

(株)武智工務所 ○小椋仁志
関西大学工学部 山肩邦男

1. 序

前報¹⁾で、実大の節杭(節付き円筒コンクリート杭)と円筒杭(節のない円筒コンクリート杭)とを大型土槽内に造成した地盤に押し込んだ実験の結果を報告し、両者の先端抵抗や摩擦・周面抵抗を比較検討した。本報では、この実験で測定した土槽底面での鉛直応力や、土槽底面の影響を補正した節杭の周面抵抗について検討する。

2. 土槽底面の鉛直応力

本実験では図1に示すように、300杭(外径300mmの円筒杭)、φ450杭(同450mm)および節杭(本体径300mm、節部径440mm)を、地表面から沈下速度制御方式で押し込んでいる。杭の貫入量が約3.3mになるまでを貫入過程と呼び、それ以後を載荷試験に準じる載荷過程としてさらに30~40cm貫入するまで載荷したが、いずれの過程でも10~20cmごとに除荷を行った。地盤は湿潤状態の砂(平均粒径 $D_{50}=0.6\text{mm}$ 、均等係数7.3、平均含水比6.5%)を土槽(6m×4m、深さ約5m)に詰めたものであり、地盤全体の平均単位体積重量 γ は 1.695gf/cm^3 、相対密度 D_r は62.3%である。また節杭を押し込む時には、周囲に砂利($D_{50}=7.8\text{mm}$ の礫)を充填した。この実験の概要および結果は文献¹⁾を参照されたい。

本実験では図1に示す位置に8個の土圧計(受圧面の径50mm)を置いて、杭の貫入によって土槽底面に生じる鉛直応力 σ_z を測定した。最初に押し込んだφ300杭について、貫入・載荷過程の各サイクルの最大荷重時における杭直下での σ_z と杭頭荷重 P_o の関係を図2に、載荷過程の最終サイクルにおける σ_z の分布を図3に示す。 σ_z の値は載荷直前の値を初期値としており、地盤の重量やそれまでの貫入による残留応力を差し引いている。また、図中の点線は地盤を弾性体と仮定したMindlinの第1解による計算値である。この値は、実験で測定された先端抵抗と摩擦抵抗とをそれぞれ分布荷重として、半径方向に5分割、円周方向に4分割した杭先端面と、深さ方向に5分割、円周方向に4分割した杭周面に作用させ、各々の荷重による σ_z を重ね合わせて求めたものである。土槽底面の存在は鏡像荷重によって考慮している。地盤のポアソン比 ν を数種類変えて計算した結果、 $\nu=0.45$ のとき荷重(貫入量)が小さい間で測定値と計算値とはよく合うことが分かった。これらの図から、杭頭貫入量 S_o が2,000mmを超えると σ_z の増大が著るしいこと、杭の近傍では実測値は計算値の1.5~2倍程度となることなどが分かる。これは、ある一点に力が作用した時、弾性体内では応力が全体に分散するのに対し、実際の地盤ではKöglerやFröhlichなどが指摘したように、力の作用点の近傍に集中して応力が発生するためと考えられる。

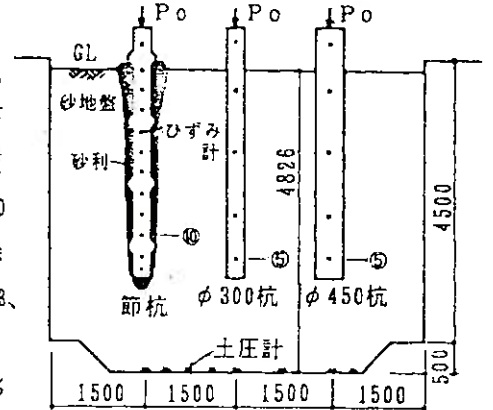


図1. 実験土槽(断面)、試験杭の状況

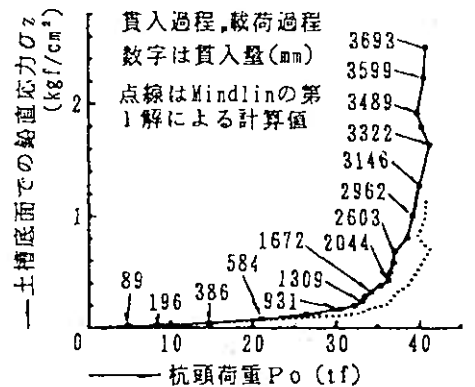


図2. φ300杭の $P_o \sim \sigma_z$ 関係

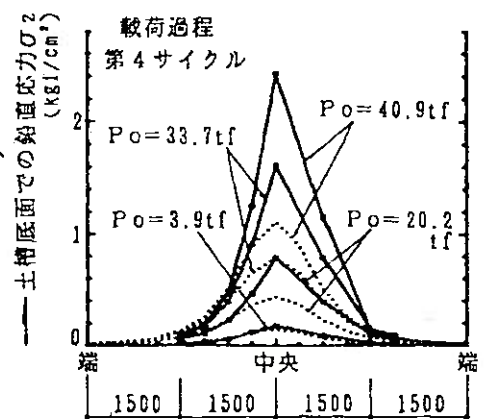


図3. φ300杭の σ_z 分布

Study on Frictional Resistance of Nodular Pile by Full-scale Test of Jacked Piles

Hitoshi Ogura (Takechi Engineering Co., Ltd.) and Kunio Yamagata (Kansai University)

3. 土槽底面の影響を補正した抵抗

本実験では、土槽の深さに比べて杭の貫入量が大きいため、測定された杭の先端抵抗 P_p や摩擦・周面抵抗 P_f の値には土槽底面の影響が入っていると考えられる。したがって、抵抗値を定量的に検討するためにはこの影響を補正する必要があり、次の手順で補正抵抗値を求めることにする。まず、土槽底面の存在を鏡像荷重によって考慮した状態で、 P_p と P_f を作用させた時に生じる杭の先端沈下量 S_{pm} を Mindlin の第 1 解によって計算する。計算は土槽底面での σ_z を求めた時と同じ方法で行う。次に、鏡像荷重を考えない、すなわち土槽底面が存在しないと仮定した時の沈下量 S_{pi} を

同様の方法で求める。この結果得られた S_{pi}/S_{pm} の値を補正係数とする。最終貫入時における補正係数は $\phi 300$ 杭では 1.089、 $\phi 450$ 杭では 1.153、節杭では 1.168 となり、測定された抵抗値は土槽底面の存在によって、底面がない場合の抵抗値より 9~17% 程度大きくなっていてと考えられる。底面がない場合の抵抗値として、測定された

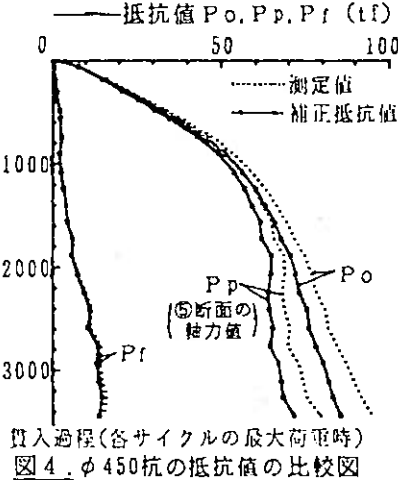


図4. $\phi 450$ 杭の抵抗値の比較図

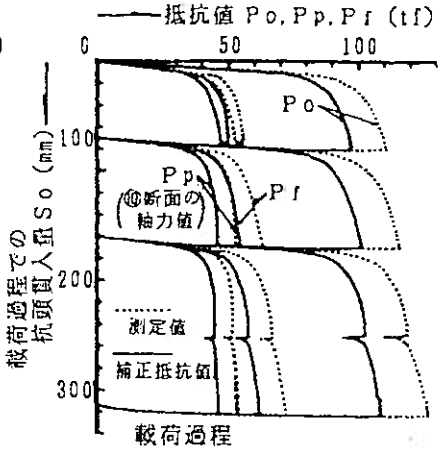


図5. 節杭の抵抗値の比較図

抵抗値を補正係数で除した値を採用し、これを補正抵抗値と呼ぶ。図4に $\phi 450$ 杭の貫入過程での各サイクルの最大荷重時における測定値と補正抵抗値との比較図を、図5に節杭の較荷過程における両者の比較図をそれぞれ示す。

4. 節杭の周面抵抗の検討

(1) 模型実験による実験式 本実験で得られた節杭の周面抵抗の補正抵抗値は図5のように約 60tf となる。この値について、X線を用いて地盤の動きを観察した模型実験²⁾ で得られた実験式によって検討する。周面抵抗が最大値に達すると、図6のように節部径を持つせん断面が形成される。この時、せん断面に働く垂直圧が節部下面の作用によって図7のように大きくなるとして導いたのが次式である。

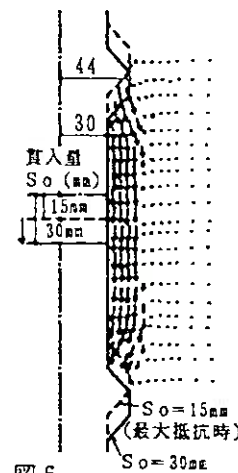


図6. 模型実験²⁾ における杭周地盤の挙動

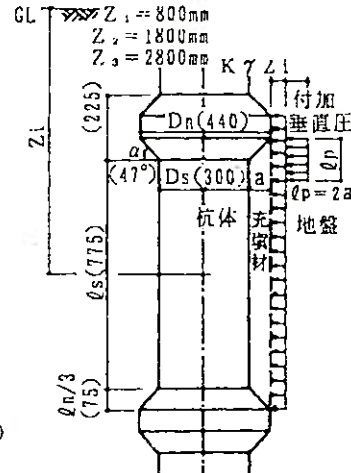


図7. 杭周の垂直圧の分布と杭体の寸法(mm)

$$P_v = \sum_{i=1}^n \frac{\{(K \gamma Z_i \cdot \tan \phi_{sg} + C_{sg})(\rho_s + \frac{2}{3} \rho_n) + (K \gamma Z_i \cdot \tan \delta_{cs} + C_{cs}) \times \frac{1}{3} \rho_n\} D_n \cdot \pi}{1 - \tan \phi_{sg} \cdot \tan(\alpha - \delta_{cg}) \cdot \frac{2 D_n}{D_s + D_n} \cdot \frac{3 \rho_p}{\rho_n}} \quad (1)$$

ここに、 P_v は節杭の周面抵抗、 n は上と下の節部にはさまれた本体部の数(本実験では $n=3$)、 K は側圧係数、 Z_i は i 番めの本体部の中心深さであり、 $\rho_s, \rho_n, D_s, D_n, \alpha$ および ρ_p は図7に示す杭体各部の寸法である。また、 ϕ_{sg} と C_{sg} は地盤(砂)と充填材(礫)との間の、 δ_{cs} と C_{cs} は杭体(コンクリート)と地盤(砂)との間のそれぞれ摩擦角と粘着力を示し、 δ_{cg} は杭体(コンクリート)と充填材(礫)との間の摩擦角を示している。

(2) 砂・礫・コンクリート相互間のせん断・摩擦試験 地盤と充填材および杭体相互間の摩擦角と粘着力を求めるために、大型一面せん断試験機³⁾ (長さ300mm、幅200mm、試料厚さ120mm)を用いてせん断・摩擦試験を行った。地盤と充填材は本実験と同じ砂と礫を、杭材としてはコンクリートの代わりにモルタル($w/c=85\%$ 、 $s/c=2$)を用いたが、この表面は杭材と同じ表面粗さ ($R_{max}(L=0.8mm)=17.2\mu m$) になるようにサンドペーパーで削った。試験は、砂のせん断試験、礫のせん断試験、砂と礫とのせん断試験、砂とモルタルとの摩擦試験および礫とモルタルとの摩擦試験の5種類とした。砂や礫はせん断箱内に適当な厚さとなるように入れた後、 15×20 cmもしくは

10×10cmの板を介して、重さ1.25kgfのランマーを落下して詰めた。落下高さと同回数および一層の厚さは密度に応じて調節した。砂のDrは地盤の平均密度62.3%に近い65%としたが、砂のせん断試験ではこの他にDr=67、82、97%の場合についても行った。礫のDrは試験杭での充填状況を考慮してほぼ100% ($\gamma = 1.57 \text{ kgf/cm}^3$)となるようにした。砂の含水比は地盤と同じ6.5%となるように調整し、礫はランマー落下時の分級を防ぐため詰める直前まで水に浸しておいた。垂直圧 σ_n は0.5、0.7、1.0、1.5kgf/cm²の4通りとし、加圧後15分間圧密した。加力ジャッキとせん断箱の間に板をはさみ、これが押しつぶされる過程を利用して、最大荷重までは荷重速度がほぼ一定に、それ以後は変位速度が一定(1mm/分)になるようにせん断力を加えた。以下、これらの試験で得られたせん断強度について述べる。

(i) 砂のせん断強度

τ_{ss} 図8にDr=82%の場合、図9に $\sigma_n = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合の τ_{ss} と変位量の関係を示す。図中のDrは、試料作製時の体積と重量から求めたものである。また

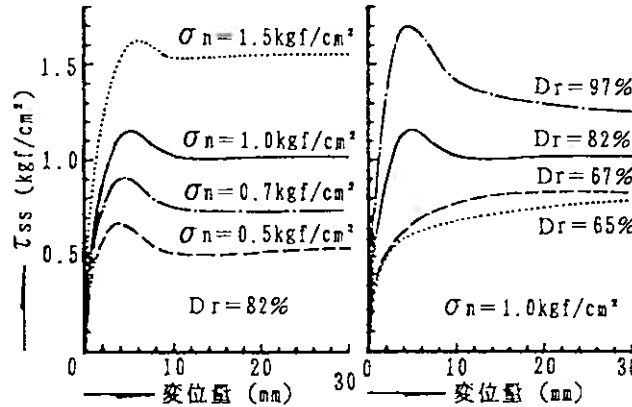


図8. τ_{ss} ~変位量関係 図9. τ_{ss} ~変位量関係

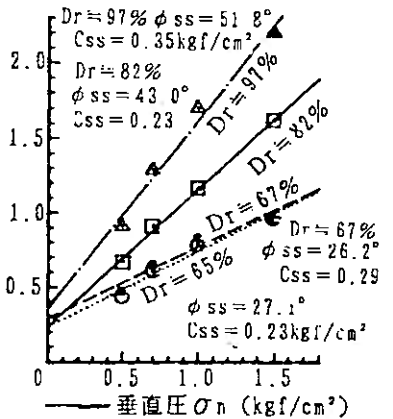


図10. τ_{ss} ~ σ_n 関係

図10は τ_{ss} のピーク値と σ_n の関係である。Dr=65%および67%の場合は τ_{ss} にピークが生じていないため、変位量が30mmのときの値を採用している。図中の直線は最小自乗法による回帰直線であるが、この傾きから求めた砂の内部摩擦角 ϕ_{ss} の値には密度の影響が大きく表れていること、これに対して τ_{ss} 切片から求められる粘着力 C_{ss} の方はあまり密度には影響されていないなどが分かる。

(ii) 砂と礫との間のせん断強度 τ_{sg}

τ_{sg} を求めるにあたっては試料の作製を、(a)下箱に砂を詰めてから礫を上箱に入れる場合と、(b)下箱に礫を詰めてから上箱に砂を入れる場合の2通りの方法で行った。いずれも下箱に入れた試料を平らに均してから、上箱の試料を詰めている。また、試料作製時のランマーの落下による体積変化や σ_n を作用させた時の圧密のため、砂と礫との境界面を上箱と下箱との境目に合わせるのには難しいので、上下の箱の隙間を6mmとし、境界面が隙間内にあるのを確認してからせん断力を加えた。図11(a)、(b)は試験終了後の状態を描いたものである。また、図12は $\sigma_n = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ での τ_{sg} と変位量の関係であり、図13は τ_{sg} のピーク値と σ_n の関係である。図12と図13には τ_{ss}

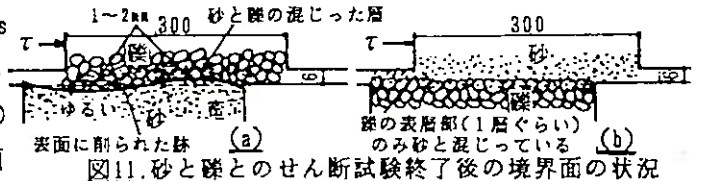


図11. 砂と礫とのせん断試験終了後の境界面の状況

(Dr=65%) および礫のせん断強度 τ_{gg} も併記している。これらの図から以下のことが分かる。①せん断強度は $\tau_{gg} > \tau_{sg}(a) > \tau_{sg}(b) > \tau_{ss}$ の順に大きい。② $\tau_{sg}(a)$ は τ_{gg} と τ_{ss} との中間になっている。砂層の表面は図11(a)のように礫に削られて、両者が混った層が形成されている。これは節杭の貫入時における杭周の状況とよく似ている。③ $\tau_{sg}(b)$ は変位量が小さい間は $\tau_{sg}(a)$ とほぼ等しいが、大きくなると τ_{ss} に近くなる。これは図11(b)のように最終的には砂層内でせん断が生じたためと考えられる。以上より τ_{sg} は τ_{gg} よりは小さく、同じ密度の τ_{ss} よりは大きいものと考えられる。

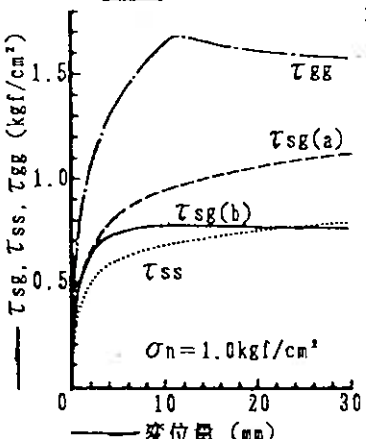


図12. τ_{sg} ~変位量関係

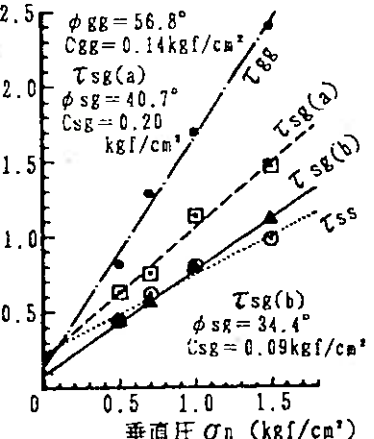


図13. τ_{sg} ~ σ_n 関係

(iii) 砂および礫とコンクリートとの間の摩擦

強度 τ_{cs} , τ_{cg} 一面せん断試験機を用いた砂とコンクリート(モルタル)との間の摩擦試験は、Potyondy⁴⁾を始めとして多くの研究者が行なっている。図14に本試験で得られた τ_{cs} および τ_{cg} と変位量の関係を、図15にピーク値と σ_n との関係を示す。これらの図には τ_{ss} ($D_r=65\%$) や τ_{gg} も併記しており、 τ_{cs} は τ_{ss} の $1/2 \sim 2/3$ 、 τ_{cg} は τ_{gg} の $1/3 \sim 1/2$ の値となることが分かる。前者は粘着力の、後者は摩擦角の差が大きくなっている。

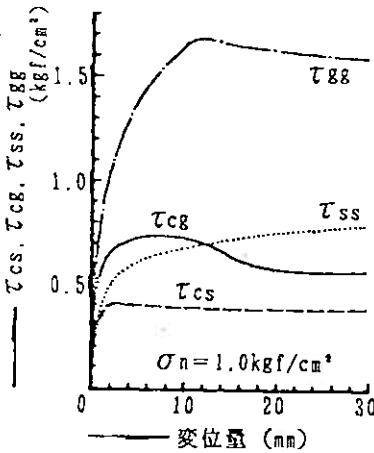


図14. τ_{cs} , $\tau_{cg} \sim$ 変位量関係

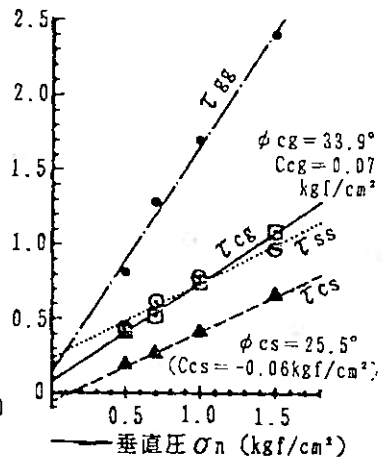


図15. τ_{cs} , $\tau_{cg} \sim \sigma_n$ 関係

(3) 本実験での節杭の周面抵抗の検討

以上のせん断・摩擦試験で得られた摩擦角や粘着力の値を用いて節杭の周面抵抗を検討するが、 τ_{sg} は τ_{ss} よりも大きいこと、また杭周では礫のすぐ外側には砂層があって、実際の地盤ではせん断試験と異なりせん断面が両者の境界に規制されにくいことなどから、杭周のせん断面は礫にごく近い砂層内で生じていると考える方が自然であろう。このことから(1)式中の ϕ_{sg} と C_{sg} は ϕ_{ss} と C_{ss} にそれぞれ置き換えることにする。次に、円筒杭の摩擦抵抗 P_f と砂とコンクリートとの摩擦試験の結果を用いて K の値を逆算すると、 $\phi 300$ 杭では $K=1.66$ 、 $\phi 450$ 杭では $K=2.05$ となるので、ここでは両者を平均して $K=1.86$ を採用する。これらの値を用いると、節部径と等しい外径の円筒杭の摩擦抵抗 P_s は $P_s=11.2tf$ と算定される。また節部下面の作用を考えた周面抵抗 P_v を、(1)式によって求めると $P_v=29.0tf$ となる。すなわち P_v は P_s の約2.6倍となるが、これは模型実験での値約2.5倍とほぼ同じになる。続いて杭周の砂層の密度について考える。杭を貫入していくと一般に地盤は締め固められ、杭周の地盤の密度が局部的に増大する。砂のせん断強度には密度が大きく影響するため、杭周の砂層内にせん断面が生じる節杭の場合では、杭周地盤の局部的な密度の変化の影響が大きいものと思われる。しかし、その局部的に変化した地盤の密度を測定することは難しく、本実験においてもその値は得られていないので、次のような推測を試みる。杭がゆるい砂地盤に貫入する時の地盤が締め固まる範囲は杭径 D の6~8倍であると、Meyerhofが提案している。⁵⁾ そこで杭周の $7D$ の範囲の地盤が締め固まるものとし、文献⁶⁾などを参考にしてこの範囲の地盤の密度を図16の実線のような分布と考える。これを破線のように $3.5D$ 間の地盤が杭の貫入によって一様に密度が増大するものとする、平均相対密度 $\bar{D}_r=62.3\%$ に対して杭周での D_r は約81%になると算定される。そこで $D_r=82\%$ の時の砂のせん断試験の結果を(1)式に代入すると $P_v=61.9tf$ となり、実験における節杭の周面抵抗 $60tf$ に近似した値が得られる。したがって、本実験で得られた節杭の周面抵抗の値は、杭周地盤の密度の変化による影響も考えると説明できることが分かる。今後、杭貫入時の杭周地盤の密度の変化についてさらに検討していく予定である。

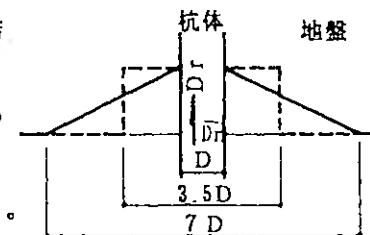


図16. 杭体周辺の密度分布

5. 結語

本報告では、実大杭の押し込み実験で得られた節杭の周面抵抗を、模型実験による実験式や砂・礫およびコンクリート相互間のせん断・摩擦試験の結果などを用いて検討した。その結果、節杭の周面抵抗には模型実験で見られた節部下面の作用の他に、杭の貫入に伴う杭周地盤の密度の変化も大きく影響することが分かった。なお、本報告中のせん断・摩擦試験は大阪市立大学工学部土質研究室のせん断試験機を借用して行ったものであり、同研究室の三笠正人教授、高田直俊助教授、大島昭彦氏および土質力学調査工事の岡島洋一氏に厚く感謝致します。

参考文献

- 1) 小椋、山府、大杉、上野屋「実大の節杭と円筒杭との押し込み比較実験結果」第21回土質工学研究発表会、pp.1255~1258、昭和61年6月
- 2) 小椋、山府、岸田「模型実験による節付円筒杭の支持力特性の検討」日本建築学会構造系論文報告集、第374号、昭和62年4月
- 3) 高田、柚木「粗粒材を用いた単純、一面せん断の比較試験」土と基礎、Vol.32、No.5、pp.17~22、昭和59年5月
- 4) Potyondy, J.G. "Skin friction between various solids and construction materials" Géotechnique, Vol.11, No.4, pp.339~353, 1961.
- 5) Meyerhof, C.G. "COMPACTION OF SANDS AND BEARING CAPACITY OF PILE" ASCE, SM.6, pp.1~29, 1959.
- 6) BCP委員会「砂層に支持されるくい」の支持力に関する実験的研究 pp.97~100、1969年7月