基礎と地盤の動的相互作用を含む環境振動簡易評価手法 —埋め込み剛基礎の場合—

SIMPLE EVALUATION TECHNIQUE OF ENVIRONMENTAL VIBRATION WITH SOIL-STRUCTURE INTERACTION FOR A RIGID EMBEDDED FOUNDATION

秋田 真 ——— *1 前田寿朗 ——— *2

Makoto AKITA ——— *1 Toshiro MAEDA ——— *2

キーワード：
交通振動, Rayleigh 波, 基礎入力動, ガウス求積法, 埋め込み基礎

We have proposed a simple evaluation technique for environmental vibration based on soil-structure interaction. In this article, this technique was extended to cover an embedded foundation by applying averaging method with extrapolated displacements at Gauss points in depth. The method was verified by axisymmetric FEM simulation and applicability was depicted with real traffic acceleration data.

Keywords:
Traffic vibration, Rayleigh waves, Foundation input motion, Gaussian quadrature, Embedded foundations

1. はじめに

環境振動を対象とした短時間で信頼度の高い建物の振動予測を行うために、著者の一人は測定時に短時間で振動予測を可能とする簡易評価手法¹⁾を提案している。同手法は、振動測定時に実施した微動アレー測定結果の逆解析による地盤モデルの構築、振動源のモデル化を必要としない地盤の振動測定結果に平均化手法²⁾を用いた基礎入力動評価、そしてサブストラクチャー法を適用した計算負荷を減じた応答評価を特徴とする。

本報告では表面剛基礎を対象とした既報^{1, 3)}を埋め込み基礎へ拡張し、基礎入力動評価における数値積分の精度を半無限地盤における Rayleigh 波入射問題で解析解との比較により確認するとともに、実際の交通振動測定データへの簡易評価手法の適用性を評価した。

2. 埋め込み基礎に対する簡易評価手法の拡張

2.1 基礎入力動の評価方法

図1に、本研究で対象とする正方形の想定基礎と走行路の位置関係を示す。座標系には想定基礎底面中心に原点を有する z 上向き正の右手系を使用する。平均化手法による埋め込み基礎の基礎入力動近似評価式²⁾に測定データの利用を考慮した栗本他⁴⁾の式⁴⁾を用いると、基礎入力動は(1)式により評価される。 ρ は質量密度、 u^f , v^f , w^f は自由地盤における変位の x , y , z 成分、 S は想定基礎と地盤の仮想境界面、 V は仮想境界面 S で囲まれる領域である。 Δ_i^* は添え字 i 方向の基礎入力動の並進成分、 ϕ_i^* は i 軸まわりの回転成分を表す。 A_0 は想定基礎と地盤の仮想境界面の全面積、 S_z は仮想境界面の z 方向の1次モーメント、 J_{pi} は仮想境界面の i 軸に関する極2次モーメントである。 K は埋め込み基礎底面中心に集約されたインピーダンスマトリックスで、添え字 VV は上下、 HH は水平、 RR は回転、 HR は水平回転連成、 TT は振れの成分を表す。

(1)式における積分評価には、自由地盤内の仮想境界面 S 上および仮想領域 V 内における応答を定める必要がある。栗本他⁴⁾は想定基礎の隅角8点の内の6点に測定点を設置し、各測定点で得られた地震動変位データから、仮想境界面 S 、仮想領域 V 内の変位データを

線形補間により定め、積分評価を行っている。それに対して本報では、測定点を任意に設定できる建設直前の空地での測定を前提として比較的少ない測定点で高振動数範囲の積分精度評価の向上が期待されるガウス求積法を適用した。具体的には、図1に示すように地表面のガウス積分点に測定点を設定し、深さ方向には実測データに別途評価した深さ方向の応答比を適用して地盤内積分点の応答を推定し、ガウス求積法による積分評価を行った⁵⁾。

図1 走行路と正方形基礎の位置関係

$$U^* = H^{-1} \iint_S A^T U^f dS - K^{-1} \iiint_V [-\rho A^T \ddot{U}^f] dV \quad (1)$$

$$U^* = \{\Delta_x^*, \Delta_y^*, \Delta_z^*, \phi_x^*, \phi_y^*, \phi_z^*\}^T \quad (1-1)$$

$$U^f = \{u^f(x), v^f(x), w^f(x)\}^T \quad (1-2)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot & \cdot & z & -y \\ \cdot & 1 & \cdot & -z & \cdot & x \\ \cdot & \cdot & 1 & y & -x & \cdot \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

$$H = \iint_S A^T A dS = \begin{bmatrix} A_0 & \cdot & \cdot & \cdot & S_z & \cdot \\ \cdot & A_0 & \cdot & -S_z & \cdot & \cdot \\ \cdot & -S_z & \cdot & J_{px} & \cdot & \cdot \\ S_z & \cdot & \cdot & \cdot & J_{py} & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & J_{pz} \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{HH} & \cdot & \cdot & \cdot & K_{HR} & \cdot \\ \cdot & K_{HH} & \cdot & -K_{HR} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & K_{VV} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & -K_{HR} & \cdot & K_{RR} & \cdot & \cdot \\ K_{HR} & \cdot & \cdot & \cdot & K_{RR} & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & K_{TT} \end{bmatrix} \quad (1-5)$$

¹⁾ 早稲田大学大学院創造理工学研究科建築学専攻 大学院生
(〒169-8555 新宿区大久保3-4-1)

²⁾ 早稲田大学理工学術院建築学科 教授・博士(工学)

¹⁾ Graduate Student, Dept. of Architecture, Waseda Univ.

²⁾ Prof., Dept. of Architecture, Waseda Univ., Dr. Eng.

2.2 ガウス求積法の適用性の確認

(1)式におけるガウス求積法の適用性を確認するため、半無限地盤における x 方向に伝播する Rayleigh 波入射に対する正方形埋め込み基礎の基礎入力動について、(1)式の解析解とガウス求積法による数値解を比較した。解析解の導出にあたっては、円筒形埋め込み基礎に関する研究⁹⁾を参考にした。ポアソン比 0.25、面積等価な円半径に対する埋め込み深さの比で定義した埋め込み比 $\delta = 0.0$ および 1.0 とし、基礎のインピーダンスには面積等価な円筒形基礎に対する軸対称 FEM の結果を用いた。 z 方向の積分点数に対して x 方向の積分点数による影響が顕著であることを確認し、 y 軸直交の面を除く積分において y 方向の積分には 1 点積分、 z 方向には 3 点積分、 x 方向には 2 点あるいは 3 点積分を使用した。図 2 に想定基礎地表面中心位置の自由地盤応答の各成分で無次元化した、底面位置での基礎入力動の水平、上下、ロッキング成分を、S 波の波数に基礎半幅を乗じて定義した無次元振動数 a_0 に対して示す。尚、ロッキング成分については基礎半幅を乗じて水平成分で無次元化した。

解析解に対して、 x 方向 2 点積分による数値解は上下および水平成分では δ によらず $a_0 = 2$ 程度まで一致し、ロッキング成分では $\delta = 0.0$ のとき $a_0 = 1$ 、 $\delta = 1.0$ のとき $a_0 = 2$ 程度まで一致する。また $\delta = 1.0$ のとき特に上下成分で誤差が顕著になるようである。 x 方向 3 点積分では各成分とも、 $\delta = 0.0$ のとき $a_0 = 3$ 程度まで、 $\delta = 1.0$ のとき $a_0 = 4$ 程度まで解析解に対応する。以上より伝播方向に対する積分点数は対象とする振動数に応じて 3 点以上にすることが望ましいと考えられる。

3. 交通振動の適用性の検討

図 1 に示した位置関係において生じる主要な波動場を走行路に直交する x 方向に伝播する Rayleigh 波と想定し、基礎入力動の水平 x 成分(Δ_x^*)、上下 z 成分(Δ_z^*)、 y 軸まわりのロッキング成分(ϕ_y^*)のみを扱うこととする。各測定点にはサーボ加速度計を 2 台設置し、上下および水平 x 方向の 2 成分をサンプリング周波数 256Hz、測定時間 16 秒で測定した。

3.1 測定概要³⁾

図 1 に示す厚さ 2m で 1 辺 $4\sqrt{5/3}$ m(=約 5.16m)の正方形基礎を想定し、走行路より 12m 離れた位置を想定基礎の地表面中心に設定した。測定点を 2×2 、 3×2 、 3×3 点(x 方向測定点数 $\times y$ 方向測定点数)のガウス積分点に設置し各 18 回の測定を行った。同一加振の比較検討を行えるように 2×2 、 3×2 点測定では同時測定を行い、参照基準点として地表面想定基礎中心位置にも測定点を設置した。本報では代

表測定データとして 3×2 点測定におけるデータを使用する。図 3 に交通振動測定で得られた地表面上の想定基礎中心位置の加速度フーリエスペクトル振幅の上下および水平の 2 成分の例を示す。

3.2 地盤モデルとインピーダンス関数

PS 検層結果に基づいて、図 4 に示す軸対称 FEM 4 層地盤モデルを作成した。モデル化範囲を半径 20m、深さ 30m とし、境界条件として側面エネルギー伝達境界、底面粘性境界を設定し、履歴減衰を 2% に設定した。要素寸法は $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ を基本とし、想定基礎位置ではガウス積分点位置に合わせるため $0.2\text{m} \times 0.2\text{m}$ とした。S 波 1 波長あたり 5 要素で評価した最大振動数は 25Hz である。

正方形基礎を面積等価な半径 3m の円形無質量剛基礎に置換し、切り欠き地盤の基礎と地盤の境界面に剛体拘束条件を設定して軸対称 FEM によりインピーダンスマトリックスを求めた。図 4 に基礎周辺の FEM モデルを、図 5 に表面基礎および埋め込み基礎インピーダンスの水平、上下、回転、水平回転連成分を示す。

3.3 交通振動に対する基礎入力動

埋め込み基礎の基礎入力動評価に必要な自由地盤内応答は、軸対称 FEM により地表面上の参照点の応答に対するガウス積分点の応答の比を算定し、得られた応答比と参照点の実測データとの積により推定した¹⁾。3.を参照して z 方向の積分点数を 3 点とした。(1)式の第 1 項の底面の面積積分および第 2 項の体積積分の各ガウス積分点に対する参照点は、ガウス積分点直上の測定点であり、第 1 項の底面を除く面積積分については、直上近傍の測定点である。各ガウス積分点と参照点の関係を 3×3 点測定を例に図 6 に示す。

図 7 に、実測データに基づいて評価した表面基礎および埋め込み基礎に対する基礎入力動を示す。水平および上下成分は想定基礎地表面中心位置の自由地盤の各応答成分で規準化し、ロッキング成分については想定基礎半幅を乗じて水平成分により規準化している。平均化法による表面基礎および埋め込み基礎底面位置の基礎入力動をそれぞれ AVG (Flat), AVG (Embedded) とし、走行路中心での上下点加振による無質量剛基礎の同様な応答を FEM (Flat), FEM (Embedded) として示す。後者については相反定理に基づいて、基礎底面中心位置での上下、水平、およびロッキング点加振による走行路中心の上下応答を、軸対称 FEM により求めて評価した。

並進成分は高振動数ほど振幅の小さい入力損失効果を基本的に示し、ロッキング成分については振動数とともに増大したのち減少し、いずれも図 2 の半無限地盤に対する基礎入力動と類似した傾向にある。上下成分については、表面基礎および埋め込み基礎ともに FEM と平均化手法の差は比較的小さく、15Hz 程度までは図 2 の半無限地

図 2 Rayleigh 波に対する埋め込み基礎の基礎入力動

図3 交通振動測定加速度フーリエスペクトル振幅

図4 軸対称地盤モデルと基礎モデル

図5 基礎のインピーダンス

図6 3×3点測定 Gauss 積分点と測定点の関係

図7 交通振動に対する埋め込み基礎の基礎入力動

盤と同様に表面基礎の基礎入力動がやや大きめである。水平成分については、FEM と平均化手法は主要なピークで対応するが、平均化手法にはより多くの細かい変動が認められ、実測データにおける測定地点ごとのばらつきが反映されているようである。また、表面基礎において手法間の違いがより顕著である。ロッキング成分について

では手法間の違いは比較的小さく、表面基礎の入力動は埋め込み基礎よりも大きめであり、半無限地盤で見られた傾向に対応する結果となっている。なお、表面基礎、埋め込み基礎共に、交通振動においてはレイリー波に対すると同様にロッキング入力に顕著である。

3.4 交通振動に対する応答予測

想定基礎を質量密度 2.4t/m^3 、ヤング係数 $2.05 \times 10^7 \text{kN/m}^2$ の RC 基礎とした場合、スウェー・ロッキングモデルによる表面基礎および埋め込み基礎の重心位置の各成分の基礎応答を図 8 に SR (Flat), SR (Embedded) として示す。また同図に想定基礎の等価面積をもつ RC 基礎を含めてモデル化し、相反定理を適用して求められた軸対称 FEM による一体解法の結果を FEM (Flat), FEM (Embedded) として示した。図 7 の基礎入力動と同様に想定基礎地表面中心位置の自由地盤応答の各成分に対して規準化を行っている。図 9 には図 7 の基礎入力動に対する図 8 の応答の伝達特性を示した。

上下成分については、基礎入力動同様に FEM と平均化手法の差は比較的小さく、図 9 の SR モデルの伝達特性にも見られるように、高振動数での減少はより顕著となっている。水平成分については、いずれの基礎形式においても回転入力動の影響が伝達特性を介して含まれ、水平入力動に比べて表面基礎応答の増大、埋め込み基礎応答の減少につながっている。ロッキング成分についてはほぼロッキング入力相当である。

4. まとめ

本報告においては、表面基礎に対して展開した環境振動簡易評価手法を埋め込み基礎に拡張し、地表面での測定結果から地盤内応答を推定しガウス求積法を用いて平均化手法を適用した。まず、半無限地盤に埋め込まれた基礎の基礎入力動に対して、解析解との比較により数値積分法の精度評価を行って積分点数を評価した。つぎに、実地盤の PS 検層結果に基づいて設定した地盤モデルを用いて、測定結果を用いた簡易評価法と FEM シミュレーションを比較し、基礎入力動において概ね対応する結果が得られること、ならびに基礎

応答においては交通振動に対する基礎ロッキング入力動の影響が大きいたことが示された。以上より、測定結果から地盤内応答を推定しガウス求積法を用いて平均化手法を適用する、簡易評価手法の有効性が確認されたと考えられる。今回の検討においては、インピーダンスおよび地盤内応答の推定に FEM による解析結果を用いたが、現地での測定時に迅速な検討を可能とするような、より簡便な手法の適用も可能である。

謝辞

環境振動簡易評価手法の検討の機会を与えていただくとともに、その発展に対して有用な議論をいただいた、大成建設株式会社日比野浩および田口典生、両博士に感謝いたします。

参考文献

- 1) 前田寿朗, 斎藤豪, 日比野浩, 田口典生: 基礎と地盤の動的相互作用を含む環境振動簡易評価手法の開発, 日本建築学会技術報告集, 第 31 号, pp.785-788, 2009.10
- 2) 井口道雄: An Approximate Analysis of Input Motions for Rigid Embedded Foundations, 日本建築学会論文報告集, 第 315 号, pp.61-75, 1982.5
- 3) 木村友彦, 秋田真, 前田寿朗: 交通振動に対する環境振動簡易評価法の検討 その 1 表面基礎の基礎入力動近似評価法におけるガウス求積法の適用性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010.9
- 4) 栗本修, 井口道雄: 実地震記録に基づく基礎入力動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 427 号, pp.67-74, 1995.6
- 5) 秋田真, 木村友彦, 前田寿朗: 交通振動に対する環境振動簡易評価法の検討 その 2 埋め込み基礎の基礎入力動に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010.9
- 6) Michio Iguchi: Seismic Response of Cylindrical Embedded Foundations to Rayleigh Wave, Proc. of Japan Earthq. Engrg., Vol.6, pp.1729-1736, 1982.

図 8 交通振動に対する埋め込み基礎の応答予測

図 9 埋め込み基礎の伝達特性

[2010 年 10 月 20 日原稿受理 2010 年 12 月 7 日採用決定]