

報 文

ピンホール試験による関東ロームの耐水蝕性の評価

加藤 誠 安富 六郎 山田 恒利*

An Evaluation of Water Resistance on
Kanto Loam by Pinhole Test.

Makoto Kato Rokuro Yasutomi Tunetoshi Yamada*
Tokyo University of Agriculture & Technology.
Mitubishi Construction Inc.*

Summary

This paper is intended as an investigation of water resistance on Kanto loam with rainfall.

A great deal of effort has been made on the study of erosion since old times.

What seems to be lacking, however, are studies about the dispersion of soil aggregation and the permeability for ground water. The purpose of this paper is to show how to decide the value of man-made slope design against erosion control.

Permeability test, pF test, pinhole test were made to carry out the purpose. The tested samples were the undisturbed and the compacted samples of Kanto loam which were obtained from experimental fields of ROLLING LAND LABORATORY, Tokyo University of Agriculture and Technology.

The pF test was carried out using the pressure plate apparatus to obtain soil moisture characteristics curves. Pinhole test was made to the pinhole test apparatus that was improved the J.L. Sherard's model.

The conclusion are as follows;

- (1) Kanto loam is easily eroded with rainfall because it has the pores in 15~17% of the soil volume, which is called "mesovoid" by Brewer's pore size classification system.
- (2) Kanto loam compacted greater than $0.6\text{g}/\text{cm}^3$ in dry density has high water resistance of soil.
- (3) The Water resistance of the undisturbed Kanto loam is evidently different from that of the compacted soil.

Key words : Pinhole test, Kanto loam, dry density, soil structure,
soil water characteristic curve.

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn, 70, 13-22, 1994)

1 はじめに

土壌の耐水蝕性に影響する物理的性質(土壌物理用語辞典, 1974)には(1)土壌の浸透能と, (2)水に対する分散性があげられる。(1)の浸透能に影響する要因には, 土壌内に形成されているマクロポアやミクロポアの形や量, 不透水層の有無や位置に関係している。(2)の分散性に影響する要因には, 土壌団粒の性状や量, スレーキング, 雨滴に対する抵抗性などがあげられる。造成される農地

の侵食対策はこの様な物理的性質を尺度に土壌の耐水蝕性を判定し, 設計施工される必要があると考えられる。

農地の造成事業では, 土地の条件が僅かでも異なれば土壌侵食による被害を受けたり受けなかつたりするようなことを十分反映した設計を行うために, 土壌の物理的性質から示される係数を使用して, ミドルトンの提案した分散率や侵食率などの係数で受食性の評価をおこなう必要がある。しかし, このような方法は, 間接的であり,

東京農工大学 農学部(東京都府中市幸町3-5-8) *三菱建設株式会社(東京都中央区日本橋本町3-3-6)

キーワード: ピンホールテスト, 関東ローム, 乾燥密度, 土壌構造, 土壌水分特性曲線

耐水蝕性を見積るために調査、サンプルの数、それに伴う試験の種類、などが膨大のものとなるので実用的ではない。

そこで、ダム工学の分野で（例えば松本ら、1991；吉田、1987）において土の耐水蝕性を直接的に評価する試験としてピンホール試験が行われている。この試験により得られる測定値は、土壌の浸透能と分散性の両方の耐水蝕性の主要素が混ざりあった値と考えられるが、この試験方法が関東ローム（立川ローム）の耐水蝕性の評価に適用できるかどうか実験的に研究を行ったのでここに報告する。

2. 研究の方法

2-1. 試料

試料は、東京都八王子市堀之内の東京農工大学農学部付属波丘地利用実験・実習施設の敷地内から掘削した関東ローム（立川ローム）である。供試体は、試料を実験室内で空気乾燥させ、所定の方法で100ccのサンプル缶に締固めて作成した。また、自然地盤より採取した不攪乱状態の供試体も使用した。

2-2. 締固め供試体の作成方法とその準備

含水比を調節した立川ロームを、100ccのサンプル缶に0.5kgfのランマーを高さ15cmから所定の回数（3層5回、3層15回、3層25回、3層55回）だけ自由落下させ、回数別の四本の締固め曲線を求めた。そして、求められた各々の締固め曲線上の異なる七つの含水比で締固め、合計28個の供試体を作成した。

このように締固められた供試体と不攪乱試料の供試体を約-30cmH₂Oの吸引圧で脱気して飽和させた。

2-3. 透水試験

変水位透水試験を行い、各締固め条件により締固められた試料と不攪乱試料の透水係数を求めた。

2-4. pF試験

加圧板法により、pF値の範囲を0.0~3.3として、土壌水分特性曲線を求めた。

表-1 関東ロームの物理試験結果

Table. 1 Physical Properties of Kanto Loam.

| | |
|----------------------|----------|
| 比重 Gs | 2.784 |
| シルト分 | 15.9% |
| 粘土分 | 53.2% |
| コロイド分 | 19.8% |
| 60%粒径D ₆₀ | 0.0023mm |
| 30%粒径D ₃₀ | 0.0015mm |
| 10%粒径D ₁₀ | |
| 液性限界 LL | 137.5% |
| 塑性限界 PL | 91.6% |
| 塑性指数 PI | 45.9 |

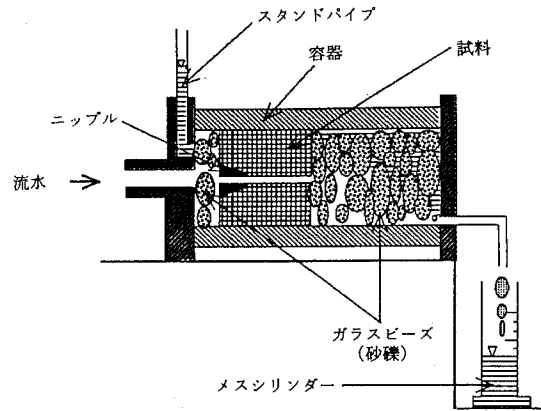


図-1(a) ピンホールテストの試験装置

Fig. 1(a) Experimental Apparatus of Pinhole Test.

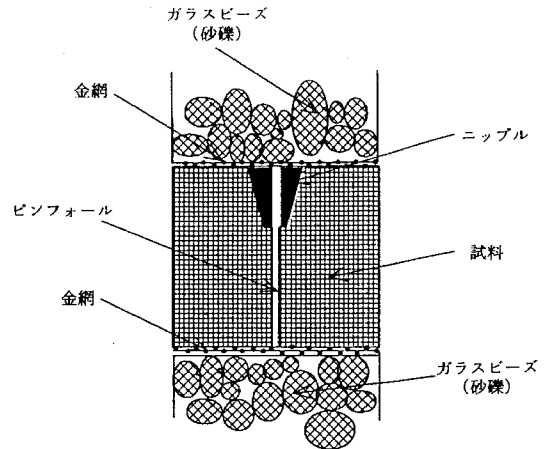


図-1(b) ピンホールの周辺の拡大図

Fig. 1(b) Details of Pinhole in sample.

2-5. ピンホール試験

2-5-1. 試験装置

研究に用いた試験器は、J.L.Sherard等⁶⁾によって考案された土の分散性を判別するピンホール試験器をもとに、本研究室で100ccのサンプル缶の試料を試験に供する事ができるように改良した装置である。（図-1）

2-5-2. 試験方法

本試験の供試体の中心部に図-1に示したように円錐筒のニップルを埋設した。ニップル中心には直径1.1mmの穴が開けてあり、その穴をガイドにして、供試体に直径1.0mmのニードルでピンホールを穿った。このピンホールの一端から、おおよそ、50, 100, 200, 300, 400, 500, 700, 1000, mmH₂Oの水頭を持つ水を5分間隔毎に流した。

その水頭毎の透水流量を測定し、透過水の色調を観察した。試験終了後、供試体を半分に切断し、ピンホールの直径を測定した。

2-5-3. 侵食の判定方法

ピンホール試験において、50~1000mmH₂Oまで8段階に5分間ずつ圧力を上昇させた水を流出させ、ピンホールの壁面の土粒子が侵食され、流出口側より流れ出てくる土粒子の有るかどうかを目視により観察し、耐水蝕性を判定した。

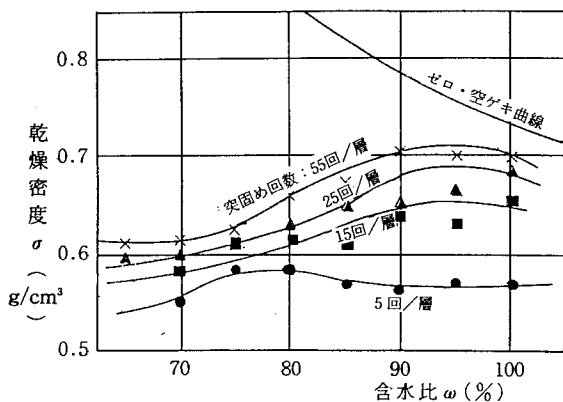


図-2 締固め曲線
Fig. 2 Compaction curves.

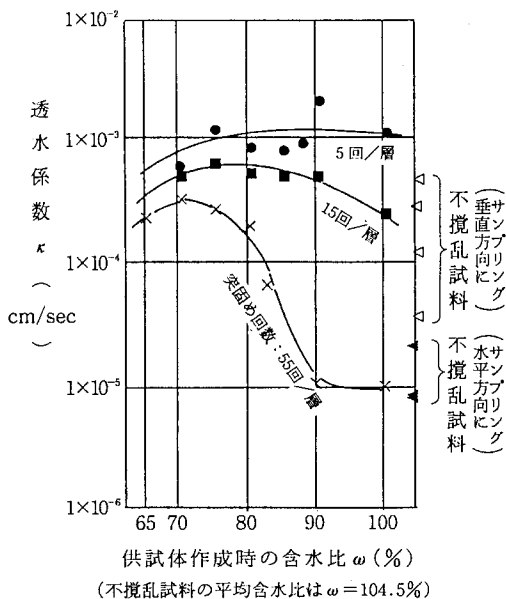


図-3 締固め含水比と透水係数

Fig. 3 Relation between Moisture content and Coefficient of Permeability.

今回の研究においては、土粒子の混ざった、濁った水が流出したかどうかにより、侵食されたかどうかを判断した。また、図-7に示した理論曲線から侵食が生じた場合には逸脱し、理論曲線に沿う実験値を示す場合には侵食がなかったとして、総合的に耐水蝕性を判断する場合のデータとした。

3. 結果

3-1. 締固め試験

締固め回数 5, 15, 25, 55回から得た、締固め曲線を図-2に示した。

3-2. 透水試験

締固め回数, 5, 15, 55回の供試体と不攪乱試料の κ ~ ω の関係を図-3に示した。

3-3. pF試験

締固め回数15と55回の供試体についてのpF試験の結果を図-4, 5に、不攪乱試料については図-6に示した。

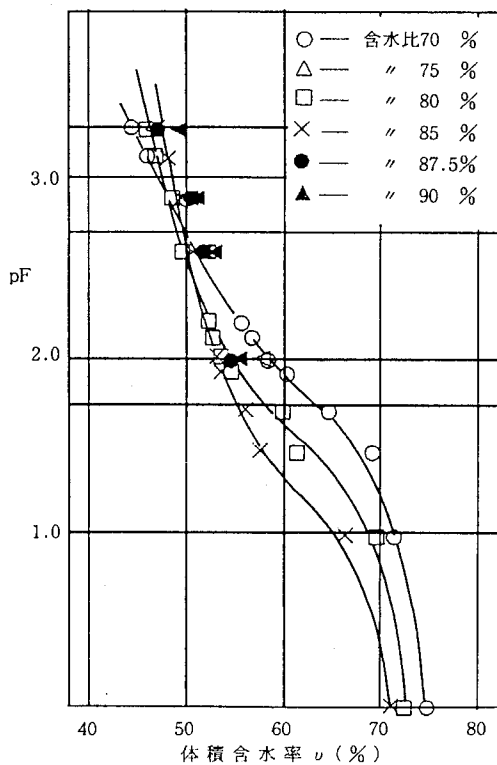


図-4 土壌水分特性曲線 (突固め回数5回/層)

Fig. 4 Soil Moisture Characteristic Curves.
(Compacted sample, 5 drops per a layer)

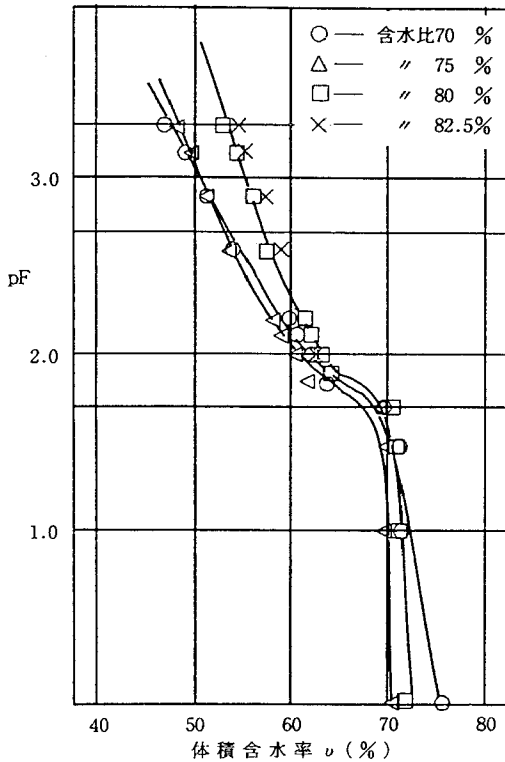


図-5 土壌水分特性曲線 (突固め回数55回/層)

Fig. 5 Soil Moisture Characteristic Curves. (Compacted sample, 55 drops per a layer)

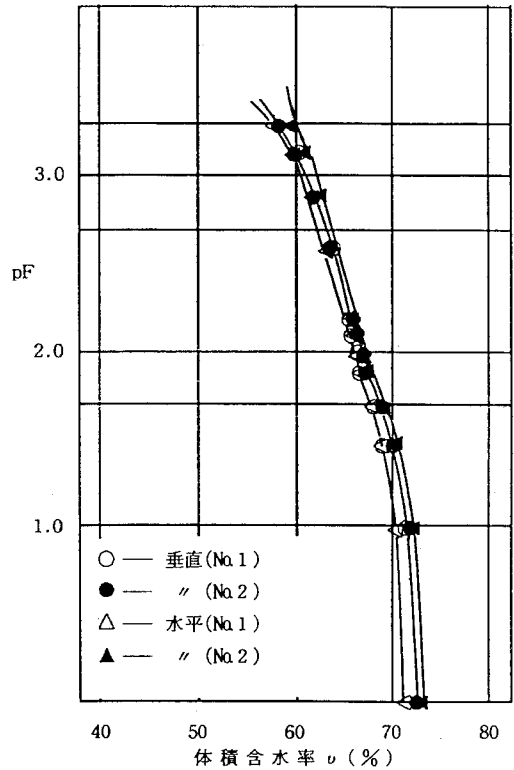


図-6 土壌水分特性曲線 (不攪乱試料)

Fig. 6 Soil Moisture Characteristic Curves. (Undisturbed sample)

3-4. ピンホール試験

3-4-1. ピンホール内の流量と直径

ここでは、供試体中央部にあけられたピンホールの直径と流量を求めた。

供試体の流入側のニップルと供試体に設けられたピンホールを径の異なるパイプと見なして、ピンホール内を流れる水の流量を水力公式に当てはめ、流量を求めた。

ピンホール内における損失水頭(h)は、

$$h = [V_1^2 (K_f + f_1 l_1 / d_1) + V_2^2 (K_c + f_2 l_2 / d_2 + K_o)] / (2g) \quad \dots\dots(1)$$

$$f = 64 / R = 64 \nu / V d \quad \dots\dots(2)$$

- V_1, V_2 : ニップル, 供試体内のピンホール内の流速
- f_1, f_2 : ニップル, 供試体内のピンホール壁面の摩擦損失係数
- l_1, l_2 : ニップル, 供試体内のピンホールの長さ
- d_1, d_2 : ニップル, 供試体内のピンホールの直径
- R : レイノルズ数 ν : 動粘性係数

V : 流速 d : パイプの直径

K_f : 水がピンホールに流入する時の収縮損失係数

K_c : ニップルから供試体へ水が流入する時の収縮損失係数

K_o : 水がピンホールから流出する時の拡大損失係数

(2)式を(1)式に代入し、ニップルと供試体のピンホールの中を流れる流量は等しい連続の方程式より(3)式の V_2 に関する二次方程式が得られる。

$$[K_f (d_2 / d_1)^4 + K_c + K_o] \times V_2^2 + [64 \nu (d_2^2 l_1 / d_1^4 + l_2 / d_2^2)] \times V_2 - 2gh = 0 \quad \dots\dots(3)$$

本研究では、

$d_1 = 0.15\text{cm}$, $l_1 = 1.25\text{cm}$, $l_2 = 3.85\text{cm}$, $K_f = 0.25$, $K_o = 1.0$, $\nu = 1.139 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{s}$ (水温15°C), $d_2 = 1.0$ または 1.1mm において、 K_c を求めた。

- $d_2 = 1.0\text{mm}$ の時 $K_c = 0.32$
- $d_2 = 1.1\text{mm}$ の時 $K_c = 0.25$

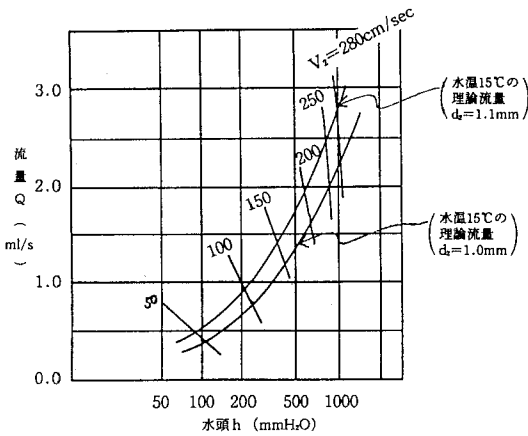


図-7 ピンホールの径と流量と水頭の関係

Fig. 7 Relation between Pinhole Diameter, Discharge and Head.

となる。

次に、このKcを用いて流量と水頭の間係を求めた。なお、実験に際し、供試体にピンホールを穿ける道具として、直径1mmのドリルの刃を用いた。なお、 d_2 は、ピンホールの直径を目盛り付きルーペで測定したところ、1.0~1.1mmであったので、計算には1.0mmと1.1mmの二つの値を用いた。実際のピンホール内を流れる水の

流量と水頭の間係は、この二つの d_2 より求めた曲線の間の値として測定されると思われる。その理論計算の結果を図-7に示した。

3-4-2. 測定結果

締め回数5, 15, 25, 55回の供試体と不攪乱試料の水平方向と垂直方向の供試体について、流水の侵食のために侵食したかどうかを判定した、侵食性の有無を

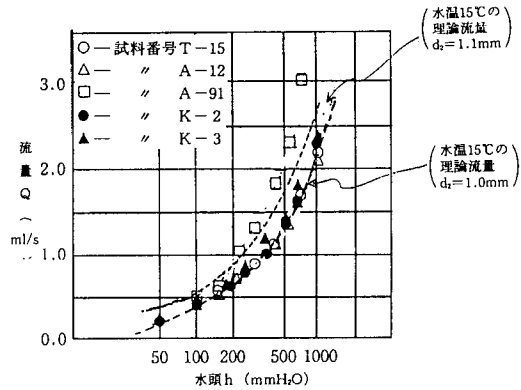


図-8 流量と水頭 (不攪乱試料, 垂直方向)

Fig. 8 Relation between Discharge and Head at Pinhole Test. (Undisturbed Sample from Vertical layer)

表-2 間隙径の分布と耐水蝕性の観測結果

Table. 2 Results of Calculated Pore Diameter & water resistanse test.

| 締め回数 含水比 | 供試体の間隙の直径 (mm) | | | | | | | | | | 侵食の有・無 |
|-------------|----------------|--------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------|---|--------|
| | 0.30 以上 | 0.30 ~0.1 | 0.10 ~0.06 | 0.06 ~0.03 | 0.03mm 以上の合計 | 0.03 ~0.0075 | 0.01 ~0.0038 | 0.0038 ~0.0015 | 0.0015 以下 | | |
| 5-70 | 4.20 | 3.80 | 5.80 | 8.80 | 22.60 | 7.70 | 3.50 | 7.20 | 59.00 | 有 | |
| 5-75 | | | | | 22.40 | 8.30 | 3.00 | 3.20 | 62.90 | 有 | |
| 5-80 | 4.30 | 11.40 | 2.20 | 8.40 | 26.30 | 5.80 | 1.80 | 3.20 | 62.90 | 有 | |
| 5-85 | 6.50 | 12.70 | 2.10 | 4.20 | 25.50 | 3.90 | 1.60 | 3.20 | 65.80 | 有 | |
| 5-87.5 | | | | | 25.10 | 4.10 | 2.00 | 3.20 | 66.60 | 有 | |
| 5-90 | | | | | 24.50 | 4.00 | 2.10 | 4.80 | 65.60 | 有 | |
| 15-70 | 6.20 | 1.90 | 4.80 | 9.70 | 22.60 | 10.40 | 3.30 | 4.80 | 58.90 | 有 | |
| 15-75 | 2.10 | 2.00 | 5.00 | 9.80 | 18.90 | 8.90 | 3.20 | 5.60 | 63.40 | 有 | |
| 15-80 | 4.00 | 2.50 | 5.40 | 9.10 | 21.00 | 7.00 | 2.20 | 4.40 | 65.40 | 有 | |
| 15-85 | 1.50 | 8.20 | 3.00 | 4.60 | 17.30 | 11.00 | 1.70 | 5.00 | 71.40 | 有 | |
| 15-87.5 | 1.30 | 7.50 | 2.10 | 4.10 | 15.00 | 3.60 | 2.20 | 7.20 | 72.00 | 有 | |
| 25-65 | | | | | 16.20 | 12.30 | 4.30 | 4.30 | 62.90 | 有 | |
| 25-70 | | | | | 20.00 | 8.80 | 4.60 | 2.40 | 64.20 | 有 | |
| 25-75 | | | | | 19.20 | 7.40 | 0.10 | 5.90 | 67.40 | 有 | |
| 25-80 | | | | | 16.20 | 6.50 | 2.40 | 2.70 | 72.20 | 有 | |
| 25-82.5 | | | | | 13.20 | 5.40 | 1.80 | 2.70 | 76.90 | 無 | |
| 55-70 | 5.60 | 0.10 | 2.20 | 9.70 | 17.60 | 11.00 | 3.50 | 5.50 | 62.40 | 有 | |
| 55-75 | 1.10 | | 0.30 | 12.50 | 13.90 | 9.60 | 3.20 | 4.70 | 68.60 | 無 | |
| 55-80 | 0.70 | 0.60 | 0.20 | 10.30 | 11.80 | 7.40 | 2.10 | 4.60 | 74.10 | 無 | |
| 55-82.5 | | | | | 12.20 | 5.30 | 2.00 | 2.60 | 77.90 | 無 | |
| 垂直-1 | 1.80 | 1.00 | 1.20 | 2.20 | 8.40 | 3.80 | 2.20 | 5.70 | 79.80 | 無 | |
| 垂直-2 | 1.10 | 2.70 | 1.30 | 2.70 | 7.80 | 4.80 | 2.30 | 4.80 | 80.30 | 無 | |
| 水平-1 | 1.40 | 2.00 | 1.10 | 2.30 | 6.80 | 4.60 | 2.00 | 5.90 | 80.70 | 無 | |
| 水平-2 | 1.20 | 3.20 | 1.40 | 3.10 | 8.90 | 4.10 | 1.80 | 4.10 | 81.10 | 無 | |

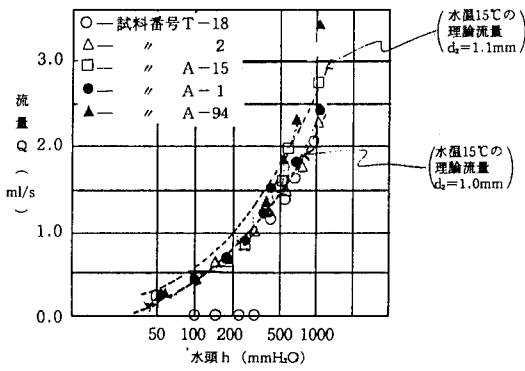


図-9 流量と水頭 (不攪乱試料, 水平方向)
Fig. 9 Relation between Discharge and Head at Pinhole Test.
(Undisturbed Sample from Horizontal layer)

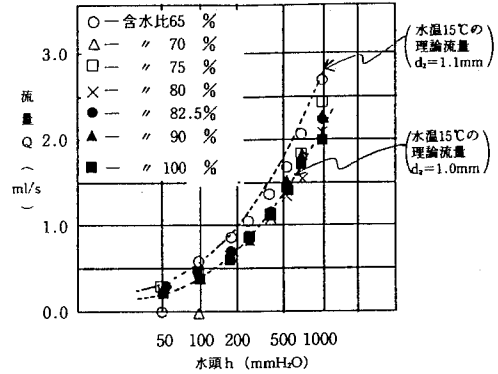


図-12 流量と水頭 (突固め回数25回/層)
Fig. 12 Relation between Discharge and Head at Pinhole Test.
(Compacted Sample, 25 drops per a layer)

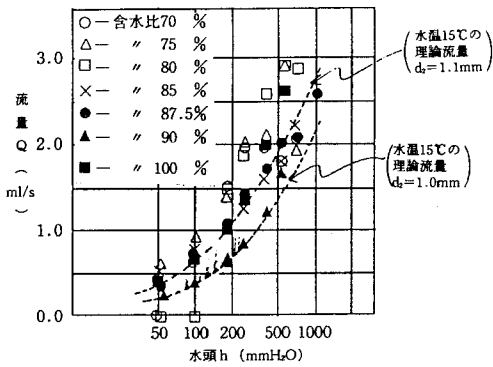


図-10 流量と水頭 (突固め回数5回/層)
Fig. 10 Relation between Discharge and Head at Pinhole Test.
(Compacted Sample, 5 drops per a layer)

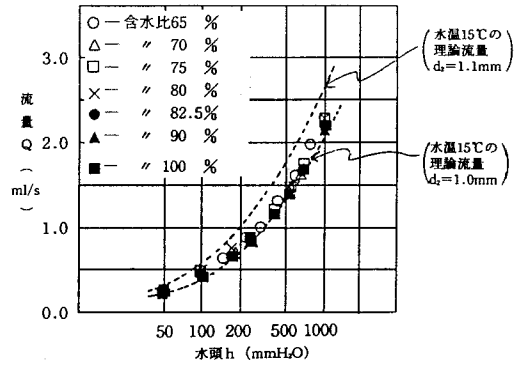


図-13 流量と水頭 (突固め回数55回/層)
Fig. 13 Relation between Discharge and Head at Pinhole Test.
(Compacted Sample, 55 drops per a layer)

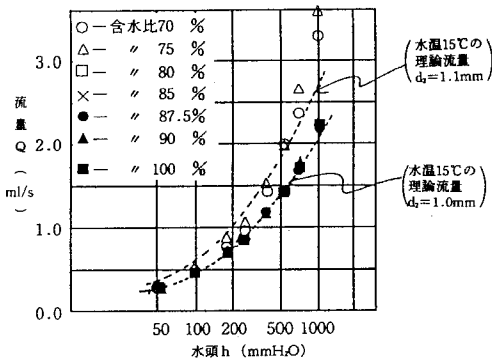


図-11 流量と水頭 (突固め回数15回/層)
Fig. 11 Relation between Discharge and Head at Pinhole Test.
(Compacted Sample, 15 drops per a layer)

表-2に、また、透過流水の水頭と流量の測定結果を図-8~13に示した。

4. 考察

4-1. 乾燥密度と耐水性

締固め回数別の流量と水頭の関係を示す図より、締固め回数5回の供試体と与えた水頭と流量の測定値を図-10に示したが、図-10の測定値は乱れている。締固め回数が多くなるにつれて、理論曲線に沿った測定値が得られた。このように、理論曲線に沿うことは、ピンホールの直径が変化しないことを示し、理論曲線より上に離れることは、流量が通水圧の増加とともに多くなることであり、ピンホールの壁が侵食されて、ピンホールの直径が大きくなることである。そして、試験終了後、ピンホー

ルに沿って切断した供試体のピンホールの形状の観察により図-14を得た。図より、乾燥密度が約0.6g/cm³より小さい場合には、ピンホールの洗掘が起こり、乾燥密度が約0.6g/cm³よりも大きい場合には、洗掘を生じない結果が得られた。すると、供試体の締固め時の含水比よりも乾燥密度が耐水蝕性に影響すると考えられる。しかし、不攪乱試料の場合には、乾燥密度が約0.6g/cm³の試料においてでも、ピンホールの洗掘は観察されていない。

4-2. 間隙と耐水性

穴瀬 (1963) の「間隙分布と透水性」の論文の中で、Nelson, Baverらの研究 (Nelson W.L, Baver L.D., 1940) によれば、土の透水性は間隙の大きさと量に関係する。加圧板法においてpF～水分特性曲線を得る時、加圧力が0～40cmH₂Oの間で大間隙内の水が排水されてしまうので、このような大きさの間隙の量が土壌の透水性に最も関係があることを報告していると述べている。土塊中の間隙は、径が揃った多数の毛細管の束でできていると仮定し、40cmH₂Oの加圧力が毛管力と

平衡していると考えると、間隙の大きさは、ラプラスの式より、

$$h = 2 \sigma \cos \alpha / g \rho r \quad \dots\dots(4)$$

ここに、

- h : 毛細管上昇高さ σ : 水の表面張力
- ρ : 水の密度 g : 重力の加速度
- r : 毛細管の半径 α : 接触角

である。

土壌水分特性曲線と(4)式より、間隙の分布率を求めた。加圧力40cmH₂Oに平衡する毛細管の半径は r = 0.075mm である。このようにして、各供試体の土壌水分曲線より、間隙分布を計算して求めた。そして、ピンホール試験の結果、ピンホールが侵食されているかどうかを観察した結果を表-2に示した。

また、表-3は、Brewer (1964) が間隙の直径と形状について提案した表である。この表は、Johnson (1960) の土壌孔隙 (間隙) の分類の中の0.075mm以下の間隙の直径を細分化したものである。すると、表-2より得た間隙の直径が0.06～0.03mmのメソ孔隙 (間隙) 以上

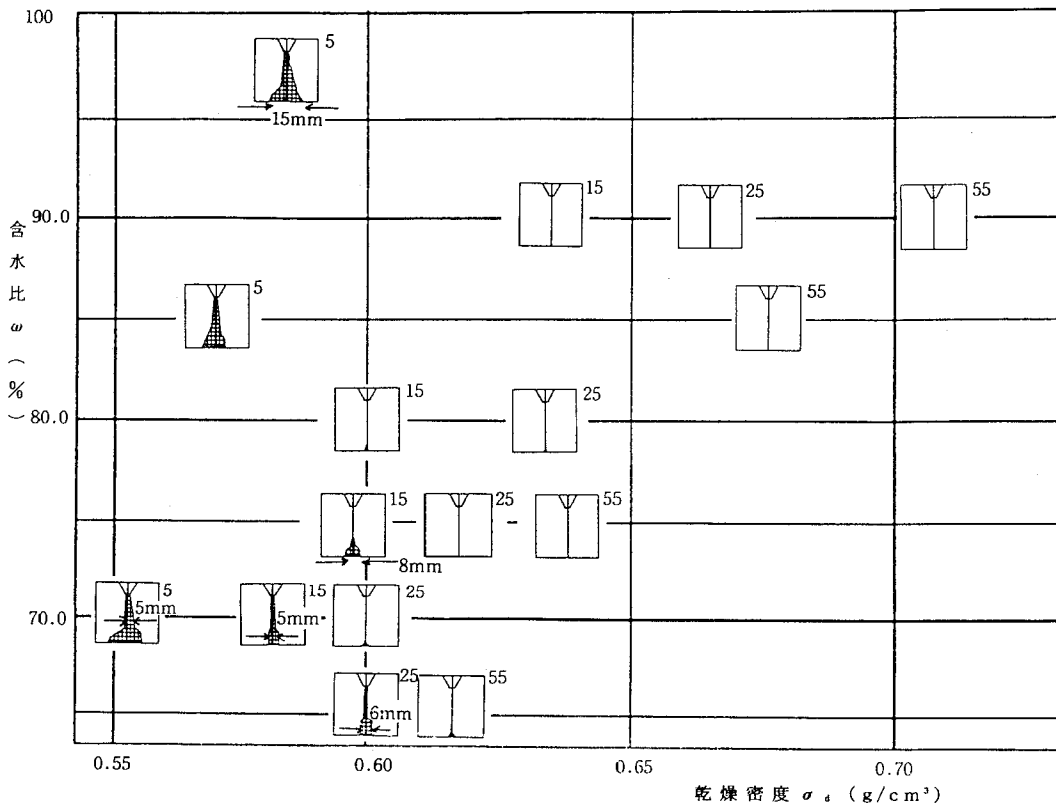


図-14 ピンフォールの侵食状況
Fig. 14 Comparison of Erosion Grade after Pinhole Test.

表-3 Brewerによる間隙の分類
Table. 3 Classification of pore by Brewer.

| 孔 隙 の 種 類 | 大 小 (μ) |
|------------------------------|-----------|
| マクロ孔隙(macrovoid) | 75< |
| 粗 マクロ孔隙(coarse macrovoid) | 5000< |
| 中 マクロ孔隙(medium macrovoid) | 2000~5000 |
| 小 マクロ孔隙(fine macrovoid) | 1000~2000 |
| 微細マクロ孔隙(very fine macrovoid) | 75~1000 |
| メソ孔隙(mesovoid) | 30~75 |
| ミクロ孔隙(microvoid) | 5~30 |
| ウルトラミクロ孔隙(ultramicrovoid) | 5> |
| クリプト孔隙(cryptovoid) | 0.1> |

の大きさの間隙が15~17%を占めた場合には、ピンホールは侵食されていることがわかった。

4-3. 不攪乱試料と締め固め試料の耐水性

4-1節において、締め固め試料では、乾燥密度が約0.6g/cm³以上であればピンホールの侵食は少ないか、または、侵食されないとの結論を得た。しかし、各水頭段階で便宜的に5分間と決め、その間の侵食の様子を観察して、土の分散性や、耐水蝕性を考察している。

4-3節では、乾燥密度が不攪乱試料と締め固め試料とともに似た値をもつ試料を使用して、耐水蝕性を比較した。不攪乱試料として乾燥密度が、0.609g/cm³のもの

を、締め固め試料としては、締め固め条件が1層あたり15回、含水比は75%で、乾燥密度が0.612g/cm³の供試体を選んだ。そして、85cmの水頭を持つ水を締め固め試料では1245分間、不攪乱試料では9日間通水した。その結果、不攪乱試料では、侵食が観察されなかった。一方、締め固め試料は、約20時間程度の短時間でも、写真-1に示すように、直径1mmのピンホールは直径約3mmまで侵食され拡張した。

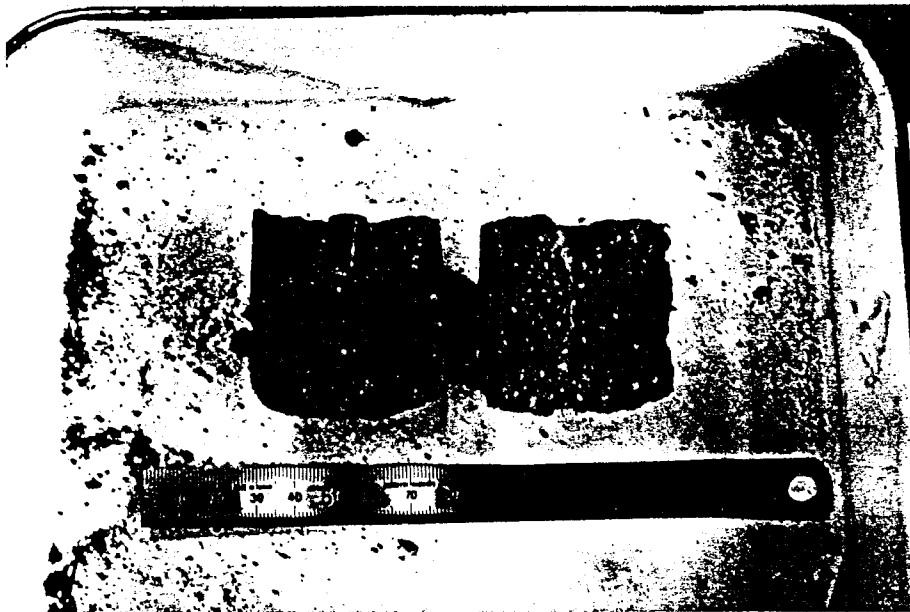
以上の結果を総合すると、土壌の侵食性を表すパラメータは乾燥密度に加えて、間隙の大きさとその量を土壌の耐水性を表すパラメータとすることが妥当性のある考え方と思われる。

5. 結論

1. 改良したピンホール試験器を土の耐水蝕性の判定に利用することができる。
2. 関東ロームの耐水蝕性の判定には、間隙の大きさと量によることが判明した。Brewerの間隙分類の中で、メソ間隙以上の大きさの間隙が15~17%を占めると侵食され易い。
3. 関東ロームを締め固める場合、乾燥密度を0.6g/cm³以上とすれば、耐水蝕性の土塊となる。
4. 不攪乱状態と締め固め状態の土では耐水蝕性が異なる。

写真-1 侵食されたピンホール

Photo. 1 Pinhole after Test.



6. おわりに

ピンホールを土塊に穿ち、通水し、土壌の耐水蝕性を評価する方法は実用的な評価法であると思われる。対象とする土壌を盛立てたり、切取ったりして農地が造成される。すると、これらの現地のサンプリング供試体に対して試験を行って得られた試験結果から対策工の設計や施工をおこなえば、ピンホール試験は耐水蝕性を評価するための優れた試験法であると思われる。しかし、土壌の供試体要素の試験からのデータより、実際の土構造物の挙動までも予測できるかどうかについては不明な点が多く残されていることは言うまでもないことである。

土壌の侵食性の問題に関する研究や実務は古くから多くの研究者や技術者により行われてきたが、今日まで、決定的な解決方法が見いだされていない困難な問題である。このような観点より考察すると、ピンホール試験は容易に実施できる試験法なので、現地毎の土の成因別の耐水蝕性の評価基準を設け、その判断をもとに法面保護工法の設計の対策にこの結果を取り入れたいと思う。

7. 参考文献

- 穴瀬真 (1963) : 間隙分布と透水性—Marshallのゼミから—, 東京大学農学部農地工学研究室研究の試料と記録, 13, 10—15.
- Brewer, R. (1964) : Fabric and Mineral Analysis of Soils. 131—133, John Wiley & Sons, Inc.
- 土壌物理研究会編 (1974) : 土壌物理用語辞典 (9. 土壌侵食) 養賢堂, 119—128.
- 土壌物理性測定法研究会編 (1987) : 土壌物理性測定法 養賢堂, 94, 1987.
- Johnson W.M., McClelland J.E., Mccaleb S.B., Rudolph Ulrich, Harper W.G., and Hutchings T.B (1960) : Classification and Description of Soil Pores. Soil Science, 89, 319—321.
- James I. Sherard, Lorn P. Dunnigan, Rey S. Decker and Edgar F. Steele. (1976) : "Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils" Geotechnical Engineering Division. (ASCE) .102, NO. GT 1, 69—85.
- Nelson, W.L., Bayer, L.D. (1940) : Movement of water through soils in relation to the nature of the pores. Soil Science Society of American Proceeding, 5, 69—76.
- 山口嘉一, 松本徳久, 田原則雄 (1991) : ピンホール試験によるフィルダムコア材の分散性の判定, 第二六回土質工学研究発表会講演集, 1731—1733.

吉田 裕 (1987) : "ピンホールテスト" 土と基礎, 35, NO.11, pp87—88.

(受稿年月日 1994年3月5日)