

木杭打設による周辺地盤の変形挙動に関するモデル試験

防衛大学校 (学) ○奥田 大史, (正) 正垣 孝晴

1. はじめに

三重津海軍所は、佐賀藩が 1859 年に設置した洋式海軍施設である。我が国で現存する最古のドライドックがこの敷地内に地中保存され、2015 年に登録された世界遺産「明治日本の産業革命遺産」の構成資産の一つになっている。同船屋地区は、2017 年 1 月から本格的な発掘調査が行われており、大型の木造建物が建設されていた記録¹⁾と整合する基礎としての木杭が発掘調査で確認されている。この地盤工学的調査として、木杭周辺の含水比 w_h と非排水強度 c_u の測定から杭の設置方法や役割、施工法等の検討が行われている²⁾。本稿は、室内のモデル試験から現地の杭周辺の地盤の変形挙動を検討する。

2. 試験方法

図-1 は土槽(Tank)と杭(Pillar)の貫入装置を示している。図-1 の土槽と直径 35 mm (先端水平) の鉄製の半割杭とモデル地盤上に拘束圧として载荷する鉛玉の状態を、それぞれ写真-1、2 に示す。モデル地盤としての土槽は、写真-3 に示す圧密土槽 (内径 $d46.8$ cm, 高さ $h70$ cm) から $d25$ cm, $h33$ cm, 肉厚 2 cm の塩ビパイプで採取した粘性土を

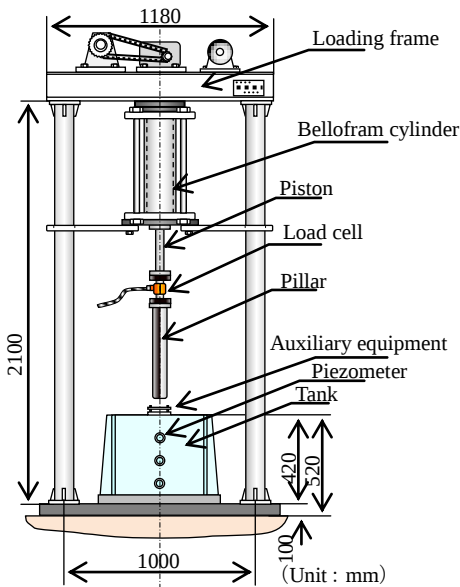


図-1 土槽と杭の貫入装置

半割しており、一方に鉛玉で拘束圧を载荷し、他方は無载荷の大気圧下のモデル地盤とした。 $h40$ cm, 幅 30 cm の土槽底にこのモデル地盤を静置した後、木矢で固定している。ベロフラムシリンダーに装着された半割杭を空気圧で 2.8 m/s の等速で貫入する。

供試土は横浜港の海底から採取した沖積粘土であり、2 mm 篩で貝殻等を除去した再構成土の川崎粘土 (本牧粘土) である。土粒子密度 $\rho_s=2.613$ g/cm³、液性限界 $w_L=108$ %, 塑性指数 $I_p=58$ の高塑性粘土 (CH) に分類される。船屋地区の杭遺構は、 $w_L=115$ %, $I_p=63$ % の高塑性シルト (MH) の地盤中にあり、化学組成と粘土鉱物の観点でも同等であり³⁾、本モデル試験の有効性が認識できる。 w_L の 2 倍程度の含水比のスラリー状の川崎粘土を圧密土槽に投入して、10 kPa の初期圧密圧力から数段階で 40 kPa と 60 kPa の圧密荷重を断面積で割った圧密圧力 p をかけた異なる強度の再構成土である。圧密試料からの排水と圧密沈下が終了したことから、各段階の圧密終了を確認し、最終の圧密段階の試料をモデル試験の供試土とした。土の変形挙動の測定と整理方法等は、従来^{4,5)}と同じである。

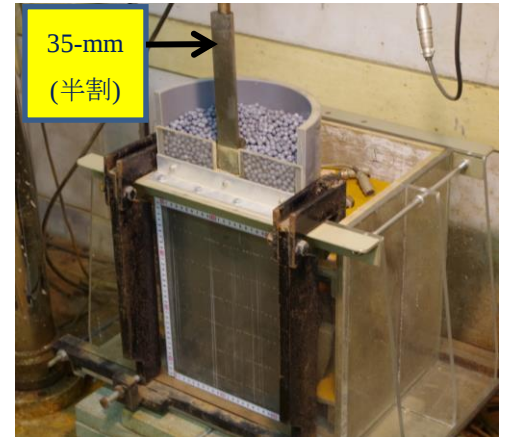


写真-1 土槽と半割杭



写真-2 鉛玉による拘束圧の载荷状況



写真-3 圧密土槽 (塩ビパイプによる試料採取の状況)

キーワード 三重津海軍所, 世界遺産, 打込杭, モデル試験, 地盤の変形

連絡先 〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL : 046-841-3810

3. モデル地盤の強度・圧密特性

写真-3 に示す塩ビパイプによる試料採取前に、塩ビパイプの外側で採取したブロック試料から一軸 (JIS A 1216) と標準圧密試験 SOT (JIS A 2017) を行った。それぞれの供試体は、 $d15\text{ mm}$, $h35\text{ mm}$ ⁶⁾と $d30\text{ mm}$, $h10\text{ mm}$ ⁷⁾である。図-2 は、それらの結果を土槽地盤表面からの深さ z に対してプロットしている。 p の値によって、含水比 w_n 、

湿潤密度 ρ_t 、間隙比 e 、サクシオン s_0 、破壊ひずみ ε_f 、一軸圧縮強さ q_u 、変形係数 E_{50} の値は異なるが、これらは p が大きいと w_n が小さくなることに対応している。土槽上下の w_n の差は $q_u=57\text{ kN/m}^2$ の地盤で 4%, $q_u=77\text{ kN/m}^2$ の地盤で 8% 程度の差であるが、船屋地区の木杭遺構の粘土地盤の含水比の変化 (76.7~154.3%) を考えると容認される変動である。なお、 $q_{u(l)}$ ⁸⁾ は、試料採取に伴う攪乱や応力変化を補正した q_u である。

図-3 は UCT の応力 σ とひずみ ε の関係である。再構成粘土であるが、圧密が終了したブロックサンプリングの試料であることを反映して $\varepsilon_f=5\sim12\%$ で破壊している。 q_u は $q_u=57\text{ kN/m}^2$ と $q_u=77\text{ kN/m}^2$ の地盤で、それぞれ $43.3\sim77.5\text{ kN/m}^2$, $50.6\sim108.9\text{ kN/m}^2$ であり、船屋地区の $q_u=24\sim41\text{ kN/m}^2$ ⁹⁾ 比較して高めではあるが、モデル試験の地盤として現地の地盤を適正に再現できていると判断される。

4. 杭貫入がモデル地盤の表面挙動に及ぼす影響

杭の地盤への貫入を半割杭でシミュレートするが、アクリル面上で観察される土の変形挙動が杭の貫入を再現できている保証はない。アクリル板と土の摩擦に起因して杭辺の土に挙動が拘束される危険があるからである。半割チューブ半割コーンの同様のモデル試験では、この影響は小さいことが確認されている^{4),5)}が、貫入体の有効面積が大きい半割杭では、明らかにされていない。

図-4 は、モデル地盤表面の変形量を測定する位置を示している。変形量は、 $d10\text{ mm}$, 重さ 0.571 g の画鋸の鉛直方向の変位 D_s を 0.01 mm 精度のノキスで測定した。図-5 は、図-4 の a, b, c, d の D_s を半割杭の中心からの円弧上距離 D_c に対してプロットしている。 D_s の正と負はモデル地盤面の膨張と沈下を意味する。図-5 は $\sigma'_{v0}=6.6\text{ kPa}$ の場合であるが、 D_s は $\pm 1\text{ mm}$ の範囲内にあり、 D_c に依存していない。アクリル板と粘土の摩擦に起因する拘束があれば、 $D_c=0\text{ cm}$ の D_s の絶対値が大きく、 $D_c=0\text{ cm}$ から離れると D_s の絶対値が小さくなるが、a~d のいずれの位置でもこのような傾向はない。このことは、半割杭の貫入による周辺地盤の変形にアクリル板との摩擦の影響は小さいことを意味する。

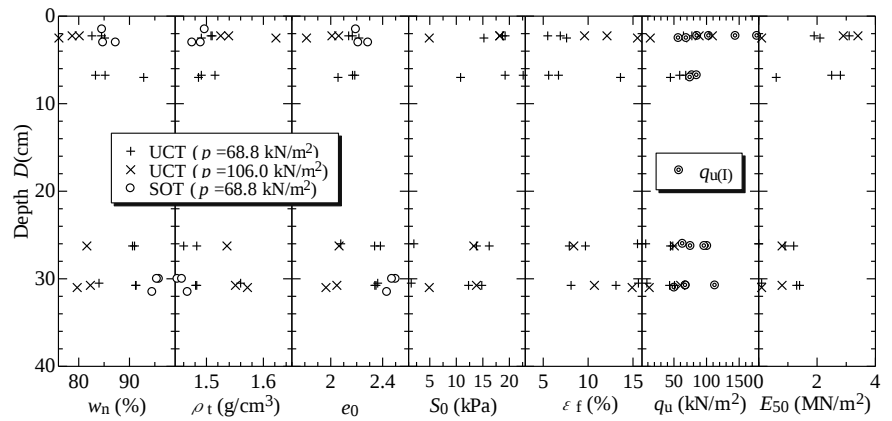


図-2 一軸圧縮試験と標準圧密試験

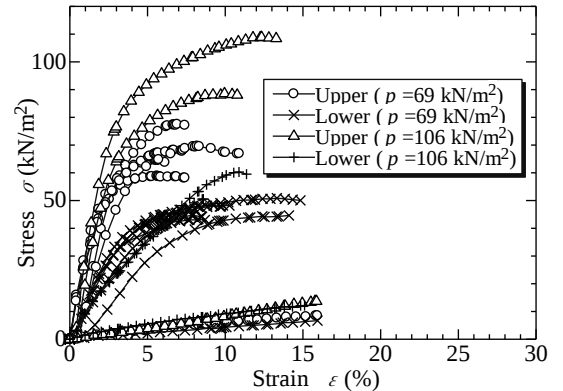


図-3 応力とひずみの関係

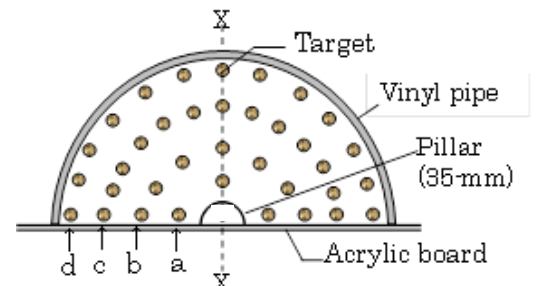


図-4 モデル地盤表面の変形量測定位置

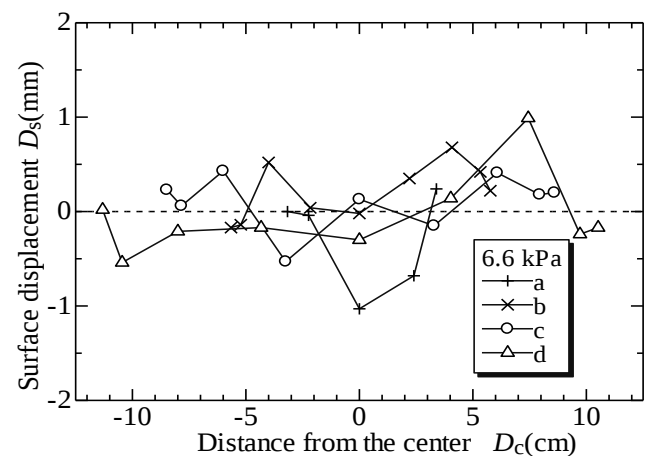


図-5 D_s と D_c の関係

5. 杭貫入による周辺地盤の変形挙動

$q_u=57.0 \text{ kN/m}^2$ の地盤に半割杭杭を貫入した場合の土槽の亚克力板に沿うターゲットの動きを $\sigma'_{v0}=0$ と 6.8 kPa に分けて、それぞれ図-6(a)と(b)に示す。縦軸はモデル地盤表面からの深度、横軸は同左端からの距離である。矢印の元と先は、貫入前後のターゲットの位置を示す。これらの位置は、貫入前後に撮影した写真から判定した。半割杭周辺のターゲットの移動は、半割杭に近い領域で大きく、 z が大きくなると $\sigma'_{v0}=6.8 \text{ kPa}$ が 0 kPa のそれより幾分大きい。

水平方向のターゲットの配置を密にした $z=2.5, 6.5, 11.5, 16.5, 21.5, 26.5, 31.5, 32.75 \text{ cm}$ の位置から杭が 1 cm 貫入した際のチューブ壁面近傍のターゲットの鉛直変位 D_v を図-7に示す。図-6の結果を反映して、 $z > 21.5 \text{ cm}$ の領域で $\sigma'_{v0}=6.8 \text{ kPa}$ のターゲットの D_v が幾分大きい。ターゲットの移動を示す記号を切断するように表記した縦線は、杭の貫入の影響が及んでいない境界であり、 $\sigma'_{v0}=0$ と 6.8 kPa を赤と青色で示している。緑は両者共通の境界線である。これらの線は、 $z=2.5 \text{ cm}$ に対して記入されていないが、他の z では概ね 35 mm の杭径の範囲内に納まっている。この範囲は、拘束圧载荷の $\sigma'_{v0}=6.6 \text{ kPa}$ で幾分大きい。

以上のことから、杭貫入による周辺地盤の変形は、杭径の範囲であり、この領域内では間隙水圧の発生と消散による含水比低下と強度増加が予想される。以上の結果は、 $q_u=77 \text{ kN/m}^2$ の地盤の場合でも同様であった。

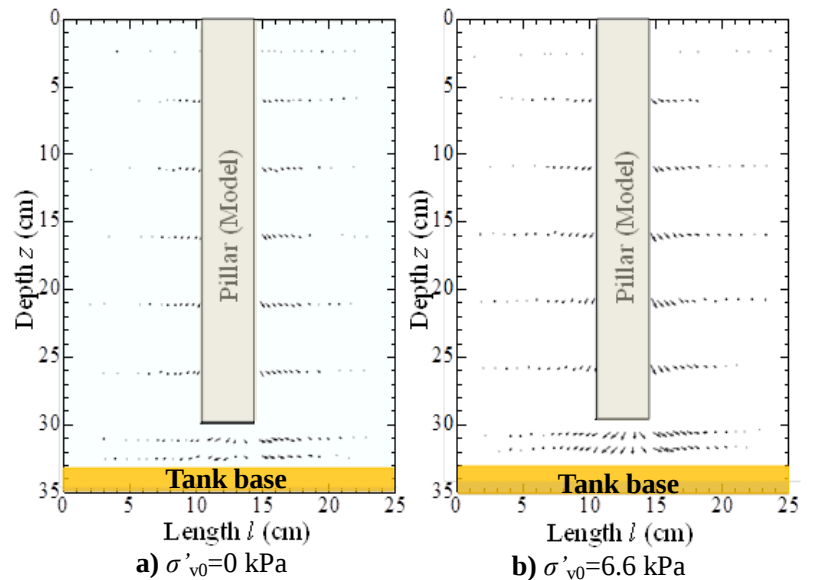


図-6 土粒子の移動 ($q_u=57 \text{ kN/m}^2$ の地盤)

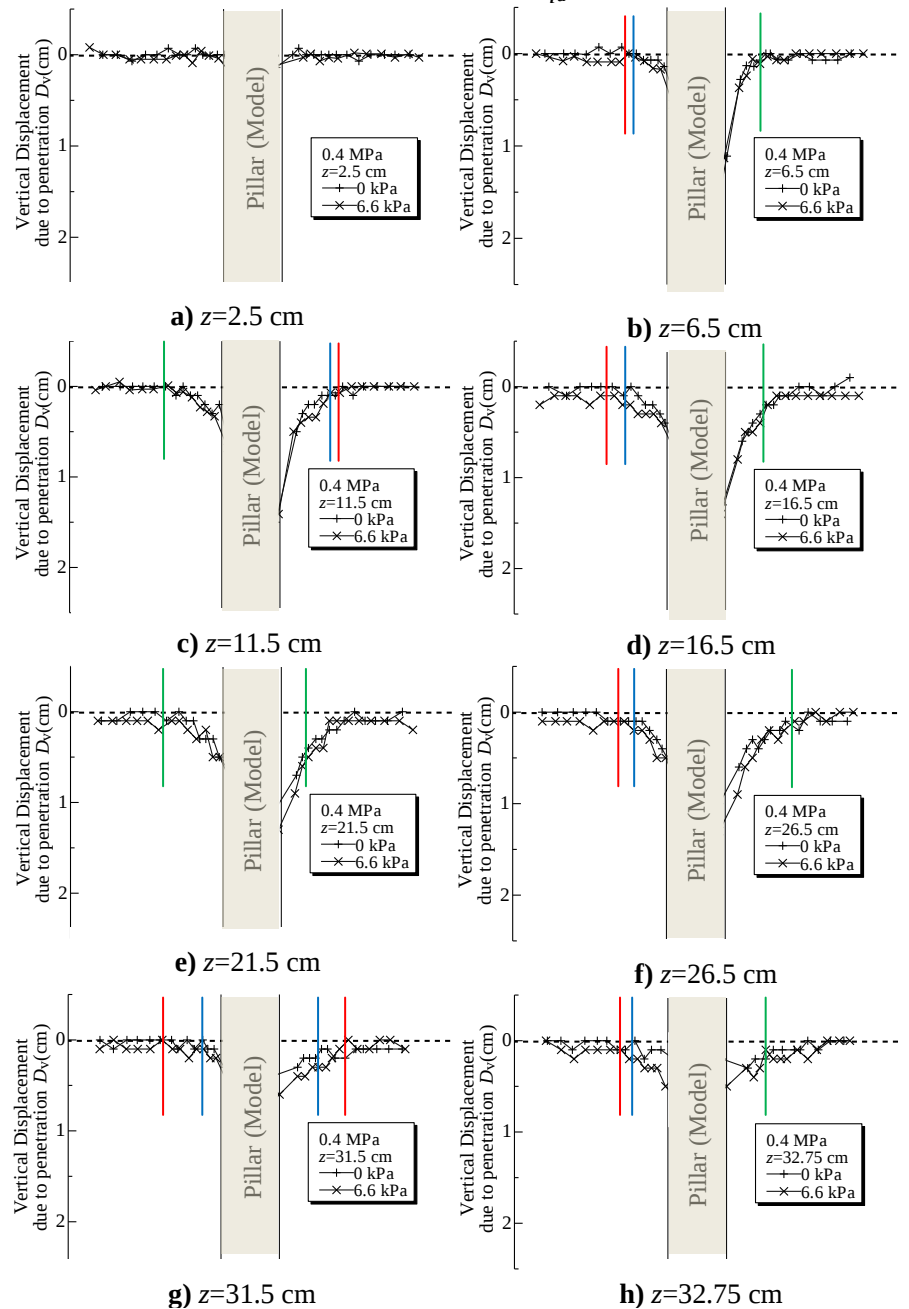


図-7 D_v と z の関係 ($q_u=57 \text{ kN/m}^2$ の地盤の場合)

6. 三重津海軍所舟屋地区の木杭の分析

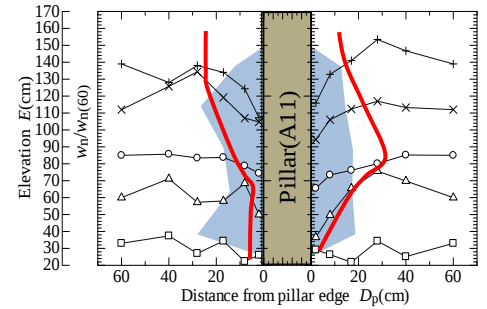
船屋地区の木杭の発掘調査として、A11 杭の断面を含むトレンチ面の w_n と非排水強度 $c_u (=q_u/2)$ の変化が測定されている²⁾。図-8 と 9 は、それぞれ w_n と c_u の測定結果である。木杭設置の影響は、木杭からの距離 D_p が小さい領域で w_n が低下し、 c_u が大きくなることで認識できるが、この影響範囲に赤線を描いている。青の着色領域は、図-7 に示した $\sigma'_{v0}=6.6$ kPa のターゲットが影響を受けた範囲をモデル試験と実物の杭径と深度の比を整合させて示している。両者の対応は、比較的良好であると判断される。杭の施工法の記録はないが、このことは現地の杭は打込によって施工されたことを示していると解釈される。

7. おわりに

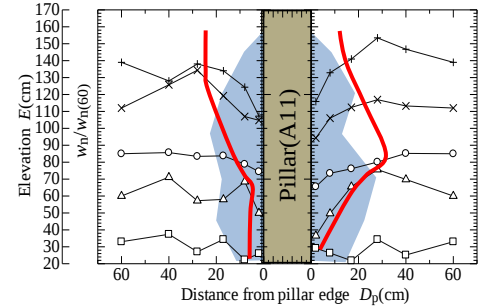
モデル試験で検討した半割杭の貫入による周辺地盤の変形挙動は、三重津海軍所の杭遺構の周辺地盤の w_n と c_u の挙動とほぼ同等であり、三重津海軍所遺構の杭遺構は、打込杭により施工されたと推察された。2018 年 1 月の発掘調査では、A12 杭に加え、A, B 列の横に C, D, E 列杭も確認されている。図-8 と 9 で述べた A11 杭の結果を踏まえ、他の杭の調査を予定している。また、A 列杭のような杭先端が平坦で支持地盤まで杭が到達していない打込杭の施工法は極めてまれであり、当時の施工の意図を考察することも重要である。さらに、本稿のモデル地盤 ($q_u=57.0$ kN/m²) より強度の低い地盤の挙動による検討も予定している。

参考文献

- 1) 佐賀県立図書館蔵郷土 1058, 「三重津御船屋絵図」; 安政 2~4 年 (1855~ 57)頃と考えられる三重津船屋。
- 2) 正垣・奥田・中野: 三重津海軍所舟屋地区の土木遺構としての木杭の荷重履歴, 第 14 回地盤工学会関東支部発表会, pp.25-28, 2017.
- 3) 正垣・奥田・小口: 三重津海軍所ドック渠壁と旧佐賀城構口橋台の路床の土工材料の産地同定, 第 45 回土木学会関東支部技術研究発表会, 投稿中, 2018.
- 4) Shogaki, T. : Mechanism of sample disturbance caused by tubepenetration model tests on Toyoura sand, *Soils and Foundations*, Vol.57, No.4, 2017.
- 5) Shogaki, T. and Okuda, D. : Effect of confining pressure on deformation behavior around soils caused by sampling tube and cone penetrations, ISOPE-2018 (in printing).
- 6) Shogaki, T. : Effect of specimen size on unconfined compressive strength of natural deposits. *Soils and Foundations*, Vol 47, properties No.1, pp.158-167, 2007.
- 7) Shogaki, T. : Effect of specimen size on consolidation parameters of marine clay deposits, *Journal of ASTM International*, Vol. 3, No. 7, pp.106-118, 2006.
- 8) Shogaki, T. : An improved method for estimating *in-situ* undrained shear strength of natural deposits,” *Soils and Foundations*, Vol.46, No.2, pp.109-121, 2006.
- 9) 正垣・渡邊・奥田: 小径倍圧型サンプラーで採取した有明粘土の原位置非排水強度と圧密特性, 第 14 回地盤工学会関東支部発表会, pp.436-439, 2017.

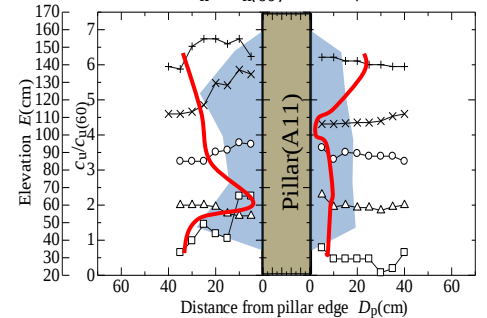


a) $q_u=57$ kN/m² の地盤

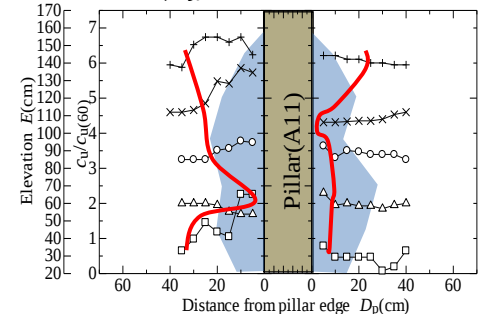


b) $q_u=77$ kN/m² の地盤

図-8 $w_n/w_{n(60)}$ と D_v の関係



a) $q_u=57$ kN/m² の地盤



b) $q_u=77$ kN/m² の地盤

図-9 $c_u/c_{u(60)}$ と D_v の関係