

杭打設にともなう K_0 の増加に関する実験的検討

沼田淳紀¹・嶋本栄治²・染谷昇³・國生剛治⁴

¹正会員 工修 飛鳥建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472)

²正会員 工修 飛鳥建設株式会社 中岳ダム作業所 (〒899-8600 鹿児島県會於郡末吉町南之郷 10855-1)

³飛鳥建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472)

⁴正会員 工博 中央大学 理工学部土木工学科教授 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

地盤にサンドコンパクションパイルや既製杭を打設した場合、地盤の密度増加に加えて水平有効応力の増加などが期待され、これらにより液状化強度がさらに増加すると考えられる。サンドコンパクションパイル工法の設計は主に密度増加を対象としているが、細粒分の多い地盤を対象とした場合、改良効果が上がらない場合があり、今まで設計に考慮していなかった水平有効応力の増加を見込むことが望まれている。このような現象は、サンドコンパクションパイルに限らず、打込み式の杭打設でも同様であると考えられる。そこで、杭打設にともなう K_0 増加の検討を行うために、幾つかの細粒な試料を用いて模型地盤で標準貫入試験を実施し、水平方向の土圧を計測した結果を再整理し、密度や土質に対する定性的な K_0 の増加傾向を明らかにした。

Key Words: coefficient of earth pressure at rest, fines, grain size, liquefaction, N -value, pile, sand, silt, soil improvement, standard penetration test, relative density

1. はじめに

最も良く使われる液状化対策工法のひとつとして、サンドコンパクションパイル工法（以下、SCP と呼ぶ）があげられる。この工法は、主に、砂杭を地盤内に打設することで地盤の密度増加を期待しているが、これと同時に①水平有効応力の増加、②繰返しせん断による微視構造の安定化、③砂杭と締固められた地盤の複合地盤としての剛性の増加、④砂杭による透水性の向上も期待される^{1), 2)}。SCP と同様な地盤の密度増加は、打ち込み式の杭打設でも同様に生じ、また①、②、③の効果も期待できると考えられる。実際に、打ち込み式の杭打設後の杭間地盤で実施された標準貫入試験による N 値は、SCP の設計に用いられる原地盤 N 値と改良後パイル中間 N 値の関係図³⁾上で、SCP と同程度の置換率の結果と比較して、同等かそれ以上に杭打設後の N 値が増加している^{4), 5), 6), 7)}。

SCP は、細粒分の多い地盤に対しては、改良効果が上がりにくい場合が多く、特に、1995 年兵庫県南部地震以降設計で考えられるようになったレベル 2 地震動を対象とした場合には、密度増加だけの効果では設計上目標値を満足できない場合がある。このような場合を始め、SCP や打ち込み式杭の合理的設計を行うために①～③の効果を積極的に取り入れるべきであり、ここでは、①について

検討を行った。

水平有効応力の増加、つまり、静止土圧係数 K_0 が増加すると液状化強度が増加することが明らかにされている⁸⁾。SCP の打設にともなう地盤内の K_0 は、現場の計測結果から増加することが知られている^{9), 10)}。また、静的にモルタルを地盤内に圧入し地盤の締固めを行うコンパクショングラウチングにおいても K_0 の増加が計測されており¹¹⁾、このような K_0 の増加は SCP に限らず打ち込み式杭の打設においても期待できると考えられる。また、数値解析においても K_0 などを取り入れた解析方法の考え方の提案^{12), 13)}や解析結果と被害事例などの比較検討が行われ¹⁴⁾、 K_0 を取り入れることが有効であるとともに、 K_0 の増加を考えた方が被害事例に整合することが示されている。

このように、SCP や打ち込み杭の打設による地盤内の K_0 の増加は明らかであり、設計にも取り込まれつつある。しかしながら K_0 については不明なことが多く、まず、どのような条件で K_0 が増加するかなどの基本的なことを明らかにする必要がある。そこで、4 種類の細粒な土による模型地盤に標準貫入試験^{15), 16)}（以下、SPT と呼ぶ）を実施し、 K_0 を計測した実験結果を再整理し、模型地盤にサンプラーが貫入されることで増加する K_0 が、土質や密度により定性的にどのように変化するかを検討した。

2. 実験方法

実験は、4種類の細粒な土を用いて土槽内に模型地盤を作成し、その地盤でSPTを実施した。このときのサンプラー貫入時の水平方向の土圧を計測した。図-1に、実験に用いた土槽¹⁷⁾を示す。土槽は、土槽内部の上面および下面にゴム膜があり、これより上載圧を載荷できる。側面には土圧計が設置されている。上蓋の中央には孔が設けてあり、そこよりSPTが実施できる。なお、SPTのロッド先端部のサンプラー外径は51mm および内径は35mmである。これに相当する置換率はサンプラーが中実と仮定すると0.4%であり、中空とすると0.2%であり、本実験は、このような種類の置換率のみの検討である。

図-2に、実験に用いた4種類の試料の粒度組成を示す。このような試料を用いて異なる密度の地盤を作成した後、模型地盤を飽和し、上載圧98kPaで圧密を行い、予備打ちを15cm行った後にSPTを実施した¹⁵⁾。SPT実施時に計測した水平方向の土圧と載荷した上載圧より土圧計中央位置での K_0 を求めた。一次圧密が終了していることは確認しているが、SPT実施時には間隙水圧は計測していない。したがって、厳密には水平有効応力は求められないが、上載圧を実験中一定に保っていること、模型地盤の上下端面は排水境界であることを考慮すると、求められた K_0 は水平有効応力にほぼ等しいと考えられる。

3. 相対密度

このような実験を行う時に相対密度は重要な指標であるが、ここで用いたような細粒な試料に対し確立された相対密度の定義方法はない。そこで、ここでは最小間隙比を物理的に得られる最小の間隙比と定義し、最大間隙比はJISによる方法で求めた間隙比と定義して相対密度を求めた^{18), 19)}。図-3に、50%粒径に対して求められた最大および最小間隙比を示す。

サンプラーの貫入により土槽内部の地盤部分の体積が減少し地盤の密度が増加する。このときの増加する相対密度は、サンプラーの置換率を0.4%とした場合で、計算上豊浦砂が最も密度増加が大きく、その増加する最大相対密度は2%程度であり、かなり小さい。

4. 実験結果

図-4に、模型地盤圧密後の初期の K_0 を地盤の相対密度に対して示す。相対密度や試料の種類によらず、 K_0 は概ね0.3~0.5の範囲である。このように、密度が異なっても K_0 が変化しない傾向は、N値の異なる地盤でほぼ K_0 が0.5であった事例¹¹⁾や、個別要素法による粒子間摩擦角を変え数値解析を実施し K_0 が変化しなかった事例

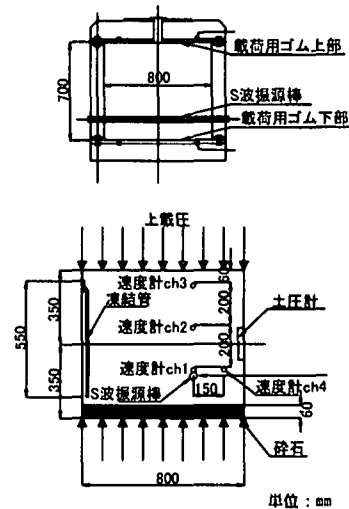


図-1 土槽概略図^{17), 15)}

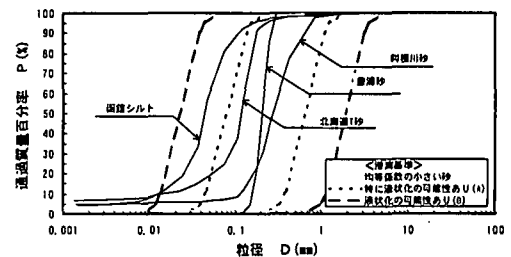


図-2 試料の粒度組成¹⁵⁾

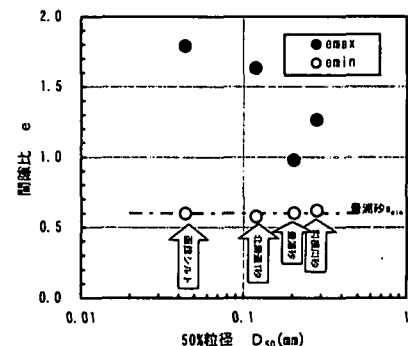


図-3 50%粒径と最大および最小間隙比の関係¹⁹⁾

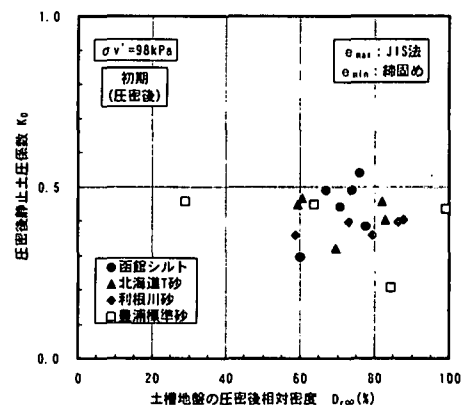


図-4 初期 (模型地盤圧密後) の相対密度と K_0 の関係

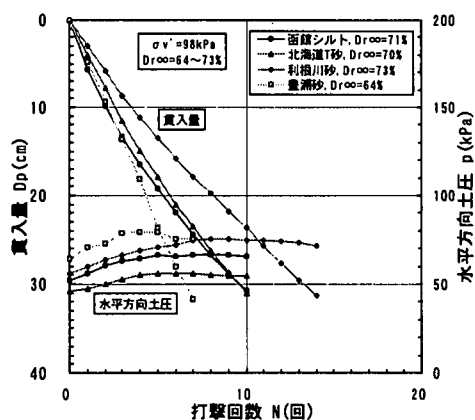


図-5 SPT 実施時における K_0 の変化

とも整合している。一方、 K_0 の推定式として、経験的に求められた Jaky²¹⁾ による $K_0 = 1 - \sin \phi$ が良く知られているが、これとは整合していない。

図-5に、SPT 実施時における K_0 の変化とサンプラーの貫入量の関係を示す。サンプラーの貫入とともに土圧が上昇していることがわかる。サンプラーの貫入量と打撃回数との関係はやや下に凸であり、これは、土圧の上昇による影響と考えられる。土圧の上昇は、貫入量が15~20cm のところから頭打ち状態になっている。この深さは、サンプラー先端部分が土圧計の中央を通過する深度に一致しており、さらに深くサンプラーが貫入した状態では土圧はほぼ一定値かやや低下することがわかる。これより K_0 は、貫入量が30cm を越えた最終貫入時点での土圧より求めることとし、初期の K_0 と区別するために K_0^* と表記する。

図-6に、SPT 実施後のサンプラーが模型地盤に貫入された状態における模型地盤の相対密度と K_0^* の関係を示す。この状態は、SCP や打込み式の杭が打設された状態を模擬している。サンプラー貫入後の K_0^* は、相対密度が高いほど大きい。初期の K_0 は、ほぼ一定値であったので相対密度が高いほど K_0 の増加が大きいこと、また、この傾向は土質による差異はほとんど認められないことがわかる。

5. K_0 の増加率との相関

K_0 増加率を K_0^*/K_0 と定義し、 K_0 増加率と各種指標との相関について検討する。

図-7に、相対密度と K_0 増加率の関係を示す。 K_0 増加率は、一点を除き全てが1以上であり、サンプラーの貫入により K_0 が増加することがわかる。増加傾向は相対密度が高いほど顕著であり、豊浦砂の相対密度が約100% のケースでは3以上になっている。一方、相対密度が約80% 以下では、多くは1.5程度であり、N 値が0回であったケースでは約1 または1 以下となっている。このよ

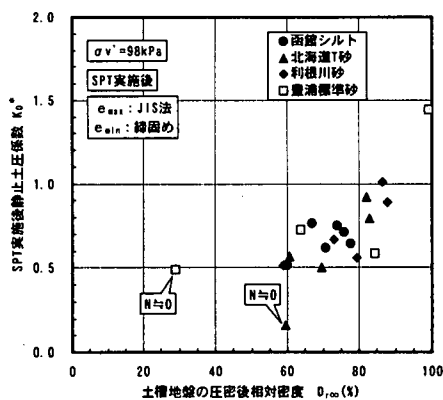


図-6 SPT 実施後の相対密度と K_0^* の関係

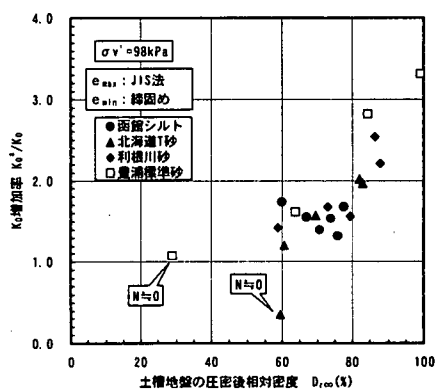


図-7 相対密度と K_0 増加率の関係

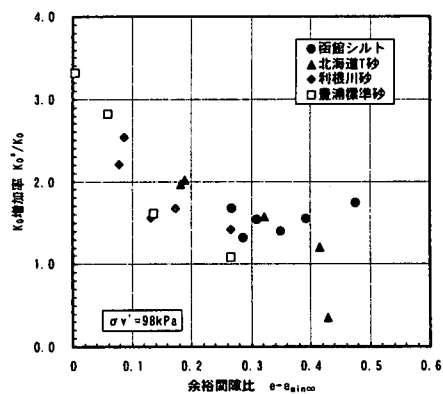


図-8 余裕間隙比と K_0 増加率の関係

うに、 K_0 増加率は地盤の初期密度に大きく左右されることがわかる。また、この傾向は土質による差異はほとんど認められず、相対密度と K_0 増加率はほぼ一義的な関係にある。

サンプラーの貫入は、密になり得る余裕の間隙比の絶対量が少ないほど K_0 が増加すると考えられる。そこで、余裕間隙比²²⁾ $e - e_{min}$ を考える。図-8に、余裕間隙比と K_0 増加率の関係を示す。土質によらず余裕間隙比が小さいほど K_0 増加率が大きくなる傾向がより明瞭になる。この図によれば、余裕間隙比が0.3~0.4 より大きな場合は、 K_0 増加率は1.5程度かそれ以下であるが、それより小さな余裕間隙比になると、余裕間隙比が減少することによりほぼ直線的に K_0 増加率が増加することがわかる。

本実験に用いた4種類の試料は、土質によらず相対密度とN値の相関が高いことが明らかになっている¹⁶⁾。図-9に、N値と K_0 増加率の関係を示す。土質に関係なく相関が高くN値が約15以下では K_0 増加率は1.5程度であるが、N値15以上になるとN値の増加により K_0 増加率が大きくなることがわかる。このように相関が高いのは、相対密度とN値、および、相対密度と K_0 増加率の相関がそれぞれ高いためである。実務的には、余裕間隙比よりもこのような関係が使いやすいと考えられる。

以上より、ここでの検討は1種類の置換率、1種類の上載圧の小さな模型地盤で得られた結果であるので、あくまでも定性的な傾向を示すものであるが、今後 K_0 増加率を予測するには、本実験で使用した土質の範囲内で、置換率とともに初期地盤の余裕間隙比や相対密度が重要であり、これらはN値によって表現することが可能で、土質による差異は少ないことが明らかになった。

6. まとめ

細粒な4種類の土質を用いて上載圧98kPaの土槽貫入実験で計測された K_0 を検討し、以下が明らかになった。

- (1) 模型地盤の圧密後の K_0 は、相対密度と土質に関係なく0.3~0.5程度であった。
- (2) 標準貫入試験のサンプラーの貫入による K_0 の増加は、初期の相対密度や余裕間隙比と相関が高く、相対密度が高いほど、また、余裕間隙比が小さいほど K_0 増加率は大きくなり、この関係は土質によらない。
- (3) 相対密度とN値、および、相対密度と K_0 増加率のそれぞれの関係は、ともに相関が高いので、N値と K_0 増加率の関係も相関が高い。この関係では、N値が15以下では K_0 増加率は1.5程度であり、N値が15以上になるとN値の増加にともなって K_0 増加率が増加する。

謝辞: 土槽貫入実験を実施するにあたり、株式会社シー・アール・エスの吉田保夫氏には実験の指導をして戴いた。中央大学の諏訪正博氏および渡辺圭氏には実験に協力して戴いた。ここに記して、心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 吉見 吉昭: 「ねばり強さ」に関する液状化対策の評価基準, 土と基礎, Vol.38, No.6, pp.33-38, 1990.6.
- 2) 大林 淳, 原田 健二, 山本 実, 佐々木 康: 締固め地盤の液状化抵抗に関する評価, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp.1411-1416, 1998.
- 3) 土質工学会: 液状化対策の調査・設計から施工まで, p.190, 1993.
- 4) 藪内 貞男: 摩擦杭工事の注意事項と対応, 基礎工, pp.101-108, 1983.3.
- 5) 高髙 善文, 寺田 邦雄: 杭の打設による既設杭への影響, 第17回土質工学研究発表会, pp.2061-2064, 1982.
- 6) 伊藤 賢治: 上越新幹線・新潟駅における液状化砂地盤の処理工法, 基

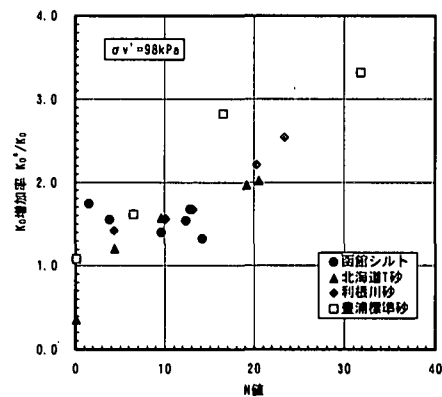


図-9 N値と K_0 増加率の関係

礎工, pp.66-74, 1978.7.

- 7) 石川 泰, 大島 豊, 西村 功, 山内 一秀, 鳥井原 誠, 大井 高志: 先端閉塞治具を用いた鋼管杭の打設による地盤の液状化対策(その3 工法および現場実験の概要), 第33回地盤工学研究発表会, pp.919-920, 1998.
- 8) Ishihara, K., Iwamoto, S., Yasuda, S. and Takatsu, H.: Liquefaction of anisotropically consolidated sand, ICSMFE, Vol.2, pp.261-264, 1977.
- 9) 日置 和昭, 中角 功, 永田 永昌: 締固めによる改良地盤の液状化抵抗に関する考察, 第35回地盤工学学会研究発表会, pp.2393-2394, 2000.
- 10) 山本 実, 野津 光夫, 山田 隆, 小飼 善弘: 静的締固め砂杭工法の改良効果—佐原試験工事—, 第32回地盤工学研究発表会, pp.2317-2318, 1997.
- 11) 善 功企, 野上 富治, 松下 信夫, 山本 良, 滝 昌和: コンパクショングラウチングの液状化対策効果, 第35回地盤工学研究発表会, pp.2411-2412, 2000.
- 12) 三輪 滋, 小堤 治, 安田 進, 森 浩章: SCP改良地盤の地震時挙動の評価におけるモデル化に関する問題点の整理, 第35回地盤工学研究発表会, pp.2419-2420, 2000.
- 13) 宇野 浩樹, 立石 章, 堀越 研一, 藤原 斉郁, 古池 章紀: 三次元有効応力解析による密度増大工法の液状化抑制効果に関する一検討—二次元解析と三次元解析の比較—, 第35回地盤工学研究発表会, pp.2401-2402, 2000.
- 14) 原 幸司, 足立 雅樹, 三輪 滋, 野津 光夫, 八嶋 厚, 森 浩章: 有効応力解析によるSCP改良地盤の事例にもとづくモデル化の検討(その1: 西宮浜におけるSCP改良地盤の検討), 第35回地盤工学研究発表会, pp.2397-2398, 2000.
- 15) 嶋本 栄治, 沼田 淳紀, 染谷 昇, 國生 剛治: 細粒な土の土槽貫入実験(実験方法), 土木学会第56回年次学術講演会概要集, 第3部, 投稿中, 2001.
- 16) 沼田 淳紀, 嶋本 栄治, 染谷 昇, 國生 剛治: 細粒な土の土槽貫入実験(実験結果), 土木学会第56回年次学術講演会概要集, 第3部, 投稿中, 2001.
- 17) 國生 剛治, 吉田 保夫, 諏訪 正博, 桑原 弘昌, 佐藤 正行: 土槽貫入実験によるまき土の液状化強度の評価(その1), 第34回地盤工学研究発表会, pp.125-126, 1999.
- 18) 沼田 淳紀, 染谷 昇, 嶋本 栄治, 國生 剛治: 細粒な土の相対密度(試料の諸特性), 第36回地盤工学研究発表会, 投稿中, 2001.
- 19) 沼田 淳紀, 嶋本 栄治, 染谷 昇, 國生 剛治: 細粒な土の相対密度(定義方法), 第36回地盤工学研究発表会, 投稿中, 2001.
- 20) 岩崎 好規, 澤田 純男, プラダン テージ B.S.: 個別要素法による砂の繰返し載荷挙動のシミュレーション, 土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.131-136, 1988.
- 21) Jaky, J.: Pressure in soils, Proc. 2nd ICSMFE, Vol.1, pp.103-107, 1948.
- 22) 石原 研而, 渡辺 忠雄: 飽和土の液状化におよぼす粒度と間ゲキ比の影響, 第7回土質工学研究発表会, pp.313-315, 1972.