

大型海洋構造物の波浪動揺解析

A Response Analysis of A Large Offshore Platform Under Wave Forces

渡邊英一・田中稔郎・松本敏克・酒井哲郎・北原道弘

Presented herein is a study on the dynamic response analysis of a large two-dimensional ocean platform with several tubular legs, decks and is elastically built in the flat seabed. The emphasis is placed on the scale effects of the span length and the diameter of the steel leg upon the response acceleration due to wave forces. The interaction between the platform and the sea is assumed to be described by the modified Morison's formula using the Stokes waves with the period from 8 to 12 secs.

1. はじめに

21世紀に向けて多価価値利用空間の創出の需要に答えるため、大型海洋構造物が注目されはじめており、現在、様々なタイプのものが提案され、また、様々な面からの検討が行われようとしている。

その一例として、人間が常住することのできるような、多スパン多層の巨大な海洋構造物の構想を挙げる事ができる¹⁾。海洋構造物と言えは従来は石油掘削のためのものが主体であり、しかも、基礎的な研究は、静的なモデルによる強度面に関するものがほとんどで、動的な研究、すなわち、外力を受ける構造物の振動応答を考慮した研究は数少ない。本研究では、居住空間の創出を意図した大型海洋構造物の快適性に着目した振動・動揺面での検討を行った。

海洋構造物に作用する外力としては、波力、潮流力、風力及び地震力が考えられる。このうち、地震力以外は、常時作用する外力である。したがって、快適性については、外力として波力、潮流力、風力を対象として検討されるべきである。そこで、本論文では快適性の検討に当り、構造物に作用する外力としてまず、波力のみを考え、パラメータとして、①スパン長 s (レグ間隔)と波長 λ の比、②レグの管径 D を選び、デッキ部分の最大応答加速度を調べることで、快適な海洋構造物の設計条件を考察することを目的とした。

2. 解析モデルと定式化

2.1 概説

大型海洋構造物に関する過去の研究としては、暴風時に構造物に作用する水平方向の合計波力や支点反力の分布、変位、部材応力、補剛の必要性、波長の影響などについて考察したものがあり、構造物が巨大であるほど有利な面が多いという結果がでている²⁾。しかし、前述のように、これらの考察は静的なモデルによるものであるから、本研究では、動的解析によって、快適性に関する考察を進めることにする。

対象とする解析モデルは、多数のレグを有する海洋構造物の2次元モデルで、平坦な海底地盤に水平、鉛直、回転方向のバネで弾性支持されていると仮定している。部材は、レグ、デッキともに鋼製とし、レグは円筒状、デッキは薄い平板状の構造を有するものとする。解析には、有限要素法を用い、レグ、デッキをそれぞれ、一つの節点につき、水平、垂直、回転の3つの自由度を持った棒要素に分割してある。また、

・ 正員 Ph. D.、工博 京都大学教授 土木工学科；
・ 学生員 京都大学大学院工学研究科 修士課程；
・ 正員 工博 京都大学助教授 土木工学科；
・ 正員 工博 東海大学海洋学部助教授 海洋土木工学科

波浪のモデルは、ストークス5次波とする³⁾。解析モデルの運動方程式は以下のように一般的に書ける。

$$[M] \{\ddot{q}\} + [C] \{\dot{q}\} + [K] \{q\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

ここに、[M]は質量マトリックス、[C]は減衰マトリックス、[K]は剛性マトリックス、 $\{\ddot{q}\}$ 、 $\{\dot{q}\}$ 、 $\{q\}$ は、それぞれ節点の加速度、速度、変位を、 $\{F(t)\}$ は外力を表す。この外力としては、波力、地震力、デッキ荷重、および地盤反力を考慮しているが、そのうち、地盤反力は、地盤のパネ定数を剛性マトリックスの中に加え合わせることによって考慮される。

2. 2 波力

波浪のモデルには、ストークス5次波理論を適用し、レグに働く波力の算定には、モリソン式を適用する。なお、波の作用のもとで運動している物体に働く波力を論じるために、相対速度、加速度を考慮した修正モリソン式を用いたので、それをここに示す⁴⁾。

$$dF = C_D \frac{w}{2g} D (u - \dot{q}) |u - \dot{q}| dz + (C_M - 1) \frac{w}{g} \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \ddot{q} \right) dz + \frac{w}{g} \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} dz \quad (2)$$

C_D : 抗力係数, C_M : 慣性力係数, w : 流体の単位体積重量, u : 水粒子速度の水平成分
 z : 海底からの高さ, t : 時間, g : 重力加速度

モリソン式の第1項は抗力項、第2項と第3項は慣性力項を表す。抗力は、表面摩擦とせまい意味での抗力に分かれる。速度が小さければ、流線は柱から分離せず、表面摩擦が主になるが、速度が大きくなってくると、流線は柱から分離し、柱の背後で渦が発生し、そのときの速度の減少分が、柱に作用する力となる。これを、せまい意味での抗力とよぶ。慣性力は、付加質量力とフルード・クライロフの力から成るが、前者は第2項であり、流体の動きを減速するためにはたらく力、後者は第3項であり、柱のまわりの圧力勾配によりもたらされる力で、柱の位置における水粒子の加速度に比例する。

モリソン式は、 u に構造物がなかった場合の流体速度を用いているが、構造物が充分小さいという仮定のもとにはじめて論じることが可能になる。したがって、管径・波長比に対しては、その適用範囲が存在する。モリソン式の適用範囲は、円柱の直径 D と波長 λ を用いると次のとおりである⁶⁾。

$$D/\lambda \leq 0.2 \quad (3)$$

また、波高と円柱の直径の関係によっては、モリソン式を適用できないことがある。たとえば、波高を4mとした場合、円柱の直径を12m以上にすると、干渉領域に入り、モリソン式を適用できなくなる⁶⁾。

2. 3 設計パラメータ

本論文での主要パラメータを、① スパン長と波長の比、② レグの管径としたことは前に述べた通りであるが若干の補足的説明を加えたい。

(1) スパン長と波長の比

海洋構造物が波力を受ける場合、レグ間の水平距離(以後、スパン長と称する)と波長の比は、海洋構造物全体が受ける合計波力に、重大な影響を及ぼすものと考えられる。すなわち、スパン長を、半波長の偶数倍にすれば、各レグにかかる波の位相差はないので、海洋構造物が受ける合計波力は最大になると考えられる。逆に、半波長の奇数倍のときは、波力は、となり同志のレグで相殺されることになり、合計波力はゼロになると予想される。一方、各レグは一つの構造系の一部であり、当構造系は一体として挙動する性質も持っているし、造波抵抗も存在するので、果してこのような関係が、デッキ部分の振動に対しても成立するかを考察することは興味あるところである。

このような考察を行うにあたって、波長を一定に保ち、スパン長を少しずつ増加させ、それぞれのスパン長について、デッキのある節点の水平及び鉛直方向の最大応答加速度を求めていった。また、デッキの剛性はスパン長に比例させて大きくするモデルを採用した。

ところで、普通の人間が日常生活の上で許容できる振動加速度の限界値については、船舶での生活に慣れた人とそうでない人では大きな差異があり、5～20 gal という範囲が提唱されている^{8)・9)・10)}。

(2) レグの管径

モリソン式を見るとわかるように、抗力項は管径の1乗の関数、慣性力項は管径の2乗の関数である。よって、管径が大きくなるにつれて、レグに作用する波力は、2次関数的に増加することになる。

また、肉厚 d (cm) の円筒の断面二次モーメント I_{leg} は、次式で求められる。

$$I_{leg} = \pi \{D^4 - (D - 2d)^4\} / 64 \quad (m^4) \quad (4)$$

この式は、レグの曲げ剛性 $E I_{leg}$ が、管径が大きくなるにつれて、3次関数的に増加することを示している。地盤反力も、レグの管径によって変化するものと考えられる。地盤を異方性の弾性体と考えて、水平方向と垂直方向でそれぞれ単位面積当りのバネ定数 K_h 、 K_v (tf/m³) が与えられているとすると、いま、管径 D (m) のレグの根入れ深さを H (m) とすれば水平方向のバネ定数 k_h 、回転方向のバネ定数 k_θ 、垂直方向のバネ定数 k_v は、それぞれ、以下のように表せる。

$$k_h = K_h \cdot H \cdot D; \quad k_\theta = K_h \cdot D \cdot H^3 / 3; \quad k_v = K_v \cdot \pi D^2 / 4 \quad (tf/m) \quad (5)$$

以上より、地盤のバネ定数のうち、水平方向と回転方向については、管径の1乗の関数で与えられ、垂直方向については、管径の2乗の関数として表される。したがって、管径が大きくなるにつれて、各バネ定数も大きくなり、それにしたがって、剛性も大きくなる。結局、レグの管径が変化すると、それに対応して、波力と剛性が変化することがわかった。波力が増加すると、変位も増加するが、剛性が大きくなると、変位しにくくなる。ここでは、これらが、構造物の加速度にどう影響してくるかを調べることを目的とする。

3. 数値解析法

既に述べたように、解析は棒材の有限要素法を用い運動方程式を定式化し、固有振動数の中より低いものから適切に順次10個のモードを選択し、モード解析法を適用して低次元化した後、ニューマークの β 法により定常振動解析した。なお、10個以上のモードを用いても解の値は変化しないことが確認された。

4. 数値計算結果

(1) 数値計算モデル

対象としたモデルは、図-1のとおりである。水深 100mの深海波では、平常時の波の周期は10秒前後であるのが普通である。また、周期が決まると、波長もだいたい決まってくるので、波は表-1のような3通りのタイプを適用することにした。なお、強度面に関する検討では、この中のBタイプの波を適用した。

① スパン長比 s/λ の検討に際しては、管径Dは8mに保ち、デッキの断面二次モーメントIとスパン長sの比 $I/s = 0.01 \text{ m}^4/\text{m}$ とした。

また、② 管径Dの検討に際しては I/s は上記の値を用いるものとし、スパン長比 s/λ の値を適当に変化させたが、結果の図として水平応答をみたときについては1.0、鉛直応答に対しては1.25のものを示した。なぜならば、後述のように、このような場合丁度応答値が大きいことが判ったからである。また、水平応答値についてはデッキ上のどの点で評価してもほぼ変わりはないので、図-1のP点を代表点にとり、鉛直応答については最大値をみるためデッキ中央点であるQ点を選んだ。

表-1 用いたストークス5次波の特性

タイプ	周 期 (秒)	波 長 (m)	波 速 (m/秒)
A	8	100	12.5
B	10	150	15.0
C	12	225	18.8

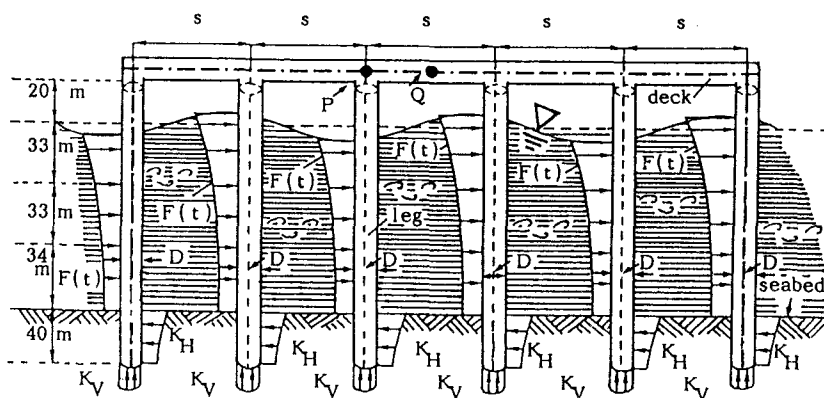


図-1 数値計算の6本レグの2次元モデル

また、モリソン式における抗力係数 C_D の値は0.7、慣性力係数 C_M の値は2.0を用いた^{(2), (4), (5), (6), (7)}。つぎに、接地部に関するデータとしては、根入れ深さを40mとし、地盤の単位面積あたりのバネ定数は、水平方向 K_H を $10,000 \text{ tf/m}^3$ 、垂直方向 K_V を $20,000 \text{ tf/m}^3$ とした。

ニューマークの β 法の β の値は $1/6$ 、減衰定数は剛性比例型として0.02、鋼のヤング係数は $21,000,000 \text{ tf/m}^2$ 、デッキ部分の密度は 7.85 tf/m^3 、デッキ荷重は 120 tf/m 、デッキ断面積は 15.3 m^2 、レグ部分の密度は、浮力を考慮に入れて、 0.333 tf/m^3 とした。定常状態に達するのに必要なレスポンスの解析時間は波の4周期分であることがわかった。また、解析のための時間間隔は0.05秒とすれば良好な結果を得ることができることもわかった。

(2) 予備的考察

波力を考える際には、全水平長 l と波長 λ の比 μ 、レグの本数、 $m+1$ 、の影響をまず検討すべきであろう。いま、簡単に考えて、鉛直方向には波力は変化しないものと仮定すれば、図-2 にあるように、水平位置 x での相対的な波力 F は次式で近似できよう。

$$F' = \sum_{k=0}^m \frac{\sin}{(\cos)} \frac{2\pi x_k}{\lambda} ; \quad l = \mu \lambda \quad ; \quad x_k = \frac{k}{m} l$$

したがって、

$$F' = \sum_{k=0}^m \frac{\sin}{(\cos)} \frac{2\pi \mu k}{m}$$

そこで、文献[2]の全長 $l = 1 \text{ km}$ の海洋構造物の例についてレグの本数、 $m+1$ 、を変化させてレグ一本当りの相対波力の絶対値を求めてプロットすれば図-3 のようになる。

これより、参考とした例は、 $\mu = 3.6$ とい

う特殊なものではあるが、本数が増加すればある程度波力が減少し、海洋構造物の巨大化に伴うサイズエフェクトが期待できるものと推測できよう。特に、 $m = 10$ 、すなわち、11本のレグの場合波力は0近くまで減少することがわかる。なお、実線がSIN波、点線はCOS波を示し、それぞれ最初のレグに作用する波力が0および最大になる2つの時間を想定している。

また、特に、本数を6本、すなわち、 $m = 5$ に限定したとき、全長比 $\mu = l/\lambda$ を増大すればレグ一本当りの波力絶対値はどう増減するかが図-4に示されている。同図では $\mu = 2.5, 5.0$ がそれぞれ、スパン長/波長の値が0.5と1.0に対応している。明らかに、 $\mu = 0, 5.0$ では波力の絶対値が最大値をとることになり、また、逆に $\mu = 2.5, 7.5$ では、波力は0となることがわかる。この傾向は μ が5の倍数だけ増加すると周期的に現れる。しかし、このような結果はあくまで、それぞれのレグが単独に挙動するという仮定のもとで有効な訳であって、デッキやブレーシング等によって互いに結合された構造では全く予測できないことである。この場合、デッキの存在による影響が以下の数値計算によって明らかにされよう。

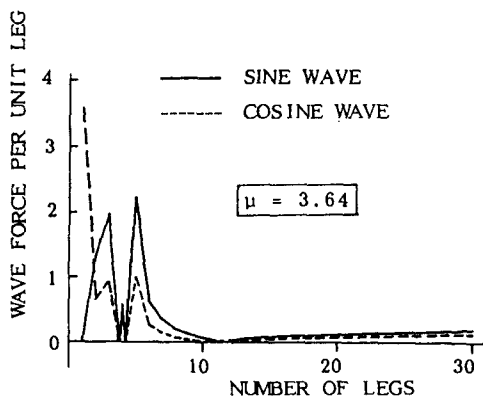


図-3 レグ本数とレグ一本当りの波力との関係

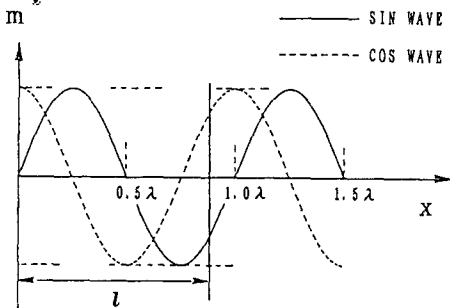


図-2 波力の簡易的検討

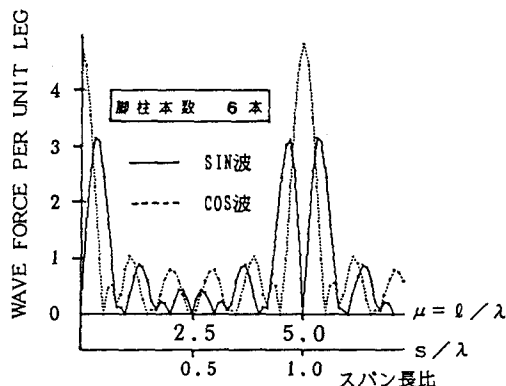


図-4 波数とレグ一本当りの波力との関係

(3) スパン長比に関する数値計算結果

P点の水平方向の絶対最大応答 (図-5)

管径Dを8 mにして計算した。結果より、スパン長と波長の比のスケール効果が、はっきりと現れている。スパン長比 (=スパン長/波長) を増大していくと、P点の水平方向の応答最大加速度と変位は、図-4からも推測できるように、スパン長が、半波長の偶数倍で極大となり、奇数倍で極小となった。すなわち、構造物に作用する合計波力の最大・最小にあわせて、最大応答加速度も極大・極小となる、といえそうである。

また、スパン長比を一定に保ったとき、A、B、Cのタイプの順に全体的に値が小さくなっている。すなわち、波の波長が長ければ長い程応答値が小さくなっていく。ところが先ほどの予備的考察によれば、レグが受ける波力は、波高が同じであるから、タイプによっては左右されないはずである。したがって、この結果はデッキの長さや剛度の影響により左右される動的効果として得られたものと考えられる。

この他、各タイプにおいて、スパン長が半波長の2倍のときの極大値よりも、4倍のときの極大値の方がかなり小さくなることも明らかである。

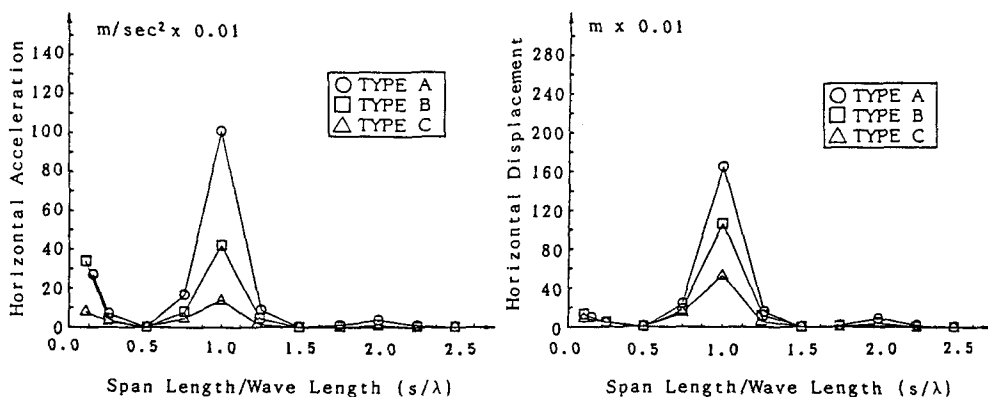


図-5 スパン長比 s/λ がP点の絶対最大水平応答加速度・変位値に与える影響

Q点の鉛直方向絶対最大応答 (図-6)

やはり、管径D=8 mの場合を考えた。Q点の鉛直方向の最大応答加速度・変位については、デッキ中央部のたわみに関連していることを考えれば、P点の水平方向絶対最大応答値と全く異なり、スパン長が半波長の偶数倍のとき逆に極小値をとることが予想できる。数値計算結果より、確かにそのような傾向が見られることがわかる。したがって、水平方向によく揺れるときは鉛直方向にはあまり揺れず、逆に、鉛直方向によく揺れるときは水平方向にはあまり揺れないということがわかる。また、絶対最大応答値のオーダーはP点の水平絶対最大応答値のそれより小さいことがわかった。

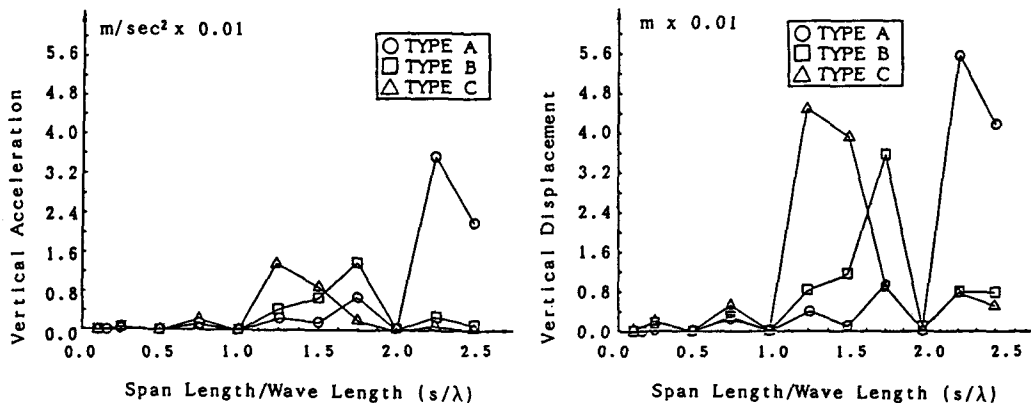


図-6 スパン長比 s/λ が Q 点の絶対最大鉛直応答加速度・変位値に与える影響

(4) レグの管径に関する数値計算結果

P 点の水平方向絶対最大応答値 (図-7)

スパン長比 s/λ を、(3)において水平方向の応答が最大となる 1.0 に固定したときの絶対応答極大値は、管径 D が 8 m のときに得られ、絶対最大加速度値はおよそ 100 gal であることが示されている。さらに管径 D が 8 m より離れて行けば、応答値は大きく減少することがわかる。

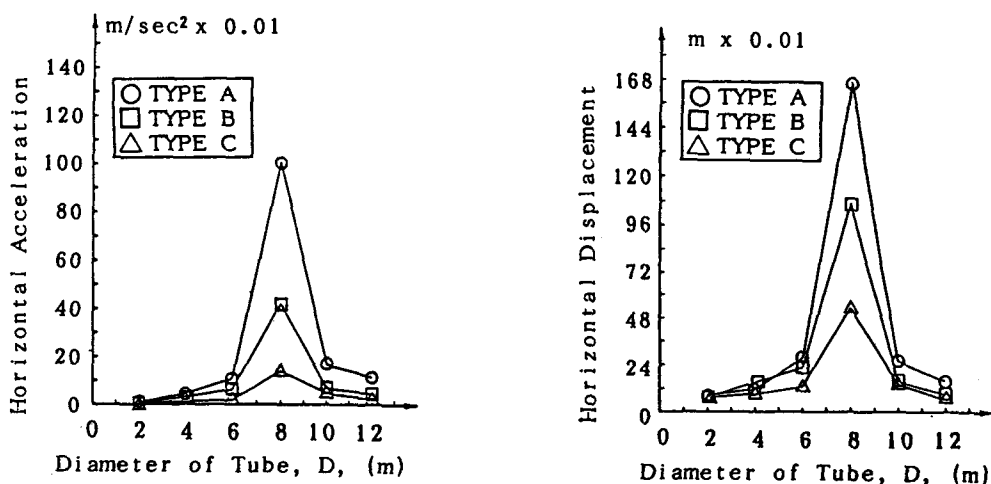


図-7 管径 D が P 点の絶対最大水平応答加速度・変位値に与える影響

Q点の鉛直方向の絶対最大応答値 (図-8)

(3)において、鉛直方向の応答が比較的大きくなるスパン長比 $s/\lambda = 1.25$ のときについて計算した。3つのタイプともに、管径Dが大きくなるにしたがい、最大応答加速度の値も大きくなるという結果が得られた。

また、管径を一定に保ったとき、スパン長比が一定であり、C、B、Aの波のタイプの順に応答値が小さくなっていることから、スパン長の絶対値が大きいほど、すなわち、波の波長が大きくてデッキが軟らかい構造であるほど、最大応答加速度は大きくなっていることがわかる。

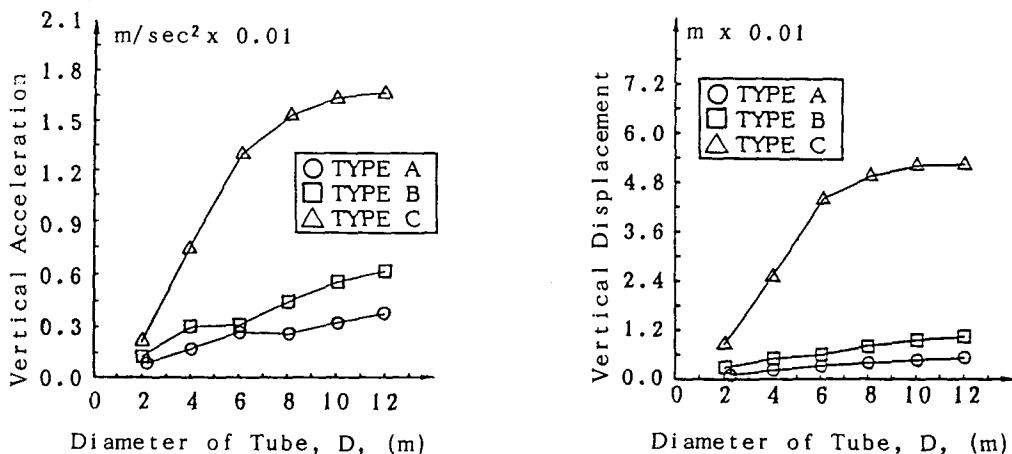


図-8 管径DがQ点の絶対最大鉛直応答加速度・変位値に与える影響

5. 結論

本研究では、海洋構造物の振動応答に着目して、快適性の検討を行った。ここに結論を箇条書きにまとめてみる。

- (1) スパン長を波長の整数倍にすると、各レグに作用する波力の位相がそろい、絶対水平応答加速度が大きくなることが容易に予想されるが、解析の結果からも、そのようなことが起こることが推測される。また、スパン長比を一定に保ったとき波の波長が小さいほど応答値が大きくなることが見られる。
- (2) スパン長が波長の整数倍になったときデッキ中央部の絶対最大鉛直応答値は極めて小さくなる。また、当然のことながら、スパン長比を1.0より小さくすれば応答値を小さく抑えることができる。
- (3) レグの管径を変化させると、作用する波力とレグの剛性が共に変化し、ある管径のときに最大応答加速度が極大になることがありうる。本論文で取り扱ったケースでは、水平方向の応答値はスパン長比 $s/\lambda = 1.0$ の場合、管径 $D = 8$ mのとき極大値を生じ、鉛直方向の応答値は $s/\lambda = 1.25$ の場合、管径Dとともに増大した。
- (4) デッキの剛度や長さは、構造物の振動動揺に関する重要な要素のひとつであることが結果から推測され、さらに十分な検討が必要であると思われる。

6. あとがき

スパン長と波長との比の値にも依るが、予備的検討により、レグの本数が増大すれば応答値も小さくなるというサイズエフェクトも期待できるようである。したがって、更にレグ本数を増やした場合の検討をする必要もある。

また、地震力と波力を同時に考慮した構造強度面の検討も同様に必要であるが、この点についても筆者らは検討を行っており、近日中に成果を公表できればと考えている。

なお、本論文では確定論的立場に立って、波と構造物間の相互作用の本質に関わる一つの問題点を議論したものである。大型海洋構造物の現実的設計に当たっては、例えば、入力波のスペクトルなど、確率論的側面も十分考慮すべきであることは論を待たない。

7. 参考文献

- 1) 寺井精英：海洋情報都市、TBSブリタニカ、昭和61年。
- 2) 沿岸開発技術研究センター：海洋構造物の安全性に関する研究報告書、海洋構造物の安全性に関する研究委員会、昭和63年。
- 3) Lars Skjelberia and J. Hendrickson: Fifth order gravity wave theory, Proc. of 7th Conference on Coastal Engineering, 1, 1986.
- 4) 岩垣雄一：最新海岸工学、昭和62年。
- 5) Dean, R. G.: Evaluation and development of water wave theories for engineering application, Special Report 1, prepared for U. S. Army Corps of Engineers, Coastal Research Center, 1974.
- 6) 荻原国宏：土木学会編 新体系土木工学25 流体力、技報堂出版、昭和61年。
- 7) API: API Recommended practice for planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, 15th ed., 1984.
- 8) 浜中冬行他：海洋構造物の居住性に関する研究（その1）、（その2）、日本建築学会学術講演梗概集、昭和51年。
- 9) 後藤剛史：居住性に観点を置いた高層建築物に生じる振動の評価に関する研究（その1）振動に対する人間の各種反応、日本建築学会論文報告集、第237号、昭和50年。
- 10) 星野、二宮他：沖縄海洋博覧会”アクアポリス”ー設計・建造と試験研究概要ー、三菱重工技報、Vol. 13, No. 4, pp. 1~9、昭和61年。

(1989年10月12日受付)