

高有機質土の地盤改良

Ground Improvement of Organic Soils

桜井博幸 Hiroyuki SAKURAI (株)ジーアイシー)
 佃 哲範 Tetunori TUKUDA (株)ジーアイシー)
 藤村 尚 Hisashi FUJIMURA (鳥取大学工学部)

高有機質土の自然含水比 w_n と強熱減量 L_i の関係は、 $w_n = 9L_i$ ($L_i < 65\%$) の直線関係が認められる。高有機質土は、主に植物繊維から構成されており、そのせん断強さは、繊維の切断による抵抗などが発揮されやすい。室内配合試験を行った結果、高有機質土のセメント系固化材による安定処理土の一軸圧縮強さ q_u は、自然含水比 w_n が 500% 以上になれば、改良効果はあまり見込めないようである。これは自然含水比や強熱減量の高い土ほどビチューメン、腐植酸などの有機物含有量が多くなり、固化材による混合処理効果が期待できなくなることと考えられる。現場では改良の対象土質である高有機質土と粘性土に対して一般軟弱土用の固化材を用いて改良を行った。その結果、所要深度まで設計基準強度 q_{ack} を十分に上回る安全側の強度で改良を行なうことができた。ただし、地層境界付近においては強度が大きくばらついた。これは対象土質が平面的あるいは深度方向に不均一に堆積していることが起因している。このため現場強度は、現地土に対して室内配合試験を入念に実施しさらに従来の経験を踏まえて予測せざるを得ないとする。今後は、改良を行った谷部ごとの高有機質土に対し、自然含水比と地盤改良効果との関係について整理し、強度のばらつきが精度良く予測できる手法について調べる必要がある。

キーワード：高有機質土、セメント系固化材、自然含水比、強熱減量、安定処理、固化阻害成分

1. はじめに

一般に高有機質土は、枯死した植物遺体の集合体であり、かつ植物遺体が分解過程にあるため、粘性土など一般の土とは異なった性質を有している。このため、道路盛土に伴う地盤の圧密沈下及び地盤の破壊などの問題を考えるとき、高有機質土の物理的・力学的性質を調べておく必要がある。そこでまず物理的性質を調べるため自然含水比、湿潤密度について土質試験を行った。高有機質土の有機物含有量は、強熱減量試験によって調べた。次に力学的性質を調べるため一軸圧縮試験を行った。また粘性土についても同試験を行い、両土質の性質について比較した。

植物遺体が骨格構造を形成する高有機質土では、有機物の量と質が土自体の基本的性質を支配する要因となり、特に固化特性については一般的な土と異なり、化学的性質が重要な意義を持つ。そこで高有機質土の強熱減量値に注目し、セメント系固化材による安定処理についても調べた。

鳥取県中部地域に堆積する地盤に対しセメント系固化材を添加し、攪拌混合して改良柱体を形成した現場の調査・試験及び施工に至るまでの深層混合処理工法の工事事例について紹介する。また、これらの事例をもとに改良土の室内強度と現場強度及び現場強度のばらつきについて考える。

2. 地形・地質

当地域の地形は南方から北方にかけて、①山地及び丘陵地、②低地(氾濫原、有機質土)、③砂丘に分類される。山地及び丘陵地は、古第三紀以前の花崗岩類を基岩とし、その上位に第三紀の火山岩類である安山岩、玄武岩、流紋岩及び第四紀更新世の火山碎屑物(凝灰角礫岩、火山

灰) などにより形成されている。低地は、縄文海進によって陸地の内部まで海水が浸入し、その後の海退と上流からの土砂堆積によって形成された。低地のうち、低平な氾濫原には、粘性土・砂などが堆積する。また湖沼跡地や砂丘の背後地の低湿地及び丘陵地に挟まれた凹地(小おぼれ谷)には高有機質土が分布する。凹地は海岸線が沿岸州でせき止められると波浪の少ない静かな湾となる。上流側から運ばれた土砂は、南側から徐々に湾内を埋め高有機質土の沈積は急速に進んでいったとみられる。

3. 地盤の物理的・力学的性質

3.1 物理的性質

高有機質土と粘性土の物理的性質を比較した場合、高有機質土は、粘性土に比べ自然含水比 w_n が高く、湿潤密度 ρ_i が低い傾向を示す。

高有機質土の w_n と強熱減量 L_i の関係を図-1 に示す。

高有機質土の試料採取は、表土を 1~2m 程度掘削するブロックサンプリングと機械ボーリングによるシンウォールサンプリングにより行った。サンプリング試料は、日本統一土質分類体系に基づいて、無機質土粒子を主体とした分類体系に入れない土質として、高有機質土(Pl)とした。

及川・石川¹⁾が、我が国における各地域の多くのデータをもとに両者の相関をまとめている。これによると、両者の相関は $w_n/L_i = 8 \sim 12$ に示す範囲に分布しているとされている。

今回の土質試験で得られた自然含水比 w_n と強熱減量 L_i の関係は、図示するように $L_i < 65\%$ において $w_n = 9L_i$ の直線関係が認められるようである。

3.2 力学的性質

1) 強度特性

高有機質土と粘性土の非排水せん断強さを推定する目的で一軸圧縮試験を行った。

一軸圧縮強さ q_u と地盤の標高との関係について図-2にまとめる。同図に示す q_u は、複数地点から採取したデータである。同図にみられるように、高有機質土の堆積している標高は、粘性土に比べ高位に位置していることがわかる。

高有機質土の強度は、 $q_u=10\sim80\text{ kN/m}^2$ 付近に分布し、平均 $q_u=40\text{ kN/m}^2$ となる。一方、粘性土の強度は $q_u=80\sim160\text{ kN/m}^2$ 付近に分布し、平均 $q_u=120\text{ kN/m}^2$ となる。

粘性土は土粒子から構成され、そのせん断強さは基本的に個々の土粒子の接触点でのせん断抵抗から成り立っている。高有機質土は、主に植物繊維から構成されており、そのせん断強さは、繊維の切断による抵抗などが発揮されやすい。これらのことから高有機質土の強度特性は、土の構造自体が粘性土と異なり、せん断挙動が繊維質有機物の量・質によって影響を受けやすいものと考えられる。その強度は、粘性土と比較して小さい。

2) 固化特性

図-3 は高有機質土用固化材を用いて高有機質土を安定処理した時の強熱減量 L_i と一軸圧縮強さ q_{u28} の関係について示す。固化材添加量は、 $200, 300, 400\text{ kg/m}^3$ の三種類とし、養生期間は 28 日間の湿空養生とした。

図示するようにすべての固化材添加量でも強熱減量の増加に伴う一軸圧縮強さの低下が見られる。

なお、試験で用いた高有機質土は、強熱減量の値が異なる 5 試料を使用した。土の強熱減量試験は JGS T 221-1990、安定処理土の締固めをしない供試体作製方法は JGS T 821-1990、土の一軸圧縮試験は JGS T 511-1990 によりそれぞれ地盤工学会基準に従って行った。

4. 地盤改良

地盤改良のうち、その改良深さが 3 m 以深に及ぶ場合、一般に深層改良と呼ぶ。セメント系固化材による深層改良は、固化材の優れた特長を生かした原位置固化工法として実績が多い。

これらの地盤に対しセメント系固化材を添加し、攪拌混合して改良柱体を形成した現場の調査・試験及び施工に至るまでの深層混合処理工法の工事事例について紹介する。また、これらの事例をもとに改良土の室内強度と現場強度及び現場強度のばらつきについて考える。

図-4 に深層混合処理工法の施工前調査から本施工までの固化材添加量の決定フローを示す。これによると施工前は、原地盤の土質構成や物性を把握するため調査・試験を行い、その改良体の設計強度を決定する。設計強度が決定されると室内と現場の強度比を考慮した室内強度が決定される。そして施工に先立ちより経済的な固化材の種類と適正な添加量を決定する目的で、室内配合試験が実施される。

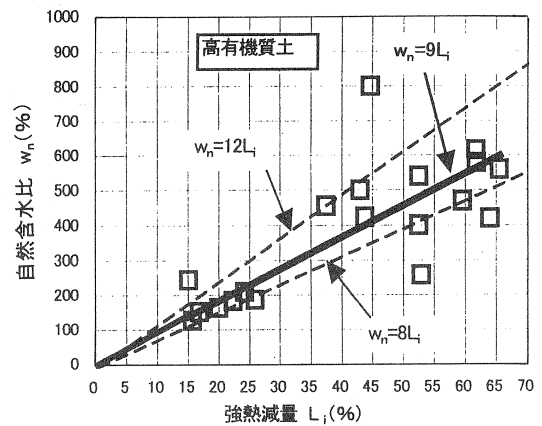


図-1 自然含水比と強熱減量の関係

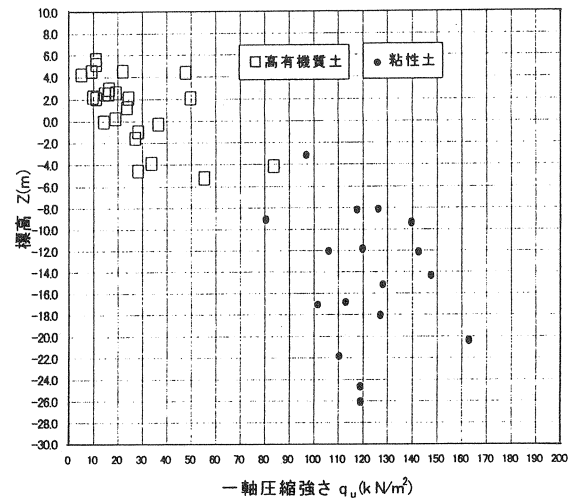


図-2 一軸圧縮強さと標高の関係

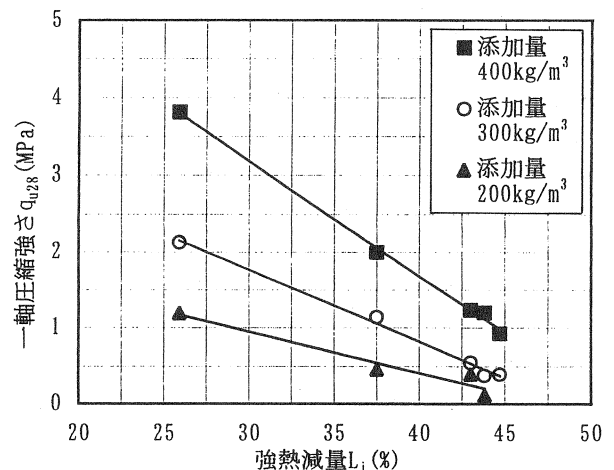


図-3 固化材添加量の違いにおける強熱減量と一軸圧縮強さの関係

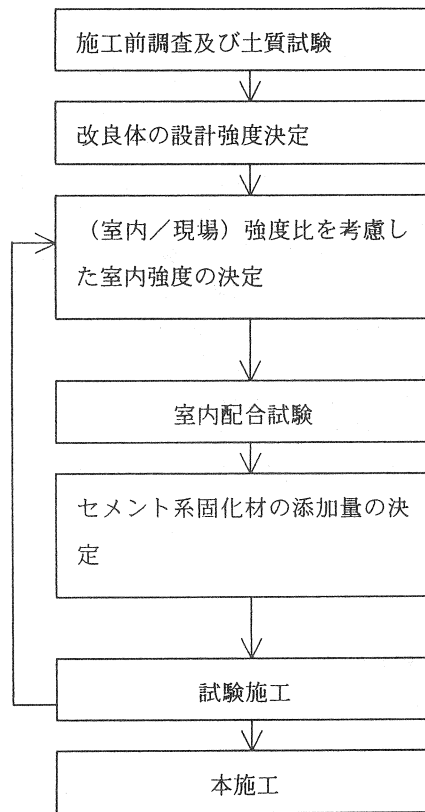


図-4 固化材添加量の決定フロー²⁾

4.1 室内配合試験

セメント改良土の強度は、様々な条件によって大きく変わる。それらの条件とは、セメントの種類・添加量・材齢あるいは対象土質の種類・含水比・有機物含有量などである。深層混合処理工法による地盤改良は、これら

の条件を変えたセメント改良土の試験結果をもとに最適なセメントの種類、添加量を決定しなければならない。

そこで本施工に先立ち実施した室内における一軸圧縮強さと固化材の添加量、材齢との関係あるいは、改良を行う対象土質の含水比との関係など室内試験の関係について示す。

室内配合試験では、表-1 に示すように当地域に堆積する高有機質土と粘性土に対し、それぞれ異なる自然含水比 w_n ごとにセメント系固化材の種類と添加量を変化し、その改良効果について調べた。

ここでは、固化材の種類として一般軟弱土用を用いた試験結果について報告する。試験方法は、地盤工学会基準「JGS T 821 安定処理土の締固めをしない供試体の作成方法」により供試体を作製した。

表-1 室内配合試験

対象土質	高有機質土	粘性土
自然含水比 w_n (%)	185, 455, 500, 800	33
固化材	一般軟弱土用 高有機質土用	一般軟弱土用 高有機質土用
固化材添加量 (kg/m ³)	100, 200, 300, 400, 450, 500	185, 370, 555

図-5 に高有機質土と粘性土に対しそれぞれ一般軟弱土用の固化材による改良効果を示す。

改良土の一軸圧縮強さ q_{u28} は、固化材の添加量が多いほど大きくなる。特に、粘性土の改良効果は、高有機質土に比べ著しく良好であることがわかる。また自然含水比 w_n によって改良効果は大きく異なる。高有機質土の場合、 w_n が 500%あるいは 800%になると改良効果はあまり増加しない傾向を示す。

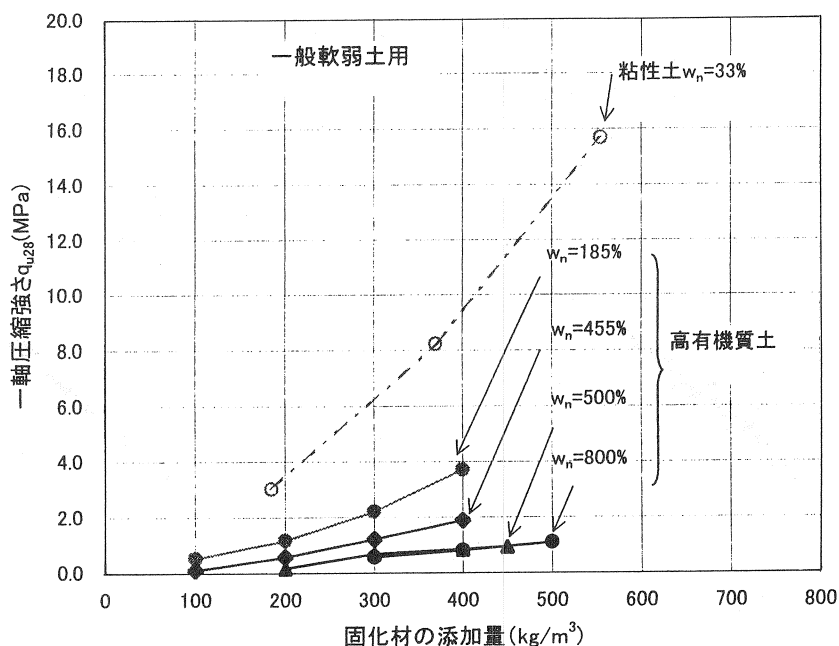


図-5 固化材の添加量と一軸圧縮強さの関係

図-6 は図-5 に示す高有機質土について、異なる添加量の下での一軸圧縮強さ q_{u28} と自然含水比 w_n の関係を示している。これによれば自然含水比と一軸圧縮強さ q_{u28} の関係には比例関係が見られない。

固化材の添加量 400 kg/m^3 の場合、 $w_n=185\%$ から $w_n=455\%$ まで含水比が 270% 増加することにより改良土の強度は、 $q_{u28}=3.7 \text{ MPa}$ から 1.9 MPa まで減少する。ただし、含水比が $w_n=500\%$ から $w_n=800\%$ まで改良土の強度は $q_{u28}=0.8 \text{ MPa}$ とほとんど変化が見られない。このように、室内配合試験では高有機質土の自然含水比 w_n が改良土の強度増加へ与える影響は 500% まで大きい。が、 $w_n=500\%$ 以上になれば、固化材の添加量を $450 \sim 500 \text{ kg/m}^3$ と増やすことによる改良効果はあまり見込めないようである。

岡田ら³⁾、大場⁴⁾の研究によれば、自然含水比や強熱減

量の高い泥炭ほどピッチューメン、腐植酸などの有機物含有量が多くなると言われている。また含水比が高く、繊維質な泥炭ではセメントなどの固化材による混合処理効果が期待できなくなることについても述べている。

セメント系固化材を添加した改良土は、一般に添加量が多いほど一軸圧縮強さが増加し、添加の直後から養生日数の増加に伴って強度が増加することが知られている。図-7 と図-8 に室内配合試験の結果から、各土質の改良土の一軸圧縮強さと材齢 7 日と 28 日（材齢の経過）にともなう強度比を示す。材齢の経過とともに強度は大きくなり、高有機質土の強度比は q_{u28}/q_{u7} は 1.2 程度、粘性土では q_{u28}/q_{u7} は 1.3 程度となる。このことから、高有機質土は、現場処理土の材齢 7 日の強度 q_{u7} から材齢 28 日 q_{u28} を予測するに当たって、室内処理土比の $q_{u28}/q_{u7}=1.2$ が見込める。

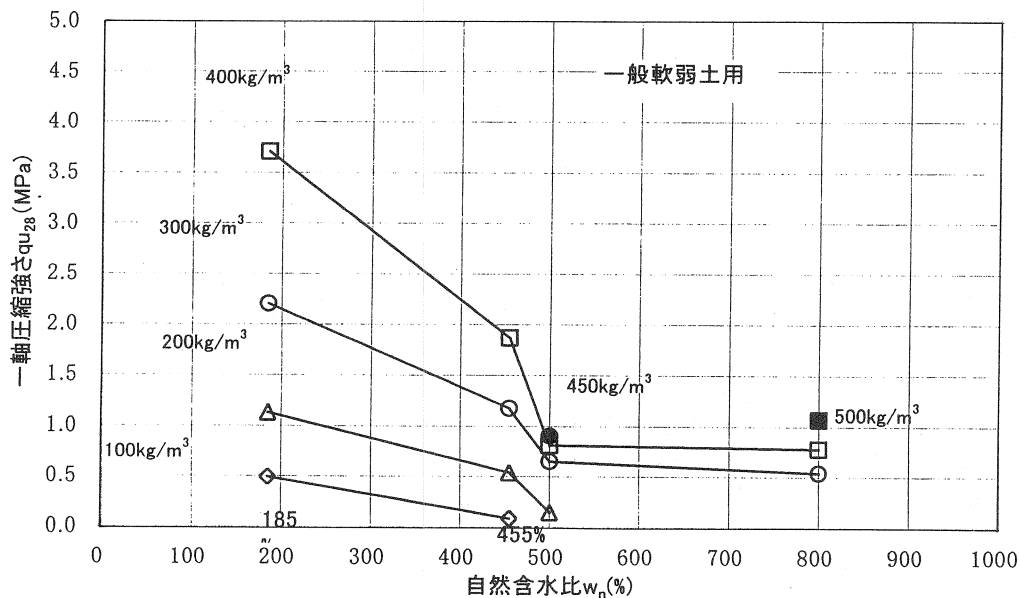


図-6 高有機質土の自然含水比と一軸圧縮強さの関係

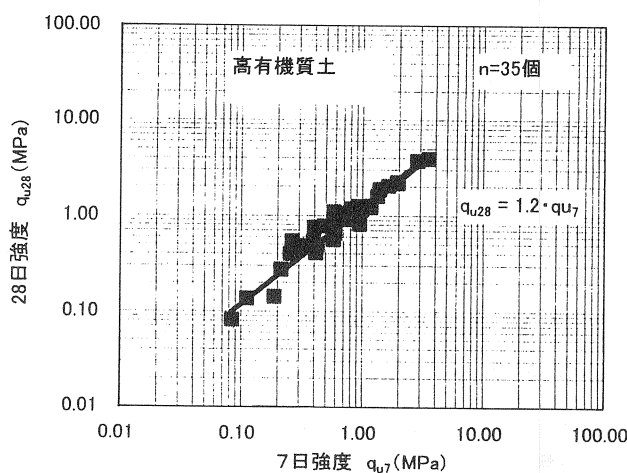


図-7 高有機質土の材齢 28 日強度と 7 日強度の関係

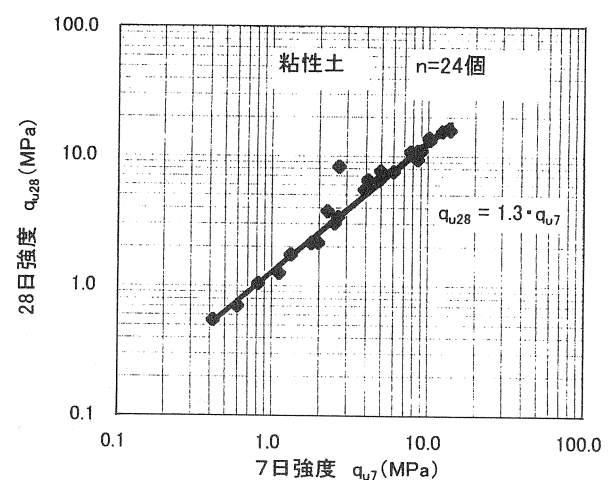


図-8 粘性土の材齢 28 日強度と 7 日強度の関係

4.2 固化材の添加量の決定

本施工に入る前に、現場における固化材の添加量が妥当であるかどうかの確認を行う必要がある。現場では採取した土質に対して配合試験を行い、その結果と事前に実施した室内配合試験の結果を比較し、その現場に応じた固化材の添加量を決定する。表-2に現場Cにおける固化材の添加量、室内強度及び現場強度についてまとめる。

表-2 現場Cにおける固化材の添加量の決定

対象土質	高有機質土	粘性土
自然含水比 w_n (%)	373	33
固化材の添加量 (kg/m^3)	315	100
固化材の種類	一般軟弱土用	
室内目標強度 q_{ul} (MPa)	0.84	
現場強度 q_{uf} (MPa)	0.28	

(*強度比 $q_{uf}/q_{ul}=1/3$)

図-9に現場Cにおける室内配合試験の結果と本施工前の配合試験の結果を示す。 $q_{ul}=0.84\text{MPa}$ に必要な固化材添加量は、 $160\text{kg}/\text{m}^3$ である。本施工前の配合試験では自然含水比が $w_n=373\%$ で、室内目標強度 $q_{ul}=0.84\text{MPa}$ に必要な固化材添加量は $315\text{kg}/\text{m}^3$ となった。このように、現場Cにおける室内配合試験の自然含水比 w_n と本施工前の w_n は異なる。この結果、室内目標強度に必要な固化材の添加量は、異なる結果となった。このように w_n の室内配合試験時と本施工前の値が大きく異なる原因は、高有機質土の w_n が平面的に著しく不均一であることが起因している。高有機質土の表層部と下層

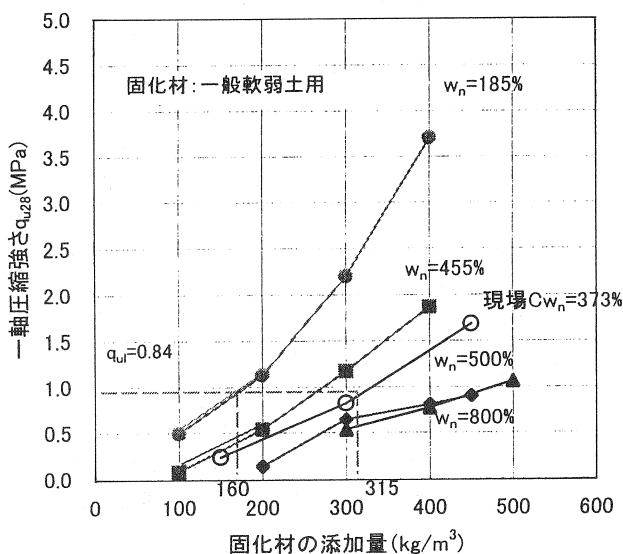


図-9 現場の固化材添加量と一軸圧縮強さの関係

部の強度は大きく異なる。これは、表層部の w_n が下層部に比べ非常に大きい値を示すことが起因している。

これらを考慮した場合、本施工前においても w_n を測定し、固化材の添加量を安全側に設定することが望ましい。

4.3 本施工

本施工における現場Cの深度と改良土の強度について図-10に示す。なお、改良土は、ボーリング機械によりサンプリングした。図中右側に現場の簡易柱状図を示す。地層構成は上部が層厚6mの高有機質土層が、その下部は層厚6mの粘性土層が堆積する。改良体の設計基準強度は $q_{uck}=0.28\text{MPa}$ である。

高有機質土の自然含水比は、 $w_n=373\%$ である。固化材は一般軟弱用の固化材を用いて $315\text{kg}/\text{m}^3$ の添加量を投入した。またその下位の粘性土は同種の固化材を $100\text{kg}/\text{m}^3$ 添加している。その結果、図のように所要深度まで設計基準強度 q_{uck} を十分に上回る安全側の強度で改良が行われた。地層境界付近においては強度が大きくばらついていることがわかる。これは現場ヤードにおいて地層境界が、平面的あるいは深度方向に不均一に堆積していることが起因しているものと考えられる。当現場のように上部層と下部層の固化材の添加量が異なる場合は、予定している地層境界付近では添加量の多い高有機質土で用いた添加量で粘性土層を改良している。これらの要因により地層境界付近においては、強度が大きくばらつく結果になったものと考えられる。

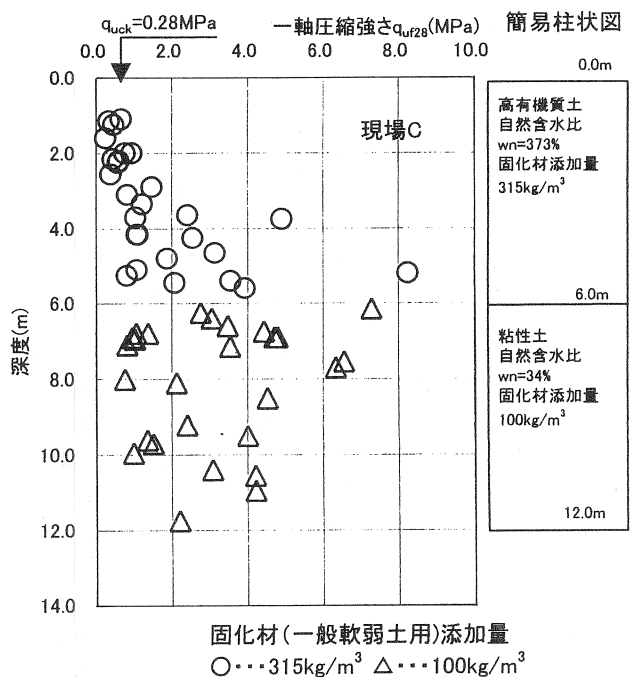


図-10 現場の一軸圧縮強さと深度の関係

4.4 現場強度

深層混合処理工法では、あらかじめ室内配合試験を行って固化材の選定と所要の投入量を決定するが、現場強度のばらつきは多い。この大きな理由としては、

- ①地盤の物性の不均一性
- ②施工機種と攪拌混合精度
- ③改良材の供給量の変動

などが挙げられる。

当地の高有機質土のセメント固化材による室内強度 q_{ui} と現場強度 q_{uf} との関係を図-11 に示す。同図にみられるように、当現場の q_{uf}/q_{ui} はおおよそ 1/5~2 の範囲に分布する。北海道における泥炭地盤に対する粉体噴射攪拌の場合の室内強度 q_{ui} と現場強度 q_{uf} との関係によると q_{uf}/q_{ui} はおおよそ 1/3~1 の範囲にあるとされている⁵⁾。このため安全側の値として、室内配合試験による目標強度は現場所要強度の3倍に設定することが多い。

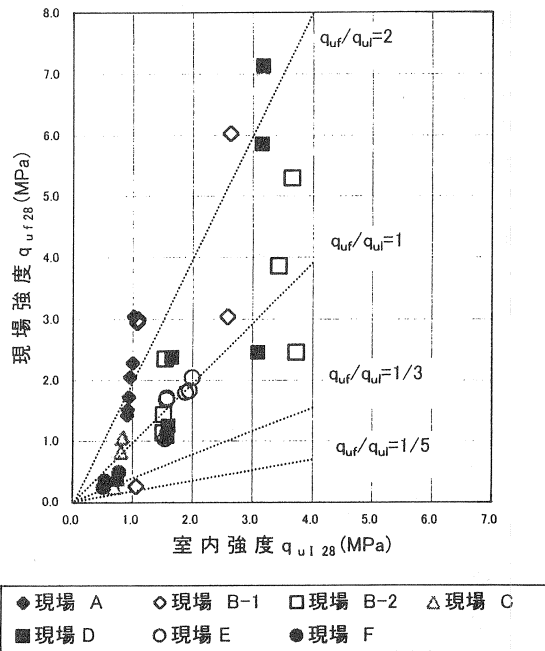


図-11 室内強度と現場強度の比較

高有機質土地盤では、地層境界が深さ方向にも平面的にも著しく不均一である。このため混合攪拌後の改良柱体の強度はばらつきがかなり大きくなる場合がある。室内配合試験と現場施工の大きな違いは、攪拌混合状況に大きな違いがあると考え。室内配合試験では現地で採取した試料を室内に持ち帰り試料土と固化材をホバート型ソイルミキサーにて3分間攪拌混合した。

現場施工では改良柱体の強度のばらつきを少なくするための粉体タイプの場合、粘性土では攪拌回転数 300 回/m 程度で行うが、泥炭層では、400~450 回/m 程度の施工を行うことも報告されている⁶⁾。当現場で

は 400 回/m で行った。また当現場のように高有機質土に対しては、貫入時吐出を行っている。貫入時吐出は、土と改良材の攪拌が貫入時と引き抜き時の両方で行うことが可能なため、攪拌の均質性が向上する。このように従来は設計投入量をはるかに超える多量の固化材を投入して強度のばらつきをカバーしてきていたこともあるが、このように施工機種と攪拌混合の向上を図ることにより必要以上の投入量を低減し、高品質な改良柱体を作製できるものと考えられる。

5. まとめ

高有機質土の自然含水比 w_n 、一軸圧縮強さ q_u は、繊維質有機物の量・質の影響を受けやすい。また安定処理土の一軸圧縮強さ q_u は、強熱減量 L_l の増加に伴い低下するが、安定処理を行う場合は、水分量及び土粒子内に含まれる固化阻害成分を考慮した安定処理の方法を考える必要がある。

深層混合処理工法の工事事例では改良土の現場強度のばらつきがみられた。この大きな要因は、高有機質土の自然含水比が深さ方向にも平面的にも著しく不均一であることに起因する。現場強度は、現地の土に対して室内配合試験を入念に実施しさらに従来の経験を踏まえて現場強度を予測せざるを得ない。そのため個々の施工方法、施工量などと現場処理土の関係を蓄積し深層混合処理工法による改良柱体の品質向上を図った。今後は、各施工方法、施工機械ごとに強度のばらつきに関するデータを蓄積し、強度のばらつきも精度良く予測できる手法が求められる。

なお、本原稿の作成にあたりご協力をいただいた鳥取県に感謝申し上げます。

《 参考文献 》

- 1) 及川洋・石川剛：泥炭の物理化学的性質に関する一考察、高有機質土の諸問題に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp. 97~100, 1993.
- 2) (社)セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル〔第二版〕、P. 90, 1999.
- 3) 岡田能彦・下田正雄：泥炭によるセメントの水和遅延作用に関する研究(1)－泥炭の有機物組成－、小野田研究報告、Vol. 32, No. 103, pp. 11~24, 1980.
- 4) 大場正男：土中の有機物がセメンティング効果に及ぼす影響、土木技術資料、Vol. 10, No. 12, pp. 606~611, 1968.
- 5) 能登繁幸：高有機質土地盤の問題点を探る、7. 地盤改良の現状と問題点、土と基礎、Vol. 42, No. 10, P. 77, 1994.
- 6) 林 宏親・西川純一・阿部康明・加藤利彦：深層混合処理工法による泥炭地盤改良効果、土質工学会北海道支部技術報告集、第 33 号、pp. 21~26, 1993.