

## 改良地盤の品質検査における合否判定の考え方

Consideration for Judgement on the Quality Inspection for Improved Ground

田村 昌仁 (たむら まさひと)

建設省建築研究所第三研究部 主任研究員

中野 健二 (なかの けんじ)

不動産建設(株)ジオエンジニアリング事業本部 課長

日比野 信一 (ひびの しんいち)

(株)テノックス技術部 部長

溝口 栄二郎 (みぞぐち えいじろう)

(株)テノックス技術部

## 1. はじめに

改良地盤の築造においては、改良地盤に要求した性能が確保されていることを確認するための品質検査が必要である。品質は、「施工」と直結しているため施工管理により実現されるが、「検査」による確認は良質な施工を維持するためにも重要である。しかし、地盤改良工法の中には要求性能が明確でなく、品質検査の目標である「品質基準」が示されていない場合もある。このため、仕様書どおりの施工をすることのみが重視され、品質検査の意義や合否判定条件が曖昧なままに、改良部分の強度や $N$ 値などを調査することも少なくない。

筆者らは、ユーザーに対する品質保証を重視した品質管理の考え方を提示した<sup>1)</sup>。ここでは、検査手法を定める際に考慮すべき事項や合否判定の基本的な考え方などを述べる。また、深層混合処理工法(DM工法)やサンドコンパクションパイル工法(SCP工法)を対象とした合否判定の考え方を紹介する。

## 2. 品質検査の前提条件

合理的な品質検査を実施するためには、改良地盤のあるべき状態を規定した「品質基準」が明確でなければならない。そして、その基準は確率論に基づいていることが望ましい。これは、改良地盤の品質検査は、一般に抜取り検査であり、この検査から母集団の品質を推定するためには統計的手法に頼らざるを得ないためである。地盤改良工法の種類によっては、品質基準を明確にしにくい場合や余裕を大きくとった仕様を採用する場合や品質基準自体に余裕を持たせる場合もあろうが、既存資料の蓄積が乏しく母集団の品質の評価方法が曖昧では検査手法の信頼性や仕様の妥当性を論じることができない。図1には、母集団の設定から合否判定条件を決めるまでの考え方をフローで示す。

## 2.1 母集団の設定

品質検査における母集団は、同一地盤、同一施工を基本とする。また、強度や $N$ 値などの検査指標をランダムにサンプリングすることが重要であり、地盤の複雑さや工事量等に応じた検査数量を確保することが必要である。

地盤改良の効果は、地盤条件や施工仕様により異なる。このため、まず事前調査で土質、地層などを把握する。

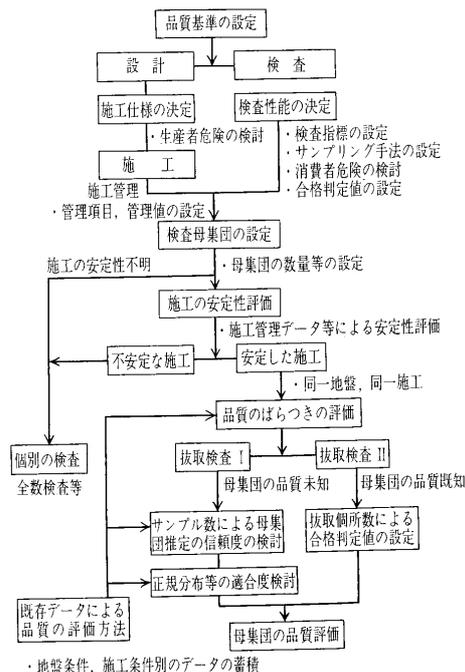


図1 改良地盤の品質検査フロー

次に、同一の施工仕様が確保され、安定した施工がなされていることを施工管理データから確認する。この安定性は、自動計測された管理データにより判定することが望ましい。

DM工法の場合、自動計測データに基づき、地盤の同一性や施工の安定性をおおむね把握することができる。電流計による貫入抵抗は、事前調査と対比して支持層位置や地層の変化を確認する有効な情報となる。貫入速度、攪拌翼の回転数は、地層の変化や地中障害物の存在に関する情報となり、攪拌混合の安定性を判断できる。SCP工法の場合でも、深度計や砂面計を用いて単位施工長ごとの砂の吐出量を自動計測できる。これらの管理データの記録・保存は、品質保証にとって重要である。

## 2.2 母集団の品質評価

統計的な検査手法を採用するためには、母集団の特性値(平均値、変動係数、標準偏差)が既知とみなせるかどうか重要である。これらの特性値を把握するためには、一定以上のサンプル数による調査を要する。このサンプル数 $n$ は、標本分散と正規分布の分散の比と $n$ の関係(図2)から論じることができる。図2より、 $n=25$ までは推定精度が急激に増加し、それ以降はぼ

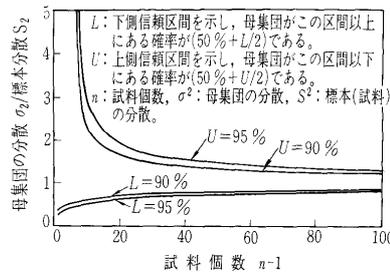
定になっていることより  $n > 約25$  が目安となる。また、試験値が正規分布に適合していることを確認した上で標準偏差（変動係数）の安定度を把握することが必要である。注意すべきは、度数分布の区間設定が多すぎるために理論値としての度数が 0 となる区間が生じる場合と、標準偏差が大きく理論値としての度数が負の領域でも 0 に近づかない場合である。前者の場合、区間統合を適切に行うことが必要である。後者の場合、物理的に負の値があり得ない以上、正規分布とみなすのは適当でなく、対数正規分布に近似する方法も有効であろう。

表一 1 は、DM 工法による改良体から採取したコア強度の変動係数<sup>2)</sup>が、A~E の 5 現場においておおむね一定であると判断できるかどうかを  $F$  検定により調べた例を示している。ここでは、5 現場の変動係数の平均値  $\overline{V_{quf}} = 27.0\%$  を母集団の変動係数とし、これと各現場の変動係数  $V_{quf}$  が等しいかどうかを  $F$  値により検定している。 $F$  値は、統計的に求められる値で、それぞれの現場の試料個数  $n$ （自由度  $n-1$ ）と母集団（自由度  $\infty$ ）とから  $F$  分布表<sup>3)</sup>を用いて、次に述べる「危険率」に応じて読み取ることができる。ここでの「危険率」とは、各現場の母集団における変動係数  $V_{quf}$  が等しいにもかかわらず、誤って有意差があると判断する確率であり、有意水準とも呼ばれ、 $F$  分布表<sup>3)</sup>では一般的に 1.0% および 5.0% の  $F$  値が示されている。

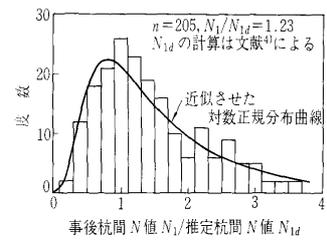
検定の手順を示すと、まず、 $F$  分布表から各現場の試料個数  $n$  と危険率に応じて  $F_{\infty, n-1}(0.01)$ ,  $F_{\infty, n-1}(0.05)$  の値を読み取る。次に、これに  $\overline{V_{quf}}^2$ （各現場の  $V_{quf}$  の平均）を乗じ、この値が各現場  $V_{quf}^2$  を下回る場合、設定した危険率に対して有意差ありと判定される。

$F$  検定によれば、 $\overline{V_{quf}} = 27.0\%$  に対して、危険率 5.0% では E 現場に有意差が認められ、危険率 1.0% では有意差がないと判断される。改良地盤に  $F$  検定を適用するに当たっては、工場製品に比べ、変動係数が大きいことから、有意差ありと誤って判断する可能性も大きいと考えられ、また JIS Z 9003 におけるロットの標準偏差の推定法に準じて、危険率 1.0% で判断してよいと考えられる。

次に SCP 工法について、液状化対策として埋立土と沖積砂層に施工された現場での事前と事後の  $N$  値について考察する。設計実務では、拘束圧および細粒分含有



図一 2 試料個数と分散の推定精度の関係



図一 3 事後杭間  $N$  値  $N_1$  / 推定杭間  $N$  値  $N_{1d}$  の分布

率の  $C_f$  の影響を考慮して、事前  $N$  値から改良率に応じて事後の杭間  $N$  値を推定する機会が多い<sup>4)</sup>。拘束圧 1.0 kgf/cm<sup>2</sup> で基準化した  $N$  値（換算  $N$  値： $N_{1.0} = 1.7N / (0.7 + \sigma_v')$ ）では、事後換算  $N$  値杭間  $N_{1.0}$  は、 $C_f$  が増えると小さくなる傾向がある<sup>5)</sup>。事前  $N$  値と  $\sigma_v'$  および  $C_f$  に応じた事後の杭間推定  $N$  値を  $N_{1d}$  とし、同じ  $\sigma_v'$  の条件で求めた事後杭間  $N$  値  $N_1$  との比 ( $N_1/N_{1d}$ ) をヒストグラムで示した例が図一 3 である。 $N_1/N_{1d}$  の変動係数等は、自然対数  $X = \ln(N_1/N_{1d})$  が正規分布に適合することにより求めた。

### 3. 深層混合処理工法

DM 工法の合否判定条件を設定するためには、品質基準<sup>6),7)</sup>だけでなく、検査性能（検査の信頼性）に対する検討が必要である。検査性能としては、消費者に対する品質保証の立場からは検査における合格判定条件を、生産者保護の立場からは合格確率を考慮した配合強度の設定方法を明確にすることが重要と考えられる。ここでは、既往の指針等<sup>8)~11)</sup>に見られる品質基準と配合強度および検査における合格判定条件の関係を表一 2 にまとめ、以下にその検査性能を考察した。

コンクリートやソイルセメントコラムは、品質にあるばらつきを有しているため、確率論に基づいた品質基準を設定する機会が多い。例えば、強度が正規分布しているものとして、設計基準強度 = 平均値 - 一定数 × 標準偏差と設定し設計基準強度を下回る確率（不良率）を規定する方法である（①③④⑤）。一方、検査における判定条件により品質基準を与えているような場合もある（②）。

表一 2 に見られる判定基準および判定式は、下記の 3 とおりおよびその組み合わせである。なお、 $f_0$  は所要の強度、 $a$  は所要の強度に対する割合、 $\sigma$  は標準偏差、 $k$  は規定された不良率に対する正規偏差である。

$$I : X_N (\text{試験結果の平均値}) > f_0$$

表一 1 強度試験と変動係数の安定度の検討

現場	試料数 $n$	平均値 $q_{uf}$ (kN/m <sup>2</sup> )	標準偏差 $\sigma_{n-1}$ (kN/m <sup>2</sup> )	変動係数 $V_{quf}$	$\overline{V_{quf}}$	$V_{quf}^2$	$\overline{V_{quf}}^2$	$F$ 値		検 定 結 果			
								危険率 1.0% $F_{\infty, n-1}(0.01)$	危険率 5.0% $F_{\infty, n-1}(0.05)$	$F_{\infty, n-1}(0.01) \times \overline{V_{quf}}^2$	判 定	$F_{\infty, n-1}(0.05) \times \overline{V_{quf}}^2$	判 定
A	30	1 770	410	0.23	0.27	0.053	0.072	1.69	1.46	0.122	○	0.105	○
B	40	3 190	830	0.26		0.068		1.59	1.40	0.114	○	0.101	○
C	50	6 370	1 590	0.25		0.063		1.52	1.35	0.109	○	0.097	○
D	30	4 040	1 090	0.27		0.073		1.69	1.46	0.122	○	0.105	○
E	50	3 710	1 190	0.32		0.102		1.52	1.35	0.109	○	0.097	×

\*  $F$  検定結果  $V_{quf}^2 > F \times \overline{V_{quf}}^2$  : 有意差あり (×),  $V_{quf}^2 < F \times \overline{V_{quf}}^2$  : 有意差なし (○)

表一 2 コンクリートや深層混合処理工法による品質基準と判定基準

指針, 仕様書	品質基準	配合強度, 調合強度	判定基準および判定式	備考
① 土木学会 <sup>8)</sup>	コンクリートの強度は, 所定の材齢において, 設計基準強度 $f_{ck}'$ を, 指定された割合以上の確率で下回らないこと。	配合強度 $f_{cr}'$ は, 一般の場合, 現場におけるコンクリートの圧縮強度の試験値が, $f_{ck}'$ を下回る確率が5%以下になるように, これを定める。 $f_{cr}' = a \cdot f_{ck}'$ $a$ : 割増し係数*1	判定式は下記のとおり。 $\bar{x} \geq \bar{X}_L = f_{ck}' + kS_N$ $\bar{x}$ : 圧縮強度の平均値 $\bar{X}_L$ : 合格判定値 $S_N$ : 圧縮強度の標準偏差 $k$ : 合格判定係数	$f_{ck}'$ を下回る確率が5%以下であることを, 適当な生産者危険で推定できる検査手法である。
② 日本建築学会 <sup>9)</sup>	コンクリートの強度は, 右記(判定基準および判定式)に示す事項を満足するものであること。	調合強度は, 構造体コンクリートの強度管理の材齢に応じて, 下式を満足するように定める。 $F_{28} \geq F_c + T + 1.73\sigma$ $F_{28} \geq 0.8(F_c + T) + 3\sigma$ $F_{28}$ : 調合強度 $F_c + T$ : 気温補正強度 $\sigma$ : 標準偏差	1回の試験結果は, 指定した呼び強度 $f_0$ の値の85%以上, 3回の試験結果の平均値は, $f_0$ 以上でなければならない。 $x_i = \min(x_1, x_2, x_3) \geq 0.85f_0$ $\bar{x} \geq f_0$ $x_i$ : 1回の試験結果 $\bar{x}$ : 3回の平均値	標準品のコンクリートの配合は, 所定の強度, スランプ, 空気量を満足し, かつ検査に合格するように生産者が定める。
③ 住宅・都市整備公団 <sup>10)</sup>	設計基準強度 $F_c$ は, 下式により求められる。 $F_c$ を下回る確率は, $p=2.5\%$ となる。 $F_c = \bar{q}_{uf} - 2\sigma_f$ $\bar{q}_{uf}$ : 現場平均強度 $\sigma_f$ : 現場強度の標準偏差	配合強度に関する記述は無い。配合強度 $m$ は, 設計基準強度 $F_c$ の2倍とする場合が多い。 $m = 2F_c$	一軸圧縮強度の全平均値 $\bar{F}$ が設計基準強度 $F_c$ の2倍以上, かつ $n$ 供試体の試験値の平均値 $F_i$ が $F_c$ 以上*2。 $\bar{F} \geq 2F_c$ $F_i \geq F_c$	コア採取は下記のとおり。 頭部コア : 100コラムに1箇所 深度コア : 500コラムに1箇所
④ 鉄道総合技術研究所 <sup>11)</sup>	設計基準強度 $\sigma_k$ は, 下式により求められる。 $\sigma_k$ を下回る確率は, $p=25\%$ となる。 $\sigma_k = \bar{\sigma}_f - 0.67S_f$ $\bar{\sigma}_f$ : 現場平均強度 $S_f$ : 現場強度の標準偏差	配合強度に関する記述は無い。配合強度 $m$ を下式から求める場合が多い。 $m = \bar{\sigma}_f + \sigma_k + 0.67S_f$	改良体の28日一軸圧縮強度の平均値 $\bar{\sigma}$ がいずれも $0.8\sigma_k$ を $1/20$ の確率で下回らない事, および $\sigma$ が $\sigma_k$ を $1/4$ の確率で下回らない事。	コア採取は下記のとおり。 頭部コア : 改良長200mに1箇所 深度コア : 改良長1000mに1箇所
⑤ 計量基準型抜取り検査の設計例	品質基準として, 設計基準強度 $F_c$ を下回る確率を, $p=10\%$ と仮定する。 $F_c = \bar{q}_{uf} - 1.28\sigma_f$ $\bar{q}_{uf}$ : 現場平均強度 $\sigma_f$ : 現場強度の標準偏差	配合強度 $X_f$ は, 設計基準強度を下回る確率が, 5%以下となるように定める。 $X_f = a \cdot F_c$ $a$ : 割増し係数	$F_c$ を下回る確率が $p_1$ 以下であることを, 適当な消費者危険 $\beta$ で推定できること。 $\bar{x} \geq \bar{X}_L = F_c + k\sigma$ *3 $\bar{x}$ : $n$ 箇所の平均値 $\bar{X}_L$ : 合格判定値	消費者危険 $\beta$ を考慮した計量基準型抜取り検査である。抜取り数に応じた合格判定値 $X_L$ を定めることで消費者に対する品質を保証している。

\*1: 割増し係数  $a = 1/(1 - 1.64V)$ ,  $V$ : 変動係数

\*2:  $\bar{F}$ : 各採取箇所における一軸圧縮強度  $F_i$  の平均値。  
 $F_i$ :  $i$  番目の採取箇所における一軸圧縮強度であり, 3個以上採取した供試体の平均値で表す。 $n \geq 3$ 。

\*3: 抜取り数  $n$  と合格判定係数  $k$

サンプル数 $n$	3	5	10	20
合格判定係数 $k$	1.74	1.57	1.40	1.29

$n$  と  $k$  は,  $\beta = 10\%$  として求めた。

II:  $x_i$  (個々の試験結果)  $> f_0$  or  $af_0$

III:  $X_N - k\sigma > f_0$

Iの方法は, 平均値保証的な考え方である。IIの方法は, 最低強度保証的な考え方であり, 極端にばらつきの大きい品質のロットを不合格としたい場合に有効な検査方法である。また, IIIの方法は, 品質のばらつきを考慮した検査手法であり, 試験結果が所要の強度を下回る確率(不良率)がある値以下であることを規定した手法である。確率論に基づいた品質基準を設定している場合には, 品質のばらつきを考慮したIIIの手法を用いることが, 品質基準と検査性能の関係を明確にする上でも有効である。

検査性能とは, 品質を表す指標とその合格確率の関係により論じることができる。今, 強度の分布が正規分布に従い,  $\sigma$  が一定の場合, IIIに示される判定条件に対する合格確率  $L(p)$  は式(1)で与えられる。なお,  $\phi, m, n$  はそれぞれ正規分布関数, 平均値, サンプル数である。

$$L(p) = \phi\left(\frac{m - f_0 - k\sigma}{\sigma} \cdot n^{1/2}\right) \dots\dots\dots (1)$$

$n=10, V=\sigma/m=0.3$ における合格確率  $L(p)$  と不良率  $p$  の関係(OC曲線)を図-4に示す。図中の実線は①の判定条件によるOC曲線, 破線は⑤の判定条件によるOC曲線を示す。筆者らが検討した⑤は, 母集団の品質基準に対して生産者が配合上の余裕度を設定し, 消費者危険  $\beta^{(1)}$  を考慮した判定である。この場合, 品質基準の不良率  $p$  のほか, 生産者が決める配合上の不良率  $p_0$ , 消費者に対する品質保証を目的とした不良率  $p_1$  を設定する必要がある。抜取り検査では, 品質基準に適合するものを確実に合格し, 適合しないものを確実にすることができないため,  $p_0, p_1$  およびそれらに対する合格率が必要になる。 $p_0$  と  $p_1$  は, 品質のばらつきの実状や検査の役割等に応じて適切に設定すればよい。

図中には, 品質基準と配合強度に対して規定した不良率を併せて示している。①では, 品質基準に不良率  $p=5\%$  を規定しており, 配合強度には品質基準と同一の値

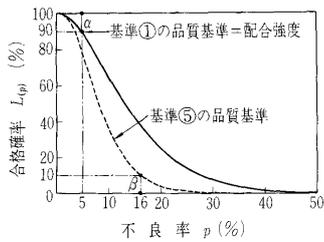


図-4 合格確率  $L_p$  (%) と不良率  $p$  (%) の関係

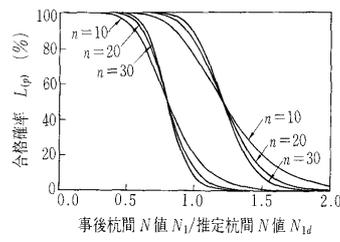


図-5 合格確率と  $N_1/N_{id}$  の関係

を設定している。 $p=5\%$ のときの合格確率は、 $L_p=90\%$ であり、配合強度で規定した品質と同一のコンクリートが検査において不合格となる確率はほとんどないことがわかる。また、 $p=5\%$ であることを生産者危険 $\alpha=10\%$ で推定できる検査性能を有した判定基準である。この検査は、調合管理に対する信頼性が高いコンクリートに対しては有効であろうが、不良率が大きいものを誤って合格とする可能性もあるので、品質の予測精度が乏しい地盤改良に対しては適用できるかどうか検討を要する。一方、⑤の手法では、品質基準を $p=10\%$ としたが、配合強度に $p_0=5\%$ と余裕を与えた。また、判定では $p_1=16\%$ であることを $\beta=10\%$ で推定する方法を考えた。これは、 $p_1>16\%$ の品質のものを90%以上の確率で不合格にする手法であり、不良率が大きく品質の劣るものを誤って合格にすることがないように配慮したためである。

どのような判定条件を設定するかは、品質基準の考え方などにより異なるが、母集団の品質に対する合格確率を知ることは生産者と消費者にとって重要である。

#### 4. サンドコンパクションパイル工法

SCP工法の品質検査は、目標  $N$  値の指定とチェックボーリングの実施による。

$N$  値による合格判定は、図-5に示した推定杭間  $N$  値  $N_{id}$  に対する事後杭間  $N$  値  $N_1$  の比 ( $\bar{N}_1/\bar{N}_{id}$ ) を用いて行うことができる。この方法では、まず、改良地盤に対する要求性能として事後杭間  $N$  値の母集団に対する品質基準を設定する。次に品質基準から ( $\bar{N}_1/\bar{N}_{id}$ ) の目標値  $M$  を決める。目標値  $M$  を1以下とすると、実測値が推定値を下回ってよいことになるが、推定  $N$  値はあくまで杭間の値であり、杭間以外の  $N$  値は杭間の値より一般に大きい。このため、目標値が1以下であっても改良範囲全体としては特に支障がない可能性もある。生産者は、 $M$  より大きめの施工仕様の目標値  $M_0$  を設定し、検査では  $M$  より小さい  $M_1$  に対して消費者危険  $\beta$  を考慮した判定を行う。 $M, M_0, M_1$  の関係は、前章の  $p, p_0, p_1$  の関係と同様に考えればよい。図-5は、 $M_0, M_1$  をそれぞれ1.2, 0.8と仮定した場合のOC曲線である。この図では、合格確率50%における横軸の値 ( $\bar{N}_1/\bar{N}_{id}$ ) が母集団の平均値を表している。今、調査  $N$  値の数量  $n$  を10, 20とし、 $\beta=10\%$ とすると、合格判定値  $M_L$  ( $n$  個の  $N$  値に対する  $\bar{N}_1/\bar{N}_{id} > M_L$  で合格) は、図よりそれぞれ1.1, 1.0程度であることがわかる。

これに対して、施工仕様を  $M_0=1.2$  で設定した場合、 $n=10, 20$  に対して ( $\bar{N}_1/\bar{N}_{id}$ ) がそれぞれ1.1, 1.0となる合格確率の期待値は、 $M_0=1.2$  で  $n=10, 20$  のOC曲線との交点で表され、それぞれ65%, 85%程度であることがわかる。図-5のようなOC曲線を設定すると、品質基準と生産目標、合格判定との関係を把握できる。

現在の設計法では、 $N_{id}$  が小さい弱層で設計上必要な目標  $N$  値を設定する方法が採られており、 $\bar{N}_1/\bar{N}_{id}$  よりむしろ  $N_{id\min}$  を基準として、 $N_1$  全体の分布に対して判定するケースが多いようである。しかし、原地盤の  $N$  値のばらつきや細粒分含有率の影響が大きいので、 $N_1$  を直接判定に用いるより、これらの影響を考慮した ( $\bar{N}_1/\bar{N}_{id}$ ) が、ばらつきの安定性に言及する上で有効と考えられる。

#### 5. あとがき

基礎構造の限界状態設計法の整備が各方面で進められており、近い将来確率論に基づく設計法が構築されるであろう。しかし、設計で確率論を用いるのであれば、品質検査など品質保証に係わる事項についても確率に基づく検討が必要である。採用する判定条件が品質基準に対してどの程度信頼できるかというユーザーの指摘に対して定量的に答えられなければ、検査に要するコストの意味を説明できない。品質基準より大きく劣る可能性のあるものが合格となりやすい検査であれば、適切な検査とはいえない。品質検査は厳密である必要はなく、「使う側」と「つくる側」が互いに納得できるものであればよいが、統計的手法に基づく検査に耐えられるかどうか十分認識した上で、検査性能を表示し、改良地盤の品質基準と検査手法を設定することが重要である。

#### 参考文献

- 1) 田村：消費者危険を考慮した改良地盤の品質管理の考え方、土と基礎、Vol. 44, No. 4, pp. 37~40, 1996.
- 2) 例えば、平出ほか：建築基礎地盤としてのセメント系改良地盤に関する研究（その16）、日本建築学会大会、構造I、pp. 845~846, 1995.
- 3) 亀田・池淵・春名：土木学会編 新体系土工学2 各率・統計解析、技報堂出版、pp. 296~297, 1981.
- 4) 水野・末松・奥山：細粒分を含む砂質土盤におけるサンドコンパクションパイル工法の設計法、土と基礎、Vol. 35, No. 5, pp. 21~26, 1987.
- 5) 山本・桑原・原田・鈴木：液状化対策としてのSCP改良地盤の事後評価に関する考察、土木学会第51回年次学術講演会、pp. 588~599, 1996.
- 6) 日本工業規格、JIS Z 9002~9004.
- 7) 松本 洋：抜き取り検査実施法、日科技連、1964.
- 8) 土木学会：平成8年度制定コンクリート標準仕様書施工編、pp. 16~24, pp. 56~66, pp. 126~156, 1996.
- 9) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事、pp. 144~158, pp. 271~275, pp. 505~512, 1986.
- 10) 住宅・都市整備公団：ソイルセメントコラム工法設計・施工指針（案）、pp. 46~53, 1988.
- 11) 鉄道総合技術研究所：攪拌混合基礎（機械攪拌方式）設計・施工の手引き、pp. 13~35, 1987.

(原稿受理 1997.2.19)