

海苔生産地における地下水への影響を配慮した大深度 ニューマチックケーソンの施工

Construct of Pneumatic Casson Considering the Influence for Ground Water in the Area as well known Seaweeder Produce

齋藤 啓一*

Hirokazu Saito

池ノ内 烈*

Tsuayoshi Ikenouchi

要 約

福岡 208 号矢部川橋 P2 基礎工事は、地域高規格道路である有明海沿岸道路において、一級河川矢部川を渡河する 3 径間連続 PC 斜長橋（橋長 517 m，最大支間 261 m）の主塔基礎（長さ 13 m，幅 22.5 m，深さ 49.5 m）をニューマチックケーソン工法にて築造するものである。本工事の主な特徴を以下に挙げる。

- ① 大深度・高気圧（最大気圧 0.5 MPa 以上）下の施工である（橋梁基礎における本工法での施工は日本で一番目の深さとなる）。
 - ② 軟弱地盤（有明粘土層）における初期沈下を伴う。
 - ③ 周辺は有明海苔の生産地であり、その加工に大量の地下水を使用している。
- 本稿では、地下水への影響防止を主眼に、問題点と解決策について述べる。

目 次

- § 1. 工事概要
- § 2. 周辺環境条件
- § 3. 施工上の制約条件と対策
- § 4. 評価及び今後の課題

§ 1. 工事概要

工 事 名：福岡 208 号矢部川橋 P2 基礎工工事

発 注 者：国土交通省 九州地方整備局

請 負 者：西松・大豊特定建設工事共同企業体

工事場所：福岡県柳川市大和町中島地内

工 期：自 平成 16 年 3 月 10 日

至 平成 17 年 9 月 20 日

（工事用地内の民家退去遅延に伴う 159 日間の工事中止期間を含む）

§ 2. 周辺環境条件

2-1 現場位置及び地質条件

現場は、筑後平野を流下して有明海に注ぐ矢部川の下流域（河口より約 4 km）に位置し、干拓地が広がっている。現場位置を図-1 に示す。ケーソン沈設は、表層の層厚 10 m 程度を有して堆積する通称「有明粘土」と呼ばれる沖積軟弱粘土層を貫通し、その下方は洪積層（200 m 以上の厚さで堆積）である。これらの各層には

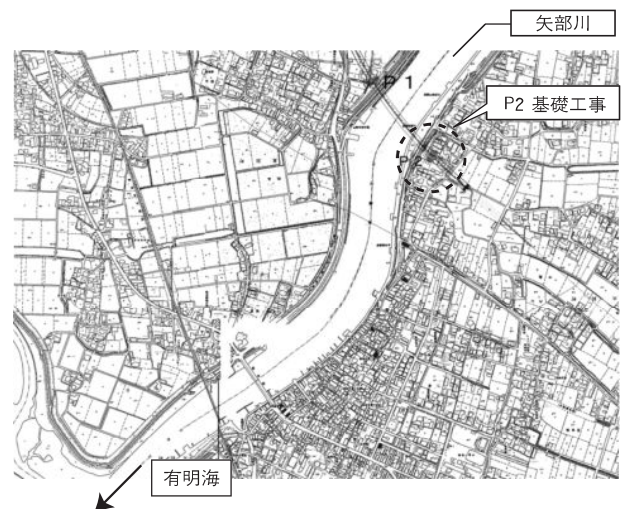


図-1 現場位置図

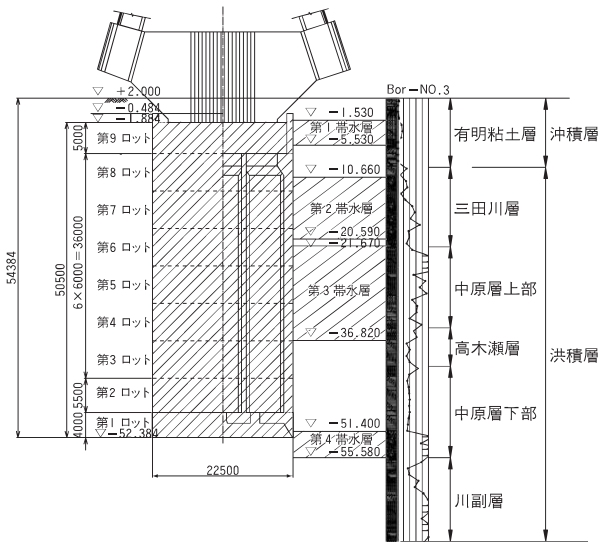
豊富な地下水を含有する帯水層があり、第 1~4 帯水層まで存在している。

なお、支持地盤として第 4 帯水層である砂礫層（N 値 > 50）が選定されている。地質概要を図-2 に示す。

2-2 社会環境条件

工事場所周辺には、有明海苔の生産自営業者が集約しており、収穫期（11~3 月）には、大量の地下水を加工用に使っている（1 軒あたりの平均揚水量 $Q=120$ l/min 揚水時間 $T=12$ hour）。各生産業者は、複数の深度の異なる井戸を個別に所有しており、異なる帯水層からの地下水を加工過程において目的別に使い分けている。また地下水は、各家庭における飲料・生活用水として

*九州（支）大和（出）



図一2 地質概要断面図

表一1 帯水層別井戸所有戸数集計表
(第1~第4帯水層 現場より半径300m以内)

所 在 位 置	帯水層名	井戸所有戸数		揚水量 (海苔生産期) (l/min)
		海苔使用	生活用水	
R<100	第1	4	0	547
	第2	0	0	—
	第3	1	0	109
	第4	4	0	292
100<R<300	第1	20	15	1,887
	第2	7	5	464
	第3	1	1	132
	第4	26	12	3,160

も利用されている。このような井戸は、現場を中心として半径1km以内に大和町で685か所、高田町(対岸)で255か所、計940か所に存在している。表一1に現場近傍の帯水層別井戸所有戸数の集計を示す。

以上のような背景から当該地での大深度ニューマチックケーソンの施工に伴う地下水への影響が懸念され、その対策が重要であった。

§ 3. 施工上の制約条件と対策

3-1 施工上の制約条件

周辺環境条件より生じる制約は、以下の2つである。

(1) 地下水の枯渇防止

函内気圧の低減に寄与する地下水位低下工法等の補助工法が採用できず、最終的な函内気圧が0.5MPa以上に達する定常高地下水位での沈設を余儀なくされた。

(2) 地下水の懸濁防止

地下水を懸濁する最大要因の1つは刃口等からの漏気である。漏気防止の第一義的な対策は、函内気圧の抑制であり、ケーソン沈設における重要な管理要素である函



写真一1 遠隔操作による函内無人化掘削



写真二1 函内無人化掘削状況

内気圧の設定に制約を伴う。

上記の制約条件に対する施工時の主たる対策を以下に示す。

3-2 定常地下水位における大深度ニューマチックケーソンの施工

高気圧下での函内作業は、函内での滞在可能時間の減少および高気圧障害の発症頻度や程度の上昇を伴い、工程及び安全上の重大な制約条件となる。そこで、この対策として、函内作業の効率向上と高気圧障害の危険度低減を目的に3つの特殊工法を採用した。

(1) 遠隔操作による無人化掘削(写真一1, 2)

函内気圧0.18MPa以深においては、遠隔操作による無人化掘削とし、ケーソンの傾斜、刃口深度、刃口反力、函内気圧などの函内からの各種リアルタイムの情報を地上の遠隔操作室に集約した。

(2) 酸素減圧・酸素再圧システム

酸素減圧システムとは、減圧時に純酸素(25分)と空気(5分)を交互に吸引することで、減圧症の原因となる体内溶存窒素の肺における気化と排出を促進する効果(酸素窓効果)を利用した減圧法で、0.25MPaを超える高気圧作業から採用した。なお、再圧設備においても、



写真—3 ヘリウム混合ガス呼吸システム

同呼吸法が可能となる設備を併設した。

(3) ヘリウム混合ガス呼吸システム (写真—3)

ヘリウム混合ガスとは、ヘリウム・窒素・酸素の3種類の気体を人工的に混合したものである。その組成比率は、ヘリウム40%、窒素39%、酸素21%となっており、窒素酔い及び減圧症の原因となる窒素含有量が空気と比べて半分となる。またヘリウム分子量は酸素の1/8、窒素の1/7と極めて小さいため、ヘリウム混合ガスの密度は空気より小さくなり(約1/2倍)、気道抵抗の低減にも有効である。当工事では、函内気圧0.4MPa以上において、人力作業による函内機械の維持管理及び沈設完了後の地耐力試験や函内機械の解体撤去作業に際して活用した。

3-3 函内気圧の設定に制約を伴うニューマチックケーソンの沈設

(1) 函内気圧設定に際しての留意点

函内気圧設定に際しては、以下の2点について留意する必要がある。

① 掘削面の保全や掘削土の排出に係る効率維持

函内気圧が理論気圧(刃口深度と地下水位の水頭差に相当する気圧)を下回る場合、函内への地下水浸透を招き、床付面の攪乱や掘削土排出における効率低下が生じ

る。一方、函内気圧が理論気圧を上回る場合には、刃口等からの漏気に伴い周辺地下水へ重大な影響を与える。

② ケーソン沈設に際しての荷重バランスの維持

沈下荷重が抵抗荷重を大きく上回り過剰沈下が発生した場合は、掘削機械等の函内設備の破損やケーソン本体の異常傾斜などの原因となり得る。また、沈下荷重が抵抗荷重を大きく下回る場合には、ケーソン沈下不能となり、ケーソン本体の浮上を伴うこともあり得る。

ここで沈下荷重と抵抗荷重とは、以下を意味する。

$$\text{沈下荷重} = \text{ケーソン本体荷重} + \text{載荷荷重}$$

$$\text{抵抗荷重} = \text{周辺摩擦抵抗力} + \text{刃口抵抗力} + \text{揚圧力}$$

これらの荷重と深度の関係を示した沈下関係図に表現して深度毎の荷重バランスを管理する。当工事の計画沈下関係図を図—3に示す。

(2) ケーソン沈設時の課題と対策

(1)の留意点を踏まえて、ケーソン沈設時の課題と対策を沈設段階毎に詳述する。

① 初期沈設 (No.1, 2ロット沈設)

初期沈設におけるケーソン本体の平面位置や傾斜に係る精度確保は、極めて重要な管理要素であり、その良否は、場合によっては最終沈設段階における精度にまで影響を及ぼす。

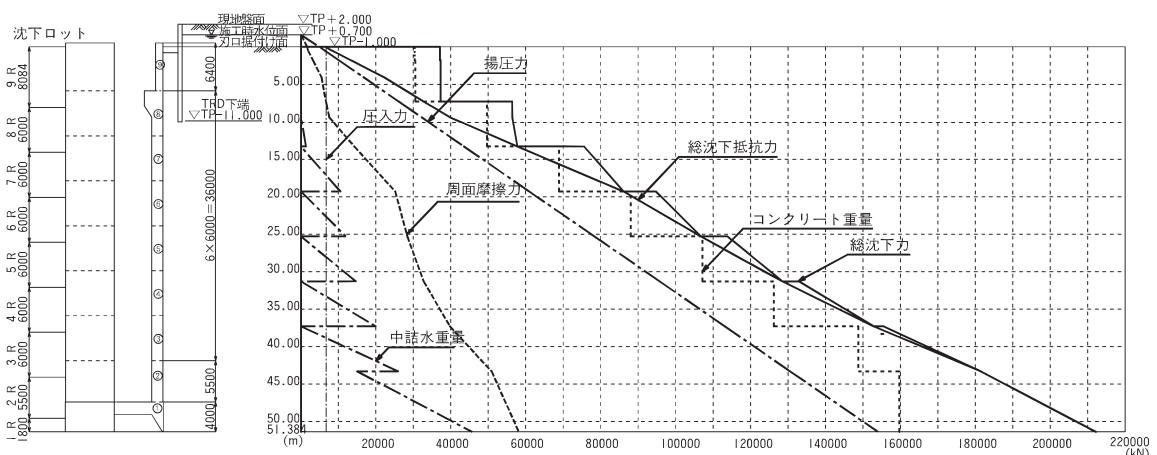
また、近隣の海苔生産業者に対して、工事全体の安心感を与えるためにも、初期沈設における安全や環境に係る一切の危険性や不確実性を事前に払拭する必要があった。工事の進捗上重要な初期沈設における課題は以下の通りであった。

- ・軟弱支持地盤「有明粘土層」での刃口抵抗力の確保
 - ・第一帯水層を貫通する際の漏気の発生防止
- 上記課題に対する対策を以下に示す。

a. 支持層の砕石置換

ケーソン No.1, 2ロット構築と艀装組立は、重心が高くなるとともに、軟弱な有明粘土層で全体の荷重を支持することになり、安全の確保が困難であった。

この対策として、刃口掘付支持層の全面を事前に砕石(層厚1m)にて置換し、地耐力を確保した。



図—3 沈下関係図

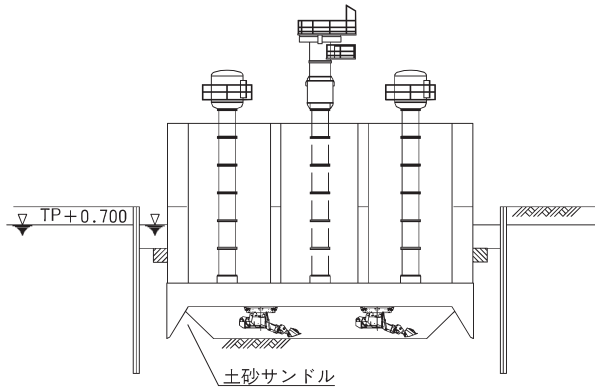


図-4 「土砂サンドル」使用時の函内断面



写真-4 過沈下防止金物使用時の函内状況

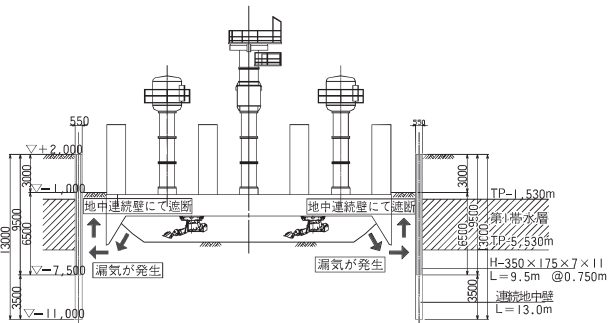


図-5 地中連続ソイルセメント壁による漏気防止対策

b. 過沈下防止金物の設置

ケーソン沈設では、刃口抵抗力の確保を目的に、土砂サンドルにて函内開口率を縮小する。しかし初期では、土砂サンドル（図-4 参照）の構成材料自体が有明粘土となり、安定性に欠ける。また、No.1 ロットの支保工を解体する際には、ケーソン本体の重量が一気に刃口に集中し、安定性の確保が出来なかった。

この対策として、過沈下防止金物（写真-4 参照）を先行設置して、必要な刃口抵抗力を確保した。

c. 地中連続ソイルセメント壁によるケーソン外周の遮断

初期沈設では、第一帯水層を貫通するが、そこからの地下水は、海苔生産において特に大量に利用されている。初期沈設では、函内気圧による揚圧力への依存度が高くなり、必然的に漏気を誘発する。この漏気から第一帯水

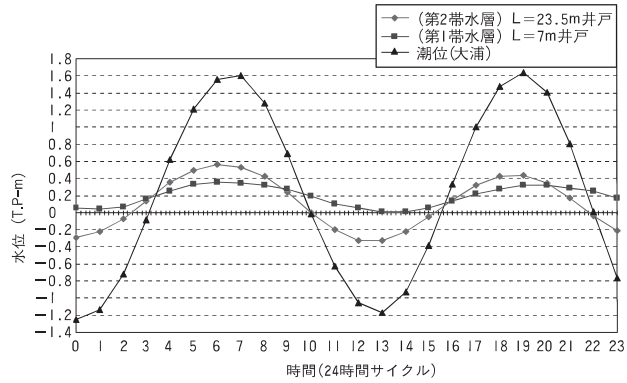


図-6 水位変化図 (H 17.5.1 測定 のり休止時)

層を保護するために、地中連続ソイルセメント壁によりケーソン外周を遮断した（図-5 参照）。

以上の対策が有効に機能した結果、漏気（の影響）もなく No.1, 2 ロットの沈設完了時点において以下の施工精度を確保できた。

平面偏心量 69 mm（規格値 300 mm）

刃口深度最大差 2 mm（規格値±100 mm）

② 通常沈設 (No.3~8 ロット沈設)

通常沈設に際しては、漏気を発生させないことを主眼として管理した。函内気圧を抑制すれば、地下水が函内底面に容易に浸透し、床付面の攪乱や掘削土の排出における効率低下を招くが、これを許容して施工した。具体的対策を以下に示す。

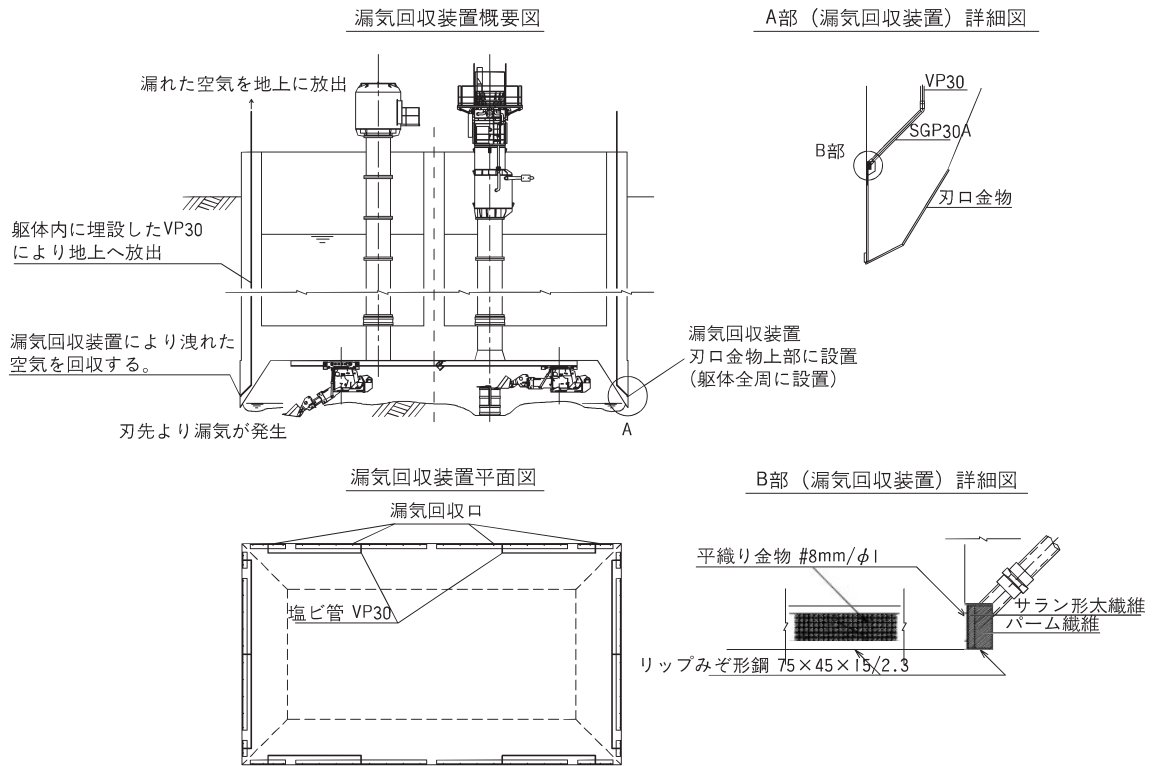
a. 函内気圧管理の厳密化

有明海沿岸は潮位変動が大きい地域であるため、地下水も半日に 1 m 近い自然変動を呈する（図-6 参照）。これに追従するため、沈設当初は、ケーソン周辺に設置した観測井戸（半径 100 m 以内に 16 か所）における地下水位の観測結果を基にして、函内水位が常に刃口より 0.5 m 程度上になるように函内気圧を調整し、モニターにて水面高さを監視した。しかし、周辺地下水位は、海苔生産に伴う大量の地下水の汲み上げにより、急激かつ大幅な変動を呈し、時には数十分のうちに 2 m 以上の変動も確認された。従って沈設途中に、自然変動に加えて、人為的な変動に追従するため、函内水位の連続計測が可能な光波式水位計を函内に設置し、24 時間体制の厳密かつ直接的な管理に変更した。その結果、通常沈設時の漏気を回避することができた。

b. 先行圧入工法の採用

通常ケーソン沈設においては、ケーソン本体の自然沈下に至る前に一時的かつ局部的に地山と刃先との間に空隙が生じ、漏気の原因となる。

対策として、鉛直アースアンカー（L=80 m）と油圧ジャッキ（2,400 kN/基×4 基=9,600 kN）により、刃口先端と地山との間に空隙が生じる前に先行圧入（載荷荷重の追加）を実施して、人為的にケーソン本体の地盤への貫入を誘発した。



図一七 漏気回収装置

c. 漏気回収装置の設置 (図一七)

万が一の漏気に備えて、漏気回収装置をケーソン外周面の刃先金物直上に設置した。これは、ケーソン外周に回り込んだ漏気をケーソン躯体内に取り込み、躯体内に埋設した通気管を通じて各ロット天端より外気に放出する装置である。

この装置は通常深度の施工においては有効な漏気対策である。発生した漏気を速やかに回収して地下水への影響防止に寄与するとともに、漏気発生を迅速かつ明確に示すことにより、漏気発生に対する監視機能を有している。一方で、沈設完了段階に発生した井戸噴発から鑑みて、施工深度の大深度化に伴う漏気の高圧化に対して十分な回収能力を有していなかった点が反省される。

③ 最終沈設 (No.9 ロット沈設)

最終沈設における課題は以下の3点である。

- ・ケーソン本体の沈設深度に係る精度確保
- ・掘削面の保全 (余掘りや攪乱の回避)
- ・中詰めコンクリートの有効断面の確保

沈設完了から中埋めコンクリート打設までの期間においては、掘削面を保全するため函内気圧を理論気圧と同等に設定せざるを得なかった。必然的に周辺井戸への影響は回避できないと判断し、海苔生産業者と協議した結果、海苔生産の休止期間中において、一時的かつ短期間の井戸への影響について了解を得た。実施工に際しては、予測通り周辺井戸の墳発 (箇所数：5か所、噴出高さ：約1m、墳発期間：7~9日間、写真一五参照) が発生したが、地耐力試験や函内設備の撤去に係る作業期間の短縮を図り (1日当りの函内作業を4直編成にして対応)、



写真一五 周辺井戸の墳発

重大な事業損失には至らなかった。

§ 4. 評価及び今後の課題

4-1 評価

当工事における最終沈設完了後の評価は、以下の通りである。

- (1) ケーソン沈設精度の確保
 - 平面偏心量 14 mm (規格値 300 mm)
 - 刃口深度最大差 -9 mm (規格値±100 mm)
- (2) 高気圧障害の発生防止

軽度の減圧症が3件発生（入函回数に対して2～3%の割合）したが、重度の高気圧障害は発生しなかった。

(3) 海苔生産における事業損失の回避

海苔生産における重大な事業損失はなかった。

このように品質・安全面において十分な成果を得ることが出来た。これは、本工事で採用した特殊工法が十分に機能した結果と考えられる。

しかし設計当初は、以上の特殊工法の全てが採用されていたわけではなく、過沈下防止金物、漏気回収装置の設置（いずれも在来工法）については、発注者への技術提案により採用されたものである。

また、光波式水位計は、管理の厳密化のため自主的に採用した。ニューマチックケーソン工法では、初めての採用と考えられる。

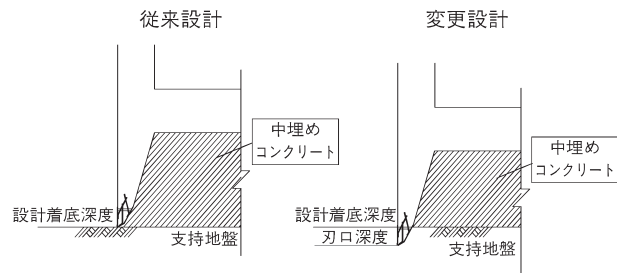
さらに本報では詳述しなかったが、沈下抵抗力の一部である周面摩擦力を低減するため、滑材の注入を自主的に採用した。滑材の注入にあたっては、一般的なベントナイトのみの使用ではなく、拡散防止のため生物に無害な粘性付与材を添加したモンモリロナイトを採用した。この対策は、懸濁防止に有効であった。

4-2 今後の課題

4-1で述べた成果は得られたものの、沈設完了時点の漏気対策が課題として残った。これは、計画段階から想定された事象であり、今後本工事と類似条件での施工に対して有効と思われる提案を以下に述べる。

(1) ブローホールの設置

ブローホールとは、ケーソン周辺に数本のボーリングを行い、その中にストレナー管を設けたものである。エアリフト設備により地下水を汲み上げて帯水層内に流動域を構成し、ケーソンからの漏気をボーリング孔内に集積・排除することにより、漏気の拡散を防止する。本工



図—8 刃口深度変更概要図

事のように地下水位の低下に厳しい制約を受ける場合は、エアリフト設備を設置しない。

(2) 着底深度と刃口深度の見直し

函内気圧を理論気圧と同等に設定しても、漏気を防止できるように着底刃口深度を設計着底深度より深くする（図—8参照）。

つまり刃口先端を圧入により、設計深度からH=500程度先行貫入し、函内掘削は設計深度で終了する。発注者との設計変更に関する事前協議が必要である。

(3) 漏気回収装置の能力向上

ケーソン外周壁面上の漏気回収開口部及び通気管を拡大し、漏気の回収能力を向上させる。

以上の対策を施せば、本工事と類似する課題を解決できると考えられるが、実用化に際しては更なる詳細検討が必要である。

謝辞：当社において前例のない大深度・高気圧ニューマチックケーソンの施工に際して、厚い御理解・御協力を頂いた地域住民の方々、熱心な御指導・御鞭撻を賜った東京医科歯科大学真野教授や西松建設土木設計部・技術研究所の方々、そしてその他工事関係各位に対しまして、厚く御礼申し上げます。