

シリカレジン注入材の模擬地山における発泡圧と 浸透性に関する基礎的研究

A STUDY ON PENETRATION MECHANISM AND FOAMING PRESSURE OF URETHANE GROUT IN THE MODEL GROUND

鈴木雅行¹⁾・鮫沢 博²⁾・吉武 勇³⁾・中川 浩二⁴⁾

Masayuki SUZUKI, Hiroshi SAMEZAWA, Isamu YOSHITAKE and Koji NAKAGAWA

The purpose of present study is to obtain the fundamental data of urethane grout for forepoling as one of the auxiliary method. Especially, the foaming pressure and penetration mechanism of urethane grout was discussed in the model or actual ground with various permeability coefficients. The laboratory test on solidified shape, which had two parameters (penetration range & foaming pressure), was carried out. From the test result, it was ascertained that the permeability coefficient of ground significantly influenced the penetration mechanism and solidified shape of urethane grout.

Key Words : *urethane, grouting, solidified shape, foaming pressure, penetration mechanism*

1. はじめに

山岳トンネルの補助工法の一つとして、注入式フォアポーリングや注入式長尺鋼管フォアパイリングなどが採用されている。これらの注入材の一つとして、軟質な地山や切羽の安定化対策として、シリカレジン注入材が用いられている¹⁾。シリカレジン注入材は一般的な注入材と異なり、固結する際に発泡するという特性を有しており、さらに靱性も高いため地山注入後の改良効果が高いことが特徴である¹⁾。しかし、地山注入後の発泡圧力や浸透性を測定することが難しいこと、今までに発泡圧力について計測されたことがないことから、地山内の注入状況について不明な点が多く、地山条件に応じた合理的な注入の設計をすることが困難な状況であった²⁻⁴⁾。そこで、実際のまき土地山に注入式フォアポーリングを施工し、その改良体を掘り出し注入改良体を観察した。その結果、注入改良体の注入状況は、ボルト周辺からシリカレジンの割裂脈が形成され、その後割裂脈周辺の地山に浸透し固結状態になることが観察された。そこで、同様の改良体を室内実験で再現するために、珪砂により模擬地山を作成し、注入材を充填後発泡させ、その時の発泡圧力と自然浸透範囲および発泡圧による浸透範囲について基礎的な検討を行なうことで、シリカレジ注入材の注入改良後の形態や将来の合理的な注入設計に関する基礎資料を得ることを目的に実験を行った。

2. 実地山における注入改良状態

現場注入実験場所としては、広島型花崗岩とまき土が分布している切土法面を対象に注入実験を行った。表-1に地山物性値を、表-2に実験に用いたシリカレジン注入材の諸元を示す。また、注入改良後の改良体の掘り出し形態を写真-1に、また、改良体の切断面を写真-2に示す。注入は、 $\phi 25\text{mm} \times L=3.0\text{m}$ の注入用ボルトを切

-
- 1) 正会員 工修 ハザマ 土木事業総本部 トンネル統括部
2) 第一工業製薬(株) ウレタン
3) 正会員 工博 山口大学 工学部 社会建設工学科助手
4) 正会員 工博 山口大学 工学部 社会建設工学科教授

表－１ 現場注入実験地点の地山物性値

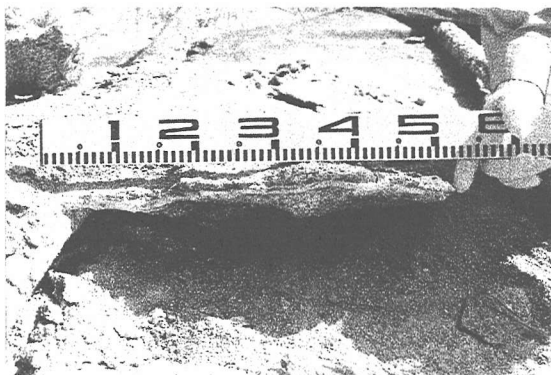
	強風化花崗岩(B)
現地状況	切 土 斜 面
地質状況	花崗岩の組織は一部に残存するが全体としてはまさ土化している。節理は不明瞭であるが、開口部も見られる。
平均強度	0.62 (0.05～1.98) N/mm ²
透水係数	2～1×10 ⁻³ cm/sec



写真－１ 注入改良体掘り出し結果

表－２ シリカレジン注入材の諸元

	A 液	B 液
組 成	珪酸ソーダ特殊改質材触媒	特殊プレポリマー粘度低下剤
密 度 g/cm ³	1.45±0.03	1.23±0.03
	混合液：約 1.3	
粘 度 mPa・sec	110±30	160±30
	図-3 参照	
重量比	A 液/B 液 = 1/0.9～1.1	



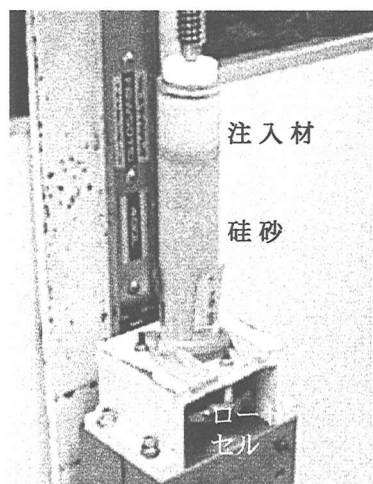
写真－２ 注入改良体切断面

土斜面に打設し、その後注入速度 6L/min にて注入材 30kg/本の注入終了後、改良体を掘り出した。その時の注入圧については、約 1.0MPa 程度であった。写真－２に示した注入改良体切断面の改良状況から、まさ土化した地山に最初に割裂脈が入り、その後周辺地山に浸透注入した状況が確認された。また、その時の注入脈は 20mm 程度であった。なお、注入脈の改良強度測定結果から、発泡倍率は 1.2～1.4 倍程度の発泡状況であった。

３．発泡倍率の相違による浸透性評価

3.1 実験目的と方法

シリカレジン注入材は混合された後、硬化する際に発泡現象が生じることから、この発泡圧によって浸透促進効果があるものと考えられる。現場注入実験により、まさ土化した実地山への注入結果から写真－２で示したように割裂浸透形態で注入されていたことから、実地山でのシリカレジン注入材の浸透性を評価するためには発泡倍率の違いによる発泡圧を求め、注入圧による浸透性とは区別して、発泡圧による浸透性を検討する必要があるものと考えられる。このような目的のもと、透水性の異なる模擬地山として 3, 4, 6, 8 号硅砂を用い、発泡倍率を自由発泡, 1, 2, 3 倍にしたときの各発泡圧による浸透特性を評価するための注入実験を行った。なお、実験用の模擬地山(高さ 15cm)は、含水



写真－３ 発泡圧測定実験装置

比 10% に調整した珪砂を高さ 5cm ずつ投入・突き固め作製した。実験に際しては、シリカレジン注入材の発泡圧測定と浸透深さの測定ができると同時に、発泡圧により試験装置が変形しないものとして、透明の亚克力円筒管(φ40mm×ℓ=210mm)を用いることとした。実験装置を写真-1 に示す。ウレタン注入材の発泡圧力の測定にあたり、ロードセルを取り付けた装置を用い、この装置内にセットした円筒管にウレタン注入材を 2cm 厚まで充填した。このとき、円筒管内のピストンを調節してシリカレジン注入材の液面上方に空間を設け、シリカレジンの発泡に伴う体積増加倍率(発泡倍率)を調整した。

3.2 実験結果および考察

(1) 発泡倍率と浸透距離について

表-3 に浸透距離と発泡圧力試験結果をまとめて示す。ここで、シリカレジン注入材の発泡圧力による浸透距離を評価するためには、自由発泡による浸透分を取り除く必要がある。このため、各ケースの浸透距離から発泡圧力 0 である自由発泡時の浸透距離(自由浸透距離)を差し引いた距離(発泡浸透距離)について発泡倍率または発泡圧力で整理・評価を試みた。

図-1 に発泡浸透距離と発泡倍率の関連性を示す。この図から、模擬地山の透水性が大きいほど(8号珪砂→3号珪砂)発泡による浸透距離は大きく、またシリカレジン注入材の発泡倍率が大きいほど発泡浸透距離は小さくなることが確認された。ここで表-3 に示す発泡浸透比に着目すると、最も発泡圧の高くなる 1 倍発泡で 57~71%，2 倍発泡では約 55~60%，発泡圧が小さい 3 倍発泡では 42~50% 程度であった。さらに、これらの結果では模擬地山の透水性が小さいほど発泡浸透比が大きくなっているが、実際の浸透距離については、比較的締まった地山に相当する透水係数の 8 号珪砂($k=4.65 \times 10^{-3}$ cm/sec)においては、1 倍発泡でも 7mm 程度とほとんど浸透しないことが確認された。

ここで、発泡浸透距離と発泡圧力の関係を図-2 に示す。この結果から、全ての地山条件で発泡圧の増加により浸透距離が大きくなること、また、

表-3 発泡倍率別薬液浸透実験結果

珪砂	測定項目	発 泡 倍 率			
		自由	1 倍	2 倍	3 倍
3 号	浸透距離 mm	9	21	20	17
	発泡圧力 MPa	—	0.14	0.11	0.06
	*発泡浸透比 %	0	57	55	47
4 号	浸透距離 mm	7	17	16	12
	発泡圧力 MPa	—	0.24	0.12	0.10
	*発泡浸透比 %	0	59	56	42
6 号	浸透距離 mm	4	11	10	8
	発泡圧力 MPa	—	0.29	0.17	0.10
	*発泡浸透比 %	0	64	60	50
8 号	浸透距離 mm	2	7	5	4
	発泡圧力 MPa	—	0.54	0.15	0.10
	*発泡浸透比 %	0	71	60	50

*発泡浸透比=(浸透距離-自由浸透距離)/浸透距離

発泡圧力は最大値を示した値である

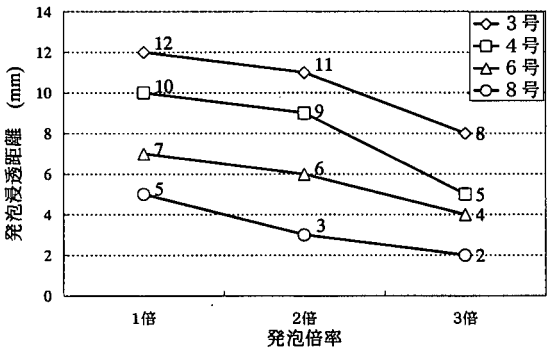


図-1 発泡浸透距離と発泡倍率の関連性

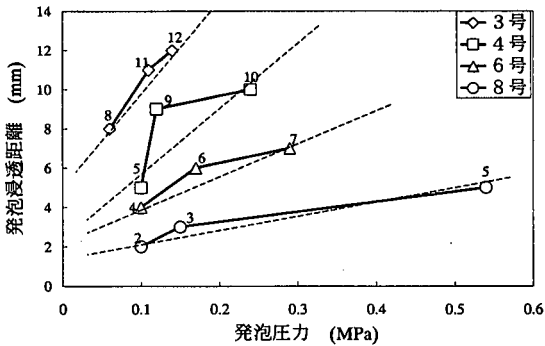
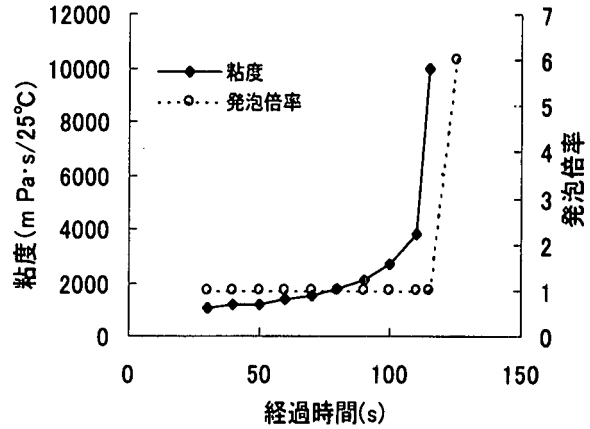


図-2 発泡浸透距離と発泡圧力の関係

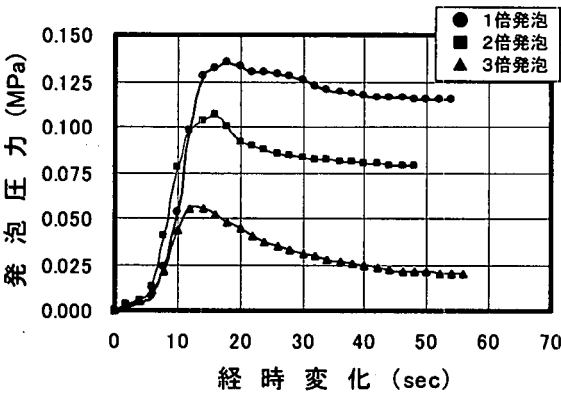
模擬地山の透水係数が小さいほど発泡圧力は急激に増加することが確認された。また全体的な傾向として、模擬地山の透水係数が小さくなるほど、発泡圧力の増加に対する発泡浸透距離の増分(勾配)が小さくなっていることが分かった。さらに、3号珪砂($k=1.32 \times 10^0 \text{cm/sec}$)では浸透性が高いため発泡圧が上がりにくく、1倍発泡においても0.14MPa程度であるが、透水係数 $k=4.65 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ と透水性の低い8号珪砂における1倍発泡では、発泡圧力が0.54MPaにも達し、実際の注入圧(約1.0MPa)の50%を超過するものであることが分かった。



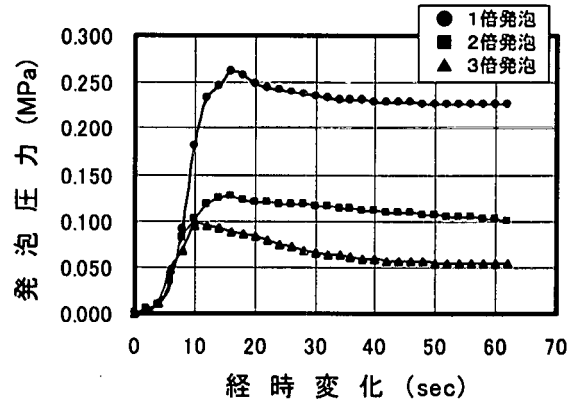
図－3 シリカレジン注入材の粘度変化および発泡状況

(2) 透水係数の異なる模擬地山別の発泡圧力について

シリカレジン注入材は、単体の液体粘度は表－2に示したように110～160mPa・sであるが、混合された段階で瞬時に粘性が上昇し1,000～4,000mPa・sとなり、発泡固結する性質を有している。図－3は液温25℃におけるシリカレジン注入材の粘度変化と発泡倍率を測定したものである。通常の薬液では発泡完了まで45～60秒程度であることから、その過程を計測する目的で、助剤を添加して発泡までの時間について薬液の性状を変化させない状態で遅延させ反応させた結果である。発泡は120秒から130秒までの間に瞬時に発生し、固結した。また、このときのシリカレジンの粘性は2液混合後、50秒程度から徐々に増加し、発泡現象直前で4000mPa・sまで上昇し、それ以降発泡による体積膨張と同時に急激に粘性が高くなり固結に至っている。このように、シリカレジンの注入固結過程においては急激な粘性の上昇と急激な発泡現象が短時間に発生するため、透水係数の異なる模擬地山への注入に関しては発泡圧力を把握することで、各地山条件別の固結改良性状の評価につながるものと考えられる。



図－4 3号珪砂地山での発泡圧力の経時変化



図－5 4号珪砂地山での発泡圧力の経時変化

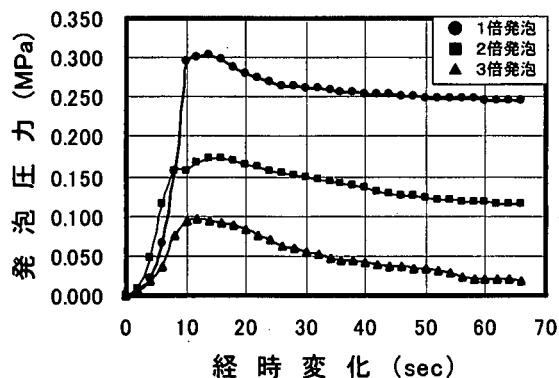


図-6 6号硅砂地山での発泡圧力の経時変化

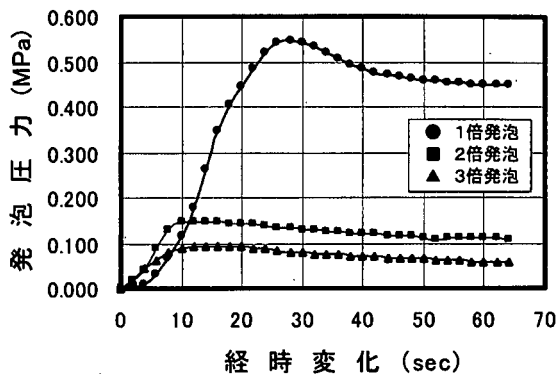


図-7 8号硅砂地山での発泡圧力の経時変化

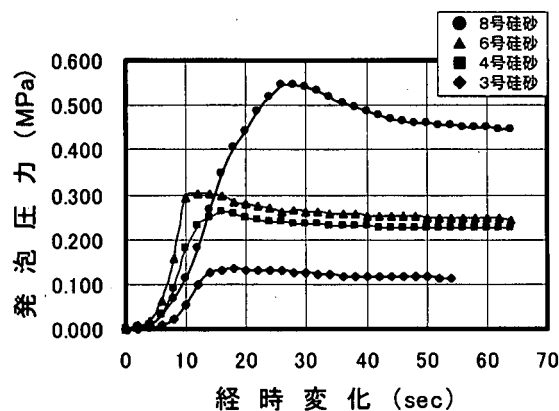


図-8 1倍発泡時の発泡圧力の経時変化

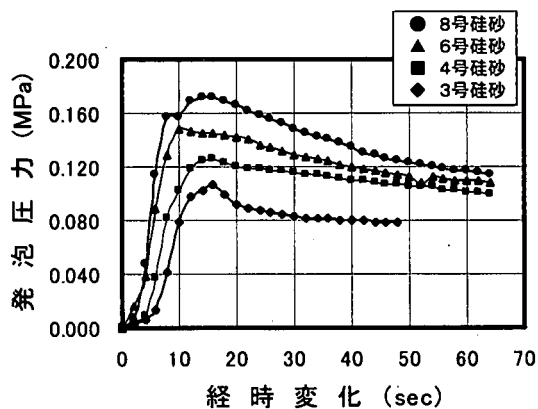


図-9 2倍発泡時の発泡圧力の経時変化

図-4~7に3~8号硅砂までの4種の模擬地山に対し、シリカレジン注入材を1倍、2倍、3倍発泡させた時の発泡圧力の経時変化を示す。これによると、3号4号6号硅砂の模擬地山においては発泡開始後圧力が10~15秒程度でピークに達した後、徐々に低減していく結果となった。これは、図-2で示した発泡浸透距離と発泡圧力の関係から、初期の段階で浸透した後は早期に圧力がピークに達するとともに、注入材が固結することで圧力上昇がなくなり、その後地山内の応力分散の結果圧力が軟化したものと考えられる。ただし、8号硅砂における1倍発泡時の圧力は発泡開始後30秒程度でピークを示しており、比較的透水係数の小さい地山での圧力は他のケースよりピークまでの継続時間が長いことがわかる。このことは、透水係数の比較的小さい地山条件においては、地山内には浸透せず、新たな割裂を発

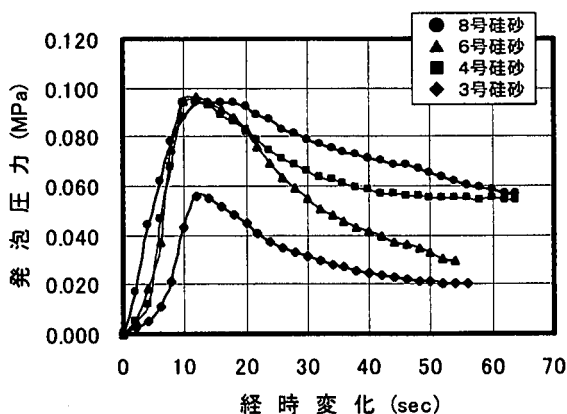


図-10 3倍発泡時の発泡圧力の経時変化

生させることでシリカレジンの改良固結体の性状が割裂性状を示しやすいことが想定できる。ただし、8号硅砂の実験において2倍発泡と3倍発泡のケースでは3～6号硅砂の実験同様、圧力のピークは10秒程度であり、一度発泡させた場合、圧力上昇は小さく浸透距離も殆ど広がらない結果となることがわかる。

表-4 各種硅砂模擬地山の透水係数と注入改良形態

模擬地山	3号硅砂	4号硅砂	6号硅砂	8号硅砂
透水係数 (cm/sec)	1.32×10^0	2.71×10^{-1}	6.70×10^{-2}	4.65×10^{-3}
模擬地山 注入形態				

図-8～10は3～8号の4種類の硅砂模擬地山に対し1倍発泡、2倍発泡、3倍発泡と発泡倍率別に圧力変化をまとめたものを示す。図-8の1倍発泡では、8号硅砂が他の3～6号硅砂の場合に比べ2倍程度の圧力になることがわかった。また、表-4に各種模擬地山の透水係数と注入形態の区分を示す。これらの結果から、透水係数が 10^{-3} cm/sec程度の難透水性地山においては地山にシリカレジン注入材が浸透せず、発泡圧力は上昇する。また、その時の圧力が他の場合に比較して大きいことから、割裂状に地山に注入されることで、割裂注入となることがわかる。また、4号、6号硅砂地山においてはほぼ同様な発泡圧力を示し、注入改良形態も割裂・浸透状態になることがわかった。3号硅砂地山のような比較的透水性の良い地山においては注入材の浸透性も良く、シリカレジン注入材の混合後の粘性が比較的高いにもかかわらず、浸透距離も大きく、固結改良体としては浸透注入になることがわかった。

6. おわりに

模擬地山のうち、3号硅砂地山のような透水性の大きい地山については、地山注入後の発泡圧力も小さく、発泡開始後の浸透量も比較的大きいため、浸透注入により比較的円筒形の改良体が得られることがわかった。4号、6号硅砂地山に場合には透水係数が $10^{-1} \sim 10^{-2}$ cm/sec程度になると注入圧力も3号硅砂地山に比べ上昇し、割裂・浸透の注入改良形態になることがわかった。8号硅砂地山のように透水係数の小さい模擬地山においては、地山へシリカレジン注入材が浸透していかないため、注入材自体の発泡圧力も大きくなり、その結果、割裂注入になることがわかった。以上から、透水係数の大きな地山においては、比較的均質な円筒状の改良体ができ、改良範囲も大きい改良体が形成することがわかった。また、8号硅砂地山のような比較的透水係数の小さい地山においては地山注入後の発泡圧も大きく、浸透範囲も小さいことから、注入後は地山に割裂状態で注入され、均質な改良体にはなりづらいことがわかった。これらの結果から、地山条件により、注入固結形態が大きく異なることと、注入材の発泡圧力も透水係数の比較的小さい難透水性地山においては大きな圧力を示すことから、注入設計にあたっては、これらの改良形態と発泡圧力を十分把握の上、適切かつ合理的に設計する必要があるものと考えられる。

今回の研究結果により、シリカレジン注入材の設計にあたっては、従来は全ての地山に対して比較的均等に円筒状に改良されるとしてきた考え方を、地山の透水性による注入形態の違いを明らかにすることにより、より効果的で合理的な注入を行うための基礎資料となるものと考えられる。

参考文献

- 1) ジェオフロンテ研究会：ウレタン系注入式フォアポーリング技術資料，1998.11.
- 2) 肥後満朗，牧 宏久，中垣圭介，河原幸弘，古川浩平，中川浩二：ウレタン注入式フォアポーリングにおけるウレタン注入材の注入形態に関する研究，土木学会論文集，No.553/VI-33，pp.81～92，1996.12.
- 3) 鈴木雅行，田中 彰，鮫沢 博，中垣圭介，坂尾和男，中川浩二：難透水性地山におけるウレタン注入材の地山改良機構に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.616/VI-42，pp.21～34，1999.3.