

II-313 底泥層内部の最大せん断応力と波高減衰

徳島大学工学部 正員 中野 晋

1. はじめに 波と底泥の相互干渉は Dalrymple and Liu¹⁾の粘性流体モデルから発展した粘性流体多層モデル²⁾や粘弾塑性体モデル³⁾によってある程度計算することができるようになった. しかし現象と関係する諸量が極めて多いため, 底泥床上の波高減衰一つとっても波高減衰にどのような量の影響度が大きいかなど断片的な知見しか得られていない(たとえば底泥厚さが大きいほど波高減衰は大きいようだとある含水比の時に減衰は最大になるなど). そこでこの研究では底泥内部の最大せん断応力分布と諸条件との関係を調べ, その結果を基に底泥床上での波高減衰について考察を加えた.

2. 底泥層内部の最大せん断応力分布 海底地盤の波浪による液状化を調べる上で底質内の応力分布特性を知る必要があるため, これまで砂層と粘土層について多くの研究がなされている. そのうち Yamamotoら⁴⁾の多孔質の弾性地盤を対象とした解析によると深さが ∞ で飽和した海底地盤内の最大せん断応力の振幅は

$$\tau_{\max} = P_0 k z \exp(-kz) \dots\dots\dots (1)$$

で表される. ここに, P_0 は海底表面での圧力振幅, k は波数, z は海底面からの深さである. この式は液状化していない海底地盤のおおよその応力を代表できるものと考えられる. 著者が対象としている底泥層は一部あるいは全域が流動状態にある場合で状況が大きく異なるため, 式(1)をそのまま適用することはできない. しかしこの式は波浪条件から容易に計算できるため, 底泥内部の応力場を知る手がかりとなる.

粘性流体多層モデル²⁾に柴山ら³⁾と同様次式で示す Voigt粘弾性を考慮した相当粘度を用いて, 波と底泥の相互干渉を計算する.

$$\nu = \nu_0 + iG/\rho\sigma \dots\dots\dots (2)$$

このとき, G (Voigt粘弾性についての弾性係数) の値は鶴谷ら⁵⁾が回転粘度計を用いて測定したカオリナイトについての流動曲線から Bird⁶⁾の方法を用いて評価した $G_H = 1.01 \times 10^9 W^{-3.38}$ の関係と青木ら⁷⁾の測定結果を参考に $G = K_G G_H$ (K_G : 変換係数=3) として与えた. なおここで G_H は Maxwell 粘弾性についての弾性係数で, W は含水比(%単位)である. また ν_0 は降伏関数 F を用いて

$$\nu_0 = \mu_B / F, \quad F = 1 - \tau_y / \sqrt{J_2} \dots\dots\dots (3)$$

で各層ごとに空間的に平均して収束計算から求めている. ここで μ_B は塑性粘度, τ_y は降伏値, J_2 は偏差応力の2次不変量である. なお $\sqrt{J_2}$ は最大せん断応力 $\tau_{\max}$ とほぼ等しく, 式(4)で評価している. また式(1)では $\tau_{\max}$ の絶対値は時間には無関係であるが, 底泥内では後で述べるように位相によって変動するため, その最大値 $(\tau_{\max})_{\max}$ を用いている. 各位置での最大せん断応力は

$$\tau_{\max} = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{xx}' - \sigma_{zz}')^2 + \tau_{zx}^2} \dots\dots\dots (4)$$

で求められる. σ_{xx}' , σ_{zz}' , τ_{zx} はそれぞれ x , z 方向の偏差応力およびせん断応力であり, それぞれ

$$\sigma_{xx}' = 2\rho\nu u_x, \quad \sigma_{zz}' = 2\rho\nu w_z, \quad \tau_{zx} = \rho\nu(u_z + w_x)$$

である. ここで u , w は流速で, u_x などは速度勾配を表す.

図-1に $\tau_{\max}/P_0$ の鉛直分布の位相ごとの変化を示す. 計算は底泥層を5層に分けて行っている. 各層間で不連続となっているのは計算モデルが境界面での σ_{xx} の連続を考慮していないためと考えられる. 位相0は波の峰が通過する時点であるが, $\tau_{\max}$ は峰の通過後に応力が表面付近から深部に伝播するようすがわかる. 図中の太い実線は式(1)の関係を表しており, $W=150\%$ のカオリナイトが運動状態にある時には表面近くを除くと最大せん断応力はこれより小さくなるのがわかる. またこの粘土についての $\tau_y/P_0=0.066$ であり, 時間的には一部で応力が降伏値以下になっている. 図-2は $(\tau_{\max})_{\max}/P_0$ が含水比によってどのように変化するかを調べたものである. 含水比が低いものは式(1)の关系到近く, 含水比が高く軟らかいものほど最大せん断応力値は小さくなるのがわかる. また表面付近でも $\tau_{\max}$ は0とはならず, 深さ方向へ

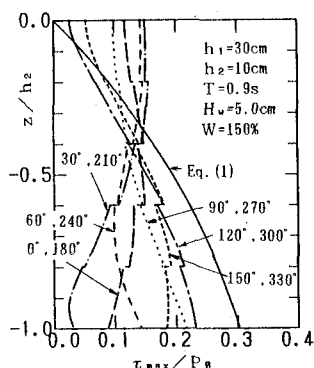


図-1 最大せん断応力分布の位相変化

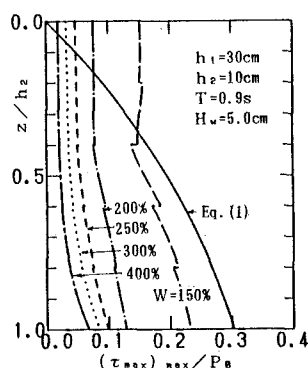


図-2 最大せん断応力分布の含水比による変化

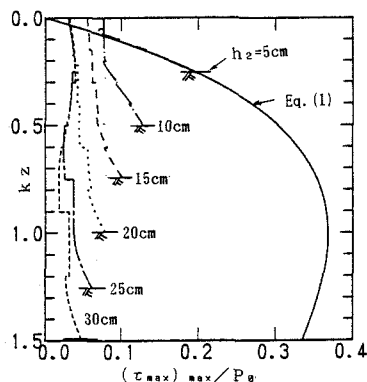


図-3 最大せん断応力分布の底泥層厚さによる変化

の変化も小さいことがわかる。図-3は底泥層の厚さを変えて計算した結果である。底泥厚さ $h_2=5\text{cm}$ では表面付近を除くとほぼ式(1)の関係と一致している。これに対し、 h_2 が大きくなるほど、 $\tau_{\max}$ の最大値は小さくなる傾向がみられる。底泥層厚さが10cmと20cmで波高減衰を比べると明らかに20cmの場合の波高減衰が大きいことが観測されている²⁾。この結果から判断して底泥層が増すと $\tau_{\max}$ が小さくなり、粘性が大きくなる。その結果、粘性逸散量つまり波高減衰が増大することになるのではないかと考えられる。

3. 粘弾性パラメータと波高減衰 運動状態での底泥の流動特性パラメータを次のように考える。運動状態の $\tau_{\max}$ は式(1)で表される $\tau_{\max}$ より小さく、深さ方向には比較的一様な分布を示す。式(1)で求められる $\tau_{\max}$ の内、底泥内で最も大きいものを $\tau_{\max 0}$ とすると、

$$\tau_{\max 0} = P_0 / e \quad (h_2 \geq 1/k) \quad \dots\dots (5)$$

$$\tau_{\max 0} = P_0 k h_2 \exp(-k h_2) \quad (h_2 < 1/k)$$

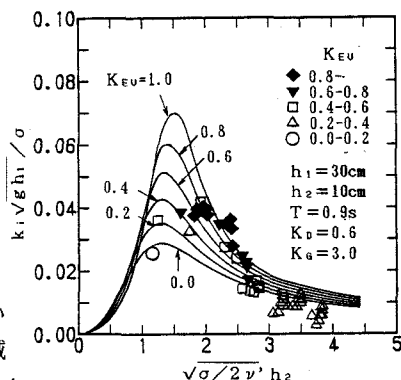
である。仮に $\tau_{\max} = K_D \tau_{\max 0}$ ($K_D=0 \sim 1$) として表せる場合には、底泥層全体の平均的な動粘性係数 ν' は

$$\nu' = \mu_B / (1 - \tau_{\nu} / K_D \tau_{\max 0}) \quad \dots\dots (6)$$

として評価できる。また弾性の影響度を表すパラメータ

$$K_{Ev} = G / \sigma \rho \nu' \quad \dots\dots (7)$$

を考える。これが大きい時には弾性体に近い挙動を示し、0に近いときは粘性流体としての挙動を示す。これらの量を考慮して波高減衰係数の整理を行う。図-4は $K_D=0.6$ の一定として、 $\tau_{\max 0}$ から ν'



を求め、これから評価した境界層厚さについての無次元量と無次元 図-4 波高減衰係数と粘弾性パラメータ 波高減衰係数の関係である。実験は含水比170～402%のカオリナイトについてのもので、波高は約1～8cmである。図中に示した曲線はDalrymple and Liuの2層流体モデルで粘性係数を式(2)の形に変えて計算したものである。含水比の高いものは図の右側に、低いものは図の左側に分布している。2.での考察からわかるように高含水比の底泥では $K_D=0.1 \sim 0.2$ 程度であり、 $K_D=0.6$ は過大であり、実際にはこれらの点はさらに右側に移動するはずである。これらのことを考慮すると、実測値と計算値の一致は良好である。

謝辞：本研究は文部省科学研究費奨励研究A（課題 No.01750514）の補助の下に実施された。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献：1) Dalrymple-Liu(1978): J. Physical Oceano., 8, 1121-1131 2) 中野ほか(1987): 港研報告, 26-2, 171-212 3) 柴山ほか(1989): 海工論文集, 36, 334-338 4) Yamamoto et al. (1978): J.F.M. 87-1, 193-206 5) 鶴谷ほか(1986): 港研資料, 556, 1-29 6) たとえば富田(1975): レオロジー, コロナ社, 361-363 7) 青木ほか(1989): 44回年講, II, 800-801