

グラウチングによる節理のせん断強度の改良効果に関する室内実験的研究 (挟在物による影響)

The experimental study on the improvement by grouting on the shear strength of rock joint
(the effect by the filling)

水戸義忠*・若林成樹**・菊地宏吉***・近藤聡史****

Yoshitada MITO, Naruki WAKABAYASHI, Koukichi KIKUCHI and Satoshi KONDO

It is important to estimate the degree of mechanical improvement by grouting for the strength of rock mass. However there is few information of mechanical improvement. Therefore, we had performed direct shear tests on several joints before and after grouting by using concrete imitating real joint roughness. This paper shows the improvement of shear strength of the effect by the filling. We made sure that the lesser the clay in it, the greater the improvement of strength.

1. まえがき

近年、土木構造物の建設にあたって、良好な基礎岩盤箇所の立地が少なくなっている。このため、やや安定性に欠く基礎岩盤における土木構造物の建設機会が必然的に増加している現状にある。このような趨勢の中、土木構造物自体の安定性確保の上で、構造物基礎の岩盤改良（基礎処理）は、不可欠のものとなっている。この基礎処理の方法の一つとしてグラウチングがある。グラウチング工法には、主にコンソリデーショングラウチングとカーテングラウチングがあり、コンソリデーショングラウチングは透水性ならびに変形性、強度などの力学的特性の改良を目的として実施され、カーテングラウチングは、岩盤の透水性の改良を目的として実施される。しかしながら、グラウチングが岩盤の力学的性状に及ぼす効果については、これまでに検討が行われた例が少なく、不明な点が多い。このため、コンソリデーショングラウチングにおける力学的な改良効果は、設計に考慮されることなく、コンソリデーショングラウチングは岩盤の信頼性を高めることにのみ行われているのが現状である。

従来よりコンソリデーショングラウチングによる岩盤の改良効果の確認については、ルジオン試験による透水性の変化によって検討が行われるのが一般的である。カーテングラウチングによる改良効果の検討と同様にチェック孔における透水試験結果やセメント注入量のみを判断材料として効果の確認がなされてきた。すなわち、透水性が改良されることによって岩盤内の空隙部にセメントが充填されていることを確認し、これをもって岩盤の力学的特性が改良されたとするものである。しかしながら、岩盤の力学的な改良の度合いが定量的に判明すれば改良後の岩盤の力学的特性をある程度設計に取り入れることが可能となり、より効率的、経済的な掘削線の決定ならび、より安全な基礎岩盤の設計において、大きな効果を及ぼすものと考えることができる。改良後の岩盤の力学的特性をある程度設計に取り入れることが可能となり、より効率的、経済的な掘削線の決定ならび、より

* 工博 京都大学助手 工学部資源工学科

*** 工博 京都大学教授 工学部資源工学科

** 清水建設㈱ 技術研究所

**** 京都大学工学研究科資源工学専攻修士課程

安全な基礎岩盤の設計において、大きな効果を及ぼすものと考えられる。

グラウチングに影響を及ぼす大きな要因として(1)グラウトの濃度(2)グラウトの注入圧力(3)節理面の粗度(4)節理の開口幅(5)節理内における初期的な粘着力(6)節理内の壁面強度(7)節理内に存在する挟在物、といったものが考えられる。筆者等はこれまでにコンソリデーショングラウチングにおける岩盤の力学的改良効果について、その改良効果について明らかにすることを目的として、種々の粗さを持つ節理を有する岩盤供試体にグラウチングを行い、(3)(5)の要因について試験を行った。そこで、今回は(7)挟在物の有無、量に着目して試験、検討を行った。

2. 試験の内容

2. 1 試験方法

節理面の改良効果を検討する上では、節理面の粗さに対応した特有のせん断強度(粘着力や摩擦角)の把握が必要である。そのため、天然の節理面を型どり、その型を用いて作製した人工的な供試体を用いて、節理面特有のせん断強度の把握を行った。今回の室内実験では、この模型供試体を用いてグラウチング前後のせん断強度の変化を検討した。

2. 2 模型供試体

一連の室内試験に使用する節理面のモデルとして、奥美濃地域に産出する流紋岩の節理を使用することとした。現地においてある程度の大きさの節理面を含む岩体をいくつか選出し、節理面をはさむように上下2つで1組の供試体を整形・加工した。その実岩盤を基に、シリコンでそれぞれの節理面を型どり、この型にモルタルを流し込むことによって模型供試体を作製した。セメントには普通ポルトランド・セメントを用い、砂は、静岡県浜岡産の陸砂(比重2.60、粗粒度2.80)を用い、重量を砂：セメント：水＝4：2：1の割合で配合させた。作製後、水中でおおよそ2ヶ月間養生させた後、試験に供するものとした。供試体の寸法は、基本的に高さ20cm(節理面をはさんだ2つのブロックをあわせて)、奥行き30cm、横幅30cmとした(図-1)。今回の試験においては、挟在物の存在量が及ぼす影響について検討するために、油性粘土を充填物と想定して、これを節理面に挟んだ。粘土の厚さは、1mmとして、節理面全体に存在させた時を100%として、図-2 a)、b)、c)に示すように粘土を75%、50%、25%と段階的に存在させた供試体を作成した。

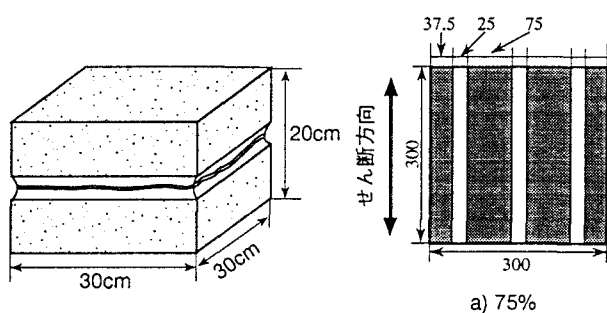


図-1 供試体概観図

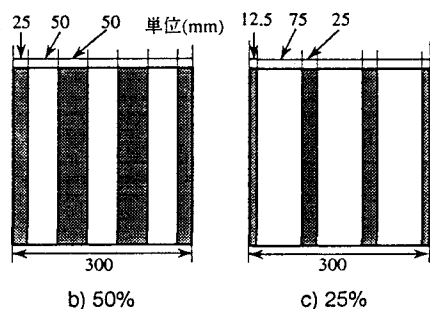


図-2 節理面粘土充填図

2. 3 グ라우チング

グラウト剤としては、高炉セメントB種(小野田セメント(株)製)を使用し、濃度が、常時 w/c が1になるように混ぜ合わせ、注入前には、常に温度及び粘性を計測し管理を行った。注入にあたっては、供試体の節理面から動水勾配1の状態で行い、ひとつの供試体につき、4～5リットル程度ミルクを注入した後に、終了するものとした。グラウトを注入した後に2週間程度放置した後、せん断試験を行った。

2. 4 一面せん断試験

模型供試体は挟在物の量を段階的に変化させて合計33個作成し、同条件の挟在物の量が等しい供試体4個に4段階に変化させた異なる鉛直圧力を作用させた。この場合の鉛直応力は、0.5、1.0、1.5、2.0(MPa)の大きさとした。このようにして、グラウト注入前後におけるそれぞれ4組の測定値から、クーロンの破壊基準にもとづき粘着力Cと摩擦角をグラウト注入前後において求め、改良の度合いを評価することにした。せん断方向については、できるだけ大きな凹凸を衝突させないような方向とした。またせん断は、供試体の長さの1割程度(約3cm)行い終了するものとした。せん断速度は、1分間に1mm程度の変位速度とした。

2. 5 一面せん断試験結果

以下に全ての供試体のせん断試験結果を示す。それぞれの供試体につき、せん断強度と残留強度を表示している(表-1)。いずれの条件においてもグラウティング前に比べグラウティング後のせん断強度が上昇しているのがわかり、グラウティングによる改良効果が、はっきりと現れている。また、すべての供試体はせん断の終了の際、節理面間の鉛直変位が増大した状態であることが確認された。

2. 6 粘土の物性試験結果

充填物として用いた油性粘土を、実際の試験に供する時と同じく厚さ1mmにのばして粗さのない平滑なコンクリートブロックに挟み、垂直応力を4段階に変えてせん断試験を行い、粘土板の粘着力・摩擦角を計算すると粘着力が0.057MPa、摩擦角がほぼ0という値を得た。また、密度は約2.5g/cm³であった。

3. 考察

3. 1 クーロンの破壊基準に基づいた強度改良効果の検討

次にせん断試験の結果をもとにして描いたせん断応力変位曲線のグラフを示す(図-3)。これよりグラウティング前は、ピーク強度に達するまでに1~4mm程度のせん断変形があることが認められるが、グラウティング

表-1 せん断強度、残留強度

鉛直応力 (MPa)	0.5	1.0	1.5	2.0
粘土（％）	グラウティング前			
25	1.03	1.70	1.82	2.40
	0.25	0.55	0.71	1.18
50	0.86	1.58	1.50	2.05
	0.23	0.50	0.51	0.95
75	0.61	0.99	1.31	1.61
	0.15	0.44	0.48	0.76
100	実施せず	0.49	実施せず	実施せず
		0.33		
粘土（％）	グラウティング後			
0	0.60	1.00	1.75	1.97
	0.55	1.17	1.50	1.50
25	0.29	0.55	0.76	0.96
	0.18	0.62	0.66	0.75
50	0.25	0.40	0.67	0.92
	0.17	0.51	0.45	0.81
75	0.21	0.38	0.60	0.89
	0.15	0.42	0.40	0.82
100	0.25	0.35	0.52	0.71
	0.14	0.36	0.46	0.60

上段：せん断強度(MPa) 下段：残留強度(MPa)

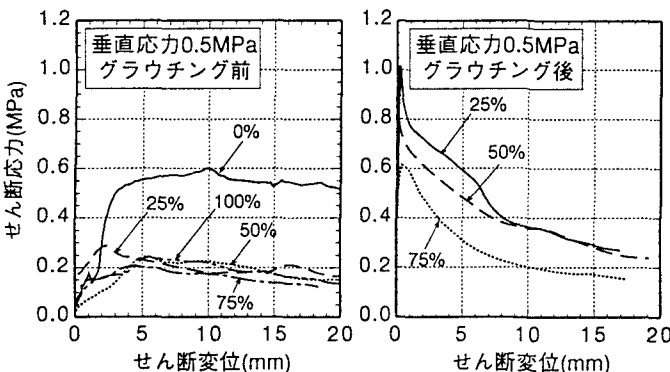


図-3 応力変位曲線

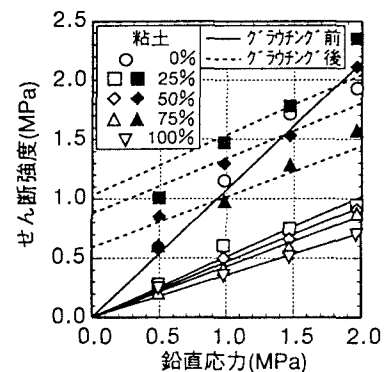


図-4 クーロンの破壊基準に伴う近似曲線

を行うことによりピークまでの変位は、ほとんどなくなっている。従って、グラウチングにより変形性も改良されていることがわかる。また図-3の結果をもとに垂直応力値とそれに対する最大せん断応力値を挟在物の粘土量別にプロットし、クーロンの破壊基準に伴う近似曲線を示した(図-4)。図中の直線は、試験結果をもとに、1次式を回帰モデルとする最小2乗法近似による回帰を行ったものである。グラウチング前の直線は、節理面の初期的な粘着力がほとんど認められないために原点を通る直線で近似してある。一方、グラウチング後の近似曲線においては、グラウチング前後で摩擦角の変化が生じないという報告⁹⁾をもとに、グラウト前の直線に平行な傾きを持つ直線で近似してある。また、粘土100%のグラウチング後の曲線が存在していない。これは、節理面全体に充填物が存在しているとき、つまり粘土100%の時は、グラウトミルクが内部に浸透しなかったため試験を省略したことによる。試験後、予備の供試体1つを用い粘土100%状態でグラウチングを行いせん断試験を行ったが、グラウチング前後で強度に変化が認められなかった。いずれ場合も、グラウト後の最大せん断応力値が、グラウト前の最大せん断応力値を大幅に上回っている。これにより、せん断強度が明らかに改良されていることがわかる。またグラウチングによる粘着力の改良効果は、0.5~1.0MPa程度の範囲である。三軸圧縮試験の結果よりグラウト自体の粘着力は、約7MPaなので、実際の粘着力の上昇値は、それに比して著しく小さい。

3. 2 充填物が強度改良効果に及ぼす影響に関する検討

せん断試験結果において、それぞれの垂直応力ごとにせん断強度と粘土量との関係をプロットしたのが図-5である。この図からグラウチング後では、粘土量が多くなるほど、せん断強度が顕著に低下しているのがわかる。そして、粘土が存在していない場合(0%)を除きほぼ直線上にプロットされている。これより節理面に存在する充填物の面積に比例してある一定の割合で強度が減少していくことが伺える。グラウト前の0%においては、予想される値より大きい値となっているのは、粘土を充填した場合と開口幅が違うことによる影響であるものと推察される。充填物としての粘土は、厚さ1mmに統一してある。粘土が存在しない0%に比べて、充填物が存在している25%・50%・75%・100%は、開口幅が1mm厚い。実際にせん断試験後の供試体を取り出し、せん断面を確認してみると、粘土部分だけが主にせん断されており、粘土が存在しない部分のモルタル部分は、ほぼせん断破壊されていなかった。一方、粘土0%の場合、開口幅が小さく節理面全体でせん断破壊が起きていたため、強度が大きくなっているものと考えられる。さらにグラウト前後のせん断強度の上昇値を考慮すると、充填物の量が少ないほど大きな改良効果を示していることが見受けられる。これは、充填物の量が少ないということは、グラウトされる面積が大きくなり、強度の改良効果も大きくなるためであると考えられる。

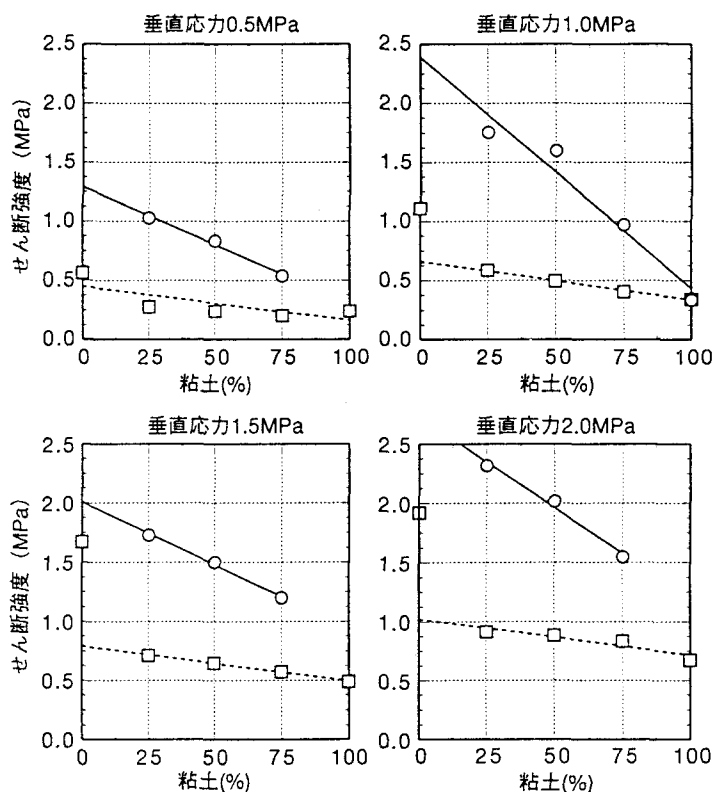


図-5 せん断強度と粘土量の関係

4. 結論

節理面のせん断強度についての室内試験結果より、グラウチングによる節理のせん断強度に関する基礎的な検討を行ったところ、以下のような知見を得た。

- (1) グ라우チングにより、節理面のせん断強度、粘着力が増加していることが認められた。せん断強度は、0.25～1.48Mpa、粘着力は、0.5～1.0Mpa上昇しており、グラウチングによる強度の改良がなされていると判断できる。
- (2) 節理面に存在する充填物の面積の減少に比例して、せん断強度がある一定割合で増加していくことが認められた。これは、グラウチング前後のいずれもみられる現象であり、節理面のせん断強度に充填物の存在面積の関数が1次的に含まれると考えられる。
- (3) 節理面全体に充填物が存在しているときには、グラウチングを行ってもその改良効果はほとんど認められない。一方、充填物の量が少なくなるほどグラウチングによる改良効果の度合いが大きくなる。

従来より、グラウチングによる岩盤強度の改良効果については、ほとんど知見が得られていなかった。本研究は、岩盤内に存在していて、岩盤の工学的特性に大きな影響を与えるとされている節理面の強度の改良効果について検討した基礎的研究であり、岩盤の強度の改良効果を直接的に評価したものではない。しかしながら、以上の知見は原位置では非常に困難である岩盤のせん断強度の改良効果を把握するための基礎的な検討に役立つものと考えられる。

以上が、本研究において得られた結論であり、グラウチングによる岩盤の力学的改良効果に関して実験的に把握することができた。この成果は力学的な改良効果の可能性を裏付ける上での一つの証拠を提示するものであり、今後のグラウチングによる岩盤改良の可能性について示唆するものであると考えられる。

5. 今後の課題

グラウチングによる節理の強度の改良効果については、本研究はいわば基礎的な段階に位置づけられる。自然の岩盤に分布する節理面のせん断強度の改良効果を把握するためには、粗度や垂直応力、充填物の面積比率だけでなく、充填物の厚み、湿潤度、亀裂の連続性、開口幅や壁面強度といった様々な要素を考察する必要がある。

また、グラウトの注入方法についても、今回の室内試験においては $C/W=1$ の一定濃度に保ったまま、一定の動水勾配のもとおこなったものであった。しかしながら、実際の現場においてはグラウトの濃度および圧力を変化させながら注入を行うことが一般的であり、室内試験の成果がそのまま現場レベルの適用に値するものとはいえない。今後の研究においては、種々の濃度による注入が行われるような工夫を施さねばならない。

以上、節理のせん断強度の改良効果を把握する上での問題点を述べたが、最終的に検討すべきものは、岩盤強度の改良効果であり、このためには、節理のせん断強度の改良効果が、岩盤強度の改良効果に対していかなる物理的意味を有するかについて検討する必要がある。

6. 参考文献

- 1) 吉野尚人他：グラウチングによる節理面のせん断強度の改良効果に関する実験的検討（初期粘着力による影響）、第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.31～35、1995.2