

細粒分を含んだ締固めによる改良地盤の評価

原田健二¹・安田 進²・丹羽俊輔³・新川直利⁴・出野智之⁴

¹正会員 工博 不動建設株式会社 ジョイント・アライアンス事業本部 (〒110-0016 東京都台東区台東1-2-1)

E-mail:h-kenji@fudo.co.jp

²正会員 工博 東京電機大学教授 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail: yasuda@g.dendai.ac.jp

³正会員 工修 東京電機大学 研究生 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail: 03hy090@ed.ccs.dendai.ac.jp

⁴正会員 工修 不動建設株式会社 ジョイント・アライアンス事業本部 (〒110-0016 東京都台東区台東1-2-1)

E-mail: shin@fudo.co.jp, ideno@fudo.co.jp

締固めによる改良地盤が1995年兵庫県南部地震のようなレベル2地震においても変形抑制効果があったことが報告されている。筆者らはこの要因のひとつとして、締固めによる改良地盤の特性に着目し、静止土圧係数 K_0 が増加した状態を想定した室内標準貫入土槽試験と繰返しせん断試験を実施してきた。

本報においては、きれいな砂から細粒分を含んだ試料を対象に実施した一連の実験結果から得られた N 値と液状化強度から、締固めによる改良地盤の適切な評価方法および合理的な設計方法について考察する。

Key Words : compaction method, liquefaction resistance, SPT N -value, fines content, coefficient of earth pressure at rest, relative density

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レベル2地震においても変形抑制効果があったことが報告されている¹⁾。筆者らはこの要因のひとつとして、締固めによる改良地盤の特性に着目し、豊浦標準砂を対象に静止土圧係数 K_0 が増加した状態を想定した室内標準貫入土槽試験と繰返しせん断試験を実施してきた²⁾。一般に、締固めによる改良地盤の評価は、杭間での標準貫入試験による N 値でなされており、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、その状態が長期に渡って維持されることも確認されている³⁾。 K_0 の増加が液状化強度の増加に寄与することは石原ら⁴⁾が示しており、締固めによる改良地盤の杭間の液状化強度は、 N 値より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、図-1に示すように N 値および液状化強度 R_L 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るという“ダブルカウント”の問題については比較的清い砂のみについて研究されてきており²⁾、細粒分を含んだ地盤については同様の課題が残されている。

本報では、このような K_0 の増加が締固め改良地盤の N 値や液状化強度に及ぼす影響を把握することを

目的として、きれいな砂から細粒分を含んだ試料を対象に実施した一連の実験結果より、締固めによる改良地盤の適切な評価および合理的な設計法について考察する。

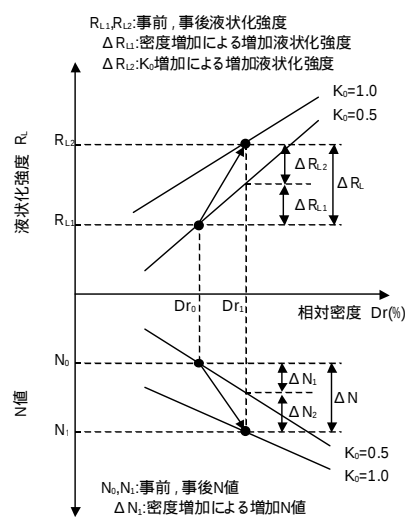


図-1 N 値、液状化強度のダブルカウントの説明図

2. 試験概要

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 増加の影響を把握するために、相対密度をパラメータとして室内標準貫入土槽試験と繰返しねじりせん断試験を実施した。

(1) 室内標準貫入土槽試験

実験に用いた標準貫入試験装置および土槽を図-2に示す。標準貫入試験装置のサンプラーとロッキングヘッドはロッドカップリングで直結しており、ロッド長は50mmである。土槽は、内径770mm、深さ921mmの鋼製円形土槽であり、模型地盤に対する水平および鉛直応力を、土槽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 状態を再現している。なお、 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。

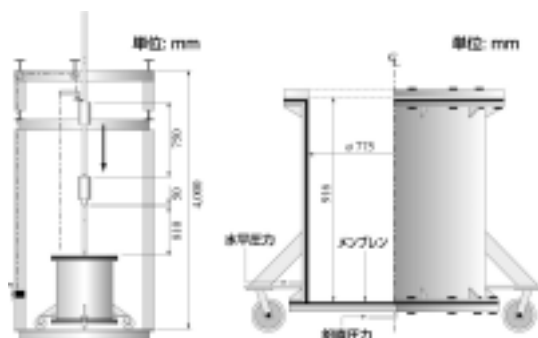


図-2 室内標準貫入試験装置および土槽

模型地盤は飽和地盤とし、図-3に示す粒度分布の3種類の試料を用いて実験を行った。以下、豊浦砂をTS試料、高浜砂をTA試料、尾久土をOK試料と略す。きれいな砂の液状化強度は、砂の最小密度・最大密度試験方法⁵⁾により定義される相対密度で評価されるが、細粒分が混入してくると緩く試料を作製したつもりでも同じ試験方法で評価すると中密な状

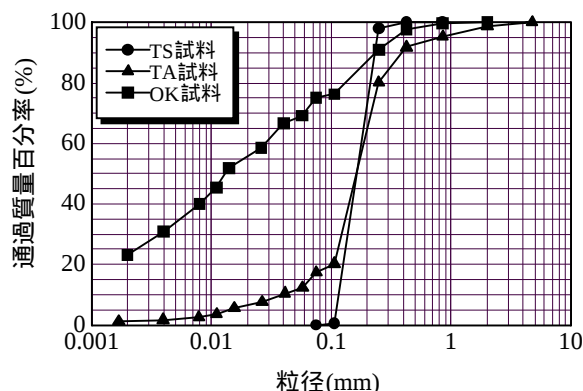


図-3 使用した試料の粒度加積曲線

表-1 使用した試料の物性値

	ρ_s	$F_c(\%)$	U_c	e_{max}	e_{min}	e_{min}^*
TS試料	2.650	0	1.51	0.985	0.611	0.674
TA試料	2.688	17.7	5.00	1.207	0.677	0.616
OK試料	2.713	70.0	-	1.605	0.685	0.624

態とされる70～80%となり、密度状態を適切に評価できないのが現状である。これについて沼田ら⁶⁾は、締固め試験により求められる最小間隙比を使った相対密度は、N値や液状化強度との相関が高いことを示している。これより、表-1の各試料の物性値一覧には、通常の試験方法で求めた最小間隙比 e_{min} と、突固めによる土の締固め試験方法（JIS A 1210:1999）のA-a法（締固め仕事量 E_c 550kJ/m³、乾燥繰返し法）により求められた最大乾燥密度を最小間隙比に換算した e_{min}^* を併記している。同表より、TS試料のような細粒分を含まないきれいな砂については、 e_{min}^* の方が大きくなっているのに対し、細粒分を含むと e_{min}^* は e_{min} に比べかなり小さくなっている。なお、細粒分を多く含むTA、OK試料の模型地盤の作製は、実験の効率化を図るため、図-4に示す地盤再利用攪拌装置を用いて試料土の再利用を行った。同装置を用いて作製した地盤の均一性についてはサンプリングした試料の粒度試験結果より、平面的、深度的にも均一であることを確認している⁷⁾。

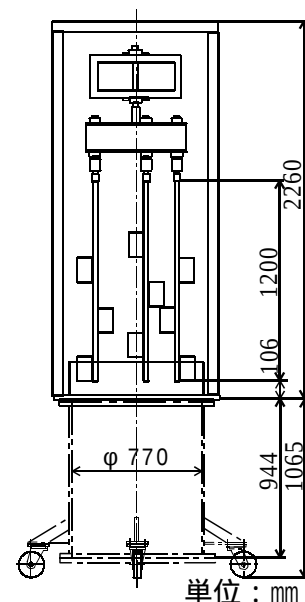


図-4 地盤再利用攪拌装置

標準貫入試験は、模型地盤作製後、水平・鉛直応力を加えて、それによる圧密が終了した後に行った。その際、土槽中央付近でのN値を得るために30cmの予備打ちを行った。また、本打ちでは一打撃ごとに拘束圧の確認をして K_0 値が一定となるよう調整した。また、重錘の落下方法はトンビ法とした。

(2) 繰返しねじりせん断試験

標準貫入土槽試験と同様の試料も用いて、中空ねじり試験装置による非排水繰返し載荷試験を行った。供試体の作製方法は最適含水比に調整した後、所定の相対密度になるように外径10cm、内径6cm、高さ10cmの中空円筒型に突き固め法で作製した。そして、B値が0.95以上になるように飽和させた後、 $\sigma_v' = 98\text{kPa}$ を一定として、それぞれの K_0 条件となるよう側圧を調整し、 $K_0 = 0.5, 1.5$ の場合は異方圧密、

$K_0=1.0$ の場合は等方圧密した．その後，非排水状態にして一定の応力比で繰返し载荷を行った．繰返しせん断応力は，ペロフラムシリンダーによる水平方向の動きをラックピニオンで回転方向に変えてねじり力が加わるようになっている．なお，異方応力状態で実験を行う場合，供試体の水平方向へのひずみ生じない状態で繰返し载荷を行う必要があるため，

繰返し载荷中の軸方向の変位を拘束するストッパーを付けて実験を行った．

3．実験結果

(1)室内標準貫入土槽試験

図-5(a)～(c)に室内標準貫入土槽試験の結果を示

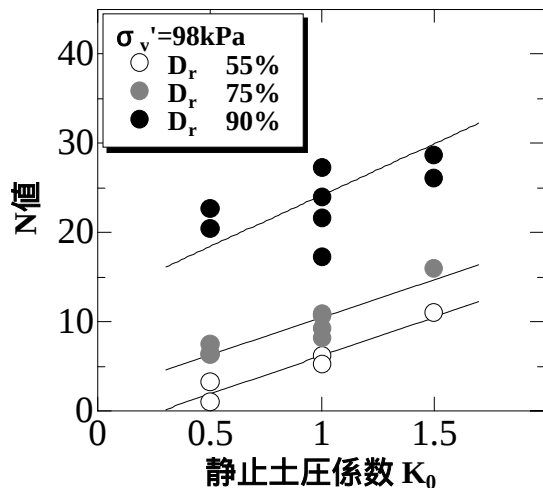


図-5(a) N値と静止土圧係数の関係 (TS 試料)

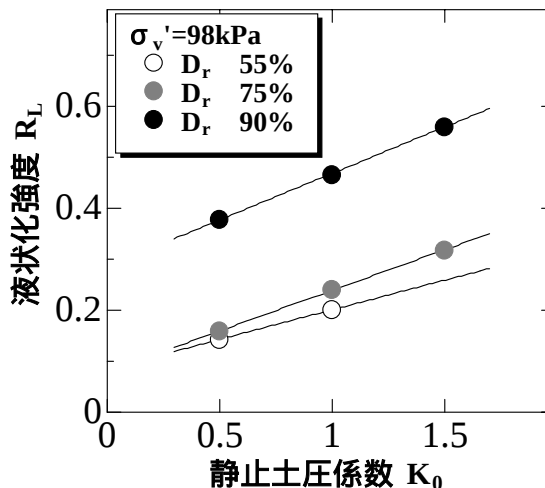


図-6(a) R_L と静止土圧係数の関係 (TS 試料)

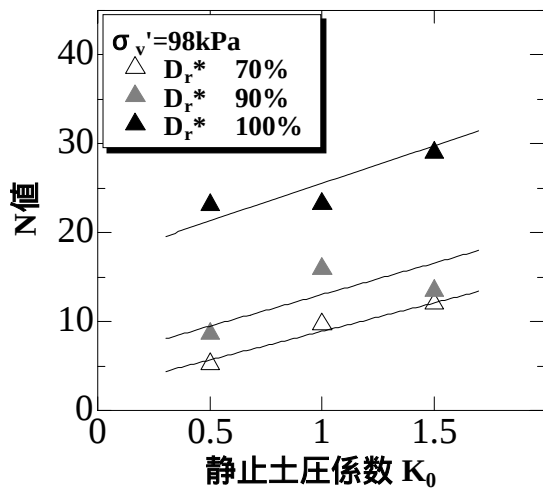


図-5(b) N値と静止土圧係数の関係 (TA 試料)

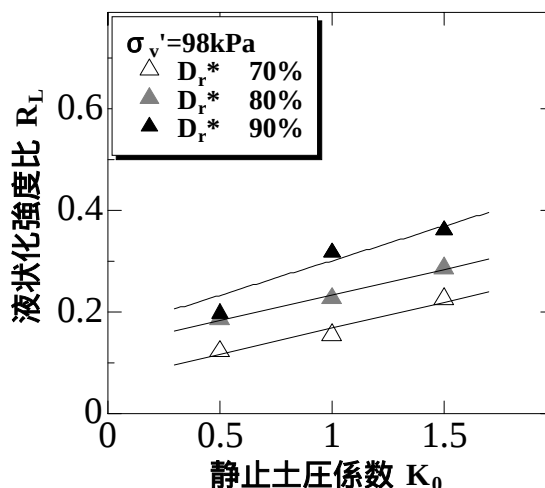


図-6(b) R_L と静止土圧係数の関係 (TA 試料)

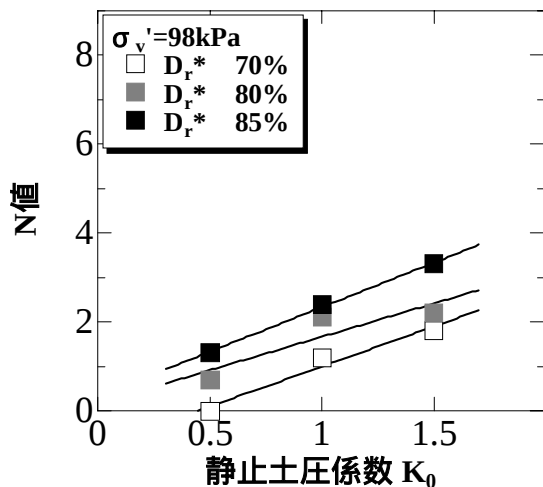


図-5(c) N値と静止土圧係数の関係 (OK 試料)

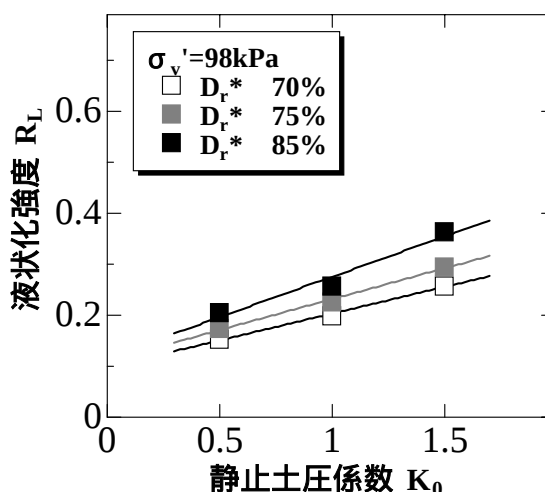


図-6(c) R_L と静止土圧係数の関係 (OK 試料)

す．図中の実線は，同程度の相対密度における試験結果の近似直線である．なお，相対密度の算定においては，TA，OK試料は通常の最小密度試験方法の適用外であり，相対密度が正しく評価できないことが考えられるため，締固め試験による最小間隙比 e_{min}^* から求めた Dr^* で評価している．

いずれの試料についても K_0 が増加することによって， N 値が増加しており， K_0 の増加に伴う N 値の増加割合は，それぞれの相対密度においてほぼ一定であることがわかる．また，相対密度がその締固められる最大の密度の状態に近くなると N 値が急増するが，その傾向は細粒分含有率の少ない試料ほど強い．

(2) 繰返しねじりせん断試験

N 値の場合と同様に，繰返しねじりせん断試験結果を液状化強度 R_L と K_0 の関係で整理したものを図-6(a)～(c)に示す．いずれの試料についても， N 値の場合と同様に R_L に及ぼす K_0 の増加効果は相対密度が異なってもほぼ一定であるといえる．

4．締固め改良地盤における N 値と液状化強度の関係

(1) 相対密度と N 値および液状化強度の関係

図-5と図-6の結果を合わせて， K_0 をパラメータに液状化強度 R_L ，相対密度 Dr （TA，OK試料については Dr^* ）， N 値の関係でみたものを図-7(a)～(c)に示す．同図の黒塗りのプロットは，図-5,6に示す実験結果の平均値であり，それを元に K_0 毎の曲線を引いている．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 値における R_L のプロットを白抜きで示している．

同一相対密度における N 値を K_0 と比較すると，いずれの試料についても， K_0 の増加に伴って N 値は大きくなるが，相対密度の大きいところではTS試料で

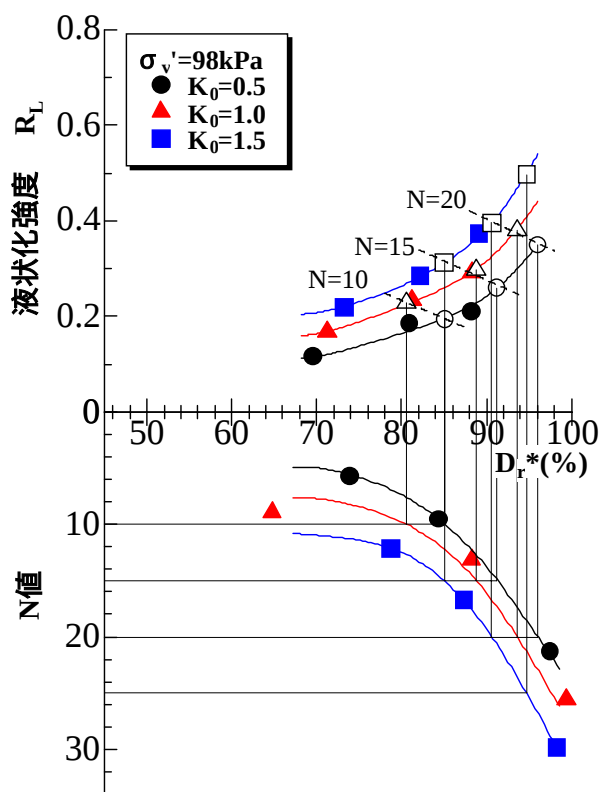


図-7(b) N 値と静止土圧係数の関係 (TA 試料)

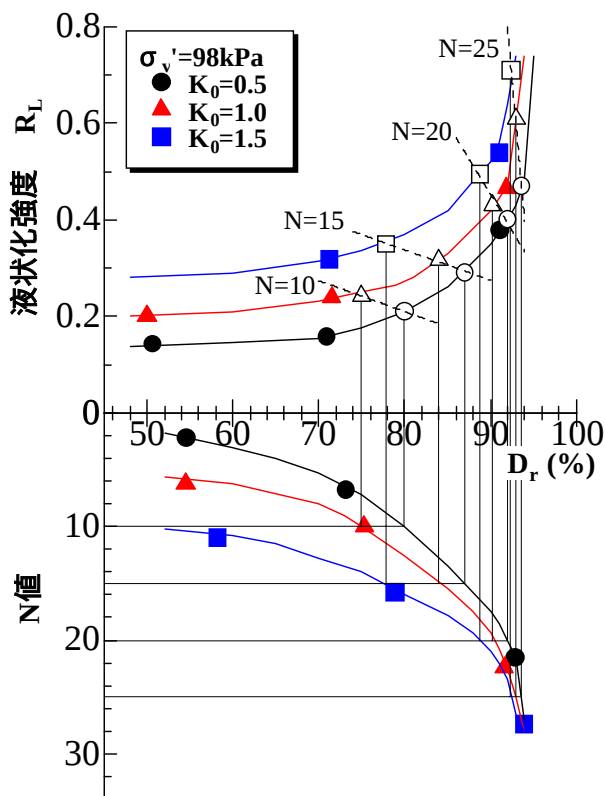


図-7(a) N 値と静止土圧係数の関係 (TS 試料)

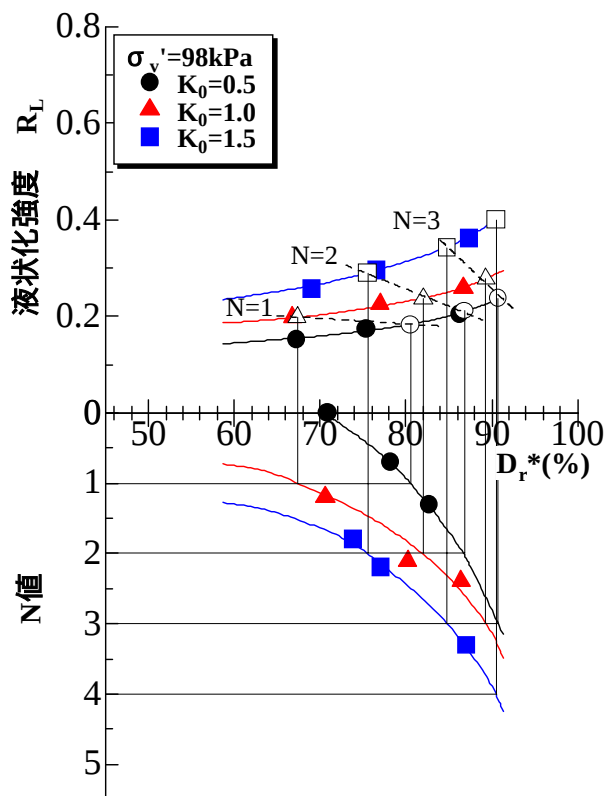


図-7(c) N 値と静止土圧係数の関係 (OK 試料)

その影響が小さくなっている．一方，液状化強度についても，相対密度の増加に伴い液状化強度が大きくなり，同一相対密度における K_0 の影響は相対密度が90%を超えてくると小さくなっており，その傾向は細粒分含有率が少いほど強い．

(2) 増加N値および増加液状化強度の分離

ここでは，図-1で示したN値および液状化強度の増加分のうち，密度増加によるものと K_0 増加によるものの割合がどの程度であるか把握するために，図-7(a)～(c)よりその割合を読み取った．図-8(a)～(c)には，初期N値が5（OK試料については初期N値が0.5）の場合における増加N値の絶対値に対するN値， R_L の分離とその割合について示す．これより明らかなように，いずれの試料も増加N値が大きくなると K_0 増加によるもの（図-1の ΔN_2 ， ΔR_{L2} ）より，密度増加によるもの（図-1の ΔN_1 ， ΔR_{L1} ）のほうが卓越し，その割合は60%～90%程度となることがわかる．ただし，液状化強度についてはN値の場合に比べ， K_0 増加による影響が若干大きくなる傾向がある．

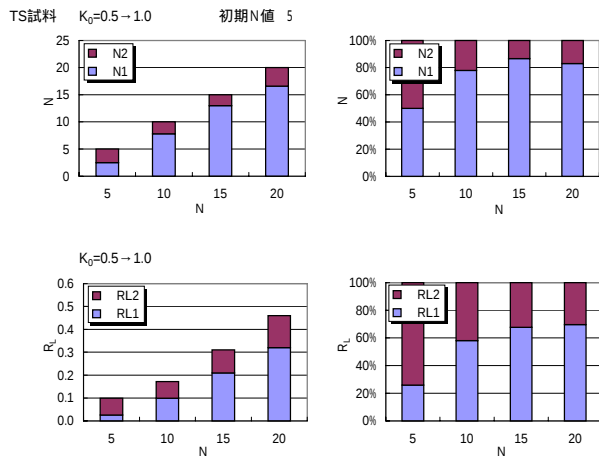


図-8(a) N値および R_L の分離（TS 試料）

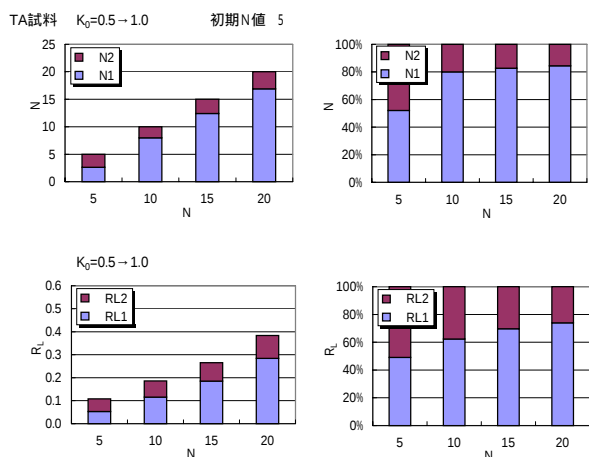


図-8(b) N値および R_L の分離（TA 試料）

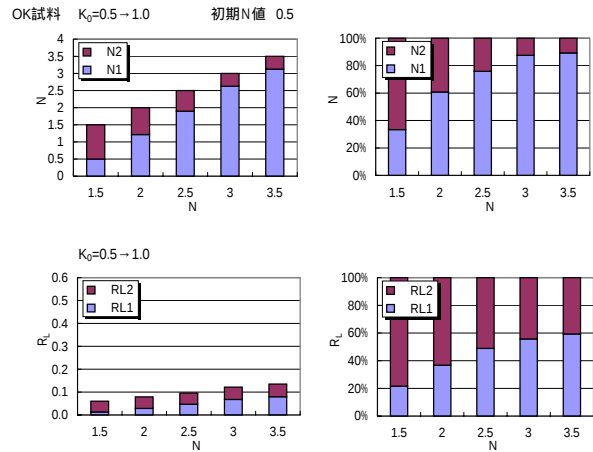


図-8(c) N値および R_L の分離（OK 試料）

(3) 締固め改良地盤のN値と液状化強度の関係

道路橋示方書(1996)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．そこで，図-9に道路橋示方書のN値と液状化強度の関係と，今回の各試料における実験結果を示す．なお，道路橋示方書の液状化強度曲線の細粒分含有率は，実験で使用した各材料のものに合わせている（TS：0%，TA：18%，OK：70%）．同図より，TS試料ではN値20程度のあたりで実験より求めた液状化強度がやや高めであるのを除くと，いずれの試料についても実験値は道路橋示方書の液状化強度曲線によく一致していることがわかる．

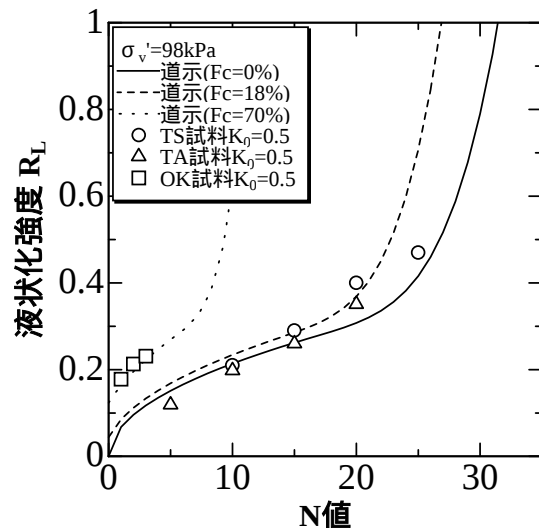


図-9 液状化強度とN値の関係（ $K_0=0.5$ ）

次に， K_0 の増加による液状化強度の増加程度に及ぼす細粒分含有率の影響を調べるために，同一の密度条件で， $K_0=0.5$ の液状化強度と $K_0=1.0$ ， 1.5 における液状化強度の比率を縦軸にとり，細粒分含有率ごとに整理したものを図-10に示す．これによると，多少のばらつきはあるものの， K_0 の増加による液状

化強度は、 K_0 が 0.5 から 1.0 となった場合で概ね 1.1～1.2 倍、 K_0 が 0.5 から 1.5 となった場合で概ね 1.2～1.5 倍となり、その増加比率は細粒分含有率によらずほぼ一定となることがわかる。サンドコンパクションパイル工法による改良地盤の調査により、改良地盤の静止土圧係数は概ね改良率に依存して増加する傾向にあることが確認されており³⁾、上記の液状化強度増加比率を用いることにより、静止土圧係数の増加という締固めによる改良地盤のひとつの特性に関する適切な評価ができるとともに、合理的な締固めによる改良地盤の設計が可能となる。

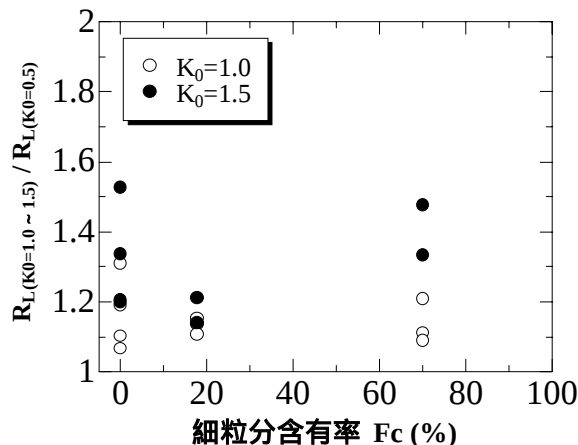


図-10 K_0 増加による液状化強度増加比率

5. まとめ

本報では、締固めによる改良地盤の液状化強度の評価に関して、静止土圧係数の増加に着目し、きれいな砂から細粒分を多く含んだ試料を対象に、標準貫入土槽実験および中空ねじり試験を行い、 N 値や液状化強度に及ぼす静止土圧係数の影響について以下に示す事項を確認した。

(1) 相対密度が大きくなるにつれ、 N 値および液状

化強度の増加に対する K_0 増加の影響は小さくなり密度増加による影響が卓越してくる。

(2) K_0 の増加による液状化強度は、 K_0 が0.5から1.0となった場合で概ね1.1～1.2倍、 K_0 が0.5から1.5となった場合で概ね1.2～1.5倍となり、その増加比率は細粒分含有率によらずほぼ一定となる。

今回の検討は、締固めによる改良地盤の特性のひとつである静止土圧係数の増加という点について検討したにすぎず、杭間と杭芯とで構成される複合地盤としての定量的な評価などについて、今後さらなる研究を進める予定である。

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，大林淳，山本実，安田進：締固めによる改良地盤の N 値と液状化強度の評価について，第11回地震工学シンポジウム講演論文集，pp.707-710., 2002.
- 3) 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回年次学術講演会集，pp.540-541，1997.
- 4) Ishihara, K., Iwamoto, A., Yasuda, S. and Takatsu, H. : Liquefaction of Anisotropically Consolidated Sand, Proc. of 9th ICSMFE, pp.11 ~ 15, 1997.
- 5) (社)地盤工学会：土質試験の方法と解説，第8章砂の最小密度・最大密度試験，pp.136-144., 2000.
- 6) 沼田淳紀，染谷昇，田雑満孝，國生剛治：細粒な土に対する最小間隙比定義方法の提案，第11回地震工学シンポジウム講演論文集，pp.665-670., 2002.
- 7) 安田進，丹羽俊輔，山下丈二：模型実験における試料土の再利用装置の開発，第4回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，pp.113-118., 2003.

(2003. 6. 30 受付)

EVALUATION OF THE GROUND IMPROVED BY COMPACTION WITH FINES CONTENT

Kenji HARADA, Susumu YASUDA, Syunsuke NIWA and Naotoshi SHINKAWA

In the 1995 Hyogo-ken Nambu Earthquake, the reduced degree of deformation observed in ground in Port Island and Rokko Island that had been improved by compaction, confirms that this type of ground improvement functioned effectively under level 2 earthquake. In order to clarify why the such improved ground resist against intence earthquake, the series of laboratory SPT container test and the cyclic shear test under anisotoropic condition were conducted noticing the increase in coefficient of earth pressure at rest K_0 in the compacted ground.

This paper describes the appropriate evaluation of the ground improved by compaction with fines content obtained from the results of these laboratory tests.