

波浪による液状化にともなう離岸堤の変状に関する考察

運輸省 港湾技術研究所 正会員 ○善 功企
同 上 正会員 山崎浩之

1. まえがき

離岸堤を構成する異形ブロック等が、経年的に砂地盤中に沈み込んだ例が報告されている¹⁾。この原因として、局所洗掘や砂の吸出し等があげられているが、砂地盤中への沈み込みのメカニズムは、必ずしもこれらの原因だけでは説明できない。筆者らは、波浪の作用によって海底砂地盤が液状化することを室内実験²⁾および現地観測^{3)、4)}により確認しており、また、液状化にともない異形ブロックが砂地盤中へ沈み込む現象についても室内実験により再現し、ブロックの沈み込みが地盤の液状化に起因することを明らかにしている²⁾。最近、液状化を判定するための方法もいくつか提案されており^{2)、5)-7)}、離岸堤の安定問題を取扱う場合には、このような波浪による海底地盤の液状化現象を考慮する必要があると考えられる。そこで、ここでは、ある海岸の離岸堤を研究の対象として、主として海底地盤の液状化という観点から、その安定問題に関するケーススタディを実施した結果について報告する。

2. 波浪による液状化理論

(1) 液状化規準

筆者らは、既に海底砂地盤の液状化の予測方法について報告している¹⁾が、それによると、液状化規準は、以下に示す簡単な式で表される。

$$\sigma'_{v_0} \leq - (p_b - p_m) \quad (1)$$

ここに、 σ'_{v_0} ：静穏時の有効土被り圧、 p_b および p_m ：それぞれ、海底地盤表面および地盤中の水圧変動で、静水圧からの増分を正とする。式(1)によると、液状化現象を支配する要因は、 σ'_{v_0} 、 p_b 、 p_m の3つであるから、これらが得られれば簡単に液状化の予測を行うことができる。

(2) 静穏時土被り圧

σ'_{v_0} については、海底表面の上載荷重による地盤中の有効応力を σ' 、地盤の水中単位体積重量を γ' 、地盤面からの深度を z とすると、次式で与えられる。

$$\sigma'_{v_0} = \gamma' z + \sigma' \quad (2)$$

(3) 変動間隙水圧

海底地盤中の変動間隙水圧 p_m については、圧密係数 C_v 、伝達係数 α 、時間 t として、次式で示すBiot型の基礎方程式が提案されている。

$$C_v \frac{\partial^2 p_m}{\partial z^2} = \alpha \frac{\partial p_m}{\partial t} - \frac{\partial p_b}{\partial t} \quad (3)$$

式(3)を次項で述べる微小振幅波理論を用いて無次元化すると、式(4)が得られる。

$$C \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial \bar{Z}^2} = \alpha \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{T}} + 2\pi \cos(2\pi \bar{T}) \quad (4)$$

ここに、 C ：排水係数 ($=C_v T / l^2$)、 $\bar{P} = p_m / p_0$ 、 $\bar{Z} = z / l$ 、 $\bar{T} = t / T$ で、 p_0 は海底面上の水圧変動振

幅、 T は周期、 l は透水砂層の厚さである。

(4)海底面の水圧変動

微小振幅波を仮定すると、 p_b は次式で与えられる。

$$p_b = p_0 \sin(\lambda x - \omega t) \tag{5}$$

ここに、

$$p_0 = \frac{\gamma_w H}{2 \cos(\lambda h)} \tag{6}$$

H :波高、 h :水深、 ω :角振動数(= $2\pi/T$)、 λ :波数(= $2\pi/L$)、 L :波長、 x :水平方向座標である。一次元の場合、式(6)の λx の項は考慮しなくてもよい。また、式(5)の p_b を式(3)に代入して無次元化すると式(4)が得られる。

(5)初期条件および境界条件

式(4)は、差分法により解かれるが、そのときの初期条件は、

$$\bar{T} = 0 \text{ で } \bar{P} = 0 \tag{7}$$

境界条件は、

$$\bar{Z} = 0 \text{ で } \bar{P} = \sin(2\pi\bar{T}) \tag{8}$$

$$\bar{Z} = 1 \text{ で } \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{Z}} = 0 \tag{9}$$

となる。

3. 解析の前提

離岸堤の変状・沈下やその周辺地盤の局所洗掘に関しては、これまでかなりの調査結果が報告されているが、現象の複雑性から、これらを予測するための定量的手法はまだ確立されていない現状である。そこで、本文では、図-1のような離岸堤(潜堤)モデルを想定し、その安定性について地盤の液状化の観点から検討するものであるが、定量的な取扱が可能ないように、現象をできるだけ単純化して以下のように分類した。すなわち、離岸堤の安定問題を、図-2に示すように、主要な3つのパターンに大別した。その1つは、離岸堤の全体の安定(領域IとII)、2つ目は、離岸堤法面の安定(領域I)、3つ目は、離岸堤内(領域II)の安定問題である。従来の設計法にもとづく静的な円形すべり計算結果では、上記3パターンとも十分な安全率を有している。領域IIにおいては、離岸堤表面に作用する水圧変動が非線形的になることや、既往の調査による離岸堤の変状をみると、マウンド法先部が洗掘されている例が多いことなどから、ここでは、まず領域Iのマウンド法先部地盤に限定した液状化現象について検討を行うことにした。

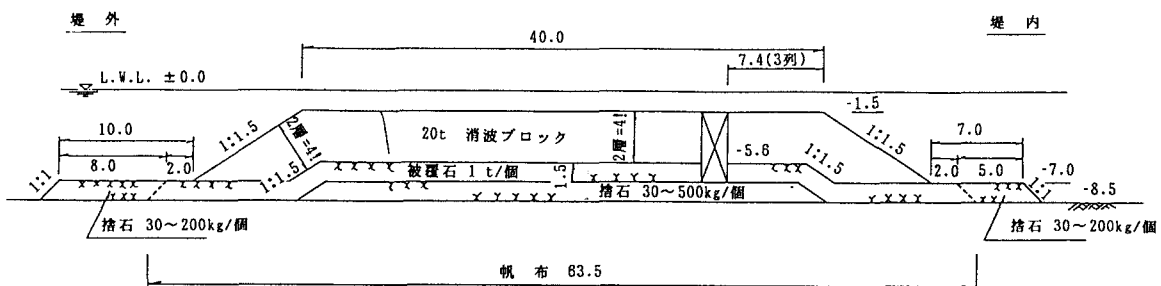


図-1 離岸堤(潜堤)モデル

4. 解析条件

解析では、離岸堤の2つの区間（A-1およびA-2）を対象とし、解析条件を以下のように設定した。

(1) 波浪条件

設計波高および周期： $H_{1/3} = 5.7\text{m}$ 、 $T_{1/3} = 14.2\text{s}$ （50年確率）、入射角： $\beta = 0^\circ$ を参考に、図-3に示す離岸堤設置地点の $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ の結合分布から表-1の波を想定した。解析では微小振幅波を仮定している。

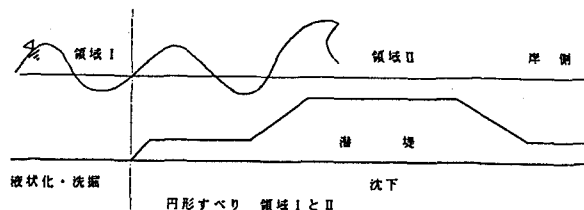


図-2 対象地盤領域

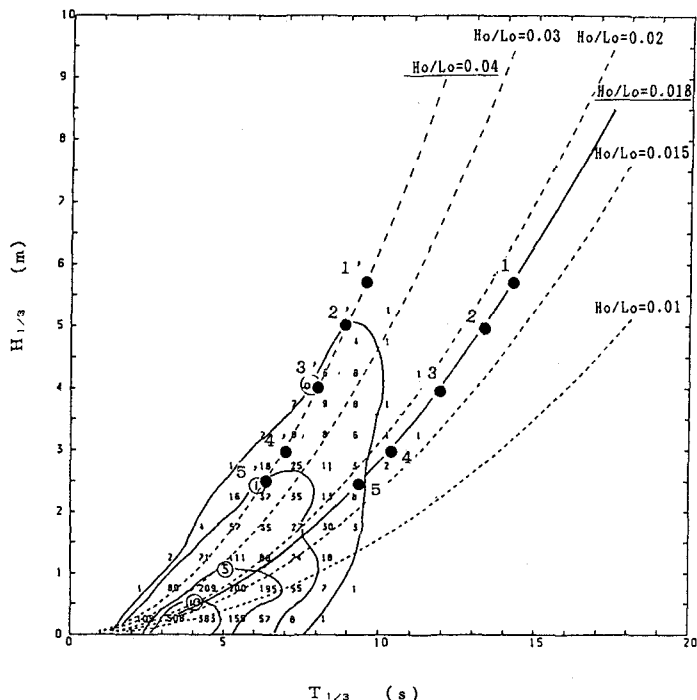


図-3 有義波高、周期の結合分布

表-1 波高、周期と海底面の水圧振幅

番号	有義波高 $H_{1/3}$ (m)	波高* H(m)	周期 T(s)	水圧振幅** p_o (tf/m^2)
1	5.7	10.3	14.2	4.85
1'			9.5	4.31
2	5.0	9.0	13.2	4.17
2'			9.0	3.70
3	4.0	7.2	11.8	3.24
3'			8.0	2.76
4	3.0	5.4	10.2	2.29
4'			7.0	1.89
5	2.5	4.5	9.3	1.88
5'			6.3	1.41

注) * $H = 1.8H_{1/3}$ 、
** 上段：波形勾配 $H_o/L_o = 0.018$ 、
下段： $H_o/L_o = 0.040$

(2) 地盤条件

対象となる離岸堤周辺部地盤は、図-4に示すとおりで、粘土層を不透水境界として透水層厚 l を決めた。A-1区間の l は20.5m、A-2区間では、粘土層が比較的浅層にみられており l を2.0mとした。透水砂層の水中単位体積重量 γ' は $1.0\text{tf}/\text{m}^3$ とした。また、この地点の水深は、DL-8.5mである。

(3) 土質条件

N海岸砂を用いた室内液状化実験結果とその他の現地観測および解析結果を参考に、伝達係数 α を2.0とした。排水係数 C は、圧密係数 C_v 、透水層厚 l のほかに、波の周期 T の関数でもあるので、N海岸で得られた図-3の結合分布を参考にして、波形勾配が0.018と0.04の場合について解析した。排水係数の一覧を表-2に示す。

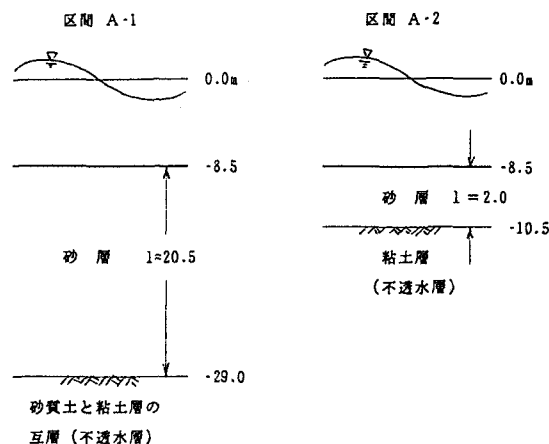


図-4 地盤の層構成

5. 解析結果と考察

(1) 波浪による応力変動

図-5に、解析により求まる地盤中の有効土被り圧の変動 ($p_b - p_m$) を、海底面に作用する水圧変動振幅 p_0 で無次元化した値 ($p_b - p_m$) / p_0 の深度分布の一例を示す。式(1)で提案した液状化規準によると、このような有効土被り圧の変動量が、静穏時の海底地盤中の有効土被り圧を越えたところで液状化が発生することになる。したがって、法先部地盤のように上載荷重がない場合には、0.24m以浅で液状化が発生すると考えられる。ただし、図-5の破線で示すように、捨石や異形ブロックなどの上載荷重による抑え効果が十分期待される場合には、静穏時の有効土被り圧が大きくなるから、地盤の液状化は発生しなくなる。このことは、式(1)、(2)より明らかである。

(2) 液状化深度

図-6は、A-1区間における液状化の予測結果である。図-6によると波形勾配の影響はそれほど大きくは表れていないことがわかる。また、波高が4m程度以下の波に対しては海底砂地盤における液状化現象は発生しないことが明らかである。図-6には、波高が10.3mまでの結果が示されているが、潜堤前面の水深8.5mの地点の最大波高は、規則波の碎波限界波高から推定すると6.5m (波形勾配が0.018のとき) となるから、最大液状化深度は、このときの波に対して1.3m程度となるものと思われる。

図-7は、A-2区間における液状化深度を示している。この場合も、図-6と同様な結果が得られているが、液状化深度は1.6m程度となる。したがって、4m程度以上の波が来た場合には、潜堤法先の変状はある程度覚悟する必要があるだろう。この影響は、長期的には徐々に堤本体部分に波及していく可能性があると考えられる。

表-2 排水係数

波番号	排水係数 $C = C_v T / l^2$									
	1	2	3	4	5	1'	2'	3'	4'	5'
A-1	0.036	0.033	0.030	0.026	0.023	0.024	0.023	0.020	0.018	0.016
A-2	3.8	3.5	3.1	2.7	2.5	2.5	2.4	2.1	1.9	1.7

注) 圧密係数 $C_v = 1.06(m^2/s)$
 層厚 $l = 20.5m$ (A-1区間)、 $l = 2.0m$ (A-2区間)
 波形勾配 $H_0/L_0 = 0.018$ (1~5)、 $H_0/L_0 = 0.040$ (1'~5')

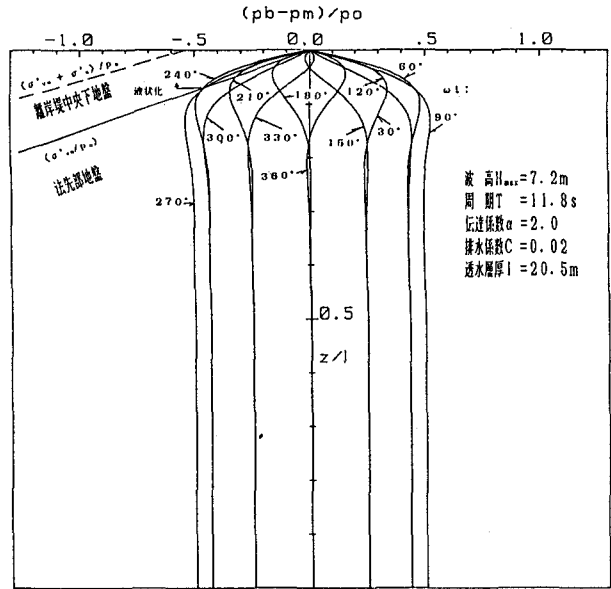


図-5 応力変動と液状化

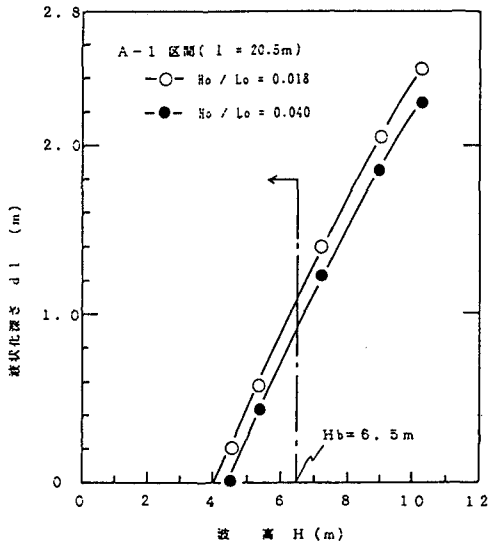


図-6 液状化深度 (A-1区間)

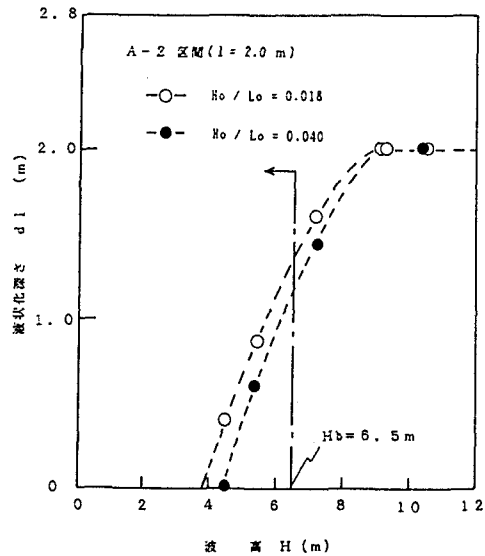


図-7 液状化深度 (A-2区間)

(3)液状化範囲

図-8は、図-5のケースについて、1波長分の波に対する地盤の液状化範囲を示したものである。図-8では、波の谷が法先部の位置にあるときの結果を示している。捨石下部地盤の有効土被り圧は、捨石による上載荷重を考慮しているが、水圧の伝播は捨石による影響を無視して捨石がないものとして解析している。図-8より明らかなように、潜堤法先地盤のかなりの範囲で液状化が生じる結果が得られる。

海底地盤が液状化すると、液状化した地盤の強度は0となることから、付近の捨石等は液状化地盤の方へ向って沈み込むことが考えられる。この液状化にともなう変状パターンを描くと図-9のようになる。2. および5. (1)で述べたように、海底地盤の液状化は有効土被り圧に大きく依存するから、上載荷重の大きな潜堤本体下の地盤の液状化抵抗力は大きい（ブロック等の自重が十分地盤に伝わる場合）と考えてよい。したがって、土質工学的にみた潜堤の弱点は法先部にあると考えられ、図-9のように、法先部の液状化の影響が堤本体部分に波及することによって、捨石、ブロック等が沈下・分散し機能を維持できなくなることが想定される。また、沈下・分散によりブロック等が個々に地盤中に埋没すると、抑え効果がなくなり、さらに液状化により沈下が進行することになる。

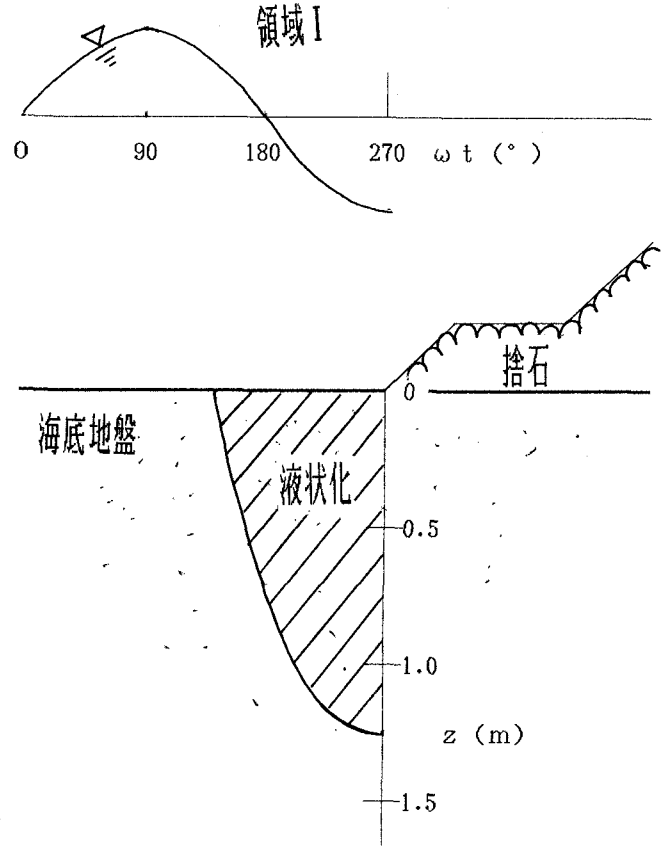


図-8 液状化領域

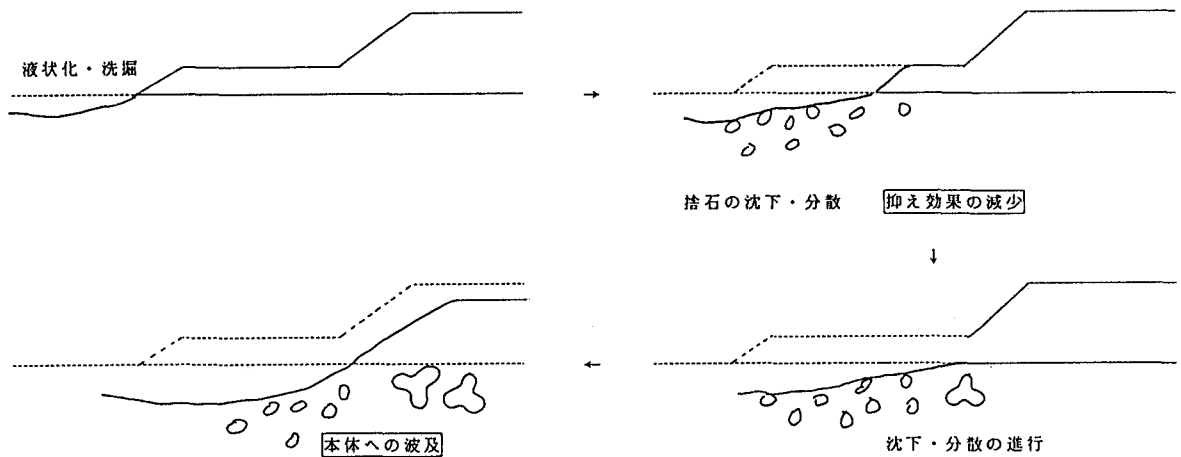


図-9 離岸堤の変状パターン

6. あとがき

本文では、波浪による海底地盤の液状化深度について、実際の離岸堤法先部地盤をモデルとしてケーススタディを行った。解析で用いた入力定数は、現地から採取した試料を用い実験から決定したものである。解析結果によると、設計波高が来襲した場合、法先部では1.1m～1.6m以浅において液状化現象が発生する結果とな

った。液状化した地盤は支持力を消失するから、法先部地盤中へ捨石等が沈み込む可能性があることも予想される。捨石などが地盤中に沈み込む場合には、側方へ広がりながら個々の捨石はいわゆるばらばらになった状態で砂地盤中沈下し、抑え効果がさらに期待できなくなる。このことも沈み込みを促進する原因の一つと考えられる。今後、さらに、沈み込み量の定量的把握方法について検討する必要があると思われる。

参考文献

- 1)西田仁志、山口 豊、近藤豊次、清水謙吉(1985)：孔間弾性波法による離岸堤の埋没状況に関する考察、第32回海岸工学講演会論文集、土木学会、pp.365-369.
- 2)善 功企、山崎浩之、渡辺 篤(1987)：海底地盤の波浪による液状化および高密度化、港湾技研報告、第26巻、第4号、pp.125-180.
- 3)善 功企、山崎浩之、佐藤 泰(1989)：波浪による海底地盤中の応力変化に関する現地観測、海洋開発論文集、土木学会、Vol.5、pp.85-90.
- 4)善 功企、山崎浩之、佐藤 泰(1989)：海底地盤の波浪による液状化－現地観測および解析－、港湾技研報告、第28巻、第3号、pp.29-57.
- 5)前野賀彦、酒井哲郎、間瀬 肇(1988)：波浪による砂層の液状化傾向と波形勾配との関係、海洋開発論文集、土木学会、Vol.4、pp.5-10.
- 6)酒井哲郎、服部明彦、間瀬 肇(1989)：波浪による砕波帯海底地盤の有効応力ゼロ領域の発生、海洋開発論文集、土木学会、Vol.5、pp.79-84.
- 7)泉宮尊司、古保弘和、飯田秀樹(1989)：波浪による海底地盤の液状化発生条件および海底谷のある海浜への適用、第36回海岸工学講演会論文集、土木学会、pp.784-788.