

**投稿論文(和文)**

**PAPERS**

# ウレタン注入式フォアポーリングにおける ウレタン材の注入形態に関する研究

肥後満朗<sup>1</sup>・牧 宏久<sup>2</sup>・中垣圭介<sup>3</sup>・河原幸弘<sup>4</sup>・古川浩平<sup>5</sup>・中川浩二<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 ㈱間組 技術・設計第二部設計第二課長 (〒107 東京都港区北青山2-5-8)

(ジェオフロンテ研究会, ウレタン開発WGリーダー)

<sup>2</sup>工博 第一工業製薬㈱ 建設施工薬剤研究部長 (〒600 京都市下京区西七条東久保町55)

<sup>3</sup>㈱カテックス 営業本部長 (〒460 名古屋市中区上前津1-3-3)

<sup>4</sup>正会員 工修 日本技術開発㈱ (〒164 東京都中野区本町5-33-11), 元山口大学大学院

<sup>5</sup>正会員 工博 山口大学教授 工学部 社会建設工学科 (〒755 宇部市常盤台)

ウレタン注入式フォアポーリングにおけるウレタン材の注入形態を把握すべく、3種類の模擬地山を対象にした室内実験および現場実験を実施し、以下の知見を得た。①含水比が小さい山土やマサを対象にした注入では、固結体は塊状になるが、湿潤状態では葉片状になる。②山土やマサを対象にした注入で、球状ないし円筒状の固結体であっても内部構造は”割裂・浸透注入”の注入形態となる。③間隙径の大きい礫の場合には”浸透注入”となると思われる。④山土やマサでは、注入量の3.5～6倍程度の改良体積となるが、礫では6.5～10倍程度となる。⑤地中の注入材の換算発泡倍率は山土やマサでは2～4倍、礫では2～7倍と大きくなる。

**Key Words:** urethane, forepoling, grouting, solidified shape

## 1. はじめに

ウレタン注入式フォアポーリングは、一般にトンネルの坑口等で用いられているセメントモルタルを充填材とするフォアポーリング<sup>1)</sup>と異なり、ボルトの剛性ととも地山にウレタンを注入することによってボルト間の地山を補強し、地山の崩落を防止する補助工法と考えられる。よって、地盤改良体が各ボルト間を連結するか、連続しないまでも未改良範囲を小さくして、ボルト間からの土砂崩落を防止できるように注入設計することが必要になる。

通常のセメントミルク注入や薬液注入の注入形態については、種々の観点から多くの研究がなされており、数多くの研究成果<sup>2)</sup>が発表され、注入工の設計や施工に関して有用な情報となっている。ところが、ウレタン注入式フォアポーリングについては国内で年間200件以上もの使用実績があるにもかかわらず、

筆者らの文献調査においては、新しく開発された注入材の物性や試験注入結果等についての報告が数例<sup>3)~5)</sup>認められるだけであり、注入設計等に有用な体系化された研究はほとんどなされていないようである。ウレタン注入材は、通常のセメントミルク注入工や薬液注入工で用いられる注入材と比較して、反応硬化過程で発泡するとか、反応硬化前の粘性が大きいとかの著しく異なる特性を持っている。例えば通常の薬液注入であれば、トンネル切羽で注入する場合注入圧の防護のためにコンクリート製のバルクヘッドを必要とするが、ウレタン注入式フォアポーリングにおいては、このような材料特性から、バルクヘッドなしで比較的高圧の注入が可能であるなど、施工性も異なっている。なお、注入管理方法としては、注入量と注入圧の両方から管理しているケースが多い。筆者らは、先の論文<sup>6)</sup>において、ウレタンの材料特性に関する室内実験を実施し、ウレ

タン注入式フォアボーリングの“施工性”や“改良効果”について材料特性からみた基本的性質を報告した。

本研究においては、ウレタン注入式フォアボーリングの設計手法や施工管理方法を検討するためには、まず改良体の形状や大きさ等に強く影響する注入形態を把握することが必要と考えた。そこで、この目的のために、3種類の模擬地山を用いて、地山の含水比や注入材の種類および注入速度や注入量を変化させて注入し、改良体の形状や大きさ等について検討する室内実験を実施した。

次に、室内実験における実験結果が実物大の注入時に得られるものと同様の傾向になることを確認すべく、比較的締ったマサ盛土において、注入速度や注入量を変化させて通常の現場と同様な方法で注入した。ここでは、主に改良体の形状や大きさおよび強度について測定する現場注入実験を実施し、先の模擬地山注入実験結果と比較し検討した。

## 2. 模擬地山注入実験

### (1) 実験の目的

ウレタン注入式フォアボーリングの実施工において、例えば粘土分の少ない崖錐層においては、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状態が見られるし、粘土や砂の互層においては注入脈がフィルム状に走るのが見られる。このように、注入対象地山によって、ウレタン注入材の注入形態は大きく異なるようである。また、“ウレタン”と分類される注入材であっても種類によって特性が異なることから、注入材料によっても注入形態が異なることが予想される。次に、薬液注入工においては、主に注入速度によって浸透注入や割裂注入になったり注入形態が異なるとの報告<sup>7)</sup>もあり、ウレタン注入工においても、注入速度等の施工法によって注入形態が変化することも考えられる。

ここでは、模擬地山を用いてこれらの注入形態を左右すると思われる各種条件を変化させて注入し、注入完了後に改良体を取り出し、改良体の形状や大きさについて調査し、その傾向を把握することを目的とした。

### (2) 実験方法

#### a) 実験装置と実験の概要

エア抜き孔を設けた内径30cm高さ30cmの円筒缶に、所定の地山用材料を3層で締固めたものを模擬地山とした。図-1に示すようにφ22mmの注入ボルトを設置し、上部に高強度のウレタンを用いてシール

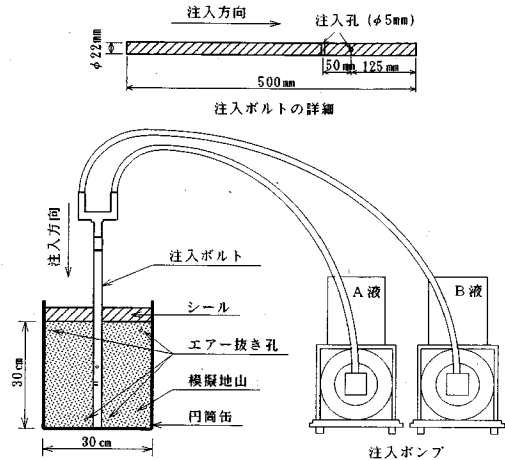


図-1 実験装置図

し、1.5ショットで所定の注入量を注入した。注入速度は一定に保ち、10秒毎にポンプ圧を測定した。また、注入時の液温は全体を通じて20~24℃程度であった。

シール材と円筒缶の間から、リークが発生したもののについては、リークした固結物の重量を測定し、注入量から差し引いて実注入量とした。模擬地山、注入材料および注入条件等については以下に示す。また、実験ケースを表-1に示す。

#### b) 模擬地山の材料と作成方法

模擬地山の材料としては、注入後に固結改良体を水洗いで取り出せることに配慮するとともに、間隙の大きさの差が実験に反映されるように、以下の3種類を選定した。なお、これら3種類の模擬地山は、実施工において適用頻度が多いと思われる粘性土や砂層の代用として⑦山土と①マサを、そして粘土分が少ない崖錐層の代用として②礫を選定したものである。また、②の材料は、粗礫だけでは反応前の注入材が注入直後に下部へ流れ落ちる現象が予備実験で確認されたため、細かい礫を目潰しとして用いた。

⑦山土

①マサ

②礫 (25mmフルイ残留の粗礫と1.7mmフルイ残留の細かい礫を重量比2:1で混合したもの)

これら3種類の模擬地山は、図-2荷示す粒度で構成されており、土粒子の粒径からHazenやCreagerの式より透水係数を算出すると、⑦山土が $k = 1 \sim 2 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 、①マサが $k = 5 \sim 8 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 、②礫が $k = 2 \sim 5 \times 10^0 \text{ cm/sec}$ 程度と予想される。

模擬地山の作成は、山土とマサについては、含水比を調整したものを、10cm厚ずつ3層に分けて締固めた。礫については、自由落下により充填した後、

表-1 模擬地山注入実験条件と結果一覧

供試体 No.	模擬地山	注入材		注入速度(ℓ/min)					注入量(ℓ)					含水状況(%)					固結体の形状	固結体積(ℓ)	実注入量(kg)
		S	R	1	2	3	4	5	0.2	0.5	0.7	1.0	1.2	13	16	19	22	25			
1	山土	○		○								○	○						A	5.40	1.58
2		○		○								○	○						A	5.40	1.24
3		○		○								○	○						A	3.60	1.00
4		○		○								○	○						A	2.85	0.68
5		○		○								○	○						A	1.60	0.39
6			○		○								○	○					B	4.45	1.82
7			○		○								○	○					B	3.60	1.48
8			○		○								○	○					B	3.00	1.16
9			○		○								○	○					A	0.80	0.34
10			○		○								○	○					A	1.05	0.36
11		○		○									○	○					C	3.08	1.44
12		○		○									○	○					C	2.52	1.24
13		○		○									○	○					C	1.96	0.92
14		○		○									○	○					C	1.00	0.58
15		○		○									○	○					C	0.68	0.42
16			○		○								○	○					B	2.76	1.80
17			○		○								○	○					C	3.68	1.42
18			○		○								○	○					C	2.62	1.06
19			○		○								○	○					C	1.20	0.76
20			○		○								○	○					C	1.15	0.40
21		○		○									○	○					B	7.40	1.25
22		○		○									○	○					B	6.35	1.28
23		○		○									○	○					B	5.50	1.22
24			○		○								○	○					B	5.75	1.44
25			○		○								○	○					B	4.20	1.48
26			○		○								○	○					B	3.55	1.30
27		○		○									○	○					A	4.20	1.18
28		○		○									○	○					A	2.90	1.08
29		○		○									○	○					A	3.35	1.28
30		○		○									○	○					A	3.65	1.28
31		○		○									○	○					B	3.10	1.30
32			○		○								○	○					B	3.60	1.38
33			○		○								○	○					B	3.45	1.40
34			○		○								○	○					B	3.70	1.52
35		○		○									○	○					C	1.12	1.30
36		○		○									○	○					C	0.42	1.30
37		○		○									○	○					C	1.15	1.22
38		○		○									○	○					C	0.95	1.26
39			○		○								○	○					C	2.25	1.36
40			○		○								○	○					C	0.79	1.38
41			○		○								○	○					C	0.79	1.36
42			○		○								○	○					C	0.47	1.46
空气中乾燥状態																					
46	礫	○		○								○	○						A	10.05	1.54
47		○		○								○	○						A	9.70	1.24
48		○		○								○	○						A	7.10	0.98
49		○		○								○	○						A	6.35	0.70
50		○		○								○	○						A	3.90	0.40
51			○		○								○	○					A	6.20	1.80
52			○		○								○	○					A	6.50	1.48
53			○		○								○	○					A	5.25	1.14
54			○		○								○	○					A	3.30	0.78
55			○		○								○	○					A	2.05	0.46
9 12 15 18 21																					
56	マサ	○		○								○	○						A	7.40	1.56
57		○		○								○	○						A	4.80	1.26
58		○		○								○	○						A	3.85	1.00
59		○		○								○	○						A	3.00	0.72
60		○		○								○	○						A	1.60	0.42
61			○		○								○	○					A	4.55	1.82
62			○		○								○	○					A	4.30	1.48
63			○		○								○	○					A	3.20	1.14
64			○		○								○	○					A	2.40	0.80
65			○		○								○	○					A	1.65	0.44
66			○		○								○	○					C	0.54	1.06
67		○		○									○	○					B	5.85	1.28
68		○		○									○	○					A	4.80	1.20
69		○		○									○	○					A	4.15	1.32
70			○		○								○	○					C	2.44	1.38
71			○		○								○	○					B	2.62	1.34
72			○		○								○	○					B	4.95	1.34
73			○		○								○	○					B	3.60	1.38
74		○		○									○	○					A	3.35	1.26
75		○		○									○	○					A	4.20	1.26
76		○		○									○	○					A	4.80	1.32
77		○		○									○	○					A	5.15	1.30
78			○		○								○	○					B	3.70	1.36
79			○		○								○	○					B	2.85	1.34
80			○		○								○	○					B	3.25	1.40
81			○		○								○	○					B	3.70	1.44

(注) No. 43~45は、予備実験のため欠番とする。

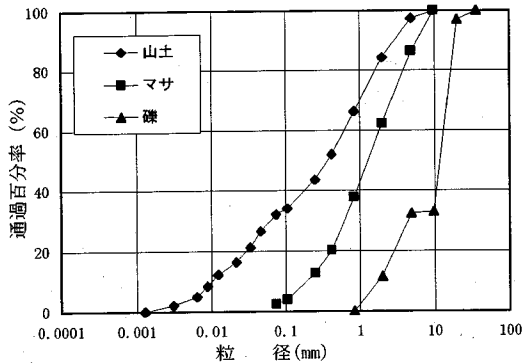


図-2 模擬地山の粒度分布

表-2 使用注入材の特性

製品名	注入材 S		注入材 R	
	A 液	B 液	A 液	B 液
組成	特殊ポリオール 架橋剤 発泡剤 触媒	ポリイソシアネート 難燃剤	珪酸ソーダ 特殊改質剤 触媒	特殊プレポリマー 粘度低下剤
外観	微白濁液体	褐色液体	微白濁液体	褐色液体
粘度 (mPa·s/25℃)	120 ± 30	150 ± 30	110 ± 30	160 ± 30
比重 (20/4℃)	1.08 ± 0.03	1.26 ± 0.03	1.45 ± 0.03	1.23 ± 0.03
配合 (重量比)	A/B = 1/0.9~1.1		A/B = 1/0.9~1.1	
ライズタイム (秒/20℃)	70 ± 15		45 ± 15	
酸素指数*	27.0		28.5	

\*JIS K7201

シール材の模擬地山への浸透を防止するために、上部に不織布を敷いてその上にシール材を用いてシールした。

#### c) 注入材料と注入ボルト

注入材料は、使用実績の多い注入材 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) と、最近使用実績の増加が認められる注入材 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) を用いた。なお、両注入材は、先の論文<sup>6)</sup> で取り上げた注入材と同じもので、その特性を表-2 に示す。

注入ボルトは、通常使用されている φ22mm の鋼管で、模擬地山のほぼ中央位置に直交する方向に注入孔を 4 孔設けた (図-1 参照)。

#### d) 実験条件と設定水準

(1) 実験の目的の項で述べたように、主に地山条件や使用注入材および注入速度等によって、注入形態が異なると予想されることから、これらの条件を組み合わせて表-1 の 2 重線より左の部分に示すような 78 ケースの実験を実施した。以下に、各実験条件とその考え方を述べる。

① 注入量：実施工では、注入対象地山やトンネル周辺条件に応じて注入量を変更しているが、30ℓ/本

程度が多い<sup>8)</sup>。供試体のサイズを考慮すると (実施工では ℓ = 3.0m のボルトを使用し、有効な注入長としては、ℓ = 2.0m 程度が多いようである。これに対し、今回の室内実験ではボルトの地山への貫入長は 0.3m である。)、約 4.5ℓ/本程度となる。しかし、このような注入量では固結体の体積が大きくなり、円筒缶と接触してしまい注入形態の評価が困難となる。ここでは、注入量に対して 10 倍の改良固結体を得られても、その体積は、円筒缶体積の 1/2 以下になり、円筒缶に接触しないように配慮した。このような考えに基づき、かつ注入量の差が明確になるように、0.25~1.25ℓ/本の範囲で 5 段階に注入量を変化させた。

② 注入速度：実施工では、注入速度として 5~10ℓ/min 程度の実績が多い。これは、注入量 30ℓ/本に対する実注入時間としては 3~6 分間に相当する。実験においては、ライズタイムの影響を考慮して、できるだけ低速注入のデータも望まれた。しかし、先に述べたように、供試体の大きさによる注入量の制約があることに加え、ポンプの制御可能な最低速度が 1ℓ/min 程度であるという制約もあった。ここでは、これらの制約の中で、注入速度の変化に伴う注入形態の差に期待して、1~5ℓ/min の範囲で 5 段階の注入速度を採用した。

③ 模擬地山の含水比：礫については気乾状態のものを用い、含水状況を変えた実験は行っていない。山土とマサについてはそれぞれ十分な水を加えて湿潤状態を作り出し、これを最大含水状態 (それぞれ含水比 25% と 21%) とし、表乾状態 (それぞれ含水比 13% と 9%) との間を 5 段階に変化させた。所定含水比の模擬地山作成に際しては、まず表乾状態を作りだし、続いて計算上求められた水を添加し良く混ぜ合わせた。締め固めは前述の方法によっている。この結果、模擬地山の間隙率は山土が 54~42%、マサが 47~35%、礫が 42% となった。また、単位体積重量は山土が 1.38~1.86gf/cm<sup>3</sup>、マサが 1.60~1.98gf/cm<sup>3</sup>、礫が 1.60gf/cm<sup>3</sup> である。なお、ここで山土とマサの湿潤状態とは、複数の施工経験者がその経験上過去最も湿潤状態であったと思われる現場状況を再現したものを用いている。また、砂層等では、地山が乾燥すると切羽先端が崩落しやすい傾向を示すことから、山土やマサでは表乾状態を最小の含水比として取り上げた。

#### e) 注入状況と改良体体積の測定

① 注入圧力：前述のように注入圧力は 10 秒毎にポンプ圧を測定している。しかし、注入速度によってポンプ圧が上昇する傾向は見られるものの、パイプ内部やミキサー等の管内抵抗を考慮すると、注入工で


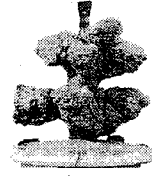

形状の呼称	㊶タイプ	㊷タイプ	㊸タイプ
	土粒子を取り込んだ球状 または円筒状の固結体	土粒子を取り込んでいるが形状が歪な固結体	土粒子の取り込みが 少なく葉片状の固結体
形状の概念 と代表例			
	供試体No. 5 0      供試体No. 7 4	供試体No. 3 2	供試体No. 1 1

図-3 固結体の形状による分類

の実注入圧はせいぜい1 kgf/cm<sup>2</sup> (0.1MPa) 程度と思われた。したがって、本研究では、注入圧力についての検討は行っていない。

②エア抜きの効果とリーク：注入時のエア抜きのために、図-1に示したように円筒缶の4ヶ所に直径5mm程度の孔を設けた。湿潤状態の地山注入時に、エア抜き孔から水が若干滴るのが観察されたが、顕著な排水は見られなかった。また、円筒缶上部のシールの隙間からいくつかの供試体で注入材のリークが見られた。

③改良体の取り出しと体積測定：注入完了後に円筒缶を切断し模擬地山を取り出し、刷毛を用いながら水洗いにより未固結部を取り除き、残ったものを固結体とした。固結体の体積は水と置換することによって測定した。また、いくつかの供試体について針貫入試験を行い換算一軸圧縮強度を求めた。

### (3) 実験結果と考察

#### a) 固結体の形状について

水洗いで残った固結体は大きさが異なるのみならず、様々な形状のものが得られた。ここでは、以下のように固結体の形状を3分類して考察した(図-3参照、なお図-3中の供試体No.は表-1に対応、以下同じ)。

㊶タイプ：注入パイプ中央付近に設けた注入孔を中心とした球状の固結体、または注入パイプを中心とした円筒状の固結体で模擬地山を取込んで固結しており、注入効果や注入範囲等を検討する場合には、均一なマスとして取扱ってもよいと思われる。

㊷タイプ：固結体自体は㊶タイプと同様均一なマスとして取扱ってもよいと思われるような固結体状況であるが、固結体が例えば複数の固結物が合体して





















できたように全体としては歪な形状となっているもの。このような形状であることから実施工においては、どの範囲までを改良範囲として考えるかが問題となると思われる。例えば、フォアポーリングとしての注入効果を考える場合には、固結体に外接する範囲を改良範囲として取り扱っても良さそうであるが、支持力の増強を目的として注入する場合には、改良範囲の設定が問題になると思われる。

㊸タイプ：土粒子が固結体の表面に付着している程度で固結体への土粒子の取込みがほとんどなく、固結体は注入ボルトを中心とした放射状の薄層からなっている。注入式フォアポーリングのように地山の崩落防止だけを目的にした注入においては、固結体の脈が及んでいる範囲では崩落防止効果が期待できそうであるが、地山を固結させ強度を増加させるというまでの効果は期待できないと思われる。

#### b) 固結体の成長について






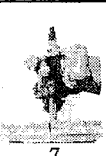









図-3で示したように様々な形状の固結体を得られたが、これらの固結体は地中でどのような過程で成長したのかを考えてみる。本実験では、模擬地山の条件や注入材の種類および注入速度を同一にして、注入量を0.25ℓ/本から1.25ℓ/本まで5段階に変化させたケースにおいて、その各々を比較することによって固結体の成長過程を知ることができる。

このような考えで、固結体の写真を整理した結果を図-4に示す。図-4の写真において、注入量が増えるにしたがい、左から順に右側へ固結体が成長したと考える。注入量が増加するとともに固結体が大きくなっているのは当然であるが、その形状はほとんど変わらず注入量にかかわらず最初(0.25ℓ注入時)の形状分類(㊶タイプ、㊷タイプ、および㊸タイプ)

形状	模擬地山	含水比	注入材	注入速度	注入量 (ℓ/本)				
					0.25	0.5	0.75	1.0	1.25
㊸タイプ	マサ	9%	S	1 ℓ/min	 60	 59	 58	 57	 56
	礫	気乾	S	1 ℓ/min	 50	 49	 48	 47	 46
㊹タイプ	山土	13%	R	1 ℓ/min	 10	 9	 8	 7	 6
㊺タイプ	山土	25%	R	1 ℓ/min	 15	 14	 13	 12	 11

(写真の数字は、供試体No.を示す。)

図-4 注入量の増加に伴う固結体の成長過程

形状	模擬地山	含水比	注入材	注入量	注入速度 (ℓ/min)				
					1	2	3	4	5
㊸タイプ	マサ	9%	S	1ℓ	 57	 74	 75	 76	 77
㊹タイプ	山土	13%	R	1ℓ	 7	 31	 32	 33	 34
㊺タイプ	山土	25%	R	1ℓ	 12	 35	 36	 37	 38

(写真の数字は、供試体No.を示す。)

図-5 注入速度を変化させた場合の固結体の形状変化

表-3 各種条件と固結体の形状分類

模擬地山	含水比	注入材	㊶タイプ	㊷タイプ	㊸タイプ	供試体No.
山土	13%(表乾)	S	■	□	□	1, 2, 3, 4, 5, 27, 28, 29, 30
		R	■	□	□	6, 7, 8, 9, 10, 31, 32, 33, 34
	16%	S	■	□	□	33
		R	■	□	□	36
	19%	S	■	□	□	22
		R	■	□	□	35
	22%	S	■	□	□	21
		R	■	□	□	24
	25%	S	■	□	□	11, 12, 13, 14, 15, 35, 36, 37, 38
		R	■	□	□	16, 17, 18, 19, 20, 39, 40, 41, 42
マサ	9%(表乾)	S	■	□	□	56, 57, 58, 59, 60, 74, 75, 76, 77
		R	■	□	□	61, 62, 63, 64, 65, 78, 79, 80, 81
	12%	S	■	□	□	69
		R	■	□	□	73
	15%	S	■	□	□	68
		R	■	□	□	72
	18%	S	■	□	□	67
		R	■	□	□	71
	21%	S	■	□	□	66
		R	■	□	□	70
礫	気乾	S	■	□	□	46, 47, 48, 49, 50
		R	■	□	□	51, 52, 53, 54, 55

㊶供試体No. 43, 44, 45は欠番

のままであると考えられる。このことから、ここで  
の注入量の範囲においては固結体の形状は注入量の  
多少ではなく、地山条件や注入材の種類および注入  
速度など、注入量以外の要因に左右されると考えら  
れる。

c) 注入速度と固結体の形状について

図-5に示すものは、模擬地山の条件や注入材およ  
び注入量を一定にして、注入速度を1 ℓ/minから5  
ℓ/minまで5段階で変化させたケースを整理したも  
のである。この表においても、図-4と同様注入速度  
の差にかかわらず固結体の形状はほぼ同一の分類に  
区分される。なお、礫については、注入速度を変化  
させた実験は実施していないが、図-5のように他の  
地山において注入速度による形状の変化がないこと  
から、注入速度にかかわらず1 ℓ/minのケースと同  
様㊶タイプの固結体になったであろうと考えられる。

d) 固結体の形状を左右する要因について

図-4および図-5で示したように、ここでの実験条  
件下においては、固結体の形状は注入量や注入速度  
には左右されず、模擬地山の特性や注入材の種類に  
左右されていると考えられる。

表-3は、模擬地山の種類と含水比および注入材の  
種類別に、固結体の形状を分類したものであり、こ  
の表から以下の傾向が読み取れる。

- ①山土やマサの場合には、含水比が小さい場合に㊶  
タイプの形状の固結体になり、含水比の増加に伴  
い㊷タイプの形状に変化し、湿潤状態の含水比  
(山土: 25%, マサ: 21%) になると㊸タイプの  
形状になりやすい。
- ②山土やマサの場合において、注入材Sの方がRと  
比べて若干㊶タイプの形状を示しやすい傾向が見  
られる。
- ③礫においては、注入材の種類にかかわらず、すべ  
て㊶タイプの形状になっている。

これらの傾向について、注入のメカニズムは以下  
のように考察される。

①の傾向について

湿潤状態という含水比が大きい条件下でみられる  
㊸タイプの形状の固結体について、次のように考え  
られる。まず固結体が注入ボルトを中心にして放射  
状に分布していること、固結体の中に土粒子をほと  
んど組込んでいないことが大きな特徴である。注入  
脈は模擬地山を割裂して進展するが、土粒子間の水  
に阻害されて土粒子間に浸透できないために、土粒  
子をほとんど取込んでない葉片状の固結体となる。  
その形状は、注入圧や発泡圧による割裂によって、  
注入パイプを中心にした放射状の注入脈になったと  
考えられる。

含水比の小さい模擬地山ほど㊶タイプの固結体にな  
りやすい傾向については、土粒子間の水の少ない  
地山ほど、注入孔からの浸透が容易であることから、  
球状ないし円筒状の固結体になりやすいと考えられ  
る。

②の傾向について

注入材SとRの材料特性のうち浸透性に関する  
と思われるものについて比較する。両注入材は表-2に  
示したように粘度はほぼ同程度であるが、ライズタ  
イム(A, B 2液を混合してから発泡が完了するま  
での時間)は注入材Sの方が長く(S: 70±15秒,  
R: 45±15秒)なっている。また、先の論文<sup>6)</sup>で明  
らかにしたように、SとR両注入材のA, B 2液の  
単体での浸透性およびぬれ性(表面を研磨した硬質  
砂岩への滴下液の広がり面積を測定したもので、よ  
り細かい土粒子への浸透製が評価される。)はRの  
方が優れている。

ライズタイムが短かく、浸透性およびぬれ性にす  
ぐれたRの方が、歪な形状の固結体になりやすい点  
については、以下のように考えられる。

e)に述べるように山土やマサを対象にしたケー  
スにおける㊶タイプおよび㊷タイプの固結体は、その  
すべてが「割裂・浸透注入」と分類される注入形態  
を示している。A, B 2液の混合から発泡開始まで  
の時間(注入材Rは約38秒, 注入材Sは約50秒)や  
ライズタイムが短いRの方が、浸透性には優れて  
いるものの注入材の固結が早く、先に注入された注  
入材は固結を開始していることから固結体の成長が困  
難となり、新たに割裂脈を作って注入されることか  
ら、割裂脈の数が多くなり、歪な形状になると考え  
られる。

③の傾向について

礫においては、間隙径が大きいことから注入材S  
とRのライズタイムや浸透性およびぬれ性の差にか



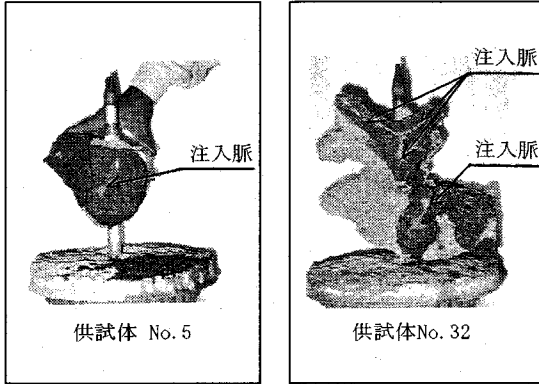


写真-1 固結体の切断面の状況

かわらず、間隙に浸透して発泡し、**Ⓐ**タイプの形状の固結体になったと考えられる。

e) 固結体の内部構造と注入形態について

「注入の設計施工指針」<sup>9)</sup>等においては、注入形態を「浸透注入」、「割裂注入」、「割裂・浸透注入」および「境界注入」に4分類している。本実験での固結体の注入形態について確認すべく、固結体を切断し切断面を観察した。

山土やマサを模擬地山とした**Ⓐ**タイプおよび**Ⓑ**タイプの形状を示す固結体には、そのすべてにおいて写真-1に例示するような割裂によると思われる注入脈（写真で白く写っている部分）が見られる。

このことから、割裂脈より割裂脈周辺の地山に注入材が浸透することによって固結体が得られていることが確認された。よって、山土やマサを対象にした注入で**Ⓐ**タイプおよび**Ⓑ**タイプと区分されたものはすべてが先の注入形態の分類によれば「割裂・浸透注入」であり、礫を対象にした**Ⓐ**タイプの形状を示す固結体のみが「浸透注入」と予想される。（礫を対象にした固結体は、礫そのものが堅硬であり切断困難なため切断による注入状況の確認は行っていない。しかし、空隙の大きさとその連続性からこのように予想することは妥当であろう。）また、山土やマサの湿潤状態を模擬地山にした固結体に見られる**Ⓒ**タイプの形状を示す固結体が「割裂注入」と区分される。球状や円筒状の形状を示す**Ⓐ**タイプについては、図-4に示したように注入量の増加に伴い浸透領域が拡大した結果による固結体と考えられ、一見すると「浸透注入」であろうと考えられるところである。ところが、今回の注入実験においては、間隙径の大きい礫を対象にした注入を除いて、山土やマサを対象にした注入では完全な「浸透注入」は認められていない。

山土やマサを対象にした注入で**Ⓐ**タイプおよび**Ⓑ**

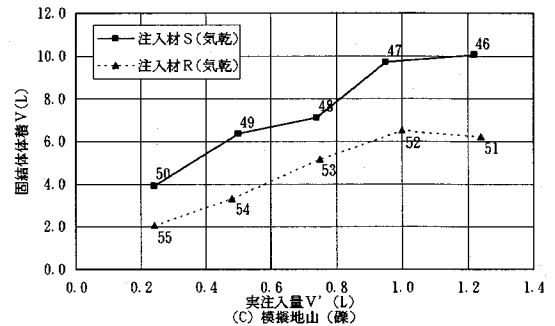
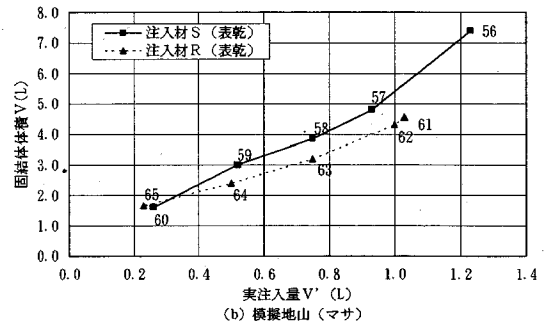
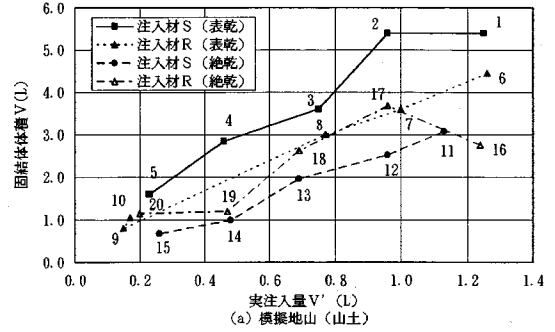


図-6 各模擬地山における固結体体積

タイプに分類される注入固結体では、その成長過程は以下のように考えられる。

まず、注入材の大量の移送は浸透では困難であることから注入孔近くから割裂脈が発生し、割裂脈の周辺に浸透するとともに、引張強度が数10 k g/cm<sup>2</sup>の固結体を作る。そのため、発泡固結後におけるこの部分への浸透あるいは割裂脈の作成は困難であることから、別の弱い所に新たな割裂脈を作り、新たに割裂脈周辺を浸透注入により固結させるという順番で固結体の範囲が拡大し、**Ⓐ**タイプおよび**Ⓑ**タイプの大きな固結体に成長したと予想される。

f) 固結体の大きさについて

図-6は、注入速度を1 ℓ/minと一定にして、目標注入量を0.25 ℓから1.25 ℓまで段階的に変化させたケースでの体積測定結果を示している。ここで、実注入量とは注入量からリーク量を差し引いた値であ

り、体積に換算している。

図-6(a)～(c)において、実注入量と固結体体積は直線に近い関係にあり、以下の傾向が読み取れる。なお、図-6(a)中の供試体 No.16は、円筒管の底部破損が発生し、多量のリークが発生したもので、他のケースと注入条件が異なると考えられることから除いて考察する。

①表面乾燥飽和状態の山土（含水比13%）においては（図-6(a)）、注入材Sの場合で実注入量に対し約5倍の固結体が得られており、注入材Rの場合は、約3.5倍となっている。なお、この場合の固結体形状は、注入材Sがすべて④タイプ、注入材Rは供試体No.9, 10が④タイプで他は⑤タイプと分類されている。

②湿潤状態（含水比25%）の山土においては（図-6(a)）、注入材Sで約2.7倍注入材Rが3.7倍の固結体が得られており、注入材による差は①と逆になっている。これは注入材の発砲状況によると考えられる。後述する換算発泡倍率の考え方によれば、この条件下において、注入材Rは平均1.6倍の換算発泡倍率となっており、注入材Sは平均1.1倍とほとんど発泡していないことになる。また、固結体の形状は、すべて③タイプと分類されている。

③表面乾燥飽和状態のマサ（含水比9%）においては、（図-6(b)）注入材Sは約5.5倍、注入材Rは4.5倍と①と同様注入材Sの方が大きな固結体が得られている。なお、このケースにおいてはすべての固結体が④タイプと分類される。

④気乾状態の礫を対象にしたケースにおいては（図-6(c)）、注入材Sが約9.5倍、注入材Rが約6倍の固結体が得られている。なお、このケースは、先にも述べたようにすべてが④タイプの固結体形状である。以上の結果をまとめると、以下のように整理される。

①固結体の大きさは、地山の性状によって改良倍率が異なり、その値は2.5倍程度から9.5倍程度までと考えられる。

②改良倍率を模擬地山の種類で分けると、礫、マサ、山土の順で大きく、間隙径の大きい地山ほど改良倍率が大きくなっている。

③同一地山条件で固結体の形状が④タイプおよび⑤タイプに分類される範囲においては、自由発泡倍率（大気圧下での発泡倍率）が大きい注入材Sの方が、固結体が大きくなる。

④割裂注入の③タイプの固結体は④および⑤タイプに比較して固結体の大きさが小さい。このような傾向は、間隙径の大きい地山では、注入形態としては浸透注入ないし割裂・浸透注入となり注入材が比較

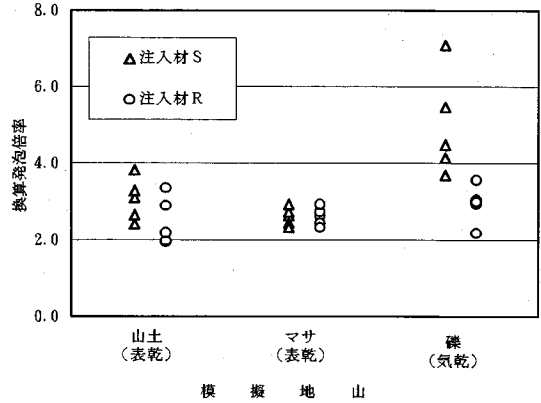


図-7 各模擬地山における注入材の換算発泡倍率

的大きく発泡した状態で固結体を構成し、割裂注入ではほとんど発泡しないことによると考えられる。

ここで、薬液注入工の注入量の計画等において用いられている方法<sup>10)</sup>での“充填率”を100%と仮定して、表乾状態（山土、マサ）および気乾状態（礫）の模擬地山の間隙がすべて注入材で置換されて固結体が得られていると考える。そして固結体の間隙体積と注入量との比から固結体中の注入材の発泡倍率を算定すると図-7のようになる（換算発泡倍率と呼ぶ）。図-7に示すように、間隙径の小さい山土やマサでは注入材Rの換算発泡倍率が2～3.5倍、注入材Sの換算発泡倍率が2.5～4倍と小さく、間隙径の大きい礫では注入材による差が大きく注入材Rは山土やマサと同様2～3.5倍、自由発泡倍率が大きい注入材Sでは3.5～7倍と大きい換算発泡倍率を示しており前述の③や④の考えを裏付けている。

### 3. マサ盛土での現場注入実験

#### (1) 実験の目的

模擬地山を対象にした注入実験で多くの知見が得られた。しかしこれらはあくまでも地山体積が約20ℓと限られた条件下でのものである。また、今回の模擬地山注入実験においては注入ボルトと地山が接触しているが、実施工においてはφ42mm程度のビットで地山を削孔し、φ22mmの注入ボルトを挿入して注入することから、注入ボルトと地山の間にクリアランスが存在することになり、異なった注入形態を示すことが考えられる。

そこで、実物大で一般的な施工方法にもとづく注入実験によっても、先に述べた固結体の形状や大きさについての傾向が再現できるかどうか確認することを目的とした。

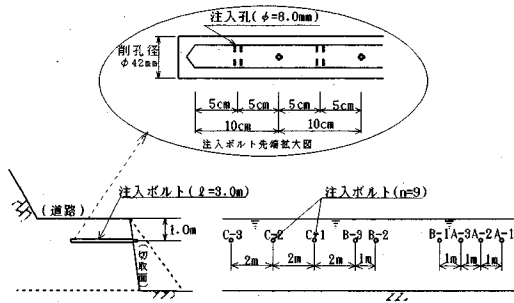


図-8 注入ボルト配置

## (2) 実験方法

### a) 現場条件と実験の概要

固結体の形状や大きさを掘り出して確認するためには、未固結な地山が対象になる。また、先の室内実験と実物大との比較をするためには、地山条件等ができるだけ近似していることが望ましい。

ここでは、先の室内実験での3種類の模擬地山のうち中間的な粒径であり、かつ改良倍率も中間的(図-6参照)な値を示したマサを取り上げた。これは、マサ以外では現場注入実験に適した条件を得ることが容易でなかったことにもよる。現場注入実験は、図-8に示すようなマサの切取法面を利用して、長さ3mの実施工で一般的な注入ボルトを用いて注入し、固結体を掘り出し、固結体の形状や大きさについて調査することにした。

### b) 地山条件

実験の対象としたマサは、盛土されて半年以上経過したものであり、盛土上のダンプトラックの走行によりかなり縮まった状態になっている。先の室内実験でのマサは、針貫入実験で平均  $5.3 \text{ tf/m}^2$  ( $0.05 \text{ MPa}$ )の地耐力が得られる程度のものであったが、今回のマサは、同一実験方法で  $12.4 \text{ tf/m}^2$  ( $0.12 \text{ MPa}$ )の地耐力が得られている。なお、含水比は平均 5.8%で、先の室内実験におけるマサ(表乾状態の含水比9%)より小さい値となっている。

### c) 注入材料と注入ボルト

注入材料は、表-2の注入材Rで注入材の液温は  $20 \sim 23^\circ\text{C}$  であった。注入ボルトは、実施工で比較的使用頻度が高いと思われる図-8に示す長さ 3.0m、 $\phi 22\text{mm}$ のものを用いた。このボルトには、先端付近に  $\phi 8\text{mm}$ の注入孔が8孔設けてある。

### d) 実験条件と設定水準

室内実験においては、模擬地山の材料や含水比および注入材料の種類を変化させるとともに注入速度や注入量を変化させて、固結体の形状や大きさについて評価したが、現場注入実験では、注入速度と注

表-4 現場注入実験での注入条件

孔番	目標注入量 ( $\text{l}/\text{本}$ )	注入速度 ( $\text{l}/\text{min}$ )
A-1	15	3
A-2	15	6
A-3	15	12
B-1	30	3
B-2	30	6
B-3	30	12
C-1	60	3
C-2	60	6
C-3	60	12

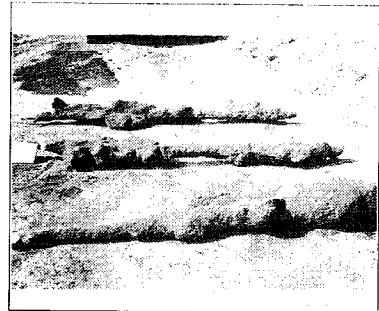


写真-2 現場注入実験での固結体の状況

(単位: cm)

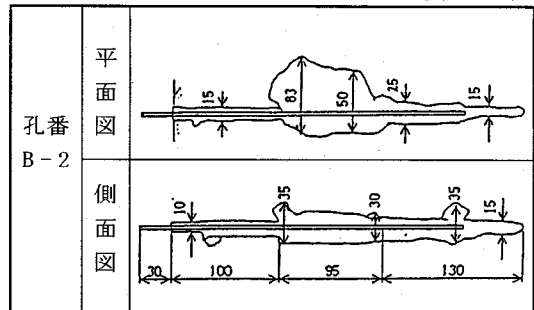


図-9 固結体のスケッチ

入量のみを変化させて固結体を確認することにした。

注入速度については、実施工では  $5 \sim 6 \text{ l/min}$  程度が多いようであり、注入量としては、  $30 \text{ l/本}$  程度が多い<sup>8)</sup>ようである。このような現状に配慮して、注入量  $30 \text{ l/本}$  と注入速度  $6 \text{ l/min}$  を中間値として表-4に示すような条件で9本の注入を実施した。

## (3) 実験結果と考察

### a) 固結体の形状について

固結体の一部を写真-2に、注入量や注入速度の中間値を用いた孔番B-2の固結体のスケッチを図-9に例示する。図-9に見られるように、固結体の形状は削孔長全長におよぶ  $\phi 10 \sim 30\text{cm}$ の円筒状の部分と、ボルト中央部付近に大きく拡大した扁平な部分からなっている。この拡大部分は、すべてのケースにお

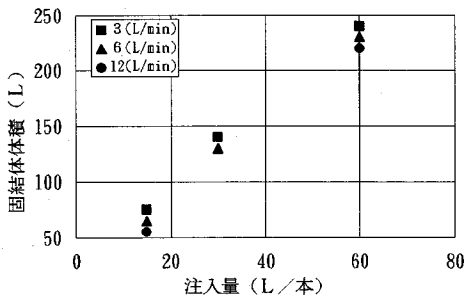


図-10 注入量と固結体の関係

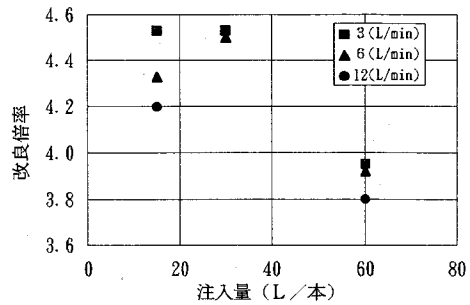


図-11 注入量と改良倍率の関係

いて水平方向に扁平な固結体となっており、この部分を切断すると、室内実験での写真-1と同様な割裂脈が観察される。

このような傾向から、注入メカニズムは以下のように考えられる。まず、注入材は注入ボルトと地山間のクリアランスに入り、注入孔周辺地山に浸透しφ10～30cmの円筒状の固結体を作る。次に、注入孔周辺の浸透範囲を拡大することが困難であることから、割裂脈が発生することになる。図-8に示したように、注入孔の土被り厚が約1mと薄いことから、注入圧が地表を隆起させる方向に作用し、割裂脈は水平方向に拡大する。この拡大した割裂脈から周辺の地山に浸透し、「割裂・浸透注入」による扁平な固結体となる。よって先の模擬地山注入実験での固結体の形状分類(図-3参照)によると、ほとんどが㊸タイプと分類される。

なお、現場実験での固結体の針貫入試験による換算一軸圧縮強度は、平均62kgf/cm<sup>2</sup>(6.1MPa)室内実験(マサを対象にした室内実験での固結体では、注入材Rで40～80kgf/cm<sup>2</sup>(3.9～7.8MPa)が得られている)と同程度の固結体強度が得られている。

#### b) 固結体の大きさについて

水槽を用いて、水と置換する方法で固結体の体積を測定した。固結体の体積は、図-10に示すように注入量とほぼ直線の関係があり、改良倍率で整理すると図-11に示すように3.8～4.5倍となっている(孔番B-3は、閉塞により注入を中断したため、図-10, 11では省いて整理している。)

なお、この値は室内実験結果のうち表乾状態のマサを対象にした注入材Rの値とほぼ同程度である(図-6(b)参照)。

固結体の形状や大きさについては、現場注入実験も模擬地山を用いた室内実験もほぼ同様な傾向を示しており、地盤条件が同様であれば先の室内実験結果は実施工を代表していると考えても良さそうである。

## 4. まとめ

室内実験結果および現場注入実験結果より、本研究で対象とした山土、マサ、礫といった地山へのウレタン注入式フォアポーリングの注入形態に関して以下のようにまとめられる。

### (1) 固結体の形状について

①山土やマサにおいては、含水比が小さい条件下では塊状の固結体になるが、含水比が大きい湿潤状態では土粒子間の水に阻害されて注入材の浸透が得られにくく、割裂脈だけの葉片状の固結体になる。

②塊状の固結体であっても、ライズタイムが短く浸透性に優れた注入材Rのほうが歪な形状になりやすい。

③㊸タイプと分類された球状ないし円筒状の固結体であっても、山土やマサにおいては㊸タイプの形状の場合と同様固結体の内部構造は「割裂・浸透注入」と分類される注入形態になっている。

④間隙径の大きい礫においては、注入材の種類にかかわらず塊状の形状となり「浸透注入」の注入形態を示すと考えられる。

### (2) 固結体の大きさについて

①間隙が水で飽和されていない場合、間隙径の大きい礫においては、注入量の6.0～9.5倍程度の固結体が、次に間隙の大きいマサでは4.5～5.5倍程度の固結体が、そしてもっとも間隙の小さい山土では3.5～5.0倍程度の固結体が得られる。これは、地中の注入材の換算発泡倍率が、山土やマサでは2.0～4.0倍、礫では2.0～7.0倍と間隙の大きい地山ほど大きいことによる。しかし、含水比が湿潤状態に近づくと極端に固結体の体積は小さくなる。

②塊状の固結体が得られるケースにおいては、自由発泡倍率が大きい注入材Sのほうが固結体積は30%程度大きくなる。

以上のことから、今後の検討課題、実験結果の設計への適用方法、および、施工管理の方法について

以下のことが考えられる。

- ① 本研究においては、供試体の大きさや円筒缶の状況から高圧での地山注入は行ってなく、注入圧や発泡圧の影響については検討していない。但し、注入圧や発泡圧の影響は注入形態を検討する上で無視できず、今後発泡圧の測定方法の開発等も含めて検討する必要がある。
- ② 実施工においては、対象とする地山がこれら3種類の地山のどの位置に相当するのかを検討することによって、固結体の形状や大きさを予測することが可能になると思われる。
- ③ 注入量の計画においては、前記の改良倍率を利用して、必要な固結体積に応じて、注入量を設定することが可能となる。
- ④ 地山含水比が湿潤状態に近づくると極端に固結体の体積は小さくなることから、施工管理においては地山の含水状況に配慮することが重要となる。

謝辞：本研究を行うにあたり、山口大学学生出本剛史、上杉広光の両氏、および第一工業製薬(株)鮫沢博氏、第一建工(株)畠山正紀氏に、実験や結果の整理に多大な協力をいただいた。深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 日本道路公団：設計要領第三集第9編トンネル，p. 93, 1985年10月。
- 2) 例えば、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，第406号III-11, pp. 157~166, 1989年6月。

- 3) 川地武，久保博，坂下智子：ウレタン系硬化剤を用いたグラウト材の研究(その1) -ウレタン系硬化材とセメントの混合系の物性-土木学会第47回年次学術講演会，第IV部門，pp. 402~403, 1992年。
- 4) 志賀孝和，居相好信，藤沢薫，宇田信也，小柳博：高浸透性ウレタン圧入式フォアパイリングの開発，土木学会第48回年次学術講演会，第IV部門，pp. 402~403, 1992年。
- 5) 守屋進，片脇清：ウレタン注入材の安全性に関する試験，(社)日本道路協会，第20回日本道路会議，一般論文集，pp. 260~261, 1993年。
- 6) 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ポ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。
- 7) 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・確認手法に関する研究委員会：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。
- 8) ジェオフロンテ研究会：ウレタン注入式フォアパイリング技術資料，pp. 40~49, 1992年11月。
- 9) 日本国有鉄道編「注入の設計施工指針」pp. 19~20, 1987年1月。
- 10) (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。

(1995. 6. 12受付)

## STUDY ON TYPES OF SOLIDIFIED SHAPE OF URETHANE GROUT FOREPOLING

Mitsuaki HIGO, Hirohisa MAKI, Keisuke NAKAGAKI, Yukihiko KAWAHARA,  
Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA

Laboratory tests on three types of model grounds were made to grasp the solidified shape of the urethane grout forepoling and the following have been recognized. 1. When the grouting was made to the ground of pit soil or decomposed granite, the solidified grouted material formed a block-shape when the soil was of low water content, and the grouted material formed a leaf-blade-shape when the soil was wet. 2. Even when the solidified shape of the grouted material was spherical or cylindrical in grouting the type of "fracture/permeation grouting" was observed in the internal structure.