

エジェクター方式深層混合処理工法 (CI-CMC工法) の改良体品質についての考察

村上 恵洋¹・田中 克実¹

¹株式会社不動産テトラ 地盤事業本部 第二研究室 (〒542-0081大阪府大阪市中央区南船場2-3-2)

深層混合処理工法改良体の品質は現場改良体コアの一軸圧縮強さの平均値とバラツキを求めることで検証することが出来る。これらの項目は工法特性、地盤種別、目標強度、施工条件等によって変化すると考えられ、各々の条件を適切に分析することで、改良体の品質を評価し、以降の施工における配合設計に反映させることが重要である。本稿では、固化材をエアに同拌させ霧状に放出させることで高い攪拌混合能力を発揮し、大径の高品質改良体造成を実現したエジェクター方式深層混合処理工法（CI-CMC工法）の近畿地区での現場の事後調査結果の分析から同工法の改良体品質に関する考察を行ったものである。

キーワード 新技術、地盤改良、深層混合処理工法、品質管理

1. はじめに

固化を改良原理とする代表的な地盤改良工法として、セメント系の改良材を地盤中の原位置で攪拌混合し、化学的な結合作用を利用して軟弱土を改良する深層混合処理工法がある。本工法における分野では改良径の大径化による大量施工を行い、コスト縮減を求められるケースが増えている。しかしながら、闇雲に大径化を行うことは、攪拌効率の低下を招き、改良体の品質低下を発生させるため、大径化には攪拌効率を向上させるための技術革新を同時に実施する必要がある。攪拌効率を向上させ

る技術の一つにエジェクター吐出方式がある。本方式を採用した深層混合処理工法（CI-CMC 工法）は、大径化と同時にバラツキの少ない均質な改良体の造成が可能となっている。エジェクター吐出と攪拌装置を図-1 に示す。エジェクター吐出状況を写真-1 に示す。一方で改良体の品質は、工法の攪拌性能および地盤条件、施工条件により変動するため、データを蓄積し、性能を適正に評価することが重要である。本稿は、近畿地方整備局管内において CI-CMC 工法により施工された 32 現場における品質確認試験の結果を分析して、その性能評価を実施したものである。各現場の改良径は、φ1.6m：26 現場、φ1.3m：5 現場、φ1.0m：1 現場であり、多くは従来工法のφ1.0mと比較して大径での施工を行っている。

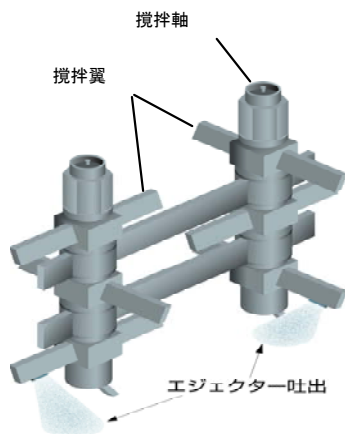


図-1 エジェクター吐出と混合処理装置



写真-1 エジェクター吐出状況

2. エジェクター吐出方式による深層混合処理工法

エジェクター吐出方式とは、改良材と水を混合したスラリーをエアと同時に霧状に高速噴射させる機構である。従来の吐出方式とエジェクター吐出方式の比較を図-2に示す。従来の方式では吐出したスラリーにムラができていたものに対し、エジェクター吐出方式では、攪拌域全体に改良材スラリーを広く散布でき、更に土の破碎効果や混合土の流動性増加が期待できる。このため、本方式を採用した深層混合処理工法である CI-CMC 工法では、バラツキの少ない均質な改良体を造成することができる。

CI-CMC 工法においては開発の初期段階で、試験工事により、改良杭頭部断面コアで一軸圧縮試験を実施することで、表-1に示すように従来方式との品質比較を行っている。従来方式と比べ CI-CMC 工法では平均強度が高く、バラツキが小さいことが確認できている。バラツキの程度は攪拌翼が深さ 1m 当りの地盤を横切る回数である羽根切り回数との相関があり、頭部断面コアによる強度の変動係数との関係として図-3に示す結果を得ている。エジェクター吐出方式を採用する CI-CMC 工法においては、従来工法と同等の品質（目標変動係数 40%²⁾）の改良体を造成する場合に羽根切り回数 180 回/m

以上を目標としており、建築基礎などでバラツキの少ない改良体を造成して目標変動係数を 30%に設定する場合には羽根切り回数 250 回/m 以上を目標として、施工管理を行っている。本稿で分析した現場においては、投入するスラリー量の影響もあり、殆どの現場で羽根切り回数は 250 回/m 以上となっている。

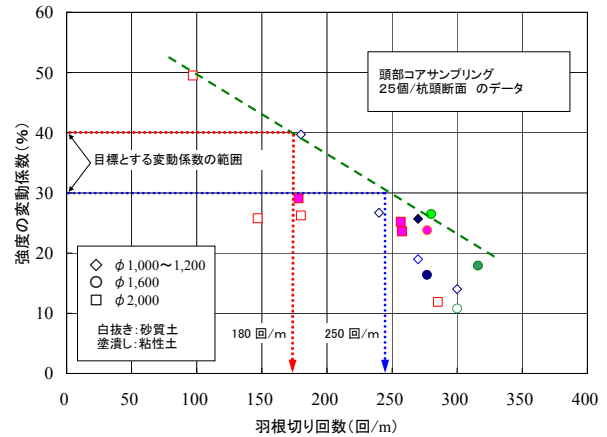


図-3 羽根切り回数と変動係数の関係
(エジェクター吐出方式)¹⁾

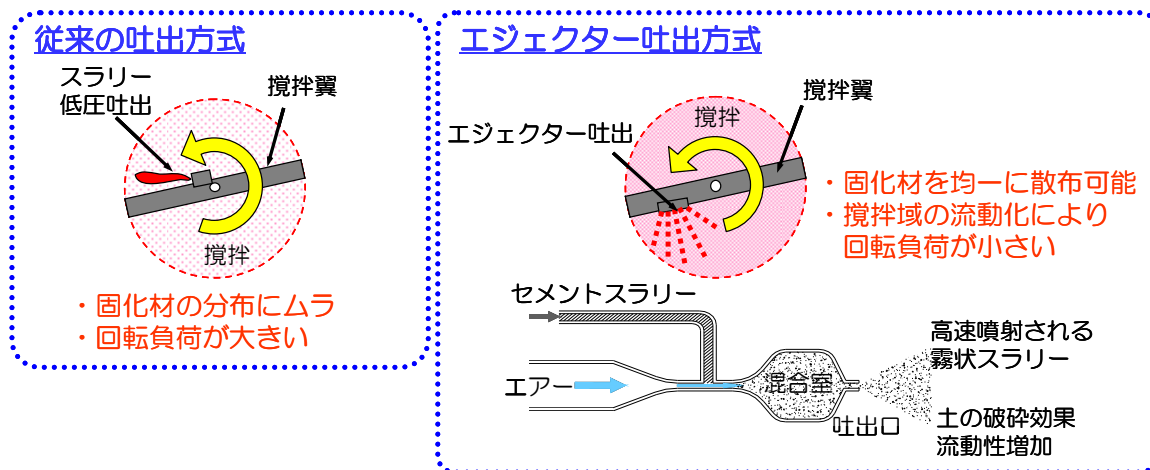


図-2 従来の吐出方式とエジェクター吐出方式の比較

表-1 試験工事における従来方式とエジェクター方式（CI-CMC 工法）の性能比較¹⁾

	土質	データ数	従来方式			エジェクター方式 (CI-CMC)		
			平均強度 (kN/m ²)	変動係数 (%)	改良径 φ (mm)	平均強度 (kN/m ²)	変動係数 (%)	改良径 φ (mm)
A試験工事	砂混りシルト	25	1,658	33	2,000	2,377	26	2,000
B試験工事	砂	36	3,096	21	1,200	3,857	17	1,200

3. 深層混合処理工法の現場強度と設計基準強度の関係

深層混合処理の設計に用いる設計基準強度 q_{uck} は、現場で発揮する改良体の一軸圧縮強さ q_{uf} であればよいが、現場強度にバラツキがあること、および現場強度 q_{uf} と室内配合試験による一軸圧縮強さ q_{ul} には違いがあることを考慮し、現場強度と室内配合試験強度の関係を式 (1) で表す³⁾。

$$q_{uck} = \gamma \cdot \overline{q_{uf}} = \gamma \cdot \lambda \cdot \overline{q_{ul}} \quad (1)$$

ここに

q_{uck} : 設計基準強度

$\overline{q_{uf}}$: 現場強度の平均値

$\overline{q_{ul}}$: 室内強度の平均値

γ : バラツキを考慮した現場強度

$$(\gamma = q_{uck} / \overline{q_{uf}})$$

λ : 現場強度の平均値と室内強度の平均値の比

$$(\lambda = \overline{q_{uf}} / \overline{q_{ul}})$$

陸上工事の場合、設計基準強度と室内強度の平均値の比は $\gamma \cdot \lambda = 1/3 \sim 1/4$ とすることが多い。

$$q_{uck} = \overline{q_{uf}} - K \cdot \sigma = \overline{q_{uf}} - K \cdot V \cdot \overline{q_{uf}} \quad (2)$$

ここに

K : 係数

σ : 現場強度の標準偏差

V : 現場強度の変動係数 ($V = \sigma / \overline{q_{uf}}$)

係数 K は目標とする設計強度に対して幾らの不良発生率となるかの指標であり、不良発生率との関係は図-5 に示すとおりである。

現場と室内の強度比 λ や変動係数 V は工法の特長である攪拌性能や地盤条件、施工条件により変動するものであり、深層混合処理工法においては、これらの数値を蓄積することが、施工に対する性能評価に繋がるため重要である。

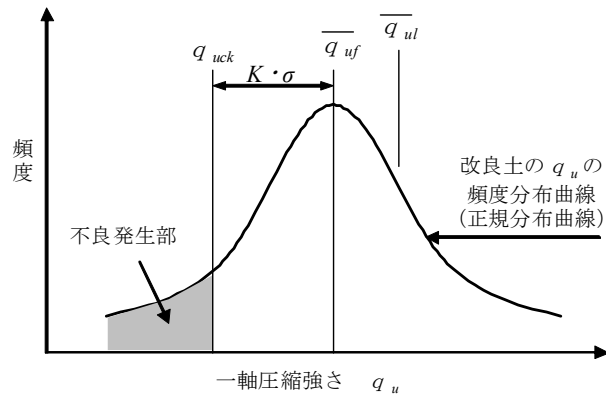


図-4 設計基準強度と現場強度、室内強度の関係³⁾

4. 深層混合処理工法における品質管理

深層混合処理工法の品質管理基準としては、一軸圧縮試験 (JIS A 1216) による規格値として、「①各供試体の試験結果は改良地盤設計基準強度の 85%以上。②1 回の試験結果は改良地盤設計基準強度以上。なお、1 回の試験とは 3 個の供試体の平均値で表したものの。」が国土交通省の共通仕様書などにより広く採用されている。このため、深層混合処理工法の品質管理および配合計画は、上記①、②において、品質不良が発生しないように適正に実施する必要がある。

一方で、現場強度のバラツキを考慮し、統計的手法をもってその評価を行うことができる。現場強度の強度分布が正規分布にあると考えるとき、図-4 および式 (2) に示す関係が成り立つ³⁾。

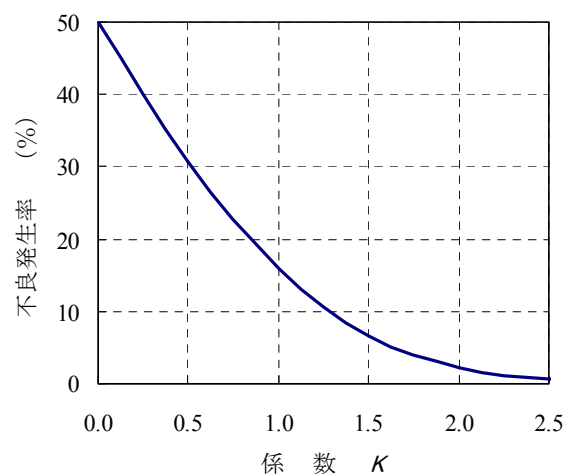


図-5 係数 K と不良率の関係³⁾

5. CI-CMC工法における改良体の品質分析

(1) 現場コアの一軸圧縮強さとバラツキ

各現場では目標となる設計基準強度に対して、施工前に現地で採取した試料を用いて、土層毎に室内配合試験により室内目標強度（設計/室内の配合比は 1/2～1/4、材齢 28 日）を満足する固化材と添加量を設定する。また、施工後のチェックボーリングにおいて材齢 28 日の現場強度の確認が行われている。

設計基準強度が異なる各現場の現場強度を等価に比較するために、現場強度を設計基準強度で除したものの頻度分布を図-6 に示す。現場強度と設計基準強度の比の平均は 3.0 にあるが頻度のピークは 1.5-2.0 の範囲にある。1.0-1.5 が全体の二割強含まれている一方で個数は少ないが 10 以上のものも含まれ、最大は 14.1 であった。このような現象は強度発現が低い有機質土や粘性土を対象として配合設計した固化材添加量に対し、実際の地盤が強度発現が高い礫質土や砂質土であった場合や、原地盤が硬く、貫入に時間を要した場合に固化材が過剰に添加されることなどが原因である。

同様に各現場の現場強度を室内配合強度で除したものの頻度分布を図-7 に示す。現場強度と室内配合強度の比の平均は 1.0 にあり、平均としては現場強度と室内強度は等しくなる。しかしながら、頻度のピークは 0.5-0.75 の範囲にあり、最小値は 0.3、最大値は 4.7 である。

次に室内配合試験を実施している各現場の土層毎に分類して強度分布の分析を行った。分析の実施例を図-8 に示す。

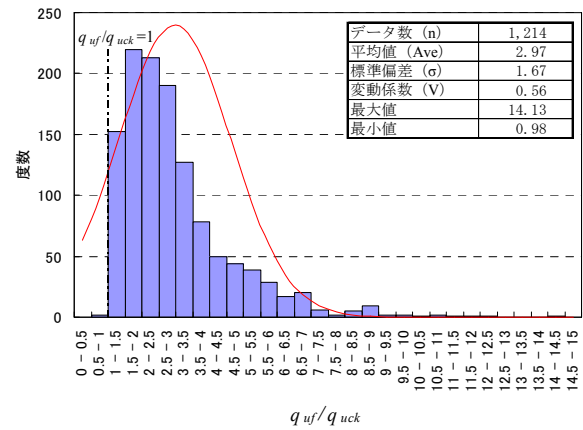


図-6 q_{uf} / q_{uck} の頻度分布

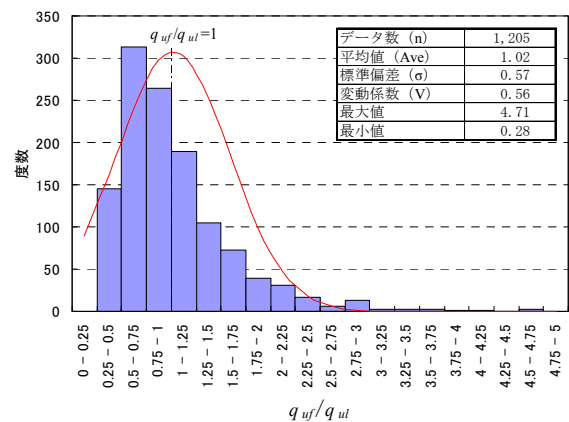


図-7 q_{uf} / q_{ui} の頻度分布

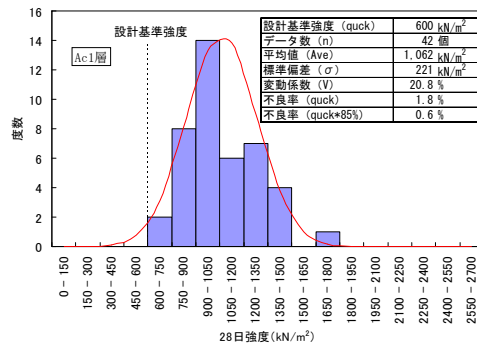
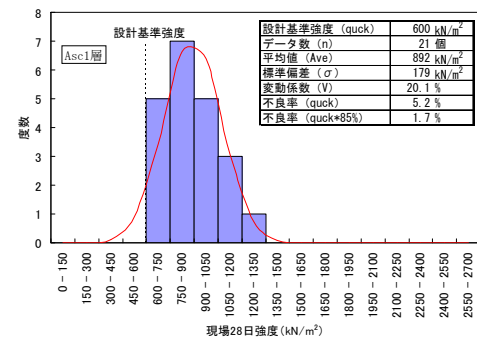
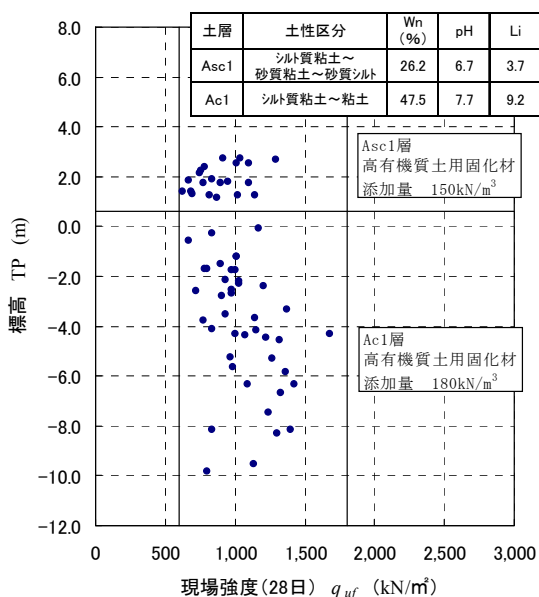


図-8 土層毎の改良体の現場強度分析の実施例

各現場の土層毎に整理した室内強度の平均値と現場強度の平均値の関係を図-9 に示す。CI-CMC 工法では、粘性土、有機質土で $\lambda=1\sim1/2$ 、砂質土で $\lambda=1\sim3/4$ の範囲にある。従来工法（スラリー攪拌）との比較を行うため、既存文献³⁾の室内強度の平均値と現場強度の平均値の係に CI-CMC 工法のデータをプロットしたものを図-10、図-11 に示す。何れも CI-CMC 工法では従来工法と比較して λ の下限値が大きいことが判る。

次に CI-CMC 工法の改良体強度のバラツキの評価として土層毎に求めた現場強度の変動係数と供試体のサンプル数との関係を整理したものを図-11 に示す。また、変動係数と $\overline{q_{uf}}/q_{uck}$ ($=1/\gamma$) の関係を図-12 に示す。品質管理結果の分析では、同一土層内の性状のバラツキや粘性土中に挟まれる薄層の砂など、土層自体の不均質性の影響を受ける。また、サンプル数が少ない現場では統計分析としての精度が低く変動係数の範囲は大きくなるが、サンプル数が 15~20 程度以上あれば変動係数の範囲は一定となる傾向にあり、試験工事で確認されている CI-CMC 工法の性能である変動係数 30%程度以下が確認できる。φ1.0m で施工されてきた従来工法の変動係数が

30~50%（平均 40%）を目標としている²⁾ことを踏まえると、CI-CMC 工法では多くがφ1.6m-2 軸の大径施工にも係わらず、バラツキが少ない品質のよい改良体が造成されていることが判る。また、図-12 から変動係数が大きくなれば $\overline{q_{uf}}/q_{uck}$ の値も大きくなる傾向が判る。

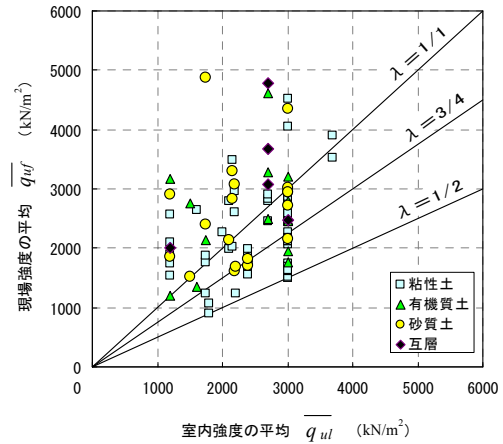


図-9 $\overline{q_{uf}}$ と $\overline{q_{ul}}$ の関係 (CI-CMC 工法)

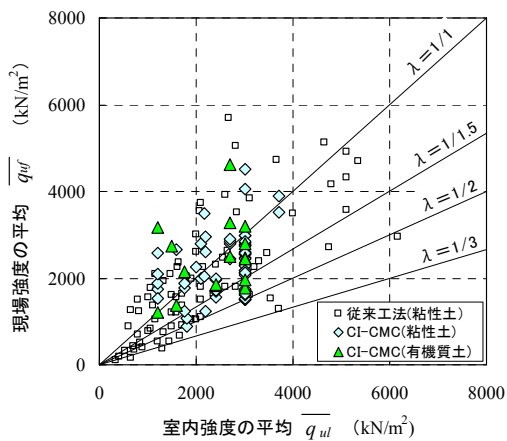


図-10 $\overline{q_{uf}}$ と $\overline{q_{ul}}$ の関係 (粘性土・有機質土)³⁾に加筆

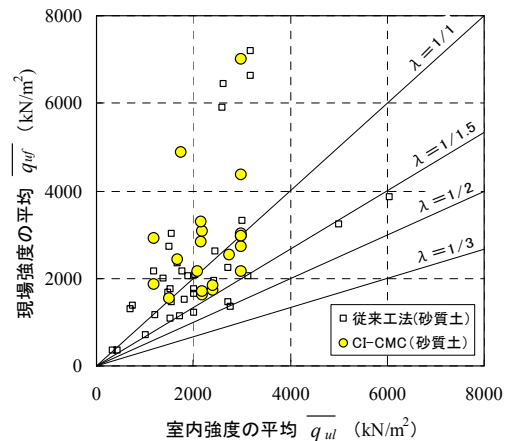


図-11 $\overline{q_{uf}}$ と $\overline{q_{ul}}$ の関係 (砂質土)³⁾に加筆

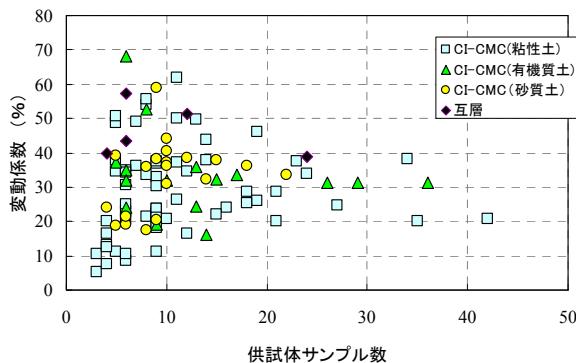


図-12 供試体数と変動係数の関係

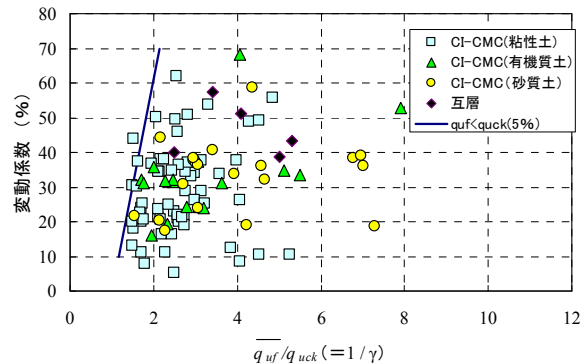


図-13 変動係数と $\overline{q_{uf}}/q_{uck}$ の関係

(2) 現場コアの変形係数

現場事後調査および室内配合試験における材齢 28 日の一軸圧縮強さ q_u と変形係数 E_{50} の関係を既往のデータと合せて図-14 に示す。今回の調査も既往のデータの分布の範囲にある。また、現場事後調査と室内配合試験では有意な差は見られない。 E_{50} と q_u は比例関係にあることが確認でき、平均で $E_{50}=350 q_u$ ，下限値付近で $E_{50}=150 q_u$ 程度である。

6. バラツキによる不良発生確率

品質管理基準に対する不良発生率を式 (2) および図-5 を用いて求め、表-2 にまとめた。また、 q_{uf} が q_{uck} を下回る確率が 5%になる条件を図-13 に示した。ここで、 σ の標準偏差を持つ「 n 個の標本の平均値」の標準偏差は $\sigma/\sqrt{n}$ として求めることが出来る⁴⁾。したがって、事後調査の供試体の一軸圧縮強さが σ の標準偏差を持つとき

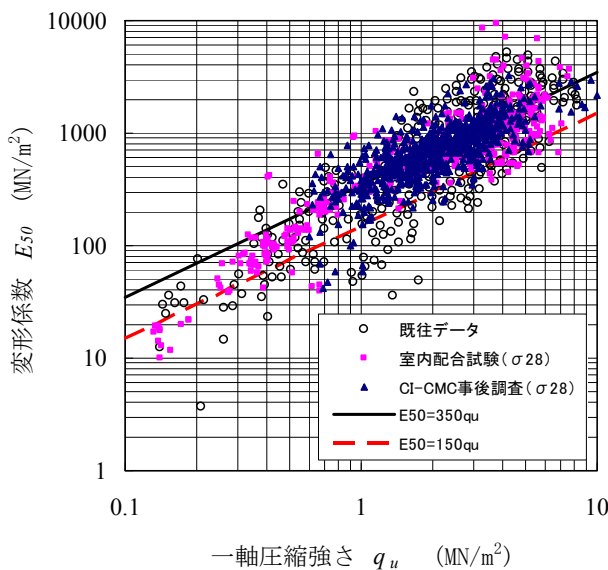


図-14 一軸圧縮強さと変形係数の関係^{3)に加筆}

表-2 改良体の諸定数と不良発生率の関係

変動係数 V	現場/室内 λ	設計/室内 $\gamma \cdot \lambda$	現場強度係数 γ	不良発生率 (%)		
				$q_{uf} < q_{uck}$	$q_{uf} < q_{uck} * 0.85$	$q_{uf(3本)} < q_{uck}$
50%	1/2	1/3	0.67	15.9	9.7	4.2
40%	1/2	1/3	0.67	10.6	5.2	1.5
40%	1/2	1/4	0.50	0.6	0.2	0.0
40%	1/3	1/4	0.75	20.2	11.3	7.4
30%	1/2	1/3	0.67	4.8	1.5	0.2
30%	3/4	1/3	0.44	0.0	0.0	0.0
30%	3/4	1/2	0.67	4.8	1.5	0.2

の「3 個の供試体の平均強度」の標準偏差は $\sigma/\sqrt{3}$ とし

て求めることができる。表-2 から $\gamma \cdot \lambda=1/3$ で配合設計した CI-CMC 工法の改良体の品質が、 $V=30\%$ 、 $\lambda=1/2$ であるならば、現場強度が設計基準強度を下回る確率は 4.8%、設計基準強度の 85%を下回る確率は 1.5%、3 個の供試体の平均値が設計基準強度を下回る確率は 0.2%となり、共通仕様書が定める管理基準値をほぼ下回らない設定ができていると判断できる。粘性土、有機質土については $\lambda \geq 1/2$ であるためこれに該当する。一方、砂質土に関しては $\lambda \geq 3/4$ であるため、安全側の設定と判断できる。砂質土においても粘性土や有機質土と同程度の不良発生率を目標とする場合は $\gamma \cdot \lambda=1/2$ の設定が可能である。

7. まとめ

- ① エジェクター吐出方式を採用した CI-CMC 工法の改良体の品質は、従来工法と比較して大径施工を実現しているにも係わらず、現場強度の平均の下限値で従来工法を上回り、変動係数 $V=30\%$ 程度の品質のより改良体が造成されている。
- ② CI-CMC 工法の現場での E_{50} と q_u は比例関係にあることが確認でき、平均で $E_{50}=350 q_u$ ，下限値付近で $E_{50}=150 q_u$ 程度である。
- ③ CI-CMC 工法において〔設計基準強度/室内配合強度〕 $\gamma \cdot \lambda=1/3$ の設定は、改良体の事後の一軸圧縮強さが、共通仕様書で定める品質基準値をほぼ下回らないような設定である。
- ④ 土質により〔現場強度の平均値/室内強度の平均値〕 λ が異なるため、土層毎に $\gamma \cdot \lambda$ を設定することで、土質種別によらず同程度の品質が確保可能なバランスのよい配合設計が可能となる。CI-CMC 工法の場合、粘性土や有機質土で $\gamma \cdot \lambda=1/3$ 、砂質土で $\gamma \cdot \lambda=1/2$ と定めることができる。

参考文献

- 1) (財) 先端建設技術センター：先端建設技術・技術審査証明、CI-CMC 工法（大径・高品質の深層混合処理工法）（内容変更と更新）審査技術依頼者：（株）不動テトラ，（株）ソイルテクニカ，2012.1
- 2) 中村，松沢，松下：深層混合処理工法における攪拌効率の向上についての研究，第 17 回土質工学研究発表会，1982.6
- 3) (財) 土木研究センター：陸上工事における深層混合処理工法 設計・施工マニュアル改訂版，2004.3
- 4) 例えば，Alfredo H.S.Ang, Wilson H.Tang, (伊藤，亀田訳)：土木・建築のための確率統計の基礎，丸善（株）