

消費者危険を考慮した改良地盤の品質管理の考え方

A Method of Quality Control of Improved Ground Considering Consumer's Risk

田 村 昌 仁 (たむら まさひと)

建設省建築研究所 主任研究員

1. はじめに

良好な宅地不足のため、軟弱地盤が建築物の建設敷地となり、敷地の健全性を確保する手段として地盤改良を採用するケースが増えている。建築物の基礎地盤を構築するための深層混合処理工法および浅層混合処理工法、埋立地で見られるサンドコンパクションパイル工法による液状化対策などがその具体例である。

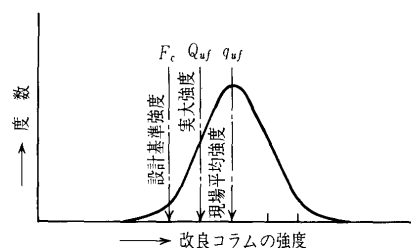
最近こそ、改良地盤を建築物の本設基礎地盤とするケースが増え、そのための本格的な検討が各方面でなされつつあるが、これまで「自然地盤」に代わる「改良地盤」の位置付けが建築分野の技術体系のなかで明確でなく、その効用についても認識に欠ける面があった。各行政庁の判断においても、改良地盤の評価が一定でなく、地域によって対応が異なる部分も見受けられる。このような背景には、改良地盤の性能を考えるうえで最も重要と思われる改良地盤のばらつきやその評価方法に関して定説がなく、改良による効果確認や品質検査をどのようにすべきかわからないことがあげられる。改良部分から採取したコア強度や改良範囲の N 値が、ある目標値を上回ることで効果確認がなされたり、標準配合・標準施工が行われるという前提で効果確認に代えることもあるが、それらの方法が改良地盤の品質保証とどのような関係にあるのか明確に示すことが重要である。本文は、ユーザーに対する品質保証という観点に立って、改良地盤の品質管理を要求性能と関連づける一つの考え方を示したのであり、事例調査による検討結果を併せて報告する。

2. 品質管理に対する要求性能

JIS Z 8101（日本工業規格）において、品質管理とは「買い手の要求に合った品質の製品を経済的に作り出すためのすべての手段の体系をいい、近代的な品質管理は統計的な手段を採用しているので、特に統計的品質管理と呼ぶことがある。」と規定されている。この考え方は、工場製品に対するものであり、品質が施工性に依存する建設工事の品質管理と基本的に異なるという考えもある。建築物が自然地盤に支持される場合、自然地盤の品質管理という発想はないのに、同じ支持地盤としての改良地盤になぜ品質管理が要求されるのかという考えもある。しかし、自然地盤と異なり改良地盤の築造にコストが発生する以上、ユーザーに対して設計上の要求性能が達成されていることを保証する責任が築造行為に生じる。ただ、「改良地盤」に関しては、品質管理の前提である

「品質基準」と「検査指標」を明確にすることが難しい。

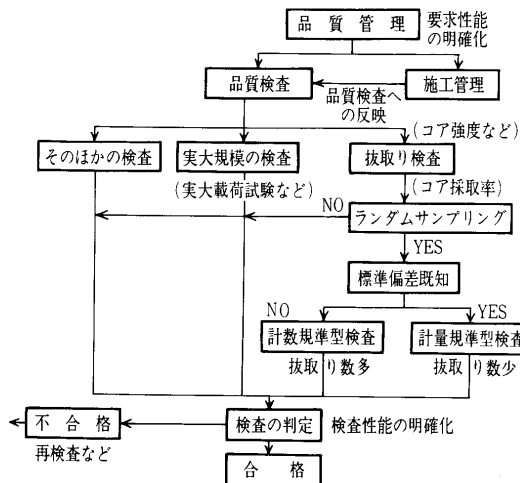
改良地盤の品質管理においてまず第一に考えなければならないのは、設計時の要求性能の確保である。ここで、深層混合処理工法（以下、コラム工法）を例にとった場合の品質管理方法について考える。コラム工法などの固化材を用いる地盤改良では配合量の設定が設計の第一歩である。図—1には、コラム現場強度（同一土質）の分布を示す。設計では、この頻度分布や室内強度と現場強度の比などに関する既往データを考慮し、改良部の設計基準強度 F_c を確保するための現場目標強度を決定する。この品質のばらつきを考慮した F_c の設定こそが、改良地盤に要求した基本性能である。 F_c を（平均強度－標準偏差 σ ）、（平均強度－ 2σ ）とみなすと、それは F_c を下回る割合（許容不良率）がそれぞれ16%，2.5%とみなしたことになる。したがって、設計における許容不良率の確認が品質管理においてまず重要となる。



図—1 コア強度の分布

図—2には、改良地盤の品質管理の考え方を示す。品質を保証する方法としては、工程の安定性を反映する施工管理や抜き取り検査方法などの品質検査がある。しかしながら、地盤改良の施工管理とは、材料の供給や施工範囲が設計どおりかどうか確認する程度のいわば積算に対する保証という面が強く、改良部の品質をどこまで保証できるのか不明確な部分が少なくない。工場製品のように製造物の構成材料のすべてを管理できるのであれば施工管理が品質の保証に直結すると考えられるが、改良効果は地上で把握できない未知な地盤性状に大きく左右される。地盤性状や混合具合などを把握できる明確な指標が施工時に与えられればよいが、現状では十分とはいえない。コラム工法では、既往データにおける品質のばらつきを想定した設計がなされているが、適切な標準的施工管理がなされることを前提にして、既往データを個々の設計に採用しているとも考えることもできる。

実施工においても、改良地盤の品質保証を施工管理だけで十分とみなすケースはほとんどなく、要求性能の確認という意味での何らかの品質検査が行われている。コ



図—2 改良地盤の品質管理の考え方

ラム工法の場合、一般的に採取コアの一軸圧縮強度 q_u が抜き取り検査における検査指標となっており、採取したコアの個々の q_u やそれらの平均値とそれぞれの目標値との大小比較が検査方法となる。具体的な検査方法を明記した指針等は少ないが、住宅都市整備公団の「ソイルセメント工法設計・施工指針（案）」¹⁾と鉄道総合技術研究所「攪拌混合基礎（機械式攪拌方式）設計・施工の手引き」²⁾における検査値と目標値の関係を表—1に示す。両者の検査方法には大きな差異が認められるが、これは改良地盤に要求する性能が異なるためであろう。品質保証の上で重要なのは、検査方法それ自体ではなく、要求性能に対する検査がどのような性能でなされるかであり、図—3に示した要求性能と検査性能の関係を明確にすることである。

3. 消費者危険の導入

抜き取り検査をする場合、消費者危険、生産者危険、下限不良率、上限不良率という概念がある³⁾。

消費者危険：不良品を合格とする割合

生産者危険：良品を不合格とする割合

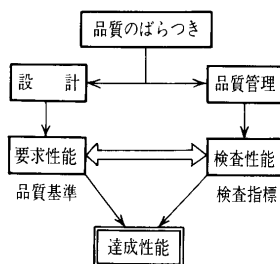
下限不良率：不合格としたい不良率の下限

上限不良率：合格としたい不良率の上限

表—1 コア強度による品質検査手法（コラム工法）

住都公団	各採取箇所の一軸圧縮強度の総平均値 $> 2F_c$ 採取箇所毎（3箇所以上）の平均値 $> F_c$
鉄道総研	採取位置の一軸圧縮強度の平均値が $0.8F_c$ を $1/20$ 以上の割合で下回らない。 上記平均値が F_c を $1/4$ 以上の確率で下回らない。

F_c ：設計基準強度（この設定方法は上記の機関で異なる）
調査数量は改良規模に応じて別途規定している。



図—3 要求性能と検査性能

消費者危険と生産者危険は、JISにおいてそれぞれ10%、5%という標準値が定められている。下限不良率および上限不良率は、それぞれ消費者危険および生産者危険に対応したものである。上記の考え方に基くと、製品に対する要求性能を不良率で表すことができれば、それに対応した抜き取り検査方法が定まる。具体的には、下限不良率を30%と仮定すると、不良率が30%を超える不良品を合格とする危険率（消費者危険）が10%を超えない抜き取り検査方法が定まるということである。

ユーザーに対する品質保証という観点に立つと、消費者危険およびその判断基準といえる下限不良率が重要になる。生産者危険および上限不良率も生産者保護の立場から重要であるが、上限不良率は生産者自ら考慮すべき内容でもあり、ここでは特に限定せず、検査方法を考えることにする。以下の不良率とは、下限不良率であり、この下限不良率がユーザーに対する許容不良率になる。なお、上限不良率と下限不良率の関係は、図—5に後述している。許容不良率の設定方法に関しては、設計における要求性能が基本となろう。例えば、前章で述べたようにコラム工法における設計基準強度 F_c の設定を（平均強度 -2σ ）と設定したなら設計基準強度に対して許容不良率を2.5%にすべきという考え方があり得る。

抜き取り検査方法は、計量規準型抜き取り検査（検査値と目標値との量的関係に注目する検査方法。抜き取り数に応じて目標値が変化する判定方法。）と計数規準型抜き取り検査（検査値の合否判定数に注目した検査方法。全抜き取り数と不良数の関係から判定する。）の二つに大別される。JISでは、様々な抜き取り方法をJIS Z 9001～9015³⁾に詳しく規定している。これらの検査方法に関して共通に言えることは、許容不良率が多いほど、また標準偏差などの品質のばらつきが把握できているものほど、検査数量が少なくかつ目標値も低く設定できるということである。

以下、上記の手法のうちからJIS Z 9003およびJIS Z 9002に注目した検討を行う。検査性能は、検査総数 n と検査対象範囲における試料総数 N との関係にも左右されるが、 N が n に比較して十分大きい（通常 $n/N \leq 0.1$ ）場合には影響は少ないと考えられている³⁾。

JIS Z 9003の「計量規準型1回抜き取り検査」はJISに規定されている検査方法の中で、検査数量が少なくかつ許容不良率を低く設定できる有効な方法である。この方法は、標準偏差が既知なものに対して不良率や平均値を保証できる特徴を有している。表—2には、固結による改良地盤を対象とした場合の適用方法を示す。図—4には、この検査方法における許容不良率と合格判定係数 k 、抜き取り数の関係を示す。なお、この方法では、下限規格値を設計基準強度 F_c とみなすと、抜き取ったコア強度の平均値 $\bar{X}$ と F_c 、 k の関係は、式(1)で与えられる。

$$\bar{X} \geq F_c + k\sigma \dots\dots\dots (1)$$

合格判定係数 k が大きいほど、目標値が大きくなり、検査がそれだけ厳しくなる。 k の値は、許容不良率が小さく、抜き取り数が少ないものほど大きくなり、抜き取り数3～20個の範囲において許容不良率5%、15%、30%

表-2 計量規準型抜取り検査

検査指標：改良部コア一軸圧縮強度
 判定性能：消費者危険10%
 判定方法：平均値 $\bar{X} \geq$ 目標値 (= 下限規格値 + 合格判定係数 $k \times$ 標準偏差 σ)
 平均値 $\bar{X}$ ：抜取り数 x 個の一軸圧縮強度の平均値
 下限規格値：許容不良率に対する規格値

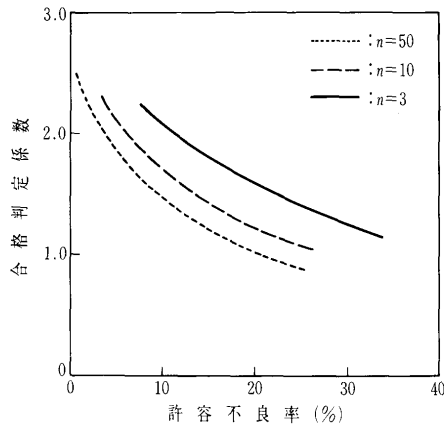


図-4 合格判定係数と許容不良率

に対してそれぞれ2, 1.5, 1前後となる。なお、図-5には、この検査方法における上限不良率と下限不良率(許容不良率)の関係を示す。上限不良率は、下限不良率より当然小さく設定すべきであるが、上限不良率をできるだけ下限不良率に近づけて設定する方が生産者側からみるとそれだけ無駄の少ない検査が可能となる。しかし、図からわかるように同一の下限不良率において上限不良率が大きいほど抜取り数が多くなり検査数量が増すことになる。したがって、上限不良率の設定は、検査数量とのバランスを考慮することが必要となる。

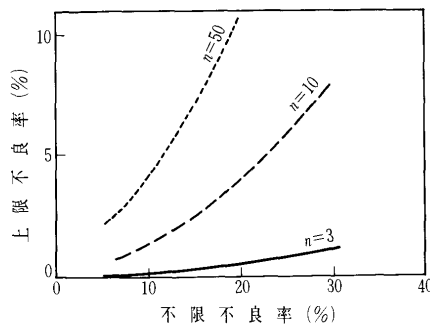


図-5 上限不良率と下限不良率

次に JIS Z 9002「計数規準型1回抜取り検査」の適用方法(表-3)を述べる。この方法では、検査値が規格値(例えば、設計基準強度)を下回っていても検査数が多いければ所定の要求性能を満足することは可能であるが、ここでは規格値を満足しないケースがゼロに限定した、いわば最小の抜取り数を考えた。表-4には、許容不良率と抜取り数の関係を示す。許容不良率5%, 15%, 30%に対する最小の必要抜取り数は、約40個、約15個、約5個となる。

上述した二つの方法を比較すると、同一の許容不良率を満足するような抜取り数は、計量規準型検査が計数規

表-3 計数規準型抜取り検査

検査指標：改良部コア一軸圧縮強度
 判定性能：消費者危険10%
 判定方法：検査値 $\bar{X} \geq$ 規格値
 (上記を満足しないケースがゼロに限定)
 検査値 $\bar{X}$ ：個々の一軸圧縮強度
 規格値：不良品、良品を判断する規格値

表-4 許容不良率と最小抜取り数

許容不良率 (%)	3	5	10	16	25	31
必要最小抜取り数	50	30	15	10	7	5

表-5 消費者危険を考慮した品質管理の問題点

- ① 検査指標の抜取りがランダムサンプリングを満足しているのか?
- ② 許容不良率の設定根拠を明確にできるのか?
- ③ 要求性能と直結する検査指標を明確にすることができるのか?
- ④ 変動係数が相当大きく、(固結工法の場合40%前後にもなりうる)ものに対して統計的处理でよいのか?
- ⑤ 要求性能の保証を検査に対してそのまま要求する考え方は、設計基準強度に対する安全率(通常長期3)の設定とどのような関係にあるのか?
- ⑥ 抜取り検査で不良と判定された場合に、どのような取扱いをすべきか?
- ⑦ 抜取り検査における母集団(ロット)をどのように設定すべきか?
- ⑧ 自然地盤の評価においてすら統計的手法は取り入れられていないのに、改良地盤に対してかなりの品質保証を要求すること自体に無理が多いのでは?
- ⑨ 改良体自体に要求する性能の検査は可能であるとしても、本来の要求性能は改良体の支持性能であるため、本質的な検査になり得ないのではないか?

準型検査よりかなり少ないことがわかる。これは、計量規準型の場合には、標準偏差などの品質のばらつきが把握できているためであり、ばらつきの把握状況が改良地盤の品質保証の難易さと直結していると考えられる。

上記のような手法を改良地盤の検査方法として適用するためには、表-5に示すような問題点がある。これらの問題点の一つであるランダムサンプリングに関して、「コア強度はよく固まった部分の値であり、採取コアを代表する指標ではない」との指摘がある。意識的サンプリングを完全に防ぐための方法はないが、採取したコアの外観等による一次判定も必要と考えられる。例えば、コア採取率(採取したコア長の中で固まっていない部分をさらに除外した割合)やRQD値などが許容値以下になるとランダムサンプリングが不可能となり、抜取り検査自体が適当でないとする考え方である(図-2参照)。許容不良率の設定に関しては、コラム工法の場合、例えば、図-1に示すようなコア強度の頻度分布と実大コラムの強度の関係を求めて、実大コラムの圧縮強度以下の割合が下限不良率とする方法などが考えられる。既往の実験結果において実大コラムの強度が(平均値-標準偏差)にほぼ等しくなっていることより、設計基準強度に対する目標を実大コラム強度でよいとみなすと、下限不良率を16%と設定することが可能であろう。

上記の検査方法は、設計体系全体にもかかわる多くの問題点がある反面、表-6に示す利点もある。これらの利点のうち、設計者やユーザーの品質に対する考え方を品質管理に反映できることと、優れた工法が品質管理に

表一 6 消費者危険を考慮した品質管理の利点

- ① 設計における要求性能と検査の要求性能を関連させることができる。
- ② 画一的な検査方法では検査性能が不明であるが、許容不良率に応じた検査方法が設定できるので、設計者やユーザーの考え方を改良地盤の設計・施工に反映させることができる。
- ③ 品質のばらつき（変動係数、標準偏差）が少なく、優れた品質を保証できる工法に対しては、検査が容易になる。検査が容易とは、検査数が少なくなるだけでなく、検査値と比較し得る目標値も低く設定できることを意味する。
- ④ 抜き取り検査において、設計基準強度よりかなり大きいコア強度が実測されると、過剰設計とみなされる危険性があるが、抜き取り数の少ない検査方法では設計基準強度より相当大きい目標値の設定が当然必要であるというストーリーが成り立つ。

おいてより高い評価が得られることは、消費者危険や許容不良率という概念を導入する最大のメリットであり、このメリットをどう評価するかが、改良地盤の品質管理を考えるうえで重要になると思われる。

4. 事例調査

コラム工法による品質検査の実測値に対して、前述した検査方法を適用することにした。表一 7, 8 には、調査結果および検査結果を示す。計量規準型検査では、標準偏差と設計基準強度との関係に注目して、 $\sigma/F_c = 0.5, 1.0, 1.5$ の 3 ケースを想定した。実測データから期待できる最小下限不良率が小さいほど、品質が優れていることを表しているの、 σ/F_c が小さくばらつきが少ないと想定した場合ほど当然検査結果は良好となる。 $\sigma/F_c = 0.5$ （平均強度 $= 2F_c$ 、変動係数 25% に相当する）を想定した場合には、許容不良率は、ケース I（3 個のコアの平均値が 1 本のコラムの検査値と考えた場合であり、抜き取り検査数 12）、ケース II（抜き取り検査数 36）のいずれも 1% 以下となり、極めて品質が優れている

表一 7 事例調査

建物概要	鉄骨造 2 階、店舗、建築面積約 6 000m ² , $F_c = 10\text{kg/cm}^2$					
コラム寸法	直径 1 m, 改良長 1 ~ 3 m, 本数 1 054 本					
抜き取り方法	100 本につき 1 本のコア抜き（各コラムから 3 個）計 36 個					
調査結果	コラム	1	2	3	平均値	全平均値
	a	42.7	38.7	35.4	38.9	36.5 変動係数 (42.6%)
	b	66.5	55.5	64.3	62.1	
	c	40.5	22.4	54.9	39.3	
	d	47.6	48.0	46.9	47.5	
	e	28.6	39.7	29.9	32.8	
	f	28.3	17.9	18.9	21.7	
	g	22.5	21.7	23.8	22.7	
	h	15.4	19.5	23.1	19.3	
	i	19.2	17.3	21.3	19.3	
	j	25.1	20.7	18.9	21.6	
	k	64.3	66.0	54.6	61.6	
	l	49.5	50.6	58.6	52.9	

表一 8 検査結果

検査方法	ケース	期待しうる最小許容不良率		
計量規準型 抜き取り検査 (JIS Z 9003)		$\sigma/F_c = 0.5$	$\sigma/F_c = 1.0$	$\sigma/F_c = 1.5$
		1% 未満	2.5%	12%
	ケース II	1% 未満	1% 未満	5%
	ケース I	10~16%		
計数規準型 抜き取り検査 (JIS Z 9002)	ケース II	5%		

ケース I：採取位置毎（3 個）の平均値が 1 個の検査値

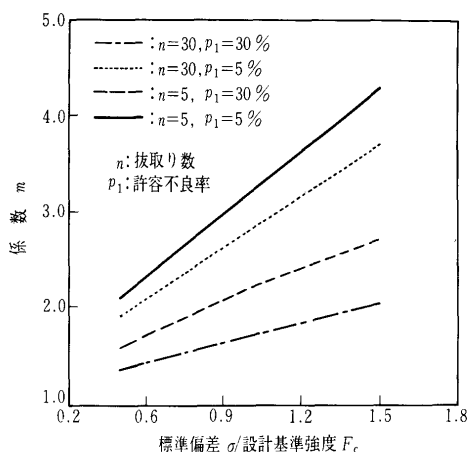
ケース II：個々のすべてのデータがそれぞれ 1 個の検査値

ことになる。しかし、コア強度の実測データにおける現場平均強度（36.6 kgf/cm²）と変動係数（42.6%）を考慮すると、 $\sigma/F_c = 1.5$ に近く、ケース I の場合に、実測データから期待しうる許容不良率（設計基準強度を下回る割合）の最小値は 12% 程度となる。また、計数規準型検査では、ケース I、ケース II で期待できる最小許容不良率は、それぞれ 10~16%、5% 程度（表一 4 参照）ということになる。

5. 検査の判定方法と検査性能

抜き取り検査で判定をする場合、判定の持つ意味を知ることが重要である。ここでは、平均値 $\bar{X} \geq$ 係数 $m \times$ 設計基準強度 F_c 型の判定の検査性能を考えることにする。

図一 6 には、係数 m と σ/F_c 、抜き取り数、許容不良率の関係を示す。係数 $m = 2$ の判定は、 $\sigma/F_c = 0.5$ を仮定できる場合には、抜き取り数 5 ~ 30 個の検査に対して、許容不良率が 5% 前後となる性能を有しているが、 $\sigma/F_c = 1.0$ および 1.5 前後と品質のばらつきが大きいものに対しては $m = 3$ および 4 としなければ、同様の許容不良率が確保できないことがわかる。

図一 6 係数 m と標準偏差 σ /設計基準強度 F_c

6. あとがき

品質は、工程により得られるもので検査では確保できないため、本来は施工管理を重視した改良地盤の品質管理が重要である。要求性能が十分確保されているというデータが蓄積されるにつれ、検査に頼らない合理的な品質管理が可能となるが、検査性能や検査の位置付けが不明なまま検査がなされ、達成性能が十分把握できない場合も少なくない。どのような検査方法を採用するにしても、ユーザーのためあるいはユーザー自身が検査性能を把握し、検査性能が改良地盤に対する要求性能との関係を知ることが必要であろう。なお、実測データを提供していただいた関係者各位に感謝する次第である。

参考文献

- 1) 住宅都市整備公団：ソイルセメント工法設計・施工指針（案），1988。
- 2) 鉄道総合技術研究所：攪拌混合基礎（機械式攪拌方式）設計・施工の手引き，1987。
- 3) 日本工業規格（JIS Z 9001 ~ JIS Z 9015）。

（原稿受理 1995.1.30）