

◆ ダム分野における新技術特集 ◆

注入形態に着目した弾性波トモグラフィーによる グラウチング効果の判定

山口嘉一* 山本重樹** 今林 豊*** 石川浩行****

1. はじめに

調査対象地盤において弾性波探査や電気探査といった物理探査を密に実施し、その測定値から物理量分布を画像化するジオトモグラフィー技術のダム基礎グラウチングによる遮水性改良効果判定への適用性が検討されている^{1)~3)}。透水性を指標とした直接的な評価ではなく、他の物理量を指標とした間接的な評価ではあるが、ジオトモグラフィーのグラウチング効果判定への適用性が確認できれば、この技術を透水試験などの従来判定方法と適切に組み合わせることによりグラウチング効果判定の高度化・合理化が図れる可能性がある。しかし、既往の研究^{1)~3)}では、ジオトモグラフィーの結果については、グラウチング前後での物理量分布の定性的変化を中心に考察するにとどまり、グラウチングの注入形態を考慮した結果の定量的分析はなされていない。

以上のような現状に鑑み、石英安山岩で構成される亀裂性岩盤における試験グラウチングと併せてジオトモグラフィーのひとつである弾性波トモグラフィーを実施した。結果については、既往の研究と同様、グラウチングによる弾性波速度分布の変化のほか、これと透水性変化の定量的関係をグラウチングの注入形態を考慮して総合的に分析し、弾性波トモグラフィーのグラウチング効果判定方法としての適用性および今後の課題について検討する。

2. 試験サイトの地質

試験サイトの地質は、新第三紀中新世の石英安山岩である。岩盤は、全体的に硬質緻密であり、後述する試験サイトのグラウチング孔における採取コアを観察した結果では、全体の約86%がCM

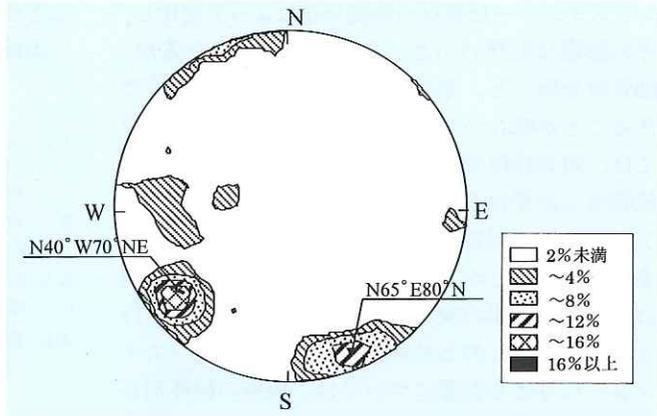


図-1 亀裂シュミットネット下半球投影

表-1 岩石の平均的な物性

岩級区分	絶乾比重	吸水率 (%)	有効間隙率 (%)	一軸圧縮強さ (MN/m ²)	弾性波速度 (km/s)	
					P波速度	S波速度
CL	2.262	5.57	12.47	6.60	1.68	0.73
CM	2.318	4.63	10.57	15.17	2.22	0.99
CH	2.337	4.38	9.97	20.03	2.86	1.32

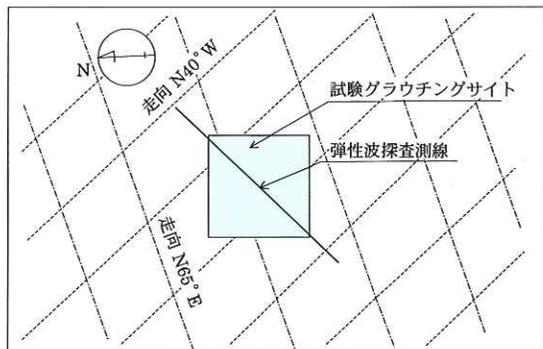


図-2 試験サイトと卓越亀裂走向との平面的位置関係と模式級、約4%がCH級、残りの10%はCL級またはD級である。D級以外の各岩級の岩石の平均的な物性を表-1に示す。

図-1の亀裂の方向分布を表すシュミットネット下半球投影に示すように、対象岩盤の亀裂はN40° W70° NE および N65° E80° N に集中している。これらの卓越亀裂群の走向と試験サイトの平面的な位置関係の模式を図-2に示す。

Evaluation of Grouting Effect with Seismic Tomography Considering Grouting Mechanism

3. 試験グラウチングと弾性波トモグラフィの方法

(1) 試験グラウチング

試験グラウチングは、図-3 に示すような孔配置および深度で、中央内挿法にしたがって実施した。図中の孔番の最初の数字は注入次数を、またその後の数字は同次数孔の施工順序を示す。岩盤掘削面には予め最低 20cm 厚のカバーコンクリートを打設し、注入区間より上位の 2m 厚のカバーロックにはスラッシュグラウチングを実施した。以後、カバーコンクリートの最下面を試験サイトの深度方向の基準面 GL-0.0m とする。削孔はロータリー式ボーリング工法により、岩盤の亀裂およびセメントグラウトの充填状況を観察するため、孔径 66mm で全孔コア採取した。注入仕様の詳細は、表-2 に示すとおりである。透水試験としては、一般的な 5m 長の各ステージのグラウト注入前に、ルジオンテストを「ルジオンテスト技術指針」⁴⁾ に準拠して実施し、ルジオン値を透水性指標として求めた。また、透水試験およびグラウチング時の岩盤変位を監視するため、岩盤変位計を図-3 (a) に示す 2 箇所に設置した。なお、岩盤変位計の不動点の深度は、注入区間最下端より 5m 深い位置とした。孔内水位から推定される地下水位は、第 2 ステージと第 3 ステージの境界部付近 GL-12~13m に存在していた。

(2) 弾性波トモグラフィ

弾性波探査はグラウチング開始前、2 次孔施工後 3 日目、全施工終了後 (4 次孔施工後 9 日目) の 3 回、図-3 中の K-1、K-2 孔を結ぶ測線上で実施した。具体的には、K-2 孔内および地表の基準面に 1m 間隔で配置した発振点でそれぞれ発破あるいはかけやにより発生させた地震波を、地表および K-1 孔内に 1m おきに配した受振器で受振した。K-1、K-2 孔の掘削長は 22m、両孔間距離は 11m で、測定点総数は 56 である。なお、ここでの弾性波速度とは P 波速度のことである。

表-2 試験グラウチングの仕様

注入方法	ステージ方式 (5m×3ステージ)					
注入材料	普通ポルトランドセメント (C)+水 (W)					
ルジオンテスト	ステージ	第 1	第 2	第 3		
	最大圧力 (kPa)	294	490	980		
規定注入圧力	ステージ	第 1	第 2	第 3		
	規定注入圧力 (kPa)	294	490	980		
規定注入速度	20ℓ/min/ステージ (4ℓ/min/m)					
配合切替基準	配合 (W/C)	8	6	4	2	1
	注入量 (ℓ)	400	400	400	400	1600
注入開始配合 $Lu < 20 \rightarrow W/C = 8$ $Lu \geq 20 \rightarrow W/C = 4$ ここに、 Lu はルジオン値						
注入終了基準	規定注入圧力で注入速度が 1ℓ/min/ステージ以下となつてから、30 分間注入を継続し、注入速度の増加がない場合					

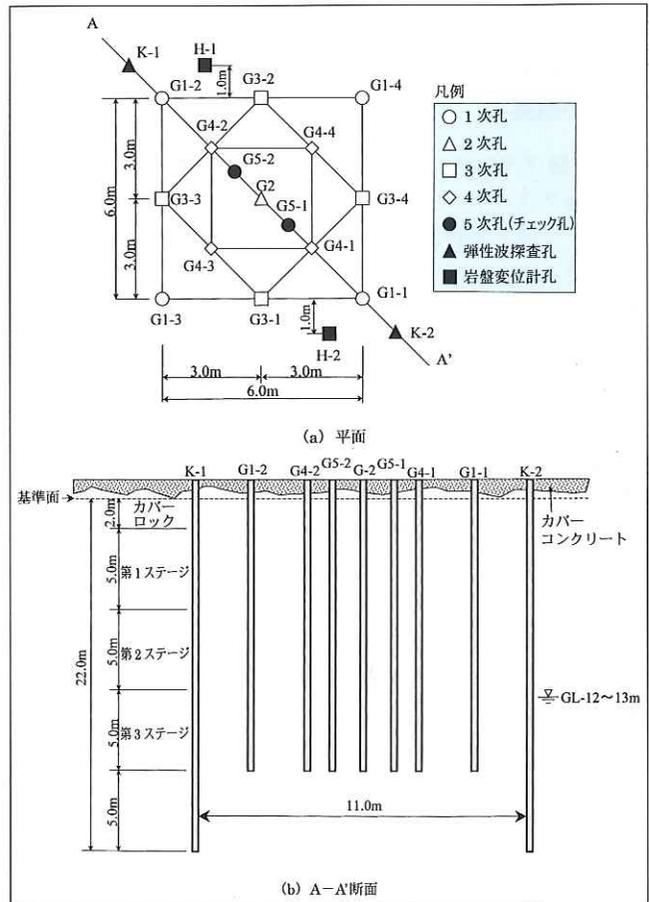
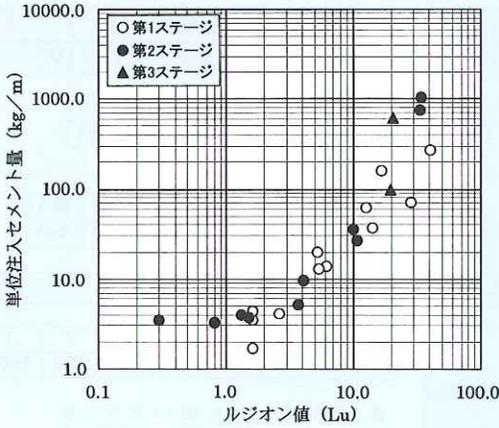
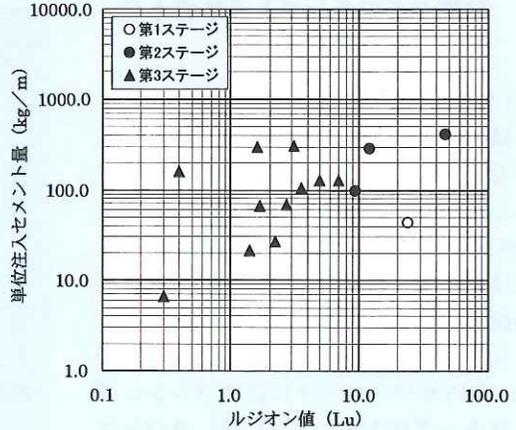


図-3 試験グラウチングの孔配置および深度

探査結果の解析は対象岩盤の測定点で囲まれる領域を 1m × 1m の 242 個の単位ブロックに分割して弾性波の理論走時が観測走時に近づくように



(a) 限界圧力が発生しない場合



(b) 限界圧力が発生した場合

図-4 ルジオン値と単位注入セメントの関係

くり返し計算を行い、最終的な弾性波速度分布を求めた。

4. 試験グラウチングと弾性波トモグラフィーの結果

(1) 試験グラウチング

試験グラウチングでは、注入次数の進行に伴うルジオン値と単位注入セメント量の明瞭な低減傾向が読み取れ、注入による岩盤の遮水性改良効果は十分であったと判断された。

図-4 に全グラウチングステージを透水試験時に限界圧力が現れた場合と現れなかった場合に別けてルジオン値と単位注入セメント量の関係を整理したものを示す。また、図-5 にグラウト注入時に2点で計測した最大岩盤変位のうち大きい方の値をステージごとに整理した頻度分布を示す。

透水試験時の限界圧力の発生ステージ数は、第1、2ステージで少なく、第3ステージで非常に多い。限界圧力が発生していない場合、ルジオン値と単位注入セメント量の相関は高い(相関係数0.918)。また、第1、2ステージにおける注入時の最大岩盤変位は、ほとんどの場合が0.1mm以下と小さい。なお、表-2に示すように、ルジオンテストの最大注入圧力とグラウト注入時の規定圧力は等しいため、ルジオンテスト時に限界圧力が発生しない場合はグラウチング時にも限界圧力は発生しなかった。したがって、第1、2ステージの注入形態は、既存亀裂をあまり大きく押し広げずにセメントグラウトを亀裂内に充填したものと考えられる。

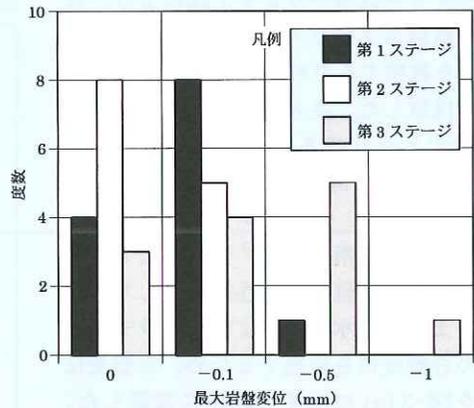


図-5 最大岩盤変位の頻度分布

一方、透水試験時に限界圧力が発生した場合、ルジオン値と単位注入セメント量の相関は、限界圧力が発生しない場合よりもかなり低くなっている(相関係数0.484)とともに、同ルジオン値における単位注入セメント量は、限界圧力が発生しない場合よりも多くなっている。また、第3ステージ注入時の最大岩盤変位は、0.1mm以上というステージがかなりある。したがって、第3ステージの注入形態は、既存亀裂を若干押し広げるかあるいは新たな亀裂を発生させてセメントグラウトを充填したものと考えられる。第1、2ステージでは限界圧力以下の注入圧力による注入でも十分な遮水性改良効果が得られたことから判断すると、第3ステージの注入圧力は適切な注入圧力より過大であったと考えられる。

(2) 弾性波トモグラフィー

各回の探査結果の解析から得た弾性波速度コン

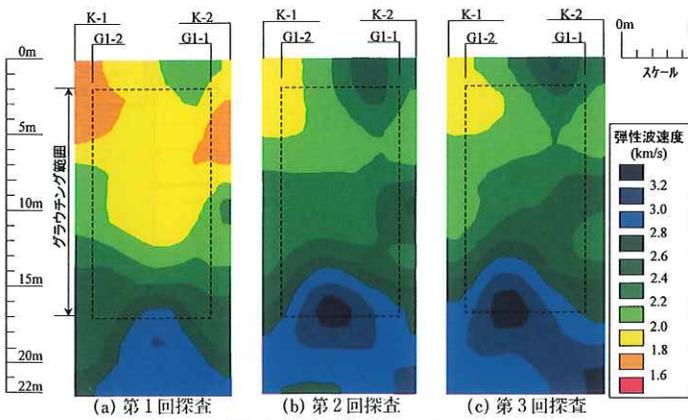


図-6 弾性波速度コンター

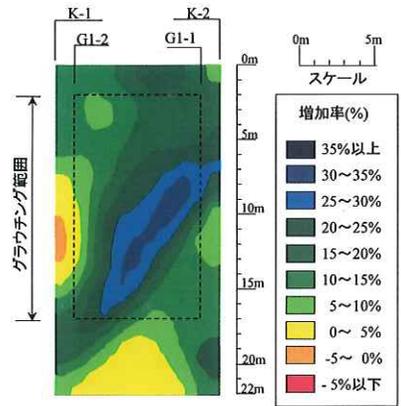


図-7 第3回探査の第1回探査に対する弾性波速度増加率コンター

ターを図-6に示す。この図より、グラウチング前に実施した第1回探査から得られた弾性波速度に比べて、2次孔施工後に実施した第2回探査から得られた弾性波速度は探査領域全域にわたって大きくなっていることがわかる。しかし、グラウチング全施工後に実施した第3回探査では、第2回探査に比べて弾性波速度は若干上昇しているが全体的な分布に大きな変化は見られない。図-7に第1回探査の弾性波速度に対する第3回探査のその増加率コンターを示す。この図より、増加率コンターが右上から左下に傾斜していることがわかる。この傾斜は、試験サイトに発達した卓越亀裂群のうちN40°W70°NEの亀裂群と弾性波探査断面との交線の傾斜に概ね一致している。このことから、今回の試験グラウチングでは、主に既存亀裂内にグラウトが充填されることにより岩盤の遮水性が改良されたことが予想される。なお、もう1つの卓越亀裂群N65°E80°Nの存在が増加率コンターの傾斜に影響を及ぼさなかったのは、この卓越亀裂群と弾性波探査断面との交差角が比較的低角度であることに加えて、図-1に示すように亀裂の集中度がN40°W70°NEより若干低いことがあげられる。

図-8に弾性波速度の深度方向分布を示す。なお、図中では解析単位ブロックの深さ方向の1辺の長さである1mごとの平均値と注入ステージ深度区間(5m)ごとの平均値を示している。この図より、探査実施時期によらず、平均弾性波速度は深度方向に増加していることがわかる。前述したように、グラウチング対象領域の岩盤の大部分が

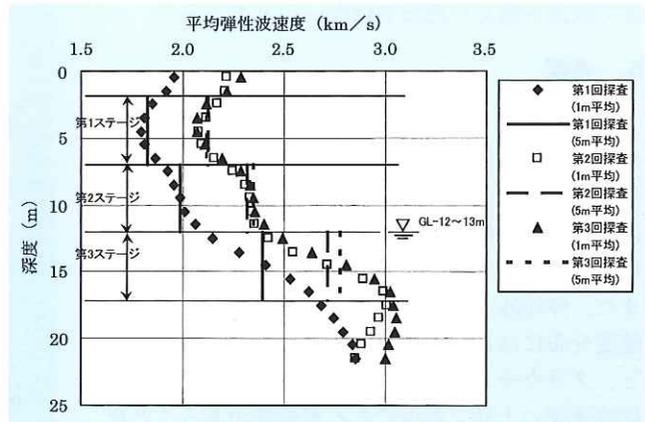


図-8 弾性波速度の深度方向分布

深度によらず CM 級の岩盤であることから、平均弾性波速度の深度方向の増加は、拘束圧の影響を受けているのではないかと考える⁵⁾。しかし、第1回探査結果を詳細にみると、グラウチング注入区間の第3ステージの平均弾性波速度が第1、2ステージに比べてかなり大きくなっている。これは、弾性波速度の拘束圧依存性のほかに、第2と第3ステージの深度境界付近に地下水位が存在していたことにもよると考える。さらに、図-8からも、第2回探査では第1回探査よりかなり弾性波速度が増加しているが、第2回探査と第3回探査では弾性波速度はあまり変化していないことがわかる。ただし、第3ステージより深部については、第3回探査における弾性波速度の上昇が見られる。これは、弾性波探査の領域の下部付近で速度測定波線密度が他の領域に比べて粗になっていることによる解析精度の低下が原因とも考えられるが、4次孔のうち、弾性波探査の測線上のG4-1、G4-2孔の第3ステージのセメント注入量が比較

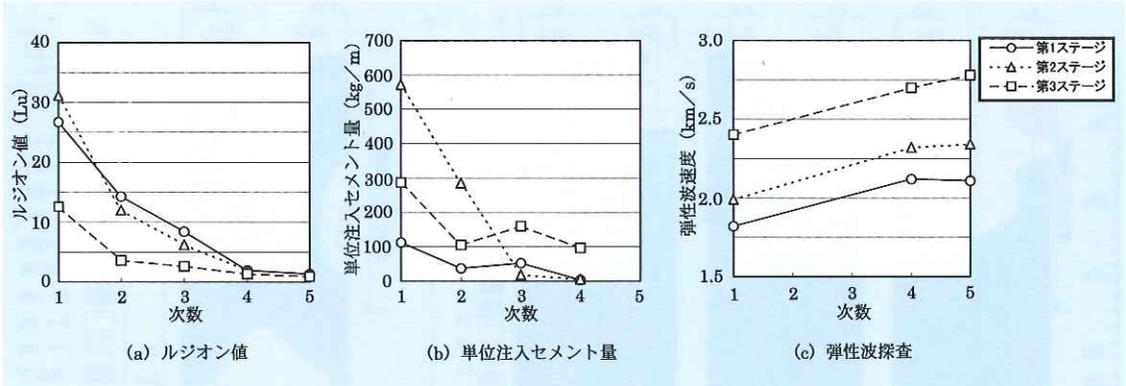


図-9 ルジオン値、単位注入セメント量および弾性波速度の次数推移

的多かったことから、第3ステージから下部の
まで改良が進んだためではないかと考える。

5. 考察

試験グラウチングの結果から、第1、2ステ
ージの注入形態は岩盤の既存亀裂を押し拡げないグ
ラウト充填であること、第3ステージの注入形態
は岩盤の既存亀裂の押し拡げあるいは新たな亀裂
を形成してのグラウト充填であることを示した。
また、弾性波トモグラフィーの結果から、弾性波
速度分布には岩盤の拘束圧依存性が認められるこ
と、グラウチングの次数を追っての改良効果を弾
性波速度の上昇で表現できる可能性があることを
示した。

ここでは、これらの成果を踏まえて弾性波ト
モグラフィーによるグラウチング遮水性改良効
果の定量評価の可能性について検討する。まず、
図-9(a)、(b)に、ステージごとの平均ルジオン
値および平均単位注入セメント量の次数推移を、
図-9(c)に、ステージ対象深度区間における解析
単位ブロックの平均弾性波速度値の次数推移を
示す。なお、弾性波トモグラフィー実施断面にお
いては、2次孔までの注入効果は、3次孔が対象断
面内にないため、対象断面内にある4次孔の注入
開始前のルジオンテストによって評価されていると
考え、図-9(c)では、第1、2、3回の弾性波探
査結果をそれぞれ1、4、5次孔に対応させている。
全体としては、ルジオン値および単位注入セメン
ト量は次数とともに減少し、一方、弾性波速度は
次数とともに増加している。これらの次数推移は、
いずれも岩盤の亀裂がグラウトで徐々に充填され
た結果を反映している点で一致している。特に、
透水性の低減の4次孔以降での収束傾向が弾性波

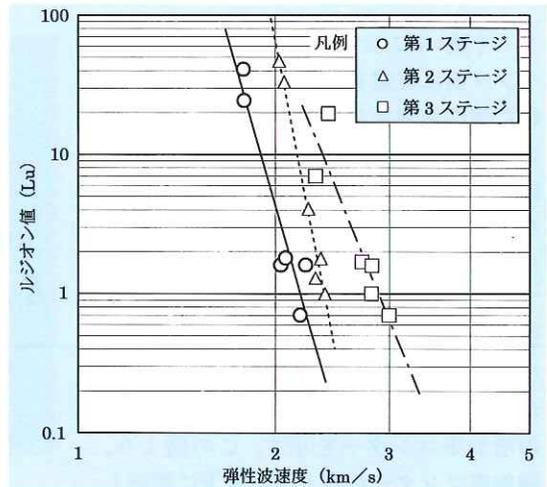


図-10 ルジオン値と弾性波速度の関係

速度の上昇の収束傾向とほぼ対応し、両者の相関
の高さがうかがえる。

次に、図-10に弾性波速度とルジオン値の相関
を各ステージごとに示す。なお、各ルジオン値に
対応する弾性波速度は、同次数の弾性波速度探査
結果のうち、鉛直方向についてはルジオンテスト
ステージに対応する5単位ブロック(5m)分、水
平方向には孔軸を含む単位ブロックを中心に3
単位ブロック分の計15ブロックの平均として求め
た。また、今回の弾性波トモグラフィーの結果に
は弾性波速度の拘束圧依存性や地下水条件による
影響が見られたので、両者の関係はステージご
とに整理した。この図より、ステージごとの弾性
波速度とルジオン値の間には、比較的良好な負の
相関が認められる。さらに、地下水条件と注入形
態が異なる第1と第2ステージのデータと第3ス
テージのデータの2つのグループに大別できそう
である。したがって、今回対象とした岩盤におい

ては、弾性波速度の拘束圧依存性、地下水条件、グラウチング形態を考慮しておけば、岩盤の弾性波速度から岩盤の透水性をある程度定量的に推定できるものとする。ただし、厳密な定量的評価には、注入されるグラウトの水セメント比が一定でないこと、注入されたグラウトは主に注入後の時間経過による間隙水圧の消散にともなう岩盤内有効応力の増加による脱水で密度が上昇する⁶⁾⁻⁹⁾こと、また弾性波探査時にはグラウトの材齢が次数、ステージごとに異なることなどが、亀裂内に充填され、固化したグラウトの弾性波速度に与える影響についても検討する必要がある。

6. おわりに

石英安山岩で構成される亀裂性岩盤における試験グラウチングと併せて弾性波トモグラフィーを実施し、そのグラウチングによる遮水性改良効果判定方法としての適用性を検討した。

- (1) ルジオン試験時の限界圧力の発生状況、ルジオン値とセメント注入量の関係、グラウチング時の岩盤変位状況からグラウトの注入形態がおおむね推定できた。
- (2) グ라우チングによる改良の進行を弾性波トモグラフィーの結果として得た弾性波速度の上昇としてとらえることができた。
- (3) 弾性波速度とルジオン値には比較的良好な相関が認められ、弾性波トモグラフィーを用いたグラウチングによる遮水性改良効果の定量評価の可能性が高いことがわかった。ただし、厳密な定量評価には注入形態、固化グラウトの特性、弾性波速度の拘束圧依存性や地下水条件を併せて検討する必要がある。

参考文献

- 1) 蓮井昭則、稲葉秀雄、結城則行、中川浩二：孔間弾性波・電磁波測定によるグラウチング効果の判定について、ダム工学, No.8, pp.35-44, 1992年12月。
- 2) 川上俊器、中江兼二、山田啓一、永山功、片平博、首藤美誠：ジオトモグラフィと原位置岩盤変形試験によるグラウチング効果の判定、第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.337-342, 1994年1月。
- 3) 建設省：官民連帯研究「新地盤探査技術の開発」報告書, 71p., 1995年3月。
- 4) 建設省河川局開発課監修：ルジオンテスト技術指針・同解説, (財)国土開発技術研究センター, 56p., 1984年6月。
- 5) 船戸明雄、荘司泰敬、大橋武一郎：拘束圧下での岩石の超音波速度測定、第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.211-216, 1987年12月。
- 6) Ewert, F. K. : Rock Grouting with Emphasis on Dam Sites, Springer-Verlag, pp.120-129, 1985.
- 7) International Society for Rock Mechanics, Commission on Rock Grouting : Final Report, 51p., 1995.
- 8) Combefort, H. (齊藤二郎・福住隆二共訳)：地盤注入《基本理論と施工技術》, 鹿島出版会, pp.59-63, pp.94-102, 1969年。
- 9) Houlsby, A. C. : Optimum Water: Cement Ratios for Rock Grouting, Proc. Conf. Grouting in Geotechnical Engineering, ASCE, pp.317-331, 1982.

山口嘉一*



建設省土木研究所ダム部
フィルダム研究室長,
工博
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI

山本重樹**



同 フィルダム研究室
研究員
Shigeki YAMAMOTO

今林 豊***



九州地方建設局
嘉瀬川ダム工事事務所
(前 フィルダム研究室
研究員)
Yutaka IMABAYASHI

石川浩行****



(前 フィルダム研究室
交流研究員)
Hiroyuki ISHIKAWA