

養生温度が砕・転圧土の強度発現に及ぼす影響

堀田 崇由 北島 明

概 要

砕・転圧盛土工法は老朽化したフィルダムの池内に堆積した底泥土、あるいはこれに工事に伴う掘削発生土を加えた混合泥土をセメント系固化材により所要の強度と遮水性を有するように固化改良した築堤土により堤体改修を行うものである。筆者らはこれまでに、堤体改修工事は夏の暑い日や冬の寒い日のように広い温度環境下で行われることから、初期強度におよぼす養生温度環境の影響を把握することを目的に、現場での計測や恒温室内での改良土の温度分布を測定してきた。その結果、初期固化ピット内では夏季では45℃前後、冬季では20℃前後の養生温度となっていることがわかった。本稿では、室内試験と同様にカオリン粘土を原土として作製した供試体を用いて養生温度が発現強度に及ぼす影響について調査した結果を報告するものである。

Effect of temperature on strength in cement-mixed muddy soil

Abstract

Using muddy soil mixed with cement is an excellent and cost-effective method for repairing old dams with fill-type dam embankments. We have applied to this method to the repair of more than 12 dams across the course of the year, in both hot and cold conditions. Because repair work is conducted across such a wide range of temperature conditions, we began researching the distribution of temperature in cement mixed with muddy soil within a pit at the field-site, for the purpose of measuring the effects of temperature on initial strength. Results obtained showed that the temperature inside the pit was about 45°C in summer and about 20°C in winter. In this paper, we show the effects of temperature on strength in cement-mixed muddy soil by testing in a homoeothermic room.

キーワード： 砕・転圧盛土工法、養生温度、発現
強度

§1. はじめに

砕・転圧盛土工法^{1),2)}は老朽化したフィルダムの池内に堆積した底泥土、あるいはこれに工事に伴う掘削発生土を加えた混合泥土をセメント系固化材により所要の強度と遮水性を有するように固化改良した築堤土により堤体改修を行うものである。堤体改修工事は夏の暑い日や冬の寒い日のように広い温度環境下で行われる³⁾ことから、初期強度におよぼす養生温度環境の影響を把握することを目的に、堤沢ため池改修工事の実施工での各施工段階における温度変化を調査してきた⁴⁾。その結果、初期固化ピット内では夏季では45℃前後、冬季では20℃前後の養生温度となっていることがわかった。本稿では、室内試験と同様にカオリン粘土を原土として作製した供試体を用いて養生温度が発現強度に及ぼす影響について調査した結果を報告するものである。

度増分の夏・冬季間の相違は、固化発現が夏季において早く進み、冬場において遅れることを示している。

このような季節による相違の原因は底泥土および固化材スラリーの温度によるところが大きいと考えられ、今回の計測結果から攪拌混合直後の初期固化土の養生温度は最低気温+10℃程度になることがわかった。

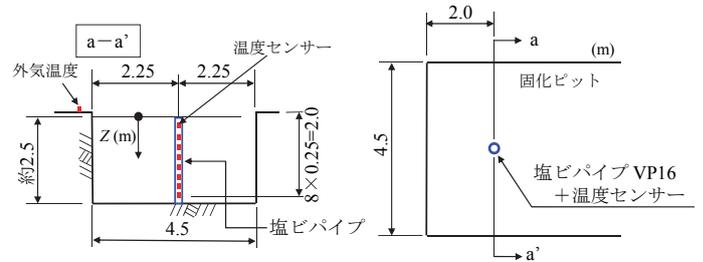


図 1 固化処理ピットにおける初期固化土の温度分布測定

§2. 初期固化土および砕・転圧土の温度分布

2.1 初期固化ピット内の温度分布

実施工時における初期固化土および砕・転圧土の養生温度を調査した例として、堤沢ダム(山形県新庄市、2015年3月竣工)の事例を示す。本工事の砕・転圧盛土工法による築堤は2014年9月3日から11月末の約3ヶ月にわたって実施された。初期固化ピット内の底泥土に固化材を添加混合してから掘削・解砕するまでの深さ方向の温度特性を調べるために、固化材の添加・混合直後のまだ固まらない状態にあるピット内の固化処理底泥土に図1に示すような温度センサーを埋設して初期固化ピット内の温度分布を計測した。この時、初期固化養生温度に影響を及ぼすと考えられる固化材スラリー水湿および外気温度も計測した。温度測定は夏場の暑い時期として9月上旬、冬場の寒い時期として11月上旬をそれぞれ選択して実施した。

図2には夏季の温度測定結果(固化材添加量 $\Delta Mc=110\text{kg/m}^3$)、図3には冬季の温度測定結果($\Delta Mc=90\text{kg/m}^3$)をそれぞれ示す。図から、ピット内の発熱温度は固化材添加後から増加しほぼ一日で最大値に達した後、わずかながら低下する傾向にあること、温度は深さにより異なり地表面付近25cmでは外気温度の変動に対応して波状に変化して影響を受けていること、また下層付近の200cmでは地中温度の影響により改良直後は温度が低いものの時間経過とともに増加してゆくことがわかる。夏季と冬季における温度変化パターンは、夏季においては固化材添加時の約28℃から38~46℃への温度増分約10~18℃、冬季においては固化材添加時の13~17℃から15~24℃への温度増分約2~7℃と、夏・冬季間で相違している。温

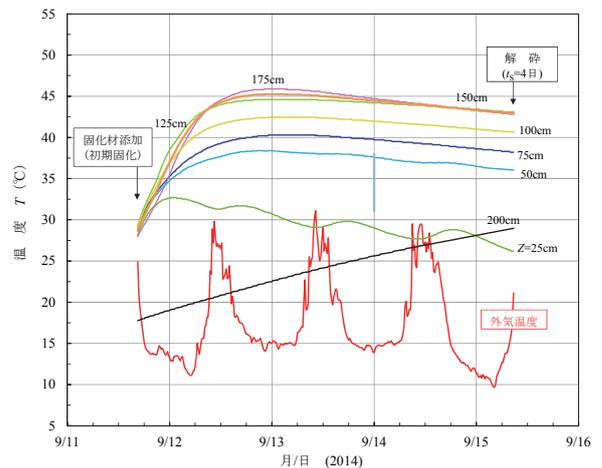


図 2 初期固化土の深さ方向温度分布の測定(夏季)

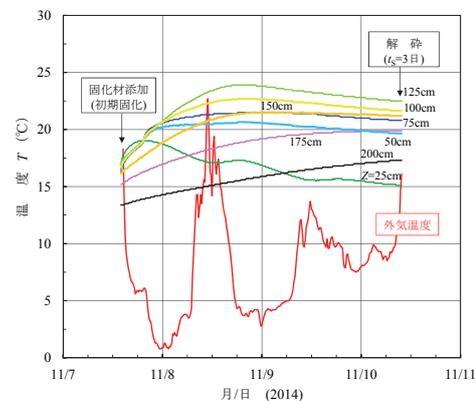


図 3 初期固化土の深さ方向温度分布の測定(冬季)

2.2 盛り立てヤード(砕・転圧土)の温度分布

砕・転圧土(傾斜遮水ゾーン築堤エリア)の養生条件は初期固化土のそれとは大きく異なる。すなわち、初期固化土が比較的深いピットの中で大きな塊状(体積に比較して表面積が小さい)として養生されるのに対して、砕・転圧土は厚さ 30cm に撒き出して平面状に転圧するので、薄い層状(体積に比較して表面積が非常に大きい)として養生される。一方、初期固化土は塊状の中心部ほど養生温度が高いため発現強度が大きく、表層部分との強度に差が生じるが、バケット式解砕機による掘削・解砕・積み込み過程や築堤面における撒き出し・敷き均し過程において十分に混合されるため強度差のない均一な状態で長期間養生される⁵⁾。

砕・転圧土層内の築堤当日からの温度特性を調べるために、築堤中の砕・転圧土層内に図 4 に示すように底面 $T3(30\text{cm})$ 、中間面 $T2(15\text{cm})$ 、上面 $T1(0\text{cm})$ に温度センサーを埋設して固化中の温度変化を測定した。図 5 と図 6 には夏季と冬季における測定結果をそれぞれ示す。図から、外気温度の影響を築堤当初に受けるものの(特に地表面で顕著)、翌日の次層築堤時には外気温の影響が小さくなることわかる。これは、砕・転圧土層内は築堤当初において表層部が外気温度の影響を受けるものの、層内部は築堤当初からの固化発熱や、次層を築堤することによる新たな固化発熱により外気温度の影響が少なくなるものと思われる。

§3. 室内強度試験

3.1 試験条件

養生温度が固化改良土の強度に及ぼす影響を調べるために表 1 に示す条件の固化材添加量および養生条件の供試体を作製した。

初期固化土の供試体の作製本数は○印: 10 本 ($t=1,3,10,28,56$ 日、2 本ずつ実施)、◎印: 12 本 ($t=1,3,10,28,56,84$ 日、2 本ずつ実施)とした。砕・転圧土の製作本数は全て 12 本で、初期固化養生日数 $t_{is}=3$ 日として $t_{cc}=1,3,7,25,53,81$ ($t=t_{is}+t_{cc}=4,7,10,28,56,84$)とした。

3.2 供試体の作製

再現性を重視するため、前年度に恒温恒湿室において実施した室内試験と同様に、供試体は乾燥状態のカオリン粘土を原土とし、固化材はセメント系固化材(GS200)を使用した。カオリンに同量の水を加えた擬似底泥土(含水比 $w=100\%$ 、 $\rho_t=1.25\text{g/cm}^3$)に固化材に同量の水を加えた固化材スラリー($C/W=1.0$)を添加混合して作製した。供試体作製の手順を以下に示す。

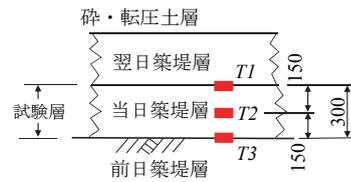


図 4 築堤ヤードにおける砕・転圧土層の温度分布測定

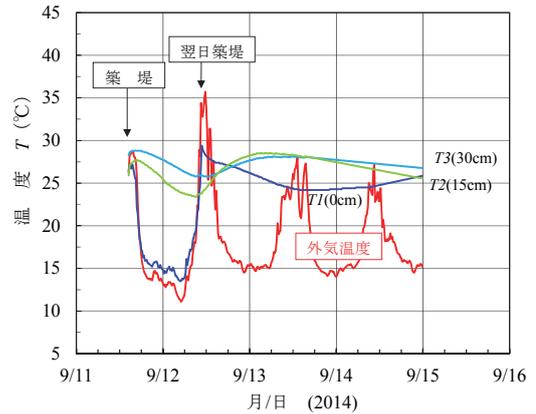


図 5 砕・転圧土の深さ方向温度分布の測定(夏季)

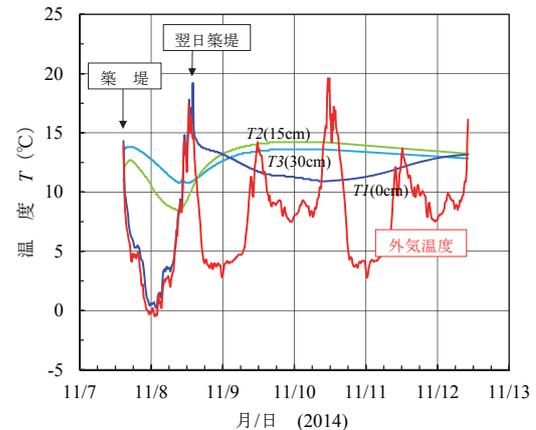


図 6 砕・転圧土の深さ方向温度分布の測定(冬季)

表 1 作製した供試体の固化材添加量と養生条件

固化材添加量 $\Delta Mc(\text{kg/m}^3)$	養生温度 T (°C)			
	5	20	35	50
75	◎	○	◎	○
100	◎	◎	◎	○
150	◎	○	◎	○
200	◎	○	◎	○
150 [*]	◎	◎	◎	◎

^{*}) 砕・転圧土供試体

- ① 必要な供試体本数に応じた、カオリン粘土、固化材、水の重量を計算で求め、それぞれを計量する。
- ② ミキサーにて約 2 分間攪拌混合する。この時、粉体状のカオリンや固化材は空气中に飛散しやすいので、あらかじめ少量の水と共にへらなどで混合しておく。
- ③ 攪拌・混合した改良泥土を速やかにモールド(初期固化土用供試体は D/H=50mm/100mm、砕・転圧土用供試体は 100mm/200mm)に流し込み、気泡が残らないように振動を与えて密実に詰める。
- ④ 表面が乾燥しないようにラップを掛け、所定の温度の養生庫内で保存する。初期固化土はモールド上端よりもやや盛り上がった状態で養生し、翌日上端の高さに合わせてストレートエッジで整形する。
- ⑤ 砕・転圧土は所定の初期固化養生期間($t_s=3$ 日)後にモールドから脱型し、ストレートエッジを用いておよそ 1cm 角になるよう砕き、D/H=50mm/100mm のモールドに突き固めて作製する。
- ⑥ 突き固めは 1.5kg ランマーを用いて、JIS-1210 A 法に準じたエネルギーを 2 層に分けて供試体に与えて作製した。

3.3 供試体の養生

堤沢ため池の初期固化ピットの内部では夏場では 45℃ 前後、冬場でも 20℃ 前後の温度が保たれているのに対し、冬場では初期固化ピットの表層 20cm 以下の部分や砕・転圧盛土層(傾斜遮水ゾーン築堤面)では 10℃ 以下になることが分かっている。そこで養生温度と発現強度の関係を求めるために、養生温度 $t=5, 20, 35, 50^\circ\text{C}$ に設定できる養生庫を使って、作製した初期固化土および砕・転圧土供試体を所定の期間保管・養生し、一軸圧縮試験を実施した。

砕・転圧土の初期固化養生期間に使用するモールドを除いて、全ての供試体は D/H=50mm/100mm の 3 分割式モールド内で養生している。養生期間は最長 84 日を予定していることから、それぞれの供試体の含水比が変化しないように、モールドごと個別にチャック付きのビニール袋内で保管した。

§4. 試験結果

4.1 一軸圧縮強さに及ぼす養生日数の影響

初期固化土の一軸圧縮強さにおよびす養生日数の影響を調べるために、表 1 に示す条件の供試体について、一連の一軸圧縮試験を実施した。養生温度 $T=5, 20, 35, 50^\circ\text{C}$ の一連の試験結果から固化材添加量 ΔMc が多いほど発現強度が大きくなり、その差は 10 日目くらいまで大きく広がる

が、その後は差があまり広がらないことがわかった。代表的な例として、養生温度 $T=35^\circ\text{C}$ における一軸圧縮強さ q_u ~ 養生日数 t 関係を図 7 に示す。

図 8 には固化材添加量 $\Delta Mc=100\text{kg/m}^3$ における一軸圧縮強さ q_u ~ 養生日数 t 関係を示す。この図から養生温度 $T=5\sim 35^\circ\text{C}$ と比較して $T=50^\circ\text{C}$ の養生条件下の供試体の一軸圧縮強さが著しく大きく発現していることがわかる。この傾向は $\Delta Mc=75, 150, 200\text{kg/m}^3$ の一連の試験についても同様であった。

4.2 一軸圧縮強さに及ぼす養生温度の影響

図 9 は養生日数 $t=10$ 日における固化材添加量 ΔMc ~ 一軸圧縮強さ q_u 関係、図 10 は $t=56$ 日における同様の関係を示したものである。図 9 から、養生日数が比較的少ない場合では固化材添加量の増加割合に対して養生温度が

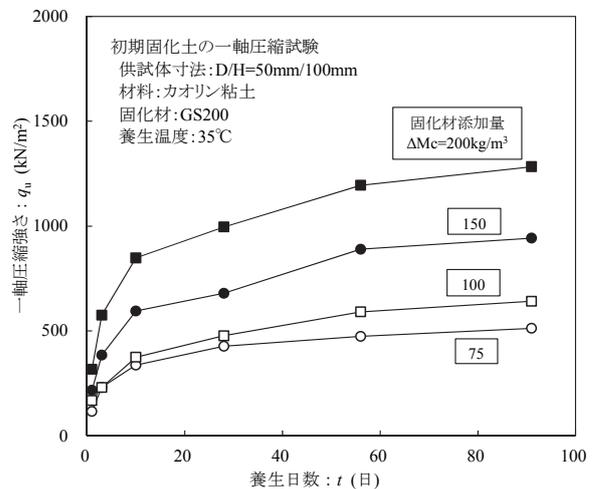


図 7 一軸圧縮強さ q_u ~ 養生日数 t 関係 (養生温度 $T=35^\circ\text{C}$)

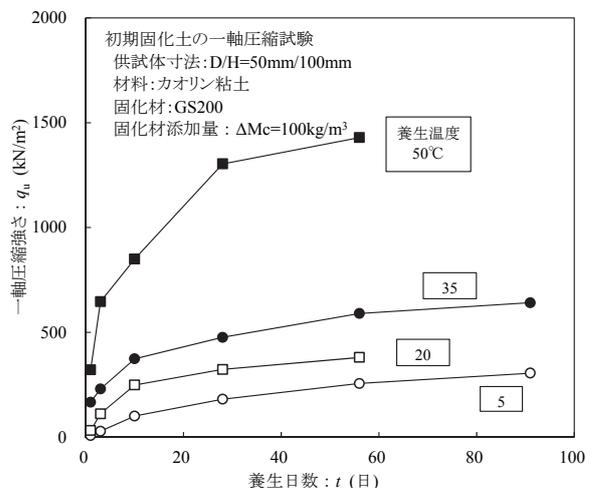


図 8 一軸圧縮強さ q_u ~ 養生日数 t 関係 (固化材添加量 $\Delta Mc=100\text{kg/m}^3$)

養生温度が砕・転圧土の強度発現に及ぼす影響

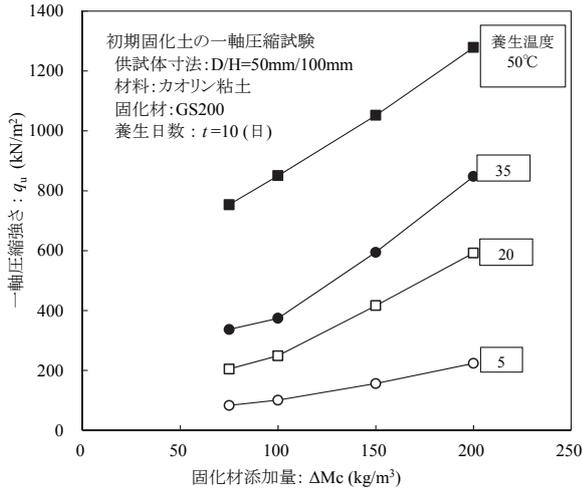


図9 一軸圧縮強さ q_u ~ 固化材添加量 ΔMc 関係 (養生日数 $t=10$ 日)

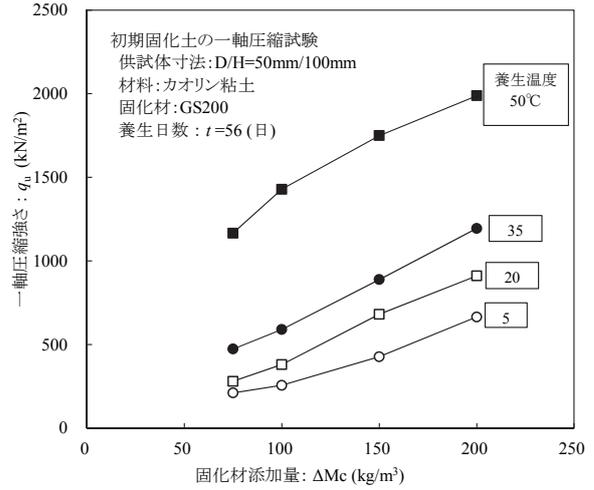


図10 一軸圧縮強さ q_u ~ 固化材添加量 ΔMc 関係 (養生日数 $t=56$ 日)

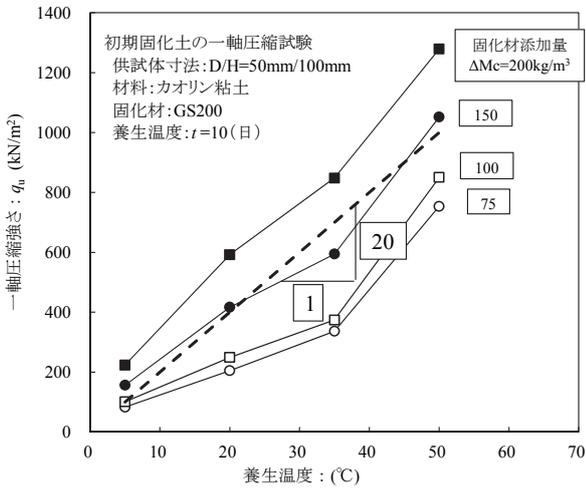


図11 一軸圧縮強さ q_u ~ 養生温度 T 関係 (養生日数 $t=10$ 日)

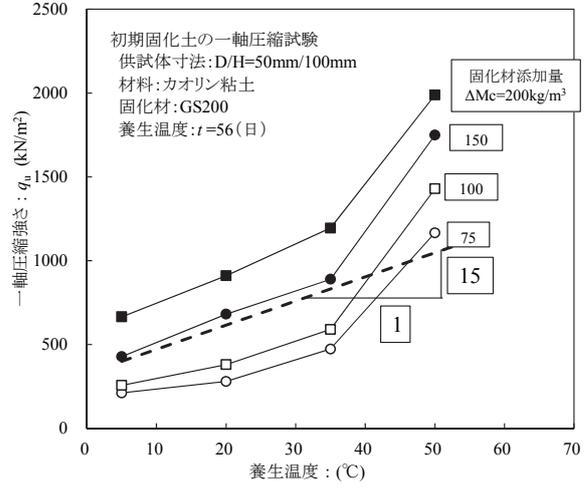


図12 一軸圧縮強さ q_u ~ 養生温度 T 関係 (養生日数 $t=56$ 日)

及ぼす影響が大きく、例えば $T=20^\circ\text{C}$ 、 $\Delta Mc=200\text{kg/m}^3$ の供試体の一軸圧縮強さは $T=35^\circ\text{C}$ 、 $\Delta Mc=150\text{kg/m}^3$ の供試体とほぼ同様で、 $T=50^\circ\text{C}$ 、 $\Delta Mc=75\text{kg/m}^3$ の供試体よりも小さいことがわかる。一方、養生日数が比較的長い供試体の試験結果を示した図10では $T \leq 35^\circ\text{C}$ の条件では養生温度の影響が小さくなっているが、 $T=50^\circ\text{C}$ の条件では養生日数に関わらず養生温度の影響が大きいことがわかる。図11は養生日数 $t=10$ 日における養生温度 T ~ 一軸圧縮強さ q_u 関係を、図12は $t=56$ 日における同様の関係を示したものである。図11中の破線は傾き $\alpha=20T$ の直線で、これは養生温度が1度上昇すると一軸圧縮強さが 20kN/m^2 増加することを示している。一方、図12に示すように養生期間が長い場合は $T \leq 35^\circ\text{C}$ の条件では $\alpha=15$ と養生温度の影響が小さくなっているが、 $T=50^\circ\text{C}$ の条件では逆にその影響が大きくなっていることがわかる。

§5. 考察

一連の試験結果から、初期固化土の強度発現に及ぼす養生温度の影響は無視できないレベルにあることがわかった。特に養生温度 $T=50^\circ\text{C}$ の条件下では初期強度の発現が大きいことは予想されたが、養生日数が経過しても強度増加の割合が減少せず、他の養生温度との差が開く一方であることが分かった。その原因については現在のところ不明であるが、実施工を考慮した場合、養生温度が 50°C を超える養生条件は夏場の施工であっても初期固化ピットの中央部分に限られ、その場合でも養生期間は4日程度であることを考慮すると、堤体の過度な強度発現への影響は小さいと考えられる。

こうした経緯から $T=50^\circ\text{C}$ の試験結果を除外し、 $T \leq 35^\circ\text{C}$ の条件の試験結果についてのみ、積算温度 M で整理した

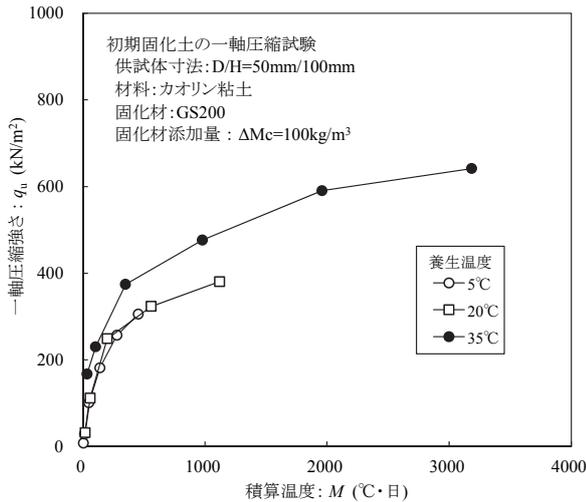


図 13 一軸圧縮強さ q_u ~ 積算温度 M 関係
(初期固化土、固化材添加量 $\Delta Mc=100\text{kg/m}^3$)

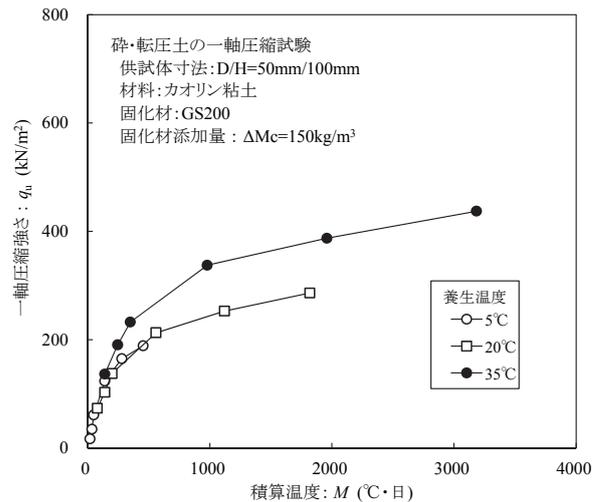


図 14 一軸圧縮強さ q_u ~ 積算温度 M 関係
(砕・転圧土、固化材添加量 $\Delta Mc=150\text{kg/m}^3$)

関係を図 13 に示す。積算温度の補正については過去にも多数の研究が報告されているが、ここでは特に補正は行わず、単純に養生温度×養生日数として整理している。同様に図 14 には砕・転圧土(初期固化養生日数 $t_{is}=3$ 日、固化材添加量 $\Delta Mc=150\text{kg/m}^3$)の試験結果を示す。

これらの図から $T \leq 20^\circ\text{C}$ では積算温度で整理した発現強度はほぼ一致し、 $T=35^\circ\text{C}$ も比較的近い値を示しているように見える。つまり固化材添加量 ΔMc が同じであれば、養生温度は初期強度にこそ影響を及ぼすが、長期的には同等の強度に収束することを意味している。

§6. おわりに

砕転圧盛土工法は老朽化したフィルダムやため池の優れた改修工法として、多くの学会賞を受賞し、適用現場も順調に増えてきている。開発当初は農閑期の冬場の施工を想定していたが、実際は一年を通じて施工する例が増えており、夏季と冬季の養生条件の相違による影響を明らかにする必要性が生じてきた。

今回の現場計測および室内試験の結果から、夏季と冬季の養生温度の差は初期固化土および砕・転圧土の初期強度に大きな影響を及ぼすことがわかった。しかし実施工において想定される養生温度の範囲では積算温度と一軸圧縮強さの関係はほぼ一本の曲線上にプロットでき、このことは長期的には養生温度の影響が消失することを意味しており、堤体の長期強度への影響はないことがわかった。今後は季節による養生温度の相違の影響を最も強く受ける初期固化土の表層部分における品質管理方法について、より実務的な方法を検討して行きたい。

参考文献

- 1) (社)農業農村整備情報総合センター：ため池改修工事の効率化－砕・転圧盛土工法によるため池堤体改修－設計・施工・積算指針(案), 2006.
- 2) (社)農業農村整備情報総合センター：砕・転圧盛土工法によるフィルダム堤体改修, 一堆积土・発生土を有効利用したフィルダムのリニューアル技術－, 設計・施工・積算指針(案), 2009.
- 3) 福島伸二, 北島 明, 谷 茂: 砕・転圧盛土工法における底泥土の固化強度に及ぼす温度の影響, 平成 22 年度農業農村工学会全国大会講演要旨集, pp.342~343, 2010.
- 4) 北島 明, 福島伸二, 谷 茂, 酒巻克之: 固化改良底泥土(砕・転圧盛土工法)の初期固化・築堤過程における温度環境特性, 第 70 回土木学会年次学術講演会, 第 III 部門, pp 13~14, 2015.
- 5) 福島伸二, 北島 明, 谷 茂: 砕・転圧盛土工法における初期固化時の強度不均一性が砕・転圧土強度に及ぼす影響, 第 69 回土木学会年次学術講演会, 第 III 部門, pp.195~196, 2014.

ひとこと



堀田 崇由

砕転圧盛土工法は通年施工可能な工法であるため、夏季と冬季の養生温度を把握することは大変重要である。私自身も諸先輩方の熱いご指導ご鞭撻により、技術者としての強さを発現していきたい。