

衝撃加振による構造体中の振動伝搬および音響放射の測定

Measurements of Vibration Propagation in Structures and Sound Radiation by Impulsive Excitation

橘 秀 樹*・矢 野 博 夫*

Hideki TACHIBANA and Hiroo YANO

1. ま え が き

各種構造体中における振動の伝搬性状あるいは固体音の放射特性などを計測する場合、大きな加振力を得るためにハンマリングあるいは落錘などによる衝撃加振の方法がとられることが多い。このような加振（入力）方法がとられた場合の衝撃応答の分析方法としては、従来種々の方法がとられているが、中には物理的意味が不明確なものもないとは言えない。

そこで本稿では、衝撃入力による振動伝搬、音響放射の測定において、振動や音圧の衝撃応答信号については全時間 2 乗積分値、放射音の音響インテンシティについては全時間積分値に着目することにより、定常ランダム加振による場合と等価な結果が得られることを理論的・実験的に示す。

2. 理 論 的 考 察

図 1 に示す線形系において、定常ランダム信号 $n(t)$ を入力したときの出力 $y(t)$ と系のインパルス応答 $h(t)$ とは周知のとおり次式のたたみ込み積分で表される。

$$y(t) = \int_0^\infty h(\lambda) n(t-\lambda) d\lambda \quad (1)$$

上式の 2 乗を二重積分の形で表し¹⁾、その時間平均をとると、

$$\begin{aligned} \overline{y^2(t)} &= \overline{\int_0^\infty h(\lambda_1) n(t-\lambda_1) d\lambda_1 \int_0^\infty h(\lambda_2) n(t-\lambda_2) d\lambda_2} \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty h(\lambda_1) h(\lambda_2) \overline{n(t-\lambda_1) n(t-\lambda_2)} d\lambda_1 d\lambda_2 \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty h(\lambda_1) h(\lambda_2) R_n(\lambda_1 - \lambda_2) d\lambda_1 d\lambda_2 \quad (2) \end{aligned}$$

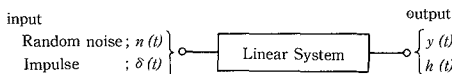


図 1 線形系の入出力関係

ここで、 $R_n(\tau)$ はランダムノイズの自己相関関数で、つぎの性質をもつ。

$$R_n(\tau) = N \cdot \delta(\tau) \quad (3)$$

N : $n(t)$ の単位周波数あたりのパワー

$\delta(t)$: デルタ関数

したがって、(2)式は次のように整理できる²⁾。

$$\overline{y^2(t)} = N \int_0^\infty h^2(t) dt \quad (4)$$

つぎに、図 2 は音や振動の伝搬特性を測定する場合を単純化して、1点入力-多点出力の系として表したものである。この系において、入力点に定常ランダム信号を加えたときとインパルス信号を加えたときのそれぞれの出力点における応答の間には(4)式の関係があるわけであるから、任意の 2 点 j, k における出力の比あるいは相対レベル差 ($\Delta L_{j,k}$) はつぎのように表せる²⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\overline{y_j^2(t)}}{\overline{y_k^2(t)}} &= \frac{\int_0^\infty h_j^2(t) dt}{\int_0^\infty h_k^2(t) dt} \equiv r_{j,k} \quad (5) \end{aligned}$$

$$\Delta L_{j,k} = 10 \log r_{j,k} \quad (6)$$

すなわち図 2 で表されるような伝搬系において、衝撃入力によって音あるいは振動の伝搬分布を調べる場合、各測定点（出力点）における応答を全時間にわたって 2 乗積分し、相互の比あるいはレベル差をとることにより、定常ランダム入力による場合の出力の実効値の比またはレベル差と等価な結果が得られることになる。

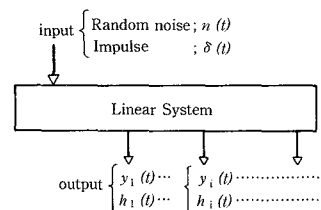


図 2 1点入力-多点出力の系における入出力関係

* 東京大学生産技術研究所 第 5 部

研究速報

以上の考察では、入力信号として理想的なホワイトノイズあるいは δ 関数的単位インパルスを想定しているが、実際の音響測定ではそのような理想的な励振は不可能である。しかし、オクターブあるいは1/3オクターブバンドフィルターなどによって周波数帯域を制限し、その帯域を含む周波数範囲で励振入力のスpekトルをほぼ一樣にすることができれば、(4)~(6)式の関係は近似的に成立すると考えられる。

以上は、音場における音圧や構造体における振動加速度など単一の信号についての考察であるが、構造体などから放射される音響インテンシティー（音波のパワー流束密度で、音圧と粒子速度の積）を測定の対象とする場合には、音圧と粒子速度の二つの信号について同時に考える必要がある。

そこで図1に代わるものとして図3に示すように、一つの出力点について二つの伝搬系を考え、それぞれのインパルス応答を $h_1(t)$, $h_2(t)$, また定常ランダム入力に対する応答を $y_1(t)$, $y_2(t)$ とすれば、(4)式が導かれたのと同様に次式の関係が得られる³⁾。

$$\overline{y_1(t) \cdot y_2(t)} = N \int_0^\infty h_1(t) \cdot h_2(t) dt \quad (7)$$

上式で $y_1(t)$, $h_1(t)$ をそれぞれ定常ランダム入力、インパルス入力に対する音圧出力 $p_n(t)$, $p_\delta(t)$ とし、 $y_2(t)$, $h_2(t)$ を同様な場合の粒子速度出力 $u_n(t)$, $u_\delta(t)$ に置き換えれば、次式が得られる。

$$\overline{p_n(t) \cdot u_n(t)} = N \int_0^\infty p_\delta(t) \cdot u_\delta(t) dt \quad (8)$$

すなわち、

$$\bar{I}_n = N \int_0^\infty I_\delta(t) dt \quad (9)$$

ただし、

\bar{I}_n : 定常ランダム入力による場合の音響インテンシティー出力

$I_\delta(t)$: インパルス入力による場合の音響インテンシティー出力の瞬時値

上式は、衝撃入力による場合の音響インテンシティー出力の瞬時値の全時間積分値が定常ランダム入力による場合の音響インテンシティー出力に等価であることを意味する。またこれより、(5), (6)式に対応する関係として、つぎの関係が得られる。

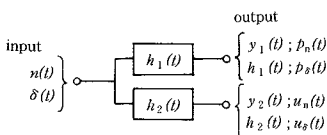


図3 音圧および粒子速度に対する線形系の入出力関係

$$\bar{I}_{n,j} / \bar{I}_{n,k} = \int_0^\infty I_{\delta,j}(t) dt / \int_0^\infty I_{\delta,k}(t) dt = r_{j,k} \quad (10)$$

$$\Delta L_{j,k} = 10 \log r_{j,k} \quad (11)$$

すなわち、構造体などの1点を加振したときの各部位で放射される音の音響インテンシティー分布を測定する場合、衝撃加振によるときには瞬時音響インテンシティー出力の全時間積分値をとることにより、定常ランダム加振によって測定される音響インテンシティーの分布と等価な結果が得られることになる。

3. 実験的検討

(1) 構造体中の振動の伝搬と音の放射に関する基礎的実験

以上に述べた理論的關係を実験的に確認するために、構造体中における振動の伝搬とそれによる音の放射（固体音放射）を例にとり、模型実験による基礎的検討を行った。

伝搬系としては、図4に示すようにアクリル製模型残響室（容積0.2m³）の上面に厚さ15mmのコンクリートスラブを周辺固定で取り付け、模型残響室の側壁の1点を定常ランダム加振と衝撃加振によって励振したときのスラブ面上の振動加速度の分布および放射音の音響インテンシティーの分布を測定した。具体的な励振方法としては、動電型加振器を用い、広帯域ノイズ（100 Hz~10 kHz）と継続時間0.1msの矩形インパルスを入力した。測定方法としては、質量1gの圧電型加速度ピックアップを用いてスラブ面上の11点における振動加速度を測定した。またそれらの点から55mm離れた点におけるスラブに垂直方向の音響インテンシティーを2マイクロホン型インテンシティープローブ（1/2 in. コンデンサーマイクロホン2個を間隔12mmで使用）と直接法にもとづく音響インテンシティー分析システム（B&K 3360）を用いて測定した。分析は1/3オクターブバンドごととし、定常ランダム加振の場合には通常の方法で実効値レベルを求めたが、衝撃加振の場合には、振動加速度については(4)式にもとづいて2乗積分、音響インテンシティー

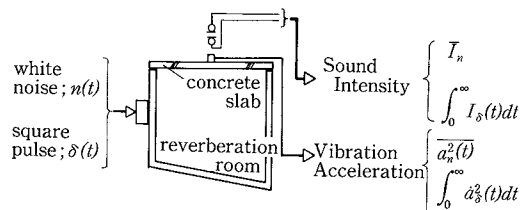


図4 構造体中の振動伝搬および音響放射実験の概要

については(9)式にもとづいて積分の演算を行った。

測定結果として、1, 2, 4 kHz (1/3 oct. band) における振動加速度および音響インテンシティーのレベル分布について、定常ランダム加振と衝撃加振による場合を比較して図5, 6に示す(ただし、測定点P1における両加振方法による測定値を一致させて示した)。これらの結果において、いずれの周波数帯域についても両加振方法によるレベル分布は相対的によく一致しており、(6), (11)式の関係が成り立っていることがわかる。

(2) I 型鋼からの音響放射特性の測定

鉄骨造の各種構造物の振動による音の放射がしばしば問題になる。このような構造物からの音の放射性状を調べる場合、衝撃加振のほうが定常加振よりも加振力の点で有利であり、また測定も簡便である。そこでここではこのようなケースを想定したモデル実験として、I 型鋼(断面 120 mm×60 mm, 長さ 1 m)を無響室内に吊し、その一端を加振したときの音の放射を音響インテンシティー法(上記の測定システムを使用)によって測定した。この場合、実験条件としてI 型鋼に何ら制振処理を施さない場合と、ウェブ部分の両面に塩ビ系ダンピング材を張り付けて制振処理した場合の2条件とした。加振方法としては、(1)の実験と同様な方法で、ウェブの端部に加振器を取り付けて定常ランダム加振と衝撃加振の両方を行った。

測定結果として、制振処理の有り・無しの場合に、I 型鋼の周囲(断面方向)における音響エネルギーまたはパワーの放射特性の測定結果を図7(a), (b)に示す。それぞれの図中で実線は定常ランダム加振による場合の音

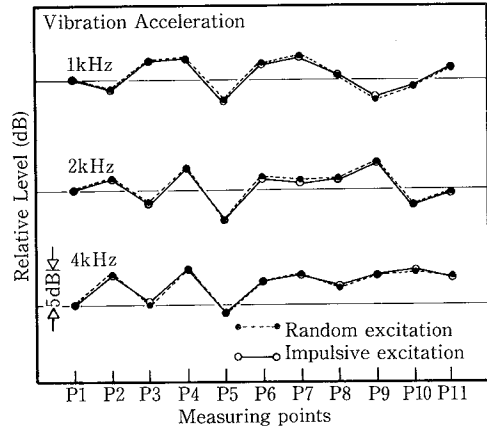


図5 振動加速度レベル分布の測定結果

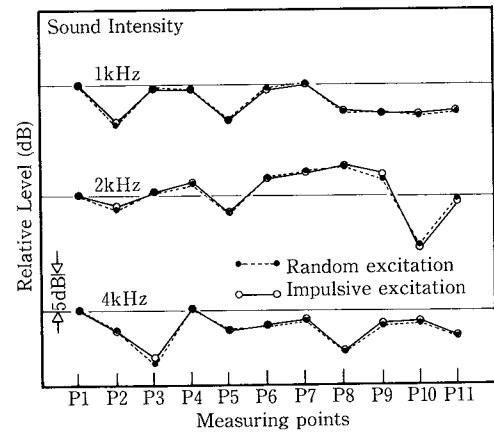


図6 音響インテンシティーのレベル分布の測定結果

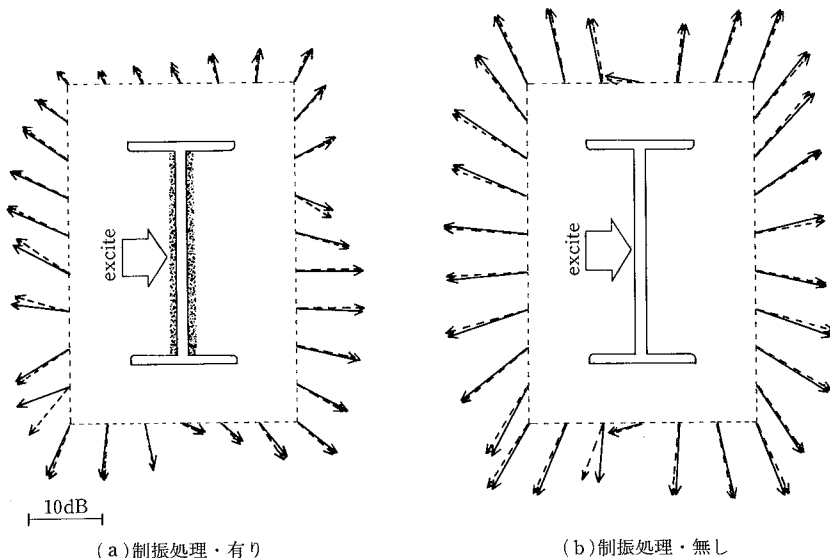


図7 I 型鋼の音響放射特性 (4kHz 1/3 オクターブバンド)

研究速報

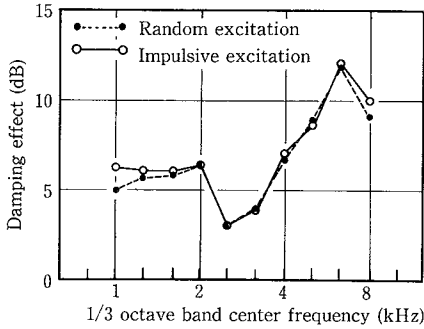


図8 I型鋼の制振処理の効果

響インテンシティーベクトル、破線は衝撃加振による場合の音響インテンシティー（正確には、音響インテンシティーを時間積分しているの、音響エネルギー流束密度）ベクトルである。これらのベクトルは、直交2方向の音響インテンシティーの測定結果を合成して求めた。ただし、この場合のベクトルの大きさは、それぞれのベクトルの測定線に垂直な方向の成分の総和（測定断面についての全音響インテンシティー）を一致させて表示した。

定常ランダム加振による結果と衝撃加振による結果を比較すると、制振処理の有り・無しの場合ともに、一

部の点を除いてベクトルの方向と相対的な大きさはほぼ一致していることがわかる。またこれらの結果から、制振処理の効果が視覚的にも明瞭に把握できる。

つぎに、制振処理をした場合としない場合の測定断面についての全音響インテンシティーの差を求め、制振処理の効果を調べた。その結果を図8に示すが、定常ランダム加振による結果と衝撃加振による結果は測定周波数範囲全体にわたってよく一致している。

一般に、大型の構造体中における振動伝搬特性あるいはそれによる音響放射特性を測定する場合、ハンマリングなどによる衝撃加振の方法がとられることが多いが、以上に述べたような分析処理方法をとることにより、定常ランダム加振による場合と等価で物理的にも明確な結果が得られる。
(1986年3月15日受理)

参考文献

- 1) M.R. Schroeder "New Method of Measuring Reverberation Time", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 37 (1965)
- 2) 橘, 矢野, 石井「衝撃入力による建築音響測定(定常ランダム入力による場合との対応について)」日本音響学会誌 Vol. 35 No. 11 (1979)
- 3) 矢野, 橘「音響インテンシティー法による構造体の音響放射の測定(定常ランダム加振と衝撃加振の関係)」日本音響学会講演論文 1986年3月

