

混成堤における滑動を考慮した信頼性設計法の高精度化に関する検討

Research on Advanced Reliability Design of Composite Breakwaters based on Sliding Distance

下迫健一郎¹・千田奈津子²・有川太郎³・山野貴司⁴

Kenichiro SHIMOSAKO, Natsuko SENDA, Taro ARIKAWA and Takashi YAMANO

While the research on the deformation-based reliability design of composite breakwaters has been carried out for many years, sliding phenomena including rocking motion have not been carefully examined. In this study, hydraulic model experiments were conducted in a wave flume to investigate the characteristics of wave forces and sliding phenomena of the breakwater caisson. The difference of static friction coefficient and dynamic one should be considered in order to improve the estimation accuracy. Numerical simulation (CADMAS-SURF) can reproduce the time series of wave forces more precisely compared to the practical model used in the current calculation method, especially in deep water area.

1. はじめに

平成 19 年度施行の新しい「港湾の施設の技術上の基準・同解説」においては、構造物の設計が仕様規定型から性能規定型へと変更になり、防波堤の耐波設計では、従来の安全率による設計法から部分係数を用いた設計法へと変更される。また、これまでの基準においても、すでに変形を考慮した信頼性設計法を適用してもよいとの記述があり、今後はより精度の高い設計法の一つとして、変形を考慮した信頼性設計法の実務への適用がさらに進むことが予想される。

変形を考慮した信頼性設計法に関しては、これまでに数多くの研究が行われている。たとえば、直立部の滑動安定性に関して、下迫ら (1998) は、数値シミュレーションにより算定した供用期間中の滑動量を指標とする新しい設計法を提案しており、高知港においては、滑動量を考慮した設計法に基づいて実際に防波堤の建設が行われている (下迫ら, 2006)。

しかしながら、滑動量算定の基本となる滑動モデル自体に関する詳細な検討については、高木ら (2006) が大水深の非碎波領域における波力の時系列モデルについて、有限振幅重複波理論を用いる方法を提案しているものの、碎波領域も含めた一般的なモデルに関しては、谷本ら (1996) のモデル以降、ほとんど行われていない。本研究は、混成堤の滑動現象について、水理模型実験および数値シミュレーションによる詳細な検討を行い、従来の滑動量算定手法の問題点を明らかにして、設計法の高精度化を図ることを目的としたものである。

2. 滑動モデルの再検討

谷本ら (1996) は、混成堤のケーソンに作用する波力の時間変化について、三角形パルスと正弦波形とを組み合わせた時系列モデル (滑動モデル) を提案している。このモデルは、波力算定式として用いられている合田式における衝撃的成分と重複波的成分を適切に表しており、しかも波力が衝撃的になるほど、三角形パルスのピーク値は大きくなる一方で作用時間は短くなり、実際の波力の特性をよく表している。ただし、大水深域のように非碎波の波が作用する場合には、高木ら (2006) が指摘しているように実際の波力の時間変化とかなり異なってくる。また、碎波の場合についても、条件によっては三角形パルスの作用時間がかなり異なる場合もある。

また、滑動量の計算においては、ケーソン前面に作用する水平波力と底面に作用する揚圧力のみを考慮しているが、実際には越波によってケーソン上面に作用する波力や、越波や回折波によって生じる防波堤背後の水位変動による波力の変化も生じるが、これらの影響については考慮されていない。

さらに、滑動が生じない場合でも、ある程度以上の波力が作用すると、ケーソンとマウンドおよび基礎地盤が一体となって弾性的挙動を示す、いわゆるロッキング現象が発生する。従来の滑動モデルにおいては、こうしたロッキングの影響は考慮せず、波作用後の残留変位のみに着目して滑動量を計算しているが、実験結果等とは比較的一致している。しかしながら、ロッキングがケーソンの滑動だけでなく、マウンドも含めた防波堤全体の変形にどのような影響を与えているのかは明らかではない。

3. 水理模型実験

(1) 実験の概要

実験は、図-1 に示す小型造波水路 (長さ 36 m, 幅

1 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 耐波研究室長
2 (独法)港湾空港技術研究所 耐波研究室
3 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 主任研究官
4 修(工) (独法)港湾空港技術研究所 耐波研究室

0.48 m, 高さ 1 m) で実施した。造波板前面から堤体前面までの距離は 27.64 m である。実験に使用したケーソン模型は、底面の床版のみがモルタル製で、その他はアクリル合成樹脂製である。

図-2 は堤体の断面を示したものである。実験断面および波浪・潮位の条件は、実際に滑动被災のあった現地の防波堤を参考に、模型縮尺 1/34 程度で再現している。ただし、ケーソン重量については、ケーソン内のおもりの重量を 2 種類に変化させ、いずれの場合も現地の重量よりも相対的に軽くした。これは、比較的小さい波高でも滑动が生じるようにして、波力の作用時間の違いが滑动量に及ぼす影響を詳細に検討するためである。

実験では、ケーソンに作用する波力とケーソンの変位量を計測した。波力については、通常の設計で考慮される前面に作用する水平波力と底面に作用する揚圧力だけでなく、ケーソン上面に作用する打ち込み波力、伝達波によるケーソン背面の圧力、ケーソン側面の波力も計測

し、滑动に及ぼす影響について検討した。図-3 は、計測器の配置を示したものである。ケーソンの前面に 4 箇所、上面、底面に各 2 箇所、側面、背面に各 1 箇所、波圧計を取り付けている。また、ケーソン背面には、ばね式の変位計を 2 台設置し、波作用時のケーソンのロッキングおよび滑动量を計測した。

実験波は規則波を用い、周期については現地における被災時の有義波周期に合わせて $T=2.48$ s のみとした。有効作用波数は 6 波である。また、潮位については被災時の潮位を中心に行ったが、一部潮位の低いケース（設計潮位相当）についても実施した。波高については、8.3 ~ 28.2 cm まで 4 段階に変化させて行った。

(2) 波力特性

a) 波力の時間変化

図-4 は、ケーソンに作用する波力の時間変化の例を、波高 H が 25.0 cm のケースの第 1 波について示している。それぞれの波力は、各点の波圧計により得られた波圧に分担面積をかけて足し合わせ、ケーソン 1 函（水路幅方向の長さ 40 cm）あたりの合力として表示している。ここに、全水平波力 F_H は前面水平波力 F_F と背面水平波力 F_R の合力、全鉛直波力 F_V は揚圧力 F_U と天端面に作用する打ち込み波力 F_T の合力（上向きを正）である。

背面の水平波力は、おもに越波による防波堤背後の水位変動によるものであるが、このほかに、ごくわずかながらマウンドからの透過波の影響もある。また、今回の実験では、ケーソンが水路側壁にぶつかって滑动が止まることを防ぐため、ケーソンと水路との隙間を約 2 cm とやや広く取っているため、そこからの透過波の影響も含まれている。ただし、背面水平波力が大きくなるのは前面水平波力がかなり小さくなってからであり、ケーソンの滑动はほとんど止まっている場合が多く、滑动量への影響はほとんどないと考えられる。なお、実際の現地においては、堤頭部や孤立面の状態においては、前面波力が最大となるとともに回折波の影響によって背面水位が変化している可能性があり、滑动量に影響を及ぼすものと考えられる。

一方、鉛直波力に関しては、越波水が天端面へ落下する際に衝撃的な打ち込み波力が作用している。ただし、これについても前面水平波力とは位相差があるため、滑动量に及ぼす影響は比較的小さいものと思われる。なお、今回の実験では対象としていないが、消波ブロック被覆堤の場合にはブロック斜面を遡上するようにして越波するため、比較的小さい時間に天端面への波力が作用することになる。このため、ケーソンの滑动にブレーキが掛かり、滑动量が小さくなると考えられる。

さらに、滑动に対する水平波力と鉛直波力の影響を合わせて考えるため、滑动合成波力 F_S を定義し、その時

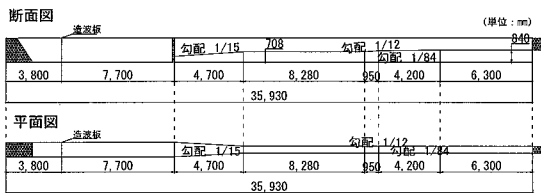


図-1 実験水路

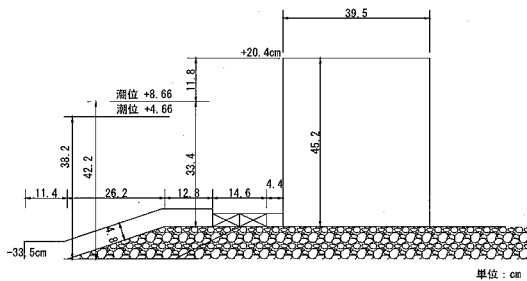


図-2 実験断面

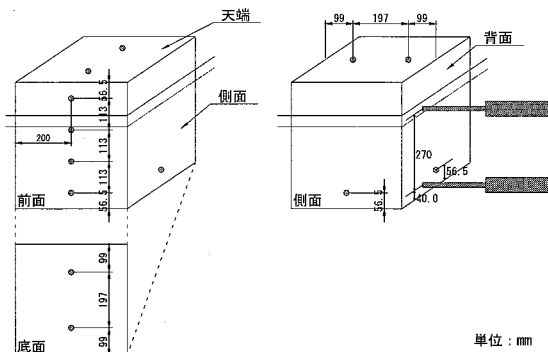


図-3 計測器配置図

間変化についても検討している。なお、背面水平波力および打ち込み波力の影響を考慮するため、以下のように3通りの滑動合成波力を定義した。

$$F_{S1} = F_F + \mu F_U \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$F_{S2} = F_F + \mu F_V \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$F_{S3} = F_H + \mu F_V \quad \dots\dots\dots (3)$$

すなわち、 F_{S1} は前面水平波力と揚圧力のみを考慮したもの、 F_{S2} は F_{S1} に打ち込み波力の影響を追加したもの、 F_{S3} はさらに背面水平波力の影響も追加したものである。ここに、 μ はケーソン底面と基礎マウンド上面との摩擦係数であり、設計では0.6が用いられ、実験においても通常は平均的に0.6程度となる。ここでも、 $\mu=0.6$ とした場合の結果を示した。 F_{S1} と F_{S3} を比較すると、波力が最大となるピーク（前述の滑動モデルにおける三角形パルス部分）についてはほとんど違いがないものの、 F_{S3} の場合、そのあとの腰掛け部（正弦波形部分）については、背面波力および打ち込み波力の影響によって大幅に小さくなっていることが分かる。

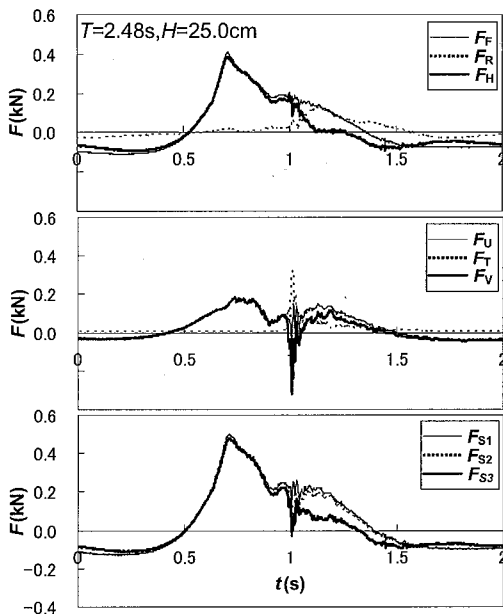


図-4 ケーソンに作用する波力の時間変化の例

b) 滑動モデルおよび CADMAS-SURF との比較

実験と同じ断面および波浪条件を対象として、数値波動水路(CADMAS-SURF) (沿岸開発技術研究センター, 2001)を用いて波力の時間変化について数値計算を行い、滑動モデルおよび実験結果と比較した。図-5は、前面

水平波力 F_F の時間変化について、滑動モデル、実験結果、CADMAS-SURF の計算値を比較したもので、波高の小さい $H=8.3$ cm (非碎波) の場合と、波高の大きい $H=25.0$ cm (碎波) の場合の2つの例を示している。なお、滑動モデルと CADMAS-SURF の計算値については、波力が最大になる時刻が実験結果の波形と一致するよう、位相を調整している。

非碎波の場合、計算値は実験結果とよく一致しているのに対して、滑動モデルは波力のピーク値がやや小さく、波形も実験結果を再現できていない。これは、波高水深比が比較的小さい条件の場合、合田式では波力をやや小さめに見積もる場合があること、また、時間変化も二山型の波形にならないためであり、高木ら (2006) が指摘しているとおりである。

一方、碎波の場合、ピーク値はいずれも同程度の値となっているが、波形としてはそれぞれ異なっている。ピーク付近で波力が増加するときの勾配は、数値計算結果と実験結果が比較的良好に一致しており、一方、減少するときの勾配は、滑動モデルと実験結果が比較的近い。三角形パルス部の継続時間については、滑動モデルと実験結果が比較的近くなっている。

なお、今回の実験ではそれほど衝撃的な波力は作用していないが、きわめて衝撃的な波力が作用する場合には、実際に滑動に寄与する有効な波力（底面に働くせん断力）は、波力そのもののピークよりも小さく、作用時間はやや長くなる（高橋ら, 1994）が、滑動モデルには、こうした影響が考慮されている。

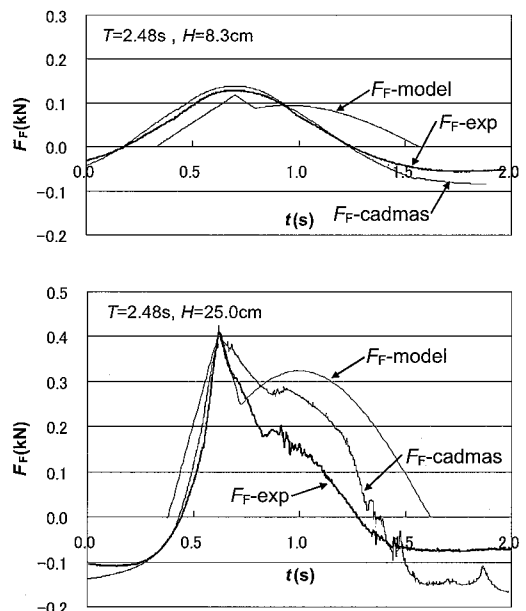


図-5 前面水平波力の実測波形と計算波形

(3) 波力と滑動量の関係

a) 波力と変位の時間変化

図-6 は、実験における波力と変位の時間変化の例を、図-4 と同じケースについて示したものである。図中には後述する滑動の計算波形 X_{CE} も合わせて示している。

背面水平波力および打ち込み波力を考慮した滑動合成波力 F_{S3} については、点線で滑動限界波力（摩擦係数 $\mu=0.6$ と仮定）を示している。理論上は、滑動合成波力が滑動限界波力を超えると滑動が始まることになるが、実際にはそれよりも早くケーソンの変位が始まっている。これは、主にケーソンとマウンドが一体となって弾性変形（ロッキング）するためである。この例では、上側変位 X_1 （上端から 142 mm での変位）は最大約 5 mm であるが、最終的な残留滑動量は約 2.4 mm で、残りの 2.6 mm 分がロッキングによる変位であると見なすことができる。

上側変位 X_1 のほうが下側変位 X_2 （下端から 40 mm での変位）に比べて最大変位が大きくなっているが、これはロッキング変位には水平変位と回転変位があり、下側のほうはマウンド面にきわめて近く回転変位がほとんど生じないのに対して、上側では回転変位の影響が大きくなるためである。また、残留変位も上側のほうが大きくなっていることから、この波によって、ケーソンが滑動すると同時に、わずかに港内側へ傾いたことも分かる。

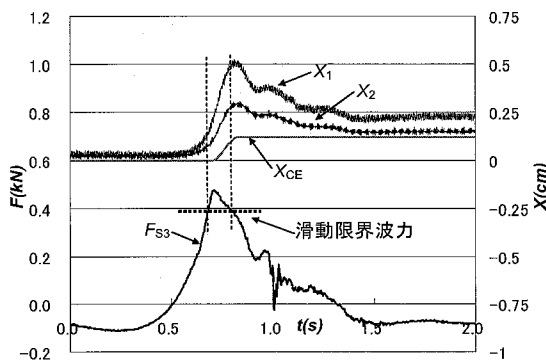


図-6 波力と変位の時間変化の例

b) ロッキング変位と残留変位

滑動に対するロッキングの影響を検討するため、図-6 で定義した方法でロッキング変位と残留変位を分離し、その値を比較した。図-7 は、横軸に滑動合成波力 F_{S3} をとり、縦軸に 1 波ごとの下側変位 X_2 のロッキング変位と残留変位（滑動量）の関係を示したものである。ロッキング変位は弾性変位であるので、滑動合成波力にほぼ比例して増加するが、波力が滑動限界以上になると頭打ちとなっていることが分かる。これに対して、残留変位は当然ながら滑動限界に達するまではほとんど 0 であ

り、その後急激に増加する。

なお、今回の実験ではマウンドの下が固定床であるため、現地に比べると弾性係数がやや大きいと考えられる。すなわち、現地では相対的にロッキングによる変位が大きいと考えられる。

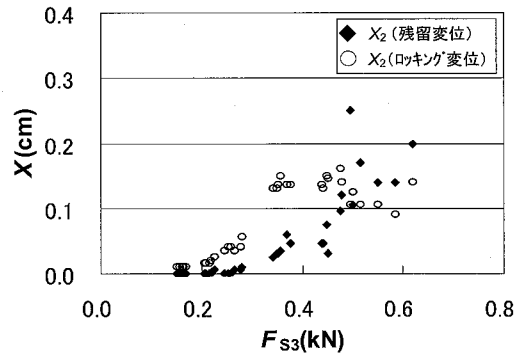


図-7 ロッキング変位と残留変位

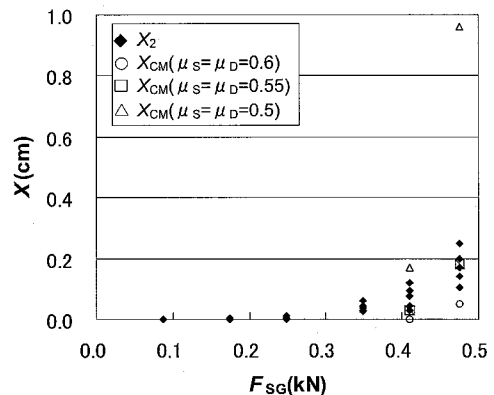


図-8 滑動モデルによる計算値と実験値の比較

c) 滑動量の再現計算

図-8 は、今回の実験条件に対応した滑動モデルによる波力の時系列データを用いて、運動方程式に基づいて得られる滑動量の計算値 X_{CM} と、実験における下側変位 X_2 の 1 波ごとの残留変位を比較したもので、横軸は合田式による滑動合成波力の計算値 F_{S3} である。計算値については、比較のため静止摩擦係数 μ_s と動摩擦係数 μ_D を 0.6, 0.55, 0.5 の 3 種類に変化させている。今回の実験では、 $\mu_s = \mu_D = 0.6$ とした場合には計算値のほうがやや小さく、 $\mu_s = \mu_D = 0.55$ とした場合に滑動量はほぼ一致する。ただし、実際には必ずしも摩擦係数の影響だけでなく、波力のピーク値および継続時間の誤差の影響も大きいと考えられる。なお、 $\mu_s = \mu_D = 0.5$ の場合の計算値で非常に大きな滑動量が生じているのは、滑動限界波力が滑動モデルにおいて重複波成分を表す正弦波のピークよりも小さくなり、滑動の継続時間が非常に

長くなるためである。

一方、図-9は実測波力の時系列データから得られる滑動量の計算値 X_{CE} と、実験における下側変位 X_2 の1波ごとの残留変位を比較したもので、横軸には滑動合成波力の実測値 F_{S3} をとっている。ここでは、より現実的な滑動現象を再現するため、静止摩擦係数 μ_s と動摩擦係数 μ_D を区別して計算値の比較を行った。

$\mu_s = \mu_D = 0.6$ の場合、滑動量の計算値は実測値よりかなり小さい。そこで、 $\mu_s = 0.6$ 、 $\mu_D = 0.5$ とすると、実測滑動量が0.1 cm以上の範囲では、計算結果と実験結果は比較的よく一致している。さらに静止摩擦係数を小さくして、 $\mu_s = 0.55$ 、 $\mu_D = 0.5$ にすると、滑動量の小さい領域でもかなり滑動量が一致している。このことから、波力の時間変化が比較的精度良く分かっている場合、滑動量を正確に算定するためには、静止摩擦係数と動摩擦係数の両方の値を適切に評価することが重要であると考えられる。なお、波力が大きい条件の場合に静止摩擦係数が小さくなくても滑動量があまり変化していないのは、波力の時間変化の立ち上がりがきわめて急であり、滑動限界波力を超える時刻がほとんど変わらないためである。

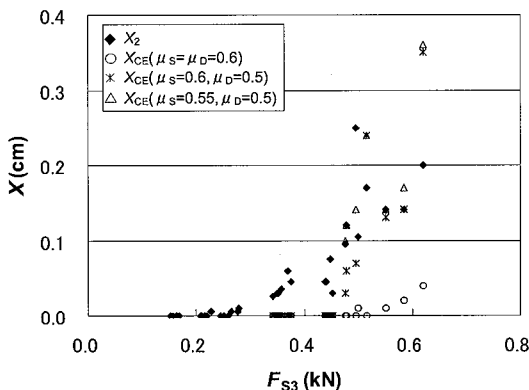


図-9 実測波力に基づく計算値と実験値の比較

前述の図-6には、 $\mu_s = 0.55$ 、 $\mu_D = 0.5$ とした場合の実測波力に基づく変位の計算値 X_{CE} の時系列データを示し、実測データと比較している。実測変位にはロッキング変位が含まれるため波形は一致しないものの、残留変位がほぼ一致しているだけでなく、計算値の変位が一定になる時刻と、実測変位が最大になっている時刻がほぼ一致している。したがって、このケースの場合、ロッキングを除いた実際の滑動現象による残留変位をよく再現できていると考えられる。

4. ま と め

本研究の主要な結論は以下のとおりである。

(1) 従来の滑動モデルは、平均的には波力の時間変化を

ある程度適切に表しているが、波高水深比の小さい非碎波の条件では、波力の時間変化を適切に再現できていない。こうした条件で、有限振幅重複波理論を用いるか、CADMAS-SURFなどの数値計算を用いて滑動量をより正確に算定する必要がある。一方、碎波領域では波力のピーク値および継続時間のばらつきが大きいこと、滑動モデルと数値計算結果の差があまり大きくないことから、現状においては従来の滑動モデルを用いてよいと考えられる。

(2) 実測波力から滑動量を算定する場合、静止摩擦係数と動摩擦係数の値を変えることにより、実際の滑動量により近づくことが分かった。実験ケースが少ないため動摩擦係数の適切な値を評価することはできないが、波力の時間変化を正確に再現できる場合、静止摩擦係数と動摩擦係数の違いを適切に考慮することで、滑動量の算定精度が向上すると考えられる。すなわち、従来の滑動モデルは波力の時間変化や摩擦係数の変化を必ずしも正確に表しているわけではないが、結果的に比較的滑動量が一致していると考えられるべきである。

(3) 条件によっては、従来の滑動モデルで考慮していない越波による打ち込み波力や背面の水位変動の影響が滑動量に影響を及ぼす場合があり、これらの影響についても適切に考慮する必要がある。

なお、将来的には、CADMAS-SURFの計算結果を滑動量の計算プログラムに直接取り入れることにより、滑動量の算定精度が向上するだけでなく、従来の滑動モデルで計算できなかった上部斜面ケーソンや直立消波ケーソンなど形状の複雑な防波堤の滑動量も計算可能となる。ただし、現状では非常に計算時間がかかるため、あらかじめいくつかのケースについて計算を行い、従来の滑動モデルに代わる適切なモデル化を行って滑動量の計算に用いるのが現実的な対応である。

参 考 文 献

- 下迫健一郎・高橋重雄(1998): 期待滑動量を用いた防波堤の信頼性設計法, 港研報告, 第37巻, 第3号, pp. 3-30.
- 下迫健一郎・大暮菜々子・中野史文(2006): 滑動量を要求性能に設定した混成堤の信頼性設計法, 港空研報告, 第45巻, 第3号, pp. 3-23.
- 高木泰士・柴山知也(2006): 大水深地点におけるケーソン式防波堤の信頼性設計手法の提案, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 901-905.
- 高橋重雄・下迫健一郎・上部達生(1994): 衝撃碎波力に対する防波堤ケーソンの動的挙動, 港研報告, 第33巻2号, pp. 59-86.
- 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.
- (財)沿岸開発技術研究センター(2001): 数値波動水路の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリー, No. 12