

波力と地震力を同時に受ける海洋構造物の不規則応答解析
 Seismic Response Effects on Offshore Structure in Random Sea
 by

河野 健二 (I), 山田 善一 (II), 家村 浩和 (III), K.Venkataramana (IV)

For a typical offshore structure located in seismically active region, sea waves and earthquake ground motions seem to be two main design loads. Most of investigations, which dealing with offshore structures subjected to earthquake forces, treat sea wave forces separately because the probability of simultaneous occurrence of severe earthquake ground motions and strong sea waves is extremely small.

The object of this study is to investigate the effects of sea waves on the seismic response of offshore structure and verify whether the dynamic analysis omitting sea waves is satisfactory from practical consideration. Emphasis is placed upon the evaluation of nonlinear hydrodynamic damping effects due to sea waves for the seismic response. The model considered is a jacket structure constructed on pile-soil foundation. It is shown that the earthquake forces have significant roles on the dynamic response evaluations of offshore structures. Sea waves act as a damping medium and reduce the seismic response of offshore structures. Since more exact evaluation can be obtained for simultaneous loadings of earthquake ground motions and sea waves, it is very important to predict not only the sea wave forces but also the earthquake forces in the dynamic response computations.

1. まえがき

海洋構造物の発展にともない、その建設環境はますます厳しいものになることが予想される。その中で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用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。Penzienらは海洋構造物に波力と地震力が別々に作用する場合の解析を行い、地震応答に及ぼす抗力の影響が構造物の周期や水深と共に重要性を増すことを示している。¹⁾

本研究で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。強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、微小な波力の作用する場合は多いと思われる。動的応答解析においては抗基礎と上部構造物系との動的相互作用を考慮した。²⁾地震力と波力が同時に作用する場合の不規則解析を行い、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。

-
- | | | | | |
|-------|----------|-----------|-----|----|
| (I) | 鹿児島大学工学部 | 海洋土木開発工学科 | 助教授 | 工博 |
| (II) | 京都大学工学部 | 土木工学科 | 教授 | 工博 |
| (III) | 京都大学工学部 | 土木工学科 | 助教授 | 工博 |
| (IV) | 京都大学工学部 | 大学院 | | |

2. 定式化

波力や地震力は一般に不規則な特性を有するため確率過程として表される。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。

2.1 全体系の運動方程式

波力と地震力を受ける海洋構造物の運動方程式は一般に大きな自由度を有する。杭-地盤系と上部構造物の動的相互作用を考慮する場合、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。動的サブストラクチャ法を適用すると全体系の運動方程式を求めることができるが、その誘導についてはすでに述べているので、ここではその結果のみを示すことにする。⁴⁾ 地震力と波力を受ける場合の運動方程式は次のようになる。

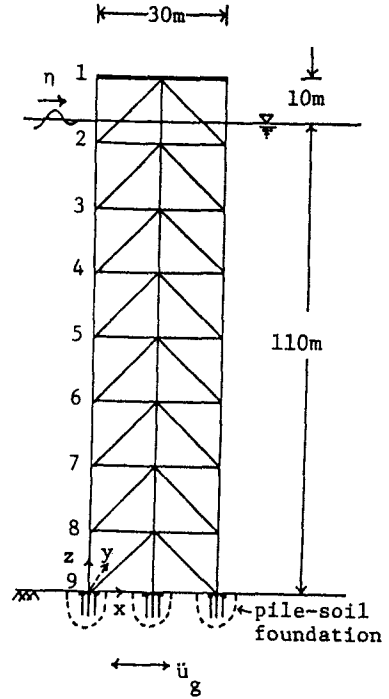


Fig.1 Analytical model of structure-pile-soil system

$$\begin{bmatrix} [I] & [\bar{M}_{ap}] \\ [\bar{M}_{pa}] & [\bar{M}_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{q}\} \\ \{\ddot{u}_p\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [2B_{fj} \omega_{fj}] & [\bar{C}_{ap}] \\ [\bar{C}_{pa}] & [\bar{C}_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{q}\} \\ \{\dot{u}_p\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [w_{fj}^2] & 0 \\ 0 & [\bar{K}_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q\} \\ \{u_p\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

where

$$\begin{bmatrix} [P_a] \\ [P_b] \end{bmatrix}_w = \begin{bmatrix} [\phi]^T [C_M] & [\phi]^T [C_D] \\ [G]^T [L]^T [C_M] & [G]^T [L]^T [C_D] \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} [P_a] \\ [P_b] \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} [\phi]^T [\bar{M}_{aa}] [L] [G] \\ [G]^T [L]^T [\bar{M}_{aa}] [L] + [M_{bb}] [G] \end{bmatrix}$$

$$\{u_g^c\} = [\phi] \{q\}$$

$$[\bar{M}_{ap}] = [\phi]^T [\bar{M}_{aa}] [L] [G]$$

$$[\bar{M}_{pa}] = [G]^T [L]^T [\bar{M}_{aa}] [\phi]$$

$$[\bar{M}_p] = [M_p] + [G]^T [[L]^T [\bar{M}_{aa}] [L] + [M_{bb}]] [G]$$

$$- \begin{bmatrix} [P_a] \\ [P_b] \end{bmatrix}_w \begin{Bmatrix} \{\dot{v}_{oa}\} \\ \{v_{oa}\} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} [P_a] \\ [P_b] \end{bmatrix}_e \{\ddot{u}_g\}$$

$$[\bar{C}_{ap}] = [\phi]^T [C_D] [L] [G]$$

$$[\bar{C}_{pa}] = [G]^T [L]^T [\bar{C}_{aa}] [\phi]$$

$$[\bar{C}_p] = [G]^T [[c_{bb}] + [L]^T [C_D] [L]] [G]$$

$$[\bar{K}_p] = [K_p] + [G]^T [K_{bb}] [G]$$

$$[\bar{M}_{aa}] = [M_{aa}] + [C_A]$$

$$[\bar{C}_{aa}] = [C_{aa}] + [C_D]$$

ここで $[\Phi]$ は上部構造物の非減衰系のモーダルマトリックスである。 ω_j はこれに対応した固有振動数、 β_j は減衰定数であり、構造減衰と流体力による減衰を含んでいる。一般に式 (1) は非比例減衰系となるが、本解析モデルでは応答を支配する固有振動数が、十分離れており、モード間の連成の影響が小さいと思われる。したがって式 (1) はさらに非減衰系に対する固有値解析を適用することによって、次のような式で表される。

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

where

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

式 (2) から分かるように水粒子の速度 v_{oa} 、加速度 \dot{v}_{oa} および地震波の加速度 \ddot{u}_g が与えられると、応答は式 (2) を解いて求められる。一般には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。この関数を用いると、構造物各節点における水粒子の速度、加速度に関するパワースペクトル密度関数が次のように表される。すなわち

$$\begin{aligned} [S_{v_{oa}}] &= [F(z_1)F(z_2)S_{\eta\eta}(\omega)] \\ [S_{\dot{v}_{oa}}] &= [\omega^2 S_{v_{oa}}] \\ F(z_j) &= \frac{gk \cosh(kz_j)}{\omega \sinh(kd)}, \quad S_{\eta\eta}(\omega) = a_1 \left(\frac{\bar{H}}{gT}\right)^2 g^2 \exp(-b_1(\omega T)^{-4}) / \omega^5 \\ \omega^2 &= gk \tanh(kd) \quad g = 9.8 \text{ m/s}^2, a_1 = 4120, b_1 = 1052 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで d は水深であり、 \bar{H} は平均波高、 T は平均周期を表している。水粒子の加速度や速度が求められると、構造物に作用する波力は相対速度によるモリソン式を用いて表される。断面が円形であることを想定し、この場合、抗力係数は1.0 質量係数は2.0 を用いている。これより波力のパワースペクトル密度関数を求めることができる。一方、地震動の加速度は、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。すなわち

$$S_{\ddot{u}_g \ddot{u}_g}(\omega) = \frac{1 + 4h_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}{[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2]^2 + 4h_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2} S_0 \quad (4)$$

ここで h_g 、 ω_g は表層地盤の特性を表すパラメータであり、 S_0 は基礎における地震波の強度である。

したがって波力や地震力のパワースペクトル密度関数が求められると、スペクトル解析を用いて式 (2) より応答を求めることができる。式 (2) における外力のパワースペクトル密度関数は次のように表される。

$$[S_{FF}(\omega)] = [\psi]^T \begin{bmatrix} [P_a] \\ [P_b] \end{bmatrix}_w \begin{bmatrix} [S_{\dot{v}_{oa}}] \\ [S_{v_{oa}}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [P_a] \\ [P_b] \end{bmatrix}_e \{\ddot{u}_g\} \quad (5)$$

式(2)より一般座標系の応答は次のように表される。

$$[S_{yy}(\omega)] = [H(\omega)][S_{FF}(\omega)][H(\omega)^*] \quad (6)$$

where

$$[H(\omega)] = [\omega_j^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_j\beta_j]^{-1}$$

これより逆フーリエ変換を利用して式(1)で表された一般座標系の二乗平均応答が求められる。この結果を用いると、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。

2.2 地震力と波力による応答評価

海洋構造物が地震力と波力を同時に受ける場合の応答について考えることにする。これらの外力は不規則な特性を有しており、その強度等についても確定的な扱いは難しいと思われる。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。任意の応答を λ として、この応答に対する初通過確率は、Vanmarkeによって示された。³⁾すなわち、構造物の応答が二乗平均応答として求められると、任意の応答 λ を越えない確率は次のように表される。

$$L(\lambda) = \exp\left[-\frac{1}{\pi} \frac{\alpha_2}{\alpha_0} t_0 \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2}\right) C_1\right] \quad (7)$$

$$\text{where } C_1 = \frac{1 - \exp\left[-\sqrt{\frac{\pi}{2}} q_x \gamma\right]}{1 - \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2}\right)} \quad q_x = \left(1 - \frac{\alpha_1^2}{\alpha_0 \alpha_2}\right)^{1/2} \quad 0 \leq q_x \leq 1$$

$$\text{where } \alpha_i = \int_0^{\infty} \omega^i G_x(\omega) d\omega \quad (i = 0, 1, 2)$$

ここで $G_x(\omega)$ は応答のパワースペクトル密度関数であり、 q はその関数から得られる形状係数を表す。また t_0 は入力波の継続時間である。

3. 応答解析結果

海洋構造物が波力と地震力を受ける場合の動的応答解析を行い、その応答特性について検討を加える。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。地盤のせん断波速度は100m/sである。

3.1 動的応答特性

上部構造物基礎を固定した場合と、杭基礎とした場合の動的応答特性について解析する。Tableはそれぞれに対する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1次振動モードに対するパワースペクトルを示したものである。入力地震動の二乗平均加速度が30galと100galであり、杭基礎を含む全体系の応答に対するものである。1次と2次の固有振動数が十分に離れているため、地震入力のみがある場合、振動モード間の連成は生じないことが分かる。

Fig. 3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. 4は同様に波力が作用するとき、二乗平均加速度100galの大きな地震力が作用した場合のパワースペクトルを示している。平均波高3mの波力に比べ地震力の影響が大きく、応答は構造物の1次振動数での応答が支配的となっている。このように波力と地震力が同時に作用するとき、その応答特性は、それぞれが独立に作用する場合と異なっている。さらに同時入力の場合においても、地震加速度の増加とともに波力に比べて地震力の影響が卓越することが分かる。

3.2 地震応答に及ぼす波力の影響

海洋構造物が地震力と波力を受ける場合の応答解析結果について述べることにする。Fig. 5は構造物基礎を固定した場合のそれぞれの入力に対する節点1のx方向の二乗平均応答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。この応答は入力地震の大きさとともに増加することが分かる。また破線で示された応答は波力のみが作用する場合の応答であり平均波高と平均周期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。平均波高や平均周期によって異なるが、入力地震の二乗平均加速度が30galから50galを越えると、同時入力に対する応答は、地震力のみによる応答よりも小さくなる。これは波力が存在するとき、流体力による減衰が増加することによるものである。波力と地震力に対する応答をそれぞれ独立に求

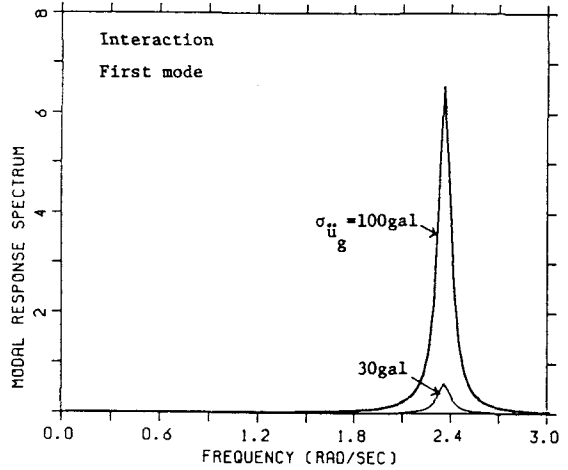


Fig. 2 Modal response spectrum

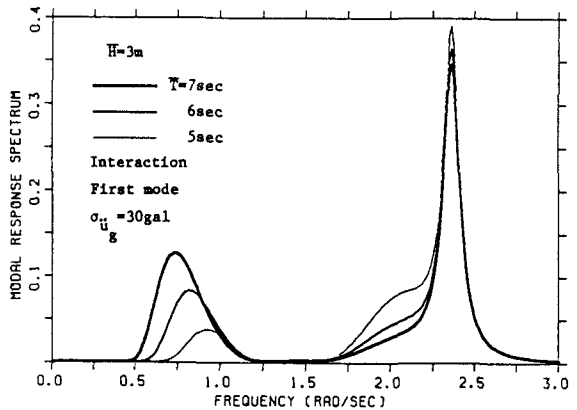


Fig. 3 Modal response spectrum

Table 4.1 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

め、その応答の和を求めると、同時入力を考える場合応答は過大な評価を与えることが分かる。平均波高と入力地震動の二乗平均加速度が増加するにつれて、同時入力と独立な入力に対する応答は大きな相違を示すことが分かる。実際には、このような場合の生じる確率は微小なのであるのに対して、平均波高の小さな波力が存在する場合が多いと考えられる。

Fig. 6は杭基礎を含む全体系の応答を同様な入力条件に対して示したものである。上部構造物と杭基礎系との動的相互作用を考慮するとき、基礎固定の場合より応答は減少している。これは基礎系の振動にともなう逃散減衰の影響によるものと考えられる。平均波高が3mのとき、同時入力の応答は入力地震動の二乗平均加速度が約40galを越えると、地震力だけの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力だけ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。一般に構造物と地盤-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。このような構造物と地盤系との動的相互作用を考えた場合においても波力と地震力の同時入力は独立な入力に対する応答と異なる結果を与えることが分かる。

Fig. 7は構造物と地盤系との動的相互作用を考慮した場合の波力と地震力に対する節点1のx方向の変位に対する二乗平均応答を示したものである。地震力の二乗平均加速度は100galと一定とし波力の平均周期と平均波高が変化する場合の応答を示している。波力に対する応答は、その平均周期の増加にともない、大きくなる。一方、波力と地震力が同時に作用する場合の応答は、それぞれの独立な入力による応答の和より小さく、平均周期の大きさとともに、その影響は変化することが分かる。

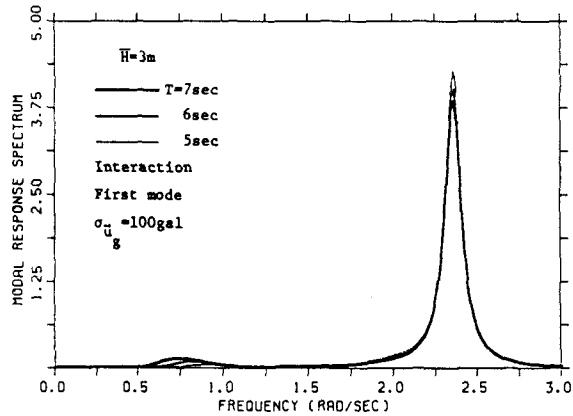


Fig.4 Modal response spectrum

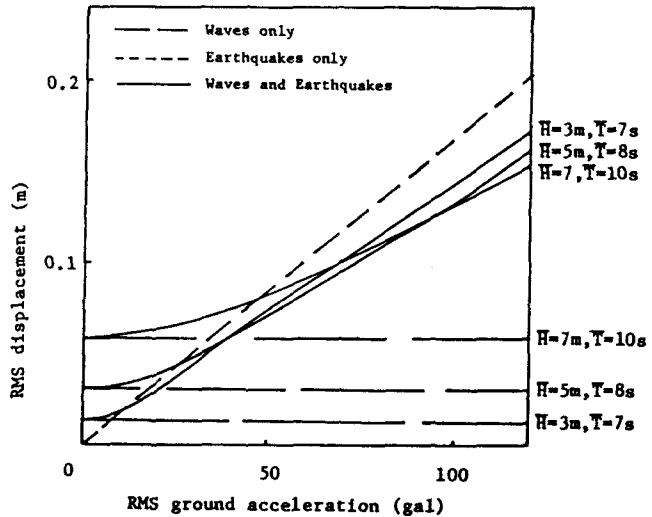


Fig.5 RMS displacement at node 1 (Rigid Base)

3.3 応答評価に及ぼす地震力の影響

地震力が海洋構造物の応答に及ぼす影響について調べるため、平均波高 7m、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。Fig. 8は構造物基礎を固定した場合の応答について示したものである。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。点線は地震力のみが、実線は波力のみが作用する場合の結果である。地震力の作用する継続時間が構造物の固有周期の数十倍程度であることを考えると、平均波高 7m、平均周期10秒の波力による応答は比較的大きな地震力による応答に対応していることが分かる。Fig. 9は平均波高 7m、平均周期10秒の波力による応答を超過レベルの基準にとり、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。

平均波高 3m、平均周期 7秒の波力のみが作用する場合、この基準レベルの応答を越える応答は生じないことが分かる。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、同時入力に対する応答は地震のみに対する応答に比べて基準レベルを越える確率が小さいことが分かる。

Fig. 10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応答超過の信頼性を与えることになる。また地

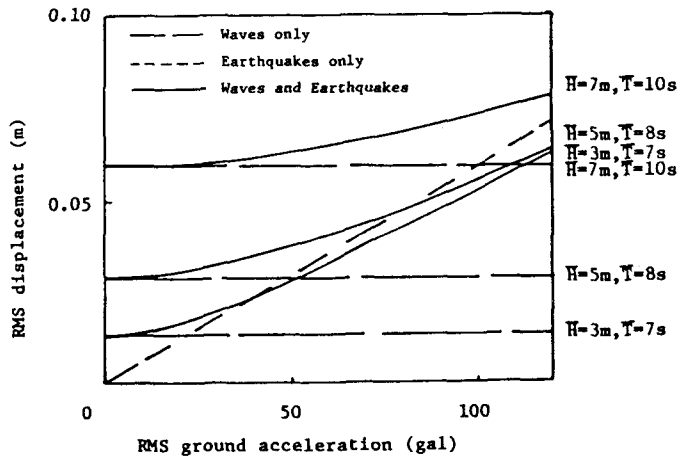


Fig.6 RMS displacement at node 1 (Interaction)

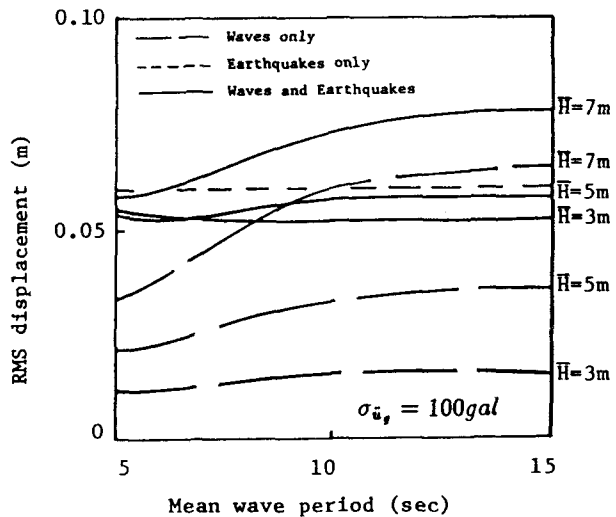


Fig.7 RMS displacement at node 1 (Interaction)

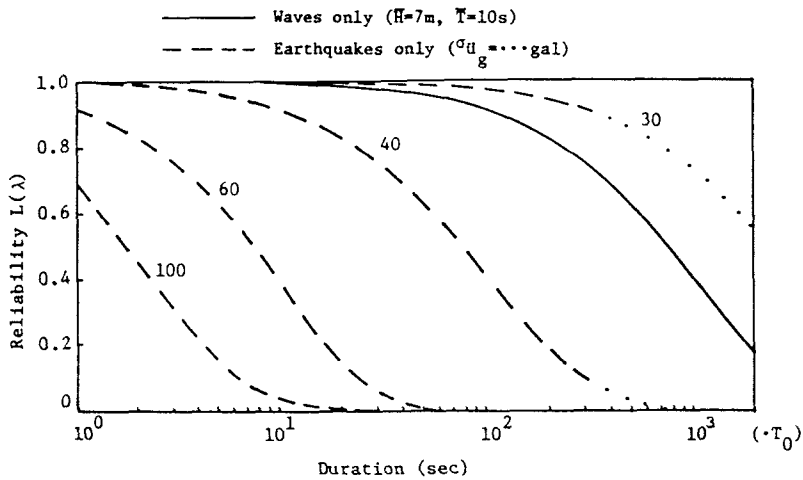


Fig.8 Reliability of Wave and Earthquake loadings (Rigid Base)

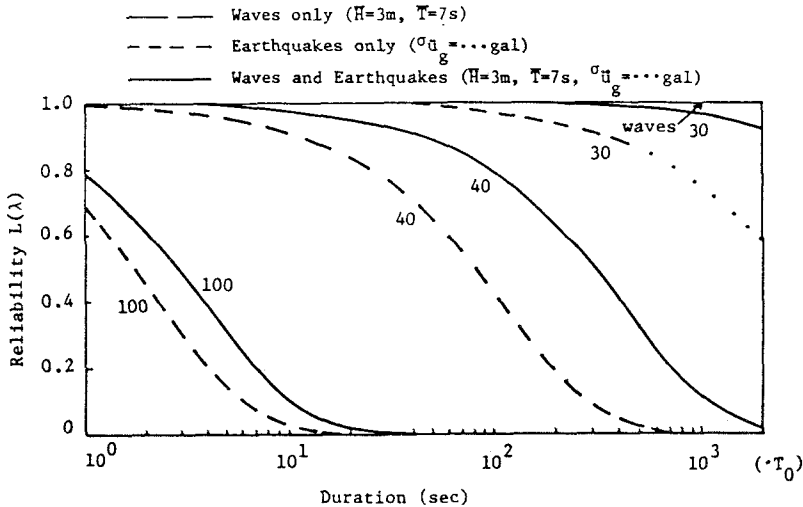


Fig.9 Reliability of Wave and Earthquake loadings (Rigid Base)

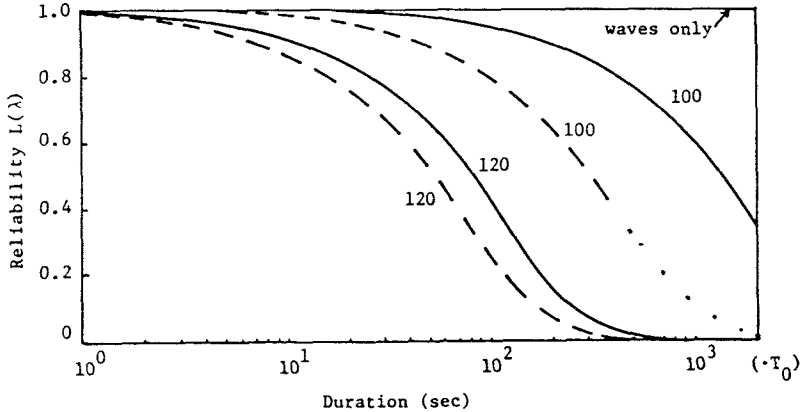


Fig.10 Reliability of Wave and Earthquake loadings (Interaction)

震力のみを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。海洋構造物の動的応答の支配的な外力は波力であるが、本解析で示したように地震力の影響も無視することはできないと思われる。

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い、地震力の影響について検討を加えた。本解析で得られた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。地震力のみが作用する場合、応答は構造物系の1次の振動が卓越する。波力と地震力が同時に作用する場合は、応答は波力の卓越振動数と構造物系の1次振動が支配的となる。この影響は波力や地震力の大きさによって変化する。
- (2) 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、地震力のみでの応答に比べて、同時入力の応答は減少する。これは流体力による減衰が増加するためと考えられ、波力と地震力の同時入力については注意を要する。
- (3) 波力の作用する継続時間に比べて、地震力のそれは非常に短いので、ある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。構造物と地盤系の動的相互作用を考慮した場合や、波力と地震力が同時に作用した場合は応答超過の確率が減少するため、より大きな地震力が設計波力に対応する。

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) J.Penzien, M.K.Kaul and B.Berge, "Stochastic response of offshore towers random sea waves and strong motion earthquakes", Computers and Structures, Vol. 2, pp. 733 - 756 (1972)
- 2) H.Takemiya et al, "Soil - structure interaction of gravity - type steel offshore structure for earthquakes", Proceedings of International conference on offshore Mechanics and Arctic Engineering held at Tokyo, pp. 663 - 670, (1986)
- 3) 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)
- 4) Y.Yamada, H.Iemura, K.Venkataramana, and K.Kawano, "Dynamic response analysis of offshore structure due to ocean wave and earthquake excitation", Journal of Structural Engineering, Vol. 34A, pp. 973 - 982 (1988) (Japanese)
- 5) 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)

(1988年10月12日受付)