

ソイルセメント壁および深層地盤改良の汎用施工機械 CSM 工法の施工機械の開発・展開・改良

佐久間 誠 也

CSM (カッターソイルミキシング) 工法 (以下「本工法」という) の施工機械について、誕生の経緯、ケリーバー方式から吊り下げ方式への変遷、狭隘地・低空頭型機械の開発、高トルク型機械への改良などについて概要を述べる。また、CSM クアトロカッター機 (以下「本施工機」という) の機械構造と具体的な工夫内容を説明すると共に現場施工への展開や最新の改良機械を紹介する。

キーワード：CSM 工法，ソイルセメント壁，水平多軸回転カッター，等壁厚，大深度，低空頭，狭隘地

1. はじめに

パワー工法研究会は、B 社 (独) の基礎工事技術の普及とその技術の日本化を目指す研究会であり次の4つの工法の委員会を立ち上げている。工法名は、B 社 (独) の機械名などから、等壁厚のソイルセメント壁や地盤改良が施工できる本工法、杭打ちや障害物の撤去などの施工ができる BG (ボアーゲレーテ) 工法、大深度・大壁厚の地中連続壁が施工できる BC (パウアーカッター) 工法、地震時の液状化対策などに有効な地盤の締め固めができる DV (ディーブパイプロ) 工法がある。本稿においては、これらの中から近年普及が進んできている本工法について、誕生の経緯、ケリーバー方式から吊り下げ方式への変遷、狭隘地・低空頭型機械の開発、高トルク型機械への改良などについて概要を述べる。

本工法は、施工機械が2004年に初めて日本に導入されてから9年が経過し、その間に狭隘地・低空頭型の機械の開発も実施工案件に対応しながら進められてきた。そして、新しい機械の開発と共に遮水壁や土留め壁に加え地盤改良の実績もできた。また、本体利用可能な鋼製地中連続壁工法 - II の施工機械としての施工実績も増えつつある。

2. 本工法の概要

本工法とは、水平多軸型地中連続壁掘削機と同様の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)

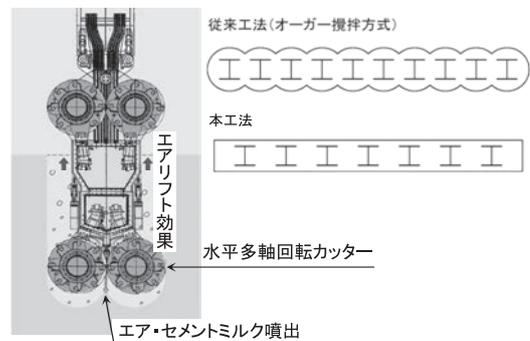


図-1 本施工機概念図

や地盤改良体を造成する工法である (図-1)。その特長には、以下の様な点がある。

- ①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もしくは軽減できる。
- ②エアプロウを併用した高速回転カッターによる攪拌のため高い攪拌性能を持つ。
- ③等壁厚のソイルセメント壁が造成されるので、芯材配置を任意に設定できるため、設計の自由度が高い。
- ④壁体がパネル状に造成されるため、小さな円形立坑の施工が可能である。
- ⑤壁体のジョイントは、止水性の高いカッティングジョイントである。
- ⑥カッター部に内蔵した傾斜計やジャイロコンパスにより、リアルタイムでの掘削精度確認が可能である。
- ⑦大壁厚・大深度にも対応できるため、地盤改良機械としての汎用性がある。
- ⑧ NETIS 登録技術である (登録番号 KT-050014-A)。

現在、日本にはケリーバー方式と吊り下げ方式の本施工機が合計7台ある。日本にある本施工機の一覧表

表-1 CSM機一覧表

種類	ケリーバー方式		吊り下げ方式	
	2カッター		クアトロカッター (4カッター)	タンデムカッター (2カッター)
機械姿写真				
開発年:日本導入年度	2004年	2004年	2006年(サイドカッター:2007年)	2013年
国内保有台数	1台	2台	3台(サイドカッター仕様:3台)	1台
カッター	型式	BCM3型	BCM5型	BCM5型
	トルク	0-30kN・m	0-45kN・m	0-45kN・m
ベースマシン	機械高	~35m程度	~35m程度	約6.5m(サイドカッター:約8.6m)
	機械長	10m程度	10m程度	8.0m程度
掘削深度(実績最大深度)	~35m(20m)	~35m(31m)	~65m(60m)	~65m(60m)
掘削壁厚	500~700mm	500~900mm	500~1,200mm	640~1200mm
掘削幅	2,200mm	2,400mm	2,400mm	2,800mm
施工実績(試験施工含む)	5件(海外22件)	9件(海外88件)	31件(海外1件)	1件(海外7件)

2012年3月現在 バウアー工法研究会 CSM 委員会調べ

を表-1に示す。

3. 本施工機開発の経緯と変遷

日本における、原位置土攪拌混合ソイルセメント地中連続壁(以下、ソイルセメント壁)の施工機械は、オーガー攪拌方式のSMW機やチェーン攪拌方式のTRD機など、工法とセットで開発された機械が主流となっている(表-2)。B社(独)は、ソイルセメント壁の経済性に目を付け、安定液掘削による地中連続壁の施工機械で採用されていた水平多軸回転カッターを用いたソイルセメント壁の施工機械の開発に約10年前に着手した。

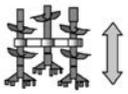
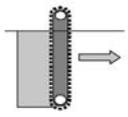
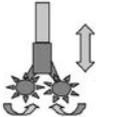
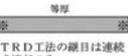
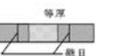
その結果2003年にケリーバー方式の本施工機が海

外においてB社(独)とS社(仏)の共同開発によって生まれた。そして、欧州における試験施工を踏まえて2004年に本工法の施工機械としてBCM3型がD社およびBCM5型がM社によって日本に導入された。なお、BCM3型とBCM5型の違いはカッタートルクの違いであるが、近年は5型が主流になっている。

(1) ケリーバー方式から吊り下げ方式への変遷

ケリーバー方式の機械で大深度施工を行うには、ケリーバーを長くする必要があり、施工機械の大型化が避けがたく、おのずと掘削深度に限界(35m程度)があった。そこで、B社(独)と日本のH社は、従来安定液掘削の範疇であった50mを超える大深度においても経済性・施工性・品質を満足するソイルセメント壁が吊り下げ方式で、対応できないかを模索していた。最終的には試作機を作った方が早いという結論に到り、共同で従来の吊り下げ方式による地中連続壁の機械を参考に、国内にあった既存の地中連続壁掘削機の水平多軸回転カッター部(トレンチカッターBC30:H社所有)とB社(独)が新たにドイツで製作したフレーム部を組み合わせることでカッターフレームを組み立て、地中連続壁の低空頭用ベースマシン(CBC25)から吊り下げることにより、大深度・低空頭型本施工機(CBC25-BCM10型-本施工機)を造り上げた(写真-1)。表-3に、この機械の諸元を示す。

表-2 ソイルセメント壁造成工法の比較

工法	SMW工法	TRD工法	本工法
項目			
掘削機構(イメージ)			
掘削機械の種類	多軸オーガ	カッターチェーン	水平多軸回転カッター
攪拌方向	水平	鉛直	鉛直
攪拌範囲	局部的(上下動あり)	地表から壁底	局部的(上下動+エアブローあり)
連続性	パネルの継ぎ合せ	連続造成	パネルの継ぎ合せ
壁の形状			



写真一 1 CBC25-BCM10 型 CSM 機

表一 3 CBC25-BCM10 型 CSM 機 諸元

掘削深度 (m)	~ 65
掘削壁厚 (mm)	640 ~ 1,200
掘削幅 (mm)	2,800
カッターフレーム重量 (t)	18
カッターフレーム全長 (mm)	9,057
カッタートルク (kN・m)	0 ~ 80
カッター回転数 (rpm)	0 ~ 35
ベースマシン全装備重量 (t)	102
機械寸法 (m) 高さ×幅×奥行き	14.9 × 5.5 × 9.1

①吊り下げ方式の低空頭化

CBC25-BCM10 型は空頭高さが約 15 m 程度であり、三点式の SMW 機に比べれば約半分ほどの高さであるが、高架下や路下での作業には難があった。また、工事の需要が少なかったため、試験施工 1 件、実施工 1 件のみで海外に流出してしまった。しかし、実施工においては玉石ばかりが厚く堆積した固い層においてソイルセメント壁の構築に成功しマシン能力の高さを示した。

その後、B 社（独）は、BCM10 型機の開発により日本における吊り下げ方式の本施工機の需要を確信し、機械高さ 6.5 m、施工深度 65 m、対応壁厚 0.5 ~ 1.2 m の大深度・低空頭型の非常にコンパクトなクアトロカッター機を開発した。日本ではこの機械を T 社が導入した。クアトロカッター機は、写真のように回転カッターを 4 対を有しており、攪拌性能の向上やカッター引き上げ時の負荷低減を実現した（写真一 2）。また、ベースマシンは専用機とし低空頭仕様とした。なお、クアトロとはイタリア語で数字の 4 を言い馬車の車輪という意味もある。これらをイメージし



写真一 2 BCM5 型 本施工機 (クアトロカッター)

てクアトロカッターと命名された。

②クアトロカッターの狭隘地対応型への改造

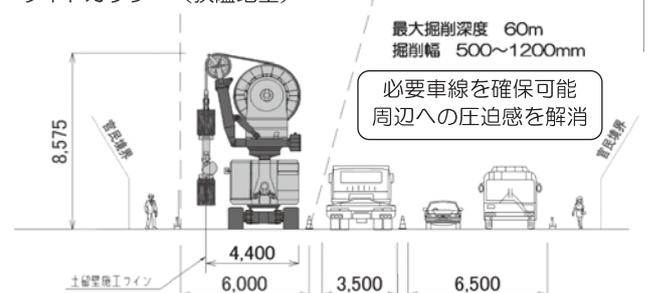
クアトロカッターの施工性に着目した H 社は、設計施工型の技術提案工事に採用することを決め施工時の通行車線数や歩道を考慮した機械のコンパクト化への改造に取り組んだ。道路上の作業帯の幅を 6 m と想定したが、クアトロカッターは、カッターからベースマシンの後部までおよそ 8 m あったため、B 社（独）に狭隘地対応型への機械の改造を依頼し、共同でクアトロサイドカッターを開発した。

クアトロサイドカッターは、カッターをベースマシンのサイドに吊り下げられる構造にしたことによりカッター中心からキャタピラー端部までの幅を 4.4 m まで縮めることが可能となった（図一 2）。カッターをベースマシンに対して前方のみで吊るタイプをフロントカッター、サイドでも吊れるタイプをサイドカッター

フロントカッター（低空頭型）



サイドカッター（狭隘地型）



図一 2 サイドカッターの適用例

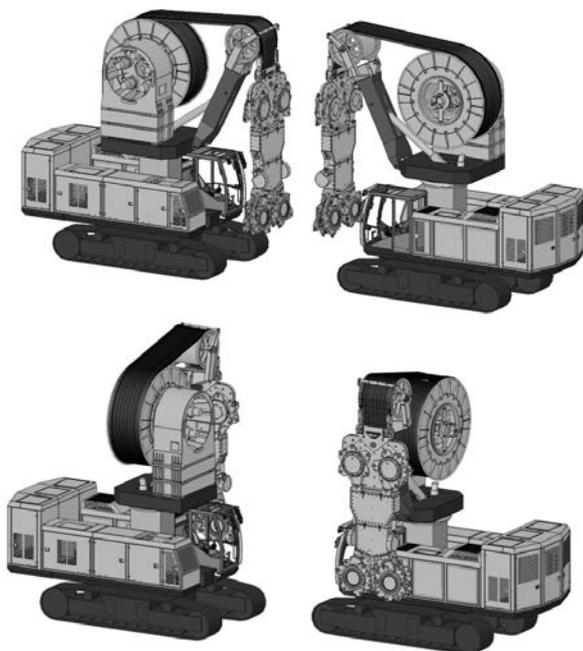
表一 4 BCM5 型 本施工機 諸元

掘削深度 (m)	~ 65 (F) ~ 60 (S)
掘削壁厚 (mm)	500 ~ 1,200
掘削幅 (mm)	2,400
カッターフレーム重量 (t)	14.5
カッターフレーム全長 (mm)	5,160
カッタートルク (kN・m)	0 ~ 45
カッター回転数 (rpm)	0 ~ 40
ベースマシン全装備重量 (t)	~ 84 (F) ~ 87 (S)
機械寸法 (m)	6.5 × 3.3 × 8.0 (F)
高さ × 幅 × 奥行き	8.5 × 4.4 × 8.0 (S)

ターと便宜上呼ぶことにした。これらは、パーツの組換えにより互換性がある機械となっている。表一 4 にクアトロカッターの諸元を示す。なお、表中の (F) はフロントカッター、(S) はサイドカッターを示す。

(2) サイドカッターの機械構造と工夫

フロントカッターからサイドカッターへの改造は、設計に約 2 ヶ月半、部品調達に約 2 ヶ月半、そして組立てに 2 ヶ月と 7 ヶ月を要した。構造的には、ベースマシンと一体となっていたホースドラムおよびカッター部を新しく製作した回転テーブル付きのポストの上に載せている。このため、高さが約 8.5 m とフロントカッターに比べ約 2 m ほど高くなってしまったが、前述のとおりフロントカッターとサイドカッターはパーツの組み換えにより互換性があるので使用条件に



図一 3 サイドカッターの動作図

応じて使い分けることができる。

具体的な改造のポイントは、図一 3 に示すとおり下部旋回台に加え上部旋回台を設置することにより、キャタピラー部、ベースマシン本体、カッター部がそれぞれ自由に旋回できるようにしたことである。

(3) 高トルク型タンデムカッターの誕生

クアトロカッターの実績が増えてくるにつれて、土丹層などの硬質地盤における掘削能率のアップが求められてきた。このため、B 社 (独) は高トルクを持つ開発当初の吊り下げタイプ BCM10 型の改造に着手し、クアトロカッターのベースマシンに取付け可能な、姿勢制御装置を搭載したタンデムカッターを誕生させた (写真一 3)。現在、日本に導入されているのは 1 台ではあるが、土丹層の掘削スピードを見る限りトルクアップは成功であった。



写真一 3 タンデムカッター

4. 狭隘地・低空頭型機械としての施工への展開

本工法の施工への展開は、東京地区や大阪地区において道路、鉄道、共同溝、地下通路、シールド立坑などにおける実績が増えており、設計に本施工機の使用が前提となっている工事も見受けられる。この背景には狭隘地施工や上空制限を受ける低空頭型施工と言った都市部独特の施工条件の厳しさがある。

パワー工法研究会では、本工法の普及を図るために工法の技術積算資料の発刊や NETIS 登録、東京都の新技术登録などを行ってきた。また、鋼製地中連続壁協会からは、鋼製地中連続壁工法-II における積算

に本施工機を用いた場合の資料が発刊されている。

5. 地盤改良への適用

本施工機による地盤改良の実績は、鉄道に近接した重力式擁壁としての実績が1件あるが、格子状の改良による構造物基礎等の地盤改良にも適用可能である。また、掘削性能が高いことから固結した壁の切削が可能であるため、格子状の改良においても確実なジョイントを施工できる。このような地盤改良は、地震時の液状化対策としても有効である。さらに、全面改良する場合には矩形断面であるため、隙間無く効率的な施工が可能であり汚染土壌などの改良にも有効である。

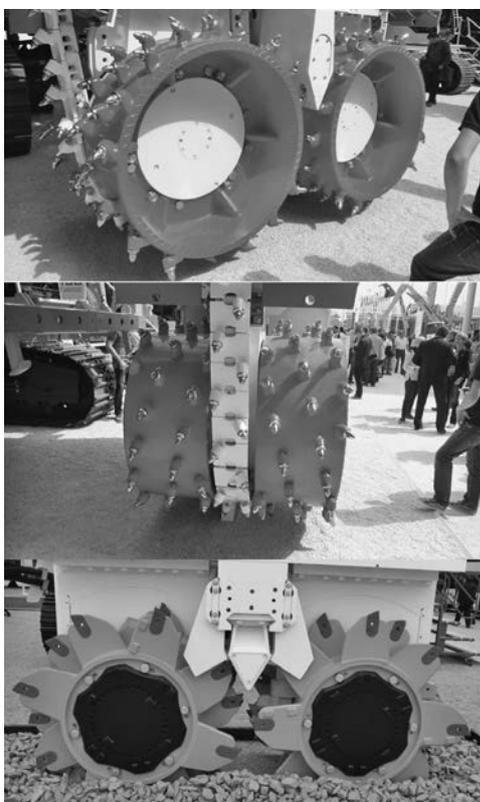


写真-4 本施工機の類似カッター

6. おわりに

狭隘地・低空頭下を対象とした工事における建設機械の開発は、時間と費用が掛かるが、特殊条件下の工事が常にあるとは限らないのでなかなか採算が合わないものである。しかし、今回紹介したCSM機は、狭隘地・低空頭下の工事のみならず大深度、大壁厚のソイルセメント壁や地盤改良が施工できるため汎用性が広い機械であるので今後のさらなる普及が期待される。また、海外ではCSM機に類似した機械が開発されており、今年の4月にミュンヘンで開催された「BAUMA 2013」（建設機械の国際展示会）においては、写真-4に示すように水平多軸回転カッターを用いた類似工法の機械がいくつか出展されていた。BAUMAでは、他にも数多くの最先端の建設機械が展示、紹介されており建設現場の省力化、効率化に大いに寄与するものと感じられた。

JICMA

《参考文献》

- 1) 佐久間誠也, 梅本慶三, バウアー工法研究会: 寄稿「大深度・低空頭型CSM工法の開発と試験施工」基礎工2006年5月号 Vol. 34, No. 5 P89～92: 総合土木研究所
- 2) 佐久間誠也他: 「硬質地盤における新しいソイルセメント壁の造成工法」土木学会トンネル工学報告集 Vol. 16 2006年11月 P433～438
- 3) 佐久間誠也/バウアー工法研究会: 報文「ケリーバー及び吊り下げ方式のCSM機と施工事例」基礎工2008年3月号 Vol. 36, No. 3 P53～56: 総合土木研究所
- 4) 原田哲伸・井上隆広・岩倉孝幸: 狭隘地における大深度地下連続壁の施工—CSM工法クアトロカッター機の開発と品川線大橋連結路工事への適用—土木施工 平成21年4月号
- 5) 佐久間誠也: 各論「最近の土留め・仮締切り工法の特徴と課題」基礎工2012年3月号 Vol. 40, No. 3 P6～10: 総合土木研究所

〔筆者紹介〕

佐久間 誠也 (さくま せいや)
 ㈱安藤・間
 土木事業本部
 技術第一部長
 (バウアー工法研究会 CSM 委員会委員長)

