

ICT 施工を導入したロックフィルダムの施工管理方法の合理化に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 25

担当チーム：水工研究グループ（水工構造物）

研究担当者：榎村康史、佐藤弘行

【要旨】

近年、我が国の社会資本整備において、施工の効率化や精度の向上、品質管理の合理化等を目的に ICT 施工の積極的な導入が推進されている。一方で、最重要構造物の一つであるロックフィルダムは求められる品質レベルは他の一般的構造物より高いため、ICT 施工の導入による品質管理の合理化までには至っていない。品質管理を合理化するためには、ICT 施工導入による施工プロセス管理の確実性向上に加え、盛立材料の粒度や含水比のばらつきによる、密度、遮水性などの盛立品質のばらつきを把握した上で、検討する必要がある。

平成 25 年度は、品質管理データのばらつきを考慮した品質管理基準の検討として、強度のばらつきを考慮したすべり安全性の影響、および変形性のばらつきを考慮した堤体の沈下の影響についての検討を行った。そのうえで、ICT 施工を導入した場合のロックフィルダムの品質管理方法について品質管理データのばらつきを考慮した品質管理基準に関する提案を行った。

キーワード：フィルダム、ICT 施工、品質管理

1. はじめに

近年、我が国の社会資本整備において、施工の効率化や精度の向上、品質管理の合理化等を目的に ICT 施工の積極的な導入が推進されている。平成 20 年 7 月には「情報化施工推進戦略¹⁾」が策定され、ダム分野においても ICT 施工の導入が重要であると位置づけられている。河川土工および道路土工等では、ICT 施工を施工管理に導入した場合、まき出し厚、締固め回数等、施工プロセス管理の確実性を向上させることができることから、密度試験等、締固め後の現場試験を省略する方針へ転換しており²⁾、建設業界全体としては盛土の品質管理は合理化・省略化が進んできている。

一方で、大量の貯水を行う最重要構造物の一つであるロックフィルダムに要求される品質レベルは他の構造物よりも高い。また、盛立材料の密度のほか遮水性も品質管理対象としており、密度と遮水性ともに設計上の重要性は大きい。このような理由から、ロックフィルダムの品質管理において、転圧回数等の工法規定管理のみをもって従来の品質管理と置き換えることは容易に許容できるものではない。しかし、社会資本整備予算が縮小され、ダムの設計施工においても従来以上の合理化が求められている現状において、ICT を利用した施工管理の合理化は推進していかなければならない重要な課題である。

平成 25 年度は、品質管理データのばらつきを考慮した品質管理基準の検討として、強度のばらつきを考慮

したすべり安全性の影響、および変形性のばらつきを考慮した堤体の沈下の影響についての検討を行った。そのうえで、ICT 施工を導入した場合のロックフィルダムの品質管理方法について提案を行った。

参考文献

- 1) 情報化施工推進会議：情報化施工推進戦略，2008 年 7 月。
- 2) 国土交通省：TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領，2012 年 3 月。

2. 強度のばらつきの影響の検討

2.1 検討方法

2.1.1 解析モデル

解析モデルを図-2.1 に示す。堤高 100m のロックフィルダムを模擬しており、上流面勾配は 1:2.5、下流面勾配は 1:2.0 とロックフィルダムとして一般的な値を設定した。なお、簡単のため、ゾーン区分はしておらず、貯水はモデル化していない。図-2.1 の解析モデルについて、図-2.2(a) から (e) に示すように、格子状の要素に分割し、各要素に内部摩擦角 ϕ を正規乱数として与え、震度法による円弧すべり解析のモンテカルロシミュレーションを行った。斜面の信頼性設計等においては、図-2.2(a) から (e) に示したような安定解析において要素分割数をどのように設定すべきかは議論のあるところである。本検討においては、図-2.2(a) については密度等の強度に関する品質管理試験のデータ数が非常に少ないため、堤体全体の密度等の強度に関する物性値の平均値や標準偏差の推定精度が非常に

低いため、図-2.2(a)のように堤体全体として強度の平均値や標準偏差を考えざるを得ない場合を想定している。一方、図-2.2(e)については、密度等の強度に関する品質管理試験のデータ数が多いとともに、ICT施工が実施される程度の領域の密度や強度等の物性値の均質性が担保されている場合を想定している。

表-2.1 に解析条件を示す。粘着力 c はゼロとし、地震力として水平震度 $k=0.15$ を与えた。表-2.1 のとおり、 ϕ の標準偏差 σ の異なる 3 ケースについて検討を行った。各ケースについては、安定した統計量が得られるよう、シミュレーションの回数は 1 万回とした。

表-2.1 解析条件

Case#	湿潤単位体積重量(kN/m ³)	内部摩擦角(度)	
		平均値 μ	標準偏差 σ
Case1	21.8	45	0.7
Case2			1.0
Case3			1.3

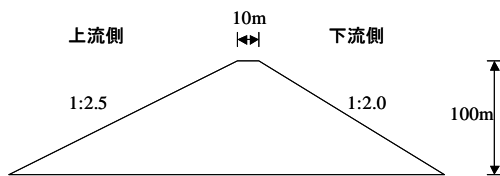


図-2.1 解析モデル

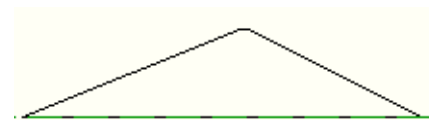


図-2.2(a) 分割なし

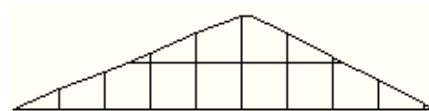


図-2.2(b) 50m の格子に分割

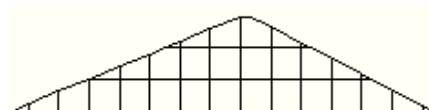


図-2.2(c) 33m の格子に分割



図-2.2(d) 20m の格子に分割

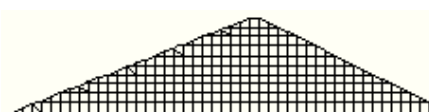
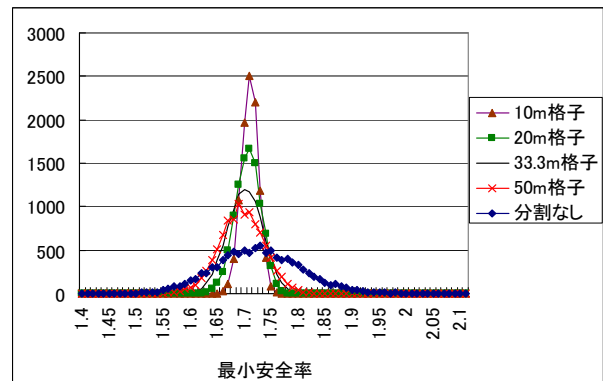


図-2.2(e) 10m の格子に分割

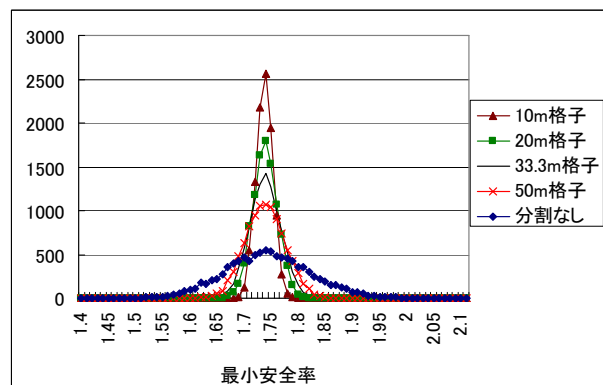
2.2 解析結果

2.2.1 円弧の堤体表面からの最低深度の影響

一般的に、ロックフィルダムのロック材は粘着力 $c=0$ として円弧すべり解析を行うため、最小安全率の円弧は堤体表面を切る円弧となり、堤体内部の物性のばらつきの影響を適切に評価することができない。そこでここでは、すべり円弧の堤体表面からの最低深度を設定した時の最小安全率の分布を検討した。表-2.1 の Case3 の条件について、図-2.3(a) に円弧の深度が堤体表面からの 10m 以上に設定した場合の最小安全率の頻度分布、図-2.3(b) に円弧の深度が堤体表面からの 20m 以上に設定した場合の最小安全率の頻度分布を示す。どちらの場合についても、最小安全率の分布は概ね正規分布となる。地表面からの深度を 10m 以上にした時には、格子分割の大きさによって最小安全率の平均値（ピーク値）に若干差が見られるが、地表面からの深度を 20m 以上にした時には、格子の大きさによらず最小安全率の平均値はほぼ一定値になる。また、図-2.4 に 10m 格子の時の最小安全率の円弧を示すが、堤体表面からの最低深度が 20m の方が、半径の小さい円弧が多いことがわかる。

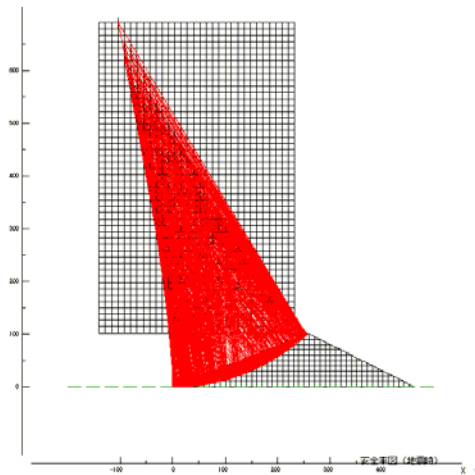


(a) 堤体表面からの深度 10m 以上に設定した場合

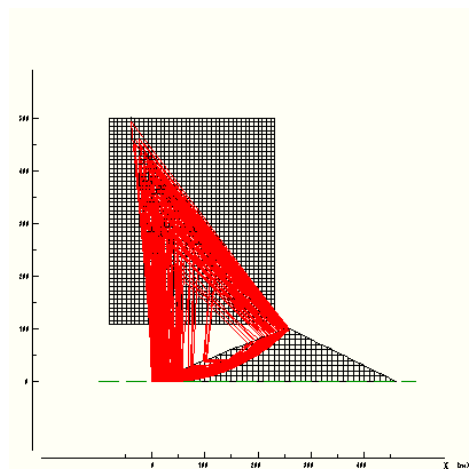


(b) 堤体表面からの深度 20m 以上に設定した場合

図-2.3 堤体表面からの最低深度を変化させた時の最小安全率の分布



(a) 堤体表面からの深度 10m 以上の場合



(b) 堤体表面からの深度 20m 以上の場合

図-2.4 最小安全率の円弧 (1000 回のケース)

表-2.2(a) 最小安全率の平均値

	分割なし	50m格子	33.3m格子	20m格子	10m格子
Case1	1.738	1.738	1.738	1.737	1.737
Case2	1.739	1.737	1.737	1.737	1.736
Case3	1.740	1.734	1.734	1.735	1.733

表-2.2(b) 最小安全率の標準偏差

	分割なし	50m格子	33.3m格子	20m格子	10m格子
Case1	0.042	0.019	0.016	0.012	0.009
Case2	0.061	0.028	0.022	0.018	0.012
(Case2/Case1)	(1.439)	(1.439)	(1.431)	(1.419)	(1.398)
Case3	0.079	0.037	0.029	0.023	0.015
(Case3/Case1)	(1.890)	(1.890)	(1.869)	(1.839)	(1.780)

2.3 強度のばらつきの影響に関するまとめと ICT 施工を導入したロックフィルダムの品質管理についてすべり安定性の観点からの提案

本検討では、円弧すべりによる安定解析において、強度のばらつきがすべり安全率に及ぼす影響の検討を行った。

以上の検討内容および昨年度までの研究成果をふまえて、ICT 施工を導入したロックフィルダムの品質管理について、すべり安定性の観点から以下の品質管理基準に関する提案を行う。

- ・本検討における強度のばらつきを考慮したすべり安定解析の結果、ロックフィルダムの築堤材料の強度の平均値が同じであれば、基本的にはすべり安全率の平均値はばらつきに関わらず同じ値になると考えられる。しかし、これは、強度の平均値を精度よく評価可能な場合に言えることであり、品質管理試験数が不十分であったり、施工途中で材料特性が大きく異なる材料の変更があった場合等には、強度の平均値の推定精度が悪くなると考えられるため、上記のような結果を適用することはできないと考えられる。堤体の強度を精度よく把握するためには、昨年度までに得られた成果で示したように、近年技術開発が進んでいる ICT 技術を活用し、盛立前の材料・粒度・含水比などの管理を十分に行ったうえで、盛立材料を堤体のどこに使用したかトレースすることが可能になるようにし、GPS による転圧回数の管理等の ICT 施工を行うことにより、堤体の材料・盛立条件・転圧回数等のデータのトレーサビリティを確保することで、締固め後の強度に関わる物性値のばらつきを小さくすることが重要であると考えられる。
- ・図-2.3 や表-2.2(b)に示したように、分割数が多いほど、すべり安全率のばらつきは小さくなっている。分割数については、実際のロックフィルダムについて考えると、品質管理試験の試験数が対応するもの

2.2.2 内部摩擦角の標準偏差と格子サイズの影響

堤体表面からの深度を 20m 以上とした時の、最小安全率の平均値と標準偏差を表-2.2(a)、(b)に示す。

2.2.1 の結果のとおり、安全率の平均値は、格子の大きさや ϕ の標準偏差によらずほぼ一定値となっているが、当然のことながら最小安全率の標準偏差は格子の大きさや ϕ の標準偏差に依存しており、 ϕ の標準偏差が小さく、あるいは格子の大きさが小さければ、最小安全率の標準偏差は小さくなる。表-2.2(b)の標準偏差を見ると、最小安全率の標準偏差の比率 (Case2/Case1、Case3/Case1) は、格子の大きさによらず、 ϕ の標準偏差の比率 (1.0/0.7=1.429、1.3/0.7=1.857) にほぼ近い値となっており、他の解析条件が等しければ、 ϕ のばらつきが変化した時の最小安全率のばらつきの変化は、 ϕ のばらつきの変化の比率から推定できるものと考えられる。

と考えられる。つまり、盛立における品質管理試験の頻度が多いほど、盛土内の物性の空間的な分布をよく把握していることになるため、分割数を細かく設定することが可能になると考えられる。現在のロックフィルダムの密度の品質管理試験で使用されている砂置換法あるいは水置換法による原位置密度試験の頻度をこれまでよりも飛躍的に多くすることは難しい点もあると考えられるが、RI 密度計等、ICT により開発された技術を積極的に補助的に活用することにより、密度や強度等の盛土の強度に関わる物性値の空間的な把握をきめ細かく実施することが望まれると考えられる。そのうえで、設計におけるすべり安定解析あるいは耐震性能照査におけるすべり変形解析において、想定すべり線沿いに強度の弱い部分が連続していないかなどについて検討を行うことが望まれると考えられる。

- 近年、大規模地震に対するロックフィルダムの耐震性能照査が行われており、動的解析から築堤材料のピーク強度を用いて Newmark 法等により地震時のすべり変形量を算出する方法がよく用いられている。一方、近年の研究により、地震時のすべり変形については、ひずみ軟化や地震による繰返し载荷による強度低下を考慮したうえで、地震時のすべり変形量を算出する必要性が指摘されている。ロックフィルダムの築堤材料に関しては、ひずみ軟化あるいは繰返し载荷によりどの程度強度が低下するか等、今後検討すべき項目はあるものの、一般的には締固めがよいほどピーク強度および残留強度は大きくなると考えられる。このような、現在研究途上の項目について、将来的に検討すべき必要が出てくるものもあると考えられ、ICT 施工により得られたデータを将来にわたって有効に活用可能なような形にすることが望まれる。
- 浅いすべりの場合には、局所的な強度物性によりすべり安全率が決まると考えられることから、堤体表層付近の堤体材料については、ICT 施工を活用して、強度に関わる密度等の物性の平均値を大きくかつばらつきが少なくなるように品質管理を行うことが望ましいと考えられる。一方、表層付近の低拘束圧状態の内部摩擦角は、高拘束圧状態の内部摩擦角よりも大きくなることが知られており、低拘束圧状態の強度をふまえたうえで、ICT 施工の品質管理に活用する手法の開発が望まれる。

3. 変形性のばらつきの影響の検討

ロックフィルダムの設計において、変形性については、変形量の許容値等についての明確な規定はないが、施工時の沈下に対しては施工余盛、建設後の沈下に対しては設計余盛として、設計で考慮している。施工余盛および設計余盛は、既往のロックフィルダムの沈下例等から経験的に設定する方法とあわせて、近年では築堤材料の変形性を考慮した有限要素法による変形解析から施工余盛と設計余盛を設定している例も増えてきている。

2章で検討した強度については、前述したとおり、すべり安定解析は強度の平均値問題であったが、本章において検討する変形性については、後述するように変形性の平均値が同じでもばらつきが大きい方が、変形量が大きくなるのが一次元変形理論で示すことができる。

そこでここでは、一次元鉛直方向の変形（沈下）問題において、変形性のばらつき等が変形量（沈下量）に及ぼす影響の検討を行い、ICT 施工を導入した場合のロックフィルダムの施工管理方法について、変形性の観点からの検討を行った。

3.1 検討方法

3.1.1 一次元の鉛直方向の変形問題理論的考察

図-3.1 に示す一次元の鉛直方向の変形（沈下）モデルを考える。図-3.1 より、鉛直方向の応力 σ は式 (3.1) で表わされる。

$$\sigma = P/a \quad (3.1)$$

ここで、 σ ：鉛直方向の応力、 P ：図-3.1 のモデル上下端の载荷重（単位奥行当り）、 a ：図-3.1 のモデルの幅、である。各要素に作用する鉛直方向の応力 σ は一定と仮定すると図-3.1 の鉛直方向の変位量 d について式 (3.2) が得られる。

$$d = \sum_{i=1}^n d_i = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\sigma}{E_i} \right) \times \left(\frac{b}{n} \right) \right] \quad (3.2)$$

ここで、 d ：図-3.1 のモデル全体の鉛直方向の変形量（沈下量）、 d_i ：各要素の鉛直方向の変形量（沈下量）、 E_i ：各要素の変形係数、 b ：図-3.1 のモデルの高さ、 n ：要素数、である。また、鉛直方向のひずみについては、式 (3.3) となる。

$$\varepsilon = d/b = \sigma/E \quad (3.3)$$

ここで、 ε ：図-3.1 のモデル全体の鉛直方向のひずみ、 E ：図-3.1 モデル全体の変形係数、である。

式 (3.2) と式 (3.3) から、次の式 (3.4) が得られる。

$$\varepsilon = \frac{d}{b} = \frac{\sigma}{E} = \sigma \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \right) \quad (3.4)$$

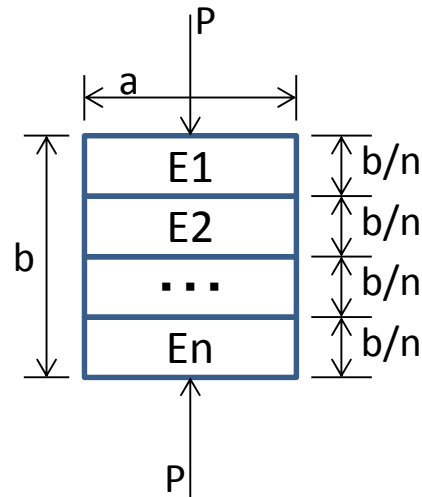


図-3.1 一次元鉛直方向変形モデル

式 (3.4) から、図-3.1 モデル全体の変形係数 E について、以下の式 (3.5) が得られる。

$$E = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i}} \leq \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n}、等号は E_1 = \dots = E_n \quad (3.5)$$

ここで、数学的に、(相加平均) \geq (相乗平均) \geq (調和平均)、の関係式を用いている。式 (3.5) は、(調和平均) \leq (相加平均) の関係になっている。

式 (3.5) から、図-3.1 の単純な一次元鉛直方向の変形モデルにおいては、図-3.1 のモデル全体の変形係数は、図-3.1 の各要素の変形係数の単純平均よりも、必ず小さくなる。言い換えれば、図-3.1 の単純な一次元鉛直方向の変形モデルにおいては、図-3.1 のモデル全体の変形量（沈下量）は、図-3.1 の各要素の変形係数の単純平均から求めた変形量（沈下量）よりも、必ず大きくなる。この点が、2章で検討した強度についてのすべり安定性はすべり面の平均値問題であったことと、本章における変形性については単純な平均値問題ではないことの大きな違いである。

ここでは、図-3.1 の単純な一次元鉛直方向の変形モデルにおいて、各要素の変形係数のばらつきや要素分割数が変形量（沈下量）に及ぼす影響の検討を行い、ICT 施工を導入した場合のロックフィルダムの施工管

理方法について、変形性の観点からの検討を行った。

3.1.2 検討条件

強度と同様に、一般的に、同一の盛立材料については、含水比や粒度等の条件が同一の場合、密度が大きい方が変形係数は大きくなる、つまり変形性は小さくなると考えられている。

図-3.2 に、既設ロックフィルダムのロック材の室内試験から得られた、拘束圧と変形係数の関係を示す。一般的に、図-3.2 に示すように、ロックフィルダムの築堤材料の変形性については、拘束圧が大きくなるほど変形係数は大きくなるものと考えられている。ここでは、簡単のため、図-3.2 より、変形係数の平均値は 1000kgf/cm^2 とし、表-3.1 のように変形係数のばらつきは3種類設定した。なお、変形係数のばらつきは、正規分布と仮定して乱数を発生させて変形量（沈下量）を算出した。

一般的に、ロック材の密度は 2.0g/cm^3 程度であるため、本検討では、土被り 50m 程度の深度にあるロックゾーンを想定し、上載荷重は 10kgf/cm^2 とし、図-3.1 のモデルの高さは 10m として、変形係数のばらつきによる変形量（沈下量）を算出した。

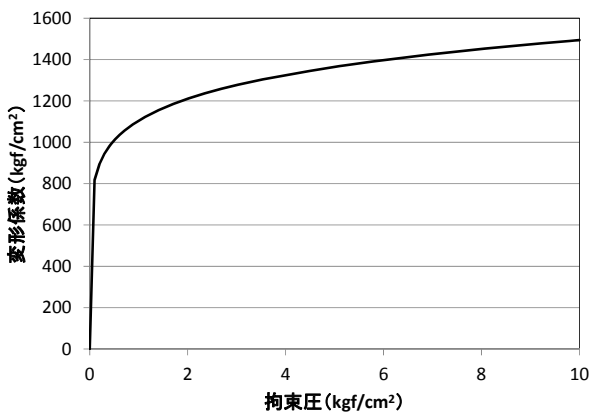


図-3.2 既設ロックフィルダムのロック材の変形係数の一例

表-3.1 変形係数の平均値および標準偏差

	変形係数(kgf/cm^2)	
	平均値	標準偏差
case1	1000	100
case2		200
case3		300

3.2 検討結果

図-3.3 から図-3.5 に、表-3.1 に示した各ケースについて、

それぞれ 40 回の計算結果を示す。なお、図-3.3 から図-3.5 において、特に要素数が少ない場合に变形量が赤い実線よりも小さいデータがある。これは、変形係数のばらつきを乱数で発生させているために、モデル全体の変形係数を小さく評価していることが原因である。

図-3.3 から図-3.5 を見ると、前述の乱数発生上の問題による変形量の若干の過小評価結果を除き、3.1.1 の一次元変形理論において考察したとおり、変形係数にばらつきがある場合の変形量は、変形係数の単純平均から算出した変形量よりも大きくなっている。また、標準偏差が大きくなると変形量は大きくなる。図-3.3 から図-3.5 を見ると、変形量のばらつきは赤い実線（変形係数の単純平均から算出した変形量）から黒い実線（変形係数の平均値 $-1 \times$ 標準偏差から算出した変形量）の間に概ね分布しているが、変形係数のばらつきが大きくなるほど、変形量の分布幅は広くなる傾向にある。

図-3.3 から図-3.5 を見ると、要素数が少ないと変形量のばらつきが大きく、要素数が 1000 になると変形量の結果は収束する傾向にある。要素数 1000 の時の変形量を見ると、図-3.5 の標準偏差が 300kgf/cm^2 の場合、変形量は 0.11m から 0.12m の間に分布しており、変形係数にばらつきがない場合の沈下量（赤い実線） 0.1m よりも 10% から 20% 程度大きくなっている。

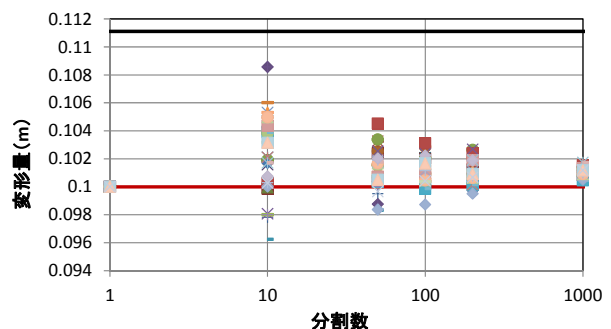


図-3.3 標準偏差 100kgf/cm^2 の場合 (case1) の分割数と変形量 (40 ケース)

※黒実線は、変形係数が一定値 = (平均値) $-1 \times$ (標準偏差)、の沈下量

※赤実線は、変形係数が一定値 = (平均値)、の沈下量

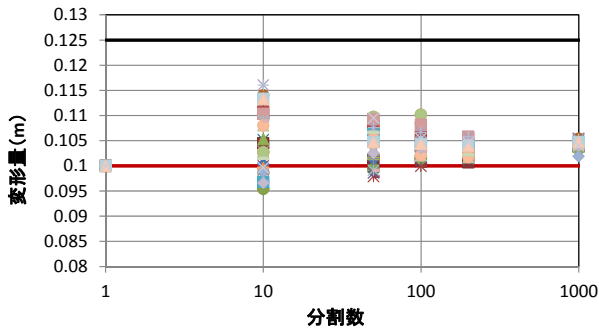


図-3.4 標準偏差 200kgf/cm²の場合 (case2) の分割数と変形量 (40 ケース)

※黒実線は、変形係数が一定値 = (平均値) - 1 × (標準偏差)、の沈下量

※赤実線は、変形係数が一定値 = (平均値)、の沈下量

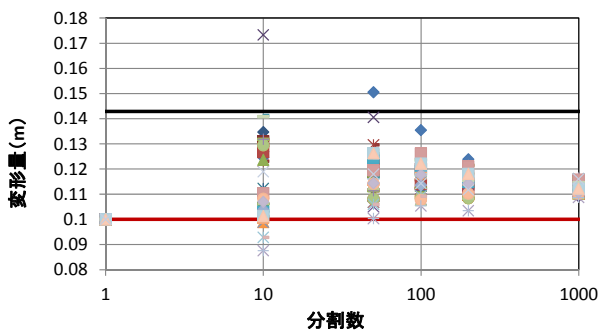


図-3.5 標準偏差 300kgf/cm²の場合 (case3) の分割数と変形量 (40 ケース)

※黒実線は、変形係数が一定値 = (平均値) - 1 × (標準偏差)、の沈下量

※赤実線は、変形係数が一定値 = (平均値)、の沈下量

3.3 変形性のばらつきの影響に関するまとめと ICT 施工を導入したロックフィルダムの品質管理について変形性の観点からの提案

本検討においては、一次元鉛直方向変形モデルにより、変形性のばらつきが堤体の変形量 (沈下量) に及ぼす影響の検討を行った。本検討においては簡単のため一次元モデルにより検討を行ったが、岩盤の二次元有限要素法による検討結果においても、変形性の平均値が同じでもばらつきが大きい方が変形量が大きくなることが明らかとなっている¹⁾。そのため、二次元あるいは三次元のロックフィルダムの堤体をモデルにした変形解析においても、ロックフィルダムの堤体の変形性の平均値が同じでもばらつきが大きい方が、堤体の変形量は大きくなるものと推測される。

また、近年の大規模地震によるロックフィルダムの

被害形態では、すべりの発生は比較的少なく、揺すり込みによる比較的大きな沈下が発生しているケースがいくつか見られる。そのため、現在試行中の大規模地震に対するロックフィルダムの耐震性能照査において、揺すり込み沈下の評価の重要性が認識されるようになってきているが、ロックフィルダムの築堤材料を用いた動的試験結果は少ないのが現状である。

以上の検討内容および昨年度までの研究成果をふまえて、ICT 施工を導入したロックフィルダムの品質管理について、変形性の観点から以下の品質管理基準に関する提案を行う。

- 本検討における一次元モデルによる変形性のばらつきの結果、および既往の研究による二次元有限要素法によるダム基礎岩盤の変形性のばらつきを考慮した変形量の検討結果から、ロックフィルダムの築堤材料の変形性の平均値が同じであっても、変形性のばらつきが大きければ堤体の変形量は大きくなるものと考えられる。施工時および運用時における堤体の変形量、さらには大規模地震による揺すり込み沈下量を小さくするためには、昨年度までに得られた成果で示したように、近年技術開発が進んでいる ICT 技術を活用し、盛立前の材料・粒度・含水比などの管理を十分に行ったうえで、GPS による転圧回数等の ICT 施工を行い、堤体材料の締固め後の変形性の物性値の平均値を大きくするとともに、変形性の物性値のばらつきを小さくすることが重要であると考えられる。

- 図-3.3 から図-3.5 に示したように、分割数が多いほど、変形量のばらつきは小さくなっている。分割数については、実際のロックフィルダムについて考えると、品質管理試験の試験数が対応するものと考えられる。つまり、盛立における品質管理試験の頻度が多いほど、盛土内の物性の空間的な分布をよく把握していることになるため、分割数を細かく設定することが可能になると考えられる。この点は、前章のすべり安定解析における要素の分割数と同様と考えられる。現在のロックフィルダムの密度の品質管理試験で使用されている砂置換法あるいは水置換法による原位置密度試験の頻度をこれまでよりも飛躍的に多くすることは難しい点もあると考えられるが、RI 密度計や FWD 等、ICT により開発された技術を積極的に補助的に活用することにより、密度や変形性等の盛土の変形性に関わる物性値の空間的な把握をきめ細かく実施することが望まれる。

参考文献

- 1) 山口嘉一、赤松利之：確率論的変形解析によるフィルダム基礎設計の基礎的研究、土木技術資料、第 3869 号、平成 14 年 6 月。

RESEARCH ON RATIONALIZATION OF CONSTRUCTION MANAGEMENT OF ROCKFILL DAMS USING ICT CONSTRUCTION

Abstract: In the public works in Japan, introduction of ICT construction is promoted for the purpose of the increase in efficiency of construction, improvement in accuracy and rationalization of quality control. Since the quality level required for a rockfill dam is higher than that of other earth structures, rationalizations of quality control using ICT construction have not been achieved yet. Since budget for public works including dams has been reduced because of the financial situation, the rationalization using ICT is an important issue which must be promoted. The certainty of construction process management can be improved using ICT construction. In addition, if we control grain size distribution and water content of embankment materials more appropriately using ICT, we can propose a new quality control method which can reduce the frequency of in-situ tests.

In fiscal year 2013, we investigated the effects of the variability of strength on the safety factors of stability analysis. We also investigated the effects of the variability of deformation coefficients on the deformation. Based on the results, we suggested a quality control method of rockfill dams when ICT construction methods are introduced.

Key words: rockfill dam, ICT construction, rationalization of quality control