

大深度ニューマチックケーソン施工の合理化

前田建設工業(株) 正会員 ○森田 篤
前田建設工業(株) 正会員 小熊 登
前田建設工業(株) 後藤信男
東京理科大学 フェロー会員 龍岡文夫

1. はじめに

現状、ニューマチックケーソンの施工において、掘削対象地盤の土質によっては初期の間隙水圧よりも小さな作業気圧で施工される場合があり、掘削盤の水位を下げるために理論上必要な圧力よりも小さな作業気圧での施工が可能となることがある。そこで、小さな作業気圧でニューマチックケーソンの掘削が可能となるメカニズムについて土槽実験、解析および、施工中のニューマチックケーソンの施工データの分析、現場計測により考察、確認した。本発表では、実験、解析、現場計測から得たニューマチックケーソン掘削のメカニズムに関する知見と大深度のニューマチックケーソンの施工を合理化する新しい工法の可能性について報告する。

2. ニューマチックケーソンの施工に関する現状

ニューマチックケーソン工法では圧気をかけて掘削地盤の水位を下げることで、気中掘削作業を可能にしている。一般に、作業気圧はケーソン刃先の掘削対象地山の土質や地下水条件に応じて、式1および表-1のよう

$$P_w = 0.0098 \times m \cdot (H + 1.0) \cdots \cdots \text{(式1)}$$

P_w : 作業気圧 (MPa)

H : 平均水面から刃口までの深さ(m)

m : 土質などによる係数

表-1 mの値¹⁾

	A	B
シルト・粘土	0.8	0.75
細砂	0.9	0.85
砂礫	1.0	0.95

A : 周辺が攪乱されやすい (フリクションカット)

B : 周辺が攪乱されにくい (円形断面, フリクションカットなし)

¹⁾ 日本圧気技術協会

ここで、シルト・粘土や土丹のような難透水層を掘削する場合の作業気圧は地下水圧の0.75～0.8倍、砂礫では0.95～1.0倍程度を目安とされており、これらは過去の経験をもとに設定されたものである。

今回、ニューマチックケーソン工法で建設中の立坑において、施工データの整理および各種計測を行い、作業気圧、地下水頭と作業気圧の関係について評価した。対象とした立坑の概要を図-1に示す。掘削対象地盤の土質は砂、粘土、礫、土丹層および土丹に挟在する砂層である。地下水位は各層ほぼ同じで、TP.0m (GL-5m) 前後である。掘削深度や作業気圧等の施工データに加え、ケーソン刃先近傍および周辺地山の間隙水圧を計測し、掘削の進行に伴う作業気圧やケーソン刃先周辺の間隙水圧の変化について分析した。

図-2にケーソンの掘削深度と作業気圧および間隙水圧との関係を示す。ここで、掘削前の水位は各地層でほぼ同じであることが事前調査において確認されていることから、掘削前の各深度における間隙水圧（以後、自然水圧）は深度に比例するものとして、刃先深度における水圧を示している（破線）。刃先水圧はケーソン躯体外側の刃先から4.0m上部に設置した間隙水圧計により測定しているため、4.0m分の水圧を加えて、ケーソン刃先深度における水圧に換算してプロットしている。作業気圧は作業室内天井に設置している圧力計の測定値で、掘削地盤表面に作用する気圧と等しいとみなした。掘削初期の圧気をかけ始めた、深度GL-6.7m (TP.-2m) から深度GL-14.7m (TP.-10m) までの掘削では、作業気圧が自然水圧を上回っている（図-2, ①）。これは土かぶりが小さく緩い埋土の掘削において、地下水圧も小さいことから多少、エアブロー気味の施工と

キーワード ニューマチックケーソン, 不飽和

連絡先 〒102-8151 東京都千代田区富士見1-10-2 前田建設工業(株) 土木事業本部 土木設計部 TEL03-5276-5166

なるためである。GL-14m付近以深の掘削では作業気圧および刃口の水压は全般的に自然水压を下回っており、砂層では概ね 50kPa 程度小さくなっている（図-2，②）。ただし、粘土層下位の砂層の GL-30m（TP. -25m）付近および土丹層に挟在する砂層の GL-60m（TP. -55m）付近では作業気圧および刃先水压が急上昇し、自然水压を上回っている（図-2，③）。

3. 想定メカニズム

砂層や砂礫層において作業気圧および刃口水圧が自然水压を下回る現象、粘土層直下や土丹層中の挟在砂層において圧力が急激に上昇する現象に関して、その要因について考察した。現場計測結果の要点をまとめると次のとおりである。

- 1) 作業気圧と刃先水压は自然水压を下回る。
- 2) ただし、ケーソン刃先が難透水層（粘土，土丹）から砂層に差し込んだ際、作業気圧と刃先水压が一時的に上昇する。
- 3) 水压はケーソン周囲で急激に低下し、7 m離れた位置では自然水压とほぼ変わらない。

これらの現象が生じる要因として、地盤の不飽和化によるケーソン周辺地盤の透水性の低下を想定した。一般に土質地盤の透水係数は飽和度とともに変化し、飽和度が低下すると透水係数も小さくなる。ケーソン周囲もしくは刃口周囲を包み込むように低透水領域が形成されて作業室内へ地下水が浸入し難くなることで、作業気圧を下げる事が可能になり、また、ケーソン周囲の低透水領域内ではわずかな地下水の流れにより水頭差が生じ（水頭差が生

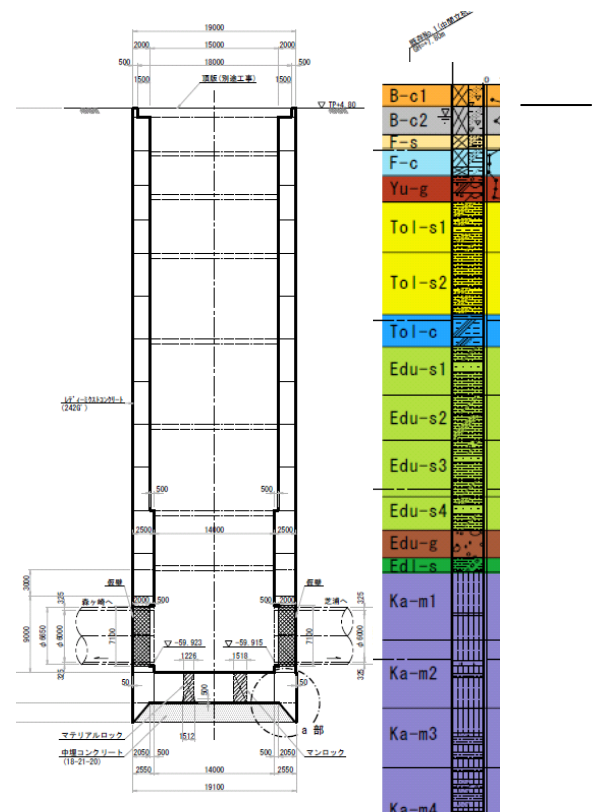


図-1 立坑施工概要

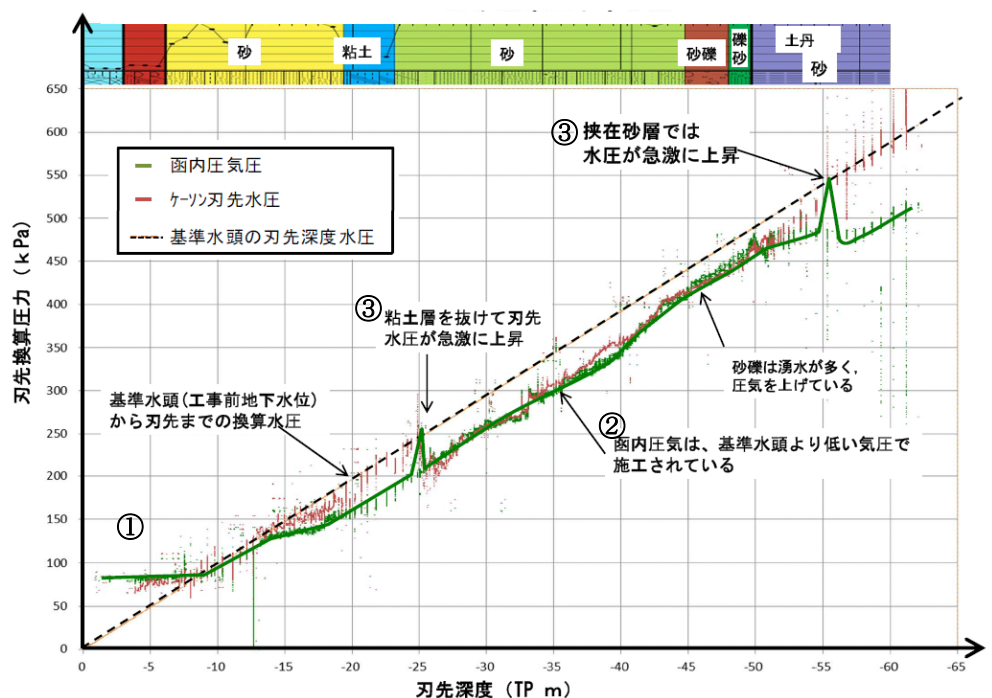


図-2 施工の進行に伴う気圧，水压の変化

じても流れる地下水量が小さくなり），その結果，ケーソン近傍の範囲で水压が低下すると考えられる。そして、透水係数が小さくなる要因としては圧気および掘削に伴う地盤の不飽和化が考えられる。図-3 に想定メカニズムの概要を示す。一般に、ニューマチックケーソンで施工した立坑や基礎の周辺地盤は、施工完了後も不飽和状態が維持され、それによって液状化現象が起こらないことはよく知られている。

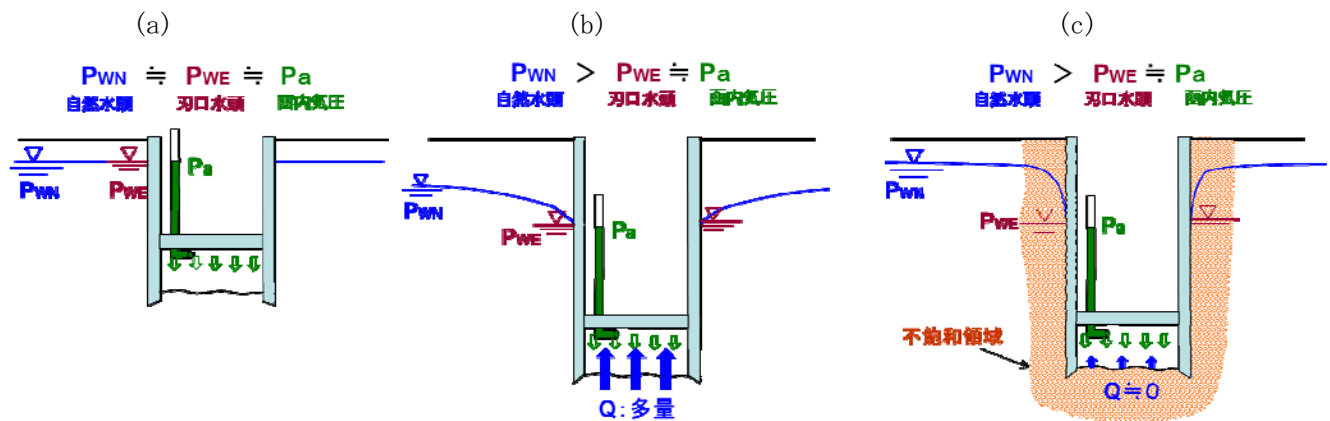


図-3 想定メカニズム（１）

また、不飽和領域は砂や礫などの比較的透気性のある層において圧気をかけながら沈下掘削する過程において順次形成されるが、粘土や土丹層のような不透水層では不飽和領域が拡がりにくいと考えられる。一般に、透水性が小さい土質では透気性も小さく、また、飽和状態から不飽和化するためには高い空気圧（エントリー圧）が必要となる。そのため、不透水層を掘削する間には不飽和領域が発生しにくい。（ただし、不透水層は地下水が流れにくいいため、小さな作業気圧でも地下水が浸入することなく、掘削作業が可能である。）ここで、ケーソン刃先が不透水層から透水層にさしかかった時には多量の湧水が発生する懸念がある。不透水層を掘削中に不飽和領域が形成されないと、掘削対象が不透水層から透水層へ移る時には飽和状態の透水層を掘削することになる。その場合、透水性が高い状態ゆえに地下水の流入量が大きくなるため、高い作業気圧が必要になる（図-4）。実際の施工においても掘削深度が粘土もしくは土丹層の深度からその下にある砂層や挟在砂層に差し掛かった時に作業気圧および刃先圧力が大きく上昇している（図-2 の③）

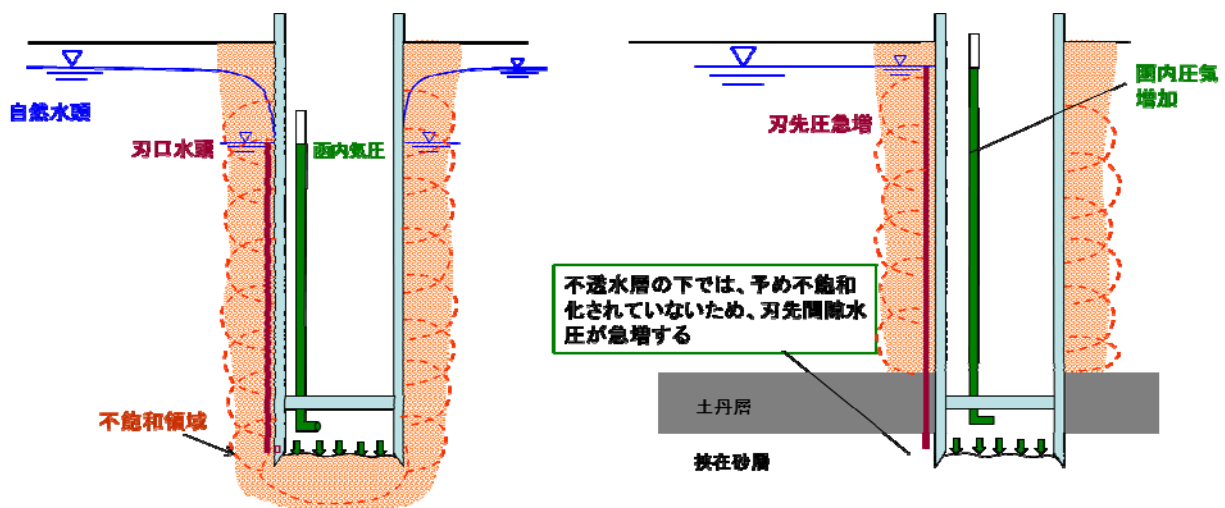


図-4 想定メカニズム（２）

4. 室内実験および試験

ニューマチックケーソンの施工で観察された現象を土槽実験で再現し、想定したメカニズムを検証した。土槽実験装置の概要を図-6 に示す。実験の試料には現場で採取した砂を用いた。予備的実験として、ケーソン内の気圧（以降、室内圧、 P_c ）を調整してケーソン内へ流入する間隙水とケーソン内気圧との関係がケーソン底部を不飽和化することによりどの程度変化するかを評価した。実験は室内圧 P_c の加圧・保持・減少を最大圧や保持時間を変えながら次のとおり、3回実施した。

[実験ケース：函内圧 P_c の変化]

- 1 回目（ケース 1）： $P_c=83\text{kPa}$ →（加压）→ $P_c=86\text{kPa}$ （10 分保持）→（減圧）→ $P_c=79\text{kPa}$
 2 回目（ケース 2）： $P_c=79\text{kPa}$ →（加压）→ $P_c=86\text{kPa}$ （30 分保持）→（減圧）→ $P_c=79\text{kPa}$
 3 回目（ケース 3）： $P_c=79\text{kPa}$ →（加压）→ $P_c=88\text{kPa}$ （30 分保持）→（減圧）→ $P_c=79\text{kPa}$

（ケース 1 の $P_c=83\text{kPa}$ はケーソン内水位がケーソン底面でつり合う圧力である．以降，初期平衡圧）

実験結果を図-6, 7 に示す．1 回目のケースでは函内圧 P_c を 85kPa まで上げるとケーソン周囲に気泡が発生し，周辺地盤の不飽和化が目視観察により認められた．その後 $P_c=86\text{kPa}$ まで上げて 10 分間保持した後，函内圧を徐々に低下させると，初期圧の $P_c=83\text{kPa}$ あたりでケーソン内に水が流入しはじめ，その後函内圧の低下とともに流入量が増加した（図



図-5 土槽実験装置概要

-6，実線）．2 回目のケースでは 1 回目同様 $P_c=86\text{kPa}$ まで函内圧を上昇させ，30 分間保持した後に函内圧を低下させた（図-6，破線）．その結果，ケーソン内へ水が流入し始める函内圧は $P_c=82\text{kPa}$ で，1 回目のケースよりも小さくなった．その後の函内圧の低下に伴う水の流入量についても 1 回目のケースよりも少なくなった．3 回目のケースでは函内圧を $P_c=88\text{kPa}$ まで上昇させ，30 分間保持した後に函内圧を低下させた（図-6，点線）．その結果，2 回目のケースと同様， $P_c=82\text{kPa}$ あたりからケーソン内に水が流入し始めた．

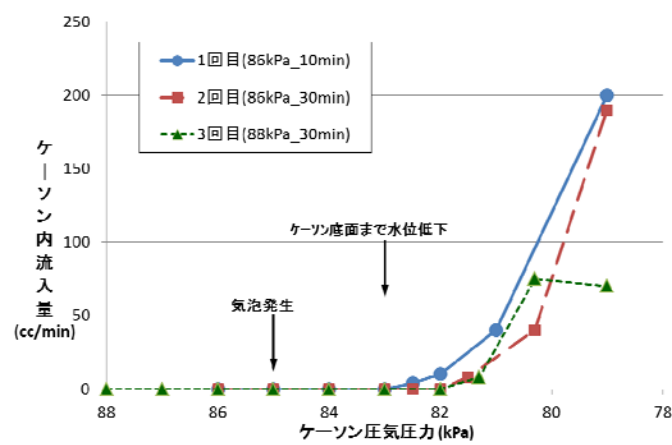


図-6 予備実験結果



図-7 気泡発生状況

ケース 2，ケース 3 の結果では，函内圧を初期平衡圧よりも 1kPa （水頭 10cm 相当）小さくしてもケーソン内へ水が流入することがなく，一見，平衡状態にある．これは，一旦，函内圧を上げてケーソン底面や周辺地盤を意図的に不飽和化させたことにより，すなわち難透水層が形成されて，ケーソン内へ水が流入しにくい状態になったことによると考えられる．（ケース 1 ではケーソン側面外周に沿って気泡の発生がみられたものの，底面には不飽和領域がまだ形成されていないものと推定される．）

ここで，試料の飽和度と透水係数との関係を保水試験により確認した．試験結果を図-5 に示す．飽和状態から不飽和状態になることで透水係数が小さくなり，その程度として，例えば飽和 100% から飽和度 90% に変化すると透水係数は 1 オーダー小さくなることを確認した．（図-8）

以上、ケーソン近傍地盤が不飽和化することで、ケーソンの函内圧をある程度まで小さくしても、地下水の流入が抑えられることが実験で再現された。今後、土槽内各所で水圧測定できるような装置を改造し、不飽和領域や水圧の分布を測定して、ケーソン周辺に発生する不飽和と地下水挙動に関するメカニズムをより詳細に検討する予定である。

5. 現場計測および現地試験

ケーソン施工現場において弾性波トモグラフィーを行い、ケーソン周辺地盤の不飽和化の状況を確認した。弾性波トモグラフィーでは地盤が不飽和化すると弾性波速度、特にP波速度が低下することを利用して、ボーリング孔間の弾性波速度分布から不飽和領域を把握した。弾性波トモグラフィーの結果を-9に示す。ケーソン底盤に発生した不飽和領域はケーソン側方に広がり、掘削深度が深くなってもケーソン側部の浅い深度に残留していることが確認された。

次に現地盤において、ボーリング孔を用いて地下水の揚水試験および回復試験を行った。試験はニューマチックケーソンの施工を再現すべく、ケーシングをケーソン躯体にみたく、ケーシング内に空気圧をかけた状態で行った。また、各試験ではケーシング内の圧力を孔底の水圧よりも大きな圧力をかけてケーシング底部からエアブローさせる場合、すなわち孔底地盤を不飽和化させる場合とさせない場合とを行い、不飽和化に伴う透水性の変化に着目した。試験は水位を一定に保ちながら揚水量を測定する揚水試験（ニューマチックケーソンの施工を模擬）と一旦、孔内水位を孔底まで下げた後、水位が回復時間を測定する回復法とを実施した。図-10に試験概要を、表-2に実施した試験ケースと結果を示す。

ボーリング孔を使用した水理試験の結果、以下を確認した。

- ①圧気（エアブロー）により孔底近傍を不飽和化させることで、揚水量が大きく変化し、飽和状態の7～33%に減少する。
- ②砂層、砂礫層では孔底近傍を不飽和化させることにより、地盤の透水係数が1オーダー程度小さくなる。
- ③透水係数は砂礫： $10^{-2} \sim 10^{-4}(\text{cm/sec})$ 、砂：概ね $10^{-4}(\text{cm/sec})$ オーダー、土丹：概ね $10^{-5}(\text{cm/sec})$ オーダーとなる。

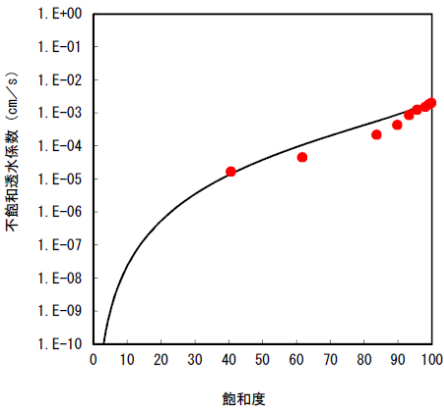


図-8 飽和度と透水係数の関係

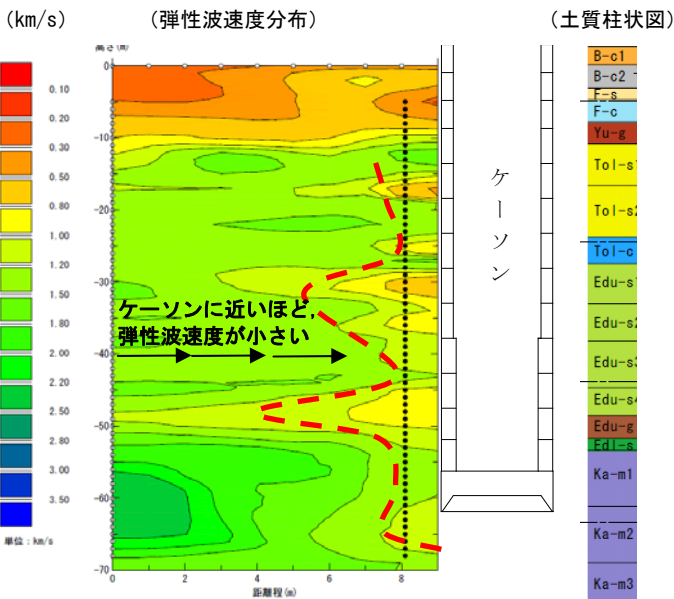


図-9 ケーソン周辺の弾性波速度分布

表-2 水理試験結果

地質	加圧 P_i (Mpa)	実施時	揚水量 Q (リットル/min)	透水係数 k (cm/sec)
-36m 砂	0.20	フロー前	1.61	9.84×10^{-4}
		フロー後	0.20	1.17×10^{-4}
	0.23	フロー前	1.19	1.03×10^{-3}
		フロー後	0.08	7.20×10^{-5}
	0.26	フロー前	0.21	3.44×10^{-4}
		フロー後	—	—
-50m 砂礫	0.36	フロー前	6.0	5.13×10^{-3}
		フロー後	2.0	1.71×10^{-3}
	0.40	フロー前	1.0	2.22×10^{-3}
		フロー後	0.1	2.22×10^{-4}

6. おわりに

ニューマチックケーソンの施工において、高圧での圧気作業は作業時間が制限されたため、可能な範囲で作業気圧を小さめに保つことは作業効率の向上につながる。不飽和化を制御することで、少なくとも異常湧水や必要以上の作業気圧の上昇を避けることができれば、ニューマチックケーソン施工の合理化につながると考えられる。さらには不飽和化を補助工法として用いることで、より大深度の立坑にニューマチックケーソン工法を適用できる可能性もあると考えられる。現在、掘削前の地盤を予め不飽和化し、作業気圧の低減を図る工法を試験施工し、効果を確認中である。最後に、ご協力頂いた関係者の方々に感謝の意を表します。

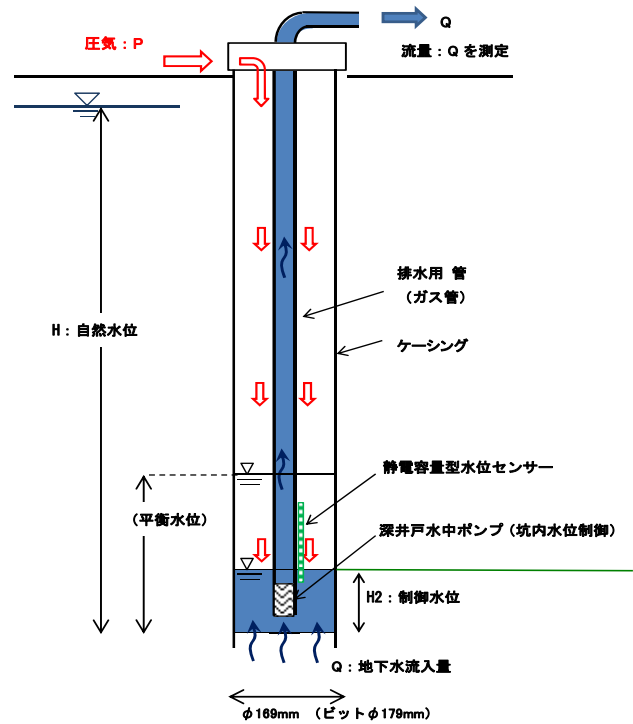


図-10 ボーリング孔水理試験の概要