

ブラックプール減圧表改訂表使用による 減圧管理実績

蜂須賀和吉¹・土肥俊満¹・朝岡正典¹
山本十四郎²・廣山浩³・岩佐実⁴・豊田敏之⁵

¹国土交通省 伏木富山港湾事務所（〒930-0856 富山県富山市牛島新町11-3）

²鹿島建設株式会社 関西支店 土木部（〒550-0011 大阪府大阪市西区阿波座1-3-15）

³鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

⁴正会員 鹿島建設株式会社 北陸支店 土木部（〒950-8550 新潟県新潟市万代1-3-4）

⁵鹿島建設株式会社 東京土木支店 土木部（〒107-8477 東京都港区元赤坂1-3-8）

当現場は、富山県射水市（旧新湊市）の富山新港港口に架かる斜張橋「新湊大橋」（仮称）の東側主塔基礎をニューマチックケーソン工法で築造するものである。最大掘削深度が-48.0mと深く、最大掘削深度での作業室内理論気圧は0.484MPaとなる。

現行法での減圧管理は、厚生労働省で定める高気圧作業安全衛生規則（高圧則）の減圧表（別表第1）使用が原則であるが、高気圧障害（減圧症）の発症率の低減の観点から東京医科歯科大学眞野教授のブラックプール減圧表改訂表を採用し、酸素減圧および3種混合ガスの併用による減圧管理について厚生労働大臣の承認を受けて、減圧症の発症者数『ゼロ』で工事を完了した実績について報告する。

**キーワード：ニューマチックケーソン，圧気工事，大深度，高気圧障害，減圧症，
3種混合ガス，ブラックプール減圧表改訂表，酸素減圧，減圧管理**

1. はじめに

「新湊大橋」（仮称）は、物流の円滑化と分断された東西の地域活性化のため、新湊地区の港口部を結ぶ臨港道路東西線として整備が進められている。

港口に架かる中央径間長 360mの斜張橋の主塔基礎は、以下の特徴からニューマチックケーソン工法が採用された。

- ①海上施工となる
- ②荷重規模が大きい
- ③支持層深度が深い
- ④周辺環境への配慮

当工事の東側主塔基礎は、2003 年冬より海上仮設工事から開始した。

厚生労働省から減圧管理にブラックプール減圧表改訂表の使用と酸素減圧、3種混合ガスの使用について承認を得て作業し、減圧症の発症ゼロで高気圧下の作業を終了したので、その実績を報告する。



図-1 臨港道路富山新港東西線 完成イメージ

2. 工事概要

工 事 名：伏木富山港(新湊地区)道路(東西線)橋梁
(P23)基礎(ニューマチックケーソン)工事

発 注 者：国土交通省 北陸地方整備局

施 工 者：鹿島・前田・本間特定建設工事共同企業体

工事場所：富山県射水市堀岡西新明神地先

工 期：2003(H15).9.3～2005(H17).9.30

主要工事数量：

(1)除却工 6,946m³

(2)仮設工(築島工, 栈台工他) 1 式

(3)ニューマチックケーソン工

ケーソン(B27.0m×L12.0m×H44.0m) 1 基

掘削土量 15,016m³

コンクリート 7,513m³

頂版(B29.0m×L13.0m×H6.0m)

コンクリート 2,250m³

(4)ニューマチックケーソン設備工 1 式

(5)計測工 1 式

本工事は、道路橋梁基礎のニューマチックケーソンとしては日本最大深度である。作業室内の理論気圧 0.484MPa という高気圧下での作業となり、その安全対策を十分に行う必要があった。

高気圧下での作業では、暴露圧力が高くなり人体への影響や負担も増大し、減圧症の発症率が高くなる。近年、ニューマチックケーソン工事でも大深度化が進んでおり、減圧中のトラブルが原因で重度の減圧症を発症し、重大災害も発生している。

本工事は、ゲージ圧力 0.3MPa 以上の高気圧下で作業を行うため、労働安全衛生法第 88 条第 3 項及び労働安全衛生規則第 89 条の 2 の第 6 項に該当する工事であり、厚生労働大臣に建設工事計画の届け出を行い、審査を受けた。

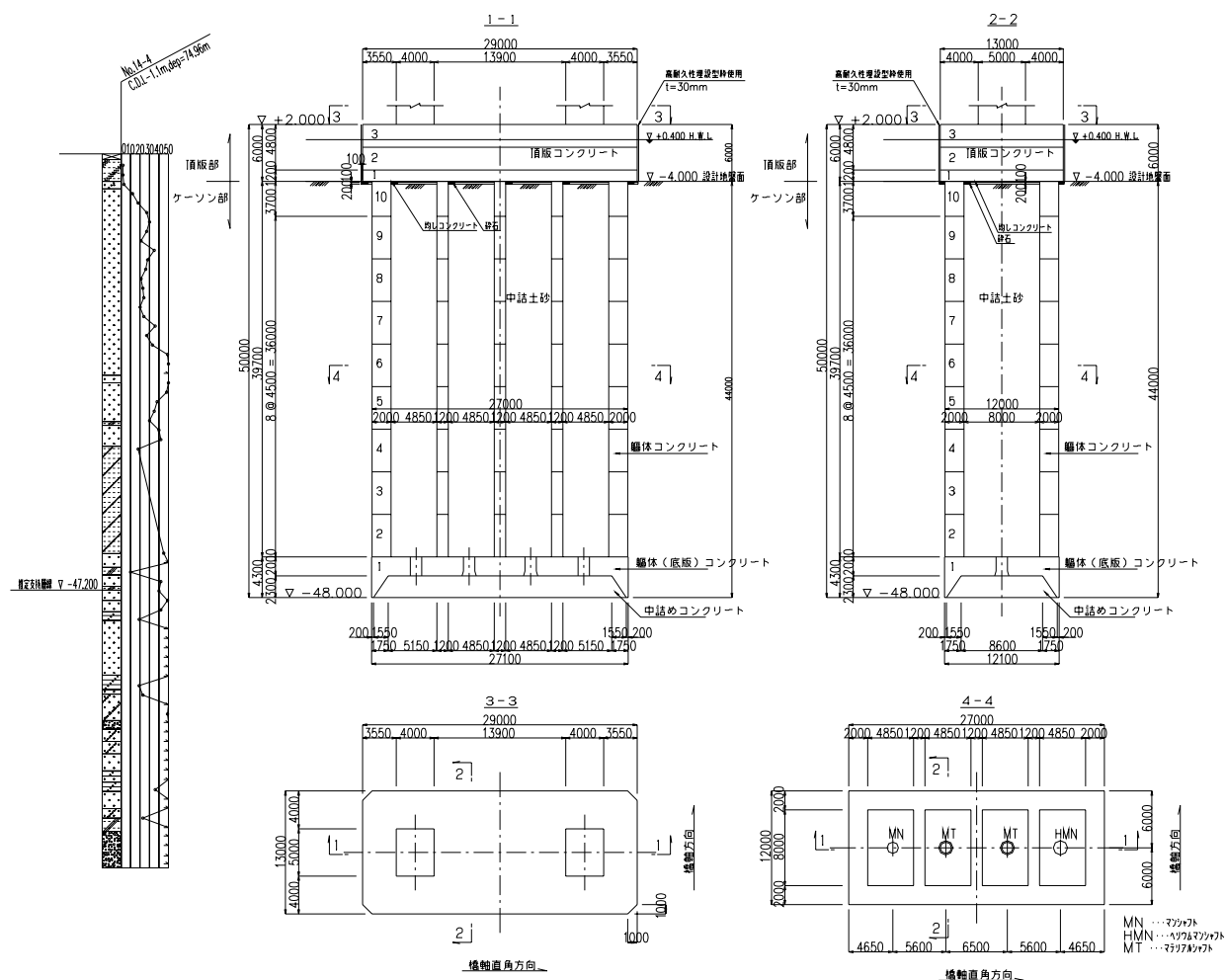


図-2 P23主塔ケーソン基礎構造図

3. 減圧管理計画

(1)高気圧障害（減圧症）について

日常平地で生活している環境圧力絶対気圧は1気圧、ゲージ圧力では0.0MPaである。ニューマチックケーソン工事のような高圧室内業務の入函者は、これ以上の高い圧力下で作業しなければならない。作業終了後に高気圧下から戻る際、減圧管理方法に問題があると種々の障害を起こすことがある。

ニューマチックケーソン工事にもっとも関係する高気圧障害は『減圧症』と呼ばれる症状である。減圧症は、高気圧下では圧縮された酸素と窒素が肺から血液中に取り込まれるが、急激な減圧を行った場合、体内に溶解した窒素ガスが過飽和状態となりビールの栓を抜いたごとく体内で気泡を形成し、血管閉塞や筋肉や神経組織を圧迫することにより発症するものである¹⁾（図-3）。最も多い症状は関節筋肉痛（ベンズ）であり、肘や肩、膝などの高気圧下の作業で負荷のかかった関節部に起き易く、激しい痛みを伴う。その多くが減圧後の1～2時間以内に発症するのが特徴であり、治療法としては再圧治療タンク（ホスピタルロック）での再圧治療を行うことで症状は解消される。

鹿島施工のニューマチックケーソン工事における減圧症の発症者数を表-1に示す。減圧症発症者は、

現場の再圧治療タンクで再圧治療を行い症状は完治している。

(2)厚生労働省からの指導事項

現在国内で使用している減圧表は、高気圧作業安全衛生規則(第15条・第18条)で定める別表第1である。しかし、別表第1は厳守していても気圧が高くなるに従って減圧症の発症率が高くなり、特に0.3MPaを超えると発症率が3%を超えるといわれている（表-2・図-4）²⁾。今回の計画では、東京医科歯科大学 眞野教授のご指導により減圧症の発症率が別表第1より低いことが知られているブラックプール減圧表改定表(酸素呼吸・3種混合ガス併用)の採用を計画した。

ブラックプール減圧表改定表は、英国海軍が古くから使用していた「ブラックプール減圧表」を1986年に眞野教授が改定したものである。

ブラックプール減圧表改定表は別表第1に比べ減圧時間を長く取っている。別表第1を使用した場合、1日2回の高気圧下での作業が可能となっているが、ブラックプール減圧表改定表は減圧時間が長く、1日に1回しか高気圧下の作業を実施することが出来ないのが特徴である。0.39MPaの高気圧下で100分間の作業を行った場合の減圧の比較を図-5に示す。

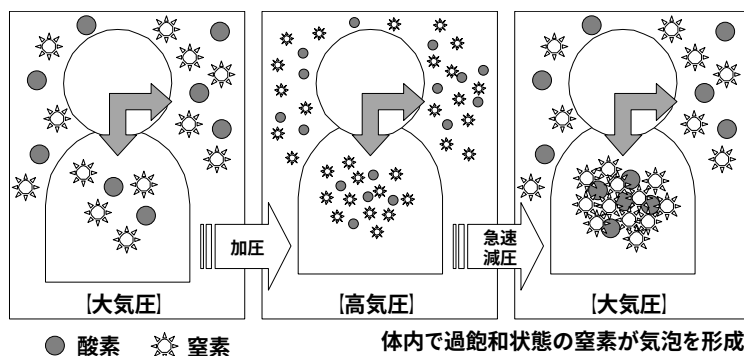


図-3 減圧症のメカニズム

表-1 過去工事の減圧症発症者数

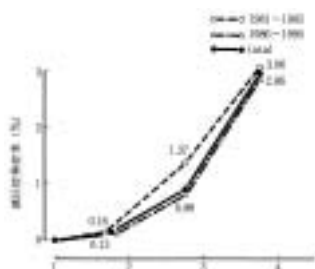
No	工事名称	施工年	施工場所	最大気圧 MPa	延べ入函者数	減圧症発症者数	減圧症発症率
1	A工事	1996	東京都	0.27	3,743 人	33 人	0.88%
2	B工事	1998	新潟県	0.27	771 人	6 人	0.78%
3	C工事	1999	東京都	0.31	845 人	10 人	1.18%
4	D工事	1999	群馬県	0.20	1,087 人	0 人	0%
5	F工事	2000	岡山県	0.40	469 人	6 人	1.78%
6	G工事	2001	石川県	0.40	2,884 人	23 人	0.80%
7	H工事	2001	埼玉県	0.20	179 人	1 人	0.56%
8	I 工事	2002	東京都	0.16	184 人	0 人	0%
9	J 工事	2003	東京都	0.10	810 人	0 人	0%
10	新湊橋梁 P23	2004	富山県	0.48	507 人	0 人	0%
			計		11,479 人	79 人	0.69%

※減圧症発症者は現場再圧治療にて完治

作業圧力 (kg/cm ²)	1980～1985			1986～1990		
	曝 作 業 員 数	減 圧 症 発 症 数	発 症 率 (%)	曝 作 業 員 数	減 圧 症 発 症 数	発 症 率 (%)
～1.0	18,268	0		2,673	0	
～1.2	2,832	2	0.07	657	0	
～1.4	2,768	2	0.06	743	0	0.13
～1.6	2,152	5	(11/3,440)	1,343	1	(7/5,300)
～1.8	1,714	4		1,358	1	
～2.0	983	2		1,218	0	
～2.2	743	9		2,947	12	
～2.4	489	16	3.27	2,348	22	0.83
～2.6	985	9	(16/5,886)	2,823	21	(38/25,476)
～2.8	1,287	11		4,226	13	
～3.0	482	4		11,858	137	
～3.2	232	9		267	6	
～3.4	27	0	0.06	16	1	0.06
～3.6	25	0	(18/294)	36	2	(11/286)
～3.8	0	0		11	0	
～4.0	0	0		34	2	
計	8	0		77	1	1.30(1/77)
総計	23,121	73	0.31	34,936	214	0.61
1kg/cm ² 以上	13,626	73	0.54	29,241	214	0.73

※1kgf/cm²=0.098MPa

表-2 作業圧力別減圧症発症率の比較



※1kgf/cm²=0.098MPa

図-4 作業圧力別減圧症発症率の比較

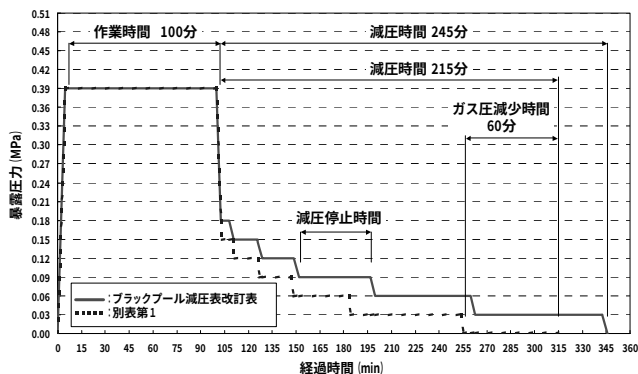


図-5 減圧表比較

現在の別表第1は、諸外国の減圧表と比較すると減圧時間が短く、減圧症の発症率が非常に高いと言われている。

作業最大圧力が0.20MPa以下では別表第1による減圧管理においても減圧症の発症率が低いこと、0.20MPaを超えると減圧症の発症率が1%近くに急増するという統計結果から、本工事の減圧管理は、作業最大圧力が0.20MPaよりブラックプール減圧表改定表による減圧管理を行うこととした。

厚生労働省は、高圧則で定める別表第1を使用し、法律の遵守を求める一方で、過去の減圧症の発

症率から別表第1への問題意識も持っていた。

そこで厚生労働省にブラックプール減圧表改訂表に関する説明を行い、その有効性を理解頂いたが、ブラックプール減圧表改訂表の承認のために、法解釈の上で譲ることのできない次の事項を指導された。

【指導事項】

- ①ブラックプール減圧表改訂表の中で、別表第1より減圧停止時間の短いものは再検討すること。
- ②最終の減圧終了後、1時間までは安全のため、作業員に重激な業務をさせないこと。
(ガス圧減少時間の確保)

ブラックプール減圧表改訂表については、眞野教授の了解を得て、以下のように修正し、厚生労働省の承認を得た。

【修正事項】

- ①の減圧停止時間は表-3のように修正した。
- ②のガス圧減少時間は、ブラックプール減圧表改訂表を使用した場合、減圧時間に含まれているため本来は不要であるが、指導事項のとおり、1時間のガス圧減少時間を追加した。

表-3 減圧表訂正箇所

暴露 圧力 (MPa)	暴露 時間 (分)	減圧 停止時 圧力 (MPa)	減圧停止時間(分)			
			別 表 第 1	ブラックプール減圧表 改定表		
				6時間 作業	メンテナ ンス作業	訂正 時間
0.27～ 0.29	60	0.06	13	—	10	15
0.29～ 0.31	60	0.06	18	—	15	20
0.31～ 0.33	135	0.03	65	60	—	65

(3)酸素呼吸併用減圧(酸素減圧)

酸素吸引の目的は、高気圧下で体内に溶け込んだ減圧症の原因となる体内溶解不活性ガス(窒素など)の排出促進効果を狙ったものである。

酸素減圧は減圧症対策として非常に有効である反面、酸素中毒症や減圧中の火災助長要因という危険な面を持ち合わせている。酸素の過剰摂取による酸素中毒症を抑制するため、酸素の使用方法については医学的指導を受け、本工事の酸素減圧実施基準は作業最大圧力が0.25MPa以上で暴露された管内作業

員を対象と定めた。

減圧開始後マンロック内の圧力が0.09MPaから酸素吸引による酸素減圧を開始する。純酸素（医療用酸素）を25分間吸引し、その後マンロック内の空気を5分間呼吸（エアブレイク）することを繰り返す。酸素減圧の酸素吸引時間例を図-6に示す。

酸素吸引による体内溶存窒素の排泄促進効果（酸素窓効果）とは、減圧時に純酸素を吸引することで、肺の中の窒素分圧がゼロになり、体内の窒素分圧と肺の中の窒素分圧との差が大きくなることで、体内溶存窒素が早く肺から排出され減圧症発症要因が除去される。

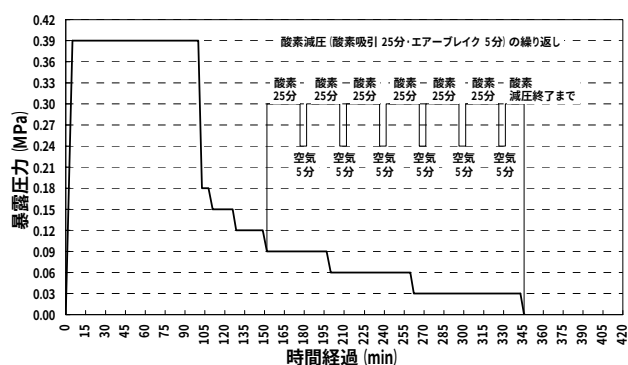


図-6 酸素減圧



(4) 3種混合ガス呼吸

3種混合ガス呼吸システムは、高気圧下での呼吸空気をヘリウム・窒素・酸素の3種混合気体とし、空気中の窒素分圧をヘリウムガスで置き換えることにより、窒素ガスに起因する減圧症や窒素酔いなどの高気圧障害を予防する。3種混合ガスの組成比率は、作業室内最大圧力をもとに以下の項目に注意し決定した。

a) 酸素中毒の予防

最大作業圧力で呼吸しても酸素中毒、かつ大気圧で呼吸しても酸欠にならない。

b) 窒素酔いの予防

最大圧力で窒素酔いにならない。

c) 減圧症発症の予防

必要な気圧を保つための残りをヘリウムとする。ヘリウムの原子質量は極めて軽く、呼吸時の気道抵抗の低減に有効である。

3種混合ガスの使用は、作業最大圧力が0.40MPaからを対象とし、できるだけ窒素の吸入を低減させるためマンロック内の圧力が0.30MPa以上の範囲で使用する。

本工事で使用した3種混合ガス組成比率を図-7に示す。

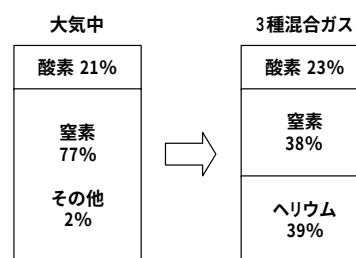


図-7 当工事使用の3種混合ガス組比率



(5)自動減圧

最大掘削深度での作業室内理論気圧は0.484MPaと高く減圧時間が長くなり、減圧停止回数も多くなる。従来の手動減圧では錯誤による減圧手順（減圧速度、減圧停止圧力、減圧時間等）の誤り、減圧停止圧力での換気操作による保持圧力のばらつきにより、不正確な減圧となりやすい。このことも減圧症発症率を上昇させる要因の一つと考えられる。自動減圧装置の使用は、正確な減圧管理を行うことができ、減圧症の予防に有効である。

手動減圧の減圧結果を図-8に示す。実線が減圧室内の圧力であり、手動バルブ操作の場合、減圧停止時間中の圧力保持が一定しておらずバラツキがある。（ダイバー用腕時計式圧力計の記録であるため圧力曲線が逆に表示される。）

自動減圧の減圧結果を図-9に示す。手動バルブ操作時の減圧と比較すると、減圧の速度、減圧停止時間中の圧力保持が一定しており、正確な減圧ができていることがわかる。減圧停止時間中の圧力の保持を表わす横実線が太く見えるのは、マンロック内の自動換気動作が狭い圧力範囲で行われており、一定の送気、一定の排気を精度良く繰り返す自動運転がなされている。

自動減圧の開始は、減圧症発症率の高くなる作業最大圧力0.20MPa以上から実施した。

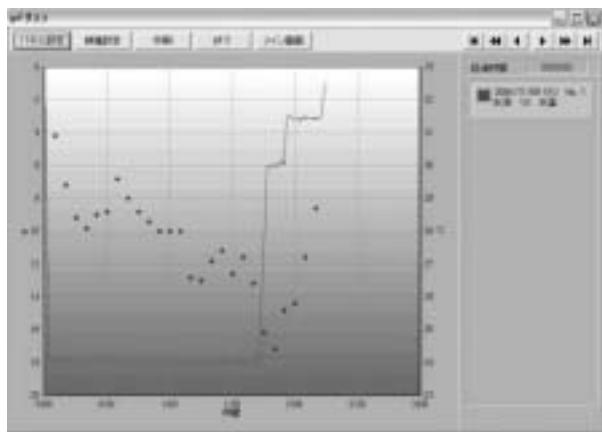


図-8 手動バルブ操作時の減圧【函内気圧 0.18MPa】

(6)圧慣れ

普段高気圧下に入っていない者が高圧室内に入る場合は、減圧症を発症しやすいため、初期の高気圧下時間を制限し、徐々に高気圧下時間を延長する圧慣れを実施することで、減圧症を予防する。

圧慣れは、0.20MPa以上の高気圧下に2週間以上入っていない者を対象とする。

(7)減圧管理計画

減圧管理計画一覧を表-4に示す。

本工事で実施した、減圧症の発症防止対策（新規採用設備を含め）を下記の示す。

- ①ブラックプール減圧表改定表の採用
- ②酸素呼吸を併用（酸素減圧）
- ③3種混合ガス呼吸作業
- ④自動減圧装置での減圧
- ⑤腕時計式圧力計（ダイバーズウォッチ）の使用
- ⑥圧慣れ入函の実施
- ⑦無人遠隔掘削
- ⑧ロック昇降エレベータの使用
- ⑨マンロック内のデジタル圧力計の設置
- ⑩マンロック内の自動圧力管理
- ⑪マンロック内のテレビ監視の実施

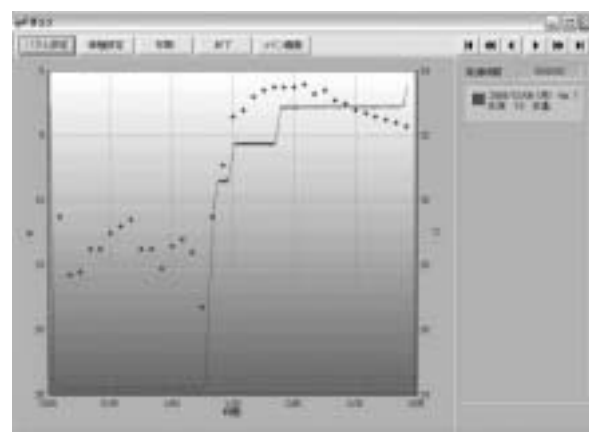


図-9 自動減圧装置運転時の減圧【函内気圧 0.24MPa】

表-4 減圧管理計画一覧

理論気圧 (MPa)	減圧表	減圧呼吸	函内呼吸	減圧方法	昇降設備	掘削方法
0.00～0.10	別表第1	空気	空気	手動減圧	螺旋階段	有人操作掘削
0.10～0.18	別表第1	空気	空気	手動減圧	螺旋階段	有人操作掘削
0.18～0.20	別表第1	空気	空気	手動減圧	螺旋階段	無人遠隔掘削
0.20～0.25	B P	空気	空気	自動減圧	エレベータ	無人遠隔掘削
0.25～0.30	B P	酸素減圧	空気	自動減圧	エレベータ	無人遠隔掘削
0.30～0.40	B P	酸素減圧	空気	自動減圧	エレベータ	無人遠隔掘削
0.40～0.48	B Pヘリウム用	酸素減圧	3種混合ガス	管制室	エレベータ	無人遠隔掘削

※ B P：ブラックプール減圧表改訂表

4. 減圧管理実績

(1) 酸素減圧実績

酸素呼吸システムを使用した酸素減圧実績を表-5に示す。

当初は0.20MPa以前に函内掘削機の1台増設を計画していたが、函内土質状況が悪く組み立てることができなかった。0.23MPa付近で組立可能な函内土質になったが、減圧症の発症率が低くなる酸素減圧開始の0.25MPa深度を待ち函内掘削機の組立を実施した。

(2) 減圧対象者数と暴露圧力

本工事の高圧則に定める高気圧作業業務（0.1MPa以上の高圧室内作業）従事者の人数は延べ507名であった。

減圧対象者数と暴露圧力の関係を図-10に示す。

様々な減圧症対策を講じた結果、作業室内最大圧力0.463MPaになった高気圧下の作業を減圧症の発症者数0名で終了する結果となった。

今回実施した減圧症対策を行わなかった場合、表-2の1986年～1990年発症率で図-10の減圧対象者数から減圧症発症率を推定すると以下ようになる。

①～⑤（0.1～0.2MPa）188人×0.13%=0.2人

⑥～⑪（0.2～0.3MPa）104人×0.83%=0.9人

⑫～⑱（0.3MPa～）215人×2.86%=6.1人

（合計）7.2人

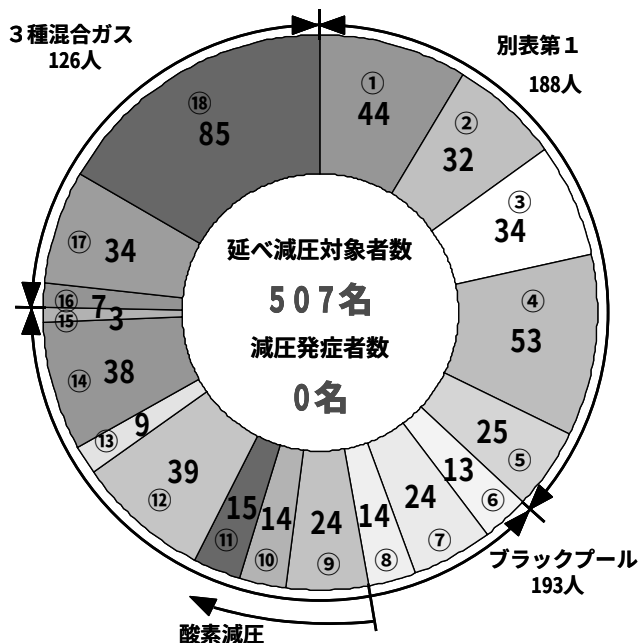
507名に対しての減圧症発症率は1.4%となる。

表-1に示す過去工事の類似条件工事であるF工事とほぼ同じ結果になったと予測されることより、今回の減圧管理は十分に効果を発揮したことが認められた。

表-5 酸素減圧実績

年月	作業気圧(MPa)	減圧表	作業人員	主な作業	減圧方法	酸素中毒有無
H16.12	0.25～0.32	B P	68人	メンテナンス・掘削機組立	自動減圧	無
H17.1	0.32～0.37	B P	51人	メンテナンス	自動減圧	無
H17.2	0.37～0.45	B P	75人	メンテナンス・掘削機組替	自動減圧	無
H17.3	0.45～0.46	B Pヘリウム用	82人	地耐力試験・函内設備撤去	管制室	無
計			276人			

※B P：ブラックプール減圧表改訂表



※0.10MPa未満の函内作業員数を除いた高圧則に定める高気圧業務（0.10MPa以上の高圧室内作業）従事者数の集計である。

①	0.10MPaを超え0.12MPa以下 別表第1
②	0.12MPaを超え0.14MPa以下 別表第1
③	0.14MPaを超え0.16MPa以下 別表第1
④	0.16MPaを超え0.18MPa以下 別表第1
⑤	0.18MPaを超え0.20MPa以下 別表第1
⑥	0.20MPaを超え0.22MPa以下 ブラックプール減圧表改定表
⑦	0.22MPaを超え0.24MPa以下 ブラックプール減圧表改定表
⑧	0.24MPaを超え0.25MPa以下 ブラックプール減圧表改定表
⑨	0.25MPaを超え0.27MPa以下 ブラックプール減圧表改定表
⑩	0.27MPaを超え0.29MPa以下 ブラックプール減圧表改定表
⑪	0.29MPaを超え0.31MPa以下 ブラックプール減圧表改定表
⑫	0.31MPaを超え0.33MPa以下 ブラックプール減圧表改定表
⑬	0.33MPaを超え0.35MPa以下 ブラックプール減圧表改定表
⑭	0.35MPaを超え0.37MPa以下 ブラックプール減圧表改定表
⑮	0.37MPaを超え0.40MPa以下 ブラックプール減圧表改定表
⑯	0.35MPaを超え0.40MPa以下 3種混合ガス呼吸用減圧表
⑰	0.40MPaを超え0.45MPa以下 3種混合ガス呼吸用減圧表
⑱	0.45MPaを超え0.50MPa以下 3種混合ガス呼吸用減圧表

図-10 減圧対象者数と暴露圧力

5. 今後の課題

今後、同種の施工を行う場合の主な課題・反省・留意点を挙げると、次のとおりである。

(1) 高圧下での函内設備組替

本工事のケーソンは中規模ケーソンであり、マンロック及びマテリアルロックがそれぞれ2基設置されている。しかし、3種混合ガスの吸引設備はマンロックの1基にしか計画されていない。

函内圧力 0.42MPa で実際に機械トラブルが発生した時の問題点を以下に述べる。

- ① この函内圧力で可能な最大作業時間は 90 分であり、減圧時間に 160 分を要する。
- ② そのため交代の作業員が入函できるのは、約 4 時間後となる。
- ③ 8 時間で 180 分の作業時間しか取れず、組み替え作業のため、掘削作業が 2 日間停止する結果となった。

今回使用の掘削機は、構造がシンプルで解体組立が容易なタイプの機械であったため、2日間の停止で解決できたが、構造が複雑で機体重量の重い掘削機の場合、掘削作業の停止期間は延びることが予測される。

今後の課題として、3種混合ガスを使用する大深度のニューマチックケーソンは、発注時の設計で2基以上の3種混合ガスシステムを標準とすべきである。

(2) 高圧則別表第1の法改正

ブラックプール減圧表改訂表は、本工事の結果からも減圧症の発症予防に非常に有効であった。また、減圧症の発症防止には慢性の減圧症と言われる無菌性骨壊死防止にも役立つものである。

今後同種工事においても、ブラックプール減圧表改訂表による減圧管理が標準とされることを推薦する。

現在、厚生労働省は高圧則の減圧表を外部の委員会の協力もと、法改正する動きがあると聞いている。早い時期の法改正が望まれる。

6. むすび

本工事は、ニューマチックケーソン工法による橋梁基礎としては、日本最大深度である。

ブラックプール減圧表改訂表の使用を厚生労働省から公に承認を得たこと、また、各種減圧症対策を実施したことで減圧症ゼロを達成できたことは、非常に幸いな結果であった。

参考文献

- 1) 圧気工事の安全建設技術者テキスト(5)、建設業労働災害防止協会、P222, 1982.
- 2) 眞野喜洋：圧気作業下での潜函病とその対策、〈基礎工〉総合土木研究所、P34, 1992年3月.
- 3) 眞野喜洋：高気圧作業・酸素減圧特別教育(現場開催)、2004