

まとめとしての

「わが国におけるニューマチックケーソン工法発展の歴史的背景に関する考察」

平川 修治(脩士)*

“Historical Study on the Development of Pneumatic Caisson Method in Japan” as Concluding

S.Hirakawa

ABSTRACT

In reviews of a pneumatic method in our country, there are many misunderstandings associated with periods and terms in books and reports. It is especially remarkable that these misunderstandings happened at the period which the pneumatic method was introduced to our country at the early period. About one hundred years was past since the pneumatic method with airlock was introduced to our country in 1899. It is unusual that a proper construction method has been used for a long time. These are caused by some reasons which are modification of the construction machines imported from the over sea at the early period, active application to field works, settlement of the design methods and introduction of high project management. The author classifies this subject under three problems: the design method of pneumatic caisson, the excavating machine and the project management and has investigated the processes of each problem. This report is written subject to the pneumatic caisson method of up to date as concluding.

Key words : Foundation, Construction method, Pneumatic caisson method.

概要

過去において、わが国のニューマチックケーソン工法の歴史について言及されている著書や報文などには、その年代や表現方法をとりがえて記述されているものが多く見かけられる。とりわけ、圧気工法がわが国にもたらされた時期のものに、これらが顕著のようである。

エアロックを用いた圧気工法の導入時期は1899年(明治32年)で、以来今日まで96年もの歳月が経過している。単独の工法としてこのように長年月にわたり定着してきた工法は数多くみられないと考える。これらの要因を考えてみるに、初期の時代に海外から輸入された施工機械をわが国独自で改良し、これを活発に現場に活用してきたこと、設計方法の確立、さらに高度な工事管理方法が導入されてきたからではなからうか。筆者はこれらを設計法、施工機械ならびに工事管理法に分けてその発展過程について考察してきた¹⁾²⁾³⁾⁴⁾が、本文はそのとりまとめとして、ニューマチックケーソン工法の現況について述

べたものである。(基礎工、施工法、ニューマチックケーソン工法)

1. ニューマチックケーソンの設計法

本工法がわが国に導入され、これが独自の発展をとげてゆく過程において、その設計法は設計者独自の手法で処理されてきた。ニューマチックケーソンは他の基礎工もしくは地下構造物とことなり、施工時応力と完成時応力の両面を考慮して設計する必要がある。ために、特に施工時応力に関する設計には施工過程に精通した設計者によることが要求される。

こうした観点から、建設省道路局では昭和45年に橋梁下部構造を中心とする設計指針⁵⁾を制定すると同時に設計法の思想の統一をはかり、これが道路橋示方書・下部構造編⁶⁾「以下道示・下部工と略記する」に収録され今日にいたっている。

道示・下部工は、幅員4車線、スパン200m以下の道

*土木工学科

路橋を対象とし、全国的にみて汎用性が高いものである。筆者は共同研究者の1人として設計合理化の研究をすすめてきており⁷⁸⁾、これにより設計法思想統一がはかられたと確信をえたので、これを契機として設計の自動化の開発につとめてきた。

本章では道路橋下部構造の基礎をニューマチックケーソン工法による場合の設計法の自動化の現況について述べる。

1-1 最適設計に関して

ケーソン各部の設計アルゴリズムに関しては、道示・下部工を通じて周知のとおりであるが、トータルとしての設計成果については、その評価要因を設定し、これらによる最適設計成果をえる必要がある。

1-1-1 経済性に関する評価の検討

ケーソン基礎の工事費としては、大きく分けてケーソンの構築および掘削沈下関係の直接工事費と、栈橋工、築島工、機械・電気設備および共通仮設費などの間接工事費に分類される。これらのうち間接工事費は、ケーソン沈設位置における地盤条件や施工条件などにより大きな変動があり、経済性を検討する場合間接工事費を包含したものを比較するのはきわめて困難を伴う。このため、経済性を評価する尺度として直接工事費を取りあげることとした。

直接工事費(Pr)は、構築工事費(P1)と掘削沈下工事費(P2)に含まれる各工程の工事単価(CiおよびCj)および数量(xiおよびxj)の積の総和であり

$$Pr = P1 + P2$$

$$P1 = \sum (Ci \cdot xi) \quad (1 \cdot 1)$$

$$P2 = \sum (Cj \cdot xj)$$

で表わされる。

既往の施工ニューマチックケーソン基礎の実績8橋17基を取りあげPrについて調査すると、ケーソン基礎の掘削土量とPrの間にはほぼ直線的な関係がみられる。

したがって、Prは

$$Pr = \alpha \times (\text{掘削土量}) \quad (1 \cdot 2)$$

で表わすことができ、ケーソン基礎の経済性を有効に評価できる尺度は掘削土量であるといえる。

一般的にいって、ケーソンの外形寸法の増減は構築工事費に正比例するので、ケーソンの立体形状が特殊なものでない限り、掘削土量と構築工事費はほぼ正比例するといつてよい。

以上のことから経済性評価の一つの目的変数として掘削土量を考え、設定された範囲内でこの値を最小にすれば経済的であるといえる。

ケーソン基礎の掘削土量は一般的には

$$Va \doteq A \cdot l \quad (1 \cdot 3)$$

ここに、 Va:掘削土量(m³)

A:ケーソン底面積(m²)

l:ケーソン根入れ長(m)

であり、同一根入れ長のケーソンであれば、掘削土量を最小にするためにはケーソン底面積を一定の制限内で最小にすればよいことになる。また、ケーソンの根入れ長は、安定計算によって決定される場合はまれであり、一般には、設計者がケーソンをどの地層で支持させるかで決定される。したがって、ケーソン基礎の工事費の経済性を評価する条件は、ケーソンの底面積いかんで決定されることになる。

1-1-2 ケーソン基礎の力学的安定性に関する検討

ケーソン基礎の設計においては、ケーソンの断面形状および外形寸法の選定が重要事項の一つであり、これら形状寸法の最終決定は、一般に安定計算の結果による場合が多い。

ケーソン基礎の安定性は、各外力状態に対して底面地盤および全面地盤の許容値に対する安全率が1以上であり、かつケーソン天端の変位量が許容変位量以下という条件を満足する必要がある。しかしながら、ケーソン天端の変位量は上部構造からの制約を受けるので、この値を固定値と考えるとすれば、ケーソン基礎の力学的安定性の評価基準としては、底面地盤と前面地盤に対する安全率と考えることができる。

以上の各項について検討した結果、与えられた設計条件に対する設計結果の評価の基準は次のとおりである。

- ① 経済性の面からは掘削土量が最小であること。すなわち根入れ長が決定しているときはケーソン底面積が最小であること。
- ② 力学的安定性の面からは底面および側面地盤の安全率の分散が最小であること。こうした検討経過をたどり、Tab.1・1に示めず設計適用範囲を設定したうえ、Fig.1・2に示めすような自動設計フローチャートのもとで最適自動設計成果をうる。

Tab.1・1 the Sphere of Automatically Design Program

形 式	ニューマチックケーソン (掘削用・橋台用)	オープンケーソン (掘削用・橋台用)
使用目的	道路橋基礎(傾斜:4車線まで)	
使用材料	鉄筋コンクリート	
適用範囲	ケーソン長	10~35 m
	断面形状	5~60 m
適用範囲	断面形状	・円形: 隔壁なし ・小判形: { 隔壁なし { 隔壁1枚~4枚まで
	平面寸法	・円形: 直径4.0~10.0 m ・小判形: 長径4.5~24.0 m 短径4.0~10.0 m
適用範囲	・円形: 直径3.0~10.0 m ・小判形: 長径3.5~24.0 m 短径3.0~10.0 m	

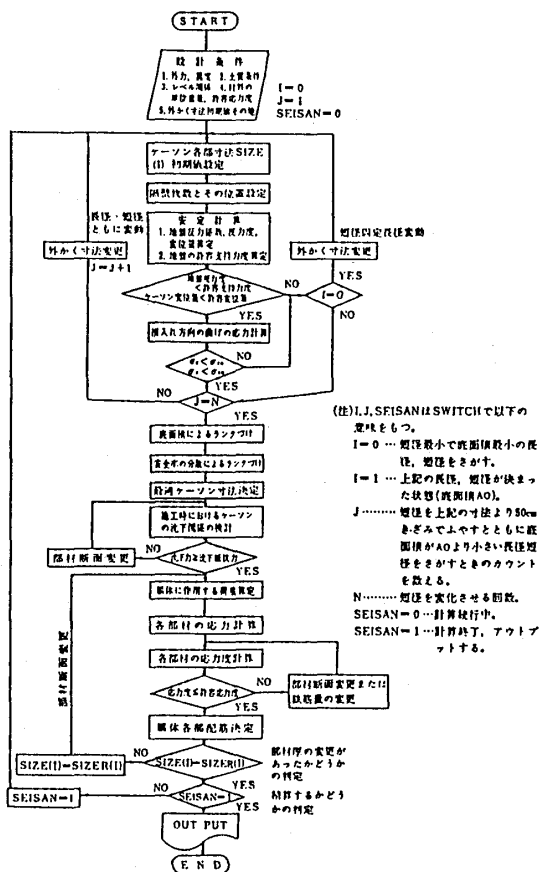


Fig.1-1 Flowchart of Automatically Design of Caisson Foundation

	設計計算				判 断			
	部 数	ステップ数	実行時間	部 数	ステップ数	実行時間	プ ロ ッ タ ー 時 間	
ニューマチックケーソン	フォートラン	12000	5~6分	アルゴリズム フォートラン	25000	5~10分	15~30分*	
オープンケーソン	フォートラン	13000	5~6分	アルゴリズム フォートラン	25000	5~10分	15~30分*	

Tab.1-2 the Scale of Automatically Design Program

Tab.1-3 the Comparison of Result of Automatically Design and Other Design(A)

	ケーソン主要諸元	既設設計(1)	自動設計(2)	(2)/(1)
A (例)	ケーソン寸法 (m)	19×8×26.5	18×6.5×26.5	—
	底面積 (m ²)	143.0	107.9	0.755
	コンクリート量 (m ³)	1,539	1,190	0.773
B	ケーソン寸法 (m)	25×7×21	24×5.5×21	—
	底面積 (m ²)	170.3	131.0	0.769
	コンクリート量 (m ³)	1,800	1,481	0.803
C	ケーソン寸法 (m)	11×7×20	10.5×4.5×20	—
	底面積 (m ²)	71.5	44.2	0.618
	コンクリート量 (m ³)	788.0	596.0	0.756
D	ケーソン寸法 (m)	9.3×6.5×11.5	9×4×11.5	—
	底面積 (m ²)	54.0	34.9	0.645
	コンクリート量 (m ³)	376.0	289.0	0.756
E	ケーソン寸法 (m)	6×6×31	5×5×31	—
	底面積 (m ²)	29.2	20.4	0.699
	コンクリート量 (m ³)	432.0	428.0	0.991

1-2 自動設計プログラムの規模と既往設計結果との比較

1-2-1 自動設計プログラムの規模

自動設計プログラムの規模はTab.1・2に示めすとおりであるが、本プログラムにはオープンケーソンをも含めている。

1-2-2 既往設計結果との比較

自動設計結果の検証を行なうため、既往設計例におけるものと同じ設計条件に基づいて自動設計を行ない、両者の比較を行なってみた。Tab.1・3は、ニューマチックケーソン基礎における比較であり、自動設計結果は既往設計結果に比べケーソン平面寸法が小さく、底面積で

Tab.1-4 the Comparison of result of Automatically design and Other Design(B)

編 号	項 目	既設例	各 個 土 圧 の と り 方							両端中心以下土圧を考慮した場合	常時11定後
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦		
No.1	長 径 m	21.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	
	短 径 m	7.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
	1P(横切) 底面積 m ²	138.485	94.635	94.635	94.635	94.635	94.635	94.635	94.635	94.635	
	既設例に対する底面積の割合	0.683	0.683	0.683	0.683	0.683	0.683	0.683	0.683	0.683	
No.2	長 径 m	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	
	短 径 m	7.0	5.5	5.5	5.0	5.0	5.5	5.0	5.0	5.0	
	A1 底面積 m ²	66.485	54.008	54.008	49.635	49.635	54.008	49.635	49.635	49.635	
	既設例に対する底面積の割合	1.000	0.812	0.812	0.747	0.747	0.812	0.747	0.747	0.747	
No.3	長 径 m	8.5	11.5	8.5	10.0	8.5	8.5	11.0	8.5	9.0	
	短 径 m	8.5	5.5	8.5	6.5	8.5	8.5	5.5	8.5	7.5	
	9P(横切) 底面積 m ²	56.745	56.758	56.745	55.933	56.745	56.745	54.008	56.745	55.429	
	既設例に対する底面積の割合	1.000	1.000	1.000	0.986	1.000	1.000	0.952	1.000	0.977	
No.4	長 径 m	15.6	14.5	15.0	14.5	14.5	15.5	14.5	14.5	15.0	
	短 径 m	6.0	6.5	6.0	4.5	5.0	4.5	4.5	5.0	4.5	
	A1 底面積 m ²	85.874	85.183	82.274	60.904	67.135	65.404	60.904	67.135	67.654	
	既設例に対する底面積の割合	1.000	0.992	0.958	0.709	0.782	0.762	0.709	0.782	0.782	

既設例と同一の土圧をとった場合

約20～30%程度減少しており、経済的な設計となっていることが検証された。

またTab.1・4は橋台基礎ケーソンにおける既往設計結果と自動設計結果の比較を行ない、あわせて各偏土圧に対する自動設計結果も示している。Tab.1・4によるとC橋以外はやはり自動設計結果は既往設計結果に比べ底面積で約20～30%程度小さくなっている。

ニューマチックケーソンの設計法の合理化に関しては、過去幾多の試みがなされてきた。しかし、いずれの場合も問題点を残しており、何らかの手法でこれを補填している。

本文で述べた新たな設計手法は、トータルシステムとしての設計の合理化手法が提案されたものとして、今日では多くの機関で幅広く利用されている。

また、特殊ケースとして、長大橋梁基礎ケーソンにもこれらが部分的に活用され、レインボー大橋の基礎ケーソンなどは平面寸法ならびに沈設深さとも、世界1級のものが完成されている。

2. ニューマチックケーソンの施工機械

ニューマチックケーソンの施工機械は、本工法がわが国に導入されて以来、常にその合理化がはかられ、特にエアロックに関して著しいものがあつたことは、すでに筆者が指摘してきたとおりである⁹⁾。

エアロックの合理化に関しては、現今ではケーソンの形状寸法、排土量などにあわせ容易に処理されており大きな問題点は解消されているといつても過言ではない。

周知のごとく、ニューマチックケーソンは、作業室での掘削作業の能率向上を計る必要があるが、このネックとなつたのが作業員の絶対数不足と高齢化であり20数年前からこの傾向が顕著である。

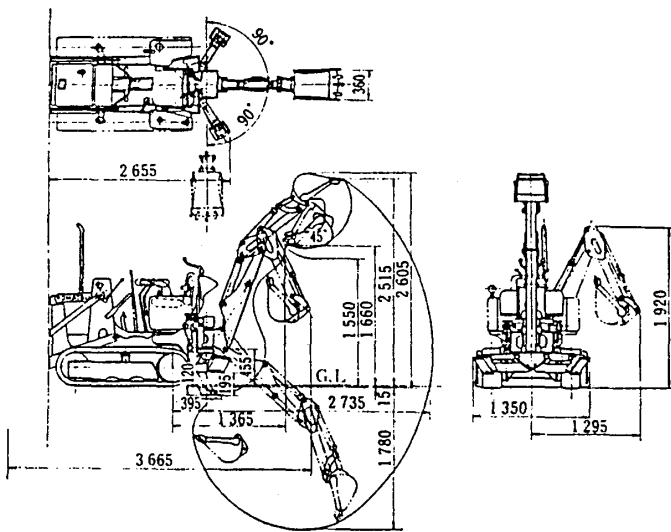


Fig. 2.1 Excavation Machine in workin chamber

ニューマチックケーソンの作業室は、その高さが2.0m～2.5m程度(2.5mを超えることはかえって危険である)とするのが通常であるため、限られたスペースでの作業室内省力化の方法としてまず導入されたのが組立式ベルトコンベアであつたが、作業室内は湿度が高いため、モーターの故障が相つぎ、省力化に寄与できたとはいえ、修理費がかさみ意外なコスト高ともなつた。

ついで導入されたのが、小型ブルドーザーを改良した掘削用バックホーである。この掘削機はFig.2・1に示めすとおりで、ショベルとしても供用できる。本機の稼働により作業室内の作業能率が著しく向上でき、排土バケットも1 m³のものが常時使用可能となつた。

掘削バックホーはキャタピラによって作業室内での地上走行機構を有する掘削機であるため、軟弱地盤でのトラフィカビリティや玉石層での作業性に問題がある。この欠点を克服するために導入されたのがFig.2・2に示めすような天井走行ショベルである。

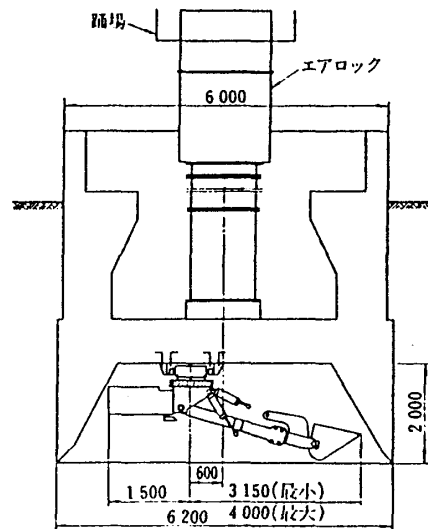


Fig. 2.2 Excavation Machine in working chamber

この掘削機は作業室天井スラブに取付けられたレールに懸架され、レール方向に移動可能な機構となっている。

ショベル部は岩掘削用、土丹掘削用などの数種のアタッチメントの取り替えができるので、本機の導入により画期的な作業能率向上がはかられるようになった。

前章で紹介したレインボー大橋のケーソン工事においては、ケーソンの平面寸法が50m×70mの巨大なものであり、かつ掘削対象地盤が軟硬変化に富んだ土質であつたにもかかわらず、比較的短期間でケーソンの沈下が完了したことは特筆される。

ケーソンの作業室内での掘削作業省力化の最終目標は完全無人化であるが、これに至るには問題点が余りにも

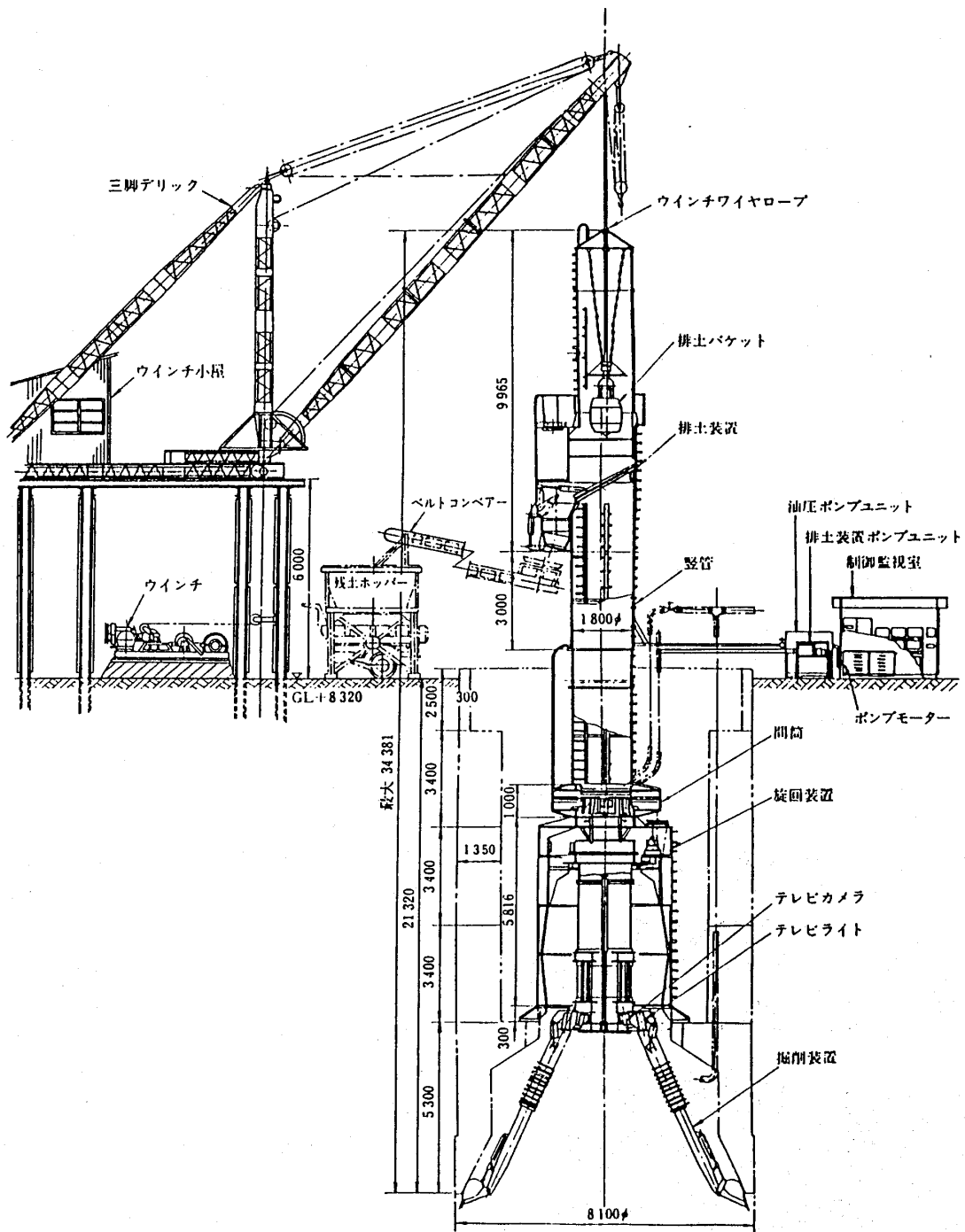


Fig. 2-3 Unmanned Testing Pneumatic Caisson

多いので、いまだ時期尚早の感がする。

ニューマチックケーソンの沈下作業の無人化を志向して、本格的な試験工事が実施されたのは、1971年（昭和46年）建設省中部地方建設局が新木曾川橋の下部工事においてであり、この試験ケーソンの概要はFig.2・3に示めすとおりである。

当時は機械制御用の電子機器のレベルが比較的低く、作業能率の低さや掘削設備総重量が余りにも大であったので、多くの課題を残しつつ単なる試験工事で終了した。しかし、これを契機として無人化への研究が本格的

に開始されてゆく。1980年（昭和55年）に至り、ケーソン作業室の掘削作業の自動化を前記の試験無人ケーソンのように、大幅な改良に集中せず、現有設備の個々のものに自動化を導入されるようになり、現在ではFig.2・4に示すようなりモートコントロールによる自動化が進められてきている。

大深度ケーソンでは作業気圧に法的制限があるため、これを克服するためには、厳選された最小限の人力に依存せざるをえないものの、掘削作業を行うときには、リモートコントロール装置を駆使して無人化に近いような

方策がとられてきている。

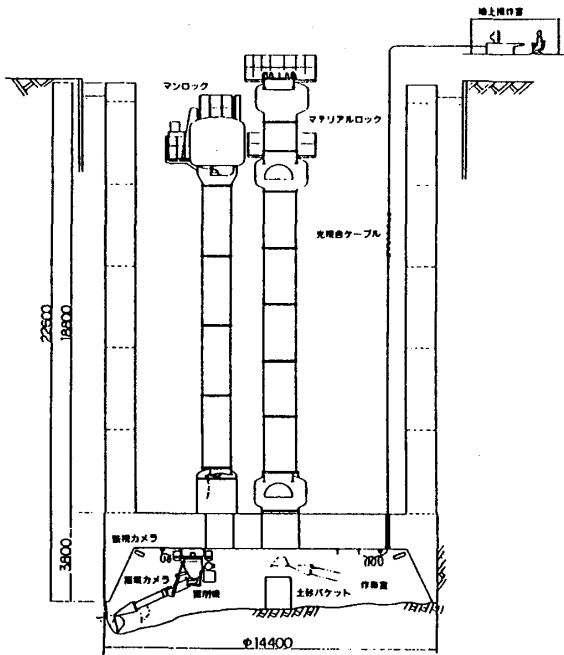


Fig. 2-4 Unmanned Excavation System of Pneumatic Caisson

なお、Photo.2・1 はリモートコントロールによる掘削機の稼働状況を示したものである。

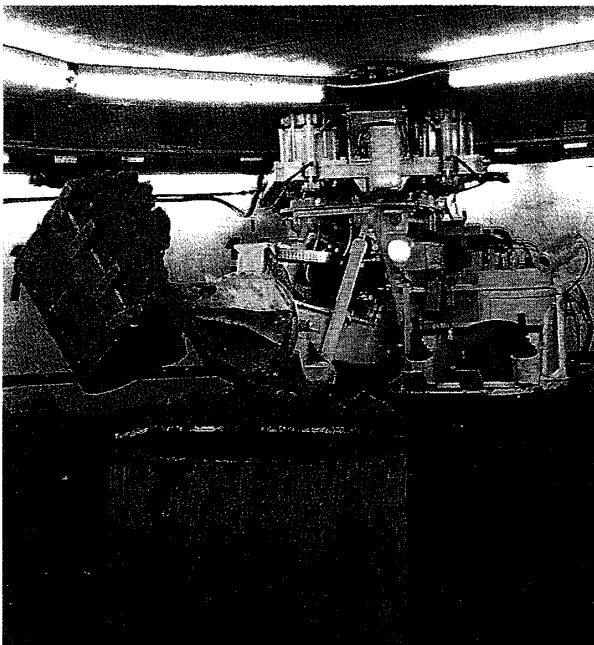


Photo. 2-1 Remote Control Excavation Machine

3. ニューマチックケーソンの工事管理法

ニューマチックケーソン工法は、高気圧下の作業をとまらるので、大気圧のもとでの作業とことなり、定められたルールにのっとりすべての作業をすすめてゆく必要がある。わが国にニューマチックケーソン工法が導入さ

れて以来、本工法による工事中の事故が数多く発生しており、とくに敗戦後15年を経過した時点でそのピークを示している。そのため労働省は労働安全衛生規則の関係条項を全面的に改正し、新たに「高気圧障害防止規則」を制定して事故の防止策を強く打ち出したのが1961年（昭和36年）3月であった。以来今日まで、「これは不可抗力であった」といわれる事故も発生件数が減少してきている。高気圧障害防止規則も現在では「高気圧作業安全衛生規則」と名称も変わり、より高度な観点から工事の管理すめられてきている。

高気圧下の作業は適正な圧縮空気の管理下で実施され、またこの作業にもなって発生する障害防止に極力つとめなければならない。

さらに、ニューマチックケーソン工法を用いて地下構造物を施工するにあたっては、圧縮空気の利用が不可欠であるので、施工中の圧縮空気の消費量を事前に推定し、コンプレッサーの諸元を設定しておく必要がある。

本章では上記の2項について現今ではどのように管理されているかについて述べる。

3-1 減圧症対策

ニューマチックケーソン工事における作業員は大気圧下での何倍かの圧力をうけるので、作業中に加圧および減圧にもなって各種の作用をうける。これらは高気圧下作業時に発生する障害を対象としているので、潜水作業によるものも包含して現在では「減圧症」といっている。

人間が高気圧下にあると、呼吸により肺を通して体内に溶解した空気は、不注意な減圧により、すぐに排除できず過飽和状態となり、やがて末梢血管や組織内で気泡を形成する。空気の組成中、窒素ガスの占める割合は78.1%であるので、主として窒素ガスの気泡せんそくによる血行障害や気泡の神経に対する圧迫などが原因で一連の症状を発生することになる。Robert Boyleは1670年にこれらのことを推定し、1880年にいたりPaul Bertが臨床実験によりこれらの事実を証明している。

土木工事にニューマチックケーソン工法がとり入れられて以来、減圧症は職業病として大きくとりあげられており、かの有名なブルックリン橋の工事を指揮したWashington A. Roeblingも強度の減圧症 (Bends) にかかり歩行不能者となったにもかかわらず、全力を傾注して工事完成につとめたことは著名である。

減圧症発生防止の対策として、原因が主として減圧にともなう血液や組織中での窒素ガスの気泡化であることから、これをできるだけ少なくするようにつとめればよく、すなわち減圧方法が合理的であることと、万一発生した場合の治療方法の適正さが重要である。ある報文などでは、気泡化の原因を炭酸ガスによるものと明記して

あるものも2、3あり¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾、これを信じて工事管理を行った技術者もあったと思えば、現在では隔世の感がする。

高気圧下作業に際しては、1937年(昭和12年)3月、内務省令41号が制定され、またはじめて行政の管理下に置かれるようになった。また、戦後1947年(昭和22年)には労働基準法にもとづく労働安全衛生規則が制定されるにおよび、ニューマチックケーソン工事における諸事故防止に以前にもましてつとめられるようになった。

戦後におけるわが国の産業発展はめざましく、とくに数次におよぶ道路の整備事業の実施によって、土木構造物も大型化し、構造上、施工上の諸条件がニューマチックケーソン工法の採用を余儀なくさせ、本工法の施工頻度が急激に増大した。それ以前は経験豊富な特定な施工業者が主体となって施工していたものが、こうした社会情勢のもとに、多くの未経験業者が工事受注を開始したために、各種の事故が漸増してきたことと、梨本らが活発な研究成果をあげたので、本章のはじめでものべたように「高気圧障害防止規則」が制定されるようになったのである。

1961年(昭和36年)3月に制定された「高気圧障害防止規則」は、それ以降ニューマチックケーソン工法の技術の進展、減圧症に関する著しい研究成果などがあったものの、一方では工事管理上の盲点による重大災害が発生しはじめたのを契機として、幾度か規則の改訂がなされた。さらにこの法規は、1977年(昭和52年)4月「高気圧作業安全衛生規則」と改称され今日におよんでいる。

人間が高気圧下で作業しようとする作業気圧はゲージ圧で4.0Kgf/m²とされているが、3.0Kgf/m²を超過すると作業時間が極度に低下し、作業能率の低下は勿論のこと減圧症発生の頻度も著しく高くなる。このため、地下水低下工法の適用が可能である場合は、作業気圧を3.0kgf/m²以下におさえるために、こうした補助工法に依存している。

ケーソンの施工位置によっては、地下水低下工法を利用するのが不可能な場合も当然考えられ、こうした悪条件のもとでも、沈下掘削作業を遂行しなければならない場合、無人化の導入は不可欠であるが、それでも施工機械の修理点検や作業室外への施工諸機械の撤去作業の際は作業員が作業室への入室を余儀なくさせることは必然である。

減圧症の主原因が空気中の窒素ガスであり、作業気圧が高いほど、また作業時間が長いほど、これに比例して、人体の組織に窒素ガスが多量に溶解してゆく。ために、高気圧下の作業を終えた場合、減圧方法の不用意により、窒素ガスの組織中での気泡化が通常より多くすすむことになる。

こうした観点から、空気が混合気体であり、この組成中で78.1%ある窒素ガスはある程度減量されれば減圧症

を軽減できる点に着目して、課題の克服につとめようとした。

現今では呼吸ガスの1部をヘリウムガス(He)で代替した混合ガスを造り、高圧作業に対処する方法が研究され、実験段階で好成果をもたらしたので、日本道路公団名港西大橋の工事において実用されるようになった。この状況を示めしたのがFig.3・1である。

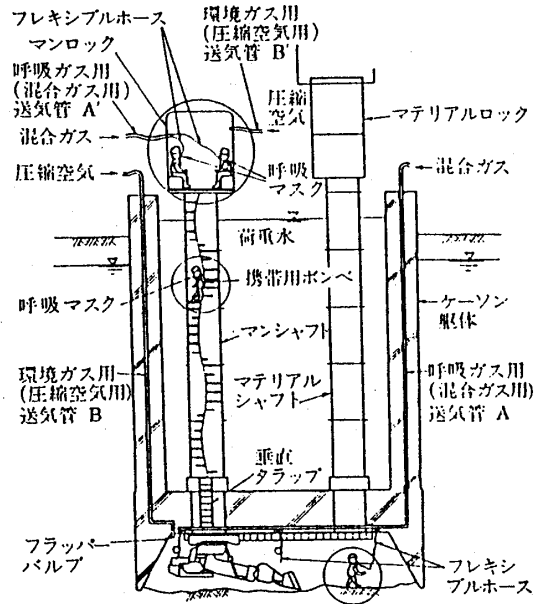


Fig.3・1 Remote Control Caisson using He mixed Gass

3-2 ニューマチックケーソン工事における圧縮空気の消費量の推定方法

Brenneckeは、ニューマチックケーソン工事における圧縮空気の送気量の推定方法を時間あたりの量で式(3.1)のように示している¹³⁾。また、作業員一人あたり0.5kgf/cm²の圧力下では、少くとも20m³/h、0.5kgf/cm²以上では30m³/hの新鮮な空気を送気して、作業員の呼吸による炭酸ガス量の増大防止につとめるようになっている。これらはその数値こそことなれ、その考え方に現在でも変わらない。

$$Q = (\alpha F + \beta U)(1 + H/10.333) \quad (3.1)$$

式中 F : 作業室内壁および天井スラブの総面積 m²

H : 2~3m高く見積った水頭高 m

U : 刃口周長 m

α : 作業室の使用材料(コンクリート、鋼板)による係数

β : 刃先部からの漏気量 m³/h/m

式(3.1)から得られた推定値、エアロップのドア閉閉にともなう空気の消費量、送気管やシャフトの継手部からの漏気量および作業員の保健上換気に必要な空気量などを勘案して、総所要空気量を求め、これによってエアプラントの規模(コンプレッサ台数)がきめられる。式

Tab.3・1 The Proposal of estimation method of compressed air consumption

算定項目	算定方法													
①作業気圧、送気管の圧力降下、圧縮比など	$p = p_w + p_l (\text{kgf/cm}^2)$ $\lambda = \frac{1.033 + p}{1.033}$ λ : 空気の圧縮比	p : 送気本管圧, p_w : 作業気圧, p_l : 送気管の圧力降下 (通常0.5kg/cm ²) $p_l \geq (S, F) \cdot 1.21 \cdot \frac{L \cdot Q^2}{(1.033 + p) \cdot d^{5.31}}$ 参照 $S \cdot F$: 1.5~2.0, L : 換算送気管延長(m) (バルブは6m/箇所) Q : 送気管の自由空気量(m ³ /min), d : 送気管の内径(cm)												
②送気管の継手からの漏出圧縮空気量 $n_1 q_1$	$q_1 = \begin{cases} \phi 100\text{mm送気管} & 0.08\text{m}^3/\text{min}/100\text{m} \\ \phi 200\text{mm送気管} & 0.16\text{m}^3/\text{min}/100\text{m} \end{cases}$ n_1 : 送気管延長/100													
③エアロック、シャフトの継手からの漏出圧縮空気量 $n_2 q_2$	$q_2 = 0.04\text{m}^3/\text{min}/\text{箇所}$ n_2 : 継手の箇所数													
④掘削作業中刃先から漏出する圧縮空気量 q_3	$q_3 = \beta \cdot S \text{ m}^3/\text{min}$ β : 表による S : ケーソン刃口の外周長(m)	<table border="1"> <caption>β の概略値</caption> <thead> <tr> <th>土質</th> <th>β m³/min・m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>シルト・粘土</td> <td>0.02</td> </tr> <tr> <td>細砂</td> <td>0.05</td> </tr> <tr> <td>粗砂</td> <td>0.08</td> </tr> <tr> <td>砂 礫</td> <td>0.10</td> </tr> <tr> <td>玉石・岩</td> <td>0.15</td> </tr> </tbody> </table>	土質	β m ³ /min・m	シルト・粘土	0.02	細砂	0.05	粗砂	0.08	砂 礫	0.10	玉石・岩	0.15
土質	β m ³ /min・m													
シルト・粘土	0.02													
細砂	0.05													
粗砂	0.08													
砂 礫	0.10													
玉石・岩	0.15													
⑤エアロックのドア開閉に伴う損失圧縮空気量 $n_4 q_4$	$q_4 = \frac{V_v}{t} \text{ m}^3/\text{min}$ (マンロックは含めない)	V_v : エアロック1基あたりの気密室容積(m ³) t : ドア開閉の平均間隔(min) n_4 : エアロックの基数												
⑥ワイヤボックスからの漏出圧縮空気量 $n_5 q_5$	$q_5 = 0.5\text{m}^3/\text{min}$ n_5 : ワイヤボックスの孔数													
⑦作業員の換気に必要な圧縮空気量 q_6	$q_6 = \frac{0.67M}{\lambda} \text{ m}^3/\text{min}$ M : 作業員数													
⑧所要自由空気量 Q	$q_3 > q_6$ の場合 $Q = \lambda (n_1 q_1 + n_2 q_2 + q_3 + n_4 q_4 + n_5 q_5) \text{ m}^3/\text{min}$ $q_3 < q_6$ の場合 $Q = \lambda (n_1 q_1 + n_2 q_2 + q_6) \text{ m}^3/\text{min}$ 掘削作業休止の場合 $Q = \lambda (n_1 q_1 + n_2 q_2) \text{ m}^3/\text{min}$													

(3.1)は、わが国で多くの技術者により修整が加えられ近年におよんでいたが、個々の方法が偏った解釈のもとで誤った方向に展開され、理解に苦しむものも提案されてきた。筆者は、圧縮空気消費量推定方法の原点にたち、Tab.3・1の方式を提案したが¹⁰⁾、標準的なニューマチックケーソン工事では、実状とほぼ近いものであることが実証され、建設省の直轄工事や都道府県の工事で採用されるようになり、工事管理合理化の一助となっている。

近年、地下構造物の建設にあたり、ニューマチックケーソン工法が多岐にわたって活用されるようになった。本工法の長年月にわたる施工技術の進歩はみるべきものがあり、とくに設計法や工事管理法においては著しいものがみられている。

欧米諸国から導入された本工法が今日のような隆盛をみせることは、初期の工事を指導した外国人技術者達はもちろん、石橋をたたいて渡る思いで工事に従事した諸先輩達は夢想だにしまかったに相違ない。外国から導入した工法で、これほどわが国に定着したものは、その件数にして如何ほどあるのだろうか。特に深海の潜水作業用に主として用いられるヘリウム混合ガスが建設分野へ活用されるようになり、ニューマチックケーソン工法に

よる地下構造物の建設には明るい前途がひらかれているものと確信する。

参考文献

- 1) 平川脩士：わが国におけるニューマチックケーソン工法の歴史(その1)、日本土木史研究発表会論文集、土木学会、pp.52-54、昭和57年6月
- 2) 平川脩士：同上(その2)、pp.215-220、昭和62年6月
- 3) 平川脩士：同上(その3)、pp.255-262、平成元年6月
- 4) 平川脩士・越賀正隆：わが国におけるニューマチックケーソン工法発展の歴史的背景に関する考察、福山大学工学部紀要第13号、pp.69-85、1991年3月
- 5) 日本道路協会：「道路橋下部構造設計指針・ケーソン基礎の設計篇」、丸善、昭和45年3月
- 6) 日本道路協会：「道路橋示方書・同解説、IV下部構造篇」、丸善、昭和55年5月
- 7) 平川脩士、他3名：ケーソンの自効設計、橋梁と基礎、pp.74-79、pp.1-6、1974年9月
- 8) 平川脩士、他3名：ニューマチックケーソン基礎自

動設計の合理化に関する研究、土木学会論文報告集
第257号、pp.61-73、1977年1月

- 9) 平川脩士、越賀正隆：わが国におけるニューマチックケーソン工法発展の歴史的背景に関する考察、福
山大学工学部紀要第13号、pp.72-77、1991年3月
- 10) 大蔵省臨時税関工事部：「横浜港税関海面埋立工事
報告」、pp.463、明治39年3月
- 11) 山田亀治：鴨緑江橋津工事報告、帝国鉄道協会報告
第14巻第1号、pp.142、大正2年2月
- 12) 山崎匡輔：潜函病に就いて、土木学会誌第27巻第5
号、pp.3、昭和16年5月
- 13) L. Brennecke, E. Lohmeyer：「Der Grundbau」,
dritter band, Verlag von Wilhelm Ernst &
Sohn, pp.330-331, 1934
- 14) 平川脩士：ニューマチックケーソン工法における所
要空気量の算定方法、土木施工、Vol.127、No.14、
pp.76-82、1986年11月