

舞鶴工業高等専門学校 正会員 ○高谷 富也
神戸大学 工学部 正会員 北村 泰寿

1. まえがき 人為的な加振源から伝播してくる波動により発生する振動障害の防止策の一つとして、空溝による振動遮断対策がある。この問題の境界要素法解析に、全無限基本解を用いて近似的に半無限地表面を実現する解法^{1), 2)}が取られることが多い。しかし、分割要素の大半を半無限地表面の実現のために用いるため、計算コストの面からも実用的ではない。このため本研究では半無限弾性体内部の矩形面に作用する等分布加振力による変位・応力解を求め、三次元境界要素法の基本的な解として利用している。

2. 間接法による溝の解析 図-1に示す領域 Ω の解析モデルに対して、半無限基本解を用いるために図のように同じ材質の領域 Ω' を埋め込む。このとき、領域 $(\Omega + \Omega')$ に対して次式の境界積分方程式が得られる。

$$u_k(\eta) = \int_S u_{ik}^*(\xi, \eta) \phi_i(\xi) d\Gamma_\xi + \int_A u_{ik}^*(\xi, \eta) \bar{p}_i(\xi) d\Gamma_\xi \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 u_{ik}^* は半無限弾性体に対する変位基本解、 ϕ_i は密度である。また、積分範囲 S は溝部分、 A は加振力の作用範囲を意味する。変位基本解の対称性を考慮し、ソース点 η での表面力 p_k を求めれば次式となる。

$$p_k(\eta) = \int_S p_{ki}^*(\eta, \xi) \phi_i(\xi) d\Gamma_\xi + \int_A p_{ki}^*(\eta, \xi) q_i(\xi) d\Gamma_\xi \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 p_{ki}^* は応力基本解、 q_i は地表面に作用する分布加振力である。

いま、ソース点 η を溝部分の任意点 ξ_0 に近づけ、 $p_k(\xi_0) = 0$ であることを考慮すれば、未知の密度 ϕ_k に関する積分方程式を次式のように得る。

$$\frac{1}{2} \phi_k(\xi_0) + \int_S p_{ki}^*(\xi_0, \xi) \phi_i(\xi) d\Gamma_\xi + \int_A p_{ki}^*(\xi_0, \xi) q_i(\xi) d\Gamma_\xi = 0 \quad \dots\dots (3)$$

また、地表面の変位式は次式で与えられる。

$$u_k(\xi_0) = \int_S u_{ki}^*(\xi_0, \xi) \phi_i(\xi) d\Gamma_\xi + \int_A u_{ki}^*(\xi_0, \xi) q_i(\xi) d\Gamma_\xi \quad \dots\dots (4)$$

3. 矩形加振解の誘導 半無限弾性体内部の矩形面の等分布加振力による変位・応力解の誘導は、鏡像の原理に基づいて誘導する³⁾。まず、図-2において、全無限解の鏡像解による地表面に相当する位置の応力を求める。ついで、この応力を打ち消すために、逆の応力分布を加振力として半無限弾性体表面に作用させ、ポテンシャル解を求める。この解を鏡像解に重ね合わせれば、所要の半無限解が得られる。しかし、点加振における鏡像解が簡単な形で得られるのに対して、矩形加振における鏡像解は波数無限積分で表わされ、数値積分上取り扱い難い性質を有することがわかっている。本研究では、数値積分上の工夫として図-3に示すように鏡像解は点加振解を矩形面に関してガウ

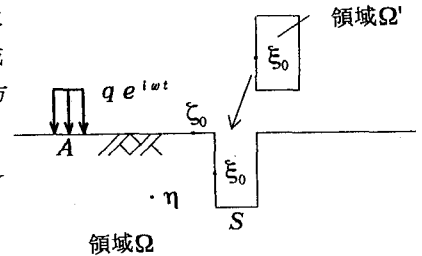


図-1 解析モデル

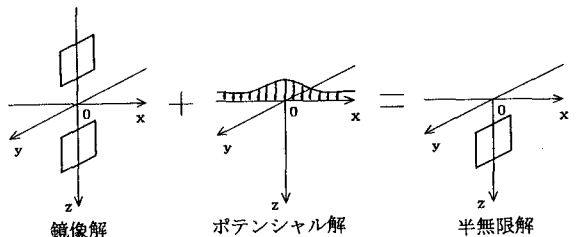


図-2 半無限解の誘導

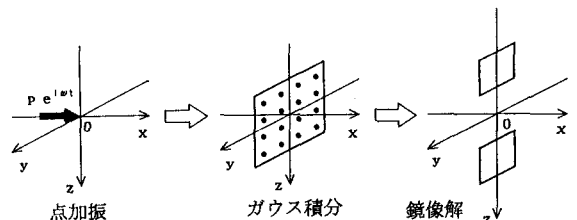


図-3 ガウス積分による鏡像解の評価

ス積分した。なお、ポテンシャル解はレイリー極を有する波数積分のため、既往の文献4)と同様に数値積分した。

4. 計算結果および考察 図-4に示す空溝の計算モデルにおいて、加振源は半無限弾性体表面の幅0.5m、長さ15mの矩形面に作用する等分布鉛直加振力 $q_z = 10^3 \text{ kg/m}^2$ としている。また、空溝を加振源中央から15m離れた位置に設け、寸法を深さ3m、幅0.5m、長さ15mとする。地盤の密度、せん断弾性係数、ポアソン比として以下の値を用いる。

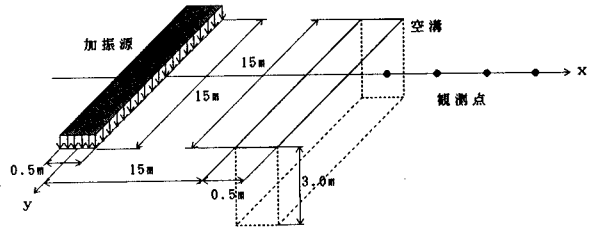


図-4 空溝モデル

$$\rho = 2.0 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4, \quad \mu = 8.0 \times 10^6 \text{ kg/m}^2, \quad \nu = 1/3$$

計算結果は、紙面の都合上、加振周波数が5Hz、15Hz、25Hzの3つのケースについて、加振源中央と溝中央を結ぶ地表面線上の鉛直変位の距離減衰曲線で示す。

図-5は、三次元解析の検証のため、鉛直変位の距離減衰を二次元モデルに対するそれと比較したものである。なお、溝を有する解析モデルに対する二次元解析は、文献5)の解を用いて、三次元解析と同様に間接法で行った。また、同図において、溝の無い半無限地盤に対する結果は、二次元、三次元ともに理論解である。既往の結果⁶⁾から判断して加振周波数 5Hzでは溝による振動遮断は生じない。したがって、加振周波数 5Hzでの距離減衰は溝の無い半無限地盤のそれとほぼ一致するはずである。図-5より、半無限地盤の理論解とほぼ一致していることから、本研究の三次元境界要素法は妥当な結果を与えるものと判断できる。一方、加振周波数 25Hzでは溝による振動遮断効果が大きく現れており、これも既往の結果⁶⁾と一致した現象である。また、図示していないが、溝の無い半無限地盤の変位に対する振幅比として減衰効果を評価すれば二次元と三次元の減衰状況はよく一致している。つまり、加振力の载荷長さおよび溝の長さが15m程度であれば、二次元解析により溝による振動遮断効果を評価しても差し支えないものと見なせる。

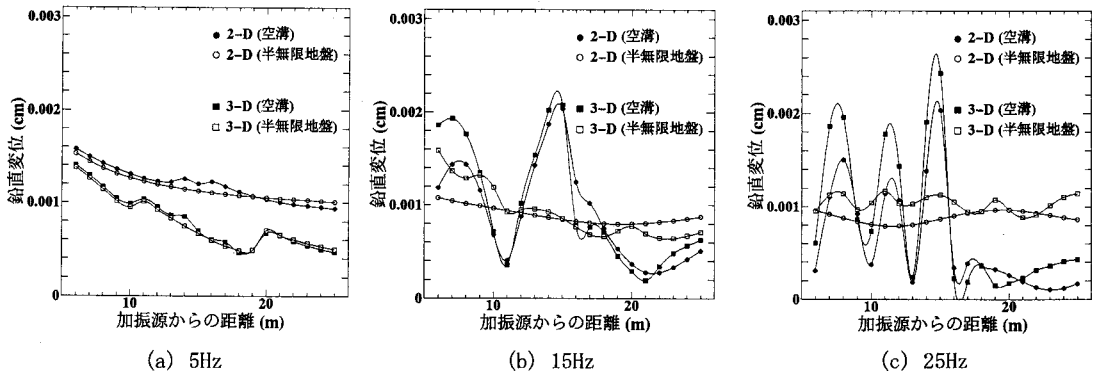


図-5 加振源からの距離減衰

5. あとがき 本研究では、半無限弾性体内部の矩形面に作用する等分布加振力による変位・応力解を用いて、空溝による振動遮断問題を三次元境界要素法解析した。変位・応力解の数値計算に際しては、被積分関数の性質が悪い鏡像解に対して数値計算上の工夫を行い、計算機コストの面で有用であることがわかった。

参考文献 1) Banerjee, P.K., Ahmad, S. and Chen, K. : Earthquake Engng. Struct. Dyn., Vol.6, pp.1041-1060, 1988. 2) Dasgupta, B., Beskos, D.E. and Vardoulakis, I.G. : Comput. Mech., Vol.6, pp.129-142, 1990. 3) 例えば、松岡・八幡：日本建築学会論文報告集、第288号、pp.73-84、1980. 4) 例えば、金井・田治見・大沢：地震工学、彰国社、1968. 5) 北村・網野：建設工学研究所報告、第38号、pp.309-321、1991. 6) 鈴木・石垣：地震、Vol.11、No.3、pp.130-136、1959.