

粒度分析に基づくまさ土斜面の風化度判定

佐藤 健¹・板橋一雄²・長谷川英明³・熊崎幾太郎⁴・若松雅佳⁵・平岩由夫⁶

¹正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-1112 岐阜市柳戸1番1)

²正会員 工博 名城大学教授 理工学部土木工学科 (〒468-0073 名古屋市天白区塩釜口1-501)

³正会員 中部電力(株) (〒459-8001 名古屋市緑区大高町字北関山20-1)

⁴正会員 工博 同 上

⁵正会員 徳倉建設(株) (〒460-0003 名古屋市中区錦3-13-5)

⁶正会員 同 上

ボーリング試料に対するふるい分け試験に基づいて、まさ土斜面の風化度判定を行った。負の二項分布による粒度表現方法を利用して、鉱物組成や化学組成に着目した判定法も合わせて適用し、結果の妥当性を検証した。風化による粒度変化の規則性を確認し、広範な斜面各部の風化度評価が、ふるい分析から比較的簡単に行えることを、実例を引用しながら示した。

Key Words: decomposed granite, grain size distribution, negative binomial distribution, direct shear test, sieve analysis, weathering

1. 研究の背景

まさ土はおもに日本の西南部に分布する花崗岩系風化残積土¹⁾で、風化されやすく、風化の進行とともにその力学的特性に大きな変化を生じる²⁾。まさ土が水による侵食に弱い性質を有することもよく知られており³⁾、水源地や貯水池の岸辺を形成する斜面では、侵食で生じたと思われる崩壊が繰返し発生し、護岸工事の頻度が増すなど問題も生じている⁴⁾。

花崗岩の風化の程度を判定する方法については、いくつか報告されている。Lumb⁵⁾は花崗岩の風化にともなう鉱物組成の変化に着目し、石英と長石の風化に対する抵抗力の違いを利用した風化指標を提唱している。風化にともなう非晶質成分中の化学組成の変化から、ばん珪比を用いた判定法も提案されている⁶⁾。

まさ土を対象にした報告ではないが、弾性波探査⁷⁾、引張試験⁸⁾、シュミット・ハンマー試験⁹⁾など、風化に伴う力学的性質の変化に着目した評価法も提案されており、これらの方法もまさ土の風化度の判定に利用できると思われる。

まさ土の粒子破碎特性に注目した研究も行われている。福本^{10), 11)}は、花崗岩からまさ土に変化する

過程を数学的に表現した粒度式を誘導し、室内の圧縮試験やせん断試験など外力の負荷によって発生する粒子破碎現象のモデル化を試みている。立石ら¹²⁾は、福本による粒度式の考え方を整理して、確率分布の1つである負の二項分布を強く意識した粒度分布の表現法を提案し、粒子破碎に伴う粒度変化の規則性を議論している。これらの研究は、せん断力や圧縮力などの外力負荷による土粒子の破碎現象を念頭において、その後、乾燥・湿潤の繰返し負荷による堆積軟岩の室内スレーキング実験における粒度変化にもこの粒度表現法が適用できることもわかってきた¹³⁾。

本研究は、水位変動の激しい揚水式発電所の上池斜面の護岸工事に対する予備調査の一環として行ったもので、まさ土で形成された貯水池斜面の中で、風化の進行度を考慮して、護岸工事の優先順位を決定することを目的に実施したものである。風化程度を評価する方法は先述のようにいくつか提案されているが、本研究では、粒度試験にもとづく風化度判定を試みた。ふるい分けによる粒度試験は土質試験法として広く普及しており、X線回折装置(鉱物組成の推定⁵⁾に必要)、ICP発光分析装置(ばん珪比の推定⁶⁾に必要)などの特別な装置は必要としな

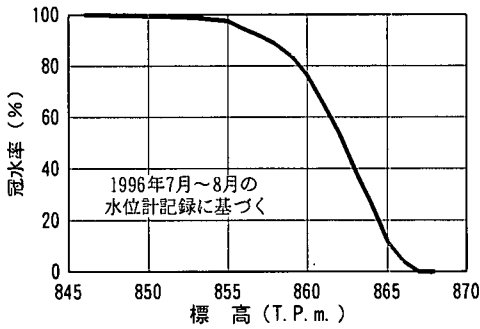


図-1 貯水池斜面の冠水率

い。また、粒子破碎現象による粒度変化の規則性¹²⁾が風化の進行を評価する尺度として利用できることは、スレーキングによる細粒化現象への適用結果¹³⁾からもある程度類推されたので、粒度試験による風化度の判定を試みた。

2. 貯水池の水位変動と周辺の地盤

対象とする貯水池のまさ土斜面は、頻繁で大きな水位変動の影響を受け、一部に護岸工が施工されているものの、大半が自然斜面であり、水位変動範囲内の裸地斜面では、小規模な崩壊跡が確認されている。1996年7月～1997年8月の貯水池の水位変動を、水位計の記録にもとづいて、冠水率として図-1に示した。冠水率50%に対応する標高863m付近が頻繁な水位変動の位置で、最高水位868m、最低水位846mと最大で22mの水位変化がこの図から確認できる。貯水池周辺は、三河山地と呼ばれる隆起準平原状の山地¹⁴⁾で、山地のダム湖ではあるが、比較的勾配の小さい斜面に囲まれている。また、当該地は日本列島の大構造区分の嶺家変性帯に位置し、表層部付近からかなり深い部分まで、まさ土の分布が確認されている。図-2に、貯水池周辺斜面の模式的な地質断面図を示した。水位変動により冠水する斜面は、土壌化したまさ土が露呈している箇所が多く、一部の緩斜面では黒ぼくが露呈している。また、水位変動による侵食を受けたと思われる斜面では、まさ土、風化花崗岩が切り立って露呈している。

3. ボーリング試料に対する風化度の判定

(1) ボーリング試料

水位変動の影響を受ける貯水池斜面において、代表的な2地点(以下B1、B2と呼ぶ)を選定して

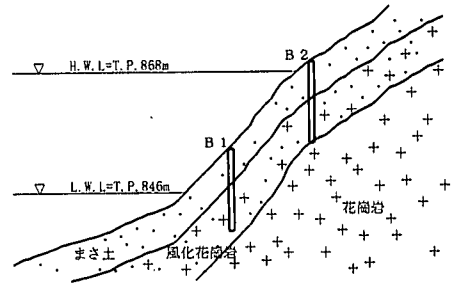


図-2 模式的な地質断面図

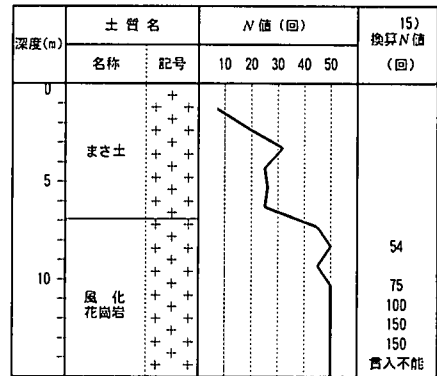


図-3 B1のボーリング柱状図

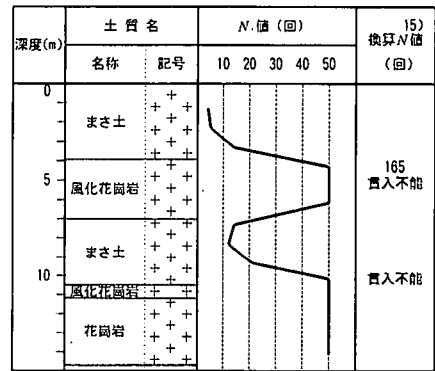


図-4 B2のボーリング柱状図

ボーリング調査を実施した。調査には、ロータリー式ボーリングを使用し、1m毎に、標準貫入試験によるN値測定とコアパックによる試料採取を行った。得られた土質柱状図を図-3、4に示した。

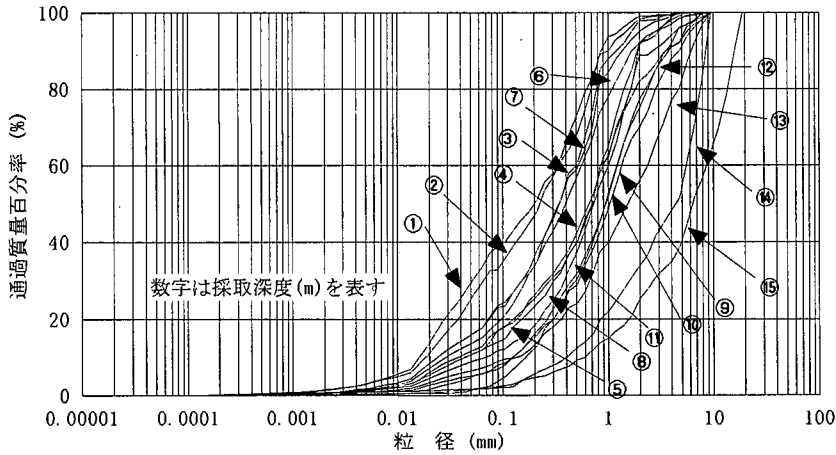


図-5 B1 試料による粒径加積曲線

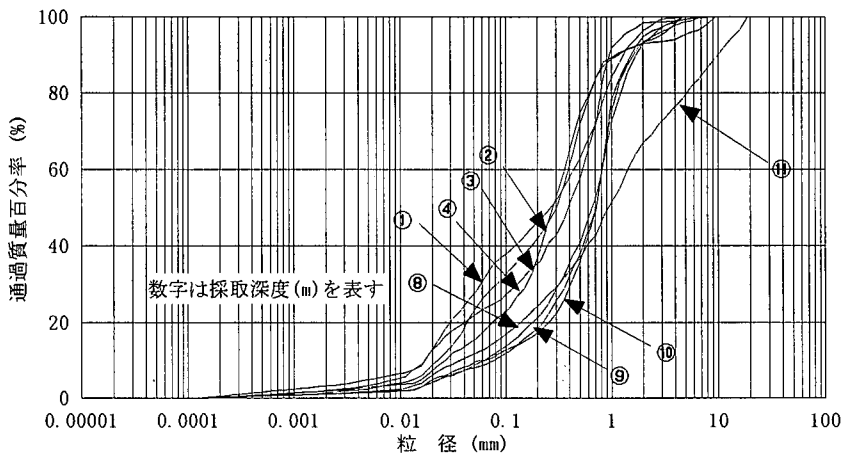


図-6 B2 試料による粒径加積曲線

B1の孔口標高は859.56mで、図-1の冠水率から判断して、頻繁な水位変動に見舞われる標高よりやや低い位置で実施された。深度方向に、まさ土から風化花崗岩に推移する様子が、図-3の柱状図からよくわかる。B2の孔口標高は869.81mで、図-1の最高水位より高い位置で実施され、水位変動が頻繁に発生する冠水率50%の標高はボーリング孔口下7~8mの位置である。地盤は、まさ土と風化花崗岩が互層になっている。図-3、4中の換算 N 値は(4)で、詳述する。

(2) 負の二項分布による粒度試験結果の整理

採取した試料の粒度試験を行い、試験結果にベストフィットする負の二項分布のパラメータを算定して、深度方向における粒度分布の違いを評価した。

負の二項分布の数学的な記述は式(1)によって与えられる^{10), 11), 12)}。

$$q_n = \binom{n+m-1}{n} (1-r)^m r^n \quad (1)$$

ここに、 $n = 0, 1, 2, \dots$

上式によって、番号 n に対する粒径の残留率 q_n がパラメータ r と m によって表現される。

粒径加積曲線から各粒径の残留率を求め、式(2)で定義されるパラメータ (r, m) を求めた。

$$r = \frac{(\sigma^2 - \mu)}{\sigma^2} \quad m = \frac{\mu^2}{(\sigma^2 - \mu)} \quad (2)$$

ここで、 μ と σ^2 は粒径番号に関する平均値と分散である。

パラメータ (r, m) と粒径番号に関する平均 (μ) と分散 (σ^2) は、先述の(2)式で関係づけられており、文献^{16), 17), 18)}はいくつかの興味ある

る指摘を行っている。

福本^{10), 11)}は、 r を相隣合う粒径の残留率の比、 m を経過時間あるいは分解の回数に係するパラメータとして負の二項分布による粒度式を理論的に誘導し、その中で、 r は粒径番号や m にかかわらず一定としている。本研究の中で使っている r と m は、粒度に対する負の二項分布のあてはめに基づくフィッティングパラメータ的の意味合いをもち、風化に伴って r が小さく、 m が大きくなることの理論的な考察は今後の課題である。

地盤は、地表面から深部に向かって徐々に風化が進行していくので、鉛直的に採取したボーリング試料には風化度との強い相関が期待された。

深度方向の粒度の違いを反映した負の二項分布パラメータの傾向的变化がわかれば、場所的な風化の程度を相対評価する際の基準がボーリング試料の解析から作成できると考えて、この解析を行った。

粒度試験は、B1で深度方向1mごとに15点、B2で深度5mから7mを除いて、深度2mから11mまで1mごとに7点、合計22点の試料に対して実施した。ふるい分析によって75 μ mまでの粒度分布を求め、75 μ m以下の細粒分の粒度分布は光透過法または沈降分析により求めた。得られた粒径加積曲線を図-5、6に示した。50%粒径、均等係数など粒度を表現する指標はいろいろあるが、粒度分布の全体を的確に評価するには負の二項分布による方法が効果的である^{10), 11), 12)}。

粒径加積曲線にもとづいて残留率分布をまず作成する。負の二項分布によるフィッティングを行う際には、残留率分布における粒径の刻み幅および最大粒径 D_{max} により、推定される負の二項分布のパラメータが異なってくる。パラメータの相対的な比較を行うためには、評価する対象（今回は貯水池周辺の風化花崗岩）の中では、これらの値を一定にして、パラメータ推定を行うことが重要である。

粒径の刻み幅は、対数目盛上で等間隔となり離散分布である負の二項分布に対応させやすいこと、粒度試験結果を利用しやすいこと、などにより、JIS規格によるふるい目間隔 $\sqrt[4]{2}$ を採用した。ふるい目の設定されていない細粒分についてもこの間隔を採用し、試験結果のない粒径はその前後の試験結果を考慮して、内挿により求めた。

今回の対象が貯水池周辺の限られた地域の相対的な評価であること、判定のための作業量を少なくすること、などを考慮して、実施した全ての粒度試験の最大粒径に対応する、 $D_{max}=19.0\text{mm}$ を解析時の最大粒径として採用した。

最大粒径 D_{max} から $\sqrt[4]{2}$ の間隔で、順番に番号を

付け、式(3)によって n 番目の粒径 d_n を粒径番号 n として、粒度分布を離散的に表示する。公比 λ が、JIS規格のふるい目間隔の値 $\sqrt[4]{2}$ である。

$$n \log \left[\frac{1}{\lambda} \right] = \log \left[\frac{d_n}{D_{max}} \right] \quad (3)$$

本論文で行った負の二項分布によるフィッティングの方法と、実測の粒径分布との比較例を付録に示した。

まさ土の一部に細粒分を多く含んだものがあり、その取り扱いによっても、パラメータ値が少し異なることも判明したので、解析時の最小粒径 D_{min} を0.1 μ mと十分に小さい値で統一した。 $D_{min}=0.1\mu\text{m}$ の加積通過率を0%として、粒度試験により得られた最小粒径以下の粒径加積曲線は滑らかな曲線で内挿し、推定した。

(3) 鉱物組成と化学組成の分析

採取した試料の鉱物組成と化学組成の分析を行い、まさ土の風化度判定も行った。鉛直方向に採取した試料の深度と風化度の相関関係を確認するのが、この試験のねらいである。試験は、深度方向2mにつき1試料実施し、B1で6点、B2で7点、合計13点の試料に対し実施した。

鉱物組成の分析はX線回折装置により行った。まさ土の鉱物組成のうち、石英は風化に対する抵抗力が強く、長石は風化に対する抵抗力が弱い⁶⁾。したがって、試料中に存在する石英と長石の含有量により風化の程度を知ることができ⁶⁾、式(4)により算出される Nq^* 値によって風化の進行の程度を調べた。風化が進行するほど Nq^* 値は大きくなる。

$$Nq^* \text{値} = \frac{\text{石英}}{(\text{石英} + \text{長石})} \quad (4)$$

化学組成の分析は、採取した試料の溶出試験により行った。一回当たりの溶出量が一定になるまで、すなわち非晶質物質の溶出が完了し結晶質からの溶出だけになるまで、塩酸と水酸化ナトリウムによる洗浄を繰り返し、非晶質物質の溶出量を推定した。繰り返し回数は8回とし、ICP発光装置を用いて、試料中に存在する非晶質物質中のアルミニウムと珪素の含有量を測定した。なお、結果は Al_2O_3 と SiO_2 の酸化物に換算して質量を求め、式(5)により、ばん珪比を算出した。ばん珪比は、風化が進行すると大きくなり、まさ土の風化の指標として効果的であることが指摘⁶⁾されている。

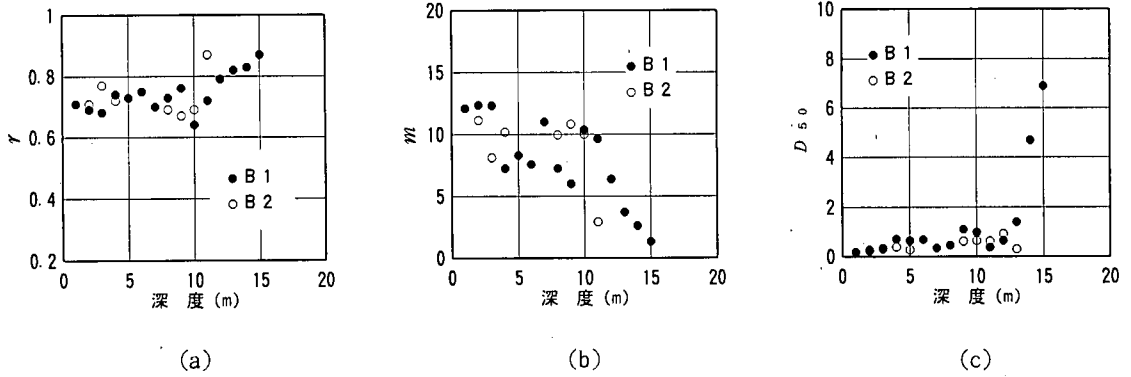


図-7 (r , m), D_{50} と深度との関係

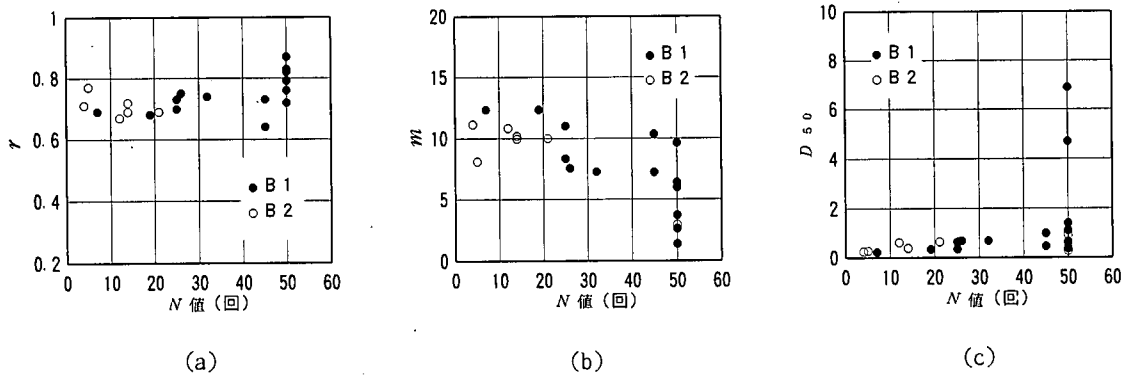


図-8 (r , m), D_{50} と N 値との関係

$$\text{ばん珪比} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} \quad (5)$$

(4) 結果と考察

負の二項分布のパラメータ (r , m) と平均粒径として D_{50} を採用して、深度、 N 値との関係を図-7, 8に示した。地表面から深部に徐々に風化が進行していくので、鉛直的に採取したボーリング試料には、深度と風化度に強い相関性が期待される。また、風化が進行するとその物理的性質に変化を生じ、強度も小さくなるので、同一と認められるまさ土については地盤強度と風化度は強い相関性を持つと考えられる。したがって、パラメータ (r , m) の深度、 N 値との対応を調べることで、風化の程度と (r , m) の関係を間接的に検討した。採取

深度が風化の進行程度をよく表現していることは、 Nq^* 値とばん珪比による化学的風化指標を用いた検討で確認する。

図-7 (a), (b), 図-8 (a), (b) の結果から、サンプルの採取深度が浅くなるにつれて、 r が減少し、 m が増加する傾向が伺える。(r , m) と深度の関係ほど強い相関は認められないが、 N 値が小さくなるほど、 r は減少し、 m は増加する傾向も読み取れる。

室内でのせん断力や圧縮力の強制負荷による粒子破碎実験の結果によっても、この傾向が確認されている^{16), 17)}。外力負荷による粒子破碎と同じ変化傾向で、風化に伴う粒度分布の変化も説明できることが、図-7, 8の結果からわかる。

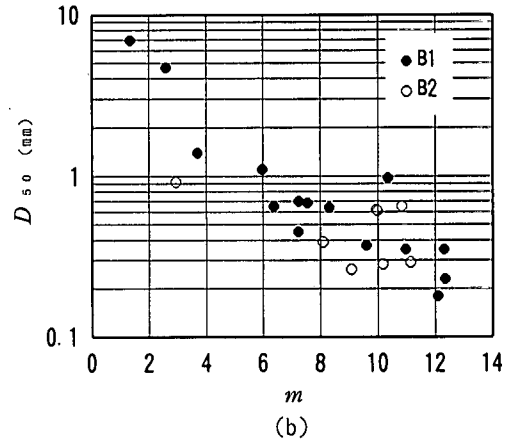
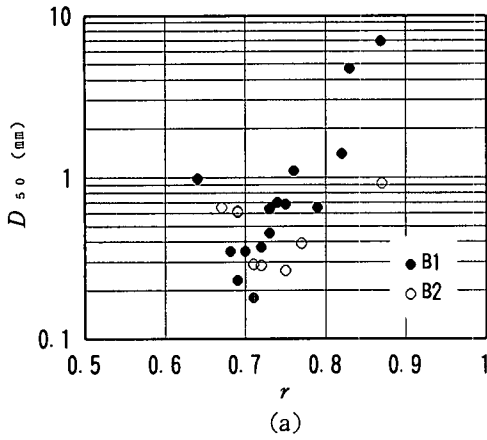


図-9 (r , m) と D_{50} との関係

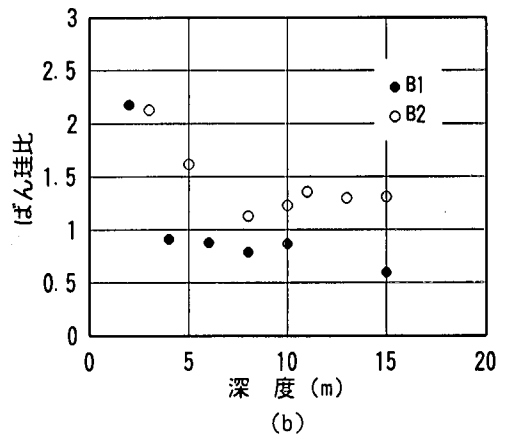
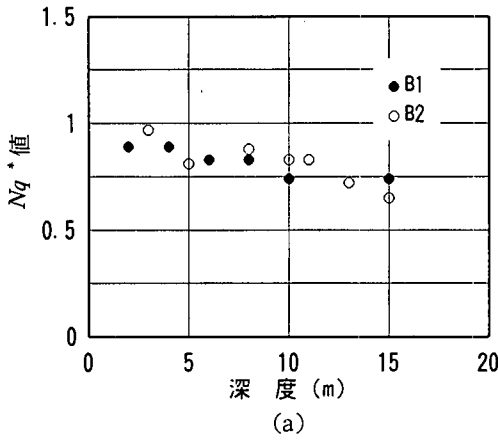


図-10 Nq^* 値, ばん珪比と深度との関係

図-9に(r , m)と D_{50} の関係を示した. この図より D_{50} が小さくなるほど r は小さくなり, m が大きくなることからわかる.

粒度に対して(r , m)の二つのパラメータをもつ負の二項分布を当てはめることは, 粒度の平均と分散の両者を一度に考えることになる. したがって, 風化に伴う平均粒径 D_{50} の減少と細粒分の増加あるいは粗粒分の減少を同時に評価でき, 平均粒径 D_{50} のみの評価よりも勝ると考えて(r , m)に着目した検討を行った.

図-10に Nq^* 値と深度, 及びばん珪比と深度の関係を示した. Nq^* 値やばん珪比はまさ土の風化指標として使われており, 風化の進行とともに Nq^* 値, ばん珪比が大きくなるがよく知られている^{5), 6)}.

図-10(a)の Nq^* 値は採取深度の減少とともに大きくなり, 図-10(b)のばん珪比もB2

の深度10m付近の結果を除き, 地表に近づくにつれて値が大きくなっている. 図-10(b)のB2における深度10m以深で, ばん珪比が大きくなっている理由として, サンプルの採取深度が頻繁な水位変動の影響を受ける標高(図-1の冠水率参照)に対応しており, 日常的な水位変動によって既に過剰な溶脱作用を受け, 非晶質物質の化学組成に変化が生じたことが考えられる. しかしながら, 全体的な傾向は, 深度が浅くなるにつれて, 非晶質物質中のばん珪比が増加しており, 西田らの研究成果⁶⁾を準用すれば, B1, B2のボーリング試料は深度が浅くなるほど風化の程度は激しくなっていると判断できる. Nq^* 値, ばん珪比と深度との関係から, ボーリング試料の採取深度が風化の程度とよく整合していることが判り, 先述した粒度試験による風化度の判定が有効であることを裏付けている.

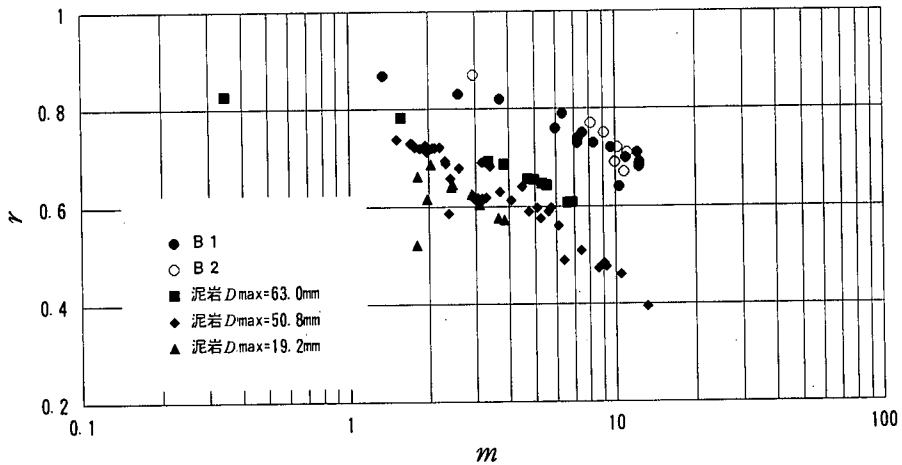


図-11 パラメータ (r , m) と軟岩との関係

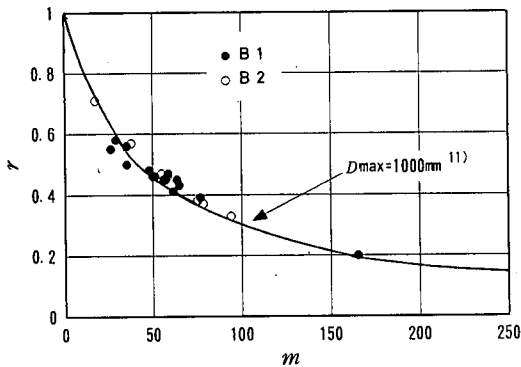


図-12 まさ土細粒化の一般的傾向¹¹⁾と B1, B2 試料の関係

筆者らは¹³⁾、スレーキングによる泥岩の細粒化現象を負の二項分布によって解析し、スレーキングによる細粒化現象においてもパラメータ (r , m) の間には規則的な関係が成立することを報告した。すなわち、泥岩がスレーキングにより細粒化するとき、パラメータ (r , m) は、 $r - \log(m)$ 図上を左上から右下方向へ直線的に移行する関係を見出し、広範な堆積軟岩に対する平均的な関係式も示した¹³⁾。図-11は今回のボーリング試料に対する粒度試験から得られた結果を、泥岩の関係とともに $r - \log(m)$ 図上に整理したものである。この図より① D_{max} によって $r - \log(m)$ の直線関係が平行移動する、②同じ D_{max} でも泥岩とまさ土では $r - \log(m)$ の直線関係が異なる、③泥岩、まさ

土の種類が異なっても細粒化に伴う粒度の変化は、 $r - \log(m)$ 図上でほぼ平行な直線上を左上から右下に移動する、ことがわかる。

岩質が $r - \log(m)$ 図における直線の位置を決め、その後の細粒化は $r = a - b \log(m)$ で表現される直線上を移動することが、図-11の結果から確認できる。ここで、 a , b は、 $r - \log(m)$ 図上での直線回帰パラメータである。

福本^{10), 11)}は、 $D_{max} = 1000\text{mm}$ として、多くのまさ土に対する粒子破碎実験後の粒度分布よりパラメータ (r , m) を求め、地域的な違いによらず粒子破碎によってパラメータ (r , m) が一定の関係を保ちつつ変化する傾向のあることを見出した。図-12は、今回の粒度試験によって得られた結果を、 $D_{max} = 1000\text{mm}$ として再計算し、福本による関係線¹¹⁾とともに (r , m) 図上に整理したものである。外力負荷と風化といったまさ土粒子の細粒化の原因に違いはあっても、細粒化に伴ってパラメータ (r , m) が左上から右下に福本の提案したユニークな関係線上を移動することが確認できた。このことは、採取場所や細粒化の原因に違いはあっても、風化過程にあるまさ土は同じ規則性で細粒化している可能性を示唆しており、興味深い結果である。

図-11より、パラメータ (r , m) は $r - \log(m)$ 図上を直線的に移行するので、同じ種類と見なすことのできるまさ土については、どちらか一方のパラメータを基準にして、風化度の判定を行うことができる。図-11, 12の結果から、 r に比べて m の変化の範囲が大きいこと、 m は破碎回数あるいは経過時間を示し物理的意味が明快であること、などからパラメータ m に注目して風化の程度

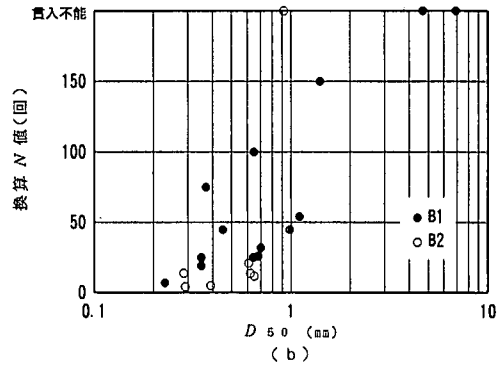
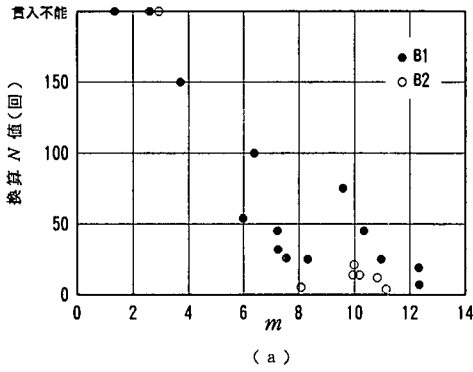


図-13 パラメータ m , D_{50} と換算 N 値の関係

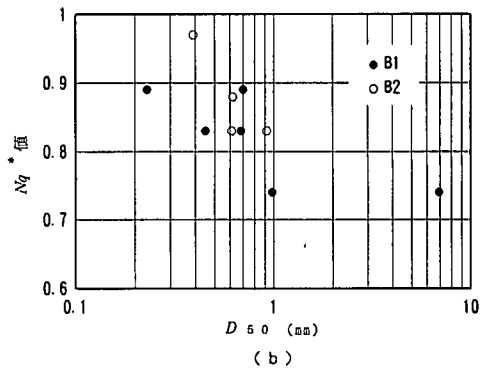
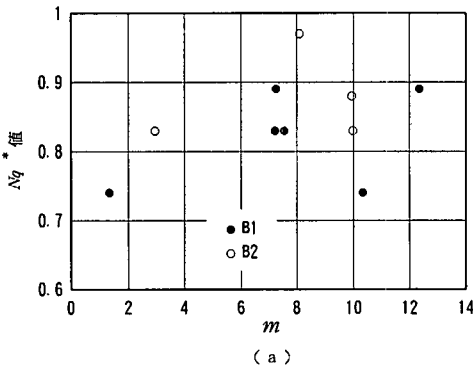


図-14 パラメータ m , D_{50} と Nq^* 値の関係

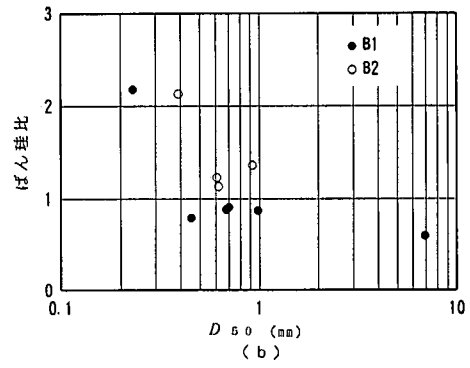
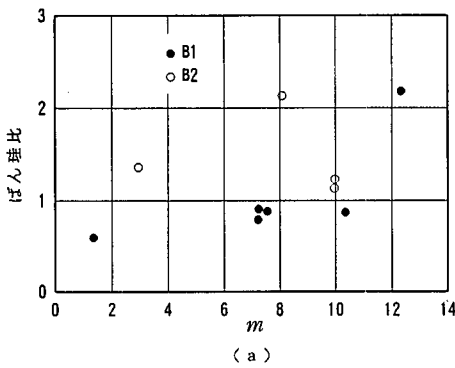


図-15 パラメータ m , D_{50} とばん珪比の関係

を判断することにした。

風化の程度を広く捉えるため、図-13 (a) に標準貫入試験の50回打撃時点の貫入量から計算した換算 N 値を採用して、B 1, B 2 の試料に対するパラメータ m と、換算 N 値¹⁵⁾ の関係を示した。

$$\text{換算 } N \text{ 値} = 50 \text{ 回} \times \frac{30 \text{ cm}}{\text{打撃50回に対する貫入量 (cm)}} \quad (6)$$

Nq^* 値、ばん珪比と m との関係も図-14 (a), 15 (a) に示した。 Nq^* 値、ばん珪比と m との関係は、幾分バラツキが見られるものの概ね右上がりの傾向が認められ、当該地域のまさ土の風化度判定に m が利用できそうなことが確認された。

図-13 (b), 14 (b), 15 (b) には D_{50} と換算 N 値, Nq^* 値, ばん珪比との関係を示した。

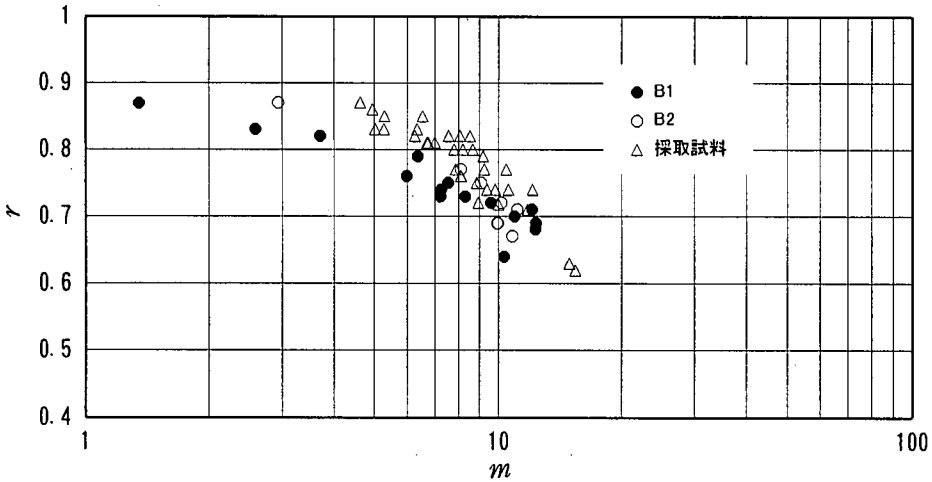


図-16 各試料のパラメータ (r , m) の関係

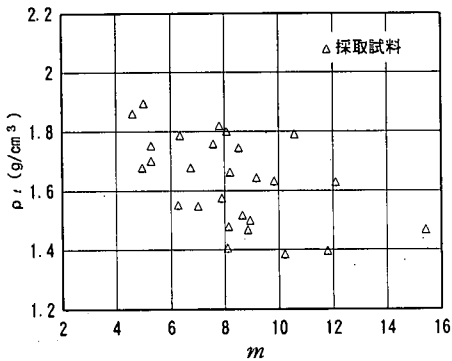


図-17 湿潤密度 ρ_i とパラメータ m の関係

同一の Nq^* 値, ばん珪比に対する D_{50} と m の値を比較すると, D_{50} の方がいくぶんばらつきが少なく, 風化指標として好ましい印象を受ける。

これは, D_{50} が粒径分布の平均値的な意味合いを表すのに対して, m が式(2)からもわかるように, 粒径分布の平均と分散から算出されており, m だけの単独評価では不十分であることを物語っている。したがって, 以下の検討では, 粒径分布の平均と分散を同時に考慮することができるように, 負の二項分布パラメータ (r , m) を用いて風化度を評価することにする。

4. 貯水池周辺地盤の風化度判定

(1) 試料の採取

地表踏査にもとづいて, 広範な貯水池斜面を侵食状況や地盤状況に応じて25地区に区分けし, このうち風化度の判定が必要と考えられる12の地区を選定して, それらの地区より34地点で試料採取を行った。貯水池で発生する崩壊が表層部分の小規模なもので

あることから, 試料の採取深さは地表面から20~30 cmの深度とした。

(2) 粒度試験による風化度の判定

地盤の表層は, 気象や水位変動, 植生等の影響を受け, 複雑な条件下で風化が進行する。このため, これら条件が異なる場合には粒度試験による風化度判定法のパラメータ (r , m) に影響が及ぶことも考えられる。しかし, 今回の対象が貯水池周囲の斜面という限られた範囲であることを考慮すれば, これら要因の影響は各試料とも同程度であると考えられ, 相対的な風化度はパラメータ (r , m) により的確に判定できると考えた。

採取した試料の粒度試験は, JIS規格のふるいを使用したふるい分析によって32 μ mまでの粒度分布を求め, 32 μ m以下の細粒分の粒度分布は沈降分析により1 μ mまで求めた。さらに, 先述したように0.1 μ mまでを滑らかに外挿して粒径加積曲線を求めた。

(3) 結果と考察

負の二項分布パラメータ (r , m) を B1, B2の結果とともに r - $\log(m)$ 図上に示すと図-16のようになる。B1, B2のボーリング試料に対して行った風化度判定の結果を物指しにして, 各地点の風化程度が概略判定できる。すなわち, 風化に伴う細粒化によって, 粒度が r - $\log(m)$ 図の直線上を左上から右下に向かって移動する規則性に従えば, 右下にプロットされた試料は左上のものよりも風化が進行していると判断される。

まさ土は風化にともなう物理的特性の変化として間隙率の増大, 力学的特性の変化として強度の低下がよく知られている¹⁾。図-17に試料採取位置で

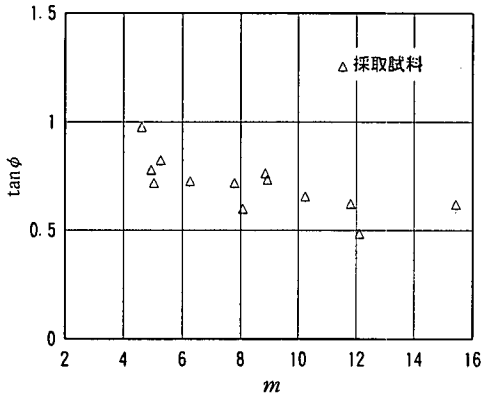


図-18 強度係数 $\tan \phi$ とパラメータ m の関係

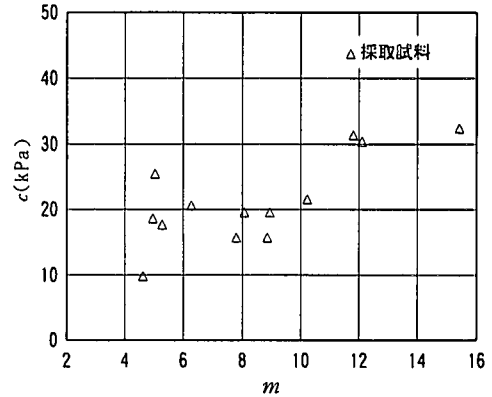


図-19 強度定数 c とパラメータ m の関係

の湿潤密度 ρ_i と m の関係を、図-18、19には攪乱試料を地山の密度、含水比に調整し、静的に締固めたまさ土試料に対する一面せん断試験（供試体直径6cm、高さ2cm、定圧せん断、せん断速度0.25mm/min）から推定した強度定数 $\tan \phi$ 、 c と m の関係を示した。静的な締固めでも土粒子の破碎が発生し、せん断開始時の粒度は試料採取時のものから幾分変化する。また、せん断強度推定のための垂直荷重負荷によっても粒度の変化は危惧され、まさ土のような破碎性地盤の強度推定は難しい。ここでは、粒子破碎率は考えないで、最大せん断応力点より強度定数 $\tan \phi$ 、 c を推定し、試料採取時の粒度から推定された m との関係を探った。強度定数 c は細粒化（ m の増加）に伴い、粘土分が増加したものについては、若干の増加傾向が見られるが、 m が6～10では一定と見なせそうである。また、 ρ_i 、 $\tan \phi$ は、ともにパラメータ m の増加とともに減少する傾向が認められる。

風化に伴う物理的、力学的性質の変化に関する一般的な記述¹⁾とパラメータ m の変化がよく符合することが、これらの結果より確認できた。

図-18、19の力学試験を実施した地点が風化度調査の試料採取地点より少ないのは、景観、道路等の公共物や民地への距離を勘案して緊急性を要する地点を優先的に実施したためである。

5. 結論

広範な貯水池斜面の護岸工事を効率的に行うために、代表的な斜面からの試料採取と粒度試験に基づいて、まさ土斜面の風化の進行程度を判定した。事前に行った2箇所のボーリング試料の確認試験で、深度方向の各粒度にベストフィットする負の二項分布パラメータ（ r 、 m ）が、X線回折で推定され

た Nq^* 値と溶出試験結果で推定された非晶質成分中のばん珪比の変化とよい対応を示す事が判明したので、この方法の採用に踏み切った。

本研究から得られた主要な結論をまとめると次のようになる。

(1) 異なる2箇所のボーリング試料に対する深度方向の粒度分布の違いを、負の二項分布パラメータ（ r 、 m ）により考察したところ、地表面に近づくにつれて r が減少、 m が増加する傾向にあることがわかった。

(2) ボーリング試料に対して、X線回折と溶出試験を実施したところ、従来から風化指標に有効であると指摘されている Nq^* 値（石英と（石英+長石）の質量比）と非晶質成分中のばん珪比（アルミニウムと珪素の含有量を Al_2O_3 と SiO_2 の質量比で表示）の傾向的变化が認められた。すなわち、浅層になる程 Nq^* 値とばん珪比が増大していることが判明し、風化指標としての Nq^* 値とばん珪比の意味から判断して、当該ボーリング地点の試料は、浅層程風化の進行が激しいことが推論された。

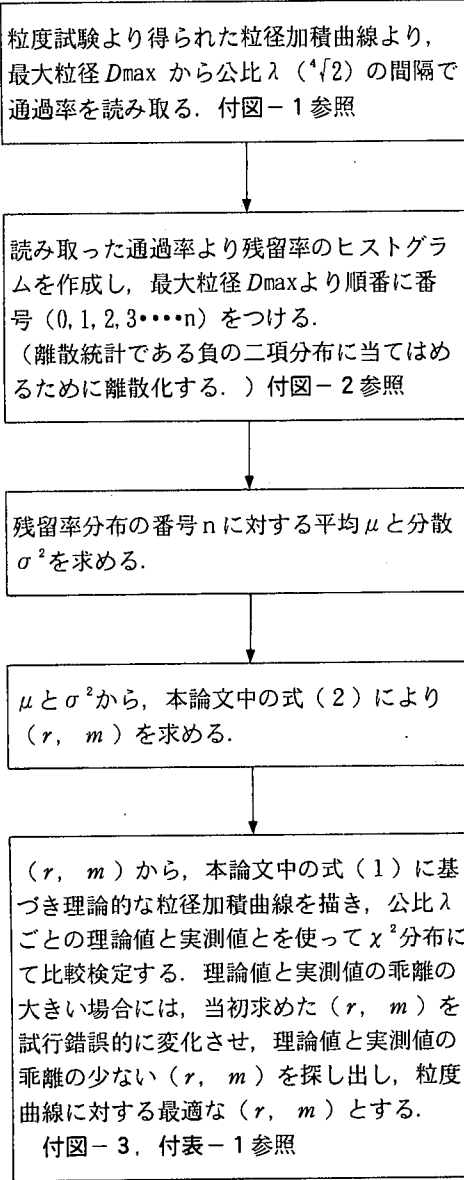
(3) スレーキングに伴う細粒化現象で確認された $r - \log(m)$ 図上での直線関係と、当該地域のまさ土の関係は、当該地域のまさ土が少し細粒側にプロットされるものの、両者は平行な直線上を移動することがわかり、各試料に対する Nq^* 値とばん珪比の風化指標の変化も勘案すれば、風化の進行に伴って、 $r - \log(m)$ 図上の直線を右下方向に移動するような粒度の変化をすることがわかった。

(4) 広範な貯水池周辺まさ土斜面から採取した試料に対する（ r 、 m ）を算出して、 $r - \log(m)$ 図上にプロットしたところ、ボーリング試料に近いところに結果が整理され、 $r - \log(m)$ 図上での整理によって、風化の進行程度を簡単に、相対評価できることがわかった。

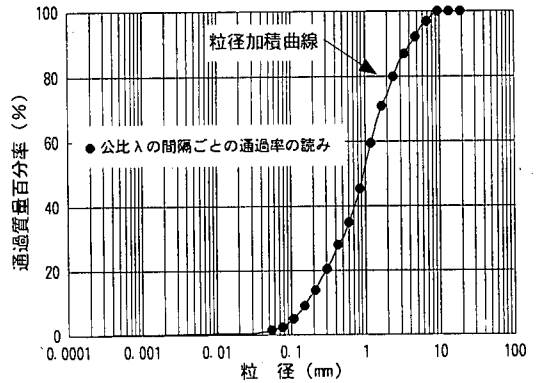
(5) m に着目して、対応する試料の湿潤密度 ρ_i と強度定数 $\tan \phi$ を調べたところ、 m が大きくなる程 ρ_i 、 $\tan \phi$ とも減少する傾向が伺われた。

付録

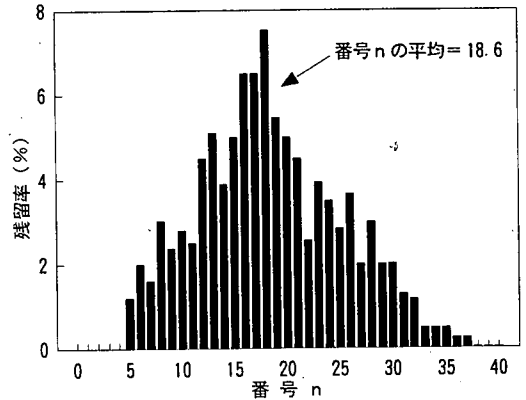
粒度試験結果に基づく負の二項分布パラメータ (r , m) の算出方法とフィッティング結果



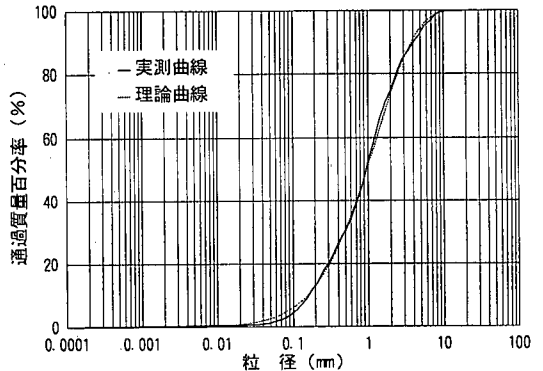
注：下記資料は、本論文の B 1、深度 8m のデータを使用した。
付図-2 は $n=69$ まで微量な数値が続くが、グラフは $n=40$ までとした。



付図-1 粒径加積曲線の解析



付図-2 粒径番号に関する残留率分布



負の二項分布による粒径加積曲線と実測値の比較
付図-3

付表-1

試料	B 1 深度 8m		
平均	18.6	r	0.65
分散	53.8	m	9.82
χ	26.73	自由度	68
$\chi^2(68, 0.05)$	87.96		

参考文献

- 1) 土質工学会編：土質試験の方法と解説, pp. 509-525, 1990.
- 2) 西田一彦, 青山千彰：乱さない不飽和まさ土のせん断強度特性, 土と基礎, Vol. 29, No. 6, pp. 35-40, 1981.
- 3) 福田護：浸水に伴う土のせん断抵抗の低下と盛土斜面の安定解析, 土木学会論文報告集, Vol. 18, No. 3, pp. 155-163, 1978.
- 4) 土質工学会編：土質基礎工学ライブラリー日本の特殊土, pp. 86-87, 1974.
- 5) Lumb, P. : *The Properties of Decomposed Granite, Geotechnique*, pp. 226-243, 1962.
- 6) 西田一彦, 佐々木清一, 久保井利達：まさ土の非晶質物質とその特性について, 土質工学会論文報告集, Vol. 24, No. 2, pp. 180-190, 1984.
- 7) 奥園誠之, 島田忠則：切土のり面崩壊の予知における弾性波探査の有意性と問題点, 昭和49年度試験所報告, pp. 41-47, 1975.
- 8) 木宮一邦：三河・富草地域の花崗岩礫の風化速度(花崗岩の風化・第2報)：地質学雑誌, 第81巻, 第11号, pp. 683-696, 1975.
- 9) 斎藤徳美, 阿部司：シュミット・テストハンマーによる風化火成岩の反発度について, 物理探査, Vol. 26, No. 1, pp. 19-31, 1973.
- 10) 福本武明：まさ土の粒度式に関する一考察, 第22回土質工学会研究発表会, pp. 165-166, 1987.
- 11) 福本武明：まさ土の粒度式について, 第23回土質工学会研究発表会, pp. 197-198, 1988.
- 12) 立石哲郎, 板橋一雄, 田口泰敏：パスカル分布に基づくまさ土の粒度分布の表現法, 名城大学理工学部研究報告, No. 29, pp. 104-110, 1989.
- 13) 佐藤健, 板橋一雄, 河邑真：乾湿繰り返しによる泥岩の細粒化試験と結果の整理法, 土木学会論文集, No. 487/Ⅲ-26, pp. 69-77, 1994.
- 14) 庄内士郎編：愛知県地学のガイド, pp. 11-13, コロナ社, 1978.
- 15) 高速道路調査会：構造物基礎における地盤定数の評価に関する研究報告書, pp. 66-69, 1989.
- 16) Fukumoto, T. : Particle Breakage Characteristics of Granular Soils, *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 1, pp. 26-40, 1992.
- 17) 板橋一雄, 牧岳志, 高木聖崇, 久原善光：破砕性土質材料の一次元圧縮ならびに単純せん断挙動と粒子破砕特性, 第9回地盤工学シンポジウム論文集, pp. 33-38, 1997.
- 18) 福本武明, 貝谷政信：泥岩の細粒化特性, 土木学会論文集, No. 589/Ⅲ-42, pp. 41-53, 1998.

(1998.5.22受付)

WEATHERING ESTIMATE OF DECOMPOSED GRANITE
BY PARTICLE DISTRIBUTION ANALYSIS

Takeshi SATO, Kazuo ITABASHI, Hideaki HASEGAWA,
Ikutaro KUMAZAKI, Masayoshi WAKAMATSU and Yoshio HIRAIWA

Grain size distribution curves of decomposed granite sampled from slopes of a reservoir for a pumped storage power plant were analyzed by the negative binomial distribution in order to estimate the weathering rate. The verification was made by comparisons with the results obtained from X-ray analysis and chemical dissolution tests. Engineering applications showed that a unique relationship among the parameters was available to relative estimation for weathering of soils at each slope.