

グラベルパイルによる砂質地盤の締固め効果に関する室内試験

環境防災研究室 小林友博
指導教員 大塚 悟

1. はじめに

近年、地震被害において液状化被害が問題視されている。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、およそ27000件の住宅が液状化の被害を受けた。宅地の液状化被害は人命が失われることはないが、ライフラインの寸断、家屋の沈下によって、劣悪な生活環境に置かれる。そのため、宅地の地盤改良により液状化による被害を低減することは災害対策において重要なことである。現在、宅地の地盤改良では、セメント系固化剤を用いた表層改良や柱状改良が用いられるが、有機物質の発生や、固化不良の土質が存在することなど多くの問題がある。それに対して、グラベルパイル工法は自然材料を用いるため、環境への負荷が少なく、撤去時の費用が安価である。また、グラベルパイルの打設は地盤の密度増大と間隙水圧消散効果を生み出すため、単一工法より経済的で大きな効果を見込める。しかし、GP工法による地盤改良の設計指針において、インフラ等の大規模な構造物は確立されているものの、宅地地盤のような小規模な構造物に対しては不確立である。加えて、現在の日本建築学会指針では、砂質地盤においてGPの液状化対策効果を締固め効果で評価しているが、定量的な評価はされていないという問題がある。この問題を踏まえ既往研究では、設計指針構築を目的として、東北珪砂6号を使用して砂質地盤を作成し、GP格子状打設時における貫入試験を行った。その結果、未改良地盤から得られたデータを締固め効果の定量的検討の指標とし、改良地盤のデータと結び付けることで、初期相対密度-換算相対密度の関係を示した。上記の関係より、相対密度の条件を満たすためにどの程度の改良率でGPを打設すればよいかを知ることができ、施工する際の指標になると考える。

本研究では、平均粒径の異なる砂質地盤でGP格子状打設時における貫入試験を行い、本研究と既往研究で得られた初期相対密度-換算相対密度の関係を比較することで、締固め効果の特性に違いがあるのかを検証すると

共に、宅地地盤の設計指針を構築することを目的として模型実験を実施する。

2. 試験方法

本研究での模型地盤は、東北珪砂7号を用いて水中落下法により400×400×300mmの地盤を作成した。東北珪砂7号の特徴としては、既往研究で用いた6号に比べてシルトが含まれていることである。東北珪砂6号と7号の物性値、粒径加積曲線を表1、図1に示す。

表-1 東北珪砂6号・7号の物性値

砂の種類	東北珪砂6号	東北珪砂7号
土粒子密度 ρ_s	2.63 g/cm ³	2.64 g/cm ³
最大間隙比 e_{max}	0.878	1.067
最小間隙比 e_{min}	0.551	0.614

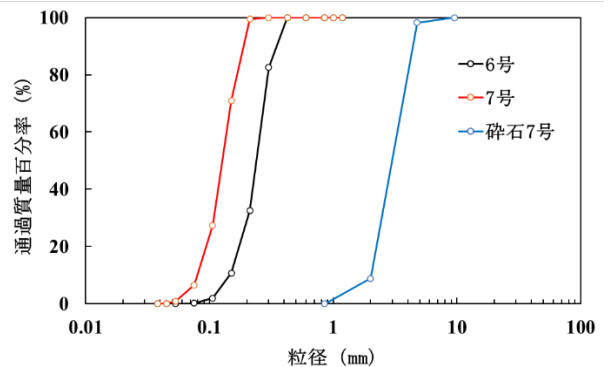


図-1 東北珪砂6号・7号の粒径加積曲線

GP材料は砕石7号を使用し、杭長は150mm、杭径は24mmとした。また、GPによる締固め効果発現機構を確認することを目的として、コーン貫入試験を行う。試験機の概要を図2に示す。コーン(直径10mm)を設置したロッドを地盤に貫入することで貫入抵抗値(R)を計測する。得られた貫入抵抗値(R)を貫入深度 Z(mm)で除すことで深度依存性を取り除いた貫入抵抗比 R/Z が求まる。コーン貫入試験の条件を表2に示す。

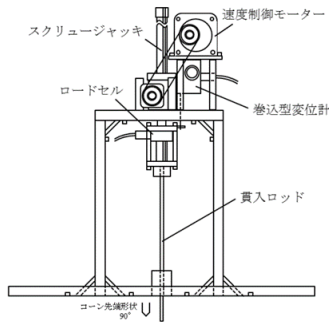


図-2 コーン貫入試験装置概要

表-2 コーン貫入試験の条件

模型地盤作成方法	水中落下法
模型地盤寸法	400×400×300mm
模型地盤材料	東北珪砂7号および6号
杭長・杭径	150mm, 24mm
GP材料	砕石7号

2. 1 未改良地盤における貫入試験

未改良地盤では、東北珪砂7号および6号で各相対密度の地盤を作成後、コーン貫入試験を行った。6号は過去のデータを引用した。7号および6号の未改良地盤における貫入抵抗比の深度100mm～150mmの範囲の平均値と初期相対密度の関係を図3に示す。図3より、求められた近似式はそれぞれ $y = 169.07e^{0.0407x}$, $y = 295.21e^{0.033x}$ となり、GP打設後の地盤状態を推測するための指標とした。また、両者を比較すると、 $Dr=30\%, 40\%, 50\%$ のような比較的緩い地盤の場合、貫入抵抗比は6号よりも7号の方が小さく、 $Dr=60\%, 70\%, 80\%$ のような比較的密な地盤の場合、同程度の値をとることが確認できた。この結果を踏まえると、緩い地盤ではせん断抵抗角 ϕ は6号よりも7号の方が小さく、密な地盤では同程度になることが考えられる。よって、粒径が均一という条件の下では、緩い地盤では粒径が小さいほど貫入抵抗比の値は小さくなり、密な地盤では、粒径によらず、ある一定の値をとることが推察される。

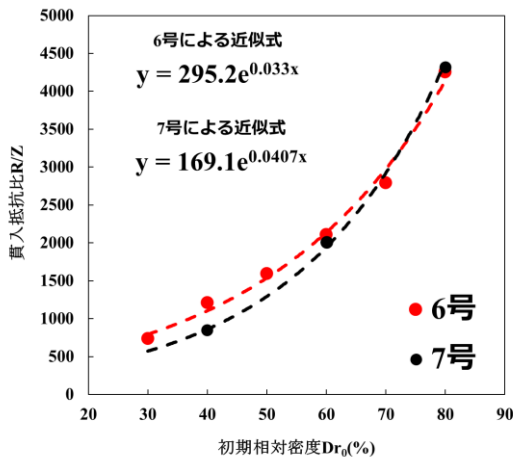


図-2 コーン貫入試験装置概要

2. 2 GP 格子状打設における貫入試験

改良地盤では、東北珪砂7号・6号の模型地盤に対してGPを格子状に打設後、貫入試験を行った。6号は過去のデータを引用した。時間の都合上、7号の改良地盤より取得したデータは $Dr=40\%, 60\%$ の2ケースである。試験条件を表3に示す。

表-2 東北珪砂7号の試験条件

試験ケース	相対密度 (%)	杭間隔 (mm)	改良率 (%)
A-1	40	95	5
A-2		75	8
A-3		55	15
B-1	60	95	5
B-2		75	8
B-3		55	15

7号および6号の改良地盤における貫入抵抗比の深度100mm～150mmの範囲の平均値と改良率の関係を図3に示す。図3より、各相対密度の貫入抵抗比の値は、6号よりも7号の方が小さい。この結果について考察すると、相対密度60%での改良地盤の結果とA-3($Dr=40\%$ 、改良率15%)の結果に誤差が生じたと考える。相対密度60%での改良地盤の結果については、未改良地盤の結果(図2)より、6号と7号の貫入抵抗比は同程度であるため、改良地盤の貫入抵抗比も同程度の値になると推察する。誤差の原因としては、相対密度を調整する際に突き棒で突く回数が多いことが考えられる。A-3の結果については、データから傾向を推測すると、A-3の試験値は傾向から逸脱していると考えられるため、何かしらの誤差が生じたと予想する。この考察を踏まえてグラフの形状に着目すると、6号および7号のグラフは類似しており、緩い地盤と比べて密な地盤の方が傾きは大きいこと、効果には限界値が存在することが判明した。締固め効果に限界が生じる原因としては、砂のダイレタンシー(せん断に伴う体積の膨張)が関係していると推測する。グラベルパイルの貫入は排土をしないため、貫入体積分を押し上げ、周辺地盤を圧縮させることで締固め効果を発揮する。しかし、抵抗力が増え続けると圧縮できずに地盤が抜きあがってしまうことで、締固め効果に限界が生じる。この挙動を促進させる地盤物性としてダイレタンシーが働くことと推察される。よって、粒径が均一という条件の下では、グラフが類似しているために、締固め効果の傾向は同じ傾向にあり、密な地盤ほど締固め効果が大きいことや、効果には限界値が存在することが推察される。

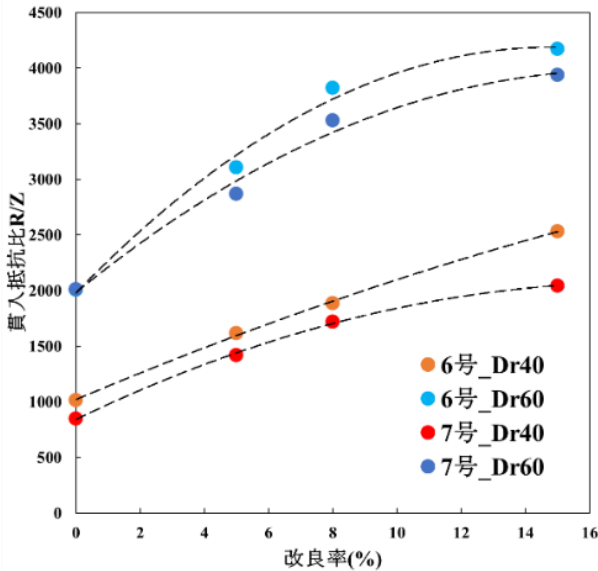


図-3 格子状打設の締固め効果

2. 3 初期相対密度-換算相対密度の関係

図 4 より、未改良地盤のグラフ(図 2)から得られた近似式に、改良後の貫入抵抗比の深度 100~150mm の範囲の平均値(図 3)を代入することで、未改良時の値と等価なグラベルパイル打設後の相対密度を求めた。求めた値を換算相対密度とし、締固め効果の指標とする。改良地盤で誤差について考察したことを踏まえると、6 号および 7 号の初期相対密度-換算相対密度の関係は同程度の結果になった。同程度の結果になった原因として、各地盤条件による格子状打設の締固め効果(図 3)のグラフの形が類似しており、締固め効果の傾向がおおよそ等しいことが挙げられる。よって、粒径が均一という条件の下では、初期相対密度-換算相対密度の関係は同程度になると推察する。初期相対密度-換算相対密度の関係(図 4)と各地盤条件による格子状打設の締固め効果(図 3)より、グラベルパイルによる締固め効果を発揮できる地盤の最大相対密度を表現できた。図 3 では、東北珪砂 6 号および 7 号は相対密度 60%の改良率 15%で限界値を迎えており、図 4 では、おおよそ換算相対密度 75%のときである。つまり、相対密度 75%の地盤にグラベルパイルを打設しても締固め効果の増加は見込めないことがわかる。この指標を用いることで、相対密度の条件を満たすためにどの程度の改良率でグラベルパイルを打設すればよいかを知ることができることに加えて、無駄なく効率の良い施工ができるようになることに期待したい。

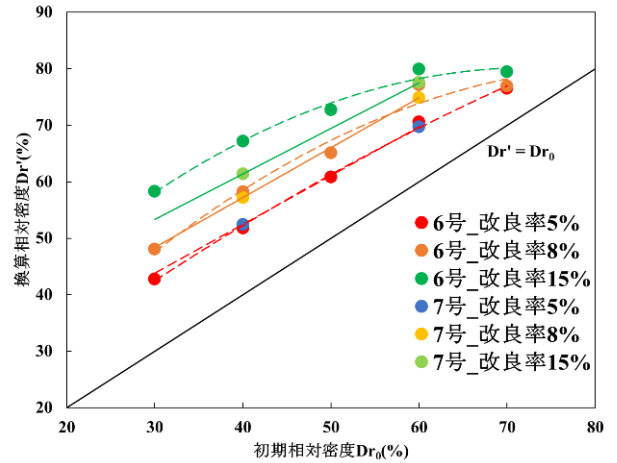


図-4 地盤改良効果の計測

3. まとめ

本研究より、東北珪砂 7 号を用いて初期相対密度-換算相対密度の関係を示した。粒径が均一という条件下では、グラベルパイルによる締固め効果は同じ傾向にあり、初期相対密度-換算相対密度の関係も同程度の結果になることが推察される。また、初期相対密度-換算相対密度の関係より、相対密度の条件を満たすためにどの程度の改良率でグラベルパイルを打設すればよいかを知ることができるに加えて、締固め効果の限界が生じる地盤の相対密度を確認することができることに期待する。

4. 今後の課題

本研究で得られた成果をグラベルパイルによる液状化対策に適用するには、相対密度を変化させた液状化強度試験が必要であり、目標とする地震動に対して液状化を防止する相対密度の目標値を決めなくてはならない。また、実験で取得できるデータにばらつきが生じやすいのは明らかであり、実験ケースは東北珪砂 6 号と 7 号の 2 ケースのみである。本実験の成果をより信頼できるものにするためには、より多くのケースで実験をしなくてはならないことは勿論のこと、実験結果にばらつきが生じないように工夫することも今後の課題である。

参考文献

- 1) 金子泰士・大塚悟・福元豊：砕石パイルによる緩い砂質地盤の締固め効果に関する模型試験第 15 回地盤改良シンポジウム 2022.12