

# X線を用いた土の浸透破壊実験とその考察

中島秀雄・長瀬迪夫・飯島 豊

## Seepage Failure Experiment Using X-Ray Photos

Hideo NAKAJIMA, Michio NAGASE and Yutaka IJIMA

### Abstract

The main difficulty of elucidation of seepage failure lies with the difficulty of direct observation and measurement of the process of the phenomena in the field. Therefore our experimental approach has no clear conception of the moment when critical state is reached. Most experimenters obtain critical gradient or critical velocity from the value of a flow passing through a vessel at the point of sudden increase. Here, they definite critical gradient following Terzaghi's conception and critical velocity adopting Justin's model. Since piping, in the narrow sense of the word, originates from non-uniformity of the specimen, critical velocity should be determined at a point where the flow is concentrated.

This paper presents the results and reviews of the following investigations:

- (1) Observation of seepage failure, using X-ray photographs
- (2) Tri-dimensional finite differential model simulation of "the experiment" to obtain the distribution of potential gradient when piping occurs
- (3) Experiment to determine critical velocity of the flow that transports particles upward and out of the vessel

The results of the investigation are as follows:

- (1) Prior to failure of the whole specimen or increase of flow through the vessel, several tubular cavities occur at the bottom and expand upward increasingly rapidly, until they reach the upper surface of the specimen. The small cavities that appear may be hydraulic fracturing caused by slightly uneven flow from the rectifier, below the specimen.

Final quick collapse above the tops of cavities is piping in the narrow sense of the term. In areas where the material and state of flow are perfectly uniform, critical gradient and critical velocity should both occur at the same time.

- (2) Tri-dimensional model simulation gave the following results.  
When a tubular cavity reaches 80% of the height of the specimen, the value of the gradient in the remaining thickness above the cavity is estimated as five times that of an ideal, evenly distributed gradient.
- (3) Soil grains placed in a fine tube through which water flows upward are lifted separately at a certain velocity of flow, and they are expelled from the top of the tube.

The critical ascending flow velocity, thus defined, exceeds values of critical velocity usually obtained by a factor of roughly 100. This ascending critical velocity for rather coarse material coincides with Justin's criteria.

In the past, experiments have used thin tubes for critical velocity tests and wider ves-

sels for critical gradient tests. The former cases, however, is affected by resistance due to arch action and wall friction, and the latter case can't avoid being affected by minute irregularities of the material and the state of the specimen.

It is a basic problem whether critical gradient and critical velocity can both be occur at the same time or not, in area where the material and state of flow are perfectly uniform. When it was allowed, their concept of critical velocity would be different from Justin's model. As far as the result through their methods, Justin's model will not be realized during their experiment. Two criteria, therefore, are not be simultaneously attained in an experiment.

The following can be said concerning experiments conducted in the past:

First, there has been no explanation of why these two types of vessels are most suitable, nor why two criteria are determined from measured discharge.

Second, even though apparent criteria associated with major phenomena might be plotted on the correlation of critical velocity with grain size, this information is nevertheless meaningless.

Third, papers have repeatedly used certain experimental formulas and criteria without giving their source or the content in which they were originally used.

Observations and descriptions of seepage failure must include the progressive stages as well as the critical state. Results from laboratory tests are of limited value because models are of finite size. Actual seepage failure in the field is a progressive phenomenon.

Immediately after surfacial fail due to pressure, there generates a steep gradient around leak. Prior to progression of cavitation, hydraulic potential tends to be steady state. Continuous leakage brings successive excluding of soil grains out of the leak resulting expanding of cavitation toward the river. At a certain distance to the river, cavitation has critical gradient between river water and its top, Remainder of ground is suddenly penetrated through boiling or piping, that is fated to cause a collapse of the levee.

Hence, seepage failure should be investigated as two different phenomena; one of grain size balance under seepage flow and a phenomenon on the field scale.

Also, concerning the condition of uniformity of material, critical velocity must be attained when critical gradient is given under ideal condition, and state of flow concentration under less than ideal condition must be evaluated to determine critical velocity exactly.

## 1 まえがき

浸透破壊実験に関して最も問題となるのは、河川堤防におけるパイピングのような野外における浸透破壊現象が、その発生過程において、直接に観察あるいは計測することがむづかしいために、現象の形態、機構、経過などの記載が正確になされていないことである。

さらに、もう1つのことは、浸透破壊の発生基準としての限界流速の概念および定義が明確にできていないために、限界流速実験と称する実験において、どのような現象を確認した時に限界流速に達したとするのかが明らかになっていないことである。

通常は、実験容器を通過する流出水量を測定し、その流出水量が急激に増加する時点をもって、浸透破壊が生じたものとしている。

しかしながら、パイピング現象は、土の不均一性のた

めに、局所的な破壊から始まるとされており、また、一般に、限界流速は土粒子の安定が失われる時の流速と定義されている。このために、限界流速は、野外においては、構造物周辺の最も流速の大きくなる部位において発生すると考えられている。一方、実験においては、試料が完全に均一状態であれば、試料の全断面の平均流速をもって限界流速とし、試料の不均一性が無視できない時には、破壊の始まった局所の流速をもって限界流速としなければならない。

そこで、下記の実験および解析を行って、浸透破壊現象、特に限界流速の意義を検討した。

### (1) X線透視による浸透破壊現象の観察

土の性質・条件を単純化するために、材料としてはガラスビーズを使用した。ボイリングやパイピングなどの多様な現象を容易に発生させることができる実験容器を使用し、浸透破壊の発生経過およびその形態の観察を行っ

表-1 実験その1に用いた試料の特性  
Table 1 Characteristics of samples used in experiment No.1

試料番号	①	②	③	④	⑤
粒 径 (mm)	0.037 ~0.074	0.074 ~0.125	0.25 ~0.29	0.42 ~0.59	0.037 ~2.0
乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.70	1.51	1.47	1.47	1.80
間 隙 比	0.470	0.656	0.701	0.701	0.389
透水係数 (cm/sec)	$2.75 \times 10^{-3}$	$8.46 \times 10^{-3}$	$2.81 \times 10^{-2}$	$6.21 \times 10^{-2}$	$2.67 \times 10^{-3}$

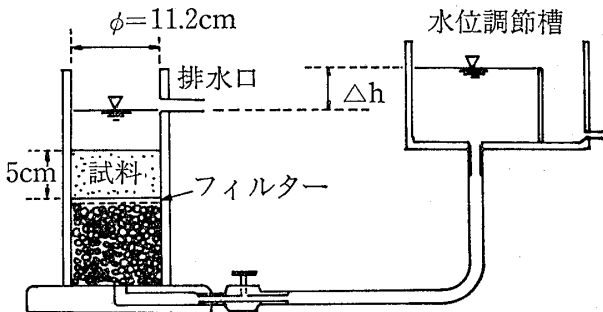


図-1 実験その1の実験装置

Fig.1 Experimental set up of Experiment No.1

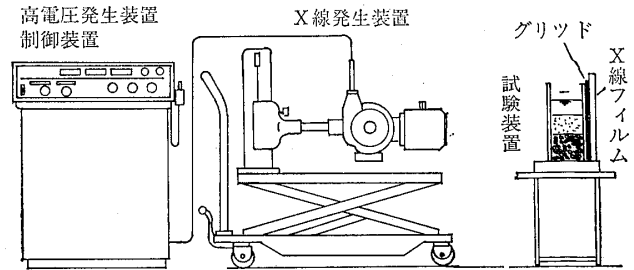


図-2 実験その2のX線写真撮影装置

Fig.2 X-ray photo apparatus of Experiment No.1

た。そのために、X線透視撮影装置およびビデオ装置を用いた。

(2) パイピング発生時の水圧分布計算

実験の観察によると、破壊は一樣な流れのもとで全体にわたって瞬時に発生するものではなく、それ自体が局部的破壊の経過として見られるものである。したがって、破壊現象が表面に顕在化する瞬間の試料内部の動水勾配と流速の分布を三次元モデル浸透計算によって検証した。

(3) 土粒子上昇限界流速実験

「限界流速」は、土粒子の有効重量に対して上昇水流による力の方が大きくなることによって、土粒子が浮揚上昇する時の流速として理解される場合と、粒子の骨格あるいは土塊としての土の構造が崩壊するときの浸透実流速として現解される場合とがある。

限界流速実験として行われている実験においては、限界流速についての定義の仕方およびその実験装置は、前者の考えに立っているようであるが、限界流速状態到達の認定の仕方によると後者のようである。

筆者が実施した実験においては、土の構造崩壊とは関係なく、土粒子が上昇水流によって浮揚し、やがて上昇

し排出される現象の経過を確かめた後、浮揚から上昇に移る時のパイプ内水流の流速を求めた。これは、物理的には Justin (1923) の限界流速のモデルに最も近い方法である。

2 X線透視による浸透破壊現象の観察

2.1 実験その1\*

(1) 実験の方法

図-1および図-2に示すような実験装置を使用して実験を行った。実験容器下部には豆砂利区間を設け、その上に不織布のフィルターを敷き、厚さ5cmの試験区間を設定した。実験に用いた試料は5種類で、それらの試料の性質は表-1に示す通りである。材料としては粒径の異なる球状のガラスビーズを用いた。試料①から試料④までは粒径が比較的均一な試料であるが、試料⑤は、均等係数が6で、10%粒径を0.074mmとした混合試料である。

実験の方法は脱気した試料を実験容器内に水中落下

\* この実験の概要は、1985年6月、第20回土質工学研究発表会において発表。

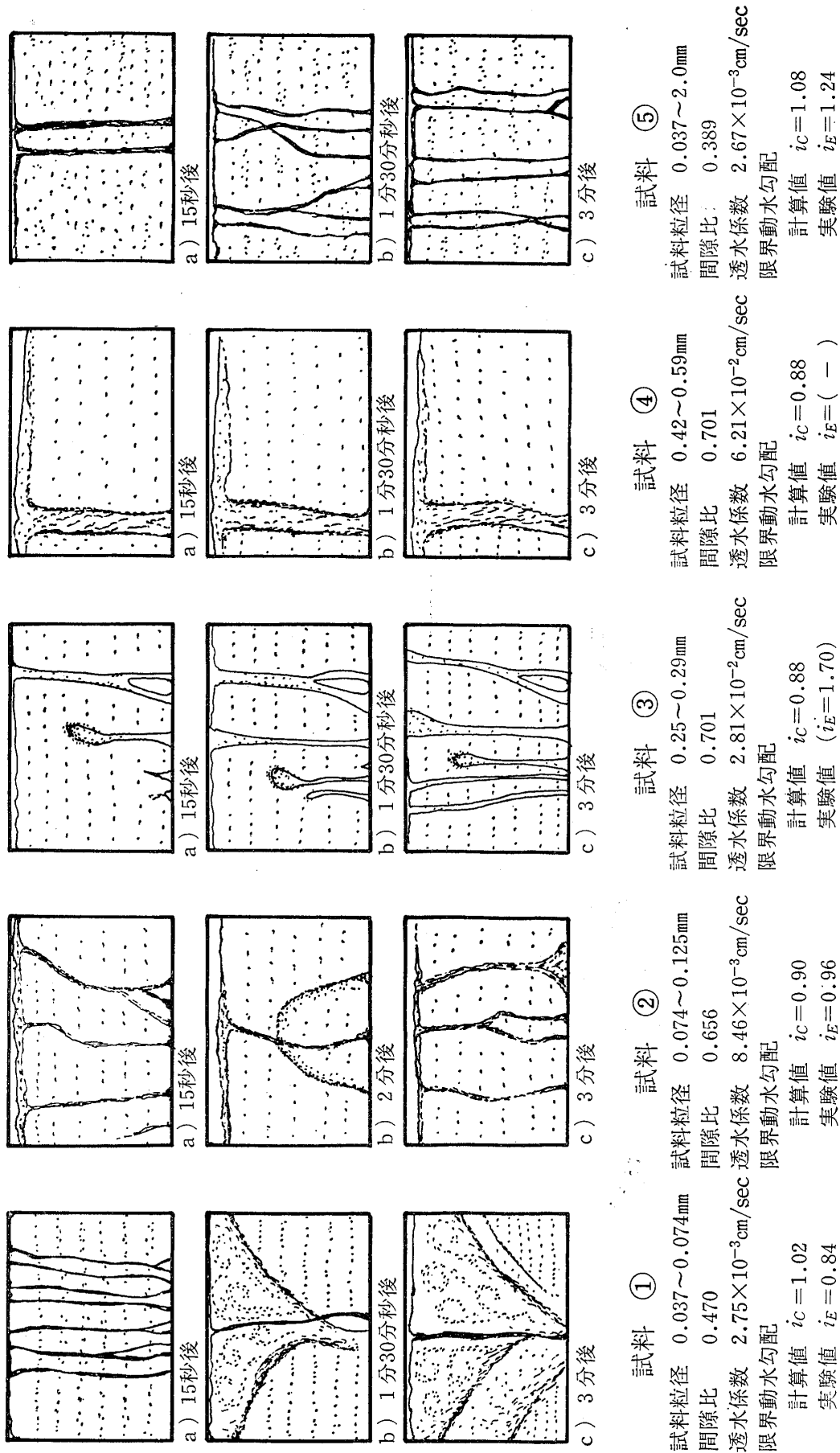


図-3 X線写真に基づく試料の浸透破壊過程のスケッチ  
 Fig.3 Sketch of seepage failure process based on X-ray photos

させて厚さ 5 cm とした後、試料の上下面の水頭差を段階的に増加し、容器上面からの排水量を 5 分間ごとに繰り返し測定した。水頭差の段階的増加は、各水頭を与えた段階で、5 分間ごとの測定排水量が一定になったと認められた後に行った。X線透視写真は、試料の上面に粒子の流出、移動が認められた時点から撮影を開始し、試料の側方からの透視画像を撮影した。

(2) 実験結果

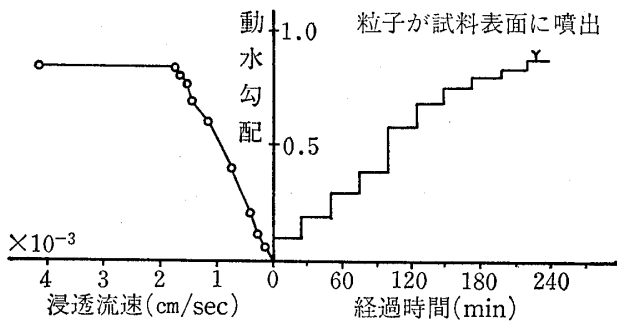
表一に示した 5 種類の試料について、浸透破壊現象の形態と経過を X線透視写真から読み取った。その結果を図一3に示す。図中の a), b) および c) の状態は、試料の上面に粒子の流出、移動が認められた時点から、それぞれ 15 秒、1 分 30 秒 (試料②については 2 分) および 3 分経過した時の観察結果である。

試料①においては、

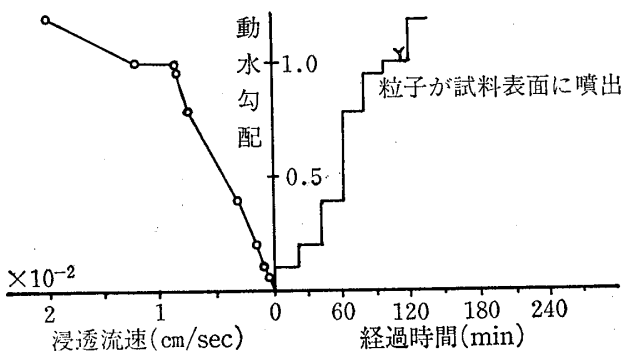
- a) 複数本の筋状の水みちが観察される。
- b) 試料上半部において液状化が始まっている。
- c) b) に引きつづき、液状化状態が試料全体に及んでいる。

この液状化状態において、対流する水と試料の高さは初期の試料厚さに比べて 35% 増加している。

試料②においては、



図一4 実験データ 試料①  
Fig.4 Data for specimen ①



図一5 実験データ 試料②  
Fig.5 Data for specimen ②

a) 試料①の場合に比較すると、やや太い数本の水みちが観察されるが、液状化状態には至らず、試料上面において粒子の流出点移動しているのが認められる。

b) 目視によれば、a) の状態に比べて大きな変化は見られない。

試料③においては、

a) 試験区間の上下を結ぶ水みちと、発達途中にある水みちが認められる。また、一部においては、粒子組織が少しゆるんだゾーンが水みちの発達に先行して生じているのが認められる。

b) 発達途中にある水みちに先行するゆるみゾーンは水みちに成長し、その水みち長を増加して、試料上面に達しているのが認められる。

c) 水みちの発達過程において特徴的なことは、その先端部に塊状のゆるみゾーンが発生し、それが平均的には流れの方向に進行していることである。

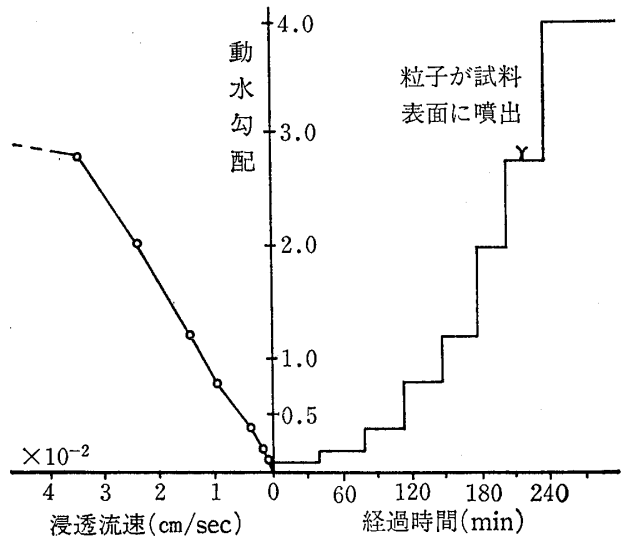
試料④においては、a) の段階において 1 本の太い水みちが認められており、その後の b) および c) のいずれの段階においても、この状況はほとんど変化していない。

試料⑥においては、

a) 3 本の太い水みちが見られる。

試料上面の目視観察によれば、粒子の小さい流出口が数箇所に見られたが、X線透視写真に見られるような規模のものではない。したがって、X線透視写真では、複数本の筋状の水みちが重なって見えているものと考えられる。

b) 細粒子の洗い出しが進行し、試料上面で粒子の堆積が進行しているのが認められる。



図一6 実験データ 試料③  
Fig.6 Data for specimen ③

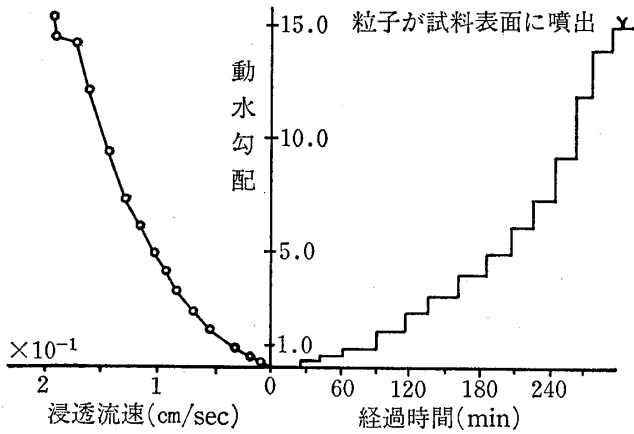


図-7 実験データ 試料④  
Fig.7 Data for specimen ④

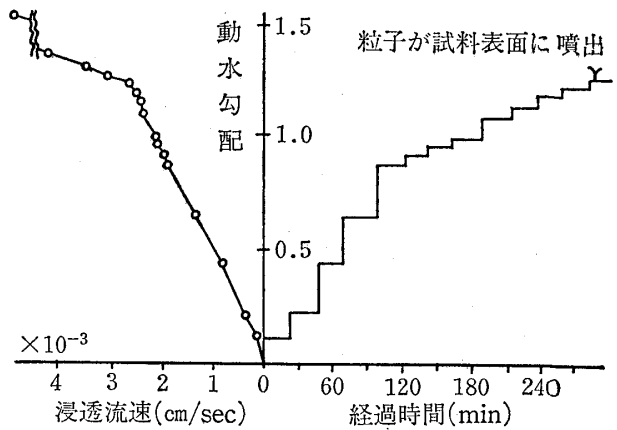


図-8 実験データ 試料⑤  
Fig.8 Data for specimen ⑤

c) 引き続き細粒子が洗い出され、試料上面で粒子の堆積が進行しているのが認められる。

さらに、それぞれの試料に関する経過時間および浸透流速と動水勾配との関係を示すと、図-4～図-8のようになる。これらの図において、粒径の最も大きい試料④の結果(図-7)では、土の透水性と比較して給水管が細いために、動水勾配を大きくしても管路の抵抗が作用し、流量の増加が妨げられている。

(3) 実験結果の考察

実験結果において特に興味を持たれるのは、パイプ状水みちが試料の底部から上方に向かって発達していくこ

とである。特に試料③については、3分間に撮影した3枚のX線透視写真(図-9上部のスケッチ参照)において、5本の水みち(A, B, C, DおよびE)が識別され、つぎつぎと上昇し上面に達していることがわかる。これらの水みちの頭部の高さを縦軸に、時間を横軸にとって、それぞれの水みちの上昇発達状況を示すと図-9の下部のようになる。

スケッチa)とb)によって求められる水みちCとDの上昇速度には、明らかな相違が認められる。また、b)とc)によって求められる水みちEの上昇速度は、水みちCの場合とほとんど等しくなっている。ここに、水みちAお

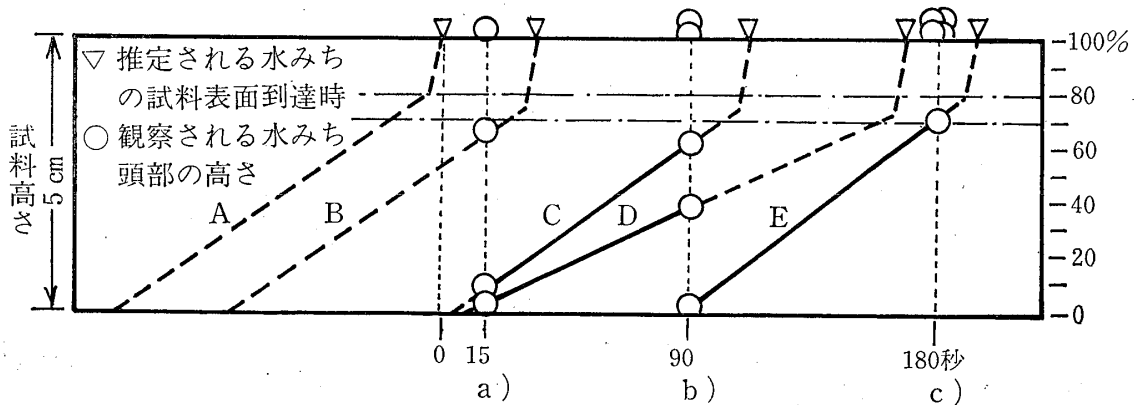
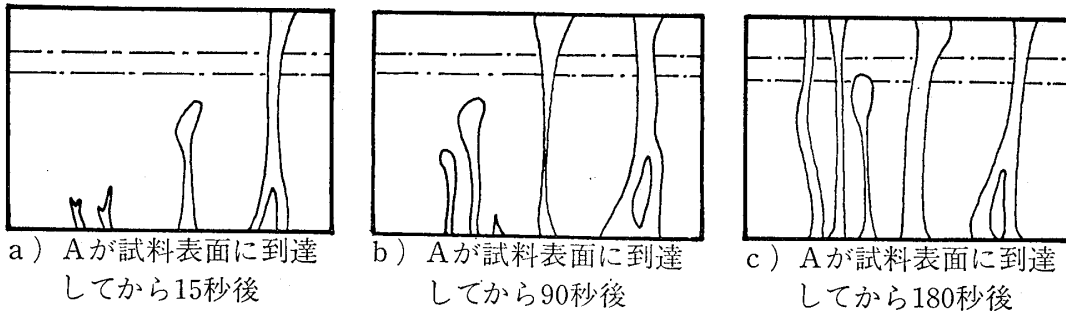


図-9 試料③の水みち上昇経過の解析図

Fig.9 Analytic diagram of rise of tubular cavities on specimen ③

よびBについては、CあるいはEの場合と同じ上昇速度であるとして破線で示している。また、水みちDの場合、a)とb)によって求められる上昇速度が維持されるものとするれば、c)においては上面に到達しないことになるにもかかわらず、スケッチc)に示すように、実際には、それまでに水みちは完成している。このことは、試料の上面に近いある高さから上部において、上昇速度が増加することを意味している。すなわち、水みちは、試料内の高さが70%付近までは定速度かあるいは緩く速度を増して上昇し、70~80%付近から急に速度を増すものようである。このことは、後に述べるように、“実験その2”において確認された。

このような現象は、試料の粒子骨格構造の崩壊とは考えられず、また、粒子の運搬排出によって空洞が上側に向かって発達する現象でもない。図-10に示すように、試料底部から水みちが発生することは、試料が揚圧力で持ち上げられようとするとき、試料内に微小な変形を生じ、試料下部付近の状態に差があるために、いくつかの点に引張り応力が働き、フラクチュアが発生するためと考えられる。写真からの判読によれば、フラクチュアは2~4mm程度の太さである。このフラクチュア空隙内における水圧勾配は極めて小さく、その先端部の水圧は、周辺部の水圧との差が大きいため、フラクチュアリングがさらに進行する状態にある。また、空隙内外の水圧

差はフラクチュアの上部で大きく、下部では小さいために、フラクチュア内では対流が生じる。現象のこの段階では、粒子が外部に排出されているような状況は見られないので、試料はフラクチュアの両側に圧縮されている

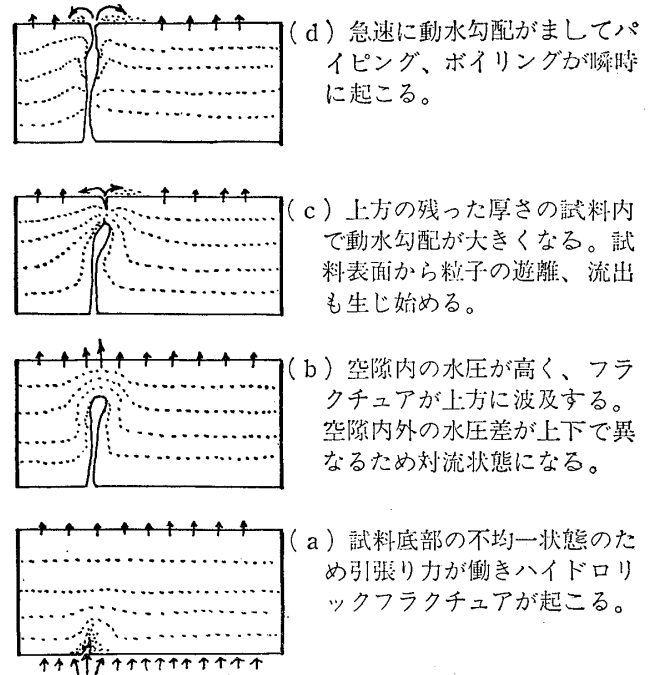


図-10 水みち上昇経過の解釈図  
Fig.10 Interpretation of rise of tubular cavities

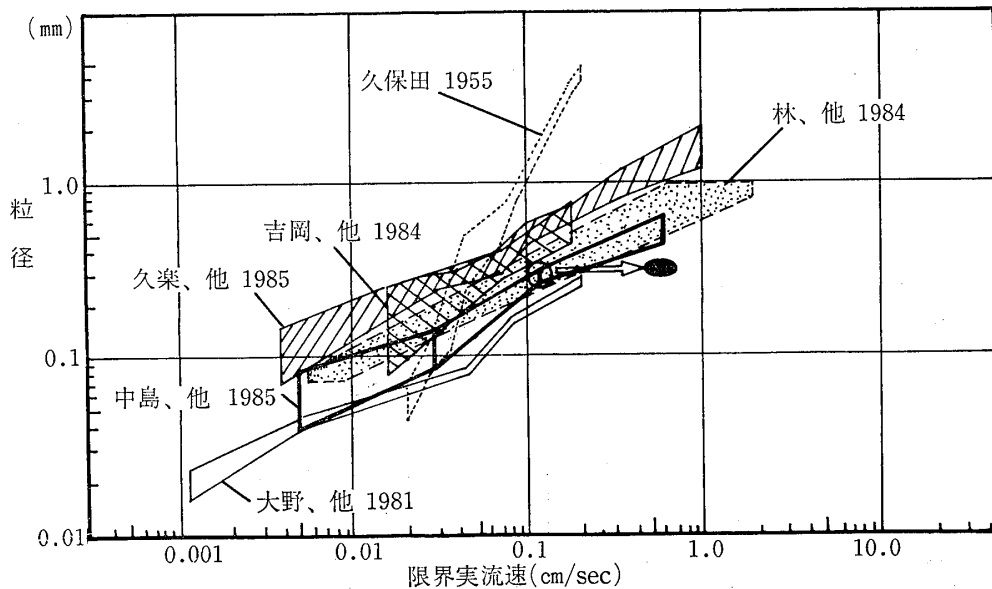


図-11 粒径と限界実流速の関係図 他の実験値との比較、太線が実験その1の結果、黒楕円は次章で求めた局部流速値  
Fig.11 Relation between grain size and critical velocity correlating with other data. Thick line shows our results. Black oval points local velocity obtained in next chapter

表一2 実験その1の結果—限界流速  
Table 2 Critical velocities obtained through Experiment No.1

試料番号	①	②	③	④	⑤
限界実流速 (cm/s)	$4.84 \times 10^{-3}$	$2.83 \times 10^{-2}$	$1.12 \times 10^{-1}$	$5.79 \times 10^{-1}$	$2.21 \times 10^{-2}$

と推定される。

フラクチュアが80%近くの高さまではほとんど一定速度で上昇してくるが、これより上部の上面までの部分の動水勾配が著しく大きくなり、ポイリングあるいはパイピングが瞬時に生じて表面まで貫通するものと考えられる。

実験に用いたそれぞれの試料について、パイプ状水みちが貫通した時の容器断面を通る流量から限界実流速を求めると、表一2に示すようになる。これを既往の実験結果と比較すると図一11のようになる。

2.2 実験その2\*

(1) 実験の方法

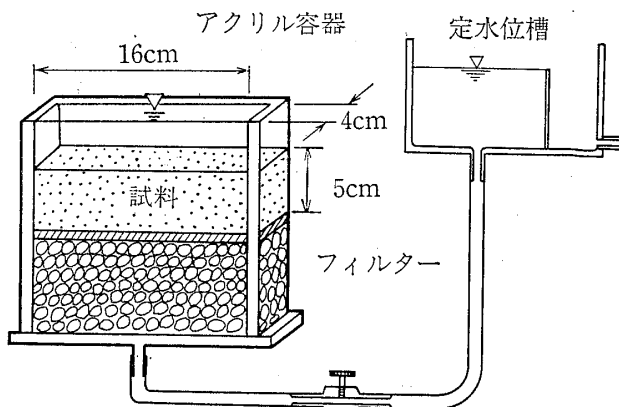
“実験その1”で述べたようなX線の透視写真撮影では、観察しようとする現象が極めて短時間に生成・発達し、この現象の変化速度に比べて、観察の間隔が大き過ぎることが現象の正確な記述を困難にしていた。

そこで、試料内部で生起する浸透破壊現象を連続的に観察するために、本実験では、図一12に示すような箱型容器の実験装置を用い、X線による透視写真の撮影に代って、図一13に示すように、イメージインテンシファイアを使用し、モニターテレビの画像を目視と同時にその画像をビデオ録画することによって、繰り返し目視観察することができるようにした。

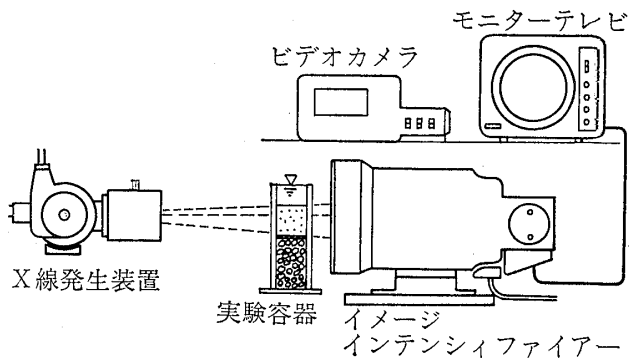
表一3 実験その2に用いた試料の特性  
Table 3 Characteristics of samples used in experiment No.2

試料番号	粒径 (mm)	間隙比	透水係数 (cm/sec)	記録方式
④	0.074 ~ 0.12	0.761	$5.73 \times 10^{-3}$	X線写真
③		0.747	$5.08 \times 10^{-3}$	X線VTR
②		0.773	$5.97 \times 10^{-3}$	X線VTR

\* この実験の概要は、1986年6月、第21回土質工学研究発表会において発表。



図一12 実験その2の実験装置  
Fig.12 Exmental set up of Experiment No.2



図一13 実験その2のX線ビデオ撮影装置  
Fig.13 V.T.R. apparatus for X ray-photo of Experiment No.2

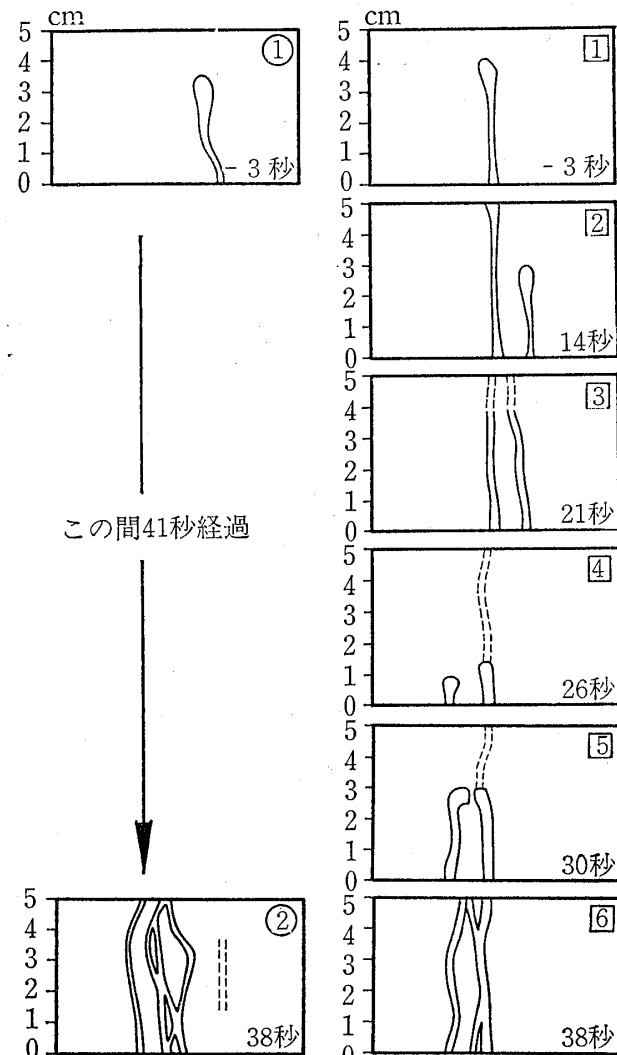
この実験においては、3つの試料を用い、試料③および試料②については、ビデオ撮影方式によって、また、試料④については、X線透視写真撮影方式によって記録した。実験の方法および条件は、“実験その1”の場と同じである。

実験試料の材料としては、“実験その1”の試料②と同じ粒径(0.074~0.125mm)のガラスビーズを用いた。3つの実験に用いた試料の性質は表一3に示す通りである。

(2) 実験結果

試料④において、パイプ状の水みちが発生した動水勾配段階におけるX線透視写真は、パイピングが発生する3秒前に撮影されている。しかしながら、X線透視写真においては、撮影に時間がかかることから、次の撮影はパイピング発生から38秒後であった。図一14a)は、これらのX線写真からのスケッチである。これによると、パイピング発生3秒前に1本の水みちが試料内部に形成されつつあることはわかるが、41秒後には3~4本の水みちが完全にでき上がっていて、その間に進行した水みちの





この間41秒経過

a) X線写真からのスケッチ b) ビデオ撮影像のスケッチ

図-14 X線写真およびビデオ撮影による水みち発達経過のスケッチ

Fig. 14 Sketch of tubular cavities' expand based on to X-ray photos and' V. T. R.

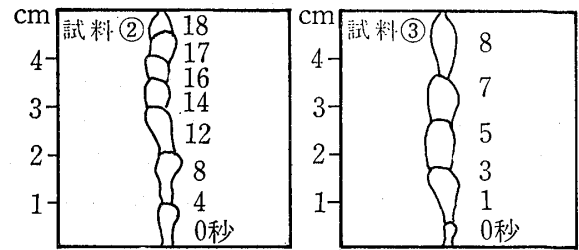
発達過程は一切不明である。

これに対して、ビデオ撮影においては、試料が流出を始める前から連続的に浸透破壊現象を捕らえることができる。そこで、試料③のビデオ画像から、パイピング発生前3秒、発生後14秒、21秒、26秒、30秒および38秒における試料内部の状態をスケッチしたものを、X線写真からのスケッチと比較して示すと、図-14b)のようになる。

このように、浸透破壊現象を連続的に撮影することができるビデオ画像に基づいて得られたパイピングの発達過程を要約すると、つぎのようになる。

- i) 試料底面からパイプ状の水みちが生じ、その先端に塊状のゆるみゾーンを伴って、ほぼ定速度で上昇する。

a) 水みち発生後の経過スケッチ



b) 発達速度

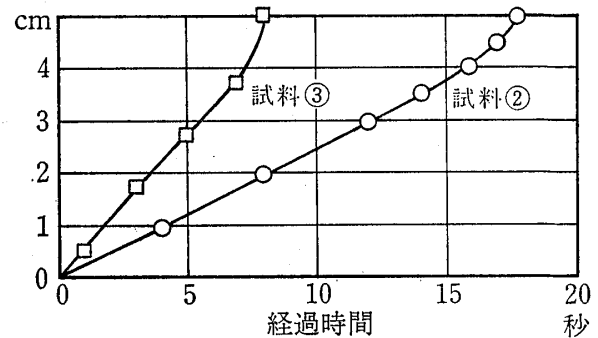


図-15 水みち発達速度の解析

Fig. 15 Diagram of rate of rise of tubular cavities

表-4 実験その2の結果—限界流速

Table 4 Critical velocities obtained through experiment No. 2

試料番号	計算限界動水勾配 $i_c^*$	噴砂発生時動水勾配 $i_E^{**}$	実験限界実流速 $V_{CE}(\text{cm/s})$
Ⓐ	0.852	0.94	$1.59 \times 10^{-2}$
Ⓑ	0.859	1.04	$1.45 \times 10^{-2}$
Ⓒ	0.846	0.94	$1.57 \times 10^{-2}$

\* 計算限界動水勾配( $i_c$ )は、Terzaghi の限界動水勾配式によって求めている。

$$i_c = (G_s - 1) / (1 + e) \quad G_s: \text{試料の真比重} \\ e: \text{試料の間隙比}$$

\*\*噴砂発生時動水勾配( $i_E$ )は、試料上面で粒子の流出が生じた時の動水勾配を表す。

- ii) フラクチュアが試料高の90%以上の高さに達すると、その頂部から試料表面の間に、一瞬のうちに細い筋ができてフラクチュアが貫通する。この段階で狭義のパイピングが発生したことになる。
- iii) 水みちが表面まで貫通した直後、その水みちの上半分はいったん消滅あるいは閉塞し、しばらくして下半分が再び上方へのびていく。このことは、フラクチュア内の高い水圧が貫通と同時に低下するため

に、上半分の粒子がその周辺の残留過剰水圧によって押し出され、水みちが閉塞されるものと見てよいであろう。

また、パイプ状水みちの先端の進行状況は図-15に示す通りである。これによると、水みちが発生してから試料上面に達するまでの時間は、試料⑧では18秒、試料⑨は8秒で、互に異なっているが、試料高のおよそ70%より上部において速度が大きくなっている。

なお、パイプ状水みちが試料の上面に到達した時の平均動水勾配および平均浸透実流速を、それぞれの試料について求めると、表-4のようになる。

### 3 三次元浸透モデル計算による検証

#### (1) 計算法および条件

三次元差分法による浸透計算によって、パイピングの発達過程のシミュレーションを行って、実験の検証をした。プログラムとしては、[OYO TRIW・84] (上沢, 1982)を用いた。

浸透モデルは、辺長11cmの正方形で、高さが5cmの立体試料とし、試料底面中央から上方に伸びる角柱形の水みちができたものとし、その水みちの高さを35mm (試料高の70%) および42.5mm (試料高の85%) とし、また、水みちの幅をそれぞれについて1mmと3mmの2種類とした (図-16参照)。

試料の透水係数  $k_p = 3 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$  とし、水みちの

透水係数  $k_p = 3 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$  とした。

また、試料の上下面にかかる水頭差による平均動水勾配  $i$  を1.70として計算した。

#### (2) 計算結果と考察

図-17は、各モデルの中心を通る鉛直断面における水圧ポテンシャルを表したものである。フラクチュアリングの水みちが上昇するに従って、その先端部の上方に著しく大きい動水勾配が生じ、直上部の上昇流速は、試料内部の他の部分よりも遙かに大きくなる。この関係を三次元的に示すと、図-18のようになる。

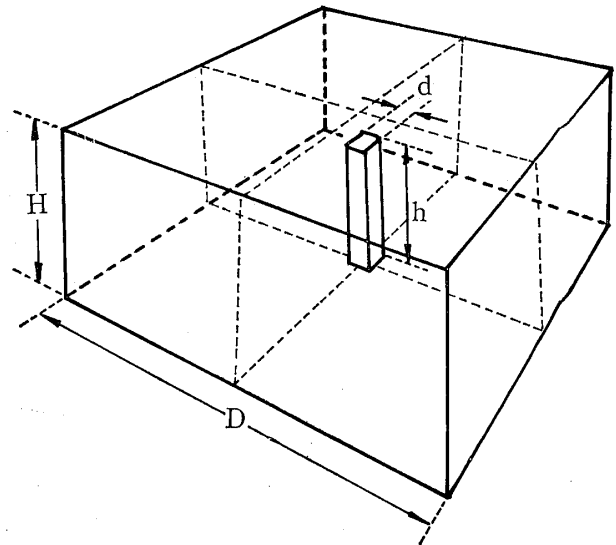


図-16 3次元シミュレーションモデル  
Fig.16 Tridimensional simulation model

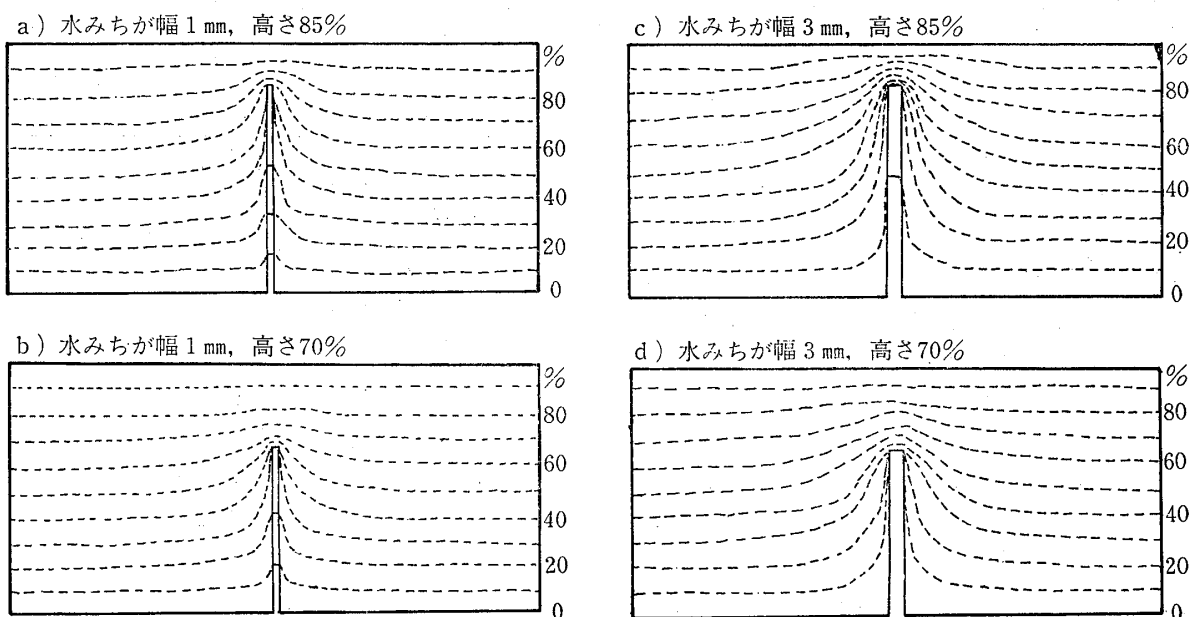


図-17 3次元モデルシミュレーションの結果、水圧ポテンシャル分布図  
Fig.17 Distribution of hydraulic potential given by tridimensional model simulation

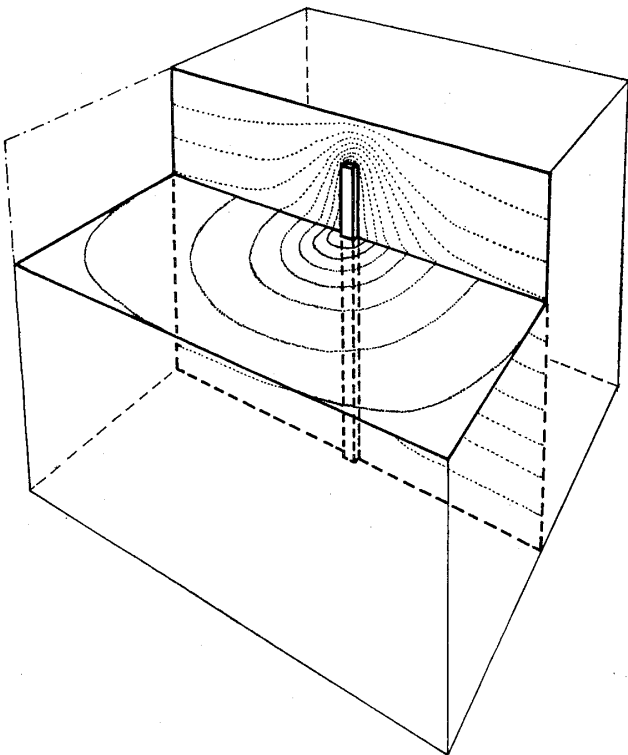


図-18 解析結果の3次元的表现  
Fig.18 Tridimensional illustration of result

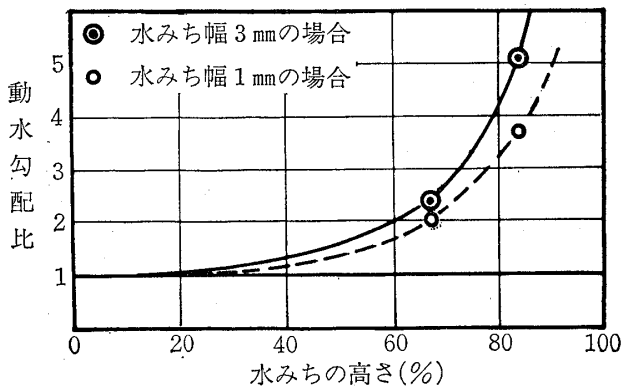


図-19 水みちの径と高さによる残余区間の動水勾配の増大比  
Fig.19 Magnification of hydraulic gradient in remainder of specimen, depending on diameter and height of a tubular cavity

また、水みち発生前の平均動水勾配に対する水みち直上部の動水勾配の比と、水みちの高さとの関係は、それぞれの水みち幅に対して、図-19のように表すことができる。

実験の結果に近い計算モデルは、図-17(c)のケース(水みちの幅が3mmで、水みちの高さが85%の場合)である。この場合の動水勾配の比は、図-19によれば、約5となっている。したがって、局部条件として考えるときには、流速も周囲の流速の5倍程度になっているとい

える。図-11は、前章で述べた実験(“実験その1”の試料③)の結果を、三次元シミュレーション計算に基づいて、局所の実流速に換算した値を黒丸で示してある。

#### 4 土粒子上昇限界流速実験

##### (1) 実験の方法

この実験は、土の破壊時の流速ではなく、土粒子が浮揚上昇する時のパイプ内の流速を測定するものである。

容器としては、図-20に示すように、内径2.0cm、高さ100cmの亚克力パイプを用いた。試料としては、図-21に示すような5種の単粒径(ふるい目1段階の間に入るように調整した)の砂試料を用いた。

実験の過程においては、容器内の供試体内部の状態、および土粒子が分離して水とともに流動・運動し、最終的に容器上端から排出される状況を観察した。そして、土粒子が容器上端から排出される時の流速を本実験の限界流速として求めた。

なお、最初の実験では、図-20に示す容器形状1を用いて、各試料の浸透破壊～土粒子上昇過程を観察した。しかしながら、この実験容器では、試料の初期の浸透破壊に際しての変位の拘束、試料表面と容器壁の間の過大流速などの影響があると考えられたので、引き続いて、実験容器形状2による実験を行った。

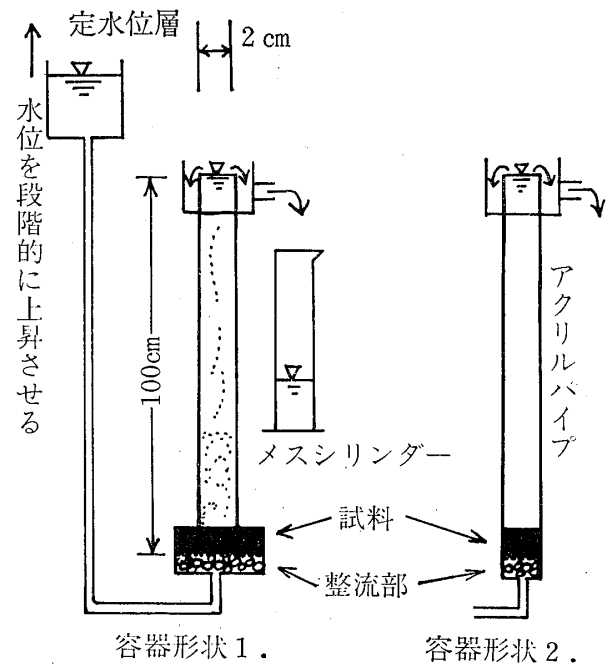

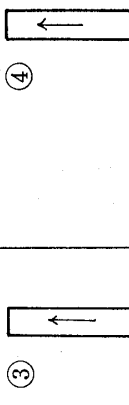

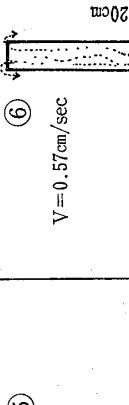

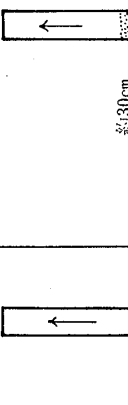
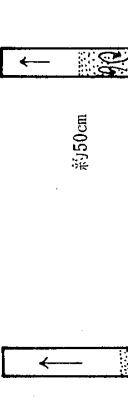
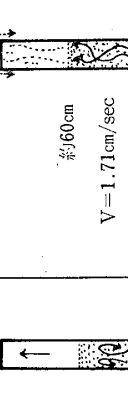

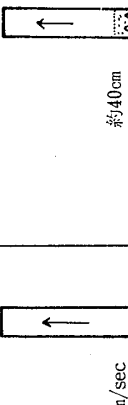
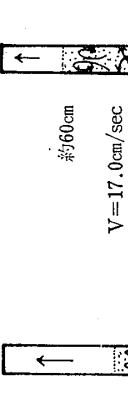
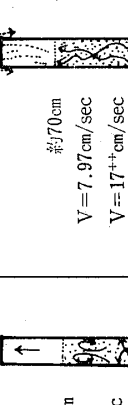


図-20 土粒子上昇限界流速実験装置  
Fig.20 Set up for the experiment to obtain the critical velocity to lift a soil grain

試料	ヒープ・小パイピング発達段階	噴砂段階	対流・乱流段階	粒子上昇排出段階
<p>① 細粒砂 0.074~0.11mm</p> <p>わずかの圧力変化で試料が急激に膨張する。パイピングの進行はみられない。Terzaghiの定義からは、この体積膨張時が限界動水勾配と考えられる。累計流量-動水勾配の曲線の折点にも一致する。</p>	<p>②</p> 	<p>③</p>  <p>①と同じ水位で、その後局所的に噴砂が生じ、試料中央部付近は液状化状態になる。その後液状化状態は全体に広がる。</p>	<p>④</p>  <p>約15cm</p> <p>わずかに水位を上昇させるとは約15cmの高さまで対流するようになり、その上部4cm程は砂が浮遊する。</p>	<p>⑤</p>  <p>約20cm</p> <p>さらに水位を上昇させると、土粒子の沈下・上昇と水流のパラランスが崩れ、砂は上昇し始める。約20cmの高さまで乱流状態になり、その上では砂をわずかつつ、ゆるやかに口元まで運ぶようになる。</p>
<p>中粒砂 0.11~0.25mm 0.25~0.42mm</p> <p>試料の膨張と同時に試料下端より上に向けてきのこ状の小パイピングが生じ、その数が多くなる。パイピングが進行していくのが観察される。</p>	<p>②</p> 	<p>③</p>  <p>約30cm</p> <p>わずかに水位を上昇させると、砂はパイピング内を上昇し、約28cmまで対流し、その上部2cm程は粒子が浮遊している。</p>	<p>④</p>  <p>約50cm</p> <p>さらにわずかに水位を上昇させると対流域はさらに上昇し、対流域は下に乱流域が現われる。</p>	<p>⑤</p>  <p>約60cm</p> <p>さらに水位を上昇させると約60cmの高さまで乱流域となり、その上では砂がゆるやかに、わずかつつ口元まで運ばれるようになる。</p>
<p>粗粒砂 0.42~0.85mm 0.85~2.00mm</p> <p>圧力の増加とともに徐々に試料の体積が膨張する。ほぼ同時に試料の上下方向のいなる所から小パイピングが生じる。①体積膨張に幅がある。②累計流量と動水勾配の曲線の折点が明瞭である。</p>	<p>②</p> 	<p>③</p>  <p>約40cm</p> <p>さらに水位を大幅に上昇させると砂はパイピング内をさらに上昇し、約40cm上昇して対流する。対流の上部に浮遊層はない。</p>	<p>④</p>  <p>約60cm</p> <p>さらに水位を上昇させると砂はパイピング内をさらに上昇し、対流域は高さ60cmまでになり、その下部30cmは乱流域となる。</p>	<p>⑤</p>  <p>約70cm</p> <p>さらに水位を上昇させると約70cmの高さまで乱流域となる。その上では砂がゆるやかに、わずかつつ口元まで運ばれるようになる。</p>

図一21 容器形状一1の実験結果、現象経過の観察、土粒子上昇限界流速  
Fig.21 Result of experiment (using vessel 1). Observation of phenomena and ascending flow velocity.

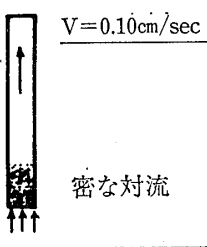
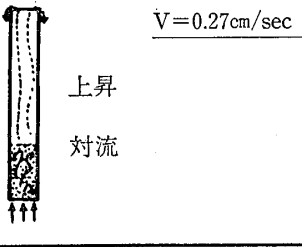
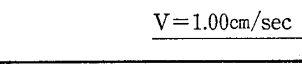
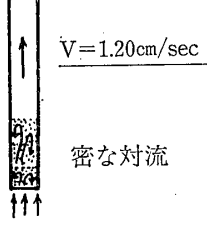
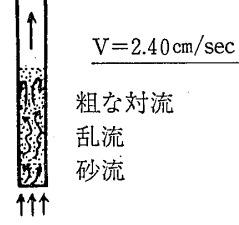
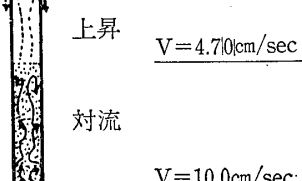
現象段階 試料		対流・乱流段階		粒子上昇排出段階 ⑥	特 徴
		④	⑤		
細粒砂 0.074~0.11mm					わずかな流速増加で砂は対流状態から乱流状態に変わる。パイプ内の水の流れはおだやかである。
中粒砂 0.11~0.25mm 0.25~0.42mm					
粗粒砂 0.42~0.85mm 0.85~2.00mm					細粒砂に比べて大幅に流量が増加しないと砂は上昇してゆかない。パイプ内の水の流れは乱れている。

図-22 容器形状-2の実験結果, 現象経過の観察, 土粒子上昇限界流速  
 Fig.22 Result of experiment (using vessel 2), Observation of phenomena and ascending flow velocity

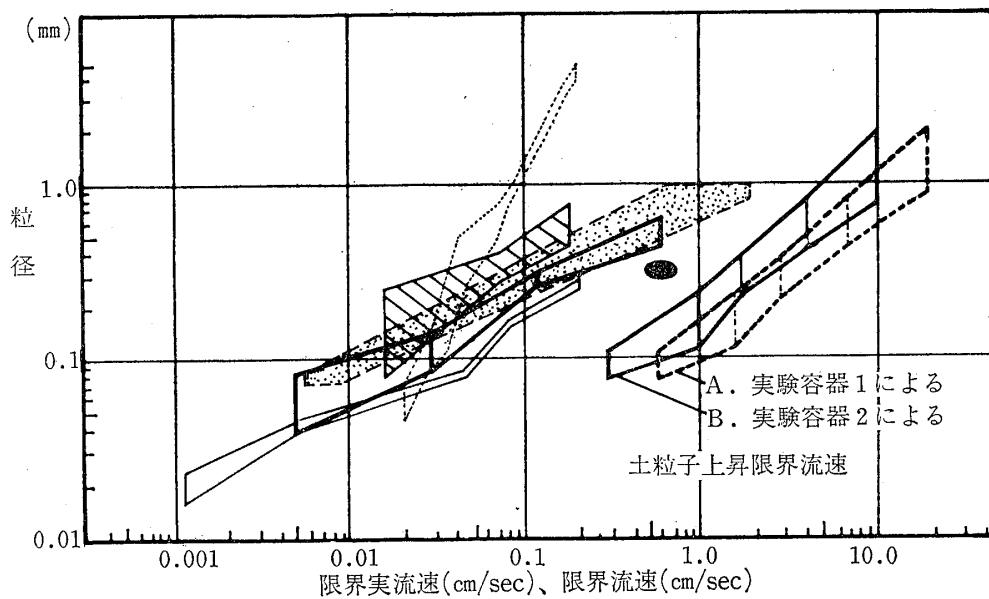


図-23 粒径と土粒子上昇限界流速の関係図  
 Fig.23 Relation between grain size and critical ascending flow velocity to lift a soil grain

## (2) 実験結果

容器形状1の実験では、図-21に示すように、試料底部から小さなパイピングが生じ、表面に到達するとともに試料全体が液状化の状態になり、さらに、土粒子が対流状態になって、上方のパイプの中を上昇する状況が観察された。そして、細粒砂では小パイピングが発生することなく試料の液状化が生じており、一方、粗粒砂では上下方向いたるところから小パイピングが発生する傾向が見られ、試料の粒径による差異が認められた。また、土粒子の上昇排出時の水流速は、細粒砂で0.57cm/sec、粗粒砂では17cm/sec以上であった。

容器形状2の実験では、図-22に示すように、現象形態の経過は前者の実験によるものとはほぼ同様であったが、土塊状態の試料が破壊した後の段階(対流・乱流段階)の流速も求めた。この実験における限界流速値は、細粒砂では0.27cm/sec、粗粒砂では10.0cm/secとなり、容器形状1の実験に比べて若干小さい値を示している。

## (3) 実験結果の考察

上記の実験による土粒子上昇限界流速の値を、他の実験による限界流速値と比較すると、図-23に示すようになる。これによると、本実験による土粒子上昇限界流速は、他の限界流速実験値に比べて1~2桁大きく、また、粒径に対する限界流速の両対数図上の比例勾配は、他の実験の場合よりはやや急勾配になっている。

実験容器の違いは、限界流速値に2倍前後の違いを生じる結果となっているが、その理由は明らかでない。

また、前章において、計算によって求めた局所の流速値は、これらの2種類の実験による限界流速値の中間に

位置することになる。したがって、一般的に限界流速と呼称されているものの値は、単独粒子の浮揚・上昇流速、局部破壊の局部流速、試料断面平均流速の順に小さくなっている。

## 5 浸透破壊の現象と機構の整理

浸透破壊に関する諸概念は明確でなく、それらの理解に混乱が生じている面があるので、さきに述べた実験の結果と、これまでに報告されている諸実験結果とを総合し、特に、野外現象および浸透破壊実験におけるボイリングとパイピング現象を中心にして、浸透破壊現象の機構を体系的に考察する。

## 5.1 現象形態に関係する要因

ボイリングとパイピングの現象の発生形態に関係する要因としては、表-5に示すように考えることができる。これらの諸要因の中で、これまでに発生条件の対比事項として着目されてきたのは、主に、粒径、配合、間隙比であり、そのほかに、容器形状、水圧上昇速度に関する研究がある。

## (1) 容器形状

Terzaghi (1922) は、“試料の厚さが実験容器の直径の1/3以上になるとアーチ作用が十分に働く”と述べ、林ら (1984) は、しらすを用いた実験において、このことを実証している。林らによれば、高さ/直径が0.5の時に、実験による限界動水勾配は、Terzaghiの式による計算値の1.9倍となり、この比が、1.0の時には5倍に

表-5 ボイリングとパイピング現象の諸要因

Table 5 Factors affecting on boiling and piping phenomena

要因	要因を構成する要素あるいは条件	現象を起こすときの流れの運動に関する量
材料要因	●粒径・配合 ●粒度組成 ●粒子形状	→着目粒径, 有効径 →粘着力, 透水係数 →摩擦係数
状態要因	●密度-間隙比 ●密度の不均一性 ●材料の不均一性	→水平拘束力 →流れの集中 →流れの集中
モデル要因	●容器の壁面・形状 ●水位固定条件 ●上面排砂条件 ●水圧上昇速度	→リーク, アーチ作用 →水圧伝搬, 試料の浮揚 →流速低下, 排砂停止 →浸透水圧?, 揚圧力?

なるといわれている。試料の粒度組成にもよるが、土の種類と状態に対する限界条件値として限界動水勾配を求める実験で、アーチ作用を生じさせないことが重要であると考えられる。

しかしながら、一方では、高さに対して十分な直径を持たせた場合には、試料内の動水勾配、流速分布に不均一性が生じて、局部的破壊あるいはパイピングの発生となり、全般破壊と平均動水勾配とを関連づけることができなくなる。

ここでいう全般破壊とは、Terzaghiの式が表している破壊現象が、試料全体に同時に生じることを意味している。いいかえれば、ある範囲（理論的には、無限大）の土が、水圧による破壊によって同時に液状化することを意味する。理論的には、全く均質なある範囲の土が、一樣な水圧の上昇によって、ある水圧のもとで同時に破壊する現象を想定することはできる。しかしながら、実験室における小口径の浸透実験においてさえ、土が局部的に破壊する現象として観察されることを考えると、実際問題としては、全般破壊は起こらないであろう。

浸透実験に関する諸文献においては、土が局所的に液状化した時の水圧をもって限界動水勾配としている。現在採用されている限界動水勾配を決定する条件においては、土が液状化する範囲（全面的であるのか、局所的で良いのか）を定めていないので、Terzaghiの式によって求められる限界動水勾配（全面的な液状化）と比較することは困難である。

しかしながら、一般的な浸透実験において得られた結果を、均一に流れによる全般的破壊の発生と比較するときには、一次近似として、実験結果に対して影響を及ぼしたアーチ作用の補正を行って「限界動水勾配」を求めることが必要であると考えられる。

## (2) 不均一性

ポイリング状態になった後の1脈の砂の流れをパイピング現象という場合は、土塊が破壊した後の相であって、土の均一性とは無関係である。一方、限界動水勾配以下でパイピング現象が先行して生ずる場合は、流れの集中によるものであり、試料およびその状態の不均一性が重要な要因となっていると考えられる。

## (3) 動水勾配上昇速度

動水勾配上昇速度 ( $di/dt$ ) と破壊形態の関係は、大西他 (1980) が、2種類の砂試料について緩急2速度の条件で実験を行っているほか、Zyl (1981) は、浸透破壊においてその影響があることに言及している。

これらの論文に述べられていることや筆者が行った実験およびモデル計算の結果を総合すると、つぎのように

考えることができる。

容器を用いた実験においては、容器上端の自由水面は高さが固定されているが、試料の一次元方向の膨張変位は許容されている。したがって、試料下方において水圧が変化した場合、試料粒子が変位することなしに、間隙の水のみが圧力の変動を伝搬することは起りにくく、試料粒子の変位を通して伝播する。このとき、土試料全体を持ち上げるか、あるいは土試料の一部もしくは全体の膨張変位によって、試料内部における水圧勾配変化を起しながら、一定の時間を経て新たな直線的水圧勾配になる。後者の場合には、破壊時の動水勾配あるいは流速は膨張量に応じて変化するものと考えられる。すなわち、動水勾配上昇速度 ( $di/dt$ ) が大きく、試料自体の膨張あるいは勾配遷移経過に余裕がない場合には、瞬時に壊れる方向に向うことになる。一方、動水勾配上昇速度が小さい場合には、膨張により勾配が緩和しただけ限界動水勾配が大きくなり、同時に、透水性が増加することも加わって流速が大きくなる。

これらのことは、単純化されたモデル計算および限られた条件下における実験の結果からのものである。かりに、野外における実際の現象が、計算や実験における現象と同じであるとみなしても、地層の膨張変位拘束の有無や地層表面上の湛水・排水条件の相違、さらに、動水勾配上昇速度の影響の仕方も異なることが考えられる。また、この問題の実験に関しても、実験材料、容器の大きさ、上昇速度の大きさなどによる破壊形態の違いとか、限界動水勾配値の変化がどのように影響するかなどの点については未だ充分明らかでない。

## (4) 流出砂排出条件

限界動水勾配あるいは限界流速に関する実験は、主として原理モデルとして行われるものであるが、野外現象やこれを模した水平流モデル実験は、むしろ構造物モデル（模型）の問題であって、実験の意義も異なるものである。特に、野外においてパイピングが発生した後で、空洞発達が進行するためには、河川水位等の外力条件が持続する他に、漏水口の径、形状変化や噴出した砂の堆積による口元高さの変化などによって、砂粒子搬出が停止しないという条件が必要である。

## 5・2 野外の浸透破壊現象の系列

野外における浸透破壊については、地中の現象までを含めて、その全貌が観察されたことはない。しかし、構造物の外部における水位、漏水、噴砂、水みちの貫通などの現象と種々の実験結果を総合すると、浸透破壊の現象、機構および限界条件を次のように理解することができ

きる。

ここでは、野外の構造物として河川堤防を想定する。図—24は、河川堤防の下を通る漏水や堤内地の地盤表層から被圧した水が吹き出し、透水層内に水みちおよび空洞ができる進行性の現象をモデル化したもので、被圧型漏水と呼ぶこととする。

図中の①の鎖線は、堤内地の地盤表層が不透水性であるか、あるいは透水層が行き止まり型を呈するところでは、河川水の高水位時に、堤内地の透水層は高い被圧水頭を持つことを示している。この水圧が表層の重量よりも大きくなると、表層は部分的に持ち上げられ（ガマ、エクспанションという）、その一部が破れて漏水が発生する。漏水口の形成のされ方にもよるが、瞬時に漏水が発生した場合、その発生直後には水頭分布は①の状態になり、初期の大きな流速で透水層の砂が噴出し、孔直下に空洞が形成される。

①—②の過程は、空洞状水みちの発達に先立ち、漏水に伴って孔周辺の水圧が平衡状態に向う過程である。

②—③の過程は、漏水の継続によって、水みちが河川方向に発達し、この発達に伴って、水圧分布が平衡に近い状態で河川方向に移動することを示している。

つぎに、空洞状水みちが $i_c$ の位置までくると、空洞先端と河川の間での動水勾配（3次元のモデルにおいてであるが）が限界動水勾配に達し、この間でポイリングあるいはパイピングが生じて短時間に貫通状態になり、激しい水流が地層と堤体土を浸食し、破堤に至ることになる。この現象の過程では、漏水発生後の平衡状態の流速によって、あるいは孔口の拡大と空洞の拡大の相互関係

によって、空洞拡大が停止するか、進行するかが左右される。また、河川の高水位などの外部条件が持続するかどうか、より決定的な影響を与えることになる。

これらの現象の各過程における浸透破壊現象の種類と破壊条件（基準）との対応関係を示すと、つぎのようになる。

#### (1) 被圧型漏水発生経過

表層の持ち上がり（アップリフトと表層重量とのバランス）

表層の破壊（土の強度・潜在的弱点）

漏水・噴出（限界動水勾配・限界流速を越える）

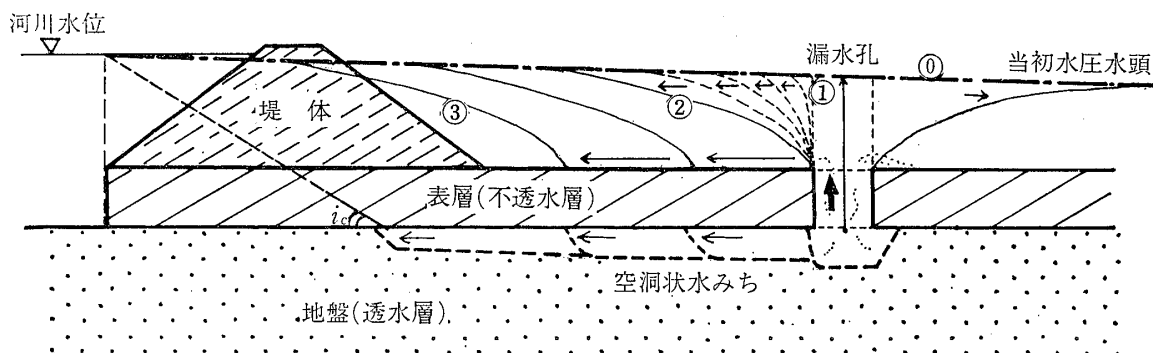
#### (2) 空洞状水みちの発達条件

初期の空洞における周辺水位が平衡状態に近づこうとする過程が先行する。その後、空洞発達が引き続いて起こるためには、つぎの3つの条件を満たしている必要がある。

i) 透水層から空洞に向かう動水勾配あるいは浸透流速が限界値を越えていること。表層下面に接する透水層の空洞は、薄く水平に広がるレンズ状の断面形と推定されるので、空洞への流れは主に鉛直上昇流とみなされる。

ii) 空洞内の水の流速が、空洞壁面から分離した砂粒子を漏水孔口まで運搬できる大きさであること。空洞内の運搬力は複雑で明らかでないが、水平管の中の流れによる掃流力として近似されよう。

iii) 砂粒子を漏水孔口まで運搬、排出できる上昇流速が持続されること。この流速は本文に述べた土粒子上昇限界流速に相当する。



①：当初の水圧水頭。①：表層が水圧によって隆起（ガマ発生）、破壊した直後の水圧のモデル。①→②：漏水の継続によって孔周辺の水圧が下がり、定常状態に移行する。②→③：漏水の継続によって地盤の土粒子が運び出され、空洞状水みちが河川の方に向かって伸びていくと、定常に近い水圧ポテンシャルの分布も河川の方に向かって移動し、空洞状水みちが河川にある距離まで近づくと、水みち先端と河川水位の間の動水勾配が限界に達し、河川との間の残った区間が一挙に破壊する。

図—24 被圧型漏水と空洞状水みち発達過程の模式図

Fig. 24 Schematic illustration of artesian leakage and progression of cavitation



これらの条件のうち、i)は Terzaghi の限界動水勾配の概念が対応する。ii)は水平の搬送条件であり、これよりも鉛直上昇方向の搬送のための流速の方が大きいといえるが、他方、相当の広がりを持つ空洞の全体からの流れは、漏水孔口では集中して大きな流速になる。このため、空洞発達の有無は、空洞の広がり、孔口の形状と土質材料によって複雑に変化するものといえる。

また、地盤の材料は、混合粒径から成っており、粒径に関連しての逐次破壊という側面も加わることがあるであろう。そしてその粒径と限界流速の関係には Koslova の実験が対応するとされているが、1957年に Talobre が自著で紹介している以外に、その出典は不明であり、実験の内容も方法も知ることができない。

上に述べたように、野外のパイピング現象および構造物の被害現象としてのパイピングは、複合した現象経過

であり、その発達経過は、水理的な非定常過程であるとともに、空洞、漏水孔口などの土質モデルの変化を含む過程である。

### 5・3 実験における浸透破壊の現象と発生条件

砂質土を対象として、これまでに行われた主な浸透破壊実験の概要を示すと、表-6 のようになる。これによると、多くの場合、実験は、浸透破壊の現象形態や経過を観察し、限界動水勾配あるいは限界流速を速めているが、これらの実験は、浸透破壊の「原理モデル実験」といべきものと、構造物周辺の浸透の「模型実験」とに大別される。また、多くの場合、限界動水勾配あるいは限界流速を、試料内部が均一な流れの状態であるという条件下で求めている。

モデル内あるいは試料内の流れの集中を考慮した検討

表-6 浸透破壊実験諸例の内容

Table 6 Contents of examples of seepage failure experiment

実験者	年次	実験名称	内容	試料(容器)の寸法(単位: cm)
久保田敬一	(1955)	(限界流速実験)	限界流速 $V_G$	$\phi 5 \times H-$ (容器は40) 詳細不明
中島保治	(1965)	パイピング室内モデル実験	限界動水傾度 $I_G$	$\phi - \times H-$
朝倉喜美男	(1970)	パイピング試験	限界動水勾配 $I_G$ 透水係数	$\phi - \times H21$ (試料の上下は砂礫)
志村孝吉	(1971)	ポイリング発生 限界動水勾配実験	限界動水勾配 $I_G$	$\phi 7 \times H-$
稲田倍穂, 他	(1980)	浸透破壊実験 (矢板のある水平流)	比例限界動水勾配 $I_S$ 全面破壊動水勾配 $I_F$	L 170 $\times$ B 100 $\times$ H 60
大西有三, 他	(1980)	浸透破壊 (ポイリング) 実験	限界動水勾配 $I_G$ 限界流速 $V_G$ $di/dt$ と破壊形態	$\phi 19.6 \times H-$ (容器は100)
大野睦雄, 他	(1981)	限界動水勾配実験 限界流速実験 (水平) 浸透流実験	限界動水勾配 $I_G$ 限界流速 $V_G$ 動水勾配と 下流端浸食状況	$\phi 15 \times H12$ $\phi 2.59 \times H-$ (容器は100) L 36 $\times$ B 26 $\times$ H 25
山下 亮, 他	(1981)	浸透実験	限界動水勾配 $I_G$	$\phi 10 \times H15$ (1~20)
林 重徳, 他	(1984)	限界流速試験 (流動化試験) 限界動水勾配試験	限界動水勾配 $I_G$ 限界流速 $V_G$	$\phi - \times H-$ $\phi 4.59 \times H-$
吉岡 淳, 他	(1984)	(水平) 浸透流実験	限界動水勾配 $I_G$ (限界流速 $V_G$ )	L 45 $\times$ B - $\times$ H 16
林 重徳, 他	(1985)	限界動水勾配試験 (乱さないしらす)	動水勾配~流速	$\phi 25 \times H20$
河野伊一郎他	(1985)	水平 2次元モデル実験 鉛直 2次元モデル実験	動水勾配~破壊形態 動水勾配~破壊形態	L 150 $\times$ B 80 $\times$ H 10 L 150 $\times$ B 10 $\times$ H 80
中島秀雄, 他	(1985)	浸透破壊 (パイピング) 実験 水平浸透流実験	限界流速 $V_G$ パイピング破壊形態	$\phi 11.2 \times H 5$ (X線透視) L 100 $\times$ B 16 $\times$ H 29 (X線透視)
中島秀雄, 他	(1986)	浸透破壊 (パイピング) 実験 土粒子上昇限界流速実験	破壊形態, 現象経過 土粒子上昇限界流速	L 16 $\times$ B 4 $\times$ H 5 (X線透視) $\phi 2 \times H 5$ (容器は100)

を行った例としては、吉岡、他(1984)の浸透流実験がある。これは、水平浸透流モデルの下流端における局部動水勾配・流速を、有限要素法二次元断面モデル浸透計算から求め、実験値との比較を試みたものである。

また、2・1に述べた実験(中島、他、1985)においては、鉛直流の浸透破壊の実験過程を三次元差分モデル浸透計算によってシミュレートし、試料内の小パイピング発達時の水圧ポテンシャル分布を求め、局所破壊の動水勾配、浸透流速を推定し、それらが通常求められている試料全体の平均の値に対して、5~6倍であり得ることを示した。さらに、2・2(中島、他、1986)に示したように、土粒子が水流によって上昇運搬される時の流速を実験によって求めた。

ここで、広義のパイピング実験として、限界動水勾配および限界流速を求める実験を行うに当たって考慮すべき事項を挙げると、つぎの通りである。

- i) 実験は原理モデル実験か、構造物模型実験か。
- ii) 実験において、どのような現象を生じさせようとするか。そして、どのような現象を認めた時に限界状態に達したと判断するか。
- iii) 限界動水勾配と限界流速をどのようにして区別するか。(同じ現象の同一の瞬間に両限界値が存在するのか、別々の実験で求めるよりほかに方法はないのか。2つの限界値は異なる浸透破壊現象の発生の限界値なのか。)
- iv) 以上のことに対応するためには、どのような実験手段、どのような実験装置が必要であるか。(既往の実験についていえば、なぜ限界流速実験容器は細く長いのか。試料はどれだけ入れればよいのか。いずれの場合も段階的に動水勾配を増加してゆき、透過水量が増加することをもって破壊としているが、一方の実験では限界動水勾配を得たとし、もう一方の実験では限界流速を得たとするのはなぜか。)
- v) 特に、土塊あるいは土層を試料として限界流速実験を行う場合、単一粒子の浮遊限界がいかにして求められるのか、容器が細い管であるということで、なぜ限界流速が得られるのか。
- vi) 一般に広く認識される定義に従って、限界流速を求めようとするならば、浸透流ではなく、「上昇水流」が土粒子を浮揚させる時の流速を求めるべきではないか。(これは、本文の「土粒子上昇限界流速実験」である。この意味では、限界流速は、限界動水勾配において発生する現象とは、全く別の現象の限界値であるとするべきである。この時、限界動水勾配状態において試料内に存在している均等な浸透流

速は、別の定義をすべき流速であるといえる。)

- vii) 「原理モデル実験」として限界動水勾配を求める場合においても、つぎのような技術的問題のために、その結果に影響を与えることになる。

実験容器(試料)の高さが直径の1/3以上になると、アーチ力が作用するか、あるいは壁面の摩擦が影響するとされている。

試料の粒度および状態(密度、かみあい)のわずかな不均一性が流れの集中の原因になる。

動水勾配の増加速度  $di/dt$  によって、破壊の形態、経過に差異があるとされており、実験装置の試料上方の水位を一定に保つか、試料表面の隆起を許すかなどの条件によって異なる。

- viii) 試料厚さ全体としての平均動水勾配によって限界動水勾配を求める場合、試料内の完全な均一性が仮定される。しかしながら、実際の土は不均一であるので、上記の仮定によって求められる値は、見かけの動水勾配というべきである。

流れの集中、局部的破壊が先行して発生した場合は、その局部における限界時の状態を求めなければならない。

次に、いろいろな実験によって得られた限界流速の値や理論値を比較すると、次のようなことが考えられる。

通常行われている限界流速実験は、土塊を通る浸透水量から計算したもので、その値は、試料内の不均一な状態、粒子間のインターロッキングなど種々の要素を含む結果としての破壊時の平均的浸透流速であり、単独の土粒子が浮揚時に受ける水流の流速を意味するとは考えられない。したがって、この値を試料粒径との関係で表すことは物理的意味のないことで、これは単なる示標としての意味しかない。

一方、土粒子上昇限界流速は、粒径との関係で表すことができるものであり、Justinの理論値あるいは球体の流水抵抗の式\*による値などと比較できるものである。この土粒子限界流速と粒径との関係は、図-25に示すようになる。この図には、今までに発表された通常限界流速実験値(スケールの粒子ではなく土塊についての値であり、物理的意味からは「見かけの流速」となる)を書き加えてある。この図から明らかなように、「見かけ限界流速」、「局所の限界流速」、「土粒子上昇限界流速」の順に流速が大きくなっており、これは、流れの集中が起こりやすい土において、平均的に均一な土塊と見

\* 土木学会編(1974), 土木工学ハンドブック第8編 第8章 p.454 参照

ることと、単一の粒子を対象とすることによる違いといえる。

さらに、土粒子上昇限界流速の実験値は、球体の受ける水流による抵抗の曲線(A)に一致しており、また、抗力係数  $C_D=2$  としたときの Justin の理論値に対しては、中～粗粒の砂の粒径範囲では概ね一致している。さらに、

かれが土の不均一性を考慮して提案した安全率4をとるならば、細粒砂の範囲でも合致する。Justin の示した値は、土粒子の継続的排出によってマクロな意味おけるパイピングが発達するための条件である。この意味において、Justin は、自らの理論式と実用上の判断において、極めて適切な提案を行ったものといえる。

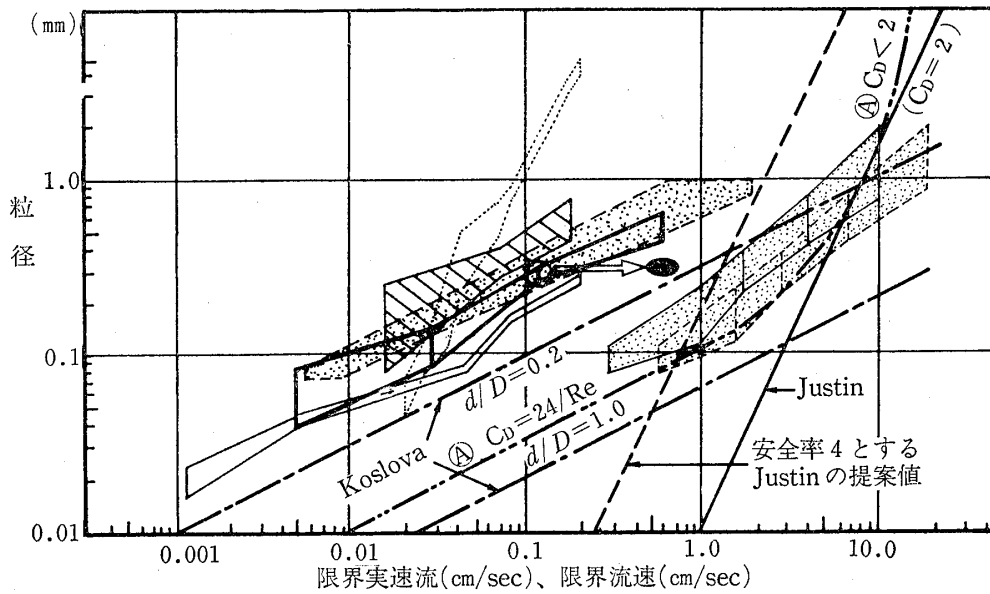


図-25 限界流速の諸実験、理論による提唱値の関係図

Fig. 25 Critical velocities proposed theoretically and experimentally to be compared with one another

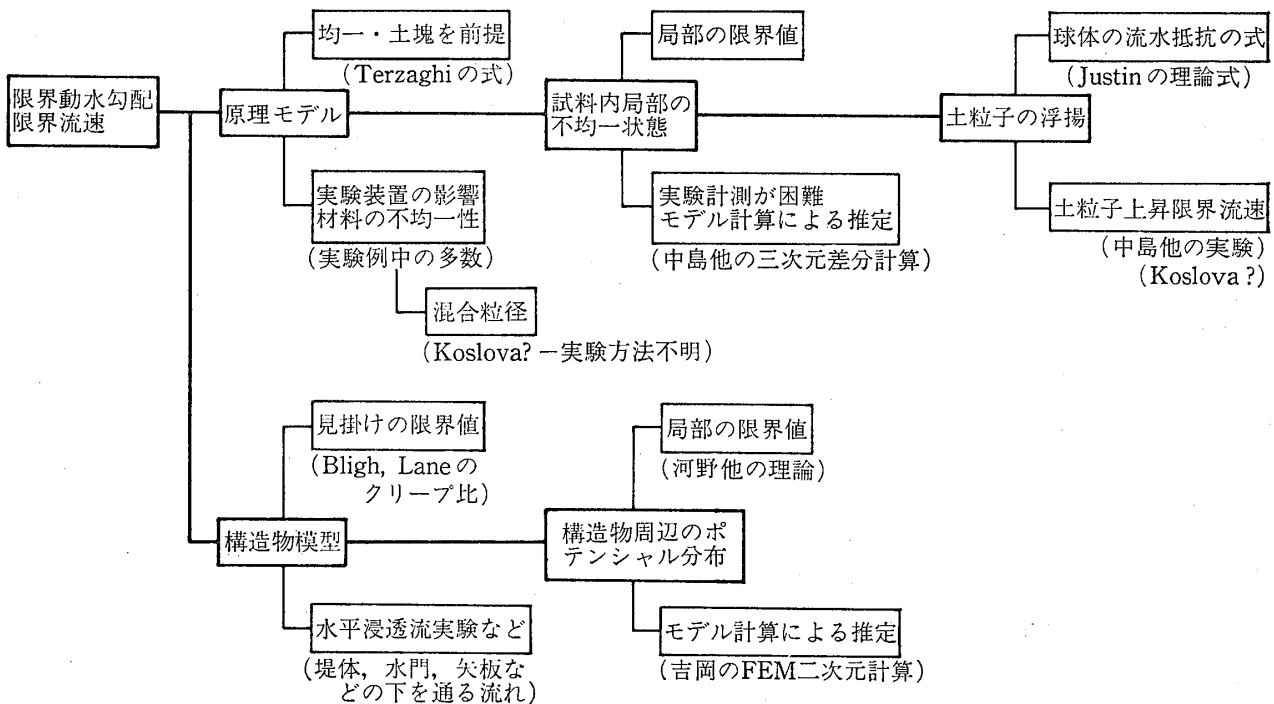


図-26 浸透破壊実験の種類と限界値の相互関係

Fig. 26 Relations between sorts of experiment and criteria of seepage failure

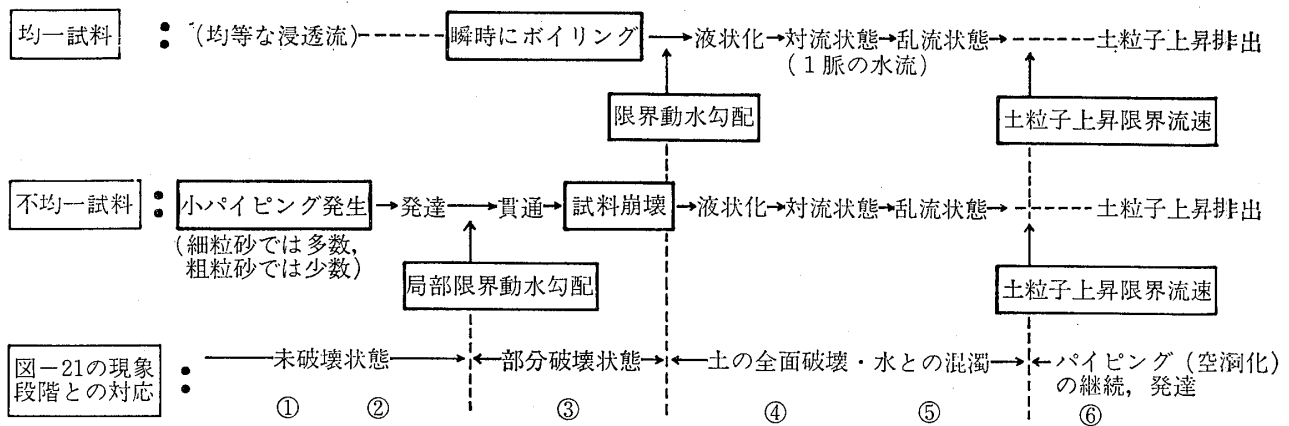


図-27 浸透破壊の現象系列

Fig.27 Series of progressive phenomena of seepage failure

実験結果に比べて、Justin の式による値が10~100倍も過大であると評価する意見もあるが、単純にその結果の値を比較するのではなく、その実験の内容とその結果の物理的意味を十分考慮した上で評価すべきであろう。

さらに、混合粒径試料の限界流速の実験値としてしばしば引用される Koslova の実験式は、正しくプロットすると、図-25に示すように、球体の浮揚時の水流の流速(A曲線)に近似し、中粒砂では、Justin の式あるいは土粒子上昇限界流速に一致する。(このような傾向から Koslova の実験は、恐らく、大多数の限界流速実験とは異なり、むしろ、土粒子上昇限界流速実験に近いものであったのではないかと想像される。)

これらのことから考えると、通常行われている「限界流速実験」は、本質的には、「限界動水勾配実験」と異なるものではない。2つの限界値を一つの破壊現象が発生する同一瞬間の2側面であるとして、その限界流速を粒径との関係で整理しようとするならば、むしろ「限界動水勾配到達時の浸透流速」を用いるべきであろう。

浸透破壊実験における種々のケースと破壊発生限界条件の関係を系統的に示すと、図-26のようになる。また、図-27は、限界動水勾配による試料の破壊から、土粒子の排出に至る現象の経過を模式的に示したものである。通常の浸透破壊実験では③~④段階で終らせているが、野外のパイピング進行に対しては、⑥段階までの条件が極めて重要となる。

## 6 あとがき

堤防やダムの下を空洞状の水みちが貫通することをパイピング発生と呼んでいることもあれば、土の表面から1個の土粒子が飛び出した時に、パイピングが発生した

と判定していることもある。これは、限界流速を求める実験方法が、限界流速の定義からどのような必然性をもって決められているのか明らかでないためである。

このようなことから、2~3の実験およびモデルシミュレーションを行って、その結果と既往の実験結果とを比較し、浸透破壊の現象と実験の位置付けの検討を試みたわけである。

その結果として、つぎの事項を十分考慮して、浸透破壊実験を行うことが必要であると考えている。

第1に、想定する現象の規模、複合性、均一性に係る実験の位置付けを明確にすることが必要であること。

次に、土の不均一性、土中の水の動きなどを連続的に実測することが難しいために、実地における破壊の厳密な予測・判定は不可能に近いが、局部条件の評価手法および不均一性の定量的な表現法を開発することによって、構造物設計に際して、具体的かつよりの確な浸透破壊を考慮することが可能になると考えられること。

第3に、野外の現象においても、実験容器内の現象においても、現象の経過をよく観察・記述することが重要である。さらに、実験に関しては、実験の仕組み、装置の寸法を明記すること、また、認定した限界値などのような現象に対応し、どのような意味を持つのかを明確にすることが、概要報告においても不可欠であること。

## 参考文献

- 朝倉喜美男・長谷川英明(1970):土質材料のパイピングに対する抵抗性について,第5回土質工学研究発表会講演集 pp.373~376  
林重徳・山内豊聡(1984):しらすの限界流速と地山の浸透破壊問題への適用,日本応用地質学会昭和59年

- 度研究発表会予稿集 pp. 140~143
- 林重徳・斉藤芳徳・松雪清人(1985)・乱さない一次しらすの浸透崩壊特性, 第20回土質工学研究発表講演集 pp. 1489~1490
- 稲田倍穂・太田正彦・本間重雄・稲場弘之(1980) : 浸透破壊現象に関する基礎的実験, 第15回土質工学研究発表講演集 pp. 1137~1140
- Justin, J. D. (1923) : The Design of Earth Dams, ASCE Transactions, No. 1531, pp. 48~51
- 河野伊一郎・西垣誠・早瀬宏文(1985) : 浸透水による地盤の進行性破壊に関する実験, 第20回土質工学研究発表会講演集 pp. 1475~1478
- 松尾新一郎・河野伊一郎・久保田英之(1971) : 矢板等の下をまわる浸透流と地盤の安定に関する考察, 第6回土質工学研究発表会講演集 pp. 487~490
- 中島秀雄・松原幹夫・飯島豊(1985) : X線写真を利用したパイピング現象の観察(第一報), 第20回土質工学研究発表会講演集 pp. 1479~1482
- 中島秀雄・長瀬迪夫・飯島豊(1986) : X線写真を利用したパイピング現象の観察(第二報), 第21回土質工学研究発表会講演集 pp. 1651~1652
- 中島保治(1965) : 干拓堤防のパイピングについて, 土と基礎 Vol. 13, No. 2, pp. 83~88
- 大西有三・大津宏康・山花豊(1980) : ボイリング現象に関する一次元モデル実験について, 第15回土質工学研究発表会講演集 pp. 1141~1144
- 大野陸雄・山崎弥・トランデュック フィォアン(1981) : 砂のパイピング特性に関する実験的研究, 間組研究年報 pp. 27~35
- 志村孝吉(1971) : 粗粒土における限界動水勾配について, 電力中央研究所報告 No. 71001, 22p.
- Terzaghi, K. (1922) : Der Grundbruch an Stauwerken und seine Verhütung, From Theory to Practice in Soil Mechanics, 446p
- 上沢弘(1982) : 電子計算機による三次元地下水流の解析応用地質年報, No. 4, pp. 121~140
- Van Zyl D. (1981) : Seepage Erosion Analyses of Structures, 10th Int. Con. SMFE, pp. 503~509
- 山下亮・内田一郎・村田重之(1981) : 一次元浸透実験における問題点とその破壊過程について, 第16回土質工学研究発表会講演集 pp. 1117~1120
- 吉岡淳・久楽勝行・佐藤正博(1984) : 水平方向の浸透流によるパイピング現象について, 土木学会第39回年次学術講演会講演概集 Ⅲ-354, pp. 707~708

