

波浪による海底地盤の液状化に関する二次元差分解析

九州大学大学院 学 ○高松 賢一 正 善 功企
正 陳 光斉 正 笠間 清伸

1.はじめに

国土全域が海に囲まれている我が国にとって、港湾施設を安全でかつ耐久的に維持していくことは国家繁栄のために欠くことのできない永遠の課題である。そのような我が国の港湾施設を脅かす最大の敵の一つに波浪による海底地盤の液状化がある。波浪時に急激な水位変動が生じた場合、海底面に作用する水圧と海底地盤内を伝達していく水圧との間に差が生じるため、海底地盤内では過剰間隙水圧が発生する。過剰間隙水圧の上昇は海底地盤の液状化を引き起こし、液状化した砂粒子は掃流力の作用により輸送される。砂粒子の輸送が原因で港湾構造物が支持力を失い、被災したという報告は少なくない。これまでの研究¹⁾において、一次元不連続変形法解析により波浪時に海底地盤は液状化し、砂粒子が浮上することを確認することはできた。しかし、このとき海底地盤液状化に大きく関係する砂粒子が受ける浸透力を求めるためには、地盤内に発生する過剰間隙水圧を正確に定量化する必要がある。

そこで本文では、海底地盤の過剰間隙水圧に着目し、海底地盤内を伝達する水圧を二次元の圧密方程式でモデル化し、波浪条件と地盤条件が過剰間隙水圧の発生機構に与える影響についてパラメーター解析を行うことによって解明した。

2.解析方法

解析で用いた海底地盤の概念図を図-1に示した。過剰間隙水圧分布を求めるために、波浪により海底面が受ける水圧分布を微小振幅波理論より式(1)で与え、海底地盤内を伝達する水圧を圧密方程式型の微分方程式(式(2))でモデル化した。式(2)を二次元差分法を用いて、表-1,2にあるような波浪条件および地盤条件をそれぞれ変化させて解き、両条件が過剰間隙水圧分布の発生機構に与える影響について整理し、考察した。そして、その結果を用いて過剰間隙水圧が有効土被り圧を上回る液状化の深度を決定した。また、解析結果をこれまでの一次元解析で導かれる結果²⁾と比較検討した。

$$P_b = \frac{\gamma_w \cdot H}{2 \cosh(\lambda D)} \cdot \sin 2\pi \left(\frac{X}{F} + \frac{t}{T} \right) \dots\dots\dots(1)$$

$$C_v \left(\frac{\partial^2 P_m}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial Z^2} \right) = \alpha \cdot \frac{\partial P_m}{\partial t} - \frac{\partial P_b}{\partial t} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $\lambda = 2\pi/F$: 波数である。

3.解析結果および考察

図-2 に変動間隙水圧振幅値の深度分布図を示した。水平軸の変動間隙水圧の値はそれぞれの深度における水圧変動の最大値を意味する。ある深度以深になると変動間隙水圧振幅値は一定値に収束していく。その収束値は排水性の高い(排水係数Cが大きい)地盤の方が小さくなる。また、Cが大きい地盤では深くなるにつれて最終的に水圧変動量は小さくなる。次に、C=0.01の地盤では、二次元解析による変動間隙水圧振幅は一次元解析結果にほぼ一致

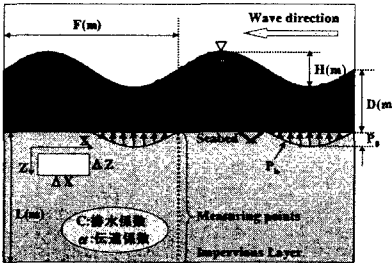


図-1 海底地盤の解析概念図

表-1 入力条件

波浪条件	水深	D(m)	50
	波高	H(m)	10
	波長	F(m)	表-2参照
	周期	T(s)	(F/1.56) ^{1/2}
海水の単位体積重量	γ_w (kN/m ³)		10.1
	土の飽和単位体積重量	γ_{sat} (kN/m ³)	15.0
	土の水中単位体積重量	γ' (kN/m ³)	4.90
地盤条件	透水層長	L(m)	20
	排水係数	C	表-2参照
	伝達係数	α	表-2参照
鉛直方向の差分間隔	ΔZ (m)		0.4
	水平方向の差分間隔	ΔX (m)	F/16

表-2 解析ケース(枠内は波長)

C	α	1.5	2.0	3.0	4.0
		30	30	30	30
0.01		150	150	150	150
		300	300	300	300
		30	30	30	30
		150	150	150	150
0.1		300	300	300	300
		30	30	30	30
		150	150	150	150
		300	300	300	300
1.0		30	30	30	30
		150	150	150	150
		300	300	300	300
		30	30	30	30
10.0		150	150	150	150
		300	300	300	300
		30	30	30	30
		150	150	150	150

注)単位は全てmである。

し、海底面付近で伝達する水圧は急激に減衰する。しかし、 $C=1.0$ の地盤では、海底地盤内を伝わる水圧は比較的緩やかに減衰していく。さらに、二次元解析による変動間隙水圧振幅は一次元解析結果に一致せず、一次元よりも急激に減衰し、大きな減衰量となる。これは排水しにくい地盤 ($C=0.01$) では水が地盤中に溜まり易く、排水しやすい地盤 ($C=1.0$) では水が地盤中に溜まりにくいからであると考えられる。また、 $C=1.0$ の地盤で一次元と二次元の解析解に差が生じたのは、二次元の方では水平方向の排水が活発に行われ、その結果、水圧の減衰量が大きくなるためと考えられる。

図-3に位相差の深度分布を示した。位相差とは海底面で発生した変動間隙水圧が各深度地点で応答するまでにかかる時間を意味する。 $F=150\text{m}$ の場合は0.8mの深さで最大0.37秒の位相差が生じる。 $F=30\text{m}$ の場合は同じく0.8mの深さで最大0.17秒の位相差が生じる。しかし、両ケースとも0.8mからは位相差が減少し、2.8m以深では生じないという結果になった。すなわち波長の大きな波の方が海底面付近において水圧の伝達に時間がかかると言える。

図-4に C と過剰間隙水圧および伝達係数 α と過剰間隙水圧の両関係を示した。 C が大きくなると、また α が大きくなると発生する過剰間隙水圧も大きくなる傾向にあることが分かる。また、 $C=0.1$ までは発生する過剰間隙水圧が一次元解析結果と一致するのに対して、 C がそれ以上に大きくなると一次元解析とは大きく異なってくる。さらに、波長が大きくなれば一次元と二次元で一致する C の値は増加していく。これは C を大きくして排水性が増すと、水平方向の排水も活発に行われるようになり、二次元解析では水平方向の排水を考慮して過剰間隙水圧の算定を行えるが、一次元解析では水平方向の排水を考慮した過剰間隙水圧の算定を行えないためであると考えられる。

図-5に伝達係数 α と液状化深度の関係を示した。 C が減少するにつれて、また α 、波長が増加するにつれて液状化深度は増加する。波長が300mのときは、 $C=0.01$ と $C=0.1$ の結果は一致する。

4. 結論

- (1) 排水係数が減少し、伝達係数と波長が増加するほど、発生する過剰間隙水圧の値は増加し、液状化深度も増加する。
- (2) 波長の増加に伴い、位相差も増加する。
- (3) 排水係数の増加に伴い、伝達水圧の減衰量も増加する。
- (4) 波長が短い場合、または C が大きい場合は、水平方向の水の流動が生じる可能性があるため、過剰間隙水圧を算定する際に水平方向の水の流動を考慮した二次元解析を用いるのが適切である。

<参考文献>

- 1) 陳 光齊・善 功企・笠間 清伸・高松 賢一:「波浪による海底地盤砂粒子挙動の数値シミュレーション」: 海岸工学論文集, 第48巻, 2001
- 2) 高松 賢一・善 功企・陳 光齊・笠間 清伸:「不連続変形法による海底地盤の液状化解析」: 第36回地盤工学研究発表会, pp.1197-1198, 2001.

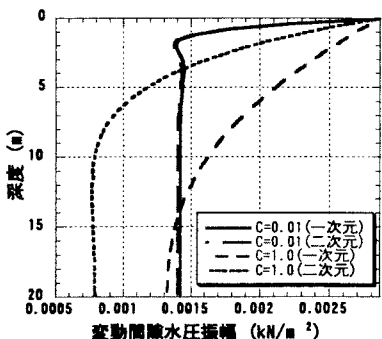


図-2 変動間隙水圧振幅値の深度分布

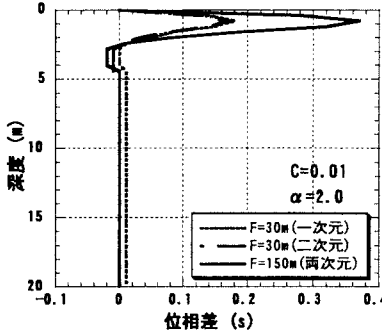


図-3 変動間隙水圧伝達の位相差

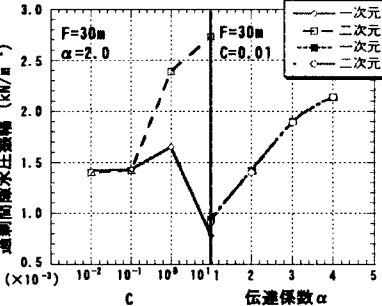


図-4 C , α の過剰間隙水圧に与える影響

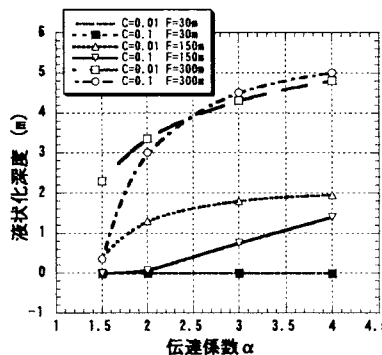


図-5 伝達係数 α - 液状化深度