

テンションレグ係留による浮体構造物の 地震時挙動に関する実験的研究

野津 厚¹・米山治男²

¹正会員 工修 運輸省港湾技術研究所構造部 (〒239横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工修 運輸省港湾技術研究所構造部 (〒239横須賀市長瀬3-1-1)

テンションレグ係留による浮体構造物の地震応答特性について、水中振動台を利用した模型振動実験を行った。テンションレグ係留の浮体の応答加速度は、無係留の浮体の応答加速度より大きいという結果であった。係留索の張力のスペクトルには、加振振動数と浮体-係留系の固有振動数に対応した二つのピークが見られた。浮体と海水との動的相互作用を考慮した有限要素法解析により実験結果の再現を試みたところ、応答加速度、係留索の張力等の点で計算結果と実験結果はおおむね良い一致を示し、解析手法の妥当性が示された。

Key Words : floating structure, seaquake, shaking table test, mooring, tension-leg, finite element method

1. はじめに

一般に浮体構造物は免震性を有するとされているが、P波すなわち地震に対する浮体構造物の挙動については十分に検討しておく必要がある。本研究では、テンションレグ係留による浮体構造物の地震応答特性を把握するために模型振動実験を実施した。また、構造物と海水との動的相互作用を考慮した有限要素解析により実験結果の再現を試みた。

2. 模型振動実験

図-1は模型振動実験の概要を示したものである。図に示すように、本実験で使用した水中振動台は水槽(長さ23m×幅13m)の底部に箱(内寸は長さ3.5m×幅3.5m×高さ1.8m)のある構造となっており、この箱が可動部分である。水槽が満水の状態では、箱の部分の水深は3.6m、それ以外の部分の水深は1.8mとなる。本実験では水深は箱の底から測定して50cm、150cm、250cm、350cmの四通りとした。水深50cmおよび150cmのケースでは水は箱の内部だけに存在するが、水深250cmおよび350cmのケース

では長さ23m、幅13mの水槽全体に水が存在する。

浮体模型は図-2に示すように箱形をしており、底板および側壁はアクリル製である。寸法は長さ50cm、幅25cm、高さ15cm、質量は6.25kgである。本実験の加振振動数に対して、模型の剛性は十分に高い。模型は4本の係留索により係留した。模型の自然状態での喫水は5cmであるが、係留索の張力により喫水を10cmとしている。係留索のバネ定数は一本あたり0.98kN/mである。

このように係留した状態で可動部分を鉛直方向に正弦波加振し、浮体の応答を調べた。振幅は200Gal、波数は20波とし、加振振動数は表-1に示すように5Hz、15Hz、25Hzおよび35Hzとした。また、比較のため、無係留の実験も実施した。この場合、浮体の喫水は5cmである。表-1に実験ケースを示す。計測項目は振動台可動部分の鉛直加速度(以下、台加速度とする)、浮体の鉛直加速度(以下、浮体加速度とする)、係留索の張力である。

3. 実験結果と考察

図-4(a)は無係留の場合の台加速度と浮体加速度の

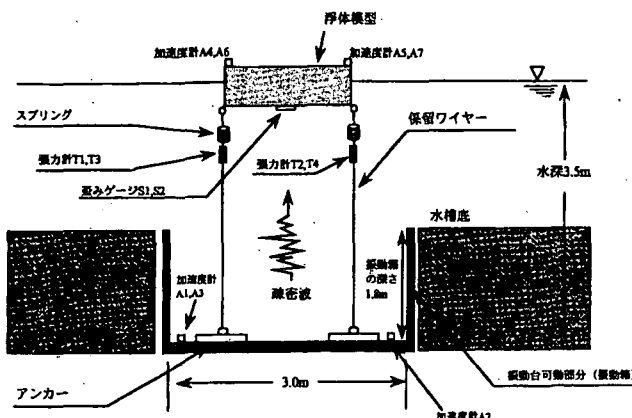


図-1 浮体模型係留状況（テンションレグ係留・水深350cm）

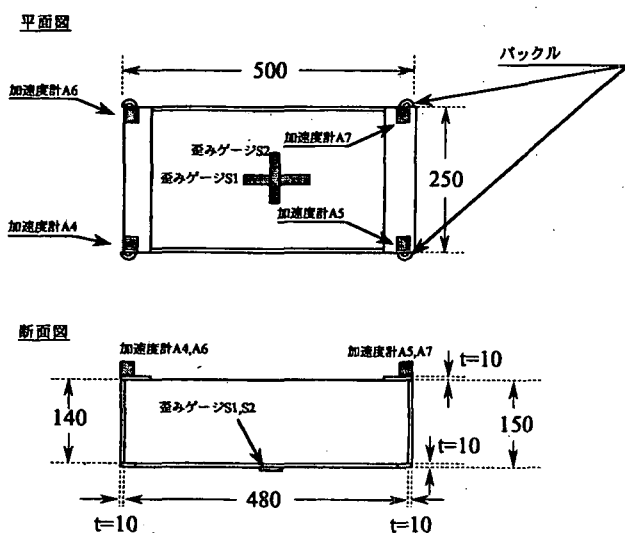


図-2 浮体模型平面図および断面図

表-1 実験ケース

実験ケース	係留方法	水深(cm)	加振振動数(Hz)
CASE1	無係留	50,150,250,350	5,15,25,35
CASE2	テンションレグ係留	50,150,250,350	5,15,25,35

時刻歴、(b)はテンションレグ係留の場合の台加速度と浮体加速度の時刻歴である。いずれも加振振動数は15Hz、水深150cmである。いずれの場合も、浮体加速度は台加速度と同一の振動数の正弦波であり、位相もほぼ同じであるが、振幅はテンションレグ係留の場合の方が大きい。テンションレグ係留の場合、浮体と海底面との間に生じた相対変位により係留索に復元力が生じ、そのために浮体の応答加速度が大きくなるものと考えられる。

図-4(a)は水深50cm、加振振動数5Hzの場合の係留索の張力（4本分の合計、以下同様）の波形を示したものである。張力の波形には、加振振動数とは異

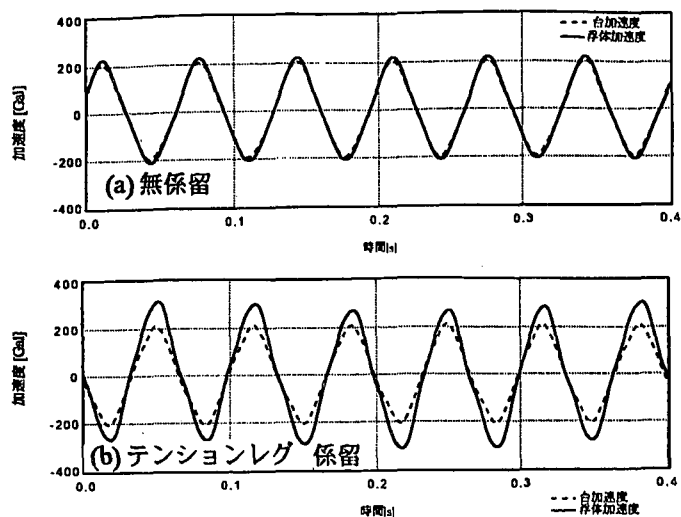


図-3 加速度波形（水深150cm、加振振動数15Hz）

なる振動数の波が混在している。図-5(a),(b)は水深150cmの場合の張力のフーリエスペクトルを示したものである。張力のスペクトルには、二つのピークが見られ、その一つは加振振動数に対応し、もう一つのピークは常に2.7Hz付近に現れる。このピークは浮体-係留系の固有振動数に対応すると考えられる。浮体-係留系の固有振動数を水の存在を無視して求めると約4.0Hzとなるが、現実には浮体の周囲は水が存在するため、付加質量効果により固有振動数が2.7Hzに下がったものと思われる。

4. 有限要素解析による実験結果の再現

構造物と海水との動的相互作用を考慮した有限要素解析により実験結果の再現を試みた。海震は海水中を伝播するP波（疎密波）であるから、その流体場はヘルムホルツ方程式を用いた境界値問題として次式のように表現できる（清川ら²¹⁾）。

$$\partial^2 \phi / \partial x^2 + \partial^2 \phi / \partial z^2 + (\omega/c)^2 \phi = 0 \quad (\text{in } \Omega) \quad (1)$$

$$\phi = 0 \quad (\text{on } S1) \quad (2)$$

$$\partial \phi / \partial n = 0 \quad (\text{on } S2) \quad (3)$$

$$\partial \phi / \partial n = v \quad (\text{on } S3) \quad (4)$$

ここで、 ϕ は速度ポテンシャルのフーリエ変換、 c は水中音速、 n は境界面の法線方向単位ベクトル、 v は振動台表面および浮体表面の速度の法線方向成分のフーリエ変換である。(1)式は流体領域 Ω で速度ポテンシャルが満足すべき支配方程式、(2)式は表面波が発生しないとした場合の自由表面 $S1$ における境界条件、(3)式は海底面および水槽側面 $S2$ において

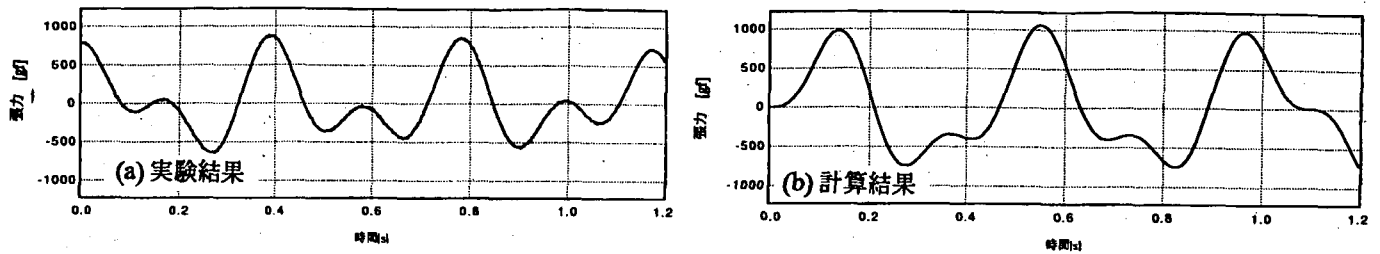


図-4 係留策の張力の時刻歴 (水深50cm、加振振動数5Hz)

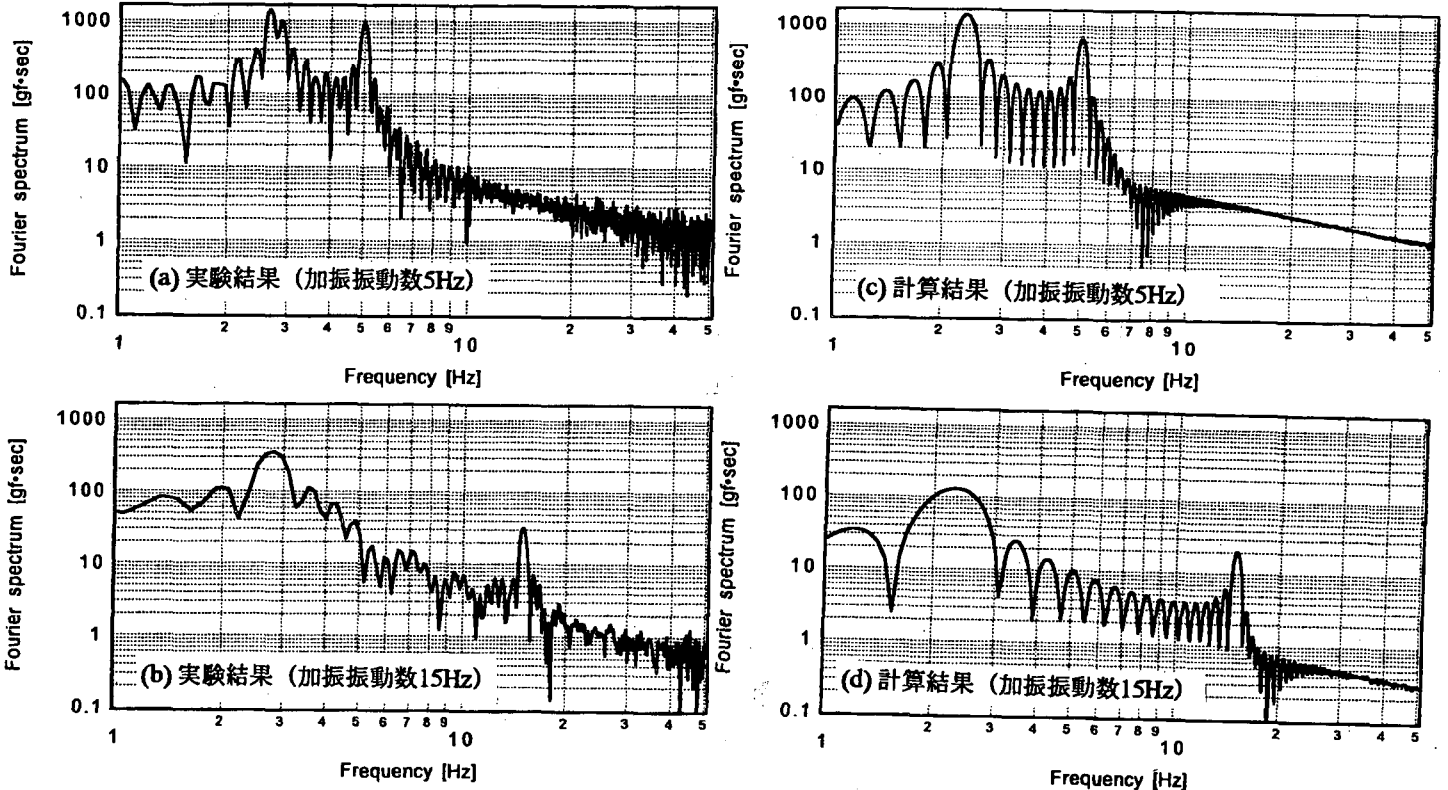


図-5 係留策の張力のフーリエスペクトル (水深50cm、加振振動数5Hz)

流体が境界面に垂直な方向には運動しないという条件式、(4)式は振動台および浮体の運動と流体の運動が境界面S3において連続であるという条件式である。以上のような考え方で浮体の挙動を計算できるプログラムとして、本研究では二次元有限要素法プログラムBEADⅢ^{3), 4)}を用いた。上記の定式化から分かるように、本解析手法は水の圧縮性が顕著に現れる場合にも適用可能である。一方、浮体の動揺による発散波の影響については、本解析手法では考慮していない。

解析に用いたメッシュの一例を図-6に示す。解析は浮体模型の中央を短手方向に横切る断面について行った。これは解析を二次元で行うことによる誤差を少しでも少なくするためにとった措置である。テンションレグのケースでは係留策の復元力を考慮している。テンションレグ係留の場合について、まずホワイトノイズを入力して応答計算を行った結果、浮体-係留系の固有振動数は2.3Hzであるとの計算結

果が得られた。この値は実験結果とほぼ一致している。詳しく見ると、計算結果は浮体-係留系の固有振動数をやや低く評価している。これは、ここでの解析が二次元計算であるため、浮体が奥行き方向に無限に長いとして計算しており、浮体の付加質量効果を実際よりも大きめに評価しているためであると思われる。二次元の計算条件で浮体の付加質量が大きめに評価されるという点については、大型矩形浮体の波浪中の動揺に関する既往の研究においても、同様の傾向が示されている⁵⁾。

次に、実験と同じ振幅200Gal、20波の正弦波を入力して浮体の応答を調べた。図-5(c),(d)は水深150cmの場合の張力のフーリエスペクトルの計算結果を示す。実験結果と計算結果はピークの位置、高さ等の点で良く一致している。スペクトルの二つのピークは加振振動数と浮体-係留系の固有振動数に対応する。

図-4(b)は水深50cm、加振振動数5Hzの場合の係留

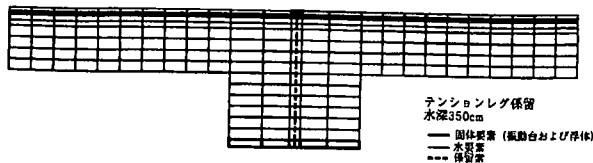


図-6 計算に用いたメッシュ

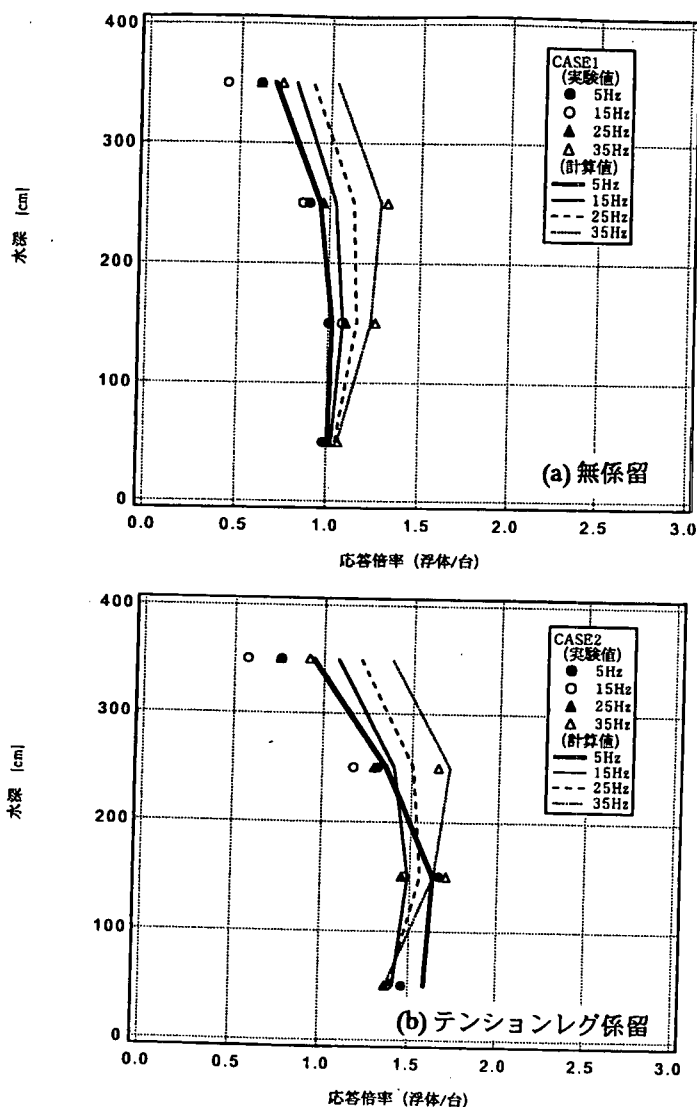


図-7 応答倍率の実験値と計算値

索の張力の時刻歴の計算結果を示す。これを実験結果(図-4(a))と比較すると、計算結果は複数の振動数の正弦波の重なり合った実験結果の特徴をよく再現できていると言える。

最後に、応答倍率(台加速度の振幅に対する浮体加速度の振幅の比)について実験結果と計算結果とを比較したものが図-7(a),(b)である。これらの図によれば、計算結果は次のような点で水深および周波数毎の応答倍率の大小を良く再現している。

- (1) テンションレグ係留の浮体は無係留の浮体より全般に応答倍率大きい。
- (2) 無係留の場合には、加振振動数が大きいほど

応答倍率が大きい傾向にある。

(3) テンションレグ係留で水深50cmの場合には、5Hzの入力に対して最も応答倍率大きい。一方、テンションレグ係留で水深250cmおよび350cmの場合には、35Hzの入力に対して最も応答倍率大きい。

(4) 係留方法の如何に関わらず、水深250cmおよび350cmのケースでは応答倍率が小さい。

なお、上記の現象のうち(4)は、本研究で用いた実験装置の形状に起因する現象である¹⁾。すなわち、水深250cmおよび350cmのケースでは水が水槽全体に広がっており、加振されるのはその一部に過ぎないので、エネルギーの散逸により浮体の応答加速度が低減するものである。従って、実際の海域でこのような現象が発生するわけではない。

5. 結 論

浮体構造物の海震応答特性に関して模型振動実験と解析を行った。その結果、次のような結論が得られた。

- (1) テンションレグ係留の浮体の応答加速度は、本研究における実験条件では無係留の場合より大きかった。
- (2) テンションレグ係留の場合の張力のスペクトルには、加振振動数と浮体-係留系の固有振動数に対応する二つのピークが見られる。
- (3) 浮体と海水との動的相互作用を考慮した有限要素解析により実験結果の再現を試みたところ、応答加速度、係留索の張力等の点で計算結果と実験結果は良く一致しており、本解析手法の妥当性が示された。

参考文献

- 1) 野津厚・米山治男、浮体構造物の海震応答特性に関する実験的研究, No.858, 1997
- 2) 清川哲志・稲田 裕: Seauakesの発生メカニズムについて, 海岸工学論文集, 第36巻, 1989, pp.734-738
- 3) 上部達生, 野田節男, 千葉忠樹, 檜垣典弘: 水との連成を考慮した大型混成式防波堤の振動性状と動水圧, 港湾技術研究所報告, Vol.20, No.4, 1981, pp.41-81
- 4) 上部達生, 守屋正平: 砂地盤上の大水深混成式防波堤の大型模型振動実験と地震応答解析, 港湾技研資料, No.589, 1987
- 5) 上田茂, 白石悟: 大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究(第2報)-数値シミュレーション手法について-, 港湾技術研究所報告, Vol.19, No.3, 1980, pp.105-143