

## 2.1 ダム地質におけるリスク評価と安全率設計法との関係

研究年度：令和2年度

研究分野：地質・基礎に関する調査研究

調査研究名：ダム地質におけるリスク

研究者：脇坂安彦

### 【要約】

リスクの定義には様々なものがあるが、地質リスクは望ましくない地質事象の影響の大きさと望ましくない地質事象の生起確率の組み合わせと定義することが適切である。ダムの設計の一部、たとえば重力式コンクリートダムの滑动に対する設計では安全率設計法が用いられている。安全率設計法における安全率は、外力と強度の分布は確率的であるため、暗黙のうちに破壊確率を考慮して決定されている。すなわち、安全率設計法においては、リスク評価における生起確率に相当する破壊確率が導入されている。したがって、安全率設計法を用いている設計にかかわる地質リスクについては、その生起確率を0または1のどちらかに判断する必要がある。

### 【キーワード】

リスク、地質リスク、生起確率、安全率設計法、破壊確率、ダム地質

### 【背景・目的】

最近の社会は金融リスクをはじめ自然環境に関するリスクとして環境汚染リスク、災害リスクなど様々なリスクが存在しており、リスク社会と呼ばれている。様々なリスクに的確に対応するためには、対象とするリスクの評価（リスクアセスメント）を行い、管理（リスクマネジメント）を着実に実施する必要がある。

ダム建設事業においても地質事象に由来する様々なリスクが存在する。安全・安心なダム建設を経済的に行うには、これらの地質事象に由来するリスクの評価、管理を的確に行うことが求められている。

本稿の目的は、ダム地質におけるリスク評価とダムの設計の一部で用いられている安全率設計法との関係を示すことである。

### 【令和2年度の研究内容】

#### (1) 地質リスク

リスクには様々な定義があり、それに伴って地質や地盤に関するリスク（以降、地質リスクと呼ぶ）にも様々な定義がなされている<sup>①</sup>。科学的なリスク評価を行う目的を、吉川<sup>②</sup>が述べているように様々な要因で生じるリスクをすべて同一の指標で表現することによって、高いリスクについて重点的に費用を投じてリスク削減を行い合理的な政策を行うこととするのであれば、リスクは定量的な定義としなければならない。

ダム事業においても設計時および施工時などにおいて、地質やそれ以外の様々な要因によるリスクが発生する。したがって、費用投資の優先順位を的確につけるためには、あらゆるリスクが定量的に示される必要がある。そこで、脇坂<sup>①③④</sup>は地質リスクを

次のように定義した。

地質リスク＝望ましくない地質事象の大きさ×望ましくない地質事象の生起確率・・・(1)

ここで、ダム建設における望ましくない地質事象とは、ダムの立地場所の変更、設計変更、施工時の施工範囲や施工方法の変更や施工後の対策などを要する事象である。このように望ましくない地質事象は、事業費の増大を伴う事象である。望ましくない地質事象の生起確率（この場合の生起確率は広義の生起確率）は、存在確率と生起確率（この場合の生起確率は狭義の生起確率）に区別されると考えられる<sup>③④</sup>。存在確率は対象地域に望ましくない地質事象が存在する確率、生起確率は存在する望ましくない地質事象が真に望ましくない地質事象となる確率である。すなわち、広義の生起確率は存在確率と狭義の生起確率の組み合わせとなる。

#### (2) 安全率設計法

安全率設計法とは、設計の対象となる構造物や岩盤の強度( $S$ )とそれらに作用する外力(荷重)( $L$ )とがある場合、安全率( $F_s$ )を次のように定義し、安全率が1.0以上となるように設計荷重または設計強度を設定する方法である。

$$\text{安全率}(F_s) = \text{強度}(L) / \text{外力}(S)$$

外力と強度にばらつきがなければ、安全率は1.0以上でよいこととなるが、実際には両者には図-1に示すようにばらつきがある。図のように外力および強度のばらつきは、確率分布で表現することができる。設計時の外力(設計荷重： $L_d$ )および強度( $S_d$ )を図のようにとると、設計荷重の確率は斜線部の面積、設計強度の確率は縦線部の面積で表される。

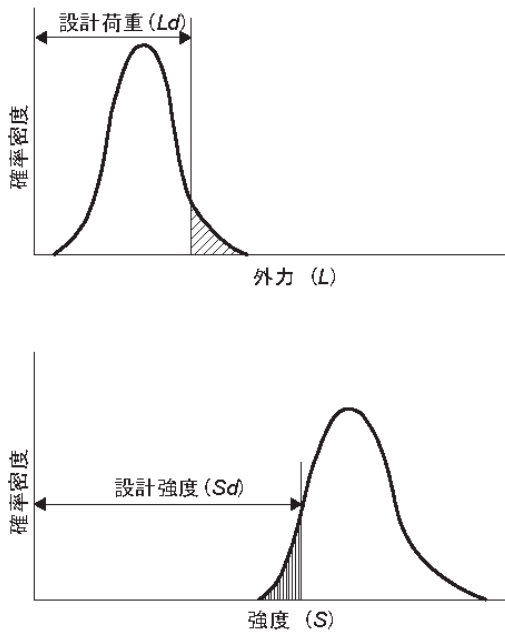


図-1 外力および強度の確率分布

構造設計学では安全率( $F$ )は、

$$F = S_{min} / L_{max} \dots \dots \dots (2)$$

$S_{min}$ : 強度( $S$ )の最小値

$L_{max}$ : 外力( $L$ )の最大値

で表される (図-2)。この場合、図-3a) のような最小設計強度と最大設計荷重の関係となっていると  $F > 1.0$  となり、安全な設計となる。しかし、絶対的な  $S_{min}$  および  $L_{max}$  を決定することはできない。そのため、小さ過ぎる  $L_{max}$  をとると危険な設計と

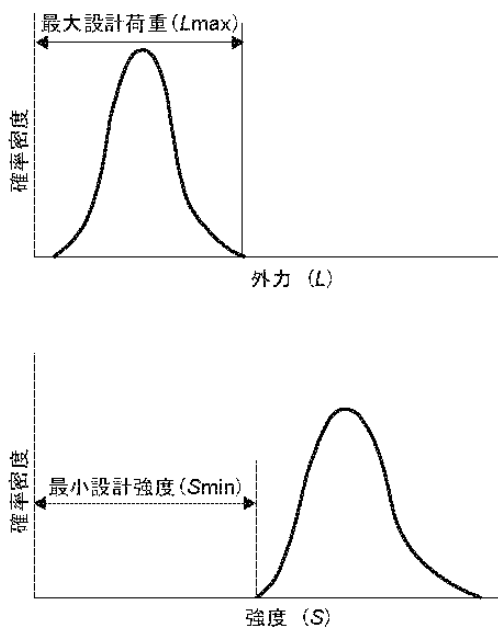


図-2 最大設計荷重および最小設計強度

なり、大き過ぎる  $S_{max}$  をとると不経済となるので、適当な  $S$  および  $L$  (それぞれ  $S_p$ ,  $L_p$  とする) を設計値として定め、安全率( $F^*$ )を次のように表す。

$$F^* = S_p / L_p \dots \dots \dots (3)$$

$F^*$  は  $S_p$  および  $L_p$  の設定に際して入る不確かさを包含するように導入されたもので、余裕安全率と呼んでしかるべきものであるとされている<sup>(5)</sup>。柴田<sup>(6)</sup> は  $F^*$  を公称安全率と呼んでいる。ここでいう不確かさとは、図-1 における設計荷重および設計強度の確率のことである。それぞれの確率が 0 となるのが、 $S_{min}$  および  $L_{max}$  である。

$S_{min}$  および  $L_{max}$  を決定することが、設計上、危険にも不経済にもならず、理想である。しかし、上述のようにこれは現実的ではないので、決定された設計荷重に対して設計強度の確率ができるだけ 0 に近づくような  $F^*$ 、決定された設計強度に対して設計荷重の確率ができるだけ 0 に近づくような  $F^*$  を設定する (図-3b)。

(3) ダムの設計における安全率設計法

ダムの設計における代表的な安全率設計法は、重力式コンクリートダムにおける滑動安全性、フィルダムにおける堤体のすべりに対して用いられている。

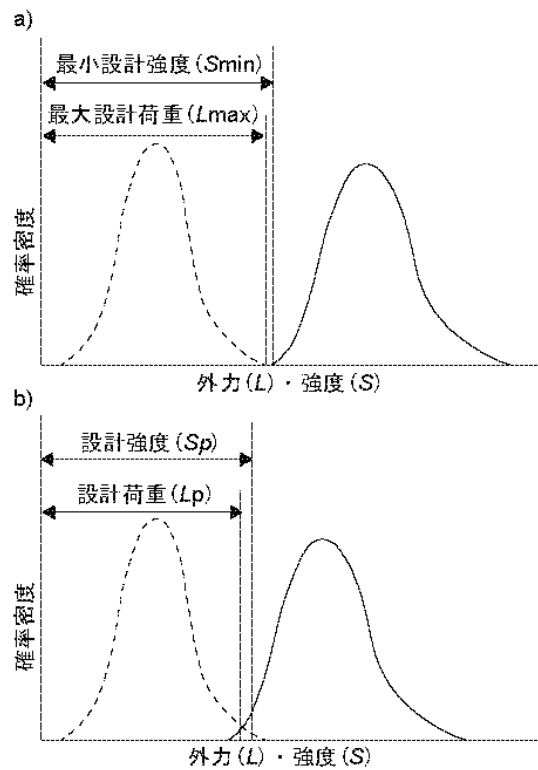


図-3a) 安全率( $F$ )が 1.0 以上となる最小設計強度および最大設計荷重、b) 安全率( $F^*$ )が 1.0 以上となる設計強度および設計荷重

重力式コンクリートダムは、滑動安全性にかかわる望ましくない地質事象には、大規模断層破砕帯、低角度不連続面、深層風化、大規模熱水変質帯、低固結度堆積岩類などのせん断強度が低い岩盤があげられる。

河川管理施設等構造令施行規則では滑動安全性に関する安全率（単位幅当たりの剪断力（外力：設計荷重）と単位幅当たりの剪断摩擦抵抗力（岩盤の設計強度）との比）は4.0以上とされている。この安全率4.0以上を確保するため、ダム堤体の規模が固定されている場合は、設計荷重は変更できないため、岩盤の設計強度で対応することとなる。

(4) 破壊確率とリスク評価における生起確率

信頼性設計においては、破壊確率の概念が導入されている。破壊は図-4において外力と強度の確率が重複している領域で生じる。したがってこの領域の外力の確率と強度の確率を乗じたものが破壊確率である。信頼性設計では1から破壊確率を減じたものは、信頼性、信頼度と呼ばれている。

破壊確率の点からみると、図-3a)に示した  $S_{min}/L_{max}$  の比（安全率：F）が1.0以上となるのは、破壊確率が0となる場合である。また、図-3b)に示した  $F^*$  が1.0以上となるように  $S_p$  および  $L_p$  を設定する場合、暗黙のうちにこの破壊確率が限りなく0に近づくように考慮されているものと考えられる。

既述のようにダム堤体の規模が固定されている場合は、設計荷重は変更できないため、岩盤の設計強度で対応することとなるが、図-5はそのことを表したものである。図ではダム堤体規模は固定されているので設計荷重  $L$  も固定されている。設計岩盤強度  $S_1$ 、 $S_2$  および  $S_3$  は、それぞれ最低岩盤強度から同じ比率として設定している。a) および b) では、それぞれ CL 級岩盤および CM 級岩盤に着岩させているため、安全率4.0を達成できていない。他方、c) の CH 級岩盤着岩では安全率4.0となっている。この安全率4.0は地すべり対策工の計画安全率（最

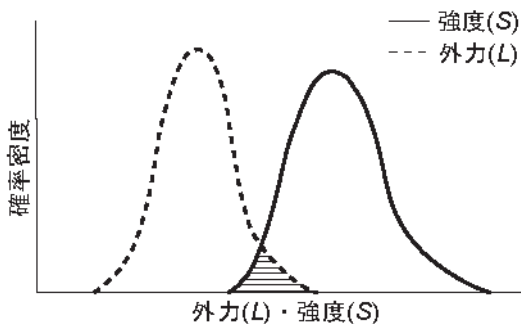


図-4 構造物などが破壊する領域（図中の横線部）

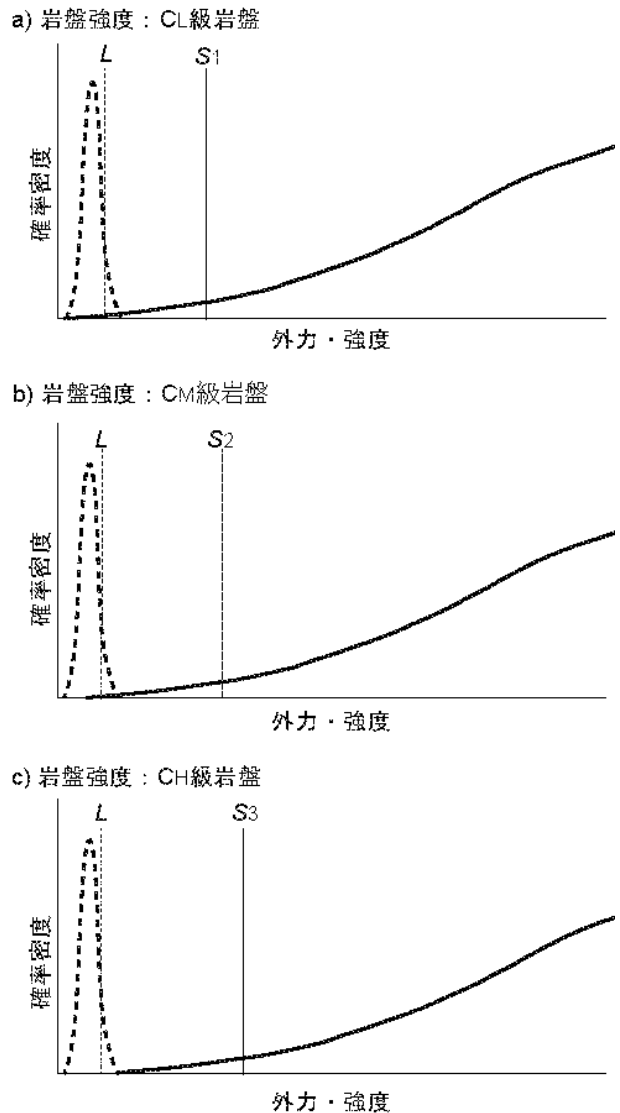


図-5 ダム堤体規模が固定されている場合の設計岩盤強度による安全率の変化

高 1.2) と比較して高い値である。このような高い安全率が設定されているのは、ダムが崩壊したときの影響が甚大である構造物であることとともに、岩盤強度のばらつきの大きさを考慮して、図のように破壊確率が0となるように設定されているためと考えられる。

この破壊確率が0でないということは、望ましくない地質事象が生起することを表している。すなわち、破壊確率はリスク評価における生起確率と同一のものである。

(5) リスク評価と安全率設計法との関係

上述のように安全率設計法において暗黙のうちに考慮されている破壊確率はリスク評価における生起確率と同一のものである。すなわち、安全率設計法を用いている事象には、すでにリスク評価における

生起確率が考慮されていることとなる。したがって、重力式コンクリートダム の 滑動安全性にかかわる望ましくない地質事象である大規模断層破碎帯、低角度不連続面、深層風化、大規模熱水変質帯、低固結度堆積岩類などのせん断強度が低い岩盤のリスク評価を行う際の生起確率は、0 または 1 のどちらかに確定する必要がある。

図-6 はリスク評価の結果、それぞれ A、B および C のようにリスクが決定されたことを示している。これらのリスクが滑動安全性にかかわる低せん断強度の事象であった場合、縦軸の存在・生起確率（今後は生起確率と表記する）は、0 または 1 のどちらかに確定しなければならない。A～C のリスクの生起確率を 0 または 1 のどちらかに確定する場合、最も単純であるのは、図-7 に示したように生起確率 0.5 を境にそれ以上を生起確率 1 とし、それ未満を生起確率 0 とすることである。これよりも安全側の

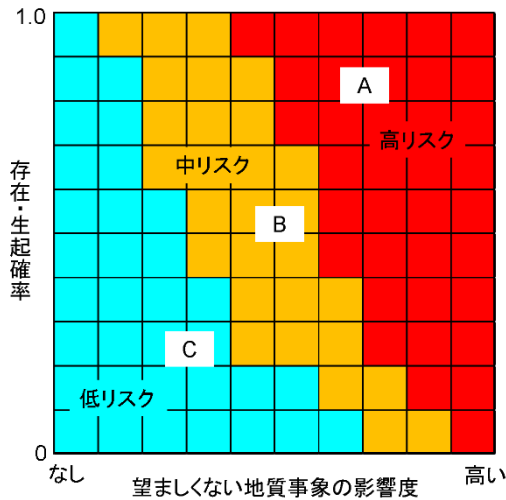


図-6 事例としてのリスク A、B および C

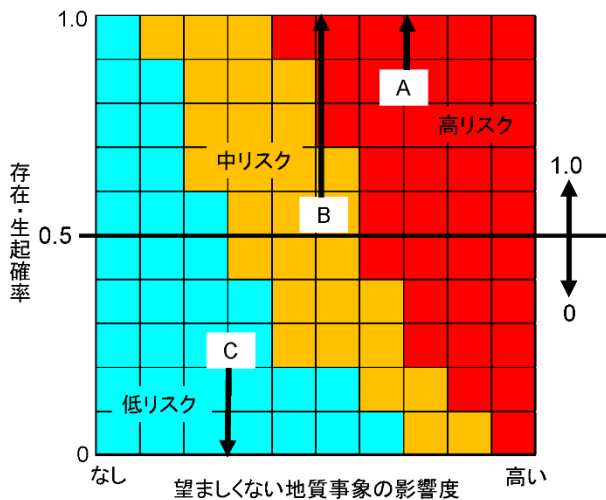


図-7 生起確率 0 または 1 の境界確率を 0.5 とした場合

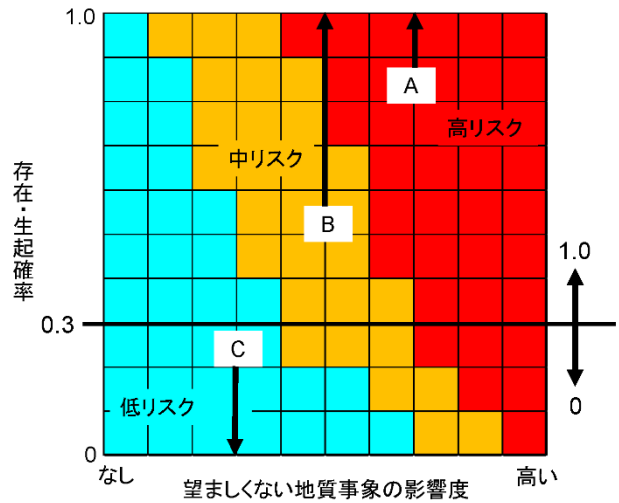


図-8 生起確率 0 または 1 の境界確率を低く設定した場合

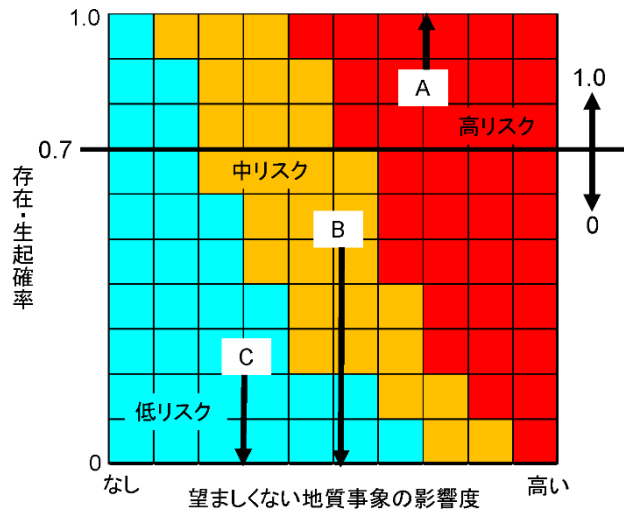


図-9 生起確率 0 または 1 の境界確率を高く設定した場合

設計とする場合には、図-8 のように境界の生起確率を低下させる。ただし、この場合は安全側の設計となるが、不経済となる。逆に経済性を重視する場合には、図-9 のように境界の生起確率を高くする。ただし、この場合は危険側の設計となる。

このように安全率設計法にかかわる地質事象のリスクの生起確率を 0 または 1 のどちらにするかは、当該リスクの生起確率の値と境界となる生起確率に支配されている。境界の生起確率を低くすると安全側の設計となるが不経済、高くすると経済的ではあるが危険側の設計となり、設計の安全性と経済性は二律背反の関係にある。境界となる生起確率をどのように設定するか、すなわち、設計の安全性と経済性のどちらを重視し、合理的な設計とするかは、まさに工学的判断である。工学的判断はダムの規模、事業費、リスクが発現した場合の補修にかかわる費用および社会的影響などを勘案して実施する必要がある

ある。

### (6) 岩盤強度のばらつき

安全率設計法においては破壊確率が暗黙のうちに考慮されている。安全率設計法において的確な設計強度を設定するためには、岩盤強度のばらつきを精度よく把握すること、人為的な要因によるばらつきを減ずることが必要である。

岩盤強度のばらつきは地質的には、地質、岩塊の硬さ、不連続面などの各分布の不均質性、不規則性に起因している。地質分布などにはこのような不均質性、不規則性があるために、地質分布のばらつきを把握するためには、それらの不規則性、不均質性の程度に応じた質・量の地質調査を行う必要がある。

図-10 のような付加体の混在岩を例とした不均質かつ不規則な地質分布を呈する岩体のボーリング調査量について考える。この図のように泥質岩の基質の中に不規則な形状の砂岩ブロックが不均一に分布している場合、仮に図-11 のような位置にボーリング孔が設置されると、ボーリング孔はすべて泥質岩基質中に設置されることとなる。これらのボーリング調査結果に基づく地質平面図には、泥質岩のみが表示されることとなり、真の地質分布とは大きく異なっている。図-10 のような地質分布である場合、的確に不均質かつ不規則な地質分布を把握するには、図-12 に示すボーリング孔の数量と設置位置が必要となる。

図-12 のようなボーリング孔の数量と配置の計画を立案するためには、ボーリング調査に先立って、広域的な地表地質踏査を行って、ダムを設置する対

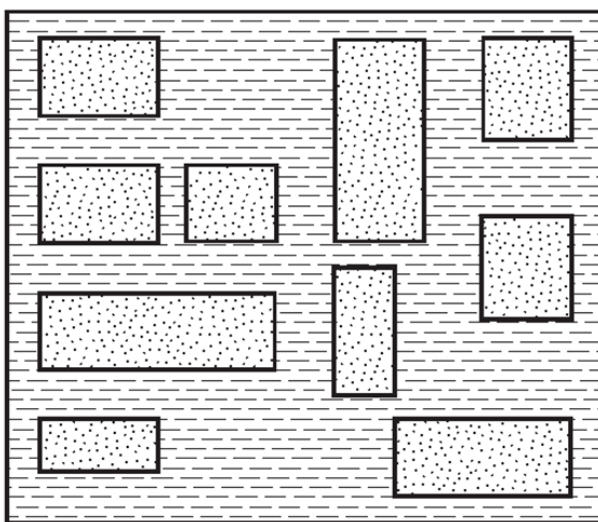


図-10 泥質岩基質中に不規則な形状の砂岩ブロックが不均一に分布している岩体

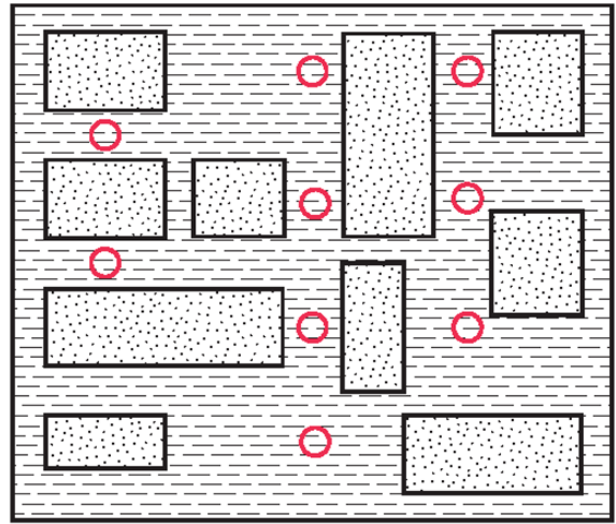


図-11 図-10 の岩体におけるボーリング孔の設置位置(1)。赤丸がボーリング孔位置を示す。

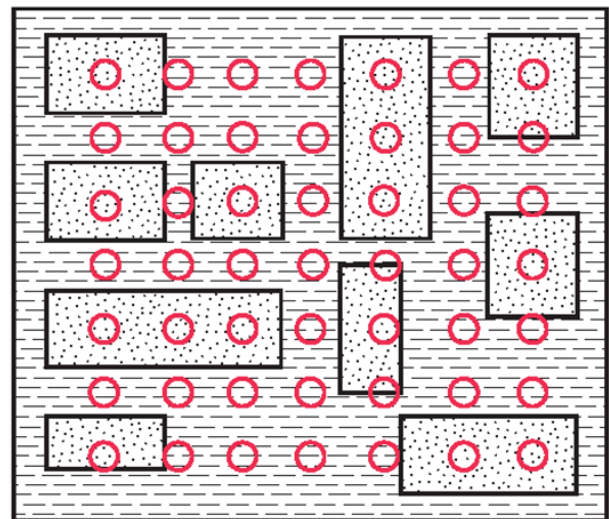


図-12 図-10 の岩体におけるボーリング孔の設置位置(2)。赤丸がボーリング孔位置を示す。

象地域の地質分布の地質分布の特性（不均質性および不規則性）を把握しておく必要がある。

図-10~12 は地質分布の例を示したが、同様なことは岩盤の強度分布、すなわち岩級分布についても同様である。

地質分布および岩級分布を精度よく把握するためには、的確な地質学的解釈を行う必要がある。地質学的解釈には、2段階がある。一段階目は、地表地質踏査、ボーリング調査、横坑調査などで得られた地点ごとの構成地質の岩石の種類（岩質、岩相、層相）および地質構造を特定するための解釈である。

この解釈は観察事実の記載に該当するものである。一段階目の地質学的解釈によって、ボーリング柱状図などが作成される。

二段階目は、複数地点に関して一段階目の地質解釈で得られた構成地質の岩石の種類（岩質、岩相、層相）および地質構造に関する0次元（点）、1次元（線）および小規模な2次元（面）の情報を比較し、異なる地点間での連続する構成地質を同定し、対象とする構成地質の分布（連続性、広がり）を推定し、3次元化することである。この二段階目が狭義の地質学的解釈である。この二段階目の地質学的解釈によって、地質平面図、地質断面図、岩級区分図などが作成される。

岩盤強度のばらつきには、地質調査の質に起因するものも存在する。たとえば、ボーリングによるコア採取の乱れである。本来、棒状であるボーリングコアを採取時に礫状にしてしまうと、割れ目間隔は人為的に短くなってしまう。的確な岩盤性状を把握し、岩盤強度を見積もるためには、乱さないボーリングコアを採取する必要がある。

### 【結果とりまとめ】

本年度の研究の結果、以下の成果が得られた。

- ①構造設計学における安全率は強度の最小値と外力の最大値の比であるが、全体的な強度の最小値、外力の最大値を求めることはできないため、適当な強度および外力を設定して、余裕安全率または公称安全率と呼ぶべきものが設定されている。
- ②重力式コンクリートダムを滑動安全性にかかわる望ましくない地質事象である大規模断層破碎帯、低角度不連続面、深層風化、大規模熱水変質帯、低固結度堆積岩類などのせん断強度が低い岩盤は安全率設計法にて対応されている。
- ③公称安全率の設定には、破壊確率が暗黙のうちに考慮されている。この破壊確率はリスク評価における生起確率と同一のものである。
- ④しかたがって、安全率設計法が用いられている地質事象のリスク評価に当たっては、生起確率は0または1のどちらかに確定する必要がある。
- ⑤地質事象のリスクの生起確率を0または1のどちらにするかは、当該リスクの生起確率の値と境界となる生起確率に支配されている。
- ⑥境界の生起確率を低くすると安全側の設計となるが不経済、高くすると経済的ではあるが危険側の設計となり、設計の安全性と経済性は二律背反の関係にある。
- ⑦境界となる生起確率をどのように設定するか、すなわち、設計の安全性と経済性のどちらを重視し、合理的な設計とするかは、工学的判断による。
- ⑧安全率設計法における的確な設計強度を設定する

ためには、岩盤強度のばらつきを精度よく把握すること、人為的な要因によるばらつきを減ずることが必要である。

### 【今後の課題】

ダム設計において安全率設計法が用いられている地質事象に関しては、リスク評価における生起確率を0または1のどちらかに確定しなければならない。この確定は関与する技術者の工学的判断によっているが、その技術者の経験、知識に依存しており、多分に主観的なものとなっている。この主観的な工学的判断をより客観的なものとする努力が必要である。

### 【参考文献】

- (1) 脇坂安彦：ダム地質におけるリスクマネジメント，令和元年度ダム技術研究所調査研究活動報告，一般財団法人ダム技術センター，pp.2-1-2-16，(2020)。
- (2) 吉川肇子：第6章 リスク・コミュニケーション，今田高俊編，リスク学入門，4，社会生活からみたリスク，岩波書店，pp.127～147，(2007)。
- (3) 脇坂安彦：土木地質におけるリスクとその管理，地質調査総合センター研究資料集，pp. 11-14，(2008)。
- (4) 脇坂安彦：地質のリスクマネジメント，地盤工学会誌，57-2，pp. 10-13，(2009)。
- (5) 山口柏樹：安全率を考える，土と基礎，30巻，9号，pp. 3-8，(1982)。
- (6) 柴田明徳：確率的手法による構造安全性の解析，確率の基礎から地震災害予測まで，森北出版，275p. (2005)。