

変形性のばらつきを考慮したダム基礎設計

DAM FOUNDATION DESIGN CONSIDERING SCATTERING OF ITS DEFORMABILITY

山口嘉一*・赤松利之**

Yoshikazu YAMAGUCHI and Toshiyuki AKAMATSU

Because embankment dams are often constructed on soft rock foundations, it is important to precisely predict deformation of the foundations due to the fill placement in the design stage. For the accurate evaluation of settlement and strain of rock foundation surface during the construction, the influence of the scattering of the deformability of foundations on the deformation behavior should be investigated.

In this paper, the evaluation method of settlement and strain of rock foundation surface during the construction was studied with the statistic method considering the scattering of the deformability of foundation. Based on the analytical results, the foundation design with the deterministic method for dam foundation was enthusiastically discussed.

Key Words : scattering, deformability, statistic method, dam, soft rock

1. まえがき

ダムや橋梁基礎などの大型構造物を建設する場合、基礎岩盤の変形に伴う構造物の安全性を検討する必要がある。ダムに関して見ると、フィルダムは堤体の基礎変形への追従性の良さから、コンクリートダムの基礎より相対的に軟質な岩盤、いわゆる軟岩を基礎とすることが多い。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精度良く予測する必要がある。変形解析の入力物性値となる変形係数は、平板載荷試験や孔内載荷試験などの原位置試験により評価される。しかし、変形係数は、岩種・岩級の同じ岩盤であってもばらつきをもって得られるが、現状においては確定論的対応における設計値を定める方法が確立されていないため、変形係数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、モデルダムに対して基礎軟岩の変形係数のばらつき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を確率論的な手法により検討した。この検討結果を基に、確定論的手法による設計を前提として、変形係数のばらつき分布に応じた適切な変形係数の設計値の決定方法について考察した。

2. 解析モデルと解析条件

本解析では、基礎岩盤が弾性体として挙動するものと仮定し、有限要素法による2次元弾性応力変形解析コードを用いた。解析モデルの諸元は、表-1に示すとおりである。モデルダムの堤高およびアバットメント部の掘削勾配は、軟岩を基礎とするフィルダムの平均的な値として、それぞれ50m、1:1.5とした¹⁾。また、変形係数の確率密度関数を設定する上で用いる平均 μ は、軟岩のうちフィルダム基礎とした場合に変形に関する検討が必要になる軟岩を想定して100 MPaとし²⁾、ポアソン比 ν は、軟岩に対する基礎の変形解析で一般的に用いられている0.3とした。解析モデルとしては、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。解析モデルの有限要素メッシュ(要素数3300、節点数3421)は図-1に示すとおりである。解析は平面ひずみ状態で行った。境界条件としては、左右端の境界は水平方向の変位を固定し、底面は固定境界とした。なお、ダム堤体部はモデル化せず、堤体荷重を基礎岩盤表面に分布荷重として与えて解析した。

* 正会員 工博 建設省土木研究所

** 正会員 工修 建設省土木研究所

表-1 解析モデルの諸元

堤高	50m
掘削勾配	1:1.5
堤体材料の単位体積重量	19.6 kN/m ³
基礎岩盤の平均変形係数	100 MPa
基礎岩盤のポアソン比	0.3

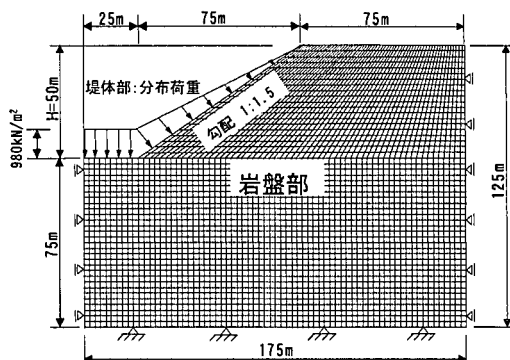


図-1 解析モデルの有限要素メッシュ

3. 解析方法

本解析では、堤体築造による基礎岩盤表面の変形挙動に大きく影響する要因の一つである変形係数を確率変数として、変形係数のばらつきを模擬するのに乱数を用いた。検討に用いた確率密度関数としては、図-2に示す7

種類とした。CASE1～5は、ばらつきの程度を示す変動係数(標準偏差 σ /平均値 μ)を0.1～0.7の間で5種類に変化させた正規分布、CASE6は変動係数を0.3とした一様分布、CASE7は対数目盛上での変動係数を0.3とした対数正規分布とした。確率密度関数に基づく乱数により発生させた変形係数が0以下になる場合は、0.1 MPaとした。また、それぞれの図には確率密度関数を実線で、1回の解析のために発生させた3300要素の頻度分布を示している。頻度分布は多少のばらつきが見られるが、理論値に近い分布を示している。

次に、乱数により発生させた変形係数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、解析結果について統計的な処理ができるように、変形係数の割り付け作業を各ケース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、100 realsの解析から得た沈下量およびひずみを統計的に処理した。なお、統計処理を行うに際しての解析回数100の妥当性については、別途確認している。また、100 realsの330,000の変形係数の頻度分布については、紙面の都合上割愛したが、1 realに比べ極めてなめらかな分布である。このようにして得られる確率論的手法の結果と、変形係数のばらつきを考慮せず、変形係数として $\mu - \alpha \sigma$ (α は係数)を用いた確定論的手法の結果を比較し、その検討結果を基に確定論的手法により設計を行う際の変形係数のばらつきに応じた適切な係数 α について検討した。

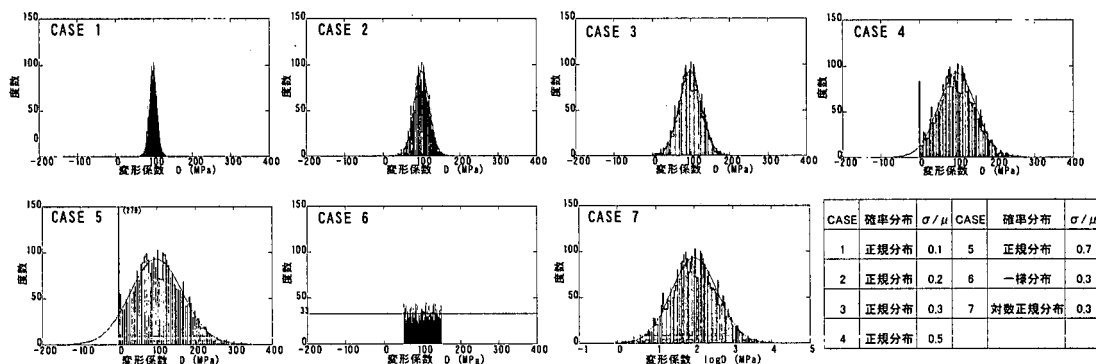


図-2 各解析ケースにおける1 realの変形係数の頻度分布

4. 解析結果と考察

図-3は前述の確率分布の条件下で、基礎軟岩の変形係数のばらつきを考慮した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点間の伸び方向ひずみとして整理している。図中では沈下量および伸び方向ひずみを負として整理している。また、図-4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変形係数の平均値 μ を与えた均質モデルを用いた確定論的手法の結果で正規化した値を描いたものである。両図中の実および点線は、それぞれ変形係数の μ および $\mu-0.3\sigma$ ないしは $\mu-\sigma$ を用いた確定論的手法による結果を示している。なお、結果については、紙面の都合上 CASE3（正規分布、 $\sigma/\mu=0.3$ ）のみを示している。また、図-4 に示す確定論的手法の結果で正規化した δ/δ_μ 、 $\varepsilon/\varepsilon_\mu$ を統計処理し、その平均値、標準偏差、変動係数を算出した結果を表-2 に示す。まず、確率分布を正規分布として、変動係数（実際には標準偏差）を変化させた CASE1～5 についてみると、確率論的手法による沈下量およびひずみの平均値は、変形係数の平均値を用いた確定論的手法による沈下量およびひずみより若干大きくなり、変動係数を大きくすればその差は大きくなる傾向にある。CASE4、5 においては、分布範囲が広くなり、その中で極端に小さく設定した変形係数の影響を受け、沈下量およびひずみともに大きな値が発生し、結果的に変動係数がかかなり大きくなる結果となった。この傾向は特にひずみにおいて顕著である。また、CASE3 の結果である図-3、4 を見ると、沈下量およびひずみとも堤体荷重が最も大きくなる河床部において相対的にばらつきが大きくなり、沈下量の場合、上位標高部になるに従いそのばらつきは小さくなる傾向にある。ま

表-2 解析結果

ケース#	沈下量より算出			ひずみより算出		
	$\mu(\delta/\delta_\mu)$	$\sigma(\delta/\delta_\mu)$	$\sigma(\delta/\delta_\mu)/\mu(\delta/\delta_\mu)$	$\mu(\varepsilon/\varepsilon_\mu)$	$\sigma(\varepsilon/\varepsilon_\mu)$	$\sigma(\varepsilon/\varepsilon_\mu)/\mu(\varepsilon/\varepsilon_\mu)$
CASE 1	1.004	0.004	0.004	1.002	0.078	0.078
CASE 2	1.019	0.009	0.009	1.010	0.166	0.165
CASE 3	1.046	0.016	0.015	1.023	0.281	0.275
CASE 4	1.147	0.062	0.054	1.101	1.425	1.294
CASE 5	1.341	0.916	0.683	4.168	44.078	10.574
CASE 6	1.044	0.015	0.014	1.025	0.282	0.275
CASE 7	0.932	0.081	0.087	0.713	1.461	2.050

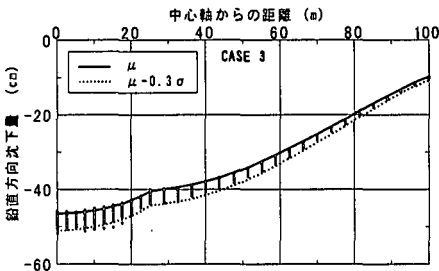


図-3(a) 沈下量分布 (CASE3)

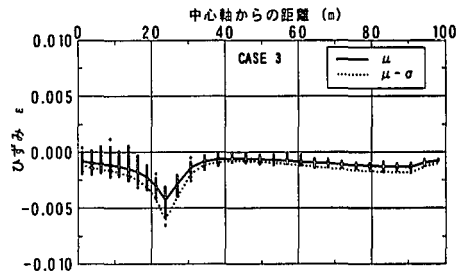


図-3(b) ひずみ分布 (CASE3)

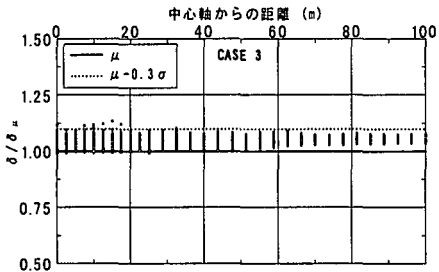


図-4(a) δ/δ_μ の分布 (CASE3)

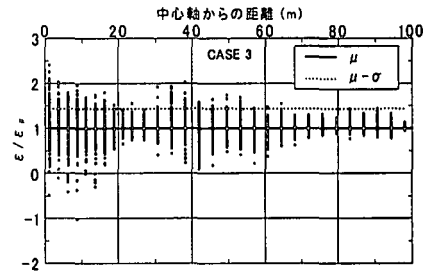


図-4(b) $\varepsilon/\varepsilon_\mu$ の分布 (CASE3)

た、確率論的手法による沈下量分布は、概ね μ と $\mu-0.3\sigma$ なる変形係数を用いて得られる確定論的手法による結果の範囲内に分布することがわかる。一方ひずみの場合、沈下量に比べてばらつきの幅は大きくなる傾向にあり、最大値発生地点（基礎隅角部）付近において、ばらつきが小さくなるものの、全体としては、沈下量と同じく上位標高部になるに従いそのばらつきは小さくなる傾向にある。また、数%のデータを除くと、 $\mu-\sigma$ の変形係数を用いた確定論的手法による結果よりも小さい範囲に分布することがわかる。したがって、変形係数のばらつきに対する感度は伸び方向のひずみの方が沈下量よりも高いといえる。次に、CASE3、6、7 の結果より、変形係数の確率密度関数の違いの影響を $\sigma/\mu=0.3$ と同じ正規分布、一様分布、対数正規分布とで比較検討する。その結果、CASE3、6 については、ほぼ同様な結果が得られた。一方、CASE7 の場合については、沈下量およびひずみの平均値は、CASE3、6 の沈下量およびひずみの平均値よりも小さくなるが、変動係数は大きくなる。この理由としては、図-2 に示す対数正規分布において平均値および変動係数を算術目盛の値に変換すると、平均値 261.87 MPa、変動係数

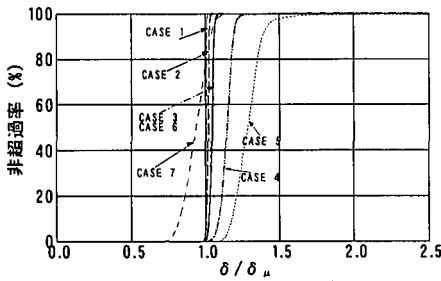


図-5(a) 非超過率分布 (沈下量)

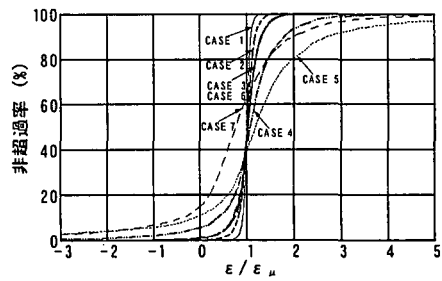


図-5(b) 非超過率分布 (ひずみ)

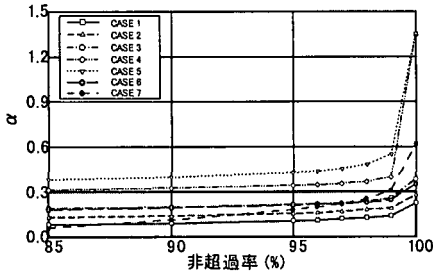


図-6(a) α算出結果 (沈下量)

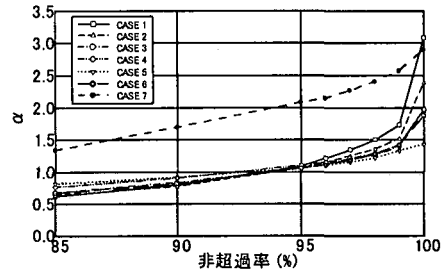


図-6(b) α算出結果 (ひずみ)

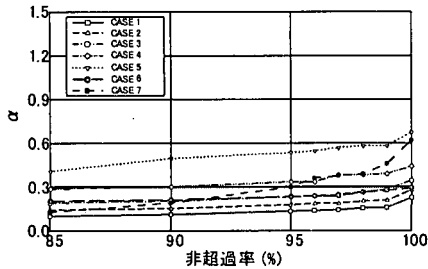


図-7(a) α算出結果 (最大沈下量)

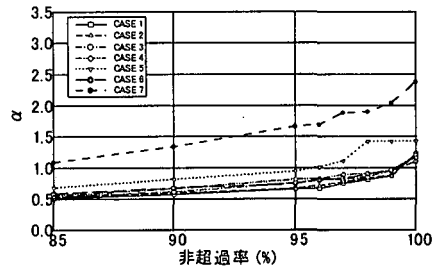


図-7(b) α算出結果 (最大ひずみ)

2.39 となり、CASE3、6 の設定値と比べてそのばらつき幅が極めて大きくなっているためと推察する。

次に各ケースにおいて、変形係数の平均値を用いた確定論的手法の結果で正規化した δ/δ_μ 、 ϵ/ϵ_μ の非超過率を求め、式(1)、(2)により各非超過率における確定論的手法として用いる μ - α σ の係数 α を算出した。非超過率分布を図-5 に、非超過率と α の関係を図-6 に示す。また、図-7 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であり、沈下量については河床部中央にあたるモデル左端、ひずみについては最大箇所 (隅角部) 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。

$$\alpha = (1 - \frac{\delta}{\delta_\mu}) \times \frac{\mu}{\sigma} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\alpha = (1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_\mu}) \times \frac{\mu}{\sigma} \quad \dots\dots\dots(2)$$

図-6 より、沈下量に関して見ると、CASE1～3、6、7 は、概ね α は 0.3 以下となり、CASE4、5 はそれよりも大きく α は 0.3～0.6 となる。一方ひずみについて見ると、CASE7 を除き、非超過率 95%未満とした場合、 α は 1.0 以下となるが、CASE7 の非超過率 80%以上 (図中には示していない) および CASE7 以外のケースにおいて非超過率 95%以上で α は 1 以上となる。また、図-7 より、最大沈下量については沈下量全体の傾向とほぼ同じで、ひずみについては、図-4 (b) からわかるように最大値付近のばらつきが小さいことから最大箇所およびその両測点を対象とした α は全体的に小さくなり、CASE5 の非超過率 96%以上および CASE7 の非超過率 84%以上 (図中には示していない) を除くと α は 1.0 以下となる。

設定した確率分布のうち正規分布 (CASE1～5) を対象として、変動係数と非超過率 95%における α 値の関係を図-8 に示す。図より、ひずみより算出した結果については、変動係数に関らず α は概ね 1.1 を示し、それ以外では、変動係数が大きくなれば α は大きくなる傾向にある。沈下量より算出した結果は、沈下量最大箇所より算出

した結果も含め、変動係数が0.3以下であれば、 α は0.3以下となり、変動係数が0.3より大きくなると、 α は0.3~0.6となる。一方、ひずみの最大箇所およびその両測点より算出した結果では、変動係数が0.3以下であれば、 α は0.8以下となり、変動係数が0.3より大きくなると、 α は0.8~1.0となる。

いま、伊藤ら³⁾は、原子力および水力発電所建設地点21ヶ所の各種試験データを整理し、岩石および岩盤物性値のばらつきの実態調査を行っており、その中で変形係数などの変形性に関する諸係数値の変動係数は、深成岩盤で0.6~0.8、火成堆積岩盤で0.5~0.6、水成堆積岩盤で0.4~0.6の範囲にあるとしている。しかしながらフィルダムの実施工時には、堤体盛立前には岩盤検査が行われ、極端に変形性が大きい（強度が小さい）箇所は掘削除去あるいはコンクリートにより置換することになる。また、グラウチングによって岩盤の変形性が改良されることが多くの研究^{4)~6)}で明らかにされつつある。特に、グラウチング前の変形性が大きい箇所ほどグラウチング後の変形性の増加率が大きくなることが示されている⁷⁾。つまり、極端に変形性の大きい箇所が掘削除去あるいはグラウチングにより改良される傾向にあり、実際の変形性のばらつきは小さくなると考えられる。さらに、研究対象としている軟岩は、不連続面が硬岩などに比べてあまり発達していないことから、亀裂性岩盤に比べれば変形性のばらつきは比較的小さく、岩級、岩種、深度を限定すれば、本来ばらつきはさほど大きくないと予想される。以上のことを考慮して、変形係数の変動係数を概ね0.3~0.5を一応の目安と考え、非超過率95%を対象として図-8の結果に当てはめると、沈下量で評価する場合の α は0.3、ひずみで評価する場合の α は全データ評価で1.1、最大値評価で0.8となる。伊藤ら⁸⁾は、風化花崗岩および泥岩の基礎岩盤における変形性のばらつきを考慮した解析により、構造物基礎マットコンクリートの沈下量から算出した係数 α は0.3としており、ダム堤体築造による基礎岩盤表面の沈下量に着目した本研究においても同様な結果が得られたことになる。一方、ひずみから算出した α は、沈下量から算出した結果と比較して大きい値が得られた。なお、監査廊継目の開きやスパン設計にはひずみが重要なパラメータとなる。実設計時には、基礎岩盤の変形係数のばらつきの意味を吟味し、その取り扱いについて十分検討を行った上で、確定論的手法における変形係数の設計値を定める必要がある。

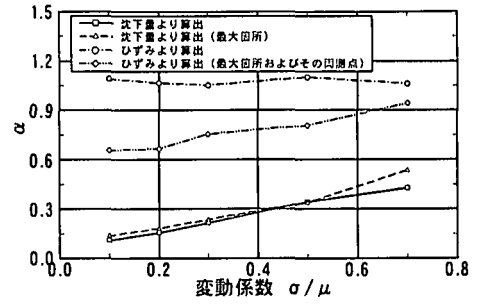


図-8 変動係数 σ/μ と α の関係(非超過率95%)

5. まとめ

本研究では、確率論的手法を用いた検討により、ダム基礎岩盤の変形係数のばらつき分布に応じて、確定論的手法により設計する場合の適切な変形係数の設計値の決定方法について検討した。その結果、確定論的手法ではばらつきを考慮した設計を、所定の信頼性を確保したうえで評価を行うために、入力物性値となる変形係数を μ - α と σ として、係数 α をばらつきの程度を表す変動係数および評価項目に応じて決定した。

今後は、変形係数の拘束圧依存性を考慮した深度方向の増加、および軟岩の非線形変形特性²⁾ないしは異種岩種・岩級の混在を考慮した場合についても同様な検討を行い、設計値算出に用いる係数 α について、さらに検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：ダムの岩盤掘削，pp.118-122，1992。
- 2) 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。
- 3) 伊藤 洋，新 孝一：地盤物性値のばらつきとその影響評価，電力中央研究所研究報告，No.87058，1988。
- 4) 飯田隆一：土木工学における岩盤力学概説，pp.102-103，1978。
- 5) 菊地宏吉：グラウチングによるダム基礎岩盤の力学的改良効果に関する評価技術の現状と課題，ダム技術No.117，pp.3-12，1996。
- 6) 山口嘉一，今林 豊，石川浩行，吉田 等：亀裂性岩盤におけるグラウチング試験と弾性波トモグラフィーによる効果判定，第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.443-448，1998。
- 7) 川上俊器，中江兼二，山田啓一，永山 功，片平 博，首藤美誠：ジオトモグラフィと原位置岩盤試験によるグラウチング効果の判定，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.337-342，1994。
- 8) 伊藤 洋，新 孝一：地盤物性値のばらつきの影響評価，電力土木，No.208，1987。