マサ土の粒子破碎に伴う透水性低下について

(Significant Drop in Permeability Due to Particle Breakage of Decomposed Granite Soils)

松 尾 新 一 郎* (Shinichiro Matsuo)

福 本 武 明** (Takeaki Fukumoto)

キーワード：間ゲキ比／締固め／透水性／比表面積※／風化／マサ土／密度／粒子破碎
IGC： D4/D3

1. 序 言

マサ土粒子の破碎とそれに伴う透水性低下との関係を明らかにすることは、単に現象の解釈というだけでなく、マサ土の“特殊土”としてのイメージからくる不安感を一掃して、健全な使用を促すうえで有意義なことと思われる。

著者らは、このような立場から『マサ土の透水性に及ぼす粒子破碎の影響』（以下、前報¹⁾と呼ぶ）を公表し、その中で透水現象と粒子破碎現象との間に驚くほど整然とした規則性のあることを指摘した。

しかしながら、この知見は、あくまで特定のマサ土を対象に、粒度配合を9通りに変えて調製した試料について、突固め回数100回という試験条件下で得られた結論であって、マサ土の種類や突固めエネルギーが違った場合にも依然として同様に成り立つという保障はない。この点を解決して、前報の結論にいっそう一般性を持たせることが希求される。

そこで、本報では試験条件として、産地と風化度の異なる3種類のマサ土を取り上げ、それらを自然粒度のまま使用するとともに突固め回数を10～400回の範囲で適当に変えて行なうこととし、それ以外の試験条件は前報と変わらないものとする。

なお、方法論は前報を踏襲して、石英質河川砂（非破碎性土の代表）に対し、マサ土と同一粒度（自然粒度）・同一条件下で締固め試験および透水試験を行ない、両材料で得られた試験結果を突き合わせながら、巨視的立場から粒子破碎の影響を分析する方法によった。

2. マサ土と石英質河川砂に対する比較実験

2.1 実験方法

マサ原土は生駒山系、六甲山系、そして滋賀県産の3種類で、それらの4.76mm通過分をそのまま試料として用いる。ただし、必要個数の供試体をつくる時、四分法または分取器では粒度組成にむらができるので、いったん7階級（使用フルイ：2.00, 0.84, 0.42, 0.25, 0.105, 0.074mm）に分級したのち再び調合して粒度の一致を確実にしてから使用した。各試料の物理的性質は、図-1と表-1に示す。なお、表中の材質補正 $M^{(2)}$ は、マサ土と後述の河川砂に対する最小密度の測定結果、すなわち図-2から、それぞれ絶乾状態の値を読み取って算定した値である。一方、比較用の石英質河川砂（非破碎性土の代表）としては、加古川砂（ $G_s=2.657$ ）と淀川砂（ $G_s=2.644$ ）を用い、前者は生駒マサ（Iマサ）と同一粒度に、そして後者は滋賀マサ（Sマサ）および六甲マサ（Rマサ）とそれぞれ同一粒度に調製して用いた。その際、細粒分の粒度組成を完全に一致させる必要上、河川砂の74 μ 以下は使わずマサ原土から採取した74 μ 以下を使用した。

同一粒度に調製したマサ土と石英質河川砂は、同一条件下で締固め試験（JIS A 1210, 1.1-b 法）を行ない、

図-1 試料の粒径加積曲線

* 京都大学工学部 教授（京都市左京区吉田本町）

** 立命館大学理工学部 助教授（京都市北区等持院北町）

※ 土質工学会制定以外のキーワード

・ この論文に対するディスカッションは昭和53年10月1日までに投稿下さい。

表-1 試料の物理的性質

試料 略称	産地	土粒子比重 G_s		最小密度 (絶乾)		材質補正 $M = \left(\frac{\gamma_{d \min}}{\gamma_{ds \min}} \right)_0$	比表面積 S_w (cm^2/g)	マサ土の 風化度 F	マサ土の 色調 (乾燥 状態)	日本統一 土質分類	備考
		マサ土	河川砂	マサ土 ($\gamma_{d \min}$) ₀ (g/cm^3)	河川砂 ($\gamma_{ds \min}$) ₀ (g/cm^3)						
I	生駒山系	2.679	2.657 (加古川砂)	1.550	1.800 (加古川砂)	0.861 ^{ア)}	67.216	0.28	茶褐色	(S-M)	比較的自然的まま
S	滋賀県	2.643	2.644 (淀川砂)	1.370	1.520 (淀川砂)	0.901 ^{イ)}	160.169	0.13	白桃色	(SM)	比較的自然的まま
R	六甲山系	2.656	2.644 (淀川砂)	1.625	1.700 (淀川砂)	0.956 ^{ア)}	168.358	0.66	茶色	(SM)	人工的破碎 (発破等)

注: ア) 図-2 から算定

イ) 文献 2) の表-2 中の値を借用

ウ) 相隣るフルイ間に残留する粒子を球形と仮定して算出した値

エ) 定義は、文献 3) を参照のこと

図-2 同一粒度のマサ土と河川砂に対する最小密度の測定結果

引続き透水装置にセットして層流状態で変水位透水試験 (JIS A 1218) を実施した。また、粒子破碎の程度を知るために、突固め前と透水試験後に粒度分析を行なった。なお、実験方法の詳細については前報¹⁾を参照されたい。

2.2 実験結果

同一粒度のマサ土と河川砂に対する実験結果は、比較しやすいように一対にして図-3～図-5に示す。図-3は、Iマサに対して突固め回数を10, 25, 50, 100, 200, 400回の6通りに変えたときの結果であり、図-4と図-5は、それぞれSマサとRマサに対して突固め回数を25, 100, 400の3通りに変えたときの結果である。

これらの図から知れる事柄の中で、文中の議論に必要なことだけを列挙すれば次のようになる。

- 1) 破碎曲線 (b図) から明らかなように、突固め回数 $N \leq 200$ 回の場合、石英質河川砂はマサ土に比べて実質上、非破碎性土と見なして差し支えない。
- 2) しかし、突固め回数が400回になると、石英質河川砂といえども相当な粒子破碎を生じるから、もはやマサ土との純粋な比較は困難である。
- 3) マサ土と河川砂に対する締固め曲線 (a図) の形状が、低い含水域において大きく異なる。この領域は一応、力学的に不安定な領域²⁾と考えられるから、厳密な比較を避けたほうが賢明である。
- 4) 他方、最適含水比をはるかに越える高含水域では、とくに河川砂において、突固め時にモールド内部の土中水が試料上面へしみ出す現象を伴いやすいから、この領域の実験データは重視しないほうがよいと思われる。

以上のことから、次節以降では主として突固め回数 $N \leq 200$ 回の範囲で、かつ最適含水状態を中心とする、その前後の主要な含水域だけを対象に考察を進めることにする。

3. 無破碎状態の透水係数 k_0 の推定

粒子破碎に伴う透水性低下の程度を知るには、まず“無破碎状態の透水係数”，すなわち、マサ土と同一物性を保持しながら粒子破碎を生じない状態での仮想上の透水係数 k_0 を推定する必要がある。

3.1 推定手順

① “無破碎状態”のマサ土の乾燥密度 $\gamma_{d'}$ は、次式²⁾から推定される。

$$\gamma_{d'} = M \cdot \gamma_{ds} \quad (1)$$

ここに、 M は材質補正 (表-1)， γ_{ds} は同一粒度に調製した河川砂の乾燥密度である。

② (1)式の $\gamma_{d'}$ を間デキ比 e_0 に換算する；

$$e_0 = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{\gamma_{d'}} - 1 \quad (2)$$

③ この e_0 を次式¹⁾に代入すれば、“無破碎状態”に

図-3 I マサ（生駒山系）の実験結果〔左図—マサ土、右図—同一粒度の河川砂〕

図-4 S マサ (滋賀県産) の実験結果 [左図—マサ土, 右図—同一粒度の河川砂]

における透水係数 k_0 が求められる。

$$k_0 = \frac{1}{K \cdot S_w^2} \cdot \frac{e_0^3}{1 + e_0} \quad (3)$$

ただし、式中の S_w は破碎前の比表面積 (表-1) であり、係数 K (図-6 参照) は破碎後の値を代用する [その理由は前報¹⁾を読まれたい]。

④ したがって、粒子破碎に伴う透水係数の低下度は、マサ土の透水係数 (実測値) k と、それと同じ含水比時における“無破碎状態”の透水係数 k_0 との比 (k/k_0) として算定される。

なお、具体的な計算過程の一例を表-2に示す。

3.2 推定精度

図-7 は、上記の要領で求めた k_0 値を含水比 W に対してプロットした図、つまり“無破碎状態の透水曲線”の一例を示したものである。図中には、対比のためにマサ土と河川砂とで実測された透水曲線 (細線) を併記す

る。その中で“無破碎状態”の透水曲線 ($k_0 \sim W$ 曲線) と無破碎に近い河川砂の透水曲線 ($k_s \sim W$ 曲線) との比較は、 k_0 値の推定精度を調べるうえで有効な手段となる。

いま、マサ土の最適含水状態に目を向け、この含水比時の $(k_0)_{opt}$ と $(k_s)_{opt}$ の値を図上より読み取って、両者の相関を調べると 図-8 が得られる。図中の点群は必ずしも 45° の線に沿って密に集まっているとはいえないが、この程度の隔たりは透水係数の測定精度などを勘案すれば許容され得るものと思われる。

このことから、 $(k_0)_{opt}$ の推定精度は、一応満足なものとなすことができる。なお、このことは、別に最適含水比時に限ったことではなく、その前後の主要な含水水域 (2.2 節参照) においても同様に成り立つと考えて差し支えない。というのは 図-7 中の $k_0 \sim W$ 曲線と $k_s \sim W$ 曲線を比較する場合、最適含水比前後の含水域に目

図-5 R マサ (六甲山系) の実験結果 [左図—マサ土, 右図—同一粒度の河川砂]

図-6 係数 K (表-2 中, [10] 欄参照) と含水比 W の関係

表-2 計算例 (I マサ, $N=100$ 回時)

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]
含水比 W (%)	乾燥密度 γ_d (g/cm ³)	間ゲキ比 e	透水係数 k (cm/sec)	飽和度 S_r (%)	土粒子 表面積比 $\left(\frac{S_w'}{S_w}\right)$	破碎前の 比表面積 S_w (cm ² /g)	破碎後の 比表面積 S_w' (cm ² /g)	$\frac{e^3}{1+e}$	破碎後の 係数 K	河川砂の 乾燥密度 γ_{ds} (g/cm ³)	材質補正 M	無破碎状態の 乾燥密度 γ_d' (g/cm ³)	無破碎状態の 間ゲキ比 e_0	$\frac{e_0^3}{1+e_0}$	無破碎状態の 透水係数 k_0 (cm/sec)	透水係数の低下度 $\left(\frac{k}{k_0}\right)$
1.435	1.812	0.478	2.02×10^{-4}	85.3	1.659	67.216	111.511	0.0739	0.0294	1.940	0.861	1.670	0.604	0.1374	1.03×10^{-3}	0.196
4.672	1.863	0.438	6.24×10^{-4}	—	1.905	67.216	128.046	0.0584	0.0057	1.900	0.861	1.636	0.638	0.1585	6.15×10^{-3}	0.101
7.421	1.900	0.410	3.18×10^{-4}	—	1.810	67.216	121.661	0.0489	0.0104	1.943	0.861	1.673	0.601	0.1356	2.89×10^{-3}	0.110
10.308	1.950	0.374	4.87×10^{-5}	—	1.919	67.216	128.988	0.0381	0.0470	1.971	0.861	1.697	0.579	0.1229	5.79×10^{-4}	0.084
13.080	1.896	0.413	1.81×10^{-5}	87.9	1.808	67.216	121.527	0.0499	0.1867	1.935	0.861	1.666	0.608	0.1393	1.66×10^{-4}	0.109
15.721	1.832	0.462	1.92×10^{-5}	89.5	1.849	67.216	124.282	0.0674	0.2273	—	0.861	—	—	—	—	—
測定値												表-1 参照		$\frac{[9]}{[4] \times [8]^2}$		$\frac{[4]}{[16]}$
												図-3 からの 読定値		$\frac{G_s \cdot \gamma_w}{\gamma_d'} - 1$		$\frac{[15]}{[10] \times [7]^2}$

を転じつつ両曲線間の隔たりの程度を観察すれば、最適含水比時に得られた相関性(図-8 参照)に優るとも劣らないものが主要な含水領域にわたって十分期待できる、といえるからである。もちろん、これと同じことは図-7の代表例(突固め回数:100 回)以外の、突固めエネルギーの異なる図面からも一様に認められる。

以上のことから、次節以降では最適含水比を含む主要な含水域において、 k_0 値の推定精度は一応満足なものであるという建前で臨むことにする。

4. 粒子破碎に伴う透水性低下のパターン

マサ土の最適含水状態に照準を合わせて、突固めエネルギー・比表面積・透水係数の関係を考察し、粒子破碎に伴う透水性低下のパターンを鮮明にする。

4.1 透水係数の低下度と突固めエネルギーの関係

図-9 は、前節で述べた“無破碎状態”の透水係数(k_0)_{opt} と、マサ土で実測された透水係数(k)_{opt} とを、突固め回数 N に対してプロットした図である。図中の矢線は、 k_0 と k を結んで粒子破碎に伴う透水係数の低下の程度が直感的にわかるようにしたものである。

この図は、透水係数が突固めエネルギーの増加とともに減少するという衆知の事実を示しているにすぎない。ただ、マサ土の場合、破碎粒子による粒子間の間ゲキの閉塞効果のために、その分だけ余計に透水係数の減少傾向に拍車がかかる結果となる。

図-10 は、図-9 の縦軸を透水係数の低下度(k/k_0)_{opt} で表わしたものである(3.1, ④参照)。図は、粒子破碎に伴う透水係数の低下度が突固めエネルギーとマサ土の種類に大きく依存することを示している。すなわち、透水係数の低下度は、突固めエネルギーの増大とともに激しくなり、その激しさの程度がマサ土の種類によって異なる。とくに、高い突固めエネルギーになるほど I マサと他の 2 者(S, R マサ)との差が歴然としてくるのは、もちろん粒度に大きく関与する⁴⁾が、見方を変えればむしろ風化度とかかわって、マサ土には破碎に鋭敏なものとそうでないものがある⁵⁾ことを暗示する例証として受け取ったほうが穏当なように思われる。

4.2 比表面積と突固めエネルギーの関係

現象の解釈上忘れてならないのは、粒度(比表面積)の変化である。いま、3 種類のマサ土に対して、図-3 ⑥~図-5 ⑥ から最適含水比時の土粒子表面積比(S_w'/S_w)_{opt} を読み取り、それらの値に破碎前の比表面積 S_w (表-1 参照)を乗ずると、各試料の破碎後の比表面積(S_w')_{opt} が算出される。このようにして求めた(S_w')_{opt} を突固め回数に対してプロットすれば、図-11 が得られる。

図-11 は、突固めエネルギーの増大につれて比表面積

図-7 無破碎状態の透水曲線〔突固め回数 $N=100$ 回の場合〕 図-8 $(k_0)_{opt}$ と $(k_s)_{opt}$ の相関性

の増加割合が急速に鈍ることを示すとともに、その鈍化傾向がマサ土の種類によって大きく異なることを示しており、既報^{3),5)}の傾向と符号する。

4.3 透水係数、比表面積、突固めエネルギーの関係

いま、比表面積 S_W のマサ土が“無破碎状態”で突固められたときの仮想上の透水係数は $(k_0)_{opt}$ であるが、実際の締固め過程では粒子破碎を伴うから比表面積は $(S_W')_{opt}$ となり、透水係数は $(k)_{opt}$ となる。このような諸量の変化を突固め回数をパラメーターとして両対数紙上に描くと、図-12 が得られる。図中の中空の記号は

無破碎状態 $[S_W, (k_0)_{opt}]$ を、黒塗の記号は破碎後の状態 $[(S_W')_{opt}, (k)_{opt}]$ を表わし、その間を矢線で結んでいる。

矢線の観察から、主として次の事柄が知られる；

- 矢線は、突固めエネルギーの大小にかかわらず、ほぼ同じ傾きをもつ。
- 矢線の長さは、突固めエネルギーが低いほど短くなる。
- 矢線の頭と尾は、交点 O を通る二直線（点線）上に整列する。

これらの事柄はいずれも、3 種類のマサ土に共通していえることであり、含蓄のある内容のものであるから、項を改めて解説する。

4.4 透水性低下の定式化

前項の i) で述べた性質は、粒子破碎とそれに伴う透水性低下の関係の定式化を可能にする。すなわち、矢線の傾度は、図-13 より

$$\frac{\log(k)_{opt} - \log(k_0)_{opt}}{\log(S_W')_{opt} - \log S_W} = \frac{\log\left(\frac{k}{k_0}\right)_{opt}}{\log\left(\frac{S_W'}{S_W}\right)_{opt}} = -\mu = \text{const.}$$

と表現できるから、結局次式が得られる。

$$\left(\frac{k}{k_0}\right)_{opt} = \left(\frac{S_W'}{S_W}\right)_{opt}^{-\mu} \quad (4)$$

この式は、任意の突固めエネルギー下での透水係数の

図-9 透水係数と突固めエネルギーの関係

低下度 $(k/k_0)_{opt}$ が、土粒子表面積比 $(S_w'/S_w)_{opt}$ の大小によって一義的に決まることを示しており、前報の式と計らずも完全に一致する。(4) 式の妥当性は、図-12 に用いたデータを再整理して示した図-14 から、具体的に察知できる。

なお、式中の μ については、図-14 から明らかなように突固めエネルギーに無関係な定数といえるが、マサ土の種類によって違った値をもつようである。しかし、後者については今回比較用として異質な2種の河川砂（加古川砂・淀川砂）を使ったこと、およびマサ土と河川砂の初期粒度を完全に一致させることが難しく若干の誤差を含むこと、などを考慮すれば確定的なことが言えず、今後さらに多数の風化度の異なるマサ土で条件をそろえて実験する必要があると思われる。

4.5 透水性低下のパターン

4.3 で述べた ii) と iii) の性質は、次のようなことを

図-10 透水係数の低下度と突固めエネルギーの関係

図-11 比表面積と突固めエネルギーの関係

意味している。まず、ii) については、低い突固めエネルギー下ほど矢線が短くなり、やがて図-12 上の O 点に収束するようである。この点の物理的意味は、突固め回数 $N=0$ 回の場合に相当すると思われる。

一方、項目 iii) は、矢線の頭と尾がいずれも O 点を通る二直線上（図-12 中の点線上）にきれいに整列することを述べている。とくに、矢線の頭が縦軸から傾き ψ をもつ直線上に並ぶ性質は、任意の突固めエネルギー下で締固められたマサ土の透水係数 $(k)_{opt}$ と比表面積 $(S_w')_{opt}$ が常に次式の関係で結ばれていることを示すと同時に、それが図上で粒子破碎の影響範囲を限定する形で寄与することを示している。

$$(k)_{opt} = \xi \cdot (S_w')_{opt}^{-\rho} \quad (5)$$

式中の ξ と ρ は、マサ土の種類によって決まる係数で

図-12 粒子破碎に伴う透水係数の低下状況

図-14 $(k/k_0)_{opt} \sim (S'_w/S_w)_{opt}$ 関係

図-13 説明図

ある。とくに、 ρ は図-13中の直線の傾斜に相当する量で、粒子破碎の影響度を表わす指標と考えられる。つまり、 ρ が小さいほど透水性に及ぼす粒子破碎の影響が顕著な土質であることを意味する。なお、文中の3種のマサ土に対する ρ 値は、7.88 (Iマサ), 15.00 (Sマサ), 19.30 (Rマサ)であった。

以上のことから、粒子破碎に伴う透水性低下のパターンを簡潔に記述することができる。すなわち、マサ土の透水係数は、突固めエネルギーの大小にかかわらず、常に(4)式で推定される倍率だけ低下し、(5)式を満足する状態で落ち着く。

5. 広い含水域への適用性

(4)式は、最適含水比時の考察から導き出された式であるから、それ以外の含水域で適用可能かどうかは改めて調査する必要がある。

図-15は、締固め含水比の全域にわたって、透水係数の低下度 (k/k_0) と土粒子表面積比 (S'_w/S_w) の関係を、両対数紙上に一括図示したものである。この図から明らかなように、少なくとも最適含水比を含む主要な含水域(2.2参照)内では、含水比の大小にかかわらず直線関係が成り立つ。

したがって、(4)式は添字の opt を省いて(6)式のように表現し、相当広い含水域まで拡張して使っても差し支えないものと判断される。

$$\left(\frac{k}{k_0}\right) = \left(\frac{S'_w}{S_w}\right)^{-\mu} \quad (6)$$

図-15 $(k/k_0) \sim (S_w'/S_w)$ 関係

6. 結 言

マサ土粒子の破碎とそれに伴う透水性低下との関連性を、前報¹⁾と同じ方法論で試験条件(マサ土の種類・突固めエネルギー)を変えて検討した結果、主として次のような事柄が判明した。

(1) 突固めエネルギーの増加に伴う透水係数の減少傾向は、マサ土の場合、粒子破碎の影響を受けて普通土より著しくなる。

(2) 最適含水状態において、任意の突固めエネルギーで締固められたマサ土の透水係数と比表面積との間には、両対数紙上で直線関係が成り立つ〔(5)式参照〕。

(3) 最適含水状態におけるマサ土の透水係数は、突固めエネルギーの大小にかかわらず、常に粒子破碎のために(4)式で推測される倍率だけ低下し、(5)式を満

足する状態で落ち着く。

(4) 粒子破碎に伴う透水係数の低下度は、最適含水比時に限らずその前後の主要な含水領域にわたって(6)式を用いて推定できる。この式は、前報¹⁾とまったく同じ式である。異なる試験条件下で同じ関係が成り立つことから、(6)式の普遍性が期待される。

記 号 説 明

- e = 間ゲキ比
- e_0 = 無破碎状態のマサ土の間ゲキ比
- F = 風化度(乱したマサ土の場合)
- G_s = 土粒子比重
- k = マサ土の透水係数 (cm/sec)
- k_0 = 無破碎状態のマサ土の透水係数 (cm/sec)
- k_s = 河川砂の透水係数 (cm/sec)
- (k/k_0) = 粒子破碎に伴う透水係数の低下度
- K = (3) 式中の係数
- M = 材質補正 $[=(\tau_{d \min}/\tau_{ds \min})_0]$
- N = 突固め回数 (回)

S_r = 飽和度 (%)
 S_w, S_w' = 土粒子の破碎前, 後の比表面積 (cm^2/g)
 (S_w'/S_w) = 土粒子表面積比
 W = 含水比 (%)
 γ_d = マサ土の乾燥密度 (g/cm^3)
 γ_{ds} = 河川砂の乾燥密度 (g/cm^3)
 γ_d' = 無破碎状態のマサ土の乾燥密度 (g/cm^3)
 $(\gamma_{d \min})_0$ = マサ土の絶乾状態における最小密度 (g/cm^3)
 $(\gamma_{ds \min})_0$ = 河川砂の絶乾状態における最小密度 (g/cm^3)
 γ_w = 水の単位体積重量 (g/cm^3)
 μ = (4) 式中の係数
 ξ, ρ = (5) 式中の係数
 ψ = 図-13 中の二直線の交角

参 考 文 献

- 1) 松尾新一郎・福本武明 (1977): マサ土の透水性に及ぼす

粒子破碎の影響, 「土質工学会論文報告集」, Vol. 17, No. 1, pp. 87~97.

- 2) 松尾新一郎・福本武明 (1976): マサ土の締固め特性に及ぼす粒子破碎の影響, 「土質工学会論文報告集」, Vol. 16, No. 4, pp. 93~102.
- 3) 福本武明 (1972): 締固めたマサ土の密度に関する粒子破碎の影響, 「土質工学会論文報告集」, Vol. 12, No. 3, pp. 55~63.
- 4) 松尾新一郎・福本武明 (1976): マサ土の破碎性に影響する諸要因, 「土質工学会論文報告集」, Vol. 16, No. 4, pp. 87~92.
- 5) 福本武明 (1977): マサ土の風化度と粒子破碎現象の関連性, 「土木学会関西支部年次学術講演会概要集」, pp. III-31-1~2.

(原稿受付, 1977. 1. 5)