

空気圧入による地盤の不飽和化の実験と検証

－ 大深度ニューマチックケーソンの合理化施工にむけての取り組み －

森田 篤^{*1}・後藤 信男^{*1}・小熊 登^{*1}・久慈 雅栄^{*1}・河野 浩之^{*2}・三上 武子^{*3}

Experiment and Verification of Soil Desaturation by Air Injection

－ Towards Rationalizing the Construction of Large Depth Pneumatic Caisson －

Atsushi MORITA, Nobuo GOTO, Noboru OGUMA, Masayoshi KUJI, Hiroyuki KONO, Takeko MIKAMI

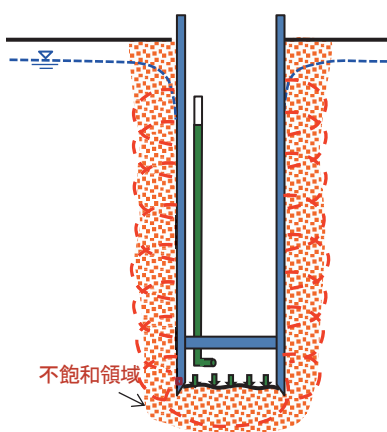


図-1 不飽和領域形成の概念図



写真-1 ケーソン横の調査ボーリング



写真-2 模擬ケーソン円形土槽実験装置

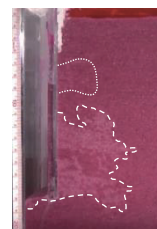


写真-3
アクリル実験土槽
不飽和領域可視化

研究の目的

現状のニューマチックケーソン工法は施工深度に限界があり、さらなる適用深度の拡大と合理化施工の向上が要求されている。本報告では、地盤の不飽和化を利用したニューマチックケーソンの合理化施工法を開発する目的で、ケーソン周辺の地盤に想定される不飽和領域の形状と形成過程を確認するとともに、現場試験および室内実証実験を行った。

技術の説明

ニューマチックケーソン工法で建設している東京都芝浦水再生センター・森ヶ崎水再生センター間連絡管発進立坑工事において、施工時の作業気圧や地盤中の間隙水圧の変化を整理することにより、ケーソン周辺地盤の不飽和領域の存在とこれに伴う切羽面の透水性の低下を想定した。また現地盤での不飽和化の確認として、ボーリングによる地質確認、現場透水試験、弾性波トモグラフィーを実施した。

室内実験では中央にケーソンを模擬した円筒形土槽を作成し、ケーソン内の加圧・減圧による底部地盤の不飽和化と透水性の変化を測定した。また、地盤内の不飽和領域の可視化を目的として、透明アクリルの実験土槽を用いて不飽和領域の範囲と形成過程を確認した。

さらにこれらの実験結果を踏まえ、施工現場において予め空気を注入して飽和砂質地盤を不飽和化させる実証試験を行った。

主な結論

- ・ ニューマチックケーソンの掘削では底盤から側方にかけて不飽和領域が形成され、作業気圧を理論気圧より小さくしてもケーソン内への地下水流入が抑えられることを、現地試験および土槽実験で再現した。
- ・ 模型実験により、不飽和領域がケーソン底部および側部に塊状に形成されることを確認した。
- ・ ニューマチックケーソンの合理化施工のための補助工法として、事前に地盤を不飽和化させることにより、ケーソン掘削時の作業気圧を低減できる効果を現場実証試験により確認した。

*1 本店 土木事業本部 土木設計部
*3 技術研究所 地盤・環境研究室

*2 東京土木支店 施工第1グループ

空気圧入による地盤の不飽和化の実験と検証 —大深度ニューマチックケーソンの合理化施工にむけての取組み—

森 田 篤^{*1} 後 藤 信 男^{*1}小 熊 登^{*1} 久 慈 雅 栄^{*1}河 野 浩 之^{*2} 三 上 武 子^{*3}

要 旨

ニューマチックケーソンの建設において、作業気圧を小さく抑える合理化施工を目指して、空気注入による地盤の不飽和化工法の開発を試みた。工法の検討にあたっては、実際の施工現場における圧力管理記録を整理し、さらにボーリング調査、透水試験、トモグラフィ計測を実施することにより、ケーソンの施工に伴う不飽和領域の存在とそれに伴う透水性の低下を確認した。次に、ケーソンを模擬した大型円形土槽を作成して圧気による不飽和化を実験レベルで検証するとともに、透明アクリルの二次元模型により不飽和領域の形状と形成過程を可視化し、数値解析による定性的な確認も実施した。

これらの成果を踏まえて、施工現場において予め空気を注入して飽和砂質地盤を不飽和化させる実証試験を行い、通常より小さい作業気圧で施工できることを確認した。

キーワード ニューマチックケーソン／不飽和／模型実験／二相流解析／合理化施工

目 次

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| 1. はじめに | 5. 数値解析による不飽和領域の検証 |
| 2. ニューマチックケーソン施工記録の整理 | 6. 不飽和を利用した合理化工法の開発 |
| 3. 現地盤における調査試験および計測 | 7. 今後の展開と課題 |
| 4. 模型実験による不飽和化の確認 | 8. おわりに |

EXPERIMENT AND VERIFICATION OF SOIL DESATURATION BY AIR INJECTION —TOWARDS RATIONALIZING THE CONSTRUCTION OF LARGE DEPTH PNEUMATIC CAISSON—

Atsushi MORITA
Noboru OGUMA
Hiroyuki KONO

Nobuo GOTO
Masayoshi KUJI
Takeko MIKAMI

Synopsis:

For rational construction of the Pneumatic Caisson, we tried to develop a method of soil desaturation by air injection. By the field work, it was confirmed the unsaturated ground and permeable drop by construction of the Pneumatic Caisson. As the next trial, we made an experimental soil tank which simulated a Caisson, and inspected desaturation by air pressure at experiment level and visualized an unsaturated shape and formation process.

Based on these result, we demonstrated soil of permeable layer on site by air pressure and we confirmed that the atmospheric pressure during work can be done low.

* 1 本店 土木事業本部 土木設計部
* 3 本店 技術研究所地盤・環境研究室

* 2 東京土木支店 施工第1 G

1. はじめに

近年では、大深度立坑の構築にニューマチックケーソン工法が用いられることが多い。これは下部の作業室に圧気を用いて湧水を抑制しながら掘削を行う工法であり、とくに都市部における大深度の立坑構築では経済性、安全性に優れている。しかしながら圧気設備等の制約により、ニューマチックケーソンの施工実績は深度70m級が最大であり、今後需要が増えると予想される100m超クラスの立坑には適用できないのが現状である。

一方でニューマチックケーソンは、理論気圧より低い圧気で施工できることが一般的に知られている（図-1）。この要因の一つとして、施工の過程における地盤の不飽和化が考えられるが、これまでニューマチックケーソンの施工に伴う不飽和の形成と進行を詳細に確認した例はない。

ニューマチックケーソンの施工では、作業気圧が小さいほど作業効率が向上し施工コストが抑えられる。地盤の不飽和化を利用して圧気をより小さく抑えられれば、現状の設備でも70m級を超える立坑の掘削も可能となる。

筆者らは、実際の施工現場において計測管理記録の整理や地盤調査を行うとともに、室内模型実験および数値解析により、不飽和化の確認と検証を試みた。さらに合理化施工に向けた工法開発として、予め地盤に空気を注入して飽和砂質地盤を不飽和化させ、作業気圧を通常より小さく抑える手法を考案し現地実験を試みた。

本編では、圧気による地盤の不飽和化の実験と検証、さらに不飽和化を利用した技術開発の取組みについて報告する。

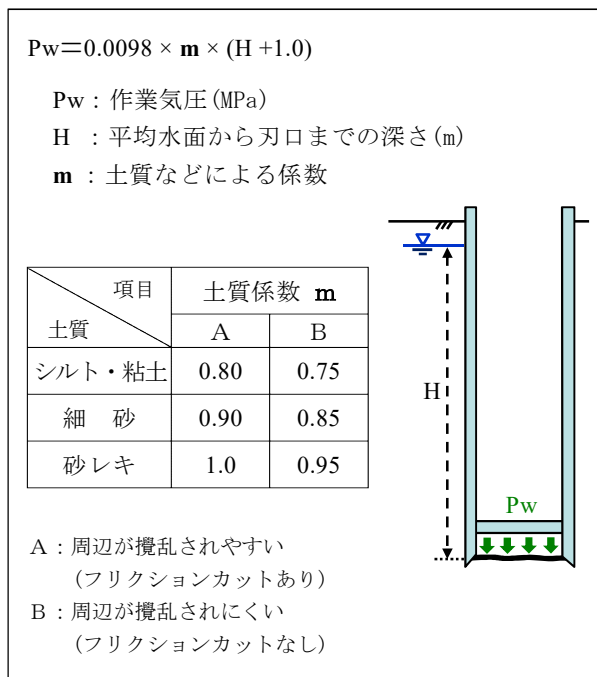


図-1 掘削深度と作業気圧¹⁾

2. ニューマチックケーソン施工記録の整理

2.1 施工の概要

施工管理記録の整理を行ったのは、大井ふ頭中央海浜公園内でニューマチックケーソン工法により建設が進められていた立坑である。これは東京都芝浦水再生センターと森ヶ崎水再生センターを繋ぐ連絡管の構築において、両方向への発進坑となるもので、外径 19.0m、深さ 71.8m の大深度立坑である。



写真-1 ケーソン位置と施工全景

事前のボーリング調査による地質状況は図-2 のとおりである。

TP-6.0m までは埋土、盛土および第四期完新世の有楽町層で、N値は小さく軟質である。TP-6.0m から TP-49.7m までは東京層および江戸川層と呼ばれる第四期更新世中期の地層で、いずれもN値 60 以上の砂層を主体としているが、東京層の一部にはシルト層を挟んでいる。また江戸川層下部にはやや厚い礫質土が分布している。

TP-49.7m 以深は第四期更新世前期の上総層群と呼ばれる地層で、固結した粘土（土丹）から成り、やや締まりの悪い砂の薄層を挟んでいる。

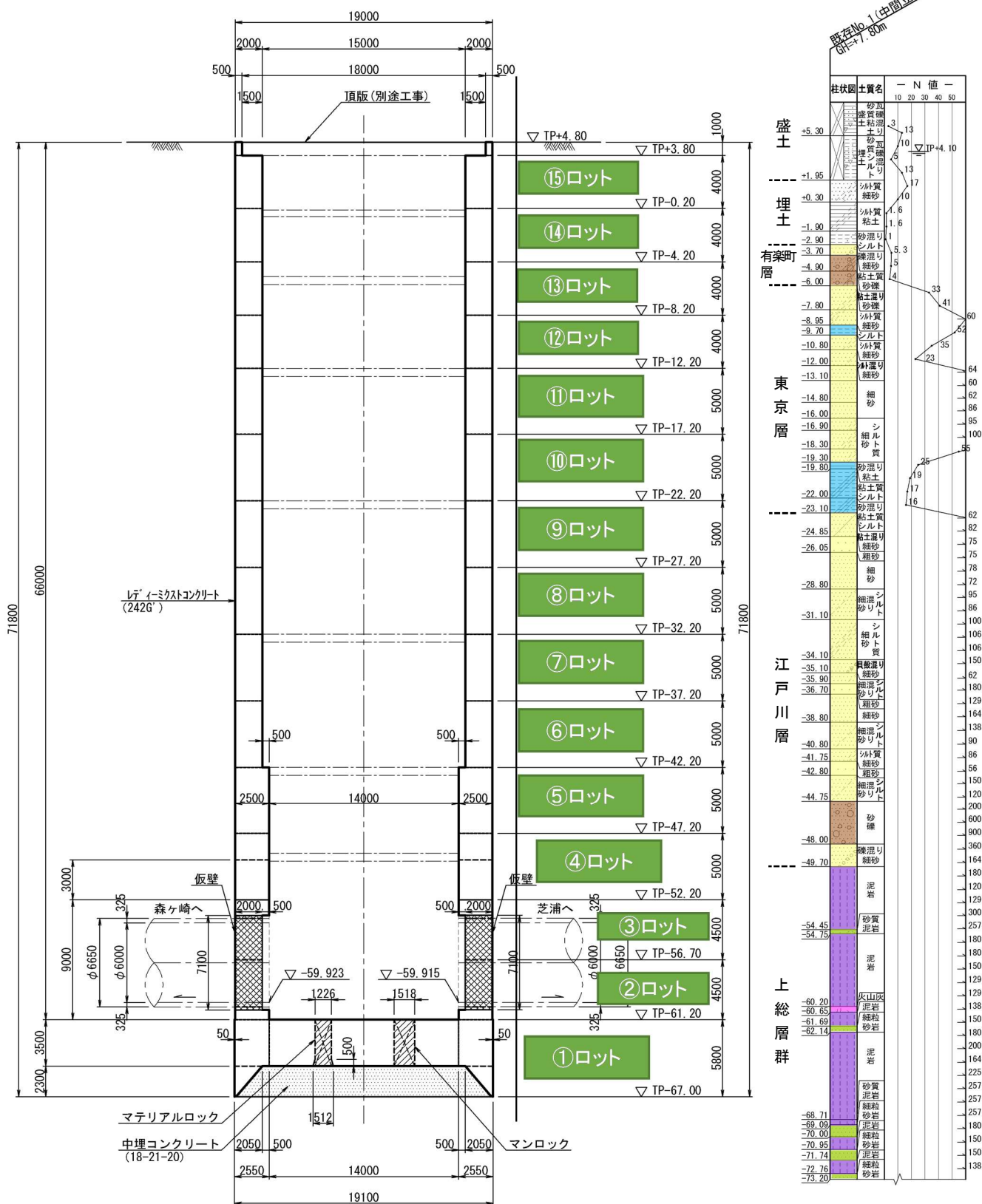


図-2 立坑の構造と地質柱状図

- 砂礫
- 砂
- 粘土、シルト
- 泥岩(土丹)
- 砂岩(介在砂層)
- 火山灰(凝灰岩)

2.2 施工管理記録の整理結果

ケーソンの施工にあたっては、沈設精度や函内の状態をリアルタイムに監視し、安全に施工を進めていくことを目的として計測管理を実施している。

主な項目としては、沈設管理として周面摩擦、土圧、刃口反力、間隙水圧、函内圧、スラブ盤圧、姿勢制御として傾斜計、距離計、他に函内温度、ガス濃度、鉄筋応力、空気流量などがある。ここでは、実際の作業気圧と外から加わった水圧との関係を見る目的で、刃先外側に設置した間隙水圧計と函内に設置した圧力計のデータを整理した。

函内圧およびケーソン刃先間隙水圧の深度変化を図-3に示す。砂地盤の掘削において、施工時の函内圧力および刃先の間隙水圧は理論水圧（工事前地下水位から刃先ま

での換算水圧）を 50kPa（水頭換算 5m）程度下回っている。一方で、刃先が難透水層（粘土、土丹）を抜けて砂層に入った時点では、函内圧を一時的に理論気圧まで上昇させていることが明らかとなった。

これら現象の要因の一つとして地盤の不飽和化を考えた。すなわち、ケーソン周りが不飽和化して透水係数の小さな領域が発生し、この結果として、函内圧を下げた状態でも地下水が流入しにくくなって掘削作業が可能となったと推定される。一方で低透水性の粘性土を掘削した場合は、下位の砂質土が不飽和化しておらず、粘性土を掘り抜いた時点で流入量が急増したため作業函内圧を上げたと想定される。図-4に想定模式図を示す。

ニューマチックケーソン周辺地盤の不飽和化については、既往の論文²⁾³⁾においても報告されている。

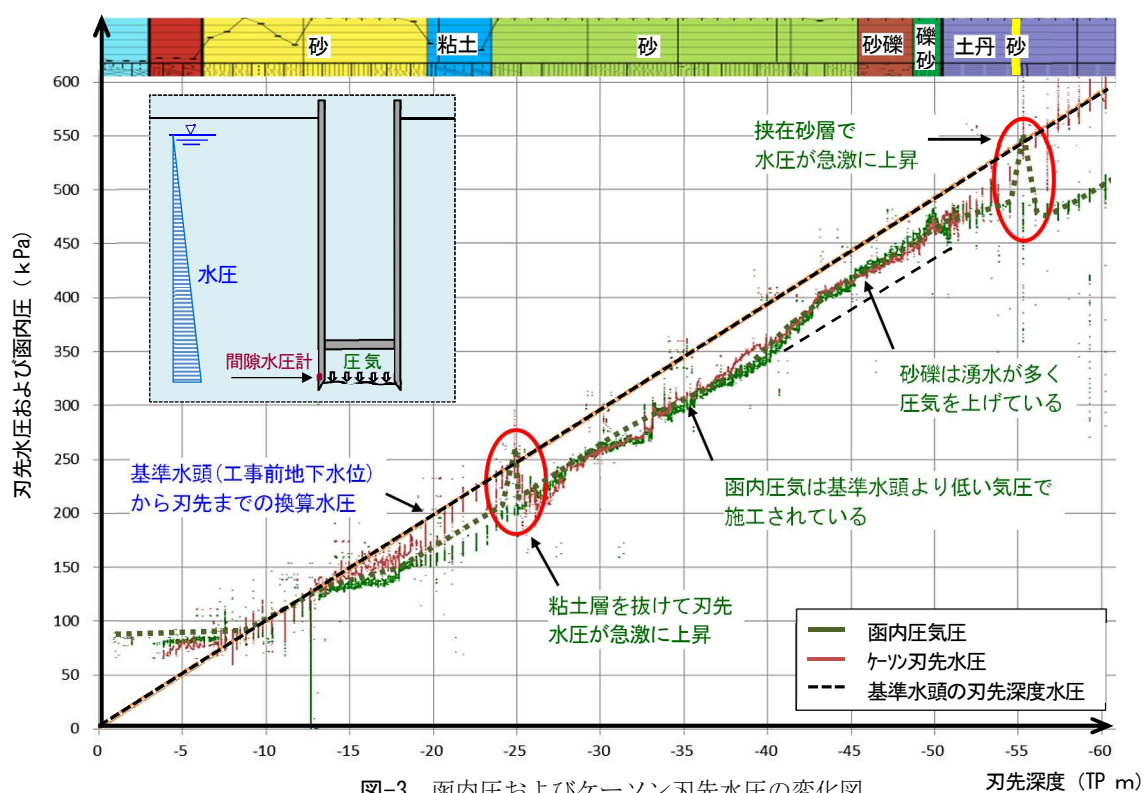


図-3 函内圧およびケーソン刃先水圧の変化図

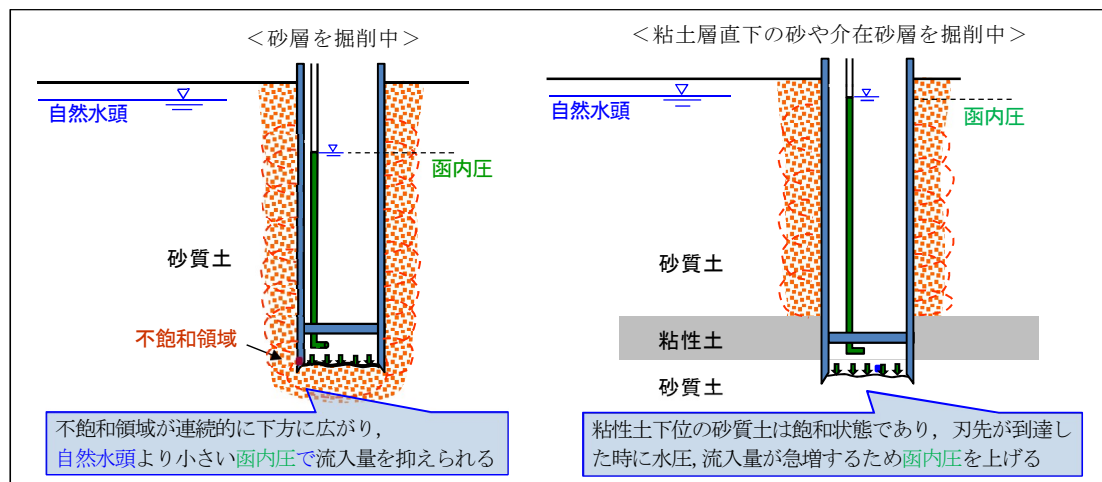


図-4 ケーソン周辺の不飽和化の模式図

3. 現地盤における調査試験および計測

3.1 透水試験による不飽和の確認

施工管理記録から推定した“地盤の不飽和化”を現地盤で確認する目的で、施工中のケーソン脇でボーリングによる透水試験を行った。調査は砂および砂礫地盤を対象とし（図-5）、ケーシング内に空気圧をかけてブローさせ地盤に空気を注入し、空気注入前（飽和状態）および注入後（不飽和状態）に揚水試験を行って透水性の変化を測定した（図-6）。

試験の結果、砂層および砂礫層では透水係数が $1/10$ 程度に小さくなり、地盤が不飽和化したことを確認した（図-7）。

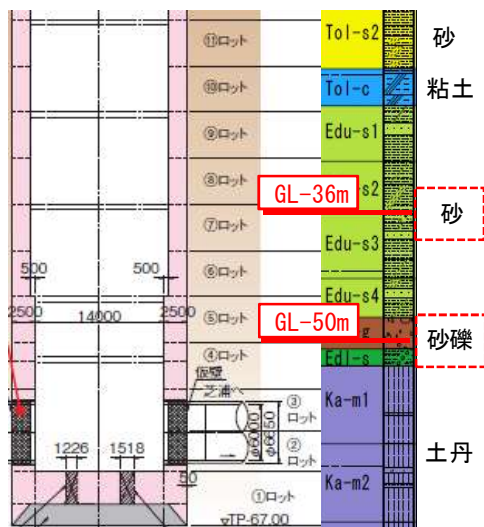


図-5 透水試験実施位置図

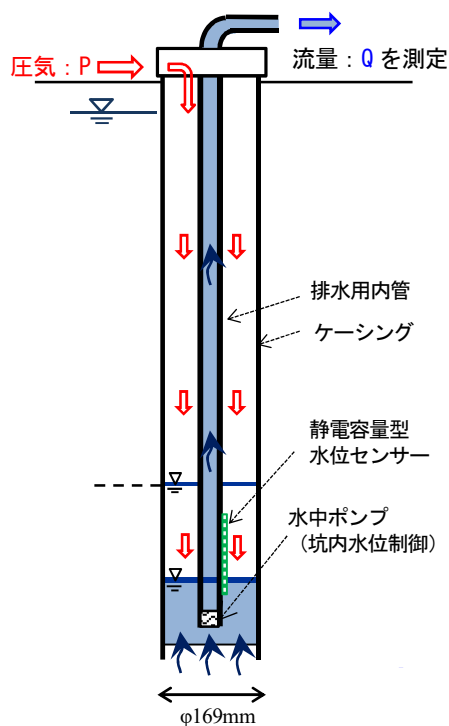


図-6 透水試験概要図



写真-2 ボーリング調査全景



写真-3 ケーシング内の圧気作業

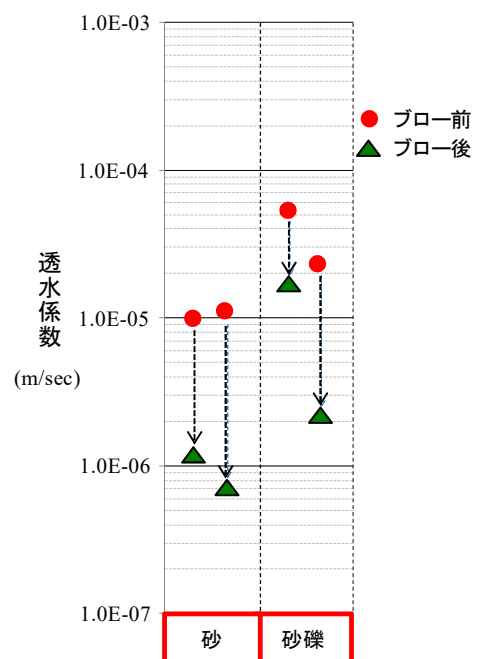


図-7 透水試験結果図

3.2 弾性波トモグラフィー

ニューマチックケーソンの周辺域に形成されていると想定した不飽和領域（図-4）の有無を確認する目的で、施工中のケーソン脇において、ボーリング孔内および地表部に発振器および受振器を設置して弾性波トモグラフィーを行った（図-8）。

計測結果を図-9 に示す。P 波速度 $<1.5\text{km/s}$ の不飽和地盤領域がケーソン側面に沿って形成され、施工期間中残留していることが明らかとなった。

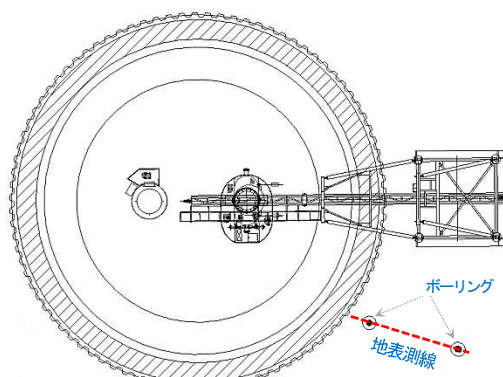


図-8 弾性波トモグラフィー位置図

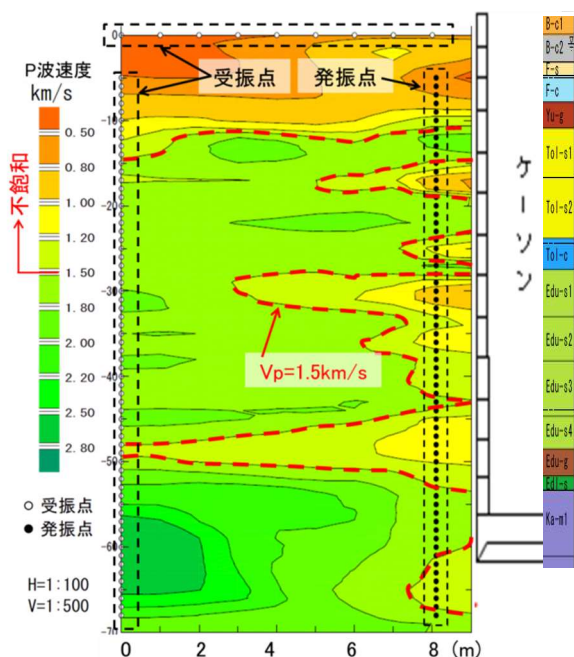


図-9 弾性波トモグラフィー結果図

4. 模型実験による不飽和化の確認

4.1 大型円筒土槽実験

ニューマチックケーソンの周辺部に形成される不飽和化を再現する目的で、大型円筒土槽を用いた実験を行った。装置を写真-4 および図-10 に示す。φ600mm の円筒形土槽に、掘削した砂で現地地盤を模擬した飽和状態の地盤を造り、その中に φ100mm のアクリル製の模擬ケーソンを設置した。



写真-4 大型円筒土槽

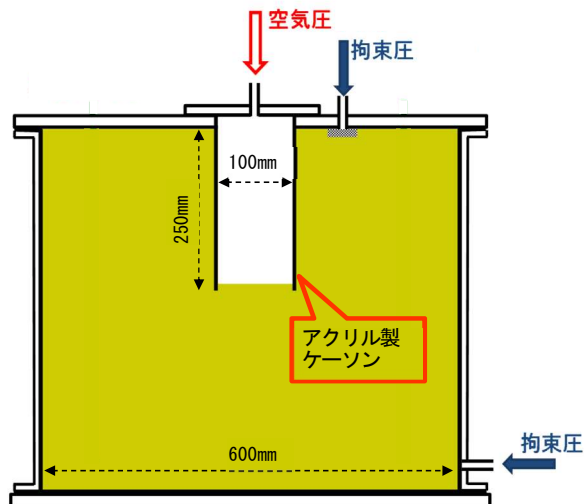


図-10 大型円筒土槽構造図

実験では、ケーソン内気圧を上げて底部から地盤内に空気を注入し、不飽和領域を形成させた。またこの過程において、加圧（ケーソン底面まで）→減圧を繰り返し、各減圧力時のケーソン内への流入量を計測した。

この結果、不飽和地盤状態でケーソン内に水が入り始める圧力（平衡圧）は飽和地盤時に比べて約1 kPa（水頭100mm 相当、＝アクリルケーソンの直径）小さくなったこと、不飽和化により透水性が小さくなったことが明らかとなった（図-11）。

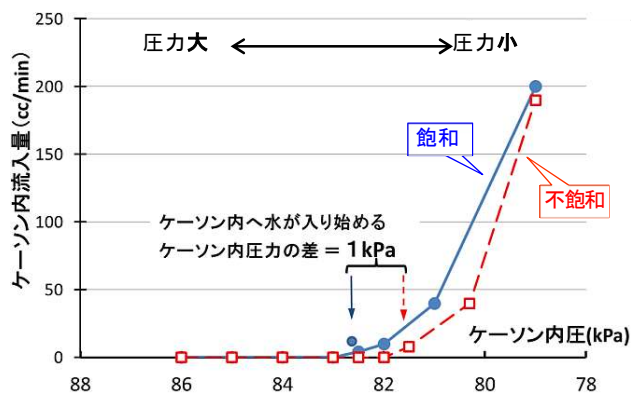


図-11 ケーソン内圧力と流入量の関係図

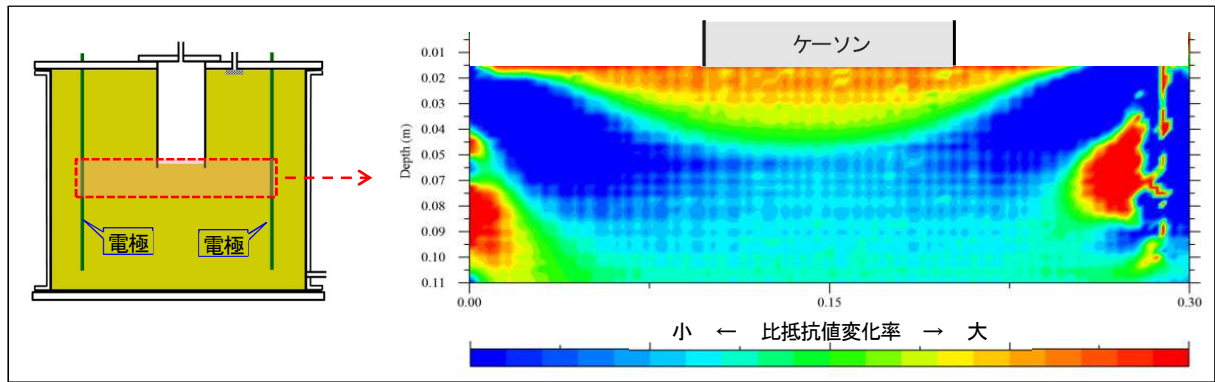


図-12 比抵抗トモグラフィー結果図

さらに、ケーソン底盤の地盤における不飽和領域の形成状況を確認する目的で、土槽内で比抵抗トモグラフィーを行った（図-12）。この結果、ケーソン底部に不飽和領域の形成を確認し（比抵抗変化率が数%上昇）、時間が経過しても不飽和状態が保持されることを確認した。

4.2 二次元模型実験

現地試験および大型土槽実験において地盤の不飽和現象を確認したが、形成過程の挙動は明らかとなっていない。ここでは、不飽和領域の拡がりを可視化することを目的とした模型実験を行った。作成した模型を図-13 および写真-5 に示す。

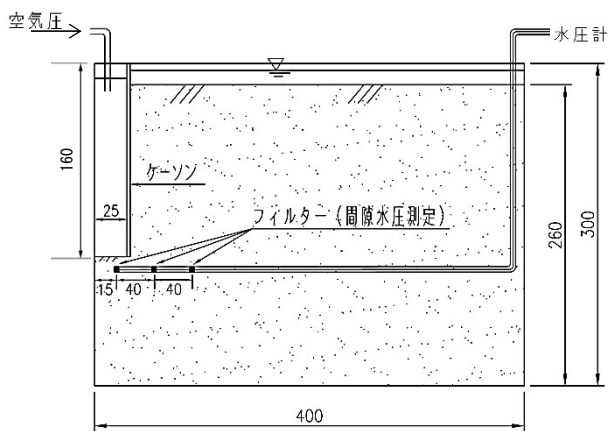


図-13 アクリル土槽構造図

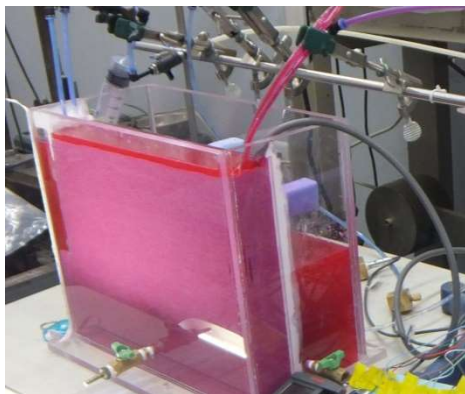


写真-5 初期地盤作成

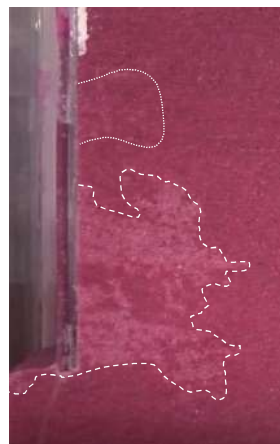
模型 (300mm×400mm×50mm) は、地盤内の不飽和の拡がりを可視化するため透明アクリル板で作成し、地盤材料は 6 号珪砂および現地採取試料（細砂）を用いた。また槽全体を赤色の着色水で満たし、空気の侵入が観察できるように工夫した。

初期飽和地盤は、ケーソン外側に珪砂を水中落下で締固めながら作成した。また刃口周辺の水圧変化を測定する目的で、水圧計に繋いだ水管 (φ5mm) を初期地盤作成時に 3 か所埋設した（図-13）。

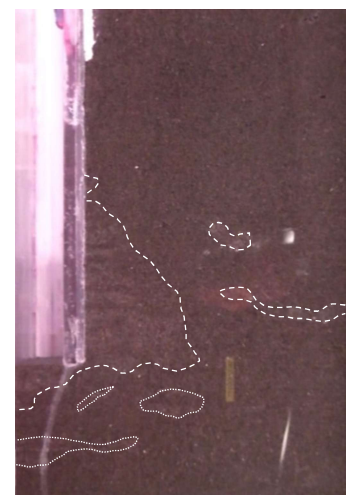
飽和地盤を作成後、ケーソンに一定量の空気を送ってケーソン内の水を刃口から少しずつ排出し、さらに空気を送り続けて地盤内へ浸透させた。不飽和領域の拡がり状況を写真-6 に、その経時変化を写真-7 に示す。

地盤作成時の層状の締固めや埋設した水圧測定管の影響により、地盤の透水性に不均一および異方性が生じ、不飽和領域は初期には横方向に枝状に拡がる傾向はみられるが、最終的にはケーソン幅の 2～3 倍の範囲で塊状に形成された。

ケーソン内に圧入した空気圧とケーソン底盤周辺の間隙水圧の経時変化を図-14 に示す。ケーソン内水位が底盤の位置で釣り合った状態を初期値として、間隙水圧は初



珪砂



現場採取試料（細砂）

写真-6 空気の圧入による不飽和領域の形成

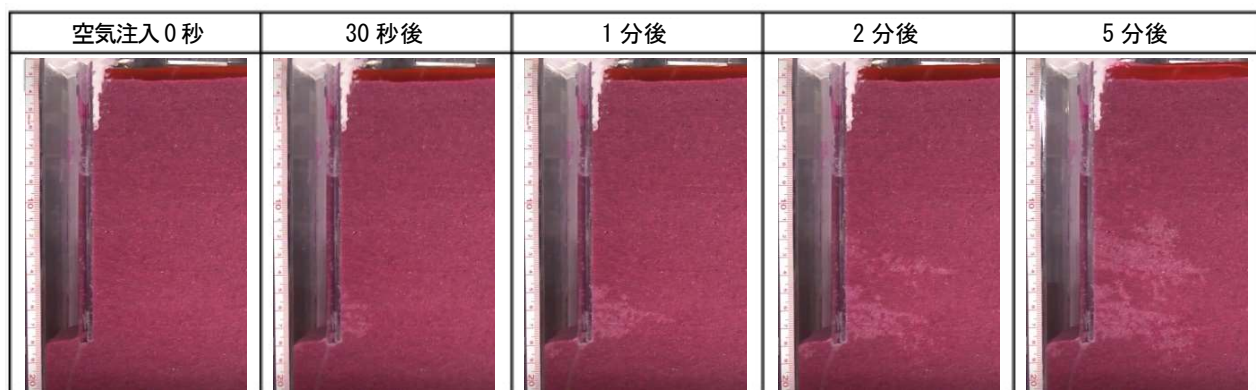


写真-7 不飽和領域の拡大状況

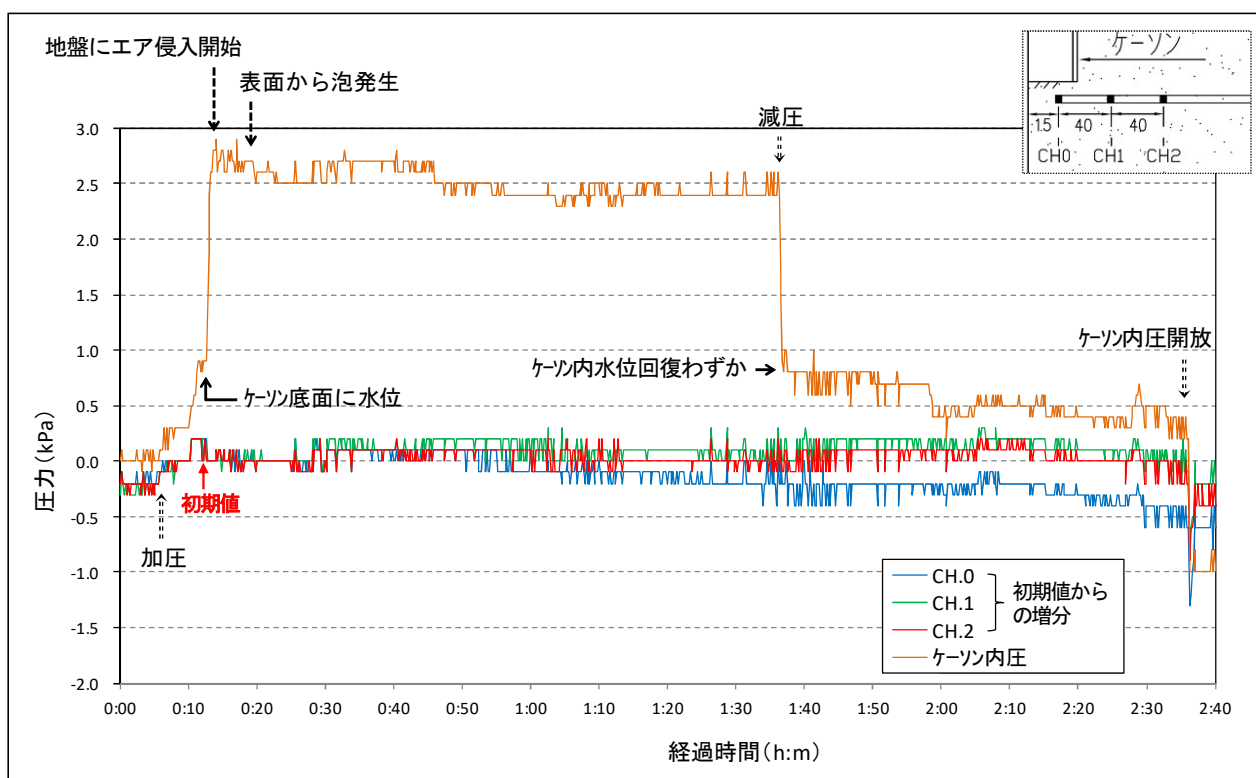


図-14 間隙水圧の変化図

期値からの増分を示している。ケーソン内に空気を送って不飽和領域が拡大している段階では間隙水圧に有意な変化は見られないが、ケーソン内を減圧して間隙水がわずかにケーソン内へ流入する過程では、ケーソン直下（CH.0）の間隙水圧が約 0.5kPa 低下している。これは、地下水の流れに沿って不飽和領域内で水圧が低下すると仮定した報告⁴⁾と一致する。

本実験では、空気を強制的に地盤内へ浸透させた場合の不飽和領域の広がりを可視化するとともに、間隙水圧の測定で不飽和領域はケーソン底盤付近に広がり、透水性によって下方への広がりが変化すること、一旦不飽和領域が形成されると、ケーソン内圧を下げて地下水がケーソン内へ流入する際に、水圧が不飽和領域内で低下する傾向があることを確認した。

5. 数値解析による不飽和領域の検証

アクリル製の二次元室内模型実験では、ケーソン内の圧力を高めることで発生する不飽和領域の広がりを可視化した。さらにこの実験結果を検証するため、気液二相流解析手法を用いてパラメトリックな解析を行った。

気液二相流解析は、地盤中における地下水分布を空気と水の二相の挙動として、単純な浸透流解析とは異なり地盤の飽和度に応じた浸透特性を考慮して解くものである。ここでは解析ソフト「GET FLOWS ((株)地圏環境テクノロジー)」を使用した。

解析に用いた物性値を表-1 に、解析結果を図-15 に示す。物性値は、現地地盤砂試料の室内物理試験値を使用した。

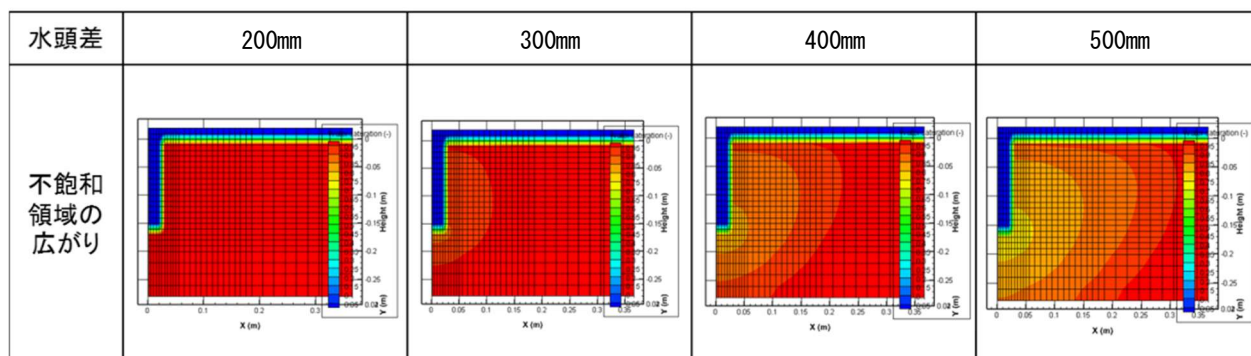


図-15 ケーソン圧力を変化させた場合の不飽和領域の広がり比較

表-1 解析使用物性値

物性	数値	単位
地盤空隙率	0.2	-
透水性係数	1.85E-05	m/sec
透気係数	1.01E-03	m/sec

図-15 は、ケーソン部の気圧を水頭差 100mm(1.0[kPa]) ずつ大きくして不飽和領域の広がりを求めたものである。水頭差 200mm まで不飽和領域の広がりは確認できず、300mm 以降で水頭差に応じて広がっている。水頭差 200mm まで不飽和領域が広がらないのは、空気が水を押し出すために必要な圧力が関係していると考えられる。

本解析で不飽和領域は、ケーソンの圧力増加に応じて底盤周辺にケーソン径の数倍程度で塊状に拡がると想定された。これは二次元模型実験結果と定性的に一致しており、予測手法としての有用性を確認した。

6. 不飽和を利用した合理化工法の開発

現場試験および室内実験の結果、ニューマチックケーソンの底盤および側部に不飽和領域が形成されることにより、掘削施工時の圧気圧が理論気圧より小さい状態でもケーソン内への地下水の侵入が抑えられることを確認した。

そこで、実際の施工現場において刃先より深部の未達砂層を対象に、ケーソン脇に設けたボーリング孔から空気を強制的に注入して不飽和化させることにより、掘削時の作業気圧の低減を試みた。

図-16 に空気注入工法の概要、図-17 に注入孔の配置を示す。不飽和化の対象としたのは、施工中に実施した地質調査で明らかとなった GL-70.5~75.5m 間の介在砂層である。空気注入孔は、地盤を乱さないように薬液注入工法の一つであるダブルパッカー工法を応用して削孔し、深度方向に 330mm の間隔でステップ注入によりボーリング孔から空気を浸透注入させた。写真-8~10 に機器および作業状況を示す。

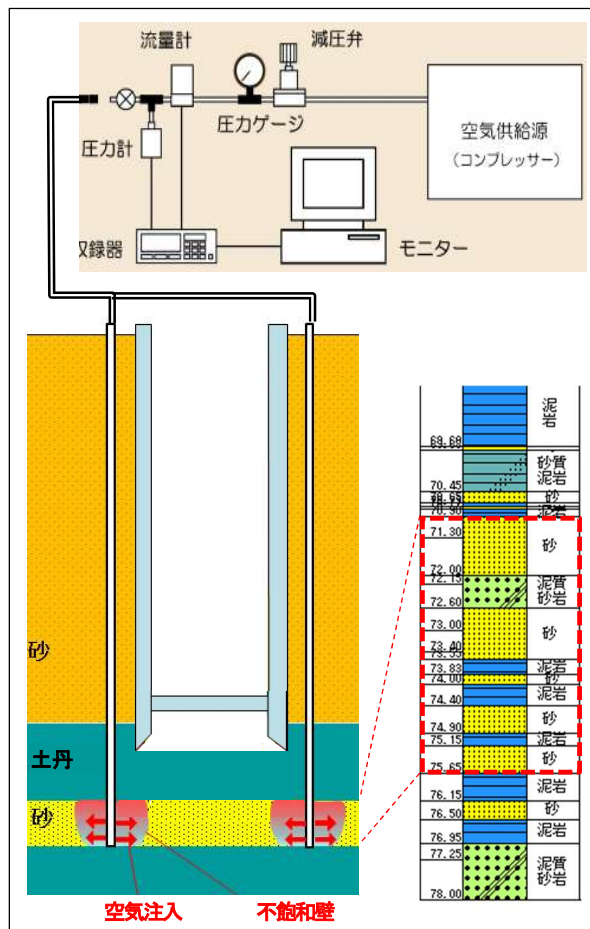


図-16 空気注入工法の概要図

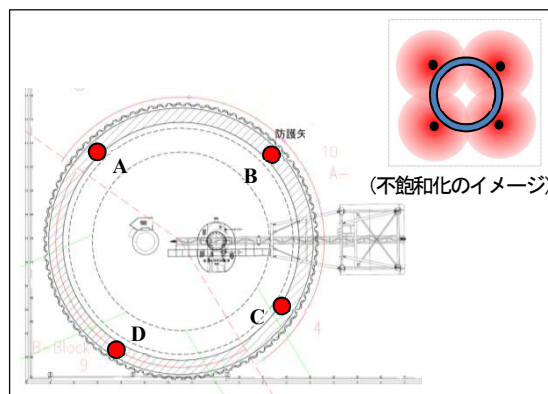


図-17 空気注入孔配置図



写真-8 ダブルパッカー



写真-9
空気注入孔



写真-10
空気注入操作

介在砂層への空気注入を行った後のケーソン掘削作業においては、それ以前の砂層で発生したような多量湧水や管内圧力上昇が発生せず、事前の不飽和化による作業気圧の低減効果が確認された。また、対象とした砂層での実際の作業では、理論気圧より 130kPa（水頭 13m）小さな管内圧で施工することができた（図-18）。

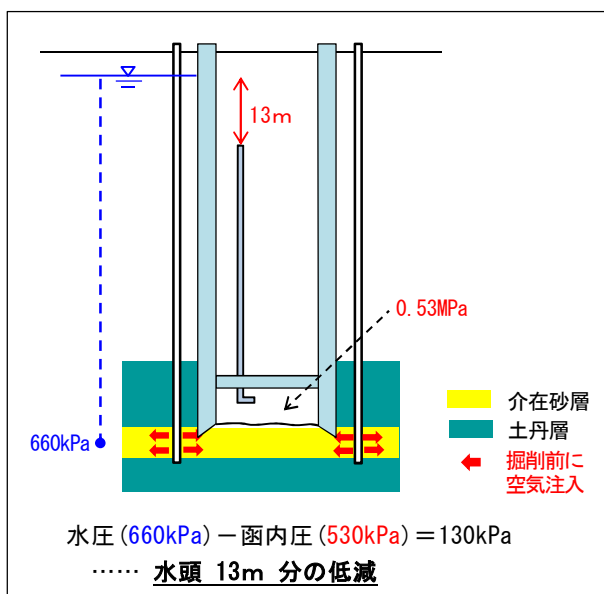


図-18 空気注入による作業気圧低減効果

7. 今後の展開と課題

事前に空気を注入して周辺地盤に不飽和領域を形成し、作業管内圧を通常より小さく抑えることにより、以下のようなメリットがある。

- ・ 高圧環境下の作業に伴う健康上のリスクが低減する
- ・ 圧気作業後の減圧時間が短くなり、作業の効率が向上する
- ・ 多量湧水を防ぐことができる
- ・ 圧力変動およびそれに伴う地盤の緩みを防止する
- ・ より大深度の立坑を、標準設備のニューマチックケーソン工法で構築できる

今後、空気注入による不飽和化工法を実用的に適用し、より大深度の立坑に適用するための課題として、以下の取り組みを進めていく。

- 1) 不飽和化およびその効果をより定量的に評価、予測するためのデータの蓄積
- 2) 介在砂層に限らず、厚い透水層や平面的に広い範囲を不飽和化する方法
- 3) より効率的に不飽和化する方法の開発と検証
- 4) より正確な効果予測、設計方法の構築

8. おわりに

ニューマチックケーソンの合理化施工法の一つとして、事前空気注入による不飽和化の有効性を確認した。今後、不飽和化の効果をより定量的に精度良く予測できるよう、実施工の計測や実験およびその再現解析を重ねていく予定である。

最後に、本研究にあたって様々なご指導をいただきました龍岡名誉教授および、現場実証試験において多大なるご協力をいただいた現場関係者の皆様に深謝いたします。

参考文献

- 1) 日本圧気技術協会：ニューマチックケーソン工法施工マニュアル【第四版】，P.47，2000
- 2) 白石俊多：ニューマチックケーソン基礎は激震を耐え抜いた，基礎工，Vol.13,No.9,pp120-127，1997
- 3) 藤井直，大内正敏，小松満，西垣誠：ケーソン周辺地盤の飽和度調査と不飽和砂試料の液状化強度，日本地下水学会 2008 年秋季講演会要旨，pp84-89，2008
- 4) 龍岡 他：大深度ニューマチックケーソン施工の合理化，土木建設技術発表会概要集，pp256-261，2015