

サンドコンパクションパイル工法設計時の 注意事項について

渋木雅良・上堂蘭四男

A CONSIDERATION TO DESIGN OF SAND COMPACTION PILE METHOD

Masayosi SIBUKI and Yotuo KAMIDOZONO

abstract

At present we usually refer to the relationship found in Fig.1 in order to know the proper sand fill ratio attaining the N -value that is expected to show after the ground improvement of sandy soil by means of sand compaction pile. However it involves some problems pointed out to design the sand compaction pile by that way. The study about many investigations carried out by OYO corporation in the last some years concerning the evaluation of the effectiveness of ground improvement revealed followings.

- (1) It is the simplest but effective method to refer to the relationship shown in Fig.1 in order to know the proper sand fill ratio (a_s). But it is important to consider followings.
 - a) The relationship shown in Fig.1 is originally made of the data about the sandy soil that contains the finer-content less than 20%, but now it seems reasonable that we use the relationship to the soil that contains the finer-content of 20%~40%.
 - b) The upper limit of N_1 is 25~30 using the relationship shown in Fig.1.
- (2) A direct application of Fig.1 often causes following problems, but they are avoidable by taking the arrangements described below.
 - a) PROBLEM: The 2 meters layer below surface is out of improvement effect.
ARRANGEMENT: Soil stabilization by mixing cement and compaction.
 - b) PROBLEM: The layer near the bottom of sand compaction pile is out of improvement effect.
ARRANGEMENT: Designing the pile length 1 meter longer than the depth of planned improvement zone.

1 まえがき

軟弱地盤中に衝撃荷重によって砂を圧入し、直径の大きな締め固められた砂杭を造成し、地盤の安定化を図ることを目的としたサンドコンパクションパイル工法は、砂質土地盤にも粘性土地盤にも適用されており、特に、砂質土地盤に対しては、

1. 地盤を締め固め、地震時の液状化が防止できる。
2. 地盤のせん断抵抗や水平抵抗が増大する。
3. 圧縮沈下が低減する。
4. 締め固めによって、地盤が均一化する。

などの効果が期待されている。

しかしながら、サンドコンパクションパイル工法を実施するに当たっては、従来からの施工実績を参考にして、砂圧入量や砂杭の間隔などに関する量を求めている場合が多い。

当社においては、数年前から本工法による砂質土地盤の安定化の効果判定調査を実施してきたが、これらの資料を整理する過程において、設計の決め手となる改良前後の N 値の関係図(図-1)を機械的に適用したのでは予想通りの結果が得られないことが多いことに気がついた。すなわち、改良前の原地盤 N 値が同じで、投入砂量

も全く同じであっても、改良後の地盤のN値が大幅に異なることがある。その原因としては、投入砂量を一定にしても砂圧入率が一定にならないのではないかと考えられる。このような観点から、現在までに得られている40箇所ボーリング資料を用いて、サンドコンパクションパイル工法施工前後における地盤の実測N値の比較を行った。その結果、この施工実績に基づいて行い設計法には、いくつかの注意すべき点があることが判明した。

2 砂質土地盤における設計

サンドコンパクションパイル工法は、実地施工でその効果を把握して体系づけられてきた経験則活用の工法であって、砂質土地盤における一般的な設計法は、つぎの通りである。

(1) 砂質土地盤の改良目標は、多くの場合、N値で指定される。すなわち、改良前の原地盤N値(N₁)と改良後の原地盤の所要N値(N₂)が与えられ、これらの条件から、必要とする砂の圧入率(a_s)を決定する。この場合、図-1に示すような施工実績に基づいて作られたN₁~N₂関係図を用いることが多い。

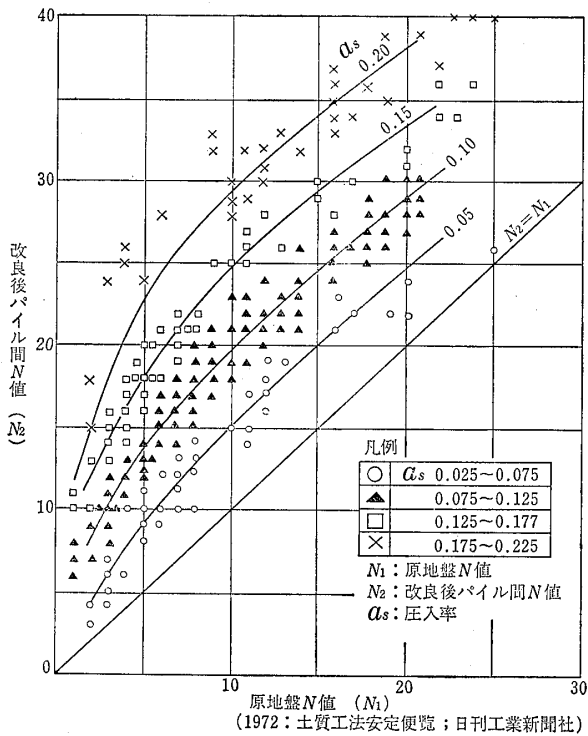


図-1 砂質土地盤の締固め効果例(原地盤N値と改良後パイル間N値との関係)

Fig. 1 Relationship between N-value before improvement and N-value after improvement

(2) パイル1本の分担する改良面積をA、パイル間隔をd、深さ1m当りの砂圧入量(締固め後の砂量)をSとすると、

$$S = a_s \cdot A \quad (1)$$

ここに、正方形配置の時 $A = d^2$ (2)

正三角形配置の時 $A = \sqrt{3}/2 \cdot d^2$ (3)

であり、土量変化率の関係から、締固め後の砂量Sに対応する地上計量の砂量S'は、

$$S' = 1.2 \sim 1.3 S \quad (4)$$

としている。

(3) (1)~(3)式によって、種々の間隔と砂圧入量の組合せが得られるが、施工性、経済性、工期などの諸条件を考慮して、最適の配置、間隔、砂圧入量を求める。通常、改良後のN値N₂=10~25、パイル間隔d=1.5~2.2m、砂圧入量S=0.3~0.5m³/mの範囲が多く選ばれる。

3 敷地の地質および工事の概要

3-1 敷地の地質

サンドコンパクションパイルが施工された敷地の地質構成は、図-2に示す通りで、地表より深度7m付近までは埋立土となっており、その下部には沖積層が分布している。埋立土は砂質土で構成されており、0.5~2.0mの層厚の粘性土あるいは砂礫を挟在している。沖積層は、上部の約14m厚が砂質土で、その下部は粘性土で構成されている。

この敷地に対するサンドコンパクションパイル工は、

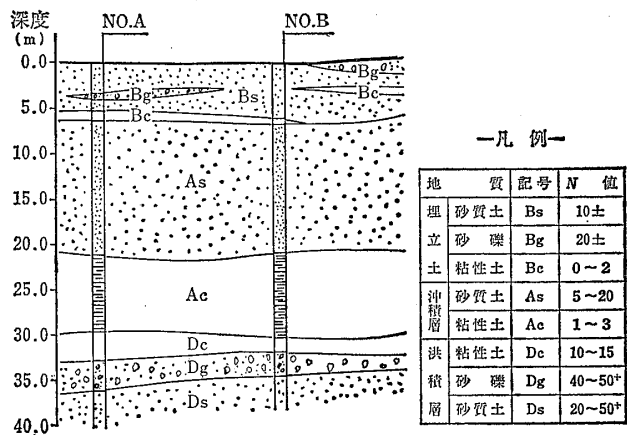


図-2 敷地の地質断面図

Fig. 2 Schematic geological section of the site

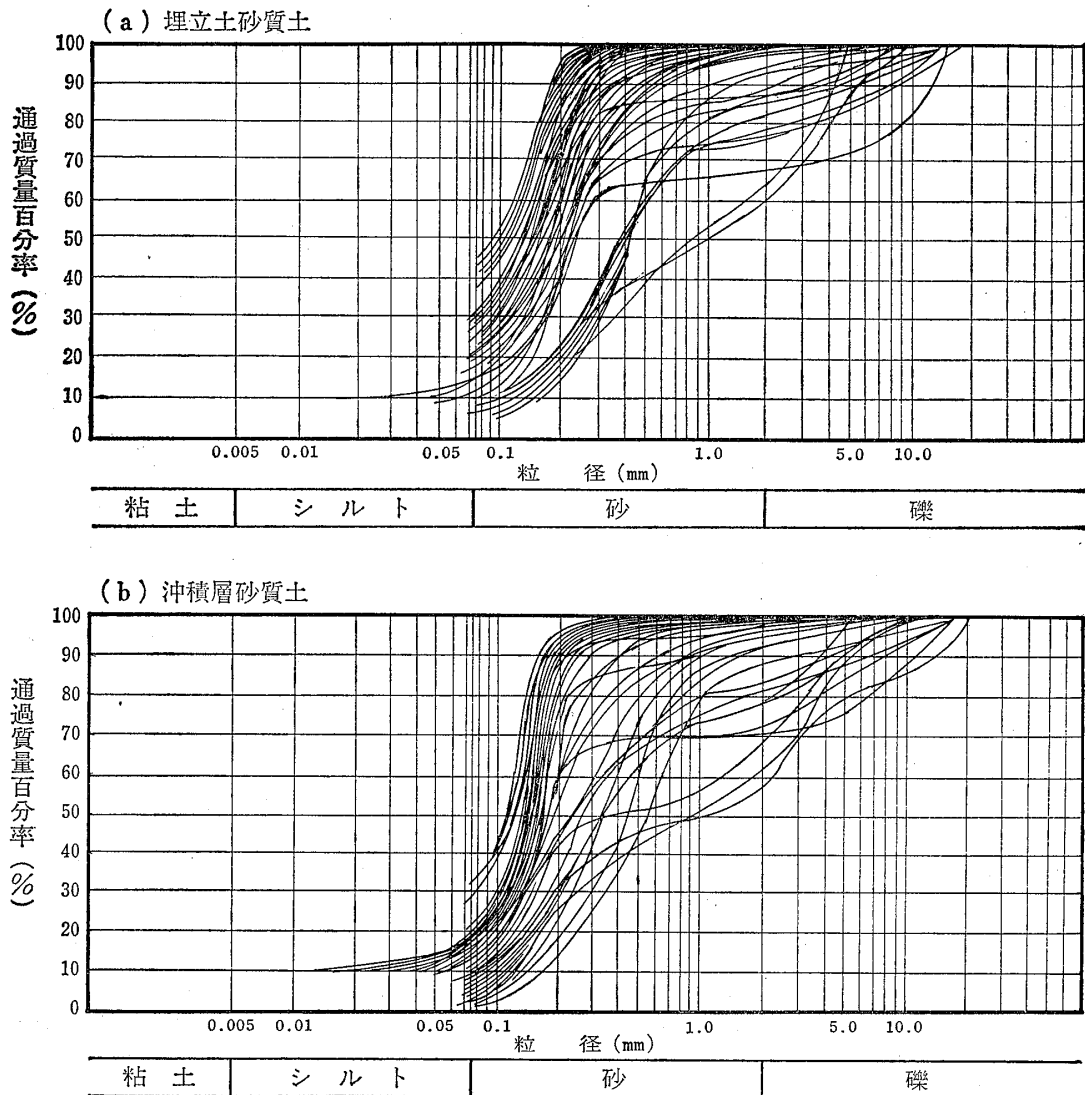


図-3 砂質土の粒径加積曲線
Fig.3 Grain size distribution of sandy fill and alluvium sand

地震時における液状化防止対策を目的として、原則として地表から深度10mまでの区間の砂質土を改良の対象とした。

深度10m以浅において、地盤改良の対象となった埋立土中の砂質土および沖積層の砂質土の粒径加積曲線を、図-3に示す。この結果によれば、沖積層砂質土では、細粒分含有率がほとんど20%以下であるが、埋立土砂質土では、細粒分含有率が20~40%の土も認められる。

3-2 工事の概要

地盤の液状化防止に必要な原地盤所要 N 値は、図-4に示す通りである。これらの値は、地盤応答解折によって求めたものである。そして、施工後の地盤の N 値が、

図-3に示すような値になることを改良目標として、砂圧入率の決定を行った。

サンドコンパクションパイル施工前に、50m間隔でグリッドを設け、その交点においてボーリングを行い、 N 値測定を実施した。そして、このボーリング地点を中心とした1辺50mの正方形(2500 m^2)を1ブロックとし、その中心にあるボーリング孔で測定された N 値をもって代表することにした。この改良前の原地盤 N 値(N_i)と図-3に示した原地盤の所要 N 値を各深度毎に比較し、その差の最大値を求める。この最大値を用いて、図-1に示す関係によって、そのブロックの砂圧入率(a_s)を求めた。また、地上計量による締固め前投入砂量(S')は、当敷地内における過去の実績を参考にして、効率的

な投入量として0.45~0.50m³/mが選択された。以上のようにして得られたサンドコンパクションパイルの工事仕様は、表-1の通りである。

パイル砂材は、図-5に示す粒径範囲に入る砂材で、海砂、碎石、スイサイの混合材が用いられた。

なお、工事施工後において、工事施工前に50m間隔に実施したボーリング地点と同一地点にチェックボーリングを行い、施工前後のN値を比較することによって、効果の判定を行った。

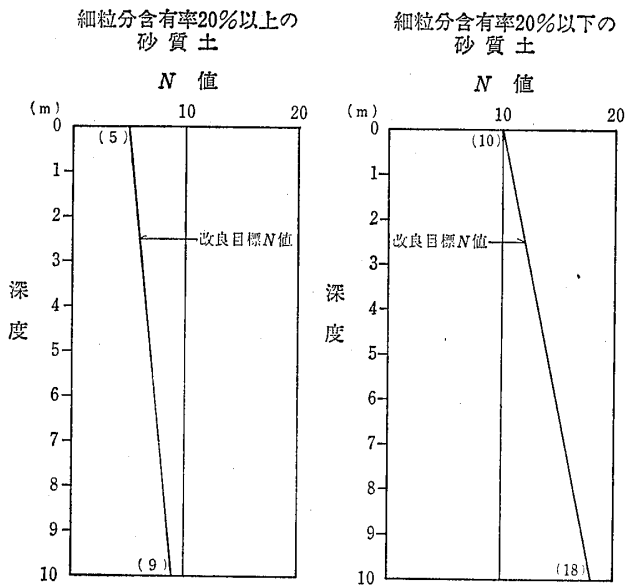


図-4 改良目標N値

Fig. 4 N-value expected after improvement

4 サンドコンパクションパイルによる地盤改良前後におけるN値の比較

深度10mまでの区間において、ある深度以深が粘性土である場合、あるいはN値が高く改良を要しない砂質土が存在する場合は、それより上部の砂質土部分のみの改良を行っているので、パイル長は10m以下のものがある。また、サンドコンパクションパイルを施工した部分にも、粘性土が挟在しているが、これらの粘性土部分を除いて、砂質土地盤の改良前のN値(N₁)と改良後のN値(N₂)との関係を各深度ごとに示すと、図-6のようになる。この図において、パイル先端部に該当するものは白丸(O)で示してある。

4-1 地表付近の改良効果

図-6に示す各深度について、改良後のN値が改良前のN値に等しいか、あるいは小さい場合(N₂ ≤ N₁)の

表-1 パイルの工事仕様
Table 1 Specification of sand compaction pile

砂圧入率 (a _s)	地上計量の砂量 S'(m ³ /m)	締固め後の砂量 S(m ³ /m)	パイル配置	パイル間隔 (m)
0.06	0.50	0.38	正方形	2.5
0.10~0.11	0.45~0.50	0.34~0.38	正三角形~正方形	1.9~2.1
0.15	0.50	0.38	正方形	1.6

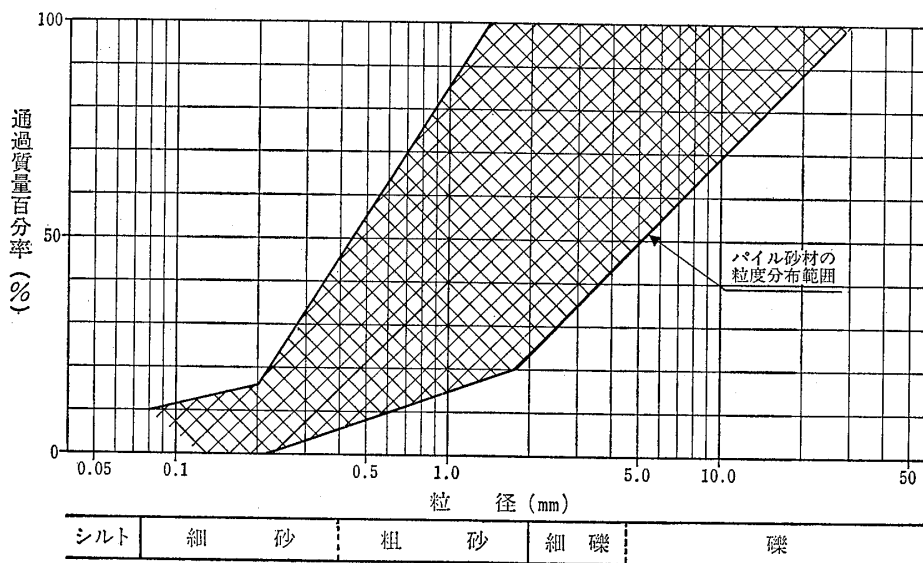


図-5 パイル砂材の粒度分布図

Fig. 5 Grain size distribution of material of sand compaction pile

個数のパイル先端部を除いた全個数に対する割合は、表-2に示すようになる。深度-3 mから深度-9 mまでの割合が5~17%の範囲(平均12%)であるのに対して、深度-1 mでは47%、深度-2 mでは33%と大きな値となっている。このことは、地表付近の改良効果が、それ以深とくらべると、かなり劣っていることを表わしている。このように、地表付近では、押し込み振動エネルギーが上方へと逃げるため、すなわち地表が隆起するために効果が劣るということは、従来から定性的にはいわれていたことではあるが、その影響が地表近傍だけでなく、2 m余の深さにまで及んでいることが判明した。

4-2 パイル先端部の改良効果

図-6に示されているパイル先端部における改良前後

のN値の関係は、図-7(a)のとおりであり、パイル先端部から1 m上部におけるそれらの関係は図-7(b)のようになる。これらの位置において、 $N_2 \leq N_1$ である個数の全個数に対する割合は、表-3のようになる。すなわち、パイル先端部における割合は27%で、この値を表-2の値と比較すると、深度-1 m、-2 mにつぐ大ききで、それ以深における割合(平均12%)よりもはるかに大きい値を示している。このことは、パイル先端部より下方の地盤は緩い状態にあるので、押し込み振動エネルギーが下方へと逃げて緩和されるため、改良効果が劣ることを表わしている。

これに対して、パイル先端部から1 m上部における割合は11%で、深度-3 m以深におけるものと同程度であって、改良効果に対する低下は認められない。

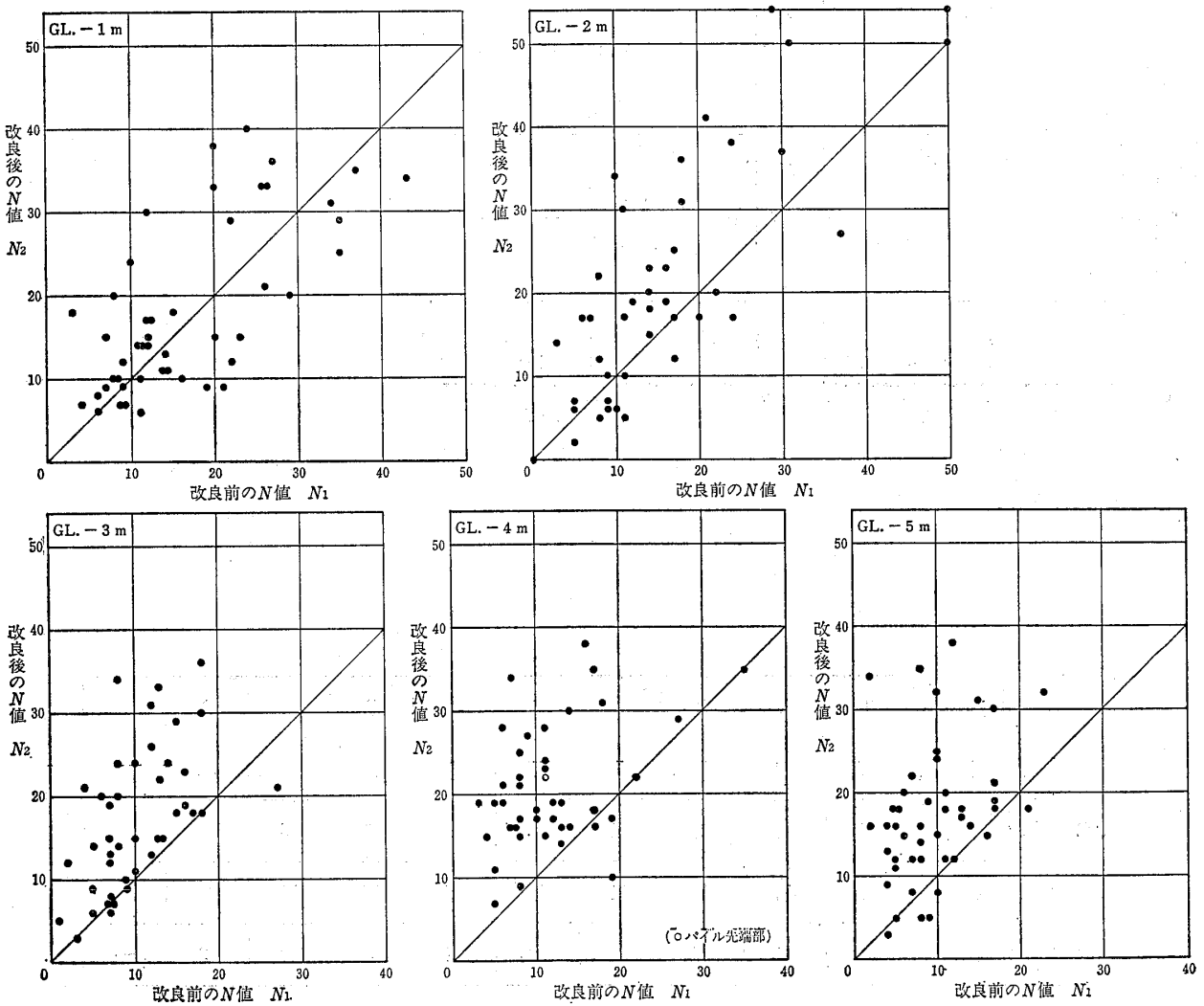


図-6 当敷地における改良前N値 (N_1) と改良後N値 (N_2) との関係
 Fig. 6 Relationship between N-value before improvement and N-value after improvement (classified by depth)

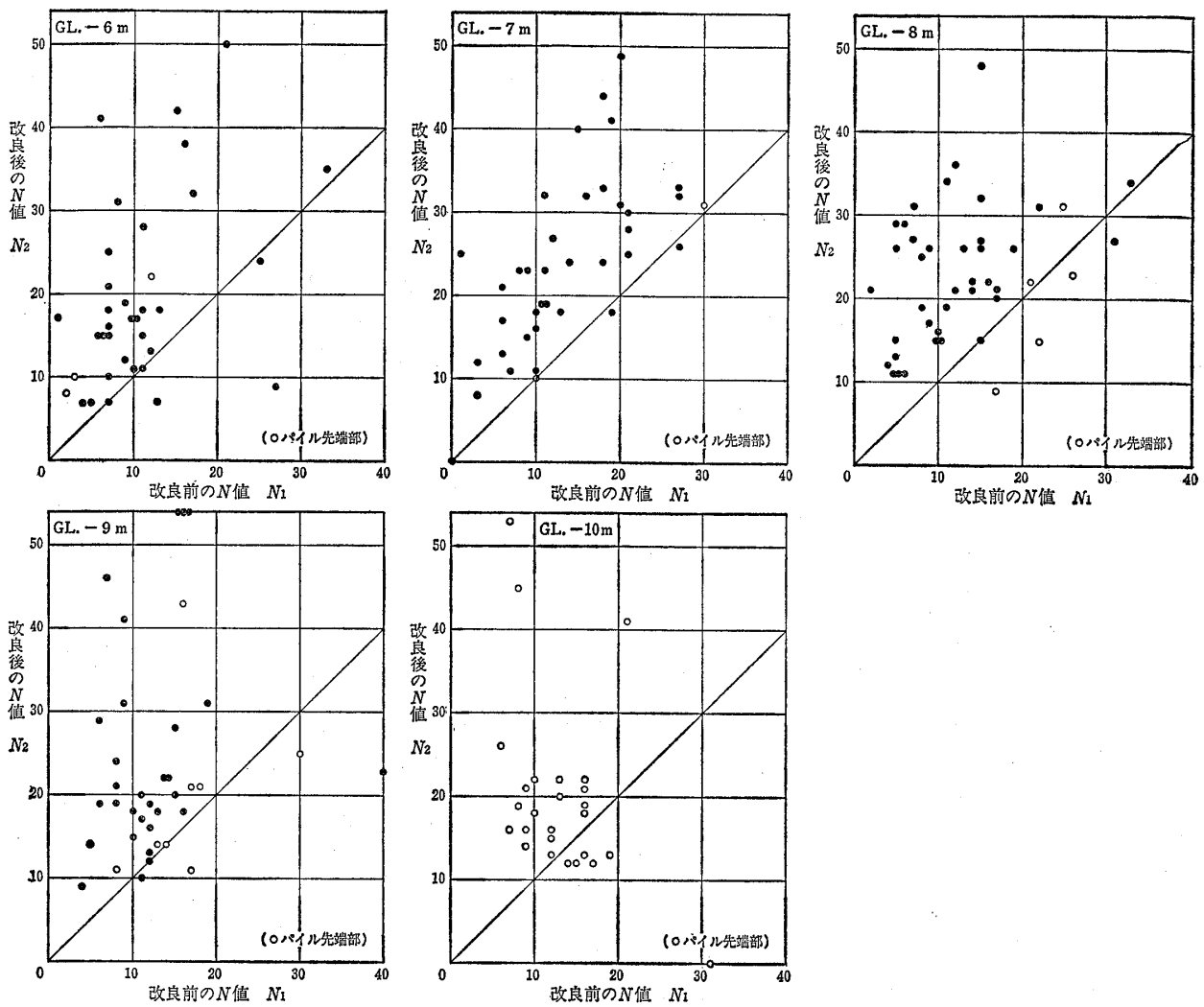


図-6 当敷地における改良前N値 (N_1) と改良後N値 (N_2) との関係 (つづき)
 Fig. 6 Relationship between N -value before improvement and N -value after improvement (classified by depth) (continued)

表-2 改良後においてN値の増加がみられなかった割合 (その1)
 Table 2 Evaluation of improvement effect (classified by depth)

深 度 (m)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	全 個 数	47	42	42	42	45	36	38	43	38	26
B	パイル先端部 個 数	0	0	0	1	0	3	1	5	8	26
C	パイル先端部 を除いた個数	47	42	42	41	45	33	37	38	30	0
D	$N_2 \leq N_1$ の 個 数	22	14	7	4	8	5	4	2	3	—
	D/C	47%	33%	17%	10%	18%	15%	11%	5%	10%	

※ $N_2 \leq N_1$ の個数：改良後のN値(N_2)が改良前のN値(N_1)より大きくならなかった個数

4-3 粘性土上部付近の改良効果

図-8は、砂質土中に挟み層として存在する粘性土の上部1m以内の区間における改良前後のN値の関係を示したものである。この結果によれば、 $N_2 \leq N_1$ である個数の全個数に対する割合は、表-3に示すように15%である。これは、表-2に示す深度-3m以深における割合(5~17%)の範囲内にあり、粘性土の上部において、改良効果がとくに劣るといふことはないようである。当地の場合、砂質土に不規則に挟まれている粘性土の層厚は2m以下であるため影響が少ないことも考えられる。

表-3 改良後においてN値の増加がみられなかった割合(その2)

Table 3 Evaluation of improvement effect for the discussed zone

		パイル先端部	パイル先端から1m上部	粘性土層上部1m区間部
A	全個数	44	46	40
D	$N_2 \leq N_1$ の個数	12	5	6
	D/A	27%	11%	15%

5 増加N値(改良後のN値の増加量)について

5-1 均等係数と増加N値との関係

サンドコンパクションパイル施工後のN値(N_2)と施工前のN値(N_1)の差を $N_3 (=N_2 - N_1)$;増加N値と呼ぶことにすると、均等係数(U_0)と増加N値(N_3)との関係を求めると、図-9に示すようになる。ここに、深度-1m、-2m、パイル先端部は除外してある。一般的には均等係数が大きく、粒度配合の良い土の方が締め固め効果は大きいとされているが、図-9を見る限りは、上記のような傾向は認められない。

5-2 細粒分含有率と増加N値との関係

図-10は、細粒分含有率(S_f)と増加N値(N_3)との関係を示したものである。ここに、深度-1m、-2m、パイル先端部は除いてある。この図において、増加N値(N_3)の上限値に注目すれば、細粒分含有率(S_f)が増えると、増加N値(N_3)の上限値は小さくなる傾向を示している。そして細粒分含有率が50~60%以上(細粒土)になれば、改良効果は殆んど期待できないことを表わしている。このことは、バイブロのような振動・衝撃的な荷

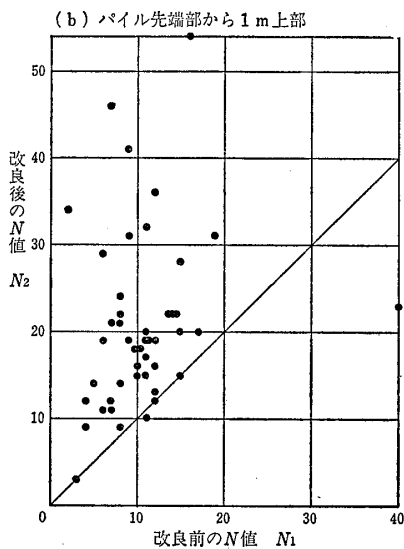
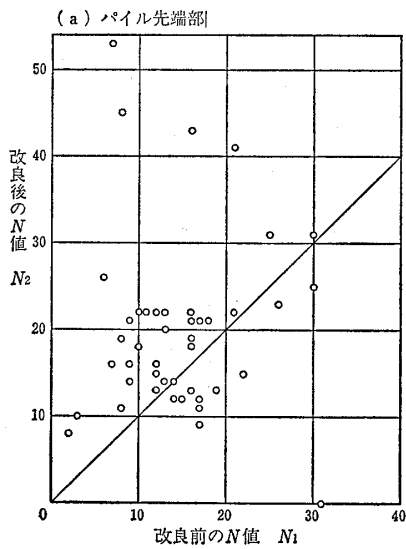


図-7 パイル先端部の改良前N値(N_1)と改良後N値(N_2)との関係
Fig. 7 Relationship between N-value before improvement and N-value after improvement at the bottom of pile

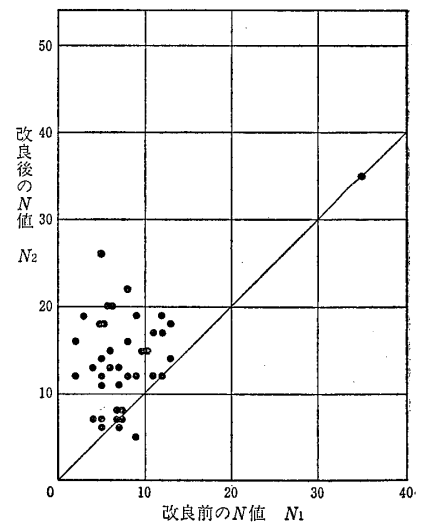


図-8 挟み粘性土層の上部1m以内の区間の改良前N値と改良後N値との関係
Fig. 8 Relationship between N-value before improvement and N-value after improvement (1m above the clayey layer)

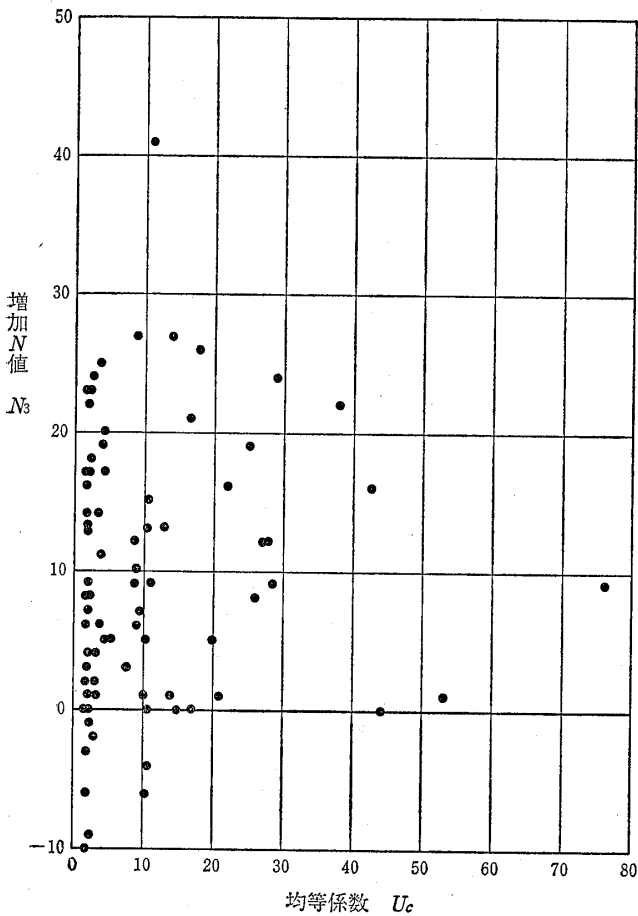


図-9 均等係数と増加N値との関係

Fig. 9 Relationship between uniformity coefficient and increase of N-value

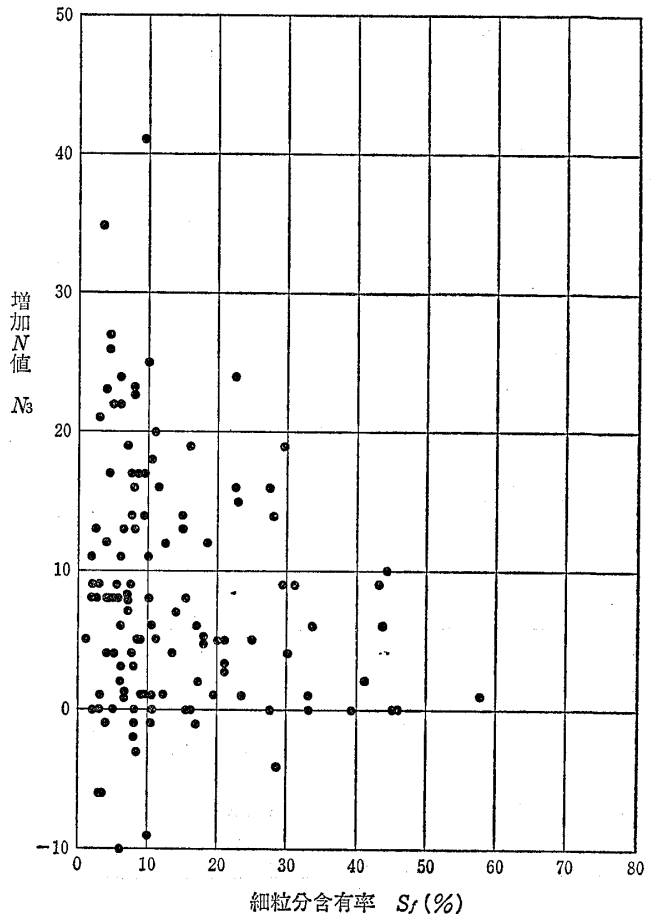


図-10 細粒分含有率と増加N値との関係

Fig. 10 Relationship between finer content and increase of N-value

重によっては、細粒土のような透水係数が小さい土の密度・強度を増大させることが困難なことを表わしている。

さきに示した改良前後のN値の関係図(図-1)は、細粒分含有率が20%以下の砂質土地盤に対する施工結果の集積であるが、図-10の結果を見る限り、細粒分含有率が20~40%の地盤でも改良効果を期待することができる。

5-3 改良前N値と増加N値との関係

細粒分含有率が20%以下の砂質土について、改良前のN値(N_1)と増加N値(N_3)との関係を示すと、図-11のようになる。ここに、深度-1m, -2m, パイル先端部のものは除いてある。図-11において、増加N値(N_3)の上限値に注目すれば、改良前N値(N_1)が大きくなるに従って、増加N値(N_3)の上限値が小さくなる傾向がみられる。すなわち、改良前N値が10程度であるときには、そのN値をおよそ20程度増加させることは可能であるのに対し、改良前N値が30程度になると、5以上の増加を期待することは困難となる。

5-4 砂圧入率と増加N値との関係

表-1に示した4種の砂圧入率(a_s) (0.06, 0.10, 0.11, 0.15)ごとに、増加N値(N_3)のヒストグラムを作ると図-12のようになる。ただし、細粒分含有率が20%以下の砂質土に関するもので、深度-1m, -2mとパイル先端部は除いてある。

これらのデータに基づいて、それぞれの砂圧入率における増加N値の平均値(\bar{N}_3)、不偏分散の平方根(v)および標準偏差(σ)を計算すると、表-4に示すようになる。この表によって、砂圧入率と増加N値の平均値との関係をグラフで示すと図-13が得られる。この図中に示す斜線部分は、図-1に実線で示されている。それぞれの砂圧入率に対する標準的の曲線から求めた増加N値の範囲(ここでは、増加N値の標準的目標値と呼ぶことにする)を表わしている。図-13によると、砂圧入率が0.10以下(0.06と0.10のとき)では、標準的目標値にくらべて、増加N値の平均値の方が大きくなっており、一

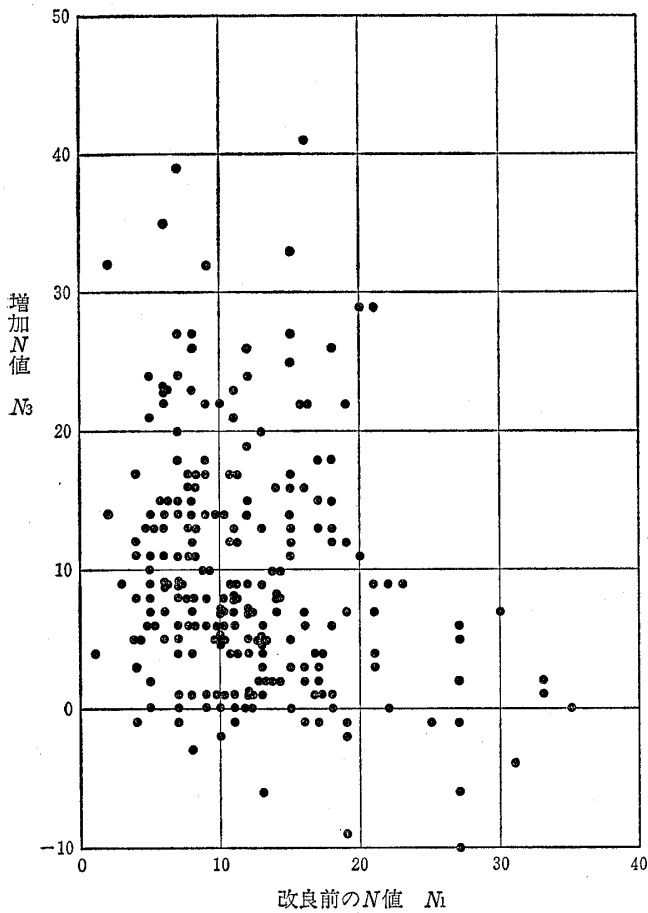


図-11 改良前N値と増加N値との関係

Fig. 11 Relationship between N -value before improvement and increase of N -value concerning with sandy soil containing finer content less than 20%

表-4 砂圧入率別の増加N値の平均値
Table 4 Mean value of increase of N -value for various sand compaction pile

	砂圧入率 a_s	個 数	平均値 \bar{N}_3	不偏分散の平方根 v	標準偏差 σ
A	0.06	44	8.82	6.30	6.34
B	0.10	48	11.88	9.21	9.26
C	0.11	113	8.06	8.36	8.38
D	0.15	33	12.18	8.80	8.87

方, 砂圧入率が0.10以上 (0.11と0.15のとき) では, 小さくなっている。

しかしながら, 砂圧入率が0.10から0.11にとわずかではあるが増加しているにもかかわらず, 増加 N 値の平均値が4程度の減少を示すことは, 図-1に示す結果から

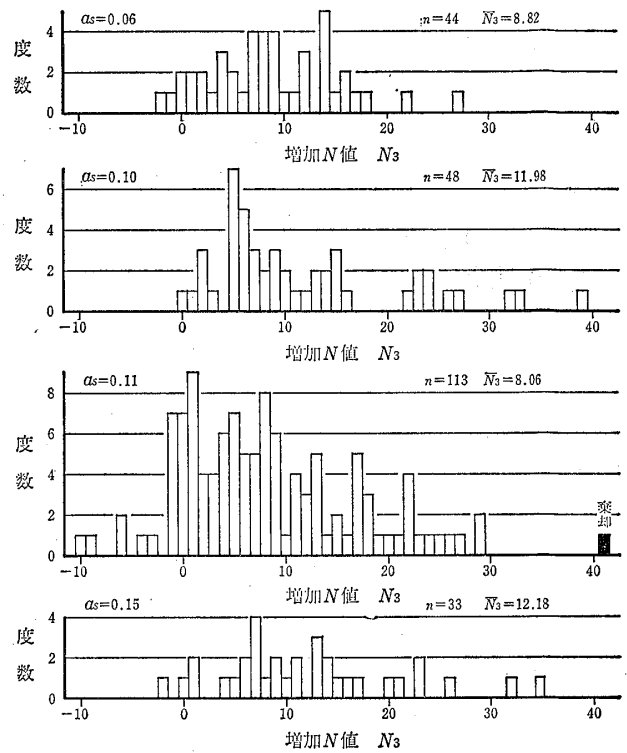


図-12 砂圧入率別増加N値のヒストグラム

Fig. 12 Histograms of increase of N -value for various sand fill ratio

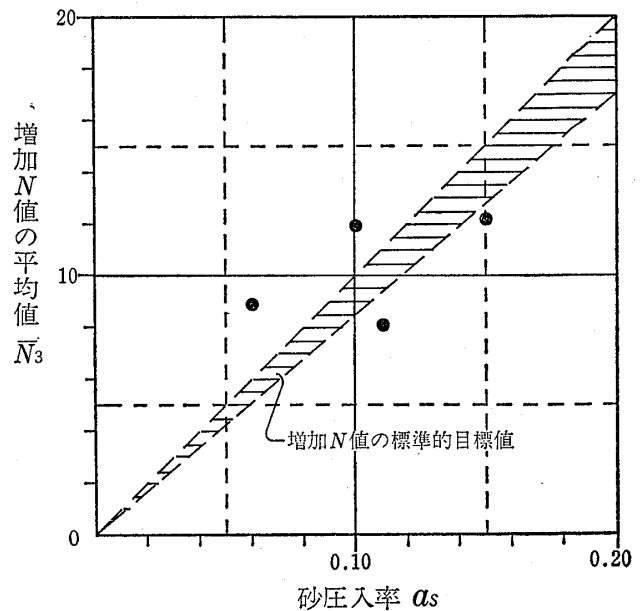


図-13 砂圧入率と増加N値の平均値との関係

Fig. 13 Relationship between sand fill ratio and mean value of increase of N -value

みても疑問を生ずるところであり、また、表-4に示す不偏分散の平方根の値が6.30~9.21と大きな値となっている。そこで、分散分析を行い、各砂圧入率の増加 N 値の母平均の差の検定を行った。その結果、

$$H_0: \bar{N}_{3A} = \bar{N}_{3B} = \bar{N}_{3C} = \bar{N}_{3D}$$

は有意水準1%で棄却できないことが判明した。すなわち、増加 N 値の平均値の差は最大4.12を示しているが、その差が明瞭にあると認められないことをいっている。

6 まとめ

サンドコンパクションパイルによる砂地盤の改良工法は、パイプロの振動・衝撃によって砂地盤中に砂杭を形成するものである。すなわち、砂材を砂地盤に押し込むことによる砂地盤の密度と強度の増加ならびにパイプロの振動・衝撃自体による周囲の砂地盤の密度と強度の増加を目的としている。しかしながら、その改良効果に關与する要因としては、つぎのようなものが考えられる。

- (1) 押し込み振動エネルギーを緩和する要因
 - 周囲の土の拘束力
 - 打設範囲・順序
 - 砂杭の密度、など
- (2) 同一エネルギーでの強度増加の難易に関する要因
 - 地盤の粒度配合・粒度組成・初期密度・せん断強度・透水係数、など
- (3) 押し込み振動エネルギーに関する要因
 - パイプロの衝撃・振動力
 - 投入砂量
 - 単位長さ当りの施工時間、など

今回の効果判定調査においては、改良前および改良後に同一地点でボーリング調査を行っており、改良前後の N 値の比較が深度1mごとに可能であり、また、改良前の調査においては、主な砂質土で粒度試験もを行っている。これらのデータを用いて、改良効果に影響を及ぼす地盤の特性を検討した結果、つぎのことが判明した。

- (1) 期待する N 値を得るために必要な砂圧入率(a_s)を決定する方法としては現状、図-1を用いることが簡便であり、そのほかによい方法はないように思われる。そこで、図-1を利用するに際して留意すべき点を示すと以下の通りである。

a) 図-1は細粒分含有率20%以下の砂質土に関して作成されたものであるので、20%以下の砂質土に適用できることはいうまでもないが、細粒分含有率20~40%の砂質土について適用してもよいようである。この場合、十分な施工実績が集積されているわけではないが、ある程度の改良効果は期待できる。

b) 図-1は、地盤改良前の原地盤 N 値(N_1)が25以下である場合について示してある。今回の結果においては、 N_1 が30以上の場合には、改良効果はあまり期待できないことが判明した。したがって、図-1の適用に当たっての N_1 の上限値は、25~30と考えられる。

(2) N 値が期待するほど増加しない部分があり、つぎのような対応が必要となる。

a) 圧入された砂が上方にも広がるために、上載圧が小さい地表付近では、改良効果が低下するといわれてきたが、それが地表下2m程度まで及ぶことが認められた。したがって、サンドコンパクションパイル打設後に、セメント安定処理をするともに、重機で転圧する。

b) パイル先端付近では、圧入された砂が下方にも広がるなどの理由によって、砂圧入率は低下し、改良効果が低くなることが考えられている。この検討によれば、パイル先端より上方約1mのところまでは及ばないようであるが、先端部においては改良効果が低くなっている。したがって、パイル長を地盤改良深度よりも1m程度長くする。

7 あとがき

ここに述べた検討結果によれば、実際には、ばらつきが非常に多く、図-1に適用するに当たっては、このばらつきを考慮する必要のあること、および条件によっては適用できないことがわかった。今後さらに、投入砂材や地盤の堆積環境などによる違いを検討する必要があるであろう。とくに、堆積環境による違いは大きいようで、当該地においても砂洲部分と埋立部分では異なった結果を示すであろうことが推測される。そしてまた、堆積環境や年代の差によって、砂粒子の構造や粒子間のセメンテーションなどが複雑に影響するものと考えられる。