

(18)

ケーソンの歴史

1. まえおき

過去において、ニューマチックケーソン工法の歴史に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にかえて記述されているものが多くみつけられる。かくいう筆者もそのうちの1人であり、10数年前に長崎武雄氏の指摘をうけて、文献の再確認を行った経験がある。以来適当な機会をとらえて、本工法に関する正しい変遷についてのとりまとめを行いたいと考えていた。

本文は、わが国のニューマチックケーソン工法の歴史とを編にのけてとりまとめたものの第1編であり、「その1」として本工法の概観のものについて述べたものである。次編以降において、ニューマチックケーソン工法特有の施工設備、設計法および工事管理法などについても、工法の発展とともにこれらの歴史を述べてゆきたい。

2. ダイビングベル、泳気鐘のよがに潜水函

コップ状の筒を逆にして水中に静かに沈めてゆくと、筒内の空気はコップが沈むにつれて圧縮され、この空気が水の浸水を防ぐように抵抗する。沈めた水深に等しい圧縮空気を送ると浸水はコップ下面で防止することになる。この原理を利用して1250年頃にヨーロッパで釣籠式の潜水機を用い、水中作業を行ったとされている。

1778年に英国のJ・スミートンがこの方法を取り入れ、図-1のような潜水機を用い、橋梁の基礎工事をやっている。この潜水機をダイビングベルといっていた。以来ヨーロッパでは水中の土木工事に多用されようになり、レンニーによって改良が加えられ、図-2のようなダイビングベルによる水中工事が施された。

ダイビングベルはオランダ語でドイルクルコロッツ(Duikers Kloek)といわれ、1860年(万延元年)長崎製鉄所の岸壁工事において、オランダの技術者ハルズスの指導で利用された。当時はこのレンニータイプのダイビングベルを「泳気鐘」と呼んでおり、これがわが国における圧気移動式ケーソン工法のはじまりである。

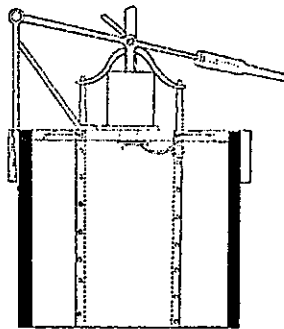


図-1 スミートンのダイビングベル

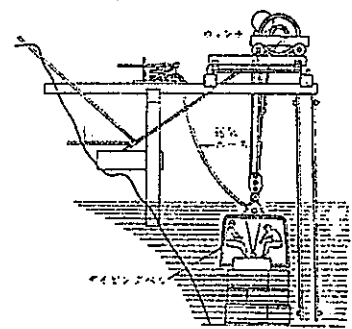


図-2 レンニーのダイビングベルと水中工事

長崎製鉄所は現在の三菱重工業長崎造船所の前身であり、この建設工事に因りて長崎の調査を行っている。当時の「泳気鐘」は長崎オランダ商館跡に図-3のように存置されている。

1859年(安政6年)に開港された横浜港は、明治22年(明治28年(1895年~1905年))の間に第1期視察海面埋立工事が実施され、このときに図-4のような移動式ケーソンが用いられている。当時このケーソンの名称を「潜水函」と呼んでいた。

この移動式ケーソンは岸壁の基礎地盤のなすし作業と基礎コンクリートの打込み用に用いられ、平面寸法は7.2m x 10.8mの長方形で、高さ4.1m、重量は247tの鋼製であり、その施工状況は図



図-3 泳気鐘

- 5 に示す通りである。

筒状の枠を水中に沈下せしめゆく途上において、圧縮空気を利用したのは1881年、M. トリーガーであり、この際の筒状の枠は基礎工事用のものでなく、炭坑の立て坑に使用したものである。この工事において彼はエアロツフを説明してなく、以後欧米で橋梁基礎にこうした工法が用いられるようになった。

横浜港の岸壁工事における「潜水函」では欧州の橋梁基礎ケーソン工事で多用されたと同形式のエアロツフを用いており、この工事におけるエアロツフの他の工事用設備は石川島造船所(石川島造船所)で製作された。

長崎製鉄所岸壁工事における「泳気鏡」と本工事における「潜水函」の相互関連は全くない。本工事は丹羽鋤考土木課長、坂出鳴海教授として施工しており、古布久成、中山彦三郎の両博士が監工として関係している。

「潜水函」による水中工事は明治25年7月に着手し、明治28年に完了しているが、「潜水函」を利用して工事を行ったのは580日であった。

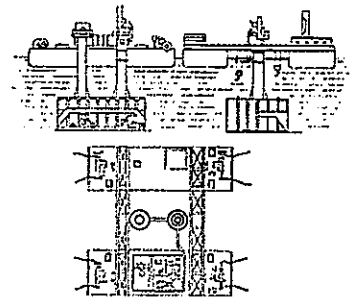


図-4 横浜港岸壁工事における移動式ケーソン(潜水函)

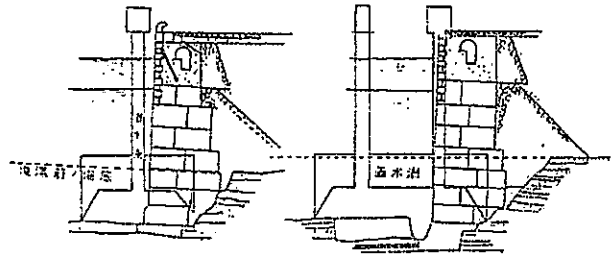


図-5 移動式ケーソン(潜水函) による水中工中実態状況

### 3. 橋梁下部構造としての潜水函

前節において述べたように、エアロツフがM. トリーガーにより発明され、ヨーロッパ北部でニューマチックケーソン工法が利用されることになった。その代表的なものとしてヨーロッパではスウェーデンのフォース橋、アメリカのブルックリン橋で、いずれも1880年前後に施工された。

エアロツフの構造はヨーロッパ形式のものと同形式のものに分かれ、現在でもこれらが踏襲されている。

これらのエアロツフのうちヨーロッパ形式のものから以下に述べておく。明治24年10月に竣工された鴨緑江橋梁に用いられ、横浜港岸壁工事同様石川島造船所で製作された。

明治27・8年戦役(日露戦争)勲受後、京城(現在のソウル)・義州(北朝鮮)間の鉄道水急線が、戦争終結後におけるわが国の満洲(現在の中国東北部)への陸路運送を容易にするため、国境を流れる鴨緑江の橋梁架設が急務となった。鴨緑江の対岸は当時清国領であったため、工事の実施には存続の難問題があった。ともかく左岸側(北朝鮮側)から橋梁工事にかかると決定され、明治22年(1909年)に着工された。

この橋梁は橋長929m(2,098呎)の歩道併設12連単線鉄道トラス橋であり、舟運のために旋回橋を設置している。橋脚基礎12基にすべてニューマチックケーソン工法が採用されているが、当時は「潜水函」という用語が使用されている。

橋梁完成後、山田通治は帝國鉄道協会報第14巻第1号(1910)に「鴨緑江橋梁は其の延長3,998呎にして必ずしも其の長文存の点に於て尤も稱するに足らずと雖水深、潮流干満、洪水及氷害其の他天然の障害の異常に非ざるもの多く且潜水函沈下及閉鎖橋架設等の工事は我國に於ける嚆矢にして朝鮮鉄道中の最難工事にして其の功績は帝國工業界の至難事業たるを以て本架橋計畫の當時は世人皆其の能力を疑ひ其の成否を危むるに非ざらん。然るも本橋梁は朝鮮運送の要路に當り欧亚交通の利便を定むるもの存るに依り本工事の成否は實に帝國の技術能力を世界に示すに足ると云ふも敢て過言に非ざるなり。」(原文どおり)と述べているが、当時の技術者の意気込みが窺われる。

また「潜水函」の利用成果について「(参考)本工事施行期間中嚴冬結氷期と盛夏降雨期とを除去し其の有効

作業期間僅に1年々箇月に過ぎず而も其の期間中約々箇月間は清国領土に着手すること能はざりし事に想ひ到れば誰か其の時日の短少なるに一撃を喫せざるものあらんや蓋し是れ主として潜水函使用機械應用の效果大なりしに起因せるものなり……」(原文どおり)と述べている。

現時臭てはこの程度のニューマチックケーソン基礎の工事はとして難工事とはいえないが、当時としてはすべてが未経験の新工法であったので、施工にあつての労苦は容易なものとあつたと考えらる。

この工事はその後ニューマチックケーソン工法採用に全く無関係でなく次第の隅田川橋梁工事に運ばれつた。 (平山復二郎著:「地産に基礎を掘る」より)

#### 4. 隅田川橋梁工事は昭和初期にいたるニューマチックケーソン

鴨綠江橋梁工事に於いて、ニューマチックケーソン工法が多大な実績をおさめているのに、この工法が関東大震災後の首都復興事業まで採用されたのは理由は詳みでないが、平山復二郎は「まさか、この工法を有利に採用出来る工事はなかつたというわけではありませぬ。これには、この工事を外地の朝鮮で施行されたということもありなるとして、つまりはこういう機械利用による施工を、積極的に実行しようという気運がまだ熱さなかつたという外ないと思ひます。」<sup>1)</sup>(原文どおり)と述べており、当時から土木工事の機械化を企図して、先進諸外国からの技術導入に熱意をもやっていた大田用造などは、橋梁基礎工事でトンネル工事に圧縮空気を利用する機会を得ていたのは事実である。

大正12年(1923年)9月1日に発生した関東大地震により大被害を受けた東京を復興すため、当時の内務省の外局として復興院(後の復興局)が設置され、首都の復興を担うことになった。この事業の一環として隅田川の橋梁の架設が計画され、橋梁基礎にニューマチックケーソン工法を採用されたことになった。

ヨーロッパではじめてとり入られた、米國において盛に利用されたニューマチックケーソン工法は、エアロツラを改良することによつて高層ビル基礎としても利用されるようになっており、この工法を視察して帰国した白石多士良の意見具申によつて、本橋梁工事は米國形式の圧気設備を採用されるようになる。もつとも、本工事における施工設備の採用決定にいたるまでに、過去鴨綠江橋梁に於いて経験のあるにもかかわらず、その互論もあつたが、大田用造の要請によつて、ニューヨーク・ファウンデーション・カンパニーから必要の施工機械一式の購入と指導技術者3名の派遣依頼がなされた。

かくして東日米人の指導のもとで永代橋、清洲橋などの基礎はニューマチックケーソン工法によつて施工されたことになり、この工事の完成は、大正14年に、本工法はも早東京電灯(現在の東京電力)鶴見火力発電所の発電機の基礎として採用されている。

隅田川の橋梁工事に従事し、本工法を修得した技術者たちは引続いて國鉄の本管川、揖斐川、新潟県の石川、大坂府の十三、三宮線の伊勢石などの橋梁、さらには滿洲國(中国東北部)における橋梁の建設に従事しつたが完成させて中々、昭和初期における本工法発展の基礎を築いてゆく。

本文は、わが國におけるニューマチックケーソン工法について、その導入期から擴張期までの変遷ととりよめたものである。文中において各工事概要を述べたのは、次編以降で視察をみた考察をしようとする所には、これらと関連をもたせて工事概要を述べようとしたのみである。本編を終るにあたり、各種の資料を提供していただいた岡本東一郎氏ならびに島崎武雄氏に謝意を申しあげる。

#### (参考文献)

- 1) 島崎武雄: 空圧ケーソンのはじめとつりかた, 土木建設業報 40-2, 410.
- 2) 平山復二郎: 地産に基礎を掘る, 白石基礎工事(録)昭和30年7月
- 3) 同上
- 4) 三菱造船(株): 創業百年の長崎造船所, 114, 121, 昭和32年10月
- 5) 文庫C 1) と同じ
- 6) 島崎武雄: 著者の長崎製鉄所建設工事に於ける土木技術, 津26回土木学会年次学術講演会, 11, 203~206, 1971年10月
- 7) 大蔵省臨時視察工部局: 横濱港視察團海面埋立工事報告, 明治39年3月
- 8) Jacoby & Davis: Foundations of Bridges and Buildings, McGraw-Hill, 4, 11, 1911
- 9) 同上 10) 大田用造: 鴨綠江橋梁工事報告, 帝國建設協会報 19, 15, 1914 ~ 15, 大正24年, 11) 平山復二郎: 地産に基礎を掘る, 白石基礎工事(録), 4, 30, 昭和30年7月

## 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2)

福山大学 正会員 平川 備士

### Historical Study of Pneumatic Caisson Method in Japan

by S. Hirakawa

#### 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88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いる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、初期の時代に輸入された施工機械をわが国独自で改良し、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。

本文は、わが国におけるニューマチックケーソン工法の歴史を3編にわけ、第1編<sup>1)</sup>は工法導入とその揺籃期のもの、第2編ではエアロック、シャフトなどの改良過程について、さらに第3編では設計法ならびに工事管理法などについてとりまとめたものである。(基礎工、施工法、ニューマチックケーソン工法)

#### 1. はじめに

ニューマチックケーソン工法によって地下構造物を施工する場合、作業室に圧縮空気を送り、ある深さにおける作業気圧を、作業員や土砂バケットの出入があっても、一定に保持するためには、エアロックならびにシャフトが必要である。第1編(その1)でも述べたように、M. Triegerが1841年に自ら発明したエアロックによって炭坑のたて坑の工事を施工している。しかしながらニューマチックケーソン工法そのものの特許は、1830年にsir Thomas Cochraneが特許をとり、エアロックも考案したようであるが、彼は一度もこれを使用しなかったらしい<sup>2)</sup>。1841年以降欧米で盛んに利用されたニューマチックケーソン工事では、施工の当事者が独自のエアロックを考案して施工している。

わが国で使用されてきたエアロックは、明治時代後半のヨーロッパ系統のものと、大正末期から使用されてきているアメリカ系統のものがあるが、本編ではこれらの構造と、現在にいたる改良過程などについて述べる。

#### 2. 19世紀後半のエアロックについて

ニューマチックケーソン工法について記述されている海外の著書には、施工事例によって構造が異なった

エアロックが紹介されている。たとえば、A. Brinton Carson は1860年代のものとして、図-1<sup>3)</sup>のようなエアロックを、またF. D. C. Henry はニューマチックケーソンの一般図として図-2<sup>4)</sup>のようなエアロックを紹介している。これらのエアロックは、いづれも作業員出入用と排土バケット専用のドアが別個に設備されており、英国では主としてこの系統のものが使用されていたようである。一方、フランスで使用されたものには、図-3、図-4のように作業員出入用と排土バケット用を別個にしたエアロックを考案している。

このように欧米各地で施工されたニューマチックケーソンでは、さきにも述べたように、施工業者が、その都度施工条件に合わせて、異なったエアロックを使用しているのが見られる。しかし共通していえることは、排土用エアロックの気密室容積をできるだけ少なくして、ドア開閉による圧縮空気の消費量を最小限におさえようとしている点である。このことは、Brennecke,

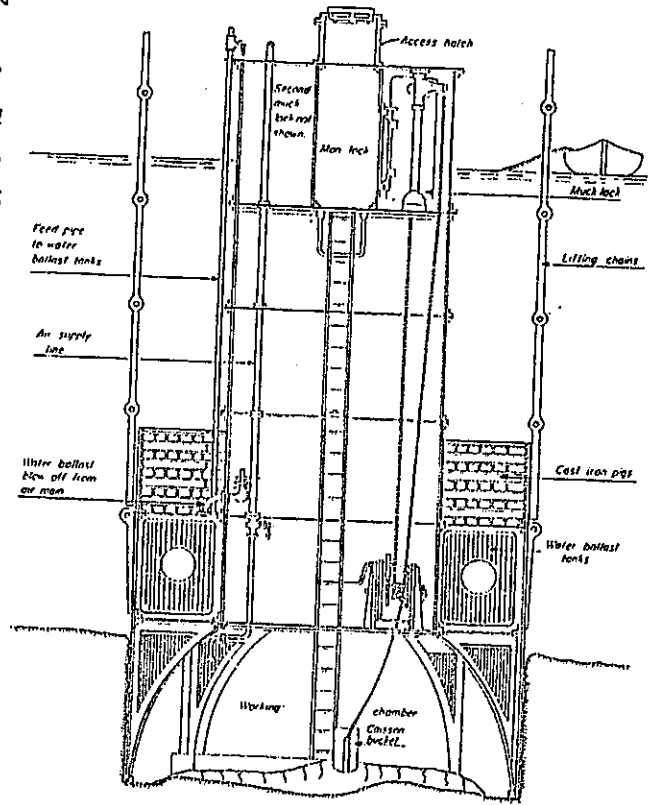


図-1 1860年代のニューマチックケーソン

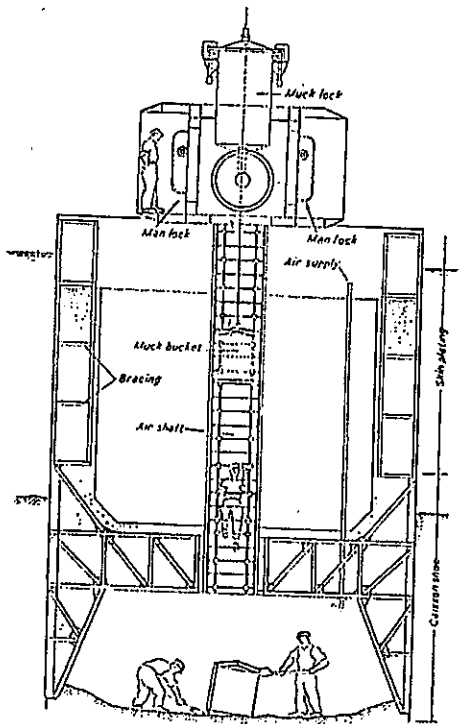


図-2 F. D. C. Henry が示したニューマチックケーソンの一般図

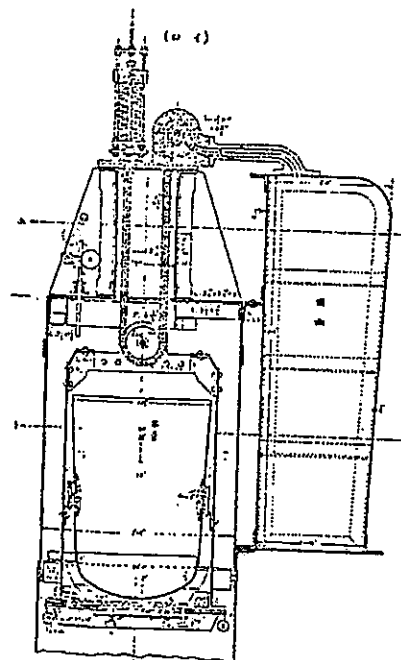


図-3 明治時代のエアロック (排土用)

Lohmeyer<sup>5)</sup>も指摘しており、当時の空気圧縮機（エアコンプレッサー）の容量に限度があったことから肯定できるものである。ただ、この系統のエアロックは重量が大きくなるため、醸装工のときに揚重能力の大きいクレーンが必要となる。

図-3、図-4は1899年（明治32年）に着工された横浜港岸壁工事における移動式ケーソン<sup>6)</sup>、ならびに1909年（明治42年）に着工された鴨緑江鉄道橋下部工の基礎ケーソン<sup>7)</sup>に用いられたエアロックであり、排土用と作業員出入用に分離することによって、ロック重量を軽減している。

このタイプのエアロックは、バリのMirabeau橋橋脚基礎ケーソンに使用されており、Zschokke・Terrierの考案によるものであって、排土バケットの昇降にチェーンを用いているのが特徴である。

わが国において、上記両工事に用いられたこのタイプのエアロックは、石川島造船所（現石川島播磨重工業）において制作されており、当時の所長であった渡辺嘉一<sup>8)</sup>が、スコットランドのフォース橋の工事経験があったことから、各種のエアロックの適否が検討された結果、このタイプのエアロックが採用さ

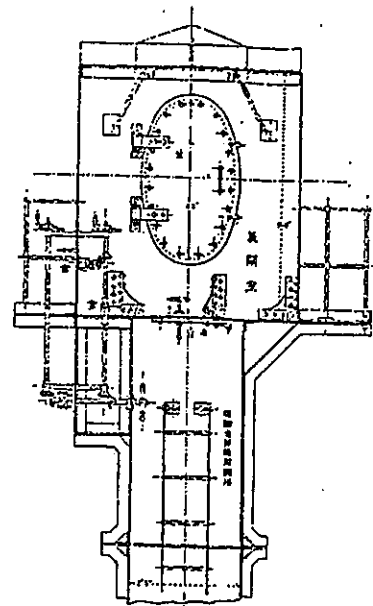


図-4 明治時代のエアロック  
（作業員専用）

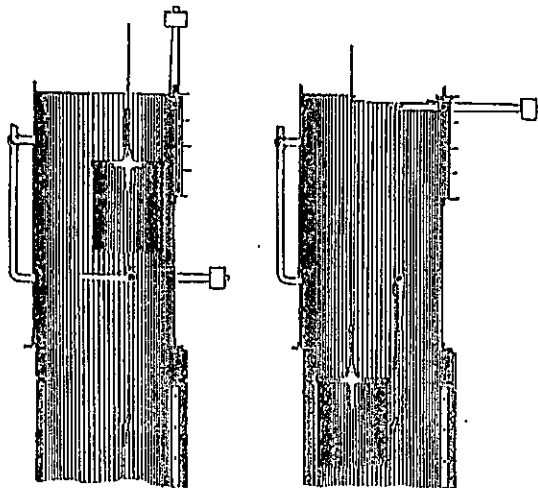


図-5 Moranのエアロック

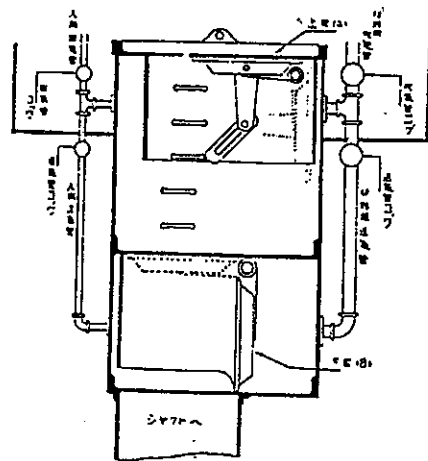


図-6 大正末期のエアロック

れたものとする。

これらのエアロックは1910年（明治43年）に、鴨緑江鉄道橋下部工事が完了して以降全く使用されていない。

### 3. 1924年（大正13年）以降のエアロックについて

前編において述べたように、1924年（大正13年）に着工された隅田川の橋梁架設工事において、その下部工にニューマチックケーソン工法が採用されるのであるが、「鴨緑江鉄道橋において経験があるにもかかわらず」との反論がおさえられ、大田円造の英断によって、New York Foundation Co. から、施工機械一式の購入と、3名の技術者を招聘して下部工のニューマチックケーソン基礎が施工開始されるのである。

欧米において、19世紀後期から橋梁下部工に主として採用されたニューマチックケーソン工法は、19世紀末から20世紀初頭にかけて、ニューヨークでビルの基礎工として盛んに用いられるようになる。これを主として施工したのがNewyork Foundation Co.で、基礎外径や現場の施工条件に合せたエアロックが考案されている。

ビルの基礎は、基礎外径が橋梁基礎に比較して小であるので、そこで考案されたのが図-5に示すMoranのエアロック<sup>9)</sup>である。このタイプは現在のものと類似した構造をしており、Singer Buildingの工事に用いられ、排土用と作業員出入用が兼用されているのが前記のものと相違している。

隅田川の橋梁基礎ケーソンでは、前述のようにこの会社の製造になるエアロックを使用することになったので、このタイプの改良型となったようである。

橋梁の基礎ケーソンはビルの基礎と異なって、一回の排土量を大きくしなければならぬうえ、作業員も多人数入室をさせる必要があり、これに合せてわが国にもたらされたのが図-6<sup>10)</sup>に示すようなエアロックである。

以来現在まで、標準タイプのエアロックは、これと類似した構造がとられている。

隅田川の橋梁諸工事は、復興局の直轄工事であり、エアロックやシャフトを含む施工機械類の所管は当然当局にあり、しばらくの間この形態が続けられる。

#### 4. エアロックならびにシャフトの改良について

隅田川での橋梁下部工にニューマチックケーソン工法が採用され、その完工前の1926年(大正15年)8月には国鉄関西線の本巣・揖斐両鉄道橋の工事に本工法が用いられたが、エアロックが不足したため、この工事用として10基のエアロックが米国から購入されている。

以後1927年(昭和2年)の新潟県万代橋のニューマチックケーソン工

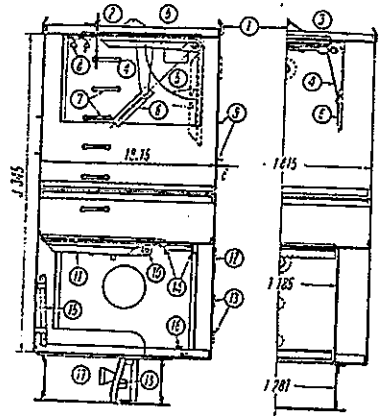


図-7 現在使用されているエアロック

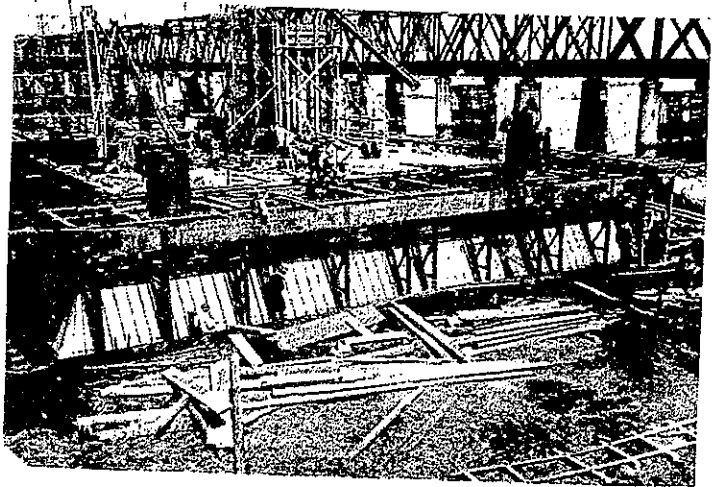


図-8 十三橋ニューマチックケーソンのシャフト埋込み

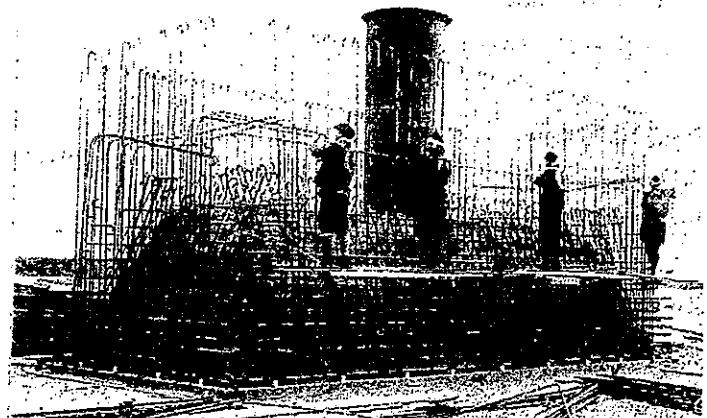


図-9 吉野川ニューマチックケーソンのシャフト埋込み



事までは直轄形態が続くが、1929年以降の橋梁工事では、建設業者による請負形態に移行してくる。しかしながら、ニューマチックケーソン工事用の主要施工機械類は、業者に貸与されており、その借入れ先は復興局ならびに鉄道省（旧国鉄）となっていた。当時の施工業者は、間組、銭高組、大林組の3社であったが、1930年（昭和5年）に東京潜函基礎工業（1940年解散）、1933年（昭和8年）に白石基礎工業（現株式会社白石）が専門業者として、それぞれ発足するにおよび、請負形態が、さらに専門業者への下請もしくは直接受注が主流となってきた。

隅田川や万代橋のニューマチックケーソン工事に従事した多くの技術者は、前記の建設業者や専門業者に転出し、自ら体得した施工技術を駆使して、多くの施工業績を残している。

専門業者が誕生して以来、従来使用していたエアロックやシャフトに、これらの技術者が改良を加えることになる。

#### (1) スペシャルシャフトの考案

わが国において、本格的なニューマチックケーソン工法が採用された隅田川の橋梁工事に続き、多くの工事に従事してきた技術者で、現在でも健在である方々は非常に少ない。なかでも直接工事に接したり、機械類の改良に当たってきた技術者は、筆者の知る限りでは、2～3名にすぎぬ状態である。

筆者は古い工事録写真のなかから、図-8<sup>1)</sup> や図-9<sup>2)</sup> のように作業室天井スラブに直接シャフトが埋込まれ、コンクリートに埋込まれる状態を発見した。現在では図-10のように、スペシャルシャフトを作業室天井スラブ上に置いて、その上にシャフトを取付けるのが一般的であるので奇異に感じていた。

スペシャルシャフトの考案経過は、「施工機械の完全転用を常に考えているのに、ケーソン1基あたり少くとも1本のシャフトを損失してゆくのは如何にも惜しい、何とかならないだろうか。しかも、その上のシャフトを撤去してゆくためには、ケーソン内部の湛水を作業室近くまで排除しなければならない。さらに非常な危険作業をとまなう。」といった要望から、1933年（昭和8年）9月から施工された、大阪駅西高架線補強工事（旧鉄道省発注・現清水建設から旧白石基礎工業が下請施工）において、大坪薫美氏<sup>3)</sup> が機械担当者として考案されたのが現在のスペシャルシャフトである。

当時は「専門業者でもあるから、特許まで取得する必要もなからう」との上司の判断があったようで、以来各施工業者間でも使用されるようになった。

#### (2) エアロックの分割

初期に米国から購入されたエアロックの寸法は内径約1.82m、全高3.88m（ショートセクション部を含む）で重量約5.4tのものであり、これを資材倉庫から現場に輸送するにあたって、しばしば問題が生じたようである。また、建築基礎ケーソンの場合は、揚重機の移動範囲に限度があるため、艀装作業に障害をきたすこともあり、担当者は非常に苦慮したと聞く。

たまたま、1935年（昭和10年）10月に着工された、東京放送会館基礎工事において、これに従事した白石幸三郎氏<sup>4)</sup> が、こうした問題に直面し、エアロックを図-11に示すように、上下2分割する案を

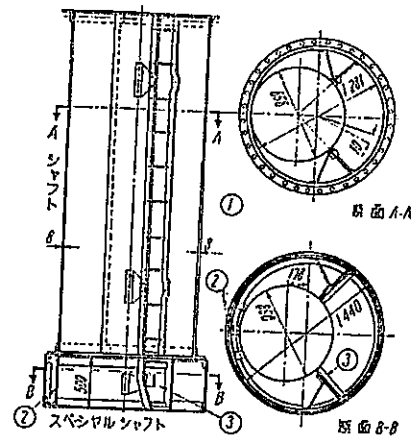


図-10 現在用いられているスペシャルシャフトとシャフト

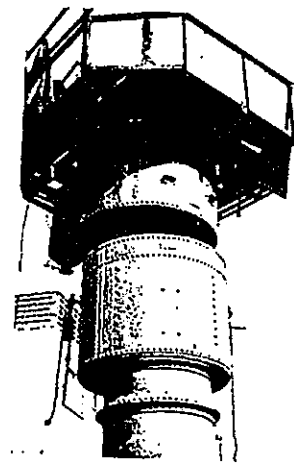


図-11 上下分割されたエアロック

考え、これを試作したところ、各種諸問題の解決に大きく寄与できた。以来前記白石基礎工業（現株式会社白石）においては、新たにエアロックを購入するにあたり、上下2分割できるものを製作するようになった。このように、ニューマチックケーソン工法が、わが国に定着してゆくにしたがって、各種の施工機械に対する改良がなされてゆく。

## 5. むすび

1924年（大正13年）に隅田川の橋梁下部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、今日まで、関係施工機械の改良件数は数知れないものがある。現今では、エアロックやシャフトにとどまらず、作業室内の省力化や高圧下の作業を最小限にとどめようとする方策も試験段階の域を脱し、さらにまた、無人化への研究も着々とすすめられている。

本編では、エアロックやシャフトを中心に、わが国におけるニューマチックケーソン工法の、初期の時代におけるものについてのべた。

本文でとりあげた、エアロックやシャフトの改良については、これらが現在ではごく一般化されているため、当時の状況があまり知られていない。筆者は、現在健在である直接の関係者に接し、こうした改良過程について貴重な知識をえることができた。次編（その3）では設計法ならびに工事管理方法などについて、こうした知られざる事項をも含めてとりまとめてみたい。

## 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, 第2回日本土木史研究発表会論文集, 土木学会, p.52-54, 昭和57年6月
- 2) A. Brinton Carson, 「Foundation Construction」, McGraw-Hill, p.338, 1965
- 3) 同 上, p.341
- 4) F. D. C. Henry, 「The Design and Construction of Engineering Foundation」, E & F. N. Spon, p.328, 1956
- 5) L. Brennecke, E. Lohmeyer, 「Der Grundbau」, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, s.330-331, 1934
- 6) 「横浜港税関海面埋立工事報告」, 大蔵省臨時税関工事部編, 第11図, 明治39年3月
- 7) 山田 亀治, 「鴨緑江橋工事報告」, 帝国鉄道協会報第14巻第1号, 付図, 大正2年2月
- 8) 三浦 基弘, フォース橋と渡辺嘉一, 第2回日本土木史研究発表会論文集, 土木学会, p.48-51, 昭和57年6月
- 9) Jacoby & Davis, 「Foundation of Bridges and Buildings」, McGraw-Hill, p.372, 1941
- 10) 平山 復二郎, 「地底に基礎を掘る」, パシフィックコンサルタンツ(株), 付第二図, 昭和30年7月
- 11) 「十三橋潜函工事報告書」, 大阪府十三工営所, 工事写真, 昭和5年8月
- 12) 「高德線吉野川橋橋梁基礎潜函工事並に構桁架設工事誌」, 鉄道省岡山建設事務所, 工事写真, 昭和10年8月
- 13), 14) 平山 復二郎, 「地底に基礎を掘る」, パシフィックコンサルタンツ(株), p.42, 昭和30年7月

## 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3)

福山大学 正会員 平川 脩士

### Historical Study of Pneumatic Caisson Method in Japan (Part 3)

by S. Hirakawa

#### 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90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いる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、初期の時代に輸入された施工機械をわが国独自で改良し、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ろうか。

本文は、わが国におけるニューマチックケーソン工法の歴史を3編にわけ、第1編<sup>1)</sup>は工法導入とその揺籃期のもの、第2編<sup>2)</sup>ではエアロック、シャフトなどの改良過程について、さらに本第3編では設計法ならびに工事管理法などについてとりまとめたものである。(構造物、施工法、ニューマチックケーソン工法)

#### 1. はじめに

わが国において、ニューマチックケーソン工法が橋梁の基礎としてはじめて採用されたのは、1909年(明治42年)北朝鮮鴨緑江の鉄道橋の工事であることは、すでにのべたとおりである。それ以来、関東大震災後の首都復興事業の一環として隅田川に架設された諸橋の下部構造の基礎に用いられたのを契機として、今日にいたるまでその施工頻度も比較的高く、利用範囲も多岐にわたるようになった。また、ケーソンの形状寸法の大型化にもみるべきものがあり、現在、首都高速道路公団が建設中の東京港連絡橋の下部構造などでは、平面寸法45m×70m、高さ51mにのぼるものも施工されるようになっている。従来ケーソンの形状寸法は、設計・施工上可成りの制限をうけているかに考えられていたが、本橋での採用により、過去の通念が打破されるまでにいたっている。

本工法がわが国に導入されて以来、とかく独自の考え方で設計がすすめられがちであり、また名人芸ともいえる工事方法が尊重されてきたのが、近年にいたり、設計法の思想統一と施工技術の向上がはかられた結果、上記のような進展がみられたのである。この過程において、施工条件の設計への忠実な反映と工事管理法の向上などに対する地味な努力の積みあげがあったことを銘記すべきである。

本編では、こうした観点にたちニューマチックケーソンの設計ならびに工事管理法について、現今におけ

るものと対比しつつ、これらの変遷過程をたどってゆきたい。

## 2. 設計法について

ニューマチックケーソン工法は、施工時と完成後の両面にわたって設計を行なう必要がある点、オープンケーソン同様に他の下部構造とことなることは周知のとおりである。過去におけるニューマチックケーソンに関する事故例で、それが設計に直接起因するものがほとんどないのは、本工法導入初期からの設計法が忠実に継承され、かつ施工条件がつねに設計に反映されるようつとめられてきたからである。また、地震時の安定計算法においても活発な研究がなされ、現在にいたるまで多数の設計手法が順次提案されてきている。さらに討議のまとめであったケーソン基礎の力学的特性が明確にされてきているのも、本工法が橋梁下部構造の基礎として長く採用されている主因でもある。

本章では、これら設計法の変遷や導入経緯などについて、主として橋梁下部構造を中心にのべる。

### (1) ケーソンの初期沈下時における検討事項

ケーソンが沈下作業に入った直後は構築高さが低く、剛性度も低い、したがってケーソンの刃口下面の地盤が部分的に支持力が働かない箇所があると、図一1、図一2のようにケーソンの自重によってビームアクションを生じ、ケーソン本体に亀裂が発生するおそれがある。こうした状態での応力を設計の習慣上2次応力と称しており、1925年P. L. a u p m a n nによってその対処方法がしめされている<sup>3)4)</sup>。

ニューマチックケーソンの施工にあたっては、作業室内で主として人力による作業が行なわれるので、ケーソン本体の損傷については労働安全上とくに注意をする必要があるうえ、亀裂発生箇所からの圧縮空気の漏気により作業室内圧力の低下をきたすなどするので、ケーソンの設計においては欠かすことができない検討事項である。

ニューマチックケーソンの平面積が  $40\text{ m}^2 \sim 70\text{ m}^2$  のものが主流を占めた時期においては、これらの検討がともすれば忘れられがちであったが、1970年3月、道路橋下部構造設計指針・ケーソン基礎の設計編<sup>5)</sup> (現道路橋示方書IV下部構造編)<sup>5)</sup> が公刊され、これらの検討が義務づけられるようになった。

こうした検討事項を含めた、初期の時代の報文は全く見あたらず、ただ旧海軍の舞鶴油槽タンクのケーソンで検討されたものが残されているにすぎない。<sup>7)</sup> 本設計計算書では、とくに図一2の状態について、P. L. a u p m a n n の報文を参考にして詳細な検討がなされており、これらの検討方法が上記設計指針公刊に際し、有力な参考資料として提供されたことを付記する。

### (2) 刃口部の設計

ニューマチックケーソンの刃口部は作業室天井スラブ下面を支点とする片持ちばり部材として設計される。初期の頃のケーソンでは、木製の水中ケーソンが多用されたので、コンクリートの強度に問題があったようで、作業室天井スラブとともに刃口部の設計・施工には特に慎重であったと聞きおよんでいる。

本稿(その1)、(その2)でものべたJR関西線木曾川、揖斐川両鉄道橋の橋脚基礎ケーソンでは、図一

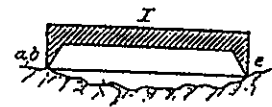


Abb. 9.

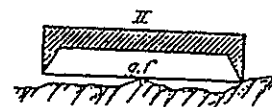


Abb. 11.

図一1 単純・片持ち支持状態におかれたケーソン

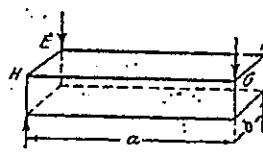


Abb. 15.

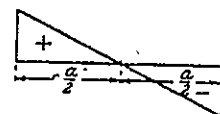


Abb. 16.

図一2 対角支支持状態におかれたケーソン

3°のような2ケースの作用荷重によって設計されている。この設計法はBrenneckeによって示されており、1940年（昭和15年）頃まではこの方法がとられた<sup>9)</sup>。

刃口部の作用荷重は、設計者の判断によって差異があったが、現在では図-4のようにほぼ統一されている。

### (3) ケーソン基礎の安定計算法

1923年（大正12年）9月1日の関東大震災は、われわれ技術者が耐震設計の必要性を強く教えられ、この分野での研究成果は著しいものがある。土木構造物においても震度法にもとづき各種の耐震設計法が提案され、久しく設計にとり入れられてきた。本項では橋梁下部構造としてのケーソン基礎の地震時における安定計算方法の変遷をたどってみることにする。

現今では、ごく一般的にはケーソン基礎を剛体とみなし、震度法によって、静的つり合い条件式からケーソン基礎の前面および底面の反力を求め、その位置での許容耐力との間で安定性を検討している。また、ケーソン基礎は支持地盤と評価しうる位置まで沈下させるので、有効根入れ長を未知数として求める方法はほとんどの場合とられていない。

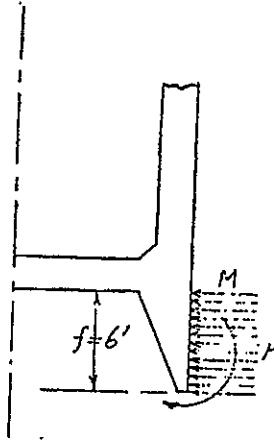
物部博士によってケーソン基礎の安定計算方法が提案されたのが1935年頃のことであり、以来後述のような計算方法が順次提案されてきている。

では、それ以前のケーソン基礎の安定計算はどのようにされていたのであろうか。当時はケーソン基礎を剛体とするか弾性体とするかの定義も明確にしないまま、ケーソン本体を地中に埋め込まれた棒状の構造物と考え、これに地震時の水平力が作用するものとして安定性の照査がなされている。

JR関西線木曾・揖斐両鉄道橋では図-5<sup>10)</sup>に示すような安定計算方法をとっているが、本橋梁ではケーソン基礎を剛体としてとりあつかっている。安定計算にあたっては、橋梁下部構造全体の重心に地震による慣性力が働くものとして、水平方向加速度を $4000\text{mm}/\text{sec}^2$ として入力している。また、ケーソンの縦方向の鉄筋量を求めるにあたって、常時の許容応力度の3倍を地震時のものとして計算しているが、この鉄筋量を所要の鉄筋量としないで、施工中ケーソン本体が中ずり状態になった場合を想定し、設計鉄筋量を決定している。

物部博士は、その著書「土木耐震学」<sup>11)</sup>でケーソン基礎の地震時の安定計算方法についてのべておられる

第十七図



第十八図

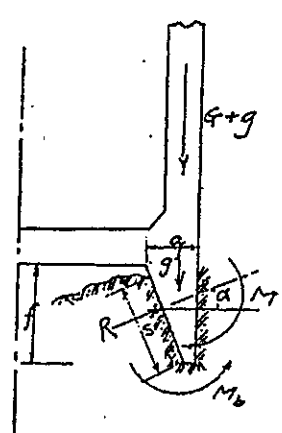


図-3 木曾・揖斐両鉄道橋のケーソン刃口部の作用荷重

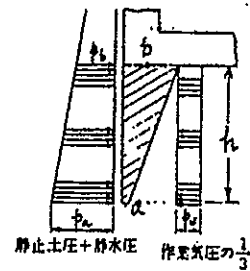
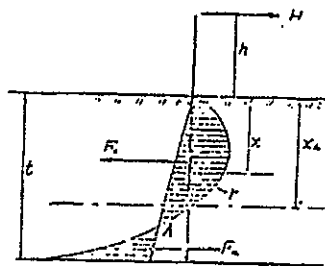


図-4 現行での刃口部の作用荷重

第十五図



第十六図

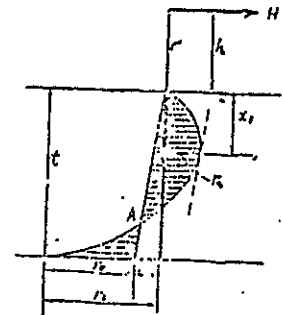


図-5 JR関西線木曾・揖斐両鉄道橋のケーソン基礎の安定計算方法

が、これは図-6に示す方法によっている。この方法では底面の影響が全く考慮されていないので、一般的には過大な根入れを要求される場合があるうえ、ケーソン基礎の前面反力分布を放物線と仮定するには、地盤性状が一様でない実状に合致していない。

物部博士の安定計算式は、長らくケーソン基礎の設計時に活用されてきたが、1953年(昭和28年)にいたり池原・横山<sup>12)</sup>が図-7に示すような算定方法を提示し問題点解決の緒を見いだそうとした。その間酒井<sup>13)</sup>がケーソン基礎を弾性体とし、ケーソン底面の地盤反力を考慮した計算式を提案したが、設計者全般に活用されることはなかった。

池原・横山による計算式が提案された後、後藤<sup>14)</sup>、白石<sup>15)</sup>と順次これに類する計算式が提案されたが、現在では吉田・足立<sup>16)</sup>による研究成果が道路橋下部構造設計指針にとりあげられ、ケーソン基礎の静的安定計算式(ケーソン指針式)として広く活用されている(図-8参照)。

本項でとりあげたケーソン基礎の各種安定計算方法とその内容をとりまとめたものが表-1である。

### 3. 工事管理法について

ニューマチックケーソン工法は、高気圧下の作業をとまなうので、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年を経た時点でそのピークを示している。ために労働省で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月である。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しなくなってきている。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が管理されている。

高気圧下の作業は適正な圧縮空気の管理下で実施され、またこの作業にとまなうて発生する障害防止に極力つとめなければならない。それでは、初期のニューマチックケーソン工事においては、これらに対しどのように留意されてきたのか、以下圧縮空気の送気量の推定方法と減圧症対策をとりあげてのべる。

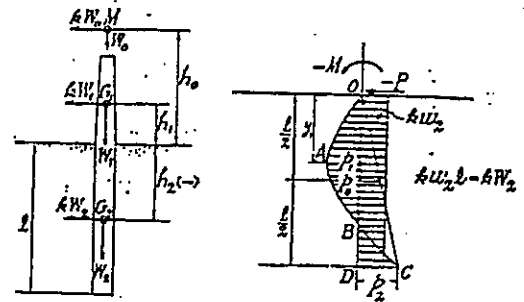


図-6 物部博士によるケーソン基礎の安定計算法

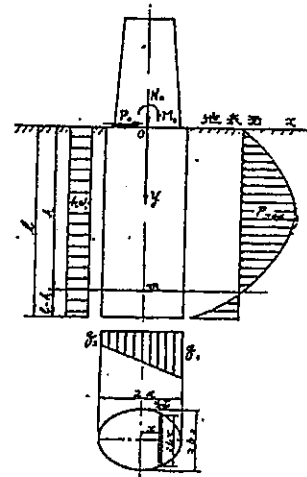


図-7 池原・横山によるケーソン基礎の安定計算法

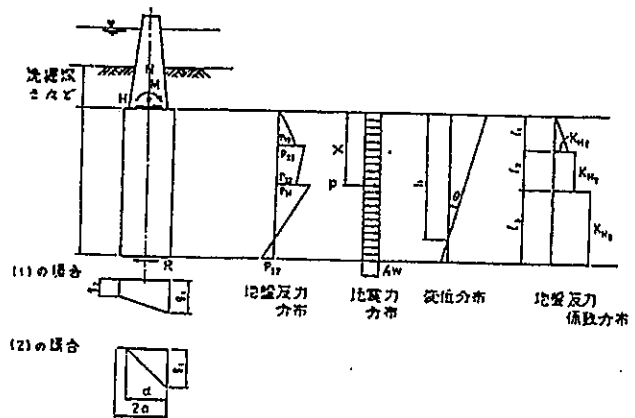


図-8 吉田・足立によるケーソン基礎の安定計算法

<sup>12)</sup>「ケーソン指針式」は1980年(昭和55年)以後「道示(道路橋示方書)の式」といわれる。

表-1 ケーソン基礎の各種安定計算方法とその内容

計算方法	ケーソン基礎の本体の剛性の仮定	作用外力に抵抗する要素					前面地盤の性状の仮定
		前面地盤の抵抗土圧	前面地盤の水平方向の摩擦抵抗	前面地盤の鉛直方向の摩擦抵抗	底面地盤反力の偏心	底面地盤の水平方向のせん断抵抗	
物部	剛体	○	-	-	-	-	前面地盤の反力分布を放物線と仮定している。
酒井	弾性体	○	-	○	○	-	前面地盤の反力分布を放物線と仮定している。
池原山	剛体	○	-	-	○	-	前面地盤は地表面からの深さに比例して増大する地盤係数をもつ弾性体とする。
後藤	剛体	○	○	○	○	-	前面地盤は地表面からの深さに比例して増大する地盤係数をもつ弾性体とする。側面の摩擦抵抗は主働土圧に比例する。
白石	剛体	○	-	○	○	○	前面地盤は地表面からの $\gamma$ 乗 ( $0 < \gamma \leq 1$ ) に比例する地盤係数をもつ弾性体とする。
ケーソン 指針	剛体	○	○	○	○	○	一層目の地盤反力係数の分布は深さ方向に増大する三角形分布とし、その下の層は深さ方向に無関係な一定の地盤反力係数分布とする。

(1) 圧縮空気を送気量の推定方法

Brenneckeはニューマチックケーソン工事における圧縮空気を送気量の推定方法を時間あたりの量で式(1)のように示している<sup>17)</sup>。また、作業員一人あたり0.5 kgf/cm<sup>2</sup>の圧力下では、少くとも20 m<sup>3</sup>/h、0.5 kgf/cm<sup>2</sup>以上では30 m<sup>3</sup>/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。

$$Q = (\alpha F + \beta U) \left( 1 + \frac{H}{10.333} \right) \quad (1)$$

- 式中 F: 作業室内壁および天井スラブの総面積 m<sup>2</sup>  
 H: 2~3 m 高く見積った水頭高 m  
 U: 刃口周長 m  
 $\alpha$ : 作業室の使用材料(コンクリート、鋼板など)による係数  
 $\beta$ : 刃先部からの漏気量 m<sup>3</sup>/h/m

式(1)からえられた推定値、エアロックのドア開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。

木曾・揖斐両鉄道橋のケーソン工事においては、隅田川の橋梁工事の途上に着工されたので、ほとんど欧米諸国の施工例を参考にしてエアプラント能力を決定している<sup>18)</sup>。このときにえられた各種の資料が、後日のケーソン工事に有力な資料を提供することになる。

式(1)の $\beta$ の推定値(ケーソン刃先部からの漏気量)は、土質性状のことなり、また掘削作業の巧拙などがあるため、資料収集が困難で、永らくとりあげられることがなかったが、飯吉は1960年(昭和35年)1月初期の時代からの収集資料をもとに、その結果を簡易式として式(2)<sup>19)</sup>を提案している。

$$Q = \{ (1.5 \sim 2.0) \beta \cdot S + 4.21 \} \left\{ 1 + \frac{m(Ho + n)}{10.33} \right\} \quad (2)$$

式中  $Q$ : 推定消費空気量  $m^3/\text{min.}$   
 $\beta, m, n$ : 土質による常数  
 $S$ : 作業室の刃口周辺長  $m$   
 $l$ : 材料ロックの数  
 $Ho$ : 水面から刃口までの深さ  $m$

式(2)は提案者自ら「空気量算定の実用式」と名づけており、工事計画をたてるときに広く利用されてきている。ただ、本式は簡易式であるため、エアラントからケーソンの作業位置までの距離が無関係であることと、掘削作業中のエアロックのドア開閉回数が正常な場合の2倍に計算されていることなど、今日では実状に即さない場合もある。現在では、これらの点を修正し合理化した算定方法が提案されている<sup>20)</sup>。

### (2) 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ともなって各種の作用をうける。これら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の包含して現在では「減圧症」といつている。

人間が高圧下にあると、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生じることになる。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<sup>21)</sup>。

隅田川の橋梁基礎ケーソン工事は工事規模において、1909年(明治42年)施工の鴨緑江鉄道橋のものをはるかに凌駕しており、とくに減圧症に対する予備知識もえられていたので、工事を管理してゆくうえでの減圧症対策にかなりの重点を置いていた。したがって、復興局は東京大学医学部物療内科教室に医学的見地からの対策を依頼している。同教室の眞鍋教授は、守口、渡辺および酒井らの医師団を構成し、ニューマチックケーソンの着手時から完了まで綿密な診療と研究にあたらせている<sup>22), 23)</sup>。

表-2は当時の減圧症の発生状況を守口が、永代・清洲の2橋についてとりまとめたものであるが、延人数に対する減圧症の発生率は約8%強であり、現在と比較すると相当数の作業員が罹病しているといえる。

減圧症は一般的な病とちがって、作業現場において、かつ高圧下の作業にともなって発生するためと、これを治療する医師に限度があり、さらに初期の時代の作業員に対する軽視などがあったため、初期の頃はかなりの発生数がみられたようである。幸いにして、当工事では後遺症による問題はなかったと報告されている。

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、これを信じて工事管理を行った作業所もあったと思えば、現在では隔世の感がする。



表-2 隅田川橋梁ケーソン工事における作業圧力と減圧症の発生数（守口による）

	圧力																			
	10	11	14	16	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Bends																				
永代橋	1	2		4	3		4	5	4	14		3	26	5	25	11				
洛洲橋					1		1	5				5	2	12	24	7	17	23	4	21
総数	1	2		5	3	1	9	5	4	14		6	5	38	29	32	28	23	4	21
Bends 以外「ケーソン」病																				
永代橋		1			1		1		1	1			2	1	2					
洛洲橋			1						1				2	2		2	1			
総数	1	1		1	1	1	1	1	1	1			4	3	2	2	1			

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、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及び、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。

わが国における戦後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、こうした社会状況のもとに、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、梨本らの研究<sup>24)</sup>が活用されて、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、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。

#### 4. むすび

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なかったに相違ない。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。

本編は、わが国におけるニューマチックケーソン工法の歴史のうち、設計法の主要項目、工事管理において必要な圧縮空気に関する事項、さらに減圧症対策などについての過去をたどったものである。

本文を含め、3編に分けてニューマチックケーソンの歴史をとりまとめてみたが、まだまだのべたりないものが多い。いずれ早い機会にこれらを補填してゆく所存である。

おわりに、多くの研究資料を提供賜った各位に深謝する次第である。

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)、第2回日本土木史研究発表論文集、土木学会、p.52-54、昭和57年6月
- 2) 同 上 (その2)、第7回日本土木史研究発表会論文集、土木学会、p.215-220 昭和62年6月
- 3) P. Laupman, Anwendung von transportierbaren Eisenbetoncaissons beim Bau des festen Wehres für das Wolchowkraftwerk, Beton u. Eisen, 5, Feb., s. 32-34, 1925
- 4) 同 上 5, März, s.81-82, 1925
- 5) 日本道路協会、「道路橋下部構造設計指針・同解説、ケーソン基礎の設計編」、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下部構造編」、丸善、昭和55年5月
- 7) 海軍省建築局、「外側槽設計計算書」、p.29-32、昭和14年8月、(福山大学蔵)
- 8) 柳生 義郎、「Pneumatic Caisson」工法による関西線木曾川・揖斐川の架橋工事計畫に就いて、土木学会誌、14巻第4号、p.58-59、昭和3年8月
- 9) L. Brennecke, E. Lohmeyer, 「Der Grundbau」, Wilhelm Sohn, 1934
- 10) 文献8)のp.55-58
- 11) 物部 長穂、「土木耐震学(改訂)」、理工図書、p.178-184、昭和27年6月
- 12) 池原 武一郎・横山 章、水平力をうけた井筒の安定計算について、土木学会誌、第38巻第12号、昭和28年12月
- 13) 酒井 信男、橋梁用特殊型井筒基礎工の水平力の安定について、土木学会誌、第25巻第6号、昭和14年6月
- 14) 後藤 尚男、橋脚井筒の側面水平摩擦力と底面上向反力を考慮した場合の耐震静的計算法、土木学会誌、第41巻第2号、昭和31年2月
- 15) 白石 俊多、井筒およびニューマチックケーソン「土と基礎の設計法」、土質工学会、昭和36年4月
- 16) 吉田巖・足立義雄、ケーソン基礎の静的水平抵抗に関する実験研究、土木研究所報告、133号の1、昭和45年3月
- 17) 文 献 9) s.330-331
- 18) 文 献 8) p.64-66
- 19) 飯吉 精一、橋梁基礎工の掘削、沈下作業の理論的考察、土木学会論文集第66号・別冊1-1、p.29-34、昭和35年1月
- 20) 平川 脩士、ニューマチックケーソン工事における所要空気量の算定方法、土木施工27巻14号、山海堂、p.76-82、昭和61年11月
- 21) David McCullough, 「The Great Bridge」, Avon Books, 1976
- 22) 守口 武次、隅田川架橋潜函工事医務概況、日本内科学会雑誌第17巻第7号、p.618-633、昭和4年10月
- 23) 守口 武次、永代、清洲両橋架橋「ケーソン」工事中に発表セシ「ケーソン」病=関スル諸研究、日本内科学会雑誌第17巻第8号、昭和4年12月
- 24) 梨本 一郎、潜函病とその治療法、呼吸と循環第7巻第11号、医学書院、p.21-32、昭和34年11月