

軟着底式構造物の応答に関する基礎研究

新 宮 清 志*・大久保伸晃**・佐久田昌昭***

1. 緒 言

海洋開発に伴いその目的、規模、設置海域、自然環境条件、使用期間等により、多種多様な形状の海洋構造物が使用されている。分類方法は何種類かあるがこれらの海洋構造物は、例えば「着底式構造物」、「固定式構造物」、「有脚式構造物」、「浮遊式構造物」の4つに大別される(社団法人 国際海洋科学技術協会振動部会, 1988)。さらに「着底式構造物」を細分類すると海底石油掘削リグ、半潜水型海洋構造物、ポンツーン型プラント等に使用される「軟着底式構造物」、コンクリート・鋼製構造物や貯油施設等に応用される「着底式構造物」、港湾構造物、防波堤、重力式プラットホーム等に利用される「重力式構造物」がある。

重力式構造物は地震力などの動的外力が作用した場合、浮力による接地圧の低下から、また動水圧の作用により陸上構造物と比較して滑動しやすい状況にある。そこで浮力と構造物の重量を調整することにより、地盤と構造物の底面との間に、ある程度の滑動を許容する事で免震性を持たせた軟着底式構造物が佐久田ら(1980)によって提案され、理論的研究が佐久田ら(1981, 1982a, 1982b)や、諏訪ら(1983)により行われた。この軟着底式構造物は、基礎底面を地盤に剛着させずに浮力と構造物重量をバラストを用いて調整することにより函体を地盤に軟着させるものである。波浪に対しては函体の滑りを許さず、ある大きさ以上の地震力に対しては多少の滑りを許容する形式である。したがって、この構造物は次のような長所がある。

- 1) 構造物の浮力やバラストを調整することにより軟弱な海底地盤の圧密沈下を防ぐことができる。
- 2) ある程度強い地震に対しては、構造物の応答を減少させることができる。

軟着底式構造物についての設計手法を確立するためには水中における構造物の滑動機構、流体力や減衰力の影響、非滑動並びに滑動時における構造物の運動状況等の

把握が必要となってくる。そこで、新宮・佐久田等は軟着底式構造物に関し理論的および実験的研究を行って来た(佐久田ら, 1989; Sakuta ら, 1990; Shingu ら, 1990, 1991a, 1991b; 新宮ら, 1990a, 1990b, 1991, 1992a, 1992b, 1992c)。

ところで、物体あるいは構造物の滑動に関する研究としては、次のようなものがある。Newmark (1965) は変位法による斜面安定の検討手法を示し、地震時におけるダムや堤防について剛体モデルでの滑動解析を行っている。藤野ら(1978)は、水平面あるいは斜面におかれた物体が地震動によりどれほど滑るかを求めるために単純化された剛体モデルを用いて滑り応答計算を行っている。土岐ら(1980)は、地盤一構造物系の動的相互作用問題において、地盤と構造物との間の剝離現象や滑動現象を表現し得るモデル化の提案を行い、かつ動的応答解析を行い、剝離、滑動現象について検討を加えている。

軟着底式構造物あるいはこれに類する構造物の研究として、筆者等とは独立に以下のような研究がなされている。上部ら(1984)は水中の剛体の地震における滑動挙動を検討するために、振動箱内の水中に置いたモルタル製剛体模型の振動実験を行っている。金谷ら(1985)は周囲を水で囲まれている構造物の滑動特性とそれに伴う構造物の応答、動水圧について振動実験により検討を行っている。Yamamoto ら(1986)は海洋構造物の滑動応答解析を試みている。藤井(1988)は地盤が弾性範囲において、振動台実験から滑動を伴う場合の動的相互作用のメカニズムと特徴を明らかにしている。今井ら(1990)は円筒状の海洋構造物に焦点を当て、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研究している。林ら(1991)は動水圧特性の振動数依存性を考慮した時刻歴応答解析を行い、大水深海域に設置された軟着底式構造物の地震時滑動について考察している。

軟着底式構造物は前述のように1) 軟弱な海底地盤に対して、2) 地震動に対して有利な構造であり、この2つのファクターに関して研究する必要があるが、実際問題として多くの場合、地盤改良やマウンドの設置等人工的な加工がなされ、かなり堅固なものになると考えられ

* 正会員 工博 日本大学教授 大学院情報科学専攻
 ** 日本大学大学院生 海洋建築工学専攻
 *** 正会員 工博 日本大学教授 大学院海洋建築工学専攻

るのでここでは、2) に主眼点を置き、地盤及び構造物は剛として検討を行うものである。なお、軟弱地盤に対する問題は今後の重要課題である。

そこで本研究は、自立形式及び係留形式の軟着底式構造物に水平振動が作用した場合を取り上げ、動的応答解析・実験を行い両者の比較検討を通し本構造物の振動性状を究明し、設計手法を確立するための基礎研究を行うものである。

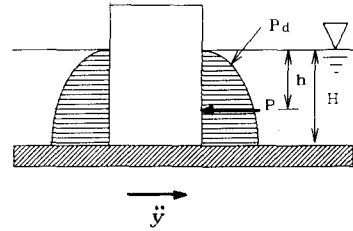


図-1 動水圧

2. 理論解析

(1) 運動方程式

構造物を剛体とし、1自由度モデルとして扱うと、運動方程式は、静止摩擦域（非滑動域）と動摩擦域（滑動域）のそれぞれにおいて次のように表示できる。

① 非滑動域

$$(m+\Delta m)\ddot{y}+kx+Q=0 \quad (1)$$

② 滑動域

$$(m+\Delta m)(\ddot{x}+\ddot{y})+C\dot{x}+kx+\text{sign}(\dot{x})Q_u=0 \quad (2)$$

$$\text{sign}(\dot{x})=\begin{cases} +1 & \text{on } \dot{x} > 0 \\ -1 & \text{on } \dot{x} < 0 \end{cases}$$

x : 構造物の相対変位 $\ddot{y}$: 地動の加速度

Q : 静摩擦力 Q_u : 動摩擦力

C : 減衰定数 k : バネ定数

m : 質量 Δm : 付加質量

なお、減衰を無視するので $C=0$ とする。

(2) 動的応答解析法

動的応答解析は逐次積分法を用い、変位については(3)、(4)式より求めた。なお、 r_1 、 r_{n+1} はそれぞれ $t=\Delta t$ 、 $t=(n+1)\Delta t$ における変位、同様に f_n は $t=n\Delta t$ における外力である。

$$r_1=(Kf_0+\beta\Delta t^2f_1+Ir_0+Jf_0)/E \quad (3)$$

$$r_{n+1}=[Fr_n+Gr_{n-1}+\beta\Delta t^2(f_{n+1}+(1/\beta-2)f_n+f_{n-1})]/E \quad (4)$$

ここで $n \geq 1$

$$K=\Delta t^2\{(1/2-\beta)+(1/4-\beta)\Delta tC/(m+\Delta m)\}$$

$$I=(m+\Delta m)+C\Delta t/2-(1/2-\beta)\Delta t^2k$$

$$-(1/4-\beta)\Delta t^3Ck/(m+\Delta m)$$

$$J=\Delta t(m+\Delta m)-(1/4-\beta)\Delta t^3C^2/(m+\Delta m)$$

$$E=(m+\Delta m)+C\Delta t/2+\beta\Delta t^2k$$

$$F=2(m+\Delta m)-\beta\Delta t^2(1/\beta-2)k$$

$$G=-(m+\Delta m)+C\Delta t/2-\beta\Delta t^2k$$

ただし、 Δt は微小単位時間、 β は $1/6$ とする。

(3) 付加質量

付加質量としては、Westergaard (1933) の動水圧を求める近似式を用いて次のように誘導した (図-1 参照)。

表-1 摩擦係数

水中重量 (N)	49	98	147
静止摩擦係数	0.337	0.435	0.492
動摩擦係数	0.243	0.330	0.385

$$P_d=7\gamma\alpha\sqrt{Hh}/8 \quad (5)$$

ここで

P_d : 深さ h における動水圧、 H : 水深

α : $(=\ddot{y}/g)$ 水平地震度 γ : 水の単位体積重量

g : 重力加速度

全動水圧 P は

$$P=\int_0^H P_d dh=7\gamma H^2 \ddot{y}/(12g) \quad (6)$$

となり、本実験に対する付加質量 Δm は次式の様になる。

$$\Delta m=7\gamma H^2/(6g) \quad (7)$$

(4) 摩擦係数

摩擦係数は、佐久田ら (1989) が求めたものを使用した (表-1 参照)。

3. 水槽実験

(1) 実験水槽および模型

本実験で使用した装置は日本大学理工学部海洋建築工学科の横・縦それぞれ 1600×4000 (mm) の振動台付平面水槽で (図-2 参照)、入力変位即ち振動台変位 (片振幅) は 2.5 mm に設定した。これはモーターの回転運動を水平運動に変換し、振動台を正弦波振動させるもので加振振動数は $0 \sim 20$ Hz 程度であり、水槽の左右には消波装置が取り付けられている。試験体は硬質塩化ビニール製の 250 (横) $\times$ 250 (縦) $\times$ 300 (高さ)、厚さ 10 (mm) の角柱で、試験体の1方向の応答変位のみを測定するために、アクリル製ガードを作成し利用した。

(2) 実験方法

本実験は、バネ係数、水中重量、水深の3つをパラメーターにとり、それぞれについて、繰り返し 1 Hz から 10 Hz まで 0.5 Hz づつ実験を行い、応答実験結果がどのようになるかを理論値を含め比較・検討を行った。

ここで、バネ係数は、 0 N/cm (即ち、自立形式) 及び

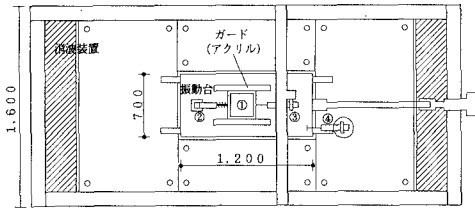


図-2(a) 振動台付平面水槽 (平面図)

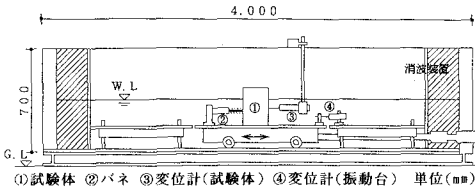


図-2(b) 振動台付平面水槽 (断面図)

表-2 模型と実物との対応

	模 型	実 物
寸法	25×25×30(cm)	25×25×30(m)
水中重量	49, 98, 147(N)	49, 98, 147(MN)
水深	5, 10, 20(cm)	5, 10, 20(m)
入力振動数	1~10(Hz)	0.1~1(Hz)
入力変位	2.5(mm)	25(cm)

48.6 N/cmである。水中重量は、49 N, 98 N, 147 N のものを使用し、水深は、5 cm, 10 cm, 20 cm とした。

(3) 相 似 則

縮尺率を 1/100 とするとフルード相似則によって実物との対応は表-2 のようになる。

4. 解析および実験結果

理論解析において自立・係留形式の軟着底式構造物に地震力が加わった時の時刻歴応答変位の一部を図-3 に示す。解析値及び実験値の絶対変位応答倍率(応答変位/入力変位)を図-4 に示す。

5. 結 言

(1) 自立・係留形式ともに、水中の滑動変位については、水深が大きくなると付加質量が増大し試験体と振動台との相対変位量が增大し、試験体の絶対変位量は小さくなる。

(2) 変位応答倍率を見ると、理論値は、水中重量一定では、水深が増すにつれて滑りだしが早くなっている。又、水中重量が増すにつれて自立形式と係留形式の値が近づいている。

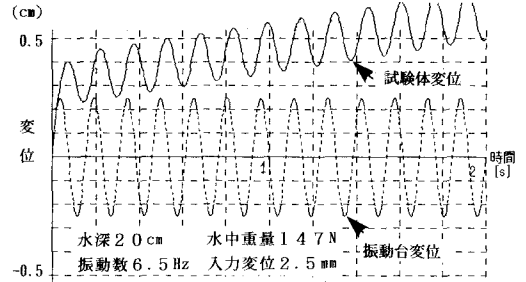


図-3(a) 時刻歴応答変位 (自立形式)

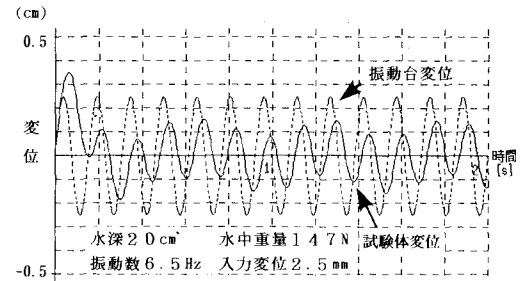


図-3(b) 時刻歴応答変位 (係留形式)

(3) 係留形式は、過渡応答状態では、試験体変位が振動台変位より大きくなるが、直ちに定常状態に達する(理論値)。図-4 の応答倍率は定常状態での値を示しているが、この過渡応答を考慮することが設計にあたり、かなり重要であり、今後の研究課題でもある。

(4) 実験値と理論値とは、多少の差異はあるもののほぼ一致した値をとっている。

(5) 係留形式は、自立形式の場合に現れるドリフトを防ぐことができる。

(6) 自立・係留形式ともに、変位応答倍率は、ある特定の振動数を境に急激に減少しており、軟着底式構造物の水平振動に対する免震効果の顕著なる事を理論的・実験的に立証した。

参 考 文 献

- 今井寛爾・草野直幹・池谷 毅・永富政司 (1990): 海洋構造物の地震時滑動現象と動水圧に関する実験, 海岸工学論文集第37巻, pp. 644-648.
- 上部達生・檜垣典弘 (1984): 水中の剛構造物の地震時滑動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 守・西 好一・青山瑞明・飯島 健・玉野浩之 (1985): 水中構造物の地震時滑動に関する振動台実験, 第23回土質工学研究発表会, 372, pp. 983-984.
- 佐久田昌昭・国府田誠・田中勝寛・小林昭男 (1980): 海洋構造物の着底方式に関する基礎的研究(その1 構造と概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2314, pp. 1079-1080.
- 佐久田昌昭・国府田誠・田中勝寛・小林昭男 (1981): 海洋構造物

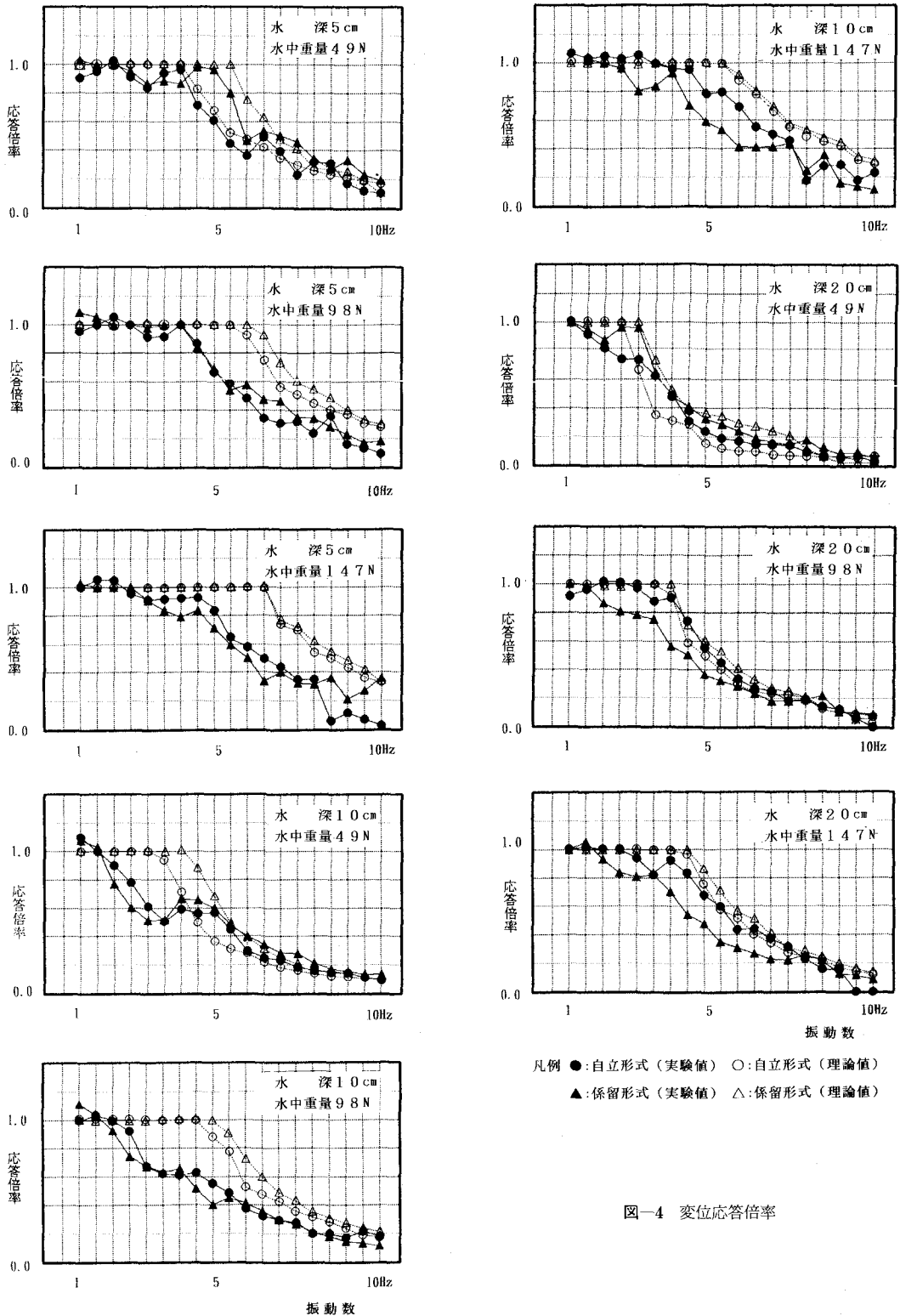


図-4 変位応答倍率

- 物の着底方式に関する基礎的研究 (その2 塔状構造物の地震応答), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 10021, pp. 2465-2466.
- 佐久田昌昭・国府田誠・小林昭男 (1982a): 海洋構造物の着底方式に関する基礎的研究 (その3 着底方式の再評価とその基本形), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 10032, pp. 2425-2426.
- 佐久田昌昭・国府田誠・小林昭男 (1982b): 海洋構造物の着底方式に関する基礎的研究 (その4 軟着底方式の地震応答性), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 10033, pp. 2427-2428.
- 佐久田昌昭・国府田誠・新宮清志・佐藤秀人・小島俊郎 (1989): 軟着底式構造物応答に関する研究 (その1 自立形式・矩形断面の場合), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 10045, pp. 1165-1166.
- 社団法人 国際海洋科学技術協会振動部会 (1988): 海洋構造物の振動問題—振動源となる外乱及び外力の予測技術 (第II編, 第1章), pp. 187-191.
- 新宮清志・船本大蔵・今村憲一・菊地正洋・管野昌利・佐久田昌昭 (1990a): 軟着底式構造物の応答に関する研究 (その2 付加質量係数の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 10011, pp. 1119-1120.
- 新宮清志・船本大蔵・石原雅嗣・平山直樹・阿部圭太・佐久田昌昭 (1990b): 軟着底式構造物の応答に関する研究 (その3 応答倍率の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 10012, pp. 1121-1122.
- 新宮清志・船本大蔵・新宅裕之・篠儀大輔・浜住純至・林 和宏・佐久田昌昭 (1991): 軟着底式構造物の応答に関する研究 (その4 自立形式の角柱, 円柱の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 10030, pp. 1261-1262.
- 新宮清志・船本大蔵・大久保伸晃・星谷恵理・鈴木秀樹・佐久田昌昭 (1992a): 軟着底式構造物の応答に関する研究 (その5 円形断面を有する場合, 変位応答の検討) 日本建築学会大会学術講演梗概集, 10024, pp. 1457-1458.
- 新宮清志・船本大蔵・大久保伸晃・星谷恵理・鈴木秀樹・大石敏寛・佐久田昌昭 (1992b): 軟着底式構造物の応答に関する研究 (その6 円形断面を有する場合, 加速度応答・ロッキングの検討) 日本建築学会大会学術講演梗概集, 10025, pp. 1459-1460.
- 新宮清志・船本大蔵・佐久田昌昭 (1992c): 軟着底式構造物の応答に関する研究 (その7 流体部分の有限要素解析と実験による検討) 日本建築学会大会学術講演梗概集, 10026, pp. 1461-1462.
- 諏訪和成・佐久田昌昭・小林昭男 (1983): 海洋構造物の着底方式に関する基礎的研究 (その5 地盤バネ定数の数値的計算法について), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 10010, pp. 2873-2874.
- 土岐憲三・佐藤忠信・三浦房紀 (1980): 強震時における地盤と構造物との剝離と滑動, 土木学会論文報告集, 第302号, pp. 31-41.
- 林 康裕・勝倉 裕・清川哲志 (1991): 軟着底式海洋構造物の地震時滑動について (構造物—地盤—流体系の非線形時刻歴応答解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2235, pp. 469-470.
- 藤井俊二 (1988): 地震時滑動を伴う構造物の地震応答特性 (滑動を伴う構造物と地盤の連成モデルの振動台実験および解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2106, pp. 211-212.
- 藤野陽三・佐々木有三・伯野元彦 (1978): 地震動による物体の滑りについて, 地震研究所彙報, Vol. 53, pp. 461-480.
- Newmark, N. M. (1965): Effects of Earthquakes on Dams and Embankments, Geotechnique, Vol. 15, No. 2, pp. 139-160.
- Sakuta, M., M. Kouda, K. Shingu, H. Sato (1990): A Study on Dynamic Responses of a Soft Settled Type Offshore Structure, Proceedings of the International Conference on Structural Engineering and Computation, Peking University Press, Beijing, China, pp. 675-683.
- Shingu, K., D. Funamoto, M. Sakuta (1990): Responses of a Soft Settled Type Offshore Structure Subjected to Seismic Forces, Proceedings of the Fourth Pacific Congress on Marine Science and Technology (PACON 90), Tokyo, Japan, Vol. 2, pp. 194-200.
- Shingu, K., D. Funamoto, M. Sakuta (1991a): A Study on Responses of a Soft Settled Type Offshore Structure—Independent Circular Cylinder—, IEEE Oceans Proceedings (Oceans 91), Hawaii, USA, Vol. 2, pp. 723-726.
- Shingu, K., D. Funamoto, M. Sakuta (1991b): Study on Dynamic Behaviour of a Soft Settled Type Offshore Structure Subjected to Seismic Forces, First Offshore Australia Conference 1991, Australian Exhibition Services Pty Ltd, Melbourne, Australia, pp. I-111-I-114.
- Yamamoto, H., T. Kimura, S. Hirashima, and T. Ohta (1986): New Aseismic Design Method of Offshore Gravity Structure in Highly Seismic Regions, 5th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, pp. 693-700.
- Westergaard, H. M. (1933): Water Pressures on Dams During Earthquakes, Trans. ASCE, Vol. 98, pp. 418-432.