

津波による洗掘*のメカニズム、 巻き上げと液状化

真野 明,

工学博士, 東北大学名誉教授

* 洗掘(scouring)と侵食(erosion)

1. はじめに/2011年大津波による大規模洗掘 山元海岸(宮城県)



津波前(2010年3月撮影)
深刻な海岸侵食、T型突堤、養浜



津波で防波堤が寸断され海水が流れ込む宮城県山元町の海岸(3月19日)=共同

津波後(2011年3月19日撮影)
高密度に破堤、津浪湾、津波水路

山元町坂元川、距離200m



津波前
(2009年12月10日)



津波後
(2011年3月14日)

*

南三陸町 志津川(宮城県)

右より新田川、八幡川、水尻川、距離200m



津波前
(2010年6
月25日)



津波後
(2011年3月
14日)

南三陸町志津川八幡川、距離50m



津波前
(2010年6月25日)

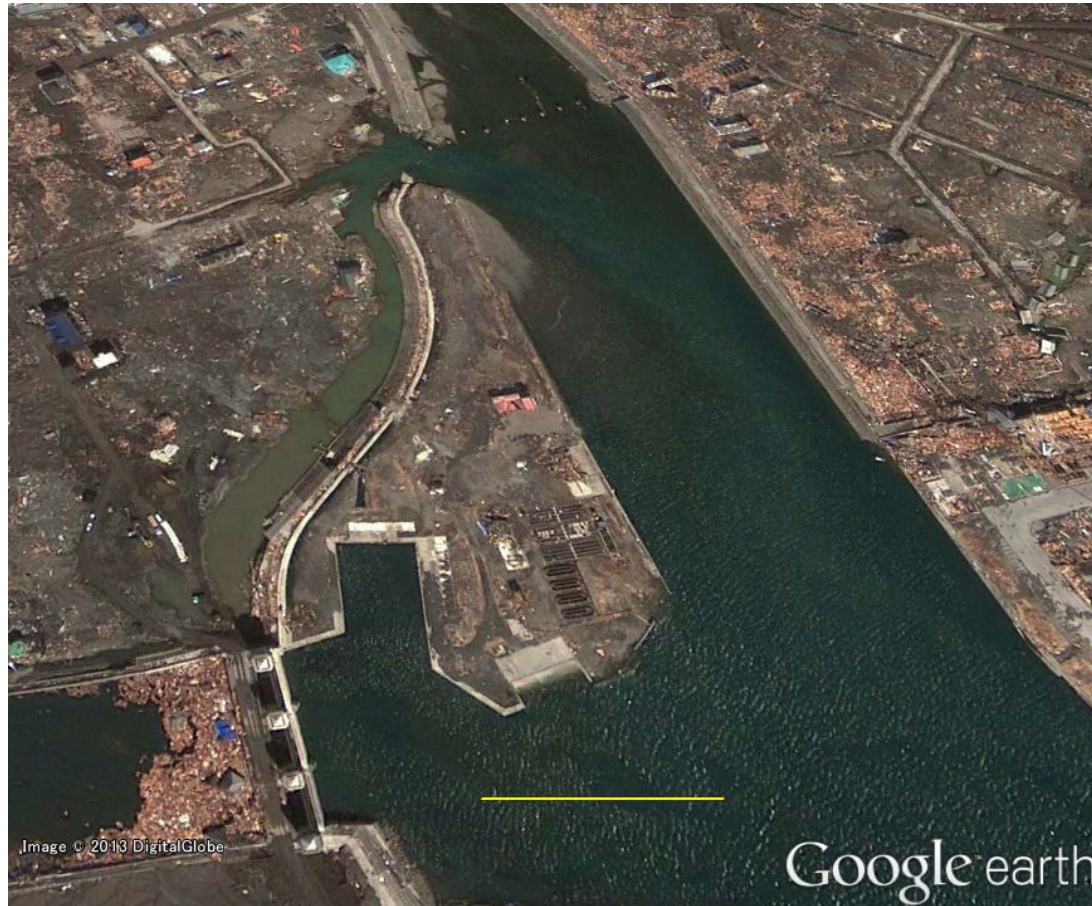


津波後
(2011年3月20日)

*

大槌町(岩手県)

大槌川、小槌川、距離100m



津波後
(2011年3月24日)

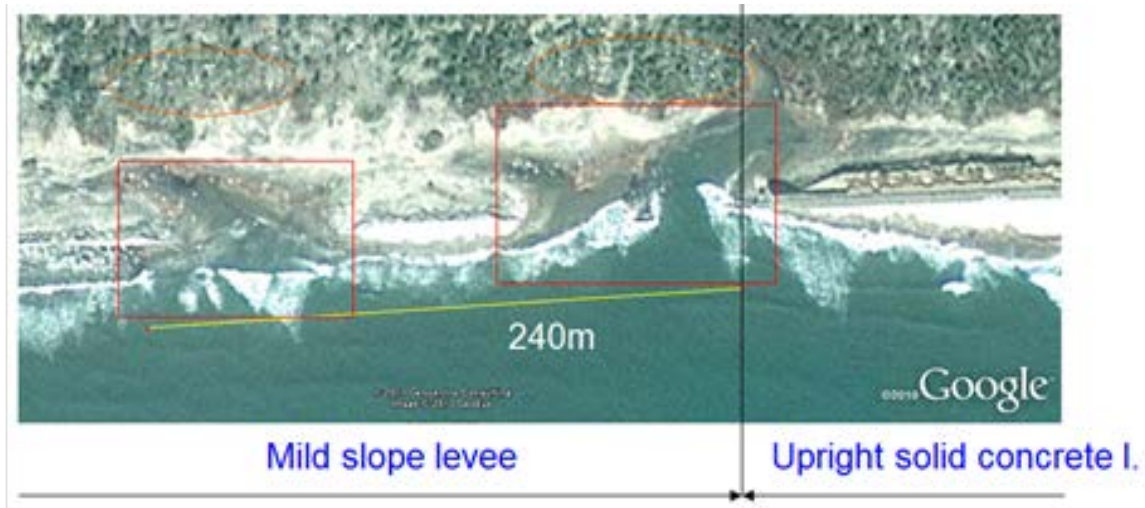


左岸JR鉄橋(2000年撮影)



左岸JR鉄橋(2007年撮影)

仙台市若林区藤塚地区



Scouring at Fujitsuka by the 2011 tsunami

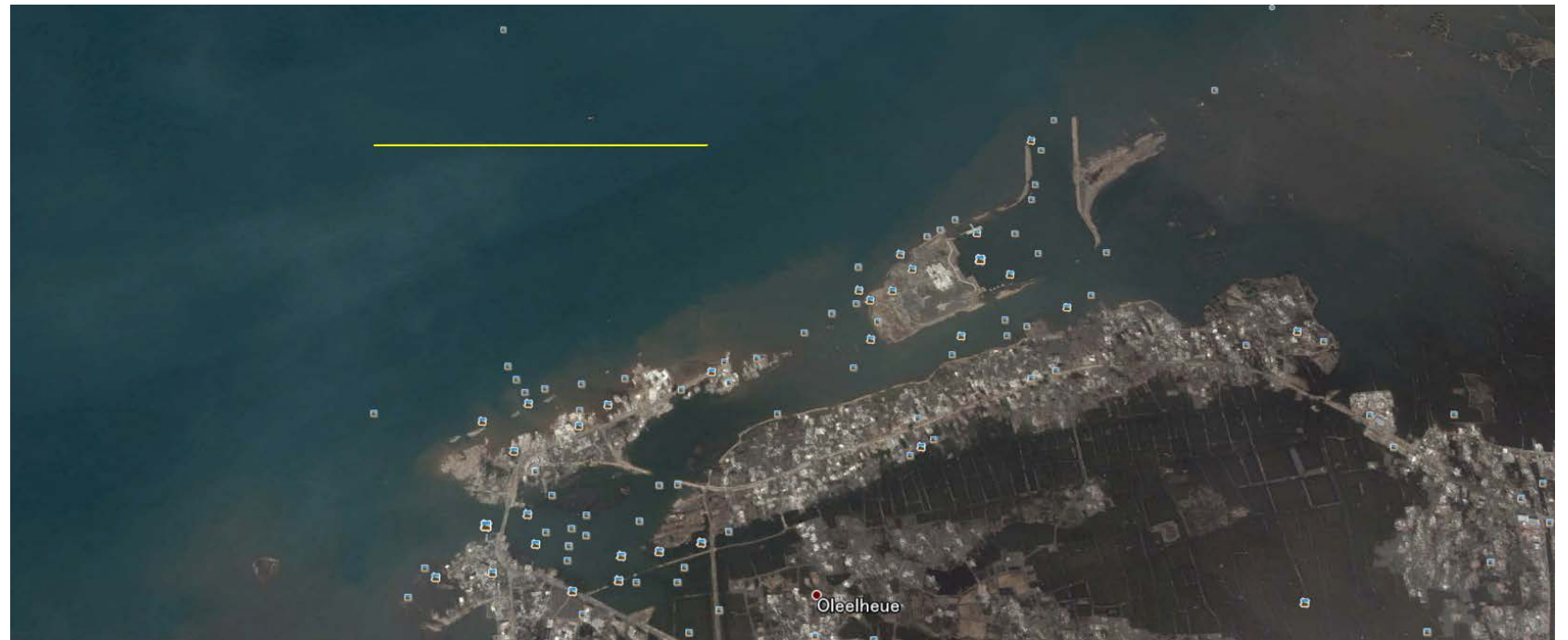
インド洋大津波 バンダアチェ

スケール1km

2004年6月3日



2005年1月28日



Hurricane Sandy, 2012



洗掘メカニズム

- 底面せん断応力による巻き上げ
 - (Takahasi *et al.* 2001, Ontwirjo *et al.* 2013)
- 過剰間隙水圧による地盤の液状化
 - (Tonkin *et al.* 2003, Yeh *et al.* 2006)

研究目的

- 洗掘メカニズムを定量化すること
- 洗掘を予測できるモデルを開発すること

発表内容

1. はじめに
2. 過剰間隙水圧の理論解
3. 準3次元有限体積法
4. 検証と応用
5. 結論

2. 過剰間隙水圧の理論解

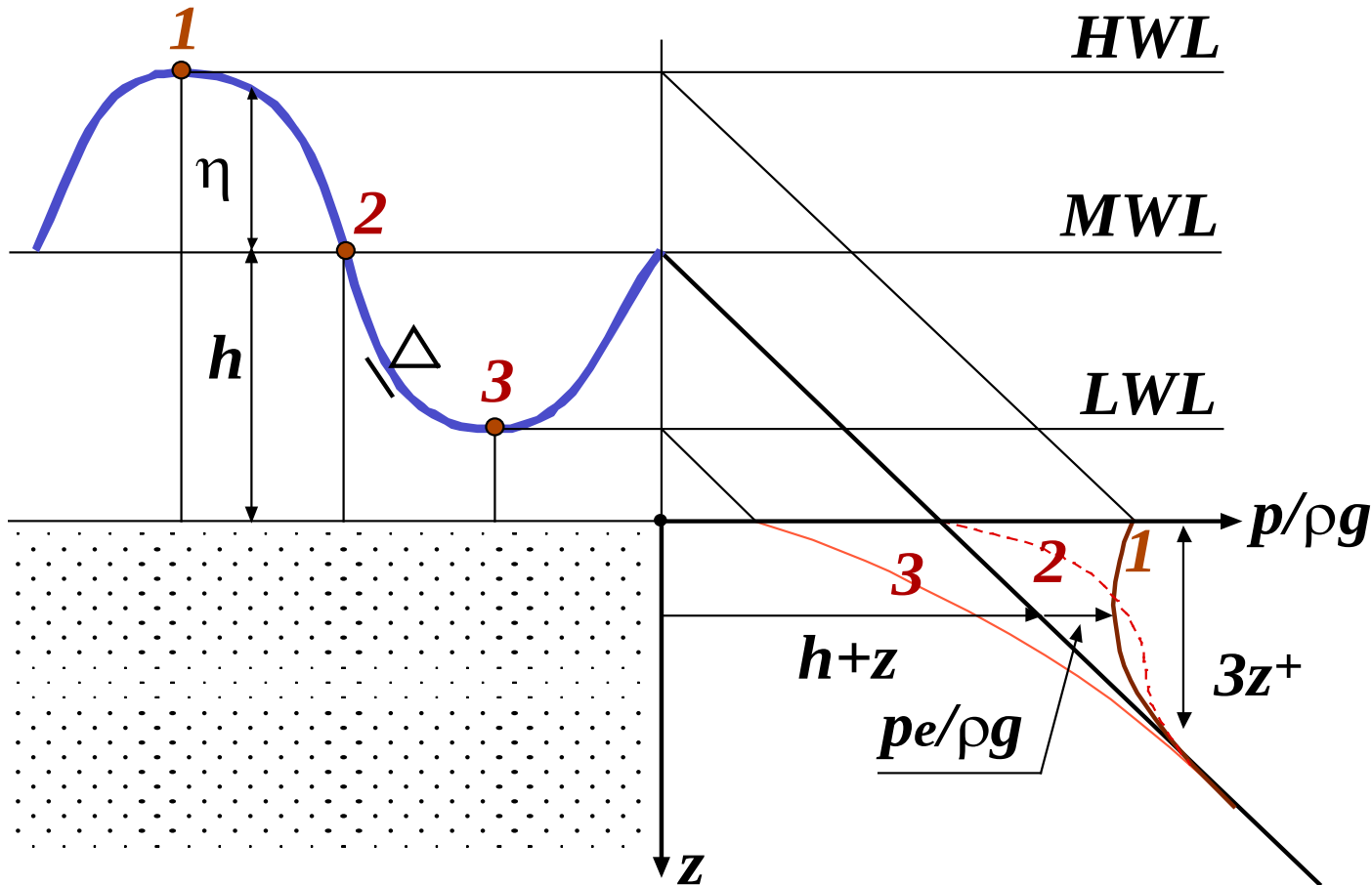


Figure 1. 津波による過剰間隙水圧の変化.

圧密方程式
(Terzaghi 1967),

$$\frac{\partial p_e}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 p_e}{\partial z^2}, \quad (2)$$

圧密係数

$$C_v = \frac{k}{\rho g M_v} \quad (3)$$

2. 過剰間隙水圧の理論解

境界条件,

$$p_e(o, t) = p_{e0} \cos(\omega t) \quad (4)$$

厳密解(Hino 1974, Francesco 2013),

$$p_e^*(z^*, t^*) = \exp(-z^*) \cos(t^* - z^*) \quad (9)$$

$$p_e^* = \frac{p_e}{p_{e0}}, \quad t^* = \omega t, \quad z^* = \frac{z}{z^+} \quad (10)$$

浸透代表深さ

$$z^+ = \sqrt{\frac{2C_v}{\omega}}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (10)'$$

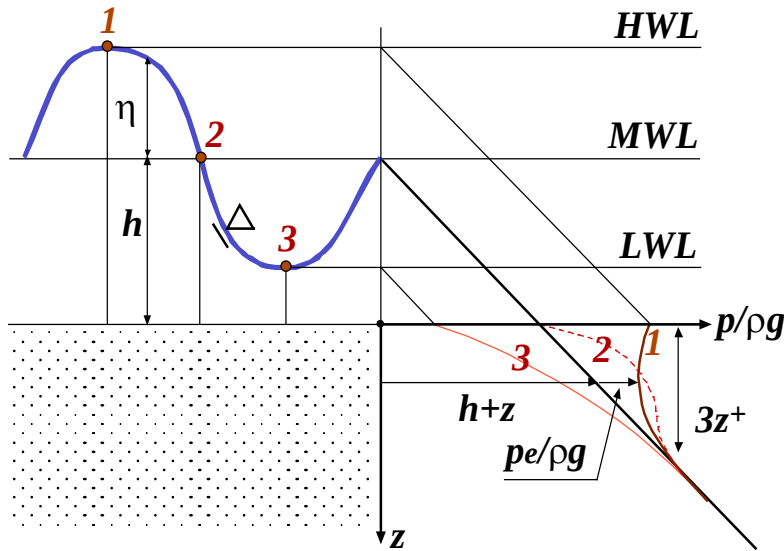


Figure 1. 津波による過剰感水圧

2. 過剰間隙水圧の理論解

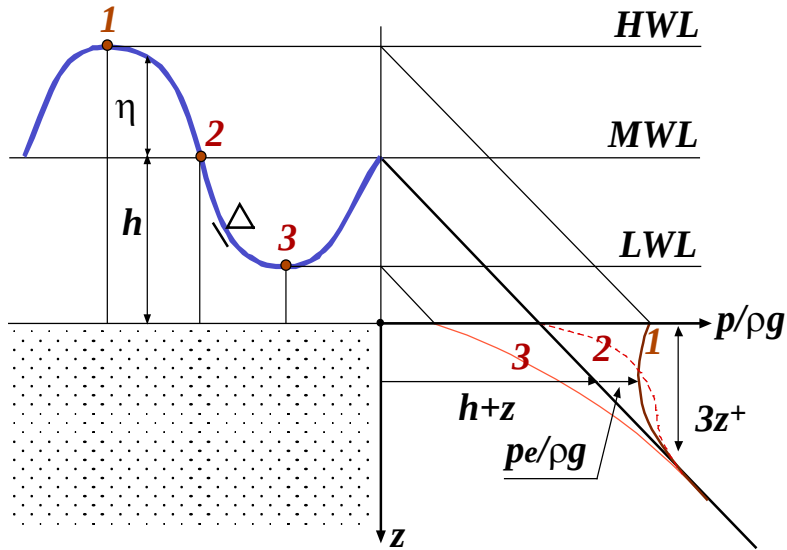


Figure 1. Pore pressure change due to tsunamis.

境界条件,

$$p_e(0, t) = p_{e0} \cos(\omega t) \quad (4)$$

厳密解(Hino 1974, Francesco 2013),

$$p_e^*(z^*, t^*) = \exp(-z^*) \cos(t^* - z^*) \quad (9)$$

$$p_e^* = \frac{p_e}{p_{e0}}, \quad t^* = \omega t, \quad z^* = \frac{z}{z^+}, \quad z^+ = \sqrt{\frac{2C_v}{\omega}} \quad (10)$$

Liquefaction condition,

$$\frac{p_e(z, t) - p_e(0, t)}{(\rho_s - \rho)gz(1 - \lambda)} = \Lambda = 1 \quad (11)$$

2. 過剰間隙水圧の理論解

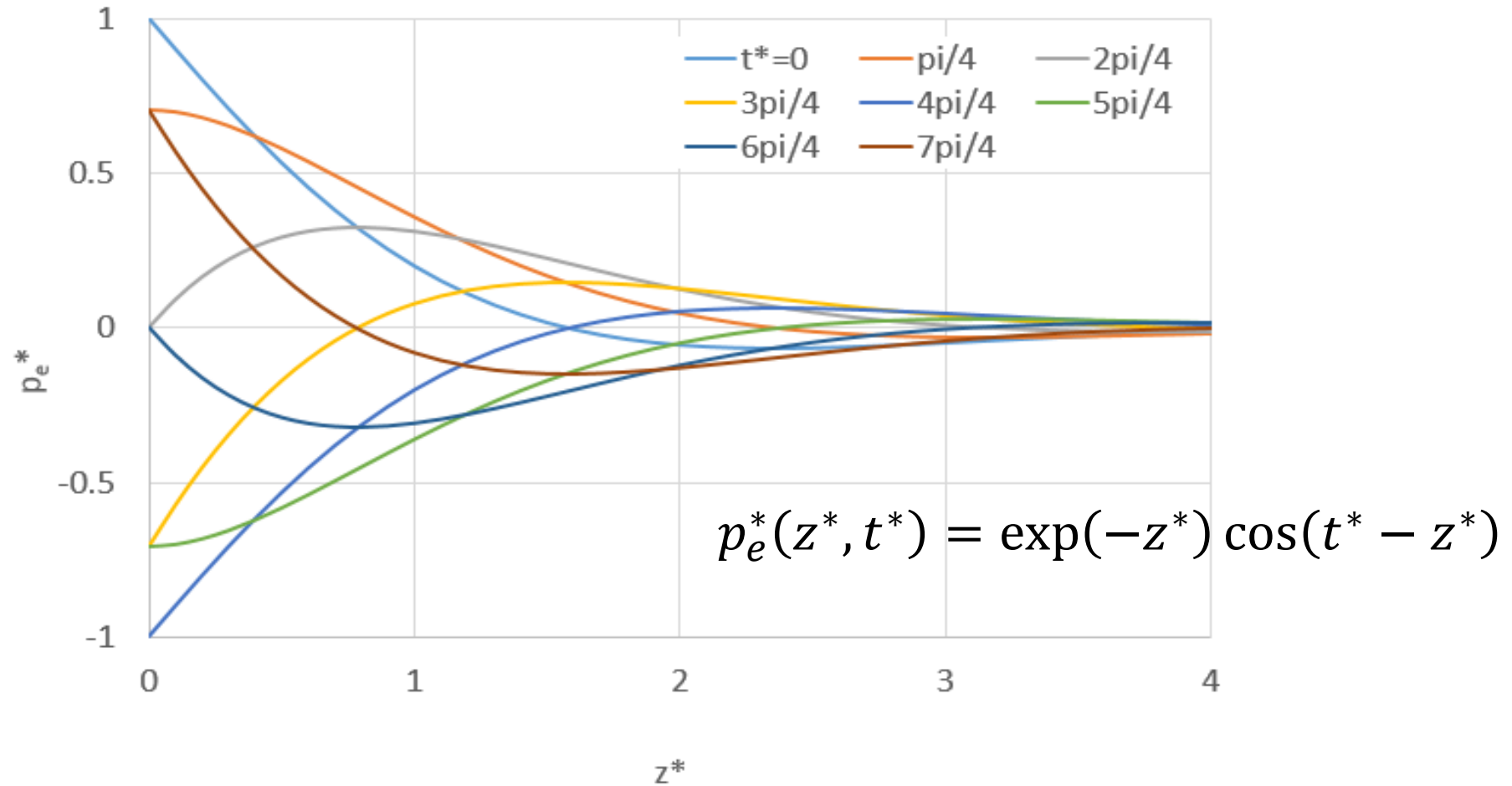
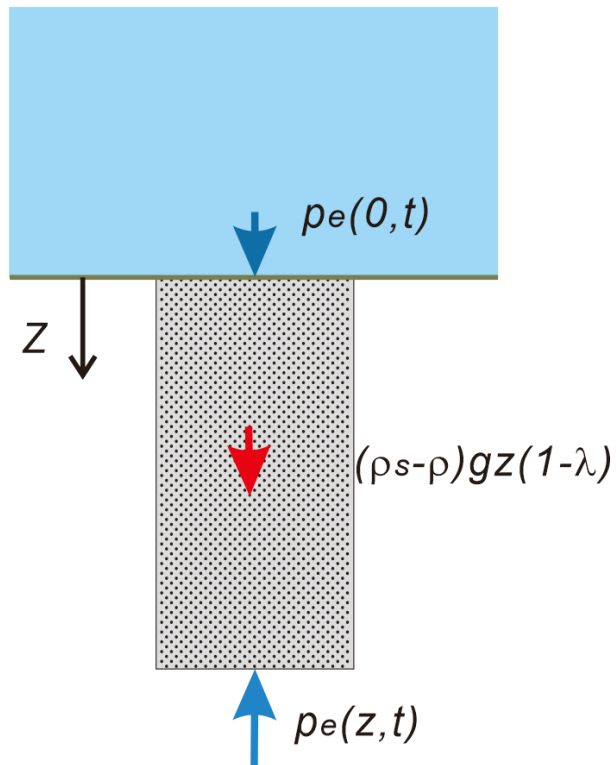


Figure2 津波の各位相での過剰間隙水圧

2.過剰間隙水圧の理論解

液状化の条件

$$\frac{p_e(z,t) - p_e(0,t)}{(\rho_s - \rho)gz(1-\lambda)} = \Lambda = 1 \quad (11)$$



$$s' = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} (1 - \lambda)$$

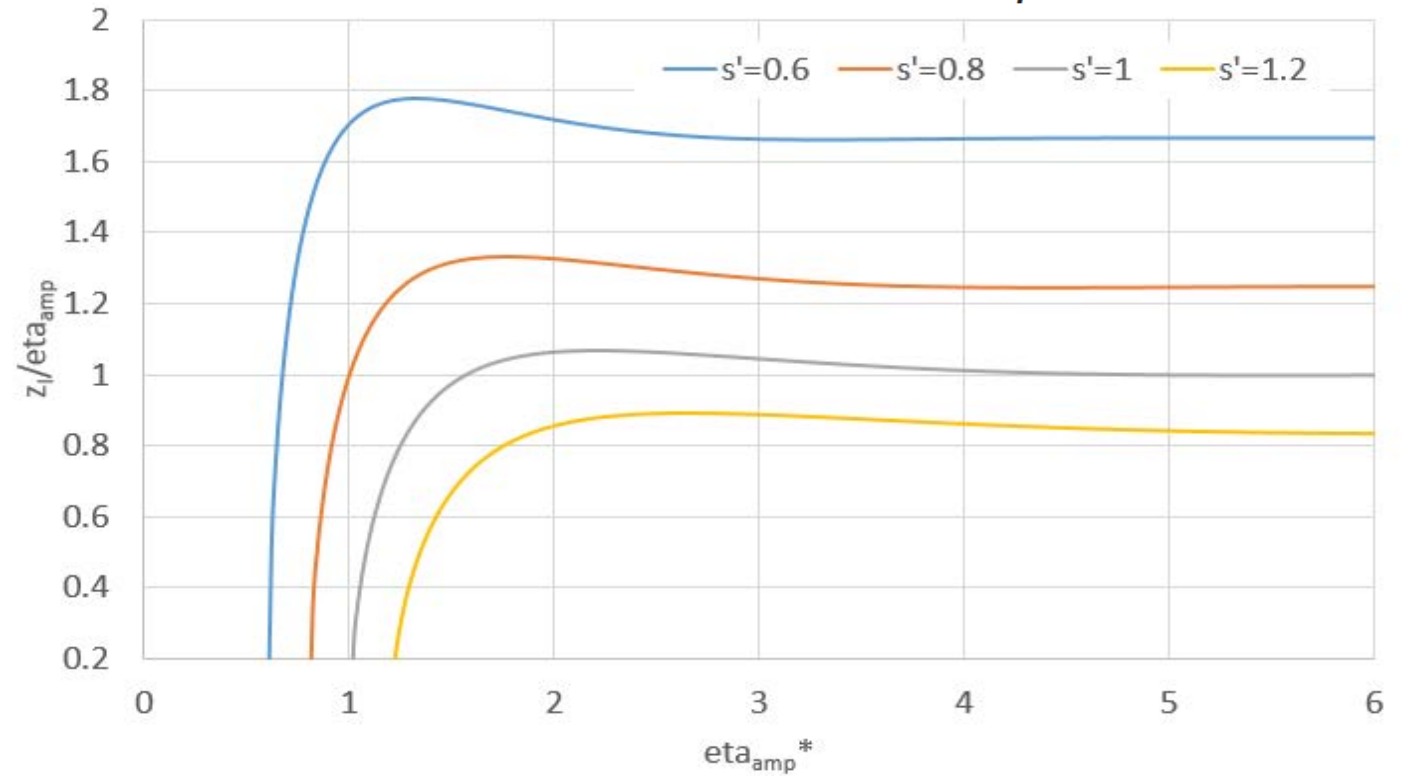


Figure 4. 土質条件 s' に対する，液状化深さ， z_l/η_{amp} と津波振幅 η_{amp}/z^+ の関係

3. 準 3 次元有限体積法

2次元浅水流方程式

$$\frac{\partial q_j}{\partial x_j} = 0, \quad \frac{\partial q_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{q_i q_j}{d} = -gd \frac{\partial \eta}{\partial x_i} + \nu_T \frac{\partial^2 q_i}{\partial x_j^2} - \frac{\rho n^2 g}{d^{7/3}} q q_i \quad (14), (15)$$

準3次元浮遊砂輸送方程式,

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{1}{d} \frac{\partial q_{sj}}{\partial x_j} = \frac{\bar{c}}{d} \frac{\partial q_{sj}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \varepsilon_j \frac{q_{sj}}{\partial x_j} + \frac{w_0}{d} (C_a - C_b) \quad (18)$$

水底變動方程式*,

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} (C_b - C_a) w_0 \quad (20)$$

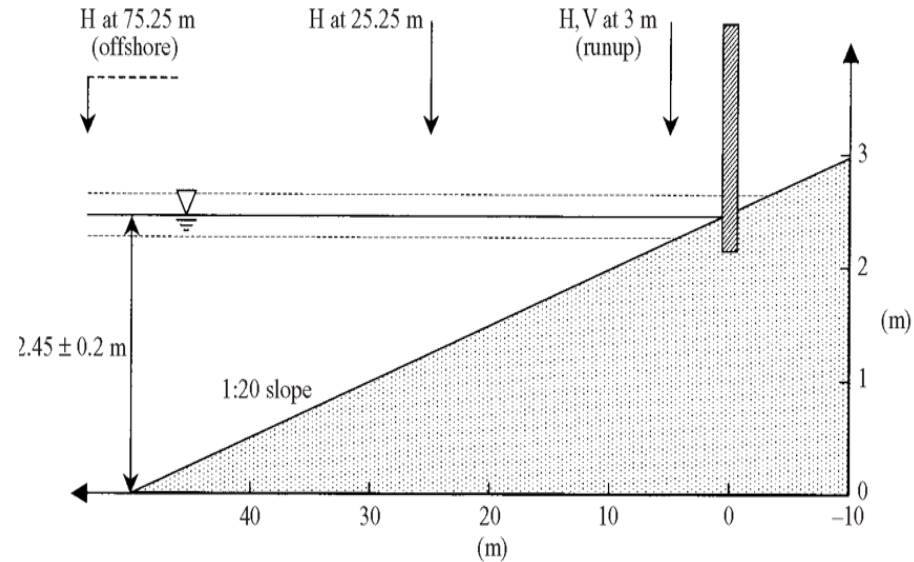
1次元修正圧密方程式(Nago 1982),

$$f_d \frac{\partial p_e}{\partial t} + \rho g f_s \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{k}{\rho g} \frac{\partial p_e}{\partial z^2} \quad (21)$$

$$f_d = M_v + \beta \lambda_w + \frac{\lambda_a}{p_0 + \rho g (\eta + h - z)}, \quad f_s = \beta \lambda_w + \frac{\lambda_a}{p_0 + \rho g (\eta + h - z)} \quad (22), (23)$$

* 液状化後の地形変化は非考慮

4. モデルの検証 (Tonkinら2003の実験)



Tonkin *et al.* (2003)による実験概要.
汀線に設置した円柱周りに圧力計を
配置し、透明円柱ないからビデオ撮
影することにより液状化を観察した.

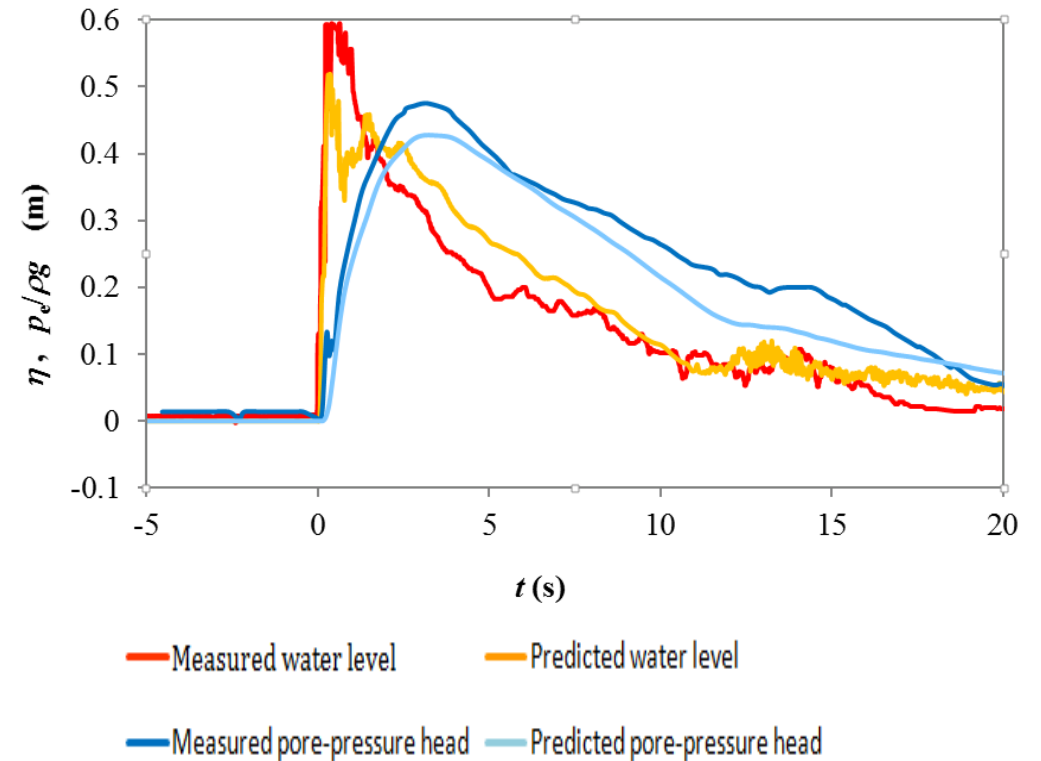


Figure 5. 水位と間隙水圧（円柱全面、
0.2m下）の再現

4. 藤塚地区破堤地点への適用

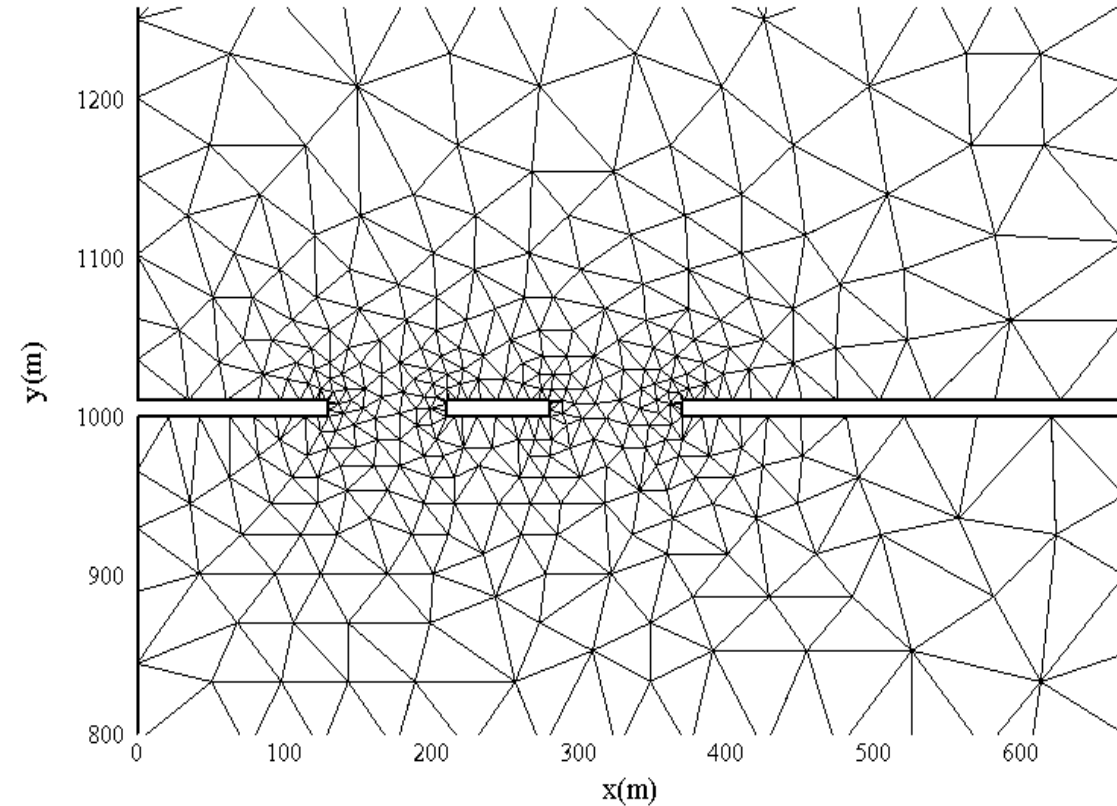


Figure 6.2011年3月12日の航空写真（左），有限体積法格子分割（右）

4. 藤塚地区破堤地点への適用

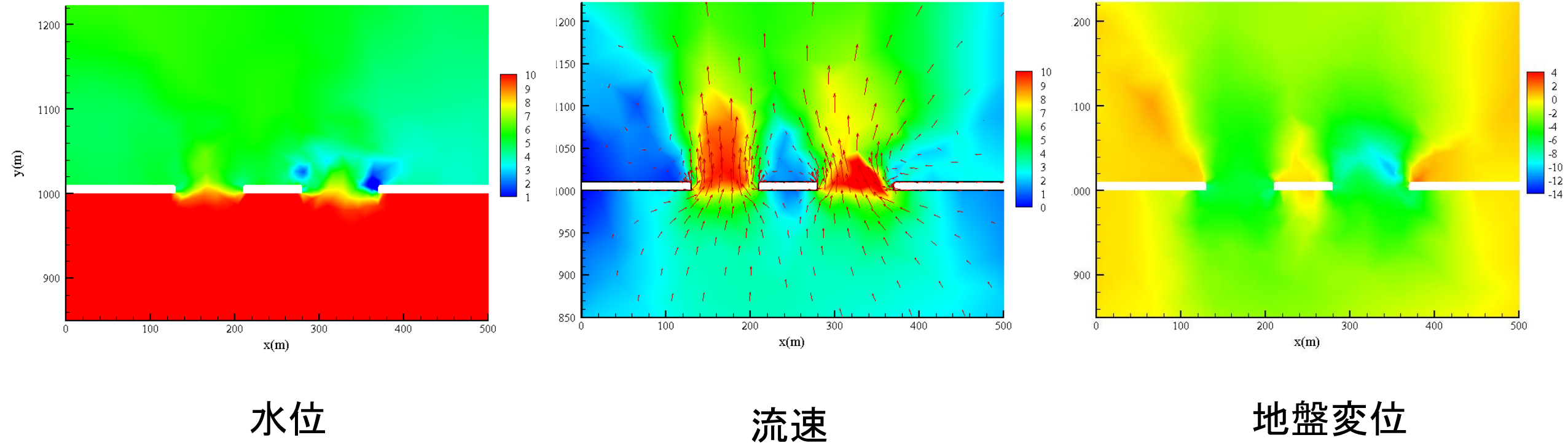


Figure 7. 計算結果 (t=30分)

4. 藤塚地区破堤地点への適用

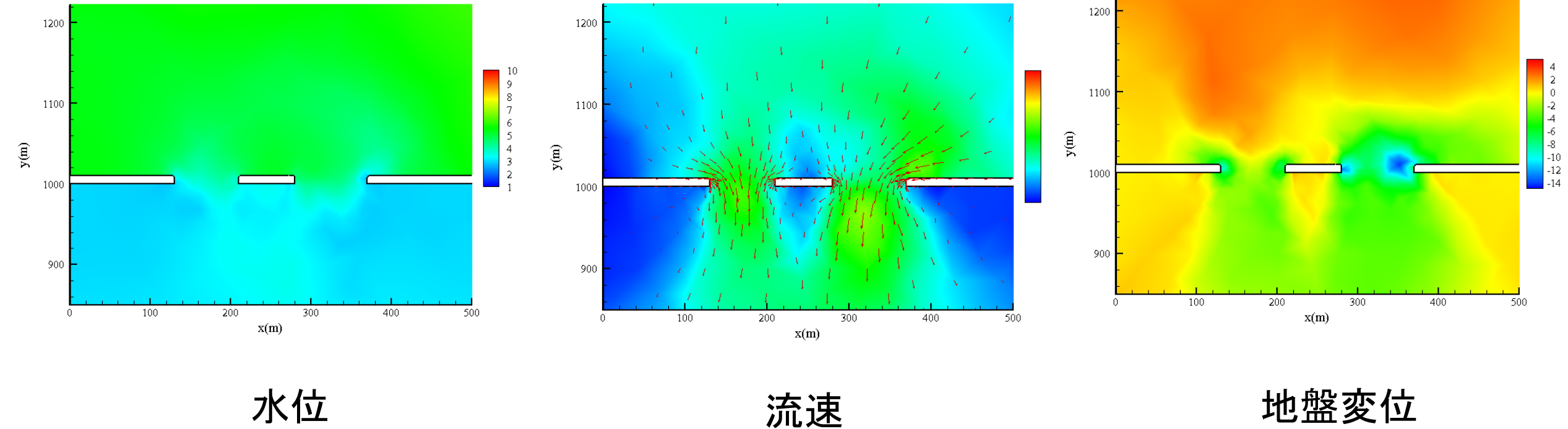
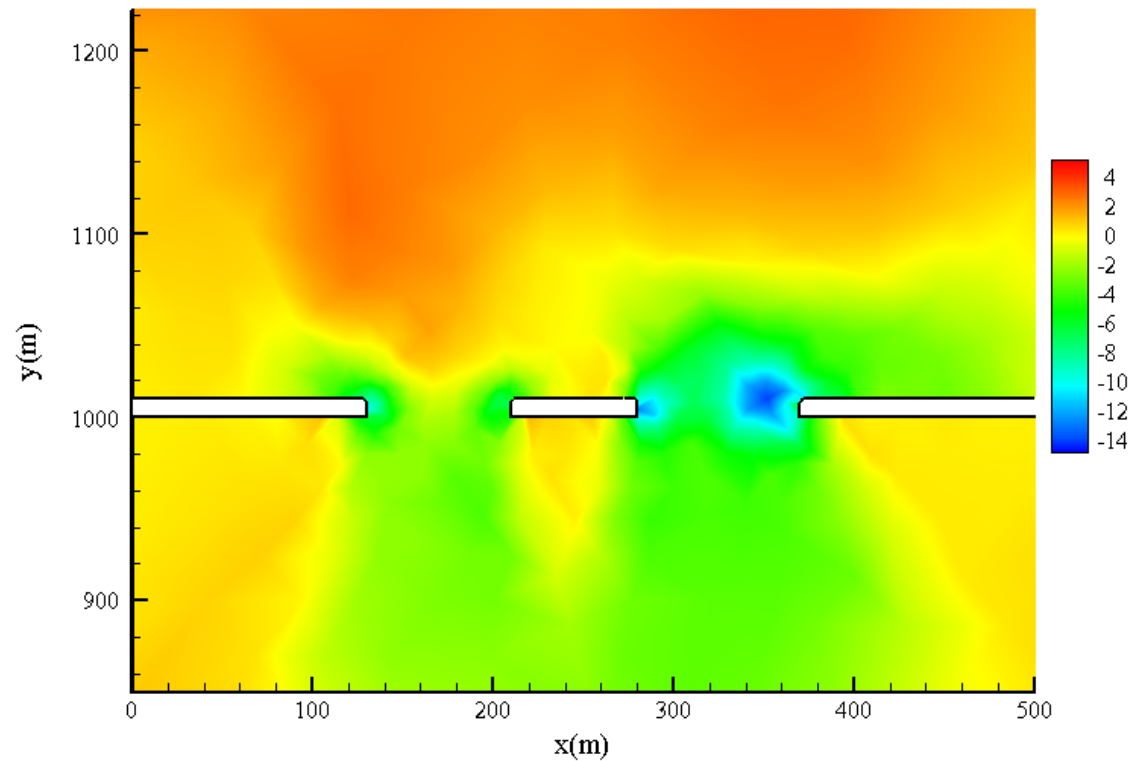
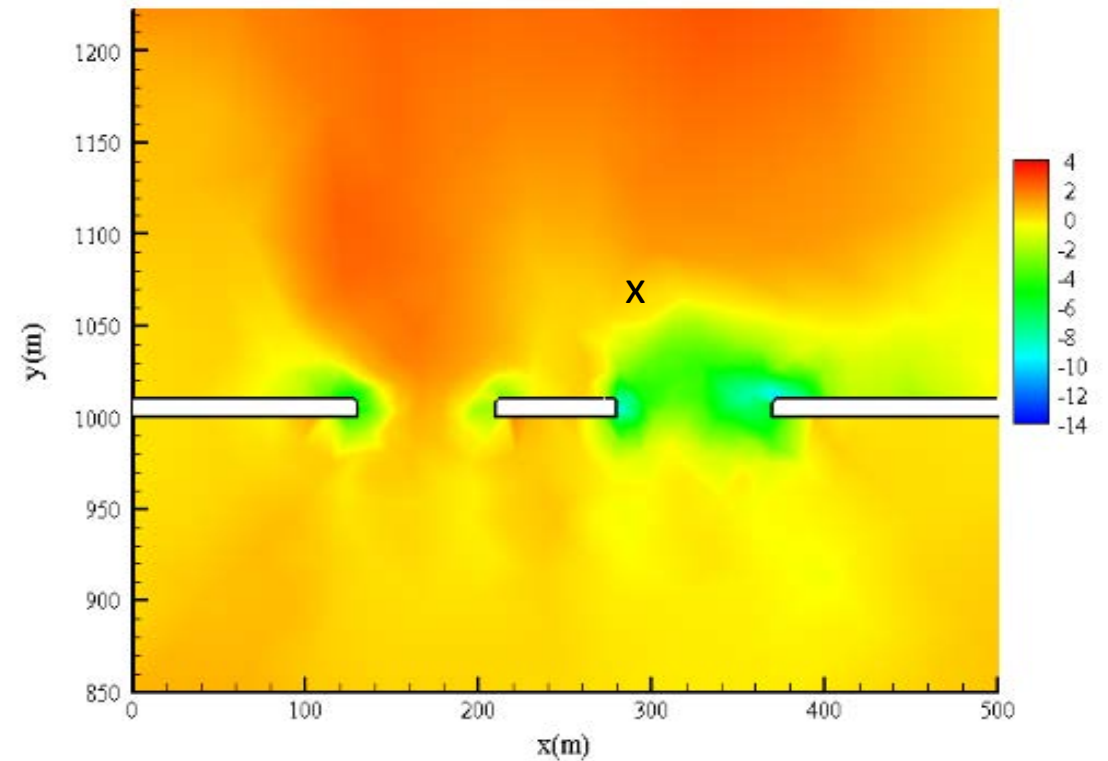


Figure 7. 計算結果 (t=55分)

4. 藤塚地区破堤地点への適用



$t = 55$ 分



$t = 100$ 分

Figure 7.地盤変位

4. 藤塚地区破堤地点への適用

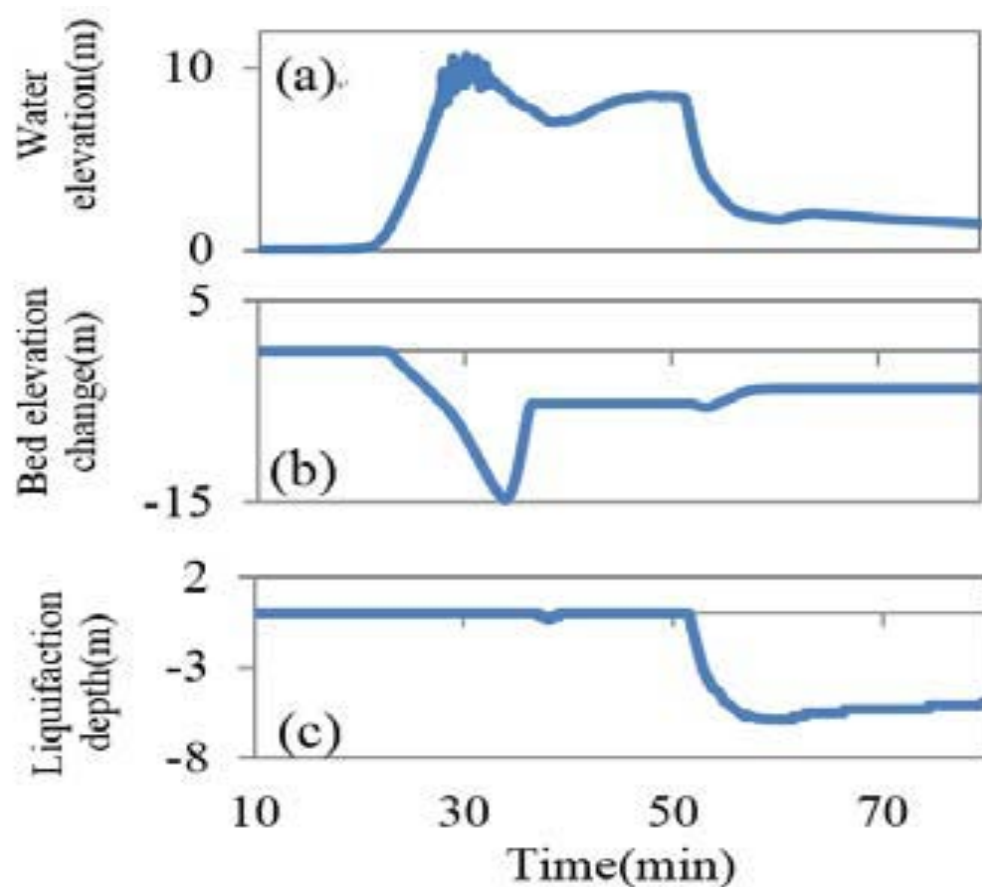


Figure 8.最大液状化位置（右開口部中央 x）での水位，地盤変位，液状化深さの時系列

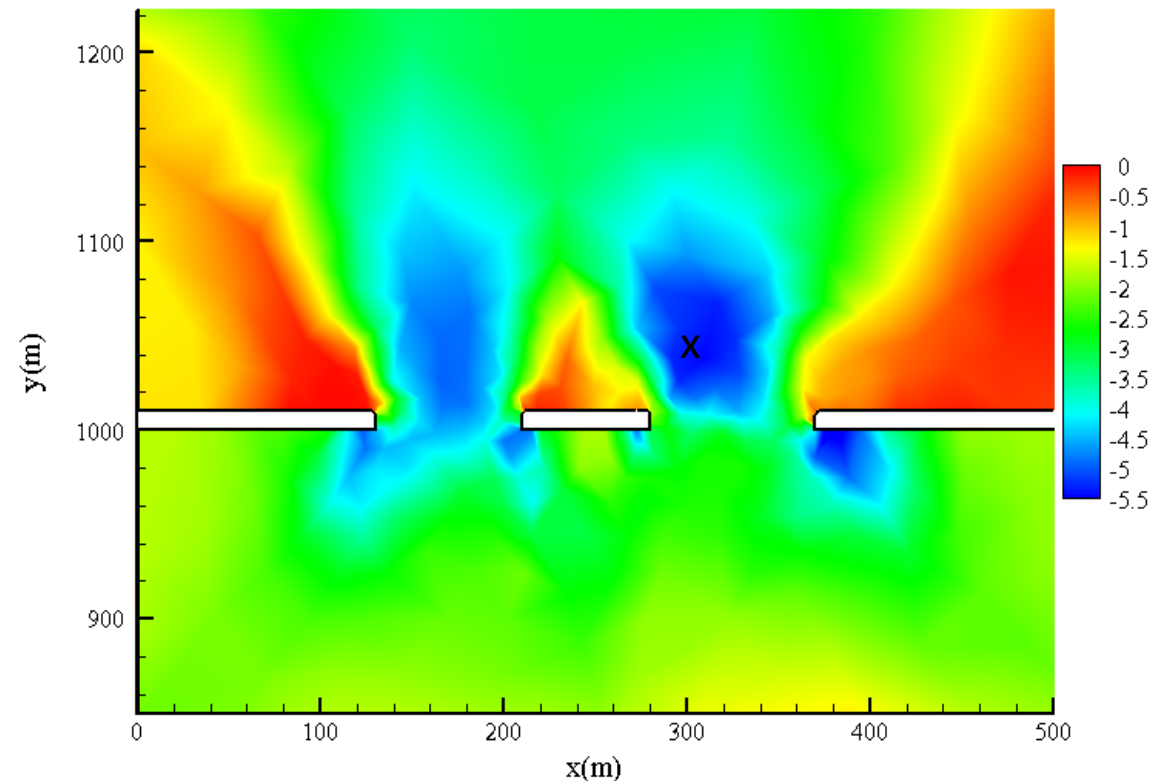


Figure 9. 最大液状化深さの平面分布. 領域全体での最大液状化深さは x 地点で 5.5m. その点での最大侵食深の28%.

5. 結論

- 津波振幅 $> z_0$ で液状化が顕著になる
- 液状化深さ = 津波振幅 $\times (0.9 \sim 1.8)$
- 疎な砂, 軽い砂ほど液状化深さが深くなる
- 藤塚の計算例では最大液状化深さは, 巻き上げによる侵食深さの28%.
巻き上げが主な侵食原因であるが, 根入れの安定性を考えるときには
液状化は無視できない.