

# 気泡シールド工法の開発

——模型実験による気泡効果の事前確認手法——

羽生田 吉 也      藤 原 紀 夫

## Development of Chemical Foam Injection Shield Tunnelling Method

——Procedure for Confirming Effects of Foam by Model Tests——

Yoshinari Hanyuda      Toshio Fujiwara

### Abstract

This paper describes model tests on fluidity and watertightness of foam-mixed soil in the Chemical Foam Injection Shield Tunnelling Method. The foam mixing ratio depends on the soil properties at the site. Conventionally, the value has been decided by a numerical procedure based on granular data of boring investigations. However, based only on this technique, there sometimes occur discrepancies in actual work and there is a need to confirm foam effectiveness for each soil by model tests beforehand, as indicated by encounters with large diameters over 10 m and construction projects abroad.

The proposed method is for fluidity to be evaluated by electric power load during mixing of soil introducing soil into a uniaxial mixer and gradually adding foam. Regarding watertightness, permeability tests were performed for coefficient of permeability. Based on these values a method of examining applicability to foam conditions and soil properties of the site is proposed.

### 概 要

気泡シールド工法では、土圧式シールドの添加材として気泡を掘削土に混合して流動性、止水性を改善しながら施工する。この気泡混合土は圧縮性にも富むため土圧室内への充満が可能で、切羽圧との均衡を図りながらスムーズな掘進ができる。また、添加量は比較的少なく、場外搬出時の土砂処理が容易である。これら特長により、工事実績は150件に及び、10 m以上の超大口径や海外工事への適用もなされるに至っている。このような状況から、工事前に、現場土質に対する気泡適用方法と効果を確認しておく必要が生じてきた。

本論文は、現場土質を用いた模型実験から気泡条件と適性を確認する手法について述べる。従来の気泡の種類や混合率を粒度分布に基づき設定する方法に加えて、ミキサによる土砂攪拌時の電力値と透水試験による透水係数に基づいて流動性、止水性を評価し、気泡条件と現場土質への適性について検討する手法を提案する。

## 1. まえがき

気泡シールド工法は、初めて現場適用した昭和56年以来<sup>1),2)</sup>その施工実績は150件に及び、掘削外径が10 m以上の超大口径シールドにも適用される状況にある。また、海外の工事にも採用され始めている。気泡による掘削土砂の止水性や流動性の向上、排出土処理性の良さなどが、土圧式シールドにおける他の添加材に比べて卓越していることに起因している。

一方、気泡の特質が、すべての土質で反映されるわけでは無く、土粒子の吸水作用による気泡の破壊現象などで掘進時の効果が薄れる場合がある。また、従来の土の粒度分布に基づく気泡混合率を与える手法だけでは、不足をきたす例も見られる。このため、現場土質に対する気泡効果を事前に確認する方法が必要になっている。

この論文は、模型実験から気泡シールド適用時の、現場土質に対する流動性と止水性効果を評価して、気泡条件と適性を検討する手法を提案するものである。

## 2. 気泡効果と検討手法

### 2.1 検討項目と模型化

(1) 止水性 土圧式シールドの掘進は、カッタの回転とスクリュウコンベア排土口の開放から始まる。この際、排土口からの湧水や土砂の噴発、また土圧室内の急激な圧力低下などは、切羽の安定保持上から回避すべき事柄である。止水性が高く圧縮性に富む気泡土を土圧室内に形成することで、地下水や土砂の流出を押さえ、圧力低下も抑制する。実験は、現場土質についての定水位透水試験による透水係数と、切羽水圧が作用し気泡土の充満した土圧室を円筒土槽でモデル化した加圧透水実験による圧力変化の大小から、止水性等を評価する。

(2) 流動性 土圧式シールドの掘進中、カッタで切削された土砂は土圧室内に入りスクリュウコンベアの土砂取込み部への到達までに流れが絞られるため、過大トルク状態に陥り易く、掘進が不能にいたることがある。気泡シールドでは充満して掘進することを原則としてお

り、流動性の改善程度は、直接、掘進速度に影響する。実験では、土圧式シールドのチャンバ内を、立型の一軸ミキサでモデル化する。切削土取込み及び気泡混合過程を土砂投入と気泡混合段階とに分け、各段階におけるミキサ攪拌時の所要電力値から流動性を評価する。

### 2.2 適用現場条件の調査

模型実験を行なう前に、気泡シールドを適用する現場の地盤条件やシールド機の構造について調査する。地盤条件として、掘進対象土の自然含水比、粒度特性、コンシステンシー特性、締固め特性、強度特性（N 値など）等の土質と地質構成等を把握しておく。

## 3. 模型実験と適用例

### 3.1 実験材料

3.1.1 気泡材料 気泡のもとになる特殊起泡材には A, B タイプがあり、これを消すための特殊消泡材がある。これらの配合、気泡混合率、消泡材の使用量は気泡シールド協会の技術資料<sup>3)</sup>に基づく。なお、気泡作成と試料土への混合は大気圧条件下で行なう。

3.1.2 試料土 現場立坑等から掘進対象土を採取して用いる。入手が難しい場合は、土質調査に基づき、含水比、粒度特性を調整した土砂を代用する。

(1) 水分調整 自然含水比が明確な場合はその値に、不明の場合は最適含水比に設定する。

(2) 粒度調整 定水位透水試験では、100 mm 内径の透水円筒を用いるので、粒径 5 mm 以下に粒度を調整する。掘削断面が数種の地層から構成される場合には、それらの土砂を配合して用いる。

実験例で用いた土の性状を表-1 に、粒径加積曲線と締固め特性を、図-1 及び図-2 に示す。また、比較基準のため、粒度特性から試算した各試料土に対する気泡混合率を基準気泡混合率として、同表に示した。

### 3.2 止水性の実験

#### 3.2.1 定水位透水試験

(1) 試験方法 JIS A 1218(1961)の方法に準じて内径 100 mm のモールドに、供試体を高さ L=123 mm に詰める。水頭 h は、150~160 mm を標準とする。試験の開始は越流コック開放直後で、水槽の排水口からの越流水量を 1 分毎に電子天びんで秤量する。測定を 4~6 時間行ない、越流水量と透水係数とを経時変化でまとめる。

(2) 試験例 試料土 I の川砂を用いた試験例を図-1

3 に示す。透水係数は気泡の混合によって、2 オーダ以上低下するのが見られる。

#### 3.2.2 加圧透水実験

(1) 実験方法 写真-1 に示す内径 300 mm のアクリルモールド内に供試体を高さ 450 mm に詰め、モールド上方から加水して、所定の圧力を作用する<sup>4)</sup>。供試体への水の浸透と初期設定圧力を確認後、各コックを締め、下方の電磁弁を10秒間、開放する。この間、低下する内部圧力を0.2秒毎に10秒間、測定する。

(2) 実験例 試料土 II を用いた実験例を図-4 に示す。気泡の種類や設定圧力による差が明瞭である。

なお、気泡を混合しない場合には、1秒以内に、圧力が零に低下した。

### 3.3 流動性の実験

#### 3.3.1 ミキサを用いた攪拌実験

(1) 実験方法 写真-2 のミキサを用いて、次に示す各段階でモータ（定格 750 W）の入力電力を、0.2秒毎に30秒間測定し、その平均値で電力値を表示する。測定の開始は、入力電力が定常状態となり気泡の完全な混合状態を目視・確認後に行なう。

①土の投入 投入土量を 10 l ずつ段階的に増分してはミキサで攪拌して電力を測定する。土量の設定を 4~5 段階とし、この上限を 60 l とする。

②気泡の混合 土の投入の最終段階に引き続いて、作成直後の新鮮な気泡を加えては、測定を繰り返す。この際の気泡混合率の設定は、試算した基準気泡混合率をばさんで 4~5 条件とし、電力値の下限が見られるか、飽和状態にいたるまで気泡を加えて行なう。

③混合状態の観察 気泡の混合状態を各段階で観察する。これより次のような状況を読み取る。

- a. 砂粒子の団粒化、粘土の塊状化
- b. 気泡による塑性的流動から液状的流動への推移
- c. 気泡の飽和状態と粗粒レキの分離
- d. 気泡混合率が低い段階での消泡
- e. 砂礫での再発泡現象

(2) 実験例 1 砂の含水状態、最大土量などを変えた事例を、試料土 II を用いた実験から示す。

a. 土の投入段階の電力値は、最適含水比条件でほぼ最大となり、締固め特性と類似した傾向が見られた。図-5 に気泡混合と加水の場合を比較して示すが、気泡土の特長である気泡添加後の水分が少なくして効果のある点が

表-1 試料土性状と気泡適用条件

試料土の識別 記号	呼称	土粒子の密度 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	単位体積重量 $\gamma_s$ g/cm <sup>3</sup>	自然含水比 W <sub>n</sub> (%)	粒度特性							締固め特性		気泡適用条件	
					液分 (%)	塑分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	最大粒径 (mm)	均等数 U <sub>c</sub>	$\rho_{max}$ (g/ccr)	W <sub>opt</sub> (%)	適用基準 気泡混合率 (%)	本誌 基準 混合率 (%)	
I	川砂	2.702	1.52	11.1	26	70	2	2	9.5	6.6	1.851	14.2	-	55	
II	川砂	2.712	1.46	11.5	10	87	3	4.76	3.3	1.686	16.4	-	55		
III	シルト質砂	2.642	-	-	1	69	13	17	4.8	-	1.763	13.6	B	30	
IV	シルト質砂	2.668	1.58	≒20	0.0	81.7	10.2	8.1	2.0	45.8	1.713	16.6	B	30	
V	シルト混り砂	2.648	1.847	22.61	2	87	6	5	9.52	3.5	1.618	15.0	B	24	
VI	粘性土	2.577	1.75	≒30	0.1	6.3	29.4	64.2	4.8	-	1.415	24.0	B	30	
VII	シルト質砂	2.648	-	19.6	3.5	75.4	13.1	8	9.5	45	1.793	14.6	B	30	
VIII	礫	2.634	1.986	12.0	61	35	3	1	76.2	78	1.953	11.5	B	69	

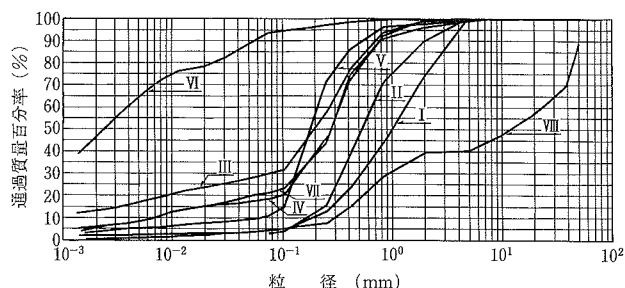


図-1 試料土の粒度分布

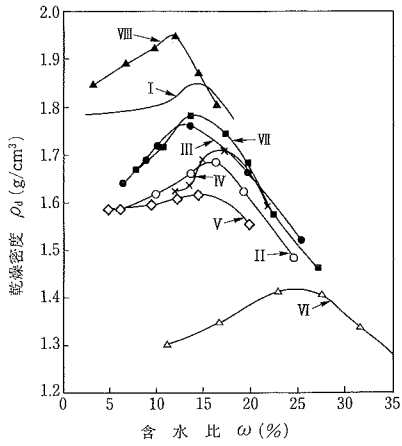


図-2 試料土の締固め曲線

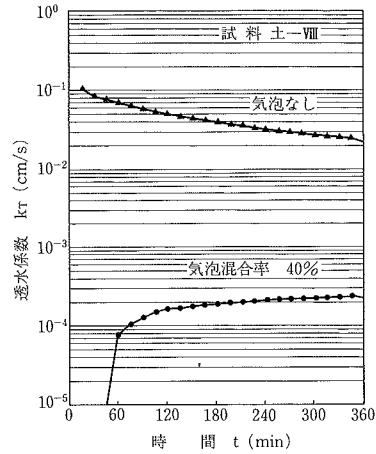


図-3 透水試験結果

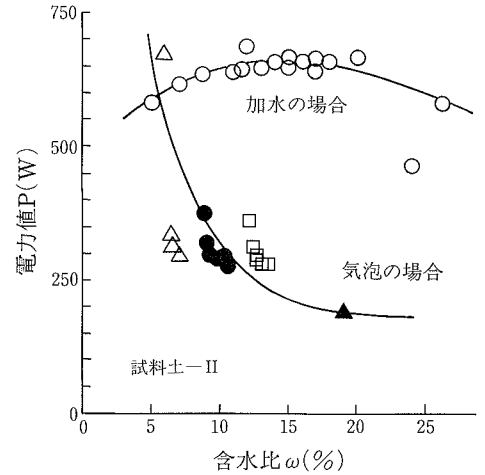


図-5 気泡混合後・加水後水分と流動性

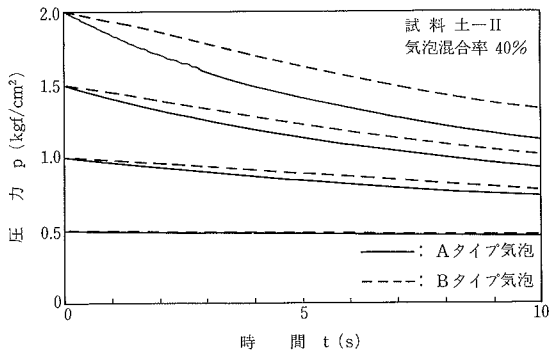


図-4 加圧透水実験例

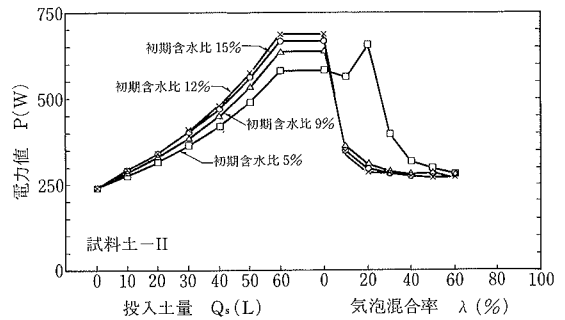


図-6 初期水分の異なる砂の流動性

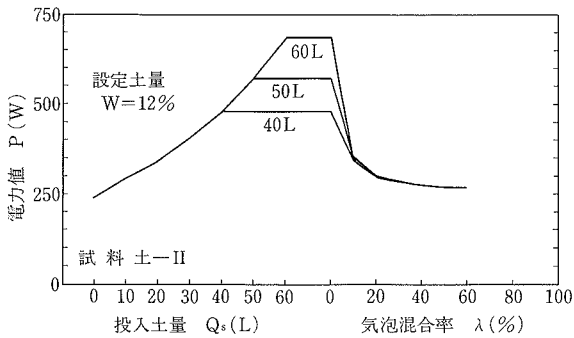


図-7 土量の電力値への影響

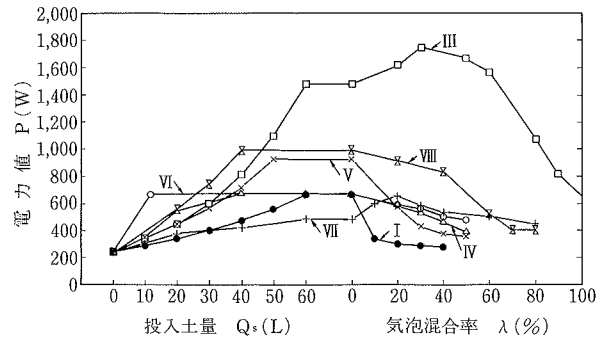


図-8 土質別の流動性調査例

分かる。

b. 図-6のように、気泡による電力値の低減は含水比にかかわらずほぼ同じで一致した特性曲線が得られた。

試料土の初期設定の含水比が低く、気泡混合率の小さな条件では、土の吸水作用による破泡が起り電力値の増加現象が入るが、ほぼ同型の曲線で大きな混合率側に平行移動した形で得られる。

c. 電力値の低減は、比較的低い混合率で顕著に見られる。土量の異なる設定では、図-7のように、土量の多いほど低減の勾配は急となる。

d. 電力値の最大低減を過ぎて、混合率をさらに増大

すると、電力値は、含水状態や土量条件によらず、ほぼ一定となり、無負荷に近い値に漸近する。

(3) 実験例2 その他の試料土に適用した事例をまとめて、図-8に示す。試料土III~VIIIは同地域で採取した洪積の粘土、細砂、礫である。特性曲線の勾配から見られるように、気泡混合の初期段階では、電力値の低減率が試料土によらず一定で小さい。更に、気泡を増やすことで、低減率の大きな状態に入る。

3.3.2 スランプ試験 JIS A 1101の方法で、スランプコーン(10 cm×20 cm×30 cmH)を使用する。掘削土の流動性が分かり、試験が簡便なことからミキサを用いた

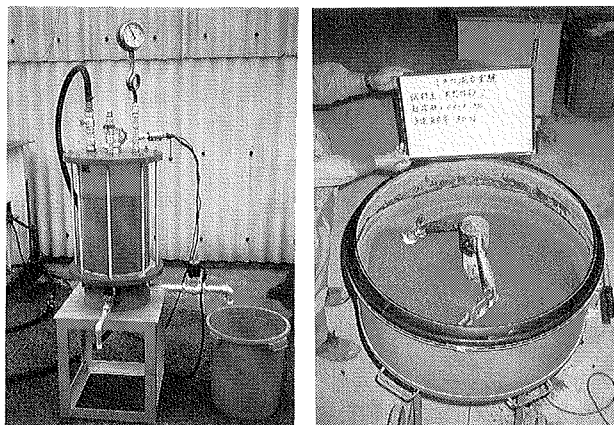


写真-1 加圧透水実験装置 写真-2 ミキサの攪拌実験装置

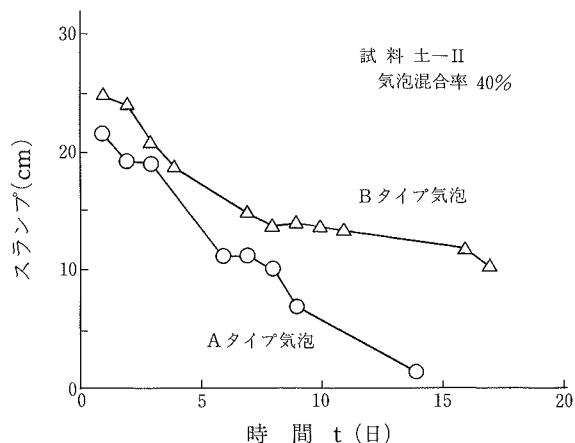


図-9 養生条件下の気泡土のスランプ

攪拌実験に並行して行なう。また、消泡後のスランプ試験から、場外搬出時の処理性をすることもできる。

図-9は、恒温恒湿条件の養生室内に保存した気泡土のスランプ試験例で、自然消泡の過程を示す。

#### 4. 考察

##### 4.1 止水性

4.1.1 定水位透水試験 気泡の有無による止水性の差を明らかにできた。気泡混合率による依存性を見るには、越流開始時間が6時間に納まらない場合があり<sup>5)</sup>、変水位透水試験を要することもある。

4.1.2 加圧透水実験 透水試験に比べて、気泡混合率による差など、気泡の効果は明瞭である。また、装置は大型になるが、短時間に結果が得られる。なお、この実験は、止水性と共に気泡土の圧縮性による切羽圧の保持を含むものである。

##### 4.2 流動性 (ミキサを用いた攪拌実験)

この実験では、測定開始のタイミングが問題である。川砂の60ℓに気泡10%を混合する場合で、完全に攪拌・混合するのに要する時間は、ミキサ起動後、約30秒である。気泡混合率の大きな場合や細粒分の多い土質では、更に長くなる。

##### 4.3 気泡混合率の推定

(1) 気泡効果と混合率 図-8に見られるように、気泡混合率を効果との関係でとらえると、次の5段階に分けられる。

- ① 土の吸水作用で破泡が発生する段階
- ② 団粒、塊状化した土の間隙に気泡が浸透する段階
- ③ 団粒化、塊状化が壊れて更に気泡が浸透する段階
- ④ 気泡の飽和に達する段階
- ⑤ 周囲機械との接触部へ浸透する段階

川砂のように適度な水分があれば、気泡の混合過程で①、②は見られず、③～⑤だけが現れる。また、地下水の補給がない砂礫や粒径の割りに含水比の小さな洪積粘性土条件では、①～②で終ったり、③を飛び越えて直接⑤に入る場合がある。

(2) 気泡混合率の補正 気泡混合率を決める上で、模型実験から対象土への効果を類推して、基準気泡混合率と実際の過不足が検討できる。例えば、川砂での値は模型実験からすると、地下水流による気泡逸失が無い限りやや大目で、洪積の粘土・シルト質砂では不足するものと推定される。

土質試験や模型実験の他に地盤構成と地質年代、シールド掘進地盤と地下水位の位置関係など地盤性状や実機シールド構造も、気泡効果を検討する上で考慮する。

#### 5. むすび

気泡シールド適用における気泡条件と流動性や止水性効果との関係を、模型実験により事前に確認する手法について、実験例を示して提案した。

圧力条件の制約や特定攪拌羽根のミキサ適用による形状効果などで模型実験の絶対値には限界があり具体的な数値として示せないが、現場発生土に対する気泡混合率など気泡条件を決める上で多くの知見が得られる。また、示した実験例は、過去に現場で不明であった現象の幾つかを解き明かすものである。今後、実験方法に若干の改良を加えて、気泡混合率と機械負荷などの実験結果と施工との数量的対応をつけ、気泡効果の事前の確認手法として確立させていきたい。

#### 参考文献

- 1) 斉藤, 藤原, 羽生田, 山下: 土圧型シールドにおける気泡混入により流動性を高める推進実験, 大林組技術研究所報 No. 21, p. 105~109, (1980)
- 2) 羽生田, 藤原, 山下: 下水道工事への気泡シールド工法の適用, 大林組技術研究所報, No. 32, p. 62~66, (1986)
- 3) 気泡シールド工法技術積算資料, 気泡シールド協会, p. 7~16, (1991. 8)
- 4) 羽生田, 藤原: 高吸水シールド工法の開発(その1), 大林組技術研究所報, No. 37, p. 21~25, (1988)
- 5) 羽生田, 藤原: 気泡シールド工法における掘削土の止水機構に関する一考察, 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集 第3部, p. 576~577, (1987. 9)