

土木 おかし ニューマチック ケーソン工法 ケーソン工法の機械化 (5)

(株)白石 技術本部 土木技術部長

鹿浦純一

(株)白石 技術本部 土木技術部

増子康之

はじめに

これまで4編にわたり連載したニューマチックケーソン（以下、ケーソンという）工法において、ケーソン工法の歴史および適用例について述べてきた。その中で、欧米諸国において発展し得なかったケーソン工法が、日本においては80年前の本格的導入以来、多くの技術者の努力により高能率で経済的かつ安全、確実な工法へと飛躍的に成長したことが記されている。このようにケーソン工法を日本が世界に誇る工法にまで成長させた要因は、ケーソン掘削に関わる作業の大幅な機械化により、現場作業員の負担を軽減させ効率的な作業としたことが大きい。本編ではケーソン工法を効率的に変化させた掘

写真1 人力掘削状況



（出典：大阪府十三工営所 十三橋潜函工事報告書）

削設備の機械化、最新の技術と発想により可能とした小断面ケーソン工法、さらには安全性を追求した大深度ケーソン工法とを主題とし、これまで開発された機械掘削技術の変遷についても述べる。

ケーソン設備の機械化

(1) 掘削設備の機械化

ケーソン工法が1841年にフランスで誕生し、1902年に我が国に導入されて以来、1970年代までの130余年の間、人力掘削すなわち作業員がスコップを手にして高気圧のケーソン掘削作業室（以下、函内という）に入り直接掘削を行っていた（写真1）。そのため、潜函病（減圧症）の予防方法が未解明であった20世紀前半までは減圧症患者が続発したとの報告がある。現在は、減圧症発症のメカニズムがほぼ解明され減圧症発症率を減少させた。また、救急再圧室を作業所に配置することも義務化されたことで発症した場合においても完治させることが可能である。しかし、減圧症の発症を完全に消滅させるまでには至っていない。減圧症発症の要因のひとつに人力掘削による過酷な労働と長い作業時間がある。そこで、作業員の労働軽減と掘削作業の効率化を目的に1961年に開発されたのが電動ブルドーザー（以下、函内ブルという）である（写真2）。これが函内掘削の機械化の始まりである。函内ブルをエンジン内燃機関駆動とは異なり電動機搭載型にした理由は、酸

写真2 函内ブル



素が多い函内の高圧縮空気中で内燃機関を燃焼させる場合の機械改良が面倒なことから、排ガス軽減を考慮したためである。函内ブルを初めて使用したケーソン工事は、1962年の国際電々公社建屋基礎工事であり、2台の函内ブルを使用して実用に供した。その後、耐荷力の向上、軟弱地盤走行対策（トラフィカビリティの向上）として湿地ブルドーザー覆帯等の改良を行ったが、人力掘削の補助として用いられたにすぎなかった。

次いで開発されたのが、函内ブルと同様クローラ・マウントタイプのバックホウ型電動掘削機（以下、函内バックホウという）である（写真3）。1969年頃から実用化され、現在でも作業環境に応じて使用されている機械である。函内バックホウは掘削作業の機械化に大きく貢献したが、きわめて軟弱な地盤や硬質土の掘削には適応せず、偶角部や刃口下の掘削には人力掘削の補助を必要とした。

さらに掘削機械の開発は進み、函内天井走行式のパワーショベル型掘削機（以下、ケーソンショベルという）が誕生した（写真4）。ケーソンショベルは天井走行型としたため軟弱層にも対応し、現在使用されている改良型ケーソンショベルは、硬軟すべての土質地盤掘削に適する万能機である。ケーソンショベルは1970年に東北自動車道・鬼怒川橋基礎工事最後の試験施工を終え、大阪・阪神高速道路公団・南港連絡橋（現：港大橋）基礎工事に初めて本格導入された。現在までに多数の施工実績を有して

写真3 函内バックホウ



写真4 ケーソンショベル（初期型）



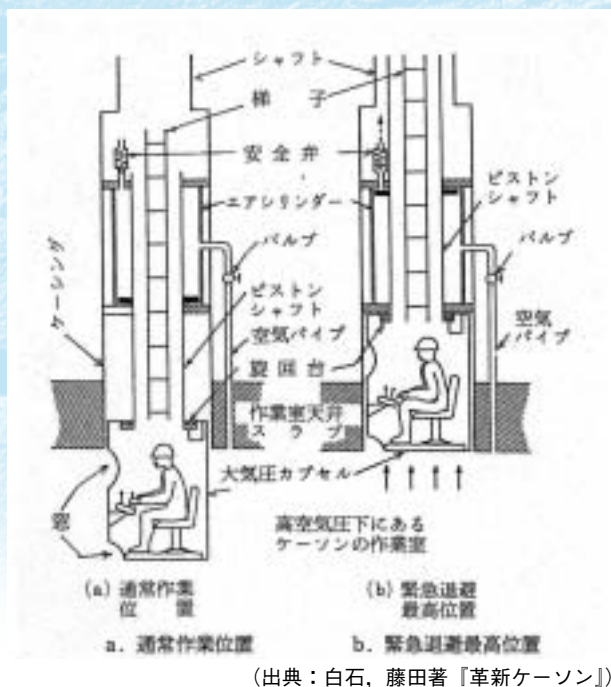
いる。

このように人力掘削から始まったケーソン函内での掘削は、問題点を克服するための機械化が進み、ケーソンショベルを誕生させるまでに至った。また、機械化に伴い掘削作業の効率化が進むと、ケーソン施工工期短縮のために、掘削土砂を排土バケットに積み込む自動積み込み装置や排土バケットを巻き上げ・横行が可能な専用排土装置であるキャリア、排土バケット内土砂を土砂ホッパに空けるバケット反転機等の設備も機械化・自動化されている。

(2) 函内掘削に無人化

函内バックホウやケーソンショベルの開発は、掘削効率の向上に貢献し、減圧症の発症率低下をもも

図1 大気圧カプセル概要図



たらし。しかし、これら掘削設備の運転員や補助要員は、函内作業時間の制限を受け、さらに出函時の減圧時間および体内ガス圧減少時間の規定に従わねば、減圧症にかかる恐れがある。特に高気圧の場合には、このような規定により現場に拘束される時間が高気圧室内実働時間に比べ著しく長くなる。そこで開発されたのが無人掘削システムである。このシステムは、図1に示すように運転員が大気圧カプセル内に座り、カプセルに取り付けた窓からケーソンショベルを直接見て遠隔操作するものである(写真5：大気圧カプセル)。これにより高気圧室内実働時間の制約がなくなり、掘削能率をさらに向上させた。無人掘削システムの試作機は、1981年に日本道路公団：名港西大橋東主塔基礎ケーソン内で試験施工を実施し、全容積16万 m^3 の世界最大のケーソンである東京港連絡橋(レインボーブリッジ)の台場側アンカレッジ基礎において本システム10組を使用し、ケーソン刃先深さ-27m以深にある6万 m^3 を掘削した。

カプセル式無人掘削機の成功を受けて、ケーソンショベルの地上遠隔操作の開発も進められた。1989

写真5 大気圧カプセル



年に東京電力(株)：富津～袖ヶ浦ガス導管新設工事第4工区において実用化された地上遠隔操作システムは、函内の掘削動作を立体的にとらえることのできる3Dカメラで撮影し、地上制御室のモニター画面にリアルタイムに映し出す。そのモニター画面を見ながら遠隔操縦するものである。写真6に地上におけるケーソンショベル遠隔操作状況を示す。また、掘削地盤状況を映し出すモニターの他に函内のケーソンショベルの位置、ケーソン躯体の傾斜、周辺地盤への影響等を別画面にグラフィック表示し、ケーソン掘削に必要な情報を直接確認することもできる。一方、函内完全無人化により掘削補助員が行っ

写真6 ケーソンショベルの地上遠隔操作状況



図2 「ベルトフィーダ式積み装置」概要図

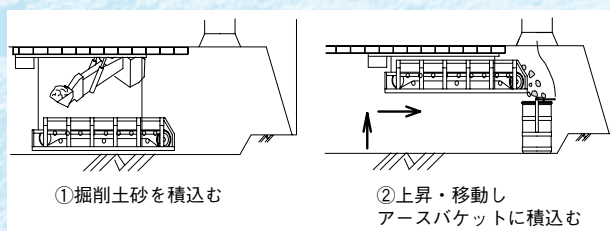
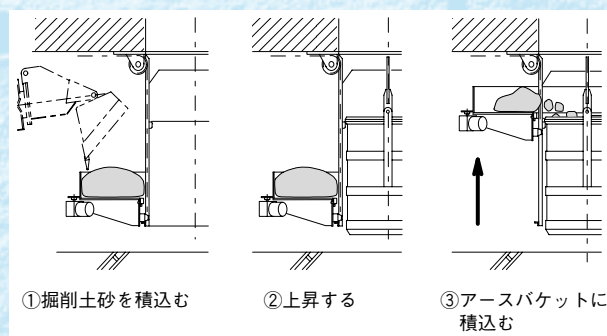


図3 「円形回転翼式積み装置」概要図



ていた排土バケットの掛け替えが不可能となった。そこで、遠隔操作を実施した当該工事では、掘削土砂の仮置き後に自動で排土バケットに積み込む自動積み装置も開発した。自動積み装置は矩形ケーソンに対応するベルトフィーダ式と円形ケーソンにも対応した円形回転翼式の2種類であり、排土作業が掘削作業の効率を低下させることを防いだ。図2にベルトフィーダ式積み装置の概要図を、図3に円形回転翼式積み装置の概要図を示す。

小断面ケーソン工法（スリムケーソン工法）

ケーソン設備の機械化は効率的な掘削作業を目的に、個々の掘削設備の大型化も図ってきた。そのため、大型地下構造物におけるケーソン工法の優位性が向上しケーソン工事に占める大断面の地下構造物の割合は増加、小断面でのケーソン工事の割合は減少傾向にある。小断面では掘削設備の機械化、無人化が困難と考えられ、工期・経済性に問題が生じていたためである。従来、人力掘削を主体として施工されてきた小断面積ケーソンでは、以下の問題点がある。

- ① 人力掘削の場合工事費が高くなる。
- ② 土砂運搬用バケット投入時に作業員が退避する必要があるが、狭い函内空間においては安全な場所を確保し難い。
- ③ 設備上重量の大きいロックがケーソン頂部に位置するため、相対的に重心位置が高くなる。これによりケーソン躯体の傾斜により作用する

転倒モーメントの偏心量が大きくなるため、初期沈設時の安定性確保が困難。

等である。これらの問題点を踏まえ、(株)白石により開発されたのがスリムケーソン工法である。本工法は小断面（掘削断面40m²未満程度）で機械掘削設備を備え、マテリアルロックとマンロックを一体型としたスリムケーソン工法である。スリムケーソン工法の概要図を図4に示す。今回開発されたスリムケーソン設備では、地上からの遠隔操作により新開発のケーソンショベル（容量0.05m³）を操作し、安全性・作業性の向上を図った。また、ロック設備をシャフト下部に設置したことにより低重心で、沈設初期も安定性が良く確実な施工を可能とした。本工法は、2005年に独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構：九幹鹿、鳥栖三島 BL 工事で実施工に供する予定である。

図4 「スリムケーソン工法」概要図

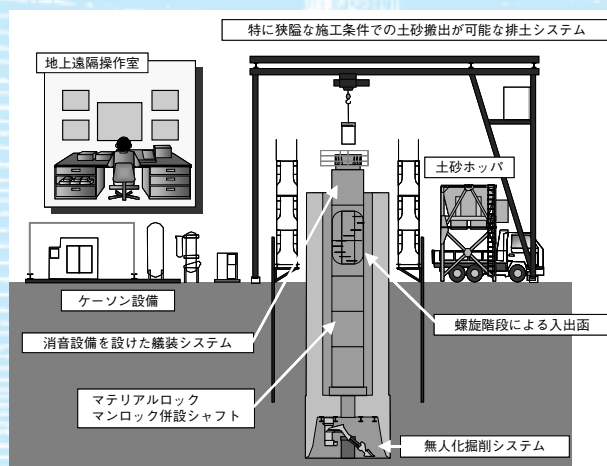


写真7 自動給脂システムを装備したケーソンショベル



超大深度ニューマチックケーソン工法

ケーソン掘削深度が増し、函内気圧が水深40m相当の圧力を超えた高気圧空气中に入ると、集中力欠如、注意力散漫、持久力欠如といった窒素酔いに陥る。この窒素酔いを防止するため、ヘリウム・窒素・酸素を用いた三種混合ガス呼吸システムを開発した。このシステムは、本編を含め5編にわたり掲載しているニューマチックケーソン工法の第1編中「日本における技術革新」で既に述べた。現在は、水深90m相当圧力までの入函作業の実験が終了している。本システムを用いることで、高気圧下においても作業員が入函する必要のあるケーソンショベルの点検・修理、およびケーソン最終到達深度の地耐力試験等の作業を可能とした。初めてこのシステムを実施した工事は1995年に沈設が完了した日本道路公団：名港西大橋・主塔基礎工事の2基のケーソン工事であり、次いで1998年に日本道路公団：第2名神高速道路員弁川橋基礎工事に使用された。その後、2000年に大阪市水道局：中部・西部および堀江幹線その他配水管改良工事（発進立坑築造工事）において、沈設深度GL-63.5m、最大気圧0.54MPaの大深度ケーソン工事を完成させている。この三種混合ガス呼吸システムを使用したケーソン工法は、現在までに14基の実績を有している。

図5 ケーソンショベル監視画面

油圧動作状況		遠正值	
油圧圧力①	11.50 MPa	設定圧力① 基準値	11.50 MPa
油圧圧力②	14.50 MPa	設定圧力② 基準値	14.00 MPa
作動油温度	23 °C	設定温度上限値	80 °C以下
油圧残圧	95 %	設定温度下限値	5 °C以下
		設定油圧残圧上限値	100 %以上
		設定油圧残圧下限値	70 %以上

ケーソンショベルの点検作業は毎日必要であり（日常点検）、90分の函内作業を三種混合ガス呼吸システムで実施した場合でも、130分以上の減圧時間を強いられる。そのため、作業員の負担低減と掘削効率の向上を図るためには、作業員の入函回数、入函時間を減らすことが重要である。そこで、ケーソン工事の完全無人化の一環として開発されたのが、自動給脂システムを装備したケーソンショベルである（写真7）。このシステムは、遠隔操作システムと併せて1997年に開発が始まり、バケット部、旋回部、走行部の3箇所においてグリスを遠隔操作にて給脂することを可能にした。現在使用されている改良型は、グリスを遠隔給脂するだけでなく、ケーソンショベルの現況を監視画面（図5）で常時確認でき、必要に応じて適所に給脂することを可能としたものである。これにより、遠隔による日常点検を可能としただけでなく、ケーソンショベルが故障した原因と箇所を油圧、油温、油量等のセンサーによる情報とケーソンショベルに設置した複数のモニター映像により地上で把握し、事前に修理を要する箇所を把握することで作業員の高気圧作業時間の短縮をも可能とした。改良化された本自動給脂システムは2003年に東京都下水道局：小松川第二ポンプ所ケーソン工事にて実用化されている。

その他にも完全無人化ケーソン工事への試みは進んでおり、ケーソンショベルの自動回収装置・回収

方法、無人地耐力試験設備の開発が終了している。
また、水深70m 相当圧力まで確立されている三種混合ガス呼吸システムも更なる大深度化時代を踏まえ、水深90m 相当である0.88MPa に対応する減圧方法およびシステムの開発が進んでいる。今後、ケーソン工事が完全無人化されることは必至であり、安全、高施工精度、高効率の地下構造物構築工法として発展することが期待される。

おわりに

作業員の安全、掘削作業の高効率を目的に開発を進めてきたケーソン設備の機械化は、国土交通省をはじめゼネコン各社の技術開発に由来するところが大きい。ここで、これまで各社が提案してきたケーソン工事の機械化の概要を特許、実用新案公告日の順に紹介する。

- ・(株)フジタ：1971年・掘削土砂を水と混ぜて流体輸送する構想
- ・国土交通省：1971年・最終の無人掘削機、バックホウ型の掘削機と排土バケットをテレビ画像を地上で見ながら遠隔操作する方式
- ・大成建設(株)：1979年・作業室天井に大気圧運転室を設けて掘削機械を遠隔操作する方式
- ・(株)白石：1980年・作業室内に設けた覗き窓のついた大気圧運転室から掘削機械を遠隔操作する方式
- ・(株)熊谷組：1980年・作業室内刃口近くに耐圧運転室を設けて掘削機械を遠隔操作する方式
- ・(株)白石：1984年・ベルトコンベアー付き掘削土砂の仮置き装置で自動排土を行う方式
- ・奥村組：1984年・バケットコンベアー式掘削機と掘削土砂の仮置き装置で自動排土を行う方法
- ・鹿島建設(株)：1985年・電動ブルドーザーやバックホウを遠隔操作する方式
- ・(株)白石：1985年・作業室内に設けた覗き窓のついた大気圧運転室の旋回と自動昇降装置
- ・飛鳥建設(株)：掘削機械に耐圧運転席を設置する方式

- ・(株)大林組：1992年・掘削土砂のスラリー輸送システム、掘削土砂を海水と混合し流体輸送を行う方式。大気中で土砂と水を分離し土砂のみを土運搬船に投入
- ・大豊建設(株)：1992年・天井走行ケーソンショベルの遠隔操作回収装置で、作業員が高気圧作業をせずに修理や撤去を行う方式
- ・国土交通省、先端建設技術センター、大本組、大豊建設、東亜建設工業、東洋建設：1994年・NPC工法、天井走行型ケーソンショベルと自動排土装置を地上遠隔操作する方式で、後者を共同研究した

ケーソン工法は設計・施工技術の発展と技術者の努力により、数々の課題を解決してきた工法であり、他工法では対処が困難とされている礫・玉石地盤や被圧地下水にも容易に対処可能な工法である。特に、本編で述べた遠隔操作システムと三種混合ガス呼吸システムの実用化は、ケーソン工法の最大の弱点とされてきた高気圧作業からの解放と施工深度の制約を撤廃する画期的な技術であると考えられる。また、地下水保全の観点からもケーソン工法の優位性は注目されている。今後、ケーソン工法は大深度地下開発の一翼を担うものとして、更なる発展が望まれるところである。

【参考資料】

- ・白石俊多、藤田宏一：『革新ケーソン』(株)総合土木研究所、1996
- ・眞野喜洋、望月昇、野澤徹、石井通夫、瀬田芳博：『潜水の歴史 A History Diving and Compressed Air Working in Japan』、(財)社会スポーツセンター、2001
- ・小田章治：「大深度ニューマチックケーソン工法ーヘリウム混合ガスシステムー」、『土地改良』VOL.3、pp.54-58、2001
- ・亀尾啓男：「スリムケーソン工法ー小断面ニューマチックケーソンの無人掘削システムー」、『土地改良』No.241、pp.52-54、2004
- ・加藤幸雄：「自動化ケーソン工法」、『基礎工』VOL.2、pp.26-28、2000. 2