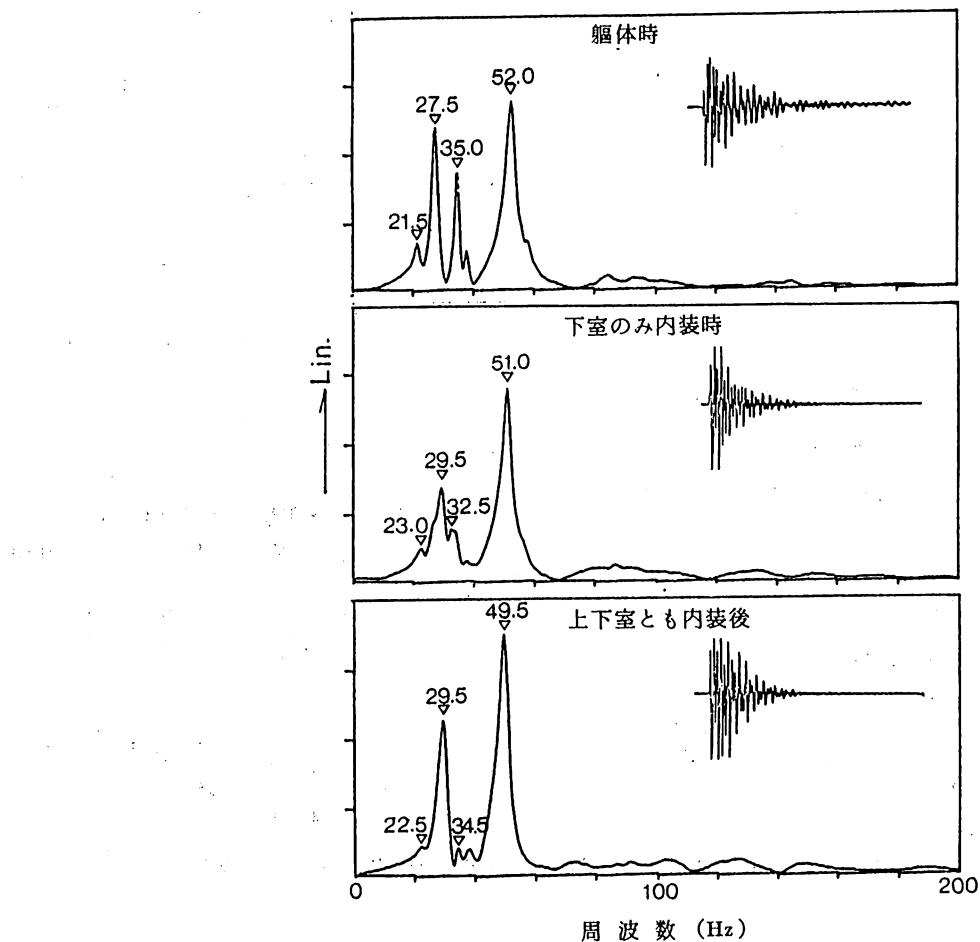


(b) 間仕切壁施工前後の固有振動モードの変化 [—●— 軀体時、---○--- 内装後]

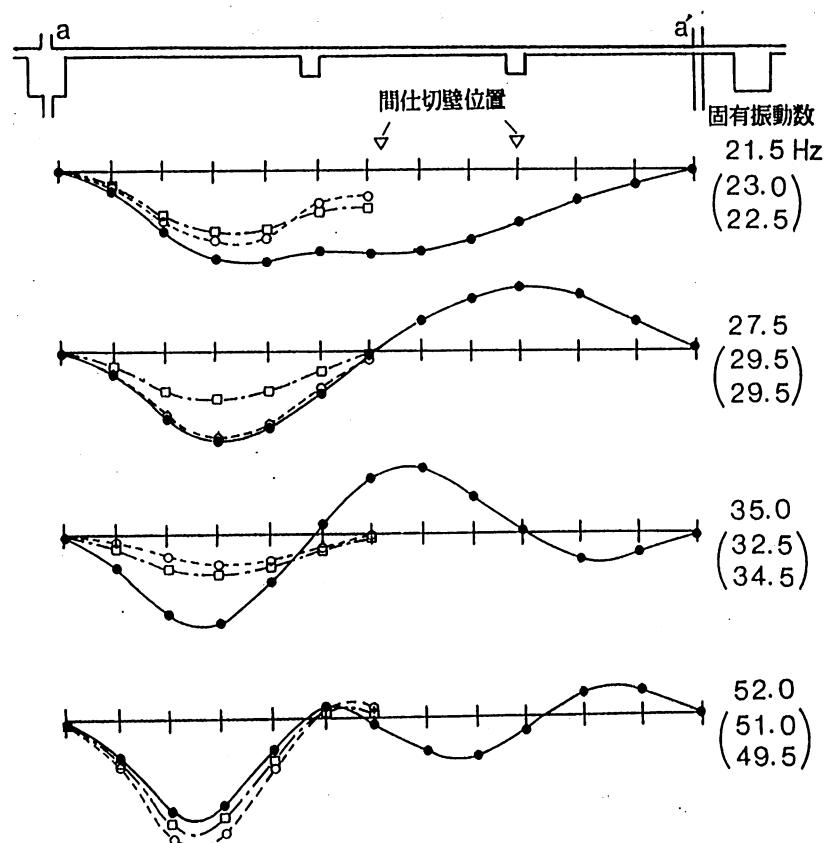


(c) タイヤ落下衝撃時の加速度振幅分布の変化 [—●— 軀体時、---○--- 内装後]

図-3.5 建物Bに関する測定結果



(a) タイヤ落下衝撃時のスペクトルおよび波形の変化



(b) 間仕切壁施工前後の固有振動モードの変化 [—●— 躯体時、---○--- 内装後]

図-3.6 建物Cに関する測定結果

変化している。このような条件下の床版を、間仕切壁の存在を無視して評価することは全くの不合理であり、かつ(b)のモード図からも明らかなように、このような大きな影響を持つ場合にも間仕切壁位置を拘束点として扱うことはできない。したがって、この影響を考慮するためには、間仕切壁を何らかの物理的条件として解析のなかに組み込むことが不可欠となる。(c)のオクターブバンド毎の振幅分布では、31.5Hzから125Hzまでの帯域において振幅、分布形ともかなり大幅に変化している。250Hz、500Hzの帯域になると殆ど変化がなくなり、間仕切壁の影響が無視できるようになる。(d)の版面平均した加速度レベルでみると、63Hzで 6dB、125Hzで 4dBの低下となっており、低音域で大きな差を生じることがわかる。なお、31.5Hzの場合には、各点での部分的な変化は大きいが、版面平均した値はあまり変化しない結果となっている。

(c) 建物Cの場合

当床構造の場合には間仕切壁の影響もかなり複雑である。間仕切壁の配置量は全体的にかなり多いと考えられるが、図-3.6(a), (b)のスペクトル図、振動モード図に示されるように振動数は殆ど変化していない。モード形は1次、3次のモードが大幅に変化し、2次、4次のモードでは大きな変化は見られない。これらの傾向は、床版の辺長比が大きいためモードが変化しやすいことや、小梁の存在により局所的に剛性が高い部分があることなどに依るものと考えられる。このような振動性状の変化を、実測面のみから定量的に追求してゆくことは困難であり、解析的な方法により評価を可能とする以外にないであろう。

下室のみ内装した場合の結果は、躯体時よりも内装後の結果に近くなっているが、何れの場合も加速度レベルの変化はあまり大きくない。

(d) 減衰性状の変化

3例の床構造に関する振動減衰特性の分析結果を図-3.7に示した。躯体時の振動減衰残響時間の周波数特性は $1/f$ の傾きに極め良く一致しており、各床構造間のバラツキも殆どない。これより式(3.1)の方法で減衰定数を求めると、周波数特性を持たない一定値となり、その値は約2%である。版厚や形状あるいは周辺の構造が大きく異なる床構造において、このように良く一致した結果が得られることは、床版の減衰機構を考える上で興味深い。

間仕切壁を設置した内装後の結果では、固有モードが卓越する31.5Hzにおいて減衰定数が2倍程度に大きくなり、周波数が高くなるにしたがいその変化が小さくなり、250Hz以上では殆ど変化が見られなくなる。この結果、内装後の周波数特性は、 $1/f$ と $1/\sqrt{f}$ の

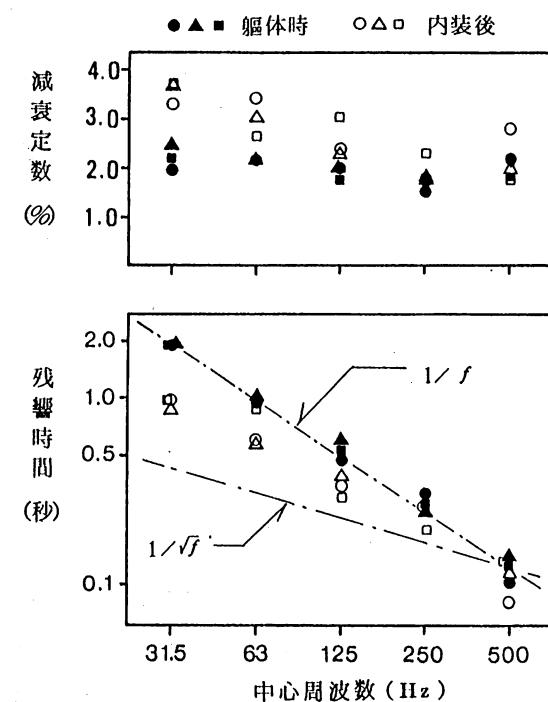


図-3.7 間仕切壁施工前後の床版振動減衰性状の変化

中間的な傾きとなる。内装後の場合にも、各床構造間の差は見られず、間仕切壁の配置量の多少に係わらずほぼ一定の変化を示している。このように躯体時と内装後では振動減衰性状に明らかに差が見られることから、今後のデーター蓄積や評価においても、この区別を明確にして進めることが不可欠である。

3) 測定結果のまとめ

床版の音響域振動の大きな特徴は、低次の個々の固有モード振動が卓越する周波数領域と、多数の高次のモードが重畳した拡散状態に近い振動場を呈する周波数領域を併せ持つことである。ここでは、これらを各々モード振動と拡散振動と呼ぶことにする。間仕切壁が床版の音響域振動に与える影響は、この2つの周波数領域によって大きく異なる。

まず、31.5Hz～125Hzのモード振動領域に関して、

- ・ 重量床衝撃音などを対象とした床版の音響域振動に関して、間仕切壁の影響を無視することはできず、基本的にこれを考慮しなければならない。すなわち、影響の有無の問題ではなく量の問題であると言える。影響の度合いは、間仕切壁の配置量、配置位置および床構造の条件等に依存する。
- ・ 間仕切壁の設置により床版には剛性増大効果が現れ、1次の固有振動数は上昇する。表-3.3に示すように当例では、その振動数の上昇比は5～60%であり、個々にかなりの差がある。
- ・ 床版振動の評価に関して、上述のように間仕切壁を無視できないが、拘束端とみなすこともできず、したがって床版全体を評価対象としなければならない。
- ・ 振動減衰は、間仕切壁の設置により大きくなり、1次の固有振動数領域では2倍近くになる。また減衰の変化に関しては、間仕切壁の配置量や位置の影響は殆ど見られない。

表-3.3 間仕切壁施工前後の固有振動変化の一覧

建物記号	振動数（上段：振動数(Hz)、下段：変化倍率）			
	1次モード	その他のモード		
A	29.5 → 33.5 1.14倍	53.5 → 52.0 0.97倍	—	
B	22.5 → 36.0 1.60倍	—	—	
C	21.5 → 22.5 1.05倍	27.5 → 29.5 1.07倍	35.0 → 34.5 0.99倍	52.0 → 49.5 0.95倍

一方、250Hz、500Hzの拡散振動領域に関しては、

- ・ 振動分布、版面平均加速度レベル、減衰などの各項目について、殆ど間仕切壁の影響は見られない。したがって、この周波数領域を対象とした固体音問題、例えば軽量床衝撃音などでは、間仕切壁の影響は無視できる。

これらの結果より、間仕切壁の影響を適正に評価し、精密な音響域振動の予測を可能とするためには、間仕切壁を定量の可能な何らかの物理量として表現し、解析方法の中に組み込むことが必要である。あるいは、最低限の対処として、間仕切壁の影響が大きいか、それとも無視し得る程度のものかを判定できる基準、方法が少なくとも必要である。

3.1.2 間仕切壁の物理量評価と解析的検討

床版振動に対する間仕切壁の影響を解析的に評価するため、これを定量可能な物理量として表すとの可否について検討する。実測調査結果では、間仕切壁の付加により床版に剛性増大効果が表れ、周波数が高くなるにしたがい、その影響が小さくなっている。これらの特性から、間仕切壁を一定の強さを持つバネ列として取り扱えることが考えられる。ここでは、この点を具体的に検討する。

1) バネ列が付加した時の床の固有振動数

床版にバネ列が付加した時の基礎的な検討として、固有振動数の変化を算出する。この場合のバネは、床版各点の回転変位成分には全く関係せず垂直変位のみに依存する並進バネとする。

(a) 単純支持板の場合

図-3.8に示す $a \times b$ の矩形板にバネ列が付加した場合の固有振動数をRayleighの方法⁴⁾により算出する。単純支持板において、境界条件に適合する(m, n)モードの固有関数を、

$$w(x, y) = \delta_0 \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (3.2)$$

とすると、振動時の運動エネルギーの最大値は、

$$T_{max} = \frac{1}{2} \rho h p^2 \iint w^2 dx dy \quad (3.3)$$

$$= \frac{1}{8} \rho h \delta_0^2 a b p^2 \quad (3.4)$$

ここで、 ρ ：密度 (kg/m^3) h ：版厚 (m) p ：角振動数 ($2\pi f$)

となる。一方、ひずみエネルギーの最大値は、まず床版に関して、

$$\begin{aligned} U_{max} &= \frac{D}{2} \iint \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right. \\ &\quad \left. + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$= \frac{D}{8} \delta_0^2 \left\{ \left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right\} a b \pi^4 \quad (3.6)$$

ここで、 D ：曲げ剛性 ($= E h^3 / 12(1-\nu^2)$) ν ：ポアソン比

となる。バネ列のひずみエネルギーに関しては、バネ付加後も固有モードの形状が変わらないと仮定すれば、単位長さ当たりのバネ定数を k (kg/m) とし、その存在部分(c)についてひずみエネルギーを線

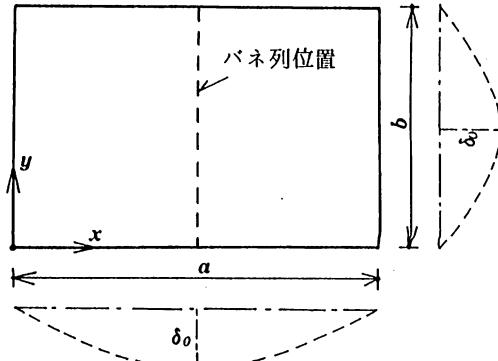


図-3.8 間仕切壁の付いた床版の計算条件

積分すれば良く、

$$U_{k, \max} = \frac{1}{2} k \int_c w^2 d r = \frac{1}{2} k \delta_0^2 W \quad (3.7)$$

となる。以上から、運動エネルギーとひずみエネルギーを等しいとおき、バネ列なしの時の固有振動数 $f_{s, 0}$ を基準として整理すると、

$$f_{s, k} = \sqrt{f_{s, 0}^2 + \frac{kW}{\pi^2 \rho h ab}} \quad (3.8)$$

となる。図-3.8について、仮に W を求めてみると、

$$W = \int_0^b \sin^2 \frac{m\pi}{2} \sin^2 \frac{n\pi y}{b} dy = \frac{b}{2} \quad (3.9)$$

となる。

(b) 周辺固定板の場合

この場合には1次モードのみを対象として、境界条件を満足する固有関数を、

$$w(x, y) = \delta \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a} \right) \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b} \right) \quad (3.10)$$

とおいて、同様の手順で計算すると、

$$T_{\max} = \frac{9ab}{8} p^2 \rho h \delta_0^2 \quad (3.11)$$

ひずみエネルギーに関しては

$$U_{\max} = \frac{ab}{8} (2\pi)^4 D \left\{ \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} \right) \right\} \delta_0^2 \quad (3.12)$$

$$U_{k, \max} = \frac{1}{2} k \int_c w'^2 d r = \frac{1}{2} k \delta_0^2 W' \quad (3.13)$$

となり、式(3.8)と同様に、バネのない時の振動数を基準に示すと、

$$f_{c, k} = \sqrt{f_{c, 0}^2 + \frac{kW'}{9\pi^2 \rho h ab}} \quad (3.14)$$

となる。 $f_{c, k}, f_{c, 0}$ は各々、バネ列有り、バネ列なしの時の固有振動数である。図-3.8について同様に W' を計算してみると、

$$W' = \int_0^b \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a} \right)^2 \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b} \right)^2 dy = 6b \quad (3.15)$$

となる。

(c) バネ列の効果とバネ定数

式(3.8)において、モード数 (m, n) が高次になった場合、床版の固有振動数 $f_{s, 0}$ はこれに応じて大

きくなるが、Wの値はほぼ一定であるから、高次モードほどバネ列の効果は小さくなる。これは実測結果の傾向と定性的に一致し、間仕切壁をバネ列として扱うことの基本的根拠となる。式(3.8), (3.14)を用いて間仕切壁が実際にどの程度のバネ定数に相当するかを、建物Aに関して試算してみると、図-3.9のようになる。すなわち、29.5Hzから33.5Hzへの1次の固有振動数の変化より、

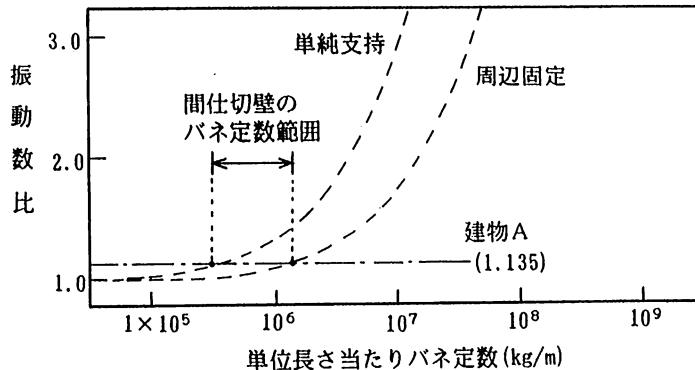


図-3.9 間仕切壁のバネ定数の固有振動数への影響 [建物A]

$$\text{単純支持の場合} \quad \text{単位長さ当たり } k = 0.5 \times 10^6 \text{ (kg/m)}$$

$$\text{周辺固定の場合} \quad " \quad k = 1.6 \times 10^6 \text{ (kg/m)}$$

となる。間仕切壁の付加により床版の固有振動数が上昇するのは、間仕切壁と床版のバネ定数が近いためであるが、このために床版の振動は間仕切壁の条件に大きく影響されることになる。したがって、間仕切のバネ定数の値も概略的なものでなく、かなり精度の良い値でないと物理量化のメリットが失われることになり、詳細な検討が必要となる。

2) バネ列付加によるモード変化を考慮した場合

間仕切壁のバネ定数に関する上記の検討は、バネ列が付加しても振動モード形が変化しないという仮定を用いた概略的なものである。ここでは、モード変化を含めた詳細な検討を有限要素法を用いて行い、バネ定数の値とその影響について評価した。有限要素法プログラムは、第2章で開発した面内・面外変位連成型であり、固有値解析は先に示したようにサブスペース法、応答解析はウイルソンのθ法を用いている。

(a) バネ定数の検討

建物Aは構造的に最も単純（壁式構造、平板スラブ）であり、間仕切壁の配置も明解であることから検討モデルとして適している。図-3.10に建物AのFEM解析モデルを示したが、これを用いて間仕切壁のバネ定数の値を特定し、その性状を検討する。

間仕切壁を評価するためには、その前提として躯体時の床版自体の条件が明確でなくてはならない。そこで躯体時の実測値との適合度を高めるため、図-3.

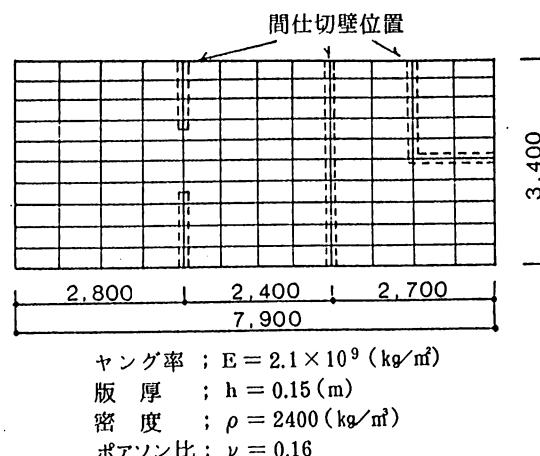


図-3.10 FEM解析モデルと解析条件 [建物A]

10の解析モデルの境界部に回転バネを付加し、単純支持と周辺固定の中間的な拘束条件を再現した。回転バネの値は、実測結果に合うように試行錯誤的に決定した。解析結果の固有振動数を表-3.4に、1次の固有振動モードの比較を図-3.11に示した。解析モデルが適正か否かの判定では、各次数の固有振動数間の振動数比がおよび振動モード形の一一致度が重要である。すなわち、各次数の振動数は長辺と短辺の影響の度合いを示すものであり、例えば表-3.4の単純支持の結果では、3次、5次、となるほど実測値の振動数比より大きくなることから、長辺の拘束の度合いが短辺より低いことがわかる。当採用モデルでは、振動数比、振動モードとも良く一致しており、間仕切壁検討用のモデルとして適正であると言える。

躯体時の解析モデルに対して、間仕切壁の位置に種々の大きさのバネ定数を付加した時の固有振動数および固有モードの変化を図-3.12、図-3.13に示した。当床版の1次固有振動数については、バネ定数の値が 10^5 程度より振動数の上昇が見られ、 10^8 以上ではバネの位置がほぼ拘束端となり、そのため固有振動数、固有モードともこれ以上変化しなくなる。間仕切壁施工後の実測モードに近い結果となるのは、単位長さ当たりのバネ定数が 2×10^6 (kg/m)の時であり、この時の固有振動数は表-3.5の通りであり、ほぼ妥当な値となっている。3次の固有モードに関しては、このバネ定数では実測モードに較べて影響が若干小さくなっている。床版の振動モードにあわせて間仕切壁が面内変形すると考えるならば、間仕切壁のバネ定数もモード次数が高くなるに応じて大きくなることになり、今後、周波数特性を持たせたバネ定数を検討することも有効であると考えられる。しかし実用的には、周波数が一定周波数より高くなればバネの効果が無視しえることから、1次モードにおいて適合性の良い値を用いれば、その値が過大でない限り解析結果の近似化に寄与できる。図-3.14には重量衝撃時の床振動加速度レベル応答解析結果の比較を示した。概ね良く一致した結果が得られているが、躯体時と内装後の差は微少であり、したがってこの結果からは一致の程度は明確ではない。

以上の結果より、間仕切壁の影響を解析的に評価

表-3.4 固有値解析結果の比較と採用モデルの条件

内 容	固 有 振 動 数 (Hz)		
	(1, 1) モード	(1, 3) モード	(1, 5) モード
実 測 値	29.5	53.5(1.81)	104.0(3.53)
計 算 値	20.6 単純支持 採用モデル 周辺固定	46.5(2.26) 29.6 54.5(1.84) 42.7	98.3(4.77) 107.7(3.64) 129.1(3.02)

*モード次数の並びは、(短辺次数、長辺次数)
*()内の数値は、(1, 1)モードに対する倍率

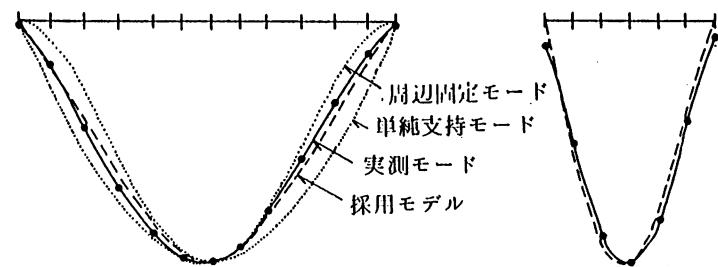


図-3.11 躯体時の固有振動モードの比較

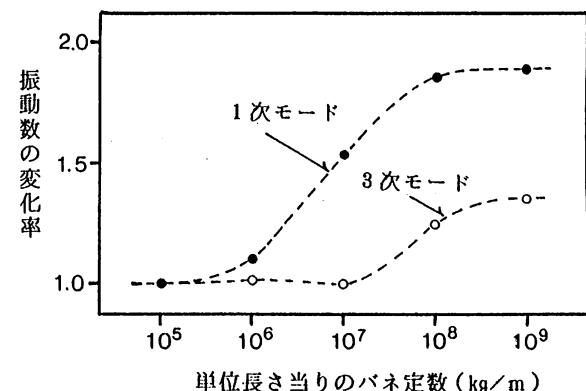


図-3.12 間仕切壁のバネ定数の変化による固有振動数の変化

表-3.5 バネ定数 $k = 2.0 \times 10^6$ (kg/m) の時の固有振動数の変化

内容	固有振動数 (Hz)	
	1次モード	3次モード
実測値	29.5 → 33.5	53.5 → 52.0
解析値	29.6 → 35.0	54.5 → 57.0

する方法として、間仕切壁部分を単位長さ当たり 2×10^6 (kg/m) の並進バネ列置換して計算することが可能である。なお、このバネ定数の値はさきの概略検討の結果とも近い値となっている。

(b) バネ定数検討結果の建物Bへの適用例

建物Bは、床構造、間仕切壁の配置ともかなり複雑であり、間仕切壁の床振動への影響も大きい物件である。この床構造に上記のバネ定数を適用した結果を示す。解析モデルは図-3.15に示す通りであり、間取りに合わせて間仕切壁のバネ列を配置した。バネ定数その他の計算条件は床Aの場合と同じである。

固有値解析の結果を表-3.6、図-3.16に示した。全体的に良く一致していると言えるが、固

有振動数の変化倍率がやや小さめである反面、振動モードではバネがややききすぎの形となっており、相反した結果も見られる。当例の場合、実測固有振動数の変化倍率が示すように、間仕切壁全体のバネ定数が床構造のそれよりかなり大きくなっていることから、間仕切壁のバネ定数の変化が結果に大きく影響する形となる。また実際には、間仕切壁自体の構造・仕様にもかなりの差があると考えられる。これらの誤差要因の存在にも拘らず、バネ列の付加は明らかに解析結果の精度向上に寄与しており、実用的に有用な方法であると言えよう。図-3.17は重量床衝撃による応答解析結果（解析方法の詳細は、後述の5章を参照）であるが、31.5Hz帯域で振幅が大きくなり63Hzで減少する傾向や、

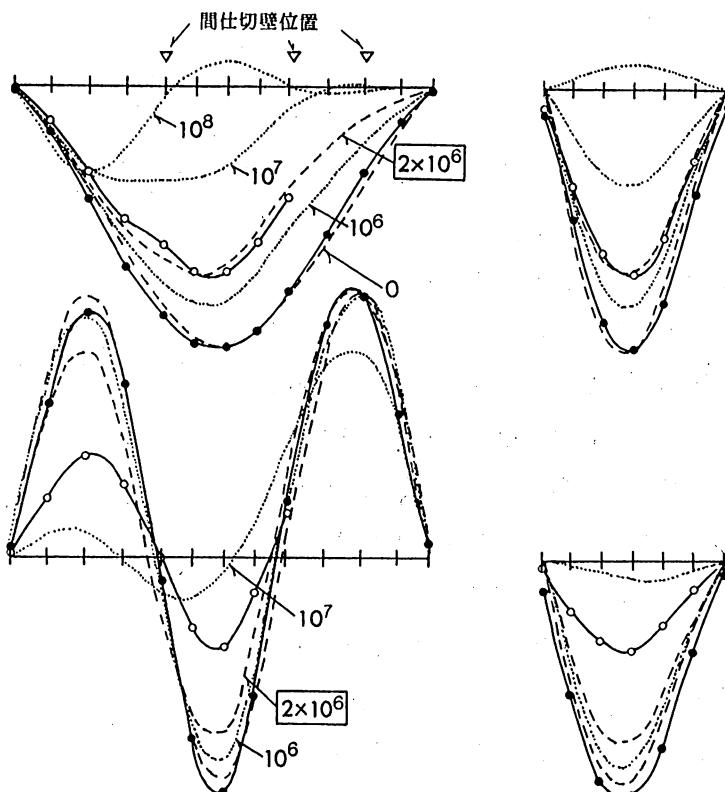


図-3.13 間仕切壁のバネ定数の変化による固有振動モードの変化

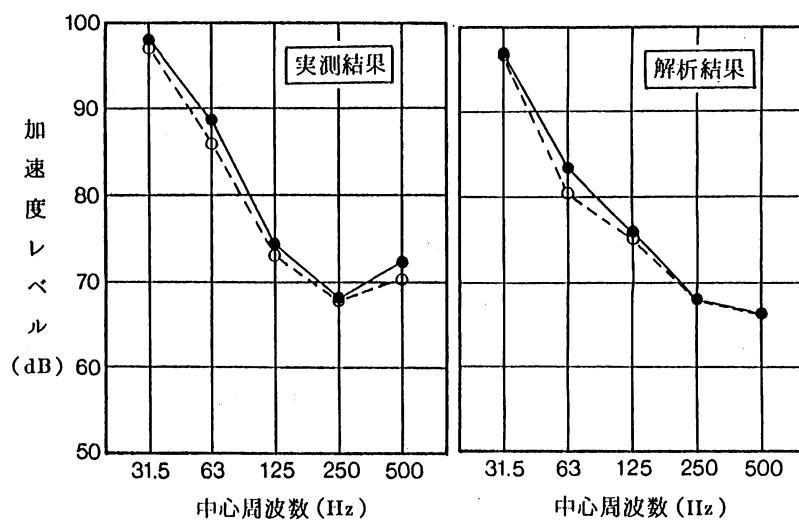


図-3.14 タイヤ落下衝撃時の応答加速度レベルの変化（衝撃点）
[—●— 躯体時, ---○--- 内装後]

表-3.6 間仕切壁による固有振動数変化の比較

内 容	固有振動数 (Hz)		
	躯体時	内装後	変化倍率
実測結果	22.5	36.0	1.60倍
解析結果	18.8	27.4	1.46倍

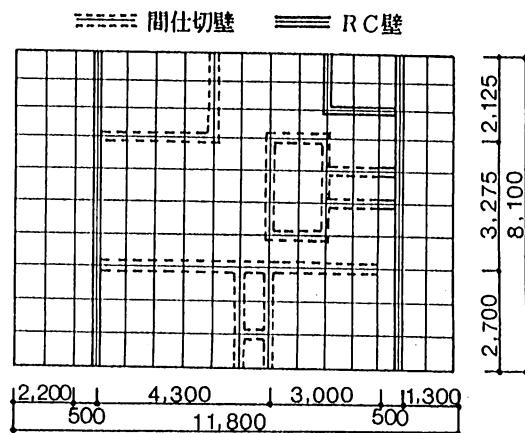


図-3.15 FEM解析モデルと間仕切壁の配置

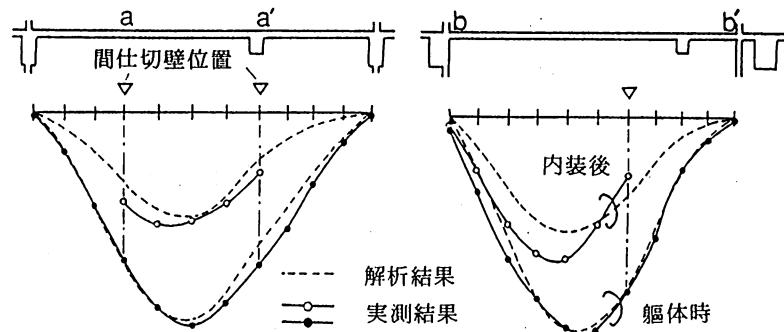


図-3.16 間仕切壁による固有振動モード変化の比較

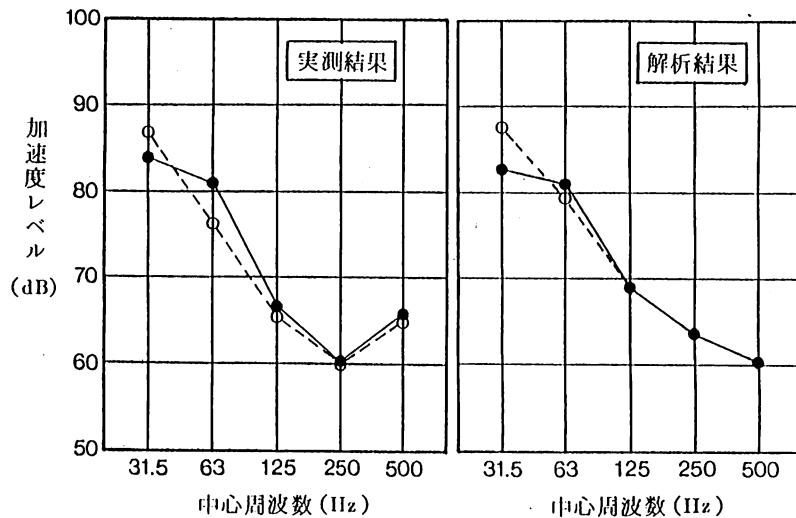


図-3.17 タイヤ落下衝撃時の応答解析結果の比較 [—●— 躯体時、---○--- 内装後]

250Hz、500Hzでは殆ど変化しないほどの定性的特徴を良く表現できている。

以上の結果をまとめると次の通りである。

- 重量床衝撃音などを対象とした建築物床版の音響域振動評価において、基本的に間仕切壁の影響を無視することはできない。
- その影響の度合いは、間仕切壁の配置量や配置位置により変化するため、実測データの蓄積により評価を進めることは困難であり、この条件を解析方法のなかに組み入れる必要がある。

- この方法として、間仕切壁を一定のバネ定数を有する並進バネ列として取り扱うことが可能であり、集合住宅の一般的な間仕切壁の場合には単位長さ当たり 2×10^6 (kg/m) のバネ定数が妥当な値となる。

3) 間仕切壁の影響検討用計算図表

間仕切壁の影響の程度を予備的にチェックするためには、3.1.2章の1)で示した固有振動数の変化を計算するのが簡便であり、これを手軽に行えるように計算図表を作成した。単純支持と周辺固定の場合の式を一つにして、計算式を再掲すると、

$$f_k = \sqrt{f_0^2 + \frac{kW}{\pi^2 \rho h l_x l_y}} \quad (3.16)$$

となる。 k のバネ定数の値は、本来 2×10^6 の値と考えられるが、実際にはある程度のモード変化による緩和があり、この分の誤差を考慮して、

$$k = 1.5 \times 10^6 \text{ (kg/m)}$$

を実用値として用いる。 w の計算は図-3.19(a), (b) の計算図表より算出する。この図表は間仕切壁の数が多い場合にはとくに便利である。ただし実際の振動モード形が、単純支持のモード形および周辺固定のモード形と大幅に異なる場合には、この方法を適用することはできない。重量床衝撃音などの固体音の検討に関しては、この結果として得られる固有振動数の変化を版厚変化に換算して評価したり、あるいは文献5)の例のように固有振動数と振動振幅との関係を利用して、定量的に評価を行うことも可能である。

<計算例>

計算図表の使用法の説明のため、図-3.18に示す床構造に関して、間仕切壁が設置された場合の固有振動数を計算する。計算図表の横軸は間仕切壁の位置を、縦軸はその存在長さを表している。単純支持の場合を例として示すと、まず間仕切壁①については、間仕切壁の位置が $0.4 l_x$ であり、壁はA点～B点の間に存在する。B点の値(0.45)からA点の値(0)を引き、この値にy方向のスパン長($l_y = 4m$)を掛けると $W_1 = 1.8$ となる。壁②は対称性により壁①と全く同じであり $W_2 = 1.8$ である。壁③については、壁の位置が $0.5 l_x$ であり、E点～F点の間に存在する。したがってF点の値(0.34)からE点の値(0.15)を引き、x方向のスパン長($l_x = 6m$)をかけば $W_3 = 1.14$ となる。これらをすべて合わせると、 $W = W_1 + W_2 + W_3 = 4.74$ となる。周辺固定の場合も含めてまとめると、表-3.7の通りとなる。この結果より、周辺固定の場合の振動数の変化を求めてみると、床版のみの場合の固有振動数は

ヤング率 ; $E = 2.1 \times 10^9$ (kg/m²)

版厚 ; $h = 0.15$ (m)

密度 ; $\rho = 2400$ (kg/m³)

ポアソン比 ; $\nu = 0.16$

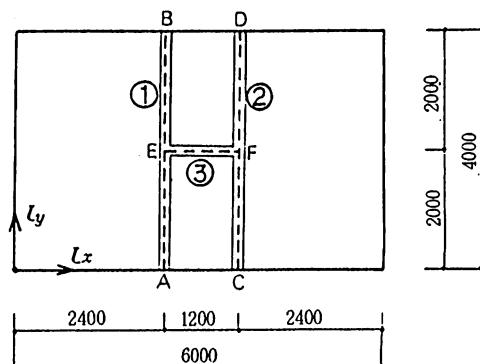
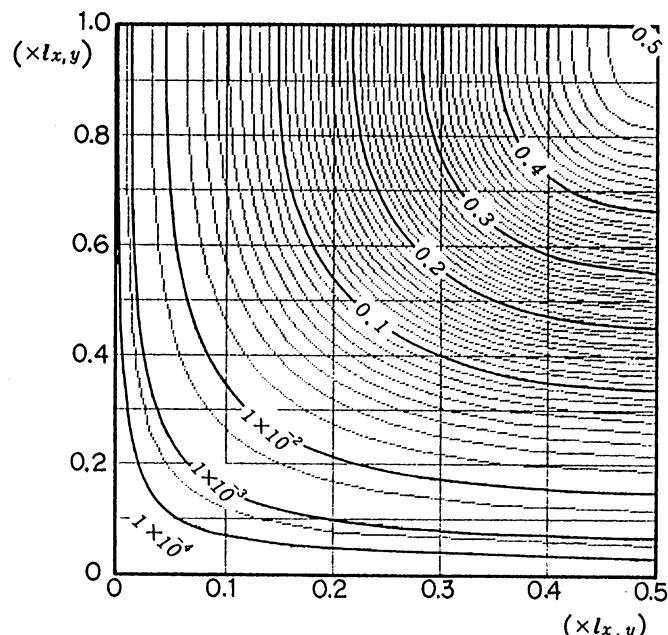


図-3.18 間仕切壁の影響についての計算モデル

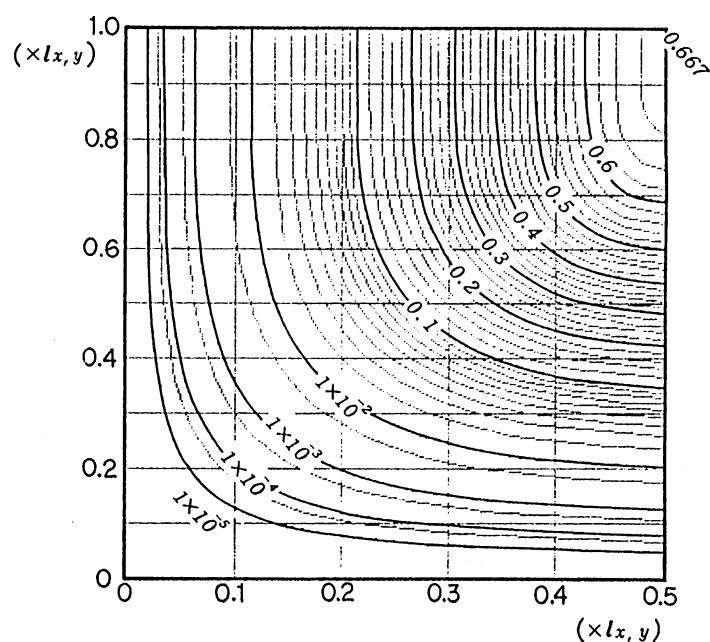
表一3.7 計算図表による計算結果

	Y方向 ($l_y=4m$)		ΣW_y	X方向 ($l_x=6m$)	ΣW_x	W
	壁1	壁2		壁3		
単純支持	0.45	0.45	3.60	0.34-0.15	1.14	4.74
周辺固定	0.54	0.54	4.32	0.50-0.17	1.98	6.30

$f_0 = 35.6(\text{Hz})$ 、間仕切壁が付いた後は $f_k = 48.5(\text{Hz})$ と、振動数が1.36倍に上昇する結果となる。



図一3.19(a) 計算図表（単純支持板用）



図一3.19(b) 計算図表（周辺固定板用）

3.2 天井の影響に関する評価

間仕切壁と天井の影響を比較すると、表-3.8のようにまとめられる。これら2つは、内容が互いに逆になる点で、良く対応した要因であるといえる。床版の音響域振動に関しては、間仕切壁の影響は直接的であり、かつ全体的であるといえ、天井の影響は間接的で局部的であると言える。したがって、天井の影響の評価は間仕切壁ほど複雑にはならず、実測結果の蓄積でほぼ対応が可能と考えられる。

表-3.8 間仕切壁と天井の比較

内 容	間仕切壁	天 井
固体音への影響	床版全体の振動特性に関係	区切られた室の音響放射に関係
影響する周波数帯域	主に低周波数域	主に中・高周波数域
解析への組み込み	並進バネとして扱える	—
その他	放射体としての影響は、ほぼ無視できる	床版への付加質量としての影響はほぼ無視できる

図-3.21は、図-3.20に示すRCプレハブ住宅において、既存の天井がある場合と、それを撤去した後の両方で重量床衝撃音を測定した結果の比較である。この場合125Hz以下では性能は殆ど変化しておらず、250Hz以上から天井による

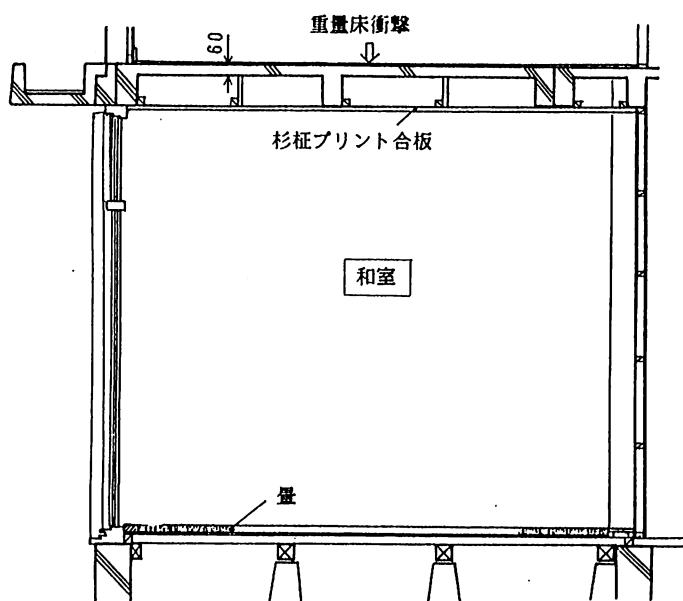


図-3.20 測定住戸 (RC造PC住宅)

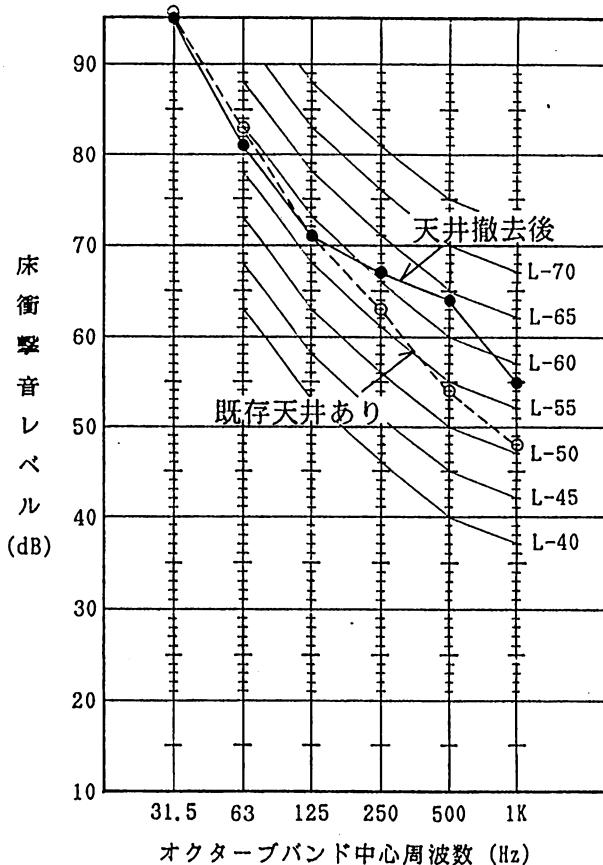


図-3.21 重量床衝撃音に対する天井有無の影響

減音効果が現れており、250Hzで-4dB、500Hzで-10dBとなっている。この傾向は、防振天井などの特殊なものと除いた一般的なボード天井に共通するものであり、毛見ら⁶⁾や吉田ら⁷⁾の報告でもほぼ同様の結果となっている。

天井の条件の一つとして、天井懐の大きさがある。天井の働きが遮音的な機構によるものならば、この天井懐の空気層の大きさが関係することも考えられる。これに対しても確定的な研究報告は見あたらないが、

5.4.1章に示す実測結果は一つの参考例となる。これは、小梁のない大型床版（アンボンド工法）の重量床衝撃音の実測例であり、同一の床構造条件（ただし柱の寸法は若干異なる）で同一の間取りとなる3階住戸と11階住戸で測定を行っている。11階に較べて3階住戸の方が天井懐が大きくなってしまい、表-3.9は各室の11階と3階との差を一覧表にまとめたものである（11階を基準としている）。

また表-3.10は、同じく両住戸における直天の部屋での測定結果の比較である。これらをみると、天井懐の大きさに関する明確な差は見られず、また差自体も殆ど誤差範囲程度の値となっている。

これらの、結果を総合すると、重量床衝撃音などの低音域での検討を主とするものでは、通常のボード天井の影響は考慮する必要は殆どないと考えられる。ただし、防振天井やその他の特殊な天井に関しては、別途検討が必要である。

表-3.9 重量床衝撃音に対する天井懐の影響

No.	天井懐(mm)		中心周波数(Hz)				
	3.F	11.F	31.5	63	125	250	500
1	210	85	4	1	-2	-2	0
2	355	230	1	-2	3	3	1
3	210	85	-3	2	-1	-2	-1
4	190	65	2	0	-2	-3	-2
5	335	210	2	0	1	1	0
6	190	65	1	-1	0	2	5
7	170	45	2	-1	-2	-1	0
8	315	190	-	-	0	0	0

単位(dB)

表-3.10 直天の場合の3F,11Fでの測定値の差

No.	中心周波数(Hz)				
	31.5	63	125	250	500
1	-2	0	-1	2	0
2	2	2	2	-1	0
3	1	2	1	0	0
4	1	4	1	2	2
5	-1	2	1	2	1
6	-	3	-1	2	1
7	-	1	-1	2	0

単位(dB)

3.3章 床版振動の境界条件に関する検討

ある対象に関して振動解析を行う場合、振動エネルギーは対象とする領域から周囲の無限領域に伝搬してゆくことになることから、厳密には無限の領域を解析対象として取り扱わなければならないことになる。しかし当然ながらこれは困難であり、全体の領域の中から、振動的に影響のあると見なされる部分を切り出して解析することになり、これは床版の振動解析においても同様である。境界要素法などでは、無限領域を取り扱える場合もあるが、これも極めて特殊で典型的な場合に限られ、実際の解析対象では何らかの条件の切り捨てが行われることになる。これらの境界条件問題は、単に床版の振動だけでなく、波動問題すべてに係わる極めて大きな問題である。

この境界条件の処理方法としては、無反射境界を考慮する方法^{8), 9), 10)}などが解析的に検討されているが、最も基本的なことは、境界部の条件の変化が評価対象部分にどの程度の、あるいはどの様な振動的影響を与えるかを明確にすることである。しかし、この評価を各種の現場測定により行う場合には、統一的なデーターを得ることは困難となる。したがって、ここでは縮尺模型を用いて実験を行い、R C 造集合住宅を想定した床構造に関して、周辺の形態条件がどの程度の影響を持つかを検討した。実験方法は、製作した模型の各部を徐々に切除してゆき、各段階で振動測定を行いその影響を評価するというものである。この方法によれば、模型製作等の不安定な要因を除去でき、かつ各部の影響に関する統一的なデーター収集が可能である。

3.3.1 模型実験の相似則¹¹⁾

模型実験の方法としては、模型材料の材質を変える方法と周波数を変える方法とがある。ここでは、実際の床構造の変化を再現するため、後者の方法、すなわち実際の材料と物性が同じ材料を用い、縮尺を変える方法を採用している。この時の縮尺比を

$$l_m = \frac{1}{n} l_r \quad (m; \text{模型}, r; \text{原型を示す}) \quad (3.17)$$

ただし $E_m = E_r$, $\rho_m = \rho_r$ (E ; ヤング率, ρ ; 密度)

とすると、実物と模型に関して各々以下のような関係が得られる。

- 1) 周波数 $f_m = n f_r$
- 2) 縦波伝搬速度 $c_L = \sqrt{E / \rho (1 - \nu^2)}$ より $c_{L, m} = c_{L, r}$
- 3) 曲げ波の伝搬速度 $c_B = \sqrt{\pi c_L h f / \sqrt{3}}$ より $c_{B, m} = c_{B, r}$

この場合には、2)と3)の関係により、模型に置いても c_L と c_B の相対的な関係は原型同様に確保されることになる。

3.3.2 境界条件に関する模型実験

a) 実験用縮尺模型

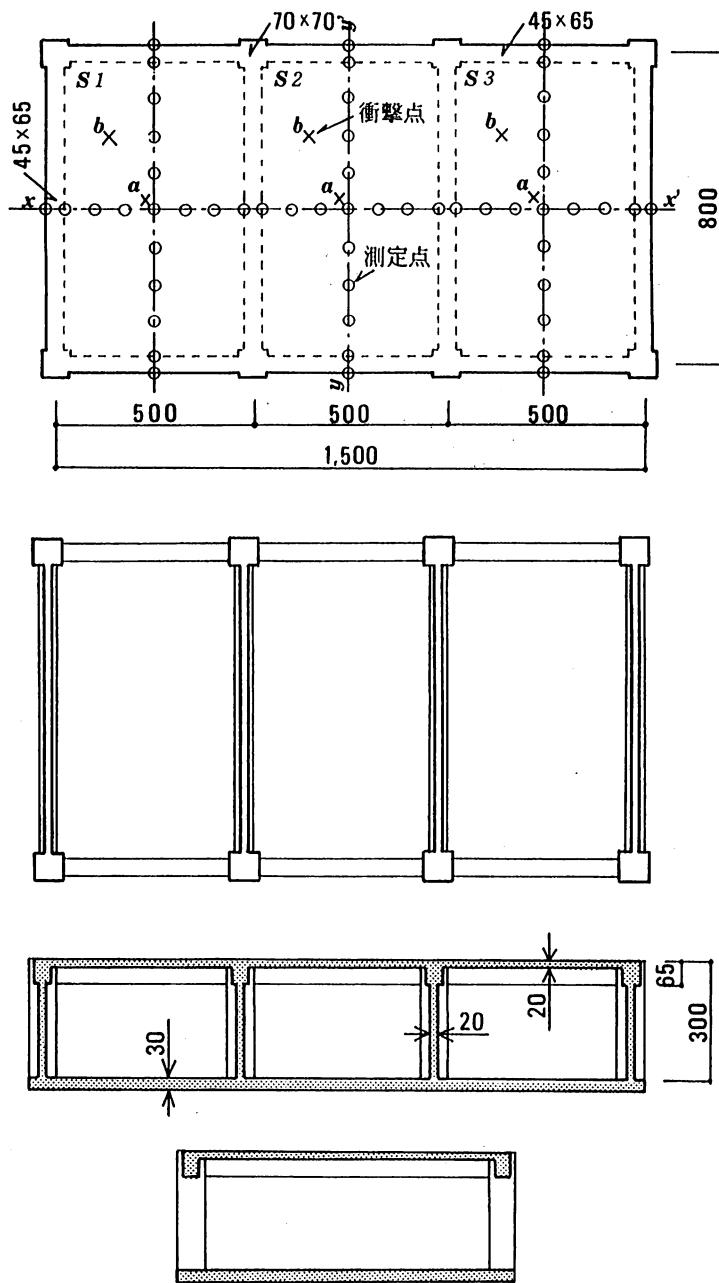


図-3.22 縮尺模型の寸法と形状

実験用縮尺模型は、図-3.22に示す1層3スパンの床構造であり、スパン方向（長辺方向）には壁があり、桁行き方向（短辺方向）の壁部分は開放となっている。模型の縮尺は1/10である。床版の条件は、S1からS3まで同一であり、寸法は実物換算で5m×8m、版厚は200mmとなる。模型寸法は図の通りである。使用材料は表-3.11に示すように、コンクリート部分はモルタルを用い、鉄筋に関してはクリンプ金網を四角に折り曲げたものを用いた。また、床版部分および壁部分の配筋は、亀甲金網にて代用した。柱、梁部の配筋状態は図-3.24の通りであり、この時の梁部の鉄筋量を実物と比較すると、表-3.13となり、模型の鉄筋量は実物に較べて

表-3.11 使用模型材料

モルタル	W/C 34% , 砂 0.6mm以下
柱、梁筋	クリンプ金網（線径1.0mm , 網目8mm）
床、壁筋	亀甲金網（// 0.55mm , // 16mm）

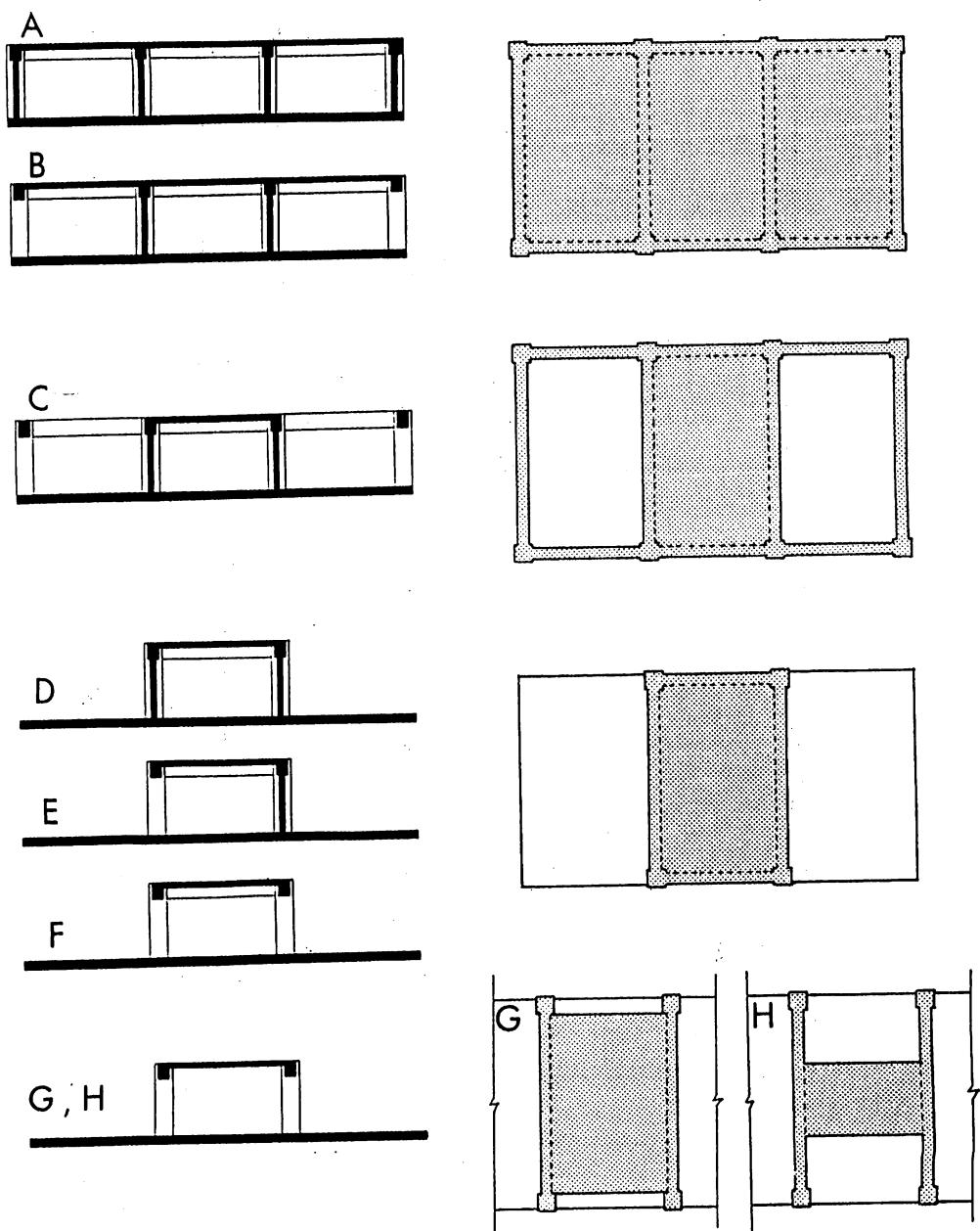


図-3.23 各試験体条件の形状

表-3.12 試験体条件説明表

試験体記号	形態条件
A	基本状態（1層3スパン）
B	Aより両端の壁を切除
C	Bより隣接床の版部を切除（梁あり）
D	Cより梁部も切除、床版S 2のみ
E	Dより片側壁を切除
F	Eより残りの壁も切除、柱あり
G	Fより短辺の梁2本を切除
H	床版の一部を切除、1方向梁に相当

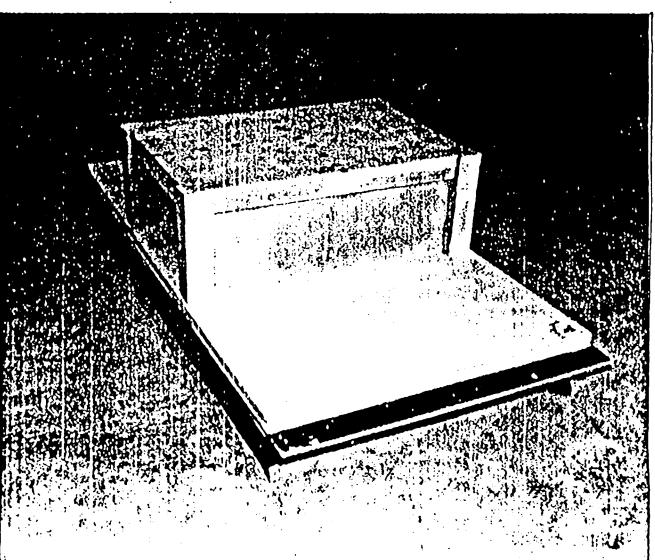
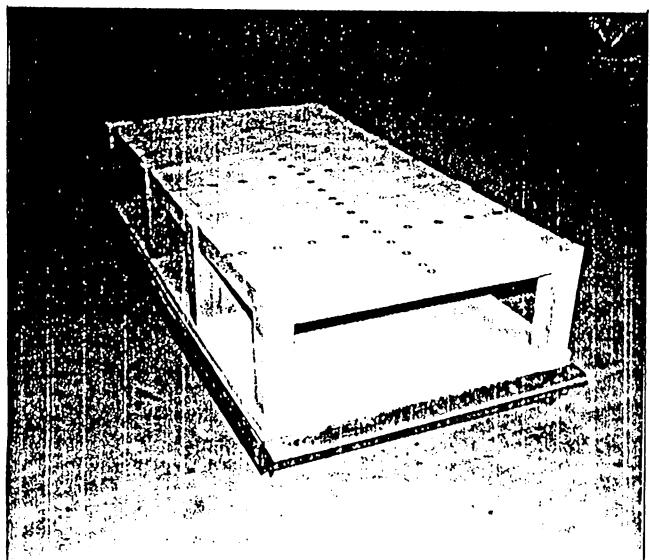
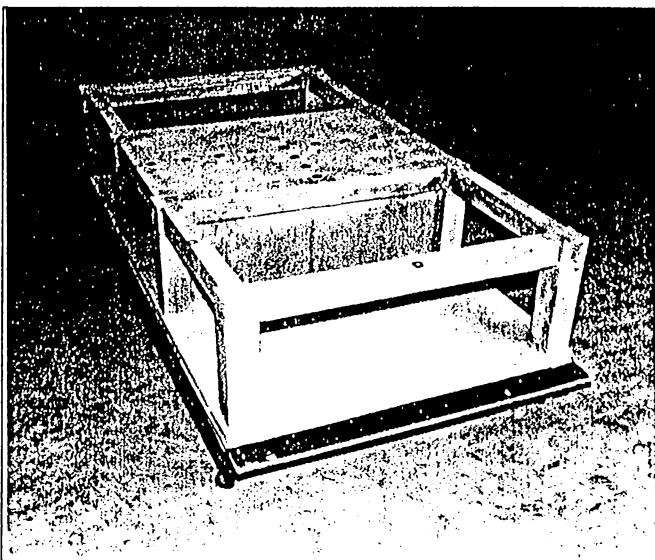
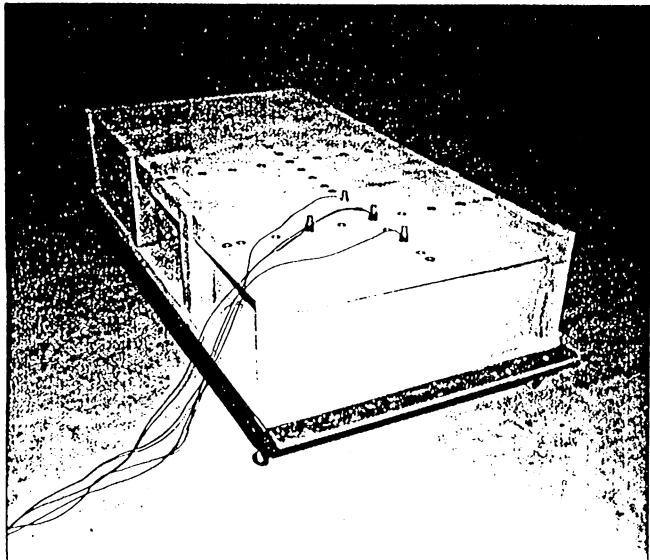
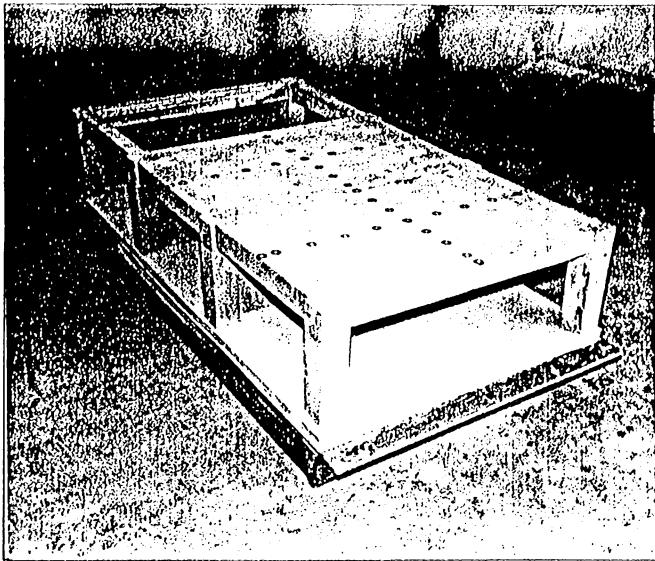
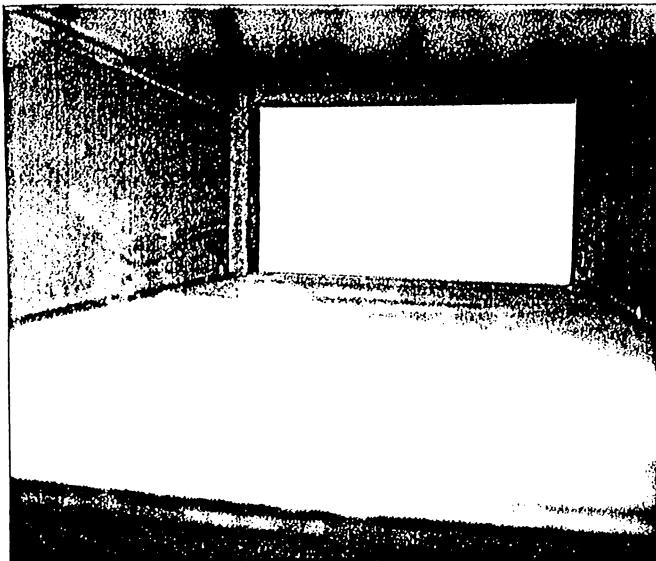


写真-3.1 各試験体の形状と測定状況

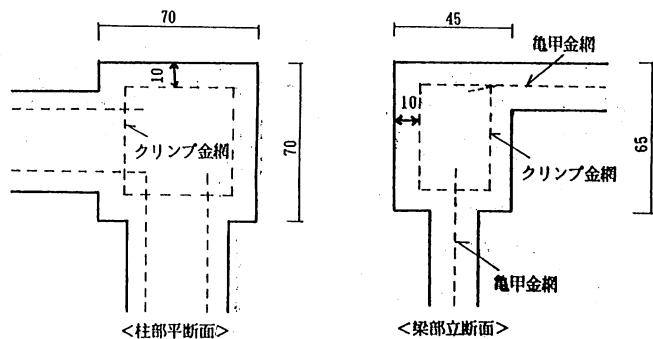


図-3.24 柱、梁部の構造

半分程度となっている。

実験では、製作した試験体の各部をダイヤモンドカッターで切除してゆき、その各段階での振動測定により、各部分の振動性状に対する影響を評価した。切除の順序および各段階での試験体の状態を示すと図-3.23、表-3.12、写真-3.1の通りである。切除作業時には、打撃等は一切加えておらず、他の部分の損傷も全く見られなかった。

b) 振動試験方法

音響域振動測定は、野球用軟球を自由落下させて実施した。相対的な変化を追跡するのが目的であるため、加振源は過大でない限りどんなものでもよいが、ここでは一応重量床衝撃音の模型実験に近い状態を想定した。衝撃力の比較は表-3.14の通りである。落下高さは、衝撃力の安定性などを考慮して45cmとした。

表-3.14 衝撃力の比較¹²⁾

衝撃源	重 量 (kg)	反発 係数	衝撃時間 (ms)	落下高 (m)	衝突速度 (m/s)	ピーク 衝撃力 (N)
野球用 軟球	0.134	0.8	2.9	0.45	2.97	388
重量床 衝撃源	7.3	0.8	21	0.8	3.96	3890

測定系統および機器等はこれまでと同様であり、衝撃時の固有振動モード、床版面の加速度振幅分布、および振動減衰の残響時間を測定している。この時のサンプリング条件は、表-3.15の通りである。

3.3.3 測定結果

衝撃試験の信頼性確認のため、まず加速度振幅算出結果のバラツキを検討した。これらの結果より、測定 c h間に差がないこと、周波数が高くなるにしたがい、測定値のバラツキが大きくなる傾向を確認している。この時の各周波数毎の90%信頼区間の算出結果は表-3.16のとおりである。

a) 材料・物理試験結果

使用したモルタルの材料試験結果、およびその動的物性試験の方法と結果について示す。実験用模

表-3.13 模型と実物の鉄筋比の比較

内 容	重 量 比	容 積 比
実物建物	7.1	2.2
縮尺模型	3.1	0.94

型の壁打設時と梁・床打設時のモルタルの材料試験結果は表-3.17に示している。試験方法は通常のアムスラー加力試験である。壁用のモルタルは、幅20mmの壁型枠の間に隙間なく充填させるために、混和材を使用している。床の場合には、ブリージングを抑えるため硬めのモルタルとしている。

一方、動的材料試験方法としては次の方法を採用了。両端自由梁の固有振動モードの節に相当する位置でモルタル板を支持し、F E Mの解析結果との比較により動的ヤング率を同定した。固有モードの一致度は図-3.25の通りであり、極めて良く一致し十分な結果となっている。試験体数は7体であり、これらの測定結果を静的材料試験結果と併せて表-3.17に示している。動弾性係数は静弾性係数の1.2~1.3倍となっている。

b) 衝撃応答スペクトル、固有振動モードの変化

各条件下での音響域振動測定結果について示す。図-3.26は、衝撃加振時のS 2スラブ中央点でのスペクトルの変化をまとめて示したものである。スペクトルすなわち固有振動数の構成が、僅かな条件変化によってもかなり大きく変化する様子が示されている。とくに条件Aから、1スパン離れた長辺方向の壁を取り除いた条件Bへの変化でも、固有振動数がかなり低下しており、スペクトルも変化している。

図-3.26に示されている各試験体の卓越スペクトルの中から、モード系の関連が明確であり、変化の追跡が可能である特徴的なモードを2つ抽出し、これを図-3.27に示した。aのモードは、床版S 2の端部が回転している単純支持のモードであり、bのモードは回転のない両端固定モードである。これを壁について考

えれば、aのモードは壁が曲げ変形している状態であり、bは壁の変形がない状態である。したがって、通常のRCスラブではaのモードの発現は極めて微少であり、bの周辺固定モードが一般的なモードであると考えられる。この2つの固有振動モードと固有振動数の変化を図-3.28、図-3.29に示

表-3.16 模型実験測定値の信頼区間

内 容	中 心 周 波 数 (Hz)					
	160	315	630	1250	2500	5000
平均値 (dB)	109.6	110.6	102.7	103.1	100.1	92.2
標準偏差 (dB)	0.27	0.45	0.46	0.66	1.16	1.71
90%信頼限界 (dB)	±0.44	±0.76	±0.76	±1.09	±1.91	±2.82
差の90%信頼限界	±0.62	±1.06	±1.07	±1.54	±2.69	±3.98

表-3.17 試験体物性の測定結果

内 容	範 囲	平 均 値
板厚 (mm)	17.8~21.6	20.1
密 度	2.19~2.34	2.26
動弾性係数 (kg/m^2)	$2.79 \sim 3.07 \times 10^9$	2.94×10^9
ボアソン比	0.16~0.19	0.17
静弾性係数 (kg/m^2)	壁 $1.7 \sim 2.0 \times 10^9$ 梁、床 $2.2 \sim 2.3 \times 10^9$	2.0×10^9 2.3×10^9

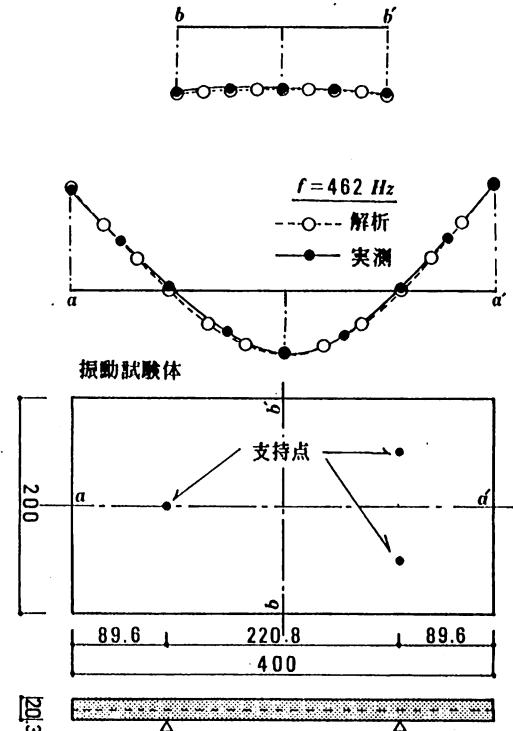


図-3.25 動弾性係数試験方法と振動モード

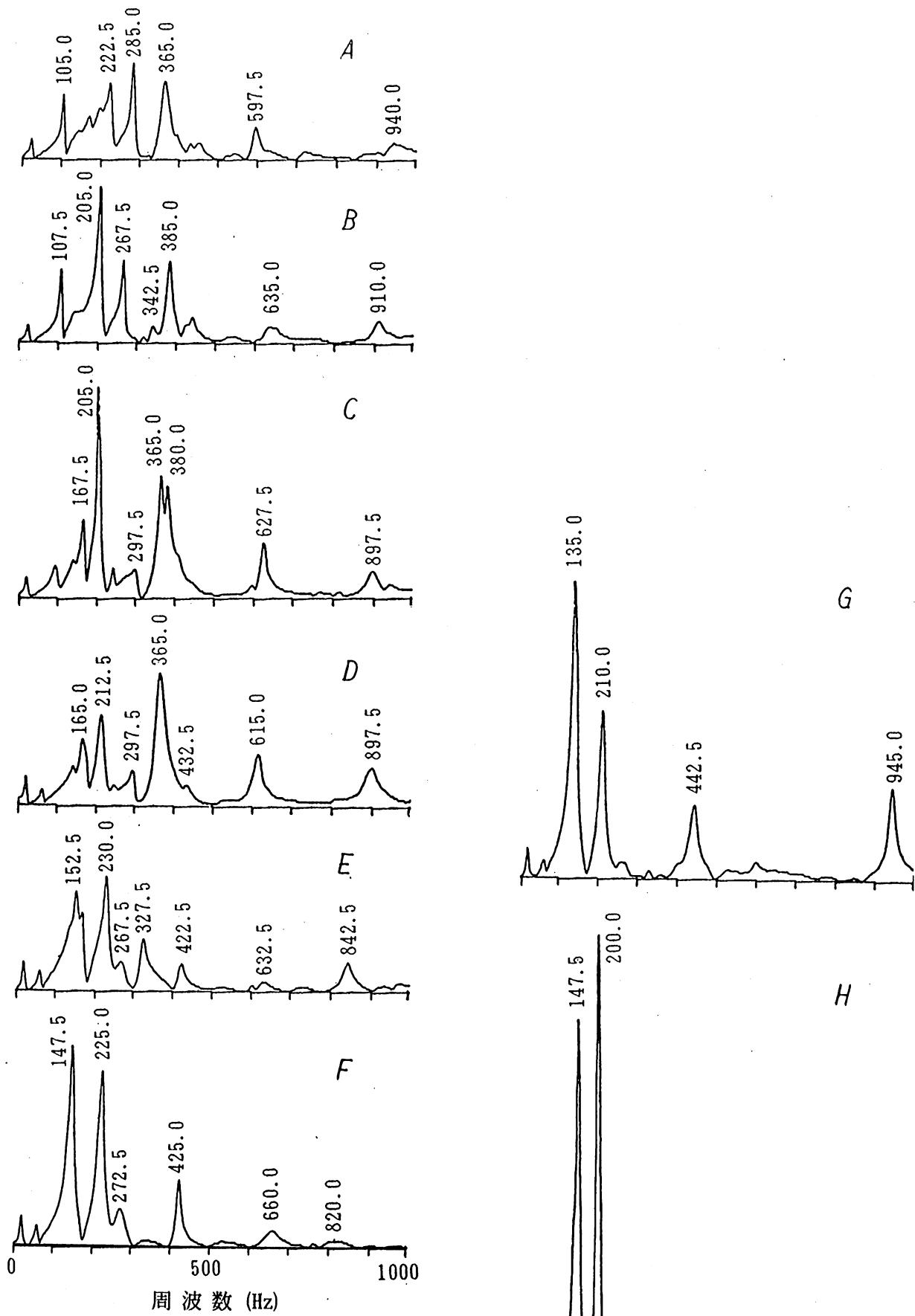


図-3.26 衝撃応答スペクトルの変化 [床S2、衝撃点a、測定点中央]

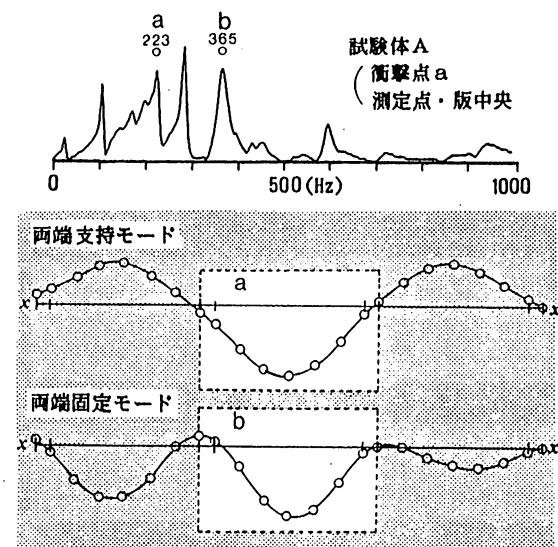


図-3.27 代表的な固有振動モード

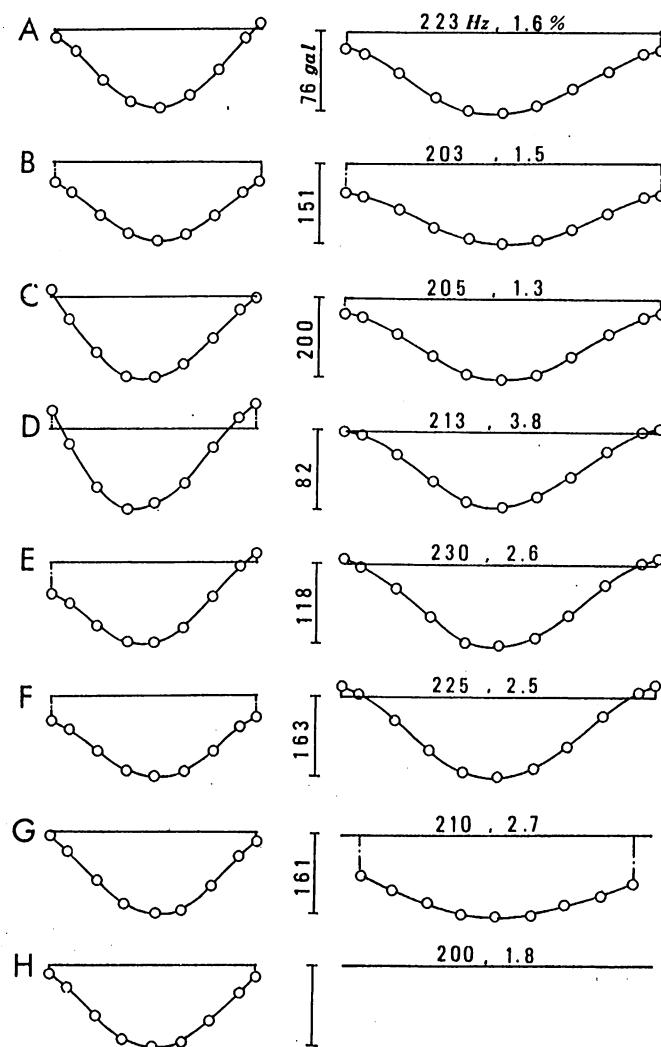


図-3.28 両端単純支持モードの変化

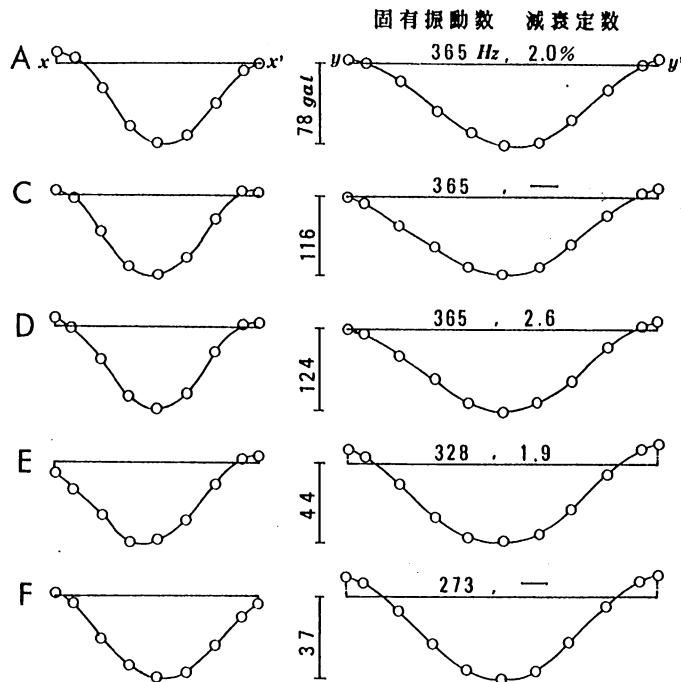


図-3.29 両端固定モードの変化

した。周辺固定モードに関して、条件Aから条件Dまでのスパン（長辺）方向の壁が存在する場合は、比較的変化は小さい結果となっているが、この壁がなくなる条件E以後では、モード形、固有振動数、およびモード振幅が大きく変化している。固有振動数の変化を図化したものを図-3.30に示したが、この結果が明確に示されており、スパン方向の壁がなくなった場合に、端部の拘束度が半分程度まで低下することがわかる。単純支持モードに関しては、いずれの項目に関してもあまり明確な傾向は表れていない。

c) 衝撃応答加速度振幅分布の変化

S 2床版について衝撃時の床版平均加速度レベルを算出した結果の変化について示す。この結果は、測定点でのモードやスペクトルの変化に較べ、床版全面について平均された値であるから、エネルギーの変化に対応するものであると言える。なお、ここでの加速度レベルは、既に示したように0.05秒の2乗積分値によるものである。図-3.31は、これらの結果を各周波数帯域毎の変化として示したものであり、図-3.32は各条件での状態変化による加速度レベルの増減を示したものである。これらの結果より、

- ・ 条件Aから条件Bの変化では殆ど影響が見られず、また長辺方向の壁が長短とも存在する状態では、隣接する床版の有無の影響は殆ど見られない。
- ・ 条件Aから条件Gまでの形態変化は、現実の床構造を考えた場合、かなり大きな変化と考えられるが、振幅分布の変化は概ね 5dB以内であり、あまり大きな差は生じていない。すなわち、ある条件下の床構造の床版平均振動応答量が、周辺条件により左右される影響度はL等級で1ランク以

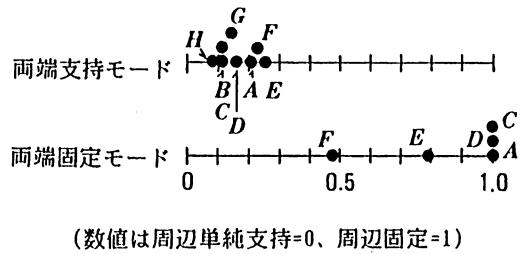


図-3.30 固有振動数の変化

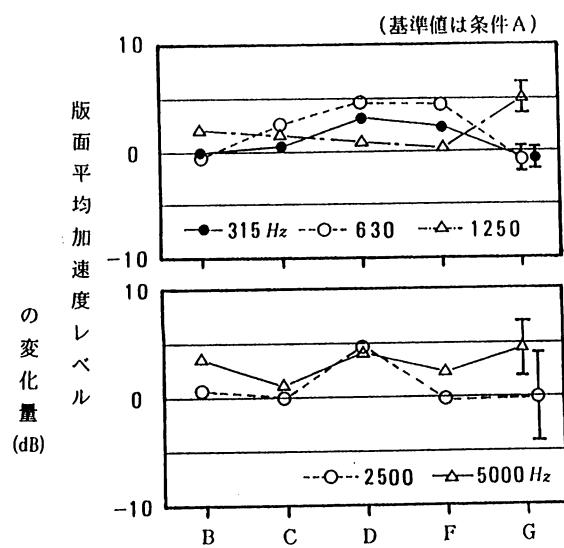


図-3.31 加速度振幅分布の変化 [版面平均値、周波数帯域別]

内である。

d) 振動減衰性状の変化

オクターブバンドの振動減衰残響時間を算出した結果を図-3.33に示した。図中のc.v.は、条件Aから条件Gまでの変化に関する変動係数であり、各周波数に関する減衰変化の程度が相対比較できる。実験の結果では、A～CまでとD～Gまでの2つのグループに大きく分けられる。160～1250Hz（実物では16～125Hz）の周波数帯域では両グループの差が顕著となっているが、2500Hz（実物では250Hz）以上の帯域では全データーとも殆ど同程度となっている。両グループの分岐点となっているDのデーターは、周囲の床や梁などの波動伝搬してゆく部分がなくなつた単独の床版の結果であり、このような条件変化により振動減衰性状が大きく変化することは興味深い。

残響時間の傾きは、A～Cのグループでは $1/f$ に近い状態となるが、D～Gグループでは1250Hzまでの固有モード振動領域では平坦な特性に近くなっている。

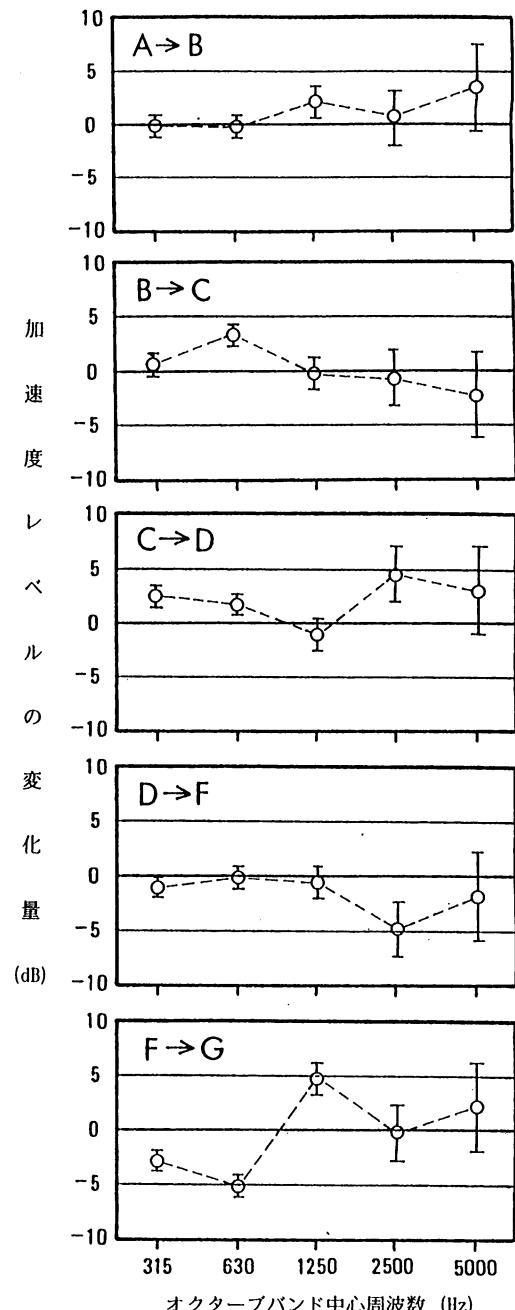


図-3.32 加速度振幅分布の変化

[版面平均値、試験体条件別]

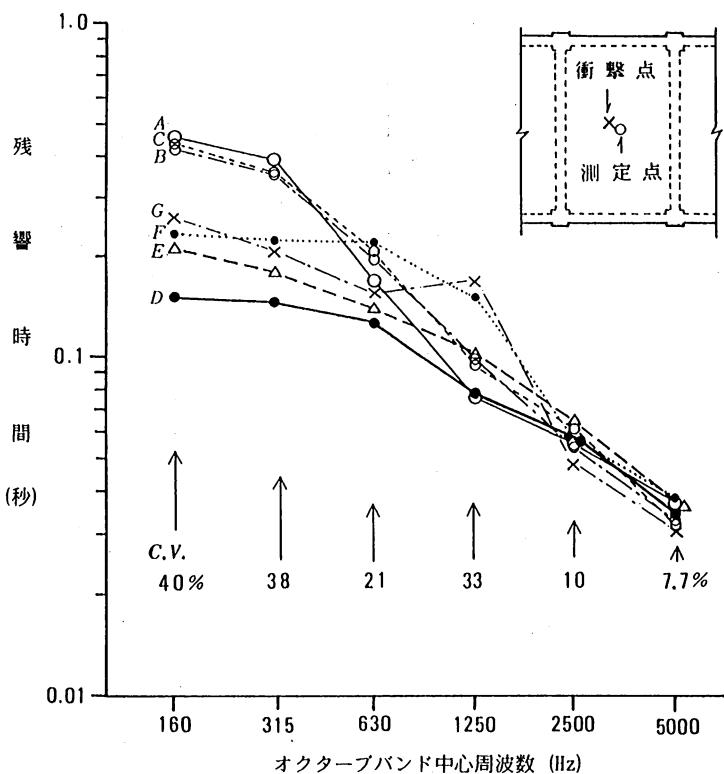


図-3.33 各試験体条件の振動残響時間特性の変化

3.3.4 結果のまとめ

今回の実験の主な結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 今回のようなRC床構造では、壁が存在する場合には隣接する床版の有無の影響は殆ど見られない。したがって、集合住宅などの壁で区切られている床版に関しては、区切られた床版部分を解析・評価の対象と考えて十分である。
- 2) 一定条件下の床構造が、周辺の形態変化によって受ける影響は最大で5dB程度までであることから、ある程度境界部の条件が考慮されていれば、解析精度は十分に確保できると言える。
- 3) 振動の減衰性状に関して、低周波数域での減衰は、周辺での透過・反射性状と関係しているため、隣接の床版の有無が関係するが、高周波数域では、材料的な減衰条件によって決定されるため、周辺の条件はあまり影響しない。
- 4) 実験手法の問題として、縮尺模型の各部を切除してゆく今回の方法はかなり有用であると考えられ、種々の床構造に対して適用が可能である。とくに連続床版の評価検討には有効であると考えられる。

3.4 RC床版の振動減衰に関する考察

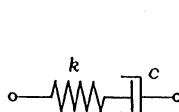
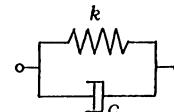
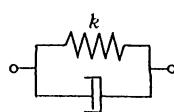
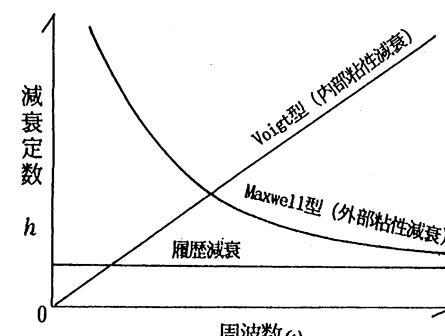
振動減衰の評価は、振動問題全般に関する極めて大きな課題であり、当然のことながら、当研究でこれを総括的に取り扱うことは困難である。ここでは、対象をRC床版の減衰の評価に限定して、既往文献や当研究での実測・実験結果をもとに若干の考察および整理を行った結果について示す。

3.4.1 減衰の分類¹³⁾

床版の振動に係わる基本的な減衰の分類を表-3.18に示した。減衰モデルによる分類、現象面からの分類、および解析に用いる比例減衰の分類について、相互の関係がわかるように整理を行った。

当研究における振動解析では、Rayleigh減衰を用いており、オクターブバンド内で周波数特性がほぼ平坦になるように係数 α , β を決定している。

表-3.18 減衰の分類と相互の関係

減衰モデルによる分類	現象による分類	比例減衰の分類	
		項目	Caugheyの条件
	<ul style="list-style-type: none"> Maxwell型モデル $h = \frac{1}{2} \frac{k}{c \omega}$ 	<ul style="list-style-type: none"> 外部粘性減衰（空力減衰） 振動速度に比例 $h = \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\omega}$ 	<ul style="list-style-type: none"> 質量比例減衰 $[C] = \alpha [M]$ $[M]$: 質量マトリクス $b = 0$
	<ul style="list-style-type: none"> Voigt (Kelvin)型モデル $h = \frac{1}{2} \frac{c \omega}{k}$ 	<ul style="list-style-type: none"> 内部粘性減衰（構造減衰） ひずみ速度に比例 $h = \frac{1}{2} \beta \omega$ 	<ul style="list-style-type: none"> 剛性比例減衰 $[C] = \beta [K]$ $[K]$: 剛性マトリクス $b = 1$
	<ul style="list-style-type: none"> 履歴減衰型モデル $h = \frac{1}{2} \frac{c^*}{k}$ 	<ul style="list-style-type: none"> 履歴減衰 $h = \text{const.}$ 	<ul style="list-style-type: none"> Rayleigh減衰 $[C] = \alpha [M] + \beta [K]$ $b = 0, 1$
<周波数特性>		<caugheyの条件式>	
		$[C] = [M] \sum_b \alpha_b ([M]^{-1} [K])^b$	

3.4.2 RC床版の振動減衰の周波数特性に関する検討

イ) コンクリート材料としての減衰

コンクリートの材料としての減衰に関するデータとして松田らの実験結果が利用できる。ここでは、RC床版の模型実験の基礎検討としてコンクリートの減衰が精密に測定されており、図-3.34～図-3.36¹⁴⁾の結果が得られている。これらの結果をもとに、コンクリートの減衰について考察すれば以下のようなになる。

まず、振動の減衰過程が指数的であるとすると、対数減衰率の定義より、減衰定数は

$$h = -\frac{1}{2\pi} \ln \delta \quad (3.18)$$

となる。 δ は減衰率である。いま周波数 f の時、1周期当たりの振動減衰を $R(f)$ dBとすると、式(3.18)より

$$h = \frac{1}{2\pi} \ln 10^{\frac{R(f)}{20}} = \frac{0.058}{\pi} R(f) \propto R(f) \quad (3.19)$$

となる。図-3.34によれば、縦波の1m当たりの減衰は \sqrt{f} に比例する特性を示している。縦波は、伝搬速度が周波数に関し一定であり、波長が周波数に逆比例することになるから、1周期当たりの減衰量 $R(f)$ すなわち減衰定数は $1/\sqrt{f}$ の特性を持つことになる。この時、振動減衰の残響時間も、式(3.20)より $1/\sqrt{f}$ の特性を持つことになる。

$$T_{60} = \frac{1.1}{f h} \quad (3.20)$$

曲げ波に関しては、図-3.36より1m当たりの振動減衰は一定である。また、曲げ波の波長は、 \sqrt{f} に反比例するから、1周期当たりの減衰量 $R(f)$ は、 $1/\sqrt{f}$ の特性を持つことになる。したがって、減衰定数 h は $1/\sqrt{f}$ に比例し、残響時間も $1/\sqrt{f}$ に比例することになる。これらは、

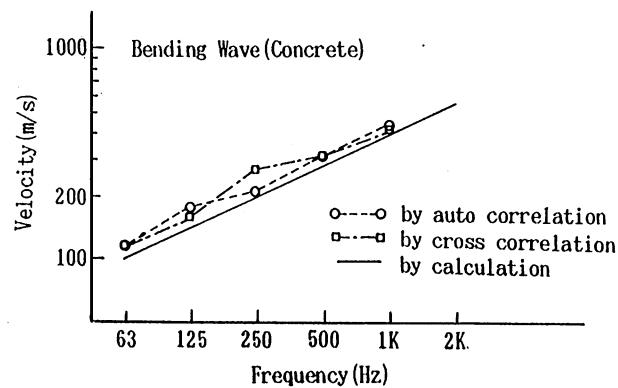


図-3.35 曲げ波の伝搬速度¹⁴⁾

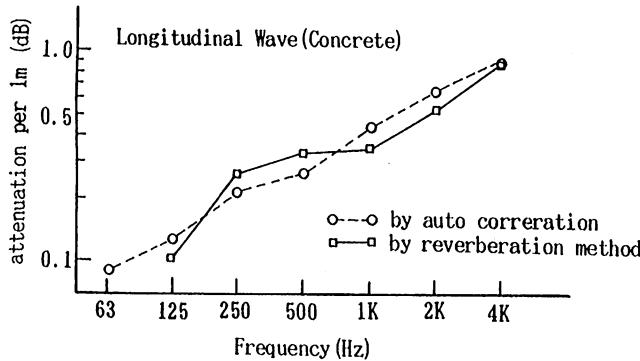


図-3.34 縦波の減衰¹⁴⁾

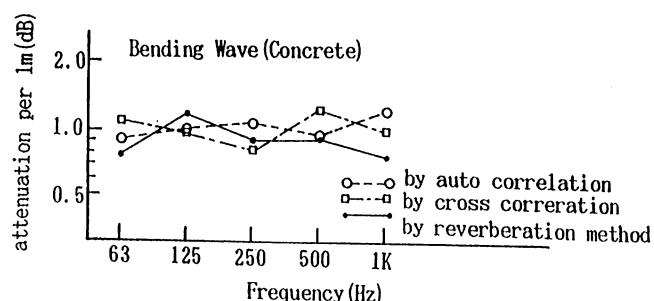


図-3.36 曲げ波の減衰¹⁴⁾

縦波の場合と同じ結果である。すなわち、コンクリート部材の、材料としての振動減衰（内部減衰）では、減衰定数、残響時間は $1/\sqrt{f}$ の特性をもつことを、文献の実験結果は示していると言える。

ロ) 床版境界での減衰

床版境界部では、境界部で消費されるエネルギーと外部へ逸散してゆくエネルギーにより減衰が生じる。この床版境界部での減衰が、仮に単位時間に境界部に入射する回数、すなわち曲げ波の伝搬速度に比例すると考えると、振動の残響時間 T_{60} は伝搬速度に逆比例することになり、したがって、 $1/\sqrt{f}$ の特性を持つことになる。これらが実験的に確かめられた例は見あたらないが、十分に成立の可能性のある仮定と考えられる。

ハ) R C床版の減衰定数

上記の「イ」、「ロ」の検討によれば、コンクリートの材料的な減衰に関して、振動の残響時間は $1/\sqrt{f}$ の特性をもち、さらに、境界部での減衰に関する振動残響時間も $1/\sqrt{f}$ の特性を持つことになる。床版の振動減衰は、これら2つの状態が複合されることになるから、その残響時間の周波数特性は $1/f$ の特性を持つことになる。このとき減衰定数は、式(3.20)より周波数に無関係に一定となる。

実測結果についても、3.1章の実建物の結果である図一3.7においても、また模型実験による結果図一3.33においても、ほぼこの特性を示している。他の研究報告、例えば井上らの研究報告においても、ほぼ同様な実測結果が示されている。これらの結果を総合すれば、R C床版の減衰定数は周波数によらずほぼ一定の特性を示し、その値は約2~3%の値となると言える。

3.4.3 減衰定数に関する間仕切壁、境界条件の影響

3.1章および3.3章での検討のうち、減衰に関する内容を改めて整理しておく。間仕切壁の減衰に対する影響は、図一3.7に示されるように主に63Hz以下の低音域の周波数に限られ、高周波数域の値には殆ど影響しない。31.5Hzでは、間仕切壁の影響で減衰定数が1.5~2倍になっており、周波数が高くなるにつれてこの変化が小さくなる傾向を示している。

一方、境界条件の減衰定数に対する影響を、図一3.33の模型実験の結果から推察すると、加振され床版から他の床版あるいは梁への伝搬がある場合（モデルA～C）と、それが無い場合で低音域での特性が大きく変わっている。伝搬がある場合では、隣接床版がある場合（A、B）でも無い場合（C）でも特性は殆ど変化しない。したがって、通常の集合住宅などの連続床版では、振動減衰に対する境界条件の影響はかなり小さく、殆ど考慮しなくて良いと推察される。

以上の検討は、実測例も少なく、条件も限定されているため、確定的な結果であるとは結論出来ないが、現象的に推察すれば十分妥当な結果であると言え、固体音に関する減衰評価の参考となるものと考えられる。

3.4.4 振動応答解析に対する減衰定数の影響

床版の振動応答解析において、減衰定数の設定値により応答解析結果にどの程度の影響がでてくる

のかを、実際の解析により検討した。図-3.37は、5章にて詳述している重量床衝撃音の解析について、減衰定数の値を変化させた時の床版の平均加速度レベルへの影響を示したものである。解析モデルは、2.7章小梁付床版の建物Cである。低音域と中・高音域を代表する63Hzと500Hzの2つの周波数帯域について計算を行ったが、両者の結果は殆ど同一であり、減衰定数が2倍になると応答値が約2dB程度小さくなる傾向を示している。これらの結果より、応答解析においては、実測より得られている減衰定数2~3%という値を用いておけば、多少の条件的なバラツキはあっても結果に大きく影響することはないと言える。

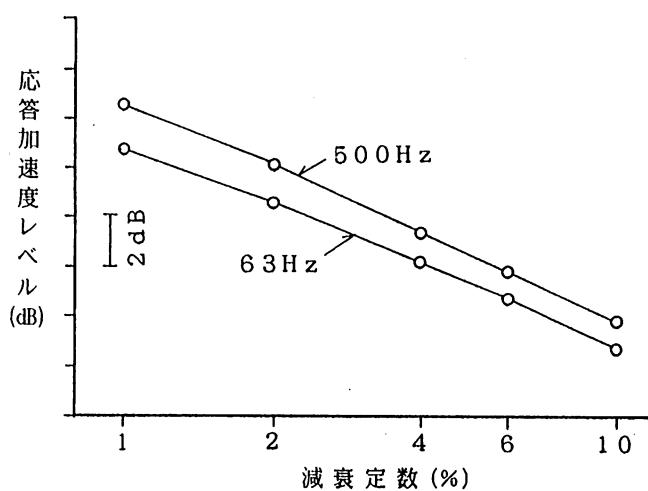


図-3.37 減衰定数の変化による振動応答結果への影響