

7. シールド掘進用添加剤の開発（その2）

溝 口 義 弘
浅 田 毅
原 田 哲 夫*
松 本 光 浩*

要 旨

前報で、フォームスチレンビーズを使用した加泥剤Aを砂質系試料に添加した混合土の性状試験結果について報告した。

今回、砂礫系試料を用いて同様の試験を行った結果、加泥剤Aは、砂礫系試料についても砂質系試料と同様に、流動性、圧縮性および止水性を改良し、掘進用添加剤として有効であることが確認された。

キーワード

添加剤／加泥剤A／フォームスチレンビーズ／流動性／圧縮性／止水性

目 次

- | | |
|---------|------------|
| 1. はじめに | 4. 考 察 |
| 2. 試験方法 | 5. ま と め |
| 3. 試験結果 | 6. あ と が き |

7. DEVELOPMENT OF AN ADDITIVE FOR THE SHIELD TUNNELING METHOD-NO.2

Yoshihiro Mizoguchi
Tsuyoshi Asada
Tetsuo Harada
Mitsuhiro Matsumoto

Abstract

In the last report, we described the results of a test in which Mud Additive A (tentative), containing foam-styrene-beads, was mixed with sandy soil to create a new soil. Following the test, we conducted a similar test with gravelly soil. Those results are described in this report.

As it did with sandy soil, Mud Additive A improved the fluidity, compressibility and water impermeability of gravelly soil, thus confirming suitability for use in shield tunneling.

* 大阪本店土木部機械課

1. はじめに

土圧系シールドで用いられる掘進用添加剤は、掘削土の性状を、流動性、圧縮性、止水性等を有するように改良することが必要とされている。

前報では、従来の掘進用添加剤に代わって開発を進めている「加泥剤A」を砂質系の山砂に添加した混合土について、攪拌抵抗試験を行った結果、無添加のものよりも流動性と圧縮性が大幅に改良されることを報告した。

本報告は、砂礫系の山砂に加泥剤Aと他に市販されている2種類の添加剤を添加した混合土について、流動性、圧縮性、および止水性に関して行った試験結果を述べるものである。なお、流動性と圧縮性については攪拌抵抗試験を、止水性については透水試験を行った。

2. 試験方法

2.1 試験試料

(1)対象土

試験に用いた対象土は、比較的粒度が一定である砂礫系の山砂を用いた。この山砂の粒度分布を図-1に示す。対象土の含水比 w は、5、10、15、20、25%に調整した。

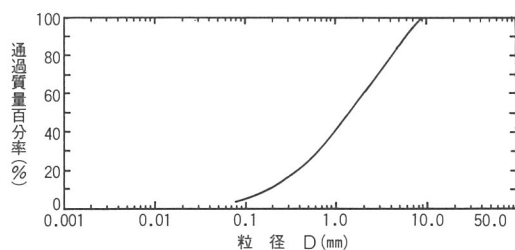


図-1 山砂の粒度分布

(2)添加剤（以下加泥剤とする）

加泥剤Aは、ビーズ、粘土およびCMCを練混ぜたスランプ20cm程度のものである。各材料の特性および性質を下記に示す。

ビーズ；ポリスチレン樹脂の発泡体、直径 ϕ 5～8 mm程度の球形

粘土；液性限界 ω_L 53%、塑性限界 ω_P 20%、比重2.45

CMC；メチルセルロース系の増粘剤

加泥剤Aと比較するために、別に現在使用されてい

る2種類の加泥剤（以下加泥剤B、Cとする）を使用した。

2.2 攪拌抵抗試験

(1)攪拌抵抗試験装置

攪拌装置は、シールドチャンパ内の掘削土の攪拌状況をモデル化したものであり、図-2に示すような直径 ϕ 300mm、高さ 400mmの試験槽内に攪拌羽根をつけた構造のものである。

攪拌羽根は、油圧モータの回転数を1/30に下げるギヤボックスとトルク変換器を介して、攪拌羽根の芯棒とドライブチェーンでつながっており、水平、反時計方向に1 rpmで回転する。攪拌および加圧時の変位量は変位計で、攪拌抵抗（以下トルクとする）はトルク変換器で、載荷圧および間隙水圧は圧力計で計測する。

(2)試験方法

所定の含水比に調整した山砂に加泥剤を添加して練り混ぜた混合土を、試験槽内に一様に締め固め、載荷板で所定の圧力に加圧した後、攪拌羽根を回転させて試験を行った。山砂に添加する加泥剤の割合（注入率）は、所定の密度に締め固めた山砂（無添加）の体積に対して30%とした。加圧（以下拘束圧 P とする）条件は、0、0.5、1.0、2.0、4.0 kgf/cm²の5 ケースとした。表-1に、攪拌抵抗試験の条件を示す。

以下、加泥剤A（B、C）を添加した混合土は単に加泥剤A（B、C）と呼ぶことにし、加泥剤を添加しないものは無添加と呼ぶことにする。

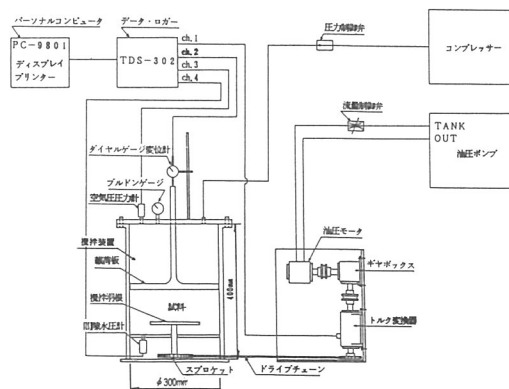


図-2 攪拌抵抗試験装置

表－１ 攪拌抵抗試験結果

N.O.	加泥剤の種類	拘束圧 (kgf/cm ²)	山砂の含水比 (%)	N.O.	加泥剤の種類	拘束圧 (kgf/cm ²)	山砂の含水比 (%)
A－１	加泥剤 A	0	5, 10, 15, 20, 25	C－１	加泥剤 C	0	5, 10, 15, 20, 25
A－２		0.5		C－２		0.5	
A－３		1.0		C－３		1.0	
A－４		2.0		C－４		2.0	
A－５		4.0		C－５		4.0	
B－１	加泥剤 B	0	5, 10, 15, 20, 25	D－１	なし (無添加)	0	5, 10, 15, 20, 25
B－２		0.5		D－２		0.5	
B－３		1.0		D－３		1.0	
B－４		2.0		D－４		2.0	
B－５		4.0		D－５		4.0	

2.3 透水試験

透水試験は、JIS A 1218に従って変水位透水試験を行った。試料は、含水比10%に調整した山砂に加泥剤を添加して練り混ぜた後、混合土を透水円筒に一樣に締固めて作成した。加泥剤の注入率は、山砂体積の15%とした。

3. 試験結果

3.1 攪拌抵抗試験

図－３－(1)～(4)は、各加泥剤を含水比 5%の山砂に添加した場合のトルクと変位量の経時変化を示したものである。

図－３－(1)で、加泥剤 A の場合は、拘束圧が大きいほど、最大トルク、変位量ともに大きな値を示した。しかも、トルクは、攪拌羽根が 1 回転するまでに最大値に達し、それ以降急激に低下し、拘束圧の大小にかかわらず一定値 (約 1kgf・m) に収束する。変位量は、トルクがピークに達するまでに最大となり、それ以降変動はあまり見られない。加泥剤 B (図－３－(2))、C (図－３－(3)) の場合も加泥剤 A と同様の傾向を示している。しかし、無添加 (図－３－(4)) の場合は、多少異なる傾向を示している。拘束圧 2.0kgf/cm² 以下 (D－１～４) では、トルクが一定値 (約 3kgf・m) に収束したが、さらに拘束圧が大きくなる (D－５) と、トルクが 10kgf・m 以下には低下しなくなる。

3.1.1 トルクと山砂の含水比の関係

図－４－(1)～(4)は、最大トルクと山砂の含水比の関係を拘束圧別にみたものである。

加泥剤 A (図中●印) の場合の最大トルクは、曲線が右下がりとなり、山砂の含水比が大きくなるに従って小さくなった。山砂の含水比が 20% 以上の場合、拘束圧にかかわらず、加泥剤 A の最大トルクは、無添加 (図中○印) の最大トルクとほぼ同じである。ところが、山砂の含水比が 20% 以下の場合、加泥剤 A の最大トルクは、無添加の場合より小さくなり、無添加の最大トルクに対する加泥剤 A の低下率は、拘束圧が大きくなるほど大きくなる。拘束圧 4.0kgf/cm² では、低下率は 1/3 以上となり、拘束圧 0.5～1.0kgf/cm² では低下率は 1/2 程度となる。加泥剤 A の最大トルクは、加泥剤 B (図中△印) と C (図中□印) の中間的な値を示している。

図－５－(1)～(4)は、残留トルクと山砂の含水比の関係を拘束圧別にみたものである。ただし、残留トルクについては、図－３－(1)～(4)で、攪拌開始 5 分以降トルクが落ち着き変動も少なくなっているため、5 分以降のトルクの平均値を残留トルクにした。

加泥剤 A の場合の残留トルクは、加泥剤 B、C とほぼ同じ値を示し、無添加のものよりは低い値である。最大トルクの場合と異なり、加泥剤 A の残留トルクは、山砂の含水比の影響をあまり受けない。

加泥剤 A を添加した混合土の最大トルクは、無添加のものに比べ 1/2 ～ 1/3 に低下する。加泥剤 A を添加すると混合土の流動性が良くなり、低含水比および高拘束圧で改良の度合いは大きくなる。これは、加泥剤 A のビーズのベアリング効果の現れである。いったん混合土が攪拌され流動性が良くなると、加泥剤 A の残留トルクは、含水比および拘束圧の影響を受けない。

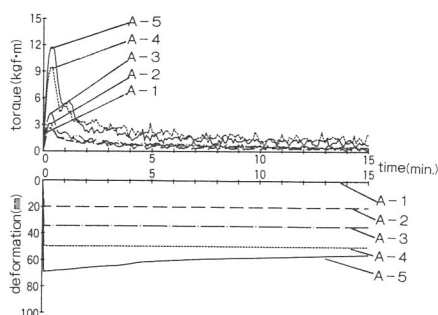


図-3-(1) トルクおよび変位量の経時変化
(加泥剤A：山砂の含水比 $w = 5\%$)

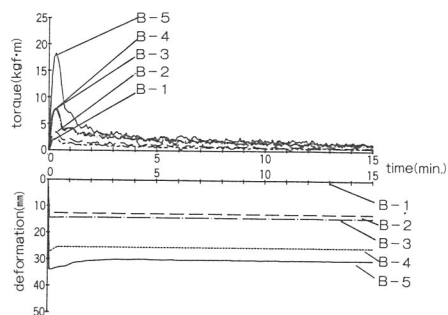


図-3-(2) トルクおよび変位量の経時変化
(加泥剤B：山砂の含水比 $w = 5\%$)

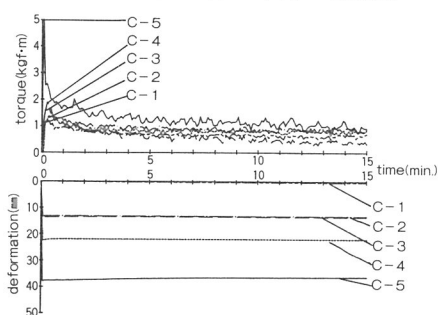


図-3-(3) トルクおよび変位量の経時変化
(加泥剤C：山砂の含水比 $w = 5\%$)

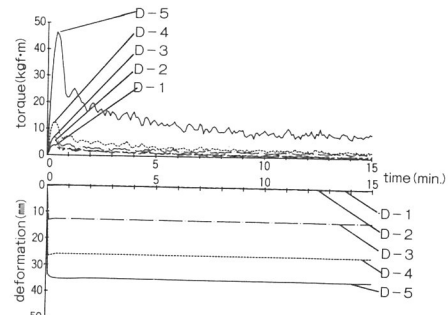


図-3-(4) トルクおよび変位量の経時変化
(無添加：山砂の含水比 $w = 5\%$)

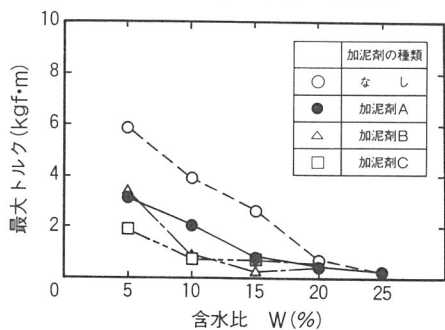


図-4-(1) 最大トルクと含水比の関係
(拘束圧 $P = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$)

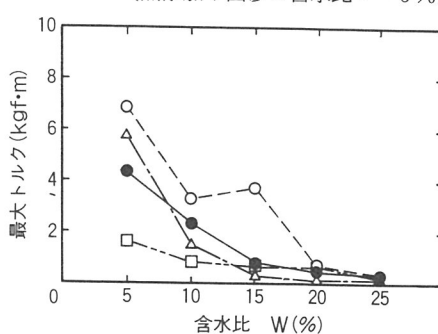


図-4-(2) 最大トルクと含水比の関係
(拘束圧 $P = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

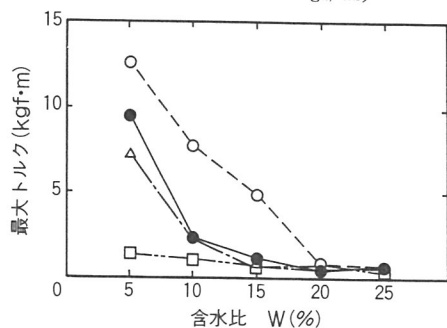


図-4-(3) 最大トルクと含水比の関係
(拘束圧 $P = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$)

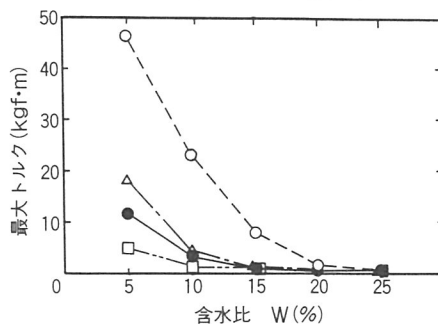


図-4-(4) 最大トルクと含水比の関係
(拘束圧 $P = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$)

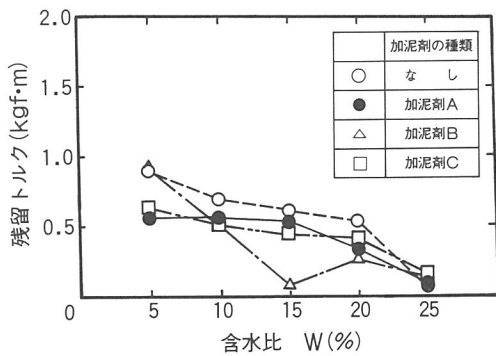


図-5-(1) 残留トルクと含水比の関係
(拘束圧 $P = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$)

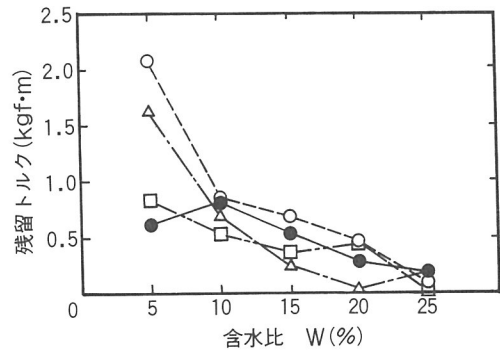


図-5-(2) 残留トルクと含水比の関係
(拘束圧 $P = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

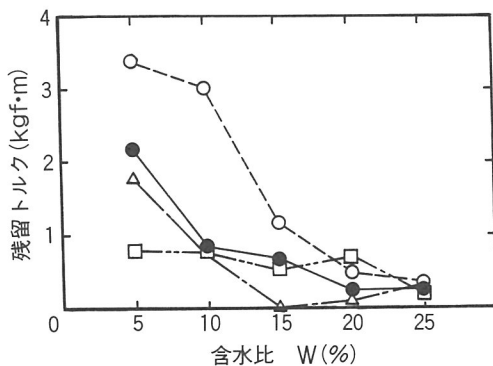


図-5-(3) 残留トルクと含水比の関係
(拘束圧 $P = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$)

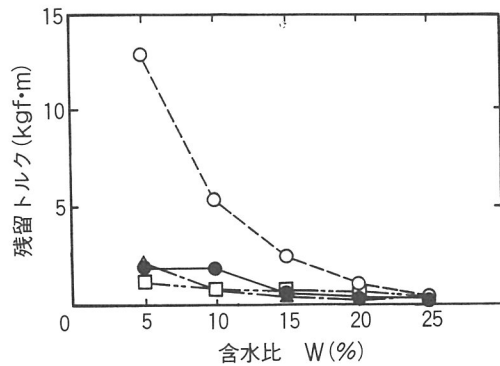


図-5-(4) 残留トルクと含水比の関係
(拘束圧 $P = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$)

3.1.2 圧縮率と山砂の含水比の関係

図-6-(1)~(4)は、圧縮率と山砂の含水比の関係を拘束圧別に見たものである。ただし、圧縮率は、最大変位量を初期試料高さで割った値である。

加泥剤Aの場合の圧縮率は、曲線が右下がりとなり、含水比が低くなるに従って大きくなり、拘束圧が大きくなるに従って大きくなった。加泥剤Aは、無添加のものに比べて圧縮率が大きくなり圧縮性がある。山砂の含水比が10%以下で、加泥剤Aは、加泥剤B、Cよりも圧縮率が大きく、含水比が10%以上になると、加泥剤BとCの圧縮率の中間的な傾向を示している。

加泥剤Aを添加した混合土の圧縮性は、無添加のものより良くなり、加泥剤B、Cと同程度の圧縮性がある。これは、ビーズ自体が多孔質で多量の空気を含み圧縮性があり、弾性体のような挙動を示すためである。

3.2 透水試験

透水試験の結果を表-2に示す。加泥剤Aを添加し

た混合土の透水係数 k は、他の加泥剤および無添加の透水係数 k と同じ 10^{-3} cm/sec の値を示した。加泥剤Aのビーズが、水みちを作り透水係数 k を上げると考えていたが、ビーズを添加しても透水係数 k に対して大きな変化を与えていないので、加泥剤Aは、加泥剤B、Cと同程度の止水性がある。

一般には細粒分の含有率が約10%以上であれば、透水係数 k は 10^{-5} cm/sec 程度になり、止水性があることが知られている。

今回行った透水試験では、試料の層厚を約10cmで行ったために細粒土が幾分流出し、透水係数 k が大きくなったと思われる。

表-2 透水試験結果

加泥剤の種類	透水係数 (cm/sec)
加泥剤A	2.6×10^{-3}
加泥剤B	2.0×10^{-3}
加泥剤C	5.2×10^{-3}
無添加	1.0×10^{-3}

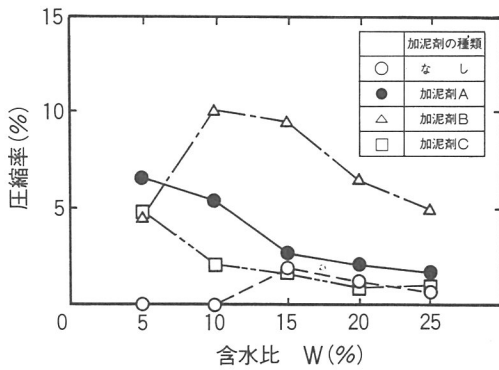


図-6-(1) 圧縮率と含水比の関係
(拘束圧 $P = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$)

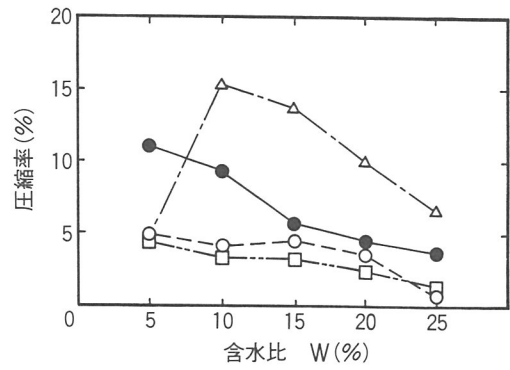


図-6-(2) 圧縮率と含水比の関係
(拘束圧 $P = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

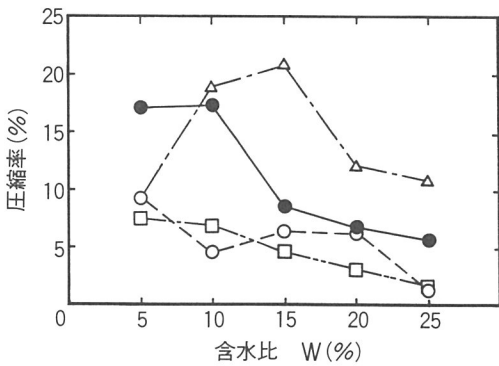


図-6-(3) 圧縮率と含水比の関係
(拘束圧 $P = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$)

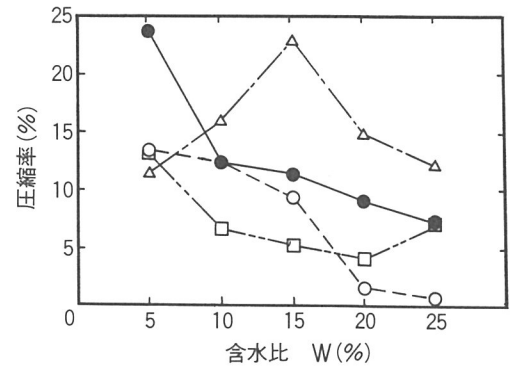


図-6-(4) 圧縮率と含水比の関係
(拘束圧 $P = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$)

4. 考察

攪拌抵抗すなわち、シールドチャンバ内における掘削土の流動性は、そのせん断抵抗に大きく関係すると思われる。このせん断抵抗は土粒子間力、すなわち有効応力に依存する。例えば、モール・クーロンの破壊基準では、せん断抵抗 τ は次の式(1)表される。

$$\tau = C + \sigma' \cdot \tan \phi \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに C : 粘着力

σ' : 有効応力 ($\sigma' = \sigma - U$)

σ : 全応力

U : 間隙水圧

ϕ : 内部摩擦角

すなわち、攪拌抵抗も有効応力に比例して、増加するものと考えられる。このことをシールド掘進時におけるチャンバ内の土の流動性にあてはめて考えてみる。チャンバ内の圧力は、切羽前面よりトンネル側に向かっ

て作用する土圧および水圧に対抗してその作用圧以上に高めた圧力（全応力）にする必要がある。そこで、式(1)から、チャンバ内の土の流動性は、このチャンバ内の圧力が有効応力成分によって受け持たれた場合小さくなる（攪拌抵抗が大きくなる）であろうし、また逆に間隙水圧成分によって受け持たれた時は、流動性が大きくなる（攪拌抵抗は小さくなる）ことが考えられる。今回の試験結果は、加泥剤Aを添加した混合土を攪拌すると、間隙水圧が発生し攪拌抵抗が小さくなり、流動性が良くなったことを示している。

次に、攪拌羽根のトルク T とせん断抵抗 τ の関係を図-7に示す。攪拌羽根（ $\phi 20 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ ）の厚さは羽根の長さに比べて短いため、せん断抵抗 τ は、攪拌羽根の回転面上下に生じると仮定すると、攪拌羽根の攪拌抵抗（トルク） T は、次式のようになる。

$$T = 2 \times \int 2 \pi r \cdot r \cdot \tau \cdot dr$$

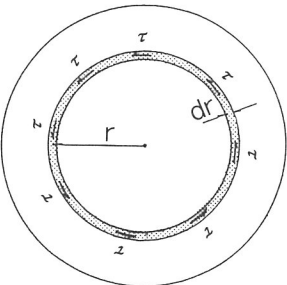
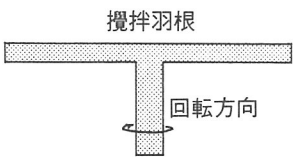
つまり、せん断抵抗 τ は

$$\tau = 3 \cdot T / 4 \pi r^3 \cdots \cdots (2)$$

となる。

式(2)を用いて最大トルク T から求めたせん断抵抗 τ と拘束圧 P との応力比 (τ/P) をとり、山砂の含水比との関係を拘束圧別に示したものが、図-8-(1)~(4)である。加泥剤 A の応力比は、山砂の含水比が大きくなるに従い小さくなり、無添加のものよりは小さく、加泥剤 B と C の応力比の中間的な値を示している。

図-9 は、図-8-(1)~(4)の加泥剤 A についてまとめたものである。この図から、加泥剤 A の応力比は、他の加泥剤と異なり、山砂の含水比が大きくなるにつれて指数関数的に減少する傾向が見られる。この関係から、加泥剤 A を添加した場合、掘削地盤の含水比と切羽前面に作用している土圧および水圧からチャンバ内の攪拌抵抗が推定でき、シールド掘進時の切羽土圧の管理の一指標になるものと考えられる。



T : トルク (kgf・cm)
 τ : せん断応力 (kgf/cm²)
r : 回転半径 (cm)

図-7 トルク T とせん断抵抗 τ の関係

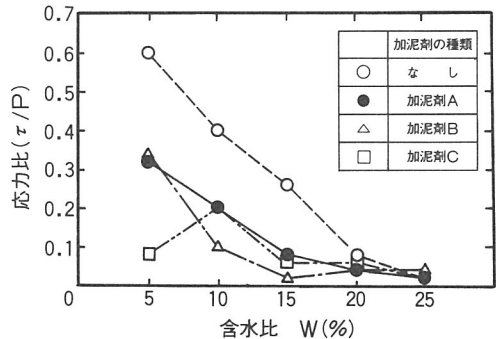


図-8-(1) 応力比と含水比の関係
(拘束圧 P = 0.5kgf/cm²)

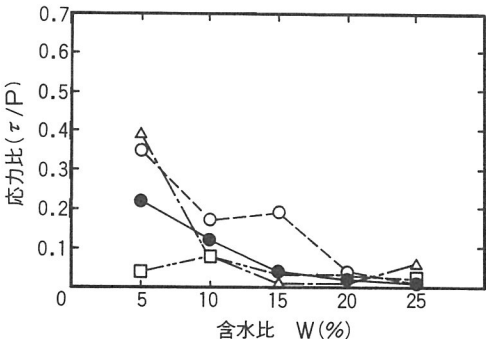


図-8-(2) 応力比と含水比の関係
(拘束圧 P = 1.0kgf/cm²)

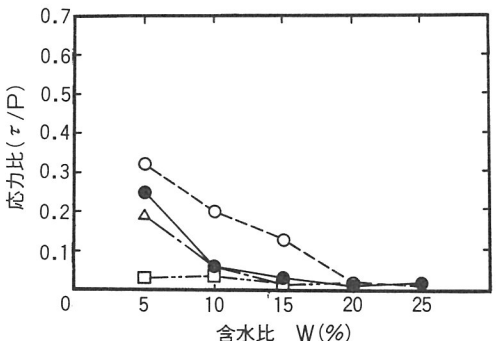


図-8-(3) 応力比と含水比の関係
(拘束圧 P = 2.0kgf/cm²)

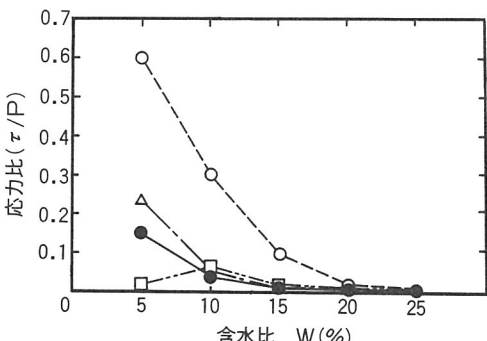
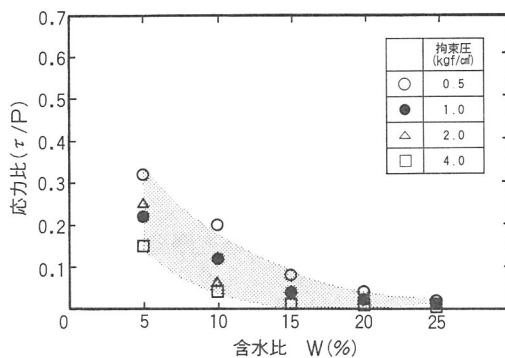


図-8-(4) 応力比と含水比の関係
(拘束圧 P = 4.0kgf/cm²)



図－9 加泥剤Aの応力比と含水比の関係

と菅機械工業(株)広田義信氏ははじめ関係各位に深く感謝の意を表します。

5. まとめ

本試験結果から次のことがわかった。

- ① 加泥剤Aを添加した混合土の流動性は、ビーズのベアリング効果により、無添加のものに比べ1/2～1/3に改良される。特に、低含水比および高拘束圧で改良の度合いは大きくなる。
- ② 加泥剤Aを添加した混合土の圧縮性は、ビーズ自体の圧縮効果により、無添加のものより改良され、他の加泥剤と同程度の圧縮性がある。
- ③ 加泥剤Aを添加した混合土の止水性は、他の加泥剤とほぼ同じ効果がある。さらに、止水性を大きくする必要がある時は、加泥剤Aの粘土含有率を大きくすればよい。
- ④ 加泥剤Aを添加した場合、他の加泥剤と異なり、切羽前面に作用する土圧および水圧に対するチャンパ内の攪拌抵抗が推定できるため、切羽の土圧管理が容易になる。

6. あとがき

本試験により、砂礫系の掘削土のチャンパおよびスクリュコンベア内における掘削土の流動性と圧縮性は、加泥剤Aを添加することで大幅に改良され、止水性に関しても、十分有効であることが確認された。今後の課題としては、

- ① 対象土の種類に合わせた加泥剤Aの配合および添加量の検討
- ② 実施工での流動性、圧縮性、止水性等の効果の確認

等が考えられる。

最後に、本開発を進めるに当たって、貴重なご意見とご協力をいただいている巧友テクノス(株)野村義浩氏