

低騒音・低振動で地盤密度を増大させる 液状化対策工法「TS-improver」を開発

中西 馨・本谷 洋二・大高 信雄

近年巨大地震の発生確率の具体的な数値が発表され、防災に対する意識の高まりとともにその対策が求められている。一方、建設工事においては、周辺環境への配慮やその経済性も求められている。そこで経済的で環境にやさしい液状化対策工法を目標に、低騒音・低振動かつ周辺地盤への変位を低減できる「TS-improver」工法を開発した。本稿では、実証実験の結果からその特徴と効果を示すとともに液状化対策としての設計と複合地盤としての設計も併せて紹介する。

キーワード：液状化対策, 密度増大工法, 改良杭径φ800, 高周波バイブロ, 低振動・低騒音, 変位低減, 複合地盤

1. はじめに

近年、南海トラフや首都直下といった巨大地震の発生が予見されているなか、去年は能登半島地震が発生し、夏には気象庁から「南海トラフ地震臨時情報」が発表された。

一度、巨大地震が発生するとその人的・経済的被害は甚大であり、社会経済活動を行ううえで必要な建物やインフラの被害も致命的なものとなることが予想される。我々はこのような状況に陥った場合、レジリエントに適応していくことが求められるが、少しでも事前の備えをしておくことが重要である。

本稿では、こうした地震時防災・減災等の都市基盤整備の一環として液状化対策に適用可能な地盤改良技術「TS-improver」工法（以下、本工法）の開発について報告する。

2. 本工法の概要

(1) 液状化, その対策と課題

地震が発生すると、緩い砂質地盤は地震動による繰返しせん断を受け、土粒子がその間隙に落込み体積が減少（負のダイレイタンス）する。地震のように短時間にせん断力が作用する場合、間隙水の排水が追付かず間隙水が圧縮応力を受ける状態となり、間隙水圧の上昇と有効応力の減少を引起こし、各土粒子がバラバラの状態になり、間隙水中を浮遊する状態となる。これが液状化である。

液状化が発生すると、地中に埋設された配管やマンホールなど地盤より比重の小さいものは浮上がり、直接基礎など地盤より比重の大きいものは沈下したり傾斜したりと安定性を保てなくなる。また、護岸際などで常に偏荷重が作用している地盤では液状化に伴う側方流動が発生しやすく、この側方流動に伴う大きな変位は杭基礎を損傷させることもある。液状化は多種多様なインフラ施設の被害を誘発する。

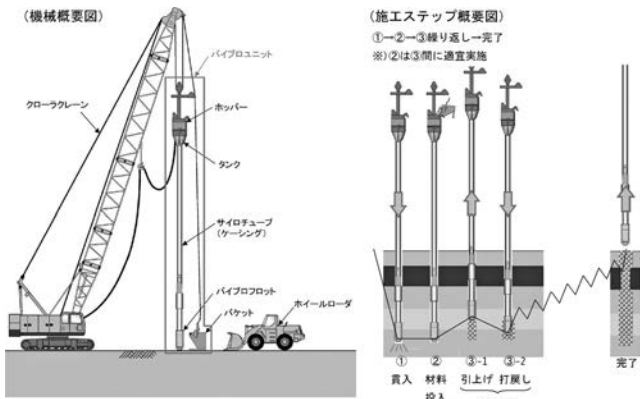
この液状化の発生を防止する策としては、土の性質を改良するか地盤内の応力・変形・間隙水圧に関する条件を改善するかの2通りがある。

本稿で記載する本工法は土の性質を改良するものに区分され、地盤の密度を増大する工法である。現在、日本国内での主な密度増大工法としては、サンドコンパクションパイル（SCP）工法がある。SCPは地盤中に振動と衝撃などの動的作用により砂杭を造成する工法である。また、都市部など振動・騒音などの周辺環境への対応を求められる場面では静的に圧入する無振動低騒音工法が採用されている。しかし、この静的な工法は動的な工法に比べて割高であるという欠点を抱えている。さらに、どちらの工法も近接部に地盤変状を発生させてしまう課題を有している。

このような状況を打開すべく、筆者らは周辺環境へ配慮した経済的な締固め系の液状化対策として本工法を開発した。

(2) 工法概要

本工法で使用する施工機はサイロチューブと呼ばれ



図一 本工法の機械概要と施工ステップ

るケーシングパイプの先端に水平振動させるバイブロプロット（高周波振動装置）を有する。このサイロチューブを地盤に貫入し、その下端部から中詰材を地中に供給しながら、バイブロユニットの引上げと打戻し工程の繰返しにより改良杭を造成し、周辺地盤の密度増大を図る工法である（図一）。

3. 改良原理と特長

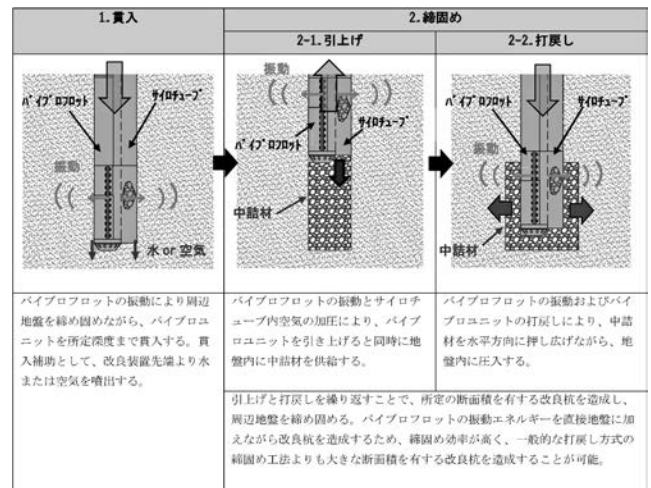
(1) 施工手順と改良メカニズム

本工法の施工ステップは、図一に示すように、①バイブロプロットを起振後に、バイブロユニット先端よりエア（または水を併用）を噴射しながら改良杭下端深度まで貫入する。②貫入完了後、バイブロユニット頂部のホッパーに碎石等の中詰め材を投入し締固めを開始する。③-1「引上げ」と③-2「打戻し」を交互に繰返し、中詰め材を地盤内に供給しながら押し広げることで改良杭の拡径を行う。

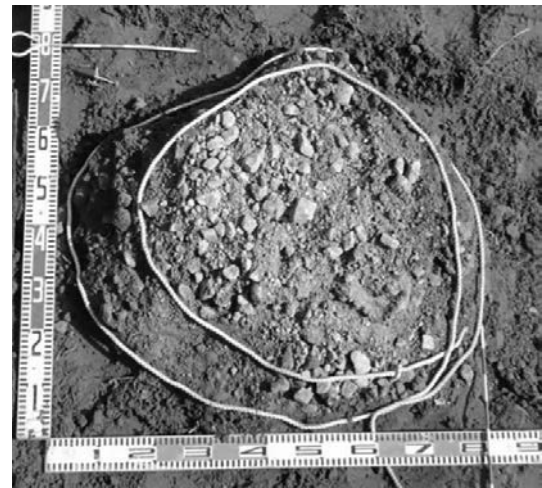
本工法は、地中に貫入したバイブロプロットの振動と中詰め材の圧入により、周辺地盤に繰返しせん断ひずみを与えて締固めるものである（図二）。

バイブロプロットの振動エネルギーを直接地盤に加えながら締固めを行うため、バイブロプロットの極近傍では一時的に間隙水圧が上昇し、土粒子の再配列が引きこされる。この動的エネルギーの作用を加えながら、サイロチューブ内の空気圧で中詰め材を地盤内に供給する「引上げ」と中詰め材を水平方向に押し広げるバイブロユニットの「打戻し」の締固めの繰返しによる静的エネルギーで地盤にせん断ひずみを与える。つまり、動的エネルギーと静的エネルギーが同時に作用することにより、効率的に締固めを行うことが可能となっている。

過年度の実証実験で、改良地盤をGL-2.0m程度まで掘削して改良杭の出来形を確認した。締固めのス



図二 改良原理



写真一 改良杭の出来形

トローク毎（引上げ：約 100 cm，打戻し：約 75 cm）に色を変えた中詰め材を用いて造成を行った結果、写真一に示すように先行ストロークでの材料が後行ストロークの材料で同心円状に水平方向へ押し出されているのがわかる。

(2) 特長

本工法の特徴を以下に示す。

- ①評価改良杭径φ 800 mmの太径改良杭を造成することで既往のSCP工法（杭径φ700 mm）に比べ改良杭本数が減り、施工延長を20%程度削減可能である。
- ②距離減衰が大きい高周波振動機が地中部で動作するため、低振動・低騒音での施工が可能である。
- ③振動エネルギーを併用して締固めを行うため、従来工法に比べ周辺地盤の変位を低減できる。
- ④懸垂型の改良機のため三点式杭打機などの専用機ではなく、汎用クレーンで施工ができる。
- ⑤先端フィンやウォータージェットなどの貫入補助装

置の併用により、貫入と締固めを容易にし、施工性の向上を図っている。

- ⑥ボトムフィード方式の採用により、中詰め材の量管理が可能となり、供給量不足を防止し、改良杭の品質を確保できる。

4. 設計法

一般的に液状化判定はFL法で行われることが多く、そのFL法にはN値を用いる。そのため、液状化対策の設計では改良杭間の目標N値を設定して、それを満足するための改良率を算定する(図-3)。

本工法は振動成分と圧入成分の両方の作用によって地盤を改良するものであるが、その寄与率が高いと推定される振動成分を反映した独自の設計式の提案には至っていない。そこで、SCP工法に用いられている方法のうち、港湾技研にて提唱されたκ法¹⁾で用いる。このκ法は、N値と相対密度および累積せん断ひずみの関係を利用したものであり、累積せん断ひずみの増分は改良率と比例関係にあり、締固め効果に影響を及ぼす細粒分含有率を用いて比例定数κを変化させるものである。

改良率の算定に当たっては、評価改良杭径φ800mmを使用する。写真-1に示す出来形確認での測定結果は、X方向は68cm～86cm、Y方向は50cm～

<p>STEP1. 原地盤の最大間隙比 e_{max}、最小間隙比 e_{min} を細粒分含有率 F_c より下式を用いて求める。 $e_{max} = 0.02F_c + 1.0$, $e_{min} = 0.6$</p>
<p>STEP2. 原地盤の相対密度 D_{r0} を原地盤N値 N_0 と有効上載圧 σ_v' より下式を用いて求める。 $D_{r0} = 0.16 \sqrt{\frac{167}{69 + \sigma_v'}} N_0$ (Meyerhofの式)</p>
<p>STEP3. 地盤の初期状態における相対密度と累積せん断ひずみの関係式より、地盤の初期累積せん断ひずみ γ_i^* を原地盤の相対密度 D_{r0} より下式を用いて求める。 $D_{r0} = \frac{\gamma_i^*}{(c_1/c_2) + \gamma_i^*}$ (地盤の初期状態における相対密度と累積せん断ひずみの関係式) $\gamma_i^* = \frac{D_{r0}}{(c_2/c_1)(1 - D_{r0})}$ ここに、 $c_1 = e_{max} - e_{min}$, $c_2 = 1 + e_{max}$</p>
<p>STEP4. 目標N値 N_1 に対応する地盤の相対密度 D_{r1} をSTEP2の式の N_0 を N_1 に変えて求める。 $D_{r1} = 0.16 \sqrt{\frac{167}{69 + \sigma_v'}} N_1$</p>
<p>STEP5. 改良後の相対密度と累積せん断ひずみの関係式も用いて、改良後の相対密度が目標N値 N_1 に対応する相対密度 D_{r1} となる改良率 a_s を算定する。 $D_{r1} = \frac{\Delta\gamma^* + \gamma_i^*}{(c_1/c_2) + (\Delta\gamma^* + \gamma_i^*)}$ (改良後の相対密度と累積せん断ひずみの関係式) $a_s = \frac{(c_1/c_2 + \gamma_i^*) \times D_{r1} - \gamma_i^*}{\kappa \times (1 - D_{r1})}$ ここに、 $\Delta\gamma^*$: 改良による累積せん断ひずみの増分 $\Delta\gamma^* = \kappa \times a_s$ (SCP工法に対する提案式) κ: 係数 $\kappa = 5 \times 10^{-0.01 F_c}$ (SCP工法に対する提案式)</p>

図-3 改良率の算定フロー

88 cm であり、地盤改良に寄与する成分の内、圧入成分のみに換算した改良効果と等価な改良杭径を逆算してφ800 mmとした²⁾。

5. 実証実験

本工法開発では実機を用いた実証実験を4年にわたる愛知、秋田、茨城にて実施し、締固め効果の確認、周辺環境への影響評価、複合地盤としての支持力増大効果の確認を行った。

図-4に示すように施工機先端に高周波振動機を装着しており、これが地中部に貫入される。貫入と締固めは基本的に施工機の振動と自重で行うため、比較的N値が高い地盤にも適用できるように補助装置を装着した。補助装置として、貫入時に使用するウォータージェットやエアージェット(図-5A)をパイプフロット先端部の横に設置した。また、地中への中詰め材の投入を容易にするために材料排出口を拡張したガイドチューブ(図-5B)と貫入および締固め時の打戻しと改良杭の拡張を容易にするために先端フィン(図-5C)を追加装着した。

改良杭芯の位置出しの間違い防止と施工の効率化を目的としてGNSSを利用した平面位置管理装置(図-6A)を装備している。これにより改良機を所定の杭芯位置まで誘導することが可能となっている。また、品質および日常出来形管理のために帳票作成システム(図-6B)も導入している。

実験の仕様として、改良率は10%、15%、20%の3水準(評価改良杭径φ800mm)とし、主な対象地盤は砂質土、中詰め材は碎石(再生材、バージン材)や砂を用いた。締固め効果の確認のために改良前後に標準貫入試験

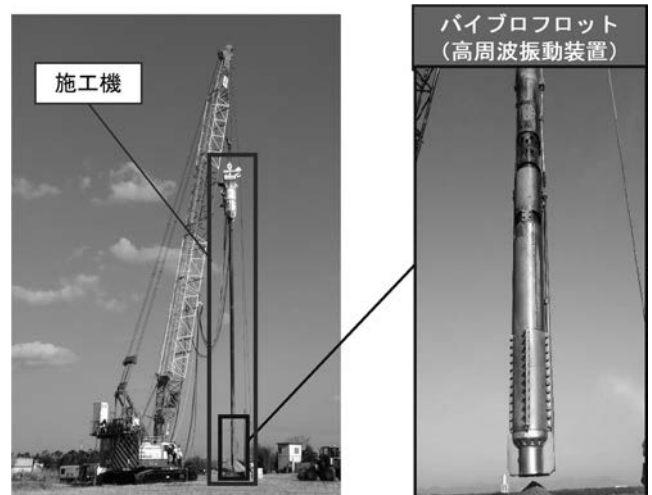


図-4 施工機：高周波振動機

(一部コーン貫入試験：CPT) と粒度試験，周辺環境への影響を測定するために地表面での変位計測，振動・騒音計測，間隙水圧の測定を行った (図一七)。



A ウォータージェット

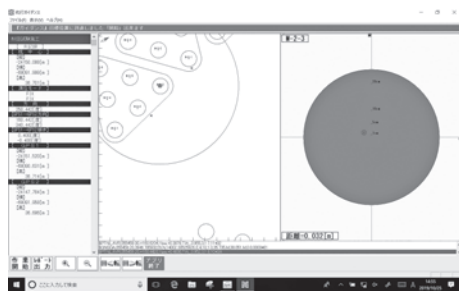


B ガイドチューブ

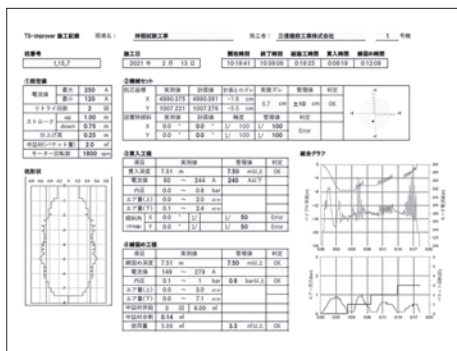


C 先端フィン

図一五 補助装置



A 平面位置管理システム



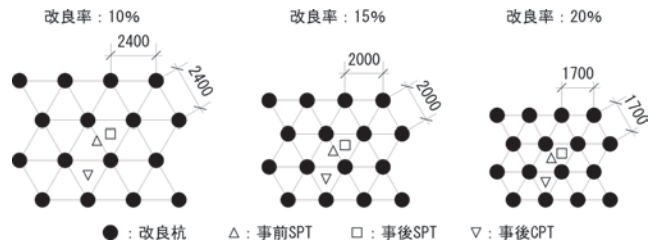
B 帳票作成システム

図一六 位置管理と帳票システム

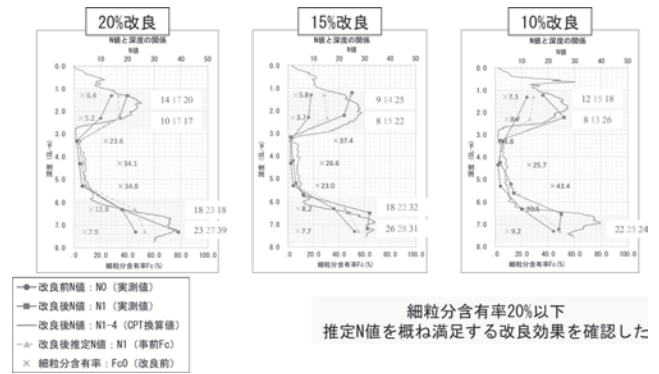
(1) 締固め効果

最終年の茨城県神栖市での実証実験における締固め効果を以下に示す。改良深度はGL±0.0 m ~ -7.5 m で，対象土質は砂質土であるがGL-3.0 m ~ -6.0 m は平均細粒分含有率 Fc 38% 程度のシルト質砂層である。改良前後で実施した貫入試験結果およびκ法による推定 N 値を図一八に示す。砂質土に対しては改良後 N 値が改良前より上昇しており，推定 N 値と同等以上の値となっている。中間のシルト質砂層部は非液状化層であるが，実測 N 値も推定 N 値も改良前からほとんど変化がなく，細粒分が多いことで締固め効果が悪いことがわかる。

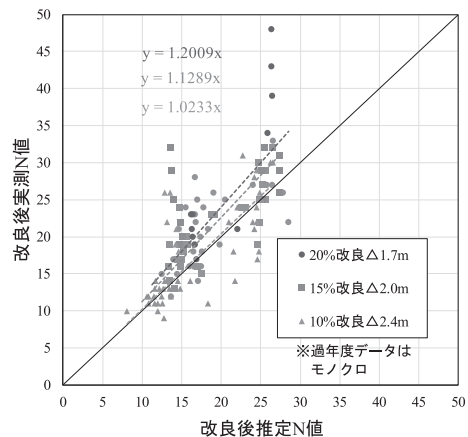
また，4 年間で実施した改良後実測 N 値と評価改良杭径φ800 mm としてκ法により推定した N 値の関係を図一九に示す。すべての改良率で実測 N 値と推定 N



図一七 改良杭配置と改良率



図一八 改良前後の貫入試験結果



図一九 改良後の実測 N 値と推定 N 値

値の相関式の傾きが1以上あり、評価改良杭径φ800mmを用いて評価すれば必要な改良後N値をおおむね確保できる。

2～3年目に秋田市で実施した実証実験において測定したN値の経年変化を図-10に示す。改良後の事後N値とその1年後のN値はおおむね同値であり、経年で締固め効果が下がることはないと推定される。

(2) 周辺への影響

(a) 振動・騒音

施工位置からおおよそ5m～100mの範囲で測定した振動と騒音の結果を図-11に示す。振動は動的

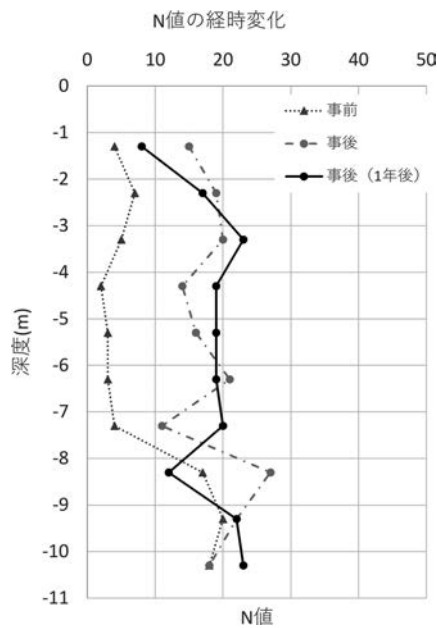


図-10 N値の経年変化

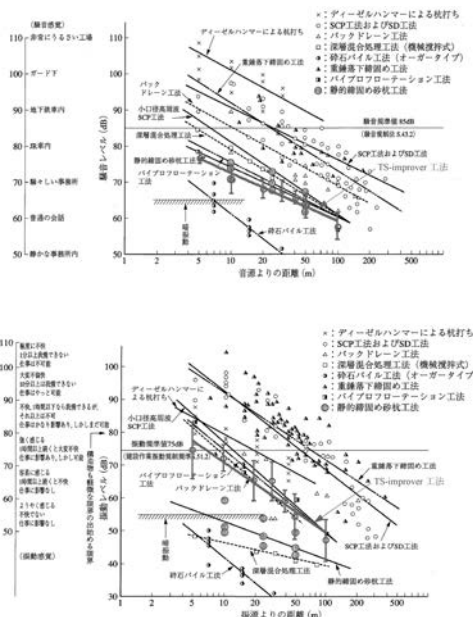


図-11 振動と騒音の距離減衰 (文献3) に加筆

なSCP工法より低く、騒音は静的締固め砂杭工法と同程度に低い。機械位置から7m程度の離隔があれば建設作業振動規制規準値75dBを満足できるレベルである。

(b) 地盤変位

地表面における水平変位量の測定結果を図-12に示す。従来のSCP工法の水平変位量に対して本工法はかなり小さな値となっている。これは、圧入を伴う締固め工法の原理と一見相反するようには思えるが、本工法が振動による土粒子の再配列に伴う負のダイレイタンシー効果が大きいためであると推察できる。これは写真-2に示すように改良後の地表面が陥没したような状態になっていることから振動による十分な締固め効果が出ていることで裏付けられる。この効果により、変位緩衝孔などの周辺環境に対する変位抑制対策は不要となる可能性が高い。

(3) 支持力効果

ここまで、液状化対策としての効果などを述べてきたが、改良杭による締固め工法であるので、複合地盤(改良杭+杭間地盤)としての支持力増大効果について

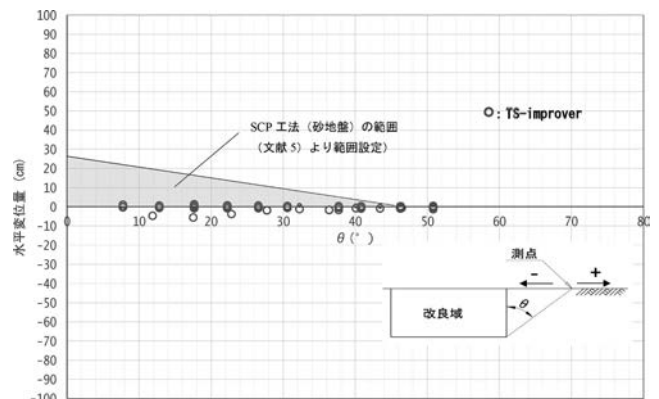


図-12 水平変位の測定結果



写真-2 改良後の地表面の状況

でも確認した。図-13に示す位置（改良杭の杭芯と杭間）で標準貫入試験を実施し、中詰め材として再生砕石（RC-40）を用いた改良杭ではN値50以上を確認した。バージンの砕石（C-40）での杭芯N値は締固め後の杭間地盤と同程度であった。このRC-40とC-40での杭芯N値の差は、再生砕石では材料に含ま

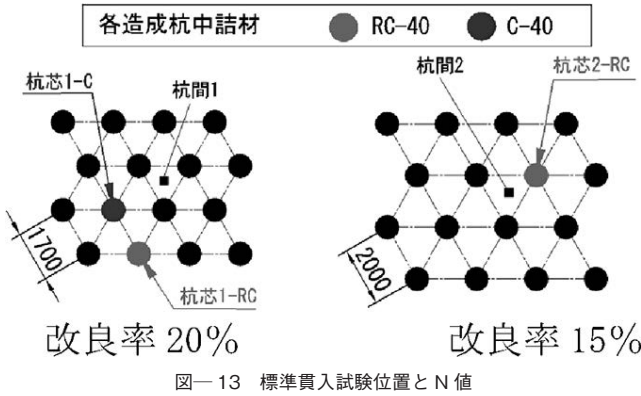


図-13 標準貫入試験位置とN値

$$q_u = q_{us1} + q_{us2}$$

$$q_{us1} = a_s * (B * \gamma_s * \beta * \eta * N_{r1} + \gamma_2 * D * N_{q1})$$

$$q_{us2} = (1 - a_s) * (B * \gamma_s * \beta * \eta * N_{r2} + \gamma_2 * D * N_{q2})$$

- q_u : 複合地盤の極限支持力
- q_{us1} : 改良杭の極限支持力
- q_{us2} : 改良地盤（杭間砂地盤）の極限支持力
- a_s : 改良率
- B : 基礎の最小幅
- γ_s : 砂杭の単位体積重量
- β : 基礎の形状係数
- η : 基礎の寸法効果による補正係数
- $N_{r1} \cdot N_{q1}$: 支持力係数（改良地盤）
- $N_{r2} \cdot N_{q2}$: 支持力係数（改良杭）
- γ_2 : 基礎底面より上の単位体積重量
- D : 基礎の根入れ深さ

図-14 複合地盤の支持力算出

表-1 極限支持力の比較

	杭間地盤		複合地盤			
	推定N値 (κ 法)	極限支持力 q_{us2} kN/m ²	杭間地盤	杭芯		杭間+杭芯
			極限支持力 q_{us2} kN/m ²	実測N値	極限支持力 q_{us1} kN/m ²	極限支持力 q_u kN/m ²
改良率 20%	17	714	607	50	280	887
改良率 15%	15	633	564	50	212	776

れるセメント分が地下水などと水和反応し固結したことが大きな要因と推察される。

複合地盤の極限支持力は、「建築基礎のための地盤改良指針案（2006年）」⁴⁾に従い、改良率 a_s を考慮して図-14で算出する。

ある想定 of 直接基礎に対する極限支持力の比較を表-1に示す。中詰め材に再生砕石を用いた場合の複合地盤での極限支持力は杭間地盤でのそれに対しておおよそ1.2倍程度になる。

6. おわりに

今回、工法の開発にあたり実施した実証実験とその結果について記載した。本工法はこれらの実証実験を経て、2022年1月に（一財）ベターリビングで建設技術審査証明（BL審査証明-057）を取得した。

今後は、地震時における社会経済活動の継続の観点から、液状化対策の一つとして本工法を広く適用していきたいと考えている。

JCMA

【参考文献】

- 1) 港湾空港技術研究所, 液状化対策としての締固め工法の設計に関する研究, No.1220, 2010年12月
- 2) 村田ら, 低振動・低騒音の液状化対策工法-改良後N値の推定方法について-, 第75回土木学会年次学術講演会, p.VI-154, 2020
- 3) 安藤・萩島, 地盤改良工法における騒音・振動対策, 基礎工, Vol.27, No.3, pp.66~71, 1999
- 4) 日本建築学会, 建築基礎のための地盤改良設計指針案, pp.348~350, 2006年

【筆者紹介】



中西 誉 (なかにし ほまれ)
大成建設
土木本部 土木設計部
室長



本谷 洋二 (ほんたに ようじ)
三信建設工業(株)
技術本部
部長代理



大高 信雄 (おおたか のぶお)
成和リニューアルワークス(株)
工事統轄部
技術部長