

地動速度に対する間隙水圧応答による表層飽和地盤の変形 - 破壊過程の考察 Deformation process in saturated soils inferred from pore pressure behavior

○ 郷隆之・松波孝治・中村正夫
○ Takayui Go, Koji Matsunami, Masao Nakamura

Surface ground motion, pore-water pressures and ground-water levels were continuously monitored at a test site in typical valley fill in Wakayama city. From the observation, it was found that the response of pore-water pressure was directly proportional to surface ground velocity during the S-wave arrivals and that its proportional constant was independent of frequency in a linear elasticity range. By analyzing data reported in previous studies on behavior of pore-water pressures during strong ground motion, the relationship between pore-water pressure and surface ground velocity in a nonlinear elasticity range was constructed. The deformation process to failure in a saturated surface soil was discussed on the basis of the empirical relationship in the entire elasticity range.

1. はじめに

地震時に水で飽和された表層の地盤では変形や破壊現象が生じる。飽和地盤内部での地震動レベルの増加に対する間隙水圧応答は、飽和地盤の変形 - 破壊過程、すなわち、地盤が線形的挙動から非線形的挙動に移り、部分的破壊が生じて遂には完全破壊（液状化）に至る過程を考える際の重要な指標となる。しかし、弱 - 強震時（線形 非線形弾性範囲）の飽和地盤内部での間隙水圧応答について、原位置観測に基づく定量的な評価は得られていない。そこで、和歌山市内の表層飽和地盤で地震動、間隙水圧及び地下水位の連続観測を実施している。本研究では、これらの観測記録による地動速度に対する線形間隙水圧応答、及び、他地点の既往の観測記録の解析から得られた地動速度に対する間隙水圧の非線形応答から、地震時における表層飽和地盤の変形 - 破壊過程を考察する。

2. 弱 - 強震時の地動速度に対する間隙水圧応答

地動速度レベルの増加に伴う地盤の変形 - 破壊過程を考察するために、S 波（SV 波+SH 波）が地表面に入射する時、S 波主要動部分における間隙水圧変化の物理的モデルを以下の様に考える。

弱震時には、SV-P 変換波による体積ひずみに応答する間隙水圧成分 P_{comp} のみが発生し、その振幅は地動速度レベルの増加に伴い線形に増大する事が予想される。一方、強震時には、弱震時と同様に SV-P 変換波による P_{comp} 成分が生じるが、その他に、SH 波に起因する強い水平せん断力により負のダイレイタンス（永久体積圧縮ひずみ）が発生し、間隙水圧の階段状の上昇（ P_{shear} 成分、残留間隙水圧）が生じる。この P_{shear} 成分は、地盤の排水効果により時間経過と共に減衰する。

本観測の結果、S 波主要動部分の最大地動速度に対する最大間隙水圧変化は良好な線形性を示す

事が確認され、この傾きを地動速度に対する間隙水圧応答率と定義した。間隙水圧応答率は、0.125 4Hz においてほぼ一定の値（ $1.38 \pm 0.24 \text{ kPa/cm/s}$ ）を取り、周波数への依存性を示さない。これは、地動速度と間隙水圧の原記録を用いて間隙水圧応答率を評価出来る事を示している。一方、本観測では、強震時の残留間隙水圧が発生した記録が得られていないために、他観測地点の強震時の記録を解析して、強震時の地動速度と P_{comp} 成分及び P_{shear} 成分の関係を調べた。

得られた弱 - 強震時の地動速度に対する間隙水圧応答から地盤の変形 - 破壊過程を考察する。地動速度レベルが 2 cm/s までは P_{comp} 成分のみが線形に増大する。これは、地盤が弾性変形している事を示していると考えられる。 P_{shear} 成分は地動速度 4 cm/s （過剰間隙水圧比=2%）で発生する。この地動速度レベルを境として、地盤の変形形態は土粒子骨格の部分的破壊が生じる事による塑性変形に移り始めていると考えられる。その後 P_{shear} 成分は、強震時（ 10 cm/s 以上）のデータが少ないとはいえ、地動速度の増加に伴い急激に増大する。一方、 P_{comp} 成分も P_{shear} 成分の $3/13$ 倍の振幅を持ち同様に増大する。これは、ある地動速度レベルに達すると地盤の部分的破壊は急激に全体へと進行しやがて完全破壊（液状化）に至る事を示唆する。

強震時の P_{comp} 成分及び P_{shear} 成分のデータの蓄積が課題であるが、強震は度々期待出来ない。従って、観測記録からのデータを補完する必要がある。そこで、想定地震時の工学的基盤上面での地震動シミュレーション波形を用いた繰返し非排水三軸試験、及び、原位置地盤加振実験を実施し、地動速度に対する間隙水圧応答の経験式を構築する事により、間隙水圧応答変化を表層飽和地盤の変形 - 破壊過程の指標とする液状化予測が期待出来る。