

ブランク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

A suggestion of effective grouted area evaluation method and evaluation of main flow path
in blanket grouting area

佐藤弘行*・山口嘉一**

Hiroyuki SATOH and Yoshikazu YAMAGUCHI

To investigate the rational evaluation method and criteria of additional holes of blanket grouting for embankment dam foundations, we continued to make fundamental numerical simulations. In addition, we proposed effective grouted area evaluation method to estimate the permeability space distribution simply. After the permeability field in the blanket grouting area of an existing rockfill dam was estimated by this method, we carried out numerical simulations and evaluated a main flow path quantitatively using the percolation concept. It was reconfirmed that the streamwise distribution of high permeability elements was important for forming a main flow path, and it was found that the sequential order of 15% exceedence probabilities sometimes differed from that of percolation critical values according to the permeability space distribution.

1. はじめに

フィルダムの遮水ゾーン基礎全域に施工されるブランクットグラウチングの効果判定は、定量的には所定領域内の遮水性についての改良目標値に対する非超過確率により行われているが、改良目標値に到達しない透水性の大きい箇所連続性あるいは接近度などの空間的分布の評価は、図面（透水性マップ）上の視覚的な判断によっている。また、一般的にブランクットグラウチングの施工は中央内挿法により行われている。この方法には追加孔が必要となる地点の抽出が容易であるという長所がある一方、改良の評価が1次数遅れる、次数が増加するにつれ追加孔の数量が等比級数的に増加する、等の短所もある。そのため、近年のコスト縮減等の社会的要請の高まりを踏まえ、より合理的なグラウチングの効果判定法や追加孔基準について検討する必要がある。

著者らは、ブランクットグラウチングにおける遮水性が改良目標値に達しない未改良部の空間的分布と上下流方向の主透水経路の関係を明確化するため、単純なケースの二次元浸透流解析を行い、主透水経路を判定するため要素内流速に対してパーコレーション¹⁾の概念を適用し、パーコレーション閾値とクラスター形状から未改良部の配置が主透水経路に及ぼす影響を考察した^{2), 3)}。その結果、未改良部の流下方向に対する空間的配置が水みちの形成に大きく影響することが分かってきた。

本研究では引き続き基礎的な検討を行うとともに、これらの基本的な結果を実問題へ反映させるための基礎的な研究として、既設フィルダムのブランクットグラウチングにおけるルジオン試験のデータをもとに透水係数の空間的分布を簡易に評価する手法として有効領域評価法を提案し、それをもとに浸透流解析を行い、その結果にパーコレーションの概念を適用して定量的に水みちを抽出し、ブランクットグラウチングの効果を評価することを試みた。

2. 未改良要素の空間的分布と主透水経路の關係の基礎的検討

著者らは、未改良要素の空間的分布と主透水経路の關係について基礎的な検討を行っており、未改良要素の流下方向への分布が重要であることが分かってきた。ここでは未改良要素と主透水経路の關係をより明確に把握するために、引き続き基礎的な検討を行った。

解析領域は図-1の通り12m×12m正方形領域で、それを64個の1.5m×1.5mの正方形要素に分割した。境界条件は、上下流端は水頭固定境界、左右岸は不透水境界とした。また、流下方向の平均動水勾配は1とした。透水係数については、未

* 正会員 工修 建設省土木研究所ダム部フィルダム研究室研究員

** 正会員 工博 建設省土木研究所ダム部フィルダム研究室室長

改良要素として図-1のBとCの領域に解析領域中心に関して点対称となるようにそれぞれ3つ、計6個配置し、その他の要素は改良要素とした。これにより、解析ケースは全部で560通りとなる。改良部分の透水係数は $k(\text{target})=k_t=5 \times 10^{-7}$ (m/s) (5Lu相当, $1Lu \equiv 1 \times 10^{-7}$ m/s) とし、未改良部分の透水係数は $k(\text{higher})=k_h=50 \times 10^{-7}$ (m/s) (50Lu相当) として解析を行った。なお、未改良要素が2個と4個のケースの詳細については既報^{2), 3)}を参照されたい。

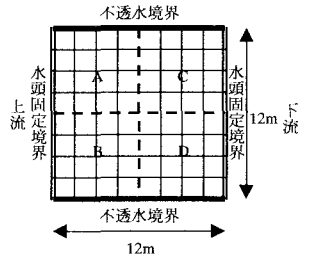


図-1 解析領域

図-2はパーコレーション閾値 V_{pc} の大きな5ケース、図-3はパーコレーション閾値の小さな5ケースのパーコレート時のクラスター形状とパーコレーション閾値を示している。なお、クラスターとはある流速以上の連続した要素の集合のことであり、パーコレートとはあるクラスターが上下流端の両方に接続した状態のことを言い、パーコレーション閾値とは、本研究中では、パーコレートしているクラスターの面積が最小の時（臨界状態）のクラスター内の最小流速を指す。また、パーコレートの判定の際は一節点での要素のつながりを認めている。

表-1 未改良要素が2・4・6個の時のパーコレーション閾値の大きい5ケースと小さい5ケースのパーコレーション閾値 V_{pc} ($\times 10^{-7}$ m/s)^a

順位	パーコレーション閾値の大きい5ケース			パーコレーション閾値の小さい5ケース		
	未改良要素の個数 2個	4個	6個	未改良要素の個数 2個	4個	6個
1	5.826	7.962	11.57	5.165	5.292	5.472
2	5.793	7.825	11.56	5.199	5.317	5.484
3	5.724	7.647	10.97	5.226	5.318	5.512
4	5.715	7.624	10.84	5.250	5.408	5.522
5	5.709	7.608	10.81	5.257	5.417	5.522

図-2と図-3を見ると、既報において得られた結論と同様に、未改良要素が流下方向に連続的に分布している時にパーコレーション閾値は大きな値を示しかつクラスターは小さくなっており、パーコレーション閾値が小さい場合には未改良要素が横断方向にばらついておりかつその時にはクラスターは大きくなっていることが分かる。さらに既報の結果と比較すると、未改良要素の個数を増加させたことにより、パーコレーション閾値の最大値はかなり大きくなっているものの、パーコレーション閾値の最小値にはあまり変化がないことが分かる(表-1)。つまり、流下方向の直線上に透水係数の大きな要素が増加すると水みちは形成されやすくなるものの、透水係数の大きな要素が横断方向の直線上に増加しても水みちの形成にはあまり大きな影響を与えないものと考えられる。

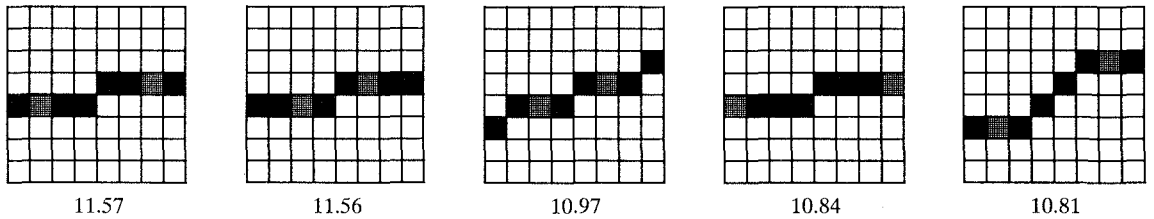


図-2 パーコレーション閾値 V_{pc} が大きい5ケース (左が上流, 右が下流)

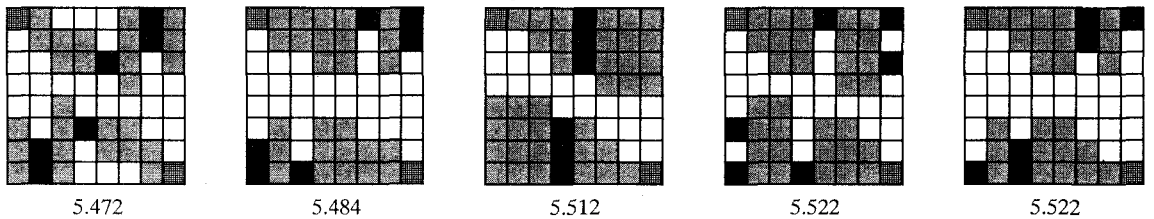


図-3 パーコレーション閾値 V_{pc} が小さい5ケース (左が上流, 右が下流)

■ k_h の要素, ■ 流速が V_{pc} となる要素, ■ V_{pc} よりも大きな流速の要素
数字は各ケースのパーコレーション閾値 V_{pc} ($\times 10^{-7}$ m/s)

3. 有効領域評価法の概要

空間的に離散的に実施されたルジオン試験等の透水試験の結果から広範囲の透水係数分布モデルを構築するためには、試験箇所以外での透水係数を何らかの方法により推定する必要があり、クリギングによる方法⁴⁾、拡張カルマンフィルタ・拡張ベイズ法による方法⁵⁾、遺伝的アルゴリズムを用いた方法⁶⁾、など様々な方法が試みられている。また、ブランケットグラウチングなどのグラウチングにおける追加孔は遮水性の改良目標値を達成し得ない前次数孔の周辺に選択的に施工される。そのため、追加孔施工後の場全体の透水係数分布を知るためにも何らかの推定方法が必要とな

る。本研究では、各次数のルジオン試験結果からグラウチング対象領域全体の透水係数分布を簡易に推定する手法として、有効領域評価法を提案する。プランケットグラウチングを例として有効領域評価法の手順を以下に示す。

- 1) 規定孔については、図-4の1~3次孔に示すように、当該孔を中心として、各次数における孔間隔と等しい長さを一辺とする正方形をその孔の改良基本面積とし、その面積内のルジオン値（透水係数）はその孔のルジオン値（透水係数）として逐次置き換えて行く。規定孔の場合は設定された全注入孔において施工されるので、当該次数だけで対象面積全てのルジオン値（透水係数）の分布が決まる。
- 2) 追加孔についても、当該孔を中心として、各次数における孔間隔と等しい長さを一辺とする正方形をその孔の改良基本面積とし、その面積内のルジオン値（透水係数）はその孔のルジオン値（透水係数）として逐次置き換えて行く。しかし、追加孔の場合は遮水性の改良目標値を達成し得ない前次数孔の周辺に選択的に施工されるため、図-4の4~7次孔に示すように、当該次数のルジオン値（透水係数）の分布は前次数までのルジオン値の分布が残る。

図-4を見ると、次数が高まるにつれて1孔あたりの基本面積が小さくなり、さらに追加孔次数時には、追加孔基準によっては前次数孔の周囲4孔全てに追加孔を施工しないため、前次数までの相対的に大きいルジオン値の分布が残ることになる。そのため、既に遮水性の改良目標値を達成しているとの判断から、前次数孔の周囲4孔のうち何孔かの注入を省略した場合には、本研究で提案している有効領域評価法は場全体の遮水性を実際の値よりも大きめに評価していることになり、実際よりも安全側の評価となる。

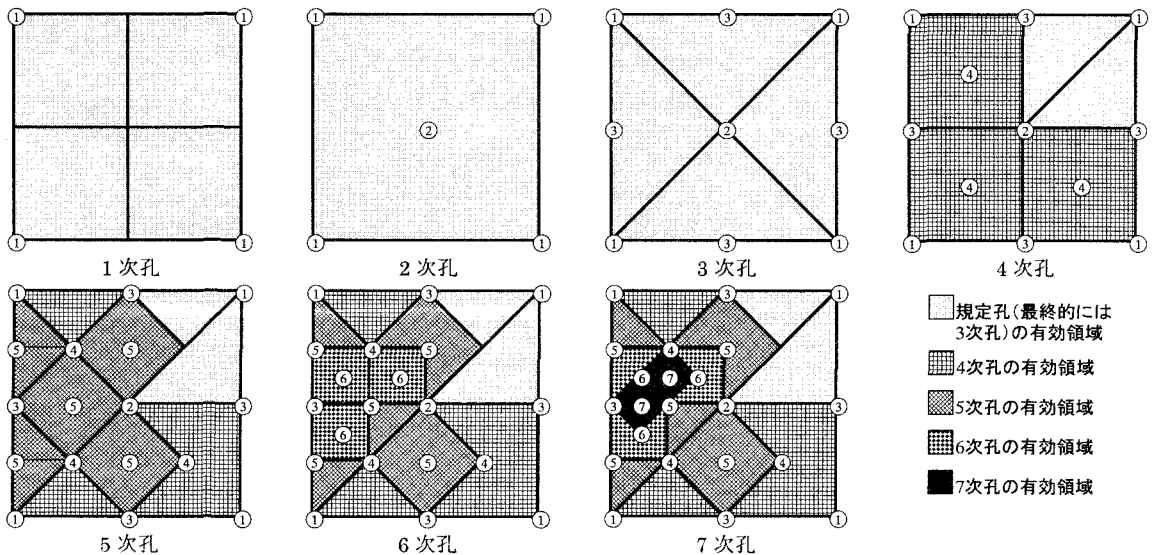


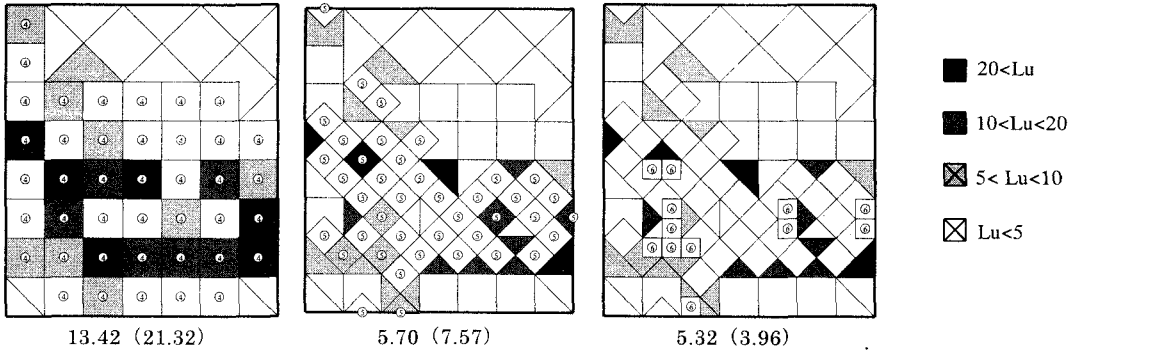
図-4 有効領域評価法の作業手順

4. 有効領域評価法による透水係数分布を用いた平面二次元浸透流解析とパーコレーション理論の適用

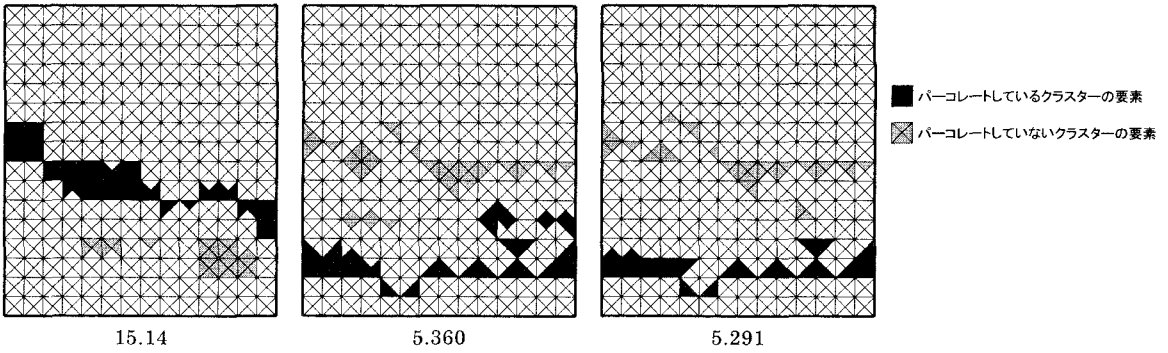
3章の方法を既設ロックフィルダムのプランケットグラウチングデータに適用して得られた各ブロック・各ステージ・各次数の透水係数分布モデルに対して、平面二次元の浸透流解析を行った。境界条件は上下流端は水頭固定境界、左右岸は不透水境界とし、平均動水勾配は1とした。透水係数としてはルジオン値を $1Lu = 1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ で変換して用いた。プランケットグラウチングサイトには中生代三畳紀~白亜紀の変はんれい岩基盤中に劣化の進んだ微閃緑岩層が分布している。

表-2にグラウチング仕様を示す。図-5と図-6は、あるステージあるブロックにおける追加孔の次数時での有効領域評価法により求められた透水係数分布と有効領域評価法から求められた全領域の85%非超過確率値(カッコ内は従来の施工工のみの85%非超過確率値)、および計算結果の流速分布より求められた臨界状態のクラスター形状とパーコレーション閾値を、2つのケース(それぞれCase1, Case2)について示している。なお図-5・図-6のスケールは縦(左右岸方向)が24m、横(上下流方向、左が上流、右が下流)が21mである。また85%非超過確率値とは、小さい方から85%に相当するルジオン値を透水係数に変換した値を示している。

図-5と図-6を見ると、次数が増加するにつれ高透水性領域は改良されるので透水係数の85%非超過確率値とパーコレーション閾値は減少する傾向にあるが、次数が大きくなると有効領域の面積が小さくなり1孔あたりの場への影響が

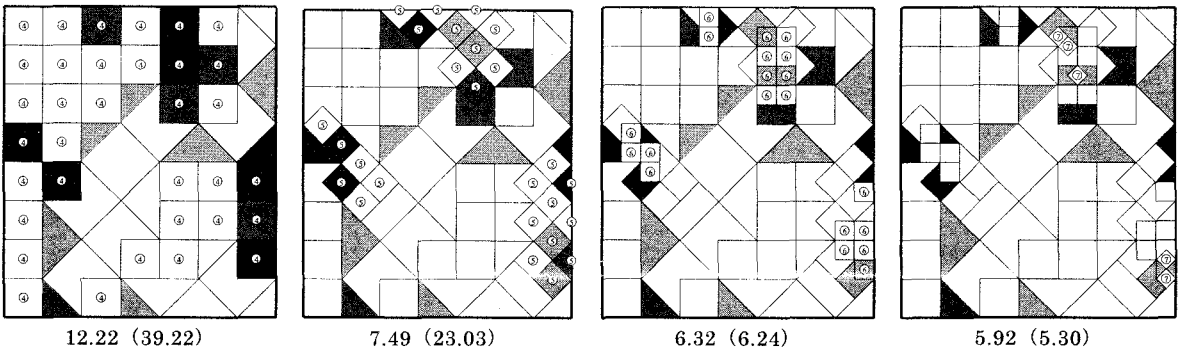


(a) 有効領域評価法により求められた各次数（追加孔）の透水係数の分布と有効領域評価法による85%非超過確率値（カッコ内は従来法による85%非超過確率値）

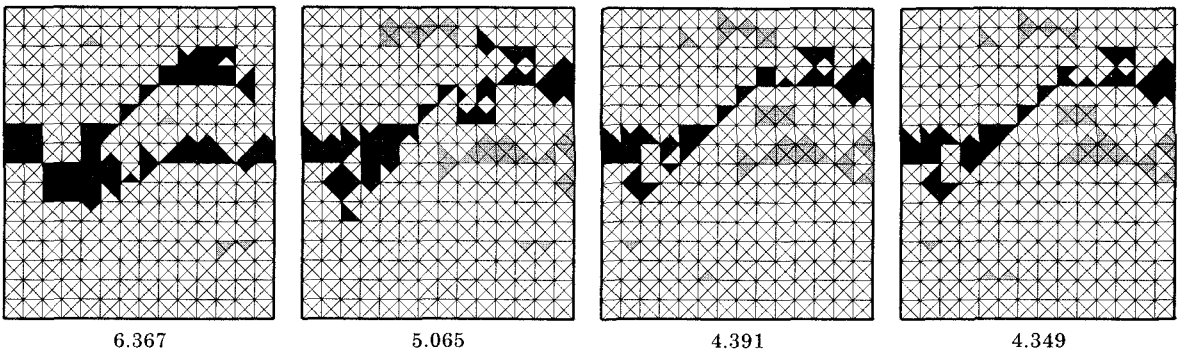


(b) パーコレート時のクラスター形状とパーコレーション閾値

図-5 Case1の結果（左から4次孔, 5次孔, 6次孔）（値はいずれも $\times 10^{-7} \text{m/s}$ ）



(a) 有効領域評価法により求められた各次数（追加孔）の透水係数の分布と有効領域評価法による85%非超過確率値（カッコ内は従来法による85%非超過確率値）



(b) パーコレート時のクラスター形状とパーコレーション閾値

図-6 Case2の結果（左から4次孔, 5次孔, 6次孔, 7次孔）（値はいずれも $\times 10^{-7} \text{m/s}$ ）

小さくなること、当該ダムでは必ずしも前次数孔の周辺4孔全てに追加孔を施工する基準を採用していないことがより強く影響したため、パーコレーション閾値の値の低減は85%非超過確率値のそれより鈍くなっている。

有効領域評価法から求めた85%非超過確率値と従来の85%非超過確率値を比較すると、追加孔の次数が小さい時(4・5次孔)は、追加孔は改良が十分ではない大きなルジオン値の箇所のみを選択的に施工されるので、従来の85%非超過確率値の方が大きい傾向を示すが、次数が大きくなると(6・7次孔)、改良が十分に進み、当該孔のルジオン値がほとんど5Lu以下に収束するので、改良目標値に達しない前次数孔の影響が残る有効領域評価法より従来の85%非超過確率値の方が小さくなる傾向がある。

最終次数(Case1では6次孔, Case2では7次孔)での85%非超過確率値は2つの方法ともにCase2の方が大きくなっているが、パーコレーション閾値はCase1の方が大きくなっており、85%非超過確率値とパーコレーション閾値の大小関係が逆転している。これは、85%非超過確率値ではルジオン値(透水係数)の空間的な分布が考慮されていないことが大きな原因として考えられ、有効領域評価法による透水係数の空間分布を見るとCase1の方がCase2よりも大きな透水係数を持つ要素が流下方向に直線的に並んでおり、その要素がパーコレート時のクラスターの形成に大きな影響を及ぼしているものと考えられる。

最終次数でのパーコレート時のクラスター形状を見ると、パーコレーション閾値の大きいCase1のクラスターは上下流方向に直線的であるのに対して、パーコレーション閾値の小さいCase2のクラスターは上下流方向に対してやや斜めになっている。これは、Case1では大きな透水係数の要素が流下方向に直線的に分布しているのに対し、Case2では大きな透水係数の要素が流下方向に対して斜めに分布していることが大きな要因であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、まず透水係数の空間的な分布が流速場に及ぼす影響の基礎的な検討を引き続き行った。次に、フィルダムのブランケットグラウチング時に得られた各次数時のルジオン試験の結果をもとに、対象領域場全体の透水係数を簡易に推定する方法として有効領域評価法を提案した。さらに、有効領域評価法により得られた対象領域場全体の透水係数をもとに浸透流解析を行い、得られた結果にパーコレーションの概念を適用することにより水みちを抽出し、臨界状態のクラスターとパーコレーション閾値からグラウチングの効果の評価を試みた。それにより、透水係数の空間的な分布によっては、透水係数の85%非超過確率値とパーコレーション閾値の大小関係が逆転する可能性のあることがわかった。

本研究は、現時点では、有効領域の大きさ、要素内の透水係数の決定方法、パーコレーションの判定方法、適切な解析要素の大きさなどにさらに検討すべき項目は多いが、透水係数の空間的な分布を考慮した上で水みちを定量的に評価できる可能性を有しているものと考えている。

今後は、現状での問題点を克服するために、様々な透水係数の分布を推定する手法を用いた上での解析を行うなどさらに研究を進め、よりパーコレートしやすいと考えられる三次元での検討を行うとともに、より適切なグラウチングの評価や追加孔基準を検討していきたい。

参考文献

- 1) 小田垣孝：パーコレーションの科学(第3版)、裳華房、1997。
- 2) 佐藤弘行・山口嘉一・吉田 等：ブランケットグラウチングにおける未改良部と主透水経路の関係(その1)、第34回地盤工学研究発表会講演集、pp.1307-1308、1999。
- 3) 佐藤弘行・山口嘉一・吉田 等：ブランケットグラウチングにおける未改良部と主透水経路の関係(その2)、土木学会第54回年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-A、pp.562-563、1999。
- 4) 中屋眞司・山口嘉一：断層破碎帯の水みちについてのストキャスティックアプローチ、第34回地盤工学研究発表会、pp.1305-1306、1999。
- 5) 奥野哲夫・本城勇介：地下水逆解析における事前情報の定式化と観測点数の違いによる最適モデル推定への影響、第34回地盤工学研究発表会講演集、pp.1323-1324、1999。
- 6) 竹下祐二・雪本孝則・中屋眞司・河野伊一郎：遺伝的アルゴリズムを用いた透水係数分布の推定方法に関する基礎的研究、第34回地盤工学研究発表会講演集、pp.1323-1324、1999。

表-2 グラウチング仕様

改良目標値	5Lu	
孔配置	中央内挿法	
孔間隔	規定孔	1次孔 6.0(m)
		2次孔 6.0(m)
		3次孔 4.24(m)
	追加孔	4次孔 3.0(m)
		5次孔 2.12(m)
		6次孔 1.5(m)
		7次孔 1.06(m)
完了基準	①改良目標値での非超過確率が85%以上	
	②改良目標値以上の箇所が3m以上の連続性を持たないこと	
	③改良目標値以上のものが最大でも10Lu程度	