

ニューマチックケーソン工法の無人化施工技術

小 滝 勝 美

ニューマチックケーソン工法において無人化工法が開発されてから25年ほどが経過しており、近年では計画段階より積極的に無人化工法を採用する事例が多くなってきている。無人化工法が開発されてより、安全性の向上や施工能力向上のために様々な開発がなされ、自動化への試みなども行われてきた。今後のニューマチックケーソン工法の無人化施工技術の方向性としては、完全無人化に向けた開発へと進むものと考えられるが、パーフェクトを目指すのではなく可能な限り函内作業を少なくすることを考えるとともに、余剰な設備等をできるだけ減らし、価格競争のできる工法として確立していくべきと考えている。

キーワード：ニューマチックケーソン，無人化工法，施工実績，完全無人化，大深度

1. はじめに

ニューマチックケーソン工法がわが国において導入されたのは、1902年に横浜税関の岸壁建設¹⁾でエアロックを装着した潜鐘工事が行われたことに始まる。

その後、橋梁基礎を中心に施工実績を積み重ねてきたが、1960年代まではスコップやツルハシを用いた人力掘削が行われ、3Kや5Kといった苦渋作業の代表的な工法として知られていた。函内掘削作業の機械化は電動式ブルドーザの投入から始まり、電動式バックホウから天井走行式掘削機へと急激に進化し、1981年には伊勢湾岸道路名港西大橋（I）工事で、無人化工法が初めて採用されている。機械化から無人化へわずか20年で移行しており、各社の技術開発に対する真剣な取り組みが窺える。

平成に入ってから、徐々に無人化工法が定着するようになり、近年では函内作業気圧が0.29 MPaを超えるような施工では、ほぼ無人化施工が採用されるようになってきた。また、更に深いケーソン（函内気圧0.39 MPa以上）の施工においては、ヘリウム混合ガス併用の無人化工法が開発され、より安全な施工法として確立されている。

本報文では、近年のニューマチックケーソン工法の無人化施工実績等を紹介するとともに、最新の技術動向について報告する。

2. 近年の施工実績の推移

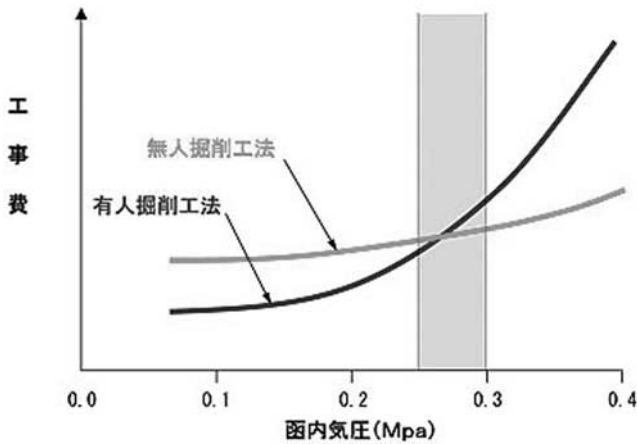
ニューマチックケーソン工法において本格的に無人

表—1 ニューマチックケーソン施工実績

平成年度	掘削基数			全体掘削土量 (m ³)
	無人掘削	有人掘削	合計	
元年	4	84	88(11)	526,500
2年	3	93	96(3)	431,500
3年	9	68	77(11)	322,500
4年	8	74	82(20)	432,800
5年	6	57	63(10)	306,400
6年	10	84	94(13)	314,900
7年	13	50	63(11)	355,500
8年	15	49	64(7)	233,300
9年	17	54	71(11)	481,900
10年	3	61	64(10)	212,400
11年	14	50	64(6)	234,300
12年	13	43	56(11)	299,400
13年	24	62	86(10)	426,400
14年	8	65	73(14)	397,100
15年	14	52	66(11)	286,600
16年	10	51	61(9)	246,300
17年	23	60	83(19)	355,400
18年	12	46	58(7)	276,500
平均	12	61	73	341,100

化工法が取り入れられたのは、平成に入ってからであり、既に20年が経過しようとしている。表—1に日本圧気技術協会が実施している施工実績調査の結果をまとめ一覧表として示す。これによると、無人化工法は年間平均として12基程度施工されており、平成当初よりもその施工基数が増えているのが分かる。なお、平成元年より現在に至るまでに無人化工法により施工された基数合計は206基を数えている。

また、表—1の掘削基数の合計で（ ）書きしている数値は、各年度で函内最大気圧が0.29 MPaを超える基数を示している。導入初期（平成元年～6年）には、函内最大気圧が0.29 MPa以上のケーソンでも無人化工法の施工割合が少なかったものの、平成7年度以降は例外はあるものの、0.29 MPa以下のケーソンにおいても無人化工法が採用されるようになってきているのがわかる。

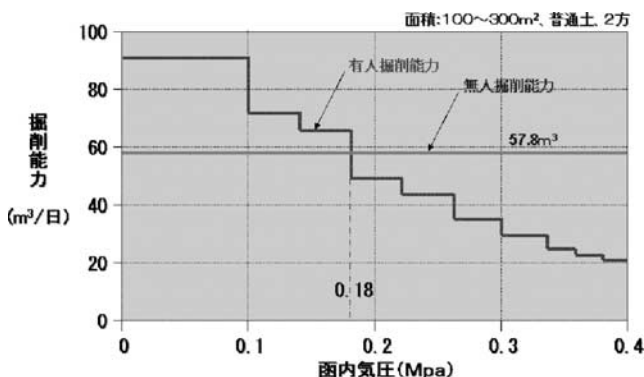


図一 有人・無人掘削の工事費比較図

ニューマチックケーソン工法における無人化工法は、ただ安全性を高めるために開発されたのではなく、施工性や施工能力の向上のために開発されてきたものである。この意味においては、無人化工法を用いても従来工法に比較してコスト縮減に繋がるような施工法は他に類を見ない。なお、従来工法（有人掘削）と無人化工法のコストパフォーマンスは図一に示すとおりであり、無人化施工によるトータルコストの逆転効果は、過去の施工実績等により通常 0.25 MPa ~ 0.29 MPa の間にあると考えられている。

3. 無人化工法による掘削能力

ニューマチックケーソン工法の積算基準としては、「国土交通省土木工事積算基準」において通常の有人掘削工法が示されている。一方、無人化工法については、公的な積算基準はなく日本圧気技術協会が発行している、「ニューマチックケーソン積算資料」があるのみであり、無人化工法の公的な積算基準の整備が望まれている。なお、これらの積算基準に記載された掘削能力の比較を図二に示す。



図二 有人・無人掘削能力比較図

図二に示すとおり、無人掘削能力は 0.18 MPa を界にして有人掘削能力よりも大きくなる。他の環境下における無人化工法では、通常は有人作業の方が施工能力が大きい。しかしながら、ニューマチックケーソン工法は高圧気下という特殊な環境条件にあり、管内での作業時間を制限されることからこのような逆転効果生まれ、正に無人化工法が最も適した工法となっている。

4. 無人化施工の実際

(1) 管内掘削機

無人化工法に用いられる管内掘削機の仕様については、各社それぞれの特徴を有しているが、基本的には天井走行式掘削機を地上の遠隔操作室においてテレビモニターを見ながら遠隔操作する方法を採用している（写真一、2）。

天井走行式掘削機の仕様としては、表二に示すとおり3種類が開発されているが、積算上の標準仕様としては 0.15 m³（山積）が採用されている。その他



写真一 天井走行式掘削機



写真二 遠隔操作状況

表一 2 掘削機仕様一覧表

バケット容量	機関出力kW(PS)	機械重量(t)
0.15m ³ (山積)	15.0	8.2
0.25m ³ (山積)	30.0	12.4
0.30m ³ (山積)	37.0	15.3

の大型掘削機については、掘削能力が大きいため大型ケーソンの施工や工程等に余裕のない場合等に採用されている。また、大型の掘削機は掘削力が強く硬質土層の掘削に適しており、故障等が少ないなどの特徴を有している。掘削機仕様の選定に当たっては、土質条件や施工規模等を踏まえて計画する必要がある。

(2) 土砂積替え装置

開発当初は、掘削作業の効率化を図るために土砂積替え装置を採用していた(写真一3)。土砂の積替え方式については、各社各様の装置を開発し施工していたが、設備が多様化すればするほど故障等の不具合が発生しやすく、また、実際の掘削能力についてもそれほど向上しなかったため、現在ではよりシンプルな方法とし、土砂積替え装置は用いずに1固の土砂バケットによる搬出作業を行っている。



写真一3 底開バケット式土砂積替え装置

(3) 自動化施工

掘削機オペレータの負担低減のため、単純な繰り返し作業等については一部自動化を採用したこともあるが、実際の現場においては初期設定の入力や位置関係の微妙なずれ等の修正等が必要となり、これらに対応するために必要とされる時間的ロスなどを考えると、自動化を採用する意味がなくなってしまい、現在では自動化施工は導入していない。一方、土砂バケットの

搬出作業の自動化についても試みたが、自動化自体は可能ではあるものの、安全性の観点から巻き上げ速度の制限等を余儀なくされ、結果的にはサイクルタイムが非常に長くなるなどの弊害が発生した。このため、現在では無人化施工(掘削作業)の一部に自動化を取り入れることは行っていない。

ただし、バケット式掘削機ではなく、岩盤掘削用としてカッタードラム式掘削機を用いて自動運転するとともに、切削ズリをベルトコンベアにより搬送して、土砂バケットに自動的に投入する施工が行われ、良好な成果を上げている事例もある(写真一4)。

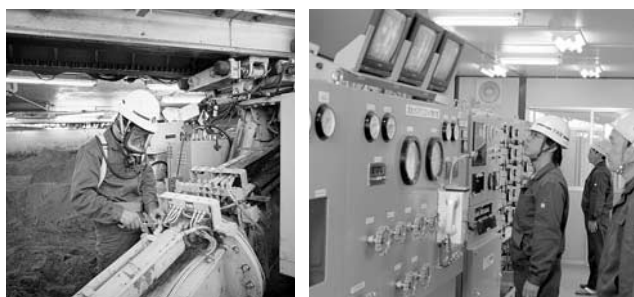
写真一4 自動化施工事例²⁾

(4) ヘリウム混合ガスバックアップシステム

無人化工法の開発により、掘削作業時には基本的に函内作業員が入ることはなくなった。しかしながら、掘削機のメンテナンスや故障時への対応のためには、どうしても作業員が函内に入る必要がある。

しかしながら、0.29 MPaを超えるような高気圧下では、窒素酔いや呼吸困難等の高気圧障害が発生しやすくなる。これらの障害を回避し安全な函内作業を行う方法として、入函時の呼吸用ガスとして窒素の一部をヘリウムと置き換えた[ヘリウム・窒素・酸素]のヘリウム混合ガスを用いたバックアップシステムを採用している(写真一5)。

ヘリウム混合ガスを併用した無人化工法の開発により、ニューマチックケーソン工法の適用範囲は



写真一5 ヘリウム混合ガス利用状況

表一3 大深度ニューマチックケーソンの施工実績

No.	構造物名称	発注者	施工時期	平面積 (m ²)	最終気圧 (MPa)
1	中部・西部及び尾江幹線立坑	大阪市	H11~H12	240.5	0.55
2	(仮称)矢部川橋基礎工P1、P2	九州地整	H16~H17	292.5	0.50~0.53
3	富山新港東西線橋梁P22、P23	北陸地整	H15~H17	381.2	0.48~0.49
4	阪南港阪南2区橋梁下部工	大阪府	H12~H13	289.0	0.46
5	高砂・書戸本水管シールド用立坑	東京都	H11~H12	122.7	0.46
6	京浜島共同溝発進立坑	関東地整	H16~H17	84.9	0.44
7	名港西大橋Ⅱ期線P2、P3	道路公団	H05~H08	1,080.0	0.40~0.42
8	第二名神員弁川橋	道路公団	H09~H10	286.0	0.42
9	日暮里・舎人線荒川横断橋	東京都	H12~H13	103.9	0.41

0.69 MPa までに広がっている。現在までに施工されたヘリウム混合ガス併用の大深度ニューマチックケーソンの施工実績を表一3に示す。

5. 最新の無人化工法

ヘリウム混合ガス併用無人化工法により、0.69 MPa まで安全な施工が可能となったが、益々大深度化する橋梁基礎や各種立坑等に対応するため、近年では完全無人化工法への追求が行われている。

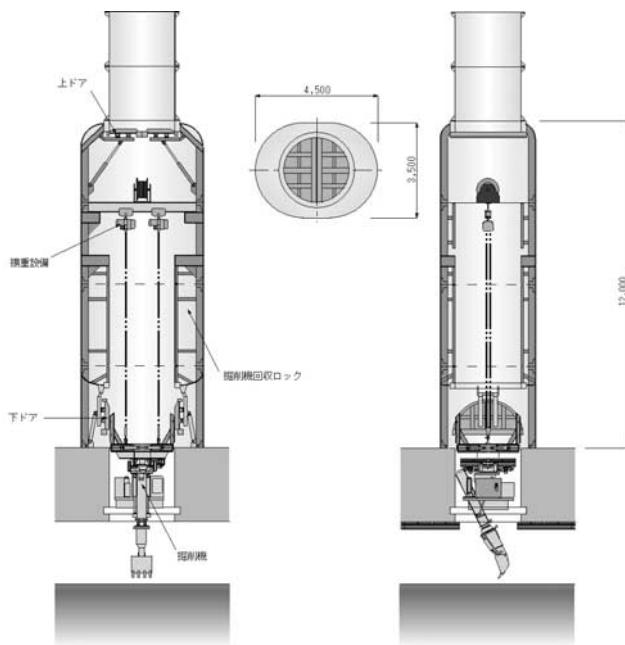
ここに言う完全無人化とは、初期沈下掘削時（～0.18 MPa 有人作業）を除いた、無人化施工時を示すものであり、可能な限り函内に入らないようにするという意味で捉えている。以下に当社において開発し完全無人化を追求する Super-ROVO ケーソン工法について紹介する。なお、本工法の開発により、超大深度（地下水面下約 90 m）までのニューマチックケーソンの施工が可能となった。

(1) 掘削機無人回収システム

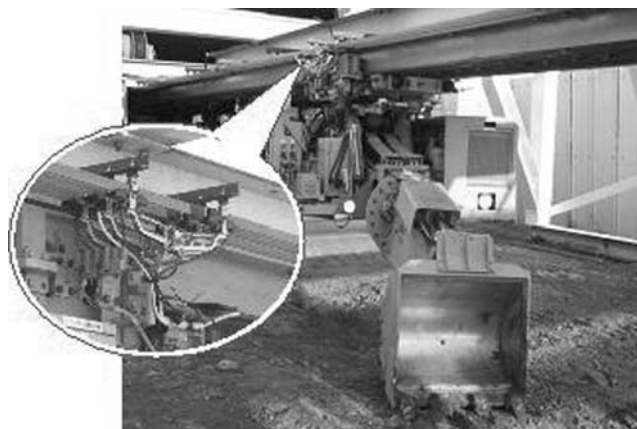
本システムでは掘削機のメンテナンス作業と解体・回収作業を大気圧下で行うことが可能となり、安全性が飛躍的に向上するとともに、函内作業がなくなるため、ヘリウム混合ガス使用量の大幅な削減と工期短縮によりコストダウンが図られる。また、本システムでは掘削機を組み立てた状態で函内への搬入・搬出が可能となっている。図一3にその概要を示す。

(2) 掘削機のケーブルレス化

現状の無人化工法においては、掘削機の動力線としてキャプタイヤを天井走行レールに沿って配線し、カーテンレールの要領で動力線が伸縮し、掘削機の動きに追従させている。これに代わる方式として、工場の生産ラインや天井クレーン等で実績のある絶縁トロリー給電システムを取り入れた（写真一6）。この方式の採用により、移動電線のメンテナンスを不要としフレキシブルな移動が実現した。また、掘削機を回収する際に課題となっていた電線の処理も簡易となった。



図一3 掘削機回収ロック概要図

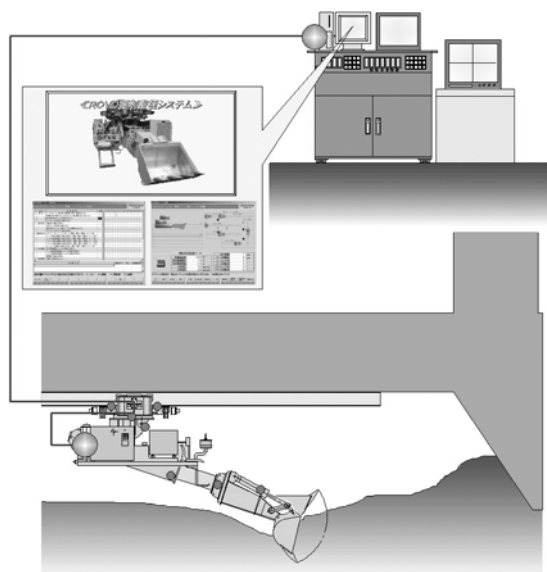


写真一6 ケーブルレス掘削機

一方、動力線の他には操作線・制御線をもケーブルレス化するために、雲仙普賢岳等の災害復旧工事で実績のある、SS デジタル無線遠隔操作システムを採用し、狭隘空間でも混信等が少なく大容量の電送が可能な信頼性の高い無線システムとして開発した。

(3) 自動メンテナンス・自己診断システム

従来の無人化工法においても導入していたシステムであるが、さらに内容を充実し掘削機から発せられる各種の異常信号を捕らえ、致命的な故障等が発生する前に早期発見できるようにしている（図一4）。これにより、故障等による函内での補修作業を大幅に削減することが可能となり、ヘリウム混合ガス使用量も減少させることができる。



図一4 自動メンテナンス、自己診断システム

(4) ヘリウム混合ガス呼吸システムのバージョンアップ

掘削機の無人回収システムやケーブルレス化、または自動メンテナンスシステム等の開発により、ほぼ函内での有人作業は無くなったものの、掘削機の回収不能やトラブル等、非常時にはどうしても有人作業に頼らざるを得ない場合が発生する。このため、ヘリウム混合ガス呼吸システムは必要不可欠な設備となり、超大深度ニューマチックケーソンに対応するために、0.88 MPa（地下水水面下 90 m）まで施工可能なシステムの構築を行った。

6. おわりに

ニューマチックケーソン工法は、今から 40 年前までは機械化が最も遅れた施工法のひとつとして数えられていたが、現在では最も無人化施工が進んだ工法のひとつとして挙げることができる。無人化施工を採用することにより、安全性の向上を図ることは勿論のことであるが、施工能力の向上まで併せ持った無人化施工技術は他に例がなく、ニューマチックケーソン工法において無人化が発展してきた原動力となっている。

無人化施工が開発されて、最初に採用した現場にお

いては、現在のように完成度の高い機械ではなかったため故障が多くなり、特にセンサー関係のトラブルに悩まされた。見学会を開催したときに、見学者が現場へ到着しているのにも拘わらず、作業室内では修理作業を行っていたなどの経験もある。

しかしながら、掘削機械やセンサー類の改良・改善を行うことにより、現在では非常に完成度が高く、故障の少ない掘削機となっている。作業前点検などは欠かせないものの、高圧・高温・多湿の悪条件下でもほとんど故障が発生せずに、1 ロット分の沈下掘削をこなせるようになってきている。近い将来には完全とまでは言えないものの、掘削開始から完了までをメンテナンスフリーに近い状態で施工できる掘削機の誕生も夢ではないものと考えている。

最後に今回は掲載していないが、完全無人化施工の追求に欠かせないものとして、沈下完了後の地耐力試験の遠隔操作技術がある。既に数社において開発されており、実証試験も完了していることから、実用化段階に入ったものと考えている。さらには、掘削機の組立・解体用ロボットの開発なども行われており、掘削機回収用ロックなどの大型設備を必要とせず、より簡易で安価な工法を目指す試みもなされている。

ニューマチックケーソン工法は今後も発展し、完全無人化が完成した場合には、函内気圧の制限を受けることなく 100 m 以上の深度にも対応できる施工方法と成り得る可能性があり、これからも技術開発を進めていきたい。

JCMA

《参考文献》

- 1) 石井通夫：年表で概観するニューマチックケーソン掘削排土装置等の変遷，建設と圧気，日本圧気技術協会，第 27 号（2005.12）
- 2) 傾斜した岩盤を掘削して沈下させる無人化ケーソン工法，建設と圧気，日本圧気技術協会，第 17 号（2000.12）

〔筆者紹介〕

小滝 勝美（こだき かつみ）
 (株)大本組
 技術本部技術企画部
 技術企画課長

