

# レベル2地震動における締固めによる改良地盤の液状化強度の評価について

原田健二<sup>1</sup>・安田 進<sup>2</sup>・山本 実<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 不動産建設株式会社 ジオ・エンジニアリング 本部 (〒110-0016 東京都台東区台東 1-2-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 東京電機大学教授 (〒350-0311 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

<sup>3</sup>正会員 不動産建設株式会社 ジオ・エンジニアリング 本部 (〒110-0016 東京都台東区台東 1-2-1)

締固めによる改良地盤が1995年兵庫県南部地震のような大地震においても被害が少なく有効であったことが報告されている。筆者らは、この要因として締固め改良地盤の評価の問題に着目し、杭間における静止土圧係数 $K_0$ の増加や杭間と杭芯で構成される複合地盤などの効果を指摘してきた。また、締固めによる改良地盤評価は、通常は杭間での標準貫入試験によるN値で行われ、この杭間において砂杭打設後にはN値の増加とともに $K_0$ が増加していることが確認されている。

本報においては、このような $K_0$ 増加が締固めによる改良後のN値や強度に及ぼす影響を把握するために実施した室内標準貫入土槽実験と繰返しせん断試験の結果を示す。さらに1996年道路橋示方書に示されているN値と液状化強度の関係を比較し、締固めによる改良地盤の液状化強度の適切な評価について併せて考察する。

**Key Words** : large scale earthquake, compaction method, liquefaction resistance, SPT N-value, coefficient of earth pressure at rest

## 1. はじめに

締固めによる改良地盤が1995年兵庫県南部地震のような大地震においても被害が少なく有効であったことが報告されている<sup>1)</sup>。筆者らは、この要因として締固め改良地盤の評価の問題に着目し、杭間における静止土圧係数 $K_0$ の増加や杭間と杭芯で構成される複合地盤などの効果を指摘してきた<sup>2)</sup>。

また、締固めによる改良地盤の評価は、通常は杭間での標準貫入試験によるN値で行われる。そして、この杭間での調査により砂杭打設後には $K_0$ が増加していることが確認されている。さらに、石原ら<sup>3)</sup>が示しているように $K_0$ が増加することにより液状化強度は増加するので、締固め改良地盤の杭間における液状化強度は、N値から求められる液状化強度よりも大きな抵抗を有している可能性がある。しかしながら、図-1に示すようにN値の増加には、密度増加によるもの以外に $K_0$ の増加によるものも含まれているという“ダブルカウント”の問題も指摘されており、その問題については、いまだに解決されていないのが現状である。

本報においては、このような $K_0$ 増加が締固めによる改良後のN値や強度に及ぼす影響を把握するために実施した室内標準貫入土槽実験と繰返しせん断試験の結果について考察する。

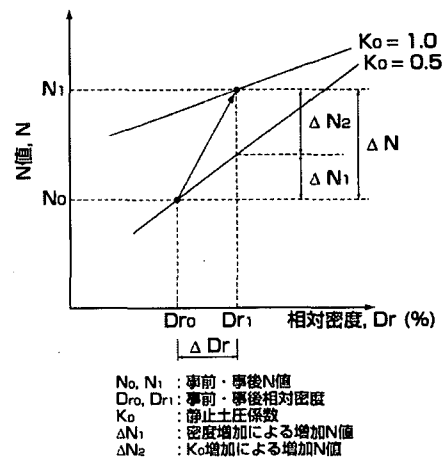


図-1 N値のダブルカウントの説明図

## 2. 締固めによる改良地盤における静止土圧係数の増加

振動式サンドコンパクションパイル (SCP) 工法は、日本において締固めを改良原理とする代表的な液状化対策工法として、多くの施工実績を有している。また、最近では、非振動式の静的締固め砂杭工法も開発され<sup>4)</sup>、振動・騒音などの周辺環境問題が考慮される市街地などにおいても適用を拡げている。これらの締固め工法は図-2に示すように、よく締まった杭を地中に造成し、打ち戻し過程での砂杭の拡径により周辺地盤を締固めるが、同時に地盤を側方に押し出すため砂杭間地盤の $K_0$ が増加するものと考えられる。

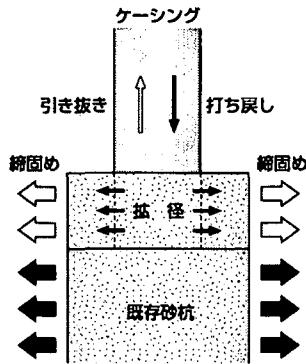


図-2 締固め砂杭工法の改良原理

両工法の施工現場でのプレシオメータを中心とした $K_0$ の調査結果<sup>5)</sup>をまとめたものが図-3である。同図では、改良率 $a_s$  (原地盤を1.0としての砂杭の体積割合であり改良程度を表す定数)と $K_0$ の関係で示しており (改良率が0%の時の $K_0$ の値が事前の $K_0$ である)、締固め改良地盤の $K_0$ は増加し、しかも長期的に維持していることが確認されている。

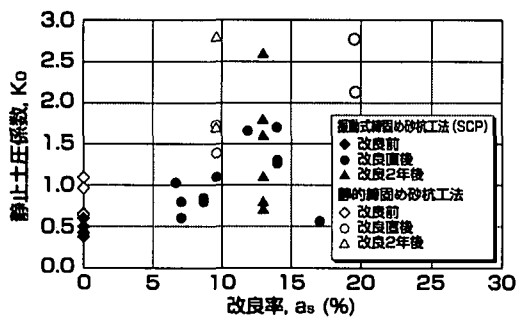


図-3 改良率と事前・事後静止土圧係数の関係

### 3. 実験概要

締固めによる改良地盤のN値と液状化強度に及ぼす $K_0$ 増加の傾向を把握するために、前者については室内標準貫入土槽実験と後者については異方圧密中空ねじり試験を実施した。

### 3.1 標準貫入土槽実験

実験に使用した標準貫入試験装置と土槽を図-4に示す。標準貫入試験装置のノッキングヘッドとサンプラーはロッドカップリングで直結してあり、ロッドの長さは50mmである。また、土槽は、内径775mm、深さ916mmの鋼製の円形土槽である。

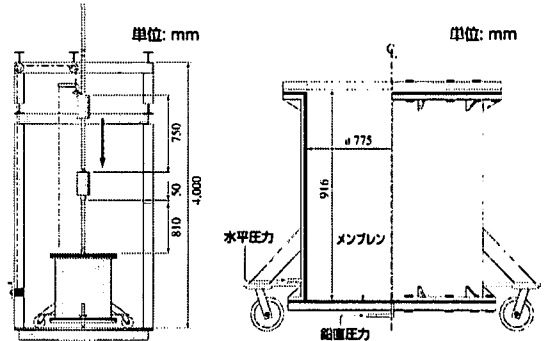


図-4 室内標準貫入試験装置及び土槽

模型地盤に対する水平及び鉛直応力を、土槽内周面と底面のメンブレンを介して水圧により独立に作用させることで任意の $K_0$ 状態を再現できる。 $K_0$ は、鉛直有効応力を98kPaで一定として水平有効応力で調整した。模型地盤は飽和状態とし、豊浦砂 ( $\rho_s = 2.65\text{kN/m}^3$ ,  $e_{max} = 0.985$ ,  $e_{min} = 0.611$ ) を用いて水中落下法で作製した。今回の実験ケースを繰返しせん断試験のケースと併せて表-1に示す。

表-1 実験ケース

目標相対密度	静止土圧係数	室内SPT土槽試験	繰返しせん断試験
		圧密後の相対密度 $Dr$ (%)	圧密後の相対密度 $Dr$ (%)
50	0.5	53.6-55.5 (54.6)	50.6
	1.0	54.5 (54.5)	50.0
	1.5	58.2 (58.2)	—
70	0.5	72.6-73.8 (73.2)	70.9
	1.0	73.1-78.1 (75.3)	71.5
	1.5	78.9 (78.9)	71.2
90	0.5	92.1-93.6 (92.9)	91.2
	1.0	85.7-94.9 (91.6)	91.9
	1.5	93.8-93.9 (93.9)	91.4

模型実験作製後、水平・鉛直応力を加えて、それによる圧密が終了した後、貫入試験を行なった。その際、土槽の中央深度付近のN値を得るため30cmほど予備打ちを行なった。また、本打ちにおいては $K_0$ が常に一定値になるように1打毎に圧力を調整した。なお、重錘の落下方法はトンビ方法とした。

### 3.2 繰返しせん断試験

標準貫入土槽実験と同じ豊浦砂を使用して、表-1に示すケースで中空ねじり試験装置による非排水繰返し載荷を実施した。この時、異方圧密状態は、有効鉛直応力 $\sigma_v'$ は98kPaとし、有効水平応力 $\sigma_h'$ を49kPa ( $K_0 = 0.5$ )、147kPa ( $K_0 = 1.5$ ) とすること

で実現している。等方圧密 ( $K_0=1.0$ )・異方圧密終了後、繰返し载荷中に軸ひずみを生じさせないようにストッパーをつけ、側方のひずみをゼロにして繰返しせん断を行なった。

#### 4. 実験結果

##### 4.1 標準貫入土槽実験

標準貫入土槽実験結果を図-5に示す。図中の実線は各圧密後の相対密度  $Dr'$  毎の平均  $N$  値を結んでおり、同じ密度でも  $K_0$  の増加に伴って、 $N$  値が増加していることがわかる。また、 $K_0$  増加に伴う  $N$  値の増加割合は、相対密度が大きくなるとやや小さくなる傾向にある。つまり、締固め改良後の地盤のように密な地盤においては、図-1に示す  $N$  値の増加成分である密度増加と  $K_0$  増加の割合は、前者の方が卓越しており、ダブルカウントの問題は比較的少ないといえる。

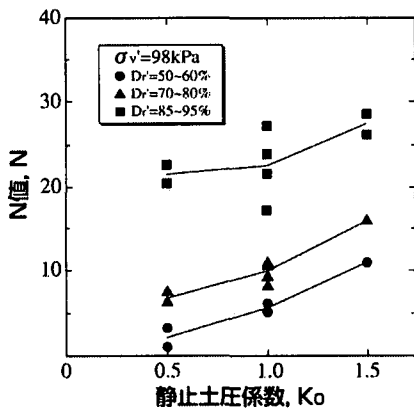


図-5  $N$  値と静止土圧係数の関係

##### 4.2 中空ねじり試験

$N$  値との関係と同じように、液状化強度  $R_L$  と  $K_0$  の関係でみたものが図-6である。図中の  $Dr'=50$ ,

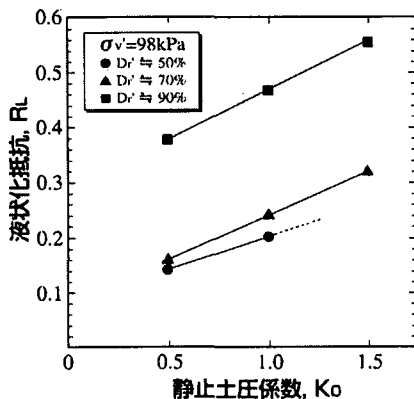


図-6  $N$  値と液状化強度の関係

70%の破線部は、 $Dr'=70\%$ の場合と同様に  $R_L$  と  $K_0$  が直線関係にあるとして外挿して示している。 $R_L$  に及ぼす  $K_0$  の増加効果は密度が違っててもさほど変わらないが、液状化強度の大きさは相対密度が70%から90%に変わる時点で急増する。この点は  $N$  値の場合と同様な傾向を示している。

#### 5. 締固め改良地盤における $N$ 値と液状化強度の関係

図-5と図-6の結果を併せて、 $K_0$  をパラメータに液状化強度  $R_L$ 、相対密度  $Dr$ 、 $N$  値の関係でみたものが図-7である。図中の黒塗りのプロットは、図-5, 6の実験結果の平均値である。そのプロット値を通るように  $K_0$  毎の曲線を引いている。 $R_L \sim Dr$  関係における  $K_0=1.5$  のラインは  $K_0=0.5, 1.0$  のラインの傾向に合わせて引いているため破線で示している。また、同じ  $K_0$  状態における  $N$  値と  $R_L$  の関係を求めるために、同じ  $N$  値 (=10, 15, 20, 25) の時の  $R_L$  のプロットを白抜きで示している。同図から指摘できる事項は以下の通りである。

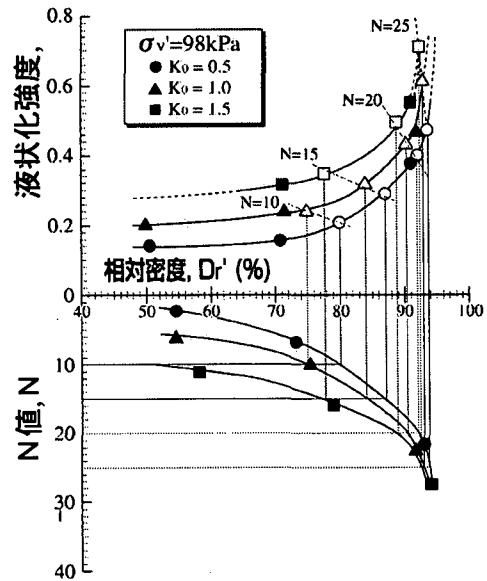


図-7 液状化強度  $R_L$ 、相対密度  $Dr$ 、 $N$  値の関係

- ①  $N$  値と  $R_L$  は  $Dr$  が 90% 程度の大きなところで急増する。
- ②  $N$  値増加の密度増加と  $K_0$  増加による成分割合は、 $Dr$  が大きくなるに伴い前者が卓越してくる。すなわち、 $K_0$  増加が  $N$  値増加に及ぼす影響は、 $Dr$  が大きいところでは小さい。
- ③  $R_L$  についても同様に、 $Dr$  の大きいところでは  $K_0$  増加が  $R_L$  に及ぼす影響は小さくなる。

## 6. 新道示による液状化強度との比較

図-7に示した同じ $K_0$ 状態での $N$ 値と $R_L$ の関係を図-8に示している。すなわち、この $K_0$ 毎のプロット値は、ダブルカウントの問題を相殺した $R_L$ と $N$ 値の関係といえる。

新道示で示されている $N$ 値と液状化強度の関係は、 $K_0$ を通常の自然地盤で得られている0.5と仮定して求められている<sup>6)</sup>。そこで、図-8のプロット値に新道示に示されているきれいな砂の $N$ 値と液状化強度曲線の関係を重ねてみると、 $N$ 値が20程度のあたりでは今回の実験から求めた液状化強度がやや高めであるが、 $K_0=0.5$ の時の曲線(太線)に比較的良好一致していることがわかる。同図には、 $K_0$ が増加した地盤を締固め改良地盤として下式における補正係数 $C$ を1.6までの0.1刻みの曲線(図の実線と点線)で表している。締固めによる改良地盤は $N$ 値の比較的大きいところにあるのでこれを考慮すれば、 $K_0=0.5$ の曲線を $C=1.0$ として $K_0=1.0$ の場合で $C=1.20\sim 1.40$ 、 $K_0=1.5$ で $C=1.40\sim 1.60$ の範囲にあることがわかる。

$$R_L (\text{改良地盤}) = C \cdot R_L (\text{自然地盤})$$

つまり、 $K_0$ が増加した締固めによる改良地盤は、自然地盤に比べて2割～6割増しの液状化強度を有していることになり、その割合は改良後の $N$ 値が大きくなるにつれ大きくなる傾向にある。

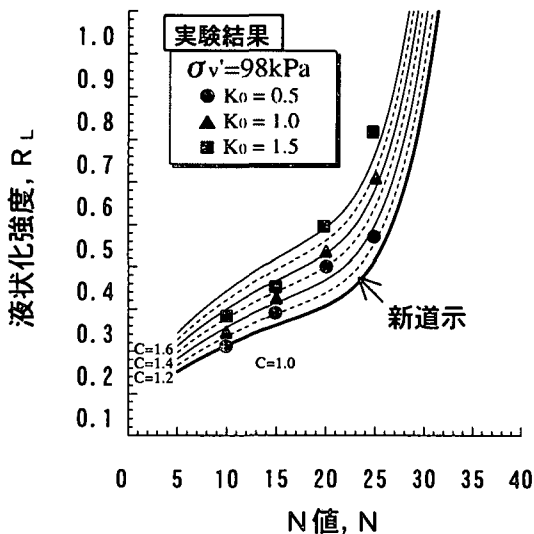


図-8  $N$ 値と液状化強度の関係

## 7. おわりに

本報においては、標準貫入土槽実験と中空ねじり試験結果により、締固めによる改良地盤での $N$ 値や液状化強度に及ぼす $K_0$ の影響について考察した。

これを課題と併せてまとめると以下ようになる。

- ①  $N$ 値と $R_L$ は $D_r$ が90%程度の大きくなるところで急増する。
- ②  $N$ 値増加の密度増加と $K_0$ 増加による成分割合は、相対密度が大きくなるに伴い前者が卓越してくる。すなわち、 $K_0$ 増加が $N$ 値増加に及ぼす影響は、相対密度の大きいところでは小さい。 $R_L$ についても同様の傾向である。
- ③ 締固めによる改良地盤の杭間における $N$ 値での評価は、液状化強度からいえば過小に評価している。

今回示した結果は、締固めによる改良地盤の杭間での $R_L$ と $N$ 値の関係である。実際には、締固めによる改良地盤は、締まった砂杭とその周辺の締固められた地盤(杭間地盤)で構成された、いわゆる複合地盤であることにも着目していく必要がある。

今後は、細粒分を含んだ試料について同様の試験を実施し、複合地盤としての評価と併せてレベル2地震時の合前述した理的な設計法について検討していく予定である。

## 参考文献

- 1) Yasuda, S., Ishihara, K., Harada, K. and Shinkawa, N. : Effect of Soil Improvement on Ground Subsidence due to Liquefaction, Soils and Foundations, *Special Issue*, pp.99-107, 1996.
- 2) 原田健二, 石田英毅: 大地震における建築物の締固めによる直接基礎改良地盤の評価に関する実証的研究, 「実務にみる地盤改良工法の技術的諸問題」建築基礎の評価施工に関する研究資料5 シンポジウム論文集, pp.93-98, 日本建築学会構造委員会・基礎構造運営委員会, 1999.
- 3) Ishihara, K., Iwamoto, A., Yasuda, S. and Takatsu, H. : Liquefaction of Anisotropically Consolidated Sand, *Proc. of 9<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.11-15, 1979.
- 4) Tsuboi, H., Ando, Y., Harada, K., Ohbayashi, J. and Matsui, T. : Development and Application of Non-Vibratory Sand Compaction Pile Method, *Proc. of 8<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol. 1, pp.615-620, 1998.
- 5) 原田健二, 山本実, 大林淳: 静的締固め砂杭打設地盤の $K_0$ 増加に関する一考察, 土木学会第52回年次学術講演会概要集, pp.540-541, 1997.
- 6) 松尾修: 種々の砂質の液状化強度について, 第31回地盤工学研究発表会, pp.1035-1036, 1996.