

波による傾斜底泥の洗掘に関する数値解析

山西博幸*・東

修**・楠田哲也***・並河洋一****

1. はじめに

河道内や河口沿岸域で底泥が堆積することは、河道断面の確保や河口沿岸施設機能の維持管理に直接関わり、浚渫に多大の費用と労力が費やされることになる。したがって、これら底泥をいかに効率よく除去もしくは堆積しないように制御するかが課題となっている。すでに、山西ら (1998) は、河岸に堆積した底泥 (ガタ土) に波を作用させることで、このガタ土を洗掘・除去させる効果とこのときの碎波水塊がガタ土面に直接作用する衝撃碎波圧を考慮した洗掘量の関係式を示している。ただし、衝撃碎波圧を算定する際に用いた一連の過程には、いくつかの経験式が使用されており、これらを数値計算等で検証する必要がある。ここでは、比較的急勾配の斜面上で碎波する波の挙動について、自由表面を持つ流れの解法の一つである SMAC 法にて解析を行う。また、現実の感潮域を想定し、水没時間や天日乾燥の有無といった条件での泥の剪断強度の変化について調べ、これらの結果をもとに現地堆積底泥の効率的除去について検討する。さらに、波による底泥の破壊機構の解析には、要素ばねと間隙ばねを組み入れた拡張個別要素法 (伯野, 1997) を用いて、底泥洗掘時の破壊状況や底泥内部の強度変化および底泥の洗掘形状とともに洗掘量について考察する。以上のように、本研究では河道断面確保の立場から、河岸に堆積した底泥除去の一手法として、波による洗掘を考え、これに関する数値計算と室内実験から底泥の洗掘機構、洗掘過程や洗掘に及ぼす影響因子などについて明らかにすることを目的とする。

2. 急傾斜面上での碎波水塊の数値計算

(1) SMAC 法による碎波水塊の挙動と経験式との比較

碎波の衝撃現象は瞬間的な変化であり、水路実験による現象解明よりも数値実験を用いた方が適当である。ここでは、傾斜面上に働く衝撃碎波圧を算出する際に山西

ら (1998) が水路実験を通して得たいくつかの経験式の妥当性を SMAC 法により検証した。なお本研究では、酒井ら (1987) 同様、計算フレームを 2 次元とし、乱れの 3 次元性に起因する斜め渦などの影響を無視している。

数値実験の外部応力条件として 1/5 勾配の斜面沖側の一様水深部 ($h=30\text{ cm}$) に室内実験の条件と同様の正弦波を与えた。図-1 は傾斜面上の碎波水塊を模式的に示したものである。ここで、 θ : 前方水面への入射角、 β : 傾斜角、 γ : 水塊の跳ね返り角、 V_1 : 水塊の入射速度、 V_2 : 水塊の跳ね返り速度、 v : 碎波水塊の落下速度、 C_b : 碎波速度、 H_b : 碎波波高、 h_b : 碎波水深、 η_b : 碎波峰高、である。また、汀線を原点とし、汀線より沖方向を正、岸方向を負とする。図-2 は SMAC 法により計算された碎波水塊の挙動の一例 (いずれも周期 $T=1.5\text{ sec}$, 波高 $H_i=11.0\text{ cm}$, 刻み幅 $\Delta X=\Delta Y=0.5\text{ cm}$, 刻み時間 $\Delta t=10^{-3}\text{ sec}$) である。図-2(a) は碎波水塊が傾斜面上に突込む様子、図-2(b) は、碎波水塊が傾斜面に衝突した直後の様子、図-2(c) は水塊の跳ね返る様子を示している。図より、碎波する際に気泡を巻き込む様子がみられ、水路側面からの目視とも合致する。また、数値計算より得られた波形から、入射角 θ と跳ね返り角 γ および SMAC 法により算出された速度ベクトルから、碎波水塊の入射速度 V_1 と跳ね返り速度 V_2 を求めた。以上の結果を既報 (山西ら, 1998) と比較したものが図-3, 4, 5 であり、いずれも経験式との良好な相関を示し、数値実験においても既報で用いた経験式の妥当性が確認された。

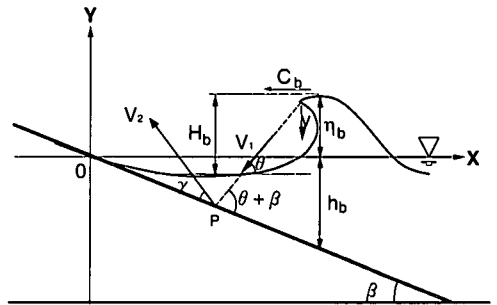


図-1 傾斜面上での碎波水塊と座標軸

* 正会員 博(工) 九州大学助手 大学院工学研究科
 ** 工 修 (株)エックス都市研究所
 *** フェロー 工 博 九州大学教授 大学院工学研究科
 **** 内外エンジニアリング(株)

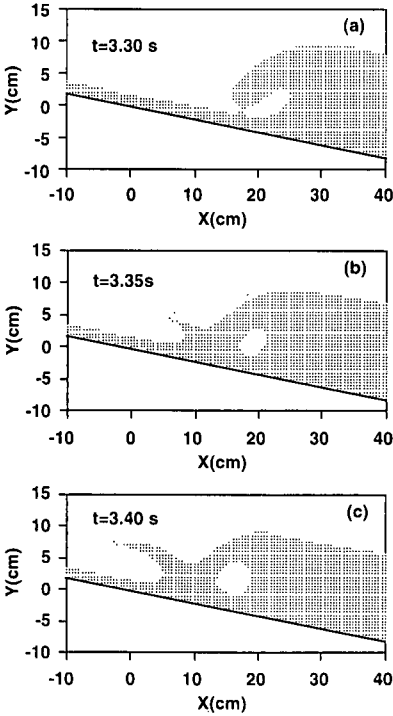


図-2 砕波水塊の挙動 ($T=1.5$ s, $H_i=11.0$ cm)

(2) 衝撃砕波圧の変動と算定曲線との比較

図-6は、汀線より沖側 25, 35 cm 地点での変動圧力の経時変化の一例(周期 $T=1.5$ s, 入射波高 $H_i=10.0$ cm)である。図中、実線は実測値を、点線は計算結果を表し、実測値、計算結果ともに、実験開始初期での値である。なお、ここでの変動圧力は全圧力から静水圧分を差し引いたものを水頭換算している。汀線より沖側 35 cm での衝撃圧は見られず、また、この位置からさらに沖側でもその傾向は同様であり、実測値と計算結果はほぼ一致する。一方、汀線より沖側 25 cm の地点では、砕波水塊の第1突込み点 (P.P.1) であることから、急激な圧力変動が見られる。また、最大衝撃圧に達した直後は、実測値、計算値ともに気泡の通過により圧力の急激な低下が見られるが、実測値と計算値とでは、その低下の度合いに差が見られる。この理由として、砕波現象の3次元な効果、気泡混入の大小あるいは計算上、斜面が階段状になるための戻り流れの流速増減など、数値実験結果と水路実験による実現象との違いが見られる。

図-7はSMAC法によって得られた変動圧力の等圧線図の一例である。図より、P.P.1付近で最大の衝撃圧が形成され、そこでの最大値 $P_{1,m}$ は 1.33 kPa であった。この値は同一条件下で衝撃砕波圧算定曲線(図-8)から求めた値とほぼ同じである。なお、図-8中に $H_i=10.0$ cm として入射波形勾配 H_0/L_0 を何通りか変化させた計算結

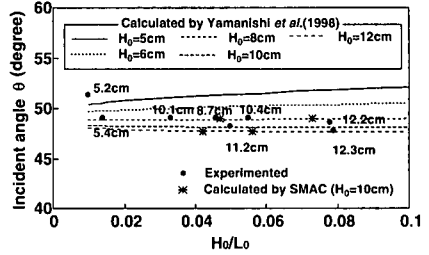


図-3 沖波波形勾配 H_0/L_0 と入射角 θ との関係

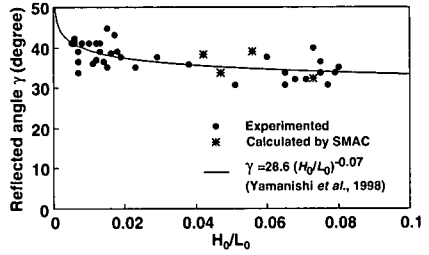


図-4 沖波波形勾配 H_0/L_0 と跳ね返り角 γ との関係

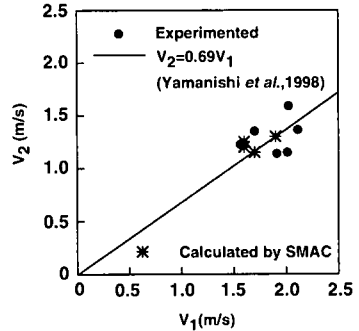


図-5 入射速度 V_1 と跳ね返り速度 V_2 との関係

果も同時に示している。

図-9は各傾斜面上の各地点における最大衝撃圧 P_m の実測値と数値実験による結果とを比較したものである。図より、斜面上各地点の最大圧力は、計算により十分再現されているので、この結果は傾斜底泥面の洗掘計算の際に使用可能である。

3. 現地底泥の土質力学的特性

(1) 現地底泥の含水比、剪断強度及び変形係数との関係

衝撃砕波圧による底泥の破壊過程を数値計算で再現するに当たり、衝撃砕波圧の受け手である底泥の力学特性を明らかにしておかなければならない。ここでは、底泥の洗掘に関わるパラメータとして、剪断強度と変形係数について検討する。実験試料には佐賀県六角川河道側面に堆積した不攪乱底泥を用いた。底泥採取地点を河道傾

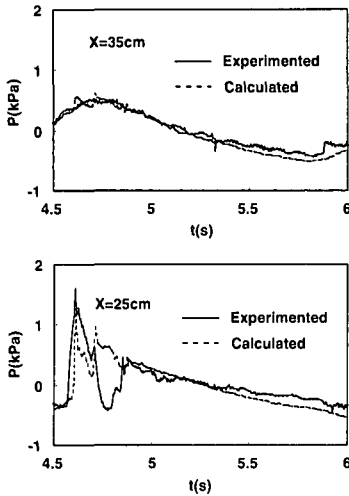


図-6 変動圧力の経時変化 ($T=1.5$ s, $H_i=10.0$ cm)

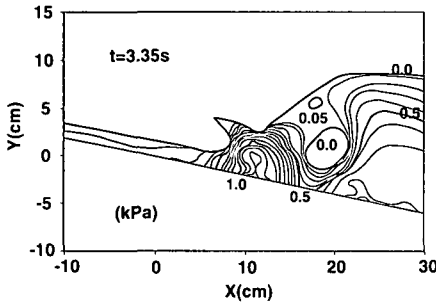


図-7 砕波水塊の等圧線図 ($T=1.5$ s, $H_i=11.0$ cm)

斜面に沿って岸側から 3 m 間隔で A, B, C 地点と定め、各地点でカラムにより底泥を採取した。図-10 は、底泥の剪断強度分布と含水比分布をもとに両者の関係をプロットしたものである。図中には山西ら (1998) が六角川ガタ土を用いて得た含水比 W と剪断強度 τ_s との関係

$$\text{不攪乱試料: } \tau_{s,1} = 1.42 \times 10^{10} W^{-4.47} \text{ (kPa)} \dots (1)$$

$$\text{攪乱試料: } \tau_{s,2} = 4.49 \times 10^9 W^{-4.47} \text{ (kPa)} \dots (2)$$

も同時に示している。図中、不攪乱試料による経験曲線(式(1))から攪乱試料による経験曲線(式(2))寄りのデータは、各地点の上層部分、つまり攪乱状態に近い浮泥の値となっている。なお、ガタ土の強度に応じて 2 種類のベーン(幅 20 mm × 長さ 40 mm, 幅 15 mm × 長さ 30 mm)を使い分け、剪断強度の値はベーン回転角速度を 0.5 deg/s として得られる最大トルクを測定して算出している。

土質工学において地盤の変形解析を行う際に、変形係数 E_{50} を近似的な弾性係数として利用することがある(地盤工学会, 1991)。これに倣い、本論文でも底泥破壊の数値計算で必要となる弾性係数(ばね定数)を変形係

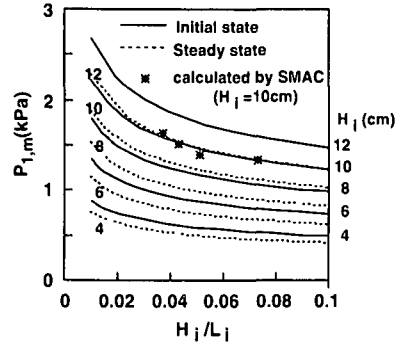


図-8 衝撃砕波圧算定曲線

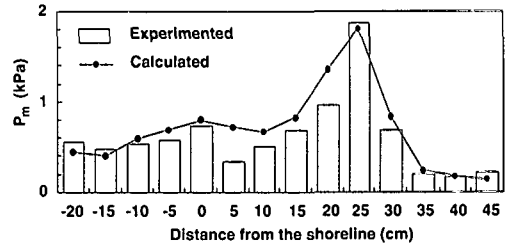


図-9 傾斜面上の変動圧力分布 ($T=1.5$ s, $H_i=10.0$ cm)

数 E_{50} によって評価する。図-11 は含水比 W と一軸圧縮試験により求めた変形係数 E_{50} との関係である。このとき、 E_{50} を W の関数として表すと次式のようなになる。

$$E_{50} = 1.27 \times 10^8 W^{-2.92} \text{ (kPa)} \dots (3)$$

(2) 底泥の剪断強度に及ぼす潮汐の影響

現地堆積底泥は日々潮汐の影響により水没・干出を繰り返すために、含水比の変化はもちろん、その堆積状態や剪断強度に影響を与える。実際に、傾斜底面に波を作用させて底泥を効率的に除去するには、潮汐による堆積底泥の強度変化を予測しておく必要がある。ここでは、水没時間や天日乾燥による底泥の剪断強度の経日変化を調べるために、不攪乱のまま持ち帰った現地底泥をそれぞれ屋外、室内、水槽内に設置し、各条件下の底泥の含水比測定、ベーン剪断試験を定期的に行った。なお、水槽内の底泥とは、SS 濃度が 10 kg/m³ である攪拌水槽内に常時水没させておいたものである。また、剪断強度は底泥層厚 5 cm 平均の値である。図-12 は各試料の剪断強度を実験開始初期の剪断強度で除した無次元剪断強度の経日変化を示したものである。屋外設置分の底泥と室内設置分の底泥の剪断強度は、日々増大し、常時水没状態にある底泥の剪断強度は、日々減少している。実測値をもとに τ_s が指数関数的に増加、もしくは減少するものと仮定すると、次式となる。

$$\tau_s/\tau_0 = \tau_{\infty}/\tau_0 + (1 - \tau_{\infty}/\tau_0)e^{-at} \dots (4)$$

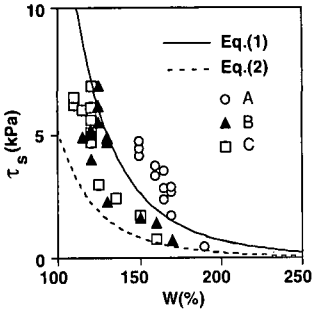


図-10 含水比Wと剪断強度 τ_s の関係

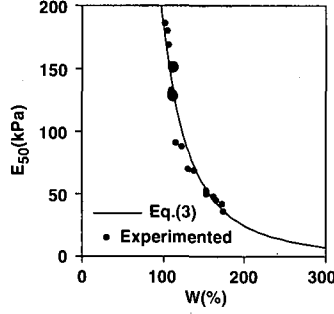


図-11 含水比Wと変形係数 E_{s0} の関係

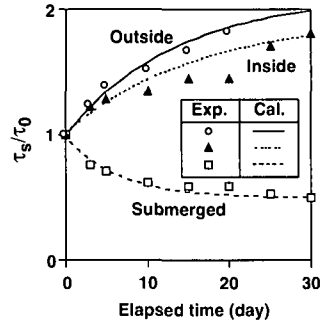


図-12 剪断強度の経日変化

ここに、 τ_0 は実験開始初期の剪断強度、 α は係数である。式(4)より、それぞれの初期硬化あるいは初期脆弱化速度は0.27 kPa/day(屋外)、0.23 kPa/day(室内)、-0.27 kPa/day(水槽内)であった。図より、日射させた屋外試料の剪断強度は2週間程度で約1.7倍まで増大している。同様に、日射無しの室内試料では1.5倍、水没試料では底泥界面に沈積する浮泥の影響から初期の値に対して0.6倍となっている。現地堆積底泥を考えた場合、大潮時に岸側上部で堆積した底泥は、次の大潮までのおよそ2週間、水没せずに天日乾燥したとするならば、その底泥の剪断強度は約1.7倍になると推測される。

4. 洗掘に関する数値計算

(1) EDEMを用いた底泥洗掘に関する計算手法の概略

個々の底泥要素は、粘着性により、かなりの連続性を有する。ここでは、波による底泥の破壊機構の解析に、個々の要素が接触したときのみ力を伝達する要素ばねとその要素間の粘着性の効果を表す間隙ばねを組み入れた拡張個別要素法(EDEM)を用いた。数値計算に必要な主なパラメータは、要素ばねと間隙ばねそれぞれのばね定数と粘性係数である。接線方向の間隙ばねの破壊基準には、クーロンの破壊基準を用いた。この基準式は、剪断強度 τ_s 、粘着力 c 、直応力 σ 、摩擦角 ϕ とすると、 $\tau_s = c + \sigma \tan \phi$ となる。粘土の場合、摩擦角 $\phi = 0$ と考えれば、 $\tau_s = c$ となる。また、要素ばねと間隙ばねの法・接線両方向のばね定数(k_{en}, k_{es})、(k_{pn}, k_{ps})は、現地不攪乱底泥の変形係数 E_{s0} をもとに定める。さらに、要素ばね、間隙ばねの法・接線両方向の粘性係数(η_{en}, η_{es})、(η_{pn}, η_{ps})は、一軸圧縮試験の数値計算結果との比較により、適切な値を定める。波による傾斜底泥の洗掘に関する数値計算の条件は、室内洗掘実験と同様とした。また、傾斜面上に作用させる衝撃圧はSMAC法で算出した衝撃碎波圧分布(図-9参照)を用いる。さらに、傾斜底泥に見立てたパッキング粒子群は、一軸圧縮試験結果とEDEMによる計算結果が一致するように定めたパラメータによ

り規定する。なお、計算の際、繰り返し衝撃碎波圧が作用することによる底泥の脆弱化も考慮した。これらより、底泥洗掘時の破壊状況や底泥内部の強度変化あるいは底泥の洗掘形状とともに洗掘量に関する考察を行う。

(2) 洗掘計算に用いるパラメータの検討

実験には毎秒1mmの速度で供試体を圧縮する装置を用いた。数値計算との比較のための実験供試体は、幅3.5cm、奥行き5.0cm、高さ7.0cmの直方体である。なお、このときの底泥試料の平均含水比Wは150%であった。図-13は、数値計算のための要素、間隙ばねの初期配置状態である。各要素は直径5mmの等径とし、これを規則的に配置した。図中の黒色要素は圧縮板に見立てた粒子群である。図-14は、実験開始14秒後の要素、間隙ばね配置図である。図より、斜め45度の角度で間隙ばねの破壊が見られ、滑り面が形成されている。また、供試体の形状をトレースし、実測値と計算値との比較をしたものが図-15である。実測値は、一軸圧縮の過程をビデオ撮影し、その画像解析から得たものである。ここでは、計算値と実測値の形状ができるだけ合致するようにパラメータを設定した。表-1は、このようにして得たパラメータの一覧である。

(3) 洗掘計算と洗掘実験データとの比較

数値計算との比較のために用いる洗掘実験結果は、周期 $T=1.5$ s、P.P.1での最大衝撃碎波圧 $P_{1,m}=1.25$ kPa、表面含水比 $W=150\%$ 、のときのものである。図-16は、数値計算のための要素配置の初期状態である。図中の黒色要素に対して、各地点での定常時の衝撃碎波圧を矢印の方向から図-17に示すように0.01秒おきに加えた。図-18、19は、それぞれ実験開始4分後(160波)での要素配置と間隙ばねの破壊状況を表している。図-18より、傾斜面表層部の要素群の多くは、繰り返し作用する衝撃圧のため、表面上からはじき出されている。また、衝撃碎波圧の作用領域では、間隙ばねの破壊が著しく、亀裂が内部まで広がっている(図-19参照)。間隙ばねの破壊された要素群は、戻り流れの作用により沖方向へ流されるものとするれば、図-19の間隙ばねの破壊状況から

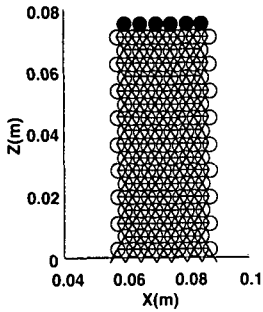


図-13 供試体の要素・間隙ばね配置 ($t=0$ s)

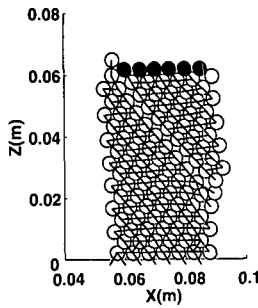


図-14 供試体の要素・間隙ばね配置 ($t=14$ s)

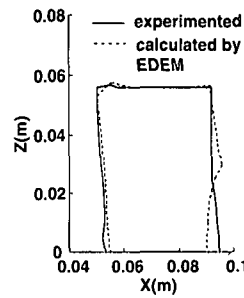


図-15 実測値と計算値との比較

表-1 数値計算に用いたパラメータ ($W=150\%$)

パラメータ	値
k_{en}	$4.61 \times 10^4 \text{ N/m}$
k_{es}	$1.32 \times 10^4 \text{ N/m}$
k_{pn}	$3.69 \times 10^4 \text{ N/m}$
k_{ps}	$1.05 \times 10^4 \text{ N/m}$
η_{en}	$5.75 \times 10^2 \text{ Ns/m}$
η_{es}	$3.07 \times 10^2 \text{ Ns/m}$
η_{pn}	$1.29 \times 10^2 \text{ Ns/m}$
η_{ps}	$2.75 \times 10^2 \text{ Ns/m}$
Δt	$1.00 \times 10^{-8} \text{ s}$

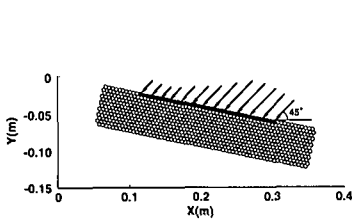


図-16 初期要素配置 ($t=0$ s)

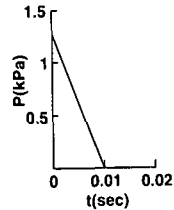


図-17 衝撃碎波圧

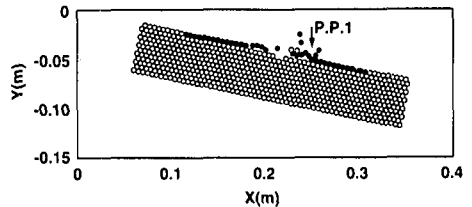


図-18 要素配置 (160 波)

推測される洗掘形状と洗掘実験結果との比較が、図-20のように示される。なお、実測値(200波)は、水路中央部での横断測量から得られる洗掘深である。図より、両者はおおむね一致し、数値計算により底泥の洗掘形状とともに洗掘量の概算も可能となった。

5. 結論

本研究で得られた成果は以下の通りである。

① SMAC法を用いた数値計算により衝撃碎波圧算定のために使用したいくつかの経験式、そして一連の算定手法の妥当性を確認した。

② 底泥の剪断強度と含水比・変形係数の関係を求め、これを定式化し、洗掘シミュレーションでの計算に利用した。また、実河川感潮域の潮汐を想定し、剪断強度の経日変化を求めたところ、2週間程度で、天日乾燥した底泥表層部の剪断強度は初期の2倍、水没状態のそれは底泥界面に沈積する浮泥の影響から初期の剪断強度の0.6倍となった。

③ EDEMを用いた計算結果から底泥洗掘に及ぼす内部破壊の状況を数値計算により示すことができた。また、間隙ばねの破壊状況から推測される洗掘形状と実験結果との比較は概ね一致し、数値計算により底泥の洗掘形状とともに洗掘量の概算も可能となった。

なお、本研究の大部は平成10年度科学研究費補助金奨励研究(A)(山西)より、一部を(財)河川環境管理財団「感潮域の水環境研究会」より援助を受けた。ここに記して謝意を表す。

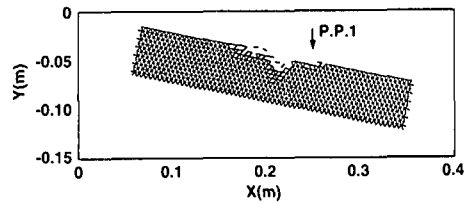


図-19 間隙ばねの破壊状況 (160 波)

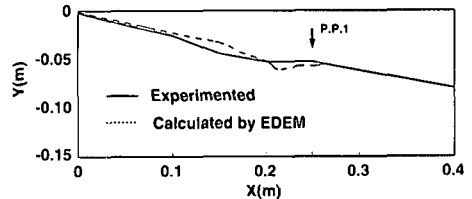


図-20 洗掘実験と数値計算との比較

参考文献

酒井哲郎・水谷太作・田中秀明・多田幸夫 (1987): 斜面上の巻き波型碎波の碎波後の運動機構の数値解析, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 71-75.
 地盤工学会編 (1991): 「土の試験実習書」—第二回改訂版—, 地盤工学会, pp. 141-146.
 伯野元彦 (1997): 「破壊のシミュレーション」, 森北出版, pp. 10-55.
 山西博幸・東修・楠田哲也・渡辺亮一 (1998): 「波による傾斜底泥面の洗掘に関する研究」, 土木学会論文集, No. 607/II-45, pp. 55-67.