

20. 大深度・低空頭対応型 CSM 機の開発

株式会社間組機電部 ○嶋田尚正 梅本慶三
株式会社間組技術第1部 増田浩二

1. はじめに

現在、地中連続壁は、SMW 工法や TRD 工法など施工性や経済性に優れた原位置攪拌ソイルセメント地中連続壁が主流となっている。今回開発された、カッターソイルミキシング (CSM) 工法は、水平多軸型地中連続壁掘削機をベースとした水平多軸回転カッター (Cutter) を用いて土 (Soil) とセメント系懸濁液を原位置で攪拌 (Mixing) し、等壁厚のソイルセメント壁体 (土留め壁・遮水壁等) を造成する工法である。その特徴として、以下のような点がある。

- ① 岩盤・硬質地盤においても、水平多軸回転カッターの性能をそのまま生かした高い掘削性能により、先行削孔等の補助工法が不要
- ② 優れた攪拌性能とカッティングジョイントによる高い遮水性
- ③ 等壁厚のソイルセメント壁の造成により、芯材の間隔を密に設定できるため、高剛性の壁体を造成可能
- ④ カッター部に内蔵した傾斜計により、リアルタイムでの掘削精度確認が可能

近年、都市部における大規模地下開発など 40 m 以深の大深度土留め壁築造へのニーズが高まっている。しかしながら、従来の CSM 機にて大深度施工を行う場合、カッターを支持しているケリーバーを長くする必要がある。そのため施工機械の大型化が避けがたく、掘削深度に限界 (35 m 程度) があった。そこで今回、低空頭型掘削機に、新しく開発された原位置攪拌用水平多軸回転カッターを吊り下げ方式にて装備し、大深度地下における原位置攪拌ソイルセメント地中連続壁が施工可能な掘削機を開発した。本報文では、今回開発した大深度、低空頭対応型 CSM 機の概要と、試験施工の概要を報告する。またドイツバウアー社において施工された内径 8,000 m

m の円形立坑構築の概要についても報告する。図-1 に、ケリーバー型と吊り下げ型 CSM 機の掘削方法の比較を示す。

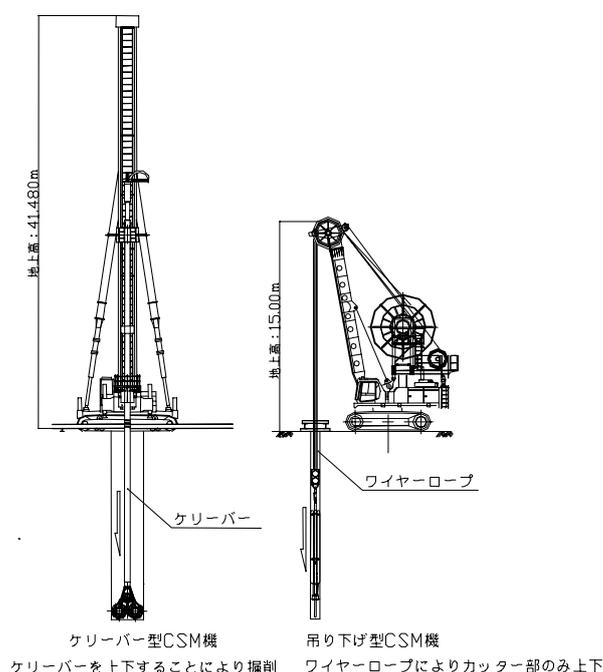


図-1：掘削方法比較

2. 吊り下げ型CSM機の概要

今回、開発した機械は従来のトレンチカッター、CBC25のカッター部分をBC25から吊り下げ型CSMカッター、BCM10に変更することを基本としている。従来の主なCSM工法の特徴に加えて、以下のような特徴がある。

- ① 吊り下げ方式の採用により大深度対応が可能
- ② 低空頭条件下、狭いヤードでの施工が可能
- ③ ガイドフラップの稼動により方向制御、修正掘削が可能

表-1に掘削機の諸元を記す。

表-1：吊り下げ型CSM機諸元 (BCM10)

| ベースマシン(BA1000) | | |
|--------------------------|----------------|----------------------------|
| 機械質量 (t) | 110.0 | |
| エンジン出力 k w [PS]/rpm | 331 [450]/1800 | (超低騒音型) |
| 全幅 (mm) | 5,446 | |
| 高さ (mm) | 14,828 | |
| 吊り下げ式CSM機カッター部分(BCM10) | | |
| 重量 (t) | 16.5 | |
| 全長 (mm) | 9,057 | |
| カッター直径 (mm) | 1,395 | |
| カッター部壁幅 (mm) | 2,800 | |
| カッターモータ トルク (KN・m) | 100 | 左右独立して2台装 備し任意に駆動可 能 |
| 方向制御フラッ プ部傾斜角(°) | 1.325 | 偏心量 107mm |
| 回転数(rpm) | 0~35 | |
| ソイルセメント 壁造成幅(mm) | 2,800 | |
| ソイルセメント 壁造成可能厚 (m) | 0.64~1.2 | |

2. 1 ベースマシン

ベースマシンは、トレンチカッターベースマシンBA1000を利用している。BA1000は、小松製作所製バックホウPC750 (3.1m³級)の改造型であり、最大吊荷重は40tである。平均接地圧は、0.026kPaである。掘削深度35m対応ケリーバー型掘削機の高さが41.48mに対し、吊り下げ型は高さ15m以下に収まっている。また造成可能深度は65mまで対応可能である。写真-1に吊り下げ型CSM機を示す。



写真-1：吊り下げ型CSM機

2. 2 カッター部

CSM機のカッター部は、トレンチカッター工法で実績のある水平多軸回転式カッター方式及び同形状のビットを採用した。左右のカッターは回転数、回転方向を任意に制御可能である。ただし、トレンチカッターでは掘削時、土砂を集める必要があり、土砂を中央部から取り込む回転方向にカッターが回転するのに対し、図-3のようにCSM機では中央部よりエアとセメントミルクを吐出するため回転をトレンチカッターの場合とは逆回転させて掘削を行う。掘削後カッター部を引き上げる時は、吊荷重の低減や固化液の攪拌を目的として、掘削時とは逆回転させながら引き上げる。また、掘削土砂がエアリフト効果により攪拌されやすいよう、カッター上部が下部より幅の狭いテーパ形状となっている。そのため、掘削時、カッター上部の横ゆれが懸念されるが、上部にガイドローラをつけることによりゆれを抑えている。方向制御の方法は、トレンチカッターと同様、カッター部に傾斜計を内蔵しており、運転室のモニターにてリアルタイムでチェックできる。そのデータを見ながらカッター回転軸と平行方向(Y方向)についてはカッター側面の方向制御フラップを動かすことにより行い、カッター回転軸と垂直方向(X方向)については、左右のカッター回転数を任意に変えることにより方向制御を行う。

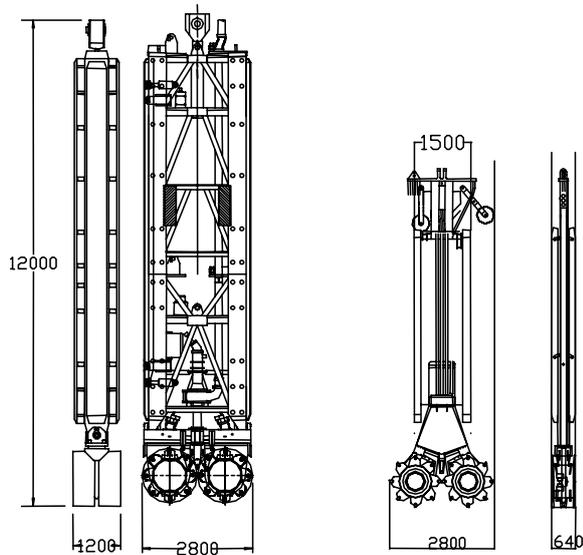


図-2：トレンチカッターとCSM機

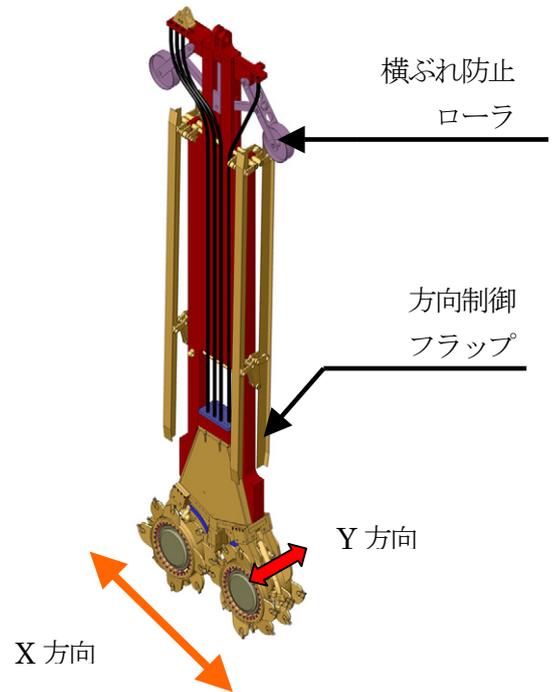


図-4：方向制御機構

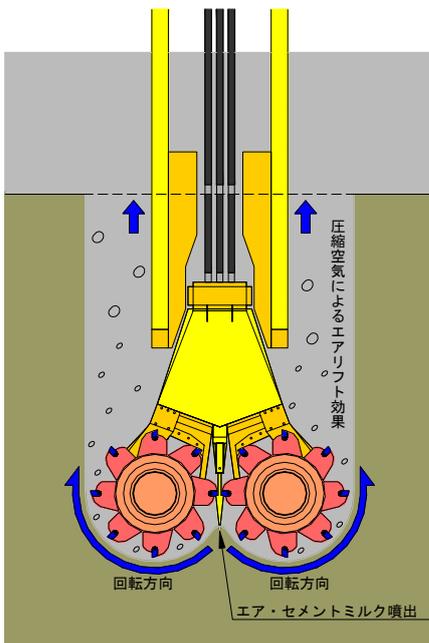


図-3：CSM機掘削モデル

3. 試験施工の概要

吊り下げ型 CSM 機の施工能力、造成されたソイルセメント壁の品質の確認等を目的として試験施工をおこなった。以下に、試験施工の概要および結果を報告する。

3. 1 概要

当工事の概要を以下に示す。

施工時期：平成17年4月～平成17年6月

工事内容：掘削壁厚 640mm

掘削深度 40m

施工延長 8.0m (2.8m×2エレメント
2.4×1エレメント)

(図-5エレメント配置図参照)

施工面積 320m²

土質条件 柱状図参照 (図-6)

要求品質：透水係数 1×10^{-6} cm/sec 以下

一軸圧縮強度 0.6N/mm² 以上

なお、試験施工は硬質地盤を含む40mの大深度施工であり、セメント主体の固化液での掘削はスラリー固化によるカッターの固着および引抜抵抗の増加が懸念されるため、掘削時にはベントナイト主体の掘削液

で掘削し、引き上げ時攪拌時には、セメント主体の固化液にて施工する2パス施工を採用した。表-2に掘削機以外の設備一覧を、表-3に注入液の配合を、写真-2に施工状況を示す。

| | | |
|-----------|-----------|-----------|
| 先行 2.8 | 後行 2.4 | 先行 2.8 |
| ① | ③ | ② |
| 2.6 | 2.8 | 2.6 |
| 8.0 | | |

図-5：エレメント配置図

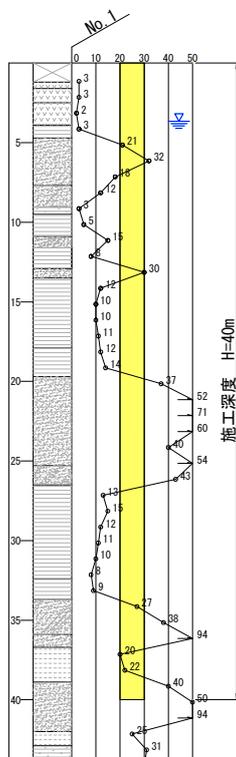


図-6：試験場所土質柱状図

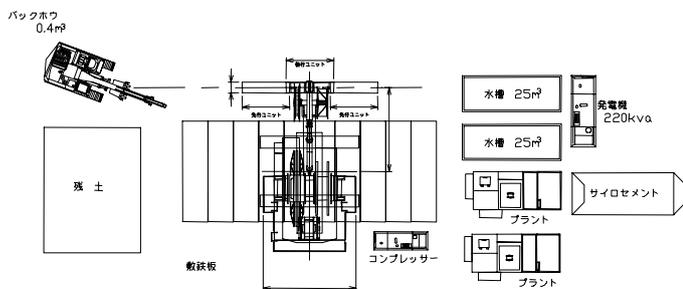


図-7：機械配置図

表-2：設備一覧

| 機材名 | 能力 | 備考 |
|---------------|------------------------|-----------------------|
| コンプレッサー | 7.5m ³ /min | |
| セメントサイロ | 30 t × 1 | |
| 水槽 | 25m ³ × 2台 | |
| ラフタークレーン | 25 t、50 t | 芯材吊用 |
| セメントミキシングプラント | 2基 | 24m ³ /h仕様 |
| バックホウ | 0.45m ³ 級 | 排泥搬出用 |



写真-2：施工状況

表-3：注入液の配合

| 配合 (掘削体積 1m ³ あたり) | セメント kg | バントナト kg | 水 kg | 備考 |
|-------------------------------------|------------|-------------|---------|--------------|
| 掘削液 | 5 | 32 | 530 | B/W= 6.0% |
| 固化液 | 197 | 5 | 292.5 | W/C= 148% |

3. 2 試験施工結果

(1) 掘削性能

掘削経過時間と到達深度の関係を図-8に示す。

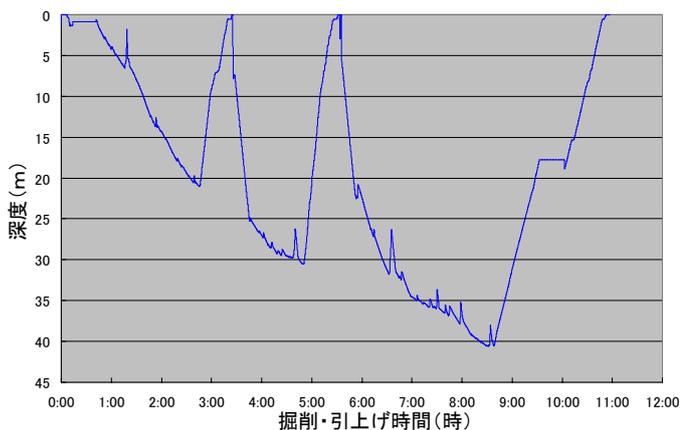


図-8：掘削経過時間と到達深度

掘削速度は以下のような結果となった。

- 全平均掘削速度：12cm/min
- 砂質土（N値=20程度）：19cm/min
- 砂質土（N値=50程度）：14cm/min
- 粘性土（N値=10程度）：9cm/min

1) N値による掘削速度

パワー工法研究会発行のCSM工法標準積算資料(案)から算出したケリーバー型による掘削速度と、試験施工の掘削速度を表-4に示す。標準積算資料(案)では、掘削から引抜までを固化液のみで施工する1パス施工を想定しているため、試験施工の掘削速度を1/2した数値と比較した。

表-4：掘削速度比較(cm/min)

| | N値=20 | N値=50 | 備考 |
|--------|--------------|-------|----------------------|
| ケリーバー式 | 9.7 | 6.5 | 標準積算資料による |
| | N値増加による速度減少率 | | |
| 吊り下げ式 | 9.5 | 7 | 2パス施工のため試験施工値の1/2とした |
| | N値増加による速度減少率 | | |

吊り下げ型とケリーバー型とは掘削性能に大差がないことがわかる。またN値の増加に対する掘削速度の低下も、ケリーバー型が32%に対し、吊り下げ型は26%と

ほぼ同割合の減少になり、ケリーバー式同様吊り下げ式CSM機の高い掘削性能が実証された。

2) 大深度下における掘削

大深度下で掘削性能評価を、大深度下での掘削性能が高いTRD工法の標準積算資料（TRD工法協会発行）を用いて以下のことを考慮し行った。

- ・TRD工法は、CSM工法とは違いカッターを横方向に移動させて掘削する方法であり掘削方法が大きく違うため、掘削速度自体の比較では問題が多い。よって今回は掘削速度ではなく掘削速度の減少率にて評価を行った。
- ・TRD工法については深度40m、壁厚640mm、エレメント幅2800mmのソイル壁を造成する際に、下記の深度で各想定地盤が存在した場合の掘削速度を算出した。

表-5：掘削速度比較(cm/min)

| | N値=20 深度10m | N値=61 深度40m | 備考 |
|-----------|----------------|----------------|-------|
| TRD工法 | 27 | 7 | |
| | 速度減少率 | | |
| 吊り下げ式CSM機 | 19 | 7 | 試験施工値 |
| | 速度減少率 | | |

このように深度、N値の増大による掘削速度減少率は、TRD工法程度に抑えられており、大深度下での高い掘削性能が証明された。

(2) 掘削精度

カッター部に内蔵された傾斜計の変位計測結果は、40m掘削においてy方向では最大69mm、x方向では、最大18mmであり、原位置攪拌ソイルセメント壁の一般的掘削精度1/150から1/200に対して、それぞれ1/580、1/2200と高い掘削精度が確認できた。また今回は傾斜計による掘削管理の妥当性自体を確認するため、長さ12mの鋼材をセメントソイル内に沈め、その変位を計測したが、XY方向とも傾斜計による掘削変位計測結果とは10mm以内の誤差（1/2000）であり、傾斜計による

掘削管理の有効性も確認できた。

(3) 透水係数と一軸圧縮強度

No.3 エlementにおいて、コアボーリングを行い造成されたソイルセメント壁の要求品質の確認をおこなった。透水係数については深度10mにおいて室内透水試験を実施し、 $2.41 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ の結果が得られ、要求品質である $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 以下を満足することができた。また、一軸圧縮強度についても、深度方向で多少のばらつきが見られたが、要求品質(0.6N/mm^2)を満足する結果が得られた。

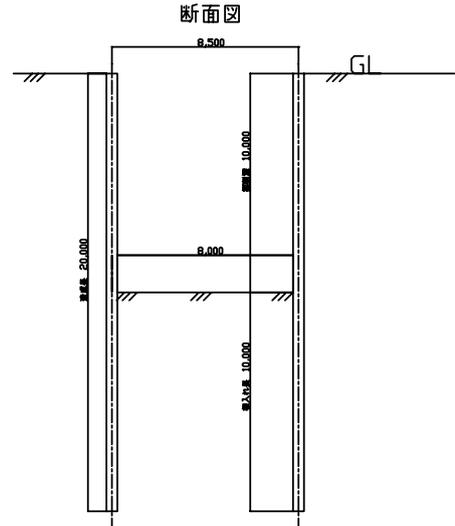


図-9：円形立坑施工図

4. 曲線への適用例

CSM工法の場合、曲線施工といっても、地中連続壁の場合と同様、厳密には多角形となる。なお今回紹介する工事は、吊り下げ型ではなく、ケリーバー型のCSM機により施工を行っている。

4.1 概要

施工場所：ドイツ

施工時期：平成16年12月～平成17年1月

工事内容：掘削壁厚：500mm

掘削深度：20m

施工延長：26.18m

(2.2m×14Element

φ8000円形立坑)

施工面積：569.8m²

土質条件：おもに細砂、N値=10～30

要求品質：一軸圧縮強度0.5N/mm²以上

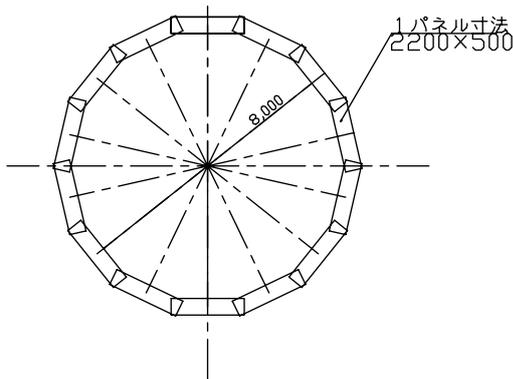
(実績：0.7N/mm²)



写真-3：円形立坑施工状況

図-9に円形立坑施工図を、写真-3において施工状況を示す。

平面図



5. おわりに

今回の試験施工を通じて、吊り下げ型CSM機の大深度掘削への有効性が証明された。近年、限られた都市部空間における高度利用を促進するための大深度土留め壁や、廃棄物処理場での遮水壁など、大深度、低空頭対応の吊り下げ型CSM機が活躍する場面は年々増えていくと考えられる。しかしながらまだこの工法の施工実績は少ない。今回の報告が、本工法の普及に役立てば幸いである。

最後に、本論文の執筆にご協力いただきました関係各位に感謝申し上げます。