環境振動による固体伝搬音予測に関する実験的研究

EXPERIMENTAL RESEARCH ON PREDICTION STRUCTURE-BORNE SOUND
DUE TO THE ENVIRONMENTAL GROUND VIBRATION

小林 真人*, 塩田 正純**, 山下 恭弘***

Masahito KOBAYASHI, Masazumi SHIODA and Yasuhiro YAMASHITA

This Paper showed the fundamental examination result about prediction technique of Structure-Borne Sound which occurred due to the environmental ground vibration. The outline of paper is shown next. Firstly, The theory of Structure-Borne Sound prediction which occurs due to the environmental ground vibration was shown, and the prediction-type was introduced. Secondary, The verification of the prediction parameter was done by using the experimental residence. From these results, As for the diffusion vibration frequency range of the vibration wall, the sound radiation coefficient showed that calculated from the mean of the vibration response. And, the difference in the actual measurement value of Structure-Borne Sound and the calculation of Structure-Borne Sound is small. Therefore, it was shown that the theory of the prediction in this research was right.

Keywords : Environmental ground vibration, Structure-Borne Sound, Coherence, Sound radiation coefficient,

Vibration response, Prediction method

環境振動, 固体伝搬音, コヒーレンス, 音響放射係数, 振動応答, 予測手法

1. はじめに

環境基準の改正, 環境影響評価法の施行, および平成12年度より施行される日本住宅性能表示制度等により騒音・振動環境に対する予測・評価・対策技術への関心が高まりつつある。このような背景を基に, 図1に示すような鉄道・道路交通・建設作業現場等から発生した地盤振動, いわゆる環境振動¹⁾が建物に入力し発生する固体伝搬音について着目すると, これまでは発生源→伝搬経路→受振(受音)部など応答部位別の現象について次のように個別の研究がなされている。

発生源に関連して, 例えば鉄道に関してその加振力特性²⁾や, 発

図1 環境振動による固体伝搬音発生モデル

生源から周辺地盤への伝搬³⁾について着目した研究があり, 一定条件下においてこれらの現象が明らかにされている。

地盤振動の予測について, 既知の振動振幅や伝搬距離による幾何減衰および地盤の内部減衰から, 予測点の振動振幅を求める方法が示されている⁴⁾。地盤の内部減衰は各土質ごとに示されているが, 波動の種類により伝搬性状が異なる。これについては産業機械や建設機械などによる近接地盤振動は, 表面波と実体波が複合する波動により幾何減衰を表すことで予測精度が良くなることが示されている⁵⁾。更に鉄道振動を対象として拡張した検討例もあり, 地盤による減衰について同様な結論が示されている⁶⁾。これらの理論に基づけば, 複雑な様相を示す発生源から直接的に予測点の振動を求めなくても, 地盤上のある点における振動振幅が実測調査等で明らかにできれば予測点における振動振幅を求めることができる。

振動の入力損失については正弦振動に対する考え方⁷⁾が示されているが, 地盤の共振周波数が考慮できない点や, ランダムな振動に対する適用性など課題となる部分がある。また解析的手法や統計的手法による検討例⁸⁾⁹⁾もあるが, 予測条件の取り扱いが難しく一般的でないのが現状である。

建物側の応答について, 建物が1点加振された場合の振動分布を表す実験式¹⁰⁾が示されているが, 環境振動のように拡がりをもつ振

* 飛鳥建設機技術研究所

** 飛鳥建設機技術研究所 工博

*** 信州大学工学部 教授・工博

Research Institute of Technology, Tobishima Corporation
Research Institute of Technology, Tobishima Corporation, Dr. Eng.
Prof., Faculty of Engineering, Shinshu Univ., Dr. Eng.

(7)式の両辺を音圧基準値の2乗 P_0^2 で割ると

$$\left(\frac{P_{rms}}{P_0}\right)^2 = \left(\frac{\rho c}{P_0}\right)^2 \cdot \frac{\bar{\delta}_{rad} \cdot \bar{v}^2 \cdot S}{A} \quad (8)$$

(8)式に常用対数をとれば(9)式となり、環境振動により建物内で発生する固体伝搬音レベル SPL が求まる。ただし(9)式において(8)式で用いた振動速度 $\bar{v}$ は、(1)式により求まる建物近接地盤の振動速度 v_r である。また地盤から建物への入力損失、および建物構造減衰による項を ΔL_m ($= v_r$ 、一面中央の振動速度)、放射面の周辺拘束によって影響される音響放射係数補正項を $\Delta L_{\delta rad}$ とする。

$$SPL = 20 \log \left(\frac{\rho c}{P_0} \right) - 10 \log A + 10 \log (\bar{\delta}_{rad} \cdot \bar{v}_r^2 \cdot S) + \Delta L_m + \Delta L_{\delta rad} \quad (9)$$

3. 実験によるパラメータの検討

(9)式の導入により環境振動によって建物内で発生する固体伝搬音予測の考え方を示した。ここでは予測に係わるパラメータとして音響放射面の振動応答の取り扱い、および室全面が振動している時の音響放射係数について着目し、内装仕上げが無い状態の鉄筋コンクリート造実験住宅を用い実験的に検討を行う。実際の建物においては柱・梁の存在や内装仕上げの有無によって現象が複雑になるが、本報告は予測に関する基礎的検討を行っているので、まず比較的単純な構造の建物において内装仕上げが無い状態を対象とする。

3.1 実験手法

本研究における実験手法を示す。実験住宅2階を受音室として設定し、実験1として受音室の振動音響特性の把握を行った。まず受音室壁面等をインパクトハンマーにより打撃加振し壁面等のインピーダンスを求めた。次に受音室空間のモードを確認するためスピーカーを受音室角隅部に設置し純音を発生させ、信号をスイープさせながら部屋中央部に設置したマイクロホンへの伝送周波数特性を調べた。またスピーカーとマイクロホンの関係はそのまま帯域雑音を発生させ残響時間を計測し吸音力を求めた。実験2として実験室に近接する地盤を電動ハンマーにて加振し、受音室における壁面等の振動速度応答と部屋中央部における音圧レベルを計測し、板振動と音圧の関係、音響放射係数、地盤上の振動源による固体伝搬音予測式について検討した。

3.1.1 計測方法

図3に示した計測位置において図4のシステムにより、実験条件別に実験1・実験2に分けて実施した。ただし実験2では空気の影響抵抗を求めるため受音室内温度を計測した。実験で用いた加振源の加振力特性は図5に示した通りである(基準値は $0dB=10^3N$)。これから有効に加振しうる周波数範囲は上限 400Hz 程度であることと、および固体伝搬音を対象とする事から 50Hz 帯域から 400Hz 帯域に着目した。ここでインパクトハンマーの加振力はフォースセンサーによる値であるが、電動ハンマーの加振力は本体重量と図4の地盤を加振したときの本体加速度の積から求めた値である。次に実験条件ごとの計測方法を示した。

(1)実験1について

①インピーダンス

図3 受音室における計測位置図

図4 計測システム図

壁面等の振動特性を確認するため、図3に示した振動計測位置近傍をインパクトハンマーにより加振し、衝撃力、振動応答波形を収録した。解析はFFTアナライザーを用い周波数分解能 1Hz、同期加算 8回で1秒間のデータの全時間応答インピーダンスを求めた。

②伝送周波数特性

受音室における固有モードを確認するため、図4に示したスピーカーを用い 50Hz から 400Hz まで純音をスイープ (0.5Hz/s) させながら発生させ、受音室中央部の騒音計設置位置における伝送周波数特性を計測した。

③残響時間

図4に示したスピーカーから 1/3 オクターブバンドで 50Hz 帯域から 400Hz 帯域のランダムノイズを発生させ残響時間を計測した。

図5 加振源の加振力特性

残響時間から Sabine の式により吸音力を求めた。

(2) 実験 2 について

図 4 に示した要領で電動ハンマーを用い、実験住宅に近接する地盤上の建物からの距離 0.9 ㍎・2.1 ㍎・4.5 ㍎のポイントを加振した。音圧レベルは受音室中央部で計測し振動計測位置 V1 は順次移動、V2 から V6 は固定した。ピックアップの固定方法は V1 と V2 はマグネット、V3 から V6 は地盤を掛矢で打撃し締め固めたのち石膏を流し入れる方法とした。

板振動と音圧間の関係を検討するため FFT アナライザーを用い周波数分解能 1Hz、同期加算 50 回として振動と音圧間のオーディナリーコヒーレンス関数 (Ordinary Coherence Function, 以下 O.C.F) を求めた。また実験住宅外部から振動を与えたときの室全面における平均音響放射係数を (5) 式を適用して求めた。更にこれらパラメータの検討結果をふまえ、実験により得られた値を用い (9) 式により室内音圧レベルを求め実測値との検証を行った。

3.2 実験結果および考察

3.2.1 板振動と音圧の関係

音響放射面の振動応答がどのように室内音圧に寄与しているか、スペクトル上で明らかにするために振動と音圧の相関を見た。これは (3) 式で示した振動速度 v が平均値として示されるか確認するためである。本研究では相関の検出方法として O.C.F を用いる。O.C.F は周知の通り振動と音圧のスペクトルをそれぞれ $G_{xx}(f)$, $G_{yy}(f)$ とし、クロススペクトル $G_{xy}(f)$ をとれば (10) 式で与えられる。式から明らかなように O.C.F は 2 つの変量間の線形関係の程度を表している¹⁸⁾¹⁹⁾。ただし O.C.F は各面からの入力 (振動) が出力 (音圧) に対して互いに独立であることが条件であるので誤差を含むことが考えられる。本来であれば入力の固有成分と出力間の相関を示すパーシャルコヒーレンス関数 (Partial Coherent Function, 以下 P.C.F) や、入力信号の共通成分と出力間の相関を示すマルチコヒーレンス関数 (Multiple Coherent Function, 以下 M.C.F) などの理論¹⁸⁾¹⁹⁾を導入すべきであるが、その前段の検討として O.C.F を適用する。

$$O.C.F = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f) \cdot G_{yy}(f)} \quad (10)$$

O.C.F の算出結果を 1/3 オクターブバンド幅で平均した値と振動計測位置との関係として図 6 から図 9 に示す。ここで示した O.C.F は図 3 における各面の→方向の振動計測位置 4 点について平均した値である。よって図 6 から図 9 の端部・中央・端部は各面の長辺方向の位置関係を示す。また壁面 C と壁面 D は扉と窓があり、コンクリート面の中央部が明確に定義できないこと、および振動応答が複雑であるのでここでは O.C.F による評価を行わない。

周波数と O.C.F の関係について検討する。各面とも 315Hz 帯域と 400Hz 帯域の O.C.F が 0.4 以下で振動と音圧の相関は低い。これは図 5 に示した通り、これらの周波数における加振源の加振力は十分あるので、地盤から建物へ振動が入力するさいに生じた減衰により壁面等の振動応答が小さくなったためと考えられる。一方、80Hz 帯域から 125Hz 帯域においては比較的に相関が高い。壁面 A で 100Hz 帯域、壁面 B で 63Hz 帯域、床で 80Hz 帯域、天井では 63Hz 帯域となっている。これは図 10 と図 11 に示したように各面の中央部におけるインピーダンスが、それぞれに対応する周波数で低下し

図 6 O.C.F 解析結果 (壁面 A)

図 7 O.C.F 解析結果 (壁面 B)

図 8 O.C.F 解析結果 (床)

図 9 O.C.F 解析結果 (天井)

図 9 O.C.F 解析結果 (天井)

図 10 インピーダンス (壁面)

図 11 インピーダンス (床・天井)

ていることから、面の共振により振動応答が大きくなっていることによるものと考えられる。またこれらの周波数帯域は図 12 に示したような、受音室における 100Hz 帯域から 200Hz 帯域のモードが含まれる帯域でもあり、これによる影響も考えられる。

図 12 伝送周波数特性

よってこれらの事から、O.C.F. について言えば振動計測位置によらずほぼ一定になっているものの、面の低次共振周波数では放射に対する寄与を中央部の振動応答から考えれば良いことを示唆している。

次に振動計測位置と振動応答の関係について検討する。各面の振動速度レベル ($0\text{dB}=5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$) について面中央部の値と、他計測点についてエネルギー平均値をとったものを1/3オクターブバンドで比較したものを図13から図16に示す。周波数特性としてはほぼ同様の傾向にあるが、O.C.F.による相関が比較的良かった80Hz帯域から125Hz帯域においては中央部における応答が平均値に比べて大きくなっている。先にも示したとおり、これら周波数ではインピーダンスの低下により中央部での速度に関する応答量が大きくなっているためである。一方、これらより高い周波数では図10や図11から明らかなように、放射面の振動モードが密になっている。よって面中央部と平均値はほぼ同等の値をとる。

以上の結果から、環境振動により建物内で発生する固体伝搬音を予測するには、低次共振が含まれる周波数やこれより高次の周波数においても、音響放射面の振動応答を面の中央部で考えることができる。また(5)式において振動応答を平均振動速度 $\bar{v}$ として取り扱ったが、これは放射面の振動モードが密な周波数領域にあるときに成り立ち、低次共振の影響を受ける周波数領域では別の考え方が必要になる。

3.2.2 音響放射係数について

図17は(5)式により求めた全放射面の平均音響放射係数を加振点の距離別に示したものである。これによれば100Hz帯域と200Hz帯域を除いて加振点による差は殆どなく、室を構成する面のコインシデンス限界周波数(計算値で壁A・C・D・床が116Hz、天井が125Hz、壁Bが131Hz)以上の周波数帯域では、平均音響放射係数ほぼ1.0の値をとる。ただし(5)式は「2. 予測式の考え方」で示したように、無限大剛平板がピストン運動するときの放射パワーから導かれる式を、閉空間においては音響エネルギーが各面からの放射の平均で表されるとして示したものである。実際には建物内の振動伝搬という複雑な経路をたどって放射していることや、音響放射面の周辺拘束条件による共振により、インピーダンスの低下を生じるため別に補正項の考えが必要になる。

3.2.3 固体伝搬音予測について

図17に示した平均音響放射係数、および表1から表4に示した値を用い(9)式により室内音圧レベルを求めた。これにより求めた計算値と実測値の比較を図18に示した。周波数によって多少のバラツキが見られるが、加振点の位置0.9m・2.1mでの結果は $\pm 1\text{dB}$ 以内に収まっており、4.5mを含めても最大で3dB程度の幅である。このことから本研究において示した予測の考え方と予測式の妥当性が確認できる。幅の原因として、(9)式で示した放射面の周辺拘束条件により影響される音響放射係数補正項 ΔL_{rad} が考慮されていないことなどが考えられる。

補正項について、特に各面の共振によるインピーダンス低下によって生じる放射量変化の影響が大きいと考えられるので、音響放射を的確に検討するには各面からの放射寄与を独立させて扱う必要がある。また実際の建物においては内装仕上げ等により音響放射の形態が異なることから、予測手法として体系立てるには室表面積や室容

図13 振動応答の比較 (壁A)

図14 振動応答の比較 (壁B)

図15 振動応答の比較 (床)

図16 振動応答の比較 (天井)

図17 平均音響放射係数算出結果

表1 実験住宅吸音力 dB

周波数	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400
A (m)	0.9	1.1	0.8	1.0	0.7	1.1	1.1	1.4	1.0	1.5
10Log A	-0.3	0.5	-0.8	0.2	-1.6	0.3	0.4	1.4	0.1	1.6

表2 実験住宅面積

部位	壁A	壁B	壁C	壁D	天井	床	合計
面積(m ²)	6.5	8.8	6.5	8.8	8.8	8.8	48.1

表3 実験住宅近傍地盤の振動速度レベル dB

周波数	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400
加振点r=0.9m	84.6	88.5	83.2	88.5	91.2	92.7	93.5	82.3	64.4	58.0
加振点r=2.1m	80.3	78.6	72.2	75.9	88.5	84.7	76.7	71.4	59.0	54.3
加振点r=4.5m	69.6	67.1	53.4	53.7	54.0	49.4	35.1	30.0	15.4	7.6

表4 実測による入力損失 ΔL_m dB

加振距離	周波数	壁A	壁B	壁C	壁D	床	天井
r=0.9m	50	47.2	31.4	40.8	36.9	41.9	40.8
	63	45.5	31.9	42.5	35.4	39.4	38.2
	80	36.8	32.6	41.5	34.4	35.5	33.7
	100	45.4	50.4	46.4	48.2	54.6	51.1
	125	60.6	59.1	51.8	53.5	61.5	60.3
	160	65.1	60.1	60.2	59.0	63.8	66.1
	200	68.7	69.8	68.1	68.8	69.0	73.2
	250	67.6	59.3	59.9	64.6	62.4	61.3
	315	53.6	49.5	50.2	53.4	55.0	55.7
	400	50.9	48.4	45.2	49.3	52.3	51.7
r=2.1m	50	39.5	32.8	38.1	33.8	41.5	40.3
	63	32.3	26.2	31.5	27.5	31.3	32.9
	80	24.9	24.8	27.7	25.0	22.8	27.5
	100	31.4	40.7	35.3	36.8	40.2	38.0
	125	64.3	65.8	57.3	60.4	67.2	61.1
	160	67.4	62.8	58.5	60.5	64.2	66.2
	200	57.0	59.6	54.1	56.0	61.8	60.2
	250	60.4	55.6	53.1	56.2	61.4	59.8
	315	51.9	51.1	48.3	51.1	53.3	52.8
	400	48.8	47.4	43.3	47.3	49.8	48.8
r=4.5m	50	36.9	24.9	30.3	24.4	31.1	29.0
	63	27.9	14.8	21.5	14.2	23.2	19.4
	80	9.4	11.1	9.5	12.3	7.4	9.6
	100	12.4	17.3	10.8	18.5	21.1	17.0
	125	29.7	27.1	21.5	26.9	32.9	32.7
	160	32.5	24.4	22.1	22.8	27.5	29.8
	200	20.9	18.0	13.2	14.5	18.8	19.9
	250	21.6	16.0	12.1	18.5	20.6	20.3
	315	9.9	8.9	6.5	9.2	10.2	10.1
	400	3.8	3.6	1.3	2.6	3.9	3.6

積が異なる受音空間や、内装仕上げを施した状態での検証が必要と考える。

図 18 (9)式による計算値と実測値との比較

4. まとめ

本報告では予測方法を確立するための第一段階として、環境振動源により発生した地盤振動が、建物に入力したときに発生する固体伝搬音予測に関する考え方、およびその予測式を提案した。更に予測に用いるパラメータに関する基礎的検討として、内装仕上げのない3階建て鉄筋コンクリート造実験住宅を用い、固体伝搬音を予測するときの壁面等の振動応答が面中央部で代表できることを示した。また全面が振動している場合の音響放射の取り扱いについて、周壁が振動したときの音響エネルギー密度計算式と、拡散音場における音響エネルギーとの関係式から展開した計算式を示し妥当性を検討した。これらの検討結果をふまえたうえで、予測計算式の考え方を検証するため、実験により得られたパラメータを用いた計算値と実測値を比較したところ、本手法により固体伝搬音の予測が可能であることを確認した。

低次モード領域における放射への寄与は、面のインピーダンス低下によるものが大きい。すなわち各面の固有成分による影響を考慮しなければならず、出力（音圧）に対する各面毎の振動応答（入力）の寄与を明確にした検討が必要になる。現在、これらを検討するために前述の P.C.F や M.C.F、さらには固有成分のスペクトルレベル（Partial Coherent Output Spectrum）や共通成分のスペクトルレベル（Multiple Coherent Output Spectrum）などの理論から、入力個々の固有成分の割合や共通成分の割合に関する理論を展開し、内装仕上げも考慮した状態で放射の寄与を検討している。次報ではこれらについて明らかにする。

参考文献

- 1) 安岡正人：環境振動とは、各領域からみた“環境振動”，日本建築学会環境工学委員会，建築音響・振動分科会第 17 回音シンポジウム，pp.1～2，1981.2.
- 2) 井上勝夫 ほか：軌道上建物に対する固体音制御のための列車走行時の加振力特性に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第 432 号，pp.11～20，1992.2.
- 3) 古田勝：時間域積分方程式法による軌道系の振動解析に関する基礎的研究，新潟大学学位論文，1998.9.
- 4) Bornitz, G.: Über die Ausbreitung der von Grosskolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe, J.Springer (Berlin), 1931.
- 5) 塩田正純：公害振動の予測手法，井上書院，1986.6.
- 6) 加来治郎 ほか：在来鉄道振動の伝搬特性について，日本音響学会講演論文集，pp.767～768，1995.9.
- 7) 山原浩，環境保全のための防振設計，彰国社，pp.299～303，1974.10.
- 8) 蓮田常雄 ほか：線路上空利用建物の振動騒音予測，鉄道総研報告，Vol.7, No.10, pp.39～46，1993.10.
- 9) 北村泰寿：加振源に近接した構造物周辺の地表面振動，日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集，pp.429～432，1986.9.
- 10) 松田由利：建築構造体を伝わる固体音，日本騒音制御工学会誌，Vol.3, No.5, pp.5～10，1979.
- 11) L.Cremer.: Structure-Borne Sound, Springer Verlag, 1973.
- 12) L.L.Beranek.: Noise and Vibration Control, McGRAW-HILL, 1971.
- 13) 安岡正人，床衝撃音防止設計法，音響技術，Vol.6, 1977.10.
- 14) 日本建築学会：建物別の遮音設計資料，技報堂出版，pp.120～133，1988.10.
- 15) 前川純一：建築環境音響学，共立出版社，pp.128～132，1990.10.
- 16) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，pp.63～66，1997.10.
- 17) B&K: Frequency Analysis, pp.230～233，1987.9.
- 18) Bendat, J.S.: Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis, New York, Wiley, 1980.
- 19) 山下恭弘：多次元スペクトル解析の適用と評価，音の環境と制御技術第 II 巻応用技術，フジテクノシステム，pp.304～310，1999.10.

(2000年5月10日原稿受理，2000年12月5日採用決定)