

砕・転圧盛土工法の簡略設計法の提案

北 島 明 福 島 伸 二

概 要

砕・転圧盛土工法は、築堤土の入手難と底泥土の除去処分を同時に解決し、築堤土と土捨て場の確保に伴う環境破壊を不要とした堤体改修技術である。砕・転圧土の目標強度は砕・転圧土ゾーンに必要な粘着力として設定されるため、固化材添加量の決定のためには添加量を変えた砕・転圧土による一連の三軸圧縮試験が必要である。一方、実施における固化改良土の強度管理は、試験実施が簡単な一軸圧縮試験による一軸圧縮強さを指標としており、固化材添加量や施工管理に必要な関係式を導くためには一軸圧縮試験と三軸圧縮試験による体系的な各種の試験を大量に実施しなければならず、小規模な堤体改修事業への適用は困難であった。

そこで、本稿は砕・転圧盛土工法を小規模な堤体改修にも適用できるように、室内配合試験の実施数を可能な限り省略できる簡略設計法を提案するものである。

Simplified design method of rehabilitation technique using cement-mixed soil for fill-type dam embankment

Abstract

A rehabilitation technique using cement-mixed soil for fill-type dam embankment can resolve two problems at the same time: good soil is needed for the embankment and a landfill site for muddy soil is required. Due to these characteristics, this method can reduce the adverse effects on the environment during construction. However, it requires a series of triaxial compression tests for design because the target strength is set for the cohesion for stability while it also requires a series of unconfined compression tests for daily quality management. Therefore, as numerous tests are needed before starting, it is difficult to apply to small-sized dams which do not have sufficient budget.

In order to extend the scope of application to small-sized dams, we have developed a simplified design method that reduces the number of tests as far as possible.

キーワード： 砕・転圧盛土工法、簡易設計法、
一軸圧縮強さ、粘着力

§1. はじめに

フィルダムやため池の多くは、老朽化して堤体改修(耐震補強や漏水防止)が求められているものの、近年周辺の市街化が進むなど堤体改修に必要な築堤土を入手しにくくなっている。一方、貯水池に堆積した底泥土は貯水容量の減少や水質悪化の原因となり除去処分が必要となっているものの、土捨て場の確保が難しく産廃処分をせざるを得ない問題を抱えている。砕・転圧盛土工法は、築堤土の入手難と底泥土の除去処分を同時に解決し、築堤土と土捨て場の確保に伴う環境破壊を不要とした堤体改修技術であり、図1に示すように原料泥土となる底泥土を、あるいは底泥土に工事に伴う掘削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改良した固化改良土を既設堤体の上流側の一部掘削した部分に腹付けて行うことを基本としている。

砕・転圧土の目標強度は、砕・転圧土盛土工法により堤体改修を施す堤体全体が安定であるために砕・転圧土ゾーンに必要な粘着力として逆算される。一方、実施工における固化改良土の強度管理は、試験実施が簡単な一軸圧縮試験による一軸圧縮強さを指標とするので、室内配合試験は、2種類の固化改良土の相互の強度関係、砕・転圧土の粘着力と一軸圧縮強さの関係、目標強度を達成できる固化材添加量を調べるための一軸圧縮試験と三軸圧縮試験による体系的な各種の試験を大量に実施しなければならない。

室内配合試験は規模の大きいフィルダムでは工事費用も大きく必須のものとして実施できるのに対して、小規模な堤体改修では費用対効果面からすべての試験を実施することは難しいため、簡略化されたものが求められる。そこで、本稿は砕・転圧盛土工法を小規模な堤体改修だけでなく、大規模な堤体改修における予備的検討にも適用できるように、室内配合試験の実施数量を可能な限り省略できる簡略設計法を提案するものである。

§2. 砕・転圧盛土工法における

固化改良土の強度関係

砕・転圧土の目標強度は、砕・転圧土盛土工法により堤体改修を実施された堤体全体の安定計算により、所要の安全率を満足して安定性が確保できる砕・転圧土ゾーンに必要な粘着力 $(c')_{CCStability}$ として逆算される。一方、実施工での強度管理は試験実施が容易な一軸圧縮試験による一軸圧縮強さが指標に用いられるので、粘着力と一軸圧縮強さの関係が必要になる。砕・転圧盛土工法における固化改良土の強度は、図2に示すように、原料泥土に固化材を添加してから強度発現が緩やかになり始める $t=10$ 日目の

強度、すなわち初期固化土では $(q_u)_{IS10}=(q_u)_{IS}^*$ により、砕・転圧土では $t_S=3$ 日とした場合には $t_{CC}=t-t_S=10-3=7$ 日目までに発現する強度 $(q_u)_{CC7}=(q_u)_{CC}^*$ によりそれぞれ設定される。

本論文中の $(q_u)_{IS10}$ の下添字 IS は Initial Stabilized の頭文字から初期固化土であること、下添数字 10 は $t=10$ 日目の強度であることを示す。同様に $(q_u)_{CC7}$ の下添字 CC は Crushed and Compacted の頭文字から砕・転圧土であること、下添数字 7 は $t_{CC}=7$ 日目の強度であることを示す。また、 $(q_u)_{IS}^*$ などの上添記号*は目標強度に関連したものであることを示す。

砕・転圧盛土工法の設計・施工指針^{1), 2)}では、室内配合試験は初期固化土と砕・転圧土の両方について実施することが規定されており、基本となるのは一軸圧縮試験による初期固化土の強度 $(q_u)_{IS}$ に及ぼす固化材添加量 ΔM_c 、養生日数、原料泥土の含水比や粒度の影響を調べる試験、初期固化土をある一定期間 t_S だけ固化させてから固化途中に解砕・転圧した砕・転圧土の再固化強度特性を調べる試験などを実施する必要がある。加えて、砕・転圧土の強度パラメータ $(c')_{CC}$ 、 $(\phi')_{CC}$ と ΔM_c の関係を求めるための三軸圧縮試験も実施しなければならない。

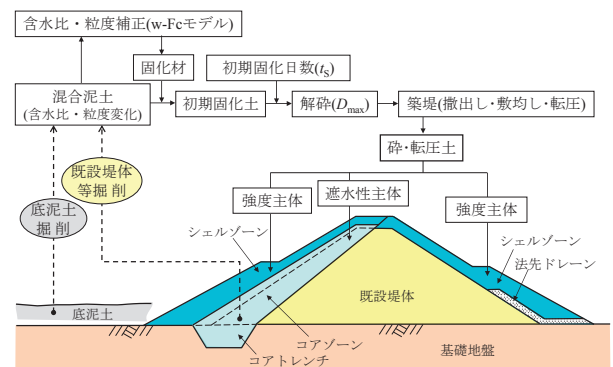


図1 砕・転圧盛土工法の基本的概念

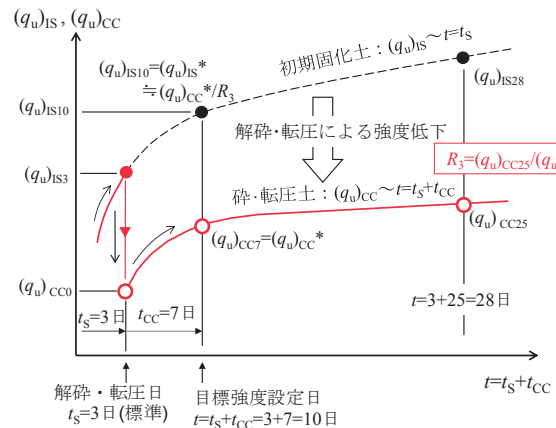


図2 初期固化土と砕・転圧土の強度発現特性($t_S=3$ 日)

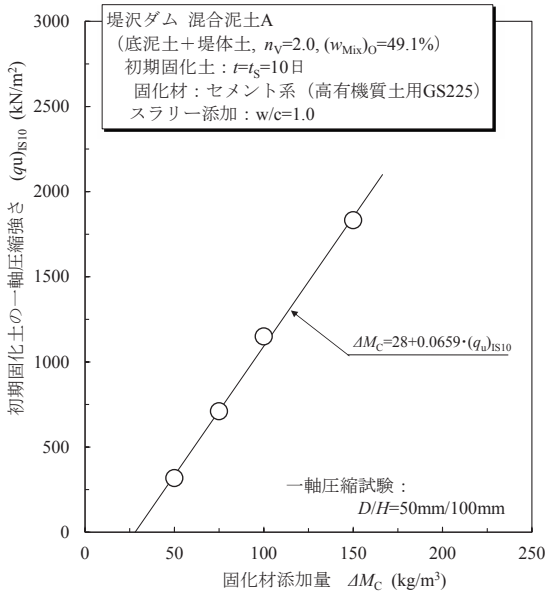


図3 初期固化土の $(q_u)_{IS10} \sim \Delta M_c$ 関係

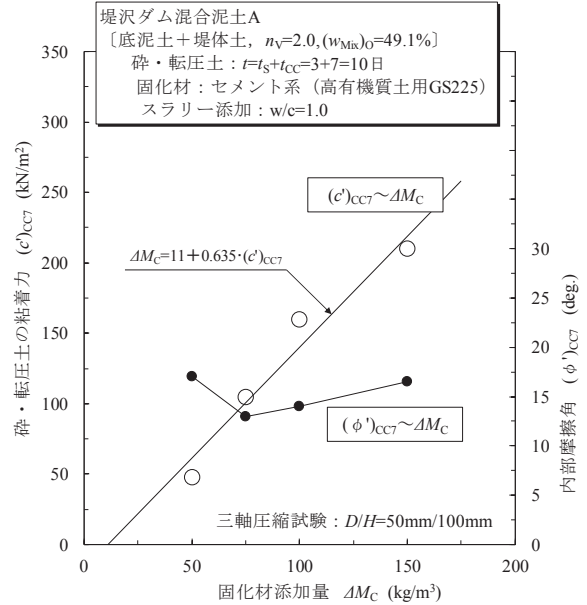


図4 砕・転圧土の $(c')_{CC7} \sim \Delta M_c$ 関係

それらの室内配合試験の結果をもとに、砕・転圧土の目標強度を現場で達成できる固化材添加量 $\Delta M_c = \Delta M_c^*$ 、施工管理指標になる一軸圧縮強さ表示の目標強度、初期固化土の $(q_u)_{IS}^*$ と砕・転圧土の $(q_u)_{CC}^*$ がそれぞれ求められる。

代表的な例として堤沢池における配合試験結果を図3、図4に挙げるが、一連の配合試験を実施するとそれぞれの土質に特有の以下のような関係式が得られる。

$$\Delta M_c = A + B \cdot (q_u)_{IS10} \quad (1)$$

$$\Delta M_c = A' + B' \cdot (c')_{CC7} \quad (2)$$

また、同一固化材添加量 ΔM_c 、養生日数 t における初期固化土と砕・転圧土の一軸圧縮強さ比 $R (= (q_u)_{CC} / (q_u)_{IS})$ は図5に示すように初期固化養生日数 t_s に依存して変化する。

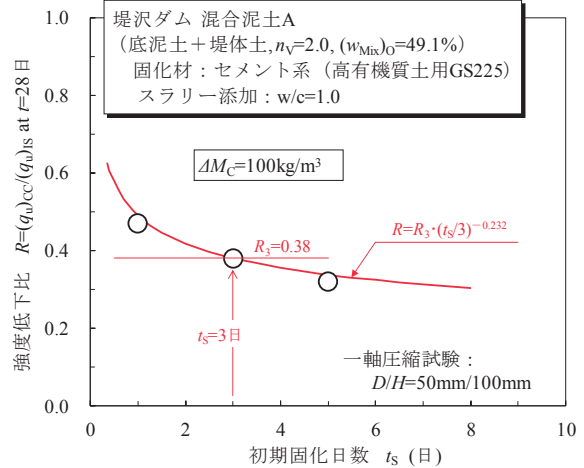


図5 砕・転圧土の初期固化土に対する強度低下比 R

§3. 砕・転圧盛土工法の簡略化設計法

3.1 砕・転圧土の粘着力と一軸圧縮強さの関係

図6は同一の配合条件で準備した砕・転圧土の三軸圧縮試験による $(c')_{CC7}$ と一軸圧縮試験による $(q_u)_{CC7}$ の関係を示したものである。図中には $(c')_{CC7} / (q_u)_{CC7} = \text{一定線}$ として $(c')_{CC7} / (q_u)_{CC7} = 1/2.0 \sim 1/3.5$ の範囲で4種類を示してある。 $(c')_{CC7} \sim (q_u)_{CC7}$ 関係は一般的な粘性土質に用いられる関係式 $c = (1/2) \cdot q_u$ では表現できず、 $(c')_{CC7}$ の増加に対応して $(q_u)_{CC7}$ が増加する傾向を示していることがわかる。

図6の図中の赤色の直線は式(1)と式(2)から ΔM_c を消去して得られる $(c')_{CC7} \sim (q_u)_{IS10}$ 関係を求め、 $(q_u)_{IS10}$ を $(q_u)_{CC7} = R_3 \cdot (q_u)_{IS10}$ を用いて変換して得られる関係式

$$(c')_{CC7} = \alpha + \beta \cdot (q_u)_{CC7} \quad (3)$$

を示したものである。また、 $(q_u)_{CC7} / (c')_{CC7}$ は式(3)から

$$(q_u)_{CC7} / (c')_{CC7} = (q_u)_{CC7} / (\alpha + \beta \cdot (q_u)_{CC7})$$

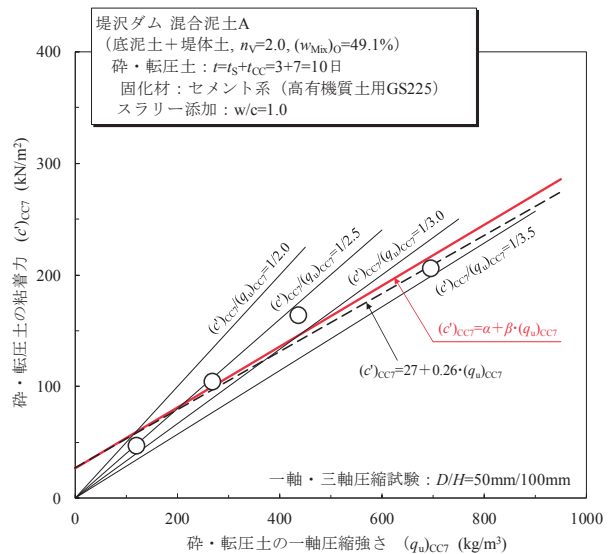


図6 砕・転圧土の $(c')_{CC7}$ と $(q_u)_{CC7}$ の関係

とおけることから、 $(q_w)_{CC7}/(c')_{CC7} \sim (q_w)_{CC7}$ 関係は図 7 に示すように双曲線となり $(q_w)_{CC7}$ の増加に対して一定値に収束することがわかる。

そこで、 $(c')_{CC7} \sim (q_w)_{CC7}$ 関係に及ぼす $(q_w)_{CC7}$ の影響を調べるために、砕・転圧盛土工法により堤体改修を実施した 5 箇所フィルダムにおける室内配合試験結果から読み取った砕・転圧土の $(c')_{CC7}/(q_w)_{CC7}$ と $(q_w)_{CC7}$ の関係を図 8 に示す。図中には、式(3)を考慮した関係式

$$(c')_{CC7}/(q_w)_{CC7} = a/(q_w)_{CC7} + B \quad (3')$$

により、データの上・下限線、平均線をうまく近似できるように係数 a と B の値を決定した曲線をそれぞれ示す。図から、 $(c')_{CC7}/(q_w)_{CC7}$ は $(q_w)_{CC7}$ に依存し、 $(c')_{CC7}$ と $(q_w)_{CC7}$ の関係は一定値ではなく強度レベル $(q_w)_{CC7}$ により変化し、 $(q_w)_{CC7}$ が増加すると $(c')_{CC7}/(q_w)_{CC7}$ が減少する傾向にあることがわかる。しかし、この傾向は特に強度レベルが低い $(q_w)_{CC7} < 300 \text{ kN/m}^2$ において顕著であるものの、 $(q_w)_{CC7}$ が増加すると一定値に収束することもわかる。

以上から、 $(c')_{CC7}$ と $(q_w)_{CC7}$ の関係式として、

$$(c')_{CC7} = 27 + 0.26 \cdot (q_w)_{CC7} \quad (4)$$

を $(c')_{CC7}$ を $(q_w)_{CC7}$ に変換するための基本式として使用する³⁾。

3.2 初期固化土と砕・転圧土の間の強度変換

ここまでの過程で、 $(c')_{CC7}$ が $(q_w)_{CC7}$ に変換されたので、次に必要になるのが $(q_w)_{CC7}$ を $(q_w)_{IS}$ に変換することであり、これには例えば初期固化養生期間を 3 日とすると強度低下比 R_3 を用いて

$$(q_w)_{IS} = (q_w)_{CC7} / R_3 \quad (5)$$

により行うことができる。 R_3 は原料泥土の種類や強度レベルなどの影響を受けることがこれまでの知見からわかっているので、 R_3 を推定するために上述の 5 箇所フィルダムにおける室内配合試験から R_3 と $(q_w)_{CC7}$ の関係を整理したものを図 9 に示す。図から、 R_3 は $R_3 = 0.5$ に近い値にあるものの $(q_w)_{CC7}$ の増加に対して減少傾向にあり、図中の曲線で示したように累乗式

$$R_3 = 0.805 \cdot [(q_w)_{CC7}]^{-0.102} \quad (6)$$

による近似が可能であると考えられる⁴⁾。

3.3 簡略化した設計法の提案

図 10 は簡略設計法の概要を図示したもので、赤破線枠内に示した関係式はそれぞれ上述の式(4)および式(6)を使って変換する過程を示している。実線枠内の関係式は図 3 に示したような初期固化土の $(q_w)_{IS10} \sim \Delta M_C$ 関係から各現場で固有に決定する式(1)で算定できるものである。すなわち、 $(c')_{CC7}$ は、式(4)を $(q_w)_{CC7}$ について整理した

$$(q_w)_{CC7} = \{(c')_{CC7} - 27\} / 0.26 \quad (4')$$

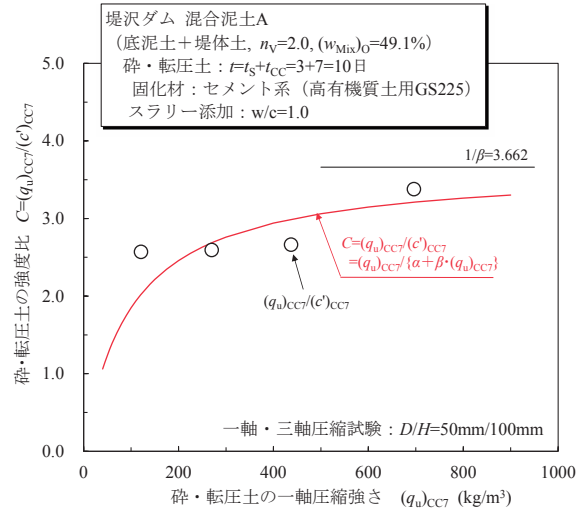


図 7 砕・転圧土の $(q_w)_{CC7}/(c')_{CC7}$ と $(q_w)_{CC7}$ の関係

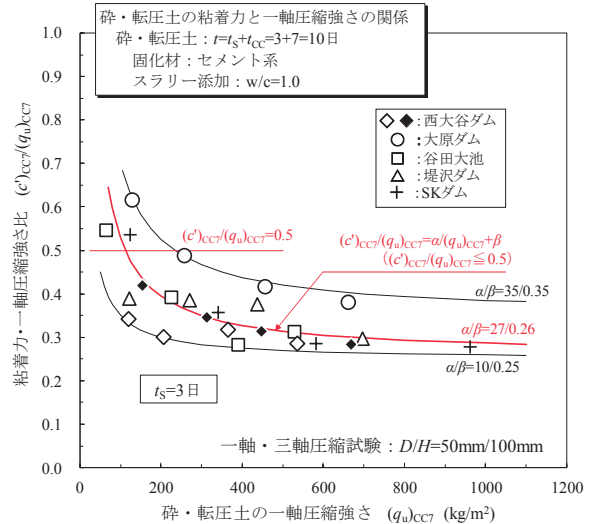


図 8 砕・転圧土の $(c')_{CC7}/(q_w)_{CC7}$ と $(q_w)_{CC7}$ の関係

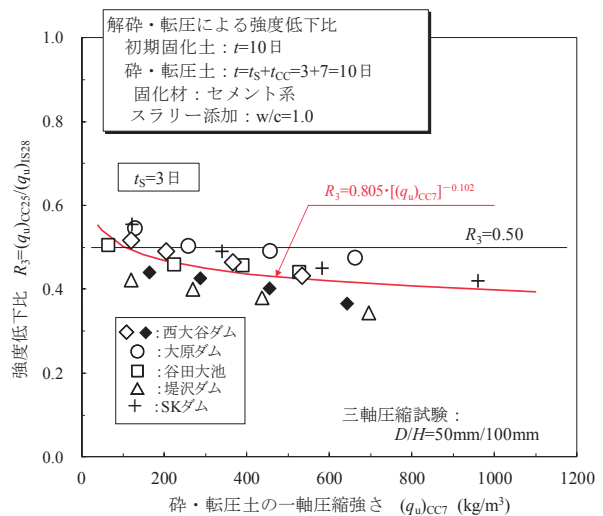


図 9 強度低下比 R_3 と強度レベル $(q_w)_{CC7}$ の関係

における $(c')_{CC7}$ に $(c')_{CCStability}$ を代入すれば $(q_u)_{CC^*}$ に変換できることを示しており、さらに $(q_u)_{IS^*}$ は式(6)に $(q_u)_{CC^*}$ を代入して強度レベルの影響を考慮して推定できる R_3 を用いて

$$(q_u)_{IS^*} = (q_u)_{CC^*} / R_3$$

により変換できることを示している。

現場で $(c')_{CCStability}$ を達成することができる ΔM_C^* は、 $(q_u)_{IS^*}$ に $\alpha_{FL}=1/1.5$ を考慮して強度割増しをした配合強度 $(q_u)_{IS^*} / \alpha_{FL}$ を、初期固化土の室内配合試験で得られた図3に示したような $(q_u)_{IS10} \sim \Delta M_C$ 関係を近似した式(1)に代入すれば

$$\Delta M_C^* = A + B \cdot (q_u)_{IS^*} / \alpha_{FL}$$

のように算定できる。つまり簡略設計での室内配合試験は図10における実線枠内の一軸圧縮試験、すなわち図3に示した初期固化土の $(q_u)_{IS10} \sim \Delta M_C$ 関係を求めるだけで算定可能である事を示している。

詳細設計法においては式(4)、あるいは式(6)は、図11に示すように、初期固化土の一軸圧縮試験、砕・転圧土の一軸圧縮試験、三軸圧縮試験を実施して、改修事例ごとに求めて行くものである。これに対して、簡略化した設計法では、 $(c')_{CCStability}$ の $(q_u)_{IS^*}$ への変換が式(4)を用いれば可能なので砕・転圧土の三軸圧縮試験(図中★2印)が省略でき、また $(q_u)_{IS^*}$ の $(q_u)_{CC^*}$ への変換が R_3 値を式(6)により推定できるので砕・転圧土の t_s や ΔM_C を変えた一軸圧縮試験(同★3印)が省略できる。その他、小規模な堤体改修では原料泥土の含水比 w や粒度変化 F_c の影響が少ないことから、初期固化土の w や F_c を変えた一軸圧縮試験(同★1印)も省略できる。以上から、簡略設計での室内配合試験は、詳細設計に比較すると試験数を8割程度削減することが可能である。

§4. 簡略設計法と詳細設計法の比較

簡略設計は小規模な堤体改修が対象となるので、堤高も低く堤体安定に必要とされる砕・転圧土ゾーンの強度レベルも高くないと想定されることから、比較例の目標強度として $(c')_{CCStability}=100\text{kN/m}^2$ を設定した場合の簡略設計による $(q_u)_{IS^*}$ 、 $(q_u)_{CC^*}$ 、 ΔM_C^* を求めると以下ようになる。

【 $(q_u)_{CC^*}$ 】

$(c')_{CCStability}$ と式(4)より

$$(q_u)_{CC^*} = (100 - 27) / 0.26 \\ = 281 \text{ kN/m}^2$$

【 R_3 】

式(6)と上記の $(q_u)_{CC^*}$ より

$$R_3 = (0.805 \times 281)^{-0.102} \\ = 0.453$$

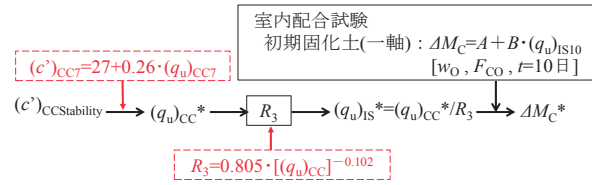


図10 簡略化した設計法の手順

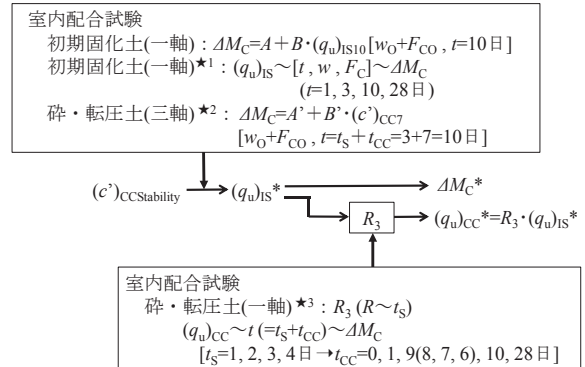


図11 詳細設計法(指針法)の手順

表1 簡略設計法と詳細設計法の比較

$(c')_{CCStability}=100\text{kN/m}^2$

	$(q_u)_{CC^*}$ (kN/m ²)	$(q_u)_{IS^*}$ (kN/m ²)	R_3	ΔM_C^* (kg/m ³)
簡略設計法	281	620	0.453	—
西大谷ダム	346	707	0.49	195/ 176
大原ダム	224	448	0.50	122/ 153
谷田大池	320	653	0.49	223/ 216
堤沢ダム	300	789	0.38	106/ 89
SKダム	319	591	0.54	91/ 94

【 $(q_u)_{IS^*}$ 】

上記の $(q_u)_{CC^*}$ と上記の R_3 より

$$(q_u)_{IS^*} = (q_u)_{CC^*} / R_3 \\ = 281 / 0.453 \\ = 620 \text{ kN/m}^2$$

【 ΔM_C^* 】

上記の $(q_u)_{IS^*}$ と堤沢池における $(q_u)_{IS10} \sim \Delta M_C$ 関係を求めた図4の図中の式より

$$\Delta M_C^* = 28 + 0.0659 \cdot (q_u)_{IS^*} / \alpha_{FL} \\ = 28 + 0.0659 \times 620 \times 1.5 \\ = 89 \text{ kg/m}^3$$

同様に前述したフィルダム 5 事例において、室内配合試験により得られた式(1)に相当する $(q_w)_{IS10} \sim \Delta M_c$ 関係と簡易設計法を用いて求めた ΔM_c^* と、詳細設計法を用いて求めた ΔM_c^* を比較したものを表 1 に示す。表から、簡略設計の結果は、詳細設計による場合に比較して、大小どちらにもばらつき平均的な値となっていること、 $(q_w)_{CC}^*$ では最大 2 割程度、 $(q_w)_{IS}^*$ では最大 3 割程度、 ΔM_c^* では最大 2 割程度の相違があることがわかる。正確な設計数値は室内配合試験を実施することが基本ではあるが、この程度の相違のあることに留意して使用するのであれば、簡略設計法を使用する価値は十分にあると考えられる。

§5. おわりに

本稿は、砕・転圧盛土工法を費用対効果的に指針に規定された室内配合試験を実施しにくい小規模な堤体改修に適用する場合を対象に、室内配合試験を可能な限り省略できる簡略設計法を提案した。

簡略設計法は、砕・転圧盛土工法を採用して堤体改修を実施した 5 例のフィルダムで調べられた室内配合試験結果をもとに、砕・転圧土の $(c')_{CC7} \sim (q_w)_{CC7}$ 関係、初期固化土と砕・転圧土の強度変換式 $R_3 = (q_w)_{CC7} / (q_w)_{IS10}$ の平均的関係を導入したもので、詳細設計法による場合に比較して、 $(q_w)_{CC}^*$ では最大 2 割程度、 $(q_w)_{IS}^*$ では 3 割程度、 ΔM_c^* では最大 2 割程度の相違があることがわかった。正確な設計数値は室内配合試験を実施することが基本ではあるが、この程度の相違のあることに留意して使用するのであれば、簡略設計法を使用する価値は十分にあると考えられる。

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:フィルダム堤体改修用固化改良土の粘着力と一軸圧縮強さの関係, 第 61 回地盤工学シンポジウム, 2018.
4. 福島伸二, 北島 明, 谷 茂:固化改良底泥土(砕・転圧盛土工法)における砕・転圧土と初期固化土の強度変換法について, 第 15 回地盤工学会関東支部研究発表会 Geo-Kanto2018, pp.127-130, 2018.

ひとこと

砕・転圧盛土工法の簡易設計手法は適用範囲の拡大に不可欠なツールであるのと同様、ボーア、サンズ、マルテ、スアレスは 1985 年以來の日本一に不可欠なツールであるので、今オフの契約更改に期待したい。



北島 明