

不飽和な天然砂の液状化における締固めの影響

EFFECT OF COMPACTION ON LIQUEFACTION OF UNSATURATED NATURAL SAND

今井忠男*・藤村恭平**・鴨志田直人***・杉本文男****

by Tadao IMAI, Kyohei FUJIMURA, Naoto KAMOSHIDA and Fumio SUGIMOTO

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災では、東北から関東にわたる広い地域において地盤が液状化し、地盤沈下、砂・泥水の噴出(ボイリング)、地盤の水平移動(側方流動)など、多数の地盤災害が発生した¹⁾。これによって、多くの住宅に被害が生じ、液状化災害は、本震災における大きな被害の1つとなった。

東日本大震災において、液状化が発生した主な地域は、東京湾の新しい埋立地、および利根川流域(千葉・茨城県)の住宅用埋立地であった¹⁾。いずれの地域も、砂質土質による埋立地であった。また、液状化災害は、人工的な埋立地で多発し、自然地盤では発生しないことが知られている²⁾。したがって、液状化災害は、砂質土の埋立による人為的な災害とも考えられており、埋立材の評価法、および施工技術の向上が望まれている。

飽和した砂質土の液状化現象については、多くの研究があるが³⁾、飽和度90%以下では、液状化は発生しないと考えられており、不飽和状態における液状化についての研究は少ない。風間ら⁴⁾は、不飽和の砂質土の液状化について研究し、不飽和状態であっても、締固めが適切でない場合、液状化が発生することを明らかにした。通常、宅地造成等では、不飽和の状態の土質が埋立てられており、その後、その埋立地の地下水位が地表面まで達し、飽和状態になることは希である。宅地造成で多発する液状化災害は、ほとんどが不飽和の砂質土で発生すると考えられる。したがって、不飽和の砂質土について、液状化し難い材料および施工条件を明らかにする必要がある。

本研究では、液状化について不飽和砂質土の、締固め易さに注目し、粒度および含水比の影響を明らかにするとともに、不飽和な砂試料の耐液状化性能について、締固め度および含水比の影響に

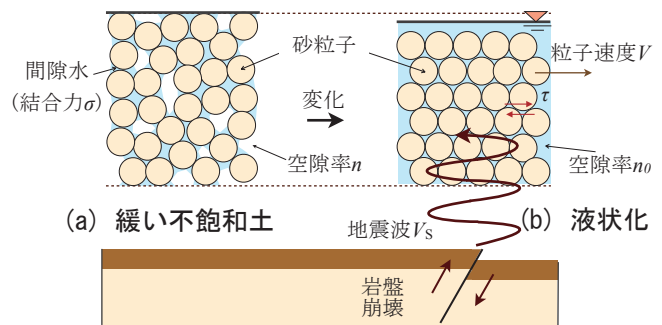


図1 砂地盤と地震波の関係

ついて、実験によって明らかにした。

2. 研究理論

2.1 地震による地盤の破壊

(1) 繰返しせん断破壊

図1(a)(b)のように、地震によるS波によって、砂地盤が繰返しせん断変形を受ける場合、せん断応力の大きさによっては、地盤は疲労破壊すると考えられる。そのため、一般には、地盤の液状化強度を評価する場合、三軸状態での繰返し試験がおこなわれている。図より、地盤中のせん断応力 τ は、構成粒子の粒子速度 V と次式の関係にある⁵⁾。

$$\tau \propto V \times V_s \times \rho \quad (1)$$

ただし、 V_s はS波(地震波)速度、 ρ は地盤の密度である。さらに、粒子速度 V は、S波の加速度 a および周波数 f とによって、次式で定まる。

$$V = a / 2\pi f \quad (2)$$

以上のことから、実際の液状化災害から、砂質土の液状化強度を調べるには、地震の加速度、周波数および粒子速度が用いられている。また、加振器を用いた砂質土の液状化実験においても、同様の手法が用いられる。

(2) 振動の加速度および周期と砂の液状化

一般に、液状化現象が発生し始める地震の強度は、加速度 a が100Gal(震度5弱)、周波数 f が2.0Hzで、振動時間 t が長い場合である⁶⁾。この条件での粒子速度は、 $V=8\text{cm/s}$ 程度となる。実際、液状化が発生したときの地震動について、粒子速度 V を解析した結果、 $V=10\text{cm/s}$ 程度であったことが知られてい

* 秋田大学大学院 准教授 工学資源学研究科 地球資源学専攻 (〒010-0852 秋田市手形学園町1-1)、
** 秋田大学大学院生、 *** 岩手大学 助教 工学部 社会環境工学科、**** 秋田大学大学院 教授 工学資源学研究科 地球資源学専攻

る⁷⁾。さらに、地盤の液状化を、地盤の疲労破壊と仮定するならば、振動の継続時間 t は、重要な要因の1つである。

2. 2 砂層のせん断強度と粘着性および摩擦力

砂層のせん断強度は、砂粒子の①摩擦力と②粘着力によると考えられる。

① 摩擦力 R は、砂粒子の摩擦係数 μ と、砂層中の粒子の噛み合わせ、そして砂層の地圧 p_0 によると考えられる。粒子の噛み合わせとは、粒子の移動し難さを示しており、具体的には、粒子の充填率あるいは砂層の空隙率 n で表すことが妥当である⁸⁾。また、摩擦係数は、粒子の表面の粗さおよび円形度によって、変化する値である。以上のことから、摩擦力は、次のような関数で表すことができる。

$$R = f(\mu, p_0, n) \tag{3}$$

② 粘着力は、乾燥した砂粒子には期待できないが、水を含み湿潤した粒子間には、水の表面張力 T_s が働き、見かけ上の粘着力が生じる。このとき、粒子間を結合させる結合応力は、毛細管力と同様、水の質量に対し接触表面積が大きいほど大きくなる。また、水が含まれる空隙の体積と表面積との割合は、粒径 ϕ が小さくなるにしたがい大きくなる。よって、粒子間の結合応力 σ は、次式で示すことができる⁹⁾。

$$\sigma = 2T_s(1/\phi^2 + 1/r\phi)^{1/2} \tag{4}$$

ただし、 r はメニスカスの曲率半径であり、空隙に大気圧の空気が作用しているときに、生ずる凹みの形状である。したがって、結合応力は、空隙に水量が多くなり、空気の無い飽和状態になると、極めて弱くなる。

砂のせん断強度に関し、上述の内容をまとめる

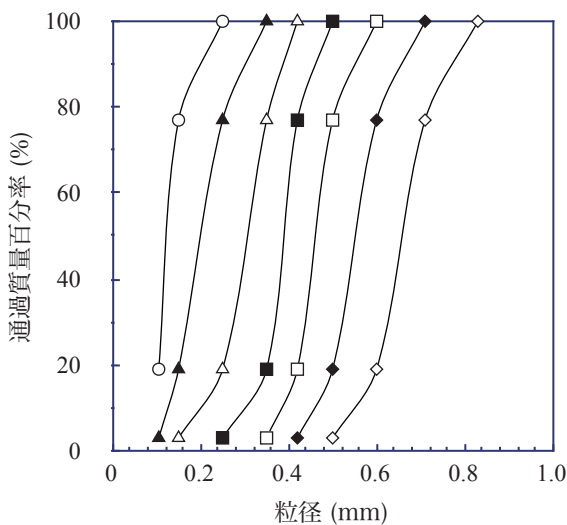


図2 砂試料の粒度分布

表1 砂のせん断強度が高くなる条件

パラメータ	せん断強度が高い状態
空隙率	小
形状	粗
粒径	小
飽和度	中程度

と表1のようになり、液状化に強い砂質土の目安になる。

2. 3 砂質土の飽和度と液状化

風間ら⁴⁾は、飽和度 S_r が75%程度の不飽和の状態であっても、締固めの程度によっては、砂質土は液状化するとしている。図1(a)のような締固めが不十分な砂は、最密な状態より空隙率 n が大きく、不飽和であっても、水分を多く含むことができる。この状態で、地震動によって粒子間の結合力が切れ、図1(b)のような粒子が最密な状態(最大密度)の空隙率 n_0 に移動していくと、飽和度 S_r は100%に近づき液状化に至ると考えられる。ここで、砂の締固め度 N_r を空隙率の比をとって、次のように定義する。

$$N_r = (n/n_0) \tag{5}$$

通常、砂の締固めの評価には相対密度が用いられる。しかし、本研究では、埋土の施工条件によっては、地盤内部の締固めが緩く、空隙率 n が最小密度の空隙率 n_1 よりも大きくなる領域(相対密度が負)も仮定したため、独自の空隙率比 n/n_0 で締固め度を定義した。また、最大密度(空隙率 n_0)での飽和状態における含水比を w_0 とし、このときの砂の飽和度を S_{r0} とした。

以上のことから、締固めが緩い($N_r > 1$)砂が、不飽和状態であっても、含水比が w_0 程度であれば、

表2 砂試料の物性値

試料名	粒子密度(g/cm ³)	使用量(g)
天然砂	2.62	250

表3 砂試料の平均粒径と空隙率(図2参照)

ϕ_{50} (mm)	n_0 (%)	n_1 (%)
○ 0.13	45.9	53.4
▲ 0.20	45.9	51.9
△ 0.30	45.1	51.9
■ 0.39	45.1	51.9
□ 0.46	45.1	51.9
◆ 0.56	46.2	51.9
◇ 0.66	46.2	51.9

地震動によって液状化が生じる可能性がある。

3. 実験方法

3.1 実験試料

本研究では、表2に示す物性の天然砂(陸砂)を用いて、粒度の異なる試料を作製し実験に供した。図2および表3は、最小空隙率 n_0 がほぼ等しく($n_0=45.6\pm 0.6\%$)、平均粒径 ϕ_{50} が $0.13\sim 0.66\text{mm}$ の範囲で異なる、5種類の試料を示している。この空隙率における飽和状態 $S_{r0}=100\%$ の含水比は、 $w_0=31.3\%$ である。また、最大空隙率 n_1 もほぼ一定であり($n_1=51.5\pm 0.6\%$)、 $n_1/n_0=1.15$ 以上では相対密度は負である。

これら砂試料は、 $S_{r0}<100\%$ の条件で、所定の含水比 w となるように水を混ぜたのち、図3に示すメスシリンダー(径70mm、長さ154mm)内へ3層に分けて充填し、それぞれの層を所定の締固め圧 p で3分間締固めた。締固めたのち、試料の体積を測定して空隙率 n を求めた。試料は、メスシリンダーに入った状態で実験した。なお、試料の2層目には水圧センサーを入れ、水圧の変化を測定した。

3.2 実験システムおよび方法

図4に、実験に用いた液状化実験システムを示す。本実験の加振器は、振動台が水平面内で円運動(回転半径 $r=0.225\text{cm}$)して、台上の試料に加速度を与える装置である。図のように、加振器の振動台の上に、試料の入ったメスシリンダーを接着剤で固定し、回転数 N (rpm)の調整によって、加速度 a および周波数 f を変化させ、試料が液状化するまで回転数を増加させた。本加振器における回転数 N と加速

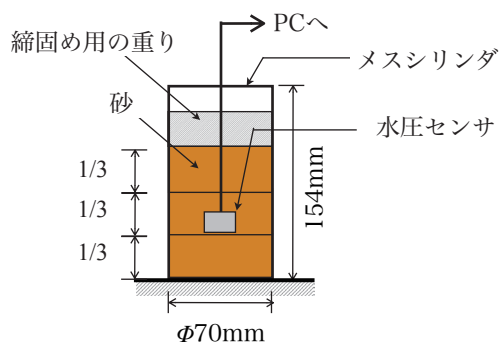


図3 砂試料の締固め方法

度 a 、周波数 f および粒子速度の関係は、以下のようである。

$$a = r(2\pi N/60)^2 \quad (6)$$

$$f = N/60 \quad (7)$$

$$V = (r \cdot a)^{1/2} \quad (8)$$

振動台には加速度計を取り付け、チャージアンプで増幅したのち機械ノイズをフィルタで除去し、オシロスコープによって加速度および周波数を測定した。さらに、試料内に設置した水圧センサーの信号も、アンプで増幅したのち加振器の振動をフィルタで除去し、データロガーを経てPCに記録した。

液状化実験では、試料および水圧センサが、室温(約 20°C)と同温になった時点で加振(初期値は 400Ga1)を開始し、水圧の変化を計測した。同一の加速度で5分以内に液状化が発生しなかった場合、加速度を 100Ga1 増加し加振した。加速度は、5分以内に液状化が生じるまで増加させた。試料の耐液状化の評価は、液状化した加速度における粒子速度 V_c と、 V_c における液状化までの時間 t を用いた。

3.3 実験条件

表4に、本実験で用いた砂試料の作製条件を示す。実験①は、締固め度に及ぼす締固め圧の影響を調べるための条件であり、平均粒径を $\phi=0.2\text{mm}$ 、含水比を $w=28.8\%$ とした。この含水比は $S_{r0}=90\%$ のときの値である。実験②は、締固め度に及ぼす含水比の影響を調べるための条件であり、 $\phi=0.2\text{mm}$ 、締

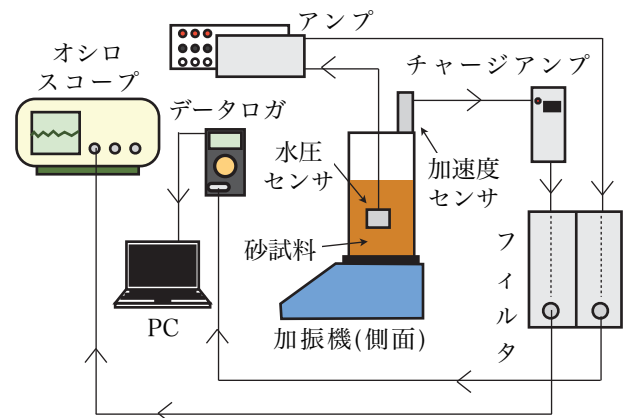


図4 液状化実験システム

表4 実験条件の一覧

パラメータ	実験①	実験②	実験③-1	実験③-2
平均粒径 ϕ (mm)	0.20	0.20	0.13~0.66	0.13~0.66
含水比 w (%)	28.2	0~34.4	28.2	28.2
締固め圧 p (kPa)	0.25~20.40	3.6	3.6	-
締固め度 n/n_0	-	-	-	1.35

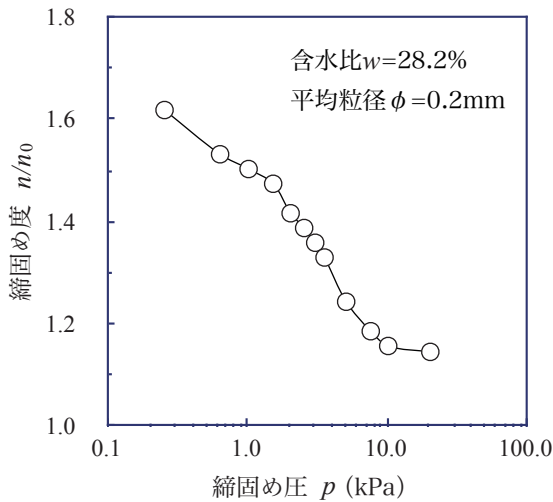


図5 締固め圧と締固め度との関係

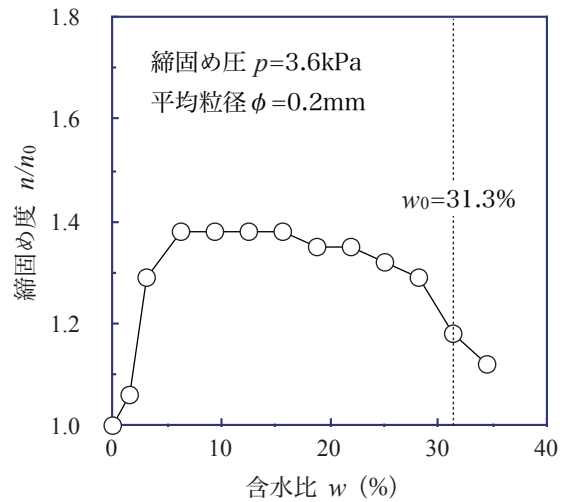


図6 含水比と締固め度との関係

固め圧を $p=3.6\text{kPa}$ とした。実験③-1は、締固め度に及ぼす平均粒度の影響を調べるための条件であり、含水比を $w=28.8\%$ 、締固め圧を $p=3.6\text{kPa}$ とした。同様に、実験③-2では、締固め度を $n/n_0=1.35$ に調整した。なお、 $n/n_0>1.15$ の締固め状態では、相対密度は負の領域である。

4. 実験結果

4. 1 締固め度に及ぼす各パラメータの影響

図5に実験①の条件における締固め圧と締固め度との関係を示す。締固め圧が増加するにしたがい、砂は $p=10\text{kPa}$ までは締固められ n/n_0 値は低下するが、それ以上、締固め圧を増加させても、締固め度は $n/n_0=1.1$ からあまり変化しないことがわかった。次に、図6に実験②の条件における含水比と締固め度との関係を示す。砂は乾燥状態で最も締まっているが、水を少量添加し含水比を3%程度にすると、急激に n/n_0 値は増加しており、砂粒子間の結合応力が働くことで、砂は締固め難くなることがわかる。含水比をそれ以上増加させると、 n/n_0 値は緩やかに低下し、さらに含水比が $w_0=31.3\%$ に近づくと、急激に n/n_0 値が低下することがわかった。この原因は、砂の含水比が飽和状態 w_0 に近くなると、水の表面張力による結合応力が低下するためである。以上のことから、通常の砂の自然含水比の範囲(5~25%)においては、水による結合応力が大きいため、締固め難く、締固め後の空隙が大きくなることがわかった。

図7に実験③-2の条件における平均粒径と締固め度との関係を示す。図より、砂の平均粒径が大きくなるにしたがい n/n_0 値は低下し、締固め易くなっていることがわかる。この原因は、砂粒子が大き

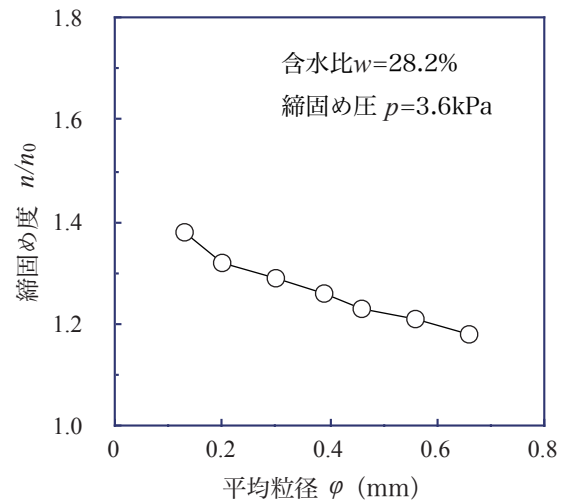


図7 平均粒径と締固め度との関係

くなると、粒子間に働く水の結合応力が低下するためである。このことから、締固め圧および含水比が同程度なら、粒度が大きい砂ほど、締固め易い優良な地盤材料であることがわかった。

4. 2 液状化に及ぼす砂の各パラメータの影響

図8は、実験①の条件において締固め度 $n/n_0=1.2$ とし、加速度 700Gal ($V=12.5\text{cm/s}$)で振動したときの水圧変化を示している。図より、水圧は18秒あたりから急激に増加し、砂の体積が収縮し始める。水圧は25秒あたりでピークを迎え、多少減少したとき、液状化が発生する。水圧はその後一定となっている。写真1に(a)振動前と(b)液状化発生時の試料の様子を示す。水圧が増加し始めると試料体積が収縮し、ピークから少し下がったとき、写真1(b)の液状化状態になった。このとき、試料の締固め度は $n/n_0=1.1$ に減少した。また、一定値までの水圧の増加量は 0.35kPa 程度あることから、水

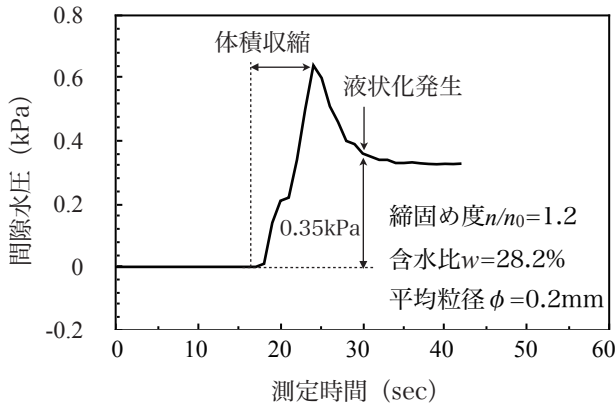


図8 間隙水圧の測定例

柱35mmに相当し、およそ水圧センサーの深さに対応する。このことから、試験前に不飽和だった試料が、液状化によって飽和したことがわかる。しかし、液状化後の締固め度は $n/n_0=1.1$ であり、含水比が28.2%であるから、このときの見かけの飽和度は $S_r=82\%$ である。このように、試料全体では不飽和であるが、液状化して表面に水が湧出する原因は、砂の液状化が、自由面である地表付近から進むため、試料上部だけが飽和し、下部は不飽和の状態なためである。例えば、液状化が進行する間、表面には下部から気泡が上がってきており、下部に向かって液状化が進むことが確認された。

次に、図9は、実験①の条件で締固めた試料について、締固め度 n/n_0 と液状化したときの粒子速度 V_c との関係を示している。図より、締固め度が緩く n/n_0 が大きくなるにしたがい、粒子速度 V_c は低くなり、液状化し易いことがわかる。ここで、 $n/n_0=1.5$ の飽和率は $S_r=60\%$ である。この結果より、飽和度の低い不飽和状態であっても、締固め度が緩いと容易に液状化することがわかった。

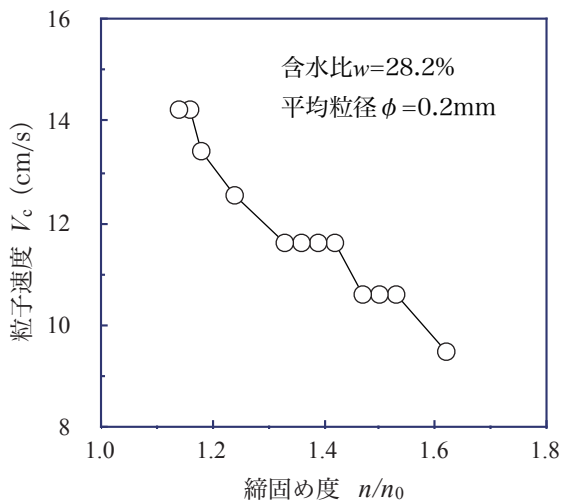


図9 締固め度と液状化粒子速度との関係

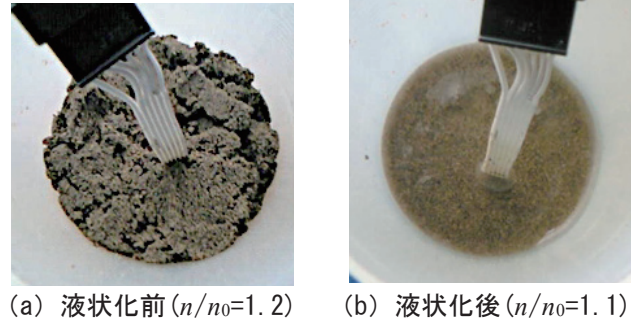


写真1 液状化前後の試料の様子

図10に、実験②の条件における含水比 w と液状化する粒子速度 V_c との関係を示す。なお、 $w \geq 31.3\%$ では飽和状態となるため、液状化実験を行わなかった。ここで、 $w < w_0$ であり、最も締固まった状態でも、見かけ上は不飽和である。図より、含水比 w が低下すると、急激に粒子速度 V_c は増加し液状化しにくくなる。 $w < 26\%$ では $a_c=1000\text{Gal}$ で一定となり、とくに $w < 23\%$ では液状化せず、地割れ状態となった($S_{r0} < 73\%$)。このことは、砂の液状化は、 $S_{r0} < 90\%$ では生じにくいという、これまでの知見と対応している。また、平均粒径0.2mmの砂における水の結合応力は、粒子速度 $V_c=15\text{cm/s}$ に対応することがわかった。なお、 $w < 23\%$ では、試料は液状化しなくなるため、 $w < 12\%$ の測定を省略した。

図11に、実験③-1および③-2の条件における、砂の平均粒径と試料が液状化する粒子速度との関係を示す。図より、平均粒径が異なっても、締固め度が一定なら、液状化する粒子速度に変化が無いことがわかる。締固め圧を一定とするなら、粒径が大きくなるにしたがい、粒子速度は増加する傾向になる。この原因は、図7に示したように、

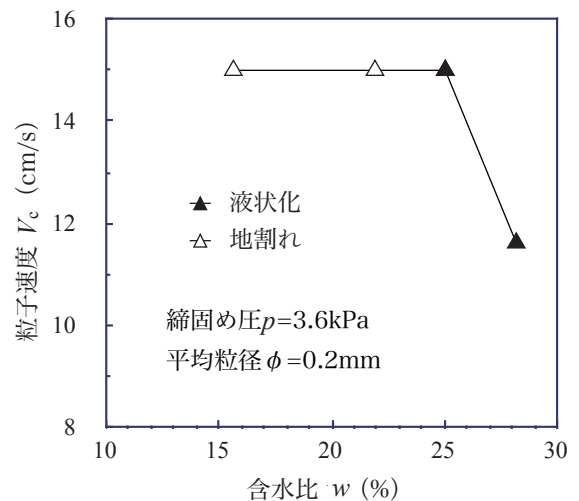


図10 含水比と液状化粒子速度との関係

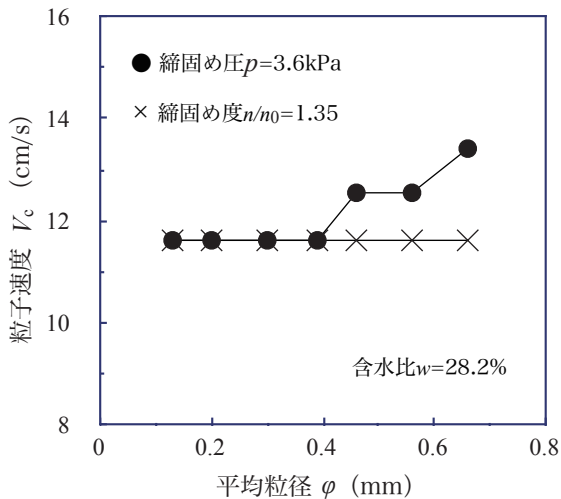


図11 平均粒径と液状化粒子速度との関係

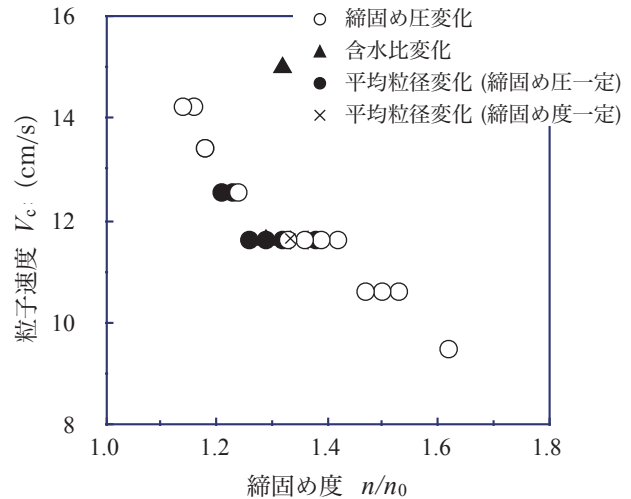


図12 締固め度による液状化粒子速度のまとめ

平均粒径が増加すると、試料は締固め易くなるためである。なお、平均粒径が $0.1 < \phi < 0.4$ mmの間では、粒子速度に変化は無いが、粒径が大きくなるにしたがい、液状化までの時間は長くなっており、液状化に対する耐性は大きくなっている。この結果より、粒度 0.4 mm以下の細粒な砂は、締固め難いが、結合応力も大きくなるため、締固め度に対し、液状化への耐性は、比較的大きいことがわかった。

5. 考察

図12は、実験①～③の液状化試験の結果を、締固め度と液状化する粒子速度 V_c との関係でまとめたものである。図より、液状化した全てのデータは、平均粒径などに関わらず、耐液状化性能は、締固め度によって決まることが明らかとなった。また、本研究によって、砂は含水比が $w < 25\%$ 、締固め度が $n/n_0 < 1.2$ で液状化し難くなることが明らかとなった。この締固め度は、相対密度 0% 程度の状態であり、含水した細粒の砂では、十分な締固め圧が必要となるが、平均粒径 0.5 mm以上の砂では、容易に締固めることができることも分った。

現実の施工では、地盤材料としての砂を乾燥させて含水比を低下させることは難しいため、締固め易い細粒分が少ない粗粒な砂を用いて、可能な限り、締固め度 $n/n_0 < 1.2$ となるように、施工することが重要と思われる。施工後は、地盤試料を深く抜き取り、締固め度 n/n_0 および含水比 w を測定し、安全性を評価することが有効である。

6. まとめ

本研究では、天然砂の締固め易さについて、粒

度および含水比の影響を明らかにするとともに、不飽和の砂試料の耐液状化性能について、締固め度および含水比の影響を明らかにした。結果を要約すると次のとおりである。

- (1) ゆるい砂の締固め度の評価の指標として、含水させた試料を締固めたときの空隙率と最大密度での空隙率との比(空隙率比)が有効である。
- (2) 含水比が $5 \sim 25\%$ 程度で、平均粒径が 0.2 mm以下の細粒な砂は、締固め難い。
- (3) 平均粒径が大きいほど締固め易く、平均粒径が 0.5 mm以上なら締固め易く液状化し難い。
- (4) 含水比が 25% 以下なら、締固め度に関わらず液状化し難い。

引用文献

- 1) 関東地方整備局(2011)：東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明報告書、pp.3-5.
- 2) 西勝、吉田信之、奥村孝幸(1997)：兵庫県南部地震による自然地盤の液状化と地盤変状、神戸大学都市安全研究センター研究報告、第1号、pp.41-51.
- 3) Lee, K. L. and H. B. Seed (1967)：Cyclic stress conditions causing liquefaction of sand, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.93, No. SM1, pp.47-70.
- 4) 風間基樹、高村浩之、海野寿康、仙頭紀明、渦岡良介(2006)：不飽和火山灰質砂質土の液状化機構について、土木工学会論文集C、Vol.62、No.2、pp.546-561.
- 5) 風間基樹、柳沢栄司、稲富隆昌、菅野高弘、稲垣紘史(1996)：アレー観測記録から推定した

- 神戸ポートアイランドの地盤の応力-ひずみ関係、土木学会論文集III、547巻、III-36号、171-182.
- 6) 液状化対策検討委員会編（1994）：小規模建築物等のための液状化マップと対策工法、ぎょうせい.
- 7) 荒井涼（2008）：平成19年度能登半島地震の地震動特性と現地調査の相対的比較、富山県立大学紀要、第18巻、pp. 78-83.
- 8) 今井忠男、馬場将行、杉本文男（2009）：実積率の高いクラッシュラン砕石の生産法とその路盤性能、砕石の研究、Vol. 24、No. 1、pp. 1-12.
- 9) 石原研而（2001）：土質力学（第2版）、丸善、pp. 33-51.

(2012年12月14日受付 2013年2月26日受理)