

【ミニシンポジウム4】

日本の土木工事における高気圧作業と減圧要領の変遷

石井 通夫[技術士（建設部門）・土木学会フェロー会員]

(株)白石・技術本部 土木技術部

キーワード 高気圧作業、ニューマチックケーソン、減圧、掘削自動化、トライミックス

Evolutions of compressed air works and decompression procedures in Japanese civil engineering

Michio Ishii

Shiraisi Corporation.

This paper addresses a brief history of compressed air works, pneumatic caissons, decompression procedure, statutory regulations for compressed air works, periodical DCS data, oxygen decompression in pneumatic caisson works, automated pneumatic caisson excavation system and helium-mixed gas or trimix breathing system that permits installation of very deep caissons in Japan.

In last section, some subjects on decompressions in pneumatic caissons are presented.

keywords Compressed air work, pneumatic caisson, decompression, Automated excavation system in pneumatic caisson, trimix.

緒言

話題提供内容は日本の土木工事における高気圧作業を中心としているが、紹介の順序は次のようにしている。①ニューマチックケーソンの概要、②本邦土木工事における高気圧作業や減圧要領の変遷、③現在の高気圧作業、④潜水の技術を土木工事に応用したヘリウム混合ガス呼吸、⑤土木工事の減圧管理が抱えている課題等。

ニューマチックケーソン工法

ニューマチックケーソン工法は圧縮空気を利用した建設工事の一施工法である。東京港に架橋されているレインボーブリッジ (Fig. 1) のアンカレッジ基礎や主塔及び周辺のループ橋基礎の大部分も、この工法で建設されている。厚生労働省の高気圧作業安全衛生規則 (略称：高圧則) は「潜函」を正式用語としているが、国土交通省の用語ニューマチックケーソン (以降、「ケーソン」と略称) が一般化しているので、ここでもそれを使う。

ケーソンの施工は地下構造物の種類に応じて変わる

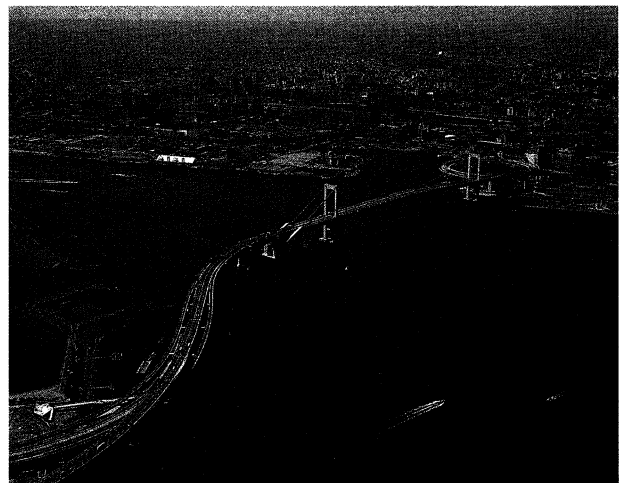


Fig.1 Rainbow Bridge in Tokyo Harbor, constructed with pneumatic caissons.

ことなくほぼ同じである。最初に、天井と先細り (クサビ状) の壁 (刃口) で囲んだ鉄筋コンクリート製作業室をつくり、作業室に送り込んだ圧縮空気が室外の地山へ逃げないようにする。作業室内下面は掘削地盤面に開放されている。次に、大気圧環境と作業室を連絡するシャフト、マテリアルロック (掘削土搬出専用) やマンロック

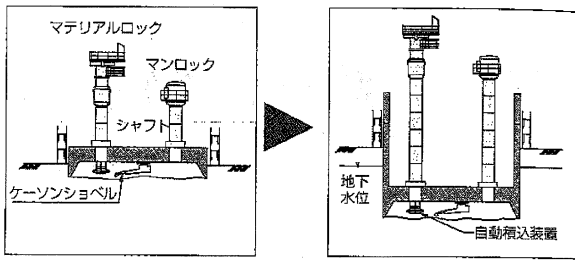


Fig.2 Rigging and sinking of pneumatic caisson

(作業員出入専用)を組み立て(機装・rigging)て、掘削作業を始める。作業室内での掘削範囲が進むと、刃口での作業室支持力が減少して作業室が地中方向へ沈下する。作業室天井部分の地中埋没前に、作業室上方外周に壁をつくって天井への土砂崩落を防いでから掘削と沈下を再開する。刃口、作業室と外壁などの総称がケーソンである。コンクリートの筒が地中に貫入する状況を想像されたい。刃口先端が地下水面標高より下になると作業室内の掘削地盤は水と土砂が交じり合って掘削の邪魔になる。刃口先端の地下水圧相当の圧縮空気を作業室へ送り込むと地下水が刃先の標高まで低下し、水を含まないドライな地盤が作業室に現れて、掘削が円滑に進む。大気圧を超える圧縮空気環境での労働すなわち高気圧作業の始まりとなる (Fig. 2)。掘削、ケーソン沈下、ケーソン上方継足しの繰り返しで、所定の地下深部までケーソンを沈めると掘削は終了する。地盤支持力確認後に作業室へコンクリートを充填して基礎工事を終えて、地上部構造(橋脚やトンネルの発進基地)をつくって後続工事に引き渡す。地中深く貫入したケーソンが耐震性に優れているとして、この工法が日本において発展した。それは阪神淡路大震災でのケーソン基礎被害皆無が証明している。

日本の高気圧作業と減圧要領の変遷

(1)最初の高気圧作業

本邦初の高気圧作業は、横浜税関岸壁工事(現在の赤レンガパーク東側)で、潜水函を用いて1902年に実施された。潜水函は潜鐘(高圧則・記載の法律指定用語)あるいは移動式潜函ともいわれる外壁の厚い作業室のみの構造物で、作業は作業室内の高気圧環境で

Table.1 The first compressed air works in Japan

- * Maximum pressure : 16psi ≒ 0.11MPa
- * Compression time : 15 minutes
- * Time per shift maximum : 3 hours
- * Decompression time : more than 15minutes
(The procedure is uniform rate of decompression)
- * Size of diving bell : 10.8×7.2m(rectangular)

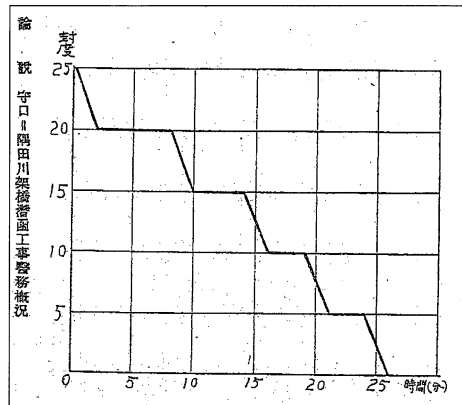


Fig.3 Decompression profile recorded on construction of Eitai Bridge foundations.⁹⁾

行い、海底掘削と岸壁の水中部建設が終われば作業台船に係留あるいは吊り下げて次の作業位置に移動する。作業室の直上はコンクリートでつくった天井とその上のバラストタンクすなわち海水を充填、排除(圧縮空気)できる部屋になっており、この操作で上浮と沈降を行っていた。英国方式のエアロックや圧力単位としてpsiを用いていた。Table.1は加減圧要領等である¹⁾。14.7psi ≒ 0.1MPa

(2)日本人技術者が初めて監督した工事

日本人技術者が初めて監督したケーソン工事は1908年の韓国清川江架橋工事²⁾(翌年実施の鳴緑江工事³⁾の試験施工)であった。そのときの最高作業気圧は29psi、1回あたり高压下滞在4時間と1psi/分の漸降方式減圧採用が報告されている。

(3)本邦初のニューマチックケーソン工事

本邦初のケーソン工事は、1925年に米国技術者指導のもとに東京・永代橋基礎工事⁴⁾で実施され、階段方式減圧⁵⁾が採用された (Fig. 3)。参考文献4)や5)に加圧要領が報告されていなかったが、報告された減圧要領が参考文献6)の加減圧プロフィール (Fig. 4参照: 最高作業気圧45psi ≒ 0.31MPaまで記載)に一

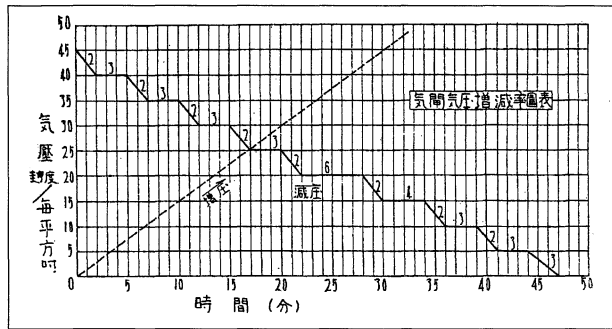


Fig.4 Compression and decompression profiles on excavation for Tanna Tunnel (Year 1926).⁶⁾
The straight line running toward upper right-hand direction represents compression speed.

致するので、永代橋工事ででの加圧要領が15psi/10分 \approx 0.1MPa/10分であったと推測できる。永代橋工事では、作業気圧に応じて最長高圧下滞在時間を設定しており、25psiでは3時間 \times 2回の滞在中間の休憩1時間であった。作業気圧区分毎の減圧症（以降、DCSと略称）発症件数は守口博士が報告⁵⁾しているが、気圧区分に応じた作業員数までは報告していないので、発症率は不明（ケーソン1基当りの発症率は計算可能）である。しかしながら、報告を改めて分析すると、圧力区分10~15psiで3件、16~20psiで7件、21~25psiで16件、26~30psiで45件、31~35psiで16件であったことがわかった。この時代（1925~1933年）のDCS発症件数データ⁷⁾も同様に、圧力25psi \approx 0.17MPa付近で発症急増傾向を報告している。

(4)高気圧作業の減圧要領変遷傾向

(3)節の補完と(5)節以降の論旨展開を理解し易くするために、予め減圧要領の変遷を、この節で要約し、概観することにした。減圧要領の対比例として、圧力0.3MPaクラス滞在60分を想定するとFig.5が得られた。図の①は永代橋工事の減圧プロフィールで、②は本邦初の高気圧作業法令（1937）、③と③-2は②を改訂（1947）した減圧要領での法解釈相違から得られた減圧プロフィールである。N.Y.は1947法令が参考にした米国・ニューヨーク州の法令にしたがった減圧プロフィールである。④は現在の高圧則・別表第1の圧力0.29MPaから抽出した。

(5)日本で最初の高気圧作業の法律

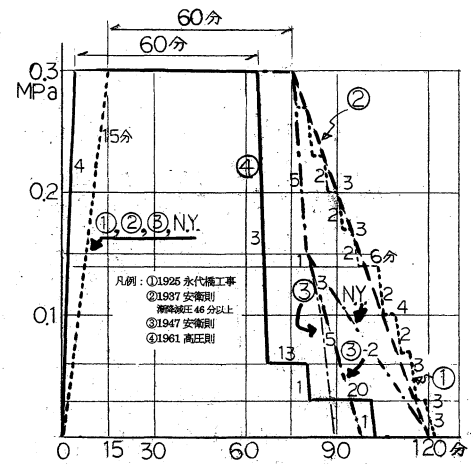


Fig.5 Examples of decompression profiles.
The working pressure is 0.3MPa and the bottom time is 60 minutes in all cases.

- Legend : ① Eitai Bridge
② The first regulation 1937
③ Revised regulation 1947 interpretation-1
③-2 Revised regulation 1947 interpretation-2
④ New decompression table 1961,
N.Y. : State of New York, Dept.Labor, industrial Code Bull.22, 1938

(1937年施行)とDCS発症状況例

我国で最初の高気圧関連法令は、1937年に内務省令第41号土木建築工事場安全及衛生規則・第29条として施行された。

Table.2は該当箇所の抽出である。

関門海底トンネルの工事記録「関門隧道工事誌」⁸⁾は法制定直後1939~1940年の減圧症発症状況（期間限定で調査）を圧力10~14psiで0件、15~20psiで11件、21~25psiで22件、26~30psiで31件、31~35psiで27件、36psi以上で178件であったことを報告している。戦時体制下での工事執行のためもあって、工事期間を通じての各圧力区分での従事者数、DCS記録や工事記録がない。同工事誌の「まえがき」で一部の記録散逸を断っている。

(6)改訂された高気圧作業の法令（1947年）

その後10年を経て、この法律は、1947年10月施行の労働省令・第9号労働安全衛生規則第3章高気圧第188条に引き継がれた（略称：安衛則・減圧要領）。Table.3はその一部抜粋である。重要な点は、Table.2

Table.2 The first Japanese Regulation for Compressed air work

内務省令第41号土木建築工事場安全及衛生規則・高気圧関連抜粋

第29条事業主は高気圧（「ゲージ」圧力1kg/cm²以上）内の作業に関しては次の各号の規定を遵守すべし。

1. 医師の診断により作業に適合せずと認められた者を従事せしめざること。
2. 労働者を1日につき2回を超えて作業せしめざること。
3. 労働者の出入の為にする気室内の加圧及減圧は徐々にこれを行うこと。
4. 1回の作業時間（前号の加圧及減圧の時間を除く）及前号の減圧時間は下表によること。（以下省略）

ゲージ圧力	1回の作業時間	減圧の時間
1.6kg/cm ² 以下	3時間40分以内	15分以上
2.2kg/cm ² 以下	3時間以内	20分以上
2.6kg/cm ² 以下	2時間以内	30分以上
3kg/cm ² 以下	1時間以内	45分以上
3kg/cm ² を超えるとき	45分以内	1時間以上

執筆注) 平均減圧速度の目安
 $1.6/15=0.11 \text{ kg/cm}^2/\text{分}$ ・以下
 $2.2/20=0.11 \text{ kg/cm}^2/\text{分}$ ・以下
 $2.6/30=0.09 \text{ kg/cm}^2/\text{分}$ ・以下
 $3.0/45=0.07 \text{ kg/cm}^2/\text{分}$ ・以下
 $3.1/60=0.05 \text{ kg/cm}^2/\text{分}$ ・以下

Table.3 Revised Japanese Regulation for compressed air work in 1947

労働安全衛生規則 第3章高気圧（1937年の法が1947年に改訂された）

第188条ゲージ圧力1キログラム平方センチメートル以上の気圧下において、労働者を就業させる場合には、左の各号によらなければならない。

1. 医師の診断書により就業に適合すると認められた者でなければ就業させないこと。
2. 高圧室内においては、1日について2回を超えて作業させないこと。
3. 加圧及び減圧を徐々に行うこと。
4. 高圧室内における1回の作業時間（加圧及び減圧の時間を除く。）作業間の休憩時間及び減圧時間は次表により行うこと。

ゲージ圧力	1回の作業時間	休憩時間	減圧時間
1.3kg/cm ² 以下	4時間以内	30分以上	圧力の1/2までは毎分0.3kg/cm ² の割合で減圧し残りは下記の割合で減圧すること。 1.05 kg/cm ² 以下は毎分0.2kg/cm ² 以下 1.4 kg/cm ² 以下は毎分0.15kg/cm ² 以下 2.1kg/cm ² 以下は毎分0.1kg/cm ² 以下 2.1 kg/cm ² 以上は毎分0.08kg/cm ² 以下
1.8kg/cm ² 以下	3時間以内	1時間以上	
2.3kg/cm ² 以下	2時間以内	2時間以上	
2.6kg/cm ² 以下	1.5時間以内	3時間以上	
3.0kg/cm ² 以下	1時間以内	4時間以上	
3.3kg/cm ² 以下	45分以内	5時間以上	
3.3kg/cm ² 以下	35分以内	6時間以上	

注) 条文が縦書きのため、横書きでは上記文中の「左」を「下記」と読み替えること。

に記載されていた総減圧所要時間への規制がないことである。このことが、減圧実施で混乱を招いた面もあると推察する（本節の後半で紹介）。Table.4の減圧要領は米国・ニューヨーク州法律を参考⁹⁾にしたこと（作業時間は同じ、減圧速度はpsi/分からkg/cm²/分換算相当値）が両者の対比から視える。

参考文献9)におけるニューヨーク州法律の減圧要領解説を要約すると、次のようになっている。

例:ゲージ圧40psiの場合、作業圧力が30psiを超えるので、平均減圧速度1psi/分とし、総減圧時間は40psi/1psi/分=40分以上とする。このとき最初の減圧は圧力(1/2)×40psi=20psiまでを5psi(≒0.34kgf/cm²)

/分の速度で行うため4分を要する。残りの減圧20psiには一様な減圧速度で40-4=36分をかければよい。作業気圧50lb以上(ゲージ圧0.34MPa以上)は緊急時以外使えない。なお、作業時間は1シフト当りの時間と1日2回、さらに中間の休憩時間を指定している。例えば、40psi作業の場合、1シフト当り1時間の作業で、休憩は4時間である。

例で紹介した減圧要領はtable.2に近似している。Table.3の「減圧時間」欄にしたがうと、Table.2との差が大きいことがFig. 5から判断できる。

Fig. 5の③、③-2とN.Y.は次のようにして得た。

* Fig. 5の③: Table- 3において(1/2)×3.0=

Table.4 参考文献9)の該当箇所原文(第3版<1941>)

Table-4 Extract from reference 9)

10-19. Rules for Compressed-air Workers.
The rules of New York State (1938) governing the time of decompression are considered to be quite satisfactory in protecting the workers. It is specified that decompression must give a drop of half the maximum gage pressure at the rate of 5 lb. per min., the remaining decompression being at a uniform rate of such value that total time will not be less than that required by the following table: ¹

Gage pressure, pounds per square inch	0—15	15—20	20—30	30 and up
Average rate, pounds per minute (not more)	3	2	1.5	1

For example, if the maximum gage pressure is 40 lb., the first 20 lb. may be dropped at the rate of 5 lb. per min., requiring 4 min.; hence the remaining 20 lb. drop will require 36 min., since the total required time is 40 min. Pressures in excess of 50 lb. may not be used except in case of an emergency.

The New York rules provide that the working time is any 24 hr. shall be divided into two shifts under compressed air and an interval in the open air, as follows:

Gage pressure, pounds	0-18	18-26	26-33	33-38	38-43	43-48	48-50
Time per shift, hours, maximum	4	3	2	1+ 1/2	1	3/4	1/2
Total time, hours, maximum	8	6	4	3	2	1+ 1/2	1
Rest interval, hours, minimum	1/2	1	2	3	4	5	6

¹ State of New York. Dept. Labor. Industrial Code Bull. 22.

1.5kg/cm²までは1.5/0.3= 5分で減圧し、残りの1.5kg/cm²を3つに区分し、(1.5-1.4)/0.1= 1分

(1.4-1.05)/0.15≐ 3分

1.05/0.2≐ 5分

合計減圧時間14分

* Fig. 5の③- 2 : Table.3において (1/2) × 3.0=

1.5kg/cm²までは1.5/0.3= 5分で減圧し、残りの1.5kg/cm²を1.5/0.1=15分で減圧する。合計20分の減圧時間となる。

* N. Y. 方式の考え方とTable.2の考え方を併用できると仮定し、総減圧時間を45分とする。

最初の(1/2)×3.0=1.5kg/cm²までは1.5/0.3= 5分で減圧し、残りの1.5kg/cm²を45- 5 = 5

分かけて一様減圧するので、Fig. 5のN. Y. のプロフィールが得られる。単位は最後にMPaへ換算した。

減圧要領の解釈要領が解説されていないので、現場技術者が戸惑ったことが推測される。

Table.5は、安衛則・減圧要領にしたがって実施した

ニューマチックケーソン工事の作業気圧区分とその範囲の減圧症発症状況¹⁰⁾を示したデータである(圧力単位:lb=psi)。

また、参考文献11)は、作業気圧(lbs=psi)区分と総作業員数(カッコ書き)のうち罹患者%を、25~30psiで33%(54名)、30~35psiで26%(93名)、35~40psiで35%(57名)、40~45psiで47%(161名)のように報告(1959年施工)している。作業室内が20℃前後、高湿の、当時の掘削作業は、スコップやつるはしによる人力掘削であった。掘削作業員は海水パンツのみを作業衣とし、ケーソン中央部掘削を終えると、刃口直下を掘削(刃口浚い)してケーソンを沈下させ、1シフトの作業終了にしていた。沈下量から掘削土量換算ができるので、それが1シフトの出来高すなわち賃金支払い対象となっていた。

DCS発症予防として1.0psi/分以下の減圧要領が指導されていた。これを用いると、圧力0.3MPaクラス滞在60分を想定した場合、総減圧時間は3.0×14.7≐ 44.1psiより45分となる。また、マンロック未設置のためマテリアルロック内での減圧速度は、減圧によるロック

Table.5 An example of DCS data in 1958:海門橋工事(日本道路公団・那珂湊)¹⁰⁾

圧力MPa 0~0.13 ~0.16 ~0.20 ~0.23 ~0.27 ~0.30 ~0.33 ~0.37 ←口演者追加

ケースン	0~19			20~24			25~29			30~34			35~39			40~44			45~49			50~54			計										
	稼働人員	発生件数	%	稼働人員	発生件数	%	稼働人員	発生件数	%	稼働人員	発生件数	%	稼働人員	発生件数	%	稼働人員	発生件数	%	稼働人員	発生件数	%	稼働人員	発生件数	%	稼働人員	発生件数	%								
P ₁	235	0	0	105	1	1.0	34	1	2.9	46	9	20.0	23	1	4.3	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	443	12	2.7				
P ₂	268	0	0	56	1	1.8	23	1	4.3	21	2	9.5	34	3	8.8	21	4	19.0	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	423	11	2.6				
P ₃	227	0	0	128	0	0	32	1	3.1	122	5	4.1	72	10	13.9	138	22	15.9	86	23	26.7	61	23	37.7	完了	完了	完了	完了	完了	完了	866	84	9.7		
P ₄	321	0	0	200	0	0	43	1	2.3	22	3	13.6	81	4	4.9	139	17	12.2	91	4	4.4	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	897	29	3.2			
P ₅	446	0	0	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	446	0	0	
合計	1497	0	0	489	2	0.4	132	4	3.0	211	19	9.0	210	18	8.6	298	43	14.4	177	27	15.3	61	23	37.7	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	完了	3075	136	4.4

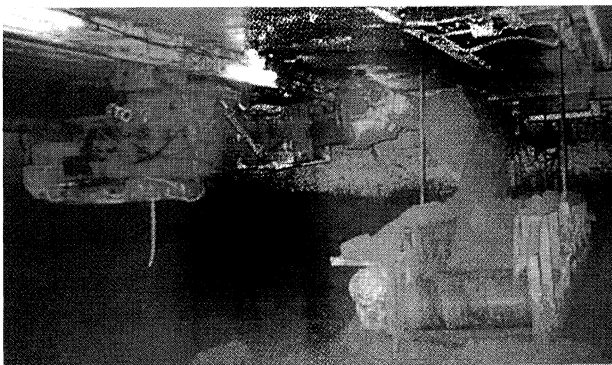
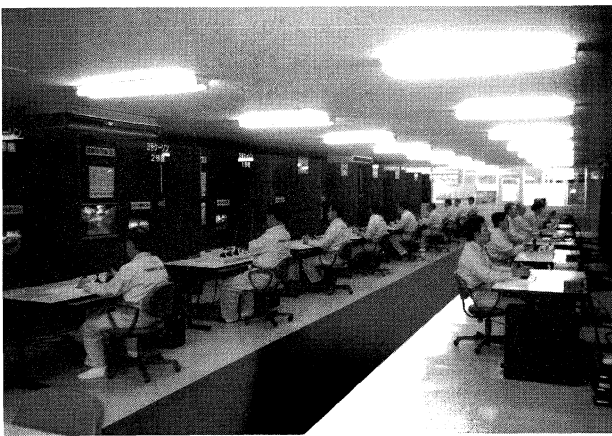


Fig.6 Caisson shovel & soil loader

内空気の断熱膨張で霧が立ち込める程度（エアロック内空容積5.4m³）を目安としていた。この状況をロック内で観察しながら打音信号で圧力制御をエアロック外の圧力制御員（ロックテンダー）に伝えていた。しかしながら、DCS発症は抑制されなかったことを佐藤良策氏（元・日本圧気技術協会事務局長）提供資料は教えてくれた。一部の工事において40psiで滞在時間超過や漸降式減圧30分が行われたりしていた。

梨本先生は1952年の東京港・晴海埠頭ニューマチックケーソン工事から減圧症治療に携わったが、1957年当時に既に「1947年規則の再検討の要あり。」との意見

をもっており、1943年版U. S. N. Diving Manualを改良した減圧表の試用を行っていた。その減圧表¹²⁾は作業気圧3.0kg/cm²、60分作業で合計40分（最初の減圧停止まで4分、減圧停止0.6kg/cm²で18分、0.3kg/cm²で16分、途中の減圧1分）の減圧時間で、DCS発症無しを報告¹²⁾していた。

(7) 高気圧障害防止規則施行(1961年)：階段減圧方式採用の減圧表施行

労働省(現・厚生労働省)は労働省令・高気圧障害防止規則(旧・高圧則と略称)を昭和36年(1961年)に制定施行し、その中で減圧停止を階段方式で行う減圧表・別表-1及び別表-2を発表した。この減圧表は2000年に圧力単位表記等をSI単位系に移行して現在も使われている(「高圧則」と略称)。旧・高圧則施行の翌年1962年に出版された梨本先生の著書¹³⁾が減圧表作成根拠を示唆している。そこでは、ホールデン式とその解や減圧比範囲の解説、人体組織の6区分、窒素の最長半飽和時間120分で減圧の考え方を紹介していた。なお、この書籍では酸素減圧の効果も紹介していた。このようにして制定された減圧表の効果について各種調査が継続的に行われてきたが、医師が予告して調査する場合と、いわゆる抜き打ちでデータ請求の場合では発症率に差(後者の発症率が高率)が出ているようである。減圧管理の差が出ているとも推測している。

1960年代のケーソン掘削作業も作業室内に作業員が入って行う人力掘削が主流で、労働賃金も掘削土量当り単価で契約していた。

現在は作業室内に掘削機械(ケーソンショベル)を設置し、その運転を地上に設置した運転室から遠隔操作

Table.6 DCS data in 1980era [By Mano・1994¹⁶] & by Kondo(2003年)

圧力 MPa(≒fsw)	1980～1985			1986～1990			2003, 大宮トンネル		
	総人員	DCS 発症数	DCS %	総人員	DCS 発症数	DCS %	総人員	DCS 発症数	DCS %
～0.10(33)	10,208	0		2,675	0		6,373	0	0
～0.12(40)	2,032	2		657	0		1,154	0	0
～0.14(46)	2,768	2		741	0	計	1,226	1	0.08
～0.16(53)	2,152	5	0.16	1,341	1	0.13	1,259	1	0.08
～0.18(60)	1,714	4	(15/9,649)	1,355	1	(7/5,310)	1,313	1	0.08
～0.20(66)	983	2		1,216	5		644	2	0.31
							計(5/5596)		0.09
～0.22(73)	743	9		2,947	12		700	0	0
～0.24(79)	489	16		2,348	12	計	335	2	0.60
～0.26(86)	665	9	1.37	2,023	21	0.83	1,307	15	1.15
～0.28(92)	1,287	11	(49/3,586)	4,326	13	(195/23,470)	1,641	13	0.79
～0.30(99)	402	4		11,826	137		計 (30/3983)		0.75
～0.32(106)	212	9		287	6		注：酸素減圧採用せず。 自動掘削は0.18MPaから 開始した。		
～0.34(112)	57	0		16	1	計			
～0.36(119)	25	0	3.06	36	2	2.86			
～0.38(125)	0	0	(9/294)	11	0	(11/384)			
～0.40(132)	0	0		34	2				
0.41～(～135)	0	0		77	1	1.30(1/77)			
Total	23,737	73	0.31	31,916	214	0.67	15,952	35	0.22
P>0.10(33)	13,529	73	0.54	29,241	214	0.73	9,579	35	0.37

1990年までのデータ出典：参考文献¹⁶⁾

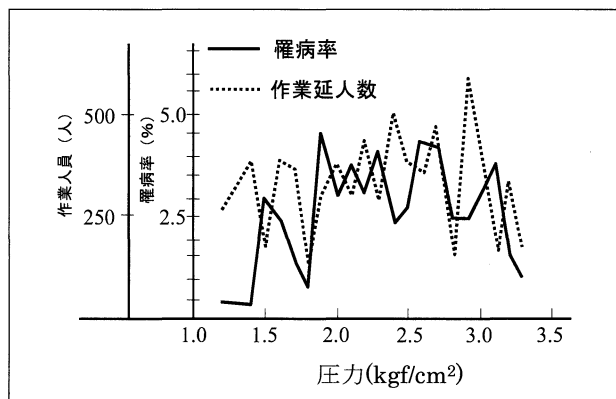


Fig.7 An example of DCS data in 1965¹⁴⁾

により掘削作業員を高気圧作業から解放する方式が主流になっている。

その結果、掘削作業は作業気圧、高気圧環境滞在時間すなわち掘削時間や減圧時間の制約もなく地上と同じ掘削時間を確保できるようになった。その結果、労働賃金は月給制となっている。Fig. 6は3基のケーソン掘削を17台のケーソンショベルで行い、それらを遠隔操作している状況である。しかしながら、掘削機械や遠隔操作に必要な不可欠な作業室内の照明装置などの維持管理や修理を行う作業員の高気圧作業が残され

た。かれらに対して、日常点検作業で短時間の高圧下滞在、修理作業では比較的長時間の高圧下滞在が要求される。圧力慣れのない修理担当技術者が突然高圧下滞在をする機会が多くなり、体質やその日の体調によっては減圧症発症の要因を抱え込むことになる。減圧症発症が減少しない理由の一つとも言える。

Fig. 7は1965年の減圧症発症データ¹⁴⁾である。掘削面積1500m²クラスの超大型ケーソン掘削に電動ブルドーザー6台を用いたが、大部分は人力掘削であった。作業圧力0.2MPa (2.0kgf/cm²) を超えると発症率(罹病率) 2.5～4.0%を記録している。1970年代には梨本先生、眞野教授らにより調査が行われた¹⁵⁾。Table.6は1980年から現在までの減圧症発症データの一部である。(8)酸素減圧の普及：1995年以降

空気減圧での減圧症の発症件数が減少しないことから酸素減圧採用が普及してきた。この減圧要領は高圧則に規定されていないものの、労働大臣審査^{注)}での当局の指導でもある。しかし、法規制外のため、実施費費用などが発注機関の工事計画積算に反映される機会は少ない。酸素減圧実施は減圧症発症軽減に意

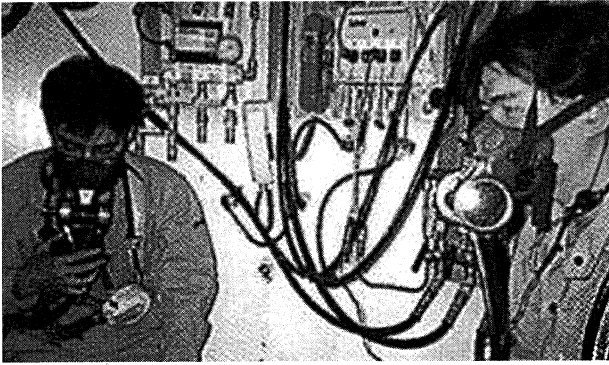


Fig.8 Oxygen decompression in man lock

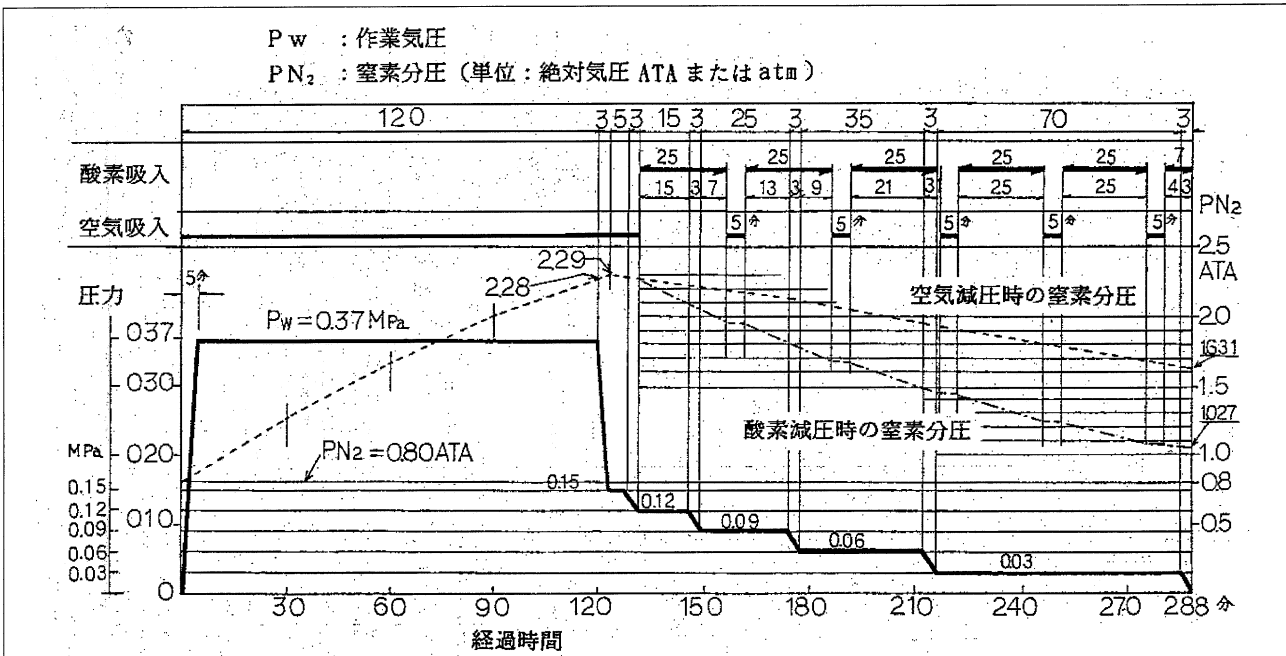


Fig.9 Effects of oxygen decompression ¹⁷⁾

欲的な施工者自主管理に依存しており、経済的負担増となっているのが実情である。

注)労働大臣審査：労働安全衛生法・第88条で建設業の事業において、仕事の内容が重大な労働災害を生ずるおそれがある場合に労働大臣がその計画を審査し、指導する制度で、高気圧作業では圧力0.3MPaを超える場合が、それに該当する。審査は、当局担当者と専門分野の有識者が行い、その結果を受けて指導事項が文書で通知される。

マンロックの室内は圧力をもった高圧空気で満たされているので、酸素減圧実施は専用呼吸マスクを用いて行う。マスクから供給される酸素の圧力は室内圧力より若干高めにマスクのレギュレーターで設定されて、室内空気を吸入しないようになっている。酸素吸入はマンロック室内圧力が0.12MPa以下となった段階から実施することが多く、吸入酸素の分圧は1.2atm以下に抑え

ることになり、酸素中毒予防ができる。また、肺機能回復のために25分酸素吸入と5分間のエアブレイクの交互連続吸入で大気圧へ帰還する。なお、呼気は室外へ直接排気している。マンロック室内排気は減圧停止圧増大や酸素濃度増大を伴うため、それを防止するためである。Fig. 8は酸素減圧実施状況である。

Fig. 9¹⁷⁾は酸素減圧の効果を窒素分圧の低下状況から定量的に見た図で、ホールデン式の解と120分組織で計算した結果である。図の点線表示は空気呼吸の窒素分圧変動状況で減圧終了時に窒素分圧1.631atm、体内ガス係数換算で約2.1となり、高圧則の減圧表に記載されている値となる。一方、減圧時の実線表示は酸素減圧での窒素分圧低下状況で、減圧終了時には窒素分圧がさらに低下して、より安全な領域にあること

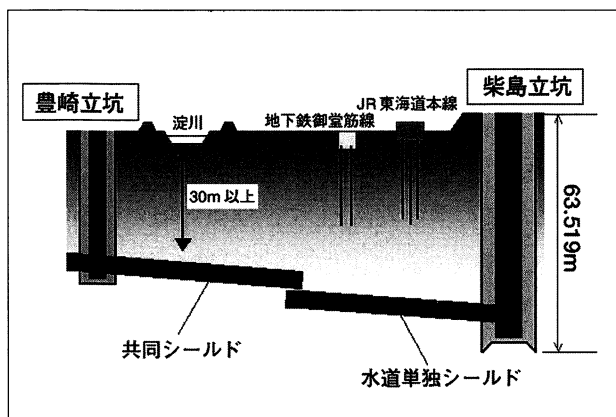


Fig.10 An example at a very deep shaft

を示している。このことは理論的に減圧時間短縮可能すなわち1回の高圧下滞在時間を長く設定できることを示唆しているが、労働大臣審査における指導は減圧時間短縮を容認していない。

ニューマチックケーソンの用途として、より深い位置への地下構造物建設が要求されるようになり、このことは、作業気圧がさらに高い環境での掘削機械修理などの高気圧作業を要求することになった。高圧則減圧表適用圧力は現在、最高0.4MPaまでであるが、それを超える作業気圧での高気圧作業のニーズがでてきた。Fig. 10は、大阪市の淀川横断水道トンネル立坑の一般図である。大阪市や関西電力(株)の事業計画に対し、河川管理者(国土交通省)は共同溝方式と図のようなシールドトンネル埋設深さ30m以上を要望したので、地表面下63.5mまで沈設する立坑ケーソンの計画となった。このケーソン沈設は、当初最高作業気圧0.60MPaクラスが予想されたが、0.54MPaに収まって2002年に終了した。このような作業気圧で、空気呼吸を行うと窒素酔いにかかった作業員が複雑繊細な遠隔操作掘削機械の修理に携わることになり、すなわち飲酒状態と同様の災害発生要因を秘めての作業となるため好ましくない。弊社の技術者はゲージ圧力0.6や0.7MPaの高圧空気呼吸とヘリウム混合ガス呼吸の相異を体験している¹⁸⁾。労働大臣の審査における指導でニューマチックケーソン工事におけるヘリウム混合ガス呼吸利用が実施でき、窒素酔いのない高気圧作業への道が開かれた。この方式は既に実用段階に入っており、地上から遠隔操作さ

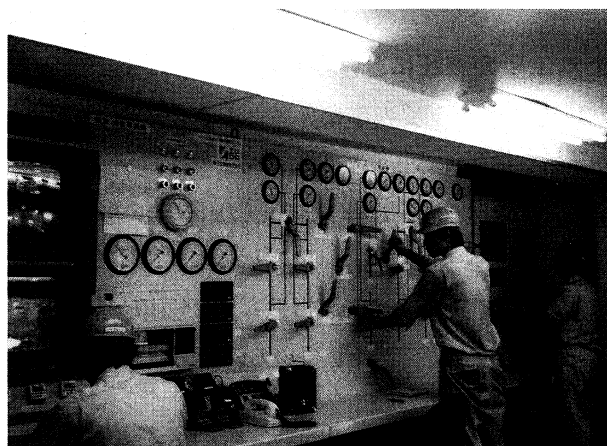
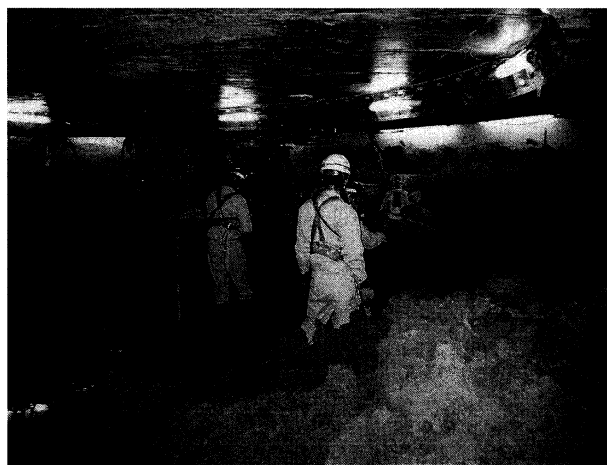


Fig.11 Personnel servicing excavation equipment in the working chamber (above) and control cabin on mixed-gas breathing system (below)

れる掘削機械などの点検修理をする技術員は高圧空気呼吸の代わりに、ヘリウム混合ガスを呼吸しながら作業する。掘削機械地上遠隔操用に視界を確保するために、作業室内は高圧空気環境にしている。現場において0.3MPaクラスの高圧空気環境で掘削機械の修理を行ってきた作業員が、空気呼吸とヘリウム混合ガス呼吸との相異を次のように述べている。空気呼吸の場合は、ボートした感じで修理し、減圧後の疲れがひどかったことを覚えている。ヘリウム混合ガス呼吸のときは呼吸が楽で、どこをどのように直せばよいという修理要領がすぐに頭に浮かび、作業がはかどった。減圧後の疲れは残らなかった。

1995年の名古屋港における名港西大橋基礎建設工事¹⁹⁾で(株)白石により、最初の混合ガス呼吸の試みが成功裡に終わった。眞野教授らが呼吸と減圧を指導した。

それ以降、11基のケーソンが減圧症もなく混合ガス呼吸の支援を受けて沈められた。適用最高圧力は0.54MPa、90分滞在と217分の減圧であった。この場合は、混合ガスとしてトライミックスを選択し、総作業員は657名であった。

混合ガス呼吸はニューマチックケーソン作業の圧力が約0.3MPaあるいは0.4MPa以上で実施することになっている。減圧時には酸素減圧を併用している。Fig. 11はヘリウム混合ガス呼吸作業の状況で、掘削機械メンテナンスと圧力管制状況である。

土木工事の減圧における矛盾

以上述べた事項の中から、土木工事の減圧における矛盾を抽出すると次のようになる。

- ①窒素酔いは敏感なヒトで、圧力0.3MPaの高圧空気を呼吸してその症状が出ると言われている。一方、高圧則減圧表は留意点指摘もなく圧力0.4MPaまでの高気圧作業を容認しているため、注意勧告が必要と考える。
- ②標高1000mを超える施工位置で、高気圧作業を実施する場合の減圧に対する留意点指導が必要と考える。
- ③建設工事発注の特記仕様書には「法令遵守」コンプライアンスが記載されている。建設事業計画担当当局は法令に規定された方法や設備設置を事業予定費用に繰り入れるが、規定外は計上しない。担当が異なる厚生労働省が行う作業員の健康を守るための指導、例えば酸素減圧の実施の限界がここに存在する。よいことはやってよい、しかし金はみないぞと言うのが現状である。

法の規定が存在するだけでこの問題は解決する。規制緩和と要望の一つである。敢えて自主管理実施でその普及に努めているのが、現在のニューマチックケーソンの高気圧作業における酸素減圧やヘリウム混合ガス呼吸にも言える。

- ④別表-2の適用条件や窒素酔いに対する知見の欠如からヘリウム混合ガス呼吸の有効性を認識できず、さらに高圧則別表第2の適用条件を十分に理解せ

ず全ての高気圧作業において圧力0.9MPaまで空気呼吸でよいという一部の建設部門の工事管理者がいることが問題である。その見解を改めてもらうためにも法規制の解釈例注釈追記が必要である。

法規制の前の段階として、空気呼吸の代わりに混合ガス呼吸で高気圧作業を行う場合のガイドライン作成とその公開が企画されてもよい時期と考える。建設事業計画担当当局の認識度向上が工事費の適正価格評価につながり、それが混合ガス呼吸利用高気圧作業の安全性向上に寄与する。以上で、私の話題提供を終わる。

あとがき

日頃、減圧症治療に取り組んでおられる方々に、減圧症を発症させる土木工事とはどんなものなのかということ、何が課題かを理解してもらえれば話題提供者の目的は達成される。それらの理解をバックアップに課題解決の活動に向かいたい。

2004年4月時点の年間ケーソン施工基数は完了と施工中を合わせて130基に及んでいる（日本圧気技術協会調べ）。橋梁基礎に採用するケーソンの大部分は河川渇水期の11月から翌年5月にかけて日本全国で施工される。この時期における河川内工事ではエアロックを見出せば、それがケーソン工事である。3～4月の最高作業気圧での高気圧作業最盛期はDCS発症多発可能性を秘める時期でもあり、より一層入念な健康管理や減圧管理推進指導を作業所担当者や本支店合同安全パトロールなどで実行している。

以上

参考文献

- 1) 大蔵省臨時税関工事部、横浜税関海面埋立工事報告、461頁、東京市、大蔵省、1906年
- 2) 中野 深、韓国清川江架橋工事報告、帝国鉄道協会報、第11巻第3号、42頁-45頁、1910年
- 3) 山田亀治、韓国鴨緑江橋梁工事報告、帝国鉄道協会報第14巻第1号、141頁-142頁、1913年
- 4) 釘宮 磐・森田三郎、永代橋基礎工事概要、土木

- 学会誌, 第13巻第5号, 688頁, 1927年
- 5) 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8号, 621頁, 1929年
- 6) 鉄道省熱海建設事務所編纂, 丹那隧道工事誌, 375頁, 土木学会, 東京市, 1936年
- 7) 正子重三, 我国に施ける圧搾空気作業, 土木学会誌, 第20巻 第12号, 1519頁, 1934年
- 8) 運輸省下関地方施設部, 関門隧道, 運輸省下関地方施設部, 609頁
- 9) Henry S. Jacoby & Roland P. Davis: Art. 10-19. Rules for Compressed-air Workers. Foundations of Bridges and Buildings. 3rd. edition Mc GRAW-HILL BOOK Co., INC. 1941, pp358-359. この成書は改訂3版・1941年4月(初版発行1941年)である。全535頁のうち63頁に亘ってニューマチックケーソンを解説し, そのうち7頁に高気圧作業手順やDCS予防の減圧の解説を当てている。
- 10) 高橋 信策, 海門橋架設工事について. 土木学会誌, Vol. 45-3, 15頁, 1960年
- 11) 飯吉精一, 基礎とずい道の掘削. 64頁, 技報堂, 1964年
- 12) 梨本一郎, 高気圧による障害(2)医学の歩み. 第24巻・第3号, 234頁, 1957年
- 13) 梨本一郎, わかりやすい潜函病予防法の解説. 19頁, 工学出版, 1962年9月, 東京都
- 14) 肥後春生, 梶本政良, 志関秀雄, 志村 喬, 大型ケーソンによる地下工場 土木学会年次講演会講演集. 135-4頁, 1967年
- 15) 眞野喜洋, 梨本一郎, 高圧作業者の実態調査その2. 潜函作業者の減圧症罹患率. 日高圧医誌, 104頁, 1973. 8
- 16) 眞野喜洋, 高圧環境と健康. 285頁, (財) 労働科学研究所出版部, 1994年
- 17) 石井通夫, 窒素分圧の話・建設と圧気. 2002年1. 15, 日本圧気技術協会
- 18) 芝山正治, 小田章治, 竹内純一郎, 眞野喜洋, 毛利元彦ら, 8ATA空気環境におけるAirおよびTrimix吸入ガスに伴う作業効率. 99頁, 生理人類学会誌, Vol. 9, No. 2, 1990年4月
- 19) 檜山義光, 安川義行, 宮内英敏, 立道勝登, 名港西大橋(Ⅱ期線)塔基礎の設計施工 橋梁と基礎. Vol. 29, No. 9, 11頁, 建設図書, 1995年