ダムグラウチングによる岩盤改良の評価方法に関する考察†

猪狩 哲夫* 菊地 宏吉** 水戸 義忠**

Study on Improvement of Dam Foundation by Grouting Treatment

by

Tetsuo IGARI*, Kohkichi KIKUCHI** and Yoshitada MITO**

The purpose of consolidation grouting for dam foundation is to improve the permeability and mechanical properties of rock masses. For permeability, the grouting effect is usually confirmed by the permeability test at check holes. But for the change of mechanical properties, it has been difficult of confirmation. So, the mechanical improvement of foundation by grouting, like the changes of elasticity and strength, has not been considered in dam foundation design. In this study, an in situ experiment has been made in order to examine the grouting effect on mechanical properties of rock masses. The testing yard where the experiment was performed was 10m square, and 13 boreholes for grouting, divided into four (4) stages, were laid out. These boreholes had the length of 7 m each, and the injection material was cement mixed with water. The experiments mainly consisted of elastic wave prediction and borehole expansion tests. As the results, the followings were obtained.

- (1) The change of distribution of elastic wave velocity by grouting represents the uniformity of rock masses.
- (2) Grouting can improve the deformability of rock masses.
- (3) For more deformable rock masses before grouting, the more mechanical improvement is achieved.
- (4) The reological model can be used to explain the grouting effect. By this model, the experiment results of poor rock masses, which have lower mechanical properties, can be well expressed.

Key words: Dams, Foundations, Rock masses, Grouting, Mechanical property, Deformation,

1 緒 言

近年のダム建設地点は地質の良好な箇所が減少し、不良な基礎地盤に計画・立地される例が多くなってきた。このため基礎処理の役割もさらに重要となってきた。

コンクリートダムを対象としたグラウチングには、止水を目的としたカーテングラウチングと、ダム基礎の強度や変形性を改良し均質性の向上を目的としたコンソリデーショングラウチング¹⁾に大別される。

このうちコンソリデーショングラウチングによる効果の評価方法は、一般に透水性の変化、すなわち透水係数やルジオン値の減少によって把握しているのが現状である。この透水性の変化のメカニズムは、ダム基礎掘削中に生じた岩盤中のき裂や初生的に存在する岩盤の割れ目にセメントが充填されたことにより、透水流路が閉塞することによるものである。

一方、コンソリデーショングラウチングの主目的が基礎岩盤の強度や変形性の改良である以上、これを力学的な指標で評価することは重要なことである。しかし、グラウチングが実際のダム基礎岩盤の力学特性に及ぼす影響については、グラウト材の注入範囲が対象地質によって多様な形態をとること、また岩盤の改良体としての定量的な把握が難しいことなどの理由から、この効果を設計上評価していないのが現状である。

このような背景の中、従来の研究事例としては、松本

ら(1988)²⁾は、フィルダムの変形予測において実測値が予測値に比べて非常に小さくなることを指摘し、その一つの理由として解析によって得られた予測値にグラウチングによる地盤の弾性係数の増加を考慮していないことを挙げており、定性的にグラウチングによる岩盤の力学的改良効果を予想している。また現場実験に基づく研究例では、増田(1962)³⁾は、有峰ダムにおいてグラウチング前後で弾性波探査を実施し、弾性波伝ば速度の上昇を確認した。さらにグラウチング前の弾性波速度が低いほどグラウチングによる増加量は大きく、この速度値の上昇を岩盤等級の上昇と位置づけた。飯田(1978)⁴⁾は、天ヶ瀬ダムにおいて、グラウチング前後で平板載荷試験を実施し岩盤の変形性の改良度合いを検討した。その結果変形係数の上昇を確認し、グラウチング後の変形係数は、グラウチング前の静弾性係数に近い数値になることを示している。

菊地(1996)⁵⁾は、比較的簡易でかつ直接的に岩盤の変形性を評価できる孔内載荷試験機を用いて、多くのダムサイトにおいてグラウチング前後の岩盤の力学特性の変化を測定しデータを集積した。その結果よりグラウチングによる岩盤の力学的改良効果を、①変形性や強度の増加(固密化)②変形性や強度のばらつきの減少(均質化)③岩盤中の不連続面が改良されより連続体に近づく(一体化)であることを示している。

† 原稿受理 平成9年8月11日 Received Aug. 11, 1997

* (株)間組土木本部 〒107-0061 東京都港区北青山, Civil Eng. Dept., HAZAMA CORPORATION, Minato-ku, Tokyo, 107-0061

** 正会員 京都大学大学院工学研究科資源工学専攻 〒606-8501, 京都市左京区吉田本町, Dept. of Mineral Sci. and Tech., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501

これらの実例においては、グラウチング前の無処理の状態とある注入基準に従って改良を行った後の比較による結果論的な評価となっているため、注入による岩盤物性の改良・変化の過程が明瞭ではなかった。

このような背景から、筆者らはグラウチングによる岩盤物性の变化のメカニズムとその定量的な把握について研究している。

本論文は、あるダムサイトにおいてグラウチング試験を行い、注入回数ごとの弾性波速度の変化および力学的な変形特性の変化を測定することにより、岩盤の固密化・均質化の過程を考察したものである。

2 グ라우チング試験

2.1 試験の概要

京都府中部に位置する治水ダムにおいて、一辺 10m の正方形の試験ヤードを設定し、Fig. 1 に示すように中間内挿法に従ってコンソリデーショングラウチング孔（孔径 66mm）を配置した。ボーリング孔の深度は、地表より 2m をグラウトカバーとしてそれ以深 GL-2m から GL-7m までの 5m を試験区間とした。

ボーリングはすべてコア採取とし、試験区間の地質状況把握に努めた。その結果、試験ヤードを構成する地質は、中生代の丹波層群に属する砂岩・珪質粘板岩互層であり、ボーリングコア観察の結果から判断される試験ヤードの全体的な岩質は、CH 級 42%、CM 級 29%、CL 級以下 29% となっている。また岩盤のき裂頻度を示す指標である RQD（コア 1m の中に占める 10cm 以上のコア長の総和）は平均で 42% であった。なお地下水位はすべての孔で認められなかった。

2.2 孔間弾性波探査の方法

この試験ヤードにおいて、初期状態、1 次孔注入後、2 次孔注入後、3 次孔注入後、4 次孔注入後の 5 段階において孔間弾性波探査を行った。試験に用いた孔間弾性波探査機は、発信を 1~20 Hz の高周波でボーリング孔壁を打撃し、受信孔中に挿入した高感度地震計で受信するものである。試験機のブロック図を Fig. 2 に示す。

孔間弾性波探査は、2-1 孔を発信孔、1-1 孔~1-4 孔をそれぞれ受信孔とし合計 4 断面で実施した。また深度方向は、Fig. 3 に示すように GL-2m 以深 50cm 間隔で送受信点を移動させ、1 回あたり 1 断面 55 測線の測定を実施した。

Fig. 1. Layout of grouting holes (Plan).

Fig. 2. Block diagram of tomographic Technique.

Fig. 3. Tomographic scan line.

2.3 孔内载荷試験の方法

孔内载荷試験は、载荷方式によって等圧分布载荷法と等変位载荷法があるが、今回の試験においては等圧分布载荷法を採用した。

各孔における载荷位置は、载荷部（载荷長 52cm）の中心部の深度が GL-2.5m から 1m 間隔で GL-6.5m までの 5 ヶ所/孔において試験を実施した。载荷方法は、荷重を岩盤の降伏荷重まで段階的に増加させていくものとし、その载荷速度は $0.5\text{MPa}/\text{cm}^2/\text{min}$ とした。⁶⁾さらに载荷载荷後と除荷までの間に 1 分間の持続荷重区間を設けた。

試験結果で得られる荷重—変位曲線の処女曲線の包絡線、および最終荷重曲線の接線勾配を用いてそれぞれ変形係数、接線弾性係数（静弾性係数）を式 (1) より求めた。

$$E = (1 + \nu) R_m \frac{\Delta p}{\Delta r} \quad (1)$$

ここで E : 変形係数, 接線弾性係数

ν : ポアソン比

$\Delta p / \Delta r$: 荷重—変位曲線の勾配

R_m : 载荷状態時の孔径

を示している。

2.4 グ라우チングの方法

グラウチングの注入仕様は、当該ダムの施工基準に従

い以下のような方法で実施した。

注入時の1ステージ長は5mとし、注入材は高炉セメントB種を用いた。水押し試験から得られるルジオン値をもとに注入開始濃度を決定し順次配合を切り替えた。注入速度は4ℓ/min./mを、注入圧力は0.3MPa/cm²をそれぞれ上限とした。規定注入圧において注入量が1ℓ/min./m以下の状態が30分以上継続した場合に注入完了とした。注入後セメントミルクの硬化を待って、2～3日後に各種実験を実施した。注入結果をTable Iに示す。

Table I. Results of Injection.

Primary holes			Secondary hole		
Nos.	Lu-Value	*Cement Inj.	Nos.	Lu-Value	Cement Inj.
1-1	19.81	150.7	2-1	1.14	0.8
1-2	20.82	88.6			
1-3	4.96	5.3			
1-4	26.18	179.6			
Tertiary holes			Quaternary holes		
Nos.	Lu-Value	Cement Inj.	Nos.	Lu-Value	Cement Inj.
3-1	8.87	73.8	4-1	1.96	7.9
3-2	3.3	9.3	4-2	8.51	21.9
3-3	14.64	26	4-3	28.47	127.4
3-4	13.31	19.6	4-4	1.29	6.1

*Cement Inj.: Cement Injection Volume(kg/m)

3 試験結果およびその評価

3・1 孔間弾性波探査の結果

Fig. 4は、平行測線（受発信点が同一深度）での各次数ごとの弾性波速度値を示したものである。これは1-4孔と2-1孔間のデータである。この図より以下のことがわかる。

- ① 1次孔注入後の速度の増加量が2次孔注入以降に比べて大きい。
 - ② 3m以深において速度値の上昇が顕著である。
 - ③ 4m以深においては、2次孔以降深度が増すにつれて弾性波速度値も順次上昇する傾向が認められる。
- これらのことは、岩盤の密度の上昇すなわち固密化する傾向を示しているものと考えられる。

Fig. 4と同じ断面での全測線における弾性波速度値の分布傾向を示したものがFig. 5である。この箱髭グラフは初期状態および各次数における速度値の最大値、平均値、最小値、さらに平均値±標準偏差を表現したものである。ややばらつきはあるものの、全体的な傾向として1次孔注入後以降平均値が上昇し、かつその分散が小さくなっている。これは1, 2次孔時に岩盤中の大きなき裂にセメントミルクが充填されることにより、大きく岩盤が改良され、岩盤の固密化とともに均質化していることを示唆している。

また、同図で4次孔注入後の平均値±標準偏差の分布範囲に拡大傾向が認められる。これは、3次孔注入後までは順次速度値が上昇しその分散も減少する傾向を示していたものが、4次孔後において速度が減少するものが

Fig. 4. The change of elastic wave velocity (at the same depth of sending and catching sonde between hole No. 2-1 and 1-4).

Fig. 5. The change of elastic wave velocity with injection stages (1: before injection 2: after primary injection 3: after secondary injection 4: after tertiary injection 5: after quaternary injection).

増えたことに起因しており、注入次数を増やしても速度値が単調に上昇しないことを意味している。この傾向は、Fig. 4における深度2～4m区間の最終次数側などでも認められており、これは弾性波速度の上昇限界、換言すれば岩盤の改良限界に近づいていることが推察される。

試験区間のすべての断面において、初期状態の弾性波速度 V_{p0} と n 次孔注入後の弾性波速度値 V_{pn} の比を「弾性波速度改良比」(V_{pn}/V_{p0}) と定義し、初期状態の弾性波速度値 V_{p0} と比較したものを、Fig. 6 (a) (b) に示す。(a) は2次孔注入後、(b) は4次孔注入後である。

この図より、初期状態の弾性波速度値が低い (2km/s 付近以下) ほど弾性波速度改良比が大きくなっており、これは初期状態の岩質が不良なもののほど、改良効果が大

Fig. 6. Improvement of elastic wave velocity as injection stages.

きいことを示している。また (a), (b) の両図を比較すると、データの上限値は右上方向に広がっており、岩盤の固密化が進んでいるものと考えられる。

その反面、全体的なばらつきも大きくなっているほか、改良比が 1 を下回る、すなわち初期状態の弾性波速度よりも注入後のそれが低下するようなデータが増えている。これは、孔間弾性波速度測定時の精度的な問題点も考えられるが、そのほかに前節で言及したように、グラウチングにより岩盤の改良限界に近づき、平均的には岩盤は改良されるものの、一部で 2 次的にき裂が開口する現象が予想される。

3・2 孔内载荷試験の結果

Fig. 7 (a), (b) は、孔内载荷試験で得られた注入前の初期状態の変形係数と 4 次孔注入後の変形係数を度数分布で示したものである。注入前 (a) では、変形係数で 320MPa (対数表示で 3.5) 付近に最頻値はあるものの分布はばらついているのに対し、注入後 (b) では変形係数の低い部分が消えて、高い領域に移行しかつ集中度も上昇していることがわかる。このことは、注入により岩盤中の節理やゆるみなどの空隙が充填され、固密化・均質化されていることを示しているもの判断される。

また注入前後の岩盤の変形特性の変化を簡々に比較したものが Fig. 8 (a), (b) である。これは注入前後の同一試験箇所計測された変形係数と接線弾性係数の対応を示したものである。

また Fig. 9 (a), (b) は、Fig. 6 と同じ方法で注入前の変形係数・接線弾性係数に対する注入後の値の比をそれぞれの改良比とし、これを注入前の値と比較したものである。

これらの図より、初期状態の各係数が概ね 1000MPa より小さい岩盤において等値線より上に移行、すなわち

Fig. 7. Frequency distribution of modulus of deformation before and after injection.

Fig. 8. Relation between before and after injection.

改良度合いが大きくなり、初期状態で 1000MPa よりも大きい岩盤では注入による顕著な力学的改良効果は期待できないと考えられる。

4 力学モデルによる検討

岩盤の変形性は、大きく分けて岩盤基質部分の硬軟による変形と節理など不連続面の開口・閉合による変形の合成と考えられる。ここで Fig. 10 (a) に示すような岩盤基質部と節理をバネに置き換えた、簡単な岩盤モデルを

Fig. 9. Relation between each modulus and their ratio of improvement.

考える。

岩盤基質部の弾性係数を E_R 、節理の剛性を k_n とし、節理密度（単位長さあたりに分布する節理の個数）を I とすると、グラウティング前の岩盤の弾性係数 E_B は式 (2) のように与えられる。⁷⁾

$$\frac{1}{E_B} = \frac{1}{E_R} + \frac{1}{k_n} \quad (2)$$

同様にグラウティング後の岩盤モデルとして Fig. 10 (b) に示すモデルを考える。このモデルでは、グラウト材のバネが節理群全体のバネに並列に連結している。すなわちグラウト材が節理等不連続面の变形性に対して与える効果は、個々の節理に作用するものではなく、節理群全体に作用するものと考えている。

グラウト材料が節理群全体の变形特性に対して与える改良効果の弾性係数を E_G とすると、グラウティング後の岩盤の弾性係数 E_A は式 (3) で表される。⁸⁾

Fig. 10. Mechanical models of rock masses.

$$\frac{1}{E_A} = \frac{1}{E_R} + \frac{1}{k_n/I + E_G} \quad (3)$$

式 (2), (3) を用いて、 k_n/I を媒介変数として E_B と E_A 関係を求めると、Fig. 11 に示すような理論曲線が得られる。この際、グラウト材による変形係数 E_G はグラウティング前後の弾性係数の値をもとに最小二乗法近似によって 500MPa、 E_R は本来理想的な岩盤を指すため、その物理量は定かではないが、ダム基礎岩盤の岩盤等級の物理定数の例⁹⁾を参考に便宜的に 10 000MPa と設定した。

Fig. 11. Comparison between rheological curve and experimental data.

この理論式では、岩盤の变形特性が小さいほど、グラウト材による影響（効果）が大きくなっており、その値は注入前後の弾性係数の等値線等から離れている部分、すなわち注入前の岩盤の弾性係数が 1 000MPa より小さい領域と考えられる。Fig. 11 はデータ数は少ないものの、理論曲線は実測値で表される改良傾向をとらえているものと考えられる。これは Fig. 9 で示された改良比が大きくなる境界値 1 000 MPa の結果を説明している。

5 結 言

本論文では、あるダムサイトにおいてコンソリデーショングラウティングの現場実験を行い、岩盤の变形特性に関する力学的改良効果について考察した。実施した実験は、孔間弾性波試験、孔内載荷試験である。孔間弾性波試験では、注入回数ごとに測定を実施することにより、岩盤の物理的な改良過程について検討した。また孔内載荷試験では、グラウティング前後の岩盤の变形係数、接線弾性係数に着目し、力学的改良傾向について考察した。さらに力学モデルによる検証を行うことにより、变形特性について現場で得られた実験データの妥当性について検討を加えた。得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

(1) 注入回数別に実施した孔間弾性波探査の結果、注入回数を増すごとに弾性波速度の増加、すなわち岩盤の固密化が認められ、特に弾性波速度が 2km/s 付近より小さい部分で変化が大きい。またその増加の過程をみ

ると、1 次および 2 次注入段階での増加量が大きく、3 次孔以降は顕著ではない。これは、初期段階の注入により岩盤中の大きなき裂が、セメントミルクにより充填され改良が進む。その後の改良幅は小さくは、徐々に改良限界に近づいていることが推察される。

(2) 孔内載荷試験によってグラウチング前後の岩盤の変形性を調べたところ、変形係数および接線弾性係数が上昇し、かつそのばらつきも減少し、岩盤が固密化・均質化していく状況が確認された。変形係数の上昇傾向をみると、岩盤が初生的に不良なものほど大きく、良好なものほど低いことが示された。簡易な力学モデルを作成し、この傾向を理論的に検証したところ、およそ 1 000MPa 以下で改良効果が大きくなる傾向を説明することができた。

今後の課題としては、技術的には弾性波探査における波動の直進性、特にき裂面で反射する弾性波の影響を整理することにより、より精度よい結果が得られる可能性がある。また体系的にはグラウチング前後の変形性の改良効果に関するデータの蓄積とともに、ダム基礎岩盤の設計上重要となるせん断強度の改良効果を評価すること、また岩盤の改良メカニズムに関する力学モデルに関して、節理等不連続面の性状を加味したより具体的・詳細なモデルを作成し汎用的な検証方法を検討・構築することを考えている。

最後に、本論文をまとめるにあたり、現場実験実施において多大なご協力をいただいた(株)間組 宇津木慎司氏、構造計測(株) 峯岸淳一氏、六川 武氏に、また実験結果考察に際して有益なご指導・ご助言をいただいた京都大学・平野 勇助教授に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 土木学会岩盤力学委員会, “ダム基礎グラウチングの施工指針”, p.1 (1972) 土木学会.
- 2) 松本徳久, 山口嘉一, 土木研究所資料, p.24 (1988).
- 3) 増田秀夫, “わが国におけるコンクリートダムの基礎岩盤の弾性波速度に関する応用地球物理的研究”, 北海道大学学位論文 (1962).
- 4) 飯田隆一, “土木工学における岩盤力学概説”, p.102 (1978) 彰国社.
- 5) 菊地宏吉, ダム技術, **117**, 3 (1996).
- 6) 土木学会岩盤力学委員会, “孔内載荷試験法の現状と課題—指針化の試み—”, p.10 (1988) 土木学会.
- 7) R. E. グッドマン (大西有三, 谷本親伯訳), “わかりやすい岩盤力学”, p.135 (1984) 鹿島出版会.
- 8) 菊地宏吉, 水戸義忠, 七澤 馨, 高橋義春, 宮本健也, ダム工学, **21**, 44 (1996).
- 9) 土木学会岩盤力学委員会, “ダムの地質調査”, p.112 (1986) 土木学会.