

液状化・津波による海岸堤防の変形挙動

京都大学大学院 学生会員 ○礪谷泰市

京都大学防災研究所 正会員 井合 進

京都大学防災研究所 正会員 飛田哲男

1. はじめに

わが国ではマグニチュード 7 を超える大地震が過去に幾度となく発生し、その度に海岸堤防等の盛土構造物においても甚大な被害が発生している。しかし、2011 年東北地方太平洋沖地震では、地震による被害に加え、その後の津波による被害も甚大であった。そこで本研究では津波の影響を顕著に受けと考えられる盛土式海岸堤防を対象とし、地震時の液状化およびその後の津波による変形挙動を、2 次元有効応力解析法 (FLIP) ¹⁾を用いて検討する。

2. 2 次元有効応力解析

解析メッシュおよび入力加速度時刻歴をそれぞれ図 1 および図 2 に示す。地下水面は地表面に等しく設定し、下部地盤全体を液状化層とした。解析パラメータは表 1 に示すものを使用し、津波の影響に関しては堤外側 (海側) 法面および下部地盤に対して水圧を作用させて解析を行った。下部地盤は排水条件とし、津波の到達に伴う下部地盤内への浸透流の影響を考慮した。尚、本研究では堤体部への浸透流の影響は考慮していない。解析ケースとしては表 2 に示す 7 ケースを行い、Case 1 では地震波のみ、Case 2 および Case 3 では堤体部と下部地盤への水圧の双方を変化させて津波の影響を考慮している。また、Case 4 および Case 5 では堤体部、下部地盤のどちらか一方の水圧を大きくすることで、それぞれの全体の変形挙動への影響の大きさを評価する。Case 6 および Case 7 では水位上昇時刻 (= 津波到達時刻) を加振直後と加振後 370 秒後に変化させ、津波到達時の下部地盤内の残留過剰間隙水圧が盛土の変形にどのような影響を与えるのか調べる。

3. 解析結果

図 3 の Case 1 (地震動のみ) および Case 2 (静水圧付与) を比較すると、海側に静水圧を与えた Case 2 では、下部地盤内の水圧分布が陸側に偏っていることがわかる。またわずかではあるが天端中央が陸側へ変位し (Case 2: 6 cm)、天端沈下量が減少している (Case 1: 28 cm, Case 2: 25 cm)。次に、図 4(a)に示すように津波を模擬する水圧を、海側堤体斜面部と下部地盤に与え、それが堤体の変形にどのように作用するか考察する。Case 1 (図 3) と比較すると、Case

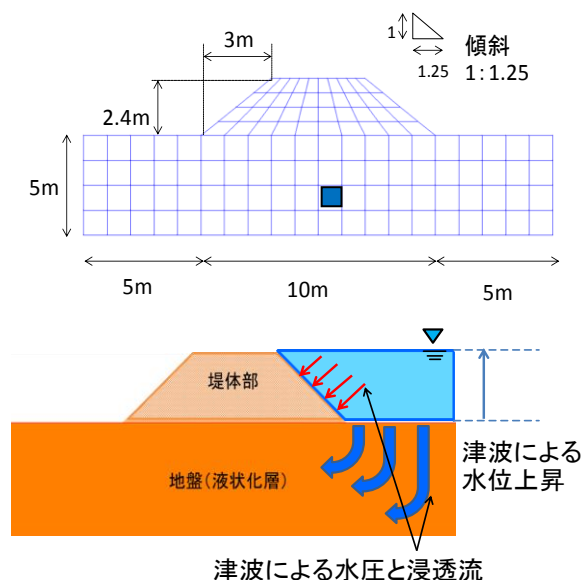


図 1. 解析手法および解析メッシュ

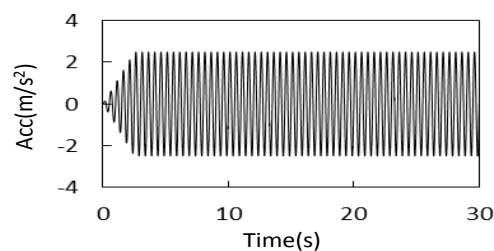


図 2. 入力加速度時刻歴波形 (正弦波)

材料名	透水係数	質量密度	間隙率	変形特性			
				初期せん断剛性	体積弾性係数	内部摩擦角	粘着力
豊浦砂	$k(m/s)$	$\rho(kN/m^3)$	n	$G_{max}(kPa)$	$K_{ms}(kPa)$	$\phi_i(^{\circ})$	$c(kPa)$
	1.64×10^{-4}	1.919	0.45	3.3×10^4	8.6×10^4	44	0

表 1. 解析に用いたパラメータ

解析ケース	入力地震波 (最大入力加速度)	堤体部への 荷重	下部地盤への 荷重	水位上昇 開始時刻	水位上昇 完了時刻
Case1	正弦波(250gal)	—	—	—	—
Case2		静水圧		t=110(s)	t=150(s)
Case3		静水圧比3倍			
Case4		静水圧	静水圧比3倍		
Case5		静水圧比3倍	静水圧		
Case6		静水圧	静水圧比3倍	t=30(s)	t=50(s)
Case7				t=400(s)	t=420(s)

表 2. 解析ケース

4 (図 4) では, 天端の堤内側への変位は 23 cm と増加し, 沈下量は 15 cm と減少した. また, 同図の下部地盤内の有効応力減少比の偏りが大きくなり, 海側の堤体下部地盤内で水圧上昇が顕著に見られる. これは, 津波によって下部地盤内に浸透流が発生していることを示している. また, 図 4(b)に示すように Case 5 では堤体部に作用する静水圧を Case 4 の 3 倍にしたものであるが, この場合には, 加えた静水圧のため海側の有効応力減少比は小さくなっていることがわかる.

次に, 津波到達時の下部地盤内の残留過剰間隙水圧の影響について検討する. 図 5 より Case 6 の方が, Case 7 と比較して有効応力減少比の小さな領域が広い (= 液状化領域が広い). これは加振直後で水圧消散が進んでいないためである. このとき天端の堤内側への変位は 27 cm, 沈下量は 16 cm である. 加振後 370 秒後に津波が到来すると仮定した Case 7 では, 天端の堤内側への変位は 19 cm, 沈下量は 17 cm であり, Case 6 と比較して水平変位量がやや減少する結果となった.

Case 6 と 7 について, メッシュ図 (図 1) に示す位置の軸差応力-軸差ひずみ関係を図 6 に示す. 加振により軸差ひずみは増大する (要素形状が平たくなる) が, 水位上昇とともに軸差応力が減少し, それに伴い軸差ひずみも小さくなっていることがわかる. また, 下部地盤への水圧を大きくした Case 4 の方が軸差応力の減少量が大きくなっていることから, 下部地盤への水圧による浸透流によって下部地盤内の要素がせん断変形を生じているためだと考えられる.

4. 結論

海岸堤防の地震時の液状化とその後の津波による複合破壊機構について, 海側の堤体斜面部と下部地盤に静水圧を与えることで津波を模擬した解析を行い検討した. 津波到達時の下部地盤の残留過剰間隙水圧の程度によって, 津波による海岸堤防の変形挙動には差がみられ, 下部地盤に残留する過剰間隙水圧が高いほど水平方向の変形量が大きいことがわかった.

参考文献

- 1) Iai, S., Matsunaga, Y., and Kameoka, T. (1992). "Strain space plasticity model for cyclic mobility." Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 32(2), 1- 15.

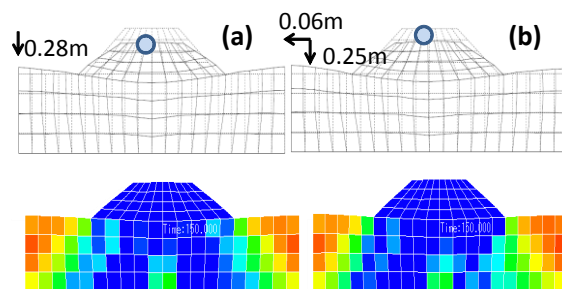


図 3. 天端変位 (上), 残留有効応力減少比 (下) (赤: 減少比が 1 に近い): (a) Case 1, (b) Case 2.

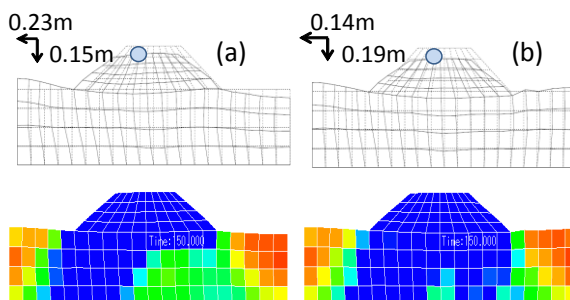


図 4. 天端変位 (上), 残留有効応力減少比 (下) (赤: 減少比が 1 に近い): (a) Case 4, (b) Case 5.

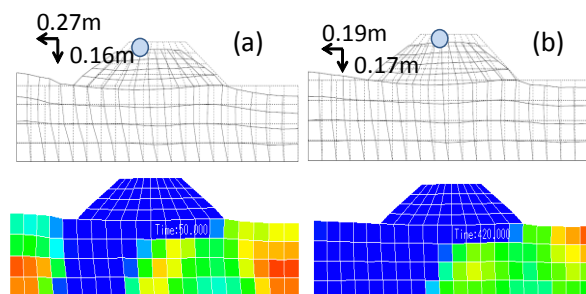


図 5. 天端変位 (上), 残留有効応力減少比 (下) (赤: 減少比が 1 に近い): (a) Case 6, (b) Case 7.

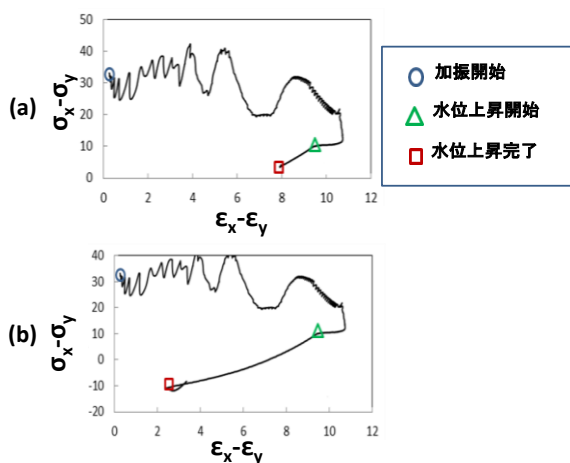


図 6. 軸差応力-軸差ひずみ関係: (a) Case 2, (b) Case 4.