

浅層地盤の地下水圧測定のための打ち込み式観測井の開発

竹森 基・濱田善弘・田子公一・阿部知之

Development of a simple driven observation well for monitoring shallow ground water pressure

Motoi TAKEMORI, Yoshihiro HAMADA, Koichi TAGO and Tomoyuki ABE

Abstract

From the point of view on cost reduction and high quality security, an effective and reliable method for monitoring ground water pressure in shallow ground has been required. In response to this requirement, the authors have developed a simple driven observation well which can be rapidly installed without necessity of borehole drilling in order to enable highly reliable observations, special considerations were made for a structure of porous part and installation procedure. Then the proto-type of this observation wells were installed in the model field of a river dike during reservoir filling, which was performed for cooperative study with the Public Works Research Institute, and ground water pressures from the wells in the river dike model were continuously observed for about one year. It was shown that the observed ground water pressures in the river dike model could be reasonably followed by the change of water table due to the reservoir filling conditions. It was concluded that application of the driven observation well to such a shallow ground condition was most effective to be used.

Key words : piezometer, observation well, dynamic penetration equipment, river dike model experiment, time lag, hydrophile filter

(要 旨)

コスト縮減や品質確保の観点から、より効率的に信頼性の高い観測結果が得られる水位観測手法が求められている。そのようなニーズに対して、筆者らはボーリングによる削孔を必要とせず迅速に設置できる打ち込み式観測井^{注)}の開発を行った。開発に当たっては、信頼性の高い観測が可能となるように有孔部の構造や設置方法等について種々の検討を行った。また、検討結果をもとに製作した試作品を独立行政法人土木研究所との共同研究において実施した模擬堤体による湛水実験に適用して、約1年間堤体内の水位観測を実施した。その結果、湛水位の変化に応じた堤体内水位分布の経時的な変化を的確に捉えた良好な観測データが得られ、その適用性が確認された。

キーワード:ピエゾメータ, 地下水観測井, 簡易打撃装置, 模擬堤防試験, タイムラグ, 親水性フィルター

注) Dunicliff(1988)によれば、地盤の地下水圧を測定する装置を観測井とピエゾメータとに区別している。観測井とは、地層間にシール構造を持たず、地層間が鉛直方向で水理的に連絡している構造を備える装置を指し、ピエゾメータとは地盤内部をシールし、その部分周辺の地下水圧にのみ応答し、その他の領域の地下水圧に応答しない構造を備えた装置と定義している¹⁾。打ち込み式観測井は、開放型ピエゾメータの一種であるが、ここでは、慣用的に観測井と称することとした。

1. はじめに

一般的に、地下水位を長期間観測する場合には、ボーリングにより削孔を行った後、孔内に塩化ビニール製の有孔管にフィルター材を巻いたものを挿入し、その外周を珪砂等で埋め戻す。さらに、有孔管の上部から地表付近までを粘性土やモルタル等で充填し遮水処置を施した後、孔内を水で洗浄する。しかし、コスト削減や品質確保の観点から、作業者の経験や技量にかかわらず、より効率的に信頼性の高い観測結果が得られる地下水位観測手法に対するニーズは高まっている。

そこで、筆者らは、比較的軟弱で地下水位が浅い地盤を対象として、ボーリングや洗浄作業を必要としない打ち込み方式の観測井の開発を行った。以下では、観測井の構造及び設置方法に関する検討結果と、独立行政法人土木研究所、および財団法人国土技術研究センターとの共同研究「堤防管理技術高度化のための堤体内水位観測方法の開発（平成17～19年度）」において実施した検証実験の結果について述べる。

2. 開発における基本方針

打ち込み式観測井の開発における基本方針は、以下のとおりとした。

- ・ 打ち込みには、一般の調査で用いられている汎用性の高い打撃装置を利用する。
- ・ 実際の地下水位の変化に追従して変化する観測水圧の遅れ（タイムラグ）をできるだけ小さくするために、管径は水位計の設置が可能な範囲でできるだけ細くする。
- ・ 観測井では、所定の深さに有孔部を設ける必要があるが、打ち込み式の場合、有孔部を露出したまま打撃貫入すると、土との接触によって目詰まり等を生じる可能性がある。そのため、観測管は、有孔部を観測管の内側に収納した状態で打撃貫入し、所定の深さに達した後に露出させる方式とする。
- ・ 河川堤防への適用を考えた場合、堤体内地盤は通常は不飽和状態であり、河川の水位上昇に伴って堤体内の水位が上昇する。そこで不飽和から飽和に至る最初の時刻を捉えるために、観測井のできるだけ下端の水位を観測できるようにする。

なお、海外では、打ち込み式観測井の有孔部の露出方法として、ケンブリッジ大学が開発した地盤に外管を打ち込み、さらに内管を打ち込む方式（Cambridge driven piezometer²⁾）（図-1参照）と、オランダのデルフト土質研究所が開発した外管を打ち込んだ後に外管を引き上げる方式の2つがある。デルフト方式は、有孔部を露出させるために観測管を上方に引き上げる際に、観測管と地盤の間の遮水性が低下する可能

性があることから、今回はケンブリッジ方式を採用した。

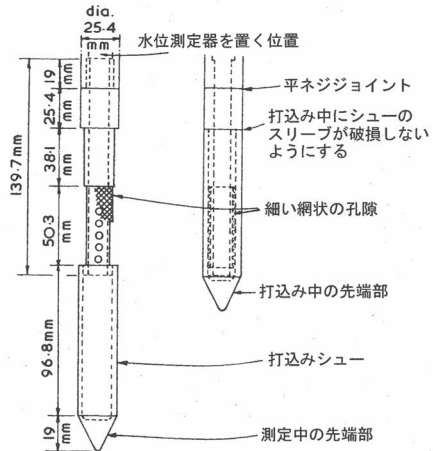


図-1 ケンブリッジ方式の打ち込み式観測井
Fig.1 Cambridge driven piezometer

3. 打ち込み式観測井の構造検討

3.1 設置方法

3.1.1 打ち込み装置について

打ち込み式観測井の設置に用いる装置としては、土質調査においてサウンディングの一種としてよく用いられているオートマチックラムサウンディング装置（以後、ラム試験機と呼ぶ）の簡易打撃装置を利用するものとした。ラム試験機は、動的コーン貫入試験装置の一種であり、重錘が所定の高さから落下するエネルギーにより、ロッド先端に取り付けたコーンを打撃貫入し、20cmを貫入するのに必要な打撃回数を求めるものである。

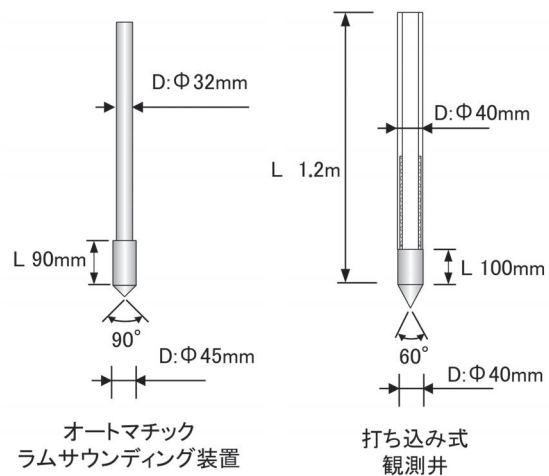


図-2 オートマチックラムサウンディング装置と打ち込み式観測井の貫入部の形状寸法の比較

Fig.2 Comparison of penetration parts between the Automatic Ram-Sounding equipment and the driven observation well.

ラム試験機で使用するロッドの径と後述する打ち込み式観測井の観測管の径は、図-2に示すように若干異なる。そのため、ラム試験機を利用して打ち込み式観測井を打ち込むために専用ノッキングヘッドを製作した。



写真-1 観測井設置作業中のオートマチックラムサウンディング装置

Photo 1 The Automatic Ram-Sounding equipment during installation of a driven observation well.

3.1.2 観測井の設置と有孔部の露出方法

観測井では、所定の深さに有孔部を設ける必要があるが、打ち込み方式の場合、有孔部を露出したまま観測管を打撃貫入すると、有孔部が直接土と接触することになり、目詰まりを生じる原因となる可能性がある。そのため、有孔部は管の内側に収納した状態で打撃貫入し、所定の深さに達した後に露出させることが望ましい。

有孔部を露出させる方法としては、観測管を引き上げる方法と、観測管の中にロッドを挿入して先端の有孔部だけを打撃貫入させる方法の2つが考えられる。前者については、引き上げた際に観測管と周辺の土との密着性が悪くなり、有孔部の上部で確保すべき遮水性が低下する可能性がある。引き上げ作業用に別途油圧の引き抜き装置を用意する必要があり作業効率が悪い、などの問題点が考えられた。一方、後者については、観測管は打ち込んだ状態で維持されるため必要な遮水性は確保されること、観測管の打ち込みから有孔部の露出まで1台の打撃装置で作業できるため作業効率が良いこと、などから前者に比べて優位と考えた。

以上より、ここでは観測管を所定の深度まで打ち込んだ後、先端部のみを打撃貫入して、有孔部を露出させる方法を採用した。

打ち込み式観測井の設置は以下の手順で行うこととした(図-3)。

- ①ラム試験機を用いて、先端部(コーンと有孔部)と保孔管を所定の深度まで打ち込む。
- ②管内に先端部を打ち込む専用ロッド(打ち込みロッド)を挿入して先端部だけを地盤に打ち込み、有孔部を露出する。
- ③打ち込みロッドを回収する。
- ④観測井内に水位計を設置する。

- (1)観測井の保孔管を打ち込む (2)保孔管内に打ち込みロッドを挿入し、先端部を打ち込み、有孔部を露出する。 (3)打ち込みロッドを回収する。 (4)水位計を設置する。

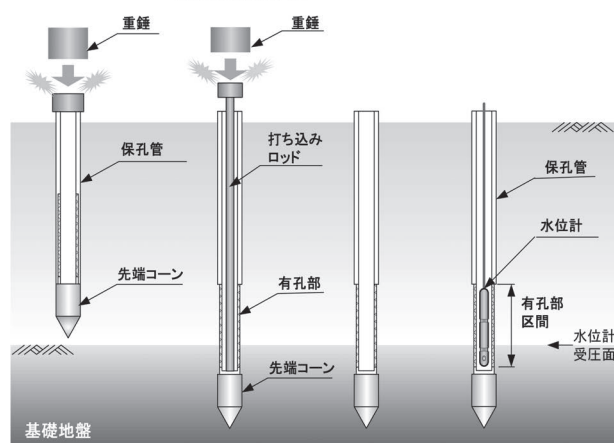


図-3 打ち込み式観測井の設置手順

Fig. 3 Step of installation procedure of a driven observation well.

3.2 管径と材質について

観測管の径および有孔部の管径は、打撃により生じる座屈力、管頭に生じる水平力による曲げ荷重を勘案し決定した。

その結果、先端コーンおよび観測管の外径は、 $\phi 40\text{mm}$ とした。また有孔部の内径は、強度を考慮するとともに、汎用の細径の水圧式水位計(GE Sensing製、外径 $\phi 17.5\text{mm}$)が挿入できるように内径を $\phi 20\text{mm}$ とした。

打ち込み式観測井本体の材質は、耐腐食性が高いステンレス(SUS303)とした。

3.3 有孔部の仕様

3.3.1 有孔部の機械的仕様

有孔部は、内径 $\phi 20\text{mm}$ の有孔管にフィルターを被覆した構造となっている。有孔部の長さは、有孔部を露出する際に生じる座屈力、先端コーンに生じる水平力による曲げ荷重を勘案した結果をもとに 200mm とした。

3.3.2 有孔部の通水性

観測井周辺の地下水位が変化したとき、観測井内に水が出入りして周囲の地下水圧と平衡に達するまでの時間をタイムラグと呼ぶ。地下水圧観測においては、

できるだけタイムラグが小さいことが求められるが、そのためには観測管の径を極力細くすること、観測管への水の出入りをスムーズにすることが重要である。以下では、フィルターの仕様と、タイムラグについて検討した。

(1)フィルター

観測井の有孔部に装着するフィルターは、細粒分が観測井内部に浸入しないこと、地下水の流入抵抗をできるだけ小さくすることが求められる。

そこで、フィルターの材料は、通水性や耐久性の面からポリエチレン樹脂製の親水性フィルター材とした。このフィルターは多孔質で吸水性が高く、水を含んでも膨張しない性質をもっている。また、通常的环境下においては耐久性にも優れている。

フィルターの孔隙の選定にあたっては、気孔径の異なる3種類の親水性フィルター(表-1)を対象に、後述する検証実験に用いた模擬堤体の土質材料を介して通水試験を実施した。土の密度は模擬堤体と同程度になるように調整した。

図-4に試験装置の概念図を、図-5に各フィルターを介した試料中の透水係数の経時変化を示す。透水係数は、フィルターCが他のフィルターに比べ若干小さい。いずれのフィルターも24時間の通水継続中の透水係数はほぼ一定の値を示した。透水係数は、フィルターAとBとで大差はなく $3\sim 4 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ であった。

通水試験終了後、土を容器から取り去り、フィルター表面の土を洗い流した後に、図-4の装置を用いてフィルターに水位差0.284mを与えた状態で30秒間に流出する水量を計測した。通水量の計測結果は、図-6に示すように、気孔径が大きいフィルターAとBでは、通水を繰り返しても通水性の低下は認められなかったが、気孔径の小さいフィルターCでは、顕著な流量の低下が認められた。

一方、強度の点では、フィルターAに比べて気孔率が小さいフィルターBのほうが優れていることから、ここではフィルターBを採用した。

表-1 通水試験に用いたフィルターの諸元

Table 1 Specifications of filter used in the discharge test.

フィルター名	A	B	C
特性	親水性	親水性	親水性
材質	ポリエチレン	ポリエチレン	ポリエチレン
気孔径	40 μm	50 μm	20 μm
気孔率	50%	42%	40%

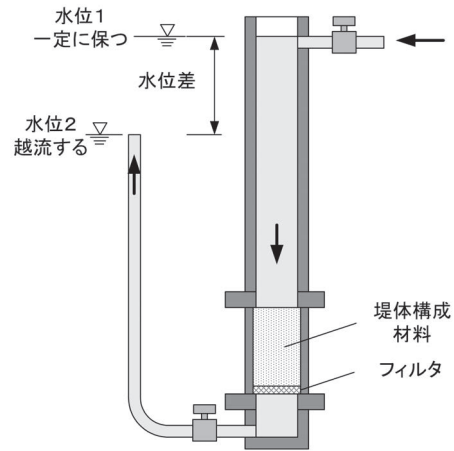


図-4 フィルター通水試験装置(定水頭方式)

Fig. 4 The discharge test device for filter (constant head type).

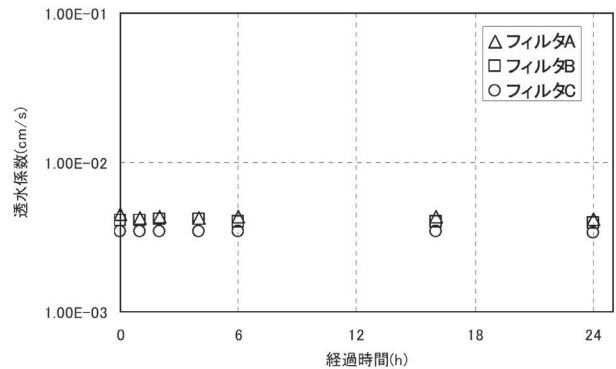


図-5 各フィルターを介した供試体の透水係数の時間的変化

Fig. 5 The change of hydraulic conductivity with time of test species interposed with various filters.

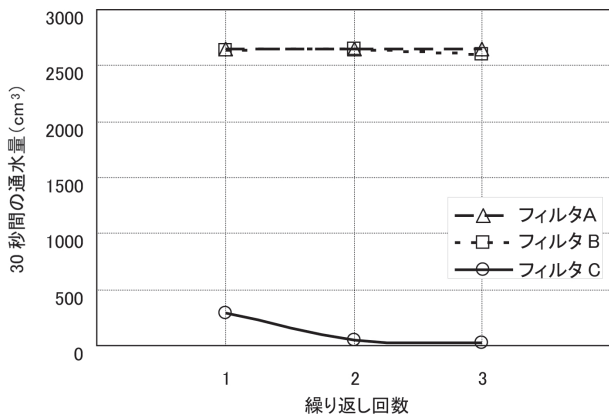


図-6 各フィルターの通水量と繰り返し回数

Fig. 6 The change of discharge rate of filters with numbers of repeat.

(2)タイムラグ

水位観測井のタイムラグは、Penmanの式³⁾によって評価される。(図-7)

$$t = 3.3 \times 10^{-6} \frac{d^2 \ln \left[\frac{L}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{D} \right)^2} \right]}{kL} \quad (1)$$

- ここで、 t : 90% 応答に必要な時間 (day)
- d : 観測管の内径 (cm)
- L : 有孔部の長さ (cm)
- D : 有孔部の直径 (cm)
- k : 地盤の透水係数 (cm/sec)

上式は、タイムラグは観測管の内径 d が細いほど小さく、有孔部の長さ L が長いほど小さくなることを示している。

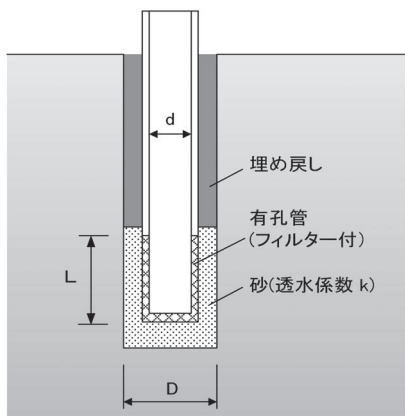


図-7 タイムラグ計算式の説明

Fig. 7 Description of the time lag equation.

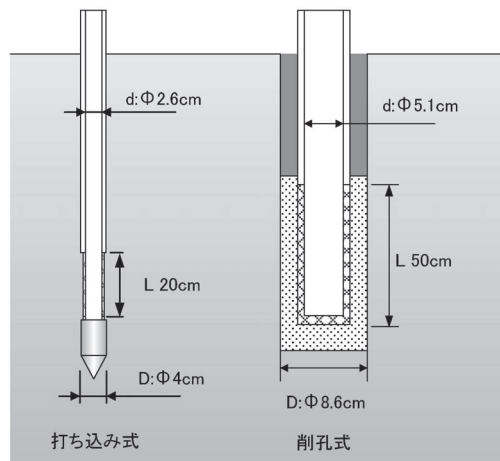


図-8 打ち込み式観測井と削孔式観測井の構造の比較

Fig. 8 Comparison of structure between a driven type and a drilling type of observation well.

図-8に打ち込み式観測井と従来の削孔方式の観測井(φ86mmのボーリング孔にVP50を挿入、有孔部の長さを500mmと仮定)の構造寸法を示す。これらをもとに両観測井のタイムラグを求めてみると、表-2に示すように地盤の透水係数を 1×10^{-4} cm/secとした時、打ち込み式観測井については約37分、従来の観測井については約61分となる。

表-2 打ち込み式と従来の削孔式のタイムラグ計算

Table 2 Calculation of time lag on a driven type and a drilling type of observation well.

打ち込み式と削孔式の寸法と地盤の透水係数		打ち込み式	削孔式
観測管の内径 d (cm)		φ 2.6	φ 5.1
有孔部の長さ L (cm)		20	50
有孔部の直径 D (cm)		φ 4.0	φ 8.6
タイムラグ (min)	透水係数 (cm/sec) $k=1 \times 10^{-3}$ の場合	3.7	6.1
	透水係数 (cm/sec) $k=1 \times 10^{-4}$ の場合	37	60.8

3.4 決定した構造

以上の検討結果をもとに最終的に決定した打ち込み式観測井の構造を図-9に示す。

有孔部は、内径φ20mmの有孔管と、その外側に装着されるポリエチレン樹脂製のフィルターからなり、長さ(L)は200mmとした。

先端コーンについては、先端角を60°とし、外径はφ40mm、その長さは100mmとした。

観測管については、有孔部直上より1.1mの区間は外径(D)をφ40mmとし、それより上部の観測管について

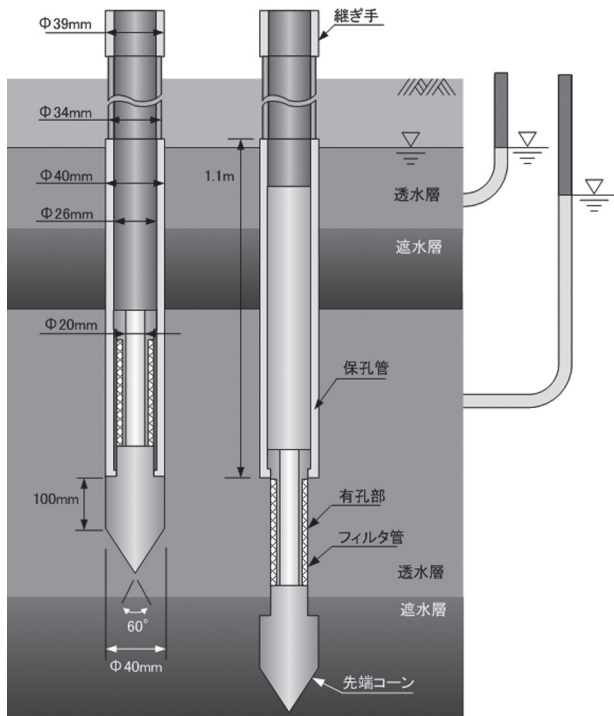


図-9 打ち込み式観測井の構造と寸法の詳細
Fig. 9 Details of structure and dimensions of the driven observation well

は外径をφ34mm、内径(d)をφ26mm、継ぎ手の外径をφ39mmとし、上位の管径を細くして、打撃時の貫入抵抗を低減することを考慮した。すなわち、コーン貫入試験のフリクションカッターと同じ効果を持たせた。

4. 模擬堤体における適用性評価実験

打ち込み式観測井の適用性を検証するために、独立行政法人土木研究所、財団法人国土技術研究センターとの共同研究「堤防管理技術高度化のための堤体内水位観測方法の開発（平成17～19年度）」において、土木研究所構内に設置された模擬堤体に打ち込み式観測井を設置して、約1年間の観測を実施した。実験では、1年間に5回、湛水位を上下させて堤体内水位の変化に応じた観測水位の追従性と観測装置の耐久性について確認した⁴⁾。

4.1 模擬堤体の形状

模擬堤体は、天端幅3m、高さ3m、のり勾配2割の形状からなる。構成材料は、細粒分含有率17.4%、均等係数2.5を示す均質な山砂である。図-10に堤体形状と寸法、表-3に構成材料の詳細を示す。

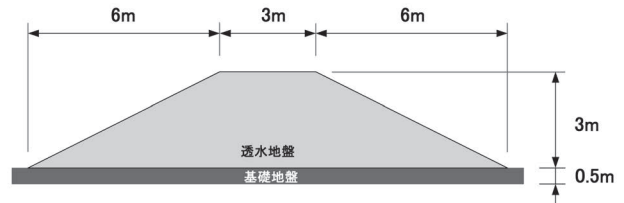


図-10 模擬堤体の形状と寸法
Fig. 10 Shape and dimensions of the river dike model.

表-3 模擬堤体の構成材料
Table 3 Properties of the river dike model material

材料名		項目
土粒子の密度		2.70 g/cm ³
粒度特性	最大粒径	2.00 mm
	細粒分含有率	17.4 %
	均等係数	2.50
	曲率係数	0.90
締固め特性	最大乾燥密度	1.575 g/cm ³
	最適含水比	20.9%
地盤材料の工学的分類		細粒分質砂(SF)



写真-2 模擬堤体の遠景
Photo 2 View of the river dike model.

4.2 模擬堤体に設置した計測器

模擬堤体に設置した打ち込み式観測井と、土木研究所が設置した内径φ6mmのチューブよりなるマンメータ型間隙水圧計の設置位置を図-11に示す。

このマンメータ型間隙水圧計のタイムラグは、(1)式によると地盤の透水係数を 1×10^{-4} cm/secとした時、表-4に示すように約5分になる。

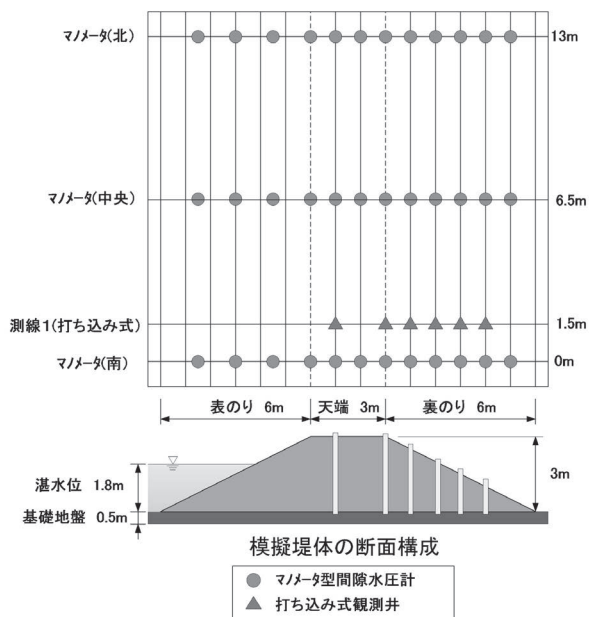


図-11 模擬堤体における観測井の配置

Fig. 11 Arrangement of observation wells and manometer piezometers in the river dike model.

表-4 マノメータ型間隙水圧計のタイムラグの計算

Table 4 Calculation of time lag on the manometer-type piezometer.

マノメータ型間隙水圧計の寸法と地盤の透水係数		マノメータ型間隙水圧計
観測管の内径 d (cm)		0.6
有孔部の長さ L (cm)		4.0
有孔部の直径 D (cm)		2.5
タイムラグ (min)	透水係数 (cm/sec) $k=1 \times 10^{-3}$ の場合	0.5
	透水係数 (cm/sec) $k=1 \times 10^{-4}$ の場合	5.3

4.3 試験条件

湛水実験では、図-12に示す湛水位の時間的変化を与えた。

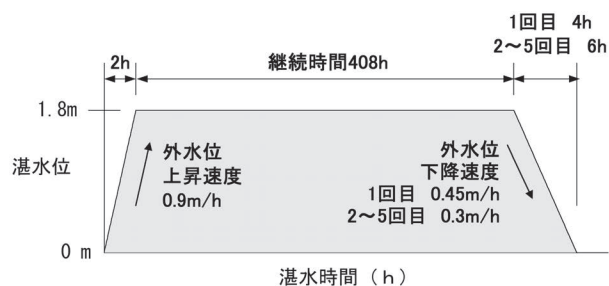


図-12 湛水試験の水位—時間変化

Fig. 12 Change of water table with time in the reservoir filling test.



写真-3 湛水実験地の遠景

Photo 3 View of experiment site of the reservoir filling test.

5. 実験結果

5.1 設置時の貫入抵抗

打ち込み式観測井はラム試験機を用いて6箇所に設置した。

図-13に模擬堤体に打ち込み式観測井を設置した時の各観測井のラム試験機による20cm毎の貫入に要した打撃回数を示す。

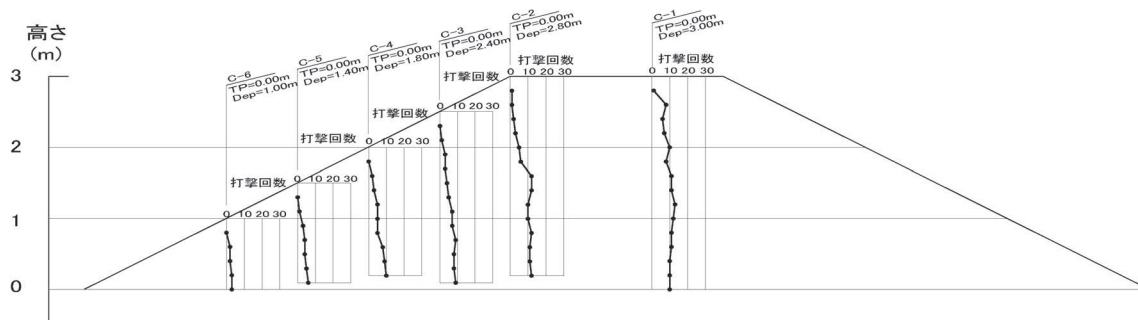


図-13 打ち込み式観測井を設置した時の20cm 貫入打撃回数

Fig.13 Numbers of dynamic penetration per 20cm interval during installation of the driven observation wells.

5.2 湛水実験に伴う水位観測結果

5.2.1 堤体内水位分布

湛水実験は、5回実施したが、観測結果はほぼ同様であった。ここでは、第5回湛水実験における観測結果を示す。観測結果は、マンメータ型間隙水圧計の測定値を基準として評価した。図-14は、打ち込み式観測井による観測水位と、最も近くに位置するマンメータ型間隙水圧計（南側）による観測水位を比較したものである。堤体内の水位は、湛水時間の経過とともに上昇し、湛水後約210時間ではほぼ定常状態となった。

5.2.2 観測水位の経時変化

湛水実験における観測結果について、表のり肩から川裏側へ1mの地点と5mの地点に設置した打ち込み式観測井とマンメータ型間隙水圧計による観測水位の経

時変化を比較すると、図-15および図-16に示した通りであった。

打ち込み式観測井とマンメータ型間隙水圧計の観測結果を比較してみると1回目の湛水実験では、2回目以降と比べ全体に水位上昇が遅い傾向が認められる。これは堤体内が初期の乾燥した状態から湛水を開始したために、堤体内への浸透が不均質であったことによるものと推察される。2回目以降の打ち込み式観測井の観測結果をみると、マンメータ型間隙水圧計と同等の応答性を示しており、乾湿を繰り返す条件下においても信頼性の高い結果が得られることがわかった。また、表のり肩から5mの地点に設置した打ち込み式観測井は、設置深度が2mと浅いことから降雨に敏感に反応しており、堤体内水位の微小な変化を捉えているものと考えられた。

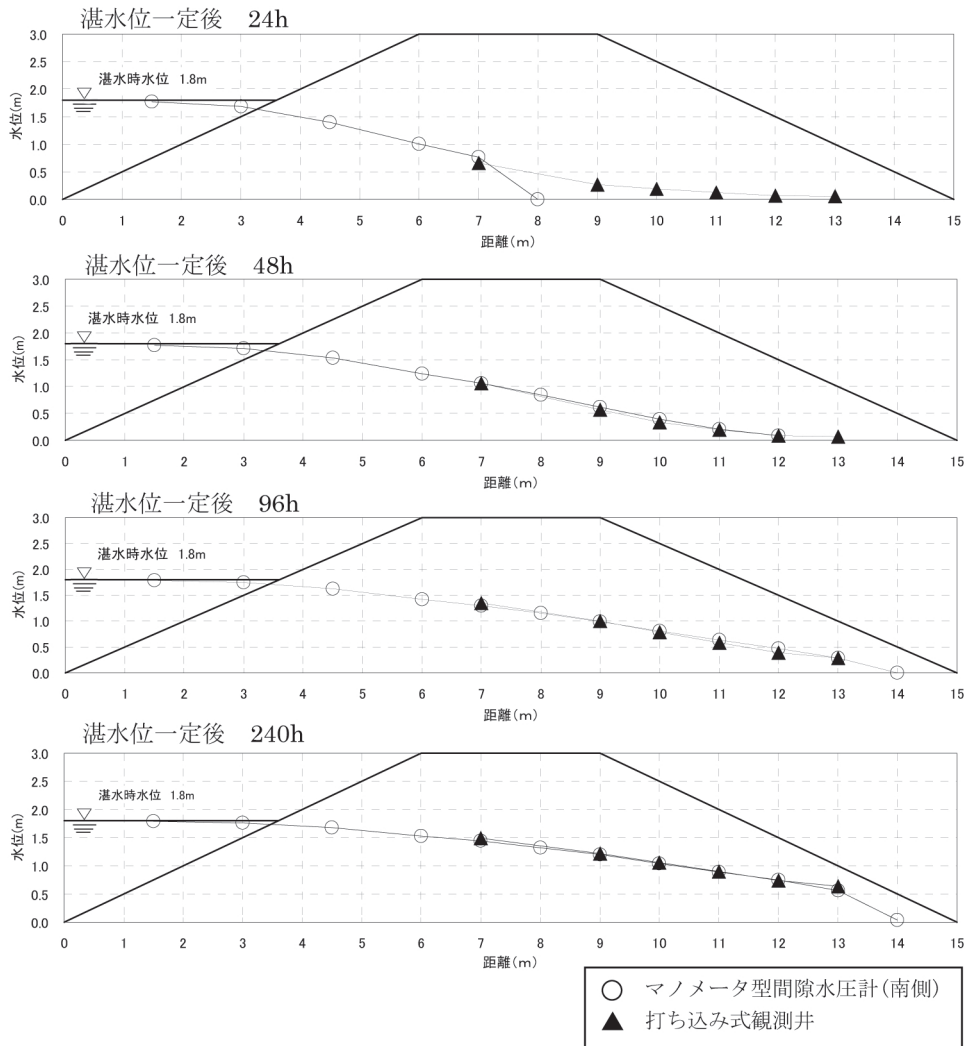


図-14 湛水位一定後の堤体内水位分布（第5回湛水実験において）

Fig.14 Water level profiles within the river dike model during constant reservoir filling level to be maintained (in the 5th reservoir filling experiment).

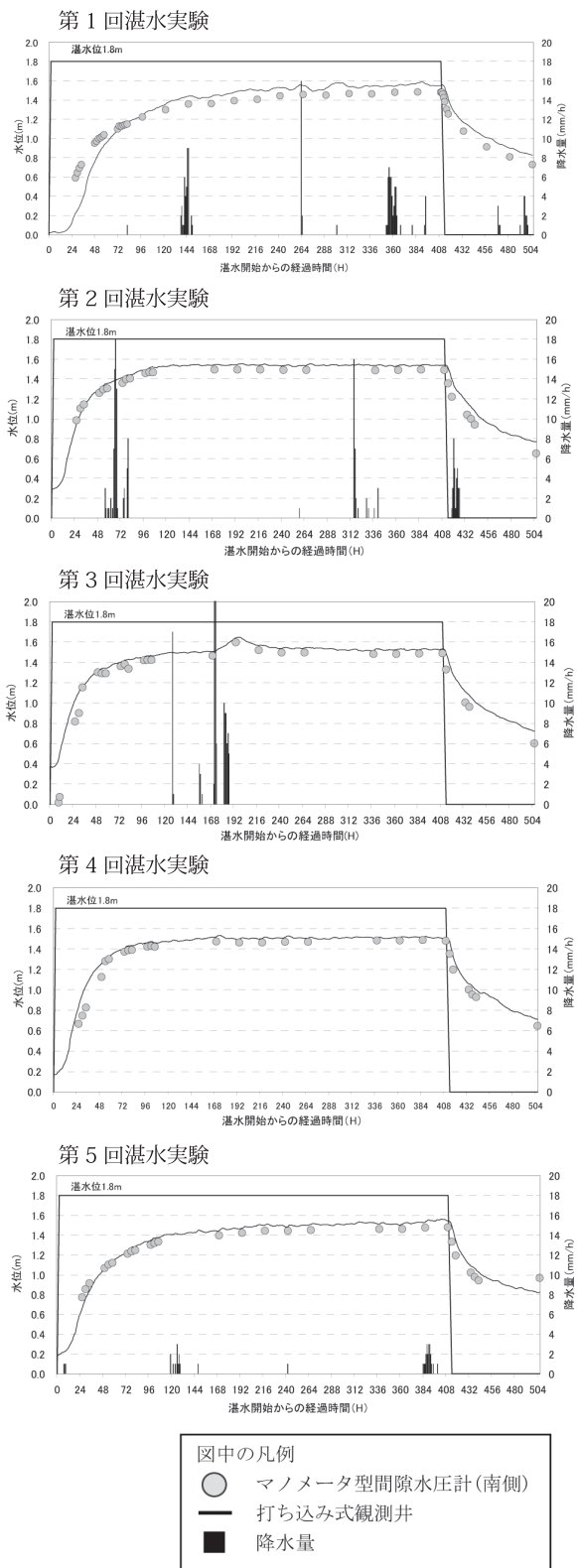


図-15 湛水実験における観測水位の経時変化 (表のり肩から1mの地点)

Fig.15 The water level changing with time observed during the whole period of reservoir filling experiment (at the point 1 meter apart from the top of slope).

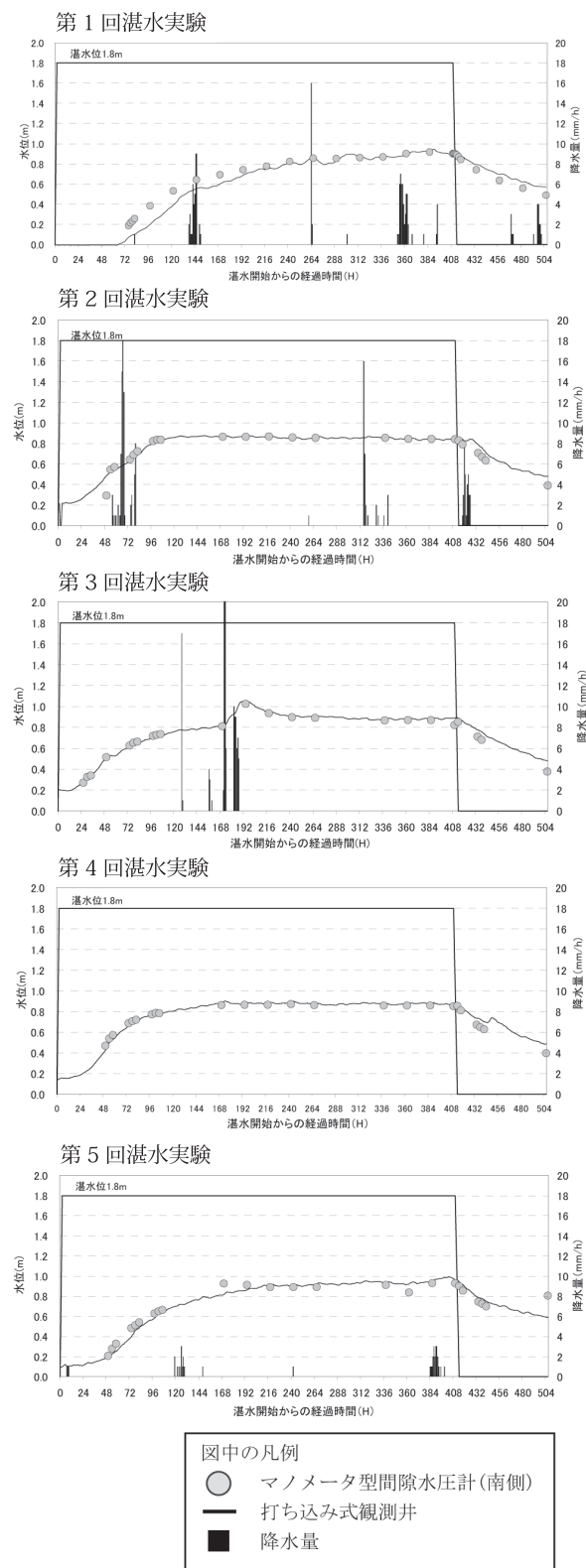


図-16 湛水実験における観測水位の経時変化 (表のり肩から5mの地点)

Fig.16 The water level changing with time observed during the whole period of reservoir filling experiment (at the point 5 meter apart from the top of slope).

5.2.3 解析結果との対比

第5回の湛水実験を対象に、非定常飽和・不飽和浸透流計算による計算値と観測結果の比較を行った。

(1)計算条件

1) 計算プログラム

計算には、非定常飽和・不飽和浸透流計算プログラム (GW-USAF) を用いた。

2) 外力条件

外力は、図-17に示すように実際の湛水位と降雨量をモデル化した。

3) 堤防モデル

堤防モデルは、図-10に示す実際の模擬堤体形状とした。

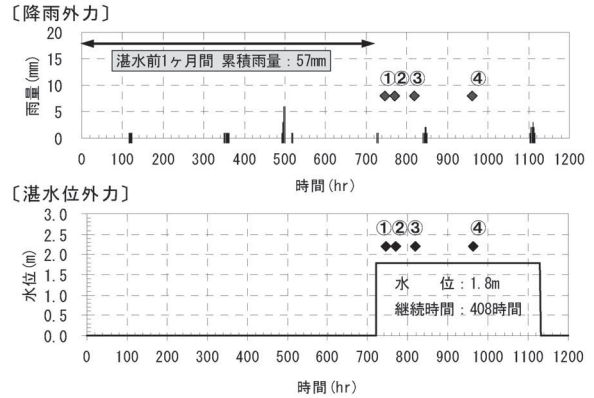


図-17 計算に用いた外力

Fig.17 Environmental conditions for the simulation.

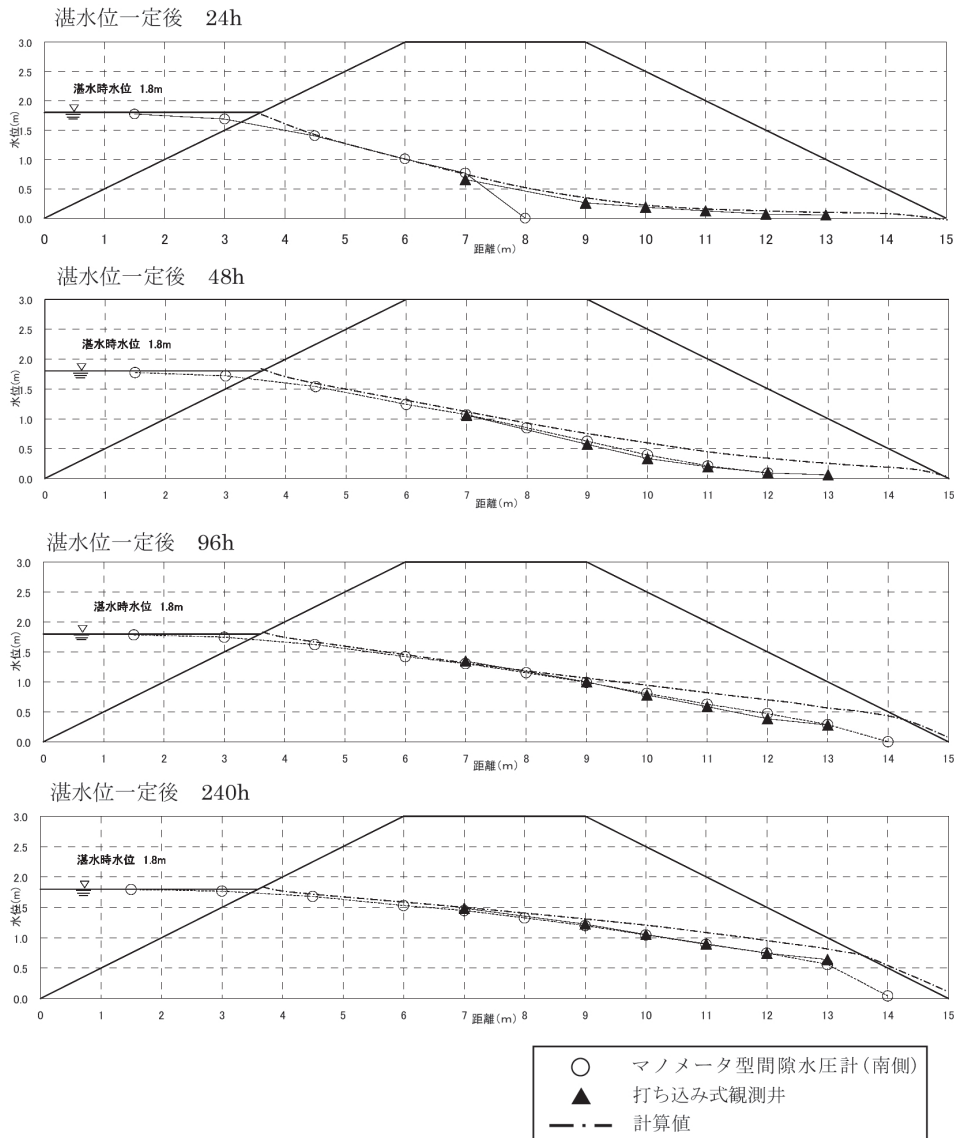


図-18 堤体内水位の観測値と計算値の比較 (第5回湛水実験において)

Fig.18 Comparisons of water levels of river dike model between observation results and simulation results (in the 5th reservoir filling experiment).

4) 水理定数

堤体の透水係数は、堤体材料の20%粒径 $D_{20}=0.08\text{mm}$ の時、Creagerの実験式より $k=9.0\times 10^{-4}\text{cm/sec}$ と推定される。これをもとに地盤の透水係数を、 $k=1.0\times 10^{-3}\text{cm/sec}$ と設定した。また、不飽和浸透特性は、「河川堤防の構造検討の手引き」(平成14年7月、財団法人国土技術研究センター)⁵⁾に示されている砂質土の一般値を採用した。

(2)計算結果

湛水位が一定になってから24時間後、48時間後、96時間後、240時間後(図-17中の①~④)における堤体内の水位分布について、計算値と観測値を比較した結果を図-18に示す。

これより、裏のり尻付近の水位は、計算値の方が若干高い傾向がみられるが、全体的に両者の整合性は良好であり、浸透流解析においても観測結果の妥当性が裏付けられる結果が得られた。

6. まとめ

打ち込み式観測井は、以下に述べる各種の利点があり、浅い深度を対象とする地下水位観測における適用性は高いと考えられる。

- ①ラム試験機のような簡易打撃装置を用いることで、のり面でも設置が容易である。
- ②削孔による方法と比べて削孔水の確保、観測区間の珪砂の敷設やベントナイトによるシール、孔内洗浄等が不要であり、作業効率が良い。
- ③従来のボーリング削孔による方法よりも、作業時間を1/5程度に短縮することができるため、設置費用を8割程度に抑えられる。
- ④観測管の内径が小さく、水の出入りが良好なフィルターを使用したことで、水位変化の応答性が良く、近年の集中豪雨災害のような短時間に水位変化が生じる場合にも適している。
- ⑤変水位透水試験を行うことで原位置で透水係数を求めることができる。
- ⑥開放型ピエゾメータなので、必要に応じて採水が可能である。

7. おわりに

今後の課題は、簡易な水位検知方法との併用による水位観測システムの低コスト化、地盤条件等による適用限界の検証、様々な地盤に適用し、打撃回数と貫入抵抗値との関係を明らかにし、打撃回数を用いて地盤の状態を把握することが考えられる。これらの特徴から、今後、広域の水文・地下水調査における水位観測や土壌・地下水汚染調査等での水質モニタリングなど、多くの分野における地下水調査や地下水観測での利用が期待される。

謝辞

上述した打ち込み式観測井の開発は、独立行政法人土木研究所と財団法人国土技術研究センターとの共同研究を通じて行ったものであり、関係各位の多大なご協力を得た。ここに記して深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Dunnicliff, J. and Green G.E. (1988): Geotechnical instrumentation for monitoring field performance, John Willey & Sons
- 2) Parry R.H.G. (1971): A simple driven piezometer, *Geotechnique*, **21**, No. 2, 163-167
- 3) Penman, A.D.M. (1960): A study of the response time of various types of piezometers, Procs. Int. Conf. on Pore Pressure and Suction in Soils, Butterworths, London, 53-58
- 4) 独立行政法人土木研究所(2008):堤防管理技術高度化のための堤体内水位観測方法の開発に関する共同研究報告書, 河川堤防における堤体内水位観測マニュアル(案)
- 5) 財団法人国土技術研究センター(2002), 河川堤防の構造検討の手引き, 51-57