

埋立礫材の新しいサンプリング手法と室内試験に基づいた群杭基礎水平載荷試験の数値解析

張 鋒¹・八嶋 厚²・木村 亮³・景山 学⁴・片山 辰雄⁵

¹正会員 博(工) 岐阜大学助教授 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

²正会員 工博 岐阜大学教授 地域共同研究センター (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

³正会員 博(工) 京都大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴正会員 工修 (株) 関電興業土木部 (〒531-8502 大阪市北区本庄東2-9-18)

⁵正会員 (株) 関電興業土木部 (〒531-8502 大阪市北区本庄東2-9-18)

本研究では、新しいサンプリング装置を用いて礫材の埋立地盤の不攪乱試料を採取し、室内試験で得られた土の力学特性を適切に評価するとともに、他の方法で評価された地盤特性と比較することにより、不攪乱試料の採取が地盤特性の適切評価に対して重要であることを検証した。また、新しいサンプリング装置の有効性を確認するとともに、境界値問題として、埋立地盤で実施した実物大9本群杭基礎の水平載荷試験の数値解析も行い、地盤力学特性の適切な評価が正しい数値解析結果を得るために不可欠であることも確認した。

Key Words : *sampling, gravel, reclaimed ground, stress-strain relation, group-pile foundation, in situ test, finite element method*

1. はじめに

ある程度以上の地震時においては、杭基礎の塑性化と地盤の降伏が予想される。杭基礎と地盤の動的相互作用を適切に評価するためには、これらの非線形挙動を精度よく評価しなければならない。その評価手法を確立するためには、以下に示すモデルの確立が必要である。

- ① 地盤の一般応力状態での線形～非線形性を適切に評価できる土の構成モデルの確立、また構成モデルの材料定数を得るための方法論の確立。
- ② 杭部材の非線形性、特にRC杭の軸力変動による曲げ剛性の非線形特性への影響を考慮できるモデルの確立。
- ③ 群杭基礎と地盤の相互作用を有限要素法などの数値解析手法で評価する場合、杭断面の寸法を考慮した杭部材の適切なモデル化。

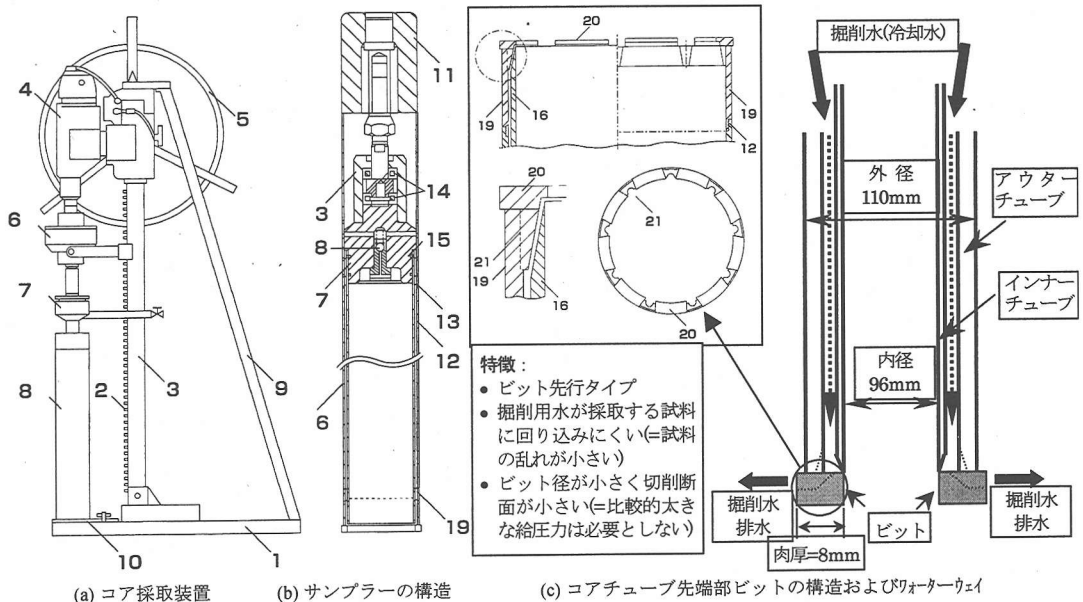
これらのうち、②の軸力変動による曲げ剛性の非線形特性への影響を考慮したモデルについては、建築分野においてRC杭のモデル化を中心に、Multi-Spring model¹⁾やFiber model²⁾が提案されている。Zhangら^{3), 4)}は、これらのモデルの離散化概念を利用し、梁要素の釣合い式の弱形式を再定式化し、軸力変動による影響を適切に表現できるモデルを提案した。提案されたモデルの妥当性はRC単純梁を対象として確かめられている⁴⁾。

③の杭部材の有限要素法におけるモデル化については、Zhangらは杭断面の寸法を考慮したハイブリッド要素をすでに提案している。その妥当性については、RC杭を対象とした数多くの実績において証明されている⁵⁾。

また①で示した土の構成モデルについては、近年その発展はめざましく、一般応力状態での力学挙動を適切に表現できるモデルが確立しつつある。適切な土の構成モデルを用いれば、コンピューターの発達と計算力学の進歩によって、現在では杭基礎・地盤・上部工一体系の3次元有限要素解析が可能となり、杭基礎を有する構造物と地盤の非線形動的相互作用が正しく評価できる時代になっている。

粘土層やゆるい均質な砂層については、高品質な試料を得るためのサンプリング手法が種々提案され、得られた不攪乱試料を用いた室内試験により、高度に発達した構成モデルの材料定数が高精度に求められる。また、原位置試験で得られた諸定数と構成式の材料定数との間の相関関係も詳しく調べられている。

一方、本研究で対象とするような埋立地盤においては、礫材を主とした地盤構成となっていることが多く、凍結サンプリングを除いて、高品質なサンプリング手法が存在しないのが現状である。このため、一般的には標準貫入試験のみが実施され、そこから得られるN値と経験的な関係式に基づいて、構成式



(a) コア採取装置 (b) サンプラーの構造 (c) コアチューブ先端部ビットの構造およびウォーターウェイ

1	底板	4	モーター	7	ウォータースイベル	10	振れ止め板	13	ハウジング	16	インナーチューブ	19	ビット
2	ラック	5	ハンドル	8	サンプラー	11	サンブラーチューブ	14	スライフトューブヘッド	17	皿ビス	20	カッティング部
3	ポール	6	減速機	9	支柱	12	アウターチューブ	15	インナーチューブヘッド	18	鋼球	21	ウォーターウェイ

図-1 新しいサンプリング装置の構造

の材料定数を決定しているのが現状である。本研究で対象とする群杭基礎の水平載荷試験プログラムにおいては、標準貫入試験に加えて孔内水平載荷試験や巨礫を除いた尖頭粒径試料の密度調整供試体を用いた室内試験が実施されている。しかしながら、弱材齢の埋立地盤の力学特性を表現するために、これらの諸試験は十分とはいえず（この問題点については、3. と 4. で詳しく議論する）、できることであれば、安価で操作容易な高品質サンプリングが望まれる。

本研究では、上記の要請に基づいて、小型、軽量、操作容易であることを第1条件に、まず礫混じり土を含めたD~CL級岩盤を対象とした浅い深度のサンプリングに適したサンプリング手法を提案する。礫材が混入していることから、ある程度大きな径を有する供試体を準備する必要があるが、本研究で用いたコアチューブの内径は96mmであり、高さ200mm、径100mmの汎用中型三軸圧縮試験装置の供試体として、側面のトリミング手順を省略できる優位点をもつ。得られた不攪乱供試体を用いて、三軸圧縮試験を実施し、初期剛性等の力学定数を求めた。この値と、N値、孔内水平載荷試験、尖頭粒径試料による密度調整供試体の三軸圧縮試験結果から得られた値を比較することによって、提案したサンプリング手法の優位性を検討した。さらに、当該埋立地盤で実施された群杭基礎の水平載荷試験への適用性を検討するために、これまでに確立した解析手法^{4),5),6)}に、不攪乱供試体から得られた力学定数を導入して、3次元有限要素解析を実施した。

表-1 コア採取装置の主な仕様

コア採取装置		コアチューブ(サンプラー)	
動力	100V, 3.4 kW	コアチューブ長さ	1300 mm
ポールストローク	1500 mm	インナーチューブ長さ	960 mm
本体外形寸法(mm)	幅 300×	コアチューブ外径	110 mm
	奥行 520×		
	高さ 210		
機械総重量	約 1.15 kN	ビット外径・内径	112 mm・96 mm
分解個数	6	ライナー外径	101.6 mm
分解時の最大重量	約 450 N	試料採取径	96 mm

2. 新しいサンプリング装置の概要および特徴

(1) 装置の概要

西方・鎌山が開発したサンプリング装置⁷⁾はD~CL級岩盤を対象とした浅い深度のサンプリングに適している。本研究では、この装置を使用するが、サンプリング手順を大きく改良することによって砂・礫混じり土も採取できるようになった。その主な改良点はサンプリング完了後、サンプラーをそのままにして、常温削孔水を冷却水である塩化カルシウム液に切り替えて、サンプリング試料を凍結させ地上に引き上げる。サンプリング装置の構造は、図-1(a)に示すように底板上にラックを刻んだポールを建て(90度回転可能)、回転を与える電動モーターをピニオンによりポールに装着し、変速機とウォータースイベルを介してコアチューブに連結させて操作ハンドルによりコアチューブ(サンプラー)を上

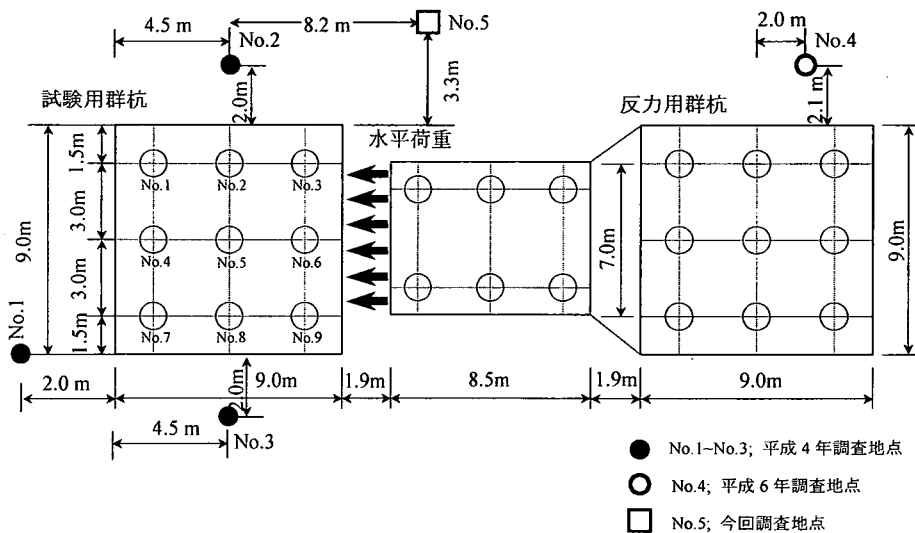


図-2 ボーリング調査地点および試験杭位置図

下(進退)させるようにした構造の装置で、油圧機構を使わず簡単な構造となっている。なお、コアチューブを地盤に進入させる際、振れを少なくするために振れ止め板も装着している。

図-1(b)に示すコアチューブはアウターチューブとインナーチューブの二重管式であり、アウターチューブヘッドはインナーチューブを固定するハウジングとスラストベアリングによって、構造的に分離されており、アウターチューブの回転はインナーチューブに伝わらないようになっている。また、図-1(c)に示すようにビット先端のウォーターウェイの形状を工夫し、ボーリング時の削孔水が切削地盤と接することを最小限に留め、採取試料の乱れを極力防ぐよう考慮されている。表-1に装置の主な仕様を示す。

(2) 装置の特徴

- 小型・軽量(分解時の最大重量=450N)で運搬が容易できる。
- 足場が不要で仮設備も小規模で済み、地盤表面からサンプリングが可能。
- ポールのストロークが 150 cm であり、一回のハンドル操作で最長 80cm の試料採取が可能である。
- 削孔水の殆どが、工夫されたウォーターウェイを通して外方向に流出するため、ライナー内の試料および未掘削地盤への削孔水による影響が少ない(図-1(c))。
- ドリル・ストリングス(アウターチューブ・インナーチューブ・ロッド等の総称を指す)がアルミ合金を使用することにより軽量化される。これにより削孔地盤まで伝達させる回転駆動力を減らし、掘進中の孔内抵抗が低減される。最良の保孔策を併用すれば約 10m の深度までサンプリングが可能である。
- インナーチューブはステンスライナー製、ポリエステル製、アクリル製の三種類があり、対

象地盤の剛性によって使い分けることができる。

- 透明な材質のインナーチューブを使用すれば、試料状態が現場で目視でき、力学試験供試体としての適否が容易に判断できる。
- サンプリング試料の端面整形のみで力学試験用供試体を提供できる

(3) 過去のサンプリング実績

この新しい装置により、これまでに種々の地盤を対象にサンプリングを実施した。対象地盤は風化軟岩(D~C_L級)、低位段丘砂礫、まさ土、D級粘板岩の埋土などがある。試料採取深度は最大で 9.73m であった。採取された試料は対象地盤のすべてにおいてほぼ 100%の採取率であり、試料の端面整形のみで力学試験が可能であることを確認している⁷⁾。コアサンプリングした供試体の Vs の測定、採取地点の小区間弾性波測定装置による Vs の測定および地表面弾性波探査による採取地点の Vs の測定を実施し、それぞれの結果を比較した。変形係数は軸ひずみが 10⁻⁵ 以下であれば低下なく、10⁻³ 程度の場合には 1~2 割の低下であった。これにより、新しいコア採取装置で採取した試料は、微小ひずみレベルにおいての乱れの影響は少ないことがわかった。また、端面整形による緩みおよびベディングエラーの影響のない供試体中央部のひずみを LDT で測定し、内部ロードセルおよび差圧計により微小な応力が正確に測定できる三軸圧縮試験装置を用いて、試料の強度・変形特性の試験を実施した。得られた試料の強度・変形特性はバラツキが少しみられるものの地盤物性値として使えることがわかっている⁷⁾。

3. サンプリングおよび室内試験による力学特性の評価

本研究では、阪神高速道路公団湾岸線岸和田大橋

における仮設ペントに用いられた 9 本群杭の杭基礎の大変形繰返し水平載荷試験⁸⁾を実施した埋立地盤で、新しい装置を用いてサンプリングを実施し、室内試験により地盤の力学特性を再評価する。

杭はペント工法で設置された場所打ちコンクリート杭で、杭長 L は 30.4m、杭径 D は 1.2m である。本実験では、9 本群杭の試験杭に隣接する 16 本群杭を反力杭にした。載荷は、片方向多サイクル繰返し方式により行い、20.50 MN まで 7 サイクルの載荷を実施した。また、載荷試験周辺地盤は上層約 10m が玉石を含む砂礫主体の埋立層であり、下層は粘性土層と砂質土層の互層である沖積層が分布している。

(1) 従来のボーリング調査と室内試験

試験地は平成 3 年に施工された埋立て地である。地盤定数を把握する目的で、平成 4、6 年にボーリング調査（標準貫入試験、孔内水平載荷試験）および土質室内試験を図-2 に示すような 4 ヶ所にて実施した。以下に地層構成について説明する。

埋土層

調査地に分布する埋土層の層厚は 12.9~13.65m であり、平均層厚は 13m である。土質は粘土混じり砂礫~玉石混じり砂礫を示し、花崗岩礫からまさ土が主体である。混入礫は $\phi 2\sim 40\text{mm}$ 程度が主体であるが、最大 $\phi 300\text{mm}$ 程度の玉石も混入している。N 値は $N=2\sim 23$ を示し、かなりばらついているが、全体的には $N\approx 10$ 程度である。

上部沖積層

粘性土と砂質土の互層で砂質土優勢な地層である。N 値は粘性土層で平均 14、砂質土層で平均 28 である。

図-3 に埋土層の孔内水平載荷試験で得られた変形係数 E と N 値の関係を示す。埋土部での N 値は、2~23 で、平均 N 値=10 である。埋土部で測定した変形係数の値は $E=0.33\sim 2.40\text{ MPa}$ であり、その平均値は $E=1.03\text{ MPa}$ である。この図より、変形係数と N 値の関係は通常によく使われている孔内水平載荷試験の式 $E=7/10N$ (MPa) が当てはまらないことがわかった。

また、平成 6 年の調査で、物理試験と排水三軸圧縮試験をも実施した。埋土の湿潤密度と自然含水比はそれぞれ 1.97g/cm^3 と 15% であった。当時、埋土で採取した試料は大礫の影響で乱れており、埋土の湿潤密度は試料を採取した直後に現場にて測定して求めた。不攪乱試料が得られなかったため、排水三軸圧縮試験は粒度調整を実施した再構成試料にて行われた。今回の三軸圧縮試験に用いられた試験装置は平成 6 年の試験装置とは異なり、2 章で述べたものである。

(2) 新たな調査

本研究では新しく開発したサンプリング装置を用いて、試験現場にて不攪乱試料の採取を再度行った。写真-1 にサンプリング装置および作業手順を示す。礫質埋土層の力学挙動を調べるのが今回の目的であ

るため、実施したサンプリングの最大深さは 10.6m とした。

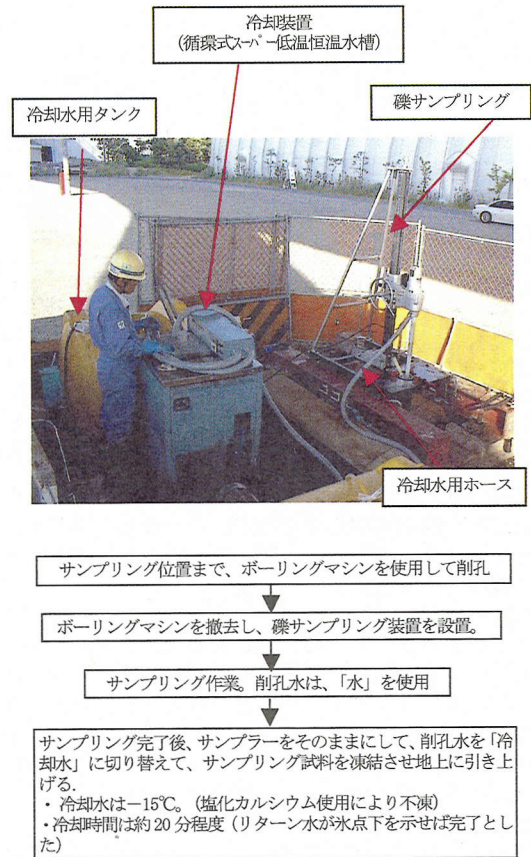


写真-1 サンプリング装置および作業手順

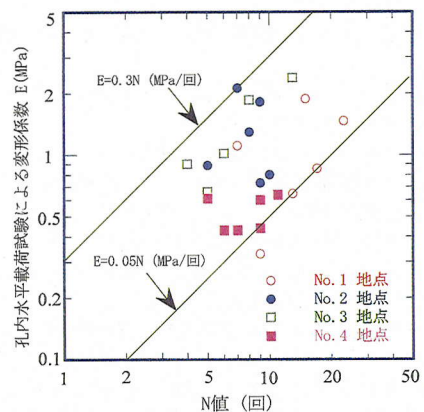


図-3 埋土層の孔内水平載荷試験で得られた変形係数 E と N 値の関係

本地盤を構成する埋立材料は、今回のサンプリング作業によって少なくとも GL-10.6m までは、粒径 50mm 以上の硬質（新鮮）な礫を多量に混在し、逆に細粒分は非常に少ない地盤であることが確認された。したがって、今回サンプリングされた試料には、

細粒分がマトリックスとして含まれていないことが推定される。また、サンプラーの試料採取径φが 96mm であったため、できるだけ粒径 50mm 以上の礫が少ない試料を使用した。

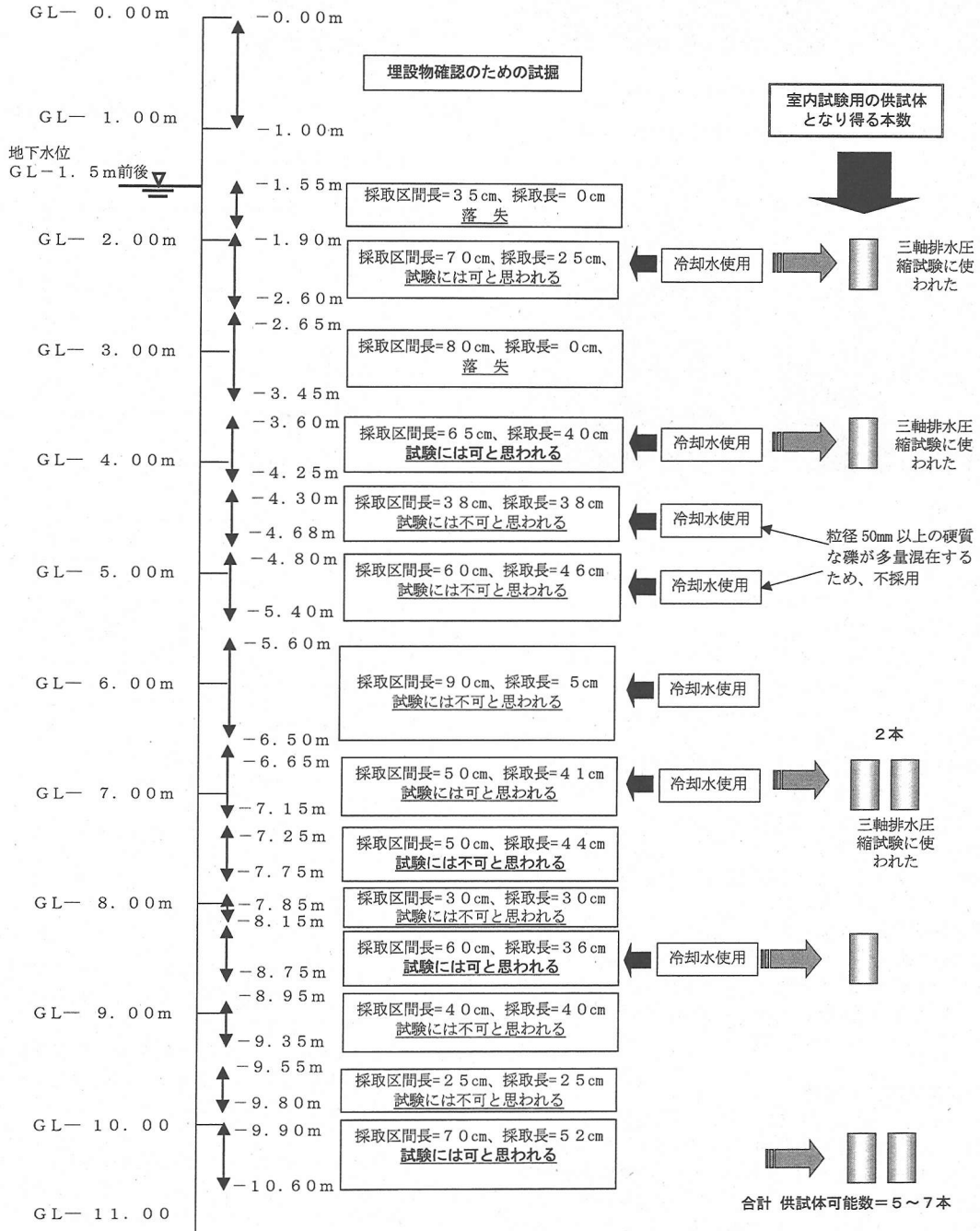
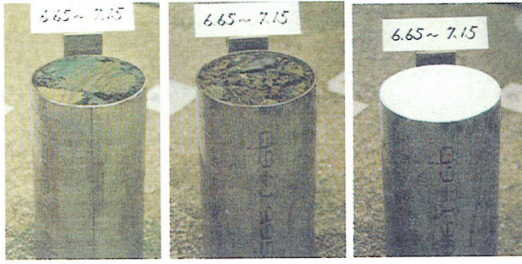
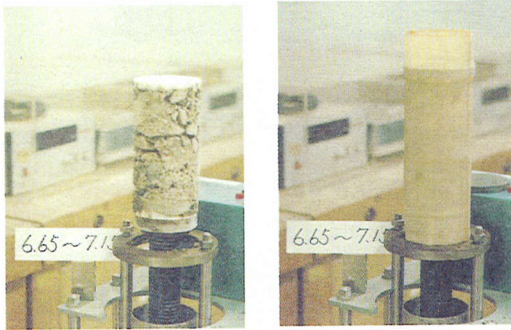


図-4 サンプリングの実施概略



(a) 上端切断面の状況 (b) 下端切断面の状況 (c) 石膏によるキャッピング状況

写真一2 切断面の状況(試料採取径 ϕ 100mm)



写真一2 にサンプリングチューブが切断された後の切断面の状況を示す。今回は大きい玉石が含まれるためステンレス性のものを用いた。この図より大きい礫が含まれていることがわかる。切断されたチューブには石膏によるキャッピングを実施し、凍結した状態で供試体を抜き取った。

図一4 にサンプリングの実施概略を説明する。今回は不攪乱の礫質試料を得るために、サンプリング試料を凍結させ地上に引き上げた。冷却時間が短いため、試料の凍結部分がインナーチューブの壁面付近に限られている。地上に引き上げられた試料の間隙水は相当量が排水される。この不飽和状態の試料を地上でゆっくりと全体凍結しているの、体積膨張はないと考えられる。

写真一3 は抜き取った状態とゴムスリーブを被せた状態の供試体の状況を示している。写真一4 は試験後の供試体状況を示すものである。三軸圧縮試験は深さ 1.90~2.60m, 3.60~4.25m, 6.65~7.25m のサンプリングを用いて実施した。

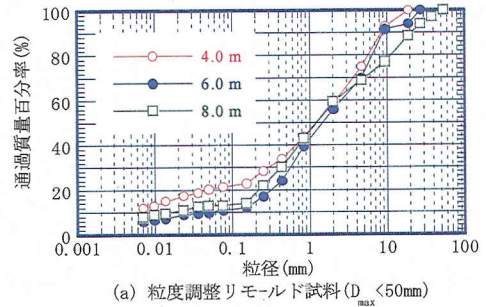
(3) 実験結果と考察

図一5 に平成 6 年度に実施した三軸排水圧縮試験に用いられた粒度調整リモールド試料と今回実施した不攪乱試料の粒径加積曲線を示す。粒度調整試料が粒径 50mm 以上の礫が除去されることを考えると、2 回のサンプリング試料の粒径分布がほとんど同様であることがわかる。

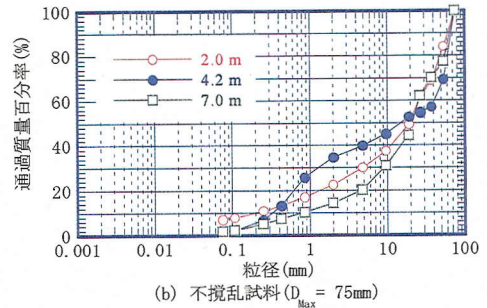
図一6 に粒度調整試料を用いた排水圧縮試験の応



写真一4 試験後の供試体状況 ($\sigma_3=98$ kPa)



(a) 粒度調整リモールド試料 ($D_{max} < 50$ mm)



(b) 不攪乱試料 ($D_{max} = 75$ mm)

図一5 三軸排水圧縮試験に用いられる試料の粒径加積曲線

力・ひずみ関係を示す。圧縮試験は 4 種類の拘束圧の下で実施し、その応力・ひずみ関係はいずれの場合においても硬化挙動を示している。また、体積ひずみの変化はせん断圧縮を示しており、せん断ひずみの増加とともに増大していく様子が伺える。一方、図一7 に示すように、不攪乱試料を用いた排水圧縮試験は 3 種類の拘束圧の下で実施し、その応力・ひずみ関係は拘束圧と粒度の違いによってかなりのばらつきが生じている。応力・ひずみ関係は硬化のみならず、拘束圧が 98.0kPa と 196.0kPa の場合では軟化挙動をも示している。体積ひずみの変化も再調整試料の結果と異なり、圧縮ひずみが一旦増加したがその後せん断ひずみの進行とともにせん断膨張に転じる。

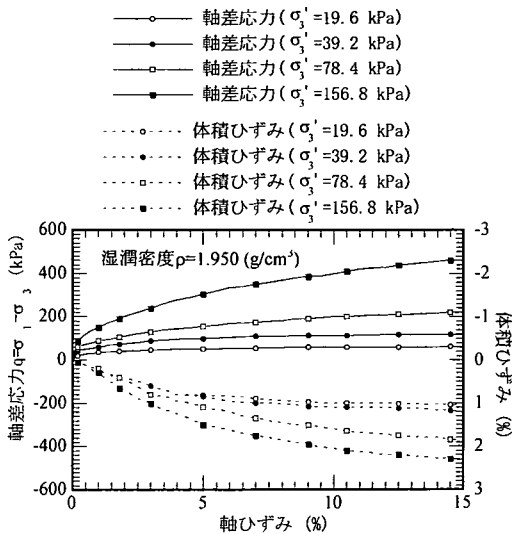


図-6 粒度調整試料を用いた三軸排水圧縮試験の応力・ひずみ関係

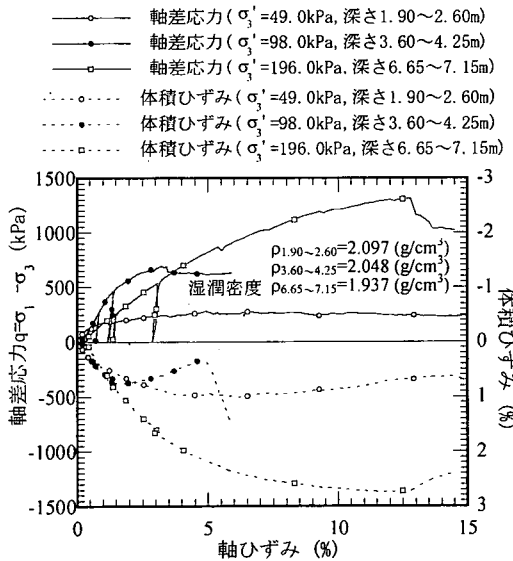


図-7 不攪乱試料を用いた排水圧縮試験の応力・ひずみ関係

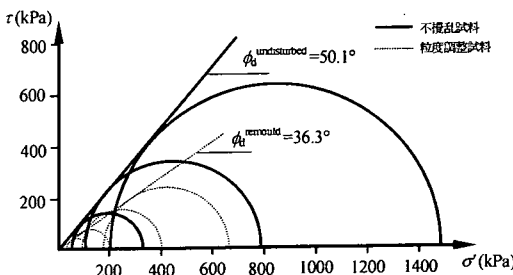


図-8 異なる試料を用いた試験で得られた Mohr-Coulomb 破壊強度(ピーク強度)

表-2 種々の試験により得られた変形係数の比較

	変形係数 E (MPa)	変形係数 E 平均値 (MPa)	弾性係数 E₀ (MPa) 平均値 (変動範囲)
SPT N 値+レーザー計器併用 (E=0.7 N)	1.40~16.1	7.00	-----
孔内水平載荷試験	0.33~2.40	1.03	-----
CD 試験 (粒度調整試料)	3.00~16.1	15.0	-----
CD 試験 (不攪乱試料)	17.6~31.8	30.0	224 (117~310)

図-8 に異なる試料を用いた試験で得られた Mohr-Coulomb 破壊強度(ピーク強度)を示す。再構成試料の内部摩擦角が 36.3° であるのに対して、不攪乱試料の内部摩擦角が 50.1° であった。また、残留強度における内部摩擦角は 41.0° であった。不攪乱試料の強度が再構成試料より高いことは土の構造と粒径の大きさの違いによるものと考えられる。したがって、当然ではあるが、再構成試料のデータを用いて地盤を評価する際、地盤の強度が過小評価される恐れがあることがわかった。

表-2 に種々の試験により得られた埋立地盤の変形係数の比較を示す。この表より、孔内水平載荷試験で得られた変形係数が他の方法で得られた値よりかなり小さくなっていることがわかる。これは、ボーリング中の孔壁の乱れによる初期剛性の低下が原因と考えられる。特に、大きい礫を含む埋土地盤においてこの低下率が大きいことが伺える。また、ピーク強度の場合と同様に、不攪乱試料を用いた CD 試験で得られた変形係数が粒度調整試料よりほぼ倍近く大きいことがわかった。また、不攪乱試料を用いた CD 試験で除荷・再載荷も行い、弾性係数を求めた。その値は変形係数よりワンオーダー大きくなっていることもわかった。

4. 解析手法および現地の実物大群杭基礎の水平載荷試験への応用

一般応力状態での力学挙動を表現できるモデルの確立に関する研究は多くの研究者の努力により発展してきた。たとえば、Chowdhury ら⁹⁾ が提案した下負荷面概念を用いた繰り返し移動硬化型弾塑性モデル (t_b subloading clay model) はさまざまな荷重過程での粘土の力学挙動を表現している。

Zhang ら^{3), 4)} は有限要素法に用いられる梁要素の釣合い式の弱形式を再定式化し、軸力変動による影響を適切に表現できるモデルを提案した。また、このモデルに基づいたビーム要素の剛性マトリクス $[K]$ を計算する際、建築構造分野で使われている RC 部材の Multi-Spring model¹⁾ や Fiber model²⁾ の離散化概念を利用した。このモデルを群杭の終局挙動を表現する 3 次元弾塑性静的・動的有限要素法の解析コード DGPILE-3D⁵⁾ に取り入れて、水平載荷を受ける群杭の終局状態の力学挙動をシミュレートした。

有限要素法を用いて群杭基礎をモデル化する時、杭断面の寸法を無視することができない。しかし通常の梁要素は体積がゼロであるため、群杭基礎を適切にモデル化しているとはいえない。Zhangら⁹⁾は杭断面の寸法を考慮したハイブリッド要素を提案し、この問題を解決している。

本研究では、9本群杭の杭基礎の大変形繰返し水平載荷試験⁸⁾をDGPPILE-3Dを用いてシミュレーションし、水平載荷試験への適用性を検証する。解析には、地盤に一般応力状態での応力～ひずみ関係を表現できる t_{ij} -clay model¹⁰⁾と t_{ij} -sand model¹¹⁾を採用した。構成式に含まれるパラメータは、室内試験、主に三軸圧縮試験および圧密試験により決まる。そのパラメータの決定法に関しては参考文献^{10), 11)}に委ねたい。室内試験データがない場合には、現位置載荷試験の孔内水平載荷試験および標準貫入試験のN値に基づいた経験式を用いて地盤パラメータを決めるが、そのパラメータの違いが解析結果にどのような影響を及ぼすかを考察する。

解析において、図-9に示すように地盤は4層に分けられ、埋土層(B)、砂質土(As1)、粘性土(Ac1)および洪積層(Dc)となっている。解析に用いられる地盤定数を表-3に示す。埋土・砂質土は t_{ij} -sand modelでシミュレートし、粘性土は t_{ij} -clay modelでシミュレートする。一方、洪積層は弾性体と仮定する。埋土の破壊応力比 R_f は次式で三軸圧縮試験の結果より求められるから、不攪乱試料および粒度調整試料の実験結果に基づいた値は違ってくる。すなわち、

$$R_f = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} = \begin{cases} 7.59 & \text{粒度調整試料} \\ 3.90 & \text{不攪乱試料} \end{cases} \quad (1)$$

また、変形係数E、圧縮指数 $C_1 = \lambda / (1 + e_0)$ の値は式(2)、式(3)により推定できる。この場合平均有効応力は埋土層中心の値(85kPa)を使うことにした。本来

表-3 地盤定数

Soil	Thickn- ess (m)	E (MPa)	v	Dr	m	α	e_0	R_f	C_1	C_e
B	10.0	---	0.30	-0.6	0.3	0.85	0.90	7.59 (3.90)	0.0034 (0.0068)	0.0016
As1	11.0	---	0.30	-0.6	0.3	0.85	0.8	4.35	0.0024	0.0010
Ac1	5.0	---	0.38	---	---	0.70	0.7	3.5	0.030	0.010
Dc	6.0	100.0	0.30	---	---	---	---	---	---	---

粘土の場合: $C_1 = \lambda$, $C_e = \kappa$; 砂質土の場合: $C_1 = \lambda / (1 + e_0)$, $C_e = \kappa / (1 + e_0)$
 ()内の数値は粒度調整試料の値

表-4 杭(直径=1.2m)の諸元

- RCの物理特性:
 コンクリートの圧縮強度: $\sigma_c = 3.8 \times 10^4$ kPa
 コンクリートのヤング率: $E_c = 2.5 \times 10^7$ kPa
 鉄筋のヤング率: $E_s = 2.1 \times 10^8$ kPa
 鉄筋の降伏応力: $\sigma_y = 3.8 \times 10^5$ kPa
- 鉄筋の配置:
 Part A: D29-24 (長さ: 345 cm)
 Part B: D22-12 (長さ: 1050 cm)
 Part C: D22-12 (長さ: 1600 cm)
 鉄筋のかぶり: 15 cm

なら、平均有効応力として埋土層の中心値を使うのであれば、その拘束圧での試験結果を採用すべきであるが、試料の数が少ないため、それに近いものを使った。

$$E = \frac{3(1-2\nu)}{\lambda/(1+e_0)} \sigma_{av} = \begin{cases} 30\text{M} & \text{粒度調整試料} \\ 15\text{M} & \text{不攪乱試料} \end{cases} \quad (2)$$

$$C_1 = \lambda / (1 + e_0) = \begin{cases} 0.0 & \text{粒度調整試料} \\ 0.0 & \text{不攪乱試料} \end{cases} \quad (3)$$

RC杭の非線形性については、Zhangら⁹⁾が提案した軸力変動による影響を適切に表現できる有限要素の梁理論を用いた。解析に用いられるRC杭の諸元を表-4に示す。解析地盤のメッシュは図-9に示す通りで、節点数が4584、要素数が3696である。

実験においては7サイクルの繰返し載荷を実施し、最大水平力が20.5MNに達したが、解析では、1サイクル目の単調載荷過程のみに着目し、解析を行う。解析結果と実験結果の比較は初期単調載荷時の荷重・変位関係および前方・中間・後方杭の曲げモーメント分布について検討を行う。本解析では図-10に水平荷重が8MNまで単調載荷した場合の荷重・変位関係の実験結果と解析結果の比較を示す。解析は不攪乱試料と粒度調整試料を用いた実験データで得られたパラメータの2ケースについて実施した。この図より、不攪乱試料を用いた室内試験データに基づいた解析では、水平変位が粒度調整試料を用いた室内試験データのものより小さく、水平載荷試験の結果とほぼ一致していることがわかった。また、孔内水平載荷試験で得られた変形係数Eは粒度調整試料の三軸試験結果よりもかなり小さく、この値に基づいた水平変位の解析値が実測値よりさらに大きくなることが予測できるため、その比較は省略する。

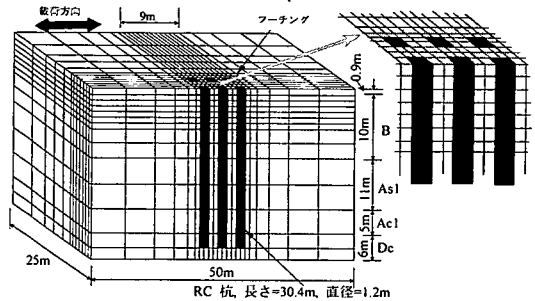


図-9 有限要素解析に用いられるメッシュ

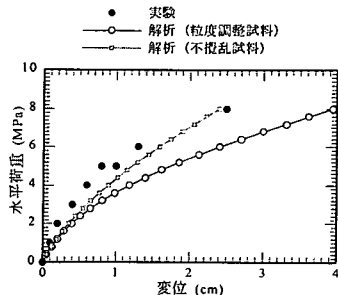


図-10 単調載荷時(最大8MN)の荷重・変位関係の比較

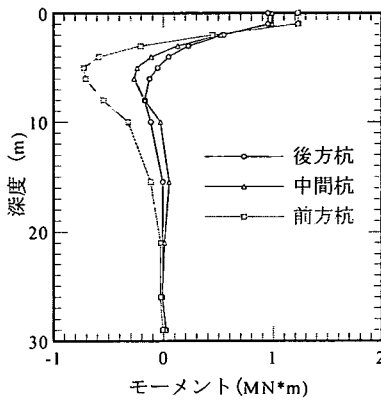


図-11 杭別の曲げモーメント分布の解析値

図-11 に不撓乱試料の実験データに基づいた解析で得られた水平荷重が 8MN に達する時の杭の曲げモーメント分布を示す。この図より、最大曲げモーメントの発生位置がいずれもフーチング付近にあることがわかった。また、最大曲げモーメントが、前方・中間・後方杭の順で減少していることも明らかになった。

図-12 に水平荷重が 8MN に達する時の杭の曲げモーメント分布の実験値および解析値の比較を示す。中間杭の地中最大曲げモーメントの解析値が実験値より小さいことを除けば、解析値が概ね実験値をよく再現している。また、解析と同様に地中部の最大曲げモーメントが、前方・中間・後方杭の順で発生していることがわかった。一方、軸力の変動による $M-\Phi$ 関係への影響を考慮しない解析が前方・中間・後方杭の曲げモーメントの差を表現できないことが報告されている⁴⁾。このことから、軸力変動の影響を十分考慮する必要性が実験および本解析より示された。

5. まとめ

本研究では、新しいサンプリング装置を用いて礫材の埋立地盤の不撓乱試料を採取し、そのサンプリング装置の有効性を確認した。また、境界値問題として、埋立地盤の 9 本群杭基礎の水平荷重試験の数値解析を行い、地盤の力学特性の適切な評価が数値解析の精度向上に非常に重要であることを確認した。その結果、以下の結論が得られた。

(1) サンプリング装置は小型・軽量であり、足場が不要で仮設備も小規模で済む。礫混じり土を含めた D~C_u 級岩盤を対象とした場合は 10m の深度までのサンプリングに適する。また、得られたサンプリング試料の端面整形のみで力学試験用供試体を提供できる。

(2) サンプリング装置のインナーチューブはステンレスライナー製、ポリエステル製、アクリル製の三種類があり、対象地盤によって使い分けることができる。透明な材質のインナーチューブを使用すれば、試料状態が直接に目視でき、力学試験供試体としての適否が容易に判断できる。

(3) 小型水槽で簡単に作れる塩化カルシウム使用の冷却水を使用すれば、直径 100mm 以上の玉石を含んだ礫質土の不撓乱供試体を採取できる。

(4) 実施した種々の試験のなかでは孔内水平荷重試験で得られた変形係数が最も小さい。粒度調整試料を用いた CD 試験の値は孔内水平荷重試験の値よりほぼワンオーダー大きいが、不撓乱試料を用いた CD 試験の値より小さく、ほぼ半分になっている。また、不撓乱試料を用いた CD 試験では除荷・再載荷も行い、弾性係数を求めた。その値は変形係数よりワンオーダー大きくなっていることもわかった。

(5) 粒度調整試料の応力・ひずみ関係はひずみ硬化挙動を示し、内部摩擦角が 36.3° であった。一方、不撓乱試料の応力・ひずみ関係はひずみ硬化・軟化挙動を示し、ピーク強度および残留強度における内部摩擦角がそれぞれ 50.1° と 41.0° であった。

(6) 9 本杭基礎水平荷重試験の単調荷重段階の数値シミュレーションでは、不撓乱試料のデータを用いた解析の水平変位は粒度調整試料のものより試験結果とよく一致している。新しいサンプリング装置の有効性を確認した。

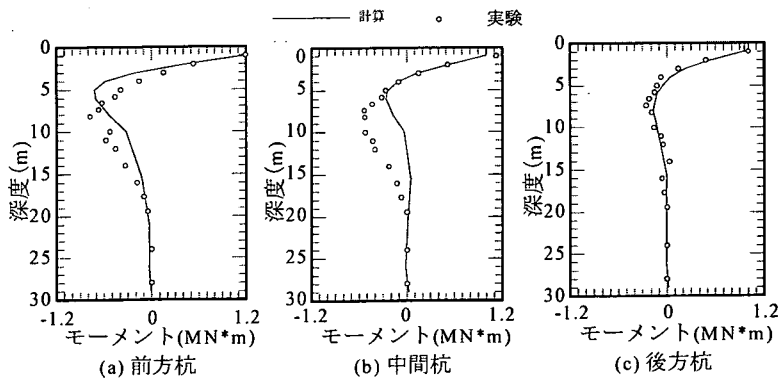


図-12 水平荷重時 8 MN 時の杭の曲げモーメント分布

(7) RC 部材の軸力変動による影響を適切に表現できるモデルの導入により，前方・中間・後方杭の曲げモーメント分布の差異，すなわち，軸力の変動による M- Φ 関係への影響が本解析より説明できることが確認された．不攪乱試料の室内試験データに基づいた本解析がかなりの精度で群杭の現地の実物大水平載荷試験を再現できることがわかった．

参考文献

- 1) Lai, S.-S., Will, G. T. and Otani, S.: Model for inelastic biaxial bending of concrete member, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 11, pp. 2568-2584, 1984.
- 2) Li, K. N. and Kubo, T.: Analysis of circular RC member in MS/fiber model, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Hiroshima, St. II, AIJ*, 1999.
- 3) Zhang, F., Yashima, A., Kimura, M. and Uzuoka, R.: 3-D FEM Analysis of Laterally Cyclic Loaded Group-Pile Foundation Based on an Axial-Force Dependent Hysteretic Model For RC, *Proc. of Int. Conf. on Geotechnical and Geological Engineering (GeoEng2000)*, Melbourne, CD-ROM, 2000.
- 4) Zhang, F. and Kimura, M.: Numerical prediction of the dynamic behaviors of RC group-pile foundation, *Soils and Foundations*, Vol. 42, No.3, 77-92, 2002.
- 5) Zhang, F., Kimura, M., Nakai, T. and Hoshikawa, T.: Mechanical behavior of pile foundations subjected to cyclic lateral loading up to the ultimate state, *Soils and Foundations*, Vol. 40, No.5, pp. 1-18, 2000.
- 6) Kimura, M. and Zhang, F.: Seismic evaluation of pile foundations with three different methods based on three-dimensional elasto-plastic finite element analysis, *Soils and Foundations*, Vol. 40, No.5, pp. 113-132, 2000.
- 7) 西方 佐男, 鎌山 隆: 軟岩のコア採取装置の開発ならびに採取試料の品質, *電力土木*, No.285, 2000.
- 8) 幸左 賢二, 鈴木 直人, 木村 亮, 木村 嘉富, 森田 悠紀雄: 終局状態に着目した実物大杭基礎の水平載荷試験, *土木学会論文集*, No.596/III-43, pp. 249-260, 1998.
- 9) Chowdhury, E. Q., Nakai, T., Tawada, M. and Yamada, S.: A model for clay using modified stress under various loading conditions with the application of subloading concept, *Soils and Foundations*, Vol. 39, No.6, pp. 103-116, 1999.
- 10) Nakai, T. and Matsuoka, H.: A generalized elastoplastic constitutive model for clay in three-dimensional stresses, *Soils and Foundations*, Vol. 26 No. 3, pp. 81-98, 1986.
- 11) Nakai, T.: An isotropic hardening elastoplastic model for sand considering the stress path dependency in three-dimensional stresses, *Soils and Foundations*, Vol.29, No.1, pp. 119-137, 1989.

(2001. 9. 11. 受付)

NEW SAMPLING DEVICE FOR GRAVELS AND ITS APPLICATION TO A NUMERICAL SIMULATION ON LATERALLY LOADED GROUP-PILE FOUNDATION

Feng ZHANG, Atsushi YASHIMA, Makoto KIMURA, Manabu KAGEYAMA and
Tatsuo KATAYAMA

In this paper, a new sampling device, which is very simple and easy operated, is developed to collect undisturbed samples in a reclaimed ground composed of gravels. By using the samples, drained conventional triaxial compression tests (CD tests) are conducted to investigate the mechanical behavior of the gravels materials. Results obtained from in situ tests such as borehole horizontal loading test, or from the CD tests with remould sample are also compared to investigate the mechanical behavior of gravel materials with different testing methods. Then a real-scale lateral loading test on a 9-pile foundation that was built in the reclaimed ground is simulated with a 3-D finite element analyses based on the experimental data. The validity of the device is confirmed.