シールドのチャンバ試料回収装置の開発

前田建設工業(株)　正会員　○野本　康介　正会員　森　芳樹
増田　昌昭　飯島　規雄
正会員　鶴巻　慎也　正会員　鈴木　大夢
正会員　出口　資門　鈴木哲太郎

1．背景と開発の目的

土圧式シールドの施工では，切羽圧を保持するため添加材を掘削土と混合攪拌して塑性流動性と止水性を満足する必要がある．その性状を確認するための一般的な方法として，チャンバ内の泥土をサンプリングし室内試験を行うことが挙げられる．しかしながら大深度の高水圧下で気泡を添加材として使用した場合，チャンバ内では気泡が圧縮された状態にあるが，大気圧下に解放されると気泡が膨張し泥土の性状が大きく変化してしまうことが知られている．例えば 0.5MPa の加圧下で注入率 10%，発泡倍率 10 倍の気泡は，大気圧下ではボイルの法則により 55%注入率に相当する空気量になる(**図-1, 2**)．ミニスランプ 3.0cm で手で持てる硬さの泥土が，指の間から流れ出す軽い手触りの状態になってしまう．実際のシールド工事のチャンバ内では 0.5MPa より大きい圧力が作用することもあり，大気圧下に解放した気泡の膨張はさらに顕著になる．チャンバ内の圧力が小さければ，膨張は比較的小さくなる．膨張した後の試料からは元の性状が推定できないことに加え，膨張する前の圧力下で試験する一般的な方法がないのが



(a)大気圧下で
ミニスランプ 3.0cm

(b)0.5MPa 加圧下で
ミニスランプ3.0cm相当を
大気圧に解放したもの

図-1　気泡を添加した泥土の圧力解放による変化

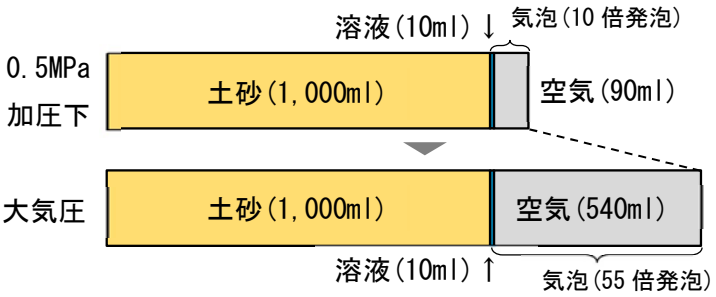


図-2　気泡を添加した泥土の圧力解放による変化の模式(10 倍発泡で注入率 10%の場合)

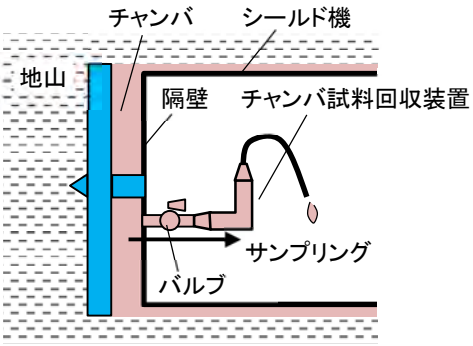


図-3　チャンバ試料回収装置の概要

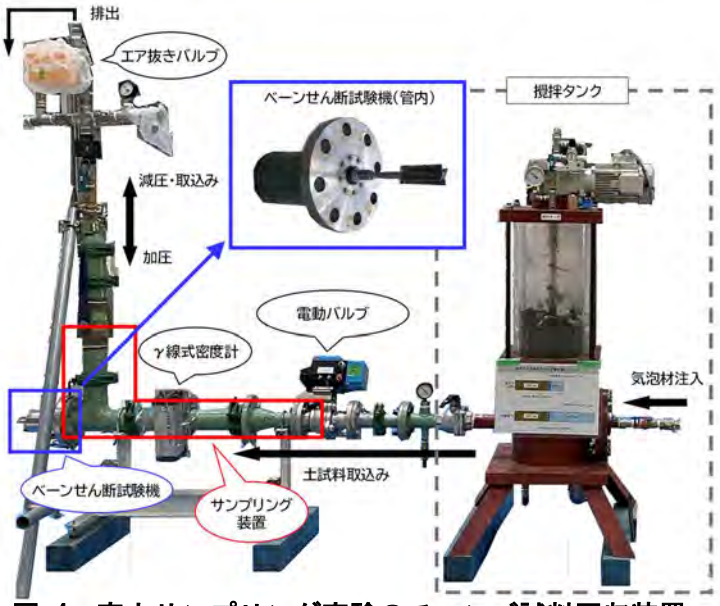


図-4　室内サンプリング実験のチャンバ試料回収装置と攪拌タンク

キーワード　土圧式シールド，大深度，高水圧，気泡，塑性流動性，ベーンせん断試験
連絡先　〒102-8151　東京都千代田区富士見 2-10-2　前田建設工業株式会社　土木技術部　ＴＥＬ03-3265-5551

現状の課題である．そこで，圧力を保持した状態でチャンバから泥土をサンプリングするとともに，圧力下のまま性状を確認できる試験装置（以下，本装置と呼ぶ）を考案した．

本稿では，本装置を用いた室内サンプリング実験を行い，チャンバ内泥土を模擬した試料を圧力下でサンプリングし，圧力下のベーンせん断試験で大気圧下と同様の値が得られることを確認したので報告する．併せてγ線による密度計測を行うとともに，その精度を確認した．また現在，実際のシールド機に設置して0.5～0.6MPaの圧力下で泥土をサンプリングしているので経過を報告する．

２．装置の概要

本装置はL字型をした耐圧管であり，チャンバからシールド機内へ連通している管にバルブを介して接続される（**図-3，4**）．バルブを開き圧力差によってチャンバ内の泥土を本装置に取り込み，本装置内を瞬時に密閉することで圧力下の状態を保ったままサンプリングする．

L字型の隅角部には本装置の外側から回転できるベーンせん断試験機を設置している．サンプリングされた試料の中でベーンを回転させ，せん断抵抗を計測する．せん断抵抗は泥土の硬さの指標となり，添加材が良好に混合された軟らかい泥土であれば小さい値を示す．

大気圧下では，泥土の硬さはミニスランプで計測されることが多い（**図-5(a)**）．圧力下でも同じ方法ができればこれまでの大気圧下の計測値と比較がしやすいが，密閉された容器の中では困難であった．それに代わるアイデアの中から本装置ではベーンせん断試験を採用した（**図-5(b-1，b-2)**）．主な理由は，地盤の試験方法として既に確立されていること（JGS 1411），止水構造が容易なこと，密閉された容器の中に計測器を後から押し込む等の容積変化を伴わないこと，試料が勢いよく取り込まれても壊れにくい堅牢な構造であること，硬さの違う試料に対して大きさが違う羽根へ交換することで幅広く対応できると考えられたこと，等があった．またアイデアの中にはサンプリングするのではなくチャンバの中へ計測器を貫入して直接測る方法もあったが，泥土が流れる勢いで計測器が破損する懸念やその際の圧力下での計測器の回収や交換が困難と考えられたことから，サンプリングを採用した．

また，γ線を用いた非接触型の密度計（PIRICA-S1，ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社製）を管の横引き直線部の外側に設置し，圧力下での試料の密度を計測した（**図-6**）．泥土の特徴を表す値の一つとして継続的に計測することで，途中で値に顕著な変化が見られた場合に掘削している地山の土質が変わったことを推定できる．また本装置においては，泥土が硬すぎた場合に入口付近で閉塞すると計測値が上昇しないため，サンプリングの成否をその場で判定する際にも用いることができる．



(a) ミニスランプ試験



(b-1) ベーンせん断試験機



(b-2) 本装置のベーンせん断試験機

図-5　泥土の試験方法

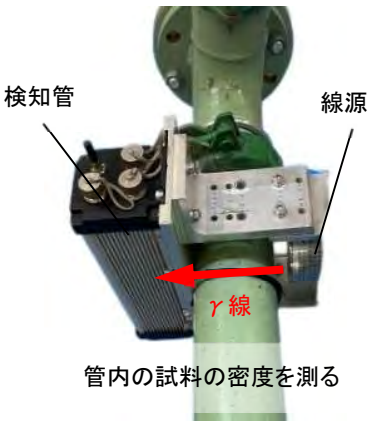


図-6　γ線密度計の設置方法

３．室内サンプリング実験

本装置の実装に先立ち，確実にサンプリングできること，圧力下で試料の性状を計測できることを実験で確認した．

(1) 試料の製作

チャンバ内を模擬した泥土を作るため，圧力下で土と添加材を混合できる攪拌タンクを製作した．全容量は約 60 リットルの円筒状で，攪拌する羽根がタンク内で回転する．中の状況が見られるように上半はアクリルで製作した．土を入れて圧力をかけた後，タンク下部から添加材を注入し，全体が一様に混ざるまで攪拌した（**図-7**）．一回の製作量は 30～40 リットルとした．



(a)土を投入，加圧　　(b)気泡注入，攪拌

図-7　室内サンプリング実験の試料作製

(2) 実験ケース

実験ケースを**表-1** に示す．

添加材は気泡と，非気泡である高分子を使用した．非気泡の高分子は主成分が液体であり，気体をほとんど含まないことから，圧力下から大気圧下に解放しても顕著な体積変化を起こさない．性状が大きく変化する要因がないため，本試験では圧力下の計測方法の検証として用いた．具体的には，非気泡を用いて圧力下で行ったベーンせん断試験および密度計測の結果と大気圧下に解放して行った結果を比べた．同一の試料で同程度の結果であったことから圧力下でも計測できることを確認した．

ベースとした土は，購入した砂と粘土を混合し細粒分含有率が 10%程度（以下，砂質土と呼ぶ）と 30%程度（以下，粘性土と呼ぶ）に調整した 2 種類とした．また参考として，後述の本装置を設置したシールド工事の立坑掘削で得られた土でも行った（以下，現地土と呼ぶ）．シールドの深度に相当し砂を多く含む土層から採取したもので，細粒分含有率は 13%前後で実験用の砂質土に近かった．現地土は細粒分含有率がばらつく懸念があったことから，同じケースを 3 回行った（ケース 13 ①～③）．

大気圧下での触手の結果からミニスランプが 3.0±0.5cm を塑性流動性が良好な目安として，0.5cm（硬い），3.0cm（良好），6.0cm（軟らかい）の 3 種類になる添加材の配合を設定した．

実験で作用させた圧力は，後述の本装置を設置したシールド工事で想定された代表的なチャンバ内の圧力から 0.5MPa とした．なお，本装置は事前に 1.5MPa まで空気圧を内部にかけて漏れがないことを確認した．

表-1　室内サンプリング実験ケース

Case No.	添加材			土	ミニスランプ (cm)
	種類	溶液濃度/発泡倍率	注入率 (%)		
1	気泡	1%/10倍	5	砂質土	0.5
2			10		3.0
3			15		6.0
4		1%/8倍	5	粘性土	0.5
5			15		3.0
6			25		6.0
7	非気泡	5.0kg/m3	40	砂質土	0.5
8			45		2.5
9			50		6.0
10		0.5kg/m3	10	粘性土	0.5
11			20		3.0
12			30		6.0
13 ①	気泡	1%/10倍	10	現地土（砂質）	3.0
13 ②					
13 ③					

表-2　室内サンプリング実験の結果

Case No.	条件			結果				
	添加材	土	ミニスランプ (cm)	ベーン (kPa)		密度(g/cm3)		
				大気圧	0.5MPa	重量計測	γ線	試料のみ重量計測
1	気泡	砂質土	0.5	3.9	1.4	1.11	－	－
2			3.0	1.2	0.9	1.43	－	－
3			6.0	0.4	0.5	1.54	－	－
4		粘性土	0.5	2.9	1.9	1.68	－	－
5			3.0	1.2	1.1	1.62	－	－
6			6.0	0.5	0.7	1.62	－	－
7	非気泡	砂質土	0.5	2.6	1.8	1.62	1.63	1.64
8			2.5	1.1	1.2	1.61	1.61	1.63
9			6.0	0.5	0.5	1.61	1.66	1.61
10		粘性土	0.5	2.9	1.6	1.73	1.86	1.86
11			3.0	1.2	1.1	1.77	1.72	1.72
12			6.0	0.4	0.7	1.71	1.70	1.70
13 ①	気泡	現地土（砂質）	3.0	1.2	1.2	1.38	1.40	－
13 ②				1.2	0.9	1.44	1.40	－
13 ③				1.2	1.1	1.41	1.42	－

※ハッチングは他と比べて過大・過小な傾向、他の計測方法と比べて差異が顕著なもの

(3) 実験手順

加圧した攪拌タンクで試料を一様に練り混ぜ，本装置内を攪拌タンクと同程度にコンプレッサで加圧した後，接続する電動ボールバルブを開いた．この状態では本装置と攪拌タンクで圧力が吊り合っているため試料は動かない．本装置の末端のエアバルブを手動で開け，圧力差をつけることで試料を取り込んだ．エアバルブに取り付けたホースから試料が流出し始めたら本装置内に試料が充満したものとし，エアバルブを速やかに閉じて内部の圧力を保持した．圧力下の試料に対して，ベーンせん断試験と密度計測を行った．

ベーンせん断試験については，0.5MPa 圧力下と大気圧下で同じ体積の気泡を混合した泥土のせん断抵抗を測定し，同様な値が得られることを確認した．本装置内では止水パッキンの抵抗が計測値に含まれるため，加圧して中が空の状態でベーンを回した値を初期値とし，サンプリング後の計測値から初期値を引いて結果とした．

密度については，γ 線による密度と重量計測による密度を比較し，γ 線方式の精度を確認した．重量計測は，本装置の両端のバルブを閉め，中の圧力を保持した状態でジョイントを切り離し，台秤で装置ごと重量を計測した．あらかじめ空の装置の重量および水を充満した重量から容積を算出しておき，試料の重量を容積で割って密度を算定した．また非気泡の試料では，大気圧下でも性状が変わらないことからサンプリングされた試料を容器に定量で計り取り重量を計測する方法でも検証した．

4．実験結果

室内サンプリング実験の結果を**表-2** に示す．

ベーンせん断試験によるせん断抵抗を**図-8** に示す，試料が良好なケースの打点のグループと軟らかいグループ（ミニスランプが 3.0cm と 6.0cm）の場合は 0.5MPa 圧力下と大気圧下が良好に一致した．試料が硬いグループ（ミニスランプが 0.5cm，ケース 1，4，7，10）では乖離が見られた．

密度は，試料が良好と軟らかい（ミニスランプが 3.0cm と 6.0cm）場合はγ線密度計の計測値，重量計測からの算定値，試料のみの重量計測が，いずれも概ね等しい結果となった．試料が硬いグループ（ミニスランプが 0.5cm，ケース 1，10）では重量計測

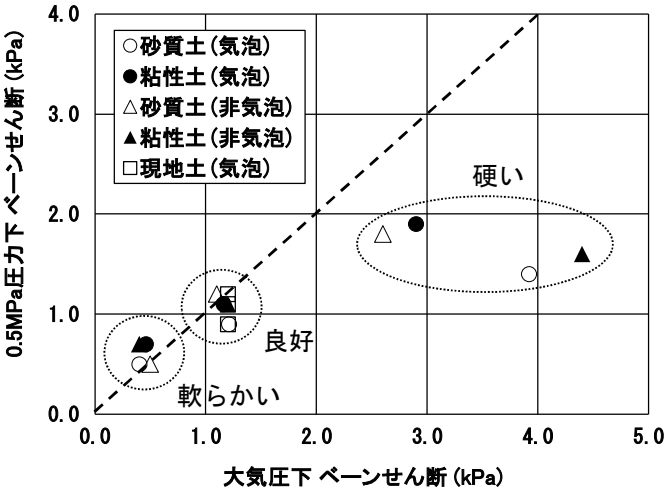


図-8　圧力下と大気圧下のベーンせん断試験の相関

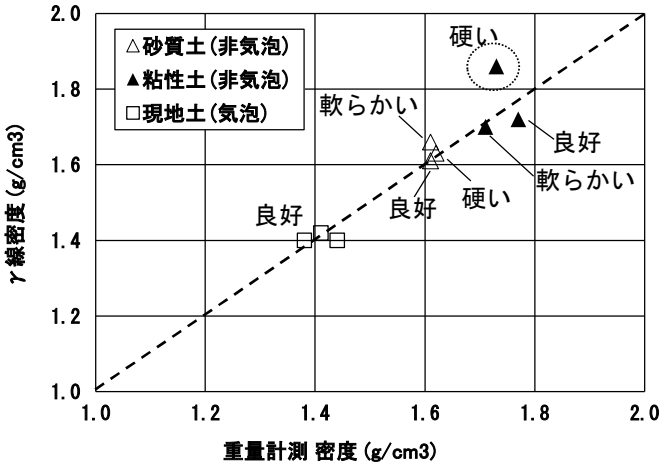


図-9　重量計測による密度とγ線による密度の相関

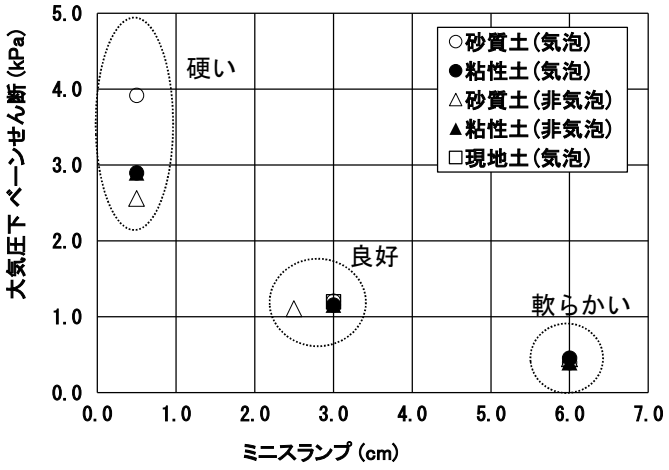


図-10　ミニスランプと大気圧下のベーンせん断試験の関係

が顕著に小さくなるケースが見られた（**図-9**）.

試料が硬い（ミニスランプが 0.5cm）場合に上記の乖離が見れられた原因としては, 本装置内に取り込んだ際に空隙が残った事が推測される. 特にベーンの羽根の周辺は形状的に回り込み難いため, 空隙でベーンが空転して小さい値に, 重量計測では空隙を含んだ分小さい値になったと考えられる. γ線密度計は, 設置した箇所がベーンの手前の直線部であったため充満しやすく影響を受けにくかった可能性がある. 試料が硬いときの特徴として流動性が悪いことが挙げられる. ミニスランプと大気圧下のベーンせん断試験の結果を**図-10** に示す. ミニスランプが 0.5cm の場合は他の硬さのグループと比べ, せん断抵抗の値が大きく, ばらつきも大きかった. ベーンの感触として回り始めに砂の粒子同士が噛み合う引っ掛かりがあり, 滑らかな流動性になっていなかったことが示唆された.

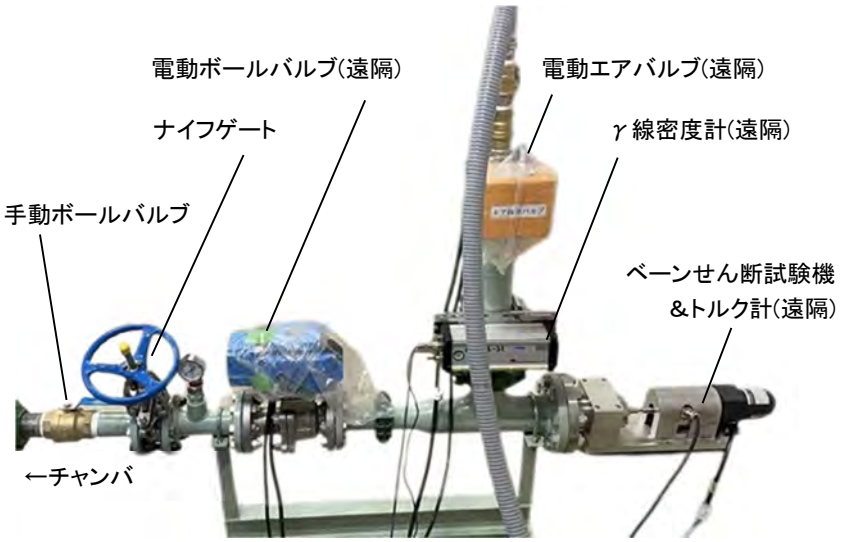


図-11　改善後のチャンバ試料回収装置

以上のことから, 試料が良好または軟らかい場合は, 本装置を用いることで圧力下での試料の硬さを把握できることが確認できた. また密度についてもγ線方式で計測できることがわかった.



図-12　遠隔操作盤

５. シールド機への設置に際しての改善点

室内サンプリング実験を踏まえ, 本装置を実際のシールド機に設置することとした. その際, 万が一本装置が破損するとチャンバの泥土がシールド機内に流入および飛散し危険なため, 安全性を強化した. その他も含め以下の 4 点を改善した（**図-11**）.

(1) 隔壁バルブの多重化

本装置とチャンバを接続する部分では, バルブにより確実にチャンバからの泥土を止められる構造とした. すなわちバルブを多重化した. チャンバと本装置の間はチャンバ側から順番に, 手動ボールバルブ, ナイフゲート, 電動ボールバルブの 3 重の仕切りを設けた.

ボールバルブは開け閉めを繰り返すと泥土に含まれる粗い砂分によりパッキンが摩耗し漏れが生じ始める. そのため最もチャンバ側にある手動ボールバルブは非常用とし, 摩耗を避けるため本装置を接続して開けた後は閉めないで使用することとした. 万が一本装置を外して修理する等の事態が生じた場合は, 手動ボールバルブを閉め, その管は二度と使わない. 本装置の修理が終わり再度設置する際には, まだ摩耗していない別のバルブを使うものとした.

サンプリング時はナイフゲートと電動ボールバルブを用いて 2 重の管理とした. ボールバルブは止水性が高いが礫や土の塊が挟まると閉まらなくなる懸念があったため, 挟まりに比較的強い構造のナイフゲートと組合せた.

(2) バルブ開閉と計測の遠隔操作による手順

本装置にチャンバ圧を作用させる際は, 万が一泥土が飛散した場合を想定し, 人払いして遠隔操作でバルブ開閉と計測ができるようにした（**図-12**）. エアバルブと計測器を電動化した. 手順を以下に示す.

① チャンバ圧をシールド機の土圧計で計測し, コンプレッサで本装置内を同程度に加圧する

② ナイフゲート：手動で開き, 本装置の周辺を立ち入り禁止とする. パトライトで注意を喚起する

③ 電動ボールバルブ：遠隔操作で開き本装置にチャンバ圧を作用させる

④ エアバルブ：遠隔操作で開き空気を抜いて本装置内の圧力を下げることで試料を取り込み，遠隔操作で閉じて密閉する

⑤ 計測器各種：取り込んだ試料に対してベーンせん断試験と密度計測を遠隔操作で行う

⑥ 終了後は逆の手順で，電動ボールバルブを遠隔操作で閉め，人が本装置の近傍へ立ち入って手動でナイフゲートを閉める．本装置内に残った圧力を抜き，解体清掃する



図-13　狭隘な設置場所



図-14　分割の大きさを小型化(縦部)

試料が軟らかい場合は上記④で圧力差が生じると瞬時に試料が本装置内に取り込まれる.エアバルブの電動による開閉は手動よりも緩慢であるため,大きく開閉しているとエアバルブに取り付けたホースから多量の試料が吐出してしまう．このことから，先述の室内サンプリング実験では安全な手順についても試行した．すなわち，最初は細めに開いて（電動エアバルブの開度 30%）すぐ閉め，密度計の値が上昇し始めたら試料がサンプリングできたものとして計測へ移る．密度計の値が変わらない場合は試料が硬めで本装置内にまだ取り込めていないと推測されるため，本装置内を再加圧した後，今度は太めに開いて（電動エアバルブの開度 50～100%）すぐ閉める．以上の二段階を行うことで試料の硬軟に対応できるようにした．

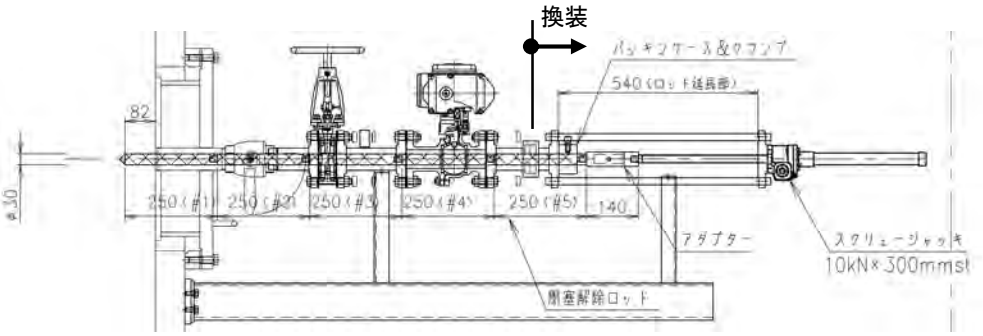


図-15　φ30mm ロッド貫入による閉塞解除の概要



(a) 閉塞解除装置全体



(b) ロッド先端突出

図 16　閉塞解除装置

ベーンせん断試験機は室内サンプリング実験の段階では手動であったが，電動モーターとトルク計を増設し，計測結果を有線で遠隔のデータロガーへ送るようにした．密度計は 1 秒ピッチで自動で計測し，結果を有線でデータロガーへ送った．

(3) 本装置の小型化

実際のシールド機内は狭隘であるため（**図-13**），バルブの配置や管の長さを見直し，全体的に小型化することで作業空間を確保した．室内サンプリング実験では非気泡のケースがあったため試料を採取できるように管を長くしていたが，実機では省略して管を短縮した．また，解体清掃時に一人で運搬できる大きさに分割するためジョイントの位置を変更した（**図-14**）．

(4) 閉塞解除装置

ナイフゲートからチャンバまでの隔壁付近の管内は清掃できないため，前回の試料が残って固結する懸念がある．サンプリング時に圧力差で試料が動かなかった場合は，何らかの方法で閉塞を解除する必要がある．管の直径 2 インチに対して直径φ30mm のロッドをシールド機内からチャンバへ貫通し，固結した試料をチャンバへ押し出せる閉塞解除装置を製作した（**図-15, 16**）．本装置のベーンせん断試験機をジョイント部で外し

て閉塞解除装置へ換装して使用する．後方の作業空間が限られていても使えるように，ロッドは長さ 250mm のものを 5 本継ぎ足してスクリュージャッキで順次押し込む形状とした．事前に圧力最大 1.0MPa を作用させた耐圧試験を室内で行い，作業中に漏れがないことを確認した．なお本稿を作成中の時点では実際のシールド機でこれを使用しないといけない非常事態は起きていない．

６．シールド機での実施

本装置を実際のシールド機に設置し，サンプリングと計測を行っている最中である．中央新幹線第一首都圏トンネル新設（梶ヶ谷工区）ほか工事は，土被り 60～90m の大深度で，延長約 12km を 2 台のシールド機で掘進する．掘削する土質は固結シルトと砂である．シールド機は加泥材に気泡を用いた土圧式で，本装置を外径φ14.04m のシールド機の中央近傍に設置した．

現在は初期掘進中で，チャンバには圧力 0.5～0.6MPa が作用している．土質は細粒分率が 70%以上と高く，事前の添加材の配合試験により水分を多めにした発泡倍率の低い気泡を注入している．試料が十分に軟らかい場合は良好にサンプリングおよび計測ができている．試料が硬いと本装置内に充満して取り込めず空隙が残ってしまう状況が室内サンプリング実験と同様に見られた．

本装置は砂質土～粘性土を想定して製作した．今後様々な工事条件で適用するために，以下の課題が挙げられる．

- 礫が含まれる土質では，チャンバに繋がる 2 インチ管が閉塞する懸念や，羽根に礫が噛んでベーンが回らなくなる懸念があり対策が必要
- 可燃性ガスが出る地盤では，防爆仕様が必要
- 中小口径のシールド機では，さらなる小型化と軽量化が必要

７．まとめ

圧力を保持した状態で気泡を混合した泥土をチャンバからサンプリングするとともに，圧力下のままベーンせん断試験により性状を確認できる装置を考案した．合わせてγ線密度計で密度も計測できるようにした．室内サンプリング実験により性能を確認した後，現在は実際のシールド機に設置し切羽圧の管理に寄与している最中である．

今後は定期的に実施し，安定した泥土の性状を確認しながら工事を進めていく予定である．また他の条件のシールド工事へも導入し，広く適用できる物に改良してゆく．

謝辞

本装置の開発およびシールド機での実施に際し，多大なるご理解とご協力をいただきました東海旅客鉄道株式会社の関係各位に感謝いたします．貴重なご指導をいただきました立命館大学総合科学技術研究機構上席研究員の小山幸則先生に厚く御礼申し上げます．