

カーテングラウチングの規定孔間隔に関する検討

Examination on interval of standard holes of curtain grouting

佐藤弘行*・中村洋祐**・山口嘉一***

Hiroyuki SATOH, Yosuke NAKAMURA and Yoshikazu YAMAGUCHI

The purpose of the curtain grouting is to construct the impervious zone by injecting cement-based grouts in the dam foundations. Uncertainties are inevitable in grouting works because it is executed in the underground. Therefore, excessive execution sometimes happens in the dam foundation grouting. Excessive execution results in the extension of construction period and in the increase of the construction cost. Therefore, to establish more rational grouting methods, we will make the detailed investigation on the rational omission of the tertiary holes of the curtain grouting in this paper. We find that we can omit the tertiary holes of the curtain grouting without declining the safety of dams by establishing a suitable omission standard.

Key Words: dam, curtain grouting, omission of tertiary holes, additional holes

1. はじめに

カーテングラウチングは、ダム基礎地盤及びリム部の地盤において、動水勾配が大きい部分と貯水池外への水みちとなるおそれのある高透水部の遮水性を改良することを目的として施工される¹⁾。

カーテングラウチングの孔配置および施工手順としては一般的に中央内挿法¹⁾が用いられており、12メートル間隔のパイロット孔（以下、P孔）から1次孔、2次孔と順次孔間隔を小さくして施工を行い、3次孔までを規定孔として施工されている事例が多い。2次孔までの施工により各孔の間隔は3mになり（2次孔の孔間隔は6m）、3次孔までの規定孔全てを施工することにより各孔の間隔は1.5mになる（3次孔の孔間隔は3m）（図-1）。

グラウチングの施工データの蓄積と、それを基とするダム基礎グラウチングの注入技術の向上に伴い、地質条件によっては、2次孔までの注入により、改良目標値を満足するような注入効果が得られている施工事例が見受けられるようになった。そのため、地質条件や2次孔までの注入結果によっては、3次孔の一部の注入を省略することが出来る可能性があるのではないかと考えられるようになり、実際、現在建設中のいくつかのダムにおいては、カーテングラウチングの3次孔を一部省略することが行われており、同時に既設ダムのデータの分析も行われつつある^{2), 3)}。グラウチングは地下での不確実性の高い作業であるため、ダムの安全性を十分に確保するために慎重な調査・設計・施工が行われてきたが、その反面、確実な遮水性の改良を前提とした厳しい管理基準の適用により、結果的に過度な施工に至った事例が見受けられるようになった。特に、施工深度の深いカーテングラウチングにおいては、過度な施工がコスト増や工期の延長をもたらす。このため、所要の安全性は維持しつつもカーテングラウチングの合理化を図る1つの手段として、当初の遮水性あるいは改良特性が比較的良好な岩盤において規定孔を省略する検討を積極的に進める必要がある。

本論文では、3次孔までを規定孔としてカーテングラウチングの施工が行われた既設ダムのグラウチングデータを用いて、設定した省略基準によりどの程度の3次孔が省略可能なか、またそれが妥当なのかについての検討を行った。

また、3次孔省略を模擬したシミュレーションを行い、2次孔までのデータと省略可能な3次孔の比率の関係等について整理し、3次孔省略について考察した。

* 正会員 工修 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研究員

** 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

*** 正会員 工博 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

2. 既設ダムデータの用いた3次孔省略の検討

2.1 検討対象ダムの概要

検討対象としたダムは、堤高57m、堤頂長390mの中央コア型ロックフィルダムである。河床部の地質はほぼ熔結凝灰岩よりなり、ダム堤敷には広く中熔結の熔結凝灰岩が存在している。図-2は検討対象ダムのルジオンマップであるが、河床部深部に比較的高透水のゾーンが存在している。

カーテングラウチングの孔配置はP孔12m間隔の中央内挿法により施工され、3次孔までが規定孔、4次孔以降が追加孔である。改良目標値は5Luであり、追加孔基準は以下の3つである。

- (1)最終次数孔において改良目標値を超える孔が左右斜めに連続する場合、それを分断するように追加孔を施工する。
- (2)最終次数孔において10Lu以上のルジオン値が存在する場合、隣接する孔のうちルジオン値が大きい孔側に追加孔を実施する。これが改良目標値以上であれば、反対側にも追加孔を実施する。
- (3)最終次数孔において改良目標値を超える孔が上下に連続する場合、(2)の方法に準拠する。

表-1は河床部における3次孔までのルジオン値の統計値、図-3は河床部における3次孔までのルジオン値の超過確率を示している。次数が進むにつれ注入効果によりルジオン値の各超過確率値は低下しているが、3次孔になっても最大値のルジオン値は大きく、かつ3次孔でも比較的高いルジオン値がある程度数残っている。

2.2 検討方法

P孔から2次孔までのデータを用いて、表-2の省略基準により3次孔の省略を検討した。

case1-1からcase2-4までは省略基準のみ、case3-1からcase4-4までは省略基準と追加孔基準の併用、case5は追加孔基準のみ、となっている。なお、case3-1からcase4-4までの追加孔基準はcase5と同じであり、2.1に記述している追加孔基準とは若干異なる。この追加孔基準は、一般的な追加孔基準と比較した場合、斜めの連続を考慮していない点で緩和されているが、隣接のP孔または1次孔を考慮している点では厳しくなっている。また、case3-1からcase4-4においては省略基準と追加孔基準を併用しているが、省略基準の方が厳しい条件になる場合、追加孔

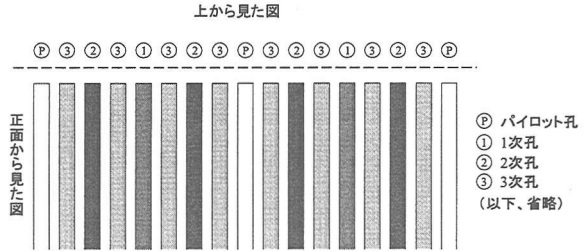


図-1 中央内挿法の概念

表-1 ルジオン値の統計量

注入孔の次数	P孔	1次孔	2次孔	3次孔
データ数	287	248	468	897
最大値	408	201	404	406
超過確率15%ルジオン値	15.03	8.34	4.7	4.02
超過確率50%ルジオン値	2.34	1.86	1.86	1.59
超過確率85%ルジオン値	0.88	0.68	0.74	0.69

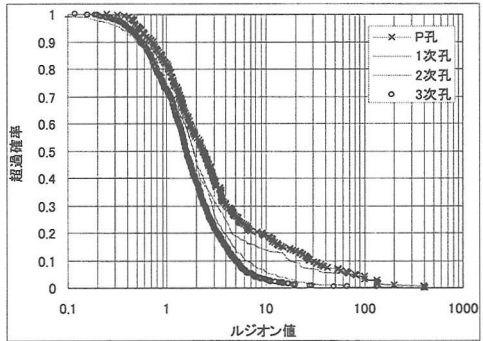


図-3 ルジオン値の超過確率

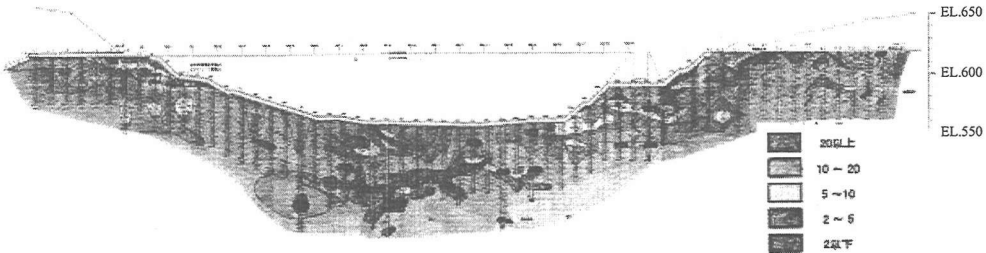


図-2 ルジオンマップ

表－２ 省略基準検討ケース

case #	省略基準	図－４を用いての省略基準の解説
case1-1	対象となる3次孔近傍のP～2次孔の6つ全てが2Lu以下の場合その3次孔を省略	C,D,E,H,I,Jが2Lu以下ならA省略
case1-2	対象となる3次孔に隣接するP～2次孔2つが2Lu以下の場合その3次孔を省略	D,Iが2Lu以下ならA省略
case1-3	対象となる3次孔近傍の2次孔の3つ全てが2Lu以下の場合その3次孔を省略	C,D,Eが2Lu以下ならA省略
case1-4	対象となる3次孔に隣接する2次孔が2Lu以下の場合その3次孔を省略	Dが2Lu以下ならA省略
case2-1	対象となる3次孔近傍のP～2次孔の6つ全てが改良目標値以下の場合その3次孔を省略	C,D,E,H,I,Jが改良目標値以下ならA省略
case2-2	対象となる3次孔に隣接するP～2次孔2つが改良目標値以下の場合その3次孔を省略	D,Iが改良目標値以下ならA省略
case2-3	対象となる3次孔近傍の2次孔の3つ全てが改良目標値以下の場合その3次孔を省略	C,D,Eが改良目標値以下ならA省略
case2-4	対象となる3次孔に隣接する2次孔が改良目標値以下の場合その3次孔を省略	Dが改良目標値以下ならA省略
case3-1	対象となる3次孔の両サイドのP～2次孔の最大値が20Lu以上の時その間の3次孔には省略基準case2-1を適用し、それ以外の3次孔には追加孔基準を適用した場合	B～F、G～Kの最大値が20Lu以上なら、3次孔には省略基準case2-1を適用。20Lu以下なら3次孔に追加孔基準を適用。
case3-2	対象となる3次孔の両サイドのP～2次孔の最大値が20Lu以上の時その間の3次孔には省略基準case2-2を適用し、それ以外の3次孔には追加孔基準を適用した場合	B～F、G～Kの最大値が20Lu以上なら、3次孔には省略基準case2-2を適用。20Lu以下なら3次孔に追加孔基準を適用。
case3-3	対象となる3次孔の両サイドのP～2次孔の最大値が20Lu以上の時その間の3次孔には省略基準case2-3を適用し、それ以外の3次孔には追加孔基準を適用した場合	B～F、G～Kの最大値が20Lu以上なら、3次孔には省略基準case2-3を適用。20Lu以下なら3次孔に追加孔基準を適用。
case3-4	対象となる3次孔の両サイドのP～2次孔の最大値が20Lu以上の時その間の3次孔には省略基準case2-4を適用し、それ以外の3次孔には追加孔基準を適用した場合	B～F、G～Kの最大値が20Lu以上なら、3次孔には省略基準case2-4を適用。20Lu以下なら3次孔に追加孔基準を適用。
case4-1	対象となる3次孔の両サイドのP～2次孔の最大値が10Lu以上の時その間の3次孔には省略基準case2-1を適用し、それ以外の3次孔には追加孔基準を適用した場合	B～F、G～Kの最大値が10Lu以上なら、3次孔には省略基準case2-1を適用。10Lu以下なら3次孔に追加孔基準を適用。
case4-2	対象となる3次孔の両サイドのP～2次孔の最大値が10Lu以上の時その間の3次孔には省略基準case2-2を適用し、それ以外の3次孔には追加孔基準を適用した場合	B～F、G～Kの最大値が10Lu以上なら、3次孔には省略基準case2-2を適用。10Lu以下なら3次孔に追加孔基準を適用。
case4-3	対象となる3次孔の両サイドのP～2次孔の最大値が10Lu以上の時その間の3次孔には省略基準case2-3を適用し、それ以外の3次孔には追加孔基準を適用した場合	B～F、G～Kの最大値が10Lu以上なら、3次孔には省略基準case2-3を適用。10Lu以下なら3次孔に追加孔基準を適用。
case4-4	対象となる3次孔の両サイドのP～2次孔の最大値が10Lu以上の時その間の3次孔には省略基準case2-4を適用し、それ以外の3次孔には追加孔基準を適用した場合	B～F、G～Kの最大値が10Lu以上なら、3次孔には省略基準case2-4を適用。10Lu以下なら3次孔に追加孔基準を適用。
case5	3次孔に追加孔基準を適用した場合	①DまたはIが10Lu以上、②DとIが5Lu以上、の時A施工

表－３ 省略基準適用結果

省略基準		注入成功		見逃し		省略成功		過施工		計	判断成功率 (注入成功+省略成功)		過施工率	見逃し率	見逃しルジオン値			見逃し連続 ステージ	
		うち追加 加孔		うち追加 加孔		うち追加 加孔		うち追加 加孔		うち追加 加孔	うち省略成 功率				最大値	2割目	3割目	2ステ (※1)	3ステ (※2)
省略基準のみ	case1-1	86		2		144		665		897	25.6	16.1	74.1	0.22	49.38	5.68	—	0	0
	case1-2	82		6		313		496		897	44.0	34.9	55.3	0.67	134.66	49.38	12.68	1	0
	case1-3	81		7		247		562		897	36.6	27.5	62.7	0.78	134.66	49.38	11.2	0	0
	case1-4	73		15		456		353		897	59.0	50.8	39.4	1.67	134.66	49.38	13.68	2	0
	case2-1	80		8		404		405		897	54.0	45.0	45.2	0.89	49.38	17.06	6.5	0	0
	case2-2	71		17		592		217		897	73.9	66.0	24.2	1.90	134.66	49.38	17.06	1	0
	case2-3	56		32		612		197		897	74.5	68.2	22.0	3.57	134.66	67	49.38	2	1
	case2-4	42		46		717		90		897	84.6	79.9	10.0	5.13	406	134.66	67	3	2
省略基準 + 追加孔基準	case3-1	76	(9)	12	(7)	458	(214)	351	(17)	897	59.5	51.1	39.1	1.34	49.38	17.06	9.02	0	0
	case3-2	71	(9)	17	(7)	610	(214)	199	(17)	897	75.9	68.0	22.2	1.90	134.66	49.38	12.68	1	0
	case3-3	59	(9)	29	(7)	632	(214)	177	(17)	897	77.0	70.5	19.7	3.23	134.66	67	49.38	2	1
	case3-4	46	(9)	42	(7)	718	(214)	91	(17)	897	85.2	80.0	10.1	4.68	406	134.66	67	4	2
	case4-1	76	(1)	12	(6)	420	(100)	389	(1)	897	55.3	46.8	43.4	1.34	49.38	17.06	9.02	0	0
	case4-2	71	(1)	17	(6)	603	(100)	206	(1)	897	75.1	67.2	23.0	1.90	134.66	49.38	17.06	1	0
	case4-3	54	(1)	34	(6)	624	(100)	185	(1)	897	75.6	69.6	20.6	3.79	134.66	67	49.38	2	1
	case4-4	40	(1)	48	(6)	726	(100)	83	(1)	897	85.4	80.9	9.3	5.35	406	134.66	67	4	2
追加孔基準のみ	case5	63	(63)	25	(25)	646	(646)	163	(163)	897	79.0	72.0	18.2	2.79	49.38	17.06	15.22	3	0

※1 見逃しが2ステージ連続している箇所の数。 ※2 見逃しが3ステージ連続している箇所の数。

基準の方が厳しい条件になる場合、どちらの場合も考えられる。隣接孔に相対的に大きいルジオン値（20Lu ないし 10Lu 以上）が存在した場合に省略基準を適用するという立場から、追加孔基準の方が厳しいことには矛盾があるが、ここではシミュレーションの一つの組合せとして処理する。なお、アバットメント部においては隣接孔間の高低差が大きく同一ステージでの省略基準の判定に支障をきたす場合が考えられるので、今回の検討では河床部のデータのみを検討対象とした。

2.3 検討結果

表-3に検討結果を示す。表-3の中の「見逃し」とは、省略可能（または追加孔不要）と判断したが実際の3次孔のルジオン値は改良目標値以上だった場合を表し、「見逃し率」とは「見逃し」となった3次孔の全3次孔に対する割合を表す。また、「過施工」とは省略すべきでない（または追加孔すべき）と判断したが実際の3次孔のルジオン値は改良目標値以下だった場合を表し、「過施工率」とは「過施工」となった3次孔の全3次孔に対する割合を表す。なお、検討対象の3次孔の全データ数は897であり、そのうち5Lu（=改良目標値）以上のデータ数は88、2Lu以上のデータ数は350である。

表-3を見ると、省略基準を変化させることにより見逃し率などの数値も変化していることが分かる。一般的には、見逃し率が大きくなると過施工率は小さくなり、省略成功率は大きくなる傾向にある。各ケースの見逃し率を見ると、見逃し率が最大

（5.35%）となるのはcase4-4で、見逃し率が最小（0.22%）となるのはcase1-1と（5ステージ施工の場合）

なっている。逆に、過施工率が最大（74.1%）となるのはcase1-1で、過施工率が最小（9.3%）となるのはcase4-4となっている。また、省略成功率が最大（80.9%）になるのはcase4-4で、省略成功率が最小（16.1%）となるのはcase1-1である。以上より、見逃し率が最大（最小）の時に過施工率が最小（最大）、省略成功率が最大（最小）になっており、省略基準により見逃し率は数%程度、過施工率と省略成功率は数10%程度変化することが分かる。また、省略基準と追加孔基準を併用したcase3-1～case3-4とcase4-1～case4-4を比較するとそれぞれがほぼ似たような結果となっており、さらにcase2-1～case2-4ともほぼ同じような結果となっている。これは、case3-1～case4-4においては、追加孔基準が適用された3次孔よりも省略基準が適用された3次孔の方が多いためと考えられる。

また、3次孔省略に関して最も厳しい条件であるcase1-1においても49.38Luという大きなルジオン値が見逃されているが、これはこの3次孔が比較的広い範囲で見ると高透水路が存在する領域であるものの、5Lu以上となったP孔～2次孔から2ステージ離れているため、本論文で検討した省略基準では省略可と判定されてしまったためである（図-5）。

表-3の見逃し連続ステージを見ると、3次孔近傍のP孔～2次孔の6つのデータを省略判断に用いるcase1-1・case2-1・case3-1・case4-1では、見逃し連続ステージが存在していない。見逃し連続ステージが存在するということは連続する高透水路が残置されているということであり、ダムの安全性上好ましいことではない。検討対象としたダムのように、2次孔時に比較的高ルジオン値が存在している時に3次孔省略を実施する場合、高いルジオン値の箇所が残る可能性を小さくしかつ連続する高透水路が残る確率を小さくするためには、case1-1・case2-1・case3-1・case4-1のように広範囲なデータを判断基準に用いるような比較的厳しい省略基準を設定する方が望ましいものと考えられる。

3. 3次孔省略のシミュレーション

3.1 検討方法

3次孔の省略基準により省略可能な3次孔の割合がどのように変化するかを調べるため、シミュレーションを試みた。

図-6のような幅300m、深度100m（20ステージ）の水平岩盤のモデルを用いた。図-7のようにP孔を12m間隔とし中央内挿法により3次孔までの位置を決定した。シミュレーションの方法は以下の通りである。

- (1) P孔～2次孔について、改良目標値以上になる箇所の数（超過確率）を設定する。
- (2) P孔～2次孔について、改良目標値以上になる地点を乱数により決定する。

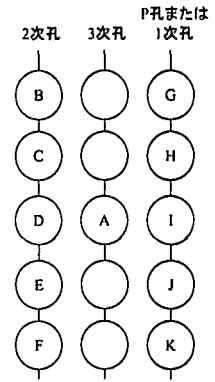


図-4 省略基準の概念
(5ステージ施工の場合)

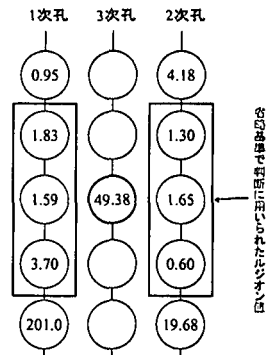


図-5 見逃しルジオン値の発生例

(3)省略基準を適用し、省略可能となる3次孔を抽出する。

(4)(2)と(3)を繰り返す。繰返し回数は100万回とする。

設定した省略基準は、以下の2種類とした。

①対象となる3次孔近傍のP～2次孔の6つ全てが改良目標値以下の場合その3次孔を省略(2.2のcase2-1と同じ)

②対象となる3次孔に隣接するP～2次孔2つが改良目標値以下の場合その3次孔を省略(2.2のcase2-2と同じ)

ここでは、3次孔に以上の省略基準を適用した場合のみ検討し、3次孔に追加孔基準を適用した場合、および追加孔基準と省略基準を合わせた基準を適用した場合については、シミュレーションは行わなかった。

なお、今回のシミュレーションでは、P孔～2次孔において改良目標値以上になる確率を次数によって変えていない。つまり、P孔～2次孔においては、次数が進むことにより遮水性の改良効果が孔間で及んでいないと仮定していることになる。

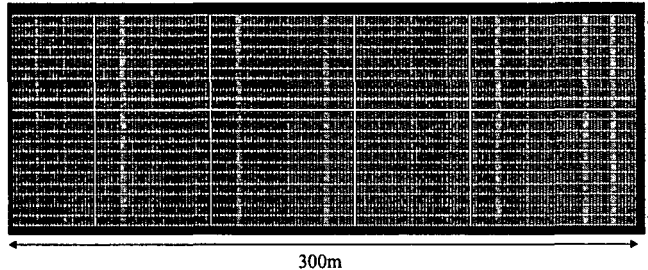


図-6 シミュレーションのモデル

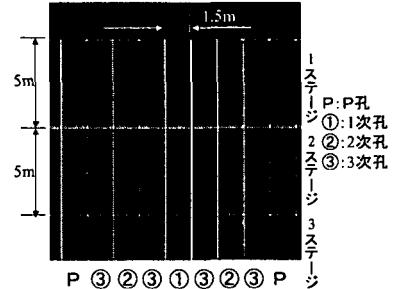


図-7 シミュレーションモデル詳細

3.2 検討結果

シミュレーション結果による、P孔～2次孔の改良目標値以上の割合と省略可能な3次孔の割合を図-8に示す。また図-9は、①のケースでP孔～2次孔の改良目標値以上の割合が15%の時の、100万回のシミュレーション結果における省略可能な3次孔の割合の頻度分布を示している。

図-8を見ると、①の条件の方が②の条件よりも厳しいので、省略可能な3次孔の割合は①の方が②よりも小さくなっている。また、図-8において、P孔～2次孔の改良目標値以上の割合が小さい時は省略可能な3次孔の割合はほぼ直線的に変化するが、P孔～2次孔の改良目標値以上の割合が大きくなると変化比率が小さくなり、初期の直線からのずれが大きくなる。これは、P孔～2次孔の改良目標値以上の割合が大きくなると、改良目標値以上のP孔～2次孔のデータの影響の重なりが多くなるためである。図-8の点線は、①と②それぞれの場合について、P孔～2次孔のデータの影響の重なりがない場合の省略可能な3次孔の割合を示している(①、②式)。

$$(①の点線) = 100\% - 6 \times (\text{P孔} \sim 2 \text{次孔の改良目標値以上の割合}) \quad (1)$$

$$(②の点線) = 100\% - 2 \times (\text{P孔} \sim 2 \text{次孔の改良目標値以上の割合}) \quad (2)$$

シミュレーションにおいてはP孔～2次孔のデータの影響の重なりはランダムに発生するため、図-8の最大値～最小値のように、省略可能な3次孔の割合にはばらつきが見られる。特に①の場合、P孔～2次孔の改良目標値以上の割合が10%以上になると、そのばらつきは10%程度になっている(図-9)。

2章で検討したデータにおいて、P孔から2次孔までの全データのうち改良目標値以上のデータの割合は18.7%である。図-8を見ると、P～2次孔で改良目標値以上のデータの割合が18.7%の時、省略可能な3次孔の割合は、平均的に①の場合約30%、②の場合約65%となっている。一方、表-3の中で、省略の可能性のある3次孔の割合(=省略成功率+見逃し率)を見ると、case2-1(①に対応)では45.9%、case2-2(②に対応)では67.9%となっている。実際のデータにおいては、図-3より明らかなように、次数が進むことにより遮水性の改良効果が及んでいるため、単純な比較は難しいが、case2-2とシミュレーション②の結果はほぼ一致しているが、case2-1とシミュレーション①の結果は15%程度の差がある。これは、case2-2と②の省略基準では3次孔に隣接するP孔～2次孔の2つのデータのみ省略の判断に用いるため比較的條件が単純であり、ほぼ(2)式と合致するが、case2-1と①は対象となる3次孔近傍のP孔～2次孔の6つのデータを省略の判断に用いるという比較的複雑な条件のため、P孔～2次孔の改良目標値以上の割合が大きくなると単純な推定からずれるためと考えられる。さらに、実際のデータの分析である

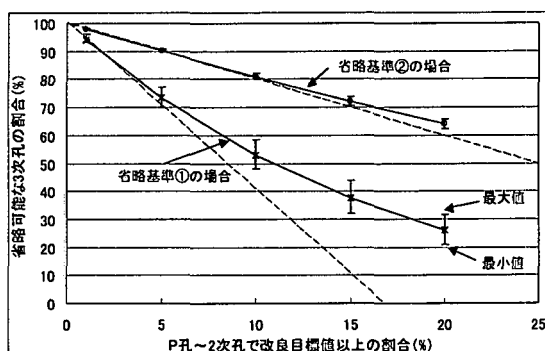


図-8 シミュレーションによる省略可能な3次孔の割合

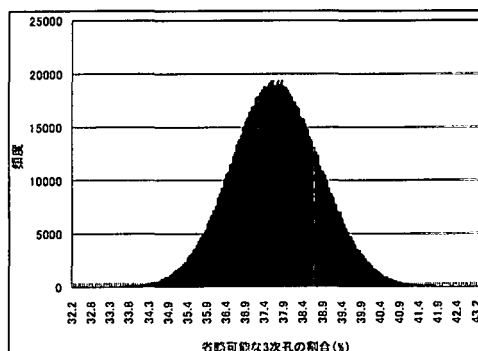


図-9 省略可能な3次孔の割合の頻度分布
(①の場合、P孔～2次孔の改良目標値以上の割合が15%の時)

case2-1 とシミュレーション①ではステージ数などの条件が異なること、①では改良目標値以上の割合をP孔から2次孔まで全て等しいと仮定したがcase2-1では異なること、実際のデータでは空間的な相関が認められるがシミュレーションでは全くランダムとして取り扱っていること、などがcase2-1の結果と①の結果の差に表われたものと考えられる。

なお、同様なシミュレーションを行い、見逃し率と致命的な見落とし（連続した高透水データ）が発生する確率についても検討している。この結果については別の機会に報告する。

4. おわりに

本論文では、ダム基礎グラウチングの合理化・効率化を目的として、カーテングラウチングの3次孔省略についての検討を行った。3次孔までを規定孔としてカーテングラウチングを施工した既設ダムのグラウチングデータを基に、省略基準を変化させた時の3次孔省略可能性の割合の変化について分析した。それにより、本論文で対象としたような2次孔においても比較的広く高透水ゾーンが存在するようなダムにおいては、見逃し率は数%程度になり、比較的大きなルジオン値の箇所が残る可能性があることが分かった。また、3次孔省略のシミュレーションを行ったが、比較的簡単な省略基準では省略可能な3次孔の割合を良好に推定できるが、複雑な条件の省略基準ではシミュレーションの条件設定をより詳細に行う必要があることが分かった。

本論文では、比較的透水性の高いダム基礎を対象としたため、3次孔の省略により見逃しルジオン値が大きくなってしまいうという結果になったが、初期の透水性が比較的低い他のダムにおいては、省略基準を適切に設定することにより3次孔を合理的に省略出来る可能性は十分あると考えられる。また、シミュレーションの条件をより実際に近く設定すれば、省略基準を変化させた時の省略可能性や見逃し率などを精度よく推定出来ると考えられる。

なお、実際にカーテングラウチングの3次孔の省略を検討するに当たっては、各ダムサイトにおいて水理地質条件が異なることが想像されるため、試験グラウチングのデータあるいは類似した条件のダムのグラウチングデータを分析することにより適切な省略基準を設定し、見逃し率・見逃しルジオン値・見逃し連続ステージなど、省略によりダムの安全性に影響を及ぼすと考えられる影響を極力小さくした上で、省略成功率を大きくするようにすることが重要である。

今後は、既設ダムのグラウチングデータの分析をさらに進めるとともに、実際のダム基礎岩盤の条件により近い条件でのシミュレーションを行うなど、引き続きグラウチングの合理化に関しての研究を進める予定である。

参考文献

- 1) 建設省河川局監修：グラウチング技術指針・同解説、(財)国土開発技術研究センター発刊、1983。
- 2) 柴田 悟、山口嘉一、平塚毅彦：ダム基礎処理のリスクマネジメント的検討、地盤の浸透破壊のメカニズムと評価手法に関するシンポジウム、地盤工学会、pp.201-206、2002。
- 3) 佐々並敏明、山下雅彦、岡田洋志、森 真樹：ダム基礎グラウチングの規定孔（3次孔）省略の可能性に関する一考察、土木学会第57回年次学術講演会、第VI部門、pp.525-526 (CD-ROM)、2002。