

### Ⅲ-15 複雑な地質条件のダム基礎岩盤の力学的設計の合理化に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 14～平 17

担当チーム：水工研究グループ（ダム構造物）

研究担当者：山口嘉一，佐藤弘行，

富田尚樹，中村洋祐

#### 【要旨】

環境保全上の制約から、さまざまな地質条件を有する地点をダムサイトとせざるを得ない現状にある。本課題では、このような状況を踏まえて、軟岩をダム基礎とした場合について、ダム基礎岩盤の変形性評価方法の提案および変形に対する基礎岩盤の安全性評価方法の提案を目指した研究を行う。

平成 17 年度は、軟岩の非線形変形性を表現するパラメータのばらつきに着目した軟岩の変形性評価について検討した。また、地質境界を有するフィルダム基礎岩盤について、左右岸の変形係数比や変形係数のばらつきの程度、地質境界の位置の違いが、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検討した。これらの成果を踏まえて、4 年間の研究成果をとりまとめた。

キーワード：ダム，基礎岩盤，軟岩，非線形変形特性，ばらつき

#### 1. はじめに

環境に配慮したダム建設を行う場合、環境保全上の制約からさまざまな地質条件を有する地点をダムサイトとせざるを得ない場合がある。このため、ダムの安全性を確保する上で、さまざまな地質条件に応じた基礎岩盤の力学特性の評価と、それを踏まえたダム基礎岩盤、堤体、付属構造物の安全性評価方法の開発が求められている。

本研究課題では、上記要請のうち、変形性の「非線形性」および「ばらつき」といった複雑さ、不確定性が設計上問題になる場合が多いと考えられる軟岩を対象として、ダム基礎岩盤の変形性評価方法の提案および変形に対する基礎岩盤の安全性評価方法の提案を目指した研究を行う。なお、ダムの形式としては、堤体の柔軟性から基礎岩盤に対する制約が緩和され、軟岩基礎における建設事例が相対的に多くなるフィルダムを対象としている。

過年度の研究成果も踏まえた本研究の概要は以下のとおりである。

##### 1) 非線形変形性を考慮したダム基礎の安全性評価手法の検討

平成 14 年度には、軸方向ひずみの測定精度の高い三軸圧縮試験を実施し、その結果に基づいて軟岩の非線形変形特性を評価した。また、平成 15 年度には、三軸圧縮試験結果である応力-ひずみ関係を精度よく再現できる構成式を用いた数値解析により、原

置平板載荷試験と実ダム築堤時の軟岩基礎の変形挙動を再現した。さらに、平成 16 年度は、非線形変形特性の研究をさらに進め、非線形変形特性を表すパラメータのばらつきについての検討を実施した。

平成 17 年度は、平成 16 年度までに検討した非線形変形特性のばらつきに着目した軟岩の変形性評価について考察した。

##### 2) 変形性のばらつきを考慮したダム基礎の安全性評価手法の検討

平成 15 年度には、線形弾性体と仮定した軟岩基礎の変形係数のばらつきがフィルダム築堤時の基礎表面の沈下量や伸び方向ひずみに与える影響を基本的なモデルを用いて検討した。また、平成 16 年度は同じ手法を用いて、ダム軟岩基礎の変形係数の深度方向の増加や堤高・掘削勾配を変えて検討した。

平成 17 年度は、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岩盤について、左右岸の変形係数比の違いや変形係数のばらつきの程度、また、地質境界の位置の違いが、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検討した。さらに、この結果をもとに、所要の信頼性を確保した決定論的設計法について検討した。

最終的には、上記 1)、2)の研究の成果を 2 つの達成目標（①非線形性およびばらつきに着目した軟岩

の変形性評価方法の提案, ②基礎の変形に伴う基礎岩盤の力学的安全性の評価方法(力学設計)の提案)に応じてとりまとめた。

## 2. 軟岩の非線形変形性評価とダム基礎の変形挙動予測

### 2.1 検討方針

フィルダム軟岩基礎の設計において, より現実に近い形で軟岩の非線形変形特性を考慮する場合, 試験結果として得られる非線形変形特性を表す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る。本研究では, 平成15年度までに, 軟岩の非線形変形特性を高精度に評価するために, 自然および人工軟岩を用いた軸方向ひずみの測定精度の高い三軸圧縮試験を実施してきた。また, 平成16年度には, 同一岩種・岩級の試料を25本採取し, 軸方向ひずみの測定精度の高い三軸圧縮試験を実施して, 軟岩の非線形変形特性のばらつきについて検討した。

平成17年度は, これまでの検討結果をもとに非線形変形特性のばらつきに着目した軟岩の変形性評価および変形挙動の予測について検討した。

### 2.2 非線形変形性モデル

軟岩をダム基礎とした場合の変形量予測を高度化するために, 軟岩の非線形変形特性を考慮する必要があることは, 昨年度までの高精度の軸ひずみ測定を行う軟岩に対する三軸圧縮試験<sup>1), 2)</sup>を用いた検討からも明らかである。既往の研究結果<sup>3)</sup>から, 軟岩の非線形変形特性には初期弾性係数の圧力レベル依存性とせん断時の偏差応力レベル依存性があることが明らかとなっている。なお, 偏差応力レベル依存性を考慮することで, ひずみレベルの依存性を考慮できることになる。本研究では, 軟岩を非線形弾性体とみなし, 圧力レベル依存性を(1)式で, 偏差応力レベル依存性については, 応力-ひずみ曲線の接線弾性係数  $E_{tan}$  と偏差応力レベルを関係付けた(2)式で表現し, 三軸圧縮試験結果における応力-ひずみ関係の再現性の検討を行った<sup>3)</sup>。

$$E_{max} = a \cdot p'^b \quad \text{----- (1)}$$

$$\frac{E_{tan}}{E_{max}} = 1 - \left( \frac{q}{q_{max}} \right)^\beta \quad \text{----- (2)}$$

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

ここに,  $a$ ,  $b$ ,  $\beta$  は定数,  $E_{max}$  (MPa)は初期接線弾性係数,  $E_{tan}$  (MPa)は接線弾性係数,  $p'$  (MPa)は平均主応力,  $q/q_{max}$  は偏差応力レベル,  $\sigma_3$  (MPa)は最小主応力,  $c$ ,  $\phi$  は強度定数,  $q$  (MPa)は偏差応力,  $q_{max}$  (MPa)は最大偏差応力を示す。

### 2.2 非線形パラメータの分布と考察

これまでに実施した高精度の軸ひずみ測定装置を用いた三軸圧縮試験の結果をもとに, 前項に示した式で非線形パラメータ  $a$ ,  $b$ ,  $\beta$  を近似した結果を図-1に示す。対象とした軟岩は, A地点は凝灰岩質粗粒砂岩, B地点は砂礫および砂岩シルト, C地点は緑色凝灰岩および斜長流紋岩, D地点は細粒砂岩で

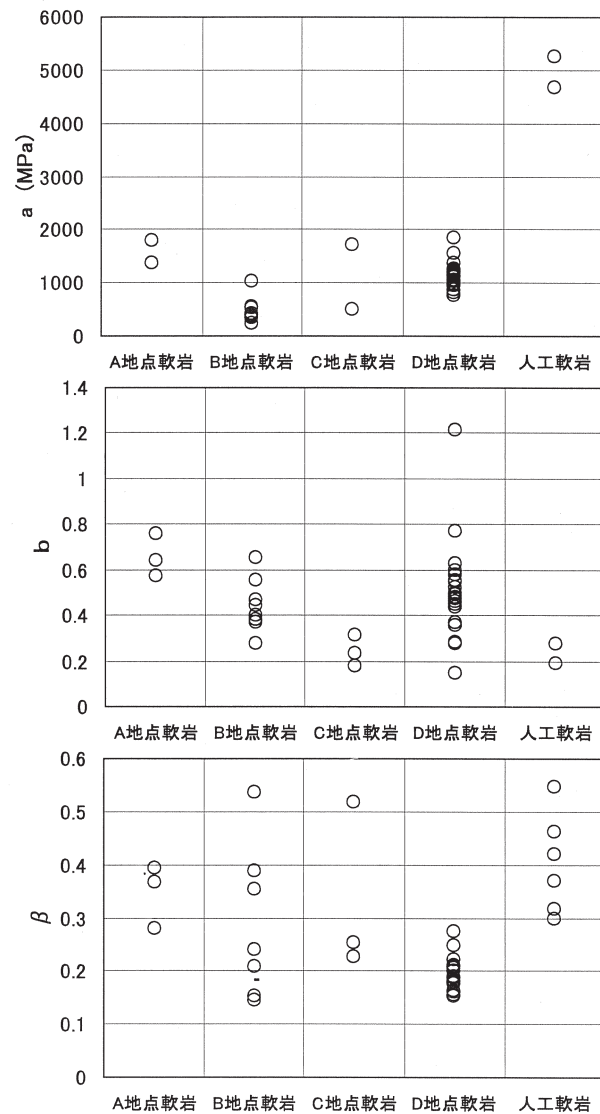


図-1 非線形パラメータの分布

あり、人工軟岩はフィルダム軟岩基礎を想定して作成した供試体（セメント・砂・水の混合体）である。

図より a については人工軟岩が自然軟岩より 5000MPa 程度と大きく、他の 4 地点が 300~2000MPa 程度である。b については 0.2~1.2 の範囲に分布するが地点ごとのばらつきも大きい。β についても各地点ともにばらつきがあり、0.2~0.6 の範囲に概ね分布することがわかる。

以上より、非線形変形特性を表すパラメータは a, b, β と 3 つあり、線形弾性体を仮定した場合の 1 つに比べると多い。このような状況下で非線形変形特性のパラメータのばらつきを考慮してダム基礎の変形に関する設計を行うことは、実務上かなりの作業量となるばかりでなく、過度に安全側の設計を行ってしまう恐れもある。

よって、非線形変形特性のパラメータのばらつきを評価し、それに伴う変形挙動を検討することは実務的でないと考えられる。また、岩種、深度、岩級ごとに非線形変形特性を把握するには多大な労力を要するうえ、コストの面からも経済的ではないと考えられる。したがって、ひずみが大きく変形量分布推定の与える影響が大きい基礎浅部において、軟岩基礎の非線形変形特性を忠実にモデル化し、基礎深部は、孔内載荷試験や弾性波探査結果を基に線形弾性体でモデル化する、もしくは、平板試験結果、孔内載荷試験結果および弾性波探査結果を用いて基礎全体を非線形性を考慮したうえで線形弾性体でモデル化する方法など、平成 15 年度の成果として報告した方法が合理的な設計を行ううえで有効な方法と考えられる。

なお、ダム基礎岩盤を線形弾性体と仮定した場合

の変形性のばらつきを考慮した変形に関する設計方法は 3 章において検討する。

### 3. ダム基礎の変形性のばらつきが変形挙動に与える影響検討

#### 3. 1 解析モデルと解析条件

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があるため、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が求められている。平成 16 年度までに、1 種類の岩で構成されたモデルダムについて、軟岩基礎の変形係数のばらつきを表す変動係数およびばらつきを模擬する確率密度関数の違いや、変形係数の深度方向分布や堤高・掘削勾配の違いが、フィルダム築堤時の基礎表面の沈下量や伸び方向ひずみに与える影響を基本的なモデルを用いて検討している。

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。検討に用いた解析モデルは、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のダム軸沿いの縦断面をモデル化したものである。解析モデル(要素数 6600, 節点数 6811)を図-2 に示す。モデルダムの堤高および斜面部の掘削勾配は、軟岩を基礎とするフィルダムの一般的な値として、それぞれ 50m, 1:1.5 とした<sup>4)</sup>。また、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分布荷重として与えた場合と、堤体をモデル化して

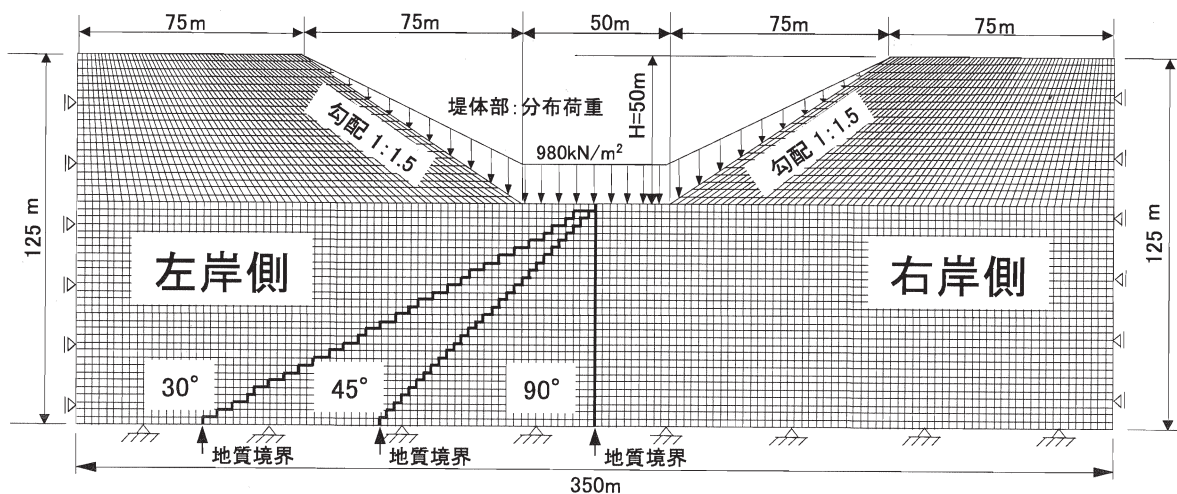


図-2 解析モデル

表-1 検討ケース

		地質境界 角度(°)	左岸側		右岸側	
			平均変形係数 $\mu$ (MPa)	変動係数 $\sigma / \mu$	平均変形係数 $\mu$ (MPa)	変動係数 $\sigma / \mu$
検討 1	CASE 1-1	45	100	0.3	100	0.3
	CASE 1-2		200			
	CASE 1-3		500			
	CASE 1-4		1000			
検討 2	CASE 2-1	30	500	0.3	100	0.3
	CASE 2-2	45				
	CASE 2-3	90				
検討 3	CASE 3-1	45	500	0.1	100	0.1
	CASE 3-2			0.2		0.2
	CASE 3-3			0.3		0.3
	CASE 3-4			0.4		0.4
	CASE 3-5			0.5		0.5
	CASE 3-6		500	0.1	100	0.3
	CASE 3-7			0.2		
	CASE 3-8			0.3		
	CASE 3-9			0.4		
	CASE 3-10			0.5		
	CASE 3-11		500	0.3	100	0.1
	CASE 3-12					0.2
	CASE 3-13					0.3
	CASE 3-14					0.4
	CASE 3-15					0.5

重量を与えた場合とで、基礎岩盤の変位、ひずみ分布に大きな差異が生じないことを確認した<sup>5)</sup>うえて、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<sup>3</sup>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<sup>2</sup>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。本研究では、地質境界が河床部中央部に位置し、その角度が水平から反時計回りに 30°、45°、90° で直線状に存在するケースを設定した。

解析は、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。

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た確率論的解析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  $\mu - \alpha \cdot \sigma$  ( $\mu$ : 平均値,  $\sigma$ : 標準偏差,  $\alpha$ : 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て、決定論的手法により設計を行う際の適切な係数  $\alpha$  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、別途解析回数をそれ以上増やしても係数  $\alpha$  に差が生じないことを確認した<sup>5)</sup>うえて、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、乱数発生の際の確率密度関数は、既往研究において適合性が高いと報告されている正規分布を採用した<sup>5)</sup>

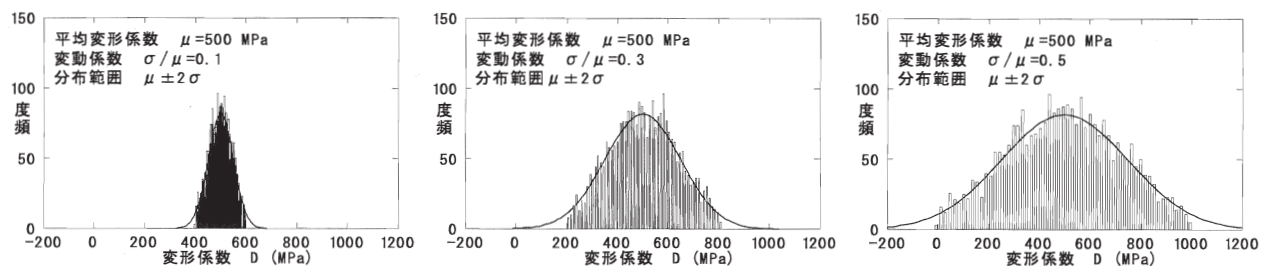


図-3 1realにおける変形係数の頻度分布の一例 ( $\mu=500\text{MPa}$ )

6) 変形係数の分布範囲は、実施工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。

平成17年度の解析は、表-1に示す3種類について行った。

検討1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、右岸側の平均変形係数を100MPa、左岸側の平均変形係数を100, 200, 500, 1000MPaと変化させて検討を行った。地質境界角度は左岸側傾斜45°とした。ばらつきの程度を示す指標には変動係数(=σ/μ)を用い、伊藤、新<sup>9)</sup>の調査結果および風化花崗岩や泥岩等の軟岩を対象とした確率論的変形解析結果、山口、赤松<sup>5)</sup>の砂岩等の軟岩基礎を対象とした整理結果から、0.3を採用した。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。ここで、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<sup>7)</sup>から、設計上重要となる沈下量の絶対値が大きくなる右岸側の方が小さい変形係数100MPaとなるケースとした。

検討2では、地質境界角度の違いによる影響評価を目的として、境界角度を水平反時計回りに30°, 45°, 90°と変化させて検討を行った。左右岸の平均変形係数は、左岸500MPa、右岸100MPaとし、変動係数は検討1と同様に0.3とした。

検討3では、ばらつきの程度を表す変動係数の違いによる影響評価を目的として、左右岸の平均変形係数をそれぞれ500MPa、100MPaに固定し、変動係数を変化させて検討を行った。検討ケースは、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とした。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<sup>5)</sup>から、0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5の5パターンとし、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。地質境界角度は検討1と同様に45°とした。図-3に平均変形係数μ=500MPa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1realでの変形係数の頻度分布の一例を示す。

### 3.2 解析結果と考察

#### 3.2.1 左右岸の平均変形係数の差の影響(検討1)

図-4は、CASE1-3における基礎岩盤表面の沈下量

とひずみ分布の確率論的手法による変形解析結果である。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、個々の打点は変形係数にばらつきを与えた確率論的手法による結果を示している。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節点を結ぶ伸び方向の直ひずみ(以下、ひずみと略称)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。この付近は、河床水平部で上載荷重がもつとも大きい領域にあたることに加えて、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。

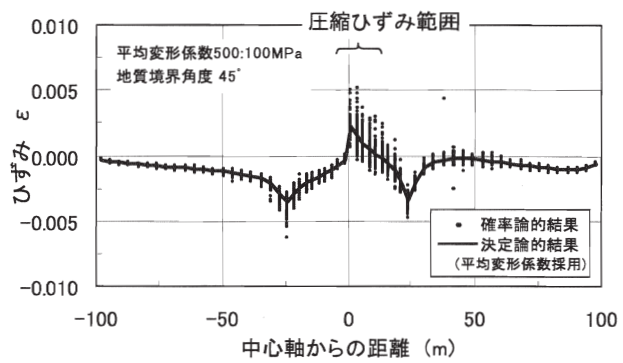
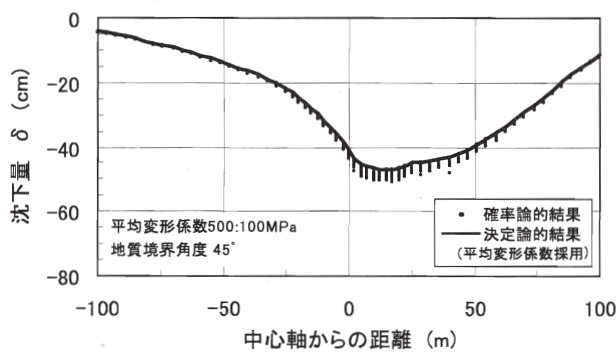
次に、変形係数の平均値を用いた決定論的手法の結果として得られた沈下量 $\delta_\mu$ 、ひずみ $\varepsilon_\mu$ で、各ケースの沈下量 $\delta$ 、ひずみ $\varepsilon$ を正規化した $\delta/\delta_\mu$ 、 $\varepsilon/\varepsilon_\mu$ の非超過率を求め、式(4)、(5)により各非超過率に対応する決定論的手法に用いる $\mu - \alpha \cdot \sigma$ の係数 $\alpha$ を算出した。

$$\alpha_\delta = \left(1 - \frac{\delta_\mu}{\delta}\right) \times \frac{\mu}{\sigma} \quad \text{----- (4)}$$

$$\alpha_\varepsilon = \left(1 - \frac{\varepsilon_\mu}{\varepsilon}\right) \times \frac{\mu}{\sigma} \quad \text{----- (5)}$$

ここに、沈下量に着目して算出した係数 $\alpha$ を $\alpha_\delta$ 、ひずみに着目して算出した係数 $\alpha$ を $\alpha_\varepsilon$ と表記する。また、ひずみから $\alpha_\varepsilon$ を算出する際、決定論的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くするのは逆方向であることから、構造上安全側の変形と考え、 $\alpha_\varepsilon$ の評価から除外した。 $\alpha$ 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の値を設定するかについて議論が必要であるが、本研究での検討結果の考察は、非超過率85%と95%に対応した $\alpha$ について行った。

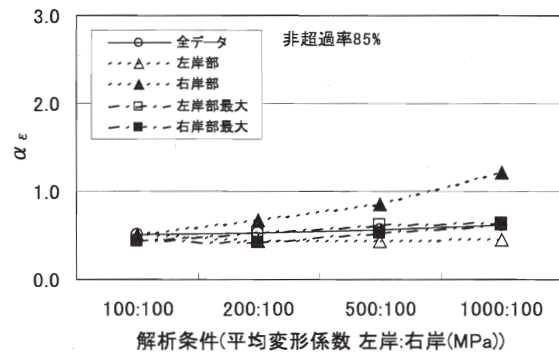
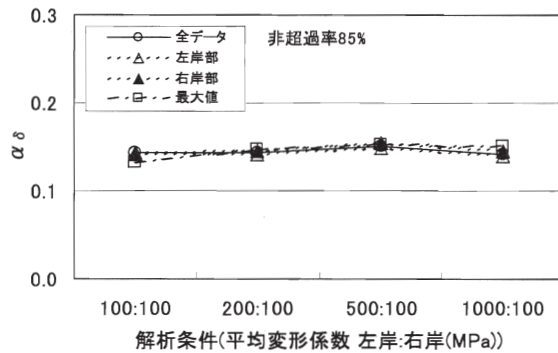
図-5および図-6に非超過率85%と95%における $\alpha$ の比較を示す。沈下量から算出した $\alpha_\delta$ については、非超過率85%および95%ともに左右岸の平均変形係数の差による差異は小さく、評価対象データの違いによる差もほとんどない。ひずみから算出した $\alpha_\varepsilon$ は、左右岸の平均変形係数の差が大きくなるに伴い、特に相対的に変形係数の小さい右岸部のデー



(a) 沈下量分布

(b) ひずみ分布

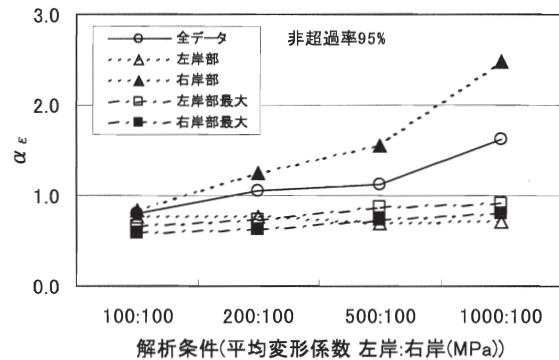
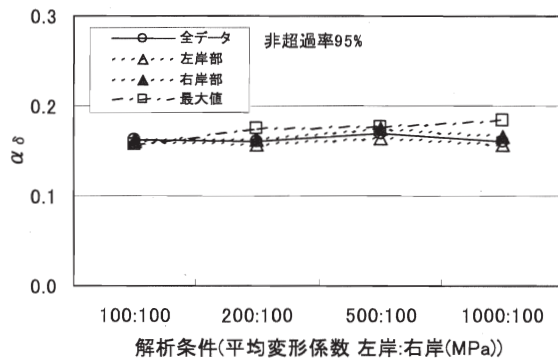
図-4 沈下量およびひずみ分布 (CASE1-3)



(a)  $\alpha_\delta$

(b)  $\alpha_\epsilon$

図-5 非超過率85%における $\alpha$ の比較



(a)  $\alpha_\delta$

(b)  $\alpha_\epsilon$

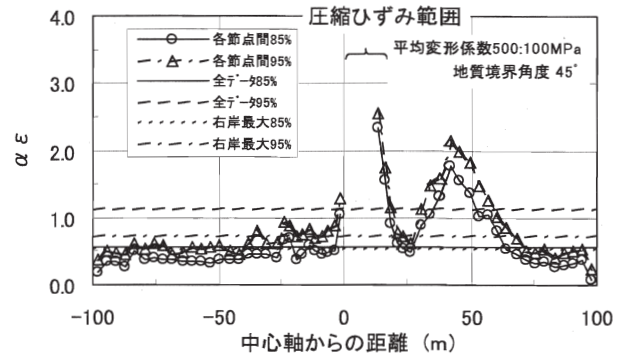
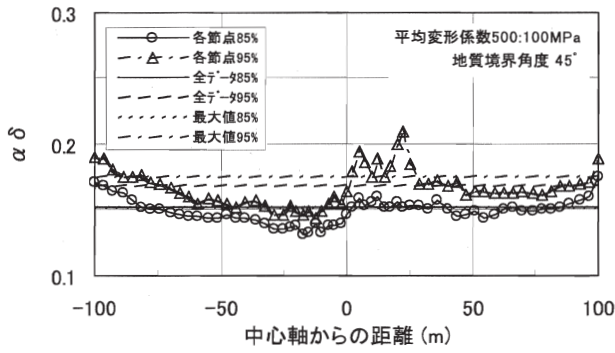
図-6 非超過率95%における $\alpha$ の比較

タを用いて算出したものが大きくなる傾向にある。評価対象データのの違いによる差は $\alpha_\delta$ に比べてかなり大きく、特に、右岸部全データのの評価で大きい傾向を示す。

図-7は、変形解析の結果から基礎岩盤表面の節点あるいは隣接節点間ごとに算出した $\alpha_\delta$ 、 $\alpha_\epsilon$ の非超過率85%、95%の値を示したものである。図には、全データでの評価と、平均変形係数を用いた決定論的解析結果で得られた最大箇所の評価(沈下量は全体の最大箇所、ひずみは右岸隅角部の最大箇所およびその両側)を抽出し整理した $\alpha$ も併記した。

節点ごとの沈下量から算出した $\alpha_\delta$ 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大きくなる傾向はあるが、全データ、最大箇所での評価と大きく異なることがわかる。一方、隣接節点間ごとのひずみから算出した $\alpha_\epsilon$ は右岸側で大きく、特に、ひずみの絶対値は相対的に小さいがひずみのばらつきが大きい河床部の右岸側と右岸アバットメント部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 $\alpha_\epsilon$ は小さい。この結果、本来、基礎の設計として重要となる伸び方向のひずみが最も大きい隅角部付近では、 $\alpha_\epsilon$ が小さい値を示し、相対的にひずみが小さい箇所では $\alpha_\epsilon$ が大きく、これらによって全データ、右岸全データでの評価による $\alpha$

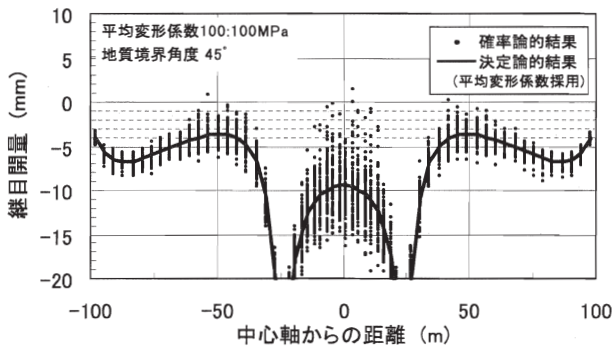


(a)  $\alpha_{\delta}$  (b)  $\alpha_{\epsilon}$   
 図-7 節点あるいは隣接節点間ごとの $\alpha_{\delta}$ および $\alpha_{\epsilon}$ の分布 (CASE1-3)

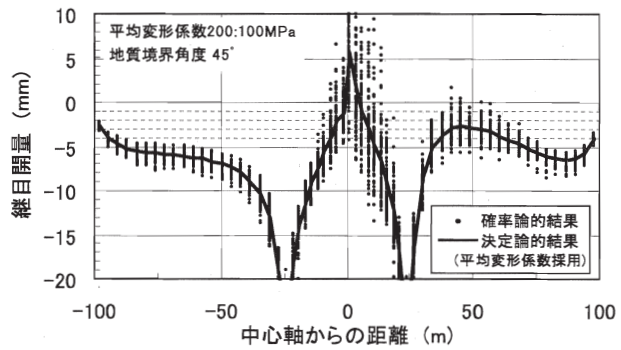
$\epsilon$ が強く影響を受けていることがわかった。

次に、各検討の解析により得られたひずみを用いて、監査廊スパン長を6mとして、引張ひずみとスパン長を乗じて監査廊の1継目あたりの開き量を算出した。図-8に監査廊の継目開き量の分布を示す。ここに、図中の実線は変形係数の平均値 $\mu$ を与えた決定論的手法による継目開き量、個々の打点は変形係数にばらつきを与えた確率論的手法による継目開き量を示している。図より、CASE1-2~4で箇所ごとの $\alpha_{\epsilon}$ が相対的に大きい右岸アバットメント付近は平均変形係数を用いて実施した決定論的解析による継目開き量(図中の実線)が概ね2~4mm程度以下と小さいことがわかる。

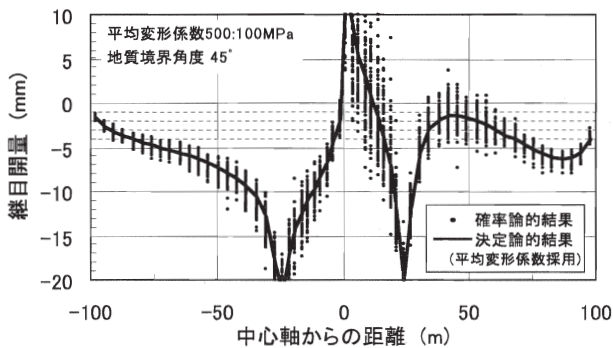
ここで、カルバート式監査廊が設置されたフィルダム築堤時の継目の開きおよびずれに関する既往の調査結果<sup>8)</sup>によると、基礎岩盤の変形係数D(MPa)と堤高H(m)の比が $D/H > 10$ の場合、岩盤の変形性が問題となることはほとんどなく、 $5 < D/H \leq 10$ では設計に際して岩盤の変形性に十分な注意を払う必要があり、さらに $D/H \leq 5$ では、監査廊は設置されていない状況にあるとしている。また、山口、赤松<sup>9)</sup>は、数パターン<sup>10)</sup>の決定論的手法による解析により得られた監査廊スパン長を6mとした場合の継目開き量と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、 $8 < D/H \leq 12$ の範囲では、概ね5mm以



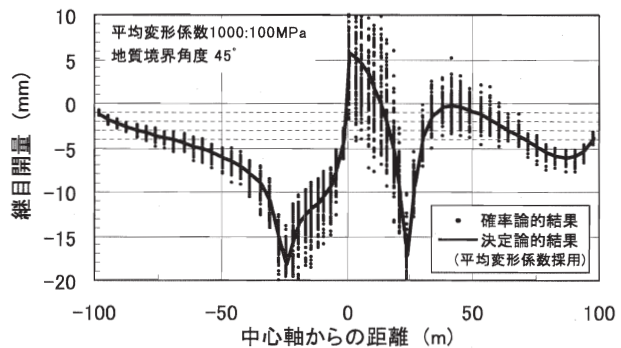
(a) 平均変形係数 100:100MPa (CASE1-1)



(b) 平均変形係数 200:100MPa (CASE1-2)



(c) 平均変形係数 500:100MPa (CASE1-3)



(d) 平均変形係数 1000:100MPa (CASE1-4)

図-8 監査廊継目開き量分布

下と報告している。よって、D/Hが5程度以下と小さい場合には監査廊の継目の開きおよびずれが問題となる可能性が高く、このときの継目開き量は概ね5~10mm以上になると考えられる。

また、貯水機能を最低限保持するという性能規定の観点から、このような問題を引き起こさない範囲に監査廊の継目挙動を抑える必要がある。既設ダムの実測挙動では、5mm程度以下の継目の開きでは上記のような問題は全く発生していないため、十分な余裕をもって性能保持を保証する基準値として、この程度の値を設定することは妥当であると判断する。

以上の観点から、平均変形係数を用いた決定論的解析による継目開き量が小さい節点を評価対象から除外して $\alpha_\epsilon$ を算出した。除外する領域を圧縮域のみ(継目開き量による除外なし)、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パターンとして比較した。図-9に各ケースの対象となる全データで評価した $\alpha_\epsilon$ 分布図を示す。図より、非超過率85%の場合、各パターンの

差異はほとんど認められなかった。非超過率95%では、圧縮域のみ除外に比較し、除外する対象の継目開き量を大きくすれば $\alpha_\epsilon$ は小さくなるが、どのケースでも除外範囲を2~3mm程度で概ね $\alpha_\epsilon$ の低減は収束する傾向を示す。よって、平均変形係数を用いた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すると、設計上大きな問題とならない引張ひずみが小さい領域のデータの $\alpha_\epsilon$ 評価への影響を除去できると判断する。

図-10に、継目開き量3mm以下となる箇所データを除外し算出した $\alpha_\epsilon$ と左右岸の平均変形係数比の関係を示す。継目開き量による除外をしなかったケース(図-5、図-6参照)では、左右岸の平均変形係数比が大きくなるに伴い $\alpha_\epsilon$ は増加し、また、評価対象データのの違いでは右岸部で評価した $\alpha_\epsilon$ が大きい傾向を示したが、継目開き量3mm以下となる節点を除外した場合は、左右岸の平均変形係数比および評価対象データのの違いによる極端な差は認められなかった。

ここで、確率論的手法により設定した非超過率に

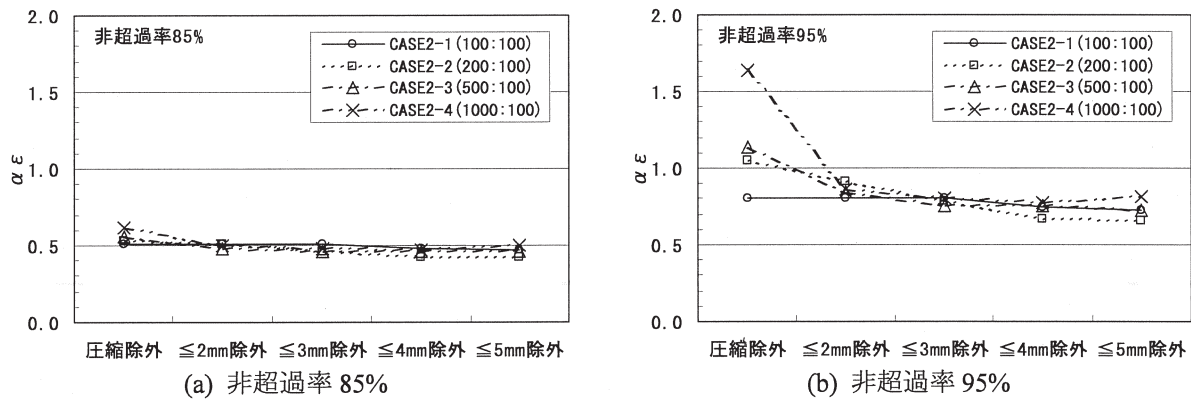


図-9 継目開き量を除外した場合の $\alpha_\epsilon$ 分布(全データ)

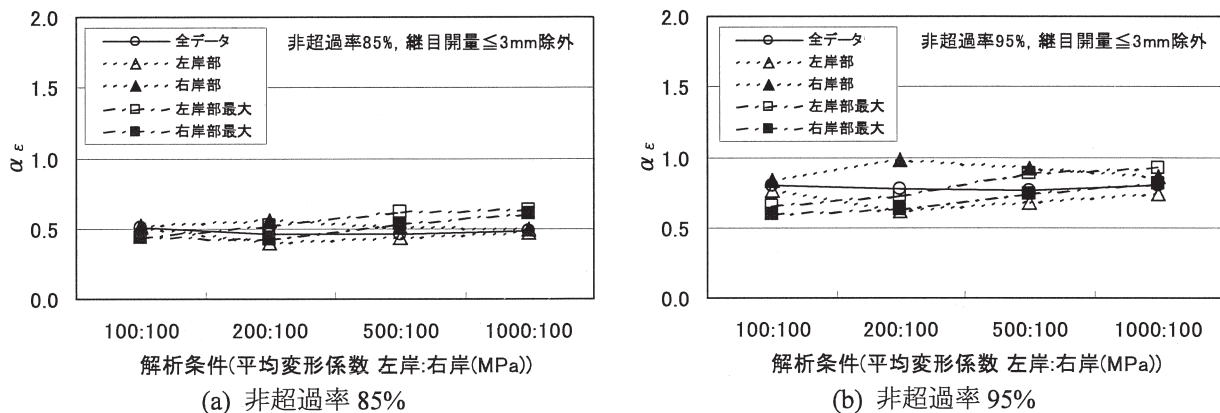


図-10 左右岸の平均変形係数比と $\alpha_\epsilon$ の関係(平均変形係数を用いた決定論的解析による継目開き量3mm以下の箇所のデータ除外)



対応した  $\alpha_\epsilon$  を用いて実施した決定論的手法の結果として得られる継目開き量と、確率論的手法による各点における非超過率に対応した継目開き量とを比較した。

表-2 に決定論的手法に用いた、平均変形係数を用いて別途実施した決定論的解析による継目開き量 3mm 以下となる箇所を除外した場合の非超過率 85%、95%に対応する  $\alpha_\epsilon$  と  $\mu - \alpha_\epsilon \cdot \sigma$  に対応する変形係数 D の一覧を示す。図-11 に表-2 の変形係数を用いた決定論的手法による解析結果と確率論的手法による解析結果の非超過率相当の継目開き量の分布を示す。図中の実線および破線は非超過率 85% の全データおよび左右岸ごとのデータで評価した  $\alpha_\epsilon$  を適用した決定論手法による継目開き量、一点破線および二点破線は同様に非超過率 95% で評価した  $\alpha_\epsilon$  を適用した決定論手法による継目開き量、

丸(○)および三角(△)のシンボルは確率論手法による非超過率 85%、95% 相当の継目開き量である。

図より、どの検討ケースにおいても、非超過率 85%、95% に対応する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は概ね近似した分布を示していることがわかる。決定論的解析結果と確率論的解析結果の差が相対的に大きいのは、河床部右岸側付近(0~15m 付近)および右岸アバットメントの隅角部付近を除いた範囲(40~60m 付近)であるが、これらは、平均変形係数を用いた決定論的解析において継目開き量 3mm 以下となる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と判断した箇所である。

よって、平均変形係数を用いて別途実施した決定論的解析の結果において、継目開き量 3mm 以下となる箇所を除外して算出した非超過率に対応する  $\alpha$

表-2 平均変形係数を用いて別途実施した決定論的解析による継目開き量 3mm 以下の箇所のデータを除外して評価した  $\alpha_\epsilon$  による変形係数一覧

非超過率と 使用データ	平均変形係数 100:100MPa				平均変形係数 200:100MPa				平均変形係数 500:100MPa				平均変形係数 1000:100MPa			
	左岸		右岸		左岸		右岸		左岸		右岸		左岸		右岸	
	$\alpha_\epsilon$	D (MPa)	$\alpha_\epsilon$	D (MPa)	$\alpha_\epsilon$	D (MPa)	$\alpha_\epsilon$	D (MPa)	$\alpha_\epsilon$	D (MPa)	$\alpha_\epsilon$	D (MPa)	$\alpha_\epsilon$	D (MPa)	$\alpha_\epsilon$	D (MPa)
85% 全データ	0.51	84.7	0.51	84.7	0.46	172.4	0.46	86.2	0.46	431.0	0.46	86.2	0.48	856.0	0.48	85.6
左右岸ごと	0.63	81.1	0.68	79.6	0.40	176.0	0.56	83.2	0.44	434.0	0.51	84.7	0.48	856.0	0.50	85.0
95% 全データ	0.80	76.0	0.80	76.0	0.78	153.2	0.78	76.6	0.76	386.0	0.76	77.2	0.80	760.0	0.80	76.0
左右岸ごと	0.77	76.9	0.83	75.1	0.62	162.8	0.98	70.6	0.68	398.0	0.93	72.1	0.74	778.0	0.86	74.2

\*) 表中のDは、 $\mu - \alpha_\epsilon \sigma$  に相当する変形係数である。

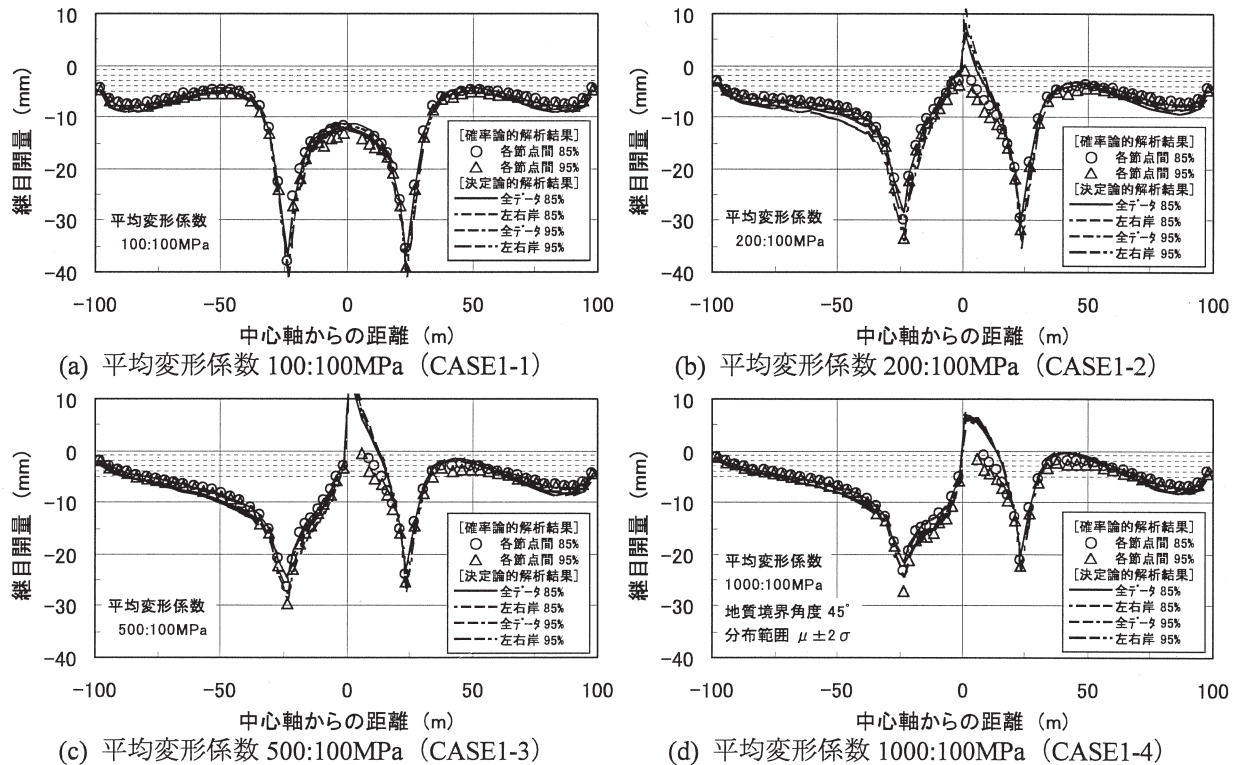


図-11 決定論的手法と確率論的手法による継目開き量の比較

$\alpha_\varepsilon$ を用いた決定論的手法による解析により、確率論的手法により設定した非超過率に対応する継目開き量分布を比較的精度良く推定できることがわかった。

### 3.2.2 地質境界角度の影響（検討2）

図-12 に CASE2-1（地質境界角度  $30^\circ$ ）および CASE2-3（地質境界角度  $90^\circ$ ）の基礎岩盤表面のひずみ分布、図-13 に、これらの隣接節点間ごとに算出した  $\alpha_\varepsilon$  の非超過率 85%、95% の分布を示す。な

お、CASE2-2（地質境界角度  $45^\circ$ ）については、検討1の CASE1-3（前掲、図-4、7）を参照されたい。

図より、隣接節点間ごとの  $\alpha_\varepsilon$  が相対的に大きくなる箇所は、これまでの検討結果と同様に、発生する引張ひずみの小さい河床部および右岸アバットメント部の隅角部付近を除く範囲である。CASE2-3 では、地質境界が位置する河床中心軸の右岸側で最大のひずみとなるが、その箇所の  $\alpha_\varepsilon$  は比較的小さい。よって、地質境界角度が異なる検討においても、隣

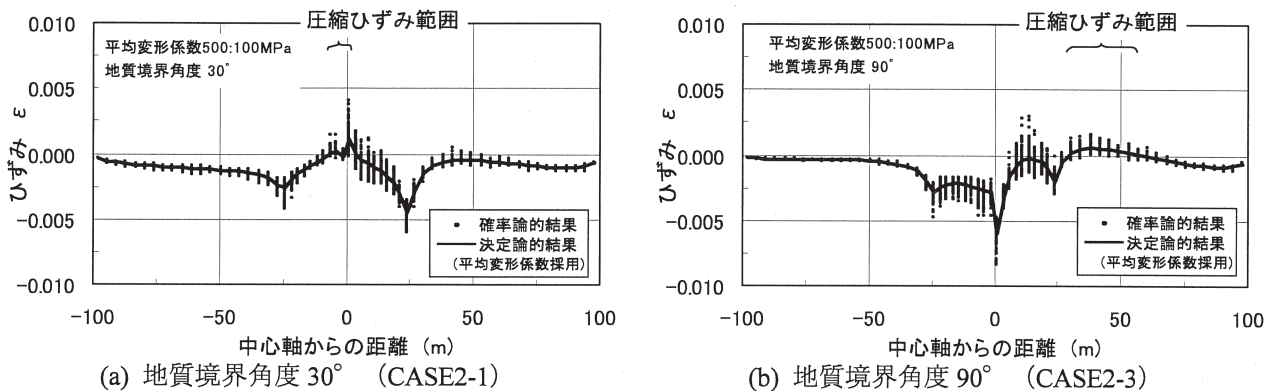


図-12 ひずみ分布

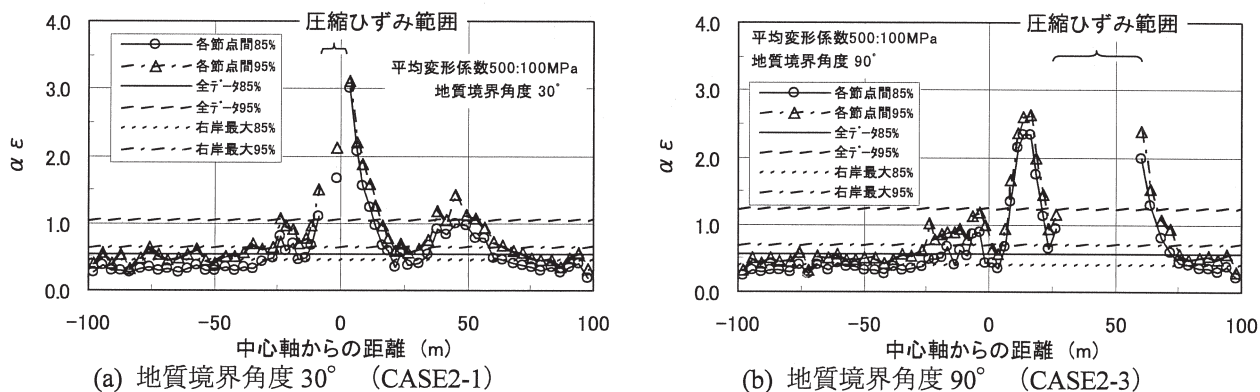


図-13 隣接節点間ごとの  $\alpha_\varepsilon$  分布

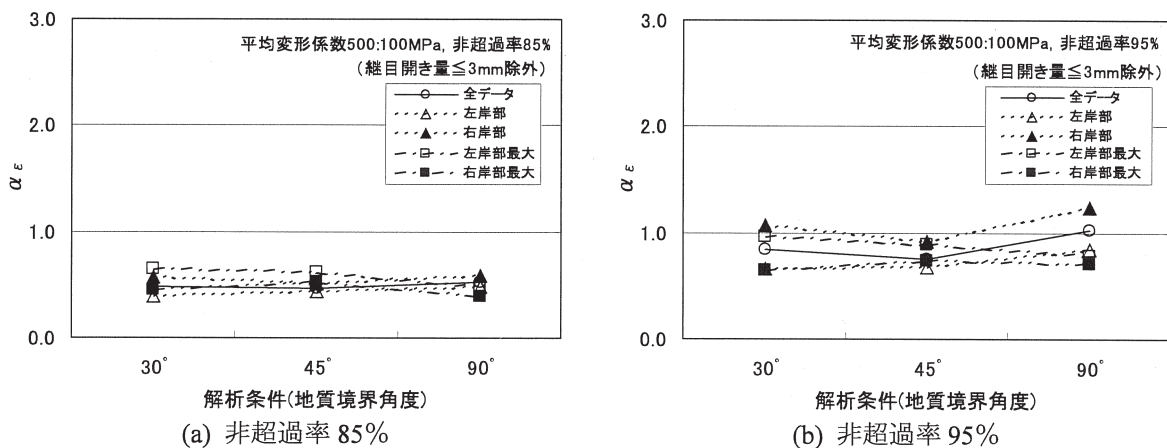


図-14 平均変形係数を用いた決定論的解析による継目開き量 3mm 以下の箇所のデータを除外し算出した  $\alpha_\varepsilon$  の比較

接節点間ごとの $\alpha_e$ が相対的に大きくなる箇所は、平均変形係数を用いた決定論的解析によるひずみが小さい範囲であることがわかる。

そこで、検討1と同様に、平均変形係数を用いて別途実施した決定論的解析による継目開き量が3mm以下となる箇所のデータを除外して $\alpha_e$ を評価した。図-14に非超過率85%および95%における $\alpha$ の比較を示す。 $\alpha_s$ については、地質境界角度の違いによる差異は非超過率85%および95%ともにほとんどなく、また評価対象データのの違いによる差もほとんどない。また、継目開き量3mm以下となる箇所のデータを除外して評価した $\alpha_e$ は、地質境界角度による $\alpha_e$ の差は小さく、評価対象データのの違いによる差異も小さい。 $\alpha_e$ は、全データで評価した場合、非超過率85%の場合で0.46~0.52、非超過率95%場合で0.76~1.02で、地質境界角度の違いによる $\alpha$ の評価の差は小さいことがわかった。

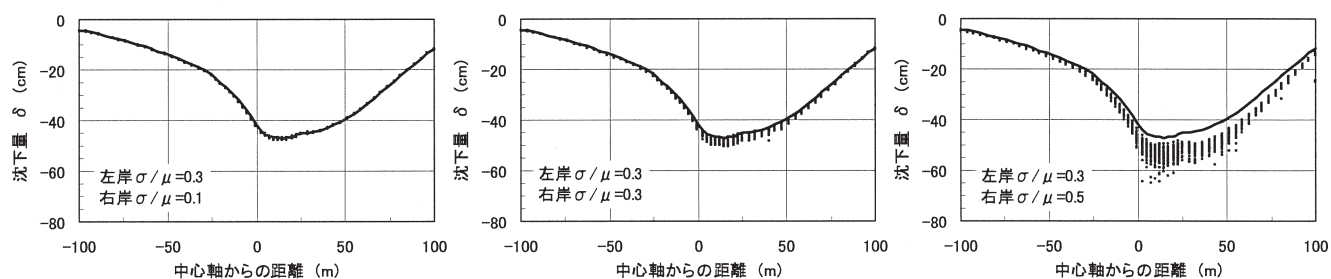
### 3.2.4 変形係数の変動係数の差の影響 (検討3)

図-15, 16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 3-11, 3-13, 3-15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。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、 $\sigma/\mu$ が大きいほど大きく、右岸側でその傾向は顕著である。

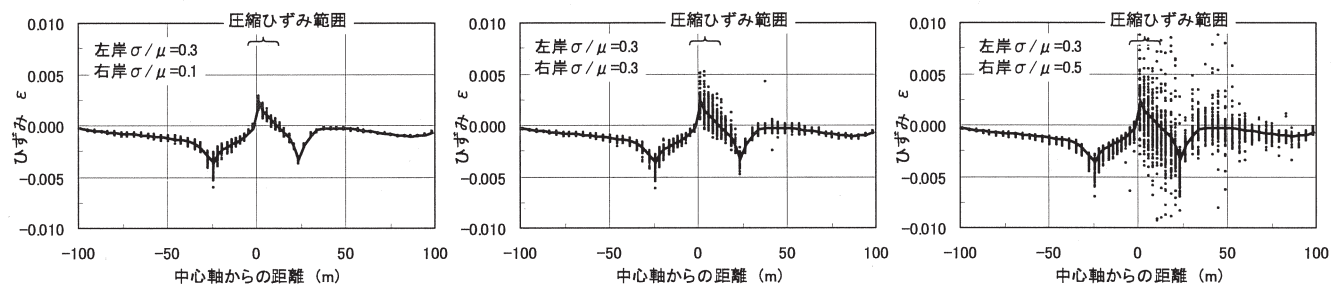
次に、図-17, 18に非超過率85%および95%における $\alpha$ の算出結果を示す。ここで、ひずみから $\alpha_e$ を算出する際、検討1, 2と同様に、平均変形係数を用いて別途実施した決定論的解析による継目開き量が3mm以下となる箇所のデータを除外することとした。図の(a)は左右岸の $\sigma/\mu$ が同値でともに変化したケース、(b), (c)はそれぞれ左岸のみ、右岸のみの $\sigma/\mu$ が変化したケースの $\alpha$ の比較である。図には、地表面の地質に応じて左右岸ごとに評価した結果を示している。

図より、全般に、沈下量から算出した $\alpha_s$ 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 $\alpha_e$ は0.4~1.2程度で、評価するデータのの違いによる差も大きい。左右岸の $\sigma/\mu$ が同値でともに変化するケースでは、 $\sigma/\mu=0.1\sim0.4$ における $\alpha_e$ の変動は小さく、 $\sigma/\mu=0.5$ で相対的に大きくなる。左岸の $\sigma/\mu$ のみが変化するケースでは、左岸部の $\alpha_e$ は $\sigma/\mu$ 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 $\alpha_e$ は変動が小



(a)  $\sigma/\mu$ =左岸 0.3, 右岸 0.1 (CASE 3-11) (b)  $\sigma/\mu$ =左岸 0.3, 右岸 0.3 (CASE 3-13) (c)  $\sigma/\mu$ =左岸 0.3, 右岸 0.5 (CASE 3-15)

図-15 沈下量分布 (右岸の変動係数 $\sigma/\mu$ が変化)



(a)  $\sigma/\mu$ =左岸 0.3, 右岸 0.1 (CASE 3-11) (b)  $\sigma/\mu$ =左岸 0.3, 右岸 0.3 (CASE 3-13) (c)  $\sigma/\mu$ =左岸 0.3, 右岸 0.5 (CASE 3-15)

図-16 ひずみ分布 (右岸の変動係数 $\sigma/\mu$ が変化)

さい。一方、右岸のみが変化するケースは、 $\sigma/\mu$ が大きくなるに伴い $\alpha_\epsilon$ は概ね増加する傾向を示し、左右岸の $\sigma/\mu$ 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。

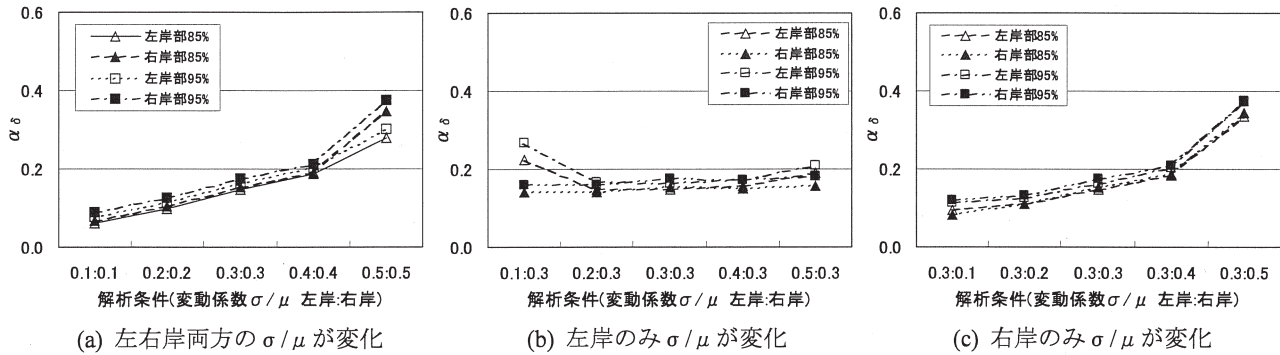


図-17  $\alpha_\delta$  の比較

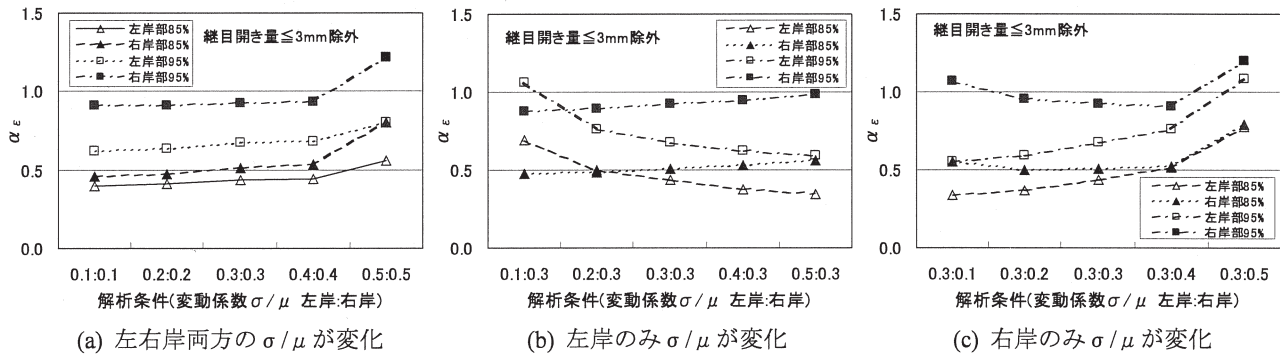


図-18  $\alpha_\epsilon$  の比較

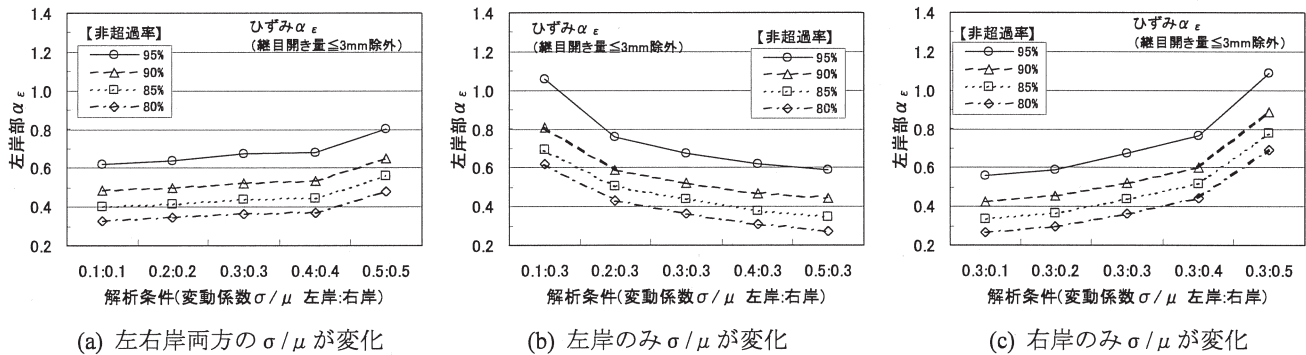


図-19 各非超過率に対応した  $\alpha_\epsilon$  の比較 (左岸部で算出した  $\alpha_\epsilon$ )

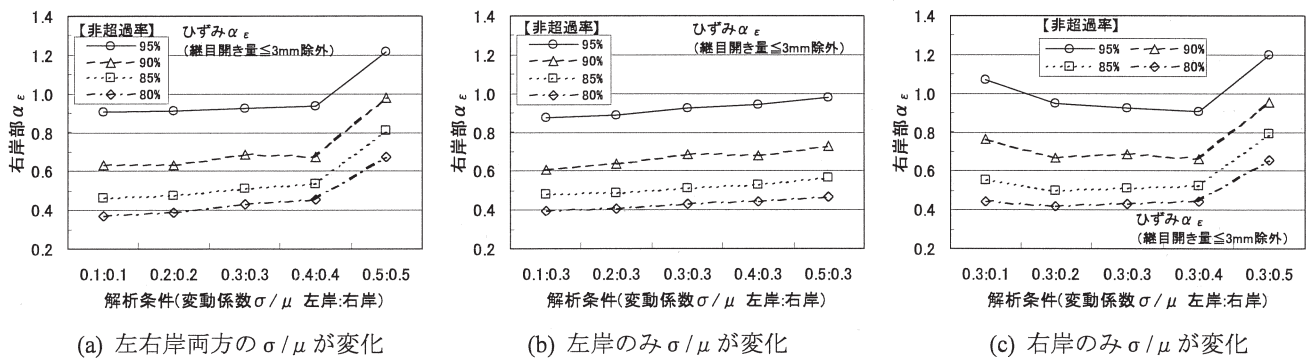


図-20 各非超過率に対応した  $\alpha_\epsilon$  の比較 (右岸部で算出した  $\alpha_\epsilon$ )

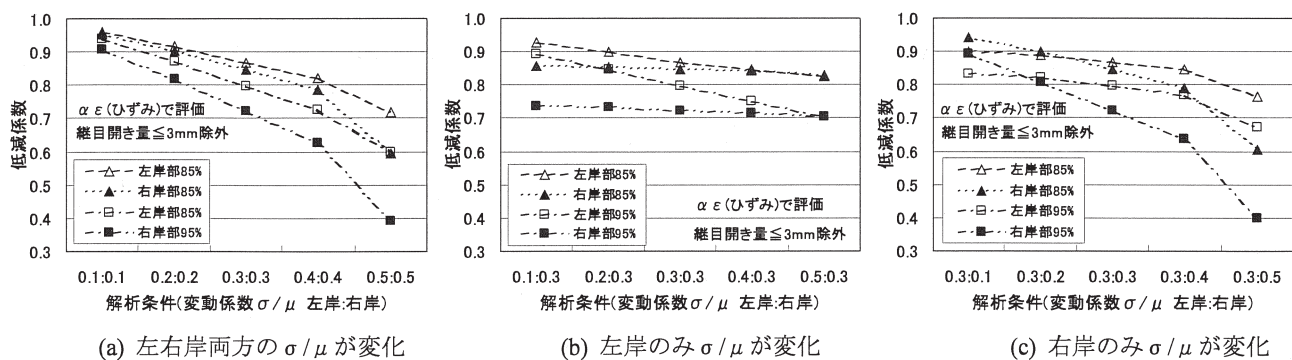


図-21 低減係数の比較

次に、非超過率 80%, 85%, 90%, 95%に対応した  $\alpha$  を算出し、変動係数の変化における推移を分析した。図-19, 20 に各非超過率における  $\alpha_i$  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  $\alpha_i$  が比較的大きい値を示す。左右岸片方の  $\sigma/\mu$  が変化する場合、どちらの場合も左岸部で算出した  $\alpha_i$  の変動が大きく、右岸部で算出した  $\alpha_i$  は  $\sigma/\mu$  の違いによらず、ほぼ同程度の値を示す。特に、 $\sigma/\mu$  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  $\alpha$  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、 $\alpha$  をかなり大きめに設定する必要がある。

ここで、変動係数が小さい解析条件においては、式(4)および(5)を用いた  $\alpha$  による評価では、式中の分母にある  $\sigma$  が小さくなるため、計算される  $\alpha$  が相対的に大きくなる。このため、 $\alpha$  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、 $\alpha$  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  $\mu$  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  $\sigma/\mu$  の変化における低減係数の推移を分析した。図-21 に、ひずみで評価した  $\alpha_i$  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、 $\sigma/\mu$  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  $\sigma/\mu$  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  $\sigma/\mu$  のみが増化するケースでは、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  $\sigma/\mu$  のみが増化するケースは、右岸部の低減係数が大きく変化し、左右岸両方の  $\sigma/\mu$  が変化する場合と概ね近似する。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。

### 3.2.5 決定論的設計に用いる係数 $\alpha$ の推定

以上の検討により得られた非超過率 85% および 95% における  $\alpha$  の算出結果を表-3 に示す。表より、沈下量から算出した  $\alpha_i$  は、変形係数のばらつきの程度を示す変動係数を 0.3 とした検討 1, 検討 2 では、左右岸の変形係数比および地質境界角度にかかわらず、全データ、左右岸別の評価ともに、非超過率 85% で 0.13~0.15、非超過率 95% で 0.15~0.18 と同程度の値となっている。また、変動係数が変化した検討 3 では、変形係数の分布幅が極端に小さい  $\sigma/\mu = 0.1$  や、極端に大きい  $\sigma/\mu = 0.5$  を除けば、非超過率 85% で 0.10~0.19、非超過率 95% で 0.11~0.21 と、こちらも同程度の値を示す。

一方、ひずみから算出した結果については、フィルダム監査廊の継目の開き量に着目して、継目開き量が微小の場合は基礎岩盤の変形に関する設計において大きな問題とはならないと判断し、平均変形係数を用いた決定論的設計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て  $\alpha_i$  を算出した。この結果、変形係数の分布幅が極端に小さい  $\sigma/\mu = 0.1$  や、極端に大きい  $\sigma/\mu = 0.5$  を除くと、検討条件別、評価対象データ別の差は小さく、非超過率 85% で 0.40~0.59、非超過率 95% で 0.59~1.24 であり、沈下量から算出した  $\alpha_i$  に比較し相対的に大

表-3 非超過率 85%, 95%を対象とした各評価項目における  $\alpha_\delta$ ,  $\alpha_\varepsilon$

解析ケース	非超過率85%						非超過率95%						
	$\alpha_\delta$			$\alpha_\varepsilon$ (継目開き量 $\leq$ 3mm除外)			$\alpha_\delta$			$\alpha_\varepsilon$ (継目開き量 $\leq$ 3mm除外)			
	全データ	左岸部	右岸部	全データ	左岸部	右岸部	全データ	左岸部	右岸部	全データ	左岸部	右岸部	
検討1	CASE 1-1	0.14	0.14	0.14	0.51	0.51	0.52	0.16	0.16	0.16	0.80	0.77	0.83
	CASE 1-2	0.14	0.14	0.14	0.46	0.40	0.55	0.16	0.16	0.16	0.78	0.62	0.98
	CASE 1-3	0.15	0.15	0.15	0.46	0.44	0.51	0.17	0.16	0.18	0.76	0.67	0.93
	CASE 1-4	0.14	0.14	0.15	0.48	0.48	0.50	0.16	0.16	0.17	0.80	0.74	0.86
検討2	CASE 2-1	0.14	0.13	0.14	0.48	0.40	0.57	0.16	0.15	0.16	0.85	0.67	1.07
	CASE 2-2	0.15	0.15	0.15	0.46	0.44	0.51	0.17	0.16	0.18	0.76	0.67	0.93
	CASE 2-3	0.14	0.14	0.15	0.52	0.49	0.59	0.17	0.16	0.17	1.02	0.85	1.24
検討3	CASE 3-1	0.07	0.06	0.07	0.42	0.40	0.46	0.08	0.08	0.09	0.72	0.62	0.91
	CASE 3-2	0.10	0.10	0.10	0.44	0.41	0.48	0.12	0.11	0.13	0.72	0.64	0.91
	CASE 3-3	0.15	0.15	0.15	0.46	0.44	0.51	0.17	0.16	0.18	0.76	0.67	0.93
	CASE 3-4	0.19	0.19	0.19	0.48	0.44	0.54	0.21	0.20	0.21	0.77	0.68	0.93
	CASE 3-5	0.33	0.28	0.35	0.64	0.56	0.81	0.36	0.30	0.38	0.99	0.80	1.22
	CASE 3-6	—	0.22	0.14	—	0.70	0.48	—	0.27	0.16	—	1.06	0.87
	CASE 3-7	—	0.15	0.14	—	0.50	0.49	—	0.17	0.16	—	0.76	0.89
	CASE 3-8	—	0.15	0.15	—	0.44	0.51	—	0.16	0.18	—	0.67	0.93
	CASE 3-9	—	0.16	0.15	—	0.38	0.53	—	0.17	0.17	—	0.62	0.94
	CASE 3-10	—	0.19	0.16	—	0.35	0.57	—	0.21	0.18	—	0.59	0.98
	CASE 3-11	—	0.10	0.08	—	0.34	0.55	—	0.11	0.12	—	0.56	1.07
	CASE 3-12	—	0.11	0.11	—	0.37	0.50	—	0.13	0.13	—	0.59	0.95
	CASE 3-13	—	0.15	0.15	—	0.44	0.51	—	0.16	0.18	—	0.67	0.93
	CASE 3-14	—	0.19	0.19	—	0.51	0.52	—	0.20	0.21	—	0.76	0.91
	CASE 3-15	—	0.34	0.34	—	0.78	0.79	—	0.37	0.37	—	1.09	1.20

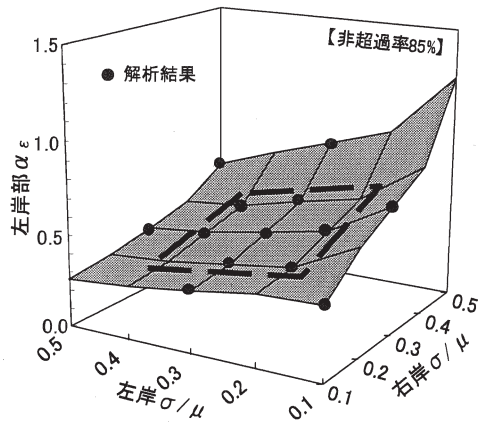
きく、同等の信頼性を確保した決定論的設計ではひずみで評価する必要がある。

次に、検討3で実施した変動係数の違いによる結果をもとに、おける左右岸の変動係数  $\sigma/\mu$  に対する非超過率 85%の  $\alpha_\varepsilon$  を三次元的な分布として表したものを図-22 に示す。また、検討1で実施している平均変形係数 200:100MPa, 1000:100MPa についても検討3と同様の検討を実施し、得られた  $\alpha_\varepsilon$  の分布を図-23, 24 に示す。左右岸で変動係数  $\sigma/\mu$  が異なる場合、全データを対象として評価できないため、ここでは左右岸各々で  $\alpha_\varepsilon$  を評価した。面上の格子の交点は、本検討で解析した左右岸の  $\sigma/\mu$  の組合せに対応した  $\alpha_\varepsilon$  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、左岸側ないしは右岸側の  $\sigma/\mu=0.3$  の結果をもとに、他岸側の  $\sigma/\mu$  の変化に対する変化傾向が同じであるとして推定した。このような図を用いることにより、左右岸の  $\sigma/\mu$  の値から、決定論的設計に用いる  $\alpha$  を推定することが可能と考えられる。したがって、変形性のばらつきを考慮したダム基礎岩盤の決定論的設計について、以下の項目が既知となれば、設計値を設定することが可能となる。

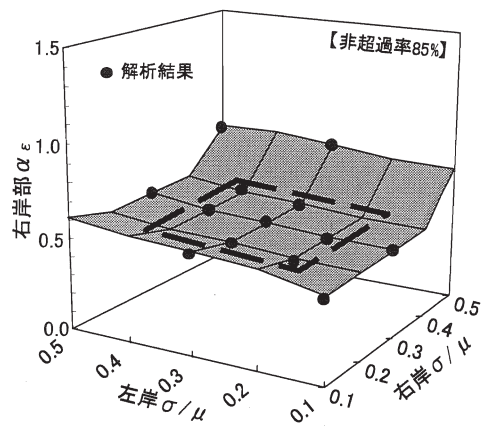
- 1) 地質境界の有無
- 2) 原位置変形試験による変形係数の調査

- ・平均変形係数の設定
  - ・変形係数の頻度分布の確認
  - ・変形係数のばらつき程度(変動係数)の調査
- 仮に、地質境界が  $45^\circ$  で分布する基礎岩盤で、左右岸の平均変形係数それぞれ 200MPa, 100MPa, 変動係数  $\sigma/\mu$  がそれぞれ 0.2, 0.4 の場合、非超過率を 85%と設定すると、決定論的設計に用いる  $\alpha$  として、図-23 より左岸 0.61, 右岸 0.53 が得られることとなる。

ここで、表-3 に示した非超過率 85%に対応する  $\alpha_\varepsilon$  は、検討条件や評価対象データの違いによる  $\alpha_\varepsilon$  の差異は小さく、左右岸の変形係数比および地質境界角度の違いによる検討結果ともに 0.4~0.6 程度である。非超過率 95%に対応する  $\alpha_\varepsilon$  は、評価対象データの違いによる差が比較的大きく、全データで評価した場合が 0.7~1.0 程度、左岸部で評価した場合 0.6~1.0 程度、右岸部で評価した場合 0.8~1.2 程度である。しかし、これらの  $\alpha$  を適用した決定論的手法での変形解析結果は、全データおよび左右岸それぞれのデータで評価した  $\alpha$  を適用した場合、それぞれが同程度のひずみを示し、確率論的解析による結果とも近似した分布が得られたため、全データで評価して問題ないとする。また、図-22~24 より、 $\sigma/\mu=0.4\sim 0.5$  の範囲では、 $\alpha_\varepsilon$  は急激な変化を示す傾向

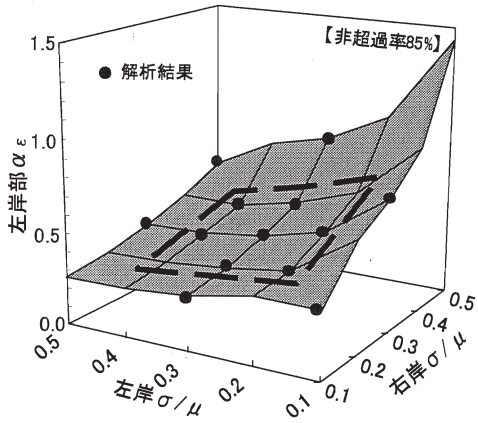


(a) 左岸部

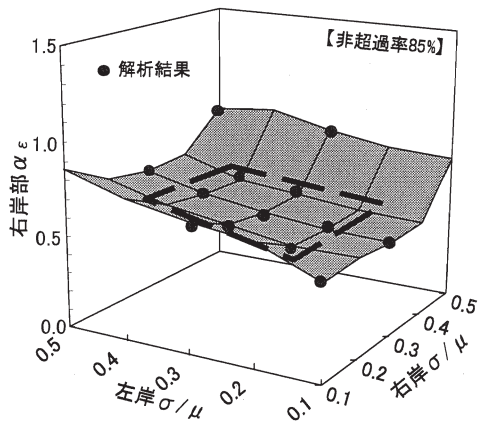


(b) 右岸部

図-22  $\alpha_\varepsilon$ 分布 (平均変形係数500:100, 非超過率85%)

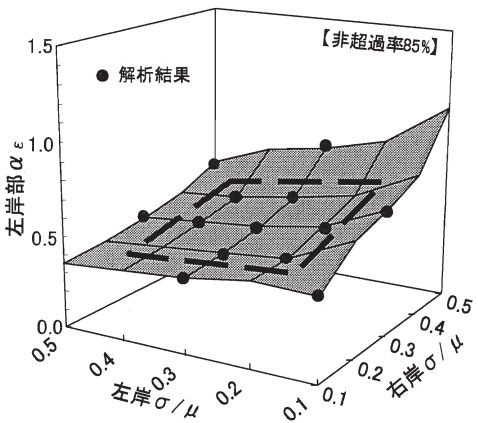


(a) 左岸部

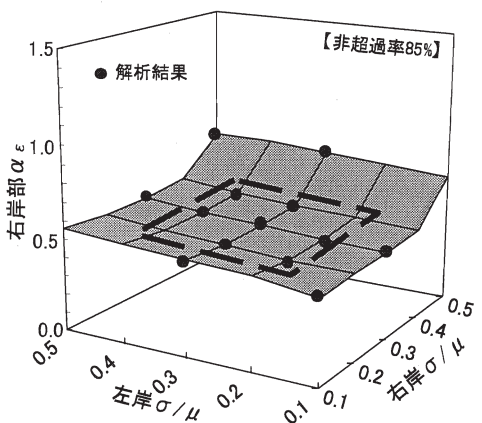


(b) 右岸部

図-23  $\alpha_\varepsilon$ 分布 (平均変形係数200:100, 非超過率85%)



(a) 左岸部



(b) 右岸部

図-24  $\alpha_\varepsilon$ 分布 (平均変形係数1000:100, 非超過率85%)

にあるのに対し、前述したように一般的なばらつきの範囲と考えられる図中の太破線で示した中央付近 ( $\sigma/\mu=0.2\sim0.4$ ) については、 $\alpha_\varepsilon$ は比較的ゆるやかな変化を示しており、左右岸の平均変形係数の差

による違いも比較的小さい。よって、この範囲の分布であれば、左右岸の変動係数が異なっても、概ね左右岸の変動係数が同じ場合の $\alpha$ で代表させても大きな違いは生じないと考える。

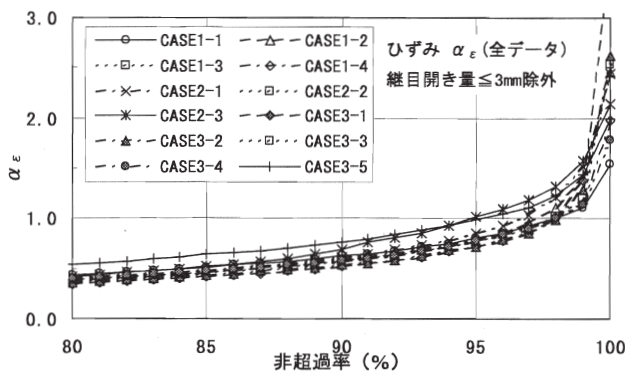


図-25  $\alpha_\epsilon$  分布 (全データ評価)

決定論的手法に基づく従来のフィルダム基礎岩盤の変形性に関する設計では、平板載荷試験、ボーリング孔での孔内載荷試験等の原位置変形試験により変形係数を評価している。原位置試験で得られる複数のデータは、ばらつきをもって得られ、これらの複数データの平均値  $\mu$  から変形係数を  $\mu - \alpha \cdot \sigma$  とし、 $\alpha$  として、0(平均値を採用)、0.5、1.0 程度の値を用いて、ある程度ばらつきの影響を考慮して設計を実施している。しかし、これらの  $\alpha$  には明確な根拠はなく、既往事例に基づく経験的な値であり、その信頼性の向上が重要と考えられていた。

本研究において、平均変形係数を用いた決定論的解析による継目開き量 3mm 以下となる箇所を除外して全データで評価した  $\alpha_\epsilon$  の分布を図-25 に示す。図より、 $\alpha_\epsilon$  の全ケースの平均値で  $\alpha_\epsilon = 0.5$  に相当する非超過率は 86%、 $\alpha_\epsilon = 1.0$  では非超過率 97% とかなり高い信頼度が確保されている。

よって、決定論的設計法における変形係数の設定について、本研究はある程度限定されたモデルケースであるため、決定論的設計に採用すべき非超過率については別途設定する必要があるが、非超過率 85% を採用した場合に  $\alpha = 0.4 \sim 0.6$  程度、非超過率 95% の場合は  $\alpha = 0.7 \sim 1.0$  程度の値が妥当と判断する。

#### 4. まとめ

平成 17 年度に実施した軟岩の非線形変形性の評価方法についての検討と、モデルダムを対象とした軟岩基礎の変形係数のばらつきの及ぼす影響についての検討結果から、以下のことが明らかになった。

- 1) 軟岩の乱さない試料に対して実施した高精度三軸圧縮試験結果から推定した非線形変形特性は、採取地点ごとの非正常変形特性を表すパラメー

タのばらつきが大きい。また、パラメータの種類も多く、これらのばらつきを評価して設計を実施することは実務的でないと判断した。

- 2) モデルダムを用いた線形変形解析では、沈下量から算出した  $\alpha_\epsilon$  は、ひずみから算出した  $\alpha_\epsilon$  と比較して相対的に小さい。監査廊の継目間隔(ブロック長)設計を行うためには、ひずみで評価する必要がある。
- 3) ひずみから  $\alpha_\epsilon$  を算出する場合、微少なひずみ領域におけるばらつきの影響を除外するため、フィルダムの止水機能を低下させないと判断した監査廊の継目開き量 3mm 以下を除外して算出することで、現実的な係数が得られていると判断した。
- 4) 継目開き量 3mm 以下を除外して算出した所定の非超過率に対応する  $\alpha_\epsilon$  から定めた変形係数を用いて、決定論的手法による変形解析を行った結果、地表面のひずみ分布について同じ非超過率に対応する確率論的解析結果と近似した分布が得られ、全データで評価した  $\alpha$  による決定論的解析で確率論的手法を概ね評価できることがわかった。
- 5) 左右岸の変動係数が変化する検討で得られた  $\alpha$  の三次元的な分布から、左右岸の変動係数を把握することで、基礎地盤の決定論的設計における左右岸ごとの  $\alpha$  を適切に設定可能とわかった。
- 6) 決定論的設計に用いる変形係数の設定について、ある程度限定されたモデルケースではあるが、非超過率 85% とした場合に  $\alpha_\epsilon = 0.4 \sim 0.6$  程度、非超過率 95% とした場合は  $\alpha_\epsilon = 0.7 \sim 1.0$  程度が概ね妥当と判断した。

本研究は、①非線形性およびばらつきに着目した軟岩の変形性評価方法の提案、②基礎の変形に伴う基礎岩盤の力学的安全性の評価方法(力学設計)の提案を達成目標として、研究を実施した。これまでの研究成果について総括的にとりまとめると以下のとおりである。

#### ① 非線形性およびばらつきに着目した軟岩の変形性評価方法の提案

軟岩の非線形変形性の評価方法の提案として、実際のダム基礎地盤から採取した試料および軟岩地盤を想定して作製した人工軟岩試料を用いて、軸方向ひずみの測定精度の高い三軸圧縮試験を実施し、軟岩の非線形変形性のモデル化および非線形変形特性



を表すパラメータのばらつきについてとりまとめた。

また、変形性のばらつきの評価として、12地点のフィルダム基礎岩盤の孔内載荷試験により得られた変形係数のデータを統計的に整理し、変形係数のばらつきの実態を把握した。この結果、ばらつきの頻度分布を表す確率密度関数は正規分布、ばらつきの程度を表す変動係数の範囲は0.3程度が妥当と判断した。

## ② 基礎の変形に伴う基礎岩盤の力学的安全性の評価方法（力学設計）の提案

軟岩の非線形変形性を考慮した変形挙動の検討については、得られた非線形変形特性を表すパラメータをもとに、実ダムを対象とした築堤モデルを用いた非線形変形解析により変形挙動のシミュレーションを行い、堤体築造に伴う基礎の変形量やひずみの予測において、より実測に近い結果を得ることができた。

次に、変形性のばらつきを考慮した変形挙動の検討では、非線形変形性を表すパラメータのばらつきを評価し、非線形変形性のばらつきを考慮した設計を行うことは実務的ではないと判断した。また、基礎岩盤を線形弾性体とした検討においては、軟岩基礎の変形係数のばらつきに着目して、モデルダムを対象とした変形性の評価を検討し、基礎地盤の力学的安全性の評価方法について検討を行い、所期の信頼性を確保した決定論的設計における変形係数を設定するための係数 $\alpha$ を提案した。

本研究によって、軟岩基礎の変形性のばらつきを考慮したうえでの力学設計に関する方法が示され、ダム軟岩基礎の設計に役立つと考えられる。今後は得られた成果を個別具体ダムの基礎設計に積極的に反映していく予定である。

#### 参考文献

- 1) Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y. S. And Sato, T. : A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory. Soils & Foundations, 31-1, pp.169-180, 1991.
- 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) 龍岡文夫・小高猛司・王 林・早野公敏・古関潤一：堆積軟岩の変形特性，土木学会論文集，No.561/III-38，pp.1-17，1997.
- 4) 土木学会：ダムの岩盤掘削，pp.118-122，1992.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.353-358，2003.1.
- 8) 松本徳久，山口嘉一：フィルダム基礎の地盤分類，第 22 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.496-500，1990.2.