一般財団法人新潟県建設技術センター

令和２年度研究助成

報告書

狭隘敷地の地盤液状化対策技術の開発

令和３年３月

長岡技術科学大学

大塚　悟

目　次

１．研究目的と概要　..... 2
２．グラベルパイルによる液状化対策工　..... 4
３．締固め効果に関する室内模型試験　..... 6
　３．１　コーン貫入試験による締固め効果の測定法　..... 6
　　３．１．１　コーン貫入試験の概要　..... 6
　　３．１．２　模型地盤の物理特性と地盤の作成方法　..... 6
　　３．１．３　グラベル・パイルの打設方法　..... 7
　３．２　未改良地盤のコーン貫入試験　..... 8
　３．３　単杭による締固め効果と面積比による改良率　..... 9
　３．４　格子配列による締固め効果と面積比による改良率　..... 13
４．排水効果に関する振動台模型試験　..... 18
　４．１　振動台模型試験の概要　..... 18
　４．２　未改良地盤の液状化試験　..... 19
　４．３　改良地盤の液状化試験　..... 20
５．締固め効果に関する実規模現地試験　..... 22
　５．１　現地試験の概要　..... 22
　５．２　試験結果の考察　..... 24
６．結論　..... 31
参考文献　..... 32

報告書

１．研究の目的と概要

地震の防災対策は人的被害の軽減の目的から，戸建住宅の耐震化施策が長年実施されてきた。その成果もあり，近年は住宅建物も耐震化が進むとともに，新しい基準で構築された住宅は地震時にも被害が軽微または限定的となる効果が確認されている。一方で地震による地盤の液状化は，宅地地盤に利用される人工地盤を中心に頻繁に発生しており，住宅建物の倒壊等の被害こそ生じないものの，液状化に伴う地盤の不同沈下によって建物基礎の損傷が数多く発生する事例が数多く報告されている。建物基礎の損傷は住宅の全壊に直結するため，人命の次に住宅資産の保護が次の防災上の課題として大きな社会問題になっている。

地盤の液状化対策は大規模なインフラ施設を対象に開発され，対策工法の効果は多くの地震被害の中で実証されてきた。しかし，本研究の対象とする小規模なインフラ施設や戸建住宅は狭隘な土地や対策費用の問題もあり、液状化対策に関する設計基準が十分に確立されていない。特に宅地地盤は個人資産のために公共工事とは異なる対策費用の問題がクローズアップされる。宅地の液状化対策はいくつかの工法が提案されているが，本研究は自然材料を用いる，グラベル・パイルによる地盤改良工法について取り上げる。狭隘な宅地において施工可能なグラベル・パイルの施工機械はいくつかの企業で既に開発されており，宅地地盤の地盤改良に適用される実績は年々蓄積される状況にある。

グラベル・パイルの液状化対策は砂質地盤の締固め効果，過剰間隙水圧の排水効果，複数杭の打設による地盤剛性の増加効果が期待できる。建築学会や地盤工学会などでは，各効果に関する定量的評価が取りまとめられているが，未だ設計指針にまでは採用されていない。本研究は上記の効果の中より，砂質地盤の締固め効果および排水効果に着目して、室内および現地試験を通して対策効果に係わる研究を実施する。締固め効果に着目する理由には，排水効果が地盤の液状化する原因となる過剰間隙水圧が発生しないと効果の現れない一方で，地震による間隙水圧の上昇は急激であるのに対して排水には時間のかかることが挙げられる。したがって，液状化対策をグラベル・パイルの排水機能に大きく依存するにはやや難がある。更には，長期的視点ではグラベル・パイルの目詰まりによる排水機能の低下が懸念されることも考えられる。一方，グラベル・パイルによる地盤剛性の増大効果は一般にグラベル・パイルの液状化対策効果に含まれておらず，副次的な効果である。また剛性は杭の施工品質や配置による影響を受けることから，液状化対策効果の主要項目に挙げるのは適切でない。一方で，地盤の

締固め効果は液状化による過剰間隙水圧の上昇防止に効果的に作用するほかに，間隙水圧が上昇する場合にもサイクリック・モビリティによる水圧の上昇防止に粘り強い作用が期待される。工法原理も土の締固めという単純なものであり，効果の永続性が期待できる。

表-1.1　液状化対策工法の分類と工法原理

原理		大分類		中分類	小分類
液状化発生の抑制	土の性質の改良	密度の増大 （有効応力の増大）	締固め工法 （密度増大工法）	表層締固め工法	
				サンドコンパクションパイル工法	スクリュー・プレス工法
				振動締固め工法	
				静的締固め工法	陸上施工
					海上施工
				動圧密工法	
		固結 （せん断変形の抑制）	固化工法	浅層混合処理工法	現位置固化工法
				中層混合処理工法	機械攪拌工法
					機械攪拌+高圧噴射工法
				深層混合処理工法	機械攪拌工法
					機械攪拌+高圧噴射工法
					高圧噴射工法
					その他
				薬液注入工法(注入固化工法)	多重管注入工法
					浸透固化工法
					その他
				生石灰パイル工法	
				事前混合処理工法	
		粒度の改良	置換工法	置換工法(掘削置換)	
				強制置換工法(圧入置換)	
				爆破置換工法	
		飽和度の低下 （有効応力の増大）	地下水位低下工法	ディープウェル工法	
				排水溝工法	
	応力・変形・間隙水圧に関する条件の改良	有効応力の増大		ゴムバックなどによる側圧の増大	
		間隙水圧の抑制・消散 （間隙水圧の遮断）	間隙水圧消散工法	バーチカルドレーン工法	グラベルドレーン工法
					スクリュー・プレス工法
				水平ドレーン工法	水平ドレーン工法
				排水機能付鋼材工法	
		せん断変形の抑制 （間隙水圧の遮断）	せん断変形抑制工法	格子状地盤改良	
				連続地中壁による工法	

以上から，本研究はグラベル・パイルによる砂地盤の締固め効果に着目して、室内模型試験および現地実規模試験を実施して対策効果に係わる効果を明らかにする。室内模型試験は管理した条件にて対策効果を系統的に把握するのに適しているが、小規模模型試験のために寸法効果が危惧される。そこで，本研究では現地実規模試験を実施して締固め効果を調査する。また，振動台模型試験によりパイルの排水効果について検討して、対策工法の安全性に対する裕度を確認する。

2．グラベル・パイルによる液状化対策工

グラベル・パイルによる液状化対策工にスクリュー・プレス工法（株式会社グランテック）がある。本研究では現地試験で試験施工をご協力頂いている。以下に対策工法の概要を，工法の施工順序を箇条書きにする事により示す（図-2.1）。

① 特殊形状のスクリューを地中に回転挿入する。排土しないため，周囲の土は圧縮固化される。先端からエアー送気する点に特徴がある。

② パイル周辺は不飽和化するために，見かけ上の粘着力が発生しており，パイルの引き上げ時に健全な孔（孔壁が自立する）ができる。

③ 孔に砕石を投入して最大 100kN の押圧力で転圧する。砕石パイルは拡径するため周辺の地盤を圧縮固化するとともに砕石パイルも締固められる。

④ この手順を繰り返して，GL まで砕石を整形する。

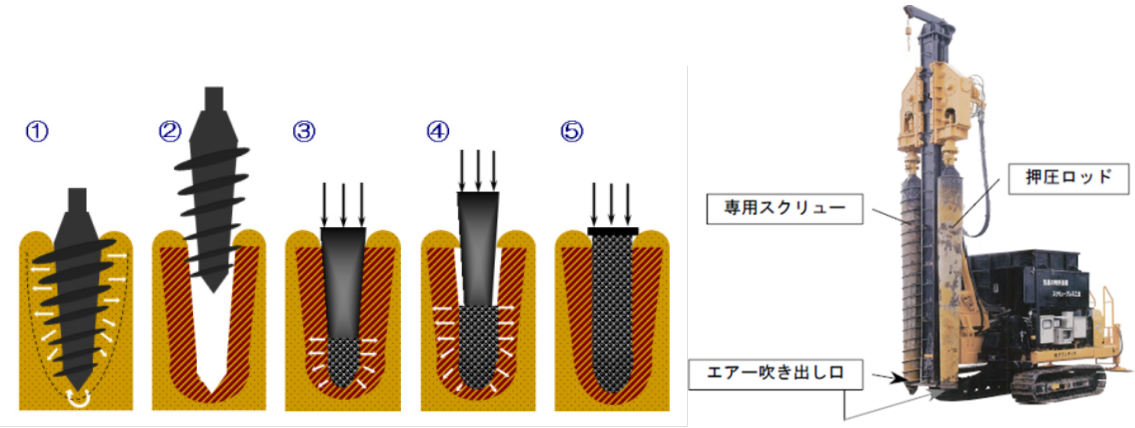


図-2.1　スクリュー・プレス工法の施工手順

スクリュー・プレス工法は，特殊形状の圧密スクリューが削孔時に排土することなく孔周囲地盤を強制的に圧縮する。一般的な削孔では削孔→スクリュー引き上げ→残土落としの工程が発生して多くの時間を要するために，液状化が問題となるような滞水砂層では掘削中に孔が崩壊する問題があった。スクリュー・プレス工法は特殊形状のスクリューにより残土排出の工程が不要であるため，4m まで 1 回で削孔可能である。また削孔中にスクリュー先端より加圧エアーを送気できる構造となっているため，送気しながら削孔すると孔周囲の地下水は送気の影響しない位置まで押しやられて削孔完了時の孔内は一時的にドライとなる。時間が経つと再び孔内に地下水が進出して孔壁の損傷が始めるため，孔壁がドライである数分の間に砕石投入を実施して健全な砕石パイルを作成する。スクリュー・プレス工法の特徴をまとめる。

① 低コスト：一般的な 25 坪程度の住宅であればコストは 100 万円程度であり，

注入固化法の 500 万円～1000 万円に対して大幅なコストダウンとなる。

② 無振動・低騒音：特殊スクリュー回転圧入による締固めと削孔を同時に行うため，無振動施工が可能である。

③ 短工期：パイル形成スピードは 80m～120m/日と高機能のため，一般的な住宅ではパイル形成 2 日，表面処理 2 日の 4 日で完了する。

④ 高品質：削孔時のスクリュー圧縮，転圧時の押圧力による圧縮により，強固なグラベル・パイルの構築と周辺地盤の締固めを行うことができる。

３．締固め効果に関する室内模型試験

グラベル・パイルによる砂質地盤の締固め効果を計測する目的で室内模型試験を実施する。効果の計測にあたって先端にコーンを設置したロッドを地盤中に貫入する小型コーン貫入試験を用いる。注意が必要なのはコーン貫入抵抗に影響するのは地盤の相対密度の他に地盤の拘束圧力がある。したがって，貫入抵抗は 2 つの影響因子を反映しており，現実には地盤の締固め効果だけを抽出するものではないが，グラベル・パイルの打設による拘束圧の発生は地盤の締固めに起因するものである。地盤の拘束応力は小さな地盤の変形によって喪失することも考えられるので，本研究では基本的に拘束圧効果を取り入れた改良効果の設計への応用は好ましくないと考えている。貫入抵抗の評価については注意深い取り扱いが必要である。

3.1　コーン貫入試験による締固め効果の測定法

3.1.1 コーン貫入試験の概要

計測に用いたコーン貫入試験装置は，先端にコーンを設置した貫入ロッド，モーター，ロードセル，変位計から構成されており，変位制御条件（貫入速度：63mm/min）で貫入試験を行う。試験装置の概要を図-3.1 に示す。最大貫入力は 490N，最大貫入量は 300mm，コーン直径は 10mm，コーン角度は 90° である。

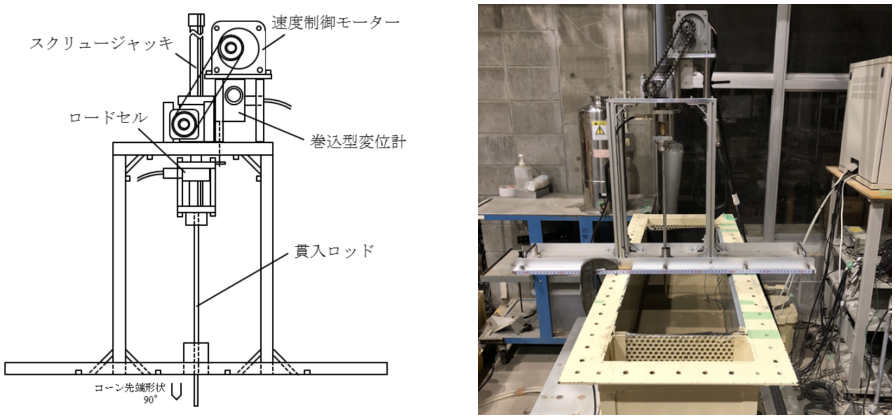


図-3.1　コーン貫入試験装置

3.1.2 模型地盤の物理特性と地盤の作成方法

実験で用いた地盤材料は東北硅砂 6 号，グラベル・パイルは砕石 7 号である。東北硅砂 6 号の諸元を表-3.1 に示す。

模型地盤の作製方法を箇条書きにする。

① 水位 100mm の土槽に東北硅砂 6 号を水中落下法にて投入する。模型地盤完成時の体積を 48,000cm^3 として地下水位を地表面になるように設定する。東北硅砂 6 号の投入量は相対密度に応じて調整する。
② 砂はホッパーを用いて落下させ，3mm 四方のふるいを通して水中落下させる。地盤からの水位は 100mm となるよう加水して調整する。
③ 地盤高さが 300mm になるように上記を繰り返す。1 回の砂投入量は全投入量の 8 分割の量とする。
④ 地盤が完成したら，土槽の水位を地表面付近まで下げた後に地表面を均す。
⑤ 相対密度の調整は作成地盤高さを計算して，突棒により密度調整を行う。

表-3.1　東北硅砂 6 号の物理諸元

最大乾燥密度 ρ_{dmax}	1.695 g/cm^3	60%　粒径　D60	0.35 mm
最少乾燥密度 ρ_{dmin}	1.401 g/cm^3	50%　粒径　D50	0.34 mm
土粒子密度 ρ_s	2.630 g/cm^3	30%　粒径　D30	0.30 mm
最大間隙比 e_{max}	0.878	10%　粒径　D10	0.23 mm
最少間隙比 e_{min}	0.551	均等係数　U_c	1.52
最大粒径	0.85 mm	曲率係数　u'_c	1.12

3.1.3 グラベル・パイルの打設方法

グラベル・パイルは杭径 ϕ24mm，38mm の 2 種類を用いる。作成時にはステンレス製の円筒をガイドに使用した。円筒はグラベル・パイルの目標仕上径より小さいものを使用し，投入した砕石を突き固めることにより拡径して所定の径になるように調整する。グラベル・パイルの打設方法を箇条書きにする。



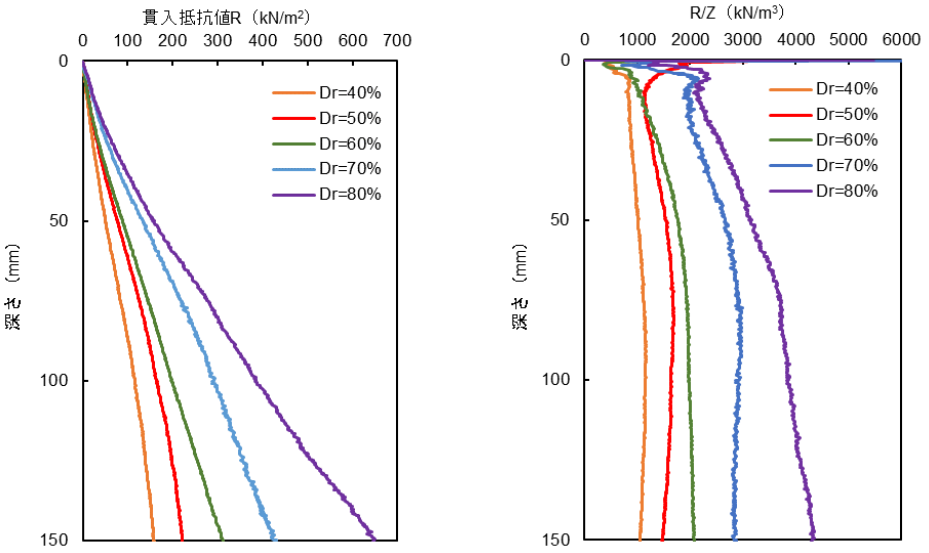
図-3.2　グラベル・パイルの作成と出来形確認

① ガイドとなる円筒底部に蓋をする押し棒を添えて，グラベル・パイルの設置深度まで挿入する。地盤は排土によりガイド周辺の圧縮を生じさせる。
② 押し棒を抜き，所定量の砕石を投入する(φ38mm:15.8g，φ24mm:6.3g)。1 回の投入で高さ 10mm のパイルを作成する。砕石の突固めはガイドを引き抜きながら砕石によるパイルが拡径するように注意する。
③ 砕石の投入と圧縮を繰り返してグラベル・パイルの長さを 150mm にする。

グラベル・パイルの作成は，開削により出来形を確認して所定の杭径が作成できるように繰り返し試行を行い，作成方法を標準化した。

3.2 未改良地盤のコーン貫入試験

未改良地盤において，コーン貫入試験を実施した。東北硅砂 6 号を相対密度 Dr=40～80%の地盤を作成後にコーン貫入試験を行った。図-3.3 に貫入抵抗値の深さ変化および貫入抵抗値を深さで除した貫入抵抗比を示す。図にはケース A-0，B-0，C-0，D-0，E-0(Dr=40，50，60，70，80%)の計測結果を示している。貫入抵抗値は相対密度に依らずにほぼ深さ方向に線形に増加し，相対密度が大きいほど大きな値を示している。したがって，模型地盤は概ね均質に作成されていることが分かる。一方，貫入抵抗比は表層付近でやや低い値を示すが，75mm 以深ではほぼ一定値を示す結果となった。本来は深さ方向に一定値となることが理想的であるが，表層は土被り圧の小さいことから地盤作成上の誤差の影響を受けやすいと考えられる。この傾向は相対密度が 70%以上において顕著で，相対密度の大きい地盤は特に表層付近で作成の難しいことが分かる。



(a)貫入抵抗・深さ関係　　(b)貫入抵抗比・深さ関係

図-3.3　無改良地盤のコーン貫入試験と貫入抵抗比

3.3　単杭による締固め効果と面積比による改良率

グラベル・パイルの打設による地盤の締固め効果を調べるために，単杭を打設して杭周辺地盤の締固め効果をコーン貫入試験により調査する。締固め効果は杭からの距離で変化することから，図-3.4 に示すように杭中心からの距離を変化させてコーン貫入試験を実施する。グラベル・パイルの締固め効果は一般に杭断面の面積を用いた改良率を用いて整理されることが多い。図-3.5 はグラベル・パイルを格子状に打設する際の改良率の定義であるが，着目した格子の面積と格子内のグラベル・パイルの面積の比を用いて定義される。改良率を用いる効果はグラベル・パイルの杭径による締固め効果の差異が改良率という基準化した指標によって整理できる利点にある。既存のインフラ施設を対象とした地盤改良では特に砂杭を用いたサンド・コンパクション・パイル工法などの調査研究で改良率による整理が有効であることが確認されている。本研究でも，模型試験結果の実務への適用を考慮すると改良率による整理が望ましい。そこで，図-3.6 に示すように単杭に対する改良率を調査地点のグラベル・パイル中心に関する円の面積に対する杭の面積比によって定義する。定義の妥当性は模型試験結果を用いて照査する。

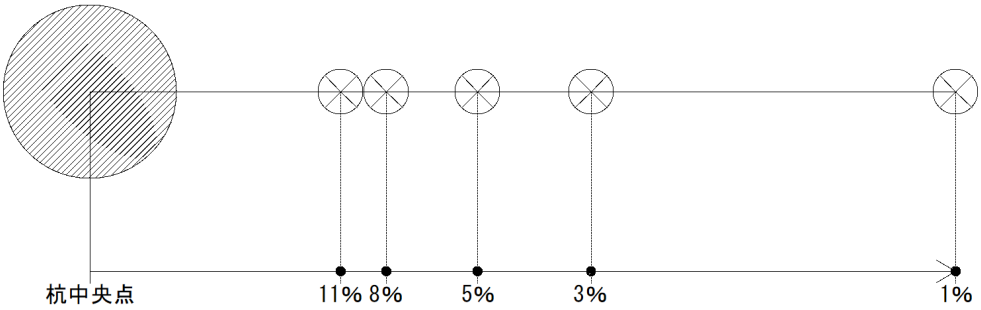


図-3.4　単杭の地盤締固め効果の調査

改良率(%)$\alpha=(A_p/A)\times100$

ここに，

A_p：改良体 1 体当りの断面積(mm^2)

d_1，d_2：杭間隔(mm)

A：杭 1 体当りの分担面積($A=d_1\times d_2$，mm^2)

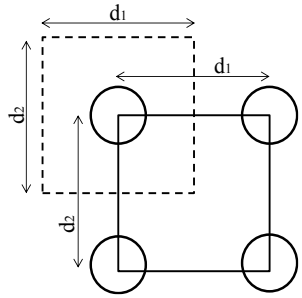


図-3.5　格子打設杭における改良率の定義

改良率(%) $\alpha=(A_p/A)\times100$

ここに,

A_p：改良体 1 体当りの断面積(mm^2)

d：貫入地点距離(mm)

A：杭 1 体の分担面積($A=d_1\times d_2\times\pi$，mm^2)

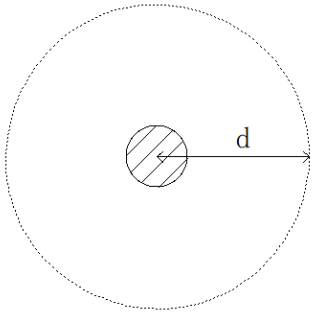


図-3.6　単杭における改良率の定義

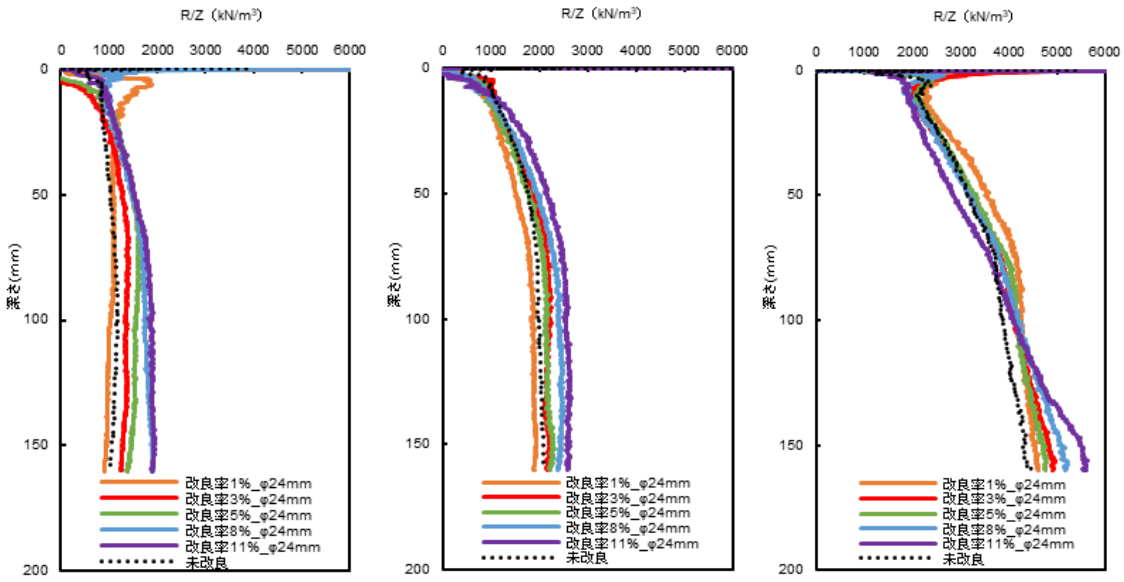
グラベル・パイルによる地盤の締固め効果は地盤の相対密度による影響が予想される。しかし，既存のインフラ施設の地盤改良工法では地盤の相対密度の影響は明確に（陽に）考慮されていない。本研究では模型地盤の相対密度を 40%から 80%まで変化させて地盤改良効果の試験を実施する。また，面積比の整理の妥当性を調べるために，グラベル・パイルの杭径を 24mm と 38mm の 2 ケースを実施する。

図-3.7 に試験結果の 1 例を示す。図は相対密度が Dr=40%，60%，80%の場合の各改良率（杭中心からの距離）におけるコーン貫入試験から得られた貫入抵抗比の深さ方向変化を示している。実験値のために多少のばらつきはあるが，どの図においても概ね，未改良地盤のコーン貫入抵抗が最も小さく，改良率が大きくなる（杭からの距離距離が小さくなる）のに従って貫入抵抗値は増加する傾向が見られる。相対密度が Dr=40%，60%では表層地盤の貫入抵抗値がやや小さいものの，深さ 100mm 以深ではほぼ一定値を示している。この傾向は図-3.3 の未改良地盤のコーン貫入抵抗と同様であり，表層地盤は模型地盤作成上の精度の問題があるほか，グラベル・パイルの打設においては杭による地盤の排土に伴う周辺地盤の抜け上がりが生じたものと考えられる。一方で，100mm 以深は良好な模型地盤が作成できており，杭の挿入による地盤挙動も断面方向への圧縮が生じていると考えられる。したがって，グラベル・パイルの地盤改良効果の定量的に評価には 100mm～150mm のデータを用いることとする。一方，相対密度が Dr=80%の場合に試験結果はややばらつきの大きい結果となっている。これは相対密度の大きい場合に模型地盤を一様に作成することの難しいことと，密な地盤にグラベル・パイルを打設すると地盤の抜け上がりが顕著になって，場合によってはせん断に伴う正のダイレタンシーによって地盤を緩める効果が現れて締固め効果が発揮されないことも考えられる。

図-3.8，3.9 に改良率は等しいものの，杭径の異なる事例の比較を示す。地盤の浅層部は両者に差異の見られる事例もあるが，深さが 100mm～150mm のデータではよく一致する結果が得られている。このことから，グラベル・パイルの

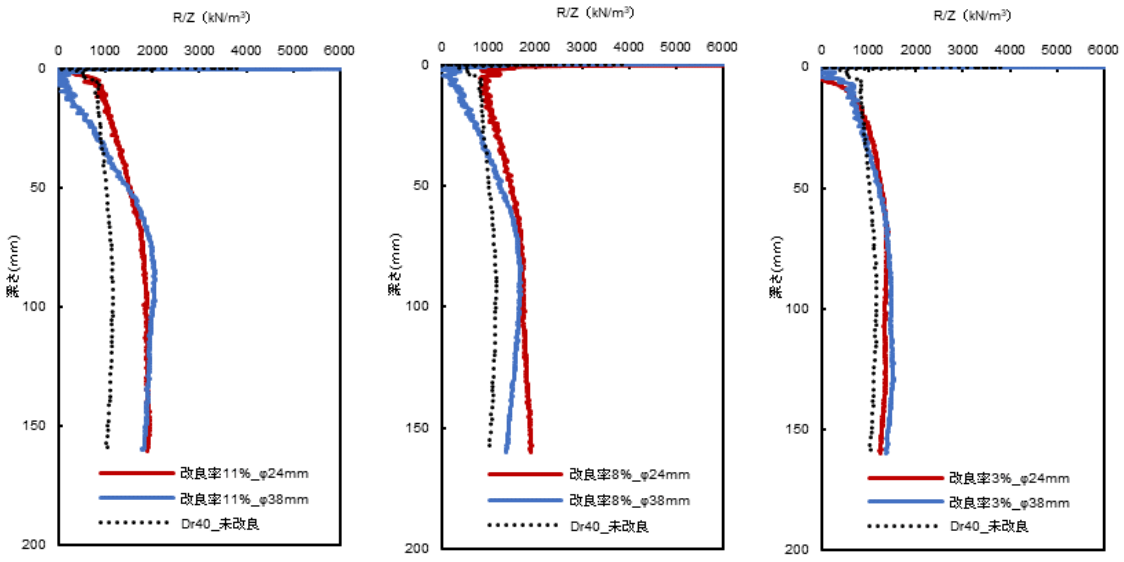
地盤改良効果については面積を用いた改良率（図-3.6）で杭径に依らずに改良効果を表現できることが分かる。

図-3.10 に地盤の相対密度によって異なる，グラベル・パイルの改良効果を示す。図は改良率による改良効果（コーン貫入試験の貫入抵抗比）を示している。改良率がゼロの場合は未改良地盤の貫入抵抗比を示しており，改良率の増加に遠もなって貫入抵抗比が線形に増加する傾向が見られる。相対密度の小さい場合に改良率による貫入抵抗比の増加割合は大きく（図において変化を示す勾配が大きい），相対密度が増加すると増加割合が小さくなることが分かる。図には示していないが，改良率を更に大きくすると貫入抵抗比の増加は頭打ちをするように非線形性を示す。特に相対密度が大きいと非線形性が顕著になる。



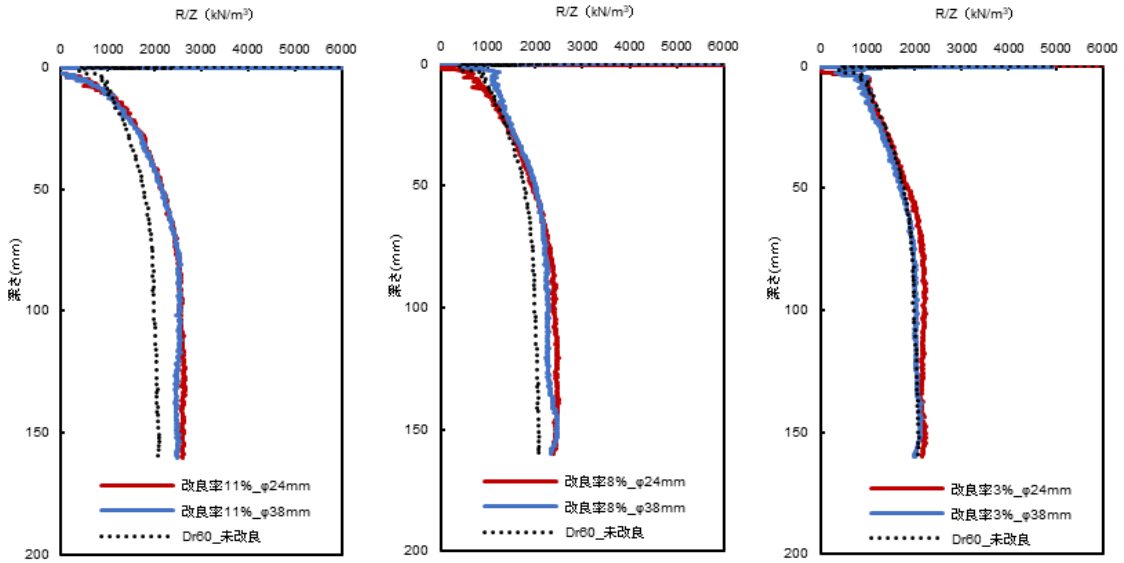
(a)Dr=40%　　(b) Dr=60%　　(c) Dr=80%

図-3.7　改良比による単杭のコーン貫入抵抗比（ϕ24mm）



(a)IR=11%　　(b) IR=8%　　(c) IR=3%

図-3.8　杭径による単杭のコーン貫入抵抗比（Dr=40%）



(a)IR=11%　　(b) IR=8%　　(c) IR=3%

図-3.9　杭径による単杭のコーン貫入抵抗比（Dr=60%）

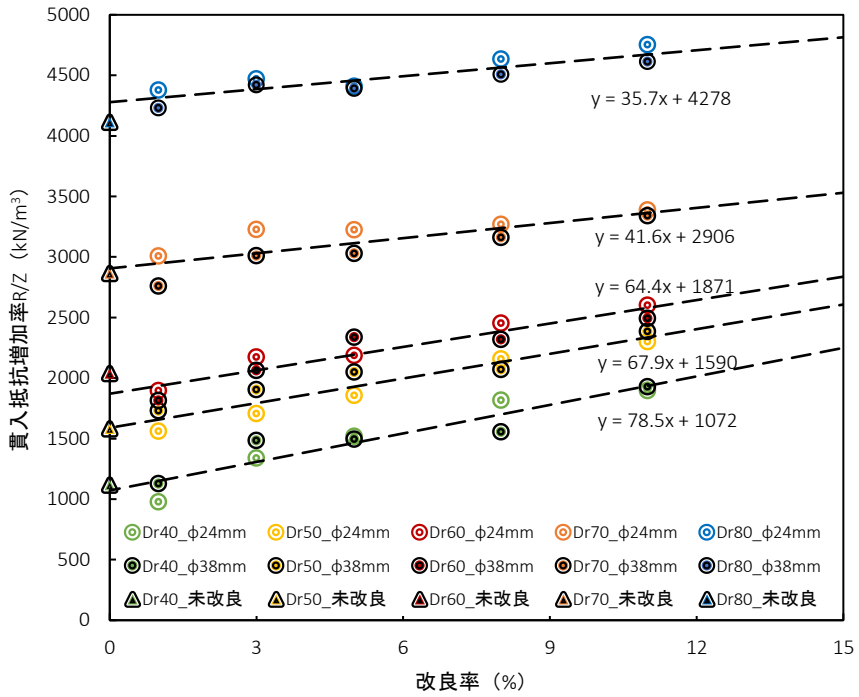
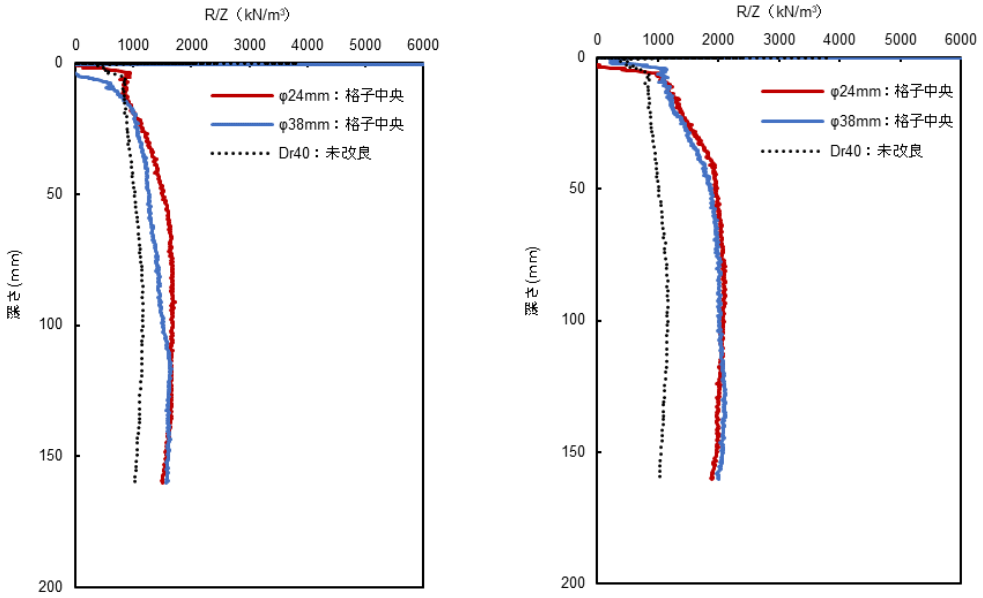


図-3.10　相対密度，改良率による単杭のコーン貫入抵抗比（地盤改良効果）

３．４　格子配列による締固め効果と面積比による改良率

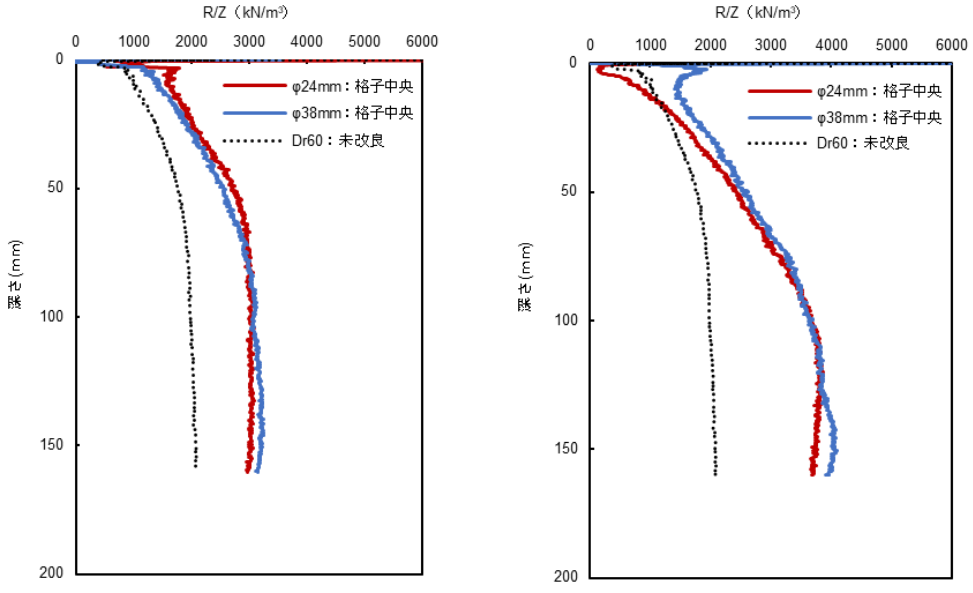
グラベル・パイルの打設による地盤改良効果を調べるために，格子配列に打設する際の格子中央点の改良効果をコーン貫入試験により調査する。地盤改良は通常，格子状にグラベル・パイルを配置することが多く，実務で一般的な工法である。本研究では格子を構成単位と捉えて格子内の地盤の地盤改良効果を計測する。単杭の試験で観測されるように，グラベル・パイルの改良効果は杭に近い箇所で大きく，杭から離れると小さくなる。したがって，格子配列の場合にどの位置の貫入抵抗値を代表値とするか問題であるが，設計では格子中央の値を用いることが多い。本研究では模型試験の特徴を生かして，格子内の位置による貫入抵抗値の差異についても合わせて検討する。模型地盤の相対密度を 40%, 60%として，改良率による改良効果を調査する。また，面積比（図-3.5）による整理の妥当性を調べるために，グラベル・パイルの杭径を 24mm と 38mm の 2 ケースを実施する。

図-3.11，3.12 に試験結果を示す。図-3.11 は相対密度が Dr=40%の事例であるが，未改良地盤に対して貫入抵抗比は改良率に応じて増加する結果が得られた。単杭の改良効果を示す図-3.10 と比較すると，格子配列の場合に単杭以上の改良効果が得られる。2 つの改良率（IR=5,8%）の事例を示すが，いずれも表層付近は貫入抵抗比の増加が小さい一方，深さ 50mm 以深ではほぼ一定値となっ



(a)改良率 IR=5%　　(b) 改良率 IR=8%

図-3.11　杭径による格子配列中央のコーン貫入抵抗比（Dr=40%）



(a)改良率 IR=5%　　(b) 改良率 IR=8%

図-3.12　杭径による格子配列中央のコーン貫入抵抗比（Dr=60%）

ている。図-3.12 は相対密度が Dr=60%の事例を示すが，Dr=40%に対して全般的に貫入抵抗比が大きい結果が得られた。改良効果の状況に大きな差異は見ら

れないが，表層からやや深部に至る範囲まで貫入抵抗比の減少が見られる。これは，単杭の場合に相対密度が大きくなると改良効果が得られ難くなることを指摘したが，格子配列の場合には Dr=60%でも締固めによる高密度化が生じて，表層ではせん断による膨張が生じて，グラベル・パイルの挿入に伴う周辺地盤の抜け上がりとともに貫入抵抗値の増加が抑制されることを示している。

図-3.13 に格子配列の地盤改良効果を取りまとめた。図は図-3.10 の単杭に対する地盤改良効果に加筆する形式をとった。改良率の定義が単杭と格子配列とで異なるために単純な比較はできないが，改良率に対する貫入抵抗比の増加は単杭に比べて格子配列では非常に大きいことが確かめられる。

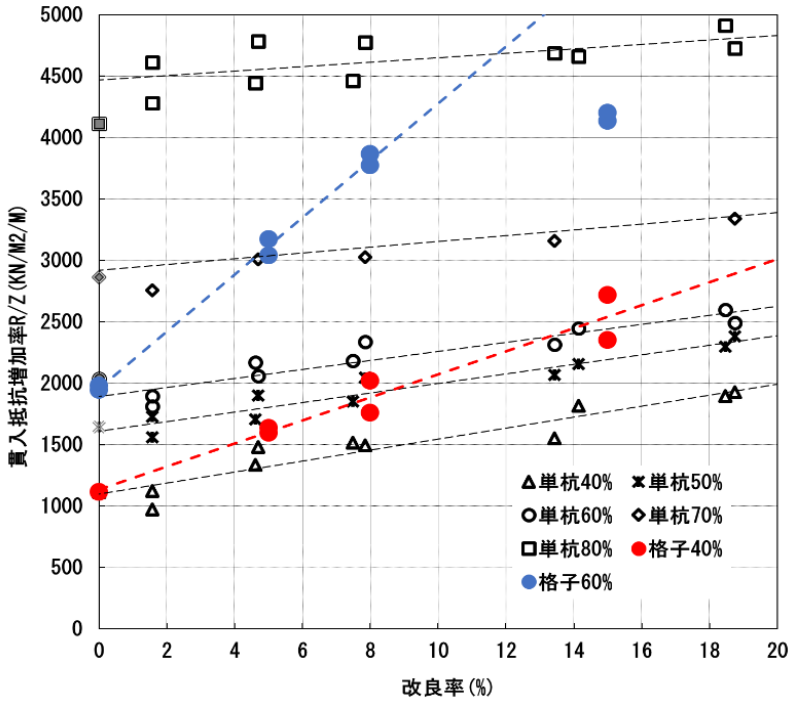


図-3.13　格子配列のコーン貫入抵抗比（地盤改良効果）

格子内における位置の差異による地盤改良効果を調査した。コーン貫入試験の試験位置を図-3.14 に示す。相対密度 Dr=40%，60%について杭径φ38mm のグラベル・パイルの格子配列の事例について貫入試験の試験結果を図-3.15, 3.16 に示す。両図は相対密度による差異を反映するものの，試験結果は格子内の調査位置によらずにほぼ同様の貫入抵抗比の得られることを示している。この事実は，（1）地盤改良による効果は杭に近いほど大きく，杭から離れると小さくなる事実，（2）格子内の位置によって四隅の杭の打設による効果は異なること，（3）杭の打設により地盤内の密度や応力は変化するため，施工履歴の影響を反映して格子内の位置による地盤改良効果が異なること，を考慮すると想定外の

結果を示している。しかし，この結果より格子内の中央点の貫入抵抗比を用いて格子配列の地盤改良効果を評価するのは妥当であることが確認された。

グラベル・パイルの施工では連続施工を実施すると，既存の杭施工の影響を受けて地盤が締め固められる報告が数多くある。その意味ではグラベル・パイルの地盤改良効果について格子 1 つを取り上げて議論するのは地盤改良機構の解明としては未だ不十分と言える。しかし，設計の視点では安全側との判断が成立することから基礎理論の構築として十分な意味があると思われる。

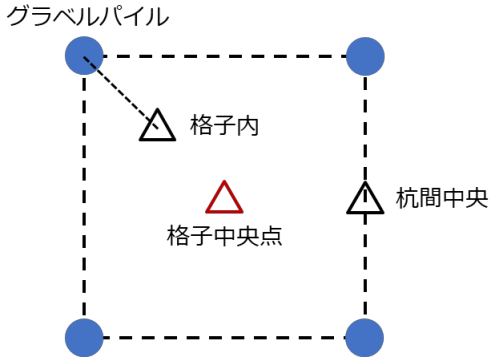
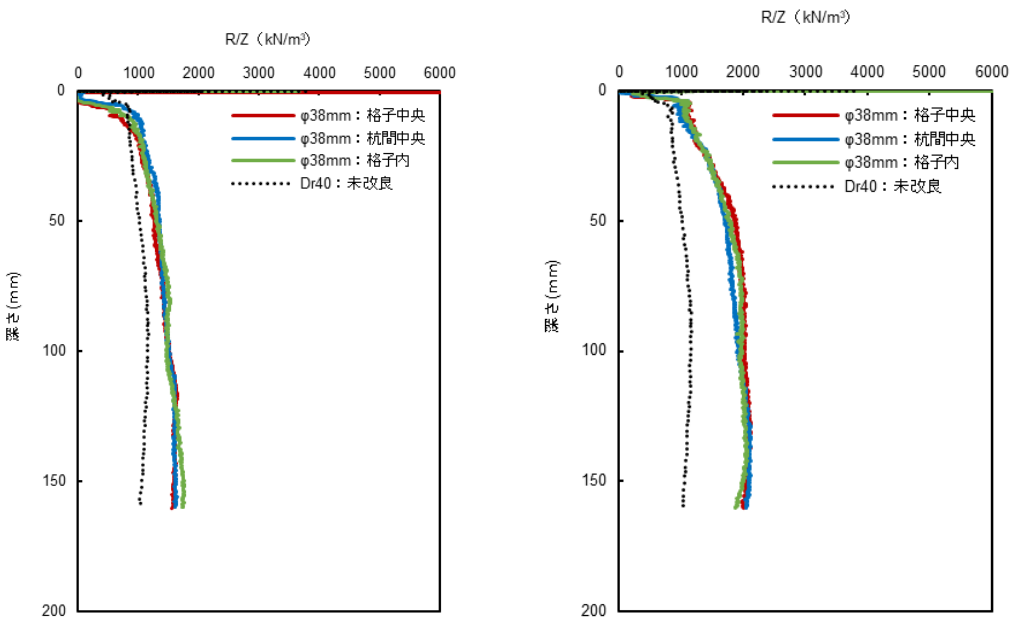
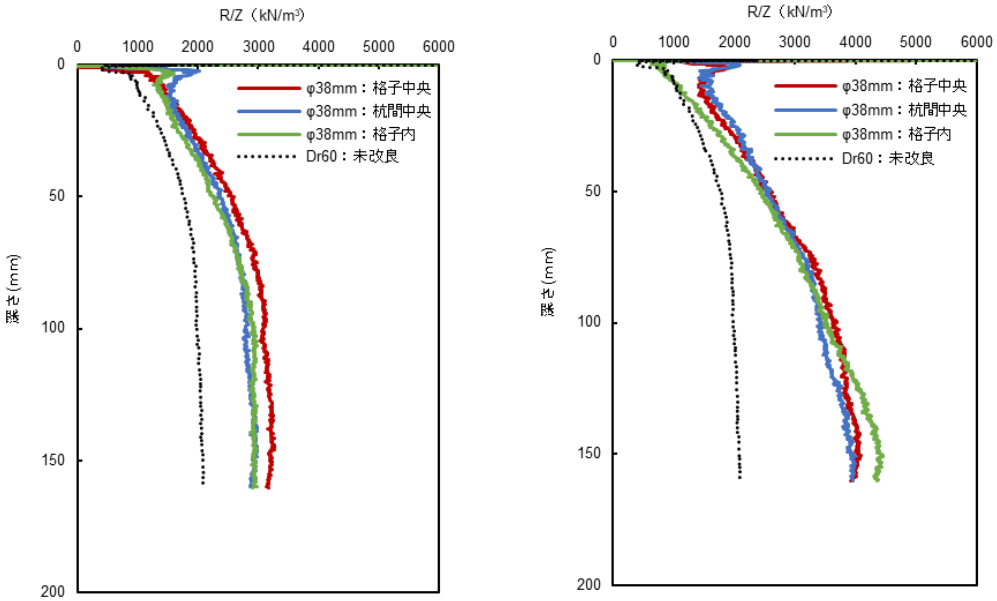


図-3.14　格子配列におけるコーン貫入試験位置



(a)改良率 IR=5%　　(b) 改良率 IR=8%

図-3.15　格子配列内の位置によるコーン貫入抵抗比（Dr=40%, ϕ 38mm）



(a)改良率 IR=5%　　(b) 改良率 IR=8%

図-3.16　格子配列内の位置によるコーン貫入抵抗比（Dr=60%, ϕ 38mm）

４．排水効果に関する振動台模型試験

グラベル・パイルの液状化対策効果に過剰間隙水圧の消散効果がある。しかし，排水効果は地盤が液状化する原因となる過剰間隙水圧が発生しないと効果の現れない一方で，地震による間隙水圧の上昇は急激であるのに対して排水には時間のかかる特徴がある。そこで，グラベル・パイルの排水効果がどの程度液状化の防止効果があるのか，振動台模型試験を用いて検討する。

4.1　振動台模型試験の概要

振動台実験装置の概略図を図-4.1 に示す。試験装置は，電気計測・制御装置，振動台(本体)，空気系装置により構成されており，空圧式サーボにより起振力を発生させる。実験で使用した土槽 は 820×28.5×20mm である。土槽の剛性が高いために加振方向と垂直な壁面にて反射波が生じることから，壁面の影響を低減するために壁面の内側に緩衝剤を設置した。振動台の加振は，初期振幅が小さく段階的に増幅する sin 波 6Hz，40 波(図-4.2)を目標加速度 1.0m/s^2 として実施した。地盤内の過剰間隙水圧を，動ひずみ測定器 TMR-7200 を用いてサンプリング周波数 1000 Hz で収録した。計測位置を図-4.3 に示す。実験ではグラベル・パイルからの距離や本数，深度による液状化対策効果の影響を調べるために，格子状に配列した改良体の格子中央点，中央点から d mm，2d mm（杭間隔 d）における，GL-5cm，GL-10cm，GL-15cm の計 9 ヶ所に間隙水圧計を設置した。また土槽外に加速度計を設置し，応答加速度を確認した。

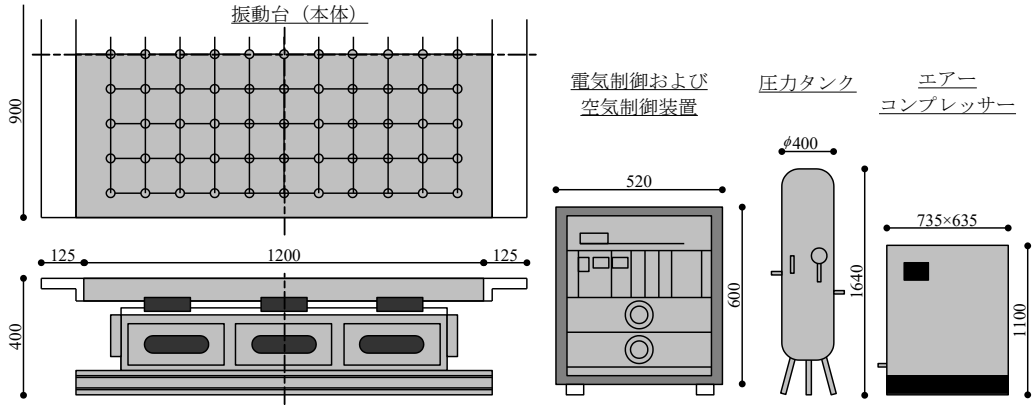


図-4.1　振動台模型試験の概要

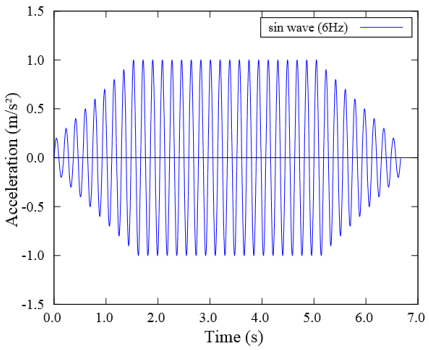


図-4.2　入力波形（加速度）

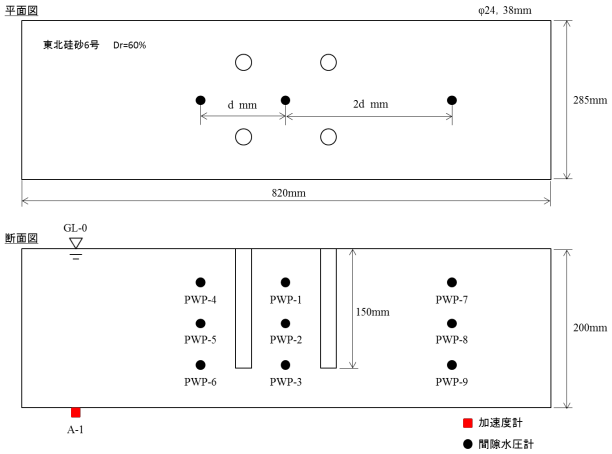


図-4.3　間隙水圧計測位置

4.2 未改良地盤の液状化試験

未改良地盤の液状化試験を実施した。試験結果は過剰間隙水圧比($\Delta u/\sigma'$)を用いて整理する。$\Delta u/\sigma'$は間隙水圧計で計測した過剰間隙水圧を有効上載圧で除したものである。図-4.4 に相対密度 Dr＝60%の事例を示す。図には 3 つの深度における測定値を示している。加振により$\Delta u/\sigma'$ は急増して完全液状化を示す 1.0 に達する。振動終了後もしばらく液状化状態が続き $\Delta u/\sigma'$の減少（過剰間隙水圧の消散）に時間を要する。過剰間隙水圧の消散は深い地点から進行して，表層地盤の消散はやや遅れることが分かる。これは液状化が粒子の浮遊した状態と捉えると沈降した粒子は下部地盤から収まることを示し，表層付近は液状化状態が継続することを表す。連続体力学の視点で過剰間隙水圧の消散を考察すると，境界条件より排水が生じて地盤深部の水圧消散が遅れる減少が生じると推測されるために，実際現象を適切に表現することが出来ない。

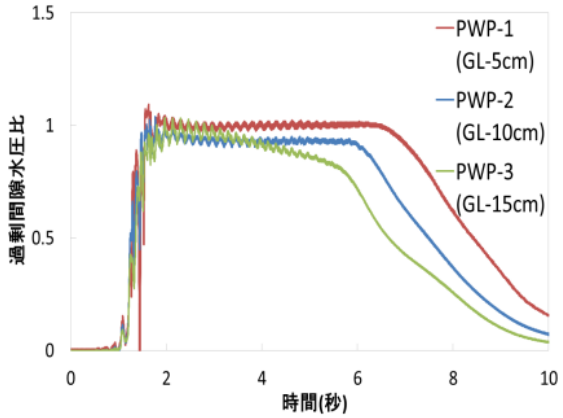
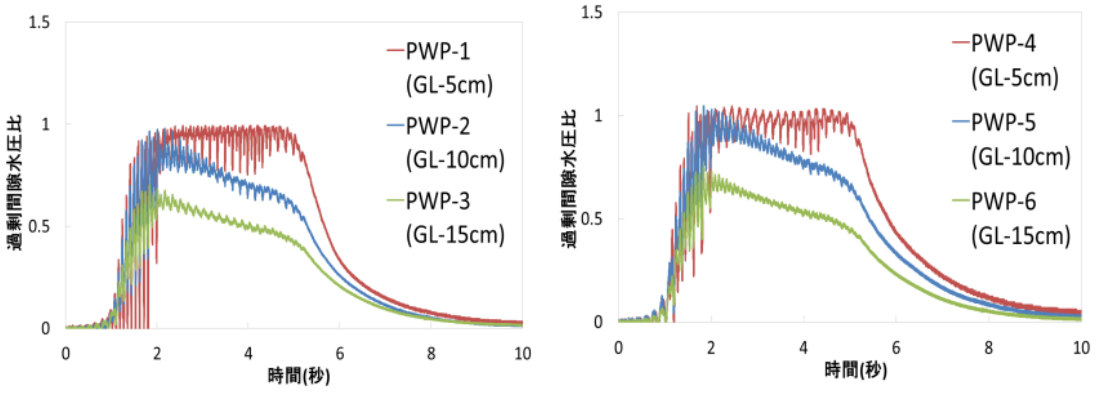


図-4.4　未改良地盤の液状化試験（Dr60%）

4.3 改良地盤の液状化試験

改良地盤の液状化試験を模型地盤の相対密度 Dr=40, 60%について実施した。グラベル・パイルは図-4.3 に示すように格子配列に打設し，杭径を 38mm とした。間隙水圧計の配置も示している。改良率は図-3.5 に示す面積による定義を用い，改良率 5，8%について試験を実施した。杭径を一定にするために，改良率は杭間距離を変化して試験を実施した。

図-4.5 に相対密度が Dr=40%，改良率 8%の試験結果を示す。図-4.4 の Dr=60%の事例に対して相対密度が小さいために液状化しやすい地盤と言えるが，比較的高い改良率のグラベル・パイルを設置したにもかかわらずに地盤表層付近では過剰間隙水圧比（$\Delta u/\sigma'$）が 1 に達して，液状化する結果となった。計測位置が深いと過剰間隙水圧の発生は抑えられるが，全般的に間隙水圧の発生は顕著である。$\Delta u/\sigma'$は加振初期にピーク値を示して加振中に減少する傾向が見られるが，これはグラベル・パイルの排水効果が発揮されたことによると考えられる。グラベル・パイルの排水効果がいつの時点から発揮されているかは不明である。排水効果は地盤の透水に起因するため，排水長の影響を受ける。本実験は小型模型試験のために排水長が短く，やや効果が過大に得られる可能性がある。しかし，排水を考慮した設計では排水効果を排水長/杭径による基準化指標で評価できることが報告されており，この報告に従うと模型試験の寸法によらずに図に示された$\Delta u/\sigma'$の減少は実現場においても排水効果として期待できる。しかし，加振中の短期間に排水効果が得られるものの，加振初期に$\Delta u/\sigma'$に比較的大きな過剰間隙水圧のピークが生じる点に問題があり，$\Delta u/\sigma'$が高い値を示す間に基礎地盤がどれほど変形するかの課題が生じる。本研究ではこの問に答える研究を実施していないが，基本的にピーク値を抑える対策が求められる。

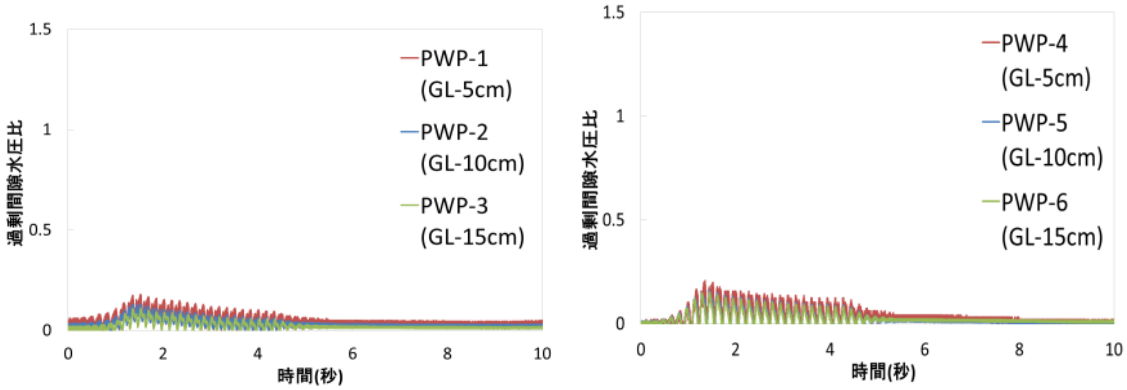


(a)格子中央　　(b)格子中央から 12cm

図-4.5　改良地盤の液状化試験（Dr40%，改良率 8%，ϕ38mm）

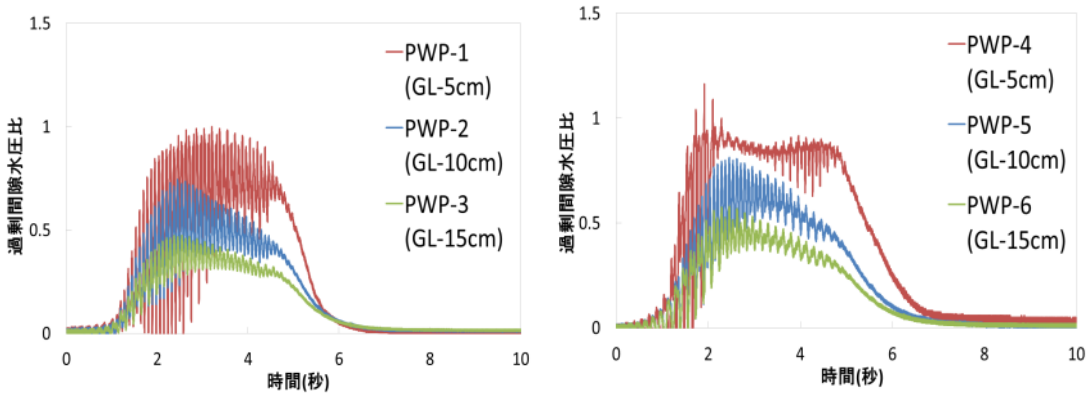
図-4.5 にて深さ方向に$\Delta u/\sigma'$のピーク値が減少するのは，締固め試験で考察したように地表面付近はグラベル・パイルによる締固め効果が低いことを反映すると考えられる。図には格子内と格子外の計測を示したが，やや格子内の観測値の$\Delta u/\sigma'$が低い値を示すが，ほとんど差異は見られない結果となった。

図-4.6 に相対密度が Dr=60%，改良率 8%の試験結果を示す。図-4.5 に比較すると$\Delta u/\sigma'$が極めて小さく，改良率が等しいものの相対密度が Dr=60%の場合には液状化対策効果が顕著に現れることが分かった。このように，グラベル・パイルの液状化対策効果は地盤の相対密度に影響されるために，効果の定量的な評価において相対密度の考慮が不可欠である。図-4.7 に相対密度が Dr=60%，改良率 5%の試験結果を示すが，$\Delta u/\sigma'$の低下は限定的であり，グラベル・パイルの設計では適切な改良率の設定が重要であることが示された。



(a)格子中央　　(b)格子中央から 12cm

図-4.6　改良地盤の液状化試験（Dr60%，改良率 8%，ϕ38mm）



(a)格子中央　　(b)格子中央から 14cm

図-4.7　改良地盤の液状化試験（Dr60%，改良率 5%，ϕ38mm）

5. 締固め効果に関する実規模現地試験

グラベル・パイルの液状化対策効果については小型模型試験を用いて検討したが，模型試験には模型地盤の寸法効果の影響が懸念される。本研究では，グラベル・パイルの実規模施工を実施して現地試験により液状化対策効果を計測する。計測は 3 成分コーン貫入試験を用いた。試験の目的は小型模型試験で得られた試験結果が実規模試験に適用できるか検証することにある。

5.1　現地試験の概要

現場試験は国土交通省北陸地方整備局信濃川下流事務所三条出張所所管の新潟県南蒲原郡田上町横場新田地区河道掘削地で実施した。試験地位置は図-5.1，ボーリング調査結果を図-5.2 に示す。ボーリング調査結果より現地は GL-10m まで砂質土で構成されている。グラベル・パイルの施工は杭長 4m であるため試験では深さ 0~5m の地盤が重要であるが，概ね緩い中砂で構成されており，また地下水位は深さ 1.5m 程度に位置するため，現地試験に適した地盤である。同地点は信濃川の河川敷に当たり，砂質土の採取地になっており，表層地盤は図-5.2 の調査から 1m ほど掘削して整地している（図-5.3)。



図-5.1　試験位置

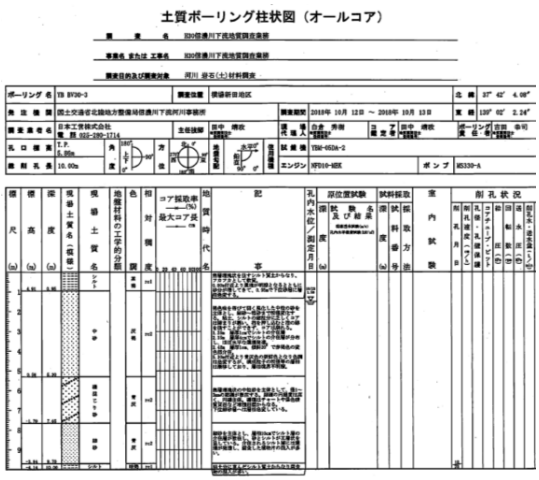


図-5.2　ボーリング柱状図

現地試験ではグラベル・パイルの地盤改良効果について表-5.1，5.2 の検討を実施する。表-5.1 では単杭の打設に伴う地盤の改良効果について杭中心からの距離を変化させて 3 成分コーン貫入試験を実施する。この試験は小型模型試験の図-3.10 に対応する。改良率に伴う貫入抵抗の増加を調べ，杭径による差異についても検討する。一方，表-5.2 では格子配列による杭打設に伴う地盤改良効果について格子中央点で 3 成分コーン貫入試験を実施する。小型模型試験の図-

3.13 に対応しており，同様に改良率による地盤改良効果を調査する計画である。グラベル・パイルは杭径 350mm，杭長 4000mm が標準であり，宅地地盤の改良では杭中心の間隔 1500mm を用いる事例が多い。本試験でも標準配置を中心に実験を実施する。試験の配置を図-5.4 に示す。写真-5.1，5.2 にグラベル・パイルの打設状況および 3 成分コーン貫入試験の実施状況を示す。



図-5.3　横場新田地区河道（河川敷）掘削地

表-5.1　単杭による地盤改良効果の検討

試験ケース	杭数	杭径（㎜）	測定距離（㎜）	改良率（%）	備考
A-0	0	-	0	0	未改良
A-1	1	350	1500	1.4	C-1と共通
A-2	1	350	670	5	
A-3	1	350	500	8	
A-4	1	350	400	11	
B-1	1	430	900	5	A-2と比較

表-5.2　格子配列杭中央における地盤改良効果の検討

試験ケース	杭数	杭径（㎜）	測定距離（㎜）	改良率（%）	備考
D-1	4	350	1500	4.3	格子中央点
D-2	4	350	1500	9.6	格子中央点

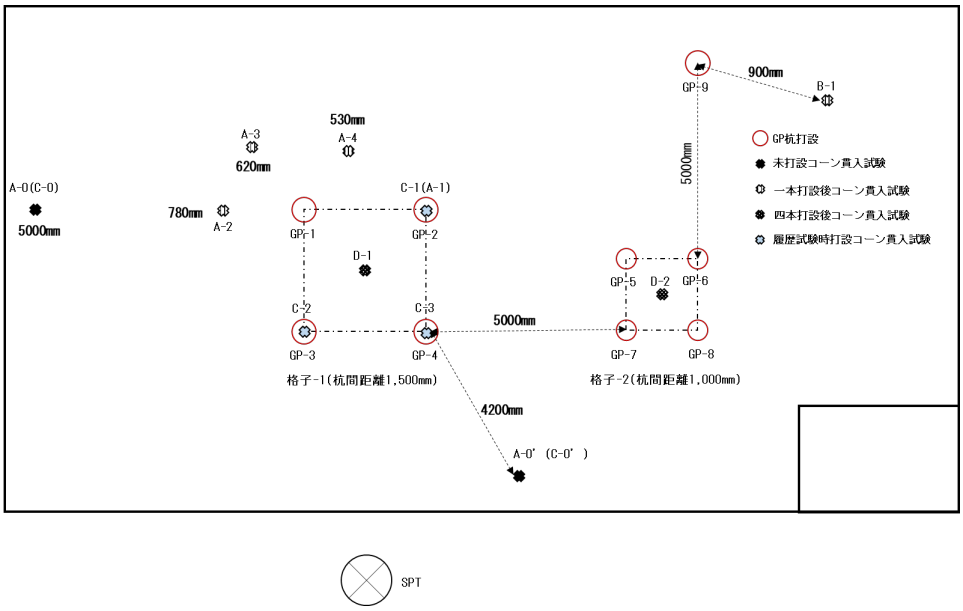


図-5.4　グラベル・パイルの施工と地盤調査位置



写真-5.1　グラベル・パイルの施工



写真-5.2　3 成分コーン貫入試験

なお，現地試験にあたっては試験場所を信濃川下流事務所三条出張所にご提供いただいた。またグラベル・パイルの施工は（株）グランテックに，3 成分コーン貫入試験など地盤調査は（株）興和にご協力を頂きました。ご支援に対して深い謝意を表します。

5.2　試験結果の考察

3 成分コーン貫入試験では，先端抵抗，周面摩擦，間隙水圧を測定できるが，本研究では小型模型試験との比較のためにコーンを貫入する際の全抵抗力（貫入抵抗力と称する）についても計測した。図-5.5，5.6 に試験結果の典型例を示

す。図-5.5 は未改良地盤，図-5.6 は単杭施工時（杭中心からの距離）の 3 成分コーン貫入試験の結果を示す。図にはラジオ・アイソトープを用いた密度検層の結果についても示している。地盤は表層および深さ 7m に礫混じり砂が分布する

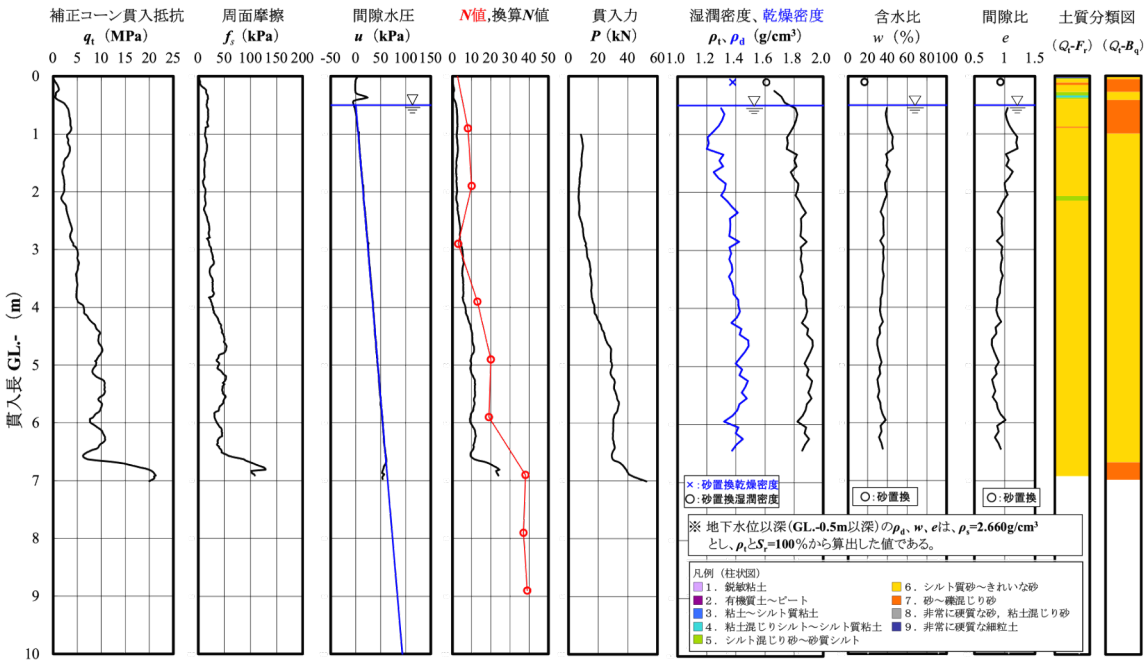


図-5.5　未改良地盤の 3 成分コーン貫入試験（A-0）

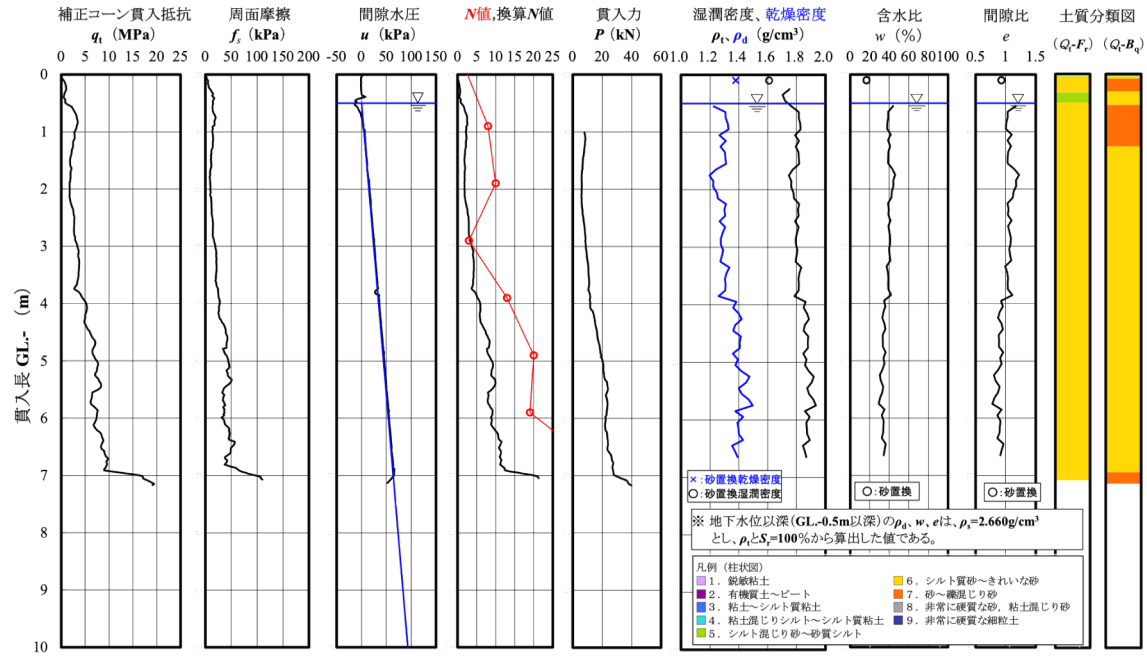


図-5.6　単杭打設時の 3 成分コーン貫入試験（A-3：改良率 8%）

が，概ね砂質地盤が分布する。図-5.7 に対応して実施した標準貫入試験の N 値分布を示す。未改良地盤のコーン貫入試験と同様の結果が得られ，表層の砂質土は N 値が 5-10 程度の緩い砂質土であり，部分的に細粒分を含んでいる。地下水位は深さ 0.5m であるが，この結果は 3 成分コーン貫入試験の水圧分布とよく対応する。貫入試験値は先端抵抗，周面摩擦ともに深さ方向に増加するが，地盤堆積状況を反映してばらつきを示す。図-5.5 にはコーン貫入試験の換算 N 値を示すが，標準貫入試験と概ね一致する結果が得られた。

現地土の物理・力学試験の結果を表-5.3 に示す。地盤は平均粒径が 0.4mm の中砂であり，均等係数は Uc=D60/D10=1.96 と粒径が揃っている。地盤の相対密度は 20－25%の非常に緩い砂質土である。力学試験は三軸試験および液状化強度試験を実施したが，現地の相対密度に調整した採取土に対して試験を実施した。内部摩擦角は ϕ=33.2°，液状化強度は R_{L20}=0.155 である。

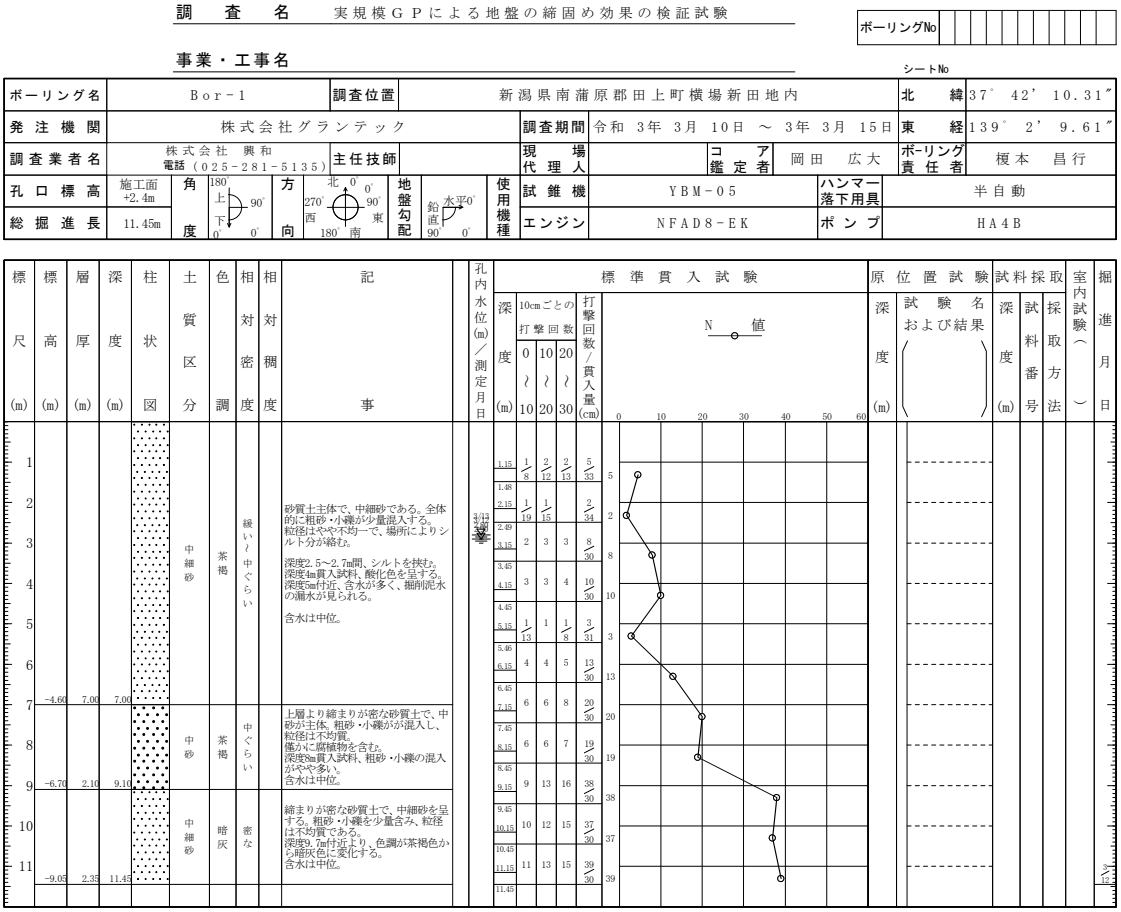


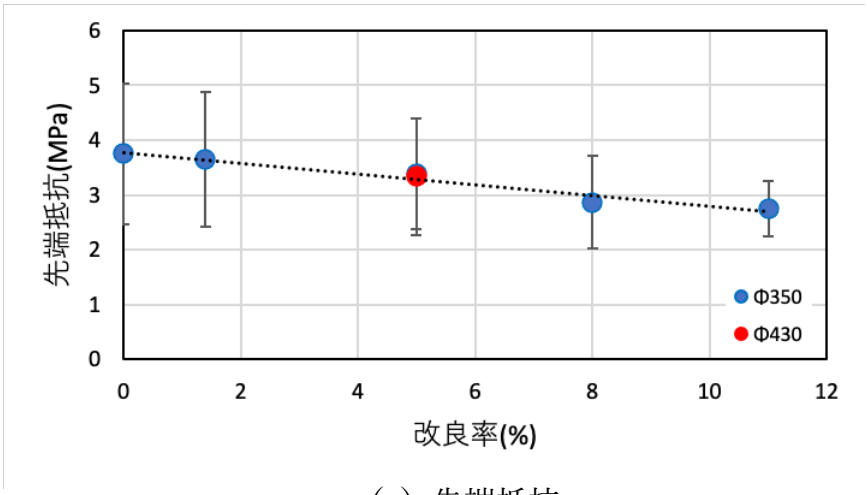
図-5.7　標準貫入試験結果

表-5.3　砂質土の物理・力学特性

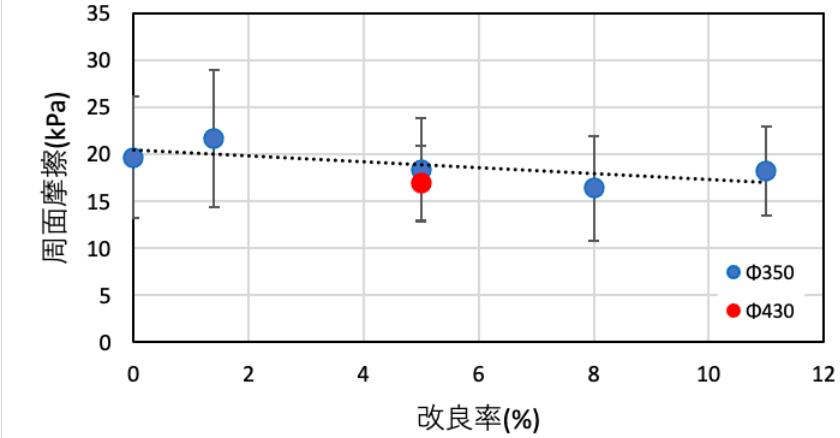
含水比 w	16.70%	最大粒径	4.75mm
湿潤密度 ρ_t	1.609g/cm3	60% 粒径 D60	0.4607mm
乾燥密度 ρ_d	1.379g/cm3	50% 粒径D50	0.4100mm
粘着力 c_{CD}	2.1kN/m2	10% 粒径 D10	0.2354mm
内部摩擦角 Φ_{CD}	33.2°	均等係数 U_C	1.96
液状化強度 R_{L20}	0.155	最大間隙比 $emax$	1.013
相対密度 Dr	22.2%	最小間隙比 $emin$	0.929

3 成分コーン貫入抵抗値はばらつきのあることから，データ整理における信頼区間の検討を実施した。表層付近は，①応力が小さく地盤のばらつきの影響を受けやすいこと，②地下水位以下の飽和地盤を対象とすること，③グラベル・パイルを打設すると抜け上がりを生じて地盤改良効果が十分に発揮されないこと，を考慮して 1.5m より深い地盤を対象とする。また，深部は杭先端部分に近い領域は杭の押し込みによる影響を受けやすいがデータからは前後のデータに差異のないことから，データ区間を大きく取ることを優先してパイル長の 4m を考慮して，データ整理区間を 1.5－4.0m とした。

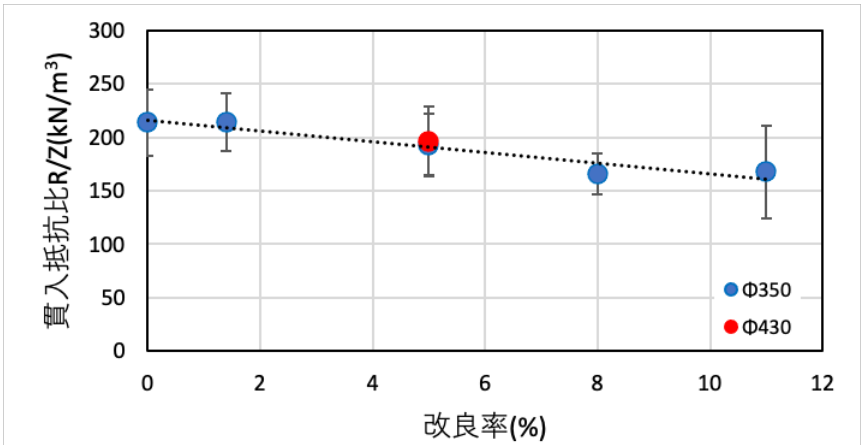
表-5.1 に示す単杭による地盤改良効果に関する現地試験について，試験結果を図-5.8 に示す。図には先端抵抗，周面摩擦，貫入抵抗比の計測結果を改良率に対して整理した。計測値にはばらつきが大きいことから試験結果の平均値とばらつきの幅を示した。改良率が高いほどグラベル・パイルに近い地点での試験結果を表しており，改良率が低いと未改良地盤の試験結果に等しくなる。しかし，図では先端抵抗，周面摩擦，貫入抵抗比ともに改良率が高いほど減少する結果が得られ，試験前に想定した改良率とともに各値が増加する結果は得られずに，逆の結果となった。未改良地盤よりも貫入抵抗が小さくなることから考えられることは，現地地盤の相対密度が 22%程度と極めて小さく，グラベル・パイルを打設しても地盤の締固め効果が十分に発揮されないことが原因と考えられる。相対密度が小さい場合にグラベル・パイルの地盤改良効果が得られない事例は，例えば図-4.5 に示す相対密度 Dr40%，改良率 8%（ϕ38mm）の振動台模型試験による液状化試験においても荷重間隙水圧の抑制効果が得られないことから確認できる。しかし，図-5.8 ではグラベル・パイルの単杭を打設してもなお未改良地盤の貫入抵抗を下回る貫入抵抗を示すことから，現地地盤ではパイルの施工により地盤が撹乱されて強度低下を生じた影響が現れたものと思われる。現地地盤は緩い砂質地盤であることから，初期にどのような地盤の構造骨格を有しているのか定かでないが，結果としてパイルの打設によって構造骨格が低位化して貫入抵抗が減少したものと考えられる。この事例は地盤改良において地盤



（a）先端抵抗



（b）周面摩擦



（c）貫入抵抗比

図-5.8　単杭による地盤改良効果（現地試験）

の相対密度に応じた施工が必要であることを示している。

図-5.8 には現地試験において杭径の違いによる貫入抵抗の差異を 1 ケースであるが調査している。先端抵抗，周面摩擦，貫入抵抗比の各図に径 430mm の事例を示したが，径 350mm の事例とよく一致した結果を示すことが示された。この結果は小型模型試験でも同様の結果が得られており，グラベル・パイルの地盤改良効果は面積比による改良率によって表現できることが分かる。

次に表-5.2 に示す格子配列によるグラベル・パイルの地盤改良効果に関する現地試験について，試験結果を図-5.9 に示す。図には先端抵抗，周面摩擦，貫入抵抗比の計測結果を改良率に対して整理するが，図-5.8 とは逆に先端抵抗，周面摩擦，貫入抵抗比ともに改良率が高いほど増加する結果が得られた。この結果は試験前に想定する，改良率とともに各値が増加する結果となった。したがって，格子配列の場合には格子を形成する 4 本のグラベル・パイルの複合的な効果が得られ，単杭の場合には貫入抵抗比が低下していたものが上昇する結果が得られた。

格子配列の地盤改良効果に対する試験結果を小型模型試験および現地試験について整理した結果を図-5.9 に示す。小型模型試験と現地試験はコーン貫入試験のスペックが異なるために単純な比較の難しいことから，図では地盤改良効果（対策後の貫入抵抗比／未改良地盤の貫入抵抗比）と改良率で整理した。残念ながら，現地試験の地盤の相対密度が 22%と小型模型試験では作成が困難なほどの緩い砂質地盤であるために，直接的な比較ができないが，小型模型試験を含めた試験結果は地盤の相対密度の観点から整合的な結果が得られた。

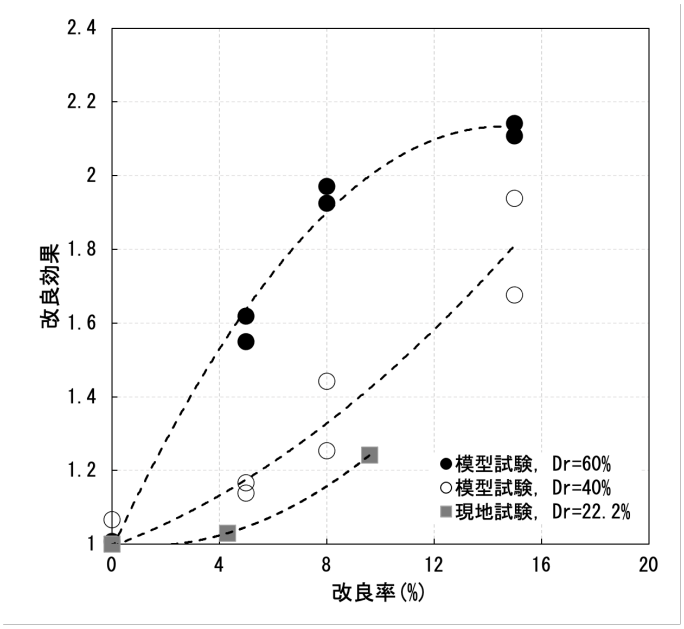
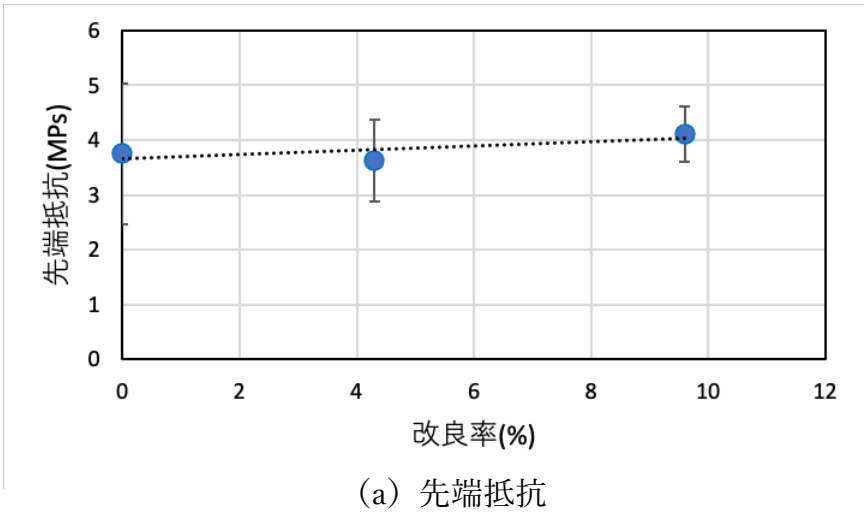
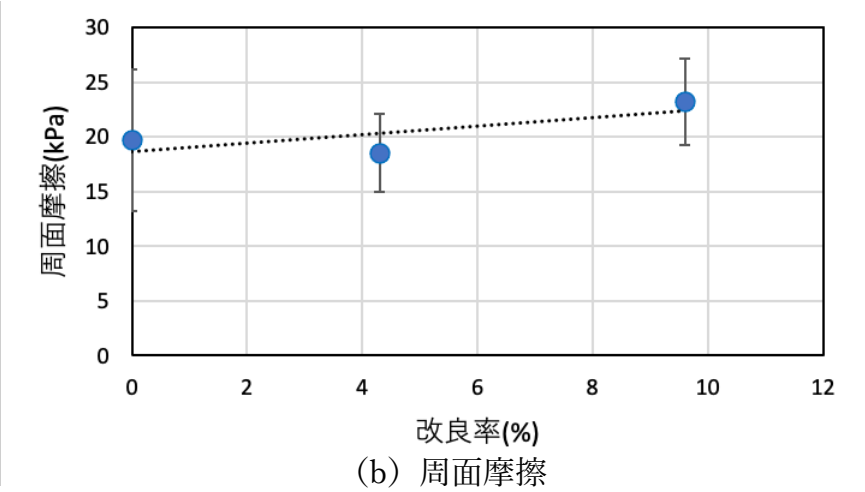


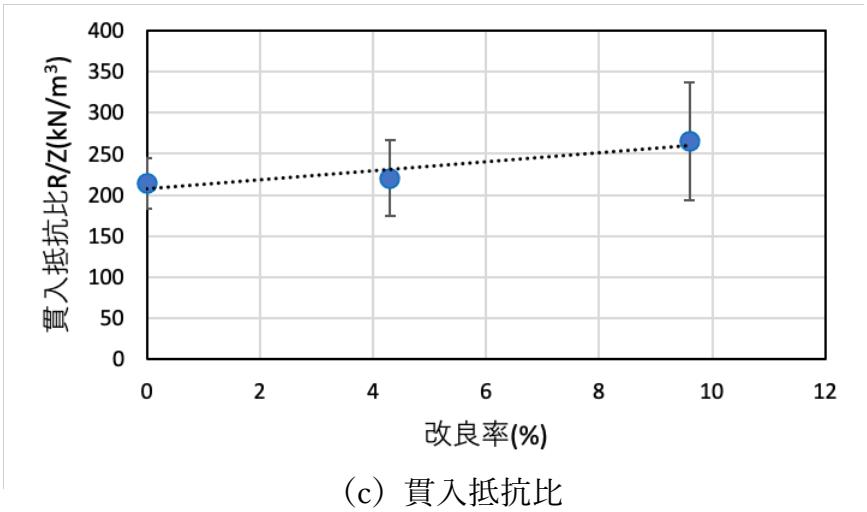
図-5.10　格子配列による地盤改良効果（相対密度の差異）



（a）先端抵抗



（b）周面摩擦



（c）貫入抵抗比

図-5.9　格子配列による地盤改良効果（現地試験）

6. 結論

本研究で得られた結論を箇条書きにする。

1. グラベル・パイルの液状化対策効果を調べるためにコーン貫入試験を実施した。小型模型試験による検討の結果，単杭の場合には杭径によらずに面積比による改良率でグラベル・パイルの地盤改良効果を表現することを示した。格子配列の場合は単杭の改良率と定義は異なるが，やはり杭径によらずに面積比を用いた改良率で整理できることを示した。地盤の相対密度を変化した検討を実施したが，相対密度によらずに同様の結果が得られた。改良率については現地試験により同様の検討を実施して，その有効性を確認した。
2. 小型模型試験を用いて，グラベル・パイルの液状化対策効果を改良率に対して整理した。単杭の場合には，相対密度が小さいほど改良率に対する貫入抵抗比の増加割合は大きく，相対密度が大きいと改良率に対する貫入抵抗比の増加割合は減少して改良効果の頭打ちが生じた。Dr=80%近くではグラベル・パイルの締固めとせん断による膨張がキャンセル・アウトして地盤改良効果が確認できなかった。
3. グラベル・パイルを格子配列に配置する場合の改良効果を小型模型試験により調査した。単杭と同様の結果が得られたが，単杭に比較して格子配列の地盤改良効果は非常に大きいことが確認された。そのために，相対密度がDr=60%においても改良率が 8%→15%で改良効果の顕著な頭打ちが観測された。
4. 小型模型試験における単杭の改良効果と格子配列の改良効果の関係については今後の課題に残された。
5. 振動台模型試験を用いてグラベル・パイルによる地盤の過剰間隙水圧の発生の抑制効果を調査した。その結果，改良率を等しくして地盤の相対密度を変化させた試験を実施すると，相対密度が小さい場合（Dr=40%）に地盤改良効果が小さく，相対密度が大きい場合（Dr=60%）に適正な液状化対策効果が確認された。グラベル・パイルによる液状化対策は相対密度を考慮した設計の必要なことが確認された。
6. グラベル・パイルの液状化対策効果における排水効果は，過剰間隙水圧の発生によって励起されるために，排水効果の発現は間隙水圧の発生以降になる。加振中における排水効果は確かに確認できるが，液状化対策としては加振初期の過剰間隙水圧の発生を抑制することが望ましい。
7. 新潟県南蒲原郡田上町横場新田地区における信濃川の河道掘削地でグラベル・パイルの実規模現地試験を実施した。現地試験は地盤性状や施工のばらつきがあるために，少ない試験結果を用いて結論つけることは難しいが，単

杭の場合に杭径によらずに面積比による改良率でグラベル・パイルの地盤改良効果を表現できる可能性を示した。

8. 現場試験より単杭の場合に改良率に対してコーン貫入抵抗が減少する逆転現象が生じた。しかし，現地地盤の相対密度は Dr=22%と極めてルーズであり，パイルの挿入による地盤の圧縮と地盤のせん断破壊の影響がキャンセル・アウトして，試験結果ではむしろ貫入抵抗が低下する結果が発現したものと考える。
9. 現地試験で格子配列の施工を実施すると，コーン貫入抵抗の上昇が確認できた。格子配列は四隅の杭の影響が重なるために単杭では得られなかった改良効果が発現したと考えられる。格子配列の地盤改良効果を小型模型試験および現地試験結果を取りまとめて地盤改良率（改良地盤の貫入抵抗比／未改良地盤の改良抵抗比）で整理すると，概ね相対密度による改良効果を整理することが出来た。

参考文献

1. 山崎浩之：液状化対策としての締固め工法の設計法に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1220，2010.
2. 伊藤克彦・中島豊・大北康治・大石博：突き棒を用いた砕石ドレーン工法における周辺地盤の締固め効果，土木学会論文集，No.444，VI-16，21-30，1992.
3. 高田徹・関平和・松本樹典・藤井衛・松下克也・佐藤隆：三成分コーン貫入試験による宅盤の評価手法に関する考察，地盤工学ジャーナル，Vol.4，No. 2，157-170，2009.
4. 日本建築学会：小規模建築物基礎設計例集，154-166，2011.
5. 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001.
6. 鈴木康嗣・時松孝次・古山田耕司：地震時の液状化事例とコーン貫入試験結果の関係，日本建築学会構造系論文集，571 号，95-102，2003.