

海洋プラットフォームの共振制御に関する研究

石田 啓*・黒崎和保**・小村辰彦***

1. 緒 言

現在、盛んに計画されているウォーターフロント開発や未来に夢を与える海洋開発の推進に際し、海洋空間の有効利用や海洋資源の採取を実行するためには、安全かつ合理的な海洋構造物の設計が不可欠となる。海洋構造物の形状は、設置水深の増加に対応して重力式から脚柱式へ、さらに浮体式へと移行するが、いずれの形式においても、沈下、振動・疲労および安定性に代表される検討課題が存在している。本論では、将来最も幅広く利用されると考えられる脚柱式構造物を対象とし、設計上必ず考慮しなければならない波力による振動変位について、従来の数値解析とは異なった新たな理論的展開および実験解析を行う。すなわち、まず、脚柱の振動変位の理論解を提示し、これを4脚柱プラットフォームに適用した時の共振特性について種々の検討を行い、最後に、波長が脚柱間隔の半分になる時に生じる変位の相殺点を利用することにより、プラットフォームの共振を抑制することが可能なことを理論および実験の両面から明示する。

2. 脚柱の振動変位の理論解

プラットフォームの諸元および座標系を図-1に示す。

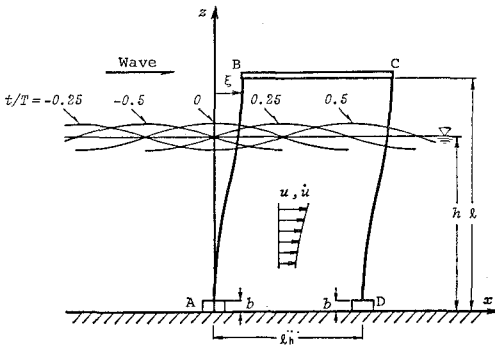


図-1 プラットフォームの座標系

座標は水底を x 軸、静止時の脚柱 AB の中心軸を z 軸とし、時間を t とする。プラットフォームは脚柱長を l 、水底部埋込高を b 、脚柱間隔を l_h とし、脚柱の振動変位を ξ で表す。脚柱に働く波力をモリソン公式で与え、抗力項にフーリエ級数展開近似を用いると、脚柱径 D で無次元化した変位 ξ' は、石田ら (1986, 1987) により次式のように与えられる。

$$\begin{aligned} \xi'_k(z', t') = & I_m \left\{ \sum_{n=1}^3 \left[\sum_{j=1}^4 f_{knj} e^{S_{knj} z'} - G_{kn}(z') \right] e^{i n t'} \right\} \\ & + \text{Re} \left\{ \sum_{n=1}^3 \left[\sum_{j=1}^4 r_{knj} e^{S_{knj} z'} - P_{kn}(z') \right] e^{i n t'} \right\} \\ & + \sum_{j=1}^4 r_{k0j} z'^{(j-1)} - P_{k0}(z') \quad \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここに、 ξ'_1 は水底から波谷までの水中区間の変位、 ξ'_2 は波谷から平均水面までの水面変動区間の変位、 ξ'_3 は平均水面以上の空中区間の変位であり、 $z' = kz$ (k : 波数)、 $t' = \sigma t$ (σ : 角周波数) である。 S_{kni} は柱の諸量および波の諸元により定まる固有値であり、 G_{kn} および P_{kn} は柱の剛性係数 EI 、断面積 A 、密度 ρ 、減衰係数 c_0 、水深 h 、慣性係数 C_M および抗力係数 C_D を含む z の関数で、すでに石田ら (1987) により明示されている。 f_{kni} および r_{kni} は柱の境界条件から定まる積分定数である。

脚柱 CD の変位は、波の進行方向を x の正方向にとった場合、脚柱 AB の変位の位相よりも脚柱間隔 l_h だけ進んだものであるから、式 (1) 中の t' を $t' - kl_h$ に置き換えたものとなる。これらの変位の解に、水底部およびデッキ接合部における境界条件を適用することにより、脚柱のたわみ曲線やデッキの変位量を求めることができる。

3. 高次振動モードの理論計算

2. で示した理論解を用い、プラットフォームの1次、2次および3次のモードの共振を算出し、その特性について検討する。各振動モードの算出には、図-2に示すような現地プラットフォームを想定し、理論式 (1) には、微小振幅波理論を適用する。この現地プラットフォームのデッキ部は鉄筋コンクリート製と見なし、比重

* 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科

** 正会員 工修 (株)間組

*** 正会員 工修 東京コンサルティング株式会社

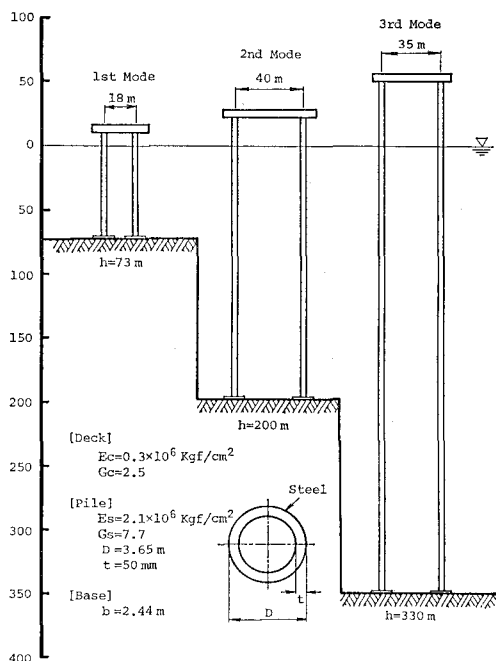


図-2 各振動モードのモデルプラットフォーム

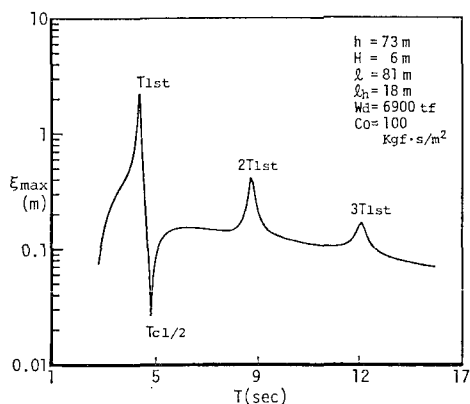
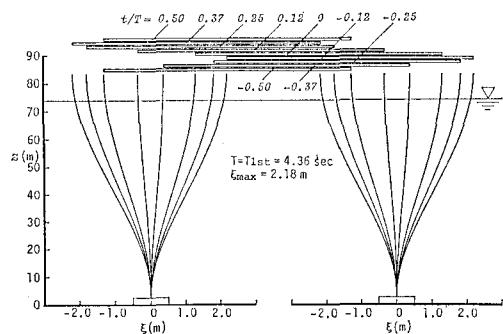


図-3 1次振動モードの共振特性

(a) 基本共振点 T_{1st}

$G_c=2.5$ を用い、脚柱については鋼製とし、比重 $G_s=7.7$ 、ヤング率 $E_s=2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ ($2.06 \times 10^4 \text{ kN/cm}^2$) を用いた。脚柱の外径は $D=3.65 \text{ cm}$ 、脚柱の肉厚は $t=50 \text{ mm}$ 、プラットフォームの水底部埋込高は $b=2.44 \text{ m}$ とした。デッキ寸法と脚柱長は現実的な波の周期の範囲で複数個の共振が発生するように選定し、脚柱間隔は、共振変位が比較的大きくなるように選定した。計算上、抗力係数、慣性係数および付加質量係数は最も広く使用されている値である $C_D=1.0$ 、 $C_M=2.0$ および $C_a=1.0$ を用い、減衰係数 c_0 は、明確に共振が生じる程度の値を与えた。また、波高は $H=4 \text{ m} \sim 6 \text{ m}$ の範囲で与えた。

図-3 は、横軸に波の周期 T をとり、縦軸にデッキの変位の1周期間の最大値 $|\xi_{\max}|$ をとって、1次振動モードを対象とした共振特性を示したものである。共振は、 $T=T_{1st}$ 、 $T=2T_{1st}$ および $T=3T_{1st}$ で発生しているが、これは、式(1)の $n=1 \sim 3$ の各項の周期が、波の周期 $T=T_{1st}$ 、 $T=2T_{1st}$ および $T=3T_{1st}$ で固有周期 T_{1st} に一致するために生じたものである。また、 $T=T_{c1/2}$ で変位の極小値が生じるが、これは、波の半波長が脚柱間隔 l_h に等しく、プラットフォームの両脚柱に働く波力の方向が逆になるため、デッキの変位が相殺されるからである。このときの波の周期 $T_{c1/2}$ を変位の相殺点と呼ぶ。図-4 (a) および (b) は、図-3 の基本共振点 $T=T_{1st}$ および相殺点 $T=T_{c1/2}$ におけるプラットフォームのたわみ形を各位相ごとに示したものである。いずれのたわみ形も1次モードの振動が卓越している。(b)の相殺点 $T=T_{c1/2}$ では、(a)の基本共振点 $T=T_{1st}$ に比べ、変位が2オーダー小さくなっている。このとき、変位がやや正方向に片寄るのは、波峰側の波力の方が波谷側の波力よりもわずかに大きいためである。

図-5 には、2次振動モードを対象とした変位の共振特性を示す。図中、2次振動モードの共振は、 $T=T_{2nd}$ と $T=2T_{2nd}$ で発生しているが、 $T=3T_{2nd}$ での共振

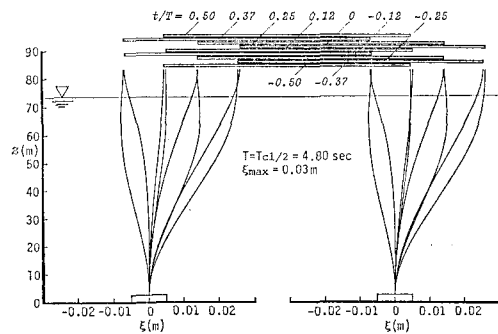
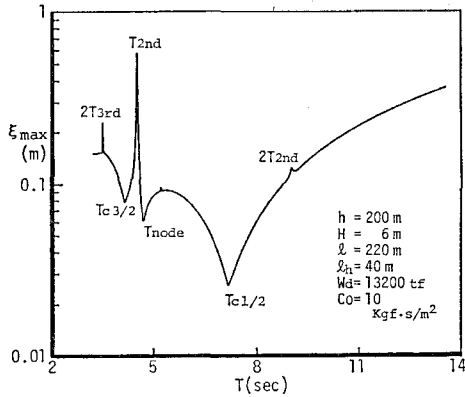
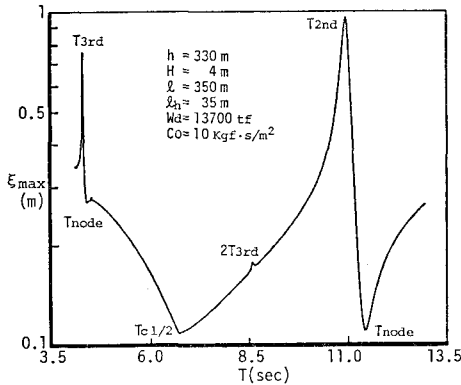
(b) 相殺点 $T_{c1/2}$

図-4 1次振動モードのたわみ形



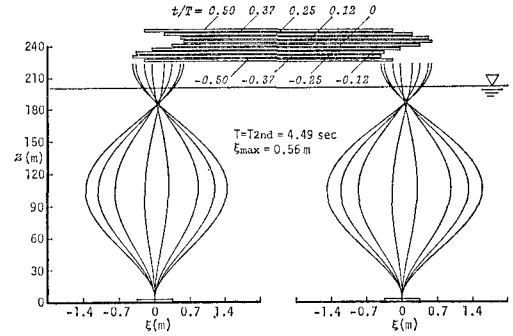
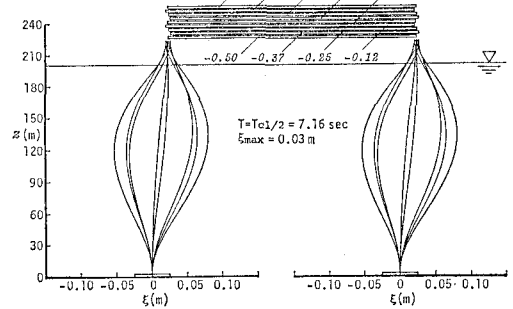
図—5 2次振動モードの共振特性

変位が見られないのは、このプラットフォームの1次モードの変位が大きいため、この中に2次モードの共振変位が隠れるためである。変位の相殺現象は、脚柱間隔が波長の約1/2および約3/2となる周期 $T=T_{c1/2}$ および $T=T_{c3/2}$ で生じる。また、 $T=T_{node}$ でも変位が急減するが、これは、振動モードの節がデッキ部に一致したために生じた現象であり、水中での腹の変位は比較的大きい。図—6 (a) および (b) は、図—5 の共振点 $T=T_{2nd}$ および相殺点 $T=T_{c1/2}$ でのプラットフォームのたわみ形である。(a) および (b) の両者共、2次モードの振動が卓越している。(a) の共振点 $T=T_{2nd}$ では、デッキ部より水中の変位が大きく、(b) の相殺点 $T=T_{c1/2}$ では、1次振動モードと同様に、脚柱全体の変位が極めて小さくなっている。

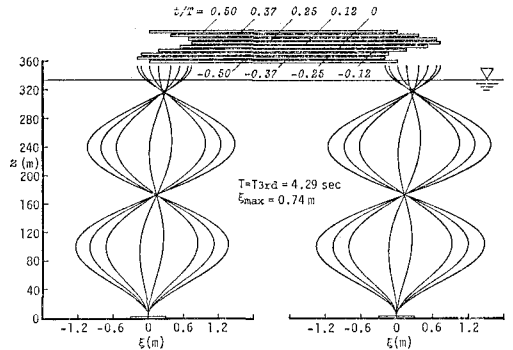
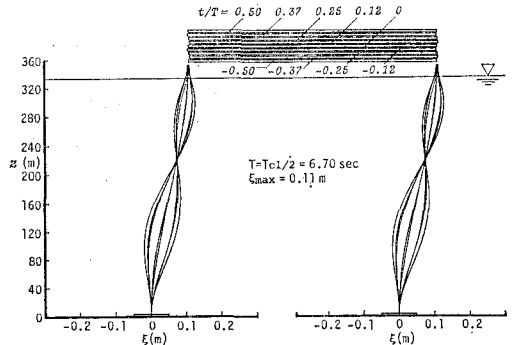


図—7 3次振動モードの共振特性

図—7 には、3次振動モードを対象とした変位の共振特性を示す。3次振動モードの共振は $T=T_{3rd}$ において顕著であるが、 $T=2T_{3rd}$ での共振は、2次振動モードの共振点 $T=T_{2nd}$ における変位が極めて大きいため、ほとんどその中に隠れてしまう。相殺現象は、2次振動モードの場合と同様、 $T=T_{c1/2}$ と $T=T_{c3/2}$ において生じる。図—8 (a) および (b) に、図—7 の共振

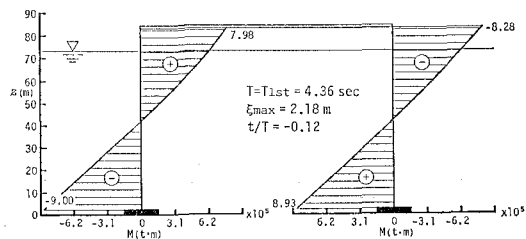

 (a) 基本共振点 T_{2nd}

 (b) 相殺点 $T_{c1/2}$

図—6 2次振動モードのたわみ形

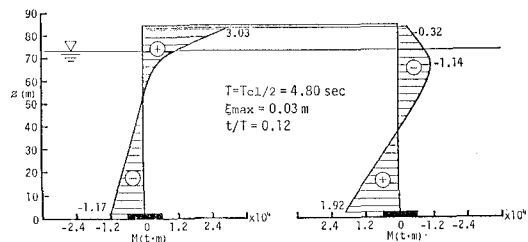

 (a) 基本共振点 T_{3rd}

 (b) 相殺点 $T_{c1/2}$

図—8 3次振動モードのたわみ形

点 $T=T_{3rd}$ および相殺点 $T=T_{cl/2}$ でのプラットフォームのたわみ形を示すが、(a) および (b) 共に、3次モードの振動が卓越することがわかる。共振点では、デッキ部より水中部の変位の方が大きい。したがって、高次振動モードの共振点では、相殺点の場合と同様、デッキ変位は小さくても、脚柱の内部応力は必ずしも無視できないと考えられる。



(a) 基本共振点 T_{1st}



(b) 相殺点 $T_{c1/2}$

図-9 脚柱の曲げモーメント図

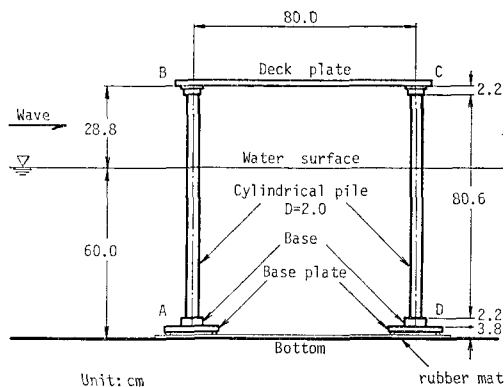


図-10 プラットフォームの模型

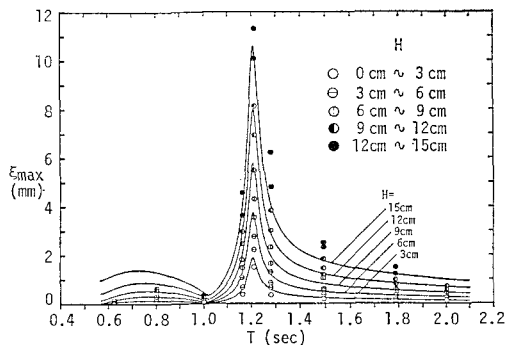


図-11 基本共振点付近の波高別の共振曲線

デッキ部より水中部の変位の方が大きい。したがって、高次振動モードの共振点では、相殺点の場合と同様、デッキ変位は小さくても、脚柱の内部応力は必ずしも無視できないと考えられる。

次に脚柱の曲げモーメントは、式(1)のたわみ ξ を用いて、 $M(z, t) = -EI \cdot D^2 \xi(z, t)$ から求める。図-9に、図-2の1次振動モードの場合の脚柱の曲げモーメント図を示す。この図の位相は、脚柱変位が最大となる時である。(a)は基本共振点 $T=T_{1st}$ での脚柱の曲げモーメント図であるが、デッキ部と脚柱の結合部および脚柱の基礎固定部で値が大きく、その最大値は $M_{max} = 9 \times 10^5 \text{ tf} \cdot \text{m}$ ($8.82 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}$) である。(b)は相殺点 $T=T_{cl/2}$ の場合であり、変位は相殺されて共振時の1/100程度となるにもかかわらず、曲げモーメントは、 $M_{max} = 3.03 \times 10^5 \text{ tf} \cdot \text{m}$ ($2.97 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}$) と基本共振時より1オーダー減少するに留まっている。すなわち、共振変位の増減に伴い、脚柱の内部応力も増減するが、相殺点での応力の減少の度合は、変位の減少の度合よりも顕著で無いことがわかる。

4. 1次振動モードの共振とその抑制に関する実験

(1) 実験装置および方法

実験は、福井高専土木工学科に設置された長さ26m、幅60cm、深さ80cmの造波水槽を用い、その中央に図-10に示すプラットフォームを設置した。これは、比重が7.7の鋼製デッキを、外径が $D=2 \text{ cm}$ で肉厚が $t=3.6 \text{ mm}$ の塩化ビニール製円柱4本で支持する形式であり、非接触型変位計を用いて、B点の振動変位を測定した。脚柱の比重は1.37であり、ヤング率は $E=28700 \text{ kgf/cm}^2$ (281 kN/cm^2) である。ここに、脚柱上端の高さは $l=87 \text{ cm}$ で、脚柱間隔は $l_h=80 \text{ cm}$ である。デッキ重量は、17.5 kgf (171.5 N)、21.6 kgf (211.7 N) および 29.6 kgf (290.1 N) の3種類を用いた。実験時の水深は $h=60 \text{ cm}$ であり、使用した波は、周期が $T=0.63 \text{ sec} \sim 2.40 \text{ sec}$ 、波高が $H=1.2 \text{ cm} \sim 15.4 \text{ cm}$ の範囲のものである。

理論計算では、抗力係数 C_D 、慣性係数 C_M および付加質量係数 C_a は、最も広く使用されている値である $C_D=1.0$ 、 $C_M=2.0$ 、 $C_a=1.0$ を用い、減衰係数 c については、プラットフォームを空中で自由振動させた時の減衰曲線から求めた値を用いた。

(2) 結果および考察

図-11は、横軸に波の周期 T をとり、縦軸に波の進行方向側の変位の最大値 ξ_{max} をとって、1次モードの基本共振点 T_{1st} 付近の ξ_{max} について、波高をパラメーターとして、実験値と理論値とを比較したものであ

る。この実験でのデッキ重量は 29.6 kgf であり、この場合 $T_{1st}=1.21$ sec で基本共振が生じている。 $T_{1st}=1.21$ sec 以下の周期では、実験値と理論値とは良く一致しているが、 $T_{1st}=1.21$ sec より大きい周期では、波高が大きくなると、理論値より実験値の方が若干大きくなる傾向がある。この原因の一つには、 C_D 、 C_M および C_a の値が必ずしも妥当でないことが考えられるが、全体的には、理論値は比較的妥当な値を与えていると言える。なお、波の進行方向と逆方向の変位の最大値についても同様な結果が得られた。

(3) 共振変位の制御

図-12 (a), (b) および (c) は、それぞれデッキ重量を変化させた場合の共振曲線であり、共振点と相殺点

一致させることによる共振変位の抑制効果を示す。横軸は波の周期 T で、縦軸は波の進行方向側の変位の最大値 ξ_{max} である。図中、●は実験値であり、実線および波線は微小振幅波理論およびストークス波理論を用いた理論値を示す。ここでは、波の波高は $H=6$ cm に固定した。いずれの場合も、波長が脚柱間隔の2倍となる波の周期 $T_{cl/2}=1.03$ sec で変位の相殺が生じており、実験値および理論値共に変位が極小となっている。(a) はデッキ重量が 17.5 kgf の場合で、基本共振は相殺点より短周期の $T_{1st}=0.87$ sec で生じ、その時の共振変位は $\xi_{max}=5$ mm である。全体的に実験値と理論値は極めて良く一致している。(b) はデッキ重量を 21.6 kgf に増大し、基本共振点を $T_{1st}=1.03$ sec の相殺点に近付けた場合である。この場合、(a) で $\xi_{max}=5$ mm であった共振変位が、(b) では $\xi_{max}=0.8$ mm にまで減少しており、共振点を相殺点に一致させることにより、共振変位を抑制し得ることが、実験および理論の両面から明らかになった。また、(c) はデッキ重量をさらに増大し、29.6 kgf とした場合で、基本共振点は相殺点を通り過ぎて $T_{1st}=1.21$ sec となり、共振変位は再び $\xi_{max}=3$ mm に増加する。(b) と (c) では、基本共振点より長周期側において、実験値が理論値より若干大きくなっているが、計算では C_D 、 C_M および C_a を固定していること、および実験では微小な変位の測定に限界があることを考えると、実験値と理論値は良く一致していると評価される。

5. 結 論

本研究により得られた結果を要約すると以下の通りである。

(i) 式(1)の理論解は、波力による小口径柱体の種々の振動モードを含む一般的なたわみ曲線を表しており、さらに内部応力の解析が可能である。

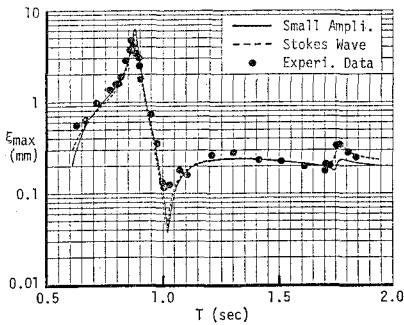
(ii) 1次のみならず、高次振動モードにおいても、共振点および変位の相殺点が存在し、相殺点での内部応力の減少の割合は、変位の減少の程度よりは顕著でない。

(iii) デッキ部の変位に関する実験値と理論値は全体的に良く一致し、式(1)の理論解の妥当性が実証された。

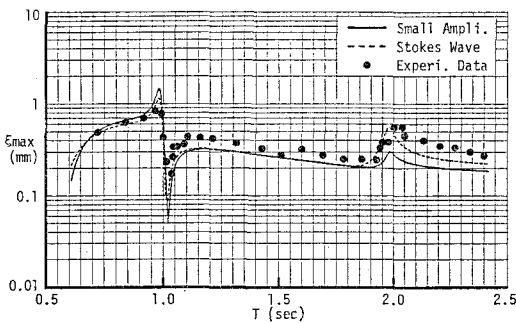
(iv) プラットフォームの固有振動周期を相殺点の周期に一致させることにより、共振変位は1オーダー減少することが実証された。

参 考 文 献

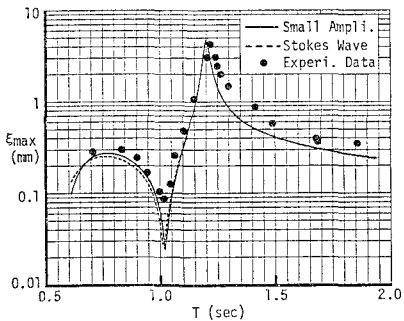
- 石田 啓 (1986): 微小振幅波による小口径柱体の振動に関する理論解, 土木学会論文集, 第369号/II-5, pp. 161~170.
- 石田 啓・加島 卓・上野 彰 (1987): ストークス波による海洋プラットフォームの振動に関する理論解とその応用, 土木学会論文集, 第381号/II-7, pp. 121~130.



(a) デッキ重量 $W_d=17.5$ kgf



(b) デッキ重量 $W_d=21.6$ kgf



(c) デッキ重量 $W_d=29.6$ kgf

図-12 共振特性の実験値と理論値の比較および共振制御