

## 機械攪拌による固化系地盤改良の新しい品質管理方法

A New Quality Control Method for Machine Agitated Ground Improvement

三木 博 史 (みき ひろし)

㈱三木地盤環境工学研究所 所長

大河内 保 彦 (おおこうち やすひこ)

㈱NOM 代表取締役

牧野 昌 己 (まきの まさみ)

㈱加藤建設 常務取締役

佐藤 利 行 (さとう としゆき)

㈱加藤建設 部長

## 1. はじめに

世界的な設計基準の性能規定化の流れの中で、固化系地盤改良に求められる性能も見直しが求められている。特に、品質管理においては、設計で要求される性能が満足されていることをどう保証していくかという観点から、その重要性がますます高まっていくと考えられる。

本来確認すべき性能は、改良域全体を代表するものでなければならないが、実際に品質管理試験で確認できるのは、限られたサンプルの特性である。このため、全体の特性を推定するための確率・統計論的アプローチが不可欠であるが、従来の方法では、この点についての考慮が不十分であった。

筆者らは、パワーブレンダー工法におけるセメント系固化材等を用いた品質管理方法に関し、長期にわたり取得した多数の品質管理データを基に、確率・統計論的な手法を用いて、信頼性設計に耐えうる新しい品質管理方法の検討を行い、地盤改良の性能を保証していこうとする新しい品質管理方法に関して、その適用性の検討を行ったので、報告する。

## 2. 現行品質管理方法と課題

従来道路分野で広く行われてきた、地盤改良の品質管理方法は以下のようなものである。

- 1) 各供試体の試験結果は設計基準強度  $q_{uck}$  の85%以上を確保する。
- 2) 3個の供試体の平均値を1回の試験結果とし、これは  $q_{uck}$  以上を確保する。
- 3) 1本の改良体について上、中、下の3箇所それぞれ1回試験を実施する。ただし、1本の改良体で設計強度を変えている場合には各設計強度ごとに3回とする。
- 4) 改良体500本未満は3本、500本以上は250本増えるごとに1本追加する。

上記の方法の確率・統計論的な意味について考察してみると、上記1)と2)の条件を満足しているサンプルでも、設計基準強度を下回る確率が0ではない場合が、統計処理の上では必然的に現れる<sup>1)</sup>。

参考文献1)においては、設計基準強度を400 kN/m<sup>2</sup>とし、上記基準を満足した4種類のバラツキの異なる

サンプル群を作成した。それぞれが正規分布するとして統計処理すると、表一1となる。

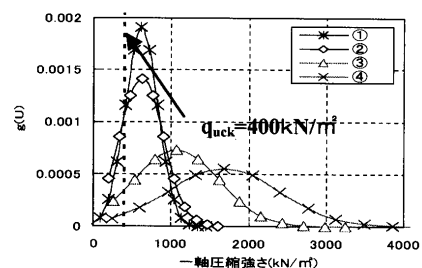
この確率分布形状を、図一1に示す。生データとしては、設計基準強度の85%以下が存在しないにもかかわらず、統計的には存在する。すなわち、試験の数を増やせば、出現しないことの方が不合理である。

図一2には、それぞれのケースで設計基準強度を下回る確率と、設計基準強度の85%を下回る確率を示した。上記のような品質管理基準では、不良率も一定となっていない。すなわち、上記の基準は、統計・確率論的な意味合いが不明確である。

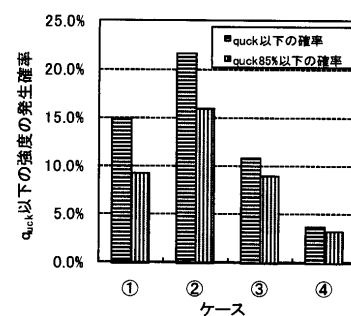
つまり、従来から広く用いられてきた上記の方法では、設計基準強度を下回る確率が小さくなるよう、経験的・

表一1 各データ群の諸数値

ケース	平均強度 (kN/m <sup>2</sup> )	標準偏差 (kN/m <sup>2</sup> )	変動係数
①	618	209	0.34
②	621	282	0.45
③	1074	545	0.51
④	1685	723	0.43



図一1 各データ群の確率密度分布



図一2 ある強度以下の発生確率

暗黙的に規定しており、しかも、設計基準強度  $q_{uck}$  の 85% 以下が出現しないようにしていることから、品質管理試験で得られる強度が、設計基準強度より非常に大きくなる傾向が生じていると解釈できる。

### 3. 現行基準・指針等の最近の傾向

最近の品質管理試験の傾向としては、確率・統計論的な考えを積極的に導入し、いわゆる信頼性設計的な考え方を取り入れる方向が現れつつある。

例えば、「改訂版 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針」<sup>2)</sup>においては、(1)式のように設計基準強度  $q_{uck}$  を設定するものとしている。

$$q_{uck} = (1 - 1.3 V_{quf}) \times \bar{q}_{uf} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $\bar{q}_{uf}$  : 現場抜き取りコアの平均一軸圧縮強さ (kN/m<sup>2</sup>)

$V_{quf}$  :  $q_{uf}$  の変動係数

この考え方は、バラツキが少なく均質に改良できている場合には、設計基準強度が現場平均強度により近くなるという点で、より合理的であるが、変動係数にかけられている係数の値は経験的なものようである。

また、品質管理試験という観点からみると、現場サンプルの平均一軸圧縮強さが、 $1/(1 - 1.3 V_{quf})$  だけ設計基準強度より割増しされる必要があることを示している。

「海上工事における深層混合処理工法技術マニュアル」(改訂版)<sup>3)</sup>においては、不良率 (改良体の強度が設計基準強度を下回る確率) を想定した品質管理に関して記述されているが、上記の(1)式を用いる方法と同様、サンプルの特性についての評価に留まっており、サンプルと改良域全体 (母集団) の関係を考慮するまでには至っていない。

### 4. 新しい品質管理方法

地盤改良体の必要性能の照査としての品質管理は、「改良体全体の平均強度」が設計基準強度を上回っていることを確認することであるといえる。

その際、平面的にも鉛直方向にもバラツキの存在する改良域全体の特性を限られたサンプル数の調査によって評価する必要がある。この概念を図-3に示す。

図の例ではボーリング等による調査孔が3孔ある。各孔から取られたサンプルに対して品質管理試験が実施され、それがその位置付近での深度方向のバラツキを代表する。一方それぞれの孔は、平面的なバラツキを代表すると考えられる。

限られた「サンプル」から改良域「全体 (母集団)」の特性を推定し、その不良率を評価するためには、母集団推定のアプローチが必要である。すなわち品質管理試験は、平均値も分散も不明な母集団 (ある強度の改良地盤全体) に関して、数量に限られたサンプルの平均値と分散から、その代表値 (特性値) を推定することと定義することができる。

図-3の例では、調査孔あたりの深度方向のサンプル

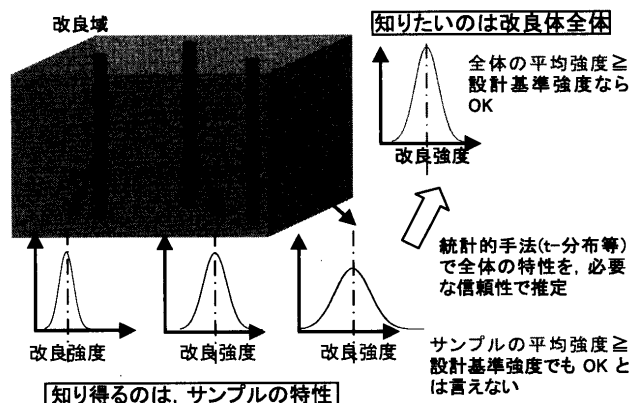


図-3 サンプルの特性と全体を代表する特性の関係

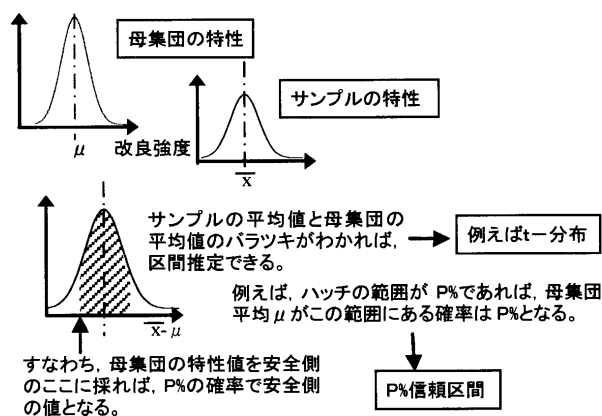


図-4 信頼区間を用いた母集団特性値の推定

数は増やすことが可能でも、平面的な分布は3個しかなく、サンプルが、空間的にランダムなものが必要なことを考慮すると、少数サンプルであると考えべきである。

例えば、母集団が正規分布をなす場合に、少数サンプルをとると、 $t$ -分布をなすことが知られている。

また、標本の平均値  $\bar{x}$  と母集団の平均値  $\mu$  を考えると、 $\bar{x} - \mu$  のバラツキを知ることができれば、母集団の平均値  $\mu$  をある信頼度で推定することが可能になる。この様子を図-4に示す。

地盤工学分野で、このアプローチをいち早く採用した基準として、新しい「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>4)</sup>がある。地盤改良を対象としてはいないが、地盤物性値の評価に信頼性設計の考え方を取り入れており、 $t$ -分布の考え方を基本にして、工学的判断を加えた形の評価方法を使用している。

本評価方法は、原理的には一般的な地盤改良工法に適用可能であるが、特にパワーブレンダー工法では、改良対象深度に、土質が異なる複数の層が存在しても、トレンチャー方式により鉛直方向に混合攪拌するため、ほぼ均質な改良体が造成される。このため、このような確率・統計論的手法の適用性が高いと思われるので、この考え方を今回の品質管理方法に応用することとした。

港湾基準では、母集団の推定に  $t$ -分布そのものは用いていないが、同様の考え方で、以下の(2)式 (記号等は地盤改良分野用に変更してある) を用いている<sup>5)</sup>。この

報 告

式は、 $n=3$  の場合で、変動係数が0.3程度であれば、77%信頼水準とほぼ一致する。

$$q_k = \overline{q_{uf}} \times (1 \pm V_{q_{uf}}/2) \times (1 \pm 0.5/n) \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $q_k$  : 特性値 (kN/m<sup>2</sup>)

$\overline{q_{uf}}$  : サンプルの平均値 (代表推定値) (kN/m<sup>2</sup>)

$V_{q_{uf}}$  : 変動係数

$n$  : サンプル数 ( $n_s$ ) もしくは、調査孔数 ( $n_b$ )

注：±は、推定対象が、荷重側か抵抗側か等を考慮して、係数が安全側になるように選択する。地盤改良の場合は抵抗力を増すためのことが多いので通常マイナス側

地盤改良の場合は、自然地盤の物性値と異なり、人為的な改良を加えるため、自然地盤のバラツキよりもむしろ小さくなると考えられる。このため、上記のような考え方でも、十分安全な特性値の推定が可能であると思われる。また、式(2)の意味するところは、サンプルの数が少なくかつバラツキの大きい場合は、信頼性を確保するために、導出値 (例えば平均強度) を大きめに割引いて評価するということである。サンプルの数が増し、バラツキが少ないと特性値は導出値に近づいていく。

実務上の品質管理に当たっては、各ボーリング孔の深度方向の特性値を式(2)を用いて求め、複数のボーリング孔の特性値に再度(2)式を適用して全体の特性値を求める方法とした。

5. 改良型土壌硬度計の活用

ここで検討している新しい品質管理方法に関して、母集団の特性値を推定する場合、その推定精度を向上させるには、サンプル数を増やすことが必要である。一方で、ボーリング調査孔数を増やすことは、品質管理コストの増大につながり、あまり得策とはいえない。

このため、オールコアボーリングのサンプルを活用して、現状では、上、中、下の3深度に実施している一軸圧縮試験に加え、深度方向のデータを増やす目的で、山中式土壌硬度計の改良型の適用を検討した。具体的にはバネ値を  $k=2.0$  N/mm から、 $k=5.9$  N/mm へ、貫入コーン部の直径を先端0.5 mm、基底部 4 mm と変更したパワーブレンダー工法硬度計 (以下 PB 硬度計と称する) を開発した。

写真-1 に PB 硬度計を示す。

地盤改良の室内配合試験時に2500点以上の貫入試験 (一軸圧縮試験は500本以上) を実施し、一軸圧縮強さと貫入量、計算されるコーン指数  $q_c$  との関係調べた。図-5 に関係を示す。図の破線は貫入量が小さい (すなわち高強度) の場合に強度を安全側に評価するように工夫したものである。図-6 に使用している  $\alpha$  と貫入量の関係を示した。

パワーブレンダー工法の実施工現場で実施した品質管理試験における、一軸圧縮強さとの比較を図-7 に示す。補正しないと強度を過大評価する傾向があり、補正した曲線の方が相関が良い。



写真-1 PB 硬度計

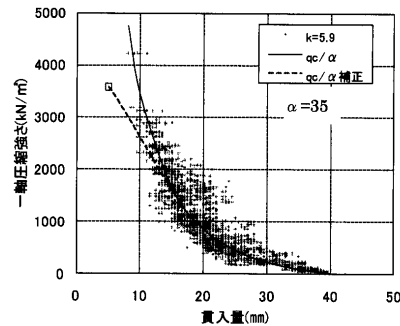


図-5 PB 硬度計貫入量と一軸圧縮強さ

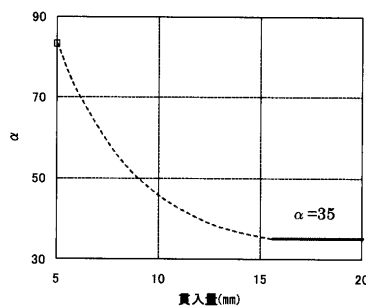


図-6  $\alpha$  と貫入量

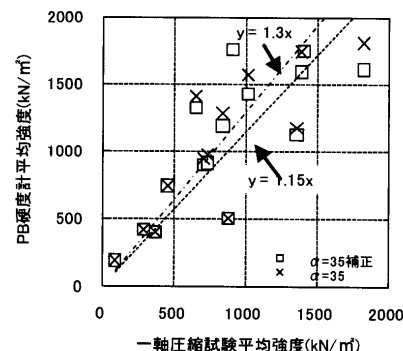


図-7 一軸試験と PB 硬度計換算値の比較

6. 本品質管理方法の適用例

ここで検討している方法は、原理的なアプローチは、確率・統計論から信頼性設計的な手法を採用している適正なものと考えられるが、工学的には、従来実施されてきた品質管理方法で、大きな問題が生じていないことから、従来の方法が危険側の結果を与えていないと解釈できるため、以下のような検証を行う必要がある。

- 1) 従来の品質管理方法で品質を満足している結果が、新しい品質管理基準によって、ほとんどが不合格と判定されるような場合は、何らかの見直しが必要となる。
- 2) 逆にほとんどが安全すぎる改良であると判定されることも、品質の評価が甘すぎる可能性がある。
- 3) データ収集により、妥当な品質評価が得られ、か

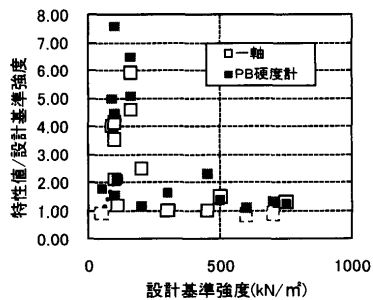


図-8 特性値/設計基準強度と設計基準強度

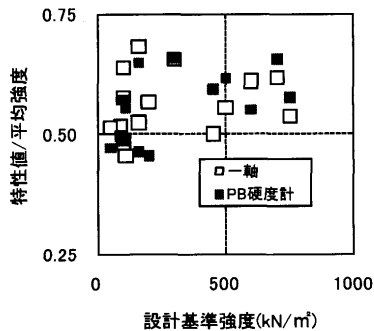


図-9 特性値/平均強度と設計基準強度

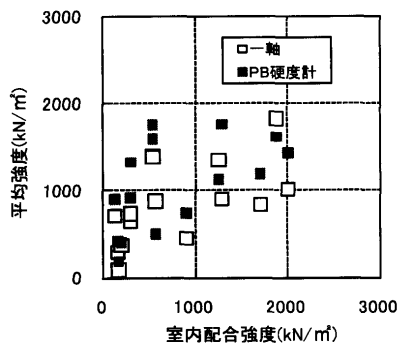


図-10 平均強度と室内配合強度

つ将来の地盤改良の合理化につながることを望ましい。

以上のような観点から、改良諸元が種々に異なる15の実施工フィールドを対象として、従来の施工方法、施工管理・品質管理方法のもとで、PB硬度計によるコア貫入試験を追加し、データ収集を行うと同時に、新しい品質管理基準を適用し、その適用性を検討することとした。PB硬度計は、一軸圧縮試験に供するコア部分(上,中,下相当部分)を除いた部分におおむね10 cmおきに実施した。ただし、割れが生じるなど、明らかに不適切と思われる結果は後から除外した。

図-8に、特性値と設計基準強度の比を設計基準強度ごとに示した。データ数を考慮すると、特性値はほぼ

PB硬度計の結果が支配的となるため、ここではあえて、別々にデータ整理を行った。

一軸試験の場合はサンプル数が少ないこともあり、3ケースでわずかながら特性値が設計基準強度を下回ったが、PB硬度計ではすべてが設計基準強度を満足した。この観点からは、従来の品質管理手法と提案法に大きな矛盾がなく、また、特性値/設計基準強度の値が非常に高いものは、より合理化の可能性があると考えられる。

図-9には、特性値とサンプルの平均強度の比(低減率)と設計基準強度を示した。また、図-10には平均強度と配合強度の関係を示す。一般的には現場平均強度が、室内強度よりも下回ることが多いことを考慮して、3倍前後の室内配合強度とすることが多いが、パワーブレンダー工法においては、平均強度と室内配合強度の相関が高く、低減率が0.5~0.7程度であることを考慮すると、室内配合強度/設計基準強度の比が2倍程度でも十分性能を満足できると考えられ、新しい品質手法を用いることにより、性能を保証しつつ地盤改良のコスト縮減が図れる可能性がある。

## 7. おわりに

限られたサンプルから、改良体全体の特性をある信頼水準で推定するという新しい品質管理手法を提案し、実施工フィールドで適用性を確認し、品質管理を通じた、地盤改良の設計・施工の合理化の可能性を示した。

ここで提案した新しい品質管理手法は、パワーブレンダー工法協会の依頼により(財)日本建設機械化協会 施工技術総合研究所において実施された、「パワーブレンダー工法の品質管理方法に関する検討委員会」(委員長:安原一哉茨城大学名誉教授)の成果をまとめたものである。関係各位に深く謝意を表する。

新しい品質管理手法の適用により、地盤改良のコスト縮減や設計手法の合理化に資することが期待される。

## 参考文献

- 1) 三木・大河内: 固化系地盤改良の品質管理に関する一考察, 土木学会第64回年次学術講演会講演概要集, pp. 903~904, 2009.
- 2) (財)日本建築センター: 改訂版 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針, 2002.
- 3) (財)沿岸技術研究センター: 海上工事における深層混合処理工法技術マニュアル(改訂版), 2009.
- 4) (財)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 5) 渡部: 港湾構造物基礎設計に用いる地盤物性値の評価, 基礎工, pp. 17~21, 2009.

(原稿受理 2011.2.6)