

地震後の浸透破壊を考慮した新しい流動変形予測法

New Prediction Method for Ground Flow Deformation due to Seepage after Earthquake

仙頭 紀明 (せんとう のりあき)

東北大学大学院工学研究科

赤堀 一彦 (あかほり かずひこ)

静岡県庁

大村 洋史 (おおむら ひろふみ)

東北大学大学院工学研究科

風間 基樹 (かざま もとき)

東北大学大学院工学研究科

1. はじめに

強震を受けた砂地盤の液状化による残留変形量は、地震動中の変形量と地震動が終息した後の変形量の和である。前者のメカニズムに関して、主要動作用中は間隙水の移動は無視できるものとして、非排水条件下の土の挙動がもっぱら研究されてきた。現在、残留変形量の予測と言えば、この非排水変形に関するものがほとんどである。しかし、実際の地震においては、地震動が終息した後、時間遅れを伴って変形が進行した事例が報告されている。例えば、1964年新潟地震において川岸町のアパートが振動後ゆっくり傾斜したことや、昭和大橋が地震後に落橋したと報告されている¹⁾こと、日本海中部地震で能代市浅内地区の道路被害²⁾等がその例と考えられる。また、大きな流動量を非排水せん断挙動のみから説明するのは少々困難である。いったん、繰返しせん断によって有効応力が小さくなった場合でも、非排水条件下はダイレイタンスーによって剛性回復が生じ、流動は止まってしまう。一方、後者のメカニズムに関しては、Yoshimiら³⁾は水平地盤の地震後の浸透現象を解析し、下層が液状化して上層に間隙水が上昇する過程において、容易に上層が有効応力ゼロの状態に達することを示している。また、任意の吸水条件で土のせん断変形特性を検討し、吸水があればせん断抵抗が回復しないことを示した研究もある⁴⁾。

一方、地震後の流動変形予測法に関しては、流動する地盤をせん断剛性が低下した固体と見なした解析⁵⁾や流体と見なした解析^{6),7)}、経験的予測方法⁸⁾等が提案されているものの、流動する地盤の物性の評価が確立されておらず、また流動がいつ始まり、いつ終わるかを明確に示しているものはほとんどないといつてよい。

本研究では、地震後の過剰間隙水圧の再配分に伴う浸透破壊により、せん断ひずみが発達するという機構から、流動変形機構を考察し、さらに、このメカニズムをもとに地震後の時間遅れを伴う流動変位を表現しうる新しい流動変位予測法を提案した。

2. 地震時の液状化による土の残留変形機構⁹⁾

傾斜飽和地盤が地震動を受けた場合の挙動を考察する。まず、斜面はその角度に応じて初期せん断応力を受けて

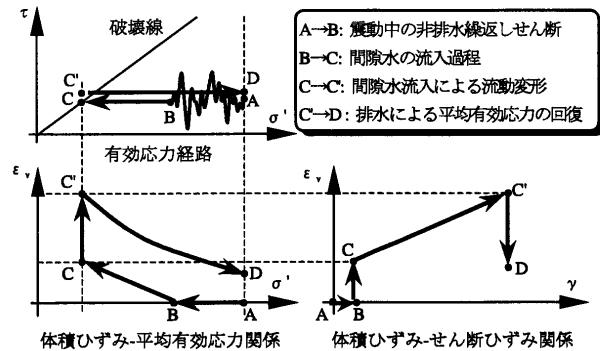


図-1 浸透流動破壊メカニズムの模式図

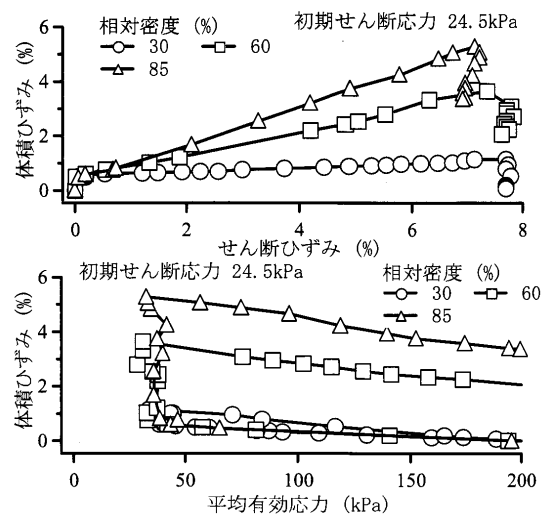


図-2 浸透流動破壊に及ぼす密度の影響

いるが、ここに地震力が作用すると、繰返しせん断によって過剰間隙水圧が発生し、せん断抵抗が減少し、変形する。次に、振動が終息した時点から、各層に残った過剰間隙水圧の再配分が生じる。各層の層厚、透水係数、体積圧縮係数に応じて時間とともに間隙水が浸透し、最終的にもとの静水圧に戻ることになる。この間、ある層は間隙水の流入量が流出量よりも多くなり、有効応力が減少し、破壊線に達して浸透破壊を起こす可能性がある。このときに発生する残留変形量が浸透破壊による流動変形量である。以上のような一連の過程における土の応力状態、および体積ひずみ、せん断ひずみの発達を模式的に書くと、図-1のようになる。図は振動中に破壊に達しないが、その後間隙水の流入によって浸透破壊した層

論文

の挙動を模式的に描いたものである。いま非排水繰返しせん断時の残留過剰間隙水圧がわかる時、その値を初期値として浸透流解析によって地震後の浸透過程を計算することはできる。しかし、A→B→Cの破壊線に達するまでの過程は計算できるとしても、C→C'→Dの変形機構が十分に解明されていない。時松ら⁴⁾はC→C'過程の体積ひずみとせん断ひずみの関係を体積ひずみ速度を一定にした中空ねじり試験により検討し、緩い砂ほど少ない体積ひずみでせん断ひずみが発達することを示している。図-2⁹⁾は密度の異なるA→Dの一連の過程における豊浦砂の実験結果である。ただし、ここではA→Bの震動中の非排水繰返しせん断履歴は与えられていない。実験は、三軸試験を用いて平均有効拘束圧196 kPaのもとで傾斜地盤の応力状態（傾斜角約6度に相当）を模擬した要素試験を実施した。初期せん断応力を一定に保ちながら、バックプレッシャーを加えて、間隙水を注入することで、軸ひずみ ϵ_a 5%まで破壊させた後、再び排水により初期応力状態に戻す実験を行った。図より緩い砂ほど小さな体積ひずみで大きなせん断ひずみが発達していることがわかる。浸透破壊後の排水による有効応力回復過程では、密な砂ほど体積膨張の回復が小さいこと、およびこの過程においてせん断ひずみはほとんど発生しないことがわかる。

3. 地震後の浸透破壊による流動変形予測法

3.1 予測手法の概要

地震後の浸透破壊機構を、一次元構造を持つ緩傾斜地盤を例にとって説明する。例えば図-3のように海底面に粘土層—中密な砂層—緩い砂層があるような場合を考える。仮に地震動によって上下砂層の過剰間隙水圧比がそれぞれ0.5, 1となったとした場合、振動後の導水勾配により下層より上層へ間隙水の移動が生じる。このため上層の t 秒後の水頭は地震動終了直後より高くなり、容易に初期有効上載圧まで上昇する。蓄積された過剰間隙水圧の逸散過程は初期せん断の影響によって、間隙水の流入で膨張し、浸透破壊した層から徐々にせん断変形を生じることとなる。図-3の消散過程を表現するために以下の手順で予測法を構築した。震動中の非排水繰返しせん断過程に発生する過剰間隙水圧は、例えば有効応力解析などを用いて求め、その残留過剰間隙水圧を初期値として地震後の過剰間隙水圧の再配分に伴う消散・蓄積過程を一次元圧密理論（(1)式）を用いて求める。

$$m_v \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{\rho_w g} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 m_v は体積圧縮係数、 k は透水係数、 ρ_w は水の質量密度、 g は重力加速度、 u は過剰間隙水圧である。

浸透破壊時は前章に示した体積ひずみ—せん断ひずみ関係を用いて、間隙水の流入による体積ひずみ増分 $\Delta\epsilon_v$ に応じて、せん断ひずみ増分 $\Delta\gamma$ を求める。

本予測手法に必要な地盤物性パラメーターは、上記の m_v 、 k および体積ひずみ—せん断ひずみ関係の三つである。液状化後の消散過程の m_v は、液状化の程度に応じ

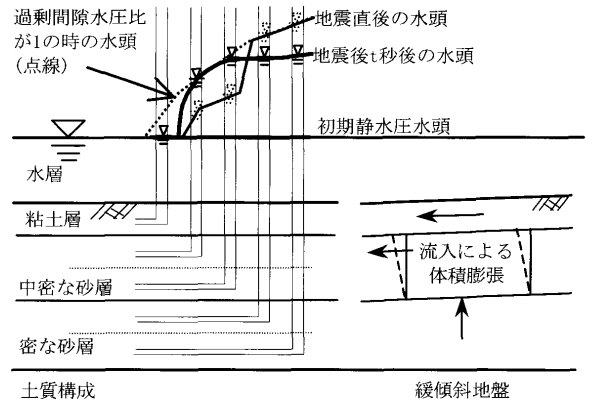


図-3 地震後の過剰間隙水圧の消散過程

表-1 予測に用いた地盤物性

| 層番号 | 深度 (m) | 土質 | 透水係数 (cm/s) | せん断波速度 (m/s) | R _s | R ₂₀ |
|-----|--------|--------|-------------|--------------|----------------|-----------------|
| 1 | 0.0 | 砂 | 1.0e-3 | 140 | 0.26 | 0.22 |
| 2 | -1.0 | 砂 | 1.0e-3 | 140 | 0.26 | 0.22 |
| 3 | -2.15 | 砂 | 1.0e-3 | 140 | 0.26 | 0.22 |
| 4 | -3.00 | 砂質ローム | 1.3e-4 | 140 | - | - |
| 5 | -3.10 | 砂 | 1.4e-2 | 140 | 0.26 | 0.22 |
| 6 | -4.15 | 砂 | 1.0e-2 | 140 | 0.26 | 0.22 |
| 7 | -5.00 | 砂 | 6.7e-2 | 140 | 0.26 | 0.22 |
| 8 | -6.15 | 粘土質ローム | 7.3e-7 | 140 | - | - |
| 9 | -6.48 | 砂 | 5.6e-2 | 140 | 0.26 | 0.22 |
| 10 | -7.00 | 砂 | 5.6e-2 | 180 | 0.30 | 0.23 |
| 11 | -7.30 | 砂 | 4.2e-2 | 180 | 0.30 | 0.23 |
| 12 | -8.15 | 砂 | 1.1e-2 | 180 | 0.30 | 0.23 |
| 13 | -9.00 | 砂質ローム | 2.4e-6 | 200 | - | - |
| 14 | -9.55 | 砂 | 6.1e-2 | 200 | 0.50 | 0.30 |
| 15 | -10.15 | 砂 | 6.1e-2 | 200 | 0.50 | 0.30 |
| 16 | -11.00 | 砂 | 3.2e-2 | 240 | - | - |
| 17 | -12.15 | 砂 | 1.7e-3 | 240 | - | - |
| 18 | -13.00 | 砂 | 4.2e-3 | 240 | - | - |
| 19 | -14.15 | 砂 | 8.0e-3 | 240 | - | - |
| 20 | -15.00 | 砂 | 1.7e-3 | 240 | - | - |
| 21 | -15.10 | 砂 | 8.6e-4 | 240 | - | - |
| 22 | -16.15 | 砂質ローム | 2.3e-3 | 240 | - | - |
| 23 | -16.45 | 砂 | 0.01 | 240 | - | - |
| | -17.00 | | | | | |

R_s, R₂₀: 繰返し回数 5, 20 回の時の液状化強度

て変化し、かつ、有効応力に関して非線形な関係があることが指摘されている¹⁰⁾ため、要素実験で m_v -有効応力関係を事前に求めておく必要がある。なお予測法の詳細な計算フローに関しては文献11)を参照されたい。

3.2 予測事例

対象地盤モデルは新潟地震で落橋した昭和大桥左岸付近の川床地盤とした。当該地点のボーリングデータ¹⁾と地盤の動的物性¹²⁾をもとに設定した一次元地盤構造モデルを表-1に示す。本検討では河床地盤の傾斜、液状化した層の体積圧縮特性が不明確であるため、傾斜角(1, 3, 5度)および液状化した地盤(層厚約10 m)の総沈下量(0.3, 0.5 m)をパラメーターとした解析を実施した。体積圧縮係数は別途実施した豊浦砂の液状化後の圧密試験結果をもとに有効応力に応じて非線形に変化するとモデル化した。図-4に残留変位分布を示す。地震中に生じた地盤の残留変形は杭の残留変形よりも小さく、非排水変形のみでは杭の被害を説明できない。これに対し、地震後の地盤の流動変形は杭の残留変形を大きく上回っている。流動変位の深度分布に着目すると、本地盤モデルでは透水係数が小さい粘性土の薄い層が

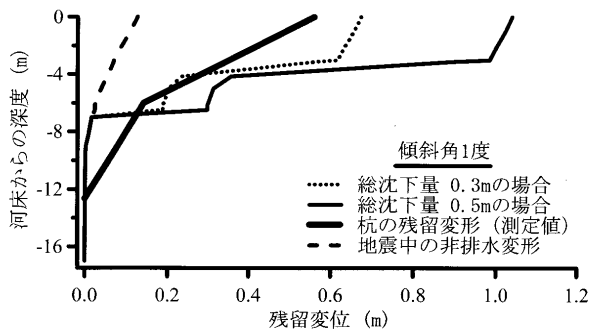


図-4 残留変位分布

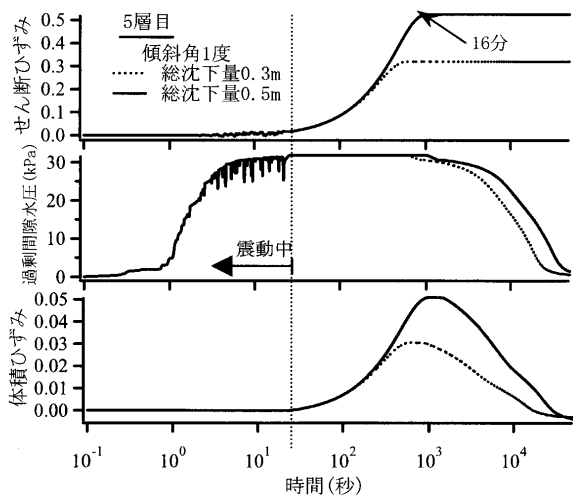


図-5 せん断ひずみ、過剰間隙水圧および体積ひずみの時刻歴

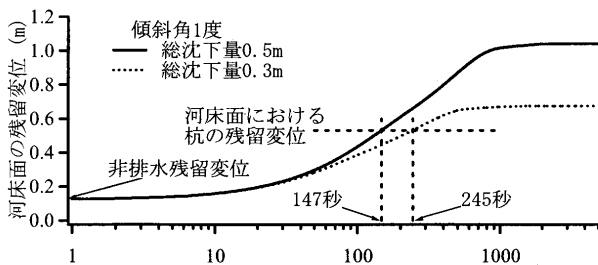


図-6 河床面変位の地震終了後よりの時刻歴

G.L. - 3 m, G.L. - 6 m 付近に存在するため、その直下の層では地盤が膨張し、せん断ひずみが大きく発達している。また、杭の変位分布と地盤の残留変位は調和的であることがみてとれる。図-5には膨張しせん断ひずみが発達する層のせん断ひずみ、過剰間隙水圧および体積ひずみの時刻歴(5層目)を示す。膨張に伴い最大50%ものせん断ひずみが発達し、完全にせん断ひずみが終息するには、約16分を要している。河床面位置の水平変位時刻歴を図-6に示す。河床面変位が測定された杭の

残留変位と一致する時刻は、地震終了後から2~4分のオーダーであり、地震後数分で昭和大桥が落橋したという証言¹⁾と整合する。

4. 結論

地震後の間隙水圧の再配分に伴う浸透破壊による流動変形メカニズムを示した。このメカニズムをもとに地震後の時間遅れを伴う流動変形を表現しうる新しい予測法を提案した。この手法を1964年新潟地震で落橋した昭和大桥の河床地盤に適用し、提案したメカニズムの流動変形予測への適用の可能性が示された。

参考文献

- 1) 土木学会新潟震災調査委員会：昭和39年新潟地震災害被害調査，1966.
- 2) 北羽新報社：日本海中部地震 M7.7 真昼の恐怖一直撃地，能代・山本の記録，pp. 154~155, 1983.
- 3) Yoshimi, Y. & Kuwabara, F.: "Effect of subsurface liquefaction on the strength of surface soil," SOILS AND FOUNDATIONS, Vol. 13, No. 2, pp. 67~8, 1972.
- 4) 時松孝次・若井修一・岸本道太：間隙水の転移による吸水が傾斜地盤の流動特性に与える影響，第34回地盤工学研究発表会，pp. 1019~1020, 1999.
- 5) 安田 進・吉田 望・安達健司・規矩大義ほか：液状化に伴う流動の簡易予測法，土木学会論文集，No. 638, III-49, pp. 71~89, 1999.
- 6) Towhata, I., Sasaki, Y., Tokida K., Matsumoto H., Tamari Y. and Yamada K.: Prediction of permanent displacement of liquefied ground by means of minimum energy principle, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol. 32, No. 3, pp. 97~116, 1992.
- 7) Uzuoka, R., Yashima, A., Kawakami, T. and Konrad, J.-M.: Fluid dynamics based prediction of liquefaction induced lateral spreading, Computers and Geotechnics, Vol. 22, No. 3/4, pp. 243~282, 1998.
- 8) 浜田政則・安田 進・磯山龍二・恵本克利：液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究，土木学会論文集，No. 376, III-6, pp. 221~229, 1986.
- 9) 風間基樹・仙頭紀明・赤堀一彦・大村洋史：地震後の浸透破壊に関する流動変形メカニズム，第36回地盤工学研究発表会，pp. 2415~2416, 2001.
- 10) 吉田 望・辻野修一・稲童丸征巳：液状化に伴う地盤沈下予測に関する基礎的研究，第29回地盤工学研究発表会，pp. 859~860, 1994.
- 11) 赤堀一彦・大村洋史・風間基樹・仙頭紀明：地震後の浸透破壊による流動変形予測法，第36回地盤工学研究発表会，pp. 2417~2418, 2001.
- 12) 地震時の地盤・土構造物の流動性および永久変形に関する研究委員会：地震時の地盤・土構造物の流動性および永久変形に関するシンポジウム論文集，pp. 167~172, 1998.

(原稿受理 2001.10.2)