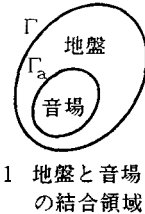


近畿日本鉄道 正 員○植松知也
神戸大学工学部 正 員 北村泰寿
神戸大学大学院 学生員 藤原申次

1. まえがき 本研究は、固体音伝搬問題の研究の第一歩として、地盤と音場の結合問題に周波数領域境界要素法の適用を試みたものである。空洞を有する半無限地盤を考え、地表面を加振するとき、空洞内に生じる音圧分布を解析する。また、地盤と音場の境界面における吸音性についても若干の検討を加える。

2. 解析手法の概要 図-1に示すように、地盤を等方均質の弾性体と仮定して、音場との結合領域を考える。いま、弾性体を二次元平面ひずみ場として取り扱い、支配方程式をFourier変換して重み付き残差法を用いれば、周波数領域における境界積分方程式が次式のように得られる。



$$\frac{1}{2} U_i(x) + \int_{\Gamma + \Gamma_a} \{ P_{ij}(y, x) U_j(y) - U_{ij}(y, x) P_j(y) \} d\Gamma = 0 \quad (1) \quad \text{図-1 地盤と音場の結合領域}$$

ここに、 U_i , P_i は像空間での i 方向の変位、表面力ベクトル、 U_{ij} , P_{ij} は二次元全無限弾性体に対する変位、応力基本解である。また、音場についても、Helmholtz方程式に重み付き残差法を用いれば、境界積分方程式が次式のように得られる。

$$\frac{1}{2} p_a(\hat{x}) + \int_{\Gamma_a} q_a(\hat{y}, \hat{x}) p_a(\hat{y}) d\Gamma_a + i\omega\rho_a \int_{\Gamma_a} p_a(\hat{y}, \hat{x}) v_a(\hat{y}) d\Gamma_a = 0 \quad (2)$$

ここに、 p_a は音圧、 q_a は p_a の法線方向微分、 p_a^* , q_a^* は基本解、 ρ_a は密度、 v_a は法線方向粒子速度、 $i = \sqrt{-1}$ である。式(1)および式(2)の離散化にはアイソパラメトリック二次要素を用いる。

弾性体と音場を結合する際に、連続条件を考慮する解法と、それぞれの場を個々に解く分離解法が考えられる。前者は、1) 弾性体の粒子速度の法線方向成分は、音場の法線方向粒子速度と一致する、2) 弾性体の表面力の法線方向成分は、音場の音圧に等しい、3) 弾性体の表面力の接線方向成分は、音場が非粘性であるため0とする、この3つの条件を境界面で考慮する方法である。後者は、まず音場との境界面で表面力を0として、弾性体のみを解く。弾性体の変位を法線方向粒子速度に変換し、それを音場の境界条件として音圧を計算する方法である。

つぎに、垂直入射音響インピーダンス z の吸音材が装着されている境界を考える。吸音材表面の法線方向粒子速度を v_a 、外周境界のそれを v 。とすると、弾性体と音場の連続条件が次式のように書ける¹⁾。

$$v_a - v = \frac{p_a}{z} \quad (3)$$

式(3)を用いれば、弾性体と音場の境界面での吸音性が考慮できる。

3. 計算結果と考察 解析モデルを図-2に示す。弾性体としてやや軟らかい岩盤を仮定し、その物理定数を $\rho = 2.0 \times 10^2 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$, $\mu = 2.0 \times 10^8 \text{ kgf} / \text{m}^4$, $\nu = 0.3$ とする。一方、空洞内の空気の物理定数は、 $\rho_a = 1.23 \times 10^{-1} \text{ kgf} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$, $c = 343.2 \text{ m/s}$ (音速) とする。幾何学的な諸元は、 $L = 40 \text{ m}$, $a = 1 \text{ m}$, $d = 6 \text{ m}$, $r = 6 \text{ m}$ とする。地盤と空洞の境界面を25要素に等分割し、地表面では加振要素は1m、その他の要素は2mである。また、加振力は $p_0 = 1.0 \times 10^8 \text{ kgf} / \text{m}^2$ とする。

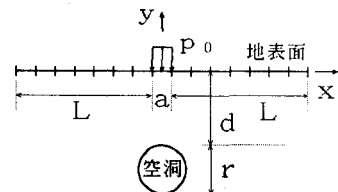
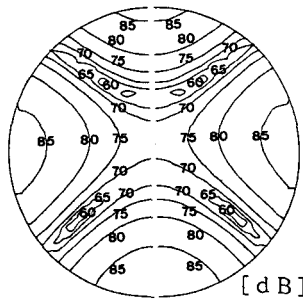
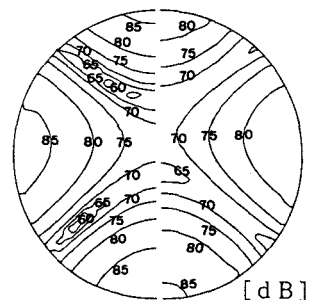


図-2 解析モデル

図-3は、加振周波数を50Hzとして、連続条件を考慮する解法と分離解法による、空洞内の音圧分布である。解析モデルが左右対称であるため、片側のみを示す。両解法の結果が同じであることがわかる。これより、地盤と音場の結合問題を解析する場合、境界面での法線方向粒子速度だけが必要であり、表面力と音圧の連続性は無視してもよいと言える。なお、以下の解析では両解法のどちらを用いても結果は同じになるが、ここでは連続条件を考慮する解法を用いる。

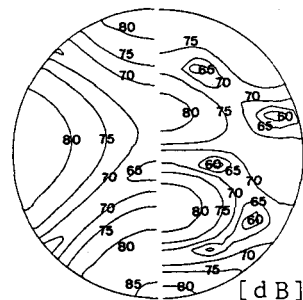


連続解法 分離解法
図-3 地盤-音場の結合解法の比較

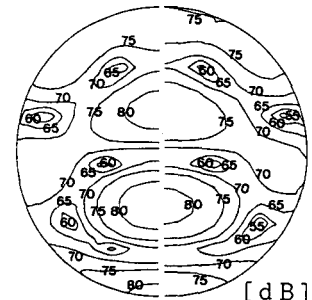


やや軟かい岩盤 やや硬い岩盤
図-4 地盤の剛性の影響

図-4は、加振周波数が50Hzのとき、地盤の剛性が空洞の音圧分布に及ぼす影響を調べたものである。図中、やや硬い岩盤の物理定数は、 $\rho = 2.4 \times 10^2 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$ 、 $\mu = 7.2 \times 10^8 \text{ kgf} / \text{m}^4$ 、 $\nu = 0.25$ である。やや軟かい岩盤と比較して、やや硬い岩盤の音圧分布は全体的



50 Hz 100 Hz
図-5 加振周波数の影響



吸音材なし 吸音材あり
図-6 吸音材の効果

に3~5dB程度低くなっている。空洞の音圧は境界面での法線方向粒子速度に影響されるが、やや硬い岩盤の場合この振動は小さくなるため、音圧が低くなるものと考えられる。

図-5は、やや硬い岩盤において、加振周波数が50Hzと100Hzのときの音圧分布である。100Hzの場合、50Hzのときに比べ、複雑な音圧分布になっており、等音圧線の間隔も狭く、音圧の高い部分、低い部分の領域も変化している。加振周波数が高くなれば、音場の境界面に生じる法線方向粒子速度の周波数も高くなるので、等音圧線も複雑な様相を呈することになる。

図-6は、やや硬い岩盤で加振周波数を100Hzとすると、地盤と空洞の境界面に吸音材を装着しない場合と、全周に吸音材を装着する場合の音圧分布を比較したものである。吸音材の定数として、垂直入射吸音率が $r_p = 0.5$ となるとき垂直入射音響インピーダンス $z = 248.3 \text{ kgf} \cdot \text{s} / \text{m}^2$ を用いている。吸音材を装着すれば、3~5dB程度低くなっており、吸音材の効果がみられる。

4. あとがき 本研究では、地盤と音場の結合問題において、それぞれの場を個々に解くことの妥当性が明らかになった。したがって、時間領域境界要素法の適用に際しても、個々の場に分けて解くことが可能である。この考え方に基づいて、時間領域境界要素法による解析を進めている²⁾ので、稿を改めて報告したい。

参考文献 1) 田中俊光：境界要素法を用いた音場の数値解析，日本音響学会誌，48巻，6号，pp.412-419，1992。

2) 植松知也：地盤-音響系の解析への境界要素法の適用に関する基礎的研究，神戸大学大学院工学研究科修士論文，1993。