

境界非線形性がインピーダンスに与える 影響についての理論的研究

(財)鉄道総合技術研究所 正会員 齊藤 正人
同上 正会員 棚村 史郎
埼玉大学工学部 正会員 渡辺 啓行

1. はじめに

一般に、基礎と地盤、構造物系の動的相互作用の理論的研究では、基礎と地盤が水平加振時も完全密着している条件を課すことで、地盤と基礎の挙動が解かれている(例えば Tajimi¹⁾, Novak²⁾)。また、このような条件下における基礎と地盤系の動的相互作用問題は、理論的手法に限らず様々な研究者によるアプローチによりほぼ解明されたといってもよい。しかし、実際の現象では、その境界においては滑り・剥離等の非線形現象が現れると考えられる。上記理論では基礎と地盤がお互いに接触面と通じて引き合うことになるが、実際に境界で剥離が生じると、相互間で力の伝達が行われなくなる。境界で滑りが生じる場合には、伝達される力は減少することになる。さらにこれらの現象に伴う接触面積の変化は、基礎・構造物系への入力地震動の変化に繋がり、これら非線形性により系の動特性は大きく影響を受けるものと考えられる。FEM 等による離散的手法により、このような境界非線形性が構造物系に与える影響についていくつか研究されているが、離散系手法では Kinematic Interaction と Inertial Interaction が分離できず、全体系の非線形応答特性は把握できるが、複素インピーダンス、有効入力動等の把握が行うことは非常に困難である。そこで本研究では、この境界非線形性を考慮した3次元弾性波動論に基づく理論的手法を開発し³⁾、境界非線形性が生じたときの基礎天端における複素インピーダンスの把握を行った。

2. 境界非線形性を考慮した理論的手法

これまでの理論解で用いられている境界の完全密着条件は、境界部に生じる地盤の振動性状を回転方向に展開したフーリエ次数の1次モードに仮定することで満たされる。境界非線形性が生じる場合には、ある瞬間にある点では滑り・剥離が生じ、またある点では接触している複雑な地盤の振動性状を示す。従って本手法では、境界部地盤の振動性状を1次モードのみならず高次モードまで考慮する。任意時間における系の応答について、境界点に生じる応力と基礎と地盤の相対変位の関係からこれらを混合境界値問題に帰着させて、これを解くことで弾性波動論に基づく理論解を求めることが可能となる。またここで誘導される任意時間の理論解は、基本的には調和振動入力に対する基本成分波の応答解であり、線形方程式の解である。各時間ステップで変化する境界条件から求まるこれらの解を、各時間刻みで連続させる方法を採用することで、各時間ステップ毎に変化する境界の非線形性を考慮した系の応答が求まる。この線形方程式の接続による非線形系の解析手法については Hartog³⁾により示されている。境界非線形性を考慮した理論解の誘導における解析モデルの諸条件等の設定は、基礎の曲げとロッキングの効果を同時に考慮した理論解(齊藤⁴⁾)をもとにしている。図1に解析モデルを示す。表層地盤は線形・均質であり、地表面は自由、表層基面には剛基盤を仮定する。また減衰は振動数に依存しない履歴型減衰を用いる。基礎は円形断面を有し、一様な弾性体である。基礎底面には Novak⁵⁾の複素回転ばねを設定する。上部構造物は線形で、基礎天端には水平荷重のみ伝達する。基礎と地盤の境界には複素非線形特性を与え、境界部の滑り・剥離・接触状態の判定は次式で定義する。

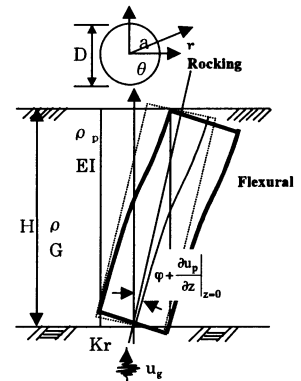


図1 解析モデル

キーワード：境界非線形性、複素インピーダンス、動的相互作用

連絡先：〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38(財)鉄道総合技術研究所 Tel 042-573-7261 Fax 042-573-7248

剥離境界条件：
$$\sigma_r|_{r=a} \leq \sigma_0$$

$$\sigma_r|_{r=a} > \sigma_0$$

$$u_r|_{r=a} = U_r, \quad u_\theta|_{r=a} = U_\theta$$

$$\sigma_r|_{r=a} = 0, \quad \tau_{r\theta}|_{r=a} = 0$$

滑り境界条件：
$$|\tau_{r\theta}|_{r=a} \geq (\sigma_0 + |\sigma_r|_{r=a}) \tan \delta$$

$$\tau_{r\theta}|_{r=a} = \sigma_r|_{r=a} \tan \delta$$

$\sigma_r, \tau_{r\theta}, \sigma_0$ ：順に半径方向境界応力，回転方向境界応力，初期境界応力
 $u_r, u_\theta, U_r, U_\theta, \delta$ ：順に半径，回転方向地盤変位，半径，回転基礎変位，摩擦角

3. 境界非線形性が複素インピーダンスに与える影響

本解析で用いた解析モデルの諸数値を表 1 に示す。境界条件は深度方向に異なるため，表層の分割数を 100 分割とする。また，地盤の周回り方向のフーリエ次数を 0 から 4 次モードまでとし，深度方向のモードは 5 次モードまで考慮する。入力加速度は 50Gal，100Gal，250Gal で設定する。図 2 に基礎天端における複素インピーダンスを示す。

(a)(d)(g)には実部(剛性)，(b)(e)(h)には虚部(減衰項)，(c)(f)(i)には Voigt 型モデルに置換したときの減衰定数を示す。複素インピーダンスは，境界条件の時間的な変化により図 3 のような時間に依存する特性を示すことから，図 2 にはその最大値と最小値を同時にプロットしている。図 2 において，上部構造物主体となる卓越振動数は 1.9Hz 近傍で，地盤主体の振動数は 3.0Hz 近傍である。線形系のインピーダンスと比較すると，上部構造物を主体とする振動数で複素インピーダンスが振動し，微小な振動数の違いによりその振幅も大きく変化する傾向に

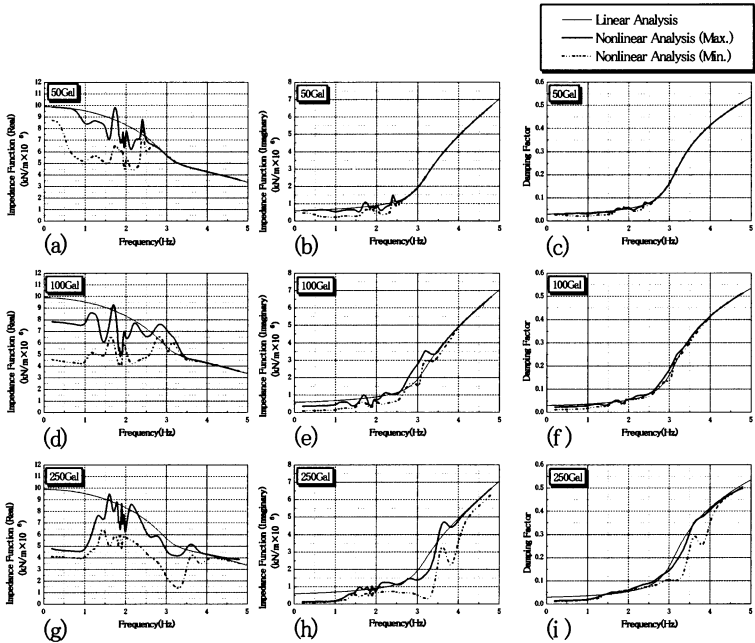


図 2 境界非線形性が複素インピーダンスに与える影響

ある。この時，平均的に剛性は低減し，減衰項も減少する。地盤の固有振動数では，入力レベルの違いにより異なるが，非線形性が大きくなる 250Gal のケースでは，線形時に比べて剛性，減衰が減少する傾向にある。これは基礎と地盤の接触面の低減により地盤の拘束効果と逸散減衰の低減が影響していると考えられる。

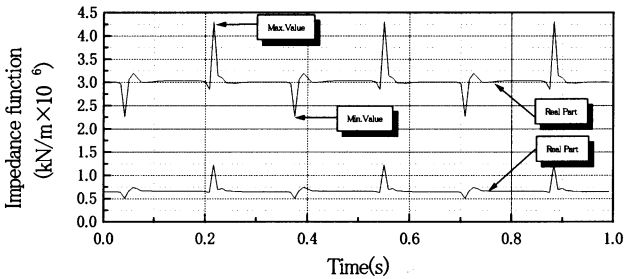


図 3 複素インピーダンスの時間的変化

参考文献

- 1) H.Tajimi, 'Dynamic analysis of a structure embedded in an elastic stratum', Proc. 4thWCEE,(1969).
- 2) M.Novak, 'Soil-Pile interaction in horizontal vibration', Int.J. Earthq.Engng Struct. Dyn.5,(1977)
- 3) J.P.Den Hartog 'Mechanical Vibrations', Mcgraw-Hill Book Company, Inc. 4th Edition,(1956)
- 4) Masato Saito, Yoshitaka Murono, Akihiko Nishimura : Study on Effective Seismic Motion of Caisson Foundation with Flexural and Rocking Motions, 10th JEES,(1998).
- 5) M.Novak, Beredugo, Y.O, 'Coupled horizontal vibration of embedded footings', Canadian Geotech. J., Vol.9 (1973)

表 1 解析モデルの諸元

Properties	Unit	Values
Soil		
Mass density (ρ)	t/m ³	1.8
Poisson's ratio (ν)	-	0.49
Shear velocity of surface (V_s)	m/s	200.0
Shear velocity of bedrock (V_d)	m/s	400.0
Damping constant (h_s)	-	0.10
Foundation		
Young modulus (E)	KN/m ²	2.5×10^7
Thickness of side-wall (t)	m	1.2
Diameter (D)	m	6.5
Length of foundation (L)	m	20.0
Superstructure		
Mass weight (M)	t	7000
Spring constant of pier (Ks)	KN/m	1.212×10^6
Damping constant (hs)	-	0.05