

# 海洋構造物の地震時滑動現象と動水圧に関する実験

今井貫爾\*・草野直幹\*\*・池谷毅\*\*\*・永富政司\*\*\*\*

## 1. はじめに

一般に重力式海洋構造物は、陸上構造物に比べ地震力が働いた時、浮力により接地圧が小さい上に、構造物に働く慣性力の他に動水圧が作用するため滑動しやすい状態にある。陸上の構造物は地震力に対し滑動しないように設計される。しかし、海洋構造物の場合、その種類（例えば『軟着底式構造物』）あるいは地震の規模によっては、機能を損わない範囲内で滑動を許容することで合理的な設計が可能となる場合がある。

このような新しい設計法を確立するには、水中での滑動現象、応答特性の把握および滑動を伴う場合の地震応答解析が必要である。

滑動の機構に関する研究としては、藤野ら(1978)は構造物の滑動を伴う振動性状を剛体滑りモデルにより解析している。また、Yamamoto *et al.* (1986)、藤井(1988)は海洋プラットフォーム、海洋プラント構造物を対象として、実地震波による滑動応答解析を試みている。

一方、地震時の動水圧に関しては壁状構造物、柱状構造物、円筒構造物、面対称構造物、没水円柱および軸対称形状に関してポテンシャル理論に基づく厳密解、あるいは近似解、簡易近似式について多くの研究成果がみられる。これに対し、水中で滑動を伴う場合の動水圧を扱った研究は上部ら(1984)、金谷ら(1988)の防波堤形状に関する2次元実験があるのに過ぎない。

本研究では、海洋構造物として最も基本的な形状で、解析との比較も容易である円筒構造物に焦点をあて、滑動を伴う場合の動水圧分布、応答加速度、滑動変位量を計測し、水中での滑動現象を実験的に調べることを目的としている。

## 2. 滑動時の応答に関する水理実験

### (1) 実験の概要

始めに気中条件で2種類の地盤模型(剛体・弾性体)

\* 正会員 Ph.D. 鹿島建設(株) 技術研究所  
 \*\* 正会員 工修 鹿島建設(株) 土木設計本部  
 \*\*\* 正会員 工博 鹿島建設(株) 技術研究所  
 \*\*\*\* 正会員 工修 鹿島建設(株) 技術研究所

を使用して振動実験を行なった。次に水中条件で剛体・弾性体地盤上で滑動のない場合(地盤に固定)および滑動を伴う場合について振動実験を行なった。振動実験項目の概要の一覧を表-1に示す。

### (2) 実験方法

a) 使用した振動台と水槽 水中振動実験には、図-1に示す小型水中振動装置を使用した。水槽の大きさは、2×2×0.7mで側壁は全面ガラス張りとしている。供試体を載せる振動地盤は、ボルト締めにより固定し着脱可能な構造としている。水中振動実験を行なう際には、地盤天端位置に合わせた鋼製の疑似海底を水槽内に設置した。

b) 実験の相似則 本研究では構造物はマッシュなもの想定し、実験では剛体模型(鋼製)を使用し、構造物の変形を考慮しない条件とした。地盤および流体系の相似則については、流体の運動が支配的となるため、フルードの相似則に基づき、実験縮尺を  $S=1/100$  として模型の寸法、加振条件、弾性地盤の弾性係数などを設定した。図-2に各物理量の縮尺比  $\lambda$  を示す。

c) 実験条件 振動台の入力加速度波形は、一方の正弦波を使用した。加振周波数については、実際の地震波の卓越周波数のうち低周波数側を含むようフルード相似則を考慮して4, 10, 20 Hzに変化させた。また、振動台の加振加速度については模型が滑動を開始する前

表-1 振動実験項目

	実験目的	実験概念図
E実験 地盤と固定	滑動していない状態での動水圧分布の把握	剛体円筒模型 散乱波 動水圧 加振方向 剛体地盤
G実験 並進滑動	並進的な滑動が生じた場合の動水圧及び応答加速度の把握	剛体地盤
H実験 滑動 + ロッキング	滑動及びロッキングが共存するような場合での動水圧分布及び応答加速度の把握	弾性地盤

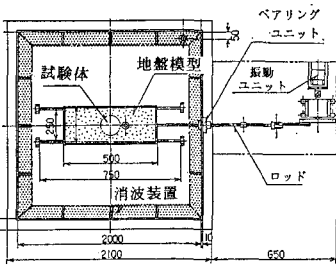


図-1 小型水中振動台の概要

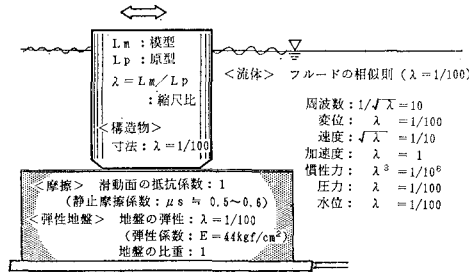


図-2 水中振動実験における縮尺比

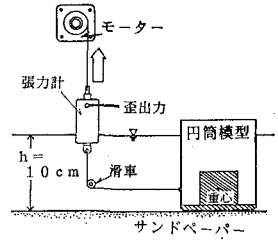


図-3 水中での静摩擦試験

表-2 実験条件

加振条件	周波数 $f = 4 \sim 20 \text{ Hz}$ 加速度 $G_x = 100 \sim 700 \text{ gal}$
水深	$h = 10, 8, 6 \text{ cm}$
模型	直径 $D = 10 \text{ cm}$ 重心高 $3 \text{ cm}$ 気中重量 $W = 1500 \text{ gf}$
摩擦条件	静止摩擦 $\mu_s = 0.54 \sim 0.6$ 動摩擦係数 $\mu_d = 0.43 \sim 0.5$
地盤	弾性係数 $E = 44 \text{ kgf/cm}^2$

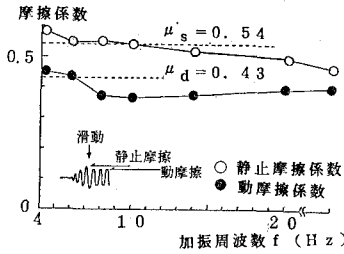


図-4 動的摩擦試験結果

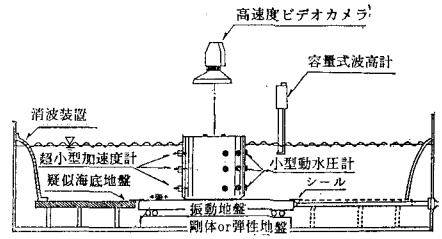


図-5 水中振動実験セットアップ状況

後の数点を含むように地盤の摩擦係数に応じて 100~700 gal の範囲で便宜変化させた。実験条件を表-2 に示す。地盤については、アクリル製の剛性地盤およびシリコンゴム製の弾性地盤模型を使用した。地盤表面については、水中において模型と地盤の間に吸着力が作用せず、繰り返し実験を行なえるようにあらかじめ一定条件で摩擦させた耐水性サンドペーパー（規格 CW 1000 cc）を使用した。

d) 地盤の摩擦特性（静的および動的摩擦試験）

地盤材料表面の性質によっては水中と気中条件とで摩擦特性が変化し、摩擦係数が変わる可能性がある。静的な摩擦係数の測定については、図-3 に示すように模型重心位置を水平方向に一定速度で引張り、張力記録から静止および動摩擦係数を算定した。摩擦係数の測定結果から、本実験で使用した耐水性サンドペーパーは、模型底版間で水膜による潤滑効果、あるいは逆の負圧による吸着効果を持たないことを確認した。

また、加振周波数を 4~30 Hz をに変化させて動的な摩擦係数の周波数依存性を調べた結果を図-4 に示す。

e) 計測項目・データ処理 水中振動実験の計測概要を図-5 に、計測センサーの取り付け配置を図-6 に示す。地盤および模型の応答加速度の測定には超小型加速度計を、円筒模型表面に作用する動水圧の測定には超小型圧力計を使用した。滑動変位については、振動 1 周期あたりの変位は加速度波形を数値積分し算定した。累積的な滑動変位については、模型上部と地盤とに配置した 4 点のマーカの動きを高速度カメラで撮影し、その画像からビデオトラッカーを使用し時系列データに変

換した。

3. 実験結果および考察

(1) 滑動時の応答加速度波形

振動実験から得られた滑動を伴う場合の応答加速度波形を図-7 に示す。弾性地盤上では、基本周波数成分に弾性地盤で増幅された約 50 Hz の高次のロッキング成分が合成された波形となる。一旦滑動が発生すると滑動現象に特有の頭打ち状の波形に変化するとともにロッキング成分はかなり小さくなる。地盤の加速度が滑動開始加速度をさらに上回ると、応答加速度波形は典型的な矩形状になり、地盤と模型とで明確に位相差を生じる。クーロン摩擦則で仮定している静止摩擦から動摩擦への瞬間的な変化は最初の滑動だけに見られ、以降は動摩擦の大きさが滑動を開始する傾向にあった。加振周波数の小さい条件では、滑動中加速度の方向が反転する前に頭打ち部分が一時的に増加波形となった。これは、動的な摩擦試験で耐水サンドペーパーの動摩擦特性が滑り速度に依存したのと対応する結果となった。実験では一方向正弦波を入力しているが、条件によって片側一方向へ累積的に滑動するドリフトが見られ

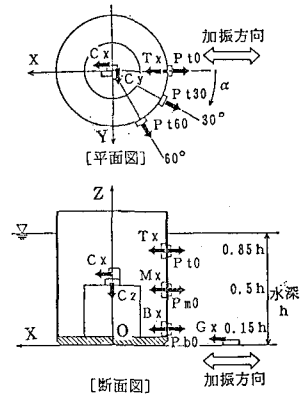


図-6 センサーの取り付け位置

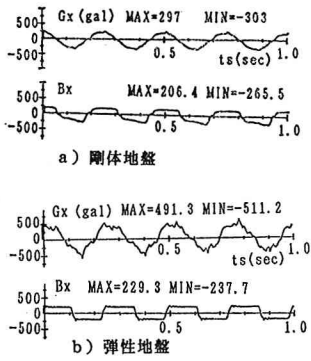


図-7 応答加速度波形(滑動時)

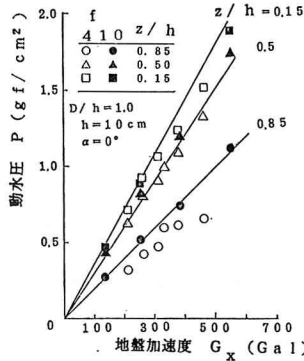


図-8 地盤加速度と動水圧の関係(固定)

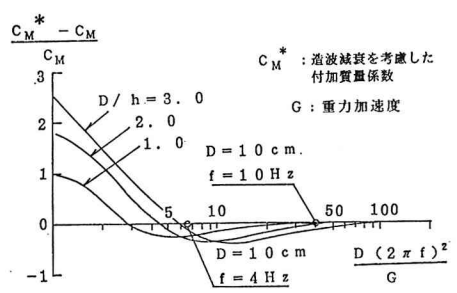


図-9 造波減衰による付加質量係数の変化

た。これは、入力加速度波形自体の歪や地盤によるロッキングの影響などが発生要因として考えられる。

(2) 動水圧

水中での滑動応答を把握するため、以下に並進振動、ロッキング、滑動を伴う場合の動水圧に関する実験結果について説明する。

a) 剛体地盤に固定 模型幅水深比  $D/h=1$  とし加振周波数  $f=4, 10, 20$  Hz と変化させ、各周波数に対し入力加速度  $G_x$  を 500 gal 程度まで増加させた。図-8 に加振周波数  $f=4, 10$  Hz 条件に対して地盤加速度  $G_x$  に対する動水圧の変化を示す。同図に示した3本の実線は、散乱波による造波減衰を含めていないポテンシャル理論(後藤・土岐, 1963)から付加質量を評価し、水圧計取り付け位置( $\alpha=0$ )度での動水圧に換算した値である。動水圧  $P$  は地盤加速度  $G_x$  と比例関係にあり、 $f=10$  Hz の条件では 500 gal 程度の大きい地盤加速度でも実験と理論値とはよく一致した。 $f=4$  Hz では水面付近で実験値がやや小さめとなった。円周方向の動水圧分布についても示すようにポテンシャル理論と同様な COS 分布を示した。

図-9 に固有関数展開法(清川ら, 1982)により造波減衰の影響を付加質量の変化として示した。 $D/h=1$  の条件では、 $f=4$  Hz で見掛け上付加質量が2割程度減少している。 $f=10, 20$  Hz の高周波数になると造波減衰の影響は小さく、散乱波を無視した後藤・土岐の理論(あるいは近似式)に基づく付加質量係数を滑動解析に組み込むことが可能である。

b) 滑動を伴う条件 水中実験による散乱波の発生状況を写真-1に示す。滑動を開始する条件での応答加速度波形および動水圧の測定結果を図-11に示す。動水圧波形は応答加速度波形と対応しており、滑動が発生すると減少し、いわゆる頭打ち状に変形する。加振周波数 4 Hz の条件では動水圧に散乱波の影響が見られ、特に水面付近で波形・位相とも加速度波形との差が見ら

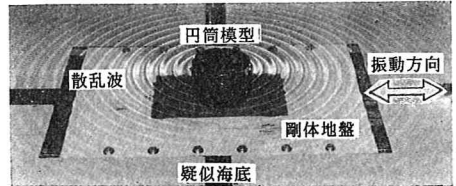


写真-1 散乱波の発生状況-10 Hz-

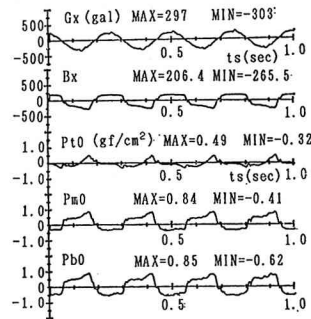


図-10 滑動を伴う場合の動水圧 ( $f=4$  Hz)

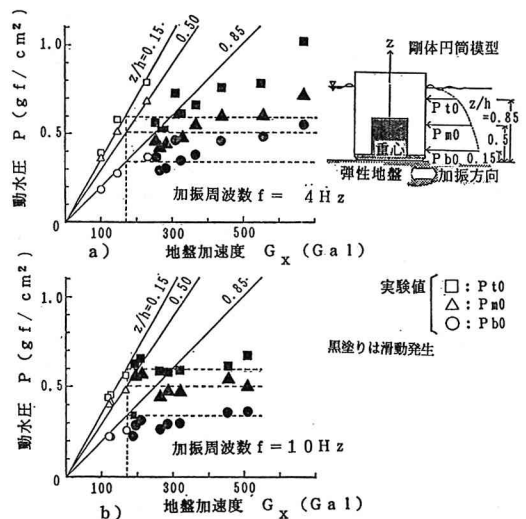


図-11 地盤加速度と動水圧の関係(滑動)

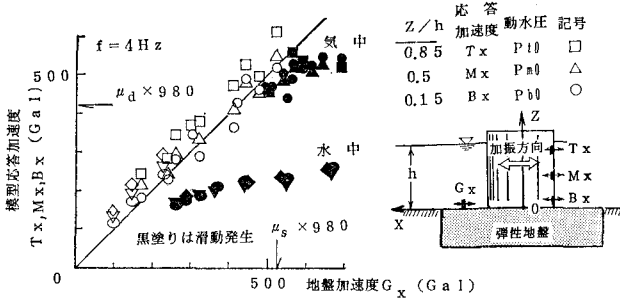


図-12 地盤加速度と応答加速度の関係

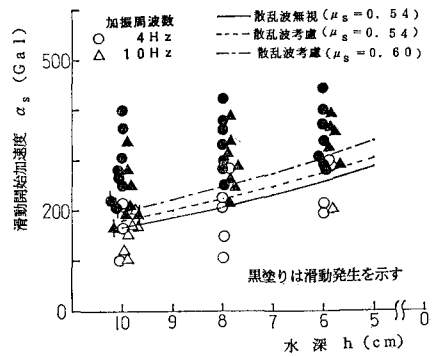


図-13 水深の減少に伴う滑動開始加速度の変化

れた。図-11に地盤加速度に対する動水圧の変化を示す。f=4 Hzについては、地盤加速度が滑動開始加速度 $\alpha_s$ を上回ると動水圧は漸増する傾向にあった。これに対し10, 20 Hzの条件においては、動水圧振幅は地盤加速度の大きさに関係なく一定値となった。この傾向は、地盤の動摩擦が加振周波数に依存すること、および散乱波による造波減衰を考慮することで説明がつく。

これより、滑動中の動水圧も摩擦係数に対して浮力と付加質量を評価したクーロン摩擦則に基づく応答加速度(図-11の破線)に対応することが判明した。

(3) 滑動開始加速度

図-12に水深10 cmの条件で地盤加速度に対する応答加速度の変化を示す。同図より滑動が発生すると弾性地盤上のロッキングによる応答加速度成分が減衰し、地盤加速度の増大に関係なくほぼ一定となる傾向が見られた。次に水深を10, 8, 6 cmと変えた条件での滑動発生の有無を図-13に領域化した。横軸には設置水深hを取り、縦軸には地盤加速度 $G_x$ を取っている。水深が浅くなると浮力が減少し、付加質量も小さくなるため、滑動開始加速度は大きくなる。同図には、振動時の散乱波を考慮しない後藤・土岐の式に基づき算定した滑動開始加速度 $\alpha_s$ を実線で示した。また、造波減衰の影響を付加質量の変化として考慮した値を破線で、摩擦特性を考慮した値を一点鎖線で示した。造波減衰の小さい周波数10 Hzに比べ4 Hzでは滑動開始加速度 $\alpha_s$ がやや大きくなる傾向にあり、散乱波を考慮した計算値は実験値に近づく結果となった。

(4) 滑動変位量

本実験で使用する滑動諸量の定義を図-14に示す。図-15に周波数4 Hzと10 Hzの加振条件で地盤加速度と振動1周期あたりの絶対滑動量との関係を示した。同じ加速度条件で気中と水中とを比較した場合、水中の方が絶対滑動量が大きく、固定座標からみた絶対変位としては小さくなっている。絶対滑動量は、地盤加速度とほぼ比例関係にあることがわかる。同図には、浮力と付

加質量を評価し、クーロン摩擦則に基づき計算した絶対滑動量を実線で示した。実際の地盤波形には弾性地盤でのロッキングが含まれているが、計算値と実験値はほぼ近い結果となった。なお、計算ではある大きさの地盤加速度で勾配が不連続に変化している。これは、クーロン摩擦則での静止摩擦から動摩擦への移行特性が変化する地盤加速度に対応している。

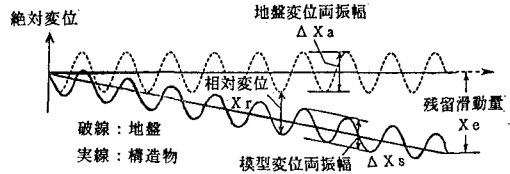


図-14 滑動諸量の定義

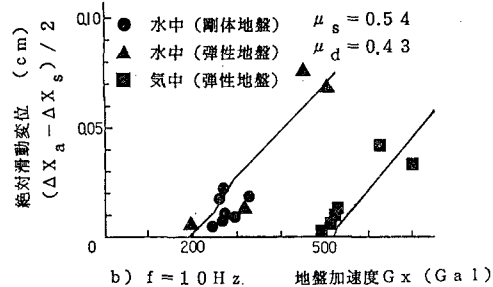
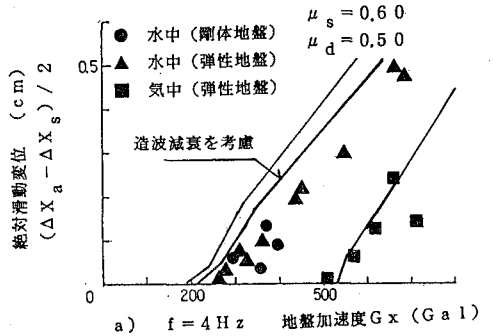


図-15 地盤加速度と絶対滑動量の関係

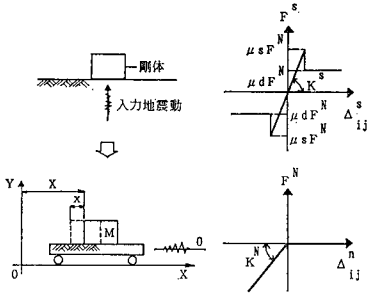


図-16 滑动解析モデル

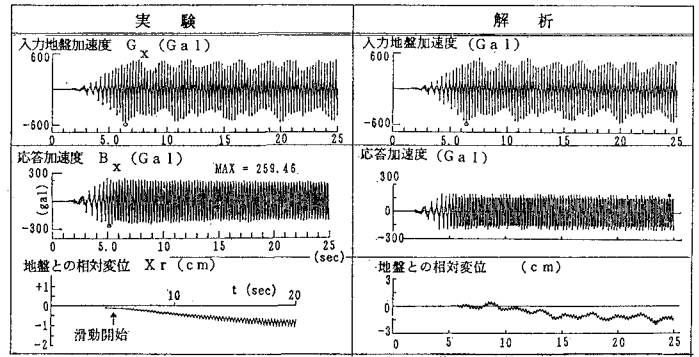


図-17 滑动解析と実験との比較 ( $f=4\text{ Hz}$ ,  $G_x=370\text{ Gal}$ )

4. 滑动解析との比較

(1) 滑动解析方法

解析では 図-16 に示すようにに構造物および地盤をそれぞれ剛体と仮定し、接触面における力の作用を摩擦係数の形で評価する (Yamamoto, et al., 1986) ことにより剛体構造物の動的挙動に関する運動方程式を作成し、滑动をシミュレートした。このクーロン摩擦則に基づく滑动解析は、鋼板間のように構造物と地盤間の接触面の性状評価が簡単な条件では、比較的精度よく滑动量を評価できることが判明している (例えば藤井, 1988)。

滑动解析には入力加速度波形として、地盤表面での加速度記録を使用した。摩擦係数の入力値としては、静的な摩擦試験結果より得られた値を使用した。

(2) 解析結果

図-17 に水中滑动実験と滑动解析を比較した結果の 1 例を示す。弾性地盤の表面の加速度は、加振周波数  $f=4\text{ Hz}$  の上に約  $50\text{ Hz}$  の弾性地盤によるロッキング成分が乗った波形となっている。応答加速度波形をみると、解析では、静止摩擦から動摩擦に移行する際の不連続なヒゲ状の波形が含まれているが実験では見られない。このように、解析では弾性地盤による高周波数のロッキング波形が静止摩擦から動摩擦への移行に敏感に影響しているが、その判定が必ずしも実際の滑动現象を正確にシミュレートしていないことがわかる。さらに静止摩擦および動摩擦係数が滑り速度に依存する摩擦特性を滑动解析では評価していない。従って、実験では累積的な変位 (ドリフト) が片方向だけに一定速度で生じるのに対し、計算ではドリフトに低周波の振動を伴うなど滑动経路に差を生じた。構造物底版と地盤との接触面による摩擦特性によっては、クーロン摩擦則が成立しない条

件もあるため、今後とも実地盤に近い条件での滑动抵抗データの蓄積が望まれる。

5. おわりに

本研究では、地盤の摩擦特性を調べた上で水中で振動時の滑动応答を測定し、滑动を伴う場合の加速度、動水圧および滑动変位について明らかにした。さらに円筒構造物において動水圧 (付加質量) および浮力を評価したクーロン摩擦則に基づく滑动解析手法の妥当性を実験的に確認した。

最後に本研究は、(財)日本船舶振興会の平成元年度の補助事業として行なった造船研究協会 SR 205 研究部会の成果の一部であり、藤田譲部会長 (東京理科大学教授) に謝意を表します。

参考文献

上部達生・楡垣典弘 (1984): 水中の構造物の地震時滑动と動水圧の実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第 23 巻第 3 号, pp. 153~186.  
 金谷・西・青山・飯島・玉野 (1988): 水中構造物の地震時滑动に関する振動台実験, 第 23 回土質工学研究発表会, pp. 983~984.  
 清川哲志・小林 浩 (1982): 大型軸対称構造物の地震付加質量 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 452~456.  
 後藤尚男・土岐憲三 (1963): 水中構造物の振動と耐震設計に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 100, pp. 1~8.  
 土岐憲三・手塚冒信 (1965): 水中橋脚に働く動水圧の近似計算式について, 土木学会第 20 回年次学術講演会.  
 藤井俊二 (1988): 地震時滑动を伴う海洋プラント構造物の地震応答特性に関する研究, 東京大学工学博士論文, 第 4 章.  
 藤野陽三・佐々木有三・伯野元彦 (1978): 地震動による物体のすべりについて, 地震研究所集報, Vol. 53, pp. 461~480.  
 Yamamoto, H., Kimura, T., Hirashima, S., and Ohta, T. (1986): New Aseismic Design Method of Offshore Gravity Structure in Highly Seismic Regions, 5th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, pp. 693~700.