

# 波浪のような繰返し力を受ける基礎構造物の 支持力向上化に関する研究

三 浦 清 一\*・川 村 志 麻\*\*・林 秀 人\*\*\*

本研究では、海岸工学の情報と地盤力学の視点に基づいて、海洋基礎構造物の支持力向上化のために設けられた側壁基礎の力学挙動とその地盤破壊防止効果のメカニズムを解明しようとしている。海洋構造物支持地盤では、地盤の強度一側方変形は地盤の堆積構造異方性の影響を強く受けることが知られている。そこで海底異方性地盤における側壁基礎の設置効果を定量化し、地盤の堆積構造異方性を考慮した地盤破壊防止策を模型実験より検討した。その結果、地盤の支持力向上のために採用した側壁基礎では、地盤の堆積構造異方性や側壁設置方向を考慮することで、より合理的な設計が可能であるなどの事実が示されている。

## 1. ま え が き

波浪場にある海洋構造物一側壁系では、外力の作用方向及びその大きさ、また地盤条件の違いによって破壊形態は種々変化する。本研究では、海岸工学の情報と地盤力学の視点に基づいて、海洋基礎構造物の支持力向上化のために設けられた側壁基礎の力学挙動とその地盤破壊防止効果を調べている。側壁基礎は、例えば神戸港に用いられたサクシオン基礎（善ら, 1998）のような根入れを有する構造物基礎や、重力式プラットフォームに用いられているスカート基礎（例えば Lacasse・D'Orazio, 1988; Tani, 1990）のように支持力や滑動に対する付設効果が期待できる。一方、構造物支持地盤では、地盤の強度一側方変形は地盤の堆積構造異方性の影響を強く受けることが知られている。そこで、海底異方性地盤における側壁基礎の設置効果を定量化し、地盤の堆積構造異方性を考慮した地盤破壊防止策を模型実験より検討した。

## 2. 試験装置と試験概要

### (1) 試験装置と異方性地盤の作製方法

本研究で用いた試験装置を図-1に示す（川村ら, 1999）。模型土槽の内寸法は幅 2000 mm、高さ 700 mm、奥行き 600 mm である。繰返し载荷試験では、ベロフラムシリンダーから模型構造物に任意の荷重を载荷できるようになっている。载荷装置には変位計とロードセルが具備されており、模型構造物の変位量と作用する荷重が随時測定できるようになっている。

海洋構造物支持地盤の堆積条件の違い、すなわち地盤の異方性の違いが側壁基礎の力学挙動に及ぼす影響を調べるために、種々の異方性地盤を作製した。以下のような手順によって作製されている（図-2 参照）。

a) 二次元平面ひずみ模型土槽を所定の角度  $\theta$  まで傾斜させ、模型地盤の深さが 400 mm になるように豊浦

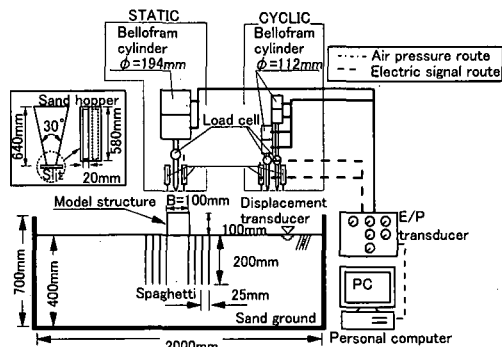


図-1 模型試験装置

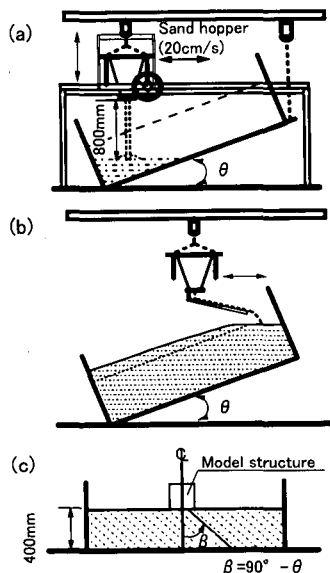


図-2 異方性地盤の作製方法

砂 ( $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{d \text{ max}} = 1.658 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{d \text{ min}} = 1.354 \text{ g/cm}^3$ ) を堆積させる（図-2(a) 参照）。

b) 土槽端部には、傾斜角を可変可能（鉛直方向より  $0^\circ \sim 90^\circ$  まで）なステンレス製の板をサンドホッパー底部に取付け、砂を堆積させている（図-2(b) 参照）。なお、

\* フェロー 工博 北海道大学大学院教授工学研究科  
\*\* 正 会 員 工博 室蘭工業大学助手工学部建設システム工学科  
\*\*\* 正 会 員 北日本港湾コンサルタント(株)技術部計画2課係長

落下高さ 800 mm ( $Dr=80\%$ の時, スリット幅 4 mm) を基本に作製するが, 右側壁部からおおよそ 200 mm の部分ではこれが難しいので, 落下高さを低下させスリット幅を減少 ( $Dr=80\%$ の時, スリット幅 3 mm) させて, 所定の密度を確保するようにしている。いずれにしても, この影響が残る可能性があるため, Terzaghi の支持力解から得られる塑性流動域がこの範囲内に入らないように構造物の設置位置を中心から左側に 100 mm 移動させて, 試験を行っている。

- c) 堆積後, 模型土槽を水平に戻す。その後地盤の乱れが生じないように余分な砂を取り除き, 地盤の表面を整える (図-2(c) 参照)。

本研究では, 鉛直方向と堆積面とのなす角  $\beta$  (反時計回りを正) が  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  になるように地盤を作製した。なお, 相対密度  $Dr$  は  $80\%$  である。地盤作製後, 土槽底部より動水勾配  $i=0.01$  の下, 地盤の堆積構造を乱さないようにゆっくりと通水し, 模型地盤の飽和化を計った。

用いた模型構造物の仕様は, 幅 100 mm, 高さ 100 mm, 奥行き 580 mm, 重量 0.127 kN である。構造物には, 模型地盤との接触面を完全粗とするために底面にサンドペーパー (G 120) が貼付けられている。これらの装置および模型地盤を用いて一連の試験を行った。

## (2) 試験方法と変形量の定義

本研究では, 基本的な繰返し荷重を受ける側壁基礎の力学挙動を調べるために, 波浪のような繰返し荷重を受けて構造物がロッキングするような場合を想定した繰返し交互載荷 (CAL) 試験を実施している (図-3(a) 参照)。載荷周期 4 秒, 偏心度  $e/B=0.3$  で半正弦波荷重が交互に構造物に与えられている。また単一方向から半正弦波荷重を周期 4 秒,  $e/B=0.3$  で構造物に与えた繰返し偏心載荷試験 (CEL) も併せて行っている (図-3(b) 参照)。なお, 荷重の繰返し回数  $N_c$  は 2000 回までとしている。

採用した側壁基礎は, 図-4 に示すように根入れ深さ  $l_w$  と根入れ幅  $t_w$  を有している。なお, 本試験では付設条件の相違による防止効果の変化を調べるために, 片側に側壁を付設した条件 (左側: CAL-LW, CEL-LW, 右側: CAL-RW, CEL-RW) と両側に付設した条件 (両側: CAL-SW, CEL-SW) のそれぞれ 2 ケースの試験を行っている。これらの試験では, 載荷 1 波目の方向を左側に統一している。以上のような模型試験を行い, 側壁基礎の力学特性を調べた。

以下では, 構造物左右の沈下量  $S_{VL}$ ,  $S_{VR}$  のうち卓越する方の値を  $S_{V\text{major}}$ , その差として表される不同沈下量を  $S_{V\text{diff}}$  と定義している。また地盤内の側方変形は, 直径 1.9 mm, 長さ 200 mm のスパゲッティを構造物底端点から 25 mm 間隔で地盤内に 8 本挿入し, 左右の水平変形量  $\delta_L$ ,  $\delta_R$  を測定することによって把握されている。これら

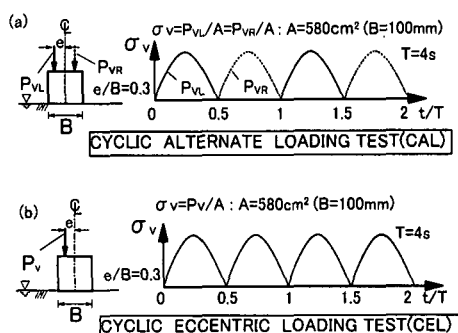


図-3 試験方法: (a) CAL, (b) CEL

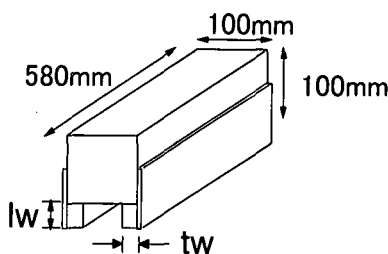


図-4 側壁基礎の形状

の計測値に基づいて構造物の沈下による単位奥行当たりの体積とスパゲッティの変位した単位奥行当たりの体積を, それぞれ沈下土量  $V_p$  ( $\text{mm}^3/\text{mm}$ ), 側方流動土量  $V_s$  ( $\text{mm}^3/\text{mm}$ ) とし, 以下の議論に用いている。詳細は川村・三浦 (2003) に詳しい。

## 3. 試験結果と考察

### (1) 水平層理地盤 ( $\beta=90^\circ$ 地盤) の側壁基礎の力学挙動

川村ら (2003) は, 波浪のような繰返し荷重を受ける構造物支持地盤では, その側方流動方向は地盤の堆積条件に依存することを明らかにしている。それゆえ, この側方流動の進行を抑えることができれば, 支持力向上に貢献できると考えるのは自然である。ここでは, まず水平層理地盤 ( $\beta=90^\circ$  地盤) の側壁基礎の基本的な設置効果を検討した。従来より, この側壁基礎は滑動の安定性やパイピングや洗掘に対する抵抗力が増すという設置効果も指摘されている (Lacasse・D'Orazio, 1988)。

図-5 は, 繰返し応力  $\sigma_v$  と沈下量比  $S_{V\text{major}}/B$  (沈下量/構造物の幅) が 3, 5, 10% に至るに必要な繰返し載荷回数  $N_c$  の代表的な関係を示している。側壁は構造物下両側に設置している。図より, 側壁付設によって, 所定の沈下量比に至るに必要な繰返し応力  $\sigma_v$  の増加が認められる。例えば, 側壁を付設することによって繰返し応力の収束値は約 1.5 倍になっている。このように, 側壁基礎は支持力向上のために有効である。なお, 建築基礎設計

指針及び既往の単調載荷試験結果では、沈下量比  $S_{vmajor}/B \approx 10\%$  付近で極限支持力に至ることが示されているので、 $S_{vmajor}/B \approx 10\%$  の収束値を繰返し強度  $\sigma_{vu}$  と定義している (川村・三浦, 2003)。また、水平層地盤 ( $\beta=90^\circ$ ,  $Dr=80\%$ ) の側壁基礎では、沈下量比は 10% まで進行しないので、その場合は 5% の沈下量比曲線の収束値を繰返し強度と定義した。

この強度増加を定量化してみた。図-6 は  $S_{vmajor}/B$  が 3% に至るに必要な構造物底部中心における正規化モーメント  $M/M_0$  と根入れ幅  $t_w$  を根入れ深さ  $l_w$  で正規化した値  $t_w/l_w$  について整理したものである。 $M$  は構造物底部中心まわりのモーメント ( $M = P_{VR} \cdot e = P_{VL} \cdot e$ ) として算出している。なお、既往の研究成果に加筆して示されている (川村ら, 1999)。既往の研究では、繰返し鉛直及び水平載荷条件の下で、根入れ幅  $t_w$ 、根入れ深さ  $l_w$  を変化させた一連の模型試験が実施されている。また、 $M_0$  は側壁を設置しない場合のモーメントを示す。図より、側壁付設による強度の増加が認められる。その効果は、載荷方法の違い (繰返し水平載荷 (CHL) と繰返し交互載荷 (CAL) 条件の違い)、地盤密度の違いによって変化していることがわかる。特に CAL 試験の  $Dr=50\%$  の地盤ではその効果が最も高い。このように載荷方法、地盤密度の相違によって破壊防止効果は異なるが、いずれにせよ側壁基礎は支持力向上に効果があると指摘できる。ただし、既往の研究においても明らかにされているが (川村ら, 1999)、外力の作用の仕方によっては、間隙水圧が上昇する場合も考えられるので、側壁付設の際には側壁を透水性にするなどの検討が必要であるかもしれない。

これらの結果に基づいて、以下の考察では、最も破壊防止効果の高い形状 ( $t_w/l_w=0.06$ ; 構造物の幅 100 mm に対して根入れ深さ  $l_w=50$  mm, 根入れ厚さ  $t_w=3$  mm, 奥行き 580 mm) を採用し、さらに模型実験を進めた。

## (2) $\beta=60^\circ$ 地盤の側壁基礎の力学挙動

基本的な側壁基礎の力学挙動を調べるために、図-7 に  $\beta=60^\circ$  地盤における繰返し偏心載荷試験 (CEL, CEL-RW 及び CEL-LW) の結果を示した。繰返し応力  $\sigma_v$  と載荷回数  $N_c$  の関係で整理している。図より、側壁を付設しない CEL に比べて側壁を付設した場合は、繰返し強度が増加していることがわかる。特に CEL-LW 試験では、CEL 試験に比べて約 2.5 倍の強度増加が認められる。

図-8(a) と (b) は、CEL 試験の代表的な地盤変形状況を示している。それぞれ沈下量  $S_{vmajor}$  が 10 および 20 mm 時の変形である。図より、地盤が側方に流動しながら変形する様子が伺える。しかしながら、側壁の設置方向によりその発達の仕方が異なっていることがわかる。特に右側付設に大きな側方変形が生じている。このことか

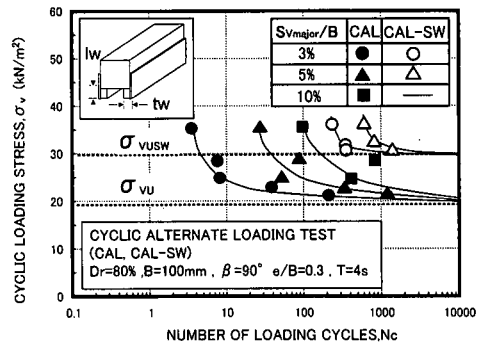


図-5  $\beta=90^\circ$  地盤における側壁基礎の繰返し強度

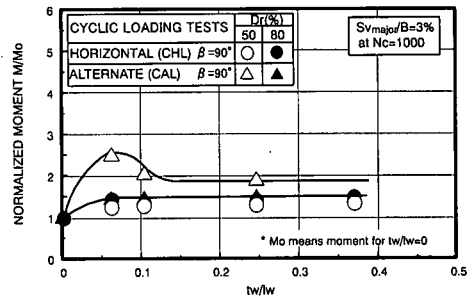


図-6 側壁形状の違いによる繰返し強度の変化

ら外力の方向と地盤の異方性の関係によっては、側壁基礎の変形挙動に相違が現れる可能性があることが明らかにされた。

図-8に基づいて、各試験の左右の側方変位量と沈下量比の関係を示した (図-9 参照)。図より、すべての試験において  $\delta_L$  の発達量は変わらないが、 $\delta_R$  の発生は異なっていることが確認できる。この変化傾向は、前述の繰返し強度の変化と同様な傾向にあることから、側方変位量の大きさが繰返し強度に影響を及ぼす 1 つの要因であると推察される。

以上のことより、異方性の度合いが異なる地盤においても側壁付設による側方流動破壊の防止効果は期待できるといえる。しかしながら、側壁の付設条件や載荷条件によって同一地盤の強度に変化が現れることから、側壁付設には十分な注意が必要であるといえる。

図-10 は、海洋構造物がロッキング沈下する場合を想定し、側壁両側付設条件 (CAL-SW) と片側付設条件 (左下設置 CAL-LW と右下設置 CAL-RW) の場合の繰返し応力  $\sigma_v$  と沈下量比  $S_{vmajor}/B$  が 10% に至るに必要な繰返し回数  $N_c$  との関係を示したものである。比較のため側壁無しの場合 (CAL) を記載している。図より、前述と同様、側壁付設によって繰返し強度  $\sigma_{vu}$  に変化が現れていることがわかる。また、側壁付設の仕方 (両側と片側の付設の違い) によって強度に明確な違いが現れて

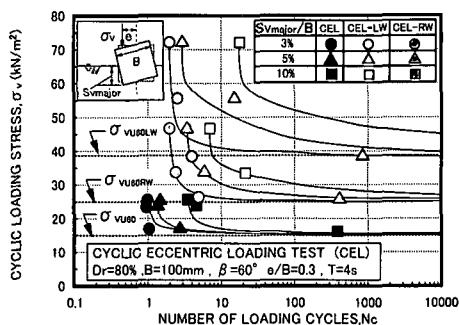
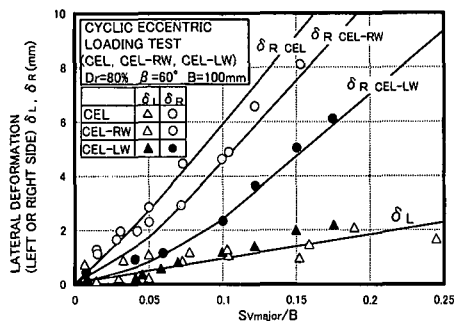
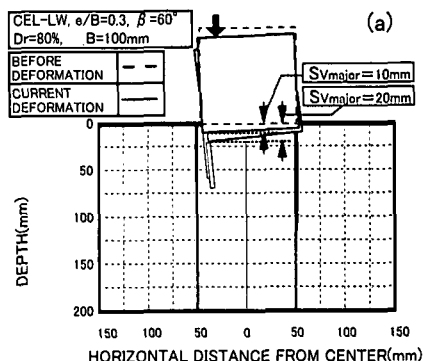
図-7  $\beta=60^\circ$ 地盤での側壁基礎の繰返し強度 (CEL)

図-9 地盤内の側方変位量と沈下量比の関係

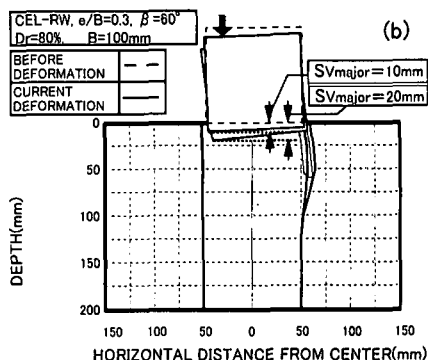
いる。特に片側付設の場合では、その強度は地盤の堆積条件（構造異方性）の影響を受けている。

図-11に側方流動土量  $V_s$  を沈下土量  $V_p$  で正規化した土量比と沈下量比の関係を示した。図より、側壁を付設した場合、側方流動土量の減少に起因して、土量比にも大きな低下が見られている。また側壁設置方向によってその大きさに違いが現れている。このように側壁を付設することでサーチャージ効果が生じ、側方への変形が抑えられることによって、前述のような強度増加が生じたものと推測される。

上記の強度の変化の定量化を試みた。図-12は所定の繰返し回数時 ( $N_c=500, 1000, 2000$ ) の  $S_{vmajor}/B$  が 10% に至るに必要な各試験の繰返し強度  $\sigma_{vu}$  を側壁無しの場合で正規化したものと地盤の堆積面と側壁とのなす角  $\omega$  (反時計回りを正) との関係として示している。例えば、左側に側壁を設置した場合でかつ  $\beta=60^\circ$  の場合では、挿入図 (a) に示すように、 $\omega$  は  $120^\circ$  になる。また両側側壁では、左右の  $\omega$  のうち、小さい値をとるものとする。図より、 $\omega$  が  $90^\circ$  以下では側壁設置による強度増加はかなり高いが、 $90^\circ$  以上になるとその効果は低下していることがわかる。特に  $\omega=60^\circ$  では、2 倍の強度増加が確認できる。また、側壁の設置の仕方によっては片側側壁でも両側側壁効果とほぼ同様の効果が得られることは、非常に興味深い。



(a) CEL-LW



(b) CEL-RW

図-8 構造物の沈下と側方変形挙動

図-13は、沈下量比  $S_{vmajor}/B$  が 10% の時の不同沈下量  $S_{vdir}$  と  $\sigma_v$  の関係を示している。CAL, CAL-SW 及び CAL-LW, CAL-RW 試験のものである。  $S_{vdir} > 0$  のとき左側が、  $S_{vdir} < 0$  のとき右側が沈下していることを示す。側壁の設置の仕方に関わらず、不同沈下量に差は認められず、ある範囲内に収まっていることがわかる。しかしながら、その発生方向に違いが生じている。すなわち側壁の有無によらず、左右対称の構造形式であれば、不同沈下の発達方向は地盤の堆積方向に依存し、片側のみの場合は構造物基礎形状の影響を強く受け、側壁を設置した方向に地盤の沈下側方変形が起こる。このことは構造物の使用目的に応じて側壁の設置方向を決定すれば、その設置効果は十分期待できることを示唆している。

以上のことから、地盤の堆積構造異方性や側壁設置方向を考慮することで、海洋構造物基礎のより合理的な設計が可能になるといえる。

#### 4. 結 論

一連の模型試験と考察により以下のような結論を得た。

(1) 側壁基礎により確実な支持力の向上が期待でき

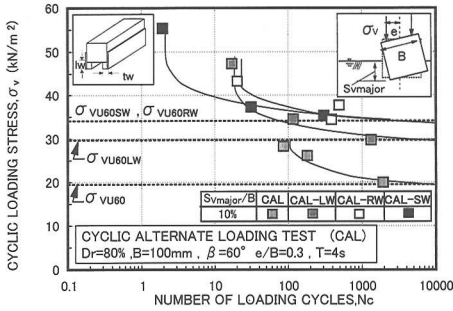


図-10  $\beta=60^\circ$ 地盤での側壁基礎の繰返し強度 (CAL)

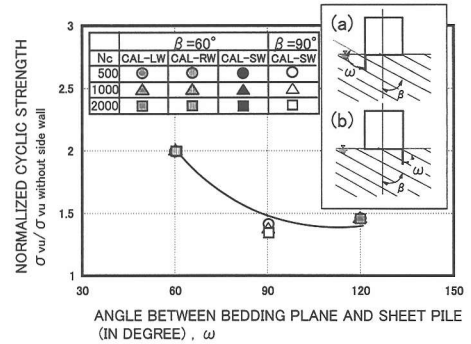


図-12 側壁の設置方向の違いによる繰返し強度の変化

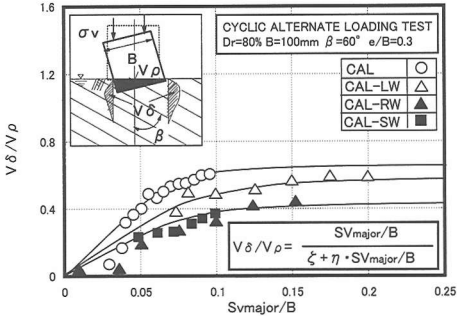


図-11 土量比と沈下量比の関係

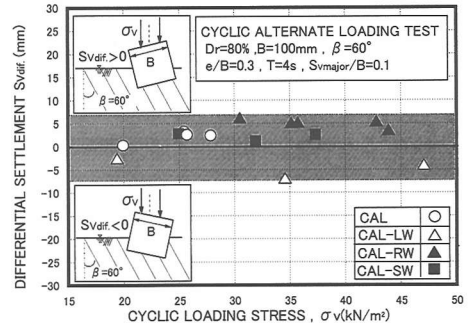


図-13 側壁基礎の不同沈下量と載荷応力の関係

る。地盤の堆積構造異方性や側壁設置方向を考慮することで、より合理的な設計が可能になる。

(2) 左右対称の側壁基礎構造形式であれば、不同沈下の発達方向は地盤の堆積方向に依存し、片側のみの場合は構造物基礎形状の影響を強く受け、側壁を設置した方向に地盤の沈下一側方変形が起こる。このことは構造物の使用目的に応じて側壁の設置方向を決定すれば、その設置効果は十分期待できることを示唆している。

### 参 考 文 献

- 川村志麻・三浦清一 (2003): 種々の載荷条件下にある構造異方性砂地盤の支持力一側方変形挙動, 土木学会論文集, No. 736, III-63, pp. 115-128.
- 川村志麻・三浦清一・勝世佑子・林 秀人 (2003): 堆積構造異

方性が構造物一砂地盤系の繰返し強度一変形特性に及ぼす影響, 第 38 回地盤工学研究発表会講演集, pp. 385-386.

川村志麻・三浦清一・横浜勝司・宮浦征宏 (1999): 繰返し力を受ける構造物支持地盤の破壊とその防止策に関する研究, 土木学会論文集, No. 624, III-47, pp. 77-89.

善 功企・山崎浩之・前田健一 (1998): サクシヨンによるケーソン基礎の海底地盤中への沈設に関する事例解析, 土木学会論文集, No. 603, III-44, pp. 21-34.

Lacasse, S. and D'Orazio, T. B. (1988): Soil reaction stresses on offshore gravity platforms, ASCE, Vol. 114, GT11, pp. 1277-1299.

Tani, K. (1990): Stability of skirted gravity foundations on very soft clay, Ph. D. Thesis, Dept. of Engineering, Manchester Univ.