

# PVC ドレーン工法について (第6報)

——ドレーン材の損失水頭について——

齋藤二郎 松尾龍之  
西林清茂 大石守夫

## PVC Drain Method (Part 6)

——Loss of Head in Vertical Drain Well——

Jiro Saito Tatsuyuki Matsuo  
Kiyoshi Nishibayashi Morio Ohishi

### Abstract

The present study experimentally treats the loss of head in a vertical drainage canal which had previously been explained only conceptually. The authors assume that most losses of head of drain material occur due to the behavior of water in the drainage canal when water released due to consolidation passes the cross sections of the drain material and the drainage canal. The PVC drain has sufficient cross-sectional area of canals so that loss of head in the drains is very small. However, the loss of head in PVC drains in the poor ground was obscured. The primary factors in loss of head were the friction between water and the drain material, the reduction of cross-sectional area by earth pressure, and the bending of drains, and so on. As a result of the experiments, it was found that loss of head is mostly caused by bending of the PVC drain material due to settlement of soil. Based on the above result, upon estimation of the loss of head in PVC drains in actual work, it was assumed that losses of head would be very small.

### 概要

本報告は、これまで概念的にしか述べられていなかったバーチカルドレーン材内通水孔の損失水頭を、実験的に検討したものである。損失水頭の多くは、圧密脱水する水の経路である、ドレーン材壁、ドレーン材内通水孔のうち後者で発生すると考えられる。実験に使用したPVCドレーン材は、通水孔断面を十分設けるなどして損失水頭の低減をはかっているが、実際の土中における損失水頭発生状況については不明の状態であった。通水孔の損失水頭発生要因としては、ドレーン材料と水との摩擦、土圧による断面縮小、曲げ等種々あるが、地盤の沈下に伴うドレーン材の曲げが大きく他は小さな要因であることが明らかとなった。この実験結果から、実際工事におけるPVCドレーン材の損失水頭を推算した結果、発生する損失水頭は非常に小さく、PVCドレーン材は損失水頭の面からも優れていることが推察された。

### 1. まえがき

一般にバーチカルドレーン工法の設計は、Barron<sup>1)</sup>、Kjellmanなどの理論にもとずいているが、Barronがサンドドレーン材内の損失水頭について言及しているにもかかわらず、実際の設計では、この損失水頭を無視した理想状態の解法を用いているのが実状である。一方、実際工事では圧密の遅れや改良効果が低減する傾向にある。この傾向は改良が深くなるほど増大するようで、その原因は、(1) 載荷重の応力伝達の減少、(2) 打設時周

辺地盤の乱れ(圧密係数の低下)、(3) ドレーン材の破断、切断、(4) ドレーン材の損失水頭、などがあり、ここで検討したドレーン材内の損失水頭もその一つである。現在、バーチカルドレーン材としては、サンドドレーン系のものでペーパードレーン系のものである。サンドドレーン材内の損失水頭については2~3の論文<sup>2)</sup>にその存在と、圧密進行への影響等が述べられているが、ペーパー系ドレーン材の損失水頭<sup>3)</sup>についてはわずかである。ドレーン材をその排水機構から分類すると、(1) 砂の間隙を通水させるもの(サンドドレーン系)、(2) 高

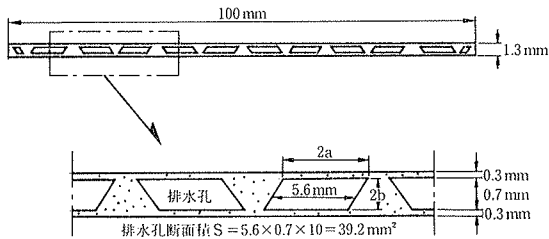
分子繊維や高分子樹脂の間隙を通過し、内部の通水孔を  
通水するもの、(3) 高分子繊維の集合でその間隙を通水  
させるもの（ペーパードレーン系）がある。PVC ドレ  
ーン材は(2)に属している。そこで、PVC ドレーン材の  
損失水頭について検討する際には当然この両者の排水機  
構の相違を考慮する必要がある、3 者の示す損失水頭の  
挙動は相当異なると思われる。

|           | 素材による分類                   | ドレーン材      | 排水機構による分類 |
|-----------|---------------------------|------------|-----------|
| パーチカルドレーン | サンドドレーン系                  | サンドドレーン    | 排水孔が間隙の連続 |
|           |                           | 袋詰めサンドドレーン |           |
|           | ペーパードレーン系<br>(プラスチックドレーン) | PVCドレーン    | 排水孔が管路    |
|           |                           | ドレーン A     |           |
| ドレーン B    |                           |            |           |
|           |                           | ドレーン C     | 排水孔が間隙の連続 |

表一 1 パーチカルドレーン材の分類

### 2. 使用したドレーン材

実験に用いた PVC ドレーン材は 10 本の管路状の通水  
孔を持った、図一 1 の断面形状のドレーン材である。



図一 1 PVC ドレーン材通水孔断面

### 3. 実験の方法および種類

実験は 2 種類の方法で行なった。

Case 1—理想状態におけるドレーン材通水孔の損  
失水頭実験

Case 2—圧密沈下による変状を経時的に受ける軟  
弱粘土中におけるドレーン材通水孔の損  
失水頭実験

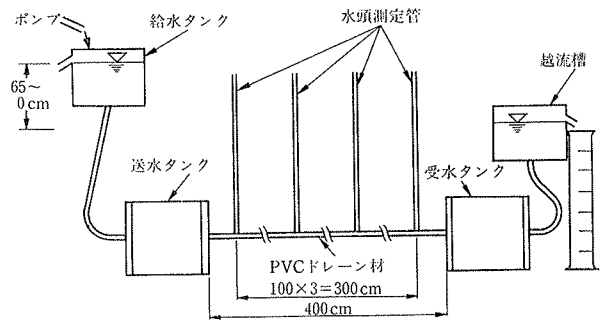
#### 3.1. 実験 Case 1

この実験は、ドレーン材の排水機能が最良の状態の時  
のドレーン材通水孔内の平均流速と損失水頭との関係を求  
めた。図一 2 に実験装置を示す。

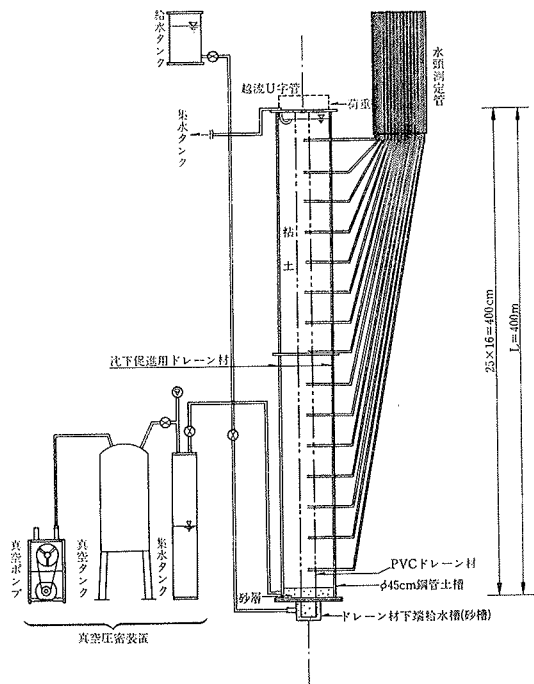
ドレーン材表面を完全にシールして、水の流れをドレ  
ーン材軸方向だけとした PVC ドレーン材を水平に設置  
し、ドレーン材両端に水頭差を与え通水を行なった。ド  
レーン材各点の水頭の測定は同一通水孔に 1m ピッチ  
で設置した水頭測定管で行なった。通水孔内平均流速は  
越流槽で測定した流量より求めた。

#### 3.2. 実験 Case 2

この実験はドレーン材が実際の土中にあり、しかも圧  
密沈下によりドレーン材が変形する状態を再現したもの  
である。図一 3 に実験装置を示す。内径  $\phi 45$  cm、長さ  
 $l=4$  m の鋼管を垂直に立て、ドレーン材を中心に設置し  
て、含水比  $w=140\%$  に攪拌調整した東京港海性粘土を  
静かに投入して地盤を作成した。この時、ドレーン材の  
下端は鋼管土槽底部の密閉した砂の入った給水部にセッ  
トし、上端を粘土上面に出した。通水は土槽底部の給水  
部に給水タンクより水頭 (10~60 cm) を加え、ドレーン  
材下端と上端の間に水頭差を発生させて行なった。ドレ  
ーン材通水孔各点の水頭の測定は、25 cm ピッチで設置  
した水頭測定管で行なった。さらに、鋼管内粘土試料上  
面に重錘による荷重 (0.03~0.09 kg/cm<sup>2</sup>) および、粘土  
試料上面をビニールシートで密閉し、土槽底部より負圧



図一 2 Case 1 実験装置



図一 3 Case 2 実験装置

吸引を行なう真空圧密による大気圧を载荷 (0.6~0.7 kg/cm<sup>2</sup>) して粘土を圧密沈下させ、粘土内ドレーン材に曲げを発生させた。

#### 4. 実験の結果と考察

##### 4.1. 通水孔の理論損失水頭

PVC ドレーン材の通水孔は、図-1 に示したように一定の断面形状のものが10本集まったものである。この各通水孔を長方形断面 (2a×2b) の微小管路と仮定し、長方形断面の管の損失水頭 (h) を求める Fanning の (1) 式<sup>4)</sup> により損失水頭の理論値を算定した。

$$h = \lambda \cdot \frac{l}{4m} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

$$\lambda(\text{管の摩擦係数}) = \frac{64}{Re} \cdot \frac{8a^2}{(a+b)^2 \cdot X} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$Re(\text{レイノルズ数}) = \frac{4m \cdot v}{\nu} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$m(\text{水力平均深さ}) = \frac{2a \cdot 2b}{2(2a+2b)} = \frac{ab}{a+b} \quad \dots\dots\dots(4)$$

X(形状係数)

$$= \frac{16}{3} - \frac{1024}{\pi^5} \cdot \frac{b}{a} \left[ \tanh \frac{\pi a}{2b} + \frac{1}{3^3} \tanh \frac{3\pi a}{2b} + \dots \right] \quad \dots\dots\dots(5)$$

$\nu$  (水の動粘度係数) = 1.146 × 10<sup>-2</sup> cm<sup>2</sup>/sec (15°C)

$l$  (通水管路長さ)

$v$  (平均流速)

$g$  (重力加速度)

これらの式を展開して以下の式を得る。

$$h = \frac{16 \cdot \nu}{b^2 \cdot X \cdot g} \cdot l \cdot v \quad \dots\dots\dots(6)$$

これらの式によって算定した水温15°Cにおける Re,  $\lambda$ , h の値を示す。

$$Re = 10.859 \cdot v$$

$$\lambda = 7.578 / v$$

$$h = 3.107 \times 10^{-2} l \cdot v \text{ cm}$$

図-4 に損失水頭と流速の関係を示す。

なお、参考までに(6)式を次のように変形すると、

$$v = \frac{b^2 \cdot X \cdot g}{16\nu} \cdot \frac{h}{l} \quad \dots\dots\dots(7)$$

となり、 $b^2 \cdot X \cdot g / 16 \cdot \nu = K$  とおくと、K は管路断面形状および水温で決まる比例定数となる。さらに  $h/l = i$  (動水勾配) とおくと、

$$v = K \cdot i \quad \dots\dots\dots(8)$$

となり、ダルシーの法則に一致し、 $K = b^2 \cdot X \cdot g / 16 \cdot \nu$  が透水係数に相当する値となる。

##### 4.2. 実験 Case 1 理想状態におけるドレーン材の損失水頭実験

実験に際して給水タンクと越流槽の間に与えた全水頭差は 5 cm~65 cm の 6 段階とした。流量の測定は全水頭差を一定とし、ドレーン材各点の水頭測定水位が一定値に落ち着いた後行なった。求めた流速 ( $V_T$ ) は実験中の水温 (T°C) を測定し、水温 15°C の時の流速 ( $V_{15}$ ) に換算した。

損失水頭はドレーン材に 1 m ピッチで設置した隣合った 2 本の水頭測定管の水頭差より求め、ドレーン材 1 m 当たりの損失水頭 (h・cm) とした。図-4 に測定条件、実験結果、流速と損失水頭の関係を示す。

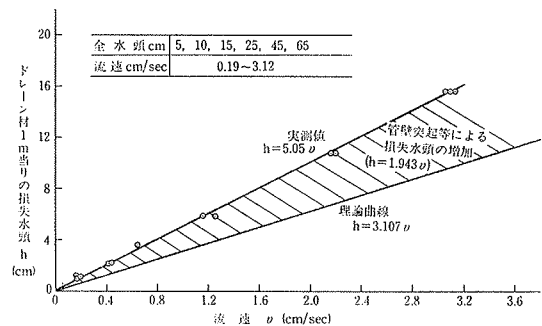


図-4 測定条件および流速と損失水頭の関係

図-4 によると、流速と損失水頭の関係はほぼ正比例関係にある。実験中の最大流速は  $V_{15} = 3.12$  cm/sec であったが、この範囲においても流速と損失水頭は比例関係にあることから、通水孔内の水の流れは層流状態にあったと考えられる。

理論値と実測値を比べるならば同一流速では実測値は理論値の約 1.5 倍の損失水頭があったことを示しているこの原因としては、理論式が管路形状による損失水頭を求めるものであり、PVC ドレーン材通水孔内壁面の粗さによる損失水頭を含まないための差と考えられる。したがって、図-4 に示す両者の差 (斜線部分) は通水孔内壁面の粗さなどによる損失水頭と考えられる。前述(6)式に従い実験結果を整理すると、

$$h_1 = \alpha_1 \cdot l \cdot v \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 $\alpha_1$ : 比例定数

$l$ : 通水長さ

$v$ : 通水孔内平均流速

の関係が成り立ち、実験 Case 1 では管路形状のみによる損失水頭 ( $l = 1$  m,  $v = 1$  cm/sec の場合)  $h = 3.107$  cm に比べ  $\Delta h = 1.943$  cm 損失水頭が増加していることとなる。

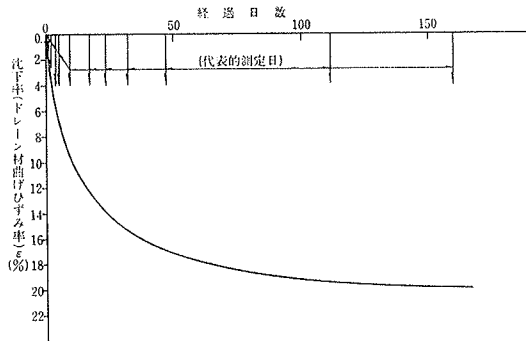
##### 4.3. 実験 Case 2 土中のドレーン材損失水頭実験

表-2 に測定条件を示す。ここで、ドレーン材曲げひずみ率 ( $\epsilon$ ) とは、 $\epsilon = S$  (沈下量) /  $L$  (ドレーン材長さ) × 100 (%) である。

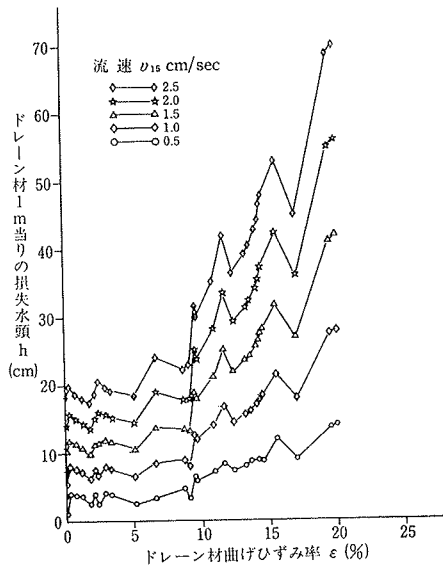
図-5 にドレーン材曲げひずみ率と時間の関係、図-

|                            |                        |
|----------------------------|------------------------|
| 全水頭 (cm)                   | 10, 20, 30, 40, 50, 60 |
| 圧密沈下期間 (日)                 | 0 ~ 167                |
| ドレーン材曲げひずみ率 $\epsilon$ (%) | 0 ~ 20                 |
| 流速 (cm/sec)                | 0.31 ~ 4.41            |

表一2 実験 Case 2 測定条件



図一5 ドレーン材曲げひずみ率と時間の関係



図一6 ドレーン材曲げひずみ率と流速損失水頭の関係

6にドレーン材曲げひずみ率と流速、損失水頭の関係を示す。

図一6によると、全体的にバラツキがあるものの、同じ流速ではドレーン材曲げひずみ率が大となるほど損失水頭は大きくなっている。特に、曲げひずみ率が $\epsilon=8\sim 10\%$ 以上になると損失水頭は急激に増大している。さらに同一曲げひずみ率のときは流速が増大するにつれて損失水頭が大きくなっており、実験 Case 1 同様、流速と損失水頭は正比例している。

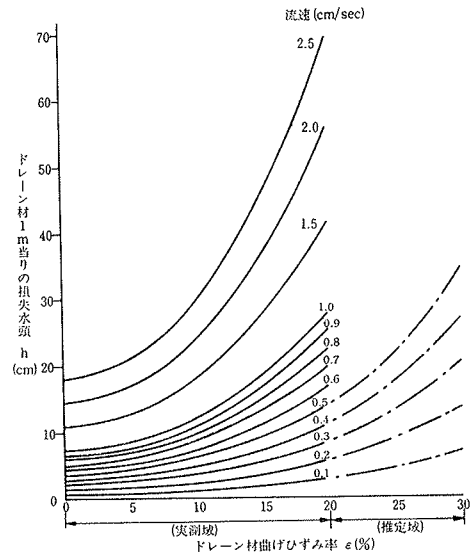
以上、当実験で得られた結果を要約すると、次の通りである。

(1) 通水長さと損失水頭は比例する。

(2) 曲げひずみ率が一定のとき、流速と損失水頭は比例する。

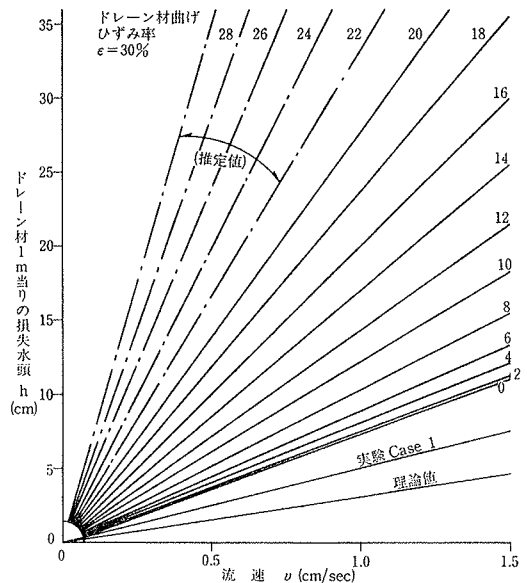
(3) 流速が一定ならば、損失水頭はひずみの増加に伴い加速度的に増大する(図一6)。

これらの性状を考え、図一6に示した測定結果のデータのバラツキを修正したのが図一7、8でドレーン材曲げひずみ率と流速、損失水頭の関係である。



図一7 ドレーン材曲げひずみ率と流速損失水頭の関係

図一8には実験 Case 1 の結果、および理論値を併せて示したが、実験 Case 2 で求めた $\epsilon=0\%$ の時の損失水頭は理論値の約2倍、実験 Case 1 結果に比べても約1.5倍の大きさである。この原因としては、前述の通水孔内壁突起などによる損失水頭に加え、ドレーン材周



図一8 ドレーン材曲げひずみ率と流速損失水頭の関係

囲の粘土側圧による通水孔断面の変形やドレーン材セット時のドレーン材のねじれ、曲がり等の影響による損失水頭が発生したためと考えられる。その大きさは、式(10)によると  $\Delta h = 2.25 \text{ cm}$  ( $l = 1 \text{ m}$ ,  $v = 1 \text{ cm/sec}$  の場合) 程度と思われる。

$$h_2 = (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot l \cdot v \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここに、 $\alpha_2$ : ドレーン材周辺土圧などによる比例定数  
さらに、粘土の沈下が発生しドレーン材に曲がりが生じた場合には、管路(通水孔)の曲がりによる損失水頭が生じる。この大きさは、式(11)、図-8によると、

$$h_3 = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \cdot l \cdot v \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここに、 $\alpha_3$ : ドレーン材の曲がりによる比例定数  
損失水頭増加量 ( $l = 1 \text{ m}$ ,  $v = 1 \text{ cm/sec}$  の場合)

- $\epsilon = 5\%$ ,  $\Delta h = 1.2 \text{ cm}$
- $\epsilon = 10\%$ ,  $\Delta h = 4.9 \text{ cm}$
- $\epsilon = 20\%$ ,  $\Delta h = 20.4 \text{ cm}$

となる。

なお、曲がりの損失水頭に与える影響は必ずしも比例せず図-7を片対数で整理して(一定流速における)ドレーン材のひずみ率  $\epsilon$  と通水長さ 1m 当りの損失水頭  $h$  の関係を実験式で表わすと、

$$\log h = \beta \cdot \epsilon + \log h_0 \quad \dots\dots\dots(12)$$

- ここに、 $h$ : 通水長さ 1m 当りの損失水頭
- $\beta$ : 比例定数 = 0.035
- $h_0$ :  $\epsilon = 0\%$  における損失水頭

となる。

以上、軟弱地盤内に打設した PVC ドレーン材の損失水頭発生の原因は、地盤の沈下(ドレーン材曲げひずみ率)の大きさによって異なるが、通水孔形状、壁突起摩擦、ドレーン材の曲がり、土圧による断面縮小などであり、このうち最も大きな原因は地盤の沈下に追従してドレーン材が曲がり、通水孔が曲がる事である。

### 5. 実際工事で発生している損失水頭

PVC ドレーン工法で地盤改良を実施した某現場の施工条件、実測時間一沈下量の関係などをもとに、圧密期間各々の時点で発生していると考えられるドレーン材 1 本当りの損失水頭の大きさを、実験結果を参考に試算した(図-9)。

なお、当現場は改良深さが約 7.6m、最終沈下量が、 $S = 231 \text{ cm}$  であった。

損失水頭は当然のことながら、水の流れ、圧密脱水が発生する時には同時に発生するが、流速、ドレーン曲げ

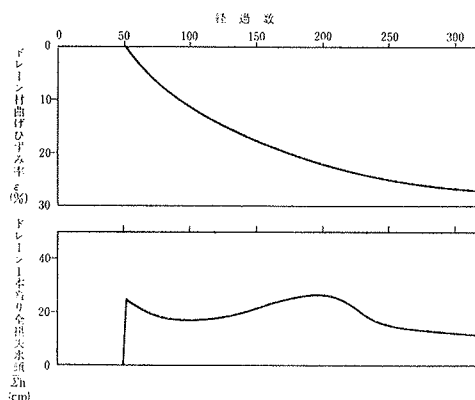


図-9 ドレーン材曲げひずみ率とドレーン材 1 本当りの全損失水頭

ひずみ率などに比例するために、盛土載荷初期の 1 日当りの沈下量が大ききな時は流速は速いが、ドレーン材曲げひずみ率が小さいために、発生する損失水頭はそれほど大きくない。圧密が進行し、ドレーン材曲げひずみ率が大きくなり、ドレーン材内の流速がある程度速い圧密中期に損失水頭は最大値を示す。圧密後期となり、ドレーンに大きな曲げひずみが生じるころには 1 日当りの沈下量は非常に小さくなり、ドレーン材内の流速も小さくなるために、発生する損失水頭は非常に小さくなる。しかし、流れ(圧密脱水)が有る限り損失水頭は存在する事となる。

### 6. むすび

PVC ドレーン材を使い、ドレーン材通水孔を微小管路と見なし損失水頭の検討を行なった結果、PVC ドレーン材では十分な断面の通水孔を持つために、発生する損失水頭は非常にわずかであることが明らかとなった。また、改良深さが 15~20m であっても、発生の予想される損失水頭はわずかであり、損失水頭による圧密促進、改良効果への影響は非常に小さいことが推察された。

### 参考文献

- 1) R. A. Barron: Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells, Trans. A.S.C.E., (1948)
- 2) Aboshi Yoshikuni: The Study on the Consolidation Process Affected by Well Resistance in the Vertical Drain Method, Soil and Foundation, Vol. 7, No. 4, (1967)
- 3) 網干, 他: ペーパードレーン工法について, 土と基礎, (Jun. 1965)
- 4) 板谷松樹: 水力学, 日本機械学会