

◆ 報 文 ◆

強度の空間的なばらつきを考慮したフィルダム基礎地盤の掘削管理

山口嘉一* 佐藤弘行**

1. はじめに

フィルダム基礎に強度の小さい粘性土層などの弱層が存在する場合、堤体のみならず、その弱層沿いのすべりに対する安全性を設計時に検討する必要がある。その上で基礎掘削時には弱層が有すべき強度の管理を行う必要がある。実際には、弱層の強度評価試験数が十分な精度で統計処理を行えるほど多くないため、測定値すべてが管理基準値を上回る下限値管理が一般に採用されている。しかし、完全塑性体を仮定した限界平衡法によるすべり安定解析は、全体の安全性がその構成要素の平均的な特性により決まる平均値問題の典型であり¹⁾、かつ粘性土が比較的完全塑性体に近い挙動を示すため、下限値管理では過度に安全側の管理基準になる恐れもある。そのため、精度の高い簡易試験方法の採用によって基礎弱層の強度評価点数を増加させ、かつ強度の統計量だけでなく、弱層の空間分布も併せて考慮することにより、基礎掘削の合理化が図れるものと考えられる。

著者らはこれまで、グラウチングの設計・施工の合理化を目的として、ダム基礎の透水性の空間的な分布に着目した水みち形成過程・抽出方法の検討、および透水性の評価手法についての提案を行っている^{2),3)}。これらの研究成果として、水みちの形成には、高透水部の上下流方向への連続性が重要であることが分かった。また、水みちの形成過程・抽出方法は、すべりに対する安全性を検討すべきフィルダム基礎における弱層抽出にも応用することができると考えている。

そこで本報では、フィルダム基礎の強度に関する掘削管理基準の合理化を目的とした基礎的な研究として、実際のアースダムの基礎となる粘性土層に対して実施された強度試験結果を基に、まず試験対象領域全体における強度の統計処理を行った。次に、強度の空間分布にパーコレーション理

論⁴⁾を適用して弱層の空間的な相関・連続性を抽出し、抽出された相対的な弱層の形状およびその中の強度の統計量から、合理的な基礎掘削管理基準についての検討を行った。

2. 試験対象地盤と試験方法

2.1 試験対象地盤

試験対象地盤は、現在建設中の堤高 15.3m、堤頂長 1,050m、堤体積約 50 万 m³ の均一型アースダムの基礎地盤の最上層である粘性土層 (Ac11) である。図-1 にアースダムの標準断面を示す。なお、対象としたダムにおいては、すべり破壊に対する安定性の確保、沈下の抑制、および砂層の液状化対策のために、基礎地盤に対してグラベルコンパクションパイル (GCP) の施工を行っている。

試験対象となる土層の平面および断面形状と試験位置を図-2 に、土層断面の写真を図-3 に示す。表土は層厚 20~50cm の休耕作土であり、ヨシ地下茎が広く分布しておりダム築造後の腐食による沈下や水みちの形成など安全性上問題があること、また強度のばらつきが大きいいため、全て掘削除去される。そのため、実際にダム基礎の最上層となるのは、粘性土層 (Ac11) で、これは B 層および C 層に区分される。B 層は地下水位以浅で風化が進んでおり、その土質はシルト質粘性土が主体で、淡褐色・赤褐色を呈している。一方 C 層は地下水位以深で、シルト質粘性土主体で青灰色を呈しており、一部薄く細粒の砂を挟んでいる。

2.2 試験方法

B 層および C 層に対して、強度評価を目的にポータブルコーン貫入試験を行った。図-2 に示す通り、B 層と C 層それぞれの 50m × 30m のブロックを 5m × 5m の 50 の単位ブロックに分割し、それぞれの単位ブロックの中心 50 点において、深度 10cm、20cm、30cm の各深度でポータブルコーン貫入抵抗値 q_c の測定を行い、その平均値を求め、その値を単位ブロックの強度とした。なお、ポータブルコーン貫入試験を強度評価方法

Excavation Management for Earth Dam Foundation Considering Spatial Dispersion of its Strength

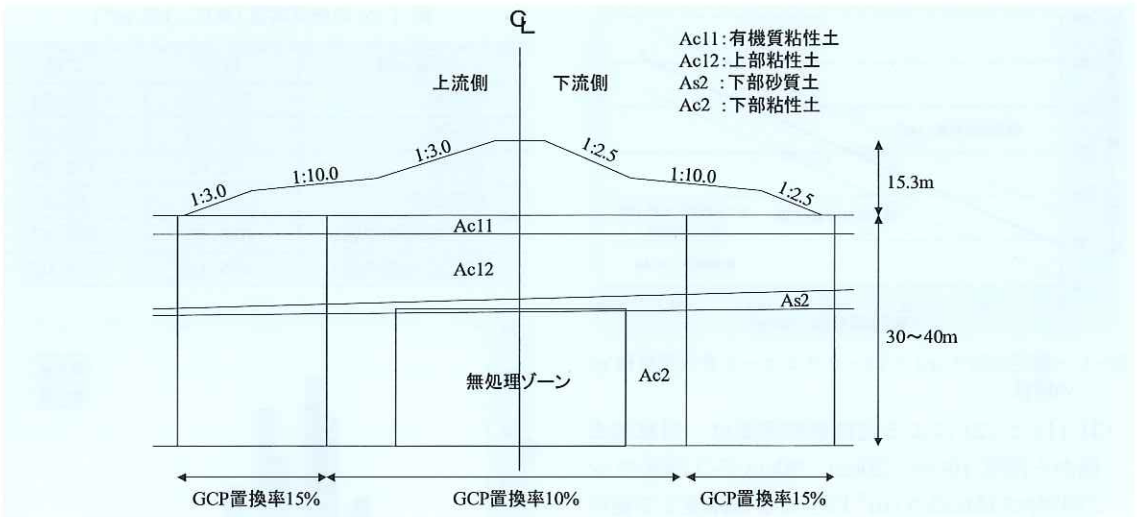


図-1 検討対象としたアースダムの標準断面

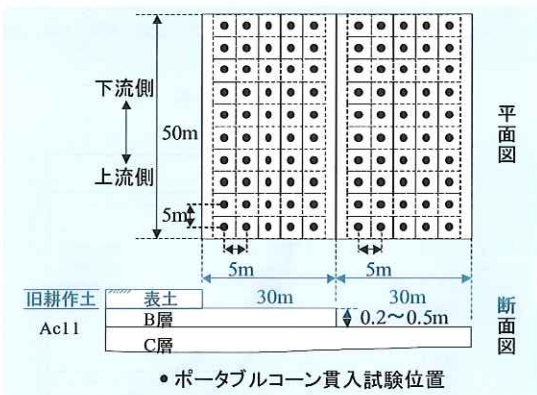


図-2 土層の平面・断面と試験位置平面

としたのは以下の理由による。対象とする地盤の N 値はほぼ 5 以下であった。試験的に、ポータブルコーン貫入試験と動的簡易コーン貫入試験を実施したが、動的簡易コーン貫入試験では動的簡易コーン貫入強度 N_d 値が 1 以下となり適切に強度を評価できない場合があったので、ポータブルコーン貫入試験により対象地盤の強度の評価を行うことにした。

2.3 設計強度と掘削基準

対象地盤である粘性土層 (Ac11) の設計強度は内部摩擦角 $\phi = 0$ で粘着力 $c = 9.8\text{kN/m}^2$ (一軸圧縮強さ $qu = 2c = 19.6\text{kN/m}^2$ に相当) である。図-4 に示す事前に行った一軸圧縮強さ qu とポータブルコーン貫入試験抵抗値 qc の対応から、対象地盤の設計強度 $c = 9.8\text{kN/m}^2$ ($qu = 2c = 19.6\text{kN/m}^2$) を満たすための管理値としては、試験結果のばらつきも考慮して、ポータブルコーン貫入抵抗値

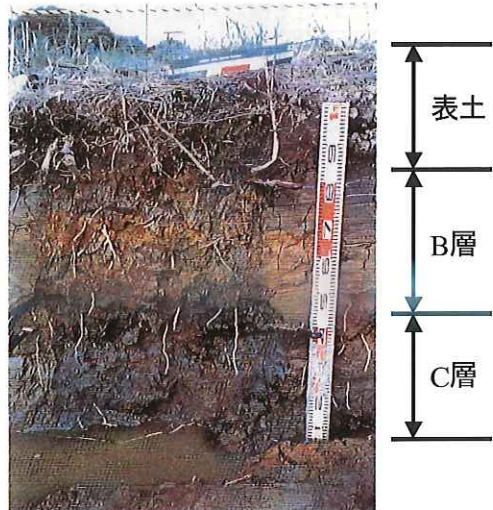


図-3 土層断面

$qc \geq 156.8\text{kN/m}^2$ が採用された。

なお、この基準が満足されない場合には、以下の基準により追加掘削を行うこととしている。

- (1) qc が 156.8kN/m^2 以下の単位ブロックが連続 (縦方向、横方向、斜め方向) する場合には、その連続する単位ブロックを掘削する (以下、これを「不連続基準」と呼ぶ)。
- (2) (1) の不連続基準による一部単位ブロックの追加掘削後、 qc が 156.8kN/m^2 を満足する強度測点数が対象領域全体の測点数の 85% を下回る場合、つまり試験箇所を対象とすると 50 点中 42 点以下の点でしか qc が 156.8kN/m^2 を満足しない場合、対象領域を全面掘削する (以下、これを「85%超過基準」と呼ぶ)。

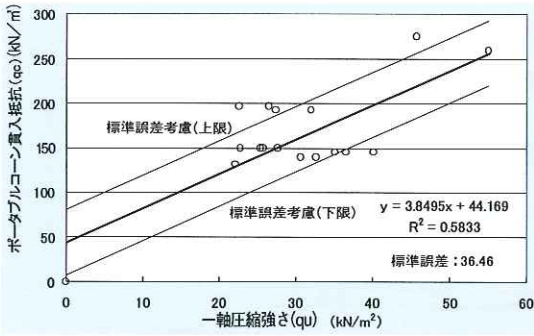


図4 一軸圧縮強さ q_u とポータブルコーン貫入抵抗値 q_c の関係

(3) (1) と (2) による追加掘削深度は、対象地表面から深度 10cm、20cm、30cm の 3 深度の q_c の平均が 156.8kN/m^2 以上になる深度まで掘削する。

なお、本報において検討対象としたアースダムの掘削管理基準は、グラウチングの追加孔基準⁵⁾を参考にして決められている。グラウチングにおける追加孔基準においては、透水性の超過確率と不連続基準、さらに最大値の規制が一般的に用いられている。この追加孔基準により、ダム基礎グラウチングにおいては、間接的に領域全体の高透水性部の空間的連続性が考慮されているものと考えられる。

3. 試験結果

表-1 に試験により得られた B 層と C 層の q_c の統計諸量、図-5 に q_c の頻度分布、図-6 に q_c の超過確率分布を示す。これらを見ると、B 層の方が平均値が大きく相対的に大きな強度値が多く分布しているが、B 層の方が標準偏差も大きく分布幅が広がっている。また、 q_c の最小値は B 層の方が C 層よりも小さくなっている。

図-7 は、B 層と C 層における q_c の空間分布と、管理基準値 ($q_c = 156.8\text{kN/m}^2$) 以下の単位ブロック (網掛け部) の分布を示している。これを見ると、B 層・C 層ともに追加掘削基準 (1) の不連続基準に該当する部分があるため、B 層においては左下部 (上流左岸側) の縦 (上下流方向) に連続した 2 単位ブロック、および左上部 (下流側) の斜めに連続した 2 単位ブロックが追加掘削され、C 層においては上部 (下流側) の連続した 6 単位ブロックの追加掘削が行われている。この追加掘削により、B 層と C 層ともに管理基準値以下の連続した

表-1 q_c の統計諸量 (単位: kN/m^2)

対象土層	B 層	C 層
平均値	232.39	196.54
最大値	451.39	330.26
最小値	92.81	113.29
標準偏差	78.66	45.67
15%超過確率値	325.56	241.47
85%超過確率値	165.13	151.02

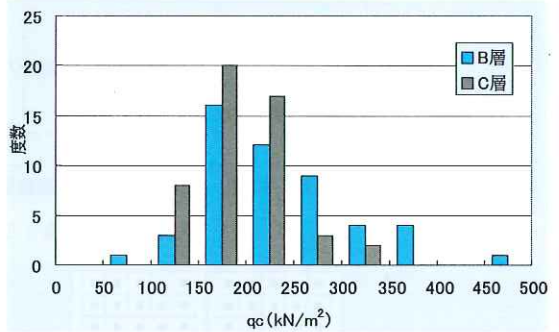


図-5 q_c の頻度分布

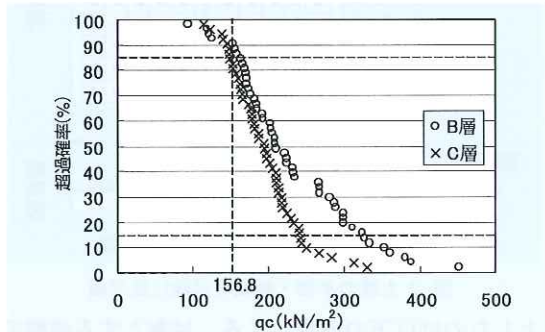


図-6 q_c の超過確率分布

単位ブロックはなくなり、また、B 層と C 層ともに q_c の管理基準値における超過確率は 85% 以上になる。

なお、図-7 の追加掘削以前の強度分布を見ると、B 層は管理基準値以上のブロックが 44 あり、超過確率は $44/50 = 0.88 > 0.85$ となり、85% 基準を満たしている。一方 C 層は、管理基準値以上のブロックが 40 で、超過確率は $40/50 = 0.8 < 0.85$ となり、85% 基準を満たしていない。

4. 掘削管理に関する考察

フィルダム基礎地盤の強度は、空間的な相関性・連続性を有しているものと考えられる。フィルダム堤体および基礎の安全性を考える上で、仮定したすべり面内の強度が重要である。ここでは、追加

掘削する前の試験対象ブロックにおける相対的な弱層が上下流方向にどのように分布しているかを評価するため、 qc の空間分布にパーコレーション理論を適用して相対的な弱層を抽出した。なお、パーコレーションとはある性質のつながりを考えるための理論であるが、その詳細については参考文献⁴⁾を参照されたい。

図-8は、 qc が上下流方向にパーコレートした時のクラスター形状およびパーコレーション閾値を示している。なおここでのパーコレーション閾値の定義は、 qc の小さい要素から要素を塗りつぶして行った時に、あるクラスターが上下流端に初めて連続した時の qc 値、つまり臨界状態のクラスター内の qc の最大値をパーコレーション閾値と定義している。また、安全性評価上安全側の評価とするため、パーコレーションの判定には接点のみの接続、つまり単位ブロックの斜めの連続性も考慮している。なお、単位ブロックの斜めの連続性を考慮しない場合についての検討も行ったが、B層については斜めの連続性を考慮した場合と変わらず、C層についてはクラスターの要素が2つ増加したものの、クラスター形状やクラスター内の統計量に大きな変化は見られなかった。図-8により抽出されたクラスターは、上下流方向に連続している相対的な弱層と解釈される。図8を見ると、C層の相対的な弱層は左右岸方向に広い幅をもって存在しているが、B層の相対的な弱層は左岸側上下流方向に直線的に存在しており、相対的な弱層であるクラスター形状を見ると、弱層が偏在するB層の方が安全性上の問題が大きいと考えられる。また、クラスター内の最大値であるパーコレーション閾値を見ると、B層の方がC層より1割程度大きくなっている。

図-9は、B層とC層それぞれの qc の不偏分散で無次元化したバリオグラムの分布を示している。バリオグラムは物性の空間的な相関性を表す指標である。式(1)で表わされ、この値が小さいほど空間的な相関が強いことを意味している。

202.86	210.8	298.8	267.34	221.77
171.4	169.83	231.18	298.8	268.91
152.59	163.56	287.83	298.8	268.91
193.45	125.83	185.61	92.806	174.54
209.23	166.7	232.75	279.99	352.31
206	184.04	223.34	286.26	380.63
191.88	155.72	223.34	311.44	451.39
204.43	171.4	176.2	360.15	388.47
158.86	119.56	168.27	333.4	323.99
209.23	121.13	182.48	234.32	327.12

(a) B層

下流
↑
↓
上流

224.13	198.16	193.45	210.8	165.13
147.88	213.93	113.29	147.88	139.94
266.56	177.77	149.45	198.16	174.54
313.01	152.59	122.7	242.26	161.99
229.61	177.77	240.69	206	195.02
243.04	180.91	187.18	217.07	218.64
139.16	159.64	144.75	166.7	157.29
176.2	213.93	187.18	163.56	209.23
210.8	232.75	152.59	217.07	250.1
283.12	239.12	182.48	201.29	330.26

(b) C層

(単位: kN/m²)

図-7 qc の空間分布と管理基準値以下の単位ブロックの分布 (網掛け部は管理基準値以下の単位ブロック)

202.86	210.8	298.8	267.34	221.77
171.4	169.83	231.18	298.8	268.91
152.59	163.56	287.83	298.8	268.91
193.45	125.83	185.61	92.806	174.54
209.23	166.7	232.75	279.99	352.31
206	184.04	223.34	286.26	380.63
191.88	155.72	223.34	311.44	451.39
204.43	171.4	176.2	360.15	388.47
158.86	119.56	168.27	333.4	323.99
209.23	121.13	182.48	234.32	327.12

(a) B層 (202.86)

下流
↑
↓
上流

224.13	198.16	193.45	210.8	165.13
147.88	213.93	113.29	147.88	139.94
266.56	177.77	149.45	198.16	174.54
313.01	152.59	122.7	242.26	161.99
229.61	177.77	240.69	206	195.02
243.04	180.91	187.18	217.07	218.64
139.16	159.64	144.75	166.7	157.29
176.2	213.93	187.18	163.56	209.23
210.8	232.75	152.59	217.07	250.1
283.12	239.12	182.48	201.29	330.26

(b) C層 (182.48)

(単位: kN/m²)

図-8 qc の上下流方向の弱層の抽出 (網掛け部は連続したクラスター) (カッコ内の数値はパーコレーション閾値)

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x) - z(x+h)]^2 \quad (1)$$

ここで、 γ はバリオグラム、 h は相関距離、 $N(h)$ は距離が h になる観測値の組合せの数、 $z(x)$ は x における観測値である。

図-9を見ると、B層の方が相関距離10m程度の時のバリオグラムの値が小さくなっており、

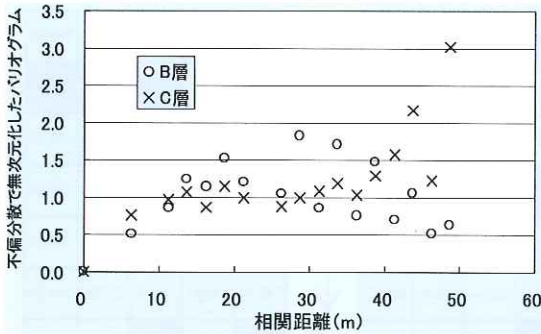


図-9 qc のバリオグラム

B層の方がC層よりもqcの空間的な相関が強いことを示唆している。このことは、図-8に示すクラスターにおいて、B層では左岸側にやや偏在しているのに対し、C層では左右岸方向に広い幅を持って存在していることと対応している。なお、相関距離30m程度以上になると、その観測距離における観測点の組合せ数が少なくなるため、バリオグラムの精度が悪くなり、ばらつきが大きくなる。

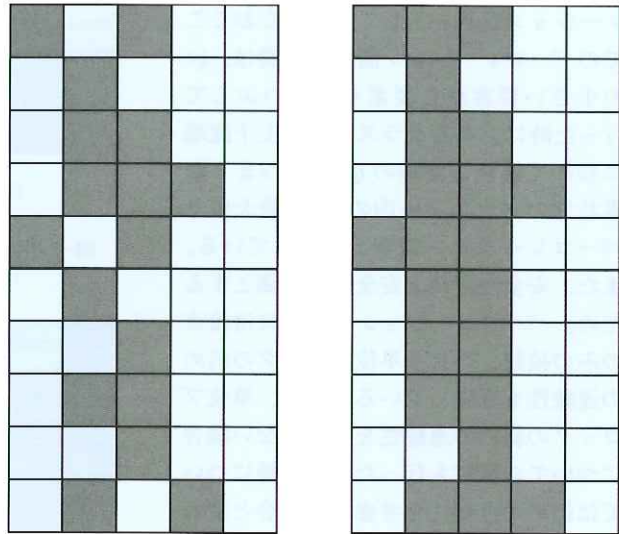
表-2は、図-8においてパーコレートしているクラスター内での統計諸量を示している。表-2を見ると、相対的弱層を表す図-8のクラスター内の平均値は、B層とC層ともに管理基準値の156.8kN/m²よりも若干大きくなっており、抽出された弱層内のすべりを弱層内の強度の平均値問題として考えれば、追加掘削基準を適用して掘削する前においても、安全性を確保するために必要な強度をぎりぎり満たしていた。なお、ここで示した方法を実際のフィルダムの基礎掘削管理に適用する際には、クラスターをそのまま弱層とするのではなく、図-10に示すように、クラスター形状を参考として弱層範囲をもう少し滑らかな形状として決定する必要がある。また、この方法を適用するブロックの範囲などについても厳密に詰める必要がある。

検討対象としたアースダムにおいては、実際には前述の基礎掘削基準が適用され、そのほとんどの箇所強度が管理基準値以上になっている。今回の検討結果から、これらの対応が直ちに過剰な対応があったと結論付けるのはあまりにも短絡的である。しかし、設計強度をポータブルコーン貫入抵抗値により評価する際にも、データのばらつ

表-2 クラスター内のqcの統計諸量(単位:kN/m²)

対象土層	B層	C層
クラスター要素数 (全要素に占める割合)*)	21 (0.42)	22 (0.44)
クラスター内の最小値	92.8	113.3
クラスター内の最大値 (=パーコレーション閾値)	202.9	187.2
クラスター内の平均値	163.4	157.0
クラスター内の15%超過確率値	191.1	175.4
クラスター内の85%超過確率値	135.6	138.6

*) 単位: kN/m²の対象外



(a) クラスター形状

(b) 弱層形状

図-10 クラスター形状を考慮した弱層形状の決定例

きを考慮した安全側の値を採用していることなど、他の条件も踏まえて掘削管理基準についてさらなる検討を進める必要がある。

5. まとめと今後の課題

本報では、フィルダムの基礎掘削の合理化を目的として、現在建設中のアースダムの基礎地盤(B層とC層)を対象として、弱層の連続性に注目した基礎掘削管理基準についての検討を行った。その際、パーコレーションの概念を用いて、低強度部の空間的な連続性に着目して相対的な弱層の評価を試みた。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 対象とした地盤のB層とC層のポータブルコーン貫入抵抗値qcの統計諸量を比較すると、B層の方が平均値が大きい。しかし、B層の方が標準偏差も大きく、B層の方がqcの最低値が小さくなっている。

- (2) C層の方が q_c の管理基準値以下のブロック数が多く、B層は85%超過基準を満たしているが、C層は85%超過基準を満たしていない。しかし、不連続基準による追加掘削により、追加掘削後はC層も85%超過基準を満たしている。
- (3) パーコレーション理論を用いて相対的な弱層を抽出し、強度の空間的なばらつきを定量的に検討した。その結果、C層の相対的な弱層は左右岸方向に広く分布しているが、B層の相対的な弱層は上下流方向に直線的に分布していることが分かった。また、相対的な弱層の指標と考えられるパーコレーション閾値およびバリオグラムの結果からもB層の方が強度の空間的な相関性が強いことが推察される。

現在フィルダム基礎の掘削管理基準として一般に採用されている下限値管理では、過度に安全側の対応となる可能性も否定しきれない。そのため、本報で提案したような弱層の連続性に注目した掘削管理基準など、より合理的な掘削管理基準についての研究を進める必要がある。

今後、本報で提案したような方法を実際のフィルダム基礎の掘削管理に適用することの事例研究を進め、合理的な掘削管理基準の確立を目指したい。

一方、ダムの安全性を検討するためには、基礎掘削における相対的な弱層の空間的な連続性、あるいはグラウチングにおける高透水部の空間的な連続性を、直接的に考慮することが重要である。そのため、強度における貫入試験やグラウチングにおけるルジオン試験のような「点」による物理量を用いた検討だけでなく、物理探査等の「面」的な計測値を併せて用い、さらにそれらのデータを有効に活用して物理量の空間分布を推定する手法⁶⁾を用いての検討も別途進めている⁷⁾。

参考文献

- 1) 松本、本城：土質データのばらつきと設計（講座）、5. 実際の構造物への適用、土と基礎、Vol.35, No.6, pp.63-70, 1987.
- 2) Hiroyuki SATOH & Yoshikazu YAMAGUCHI : Suggestion of an advanced grouting effects evaluation method, Proc. of the 2nd Asian Rock Mechanics Symposium, pp.605-608, 2001.
- 3) 佐藤、山口：プランケットグラウチングにおける有効領域評価法の提案と主透水経路の評価、第30回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.248-252, 2000.
- 4) 小田垣：パーコレーションの科学、裳華房、1993.
- 5) 建設省河川局開発課監修、財団法人国土開発技術研究センター：グラウチング技術指針・同解説、pp.87-88, 1983.
- 6) DEUTSCH, C. V. & JOURNEL, A. G. : GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide, 1998.
- 7) 山口、佐藤：透水性のばらつきを考慮したダム基礎のグラウチング効果判定の高度化、土木技術資料、Vol.43, No.11, p.15, 2001.

山口嘉一*



独立行政法人土木研究所
水工研究グループダム構
造物チーム上席研究員、
工博
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI

佐藤弘行**



同 水工研究グループ
ダム構造物チーム研究員
Hiroyuki SATOH