

大深度ニューマチックケーソンにおける 作業気圧低減による影響と対策について

岩波 基¹・大石雅彦²・阿部慎太郎³

¹正会員 長岡工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町888)

E-mail:miwanami@nagaoka-ct.ac.jp

²正会員 オリエンタル白石(株) 施工・技術本部 技術部 (〒135-0061 東京都江東区豊洲五丁目6-52)

E-mail:masahiko.oishi@orosc.co.jp

³正会員 オリエンタル白石(株) 東京支店 施工・技術部 (〒135-0061 東京都江東区豊洲五丁目6-52)

E-mail:shintaro.abe@orosc.co.jp

現在、深さが約100mの都市トンネルに対するニーズが高まっており、その発進・到達立坑の構築には高品質な立坑を比較的短い工期で施工できるニューマチックケーソン工法が適している。しかし、掘削深度100mのトンネル用立坑を構築する際に、作業気圧を1.0MPa以上に必要性が生じる可能性があるが、規定によってニューマチックケーソン工法の作業気圧の制約は0.69MPa程度とされており、これを超える気圧にして人間がその内で作業することは現状では困難である。そこで、本報告は、作業室気圧を低減した場合に、フリクションカットで生じる空隙を通して減圧による地下水低下の影響が地表まで及ぶ可能性があるため、解析によってその可能性を検討した上で、対策案について述べたものである。

Key Words : *pneumatic caisson, deep underground, down in groundwater*

1. はじめに

現在、深さが約100mの都市トンネルが必要とされ、一部計画がされている状況にある。これらのトンネルを発進・到達するために必要な立坑の構築には高品質な立坑本体を比較的短い工期で施工できるニューマチックケーソン工法が適している。しかし、深度が約100mのトンネルの工事に用いる立坑をニューマチックケーソン工法で構築する際には、作業室の気圧を1.0MPa以上にして地下水に対応する必要性が生じる可能性が高い。しかし、ニューマチックケーソン工法の作業気圧の制約は0.69MPa程度とされており、これを超える気圧にして人間がその内で作業することは現状では困難である。そのため、地上からの遠隔操作で掘削を行うことが望ましいが、何かの不具合が生じた場合には作業室に人が入らなければいけない可能性があることから、完全な無人化は実現されていない。そこで、ニューマチックケーソン工法に地下水低下工法を併用して、作用水压を低減することで作業室の気圧を低下させるのが現実的である。今までの実績としては、釜場排水工法や止水工法、ディープウェル工法がある。名港中央大橋主塔¹⁾やレインボーブ

リッジ²⁾の工事では、ディープウェルを併用することで、作業室の気圧を地下水低下工法を採用しない場合よりも0.10～0.15MPa低下させて工事を安全に完了している。

東京都および神奈川県それぞれのそれぞれのある地域では、沖積層および洪積砂層が30～40m程度堆積している下にいわゆる土丹と呼ばれる自立性が高い上総層が厚く分布している。今後、このような地層構成の地盤に大深度トンネルを構築されるものと予想される。そのため、大深度トンネル用の立坑は、この土丹層内を60m以上の深さに亘ってケーソンを沈設することとなる。この土丹層は自立性が高いので、ニューマチックケーソンに通常採用されているフリクションカットによる空隙が周辺地盤により埋まる可能性が低い。したがって、ケーソン工法ではフリクションカットにより地山と側壁の間に5cmの空隙が生じるため、これを地表から供給する砂とケーソンの側壁の注入口から注入するベントナイトで充填する。しかし、ケーソンの沈設時に水みちが生じて、土丹層より上部にある透水層から地下水が供給される可能性がある。また、貴重な大深度の空間を使うトンネルは内径が10m以上のものであることが予想され、円形立坑の直径も40m以上となると考えられる。このように大きな立坑の

表-1 地盤およびケーソン等の透水係数

土質名	地層下端 深さ(m)	単位体積 重量 (kN/m ³)	N値	透水係数 (cm/s)
ローム	15.8	17	5	3.00E-06
砂層	45	20	45	4.50E-02
上総層	200	19	50	1.05E-05
ケーソン	—	—	—	1.00E-08
マッドケーキ	—	—	—	5.00E-04
空隙case2	—	—	—	1.80E+00
空隙case3	—	—	—	1.80E+01

外周に水みちが生じた場合には、ニューマチックケーソンの施工に地下水低下工法を併用すると、その影響が地表近くの透水層まで及ぶ可能性がある。

そこで、本報告では、ニューマチックケーソンの施工に地下水低下工法を併用した場合の周辺への影響の有無について検討した上で、影響がある場合の対策方法を提案するものである。

2. 検討条件

(1) 検討対象

今回の検討では、土丹層が出現する代表的な地盤としてボーリングデータの入手できた相模原市周辺に、外径40mで掘削深度が110mをニューマチックケーソン工法で構築する立坑を検討対象とした。そして、0.7MPaの作業室内気圧と地下水低下工法で水位を40m低下させて作業室内への地下水流入を制御している状況を想定した。

(2) 地盤条件

上記の相模原のボーリングデータから、地表面15mまで中程度の武蔵野ロームが堆積し、その下に30mの良く締まった砂層があり、それより深い地盤は上総層のいわゆる土丹で構成されている地盤構成を検討に用いた。地層の透水係数とケーソン、フリクションカット内にできたマッドケーキ、空隙の透水係数をまとめて示したものが表-1である。なお、空隙は細礫程度の透水係数とその10倍程度を想定した。また、全ての透水係数はクレガーの表³を参考に設定した。さらに、マッドケーキの透水係数は深見らの計測値⁴を参考に定めた。今回の解析では、フリクションカットによる空隙が全てマッドケーキで満たされている状態をcase1、フリクションカットの空隙5cmのうち1cmに水みちができて礫程度の透水性

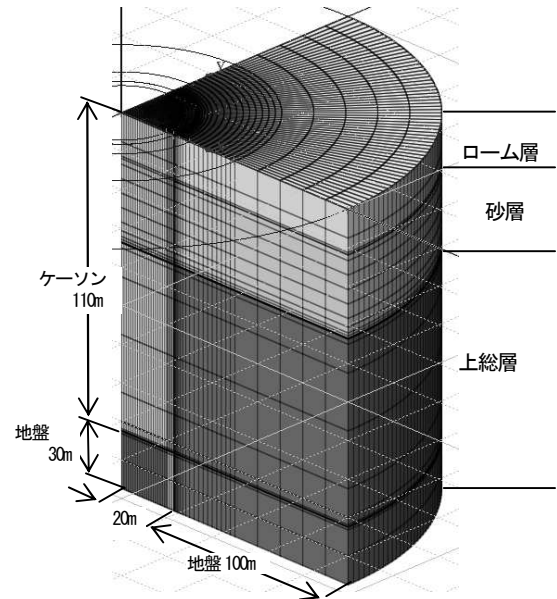


図-1 解析モデル図（全体図）

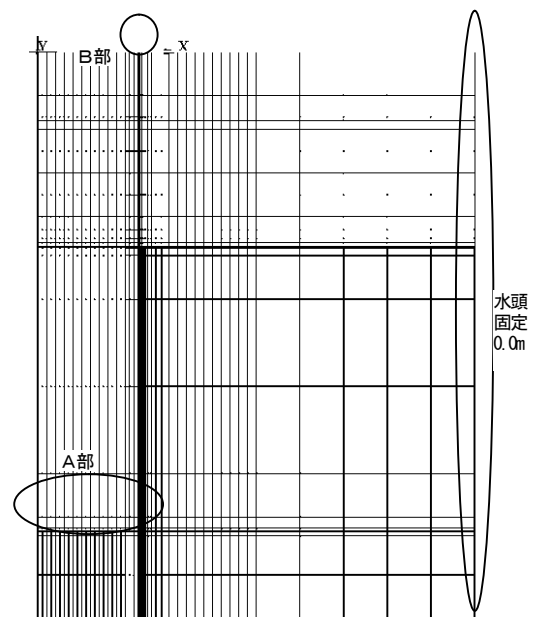


図-2 解析モデル側面図

となり、残り4cmがマッドケーキの場合をcase2、フリクションカットの空隙5cmのうち1cmに水みちができてcase2より大きな透水性となつて、残り4cmがマッドケーキの場合をcase3として計3ケースの解析を行った。

(3) 解析モデル

解析領域は、平面壁には河野⁵の揚水井戸の影響半径を参考に半径100mとし、上総層はほとんど水の流れが生じないものと考えケーソンの下側に30mとした。ケーソンの壁厚と底版厚は4mで想定したが内部も全てコンクリートで充填している状況でモデル化してある。ケー

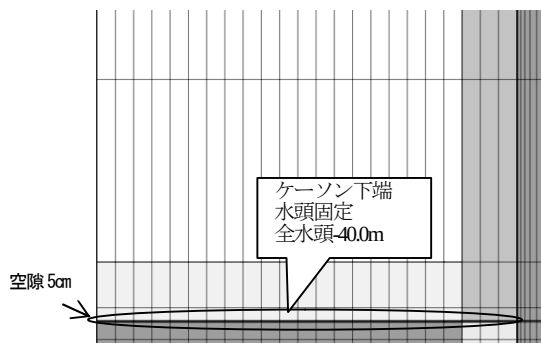


図-3 A部詳細図

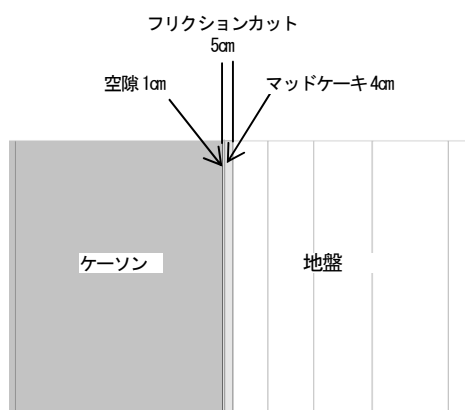


図-4 B部詳細図

ソンの半径が20m、深さが110mである。これらのモデルを示したものが図-1である。なお、対称性から1/4モデルを採用した。

図-2に解析モデルを側方から見た図を示した。境界条件は、図のように地盤のケーソンから最も遠い側面を全水頭0.0mで水頭固定し、図-3にA部の詳細図で示したケーソンの下端で全水頭40.0mに水頭固定した。今回の解析では立坑の半径方向の浸透流に着目し、その他の面においては浸透流の流れがないものとした。ケーソンの下には厚み5cmの空隙をモデル化し、表-1に記した透水係数の薄層をモデル化した。

図-4に示したフリクションカットの空隙をケーソン下端までであるものとしてモデル化した。刃口部ではふくらみフリクションカットが無くなるのであるが、その周辺の地山の形状は推測が困難なので、一般部と同様に5cmのフリクションカットによる空隙を設け、解析case1ではそこをマッドケーキで充填し、解析case2およびcase3では、ケーソンの沈下に伴い1cm程度が削られて水みちができることを想定した。

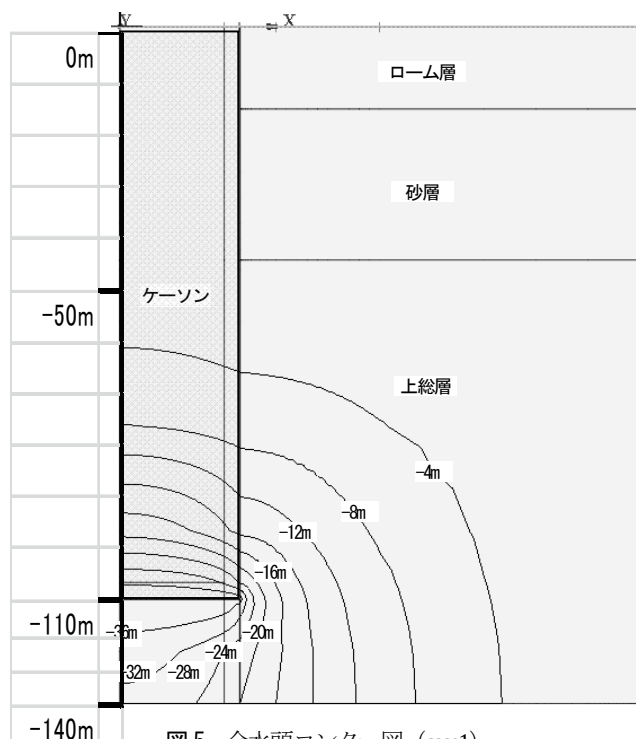


図-5 全水頭コンター図 (case1)

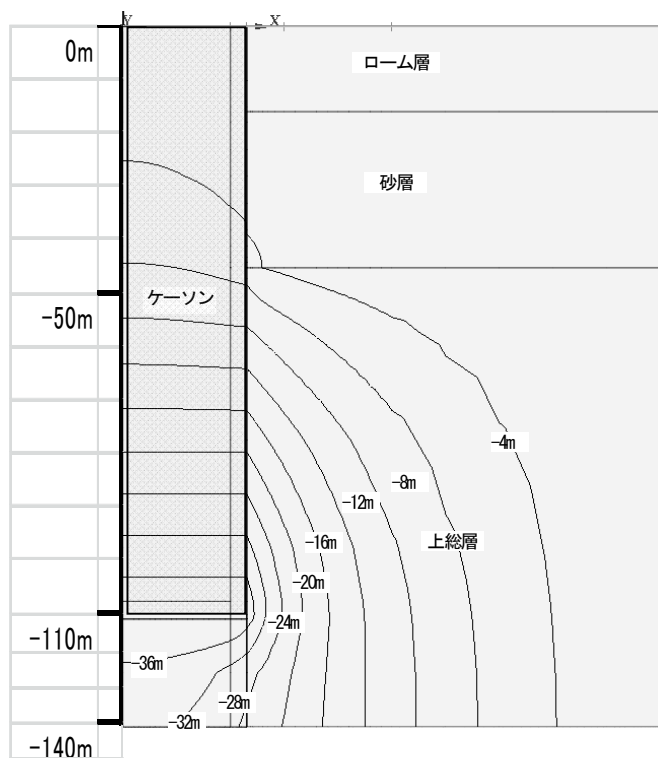


図-6 全水頭コンター図 (case2)

3. 解析結果

case1の解析によって求められた全水頭コンターが図-5であり、case2の全水頭コンターが図-6そしてcase3のそれが図-7である。

case1では、フリクションカットでできた空隙をマッ

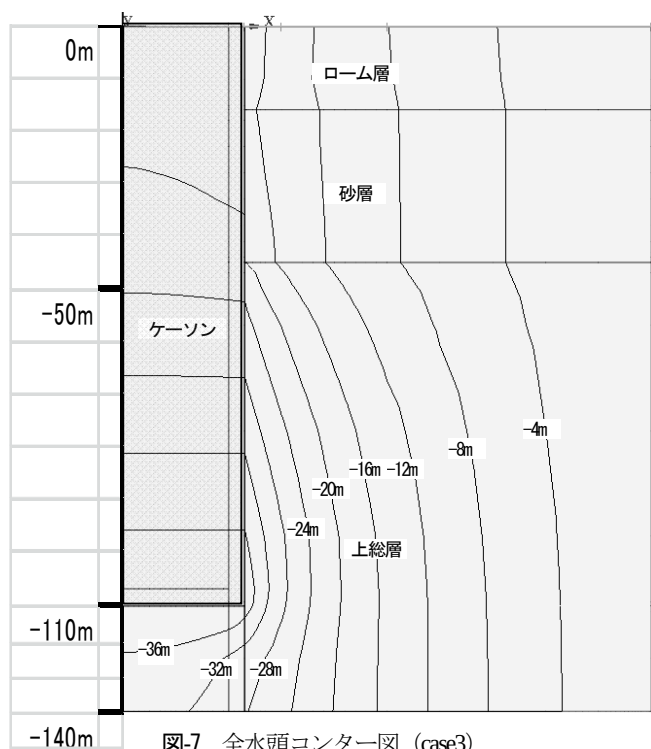


図-7 全水頭コンター図 (case3)

ドケーキで全て充填した状態で解析を行っているため、水頭の低下した領域が上総層内のみであり、地表面近傍の地下水への影響が生じない結果となった。

case2では、図-6から分かるように、砂層まで地下水低下の影響が及び、砂層の仮面で4m程度地下水位が低下している領域がケーソン周辺で生じる解析結果となった。しかし、砂層で地下水の供給があるため、ローム層までは地下水位の低下が生じない結果となっている。

一方、case3では地表面まで地下水低下が生じ、最大で16m以上水位が低下する解析結果となった。

4. 検討結果

ニューマチックケーソン工法で0.7MPa以上の水圧が作用する作業室で地下水低下工法を今回の地盤条件で適用して気圧を低減することが可能であるか検討した上で、その地下水低下を採用したことで、フリクションカットに生じる空隙を通して地表まで及ぶ可能性の有無について検討した結果を以下に述べる。

(1) 地下水低下工法の適用について

今回解析した3ケースにおいて、水頭を低下したケーソン下端での湧水量を表-2に示す。

表-2から分かるように、フリクションカットで生じる空隙がベントナイトによってできるマッドケーキで充填された場合には、湧水がほとんど無く、今回考慮してい

表-2 ケーソン下面の湧水量

	湧水量 (m ³ /min)
case1	0.00006
case2	0.01584
case3	0.08448

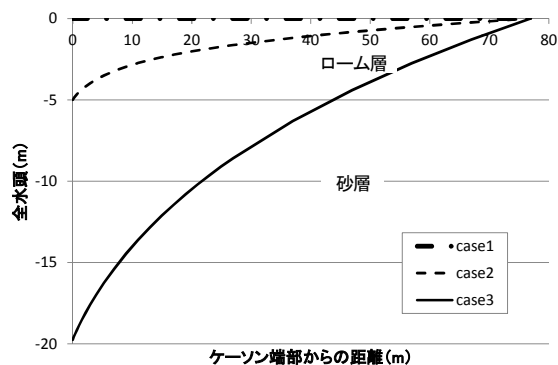


図-8 砂層の水頭コンター図 (case3)

ない上総層の介在砂層から出ることが予想される湧水の方が問題である結果となった。

また、ケーソン周辺に1cm程度の膜状の水みちが生じても湧水量が少なく、釜場排水工法で施工が可能な結果となった。しかし、マッドケーキには高い圧力をかけて脱水したものではないため、今回の地層構成だと砂層に水圧が作用するため、ケーソン下端の流線長にして65mに40mの圧力水頭が下向きにかかることとなる。この力にマッドケーキが耐えられるか疑問である。

したがって、実施工では釜場排水工法だけに頼らず、ディープウェルの準備も必要ではないかと考える。

(2) 地表への影響について

地表面への影響を考えるために、砂層下面の水位低下をcase1～case3までをまとめることとした。横軸にケーソン外面からの距離をとり、縦軸に砂層下面での全水頭としてグラフにしたものが、図-8である。

この図から分かるように、case1やcase2ではほとんど地表面付近への影響は無い結果となったが、case3ではケーソン周辺は20m地下水位が低下し、ケーソンから40m離れても5m地下水が低下している。このように地下水の低下した状態がどの程度の期間継続するかによって地表面の変状の程度が異なるため、一概に定量的な評価はできないが、周辺井戸への影響は避けることが困難であると考え。

なお、今回解析したcase3における空隙の透水係数は、完全に1cmの膜状の空洞が生じた場合に推測される透水係数の1/10以下である。したがって、ニューマチックケ

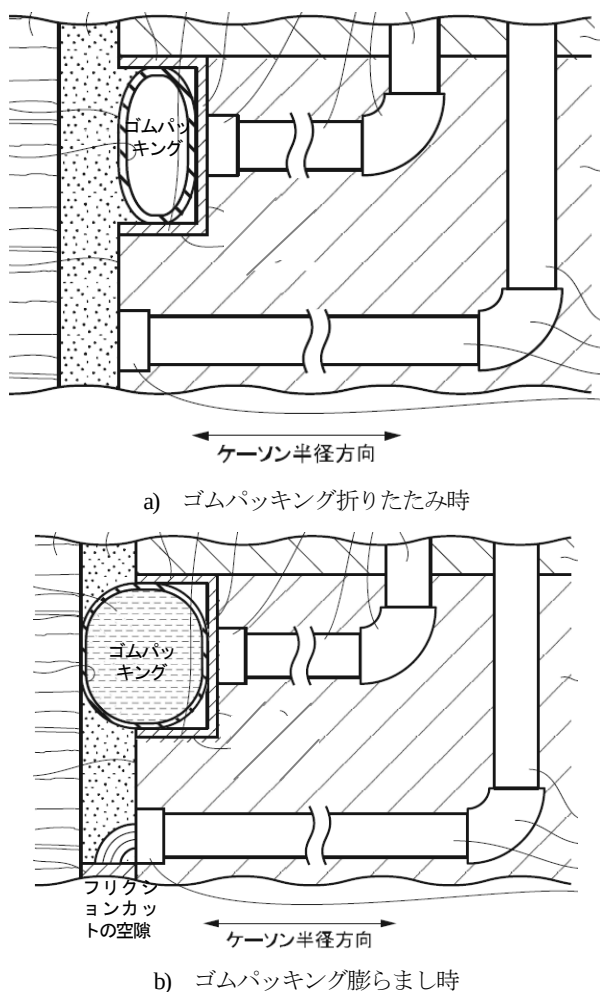


図-9 抑止工法の概要

一ソソ工法で地下水低下工法を併用して大深度立坑を構築する場合も地下水位低下による周辺への影響検討が必要であると考える。

5. 影響抑制工法の提案

筆者らは、以上の検討結果から、ニューマチックケーソン工法で大深度立坑を構築する場合にも、周辺への影響を抑制する工法が必要であると考えた。それは、図-9上図のように刃口およびその周辺にゴムパッキングを

折りたたんで内蔵して、通常の施工を行い、フリクションカットの空隙を確実に充填する必要な深度に達した時点で下図のようにゴムパッキングを膨らませ、パッキング間を固化剤で確実に充填するものである。

この工法により、フリクションカットによる空隙を確実に充填することが可能となり、地表面付近への影響を防ぐことが可能になると考える。

6. まとめ

以下に、今回得た知見を列挙する。

- ・東京都や神奈川県北部のように、軟弱層下に上総層が厚く分布している地盤において、掘削深度100m程度の場合でも、ニューマチックケーソン工法は地下水低下工法を併用することで作業気圧を0.69MPa以下に抑えることにより施工することが可能であると考える。
- ・上総層内をニューマチックケーソン工法に地下水低下工法を併用して施工する場合には、地表面付近まで地下水低下の可能性はある。
- ・地表面付近まで地下水低下の可能性のある場合には、今回提案した工法で、フリクションカットに生じた空隙を確実に充填して、地表面付近の地下水低下を防止することが必要である。

参考文献

- 1) 古郷誠：特集：ビックプロジェクトの現況 名港中央大橋，建設の機械化，pp.63-67，1990。
- 2) 石井紘史，上田敏雄，嶋村 彰：首都高速 12 号線の大規模ニューマチックケーソンの施工，建設の機械化，pp.35-40，1989。
- 3) Creager, W.P., Justin, J.D. and Hinds, J.: Engineering for Dams, Vol.III, *Earth, Rock-Fill, Steel and Timber Dams*, John Wiley & Sons, p.649,1944.
- 4) 深見秀樹，須藤賢，上野孝之：連続地中壁背面の泥水浸透特性と透水性について（その2），土木学会第54回年次講演会 III-A284，pp.568-569，1999.9。
- 5) 河野伊一郎：地下水工学，鹿島出版会，pp.53-56，1989。

(2013.9.2 受付)

INFLUENCE AND THE MEASURES CAUSED BY DECOMPRESSION IN GREAT DEPTH PNEUMATIC CAISSON

Motoi IWANAMI, Masahiko OISHI and Shintaro ABE

Construction of shafts for tunnels with an excavation depth of 100m, may necessitate an increase of the atmospheric pressure in the working chamber to over 1.0 MPa. The current standards, however, prohibit manned operations in working chambers using the pneumatic caisson method if the atmospheric pressure

inside the chamber exceeds 0.69 MPa. If the working chamber is decompressed, the impact of the groundwater level lowering caused by the decompression may extend all the way to the ground surface through friction cut. The present report examines, through analytical studies, the possibilities of such a phenomenon, and discusses measures to deal with them