

# クイックサンド状態にある砂の体積変化特性

柴田 徹\* 西原 晃\*

Volume Change Characteristics of Saturated Sand under Quick Conditions

Toru SHIBATA\* Akira NISHIHARA\*

## ABSTRACT

The object of this paper is to determine experimentally the volume change characteristics of completely liquefied sand. Three kinds of sand specimens were used, and the liquefaction of specimens was caused by upward seepage flow. Main results obtained are as follows:(1)The expansion ratio is the ratio of post-liquefied volume to pre-liquefied volume, and this ratio was found to be proportional to the flow rate of upward seepage.

(2)Between the melting point and the boiling point of a solid,the liquefied volume is almost linear with temperature. Comparison of the melting behaviour of solid with the liquefaction of sand,seepage flow rate is considered to correspond to the temperature.

Key words: Quick sand,volume change,upward seepage,melting,temperature.

キーワード:クイックサンド、体積変化、浸透水流、融解、温度。

## 1. まえがき

水を含んだ緩い砂地盤は地震時に液状化して、各種の地盤震害を引き起こす。この液状化のメカニズムに関しては、新潟地震を契機に始められた研究の進展により、その成果が実務レベルでの設計問題に取り入れられるようになった。

しかし砂地盤が液状化して側方流動を生じ、やがてそれが停止するまでの流動過程については、未解明の課題を残している。たとえば液状化した固・液の二相混合体は、粘(弾)性固体とみるか粘性流体とみるかで解析上の扱い方が分かれる。このような現状を考えると、液状化後の流動体の物性変化を解明しようとする本研究テーマは、時宜を得たものといえよう。

砂を液状化させる外作用としては地震、波浪、あるいは浸透水流などがある。これらのうちで液状化後の材料物性を調べるために、本研究では浸透実験による方法を採用した。すなわち土槽に緩詰め飽和状態で砂を満たし、底部から上向き浸透水を流してQuick sand状態を出現させる。そのとき、液化材料の体積変化特

性に影響を与える要因を明らかにする。

砂のような粉粒体の液状化は、加熱による固体の融解現象にたとえられるが、その場合には温度に相当するファクターを求めておくのが望ましい。たとえば粉粒体を容器に詰めて下からの送気で液状化させたときには、「送気流速」が「温度」に相当することが分かっている[1][2]。

本研究では浸透水によるQuick sand状態を対象としており、液化した砂材料の[浸透水流速～体積変化]関係と、固体融解時の[温度～体積膨張]関係との類似性に注目した。結果として、「浸透水流速」が「温度」に相当することなどを明らかにした。

## 2. 既往の研究

### 2.1 古川・大前の研究

ガラス管(内径6cm)中に粉粒体を詰め、底部から空気を吹き上げることによって液状化させ、その時の体積変化などを調べた[1]。粉粒体としては、277 $\mu$ mから755 $\mu$ mまでの範囲でそれぞれが均一粒径をもつ5種類のポリビニールアセテート球を使用している。

\*建設環境工学科

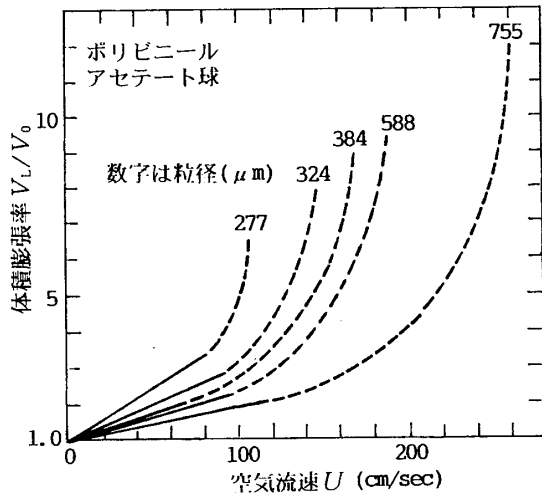


図1 空気流速と体積膨張率の関係 [1]

図1は空気流速と体積膨張率の関係を示す。ここで体積膨張率は、液状での体積  $V_L$  と固体状での体積  $V_0$  との比である。

図によれば、体積膨張率  $V_L/V_0$  は空気流速  $U$  に対して  $U$  が小さい間は比例関係にあり、 $U$  が増すと上方に凹の曲線になる。このような特性は経験的に

$$V_L/V_0 = 1 + \delta_A(U - U_c) + \delta'_A(U - U_c)^2 + \dots \quad (1)$$

で表わされる。ここに  $U_c$  は固体から液体に変わる限界の空気流速、 $\delta_A$  (添字はairの意味) は送気による膨張係数である。

一方物質を加熱したときの膨張に関して、

$$V_L/V_0 = 1 + \delta(T - T_m) + \delta'(T - T_m)^2 + \dots \quad (2)$$

が成り立つ。ただし  $T_m$  は物質の融点(絶対温度)、 $\delta$  は加熱による膨張係数である。

上記の式(1)(2)を対比すれば、粉粒体を液化させるときの空気流速は、加熱による融解時の温度に相当するといえる。

さらに式(1)の  $\delta_A$  と  $U_c$  の間には、近似的に

$$\delta_A \approx (1/6)(1/U_c) \quad (3)$$

の関係があるとしている。

## 2.2 吉見らの研究

円筒型土槽(内径28cm)に豊浦砂を厚さ30cmに満たしたのち、底部から上向き浸透水を流すQuick sandの実験を行なった[3]。流水速度をゼロから徐々に増加させると、図2に示すように流水速度が低い間は動水勾配と流速の間にDarcy則が成立する(図中のC点まで)。C点は限界動水勾配で、それを越えると間隙比の顕著な増加がみられる。

なお図2には、今回の筆者らの実験結果と共通の特徴がいくつか見られるので、後述の4章において改めて考察を加える。

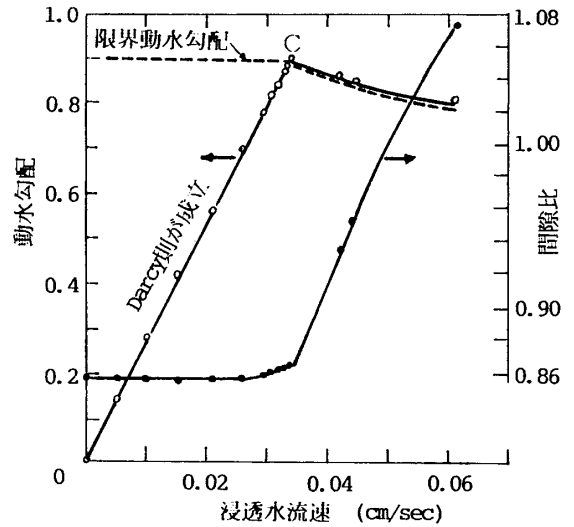


図2 吉見らの浸透実験結果 [3]

## 3. 実験の方法

### 3.1 装置

吉見らの論文[3]を参照して図3の装置を用い、浸透水によるQuick sand実験を実施した。

土槽は補強したアクリル製円筒で、内径28cm、高さ約50cmである。タンクAとBの間に水位差を与えることで、土槽底部から上向きの浸透水流を生じさせる。

図示の位置に3個の間隙水圧センサーを設置し、それらの差から動水勾配を求める。また砂層の厚さ変化(体積変化)をその表面で測定するために、土槽外側に1mm目盛りのスケールが張り付けてある。

浸透水流速は、タンクBからの越流水を経時的に計量して求めた。

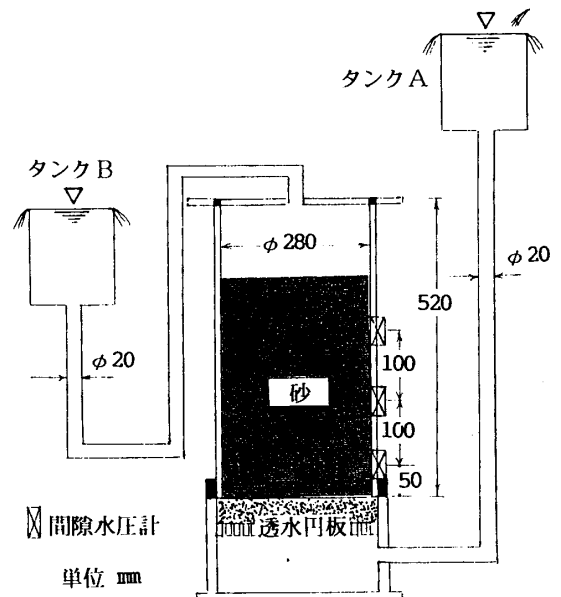


図3 実験装置

### 3. 2 砂材料

表1に示すような3種類の砂(豊浦砂、珪砂および川砂)を使用した。それらの粒度分布は図4のとおりであり、いずれも「特に液状化の可能性あり」とされる粒度範囲に入っている[4]。

表1 砂の諸性質

砂の種類	豊浦砂	珪砂	川砂
土粒子比重 $G_s$	2.65	2.62	2.59
最大間隙比 $e_{max}$	0.966	0.965	0.870
最少間隙比 $e_{min}$	0.609	0.613	0.548
有効径 $D_{10}$ (mm)	0.15	0.28	0.32
均等係数	1.4	1.6	2.2

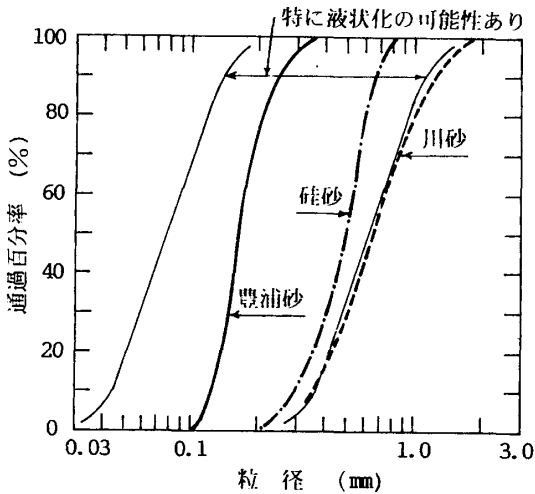


図4 砂の粒度分布

### 4. 実験結果と考察

#### 4. 1 実験の結果

図5に3種類の砂に対する結果を抜粋して示す。この図に見られる特徴を列挙すると次のようである。

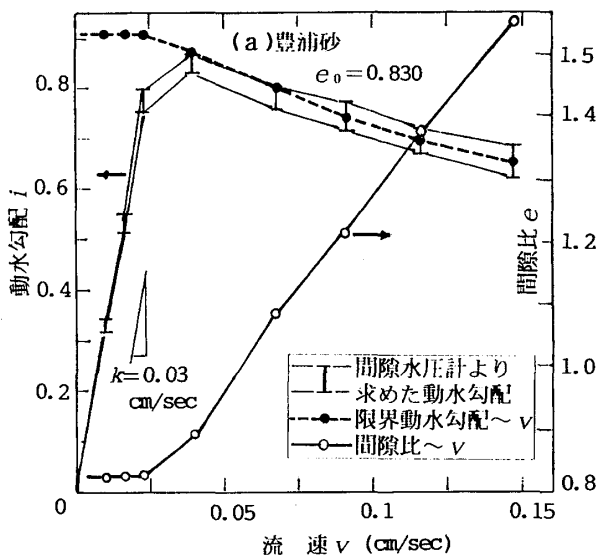


図5 実験結果のまとめ

(1)流速  $v$  が限界値  $v_c$  以下では、 $v$  と動水勾配  $i$  とが比例関係にあり、Darcy 則が成立する。

この  $v \leq v_c$  間では、間隙比  $e$  の変化はない。

(2)限界動水勾配  $i_{CR}$  は粒子比重を  $G_s$  として、

$$i_{CR} = (G_s - 1) / (1 + e) \quad (4)$$

で求められ、 $v > v_c$  の範囲では、間隙水圧計から求めた  $i$  が式(4)の限界動水勾配とほぼ一致している。

(3)  $v > v_c$  の範囲では、間隙比  $e$  が  $v$  にほぼ比例して増加する。

#### 4. 2 膨張率と流速の関係

浸透水の流速の増加とともに、間隙比が増大することが分かったので、流速と体積膨張率の関係を調べる。体積膨張率は

$$V_L / V_0 = (1 + e) / (1 + e_0) \quad (5)$$

より求められる。ここに  $e_0$  は液化する前の初期間隙比である。

図6は豊浦砂、珪砂、川砂それぞれの代表例、および吉見らの結果[3]を、体積膨張率～浸透水流速の関係にプロットしたものである。

図より  $v > v_c$  の範囲で  $V_L / V_0 \sim v$  関係はほぼ直線になること、粒径が大きくなるほど直線の勾配(膨張係数)は緩く、 $v_c$  は大きくなることが分かる。

これらの関係を式示すると

$$V_L / V_0 = 1 + \delta_w (v - v_c) \quad (6)$$

である。ここに  $\delta_w$  (添字はwaterの意味)は膨張係数で、式(1)の  $\delta_A$  に相当する。

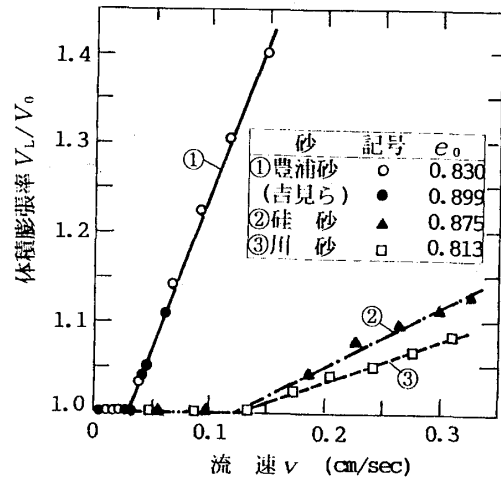


図6 体積膨張率と浸透水流速の関係

#### 4. 3 加熱による融解との関連

物質が融解する際の経験則として、融点 ( $T_m$ )～沸点間で式(2)が成立することを述べた。そこで式(2)と式(6)を対比すると、 $T$  を  $v$  に置き換えれば、物質融解の温度と浸透水流速が対応するといえる。そして液状化発生の限界浸透流速は、融点と読み換えることが

できる。ここで限界浸透流速  $v_c$  は、Darcy 則と限界動水勾配  $i_{CR}$  を用いて

$$v_c = k \cdot i_{CR} \quad (7)$$

と書ける。 $i_{CR}$  は式(4)で示したように、土粒子比重  $G_s$  と間隙比  $e$  の関数である。

#### 4.4 膨張係数と限界流速の関係

式(3)において、 $\delta_A$  と  $U_c$  の積が一定となること示された。すなわち  $\delta_A \cdot U_c = 1/6$  である。

この関係は、均一な球状粉粒体に送風して液状化させたときのものであった。同様のことが今回の砂/浸透水流の実験にも見られるかどうかを、以下で検討する。

図7は、各実験データより液状化後の体積膨張係数  $\delta_w$  と、液状化発生の限界流速  $v_c$  を求めて、両対数表示したものである。図7には古川・大前[1]のデータも併記されており、次のことが考察できる。

(1)それぞれの砂に対する  $(\delta_w \cdot v_c)$  の値は、表2に示すように各砂ごとにほぼ一定とみなされる。

砂の種類	$(\delta_w \cdot v_c)$ の範囲
豊浦砂	1/7 - 1/10
珪砂	1/6 - 1/10
川砂	1/10 - 1/16

また透水係数と限界動水勾配から、式(4)(7)を用いて限界流速  $v_c$  (cm/sec) を計算で求めると、

豊浦砂；0.03，珪砂；0.14，川砂；0.13となる。

(2)  $(\delta_w \cdot v_c)$  の値は豊浦砂と珪砂ではほとんど変わらず、古川・大前の送風実験の結果 ( $\approx 1/6$ ) に近い。

これら両方の砂を比較すると、珪砂は豊浦砂に比べて  $v_c \rightarrow$  大、 $\delta_w \rightarrow$  小となって、 $v_c$  と  $\delta_w$  の積は変わらないことになる。

(3)川砂を珪砂に比べると、 $v_c$  はほとんど変わらないが  $\delta_w$  は小さい。よって結果として  $(\delta_w \cdot v_c)$  が小さくなっている。

浸透水流による体積膨張率が川砂で低くなる理由は、今のところ不明である。一つの推論として、砂の粒度配合の貧富や粒径の大小が、膨張係数に影響を及ぼすのではないかと考えられる。

古川・大前の送風実験用材料、今回の豊浦砂と珪砂はいずれも均一粒径に近い。それに対して川砂は均等係数が 2.2 であった(表1)。しかしこの問題を解決するには、均等係数を変化させた実験が必要である。

(4)対象とする砂について、透水係数  $k$  と間隙比および粒子比重の値が予め判明しておれば、式(7)より限界流速  $v_c$  が推定できる。

したがって各種の砂について、膨張係数  $\delta_w$  の値を求めておけば、浸透水流によって Quick sand 状態にある砂地盤の挙動を解析する上で有用となろう。

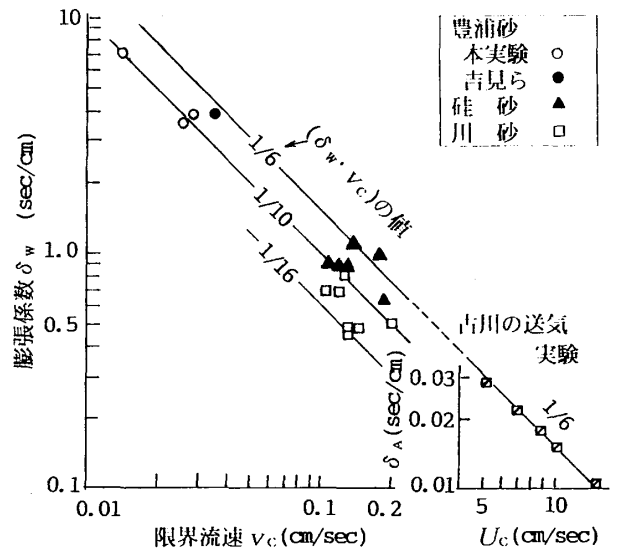


図7 膨張係数と限界流速の関係(両対数)

#### 5. むすび

古川・大前の研究は、容器に詰めた粉粒体に底部から風を送り、全体を液状化させるものであった。それにヒントを得て、上向き浸透水流による Quick sand の実験を行なった。

水で飽和した砂の塊りは、浸透水の流速を漸増させると、やがて限界動水勾配を越えて Quick sand 状態(液状化)となる。このとき、流速の増加とともに液化した砂/水-混合物は体積を増す。

一方、固体を加熱し融点を越えると、融けて液体となり、温度上昇とともに体積は膨張する。

このように体積膨張という共通の観点からすると、液化状態にある砂/水-混合物は、「流速」という「温度」を持つかのように振舞うことが分かった。

#### 謝辞

平成12年度卒業研究として、稲垣淳一・宇土美由紀の両君に実験の協力を得た。謝意を表したい。

また平成12・13年度文科省科研費(代表；柴田)の補助を受けたことを付記する。

#### 参考文献

- [1] J. Furukawa, T. Ohmae: Liquidlike Properties of Fluidized Systems, Industrial & Eng. Chemistry, Vol. 50, No. 5, pp. 821-828, (1958).
- [2] 田口善弘: 砂時計の七不思議、中公新書、中央公論社、pp. 97-128, (1995).
- [3] Y. Yoshimi, F. Kuwabara, K. Tokimatsu: One-Dimensional Volume Change Characteristics of sands under Very Low Confining Stresses, S & F, Vol. 15, No. 3, pp. 51-60, (1975).
- [4] (財)沿岸開発技術研究センター: 埋立て地の液状化対策ハンドブック(改訂版)、p. 348, (1997).