

ケーソンを単一要素とした個別要素法による混成堤の挙動計算

高山知司¹・高橋通夫²

本研究の目的は、個別要素法を用いた計算モデルにおいて、混成防波堤のケーソンを単一要素として扱うことで、ケーソンの滑動や回転といった大きな挙動の計算精度を向上させることである。傾斜やマウンドへのめり込みのみならず、従来から課題とされてきた滑動量についても定量的に表現することができるようになった。また、被覆石が滑動に抵抗する様子も再現できた。さらに、より現実的な不規則波作用下でのケーソン挙動についても滑動量は作用する波力の大きさのみならずその作用時間の影響を受けることがわかった。

1. はじめに

防波堤は、外洋からの波を遮蔽し、港内を静穏に保つために建設されるが、外洋からの波に直接晒されるために、毎年被害を受けてきた。そして、その被害額は港湾施設被害の中で大きな割合を占めている。また、防波堤の建設費の割合は、港湾工事費の中で非常に高い。そのために、経済的で、より安全な防波堤の設計法の開発が強く要請されるようになってきている。

混成防波堤の従来の設計法は、安全率に基づくもので、防波堤に作用する波力を算定し、波浪外力と堤体自重による抵抗力を比較し、堤体の諸元を決定するものである。その際、限られた数の異常波浪データを用いることに起因する設計沖波の推定誤差や波力算定式の精度など、種々の不確定要因によって危険側の波力が発生する可能性がある。そのため、安全率を設定することで設計に余裕を持たせている。しかしながら、このような従来の設計法は、大きな問題点を孕んでいる。

一つには、同じ安全率で防波堤を設計しても、不確定要因によってある防波堤ではほとんど余裕のない設計になっているが、他の防波堤ではかなりの余裕を持った設計になっている可能性がある。そこで、高山ら (1989) は、波高および波力の算定精度や摩擦係数のばらつきなどを考慮した、信頼性理論による設計法を提案している。

もう一つは、外力が抵抗力を僅かでも越えたときは即被災とし、堤体が全く滑動しないように設計している点である。防波堤の安定性は滑動や転倒に対する安全率だけではなく、設計を上回る外力が作用した場合の挙動も含めて検討すべきである。伊藤ら (1966) はこのような考え方に基づいて、期待滑動量の概念を提唱した。

期待滑動量を用いた信頼性設計法の精度を向上させるためには、堤体の滑動量を正確に求めることが不可欠で

ある。このような研究としては、下迫ら (1997)、谷本ら (1996) の研究がある。その中では、波力の時系列モデルを与え、捨石マウンドを剛体と仮定し、ケーソンの運動方程式を解くことによって滑動量を求め、実験による実際の滑動量と比較している。しかしながら、滑動量が大きくなると、実験値よりも計算値の方が大きくなる傾向が見られた。これは、実際の防波堤では、ケーソン後趾がマウンドの中へめりこむようにして滑動することがあり、剛マウンドを仮定した場合に比べて、滑動量が小さくなるためだと思われる。

高山ら (2002) は、防波堤の被災事例の統計的解析を行い、ケーソンが傾斜しながら滑動するのは、特殊なケースではないことを示した。そこで、高山ら (2004) は、個別要素法を用いたケーソン挙動の解析を行って、ケーソン後趾端で捨石が盛り上がり、滑動抵抗力となって滑動量を低減させる効果や、マウンドの弾性変形による滑動の戻りなどを再現することに成功している。しかし、ケーソンは単一要素ではなく、多数の円要素の集まりとして、後藤ら (2001) が提案した剛体連結モデルを適用している。このモデルでは、ケーソン構成要素間の力の釣合いから各要素の移動を計算した後に、剛体としてのケーソンの運動を算定しているため、このようにして求めた運動がケーソンの実際の挙動を再現しているか疑問が残る。

そこで、本論文では、superquadric 要素を用いてケーソンを単一要素として扱うシミュレーションモデルを開発し、規則波及び不規則波が作用した場合のケーソンの挙動特性を明らかにしている。

2. 数値計算モデル

(1) 要素モデル

マウンド捨石およびケーソンとして、宮田ら (2002) が用いた次式の superquadric 要素とした。

$$f(x, y) = \left(\frac{|x|}{a}\right)^n + \left(\frac{|y|}{b}\right)^n - 1 = 0 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 (x, y) は原点を要素中心とした要素表面上の座

1 フェロー 工博 京都大学教授防災研究所
2 正会員 修(工) 国土交通省鉄道局

標, a と b は要素の長径と短径を示す. 指数 n は要素の形状を規定する値で, この値が大きくなるほど矩形に近づき, $n=2$ なら楕円形となる.

i と j の2つの捨石要素を考えたとき, i の要素の表面座標 (x_i, y_i) を j の要素の中心を原点とする座標系に変換したときの値 (x_j, y_j) を, j の要素を表す式に代入して, 次式の値を求める.

$$f_j(x_i, y_i) = \left(\frac{|x_j|}{a_j}\right)^n + \left(\frac{|y_j|}{b_j}\right)^n - 1 \dots\dots\dots (2)$$

i と j の要素の接触条件は次式のようになる.

$$f_j(x_i, y_i) \begin{cases} \leq 0: & \text{touch} \\ \geq 0: & \text{no-touch} \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

そこで, 接触点としては, i の要素の表面座標 (x_i, y_i) を媒介変数を用いて与えていき, $f_j(x_i, y_i)$ の値が負で, 最小となる点とする.

(2) 法線方向接触力

異なる2つの要素が非接触なら要素間には力は作用しないが, 接触状態なら相互に力が作用し合う. 接触状態での法線方向の接触力の大きさと作用方向は次のように求める.

i と j の要素におけるそれぞれの接触点での曲率半径を求め, この曲率半径を持つ接触円を考える. 図-1 に示すように, これらの接触円が相互に接触しているとして, 接触力は接触円の中心を結んだ法線方向に作用すると仮定した. 接触力 f_n は弾性バネによる力 f_{ne} と粘性ダッシュポットによる減衰力 f_{nd} に分けて, 前者と後者の増分は微小時間 Δt の間におけるめり込み量の増分 $\Delta \delta_n$ と増分の時間的変化量にそれぞれ比例するとして次式のように与えている.

$$f_{ne}(t) = f_{ne}(t - \Delta t) + k_n \Delta \delta_n \dots\dots\dots (4)$$

$$f_{nd}(t) = c_n (\Delta \delta_n / \Delta t) \dots\dots\dots (5)$$

ここに, k_n と c_n は法線方向のバネ定数と減衰定数である.

(3) 接線方向接触力

2つの異なる要素による接触点での相対的なずれの増分 $\Delta \delta_s$ は, 各要素の中心位置の相対的な接線方向のずれによる $\Delta \delta_{si}$ と要素が中心回りに回転するときに生じる相対的な接線方向のずれ $\Delta \delta_{sr}$ の和として次式で求めた.

$$\Delta \delta_s = \Delta \delta_{si} + \Delta \delta_{sr} \dots\dots\dots (6)$$

この接線方向のずれによる接触力 f_s は, 弾性バネによる力 f_{se} と粘性ダッシュポットによる減衰力 f_{sd} に分けて, 次式のように与えられるとした.

$$f_{se}(t) = f_{se}(t - \Delta t) + k_s \Delta \delta_s \dots\dots\dots (7)$$

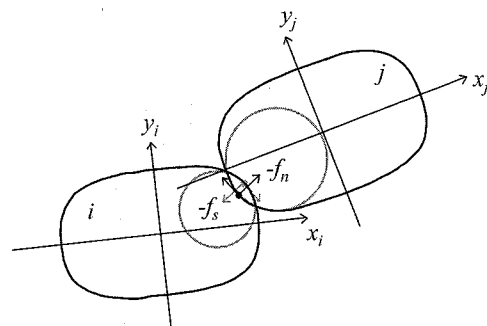


図-1 仮想接触円および力の作用点と作用方向

$$f_{sd}(t) = c_s (\Delta \delta_s / \Delta t) \dots\dots\dots (8)$$

ここに, k_s と c_s は接線方向のバネ定数と減衰定数である.

(4) マウンド捨石要素

マウンドの捨石形状としては式(1)の $n=2$ を採用して, 楕円形とした. 実際の捨石は同じ大きさと同じ形のもので構成されてはいないことを考慮して, 捨石の重量の確率分布を仮定して, 高山ら(2004)と同様に設定した.

(5) ケーソン要素

ケーソンとしては, 式(1)において $n=20$ とした矩形に近い形状とした. 式(1)で表される要素表面の接触点における曲率半径 ρ は次式で与えられる.

$$\rho = \frac{\left\{ \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}}{\left[\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 - 2 \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 \right]} \dots\dots\dots (9)$$

この式からわかるように, $n > 2$ の条件では, $x=0$ あるいは $y=0$ の点では曲率半径が無限大になってしまう. このような条件では計算できないので, $n=20$ のケーソン要素の場合, $x=0$ あるいは $y=0$ の付近で曲率半径を有限な値に抑えることを考えた. 無次元曲率半径 $(\rho / \sqrt{ab})$ の逆数をパラメータにして, 計算に使用する曲率半径 ρ_c を次式のように設定した.

$$\rho_c = \begin{cases} 10^{10} \sqrt{ab} & (\sqrt{ab} / \rho < 10^{-10}) \\ \rho & (\sqrt{ab} / \rho \geq 10^{-10}) \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

ケーソン要素についても接触判定法は, 既に述べた方法と基本的には同じであるが, 接触判定に用いる判定点については, 直線に近い部分では設定した Δx あるいは Δy 毎に設定することにした.

(6) 波浪外力

本論文では, 簡単にするため捨石とケーソンの運動に伴う流体抵抗と捨石に働く波力を無視した. つまり, 各要素間での接触力と重力, ケーソンに作用する波力の

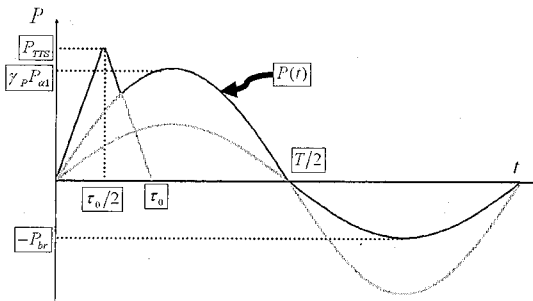


図-2 水平波力の時系列モデル

み考慮することにした。波作用時のケーソンの挙動を計算するためには、ケーソンに働く水平波力と揚圧力の時間変化およびその波圧分布を知る必要がある。

規則波については、高山ら(2004)と同様に、波力の時間変化をモデル化して与えた。不規則波については、数値波動水路で算出した波力を与えた。水平波力 p に関しては、図-2 に示すように、まず、押し波時は、谷本ら(1996)が提案した三角形波形と正弦波形を組み合わせた波形モデルを採用した。次に、引き波時は、壁面に波の谷があるときの波力算定式(港湾の施設の技術上の基準・同解説 改訂版, 1989)によって、冲向きの最大波力を求め、それを最大振幅とする正弦波形で増減させるものとした。

不規則波については、数値波動水路(沿岸技術研究センター, 2001)を用いて不規則波をケーソンに作用させ、波力を算定した。

3. 数値計算の流れと定数設定

(1) 数値計算の流れ

本計算の流れは、高山ら(2004)と同じく、図-3 に示すような流れとなっている。まず、シミュレーション断面に関する条件などを入力する。その後、一樣乱数を用いて形状や質量、初期傾斜角にバラつきを持たせ、マウンドを作成する。マウンド表面を均した後に、ケーソンを設置する。この際、ケーソンのような大きな質量を持ったものをそのまま自由落下させるとマウンドが崩壊する恐れがある。よって、ケーソンの質量は載荷開始時において、本来の質量の $1/3$ とし、徐々に増加させることで安定した載荷を行う。その後、被覆石を設置し、所定の波を作用させ計算を終了させる。

(2) 捨石間の係数決定

高山ら(2004)は、捨石が過剰に反発したり、めり込み量が過大になったりしないように検討し、捨石間のバネ定数を設定している。しかし、ここではケーソンを単一要素としているため、大質量の要素をマウンドで支える必要がある。よって、従来のバネ定数よりもやや小さくして、捨石の侵入量を増やすことでケーソンを支持す

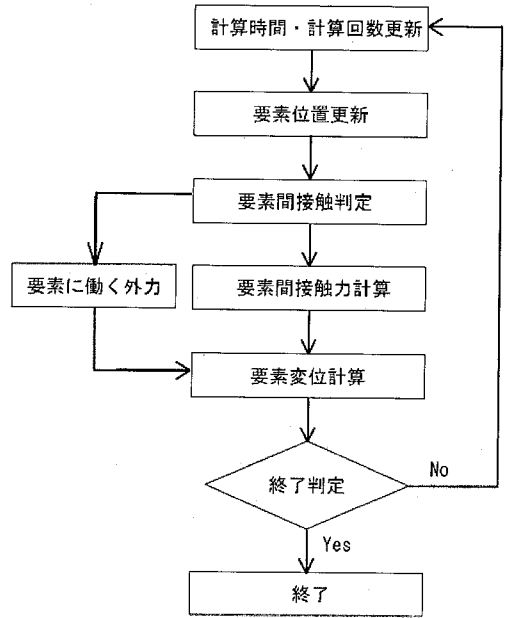


図-3 計算フロー

るということで、従来のバネ定数の 0.8 倍の値 ($5.0 \times 10^3 \text{ N/m}$) を用いた。

(3) 捨石・地盤間の係数決定

捨石・地盤間の係数に関しては、上記の捨石間のバネ定数を基本と考え、その 0.5 倍の値を用いた。実際の混成防波堤において、多くの場合地盤は砂地盤として考えることができ、捨石が地盤に対してかなり侵入することを想定している。あまりこのバネ定数を小さくすると、マウンド全体が振動することになるので、それを抑えるような値とした。

(4) 捨石・ケーソン間の係数決定

ここでもやはり最も単純に、捨石・地盤間の係数と同様に捨石間のバネ定数を基本として考えた。(2) で設定した捨石間のバネ定数に対して、試行錯誤的に 1.1 , 50 , 100 , 150 , 200 倍の値で検討を行った。検討は、ケーソンの載荷による捨石の移動状態とケーソンとマウンドとの間の摩擦係数の算定値、実際の滑動状態との比較を行い、妥当性を確保することとした。その際、法線方向のバネ定数の変更だけでは、実験での滑動量を再現できないことが分り、接線方向のバネ定数についても再検討を行い、実験値をよく再現できる係数を設定することができた(法線方向: $5.0 \times 10^5 \text{ N/m}$, 接線方向: $1.5 \times 10^6 \text{ N/m}$)。

4. シミュレーション結果

(1) 規則波を作用させた場合のケーソン挙動

図-4 と図-5 に設定した係数を用いて計算を行った場合の滑動量と傾斜角の時系列を示す。波高が 0.25 m , 周期

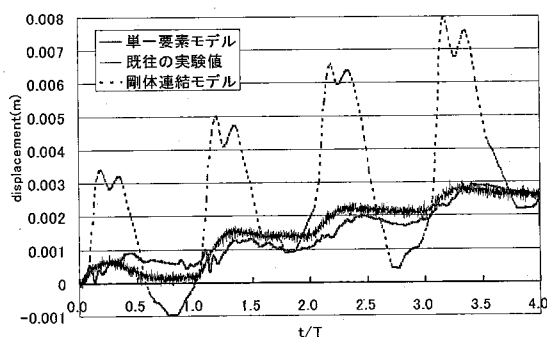


図-4 水平滑動運動に関する計算値と実験値の比較

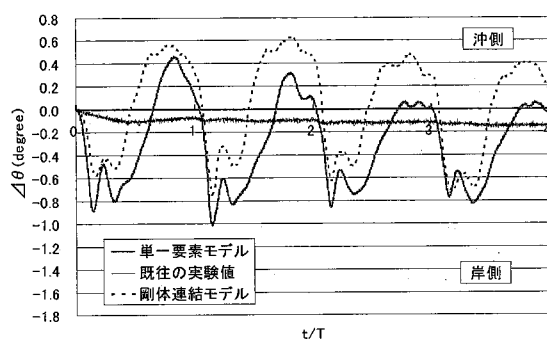


図-5 傾斜運動に関する計算値と実験値の比較

が1.5 secの波条件で実験を行っているので、この実験と同じ条件で計算を行い、実験値とも比較している。また、高山ら(2004)の剛体連結モデルで計算した結果も示している。これらの図中の太い実線は本研究における単一要素モデルによる計算値であり、細い実線は実験値、破線は高山らの剛体連結モデルによる計算値である。

図-4に示すように、実験値は1 mm 弱岸側に滑動したのち、波力が小さくなると沖側に0.3 mm程度返り、一波で約0.7 mmの残留滑動量となるのに対して、剛体連結モデルではケーソンの滑動量は5 mm程度と実験値の5倍程度大きいけれども、波力が小さくなると4 mm程度沖側に戻るために残留滑動量は実験値とほぼ同じになる。それに対して、本研究のケーソン単一要素モデルでは、実験値とほぼ同じ滑動を示し、実験結果を非常によく再現している。

図-5におけるケーソンの傾斜運動では、実験値は陸側に0.1度程度傾斜した後はほとんど傾斜運動をしないけれども、剛体連結モデルやケーソン単一要素モデルでは両振幅1度程度の傾斜運動を一波毎に繰り返す。ケーソン単一要素モデルの運動振幅は剛体連結モデルのものより少し小さく、また、沖側への運動振幅は次第に小さくなっている。

図-6に長時間にわたって波を作用させた場合の滑動

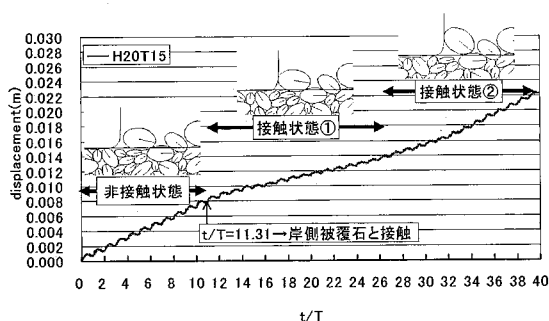


図-6 水平滑動量の長期的な変化

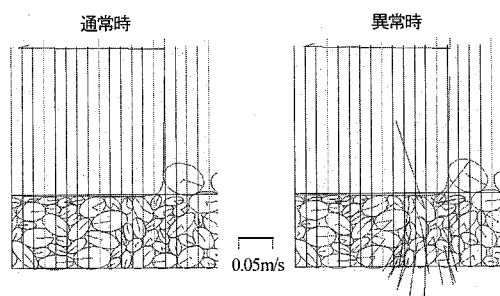


図-7 ケーソン後趾端における捨石の運動速度ベクトル

量を示す。この際に、被覆石とケーソンの関係に注目すると、初めは、被覆石とケーソンは接触しておらず、非接触状態となっている。そして、少しずつ岸側に滑動し、被覆石と接触するようになる。そして、この被覆石はケーソンの滑動に対して抵抗するようになる。その結果、残留滑動量の速度は小さくなる。その後、被覆石が起き上がり、滑動への抵抗が弱まると、滑動速度は増大する。このような滑動速度の変化を図-6はよく示している。

押し波時にケーソンが後趾端付近の捨石に強い力を加え、防波堤の被災形態の1つである支持力破壊のような現象が見られた。図-7に捨石の移動速度を矢印のベクトルで表している。ただし、通常時のケーソン速度は、 $V_x = 0.016 \text{ m/s}$ 、 $V_y = 0.004 \text{ m/s}$ である。押し波が作用した通常時は、左図のような状態であるが、波が作用し続けると右図のように突然捨石の動きが大きくなる場合がある。この現象は、被覆を行っていない状態では見られず、単にマウンドの支持力不足ではなく、被覆石がケーソンの滑動を過度に拘束し、その力が捨石に伝播し、支持力破壊のような現象が起こったのではないかと考えられる。

(2) 不規則波を作用させた場合のケーソン挙動

不規則波ではその波高と周期のランダム性によって波力も変化し、結果として滑動量も規則波とは全く異なる変化を見せた。図-8に不規則波を作用させた場合のケーソンの滑動量で特徴的な部分を示す。

押し波①と押し波②を比べた場合、波力のピーク値は

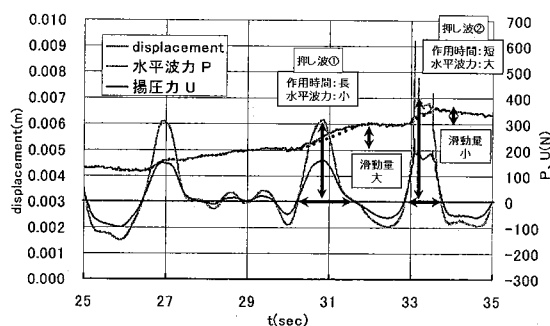


図-8 不規則波作用下での水平滑動運動

後者の方が大きいけれども、滑動量としては、作用時間が長い前者の押し波①の方が大きくなる。さらに言えば押し波①では、滑動は緩やかに起こっているのに対して、押し波②は急激に起こっている。これは波力の大きさと作用時間によって滑動量の大きさが変化することを示している。しかし、 $t=28\sim30$ sec のほとんど波力が作用していない場合でも、滑動量が若干ではあるが増加している。係数の設定には比較的大きな波力を用いたため、このような微小な波力が作用した場合の挙動については検討していない。よって、今後はこのような微小波力の作用下での挙動に対する滑動の再現を試みる必要がある。

図-9 に不規則波を作用させた場合のケーソンの傾斜角を示している。規則波と同様に、一波一波に対して傾斜動揺を繰り返し、岸側に傾斜している様子が再現できている。

5. おわりに

本研究によって以下のような主要な結論が得られた。

- 1) 剛体連結モデルを用いてケーソンを表現した場合に比べ、単一要素とした場合では滑動量に関して定性的な一致のみならず定量的な一致も見られた。また、傾斜運動に関しては、波が作用するにつれて徐々に岸側にケーソンが傾斜する様子が再現できた。
- 2) 規則波を作用させ続けることによって、岸側の被覆石がケーソンの滑動に抵抗する様子を再現することができた。
- 3) 被覆石がケーソンの滑動に対して抵抗する中で、幾つかの波条件においてはケーソンの滑動が拘束された影響によってケーソン後趾端の捨石の動きが異常になることがみられた。このことは、ケーソンが滑動した後に支持力破壊を起こすという被災の流れを個別要素法において再現できる可能性を示している。
- 4) 数値波動水路を用いて算定した、不規則波による波力をケーソンに作用させ、滑動量を計算した。作用するランダムな波力に対して、滑動量が変化していく様

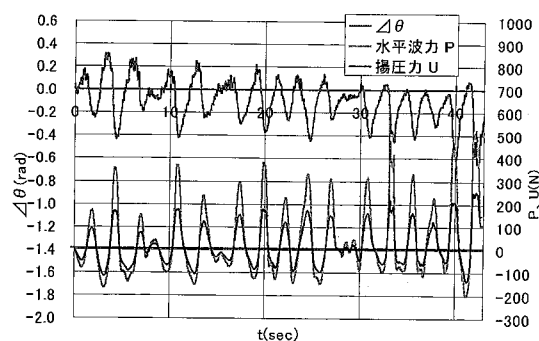


図-9 不規則波作用下での傾斜運動

子が再現できた。特に、滑動量は作用する波力の大きさのみならずその作用時間に影響を受けていることが分かった。傾斜運動に関しては、波が作用するにつれて岸側に傾斜する様子が規則波と同様に再現できた。

本研究によってケーソンの滑動量については実験を再現することができるようになったが、傾斜角については実験値よりかなり大きい。今後は、マウンド捨石の形状を楕円形だけではなく、矩形形状なども含む各種形状の捨石の集合として表現し、滑動や傾斜角に対する捨石の形状要素の影響についても検討し、計算モデルの再現性を高めたい。

参考文献

- 伊藤喜行・藤島睦・北谷高雄(1966): 防波堤の安定性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第5巻, 第14号。
 沿岸開発技術研究センター(2001): 数値波動水路の研究・開発 (CADMAS-SURF)。
 後藤仁志・酒井哲郎(2001): 粒状体モデルによる saltation・sheetflow 共存域の数値解析, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 936-940。
 下迫健一郎・高橋重雄(1997): モンテカルロ法を用いた混成防波堤の期待滑動量の計算, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 831-835。
 高山知司(1989): 信頼性理論による防波堤滑動の安定性に関する検討, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 673-677。
 高山知司・東良宏二郎(2002): 防波堤の被災特性に関する統計解析, 海洋開発論文集, 第18巻, pp. 263-268。
 高山知司・東良宏二郎・金 泰民(2004): 個別要素法を用いた混成堤の挙動計算, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 756-760。
 谷本勝利・古川浩司・中村廣昭(1996): 混成堤直立部の滑動時の流体抵抗力と滑動量算定モデル, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 846-850。
 藤井直樹・奥野俊也・安田勝則・大熊義夫(2000): 個別要素法によるケーソン防波堤の滑動計算, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 801-805。
 宮田正史・Graham G.W. Mustoe・Masami NAKAGAWA・菅野高弘(2002): 個別要素法による粒状体の荷重支持機構に関する研究, 国総研資料, 第33号。
 Tae-Min KIM and Tomotsuka TAKAYAMA (2004): EFFECT OF TILTING ON SLIDING DISTANCE OF A CAISSON, Annual Journal of Civil Engineering in the Ocean, JSCE, Vol.20, pp.89-94。