

野外の間隙水圧を正しく測定するための覚書  
 — 間隙水圧計の歴史的変遷と野外計測事例を基に —

菅原 紀明

A note on reasonable pore water pressure measurements in the fields  
 —Reviewing the historical development of pore water pressure measurements  
 and their field observation records—

Noriaki Sugawara

**Abstract**

Based on the limited libraries collected by the author, it is going to have passed for one hundred years since a pore water pressure measurement in field had been initially performed in the world. It is assumed so far that the main basic studies and discussions on the field measurements of pore water pressure had almost completed in the Specialty Session of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Mexico), and since then, points of those subjects have been turned to development of practically more serviceable instruments in the world.

This paper over-reviews the world history of development on pore water pressure measurements, including some valuable examples of field instrumentation (showing instruments, field installation methods and measurement records). And also, combining my experiences, a measuring method for obtaining reasonable pore pressure is discussed.

The basic requirements for obtaining reasonable pore pressure are (1) to use piezometer which is device that is sealed within the ground so that it responds only to groundwater pressure around itself and not to groundwater pressures at other elevations, (2) to have a little influence by pore gas pressure (or pore air pressure), and (3) to have a suitable time lag to each engineering requirement.

There are mainly three types of piezometer: open stand-pipe type, twin-tube hydraulic type and diaphragm type. Two of the former types have some limitations of installing place, while the latter diaphragm type has less limitation of installation site and high serviceability on observation procedures, and a diaphragm piezometer is accordingly the most common in use in the world in present day. Research reports showed that any pore pressure readings using diaphragm piezometers are more or less affected by pore gas pressure. For a high water pressure existed in such a large scale ground structure as earth fill dams, effects due to pore gas pressure may be negligibly small, but in most of ground surface structure with small scales those effects may become potentially a significant errors. In Western countries, especially in North West Europe, the reason why great many diaphragm piezometer are successfully used, is that instrumented grounds are consisted of in-organic silt and clay with low plasticity originated from glacial sediment and residual soil from completely weathered rocks, which may have relatively less air contents in soil textures. While in our country, since the climate is warm, the inland is surrounded by the sea, and also ash clay sediments from volcanic action widely cover the ground surface, those ground soils may be considered to contain relatively more organic gas or volcanic gas. Then, the pressure readings by diaphragm piezometer in Japan have a potential of erroneous readings due to gas pore pressure. In this paper, some improvements of diaphragm device and its placement methods against pore gas pressure affect are presented. In conclusion, a whole structure of diaphragm piezometer including a filter and installing conditions is recommended to make gas or air freely move from its cavity of instrument using coarse and long filter or slot screen surrounded sand filter. And also, if possible, diaphragm face is recommended to be set in vertical direction.

**Key word:** piezometer, pore water pressure, pore gas pressure, time lag, filter, air entry value,

## (要 旨)

手元の記録によれば、世界で最初の地盤の間隙水圧測定開始から100年を過ぎようとしている。野外の間隙水圧測定に関する主要な研究と議論は、1969年の国際土質工学会（メキシコ）の特定課題の会合でほとんど終了し、その後はより実務的に利便性を高めた機器の開発を主要な目的とした研究が進められている現状にある。本文はその世界の歴史を振り返り、貴重な過去の測定実績とその測定法（機器の構成とその野外設置方法）を紹介し、著者の経験とあわせて、正しい間隙水圧測定法に関して議論をした。

間隙水圧を合理的に求めるための基本的必要条件は、(1) ピエゾメータであること、すなわち測定区間を限定してそれ以外の部分の影響を受けないようにシールされていること、(2) 間隙ガス圧に影響されない水圧測定値であること、(3) 工学的目的に則した時間応答（タイムラグ）であること。これまで開発された計器は、有孔管式、複管式および受圧膜式の3つに大別される。前者の2つは設置される現場環境に制限があるが、後者の受圧膜式は設置環境に制限が無く、利便性が高いことから、国内外で最も広く多用されている現状にある。これまでの研究報告によれば、受圧膜式間隙水圧計は少なからず間隙ガス圧の影響を受けた圧力を測定しており、フィルダムのような高い圧力水頭を持つ土構造物においては無視できるほどの影響であるが、その他の低い圧力水頭を持つ土構造物においては無視できないほどの影響を受ける可能性を持っている。海外の、特に北欧、北米において受圧膜式が成功裏に採用されている理由は、対象地盤が無機質低塑性の粘土であることがわかった。我が国のように温暖な気候、海洋に影響された堆積環境、火山灰を起源とする堆積物は、有機物のガス、火山ガスなどの含有量が多く、受圧膜式の測定記録は間隙ガス圧の影響を無視できない場合が多いことが想定される。本文では受圧膜式計器を採用した場合の機器の構造と設置方法について考察した。その結論は、器内侵入するガスを遮断することはどのようなフィルターを採用しても不可能であることから、器内の空隙に侵入したガスが自由に出入りできる粗いフィルターを採用すること、また加えて受圧膜面を鉛直に向けて、気泡粒がその面に滞留しないような設計とすることである。そのような考え方を踏襲して試作した受圧膜式ピエゾメータを紹介した。

キーワード：ピエゾメータ、間隙水圧、間隙ガス圧、タイムラグ、フィルター、空気侵入値

### 1. はじめに

手元の記録によれば、世界で最初の地盤の間隙水圧測定開始から現在までちょうど100年を過ぎようとしている。地盤の間隙水圧計の歴史を概観すれば、間隙水圧計は同じ年代に、有孔管式、複管式、および受圧膜式が開発され、その後、各種の複合機器が開発され、現在も新たな機器・電子技術の進展とともに開発が続いている。

我が国では、有孔管式と受圧膜式が一般に多用され、複管式の使用は極めて限定され、忘れ去られたといっても良いくらいである。現在では、とくに粘土地盤の間隙水圧測定といえば、電気的計測に依存した受圧膜式が専用されている。しかし、我が国では、無数の測定データが得られているにもかかわらず、フィルダムの監視を目的とした計測を除いて、野外の間隙水圧測定に関する研究開発および実測値を活用した地盤工学的論文は皆無といつてよいくらい貧しい。

一方、古くから採用された有孔管式を用いた間隙水圧の計測は、いわゆる観測井と呼ばれて普及し、主に、井戸の揚水に伴う地盤沈下観測の地下水位変動監視、および、地すべり斜面の間隙水圧測定を目的として採用されてきた。この観測井は、大部分、ボーリング孔全長にわたりストレーナーを設けた観測井の構造を持ち、その井戸の水位の測定値から間隙水圧を決定しているのが現状である。

本文は、まず、間隙水圧測定に関する基本的必要条件と用語の定義を述べる。次に、世界の間隙水圧測定法の歴史的経過と現状を概観する。まず、有孔管式および複管式の代表的な成功例を紹介し、そして、問題とした我が国で最も多用されている受圧膜式間隙水圧計（主に電気式間隙水圧計と呼ばれている計器）の奇妙な測定記録を紹介する。その奇妙な測定となった原因を海外の同機種の使用実績を踏まえて考察する。

最後に筆者の経験と諸外国の研究成果を踏まえて、正しい間隙水圧測定は如何にあるべきかについて論議する。

## 2. 間隙水圧測定の基本的事項

### 2.1 基本的事項の概要

地盤の間隙水圧を正しく測定するために配慮されなければならない基本的事項は次の3つが挙げられる：

- ① 間隙水圧測定の対象領域（または、測定点）の地下水圧のみに応答させるために、他の領域を遮断（シール）した条件で測定されなければならないこと。
- ② 地盤の間隙は一般に水とガス（または空気）で占められるが、そのガス圧の影響のない、またはその影響の

極力小さい間隙水圧が測定されていること。

- ③ 野外的間隙水圧の時間的変動に対して工学的目的に則った時間応答をする測定システムであること。

これらの基本的な事項は、間隙水圧測定計画に当たって第一に配慮されなければならないことであり、次に、測定器の寿命、信頼性、経済性などを勘案した計測法・計測機器の選択に移行するべきである。

## 2.2 基本的事項に関わる用語の定義

### 2.2.1 観測井とピエゾメータ

#### (1) 定義

Dunnicliff and Green (1988)<sup>5)</sup> は、地盤の地下水圧を測定する装置を、ピエゾメータ(piezometer)と観測井(observation well)とに明確に区別している：

すなわち、ピエゾメータとは地盤の内部をシールし、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水圧測定装置と定義している。

一方、観測井とは地層間（水頭の異なる帯水層間）にシールを持たず、そのために地層間の鉛直方向で水理的に短絡している構造を持つ装置と定義している。観測井は透水性の高い粗粒な砂が一様に分布する地盤条件にのみ工学的に有意義な装置であると彼らは強調している（図-1）。

追記) "piezometer"とは、ギリシャ語のpiezo(圧力)に由来し、文字通りの意味は“圧力計(pressure-meter)”という意味である。しかしながら、上述の定義では

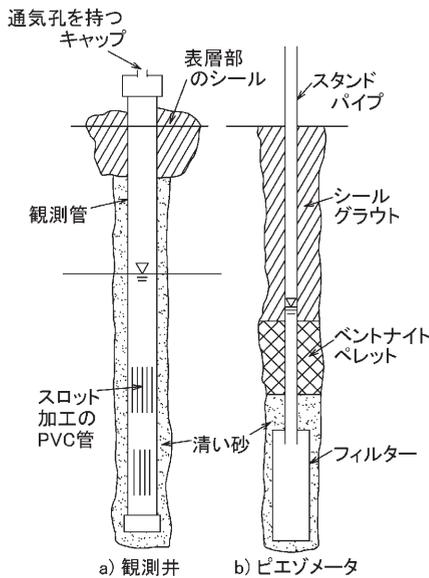


図-1 観測井とピエゾメータ  
Fig. 1 Observation well and piezometer

「ピエゾメータ」を地盤に設置した状態（系、またはシステム）の総称として取り扱っていることになるが、限定された区間の地下水圧を測定する計測機器の固有名義にもピエゾメータという用語を末尾に使用している。この2重の意味を持たせた用法は、世界各国の間隙水圧測定に関連する文献において共通して採用されているのが現状である。そこで本文では主に地盤に設置した状態の総称として「ピエゾメータ」という用語を用いるが、例えば電気式間隙水圧計に対しては電気式ピエゾメータという用語を用いることにする。それによって観測井の水位を測定することを目的とした装置、いわゆる電気式水位計とは明確に区別する。

#### (2) 誤った測定法：バカ穴計測

現状、通常地下水水位調査法として、円形穴またはスリットを全長に一樣に穿ったPVC管または鋼管に網目状のシートを巻いた構造の管を鉛直ボーリング孔に挿入し、孔壁と管の隙間に砂を充填し、地表面部分をシールした観測井戸が採用され、その管の中の水位を測定して、地盤の間隙水圧を求める方法が普及している。この測定方法では地盤内の正しい間隙水圧を測定できない。このような構造を持つ観測井の間隙水圧測定を“バカ穴計測”<sup>1)</sup>、得られた水位を“狂水位”<sup>1)</sup>または“狂水面”<sup>2)</sup>と呼んで間違った測定法であることを識者が強く訴えている。

#### (3) 裸孔内の流速と流向測定

一般に地盤は不均質であって、地下水の流れは均質な土中を流れる自由地下水面を持つ単純な流れではない。地盤は、網目状、または層状に透水係数の異なる地層が交錯しており、地下水は大小さまざまな水ミチや不連続な亀裂に存在する。

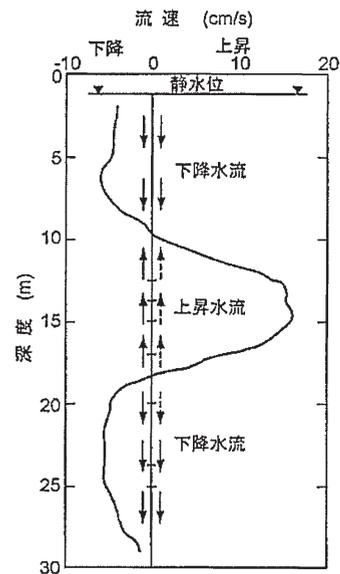


図-2 岩盤の裸孔に作られた水理的短絡回路の流向と流速<sup>3)</sup>  
Fig. 2 Flow trend and rate of hydraulic short circuits in borehole left open in rock.

図-2.<sup>3)</sup>は岩盤の裸孔で計測された孔内の流速分布と流向を示したもので、この図から、各深度で相対的に別々の圧力水頭を持っていることが分かる。裸孔の貫通によって地盤内に水理的短回路が作られたことになり、裸孔の示す水位はその回路の環境下で平衡が成り立つ水位を示しているにすぎない。

#### (4) 一様な粘土地盤の間隙水圧測定記録例

著者が関係した地盤調査において、比較的一様な粘土地盤の間隙水圧の深度変化を以下に紹介してみよう。

1978年の伊豆大島近海地震で液状化現象により表層崩壊した持越鉱山堆積場の堆積物は鉱石を人工的にほぼ一様に細粉した厚さ約20mの粘土からなる。この一様な粘土中の間隙水圧分布をボーリング穿孔中に一時的に電気式間隙水圧計で平衡間隙水圧を測定した結果は、図-3<sup>4)</sup>に示すとおりであった。一様で均質な粘土地盤の中で圧力水頭の小さな基盤岩盤に向かって水圧低下をしている姿が明らかである。これを基盤まで貫いた観測井で間隙水圧を測定すれば、粘土地盤の間隙水圧は基盤岩盤の低い水圧に等しい孔内水位を示すことになるであろう。

亀裂のない一様な粘性土地盤は、表層部の風化が進んでおり比較的透水性が高く、深くなるにつれて透水係数が小さいのが一般的である。また、一様な人工的堆積物は土被り応力による圧縮によって深い部分ほど透水係数が小さくなる。側方からの地下水流入の乏しい自然地盤の表層部では、降雨浸透にともなう水が間隙水圧を左右する。このような環境下にある地盤では地下水の供給源に近い地表部の間隙水圧水頭面が最も高く、地下水が流下するにつれてその水頭面は低くなるのが道理である。

このように、自然の土中の間隙水は、その流れの速度は大小さまざまであるが、一様に見える地盤の中でも、水頭の高い部分から低い部分に向かって流れて

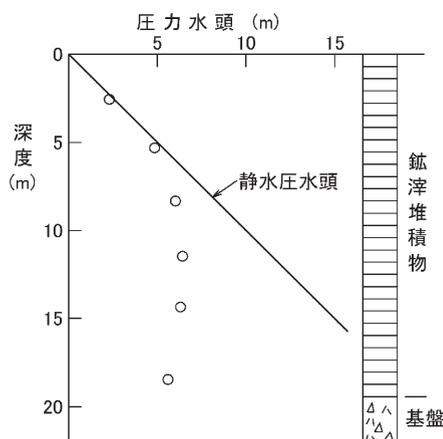


図-3 持越鉱山堆積場の鉱滓粘土の間隙水圧<sup>4)</sup>  
Fig. 3 The pore pressure in clay deposits of Mochikoshi tailing dam

おり、そのことは地層全体の土中の間隙水圧水頭が一定であることはめったにありえないことを意味している。

### 2.2.2 間隙水圧と間隙ガス圧

#### (1) 定義

土の間隙が水で満たされているとき、土中の水は土粒子がつくる骨格の間隙にあるから、これを間隙水と呼び、その間隙に働く水圧を間隙水圧と呼ぶ。

不飽和土では間隙の中に水とガス（または空気）の両者が共存するし、そのガスの圧力を間隙ガス圧と呼ぶ。ガスが空気であるとき間隙空気圧という用語を用いる。

不飽和土の例はアースダムや堤防の締固め土で代表されるが、その他に有機質堆積物があり、その中には有機質材料の分解によるガスが発生する。

#### (2) 容器の中の水圧とガス圧の違い

間隙ガス圧は間隙水圧よりも常に大きい。模式図で考えてみると、図-4に示すように、水の中に入れたストローから空気を出すと、水中の気泡はやや丸い形状を持って上昇する。これは、水の中でゴム風船を空気で膨らませた状態に例えるとわかりやすい。風船の中の空気は当然風船の外の水よりも大きな圧力を持たなければ膨らまない。風船は引っ張り合って空気圧に対抗して釣り合っている。水の中のやや丸みを持つ気泡は水と空気の境界面のメニスカスに包まれており、そのメニスカスが風船の役目を果たしていると考えると理解しやすい。

したがって、土中の水で囲まれた空気は常に周辺の

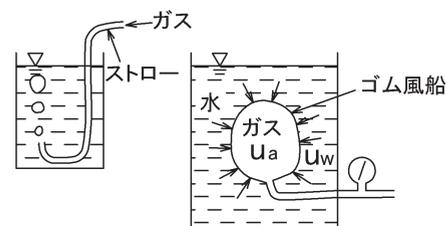


図-4 水中の気泡とゴム風船  
Fig. 4 Air bubble and rubber balloon in water.

水の水圧よりも大きいことが分かるであろう。

#### (3) メニスカスの働き

図-5(a)<sup>5)</sup>に示すように水の容器の中にストローをおいたアナロジーを考えてみよう。ストローの水位は容器の水位よりも高いレベルに上昇する。これはストローとメニスカスの間に作用する表面張力によって上昇したものである。空気の圧力は大気圧 $p_a$ であり、図-5(a)に示すA点の圧力もまた $p_a$ でなければならぬ

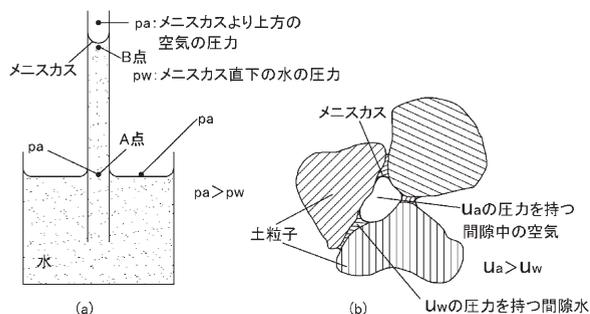


図-5 間隙ガス圧と間隙水圧<sup>5)</sup>  
(a) 水容器の中のストロー, (b) 不飽和土の空気と水の環境

Fig. 5 Pore gas and pore water pressure:  
(a) straw in container of water and (b) element of unsaturated soil.

い。もしそうでなければ、同じレベルで圧力平衡を促すための水の流れがなければならない。またA点の圧力はB点よりも大きくなければならない。なぜならば、水の圧力は水面より下に向かって、大きくなるからである。

paはそれゆえにpwよりも大きいし、メニスカスの空気側の圧力は水側の圧力よりも大きい。良く知られていることであるが、より小さな直径のストローの水ほどより高く上昇することである。メニスカスを横断する圧力差はそれゆえに大きく、メニスカスの曲率半径が小さければそれだけその差は大きい。

(4) 土中の間隙水圧と間隙ガス圧

図-5(b)<sup>5)</sup>に示す土中の間隙中の空気と水の間でメニスカスを考えてみよう。間隙空気圧  $u_a$  は間隙水圧  $u_w$  よりも大きい。間隙が小さければ、それだけメニスカスの曲率半径が小さくなり、間隙空気圧と間隙水圧の差が大きくなる。

不飽和土を取り扱う場合はこの間隙空気圧と間隙水圧の差  $u_a - u_w$  をマトリックサクション (matric suction) と呼んでいる。

(5) ガスがピエゾメータの読み値に与える影響

ピエゾメータの先端部のフィルター周囲または器内空隙の中にガスが集まり、圧力感知部分が土中の間隙水と連絡が遮断された状態になると、ピエゾメータの読み取り値は間隙ガス圧を測定したことになる。すなわち、このような状態に置かれたピエゾメータは、実際の間隙水圧よりも大きな圧力を示すことになる。

(6) 間隙水圧と間隙圧の区別

なお、我が国では間隙水圧 (pore water pressure) と間隙圧 (pore pressure) とが曖昧に使われているが、海外では厳格に使い分けている。その理由は実測された計器の圧力読み値は水圧とガス圧を複合した読み値である可能性があり、厳密に水圧の読み値であるとは言

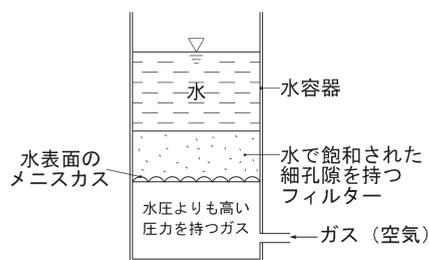


図-6 細い孔隙フィルターを挟む水とガスの分離<sup>5)</sup>  
Fig. 6 Separation of gas from water by fine-pored filter

いがたいからである。特に載荷重の変化によって土中間隙内の圧力が増加する場合、間隙水圧だけが変化するだけでなく、溶解しているガスや気泡の中も圧力変化すると解釈されるからである。この場合の厳密な用語を用いるとすれば、間隙圧 (pore pressure) という用語を用いて、間隙水だけが圧力変化したとは限らないことの意味を含んでいる。本文においても圧力計を用いて得られた圧力の読み値を間隙圧と記述する。

2.2.3 フィルターと空気侵入値

(1) フィルターの役割

すべてのピエゾメータは通水フィルターを持っている。そのフィルターは、ピエゾメータと接する土の構成物から間隙流体を分離するために必要な部分であり、ピエゾメータ設置中の損傷および周辺の全応力にともなう過度の変形がなく抵抗できるものでなければならない。

(2) 空気侵入値の定義

フィルターは一般的に空気侵入値 (air entry value, 略してAEV) によって定量的に評価される。空気侵入値は別名 bubbling pressure または blow-through pressure と呼ばれる。

図-6<sup>5)</sup>は、ある容器の中で上方に水を、下方にガスを満たし、その境界部に水で飽和した細かい間隙を持つフィルターを置いた状況を表している。ガス圧を水圧よりも高く保つと、その圧力差はガスと水の境界面の表面張力によってバランスした平衡状態にある。しかし、下方のガス圧を高くするにつれてこの平衡状態が壊れ、ガスが水の中に噴出することになる。このときのガス圧と水圧の差をフィルターの空気侵入値と定義する。

図-6のフィルター下面に形成されるメニスカスの曲率半径が小さいほど、水とガスの圧力差が大きくなり、メニスカスの最小半径はフィルターの間隙直径

表-1 フィルターの空気侵入値, 透水係数, および孔の直径<sup>11)</sup>  
 Table 1 Air entry value, coefficient of permeability and pore diameter of filters

空気侵入値(kPa)	透水係数(cm/sec)	孔の直径(mm)
13.5	$1 \times 10^{-4}$	0.024
33.0	$3 \times 10^{-5}$	0.0095
172.5	$5 \times 10^{-6}$	0.0018
292.0	$3 \times 10^{-7}$	0.0011

によって規定される。それゆえにフィルターが細かければそれだけガスが噴出するときの圧力差が大きくなる。すなわち、空気侵入値が大きくなる。

(3) 空気侵入値の分類

表-1は、間隙の大きさを変えた4つのセラミックフィルターの代表的な空気侵入値を示している(Gibbs et al.1960)<sup>11)</sup>。

Dunncliff and Green (1988)<sup>5)</sup>は、フィルターを低い空気侵入値と高い空気侵入値の2つに区別し、それぞれが次のような特性を持つものと述べている：

低い空気侵入値フィルターはガスと水の浸入を容易に許す粗いフィルターである。その典型的な空気侵入値は、3~30 kPaの領域にある。

高い空気侵入値フィルターは、間隙ガス圧と異なる間隙水圧を測定することを目的として、ピエゾメータを不飽和土に設置するとき用いられる細かいフィルターである。この目的のために採用されるフィルターの空気侵入値は少なくとも100 kPaを持たなければならない。

したがって、間隙ガスの侵入を阻止できるか否かに基づいて2つに分類していることから低いAEVと高いAEVの中間的な領域のフィルターを定義する意味はないことになる。

しかしながら、高い空気侵入値フィルターを備えたピエゾメータであっても、ガスと液体を長期間にわたり分離する機能を保つことは不可能である。ガスは拡散現象によって水に溶け込んでいるから、長期間にそのフィルターを通して器内の空隙にガスが侵入するからである。

2.2.4 タイムラグ (time lag)

(1) 定義

地下水圧が変化するとき、周辺の地盤の水圧とピエゾメータの間で圧力平衡に達するために必要な時間を動水理的タイムラグ (hydrodynamic time lag), または単にタイムラグと呼ぶ。Hvorslev (1951)<sup>7)</sup>は基本的タイムラグ (basic time lag)として次式を定義した：

$$T_{basic} = \frac{V}{Q} \tag{1}$$

ここで、

$T_{basic}$  = 当初の流量を維持したときに圧力差がゼロになるのに必要な時間 (sec)

$V$  = 圧力平衡に必要な水の流入体積 (cm<sup>3</sup>)

$Q$  = ピエゾメータの機器内部の空隙に注ぐ単位時間当たりの流量 (単位時間当たりの体積) (cm<sup>3</sup>/sec)

$$Q = FkH_f \tag{2}$$

ここで、

$F$  = 取水口係数 (無次元)

$k$  = 地盤の透水係数 (cm/sec)

$H_f$  = 周囲の地盤の間隙水圧とピエゾメータの水圧差を水頭であらわした値 (cm)

大部分の工学的目的を達成するのに十分なタイムラグは90%の圧力平衡の状態とすれば、それは基本的タイムラグの23倍であり、

$$T_{90\%} = \frac{2.3V}{FkH_f} \tag{3}$$

となる。Hvorslevは、これを工学的目的を満たすタイムラグとしている。このように、タイムラグはピエゾメータの種類と寸法および地盤の透水係数に依存する。

(2) 各種ピエゾメータのタイムラグ

有孔管ピエゾメータに対する工学的タイムラグはPenman(1960)<sup>8)</sup>によって与えられた式で評価される：

$$T_{90} = 3.3 \times 10^{-6} \frac{d^2 \ln \left[ \frac{L}{D} + \sqrt{1 + \left( \frac{L}{D} \right)^2} \right]}{kL} \tag{4}$$

ここで、(図-7参照)

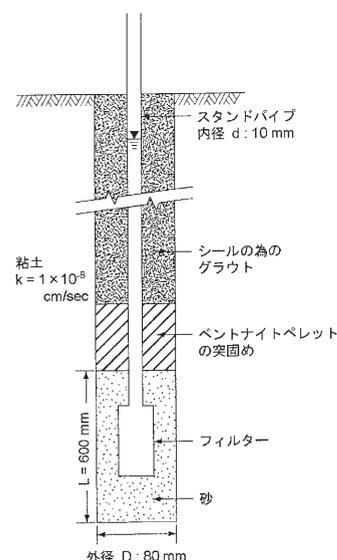


図-7 有孔管式ピエゾメータの寸法例

Fig. 7 An example of dimensions on open standpipe piezometer

- $T_{90}$  = 90%の圧力平衡に必要な時間(sec)
- $d$  = スタンドパイプの内径(cm)
- $L$  = 取水部フィルター (またはフィルターを取り囲む砂のゾーン) の長さ(cm)
- $D$  = 取水部のフィルター (または砂のゾーン) の直径(cm)
- $k$  = 地盤の透水係数(cm/sec)

有孔管式ピエゾメータの場合、(1)式の $V$ は、100cmの水頭変化に対して、有孔管の断面積を $1\text{ cm}^2$  とすれば $100\text{ cm}^3$ である。一方、受圧膜式ピエゾメータの場合、 $V=10^{-4}\sim 10^{-5}\text{ cm}^3$ <sup>9)</sup>と小さい値が一般的であるので、両者の工学的タイムラグは約百万倍の違いとなる。

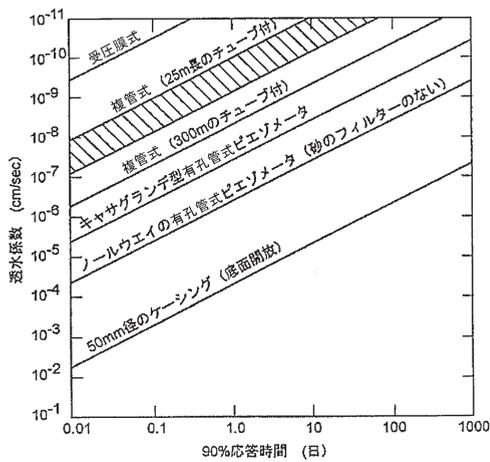


図-8 各種ピエゾメータの応答時間<sup>10)</sup>  
 Fig. 8 Approximate response times for various types of piezometer

各種ピエゾメータの応答時間を図-8<sup>10)</sup>に示した。

### 3. ピエゾメータの分類と名称

我が国のピエゾメータに関する研究は、先行した欧米の研究と開発実績に比べて皆無といってよいくらいであり、その名称に共通した日本語の用語がなく、適用用語が混乱している。したがって本文では、一冊の翻訳図書<sup>6)</sup>を参考にして、各種ピエゾメータの名称を以下に示す日本語用語を用いて記述することにする。

#### (1) ピエゾメータの2大分類

ピエゾメータは、一般に以下の2つに大別される：

- ピエゾメータ { 開放型ピエゾメータ
- { 閉塞型ピエゾメータ

開放型ピエゾメータ：

計測系が大気(圧)に解放されたピエゾメータ

閉塞型ピエゾメータ：

計測系が大気圧から遮断されたピエゾメータ

#### (2) 普及しているピエゾメータの種類

現在普及しているピエゾメータは、次の3つに分類される(図-9)：

- ①有孔管式ピエゾメータ (open stand-pipe piezometer)：ポラスフィルターにスタンドパイプを連結し、スタンドパイプ中の水位、またはスタンドパイプ頭部の水圧を測定して間隙水圧を求める装置。間隙水圧水頭をスタンドパイプの水位で求める方式を開放型、スタンドパイプ頭部の水圧をブルドン管圧力またはその他の圧力変換器で求める方式を閉塞型とよぶ。
- ②複管式ピエゾメータ (twin-tube hydraulic piezometer)：これは閉塞型のピエゾメータである。2本のプラスチックチューブに連結されたポラスフィルターと、そのチューブの上端部に取り付けた圧力計(主に、ブルドン管圧力計を使用する)で計測部を構成し、システムにガスが侵入した場合、2本のチューブを用いて脱気した圧力水によってそのガスを追い出す(この作業をフラッシング(flushing)と呼んでいる)装置を備えた測定装置。
- ③受圧膜式ピエゾメータ (diaphragm piezometer)：これは閉塞型ピエゾメータであり、圧力変換器と間隙水の間隔膜を持つ装置の一般名称。圧力に相応して変化する膜の変形またはひずみを直接検知する方式と水圧による膜の変形をゼロに戻す空気圧を測定する方式があり、前者を電気式(主に、振動弦式、電気抵抗式)、後者を空気圧式と呼ぶ。

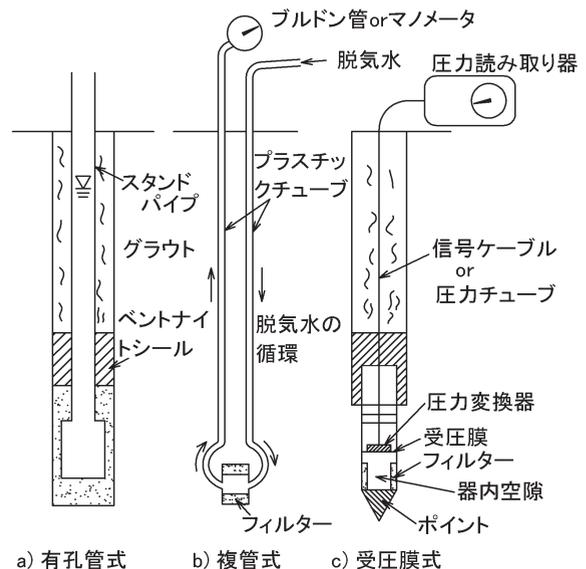


図-9 ピエゾメータの大分類  
 Fig. 9 Large group of piezometers

4. ピエゾメータ開発の歴史

(巻末の付録：ピエゾメータ開発の歴史，参照)

4.1 有孔管式ピエゾメータの開発の歴史

手元の資料<sup>12)</sup>による最初の間隙水圧測定は、1907年に有孔管式ピエゾメータを用いてインドのWaghadダムにおいて湛水時のフィルダムの浸潤水位を観測した事例が挙げられる。それはイギリスの技術者が設置した。

現在まで世界で最も普及した有孔管式ピエゾメータはCasagrande(1949)<sup>13)</sup>の開発したピエゾメータであり、Casagrandeピエゾメータと呼ばれる(5章で説明する)。1964年には、英国のDeep Hayesダムの法尻においてピエゾメータパイプを所定の深度まで打設した後、フィルター部分を開けて孔隙を作るという新たな設置方法(Drive-in piezometer)が採用された。これはParry(1971)<sup>14)</sup>によって発表されたピエゾメータと類似のものである(図-10)。

1968年にはこのピエゾメータの自動遠隔測定装置として気泡方式のシステム(Bubbler system)が採用された(図-11)。

Vaughan(1969)<sup>15)</sup>は、孔内全体をGrout-in方式で設置する単孔多点ピエゾメータの理論と設計を提唱した。それはBjerrum et al.(1965)<sup>16)</sup>が提案した多点ピエゾメータ(図-12)の孔隙間のシール問題を解消する設置方法を提案したものである。Vaughan(1969)の提案は、多点の孔隙部の完全なシールを図り、同時にタイムラグも実用的な領域に納め得るピエゾメータであり、アースダムにおいて試行されている。

各種のピエゾメータの中で最も簡便で、安価で耐久性を持ち、信頼できる読み値が得られることが認められたCasagrandeピエゾメータに代表される有孔管式は1949年以降、基本的構造に目立った新たな開発の展開はない。

4.2 複管式ピエゾメータ開発の歴史

1939年に米国開拓局が低い空気侵入値のセラミックフィルターを用い、ブルドン管圧力計を採用した複管式ピエゾメータを開発し、米国のアースダムの標準とした(図-13)<sup>6)</sup>。

英国の複管式ピエゾメータの開発は米国に遅れをとっている。英国の複管式ピエゾメータは1951年にUksダムにおいて最初に設置された。しかし、その後の複管式ピエゾメータは英国の研究結果が模範とされ、1950年～1965年には世界の模範の標準機器としてフィルダムの計測に盛んに採用され隆盛を極めた。その間に、チューブ内への空気侵入による気泡や気栓の発生を防ぐため通気性のポリエチレンチューブに非通気性のナイロンチューブを被覆すること、および、空気侵入値の高いフィルターを用いてフィルターを通過するガスの侵入を極力少なくする方式が定着した。

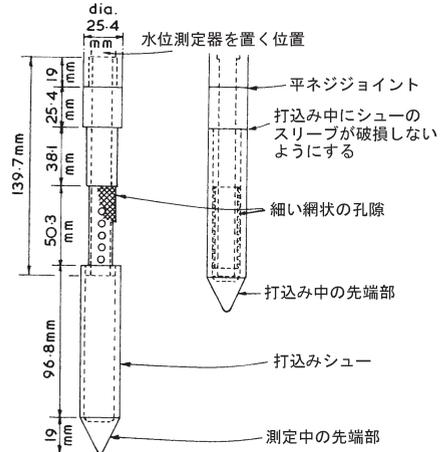


図-10 打ち込みピエゾメータ<sup>14)</sup>  
Fig. 10 Cambridge drive-in piezometer

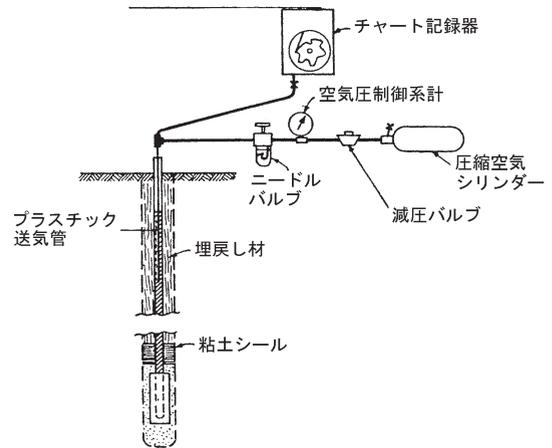


図-11 有孔管式ピエゾメータの気泡式自動測定装置<sup>47)</sup>  
Fig. 11 Bubbler system for automatic recording of open standpipe piezometer

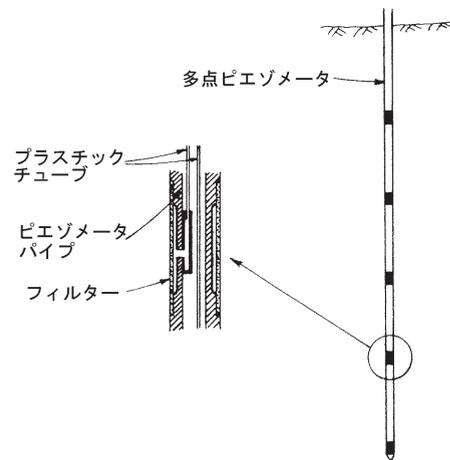


図-12 有孔管式単孔多点ピエゾメータ<sup>16)</sup>  
Fig. 12 Multiple open standpipe piezometer of borehole type

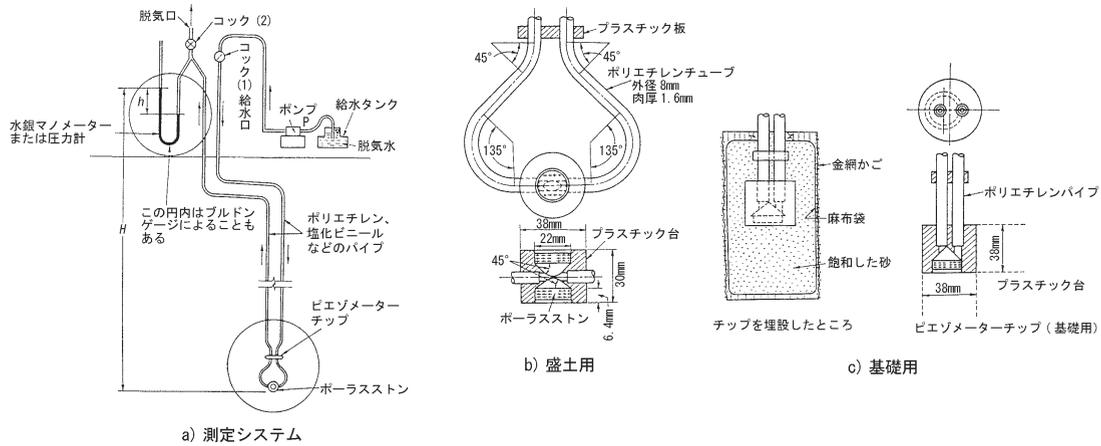


図-13 米国開拓局の複管式ピエゾメータの標準<sup>46)</sup>

Fig. 13 USBR embankment-type twin-tube hydraulic piezometer

しかし、米国ではその後、受圧膜式ピエゾメータの良好な実績を評価して、1978年に複管式の使用を中止することを決定している<sup>38)</sup>。

その後、複管式ピエゾメータは負の間隙圧を正確に測定するという特異な工学的目的をもった場合を除いて、英国以外の諸外国ではめったに使用されなくなっている。しかしながら、ガス圧の影響を完全に除くフラッシング機能を持つこのピエゾメータは面倒な操作と付属機材の脱気装置を必要とするが、最も信頼できる間隙水圧の値が得られる方式として優れたものであると認められている<sup>5)</sup>。

### 4.3 受圧膜式ピエゾメータの歴史

1935年には米国開拓局が電気接点判別式空気圧測定方式の圧力感知器を持つ受圧膜式ピエゾメータを開発し、アースダムに設置している。この方式は1949年にスウェーデンの国立土質研究所でも開発され、受圧部の測定精度をあげるために、受圧部に空気を送り込み、接点が接触した瞬間の圧力をブルドン管圧力計で計測する判別方式を採用している(図-14)<sup>17)</sup>。

Terzaghiの依頼を受けてMassachusetts Institute of Technologyのひずみゲージの専門家であるCarlsonは1942年に電気ひずみ抵抗器を用いた受圧膜式ピエゾメータを開発した。これは世界で最初の遠隔で読取りのできる電気式ピエゾメータである。この機器は、Terzaghiの3件の地盤コンサルタント業務において成功裏に活躍した<sup>18)</sup>。

1950年代になって、欧米では、野外の厳しい測定環境に適応した独自の受圧膜式ピエゾメータの開発競争が始まった。現在、受圧膜式ピエゾメータの中では振動弦ピエゾメータと空気圧ピエゾメータが世界的に最も広く使用されている。

振動弦ピエゾメータは1953年にドイツのRosshoupton

ダムに初めて用いられ、ついでフランスのSerre-Pomtonダムに設置され、1953～1960年間にすばらしい実績をあげて、この方式のピエゾメータがヨーロッパで多数使用されるようになった。

一方、米国では1958年に開発され、1961年にダムに初めて設置された空気圧ピエゾメータの使用が盛んとなり、前述したように1978年に複管式ピエゾメータに代わって米国開拓局の標準機器となっている。

我が国の受圧膜式ピエゾメータは1957年に八郎潟干拓工事に使用するために1号機が、翌年に2号機が試作されている<sup>19)</sup>。これは電気接点判別式空気圧測定方式を持ったピエゾメータである。その後、我が国では1960年代に

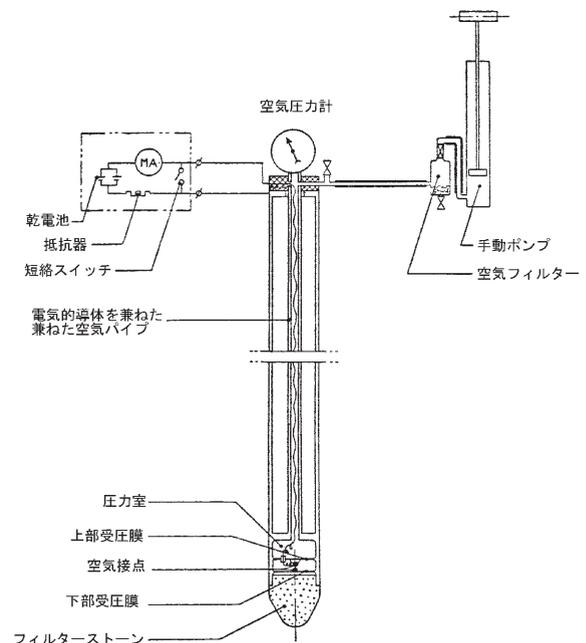


図-14 スウェーデン国立土質研究所で開発された電気接点判別式空気圧測定方式のピエゾメータ

Fig. 14 Electro-pneumatic piezometer developed by the Royal Swedish Geotechnical Institute.

なってひずみゲージによる電気抵抗式や差動トランス式が開発された。

受圧膜式ピエゾメータは1970年代以降今では世界中で最も多用されるようになってきているが、振動弦式が主にヨーロッパで、空気圧式が北米で盛んに使用され、定着している。我が国では欧米の方式とは異なる電気式ピエゾメータが一般に多用されている。

4.4 間隙水圧測定法に関する議論とその後の動向

世界で最初の間隙水圧測定法に関する国際会議は1960年にロンドンで開催された“土の間隙水圧とサクションに関する国際会議(International Conference on Pore Pressure and Suction in Soils)”である。英国の研究者が中心となり、ノールウェイ、オーストラリア、フランス、南アフリカの各国の研究者が室内・野外の測定原理と応

用について議論している。

次いで、室内・野外の実測経験が各国で蓄積された時期である1969年に、第7回国際地盤工学会がメキシコで開催された。その特別セッション“「野外と室内における間隙水圧測定法」(Pore pressure measurements in the field and in the laboratory)<sup>20)</sup>”において、実務的な間隙水圧測定法について各国の経験が話され、この時点で主な研究は終了した感がある。

その後の成果は、基本的問題というより、対象構造物と地盤条件に対応する実用的な測定法に向けた研究と製品の開発に向けられている。

製品開発の中の最大の焦点は単一のボーリング孔内で多点測定できる機器の開発に向けられている。それらの主な開発及び製品は次の通りである<sup>5)</sup>：

- 1974年：Piezofor system(Fr) \*
  - 1979年：Westbay MP system(Ca)
  - 1982年：Waterloo Multilevel system(Ca)
  - 1987年：Solexpert Piezodex system(Ss)
  - 1998年：Geokon multilevel piezometer (UK)
- \* Fr；フランス，Ca；カナダ，Ss；スイス，UK；英国

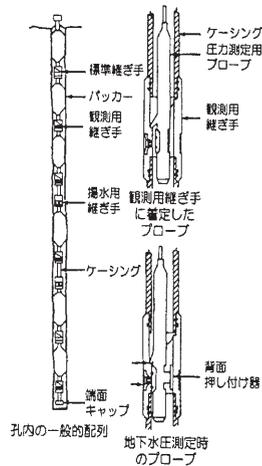


図-15 Westbay MP システム<sup>21)</sup>  
Fig. 15 Westbay MP system

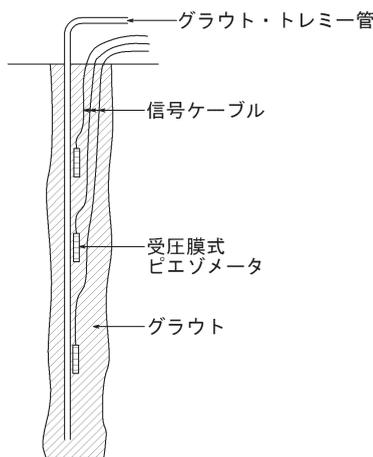


図-16 砂ポケットを持たない完全グラウト充填方式多点ピエゾメータ (トレミー管はグラウト完了後、埋め込み放置)<sup>22)</sup>  
Fig. 16 Fully grouted-in piezometer without no sand pocket (A tremie-pipe is embed in after installation)

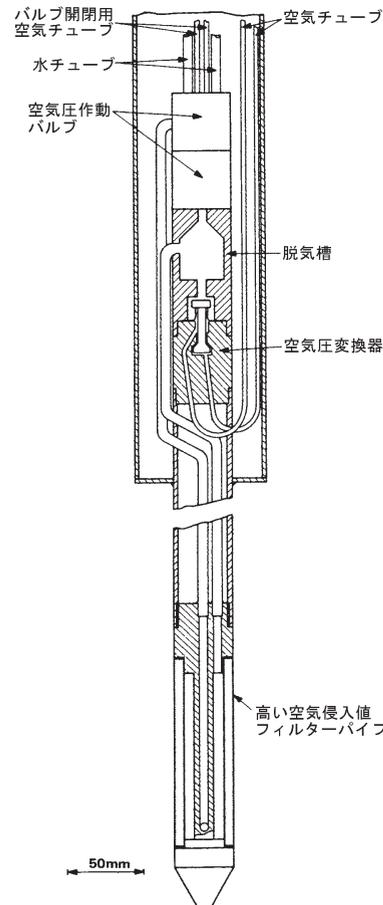


図-17 複管式を組み合わせた空気圧ピエゾメータ<sup>24)</sup>  
Fig. 17 Pneumatic piezometer combined with hydraulic system.

これらの中で最も精緻にユニット化され、高い信頼を獲得し、市販されている製品として世界中に普及した単孔多点ピエゾメータは Westbay 社の MP system (図-15)<sup>21)</sup> である。

最近の注目すべきピエゾメータ設置方法は、上述した単孔多点測定に応用でき、しかも設置作業が単純でシールが確実な方式として特筆される方法である。その方法は図-16に示すように、測定部の先端部を孔内に降ろした後で、砂のポケットを設けずに孔内全体を一様なグラウト材で埋め尽くす方法であり、その方式の設置方法を Grout-in 方法と呼んでいる。これは Vaughan (1969)<sup>15)</sup> の研究成果を受けた画期的設置方法であり、この考え方は後に MacKenna (1995)<sup>9)</sup> および Mikkelsen (2003)<sup>22)</sup> に受け継がれて受圧膜式ピエゾメータの単孔多点式に応用されている。その場合問題とされるピエゾメータのタイムラグも Vaughan (1969)によって工学的に許されることが解明され、実証されている。

次いで、注目すべきピエゾメータは、受圧膜式の欠点であった土中のガスの影響を除くことが出来るピエゾメータである。Marsland (1973)<sup>24)</sup> は河川堤防直下の有機質地盤の間隙水圧を測定するために、複管式脱気システムと空気圧ピエゾメータを組み合わせたピエゾメータ (図-17)を開発し、観測を施行している。また、主に不飽和盛土の負の間隙水圧を測定するために、Ridley et al. (2003)<sup>23)</sup> は、複管式脱気システムを備えた半導体ひずみ圧力変換器の電気式受圧膜ピエゾメータ (flushable electric piezometer)を開発し、それを英国の Geotechnical Observation社の専用機器としてインターネットで広報している。

## 5. 各種ピエゾメータの特徴と測定記録

### 5.1 有孔管式ピエゾメータの特徴と測定記録

#### 5.1.1 特徴

有孔管式ピエゾメータは間隙水圧測定方法の中で最も信頼できる計器として一般に認められている<sup>5)</sup>。その理由はスタンドパイプの中の水位とフィルターの中心点の距離で換算した水頭圧が正しい間隙水圧を示すからで、何時でも測定者自身の確認によって照査できることがこのピエゾメータの信頼を高めている第一の特徴である。また、内径8mm以上のスタンドパイプであれば、土中のガスがフィルターを通過して侵入しても気栓を形成することなくスタンドパイプの中を通して大気中に放出され、自動的に脱気されるという特徴があり、土中のガスの影響を受けない水圧を測定できることが第二の特徴である。その他の特徴は、その構造が単純であり、経済的で、製作が容易であることである。主な欠点は、スタンドパイプが建設工事の障害になること、地盤の大きな変形や変位

によってスタンドパイプが破損すること、およびフィルターの目詰まりがおこること、透水性の低い地盤における長い水理的タイムラグがあげられる。さらに寒冷期における凍結の問題があることである<sup>25)</sup>。

### 5.1.2 ローガン国際空港の間隙圧測定記録

#### (1) 概要

当時、過剰間隙水圧消散に伴う一次圧密現象は理論的な概念として受け入れられていただけであった。

Casagrande (1949)<sup>13)</sup> は、自身で開発したピエゾメータを用いて野外測定によって世界で初めてこの現象を実証した。この測定成果が世界的に広く知られ、現在でも広く採用されるようになった。

米国、ボストン東海岸沖にあるローガン国際空港は層厚が約30 mの軟弱地盤上に約8 mの厚さの浚渫粘土で水搬式埋め立てを行って建設された。浚渫粘土とその下の軟弱地盤の圧密沈下量をより正確に評価するために沈下と間隙水圧を測定する目的のプラットホーム (約4m×6m)を水上に設けた。そこで初めて開発されたピエゾメータが世界的に有名なCasagrandeピエゾメータである。

#### (2) ピエゾメータの構造と設置方法

このピエゾメータは、図-18に示すように、先端部はセラミックチューブ (外径3.8 cm, 内径2.5 cm, 長さ60.9 cm)の頭部に、軟らかいゴム製のブッシングによって外径1.27 cmのSaranチューブを接続した構造を持つ。

Casagrandeピエゾメータはその設置方法に特徴がある (図-19)。所定の測定深度の上方数mまでボーリング穿孔を行い、その孔底から内径2インチのケーシングを所定の測定深度下端まで打ち込む。その後ケーシ

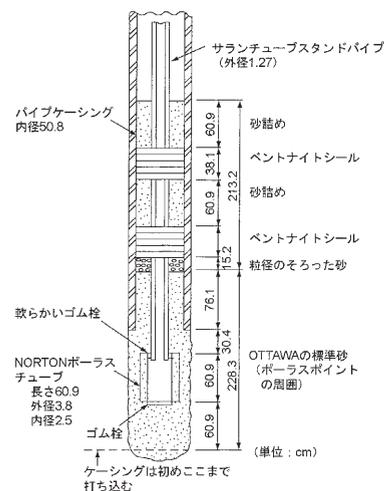


図-18 Casagrande ピエゾメータ<sup>13)</sup>

Fig. 18 Casagrande piezometer

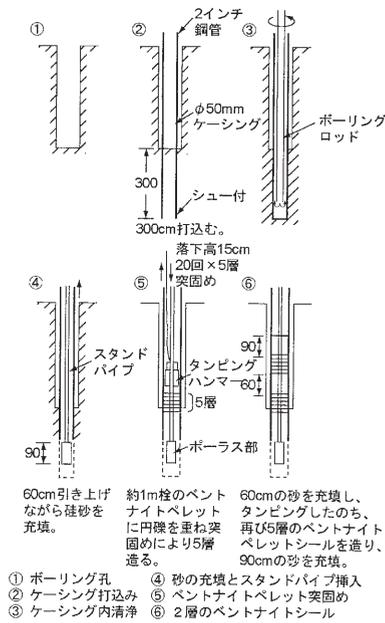


図-19 Casagrande ピエゾメータの設置手順<sup>13)</sup>  
Fig. 19 Installation procedure for Casagrande piezometer

ングの内側の土を洗い出して、その内部を清水に置き換える。ケーシングを段階的に引き抜いてその空間の下部をOttawa砂で満たす。そして、ピエゾメータの先端部分を孔内に降ろした後でその周りに再びOttawa砂を充填する。これによって良好な透水区間を作る。最後に測定区間下端より150 cm上方までケーシングを引き抜き、Ottawa砂を先端部上端より90 cm上方まで充填する。

測定区間をシールするためにSaranチューブ材とケーシングの間を鋼製筒状の突固めハンマーを用いてベントナイトボールと小円礫を交互に締固める。このように間隙水圧測定部分をケーシングの外側、およびケーシングの内側とスタンドパイプの外側の間隙を入念にシールしてピエゾメータを構成する。

(3) タイムラグの現地確認

有孔管式ピエゾメータは、野外において直接それぞれのピエゾメータのタイムラグを確認することが出来る。Casagrande (1949)は、設置したピエゾメータの実際のタイムラグを現地のピエゾメータそれぞれについて求めた結果を報告している。

野外設置後にピエゾメータのスタンドパイプの水を汲むかまたは注水して、スタンドパイプの中の水圧を変化させ、その後の平衡に向かう過程の水位変動と時間を記録する。これは、通常、地盤の透水係数を求める野外試験であり、変水頭透水試験と呼んでいる。同時にこの方法によって現地に設置した各ピエゾメータのタイムラグを確認できる。

現地では1945年2月に実施されたそのピエゾメータの変水頭透水試験によってタイムラグを照査している

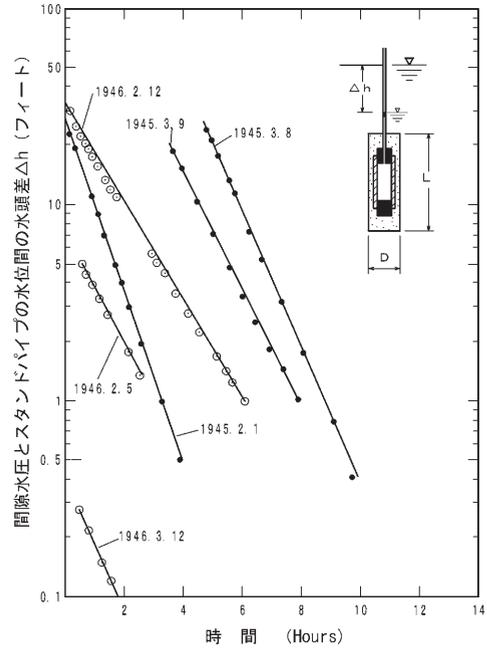


図-20 ピエゾメータのタイムラグの確認<sup>13)</sup>  
Fig. 20 Determination of time lag for the piezometers

(図-20)。当初の平衡水位の90%まで回復するために必要な時間は2時間、95%までは3時間、99%までは4.5時間であった。1946年2月に再び比較のために変水頭透水試験を行ったところ、タイムラグは前の試験時よりも長かったが、その変化はピエゾメータの読み値の精度を問題にするほどのものでなかった。

(4) 測定成果

図-21は、浚渫埋め立て工事が完了した後のピエゾメータの読み値を、最初の埋め立て開始日を起点とした経過日数で表して、間隙水圧水頭面標高の深度分布を示したものである。この間隙水圧水頭曲線を模式化して基礎地盤と浚渫粘土の一次圧密時間沈下量を評価した。この成果は後の地盤工学的手法の代表的なものとして定着し、世界的に高く評価された。

5.1.3 関東ローム高盛土斜面の間隙圧測定記録

(1) 概要

東京都西南部の南多摩宅地造成工事現場では、関東ロームの盛土材料の含水比が高く、斜面勾配2割～3割で盛土の高上げを急速に行うと、盛土高さ約8mでヒービングが発生して、工事を中断せざるを得なかった。この原因は、盛土の圧縮にともなって過剰間隙圧が発生したことによる。この間隙圧の実測のために、図-18と同等のCasagrandeピエゾメータを設置した。

(2) 測定成果

盛土斜面のヒービング時の間隙圧は、図-22に示すように、排水プランケットに挟まれた中間部で最大値

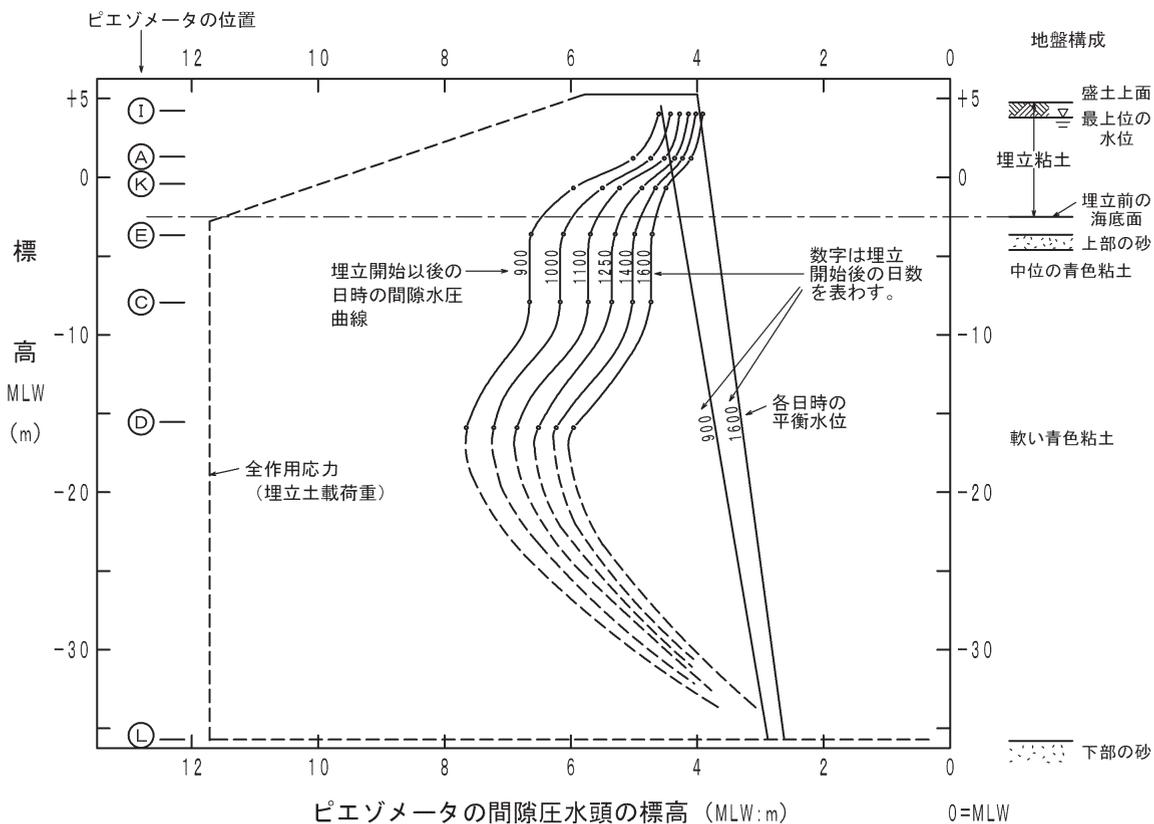


図-21 埋め立て完了後の間隙圧水頭の変化と時間<sup>13)</sup>

Fig. 21 Change of profile of pore pressure head with time after completion of embankment

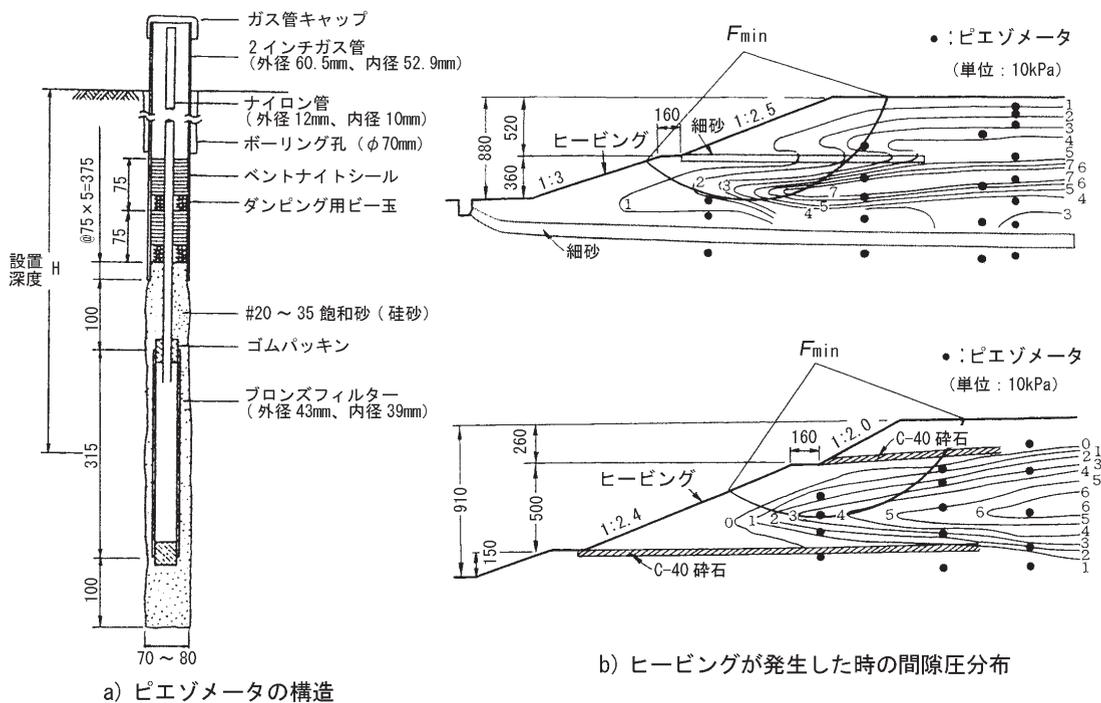


図-22 設置したピエゾメータとヒービング発生時の間隙圧分布<sup>26) 27)</sup>

Fig. 22 Schematic of open standpipe piezometer installed and pore pressure distribution in heaving stage

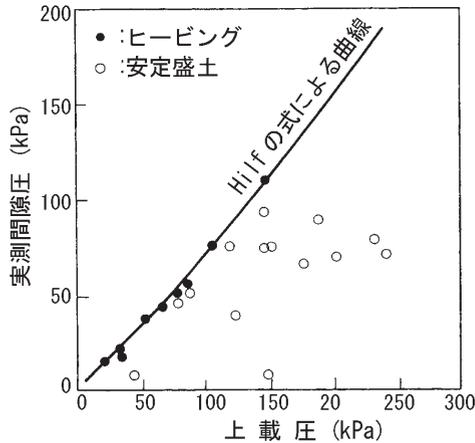


図-23 工事中の最大間隙圧と上載圧<sup>26)</sup>

Fig. 23 Maximum pore pressure developed during construction and over-burden pressure

を示し、排水ブランケットに向かって小さくなる形状を示していた。孔内傾斜計で確認されたヒービングの下面は間隙圧の最大値を示すゾーンであることも確認した。

不飽和土盛土の自重圧縮による非排水条件での間隙圧は、Hilf (1948)<sup>28)</sup>の提案した算定式で容易に予測される。関東ロームの盛土材料に関してあらかじめ求めた自重圧縮に伴う過剰間隙圧曲線に、工事中の各ピエゾメータの最大実測間隙圧と盛土の上載圧の関係をプロットすれば、図-23であった。このように、Hilfの式から得られた間隙圧曲線とヒービング時の斜面各部分の最大間隙圧とはよく一致していることが明らかである。盛土高上げ速度が速く、2つの排水ブランケット間の中央部分でほぼ非排水条件を満たす高い間隙圧が存在することが、盛土のヒービングの原因であることが明らかにされた<sup>26) 27)</sup>。

## 5.2 複管式ピエゾメータの特徴と測定記録

### 5.2.1 特徴

複管式ピエゾメータは、当初アースダムの建設中の基礎地盤と盛土に設置するために開発されたものである。基本的な測定システムは、2本のプラスチックチューブに連結されたポーラスフィルター部分と各々のチューブの末端部に取り付けたブルドン管圧力計 (U字管マンオメータまたは電気圧力変換器を用いることもある) で構成される。通常、土中のガス (または空気) がフィルター、チューブ、または固定金具を通して侵入することがあるので、そのガスを測定システムからフラッシングするために2本のチューブを必要とし、そのチューブに脱気水を圧入循環する装備をピエゾメータごとに、または一組のピエゾメータごとに常設する必要がある。フィルターは一般に米国開拓局型と英国型が知られているが、各国で独自に製作

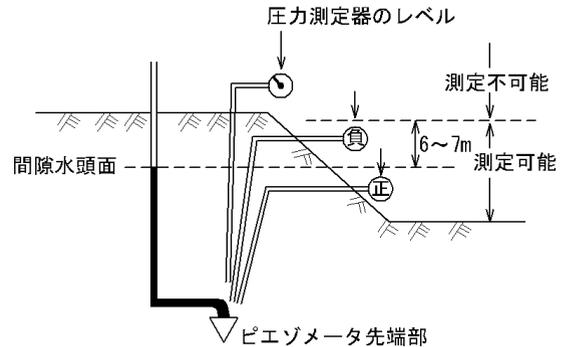


図-24 複管式ピエゾメータの適用限界

Fig. 24 Application limitation for twin-tube hydraulic piezometer

したものが市販されている。

追記) フラッシングに使用する水は蒸留水かまたは煮沸水とし、溶存ガスの混入量が1ppmより少ない脱気水を用いる。またその中に湿潤剤およびバクテリア抑制剤として第四アンモニウム化合物 (QAC) を添加することが望まれる。<sup>5)</sup>

このピエゾメータはガス圧 (または空気圧) の影響を除いた正しい間隙水圧を測定できることが最大の特徴であるが、脱気システムの付帯装備を現地に必要とすること、測定技術にある程度の熟練が必要であること、複管のチューブの中の水の凍結に配慮しなければならないことなどの欠点あげられる。より重要な問題は、圧力測定器 (通常ブルドン管圧力計を使用する) の標高よりも6~7m低い圧力水頭面をもつ場合には、正しい測定結果が得られないことである (図-24)。通常は圧力測定器の標高よりも高い圧力水頭を持つ場合に適用される。

### 5.2.2 硬質粘土切り取り斜面の間隙圧測定記録

#### (1) 概要

Vaughan and Walbancke (1973)<sup>29)</sup>は、硬質で亀裂に富むロンドン粘土からなる道路斜面内部の間隙圧の実態を明らかにした。

1964年に建設されたM1自動車道路Edgwareburyの高さ17mの切り取り斜面において、掘削後9年を過ぎたときに間隙圧の測定を行った。

#### (2) ピエゾメータの構造と設置方法

5本のハンドオーガー孔を穿ち、孔底部分をピエゾメータ先端部の形状と同じ形をしたスクレーパーで穿孔し、ピエゾメータ先端部を押し付け挿入した。ピエゾメータ先端部は空気侵入値の高いセラミックフィルターをテーパ状に成型したもの (これをBishop piezometer tipと呼ぶ) で、このテーパ面と孔底壁面が密着するように配慮した (図-25)。その上に湿

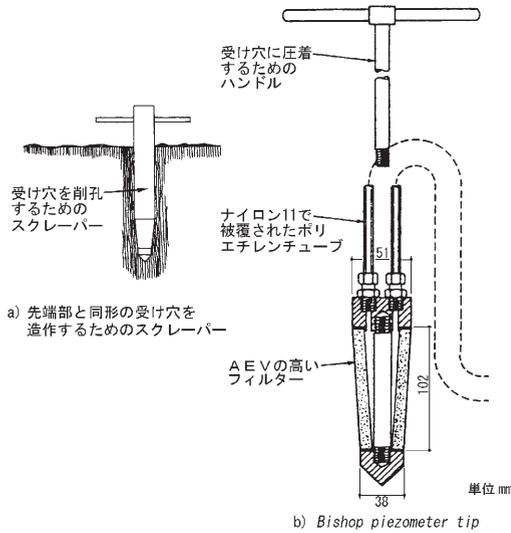


図-25 ピエゾメータ先端部と成形スクレーパー  
Fig. 25 Piezometer tip and hole forming scraper tool

潤石膏を詰め、さらにセメント・ベントナイトグラウトによって孔を充填密封した。

ナイロン11チューブで被覆した2.8mm内径のポリエチレンチューブからなる2本のチューブを先端部に接続し、フラッシングによって測定システム内のガスを追い出した後の平衡値を読み値として記録している。

(3) 測定成果

設置作業による間隙水圧の乱れを消散するために、ピエゾメータ設置後4週間放置して、1972年5月に測定を開始し、その後に3度の測定を実施した。

表-2に測定結果をまとめて示した。図-26は、測定された負の間隙水圧(表-2に示した1973年1月~5月間の平均値)を示したものである。この実測結果は、切り取り9年後であっても斜面内に負圧が残っており、最大-7mの水頭を保持していることを実証した。

これは堅い亀裂性粘土の切り取りによる時間的遅れ崩壊を説明するすばらしい発見であり、時間的遅れ崩壊に関する過去の所見の過ちを払拭するものであった<sup>30)</sup>。

5.2.3 埋め立て完了後の海成粘土の間隙水圧測定記録

(1) 概要

日本鋼管(株)(現JFEスチール(株))京浜製鉄所扇島は、最大50m、平均35mの厚さの軟弱粘土地盤に約20mの厚さの砂で埋め立てた人工島である。

埋め立て完成後の経時的圧密沈下量を予測するため、代表的2地区に複管式ピエゾメータと層別沈下計をそれぞれ7深度に設置した。ピエゾメータはガス圧の影響の少ない間隙水圧を測定することを第一に考慮して、図-27の測定システムを備えた複管式を採用した。

(2) ピエゾメータの構造と設置方法

採用した測定システムの主な特徴は次の通りである。

- ① 複管チューブとして材質的に空気を通さないサランチューブを採用した。(注: サランチューブは空気を通さない特性があるが、時間の経過と太陽にさらされると脆くなるという欠点がある)
- ② ピエゾメータ先端部はAEV=110 kPaのセラミックフィルターを採用し、室内でそのフィルターを充分に脱気・飽和した後に、先端部を脱気水中で組み立てた。そして、その水槽の中で先端部全体をアクリルパイプで密閉・封入して現地に運んだ。これによって、運搬中のフィルター部の汚れ、目詰まりの問題および空気の侵入を防止した。図-28に示すように泥水で満された孔内に挿入する場合の先端部の汚れを防止し、また飽和度の低下をしないように、また、先端部を孔底より圧入すると同時にアクリルパイプが先端部から離脱する機構とした。
- ③ 計測機器のブルドン管圧力計内部のブルドン管をシリコンオイルで完全に飽和充填することによって圧力測定管の応答時間(タイムラグ)を小さくし、同時に現地での腐食防止を期待した。
- ④ 先端部の上部に外径40.5 mm、長さ3.0 mのボーリングロッドを継ぎ足し、そのロッドで孔底から静的

表-2 間隙水圧測定値と測定日<sup>29)</sup>

Table 2 Pore pressure readings and measuring days

	ピエゾメータ				
	1	2	3	5	6
切土斜面以深の深さ(m)	3.0	4.6	3.0	3.0	4.9
設置日	1972/4/15	1972/4/16	1972/4/16	1972/4/17	1972/4/17
実測された最大過剰水圧(m)	-7.2	-5.6	-7.2	-7.2	-5.3
過剰水圧測定日					
1972/5/12	-0.8	-3.0	-4.1	-3.1	-5.0
1973/1/8	-0.8	-2.0	-6.1	-6.6	-5.4
1973/3/5	-1.0	-2.0	-6.0	-6.5	-5.1
1973/5/10	-1.0	-2.1	-6.0	-6.5	-5.1

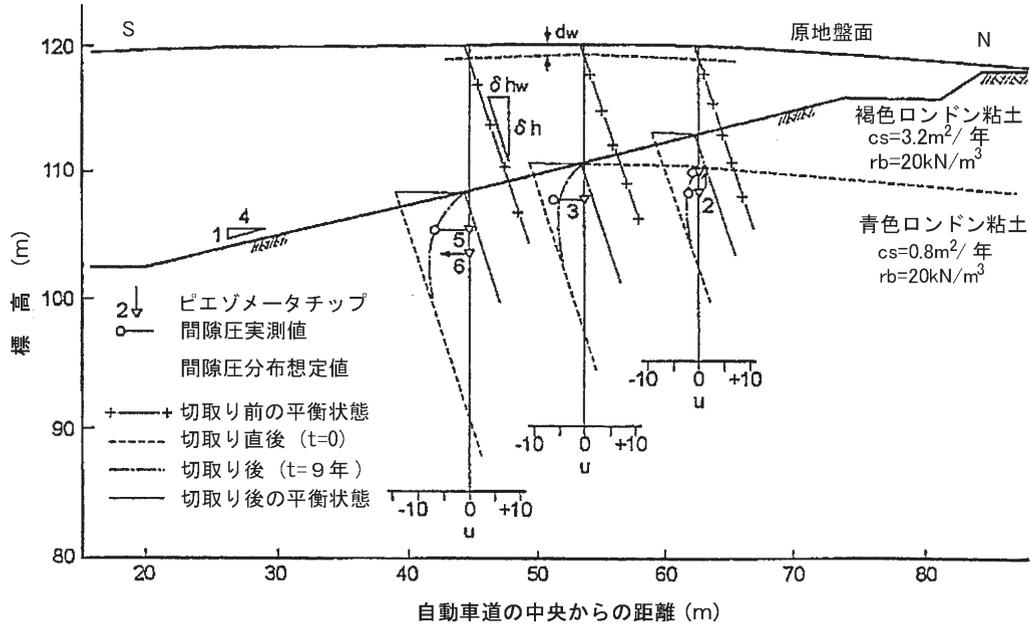


図-26 Edgwareburyの切取り9年後の残留間隙圧<sup>29)</sup>

Fig. 26 Edgwarebury cutting section showing pore pressure nine years after excavation

に圧入して、先端部と地盤間の完璧な密封を期待した。その上部をセメント・ベントナイトグラウト材で充填した。

(3) 測定成果

扇島は昭和49年に埋め立てを開始し、昭和51年に完了した。その後、約1年経過した昭和52年5月より間隙圧と沈下量観測を開始し、55年6月までの約3年間観測

を継続した。上記の観測結果の中の代表的な1年間の間隙圧の経時的変化を圧力水頭の標高で表し、図-29に、その図より過剰間隙圧水頭標高の深度分布を図-30に示した。

3年間に観測した間隙圧の変化量と沈下量から埋立地の軟弱地盤の一次圧密沈下量と時間の関係を解析し、その成果は、扇島埋立地全域の将来沈下量の時間的経過を合理的に予測算定することに役立った<sup>31)</sup>。

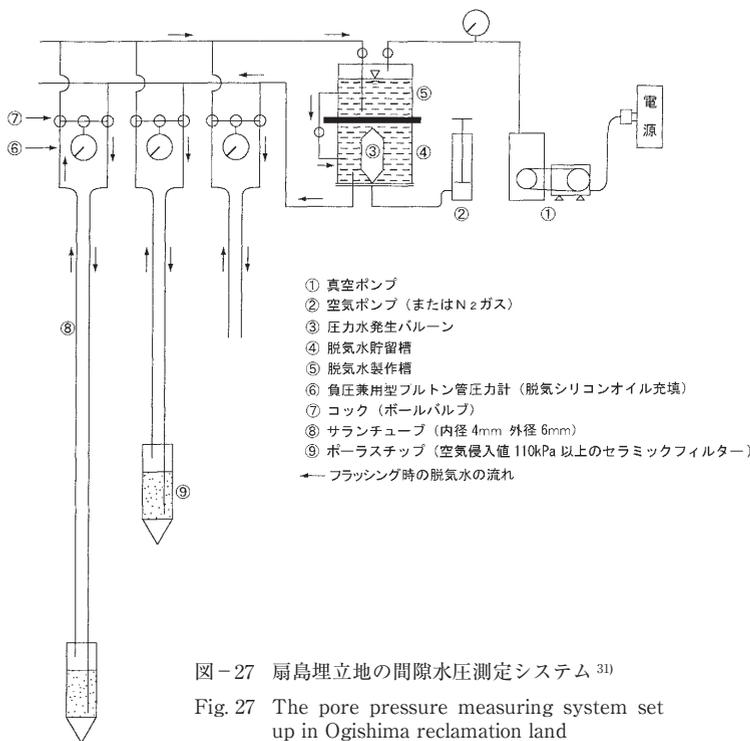


図-27 扇島埋立地の間隙水圧測定システム<sup>31)</sup>

Fig. 27 The pore pressure measuring system set up in Ogishima reclamation land

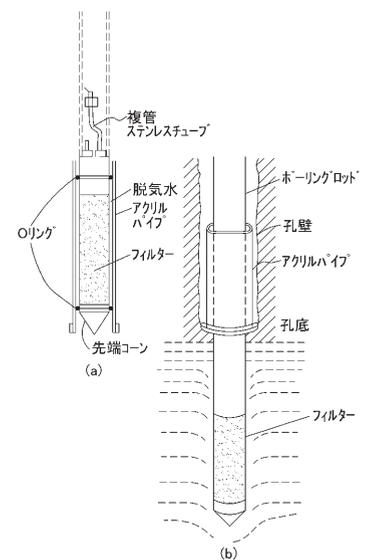


図-28 ピエゾメータ先端部の保護キャップと孔底からの圧入

Fig. 28 Protection cap for piezometer tip and pushing performance from bore-hole bottom

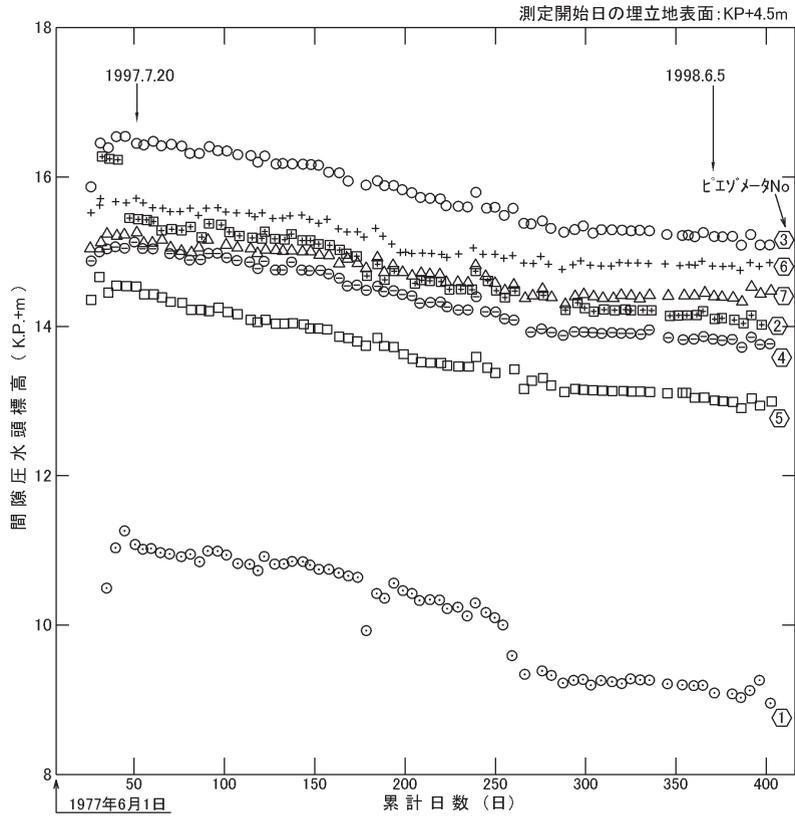


図-29 扇島埋立地軟弱地盤の間隙圧水頭の経時変化  
 Fig. 29 Change of pore pressure head readings with time in Ogishima reclamation land.

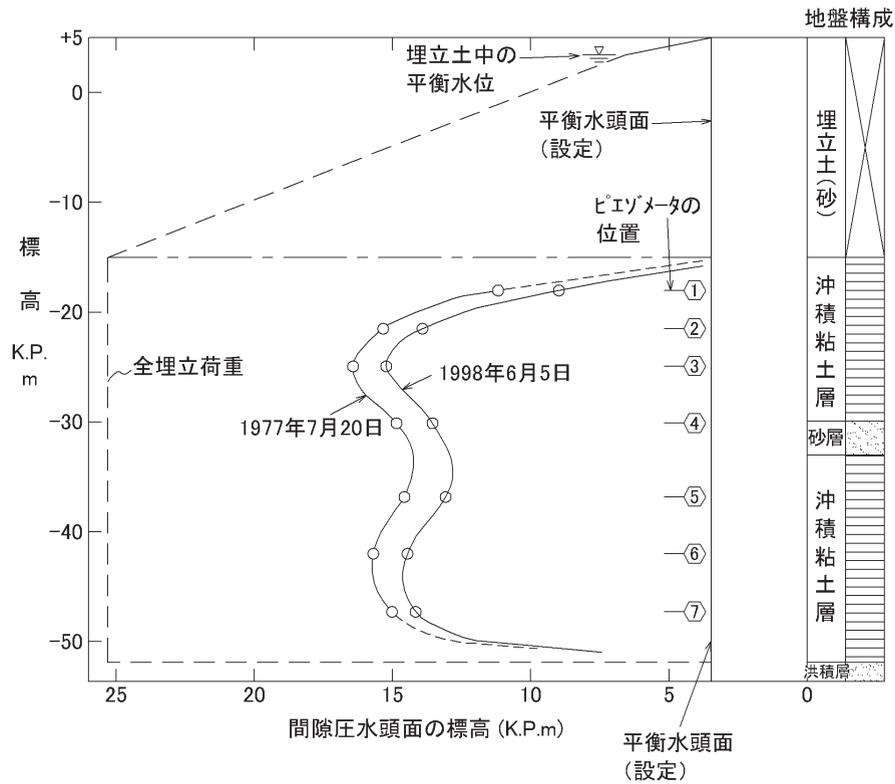


図-30 扇島埋立地軟弱地盤の間隙圧水頭の深度分布  
 Fig. 30 Change of profile of pore pressure head with time.

### 5.2.4 空気侵入値の異なる2種類のフィルターを用いた複管式ピエゾメータの比較

Bishop et al. (1964)<sup>33)</sup> は、複管式ピエゾメータを使用した場合に、空気侵入値の異なるフィルターが間隙圧の読み値にどんな影響を与えるかについて次のように報告している。

英国の Selset Dam において、空気侵入値が AEV=3 kPa と 210 kPa と大幅に異なる複管式ピエゾメータを、水平排水ブランケットの近傍にそれを挟んで設置し、排水ブランケットによる間隙圧の消散効果を明らかにするために長期間の測定を行った。

ダム完成後の定常状態にある条件下で空気侵入値の異なる2種類のフィルターをもつピエゾメータの読取り記録が図-31 に示すように得られた。

この図の中の記号Dは脱気水を循環して測定システム中の空気を除去するフラッシング時間を表している。高い空気侵入値のフィルターを備えた読み値は、経年的に

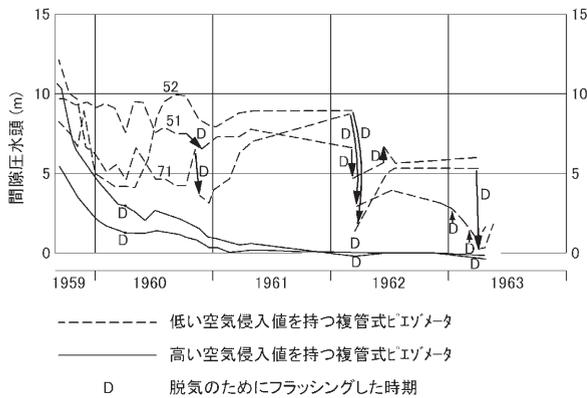


図-31 Selsetダムにおける間隙圧の消散<sup>33)</sup>  
Fig. 31 Dissipation of pore pressures of Selset dam

間隙圧がスムーズに暫時低下し、ゼロに向うという期待された読み値を示したが、低い空気侵入値のピエゾメータは奇妙な読み値の変化を示している。このことは複管式ピエゾメータであるといえども、先端部のフィルターが高い空気侵入値を持ったものでなければ、フラッシングしたとしても正しい間隙水圧を示さないことを証明している。

この結果は、低い空気侵入値フィルターの採用を標準としていた1960年以前に設置された英国および米国のダムの間隙圧測定値は、空気圧を測定している可能性があることを証明する重要な測定であった。

### 5.3 受圧膜式ピエゾメータの特徴とその測定記録

#### 5.3.1 特徴

受圧膜式ピエゾメータは、圧力変換器の端子が単純であり、基本的にはメンテナンスフリーであり、どんな比高（高さ、深度）にも設置できるという優れた利点がある。また、タイムラグが非常に小さいこともその利点である。一方、全ての受圧膜式ピエゾメータに共通した問題は、現地のポーラスフィルターを再度飽和することが出来ないことである (Mikkelsen and Wilson, 1983)<sup>25)</sup>。

このグループのピエゾメータは、通常、電気式（振動弦、電気抵抗、半導体素子）および空気圧式に大別される（図-32）。

追記）電気式ピエゾメータに共通したその他の欠点は、温度によって校正曲線が変化することと、設置時および測定中の不明な衝撃などで測定原点（ゼロ点）がドリフトすることがあることである。このために土中にピエゾメータを設置した状態で、センサーの応答を原位置で校正できる計器の開発が行われ、実用化されている。(DiBiagio, 1974)<sup>48)</sup> および Bishop, et al. 1969<sup>20)</sup> しかし、この優れた性能を持つ機器は一般的には普及していない。

振動弦ピエゾメータは、受圧膜と接続した弦の振動数を読み取る方式で、圧力情報がデジタルで伝送されることから、伝送ケーブル長に影響を受けない信号を用いているので、数キロメートルの長さの伝送が可能である。

空気圧ピエゾメータは装置が単純で耐久性があり安価であること、凍結問題がなく、通常非電氣的な計測となり、避雷器とアースを必要としない。なお、使用する空気チューブは1000m以内に限定すべきである。

その他の受圧膜式ピエゾメータの圧力変換器として多用されているセンサーには、電気抵抗ひずみ計を応用したものがあり、箔ひずみ計接着型、ひずみ計非接着型および半導体素子接着型のセンサーがあるが、その寿命は上記の振動弦式や空気圧式ピエゾメータよりも短いと言われている。

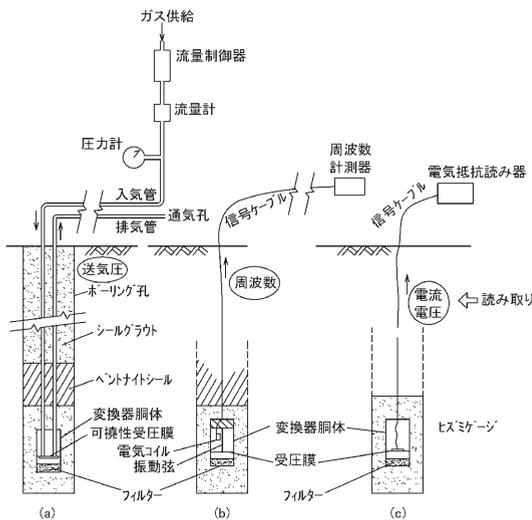


図-32 ボーリング孔に設置した3種の受圧膜式ピエゾメータ  
Fig. 32 Three types of diaphragm piezometer in bore-hole.

### 5.3.2 受圧膜式ピエゾメータの問題点

斎藤 (1979)<sup>32)</sup> は土質工学 30 年の歩みに寄せた論説の中で次のように述べている。

「間隙水圧計は誰もが測定機構にばかり注目しているようだが、問題はチップにあるのであって、これに言及する人は極めて少ないようである。特に問題が多い電気式について言えば、この種の間隙水圧計に対する不信感は、予期に反した奇妙なデータが得られる点にある。-----これはフィルターを通して測定系へ空気が侵入するため、土が不飽和の場合に特に著しいが、土が水で飽和している場合でも、水中に溶解または浮遊している空気や、地盤から発生する有機ガスが分離して、気泡を生じるに至る。水と空気が共存する場合は、水の表面張力のために空気圧の方が水圧よりも常に大きい。不飽和の場合は、水は常に引っ張り力を受けているし、飽和度がかなり高い場合でも、気圧と水圧の差が数気圧に達することがあるという。」

我が国では、この斎藤の指摘以来、電気式間隙水圧計（受圧膜式ピエゾメータ）に関する不信を持ちつつ長年に涉りそれを使用し続けているのが現状である。

しかし、英国を除く欧米各国では信頼の高いピエゾメータとして受圧膜式ピエゾメータが一般に多用されているのが現状である。この評価の違いは何処に起因しているのであろうか。この問題に対して、国内外の実例を紹介して、考えてみよう。

### 5.3.3 腐植土地盤の間隙水圧の奇妙な記録例

#### (1) 概要

東北高速道路館林工区の高速道路を横断する橋梁は計画高さ 8 m の盛土橋台であった。その橋台は砂質土、腐植土および粘土の互層からなる軟弱地盤上に建設された。この橋台の盛土の安定管理を目的として、盛土底面下の深度 3.1 m と 7.6 m に差動トランス圧力変換器（図-33）を使用し、低い空気侵入値のブロンズフィルターをもつ受圧膜式ピエゾメータを設置した。

#### (2) 設置方法

ピエゾメータの空隙を水で飽和させる目的で、あらかじめ水を入れたゴム風船にピエゾメータ先端部分を差し込んで、それをドライアイスで凍結した。また、地盤に押し込むことによってフィルターの目詰まりが生じないようにゴム風船とは別のメンブレン袋で被覆して、ボーリング孔底より 1 m 押し込んで地中に設置した。メンブレン袋は薄く、地盤に先端部を押し込む途中で破れることを期待した。

#### (3) 測定結果

図-34は盛土施工中および施工後の地盤の沈下と間隙水圧測定結果を経時的にまとめたものである。計器

を設置して約 4 ヶ月後に深度 7.6 m に設置したピエゾメータの読み値が異常な上昇を示し、その後 4 ヶ月後に減少して元に戻った。

このような挙動は明らかに異常であり、その原因は腐植土の分解に伴う有機ガスのピエゾメータへの侵入によると推測される。

### 5.3.4 関東ローム材料を用いた高盛土の間隙圧の奇妙な記録例

#### (1) 概要

工事は、ロームおよび火山灰質粘土と火山灰質砂で構成される谷を厚さ約 4 m のロームからなる盛土材料で埋め立てて施工面とする計画であった。この谷部を構成する地盤の圧縮特性が曖昧であった（二次的堆積物が堆積したものではないかと疑われた）ことから、計画施工面まで盛土嵩上げした後、さらに約 4 m のプレローディング盛土を行って残留沈下を低減する計画

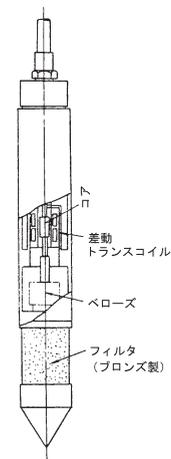


図-33 差動トランスピエゾメータ

Fig. 33 LVDT piezometer

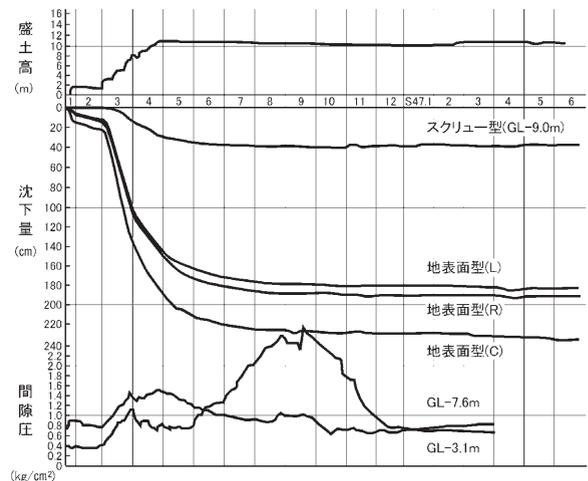


図-34 腐植土層中の間隙圧の測定記録

Fig. 34 Pore pressure readings in peaty ground.

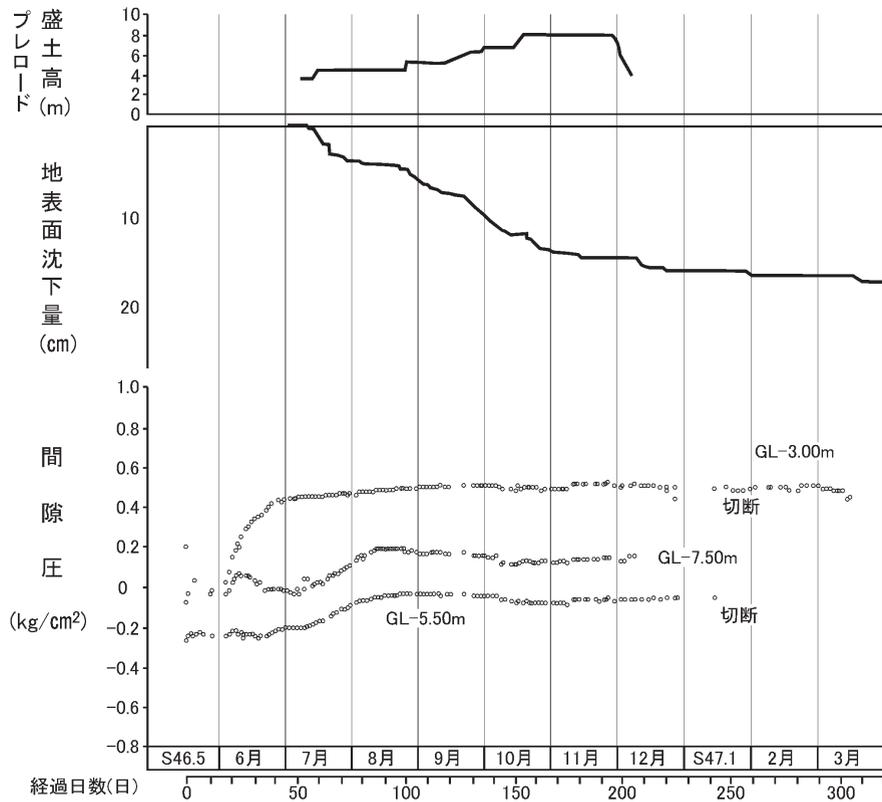


図-35 関東ローム盛土中の間隙圧の測定記録

Fig. 35 Pore pressure readings in Kanto loam embankment soil.

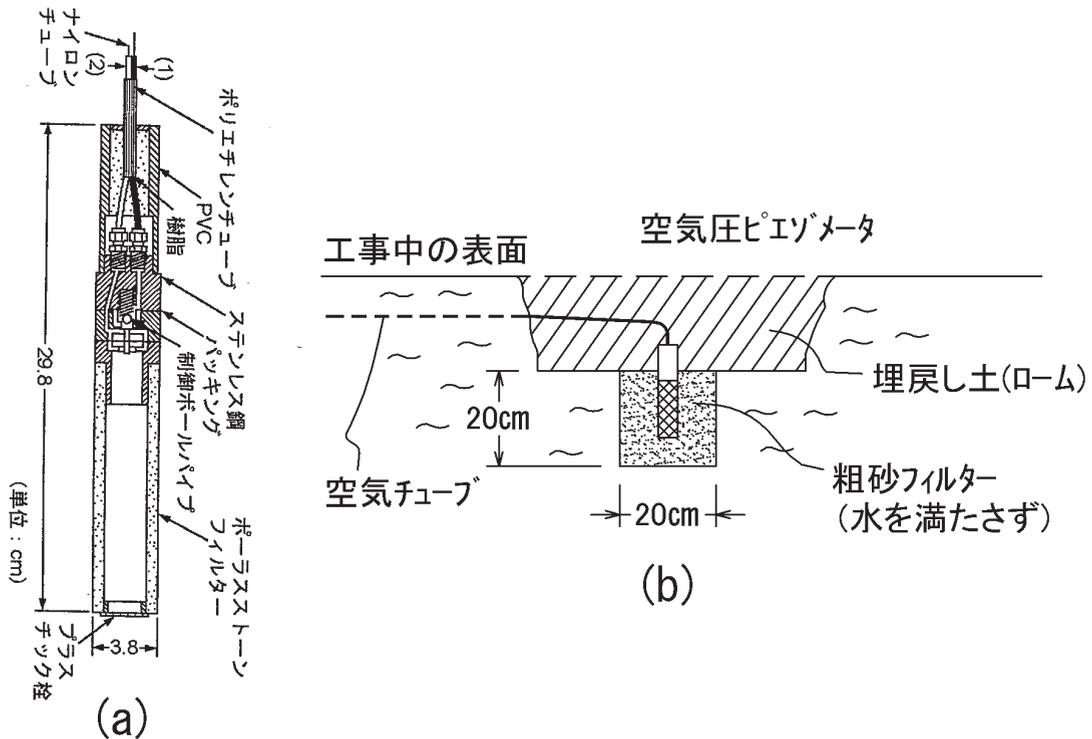


図-36 空気圧ピエゾメータとその盛土中の設置

Fig. 36 Pneumatic piezometer and its installation in embankment.

とした。そこで、プレロード終了時期を決定するために、計画施工基面より、沈下計とピエゾメータを設置してプレロード中とその後の観測を実施した。

使用したピエゾメータは箔ひずみ計接着型の受圧膜式ピエゾメータである。計画施工基面より深さ3.0, 5.5 および7.5 mにピエゾメータを設置した。

## (2) 設置方法

ピエゾメータの設置方法は、測定深度の0.5~1.0m上位までボーリング穿孔し、2インチのガス管に接続して孔底より押し込んで設置した。ピエゾメータ挿入前に受圧膜と空気侵入値の低い金属製のフィルターで囲まれた空隙を水で飽和したが、孔内に挿入する際に、飽和条件を十分に保持できる特別の工夫をしなかった。

## (3) 測定結果とその評価

図-35は、施工基面まで嵩上げを終了した後の、プレロード中の記録である。昭和46年7月から11月までプレロードしたにもかかわらず、間隙圧の読み値がほとんど上昇せず、またプレロード撤去後も間隙圧の低下が認められなかった。この図に併記した沈下記録を見ると、プレロード中の沈下は5ヶ月で約15 cmであった。

この程度の比較的小さな沈下量から評価すれば、圧縮性の低い盛土基礎地盤であると判断された。しかしながら、図-35はプレロード盛土荷重の変化と間隙圧の読み値がほとんど対応していないことが明らかである。とくに、プレロード撤去後の間隙圧読み値が降下しないことは、地盤の有効応力変化に追随していないことが、明らかであろう。

このような地盤工学的にみて奇妙な測定結果が得られた原因は、フィルターおよび器内空隙を脱気水で完全に飽和せずに、不飽和粘土に孔底より押し込んで挿入した結果、空気侵入値の低いフィルターが空気を多く含むローム材料によって包まれて目詰まりを起こしたことによると推定された。

### 5.3.5 関東ローム材料の盛土斜面において有孔管式ピエゾメータの間隙圧よりも高い読み値を示した例

#### (1) 概要

有孔管式ピエゾメータの代りに受圧膜式ピエゾメータ(図-36(a))を総数約700個設置した。

使用したピエゾメータは低い空気侵入値のセラミックフィルターを持つ空気圧ピエゾメータである。

#### (2) 設置方法

盛土中の計器の設置方法は、図-36(b)に示すように所定の設置点の表面に直径約20cm 深さ20cmの穴を掘削し、その穴の中心に先端部を鉛直に立て、その周辺

を粗砂で充填して設置した。充填した砂を水で飽和する処置をしなかった。

#### (3) 測定結果とその評価

この工事中に得られた読み値は盛土工事の進捗過程に対して矛盾がなく、スムーズな経時変化を示し、際立って奇妙な値を示さなかった。

多数の盛土斜面に設置された空気圧ピエゾメータの測定記録の中の、各盛土断面において工事中に最大値を示す読み値をその時点のピエゾメータの土被り厚さの関係でプロットして図-37に示す。同図には有孔管式ピエゾメータで得られた読み値も併記してある。

空気圧ピエゾメータの読み値はHilfの式で求めた非排水間隙圧曲線より上位にプロットされた点が数多く存在し、有孔管式ピエゾメータで得た読み値と際立って異なっている。おそらくこの原因は、不飽和盛土に存在した空気の影響を受けた読み値となったと推定される。この間隙空気圧と間隙水圧の違いは、盛土斜面の安定評価の上では無視できないほどに大きい。特に $B=1.0$ を超える値は、全鉛直土被り圧を越える値であり、理論的にありえないことであるからである。明らかにこのような実測間隙圧は間隙空気圧であるといえよう。

### 5.3.6 金属腐食に起因する異常な間隙圧の記録例

#### (1) 問題点

ノールウェイ土質研究所(NGI)のDiBiagio(1977)<sup>34)</sup>は、それまでにすばらしい記録実績を何度も得てきた振動弦ピエゾメータを使用して、大失敗した経験を報告している。

軟らかい海成粘土に数mの水平間隔をもって同一深度に押し込み挿入したピエゾメータが、設置後しばらくして解釈の困難な奇妙な読み値を示した。その典型的な記録が図-38である。この3つのピエゾメータ間での粘土の間隙水圧の差は全くないと考えられるにもかかわらず、ピエゾメータAの読み値は突然の上昇を示し、Bは徐々に増加し、Cは測定の終わりごろになって急上昇している。その後にピエゾメータを引き抜いて各センサーの再校正をおこなったが、各センサーは正常な作動をした。

#### (2) ガルバノ電池作用

ピエゾメータが不良となった原因を詳しく検討した結果、原因はステンレス鋼からなる先端部分と一般鋼材からなる押し込みロッドの間のガルバノ電池作用であることがわかった。2つの異種金属と間隙水の中でガルバノ電池が形成され、金属腐食を促すと同時にステンレス鋼(ピエゾメータ)の陰電極からの水素ガスが発生したこと、腐食作用によって発生した電流が間隙水に電気浸透効果(electro-osmotic effect)に起因し

た浸透圧をもたらしたと考えられている。両者の効果がステンレス鋼のピエゾメータの周りの間隙圧を増加させ、また読み値の奇妙な変動をもたらした。

(3) 対策

このピエゾメータの異常を示した地盤は塩分濃度の濃い海成粘土地盤であり、低い塩分濃度のクイックレイ地盤では良好な結果が得られている。このように高い塩分濃度をもつ粘土がガルバノ電池効果に著しく寄与している。そこで、その効果を排除するために、図-39に示すようにロッドとピエゾメータの間に絶縁材としてナイロンブッシングを介在させて設置することにした。その後上記のような奇妙な記録は見られなかった。

5.3.7 海外において腐植土層のガスによる奇妙な間隙圧の記録が得られた事例

(1) 概要

Greeuw, et al. (2003)<sup>35)</sup> は、オランダ国内に広く分布する非常に軟らかい粘土地盤上に堤防盛土を建設し、工事中の安定を監視する目的で軟弱地盤中の間隙圧測定を実施した結果を報告している。

そこで得られた長期間の測定データには、外的条件では説明できない異常値が多く観察された。

(2) 機器と設置方法

測定箇所は堤防建設箇所である。そこで使用されたピエゾメータは、図-40に示すように、圧電半導体素子センサーを用い、約 $10^{-7}$  m/secの透水係数の高い空気侵入値を持つセラミックフィルターを持つピエゾメータである。また、このピエゾメータは、フィルターおよび受圧膜と水の接する空洞部分を完全に真空容器の水中で脱気をした完全飽和したピエゾメータである。この先端部を地表から所定の深さまで静的に押込む方法でピエゾメータを設置した。

(3) 測定結果

25個の計器を設置したが、そのうちの10個が最大2年間の観測期間に異常な読み値を示した。図-41は堤防の天端面より下の8mに設置した異常な読み値を示したピエゾメータの記録の一例である。

問題のピエゾメータでは、設置後約160日まではピエゾメータの間隙圧水頭面は標高で+3mに相当するほぼ一定の読み値の値を示していた。その後、外部の応力条件の変化がなかったにもかかわらず、約+6.5mまで水頭上昇を示した。この水頭標高は堤防の天端のレベルを超えた高さに相当する。その高い間隙圧読み値が480日まで続いた。しかしながら、それより浅い箇所に（報文には説明がない）設置したピエゾメータの記録は図に示すように測定全期間で約+3mの標高を持つ水頭面を保ち、全期間ほぼ一定の値を示した。

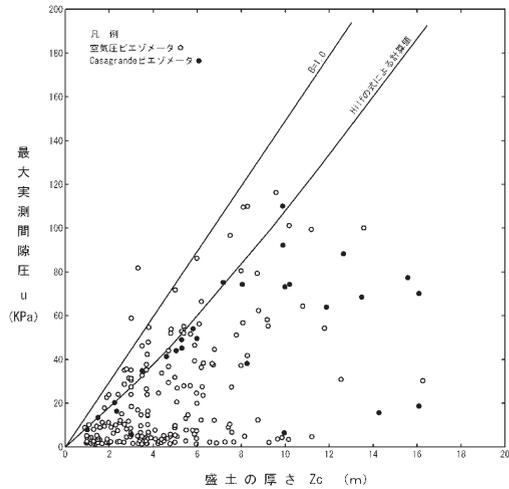


図-37 盛土工事中の各種ピエゾメータの最大間隙圧測定値

Fig. 37 Maximum pore pressure readings of two type piezometer during construction

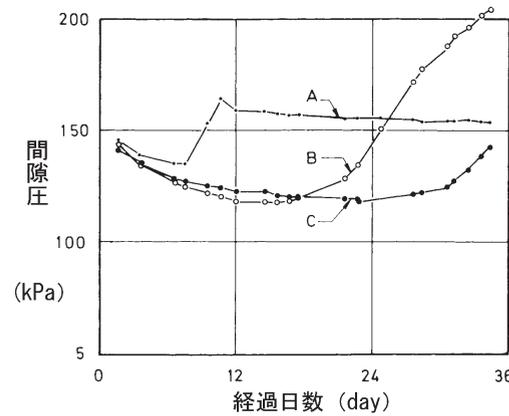


図-38 異種金属の電気腐食による奇妙な間隙圧の測定記録<sup>34)</sup>

Fig. 38 Erratic pore pressure observations caused by galvanic action between dissimilar metals in the piezometer and extension pipes

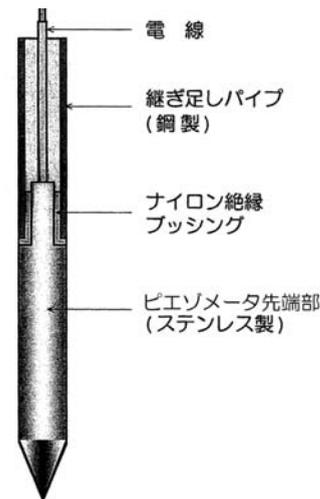


図-39 異種金属の接触を防止するためのナイロン絶縁ブッシング<sup>34)</sup>

Fig. 39 Nylon bushing used to prevent galvanic action between piezometer and extension pipes

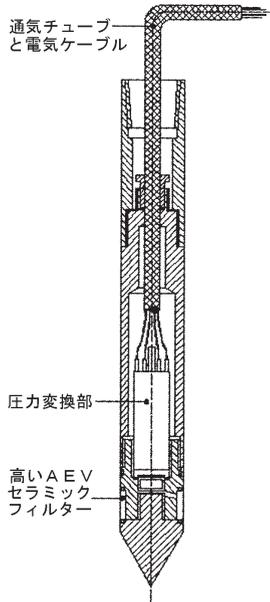


図-40 圧電半導体素子センサーを用い、高い空気侵入値フィルターを持つピエゾメータ<sup>35)</sup>

Fig. 40 Electric piezometer with piezo-resistive sensor and high air entry ceramic filter.

(4) 異常な読み値の原因

再利用を目的として上記の問題のピエゾメータを引き抜いて、室内でセンサーの照査をしたが、変換器は正常な応答を示した。また先端部のフィルターを水容器の中で外したとき、ガスの存在が確認された。

異常な読み値を示した箇所の地盤は有機物を多く含む粘土が大部分であり、有機質土の分解によるメタンガスがフィルターを通してピエゾメータの空洞部に侵入したことに起因して高い圧力の読み値になったことがその後の照査で明らかにされている。

5.3.8 海外のフィルダムにおいて長期間正常な測定記録が得られたと報告された事例

最大の間隙水圧観測実績をもつ土構造物はフィルダムであるといえる。間隙水圧の動向はフィルダムの建設工事中およびその後の安定に密接に関連するからである。この中で、正常な読み値を得たと報告された多くの観測例がある。

(1) 北欧のフィルダムの測定報告

北欧は寒冷地であるので、有孔管式および複管式ピエゾメータを現地に採用することは凍結という困難な問題を解消しなければならない。そこで凍結問題を容易に克服できる受圧膜式ピエゾメータが多用されたのは道理である。

Arhippainen, E. (1964)<sup>36)</sup> は、フィンランドにおける2つのアースダムの間隙圧を受圧膜式ピエゾメータによって測定した結果を報告しており、その測定結果は信頼できるものであったと報告している。

(2) オーストラリアのToomaフィルダムの測定報告

Pinkerton and MacConnell (1964)<sup>37)</sup> は、オーストラリアのアース・ロックフィルダムの間隙圧測定結果を次のように報告している。

高さ68mのToomaアース・ロックフィルダムはオーストラリア南東のSnowy山にある。そのダムの不透水ゾーンに使われた材料は、黒雲母花崗岩が完全に風化してできた残積土(residual soil)であり、塑性指数 $I_p=30$ の低塑性な無機質の盛土材料である。このダムの建設中(1958~1961年)およびその後の貯水面低下による間隙水圧の測定のために、米国開拓局の標準である複管式ピエゾメータ32個と受圧膜式ピエゾメータ12個を設置した(いずれのピエゾメータも低い空気侵入値フィルターを持つ)。

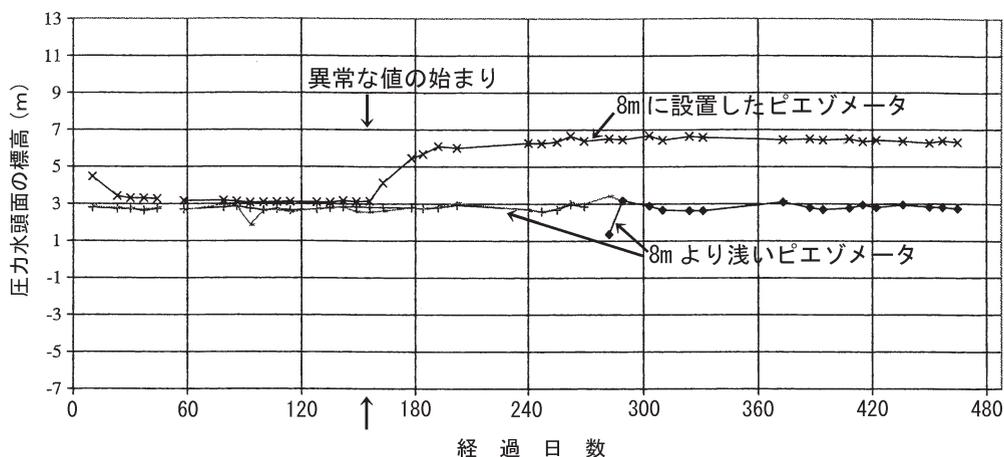


図-41 堤防直下の地盤の間隙圧の測定記録<sup>35)</sup>

Fig. 41 Pore pressure readings in the ground below the dike.

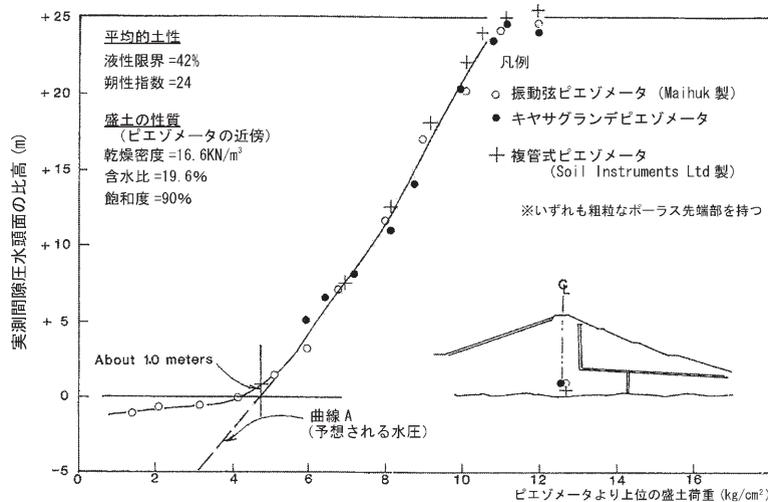


図-42 工事中に複管式、受圧膜式および有孔管式の3つのピエゾメータで観測された間隙圧の比較<sup>39)</sup>

Fig. 42 Comparison of pore pressure measured by twin-tube hydraulic, diaphragm and open standpipe piezometers

彼らは、建設工事中の受圧膜式ピエゾメータ（振動弦ピエゾメータ）の測定結果は複管式の読み値と同等であったことから、満足のいくものであったと報告している。

### (3) ブラジルの均一粘土ダムにおける3種のピエゾメータの測定結果の比較報告

#### 1) 背景

受圧膜式ピエゾメータがおおよそ1960年の初頭に広く使われ始めたとき、多数のダムで測定値の比較のためにいろいろなタイプのピエゾメータを並べて計測が行われた。特にその比較は間隙空気圧と間隙水圧の違いが最も大きい施工中に行われた。これらの経験が明らかにしたことは、ピエゾメータの違いによって測定された圧力差に、いくつかは明らかに空気圧を測定していた結果であったが、きわだった違いが無かったことである。Sherard (1981)<sup>38)</sup> は、アースフィルダム・ロックフィルダムに関する権威者として世界的に知られた技術者である。彼はそれまでのフィルダムで使用されたピエゾメータの実績をレビューして、受圧膜式ピエゾメータの優れた特徴を強調し、特に振動弦ピエゾメータが最も優れていることを主張している。そこで紹介された優れた証明としてブラジルの均一粘土ダムにおける比較実験結果を次のように紹介している。

#### 2) Sherard (1981) の報告

彼の経験の中で、有益な事例は、1958～1961年にブラジルで施工された高さ60mの均質な粘土ダムであるTres Marias Dam<sup>39)</sup>の経験であった。数箇所の代表箇所に受圧膜式ピエゾメータ（振動弦ピエゾメータ）、有孔管式および複管式ピエゾメータの3つのタイプのピエゾメータを設置し、施工中に測定を続けた。高い空気侵入値の細かいセ

ラミックフィルターを用いるという一般的処方が流布する前にTres Marias Damが建設され、振動弦および複管式ピエゾメータは当時一般的に使用された低い空気侵入値の粗粒なポーラスフィルターを用いて設置された。図-42は堤頂直下の底面近傍に設置された一組のピエゾメータから得られた測定値である。盛土材料は図-42に示したように最適含水比近傍で締め固められた中塑性の沖積起源の粘土(clay of alluvial origin)であった。測定値は実測間隙圧が水頭で約5mを越えた後では全てのピエゾメータは基本的にほぼ同じ値であった。すなわち、どの時間においても各ピエゾメータの示す読み値の差は最大でも水頭で約1.5mを超えない値であった。

Sherard (1981)はこのような結果を受圧膜式ピエゾメータが実用的に問題のない読み値を与える有力な証拠であると述べている。

#### 3) 著者の評価

Tres Marias Dam測定で確認されたことは、空気圧と水圧の差が大きくなる可能性を持つ細粒粘土質盛土であっても、間隙水圧が大気圧を水頭で約5mを越えた施工後であれば、その差が大きくないことを示しているのであって、正しい間隙水圧を示しているとはSherard (1981)は言っていない。数十メートルを超える高盛土が一般的であるアースダムにおいては測定読み値が空気圧であってもアースダムの間隙圧を代表するものとして評価しても実用的には問題がないことを示しているだけである。

しかし、アースダム以外の土木工事の分野では間隙水圧水頭が5mを超えない場合も多い。このような場合では間隙空気圧を対象地盤の代表間隙水圧として代用することは適切ではない。

(4) 高い空気侵入値フィルターを用いたノールウェイのフィルダムの測定事例

1) ピエゾメータの構造と設置方法

DiBiagio and Myrvoll (1985)<sup>40)</sup> はノールウェイの Svartevann ダムに設置したアースダム専用の振動弦ピエゾメータを紹介している。

アースダム専用に設計・製作された振動弦ピエゾメータは、機器の外壁面に作用する全応力によって不都合なひずみが生じないようにするために厚い壁のステンレススチール容器で保護され、非常に丈夫で、水密性の信号ケーブル、頑丈なシールおよび数個の細長い高空気侵入値フィルターを備えている (図-43)。

まず、この計器の出荷前に高い空気侵入値フィルターを完全に水で飽和した。現地では、同じ形状と寸法をもつ穿孔棒で盛土中に“受け穴 (socket)”を作り、ピエゾメータをその受け穴に圧着して、フィルターと土の密着を良くした。

2) 測定成果

そのピエゾメータは 1973 年に最初に設置され、それ以来 1976 年までに 28 個が設置された。1984 年に最終のチェックをしたときには、24 個の計器が良好な作動をしていた。

このようなフィルターの完全な飽和処置と設置方法によって、それらのピエゾメータの 10 年間の測定結果は図-44 に示すようにすばらしい結果であった。

3) 著者の評価

この報告で注目すべき条件はアースダム材料である。一般に北欧のアースダム材料は主に氷河の侵食・運搬・堆積土である氷堆石 (morain) である。このような材料は北欧の盛土材料として普遍的に使用されている。不飽和土材料であるが、粘着性のない細粒分を含む砂と礫からなる無機質な材料で、ガスの発生に寄与する有機物をほとんど含んでいない材料であることが注目される。このような特徴を持つ地盤であれば、ピエゾメータの構造と設置方法が適切であれば、受圧膜式ピエゾメータによって適切な間隙水圧の読み値が求まることを示唆していると考えられる。

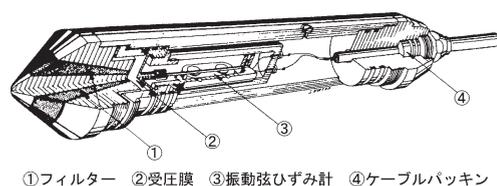


図-43 Svartevannダムのために製作された振動弦ピエゾメータ<sup>40)</sup>  
Fig. 43 Vibrating wire piezometer designed for Svartevann Dam

5.3.9 低い空気侵入値のフィルターを備えた受圧膜式ピエゾメータの間隙圧読み値の室内実験

Bishop et al. (1964)<sup>33)</sup> は、低い空気侵入値 (AEV=10 kPa) フィルターを備えた受圧膜式ピエゾメータの間隙圧読み値がどのような意味があるのかを室内試験によって明らかにしている。

この室内試験の内容は、初めに、内径 100mm のモールド中で締め固めた粘土供試体中に、牛脚油 (neatsfoot oil) で金属フィルターと先端部の空隙を飽和した振動弦ピエゾメータ先端部を圧入し、三軸圧縮試験装置にセットした。三軸圧縮試験装置には供試体のセルの外側で間隙水圧と間隙空気圧の両者の測定が出来る仕掛けを備えている。

次に、供試体を非排水条件下で等方圧縮して、それぞれの圧縮応力に対するピエゾメータの読み値を測定した。

非排水条件下で拘束圧を増加し、それぞれの拘束圧で圧力平衡に達したときの間隙空気圧と間隙水圧の測定を三軸セルの外側の圧力計で測定した。その結果が図-45 である。この図は明らかに次のことを示している。ピエゾメータの読み値は空気圧に非常に近似していること、および、空気圧と間隙水圧の差が大ききところでは水圧とは全く異なる圧力であることである。

5.3.10 低い空気侵入値フィルターを持つ受圧膜式ピエゾメータと高い空気侵入値フィルターを持つ複管式ピエゾメータの測定比較

空気圧と水圧の差が最大となる環境は間隙水圧が最も低い値となる時の盛土工事の初期の頃である。

Penman (1979)<sup>41)</sup> は、低い空気侵入値フィルターを持つ振動弦ピエゾメータを高い空気侵入値を持つ複管式ピエゾメータの近傍に設置して、盛土立ち上げ中の読み値を比較している。この比較の目的は、前者は間隙空気圧を、後者は間隙水圧を測定していることを期待したものである。

ピエゾメータ先端部の上に 14m の盛土が嵩上げされた期間に両ピエゾメータの測定を頻繁に行った。

測定結果は図-46 に示すとおりであった。設置当初の

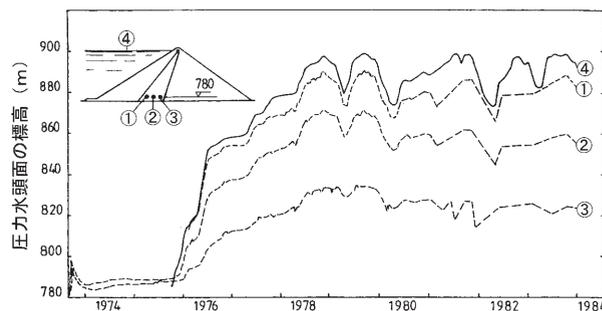


図-44 Svartevannダムの止水ゾーン底部の間隙圧と時間<sup>40)</sup>  
Fig. 44 Pore pressure readings with time in the bottom part of impervious zone of Svartevann Dam.

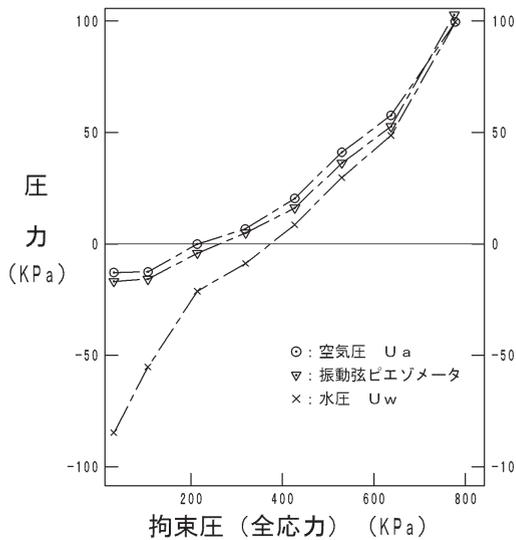


図-45 Sasumua粘土試料中のピエゾメータ読み値、間隙空気圧、および間隙水圧の拘束圧変化<sup>33)</sup>  
 Fig. 45 Variation of pore air pressure, pore water pressure and the readings of an electrical piezometer in a sample of Sasuma clay

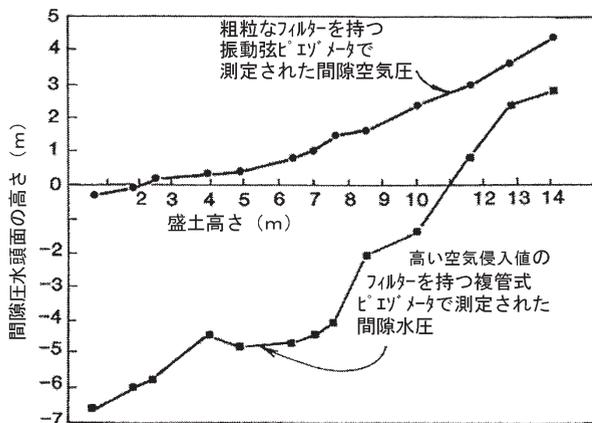


図-46 Chelmarsh ダムの不透水部に隣接して設置されたピエゾメータの間隙空気圧と間隙水圧の測定<sup>41)</sup>  
 Fig. 46 Measurements of pore air pressure and pore water pressure in side by side piezometers in the impervious section of Chelmarsh Dam

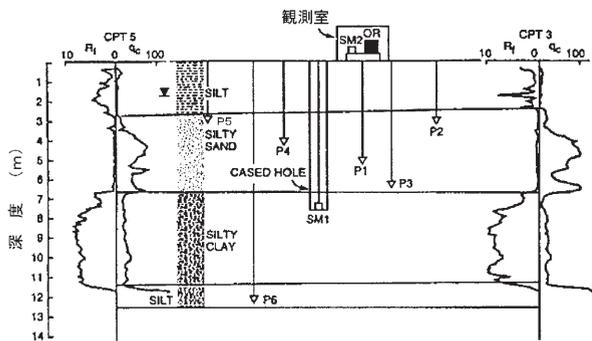


図-47 Wildlife サイトの地盤の断面と計測器の配置<sup>43)</sup>  
 Fig. 47 Cross section of Wildlife site showing sediment stratigraphy and location of accelerometers and piezometers.

間隙水圧水頭は大気圧より小さく6mの負の水頭を持ち、当初の間隙空気圧はおおよそ大気圧に等しい。盛土の高さが増加するにつれて、間隙水圧が間隙空気圧よりも速く上昇している。ピエゾメータ先端部を覆う盛土が11mとなる時点まで間隙水圧は大気圧まで上昇し、間隙空気圧は水頭で約3mの圧力になった。盛土高さが14mに増加したとき、間隙空気圧と間隙水圧の水頭差は1.5mまでに小さくなった。盛土の完全飽和条件が達成されたときには、最終的に両ピエゾメータの読み値は近似することは明らかである。

5.3.11 地震による液状化地盤の間隙圧測定事例

(1) 背景

地震時の地盤の間隙水圧を測定する場合、タイムラグの最も小さい受圧膜式ピエゾメータだけが適したピエゾメータである。

地震時の間隙圧測定は世界でこれまで少なくとも9箇所で試みられ、その中で液状化した地盤の間隙圧が実測された世界で唯一の貴重な測定データは、米国、南カルフォルニアのImperial ValleyにあるWildlifeで得られている<sup>42)</sup>。

(2) 測定箇所の地盤と地震環境

Youd and Holzer (1994)<sup>43)</sup> は、Wildlifeで実施した間隙圧測定方法の詳細と観測結果を以下のように報告している：

この地区は過去90年間に平均的に7年に1回の間隔で中規模から大規模の地震が起こっているところである。1982年に米国地質調査所(USGS)がその地区の液状化しやすい位置にピエゾメータを設置した。

図-47<sup>43)</sup> は地盤構成の断面に計測機器の位置を示している。主な地盤構成は2.7m厚さのシルト～粘土質シルト、その下に3.3m厚さの液状化しやすいシルト質砂が発達し、そのシルト質砂の下には5m厚さの硬質粘土層が分布する。

(3) ピエゾメータの構造と設置方法

計測機器の構成は2個の三方向力平衡式加速度計(SM)と6個の電気式ピエゾメータ(P)で構成される。設置したピエゾメータの感知部は、±100kPa～345kPaの測定領域を持つDatametrix model ABユニットで、その検出部品はステンレス膜にひずみゲージを接着した受圧膜である。圧力変換器を組み込んで独自に設計製作したピエゾメータの構造は図-48<sup>43)</sup>に示すとおりである。

その設計において考慮したことは：

- ① 地震時の振動中にピエゾメータ先端部と周辺地盤の間で慣性力による何らかの相互干渉が発生することを防ぐために、軽い重量の材料であるプラスチック

ケ材の一種であるデリン (Delrin) を用いた。

- ② 先端部は 10cm<sup>2</sup> 断面積を持つ円錐形とした。
- ③ 直径 3mm の孔を 6 箇所に開け、外壁面と受圧膜室との導通を図り、地盤の水と直結した。
- ④ ピエゾメータ先端部を圧入するときに、孔に土が侵入しないようにすることと、もし何らかの気泡が存在したときに気泡が逃げやすくするために、6 箇所の孔から受圧膜に向かって下降傾斜した孔とした。空気を逃げやすくするためにその孔にはフィルターを取り付けずに開放したままとし、空気または水の移動を妨げる障害を除いた。

間隙水圧計を地盤に設置するときに工夫された仕様は：

- ① 挿入する直前にそれぞれのピエゾメータ先端部を清水で満たした容器に鉛直に並べて置き、それぞれを回転しながら容器の側面に軽く打ち付けて、器内の気泡を追い出し、その作業をその気泡が出なくなるまで続けた。(この方法では残存空気と器内壁面に付着している小さな気泡を取り除くことが出来ない。このことがこの測定の批判を招くことになった。)
- ② 孔内挿入中に水で満たされることを確実にするために、水で満たした薄いプラスチック製の袋でピエゾメータの先端部を覆い、ロッドと電線ケーブルを組み立てた。その組立品をボーリングロッドに取り付けて、孔底より 0.2～0.3m 押し込んだ。この押し込みによって鋭く先のとがった先端が水で満たされた袋を簡単に破ることになる。ボーリングロッドと挿入道具を注意深く引き上げてピエゾメータをセットした。
- ③ ボーリング孔をセメント・ベントナイトグラウトで充填し、密封した。

このようにピエゾメータの設計製作および設置方法をもって、地震時液状化現象の間隙水圧測定準備が行われた。

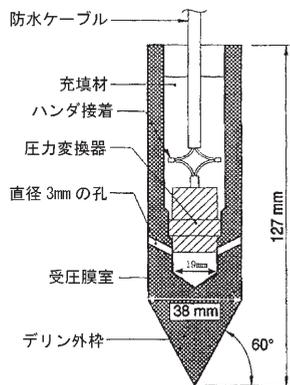


図-48 Wildlife サイトのために製作されたピエゾメータポイント<sup>43)</sup>  
Fig. 48 Cross section of USGS piezometer tip

(4) 測定成果とその評価

測定準備を整えて 5 年後の 1987 年 11 月に Superstition Hills 地震が発生し、測定現地の地表に噴砂をもたらす液状化現象が確認された。

液状化しやすいシルト質砂には 5 個のピエゾメータを設置したが、その中の P4 の計器以外は正常な記録が得られた。南北方向の地表加速度と正常な読み取りの出来た 4 つのピエゾメータの間隙圧の時間的経過を図-49 に示した。

著しい過剰間隙圧は計器の起動後最も強い加速度がこのサイトを揺すった時から 13.6 秒経過した後であった。間隙圧は上昇を続けるが、その上昇速度はゆっくりで実測間隙圧が初めの全土被り圧に近づいた時間は計器起動後 60～90 秒後であった。時間的な遅れがあったけれども、液状化現象を説明する有力な証拠の 1 つである地盤の有効応力がゼロとなることが明らかにされた。この成果は世界で唯一の記録でありすばらしいことであるといえる。

強い加速度パルスが終了したとき (起動後約 26.5 秒経過した時)、液状化層の下部でモニターされた間隙圧は初期の有効土被り圧の 50% まで上昇し、またその上部では約 70% まで上昇した。地盤工学の専門家にとって驚くべきことは記録された間隙圧がその後も同時に上昇し続けたことである。

このような時間的遅れを示した実測記録に対して、室内実験および遠心载荷モデル試験で確認される経験を基にして、Scott et al. (1995)<sup>44)</sup> は、そのピエゾメータは正確な自然のままの間隙圧を測定していないので

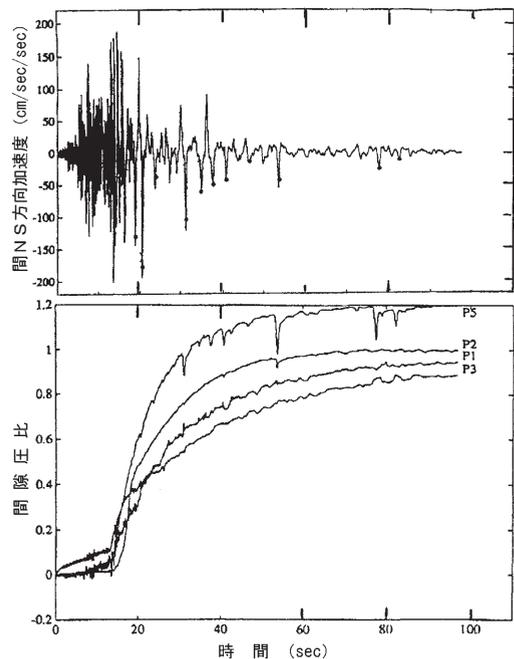


図-49 1987 Superstition Hills 地震において観測された加速度と間隙圧の時間的記録<sup>43)</sup>  
Fig. 49 Acceleration and pore pressure traces recorded during 1987 Superstition Hills Earthquake

はないかと疑っている。上述したピエゾメータの飽和のために行われた処方は、完全飽和していたという保証が無く、偶然性を期待しているに過ぎないと批判している。

### 5.3.12 受圧膜式ピエゾメータの実測間隙圧に関する現状の評価

#### (1) 受圧膜式ピエゾメータの欠点

受圧膜式ピエゾメータの共通した欠点は、上記の事例で明らかのように、先端部へのガスの侵入を防ぐことが不可能であることである。高い空気侵入値を持つフィルターを備え、器内の空隙を完全に脱気水で満たして設置すれば、短期的にはガス圧の影響を除くことが出来よう。しかし、長期測定の場合は高い空気侵入値フィルターを使用したとしても水に溶解したガスの侵入を防ぐことが出来ない。

#### (2) 諸外国のフィルダムにおける評価

このような欠点が明らかであるにもかかわらず、諸外国のアースダムなどで広く使用されている理由は、対象土構造物の規模が大きく、測定間隙圧の値が大きいので、間隙圧が正常な間隙水圧の値よりも高い値であっても、工学的には無視できる程度の差であるからである。また、ガス圧の影響が無視できるほどに小さい理由のひとつは、アースダムに使用する盛土材料が、氷河作用で堆積した氷堆石、岩の風化によって形成された残積土および河川堆積土などの低塑性の無機質な粘土であることが考えられる。

通常の河川堤防や道路盛土および埋立地の軟弱地盤などの小規模の土構造物においては、間隙ガス圧をもってその地盤を代表する間隙水圧として評価することは、あまりにも過大な圧力を採用したこととなり、到底受け入れられないであろう。

#### (3) 我が国の地盤堆積環境の違い

我が国は温暖な気候にあり、河川、海岸、海中堆積物には多くの有機物を混入している。そのことは土中に含まれるガスが比較的多い環境にあると言える。また、我が国には火山が多数存在し、火山噴火にともなう火山灰が全国に降り積もっている。このような土は高塑性の粘土を構成し、非常に細かい空気又は火山ガスが保持されている。我が国のこのような特異な土壌生成環境は、受圧膜式ピエゾメータの測定値に大きな影響を与えると考えられる。これは、欧米諸国、大陸諸国の環境とは際立った違いである。

したがって、受圧膜式ピエゾメータを使用して適切な間隙水圧を求めようとする場合は、我が国の地盤環境に適した新たな工夫が必要となるであろう。

## 6. 正しい間隙水圧を測定するため計器の選定と新たな工夫の提案

### 6.1 基本的事項

地盤の間隙水圧の野外の実態を明らかにすることは、地盤工学的知識を真の実学に導くための必須条件である。工学的目的に則した合理的な間隙水圧を求めるための必要条件を改めて提示すれば：

- ① ピエゾメータで計測すること；すなわち測定区間を限定してそれ以外の部分の影響を受けないようにシールされていること
- ② 間隙ガス圧の影響のない、または影響の小さい水圧測定値であること
- ③ 現場の工学的目的に則した時間応答をすること

この3つの基本的事項を満足することが第一に配慮されなければならない。

次いで、設置場所の環境に適し、経済的に許される機器を選択すると同時に、現地の地盤条件に対応した設置方法と測定・記録方法を決定しなければならない。

### 6.2 ピエゾメータの選択

地盤の中の間隙水圧には大気圧を原点として正と負の2つの圧力が存在する。大部分の工学的問題は間隙水圧が正の圧力を持つ場合であり、負の圧力は切り取り後の地盤および不飽和土に関連する圧力で特異な問題として取り扱われている。

負の間隙圧を求めようとすれば、有孔管式ピエゾメータは一般的に困難であり、高い空気侵入値フィルターを持つ複管式か、または受圧膜式ピエゾメータでなければならない。しかし受圧膜式ピエゾメータを用いて負の圧力を測定する場合は、短期間の測定に限定され、その値の信頼性は比較的低い。

これまで使用されたピエゾメータは、有孔管式、複管式、および受圧膜式の3つに大別される。ガス圧の影響の少ない正しい正の間隙水圧を求めようとすれば、当然、有孔管式または複管式ピエゾメータを選択すべきである。しかしながら、設置方法、維持管理、測定の利便性および設置環境に制限がないという理由から受圧膜式が便宜的に世界で最も多用されているのが現状である。そのために、市販されている間隙水圧計はほとんど受圧膜式ピエゾメータである。したがって、受圧膜式ピエゾメータを選択した場合、どのような設計・設置をするべきかについて考えてみよう。

### 6.3 受圧膜式ピエゾメータの設計と設置方法の提案

受圧膜式ピエゾメータを採用する場合、間隙ガス圧の影響を受けた読み値である可能性を認識しなければならない。

そこで、ガス圧の影響を最小とするための受圧膜式ピエゾメータの構造と設置方法を改めて検討することが望まれる。その基本的な考え方は、ガスの侵入を阻止することではなく、侵入したガスがピエゾメータの器内に貯留することがないように構造とすることと、仮に少々集積しても受圧膜の読み値に極力影響を与えないように受圧膜の向きを変更することが考えられる。

#### 6.3.1 飽和した自然地盤の正の間隙水圧を測定する場合

自然地盤の間隙水圧を測定する場合、ボーリング孔に設置されるのが一般的である。

この場合、ガス圧の影響を少なくする工夫として考えられることは(図-50参照)：

- ① 先端部に侵入したガスが外に逃げ易くすることを考えて、組み込むフィルターは基本的に空気侵入値の低い(粗い)フィルターを用いる(Mikkelsen, et al. 1983)<sup>25)</sup>。
- ② 侵入したガスが器外に逃げ易くするための更なる処置として、侵入したガスが受圧膜に影響を与える

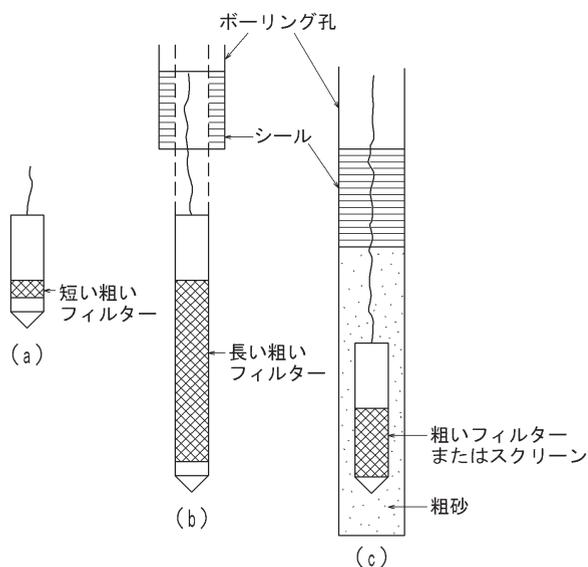


図-50 受圧膜ピエゾメータの改良案：フィルターの長さ変更と砂ポケットに包まれたフィルター

Fig. 50 Improvement of diaphragm piezometer : (a) a general design of commercially available diaphragm piezometer , (b) refinement by a longer filter or (c) point installed in sand pocket.

までの時間的余裕を与えるためにフィルターの面積を大きくする。すなわち、フィルターの長さを長くする(Greeuwet al, 2003)<sup>35)</sup>。

国内外のメーカーが市販する受圧膜式ピエゾメータのフィルターの面積は余りにも小さく、器内に侵入したガスの逃げ場がない。受圧膜式を使用するにあたってはあらかじめ長いフィルターに改造することが推奨される。

川崎市東亜燃料400号地のオイルタンク設置のためのプレローディング工法の間隙圧のモニタリングにおいては、市販機器の短いフィルター部分を、30cm長さの低い空気侵入値金属フィルターに取り替えた。そして、地盤に圧入するまでに計器内の空隙とフィルターが脱気水で飽和された状態を確保する処置を施した。それを沖積粘土層に直接圧入して設置して、約3年間に亘りCasagrandeピエゾメータの読み値とほぼ同等の正常な値を得た実績がある。

- ③ 最も無難なピエゾメータ設置方法は、穿孔した空間に飽和した砂のフィルターポケットを設けて、その砂に適したフィルター条件を備えたスクリーンをピエゾメータに組み込むことである。これによって、間隙水圧計の器内に侵入したガスは外に自由に入出力できる。

その場合の充填砂の粒度特性とスクリーンのスロット幅の関係は一般的に知られたフィルター条件を満足するための次式を参考とすることである：

$$\frac{\text{フィルター材の 85\% 粒径}}{\text{スロット幅}} > 1.2$$

- ④ 一般にその組み込みの容易な構造とするために受圧膜面は上端部で下に向けてセットされ、また、膜部分で上向きに窪みを持つのが一般的である。これは、器内に侵入したガスを受圧膜面に止まり易くしている。このような構造を改めて、図-51に示すように、鉛直面の受圧膜を持つ構造とするのも一案であろう。

岩崎他(2006)<sup>45)</sup>は鉛直面の受圧膜を持ち、砂のフィルター材に適合したスクリーンを備えたピエゾメータを製作している(図-52)。それをボーリング孔に設置して、約4年半の長期的測定結果を報告している。結果は併設して設置した有孔管式ピエゾメータの測定結果と同等の成果を得ている。

#### 6.3.2 建設中の盛土地盤の正の間隙水圧を測定する場合

一般に盛土は不飽和土である。したがって、間隙水圧は、盛土開始当初は負の間隙水圧を持つのが一般的である。盛

土工事中の負の間隙圧は安定を増加させるのに寄与しており、その時期は通常工学的に安定問題のない時期である。問題となる時期は、盛土の嵩上げの進展と伴に増加する正の間隙圧発生時期である。

盛土嵩上げ途中の盛土面直下に、受圧膜式ピエゾメータを直接設置する場合は、粗いフィルターであっても先端部を粘土に直接押し込むべきでない。空気が混在する粘土に先端部分を直接押し込むことは、水の侵入を拒むメニスカスをもった粘土がフィルターが目詰まりを促すからである。その場合は、あらかじめ受け穴を手掘りして先端部を置いて、孔壁とピエゾメータの周囲に水で飽和した砂フィルター材を充填することが推奨される。また、ガスまたは空気が受圧膜に止まらないようにするために、計器を鉛直に立てないで、横に据えることも考えられる。

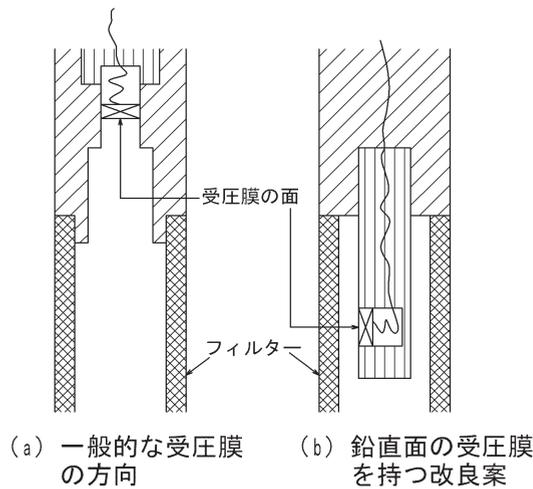


図-51 一般的な受圧膜面の向きとその変更

Fig. 51 A common direction of a diaphragm face and change of its direction.

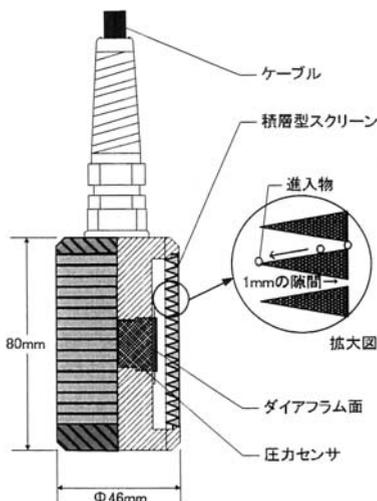


図-52 受圧膜式ピエゾメータの改良の試案<sup>45)</sup>

Fig. 52 One of a suggestive improvement of diaphragm piezometer with a combination of coarse screen and clean sand pocket

### 6.3.3 軟岩の切取り斜面の短期的負の間隙圧を測定する場合

切取り斜面は、地盤の切取りにともなう地盤応力の減少に追従して、体積膨張をしようとする。この体積膨張現象は飽和した地盤の間隙水圧を大気圧よりも小さな圧力に導く。これは大気圧を原点としたマイナスの圧力、すなわち、負の圧力である。この負の圧力を測定する場合、当然、水で飽和した高い空気侵入値 ( $AEV \geq 100 \sim 200$  kPa) のセラミックフィルターを備え、フィルターと先端部の空隙を脱気水で飽和させた先端部であることが必要である。

完全に飽和した高い空気侵入値フィルターをもつピエゾメータは不飽和土に直接圧入したとしてもフィルターが目詰まりは起こらない。このことはピエゾコン貫入試験で確認されたことである。

現地に設置する場合は、先端部の形状より少し小さい同等の形状を持つ“受け穴”を事前に掘削し、フィルター面と盛土掘削面の密着を図ることが必要である。密着を確実にするために、液性限界近傍の含水比で現地の盛土材を練って、それを脱気処方した粘土を“受け穴”に埋めて、その穴に先端部を圧入することである。受け穴に設置した後で、その上部を湿潤石膏またはベントナイトセメントなどで十分に密閉する。

当然、複管式ピエゾメータが理想的であるが、上記の構造と設置方法を併用した受圧膜式ピエゾメータであっても短期間であれば、負の間隙水圧測定は十分に可能である。

追記) Sherard(1981)<sup>38)</sup> は、不飽和盛土からなるアースフィルダムにおいて、上記の構造と設置方法を満たした条件が揃えば、受圧膜式ピエゾメータであっても負圧の間隙圧が長期間に亘り成功裏に測定できた例を詳しく紹介している。

### 6.3.4 地震時液状化時の間隙圧測定の場合

5.3.11に紹介したWildlifeにおける測定は、世界で初めての液状化発生時の間隙圧を成功裏に捉えたものである。しかしながら、地震時ピーク加速度よりも間隙圧が遅れて発生していることで、その測定結果に疑問が投げられている。その最も大きな理由は、計器内の飽和が完全であるという確証が無いことが上げられている。

飽和の維持を完全にするためには複管式-受圧膜式の組み合わせが唯一の解決方法である。高い空気侵入値を持つフィルターを採用し、ピエゾメータ先端部にチェックバルブ(電動式に開け閉めが出来るバルブ)を取り付ける。

追記) この複合ピエゾメータは、4.4節で紹介したGeotechnical Observation社のピエゾメータがあるが、砂地盤に直接打設貫入出来る構造とはなっていない。

圧力センサーは予測される間隙圧の10倍以上のフルスケールの感度を持たせて、圧力変換器の圧力変化によるひずみ(水の出し入れ)を少なくする。これによって、タイムラグを最小にする。

計器内のガスを除去するためのフラッシングによる脱気作業は、高い空気侵入値フィルターを採用すれば、数ヶ月間に1度で充分であろう。これによって計器内のガスの侵入防止が出来ることから、地震が発生するまで脱気作業を定期的に継続して、地震発生を待つということは容易に可能であろう。

砂地盤の計器設置にともなう密度変化を最小にするためにはWildlifeで採用したように、先端部をコーン形状にして、砂地盤に静的に圧入することが最も実用的であり、あわせてフィルター面と地盤の密着が容易に図ることができる。

このようなピエゾメータの構造と設置方法が現状のところ最良の対応であろうと考えられる。

## 7. あとがき

正しく合理的に地盤の間隙水圧を測定するためには、地盤条件、測定目的、維持管理、利便性、予算等多くの要素を勘案して計画を立てなければならない。これまでの計測ではセンサーの機能を優先して選定されているように思われる。しかし、ピエゾメータ先端部の種類の選択に加えて、現地における設置手法も重要な要素であることを忘れてはならない。このために、国内外の成功例と失敗例を紹介して、今後のピエゾメータの計画に役立てようとした。特に強調したことは、間隙ガス圧(または間隙空気圧)の影響に注目することである。欧米各国の地盤は我が国の地盤と異なり比較的含有するガスの量が少ない。我が国の地盤は前述したように、一般にガスの含有量が多い。したがって、我が国で普及している電気式ピエゾメータの採用にあたっては、それなりのフィルターの構造および設置方法に新たな工夫が必要であるといえよう。

## 謝辞

本文は、応用地質株式会社入社以来の約40年間に得られた著者の経験と主に海外の関連文献を基にしている。この長い期間に、個別の現場測定方法について貴重な御教示を賜わり、また多くの海外の関連文献を紹介していただいた故大矢暁氏(元応用地質株式会社社長)に深く感謝します。よりよい現場調査と現場計測にむけての大矢氏の愛着と熱情は、著者が長期間にわたり現場測定に興味を保ち得た最大の源であった。

また、本文の初稿を校閲し、多くの説明不足箇所と不適切な表現について貴重な指摘をして頂いた松澤宏博士

(現在、応用地質株式会社 技術本部技師長室 技術参与) および古田一郎氏(現在、応用地質株式会社 東京本社 技術センター 地盤解析部長)に厚く御礼申し上げます。両氏の貴重な指摘と提案を受けた本文の大幅な修正を行うことによって、より具体的で分かり易い報文に仕上げることができた。

## 参 考 文 献

- 1) 川上 浩(2002)“地すべり地における地下水の挙動と安定解析の基本” 地すべり事例研究—安定性評価と対策工の考え方—地盤工学会, 中部支部, pp.33-53.
- 2) 申 潤植(1989)「地すべり工学」山海堂, pp70-115.
- 3) Chapius,R.P.(1998): "Overdamped slug test in monitoring wells: review of interpretation methods with mathematical, physical and numerical analysis of storativity influence", Can. Geotech. J. pp.697-719.
- 4) 通商産業相持越鉦山たい積場事故調査委員会(1978)“持越鉦山たい積場事故調査報告書
- 5) Dunnycliff, J. and Green G, E.(1988): 「Geotechnical instrumentation for monitoring field performance」 John Wiley & Sons
- 6) アースマニュアル翻訳分科会(1977): 「アースマニュアル」米国内務省開拓局編 1974年版, 社団法人日本大ダム会議訳 pp.531-570.
- 7) Hvorslev, M. J.(1951): "Time lag and soil permeability in ground water observations" U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station ,Vicksburg, Ms. Bull. No.36.
- 8) 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, pp.53-58.
- 9) MacKenna,G.T.(1995): "Grouted-in installation of piezometers in boreholes", Can.Geotech. J. Vol.32, pp.355-363.
- 10) Terzaghi K. and Peck, R.B.(1967): 「Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed.」 Jhon Wiley & Sons, New York.
- 11) Gibbs,H.G., Hilf,I.W., Holtz,W.G. and Walker, F.C.(1960): "Shear strength of cohesive soils", Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, Boulder, Colorado, pp.33-162.
- 12) Nagarkar,P.K., Kulkarni,R.P., Kulkarni,M.V.

- and Kulkarni,D.G. (1981): "Failures of a Monozone earth dam of expansive clay" Procs. 10th, ICSMFE, Stockholm, Vol.13, pp.481-494.
- 13) Casagrande,A.(1949): "Soil mechanics in the design and construction of the Logan Airport", J. Boston Soc. Civ. Engrs, 36, No.2. (Appendix description: A non-metallic piezometer for measuring pore pressure)
- 14) Parry R.H.G.(1971): "A simple driven piezometer" Geotechnique, Vol.21, No.2, pp.163-167.
- 15) Vaughan,P.R.(1969): "A note on sealing piezometers in borehole" Geotechnique,Vol.19, No.3. pp.405-413.
- 16) Bjerrum,L, Kenny,T. and Kjaernsli,B.(1965): "Measuring instrumentations for strutted excavations, Procs. ASCE Vol.91, SM1, pp.111-141.
- 17) Kallstenius,T. and Wallgon,A.(1956): "Pore water pressure measurement in field investigations" Royal Swedish Geotechnical Institute No.13.
- 18) リチャード・グッドマン著, 赤木俊允訳 (2006) 「カール・テルツァーギの生涯」地盤工学会, pp.274-277.
- 19) 市原松平, 植下協 (1964) "5.2 節: 間隙水圧計ならびにその測定法" 基礎工学ハンドブック (村山朗郎, 大崎順彦編) 朝倉書店, pp.256-306.
- 20) Bishop,A.W.(1969): "Pore pressure measurements in the field and in the laboratory", Specialty sessions, Procs. 7th ICSMFE, Mexico, Vol.3, pp.427-444.
- 21) Patton,F.D. and Smith,H.R.(1986): "Design considerations and the quality of data from multiple-level groundwater monitoring wells",Procs. ASTM Symp. on Field Methods for Groundwater Contamination Studies and their Standardization , Cocoa Beach, FL
- 22) Mikkelsen,P.E. and Green,G.E. (2003): "Piezometers in fully grouted boreholes", Procs. 6th Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, Oslo, pp.545-554.
- 23) Ridley,A.M., Dineen,K. Burland, J.B. and Vaughan,P.R.(2003): "Soil matrix suction: some examples of its measurement and application in geotechnical engineering", Geotechnique, Vol.53, No.2, pp.241-253.
- 24) Marsland, A. (1973): "Instrumentation of flood defence banks along the river "Thames Procs. Symp. on Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, organized by British Geotechnical Society, Butterworths pp.287-303.
- 25) Mikkelsen,P.E. and Wilson,S.D.(1983): "Field instrumentation : Accuracy, Performance, Automation and Procurement", Procs. of An Int. Symp. on Field measurements in Geomechanics, Zurich, pp.290-311.
- 26) 谷口巖, 中山哲, 高野和一, 菅原紀明 (1997) "間隙水圧測定による盛土の工学的性質の評価" 地盤工学会, 「土と基礎」第45巻, 第11号, pp.13-16.
- 27) 谷口巖, 中山哲, 高野和一, 菅原紀明 (1998) "間隙水圧計による盛土の斜面の安定管理", 地盤工学会, 「土と基礎」第46巻, 第4号, pp.5-8.
- 28) Hilf,J.W.(1948): "Estimating construction pore pressure in rolled dams", Procs. 2nd ICSMFE, Rotterdam, Vol.3, pp.234-240.
- 29) Vaughan,P.R. and Walbanche(1973): "Pore pressure change and the delayed failure of cutting slopes in overconsolidated clay" Geotechnique, Vol.23, No.4, pp.531-539.
- 30) Simons,N., Menzies,B. and Matthews(2001), 「Soil and Rock Slope Engineering」 Part I : Soil Slopes, Thomas Telford
- 31) 菅原紀明 (2004) : "野外計測法から見た土構造物の維持管理" 地盤工学会, 「土と基礎」第52巻, 第6号, pp.1-6.
- 32) 齊藤迪孝(1979) : "現場計測—土質工学30年の歩み" 土質工学会創立30周年記念特別号, 「土と基礎」通巻263, pp.107-110.
- 33) Bishop,A.W., Kennard,M.F. and Vaughan (1964): "Developments in the measurement and interpretation of pore pressure in earth dams", Transactions, 8th International Congress on Large Dams, Vol.2, pp.47-72.
- 34) DiBiagio,E.(1977): "Field Instrumentation –A geotechnical tool" the Norwegian Geotechnical Institute Publication No.115, Oslo, pp.29-40.
- 35) Greeuw,G., Sthrijver,R.R. and Peters, A.J.M. (2003): "Performance of pore pressure transducers in soft clay and peat", Procs. 6th Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, pp.507-511.
- 36) Arhippainen E.(1964): "Pore pressure measurements in two Finnish earth-fill dams", Transactions, 8 th International Congress on

- Large Dams, pp.503-515. London, pp.565-566.
- 37) Pinkerton, I.L. and MacConnell, A.D. (1964): "Behaviour of Tooma dam," Transactions, 8th International Congress on Large Dams, pp.351-357.
- 38) Sherard, J.L. (1981): "Piezometers in earth dam impervious sections" Procs of Recent Developments in Geotechnical Engineering for Hydro Projects; Embankment Dam Instrumentation Performance, Geotechnical Engineering Division, ASCE, May 11 and 12, pp.125-165.
- 39) Areas, O.M. (1963): "Piezometers em Tres Marias", Procs. 2nd Pan American Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brazil, Vol.2, pp.413-440.
- 40) DiBiagio, E. and Myrvoll, F. (1985): "Instrumentation techniques and equipment used to monitor the performance of Norwegian embankment dams", Transactions 15th, International Congress on Large Dams, Lausanne, Vol.1, pp. 1169-1196.
- 41) Penman, A.D.M. (1979): "Construction pore pressures in two earth dams", Conf. on Clay Fills, The Institution of Civil Engineers, London, pp.177-188.
- 42) Holzer, T.L., Youd, T.L. and Bennett, M.J. (1988): "Insitu measurement of pore pressure build-up during liquefaction, Procs. 20th Joint Meeting of U.S.-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, Gaithersburg, Md, pp.214-222.
- 43) Youd, T.L. and Holzer, T.L. (1994): "Piezometer performance at Wildlife liquefaction site, California", J. Geotech. Engng. ASCE Vol.120, No.6, pp.975-995.
- 44) Scott, R.F. and Hushmand, B. (1995): "Discussion on" Piezometer performance at Wildlife liquefaction site, California", J. Geotech. Engng. ASCE, Vol.121, No.6, pp.912-919.
- 45) 岩崎智久, 伊藤義行, 堀之内富夫 (2006): "積層型スクリーンを用いた間隙水圧計, 第41回地盤工学研究発表会, 鹿児島, pp.1137-1138.
- 46) 山口拍樹, 大根義男 (1975): 「フィルダムの設計および施工」技報堂, pp.450-455.
- 47) Cooling, L.F. (1962): "Field measurements in soil mechanics", Geotechnique, Vol.12, June, pp.77-103.
- 48) DiBiagio, E. (1974): Contribution to discussion, in Procs of the Symp. on Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, British Geotechnical Society, Butterworths,

附録  
間隙水圧計発展の歴史  
History of piezometer

年代	有孔管式ピエゾメータ (open standpipe piezometer)	複管式ピエゾメータ (twin-tube hydraulic piezometer)	受圧膜式ピエゾメータ (diaphragm piezometer)	略語:PZ:ピエゾメータ AEV:空気侵入値 国際会議・重要文献・トピック	年代
1930	07: Waghadダム、湛水時浸潤面の測定(インド)			24: 土質力学の誕生 Terzaghi: Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage	1930
40	44~ ローガン国際空港埋立建設工事において 46: Casagrande PZ開発、測定(米国)	39: 米国開拓局 Fresnoダムにおいて低AEVフィルターと フィルター管圧力計を用いたPZを設置(米国)	35: 米国開拓局 電気接点判別型空気圧測定方式をダムに適用(米国)		40
50	48: スタンドパイプ頭部にブルドン管圧力計を付けた閉塞型PZ開発(スウェーデン)	51: Ulsダムにおいて円盤型低AEVフィルターを用いて、英国で初めてのPZを設置 58: Ayr, Itamダムにおいてナイロンチューブ被覆ホリエロンチューブ、高いAEVフィルターを採用(英国) 59: ナーム型高いAEVフィルターを持つチップ使用(英国)	42: Carlsonひずみ計電気式PZを開発し、現地計測で成功(Terzaghi, 米国) 49: スウェーデン土質研究所、電気接点判別型空気圧測定方式開発 50: フィルター部と圧力測定フローを分離したフィルター土質研究所システムを発表 53: Rosshauptenダムに振動弦PZを設置(独)、その後Senne-Pomtonダム(仏)に設置 58: 空気圧PZ開発(米国)	49: 一次圧密沈下量の評価のために間隙水圧測定(Casagrande) 51: Hvorslev: Time lag and Soil permeability in ground observation	50
60	60: Geonor Open Standpipe PZ開発(ノルウェー) 64: Drive-in PZの設置(英国)	60: 米国開拓局 高いAEVフィルターを用いたチップ使用 62: Tryweryダムにおいてナイロン6タイプからナイロン11タイプのチューブに変更(英国)	69: 土中のPZを現地でキャリブレーションできる振動弦PZを発表(米国)	60: International Conference on Pore Pressure and Suction in Soils, London 69: 7th ICSMFE, Mexico. Spec. Session Pore pressure measurements in the field and in the laboratory	60
70	69: Grout-in PZの理論と試作(英国)		73: 複管式を組合せた空気圧PZ発表(米国) 74: 土中のPZを現地でキャリブレーションできる振動弦PZを発表(ノルウェー) 78: 米国開拓局 ダム計測に空気圧PZを使用することを推奨(米国) 79: Westbay社MPシステム開発(カナダ)	73: Symposium on Instrumentation in Geotechnical Engineering, London 73: 切土斜面の真の間隙水圧測定とその安定評価(Vaughan and Walbancke)	70
80	83: Hallcrow bucketを用いた最高水位計を発表(英国)		84: BATシステムを発表(スウェーデン)	83: International symposium on Field Measurements in Geomechanics, Zurich 87: 地震時液状化地盤の間隙圧測定(Youd) 88: Durnicliiff: Geotechnical instrumentation for monitoring field performance	80
90			95: Grout-in PZの成功事例発表(米国)		90
2000			02: Geotech Observation社 複管式と組み合わせたPZ発表		2000