

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取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¹⁾は工法導入とその揺籃期のもの、第2編²⁾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、利用範囲也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形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. Laupmannによってその対処方法がしめされている^{3), 4)}。

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⁵⁾（現道路橋示方書IV下部構造編）⁶⁾ が公開され、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。⁷⁾ 本設計計算書では、とくに図一2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開に際し、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

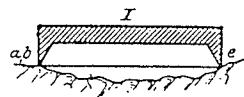


Abb. 9.

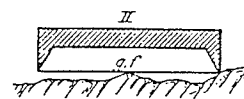


Abb. 11.

図一1 単純・片持ち支持状態におかれたケーソン

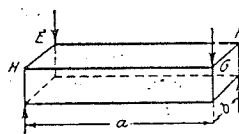


Abb. 15.

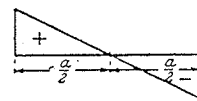


Abb. 16.

図一2 対角支持状態におかれたケーソン

3⁹⁾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Brenneck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⁹⁾。

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。

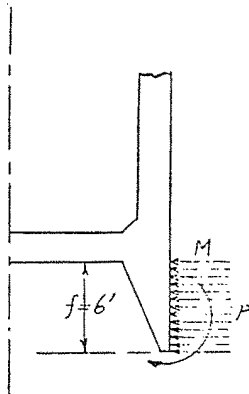
物部博士によってケーソン基礎の安定計算方法が提案されたのが1935年頃のことであり、以来後述のような計算方法が順次提案されてきている。

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-5¹⁰⁾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 4000mm/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」¹¹⁾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

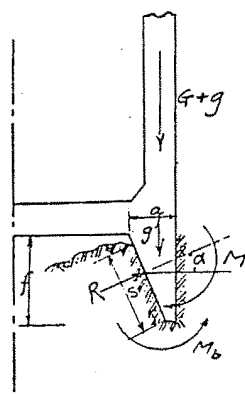


図-3 木曾・揖斐両鉄道橋のケーソン刃口部の作用荷重

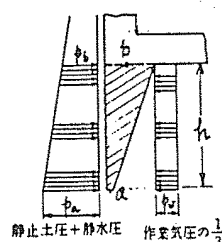
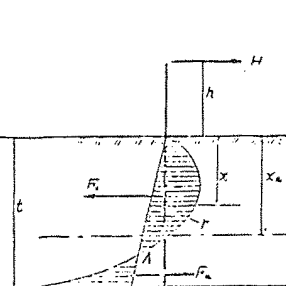


図-4 現行での刃口部の作用荷重

第十五図



第十六図

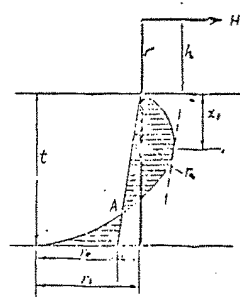


図-5 JR関西線木曾・揖斐両鉄道橋のケーソン基礎の安定計算方法

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、地盤性状が一樣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¹²⁾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¹³⁾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¹⁴⁾、白石¹⁵⁾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¹⁶⁾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取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的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、またこの作業にと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。

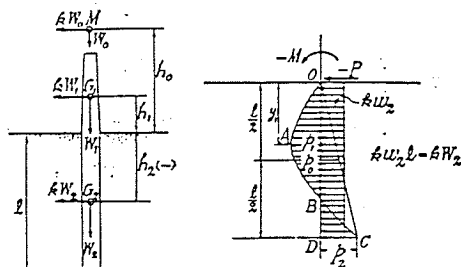


図-6 物部博士によるケーソン基礎の安定計算法

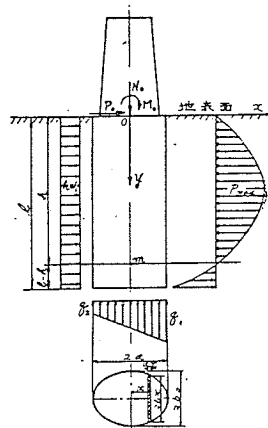


図-7 池原・横山によるケーソン基礎の安定計算法

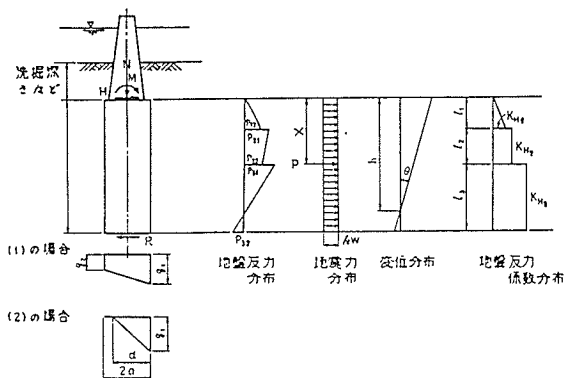


図-8 吉田・足立によるケーソン基礎の安定計算法

*「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	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。

（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¹⁷⁾。また、作業員一人あたり 0.5 kgf/cm^2 の圧力下では、少くとも $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 0.5 kgf/cm^2 以上では $30 \text{ m}^3/\text{h}$ 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なべている。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^2

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 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$

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¹⁸⁾。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 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)¹⁹⁾を提案している。

$$Q = \{ (1.5 \sim 2.0) \beta \cdot S + 4.21 \} \left\{ 1 + \frac{m(H_0 + n)}{10.33} \right\} \quad (2)$$

式中 Q : 推定消費空気量 $m^3/\text{min.}$

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

H_0 : 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²⁰⁾。

(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う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」といっている。

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²¹⁾。

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^{22), 23)}。

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う発生するためと、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。

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。

表ー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症数（守口による）

圧 力		井																							
		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				
總 数		1		2		5	3	1	9	5	4	14	5	5	38	29	32	28	23	4	21				
Bends 以外ノ「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						
總 数			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。

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²⁴⁾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