

波による傾斜底泥面の洗掘に関する数値計算

九州大学大学院 学生会員○ 東 修 正会員 山西 博幸
九州大学工学部 学生会員 並河 洋一 フェロー 楠田 哲也

1. はじめに 河道断面確保といった河川管理上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る。本研究では、傾斜底泥面に衝撃砕波圧が作用した際の底泥の洗掘状況について数値計算し、室内実験結果と比較検討した。

2. 数値計算に必要なパラメータの検討 個々の底泥要素は、粘着性により、かなりの連続性をもつ。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(伯野, 1997)を用いた。図-1は、要素間に配置した要素ばねと間隙ばねの様子を模式的に表している。数値計算に必要なパラメータは、図-1に示す要素ばね、間隙ばねそれぞれのばね定数と粘性係数、要素間に作用する粘着力である。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、この基準式は、せん断強度 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 $\phi \approx 0$ と考えれば、 $\tau_s \approx c$ となる。一方、底泥の不攪乱試料におけるせん断強度 τ_s は、ベーンせん断試験結果より含水比 $W(\%)$ の関数として次式で表されている(山西ら, 1998)。

$$\tau_s = 1.42 \times 10^{10} W^{-4.47} \text{ (kPa)} \cdots (1)$$

ここでは上式で得られたせん断強度 τ_s を粘着力 c の値として用いた。また、法線方向の間隙ばねの破壊基準は、ある時刻の間隙ばねの長さが初期設定長さの β 倍を越えたときに破壊されるとした。なお、ここでは $\beta=1.5$ とした。

次に、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})について検討する。ただし、これらのばね定数を直接求めることはできず、一般にLame定数、弾性波速度、みかけの密度などの関係式より求めるため、これらの関係式に必要な底泥密度 ρ_s 、弾性係数 E 、ポアソン比 ν 、間隙比 e を知る必要がある。底泥密度 $\rho_s = 2540 \text{ kg/m}^3$ で、底泥の弾性係数 E は、便宜上、その変形係数 E_{50} を近似的に利用できるものとした。現地不攪乱底泥の変形係数 E_{50} が一軸圧縮試験の結果より、含水比 W の関数として次式で表されている(並河ら, 1999)。

$$E_{50} = 1.27 \times 10^8 W^{-2.92} \text{ (kPa)} \cdots (2)$$

ポアソン比 ν は、一軸圧縮試験より $\nu \approx 0.3$ であった。間隙比 e は伯野(1997)と同様の方法により求めた。また、要素ばねと間隙ばねの法・接線両方向のばね定数は、それぞれの方向の透減率 s_n, s_s を用いて、以下の関係で表すものとする。

$$k_{pn}/k_{en} = s_n, k_{ps}/k_{es} = s_s \cdots (3)$$

ここでは、 s_n, s_s ともに0.8とした。

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シミュレーションとの比較により、適切な値を定めた。

3. 現地不攪乱底泥を用いた一軸圧縮試験 実験には毎秒1mmの速度で供試体を圧縮す

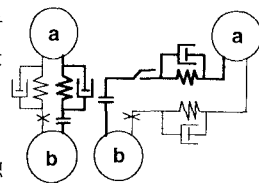


図-1 要素ばねと間隙ばね
(左)法線方向(右)接線方向

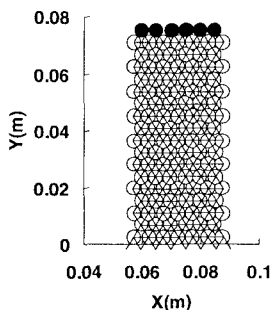


図-2 供試体の要素、
間隙ばね配置 ($t=0s$)

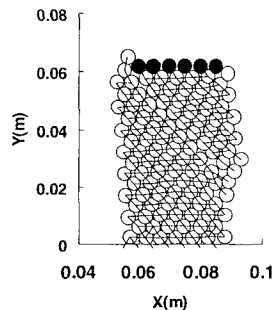


図-3 供試体の要素、
間隙ばね配置 ($t=14s$)

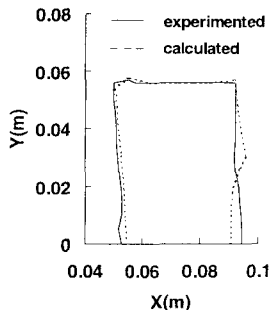


図-4 一軸圧縮試験の実測値
と計算値との比較

表-1 数値計算に用いた
パラメータ ($W=150\%$)

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}	$5.41 \times 10^2 \text{ Ns/m}$
η_{es}	$2.89 \times 10^2 \text{ Ns/m}$
η_{pn}	$1.21 \times 10^3 \text{ Ns/m}$
η_{ps}	$2.59 \times 10^2 \text{ Ns/m}$
Δt	$1.00 \times 10^{-5} \text{ s}$

る装置(RHEO TEX SD-700(株)サン科学製)を用いた。数値計算との比較のために実験に用いた供試体は、幅3.5cm、奥行き5.0cm、高さ7.0cmの直方体に整形した。なお、底泥試料の平均含水比 W は150%であった。図-2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-3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。これは実験での供試体にも見られた。図-4に実測値と計算値との比較を示す。実測値は、一軸圧縮の過程をデジタルビデオカメラによって撮影し、その画像解析から得られたものである。計算値は実測値との破壊形状ができるだけ合致するように、2.で検討したパラメータを逐次修正しながら求めた。表-1は、このとき得られたパラメータの一覧である。

4. 洗掘に関する数値計算

数値計算との比較のために用いる洗掘実験結果は、並河ら(1999)によるものである(採泥地点B, 周期 $T=1.5s$, 衝撃碎波圧 $P_{1.0}=1.25kPa$, 表層含水比 $W=150\%$)。図-5は、数値計算のための要素配置の初期状態である。図中の各黒色要素に対して、矢印の方向から図-6に示す衝撃碎波圧を0.01秒おきに加えた。図-7a, bは、それぞれ実験開始1分後(波の数 $N=40$)における要素間の力の伝達と間隙ばねの破壊状況を表している。図より衝撃圧の作用する最表面の間隙ばねはほとんど破壊されている。また、間隙ばねの破壊は底泥内部へも広がっている。特に、衝撃圧作用面最沖側から斜め45度で底面に向かって間隙ばねの破壊が強く見られ、円弧滑り面のような様相を呈している。図-8a, bは、それぞれ実験開始5.25分後($N=210$)での要素配置と間隙ばねの破壊状況を表している。図-8-aでは、衝撃圧作用面最沖側において要素間に亀裂が生じている。この亀裂部分にさらなる衝撃圧が作用すると、図-8-bで示されるように底泥要素間の間隙ばねの破壊領域で洗掘が進行する。また実際の実験では、洗掘は浜崖を形成するように岸方向へ進んでいくが、その様子は図-8bで表される間隙ばねの破壊状況からも推測される。さらに間隙ばねの破壊された要素群は、戻り流れの作用により間隙ばねの破壊された領域が、沖方向へ流されるものと考えられる。このとき、図-8bの間隙ばねの破壊状況から推測される洗掘形状と、洗掘実験結果とを比較したところ、図-9のような結果が得られた。なお、実測値($N=210$)は、水路側面から洗掘状況をデジタルビデオカメラによって撮影し、その画像解析から得られたものである。図より、両者はおおよそ一致し、数値計算により底泥の洗掘形状とともに洗掘土量の概算も可能となった。

5. おわりに 底泥洗掘に及ぼす内部破壊の状況やレオロジー的特性を数値計算により示すことができた。また、本研究の一部は平成10年度科学研究費補助金奨励研究(A)(山西)より援助を受けた。ここに記して謝意を表す。

【参考文献】山西・東・楠田・渡辺(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 No607/II-45, pp55-67. 伯野(1997):「破壊のシミュレーション」, 森北出版, pp10-55. 並河・山西・楠田・東(1999):「河川堆積底泥の洗掘強度に及ぼす影響因子についての実験的検討」平成10年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集(印刷中)

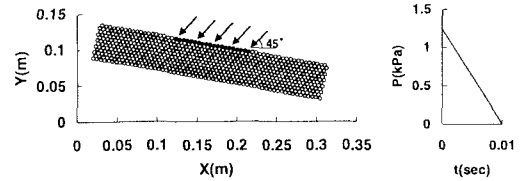


図-5 初期要素配置 ($t=0s$)

図-6 衝撃碎波圧

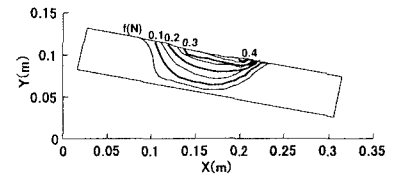


図-7a 要素間の力の伝達 ($N=40$)

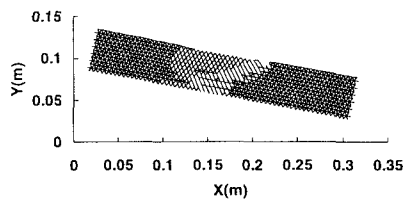


図-7b 間隙ばねの破壊状況 ($N=40$)

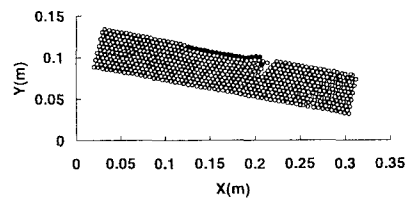


図-8a 要素配置 ($N=210$)

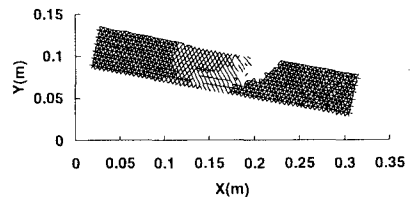


図-8b 間隙ばねの破壊状況 ($N=210$)

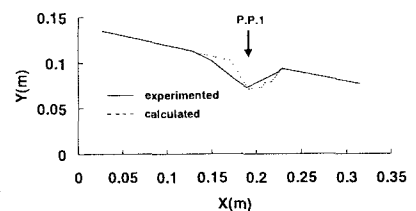


図-9 洗掘実験結果と数値計算結果との比較 ($N=210$)