

378

模型実験による節付き円筒杭の周面抵抗特性の検討

武智工務所(東京工業大学受託研究員) ○小椋仁志
関西大学 山肩邦男 武智工務所 金井重夫
東京工業大学 岸田英明

1. 序 節付き円筒コンクリート杭(以下「節杭」と呼ぶ)の支持力機構、特にその周面抵抗の特性を調べるため、筆者らは上載圧と側圧を独立に加えることのできる大型の実験槽と実径の節杭を用いて、種々の応力状態における節杭の周面抵抗に関する実験を行ってきた¹⁾。この結果、節杭の周面抵抗は、節の下面を杭先端と仮定した抵抗と、節のない通常の円筒杭の摩擦抵抗との中間的なものとして位置づけられることが分かった。このことを更に詳しく解明するため、今回、小型の実験槽内に模型の節杭を設置し、杭の沈下に伴う杭周辺地盤の動きとX線撮影装置を用いて追跡した。本報告はこの実験結果に関するものである。

2. 実験概要 (1)実験槽 本実験に用いた実験槽は文献²⁾などに述べられているものである。図1に示すように、直径33cm高さ54cmの円柱形模型地盤を造成することができる。この地盤に加える上載圧 σ_1 と側圧 σ_3 は、コンプレッサーからの空気圧を水量計を通して水圧に変換し、ゴム膜を介して供給される。(2)X線撮影装置 X線発生器は東芝EX-250-5A形を電源電圧200V、管電圧245kVpで使用し、X線吸収体には直径2.5mmの鉛玉を用いた。照射範囲を広くする必要から発生器とフィルムの間の距離を90cm(標準60cm)としたため、照射時間は25分間となった。フィルムはフジ工業用X線フィルムASA150とし、四ツ切大のものを2枚並べて撮影した。(3)模型杭 前報の実験で使用した実径の節杭の1/5の寸法(本体部外径60mm、節部外径88mm)とし、表面の最大粗さ R_{max} が4~10 μ mの鋼管(STKM13A)を使用している。杭の肉厚は3mmであり、内面にはひずみ計を32枚(4枚×8断面)貼り付けている。この模型杭は、地盤を造成する前に実験槽内に設置しておくが、この時実験槽の底面より7cm浮かせた状態でサポートしてある。(実験開始前にこのサポートは取り除く)実験槽の底面には、杭先端の下方に砂が入り込まないようにカバーを取り付けてある。これにより杭は沈下しても先端抵抗は生じない。(4)実験地盤 本実験に用いた砂は鹿島砂5号であり、その諸元は以下の通りである。

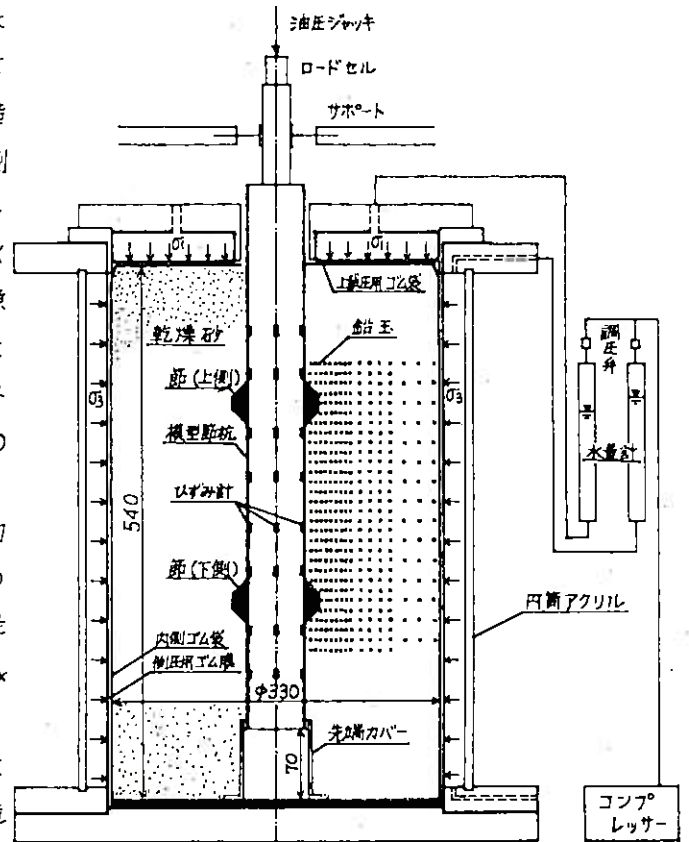


図1

槽の底面より7cm浮かせた状態でサポートしてある。(実験開始前にこのサポートは取り除く)実験槽の底面には、杭先端の下方に砂が入り込まないようにカバーを取り付けてある。これにより杭は沈下しても先端抵抗は生じない。(4)実験地盤 本実験に用いた砂は鹿島砂5号であり、その諸元は以下の通りである。

- 最大粒径: $D_{max} = 2.0 \text{ mm}$
- 有効径: $D_{10} = 0.16 \text{ mm}$
- 均等係数: $U_c = 2.8$
- 土粒子の比重: $G_s = 2.64$
- 最大密度: $\rho_{max} = 1.744 \text{ g/cm}^3$
- 最小密度: $\rho_{min} = 1.441 \text{ g/cm}^3$
- 内部摩擦角: $\phi = 50.6^\circ$ (一面せん断試験(改良型)による。垂直圧 $\sigma_N = 0.64 \sim 3.84 \text{ kgf/cm}^2$ 試料の相対密度 $D_r = 81.6\%$)

この砂を節の直下にも直接落下させることができるように工夫した特殊な砂まき装置を用いて地盤を造成した。砂を厚さ10mmまくごとに杭の中心軸を通る水平線上に鉛玉を設置した。設置位置は図1中に描いている。また、地盤の初期相対密度は表1中に示している。(5)荷重方法 地盤に所定の上載圧と側圧を与えた状態で2時間放

Study of Frictional Resistance of Nodular Cylinder Pile by Model Test

Hitoshi Ogura (Takechi Engineering Co., Ltd., Research Affiliate of Tokyo Institute of Technology), Kunio Yamagata (Kansai Univ.), Shigeo Kanai (Takechi Engineering Co., Ltd.), Hideaki Kishida (Tokyo Institute of Technology)

直して地盤が安足するのを確かめたあと、油圧ジャッキによって載荷する。載荷方式は沈下制御方式とし、毎分1mm以下の速度で沈下量が60mmになるまで載荷した。途中でX線撮影は10回行なったが、撮影時には載荷を中断した。杭頭荷重、杭頭沈下量、杭体ひずみおよび地盤の体積変化量などの測定は1分ごとに行なったが、この間の載荷は続いていた。一回の測定に要する時間は3秒程度であるので、載荷を続いていたことの測定結果に及ぼす影響は無視できよう。(6)実験種類 上載圧 σ_1 はGL-4, 8, 12 mを想定して、それぞれ0.64, 1.28, 1.92 kgf/cm² ($\gamma=1.68 \text{ kg/cm}^3$)とし、側圧係数Kは0.5, 1.0, 3.0の3通りとした。これらを組み合わせて表1に示すごとく6種類の実験を行なった。

上載圧 σ_1 kg/cm ²	側圧係数 K	側圧 σ_3 kg/cm ²	杭の重量 Ws kgf	初期状態			実験結果			
				砂の体積 Vs (cc)	砂の密度 ρ (g/cm ³)	相対湿度 Dr %	P_n tf	P_n/A_r kg/cm ²	P_n/A_p kg/cm ²	10分時の 沈下量 mm
0.64	1.0	0.64	75.47	44.58	1.693	85.7	0.74	15.5	22.7	13.9
0.64	3.0	1.92	75.53	44.58	1.694	86.0	2.01	42.2	61.6	16.9
1.28	0.5	0.64	75.52	44.58	1.694	86.0	0.67	14.1	20.6	14.3
1.28	1.0	1.28	75.39	44.58	1.691	85.1	1.32	27.7	40.6	13.5
1.28	3.0	3.84	75.36	44.58	1.690	84.8	3.75	78.8	115.2	18.6
1.92	1.0	1.92	75.22	44.56	1.687	83.9	2.03	42.6	62.4	16.1

3. 実験結果 実験で得られた杭頭荷重 P_0 ~ 杭頭沈下量 S_0 関係と軸力分布の各一例を、それぞれ図2と図3に示す。 P_0 ~ S_0 関係では、 S_0 の小さいうちは P_0 は急激に増大するが、 S_0 が約10 mm を超えるとほぼ一定になっている。軸力分布より、杭の本体部と地盤との間の摩擦力は沈下が少し進むと作用しなくなり、杭頭の荷重は2つの節による抵抗の和となっていることが分かる。ところが下側の節による抵抗は杭の沈下に伴ない節の下方の地盤が実験槽底面との間で圧縮されることによって生じる抵抗であり、周

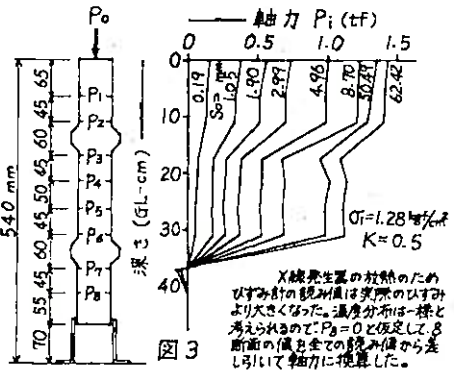
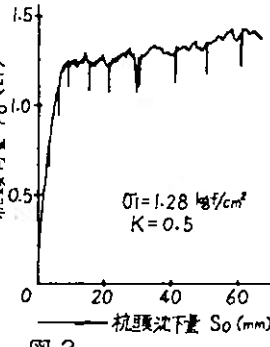


図2

図3

面抵抗を考える上ではあまり意味をなさない。このため本実験の結果を考える場合、上側の節による抵抗値のみを考える方が全体の杭頭荷重 P_0 を考えるよりも適切であろう。そこで上側の節の抵抗値として、その上下の断面(2断面と3断面)における軸力差(P_2-P_3)を採用し、これと S_0 の関係を描いたのが図4である。また図5には水量計によって測定された杭の沈下に伴う地盤の体積変化量 ΔV と S_0 の関係を示している。これらの図から次のことが分かる。①(P_2-P_3) ~ S_0 関係図において、 $S_0 = 15 \text{ mm}$ 付近まで (P_2-P_3) の値は増加するが、これを過ぎると急激に減少し、 S_0 が 25 mm を超えると漸減するようになる。②(P_2-P_3) のピーク値を P_n とし、これらを節の下面の実表面積 A_r と水平投影面積 A_p で除した値を、表1中に示している。 P_n/A_p の値は 20~115 kgf/cm² であり、同じ実験槽で行なわれた埋込み杭の先端抵抗に関する多くの実験結果(150~250 kgf/cm²)³⁾ よりもかなり小さい。③砂の体積は杭の沈下に伴い最初は減少するが、 $S_0 = 5 \text{ mm}$ 付近からは増加に転じている。 σ_1 や σ_3 が小さいほど体積増加量は大きくなる傾向がある。④(P_2-P_3) ~ S_0 関係曲線の形状や体積変化の傾向は、砂の一面せん断試験における傾向とよく似ている。

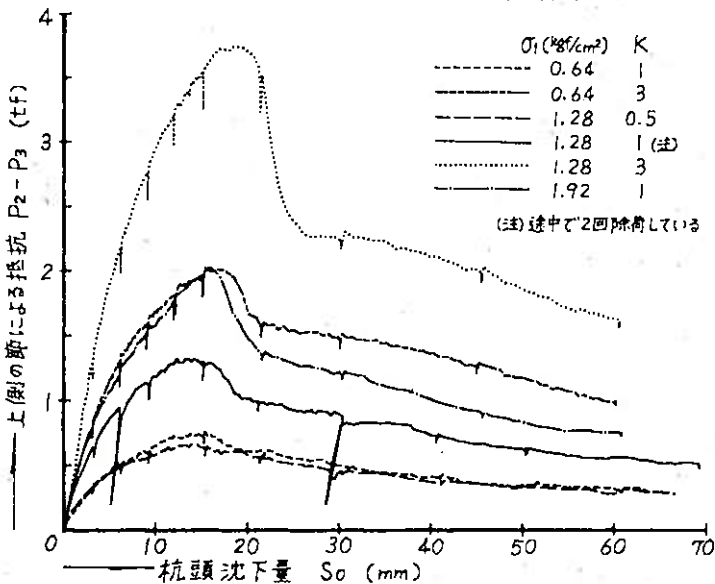


図4

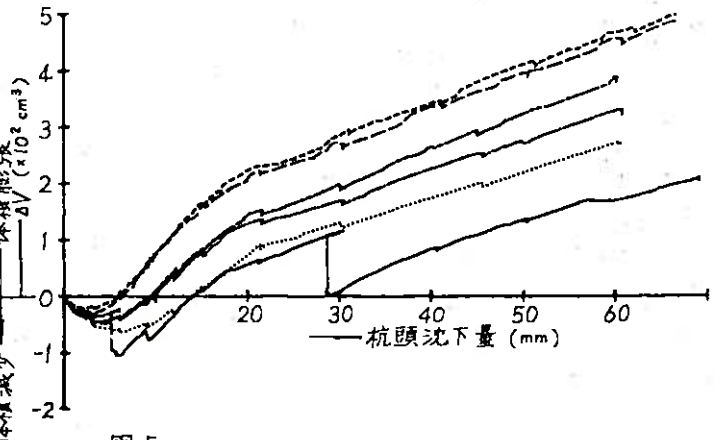


図5

4. 杭周地盤の動き X線撮影によって得られた杭周地盤の動きを鉛玉の変位ベクトルとして図6(a)~(c)に示す。いずれも $\sigma_1 = 1.28 \text{ kg/cm}^2$, $K = 0.5$ の実験のものである。(a)は杭頭沈下量 S_0 が0から6mmまでの図である。全体に地盤の動きは小さいが、節の上下のところでは上面では鉛直方向に、下面では斜め方向に押し出されるように沈下量とはほぼ等しい距離を動いている。節の下面の土の動きは杭先端部の地盤の動きを追跡した結果⁴⁾と同じ傾向と言える。地盤の動きが局部的なのは節の下面の土が締め固まる過程のためであろう。(b)は S_0 が6mmから($P_2 - P_3$)の値がピークに達する15mmまでのものである。節の上下での土の動きは(a)と同様であるが、土の動く範囲が杭から離れた所まで広がっていることが分かる。(c)は S_0 が15から30mmまでの図である。(aXb)と全く傾向が異なり、杭周の土が杭

の沈下に伴い下方に動いているのに対し、上の節と下の節の周面を結ぶ線を境界として外側の土はほとんど動いていないことが分かる。すなわち節の径を持つ円筒面がすべり面となっているわけである。この状態での節杭の周面抵抗は、すべり面の内側と外側の地盤の間のせん断抵抗に

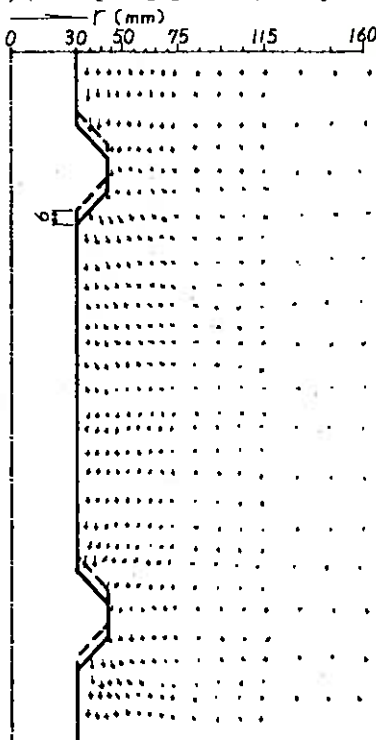


図6 (a) $S_0 = 0 \rightarrow 6 \text{ mm}$

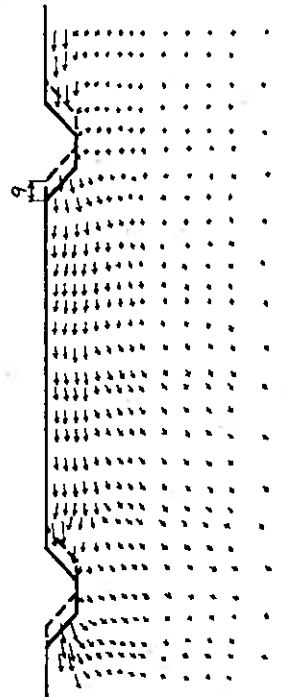


図6 (b) $S_0 = 6 \rightarrow 15 \text{ mm}$

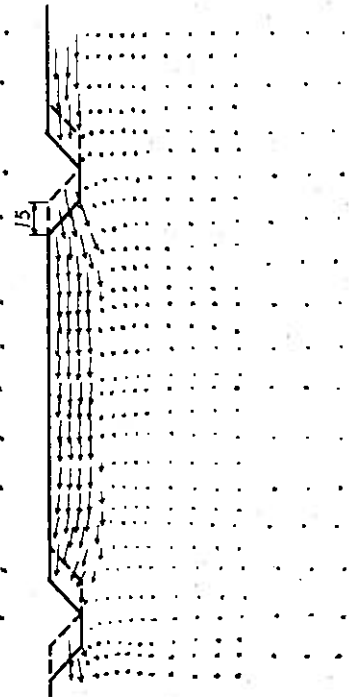


図6 (c) $S_0 = 15 \rightarrow 30 \text{ mm}$

なると考えられる。図は省略するが、 S_0 が30mmより大きい場合の土の動きは、この傾向が更に顕著になる。図7(a)~(c)には図6(a)~(c)の状態に対応した最大せん断ひずみ γ_{max} の分布を示す。これは鉛玉の位置を節点とする三角形要素に地盤を分割し、測定された鉛玉の変位からFEMの変位-ひずみマトリックスを用いて求めたものである。モデルは軸対称問題とし、ステップごとの変位量からひずみ増分を求め、これを累計したひずみから最大ひずみ ϵ_{max} 、最小ひずみ ϵ_{min} 、最大せん断ひずみ γ_{max} を計算している。また節点には鉛玉の位置の他に杭体周面の適当な位置も加えている。図から①沈下が小さい間は本体部と地盤との間でせん断(摩擦)が生じていること、②沈下が進むと節の周辺から γ_{max} が大きくなり始めるが、 $\gamma_{max} \geq 1$ に至る前に節部の径の円筒面で γ_{max} が1より大きくなっていることなどが分かる。

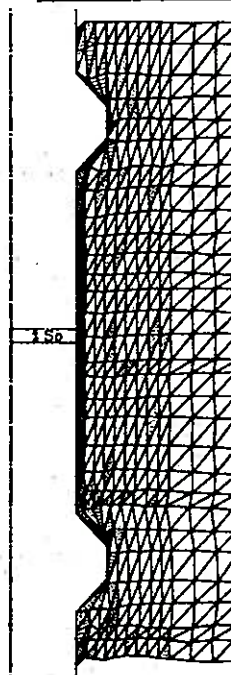
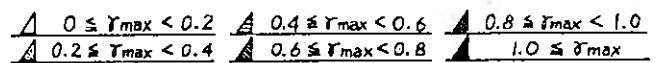


図7 (a) $S_0 = 6 \text{ mm}$

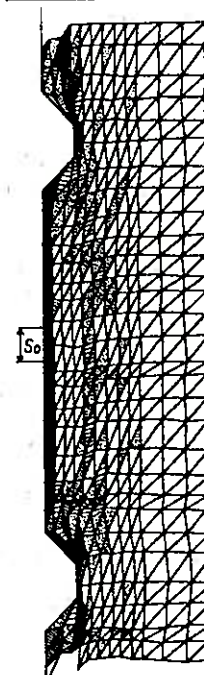


図7 (b) $S_0 = 15 \text{ mm}$

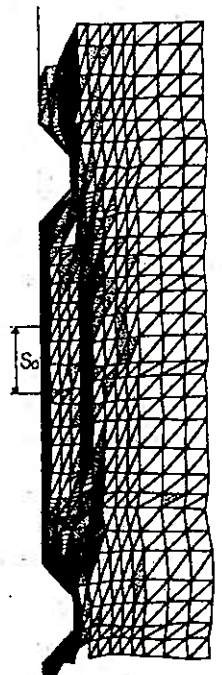


図7 (c) $S_0 = 30 \text{ mm}$

5. 節による抵抗値の検討

図8は上側の節による抵抗(P_2-P_3)のピーク値 P_n と側圧 σ_3 の関係を描いたものである。この図から P_n は σ_3 にほぼ比例していることが分かる。これは図6(c)からも分かるように、 P_n が節の径に等しい円筒面ですべりが発生し始めた時の抵抗値であり、 σ_3 はすべり面に対して垂直圧として作用しているためである。

これを一般的に考えるため、与えられた側圧によってすべり面に作用する垂直圧を σ_h と表わすこととし、壁面摩擦角を δ 、抗体各部の寸法を図9のごとくとすると、A~A'間のすべり面でのせん断抵抗は次のようになる。

$$P_s = \sigma_h \times \left\{ \tan \phi \times \left(l_s + \frac{2}{3} l_n \right) + \tan \delta \times \frac{1}{3} l_n \right\} D_n \pi \quad (1)$$

いま、仮に $\sigma_h = \sigma_3$ 、 $\delta = \frac{2}{3} \phi$ と考え、(1)式に本実験における値を代入して P_s を求める。この P_s と実験で得られた P_n との相関図を図10に示す。 P_s は P_n の60%程度の値になっており、実験で得られた節による抵抗はすべり面でのせん断抵抗よりも、かなり大きな値を示していることが分かる。

節の下面の地盤は、図6より斜め方向に押し出されるように動いているため、すべり面に作用する垂直圧は図11のように節の下面の側方では側圧よりも大きな垂直圧になると推測される。この垂直圧の分布を図12のように単純化し、側圧による垂直圧 σ_h と付加される垂直圧 σ'_h の2つに分けて考えると、(1)式の他に次の2つの式が成り立つ。

$$\sigma'_h \text{によるせん断抵抗 } P_h = \sigma'_h \times \tan \phi \times \frac{1}{3} l_n \times D_n \pi \quad (2)$$

$$A \sim A' \text{のせん断抵抗 } R_v = P_s + P_h \quad (3)$$

また節の下面に作用する垂直分力 p_v と水平分力 p_h を、図13のように円周上に分布する線荷重と考えると、 p_v と p_h は鉛直方向の力の釣り合いから

$$p_v = \frac{P_v}{\frac{1}{2}(D_n + D_s)\pi} \quad (4)$$

$$p_h \text{は} \sigma'_h \text{の反力となるから } p_h = \sigma'_h \times \frac{1}{3} l_n \quad (5)$$

となる。 δ と節の傾き α を用いると、 p_v と p_h の関係として

$$p_h = p_v \times \tan(\alpha - \delta) \quad (6)$$

が成立する。以上の(1)~(6)式から、次式が得られる。

$$P_v = \sigma_h \times \frac{\left\{ \tan \phi \times \left(l_s + \frac{2}{3} l_n \right) + \tan \delta \times \frac{1}{3} l_n \right\} D_n \pi}{1 - \tan \phi \tan(\alpha - \delta) \times \frac{2 D_n}{D_s + D_n}} \quad (7)$$

$\sigma_h = \sigma_3$ 、 $\delta = \frac{2}{3} \phi$ とし、(7)式に本実験における値を代入してA~A'間のせん断抵抗 P_v を求める。この P_v と実験で得られた P_n との相関図を描くと図14のごとくとなる。両者はほぼ一致していることから、今回の実験で得られた節による抵抗値は、(7)式で近似できるとみてよさそう。

6. 結語

以上本報では、節杭の周面抵抗特性を模型実験によって検討した結果、①沈下量が15mmくらいまでは節の下面は杭先端に似た作用をすること、②沈下量が大きくなると節の下面の土が破壊に至らないうちに節の径に等しい円筒面ですべりが発生すること、③節の下面の抵抗値は、側圧によるすべり面での地盤のせん断抵抗の他に節の作用で付加される垂直圧によるせん断抵抗も加わったものであること、等について報告した。

謝辞 本実験において、実験槽の使い方やX線の取り扱い方について親切なご指導を頂いた東京工業大学の上杉守道助手を始め岸田研究室のご一同に、厚く感謝の意を表します。また一面せん断試験にご協力頂いた関西大学大学院の金啓吉氏を始め、元関西大学学生の小野木基夫・永田邦博の両氏にも深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 山崎・小林・金井「節付き円筒杭の周面抵抗に関する一実験結果(円筒杭の摩擦抵抗との対比)」第17回土質工学研究発表会 昭和57年6月
- 2) 高野・大西・岸田「X線による杭先端部地盤の変形観察」第11回土質工学研究発表会 昭和51年6月
- 3) 高野「砂地盤に設置されたNONDISPLACEMENT PILEの先端支持力」学位論文 昭和56年3月
- 4) 高野・岸田・杉野「砂地盤中の埋込み杭周辺部地盤の変形」第13回土質工学研究発表会 昭和53年6月

