

(105) 波浪下における海洋構造物の不規則地震応答解析

住友金属工業(株) 正員 ○ K.Venkataramana  
 鹿児島大学工学部 正員 河野 健二  
 京都大学工学部 正員 山田 善一 家村 浩和

1. まえがき

地震活動域にある海洋構造物に対して地震力が構造物の動的応答に及ぼす影響を明確にしておくことは、海洋構造物の設計を合理的で信頼性のあるものにするために重要であると思われる。本研究は地震力と波力が同時に作用する場合のジャケット型の海洋構造物の動的応答解析を行い、地震力の影響について検討を加えたものである。巨大な地震が作用するとき、設計波高を与える波力が同時に作用する確率は非常に小さいと思われるが、平均的な波力の作用する場合は多いと思われる。またこのような外力を受けるとき上部構造と杭基礎との間の動的相互作用についても考慮しておく必要があると思われる。そこで本研究では地震力と波力が同時に作用する場合のパワースペクトル密度関数を用いて、スペクトル応答解析を行った。これより任意の応答レベルに対する超過確率を求め、地震力が海洋構造物の応答に及ぼす影響について検討を加えた。

2. 全体系の運動方程式

本研究ではFig. 1に示すようなジャケット型の海洋構造物が地震力と波力を同時に受ける場合の動的応答解析を行う。上部構造物は有限要素法を用いて表すことにより、運動方程式を求めることができる。杭基礎-地盤系の動的特性をインピーダンス関数を用いて表すと、動的サブストラクチャ法の適用により全体系の運動方程式を求めることができる。この場合、非減衰時の固有値解析を適用して、上部構造の自由度の低減を行うことは非常に有用である。ここで求められた全体系の運動方程式は一般に非比例減衰系となる。Fig. 1に示す構造物はTable 1からも分かるように応答を支配する1次と2次モードの固有振動数が離れておりモード間の連成の影響が小さいと考えられる。したがって全体系の運動方程式に再び非減衰時の固有値解析を適用すると、次のようになる。

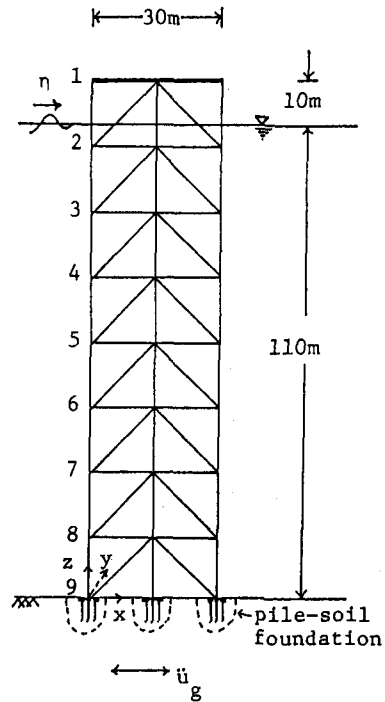


Fig.1 Analytical model of structure-pile-soil system

$$\{\ddot{y}\} + [2\beta_j \omega_j] \{\dot{y}\} + [\omega_j^2] \{y\} = [\Psi]^T \begin{bmatrix} [P_a] \\ [P_b] \end{bmatrix}_w \begin{Bmatrix} \{\dot{v}_{oa}\} \\ \{v_{oa}\} \end{Bmatrix} - [\Psi]^T \begin{bmatrix} [P_a] \\ [P_b] \end{bmatrix}_e \{\ddot{u}_g\} \quad (1)$$

where

$$\begin{Bmatrix} \{q\} \\ \{u_p\} \end{Bmatrix} = [\Psi] \{y\}$$

水粒子の速度  $v_{00}$ 、加速度  $\dot{v}_{00}$  および地震波の加速度  $\ddot{u}_g$  が与えられると、式(1)から応答が求められる。一般に、これらはランダムな特性を有するため、パワースペクトル密度関数を用いて表される。水粒子の運動に関しては微小振幅波理論を適用すると、Bretschneider型のパワースペクトル密度関数により海面運動が表される。一方、地震の加速度は、表層地盤の振動特性をとり入れた多治見型のパワースペクトル密度関数を用いて表される。

したがって式(1)のフーリエ変換を行い、スペクトル解析を適用すると、これらの外力に対する応答のパワースペクトルを求めることができる。この結果を用いて構造物各点の定常状態における二乗平均応答が求められる。

ところで本解析では、海洋構造物の建設される場所を限定していないので、波力と地震力の発生に関する同時確率密度分布は明確ではない。そこで設計波高や周期に対する応答を基準にして、地震力が作用する場合の応答超過の信頼性を求めることにする。地震力はその二乗平均加速度の大きさをパラメータとして解析を行っている。任意の応答値に対する、初通過確率は、Vanmarkeによって示された式を用いて表している。<sup>2)</sup>

### 3. 応答解析結果

**動的応答特性** 解析モデルはFig. 1に示すように水深が110mあり、杭基礎によって支持されている。構造物の主脚はパイプ断面からなり、その外径は2.8m、その厚みは27mmである。また地盤のせん断波速度は100m/sである。

Tableは上部構造物基礎を固定した場合と、杭基礎とした場合の3次までの固有振動数を示したものである。2つの異なる振動系に対する固有振動数は類似していることが分かる。

Fig. 2は波力と地震力が同時に作用する場合の1次振動に対するパワースペクトルを示したものである。これは構造物が平均波高3m、平均周期5~7秒の波力を受けているとき、二乗平均加速度が30galの地震が作用した場合の応答を示している。波力の卓越振動数と地震による構造物の1次振動数で応答の卓越がみられる。このため応答は地震力のみが作用する場合と異なり、波力が存在するとき、その影響を受けた応答特性を示すことが考えられる。

Fig. 3は構造物が波力と地震力を受ける場合の杭基礎を含む全体系に対する応答解析結果を示したものである。横軸は入力地震の二乗平均加速度であり、点線は地震のみが作用する場合の応答である。破線は波力のみが作用する場合であり、平均周期と平均波高の異なる波力に対する応答を示している。実線は波力と地震力が同時に作用する場合の応答を示している。平均波高が3mのとき、同時

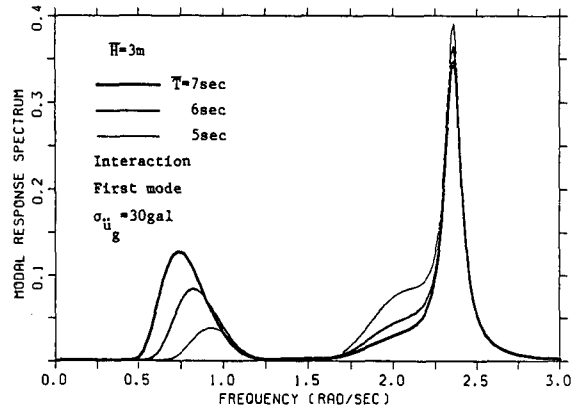


Fig.2 Modal response spectrum

Table Natural Frequencies of Offshore Structure Model (rad/s)

Vibration Mode	Rigidly Supported	Soil-Structure Interaction
1st	2.39	2.36
2nd	14.74	14.00
3rd	14.92	14.92

入力に対する応答は入力地震動の二乗平均加速度が約 40gal を越えると、地震力のみに対する応答よりも減少する傾向を示している。一方平均波高が大きいとき、同時入力の応答は地震動のみの入力に対する応答よりも大きくなっている。しかしその応答は独立に波力と地震力が入力した場合の応答の和よりも小さい。さらに構造物と地盤-基礎系との動的相互作用を考慮すると、全体系の固有振動数が小さくなり、波力を受ける場合、その卓越振動数に近づくことになり応答は増加する傾向を示す。しかしながら基礎系の振動にともなう逸散減衰の影響により、その応答は減少する場合もあり、全体系に対する応答の評価が必要であると思われる。

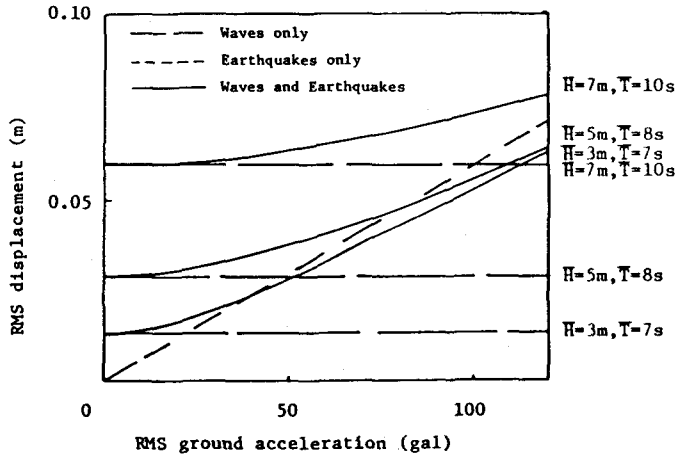


Fig.3 RMS displacement at node 1 (Interaction)

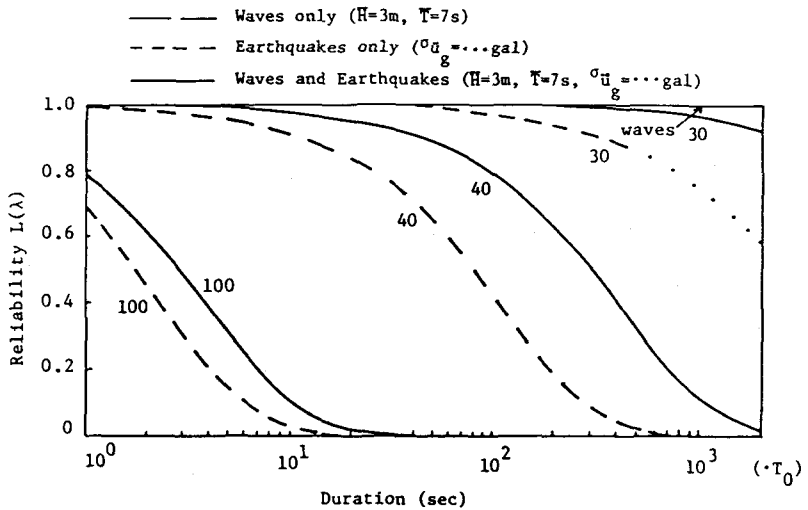


Fig.4 Reliability of Wave and Earthquake loadings (Rigid Base)

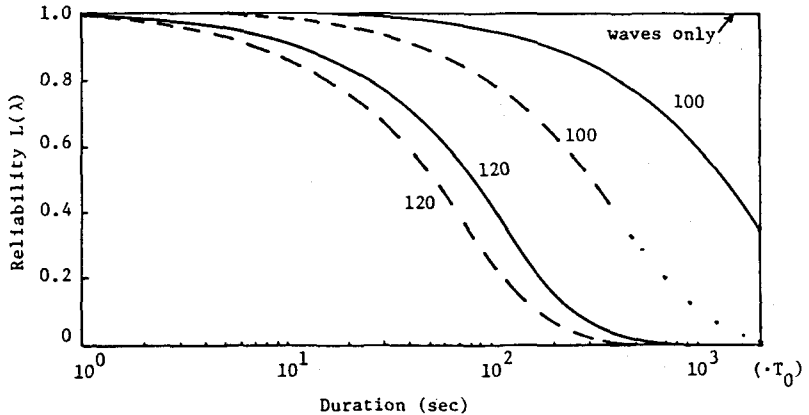


Fig.5 Reliability of Wave and Earthquake loadings (Interaction)

**地震力の影響** 海洋構造物の応答を評価する場合の地震力の影響について調べるため、平均波高 7 m、平均周期10秒の波力による二乗平均応答の 3.5倍を基準にして、応答の超過確率を計算する。波力の作用する継続時間は一般に数時間と長いのに対し、地震の場合は非常に短く数十秒である。このため波力を基準にした応答の超過レベルは大きな値を用いている。

Fig. 4 は上部構造物基礎を固定したとき、地震力と平均波高 3m、平均周期 7秒の波力が同時に作用する場合の結果を示している。点線は地震力のみが、実線は波力と地震力が同時に作用する場合の結果である。波力を一定にして入力地震動の二乗平均加速度が変化するとき、同時入力による応答は地震力のみに対する応答に比べて波力に関する応答の基準レベルを越える確率が小さいことが分かる。

Fig. 5 は構造物と地盤-基礎系の動的相互作用を考慮した場合の結果を示している。このような動的相互作用を考慮すると、地震入力がある場合の応答は減少するため、応答が超過する確率は少なくなることが分かる。このため固有周期の約10倍程度の継続時間の地震力を考える場合、動的相互作用の影響をとり入れると、基礎固定よりも大きな地震力に対して同じ程度の信頼性を与えることになる。また地震力のみへの入力に比べて同時入力による応答は一般に小さな応答を与えるため、応答超過の確率が減少することが分かる。このように海洋構造物の応答評価に及ぼす地震力の影響は、入力の条件や構造物と地盤系との動的相互作用によって変化することが分かる。

#### 4. あとがき

波力と地震力を同時に受ける海洋構造物の動的応答解析を行った。その結果を要約すると次のようになる。

- (1) 海洋構造物の応答は低次の振動モードが支配的となる。波力と地震力が同時に入力する場合の応答は、それぞれが独立に作用する場合の応答の和より小さくなる。また平均波高の小さな波力が作用するとき、地震力のみへの応答に比べて、同時入力の応答は減少する。
- (2) 海洋構造物の動的応答の支配的な外力は波力であり、その継続時間は地震に比べて非常に長いので、設計レベルの応答超過に対しては、非常に大きな地震力が対応することになる。海洋構造物の動的応答に及ぼす地震力の影響は、波力や構造物と地盤による動的相互作用等によって変化するため、さらに検討する必要があると思われる。

#### 謝辞

原稿作成に御協力いただいた鹿児島大学工学部 橋口美紀助手、愛甲頼和技官に感謝致します。

#### 参考文献

- 1) K.Venkataramana, Y.Yamada, H.Iemura and K.Kawano, "Dynamic response analysis of offshore structures due to earthquake forces", Proceeding of Symposium on Computational Methods in Structural Engineering and Related Fields, Vol.12, pp.383 - 388 (1988)
- 2) E.H.Vanmarke, "Properties of spectral moments with applications to random vibration", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.98, No.EM2, pp.425 - 446 (1972)
- 3) Y.Yamada, K.Kawano, H.Iemura and K.Venkataramana, "Wave and earthquake response of offshore structures with soil-structure interaction", Proc. of JSCE, No.398/I-10, pp.361 - 370 (1988)