地盤の間隙水圧勾配を考慮した津波による盛土侵食に関する研究

Study on the Erosion Mechanisms of Soil Embankment by Tsunamis Considering the Effect of the Pore Water Pressure

長坂陽介¹・佐藤慎司²

Yosuke NAGASAKA and Shinji SATO

The field survey of the 2011 Tohoku Tsunami in Unosumai District of Kamaishi City, Iwate Prefecture suggested the collapse of embankment due to momentary liquefaction. We performed numerical simulation of the effect of pore pressure variation on the stability of embankment. A consolidation model considering saturation of the soil was applied. The numerical analysis demonstrated that the embankment with lower saturation can be unstabilized by the rapid drawdown due to tsunami. Laboratory experiment in the oscillatory flow tunnel also verified that unsaturated sand bed becomes unstable by the rapid decrease in pressure and thus significantly increases the sand transport rate.

1. はじめに

2011年3月の東北太平洋沖地震津波により、東北地方沿岸部では堤防だけでなく鉄道や道路など多くの盛土構造物が破壊された。これらは日常生活だけでなく津波時の氾濫水の挙動にも影響を与えるため、防災面でも重要な意味を持つ。従って、津波防災を考えるうえで盛土の侵食被害機構を明らかにし、適切に予測することが必要である。

盛土侵食モデルは一般的には流れによるせん断力によりモデル化されてきた(Hanson, 1989など)が、その他のメカニズムとして地盤内過剰間隙水圧勾配が侵食や漂砂へ与える影響が指摘されている。これは水位変動による地盤表面での水圧変動が地盤内へ伝わる際に、地盤中の微小な間隙空気の影響でその伝達が阻害され、過剰間隙水圧の鉛直勾配が発生することによるものである。善(1993)、酒井ら(1996)、Yehら(2001)、Tonkinら(2003)などは水位低下時にはこの過剰間隙水圧勾配が負に大きくなり、地盤内有効応力が静穏時と比べて減少し、侵食が促進される可能性があるとしている。

そこで本研究では津波引き波時に形成される地盤内過剰間隙水圧勾配が侵食へ与える影響をさらに調べるため、まずは長坂ら(2012)による現地調査結果を簡単に確認する。そして、間隙空気の影響を考慮するために飽和度を含めた圧密方程式を用いて津波時の地盤内間隙水圧場を計算し、過剰間隙水圧勾配の侵食への可能性を調べる。さらに水理実験により過剰間隙水圧勾配の影響の検証と具体的な作用を明らかにし、現地調査結果との整合性を確認する。

2. 盛土侵食被害概要

ここでは2011年6月および11月に岩手県釜石市鶴住居の鉄道盛土で行った盛土侵食被害調査の結果を簡潔に示す。詳細は長坂ら(2012)を参照されたい。まず図-1に調査対象地域の航空写真と鉄道路線を示し、図-2には調査により得られた盛土の天端侵食深さの分布を示した。横軸は図-1内に示した盛土の法線に沿った位置で範囲は約1000mである。この図より図示した範囲の両端を除いた多くの領域で約2mの侵食深となっていることが分かる。また、図-1中央部の $x=500\text{m}$ 付近を境にして南側は平地が続く、北側は盛土背後に山が迫っており、南部の

図-1 釜石市鶴住居の航空写真 (出典: Google Earth)

図-2 鶴住居における盛土侵食深分布

1 正会員 修(工) (独法) 港湾空港技術研究所
2 フェロー 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科
社会基盤学専攻

図-3 鶴住居盛土上の水位変化の計算例

平地上と北部の山の前面で津波浸水深の変動状況が異なることが分かっている。

3. 間隙水圧場の予測

(1) 善の圧密方程式

まず津波氾濫時の水位変化による地盤内間隙水圧場を善 (1993) による圧密方程式を用いて計算し、侵食へ与える影響を考察する。このとき、陸上の盛土の初期飽和度は海底地盤よりも低いと考えられるため、飽和度による違いも調べる。圧密方程式は式 (1) により表される。

$$\alpha \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial p_b}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 α ：飽和度に関する係数、 p ：間隙水圧、 p_b ：地表面水圧、 c_v ：圧密係数、 t ：時間、 z ：鉛直方向位置である。

(2) 計算結果

式 (1) の圧密方程式に p_b として図-3に示した鶴住居地区の氾濫数値計算で得られた水位変化の2種類を条件として計算した。図-3より、同じ盛土上でも位置によって水位低下速度に違いがあり、従って水位低下時の盛土内間隙水圧の挙動にも違いが出ることが予想される。飽和度に関する係数 α については $\alpha=2.0, 5.0$ の2種類とした。これは善 (1993) による関係式を用いるとそれぞれ飽和度約99.3%, 97.2%に相当する値である。

図-4に計算結果を示した。これは地震後78分における盛土内過剰間隙水圧の鉛直分布を示しており、このとき浸水深が急速に低下し、地表面付近での過剰間隙水圧勾配が負に最も大きくなる。縦軸が盛土内深さで0 mが地表面である。横軸は過剰間隙水圧 ($=p - \rho_s g (h-z)$) となっている。 ρ_s は盛土の密度 ($=2650 \text{ kg/m}^3$) である。また、計算法は、時刻は前進差分、空間の2次微分は2次中央差分の陽解法を用いた。

地表面付近の鉛直方向勾配に注目すると、まず2つの実線の比較より水位低下速度による違いが分かる。勾配

図-4 地盤内過剰間隙水圧の計算結果 ($t=78\text{min}$, $c_v=10\text{cm}^2/\text{s}$)

の大きさは条件にもよるが、図-4のケースでは山の前面：-17.2kN/m³、平地側：-8.6kN/m³となった。土の水中重量は16.17kN/m³となるため、 $x=900\text{m}$ では完全に有効応力が0となり平地側の $x=400\text{m}$ では半分程度の有効応力が打ち消されることになる。これより、山側でより水位低下による侵食促進の効果が大きかった可能性があることが分かった。

さらに飽和度 α による違いを見ると、低飽和度 ($\alpha=5.0$) を表す点線は平地側 ($x=400\text{m}$) でも完全に有効応力を打ち消す可能性があることが分かる。これより、飽和度によって地盤内間隙水圧の挙動は大きく変わり、盛土全面で液状化状態に至った可能性もあることが分かった。

4. 水理実験

(1) 目的と条件

津波の水位低下により盛土内で有効応力が減少する可能性があることが分かったが、振動流装置を用いた水理実験によりその効果を検証する。振動流装置は流れ場のコントロールが容易で、大きな水圧変動を発生させることができる。図-5に振動流装置の観測領域の模式図を示した。観測領域は全長4.4mであり、この区間に砂を投入する。便宜的に流速や漂砂の向きは図-5左向きを正とした。図-5中段の①、②は漂砂量計測に利用した仕切りの位置を表しているが、仕切りは砂投入時と回収時に挿入して観測領域を分割する役割を果たし、それぞれの区間での実験前後での砂の乾燥質量の変化から①、②で漂砂量を計算する。仕切りは装置作動時には取り外している。また、装置の構造上図-5下段のように①、②では同位相で振幅の異なる水圧変動が発生する。

振動流装置では津波の流れ場を模擬することは難しいため、実験では飽和度と水圧変動条件による侵食状況の違いを調べることを目的とし、波形は流速非対称な非対称度0.6のクノイド波を用いた。その中で表-1、図-6のような飽和度と水圧変動の条件を変えたC1~C3を設定した。C1は飽和度低、水圧急低下で圧密方程式によると地

盤の有効応力を減少させる効果が最も大きいと予想される。C2はC1の飽和度を高くしたものの、C3はC1、C2の圧力変動を緩低下にしたものである。飽和度「高」は静水中に乾燥砂を投入したものだが、酒井ら(1996)によると同様の条件でも完全飽和はせず、過剰間隙水圧が発生することが確認されている。「低」は遡上津波を想定し、砂投入後に水を入れたものである。

共通条件について、用いた砂の中央粒径は0.21 mm, P_{left} , P_{right} は漂砂量計測地点である仕切り①, ②における水圧変動の振幅, さらに参考として圧力変化速度も示し

図-5 振動流装置の概要

表-1 実験条件

CASE	飽和度	u_{max} (m/s)	u_{min} (m/s)	圧力変動
C1	低	1.0	-1.5	急低下, 緩上昇
C2	高	1.0	-1.5	急低下, 緩上昇
C3	低	1.5	-1.0	緩低下, 急上昇

共通項目

d_{50} : 0.21mm, 周期: 3s

P_{left} : 26.3kN/m², P_{right} : 12.6kN/m²

圧力急低下 (C1, C2) または上昇 (C3) 速度: 47.0kN/m²s

圧力緩上昇 (C1, C2) または低下 (C3) 速度: 22.4kN/m²s

観測領域の流速変動 u_{sc} (t)

観測領域の水圧変動 p_{sc} (t)

図-6 C1, C2の流速・水圧変動条件
(C3はこれらの正負を逆にしたもの)

た。図-6はC1, C2での流速と水圧変動を表しており、C3はこれらの正負を逆にすることで水圧変動を緩低下としている。

(2) 漂砂量

計測結果として、まずは正味漂砂量を比較する。表-2に各ケースの条件と無次元漂砂量 $\Phi = Q/(w_s d_{50})$ (Q : 間隙を含まない体積漂砂量, w_s : 粒子の沈降速度) をまとめた。また、誤差を含めた無次元漂砂量の絶対値を図-7に示した。C1とC2を比べると、共に最大流速と同じ向きに動いていることが分かるが、図-7を見ると飽和度が低いケースでその正味量が多いことが読み取れる。

また、C1とC3は飽和度が厳密には一致しないことを考慮する必要があるが、最大流速と水圧急低下が同時に起こるC1の方がC3よりも正味漂砂量が増大するという結果となった。

(3) 侵食状況の分析

流速、水圧変動と地盤表面変動のより詳しい関係を調べるため、各ケースにおいて装置作動中の漂砂状況を記録した動画より、以下の手順で表面変動の抽出を行った。動画は図-8に例示した範囲で撮影を行っている。

- 画像中央付近の横幅250ピクセルの範囲を切り取る。
- 画像各ピクセルのRGB値のR値の時刻差分画像を各時間ステップで作成する。これは侵食表面より下の砂は動かないためR値の時間変化は小さいが表面付近で急に時間変化が大きくなることを利用するためである。
- 各差分画像におけるR値の差分値を水平方向に平均し、その鉛直方向分布を求める。これにより外れ値による誤推定の確率を下げる。
- R値の差分の平均値の鉛直方向分布を下から調べ、

表-2 結果1: 各ケースの無次元漂砂量

ケース	飽和度	最大流速 の向き	圧力 変化	無次元漂砂量	
				①	②
C1	低	正	急低下	3.3	3.6
C2	高	正	急低下	2.2	1.6
C3	低	負	急上昇	-0.7	-2.0

図-7 各ケース無次元漂砂量

あらかじめ設定した閾値を超えた地点を表面高さとする。

(5) 推定結果を確認し、外れ値を手動で補正する。

以上のようにして得られた各ケースにおける表面変動の様子を図-9に示した。装置作動時間は60秒で、横軸の0秒は表面変動開始時刻とし、縦軸はその0秒においてすべて0mmとなるように調節して示した。

図-9より、飽和度のみ異なるC1とC2は表面変動の傾向は同じで1周期内での違いははっきりとは見えないが、時間とともに飽和度低の表面が平均的に下がって最終的な表面高さに現れることが分かる。また、C1とC3は漂砂量と同じく定量的な比較はできないが、傾向としてC3は1周期内で表面が最も下がるときに少し表面が波打ち、その後の表面上昇がC1より遅れることで最終的には大きく表面高さが下がっている。

C1とC3の傾向の違いを流速、水圧変動と合わせて詳しく調べるため、図-9から周期平均した表面変動を求め、流速、水圧変動との対応を図-10に示した。図-10より以下の2つが分かる。

まず水圧が急変動する1秒~1.5秒を見ると、両者とも表面は低下しており傾向は同じである。これは砂が浮き沈みを繰り返すような層では地表面の水圧変動が瞬時に

地盤内へ伝わり、過剰間隙水圧が発生しないためであると考えられる。式(1)において $\alpha=1$ としたときに相当し、地盤内水圧は静水圧となる。

そして、1.7秒~2.2秒を見ると違いがはっきりと表れ、このときC1は流速の低下とともになめらかに堆積が進むのに対してC3では2秒付近で一度低下している。

侵食表面が最も下がっているときはその奥にまだ間隙空気が残っており不飽和のままであると考えられる。そのため、その時に表面水圧の低下するC3のケースで地盤が不安定になり、水圧が上昇するC1のケースではそのまま堆積したと考えられる。

5. 過剰間隙水圧勾配を考慮した侵食の指標

最後に、過剰間隙水圧勾配を考慮した侵食の指標を考える。長坂ら(2012)は侵食の指標として流速の自乗の時間累積値を考えたが、非粘性土での侵食速度がせん断力と抵抗力の比で表されることを考えて、本研究では式(2)のような指標 D_1 を考えた。

$$D_1 = \int \frac{u^2}{g d_{50}} dt \dots\dots\dots (2)$$

ここで、過剰間隙水圧勾配は地盤の抵抗力を下げる働きがあるため、この分母にこの効果を加えることによって式(3)のように新しい指標 D_2 を考案した。分母は過剰間隙水圧勾配が負になると重力を打ち消すことを表している。また、分母がマイナスになることはないので、この被積分項の最大値を設定してそれを超えないようにした。この最大値の適切な値は今後の課題となる。

$$D_2 = \int \frac{u^2}{\left(g + \frac{1}{\rho_s - \rho} \frac{\partial p_e}{\partial z} \right) d_{50}} dt \dots\dots\dots (3)$$

図-8 解析対象とした動画のフレーム例

図-9 表面位置の時間変化の詳細

図-10 流速, 水圧, 周期平均した表面変動の対応

これらの鵜住居における分布を計算し、図-2に示した侵食深さの分布と比較したものを図-11に示した。これらの縦軸は比較のためすべて無次元化してある。これより、式(2)の指標では横軸500m以降、つまり盛土背後に山が迫っている部分での侵食を過小評価していたが、過剰間隙水圧勾配の効果を加えた式(3)ではこの部分でのより速い水位低下速度を反映した結果、より実際の傾向に近づいていることが分かる。

6. おわりに

本研究の主要な結論と課題は以下の通りである。

- (1) 鵜住居の鉄道盛土では津波の越流により最大約2 mの侵食が発生した。盛土の標高が低いほど侵食が大きい傾向が見られたが、構造物の存在など局所的な影響も大きい。
- (2) 飽和度を含めた圧密方程式に東北太平洋沖地震津波の水位条件を適用したところ、地盤条件によっては地盤が液状化する可能性があることが分かった。

図-11 指標と侵食深調査結果分布

- (3) 振動流装置を用いた水理実験より、まず飽和度が低いケースの方が高いケースより漂砂量が多いことが分かった。また、漂砂の様子を撮影した動画の分析より、飽和地盤における侵食は圧力変動の影響はないが、不飽和表面まで下がる圧力低下により不安定な挙動を見ることが分かった。今後は飽和度や圧密係数、間隙水圧などの計測を伴った実験を繰り返すことで侵食モデルへの具体的な適用方法を調べる必要がある。

謝辞：本研究の実施においてはオレゴン州立大学Harry Yeh教授によるご指導および科技機構J-RAPIDプログラムによる補助を受けたことを記し、謝意を表する。

参考文献

- 酒井哲郎・後藤仁志・川崎順二・高尾和宏 (1996) : 振動流・水圧変動共存下での地盤内間隙水圧分布, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.1006-1010.
- 善功企 (1993) : 海底地盤の波浪による液状化に関する研究, 港湾技研資料, No.755.
- 長坂陽介・Yeh, H.・中尾秀之・佐藤慎司・田島芳満・山中悠資 (2012) : 津波による堤防及び盛土の侵食機構に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_1331-I_1335.
- Hanson, G. J. (1989) : Channel erosion study of two compacted soils, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.114, No.3, pp.296-305.
- Tonkin, S., H. Yeh and F. Kato (2003) : Tsunami scour around a cylinder, J. Fluid Mech., Vol.496, pp.165-192.
- Yeh, H., F. Kato and S. Sato (2001) : Tsunami scour mechanisms around a cylinder, Tsunami Research at the End of a Critical Decade (Ed: G.T. Hebenstreit), Kluwer Academic Publishers, pp.33-46.