
転炉スラグを用いたコンパクションパイルによる地盤改良

Soil Improvement Using Converter Slag Compaction Pile Method

木村 保(Tamotsu Kimura) 和田 啓(Kei Wada) 塩田 啓介(Keisuke Shiota) 奥村 一郎(Ichiro Okumura) 三沢 久詩(Hisashi misawa) 川鍋 修(Shu Kawanabe)

要旨：

転炉スラグのコンパクションパイルにおける適用性と経済的な設計法について検討するため、液状化防止を目的とした地盤改良現場に試験工区を設けて改良効果の調査を行った。改良前後のみならず、改良 2 年後においてそれぞれ土質調査を実施し、改良効果の経時変化をとらえた。また、パイル間隔の影響や砂を用いた場合との相違についても調べた。N 値、せん断弾性係数、横方向地盤反力係数、静止土圧係数はともに改良直後に増加し、長期経過後も改良直後と同等以上の値を示すことが確認され、転炉スラグがパイル材料に適していることが明らかになった。また、静止土圧係数の増加を考慮した経済的な設計法について考察を行った。

Synopsis：

The application of converter slag to the compaction pile method has been investigated using field measurements at a construction site for soil improvement. The measurement were made before, immediately after, and 2 years after soil improvement. The N-value, shear modulus, coefficient of horizontal subgrade reaction and coefficient of earth pressure at rest were increased by this soil improvement technique. These effects of the improvement were also observed in measurements 2 years after the soil improvement. As a result of this investigation, it was found that the converter slag was useful as a material for compaction piles. An economical design method, which considers the increase in the coefficient of earth pressure at rest, was also analyzed.

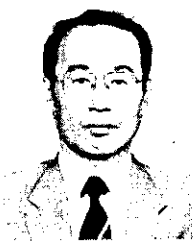
(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

転炉スラグを用いたコンパクションパイルによる 地盤改良*

川崎製鉄技報
20 (1988) 1, 69-75

Soil Improvement Using Converter Slag Compaction Pile Method



木村 保
Tamotsu Kimura
土建技術部 千葉土建
技術室 主査(課長)



和田 啓
Kei Wada
土建技術部 千葉土建
技術室 主査(掛長)



塩田 啓介
Keisuke Shiota
土建技術部 千葉土建
技術室



奥村 一郎
Ichiro Okumura
エンジニアリング事業
部 土木技術部



三沢 久詩
Hisashi Misawa
不動産建設(株) 特殊工
法事業本部 課長



川鍋 修
Shu Kawanabe
不動産建設(株) 特殊工
法事業本部

要旨

転炉スラグのコンパクションパイルにおける適用性と経済的な設計法について検討するため、液状化防止を目的とした地盤改良現場に試験工区を設けて改良効果の調査を行った。改良前後のみならず、改良2年後においてそれぞれ土質調査を実施し、改良効果の経時変化をとらえた。また、パイル間隔の影響や砂を用いた場合との相異についても調べた。 N 値、せん断弾性係数、横方向地盤反力係数、静止土圧係数はともに改良直後に増加し、長期経過後も改良直後と同等以上の値を示すことが確認され、転炉スラグがパイル材料に適していることが明らかになった。また、静止土圧係数の増加を考慮した経済的な設計法について考察を行った。

Synopsis:

The application of converter slag to the compaction pile method has been investigated using field measurements at a construction site for soil improvement. The measurement were made before, immediately after, and 2 years after soil improvement.

The N -value, shear modulus, coefficient of horizontal subgrade reaction and coefficient of earth pressure at rest were increased by this soil improvement technique. These effects of the improvement were also observed in measurements 2 years after the soil improvement.

As a result of this investigation, it was found that the converter slag was useful as a material for compaction piles. An economical design method, which considers the increase in the coefficient of earth pressure at rest, was also analyzed.

1 まえがき

コンパクションパイル工法は、軟弱地盤中に振動あるいは衝撃荷重を用いて砂や碎石等を圧入し、直径の大きい圧縮された砂柱を造成することによって地盤を安定させるものである。砂質土地盤に対しては、地盤を締め固めて密度を増大させ、地震時の液状化防止、支持力増大、沈下低減などを図るもので、タンク基礎や建家基礎などに数多く適用されている。また、粘性土地盤に対しては、一定間隔に造成され締め固められた砂柱と一体となった複合地盤として、基礎地盤全体の安定性を改善することを目的とし、その効果は、支持力増加、すべり破壊の防止、沈下低減、ドレーン効果による圧密促進などであり、盛土基礎、港湾構造物基礎などに多用されている。

コンパクションパイルの材料に一般に良質の砂が用いられてきたが、近年、鉄鋼スラグの材質の安定にともなって転炉スラグおよび高炉スラグが砂に代わる材料として利用されるようになってきた。1986年までに転炉スラグ約50万t、高炉スラグ約110万tがコ

ンパクションパイル材料として全国で使用されている。とくに、転炉スラグは砂に比べて比重や内部摩擦角が大きいという、膨張性や硬化性を有しており、これらの諸特性が軟弱地盤の強度や剛性を増大させうるうえで有効に働くと考えられることから、パイル材料としての活用が期待されている。転炉スラグを用いたコンパクションパイルの適用性については既にいくつかの報告が行われているが¹⁾、地盤改良効果は十分には解明されていない。とくに、改良後の地盤特性の経時変化についての報告は少なく、転炉スラグの活用を促進するうえで現場における土質調査データの蓄積が重要となっている。

本報告は、緩い砂地盤の液状化防止を目的とした地盤改良工事において試験工区を設け、転炉スラグコンパクションパイル打設前後および2年経過した時点でそれぞれ土質調査を行い、地盤改良効果を経時的に検討したものである。置換率の影響やパイル材料が転炉スラグと砂の場合の改良効果の違いについて調査するとともに、従来、設計において考慮されていない静止土圧係数 K_0 の増加特性に

* 昭和62年9月9日原稿受付

関しても検討を加え、経済的な設計法について考察した。

2 千葉製鉄所における施工実績

Table 1 に川崎製鉄千葉製鉄所における転炉スラグコンパクションパイルを用いた地盤改良工事の実績を示す。1975年に実施した第3製鋼工場ストリップヤード地盤改良工事をはじめとして、1986年までに約11万tの転炉スラグをパイル材料として使用している。No. 1および2は地盤のすべり破壊の防止、No. 3は支持力増加、No. 4~7は主として地震時の液状化防止を目的としたものである。

Photo 1はTable 1のNo. 5に示した西工場製品倉庫地盤改良工事におけるコンパクションパイル打設状況である。ここでは3セットのバイプロコンポーザーパイル施工機を使用して工事が行われた。本報告で述べる地盤改良効果についての調査はこの現場で実施したものである。

3 液状化防止の一般的設計法

後述する調査は、緩い砂地盤の液状化防止を目的とした地盤改良工事において実施したものである。調査結果の解析において、地盤改良効果の評価および設計法に関する考察を行う上で基本となる液状化防止に対する一般的な設計法の概要を示す^{2,3)}。

飽和した砂質土に地震による繰返しせん断力が作用すると、土粒子間の間隙水圧が徐々に増加し、土に作用する有効応力が減少する。有効応力が減少を続けゼロとなった場合には、土のせん断強度もゼロとなり、土粒子のかみ合わせがはずれ、土粒子はばらばらとなって水中に浮遊した状態となるが、これが液状化現象である。液状化に対する地盤の安定性は(1)式に示す液状化抵抗率 F_L で表わされる。

$$F_L = R/L \quad \dots\dots\dots (1)$$

Table 1 Construction achievements using converter slag compaction piles at Kawasaki Steel's Chiba Works

Construction Project	Time	Purposes of improvement	Specifications of compaction pile			Total weight (tf) (Total length (m))
			Length (m)	Diameter (mm)	Interval*1 (m)	
1. Steelmaking Shop's strip yard	1975. 9 ~10	・ Sliding	21.5	700	triangle 2.0×2.0	28,400 (22,672)
2. Scale pit and railway in continuous casting plant	1979. 8 ~12	・ Stability in excavation area ・ Sliding	21.0 & 10.0	700	square 1.5×1.5 triangle 2.0×2.0	12,000 (10,026)
3. Hot metal pretreatment center	1983. 12 ~1984. 2	・ Bearing capacity	8.0	700	square 1.5×1.5 square 1.8×1.8	8,600 (8,528)
4. Coke gas line holder foundation	1984. 2 ~3	・ Liquefaction ・ Increase of k_h	6.0	700	square 1.41×1.41	13,600 (11,874)
5. Products warehouse	1984. 11 ~1985. 2	・ Liquefaction	10.6 ~15.0	700	rectangle 1.85×1.575	42,800 (42,474)
6. #403 tank	1985. 8 ~9	・ Liquefaction ・ Bearing capacity	15.0	700	square 1.8×1.8	2,100 (2,355)
7. #402 tank	1986. 11 ~12	・ Liquefaction ・ Bearing capacity	15.0	700	square 1.8×1.8	2,300 (2,730)
*1 Pile arrangement: triangle ◻◻, square ◻◻, rectangular ◻◻						TOTAL 109,800 (101,659)

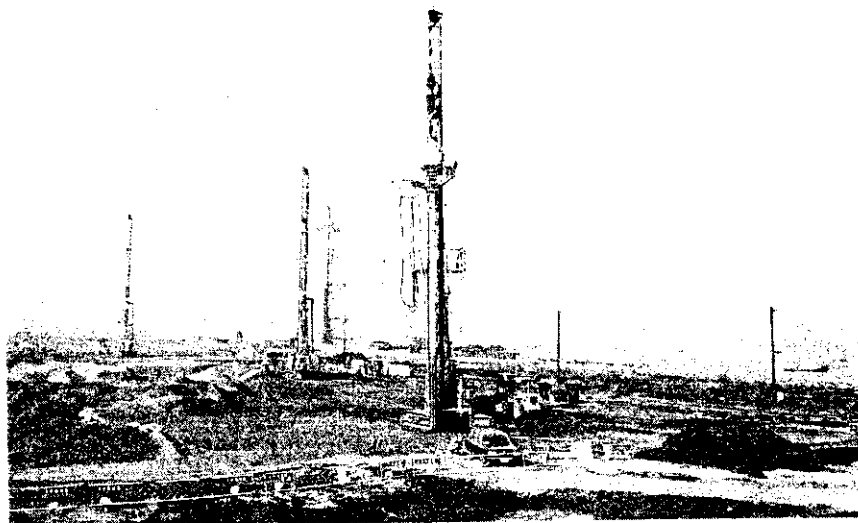


Photo 1 Compaction pile installation for the products warehouse foundation (using converter slag)

ここに、 R : 土のせん断強度比

L : 地震時せん断応力比

L は地震時に土に生じるせん断応力 τ と有効上載圧 σ_v' の比であり、外力の大きさを示すもので、(2)式によって算定される。

$$L = \gamma_d k_s \times \frac{\sigma_v'}{\sigma_v'} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 γ_d : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数

k_s : 地表面での水平震度

σ_v' : 全上載圧

一方、 R は液状化が発生するときの土のせん断応力 τ_i と σ_v' の比であり、外力に対する液状化の抵抗力を示すもので、(3)式によって算定される。

$$R = \frac{1+2K_0}{3} \cdot \frac{1}{R_t} \cdot R_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 R_i は地盤から採集した不かく乱試料の振動三軸試験によって求まる液状化時のせん断応力比(振動三軸強度比)であり、相対密度 D_r が大きいほど増大する傾向を有する。 K_0 は静止土圧係数で、 $(1+2K_0)/3$ は地盤内の異方圧密を考慮した拘束圧の補正係数である。また、 R_t は地震波の不規則性に対する補正係数で、波形の特性によって0.55~0.7の値をとる。 K_0 を一般に用いられる0.5とおけば $(1+2K_0)/3=0.67$ となり近似的に $R=R_i$ の関係が成り立つ。

振動三軸強度比 R_i は振動三軸試験によって求めるのが最も信頼性が高いが、近似的には標準貫入試験による N 値、地盤砂の平均粒径 D_{50} 、有効上載圧 σ_v' 、細粒分含有率 FC などを用いた実験公式によって推定することができる。

(2)式および(3)式によって計算される L および R を(1)式に代入し、 $F_L \leq 1$ である場合には液状化が発生すると判断されるため、地盤改良工事が必要となる。

コンパクションパイルによる地盤改良の設計は、 $F_L > 1$ となるようにパイル材料の圧入量、パイルの配置、パイル間隔を決定する⁴⁾。まず、改良後の地盤において $F_L > 1$ となるように(3)式に示した土の動的せん断強度比 R を定める。 K_0 の値を一般に用いられる0.5とおき、 R_i の算定に実験公式を用いると改良後の目標 N 値 N_i が決定される。この N_i から地盤の相対密度 D_r を介して改良地盤

の間隙比 e_1 が求まる。 e_1 と原地盤の間隙比 e_0 からパイル1本あたりの分担面積に対するパイル面積で示される置換率 a_s が次式によって求まる。

$$a_s = (e_0 - e_1) / (1 + e_0) \quad \dots\dots\dots (4)$$

パイル間隔 x は a_s とパイル面積 A_s によって計算されるが、正方形配置の場合は $x = \sqrt{A_s/a_s}$ で表わされ、 a_s が小さいほどパイル間隔が大きくなる。

4 地盤改良効果の調査^{5,6)}

4.1 調査方法

4.1.1 位置および地盤

地盤改良効果の調査は、Table 1のNo. 5で、Photo 1にも示した西工場製品倉庫建設^{7,8)}での地盤改良工事に付帯して実施した。

Fig. 1に地盤改良工事現場付近および改良範囲を示す。

調査地点の地盤は、Fig. 2に示すように地表面G.L.(A.P.+5 m)

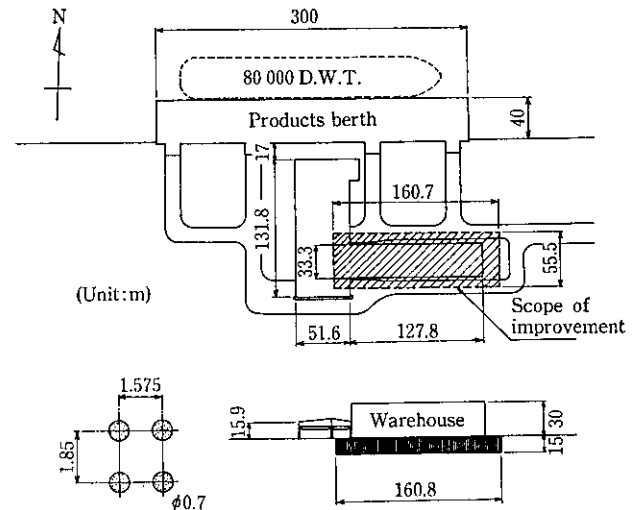
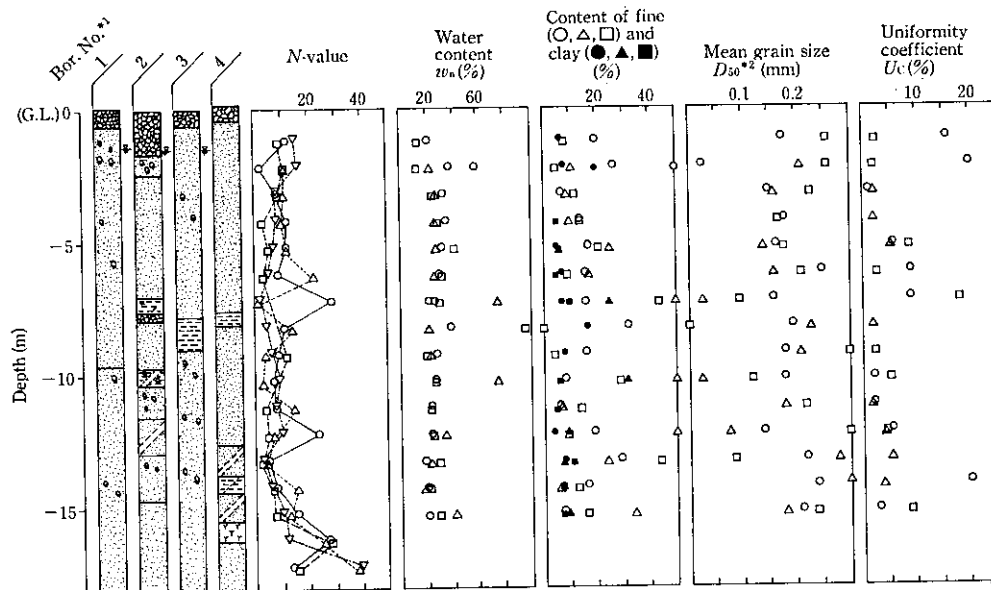


Fig. 1 Scope of improvement by converter slag compaction pile method for the products warehouse foundation



*1 Boring number: No. 1 (○), No. 2 (Δ), No. 3 (□), No. 4 (▽)

*2 Soil diameter at which 50% of the soil weight is finer

Fig. 2 Soil properties before improvement

から G.L.-8~-10 m までが埋立後約 16 年を経ている緩い埋立砂層であり、その下部に沖積砂質土層が続いている。G.L. 0~-15 m は N 値が 10 以下の軟弱な砂地盤であり、液状化の危険性があるため地盤改良の対象範囲とした。

4.1.2 パイル材料の特性

コンパクションパイルの材料として使用した転炉スラグは第 3 製鋼工場の底吹き転炉 Q-BOP 産で、6~12 箇月のエージングをしたものであり、成分は Table 2 のとおりである。転炉スラグおよび比

Table 2 Components of converter slag (%)

T.Fe	SiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	S	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
15.71	12.8	4.0	3.93	0.091	1.66	49.5	3.9

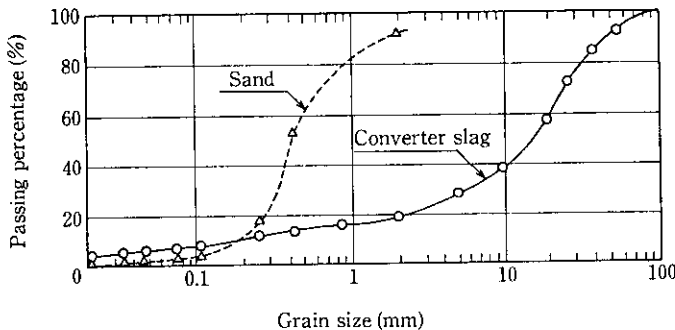


Fig. 3 Grain size distribution of pile material

Table 3 Characteristics of fill materials

Material property	Converter slag	Sand
Specific gravity G_s	2.95	2.71
Unit weight* ¹ γ (tf/m ³)	1.9~2.6	1.6~1.9
Optimum moisture content w_{opt} (%)	7.30	4.90
Maximum dry density ρ_{dmax} (tf/m ³)	2.26	1.91
Internal angle of friction* ¹ ϕ (°)	40~45	30~40
Coefficient of permeability k (cm/s)	2.64×10^{-1}	3.49×10^{-3}
Expansive ratio in water (%)	2.0~3.0	

*¹ General value

Table 4 Specifications for investigation

Investigation stage		Material for compaction piles* ¹	Piles arrangement (m)	Replacement ratio a_s (%)
Immediately after improvement	Case 1	C	square 2.4 × 2.4	6.7
	Case 2	C	square 1.8 × 1.8	11.9
	Case 3	C	square 1.5 × 1.5	17.1
	Case 4	S	square 1.8 × 1.8	11.9
	Case 5	C	rectangular 1.85 × 1.575	13.2
2 years after improvement	Case 6	C	rectangular 1.85 × 1.575	13.2

*¹ C: Converter slag
S: Sand

較として用いた砂 (市原市万田野産) の粒径加積曲線を Fig. 3 に示す。転炉スラグは砂に比べて分布幅が非常に広く、大小の粒子が混在している。Table 3 は転炉スラグおよび砂の物理的および力学的特性を比較したものである。転炉スラグの比重 G_s および単位体積重量 γ は砂に比べて 1.1~1.3 倍大きい。また、転炉スラグの内部摩擦角 ϕ は 40° 以上であり、碎石と同等の強度を期待できる。転炉スラグは上記のほか膨張性および硬化性を有することが知られている。

4.1.3 試験ケース

土質調査は改良前、改良直後および改良後 2 年経過した時点の 3 回実施した。Table 4 は改良直後および改良 2 年後での調査ケースである。Case 1~4 は地盤改良工事区域内の試験工区において置換率およびパイル材料による改良効果の違いをみたものである。Case 1~3 はパイル間隔を変化させ、置換率 a_s を 6.7, 11.9 および 17.1% にした場合である。また、Case 4 は中詰材として砂を使用した場合で、Case 2 の転炉スラグを用いた場合と比較するものである。Case 5 および 6 は一般の改良工区で調査したもので、前者は改良直後、後者は改良 2 年後の場合である。

試験の種類は、標準貫入試験、孔内水平載荷試験 (L.L.T.)、せん断波速度試験 (PS 検層)、振動三軸試験および透水試験である。

4.2 調査結果

4.2.1 標準貫入試験の N 値

Fig. 4 は杭間における N 値の変化を示すものである。砂質土層における N 値は改良前に比べて改良直後は 2 倍程度増加している。また、改良 2 年後は改良直後に比べて若干大きな値をとっている。G.L.-8 m 付近の粘性土層および G.L.-15 m 以深の改良範囲外においては N 値の増大は認められない。

Table 5 は Case 1~4 について改良前後の杭間平均 N 値の増加を

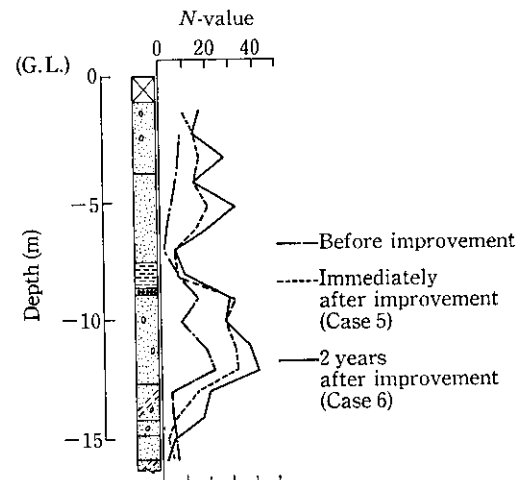


Fig. 4 N -values between piles

Table 5 Increase in N -value between piles

	Before improvement $\bar{N}_0$	Immediately after improvement $\bar{N}_1$	$\Delta N = \bar{N}_1 - \bar{N}_0$
Case 1	10.5	16.0	5.5
Case 2	13.0	21.8	8.8
Case 3	11.4	22.0	10.6
Case 4	15.0	23.7	8.7

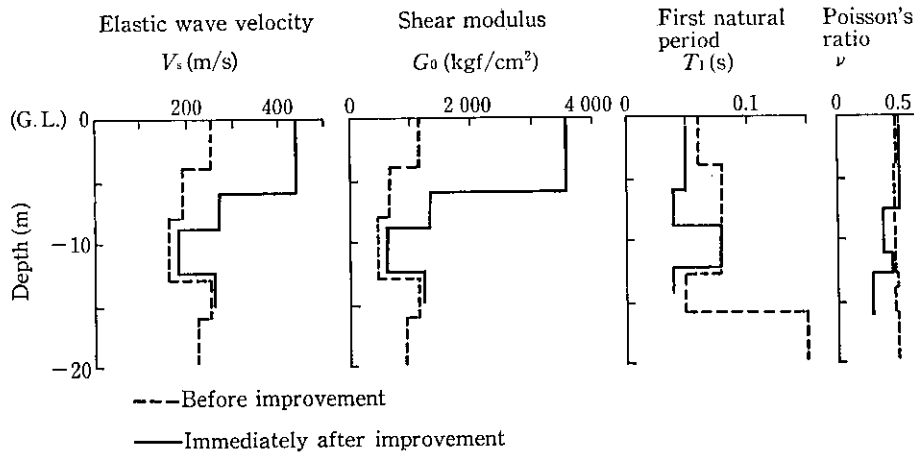


Fig. 5 Results of PS logging

 Table 6 Increase in N -value with time

Location of measurement point	Immediately after improvement $\bar{N}_1$	2 years after improvement $\bar{N}_2$	$\Delta N = \bar{N}_2 - \bar{N}_1$
Between piles	24.1	28.0	3.9
Center of pile	48.9	111.0	62.1

比較したものである。 $\bar{N}_0$ は改良前の平均 N 値、 $\bar{N}_1$ は改良直後の平均 N 値で、 ΔN は増分である。ただし、平均 N 値を求める際には細粒分含有率 FC が 35% 以上の値を有する部分における N 値を除外している。Case 1~3 を比較すると置換率が大いほど N 値の増分 ΔN が大きいことがわかる。また、Case 2 と 4 はほとんど同一の ΔN をとっており、改良直後においてはパイル材料による差異は認められない。これらのデータは、サンドコンパクションパイルによる N 値増加についての従来の実績りとよく一致している。

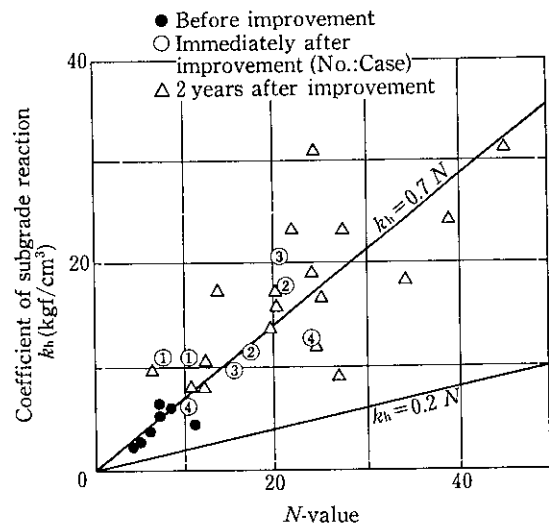
Table 6 は杭間および杭芯 N 値について改良後の経時変化をみたものである。 $\bar{N}_1$ は改良直後の平均 N 値 (Case 5) で $\bar{N}_2$ は改良 2 年後の平均 N 値 (Case 6) である。杭間 N 値は Fig. 4 に示したものと同様に若干の増加を示しているが、転炉スラグの膨張性により改良後さらに地盤が締め固まった可能性も考えられる。一方、杭芯 N 値は約 2.3 倍増加しており、転炉スラグの硬化性の影響が顕著である。このように、 N 値が経時的に増加することは地盤の強度や剛性が增大することを示しており、転炉スラグが地盤改良効果を促進する特性を有するものとして興味深い。

4.2.2 セン断波速度測定試験 (PS 検層) 結果

地盤剛性の増加は、地震時における地盤のせん断ひずみを低減させることになるため、地震に対する地盤の安定性を評価する場合の目安となる。改良前後の地盤剛性の変化を調べるため、地盤を伝わるせん断波速度を測定することによってせん断弾性係数を求める PS 検層を実施した。Fig. 5 に改良前および改良直後におけるせん断波速度 V_s 、せん断弾性係数 G_0 、一次固有振動周期 T_1 およびポアソン比 ν を示す。改良直後の G_0 は改良前に比べて明らかに増加し、G.L. 0 ~ -6 m においては 3 倍以上の値を示しており、地盤の剛性の増加が顕著に認められる。

4.2.3 横方向地盤反力係数

孔内水平載荷試験 (L.L.T.) によって杭間の横方向地盤反力係数 k_h を求めた。Fig. 6 は G.L. -3 ~ -6 m の深さで測定された k_h と N 値の関係を示すものである、●印は改良前、○印は改良直後で記


 Fig. 6 Relationship between N -value and k_h

号内の数字は Table 4 に示した Case No., Δ 印は改良 2 年後 (Case 6) の測定値をそれぞれ表わす。地盤改良による N 値の増加にともなって k_h も直線的に増加している。改良前の k_h は 2~6 kgf/cm³ であったのに対し、改良後は 6~21 kgf/cm³、改良 2 年後は 8~31 kgf/cm³ の値をとっている。 k_h と N の関係は平均的に $k_h = 0.7 N$ で表わされ、一般に用いられる $k_h = 0.2 N$ より勾配が急である。 k_h の増加は地盤の水平方向バネ定数が増加したことを示している。このことは地盤改良をすることにより、地震時における構造物の変位量の低減効果が期待できることをあらわしている。

上述の k_h のデータは杭間で得られたものであるが、杭付近の k_h は杭間よりも大きいと考えられ、原地盤とコンパクションパイルの複合地盤としての k_h は $0.7 N$ よりさらに大きく評価できると思われる。

4.2.4 静止土圧係数

静止土圧係数 K_0 は (3) 式に示したとおり、液状化抵抗に直接的に影響するものである。 K_0 は一般に 0.5 をとるものとされているが、コンパクションパイル打設後においては 0.8 ~ 1.5 程度に増加したという例が報告されている^{9,10)}。

ここでは、L.L.T. を使用して圧力-クリープ曲線および圧力-累積変形量曲線の最初の変曲点より静止土圧を求め、これを有効土被り圧で除することによって K_0 を得た⁵⁾。

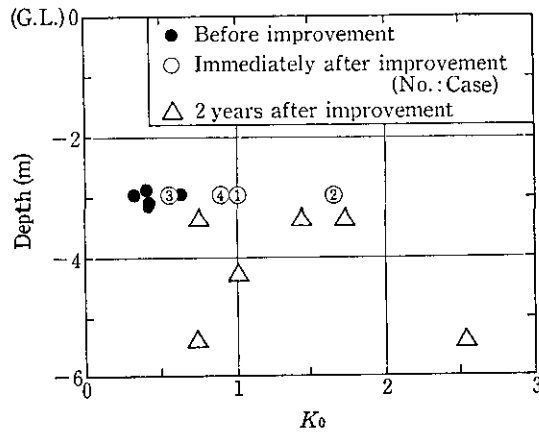


Fig. 7 Coefficient of earth pressure at rest

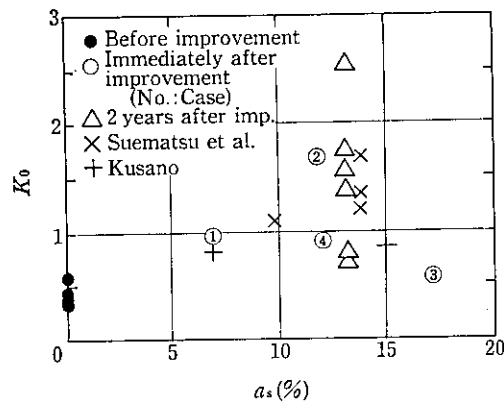
Fig. 8 Relationship between K_0 and a_s

Fig. 7は改良前後および改良2年後の K_0 を示すものである。改良直後を示す○印の中の数字はFig. 6と同様にTable 4に示したCase No.を表わす。改良前は $K_0=0.3\sim0.7$ であったが、改良直後には $0.6\sim1.7$ に増加している。また、改良2年後には $0.7\sim2.6$ の値をとっており、改良によって増加した K_0 が長期経過後も維持されていることがわかる。

Fig. 8は K_0 と置換率 a_s の関係を示したものである。改良直後のCase 1~3についてみると、Case 1および2の場合は改良前のデータと直線的に結ぶことができ a_s の増加にともなって K_0 が増加する傾向を示しているようにみられるが、Case 3の場合は逆にCase 1および2より小さな値をとっている。改良2年後のデータは、ほぼCase 1~3のばらつきの範囲内にある。パイル材料として砂を用いた場合のCase 4は転炉スラグを用いた場合のCase 2に比べて小さな値をとっている。Table 2に示したとおり転炉スラグの比重は砂の1.2~1.3倍あるため、改良後の地盤の全体的な重量は転炉スラグを使用した場合の方が砂を用いた場合より重くなる。そのため、転炉スラグを用いた場合の地盤内の拘束圧が砂を用いた場合より大きくなり、これが両者の K_0 の差に影響を与えている可能性も考えられる。×印および+印は、それぞれ末松・竹原⁹⁾および草野¹⁰⁾によるサンドコンパクションパイル打設後における K_0 の測定値であるが、著者らの結果と同等の領域に分布している。全体的にみると K_0 は a_s とともに増加する傾向を有するようであるが、この関係を定量的に求めるためにはさらにデータの蓄積が必要である。

4.2.5 振動三軸試験結果

Fig. 9は地盤から採取した不かく乱試料による振動三軸試験結果である。縦軸には20回のくり返しせん断で液状化が生じる場合の

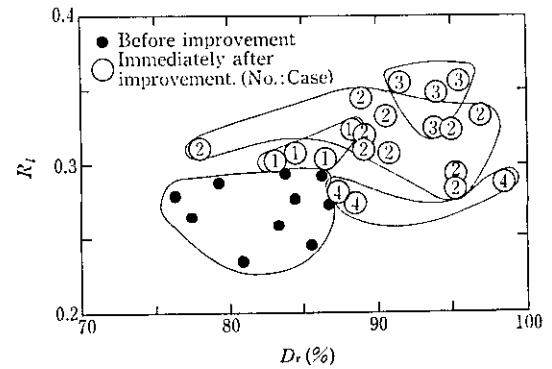


Fig. 9 Results of cyclic triaxial tests

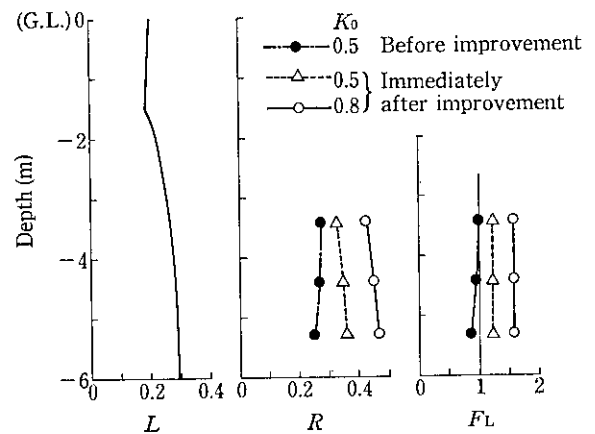


Fig. 10 Results of liquefaction analysis

せん断応力比 R_f をとり、横軸には試料の相対密度 D_r をとっている。改良前は $D_r=75\sim87\%$ で $R_f=0.23\sim0.3$ の値を示していたが、改良直後は D_r とともに R_f が増加し、 $R_f=0.27\sim0.36$ の値をとり、液状化抵抗が増大していることがよくわかる。Case 1~3では置換率の大きい場合ほど D_r および R_f が大きな値を示している。

Fig. 10はCase 2について振動三軸試験結果をもとに液状化の判定を行ったものである。 L は(2)式において地表面での水平震度 k_h を0.2として求めた地震時せん断応力比である。 R はFig. 9に示した改良前および改良直後の振動三軸強度比 R_f を用いて(3)式により算定した動的せん断強度比である。また、 F_L は(1)式で与えられる液状化に対する抵抗率である。改良前の R は(3)式において $K_0=0.5$ として算定したものであるが、このとき $F_L \leq 1$ であり液状化の危険性があったものと判断される。改良直後の R は、改良による静止土圧係数の増加を無視して $K_0=0.5$ とした場合と、Fig. 8に示した測定値の下限値 $K_0=0.8$ とした場合の2種類示してある。(3)式より、 $K_0=0.8$ とした場合は $(1+2K_0)/3=0.87$ となり、 $K_0=0.5$ とした場合に比べて R は1.3倍大きくなる。改良直後の F_L は $K_0=0.5$ とした場合には1.22となり、静止土圧係数の増加を無視しても液状化に対して安全であると判定され、地盤改良の目標が達成されているといえる。また、改良による静止土圧係数の増加を考慮して $K_0=0.8$ とした場合には $F_L=1.58$ と計算され、地盤改良効果はかなり安全側に発揮されると考えられる。

4.2.6 透水試験結果

原地盤の透水係数 k は $1 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$ cm/sであった。これに対して、改良2年後の調査で転炉スラグコンパクションパイルの杭芯で測定したところ $3 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-3}$ cm/sの値が得られた。この杭芯における透水係数の値は原地盤の砂の影響を受けて、パイル自

体の透水係数よりも小さい値を示していると思われる。なお、転炉スラグ自体の透水性は、Table 3 に示したように、サンドコンパクションパイルに使用する砂材より大きい値を示すことがわかっている。

5 静止土圧係数の増加を考慮した設計法について の考察

4.2.4 で述べたように、静止土圧係数 K_0 は改良前は約 0.5 であるが、コンパクションパイルの打設によって増加し、改良後長期経過しても維持されている。また、4.2.5 では改良による K_0 の増加を考慮すると液状化に対する安全率がかなり大きくなっていると思われることを示した。したがって、 K_0 の増加を加味することによって、従来より経済的な設計が行えるものと考えられる。

Fig. 11 は (3) 式に示した土の動的せん断応力比 R と相対密度 D_r および静止土圧係数 K_0 の一般的な関係である。一点鎖線は液状化抵抗として必要とされるせん断強度比である。●印は改良前における状態であり、 R は必要とされる値よりも低く、 K_0 は 0.5 の値をとっている。このときの相対密度を D_{r0} とする。従来の設計法では、改良後も $K_0=0.5$ のままであると考えるため、 D_{r0} で示される相対密度になるように置換率が決定される。一方、改良後の静止土圧係数 K_0 は 0.8 に増加するとすれば、改良効果は矢印の方向へ移動することとなり、相対密度は D_{r1} と設定され、置換率を低減することができる。

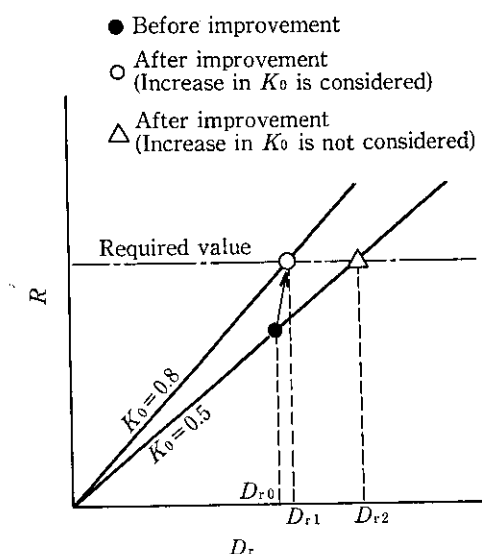


Fig. 11 General relationship between relative density D_r and dynamic shear strength ratio R

上述のような設計法を実用化するためには、さらに K_0 についてのデータの蓄積を行い、Fig. 7 に示した置換率との関係等を明確にし、 K_0 の定量的な算定方法を見出す必要があると思われる。

以上は杭間の地盤における液状化についての議論であるが、改良後の地盤は原地盤とコンパクションパイルの複合地盤であるため、実際の構造物の合理的な設計法を確立するためには、杭間における地盤の挙動のみならず、液状化抵抗に対する杭の効果についても究明する必要があると考えられる。

6 むすび

転炉スラグを用いたコンパクションパイルによる地盤改良工事において、改良前、改良直後および改良 2 年後に土質調査を実施し、改良効果の経時変化を調査した。その結果をまとめると次のようである。

- (1) 改良直後の杭間の N 値、せん断弾性係数、横方向地盤反力係数は改良前に比べて明らかに増大し、その後も維持されており、地盤改良効果が十分に発揮されたことが確認できた。
- (2) 改良 2 年後の杭芯 N 値は改良直後に比べて大幅に増大し、転炉スラグの硬化性の影響が顕著に認められた。また、杭間の N 値も改良 2 年後は改良直後に比べて若干増加している傾向があった。
- (3) 静止土圧係数は、改良前は約 0.5 であるが、コンパクションパイルの打設によって増加し、改良 2 年後も維持されている。
- (4) 振動三軸試験結果より、改良後の地盤は液状化に対して十分安全であることが確認された。

上述の結論として、転炉スラグはコンパクションパイルの材料として有効に利用できることが明らかになった。そのうえ、転炉スラグの有する硬化性や膨張性は改良効果を促進する作用を持っており、砂よりも適した材料と考えられる。また、改良後の K_0 値の増加を考慮すると置換率を低減することができ、経済的な設計が行えることも示唆した。

今回の調査により転炉スラグコンパクションパイルの地盤改良効果を把握することができたが、転炉スラグをパイル材料として普及させるためには次のような課題が考えられる。

- (1) pH などの環境保全に関する検討
- (2) 長距離の運搬は重量との関係でコストアップになることが考えられることから、運搬費による供給適正圏を設定する必要がある。
- (3) 一定した供給量を確保するための検討
- (4) ストックヤードにおける粒径やエージングの管理

今後さらに上記のような課題や経済的な設計法について検討を進めていく所存である。

参考文献

- 1) (財) 建築振興協会: 「転炉スラグを用いたコンパクションパイル工法の適用性に関する研究」, (1979)
- 2) (社) 土質工学会: 「土質工学ハンドブック」, (1982), 361-366 [(社) 土質工学会]
- 3) (社) 日本道路協会: 「道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編」, (1980), 16-87
- 4) (社) 土質工学会: 「地盤改良の調査・設計から施工まで」, (1978), 161-205
- 5) 木村 保, 奥村一郎, 三沢久詩, 川鍋 修: 「コンパクションパイル打設地盤の K_0 値について」, 第 21 回土質工学研究発表会, (1986), 1863-1866
- 6) 木村 保, 塩田啓介, 三沢久詩, 川鍋 修: 「コンパクションパイル打設地盤の K_0 値について (その 2)」, 第 22 回土質工学研究発表会, (1987), 1795-1796
- 7) 武元弘之, 橋本順次, 小泉秀夫, 一ノ瀬満郎: 「重量物用高層ラック式立体自動倉庫の建設」, 川崎製鉄技報, 18 (1986) 4, 67-71
- 8) 鋤持 滋, 木村 保, 奥村一郎: 「8 万 DWT 級の船舶を対象とする製品岸壁の建設」, 川崎製鉄技報, 18 (1986) 4, 61-66
- 9) 末松直幹, 竹原有二: 「基礎のための地盤改良工法」, 橋梁と基礎, 11 (1977) 12, 21-25
- 10) 草野 郁: 「サンドコンパクションパイル工法の実践と問題点 (3)」, 土と基礎, 31 (1983) 4, 79-85