

(217) 制振考慮した海洋構造物の地震応答解析

中央復建コンサルタンツ 正員 松浦靖治
 鹿児島大学工学部 正員 河野健二

1. まえがき

膨大な生物資源や鉱物資源及びエネルギー資源のある海洋は人間の活動の場として多くの潜在的価値を有している。構造物の設置される海域は、一般に陸上に比べて過酷な環境であるため、その設計においては主要外力である波力の他に地震力や風力等が応答に及ぼす影響についても検討することが必要になる。これらの動的外力は確率的なものであり、その設計外力の決定においては、有用な統計的手法が利用されている。このような特性を有する動的外力に対して、何らかの方法で構造物の応答を低減する方法としては TMD 等を用いたパッシブな制振法や人工的な外力を利用したアクティブな制振法が応用されている。本研究では海洋構造物が地震力を受ける場合の動的応答解析を行い、デッキ上に設けた減衰を有する付加構造物が動的応答に及ぼす影響について検討を行った。さらに付加構造物にアクティブな制振力を加えることによる動的応答への影響についても検討するためファジィ制御の適用を行った。

2. 解析法

全体系の運動方程式

海洋構造物の解析モデルとしては、図-1 に示すようなジャケット型の構造物を用いる。デッキ上に付加構造物を有する全体系の運動方程式は動的サブストラクチャー法を用いて求められる。すなわち構造物の変位は、上部構造物の基礎を固定した場合の変位と、下部構造物の運動によって生じる変位の和として表される。下部構造物は杭基礎で支持されるものとし、その動特性は振動数に独立なインピーダンス関数を用いて表される。上部構造物と下部構造の接合部分における変形の連続性と動的なつり合いを考慮すると、全体系の運動方程式を得ることが出来る。この場合、上部構造物の運動は最初の数次からなる主要な振動モードに支配される。このため上部構造物に対しては固有値解析を行い、自由度の低減を計ることができる。したがってアクティブな制振力 $u(t)$ が作用するとき地震動入力を受ける海洋構造物の全体系の運動方程式は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} [I] & [\tilde{M}_{ap}] \\ [\tilde{M}_{pa}] & [\tilde{M}_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{q}\} \\ \{\ddot{x}_p\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\backslash 2\beta_{fj}\omega_{fj}\backslash] & [\tilde{C}_{ap}] \\ [\tilde{C}_{pa}] & [\tilde{C}_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{q}\} \\ \{\dot{x}_p\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\backslash \omega_{fj}^2\backslash] & [0] \\ [0] & [\tilde{K}_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q\} \\ \{x_p\} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} [P_a] \\ [P_b] \end{bmatrix} \{\ddot{z}_g\} + \{\tilde{B}\} u \quad (1)$$

ここで

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

$$[\tilde{M}] = [M] + [C_A], \quad [\tilde{C}] = [C] + [C_D]$$

$$\{x_a\} = [\Phi] \{q\}, \quad \{\tilde{B}\} = [\Phi]^T \{B_f\}$$

ここで $[I]$ は単位マトリックス、 $[L]$ 基礎の変形に対する上部構造物への影響を表すマトリックス、 $[\Phi]$ は上部構造物のモーダルマトリックス、 $[\beta_{fj}]$ は構造物の減衰と流体力による減衰による各次モードに対応した減衰マトリックスである。また、 $[C_A]$ は流体による付加質量マトリックス、 $\{B_f\}$ はアクティブな制振力の作用点を表すベクトル、 $[G]$ は杭基礎の上部と上部構造物下部の固定点の間の変形の対応を与えるマトリックス、 $\{\ddot{z}_g\}$ は入力地震動をそれぞれ表している。動的サブストラクチャー法により、求められた式 (1) による全体系の応答は一般に低次の振動モードが支配的となる。このため再び固有値解析を適用すると式 (1) は次のようになる。

$$\{\ddot{y}\} + [\sum 2\beta_j \omega_j \setminus] \{\dot{y}\} + [\sum \omega_j^2 \setminus] \{y\} = \{f\} \ddot{z}_g + \{B\} u(t) \quad (2)$$

このように入力地震動を受ける海洋構造物は式(2)を解き、モーダルマトリックスによる変換を行うことによって求められる。この場合制振力 $u(t)$ を加える場合は何らかの方法でその大きさを決める必要がある。

制振力の決定

付加構造物によるパッシブな制振は非常に効果的に機能することもあるが、その応答の低減は十分でないことが多い。人工的なエネルギーを外的に加えるという難点はあるものの、アクティブな制振は効果的な役割を果たすことが期待される。地震力のように非常に短時間しか作用しない外力に対しては動的応答の低減をアクティブ制振だけに期待するのは難しいと考えられるが、パッシブな制振の補完的な役割としては非常に効果的なものと思われる。

一方、海洋構造物の主要外力である波力はその継続時間も長くその作用する回数も地震に比べてはるかに多い。このように動的特性の異なる外力に対してアクティブな制振法は有効な方法であると考えられる。一般に制振力の決定法に関しては多くの方法が利用されているが、本研究ではファジィ制御の適用を試みることにする。この方法はメンバーシップ関数の決定に柔軟性があり、最大制御力を目標値以下にすることができるため非常に有用である。図-2はこの場合のメンバーシップ関数と制御ルールを示したものである。入力は速度応答のみを用いており、これより重心法を用いて出力である制御力を決めることができる。応答はウィルソンの θ 法を用いて各時間刻み毎に求められる。

3. 解析結果

付加構造物による制振

解析モデルは図-1に示されるように高さが120m、デッキの幅が60m、水深が110mにあるジャケット型の構造物である。地震のせん断波速度が100m/sのとき、その固有振動数は約3rad/sである。デッキ上には付加構造物を有しておりその質量は構造物全体の約0.6%で在る。また、その固有振動数は構造物の全体系の固有振動数にだいたい一致するように柱の剛性を与えている。この場合の応答は付加構造物の減衰によって異なるが、図-3は減衰定数が5%の場合の周波数応答を示している。図-4は付加構造物の減衰が変化する場合の地震応答解析を行った結果を示している。

入力地震波はEL CENTRO NS(1940)及びEW(1940)、TAFT N21E(1952)の各成分であり最大加速度を200galとし

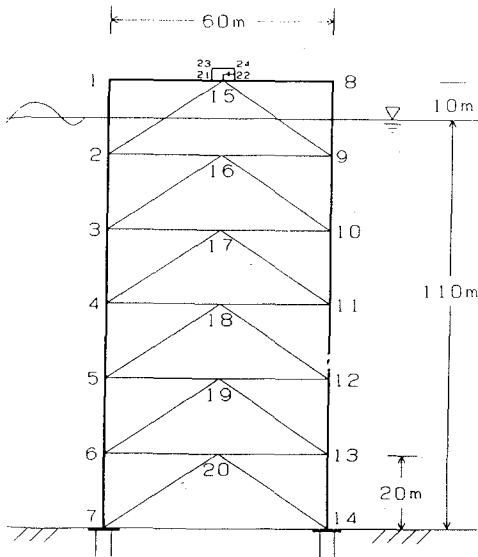


図-1 海洋構造物の解析モデル

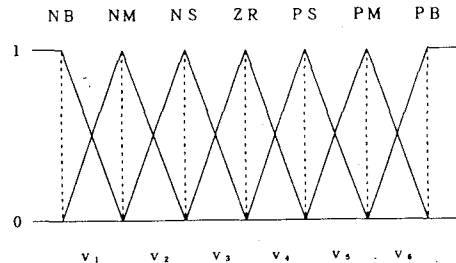


図-2 メンバーシップ関数

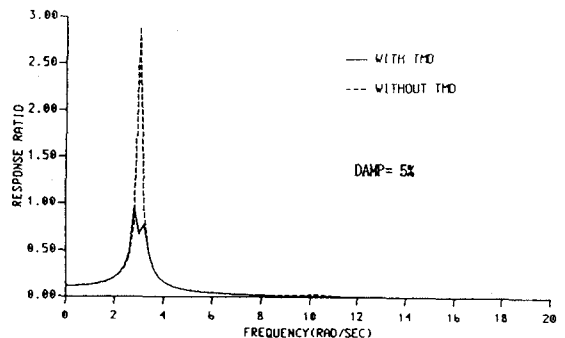


図-3 周波数応答 ($\beta = 5\%$)

ている。デッキ上における最大加速度応答と最大変位応答の変化が付加構造物の減衰の変化に対して示されている。各地震波に対する応答の変化は付加構造物の減衰の増加に対して減少する傾向を示しているが、地震波の特性によって若干異なった傾向を示している。地震波の特性が異なるため付加構造物によるパッシブな制振だけでは効果的な応答の低減を計ることはできないことが考えられる。

アクティブ制振

地震動入力に対する動的応答に対してファジィ制御を適用する場合、メンバーシップ関数の設定が問題になる。本解析では入力として速度応答を用いている。初めに最大速度応答を推定しておくことが必要となるが、付加構造物のみを有する場合の応答に基づいてこの値を求める。デッキ上での応答が最大となるので、この速度応答を用いて図-2に示したファジィ制御則により重心法を用いて制御力を決定する。

図-5はEL CENTRO EW及びTAFT N21Eの地震波を入力した場合の速度応答に対する制振の影響を示したものである。メンバーシップ関数の最大速度 V_{max} 値として $2 \sim 10(cm/s)$ を用いた場合に関して最大制御力が $2 \sim 15ton$ に対するデッキ上での最大速度応答を示している。応答は制御力の増加に伴って減少するが、 V_{max} に対して大きな相違は見られない。これは V_{max} が小さい場合ここで求められた制振力は最大制御力に対応した値になっていることによるものと考えられる。

図-6は同様の地震波を入力した場合の最大変位応答に対する制振の影響を示したものである。メンバーシップ関数の最大速度 V_{max} として $2 \sim 10(cm/s)$ を用いた場合に関して最大制御力が P_{max} が $2 \sim 5tonf$ に対するデッキ上での最大変位を示している。最大制御力の増大ともなって応答値は大きく減少しおり、その変化は速度応答の場合より大きくなっている。また V_{max} の値によって最大応答は変化するが、比較的小さな V_{max} を用いたほうが制振効果が大きいことを示している。ただ制御力を大きくした場合は逆の傾向を示すこともあることが分かる。

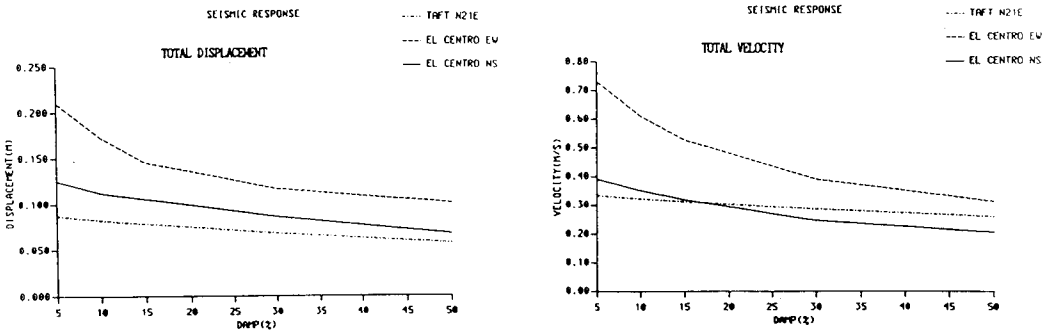


図-4 最大変位及び速度応答(減衰の影響)

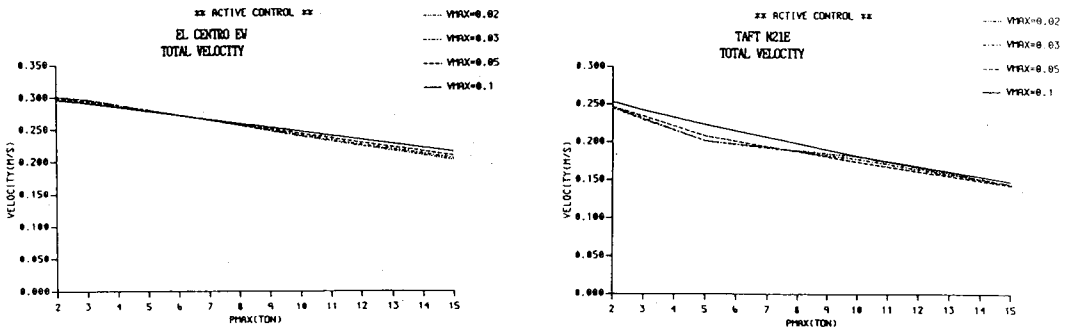


図-5 最大速度応答

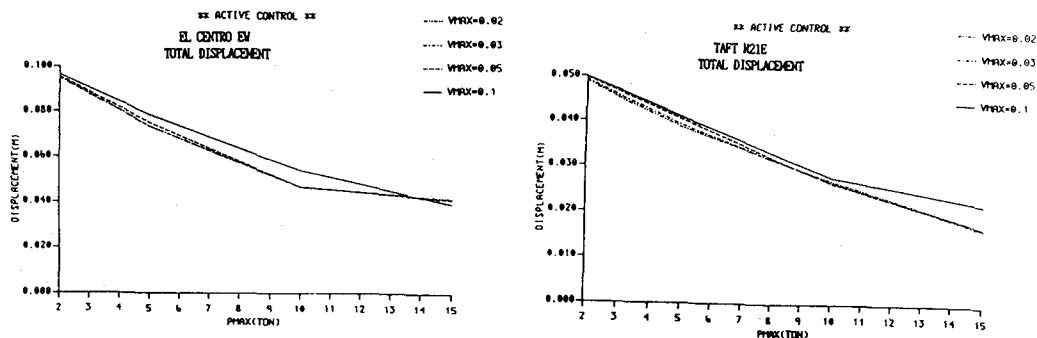


図-6 最大変位応答

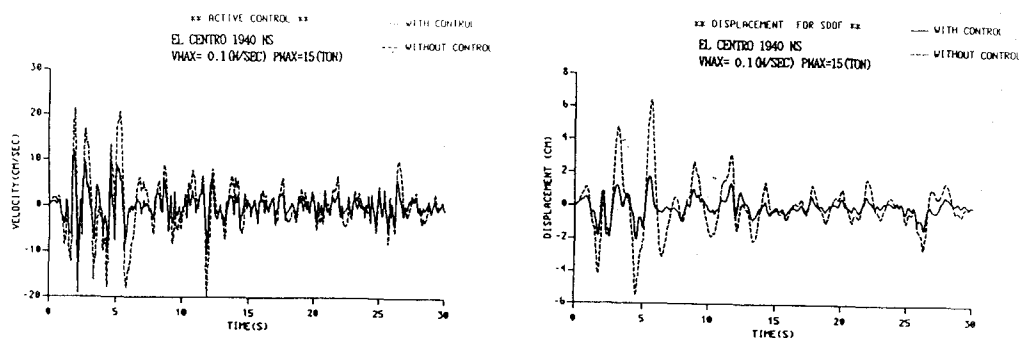


図-7 時刻歴応答 (最大制御力 15tonf)

図-7はEL CENTRO NS(1940)の地震波を入力した場合の速度と変位応答に対する応答の時刻歴を示したものである。制御力を決めるための V_{max} は $10(cm/s)$ 、 P_{max} は $15tonf$ の場合である。点線は制振力を加えない場合の応答を、実線は制振力を加えた場合の応答をそれぞれ示している。簡単な制御則に基づいて制振力を求めているにもかかわらず制振力の作用により応答は低減されていることが分かる。

このようにファジィ制御則を利用した制振は最大制御力の範囲内で効果的な制振を行うことができ、海洋構造物の制振においても有用であると考えられる。

4. あとがき

地震力を受ける海洋構造物の動的応答に及ぼす制振の影響について検討を加えた。その結果、デッキ上に設けた付加構造物による応答の低減効果は減衰や入力地震波の特性により異なるため、適切なパラメータの選択が必要なが分かった。また、ファジィ制御則を用いたアクティブな制振力を加えることにより効果的な制振を行うことができることが分かった。

参考文献

- 1) 古田均, 岡南博史, 金吉正勝, 田中洋, 'ファジィ制御の構造制振問題への応用', アクティブ制震(振)シンポジウム論文集, pp.101-108, 1992.
- 2) 宮腰淳一他, 'アクティブ制振へのファジィ制御の応用', アクティブ制震(振)シンポジウム論文集, pp.79-86, 1992
- 3) K.Kawano, K.Furukawa and KVenkataramana, 'Seismic response of offshore platform with TMD', Proc. of 10 WCEE Vol.4, pp2241-2246, 1992