

不整形な境界から発生した表面波が液状化被害に与える影響

名古屋大学 (正会員) ○中井健太郎

名古屋大学 (フェロー) 野田利弘

名古屋大学 (学正会員) 村瀬恒太郎

(公財)地震予知総合研究振興会 (正会員) 浅岡顕, 澤田義博

1. はじめに

東日本大震災において浦安市で観測された液状化被害の特徴として、①震源から離れており地表面観測記録で最大 100~150gal 程度の揺れであるにも関わらず甚大な液状化被害が発生したこと、②液状化地点と非液状化地点が面的に不均一・非一様に分布していたこと、などが挙げられる。その要因としては、地盤の材料や内部状態の不均一性、つまり、埋立て年代に伴う密度の違いや地盤改良の有無が挙げられる。著者らはこれまでに、陸側から海側へと基盤層が傾斜している浦安市の地層構成に着目して多層系地盤の地震応答解析を実施し、①液状化層以深の粘土層の存在によって地震波がやや長周期の範囲で増幅し、これに伴って生じる大きなせん断変形によって液状化しにくい中間土であっても液状化しうること、②傾斜基盤の存在によって、地層傾斜部では局所的なせん断変形が卓越し地盤内に液状化が非一様に発生することを示し、非一様な液状化被害が地盤の元々の不均一性に加えて深部地層構成の影響にもあったことを指摘してきた¹⁾。本稿では、地盤深部の不整形性が表層地盤の液状化発生に及ぼす影響を数値解析的に把握することを目的とする。用いた解析コードは、砂から中間土、粘土までを同じ理論的枠組で記述する弾塑性構成式 (SYS カムクレイモデル²⁾) を搭載した水~土骨格連成有限変形解析コード **GEOASIA**³⁾ である。

2. 解析条件

基盤層の上に粘性土および砂質土が堆積している地盤を想定した。表層の砂質土は水平成層を仮定し、基盤層が傾斜した傾斜地盤および盆地地盤において傾斜角 1 度と 3 度の 2 通りで実施した。解析に用いた材料定数は、浦安市で実施したボーリング調査および同地点から採取した不攪乱試料の各種力学試験を SYS カムクレイモデルで再現して求めている⁴⁾。初期値に関しては、深さ方向に比体積 (密度)、構造の程度、応力比および異方性の程度は均一であると仮定し、土被り圧に応じて過圧密比を分布させた。入力地震波は東京都港湾局品川地震観測所の G.L.-36m 付近での観測地震波を 2E 波として、地盤底面の全節点の水平方向に等しく入力した。地震時は境界両側端で側方境界要素単純せん断変形境界を設定するとともに、地盤底面に $V_s=400\text{m/s}$ に相当する粘性境界を用いた。

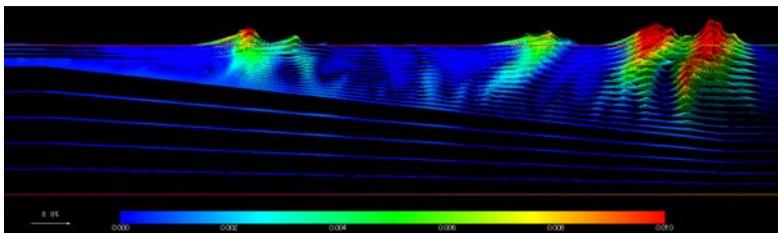


図1 傾斜地盤の速度ベクトル分布 (傾斜角 3 度)

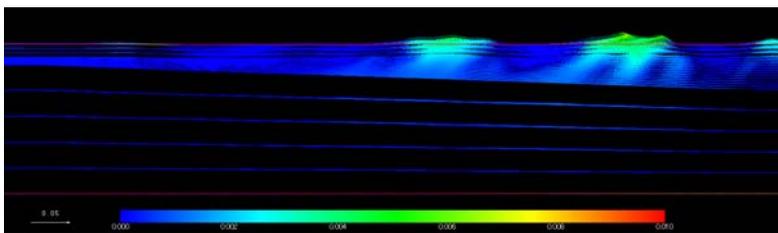


図2 傾斜地盤の速度ベクトル分布 (傾斜角 1 度)

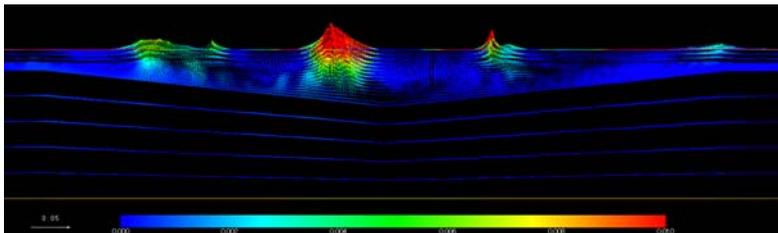


図3 盆地地盤の速度ベクトル分布 (傾斜角 3 度)

3. 解析結果

図1は傾斜地盤 (傾斜角 3 度) の地震発生表面波、不整形地盤、液状化、後揺れ現象

から 60 秒後の速度ベクトル図を示す。なお、地層傾斜部周辺を鉛直方向に 2 倍拡大して表示している。表層部において反時計回りに巻き上げるような（二次的な）表面波の発生⁵⁾が確認できる。この表面波は傾斜基端部で発生し、図中の右側へ進行していく。

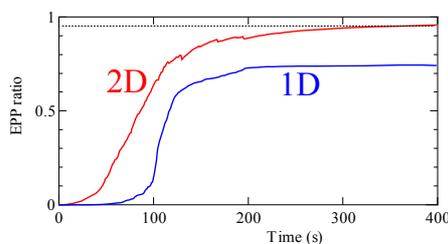


図 4 平均有効応力低下率の比較

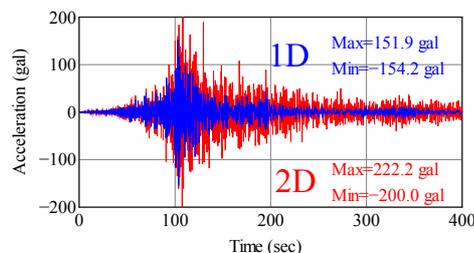


図 5 地表面加速度の比較

図 2 は傾斜角 1 度の場合の同時刻における速度ベクトル図である。傾斜角が小さいと、鉛直上向き成分が小さいことがわかる。水平成層地盤では、当然このような波は生成されず、基盤と粘土層の媒質不連続面における実体波の反射・屈折現象で、表面波が生成された。図 3 は傾斜角 3 度の盆地地盤の場合の、同時刻における速度ベクトル図である。両端から生成された表面波が谷部直上で衝突している。

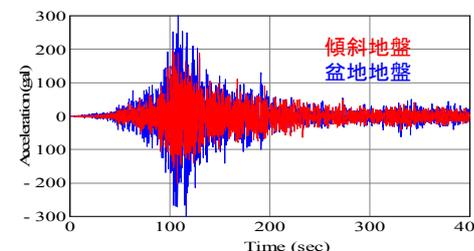


図 6 傾斜地盤と盆地地盤の比較

図 4 は傾斜角 3 度の場合の傾斜中央部における液状化層の要素挙動を示す。図中には、同地点の地層構成を反映して別途実施した、一次元解析結果（水平成層地盤）を重ねて示している。一次元解析では液状化しなかった（平均有効応力低下率<95%）が、二次元解析では平均有効応力低下率が 95%以上となっ

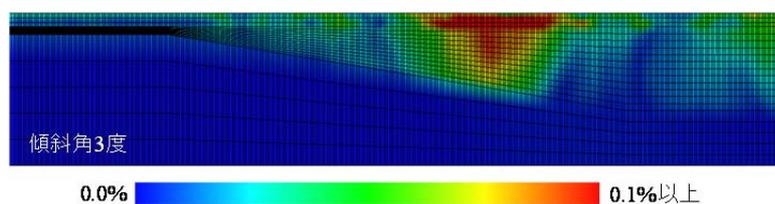


図 7 せん断ひずみ分布（地震発生から 200 秒後）

て液状化している。この要因を説明するため、図 5 に傾斜中央部における地表面加速度応答を示す。二次元解析では表面波の発生に伴って加速度が大きくなるとともに、主要動終了後も後揺れ現象が継続する。つまり、二次元解析では表面波発生が要因となって主要動終了後も平均有効応力低下率が継続的に上昇を続け、最終的に液状化に至った。図 6 は傾斜角 3 度の場合の傾斜地盤および盆地地盤中央部における加速度応答である。この点において両地盤の地層構成は等しい。加速度を比較すると同じ地層構成であるにも関わらず、傾斜地盤に比べて盆地地盤の方が最大加速度は大きい。図 3 でも示したが、両端から生成された表面波がちょうど中央部で衝突・干渉し、揺れが拡大した。

図 7 は傾斜角 3 度の場合の地震発生から 200 秒後のせん断ひずみ分布図を示す。均質な地盤材料を想定した表層部においても不均一なせん断ひずみ分布が発生している。表面波と下部からの実体波が複雑に干渉したためである。図は省略するが、傾斜角 1 度の場合にはせん断ひずみが小さいとともに顕著な不均一性を示さず、盆地地形の場合は谷部直上でせん断ひずみの局所化が顕著となる。

4. おわりに

本稿では、液状化発生に及ぼす地盤の不整形性の影響を数値解析的に検討した。その結果、1) 不整形な境界付近から表面波が生成されることによって主要動終了後も比較的強い揺れが継続し（後揺れ現象）、液状化が発生・拡大すること、2) 均質な地盤材料・状態を仮定しても、地表面の変状が大きくばらつくこと、を示した。この結果は、現象解明に多次元有効応力解析の必要性和有用性を意味する。本稿は地盤工学会東日本大震災対応調査研究委員会「地盤変状メカニズム研究委員会（委員長：浅岡顕）」に関連する研究報告である。

1) Asaoka, A. and Nakai, K. (2013): Dependency of nonuniform ground surface..., Proc. of 18th ICSMGE, pp.1419-1422. 2) Asaoka, A. et al. (2002): An elasto-plastic description of two ..., S&F, 42(5), pp.47-57. 3) Noda, T. et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis ..., S&F, 48(6), pp.771-790. 4) 中井ら(2014): 浦安市地盤の弾塑性性状のモデル化とその一次元地震応答解析, 第 49 回地盤工学研究発表会概要集, 投稿中. 5) 大槻明, 田蔵隆, 清水勝美 (1984): 傾斜基盤を有する不整形地盤の地震時挙動と地盤ひずみ, 土木学会論文集第 350 号, I-2, 291-300.