

地質境界を有するフィルダム基礎岩盤の変形に関する 信頼性設計の基礎的検討

FUNDAMENTAL STUDY ON RELIABILITY DESIGN ON DEFORMATION OF DAM FOUNDATION WITH A GEOLOGICAL BOUNDARY

山口嘉一*・中村 真**・新家拓史***

Yoshikazu YAMAGUCHI, Makoto NAKAMURA and Takuji ARAIE

Embankment dams are often constructed on soft rock foundations in Japan, so it is important to precisely predict deformation of the foundations due to fill placement at 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 stochastic deformation analysis changing coefficient of variation of the deformation modulus of dam foundation with a geological boundary. Based on the results of numerical study, the dam foundation design with the deterministic method ensured the reliability of the requirement was discussed.

Key Words: scattering, coefficient of variation, deformability, embankment dam, soft rock, geological boundary

1. はじめに

ダムや橋梁基礎などの大型構造物を建設する場合、基礎岩盤の変形に対する構造物の安全性を検討する必要がある。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堤体遮水ゾーン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。岩盤の変形係数は、同一サイトの同一岩種・岩級の岩盤でさえもばらつきをもって得られ、現状においては、そのばらつきを統計的に処理したうえで変形係数の設計値を定める決定論的な対応について具体的な方法が確立されていない。著者らはこれまでに、地質境界を有し 2 種類の岩で構成されているモデルダムに対して、変形係数のばらつきおよびその程度を表わす変動係数の差が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に与える影響度合を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、変形係数の適切な設計値の決定方法について提案を行ってきた^{1)~2)}。

本研究では、これまでの研究結果を踏まえ、地質境界を有し 2 種類の岩で構成されるフィルダム基礎岩盤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についての既往の検討結果の評価をさらに進めて、所要の信頼性を確保した基礎岩盤の変形に関する決定論的設計法について議論した。

2. 解析モデルと解析条件

本解析では、基礎岩盤が線形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。モデルダムはこれまでの研究^{1)~2)}と同じ解析モデルとし、軟岩を基礎とするフィルダムの一般的な値である堤高 50m、掘削勾配 1:1.5^{1)~4)}とした。解析モデルの有限要素メッシュ(要素数 6600、節点数 6811)を図-1 に示す。

* 正会員 工博 (独)土木研究所 水工研究グループ 上席研究員 (ダム構造物)
** 正会員 工博 (株)ニュージェック 河川グループ (前同上 交流研究員)
***正会員 (独)土木研究所 水工研究グループ 交流研究員 (ダム構造物)

解析モデルは、左右岸対称の谷形状を想定し、解析は平面ひずみ状態で行い、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。また、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た。なお、堤体の単位体積重量は、 19.6kN/m^3 とした。

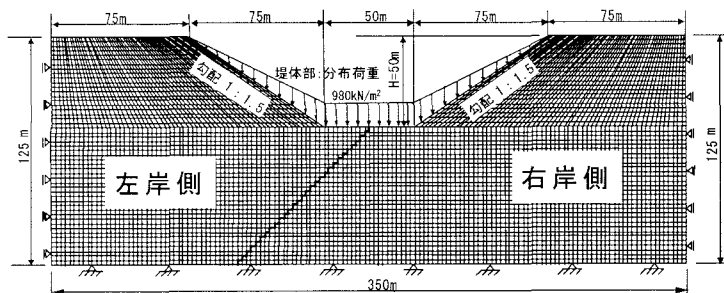


図-1 解析モデル

表-1 検討ケース

		地質境界 角度(°)	分布範囲	左岸側		右岸側	
				平均変形係数 μ (MPa)	変動係数 σ/μ	平均変形係数 μ (MPa)	変動係数 σ/μ
検討 1	CASE 1-1	45	$\infty^*)$	500	0.3	100	0.3
	CASE 1-2		$\mu \pm 2\sigma$				
	CASE 1-3		$\mu \pm 1.5\sigma$				
	CASE 1-4		$\mu \pm 1\sigma$				
検討 2	CASE 2-1	45	$\mu \pm 2\sigma$	100	0.3	100	0.3
	CASE 2-2			200			
	CASE 2-3			500			
	CASE 2-4			1000			

*) 分布範囲を規定しない場合、ただし、乱数により発生させた変形係数が0以下の場合、0.1MPaとする。

3. 解析方法

本検討では、2つの地質領域の変形係数を確率変数としたモンテカルロシミュレーション法による線形変形解析を行った。その結果として得られる沈下量やひずみと、変形係数として $\mu - \alpha\sigma$ (μ : 平均値, σ : 標準偏差, α : 係数)を用いた決定論的手法の結果として得られるそれらとの相互関係を検討し、所要の信頼性を確保したうえで、決定論的手法により設計を行う際の適切な係数 α を算出した。なお、モンテカルロシミュレーションにおける解析回数は、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各要素に割り付ける1回の作業を1 realと呼ぶ)とした。変形係数のばらつきの模擬には乱数を用いた。乱数発生の際の確率密度関数は正規分布を採用し、ばらつきの程度を示す指標には変動係数 ($= \sigma/\mu$)を用い、0.3とした^{1)~3)}。

検討ケースを表-1に示す。まず、検討1として平均変形係数 500MPa:100MPa (左右岸の平均変形係数がそれぞれ 500MPa、100MPaを示し、以下同様に略称する)、地質境界を左岸側傾斜 45° に固定し、変形係数の分布範囲を規定しないケースと、 $\mu \pm 2\sigma$ 、 $\mu \pm 1.5\sigma$ 、 $\mu \pm 1\sigma$ と規定したケースの検討を行った。ポアソン比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 で一定値とした。左右岸の平均変形係数の設定については、別途実施した決定論的手法による感度解析結果から、設計上重要となる沈下量、ひずみの絶対値が大きい右岸側の方が小さい変形係数 100MPa となるケースとした¹⁾。ここで、分布範囲を規定しないケースでは変形係数が 0 以下になった場合 0.1MPa とし、規定した場合はその範囲外の値となった場合にその値は採用せず再度乱数を発生させた。図-2 に平均変形係数 $\mu=500\text{MPa}$ 、変動係数 $\sigma/\mu=0.3$ での分布範囲を規定しなかった場合と規定した場合のある 1real での変形係数の頻度分布の一例を示す。図から、分布範囲を $\mu \pm 2\sigma$ に規定した場合はその範囲内で概ね設定した正規分布に近い分布であるが、 $\mu \pm 1.5\sigma$ 、 $\mu \pm 1\sigma$ では分布幅が狭く、設定した正規分布からはかなりずれた分布といえる。次に、検討2では左右岸の変形係数の差の違いによる影響評価を目的として、変形係数の分布範囲を $\mu \pm 2\sigma$ と規定したうえで、右岸側の

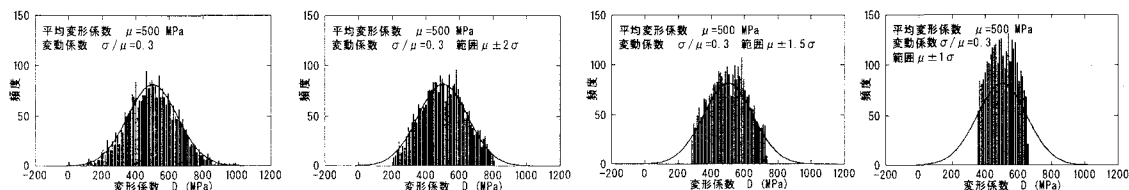


図-2 1real における変形係数の頻度分布の一例($\mu=500\text{MPa}$, $\sigma/\mu=0.3$)

平均変形係数を 100MPa、左岸側の平均変形係数 100、200、500、1000MPa と変化させて検討を行った。

4. 確率論的解析結果

(1) 変形係数の分布範囲の影響の検討 (検討 1)

図-3 は、解析結果の一例として CASE1-2 における基礎岩盤表面の沈下量と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隣接する 2 点間の伸び方向ひずみであり、図中では沈下量および伸び方向のひずみを負として整理している。図中の実線は、変形係数の平均値 μ を与えた決定論的手法による結果を示している。

図より、沈下量が最も大きい河床中心軸から右岸側隅角部付近で、沈下量、ひずみともに相対的にばらつきが大きいことがわかる。この付近では、河床中心から 25m までの河床水平部で上載荷重がもっとも大きい領域に含まれることに加えて、地質境界部近傍における左岸側の平均 500MPa の変形係数のばらつきの絶対値が相対的に大きいことやアバットメント部にも近いという地形変化点の影響を強く受けていることが予想される。

次に、変形係数の平均値を用いた決定論的手法の結果として得

られた沈下量 δ_μ 、ひずみ ε_μ 、各ケースの沈下量 δ 、ひずみ ε を正規化した δ/δ_μ 、 $\varepsilon/\varepsilon_\mu$ の非超過率を求め、式(1)、(2)により各非超過率に対応する決定論的手法に用いる μ - α σ の係数 α を算出した。

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

$$\alpha_\varepsilon = \left(1 - \frac{\varepsilon_\mu}{\varepsilon}\right) \times \frac{\mu}{\sigma} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、ひずみから α_ε を算出する際、決定論手法で解析したひずみが圧縮ひずみを示す場合は、監査廊コンクリートの圧縮側への変形で監査廊の継目が開口するのとは逆方向であることから、構造上の安全側の変形と考え、 α_ε の評価から除外した。また、 α を評価する上での非超過率については、信頼性設計としてどの程度で評価するか議論が必要であるが、設計の安全性を考慮し以下の検討結果の考察では非超過率 95% の α で検討する。

図-4 に非超過率 95% における α の比較を示す。沈下量から算出した α_δ については、分布範囲が狭くなるに伴い減少し、またデータの集計方法の違いによる差も少なく、0.1~0.2 程度の非常に小さい値を示す。 α_ε についても、同様に変形係数の分布範囲が狭くなるに伴い減少する。算出するデータのの違いに着目すると、右岸部全データを用いて算出した場合が最も大きい。

ここで、フィルダムの実施工時は、岩盤検査による変形性の大きい箇所掘削除去あるいはグラウチングによる改良に加えて、岩級区分により同一岩級の物性の幅はある程度限定されるため、実際の変形性のばらつきは小さくなると考えられる。

以上の検討から、沈下量での評価では α_δ の値が小さく、かつ評価データのの違いによる差異も小さいため、フィルダム基礎岩盤の変形性に関する決定論的設計を行ううえで大きな問題とはならないと考えられる。一方、ひずみで評価する場合、 α_ε の値は α_δ に比べかなり大きく、評価データの差異による影響も大きい。ま

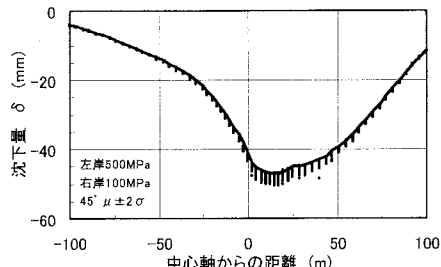


図-3(a) 沈下量分布(CASE1-2)

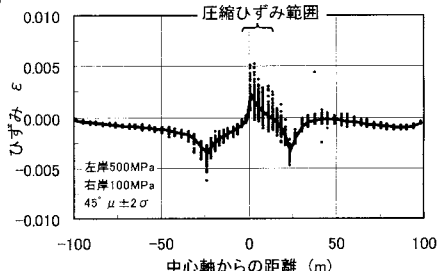


図-3(b) ひずみ分布(CASE1-2)

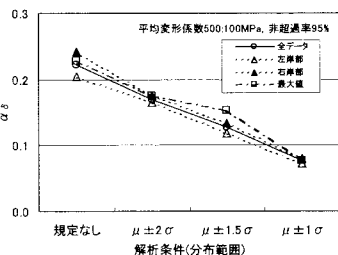


図-4(a) α の比較 (沈下量)

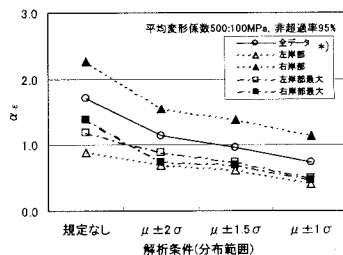


図-4(a) α の比較 (ひずみ)

*) 圧縮側ひずみを除外して算出

た、図-2 に示した変形係数の頻度分布をみると、分布範囲を規定しない場合と $\mu \pm 2\sigma$ で規定した場合は、概ね正規分布に従ったばらつき度合いと判断できるが、 $\mu \pm 1.5\sigma$ および $\mu \pm 1\sigma$ ではもはや設定した正規分布と著しく異なると判断できる。さらに、 α_e は分布範囲を規定しない場合に比較し、 $\mu \pm 2\sigma$ で大きく減少し、 $\mu \pm 2\sigma$ 、 1.5σ 、 1σ は減少傾向は緩慢である。従って、以後の検討 2 では分布範囲を $\mu \pm 2\sigma$ に規定して解析を実施した。

(2) 左右岸の平均変形係数の差(比)の影響の検討 (検討 2)

図-5 に左右岸の平均変形係数の差が異なるケースでの非超過率 95%における α の比較を示す。図より沈下量から算出した α_δ については、左右岸の平均変形係数の差による差異は小さく、算出するデータの違いによる差もほとんどない。ひずみから算出した α_ϵ は、左右岸の平均変形係数の差が大きくなるに伴い、特に右岸部のデータを用いて算出したものが大きくなる傾向にある。

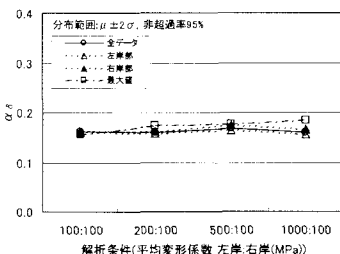


図-5(a) α の比較(沈下量)

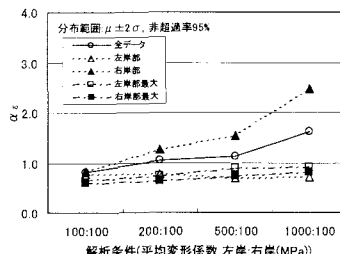


図-5(b) α の比較(ひずみ)

図-6 は、CASE2-3 における基礎岩盤表面の沈下量とひずみ分布、図-7 は変形解析の結果から基礎岩盤表面の各節点ごとに算出した α_δ 、 α_ϵ の非超過率 95% の値を示したものである。各節点ごとの α_δ は、沈下量が最大となる河床中心軸から右岸側隅角部付近でやや大きい傾向はあるが、全体、最大箇所での評価と大きく異なることがわかった。

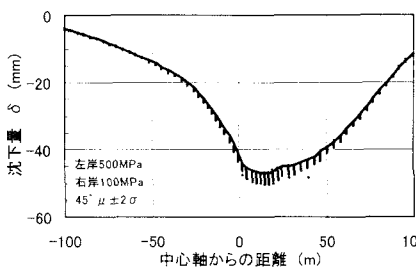


図-6(a) 沈下量分布(CASE2-3)

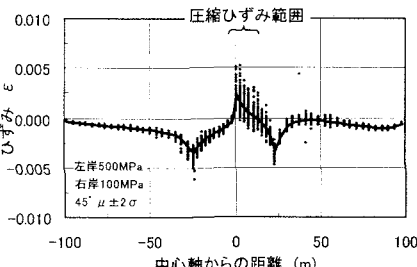


図-6(b) ひずみ分布(CASE2-3)

一方、各節点ごとの α_ϵ は右岸側で大きく、特に、ひずみ自体は小さくてもばらつきが大きい河床部付近と、ひずみが相対的に小さい右岸アバットメント部の隅角部付近を除いた範囲で大きい傾向を示す。逆に、ひずみが大きい右岸隅角部では α_ϵ は小さい。本来、基礎の設計として重要となる

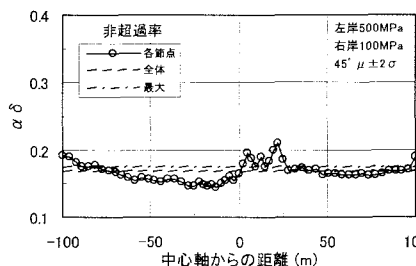


図-7(a) α_δ 分布(CASE2-3)

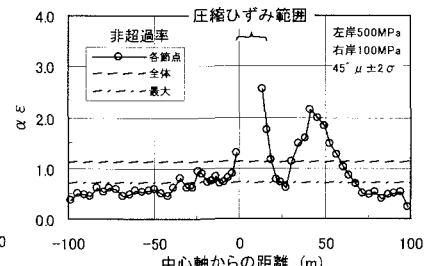


図-7(b) α_ϵ 分布(CASE2-3)

ひずみが最も大きい隅角部付近では、 α_ϵ が小さい値を示し、相対的にひずみが小さい箇所では α_ϵ が大きく、これによって全データ、右岸全データでの評価による α_ϵ が影響を受けていることがわかった。

次に、監査廊スパン長を 6m とした場合に、引張りひずみとスパン長を乗じて 1 継目あたりの開き量として監査廊の継目開き量を算出した。図-8 に継目開き量の分布を示す。図より、CASE2-2~4 で α_ϵ が相対的に大きい右岸アバットメント付近(右岸側 30~60m 付近)は決定論的解析による継目開き量が概ね 2~3mm 程度以下と小さい。

フィルダム築堤時の監査廊継目の開きおよびずれに関する既往の調査結果⁴⁾によると、基礎岩盤の変形係数 D (MPa) と堤高 H (m) の比が $D/H > 10$ の場合、岩盤の変形性が問題となることはほとんどなく、 $5 < D/H \leq 10$ では設計に際して岩盤の変形性に十分な注意を払う必要があり、さらに $D/H \leq 5$ では、監査廊は設置されて

いない状況にあるとしている。また、山口、赤松³⁾は、数パターンの決定論的手法による解析により得られた継目開き量と変形係数 D (MPa) と堤高 H (m) の比である D/H の関係から、 $D/H \leq 4$ の範囲では継目開き量が概ね 10mm 以上で、 $4 < D/H \leq 8$ の範囲では概ね 5~10mm 以上、 $8 < D/H \leq 12$ の範囲で概ね 5mm 以下と報告している。よって、 D/H が小さい場合に監査廊の継目の開きおよびずれが問題となる

場合が多く、このときの継目開き量は概ね 5~10mm 以上であるため、5mm 以下の継目開き量は、監査廊の変形としては問題のないものと判断できる。

そこで、決定論的解析による継目開き量が小さい節点について、評価対象から除外し α_e を算出した。 α_e の算出は、各節点の継目開き量に応じ、除外する領域を圧縮域のみ（継目開き量による除外しない）、圧縮域 + 継目開き量 2mm 以下、圧縮域 + 継目開き量 3mm 以下、圧縮域 + 継目開き量 4mm 以下、圧縮域 + 継目開き量 5mm 以下の 5 パターンを比較した。図-9 に各ケースの α_e 分布図を示す。

図より、圧縮域のみ除外に比較し、除外する継目開き量を大きくすれば α_e は小さくなるが、どのケースでも除外範囲が 2~3mm 程度で概ね α_e の低減は収束する傾向を示す。よって、決定論的解析による継目開き量が 3mm 以下となる節点を除外した場合に、設計上の問題とはならない微小なひずみによる α_e への影響を除外したと判断した。

継目開き量 3mm 以下のデータを除外し算出した α_e と左右岸の平均変形係数比の関係を図-10 に示す。継目開き量による除外をしなかったケース（図-5）では、左右岸の平均変形係数比が大きくなるに伴い α_e は増加し、また、算出方法の違いでは右岸部で算出した α_e が大きい傾向を示したが、微小なひずみを除外した図-10 では、左右岸の平均変形係数比および算出方法の違いによる α_e に極端に大きな差は認められなかった。 α_e は非超過率 95% で 0.6~1.0 程度である。

次に、継目開き量が 3mm 以下を除外した α_e を用いて変形係数を定め、決定論的手法の結果として得られるひずみ量と、確率論的手法によるひずみ量との違いを検証した。算出ケースは、左右岸両方に全体の平均値、左右岸各々に左右岸の平均値、左右岸各々に左右岸の最大値の α_e を適用した 3 パターンとした。図-11 に解析結果の一例として CASE2-3 平均変形係数 500:100MPa の継目開き量の分布を示す。

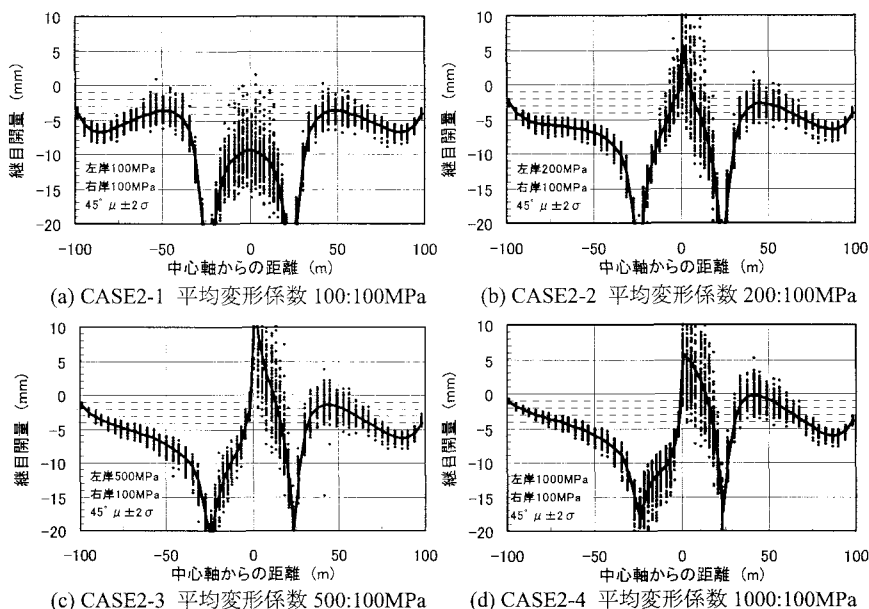


図-8 監査廊継目開き量分布

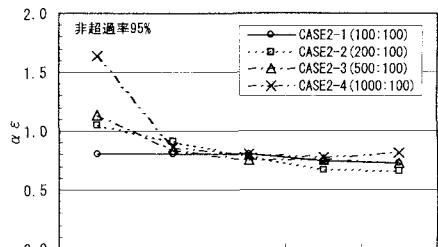


図-9 継目開き量を除外した α_e 分布

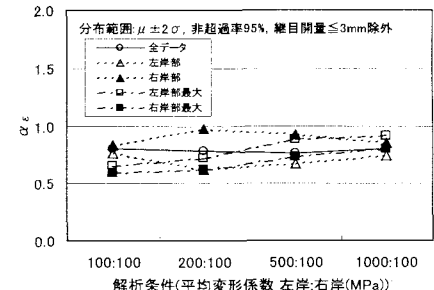


図-10 α_e 分布 (継目開き量 ≤ 3 mm 除外)

図より、決定論的解析による継目開き量と確率論的解析による継目開き量の非超過率 95%は概ね近似した分布を示した。決定論的解析結果と確率論的解析結果の差が大きいのは、 α_s 算出時に除外した継目開き量 3mm 以下で、フィルダム基礎岩盤の変形に関する設計において大きな問題とならない河床部右岸側付近および右岸アバットメント付近である。

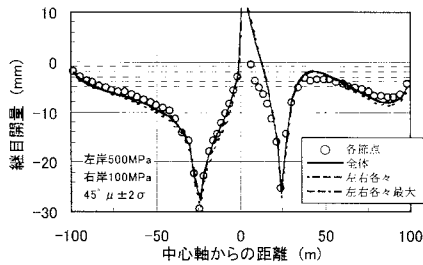


図-11 継目開き量分布 (CASE2-3)

表-2 各評価項目における α (非超過率 95%)

解析ケース	α_s			α_t			α_e (継目開き量 ≤ 3 mm除外)		
	全体	左岸部	右岸部	全体	左岸部	右岸部	全体	左岸部	右岸部
検討1	CASE 1-1	0.22	0.20	0.24	1.70	0.88	2.27		
	CASE 1-2	0.17	0.16	0.18	1.13	0.70	1.55		
	CASE 1-3	0.13	0.12	0.13	0.96	0.62	1.38		
	CASE 1-4	0.08	0.07	0.08	0.73	0.41	1.14		
検討2	CASE 2-1	0.16	0.16	0.16	0.80	0.77	0.83	0.80	0.77
	CASE 2-2	0.16	0.16	0.16	1.05	0.77	1.26	0.78	0.62
	CASE 2-3	0.17	0.16	0.18	1.13	0.70	1.55	0.76	0.67
	CASE 2-4	0.16	0.16	0.17	1.63	0.72	2.47	0.80	0.74

(3) 決定論的設計法への適用

表-2 に解析により得られた非超過率 95%における α の算出結果を示す。表より、沈下量から算出した α_s は、変形係数のばらつきの分布範囲を $\mu \pm 2\sigma$ に規定した場合に左右岸の変形係数比にかかわらず、相対的に小さい値を示した。ひずみの算出結果では、決定論的解析結果による継目開き量 3mm 以下となる箇所のデータを除外し、右岸側のひずみが小さい区間を除外して算出した α_t で検討条件別および左右岸別の評価の差は小さくなった。なお、左右岸の最大箇所て算出した α は、図-5、図-10 に示すように相対的に値は小さく、検討ケースごとの差異も小さいため、表より省略した。

以上の結果から、ひずみで評価する場合の方が、沈下量で評価する場合よりも設計値を小さく設定する必要があり、監査廊継目の開きやスパンの設計ではひずみが重要なパラメータとなる。ひずみに着目した場合、微少なひずみ領域に対してばらつきを考慮する必要はないと考え、継目開き量 3mm 以下を除外して評価すれば現実的な値が得られたと考える。得られた α を適用した決定論的手法での検証結果でも、確率論的解析による結果と近似した分布が得られたことから、ある程度限定されたモデルケースではあるが、決定論的設計法における変形係数の設定について、全データ評価の最大値である $\alpha = 0.8$ 程度が妥当と考える。

5. まとめ

本研究では、地質境界を有し 2 種類の岩で構成されているフィルダム基礎において、変形係数のばらつきが異なる場合に確率論的手法を用いた検討によりフィルダム軟岩基礎の合理的な設計方法について検討した。変形係数のばらつきを正規分布とし、分布範囲を $\mu \pm 2\sigma$ で規定した場合に現実的な係数 α が得られることがわかった。沈下量から算出した α_s は相対的に小さい値が得られ、ひずみからは、各節点ごとの継目開き量 3mm 以下を除外して算出した α_t で現実的な係数が得られることがわかった。以上から、限定的なモデルケースの検討結果ではあるが、変形係数の設定について $\alpha = 0.8$ 程度が妥当と推定した。

今後の課題として、推定した α の妥当性を検証するとともに、地質境界の位置や角度が異なる場合および左右岸で異なる変動係数の場合での α の評価方法の検討を進めていく必要がある。また、今回の研究では非超過率 95%の評価を適用したが、信頼性設計としてどの程度の非超過率で評価するかは議論が必要である。

参考文献

- 1) 山口嘉一，赤松利之，中村 真：地質境界を有するフィルダム軟岩基礎における変形性のばらつき影響検討，第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.163-168，2003。
- 2) 山口嘉一，中村 真：地質境界を有するダム基礎岩盤の変形挙動に及ぼすばらつき影響検討，第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.235-240，2004。
- 3) 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，独立行政法人土木研究所資料，第 3869 号，2002。
- 4) 土木学会：ダムの岩盤掘削，pp.118-122，1992。
- 5) 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，pp.53-63，1987