

波力を受ける海洋構造物の動的相互作用解析

Dynamic Interaction Analysis of Offshore
Platform due to Random Wave Forces

河野健二*¹ 山田善一**²

K.Venkataramana***³ 飯田毅****⁴

Kenji KAWANO, Yoshikazu YAMADA,

K.VENKATARAMANA and Takeshi IIDA

Dynamic response of offshore platform to random sea waves is investigated. Emphasis is placed upon the evaluation of dynamic soil-structure interaction effects. The structure is discretized using the finite element method. Governing equation of motion is derived by the substructure method. The random sea waves are modelled stochastically using the Bretschneider's wave spectrum and Morison's equation defines the wave forcing function. The response analysis is carried out using the frequency domain random vibration approach. Response quantities are compared by employing the principles of first passage probabilities across specific barriers. It is shown that the first few vibrational modes provide significant contributions to the dynamic response. The responses are generally larger when the interaction effects are included.

1. まえがき

ジャケット型の海洋構造物は多くの場合水深が数十メートルから数百メートルの海域で建設されている。このような海洋構造物の固有周期は陸上の構造物と比べても長く、水深によっても大きく異なる。さらに構造物を支持する海底の地盤の影響を受けて構造物系の固有周期が変化することも考えられる。海洋構造物の支配的な外力である波力の周期は約 10 秒程度あり、構造物の動的応答特性を正確に把握するためには、地盤と構造物の動的相互作用の影響を明確にしておくことが重要であると思われる。基礎固定時の海洋構造物の動的応答解析は 1960 年代に始まり^{1), 2)}、複雑な流体力の影響を取り入れた解析が可能となったが、地盤と構造物の動的相互作用の影響については、検討の余地があるものと思われる。

本研究は動的サブストラクチャ法を用いて海洋構造物の動的応答特性に及ぼす地盤基礎系の動的相互作用の影響について検討を加えたものである³⁾。杭基礎に関するインピーダンス関数を用いて基礎-地盤系の動的特性を表している。プレートシュナイダー型のパワースペクトル密度関数を用いて海面の変化を表し、修正モリソン

* 工博 鹿児島大学工学部海洋土木開発工学科 助教授 (〒 890 鹿児島市郡元 1-21-40)

** 工博 京都大学工学部土木工学科 教授 (〒 606 京都市左京区吉田本町)

*** Doctor of Engineering, Department of Engineering Science, University of Oxford

**** 工博 住友金属工業(株) 建設技術部

式により波力の評価を行っている。設計レベルの応答に対する超過確率を求め、海洋構造物と地盤の動的相互作用が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

海洋構造物に作用する外力としては波力、地震力、風力等^{4),5)}があるが本解析では波力のみを考える。海洋構造物を2次元の構造物として表し、有限要素法を適用して運動方程式を求める。簡単のため質量マトリックスは集中型を用いる。海水や構造物の運動にともなう生じる流体力を修正モリソン式で表すと、基礎地盤を除く上部構造物の運動方程式を求めることができる。すなわち、波と構造物の相対的な運動を考慮すると、構造物に作用する波力は修正モリソン式を用いて表される。この場合、抗力項は相対速度の2乗に比例するため非線形項となるが等価線形化法による近似化によって相対速度に比例した形で表される。したがって線形化された波力は次式で表される¹⁾。

$$\{F_a\} = [C_M]\{\dot{v}_{0a}\} - [C_A]\{\ddot{u}_a\} + [C_D]\{v_{0a} - \dot{u}_a\} \quad (1)$$

ただし

$$\begin{aligned} [C_M] &= [\rho c_m V] \\ [C_A] &= [\rho(c_m - 1)V] \\ [C_D] &= [\rho c_d A \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_r] \\ r &= v_{0a} - \dot{u}_a \end{aligned}$$

ここで ρ は海水の質量、 V は海水中にある構造物の体積、 A は流れ方向の構造物の面積である。 c_m は質量係数であり、1.4 から 2.0 の値を有する。また c_d は抗力係数であり、約 0.5 から 2.0 の値を有する。 v_{0a} および $\dot{v}_{0a}$ はそれぞれ水粒子の速度および加速度である。 r は海水と構造物の相対速度であり、式(1)による波力の評価においては、繰り返し計算が必要になるが、一般にこの計算は数回の実行で収束する。構造物の動的な全体変位は基礎固定時に対する動的変位と、基礎の変形にともなう準静的な変位の和として表される。基礎固定時に対する動的変位は全体応答に支配的な影響を及ぼす振動モードの和として表される。このため上部構造物の基礎固定時の運動方程式は固有値解析結果から必要な振動モードのみを選択することにより大幅に低減することができる。本解析では10次の振動モードまでを用いている。

一方、基礎の変形は杭-地盤系の動的特性を表すインピーダンス関数と上部構造物からの動的相互作用力によって表される。一般に、このインピーダンス関数は振動数の関数となるが、海洋構造物の固有周期が比較的長く、しかも応答が低次の振動モードに支配されることを考えて、本解析では振動数に独立な関数値を用いている。上部構造物系および下部構造物系に対する運動方程式がそれぞれ求められると、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が得られる。すなわち、上部構造物系および下部構造物系の結合節点における、変形の適合条件を考えると、海洋構造物全体系の運動方程式は次式で表される。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} [I] & [\tilde{M}_{ap}] \\ [\tilde{M}_{pa}] & [\tilde{M}_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\tilde{q}\} \\ \{\tilde{u}_p\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [2\beta_{fj}\omega_{fj}] & 0 \\ 0 & [\tilde{C}_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{\tilde{q}}\} \\ \{\dot{\tilde{u}}_p\} \end{Bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} [\omega_{fj}^2] & [0] \\ [0] & [\tilde{K}_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\tilde{q}\} \\ \{\tilde{u}_p\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [P_a] \\ [P_b] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{v_a\} \\ \{v_b\} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} [P_a] \\ [P_b] \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [\phi]^T [C_M] & [\Phi]^T [C_D] \\ [G]^T [L]^T [C_M] & [G]^T [L]^T [C_D] \end{bmatrix} \\
 [\tilde{M}_{ap}] &= [\Phi]^T [\tilde{M}_{aa}] [L] [G] \\
 [\tilde{M}_p] &= [M_p] + [G]^T [L]^T [\tilde{M}_{aa}] [L] + [M_{bb}] [G] \\
 [\tilde{C}_{ap}] &= [\Phi]^T [C_D] [L] [G] \\
 [\tilde{C}_p] &= [C_p] + [G]^T [[L]^T [C_D] [L] + [C_{bb}]] [G] \\
 [\tilde{K}_p] &= [K_p] + [G]^T [K_{bb}] [G] \\
 [\tilde{M}_{aa}] &= [M_{aa}] + [C_A] \\
 [\tilde{C}_{aa}] &= [C_{aa}] + [C_D] \\
 [L] &= -[K_{aa}]^{-1} [K_{ab}]
 \end{aligned}$$

ここで $[M_{aa}]$, $[C_{aa}]$, $[K_{aa}]$ は上部構造物系の質量、減衰及び剛性マトリックスであり、下部構造との結合節点以外の変形に対応している。 $[M_{bb}]$, $[C_{bb}]$, $[K_{bb}]$ は上部構造物の質量、減衰及び剛性マトリックスであり、下部構造物との結合節点に対応している。また、 $[M_p]$, $[C_p]$, $[K_p]$ はそれぞれ下部構造物系の質量、減衰及び剛性マトリックスである。 $[\Phi]$ は上部構造物の非減衰時の固有値解析から得られるモードマトリックスであり、 $[G]$ は上部構造物系と下部構造物系の結合節点における変形を適合させるためのマトリックスである。

3. 動的応答解析

一般に式(2)は非比例系の減衰マトリックスであり、応答解析においては振動モード間の連成が問題になる場合がある。ここで扱う海洋構造物系の場合、応答を支配する振動モードは、固有周期がそれぞれ離れており、その連成の影響は小さいと考えられる。そこで、式(2)に再び非減衰時の固有値解析を適用して応答解析を行うことにする。本解析では応答に支配的な影響を及ぼす5次モードまでを用いている。したがって、式(2)は次式のようになる。

$$\{\ddot{y}\} + [\backslash 2\beta_j \omega_j \backslash] \{\dot{y}\} + [\backslash \omega_j^2 \backslash] \{y\} = [\Psi]^T \begin{bmatrix} [P_a] \\ [P_b] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{v}_a\} \\ \{v_a\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{ただし} \quad \begin{Bmatrix} \{q\} \\ \{u_p\} \end{Bmatrix} = [\Psi] \{y\}$$

海水の速度や加速度が与えられると、式(3)を解くことができるが、これらの値は一般に不規則振動をする量として表される。したがって、微小振幅波理論を用いると海水の速度や加速度は不規則振動論の適用によりパワースペクトル密度関数を用いて次式のように表される。

$$\begin{aligned}
 S_{v_r v_s}(\omega) &= \omega^2 S_{\eta \eta}(\omega) M_F \exp[ik(x_r - x_s)] \\
 S_{\dot{v}_r v_s}(\omega) &= S_{v_r v_s}(\omega) = i\omega S_{v_r v_s}(\omega) \\
 S_{\ddot{v}_r v_s}(\omega) &= \omega^2 S_{v_r v_s}(\omega)
 \end{aligned} \quad (4)$$

ここに M_F は任意の水深における関数であり、 k は波数である。添字 s, r はそれぞれ海水の速度や加速度を考える節点に対応している。また $S_{\eta \eta}(\omega)$ は海面の上昇量を表すパワースペクトル密度関数であり、いくつかの形が提

案されている。本解析ではブレットシュナイダー型のパワースペクトル密度関数を用いることにする。いま平均波高を $\overline{H}(m)$ 、平均周期を $\overline{T}(s)$ とすると、 $S_{\eta\eta}$ は次式で表される。

$$S_{\eta\eta}(\omega) = a_1 \left(\frac{\overline{H}}{g\overline{T}^2} \right)^2 \frac{g^2}{\omega^2} \exp \left\{ -b_1 \left(\frac{1}{\overline{T}\omega} \right)^4 \right\} \quad (5)$$

$$\text{ただし } \omega^2 = gh \tanh(kh)$$

ここで a_1, b_1 は定数であり、 g は重力加速度、 h は水深である。したがって式(4)で各節点での海水の速度、加速度に関するパワースペクトル密度関数が与えられると、式(3)における外力に対するパワースペクトル密度関数を求めることができる。すなわち、

$$[S_{FF}(\omega)] = [\Psi]^T \begin{bmatrix} [P_a] \\ [P_b] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [S_{dot{v}_r, \dot{v}_s}(\omega)] & [S_{\dot{v}_r, v_s}(\omega)] \\ [S_{v_r, \dot{v}_s}(\omega)] & [S_{v_r, v_s}(\omega)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [P_a] \\ [P_b] \end{bmatrix}^T [\Psi] \quad (6)$$

従って式(3)に関する各次振動に対するパワースペクトル密度関数は次式で表される。

$$[S_{yy}(\omega)] = [H(\omega)][S_{FF}(\omega)][H(\omega)^*] \quad (7)$$

$$\text{ただし } [H(\omega)] = [\omega_j^2 - \omega^2 + 2i\omega\omega_j\beta_j]^{-1}$$

ここで $[H(\omega)^*]$ は周波数応答関数 $[H(\omega)]$ の共役関数である。したがって式(2)で表される応答のパワースペクトル密度関数が $[\Psi]$ による変換によって求められる。これよりフーリエ逆変換を用いると、二乗平均応答を求めることができる。すなわち、

$$E \left[\left\{ \begin{matrix} \{q\} \\ \{u_p\} \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \{q\} \\ \{u_p\} \end{matrix} \right\}^T \right] = \int_{-\infty}^{\infty} [\Psi][S_{yy}(\omega)][\Psi]^T d\omega \quad (8)$$

同様に各節点の二乗平均応答は式(2)で示されたモーダルマトリックス $[\Phi]$ による変換によって求めることができる。すなわち、

$$E[\{u_a^c\}\{u_a^c\}^T] = [\Phi]E[\{q\}\{q\}^T][\Phi]^T \quad (9)$$

このように不規則な外力である波力のパワースペクトル密度関数が与えられると、構造物の二乗平均応答を求めることができるが、最も注目される応答量は、その最大値あるいは任意の応答値に対する超過確率である。これらの値の推定は応答のパワースペクトル密度関数から得られる応答帯域に関するパラメータ等を用いて表される。すなわち、応答が限界値を超過しない確率は Vanmarke らによると次式で与えられる。

$$L(\lambda) = \exp \left[-\frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_0}} t_0 \exp \left(-\frac{\gamma^2}{2} \right) c_1 \right] \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{ただし} \quad c_1 &= \frac{1 - \exp(-\sqrt{\frac{\pi}{2}} g_x \gamma)}{1 - \exp(-\frac{\gamma^2}{2})} \\ g_x &= \left(1 - \frac{\alpha_1^2}{\alpha_0 \alpha_2} \right) \\ \alpha_i &= \int_0^\infty \omega^i G_x(\omega) d\omega \quad (i = 0, 1, 2) \end{aligned}$$

ここに t_0 は波力の継続時間であり、 γ は応答の限界値と二乗平均応答の平方根との比を表している。本解析では海洋構造物の応答が地盤の動的特性によりどのような影響を受けるかを検討するため、式(9)による二乗平均応答や式(10)による解析を行う。

4. 解析結果とその検討

海洋構造物の動的応答評価に及ぼす基礎-地盤との動的相互作用の影響を調べるためには、固有周期の異なる多くの構造物を考える必要があるが、本解析ではその中の代表的な構造物を対象に解析を進めることにする。

図-1は本解析で用いたモデルであり水深は110mである。主要部材は鋼管からなり、その直径は2.8m、厚さは27mmである。また応答解析は主に地盤のせん断波速度が100m/sの場合について行い、インピーダンス関数としては水平変形および平面内での回転変形に対応する場合のみを考え、鉛直方向の変形は無視している。

図-2は地盤のせん断波速度が変化する場合の固有振動数の変化を示したものである。ここで破線は上部構造物の基礎を固定した場合の固有振動数の変化を示している。いずれの場合も地盤の影響を考慮に入れると、固有振動数は減少し、せん断波速度の増加とともに、基礎固定時の値に接近することが分かる。特に1次の固有振動数が減少することにより、波力のパワースペクトル密度関数のピークの振動数に接近するような場合は、その影響が大きくなるものと考えられる。

図-3は平均波高が3mと7mの場合に関する応答のパワースペクトル密度関数を示したものである。平均波高や平均周期の異なる波力に対する応答は主に、波力の卓越周期と構造物系の卓越周期の影響が大きいことを示している。特に平均波高が3mのとき応答は構造物系の振動が卓越するのに対し、平均波高が7mになると、

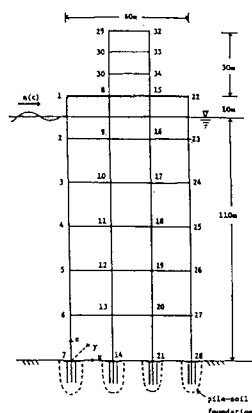


図-1 海洋構造物の解析モデル

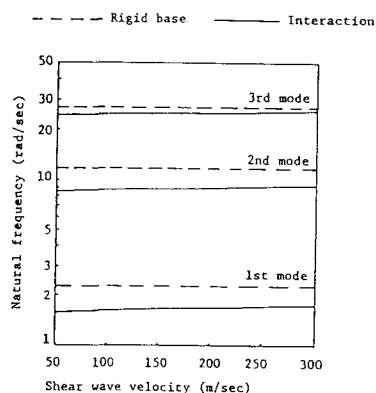


図-2 地盤による固有振動数の変化

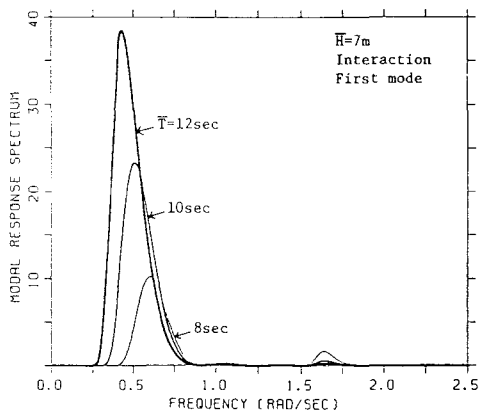
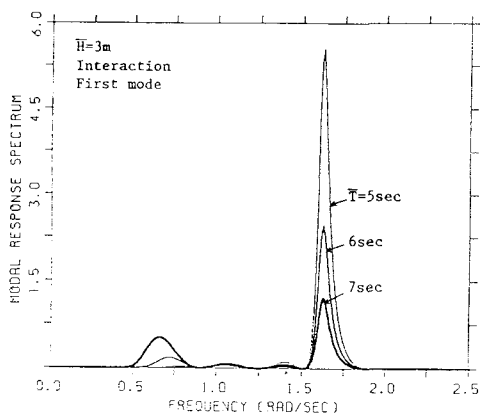
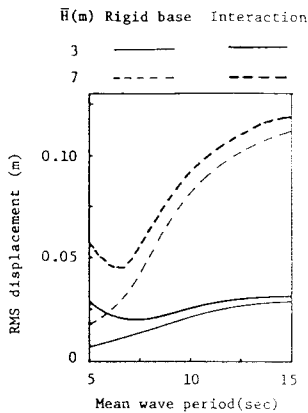


図-3 応答のパワースペクトル密度関数

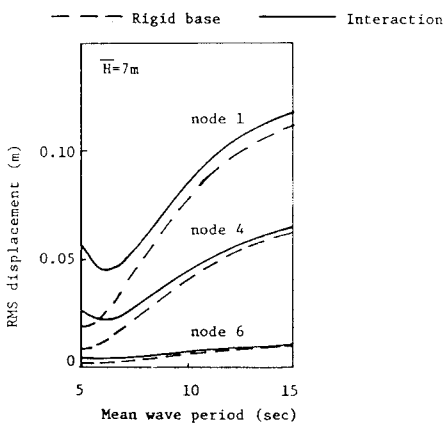
波力の卓越周期の影響が支配的になることが分かる。さらに構造物の応答は波力の特性による影響に加えて基礎―地盤の動的な影響を受けることが考えられる。そこで上部構造物の基礎を固定した場合と、基礎―地盤との動的相互作用を考慮した場合について比較する。

図－４は波力の平均波高が3mと7mのとき、平均周期が変化する場合の節点1の変位応答を示している。波力の平均周期が短くなると入力波の卓越周期が構造物系の固有周期に接近するため動的相互作用の影響が増大することが分かる。また波力の平均周期が長くなるにしたがって動的相互作用の影響は減少するが、全体に動的相互作用を考慮した場合の応答が基礎固定時の応答よりも大きくなっている。図－５は同様に波力の平均波高が7mのとき、動的相互作用が各節点の応答に及ぼす影響を示したものである。特に最も変位応答の大きい節点1では波力の平均周期が構造物全体系の固有周期に接近するとき、動的相互作用の影響が増大することを示している。

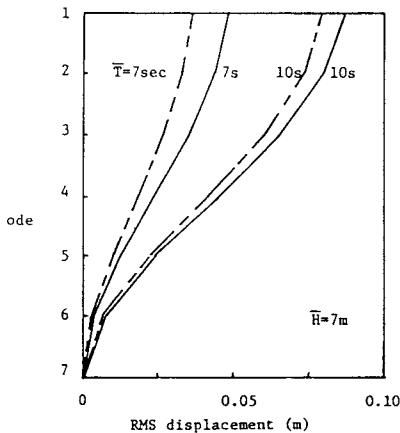
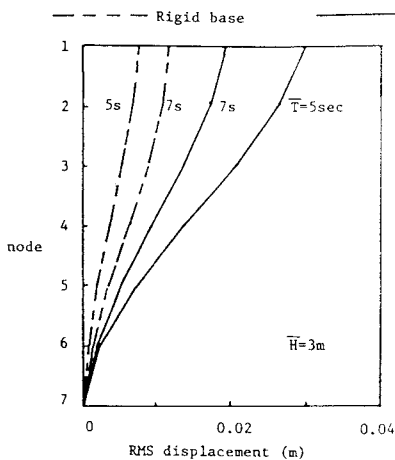
図－６は波力の平均波高が7mで平均周期が7秒と10秒と変化する場合の各節点での変位応答を示したものである。動的相互作用を考慮した場合の全体系の固有周期は約3.9秒であり、波力の平均周期から比較的離れているが、動的相互作用の影響は無視できないと思われる。このように海洋構造物の動的応答に及ぼす基礎―地



図－４ rms 変位応答(節点1)



図－５ rms 変位応答(節点1,4,6)



図－６ 全体の変位応答

盤との動的相互作用の影響は、構造物の全体系の固有周期と波力の平均周期の関係によって大きく変化することが分かる。このため海洋構造物の動的応答を正確に評価するためには動的相互作用の影響を取り入れた構造物全体系について解析を行う必要があるものと思われる。

さらに地盤と構造物の動的相互作用が波力を受ける構造物の応答に及ぼす影響を調べるため、最大応答値に注目し、設計レベルの応答に対する超過確率を求めることにする。図-7は設計レベルの応答値を基礎固定時における二乗平均応答の3倍、3.5倍及び4倍とみなした場合の応答に対する超過確率を波力の継続時間に対して示したものである。波力の平均波高が7mで平均周期が8秒と12秒の場合の結果を示している。基礎を固定した場合に比べて動的相互作用を考慮するとき、各レベルに対して応答の超過確率は高くなることを示している。波力が構造物に作用する継続時間は一般に長いため、応答の超過確率を正しく評価するためには動的相互作用を考慮した解析が必要であることが分かる。

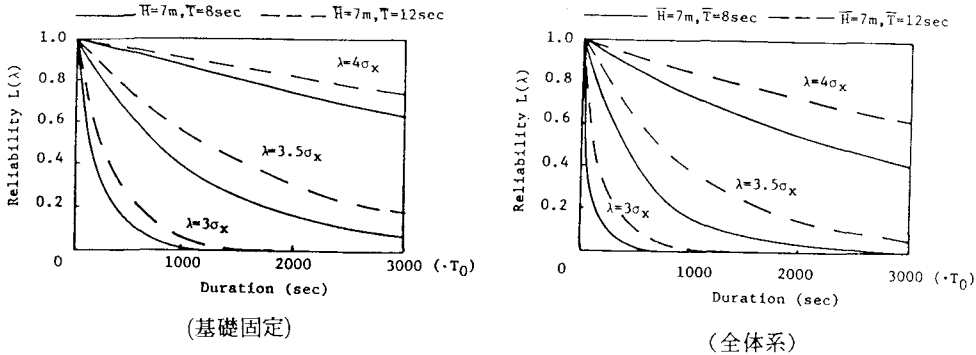


図-7 変位応答に関する超過確率(節点1)

図-8は同様に上部構造物の最下部の節点7におけるせん断力応答や曲げモーメント応答に対して応答の超過確率を求めたものである。上部構造物の基礎を固定した場合の二乗平均応答の3倍、3.5倍及び4倍に対する応答の超過確率をそれぞれ継続時間に関して示している。基礎固定時の応答は動的相互作用を考慮した場合の応答より一般に小さくなるため、各レベルに対する応答の超過確率は小さくなり過大な信頼性を与えることになる。このため継続時間の長い波力を受ける海洋構造物の動的応答解析においては動的相互作用を考慮することは、応答の正確な評価を行い、信頼性のある設計を行う上で重要なことであると思われる。

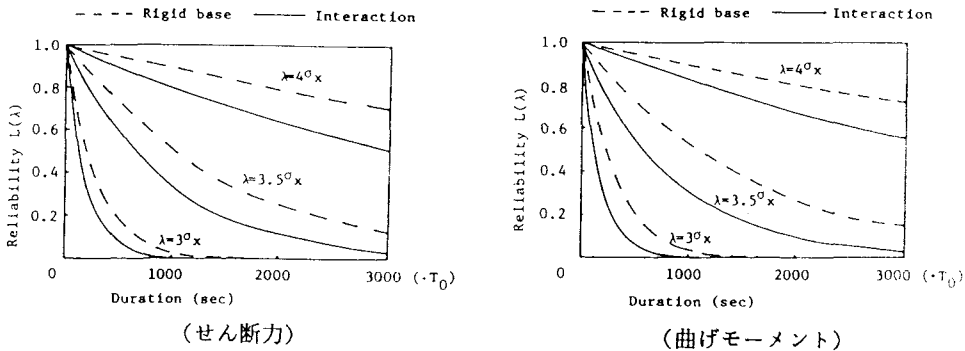


図-8 断面力応答に関する超過確率(節点7)

5. あとがき

海洋構造物の動的応答に及ぼす基礎—地盤の影響について解析を行なった。本解析による結果を要約すると次のようになる。

1. 基礎—地盤と構造物の動的相互作用は海洋構造物の動的応答評価に対して大きな影響を与えている。特に海洋構造物系の固有周期が長くなり、波力のパワースペクトル密度関数の卓越周期に接近するとき、動的相互作用の影響が増大する。
2. 基礎を固定した場合の海洋構造物の応答は、地盤との動的相互作用を考慮した場合より一般に小さな応答を与える。波力を受ける海洋構造物の動的応答では、特に1次振動モードの影響が支配的なものとなる。このためこのような振動数での動的相互作用の把握が重要になる。
3. 波力の作用する継続時間は非常に長くなるため、動的応答の評価の相違が設計レベルの応答超過に及ぼす影響は増大する。このため基礎固定時の応答に基いた応答超過に関する信頼性は過大に評価されることになるため、動的相互作用を考慮した海洋構造物の応答評価が必要であると思われる。

謝辞 本研究を進めるにあたっては石原藤次郎研究奨学基金による補助を受けたことを付記し感謝します。また原稿作成にご協力いただいた鹿児島大学工学部 愛甲頼和技官に感謝します。

参考文献

- 1) A.K.Mahota and J.Penzien, 'Nonderministic analysis of offshore structures', ASCE, EM6, pp.985-1003, 1970
- 2) J.Penzien, M.K.Kaul and B.Berge, 'Stochastic response of offshore towers to random sea waves and strong motion earthquake', Computers and structures, Vol.2, pp.733-756, 1972
- 3) K.Kawano, Y.Yamada and K.Venkataramana, 'Dynamic response analysis of offshore structure systems', The third international conference on civil and structure engineering computing, London, Vol.1, pp.315-319, 1987
- 4) W.Jesion, 'Random vibrations of the Baltic drilling platform subjected to wind loads and water waves', Earthquake engineering and structure dynamics, Vol.15, pp.595-617, 1987
- 5) H.Takemiya, K.Goda, T.Iida and T.Nakazato, 'Soil-structure interaction gravity-type steel offshore structure for earthquake', Offshore mechanics and arctic engineering, Fifth international symposium, Tokyo, pp.663-670, 1986
- 6) 山田善一、家村浩和、K.Venkataramana、河野健二、'波力と地震力を受ける海洋構造物の動的応答解析' 構造工学論文集、Vol.34A, pp.851-859, 1989
- 7) Y.Yamada, K.Kawano, H.Iemura and K.Venkataramana, 'Wave and earthquake response of offshore structures with soil-structure interaction', Proceeding of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng. Vol.5, No.2, 361s-370s, 1988

(1990年10月12日受付)