

土圧型シールドにおける気泡混入により掘削土の流動性を高める推進実験

齋藤二郎 羽生田吉也
藤原紀夫 山下幸夫

Experiment on Earth-pressured Shield Tunnelling to Increase Fluidity of Excavated Soil by Mixing Bubbles into Pressurized Chamber

Jiro Saito Yoshinari Hanyuda
Toshio Fujiwara Yukio Yamashita

Abstract

In advancing an earth-pressured shield tunnelling machine, excavated soil often blocks the pressure chamber and the functions of screw and cutters are consequently interfered with. At such a time, settling or heaving of the ground is apt to be caused. The authors turned their attention to the fact that fluidity of soil is increased by mixing air bubbles in the chamber while moving the machine forward. Therefore two series of experiments were conducted. The first series was to confirm the appropriateness of utilizing bubbles. In the second one, a model machine (457.2 mm dia. × 740 mm length) was moved forward into an artificially-created sandy soil. In each test, the model penetrated about 60 cm into the sand while air bubbles were simultaneously injected into the chamber. This paper is a report on the experiments and the results. A few remarks regarding the effects of bubble-mixing and its applications are also included.

概 要

土圧型シールドの掘進において、しばしば土砂が土圧室内等に閉塞して、スクリュコンベア、カッターが作動不能に陥ることがある。その際に、地山の陥没、隆起が発生しやすい。

筆者らは気泡が土砂に混入すると、土の流動性が高まることに着目し、気泡を土圧室内に注入しながら掘進する方法を考えた。まず、基礎実験によって、気泡を使うことの妥当性を確認し、次に、模型機(457.2φ×740mm)を用いて、土圧室に気泡を注入しながら掘進する実験を行なって、この方法の有用性を調べた。本報告は、これら一連の実験結果について述べたものである。

1. まえがき

土圧型シールドの掘進において、掘削土砂が土圧室内に閉塞することによってスクリュコンベアの排土およびカッターの機能が、しばしば停止することがある。この結果、地山の隆起あるいは陥没などの不都合な事態が発生しやすい。

従来、土砂の閉塞を解消する方法として、清水のジェット噴射¹⁾、バントナイト液や泥土²⁾³⁾の土圧室内への注入などが講じられている。

筆者らは、この対策も兼ねて、土圧室内の掘削土砂に気泡を混入して流動性を高めながら、シールドを掘進する方法を研究した。

まず、基礎実験において、土砂に気泡を混入した場合に耐久性の良いものを作成しうる起泡剤を選定してこれを用いて発生させた気泡を二つの試料土に加え、流動性、透水性などの性状を調べた。次に、土圧型シールドの模型機を、気泡を注入しながら、土槽内へ推進する実験をおこなった。

以下に、これら一連の実験結果について述べる。

2. 基礎実験

2.1. 実験方法

2.1.1. 試料土 表-3に新潟砂と利根川砂の物理性状を示す。試料土は、各砂を24時間水浸したあと、僅かな勾配をもつベニヤ板に敷きならして、1時間の水切りを

こなったものである。この際の含水比Wは、利根川砂で25.5%、新潟砂で27.9%である。

2.1.2. 起泡剤と溶液 市販の起泡剤のうち、入手できた数種類について、発泡させてできた気泡の緻密性耐久性を調べた結果、優れた1種類を選んで、以下の実験に用いることにした。この起泡剤は動物性蛋白質を主成分とし、化学的に安定し、人体に無害の液体である。発泡には、これを水で薄めた溶液を用いる。

溶液濃度は、便宜上、水に対する起泡剤の体積割合(%)をもって示す。表一1に、5%、10%濃度の溶液について、温度と粘性係数との関係を示した。

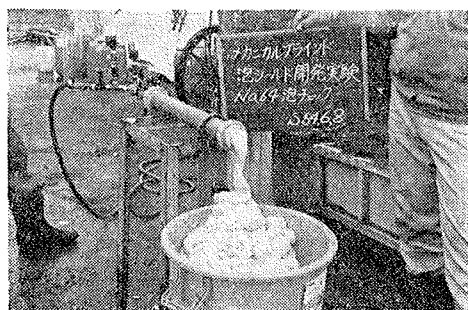
2.1.3. 発泡方法 起泡剤の水溶液と圧縮空気を泡発生器へ圧送する。同器内に配列された網目状の物体中を通過すると、写真一1に見られるシュークリーム状の気泡が発生する。

この時、気泡は、使用した溶液の約10~30倍に膨らむ。この膨張の倍率を発泡倍率と称し、(溶液比重)/(気泡比重)で計算して、求める。表一2には、基礎実験で使用する溶液濃度と発泡倍率との関係を示す。

なお、発泡倍率は、空気量と溶液量との比で変化するが、ここでは、この比をほぼ一定に管理する。

2.1.4. 気泡土の作成 試料土に気泡を所定の割合で加える。次にソイルミキサ(200rpm)により、30秒間の攪拌混合をおこなって気泡混合土(以下、気泡土と称す)を作成する。

気泡と試料土との体積比を気泡混合率として、記号λ



写真一1 泡発生器と気泡の発生状況

濃度	液温			
	10°C	15°C	20°C	25°C
5%	1.64	1.54	1.29	1.18
10%	1.75	1.63	1.36	1.24

表一1 起泡剤溶液の温度と粘性係数(c.p.)

起泡剤溶液濃度	発泡倍率		
	3%	7%	10%
発泡倍率	15.3	29.4	31.6

表一2 溶液濃度と発泡倍率

試料土名	G _s	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	U _c	74μ以下	e _{max}	e _{min}	*w(%)
新潟砂	2.76	0.17	0.30	0.32	1.88	2%	1.064	0.751	27.9
利根川砂	2.75	0.19	0.40	0.44	2.20	1%	1.157	0.726	25.5

表一3 試料土の物理的性状

*基礎実験を参照

を用いて表わす。試験に供する気泡土は、λ=25, 50, 75, 100%のものである。

2.2. 実験結果と考察

2.2.1. 気泡土の単位体積重量 図一1に試料土に対するλと、単位体積重量との関係を示す。λが大きい程、単位体積重量は小さくなるが、試料によって、全く異なる特性が現われている。

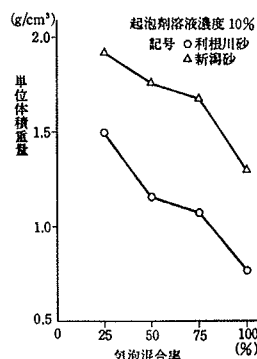
この結果は、λが等しい場合でも、実際に内部に混入できる気泡の量、つまり空気量に、かなりの差があることを示す。事実、新潟砂を使用した気泡土では、表面に、微細な孔ができ、ここから空気、溶液が浸出する現象が観察された。

2.2.2. 気泡土の流動性 スランプ、フロー、流下の各試験をおこなって流動性を調べた。なお、流下試験装置は、特製のもので、図一2の形状を有する。

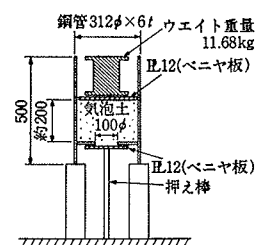
a) 溶液濃度の影響 スランプ試験の結果は図一3のようになり、λ=50, 100%の利根川砂について、それぞれのスランプは、22.5cm, 26cmとほとんど一定である。新潟砂でも変化がないが、各々、2cm, 20cmと小さい。特に、λ=50%において、利根川砂との差が大きい。

一方、フロー値は、図一4に示すように、溶液濃度の上昇に従って、増加する傾向をみせた。

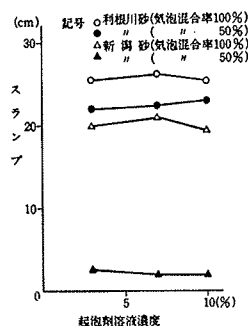
b) 気泡混合率λの影響 λによって、試料土の流



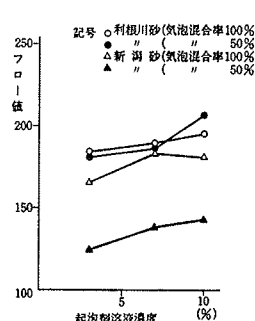
図一1 気泡土の単位体積重量



図一2 流下試験装置



図一3 使用溶液濃度と気泡土のスランプ



図一4 使用溶液濃度と気泡土のフロー値

動性に差があることは、上述のとおりであるが、さらに、 λ を4点とり、詳細に試験した。この結果を図-5に示す。

利根川砂のフロー値をみると、 $\lambda=50\%$ を境に、下降している。従って、この試料土に関する限り、適正な λ が50%付近に存在するものと考えられる。

流下試験結果を図-6に示す。気泡を同一濃度の溶液で作成して加える時、各試料土は、特定の λ を境界に完全に流下するか、全く流出しない状態に分かれた。各線は、二つの状態の境界を示している。この臨界状態における各試料土の λ は、溶液濃度が高い程、小さくて済む。また、この際の単位体積重量を計ると、新潟砂によるもの 1.79 g/cm^3 、利根川砂によるもの 1.36 g/cm^3 と、一定であった。

c) シルト含有量による影響 利根川砂1%, 新潟砂2%と、もともと、シルト分が含まれる。シルト含有量の影響を調べるため、さらに別に用意したシルト分(千葉県臼井産)を各試料土に加えて、5%, 13%となるよう調整した。この試料土を用いて気泡土を作成しスランプ、フロー試験をした。

図-7に示すように、シルト分が5%以上になると、 λ (50, 100%)にかかわらず、スランプ25~28cmにな

り、特に、新潟砂による試料土に、著しい流動性の向上がみられた。

以上の試験のうち、スランプ、フロー値は、前者が気泡土の静的な流動性を、後者はその持久性を、それぞれ表わす指標として考えられる。

2.2.3. 気泡土の止水性 定水位透水試験をおこなった結果を図-8に示す。 $\lambda=100\%$ の場合、各試料土の透水係数は1桁下がった。気泡混入により止水性が高まる事が解った。

3. 推進実験

3.1. 実験装置

推進実験装置の概略を図-9に示す。

模型機の構造は、スクリュコンベアとカッタが同一回転軸に固定され、スクリュコンベアの断面積が切羽断面の約20%(通常の10倍位)と大きい。排土口にはプレートバルブを設け、切欠リングと呼ばれる鋼管(216.3 ϕ ×70 lmm)で扇角90°分を欠いたリングを取付けることができる。

実験土槽(2,450B×1,210D×1,210H mm)には、エントランスパッキンを付け、模型機外周との水密性をよくした。

他に、計測設備として、自動計測システムを採用して、地表面変位、掘削土量、土圧、掘削力などを測る。気泡の発生装置は、基礎実験に使用したもので、模型機内部へ泡発器をセットしてある。

3.2. 実験方法

3.2.1. 試料土 土槽内に詰める掘削対象土は、表-3の利根川砂である。土槽内に、3~4層に分けて水締めする。コーン指数 $qc \approx 20 \sim 30\text{ kg/f cm}^2$ 、含水比 $W = 15 \sim 20\%$ 程度の地盤ができる。土被りは65cmで、地下水位は、土槽の隅の2箇所より0.8~1.2 l/minの水を注入して、ほぼ一定に保たれた。

3.2.2. 起泡剤の溶液濃度と発泡管理 基礎実験の結果から、同じ起泡剤を使うことにし、溶液濃度は10%と5%を用いることにした。

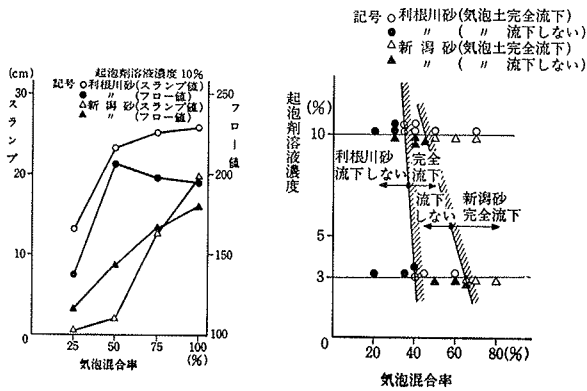


図-5 気泡混合率と流動性

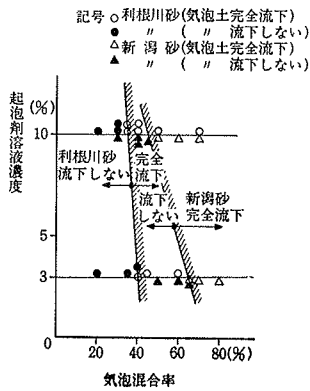


図-6 流下試験の結果

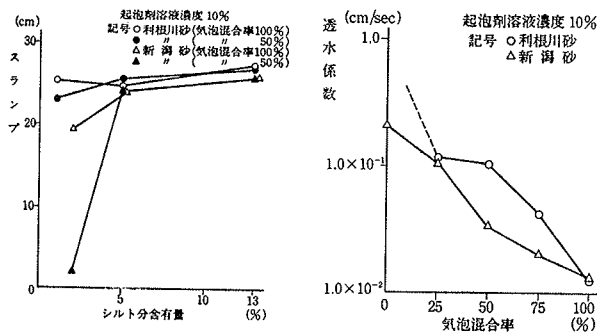


図-7 シルト含有量とスランプ

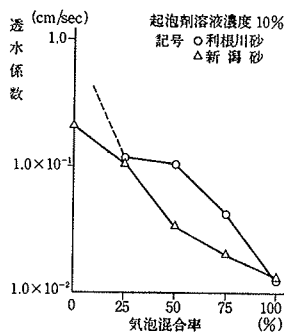


図-8 気泡土の透水係数

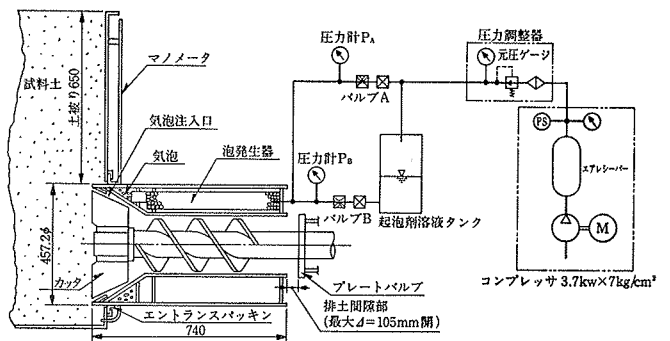


図-9 推進実験装置の概略

気泡はできるだけ強いものにするため、溶液量に対し空気を多めに入れて気泡を作成する。発泡倍率が高く、気泡がこわれにくいものになる。

混入する気泡は、あらかじめ、大気圧下に発生させて、泡の流量、発泡倍率などを調査して使う。

3.2.3. 推進方法 模型機の前部が土槽内に入った状態から、模型機後部に据えた特殊な掘削機によりカッタを含めた推進を、各実験において、約60cmおこなう。推進の開始と同時に、プレートバルブを開き、気泡を土圧室内に混入しながら推進させて、終了と同時に、このバルブを締めて、気泡注入も停止する。

推進速度、カッタ回転数は、掘削土量のバランスを保つために、気泡混入量も考慮に入れて、あらかじめ計算により設定する。

なお、地表面変位は、ダイヤルゲージを用い、土圧室内圧力は、推進直前の圧力指示値を零基準として、ひずみ型の土圧計により、連続記録させた。

3.3. 実験結果

のべ30ケースの推進実験をおこなった。表一4に代表的な16ケースの結果を条件別にA～Eと区分して示す。

3.3.1. 気泡注入の効果 基礎実験の結果と同様に、気泡の使用によって、掘削土の流動性、止水性が高められた。

プレートバルブを完全開にして、排土口に何らの拘束も与えなかった実験B群では、流動化によって、陥没ないし空洞を発生する程であった。しかし、排土口に切欠リングを取付けて、排土状態に拘束を与えると実験D群のように、比較的、地盤変位の小さい良好な掘削ができた。

実験A群、すなわち、気泡を全く注入せずに推進した

実験では、陥没、空洞を招いている。この場合に切欠リングを付けて推進すると、排出される土砂は全く少なくなり、スクリュコンベア内に土砂が圧縮された状態になり、土圧室内も閉塞状態となり、地盤が隆起し、推進も不能に陥った。

気泡を注入した各実験の推進直後には、推進直前に0.8~1.2 l/min 程度の水がプレートバルブ前面から流出していたが、気泡土のスクリュコンベア内充満によって、完全に止水された。

3.3.2. 気泡混入方法による影響 気泡混合率の低い場合の例として実験C-1, C-2がある。それぞれ約21%, 44%と推定される。この値は大気圧中での発泡を基に算出したもので、実際に、これだけの気泡が混入されたか疑問である。

その理由は、図-10に見られるように、土圧室内の圧力が0.35 kg/cm²になると、元圧が1 kg/cm²のC-2では、泡の流量が、大気中で得た値の6%になることが予想される。従って、ほとんど気泡が混らない状態となる。

元圧を1.5 kg/cm²としたC-1では、λは低いが、

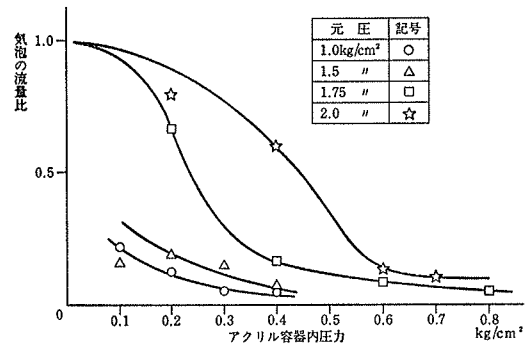


図-10 アクリル容器内の圧力と泡の流量比

実験名	発泡条件				地盤条件			排土口 制御条件	シールド操作条件		実験結果				
	起泡剤溶液濃度 (%)	発泡倍率	泡の流量 (l/min)	元圧 (kg/cm ²)	地下水位 G.L.F (cm)	コン指数 (kg/cm ²)	推進速度 (cm/min)		カッタ回転数 (r.p.m)	排出土重量 (kg/min)	排出土体積 (l/min)	地表面変位 (mm)	土圧室内圧力 (kg/cm ²)	観察記事	
実験A	1	起泡剤使用せず			42.0	—	プレートバルブ完全開	23.40	33.80	78.24	46.82	約-25.0	-0.0125~0.005変動	地表面陥没	
	2	起泡剤使用せず			47.0	—	プレートバルブ完全開	27.90	35.30	104.76	51.33	-27.5以上	-0.015~0.01変動	地表面陥没	
	3	起泡剤使用せず			49.0	—	プレートバルブ完全開	6.04	34.70	66.40	35.69	-0.19	0.013~0.003下降	推進終了後、地表面陥没	
	4	起泡剤使用せず			53.0	—	プレートバルブ完全開	17.30	33.22	74.00	39.80	0	-0.0125~0.01変動	空洞が確認された	
実験B	1	5.0	22.2	15.0	1.0	45.0	12.0~24.4	プレートバルブ完全開	13.83	15.10	107.81	61.36	-0.02	-0.01~0.01変動	気泡の混合状態良好、排土過多推進終了後陥没が発生
	2	5.0	13.2	14.1	1.0	28.0	17.6~26.5	プレートバルブ完全開	14.10	15.40	75.57	43.90	-1.48	0.01~0.045下降	気泡の混合状態良好排土や過多
実験C	1	10.0	22.0	5.73	1.5	36.0	9.9~16.5	切欠リング付	17.08	25.00	48.30	37.79	0.29	0.19~0.06変動	気泡の混合状態良好小さな空洞がみられた
	2	5.0	13.2	14.1	1.0	55.0	17.6~26.5	切欠リング付	20.30	21.30	30.10	14.22	7.82	0.01~0.355上昇	気泡の混合状態不良、排土不足
実験D	1	5.0	13.2	14.1	1.0	30.0	13.0~24.0	切欠リング付	9.59	12.80	33.34	28.58	-0.05	0.015~0.08下降	気泡の混合、ずり排出状態良好空洞はなし
	2	5.0	13.2	14.1	1.0	38.5	13.0~24.0	切欠リング付	16.44	22.00	56.55	50.60	-1.21	-0.065~0.09下降	やや気泡過多の掘削土空洞はなし
	3	10.0	29.9	14.16	1.5	42.5	10.5~16.4	切欠リング付	8.47	6.90	19.76	20.38	0.81	0.023~0.1675脈動	気泡の混合、ずり排出状態良好空洞はなし
	4	10.0	29.9	14.16	1.5	41.0	11.0~20.8	切欠リング付	14.74	10.71	45.50	33.85	0.01	0.04~0.04脈動	気泡の混合、ずり排出状態良好空洞はなし
	5	10.0	22.47	20.5	1.5	68.0	16.6~26.0	切欠リング付土圧制御	13.20	19.43	40.73	40.43	0.09	-0.005~0.02変動(微少)	気泡の混合、ずり排出状態良好空洞はなし
	6	10.0	22.47	20.5	1.5	74.5	16.6~26.0	切欠リング付土圧制御	8.27	15.70	29.88	30.01	0.17	-0.015~0.01変動(微少)	気泡の混合、ずり排出状態良好
実験E	1	10.0	29.9	14.16	1.5	24.5	13.0~24.0	切欠リング付	15.41	13.23	27.14	21.19	7.36	0.02~0.35上昇	気泡の混り方不良隆起
	2	10.0	23.4	14.4	1.0	28.0	29.2~30.0以上	切欠リング付	9.40	12.70	6.41	7.97	2.12	-0.025~0.165上昇	気泡の混り方不良、ずりの出が悪い

表一4 推進実験の条件および結果

*大気圧下の発泡における値

土圧室内の圧力が、若干上昇しても気泡の流量が、加速的に減少することがなく、隆起には、至らなかったものと思われる。また実験D群のD-1, D-2は元圧1 kg/cm²で気泡を注入しており、地表面の沈下が若干みられた。

一方、元圧1.5 kg/cm²で気泡を発生させたD-3, 4, 5, 6では、地盤変状も小さく、良好な掘削ができた。なお、実験D群の気泡混合率 λ は50%以上である。

以上のことから、気泡混入の方法は、気泡混合率 λ とともに、気泡をどのような圧力下で発生させるのかも考慮しておこなわれなければならない。

3.3.3. 地下水位の影響 実験E群は、 λ が100%近い条件で、地下水位も比較的に高いものである。元圧1.0 kg/cm², 1.5 kg/cm²の二つの例を示したが、いずれの場合にも、気泡の混りが悪く、掘削土の流動性を欠き排土不足をきたして隆起が生じている。

3.3.4. その他 実験D-5, 6は、土圧室内圧力を基準に、同圧力値を-0.015~0.04 kg/cm²の範囲内に納まるよう、推進速度を調節して制御したものである。気泡を全く注入せずおこなった実験A群においては、土圧室内圧力と、地盤変状との関連がほとんどみられないのに対して、気泡を混入した効果として土圧によって完全に掘削制御が可能となっている。

4. 考察

4.1. 砂の粒径による流動性の相違

基礎実験の試料土であった新潟砂は、土圧型シールドを用いた工事現場から採取したものである。現場では、特別な補助工法を用いることなく、また土圧室への土砂の閉塞は見られず、順調に工事を終了している。利根川砂と僅かに均等係数を異にする新潟砂に気泡を混入しても、流動性は前者ほど改善されなかった。

ところが、シルト含有量を5%以上に補正した新潟砂の気泡土の流動性は著しく増大した。

これらの理由として次のようなことが考えられる。利根川砂については、気泡の粒子が土粒子を構造的に支えきれぬ。事実、気泡と土砂とを一定の体積ずつ加えて作成される気泡土体積は、これら二つの体積の和で表わすことができた。

新潟砂は、均等係数で微妙な差があり、粒径のそろった土粒子が、内部に入った気泡粒子間をくぐって沈殿しやすく、その結果、空気と溶液の浸出が観られた。この様に新潟砂による気泡土内では消泡が進行していた。

シルト分を添加することによって、気泡の浮上り防止をし、新潟砂の沈殿は、進まなかったものと考えられる。

土圧型シールドの掘削対象土としては、当然、新潟砂のように、均一な粒径で、土圧室内部でアーチングの発

生がしにくいものが好ましい。このような土質条件では、気泡が使われることがないであろう。

気泡を適用する土砂の性状は、均等係数 U_c の大きい砂質土であれば、効果的と考えられる。

4.2. 気泡混入と掘削方法

気泡を土圧室内に入れるには、泡の流量を含めた掘削土量のバランスがとれるように、システム全体の設定をおこなう。

特に、カッタの回転数が、気泡の混合の際に重要なパラメータとして作用してくるものと考えられる。

掘削土量のバランスをとることによって、土圧室内圧力の極端な変動を防止する。仮に、土圧室内が、静止土圧以下になるような、すかし掘りの状態では、地下水を導きやすくなり、気泡混入に都合が悪い。

長い推進の間には、上記のバランスがとれない状況が生じてくるものと考えられる。

そのため、気泡の流量が、土圧室内圧力と元圧によって、どのように減少するかについて、ゆらかじめ、気泡発生器毎に検査しておく必要がある。土圧室内圧力の変動に追従させるには、元圧を高くすると、土圧変動に対して、気泡の流量低下を小さくできる。

しかし、元圧を高くすると、地表面への噴き上げが心配されるため、土圧室内圧力が異常に上昇した場合、圧縮空気流路を閉にする制御も必要である。

5. あとがき

一連の実験から、気泡混入の効果として、土砂の流動性、止水性が増大することが明らかになり、土圧型シールドに気泡を用いることの有用性が確められた。

試料土および模型機の条件は、厳しいものであったが、地下水、排土口、制御方法に関する問題の糸口を引き出すことができたように思える。

今後、実機による現場施工試験をおこなうとともに、より水に強い起泡剤あるいは発泡方法を研究しなければならない。

さいごに、本実験に御協力いただいた第一化成産業(株)および同社の堀 実氏の名を記して深甚なる感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 小池：稲城層(細砂)での問題点と実績、シールドトンネル工法の設計と施工技術、Vol. 7, (1979)
- 2) 今井：泥土加圧式シールド工法の適用性と各種施行実施例、シールドトンネル工法の設計と施工技術、Vol. 6, (1978)
- 3) 武田、中森：泥土加圧シールド工法とその施工例、最近のシールド工法、Vol. 5, (1978)