液状化時の地盤の粗密に着目した実験と考察

基礎設計室　○田邑　卓也、永田　和之

1. はじめに

東日本大震災では、関東地方の埋立地や沖積層の砂地盤において液状化による顕著な住宅被害が発生した。住宅が傾き、地割れと噴砂が見られた。液状化は一戸建て住宅を所有する人々にとって脅威であり、対策が急務となっている。

そこで液状化の対策を考える上で、液状化はどのようにして起こるのかという点に着目し、仮説を立て実験を行った。

2. 液状化と地震のメカニズム

まず、文献による液状化のメカニズムを確認してみる。

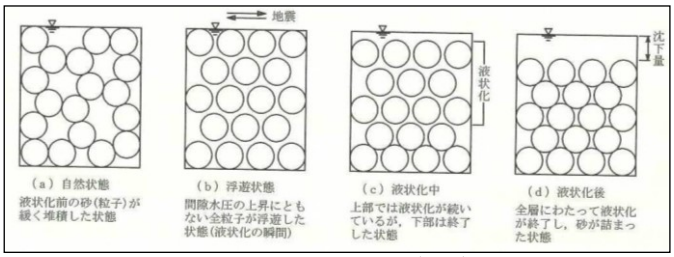

図-1　液状化のメカニズム [1)]

文献では、以下の記述がある。

『飽和状態にある粒径のそろった緩い砂質土が地震等によって揺すられた場合、砂粒子間に存在する間隙水の水圧が次第に上昇し、ついには砂粒子の噛み合わせが外れ、砂粒子は水中に浮遊した状態になる。このように、外力によって、せん断力が繰返し作用し、砂質土が液体状になる現象を液状化現象と呼んでいる。』[1)]

間隙水圧がなぜ次第に上昇するのか。せん断力がどのように作用するのか。よく解らない。体積変化や地下水の急激な流動については述べられていない。

各種地震波の伝わり方[1)]を以下に示す。地震はハンマーの打撃に対し粗密を繰り返しながら伝達すること、うねりを生じながら伝達することを紹介している。うねりに対しても地盤は、粗密を繰り返していることが示され、これが液状化のポイントであると考えることができる。

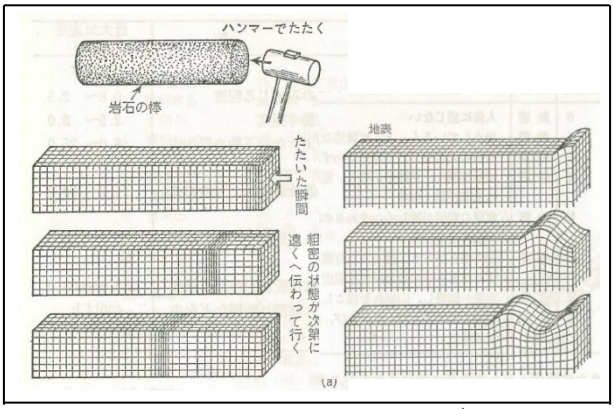

図-2　各種地震波の伝わり方 [2)]

平行移動するような単純な揺れで液状化が発生するのではなく、液状化は土塊に生じる粗密、すなわち体積変化の繰り返しによって、間隙水圧が増減し、土粒子骨格が徐々に破壊し、液状化に至ると考えた。一般的な文献には、このような液状化の説明がないことから、仮説として実験を行い、有識者の評価を仰ぎたいと考えている。

3. 実験装置と実験方法

実験装置を単純に揺らすのではなく、粗密を与えることで液状化が発生することを実験によって試みた。

○実験装置

- 砂地盤：10cm×10cm×10cm
- 使用した砂：細砂
- 飽和砂の重量：約18N（$\gamma \fallingdotseq 18kN/m^3$）
- 荷重計測：5kg(50N)のバネばかり
- 水平変位計測：ダイヤルゲージ

○実験1 静的荷重を繰り返す実験

弓状に配置した鋼板を押えることにより可動壁に水平力を2秒/回で繰り返し加える。水平力は、受働崩壊相当(30N 程度)の圧力とする。

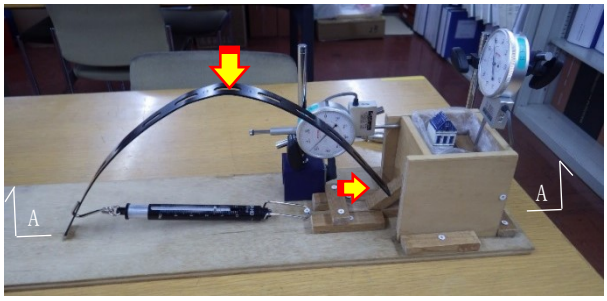

写真-1　静的荷重を繰り返す実験

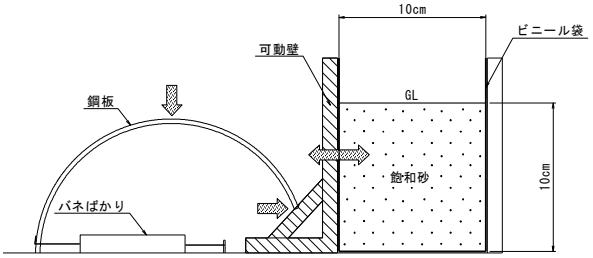

図-3　実験1の断面図(A-A)

〇実験2 木槌の打撃を繰り返す実験

木槌を用いて軽い打撃により可動壁に水平力を繰り返し加える。

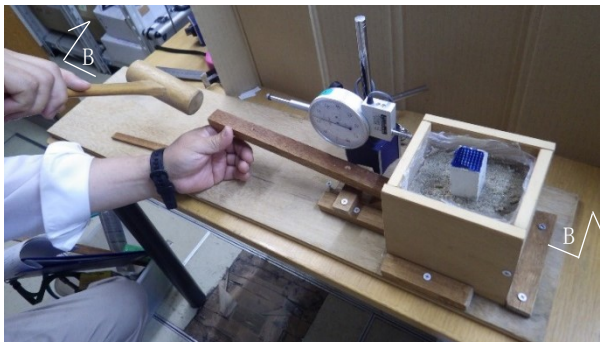

写真-2 木槌の打撃を繰り返す実験

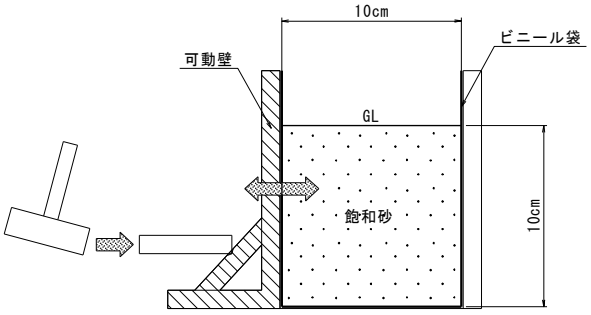

図-4 実験2の断面図(B-B)

〇実験3 紙パックで締切り、打撃を繰り返す実験

(矢板等の締切を想定)

紙パック7cm×7cm×7cmを使用

(1)紙パックの埋め込み深さ5cm

(2)紙パックの埋め込み深さ6cm

写真-3 紙パックで締切り、打撃を繰り返す実験

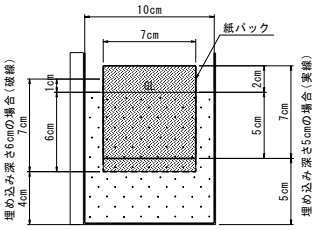

図-5 実験3の断面図(C-C)

〇実験4 可動壁面にスポンジを入れて打撃を繰り返す実験(粗密の吸収と間隙水圧の消散)

(1)スポンジ厚1.5cm・スポンジ幅10cm(全面)

(2)スポンジ厚1.5cm・スポンジ幅4cm(40%)

写真-4 可動壁面にスポンジを入れて打撃を加える実験

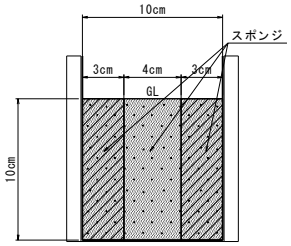

図-6 実験4の断面(D-D)

4. 実験結果

実験1では、80回繰り返し載荷したが液状化は発生しなかった。

実験2では、木槌の打撃を15回程度繰り返すと地下水の浮き上がりが発生、50回の打撃で住宅が転倒した。木槌による打撃はダイヤルゲージにより、瞬間的に0.5㎜程度の体積変化を生じていた。約0.5%の粗密が発生したと推測。目視であるが、打撃振動は砂地盤の反対側に伝達していた。

写真-5 実験2により発生した液状化

実験 3 では、住宅の周りを矢板等による締切り工法を想定しており、紙パックの埋め込み深さ 5cm の場合は 80 回の打撃で液状化が発生し、6cm の場合は 80 回の打撃では発生せず、工法の有効性が確認できた。締切り深さが浅い時には、液状化の影響を受けることが分かった。

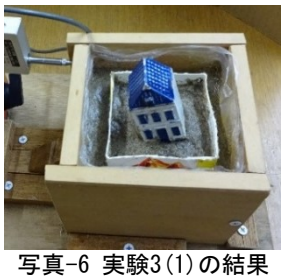

写真-6 実験3(1)の結果

写真-7 実験3(2)の結果

実験 4 では、スポンジにより粗密の吸収、間隙水圧の消散を期待した実験であり、スポンジ幅を 4cm、10cm といずれの場合も 80 回の打撃で液状化は発生せず、効果が確認できた。

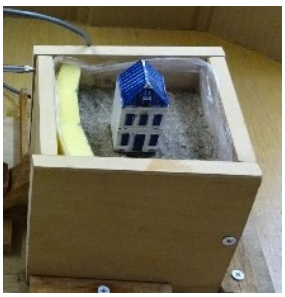

写真-8 実験4(1)の結果

写真-9 実験4(2)の結果

5. 考察

試験結果から液状化が地盤の粗密の繰り返しによって発生することはほぼ確認できたと考える。粗密を起こすエネルギーは測定できなかったが、静的な力ではなく、瞬間的な動的な力が、有力であることが分かった。地震計で観測されるように、地震動は短時間に振動を繰り返していることと近似すると思われる。また、地震動が長く続くことで液状化が発生する点に関しては、繰り返し体積変化を加えることで徐々に砂地盤の構造が破壊されていくと考えれば理解できる。瞬間的な粗密は、間隙水圧に大きく影響し、噴砂現象の発生につながり、砂地盤の構造破壊に寄与していることが想像できる。

液状化対策のポイントは、①間隙水圧の低減（水位低下やサンドドレーンなど)②地盤の補強(強度増加など)③粗密の抑制（矢板や連続地下壁の設置）と考える。既存住宅の地震対策に連続地下壁を構築する工法や矢板による締切り工法が粗密を抑制する効果があることが理解できた。間隙水圧を消散する砕石ドレーンやサンドドレーンも有効であるが、体積変化を吸収するスポンジドレーン的な製品の開発が可能であれば提案したい。

末尾に、本稿に対する批評を戴き、仮説に対する正しい評価を戴くことを切に希望して終わりとする。

《引用・参考文献》

1) 日本建築学会:小規模建築物基礎設計指針, p.88, 2008.2
2) 池田和彦・大島洋志:わかりやすい土木地質学入門, p.32, 1978.12