

杭の支持力特性に関する土槽実験と有限要素法(FEM)解析比較

Comparison of bearing characteristics of nodular pile tests of tank model and their FEM analysis

八尾真太郎,* 伊藤淳志,** 榎井健,*** 岩崎好規,**** 長屋淳一*****

Shintaro YAO,* Atsushi ITO,** Takeshi MASUI,*** Yoshinori IWASAKI,**** and Junichi NAGAYA*****

本文は、筆者らが実施してきた節杭の支持力機構に関する研究のうち、土槽による節杭載荷実験とFEM(有限要素法)解析による実験のシミュレーション結果の比較である。剛塑性を仮定する極限支持力による節杭の支持力の算定に加えて、弾塑性構成則に基づくFEM解析によっても、節杭の支持力は節縁底部の地盤の支圧抵抗によるもので、節間隔の減少は杭周辺摩擦力により、十分な支圧抵抗の成長が見られないことによることが判明した。

キーワード：杭，節杭，土槽実験，支持力，有限要素法解析

Pile, nodular pile, tank test, bearing capacity, F.E.M. analysis

1. はじめに

最近の杭の大型化が進展し、直径が2mを超えるものも珍しくなく。この程度の杭となると埋込み杭であるが、もし、この大型杭の節杭化が達成されれば、排土量や鉄筋・コンクリート量を大幅に削減することによって、環境負荷の減少に貢献できると期待できる。節杭の支持力機構の理解を目指して、川砂を入れた土槽による室内節杭実験を実施し、沈下、杭頭荷重、および軸力分布を計測した。本論文は、実験結果に対して、3軸試験の結果得られた応力-ひずみ関係を基礎にFEM解析を実施して節杭の支持力機構を議論したものである。節杭の支持力は、節部底面の支圧抵抗であること、節間隔が増大すると摩擦抵抗に移行すること確認された。

2. 節杭の研究の歴史的レビュー

節杭の支持力機構に関する実験および理論的研究は、これまで数多く報告されているが^{1~10)}、そのほとんどは工場生産の既製杭を打込みまたは埋込みによって設置するものを対象としている。

石堂^{2,3)}の研究は節杭の支持力機構に関する最初の理論的研究であり、節部の極限支持力を2次元の剛塑性論に基づく理論によって考察している。また、小椋ら^{5,6)}、藪内ら^{7~9)}は各種の実験によって節杭周面抵抗のメカニズムを検討しており、沈下の初期においては節部底面の地盤が圧縮されるが、沈下の進行に伴って周辺地盤がせん断されることを確認している。

筆者らは、節付き場所打ちコンクリート杭の開発を目的として、まず石堂^{2,3)}が平面問題として導いた節部底

面の極限支持力式を参考に、軸対称モデルによる極限支持力算定式の誘導を行った¹⁰⁾。また、一連の模型節付き杭の鉛直載荷実験を実施し、高密度(相対密度約87%)の乾燥砂地盤での実験結果を文献¹¹⁾に、比較的低密度(相対密度約35%)の湿潤砂地盤での結果を文献^{12,13)}において報告している。その結果は、同じ埋入れ長さの場合、節の数が少ない(節の間隔が大きい)ほど極限支持力が大きくなっていった。これは、上述の既往の研究と同様に、節間隔がある程度大きい場合は節部底面の支圧抵抗が十分に発揮されるのに対して、節間隔が小さくなると節の外径に沿う円筒状に地盤がせん断されるため支持力が小さくなるものと結論された。

3. 模型実験

模型実験の概要を文献¹⁰⁾から引用して紹介しておく。詳細については同文献を参照されたい。

実験地盤は、内径φ1000mm、高さ1000mmの鋼製円筒土槽内に、模型杭を吊した状態でドーナツ型の多重ふり付きサンドレイナーによって作製した。使用した砂は、粒径75μm~1.2mmに調整した気乾状態の淀川砂で、地盤の相対密度は土槽中心付近で約87%、周辺部ではほぼ100%となっている。

実験を行った5種類の模型杭の姿を図1に示した。節付き杭は、軸部が外径φ40mm、肉厚3mm、長さ800mmのアルミニウム製パイプ(先端閉塞)で、外径φ60mm、高さ20mmのアルミニウム製節部リングを取り付けてある。ストレート杭は、軸部のみのφ40ストレート杭および節部径と同じφ60ストレート杭である。軸部パイプの内面

* 関西大学工学部建築学科 教授

** 同上 助教授

*** 同上 専任講師

**** 財)地域地盤環境研究所 常務理事

***** 同上 地盤解析グループリーダー

* Prof., Dep. of Architecture, Fac. of Eng., Kansai University

** Associate Prof., Ditto

*** Lecture, Ditto

**** Director, Geo-Research Institute

***** Leader, Geo-Analysis group, Geo-Research Institute

には、図1に示す位置に軸方向力測定のためのひずみゲージを1断面当たり2枚ずつ貼り付けてある。

載荷実験は荷重制御による急速1サイクル方式とした。荷重階は等増分荷重で、8段階以上となるように想定し、スクリージャッキにより、杭頭沈下量が40mm以上となるまで載荷した。各荷重階での荷重保持時間は5分である。なお、載荷荷重はスクリージャッキと杭の間に設置した容量20kNのロードセルで確認し、杭頭荷重とした。

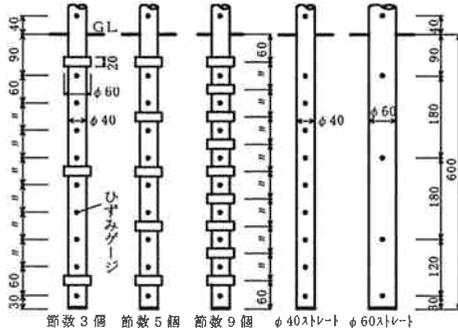


図-1 杭姿図(単位:m)

4. 実験結果

載荷実験における杭頭荷重 P_0 —杭頭沈下量 S_0 関係を図2に示した。 $S_0=40\text{mm}$ において節付き杭は $\phi 40$ ストレート杭の3~4倍、 $\phi 60$ ストレート杭の1.5~2倍の支持力となっている。また、節付き杭は $P_0=6\text{kN}$ あたりまでは節数にかかわらずほぼ同等の支持力となっているが、その後節数9個、5個の順で曲線が垂れ下がり、 $S_0=25\sim 40\text{mm}$ の範囲においては節数が少ない(節間隔が大きい)ほど支持力が大きくなっている。

軸方向力 R 分布の例として、節数3個の節付き杭の場合を図3に示した。ただし、GL-21cm深度では、測定不良となったため、除外した。ここでの R の値は、載荷荷重と最上段(地表より40mm上方)のひずみゲージの測定値との関係で最小自乗近似して関係直線を求め、地中部のゲージについてもこの関係を適用して算出した。同図において、節のある区間での R の差が大きく現れており、節部での支持力が発揮されていることが分かる。なお、後述するように、ストレート杭は比較的初期の荷重階で周面摩擦がモービライズされている。

また文献¹⁾に示したが、節付き杭の最下段のひずみゲージによる先端抵抗 R_p と S_0 の関係は、節数にかかわらず同等であった。一方、 P_0 より R_p を差し引いた周面抵抗 R_n は図2と同様の大小関係を示していたことから、図2における P_0 — S_0 曲線の傾向は、周面抵抗の違いによることが分かった。

そこで、各節の上下のひずみゲージによる軸方向力の差を節部抵抗 R_n として求め、一例として中央深さ(GL-30cm)の節の R_n と S_0 の関係を図4に示した。同図において、節数5個および9個の場合に S_0 が10mm付近で R_n がピークに達し、以後多少減少する傾向が見られ

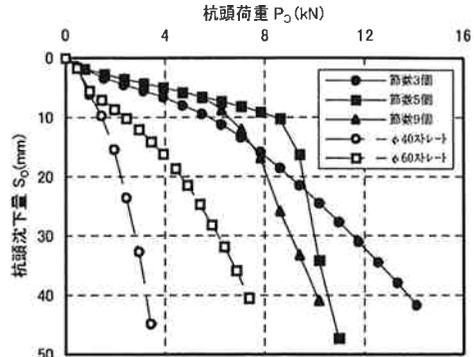


図-2 杭頭荷重 P_0 —杭頭沈下量 s_0 の関係

る。また、節数9個のピーク値は節数5個のほぼ半分となっている。これらに対して、節数3個の R_n は最大荷重まで増大している。これは、文献¹⁾で述べたように節間隔がある程度大きい場合には、節部底面の支圧抵抗が発揮されるのに対して、節間隔が小さくなると、節の外径に沿う摩擦力が発揮されるためと考えられる。

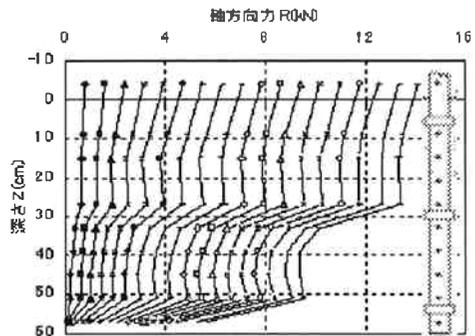


図-3 軸方向力 R 分布(節数3個)

以上のように節杭の特徴は、軸力の節深度における変化から議論することができると考えられる。単杭、節3つ、節9つの場合の軸力の変化については、図-8に示し、FEMシミュレーションと共に後述する。

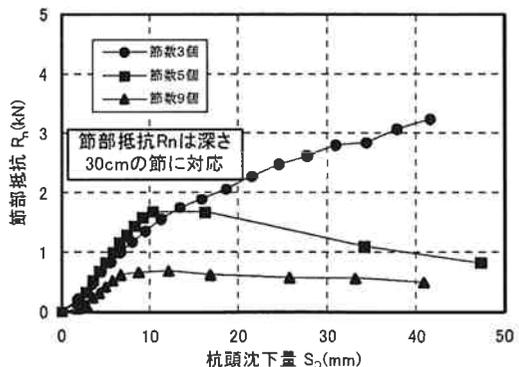


図-4 節部抵抗 R_n —杭頭沈下量 s_0 関係

図-4に見られるように、節数3つの場合が、節としての高い効率を有していることが分かる。

5. モデル地盤特性

すでに、実験に使用した地盤については述べたが、これらの室内試験に使用した淀川砂の物理特性を表-1に示した。

表-1 淀川砂の物理特性

土粒子密度	2.66g/cm ³
平均粒径	0.58 mm
均等係数	1.91
最大密度	1.63 g/cm ³
最小密度	1.34 g/cm ³

3軸圧密排水試験(CD)試験を相対密度Dr=95%での試料で実施した。これから得られたモールの応力円を図-5に示した。図-6に軸差応力-軸ひずみの関係を示した。砂地盤の構成モデルとして、ダイレタンシー特性を考慮しないDrucker-Pragerモデル、また、ダイレタンシー特性を導入したSekiguchi-Ohtaモデルを取り上げた。

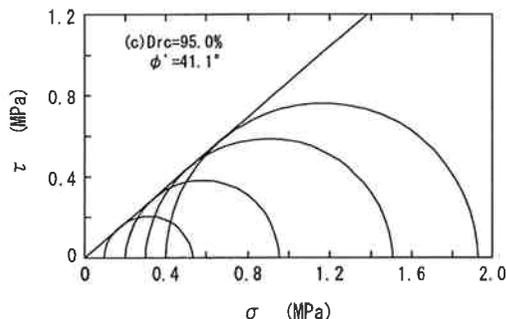


図-5 モールの応力円

表-2 Drucker-Pragerモデルによる土性パラメータ

ヤング率	E=40MPa
ポアソン比	ν=0.3
内部摩擦角	Φ=41.1°

表-3 Sekiguchi-Ohtaモデルによる土性パラメータ

圧縮係数	Cc=0.2
膨潤係数	Cs=0.006
ダイレタンシー係数	D=0.089
限界状態係数	M=1.3
ポアソン比	ν=0.3
初期間隙比	e ₀ =0.67

表-2にDrucker-Pragerモデル、表-3にSekiguchi-Ohtaモデルに用いたパラメータを示し、三軸試験のFEM解析結果を、図-6および図-7に示した。

これらのパラメータは、パラメータを適時変化させ、応力-ひずみ関係がほぼ実験結果となるような値を探求して得たものである。結果としての三軸試験シミュレーションは、それなりに合致しているが、Drucker-Prager

モデルではSekiguchi-Ohtaモデルのような変形係数の応力依存ではないため、異なる拘束圧のもとでも初期の変形性は同じである。

6. 数値解析

節杭モデルの載荷試験のシミュレーションを上述した2つの応力-ひずみ関係に基づき、2次元軸対象のFEMで行った。模型実験に用いた円筒土槽内の砂および土槽中央の節杭をソリッド要素でモデル化し、境界条件は下端を鉛直方向固定、側部を水平方向固定とした。荷重条件は、杭頭の節点に0.2mm毎の強制変位を与え、トータル変位が30mmとなるまで解析を行った。ここでは特に、軸荷重変化に注目した節の支持力に注目する。

図-8および図-9にDrucker-PragerモデルおよびSekiguchi-Ohtaモデルによるシミュレーションによって得られた杭の軸力の深度変化の結果を示した。

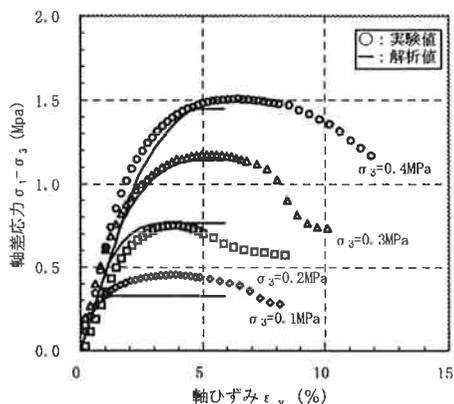


図-6 Drucker-Pragerモデルによるシミュレーション

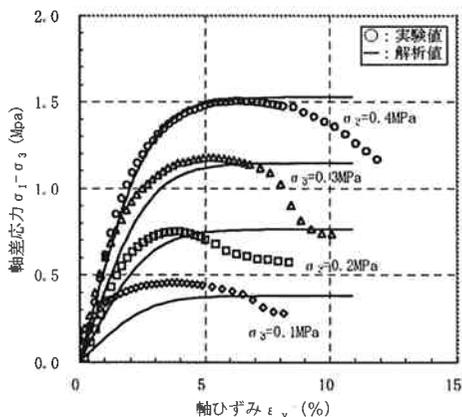
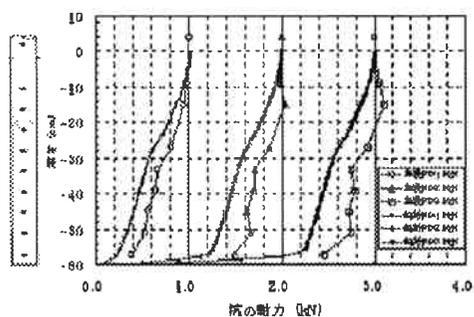
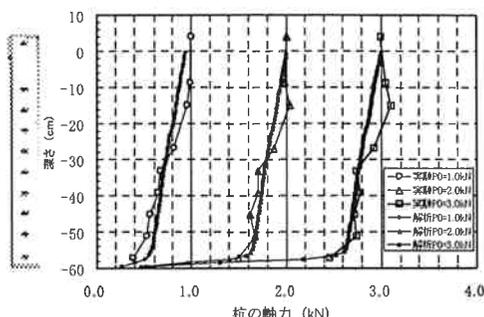


図-7 Sekiguchi-Ohtaモデルによるシミュレーション

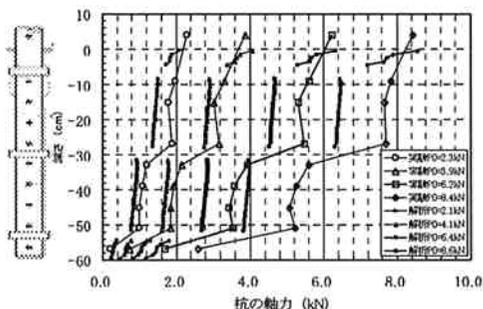
最上段の図が、節無し直杭(straight)の場合で、どの荷重段階においても軸力は深度とともに単調に減少する。Drucker-Pragerモデルに比べてSekiguchi-Ohtaモデルの方が実験結果にやや近い。中段の図は節が3つの場合である。節深度において、実験結果と同じような段階的な軸



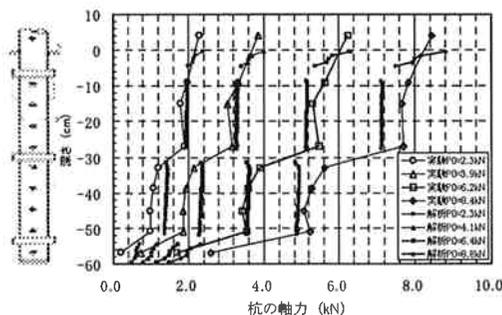
(a) 杭の軸力分布(節なし) DP



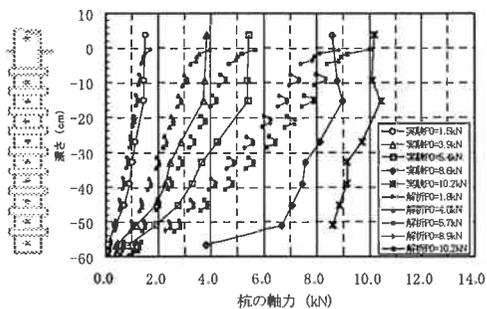
(a) 杭の軸力分布(節なし) SO



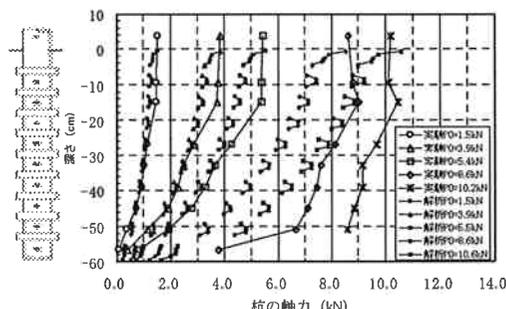
(b) 杭の軸力分布(節3つ) DP



(b) 杭の軸力分布(節3つ) SO



(c) 杭の軸力分布(節9つ) DP



(c) 杭の軸力分布(節9つ) SO

図-8 Drucker-Prager モデルによるシミュレーション

図-8 Sekiguchi-Ohta モデルによるシミュレーション

力の減少が顕著に見える。軸力の減少の程度は、実験では最上段節は他に比べてやや低いが、解析では各段節とも同程度である。

最下段の図は9つの節の場合である。9つになると各節深度における軸力の減少は3つの時に比べて小さくなるが、直杭のように減少していないのは、実験も同様であるが、これについては後述する。

全体にDrucker-Pragerより、Sekiguchi-Ohtaモデルの方が、シミュレーションの程度がよい。特に杭下端の貫入抵抗に違いが見られる。

7. 杭周辺地盤の応力

図-10 および 11 に、Drucker-Prager および Sekiguchi-Ohta

モデルのFEM解析によって得られた杭の周辺の応力状態を示した。図-10 および 11 には、節が3つの場合のもので、図-12 および 13 は、節が9つの場合についてである。

図-10 および 11 では、左側に鉛直応力成分の大きさを白黒の濃淡で示し、右側に鉛直面に作用するせん断力の大きさをkPaの単位で示してある。左側の鉛直応力成分を見ると、節縁端下部の地盤に応力球根が見られる。また、右側のせん断力の分布をみると、杭体の節部位置に大きなせん断力が見られるが、地盤には、節縁端部から外方斜め下に向けてせん断力ゾーンの発生が見られる。地盤内で見られる発生応力分布は、一般の剛性円盤基礎直下の応力分布とよく似ている。

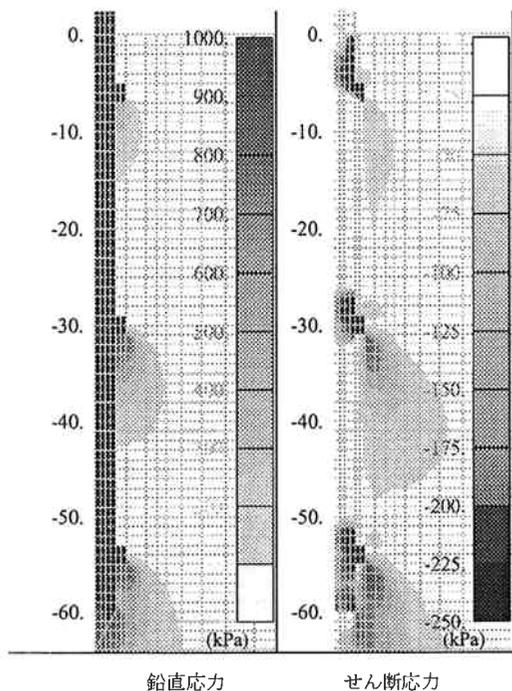


図-10 杭および周辺地盤内の応力分布
(節 3 つ, Drucker-Prager モデル)

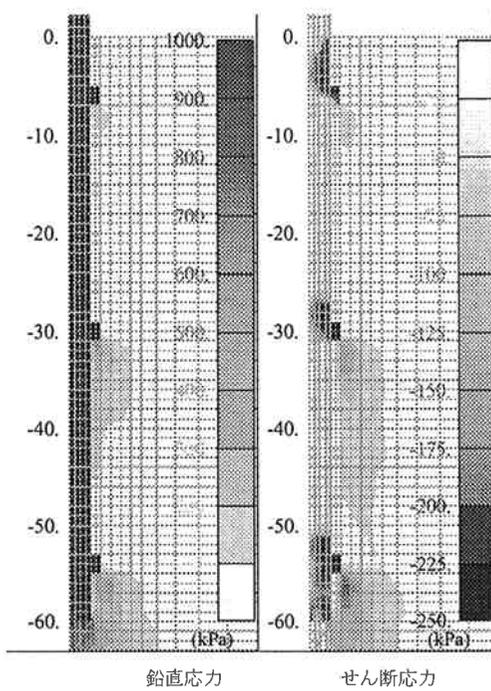


図-11 杭および周辺地盤内の応力分布
(節 3 つ, Sekiguchi-Ohta モデル)

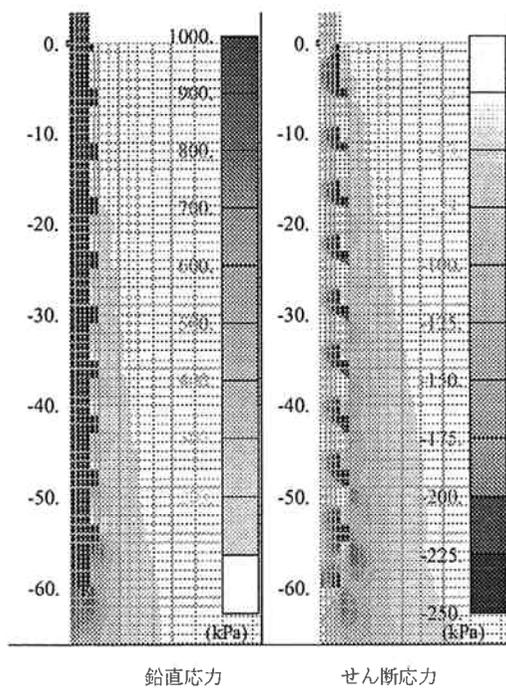


図-12 杭および周辺地盤内の応力分布
(節 9 つ, Drucker-Prager モデル)

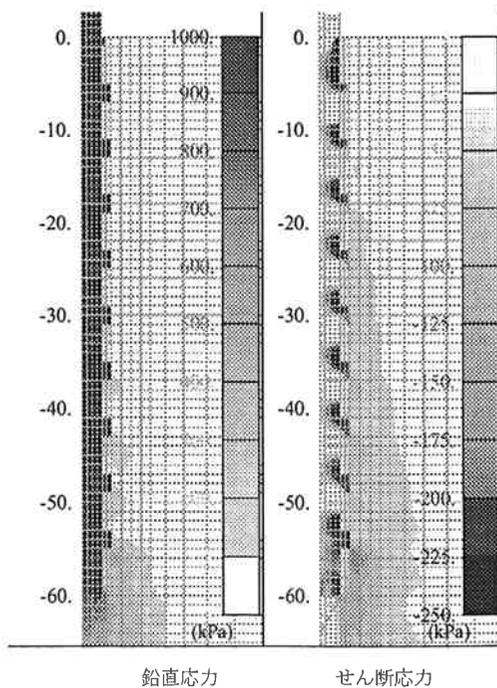


図-13 杭および周辺地盤内の応力分布
(節 9 つ, Sekiguchi-Ohta モデル)

すなわち、節杭の節効果は、節端縁部直下の地盤の支圧抵抗によって得られることが分かる。

これに比べて、図-12 および 13 に示される節 9 つの場合は、節の間隔が極めて短いために、節端部直下に発生する鉛直応力が節 3 つの場合に比べて摩擦力によって支持されている。また、この摩擦によって地盤に発生するせん断力がより連続的となっており、次第に直杭の状態に近づいていることが理解できる。ここでは、深い議論は避けるが、Drucker-Prager モデルおよび Sekiguchi-Ohta モデルによるシミュレーションにはダイレイタンスの違いはあるが、結果にはそれほどの違いは現れていない。また、杭先端支持力が Sekiguchi-Ohta モデルの方が大きく、実験結果に合致しているのは、変形性の拘束応力依存性の影響である可能性がある。

8. 結論

土槽によるモデル節杭実験を FEM 手法によって解析を行った結果、節杭効果は、節部端縁直下地盤の支圧効果と考えることができると示され、軸対称モデルによる極限支持力での算定式に合理性があるという裏付けを与えた。また、節間隔が増えるに従って節杭効果が減少するが、これは地盤内に円筒状のせん断ゾーンが発生して節部端縁直下の地盤の支圧力が十分に成長しないことによる。節杭の効果を最大ならしめるためには、この節直下の地盤の支圧力を十分に成長させる必要があることが FEM による解析によっても裏付けられた。

以上のように、剛塑性の地盤モデルに基づく極限支持力理論で節杭の支持力を議論していたことに加えて、より現実に近い弾塑性の構成則による FEM によって、従来の考え方が検証されたといえよう。土の構成関係としては、Drucker-Prager モデルおよび Sekiguchi-Ohta モデルを適用したが、結果としてはそれほどの違いはなかったが、やや、Sekiguchi-Ohta モデルの方がよい結果を示した。

参考文献

1) Mohan, D., Murthy, V.N.S. and Jain, G.S.(1969). : Design and Construction of Multi-Under-Reamed Piles, Proc. of 7th ICSMFE, Vol.2, pp.183-186

2) 石堂 稔: 砂地盤における節杭の支持力, 九州産業大学工学部研究報告, 第 6 号, pp.40~50, 1969.5

3) 石堂 稔: 粘性土中の節杭の支持力, 九州産業大学工学部研究報告, 第 8 号, pp.12~23, 1971.6

4) 山肩邦男, 平尾幸太郎, 大杉富美一: 節杭の鉛直支持力, 第 17 回土質工学研究発表会, pp.2101~2104, 1982.5

5) 小椋仁志, 山肩邦男, 岸田英明: 模型実験による節付き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, No.374, pp.87~97, 1987.4

6) 小椋仁志, 山肩邦男: 節杭の荷重~沈下量関係の理論解析手法, 日本建築学会構造系論文報告集, No.393, pp.152~164, 1988.11

7) 藪内貞男, 山下啓明, 上紺屋好行, 平山英喜: 砂中の節杭・コルゲート杭のモデル実験, 第 26 回土質工学研究発表会, pp.1351~1354, 1991.7

8) 藪内貞男, 平山英喜, 山下啓明, 染川常二: 節杭の節部形状の影響に関するモデル実験, 第 27 回土質工学研究発表会, pp.1506~1506, 1992.6

9) Yabuuchi, S.: Bearing mechanisms of multi-node piles, Proc. 4th Int. Offshore and Polar Engineering Conf., Vol.1, pp.504-507, 1994

10) 八尾眞太郎, 伊藤淳志, 榊井 健, 伊藤 仁: 節付き場所打ちコンクリート杭の節部底面支持力算定式, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.79~84, 2002.6

11) 伊藤淳志, 八尾眞太郎, 榊井 健: 節付き場所打ちコンクリート杭の鉛直支持力特性に関する模型実験, 構造工学論文集, Vol.48B, pp.321~325, 2002.3

12) 八尾眞太郎, 伊藤淳志, 伊藤 仁: 砂地盤における異形杭の鉛直荷重~沈下性状に関する模型実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.551~552, 2000.9

13) 伊藤淳志, 八尾眞太郎, 榊井 健(2002): 節付き杭の節間隔に関する模型載荷実験, 第 37 回地盤工学研究発表会, pp.1411~1412, 2002.7

The authors present results of bearing characteristics of nodular pile by model tank experiments and cyber-simulation of the test by FEM. They performed loading test of nodular pile and measured axial force along the pile. In addition to limit state approach based upon rigid plastic media, they confirmed that the node effect is due to bearing capacity of the soil beneath the node by simulation of FEM with elasto-plastic constitutive law of the soil. If the distance between nodes is decreased, the node effect is reduced from the insufficient development of the bearing resistance of the soil beneath the node, which is caused by increase of shear in the ground surrounding pile.