# 地震を考慮した津波による地盤の劣化解析

日建設計シビル	正会員	○加藤 亮輔
京都大学大学院	正会員	奥村 与志弘
	フェロー会員	岡 一三生

材料パラメ

初期間隙比

内

### 1. 研究の背景と目的

緩く砂の堆積した海底面が波浪によって液状化する現象は広く知られている。埋め立て地盤や砂州のような緩い 地盤上に津波が遡上することで、地盤の劣化を含めた同様の現象が生じることが推測され、このような地盤の劣化 現象について解析的に検討を行ってきた<sup>1)</sup>。本研究では、地震後に津波が襲来することを考慮し、津波のみを考慮 した場合と、津波襲来前に地震により地盤が液状化していた場合について解析を実施し、結果を比較する。

#### 2. 解析手法

間隙水が非圧縮であると仮定した飽和地盤では、水位変化による静水圧の変化量と同じだけ地盤内の全応力と間 隙水圧が変化するために地盤内の有効応力は変化しない。しかし、実際には間隙水は圧縮性を有するために静水圧 の変化量と異なる水圧が生じ、有効応力が変化する。これが海底地盤の液状化現象である。

以上の現象を考慮し、間隙水の圧縮性を考慮することが可能な、砂の弾塑性構成式<sup>2)</sup>を組み込んだ液状化解析コード LIQCA2D<sup>3)</sup>を用いて地震時および津波遡上時の検討を実施した。

LIQCA2Dにおける液相の構成式を以下に示す。

$$p = -K_f \mathcal{E}_{ii}^f$$

(1)

ここに、pは間隙水圧、 $K_f$ は水の体積弾性係数、 $\varepsilon_{ii}^f$ は液相のひずみテンソルである。

なお、次式の Okusa の提案式<sup>4)</sup>を用いて飽和度  $S_r$  と水の体積弾性係数  $K_f$  の関係を算出すると、飽和度 100%の時 に  $K_f = 2.0 \times 10^6$  (kPa) 、飽和度 98%の時に  $K_f = 5880$  (kPa) となる (加藤ら<sup>5)</sup>)。

$$m_w = m_{w0}S_r + \frac{1 - S_r}{p_{mg}} = \frac{1}{K_f}$$
(2)

ここに、 $m_w$ は気泡の存在を加味した水の見かけの圧縮率、 $m_{w0}$ は飽和度 100%時の水の圧縮率、 $p_{mg}$ は絶対圧力で表した間隙水圧である。

### 3. 解析条件および解析ケース

簡単のため、図1に示すような高さ5mの超規模地盤モデルを用い、 地震動および津波波形を入力した。このとき、土層はN1=10の図2 の液状化強度曲線強度を持った砂層とした。パラメータを表1に示す。 地震動としては東北地方太平洋沖地震における KiK-net 観測点田尻 MYGH06 (GL-80m)で観測されたNS成分<sup>60</sup>の0.5倍調整波を入力し た(図3)。また、津波波形は周期20分、波高5mのsin波形を用い た(図4)。

解析ケースとしては、地震動を考慮しない Casel および、地震終了 10分後に津波が襲来した場合の Case2の2ケースについて実施した。

上稻指数 Λ	0.025
膨潤指数 κ	0.0025
初期せん断係数比 G₀⁄ σ' <sub>m0</sub>	594.0
透水係数 k(m/s)	$1.0 \times 10^{-5}$
密度 ρ(t/m³)	2.0
変相応力比 M <sup>*</sup>	0.91
破壊応力比 M <sup>*</sup> ,	1.13
硬化関数中のパラメータ B <sub>0</sub> *	2500
硬化関数中のパラメータ B <sub>1</sub> *	59
硬化関数中のパラメータ C <sub>f</sub>	0
水の体積弾性係数 K <sub>f</sub> (kPa)	5880
擬似過圧密比 OCR <sup>*</sup>	1.2
ダイレイタンシー係数 D <sub>0</sub> *,n	1.0, 3.0
塑性基準ひずみ $\gamma_{ref}^{P*}$	0.0035
弾性基準ひずみ γ 💒	0.005

表1 パラメータ

N1=10

0.800

150

200



キーワード:液状化,津波,有効応力解析 連絡先:〒541-8528 大阪市中央区高麗橋 4-6-2 日建設計シビル 地盤調査設計部 06-6229-6372

## 4. 解析結果

図5にCaselの有効応力減少比のコンター図を示す。 水位が上昇している3000秒後までは水の重量により有 効応力が増加(有効応力減少比がマイナス)している が、水位が低下していくと有効応力が減少し、有効応 力減少比がプラス側へ転じている。

地震動を考慮した Case2 では、地震終了時には液状化 が生じており、その10分後でも水圧が抜けきっていない(図6)。Case2 では地震終了10分後より津波による 水位上昇が生じる。このときの有効応力減少比のコン ター図を図7に示す。Case1 と同じく水位が上昇してい る3000秒後までは水の重量により有効応力が増加して いるが、水位が低下していくと有効応力が減少し、有 効応力減少比がプラス側へ転じている。6000秒後の有 効応力減少比の最大値は0.68となっており、地震を考 慮しない Case1 の最大値0.51を上回っている。

図8にCase1およびCase2の津波による地盤劣化解析 時における有効応力減少比の時刻歴を示す(図1出力 要素)。Case1では初期状態が原点であるが、Case2で は地震による水圧が消散しきっておらず、この影響に より6000秒後もCase2の有効応力減少比が大きくなっ ている。

### 5. 結論および今後の課題

震後に津波が襲来することを考慮し、津波のみを考 慮した場合と、津波襲来前に地震により地盤が液状化 していた場合について解析を実施した結果、地震によ る地盤の液状化を考慮していた場合の方が、津波によ る地盤劣化の影響が大きいことが分かった。

本検討では小規模地盤モデルを用いているが、今後 はより実際に近い地盤モデルや実際的入力地震動によ る解析により、現実的な挙動の把握をしていく予定で ある。

### 6. 謝辞

本研究では地震波として KiK-net 観測波を使用した。 記して謝意を表する。

[参考文献] 1)加藤亮輔,奥村与志弘,岡二三生:液状 化を考慮した津波による地盤の劣化解析,第45回地盤 工学研究発表会講演概要集,pp.1523-1524,2010.2)Oka,F et al.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, *Geotechnique*, 49(5), 661-680, 1999. 3) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ: LIQCA2D011 資料, 2011. 4)Okusa,S: Wave-induced stress in unsaturated submarine sediments, *Geotechnique*, Vol32, No.3, pp.235-247,1985. 5) 加藤満:多次元液状化解析法とその応用に関する研究, 岐阜大学学位論文, 1995.



0秒後 1000秒後 3000秒後 MAX 0.00 MAX-0.22 MAX-0.16 MIN 0.00 MIN -0.46 MIN -0 27 4000秒後 5000秒後 6000秒後 1.00 0.75 0.50 MAX 0.03 MAX 0.30 MAX 0.51 0.25 MIN 0.00 MIN 0.14 MIN 0.25 0.00 -0.25 -0.50 図 5 Casel の有効応力減少比コンター図



図6 地震解析時の有効応力減少比コンター図(Case2)





