

混成防波堤の期待滑動量の計算法

下迫健一郎*・高橋重雄**

1. まえがき

現在の混成防波堤の設計は確定論的であり、ケーソンがわずかでも滑動したら被災と考える。しかしながら、実際には多少滑動しても防波堤の機能を損なうわけではなく、経済的な設計としては滑動を許容することも考えられている。ただし、その場合は滑動限界を上回る波力に対して滑動量を適切に予測できることが不可欠である。

伊藤ら(1966)は、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るべきであるという考えに基づいて、期待滑動量の概念を提唱した。また、堀川ら(1972)も期待滑動量について検討している。しかしながら、当時は波圧を精度よく表すことがまず問題であり、滑動量を適切に計算することは困難であったため、実際の設計に取り入れられることはほとんどなかった。

現在では、合田(1973)による波圧算定公式が設計に取り入れられ、より適切な波力の計算が可能であり、期待滑動量を設計に取り入れる条件は整いつつあるといえる。

一方、最近で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、信頼性理論による防波堤の設計法(高山, 1989)についても研究が進められており、防波堤の滑動確率を算定する方法も提案されている。しかしながら、将来の信頼性設計においては滑動確率だけでは不十分であり、滑動量の確率分布や期待値(期待滑動量)を考慮した設計法の確立が必要である。

本報告は、期待滑動量の予測を設計に導入することを目的とし、まず衝撃砕波力を含む種々の波力に対するケーソンの滑動特性を明らかにするとともに、滑動量の算定法を検討するものである。

2. 模型実験

(1) 実験方法

ケーソンの滑動のメカニズムを明らかにするために、まず水理模型実験を実施し、滑動時の波力や変位の時間変化を検討した。特に、重複波力作用時と衝撃砕波力作用時との滑動現象について検討を行った。

図-1は、実験における堤体の断面を示したものである。衝撃砕波力の場合には、図-1において破線で示した部分に消波ブロックを設置し、ケーソン前面での砕波を促進している。ケーソン背面の2か所に変位計を取り付け、波作用時のケーソンの動きを測定した。また、前面および底面には超小型の波圧計を取り付け、各測点に作用する波圧を測定した。さらに波力作用時のケーソンの加速度も測定し、慣性力を求めている。

実験は規則波で行い、周期(T)が2.6s, 3.04s, 3.48sの波を用いて波高をそれぞれ4~5段階に変化させて実施した。

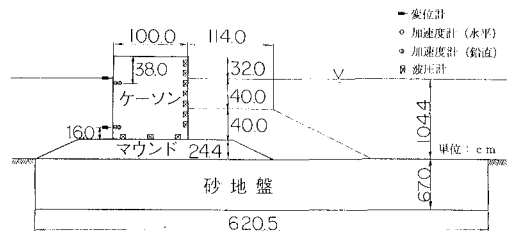


図-1 模型実験における堤体断面図

(2) 重複波による波力と滑動の特性

図-2は、重複波が作用する場合の波力や変位等の波形の例である。上から順に、水平波力 P 、揚圧力 U 、滑動合成波力 $F_s(=P+\mu U)$ 、ケーソンの重心における変位の実測値 x_{GEXP} 、滑動量の計算値 S_{CAL} を示している。ここに、 μ はケーソン底面とマウンドとの摩擦係数であり、ここでは0.6を用いている。滑動合成波力はケーソンの滑動安定性を検討する場合に用いる波力であり、 F_s が滑動抵抗力 $\mu W'$ (W' はケーソンの水中重量)よりも大きくなるとケーソンは滑動する。

F_s と x_{GEXP} の位相を比べてみると、変位が始まるのは、 F_s の値が $\mu W'$ を超えるよりも前であることがわかる。

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部主任研究官
** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部耐波研究室長

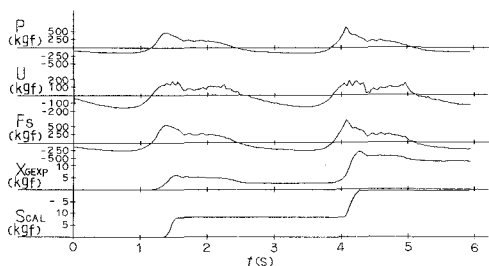


図-2 重複波の場合の波力および変位波形の例

ただし、変位のなかには波力作用後にもとに戻る成分が含まれている。図中では、変位のピーク値と波力作用後の変位の差がこれに相当する。これは、マウンドおよび地盤がばねのような働きをすることによるもので、滑動と区別するために、ここではばね変位と呼ぶことにする。実際にケーソンの滑動が始まるのは、変位の増加が大きくなり始めるころ、すなわち、 F_s が μW を超えるころと考えられる。また、変位が最大となるのは F_s の値が μW よりも小さくなった後であり、このときに滑動は停止したと考えられる。その後ばね変位は徐々にもとに戻っているが、その波形は F_s の変化にほぼ対応しており、ばね変位が完全に戻るのは F_s が0となる時刻と一致している。

ケーソンの滑動変位は、ケーソンの運動方程式から計算することができる。マウンドを剛体であると仮定すると、運動方程式は次式で表される。

$$\frac{W}{g} \ddot{x}(t) = P(t) - \mu(W - U(t)) = F_s(t) - \mu W \dots \dots \dots (1)$$

なおケーソンの質量 W/g については、厳密には水の付加質量も考慮すべきであるが、ここでは簡単のため、考慮していない。ここで、 $t=t_1$ で $F_s = \mu W$ となり、 F_s が μW を上回ったあと、 $t=t_2$ で再び $F_s = \mu W$ となるとすれば、時刻 t_1 から t_2 までのケーソンの滑動量 S_1 は、式(1)を2回積分することにより、次のように表される。

$$S_1 = \frac{g}{W} \int_{t_1}^{t_2} \left\{ \int_{t_1}^t (F_s(t) - \mu W) dt \right\} dt \dots \dots \dots (2)$$

次に、時刻 t_2 においてもケーソンは運動しており、 $t=t_3$ でケーソンの滑動が停止するとすれば、時刻 t_2 から t_3 までのケーソンの滑動量 S_2 は、次式で計算される。

$$S_2 = \frac{W(\dot{x}(t_2))^2}{2g\mu W} \dots \dots \dots (3)$$

ケーソンの総滑動量は $S_1 + S_2$ で求められる。図-2における S_{CAL} は、ばね変位を含まない滑動変位の計算値の時間変化を示したものである。変位の実測値 X_{GEXP} と比べると、最終的な総滑動量はやや大きいものの、滑動が停止する時刻 (X_{GEXP} において変位が最大となる時刻) は

ほぼ一致している。ただし、実際の滑動量は後述するようにはばつきが大きく、ここに示したケースと同じ程度の波力が作用しても、滑動しない場合もある。

(3) 衝撃碎波による波力と滑動の特性

衝撃波力が作用する場合、ケーソンはマウンドおよび地盤と一体となって運動し、ケーソンの滑動に寄与する波力、すなわち底面に働くせん断力はあまり大きくならない(高橋ら, 1994)。そのため、衝撃波力に対する滑動安定性の検討には、水平波力のかわりにせん断力を用いることが重要である。なお、重複波の場合はケーソンの加速度がきわめて小さいため、2.2で示したケースでは水平波力とせん断力はほとんど同じとなる。図-3は、衝撃碎波が作用する場合の波力や変位等の波形の例を、図-2と同様に示したものである。上から順に、水平波力 P 、ケーソンに働く慣性力 $m\ddot{x}_G$ 、せん断力 F_T 、揚圧力 U 、滑動合成波力 F_s 、ケーソンの重心における変位の実測値 X_{GEXP} 、滑動量の計算値 S_{CAL} を示している。ここに、 $F_T = P - m\ddot{x}_G$ であり、また、滑動合成波力については水平波力のかわりにせん断力を用い、 $F_s = F_T + \mu U$ としている。

水平波力とせん断力の波形を比べると、せん断力のほうがピークがやや小さく、そのあと慣性力が負のピークとなるときには逆にせん断力のほうが大きくなっている。また、せん断力と揚圧力のピークに位相差があり、揚圧力のほうがピークとなる時刻が遅くなっている。ただし、揚圧力のピーク値はせん断力に比べてかなり小さいため、滑動合成波力に与える影響はあまり大きくない。

F_s および X_{GEXP} の波形をみると、重複波の場合に比べて立ち上がり急であり、衝撃碎波力と変位の始まりはほとんど同時である。変位が最大となるのが F_s の値が μW よりも小さくなった後であることや、ばね変位がみられることは重複波の場合と同じである。ただし、ばね変位の戻りが早く、波力が腰掛け部になる時刻にはほぼ

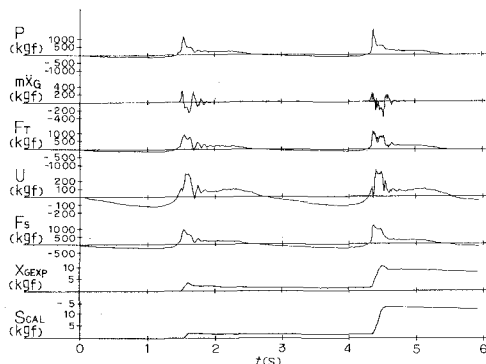


図-3 衝撃碎波の場合の波力および変位波形の例

もとに戻っていることから、主として波の周期ではなくケーソン自身の固有周期で運動していると考えられる。

ばね変位を含まない滑動量の計算値 S_{CAL} は、 x_{GEXP} と比べると2波めの滑動量がやや大きいものの、比較的よく一致している。

3. 滑動モデルによる滑動量の算定

(1) 滑動モデル

ケーソンに働くせん断力と揚圧力による滑動合成波力のピーク値とその時間変化がわかれば、ケーソンの滑動量を計算できる。実際の設計において滑動量の予測を行うためには、波力の時間変化について何らかのモデル化を行う必要がある。

谷本ら (1988) は、波力の時間変化が有限振幅重複理論による直立壁前面の水位変化に比例するものとし、剛マウンドにおける滑動モデルを提案している。このモデルは、大水深重複波領域のように引き波時の波力が相対的に大きく、冲向きの滑動も考慮する必要がある場合に有効であるが、計算がやや複雑である。

通常の設計条件では、冲向きの滑動を考慮する必要があるケースはまれであり、岸向きの滑動のみを考える場合は、波力としては正のピーク付近のみをモデル化すればよい。今回考案したモデルは波力として滑動合成力を用い、図-4に示すような作用時間 τ_0 の三角形パルスで近似した。すなわち、次式のように表される。

$$F_s(t) = \begin{cases} \frac{2t}{\tau_0} F_{Smax} & (0 \leq t \leq \frac{\tau_0}{2}) \\ 2\left(1 - \frac{t}{\tau_0}\right) F_{Smax} & (\frac{\tau_0}{2} \leq t \leq \tau_0) \\ 0 & (t \geq \tau_0) \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

実際の波力波形は必ずしも三角形パルスではないが、滑動に影響するのは図中の斜線部分のみで、ピーク付近の近似としては十分である。式(4)を用いて式(2)および式(3)を計算すると、総滑動量 S は、次式で表される。

$$S = S_1 + S_2 = \frac{g\tau_0^2(F_{Smax} - \mu W')^3(F_{Smax} + \mu W')}{8\mu W W' F_{Smax}^2} \dots\dots\dots (5)$$

なお、図-4には、この滑動モデルによる変位の時間変化の例もあわせて示しており、第2章で述べた波力と変位の位相差を適切に表していることがわかる。また、 S_1 と S_2 では、 S_1 のほうが大きな割合を占めている。

本モデルでは F_{Smax} と τ_0 をどのように与えるかが重要である。 F_{Smax} については、従来の設計で用いている合田式による波力を用いればよい。ただし、衝撃砕波力の算定には、著者ら (1992) が提案した衝撃砕波力係数 a_1 を、合田式における a_2 のかわりに用いる必要がある。衝撃砕波力係数は滑動実験結果に基づいており、底面せん断力を直接評価したものである。

一方、 τ_0 については、波の周期や波力の大きさによって異なる。一般に、波高がある程度大きくなると有限振幅性が顕著になり、正の波力の作用時間は周期の1/2よりも短くなる。また、波力が衝撃的になるにつれて作用時間はさらに短くなる。ただし、衝撃的波力の場合は、せん断力は実際にはケーソンの固有周期に依存するようになる。ここでは、有限振幅性については有限振幅重複理論による水位が正となる時間 τ_{0F} を用いることで考慮し、これに、衝撃的な影響を考慮する係数 k をかけて補正する。すなわち、次式のように τ_0 を定義する。

$$\tau_0 = k\tau_{0F} \dots\dots\dots (6)$$

τ_{0F} の値は実用的には次式で近似する。

$$\tau_{0F} = \left(0.5 - \frac{H}{8h}\right) T \quad \left(0 < \frac{H}{h} < 0.8\right) \dots\dots\dots (7)$$

また、 k については、模型実験における実測波形などをもとに、次式のように定めた。

$$k = \left(\frac{1}{(\alpha^*)^{0.3} + 1}\right)^2 \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $\alpha^* = \max\{a_1, a_2\}$ である。衝撃力成分を表す α^* が0のときは $k=1$ であり、 α^* が大きくなるほど k は小さくなる。

(2) 滑動量の計算値と実測値の比較

図-5は、規則波を用いた模型実験における滑動量の実測値と、滑動モデルによる計算値を比較したものである。縦軸は1波ごとのケーソンの滑動量であり、横軸は底面せん断力の実測値から求めた滑動安全率である。実験結果はかなりばらついているが、滑動モデルによる計算値は、実測値の平均的な値よりもやや安全側の値となっている。また、重複波の場合と衝撃砕波の場合を比較すると、同じ安全率であれば、作用時間の長い重複波のほうが一般に滑動量大きいこともわかる。

実測値が計算値よりもやや小さくなる理由としては、波力の作用時間や摩擦係数の影響などが考えられる。ま

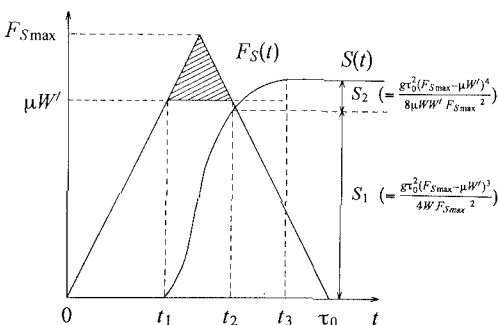


図-4 滑動モデル

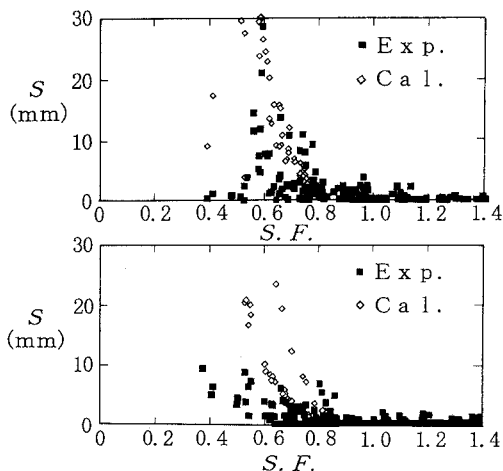


図-5 模型実験における滑動量の計算値と実測値の比較

た、ケーソンに他用する回転力のため、ケーソン後趾がマウンドの中へややめり込むようにして滑動することがあり、剛マウンド上を水平に滑動する場合に比べて滑動量が小さくなることも考えられる。

また、滑動量がかなりばらいているが、これは、滑動現象の一つであり、波力ピーク値のばらつきだけでなく、継続時間や摩擦係数のばらつきも考慮する必要があることを示している。なお、同じ安全率に対して異なる計算値があるのは、堤体重量が異なるケースでは滑動量の計算値も異なるためである。

4. 現地における期待滑動量の計算例

信頼性設計において防波堤の滑動量を予測する場合、耐用期間中の総滑動量の期待値（期待滑動量）を求める必要がある。そのためには、耐用期間中に来襲するすべての波を推定し、前述の滑動モデル等を用いて滑動量を計算しなければならない。この場合、沖波波高の推算精度、防波堤設置点までの波浪変形計算の誤差、波力公式の算定誤差、摩擦係数のばらつきなどの不確実な要素を含むことになる。実際の設計に適用する場合は、これらの変動誤差についても十分に検討する必要がある。

ここでは、一つの計算例として、ある地点で実際に計測された約9年間の波浪データを用いて、水深の異なる2か所に仮定の防波堤を設定し、その総滑動量の予測を試みた。図-6は、設定した防波堤の断面形状を示したものである。断面Aは $H=12.1\text{m}$ に対するものであり、計算において設計波高が変わっても形状は変えず、重量のみを変化させている。また、断面B、Cは $H=10.8\text{m}$ を対象としたもので、断面Aと同様に重量のみを変えている。なお、断面Cは模型実験と同様に防波堤前のマウンド上に消波ブロックを設置して水深を浅くし、衝撃砕波

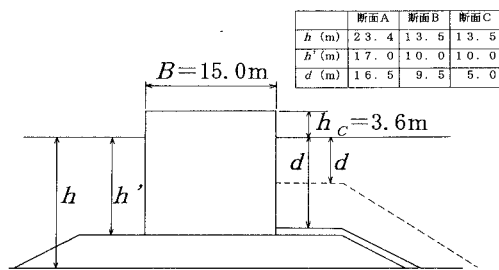


図-6 設定した防波堤の断面形状

を促進したものである。

(1) 波高と期待滑動量

図-7は、9年間の波浪データをもとに作成した波高の頻度分布を確率密度で表したものである。実線が水深23.4mの観測地点のデータであり、これから水深13.5mの場所での波高分布を求めている。実際の設計においては耐用年数(30年あるいは50年)の波高の頻度分布とそのばらつきを知る必要があるが、ここでは9年間に限っており、また、ばらつきも考慮していない。なお、たとえば水深23.4mの場合、 $H=12.1\text{m}$ 以上の波は9年間で3.7回あり、 $H=10.5\text{m}$ 以上の波は36.3回ある。ここに、 $H=12.1\text{m}$ は9年間の最大有義波高の1.8倍であり、 $H=10.5\text{m}$ は年間最大有義波高の平均値の1.8倍である。一方、水深13.5mでは、 $H=10.8\text{m}$ より大きい波は砕波するため存在せず、 $H=10\text{m}$ 以上の波も7.4回と少ない。

図-7には、水深23.4mで設計波高 H_D を変えたときの1波あたりの滑動量が示してある。たとえば $H_D=12.1\text{m}$ で $S.F.=1$ として設計すると、 $H=18\text{m}$ の波によって1波で72m滑動することになる。この1波あたりの滑動量と波高分布から、それぞれの設計波高に対する期待滑動量が太線のように求められる。たとえば、 $H_D=12.1\text{m}$ では期待滑動量はわずか0.6mであるが、 $H_D=10.5\text{m}$ とすれば約45cmとなる。将来の設計ではこの期待滑動量から逆に設計波高を決めることも考えられる。ただし、実際には同じ波高であっても波力の大きさや継続時間、さらに摩擦係数や堤体重量のばらつきなども考慮して、期待滑動量を求める必要がある。

(2) 安全率と期待滑動量

図-8は、 $S.F.=1.0$ で設計した断面に対して、重量を変えた場合の期待滑動量を計算した例である。断面Aについては $H_D=12.1\text{m}$ 、断面B、Cについては $H_D=10.8\text{m}$ としている。横軸は、各重量に対する $S.F.$ で示しており、断面Cにおいて衝撃砕波力の発生を予測せず、断面Bの波力で設計した場合の結果も示している。今回の計算条件では、同じ安全率で断面AとBを比較すると、断面Aのほうが期待滑動量が大きくなっている。これは、

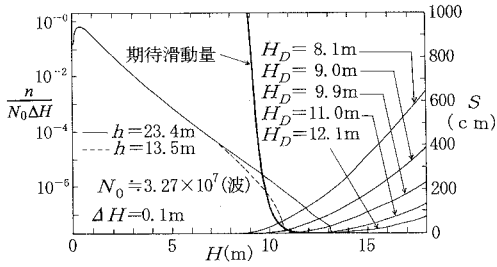


図-7 波高の頻度分布と1波当たりの滑動量

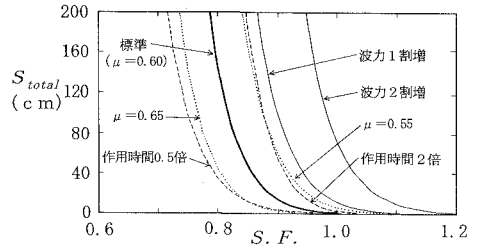


図-9 波力および摩擦係数のばらつきによる総滑動量の変化

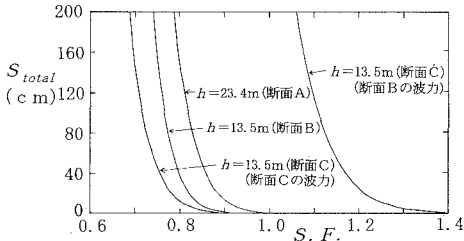


図-8 現地における防波堤の総滑動量と滑動安全率の関係

断面Aの場合は碎波によって波高の上限が決まっているのに対し、断面Bの場合は確率は小さいものの、設計波高よりも大きな波が来る可能性があるためである。たとえば、安全率0.9および0.8のとき、断面Aでは総滑動量はそれぞれ13.4cm、139.3cm、一方、断面Bでは0.8cm、36.9cmとなっている。

断面Cについては、衝撃碎波の影響で断面Bに比べて約1.5倍の波力が作用するため、断面Bの重量のままでは安全率1.2でも総滑動量は23.8mである。ただし、波力に応じて重量を増加した場合、同じ安全率では断面Bよりも総滑動量は小さい。

(3) ばらつきと期待滑動量

図-9は、波力の算定誤差、作用時間 τ_0 および摩擦係数のばらつきによる期待滑動量の変化を、 $h=23.4$ mの場合について示したものである。横軸は、 $H_D=12.1$ m、 $\mu=0.6$ で波力および作用時間が標準値の場合の滑動安全率 S.F. を、図-8と同様にとっている。波力が標準値よりも大きいと滑動量がかなり大きくなるのがわかる。たとえば S.F.=1.0 でみると、標準値の波力では期待滑動量は0.6 m であるが、波力が1割大きいと10.9 cm、2割大きいと71.8 cm にもなる。同様に、摩擦係数が0.55 に低下した場合には、S.F.=1.0 での期待滑動量は5.7 cm になる。一方、 τ_0 が2倍になると、式(7)から明らかなように滑動量は4倍になる。

これらのばらつきは現地においても予想されるものであり、さらに、今回は考慮していないが、沖波波高のばらつきや波浪変形計算の誤差なども考えられる。設計に

おいてはこれらの影響についても検討する必要がある。なお、ある程度滑動が進行すると、摩擦係数が低下して滑動抵抗力が小さくなり、より滑動しやすくなる場合もあり、また、逆にケーソン後趾がマウンドへめり込み、動きにくくなる場合もある。さらに、1 函のケーソンが滑動するとそこでの波の共振現象によって入射波高が大きくなることもある。今回の計算ではこうした影響については考慮していないが、実際の設計においてはこれらの点についてもさらに検討する必要がある。

5. あとがき

本研究では、せん断力とそれによる滑動合成波力に基づいた比較的簡単な混成防波堤の滑動量の算定法を提案した。実際の設計に期待滑動量の考え方を導入するためには、信頼性設計法との結合が重要であり、今後さらに研究を進めていく予定である。なお、本研究にあたっては、埼玉大学工学部の谷本勝利教授および当所の高山知司水工部長から適切な助言をいただいている。また、滑動量の計算にあたっては、当所海象調査研究室の協力により、全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)のデータを使用した。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

伊藤善行・藤島 睦・北谷高雄 (1966): 防波堤の安全性に関する研究, 港研報告, 第5巻第14号, 134 p.
 合田良実 (1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港研報告, 第12巻第3号, pp. 31-69.
 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎・細山田得三 (1992): 混成防波堤のマウンド形状による衝撃波力係数の提案, 海岸論文集, 第39巻, pp. 676-680.
 高橋重雄・下迫健一郎 (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巻第2号 (印刷中)
 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, 海岸論文集, 第36巻, pp. 673-377.
 谷本勝利・木村克俊・宮崎啓司 (1988): 大水深混成堤の耐波安定性に関する研究 (第1報) 一台形型直立部に働く波力および滑動安定性一, 港研報告, 第27巻第1号, pp. 3-29.
 堀川清司・小沢保臣・高橋邦夫 (1972): 高基混成堤直立部の期待滑動量について, 第19回海講論文集, pp. 351-356.