

根入れ基礎を有する海洋構造物の動的応答解析

東海大学大学院 学生員 ○内海 秀幸
東海大学海洋学部 正 員 川上 哲太郎
東海大学海洋学部 正 員 北原 道弘

1. 緒言

広義の意味における海洋構造物には様々な種類があるが、橋脚基礎部に代表されるような海底地盤に根入れされたタイプも少なくない。これらは、外力に対して高い安定性を要求されており、地震による動的挙動を把握することは工学上重要な課題の一つである。

海洋構造物の地震時挙動を明らかにするには、海底地盤および流体との連成効果を無視することはできない。そこで、本研究では、根入れ基礎を有する海洋構造物 - 流体 - 海底地盤連成系における地震動に対する動的応答解析を境界要素法を用いて行ったものである。

2. 解析モデル

解析対象とする海洋構造物 - 流体 - 海底地盤連成系モデルをFig. 1に示す。Fig. 1において、領域 I^- , I^- , I^+ は流体領域（非圧縮非粘性の完全流体）であり、 I^- と I^+ は一定水深領域。また、領域 I は構造物による波の散乱が顕著な領域である。領域 II は海洋構造物（弾性体）、領域 III は海底地盤（非排水状態での多孔質弾性体¹⁾²⁾）である。海底地盤内を伝播する入射波動 u^i は地震動を意味する。

3. 解析手法

3.1 基礎式

解析モデルの各領域 I , II , III における基礎式は周波数領域において、それぞれ以下のように表される。

流体領域 $I^- + I^- + I^+$:

$$\Delta\Phi = 0 \quad (1)$$

構造物領域 II :

$$\mu\Delta\mathbf{u} + (\lambda + \mu)\nabla\nabla\cdot\mathbf{u} + \rho\omega^2\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (2)$$

海底地盤領域 III :

$$\mu\Delta\mathbf{u} + (\alpha_b + 2\alpha_c + k_c + \frac{\mu}{3})\nabla\nabla\cdot\mathbf{u} + \rho\omega^2\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (3)$$

(3)式において、係数 α_b , α_c , k_c はそれぞれ定数であり、骨格の圧縮率、土粒子の圧縮率、水の圧縮率、また間隙率から構成される³⁾。領域 II と III に対する基礎式(1)および(3)式とを比較すれば、Lamé定数 λ に対して $\lambda \longleftrightarrow \alpha_b + 2\alpha_c + k_c - \frac{2}{3}\mu$ の関係がある。すなわち、普通の弾性体において、Lamé定数をこのような特別な値に選んだ場合の変位が、非排水状態における多孔質弾性体の変位と考えることが出来る。

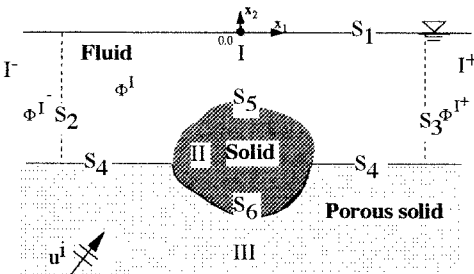


Fig. 1 Structure - fluid - seabed system

3.2 連続条件

各領域の接続境界における連続条件をまとめると次のようになる。

流体と海底地盤の境界 S_4 :

$$\mathbf{t}_G = -n_G P = n_F i \rho_F \omega \Phi \quad (4)$$

$$-i\omega \mathbf{u}_G \cdot \mathbf{n}_G = \mathbf{V} \cdot \mathbf{n}_G = -(\nabla\Phi) \cdot \mathbf{n}_F \quad (5)$$

流体と構造物の境界 S_5 :

$$\mathbf{t}_S = -n_S P = n_F i \rho_F \omega \Phi \quad (6)$$

$$-i\omega \mathbf{u}_S \cdot \mathbf{n}_S = \mathbf{V} \cdot \mathbf{n}_S = -(\nabla\Phi) \cdot \mathbf{n}_F \quad (7)$$

構造物と海底地盤の境界 S_6 :

$$\mathbf{t}_G = -\mathbf{t}_S \quad (8)$$

$$\mathbf{u}_G = \mathbf{u}_S \quad (9)$$

ここで、添字 G は海底地盤、 S は構造物、 F は流体に関連した量を表す。また、 $\mathbf{t}$ は表面力、 $\mathbf{n}$ は境界の単位法線ベクトル、 P は流体圧、 $\mathbf{V}$ は流体の速度ベクトルである。また、境界 S_2 , S_3 においては、領域 I^- と I^+ 部分における水深が一定であるという仮定から得られる、速度ポテンシャルに関する級数解と領域 I を接続する。

3.3 境界要素法

本研究において用いた解析手法を概説すれば次のようになる。まず領域 I の速度ポテンシャルおよび領域 II , III の弾性変位に関する境界値問題を、Greenの公式、および極限操作を用いて境界積分方程式に変換する。次に得られた各境界積分方程式を離散化し、3.2に示した連続条件および自由水面 S_1 の境界条件を導入する事により、各領域を接続する。その結果得られる、海洋構造物-流体-海底地盤連成系に対する連立一次方程式を用いて解析を行った。

4. 計算結果

数値計算モデルは根入れ効果を検討するため、重力式海洋構造物(type A)、海底地盤に根入れ基礎を有する海洋構造物(type B)の2ケースとした。地盤外力として弾性波(S , P 波、鉛直下方より入射)入射を考える。また、弾性構造物はコンクリート程度、海底地盤には砂岩程度の剛性を有するものと考え、構造物と地盤のせん断弾性係数の比 $\mu_S/\mu_G = 20$ 、密度比 $\rho_S/\rho_G = 1.2$ 、ポアソン比 $\nu_S = 0.2$, $\nu_G = 0.487$ として解析を行った。

計算結果として、無次元化入射波波数 $bk_T = 0.05 \sim 5.0$ に対する構造物天端中央point Aにおける応答倍率をFig. 2に示す。Fig. 2(a)の P 波入射に対する応答倍率では、 $bk_T = 0.4$ 以下の範囲ではtype Aとtype Bの応答倍率の差はほとんど見られない。しかしながら $bk_T = 0.4$ 以上においては、type Bの応答倍率は、type Aに比べて顕著に小さくなっており、構造物を根入れする事による効果が表れている。特に、 $bk_T = 0.8$ 付近における応答倍率のピーク値(図中Peak(a)およびPeak(b))を比較してみると、根入れの効果が約30%表れていることがわかる。

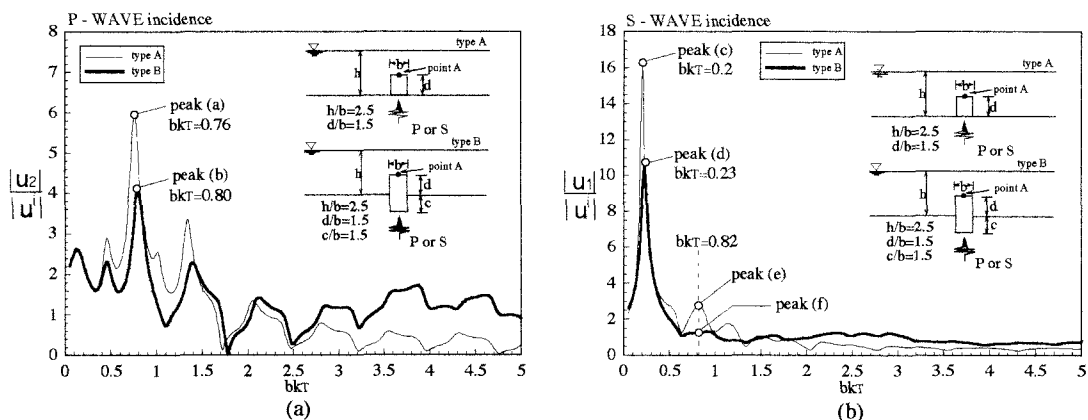


Fig. 2 Response curves at point A

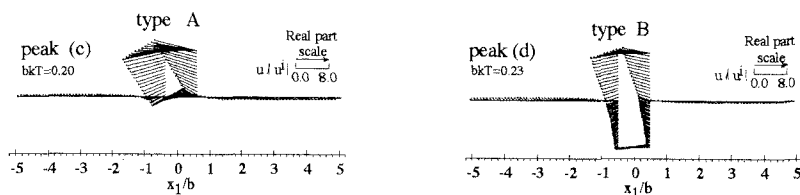


Fig. 3 Deformations for seabed and structure S-wave incidence peak(a), peak(b)

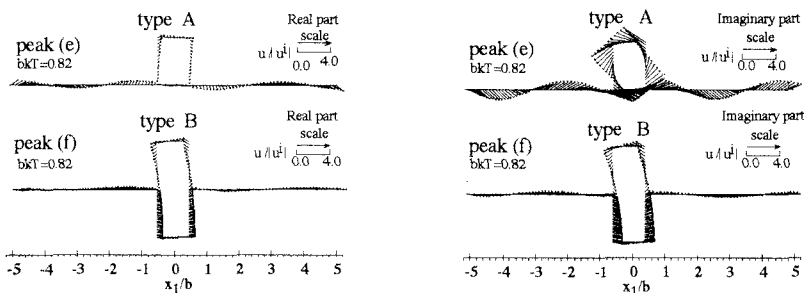


Fig. 4 Deformations for seabed and structure S-wave incidence peak(e), peak(f)

次に Fig. 2.(b) に示した、S波入射に対する応答倍率では、 $bk_T=0.2$ 付近の第一ピークにおいて、根入れの効果が顕著に表れている。図中に示した Peak(c) と Peak(d) における応答倍率を比較してみると、根入れを施すことによる変位(水平)の抑制効果が約 35% 表れていることがわかる。S波入射時では、第一ピークを示した後の応答倍率は、type A においてのみ $bk_T=0.82$ 付近で第二ピークを示すが、type B では顕著にピークがは現れていない。

Fig. 3 では S波入射時における応答倍率の第一ピーク (peak (c), peak(d)) における構造物、海底地盤での変位を示す。type A の構造物は全体的には回転を伴った剛体的な変形を示しているが、構造物底面ではねじれ弾性変形を示している。根入れを有する type B では、構造物の根入れ部分においては、曲げ変形的な弾性変形を示しているのに対し、海底地盤表面より上の部分では剛体的に傾斜してい

る。また、type A の構造物底面での変位と type B の根入れ部分の底面における変位 (type A 同様ねじれ弾性変形) を比較してみると、明らかに type B の方が変位は小さくなっており、根入れによる効果が確認される。

同様に、Fig. 4 では peak (e), peak(f) ($bk_T=0.82$) の変位を、実数部および虚数部あわせて示す。type A の場合、peak(e) では実数部に比較し、虚数部において大きな変位を示している。

参考文献

- 1) Biot, M.A.: General theory of three-dimensional consolidation, *J. Appl. Phys.*, Vol.12, pp.155-164, 1941.
- 2) 石原研而: 土質力学の基礎, 鹿島出版会, 1981.
- 3) Skempton, A.W.: Effective stress in soils, concrete and rocks, *Pore Pressure and Suction in Soils*, Butterworths, London, 1961.
- 4) 内海秀幸 他: 地震時における海洋構造物の根入れ効果の検討, 境界要素法論文集, 12 巻, pp.133-138, 1995