

1 研究背景と目的

地震時における砂質地盤の液状化は、構造物の沈下や傾斜を引き起こす地盤災害である。液状化特性の評価には、これまで主に非排水繰返し三軸試験が用いられてきた。しかし、従来の三軸液状化試験では、側圧を一定とした条件下で軸方向に繰返し载荷を行うため、原位置地盤において生じる主応力や複雑な応力経路を十分に再現できていない可能性が指摘されている。

既往研究では、粒子配向性が液状化強度に影響を及ぼすことが報告されているものの、三軸液状化試験(図1)と振動台試験(図2, 図3)とで、粒子配向性と液状化強度の関係に逆の傾向が現れる事例が確認されている。この差異の要因として、試験方法による応力状態や载荷方向の違いが影響している可能性が考えられる。

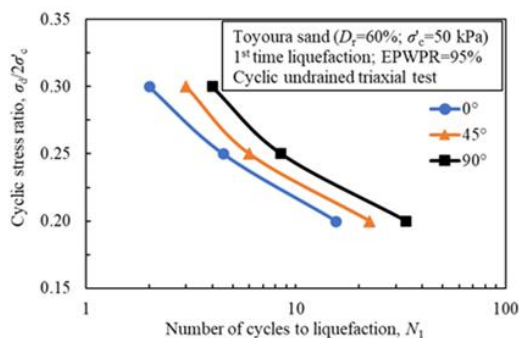


図1 三軸液状化試験の結果⁽¹⁾

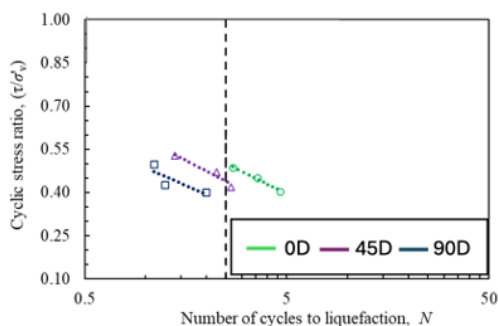


図2 振動台試験の結果(\$Dr=30\%\$)⁽²⁾

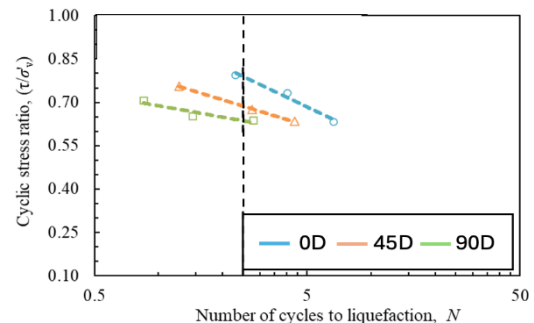


図3-振動台試験の結果(\$Dr=60\%\$)⁽²⁾

一方、原位置で行う CPM 試験を図4に示す。原位置 CPM 試験は、地盤に孔を掘り、そこに試験装置を挿入して、装置内に水を注入・排出することで孔壁を繰返し変形させ、地盤の繰返し载荷に対する特性を調べる試験である。そこで本研究では、原位置 CPM 試験を模擬し、側圧を時間的に変動させる横方向繰返し载荷を行う新しい三軸液状化試験を実施した。本研究の目的は、この新しい载荷方法によって液状化挙動および液状化強度にどのような違いが生じるかを明らかにし、原位置応力状態を考慮した液状化評価手法の有効性を検討することである。

CPM試験

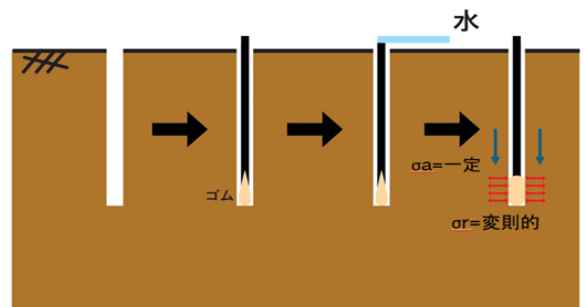


図4 原位置 CPM 試験模擬図

2 研究手法

試験には相対密度 40% に調整した豊浦砂供試体を用いた。供試体は十分に飽和させた後、所定の初期有効応力状態を与え、非排水条件下で繰返し载荷を行った。

従来の三軸液状化試験では、側圧を一定に保ち、軸方向に繰返し载荷を行う。一方、新しい三軸液状化試

験（CPM 三軸液状化試験と称す）では、軸方向応力を一定に保ち、側圧を繰返し変化させる。このように、試験方法によって供試体に加わる応力の変化が異なるため、応力状態および応力経路にも違いが生じる。図 5 に各試験方法の载荷の違いを示す。

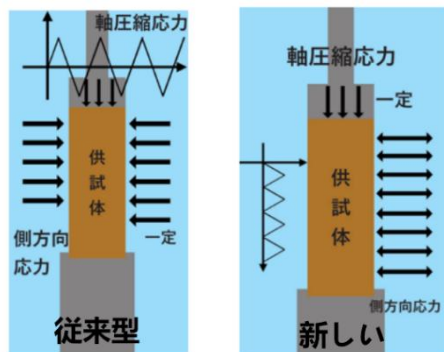


図 5 各試験法の概念図

液状化の判定には、両振幅軸ひずみが 5% に達した時点を基準とし、そのときの繰返し载荷回数を液状化回数 N_c と定義した。試験中は軸ひずみ、偏差応力、有効応力の変化を連続的に計測し、供試体の変形および応力応答を把握した。

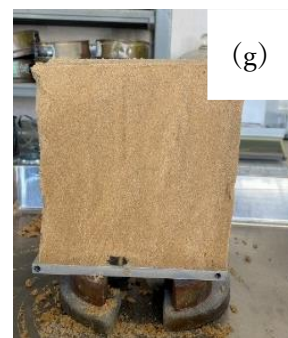
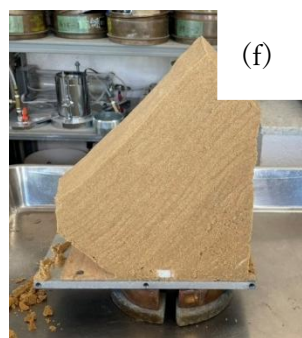
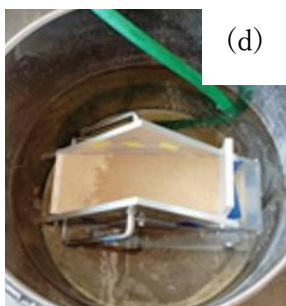
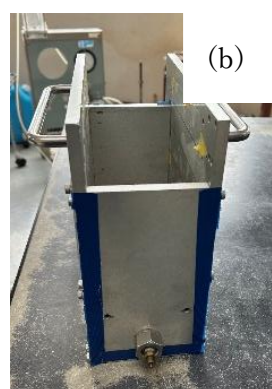


図 6 供試体作製の流れ

図 6 に供試体の作製方法を示す。図 6(a), (b) はそれぞれモールドの組み立て前と後を示し、図 6(c) はモールドに豊浦砂を入れる様子を示している。図 6(d) では、供試体の粒子配向を変えないよう下からゆっくりと水浸させている様子である。図 6(e)～(g) は、異なる粒子配向を形成させた供試体の写真であり、(e) は 0° (f) は 45° (g) は 90° の堆積角である。(h) はトリミング法による供試体の成形、(i) はメンブレンを被せた供試体を三軸試験機に設置した状態である。

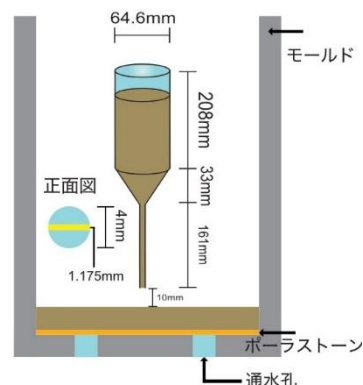


図 7 堆積させる際の図

図 7 に、砂をモールド内に堆積させる時に使用した漏斗のサイズを示す。堆積面上面から 10mm 離すことで所定の相対密度が達成できた。

3 試験結果

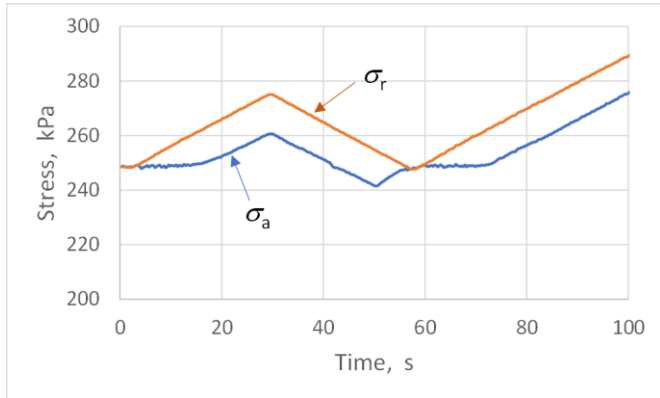


図 8 軸圧と側圧の制御-改善前-

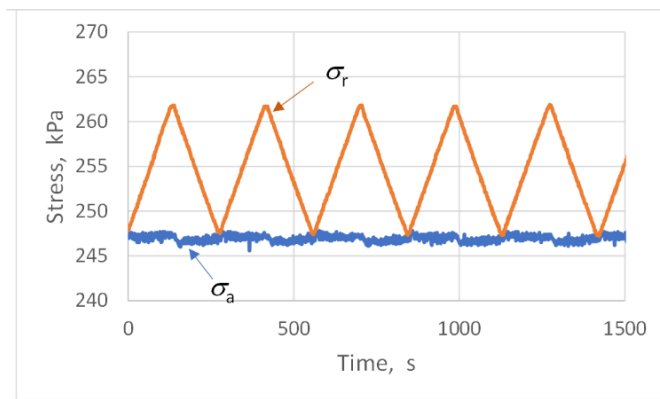


図 9 軸圧と側圧の制御-改善後-

図 8 に制御改善前の軸圧および側圧の経時変化を示す。改善前は、側圧を変化させた際に軸圧も変動しており、軸圧一定条件が満たせていなかった。

図 9 に制御改善後の結果を示す。制御速度を遅くしたことにより、側圧を三角波状に繰返し変化させても、軸圧はほぼ一定に維持できるようになった。これにより、軸圧を一定に保った状態で側圧を繰返し変化させる载荷を実現した。

以下に示す試験結果は、粒子配向角 0° の供試体のものである。現時点で、試験が成功したのは、1 ケースだけで、その結果について考察を行う。

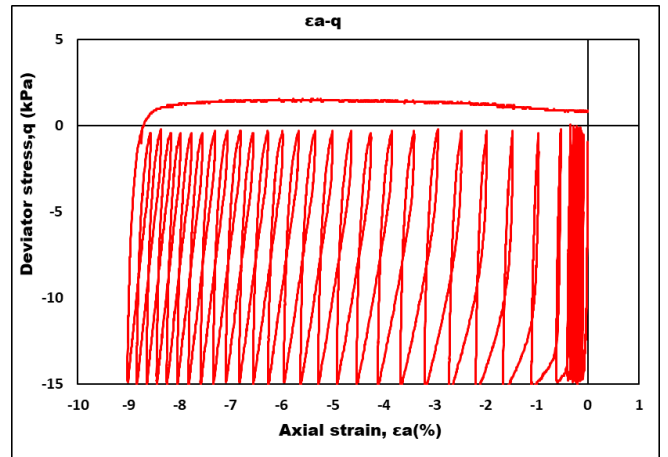


図 10 軸差応力-軸ひずみ関係

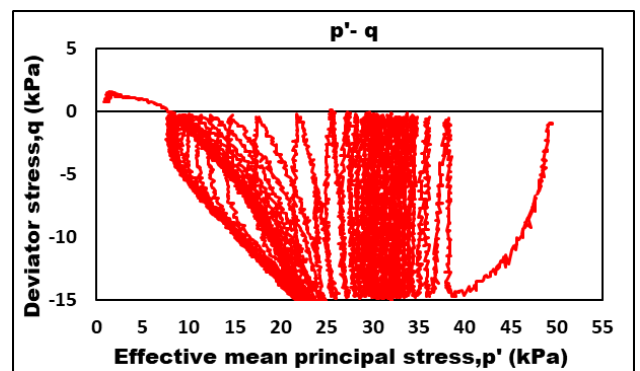


図 11 有効応力経路

図 10 に応力ひずみ、図 11 に有効応力経路を示す。軸ひずみはマイナス方向、つまり伸張側に進展していくことがわかる。有効応力経路も、繰返し载荷にともない、徐々に有効応力が小さくなり、最終的には、サイクリックモビリティのような挙動に至っている。両振幅载荷になっていないのが、通常の三軸試験と違うところである。

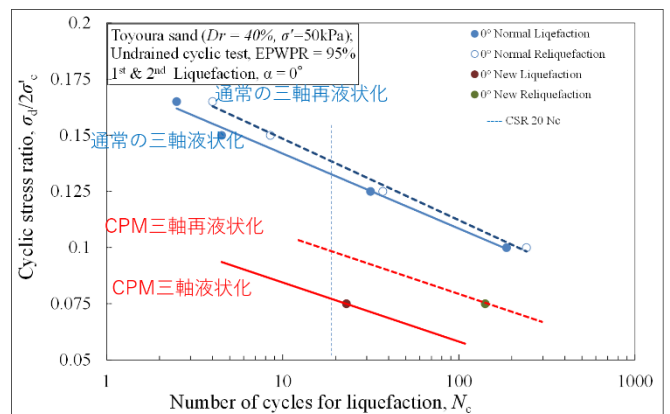


図 12 CPM 三軸試験と従来の三軸液状化試験の比較

図 12 に、CPM 三軸液状化試験と通常の三軸液状化試験の結果を繰返し応力比と液状化回数 N_c の関係を整理したものを示す。CPM 三軸液状化試験では、同一の N_c に対して必要な繰返し応力比が、通常の三軸液状化試験よりも小さくなる傾向が確認された。すなわち、CPM 三軸試験では、より小さな応力比で液状化に至る結果となった。

この結果は、横方向繰返し载荷により、原位置地盤に近い主応力回転や応力経路が再現され、供試体が従来試験よりも不安定な応力状態に置かれたことが影響していると考えられる。

4 考察

本研究で実施した 新しい三軸液状化試験により、従来の三軸液状化試験では捉えにくかった液状化強度の低下傾向が確認された。これは、液状化挙動が単に応力振幅の大きさだけでなく、応力経路や主応力方向に強く依存することを示唆している。

既往の振動台試験において報告されている粒子配向性と液状化強度の三軸液状化試験との逆転傾向も、同様の理由により、出てきた結果と考えられる。

一方で、図 12 に示すように本研究で有効な試験結果を得られたケースは 1 ケースのみのため、今後は、粒子配向性の違いによる液状化強度の比較を行い、そのメカニズム(载荷方向と粒子配向性)を解明していく必要がある。

5 結論と今後の展望

本研究では、原位置 CPM 試験を模擬した新しい三軸液状化試験を実施し、横方向繰返し载荷が液状化強度に与える影響を検討した。その結果、新しい三軸液状化試験では、通常の三軸液状化試験よりも小さな繰返し応力比で液状化に至る傾向が確認された。このことから、CPM 三軸液状化試験は、従来手法では評価しきれない原位置地盤の液状化挙動を捉えている可能性がある。

今後は、試験手順の改善を図り、再現性の高い試験を複数実施することで、粒子配向性と液状化強度の関係を体系的に整理することを目標とする。

6 参考文献

- (1) 藤原 涼：三軸試験を用いた液状化による砂粒子配向性の変化，令和 4 年度長岡技術科学 大学大学院工学研究科修士論文，2022。
- (2) 岩崎 真也：砂粒子配向性に着目した三軸試験と振動台試験による液状化強度の比較，令和 5 年度長岡技術科学 大学大学院工学研究科修士論文，2024。