

不整形な境界から発生した表面波によって拡大した埋立地盤の液状化被害

液状化, 傾斜, 表面波

(公財)地震予知総合研究振興会 ○浅岡頭, 澤田義博

名古屋大学 中井健太郎, 野田利弘, 村瀬恒太郎

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の1つに、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を、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、表層の液状化発生に及ぼす傾斜基盤の影響を詳細に検討することを目的に、傾斜基盤を有する単純化した地盤モデルを用いて地震応答解析を実施する。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

解析に用いた地層構成を図1に示す。基盤傾斜の影響を把握するために、液状化層は水平成層かつ均質な状態を仮定した。解析領域中央部900m区間の粘土層と基盤層の境界に傾斜部を設け、傾斜の状態を系統的に変化させた。水理境界は、地表面が水位面と一致するよう水圧ゼロとし、下端と両側面は非排水とした。各層の材料定数は、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。入力地震波を図2に示す。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⁵⁾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。

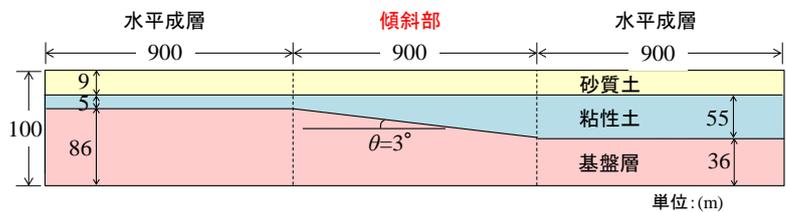


図1 地層構成図 (傾斜角3度の時)

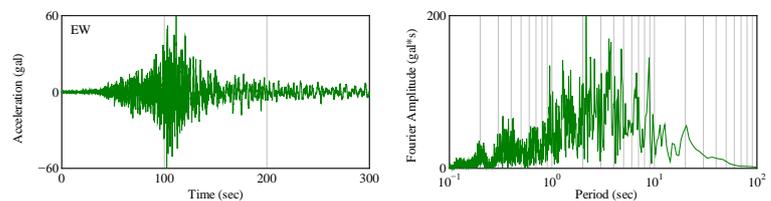


図2 入力地震波

3. 解析結果

図3は傾斜角3度の場合の地震発生から60秒後の速度ベクトル図である。地層傾斜部周辺を、鉛直方向にメッシュを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⁶⁾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。傾斜角度が小さいと、鉛直上向き成分が小さいことがわかる。水平成層地盤

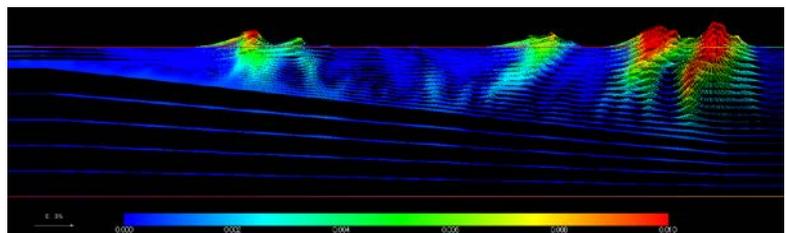


図3 地震から60秒後の速度ベクトル分布 (傾斜角3度)

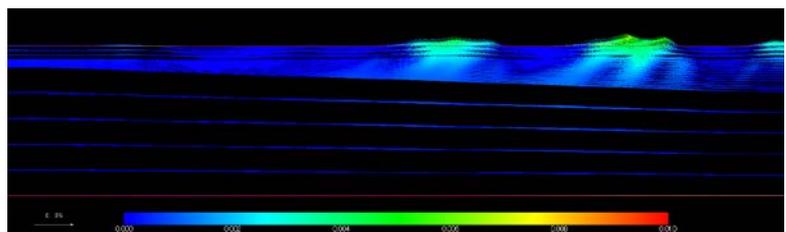


図4 地震から60秒後の速度ベクトル分布 (傾斜角1度)

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5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。

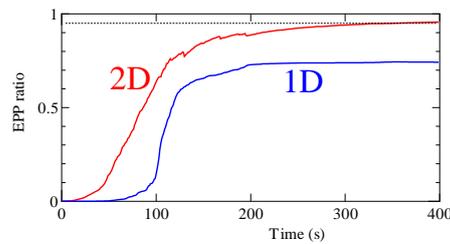


図5 平均有効応力低下率の比較

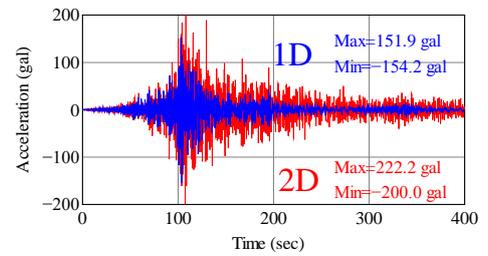


図6 地表面加速度の比較

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%以上となって液状化している。

この要因を説明するため、図6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7は地震発生から200秒後のせん断ひずみ分布図を示す。傾斜角が1度の場合、せん断ひずみが小さいとともに顕著な不均一性を示していないが、傾斜角3度の場合、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。

図8と図9は盆地地形を仮定した解析結果で、傾斜角は3度である。速度ベクトルを見ると、左右両方向から伝播してきた表面波が谷部直上の各所で衝突している。

このように、谷部直上では表面波が衝突を繰り返し、より顕著なせん断ひずみの局所化・非一様性を生み出している。

このように、谷部直上では表面波が衝突を繰り返し、より顕著なせん断ひずみの局所化・非一様性を生み出している。

このように、谷部直上では表面波が衝突を繰り返し、より顕著なせん断ひずみの局所化・非一様性を生み出している。

4. おわりに

本稿では、埋立地盤の液状化発生に及ぼす傾斜基盤の影響を数値解析的に検討した。その結果、1) 基盤傾斜によって傾斜基端部から表面波が生成され、表層の継続的な揺れを引き起こすこと、2) それに伴い、傾斜部直上では加速度が局所的に大きくなると同時に、主要動終了後も比較的強い揺れが継続し液状化が発生・拡大すること、3) 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、などを示した。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。メキシコ地震(1985)以降、図9で示した盆地地形では地震被害が甚大化することが指摘されている。液状化の危険性が高い濃尾平野も浦安埋立地の基盤のように基盤は緩やかに傾斜し、盆地地形も多く見られるため、今後この影響についても調べてゆきたい。

このように、谷部直上では表面波が衝突を繰り返し、より顕著なせん断ひずみの局所化・非一様性を生み出している。

このように、谷部直上では表面波が衝突を繰り返し、より顕著なせん断ひずみの局所化・非一様性を生み出している。

このように、谷部直上では表面波が衝突を繰り返し、より顕著なせん断ひずみの局所化・非一様性を生み出している。

このように、谷部直上では表面波が衝突を繰り返し、より顕著なせん断ひずみの局所化・非一様性を生み出している。

このように、谷部直上では表面波が衝突を繰り返し、より顕著なせん断ひずみの局所化・非一様性を生み出している。

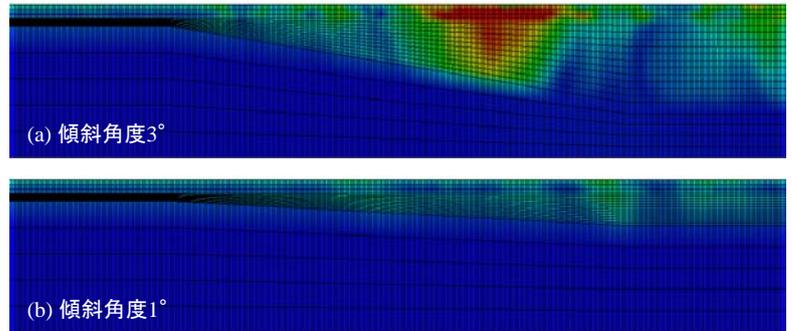


図7 地震から200秒後のせん断ひずみ分布(傾斜角3度,1度)

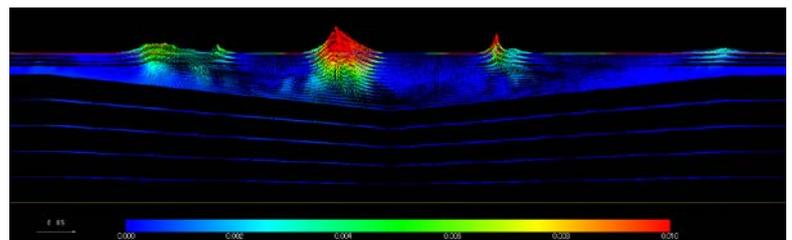


図8 地震から60秒後の速度ベクトル分布(盆地地形・傾斜角3度)

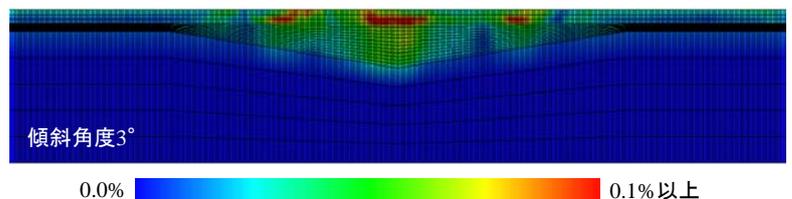


図9 地震から200秒後のせん断ひずみ分布(盆地地形・傾斜角3度)

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。

参考文献 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) 東京都港湾局 HP 6) 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.