

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

INFLUENCE OF SCATTERING OF DEFORMABILITY ON SOFT ROCK FOUNDATION WITH GEOLOGICAL BOUNDARY FOR EMBANKMENT DAMS

山口嘉一*・赤松利之**・中村 真***

Yoshikazu YAMAGUCHI, Toshiyuki AKAMATSU and Makoto NAKAMURA

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 stochastic deformation analysis considering the scattering of the deformability of dam foundation with the geological boundary. In addition, the dam foundation design with the deterministic method ensured the reliability of the requirement was discussed.

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

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堤体の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。いま、ダム基礎全域が均質な岩盤であることはまれで、複数の岩種・岩級で構成されることが一般的である。さらに、基礎岩盤の変形係数は、同一サイトの同じ岩種・岩級でもばらつきをもって得られ、現状では決定論的対応(ばらつきを統計的に処理した確定的な変形係数で検討する方法)における設計値を定める方法が確立されていない。著者らはこれまでに、モデルダムに対して基礎岩盤の変形係数の平均値を深度方向一定¹⁾および深度方向増加²⁾を考慮した条件において、変形係数のばらつきおよびその程度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³⁾。

本研究では、地質境界を有する基礎軟岩の境界位置と変形係数のばらつきが、フィルダム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、これまでの検討^{1)~3)}と同様に所要の信頼性を確保した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。検討に用いた解析モデルを図-1に示す。モデルダムの堤高および掘削勾配は、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^{1)~4)}とした。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、堤体荷重を基礎岩盤表面に分布荷重

* 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 工修 (株)ニュージェック 河川・海岸部 (元同上交流研究員)

***正会員 工修 (独)土木研究所 水工研究グループ 交流研究員

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。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。

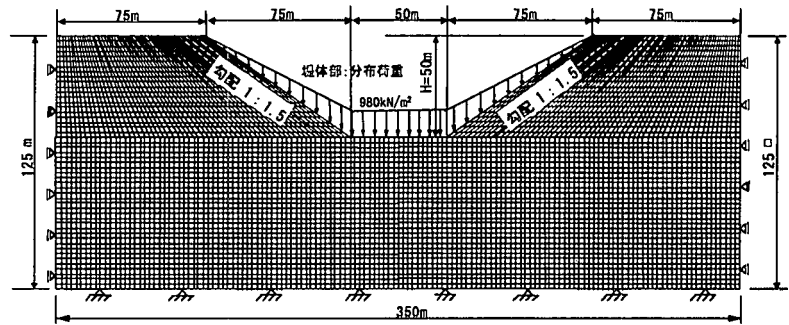


図-1 解析モデル

表-1 感度解析検討ケース

検討項目	地質境界角度 ^{a)}	地質境界位置	変形係数	ポアソン比	構造モデル	モデル図
地質境界 角度	30°	中央	右岸側100MPa 左岸側200MPa/ 500MPa/ 1000MPa	0.3	①	
	45°				②	
	90°				③	
地質境界 位置	90°	左岸側角部			④	

^{a)}水平から反時計回り

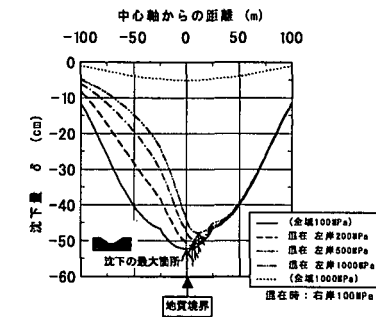
検討では、表-1に示すように、地質境界の位置と角度、ならびに2種類の軟岩の変形係数の割合をパラメータとした決定論的な感度解析を行い、堤体築造による基礎岩盤表面の沈下量や伸び方向のひずみ分布から、それぞれの最大値発生箇所や上記パラメータの変化による感度を把握した。まず、変形係数は右岸側を100MPa、左岸側を200、500、1000MPaで、ポアソン比は軟岩に対する基礎の変形解析で一般的に用いられている0.3で固定したうえで、河床部中央で水平から反時計回りに30、45、90°の位置に直線状の地質境界があるケースを比較した。なお、135、150°の位置に地質境界があるケースの解析も実施したが、右岸側に占める100MPaの領域が狭くなり、前者3ケースに比べて変形量が小さくなったため、ここではこれらのケースを示していない。次に、地質境界角度の感度分析で100MPaで均質な場合に比べて極端に大きい伸び方向ひずみが発生した90°のケースで、物性を同じとして地質境界が左岸側隅角部にあるケースを中央にあるケースと比較した。なお、右岸側隅角部についても解析を実施したが、右岸側に占める100MPaの領域が狭くなり、前者2ケースに比べて変形量が小さくなったため、ここではこのケースを示していない。さらに、30°および45°のケースについても同様の検討を行っているが、紙幅の都合上掲載していない。

続いて、感度解析における右岸側の変形係数が100MPa、左岸側のそれが500MPaで、地質境界が河床部中央で水平から反時計回りに45°のモデルを基本ケースとして、両領域の変形係数を確率変数（平均値は決定論的な感度解析の値に設定）としたモンテカルロシミュレーションによる確率論的線形変形解析を行った。その結果と、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の相互関係を検討し、所定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、別途解析回数をそれ以上増やしても係数 α に差が生じないことを確認した上で、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。

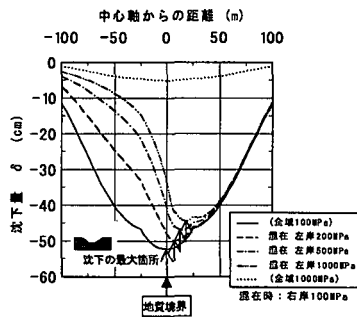
3. 決定論的手法による感度解析

(1) 地質境界角度の感度分析（モデル①～③）

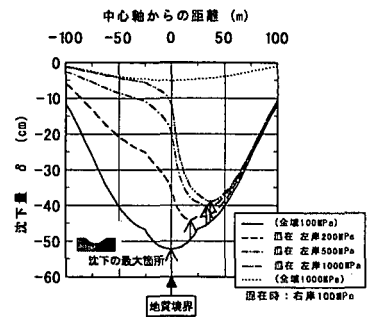
図-2～4は、堤体築造による基礎岩盤表面の沈下量分布と伸び方向のひずみ分布を示したものである。ここで、沈下量は基礎岩盤を形成する節点の沈下量で、ひずみはこれらの節点のうち隣接する2点間の伸び方向ひずみとして整理している。また、図中では沈下量および伸び方向ひずみを負として整理し、基礎岩盤全域100MPaの場合と基礎岩盤全域1000MPaの場合の結果を併記している。図より、右岸側100MPaの場合に



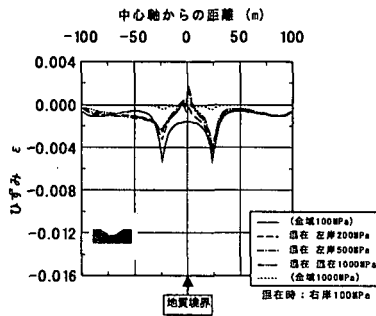
(a) 沈下量



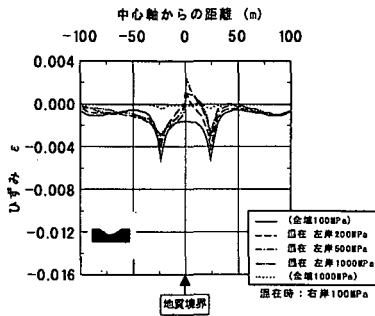
(a) 沈下量



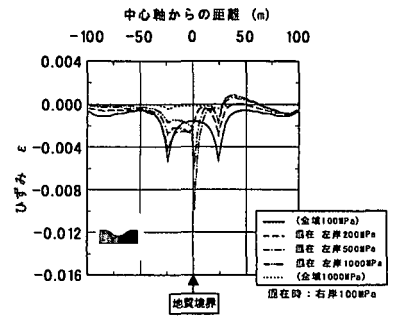
(a) 沈下量



(b) ひずみ



(b) ひずみ



(b) ひずみ

図-2 感度解析結果 (30°, 中心)

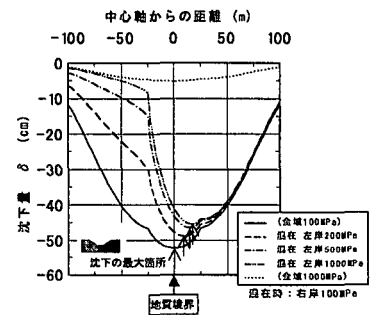
図-3 感度解析結果 (45°, 中心)

図-4 感度解析結果 (90°, 中心)

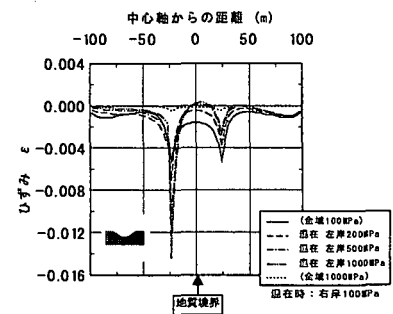
限って考えると、最大沈下量は左岸側の変形係数が大きくなるにしたがって小さくなるが、左岸側 100MPa (全域 100MPa) の場合で 52.3cm が右岸側 1000MPa の場合でも地質境界角度 30° で 47.9cm、45° で 44.5cm、90° で 39.0cm と、左岸側の変形係数の差ほどには大きくない。また、最大値の発生位置が左岸側と右岸側の変形係数の差 (比) が大きくなるにしたがって右岸側へ移動し、その移動量は地質境界角度 30° で 12.5m、45° で 17.5m、90° で 36.25m と地質境界線の角度が大きいほど大きい。ひずみについては、30° および 45° では地質境界付近で圧縮側のひずみを生じるが、伸び方向のひずみについては全域 100MPa における堤体基礎隅角部の最大値を超えることはない。一方、90° の場合には堤体基礎隅角部に加えて地質境界面で大きな伸び方向のひずみが発生し、左右岸の変形係数の差 (比) が大きいほど地質境界面で生じる伸び方向のひずみが大きいことがわかる。

(2) 地質境界位置の感度分析 (モデル③、④)

図-5 より、角度 90° の地質境界が左岸隅角部にあるケースでは中央にあるケースよりさらに大きな伸び方向のひずみが左岸隅角部で発生した。この位置では河床中心部のケースでも見られた地質境界面で生じる伸び方向のひずみと、隅角部の応力集中の影響が重なり合って伸び方向のひずみが大きく生じている。また、沈下量については隅角部にあるケースでは地質境界で急変点が存在することがわかる。



(a) 沈下量



(b) ひずみ

図-5 感度解析結果 (90°, 左岸隅角)

4. 確率論的解析

右岸側の変形係数が 100MPa、左岸側のそれが 500MPa で、地質境界が河床部中央で水平から反時計回りに 45° のモデルによる確率論的解析では、変形係数のばらつきを模擬するために乱数を用いた。乱数発生の際の確率密度関数は、変形係数に関する試験データ数が必ずしも十分でないため、正規分布を採用し、ばらつきの程度を示す変動係数（標準偏差 σ / 平均値 μ ）については、変形係数の変動係数の一般的な値³⁾として 0.3 を用いた。なお、一方の岩盤の変形係数の変動係数を 0.3 で固定し、他方のそれを 0.1 と小さくしたケースについても別途解析を実施しているが、ここでは 3 つのケースのうち係数 α が最も大きくなった両方の変動係数が 0.3 のケースについて議論する。

変形係数を確率密度関数が正規分布に従うとして乱数発生させた場合、極端に小さいあるいは大きい値となる場合が生じる。しかしフィルダムの実施工時においては、堤体盛立前には岩盤検査が行われ、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ことが多く、実際の変形性のばらつきは小さくなると考えられる¹⁾。そこで、分布範囲を規定しないケースとともに分布範囲を $\pm 2\sigma$ と規定したケースの解析も実施した。分布範囲を規定しないケースでは変形係数が 0 以下になった場合には 0.1MPa とし、 $\pm 2\sigma$ に規定した場合はその範囲外の値となった場合には、再度乱数を発生させた。両ケースにおけるある 1real での変形係数の頻度分布の一例を図-6 に示す。この図から、分布範囲を規定しない場合において、 $\sigma/\mu=0.3$ では変形係数が 0 以下になり 0.1MPa に設定した要素はほとんどないことがわかる。

図-7 および 8 は各ケースにおける沈下量とひずみ分布、ならびに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決定論的手法の結果で正規化した値を描いたものである。図中の実線および点線は、それぞれ変形係数の μ および後述する $\mu - \alpha\sigma$ において非超過率 95% の α を用いた決定論的手法による結果を示している。図より、沈下量およびひずみともに最も沈下量が大きい中心軸から右岸方向 15m 付近において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 までは河床水平部で上載荷重がもっとも大きいことに加えて、地質境界部近傍における左岸側の 500MPa の変形係数のばらつきや地形変化点の影響を強く受けていることが予想される。なお、変形係数のばらつきの範囲を現実的に $\pm 2\sigma$ の範囲に制限した方がばらつきが小さいことがわかる。

次に両ケースにおいて、変形係数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 、 $\varepsilon/\varepsilon_\mu$ の非超過率を求め、式(1)、(2)により各非超過率における決定論的手法として用いる $\mu - \alpha\sigma$ の係数 α を算出した結果を図-9 に示す。図には、設計上問題となる絶対値の大きい箇所に着目し、沈下量について最大箇所、ひずみについては左右岸の最大箇所（偶角部）およびその両側点のデータを抽出し整理した結果も併記した。

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

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

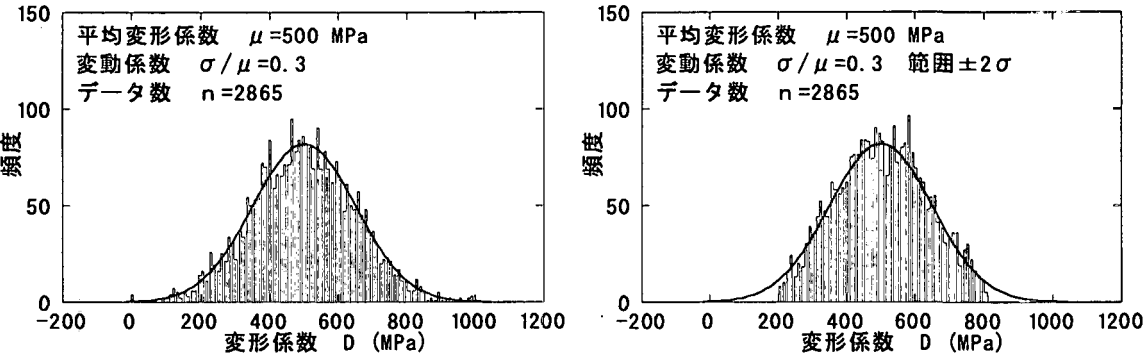
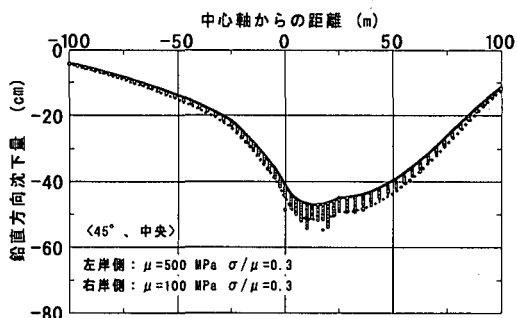
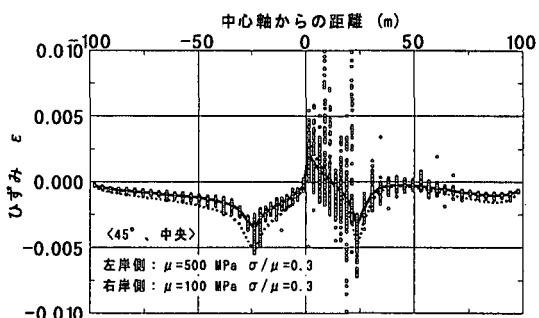


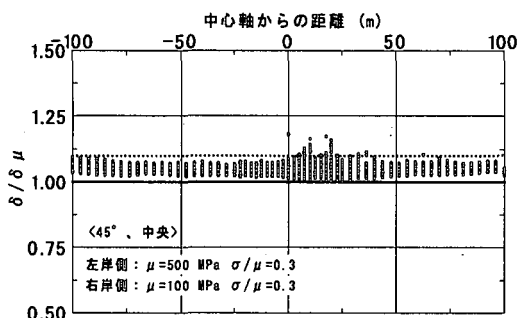
図-6 1real における変形係数の頻度分布の一例 ($\mu=500\text{MPa}$)



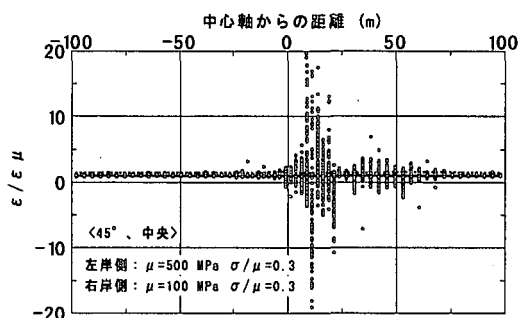
(a) 沈下量分布



(b) ひずみ分布

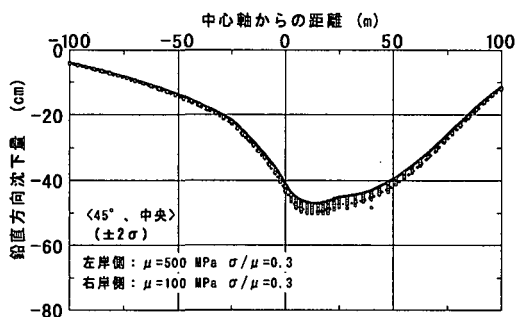


(c) δ/δ_μ 分布

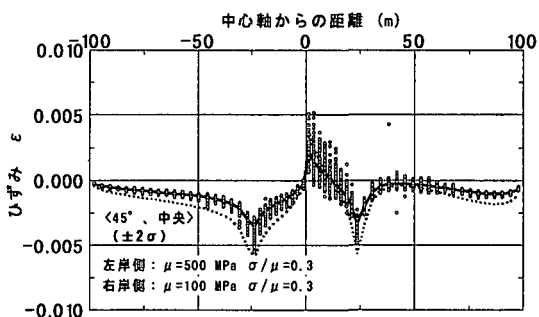


(d) $\varepsilon/\varepsilon_\mu$ 分布

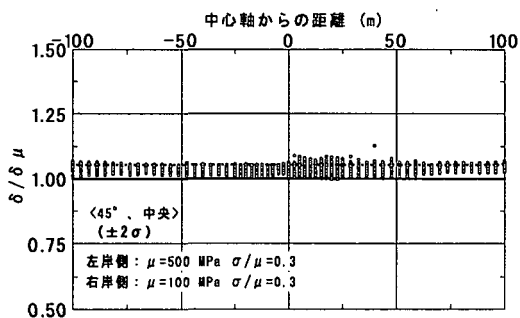
図-7 ばらつき検討結果 (分布範囲制限なし)



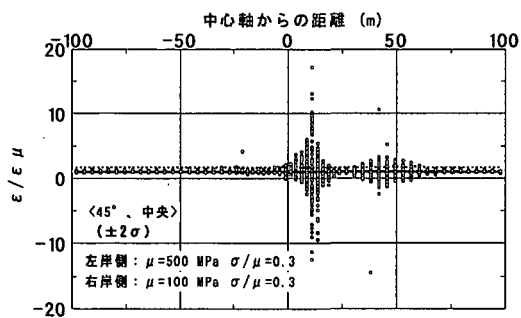
(a) 沈下量分布



(b) ひずみ分布



(c) δ/δ_μ 分布



(d) $\varepsilon/\varepsilon_\mu$ 分布

図-8 ばらつき検討結果 (分布範囲 $\pm 2\sigma$)

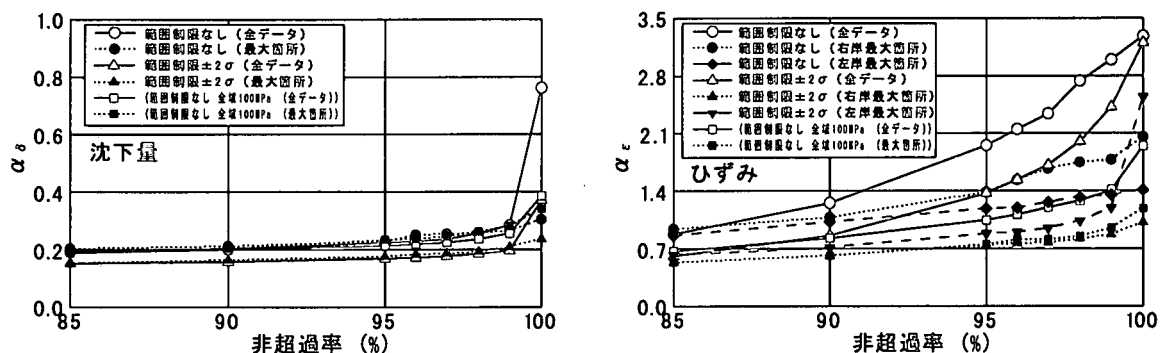


図-9 非超過率と α の関係

図より、沈下量から求めた α_s は全データ評価で行うより最大箇所で評価したほうが若干小さくなるが、分布範囲の制限の有無による違いは非超過確率 100% の場合を除き小さい。一方、ひずみから求めた α_e は全データ評価で行うより最大箇所で評価したほうが大きく減少し、さらに分布範囲を制限した場合にはさらに減少することがわかる。ただし、左右岸いずれの最大箇所から求めた α_e が大きくなるかは、一概には言えない。また、 α_s は範囲制限なしで全域 100MPa の場合と大きな差はないが、全データを用いてひずみで評価した場合には、 α_e は分布範囲を制限しても範囲制限なしで全域 100MPa の場合よりかなり大きくなる。このことから、特にひずみで評価する場合、対象とする基礎岩盤の変形係数のばらつきの範囲を評価して、現実的なばらつきの範囲に把握した上での α の設定が必要である。

5. まとめ

本研究では、地質境界を有する基礎軟岩の境界位置や角度と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検討した。ばらつきの検討に先立ち実施した感度解析では、地質境界の位置や角度によって最大値を与える位置や挙動のモードが大きく異なることがわかった。また、確率論的手法を用いた検討では、与えた変形係数の確率密度関数に対して現実的な範囲で分布範囲に若干の制約を持たせることにより、特にひずみから算出した α_e が大きく減少することがわかった。

今後の課題として、貫入岩や断層等、帯状に異なる変形特性をもつ岩盤が分布する場合の挙動特性の把握も必要である。また、確率論的評価においては角度を変化させた場合の検討を行うとともに、本来個々の岩盤物性において異なると予想される α を、領域全体で同じ α で評価することは是非等も検討を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) 山口嘉一, 赤松利之: 変形性のばらつきを考慮したダム基礎設計, 第 31 回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp.72-76, 2001.
- 2) 山口嘉一, 赤松利之: 変形係数のばらつきと深度方向分布を考慮したダム基礎設計, 第 36 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1433-1434, 2001.
- 3) 山口嘉一, 赤松利之: 確率論的変形解析によるダム基礎設計の基礎的検討, ダム工学, Vol.12, No.1, pp.27-45, 2002.
- 4) 土木学会: ダムの岩盤掘削, pp.118-122, 1992.