

Ⅲ-12 ダム基礎グラウチングの合理的計画設計法に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 13～平 17

担当チーム：水工研究グループ（ダム構造物）

研究担当者：山口嘉一、佐藤弘行、中村洋祐

【要旨】

環境に配慮したダム建設を行う場合、環境保全上の制約から複雑な地質条件を有する地点をダムサイトとせざるを得ない場合がある。このため、ダムの安全性を確保するうえで、複雑な地質条件に応じた基礎岩盤の合理的、経済的な止水設計方法の開発が求められている。本研究課題は、①ダム基礎岩盤の性状に応じた透水性評価手法の提案、②ダム基礎岩盤の性状に応じた配合・孔配置等のグラウチングの計画・設計法の提案、③透水性の空間分布を考慮したグラウチングの効果判定法の提案、の3つを最終的な達成目標としている。平成 17 年度は、①に関する検討として、高透水性地盤の透水性状や連続性に関する調査事例の分析とそれら調査手法の合理的な適用法についての検討を行った。また 3 つの達成目標に関連する検討として、透水性と他の観測データとの相関性の分析に関する検討を行った。さらに、②および③に関する検討として、既設ダムのカーテングラウチング実績データを用いた、最終次数孔とチェック孔の改良効果判定の比較によるチェック孔の省略可能性に関する検討を行った。また、今年度は本研究課題の最終年度であるため、これまでの 5 年間の研究成果についてもとりまとめた。

キーワード：ダム、グラウチング、チェック孔、高透水ゾーン

1. はじめに

環境に配慮したダム建設を行う場合、環境保全上の制約から複雑な地質条件を有する地点をダムサイトとせざるを得ない場合がある。このため、ダムの安全性を確保するうえで、複雑な地質条件に応じた基礎岩盤の合理的、経済的な止水設計方法の開発が求められている。本研究課題はこのような社会的要請に応えるためダム基礎グラウチングの合理的計画・設計法に関する調査を行うものであり、①ダム基礎岩盤の性状に応じた透水性評価手法の提案、②ダム基礎岩盤の性状に応じた配合・孔配置等のグラウチングの計画・設計法の提案、③透水性の空間分布を考慮したグラウチングの効果判定法の提案、の3つを最終的な達成目標としている。平成 17 年度は、①の検討として、高透水性地盤の透水性状や連続性に関する調査事例の分析とそれら調査手法の合理的な適用法についての検討を行った。また、3 つの達成目標に関連する検討として、透水性と他の観測データとの相関性の分析に関する検討を行った。さらに、②および③の検討として、既設ダムのカーテングラウチング実績データを用いた、最終次数孔とチェック孔の改良効果判定の比較によるチェック孔の省略可能性に関する検討を行った。

ダム基礎の止水設計においては、いわゆる水理地質構造の把握が重要である。そのためダム基礎の透水性の調査においては、ルジオンテストを基本として、必要に応

じて物理探査などの様々な調査が補助的な方法として行われている。しかし、このような透水性の調査にあたっては、各調査方法の適用性の範囲を踏まえたうえで、ダムサイトの特性に応じたより効率的な実施を検討する必要がある。そこで今年度は、ダム基礎グラウチングの実施にあたり特に重要となる高透水性地盤を対象として実施された透水性状や連続性に関する調査事例について分析を行い、各調査方法の適用性の評価および合理的な調査手法の組み合わせについて検討を行った。

ダム基礎の透水性は、ルジオンテストを基本とする透水試験により調査が行われる。透水試験のデータは点的な情報であるため、透水性の空間的分布を推定するために、透水性と相関が高い空間的なデータを利用することが可能であれば、透水性の空間分布をより精度よく推定することが可能となる。通常、データの相関性の検討では相関係数を主とした分析が実施されているが、いわゆる共線性の問題により、相関係数が大きい場合でも本当に相関があるのかは判断が難しいこと、あるいは観測データの種類が多くなるほど数値的なデータの解釈が困難になること、などの短所がある。本検討では、透水性と他のデータの相関性の検討および透水性がどのような原因に規定されているのかその要因を定量的に評価するための検討として、共分散構造分析を用いた透水性に関するデータの相関・因果関係の分析を行った。

カーテングラウチングの施工は、前次数孔の中間にその次の次数孔を施工する中央内挿法²⁾に従って、順次ルジオン値を指標として改良効果を確認しながら施工される。カーテングラウチングの改良効果の判定方法として、最終次数孔による改良効果の判定²⁾に加え、さらにサンプリング検査として位置づけられるチェック孔による効果確認が行われており、チェック孔にはダブルチェックの意味合いがあると考えられる。平成16年度には、既設4ダムカーテングラウチングの実績データを分析し、最終次数孔とチェック孔の改良効果判定結果を比較し、チェック孔省略の可能性について検討を行った³⁾。今年度は、それらに既設5ダムの検討結果を加え、全9ダムの実績データについてさらに詳細な分析を行い、チェック孔の省略可能な条件について提案を行った。

また、今年度は本研究課題の最終年度であるため、これまでの5年間の研究成果についてもとりまとめた。

2 ダム基礎岩盤における高透水ゾーンの連続性調査方法の検討

2.1 検討対象ダム

今回、調査段階において高透水ゾーンの連続性を調査するために、通常のボーリングコア分析およびルジオンテスト以外の調査手法も採用された。既設もしくは現在調査・建設中の8ダムについて事例収集を行った。各ダムの諸元、地質・高透水ゾーンの概要を表2-1に示す。

2.2 調査目的に応じた調査方法の選定

表2-2に各ダムで行われた調査方法についてまとめたものを示すが、各ダムの調査事例を見ると、その多くは単独の調査ではなく、いくつかの調査方法を組み合わせ、調査・解析が行われている。ここでは、それぞれの調査の目的に応じたより合理的な調査方法の組み合わせについて考察する。

2.2.1 割れ目・地質性状の違いによる透水性の把握

Hダムでは、ボアホールテレビと1m区間ルジオンテスト、孔内微流速測定などの組合せにより、割れ目系と透水性の関係の詳細な調査が行われ、割れ目系により透水性に差があり、透水異方向性が顕著であることがあきらかにされている(表2-3、図2-1参照)。

この例のように、ボアホールテレビや場合によってはキャリパー検層などを適用することで、通常のコア観察

表2-1 調査対象ダムの地質概要

ダム名	ダム型式 堤高	地質	高透水ゾーンの概要 (上段：分布位置、下段：性状)	成因
A	台形CSGダム 堤高50.0m	新第三紀中新世～鮮新世 火山砕屑岩、安山岩(溶岩部、自破碎部)	河床部において、スポット状に20Lu以上の高透水ゾーンが分布	<ul style="list-style-type: none"> 溶岩噴出時の冷却節理を素因とした開口割れ目の形成 その後の河川の下刻に伴う応力解放による開口割れ目の形成および地下水流動による充填物の流出
			開口亀裂 スポット状に分布しており、側方、上下流方向の連続性は不明	
B	ロックフィルダム 堤高89.9m	新第三紀中新世 石英安山岩～安山岩質 火山礫凝灰岩	左岸アバット部からリムの範囲で深部まで20Lu以上の高透水ゾーンが高角度割れ目沿いに分布 左岸深部の泥岩、河床部の安山岩	<ul style="list-style-type: none"> 断層系に起因した高角度割れ目の形成 高角度陥没型正断層群の形成と褶曲構造形成に伴う引張性割れ目の形成
			高角度の酸化割れ目	
C	ロックフィルダム 堤高105.0m	新第三紀中新世 火山礫凝灰岩、礫岩	左岸洪水吐付近の地層境界部(礫岩と火山礫凝灰岩) 主に火山礫凝灰岩中に分布	<ul style="list-style-type: none"> 構成岩相の初生物性の違いに起因した開口割れ目
			高角度の褐色化割れ目	
D	重力式 コンクリートダム 堤高130.0m	新第三紀中新世 火山礫凝灰岩	河床から左岸にかけて、50～100mの深部において20Lu以上の高透水ゾーンが分布	<ul style="list-style-type: none"> 方解石脈の溶脱
			開口亀裂	
E	ロックフィルダム 堤高76.0m	新第三紀中新世 火砕岩(粗粒凝灰岩、火山円礫岩、火山礫凝灰岩)	河床深部、粗粒凝灰岩部に100Lu以上の高透水ゾーンが分布	<ul style="list-style-type: none"> 連続性に乏しい高角度開口割れ目のネットワーク 局所的なとう曲に伴う開口割れ目の形成
			高角度開口割れ目	
F	ロックフィルダム 堤高132.0m	新第三紀中新世 石英安山岩(緻密部、粗しょう部)	左岸河床部	<ul style="list-style-type: none"> 地形侵食によるリバウンドで柱状節理が開口し高透水ゾーンを形成
			柱状節理の開口	
G	重力式 コンクリートダム 堤高98.0m	白亜紀 花崗岩	河床部、段丘堆積物直下に50Lu以上の高透水ゾーンが分布	<ul style="list-style-type: none"> 削剥に伴う応力解放
			割れ目沿い酸化、マサ化開口	
H	重力式 コンクリートダム 堤高66.2m	白亜紀 花崗閃緑岩	河床から左岸深部に向かって20Lu以上の高透水ゾーンが伸張	<ul style="list-style-type: none"> ダム軸方向の酸化した高角度割れ目のネットワーク
			高角度酸化割れ目、ネットワーク状	

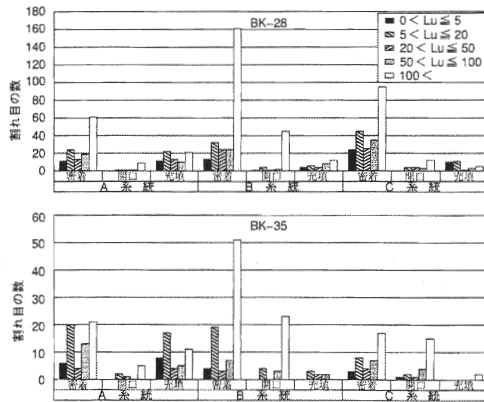
表 2-2 調査方法の概要

地質区分	ダム名 (型式)	高透水ゾーンの性状	地質性状調査		透水性調査		地下水(水みち)調査						解析			
			ホアホールテレビ	トモグラフィ	1m区間ルジオンテスト	孔内静水圧透水試験	パルス試験	トレーサー試験	孔内微流速測定	流向・流速測定	揚水試験注水試験	多段地下水位測定		水質分析	水理地質構造解析	
火山岩類	A (CSG)	開口亀裂 スポット状に分布						●								高透水ゾーンの連続性を調査
	B (フィル)	高角度の酸化割れ目 上下流に連続	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	低限界圧力多発のため透水試験前後で変状を確認 低限界圧力把握のため段階を細かく設定 比抵抗トモグラフィとパルス試験結果を比較し整合性を確認 注水試験において微流速測定により孔間の連通性を調査 注水試験において多段地下水位測定により水位変化を調査
	C (フィル)	高角度の酸化割れ目	●	●	●	●	●				●					ホアホールテレビ、透水試験で割れ目系の分布、透水性を確認 パルス試験を実施して連続性を調査
	D (重力)	開口割れ目	●				●		●							ホアホールテレビによる観察と通常のLuテストのPQパターン分析から連続性を推定 高透水ゾーンの連続性を調査 注水孔から注水し測定孔で微流速を測定し連通性を調査
	E (フィル)	連続性に乏しい高角度開口割れ目のネットワーク	●	●	●	●	●	●	●	●				●	●	開口亀裂と透水性の関係を調査 塩水を投入して水みちを調査 パルス試験での応答率の高い孔間でトレーサー試験を実施 高透水ゾーンにおける地下水起源推定
	F (フィル)	開口した柱状節理		●		●										試験グラウチング前後で弾性波トモグラフィを実施し改良効果を調査
花崗岩類	G (重力)	風化帯および深部の高角度割れ目沿い連続性は乏しい	●	●		●	●									低角度節理方向と透水性の関係を調査 低角度節理の連続性を調査
	H (重力)	ダム軸方向の酸化した高角度割れ目と低角度割れ目のネットワーク	●		●				●					●	●	ホアホールテレビにより亀裂性状を確認し、1mルジオンテストおよび孔内微流速測定を実施 →割れ目系と透水性の関係を調査 高透水ゾーンにおける地下水起源推定

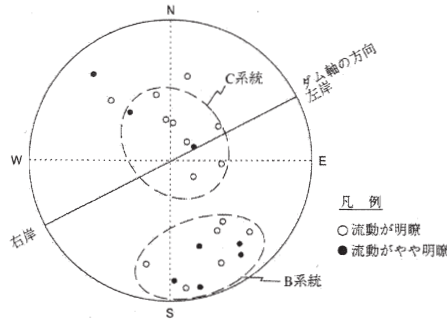
●:実施調査項目(今回の事例収集で実施の有無を確認できたもの)

表 2-3 割れ目の系統分類 (Hダム)

分類	走向・傾斜	割れ目の性状
A系統	上下流方向 左岸高角度割れ目	熱水変質脈、粘土シーム等により充填されているものが多い
B系統	ダム軸方向 下流高角度割れ目	顕著な酸化汚染、流入粘土の挟在、開口性を有するものが多い
C系統	低角度割れ目 走向はばらつきあり	開口性を有する割れ目を含む



(1 m 区間ルジオンテスト結果)



(孔内微流速測定結果)

図 2-1 割れ目系統別の透水性 (Hダム)

だけでは把握しきれない、割れ目の方向性や開口性などの情報を把握することができ、さらにそれらの割れ目に対して 1m 区間ルジオンテストや孔内微流速測定を行うことで、割れ目性状に応じた透水性を把握することが可能となり、高透水を規制している割れ目の方向性、性状などを絞り込むことが可能となる。ただし、1m 区間ルジオンテストを行うにあたっては、やみくもに行ったのでは非常に多くの時間と費用を要するため、事前のボアホールテレビなどの観察結果によって、適宜試験区間長やパッカー位置などを決めることで、効率的な試験が行えると考えられる。

2.2.2 低限界圧力地盤に対する透水性の把握

特に尾根部などの地下水位が低く限界圧力より水頭差

が大きくなるような岩盤では、通常ルジオンテストでは透水性を過大に評価してしまう場合が度々起こる。そのような場合、特に低圧力部の昇圧を小刻みに設定した孔内静水圧透水試験は、岩盤の正確な透水性を把握する方法として非常に有効である。また、低限界圧力岩盤などにおいて、特に非弾性的な P-Q 曲線などが認められる場合などでは、透水試験の前後にボアホールテレビによる観察を行い、限界圧力発生後の割れ目性状の変化等を調査することによって、有用なデータが得られる場合もある。

孔内静水圧透水試験は、基本的にある程度の数のルジオンテストが実施され、P-Q 曲線などから低限界圧力が予想された場合に適用するのが効率的である。また、岩盤性状に応じて、ロングパッカーなどを使用することでより正確な透水性の把握が可能となる。なお、孔内静水圧透水試験とは、注入管の水位を調節し、孔内圧力を制御して行う透水試験であり、地盤を破壊しないように限界圧力以下に圧力を低めて透水性を調べる必要がある場合に用いられることが多い。

2.2.3 高透水ゾーンの連続性の把握

ルジオンテストなどの単孔での試験では、あくまでその試験孔周辺のごく狭い範囲での透水性を示しているに過ぎず、高透水データが局所的なものか、それとも連続しているのかを把握することが、グラウチング計画上非常に重要となる。そのような高透水ゾーンの連続性を調査する方法として、パルス試験やトレーサー試験、揚水・注水試験などがある。

これらの試験を行うにあたって、特に重要なことは、いずれの試験においても、ある程度調査が進み、水理地質構造がある程度把握された上で実施することが肝要であるということである。通常のボーリングデータやルジオンテストデータの分析によって、ある程度水みちの想定を行った上で、効率的、効果的な試験孔の配置の検討を行い、試験を行うことで、より有用なデータを得られる可能性が高まる。また、試験結果の分析の際も、先に 2.2.1 で示した方法などによって得られた、割れ目性状と透水性の関係のデータや、その他の様々な水理地質に関する情報を組み合わせて、分析を行うことで、より詳細な水理地質構造の把握が可能になると考えられる。

2.3 結論

本検討において既往の高透水ゾーンの連続性調査事例を調べたところ、基本的に各調査手法には適用限界があり、単独ではなく、いくつかの調査手法を組み合わせることで、より有用となる可能性があることがわかった。また、試験手法によって調査段階を問わないものもあれ

ば、ある程度水理地質構造を把握した上で実施する必要があるものもあり、調査段階に応じた適切な調査手法を用いて解析を行うことで、より効率的・効果的に水理地質構造の解明が可能になると考えられる。

3 透水性と他のデータの相関性の分析

3.1 検討対象ダム

3.1.1 諸元と地質

検討対象としたダムは、堤高 89.9m の中央遮水壁型ロックフィルダムである。

ダムサイト付近の地質は、新第三紀中新世の桐内層からなる。桐内層は石英安山岩～安山岩質の火山礫凝灰岩または凝灰角礫岩 (Tb) を主体とし、泥岩～細粒凝灰岩 (Ms)、安山岩溶岩 (An) を挟在する。これらに、粗粒玄武岩 (Do) が岩床または岩脈状に貫入している。

3.1.2 検討データ

3.1.1 の検討対象ダムにおいて、左岸リム部のカーテングラウチングのパイロット孔に関するデータを収集した。検討に用いたデータは以下の通りである。

- ・ルジオン値、限界圧力、透水パターン
- ・ステージ
- ・5m 区間の代表岩種
- ・5m 区間の代表岩級、CL 級の有無、D 級の有無
- ・P-Q 曲線の分類
- ・ボーリングコアの亀裂角度、亀裂の形状、亀裂の酸化の有無、挟在物の有無
- ・その他 (変質の有無、など)

ルジオン値については、2Lu 未満、2～5Lu 未満、5～10Lu 未満、10～20Lu 未満、20～50Lu 未満、50～100Lu 未満、100Lu 以上の 7 分類にした。また、全てのコアに亀裂が存在しており、亀裂の数も多い傾向にあったため、コアの亀裂の状態の分類においては、支配的な亀裂の角度と亀裂面の状態に着目し、コアの亀裂角度は、0～30°、30～60°、60～90° の 3 分類とし、亀裂面の状態については平滑な場合と曲線状の場合の 2 つに分類した。全データ数は 358 である。

3.1.3 データ形式の変換

透水性に関連する調査のデータの書式に着目すると、以下のように分類することができる。

(a) 名義尺度 (例: 地質区分)

(b) 順序尺度 (例: 岩級区分)

(c) 間隔尺度

(d) 比率尺度 (例: ルジオン値)

通常、(c) と (d) の尺度データの場合には、平均値、標準偏差、相関係数などを計算することが可能である。しか

し、透水性に関連する調査データには、(a) や (b) のデータが数多く存在するため、様々なデータから透水性を定量的に推定することは難しい。本検討では、(a) と (b) の場合について、以下のようなデータの取扱いをした。

① 名義尺度については、その条件が該当する場合には 1 とし、該当しない場合には 0 とする、いわゆるダミー変数を用いた。例えば、地質について、ある地点が泥岩である場合、その地点の泥岩の変数を 1 とし、他の岩種 (安山岩、凝灰岩など) の変数は 0 とした。

② 順序尺度については、間隔尺度のような等間隔性は存在しないものの、順序は存在するため、性質の良い方から小さい数字を割り当てた。例えば、岩級区分については、CH 級=1、CM 級=2、CL 級=3、D 級=4、というように数値の割当を行った。

以上の方法により、収集した全てのデータについて、数値データに置き換えた。

3.2 相関性の分析

3.2.1 相関係数

3.1 のデータについて、全ての変数間の相関係数を求めた。そのうち、比較的相関が認められた相関係数を表 3-1 に示す。なお、表 3-1 には、有意でないものおよび相関係数の小さい観測データは除外している。記号の意味は表 3-2 に示す。表 3-1 のように、相関係数を行列形式で表現した表を相関行列と呼ぶ。また、図 3-2 の

表 3-1 相関行列 (上三角行列は省略)

	Lu値	ステージ	An	SLtf	Ms	代表岩種	a	b	c	j	角度1亀裂a	角度1亀裂b	角度3亀裂a	角度3亀裂b	亀裂に酸化
Lu値	1														
ステージ	-0.184	1													
An	-0.378		1												
SLtf	0.156		-0.176	1											
Ms	0.398	0.354	-0.240	-0.356	1										
代表岩種	0.398	-0.280				1									
a	0.458	-0.183	0.114			0.138	1								
b	-0.197	0.159	-0.111	-0.110	0.227		-0.281	1							
c	-0.320					-0.118	-0.323	-0.308	1						
j	0.252					0.149		-0.094	0.094	1					
角度1亀裂a	-0.250	0.123			0.118	-0.184		0.119	-0.173	0.119	1				
角度1亀裂b	0.221	-0.130			0.135			-0.114	0.209	-0.074	0.074	1			
角度3亀裂a	-0.148	-0.139				-0.188	0.168	0.109	-0.189	0.109	-0.189	0.109	1		
角度3亀裂b	0.314					0.118	0.168	-0.189	-0.233	0.187	-0.443	0.187	-0.443	1	
亀裂に酸化	0.259				0.114				-0.275	0.144	0.349	0.453	0.349	0.453	1

※灰色部分はデータの性質上、相関係数がマイナスになると予想される箇所

表 3-2 記号の意味

	全データ数	記号	記号の意味	データ数
代表岩種	358	An	安山岩	38
		SLtf	塊状火山凝灰角礫岩	74
		Ms	泥岩	117
透水パターン	358	a	図3-1参照	82
		b		75
		c		93
		j		7
亀裂の状態	358	角度1亀裂a	低角度(0~30°)の亀裂が多く、主要な亀裂が平滑なもの	215
		角度1亀裂b	低角度(0~30°)の亀裂が多く、主要な亀裂が曲線状なもの	83
		角度3亀裂a	高角度(60~90°)の亀裂が多く、主要な亀裂が平滑なもの	91
		角度3亀裂b	高角度(60~90°)の亀裂が多く、主要な亀裂が曲線状なもの	131

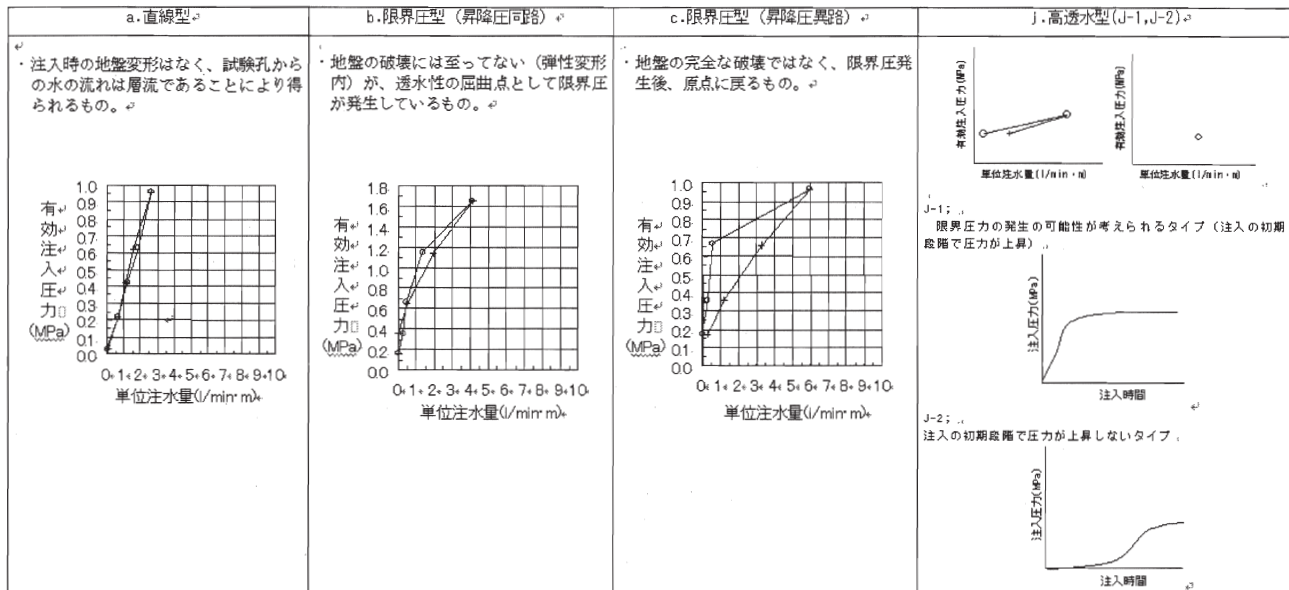


図 3-1 透水パターン⁴⁾ ※参考文献 4) の分類を微修正して使用

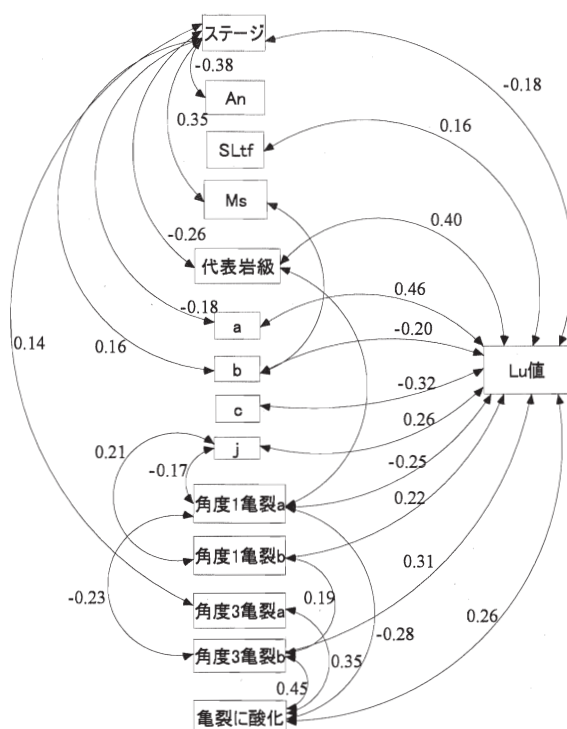


図 3-2 相関係数のパス図

うに、相関行列を視覚的に表した図をパス図と呼ぶ。なお、相関係数は、他の変数による間接的な影響を考慮していないため、相関係数が大きい場合でも直接的な相関があるかどうかについては別途検討が必要である。

なお、透水パターンが a の場合には他の透水パターンは発生しえないため、a と他の透水パターンはマイナスの相関係数となる。他の透水パターンについても、それ自身以外の透水パターンとはマイナスの相関係数になる

傾向にある。同様に、代表岩種の変数間の相関係数、角度 1 亀裂 a と角度 1 亀裂 b、角度 3 亀裂 a と角度 3 亀裂 b の相関係数についてもマイナスとなる傾向にある(表 3-1 の灰色の箇所)。図 3-2 の相関係数のパス図は、それらの相関係数については省略している。

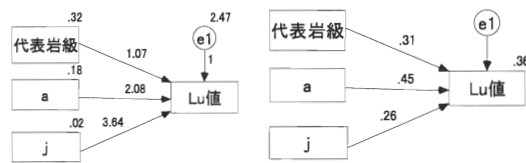
3.2.2 重回帰分析

重回帰分析は、複数の独立変数(説明変数)から 1 つの従属変数(基準変数)を推定するモデルである。

Lu 値を従属変数とし、3.2.1 で Lu 値と相関の高い代表岩種、透水パターン a、透水パターン c を独立変数として重回帰分析を行った例を図 3-3 に示す。

図 3-3 の意味は、主に以下のとおりである。

- ・非標準化の結果の代表岩種、a、j の右肩にある「0.32」、「0.18」、「0.02」はそれぞれの分散。
- ・非標準化結果の代表岩種から Lu 値に伸びている矢印の数字「1.07」は、代表岩種が 1 大きくなると、Lu 値が 1 程度分類が大きくなることを意味している。なお、Lu 値は 7 分類しており、その分類が 1 つ大きくなる、つまりルジオン値の分類が 1 つ悪い方向になる、ということの意味している。
- ・代表岩種と透水パターン a と j では、単位が異なる。そのため、単位の影響を除外した結果が図 3-3 の右側の標準化した結果である。
- ・標準化した結果の Lu 値の右肩にある「0.36」は決定係数である。決定係数の意味は、従属変数(Lu 値)が独立変数(代表岩種、a、j)から 0.36 程度説明することができ、残りの(1-0.36)は他の要因「e1」から説明されるということである。



※「.31」とは「0.31」のことであり、パス図の中で小数は「0」を省略して表記している。以降の図においても同様である。

図 3-3 重回帰分析の一例のパス図
(左：非標準化の結果、右：標準化した結果)

重回帰分析は、独立変数同士の相関をゼロと仮定していること、従属変数は1つしか設定できないこと、など実際のデータの性質や因果関係を表現しきれないことが分かっている。

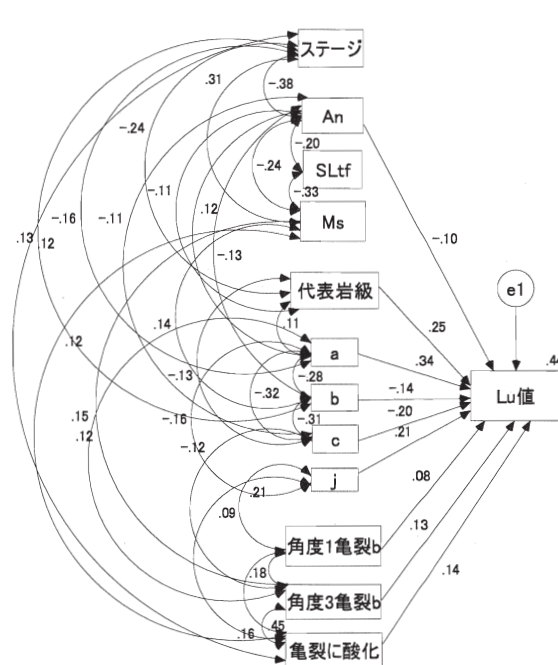
3.2.3 共分散構造分析

重回帰分析では変数間の相関を考慮した分析ができないため、本質的に因果関係がないと推定できるにも関わらず回帰係数が大きくなったり、逆に本質的に因果関係があると推定できるにも関わらず回帰係数が小さくなる場合がある。そこで、本検討では、観測変数間の相関を考慮したり、複数の従属変数を設定して分析することが可能であるなど、より詳細な分析が可能な共分散構造分析により分析を行った。なお、分析には、共分散構造分析用ソフトウェア「Amos」を使用した。

図 3-4 は、ステージ、代表岩種、代表岩級、透水パターン、亀裂の状態から、Lu 値への因果関係を分析した一例である。なお、図 3-4 には、5%確率で有意なパスのみ示している。図 3-4 の主な意味は以下のとおりである。

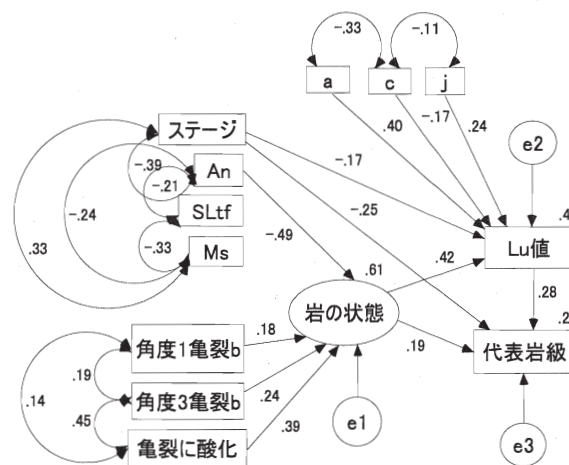
- 四角で囲まれた記号（ステージ、An など）は観測変数を表す。
- 両方向の矢印 (\leftrightarrow) は相関を表し、矢印に付随している数値は相関係数を表す。片方向の矢印 (\rightarrow) は因果関係を表し、矢印に付随している数値は偏回帰係数を表す。偏回帰係数はパス係数とも呼ぶ。
- 丸で囲まれた「e1」は、誤差を表す。つまり、誤差「e1」は、観測変数から伸びている矢印では説明できない量を表している。
- 表中の GFI、AGFI、RMSEA、NFI、CFI は、いずれもモデルの適合度を表す指標である。いずれの指標も、ほぼ適合度のよい結果となっている。

図 3-4 については、観測変数間の相関を考慮してはいるものの、共分散構造分析というよりは従来の重回帰分析による分析ということができる。表 3-1 や図 3-4 を見ると、観測項目が 12 とそれほど多くはないものの、Lu 値に対しての相関や因果関係が図を通しても分かりにくくなっている。そのため、共分散構造分析では、似たよ



	GFI	AGFI	RMSEA	NFI	CFI
計算結果	0.974	0.941	0.038	0.929	0.973
モデルの適合が非常によいとされる条件	0.95以上	0.95以上	0.05未満	0.95以上	0.95以上
モデルが不適と推定される条件	0.9未満	0.9未満	0.1以上	0.9未満	0.9未満

図 3-4 共分散構造分析の一例（標準化した結果）



	GFI	AGFI	RMSEA	NFI	CFI
計算結果	0.952	0.915	0.064	0.848	0.901
モデルの適合が非常によいとされる条件	0.95以上	0.95以上	0.05未満	0.95以上	0.95以上
モデルが不適と推定される条件	0.9未満	0.9未満	0.1以上	0.9未満	0.9未満

図 3-5 潜在変数を用いた場合（標準化した結果）

うな性質の観測変数を潜在変数でまとめて、因果関係のモデルを単純化して考えることができることが最大の特徴となっている⁵⁾。図 3-5 に、潜在変数を用いた場合の結果の一例を示す。

図 3-5 の因果関係のモデル作成にあたっては、以下のような前提条件を設定している。

- ・岩種と亀裂の状態によって、直接は観測されない「岩の状態」が規定されている。
- ・「岩の状態」は、Lu 値と代表岩級に影響を及ぼす。
- ・透水パターンは Lu 値にのみ影響を与える。

図 3-5 には、5%確率で有意な係数のみ示している。図 3-5 からは以下のような傾向が読み取れる。

- ・Lu 値の右上にある決定係数が 0.47 となっており、図 3-5 のモデルにより半分程度 Lu 値が説明されている。一方、代表岩級の説明変数は 0.21 と小さく、代表岩級については図 3-5 のモデルでは説明しきれていない。
- ・「亀裂に酸化」→「岩の状態」→「Lu 値」のパスに着目する。「亀裂に酸化」→「岩の状態」のパス係数は 0.39 とプラス、「岩の状態」→「Lu 値」のパス係数は 0.42 とプラスであることから、「亀裂に酸化」が増加すると、「Lu 値」も増加することになる。「亀裂に酸化」が増加とは亀裂に酸化があることを意味し、「Lu 値」が増加とはルジオン値が大きくなることを意味している。「亀裂に酸化」→「岩の状態」→「Lu 値」のパスは、「亀裂に酸化」があると「Lu 値」が大きくなることを示している。他のパスも同様である。

Lu 値の決定係数が比較的大きく、代表岩級の決定係数が比較的小さいのは、本論文では、透水性に着目してデータを収集したため、そのデータからは代表岩級に対する因果モデルをうまく構築できなかったためと考えられる。なお、図 3-5 を見ると、透水パターン a が大きくなると、Lu 値も大きくなる結果となっている。つまり今回のデータからは、図 3-1 の透水パターンが a の時に、ルジオン値が大きくなることを意味している。これは、本研究で対象とした地盤においては、限界圧力が低い場合が多く、その中には限界圧力がゼロに近いために限界圧力を検出できない場合も含まれていると考えられるため、透水パターンが a と評価されたデータから Lu 値への矢印の係数が正の値になっているものと推察される。

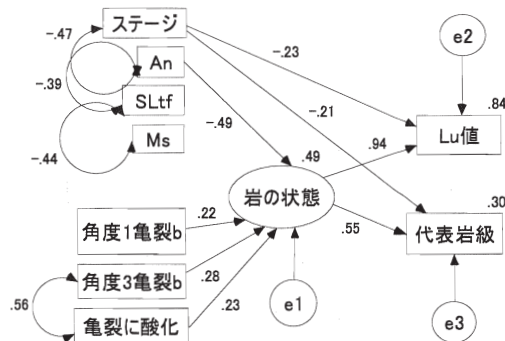
図 3-6 に、透水パターン a のみのデータを用いて分析した結果を示す。このように、ある変数のグループだけ用いて分析することも可能である。なお、図 3-6 の適合度指標を見ると、グループ分けせずに全データで分析した図 3-5 の方が、適合度指標がよい傾向がある。これは、共分散構造分析を行う際には、データ数が 100 以上で分析を行うことが推奨されているため、透水パターン a のグループのデータ数が 82 とデータ数が少ないため、その影響が出ているものと考えられる。

実際の透水性を規定する要因は、図 3-3～図 3.6 より

も複雑であるが、入手可能なデータの制約もあり、本検討では以上の分析を行った。図 3-5 は適合度指標も比較的良好な値を示しており、入手できたデータからの分析という前提はあるものの、図 3-5 のモデルによりある程度の因果関係を説明できているものと考えられる。

共分散構造分析には、当然のことながらその方法に制約はあるものの、様々な属性のデータの分析が行えること、相関のみならず因果関係を分析できること、因果関係を視覚的に分析することができること、潜在変数を用いることにより因果関係をシンプルに表現できること、など多くの長所がある。共分散構造分析では、因果関係モデルは分析担当者が自ら試行錯誤しながら作成する必要があり、実際の因果関係をモデルに適切に反映させることが非常に重要である。

ダム基礎の透水性に関するデータには、地質、岩種、岩級区分、ルジオン値、亀裂に関する情報など多種多様なデータが存在するため、それらのデータを有機的に活用した定量的な分析は難しい。しかし、本検討で用いた共分散構造分析など、近年新たに普及しつつある手法を用いることにより、そのようなデータをより効果的に分



	GFI	AGFI	RMSEA	NFI	CFI
計算結果	0.915	0.84	0.084	0.8	0.91
モデルの適合が非常によいとされる条件	0.95以上	0.95以上	0.05未満	0.95以上	0.95以上
モデルが不適と推定される条件	0.9未満	0.9未満	0.1以上	0.9未満	0.9未満

図 3-6 透水パターン a のみのデータで分析した場合 (82 データ)

析することが可能となり、ダム基礎の透水性の空間的な分布の推定だけでなく、その結果を用いて、上下流方向の浸透を考慮したグラウチングの深度方向の計画やグラウチングによる改良効果判定などにも適用できる。

4 カーテングラウチングのチェック孔の省略可能性に関する検討

4. 1 検討対象ダム

本検討では、既設9ダムのカーテングラウチングの実績データを用いて、最終次数孔とチェック孔による改良効果の比較検討を行った。また比較を行うにあたって、それぞれのダムについて初期透水性や規定孔の配孔等を考慮したゾーン区分を行い、ゾーン毎に比較検討を行った。これらのダムの諸元を表4-1に示す。また、ゾーン区分の例として、Aダムのゾーン区分図を図4-1に示す。

表4-1 ダム諸元一覧

ダム名	型式	諸元	地質	改良目標値
Aダム	中央コア型 ロックフィルダム	堤高： 57.0 m 堤長： 390.0 m 堤体積： 1,889,000 m ³	新生代第四紀 熔結凝灰岩	5Lu 非超過率 85%
Bダム	重力式 コンクリートダム	堤高： 109.0 m 堤長： 308.0 m 堤体積： 960,000 m ³	中生代白亜紀 砂岩・粘板岩	2Lu 非超過率 85%
Cダム	重力式 コンクリートダム	堤高： 100.0 m 堤長： 315.0 m 堤体積： 1,030,000 m ³	中生代白亜紀 砂岩・粘板岩	2Lu 非超過率 85%
Dダム	重力式 コンクリートダム	堤高： 97.0 m 堤長： 190.0 m 堤体積： 510,000 m ³	中生代白亜紀 花崗閃緑岩	2Lu 非超過率 90%
Eダム	重力式 コンクリートダム	堤高： 123.0 m 堤長： 393.0 m 堤体積： 1160,000 m ³	新生代第三紀 安山岩溶岩 凝灰角礫岩	2Lu 非超過率 85%
Fダム	中央コア型 ロックフィルダム	堤高： 105.0 m 堤長： 664.6 m 堤体積： 8300,000 m ³	新生代第三紀 礫岩 火山礫凝灰岩	2Lu 非超過率 85%
Gダム	重力式 コンクリートダム	堤高： 114.0 m 堤長： 331.3 m 堤体積： 750,000 m ³	中生代白亜紀 中～粗粒花崗 岩	2Lu 非超過率 85%
Hダム	重力式 コンクリートダム	堤高： 74.0 m 堤長： 225.0 m 堤体積： 300,000 m ³	中生代白亜紀 流紋岩質 凝灰角礫岩	2Lu 非超過率 85%
Iダム	アーチ式 コンクリートダム	堤高： 156.0 m 堤長： 382.0 m 堤体積： 810,000 m ³	中生代白亜紀 中～粗粒 黒雲母花崗岩	2Lu 非超過率 85%

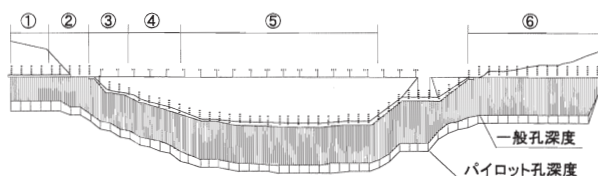


図4-1 ゾーン区分図 (Aダム)

4. 2 最終次数孔とチェック孔の比較方法

4.2.1 最終次数孔による改良効果判定

カーテングラウチングの改良効果は、通常、最終次数孔において改良目標値の非超過率が85～90%以上であることを持って判断されている。なお、規定孔は施工範囲全体に等間隔に配置されるのに対し、追加孔は追加基準に該当する箇所にしか施工しないため、規定孔と追加

孔では統計処理の対象範囲が異なる。そのため、追加孔次数における非超過率を求める場合には、既に完了判定をしている規定孔や追加孔のデータも踏まえて、施工範囲全体の評価を行う必要があり、このような方法により統計処理を行う対象となる孔を最終次数孔と呼ぶ。最終次数孔の抽出方法は、ダムにより異なるが、通常設計最終次数孔を中心とし、両側の前次数までの孔とステージ境界で区切られるメッシュを最終次数孔メッシュとし、このメッシュの中で最後に施工した孔を最終次数孔としている。

4.2.2 最終次数孔による改良効果判定

平成15年度に改訂されたグラウチングの技術指針によると、「カーテングラウチングによる地盤の改良効果は、チェック孔によるルジオンテストにより確認する」とされている。チェック孔はカーテングラウチングの改良効果を確認するためのサンプリング検査の位置づけとして、最終次数孔による改良効果判定により改良されたと判断された後、カーテングラウチングの1ブロック(12m)もしくは2ブロック(24m)に1孔の割合で、注入孔の削孔方向に斜交する形で施工され、チェック孔のルジオンテストの結果により改良効果の判定が行われる。

4.2.3 最終次数孔とチェック孔の比較方法

最終次数孔とチェック孔の比較は超過確率図を用いて行うこととし、特にルジオン値の大きい側の超過確率曲線の位置関係を重視し、以下のいずれかの条件に該当する場合、最終次数孔のルジオン値に比較しチェック孔のルジオン値が大きいと判断した。

- ① 超過確率図において、改良目標値より大きい範囲で、最終次数孔に比較しチェック孔のルジオン値が大きく上回る(1.5倍程度以上)場合
- ② 超過確率図において、ほぼ全域にわたって最終次数孔に比較しチェック孔のルジオン値が大きく上回る(1.5倍程度以上)場合
- ③ 超過確率図において、ほぼ全域にわたって最終次数孔に比較しチェック孔のルジオン値が上回り(1.5倍程度以下)、かつチェック孔で改良目標値を上回るデータが存在する場合
- ④ チェック孔におけるルジオン値(非超過確率85%値)が最終次数孔のルジオン値(非超過確率85%値)を上回り、かつ改良目標値を上回る場合(完了基準として非超過確率90%値を採用している場合は90%値を基準とする)

超過確率図によって判定を行った結果、15のゾーンが、最終次数孔に比較しチェック孔のルジオン値が大きいと

判断した。

4.3 検討結果

4.3.1 パターンの分類

検討対象とした9ダムの全68ゾーンについて、各ゾーンごとに、最終次数孔とチェック孔による改良効果判定の比較を行った。ここでは、この改良効果判定の比較結果に加え、各ゾーンの初期透水性に着目し、さらに4つのパターンに分類した。各ゾーンを4つのパターンに分類した結果を表4-2に示す。

表4-2 パターン分類結果

	パターン				ゾーン数
	I	II	III	IV	
初期透水性	比較的 低い	比較的 高い	比較的 低い	比較的 高い	
比較結果*)	Luc<Luf	Luc<Luf	Luc>Luf	Luc>Luf	
ゾーン数	36 (53%)	17 (25%)	12 (18%)	3 (4%)	68

*) Luc: チェック孔のルジオン値 Luf: 最終次数孔のルジオン値

パターン分類を行うにあたり、初期透水性については、概ねルジオン値の非超過確率85%値で10ルジオン程度を基準とし、高透水の広がりも考慮して分類した。また、最終次数孔とチェック孔の比較に関しては、先に示した超過確率図による比較方法により分類した。

以下、これらの各パターンについて説明する。

4.3.2 パターンIおよびII

これらのパターンは最終次数孔とチェック孔のルジオン値を比較すると、それほど違いが見られないか、チェック孔のルジオン値が小さくなるパターンであり、ほとんどのゾーンがこれらのパターンに分類された。

図4-2にパターンIIの例としてCダムのゾーン③における超過確率図を示す。このゾーンでは、パイロット孔の透水性は非常に高いが最終次数孔に至るまで次数低減に伴う改良傾向が明瞭に見られ、最終次数孔とチェック孔の比較では、改良目標値2Luよりもルジオン値のかなり小さい範囲で若干チェック孔のルジオン値が大きくなっているものの、ルジオン値の大きい側ではチェック孔が下回っている。

基本的にこれらのパターンIもしくはIIに該当するようなルジオン値の分布であれば、チェック孔の省略は可能であると考えられる。

4.3.3 パターンIII

このパターンは初期透水性は比較的低い、最終次数孔のルジオン値に比較し、チェック孔のルジオン値のほうが大きくなり逆転してしまうパターンである。このパターンIには今回検討を行った全68ゾーンのうち、12

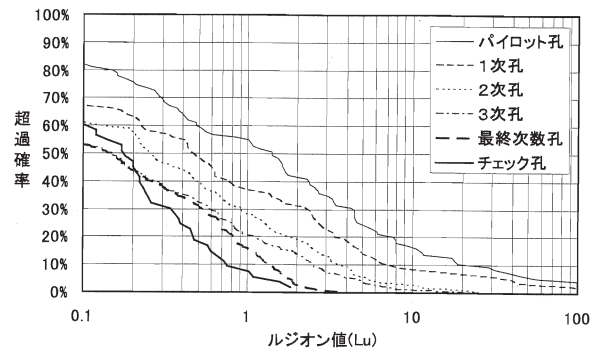


図4-2 超過確率図 (Cダム ゾーン③)

ゾーンが分類された。これらのパターンIIIに分類された12ゾーンについて、それぞれ詳細を調べてみると、基本的に問題はないと考えられるゾーンは9ゾーン、注意を要すると考えられるゾーンは3ゾーンあった。そこで、注意を要すると考えられるゾーンの例としてIダムゾーン⑥深部の詳細な検討結果を以下に示す。

図4-3にIダムゾーン⑥深部の超過確率図を示す。図に示すように、チェック孔のルジオン値は大きく最終次数孔のルジオン値を上回っており、さらにチェック孔において、ルジオン値の非超過確率85%値が2ルジオンを上回っている。このように最終次数孔に比較しチェック孔のルジオン値が大きくなった要因について検討を行った。

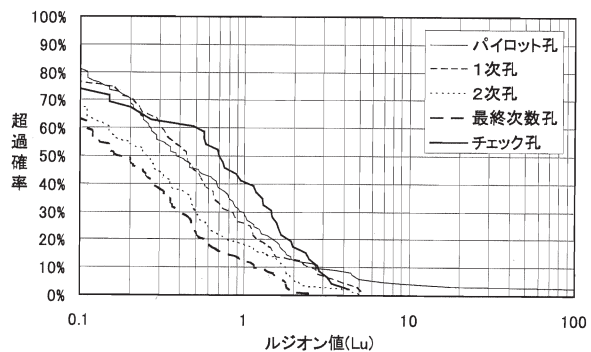


図4-3 超過確率図 (Iダム ゾーン⑥深部)

図4-4にIダムゾーン⑥浅部の超過確率図を示す。深部ではチェック孔のルジオン値が最終次数孔のルジオン値を大きく上回ったのに対し、浅部では、最終次数孔のルジオン値を下回っており、また改良目標値2ルジオンを上回るデータも発生していない。図4-5にIダムゾーン⑥周辺のパイロット孔のルジオンマップにチェック孔のルジオン値分布を重ね合わせた図を示す。この図より、このゾーンは高角度の断層・亀裂が発達しており、その断層・亀裂沿いに比較的透水性の高いゾーンが分布していることがわかる。またチェック孔で2ルジオンを上回

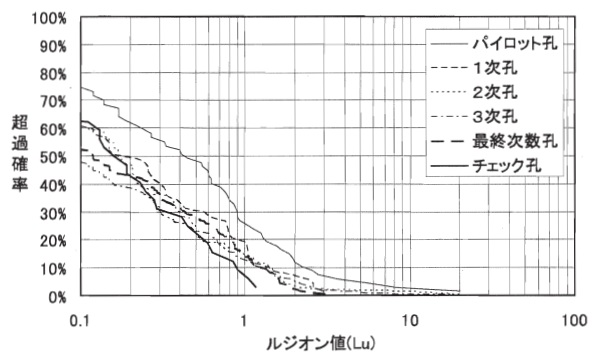


図 4-4 超過確率図 (Iダム ゾーン⑥浅部)

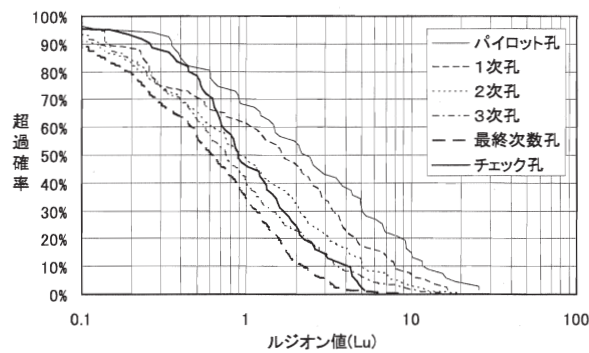


図 4-6 超過確率図 (Gダム ゾーン⑥)

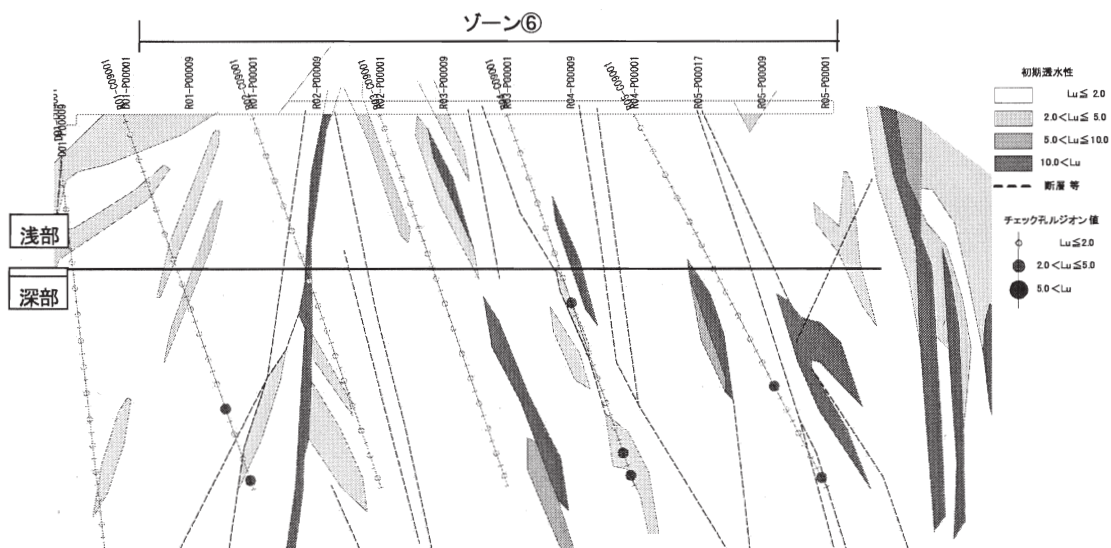


図 4-5 初期透水性とチェック孔 (Iダム ゾーン⑥周辺)

ったデータの分布を見ると、この初期透水性の高い亀裂沿いに分布しているデータもいくつか見られる。基本的にこのダムは浅部 (1~6 ステージ) は規定 3 次孔 (孔間隔 1.5m) で、深部 (7 ステージ以深) は規定 2 次孔 (孔間隔 3.0m) で施工されており、深部において高角度の断層・亀裂を起因とする比較的透水性の高いデータが見逃されてしまった可能性がある。

4.3.4 パターンⅣ

このパターンは初期透水性が高く、最終次数孔のルジオン値に比較し、チェック孔のルジオン値のほうが大きくなり逆転してしまうパターンである。このパターンⅠには今回検討を行った全 68 ゾーンのうち、3 ゾーンが分類された。これらの中で、例として G ダムゾーン⑥の詳細な検討結果を以下に示す。

図 4-6 に G ダムゾーン⑥の超過確率図を示す。図に示すように、チェック孔のルジオン値は大きく最終次数孔のルジオン値を上回っており、さらにチェック孔において、ルジオン値の非超過確率 85% 値が 2 ルジオンを上回っている。また、このゾーンの初期透水性はパイロット

孔におけるルジオン値の非超過確率 85% 値が 10 ルジオン程度と非常に高いことから、パターンⅣに分類した。このように最終次数孔に比較しチェック孔のルジオン値が大きくなった要因について検討を行った。図 4-7 にゾーン⑥周辺の岩級区分図にチェック孔のルジオン値分布を重ね合わせた図を示す。この図を見ると、CL 級岩盤もしくは断層周辺においてチェック孔で改良目標値を超過したデータも多く見られるが、必ずしも全てのデータに当てはまるわけではない。

図 4-8 にゾーン⑥周辺の初期透水性の分布図にチェック孔のルジオン値分布を重ね合わせた図を示す。この図より、初期透水性の比較的高い箇所ではチェック孔で改良目標値を超過したデータが多く発生している。この図上では初期透水性の低い箇所において、チェック孔で改良目標値を超過しているデータもあるが、それらの多くは高透水ゾーンもしくは断層の近傍に位置している。この図はあくまでパイロット孔のルジオン値のデータから推定して描いたものであり、実際は初期透水性の高い箇所であった可能性もある。



図 4-7 岩級区分とチェック孔 (Gダム ゾーン⑥)

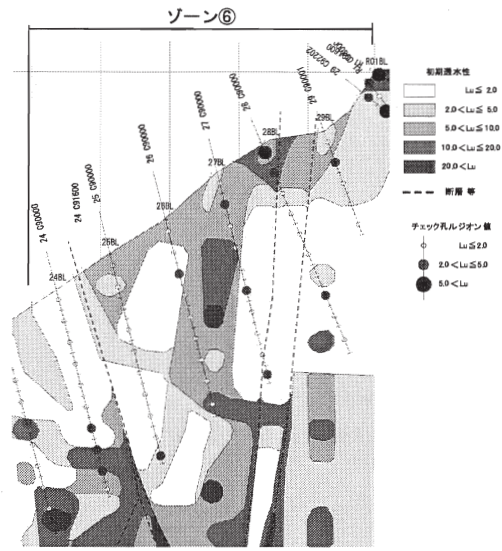


図 4-8 初期透水性とチェック孔 (Gダム ゾーン⑥)

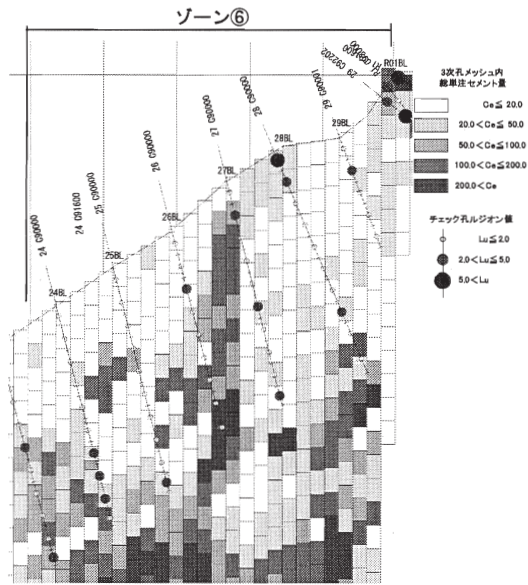


図 4-9 総単注セメント量とチェック孔 (Gダム ゾーン⑥)

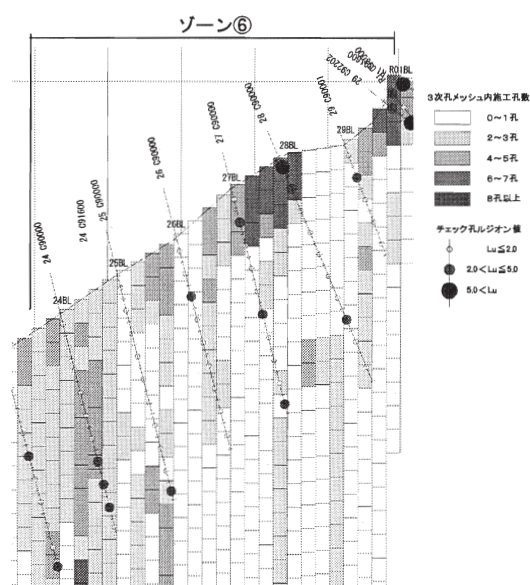


図 4-10 3次孔メッシュ内施工孔数とチェック孔 (Gダム ゾーン⑥)

図 4-9 に 3 次孔を中心としたメッシュ内の総単位注入セメント量分布にチェック孔のルジオン値分布を重ね合わせた図を示す。総単位注入セメント量とは、そのメッシュ内におけるパイロット孔から最終次数孔までのすべての孔の単位注入セメント量を合計したものである。メッシュ境界部の孔については、半分の値を両脇のメッシュに足している。この図をみると、チェック孔で改良目標値を超過したデータの多くは、比較的セメント注入量の少ない箇所が発生していることがわかる。

図 4-10 にゾーン⑥周辺の 3 次孔を中心としたメッシュ内の施工孔数の分布図にチェック孔のルジオン値分布

図を重ね合わせた図を示す。この図より、27BL から 28BL にかけて、浅部において追加孔の施工密度が高い箇所、チェック孔で改良目標値を超過するデータが発生している箇所が見られる。この箇所は透水性の割りにセメント注入量が非常に少なく、改良の進みにくかった箇所である。この他の箇所では基本的には追加孔の施工密度の小さい箇所において、チェック孔で改良目標値を上回るデータが多く発生している。

これらの結果より、このゾーン⑥では、透水性のわりに注入量が少ない箇所や、CL 級もしくは断層周辺といった弱層部において、チェック孔で改良目標値を超過す

るデータが多く発生していることがわかった。

4.4 規定孔間隔の違いによる改良効果判定の比較

本研究では9ダムの全68ゾーンについて、最終次数孔とチェック孔の改良効果判定について比較検討を行ってきた。グラウチング技術指針の改訂に伴い、規定孔次数の2次孔化が積極的に進められていることは、先に述べたが、検討を行った68ゾーンの中には、規定孔次数を2次孔として施工を行ったゾーンや、規定孔次数を3次孔とし、パイロット孔から2次孔までの結果を用いて3次孔の省略を行っているゾーンなども含まれている。よって、ここでは規定孔間隔の違いや3次孔省略の影響に伴い、最終次数孔とチェック孔の改良効果判定にどのような違いが見られるか、検討を行った。

4.4.1 規定孔間隔別パターン分類結果

表4-3に規定孔間隔別のパターン分類結果の一覧を示す。この表は、上から規定孔間隔の広い順に並べている。3次孔省略基準を適用したものについては、3次孔省略により、孔間隔が3.0mとなった箇所と1.5mの箇所が混在していることから、規定孔間隔を「1.5m～3.0m」と表記している。また、FダムとGダムでは3次孔省略基準が異なり厳密には同列とはならないが、ここでは便宜的に1つのくくりで扱うこととする。

表4-3 規定孔間隔別のパターン分類結果

規定孔間隔	規定孔次数	パターン (ゾーン数)				計
		I	II	III	IV	
3.0m	2次孔	9 (64%)	1 (7%)	4 (29%)	0 (0%)	14
1.5～3.0m	3次孔省略基準	2 (33%)	0 (0%)	4 (67%)	0 (0%)	6
1.5m	3次孔	23 (54%)	13 (30%)	4 (9%)	3 (7%)	43
0.75m	4次孔	2 (40%)	3 (60%)	0 (0%)	0 (0%)	5

表4-3中の、パターンごとのゾーン数の割合を折れ線グラフにしたものを図4-11に示す。この図において、パターンIおよびIIについて注目すると、基本的に規定孔間隔が狭くなるにつれて、パターンIの割合が減少し、パターンIIの割合が増える傾向が見られる。これは、初期透水性の高いゾーンほど規定孔間隔を狭めて施工されていることを示しており、既設のダムでは総じて初期透水性に応じた規定孔間隔の設定がなされていることがわかる。次にパターンIIIおよびパターンIVに注目すると規定孔間隔が広がるにつれてパターンIIIの割合が増えていることがわかる。パターンIVについては、そもそもこのパターンに分類されるゾーンの割合が少ないことから、はっきりとした傾向は見られない。

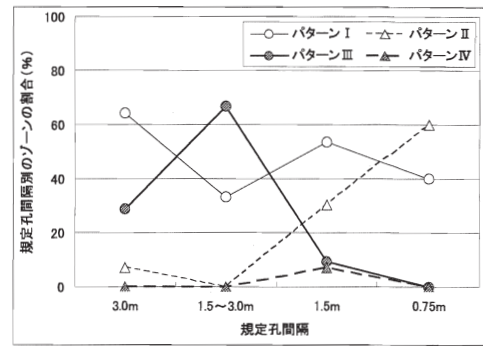


図4-11 規定孔間隔別パターン分類結果 (パターン別)

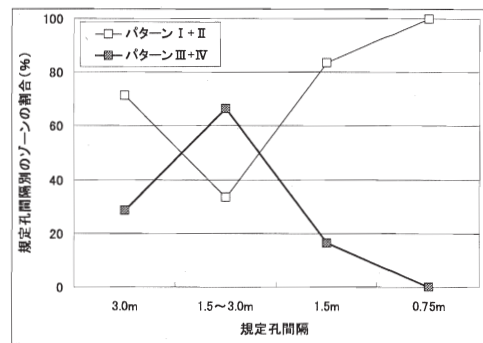


図4-12 規定孔間隔別パターン分類結果 (比較結果別)

図4-12はパターンIとII、およびパターンIIIとIVの割合を足し合わせたもの、つまりは改良効果判定の比較結果ごと ($L_{uf} > L_{uc}$, $L_{uf} < L_{uc}$) に表したものである。この図を見ると、規定孔間隔が広がるにつれて、最終次数孔に比較してチェック孔のルジオン値が大きくなり逆転してしまうゾーンの割合が大きくなる傾向が見られる。また、特に3次孔省略を適用した場合に、逆転してしまうゾーンの割合が多くなることがわかる。以下、これらの2点について考察する。

4.4.2 規定孔間隔による影響

先に、パターンIIIおよびIVに分類される要因として、高角度亀裂の卓越した岩盤や、マサ化した改良の進みにくい岩盤を挙げた。特に、高角度の亀裂が卓越する場合には、当然孔間隔を広げれば、亀裂を捕捉できる確率が低くなることから、斜めに施工するチェック孔において、最終次数孔に比較して大きなルジオン値となる可能性は高くなると考えられる。

マサ化した、改良の進みにくい岩盤については、多くの場合、規定最終次数孔においても改良目標値を超過するデータが多く発生し、結果的に多くの追加孔が施工される場合が多い。しかし、近年施工されるダムの追加孔施工基準の多くは、追加孔を施工するに当たり、追加孔の対象となる孔の両側に一度に施工するわけではなく、優先順位をつけて施工する場合が多く、仮にたまたま最

初の追加孔で小さなルジオン値が出てしまうと、その後、その周辺で全く追加孔が施工されなくなり、チェック孔で大きなルジオン値となる場合も考えられる。

これらのことから、地質性状や改良状況に応じた適切な孔配置の設定が必要であり、特に高角度の亀裂が卓越し、その上で規定孔間隔を広げて施工するような場合には、チェック孔の施工による確認も必要になると考えられる。しかしそのような場合でも、ある程度施工が進み、チェック孔でも問題となるようなデータがほとんど発生しないようであれば、施工の途中段階において、チェック孔の施工を省略することも可能であると考えられる。

4.4.3 3次孔省略による影響

本検討において検討を行った9ダムの68ゾーンの内、3次孔省略を行っているゾーンは6ゾーンあり、その中の4ゾーンで最終次数孔に比較しチェック孔のルジオン値が大きくなり逆転しており、その割合は非常に高くなっている。

それらの4ゾーンについて詳細に検討を行った結果、いずれのゾーンについても地質的な要因が大きく、3次孔省略による影響は非常に少ないことがわかった。そもそも本検討において3次孔省略基準が適用されたゾーンは6ゾーンと少なかったため、たまたまこのような結果になったと考えられる。本研究で検討をおこなった2ダムでは、いずれも適切に3次孔省略基準が設定されていたと考えられ、適切に3次孔省略基準を設定し適用すれば、問題はないと考えられる。

4.5 結論

本検討では、既設のダムのカーテングラウチング実績データを用い、最終次数孔による効果判定結果とチェック孔による効果判定結果の比較を行った、最終次数孔のルジオン値に比較し、チェック孔のルジオン値が大きくなる可能性が高くなるのは、次のような場合が考えられる。

- ① 透水性の割にセメント注入量が少なく、改良の進みにくい岩盤の場合（風化、マサ化した岩盤、等）。
- ② 高角度の亀裂、断層の卓越する岩盤の場合。
- ③ 規定孔間隔を広くした場合。
- ④ 規定最終次数孔で比較的大きなルジオン値となった箇所。
- ⑤ 初期から低透水で、セメント注入量も少なく次数進行に伴う低減傾向も見られない場合。

①、②については、基本的に地質的な問題であり、調査段階において、これらのような地質状況が確認された場合、また施工開始後においても、改良がなかなか進まないような状況が見られた場合は、注意が必要であり、

チェック孔の省略は難しいと考えられる。

③については、規定孔間隔を広くしたとしても、それが初期透水性、改良傾向に見合った配孔がなされていれば問題は少ないと考えられる。しかし、規定孔次数を減らし、基本的に悪い箇所は追加孔で対応しようというような場合は、例えば、追加1次孔（3次孔）については両側に追加孔を施工し、追加2次孔以降については優先順位を付けて片側ずつの施工とするなどの配慮を行うことで、よりチェック孔に比較し最終次数孔のルジオン値が大きくなる可能性は低くなると考えられる。

④については、指針改訂前のようにほとんど規定3次孔以上で施工されているようであれば、特に問題とされないと考えられるが、指針が改訂され、多くのダムで規定孔次数の2次孔化が進んでいる中では、先に述べたように、追加孔に優先順位を付けて片側ずつの施工方法であると、最終次数孔メッシュが大きくなるほど、比較的透水性の高いゾーンを見逃す可能性が高くなると考えられる。このような追加孔の施工方法を行う場合は、最後にチェック孔による確認も必要であると考えられるが、両側に追加孔を施工するなどの、配慮を行った場合であれば、基本的にチェック孔の省略は可能であると考えられる。ただし、施工開始当初はチェック孔の施工を行ったとしても、施工を進めている中で、最終次数孔に比較して、チェック孔のルジオン値が大きくなるような状況がほとんど見られないようであれば、また、その後の地質状況もそれほど変わらないのであれば、施工途中においてチェック孔の省略も可能であると考えられる。

⑤については、基本的に地質的に問題もなく、初期から低透水であれば、チェック孔の省略は可能であると考えられる。ただし、低透水の理由が、高角度亀裂の卓越した岩盤で、鉛直に施工したことにより亀裂を捕捉できなかったために、たまたま低透水となる可能性のあるような岩盤の場合は、当然、チェック孔による確認は必要であると考えられる。ただし、この場合についても、施工途中において、再検討を行い、その結果によってはその後のチェック孔の施工を省略することも可能であると考えられる。

また、3次孔省略による影響についても検討を行ったが、本論文において検討を行ったダムでは、いずれも適切に省略基準が作成され、基本的に3次孔省略の影響はなかった。

現在施工されているダムは、グラウチング技術指針の改訂により、カーテングラウチングにおいて規定孔次数の2次孔化や直前次数の注入効果の考慮などが積極的に取り入れられており、単純に本研究の結果を当てはめる

のは難しい。しかし、本研究の結果を元にし、さらに、各ダムにおいて、地質、改良傾向を詳細に分析することで、チェック孔の省略は可能であると考えられる。

5 平成17年度の成果のまとめ

平成17年度は、ダム基礎岩盤の性状に応じた透水性評価方法の検討として、高透水性地盤の透水性状や連続性に関する調査事例の分析とそれら調査手法の合理的な適用法についての検討、および透水性と他の観測データとの相関性の分析に関する検討を行った。また、グラウチングの計画・設計の合理化に関する検討、およびグラウチング効果判定法の検討として、既設ダムのカーテングラウチング実績データを用いた、最終次数孔とチェック孔の改良効果判定の比較によるチェック孔の省略可能性に関する検討を行った。以下にこれらの成果をとりまとめる。

- ①既往の高透水ゾーンの連続性調査事例を調べたところ、基本的に各調査手法には適用限界があり、単独ではなく、いくつかの調査手法を組み合わせることで、より有用となる可能性があることがわかった。また、試験手法によって調査段階を問わないものもあれば、ある程度水理地質構造を把握した上で実施する必要があるものもあり、調査段階に応じた適切な調査手法を用いて解析を行うことで、より効率的・効果的に水理地質構造の解明が可能になると考えられる。
- ②透水性に関するデータの相関性を検討するため、共分散構造分析を用いて、既設ダムのカーテングラウチングの調査・施工時に得られたデータの分析を行った。地質など質的データが多く、量的なデータが少ないなどの制約はあるものの、比較的妥当な因果モデルを得ることができた。
- ③チェック孔の省略可能性を検討するため、チェック孔と最終次数孔の比較をもとに、既設9ダムのカーテングラウチングの実績データの分析を行った。その結果、8割程度のゾーンではチェック孔を省略しても大きな問題は発生しないと推定されたが、2割程度のゾーンで最終次数孔のルジオン値に比べてチェック孔のルジオン値が大きくなったため、その原因について地質や規定孔間隔などを考慮した詳細な分析を行った。これらの結果を踏まえ、チェック孔の省略が可能となる条件についての提案を行った。

6 研究成果のまとめ

平成13年度から平成17年度の5年間の研究成果を表6-1に示す。達成目標①から③については、それぞれが

密接に関連しており、本研究課題で得られた成果を達成目標①から③に厳密に分類することは難しく、また報告書に報告した以外の成果もあるが、以下では、これまでの報告書をもとに、達成目標ごとにその研究成果をまとめる。

表6-1 研究成果のまとめ

	達成目標① ダム基礎岩盤の性状に応じた透水性評価方法の提案	達成目標② ダム基礎岩盤の性状に応じた配合・孔配置等のグラウチングの計画・設計方法の提案	達成目標③ 透水性の空間分布を考慮したグラウチングの効果判定法の提案
平成13年度	・軟岩・砂礫や高透水性岩盤を対象とした透水性評価の試験方法及び評価方法の検討	・三次元亀裂網模型を用いたグラウトの流動特性の検討 ・浸透流解析によるプラケットグラウチングの施工範囲および改良目標値に関する検討	
平成14年度		・カーテングラウチングの改良目標値を深部方向に緩和した場合の影響の解析的検討 ・カーテングラウチングの規定孔間隔に関する検討(主に2L改良目標値を対象) ・カーテングラウチングの規定孔間隔に関する検討(主に5L改良目標値を対象)	
平成15年度	・高透水性地盤の調査方法の事例の検討	・透水性の空間分布を考慮した場合のカーテングラウチングの施工範囲の影響の検討	
平成16年度		・カーテングラウチングのチェック孔の省略可能性に関する検討 ・水みちの確率的評価を用いた透水性の空間的相関およびカーテングラウチングの深部の影響に関する検討	
平成17年度	・ダム基礎岩盤における高透水ゾーンの連続性調査方法の検討	・最終次数孔とチェック孔の改良効果判定の比較とチェック孔の省略可能性の検討 ・透水性と他のデータの相関性の分析	

達成目標①「ダム基礎岩盤の性状に応じた透水性評価手法の提案」については、平成13年度に軟岩・砂礫地盤あるいは高透水性岩盤を対象として透水試験を実施する際の試験方法や評価の留意点をまとめ、ダム基礎岩盤の性状に応じた透水性評価方法として提案した。また、平成15年度および平成17年度には、ダム基礎の透水性を把握する際に重要となる高透水部の性状や連続性に関する調査事例について分析を行い、高透水性地盤の各調査方法の適用性の評価および合理的な調査手法の組み合わせについての検討を実施した。さらに平成17年度には、透水性と他のデータの相関性の検討および透水性がどのような原因に規定されているのかその要因や因果関係を定量的に評価するための検討として、共分散構造分析を用いた透水性に関するデータの相関・因果関係の分析を行った。

達成目標②「ダム基礎岩盤の性状に応じた配合・孔配置等のグラウチングの計画・設計法の提案」については、平成13年度に三次元亀裂網模型を用いて、効果的なグラウト注入に関する実験的な検討を行った。また、グラウチングの施工範囲や改良目標値を緩和した場合の影響について検討するため、平成13年度および平成14年度に浸透流解析による検討を実施した。さらに、透水性のばらつきや上下流方向の浸透特性を評価したうえでグラウチングの施工範囲や改良目標値などの影響を検討するため、平成15年度および平成16年度にモンテカルロシミュレーションを用いた浸透流解析による検討を実施した。また、本研究課題の実施期間中に、実際のダム建

設において、カーテングラウチングの規定2次孔化が進められたことに対応するため、最終規定孔を3次孔から2次孔にした場合の影響を検討するため、平成14年度および平成15年度に既設ダムにおけるカーテングラウチングの実績データの分析を行った。このように、達成目標②については、グラウチングの計画や設計方法に関する検討は本研究課題で最も重要であるため、3つの達成課題の中で達成課題②の研究結果が最も多い結果となっている。

達成目標③「透水性の空間分布を考慮したグラウチングの効果判定法の提案」については、達成目標②の成果と重複するが、透水性の空間的なばらつきを考慮したうえで、グラウチングによる改良効果が上下流方向の浸透にどのような効果を及ぼすのかを、浸透という性能を評価することからグラウチングの効果を評価する方法を提案し、平成15年度および平成16年度にモンテカルロシミュレーションを用いた浸透流解析による検討を実施した。前述の通り近年は規定2次孔化が進んでいること、また、追加孔の合理化などにより以前より施工数が全体的に減少していることを考慮すると、以前よりも高透水部が残される可能性が大きくなっていると予想され、高透水部が残された場合の浸透や安全性について、透水性の空間的なばらつきや上下流方向の浸透を考慮したうえで評価する必要があると考えており、平成15年度および平成16年度に実施したモンテカルロシミュレーションを用いた浸透流解析による検討のような手法が、今後グラウチングの効果判定にも役立つものと考えている。

平成17年度実施したチェック孔省略に関する検討は、サンプリング検査としてダブルチェックの意味合いがあるチェック孔の省略可能性について検討したものである。検討においては、既設9ダムのデータを用い、地質や亀裂の方向性、初期透水性、改良効果等、それらの空間的な分布を考慮したうえで、チェック孔の省略可能性につ

いて検討を行った。検討結果では、対象としたダムにおいては、最終次数孔による評価でも透水性の空間的なばらつきやグラウチングの改良効果を十分に評価できる場合が多く、チェック孔を省略できる可能性があるとの結論となった。

平成17年度実施した透水性と他物性のデータの相関の検討は、透水性の推定のみならず、グラウチングの設計や改良効果への判定など、他への発展が期待できる。つまり、本報告第3章の手法を用いて、様々なデータを有機的に活用して、ダム軸方向だけでなく上下流方向にも広範に透水性を精度よく推定することが可能になれば、平成15年度あるいは16年度に報告した確率論的浸透流解析の手法と融合させることにより、透水性の空間的なばらつきや上下流方向の浸透を考慮して、グラウチングの合理的な改良範囲や改良効果を評価することが可能となる。

参考文献

- 1) (財)国土技術研究センター編集：グラウチング技術指針・同解説、大成出版社、2003。
- 2) 佐藤弘行・山口嘉一：主透水経路の形成過程を考慮したブランクセットグラウチング効果の合理的評価、ダム技術、No. 174、pp. 24-31、2001。
- 3) 山口嘉一・佐藤弘行・阿部智彦：最終次数孔とチェック孔によるカーテングラウチングの改良効果判定の比較、第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp. 429-434、2005。
- 4) 松本徳久・山口嘉一・弘末文紀：ルジオンテストの各種境界条件下での精度と結果の解釈、土木研究所資料、第2518号、1987。
- 5) 朝野熙彦・鈴木督久・小島隆矢：入門共分散構造分析の実際、講談社、2005。