

## ため池やフィルダムの堤体改修用の固化処理底泥土の 強度に及ぼす加圧養生の影響

北 島 明 福 島 伸 二 \*1

### 概 要

著者らは老朽化したため池やフィルダムの堤体改修を目的に、池内に堆積した底泥土を固化処理して所要の強度と遮水性を有する築堤土として利用できる砕・転圧盛土工法を開発し、数箇所のため池やフィルダムに適用してきた。これまでに、固化処理土は加圧養生下におかれる場合に、固化前の圧密現象による強度増加があることが確認されている。砕・転圧盛土工法では底泥土に固化材を添加して固化しただけの初期固化土とこれを解砕・転圧した砕・転圧土が固化処理土の対象となるが、初期固化土では固化材混合後に直ちに加圧養生下に置かれ、砕・転圧土では築堤に伴って土被り圧が段階的に増加する加圧養生下に置かれる。本論文は初期固化土と砕・転圧土が施工過程で受ける加圧養生の影響を調べ、初期固化土と砕・転圧土ともに固化前の圧密現象により強度増加が認められるが、実施工を対象とすると砕・転圧土では影響を無視できることを示した。

### Influence of a pressure curing process on unconfined strength of cement-mixed muddy soils used for improvement of old embankments

#### Abstract

Muddy soil is accumulated in reservoirs of most of old earth dams, and causes pollution and reduction of reservoir capacity. This muddy soil is classified as very soft clayey soil and generally has high-water-content. In order to use such a problematic soil as an embankment soil, we have developed a new method to improve old embankments by using the muddy soil mixed with cement. Previous research results suggest that the strength and strain behavior of the cement-mixed muddy soil is considerably influenced by the pressure curing process.

This paper presents test results from investigations into the influence of the pressure curing process on the unconfined strength of cement-mixed muddy soil in the improvement of old embankments. Test results showed that the strength of cement-mixed muddy soil increased with an increase in curing pressure.

キーワード： 底泥土 固化処理土 加圧養生 強度  
堤体改修

\*1 土木本部 土木技術統括部

### §1. はじめに

著者らは老朽化したため池やフィルダムの堤体改修を目的に、池内に堆積した底泥土を固化処理して所要の強度と遮水性を有する築堤土として利用できる砕・転圧盛土工法を開発し<sup>1)</sup>、数箇所のため池やフィルダムに適用してきた<sup>2)</sup>。これまでに、固化処理土は加圧養生下におかれる場合に、固化前の圧密現象による強度増加があることが確認されている<sup>3),4)</sup>。砕・転圧盛土工法では底泥土に固化材を添加して固化しただけの初期固化土とこれを解砕・転圧した砕・転圧土が固化処理土の対象となるが、初期固化土では固化材混合後に直ちに加圧養生下に置かれ、砕・転圧土では築堤に伴って土被り圧が段階的に増加する加圧養生下に置かれる。本稿では初期固化土と砕・転圧土が施工過程で受ける加圧養生の影響を調べた結果から、初期固化土と砕・転圧土の加圧養生下における強度特性について報告する。

### §2. 初期固化土と砕・転圧土の施工中の養生条件

初期固化土と砕・転圧土では以下に示すように施工過程中に受ける加圧養生の条件が異なる。

初期固化土は、図1に概念的に示すように、深さ約 2.0～2.5m の固化ピット内で固化させることを標準としているが、固化材の添加・混合後に直ちにその深さに応じた土被り圧  $\sigma_v$ 、すなわち養生圧力  $\sigma_{CP}$  を受けた状態で固化してゆく。固化ピットの深さを  $Z_{max}=2.5m$ 、初期固化土の単位重量を  $\rho_{tS} \cdot g=15kN/m^3$  とおくと、下面位置で最大の

$$\sigma_{CPmax} = \rho_{tS} \cdot g \cdot Z_{max} = 15 \times 2.5 \approx 38kN/m^2$$

となり、上・下面の平均深さで  $\sigma_{CP} \approx 20kN/m^2$  程度である。

一方、砕・転圧土はある期間  $t_s$  だけ固化させた初期固化土を規定の  $D_{max}$  で解砕してから一定層厚に撒出し・敷均してから転圧して一層毎に築堤されるので、図2に概念的に示すように、築堤層厚の増加に応じて  $\sigma_{CP}$  が段階的に増加してゆく。 $\sigma_{CP}$  は一日の築堤量を一層当り  $\Delta Z \approx 30cm$  (層厚は  $\Delta Z=25\sim 30cm$  が一般的) で1～2層を想定し、砕・転圧土の単位重量を  $\rho_{tCC} \cdot g=15kN/m^3$  とおくと

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_{CP} / \Delta t &= \rho_{tCC} \cdot g \cdot \Delta Z \\ &= 15 \times (0.3 \sim 0.6) \approx 5 \sim 10kN/m^2/day \end{aligned}$$

となり、砕・転圧土では加圧養生時の  $\sigma_{CP}$  の大きさだけでなく、加圧速度  $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t$  も影響するものと考えられる。

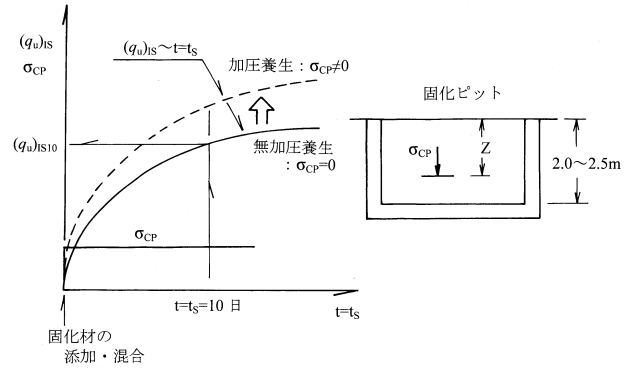


図1 初期固化土における加圧養生の影響

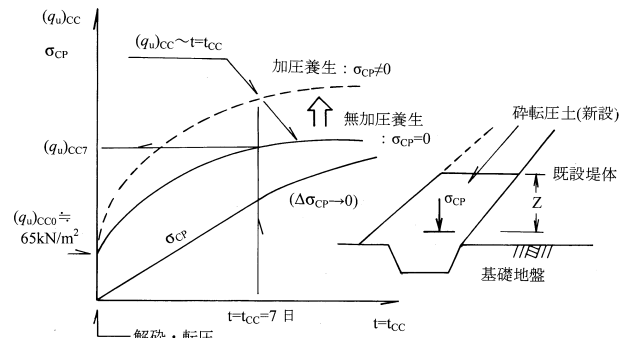


図2 砕・転圧土における加圧養生の影響

### §3. 加圧養生を受けた初期固化土の強度特性

試験に使用した底泥土は、堤体の改修工事中西光寺池(三重県伊賀市)から採取したものである。最大粒径は  $D_{max}=2.00mm$ 、 $75\mu m$  細粒以下のシルト・粘土分の細粒分含有率は  $F_c=90.0\%$  であった。また、液性・塑性限界はそれぞれ  $w_L=98.4\%$ 、 $w_P=47.0\%$  (塑性指数  $I_P=51.4$ ) であった。固化材は砕・転圧盛土工法において標準とされているセメント系(一般軟弱土用)を使用した。

初期固化土の供試体は底泥土 ( $w_0 \approx 145\%$ ) にスラリー状態(水・固化材比  $w/c=1.0$ ) にした固化材を添加し、小型ミキサーにより2分間だけ攪拌して混合してから内径  $D$  と高さ  $H$  が  $D/H=50mm/100mm$  の二つ割り成型モールド内に気泡が残らないように詰めてから上端面を平らに整形して作製した。供試体は作製後5分間放置してから所定の養生圧力  $\sigma_{CP}$  を図3に示すような載荷装置により加え、目標強度の設定日である  $t=t_s=10$  日目に一軸圧縮試験を実施した。なお、供試体を加圧養生するまでに5分間放置した理由は、初期固化土が固化前には流動状態にあり、直ちに加圧することで

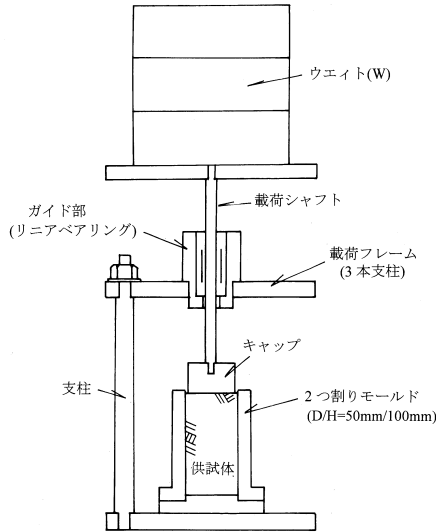


図3 加圧養生のための載下装置

ヤップ周辺から処理土が洩れ出るのを避けるために、ある程度固化させるためである。

図4に加圧養生を受けた  $\Delta M_c=200\text{kg/m}^3$  により作製した初期固化土の一軸圧縮試験により得られた応力～ひずみ曲線を示す。図より、応力～ひずみ曲線は  $\sigma_{CP}$  により影響を受け、高い  $\sigma_{CP}$  を受けた供試体ほど強度が大きく、破壊時のひずみ  $\varepsilon_{IF}$  が小さくなる傾向を示すことがわかる。

図5は  $\Delta M_c=150, 200, 250\text{kg/m}^3$  と変えて作製した初期固化土の一軸圧縮試験から得られた一軸圧縮強さ ( $q_{u,IS10}$ ) を  $\sigma_{CP}$  に対してプロットした関係を示す。 $(q_{u,IS10})$  は明らかに加圧養生の影響を受け、 $\sigma_{CP}$  が高いほど大きな強度増加を示し、特に  $\sigma_{CP} \leq 25\text{kN/m}^2$  を超えると強度が急増している。

初期固化土は前述したように固化ピット内において最大で  $\sigma_{CP}=40\text{kN/m}^2$  程度、平均で  $\sigma_{CP}=20\text{kN/m}^2$  程度の加圧養生を受けることを考えると、固化ピット上下・面における強度差は固化ピット上面において1.0とすると、中間位置で1.1程度、下面位置で1.3～1.4程度の値になることが図5から読み取れる。したがって、初期固化土は加圧養生が強度に及ぼす影響を無視できないことがわかり、実施工では加圧養生の影響があっても一樣な強度の堤体を築造できるように何らかの対策が必要と思われる。そこで、固化ピット内の初期固化土の掘削・解砕時に固化ピットの上層部だけ、あるいは下層部だけから単独で掘削・解砕することを避け、初期固化土が深さ方向に偏りなく上・下層一様に含まれるように掘削・解砕して築造するものとする。

加圧養生を受けた初期固化土が示す強度増加は、固化するまでに加圧養生により生じた含水比  $w$  の低下、すなわ

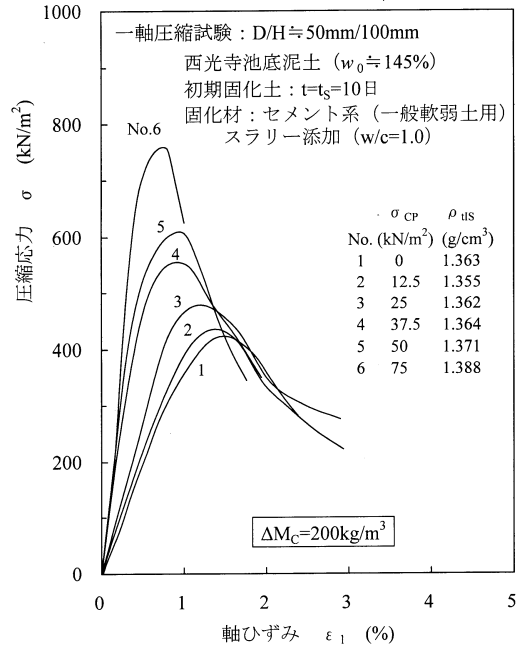


図4 養生圧力を受けた初期固化土の一軸圧縮試験結果

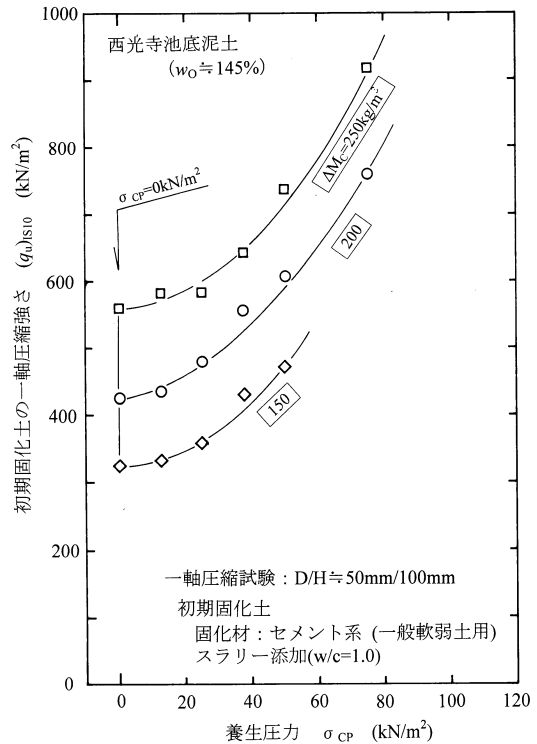


図5 養生圧力を受けた初期固化強度 ( $q_{u,IS10}$ ) ～  $\sigma_{CP}$  関係

ち圧密現象による高密度化のためと考えられる。図6は加圧養生を受けない初期固化土の強度 ( $q_{u,IS10}$ ) と  $w$  の関係を示し、これまでに初期固化土の ( $q_{u,IS10}$ ) に及ぼす  $w$  の影響は

$$(q_{u,IS10}) = a \cdot (w/w_0)^b \quad (b=1.37)$$

により近似できることがわかっている<sup>1)</sup>。そこで、一軸圧縮試験の供試体について、加圧養生中に生じた  $\varepsilon_v$  から換算した

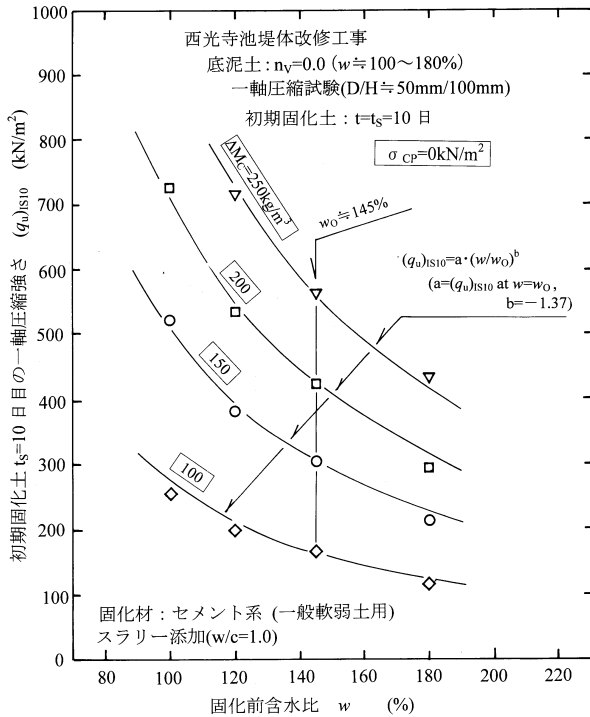


図6 養生圧力を受けない初期固化土の $(q_u)_{IS10} \sim w$ 関係

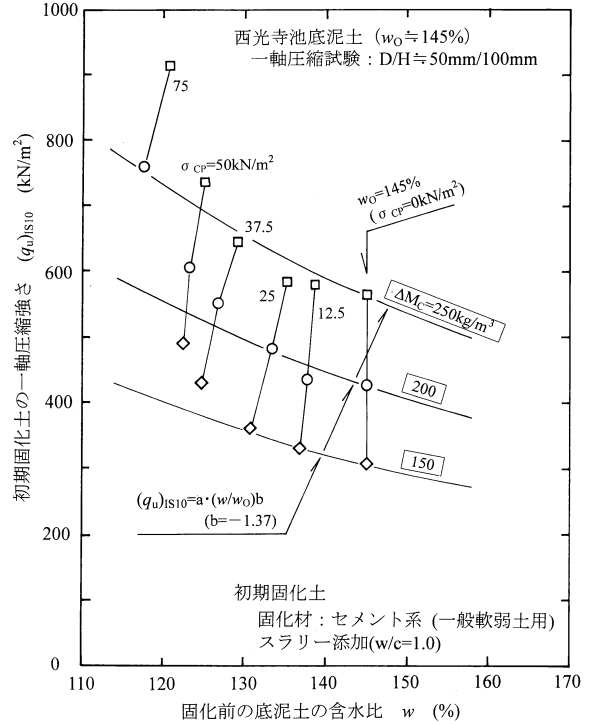


図7 養生圧を受けた初期固化土の $(q_u)_{IS10} \sim w$ 関係

$w$ の低下と強度 $(q_u)_{IS10}$ の関係をプロットしたのが図7である。図中には上式を用いた $(q_u)_{IS10} \sim w$ 関係も併せて示してある。図から、加圧養生による強度増加は $\sigma_{CP}$ が低い、おおよそ $\sigma_{CP} < 25 \sim 40 \text{ kN/m}^2$ の範囲では $w$ の低下によりほぼ説明できるようであるが、これよりも $\sigma_{CP}$ が高くなると $w$ の低下だけでは説明が難しいことがわかる。これは、 $\sigma_{CP}$ が高くなると圧密現象による $w$ の低下の他に、土粒子再配列による堆積構造の変化に起因した強度増加も加わってくるためと考えられる。また、初期固化土は、 $\sigma_{CP}$ が低くとも加圧養生の影響が大きく、加圧養生を受けない場合に比較して大きな強度増加を示すのは、固化するまでは強度の小さい超軟弱な状態にあり $\sigma_{CP}$ が低くとも大きな $\epsilon_v$ が生じやすいためと考えられる。

#### §4. 加圧養生を受けた砕・転圧土の強度特性

##### 4.1 養生圧力が強度に及ぼす影響

砕・転圧土の供試体は以下のように初期固化土の準備、解砕・突固めの2段階に分けて作製した。まず、二つ割り大型成型モールドD/H=100mm/200mm内で底泥土( $w_0 \approx 145\%$ )を所定の $\Delta M_C$ により $t_s=3$ 日間だけ固化させた初期固化土を準備する。砕・転圧土は準備した初期固化土をストレートエッジにより辺長15mm程度のサイコロ状に解砕し、D/H=50mm/100mmの二つ割り成型モールド内に2層に分けて質量1.5kgのランマーを用いて「土の突固め試験(JIS A1210)」のA法と同じ締固めエネルギー $E_c=550 \text{ kJ/m}^3$ で突き固めて作製した。

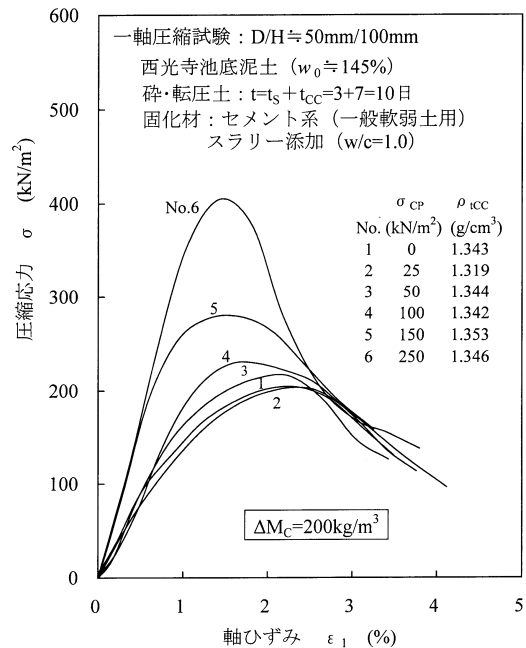


図8 養生圧を受けた砕・転圧土の一軸圧縮試験結果

図8に加圧養生を受けた $\Delta M_C=200 \text{ kg/m}^3$ の砕・転圧土( $t_s+t_{CC}=3+7=10$ 日)の一軸圧縮試験から得られた応力～ひずみ曲線を示す。図から、加圧養生を受けた砕・転圧土の応力～ひずみ曲線は初期固化土の場合と同様に高い $\sigma_{CP}$ を受けた供試体ほど高い強度を示し、破壊時のひずみ $\epsilon_{IF}$ も小さくなる傾向を示すことがわかる。

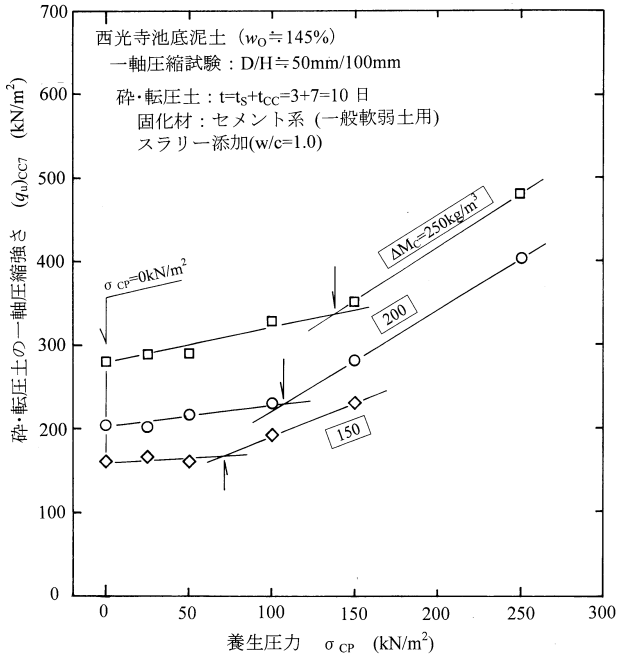


図9 養生圧力を受けた砕・転圧土の $(q_u)_{CC7} \sim \sigma_{CP}$  関係

図9は $\Delta M_c$ を $\Delta M_c = 150, 200, 250 \text{ kg/m}^3$ と変えて実施した図8に示したような試験から得られた $(q_u)_{CC7}$ と $\sigma_{CP}$ の関係を示す。図中の矢印は $(q_u)_{CC7} \sim \sigma_{CP}$ 関係を傾きの異なる二本の直線により近似した交点から推定した加圧養生による影響が強く現れる $\sigma_{CP}$ の値を示している。図から、 $(q_u)_{CC7}$ は $\sigma_{CP}$ により影響を受け、影響が強く現れる $\sigma_{CP}$ の値は $\Delta M_c$ が多いほど高いことがわかる。これは砕・転圧土が解砕・転圧した直後から $\Delta M_c$ に応じて発揮される強度 $(q_u)_{CC0}$ を有しており、 $\sigma_{CP}$ がこれに近いか、あるいは超えて $\sigma_{CP} \geq (q_u)_{CC0}$ になると影響が強く現れるためであろう。また、砕・転圧土は、高い $\sigma_{CP}$ の加圧養生を受けているにもかかわらず強度増加が少ないのは、転圧直後から発揮される強度 $(q_u)_{CC0}$ により加圧養生中に生じる圧密現象による $\epsilon_v$ が小さいためと思われる。

#### 4.2 加圧養生時の加圧速度が強度に及ぼす影響

実施工における砕・転圧土は築堤毎に段階的に増加する $\sigma_{CP}$ を受けて固化してゆくが、 $\sigma_{CP}$ の大きさは築堤速度、すなわち加圧速度 $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t$ により決まるものと考えられる。実施工での $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t$ は一日の築堤量を1~2層とした場合には $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t \approx 5 \sim 10 \text{ kN/m}^2/\text{day}$ に相当することは前述した。そこで、砕・転圧土の強度に及ぼす加圧養生時の $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t$ の影響を調べるために、作製直後の供試体に最終養生圧力 $\sigma_{CP} = \sum \Delta \sigma_{CP} = 150 \text{ kN/m}^2$ まで $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t = 25, 50, 75, 100, 150 \text{ kN/m}^2/\text{day}$ と変えて $t_{CC} = 7$ 日間( $t = t_s + t_{CC} = 3$

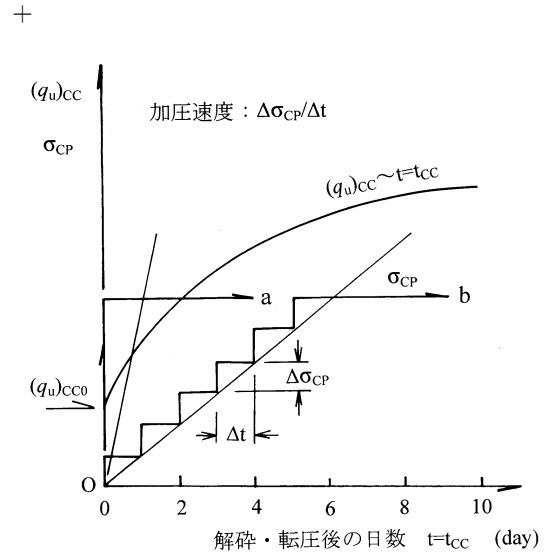


図10 養生圧力を加える際の加圧速度

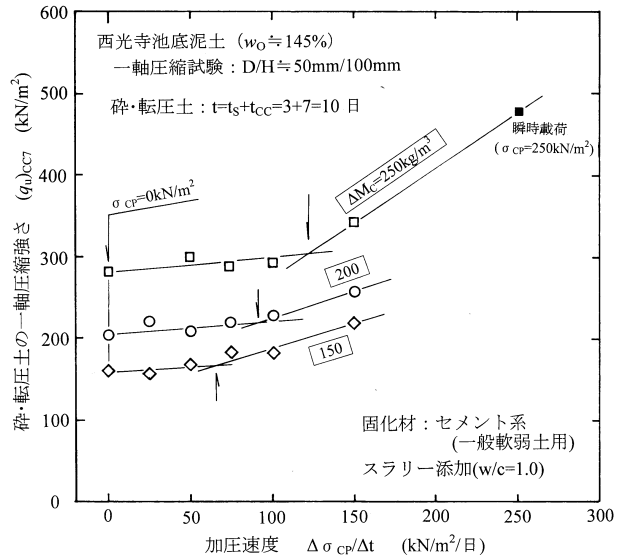


図11 砕・転圧土における $(q_u)_{CC7}$ と $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t$ の関係

+7=10日)だけ加圧養生してから一軸圧縮試験を実施して $(q_u)_{CC7}$ を求めた。 $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t$ の値は図10に概念的に示すように $\Delta t = 1$ 日毎に加えた $\sigma_{CP}$ の増分 $\Delta \sigma_{CP}$ で表し、養生圧力は最終レベル $\sigma_{CP} = \sum \Delta \sigma_{CP}$ まで一日単位で段階的に増加させた。すなわち、 $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t = 150 \text{ kN/m}^2/\text{day}$ の場合は図10のO→aのように1日目に瞬時に加え、 $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t = 25, 50, 75, 150 \text{ kN/m}^2/\text{day}$ の場合はそれぞれ図10のO→bのように $\sigma_{CP} = 150 \text{ kN/m}^2$ まで6日間、3日間、2日間に等分して段階的に加えた。また、 $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t = 100 \text{ kN/m}^2/\text{day}$ の場合は1日目に $100 \text{ kN/m}^2$ を、2日目に残りの $50 \text{ kN/m}^2$ を加えた。

図11は $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t$ を変えて加圧養生をした砕・転圧土の $(q_u)_{CC7}$ と $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t$ の関係を示す。図中の■印は図9に示した $\Delta M_c = 250 \text{ kg/m}^3$ の供試体に $\sigma_{CP} = 250 \text{ kN/m}^2$ を瞬時に加え

て加圧養生をして得られた試験値である。また、図中の矢印は  $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t \sim (q_u)_{CC}$  関係を傾きの異なる二本の直線により近似した交点から推定した加圧養生の影響が強く現れる  $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t$  の大きさを示している。図から、 $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t$  がある値を超えると加圧養生による強度増加を示すことがわかる。これは  $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t$  により決まる  $\sigma_{CP}$  の増分  $\Delta \sigma_{CP}$  が解砕・転圧後に発揮される強度  $(q_u)_{CC0}$  より大きいのか、固化速度  $\Delta (q_u)_{CC} / \Delta t$  により決まる初日の強度増分  $\Delta (q_u)_{CC}$  より大きい場合には加圧養生により圧密沈下に起因した強度増加が強く現れるためと考えられる。このことから、最終的に受ける  $\sigma_{CP}$  が高い場合であっても一日の  $\Delta \sigma_{CP}$  が  $\Delta (q_u)_{CC}$  より小さいか、あるいは解砕・転圧直後から発揮される強度  $(q_u)_{CC0}$  を超えない場合には、加圧養生の影響は少ないものと考えられる。

## §5. あとがき

本報告では砕・転圧盛土工法で対象となる初期固化土と砕・転圧土の強度発現に加圧養生条件が及ぼす影響を室内試験により調べ、実施工での対策について検討したものであり、以下の結論が得られた。

- (1) 初期固化土は固化ピット内で固化材攪拌後に直ちに加圧養生下で固化が進むが、養生圧力  $\sigma_{CP}$  を支えられる強度に固化するまでに生じる圧密現象による高密度化に起因した強度増加が生じる。
- (2) 初期固化土は固化材を混合攪拌後に固化ピット内で受ける養生圧力  $\sigma_{CP}$  は下面で最大の  $\sigma_{CP}=40\text{kN/m}^2$  程度、中間深さで平均の  $\sigma_{CP}=20\text{kN/m}^2$  程度にあり、これにより固化ピットの上・下面において無視できない強度差が生じる。
- (3) 初期固化土における  $\sigma_{CP}$  による強度増加は  $\sigma_{CP} < 25 \sim 40\text{kN/m}^2$  の領域では圧密現象による含水比  $w$  の低下から説明することができるが、 $\sigma_{CP} > 40\text{kN/m}^2$  を超えた領域では土粒子再配列による堆積構造の変化による強度成分が加わるため  $w$  の低下だけでは説明できない。
- (4) 実施工においては、初期固化土における加圧養生の影響があっても一様な強度を有する堤体を築造するために、固化ピット内の初期固化土を上層部だけから、あるいは下層部だけから単独で掘削・解砕したものを築堤することを避け、初期固化土を深さ方向に上・下

層偏りなく一様に含むように掘削・解砕して築堤することが必要である。

- (5) 砕・転圧土では一層毎の築堤により段階的に増加する養生条件下で固化が進むが、その影響は加圧速度  $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t$  により決まる養生圧力増分  $\Delta \sigma_{CP}$  が解砕・転圧した直後から発揮される強度  $(q_u)_{CC0}$  より大きい場合、あるいは加圧速度  $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t$  が固化速度  $\Delta (q_u)_{CC} / \Delta t$  よりも大きい場合に強く現れる。
- (6) 砕・転圧土では、実施工で想定される  $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t$  による決まる  $\Delta \sigma_{CP}$  が  $(q_u)_{CC0}$  より小さく、また  $\Delta \sigma_{CP} / \Delta t$  が  $\Delta (q_u)_{CC} / \Delta t$  よりも小さいことから、加圧養生の影響は無視できる。

## 参考文献

- 1) (社)農業農村整備情報総合センター編:ため池改修工事の効率化、一砕・転圧盛土工法によるため池堤体改修一、設計・施工指針(案)、(社)農業農村整備情報総合センター、2006。
- 2) 例えば、北島 明、谷 茂、福島伸二、西本浩司:固化処理底泥土を用いた老朽化フィルダム堤体の耐震補強に関する事例研究、ダム工学、Vol.15、No.3、pp.227-240、2005。
- 3) 山本哲郎、鈴木素之、岡林茂生、藤野秀利、田口岳志、藤本哲生:上載圧下で養生したセメント安定処理土の一軸圧縮強度特性、土木学会論文集、No.701/III-58、pp.387-399、2002。
- 4) Consoli, N. C., Rotta, G. V. and Prietto, P. D. M. : Influence of Curing under Stress on the Triaxial Response of Cemented Soils, *Geotechnique*, Vol.50, No.1, pp.99-105, 2000。

謝辞 本研究に貴重なご意見、ご協力をいただいた農研機構農村工学研究所の谷部長に深謝いたします。



北島 明

## ひとこと

本年度は、砕・転圧盛土工法を堤高30mクラスのフィルダムの改修工法として提案できるよう努めていくとともに、秋には日本一のみならず、アジア一の美酒に酔いながら六甲嵐を斉唱できるよう応援したいと思います。