

波浪による液状化後の海底砂地盤の挙動解析

九州大学 学 ○高松 賢一 正 善 功企
正 陳 光斉 正 笠間 清伸

1.はじめに

海洋、港湾構造物の被災原因の一つに海底砂地盤の液状化現象があると考えられている。波浪時に強い波力の影響を受けて液状化した海底地盤の支持力は著しく低下、もしくは0となる。液状化した砂粒子には掃流力が働き、輸送される可能性が生じる。輸送された後に砂の補給がなければ、海底の地盤は洗掘されることになる。洗掘によって海洋、港湾構造物の支持力が大きく失われ、被災したという報告は少なくない。液状化の発生を予測することによって、洗掘の可能性はある程度評価できるが、実際に液状化した後の砂粒子の挙動が明確ではなく、依然として洗掘と液状化の関連については不明な点が数多く残されている。従来、洗掘の問題は海岸工学の観点からの研究がほとんどで、主に外力要因として海底付近の流れを中心に考えており、液状化後の砂粒子の挙動に関しては未解明のままである。

そこで本研究では、不連続変形法を海底砂地盤に適用することによって、波浪による海底砂地盤の液状化現象および液状化後の砂粒子の移動メカニズムを土質力学的な観点から解明することを主眼としている。特に本文では海底砂粒子が上向き浸透力を受けて液状化するまでの過程を一次元解析した。

2.解析方法

波浪時の海底砂地盤および砂粒子に作用する外力の解析モデルを図-1に示した。海底地盤の液状化は、波の谷の状態、上向きの浸透流が発生するために生じる。この浸透流が砂粒子に上向きの揚力(以後、浸透力)を与える。海底表層部では土被り圧が極めて小さいので、波浪時の海底砂地盤の挙動を解析する上で、この浸透力 F_L を無視することはできない。砂粒子の挙動を追う第一段階として、図-1に示す正弦波が海底地盤に作用しているときに発生する過剰間隙水圧分布を一次元解析で求めた。海底地盤中の圧力伝達モデル式は圧密方程式(式(1))を使用した。海底面に働く鉛直方向の圧力分布 P_b を式(2) (t/T は時刻の無次元量)に示した。解析に用いた入力条件は、表-1に示す北海をモデル化したデータである。過剰間隙水圧分布をもとに液状化領域、浸透力分布を一次元解析で求めた。

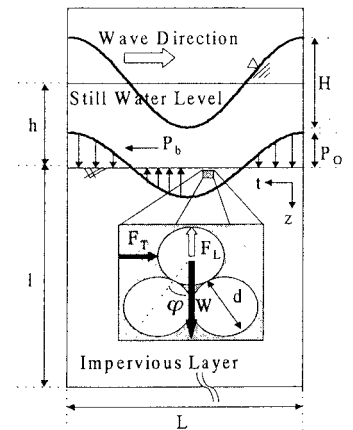


図-1 海底砂地盤モデル

表-1 入力条件(北海モデル)

水深	h(m)	70	
波浪条件	波高	H(m)	24
	周期	T(s)	15
	波長	L(m)	312
海底水圧変動振幅	P_0 (kgf/cm ²)	0.552	
単位体積重量	γ_w (gf/cm ³)	1.03×10^{-3}	
伝達係数	α	2.0	
地盤条件	飽和単位重量	γ_{sat} (gf/cm ³)	2.0
	水中単位重量	γ' (gf/cm ³)	2.0
	透水係数	k(m/s)	1.0×10^{-2}
	体積圧縮係数	m_v (cm ² /kgf)	2.452×10^{-3}
B値		0.5	
排水係数	C	1.529×10^{-1}	
層厚	l(m)	20	

$$C_v \cdot \frac{\partial^2 P_m}{\partial z^2} = \alpha \cdot \frac{\partial P_m}{\partial t} - \frac{\partial P_b}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

$$P_b = \frac{\gamma_w \cdot H}{2 \cosh(\lambda h)} \cdot \left(\sin 2\pi \left(\frac{1}{4} - \frac{t}{T} \right) \right) \dots\dots\dots (2)$$

ここに P_m および P_b : 海底地盤表面および海底地盤中の変動水圧

H : 波高、T : 周期、 λ : wave number、 C_v : 圧密係数

α : 伝達係数、

3.解析結果および考察

図-2に各深度における過剰間隙水圧($P_b - P_m$)_{max} および静水時の有効土被り圧 σ'_{v0} を示した。下向きの有効土被り圧を上向きに作用する過剰間隙水圧が上回ったときに土粒子の有効鉛直応力は負となり、液状

化すると考えられる。図-3を見ると、 180° の位相で最大約3mまで有効鉛直応力値は負となっている。

図-3に想定した領域内での有効応力分布を示した。位相にして $90^\circ \sim 270^\circ$ まで波力が下向きに作用しているのに対し、液状化はやや遅れて $60^\circ \sim 210^\circ$ の領域で発生している。また深度にして 180° の位相で最大約3mまで液状化している。この結果は図-2から得られる結果とも一致する。

図-4に想定した領域内での浸透力分布を示した。上向きの浸透力を正とした。図-4に示した液状化領域を覆うように上向きの浸透流が生じていることが分かる。そこで図-1に示すとおり土粒子に働く鉛直方向の力の釣り合いを考察する。土粒子を近似的に球形であると、土粒子密度を豊浦標準砂の 2.65g/cm^3 とすると、土粒子自重 W は粒径にばらつきがあるため $5.89 \times 10^{-10} \sim 1.57 \times 10^{-2}(\text{kN})$ と求められる。それに対して液状化領域では海底面付近で上向き浸透力が約 $40(\text{kN/m}^3)$ 働いている。よってこの力により海底面付近の砂粒子が舞い上がることは十分予想される。つまり砂粒子の挙動を追う上でこの上向き浸透力を無視することはできない。

図-5は任意の波浪、地盤条件および浸透力分布モデルを入力したときの不連続変形法による海底砂粒子の挙動を3つの時刻に分けて解析した結果である。色が薄くなるにつれて下向き浸透力は小さくなり、最も薄い部分では上向き浸透力が働いている。Case-3では海底面付近の砂粒子が浮き上がっている。これは海底面付近では土粒子自重を上回る浸透力の作用で、液状化を起こし、さらには土粒子が海中にまで舞い上がるほどの力を受けていると考えられる。

4. 結論

- 1) 海底地盤の液状化は、波浪時の急激な海面低下により、地中で過剰間隙水圧がたまり、それが上向きの浸透流を発生させるために起きる。また、海底砂粒子の挙動を追う上で、液状化領域における上向き浸透力を無視することはできない。
- 2) 海底砂地盤に不連続変形法を適用すると、液状化および砂粒子の浮上を確認することができる。

5. あとがき

本文では海底砂地盤中の間隙水圧変動を1次元解析で求めることによって、最終的に $1 \times L$ 要素内で発生する浸透力の分布を出力した。今後は、波浪条件下では無視することができない海底地盤中での上向き浸透力を外力要因として十分に加味し、液状化後の海底砂粒子の挙動解析を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 善 功企：海底地盤の波浪による液状化に関する研究、港湾技研資料、1993
- 2) 服部 昌太郎：海岸工学、コロナ者、1998
- 3) 土木学会、土木情報システム委員会編、土木情報処理の基礎、

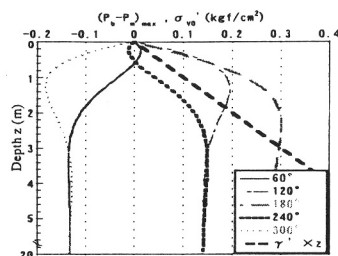


図-2 有効応力と過剰間隙水圧

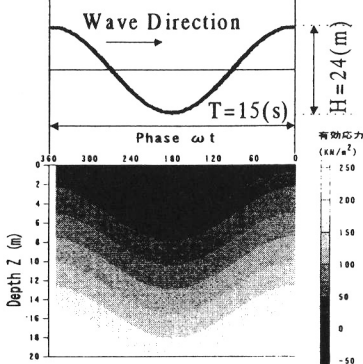


図-3 液状化領域図

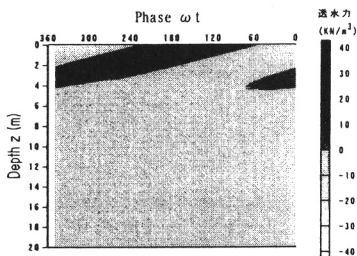


図-4 浸透力分布図

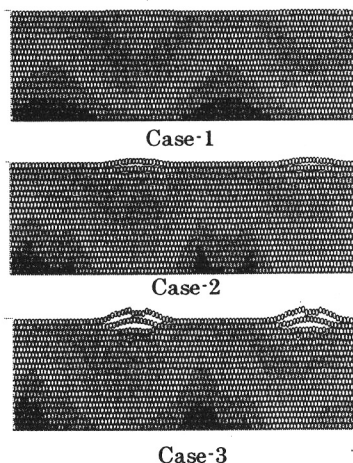


図-5 不連続変形法による土粒子挙動