

## 高圧噴射攪拌式先受け工法における 注入材の適性配合について

STUDY ON GROUTING MATERIAL MIXTURE OF JET GROUT FOREPILING METHOD

川端康夫 \*・猪俣 正\*・市川健作\*・大森 了\*・福井 隆夫\*\*

Yasuo KAWABATA, Tadashi INOMATA, Kensaku ICHIKAWA, Satoru ŌMORI and Takao FUKUI

TOM-JET system is forepiling method applicable for various grounds. It is constructs continuous piles by jet grouting using an usual jumbo drifter for tunneling, and improves the ground before the excavation.

Piles strength is influenced by grounds, because piles consist of ground material and grouting material.

This report describes the followings ;

- ① Estimation of the required strength of piles.
- ② Mixture method of grouting materials suited to grounds.

Keywords: jet grout forepiling, grouting material, continuous piles, required strength, mixture method of grouting materials

### 1. はじめに

近年、山岳トンネルをとりまく環境として、都市部の未固結脆弱地山に対する山岳工法の適用や第二東名神の建設計画で見られるような大断面トンネルの急速施工が求められ、施工の合理化、安全確保のため、何らかの先受け補強が必要とされている。

高圧噴射攪拌式先受け工法（以降TOM-JET工法）は、通常山岳トンネルで用いられる油圧さく岩機により、セメント系の注入材を2ショットで高圧噴射し、切羽前方に径40cm程度の柱列杭を造成することで脆弱地山を改良・安定化させる先受け工法である。

本工法は、全施工費に占める注入材の割合が高く、工法の確立及び経済性の向上を図るため、以下の技術的課題の解決が求められた。

#### ①切羽の安定に必要な杭体強度の算出

本工法は、通常の施工サイクルのなかで施工できる特徴を有している。掘削時のサイクルを杭造成後12時間とし、切羽の安定確保に要求される杭体強度を算出する必要があった。

#### ②地山の種類に応じた注入材の配合手法の確立

注入材は切削した地山を取込み硬化するため、同一配合でも対象地山の性質により強度発現性状が異なる。地山の種類に応じ、適正な注入材の配合を選定する必要があった。

本報文では、本工法の概要を述べるとともに、杭体の必要強度及び注入材の配合手法について検討した結果を報告する。

---

\* 正会員 飛鳥建設(株) 技術本部土木技術部

\*\* 正会員 飛鳥建設(株) 土木本部技術部

2. TOM-JET工法の概要

2. 1 工法概要

本工法は、油圧さく岩機に特殊ロッド（噴射ノズル付き単管または3重管）および注入用スィベルを装着し、所定深度（3～4 m）さく孔後、ロッドの引抜き時に接続された注入ユニット（ミキサ・グラウトポンプ）を通じて、セメントミルク、急硬材をロッド先端のノズルより高圧噴射し、前方地山に杭を造成することを基本システムとしている。本工法は、未固結地山（N値30～40程度まで）を対象とした2ショット方式による柱列杭の造成を基本としているが、固結地山または亀裂性・破砕性岩盤では、同一機械システムにて1. 5ショットの低压注入も可能とした合理的な工法である。図-1にシステム概要を、図-2に施工順序を示す。また、写真-1に施工状況を、写真-2に造成された杭の状況写真を示す。



写真-1 施工状況

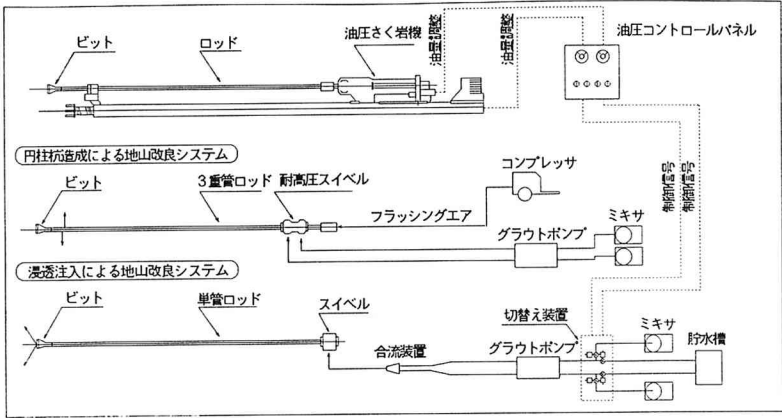


図-1 システム概要図

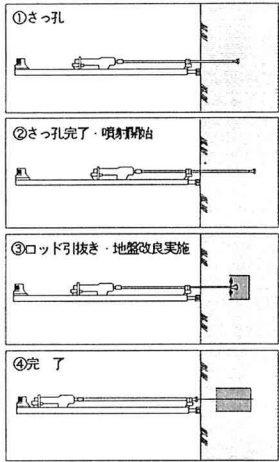


図-2 施工順序

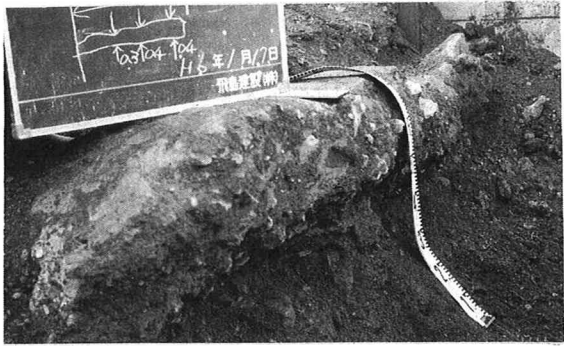


写真-2 造成杭状況

2. 2 施工仕様及び使用材料

表-1に所要施工機械および杭造成時における施工仕様の標準を示す。これら仕様は、過去のフィールド実験および実施工における杭体の造成状況、機械設備の作動状況・能力より、設定した。

表-2に使用材料および注入材の基本配合を示す。使用材料は、土質安定急硬材とコロイダルセメントをベースとした2溶液で、ゲルタイムは、所定の杭体形状の確保のため、硬化時間調整剤（セック）により、30秒前後に設定している。

表-1 施工機械および施工仕様

| 使用材料 | (比重)              | 基本配合         |
|------|-------------------|--------------|
| A液   | 急硬材(E.S.) 2.90    | ES=80kg/100ℓ |
|      | 主成分:カルシウムアルミネート   |              |
| B液   | ゲルタイム調整剤(セック)     | W/C・ES 任意    |
|      | コロイダルセメント(C) 3.02 | =90%         |
|      | 高性能減水剤(Ad.)       | C=80kg/100ℓ  |
|      |                   | 1.0%         |

表-2 仕様材料および基本配合

| 主要施工機械                    | 施工仕様                         |
|---------------------------|------------------------------|
| ①油圧さく岩機<br>(油圧制御装置組込み)    | ①注入圧: 200kgf/cm <sup>2</sup> |
| ②特殊ロッド、スィベル               | ②注入速度: 90ℓ/min               |
| ③注入ユニット<br>(ゲラウトミキ、ポンプ搭載) | ③ロッド回転数: 100rpm              |
|                           | ④引抜き速度: 0.6m/min             |

## 2. 3 工法の特長

本工法の特長を以下に示す。

①広範囲な不良地山に対応できる。

・軟弱土砂層では、2ショットにて柱列杭を造成し、先行地山にアーチゾーンを形成することで効果的な先受けが行える。

・亀裂性・破砕性岩盤では、1.5ショットで低圧注入し、目離れを防止するとともに見かけの岩盤強度を増加させる。

②施工サイクル内で施工できる。

グラウトミキサ・ポンプ等の注入ユニットを別途配置するだけで、専用機、専従者を必要とせず、掘削サイクル内で施工できる。

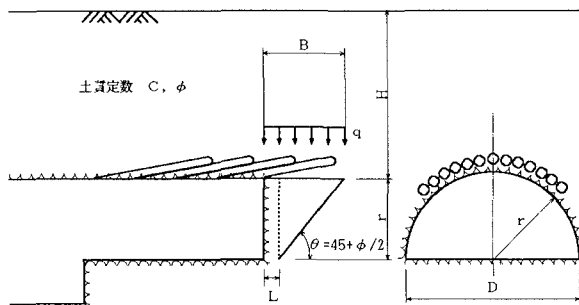


図-3 設計概要図

## 3. 杭体の設計強度の設定

先受け工の設計は、切羽の安定に対する検討と先受け工の耐力に対する検討が必要とされる。一般にパイプルーフ工では、切羽前方上部のゆるみによる荷重とこれに対する切羽面のすべり抵抗によって検討される。

本工法における杭体の所要強度は、パイプルーフの設計法に準じ、ゆるみ荷重に対する造成杭の耐力より算出する。以下に検討結果を示す。なお、図-3に設計概要図を示す。

### 1) ゆるみ荷重の算出

ここでは、以下の施工、地山条件より、ゆるみ荷重を算出した。

|      |                                                                                               |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 地山条件 | 地質：ややゆるい砂礫・崖錐、 $\gamma_t = 2.1 \text{ ton/m}^3$ 、 $C = 0 \text{ ton/m}^2$ 、 $\phi = 30^\circ$ |
| 施工条件 | 道路二車線断面（ $D = 10 \text{ m}$ ）、上半ベンチ工法、一掘進長 $1.0 \text{ m}$                                    |

ゆるみ荷重は、テルツァギのゆるみ式およびパイプルーフ工における過去の計測結果がこの式の  $1/2$  程度であることを考慮し、以下の式より算出した。

$$q = \frac{1}{2} \frac{B (\gamma_t - 2C/B)}{2k \tan \phi} \quad (1)$$

$$B = L + D/2 \times \cos(45 + \phi/2) \quad (2)$$

ここに、 $q$  ; ゆるみ荷重 ( $\text{ton/m}^2$ )  
 $B$  ; 先行ゆるみ幅 ( $\text{m}$ )  
 $L$  ; 一掘進長 ( $\text{m}$ )  
 $D$  ; トンネル直径 ( $\text{m}$ )  
 $C$  ; 粘着力 ( $\text{ton/m}^2$ )  
 $\phi$  ; 内部摩擦角 ( $^\circ$ )  
 $\gamma_t$  ; 単位体積重量 ( $\text{ton/m}^3$ )  
 $k$  ; 側圧係数  $= 1.0$

この結果、ゆるみ荷重は、最大で  $4.0 \text{ ton/m}^2$  と推定された。

### 2) 杭体の設計

杭体の設計では、改良体を連続柱列杭とし、①縦断方向の梁（一掘進長  $1.0 \text{ m}$ ）構造の検討、②断面方向の多ヒンジアーチ構造の検討を実施した。

#### ①縦断方向の梁構造の検討

杭径を  $40 \text{ cm}$  とし、両端固定の梁構造として曲げ強度を算出した結果、 $1.25 \text{ kgf/cm}^2$  となり、圧縮強度は8倍の約  $10 \text{ kgf/cm}^2$  の強度が必要とされた。

#### ②断面方向の多ヒンジアーチ構造の検討

改良体をモーメントが生じない多ヒンジアーチのシェル構造と仮定し、ゆるみ荷重により断面方向の軸力を求め、これより圧縮強度を算出した結果、約  $5 \text{ kg/cm}^2$  の強度が必要とされた。

以上の結果より、杭体の設計強度は、 $10 \text{ kgf/cm}^2$  とする。

#### 4. 注入材の配合手法の検討

本工法は、ロッド先端の2箇所ノズルより、注入液を高圧で噴射し、地山を切削すると同時に切削土砂と注入液を混合攪拌することで杭体を造成する。このため、地質の種類、地山の取込み率によって、強度発現性状が異なる。任意の地山条件において、所定の杭体強度を確保し、かつ経済的な配合を選定するためには、各種地質条件および配合条件が強度発現性状に与える影響を把握する必要がある。

ここでは、各種条件が強度発現性状に与える影響を把握することを目的に室内実験、フィールド実験を実施し、この結果にもとづき地山条件に応じた適性配合について検討した。

表-3 室内実験の実験条件

| 対象土<br>(3種)   | ①粘土       | ②砂 礫   | ③粘土混じり砂礫<br>(①:②=1:4混合) |
|---------------|-----------|--------|-------------------------|
| 比 重           | 2.609     | 2.710  | 2.692                   |
| 含水比           | 54%       | 2%     | 7%                      |
| 地山取込み率(体積百分率) |           |        | 30、50                   |
| 配 合           | 配合名(ES/C) | A液(ES) | B液(C)                   |
|               | 80/80     | 80kg   | 80kg                    |
|               | 40/80     | 40kg   | 80kg                    |

\* 注入液100ℓ中の重量

##### 4. 1 実験条件及び実験方法

室内実験は、地質の種類、地山取込み率および配合条件を要因とし、表-3、図-4に示す水準で実施した。実験時の配合は、表-2の基本配合とした。地山材料と注入材の練り混ぜは、2軸強制練りミキサで行い、練り混ぜ時間は、混合状態を確認しながら個々に判断した。

フィールド実験として、以下の2種を実施した。

- ①フィールド実験(1)：表-2に示す基本配合により、粘土層から砂礫層と広い範囲の6種の脆弱地山に実際に杭体を造成し、強度発現性状、取込み率を確認した。
- ②フィールド実験(2)：シルト混じり砂礫地山に対し、表-4に示す4種の配合で杭体を各2本造成し、強度発現性状を確認した。

強度試験用の供試体は、室内実験、フィールド実験ともに、硬化後1辺10cmの立方体に整形し、所定材令まで標準養生した。試験材令は、6、24hr、7、28日の4材令とした。

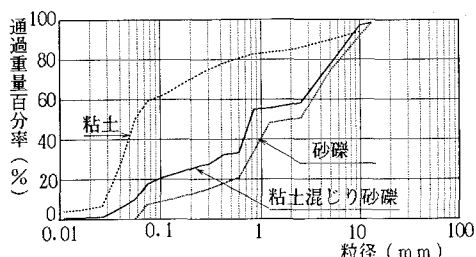


図-4 対象土の粒度分布

表-4 フィールド実験の配合

| 配 合 名<br>ES/C | A液 |        | B液  |        |
|---------------|----|--------|-----|--------|
|               | ES | セツタ(%) | C   | Ad.(%) |
| 80/80         | 80 | 0.5    | 80  | 1.0    |
| 60/80         | 60 | 0.4    | 80  | 1.0    |
| 40/80         | 40 | 0.3    | 80  | 1.0    |
| 40/120        | 40 | 0.3    | 120 | 2.0    |

単位：(kg/100ℓ)

#### 4. 2 地質条件が杭体の強度発現性状に与える影響

##### 1) 室内実験の結果

図-5に基本配合における実験結果を示す。強度発現性状に関しては、短期強度、長期強度ともに砂礫>粘土混じり砂礫>粘土の順で強度が低くなっていた。取込み率に関しては、砂礫の場合、取込み率による強度差が少なかったのに対し、粘土混じり砂礫、粘土は、取込み率の増加に伴い、強度が低下していた。

粘土分の増加による強度の低下は、粘土が多くの水分を含んでいること、粘土の組織構成上の特徴および粘土が硬化体の中で塊状に存在し易いこと等が原因と考えられる。

##### 2) フィールド実験(1)とその結果

表-5に施工条件と地山取込み率および強度試験の結果を、図-6に対象地山の粒度分布を示す。

ローム、高液性粘性土のように粘土分を多く含む地山は、室内試験同様、砂、礫を多く含む地山(シルト

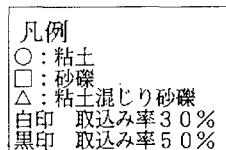


図-5 地質条件と強度発現性状の関係

混じり砂礫（その１）を除く）に比べ、低い強度を示していた。

今回の施工例では、シルト混じり砂礫（その１）、マサ土を除き、地山取込み率が27～45％の範囲となっている。シルト混じり砂礫（その１）の地山取込み率が大きくなった原因は、地山の状態（空隙大）とゲルタイムの長さ（120秒と標準の約3倍の長さ）にあると考えられる。注入液の硬化が遅れたため、地山材料が注入液から分離・沈殿し、注入液が他へリークしたことで容積に占める注入液の量が減少したものと考えられる。このため、硬化体の強度が小さくなったものと推定される。マサ土での取込み率が小さくなったのは、地山強度が高く、切削土量が少ないことが原因と考えられる。地山の取込み率は、地山強度が小さくなる従い、大きくなるが本工法の対象とする地山の範囲では、50％を超えることはないものと考えられる。

表-5 施工実施例の一覧

| 施工地山の性質      | 地質の種類        | 火山灰質粘性土<br>(ローム) | 高粘性粘土 | シルト混じり砂礫<br>(その1) | シルト混じり砂礫<br>(その2) | 砂<br>(単粒砂) | 強化地山<br>(マサ土) |      |
|--------------|--------------|------------------|-------|-------------------|-------------------|------------|---------------|------|
|              | 比 重          | 2.609            | 2.698 | 2.706             | 2.724             | 2.730      | 2.667         |      |
|              | 現場密度(g/cm³)  | 1.355            | 1.757 | 1.720             | 1.882             | 1.810      | 1.721         |      |
|              | 含水比 (%)      | 88.0             | 33.0  | 7.7               | 12.1              | 8.6        | 11.5          |      |
|              | 構成           | 礫分               | 10.6  | 27.0              | 66.8              | 62.0       | 0             | 5.9  |
| 硬化体の性質       | 強度<br>kg/cm² | 砂分               | 26.6  | 14.2              | 24.4              | 28.0       | 100           | 83.9 |
|              |              | 細粒分              | 62.8  | 58.8              | 8.8               | 10.0       | 0             | 10.6 |
|              |              | N 値              | 0~5   | 0~5               | 0~5               | 20         | 30~35         | 40   |
|              |              | ゲルタイム(s)         | 80    | 30                | 120               | 30         | 30            | 30   |
|              | 杭 径 (cm)     | 30~40            | 40    | 80                | 30~40             | 30~50      | 30            |      |
| 地山取込み率(%)    | —            | 27.0             | 83.4  | 27.0              | 45.0              | 7.3        |               |      |
| 強度<br>kg/cm² | 6時間          | 23               | —     | —                 | 40                | 35         | 40            |      |
|              | 24時間         | 35               | —     | —                 | 62                | 50         | 62            |      |
|              | 7日           | 43               | —     | —                 | 102               | 101        | 148           |      |
|              | 28日          | 51               | 54    | 46                | 156               | 135        | 200           |      |

\*：地山の取込み率は、体積百分率

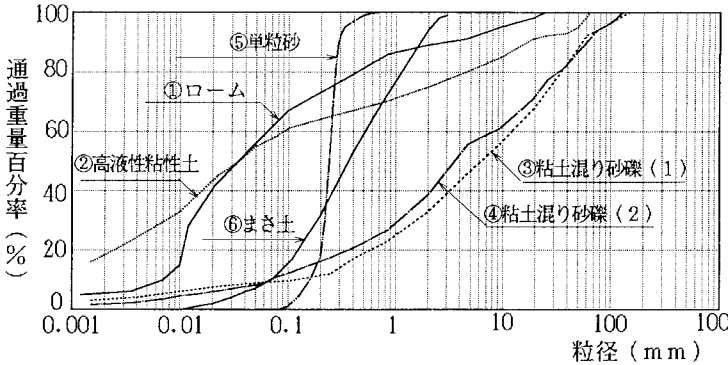


図-6 対象地山の粒度分布

4. 3 配合条件が杭体の強度発現性状に与える影響

1) 室内試験の結果

配合条件、地質条件を要因とし、地山の取込み率を50％とした場合の強度発現性状を図-7に示す。砂礫材料は、ES/Cが40/80の場合でも12時間で50kgf/cm²を超えており、所定の強度を満足しているのに対し、粘土材料は、ES/Cが80/80で20kgf/cm²程度であり、ES/Cが40/80では、10kgf/cm²程度の強度しか得られなかった。

2) フィールド実験(2)とその結果

異なる配合条件で杭体を造成し、各々の強度発現性状について確認した結果を図-8に示す。なお、本実験は、表-5中のシルト混じり砂礫（その2）と同地山で実施した。

急硬材（ES）の量を減らすことで硬化体の強度は低下し、ES/Cが40/80では12時間で20kgf/cm²程度となった。ES/Cが40/120の配合は、他の配合と強度発現の傾向が異なるが12時間強度は、ES/Cが60/80とほぼ同等であり、セメントの増量が強度に与える効果も確認できた。

今回、同一配合で2本の杭体を造成し、一材令で3個づつ計6個の供試体を採取した。造成した杭体全8本、供試体全96個の試験結果における同一配合、一材令（供試体数6個）の変動係数は、最大で21.5

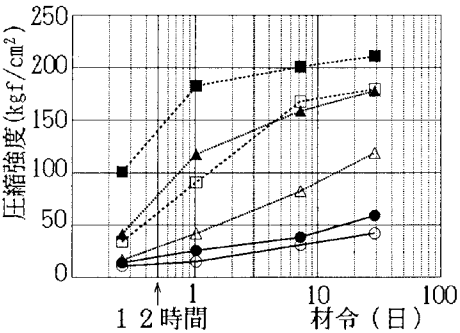


図-7 配合条件と強度発現性状の関係

%で、不良率を2.3%とした場合、目標強度は設計強度に対し50%程度の割増しが必要と考えられた。この結果、配合決定にあたっては、12時間で15～20 kgf/cm<sup>2</sup>の強度が要求される。

今回の対象地山では、ES/Cが40/80の配合は、強度不足の恐れがあることから、ES/Cが60/80または40/120の配合を選定すべきと考えられる。

#### 4. 4 地山条件に応じた注入材の配合

本工法が対象とする土砂地山を粘土、粘土混じり砂礫、砂礫に分類し、各々の適性配合について上記結果を総括する。

- ①砂礫地山の場合 : ES/C = 40/80
- ②粘土地山の場合 : ES/C = 80/80
- ③粘土混じり砂礫の場合 : ES/C = 60/80 または 40/120

実施工では、上記配合を標準とし、室内実験、試験施工の結果を踏まえ、最終的に配合を決定する。また、配合検討に当たっては、杭体の目標強度を12時間で20 kgf/cm<sup>2</sup>とし、地山の取込み率を25～45%の範囲と仮定する。

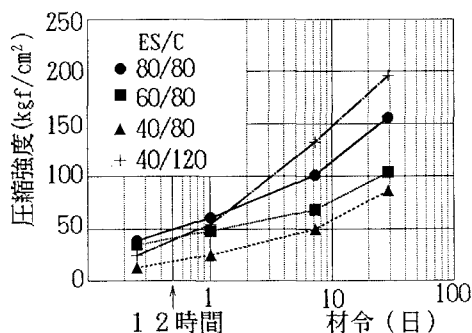


図-8 各種配合における強度発現性状

#### 5. おわりに

今回の検討を通じ、以下の結果が得られた。

- 1) 杭体の設計強度は、12時間で10 kgf/cm<sup>2</sup>とし、配合検討時における杭体の目標強度は、強度の変動を考慮し、20 kgf/cm<sup>2</sup>とする。
- 2) 対象地山が砂礫地山の場合の配合は、急硬材 (ES) / コロイダルセメント (C) = 40 kg (100 ℓ 溶液中) / 80 kg (100 ℓ 溶液中)、粘土地山の場合は、ES/C = 80/80、その他の地山では上記の中間的配合とし、室内実験、試験施工の結果を踏まえ、最終的に配合を決定する。

今回の成果にもとづき、道路三車線トンネル坑口部の先受け工にTOM-JET工法を採用した。本工法の施工により、地表面沈下の抑制、切羽の安定において良好な結果が得られ、無事掘削を完了することができた。

今後、脆弱地山や大断面トンネルの掘削において、先受け工の重要性はさらに増えていくと思われる。当TOM-JET工法においても、さらに施工実績を積重ね、工法の完成度を高めてゆく所存である。

#### 6. 参考文献

- 1) ジョフロント研究会：RJFP工法に関する検討報告書, 1992. 11
- 2) 斉藤重治：トンネルにおけるパイプルーフ工法・地盤, 理工図書, 1981.
- 3) 杉山ら：油圧削岩機を利用した複数地質適応型先受け (TOM-JET) 工法,  
日本トンネル技術協会第32回施工体験発表会, 1992, 5
- 4) 川端ら：水平ジェットグラウチング先受け工法 (TOM-JET) における注入材の配合検討,  
土木学会第49回年次学術講演会, 1994, 9