

突棒を用いた碎石ドレーン工法における 周辺地盤の締固め効果

伊藤克彦*・中島 豊**・大北康治***・
大石 博****

液状化対策工法の一つである碎石ドレーン工法は、施工時の振動・騒音が小さいため、市街地や既設構造物周辺で多く適用されている。

筆者らが開発した碎石ドレーン施工機には碎石を突固める突棒が装備されているが、突棒には周辺地盤の締固め効果も期待できる。そこで、その効果の定量化を図ることを目的に、大型土槽実験、現場実験を実施し、締固めを伴う碎石ドレーン工法の有用性を実証した。

Keywords : liquefaction, gravel drain, compaction, full scale model test, field test

1. ま え が き

碎石ドレーン工法は、グラベルドレーン工法、碎石パイル工法などとも呼ばれる液状化対策工法の一つで、透水性の高い碎石のような材料を砂地盤中に柱状に打設し、その排水効果によって地震時に砂地盤に発生する過剰間隙水圧をいち早く消散させ液状化を防止する工法である。

この工法は1976年Seedら¹⁾によって設計法が提案された。翌1977年、はやくも我が国に導入され、東京近郊の現場に適用されたが、1970年代における施工実績は4件程度であった。1983年5月26日に発生した日本海中部地震を契機として施工実績は飛躍的に増加し、1985年以降5年間で80件が報告され、いまやサンドコンパクション工法と並ぶ代表的な液状化対策工法の一つとなっている²⁾。しかしながら、この工法は地震時に地盤に発生する過剰間隙水圧の上昇過程における時間的余裕を利用しているため、瞬間的に水圧が上がる極めて緩い砂地盤などではその水圧抑制効果を発揮できず、液状化対策工として機能しない場合も考える。

筆者らはこうした問題に対処するため、低騒音・低振動で施工が可能というこの工法の特徴を生かしつつ、排水のみならず、周辺地盤の締固めという複合効果を期待できる新しいタイプの碎石ドレーン工法を開発した。すなわち、ケーシング内部に突棒を配備し、この突棒で地中に排出する碎石を突固め、間接的に周辺地盤を締固めようとするものである。

本論文はこの突棒による締固め効果を定量的に把握するために行った大型土槽実験の結果、およびそれをふま

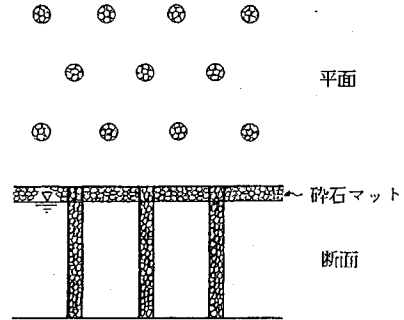


図-1 碎石ドレーンの配置

えて製作した施工機械を用いて行った現場実験結果を示すことにより、周辺地盤の締固め効果を期待しうる新たな碎石ドレーン工法の有用性について記述したものである。

2. 締固めを伴う碎石ドレーンの施工方式

(1) 碎石ドレーンの施工方式

碎石ドレーン工法は図-1のような配置で砂地盤に碎石の柱(以下碎石ドレーンと記す)を打設する工法である。碎石ドレーンは地下水位以下の緩い砂地盤を対象とするため、施工においてはケーシングの使用が前提となる。

ケーシングを貫入する方式には、①パイプローシング方式、②ドーナツオーガ方式またはベノト方式、および、③ケーシングオーガ方式の3種類があるが、①は大きな振動・騒音発生的一面で、②は施工能率、周辺地盤へ有害な変状を与える面それぞれ問題があるため、筆者らは③を基本方式として施工機械の開発を行った。ケーシングオーガを使用する方式ではケーシングと地山との摩擦、あるいはケーシングに取り付けた羽根による地山の攪乱などが原因となって周辺の地山を緩めたり、地盤の沈下を発生させたりすることが多い。そのた

* 正会員 (株) 鴻池組土木本部東京技術部長
(〒101 東京都千代田区神田駿河台 2-3-11)

** 正会員 同上課長

*** 正会員 同上課長代理

**** 正会員 工博 NKK シビルエンジニアリング部課長

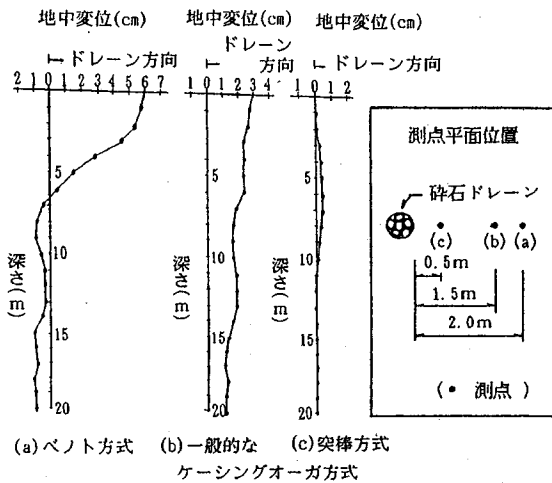


図-2 碎石ドレーン打設による地中水平変位

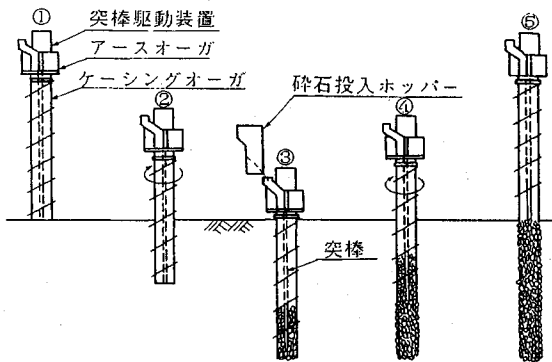


図-3 施工手順

め、ケーシング周辺地盤の乱れを何らかの形で修復することが、施工上不可欠である。その一つ的手段としてケーシング内に突棒を配備し、先端付近で排出する碎石をその突棒で突固め、押し広げることによって周辺の乱れた地盤を締固めて修復する方法がある。

図-2にN値7~12の中砂からなる地盤を対象としてベント方式(a)、一般的なケーシングオーガ方式(b)、突棒を装備したケーシングオーガ方式(c)で碎石ドレーンを施工した後の周辺地盤の代表的な地中水平変位を示す。測定位置と碎石ドレーン周面との離間距離は順に2.0、1.5、0.5mとそれぞれ異なるが、最大変位はベント方式で6cm、一般的なケーシングオーガ方式で3cm、突棒を装備したケーシングオーガ方式(以下、突棒方式と記す)で4mmとなっている。突棒方式では離間距離が短いにもかかわらず、他の方式に比較し変位は非常に小さく、突棒方式で施工すれば少なくとも碎石ドレーンへの地盤の引込みを防止できることが分る。

(2) 締固めを伴う碎石ドレーンの施工方式

突棒を使用したケーシングオーガ方式の施工は図-3

に示すような手順にしたがう。すなわち、

- ① ケーシングオーガの先端を鉛直性を確認しながら杭芯にセットする。
- ② ケーシングオーガを回転し、排土しながら所定の深さまで貫入する。これと並行してケーシング内に注水し、ケーシング先端からの地下水流入(ボーリング)防止をはかる。
- ③ ケーシング上部より碎石を投入する。
- ④ 突棒で碎石を突固めながらケーシングオーガを引き上げる。
- ⑤ ケーシングオーガを引き抜き、碎石ドレーン杭を完成させる。

筆者らはこれまでに、延長約130万mにおよぶ碎石ドレーンをこの施工機械により施工してきている。その間の施工を通じて、突棒を作動させれば周辺地盤の変位を防止するのみならず、碎石ドレーン周辺地盤をも締固めることができるとの知見が得られた³⁾。

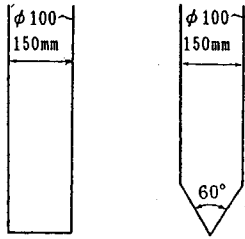
この周辺地盤の締固めが確実であれば、前述の極めて緩い砂地盤への適用性に関する問題が解決され、碎石ドレーン工法の信頼性を飛躍的に高めるのみならず、打設間隔を広げることが可能となり、経済性をも高めることができる。そこで、締固めを伴う碎石ドレーン工法の実用化に向けて、周辺地盤の効果的な締固めに最適となる突固めの方法を明確にするために次章で述べる大型土層実験を行った。

3. 突棒に関する大型土槽実験

突棒による碎石の突固め作用が周辺地盤への締固め効果(地盤の液状化強度増加量)に関与すると考えられる要因には、① 単位打設長当たりの突固め回数、② 突棒径、③ 突固めストローク、④ 突棒の先端形状、⑤ 突棒の先端位置(突棒を往復運動させるにあたってその起点となる突棒先端位置とケーシング先端位置との相対関係)、⑥ ケーシング内径、⑦ 碎石の種類および粒度などが考えられる。それらの最適な組合せを求めるとともに、突棒の締固め効果を定量的に把握することを目的に大型土槽実験を実施した。

土槽は高さ1.8mとし、直径1.2mと2.0mの2種類とした。直径1.2mの土槽は、① 模型地盤を均一にかつ能率よく作成する方法を確立すること、② 締固め効果に関与する要因のうち、地盤の液状化強度の増加量に対して支配的となる要因を見出すことの2つを目的とした予備実験に使用した⁴⁾。また、直径2mの土槽は、予備実験の成果を踏まえた本実験用に使用した。

突棒は図-4に示すように先端形状がフラットタイプと先端角が60°のコーンタイプの2種類とし、突棒径100~150mm、突固め回数50~150回/m、突固めストローク200~300mm、先端位置0~100mmの範囲で実



フラットタイプ コーンタイプ
図-4 突棒の先端形状

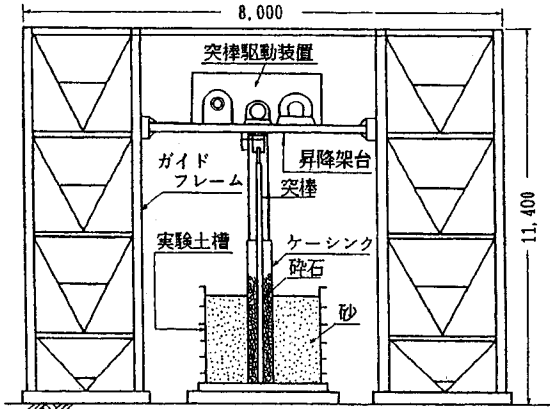


図-5 模型実験装置

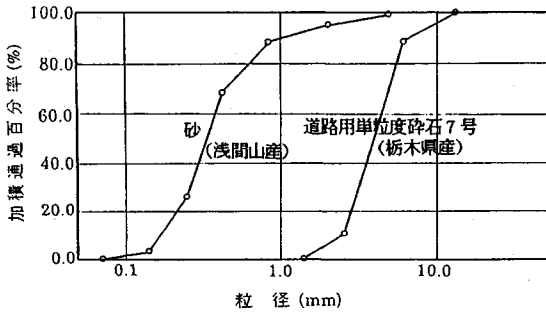


図-6 試料の粒度分布

験を実施した。予備実験の結果、前記要因の内、突固めに係わる突棒径、突棒の先端形状、突固め回数、突固めストロークが地盤の締固め度に与える影響が大きいことが分かった^{5), 6)}。

(1) 実験装置と実験手順

図-5に示す模型実験装置を用い、直径400mmの碎石ドレーン造成時の地盤の状況を模した。実験装置は、①昇降可能な突棒駆動装置、②実験土槽、③φ400mm鋼管(ケーシング)、④計測装置、⑤揚重機などの実験支援装置その他で構成し、突棒駆動装置はφ400mmの鋼管と連結した。

実験に使用した砂と碎石の粒度分布を図-6に示す。

表-1 実験条件

記号	突棒先端形状	突固めストローク	突き棒径	突き固め回数
		(mm)	(mm)	(回/m)
A	フラット	200	150	150
B	コーン	200	100	100
C	コーン	200	150	50
D	コーン	200	150	100
E	コーン	200	150	150
F	コーン	300	150	100

実験前後の土槽内地盤の締固め度の変化は、コーン貫入抵抗で評価することとし、コーン貫入試験で使用したコーンは、現場で実際に使用されているφ34.6mmとした。

おもな計測項目は以下の通りである。

突棒駆動装置：突固め時の電流、突棒反力、突棒先端位置

供試体：供試体作成時の砂の相対密度、実験前後のコーン貫入抵抗、碎石ドレーンの出来形、使用碎石量、実験時の供試体内の土圧・間隙水圧

実験は以下の順序で行った。

- ① 突棒およびケーシング(直径400mmの土槽中心への設置。
- ② 土槽内への水の注入後、ケーシング内への碎石の投入および土槽内への砂の投入。
- ③ 砂層のコーン貫入試験。(放射状に10cm間隔)
- ④ 碎石ドレーンの造成。
- ⑤ コーン貫入試験の再実施。

なお、上記②の方法で作成した供試砂の相対密度は60~70%の範囲であった。

(2) 実験結果

ここでは直径2mの実験土槽を用いた本実験のうち、表-1に示す実験条件の実験結果について述べる。なお、突棒を往復させるにあたっての基準位置はケーシング先端とし、ストローク200mmはケーシング先端より上下100mmの往復運動の全振幅を表している。

図-7に突棒径、突固め回数を同一として先端形状を変えた実験A(フラットタイプ)と実験E(コーンタイプ)の実験前後におけるコーン貫入抵抗値(q_c)の半径方向、深度方向の分布を示す。なお、実験Eについては龍岡ら⁷⁾によって提案された次式を用いて算定した q_c の有効上載圧0.098MPa(1.0kgf/cm²)に対する補正値(以下、 q_{c1} と記す)も示した。

$$q_{c1} = q_c / \sqrt{\sigma'_v} \dots \dots \dots (1)$$

σ'_v : 有効上載圧 (kgf/cm²)

同図より以下のことを指摘できる。

- ① 先端形状がフラットな突棒に対し、コーンタイプの突棒での地盤の締固め効果は著しく高い。また、締固めの影響範囲もコーンタイプでは広がる。

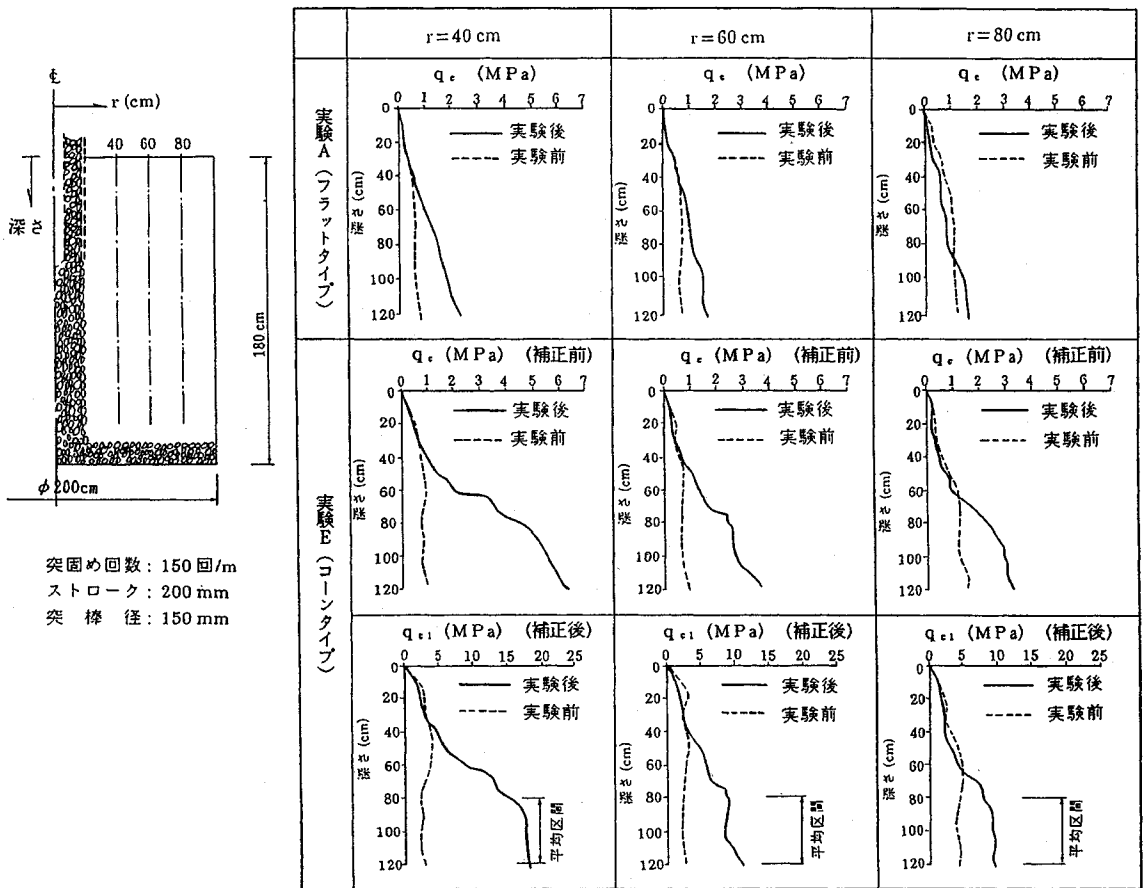


図-7 実験前後のコーン貫入抵抗値

② 実験前の q_{c1} の値は、地表面より深度 40 cm 程度まで増加し、それ以深はほぼ一定の値となる。実験後においては深度 80 cm 程度まで増加し、それ以深は一定とみなすことができる。

次に、深度 80 cm から 120 cm までの q_{c1} の実験前後の差 (以下、 Δq_{c1} と記す) を平均し、その半径方向の分布を図-8 に示す。同図より以下のことが分る。

① 土槽壁面の影響が若干見られるが、 Δq_{c1} は碎石ドレーンから離れるにしたがって双曲線状に減少する。また、突固めの影響範囲は実験 E, F で 1.0 m に達する。

② 実験 B と実験 D を比較すると突固めストロークと突固め回数が等しい場合、突棒径が大きいほど締固め効果が高い。

③ 突棒径が等しい場合、突固め回数と突固めストロークの積が大きいほど周辺地盤の締固め効果が上がる傾向にある。また、両者の積が等しい実験 E, F ではほぼ同じ結果が得られている。

④ 図-8 には突固めを行わない場合の予備実験結果 (●印で表示) をあわせて示したが、ドレーン周辺に近づくに従って負の Δq_{c1} が大きくなっている。これは碎

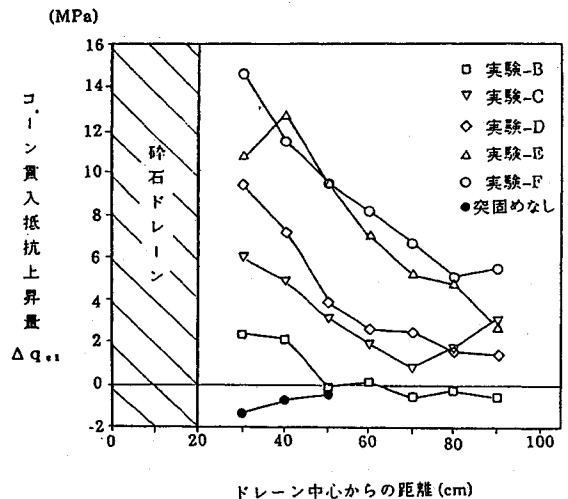


図-8 コーン貫入抵抗上昇量

石ドレーン造成時に、なんらかの形で碎石を地中に押し広げなければ、地盤を緩ませることを表したものである。

ここで、周辺地盤内の 1 点における Δq_{c1} は、碎石の突固めエネルギーの関数として与えられるという前提に

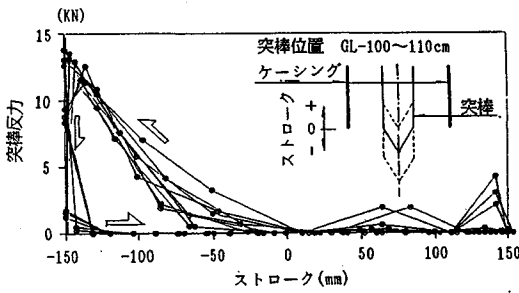


図-9 突棒ストロークと突棒反力

立つことには、大きな誤りはないと考える。

Δq_{c1} に影響するファクターとして、突棒反力・ストローク・突固めの繰返し回数、および、砕石ドレーンから着目点までの距離があげられる。すなわち、突棒による突固めの繰返しの影響は、砕石ドレーンよりの距離が離れるほど大きくなると考えられ、突固めエネルギーは放射状に広がって行くため、距離の自乗に反比例して減少すると考えられる。 Δq_{c1} に影響を及ぼすファクター間の関係を整理するため以下の仮定に基づき、突固め仕事量を検討した。

① 任意点の締固めに寄与する突棒による突固め有効範囲は、砕石ドレーン中心より任意点までの半径方向の水平距離 (以下、 r と記す) に比例する。

② 図-9 にストロークと突棒反力の関係を示すが、その軌跡はストロークが負の範囲で三角形とみなすことができる。

③ ①、②より得られた突固めの仕事量は r の自乗に反比例して発散する。

④ ①、②より突固めの仕事量は次式によって表すことができる。

$$W_p = \frac{1}{2} \cdot \frac{s}{2} \cdot \sum_{i=1}^j p_i \quad \left. \begin{array}{l} \text{ただし} \\ j = \alpha \cdot r \cdot n \end{array} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

ここに

- W_p : 締固めに寄与する突固めの仕事量 (N・m)
- s : 突棒のストローク (m)
- p_i : 1 回あたりの突棒反力最大値 (N)
- j : 着目点の締固めに寄与する突固め回数
- α : 着目点の締固めに有効な突固め範囲に関する比例定数
- r : 砕石ドレーン中心より着目点までの半径方向の水平距離 (m)
- n : ケーシングの引抜き単位長さあたりの突固め回数 (回/m)

実験では土槽の深さが限られているため p_i は一定とはならなかったが、 p_i が一定 (= p) の場合、式 (2)

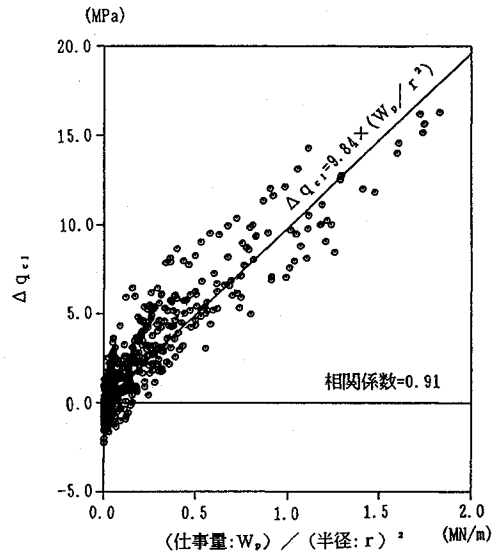


図-10 コーン貫入抵抗上昇量と仕事量

の第 1 項は次式で表わされる。

$$W_p = \frac{1}{2} \cdot \frac{s}{2} \cdot p \cdot j = \frac{\alpha}{4} \cdot s \cdot p \cdot r \cdot n \dots \dots \dots (2)$$

実験 B~F の深度 10~120 cm の Δq_{c1} と $\alpha=3$ とした W_p を r^2 で除した値の対比を図-10 に示す。両者には線形関係が認められ、次の実験式が成立する。

$$\Delta q_{c1} = 9.84 W_p / r^2 \dots \dots \dots (3)$$

式 (3) は突棒反力が地盤の締固め度をコントロールするうえでの重要な指標であることを示すとともに、 W_p と r の関連より締固め効果が双曲線的に減少することも表現していると考えられる。

4. 突固め効果の現場実験

前章において得られた突棒による周辺地盤の締固め効果を現実の施工において確認するため、4 現場を対象として現場実験を実施した。

現場実験では実施工との関連もあったため、砕石ドレーンの直径は $\phi 400$ mm ないし 500 mm とし、打設間隔は 1.2~1.8 m の正方形配列 (一部長方形配列) とした。締固め度の評価は設計で広く用いられている N 値で行うこととし、打設後の N 値の調査位置は砕石ドレーン間中央を原則とした。突固めの諸元は以下の通りである。

- ① 突棒先端形状：コーン
- ② 突棒径： $\phi 150$ mm
- ③ 突固めストローク：300 mm
- ④ 突固め回数：25 回/m

(1) 現場概要と実験結果

- a) A サイト
 - i) 現場概要

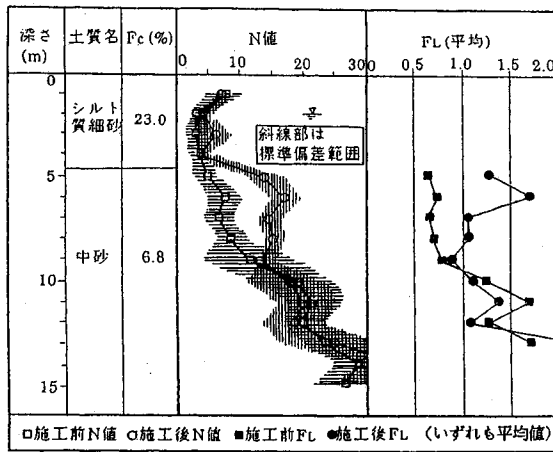


図-11 施工前後のN値の比較 (Aサイト)

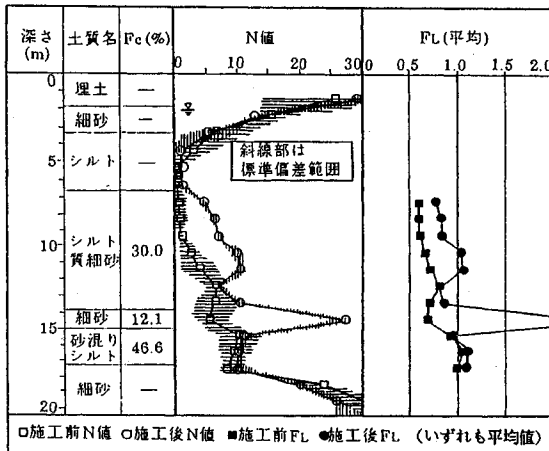


図-12 施工前後のN値の比較 (Bサイト)

新潟地震において大きな被害が発生した新潟駅周辺部の繁華街に隣接して施工した。

碎石ドレーンの仕様：

杭径 ϕ 500 mm

杭長 10.7 m

配列 1.4 m 正方形配列

ii) 実験結果

標準貫入試験は施工前に2本、施工後に4本実施した。施工前後のN値の平均値と道路橋示方書耐震設計編によって求めたFLの比較を図-11に示す。なお、図中N値の平均値周辺の斜線部分は標準偏差 ($\pm\sigma$) の範囲を表している。同図より①締固め効果は深度5m以深のN値10未満の中砂で顕著であること、②施工後のFLは大部分が1以上となり、改良地盤の液状化に対する安全率が大きく高まったことが分る。

a) Bサイト

i) 現場概要

既設岸壁背面の液状化対策として施工した。

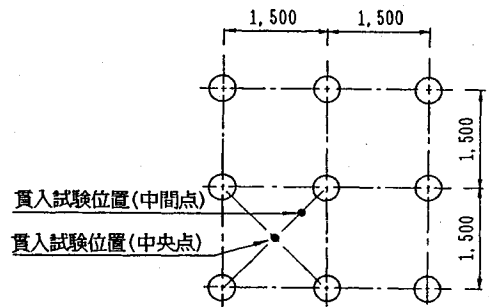


図-13 C-1工区調査位置図

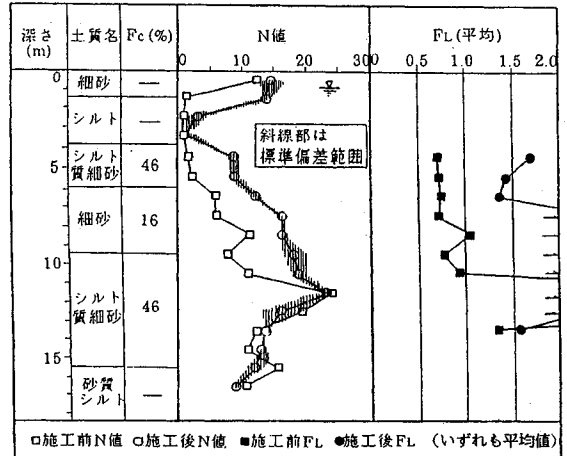


図-14 施工前後のN値の比較 (C-1工区)

碎石ドレーンの仕様：

杭径 ϕ 500 mm

杭長 17.0 m

配列 1.0×1.6 m 長方形配列

ii) 実験結果

施工前後ともに2本の標準貫入試験を行った。Aサイトと同様にまとめた試験結果を図-12に示す。シルト層では締固め効果が見られないが、砂層に対してはAサイトと同様の結果が得られた。また、FLに関してはAサイトに比較し施工前のN値が低く、施工後のFL>1の範囲が少ないが、液状化に対する安全率が上昇していることは明白である。

c) Cサイト

i) 現場概要

1.5 m, 1.8 m 正方形配列の2実験工区を設定した。

碎石ドレーンの仕様：

杭径 ϕ 400 mm

杭長 13.9 m

配列 1.5 m 正方形配列 (C-1工区)

1.8 m 正方形配列 (C-2工区)

ii) 実験結果

ここでは碎石ドレーンからの離れにともなう締固め効

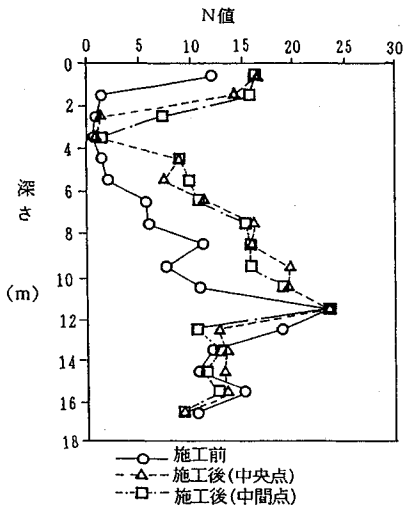


図-15 中央点と中間点の N 値の比較

果の減衰を調査するため、施工後に打設間中心(中央点)と砕石ドレーンと中央点の中間位置(中間点)各2点ずつの標準貫入試験を行った。図-13にC-1工区の調査位置を示し、図-14にC-1工区の中央点の調査結果をAサイトと同様にまとめた結果を示す。

図-15にC-1工区の中央点と、中間点の調査結果を示すが、砕石ドレーンとの調査位置との距離の影響はほとんど見られない。また、C-2工区においても同様の結果が得られた。

d) Dサイト

i) 現場概要

水処理施設での砕石ドレーン工法の適用を図るための実験工事で、1.6m正方形配列4×4=16本の工区(D-1)、1.2m正方形配列4×4=16本の工区(D-2)の2工区が設定された。ここでは動的コーン貫入試験値 N_d によって締固め効果を調査した⁸⁾。また、大型土槽実験結果と対比するため施工中の突棒反力についても測定した。

砕石ドレーンの仕様：

杭径 ϕ 500 mm

杭長 12.0 m

配列 1.6 m 正方形配列 (D-1 工区)

1.2 m 正方形配列 (D-2 工区)

ii) 実験結果

各工区で施工前9本、施工後12本の動的コーン貫入試験を行った。ここでは中央点、中間点で実施した前記Cサイトの方式に加え、非改良域における砕石ドレーン打設の影響を見るため図-16に示すような位置にも動的コーン貫入試験を行った。図-17、18にD-1およびD-2工区の中央点の N_d の施工前後の比較を示す。なお、ここでは他の実験サイトの N 値と対比するため

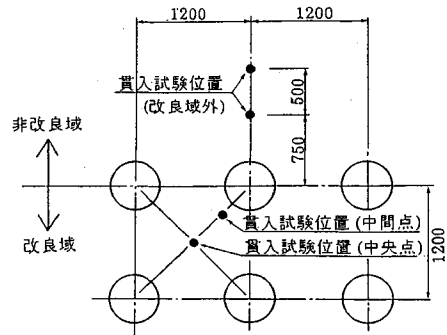


図-16 D-2工区調査位置

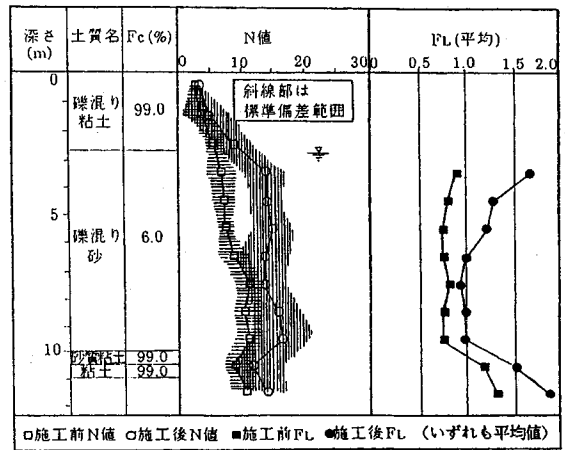


図-17 施工前後の N 値の比較 (D-1 工区)

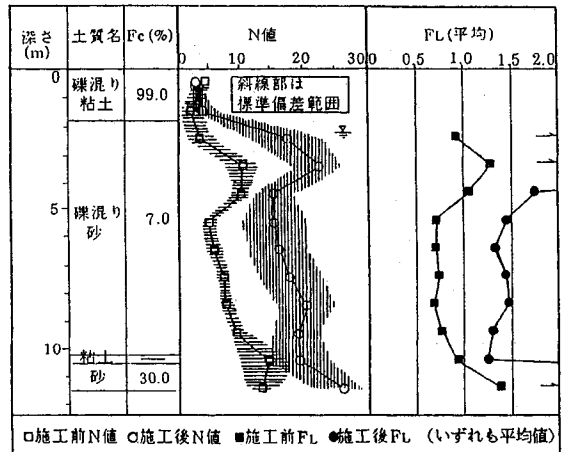


図-18 施工前後の N 値の比較 (D-2 工区)

N_d は深さ 1 m 間隔の平均値とし、 $N_d = N$ と仮定している。

打設間隔の影響は打設間隔が狭いほど、締固め効果が大きく、また、図-19に示すように中央点と中間点の差異は明白ではなかった。しかし、図-20に示すように非改良域の調査結果では、締固め効果の距離減衰がみ

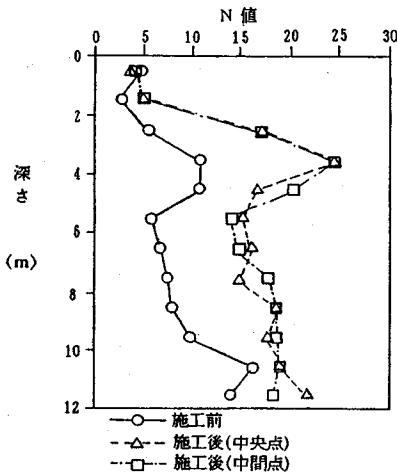


図-19 中央点と中間点の N 値の比較

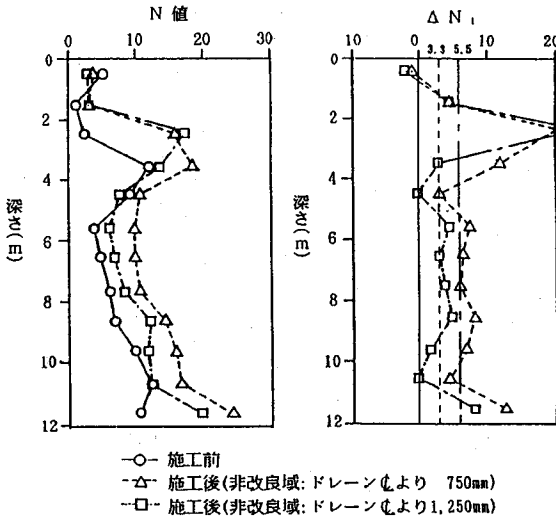


図-20 締固め効果の距離減衰

られる。つまり、砕石ドレーンが周辺に打設される改良域においては、突固めの影響が重ねあわされているため距離による明白な差異が生じないと考えられる。図-20に式(1)に準じて上載荷重 0.098 MPa (1.0 kgf/cm^2) に補正した N 値の実験前後の差 (以下、 ΔN_1 と記す) を合せ示した。

(2) N 値の上昇と実験式

D サイトにおける現場実験では、土槽実験と異なり地盤は鉛直方向に半無限とみなすことができるため、突棒反力はほぼ一定となった。 $q_c = 0.4 \cdot N$ ($q_c = 4N$ の SI 単位表示、 $0.4 \approx 4 \times 98 \times 10^{-3}$)、突棒反力一定の条件下で式(2)、式(3)は次式に展開できる。

$$\Delta N_1 = (1/0.4) \cdot \Delta q_{c1}$$

$$= (1/0.4) \cdot 9.84 \cdot \frac{\alpha}{4} \cdot s \cdot p \cdot n \cdot r^2$$

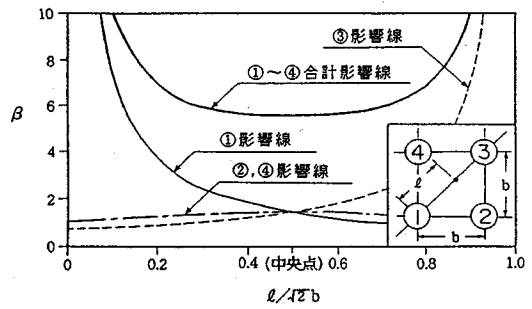


図-21 対角線上の締固めの影響線

$$= 18.45 \cdot s \cdot p \cdot n / r \dots \dots \dots (4)$$

ここに α : 突固めの有効範囲に関する比例定数 ($\alpha = 3$)

s : 突固めストローク (0.3 m)

n : 単位長さあたりの突固め回数 (25 回/m)

式(4)における 18.45 という定数は地盤の粒度構成などによって変化すると考えられるが、D サイトにおける N_d の測定位置に最も近い砕石ドレーン施工時の突棒反力 (0.03 MN) より上式に従って非改良域の ΔN_1 を求めてみた。その結果、砕石ドレーン中央からの距離が 0.75 m の位置で 5.5、1.25 m の位置で 3.3 となり、実験式で得られた計算結果と図-20 の実測値はほぼ等しい値となった。

式(4)は、砕石ドレーン 1 本あたりの周辺地盤の N 値の上昇量を表しているため、改良域においては式(4)が重ね合わされた結果が測定されているものと考えられる。図-21 に式(4)の単純な重ね合わせが成立すると仮定した場合の正方形配列 (砕石ドレーンの打設間隔: b) 対角線上の周辺地盤の N 値の上昇量の影響線を示す。同図、横軸は対角線上の距離に関する無次元量で、説明図中の砕石ドレーン①からの離間距離を対角線の長さ $\sqrt{2} \cdot b$ で除した値としている。縦軸は無次元量 β とし、間隔 b で打設した改良域の補正 N 値の上昇量 (ΔN_{b4}) を求める上での係数としている。

ここに、 $\beta = \Delta N_{b4} / \Delta N_{b1}$

ΔN_{b1} : 砕石ドレーン中心より b 離れた地点の砕石ドレーン打設 1 本あたりの補正 N 値の上昇量

同図は砕石ドレーン近傍を除き β はほぼ均一となることを表しており、現場実験において中間点と中央点の N 値の差異がみられなかったことがこれによって説明できるものとする。なお、中央点は図中横軸 0.5 に対応し、中央点の β は砕石ドレーン 1 本当たり $\sqrt{2}$ となっている。

(3) 施工後の N 値の上昇量

図-22 に A から D までの 4 現場に対し施工前の N 値が 15 未満、かつ細粒分含有率 (以下、 F_c と記す) が 20% 未満の地層の N 値に関し、横軸に施工前、縦軸に

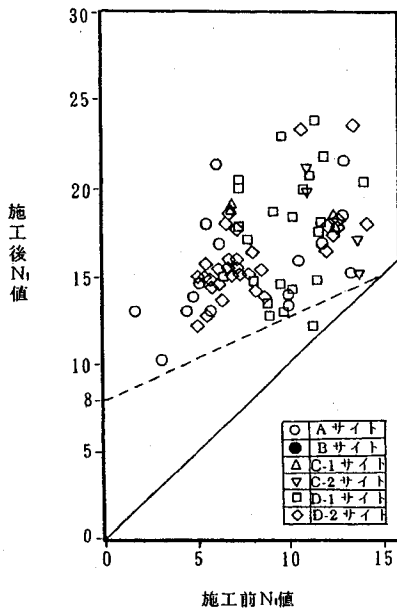


図-22 施工前後の N_1 値の比較 ($F_c < 20\%$)

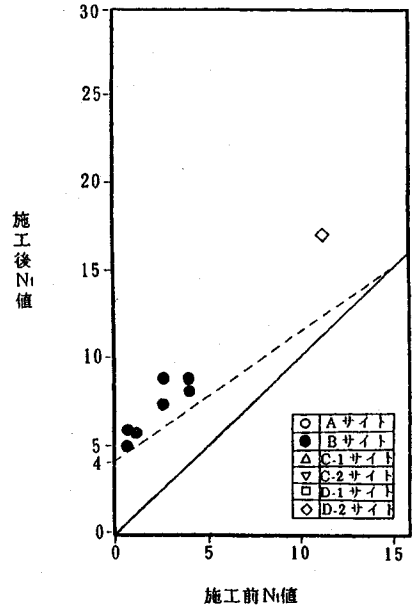


図-23 施工前後の N_1 値の比較 ($20\% \leq F_c \leq 30\%$)

施工後の N 値をとり対比した。ここでの N 値は式 (1) に準じて 0.098 MPa (1 kgf/cm^2) の有効応力下に対する補正した N 値 (以下、 N_1 と記す) である。なお、打設間隔の標準としては 1.5 m 正方形配列を考え、各現場における打設間隔の違いは砕石ドレーンの打設間隔の比で除することによって補正し、同一のグラフに示した。また、地層の境界付近に関しては境界上下 1 m のデータを除いた。図中 45° の実線は施工前後の N 値が等しいことを表している。図-23 に F_c が 20% 以上、 30% 以下の地層の N 値に対し同様に対比した。

図-22 より F_c が 20% 未満の範囲では切片 8 の破線が施工後の N_1 の下限線を、図-23 より F_c が 20% 以上 30% 以下では切片 4 の破線が施工後の N_1 の下限線を示している。

図-22, 23 より、 F_c が 30% 以下の地盤に対して締固め効果を考慮にいれた砕石ドレーンの設計が可能である。すなわち、既往の研究成果より地盤の液状化強度特性と N 値は関連づけられており⁹⁾、また、砕石ドレーンの設計にかかわるその他の土質定数も N 値と関連づけられている。そのため、原地盤の N 値に対し、図-22, 23 の 45° の実線と点線内の範囲で設計上の N 値を設定し、従来の砕石ドレーン設計手法によって締固めを伴う砕石ドレーンの設計が可能となる。なお、この場合の設計上の N 値は打設間隔補正を行う必要があるため砕石ドレーンの設計は繰返し計算となる。

締固めを伴う砕石ドレーンは、従来の砕石ドレーンに対し設計条件が同一であれば打設間隔が広げられ、打設間隔を同一とすれば地盤の液状化強度が大きく高められ

る⁶⁾。これは締固めを伴う砕石ドレーンが経済性あるいは安全性が高い液状化対策であることを示している。

5. まとめ

本論文で得られた主な結論を以下に示す。

① 突棒の先端形状が周辺地盤の締固め効果に与える影響は大きく、フラットタイプよりコーンタイプ (先端角 60°) の方が締固め効果大きい。

② 突棒をコーンタイプで施工した現場での F_L 値は大部分が 1 以上となった。砕石ドレーン本来の機能は排水であることを考えれば、コーンタイプの突棒で施工する現場では打設間隔を広くすることが可能である。

③ 突棒反力は砕石ドレーン周辺地盤の締固め効果を把握する上での指標となり、その締固め効果は土槽実験で得られた実験式を適用して推定することも可能である。

④ 砕石ドレーン周辺地盤の締固め度は、砕石ドレーンとの距離が大きくなるにしたがって双曲線的に減衰するが、砕石ドレーンによって囲まれた地盤ではそれぞれ 1 本当りの施工の影響が重複し、砕石ドレーン間の締固め効果はほぼ均一とみなすことができる。

⑤ 液状化が特に問題となる $F_c < 20\%$ 、施工前の N_1 が 10 未満の地盤に対し、突棒による周辺地盤の締固め効果は顕著である。

⑥ 図-22, 23 をもととして繰返し計算を行うことによって締固めを考慮にいれた砕石ドレーンの設計が可能である。この方法で設計した締固めを伴う砕石ドレーンは従来の砕石ドレーンに対し打設間隔を広くする

ことができ、経済性を高めることができる。打設間隔を同一として設計すれば地盤の液状化強度が高まり、地震に対する安全性を高めることができる。

6. あとがき

都市化の進展が著しい現在、低公害で施工が可能な液状化対策工法として砕石ドレーン工法は、ますますその適用範囲を広めていくものと考えられる。しかし、本工法は液状化対策として一般的な振動締固め工法に比較し高価な工法であり、また緩い砂地盤に対する適用には不向きであるとの指摘もある¹⁰⁾。大地震のたびに発生する液状化による被害を未然に防止するにあたって、より経済性が高く、不確定な地震入力に対して安全性・信頼性の高い対策工法を開発することは重要であり、この観点より砕石ドレーン工法の研究を進めてきた。ここでは、突棒方式の砕石ドレーン工法における周辺地盤の締固め効果を述べたが、現時点では細粒分含有率の高い土質に対する締固め効果の確認事例が少ないため、今後、このような土質に対する現場でのデータの蓄積を図っていくことを考えている。

最後に、本工法の開発には東京大学石原研而教授にご指導を賜っており、ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Seed, H.B. and Booker, J.R. : Stabilization of Potentially

Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains, J. GED, ASCE Vol.103, No. GT 7, pp.757~768, 1977.

- 2) 田中幸久・中島豊・坪井秀夫：対策工法，地盤の液状化対策に関するシンポジウム発表論文集，pp.15~40, 1991.
- 3) 伊藤克彦・中島豊・大北康治・大石博：新潟市内における砕石ドレーン工法施工例，第22回土質工学研究発表会講演集，pp.795~796, 1987.
- 4) 市川晴雄・三木秀二・大北康治・中島豊・伊藤克彦：砕石ドレーン突固め効果実物大模型実験（その1），第25回土質工学研究発表会講演集，pp.19~20, 1990.
- 5) 大北康治・三木秀二・伊藤克彦：砕石ドレーン突固め効果実物大模型実験（その2），土木学会第45回年次学術講演会講演概要集，pp.414~415, 1990.
- 6) 伊藤克彦・中島豊・大北康治・大石博：締固めを伴うグラベルドレーン工法，土と基礎，Vol.39, No.2, 土質工学会，pp.41~46, 1991.
- 7) 石原研而他：都市における地震危険度に関する研究，文部省科学研究費（No.01601013）自然災害特別研究計画研究成果，pp.75~123, 1990.
- 8) 小林信博・玉木博・朝尾幸司・大北康治：下水活性スラグの砕石ドレーンへの利用性に関する現位置試験，第28回下水道研究発表会講演集，1991.
- 9) 岩崎敏雄・龍岡文雄・安田進：不攪乱砂質土の非排水動的強度の正規化表示，第13回土質工学研究発表会講演集，pp.465~468, 1978.
- 10) 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, 土質工学会，pp.33~38, 1978. (1991.5.15 受付)

EFFECT OF SOIL DENSIFICATION APPLYING THE GRAVEL DRAIN SYSTEM WITH A COMPACTION ROD

Katsuhiko ITO, Yutaka NAKAJIMA, Yasuji OKITA and Hiroshi OISHI

The gravel drain system aims to avert liquefaction by quickly dissipating excess pore pressure. Since construction of gravel drains produces no serious vibration and noise, it is suitable to sites in urban areas and adjacent to existing structures. We have developed a compaction-rod type machine. One of the important characteristics of this machine is the compaction effect of the surrounding ground. To take advantage of the compaction effect, we undertook full scale model tests and verification field tests in which the increase in the strength of the surrounding ground was tested. In this paper, the compaction effect of the surrounding soil imparted by a specially designed compaction rod is shown by the test results.