

広島大学大学院工学研究科	学生会員	○安部 太紀
広島大学大学院工学研究院	国際会員	土田 孝
広島大学工学部	学生会員	布谷 信貴
五洋建設株式会社技術研究所	国際会員	熊谷 隆宏
五洋建設株式会社技術研究所	正会員	菊原 紀子

## 1. はじめに

近年の研究によって、水深の浅い海域における軟弱な底泥上を波浪が進行する際、部分的な含水比低下や強度増加という物性変化が発生することが確認されている。これは波浪により生じる亀裂が原因であると考えられ、亀裂は底泥表面に作用する水圧勾配の変動による底泥の不安定化が原因と考えられる。この水圧勾配に着目し、底泥の安定を円弧すべり安定解析法により評価する研究がされている<sup>1)</sup>。その際に用いる底泥の強度は粘土が繰り返し载荷を受けた際の強度である動的強度を用いており、ベーン強度のような静的強度の0.1~0.3倍と曖昧な数値を用いていた。本研究では、明確な定義がされていなかった動的強度として、レオロジー試験から得られる粘土の降伏値に着目し、筆者らが行った波浪作用実験並びに過去に行われた波浪作用に関する研究に対して解析を行い、その適用性について検討を行った。

## 2. 底泥の安定解析法

土田・五明<sup>1)</sup>は、波浪作用で底泥に作用する水圧変動により、底泥内にすべりが発生すると想定し、安定解析法を考案した。その概念図を図-1に示す。ここで底泥の強度は深度によらず一定値をとると仮定している。この概念図をもとに、底泥による抵抗モーメント  $M_R$  および滑動モーメント  $M_S$  を求め、安全率を算定した。抵抗モーメント  $M_R$  を式(1)、滑動モーメントを式(2)、安全率を式(3)に示す。

$$M_R = c \left( \frac{y^2}{d} + d \right)^2 \tan^{-1} \left( \frac{2dy}{y^2 - d^2} \right) \quad (1)$$

$$M_S = \frac{LH^*}{2\pi} \gamma_w \left\{ \frac{L}{2\pi} \sin(ky) - y \cos(ky) \right\} \quad (2)$$

$$F = \frac{M_R}{M_S} = \frac{c}{H^* \gamma_w} \cdot \frac{(y^2 - d + d)^2}{\sin(ky)/k^2 - y \cos(ky)/k} \tan^{-1} \left( \frac{2dy}{y^2 - d^2} \right) \quad (3)$$

ここで、 $c$ : 底泥の動的強度、 $d$ : 底泥の深さ、 $L$ : 波長、 $k$ : 波数( $2\pi/L$ )、 $\gamma_w$ : 水の単位体積重量、 $H^* = H/\cosh(kh)$ 、 $M_R$ : 抵抗モーメント、 $M_S$ : すべりモーメント、 $F$ : 安全率である。

式中の  $y$  を変化させていくことによってすべりの安全率が最小となる円弧を求めることが出来る。高含水比状態における底泥の強度  $c$  の測定には、一般にベーンせん断試験が用いられている。しかし、波浪に対する安定性を考え

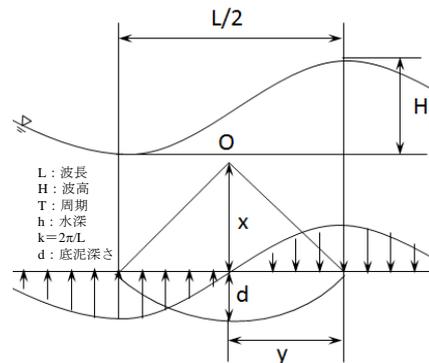


図-1 安定解析法概念図<sup>1)</sup>

る場合、繰り返し载荷に対する動的強度を考える必要がある。大根田ら<sup>2)</sup>は、破壊ひずみ 10%程度で 1000 回 载荷した際の動的強度と静的強度の比である強度比が、0.3~0.4 程度となることを示した。土田・五明<sup>1)</sup>は、 練返された状態の粘土において、破壊ひずみは 20%程度に達すると考え、大根田ら<sup>2)</sup>の強度比よりもさらに小 さい強度比である 0.1~0.3 を用いて(1)~(3)式による底泥の安定解析を行っている。本研究では、底泥の不安 定化に関して(1)~(3)式による安定解析を、粘土の降伏値を用いて解析を行い、解析に用いるべき底泥の強度 の考え方について検討した。

### 3. 安定解析法の適用対象

降伏値の安定解析への適用性を検討するために、筆者らが行った実験、土田・五明<sup>1)</sup>が行った実験、熊谷ら<sup>3)</sup>が行った実験、それに加え、粘土に 7 号珪砂を 50%混合した試料に対して波浪作用を行った実験に対して降 伏値を用いた安定解析法を適用した。それぞれの実験条件を表-1 に示す。

表-1 安定解析を適用した実験の条件

筆者ら

	含水比(%)	正規化含水比	底泥深度(m)	水深(m)	波高(m)	周期(s)	波長(m)
case1	170	1.54	0.30	0.15	0.05	1.40	1.64
case2	165	1.49	0.30	0.15	0.04	1.20	1.38
case3	150	1.36	0.30	0.25	0.09	2.00	3.05
case4	150	1.36	0.30	0.15	0.05	1.40	1.64

土田・五明<sup>1)</sup>

	含水比(%)	正規化含水比	底泥深度(m)	水深(m)	波高(m)	周期(s)	波長(m)
case1	152	1.52	0.15	0.25	0.056	1.24	1.75
case2	137	1.37	0.15	0.25	0.036	1.04	1.38
case3	150	1.50	0.15	0.25	0.046	1.14	1.57

熊谷ら<sup>3)</sup>

	含水比(%)	正規化含水比	底泥深度(m)	水深(m)	波高(m)	周期(s)	波長(m)
case1	190	1.80	0.30	0.15	0.020	1.00	1.10
case2	190	1.80	0.30	0.15	0.030	1.00	1.10

砂混合試料

	含水比(%)	正規化含水比	底泥深度(m)	水深(m)	波高(m)	周期(s)	波長(m)
case1	83	1.54	0.30	0.15	0.050	1.40	1.64
case2	83	1.54	0.30	0.20	0.070	1.60	2.16

### 4. 降伏値の測定および推定法

#### 1)降伏値の測定

降伏値とは、流動に対する底泥の抵抗力で、底泥に作用する外力が降伏値以上になると、底泥は流動し始め る<sup>4)</sup>。筆者らが行った実験で用いた試料については、底泥試料の降伏値を共軸二重円筒型の回転粘度計を用い て求めた。本研究で用いた共軸二重円筒型回転粘度計では、カップ ( $H=60.0\text{mm}$ ,  $\varphi=27.5\text{mm}$ )に試料を適量入 れ、回転粘度計に取り付けたボブ ( $H=41.5\text{mm}$ ,  $\varphi=25.0\text{mm}$ )をカップ内に挿入、ずり速度を制御しながら回転 させる。ボブの上端には、ボブに作用するせん断応力を測定するセンサーが取り付けられており、カップとボブ 間に重鎮された粘土の粘度およびせん断応力が測定できる。写真-1 に共軸二重円筒型回転粘度計およびカ ップとボブの写真を、図-2 に測定中の概略図を示す。

降伏値  $\tau_y$  は、せん断応力-せん断速度の関係を表す図である流動曲線において、せん断速度  $\dot{\gamma}(1/s)$  が 0 のときのせん断応力を指す。しかし、実際に測定を行う際には微小ながらせん断速度が生じてしまい現実的にはせん断速度が 0 の時の測定は不可能である。そこで、本研究で用いた回転粘度計の最小せん断速度は 0.0597(1/s)であるため、この最小せん断速度のせん断強度を降伏値とした。

また、降伏値-ベーンせん断強度の関係を図-3 に示す。図-3 より、降伏値  $\tau_y$  とベーンせん断強度  $\tau_{vane}$  との間には以下の関係が得られた。

$$\tau_y = 0.162\tau_{vane} \quad (4)$$

この結果は、土田・五明<sup>1)</sup>が提案した、ベーンせん断強度の 0.1~0.3 倍の範囲にあり、降伏値は底泥の流動化を考慮している安定解析に適した強度である可能性があるとして十分に言える。

## 2)降伏値の推定

既往の研究で行われた波浪作用実験では、試料の降伏値は測定されていなかった。そのため、四種類の海成粘土の降伏値と正規化含水比の関係を調査し、その関係から簡易的に降伏値を推定することとした。使用した試料は徳山港で浚渫した粘土(徳山港粘土,  $w_L=110.6\%$ )、門司港で浚渫した粘土(門司粘土,  $w_L=89.5\%$ )、水島港で浚渫した粘土(水島粘土,  $w_L=65.3\%$ )、ひびきコンテナターミナルで浚渫した粘土(ひびき粘土,  $w_L=61.2\%$ )を用いた。それらの関係を図-4 に示す。これらの関係は累乗関数となり、平均値をとると、

$$\tau_y = 231(w/w_L)^{-5.03} \quad (5)$$

となった。この式に、過去に行われた実験の含水比と液性限界を代入することで、簡易的ではあるが降伏値の推定を行った。

## 5. 降伏値の適用性の検討

筆者らが行った実験の安定解析結果を表-2 に、既往の研究の実験の安定解析結果を表-3 に示す。表-2 の結果を見ると、case1 と case3 の傾向が逆となっている



写真-1 共軸二重円筒型粘度計(左)とボブ&カップ(右)

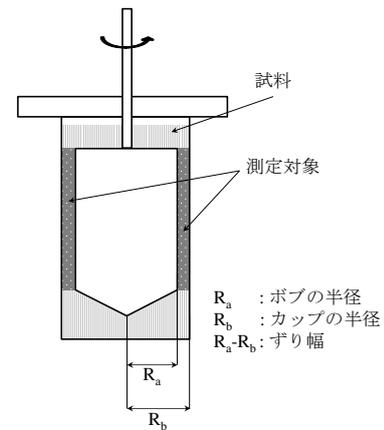


図-2 降伏値測定概略図

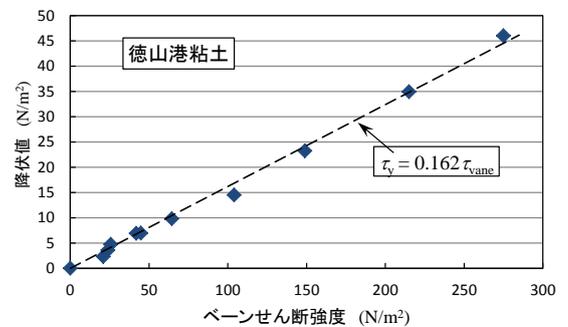


図-3 降伏値-ベーンせん断強度関係

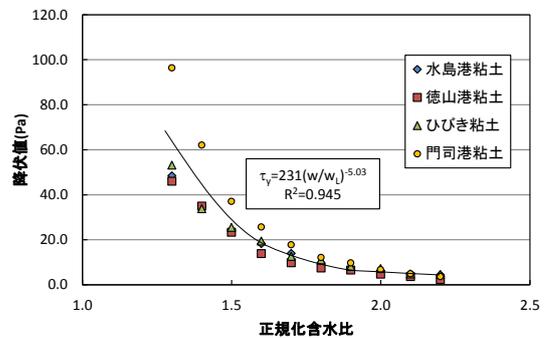


図-4 降伏値測定結果

表-2 筆者らが行った実験の安定解析結果

	含水比(%)	正規化含水比	底泥深度(m)	水深(m)	波高(m)	周期(s)	波長(m)	降伏値(Pa)	安全率	底泥挙動
case1(無混合試料)	170	1.54	0.30	0.15	0.05	1.40	1.64	28.2	0.9	中
case2(無混合試料)	165	1.49	0.30	0.15	0.04	1.20	1.38	31.5	1.44	小
case3(無混合試料)	150	1.36	0.30	0.25	0.09	2.00	3.05	50.4	1.03	大
case4(無混合試料)	150	1.36	0.30	0.15	0.05	1.40	1.64	50.4	1.65	小
case1(砂混合試料)	83	1.54	0.30	0.15	0.050	1.40	1.64	26.6	0.85	大
case2(砂混合試料)	83	1.54	0.30	0.20	0.070	1.60	2.16	26.6	0.62	特大

表-3 既往の研究の安定解析結果

	含水比(%)	正規化含水比	底泥深度(m)	水深(m)	波高(m)	周期(s)	波長(m)	降伏値(Pa)	安全率	底泥挙動
case1(土田・五明 <sup>1)</sup> )	152	1.52	0.15	0.25	0.056	1.24	1.75	28	0.79	中
case2(土田・五明 <sup>1)</sup> )	137	1.37	0.15	0.25	0.036	1.04	1.38	47	3.09	無
case3(土田・五明 <sup>1)</sup> )	150	1.50	0.15	0.25	0.046	1.14	1.57	30	1.38	中
case1(熊谷ら <sup>3)</sup> )	190	1.80	0.30	0.15	0.020	1.00	1.10	12	1.27	中
case2(熊谷ら <sup>3)</sup> )	190	1.80	0.30	0.15	0.030	1.00	1.10	12	0.76	大

が、実現象と解析結果が比較的良く整合している。また表-3の結果では、安全率の大きさは整合していない部分もあるが、傾向は良く表現できている。

また、底泥挙動が発生するが亀裂が発生しない状態を底泥挙動小、亀裂の大きさや規模を大まかに3段階評価し、全体で5段階に分類して安全率と比較した図を図-5に示す。降伏値の推定は今後さらに追及をしていく必要があるが、傾向が一致していることから、安全率に降伏値を用いることは妥当であることが分かった。

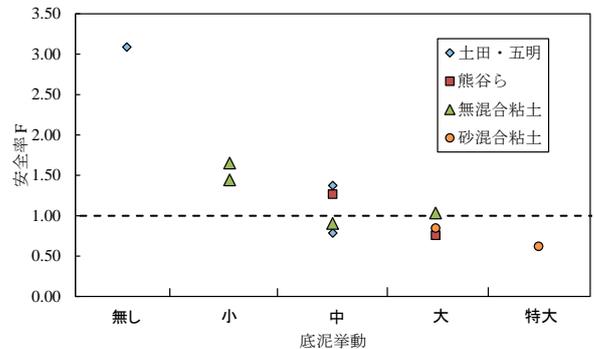


図-5 安全率と底泥挙動の関係

## 6. 結論

本研究では、底泥の不安定化を評価する安定解析法に対して降伏値の適用性を評価することを目的とした。降伏値は、回転粘度計を用いて計測を行ったものと、4種類の海成粘土の降伏値-正規化含水比の関係を調査した結果より簡易的に求めたものを利用した。以下に主要な結論を示す。

- 1) 測定した降伏値はベーンせん断強度の0.162倍と、土田・五明<sup>1)</sup>が提案した0.1~0.3倍の間に収まる事が確認できた。
- 2) 安定解析の結果は一部整合していない部分もあるが、その傾向はおおよそ表現することが出来ており、安定解析法に降伏値を用いることが妥当であることが分かった。

### 参考文献：

- 1) 土田孝, 五明美智男: 波による水圧変動に対する底泥層の安定について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.569-600, 1999.
- 2) 大根田秀明, 梅原靖文, 樋口嘉章: 振動単純せん断試験による粘性土の繰返し強度特性について, 港湾技術研究所報告, 23巻, 4号, pp.71-94, 1984.
- 3) 熊谷隆宏, 土田孝, 大坪政美, 渡辺要一, 五明美智男, 塩田耕司: 波浪作用下における底泥表面の圧密促進メカニズム, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.3, pp.223-235, 2007.
- 4) 鶴谷広一, 中野晋, 鷹濱潤: 回転粘度計による底泥の流動特性の検討, 港湾技研資料, No.566, pp.1-29, 1986.