

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

越賀 正隆・平川 修治 (脩士)

Historical Study on the Development of Pneumatic Caisson Method in Japan

M.Koshika* and S.Hirakawa*

ABSTRACT

In reviews of a pneumatic caisson 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.

Ninty two years was past since the pneumatic method with air lock 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.

In this report, the precise review of the development on the pneumatic caisson method is described on three parts which are the introduction of the construction method, modificating process for the air lock and shaft, the design method and the project management.

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ととりち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92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発展の歴史的背景を3章にわけ、第1章は工法導入とその揺籃期のもの、第2章ではエアロック、シャフトなどの改良過程について、さらに第3章では設計法ならびに工事管理法などについての考察成果を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)

第1章 揺籃期のニューマチックケーソン

1. ダイビングベル、泳気鐘ならびに潜水函

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、この空気が水の浸入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をコップ下面で防止することが出来る。この原理を利用して1250年頃にヨーロッパで釣鐘式の潜水機を用いて、水中作業をおこなったとされている¹⁾。

1778年に英国のJ. スミートンがこの方法を取り入れ、Fig.1・1のような潜水機を用い、橋梁の基礎工事を行っている²⁾。この潜水機をダイビングとっていた。以来、ヨーロッパでは水中の土木工事に多用されるようになり、

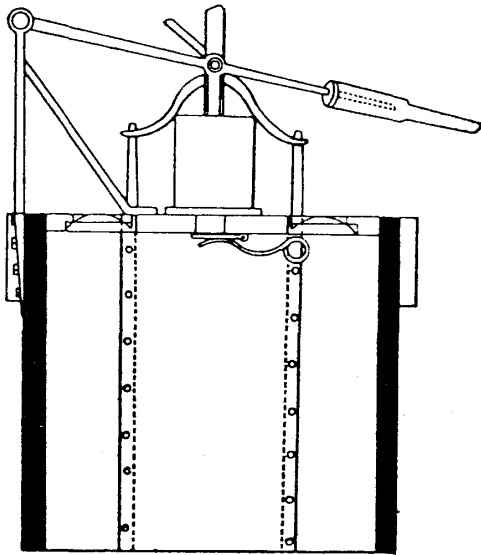


Fig.1・1 Smeaton's Diving Bell

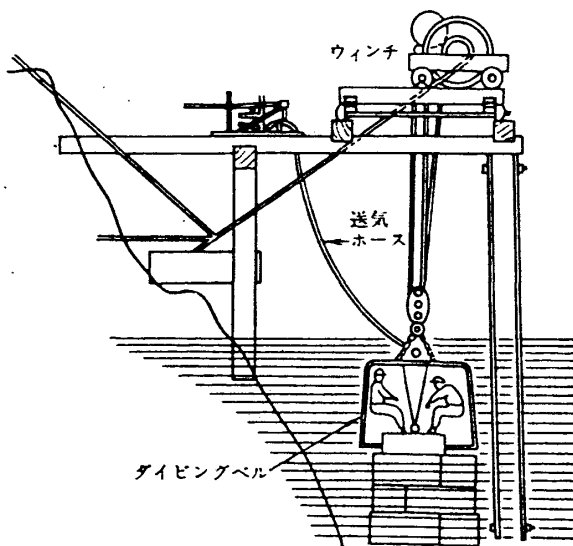


Fig.1・2 Lenny's Diving Bell and Underwater Works

レンニーによってさらに改良が加えられ、Fig.1・2のようなダイビングベルによる水中工事が施工されている³⁾。

ダイビングベルはオランダ語でドイルクルコロック (Duikers Klock)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デスの指導のもとで使用されている。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といえる。

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、この建設工事に関して島崎が詳細な調査を行っている^{5),6)}。当時の「泳気鐘」が出島オランダ商館跡にPhoto.1・1のような状態で存置されている。

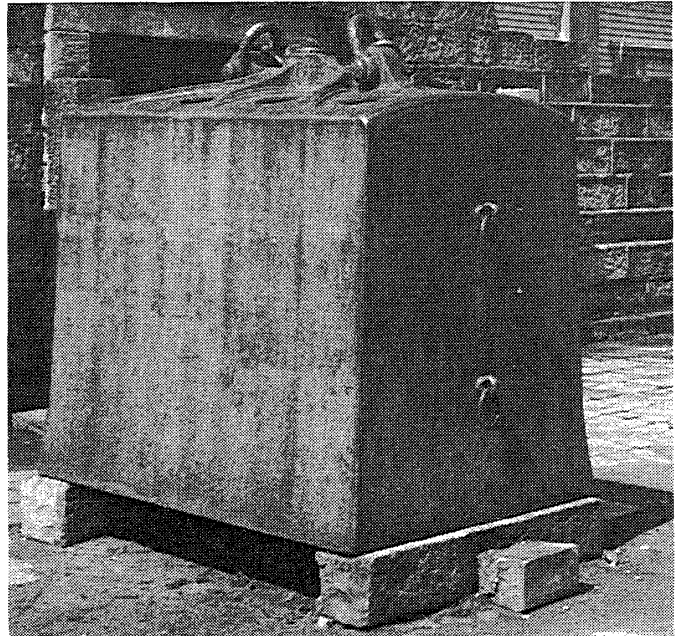


Photo 1・1 Duikers Klock (Eikisho: Diving Bell)

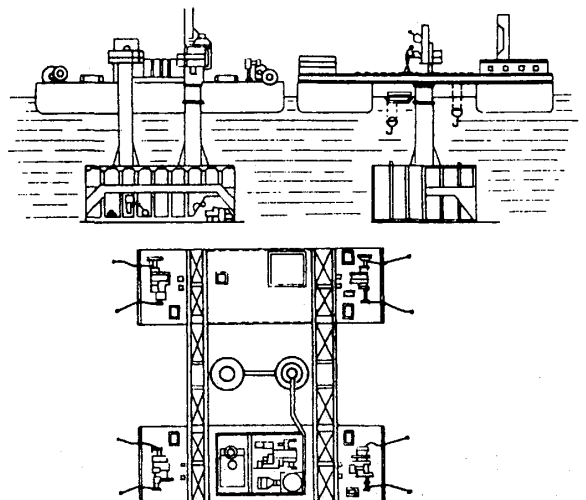


Fig.1・3 Showing Floatingtype Caisson of Yokohama Harbor Quaywall Works

1859年（安政6年）に開港された横浜港は、1899年～1905年（明治32年～明治38年）の間に第1期税関海面埋め立て工事が実施され、このときにFig.1・3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」と呼称されていた。⁷⁾

この移動式ケーソンは岸壁の基礎地盤のならし作業と基礎コンクリートの打ち込み用で使用され、平面寸法は7.2m×10.8mの長方形で、高さ4.1m、重量は247tの鋼製である。その施工状況はFig.1・4に示すようである。

筒状の枠を地中に沈下させていく途中において、圧縮空気を利用したのは1841年、M・トリーガー⁸⁾であり、このとき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った。この工事において彼はエアロックを発明しており、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型式のエアロックを用いており、この工事におけるエアロックその他の工所用設備は石川島造船所（石川島幡磨重工）で製作されている。

本工事は丹羽鋤彦が土木課長、坂出鳴海が技師として施工に従事し、古市公威、中山秀三郎の両博士が顧問として関与されている。

「潜水函」による水中工事は1902年（明治35年）7月に着手し1905年（明治38年）に完了しているが、この間「潜水函」を利用して工事を行った日数は580日であった。

長崎製鉄所岸壁工事における「泳気鐘」とこの工事における「潜水函」とは全く相互関係がない。

2. 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、エアロックがM・トリーガーによって発明されるにおよび、ヨーロッパ北部や米

国においてニューマチックケーソン工法が土木工事に採用されることになる。その代表的なものがヨーロッパではスコットランドのフォース橋ならびに米国のブルックリン橋で、いずれも1880年前後に施工されている。⁹⁾

エアロックの構造はヨーロッパ形式のものと米国形式のものに分けることができ、現在でもこれらが踏襲されている。

これらのエアロックのうちヨーロッパ形式のものが以下に述べるように、1911年（明治44年）10月に竣工をみた鴨緑江橋梁に用いられ、横浜港岸壁工事と同様に石川島造船所で製作されている。

明治37・8年戦役（日露戦争）勃発後、京城（現在のソウル）・義州（北朝鮮）間の鉄道が短期のうちに敷設され、さらに、戦争終結後におけるわが国の満州（現在の中国東北部）への陸路進出を容易にするため、国境を流れる鴨緑江の橋梁の架設が急がれた。鴨緑江右岸は当時清国領であったので、工事の実施には各種の諸問題を残しつつも、ともかく左岸側（北朝鮮側）から橋梁下部工事にかかることに決定され、1909年（明治42年）に着工された。

この橋梁は橋長929m（3098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も設置されている。下部工では橋脚基礎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、当時は基礎の名称に横浜港岸壁工事同様「潜水函」という用語が使用されている。

橋梁完成後、山田亀治は帝国鉄道協会報第14巻第1号¹⁰⁾に「鴨緑江橋梁はその延長3千98呎にして必ずしも其の長大なるの点於て之を称するに足らずと雖えども水深、潮汐干満、洪水及氷害其他天然的障害の尋常に非ざるもの多く且潜水函沈下及び開閉橋架設等の工事は我が国に於ける嚆矢にして朝鮮鉄道中の最難工事に属したるのみならず我帝国工業界の至難事業たるを以て本架橋計畫

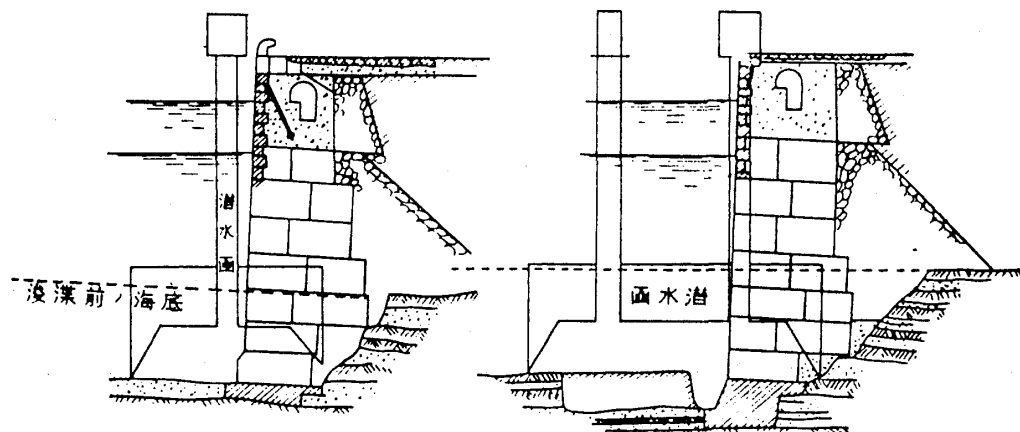


Fig.1・4 Underwater Works by using Floatingtype Caisson

の常時は世人皆我技術者の能力を疑ひその成效を危みたる処にして然も本橋梁は鮮満連絡の要路に当り欧亜交通の利便を完ふするものなるに依り本工事の成否は実に帝国の技術能力を世界に表示するに足ると云ふも敢て過言に非ざるなり。」(字句とも原文どおり)と述べており、当時の技術者の意気込みをうかがい知ることができる。

また「潜水函」の利用成果について「(前略)本工事施行期間中厳冬結氷期と盛夏降雨期とを除去しその有効作業期間僅に1年4箇月に過ぎず而も其の期間中約5箇月は清国領土に着手すること能はざりし事に想い到れば誰かその時日の短少なるに一驚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応用の効果大なりしに起因せるものなり……」(字句とも原文どおり)と述べている。

現時点ではこの程度のニューマチックケーソン基礎の工事はさ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、施工にあたっての労苦は容易ならざるものがあつたと考えられる。

この工事はその後のわが国におけるニューマチックケーソン工法採用に全く無関係でなく、次節の隅田川橋梁工事に連けいもたれていく。(「平山復二郎著:「地底に基礎を掘る」より)

3. 隅田川橋梁工事から昭和初期にいたるニューマチックケーソン

鴨緑江の橋梁工事において、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なかった理由は詳かでないが、平山復二郎は「まさか、この工法を有利に使用出来る工事がなかったというわけではありますまい。これには、この工事が外地の朝鮮で施工されたということもありますでしょうが、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熟さなかったというほかないとおもいます。」¹¹⁾(原文どおり)と述べており、当時から土木工事に機械化を企画して、先進諸外国からの技術導入に熱意をもやしていた太田円三などは、橋梁基礎工事やトンネル工事に圧縮空気を利用する機会を待っていたのは事実である。

1923年(大正12年)9月1日に発生した関東大震災により大被害をうけた東京を復興するため、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、首都の復興を担当することになった。この事業の一環として隅田川に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が採用されることになった。

ヨーロッパではじめてとり入れられ、米国においても盛に利用されたニューマチックケーソン工法は、エアロックを改良することによって、高層ビルの基礎としても利用されるようになり、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って、本橋梁工事では米国形式の圧気設備が採用されるようになる。もっとも、本工事における施工設備の採用決定に至るまでに、過去鴨緑江橋梁において経験があるにもかかわらず、との反論もあったが、太田円三の英断によって、ニューヨーク・ファウンデーション・カンパニーに対し必要な施工機械1式の導入と指導技術者3名の派遣依頼がなされた。

かくして来日米人の指導のもとで永代橋、清州橋などの基礎がニューマチックケーソン工法によって施工されることになるが、この工事の完成前の1925年(大正14年)に、本工法はもはや東京電灯(現在の東京電力)鶴見火力発電所の発電機の基礎としても採用されている。

隅田川の橋梁工事に従事し、本工法を習得した技術者たちは引続いて旧国鉄の木曾川、揖斐川、新潟県の万代、大阪府の十三、三重県の伊勢などの諸橋梁、さらには満州国(中国東北部)における橋梁の建設に従事し、これらを完成させてゆき、昭和初期における本工法発展の基礎を築いていく。

第2章 エアロック、シャフトの改良過程

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。M. Triegerは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つたらしい。¹²⁾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にあつている。

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米国系統のものがあるが、本章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のべる。

1. 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、Fig. 2・1¹³⁾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Fig. 2・2¹⁴⁾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、Fig. 2・3, Fig.

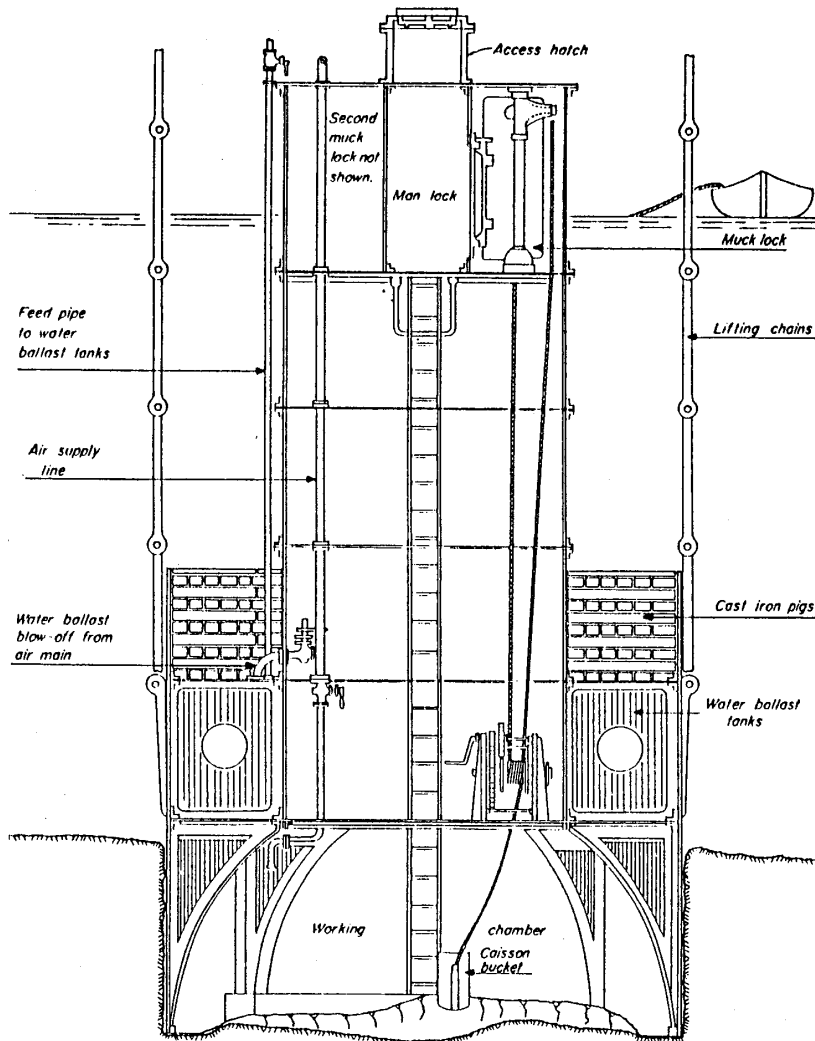


Fig.2・1 Pneumatic Caisson of the 1860's

2・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、異なる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, Lohmeyer¹⁵⁾も指摘しており、当時の空気圧縮機（エアコンプレッサー）の圧縮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、艀装工のときに揚重能力の大きなクレーンが必要となる。

Fig.2・3、Fig.2・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¹⁶⁾、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¹⁷⁾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、パリの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、初期の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）¹⁸⁾において制作されており、当時の社長であった渡辺嘉一が、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れたものと考えられる。

このタイプのエアロックは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。

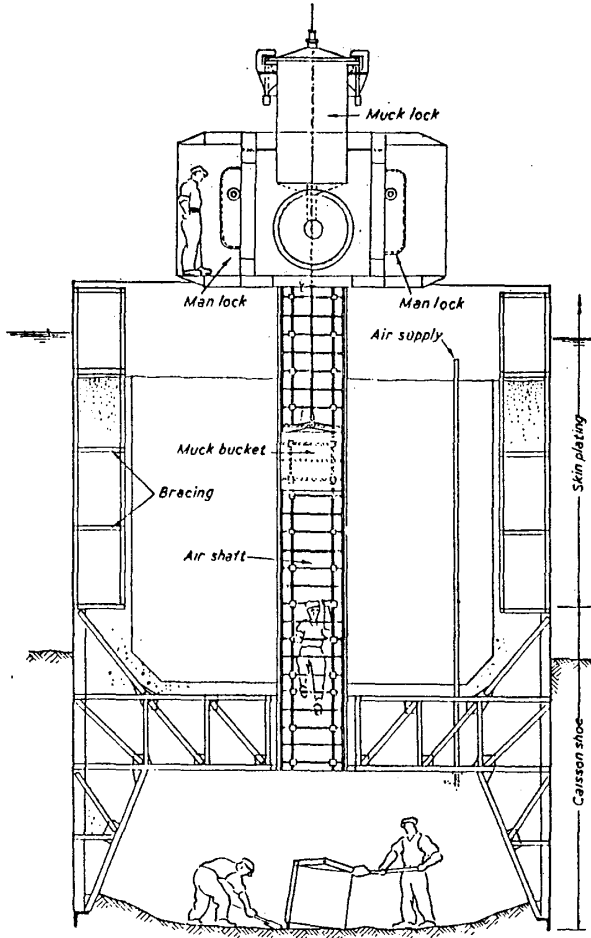


Fig. 2.2 General View of Pneumatic Caisson by D.C.H. Henry

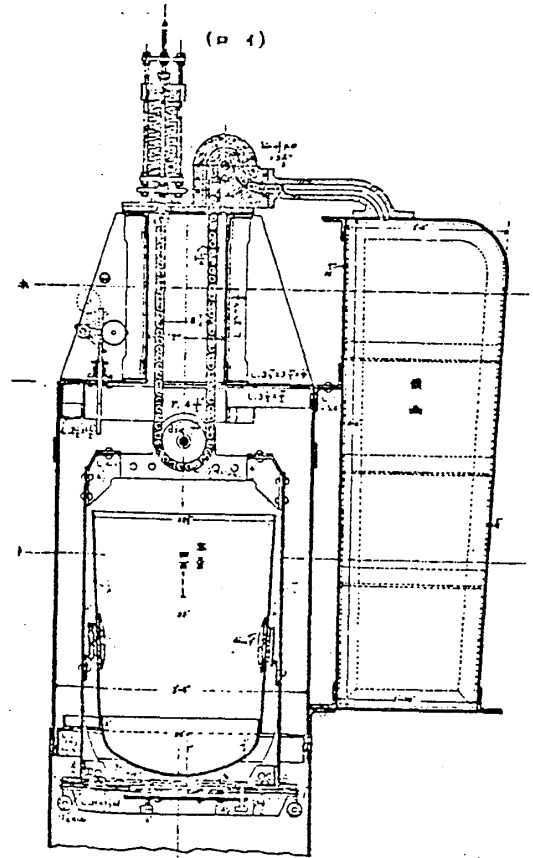


Fig. 2.3 Air Lock (for Muck) of the Meiji's

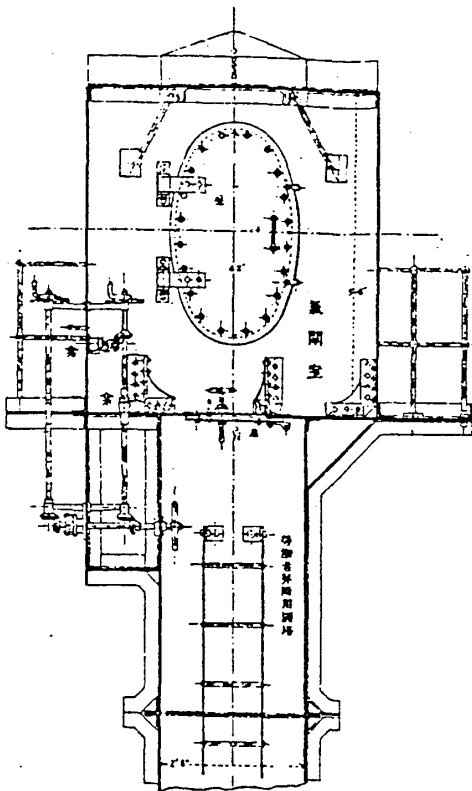


Fig. 2.4 Air Lock (for Men) of the Meiji's

2. 1924年（大正13年）以降のエアロックについて前章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三の英断によって、Newyork 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た。

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. であって、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Fig. 2.5に示す Moran¹⁹⁾のエアロックである。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古いヨーロッパタイプのもので相違している。

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従事したり、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。

過去において筆者は古い工事記録写真のなかから、Photo.2・1²¹⁾やPhoto.2・2²²⁾のように作業室セントルに直接シャフトが建て込まれ、その一部が天井スラブコンクリートに埋め込まれる状況を発見したが、現在ではFig.

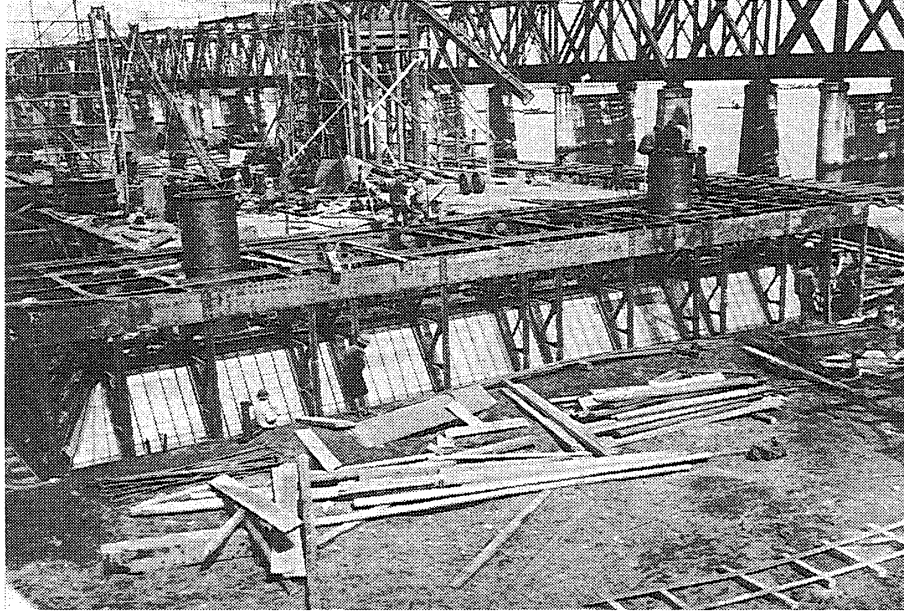


Photo 2・1 Workmanship of Forms and Placing of Reinforcement of Working Chamber (Jyuso Highway Bridge)

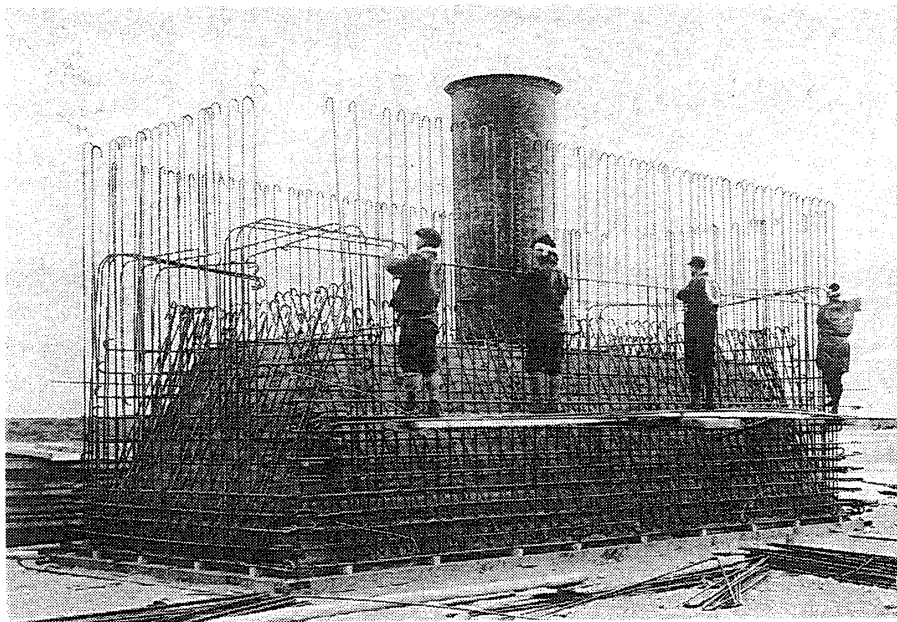


Photo 2・2 Workmanship of Forms and Placing of Reinforcement of Working Chamber (Yoshino River Railway Bridge)

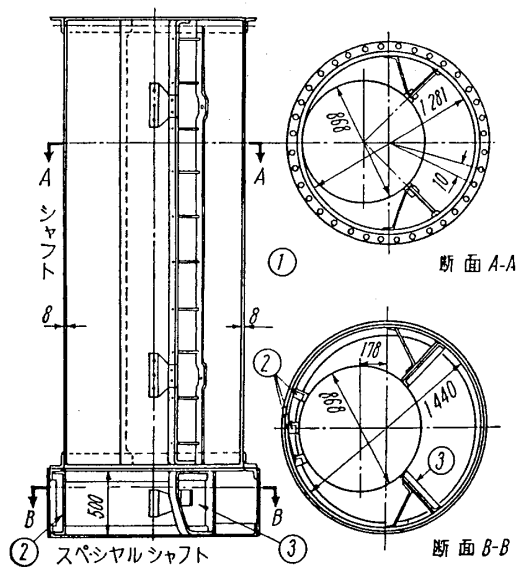


Fig.2・8 Special Shaft and Vertical Shaft of the 1933's

2・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てゆくのが一般的であるので当時は非常に奇異に感じた。

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らう。」といった要望から、1933年（昭和8年）9月から施工された、大阪駅西高架橋補強工事（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、大坪薫美が機械担当者と協議して考案し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が、こうした問題に直面し、エアロックをPhoto.2・3に示すように、上下2分割する案を考え、これを試作し

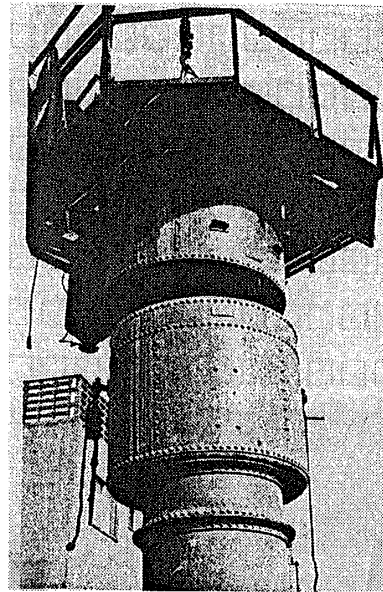


Photo 2・3 A Separated Air Lock

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きた。

第3章 設計法ならび工事管理法について

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た。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った。

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。

本章では、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、これらの変遷過程について考察する。

1. 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。さらに討議のまど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。

本項では、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、Fig.3-1、Fig.3-2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.Laupmannによってその対処方法がしめされている。²⁵⁾²⁶⁾ニューマチックケーソンの施工にあたっては、作業室内で人力による作業がともなうので、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

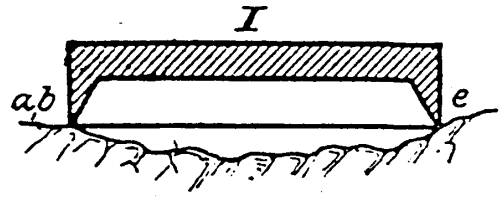


Abb. 9.

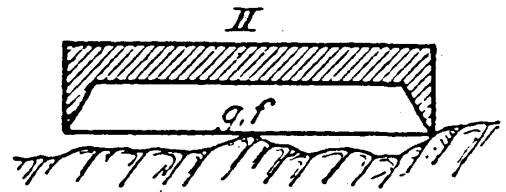


Abb. 11.

Fig.3-1 Showing Simply and Overhang Supported Caisson

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40m²~70m²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²⁷⁾(現道路橋示方書IV下部構造編²⁸⁾)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、初期の時代の設計成果は全く見あたらず、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。²⁸⁾本設計計算書では、とくにFig.3-2の状態について、P.Laupmann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。

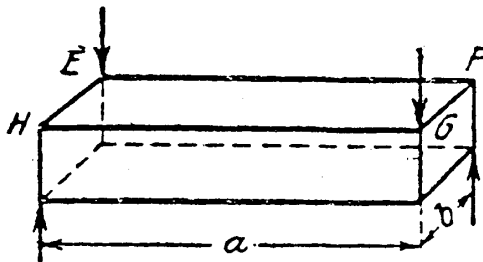


Abb. 15.

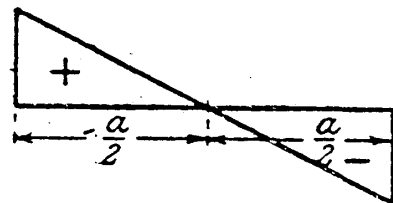


Abb. 16.

Fig.3-2 Showing Diagonal Supported Caisson

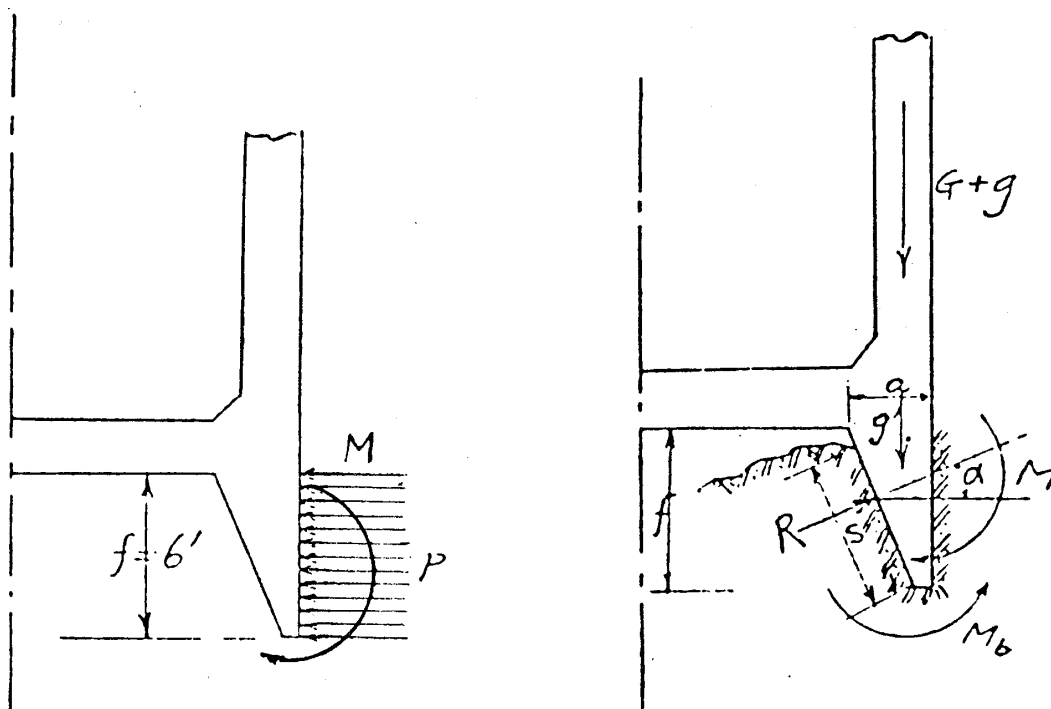


Fig.3.3 Showing Actual Pressure of Cutting Edge as for Design of Caisson Foundation Kiso and Ibi Railway Bridge

(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。

既述の旧国鉄関西線木曾川、揖斐川両鉄道橋の橋脚基礎ケーソンでは、Fig.3.3³⁰⁾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が提示したもので、1940年（昭和15年）頃まではこの方法がとられた。³¹⁾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Fig.3.4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日に発生した関東大震災は、われわれ技術者に耐震設計の必要性を強く教えられ、以来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について考察する。

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

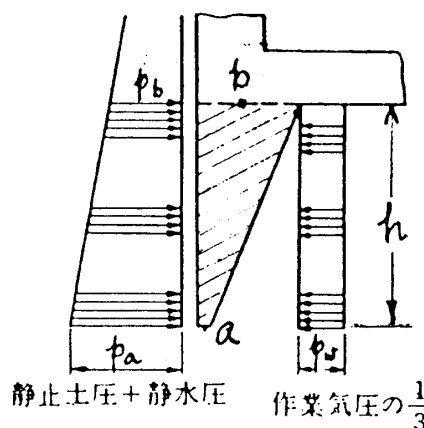


Fig.3.4 Showing Actual Pressure of Cutting Edge as for Design of Caisson Foundation now and use

効根入れ長を未知数として求めてきた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、以来以下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。

旧国鉄関西線木曾・揖斐両鉄道橋ではFig.3・5³²⁾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弾性体と仮定しながら、境界条件の設定の際に剛体条件をとり入れている。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」³³⁾でケーソン基礎の地震時の安定計算方法についておべておられるが、これはFig.3・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、地盤性状が一樣でない実状に合致していない。

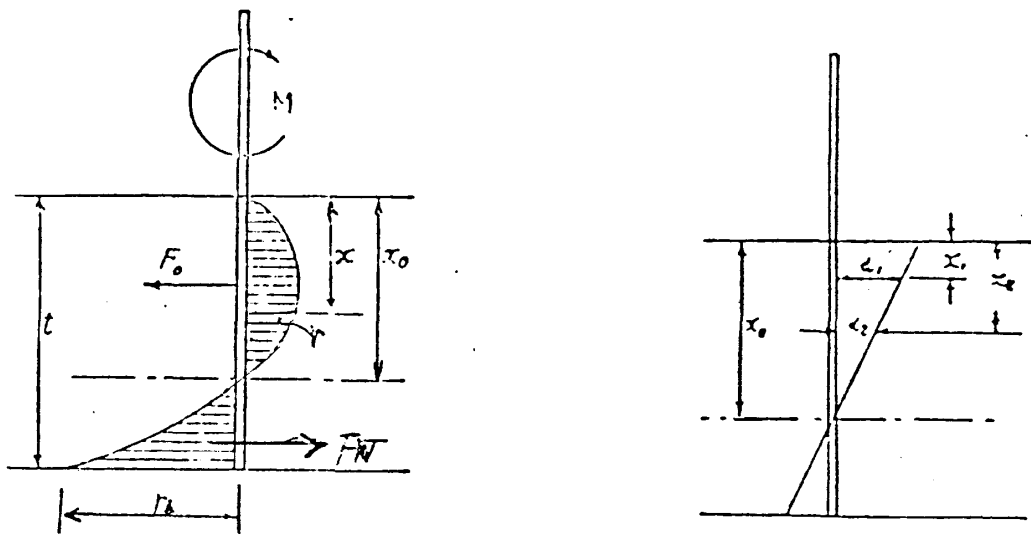


Fig.3-5 Stability Calculation Model of Caisson Foundation, Kiso and Ibi Railway Bridge

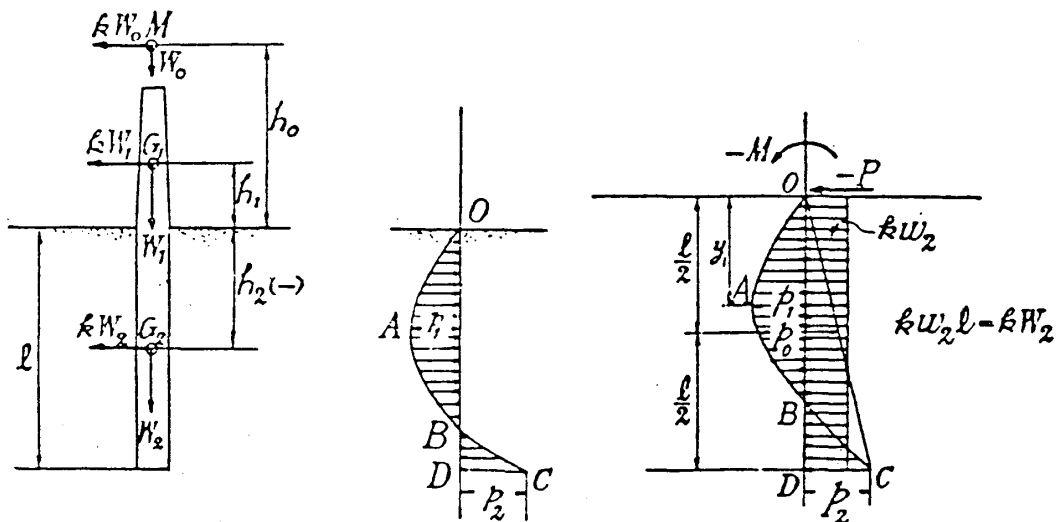


Fig.3-6 Stability Calculation Model of Caisson Foundation by Dr. Mononobe

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・横山がFig.3・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、白石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（Fig.3・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取りまとめたものがTab.3・1である。

2. 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。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

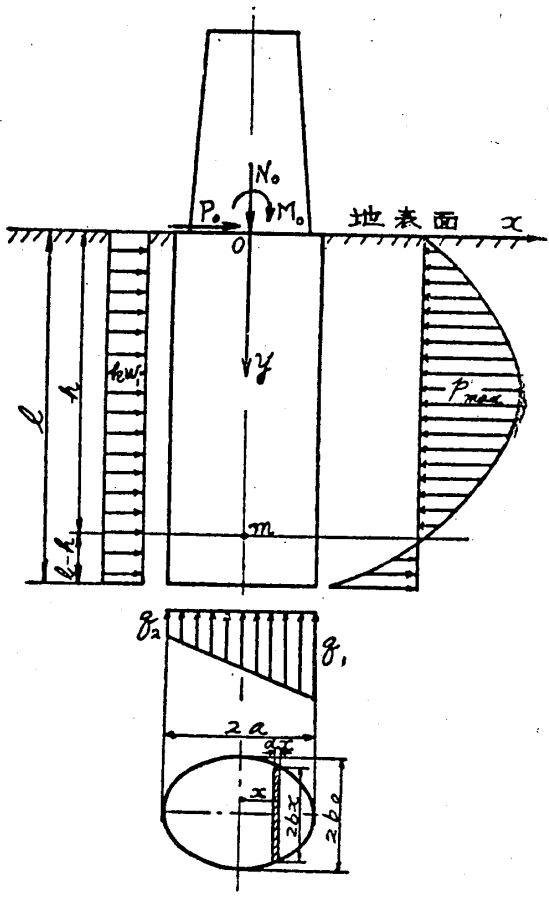


Fig.3・7 Stability Calculation Model of Caisson Foundation by Yokoyama and Ikehara

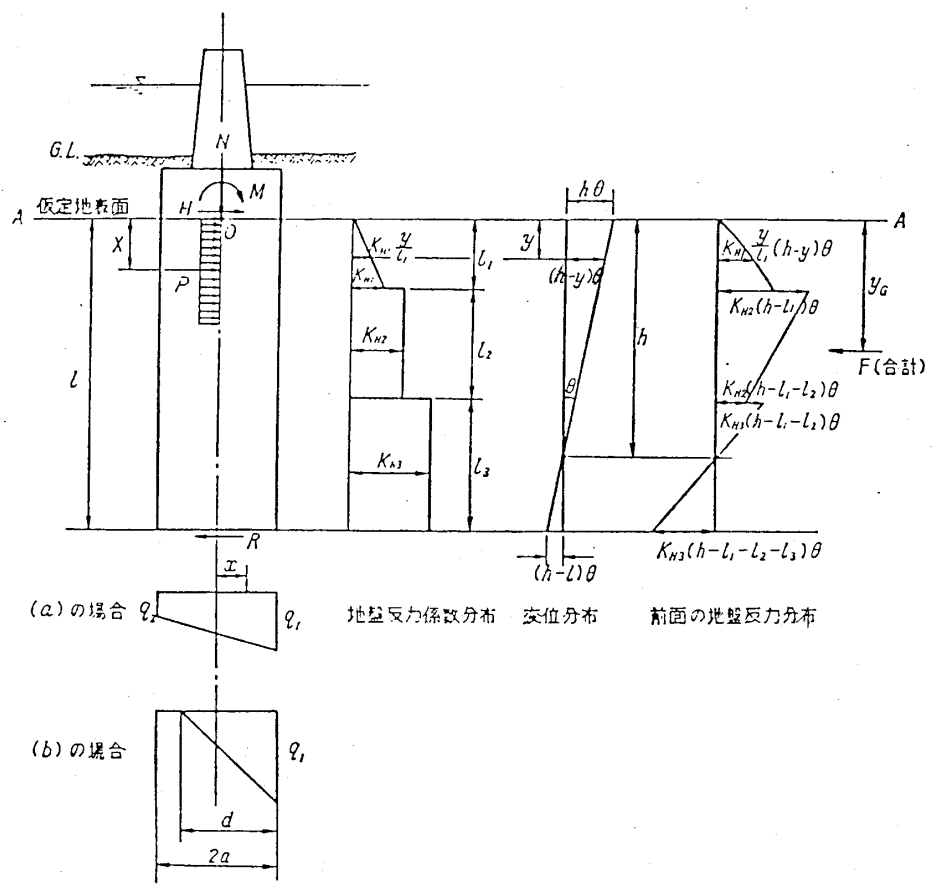


Fig.3・8 Stability Calculation Model of Caisson Foundation by Yoshida and Adachi

Tab.3・1 Various Stability Calculation Methods and their Details

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 横山	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 γ 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。

(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。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考察する。

(1) 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。また、作業員一人あたり0.5kgf/cm²の圧力下では、³⁰⁾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。

$$Q = (\alpha F + \beta U) \left(1 + \frac{H}{10.333}\right) \quad (3 \cdot 1)$$

式中 F : 作業室内壁および天井スラブの総面積 m²
 H : 2~3 m 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、鋼板など) による係数

β : 刃先部からの漏気量 m³/h/m

式(3・1)からえられた推定値、エアロックのドア閉閉にもなる空気の消費量、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。⁴⁰⁾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(3・1)のβ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⁴¹⁾式(3・2)を提案している。

$$Q = \left\{ (1.5 \sim 2.0) \beta \cdot S + 4.2 \ell \right\} \left\{ 1 + \frac{m(Ho + n)}{10.33} \right\} \quad (3 \cdot 2)$$

式中 Q: 推定消費空気量 $m^3/min.$
 β, 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(3・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、エアプ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。⁴²⁾

(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も包含して現在では「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。⁴³⁾

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。^{44), 45)}

Tab.3・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見られたようである。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。

Tab.3・2 The Relationships between Working Pressure and Break out of Decompression Disease on Eitai and Kiyosu Highway Bridge Works (by Dr. Moriguchi)

「ケーソン」病発生数ト曆力トノ関係

曆力→

	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				
清洲橋					1		1	5					5	2	12	24	7	17	23	4	21
総数	1		2		5	3	1	9	5	4	14		5	5	38	29	32	28	23	4	21
Bends以外の「ケーソン」病																					
永代橋		1				1		1		1	1			2	1	2					
清洲橋					1					1					2	2		2	1		
総数		1			1			1		1	1			4	3	2		2	1		

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。

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、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。

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。

本文は、わが国におけるニューマチックケーソン工法の発展に関する歴史的背景についての考察結果を3章にわけてとりまとめたものであるが、まだまだ検討不足の部分もあると考える。これらはいづれ早い機会に補填し

てゆく所存である。

おわりに多数の資料の提供を賜った各位に深く感謝の意をのべたい。

参考文献

第1章関係参考文献

- 1) 長崎武雄：空気ケーソンのはじめとうつりかわり，大阪建設業会報，70-8，p.10.
- 2) 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)，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」，p.114，p.121，昭和32年10月.
- 5) 文献 1) と同じ.
- 6) 島崎武雄：幕末の長崎製鉄所建設工事における土木技術，第26回土木学会年次学術講演会，p.203-206，1971年10月.
- 7) 大蔵省税関工事部：「横浜港税関海面埋立工事報告」，明治39年3月.
- 8) Jacoby d Davis：“Foundation of Bridges and Buildings，McGRAW-HILL”，p.119，1961.
- 9) 同 上.
- 10) 山田亀治：鴨線江橋等工事報告，帝国鉄道協会報第19巻1号，p.54-55，大正2年2月.
- 11) 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)，第30，昭和30年7月.

第2章関係参考文献

- 12) A.Brinton Carson，“Foundation Construction”，McGRAW-HILL，p.338，1965.
- 13) 同 上，p.341.
- 14) F.D.C.Henry，“The Design and Construction of Engineering foundation”，E&F.N.Spon，p.328，1956.
- 15) L.Brennecke，E.Lohmeyer，“Der Grundbau”，Verlag von Wilhelm Ernst&Sohn，s.330-331，1934.
- 16) 「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.
- 17) 山田 亀治，「鴨線江橋工事報告」，帝国鉄道協会報第14巻第1号，付図，大正2年2月.
- 18) 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
- 19) Jacoby & Davis，“Foundation of Bridges and Buildings”，McGRAW-HILL，p.372，1941.
- 20) 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.

- 21) 「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 (福山大学工学部平川研究室蔵)
- 22) 「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 (福山大学工学部平川研究室蔵)
- 23), 24) 平山 復二郎, 「地底に基礎を掘る」, パンフィックコンサルタンツ(株), p.42, 昭和30年7月.
- 第3章参考文献
- 25) P.Laupman, Anwendung von transportierbaren Eisenbetoncaissons beim Bau des festen Wehres für das Wolchowkraftwerk, Beton u. Eisen, 5, Feb., s.32-34, 1925.
- 26) 同上 5, März, s.81-82, 1925.
- 27) 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.
- 28) 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.
- 29) 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)
- 30) 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画に就いて, 土木学会誌, 14巻第4号, p.58-59, 昭和3年8月.
- 31) L.Brennecke, E.Lohmeyer, “Der Grundbau”, Wilhelm Sohn, 1934.
- 32) 文献8)のp.55-58.
- 33) 物部 長穂, 「土木耐震学(改訂)」, 理工図書, p.178-184, 昭和27年6月.
- 34) 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.
- 35) 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.
- 36) 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.
- 37) 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.
- 38) 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.
- 39) 文献 9) s.330-331.
- 40) 文献 8) p.64-66.
- 41) 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.
- 42) 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.
- 43) David McGullough, “The Great Bridge”, Avon Books, 1976.
- 44) 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.
- 45) 守口 武次, 永代, 清洲両橋架橋「ケーソン」工事中ニ発表セン「ケーソン」病ニ関スル諸研究, 日本内科学会雑誌第17巻第8号, 昭和4年12月.
- 46) 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.