

非線形変形特性のばらつきを考慮したダム基礎設計（その2）

独立行政法人土木研究所 正会員 山口嘉一
独立行政法人土木研究所 正会員 赤松利之

1. はじめに

軟岩をフィルダムの基礎とした場合、底設監査廊の設計や基礎変形に伴う堤体遮水部の安全性検討のために、堤体築造による基礎の変形量やひずみを設計段階で精度良く予測することが重要となる。基礎の変形性を評価するうえで、非線形変形特性を考慮する場合、決定論的対応における設計値決定の際には、試験結果として得られる非線形パラメータのばらつき分布を考慮した工学的判断が求められている。

本研究では、フィルダム軟岩基礎の非線形パラメータのばらつきおよびその程度が堤体築造による基礎表面の沈下量や伸び方向のひずみの評価に与える影響度合について確率論的手法により検討を行い、所定の信頼性を確保した決定論的手法による設計を前提として、非線形パラメータの適切な設計値の決定方法について考察を行った。

2. 解析モデルと解析条件

解析モデルを図-1、解析条件を表-1に示す。モデルは、左右岸対称の谷形状を想定したうえで、ダム縦断面の半分を対象とした。

本解析では、軟岩を非線形弾性体とみなし、ダム軸方向の2次元 FEM 非線形変形解析を行った。軟岩の非線形変形特性については、既往の研究成果¹⁾から、(1)～(3)式とした。

$$E_{\max} = a \cdot p^b \quad \dots\dots(1) \quad \frac{E_{\tan}}{E_{\max}} = 1 - \left(\frac{q}{q_{\max}} \right)^{\beta} \quad \dots\dots(2)$$

$$q_{\max} = 2 \left(\frac{c \cdot \cos \phi + \sigma_3 \cdot \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 a 、 b 、 β は定数、 $E_{\max}$ は初期接線弾性係数、 $E_{\tan}$ は接線弾性係数、 p' は平均主応力、 $q/q_{\max}$ は偏差応力レベル、 σ_3 は最小主応力、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角、 q は偏差応力、 $q_{\max}$ は最大偏差応力。

3. 解析方法

本解析では、堤体築造による基礎岩盤表面の沈下量や伸び方向のひずみの評価を行ううえで、感度の高いパラメータ²⁾ a 、 β を確率変数とし、ばらつきを模擬するのに乱数を用いた。

また、確率密度関数は正規分布とし、それぞれのパラメータの平均値および変動係数（標準偏差 σ / 平均値 μ ）は、軟岩を対象とした三軸試験結果から整理した平均的な値²⁾として表-2に示すとおりとした。

次に、乱数により発生させたパラメータ（非線形変形特性）をモデルの各要素に割り付け、堤体荷重を基礎岩盤表面に作用させて解析し、基礎岩盤表面の沈下量および伸び方向のひずみを抽出した。また、解析回数については各ケース 100 reals（乱数により発生させた変形係数をモデルの要素に割り付ける 1 回の作業を 1 real と呼ぶ）実施した。

4. 解析結果と考察

図-2は、前述の条件下で、基礎岩盤の非線形変形特性のばらつきを考慮した非線形変形解析から得られた、堤体築造による基礎岩盤表面の沈下量分布と伸び方向のひずみ分布の一例（CASE 2）を示したものである。ここで、沈下量は基礎岩盤表面を形成する節点の沈下量で、ひずみはこれらの節点のうち隣接する 2 点間の

表-1 解析条件

ポアソン比 ν	強度定数		引張強度 σ_t (MPa)	初期応力の状態 等方
	c (MPa)	ϕ (°)		
0.3	0.5	35	0.1	

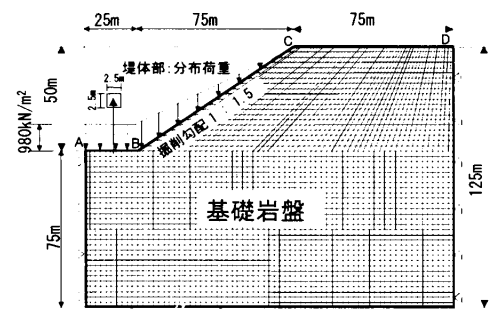


図-1 解析モデル

表-2 解析ケース

解析ケース	非線形パラメータ				
	a		b	β	
	平均値(MPa)	変動係数		平均値	変動係数
CASE 1	1000	0.2	0.4	0.4	0.0
CASE 2	1000	0.2	0.4	0.4	0.0
CASE 3	1000	0.4	0.4	0.4	0.0
CASE 4	1000	0.0	0.4	0.4	0.2
CASE 5	1000	0.0	0.4	0.4	0.3
CASE 6	1000	0.0	0.4	0.4	0.4

【キーワード】 フィルダム、軟岩、ばらつき、確率論的手法、非線形変形特性

【連絡先】 〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6 Tel.0298-79-6781 Fax.0298-79-6737

伸び方向ひずみとして整理している。
また、図-3は、確率論的手法によって得られた沈下量およびひずみの値を、 α 、 β の平均値 μ を与えた決定論的手法の結果で正規化した値の分布の一例（CASE 2）を描いたものであり、両図中の実および点線は、決定論的手法による結果を示している。次に、各ケースにおいて、 α 、 β の平均値を用いた決定論的手法の結果で正規化した δ/δ_μ 、 $\varepsilon/\varepsilon_\mu$ について非超過率を求め、式(4)、(5)により各非超過率における決定論的手法に用いる $\mu - \alpha\sigma$ の係数 α を算出した。非超過率と α の関係を図-4に示す。また、非超過率 95%を対象とした場合の変動係数と α_δ 、 α_ε の関係を図-5に示す。なお、図中には、それぞれの α_δ 、 α_ε を用いた場合の設計値（ $\mu - \alpha\sigma$ ）を示している。

$$\alpha_\delta = (1 - \frac{\delta_\mu}{\delta}) \times \frac{\mu}{\sigma} \cdots \cdots (4) \quad \alpha_\varepsilon = (1 - \frac{\varepsilon_\mu}{\varepsilon}) \times \frac{\mu}{\sigma} \cdots \cdots (5)$$

ここに、沈下量より算出した係数 α を α_δ 、ひずみより算出した係数 α を α_ε とする。

また、図中には、設計上問題となる絶対値の大きい箇所に着目した結果も示している。沈下量についてはモデル左端、ひずみについては最大箇所およびその両測点のデータを抽出し整理したものである。

図より、確率変数を係数 α あるいはべき乗の β とした両者の結果を直接比較できるかどうかの判断は難しいが、同じ変動係数で比較した場合、確率変数を α としたCASE 1～3の方が確率変数を β としたCASE 4～6に比べて α は大きくなる傾向にある。沈下量に関して見ると、全データ評価、最大値評価ともに傾向は同じで、変動係数が大きくなると、 α_δ も大きくなる傾向にあり、非超過率 95%を対象とした場合、いずれのケースについても $\alpha_\delta=0.2\sim0.4$ の範囲で変化している。一方、ひずみに関して見ると、全データ評価に比べて最大箇所およびその両測点評価による α_ε は全体的に小さくなる傾向にある。また、確率変数を α とした場合の全データ評価については、 α_ε は最も大きく、他の α の傾向と逆で、変動係数が大きくなると、結果として得られる α_ε は小さくなる。これは、 $\mu - \alpha\sigma > 0$ の条件下における α の上限値が、それぞれ、 $\sigma/\mu=0.2$ の場合 5.0、 $\sigma/\mu=0.3$ の場合 3.3、 $\sigma/\mu=0.4$ の場合 2.5 であることから、当該ケースのような α 値が大きい場合に、前述の傾向が生じることになるものと考えられる。また、当該ケースの場合、前述したように、 α_ε の傾向は他の α と異なるが、この α_ε を用いて算出した、非超過率 95%を対象とした場合の設計値に関しては、図-5中に示すとおり、他の α の結果と同様、変動係数が大きくなると、設計値は小さくなる傾向にある。

参考文献

- 1) 山口嘉一，川崎将生，岡部 登：フィルダム軟岩基礎の変形性評価法の高精度化，建設省土木研究所資料，No.3750，2000。
- 2) 山口嘉一，赤松利之：フィルダム軟岩基礎の非線形変形特性のばらつきを考慮したダム基礎設計，第 11 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，2002。

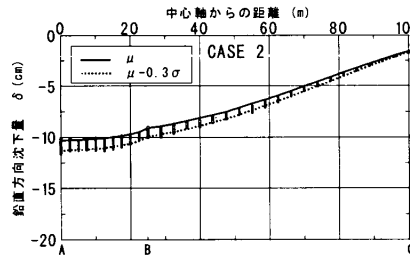


図-2(a) 沈下量分布(CASE2)

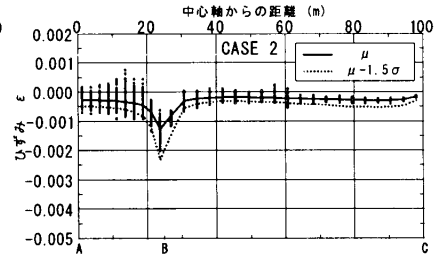


図-2(b) ひずみ分布(CASE2)

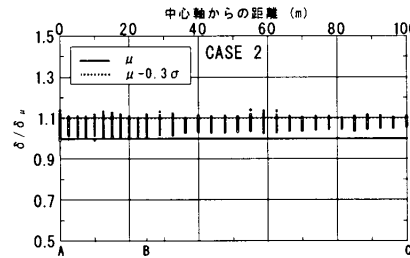


図-3(a) δ/δ_μ 分布(CASE2)

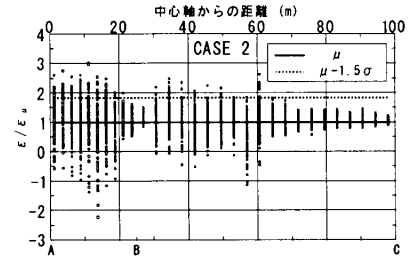


図-3(b) $\varepsilon/\varepsilon_\mu$ 分布(CASE2)

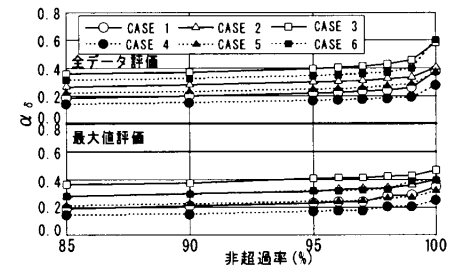


図-4(a) 非超過率と α_δ の関係(沈下量)

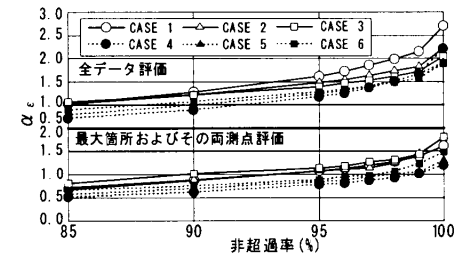


図-4(b) 非超過率と α_ε の関係(ひずみ)

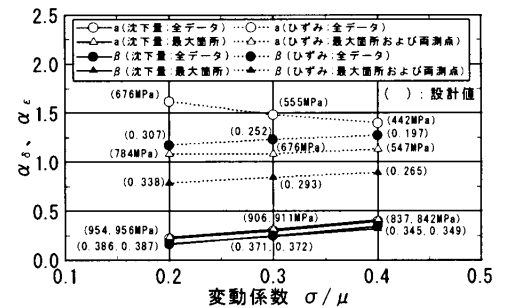


図-5 変動係数と α_δ 、 α_ε の関係(非超過率 95%)