

難浸透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

鈴木雅行¹・田中 彰²・鮫沢 博³・中垣圭介⁴・坂尾和男⁵・中川浩二⁶

¹正会員 工修 (株)間組 土木本部トンネル統括部課長 (〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

²正会員 工修 東急建設(株) (〒150-0002 東京都渋谷区渋谷3-11-11), 元山口大学大学院学生

³第一工業製薬(株) 建設施工薬剤研究部 (〒600-8873 京都市下京区西七条東久保町55)

⁴(株)カテックス 営業本部長 (〒460-8331 名古屋市中区上前津1-3-3)

⁵正会員 山口大学 工学部 社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台)

⁶正会員 工博 山口大学大学院教授 理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台)

難浸透性地山におけるウレタン材の地山改良機構を把握する目的で、粘性土を主体にした模擬地山を対象に室内実験を実施し、注入形態とその成長過程を確認した。その結果を既往の研究にあるマサ土あるいは礫を用いた模擬地山における地山改良機構と比較することにより、粘性土地山における地山改良機構を明確にした。次に、地山が互層状態にある場合として、礫・まき土・粘土の3種の地山を互層模擬地山とした条件下で6ケースの注入実験を行い、互層地山における改良機構に関して単層地山との違いを明らかにした。

Key Words: urethane, forepoling, grouting, solidified shape

1. はじめに

トンネル先受工としてのウレタン注入式フォアポーリングに通常使用されているウレタン注入材について、地山改良効果に着目した各種室内試験および実施工での施工性の試験等がなされている^{1)~3)}。それによると、各種室内実験および実施工サイズでの改良効果に着目した実験を通じ、2液の注入材が混合し反応硬化する過程で自由発泡させた場合には、8~10倍もの固結体に発泡することから、この注入材料の特性と各単層地山条件下での改良効果についていくつかの知見が得られている。

一方、従来から地山改良が困難とされてきた難浸透性地山である粘土地山のように間隙の小さな場合は、一般的に薬液注入が困難で地山の改良効果はほとんど得られないと考えられてきた^{4)~9)}。ところが、ウレタン注入式フォアポーリングの施工実績を調査すると、実際の現場において注入対象となる地山は粘土層を含む互層地山となる場合も多く、その条件下においても改良効果があったとの報告がなされて

いる²⁾。しかし、互層地山に対する注入改良効果に関しては、単層地山におけるウレタン注入材の地山改良特性をそのまま適用することは困難と思われる。従って、ウレタン注入式フォアポーリングの設計手法や施工管理方法を確立するためには、実施工で対象となる互層地山における注入形態の把握や地山改良効果および注入時の問題点の把握が必要と考えられる^{7)~10)}。

本研究では、難浸透性地山として粘土地山および粘土層を含む互層地山のウレタン注入材による改良機構を把握するために、それらの地山条件を理想化した状態で注入実験を行った。そして、粘土地山および粘土層を含む互層地山での注入改良効果に関して基本的な注入形態やその成長過程を把握することで、今後の実現場での粘土地山および粘土層を含む互層地山における地山改良をより効果的に行うための基礎資料を得ることを目的とした。

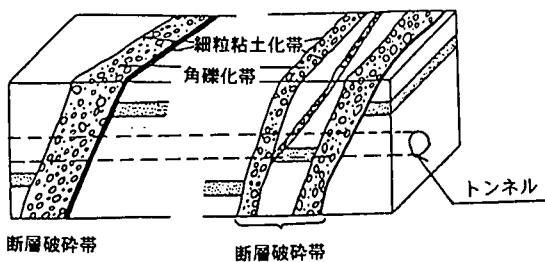


図-1 断層破碎帯におけるトンネル施工概念図¹¹⁾
(一部加筆修正)

2. 難浸透性地山におけるウレタン注入の実態と問題点

ウレタン注入式フォアポーリングをトンネル掘削の実施工に適用した場合、固結改良体は地山状況により様々な形状が観察される。例えば、崖錐層においては、ウレタン注入材をマトリックスとした礫岩状の良好な改良体が観察される。しかし、図-1 に示したように断層破碎帯を通過する場合においては、トンネル掘削対象地山が難浸透性地山である粘土地山や粘土層を含む互層地山となる場合が多い。この場合の注入形態は注入脈が葉片状になるのが見られるというように、注入対象地山によって固結形状が大きく異なるようである。

ウレタン注入式フォアポーリングの基本性状として、肥後ら³⁾は、山土、まさ土、礫の単層地山を対象として、注入材がどのように地山内部に浸透し、どれくらいの大きさで固結するかといった注入形態とその成長過程について、各種模擬地山の実験により注入改良機構をほぼ明らかにした。しかし、前述したように、断層破碎帯のような難浸透性地山への適用にあたっては、以下の点に関する問題が残されている。

①一般的に薬液の注入が困難であるとされている難浸透性地山である粘土地山についての地山改良機構についてはいまだ説明されていない。

②また、実際に現場での注入対象となる地山は断層破碎帯のように粘土地山や粘土層を含む互層地山である場合も多く、これらに対しては、山土、まさ土、礫を用いた単層模擬地山実験におけるウレタン注入材の地山改良特性³⁾をそのまま適用することができるかどうか確認する必要がある。

これらの問題を解決するためには、粘土地山およ

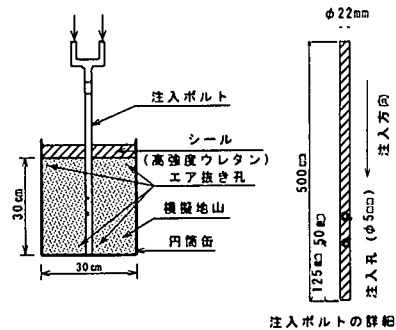


図-2 実験装置の概要

び粘土層を含む互層地山への注入実態を明らかにする研究が必要となる。

3. 模擬地山注入実験

(1) 実験の目的

難浸透性地山へのウレタン注入改良効果に関する基礎資料を得る目的で、理想化した各種地山条件に応じた模擬地山を作成し、以下の内容を明らかにするために各種実験を行った。

①難浸透性地山として単体の粘土地山を作成し、ウレタン注入材の改良機構として注入形態とその成長過程について、肥後ら³⁾により確認されているまさ土、礫地山との違いについて明らかにする。

②次に、単層地山と互層地山の注入改良効果の違いを明らかにするため、粘土、まさ土、礫の各単層条件下での注入材料別の注入量と改良体の成長過程を明らかにする。

③さらに、粘土、まさ土、礫からなる互層地山を作成し、注入材料、注入速度、注入量の条件を変化させることで、難浸透性互層地山へのウレタン注入材の注入改良形態と成長過程について単層地山条件下での改良状況との違いについて明らかにする。

(2) 実験方法

a) 実験装置と実験の概要

実験の手法と考え方は基本的に肥後ら³⁾による方法を踏襲している。図-2 に示すように、エア抜き孔を設けた内径30cm、高さ30cmの円筒缶にφ22mmの注入ボルトを設置し、模擬地山を作成した。模擬地山の上部は高強度のウレタンを用いてシールし、注入ボルトの上部から注入ポンプによってウレタンを1.5ショットで注入した。注入は注入速度および

表-1 模擬地山物性値

物性	地山	礫	まさ土	粘土
土粒子比重(g/cm ³)		2.736	2.623	2.612
透水係数 (cm/s)		2.5×10^2	7.9×10^{-3}	7.8×10^{-7}

注入量を制御して注入したため、そのときの注入圧力は難浸透性地山である粘土およびまさ土については0.2~0.3 N/mm²程度であり、礫地山については0.1 N/mm²であった。注入材は、実施工で従来より用いられることが多かった材料として、通常のウレタン材とシリカレジンウレタン材を採用し、次の2種類を用いた。

- ・注入材S：特殊ポリオールとポリイソシアネートをそれぞれ主材とする2液タイプ
- ・注入材R：珪酸ソーダと特殊プレポリマーをそれぞれ主材とする2液タイプ

なお、注入実験時の気温については注入材は液温によりライズタイムが異なるものの、20~24℃では注入形状の変化はほとんどないことを確認したうえで、実験全体を通じて20~24℃とした。

模擬地山の材料としては、間隙の大きさの差が明確になるように、以下①~③に示す3種類の地山を選定した。なお、これら3種類の模擬地山は互層状態の地山条件を理想化した状態とするために選定したものである。

- ①粘土（山口県山口市産陶芸用の粘土）
- ②まさ土（山口県宇部市産）
- ③礫（25mmふるい通過の採石）と砕砂（1.7mmふるい残留の粗砂および細礫に該当するもの）を重量比2:1の割合で混合したもの（以下、礫と称す）。

これら3種類の模擬地山材料は図-3に示す典型的な粒度で構成されている。また、これらの地山の物性値を表-1に示す。

模擬地山の作成は、単層地山の場合以下のように行った。礫層は気乾状態でよく混合し、それぞれが均一になるように注意しながら自由落下させ充填を行った。まさ土層は、含水比の調整を行い表乾状態（含水比13%）のものを10cm厚で3層に分けて締固めた。締固めについては、7×7×40cmの角柱状の木製の突固め棒（質量1,000g）で、10cmの高さから均一に締固められるよう、各層40回突き固めた。粘土層は含水比40%に調整したものを、直径30cm、高さ30cmの円柱状の粘土塊に作成した。互層地山の作成にあたっては、粘土が他層の間隙に取り込まれないように注意し、円筒缶に充填した。また、互層地山の場合には、粘土、まさ土、礫を各層10cmの3層からなる互層とした（図-4参照）。

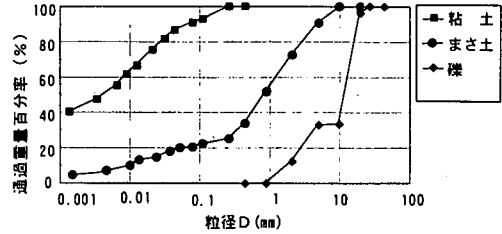


図-3 模擬地山の粒度分布

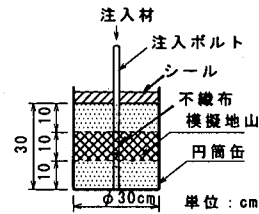


図-4 模擬地山断面

注入ボルトには、注入孔から土粒子が入り込み目詰まりしないように不織布を巻き、ボルト先端が円筒缶中央で底部に接するように固定した。次に、高強度のウレタン材を用い、供試体上部にシールを行った。なお、礫層にシールを行う際、シール材が地山内部に浸透しないように地山表面を不織布で覆った。

b) 実験条件と設定水準

注入による固結改良体の形状は、主に地山条件や注入材の種類によって異なると想定される。本実験ではウレタン改良効果に影響を及ぼすと考えられる条件のうち、地山条件としては地山の種類および互層の組み合わせ、注入施工条件としては注入材の種類、注入量、注入速度を設定した。

なお、本実験においては供試体寸法等の理由により注入圧力を大きくすることが困難であり、前述の注入圧力範囲での実験としている。

実験の順序として、各種模擬地山については以下に示す手順で実施した。

最初に、注入による改良が困難とされている難浸透性地山としての粘土単層について注入実験を行い、注入改良形態の把握および注入量と固結改良体の関係を求めた。実験ケースは粘土地山の注入予備実験から、注入量0.1, 0.2, 0.3 ℓ, 注入速度を0.3,

表-2 粘土単層模擬地山の実験条件

供試体番号	模擬地山	注入材		注入速度 (l/min)				注入量 (l)			
		S	R	0.30	0.50	1.00	0.10	0.20	0.30		
N-1	粘土										
N-2											
N-3											
N-4											
N-5											
N-6											
N-7											
N-8											
N-9											
N-10											

表-3 礫・まさ土単層模擬地山の実験条件

供試体番号	模擬地山	注入材		注入速度 (l/min)			注入量 (l)	
		S	R	0.30	0.50	1.00	0.50	
R-1	礫							
R-2								
R-3								
R-4								
R-5								
R-6								
M-1	まさ土							
M-2								
M-3								
M-4								
M-5								
M-6								

表-4 互層模擬地山の実験条件

供試体番号	模擬地山	注入材		注入速度 (l/min)				注入量 (l)					
		S	R	0.30	0.50	1.00	0.10	0.25	0.50	0.75	1.00		
1-1	まさ土 粘土												
1-2													
1-3													
1-4													
1-5													
1-6													
1-7													
1-8													
1-9													
1-10													
1-11													
1-12													
1-13													
1-14													
2-1	礫 粘土												
2-2													
2-3													
2-4													
2-5													
2-6													
2-7													
2-8													
2-9													
2-10													
2-11													
2-12													
2-13													
2-14													
3-1	粘土 まさ土 粘土												
3-2													
3-3													
3-4													
3-5													
3-6													
3-7													
3-8													
3-9													
3-10													
3-11													
3-12													
4-1	粘土 礫 粘土												
4-2													
4-3													
4-4													
4-5													
4-6													
4-7													
5-1	まさ土 礫 まさ土												
5-2													
5-3													
5-4													
5-5													
6-1	礫 まさ土 礫												
6-2													
6-3													
6-4													
6-5													

0.5, 1.0 l/min の組合せで注入材 R と S ともに実施した。また、礫、まさ土単層についても粘土地山との比較のため、注入量 0.5 l, 注入速度を 0.3, 0.5, 1.0 l/min の組合せで注入材 R と S ともに実施した。

次に、礫、まさ土、粘土それぞれの組み合わせで6種類の互層地山を作成し、先に示した各種条件下で注入実験を実施した。注入速度に関しては、肥後らにより³⁾固結形状にはほとんど影響しないという結果が報告されている。しかし、難浸透性地山に対して肥後らの実験よりも遅い注入速度が要求されることが予想された。そこで、粘土地山に対する注入速度を 0.3, 0.5, 1.0 l/min と設定し、他の材料もそれに合わせた注入速度で実験を行うこととした。

なお、注入量は改良体の体積あるいは改良範囲を大きく左右すると考えられるため、注入量は実施工では 30 l/本程度の実績が多いという実績を考慮するとともに、先に述べた供試体のサイズを考慮し、粘土単層地山では 0.1, 0.2, 0.3 l/本の3段階、互層地山では 0.1, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0 l/本と5段階に変化させ、礫層およびまさ土単層地山では 0.5 l/本と一定とした。単層地山の実験ケースを表-2, 表-3 に、互層地山における実験ケースを表-4 に示す。

本研究では、以上の組み合わせにより、単層地山では粘土地山を10ケース、礫、まさ土地山を各6ケースとし、互層地山では合計57ケースを対象に模擬地山注入実験を行った。



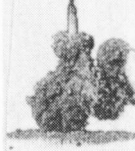

なお、実験中シール材と円筒缶の間から注入材のリークが発生したものについては、リークした固結物重量を測定し、注入量から差し引いて実注入量とした。

c) 改良体体積の測定と形状の確認

注入が完了した後円筒缶側面を切断し、改良体を取り出した。次に、改良体が壊れないように固結していない部分を水洗により取り除き、残ったものを固結体とした。固結体の体積は、水置換法によって測定を行った（以下、改良体積と称す）。ここで水置換法とは、秤に乗せた水槽中に固結体を没し、増加重量分を固結体の体積に置き換えるものである。

また、各供試体の固結形状を確認するため、供試体毎に側面2方向および円筒缶底面方向より写真撮影を行い、固結体の形状を確認した。

表-5 注入材固結形状の分類

	A (浸透)	BI (割裂浸透)	BII (割裂浸透)	CI (割裂)	CII (割裂)
外観形状					
内部形状	浸透による注入形状	割裂脈による脈状注入および浸透注入	割裂脈による脈状注入および浸透注入	割裂脈による脈状注入	割裂脈による脈状注入

4. 単層模擬地山への注入と改良効果

(1) 固結体の形状について

単層地山へのウレタン注入材による固結体の形状は、肥後らが分類した³⁾ように外観形状から大きくA (浸透)、B (割裂浸透)、C (割裂)の3種類に分類できる。また、B (割裂浸透)については注入材の浸透形態から、土粒子を大きく取り込んで球状または円筒状になったB Iと土粒子を取り込んで歪な固結形状を示すB IIに分類できる。さらに、今回対象とした粘土層への注入に関しては、全てC (割裂)の形状になることが認められた。粘土地山の場合には、肥後らの実験³⁾でみられた土粒子の取り込みは小さいが大きな葉片状での固結体を示すものと、葉片状固結体も小さくボルト周辺に限定されるものに分かれた。これらをC I、C IIとして分類する。

表-5 に注入材固結形状の分類を示す。この分類は、肥後らの分類³⁾に対してC IおよびC IIの分類を追加したものである。本節では、各実験条件と固結形状の関係を調べ、固結体の形状を左右する要因と単層地山での注入量と改良効果についての関係を求め、B I、B II、C I、C IIの固結体の発生メカニズムについて検討を加えることとする。

(2) 地山種類別の固結体形状について

図-5 に注入対象模擬地山から見た固結形状の割合を示す。ここで対象としたデータは表-2、3に示す各単層模擬地山における22ケースである。この図から、地山の変化により固結形状が明快に変化するのが認められる。また図-6 に地山種類および注入材別の典型的な固結形状を示す。間隙が大きい礫層ではA (浸透注入)の形状となり、粒径の小さい

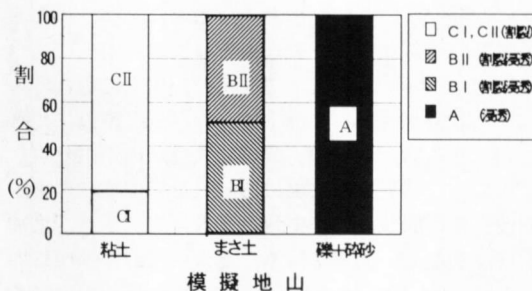


図-5 模擬地山の種類別固結形状の割合




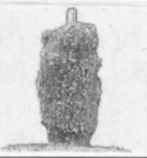


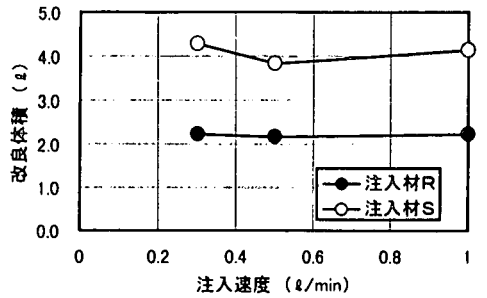
地山	注入量0.3 l/本・注入速度0.5 l/min	
	注入材R	注入材S
粘土		
まさ土		
礫		

図-6 単層地山における典型的な地山種類および注入材別固結形状

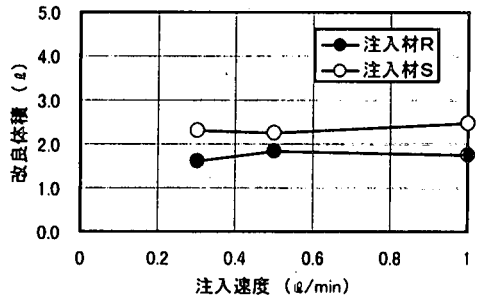
まさ土層ではB I, B II (割裂浸透注入)の形状になり易いことが改めて認められた。また、さらに粒径の小さい粘土層への注入では、C I, C II (割裂注入)の形状になることがわかる。さらに、注入材による固結形状の変化はここにおける地山種類による変化のようには大きくはない。これは礫層においては間隙が大きいため注入材が間隙に浸透して発泡固結し、すべてがAの形状になるためであろう。これに対し、粘土層においては間隙が極めて小さく間隙に浸透することが難しいため、クサビ作用により割裂し土粒子の取り込みがほとんどないC I, C IIの形状になると考えられる。肥後ら³⁾によるとCの形状に分類した山土の固結体については比較的大きな葉片状を示し、土粒子の取り込みは少ないものの改良範囲についてはA, Bのタイプとほぼ同程度の面積の改良体が得られている。しかし、粘土地山の場合は葉片状の形状が小さく、山土ほど葉片状の注入脈は広がらない。この理由としては、山土に比べて粘土が密実であることに加えて、山土に比べて大きい粘着力が注入材の地山中への浸入を困難にしたものであろう。今回の実験の注入量が山土より少ないものの、粘土地山における注入量の増加に伴う固結改良体の成長について殆ど横方向の広がりが増加せず、しかも、同時に実施したまさ土、礫地山における固結改良体と比較しても、小さい範囲の固結改良体となっていることにも粘土地山の特徴が現れているものと考えられる。さらに、葉片状の改良体の改良厚さが山土に比べ薄いことも粘土地山への注入の特徴であろう。

以上のことから、粘性土地山の注入形態に関し割裂注入となるタイプCにおいてタイプA, Bと同程度の注入脈の面積で改良できる場合をタイプC I, 割裂注入ではあるものの固結改良体の形状が小さく葉片状の広がりが小さいものをタイプC IIとして区分することとした。まさ土層においてはB I, B IIの形状が確認されているが、地山の物性や注入条件によって固結形状は変化すると考えられる。ここで、注入形態について模擬地山の種類別に固結形状の割合で示すと、以下ようになる。

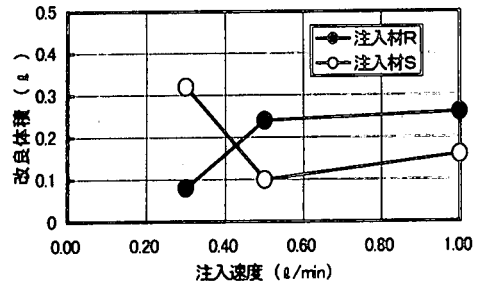
- ①礫層については全てがAの浸透注入となった。
- ②まさ土層については、全体が割裂浸透注入となった。このうち、B Iの固結形状となったものは注入材Sを用いた3例であり、注入材Rを用いた3例ではB IIの固結形状となった。
- ③粘土層においてはすべて割裂注入となった。この場合は注入材による差は見られず、注入材S, Rともに5例中1例がC I, 4例がC IIとなった。



①礫層



②まさ土層



③粘土層

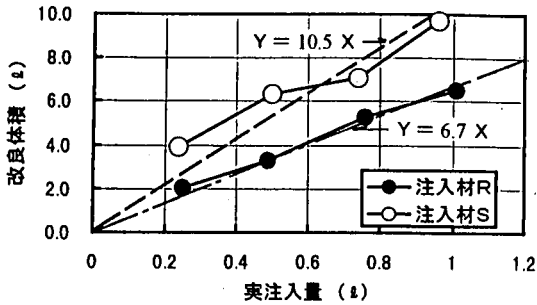
図-7 3種の単層地山における注入速度と改良体積の関係(注入量:礫層,まさ土層:0.5l,粘土層:0.2l)

このように、礫層においては空隙が著しく大きいため、注入材特性によらずAの形状となったものである。また、粘土層においては透水性が著しく小さいため層中への注入は困難であり、注入ボルト周辺に注入材は止まりC II形状になるが、たまたま供試体作成時に生じた弱面などが存在する場合、層中への大きな割裂が生じC I形状となるものと思われる。一方まさ土層においては、両注入材の粘性の差(20~24℃において注入材R:210mPa.s,注入材S:190mPa.s)がまさ土の透水性(透水係数:7.9×10⁻³cm/sec)の影響を微妙に受けたものと解釈される。

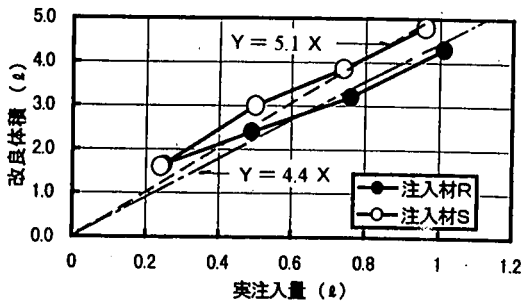
(3) 固結体の大きさ

a) 注入速度と改良体積

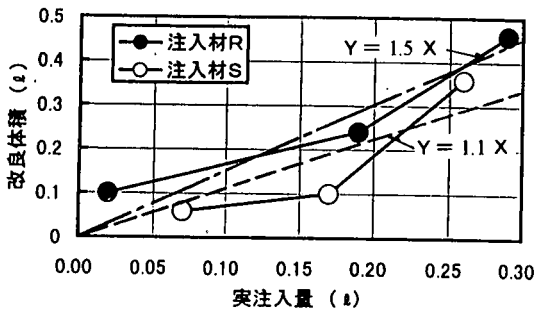
図-7に礫,まさ土,粘土各単層における注入速



① 礫層



② まさ土層



③ 粘土層

図-8 単層地山における実注入量と改良体積
(注入速度：礫層、まさ土層：1 ℓ/min、
粘土層：0.5 ℓ/min)

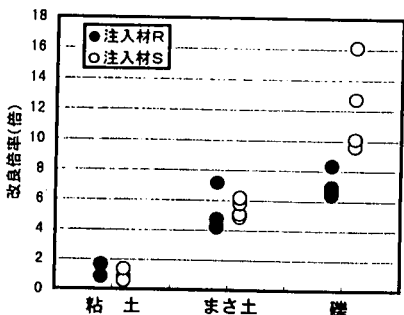


図-9 各模擬地山の改良倍率

度と改良体積の関係を示す。図-7 によると、礫層、まさ土層では注入材Sの改良体積が注入材Rに比べ大きく、特に礫層においては注入材Sは注入材Rの改良体積の2倍程度と顕著である。しかし、注入速度の違いによって改良体積の増減は見られない。また、粘土層においては、注入材SとRの関係が礫層やまさ土層に比べ注入速度が0.5 ℓ/min 以上の結果では両者の関係が逆転しているものの、改良体積の量が小さく改良体積に対する注入速度の影響の有意性は認められなかった。

b) 注入量と改良体積

図-8 にそれぞれの模擬地山における実注入量と改良体積の関係を示す。ここで、礫層、まさ土層に関するものはすでに肥後ら²⁾により発表されたものを引用している。実注入量とは実際に注入した注入材の重量を注入材の比重で除した値であり、シール材と円筒缶の間からリークしたものについては注入量からその差を差し引いている。また、礫層、まさ土層では注入速度を1.0 ℓ/min 注入量は0.25, 0.50, 0.75, 1.0 ℓ/本としているが、粘土層では注入速度を0.5 ℓ/min、注入量は0.1, 0.2, 0.3 ℓ/本としている。

今回の実験範囲内の注入量においては、改良体積は実注入量に関しておおむね比例関係にある。そこで、各模擬地山について改良体積(Y)を原点を通る実注入量(X)の関数として回帰近似すると次のようになる。図-8 にこの直線を併せて示す。図中の破線は注入材Sを、一点鎖線は注入材Rの回帰近似直線を示す。

① 礫層

注入材S : $Y = 10.5X$

注入材R : $Y = 6.7X$

② まさ土層

注入材S : $Y = 5.1X$

注入材R : $Y = 4.4X$

③ 粘土層

注入材S : $Y = 1.1X$

注入材R : $Y = 1.5X$

ここで、模擬地山の固結改良体積を改良倍率として、実注入量に対する改良体積の比で示すこととする。注入による改良範囲を改良倍率で評価することとし、図-8 の結果を改良倍率で表したものを図-9 に示す。

先の回帰式の係数ならびに図-9 によると、注入材による改良倍率は礫層においては注入材Sによるものの方が注入材Rによるものよりも1.2~2.0倍程度(回帰式の近似では係数の比は1.57倍となる)大

互層材料	速度	注 入 量 (g/本)				
		0.10	0.25	0.50	0.75	1.00
まさ土・粘土	注入材 R 0.5 g/min					
	注入材 S 0.5 g/min					
礫・粘土	注入材 R 0.5 g/min					
	注入材 S 0.5 g/min					

図-10 粘土層が透水性層に挟まれている場合の固結形状

表-6 各種互層地盤の実験内容

		case1	case2	case3	case4	case5	case6
互層	上層	まさ土	礫	粘土	粘土	礫	まさ土
	中層	粘土	粘土	まさ土	礫	まさ土	礫
	下層	まさ土	礫	粘土	粘土	礫	まさ土

きくなっている。しかし、注入材SとRの改良倍率の大きな差はまさ土層ならびに粘土層ではなくなる。このことは、本来自由発泡させたときの発泡倍率はここで用いた両材料では注入材Sの方が注入材Rよりも大きいため、比較的発泡が容易な礫層で注入材Sの改良倍率が大きくなるためであり、粘土層やまさ土層のように空隙が少なく自由発泡が拘束され困難な地山では改良倍率の差が明確でなくなったものと考えられる。

5. 互層模擬地山への注入と改良効果

(1) 実験の目的と概要

礫、まさ土、粘土の3種類の単層地山の注入実験により、地山による注入の難易と地山改良形態、改良倍率についてほぼ明らかとなった。前述のように

実施工における注入に際しては、例えば、断層破砕帯における断層粘土のように対象地山が互層状態となることも多く、かつその場合に粘土層が含まれることも多い。ここでは主に難浸透性地山である粘土層を含んだ互層地山を理想化した模擬互層地山での注入において、改良体の成長と固結形状、改良体積が地山条件にどのように支配されるかを明らかにし、今後の難浸透性互層地山での注入改良のための基礎資料とすることを目的とした。

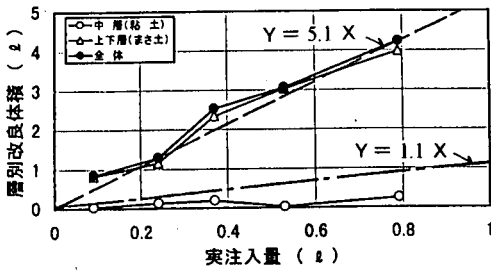
実験条件については表-4に示すとおりであるが、改めて表-6に示すように3種の地山がそれぞれ異なる他の地山に挟まれている状況の計6 caseを対象とし、注入は常に中層から行い、注入材が中層から上下層へ浸透する状況を検討した。

(2) 粘土層が透水性層に挟まれている場合

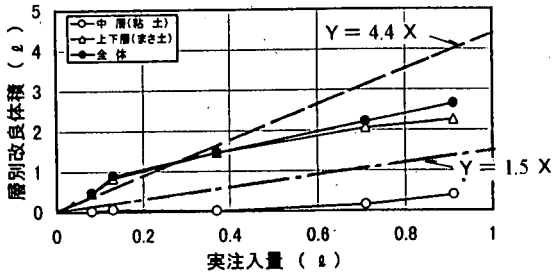
(case1, case2)

a) 改良体の成長と形状

粘土層が透水性層であるまさ土層あるいは礫層により挟まれている場合の改良体の形状と成長の過程を図-10に示す。ここでは、それぞれの実験条件に

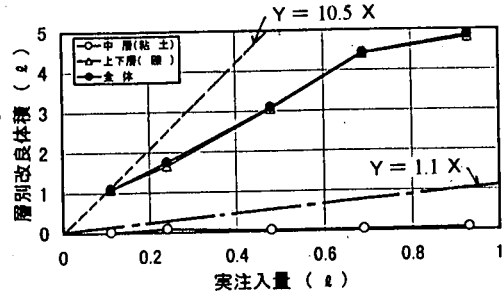


a) 注入材 S

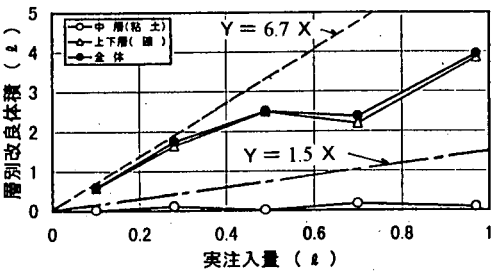


b) 注入材 R

図-11 まさ土・粘土・まさ土互層における実積注入量と改良体積



a) 注入材 S



b) 注入材 R

図-12 礫・粘土・礫互層における実注入力と改良体積

表-7 各注入材別の改良倍率

材料	まさ土・粘土・まさ土	礫・粘土・礫
S	5.4倍	5.2倍
R	2.9倍	4.1倍

において各々の注入量で固結体を固結体の成長過程と考えることとし、注入量を0.10, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 g/本として、固結後水洗により改良形状を確認する方法により改良体の成長過程を示している。従って、厳密な意味での成長過程を示したものではないが、およその推定は成り立つものとする。ただし、図-10における注入量とは注入予定量であり、実注入量とは異なる。

図-10によると、粘土を挟む地山材料、注入材の種類によらず改良体成長過程は以下のように要約できる。

- ①葉液は難浸透性の粘土層においては若干の割裂浸透を生じるものの、注入ボルトと地山のすき間に沿って上下層へ浸透する。
- ②まさ土あるいは礫層ではボルトあるいは粘土層との境界に沿って拡がるとともに、浸透による改良体が拡大する。
- ③まさ土、礫部分における改良体がある程度の大きさになると、粘土部分において割裂が生じ、葉片状の固結体が拡大する。

改良体の成長の状況ならびに形状を地山材料、注入材の種類からみると以下のことが言えよう。

- ④粘土層を抜けて上下の地山へ浸透した注入材は、礫層では早期に模擬地山全体に大きくいっばいに拡がる傾向にあるが、まさ土層では注入ボルトと地山との空隙に沿って浸入した後、地山中に拡がるのが見られる。これは両模擬地山の空隙の大きさに差があるためと思われる。
- ⑤改良体の成長の状況と形状に関しては、注入材による顕著な差とするほどのものはみられない。

b) 改良体積

図-11, 図-12に互層地山条件、注入材ごとの注入量と改良体積との関係を示す。ここで注入量は実注入量でありリーク分を差し引いている。また、それぞれの図には前章で求めた単層地山における改良体積の回帰直線を記入しており、一点鎖線は粘土、破線はまさ土、点線は礫を示している。

図-11はまさ土・粘土・まさ土に対するものである。注入材S, Rとも粘土層の改良体積は極めて小さく、改良体積の大部分はまさ土に対するものとなっている。また、まさ土中の改良体積はまさ土単層地山に対するものと近い値を示しており、注入材が粘土層中を通過する際に注入ボルトと地山とのすき間に沿って浸透するものの、その間の時間の影響は少なく、まさ土中へ浸透してから改良体積にほとんど影響を及ぼしていない。

これに対して図-12の礫・粘土・礫の地山では、

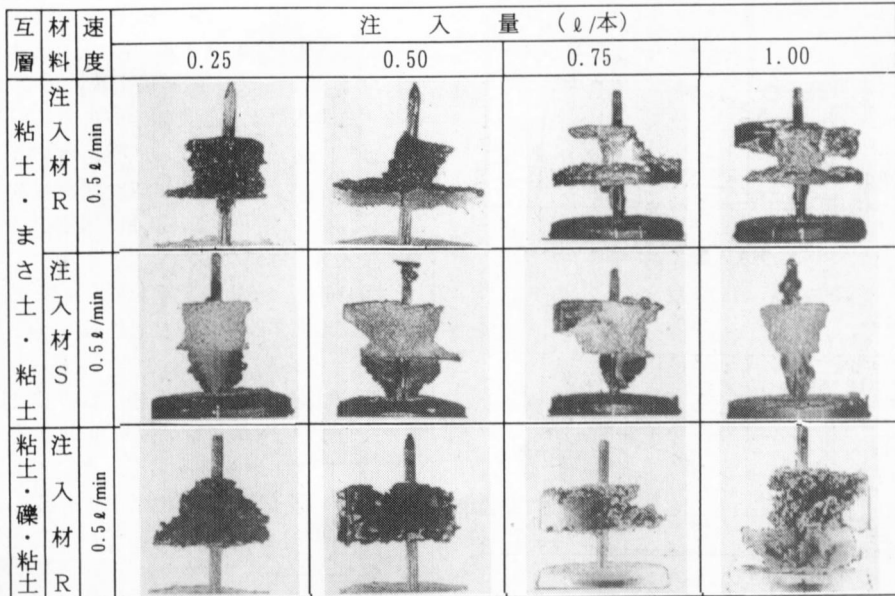
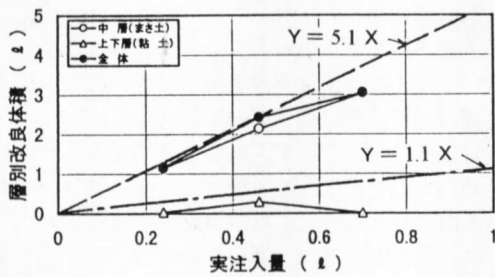


図-13 透水性層が粘土層に挟まれている場合の固結形状



a) 注入材 S

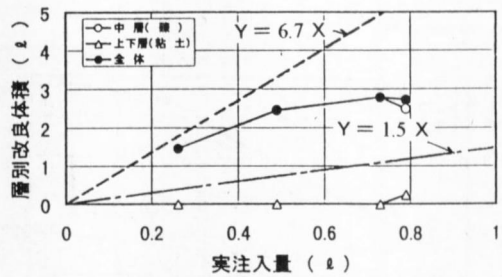
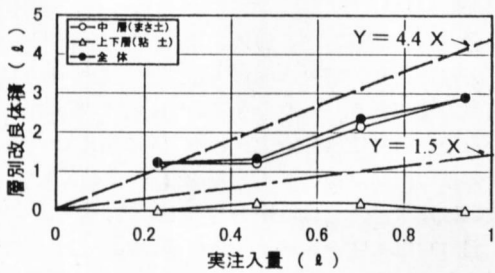


図-15 粘土・礫・粘土互層における実注量と改良体積 (注入量 R)



b) 注入材 R

図-14 粘土・まさ土・粘土互層における実注量と改良体積

粘土層の改良体積が極めて小さいことはまさ土・粘土・まさ土と同じであるが、礫層中の改良体積は礫地山単層の場合から予想される改良体積に比べてかなり小さいものとなっている。その結果、互層地山全体の改良体積は両caseの地山で同程度のものとな

っている。このことは、注入材が粘土層中を通過する際に注入ボルトと地山とのすき間に沿って浸透するものの、その間の影響が初期の自由発泡を遅らせ、初期の発泡の拡がりを阻害する作用があるものと考えられる。ここで、各実験caseにおいて最大の注入量に対するものを各caseの代表として改良倍率の目安を示すと表-7 となる。この値によると、まさ土・粘土・まさ土と礫・粘土・礫は改良体積に大きな差はなく、また注入材 S による方が注入材 R によるものより1.2~1.8倍程度改良体積は大きくなる。

(3) 透水性層が粘土層に挟まれている場合

(case 3, case 4)

a) 改良体の成長と形状

透水性層のまさ土層あるいは礫層が粘土層により挟まれている場合の改良体の形状と成長の過程の固

互層	材料	速度	注 入 量 (ℓ/本)			
			0.25	0.50	0.75	1.00
礫・まさ土・礫	注入材 R	0.5 ℓ /min				
		0.5 ℓ /min				

図-16 透水性層同士の互層の場合の固結形状

表-8 各ケースの改良倍率

	粘土・まさ土・粘土	粘土・礫・粘土
S	4.4倍	--
R	3.1倍	3.5倍

結形状を図-13に示す。ここでは、それぞれの実験ケースにおいて注入量を0.25, 0.50, 0.75, 1.00 ℓ/本として注入し、改良体の成長過程を示している。

図-13によると、粘土を挟む地山材料、注入材の種類によらず改良体成長過程は以下のように要約できる。

- ①注入材はボルト中央部の注入孔から中層の透水性層のまさ土、礫部に浸透し改良体が拡がる。
- ②さらに注入を進めると、注入材は中間層が充填され固結するため、注入ボルトに沿って上下の粘土層へ浸入し、ボルト周辺に葉片状の固結体を生じる。
いま改良体の成長の状況ならびに形状を地山材料、注入材の種類からみると以下のことが言えよう。
- ③中層の透水性層である礫層では比較的注入量が少ない時から大きくいっばいに拡がる傾向にあるがまさ土層では注入ボルト周辺から拡がるのがみられる。
- ④注入材SとRに関しては、まさ土層における改良体積について、注入材Sの方がRに比べ1.4倍程度大きい改良倍率を示した。

b) 改良体積

図-14, 図-15に互層地山条件、注入材ごとの注入量と改良体積との関係を示す。また、それぞれの図には前章で求めた単層地山における改良体積の回

帰式を記入している。

図-14は粘土・まさ土・粘土に対するものである。注入材S, Rとも粘土層の改良体積は極めて小さく、改良体積の大部分はまさ土に対するものとなっている。また、まさ土中の改良体積については、注入材Sはまさ土単層地山に対するものと近い値を示しているが、注入材Rはまさ土単層に比べやや少ない注入改良体積となった。

これに対して図-15の粘土・礫・粘土の地山では、粘土中の改良体積が極めて小さいことは図-14と同じであるが、礫層中の改良体積は礫地山単層の場合から予想される改良体積に比べて小さいものとなっている。注入材料別のケースでは、注入材Sでは発泡倍率が注入材Rに比べ大きいため中間層に早期に充填されたことから、注入材の量による改良体積の増加は見られなかった。全改良体積は両者の地山ケースで同程度のものとなっている。このことは、中間層の体積が限られており、上下層が難浸透性地山であるため、自由発泡に近い現象を阻害されたものと考えられる。ここで、各実験ケースにおいて最大の注入量に対するものを各ケースの代表として改良倍率の目安を示すと表-8となる。このケースも、粘土・まさ土・粘土、粘土・礫・粘土地山ともほぼ同程度の改良倍率となったことがうかがえる。

(4) 透水係数の異なる透水性層の互層の場合

(case 5, case 6)

a) 改良体の成長と形状

まさ土と礫層の透水性層同士の互層の場合、改良体の成長と形状を図-16に示す。ここでは、それぞれの実験ケースにおいて注入量を 0.25, 0.50,

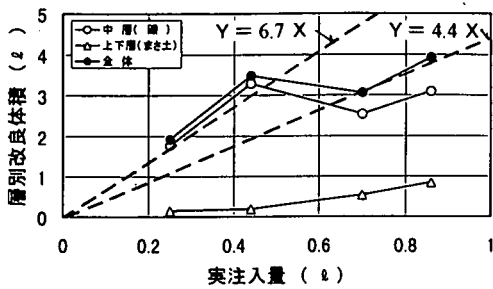


図-17 礫・まさ土・礫互層地山における実注入量と改良体積(注入材R)

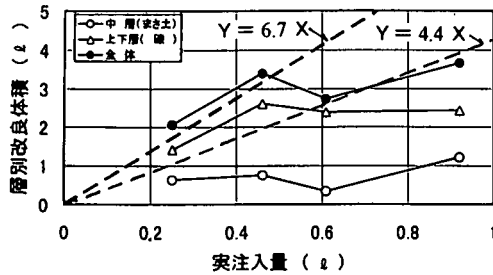


図-18 まさ土・礫・まさ土互層地山における実注入量と改良体積(注入材R)

表-9 各ケースの改良倍率

材料	礫・まさ土・礫	まさ土・礫・まさ土
R	4.0倍	4.6倍

0.75, 1.00 ℓ/本として注入し、固結後水洗により改良形状を確認する方法により改良体の成長過程を示している。図-16によると、地山材料、注入材の種類により改良体の成長過程は以下のように要約できる。

中間層がまさ土層で上下層が礫層である場合、

- ①薬液はまさ土と礫層にほぼ同時に改良が始まる。
- ②まさ土層がある程度改良されると、主に礫層の改良体が大きくなる。

中間層が礫層で上下層がまさ土層である場合、

- ①まず中間層の礫層に充填される。
- ②中間層の礫層が全て改良されたのち、まさ土に若干注入される。

このように、透水性層同士の注入でも表-1に示したように、礫が 10^3cm/sec でまさ土が 10^2cm/sec オーダーと透水性が極端に異なるため、透水性の高い層に重点的に改良される傾向があることが示された。なかでも、注入位置が透水性の高い礫層にある場合には特に礫層中心に改良が行われることが示された。

b) 改良体積

図-17, 図-18に互層地山条件、注入材ごとの注入量と改良体積との関係を示す。また、それぞれの図には前章で求めた単層地山における注入量と改良体積の関係の帰帰線を記入している。

図-17は礫・まさ土・礫に対する改良体積を示している。単層における改良と比べ、改良体積が小さくなっていることがわかる。また、注入量が多くなるに従い、注入抵抗が増加するためか改良体積は比率として見たときさらに小さくなっている。また図-18はまさ土・礫・まさ土に対するものである。この場合も図-17と同様な傾向が見られる。

ここで、各実験ケースにおいて最大の注入量に対するものを各ケースの代表として、改良倍率の目安を示すと表-9となる。この値から、ほぼ同程度の改良倍率ではあるものの、中層が礫の場合がやや改良倍率が大きくなっていることがわかる。

(5) 互層地盤における注入効果について

浸透性の良好な地山と難浸透性の地山との互層状態の地山条件において、ウレタン注入材による注入効果は難浸透性の地山の改良を期待することはできず、浸透性の良い地山を主体に改良することになる。

今回対象としたウレタン注入材は、トンネル掘削時の切羽天端安定のための補助工法として一般的に採用される。ウレタン系注入材による地山改良をトンネル切羽の崩壊防止等を主たる目的とすると考え、図-1に示した断層破碎帯区間を掘削するものとして考える。そのとき、難浸透性地山(粘土地山)を断層粘土体と考え注入の不必要な地山と考えることができれば、注入材はその周辺の破碎帯区間である浸透性の大きい地山を主に改良することになる。従って、地山安定のために改良が必要な区間のみ注入され、実現場の互層地山においても注入により改良が必要な地山に効率的に注入することが可能であるとなることができ。さらに、改良対象地山と地山安定のための必要な改良体積がわかれば、本文で提案した改良倍率を参考にして必要注入量の推定をすることも可能となる。

また、粘土とまさ土の互層地山では、各層別改良体積と単層地山での改良体積とが注入材Sにおいては比較的近い結果となった。このことは、まさ土で代表される程度の透水係数が 10^3cm/sec オーダーの地層と粘土層からなる互層地山においては、注入材Sを用いる場合は単層地山での改良体積の推定式を用いることで、互層地山での注入改良体積を推定することが可能である。注入材Rの場合は単層地山での改良体積の0.5~0.7倍程度で推定すれば可能であ

ると考えられる。

次に、礫・粘土・礫の互層においては、単層注入における改良体積に比較して改良体積は小さい結果となった。このことは、注入孔が難浸透性の地山中にあり、注入材が粘土地山中の層を通過することで注入時間が影響し、礫層における初期の発泡が阻害されたためと考えられる。それに対し、まさ土については粘土層区間通過に要する時間経過による地山改良に対する影響が小さかったためと考えられる。また、今回実験に使用した注入材RとSでは単層注入の改良体積に比較して互層地山での改良体積への低減率が異なるが、これは注入材Sの自由発泡倍率が大きかったためと考えられる。

このように、特に浸透性に大きな差のある互層地山条件では、単層地山での注入量と改良体積の関係より低い改良体積となることがわかった。

6. まとめ

本研究において粘土および粘土を含む互層地山のウレタン注入改良効果に関し、理想化した状態での模擬地山として、粘土、まさ土、礫層の互層地山を作成し、ウレタン注入材の改良効果に関して検討を行った。その結果、以下に示す結論が得られた。

- ①浸透性の良好な地山と難浸透性の地山との互層地山において、その改良効果は浸透性の良い地山を主体に発揮される。
- ②互層地山に関して各地山の浸透性の差が大きいほど単層地山での注入量と改良体の体積の関係より小さい改良体積となる。
- ③互層地山の注入において、粘土地山を固結地山と考えまさ土や礫層を未固結地山と考えると、固結地山へは注入されず、未固結な地山を効果的に改良することになり、互層地山においても効果的な注入が期待できる。
- ④各単層地山毎に得られた実注入量と改良体積の関係から、互層地山における改良体積について以下の知見が得られた。i) まさ土・粘土・まさ土の互層においては、注入材Sを用いる場合はほぼ単

層地山の改良体積と同程度となり、注入材Rを用いる場合は単層地山の改良体積に対し0.5~0.7倍程度となる。ii) 礫・粘土・礫の互層においては、注入材Sを用いる場合は単層地山の改良体積の0.5倍程度となり、注入材Rを用いる場合は単層地山の改良体積に対し0.6倍程度となることから、互層地山の注入量についても推定可能である。

謝辞：本研究を行うにあたり、(株)間組 肥後満朗氏、第一工業製薬(株)牧宏久氏、畠山正紀氏、および(株)カテックス 浅井勉氏には実験や結果の整理に多大なご協力をいただいた。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 肥後満朗, 牧 宏久, 古川浩平, 中川浩二: 山岳トンネルにおける注入式フォアボーリング用ウレタンの材料特性に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 504/VI-25, pp. 117~126, 1994年12月.
- 2) ジェオフロンテ研究会: ウレタン注入式フォアボーリング技術資料, pp. 40~49, 1992年11月.
- 3) 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ボ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年12月.
- 4) 例えば, (社)土質工学会薬液注入工法における注入効果の予測・確立手法に関する基礎的研究委員会: 薬液注入工法における注入効果の予測確認手法に関するシンポジウム発表論文集, p. 4, 1993年3月.
- 5) 日本国有鉄道編: 注入の設計施工指針, 1987年1月.
- 6) (社)土質工学会: 薬液注入工法の調査・設計から施工まで, pp. 129~132, 1985年2月.
- 7) 森麟, 田村昌仁, 原口賢一: ゲル化時間の短い急結・瞬結性薬液の砂質地盤における注入固結形態とその支配条件, 土木学会論文集, No. 406/III-11, 1989年6月.
- 8) 森麟, 田村昌仁, 千柄植: 砂質地盤における割裂発生機構, 土木学会論文集, No. 388号/III-8, 1987年12月.
- 9) 森麟, 江本佑橘, 入谷剛: 境界注入現象の発生メカニズムについて, 土木学会第49回年次学術講演会, 1994年9月.
- 10) 加賀宗彦, 森麟: 薬液注入におけるゲル化した注入材の安定性と固結砂強度の耐久性に関する基礎研究 土木学会論文集 No. 496/V-24, 1994年8月.
- 11) 田中和広, 井上大榮: 断層の定義, 考え方, 地盤工学会, 土と基礎, 43-3, pp. 11~14, 1995年3月.

(1997.12.5受付)

A STUDY ON THE EFFECT OF URETHANE GROUTING INTO LOW-PERMEABLE GROUND
(THE CHARACTERISTICS OF EFFECTS VARIED ON THE GROUND TYPES)

Masayuki SUZUKI, Akira TANAKA, Hiroshi SAMEZAWA, Keisuke NAKAGAKI,
Kazuo SAKAO and Koji NAKAGAWA

This study intended to examine the grouting effects using urethane injection into the low-permeable ground in order to examine the mechanism of urethane injection spreading into void areas in the ground. A model ground built indoor was used to carry out the grouting experiment. Thus the injected area was examined after the grouting. The experiment results were compared with the past experiments into gravel and decomposed granite soil. The grouting effect into the low-permeable ground was characterized that the spreading pattern was like curtain. The urethane spreaded through the fractures of the low-permeable ground. On the other hand, the patters into gravel and decomposed granite soil were similar and formed balloon- type patterns. Further, three types of ground materials, clay, decomposed soil and gravel, were formed into interchangeably mixed strata in 6 cases. Thus the grouting effects, spreading forms the effectiveness, were observed in each case.