大規模浮遊式海洋人工島への風波と海震の荷重効果

LOAD EFFECTS OF WIND-WAVES AND SEAQUAKES ON LARGE FLOATING ISLANDS

濱本卓司*, 加村久哉**

Takuji HAMAMOTO and Hisaya KAMURA

A probabilistic framework is presented to evaluate the load effects of wind-waves and seaquakes on a large floating island at a specific offshore site. Both long-term and short-term descriptions of loading are constructed. The long-term description of loading is given by the occurrence rates of each load intensity. On the other hand, the short-term description of loading is given by the spectral density functions in terms of each load intensity. For each load intensity, the stochastic response analysis of a large floating island is carried out on the basis of a wet-mode superposition approach and stationary random vibration theory. The site-specific responses which are conditional on the corresponding return periods are calculated. Numerical examples are presented to discuss the load effects of wind-waves and seaquakes on the large floating island with mooring system at different offshore sites.

Keywords : *large floating island, wind-wave, seaquake, probabilistic approach, load effect, return period*

浮遊式海洋人工島, 風波, 海震, 確率論的アプローチ, 荷重効果, 再現期間

1 序

日本近海に浮遊式海洋構造物を建設する場合, 風波と海震は主要な荷重要因になる。この二つの荷重効果を共通の土俵で扱うことができれば, 人工島の設置海域の選定, あるいは特定の海域における人工島の最適規模や繫留方法の決定といった予備設計段階での合理的な情報を得ることができる。異なる荷重を統一的に扱う上で確率論的アプローチは有効な方法である。しかし, 浮遊式海洋構造物に関しては, これまで波浪荷重に対する検討しか行われていない。Thoft-Christensen・Baker¹⁾, Vanmarcke・Angelides²⁾, Bhartia・Vanmarcke³⁾等は波浪荷重の長期表現と短期表現を用いて固定式海洋構造物の風波に対する構造信頼性を検討した。Soong・Prucz⁴⁾はテンションレグ・プラットフォームの剛体運動に対して海上での平均風速に関する条件付応答を求めた。

海上都市, 海上空港, 海上プラント等の大規模浮遊式

人工島の動的挙動は, 剛体運動に比べて構造物の変形が顕著になる^{5),6)}。濱本・田中^{7)~9)}は, 風波および海震に対する円形平面の大規模浮遊式人工島の動的挙動を解析的アプローチを用いて検討し, 人工島の変形を考慮することにより大幅に運動の自由度が増し, 既存の浮遊式構造物と比べて応答の空間分布が遥かに複雑になること, さらに荷重レベルが変われば, 変位, 加速度, 応力等の応答の大きさだけでなく空間分布も変化することを明らかにした。これは, 人工島の変形に伴うウェットモードの固有振動数がお互いに近接していることに原因があり, 一般には荷重レベルに応じて入力スペクトルの周波数特性が異なるため, 励起されるモードの寄与率が変化するからである。このような浮遊式人工島の時間的・空間的な応答挙動を適切に予測するには, 使用期間中に起こりうる風波と海震の荷重効果を荷重レベルごとに検討することが必要である。

* 武蔵工業大学工学部建築学科 助教授・工博

** NKK 基盤技術研究所 主任研究員・工修

Associate Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Musashi Institute of Technology, Dr. Eng.
Senior Researcher, Applied Research Center, NKK Corporation, M. Eng.

本研究では、風波と海震に対する大規模浮遊式人工島の応答解析^{8),9)}を拡張し、確率論的アプローチにより両者の荷重効果を共通の土俵で合理的に評価する方法を示す。まず全体のフレームワークを概説した後、本研究で用いる荷重評価法と応答解析法を説明し、再現期間に関する条件付応答の空間分布を求める定式化を行う。次に日本近海の設置海域を想定し、実際に本手法を適用して各海域における風波および海震に対する浮遊式人工島の条件付応答を求め、大規模人工島への風波と海震の荷重効果を検討する。数値結果に基づき、日本近海に大規模浮遊式人工島を設置する場合、再現期間が小さいうちは風波の荷重効果が支配的であるが、再現期間が大きくなるにつれて海震による荷重効果が極めて大きくなることを明らかにする。

2 解析モデルと仮定

風波あるいは海震に対して応答する浮遊式人工島をFig. 1に示す。人工島は巨視的に弾性円板と見なす。繫留はテンションレグ形式とし、人工島下面に一樣に分布している場合を考える。解析に際して、人工島～繫留索～海水連成系の動特性と風波および海震に関して以下の仮定を導入する。

- 1) 人工島は線形弾性であり、その運動は線形振動の範囲内にある。
- 2) 海水は渦なし・非粘性・非圧縮性である。
- 3) 海水領域は水平方向に無限に広がっており、海底面は水平である。
- 4) 人工島周辺には上下方向に摩擦のないガイドが配置されており、水平運動は生じない。
- 5) 繫留索は常に引張状態にあり、その挙動は線形弾性である。
- 6) 繫留索の質量効果は無視できる。
- 7) 風波は $\theta=0$ の方向から入射する不規則な平面波である。
- 8) 二次波浪外力の影響は無視する。

Fig. 1 Geometric parameters of floating island

- 9) 海震は海底面の不規則な上下剛体運動により励起される。

3 全体のフレームワーク

荷重の再現期間に関する浮遊式海洋人工島の条件付応答を求めるには、まず対象とする問題全体のフレームワークを構築し、海洋環境、荷重評価、人工島のモデル化、人工島と海水の動的相互作用、応答解析手法といった様々な要素技術が全体のフレームワークにおいてどのような位置づけにあるのかを明確にしておく必要がある。風波と海震による浮遊式海洋人工島への荷重効果を評価するために必要な要素技術間の関係をFig. 2に示す。これを6つのステップに分けて整理すると以下のようになる。

- ・第1ステップ：浮遊式人工島の設置海域において発生する風波および海震を再現期間に対応するいくつかの荷重レベル（再現期待値）に分け、各荷重レベルごとにその発生頻度を予測する。これを荷重の長期表現と呼ぶ。
- ・第2ステップ：各荷重レベルごとに海面の波高および海底の上下加速度を定常確率過程としてモデル化し、その周波数特性をパワースペクトル密度関数により表わす。これを荷重の短期表現と呼ぶ。
- ・第3ステップ：風波と海震による人工島への入射波の反射・散乱を考慮し、各荷重レベルごとに浮遊式人工島に作用する風波あるいは海震による人工島への入力の評価する。

Fig. 2 Overall framework for evaluating the stochastic response conditional on return period

- ・第4ステップ：人工島と海水および繫留索との間に生じる動的相互作用（付加質量，造波減衰，および繫留力）を考慮して，線形化された浮遊式人工島の運動方程式を誘導する。
- ・第5ステップ：各荷重レベルごとに風波あるいは海震に対する定常ランダム応答解析を行い，人工島の荷重レベルに関する条件付応答の空間分布を求める。

4 風波荷重の確率的表現

4-1 荷重の短期表現

風波による海面の変動は，厳密には非定常確率過程である。しかし，風波の非定常性に関わるパラメータは時間とともに極めて緩やかに変化するので，短期間の海面の変動は定常確率過程と見なすことができる。

風波は海上での風により成長し発達する。浮遊式人工島の設置海域が沖合にあり風の吹送距離が十分な場合，海面の状態はその海域での平均風速をパラメータとする波高スペクトルにより表すことができる。本研究では以下の Pierson-Moskowitz¹⁰⁾の波高スペクトルを用いる。

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp\left[-\beta\left(\frac{g}{\omega V}\right)^4\right] \quad (0 < \omega < \infty) \quad (1)$$

ここに， V は海面上19.5mにおける平均風速， g は重力加速度， ω は円振動数， α と β は海域に依存して決まる定数である。本研究では，北海のデータに基づき $\alpha=0.0081$ ， $\beta=0.74$ とする。

この波高スペクトルを採用すると，海面状態を表すためによく用いられる有義波高 H_s および平均周期 T_0 はそれぞれ以下のように陽な形で与えられる⁴⁾。

$$H_s = \frac{2}{g} V^2 \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2a)$$

$$T_0 = 2\pi \frac{V}{g} \frac{1}{(\beta\pi)^{1/4}} \quad (2b)$$

したがって，海面の状態は海上での平均風速 V の関数として完全に記述されることになる。

4-2 荷重の長期表現

荷重の短期表現として採用した波高スペクトルは，海上での平均風速の関数として定義することができる。したがって，荷重の長期表現としては，海上での平均風速の確率分布を与えればよいことになる。ただし，式(1)のスペクトルは海上19.5mの風速で定義されるため，以下のべき法則を用いて風速の高さ補正を行う。

$$\frac{V(z)}{V(z_{ref})} = \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^{\gamma} \quad (3)$$

ここに， z_{ref} は基準高さ， γ はべき指数であり海上での値として0.08を用いた²²⁾。

Davenport¹¹⁾は特定地域における平均風速がWeibull分布に従うことを示した。この場合，平均風速の年間最

大値 V_p の分布は極値I型に近づく。これに対し，牧野・渡壁¹²⁾は日本の最大風速の分布は再現期間が大きくなれば台風に支配されることを示し，年間最大平均風速 V_p の極値分布形として以下のIII型を提案した。

$$F_{V_p}(v) = \exp\left[-\left(\frac{w-v}{w-u}\right)^k\right] \quad (4)$$

ここに， u と k はそれぞれスケールパラメータと形状パラメータ， w は上限値を表している。風速の極値分布としてはI型，III型の他にII型が用いられることもある¹³⁾。なお，年間最大平均風速 V_p の再現期間 $T(v)$ は確率分布関数と以下の関係がある。

$$F_{V_p}(v) = 1 - \frac{1}{T(v)} \quad (5)$$

5 海震荷重の確率的表現

5-1 荷重の短期表現

地震波は厳密には強度振幅と周波数特性とが時間とともに変化する非定常過程であるが，ここでは地震波の定常部のみを対象として応答解析を行うことにし非定常性は考慮しない。

浮遊式人工島に作用する地震力は，海水中を粗密波として伝播する海震により発生する動水圧と海底面への繫留に伴い鉛直繫留索を直接伝わる変動張力との同時入力になる。前者は海底面の上下動加速度の関数となり，後者は海底面の上下動変位の関数となる。本研究では，海底面における上下動の加速度パワースペクトル密度関数として以下の修正金井・田治見スペクトルを用いる。

$$S_{\dot{u}_s \dot{u}_s}(\omega) = G_0 \cdot H_h(\omega) \cdot H_l(\omega) \quad (0 < \omega < \infty) \quad (6)$$

ここに， G_0 は上下動加速度のスペクトル強度， $H_h(\omega)$ はClough-Penzien¹⁴⁾のハイパス・フィルター， $H_l(\omega)$ は金井・田治見¹⁵⁾のロウパス・フィルターで，それぞれ以下のように与えられる。

$$H_h(\omega) = \frac{(\omega/\omega_k)^4}{\{1 - (\omega/\omega_k)^2\}^2 + 4\xi_k^2(\omega/\omega_k)^2} \quad (7a)$$

$$H_l(\omega) = \frac{1 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^4}{\{1 - (\omega/\omega_g)^2\}^2 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2} \quad (7b)$$

ここに， ω_k と ξ_k はハイパス・フィルターのパラメータ， ω_g と ξ_g はロウパス・フィルターのパラメータである。 ω_g は地盤の卓越振動数， ξ_g は地盤の代表減衰比を表している。本研究では，上下動に対する各パラメータの値を $\omega_g=30\text{rad/sec}$ ， $\xi_g=0.6$ ， $\omega_k=3\text{rad/sec}$ ， $\xi_k=0.6$ と設定した。海底面での上下動変位パワースペクトル $S_{u_s u_s}(\omega)$ および上下動速度パワースペクトル $S_{\dot{u}_s \dot{u}_s}(\omega)$ は式(6)の上下動加速度パワースペクトル $S_{\ddot{u}_s \ddot{u}_s}(\omega)$ とそれぞれ以下の関係がある。

$$S_{u_s u_s}(\omega) = S_{\ddot{u}_s \ddot{u}_s}(\omega)/\omega^4 \quad (8a)$$

$$S_{\dot{u}_s \dot{u}_s}(\omega) = S_{\ddot{u}_s \ddot{u}_s}(\omega)/\omega^2 \quad (8b)$$

5-2 荷重の長期表現

地震荷重の長期表現としては、一般に地盤の最大加速度あるいは最大速度の年間超過確率を表す地震ハザード曲線が用いられる。Cornell¹⁶⁾は、地盤の最大水平加速度が極値II型分布に従うことを示した。また、尾崎・北川・服部¹⁷⁾は我国における地震基盤上の最大水平速度も極値II型分布に従うことを報告した。このとき、地震ハザード曲線は次式で与えられる。

$$P[V_0 > v] = 1 - F_{V_0}(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\mu}{v}\right)^k\right] \quad (9)$$

ここに、 V_0 は地震基盤での最大水平速度、 μ と k はそれぞれスケールパラメータと形状パラメータである。地表面での最大速度 V_p は地震基盤上の最大速度 V_0 と以下の関係¹⁷⁾があると仮定する。

$$V_p = 5\sqrt{T_g} V_0 = 5\sqrt{\frac{2\pi}{\omega_g}} V_0 \quad (10)$$

ここに、 T_g は地盤の卓越周期である。最大地盤加速度や最大地盤速度の極値分布としては、このII型の他にI型やIII型が用いられることもある¹⁸⁾。なお、以上の地震荷重の長期表現は水平動に関するものであるが、海震は海底面の上下動によって引き起こされるため、渡部・藤堂¹⁹⁾に従い、上下動の最大速度は水平動の最大速度の1/2であると仮定する。

荷重の短期表現においては、上下動の地震動強さをスペクトル強度によって表した。そこで、このスペクトル強度を上下動の最大速度 V_p に関係付け、スペクトル強度 G_0 に関する確率分布を求める。海底面での上下動速度の分散は以下のように与えられる²⁰⁾。

$$\begin{aligned} \sigma_v^2 &= \int_0^\infty S_{v,v}(\omega) d\omega \\ &= \int_0^\infty \frac{S_{\ddot{u},\ddot{u}}(\omega)}{\omega^2} d\omega = G_0 \cdot \tilde{H}_v \end{aligned} \quad (11)$$

ここに、

$$\tilde{H}_v = \int_0^\infty \frac{H_h(\omega) \cdot H_v(\omega)}{\omega^2} d\omega \quad (12)$$

であり、以下のように陽な形で与えられる²⁵⁾。

$$\tilde{H}_v = \frac{\pi}{4\omega_k} \frac{f_1}{f_2} \quad (13)$$

ここに、

$$f_1 = 2\xi_k \omega_k \omega_g^3 + \xi_g \omega_g^2 (\omega_k^2 + \omega_g^2) \quad (14a)$$

$$\begin{aligned} f_2 &= \xi_k \xi_g (\omega_k^2 - \omega_g^2)^2 + 4\xi_k \xi_g \omega_k \omega_g (\omega_k^2 + \omega_g^2) \\ &\quad + 4\xi_k \xi_g \omega_k \omega_g (\xi_k^2 + \xi_g^2) \end{aligned} \quad (14b)$$

である。

上下動速度の最大値 V_p は標準偏差 σ_v にピーク係数 μ_v を乗じることにより求まる。

$$V_p = \mu_v \cdot \sigma_v \quad (15)$$

ここに、ピーク係数 μ_v はDavenport²¹⁾に従い次式により求める。

$$\mu_v = \sqrt{2\ln(\nu_0^* t_0)} + \frac{0.557}{\sqrt{2\ln(\nu_0^* t_0)}} \quad (16)$$

ここに、 ν_0^* は単位時間当たりのゼロアップクロッシングの平均頻度、 t_0 は定常部の継続時間である。なお、 ν_0^* として地盤の卓越振動数 $f_g = \omega_g/2\pi$ を用いた。

式(11)と式(15)より、上下動加速度のスペクトル強度 G_0 と最大速度 V_p との関係は以下ようになる。

$$G_0 = \frac{(V_p/\mu_v)^2}{\tilde{H}_v} \quad (17)$$

なお、スペクトル強度 G_0 の再現期間 $T(s)$ は式(5)と同様に次式で与えられる。

$$F_{G_0}(s) = 1 - \frac{1}{T(s)} \quad (18)$$

6 再現期間に関する条件付応答

風波および海震に対する応答解析の詳細はすでに既報^{8),9)}で報告したので、ここでは条件付応答の扱いのみを示す。

風波に対する条件付変位応答の分散は以下のように与えられる。

$$\bar{\xi}^2(r, \theta | V_p) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \xi_{nm}^2(r) \cos^2 n\theta \cdot \bar{q}_{nm}^2 \quad (19)$$

ここに、下付添字 n は円周方向フーリエ波数、 m は半径方向モード次数、 $\xi_{nm}(r)$ は人工島の $\theta=0$ における nm 次半径方向モード形、 $\bar{q}_{nm}^2$ は nm 次一般化座標の分散であり次式で与えられる。

$$\bar{q}_{nm}^2 = \int_0^\infty |H_{nm}(\omega)|^2 S_{Q_{nm}Q_{nm}}(\omega) d\omega \quad (20)$$

ここに、 $H_{nm}(\omega)$ は nm 次周波数応答関数、 $S_{Q_{nm}Q_{nm}}(\omega)$ は nm 次一般化力のパワースペクトルである。

一方、海震に対する条件付変位応答の分散は以下のように与えられる。

$$\bar{\xi}^2(r | G_0) = \sum_{m=1}^{\infty} \xi_{0m}^2(r) \cdot \bar{q}_{0m}^2 \quad (21)$$

なお、加速度・応力等の応答値も同様に求まる。

7 数値結果と検討

数値例題におけるモデルパラメータを以下のように定める。人工島は隔壁を有するコンクリート製バージを考え、半径=1000m、厚さ=50m、ヤング係数 $=2.0 \times 10^{10}$ N/m²、ポアソン比 $=0.15$ 、質量密度 $=0.40 \times 10^3$ kg/m³、空中でのモード減衰比 $=0.05$ とする。設置状態として、人工島下面にテンションレグを一様に分布させた繫留方式を考える。このとき、人工島下面単位面積当たりの繫留索のパネ剛性 k_d として 1.0×10^5 N/m³と 5.0×10^5 N/m³を考え、両ケースともに自由浮体状態からの引き込みは

10m とする。また、設置水深=200m、海水の質量密度= $1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とする。

特定の海域における風波および海震に対する応答挙動を検討するために、日本近海の2つの海域 Site A と Site B を想定した。Site A は、台風が南方から直接来るため風速の再現期待値が大きく、地震活動度の高い太平洋側（東京沖）、Site B は、一旦上陸して勢力の弱まった台風が来るため風速の再現期待値は比較的小さく、地震の活動度は比較的低いものの再現期間が大きくなると再現期待値が急に大きくなる日本海側（新潟沖）である。各海域で設定した風および地震の再現期間と再現期待値の関係をそれぞれ Fig. 3(a), (b) に示す。風の再現期待値は局地的な境界層の乱れの影響を受けない自由大気の傾度風の風速を求めた後、べき法則により海上19.5m の値に変換して求めた。また、地震の再現期待値は局地的な表層地盤のサイト効果を受けない地震基盤での上下動速度を

(a) Wind-wave

(b) Seaquake

Fig. 3 Return period and expected load intensity

Table 1 Parameter values of extreme value distributions of environmental forces

Location	Wind-wave			Seaquake	
	k	u (m/sec)	w (m/sec)	k	μ (m/sec)
Site A	6.23	27.3	90.0	2.1	0.56
Site B	6.13	13.2	90.0	1.8	0.23

求めた後、表層地盤の増幅効果を考慮し海底面での値に換算して求めた。Site A と Site B における風と地震の極値分布のパラメータの設定値を Table 1 に示す。なお、式(16)の継続時間 t_0 は風波で20分、海震で20秒とした。

7-1 風波に対する応答

再現期間に関する波高パワースペクトル密度関数を Fig. 4 に示す。強度パラメータである海上での平均風速は再現期間50年、100年、200年、500年、1000年に対する再現期待値である。2種類の繫留索剛性に対して人工島のウェットモード固有振動数 (rad/sec) を求め、波高スペクトルとの関係を示した。繫留索剛性の増加に伴い、すべてのモードの固有振動数が高振動数側に移動している。各再現期間とも、スペクトル強度は Site A が Site B よりわずかに大きく、ピーク振動数は Site A が Site B よりわずかに低い。

Fig. 5 に再現期間50年、100年、200年、500年、1000年に対する条件付変位応答の $\theta=0$ での空間分布を示す。繫留索剛性が小さいときは、低次の弾性変形モードが顕著になり人工島周辺部での応答が大きいく。繫留索剛性が大きくなると、剛体変位モードに移行し応答値は大幅に低減している。また、再現期間に応じて応答の分布形は異なり、端部が最大値となる場合もあれば人工島内部で最大値が生じる場合もある。

Fig. 4 Power spectral density functions of wave height

Fig. 5 Standard deviations of displacement response for different return periods

Fig. 6 Standard deviations of acceleration response for different return periods

Fig. 6 に再現期間50年, 100年, 200年, 500年, 1000年に対する条件付加速度応答の $\theta=0$ での空間分布を示す。変位応答と同様の傾向が見られ, 繫留索剛性の増加により加速度応答も大幅に低下している。低次モードのみが励起されており, 応答の分布形はなめらかである。

Fig. 7 に再現期間50年, 100年, 200年, 500年, 1000年

に対する半径方向曲げモーメントの条件付応答の $\theta=0$ での空間分布を示す。繫留索剛性が小さい場合は, 変形が大きくなるため曲げモーメントも大きい。一方, 剛性が高い場合は, 剛体運動が支配的になるため曲げモーメントも小さい。また, 変位・加速度に比べて, 高次モードが励起されており応答の分布形が複雑である。

Fig. 7 Standard deviations of bending moment response for different return periods

なお、各再現期間とも Site A の応答は Site B の応答よりも大きい、再現期間の小さいとき応答の差は大きく、再現期間が大きくなると応答の差は小さくなっている。

7-2 海震に対する応答

再現期間に関する海底での上下動加速度パワースペクトル密度関数を Fig. 8 に示す。強度パラメータであるスペクトル強度は再現期間50年, 100年, 200年, 500年, 1000年に対応する再現期待値である。2種類の繫留索剛性に対して人工島のウェットモード固有振動数 (rad/sec) を求め、海底での上下動加速度スペクトルとの関係を示した。風波に比べ、多くの高次モードがスペクトルの主要領域に入っている。各再現期間とも、スペクトル強度は Site A が Site B よりはるかに大きい。ただし、スペクトル強度にかかわらず地盤の動特性を一定としているので、ピーク振動数は Site A と Site B とで等しい。

Fig. 9 に再現期間50年, 100年, 200年, 500年, 1000年に対する条件付変位応答の $\theta=0$ での空間分布を示す。繫留索剛性にかかわらず弾性変形が顕著に見られる。剛性が大きくなると応答が増加しているが、この原因として、海震時に繫留索を直接伝播する地震波の影響が考えられる。海震応答は再現期間が小さいと波浪応答よりはるかに小さいが、 $k_d=5.0 \times 10^5 \text{ N/m}^3$ の場合、再現期間が大きくなるにつれ波浪応答とほぼ同程度の大きさになっている。

Fig. 10 に再現期間50年, 100年, 200年, 500年, 1000年に対する条件付加速度応答の $\theta=0$ での空間分布を示す。

Fig. 8 Power spectral density functions of vertical ground acceleration

す。変位と同様に、繫留索剛性が大きくなると応答は増加している。また、高次モードの励起が顕著であり、特に人工島中央部での増幅は大きい。

Fig. 9 Standard deviations of displacement response for different return periods

Fig. 10 Standard deviations of acceleration response for different return periods

Fig. 11 に再現期間50年, 100年, 200年, 500年, 1000年に対する半径方向曲げモーメントの条件付応答の $\theta=0$ での空間分布を示す。波浪応答の加速度値との大きな違いにもかかわらず, 曲げモーメントの値はほぼ同じオーダーになっている。しかし, 再現期間が大きくなると,

海震時の曲げモーメントは, 波浪応答よりもはるかに大きくなる。

なお, 各再現期間とも Site A の応答は Site B の応答よりもかなり大きくなっている。 $k_d=5.0 \times 10^5 \text{ N/m}^3$ の場合, Site A において海震応答を波浪応答と比べると, 再

Fig. 11 Standard deviations of bending moment response for different return periods

現期間が小さいときは最大変位ははるかに小さく、最大曲げモーメントは同程度であるが、再現期間が大きいときは最大変位は同程度、最大曲げモーメントははるかに大きい。Site Bにおいては、再現期間にかかわらず最大変位は波浪応答の方が常に大きい、再現期間が大きくなると最大曲げモーメントは地震応答の方が大きくなる。

8 むすび

大規模浮遊式人工島においては、剛体運動に比して構造物自体の変形の影響が大きくなり、応答の空間分布が極めて複雑になることが予想される。本研究では、確率論的アプローチにより、ある特定海域における風波および地震の荷重効果を求める統一的方法を示した。数値例題に基づき、本研究の範囲内で、浮遊式人工島への風波および地震の荷重効果は以下のように要約される。

- 1) 風波に対する条件付応答においては、荷重強度パラメータである平均風速の増加とともに波のスペクトルの中心領域が低振動数側に移動し、励起される各モードの寄与率が異ってくるため、再現期間に応じて応答の空間分布形が変化する。
- 2) 地震に対する条件付応答においては、荷重強度パラメータであるスペクトル強度が変化しても、海底の地盤特性が一定である限り励起される各モードの寄与率が変わらないため、再現期間に関わらず応答の空間分布形は変化しない。しかし、一般には地震強さにより

地盤特性は変化するので、再現期間に応じて地震による条件付応答の空間分布も変化する。

- 3) 風波に対する条件付応答は、再現期間が大きくなってもその増加率は小さいが、地震に対する条件付応答は再現期間とともに急激に大きくなる。このため、再現期間が大きくなると地震の荷重効果は風波の荷重効果をしのぐこともある。
- 4) 繫留索剛性が小さい場合は、風波と地震による荷重効果はともに弾性変形が支配的となる。剛性が大きくなると、風波に対しては剛体運動が支配的になるが、地震に対しては依然と弾性変形が顕著である。
- 5) 繫留は風波の荷重効果を低減する上では極めて有効であるが、地震に対しては地震波の伝播経路となり荷重効果を増幅することもある。
- 6) 地震時の加速度応答は風波の場合よりもはるかに大きくなり、風波の場合には見られない高次モードの励起が顕著である。しかし、曲げモーメントの大きさは風波の場合とそれほど変わらない。
- 7) 人工島の設置海域に応じて風波と地震の荷重効果は変化する。このため、設置海域により風波と地震の荷重効果の相対関係は変化する、*site-specific* な検討が重要になる。

本研究においては、浮遊式人工島への風波と地震の荷重効果を統一的に評価するために、確率論的アプローチに基づく全体のフレームワークを示すことを主眼とした。荷重に関する要素技術として、風波では荷重の短期表現を Pierson-Moskowitz の波高スペクトル、荷重の

長期表現を最大平均風速に関する極値III型分布、海震では荷重の短期表現を上下動加速度に関する修正金井・田治見スペクトル、荷重の長期表現を極値II型分布とした。しかし、このような要素技術に関しては解析の目的および対象海域の海象・気象に応じて適切なものを選択する必要がある。なお、本研究では条件付応答を標準偏差(rms)として評価したが、さらに応答のばらつきを評価したい場合には、各要素技術におけるモデル化の不確実性とモデルパラメータのばらつきを考慮する必要がある。この問題は構造物の信頼性評価においては重要であるが、本研究の範囲を越えるので今後の課題としたい。

参考文献

- 1) Thoft-Christensen, P., Baker, M.J.: Structural Reliability Theory and It's Application, Springer-Verlag, pp. 203-237, 1982
- 2) Vanmarcke, E., Angelides, D.: Risk Analysis and Probabilistic Modeling for Offshore Structures, in 'Offshore Structures', Krieger Pub., Vol. 2, pp.189-206, 1991
- 3) Bhartia, B.K., Vanmarcke, E.H.: Multi-Hazard Risk Analysis: Case of a Simple Offshore Structure, Technical Report NCEER-88-0023, State Univ. of New York at Buffalo, 1988
- 4) Soong, T.T., Prucz, Z.: Reliability and Safety of Tension Leg Platforms, Engineering Structures, Vol. 6, pp. 142-149, 1984
- 5) Wen, Y.K.: Interaction of Ocean Waves with Floating Plate, Proc. of ASCE, Vol. 100, No. EM2, pp.375-395, 1974
- 6) Babu, P.V.T., Reddy, D.V.: Dynamic Coupled Fluid-Structure Interaction Analysis of Flexible Floating Platforms, J. of Energy Resources Technology, ASME, Vol. 108, pp.297-304, 1986
- 7) 濱本卓司, 田中彌壽雄: 浮遊式海洋人工島の連成自由振動特性(浮遊弾性円板の流体~構造物相互作用解析その1), 日本建築学会構造系論文報告集, 第438号, pp.165-177, 1992
- 8) 濱本卓司, 田中彌壽雄: 風波に対する浮遊式海洋人工島の応答挙動(浮遊弾性円板の流体~構造物相互作用解析その2), 日本建築学会構造系論文報告集, 第442号, pp.157-167, 1992
- 9) 濱本卓司, 田中彌壽雄: 海震に対する浮遊式海洋人工島の応答挙動(浮遊弾性円板の流体~構造物相互作用解析その3), 日本建築学会構造系論文報告集, 第448号, pp.173-185, 1993
- 10) Pierson, W.J., Moskowitz, L.: A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S.A. Kitaigorodskii, J. of Geophysical Research, Vol. 69, pp.5181-5190, 1964
- 11) Davenport, A.G.: The Dependence of Wind Loads on Meteorological Parameters, in 'Wind Effects on Buildings and Structures', Vol. 1, pp.19-82, 1967
- 12) 牧野稔, 渡壁守正: ポアソン確率モデルに基づく最大風速の極値分布(その2) 台風を対象とする強風の極値分布の特性について, 日本建築学会論文報告集, 第338号, pp. 10-17, 1984
- 13) Simiu, E., Scanlan, R.H.: Wind Effects on Structures, John Wiley & Sons, 1986
- 14) Clough, R.W., Penzien, J.: Dynamics of Structures, McGraw-Hills, 1975
- 15) Tajimi, H.: Statistical Method of Determining the Maximum Response of Building Structure During an Earthquake, Proc. of the 2nd WCEE, Vol. 2, pp.781-798, 1960
- 16) Cornell, C.A.: Engineering Seismic Risk Analysis, BSSA, Vol. 58(5), pp.1583-1606, 1968
- 17) 尾崎昌凡, 北川良和, 服部定育: 地震動の地域特性に関する研究(その1) 地震活動に基づく地震動期待値とその応用, 日本建築学会論文報告集, 第266号, pp.31-40, 1978
- 18) 日本建築学会: 地震荷重—その現状と将来の展望, 1987
- 19) 渡部丹, 藤堂正喜: 設計用模擬地震動に関する研究—その1 模擬地震動の既往の数学モデルと地震動の最大値, 日本建築学会論文報告集, 第303号, pp.41-51, 1981
- 20) Crandall, S.H., Mark, W.D.: Random Vibration in Mechanical Systems, Academic Press, 1963
- 21) Davenport, A.G.: Note on the Random Distribution of the Largest Value of a Random Function with Application to Gust Loading, Proc. Inst. of Civil Engineers, Vol. 24, pp.187-196, 1964
- 22) Wills, J.A.B., Grant, A., Boyack, C.F.: The Offshore Mean Wind Profile, Dept. of Energy, Offshore Technology Report OTH 86-286, 1986
- 23) Hamamoto, T., Sasaki, H., Tanaka, Y.: Wind-Wave and Seaquake Response Distributions of an Artificial Large-Scaled Floating Island, Proc. of IASS-CSCE Int. Congress 'Innovative Large Span Structures', Tronto, Vol. 1, pp.814-825, 1992
- 24) 濱本卓司, 三角猛二郎, 佐々木仁, 田中彌壽雄: 風波及び海震に対する大規模浮遊式海洋人工島の長期応答の空間分布に関して, 構造工学論文集, Vol. 39B, pp. 9-20, 1993
- 25) Hamamoto, T., Kamura, H., Misumi, T., Tanaka, Y.: Spatial Response Distribution of Large Floating Islands Subjected to Stochastic Waves and Seaquakes, Proc. of the 3rd. Int. Offshore and Polar Engineering Conference, Singapore, Vol. 3, pp.701-708, 1993
- 26) Hamamoto, T., Kamura, H.: Stochastic Fluid-Structure Interaction of Large Floating Islands, Proc. of the 6th Int. Conf. on Structural Safety and Reliability, Innsbruck, Vol. 1, pp.141-149, 1993
- 27) 濱本卓司, 加村久哉, 三角猛二郎, 田中彌壽雄: 日本近海における大規模浮遊式人工島の応答分布, 第12回海洋工学シンポジウム論文集, 日本造船学会, pp.435-442, 1994
- 28) Kamura, H., Hamamoto, T., Misumi, T., Tanaka, Y.: Safety Evaluation for Distributed Tension-legs of Flexible Floating Structures, Proc. of the 4th Int. Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Vol. 4, pp. 463-469, 1994
- 29) Hamamoto, T.: Dynamic Response of Flexible Circular Floating Islands Subjected to Stochastic Waves and Seaquakes, Proc. of Int. Conf. on Hydroelasticity in Marine Technology, Torondheim, pp.433-445, 1994

(1995年7月10日原稿受理, 1995年11月9日採用決定)