放水による質量変化を利用した固定型海洋構造物の振動抑制システムの開発に関する研究*

菅 勝 重¹ 佐 藤 博²
大 日 方 五 郎³ 麻 生 和 夫⁴

Study on Development of Lateral Vibration-Suppression System Applied Mass-Shift with Discharging Water

by Katsushige KAN^a, Hiroshi SATO^b, Goro OBINATA^c and Kazuo ASO^d

- a. Associate Prof., Dr., Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University
(Corresponding author: E-mail kan@ipc.akita-u.ac.jp)
b. Professor, Dr., Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University
c. Professor, Dr., Graduate School of Engineering, Nagoya University
d. Emeritus Prof., Dr., Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

Since a fixed type of offshore structure such as deep-water platforms has lower natural frequency than approximately 5 Hz, this type of the structure can be easy of resonance to a seismic frequency. Hence, it is essential to avoid the state of resonance and/or so as not to maintain continuously its condition. This study has been done for the purpose of developing the vibration-suppression system applied mass-shift with discharging water, which is clean for the environment, and also economical. As the first step, a series of experiments were carried out by using the model-system, which can be discharged simultaneously water in a vessel from the cylindrical vessel on a upper deck, as soon as the structure initiated the lateral free vibration, corresponding to the above-mentioned resonance state.

As a result, it is shown that the vibration-suppression system proposed in this study can be realized on the model of experimental base.

KEY WORDS: Offshore Structure, Lateral Vibration, Vibration-Suppression System, Mass-Shift, Low Cost

1. 緒 言

近年、陸上における産業用ならびに居住用空間は、世界人口が年々増加するのに伴い減少する傾向にあり、その打開策を沿岸域および海洋に求めて種々の構造物が開発設置されることが予想されている¹⁾。その場合、比較的陸上に近い浅海域に建設される固定型構造物がより重要になってくるものと考えられる。

この種の海洋構造物は、既設構造物も含め、地震、風、波浪、海流、および流氷の衝突などの動的荷重に直接さらされるので、構造物は縦・横・ねじれ振動、および、それらの組合わさった複雑な振動を生じる。さらに、将来避けられない資源枯渇に伴う原材料不足と地球を汚染しないという時代の要請を考慮すると、あらゆるものが環境汚染を起こさず、しかも長寿命の経済設計が要求される²⁾。これらの要求を満たすように製作された構造物は柔(弾性)構造となり、在来の剛構造物よりもその固有振動数は低下する。さらに、海底油田掘削用などの産業用構造物は、長期作業のため、飲料水や資材が大量に必要となり、初期に積み込んだ

デッキ上の積載重量が操業期間中に絶えず変化することになる。特に、操業開始時には資材を大量に搬入するため、構造物の静荷重が増加し構造物自体の固有振動数も低下することになる。

したがって、そのような状態にあるとき、不運にも地震に遭遇すると、構造物は共振し、時として構造物が破壊して、既設の海底油田などは原油の流出により海洋汚染の原因となることが予想される。

文献調査の結果、現在、陸上建造物については、免震材料、免震建造物、制御装置の研究・開発が数多く実施されるとともに、実用化も進んでいる³⁻⁵⁾。しかしながら、これらの建造物および制御装置(システム)は、日常の居住性や安全性に重点を置いて設計・製作されるため、非常に高価である。

一方、海洋構造物に関してはデッキ上部に設置したタンク内用水のスロッシング作用を利用した海洋プラットフォームの共振制御に関する石田らの報告⁶⁾があるのみである。

本研究は、以上の構造物が共振して大振幅を生じ、大変形後に破壊するような場合を想定し、これらの大振幅振動が発生した直後、大振幅振動を素速く鎮静または抑制するために、経済的でも環境に優しい水力、波力および風力などの自然エネルギーを利用した振動抑制システムを開発することを目的とする。

本報告では、その第一段階として、既設構造物に常設される飲料水用貯水タンク内水を放水することで質量が瞬間的に減少し、構造物自体の固有角振動数(ω)が増加するため、構造物は共振点

*2005年9月12日受付 2006年2月20日受理

1. 普通会員 秋田大学助教授 工学資源学部 地球資源学科

2. 普通会員 秋田大学教授 工学資源学部 地球資源学科

3. 名古屋大学教授 先端技術共同研究センター

4. 普通会員 秋田大学名誉教授

[著者連絡先] FAX: 018-837-0401 (地球資源学科事務室)

E-mail: kan@ipc.akita-u.ac.jp

キーワード: 海洋構造物, 横振動, 振動抑制システム, 質量変化, 低コスト

Fig.1 Experimental apparatus. (Unit : mm)

Fig.2 Schematic of notation.

注1) からずれて応答し、応答振幅が急激に低下するという現象に着目して、固定型4脚2層構造物モデルのデッキ上部に貯水タンク、その下部にレシーバー（受水器）をもつシステムを提案するとともに、その振動抑制効果について実験的に調べ、実用性も検討した結果、提案するシステムの有益性が明らかになったので報告する。

2. 実験装置および方法

実験装置は、Fig.1にその概略を示すように、縦1.50×横2.08×高さ2.10mのコンクリート製水槽、Table 1に示すような材質と寸法を持つ4脚2層構造物モデル、振動抑制システムとしてのデッキ上・下部に取り付けた放・受水用容器、および、測定機器類からなる。なお、上部デッキと支柱（脚柱）の支持は、円筒状治具を製作して、円周方向4点を押しねじを用いて固定すると

Table 1 Material properties of the four-legs structure model used in the experiment.

Material property	Leg		Deck		
	Aluminum pipe		Aluminum plate		
Dimension (m)	O.D. 0.018	I. D. 0.016	Width 0.40	Length 0.40	Thickness 0.005
Total length (m)	2.50				
Total mass M_s (kg)	8.366				
Density ρ (kg/m ³)	2765				
Young's modulus E (GPa)	69.25				

O.D. : Outer diameter, I.D. : Inner diameter

Table 2 Size of the cylindrical vessel and bore-size of the vessel-bottom.

Vessel-number (No.)	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Material property	Plastic (Polyvinyl chloride)				
Inner Diameter D_i (m)	0.35				
Capacity (m ³)	25×10^{-3}				
Bore-size D (m)	36×10^{-3}	46×10^{-3}	60×10^{-3}	70×10^{-3}	80×10^{-3}

Table 3 Size of the receiver.

Dimension (m)	Width	Length	Height
	0.25	0.37	0.14
Capacity (m ³)	12.95×10^{-3}		

Table 4 Experimental conditions.

Vessel-number (No.)	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Bore ratio $D_1=D/D_1$ (—)	0.10	0.13	0.17	0.20	0.24
Height of discharging water H (m)	0.3 (constant)				
Initial displacement (m)	20×10^{-3} (constant)				
Initial water-quantities Q (m ³)	$[0.0, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0, 4.8, 5.6, 6.4] \times 10^{-3}$				
Atmosphere surrounding structure					
(a) Case in the air			(b) Case in the water		
—			Water depth L (m)		1.75 (constant)

もに、下部デッキは鉛直上下方向任意の位置にスライドできるようにした。

実験は、水槽内中央部に構造物モデルの下端を固定して設置した。次に、Table 2のような物理的性質を持つデッキ上部の円筒容器（実際の場合の貯水タンクを想定）内に規定量の水を入れた後、上部デッキに水平方向に力を加えて初期変位を与え、力を速やかに開放することにより、構造物はその鉛直軸を含む一平面内で振動が発生すると同時に、容器底部の水止栓を鉛直上方に素早く引き抜いて、下部デッキに設置した受水用容器（Table 3）に放水した。この際、構造物の応答変位はデッキの側端に取り付けたターゲットの変位を、レーザー式変位計（キーエンス社製）を介してFFTアナライザー（小野測器社製）により記録した。

以上の実験方法により、円筒容器（総容量＝ 25×10^{-3} m³）内底部の吐出口径 D の異なる5種類の容器（Table 2：口径 D の小さいものから順に容器 No.1～No.5 と呼称）を用い、Table 4のように、各容器内水の初期質量 M_w （注2）に相当する初期水量 Q を7段階変化させて、モデルの周りが（a）空気中と（b）水中の二つの場合について横振動抑制実験を行った。なお、主要記号の概略をFig.2に示す。

3. 結果および考察

3・1 振動波形の代表例と用語の定義

Fig 3に、容器 No.3を用いた場合で、 $M_w = 0.0$ kg、つまり上部デッキ容器内に水が無い状態（ $Q = 0.0$ m³）で構造物のみが横振動したときの代表的な応答波形を示す。この図より、（a）空気中の場合、振動開始直後から固定支持された4脚構造物特有の減衰応

注1) 共振点では $\omega/\Omega = 1.0$ （ただし、 Ω ：地震角周波数）

注2) 実験の便宜上、水量 Q を変化させたが、解析時にはこれらの値を質量 M_w に換算した。

Fig.3 Representative waves recorded in cases (a) and (b) with the vessel No.3. ($Q = 0.0 \text{ m}^3$ or $M_w = 0.0 \text{ kg}$)

Fig.4 Representative waves recorded in case (b) with the vessel No.3. ($Q = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ or $M_w = 2.0 \text{ kg}$)

答注³⁾を示すが20秒の時点での振動は収束せず持続していること、また、この現象は構造物の周りが水の(b)の場合でも、固有振動数と振幅の絶対値が(a)の場合よりも若干低下するものの、ほぼ同様な傾向を示すことがわかる。

Fig.4に、Fig.3と同じ容器No.3の(b)水中の場合で、容器内

注3) 4脚とも下端固定支持のため、空気中においても、構造(内部)減衰による減衰が観測された。なお、構造物のみの固有振動数は(a)空気中では13.0Hz、(b)水中では12.6Hzで空気中の約3%程の低下が認められた。

注4) 予備実験の結果、この現象は、放水高さ H (Fig.2参照)が約0.4m以上の場合で、吐出口径 D が最小のNo.1の容器で初期水量が多いものほど、出現しやすくなることが確認された。そこで、本研究では、放水のみの効果を調べるために、スロッシングの影響が出現しにくい $H = 0.3\text{m}$ で実験を行った。

Fig.5 Definition of the terminal time, T .

初期水量 $Q = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ($M_w = 2.0 \text{ kg}$)のときの代表的な振動応答波形を示す。ただし、図中、(i)は無放水、つまり、構造物が横振動を開始しても放水しない場合を、また、(ii)は振動開始と同時にレシーバに向けて放水した場合を示す。これらの図とFig.3(b)を比較すると、測定記録20秒の時点で、システム全体の総質量が増した(i)の無放水の場合の振幅の大きさは、Fig.3(b)の構造物のみが振動する場合の振幅よりも僅に低下しながら漸減する傾向にある。それに対して、(ii)の振動開始と同時に放水した場合は、無放水の場合よりも、明らかに振幅値が急激に減少し、しかも振動が短時間でほぼ0に収束する傾向にあることより、この非常に単純な放水システムが構造物の振動抑制に効果があることがわかる。なお、この図で、約10秒後に振幅が一旦ほぼ0となり、その後、凹凸状の波形が僅かながら観察されるが、この現象は放水容器内残存水のスロッシングによる影響と考えられる注⁴⁾。

いま、便宜的に、Fig.5のように、振動開始後の振幅が縦軸に示す初期振幅の10%以下に達する時間を収束時間 T (s)と定義する。また、収束時間 T に影響を及ぼす主要パラメータとしては、次に定義する二つの無次元量が支配的であることが予備実験と結果の整理段階で判明したので、実際のシステム設計の支配的パラメータと考えられる、これらの無次元量を用いて整理・考察した。

$$\text{質量比 } M : M = M_w / M_s$$

$$\text{口径比 } D_r : D_r = D / D_i$$

ただし、

M_w : 容器内水の初期質量

M_s : 構造物の全質量

D : 吐出口径

D_i : 容器内径

3・2 最適質量比および最適口径比

Fig.6, 7に、それぞれ、収束時間 T に及ぼす質量比 M と口径比 D_r の影響を示す。図中、各記号は実験値、実線は最小二乗法による指数近似曲線を表す。Fig.6(a), (b)より、収束時間 T は、空気中の場合、口径比 D_r が小さいものほど質量の影響を受けやすく、質量比 M が小さくなるにつれて収束時間が早くなり一定値に漸近する傾向にあることがわかる。また、実際の場合を想定した水中の場合も、空気中ほど素速く収束しないものの、ほぼ同様な傾向を示すと同時に、口径比が大なるものほど振動が早く収束すると言える。これらのことはFig.7の収束時間 T と口径比 D_r の関係からも明白である。すなわち、空気中と水中の両方の場合において、 D_r が増すにつれて T が減少し、 $D_r = 0.24$ 近傍では T が一定値となる傾向が見られ、実機を想定した際に最も近い条件と考えられる $M = 0.2$ では構造物の脚柱の周りが空気中と水中に関わらず、約5～4.4(s)程度で振動が収束することがわかる。

Fig.6 Relationship between T and M . Fig.8 Relationship between T and $T_{h \rightarrow 0}$. Fig.7 Relationship between T and D_r .

これらの結果は、質量比つまり貯水タンク内の水量が少なくても、振動を抑制できることを意味し、実機へ応用する場合に好都合であるものと考えられる。なお、本研究の実験範囲内では、 $D_r = 0.24$ 、 $M = 0.2$ で最適な振動収束を示した。

以上のことより、実際の海洋構造物を想定した場合の質量比 0.2

の近傍で、放水量が少なくても振動抑制に有効であることが確認された。このことは、振動抑制のために準備した水の繰り返し使用の可能性を示唆し、経済的観点から非常に有益であることが推定される。

3・3 収束時間に及ぼす放水時間の影響

Fig.8 に、 M が 0.2 と 0.8 の場合において、水位がゼロ、つまり容器が空になるまでの放水時間 $T_{h \rightarrow 0}$ が T に及ぼす影響を示す。空気中と水中の両方の場合において、放水時間 $T_{h \rightarrow 0}$ が少なくなるにつれて T も速くなる傾向があること、および、質量比が小さくなるほど、放水時間の影響を受けにくいことがわかる。このことは、実際の構造物が共振して大変位のピークに達した時点か、あるいは、その直前に断続的に放水を行うことで、構造物の振動抑制を安定かつ連続的に行い得る可能性を示唆している。

3・4 レシーバー無し（放水のみ）のシステムとの比較

最後に、考えられる最も単純な放水システムとして、Fig.9 のようなデッキ下部にレシーバーが無い場合（放水のみのシステム）について調べた。

Fig.10 に、口径比 $D_r = 0.17$ のときの T と M の関係を示す。図中、●印はレシーバーが無い場合である。また、破線は最小二乗法による 2 次曲線近似によるものである。これらの図より、放水のみのシステムの場合の T は $M = 0.5$ 近傍で最小値を有する放物線の傾向を示すことより、実際の構造物の質量比が 0.2 以下であることを考慮すると、この種の振動抑制システムとしては不適当であると言える。これに対し、デッキ下部にレシーバーを持つ放水システムは放水後の水の繰り返し利用を可能にし、実際の振動抑制システムへ応用する際は、放水用タンクとレシーバーを連結する給水ポンプと配管システムのみ装備すれば良く、比較的低コストの建設費用で済むこと、また、既設構造物への設置も可能であることが予想される。

以上のことより、本研究で提案した振動抑制システムは環境汚染が無く、しかも、経済的な将来のニーズに適合するシステムと考えられる。

Fig.9 System without the receiver.

4. 結 言

本研究は、固定型海洋構造物が地震周波数と共振して大変位振動後に破壊することを想定し、構造物の破損を抑制・防止するのに、環境汚染が無くしかも低コストな横振動抑制システムを開発することを目的に、デッキ上部に放水タンク、その下部にレシーバーを持つ固定型4脚構造物モデルについて実験的に調べ、実際の構造物への応用の可能性をも検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 本研究のモデル実験の範囲内では、口径比が0.24で質量比が約0.2のときに、構造物の横振動の抑制が最適となる。このことは実際の振動抑制システムを設計する場合に有益である。
- (2) 最適条件のときに、放水時間は約2秒程度という比較的短時間で振動が収束することと質量比が小さいほど放水時間の影響を受けにくいことより、実際のシステムの場合に、安定かつ連続的な振動抑制を実行できる。
- (3) デッキ下部のレシーバーに放水して構造物の横振動を抑制するという本研究で提案したシステムは、レシーバー内の水を繰返して利用できるため、実際の振動抑制システムへの応用の際、建設費用が低コストで済むこと、および、既設構造物への設置も可能であると考えられる。

Fig.10 Relationship between T and M in the system with and without the receiver.

謝辞 本研究を遂行するにあたり、本学在学中に実験を援助して頂いた、日高卓也（太陽鉄工（株））、上田雅嗣（（株）ミスズ工業）、黒岩正宏（第一電子工業（株））、田村正樹（（株）パンテック）の各諸君に深甚なる謝意を表する。

また、データ整理・図表作成の際、献身的かつ適切なアドバイスを頂いた竹村昌太氏（秋田県産業技術総合研究センター）に厚くお礼申し上げます。

References

- 1) S. Konishi, et. al.: Proc. of TECHNO-OCEAN '94, International Symposium, Kobe, Japan, Vol. I, pp. 223-228, (1994).
- 2) T. Kinoshita and M. Kanetsuna: Proc. of the 6th Ocean Engineering Symposium, Tokyo, Japan, pp. 11-22, (2001).
- 3) T. T. Soong: *Active Structural Control: Theory and Practice*, (Longman Scientific & Technical, Co-published in the United States with John Wiley & Sons, Inc., New York, 1987).
- 4) T. Fujita: Proc. of the American Control Conf. Baltimore, Maryland, pp. 254-295, (1994).
- 5) H. Nishimura et al.: Trans. JSME, Ser. C, Vol.59, No.559, pp. 714-720, (1993).
- 6) H. Ishida, et al.: J. of the JSCE, No.456 / II-21, pp. 65-74, (1992).