

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 (第2報)

山口 嘉一¹・新家 拓史¹

¹正会員 独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: yamaguti@pwri.go.jp

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。岩盤の変形係数は、同一サイトの岩種・岩級の同じ岩盤でもばらつきがあり、現状では決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。本研究では、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において、変形係数のばらつきの程度を表す変動係数の違いが、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を検討した。また、左右岸で変動係数が異なる場合にそれぞれの変動係数の組合せが変形挙動に与える影響を検討し、地質境界を有する基礎岩盤における所要の信頼性を確保した変形に関する決定論的設計法について議論した。

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、左右岸の変形係数の差やばらつきの分布範囲の違い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⁾。

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において、変形係数のばらつきの程度を表す変動係数がそれぞれに異なる場合を想定し、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検討した。また、この結果をもとに、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⁾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)~3)}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。

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を行い、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/m³とした。基本メッシュは、一辺の長さ2.5mの正方形とした。一辺の長さは、本研究で着目するフィルダムのカルバート式監査廊の一般的な継目間隔(スパン長)の6mを参考に、継目の開きやズレの挙動が分析でき、かつモデル解析としての適切なメッシュの粗さという観点から決定した。

地質境界の位置と角度は、決定論的手法による感度解析結果⁴⁾において、隅角部のひずみが相対的に大きい地質境界が河床部中央部に位置し、左岸側に45°傾斜して直線状に存在するケースを設定した。

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²⁾。左右岸の平均変形係数は、それぞれ 500MPa, 100MPa とし、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。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⁴⁾から、沈下量の絶対値が大きくなる右岸側の変形係数が小さいケースとした。変形係数のばらつきの模擬には乱数を用い、乱数発生の際の確率密度関数は正規分布を採用した^{1)~2)}。変形係数の分布範囲は、実施時には岩盤検査およびグラウチングによる改良によって変形係数はある程度の範囲に収まると考え、 $\mu \pm 2\sigma$ に規定した¹⁾。

今回の解析では、ばらつきの程度を示す変動係数 ($= \sigma / \mu$) を変化させて実施した。検討ケースを表-1に示す。解析は、左右岸の変動係数をともに変化させたケースと、左岸のみ、右岸のみを個別に変化させたケースを行った。解析に用いた変動係数の範囲は、岩種・岩級を限定すれば、変動係数は概ね 0.3~0.5 程度との検討結果^{2), 5)}から、0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 の5パターンとした。左岸のみ、右岸のみを個別に変化させたケースでは、片岸の変動係数を 0.3 に固定して、対岸を 0.1~0.5 に変化させた。図-2 に平均変形係数 $\mu = 500\text{MPa}$ における変動係数 σ / μ が 0.1, 0.3, 0.5 のそれぞれについてのある 1real での変形係数の頻度分布の一例を示す。

4. 解析結果

(1) 確率論的解析の結果

図-3, 4 は、解析結果の一例として左岸部の変動係数を $\sigma / \mu = 0.3$ に固定し右岸部の変動係数を変化させた CASE 11, 13, 15 における基礎岩盤表面の

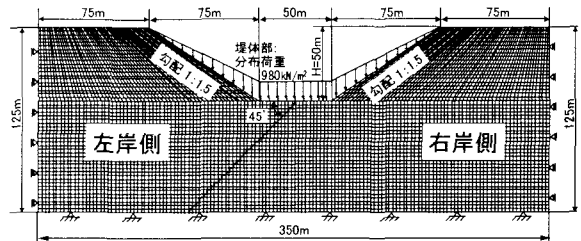


図-1 解析モデル(要素数6600, 節点数6811)

表-1 解析ケース

	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
CASE 1	$\mu \pm 2\sigma$	500	0.1	100	0.1
CASE 2			0.2		0.2
CASE 3			0.3		0.3
CASE 4			0.4		0.4
CASE 5			0.5		0.5
CASE 6	$\mu \pm 2\sigma$	500	0.1	100	0.3
CASE 7			0.2		0.3
CASE 8			0.3		0.3
CASE 9			0.4		0.3
CASE 10			0.5		0.3
CASE 11	$\mu \pm 2\sigma$	500	0.3	100	0.1
CASE 12			0.3		0.2
CASE 13			0.3		0.3
CASE 14			0.3		0.4
CASE 15			0.3		0.5

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変形係数の小さい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。また、全ケースの解析結果は表示していないが、沈下量およびひずみのばらつきは、 σ / μ が大きいほど大きく、右岸側でその傾向は顕著である。

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 で、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 $\mu - \alpha \sigma$ の係数 α を算出した。

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

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

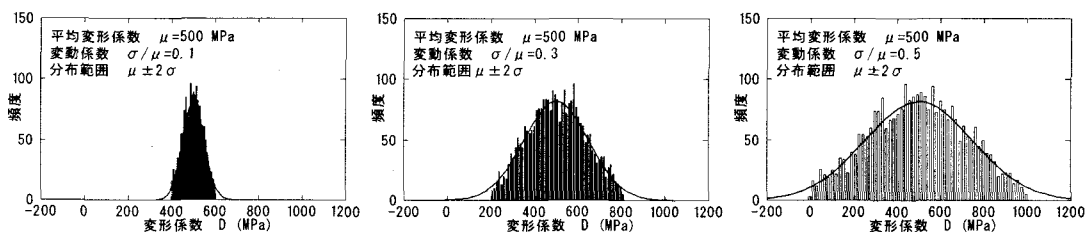
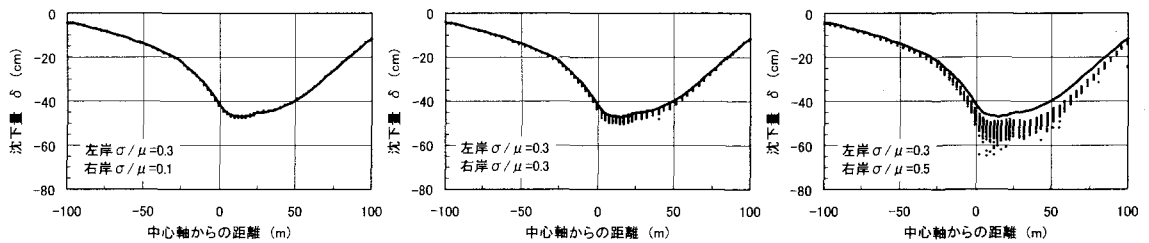
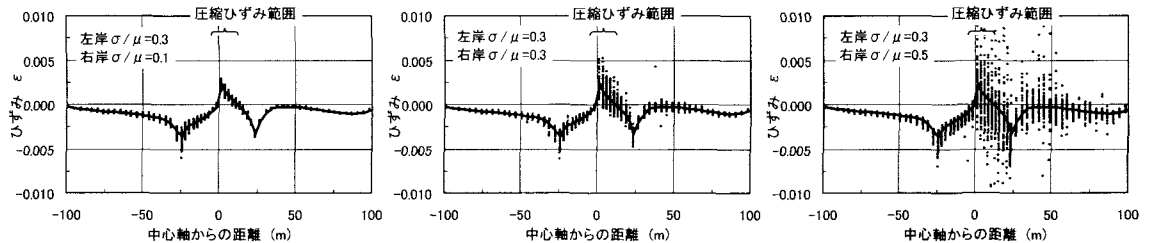


図-2 1realにおける変形係数の頻度分布の一例 ($\mu = 500\text{MPa}$)



(a) σ/μ = 左岸 0.3, 右岸 0.1 (CASE 11) (b) σ/μ = 左岸 0.3, 右岸 0.3 (CASE 13) (c) σ/μ = 左岸 0.3, 右岸 0.5 (CASE 15)

図-3 沈下量分布 (右岸の変動係数 σ/μ が変化)



(a) σ/μ = 左岸 0.3, 右岸 0.1 (CASE 11) (b) σ/μ = 左岸 0.3, 右岸 0.3 (CASE 13) (c) σ/μ = 左岸 0.3, 右岸 0.5 (CASE 15)

図-4 ひずみ分布 (右岸の変動係数 σ/μ が変化)

ここで、ひずみから α_i を算出する際、平均変形係数を用いた決定論的解析におけるひずみが圧縮ひずみを示す範囲は、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_i の評価から除外した。また、基礎岩盤表面の各節点間ごとに算出した α_i 分布の一例として、図-5 に CASE-3 の結果を示すが、 α_i は右岸側で大きく、特に、ひずみが相対的に小さい河床部地質境界付近から右岸アパ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。そこで、ひずみの評価では、監査廊スパン長を 6m とした場合の監査廊の 1 継目あたりの開き量に着目した。ダムに求められる性能規定の一つに貯水機能の保持があり、既設ダムの実測挙動では監査廊の継目の開きが 5mm 程度以下では止水性能上の問題は全く発生していない。このような知見に基づく既往の研究経緯を踏まえ、平均変形係数を用いた決定論的解析結果での継目開き量が 3mm 以下となる範囲について、引張ひずみが小さく設計上大きな問題とならない領域と判断し、 α_i の評価から除外することとした¹⁾。

図-6, 7 に非超過率 85% および 95% における α の算出結果を示す。図の(a)は左右岸の σ/μ が同値で

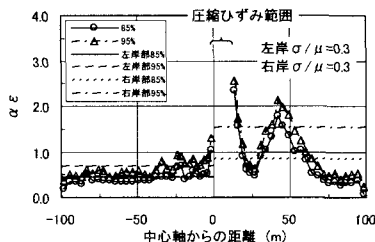


図-5 隣接節点間ごとの α_i の分布 (CASE 3)

ともに変化したケース、(b), (c) はそれぞれ左岸のみ、右岸のみの σ/μ が変化したケースの α の比較である。図には、地表面の地質に応じて左右岸ごとに評価した結果を示している。

図より、全般に、沈下量から算出した α_δ はどのケースにおいても 0.1~0.4 程度と相対的に小さく、ひずみから算出した α_i は 0.4~1.2 程度で、評価するデータの違いによる差も大きい。よって、ひずみから算出した α_i は、沈下量から算出した α_δ と比較して大きい値が得られた。つまり、同等の信頼性を確保した決定論的設計を行うためには、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る。

左右岸の σ/μ が同値でともに変化するケースでは、 $\sigma/\mu = 0.1 \sim 0.4$ における α_i の変動は小さく、 $\sigma/\mu = 0.5$ で相対的に大きくなる。左岸の σ/μ のみが増加するケースでは、左岸部の α_i は σ/μ が大きいほど小さくなる傾向を示し、 $\sigma/\mu = 0.3$ に固定した右岸部の α_i は変動が小さい。一方、右岸のみが増加するケースは、 σ/μ が大きくなるに伴い α_i は概ね増加する傾向を示し、左右岸の σ/μ がともに変化するケースと近似する。これは、変形係数が小さい右岸部が左岸部の下部に潜り込む地質構造のため、右岸部の変形の影響が左岸部に現れていると考えられる。逆に、変形係数の大きい左岸部の変動係数の変化は、変形性に与える影響が小さいと推定できる。

次に、非超過率 80%, 85%, 90%, 95% に対応した α を算出し、変動係数の変化における推移を分析した。 α の評価は、前述したように同等の信頼性を確保するために設計値を小さく設定する必要があるひずみについて、平均変形係数を用いた決定論的解析結果から得られた継目開き量 3mm 以下となる範

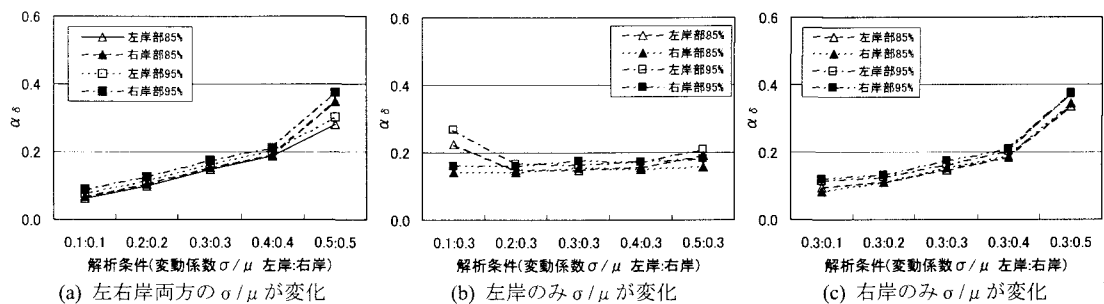


図-6 非超過率95%における α_δ の比較

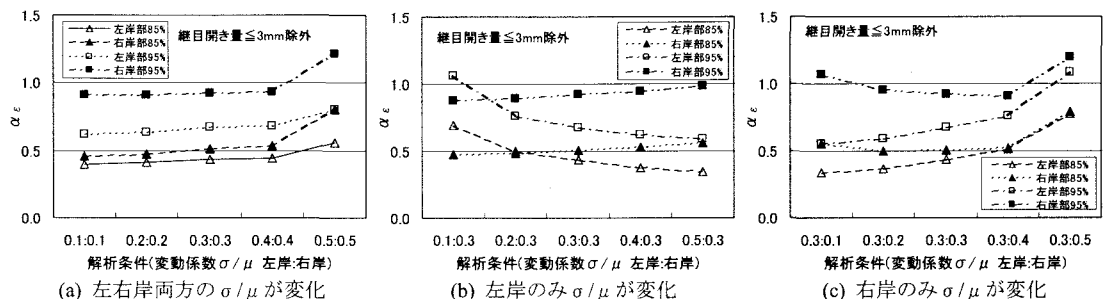


図-7 非超過率 95%における α_δ の比較

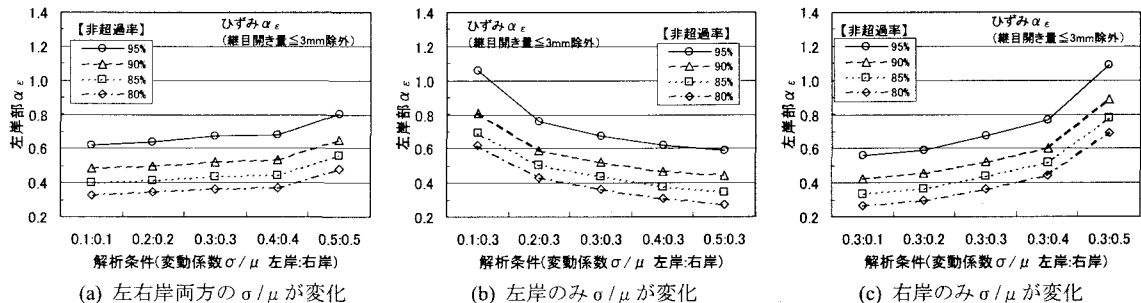


図-8 各非超過率に対応した α_ϵ の比較 (左岸部で算出した α_ϵ)

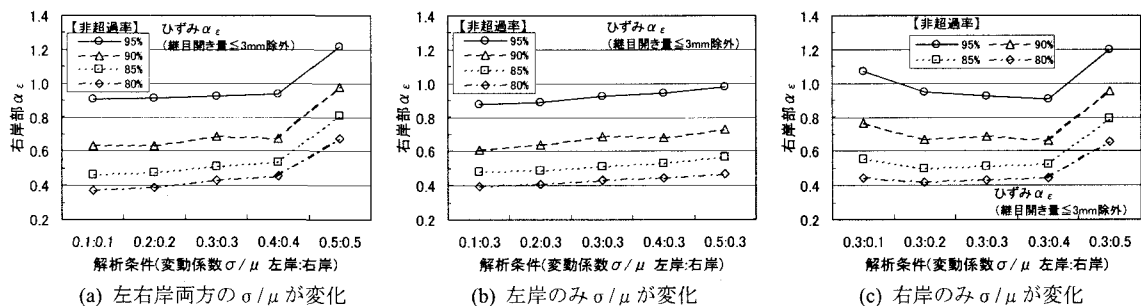


図-9 各非超過率に対応した α_ϵ の比較 (右岸部で算出した α_ϵ)

囲を除外して評価した。図-8, 9 に各非超過率における α_ϵ の分布を示す。図は、評価データを左岸部、右岸部に分けて個別に図示した。

図より、全般に、変形係数の小さい右岸部で算出した α_ϵ が比較的大きい値を示す。左右岸片方の σ/μ が変化する場合、どちらの場合も左岸部で算出した α_ϵ の変動が大きく、右岸部で算出した α_ϵ は

σ/μ の違いによらず、ほぼ同程度の値を示す。特に、 σ/μ が 0.2~0.4 の範囲ではその変動は小さい傾向がある。また、非超過率が大きくなれば α も当然大きくなるが、各ケースとも非超過率 80~90% の変化に比較し、非超過率 95% で大きく増加する傾向があり、高い信頼性を確保するためには、 α をかなり大きめに設定する必要がある。

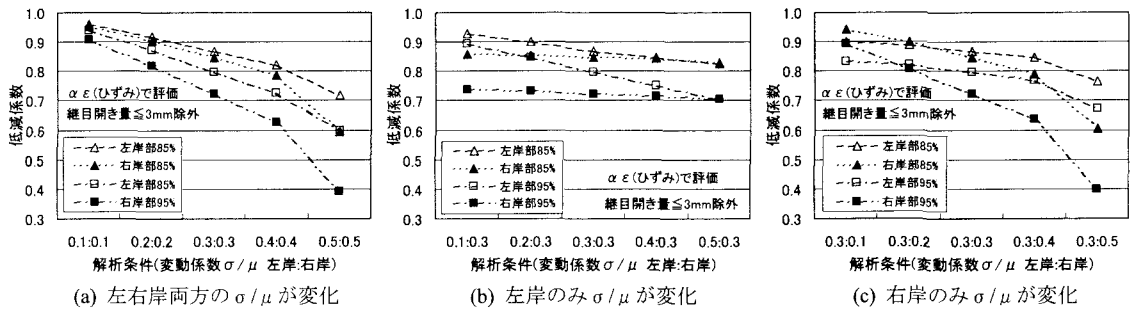


図-10 低減係数の比較

ここで、変動係数が小さい解析条件においては、式(1)および(2)を用いた α による評価では、式中の分母にある σ が小さくなるため、計算される α が相対的に大きくなる。このため、 α の評価だけでは、変形性のばらつきの影響を定量的に把握しにくいと考えられる。そこで、 α を基に算出した決定論的設計に用いる変形係数 $D (= \mu - \alpha \sigma)$ を、平均変形係数 μ で除した無次元量 $D/\mu = 1 - \alpha(\sigma/\mu)$ を決定論的設計に用いる低減係数と定義して、変動係数 σ/μ の変化における低減係数の推移を分析した。図-10に、ひずみで評価した α から算出した各検討ケースにおける低減係数の非超過率 85%および 95%の分布を示す。

図より、全てのケースで、 σ/μ が大きい場合に低減係数は小さく、変形係数のばらつきが大きいときに決定論的設計に用いる変形係数 D を小さく設定する必要がある。左右岸片方の σ/μ が変化する場合、変化する側の低減係数が大きく変化し、変化しない($\sigma/\mu=0.3$)側の低減係数は変化が小さい。平均変形係数が大きい左岸部の σ/μ のみが変化するケースでは、低減係数は比較的大きく、非超過率 85%で 0.8 以上、95%で 0.7 以上である。一方、平均変形係数が小さい右岸部の σ/μ のみが変化するケースは、右岸部の低減係数が大きく変化し、左右岸両方の σ/μ が変化するケースと概ね近似する。また、 $\sigma/\mu=0.5$ の低減係数は、 $\sigma/\mu=0.1 \sim 0.4$ のそれと比較し小さく、変形係数をかなり小さく設定する必要がある。

なお、本検討では、領域の広い右岸部の平均変形係数が小さいモデルで検討したが、別途、左右岸の平均変形係数を反転させたケース(左岸部:100MPa、右岸部:500MPa)についても、 σ/μ が変化する検討を実施した。この結果、本検討の結果と比較し、 α の値は小さく、 σ/μ の変化による差も小さいことがわかった。

(2) 決定論的設計に用いる係数 α の推定

図-11は、左右岸の変動係数 σ/μ に対する非超過率 85%の α を三次元的な分布として表したものである。面上の格子の交点は、本検討で解析した左右岸の σ/μ の組合せに対応した α である。本検討で解析を実施していないケースについては、左岸側な

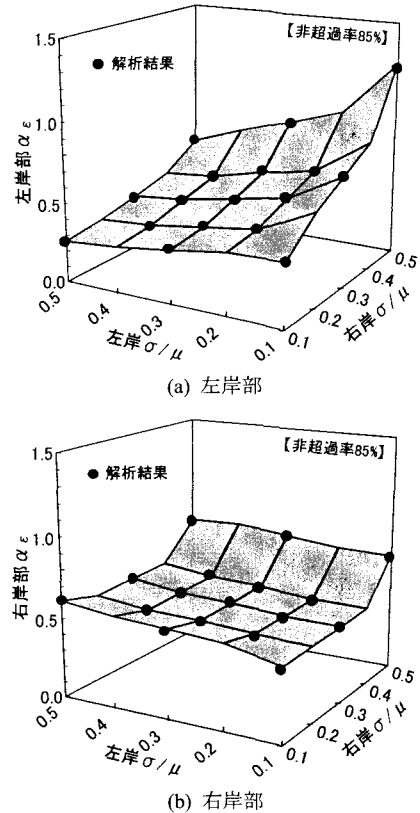


図-11 α_i 分布 (非超過率85%)

いは右岸側の $\sigma/\mu=0.3$ の結果をもとに、他岸側の σ/μ の変化に対する変化傾向が同じであるとして推定した。図より σ/μ が小さい範囲については、 α_i は比較的ゆるやかな変化を示しているのに対して、平均変形係数の小さい右岸の $\sigma/\mu=0.5$ においては、急激に α_i が大きくなる傾向を示す。このことは、前出の図-6、7に示した左右岸の σ/μ が同値とともに変化するケースの結果において、 $\sigma/\mu=0.1 \sim 0.4$ では α_i は同程度の値を示すことに対応する。

図-11のような図を用いることにより、左右岸の σ/μ の値から、決定論的設計に用いる α を推定することが可能と考えられる。ただし、 $\sigma/\mu=0.5$ では、他と比較し α が大きく、 $\sigma/\mu=0.1 \sim 0.4$ とは傾

向が異なることがわかった。

ここで、フィルダムの実施工時には、岩級区分の実施により同一岩級での変形性の極端なばらつきは小さいと想定され、また、堤体盛立前の地盤検査による掘削除去やグラウチングによる改良などにより、ばらつきの幅はある程度限定されると考えられる。よって、ばらつき幅が大きく、他のケースと比較し極端に設計値が小さくなる $\sigma/\mu=0.5$ を除いて、 α の設定について、さらに検討することとした。

図-12 は、左右岸の σ/μ が異なるケースについて、左岸の σ/μ を右岸の σ/μ で除した値を左右岸の σ/μ 比とし、この σ/μ 比と α_i の関係を示したものである。ここでは、 $\sigma/\mu=0.5$ については除外して作図している。図より、左右岸の α_i ともに σ/μ 比との高い相関関係にあり、表-2 に示す近似式により α_i を推定可能と判断した。

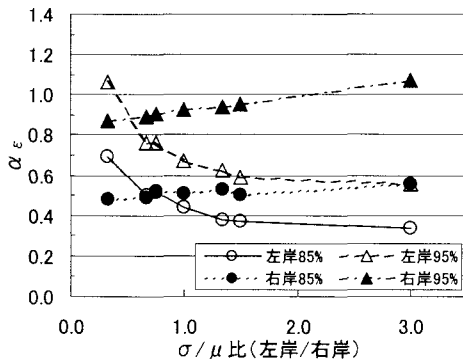


図-12 σ/μ 比と α_i の関係

表-2 σ/μ 比による α の算出

	近似式	相関係数
左岸部 85%	$\alpha_i = 0.4483 * X^{-0.3484}$	0.969
左岸部 95%	$\alpha_i = 0.7002 * X^{-0.2986}$	0.820
右岸部 85%	$\alpha_i = 0.0239 * X + 0.4826$	0.955
右岸部 95%	$\alpha_i = 0.0742 * X + 0.8473$	0.996

(注) X: 左右岸の σ/μ の比 (左岸/右岸)

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の程度を表す変動係数がそれぞれに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。

この結果、左右岸の平均変形係数をそれぞれ500MPa、100MPaとしたモデルでの変形係数のばらつきを考慮した解析では、同等の信頼性を確保した決定論的設計を行うためには、ひずみで評価する必要がある、引張ひずみが小さい領域の影響を除去した継目開き量3mm以下となる箇所を除外した α_i で評価した。 α_i は左右岸の σ/μ 比との比較的高い相関関係があり、 α の推定手法について σ/μ 比を用いた関係式を提案した。

今後は、左右岸の平均変形係数が本検討とは異なるケースについても検討し、決定論的設計に用いる係数 α の合理的な決定手法を確立したい。

参考文献

- 1) 山口嘉一, 中村 真, 新家拓史: 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, 第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.195-200, 2005.
- 2) 山口嘉一, 赤松利之: 確率論の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.
- 3) 土木学会: ダムの岩盤掘削, pp.118-122, 1992.
- 4) 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回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp.353-358, 2003.
- 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.

FUNDAMENTAL STUDY ON RELIABILITY DESIGN ON DEFORMATION OF DAM FOUNDATION WITH A GEOLOGICAL BOUNDARY (Part II)

Yoshikazu YAMAGUCHI 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.