平成17年度　土木学会北海道支部　論文報告集　第62号

斜波中の完全没水大型係留浮体における波浪中弾性応答解析

Dynamic response analysis of submerged floating structure due to waves with incident angle

北海道大学大学院工学研究科　○学生員　小室 達明 (Tatsuaki Komuro)
北海道大学大学院工学研究科　正会員　佐藤 太裕 (Motohiro Sato)
北海道大学大学院工学研究科　正会員　蟹江 俊仁 (Shunji Kanie)
北海道大学大学院工学研究科　フェロー 三上　隆 (Takashi Mikami)

1. はじめに

海洋開発技術の発達と共に，沿岸海域では浮遊式構造物の技術が進展してきている．更に将来的には水中浮遊式トンネル，海上空港，浮き防波堤，海洋上プラントなどを例に，浮遊式構造物は大型化の傾向を示すことが予想される．

浮遊式構造物が大型化の様相を示すと共に，波浪応答解析では構造物を剛体とみなした剛体運動だけでなく，構造物の弾性振動を考慮した解析が必要となる．特に運動応答量の大きな低周波領域では，波浪による *Radiation* 力は強い周波数依存を受ける．このことから大型浮体構造物の構造設計においては，主要な外力の原因である波浪に対し，構造物の弾性応答を含めた複雑な解析が要求されることとなる．

メガフロートに代表される半没水型の浮体構造物に関する弾性応答特性に関する研究は文献[1)]を例にこれまでも行われてきたが，完全没水型の浮体構造物に関する弾性応答解析の研究例は数少ない．そこで本研究では没水大型係留浮体構造物における弾性応答を含めた波浪応答解析を行うために，流体力評価に二次元境界要素法，構造解析に有限要素法に基づく解析手法を新たに確立し，その手法を用いて波浪応答特性の検討を行うことを目的とする．

2，解析手順

本解析では円形断面係留浮体を両端自由梁みなし，周波数依存性を有する流体力（*Radiation* 力，波強制力）が作用時における，定常状態での，運動，振動応答解析を有限要素法（FEM）により行う．流体中の梁のモード（*Wet Mode*）は空気中のモード（*Dry Mode*）とは違ったモード形をとるが， FEM によって離散化された運動-振動方程式を *Dry Mode* 形による基準座標へ変換することで，*Wet Mode* 形を *Dry Mode* 形の重ね合わせとして評価ことができ以下，“モード重ね合わせ法”として論じる．

流体力の誘導は等価梁の各二次元断面について，計算時間が少なく，任意の構造物断面に対応できる利点を持つ境界要素法（BEM）を用いて求める．BEM の使用時においては，適切な *Green* 関数を取り決めることが計算時間の短縮の面からも重要である．一般に構造物に対し斜に波が入射するときは，“三次元 *Green* 関数”が用いられるが[2)]，本解析では入射角面で二次元流体力を導出し梁断面に力を座標変換することで，“自由表面を

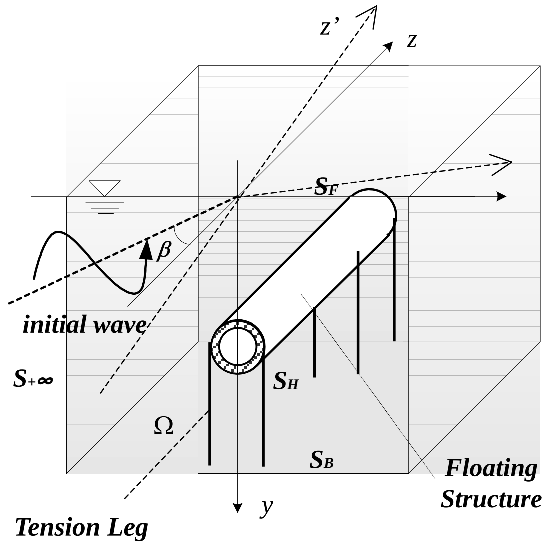


図-1　解析モデル

有する二次元 *Green* 関数”[3)]を用いた効率的な流体力の導出が可能となった．

解析における構造モデルを図-1 に示す．座標系は梁の軸方向を z 軸，梁断面における鉛直方向を y 軸，水平方向を x 軸をする．Ωを構造物を含む解析領域，S_F を自由表面，S_B を海底面，S_H を構造物表面，$S_{\pm\infty}$を無限遠での仮想境界，入射波ポテンシャルは(1)式で表され z 軸に対し入射角βで入射する．

流体に関しては非粘性，非圧縮性の理想流体であり，その運動は非回転である．自由表面上での境界条件は微小振幅波を仮定し，構造物による流体の攪乱は微小とする．また法線 n は構造物から流体向きを正とする．

$$\phi_0 = -\frac{\rho g}{iw}\exp(-iK(\sin\beta x + \cos\beta z + y) - i\omega t) \qquad (1)$$

3. 定式化

3.1 BEM による *Radiation* 問題

はじめに波浪による流体力を誘導する．解析モデルの断面を図-２に示す入射角度で切り x，z 軸に対し角度βを持つ x'，z'軸を設ける．$x'z'$断面内では断面形状が z'方向に変化しないため，入射波ポテンシャルは$\phi_{x'y}$*exp($-iKz'\cos\theta$)と表され，$x'yz'$軸の三次元ラプラスの公式は，

$$\frac{\partial {\phi_{x'y}}^2}{\partial^2 x'} + \frac{\partial {\phi_{x'y}}^2}{\partial^2 y} - (K\cos\beta)^2 \phi_{x'y} = 0 \qquad (2)$$

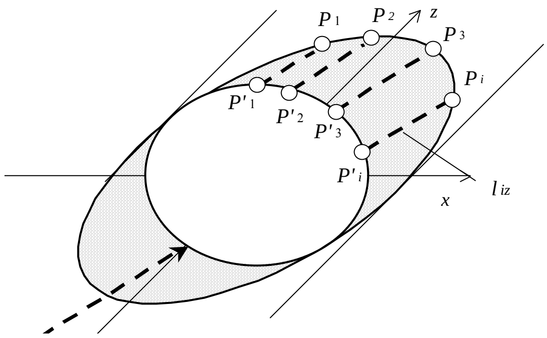


図-2 座標変換

となる．K は波数である．ここで，$x'z'$ 断面に入射角度は常に 90 度であるため第三項は消え，流体の満たす条件は二次元ラプラスの式となる．

$x'z'$ 断面での二次元流体力の誘導には，“自由表面を有する *Green* 関数”を用いた境界要素法を用いて $x'z'$ 断面の流体力を誘導する [3]．境界要素法においては各要素について求めるポテンシャルは一定要素として求める．

$x'y$ 断面における楕円形の P_i 点に作用する上下揺流体力を F_{iV} とし，これらを xy 断面の P'_i 点の二次元上下揺流体力 F'_i に座標変換する．

$$F'_{iV} = -\exp(-iKl_{iz}\cos\beta)F_{iV}\sin^2\beta \tag{3}$$

ここで l_{iz}=0.5 $B\sin\theta/\tan\beta$であり，θは BEM 断面においてルイスフォームにより座標を誘導する際のパラメータである．

3.2　FEM による振動解析

構造物を FEM によって離散化する．変位は形状関数を $N_i(z)$に

$$v(z) = \begin{pmatrix} N_1(z) & N_2(z) & N_3(z) & N_4(z) \end{pmatrix} \{\delta\} \tag{4}$$

ここに

$$N_1(z) = 1 - 3z/l_e^{\ 2} + 2(z/l_e)^3$$

$$N_2(z) = -(z/l_e) + 2(z/l_e)^2 - (z/l_e)^3$$

$$N_3(z) = 3(z/l_e)^2 - 2(z/l_e)^3,\ N_4(z) = (z/l_e)^2 - (z/l_e)^3$$

構造体の二次元断面に作用する流体力の加速度比例成分を $\boldsymbol{A}$，速度比例成分を $\boldsymbol{C}$，波強制力振幅を $\boldsymbol{E}$ とすると，流体作用における流体力のマトリックス，および外力ベクトルは以下のように表される．

$$[M_R^e] = \int_l [N]^T A[N]dz \tag{5}$$

$$[C_R^e] = \int_l [N]^T C[N]dz \tag{6}$$

$$\{q_D^e\} = F'_{iV}\int_l \exp(-iKz\cos\beta)[N]^T Edz \tag{7}$$

したがって，各係数マトリックスを全体座標系に組み立てると，離散化された振動方程式として

$$\begin{aligned} -\omega^2[M]\{Z\} + [K]\{Z\} &= \omega^2[M_R]\{Z\} \\ &\quad - i\omega[C_R]\{Z\} - [K_w]\{Z\} + \{q_D\} \end{aligned} \tag{8}$$

を得る．さて，流体作用のない場合の固有値問題

$$\omega_D^2[\mathbf{M}]\{X\} = [\mathbf{K}]\{X\} + [\mathbf{K'}]\{X\} \tag{9}$$

により決定される，モード系は図-3 に示す *Dry mode* 形である．“モード重ね合わせ法”とは基準化された *Dry mode* 形を X，強制振動における各モードの重みベクトルを｛P｝をして，*Wet mode* 形ベクトル Z を表す手法であり，

$$\boldsymbol{Z=XP} \tag{10}$$

として(9)を（7）に代入し基準化する．

$$\begin{aligned} -\omega^2[M^*]\{P\} + [K^*]\{P\} &= \omega^2[M_R^*]\{P\} \\ &\quad - i\omega[C_R^*]\{P\} + \{q_D^*\} \end{aligned} \tag{11}$$

を得る．ここで

$$[M^*] = [X]^T[M][X],\quad [K^*] = [X]^T[K][X]$$

$$[M_R^*] = [X]^T[M_R][X],\quad [C_R^*] = [X]^T[C_R][X]$$

$$[K_w^*] = [X]^T[K_w][X],\quad \{q_D^*\} = [X]^T\{q_D\}$$

となり，*の添字のマトリックスは対角化されていることに注意する．ここで[M*]はモード質量，[K*]はモード剛性である．(11)を変換して

$$\{P\} = \{-\omega^2[\tilde{M}] + i\omega[C_R^*] + [\tilde{K}]\}^{-1}\cdot\{q_D^*\} \tag{12}$$

ただし

$$[\tilde{M}] = [M^*] + [M_R^*],\quad [\tilde{K}] = [K^*] + [K_w^*]$$

である．ここで{P}は入射波の振動数に対する各モードの重みを表す，応答値である．

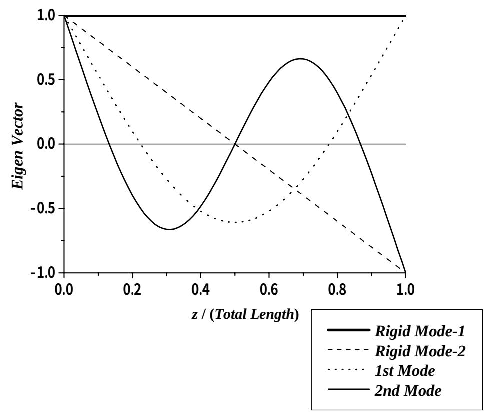
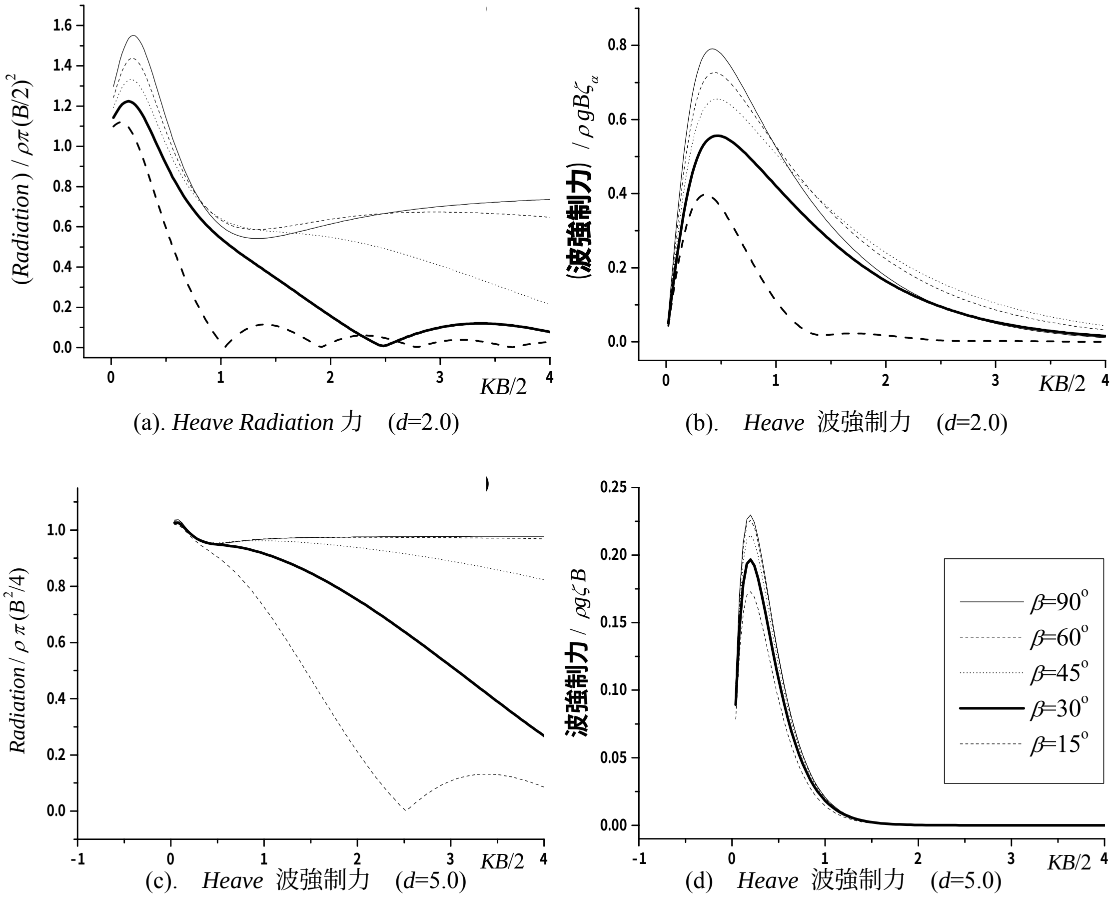


図-3　*Dry Mode* 形

4. 解析結果および考察

座標変換により求めた斜波中の二次元流体力の入斜角度，深さによる変化の様子を図-4 に示す．入射角度は 90 度，60 度，45 度，30 度，15 度について，また，浮体設置の深さは図-4 に示す無次元量 d を 1.5，5.0 について解析を行う．横軸は波数と半幅の無次元量 $KB/2$，縦軸は *Radiation* 力については断面積$\rho\pi(B/2)^2$，波強制力についてはρgB を用いた無次元量であり流体力は絶対値で表示した．各解析モデルについては入射角度を 90 度から減少させると，d=1.5，5 のどちらの場合も流体



(a). *Heave Radiation* 力　(*d*=2.0)　　(b).　*Heave* 波強制力　(*d*=2.0)

(c).　*Heave* 波強制力　(*d*=5.0)　　(d)　*Heave* 波強制力　(*d*=5.0)

図-4　斜波中の二次元流体力

力が小さくなっている．また，角度を減少させると，流体力が強い周波数依存を受けた．二次元断面内で流体力が 0 になる周波数が現れるが，これは斜波中では断面内に位相差が生じることで断面内の力が打ち消しあうことが要因と考えられる．

次に，浮体の設置深さであるが，*d* を増大させると流体力の揺れ幅が小さくなることが確認できる．これは，入射波ポテンシャルが *y* 軸の負の方向から正の方向へ指数関数的に減少した分布をとるからと考えられる．特に低周波数領域で流体力は大きく変化し，高周波数領域で一定値に収束，または強い周波数依存を受ける．また，高周波数領域では *d* が小さい方が *Radiation* 力は大きい．

これらのことから，入射角度，設置深さ位置の変化による，二次元流体力の周波数依存特性が確認できた．

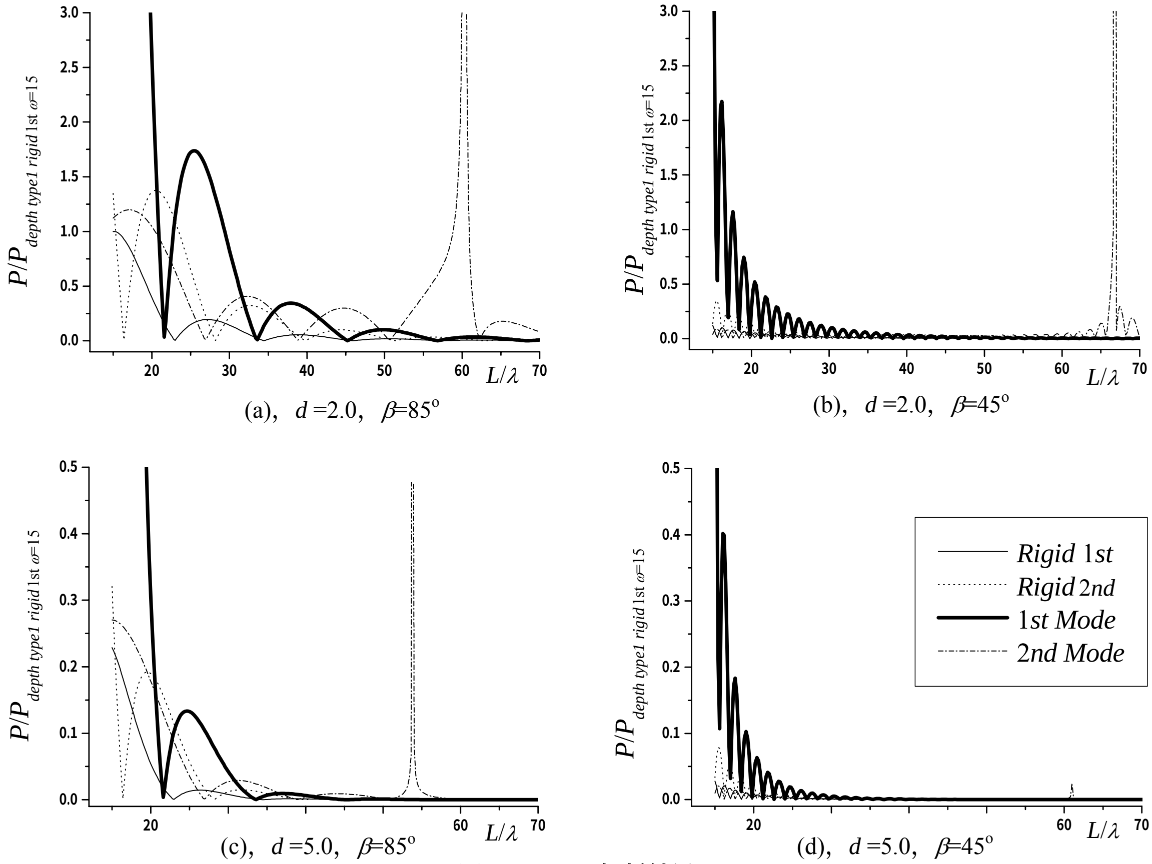
次に図-5 にモード重ね合わせ法による応答値の結果を示す．この手法では *Wet Mode* 形を *Dry Mode* 形の重ね合わせとして評価し，運動応答，振動応答の周波数による変化を表すことができる．流場水深を 100m，梁全長を 1000mと仮定し係留索が 20mおきに 50 本配置されている．また本解析では深海波を仮定している．入射する波は深海波理論に基づき波長 0.5mから 100mとした．

応答値 *P* は，波強制力振幅に依存するが，高周波数領域では波強制力振幅が 0 に収束するため，応答値が現れなかった．そこで，図-5 では周波数応答の現れる波長の範囲として 0.5mから 100mまでを仮定している．表-1 に振動解析の構造諸元を示す．解析は浮体設置の深さ位置 d=2.0，5.0 のそれぞれの場合について，角度を 85 度，45 度と変化させた，４つのパターン計算した．横軸は L/λであり，この表示方法では運動応答は低周波数領域で卓越し，振動応答は運動応答値より高周波数領域で現される．縦軸は *d*=2.0，β=85 度の場合の剛体一次モードの応答値に対する無次元量で表している．モード解析では振動の 7 次モードまでを仮定したが，グラフでは *Dry Mode* 形の剛体一次(並進)，剛体二次(回転)，振動一次，振動二次モードの応答量が示してある．

全解析タイプにおいて，低周波数の領域では運動モードの応答が，L/λ=60付近で振動二次モードの応答が見られる．振動一次モード同調点は図−5からは判断できな

表-1　構造諸元

全長 [*TL*]	1000.0	[m]
ヤング率 [*E*]	$2.1*10^{10}$	[kg/m^2]
梁の単位体積重量 [ρ ']	$8.01*10^2$	[kgsec^2/m^4]
水の単位体積重量 [ρ]	$1.0*10^2$	[kgsec^2/m^4]
外周半径 [*B*/2]	5.0	[m]
内径 [*B*'/2]	4.75	[m]
係留索の配置間隔	20	[m]
係留索の復元力	$1.2*10^5$	[kg/m]
浮体上縁までの深さ Type-1	5.0	[m]
Type-2	20.0	[m]



(a), d =2.0, β=85^o　(b), d =2.0, β=45^o

(c), d =5.0, β=85^o　(d), d =5.0, β=45^o

図-5　モード解析結果

いが L/λ=20付近である．特に低周波数領域では運動モード，振動モードの連成が大きい．

角度を減少させると，応答値曲線が周波数依存を振動している様子が確認できる．また注目すべきは，振動二次モードの同調点が右側に移行していることである．これは，入射角度が減少することで，作用する *Radiation* 力が小さくなり，同調点が右に移行していると考えられる．

次に深さについては d を大きくすることで応答値自体が減少した．これは波強制力振幅が深さの増大によって小さくなることが要因である．また，振動モードの同調点が深さ d の増大により左側に移行している．d の増大により二次元流体力の振動数による揺れ幅は小さく，高周波数領域では *Radiation* 力が大きくなるという流体力の周波数特性が理由として挙げられる．

β, d のパラメータの違いによる応答値の変化について検討したが，周波数依存性の強い流体力の応答値に与える影響が大きい．

5. まとめ

得られた知見を以下にまとめる．

(1) 斜波中の流体力について，入射角で断面を作り，求めた二次元流体力を位相差を含め座標変換することにより，効率的に流体力の導出が可能になった．

(2) 入射角度の変化により，流体力は横波の場合に比べ振幅は小さくなるものの，より大きな周波数依存を受ける．

(3) 浮体設置の深さを大きくすると，低周波数による流体力の揺れ幅は小さくなるが，高周波での収束する値は大きくなる．

(4) 入射角度の変化により，応答値は大きな周波数依存を受け，振動モード同調点が移行する．

(5) 浮体設置の深さを大きくすると，応答値振幅は小さくなり振動モード同調点が移行する．

(6) 低周波数領域では運動モードと振動モードの連成が特に大きい．

本解析においては鉛直方向のみについて検討したが，今後は水平方向の振動解析，または係留索の剛性の評価について取り組んでいく予定である．

参考文献

1) 岡本強一，増田光一，加藤渉，超大型海洋構造物の波浪応答解析，日本建築学会論文報告集第 314 号，*p*166，1982

2) 椹木亨，波と漂砂と構造物，技報堂，*p*89，1991

3) 日本造船学会海洋工学委員性能部会，実践浮体の流体力学，成分堂書店

4) 元良誠三，小山健夫，藤野正隆，前田久明，船体海洋構造物の運動学，成分堂書店，1982

5) 小保方準，藤野正隆，前田久明，斜波中の船体にする波強制力について，日本造船学会論文集 132 号，1972

6) 三倉寛明，完全没水型海中固定構造物に作用する鉛直方向力の断面形状による低減効果について，海洋開発論文集第 20 巻，85*p*，2004