

火山成粗粒土の粒子破碎が締固め土の性質に及ぼす影響

Influence of Particle Breakage on Characteristics of Compacted Volcanic Coarse-grained Soil

富田 平四郎 (とみた へいしろう)
宇都宮大学助教授 農学部農業環境工学科鈴木 敬 (すずき たかし)
宇都宮大学教授 農学部農業環境工学科松川 進 (まつかわ すずむ)
宇都宮大学助教授 農学部農業環境工学科

1. はじめに

関東ローム層を構成する火山灰質粘性土は、こね返しによる強度低下が大きい等土工上の特殊土であるが、現在では多くの調査研究の成果によりその解決が図られている¹⁾。しかし、関東ローム層中にはこのほかに比較的粒子の大きい火山成粗粒土(礫)が軽石層を形成して存在するが、この軽石層についての工学的特性は十分に把握されているとはいえず、北海道の樽前山系、駒ヶ岳系の火山成粗粒土についての研究報告^{2)~5)}が数多くされているのに対し、関東ローム層中の火山成粗粒土を対象とした研究は数少ない。

栃木県中央部から茨城県にかけて分布する鹿沼軽石層は、群馬県の赤城山を噴出源とする⁶⁾。この軽石層は高含水比で多孔質な風化軽石を主体に構成されているが、風化軽石が軟質であるため外力により容易に破碎され細粒化し軟弱化する。この細粒化に起因した構造の違いは鹿沼土に特有な現象で、これにより鹿沼土の物理性、力学性は原土とはかなり異なってくる。したがって、この破碎と強度等の関係は重要であり、その実体を把握しておくことは、原土の持つ物理性、力学性の把握と共に鹿沼土の有効利用の観点から必要不可欠である。

原土の物理性、力学性や圧密・圧縮による構造変化については既に報告されているが^{7),8)}、ここでは鹿沼土の有効利用を目途とした土質改良について取り上げた。

鹿沼土の土質改良について土工的には、①圧密、圧縮による細粒化と密度増加を図る方法と、②改良資材を投入し粒子の膠結を図る方法の二つが考えられる。

本研究では、上記の①に属する締固めによる土質改良を取り上げ、締固めに付随して生じる粒子破碎(構造の違い)が締固め土の物理性、力学性に及ぼす影響について実験により検討した。

2. 試料の基本的性質

表一に試料の基本的性質を示した。試料は、地域および深さによる違いを考慮して、栃木県内の鹿沼市(赤城山から約50 km)と真岡市(同じく70 km)からそれぞれ上、中、下の3層、上、下の2層に分けて採取した。

鹿沼土の70%以上は、多孔質な風化軽石であるため

表一 原土の諸特性

項目	鹿沼試料			真岡試料		
	上層	中層	下層	上層	下層	
含水比 w (%)	214.3	191.5	220.0	180.6	194.0	
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.06	1.05	1.01	1.03	0.94	
間隙比 e	6.90	6.36	7.44	6.21	7.49	
比重 G_s	2.67	2.65	2.65	2.72	2.70	
粒度	礫分(%)	61.2	63.3	70.9	48.3	44.4
	砂分(%)	32.9	32.7	23.7	44.4	48.7
	細粒分(%)	5.9	4.0	5.4	7.3	6.9
三相	固相(%)	12.7	13.6	11.9	13.5	11.8
	液相(%)	72.4	69.0	69.1	66.2	61.7
	気相(%)	17.9	17.4	19.0	20.3	26.5
一軸圧縮強度 q_u (kN/m ²)	103 ~145	55 ~92	—	71 ~84	41 ~58	

含水比が高く、間隙比が大きく、密度が小さい。したがって、固相比が小さく、(液相+気相)比が全体積の80%以上を占める。なお含水比は、地域、深さにより値が異なり、深い層で高く、給源火山からの距離が遠い程低く、間隙比は下層部で、密度は上層部で大きい。

地盤の支持力を一軸圧縮強度で見てみると、比較的柔らかであるが固結度の高い上層部で大きく、ルーズな下層部で小さい。

なお、鹿沼上、中層、真岡上層の風化軽石間にはイモゴライトが存在し、特に鹿沼上層に多く含まれる。このイモゴライトは自然状態で300%以上の高含水比を示すが乾燥すると非可逆的に大きく収縮する⁹⁾。

3. 実験の種類と方法

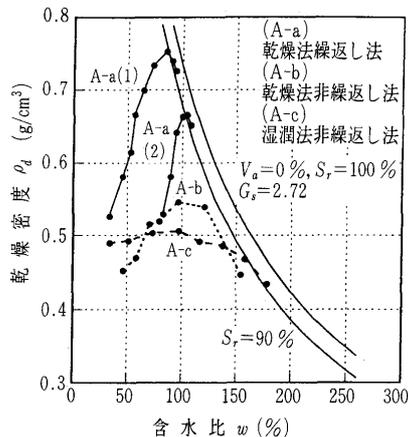
3.1 締固め試験

締固め試験は、乾燥法繰返し法(呼び名 A-a)、乾燥法非繰返し法(呼び名 A-b)、湿潤法非繰返し法(呼び名 A-c)の3方法で行った。

3.2 突固め土の物理性、力学性に関する実験

粒子破碎に起因する構造の違いが締固め土の性質に与える影響を調べるため、次の実験を行った。実験は、締固め時の含水比の違いにより粒子破碎の程度が異なることから、自然含水比(w_n)、含水比100%、40%の締固め土について ①粒度試験(ふるい分け)、②pF試験、③飽和透水試験、④一軸圧縮試験を行った。

なお、粒度試験はモールドから抜き取った締固め土を



図一 締固め曲線 (真岡上層)

表一 最適含水比 (w_{opt}), 最大乾燥密度 (ρ_{dmax})

試料名	A-a		A-b		A-c	
	w_{opt} (%)	ρ_{dmax} (g/cm³)	w_{opt} (%)	ρ_{dmax} (g/cm³)	w_{opt} (%)	ρ_{dmax} (g/cm³)
鹿沼上層	85	0.775	83	0.555	86	0.480
鹿沼中層	84	0.755	78	0.535	93	0.485
鹿沼下層	103	0.665	90	0.465	90	0.450
真岡上層	85	0.753	95	0.552	90	0.508
真岡下層	84	0.763	92	0.524	87	0.505

丁寧に解きほぐしたものについて実施した。

4. 試験結果および考察

4.1 締固め特性

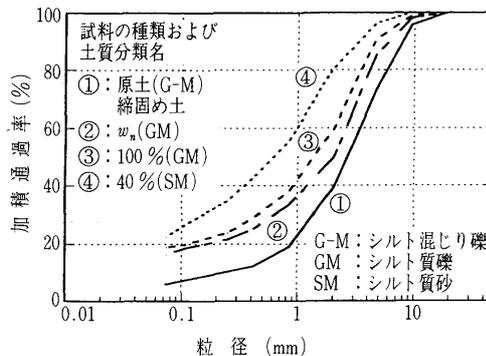
図一に真岡上層の締固め曲線を示したが、ほかについては同様であるので最適含水比 (w_{opt}) および最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) だけを表一に示した。(A-a) 法の場合、 ρ_d 値が含水比のわずかな増加により急激に増加する鋭い山形の曲線で、 ρ_{dmax} は、鹿沼下層を除きいずれも0.75 g/cm³以上となった。 w_{opt} は、鹿沼下層が103%、そのほかが約85%であるが、これらの値は自然含水比の約半分値であった。この方法は同じ試料を繰返し使用するため、風化軽石の細粒化により締固め条件が向上し ρ_d 値が大きくなった。なお、初期含水比を変えた場合の締固め曲線は、初期含水比が高い (A-a(2)) の場合、 ρ_{dmax} が小さく、かつ w_{opt} も大きくなり関東ロームと同様の傾向を示した。

(A-b) 法の場合、試料の非繰返し使用のため風化軽石の細粒化が少い分締固まらないため、(A-a) 法に比べ ρ_{dmax} が約0.2 g/cm³ 小さいなだらかな曲線形となった。この方法においても鹿沼下層の締固め効果は小さく、 ρ_{dmax} はほかの試料よりも約0.1 g/cm³ ほど小さくなった。

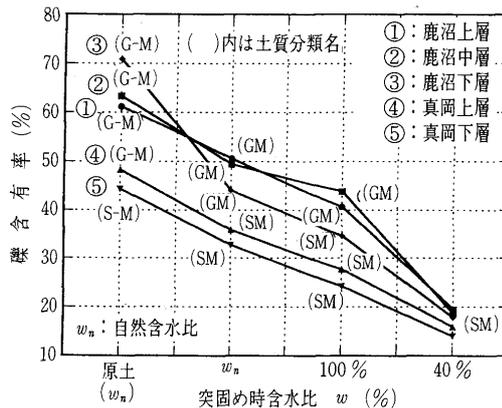
(A-c) 法の場合、いずれの試料も含水比の低下に伴い ρ_d 値がごくわずかな増加する非常になだらかな曲線で、 ρ_{dmax} もかなり小さく、ピーク位置も不明確になった。

4.2 締固めによる風化軽石の破碎

図二は、締固め土の粒度分布 (鹿沼上層) であるが、



図二 突固め時の試料含水比と細粒化の関係 (鹿沼上層)



図三 粒子破碎による礫含有率の低下

締固め時の含水比が低下すると破碎量が増し、「シルト混じり礫 (G-M)」であった原土が、 w_n および100%でシルト質礫 (GM) に、40%でシルト質砂 (SM) へと細粒化した。

この細粒化の進行を礫 (2 mm 以上の風化軽石、岩片) 含有率の変化で比較したのが図三である。含水比の低下に伴う礫含有率の減少は原土の礫含有率により異なるが、含水比40%では試料間に大きな差が無くなった。ただし、鹿沼下層は w_n , 100%での破碎量が上、中層に比べてかなり多いが、これは原土の礫含有量が多く、しかも風化軽石の径が上、中層に比べて大きい分、風化軽石相互の移動が阻害され破碎量が多くなったと考えられる。

4.3 締固め土の間隙特性

(1) 粒子破碎による水分特性曲線の変化

図四は、締固め土の水分特性曲線を試料の含水比別に鹿沼上層について示したものである。ほかの試料については、これとほぼ同様であるので省略した。

原土の水分特性曲線の特徴は、pF1 を越えた付近での体積含水率の急激な低下であり、これは風化軽石間の大間隙に保持されていた水が、圧力のわずかな増加で除去されることを示している。この傾向は粒度の粗い鹿沼試料で、特にイモゴライトを多く含有する鹿沼上層で顕著であった。次に締固め土の水分特性曲線であるが、原土に比べてかなり違ったものになった。この変化の主因は、風化軽石の破碎による大間隙の消失と団粒構造の破壊である。pF1 を越えた付近での体積含水率の急激な低下は、自然含水比試料ではわずかに残り、これ以下の

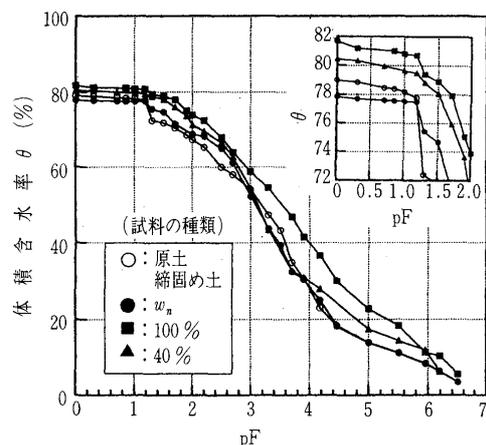


図-4 細粒化による pF-水分特性曲線の変化(鹿沼上層)

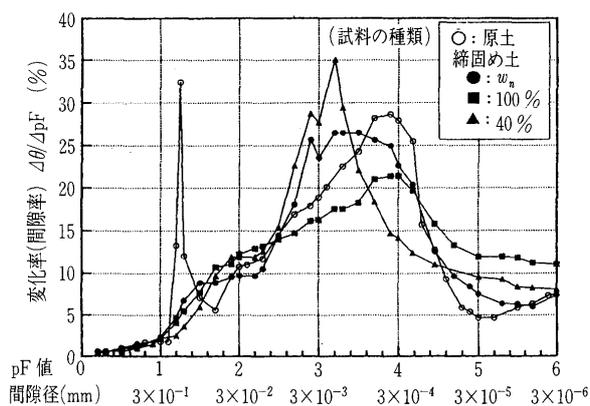


図-5 細粒化による間隙分布の変化(鹿沼上層)

含水比では細粒化が進行するため消失し大間隙構造がほとんど残存しなくなるが、pF3以下とpF4以上の保水性は向上した。特に最適含水比に近い含水比100%の場合は、全体的に高体積含水率側に移動した曲線形となり保水性が大きくなった。保水量の変化は、pF2付近の肩部とpF6間の保水量を原土のそれと比べると、 w_n で4%、100%で12%、40%で7%の増となった。

(2) 粒子破碎による間隙分布の変化

この水分特性曲線の変化(保水量の変化)は、締固めによる風化軽石の破碎に起因するものであるが、破碎後の間隙分布を水分特性曲線から求めると図-5の間隙分布曲線となる。締固め土の曲線では、原土において見られるpF1.2(ラプラス式による相当間隙径 $d=0.15$ mm)前後のピーク(図-4の θ 値の急低下に一致)が失われ、風化軽石間の大間隙が消失したことを示している。

間隙の分布を個々に見てみると、 w_n および40%の場合、pF1.5($d=0.1$ mm)からpF3.5($d=0.001$ mm)の間隙量の割合が原土に比べて多くなり、この間の保水量が増加する。一方、100%の場合は、pF2.5($d=0.01$ mm)からpF4.3($d=0.00015$ mm)間の間隙が減少するが、pF4.3以上の微細間隙の増加が顕著で結果的に保水量を増加させる。

なお、40%の場合、風化軽石の細粒化が最も進行しているにもかかわらず、粒度的に粗い w_n 、100%に比べ

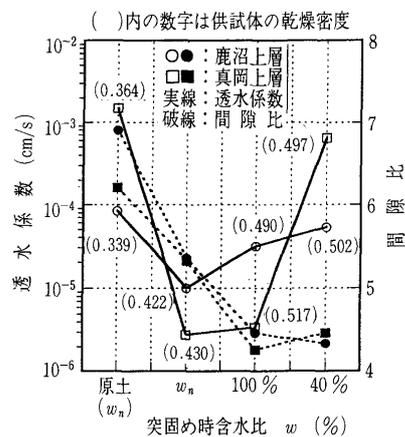


図-6 構造変化と透水係数の関係

て毛管間隙の量が多く形成される。これは含水比低下により粒子間摩擦が増加し風化軽石(破碎風化軽石を含む)の移動が妨げられる結果、毛管に相当する粗間隙が比較的多く形成されるためと考えられる。

4.4 締固め土の透水性

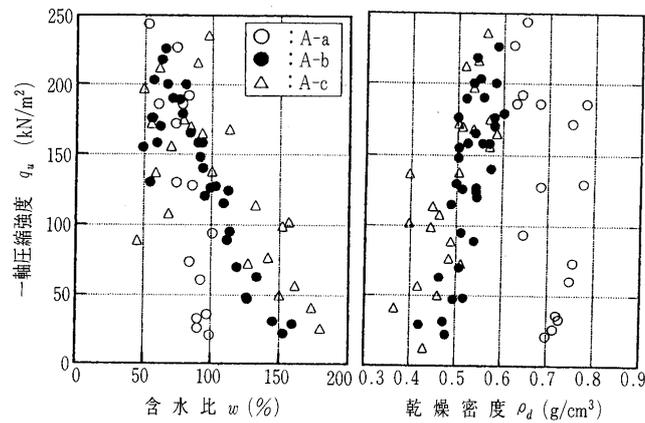
図-6は、締固め時の含水比(粒子破碎の違い)と飽和透水係数および間隙比との関係を示したものである。粒子破碎に伴う透水係数の低下は自然含水比で最も顕著であり、100%、40%と含水比の低下に伴い増加傾向を示し、細粒化の進行に一致しなくなった。これを間隙比と乾燥密度との関係で見ると、100%、40%の間隙比は w_n に比べ約1小さく、乾燥密度も大きくより密な構造であるが、透水係数は増加傾向となった。

これは次のような理由によるものと考えられる。すなわち、含水比が高い場合、潤沢な水分により風化軽石相互の移動が容易である分風化軽石の破碎が少なく(図-2)、かつ破碎された風化軽石の局所移動により粒子間の通水間隙が狭まり透水性が急低下する。一方、含水比が低くなると粗間隙が比較的多く形成されること、また、乾燥による親水性の低下、イモゴライトの非可逆的な収縮が透水係数を増加させる要因となる。

4.5 締固め土の強度

図-7に締固め土の乾燥密度(ρ_d)および含水比(w)と一軸圧縮強度(q_u)の関係を示した。 ρ_d と q_u の間にはおおむね正の直線関係が認められるが、大きく二つに分かれた。一つは ρ_d 値が0.4~0.6(g/cm³)の(A-b)および(A-c)の非繰返し法で締固めた試料、二つ目は ρ_d 値が0.6~0.8(g/cm³)の繰返し法で締固めた試料である。前者は ρ_d 値の増加に対し q_u 値がほぼ直線的に増加したが、後者の場合は両者の関係はむしろ逆で、試料の細粒化のため最適含水比(85%)を越える含水比ではオーバーコンパクション状態となり強度が低下した。

このことは含水比との関係を見ると明らかで、(A-a)の場合、含水比が80%以上では q_u 値が極端に小さい。これに対し非繰返し法の場合、含水比と q_u 値には負の直線関係が認められ、120%付近の含水比でも100 kN/m²以上の q_u 値となるなど急激な低下とならない。



図一七 含水比、乾燥密度と一軸圧縮強度の関係

ここで締固め土の強度を鹿沼上層原土の q_u 値（不攪乱）である 100 kN/m^2 以上とする場合、乾燥密度を $0.5 \text{ (g/cm}^3)$ 以上に、含水比を 120% 以下まで低下させ、粒度的には砂分が $24\sim 44\%$ のシルト質砂とすることが必要となる。

これを実際の土工に置き換えてみると、鹿沼土の自然含水比が $180\sim 220\%$ であることから、乾燥処理により含水比を半分以下まで低下させなければならず、現実的には施工上かなり難しい。したがって、所要の強度を得るための手段として一般的に用いられる改良材の添加が不可欠となろう。この場合においても、曝気乾燥等によるある程度の含水比低下は、改良材の量を減らすことになり併用すべきである。

5. まとめ

以上、火山成粗粒土（鹿沼土）の粒子破碎が締固め土の物理性や力学性に与える影響について検討した結果、おおむね次の事項が明らかになった。

締固めに伴う風化軽石の細粒化は、含水比が低いほど、また繰返し使用回数が多いほど顕著であるが、この細粒化の程度により締固め土の性質が異なってくる。

すなわち、物理的には風化軽石間の大間隙の消失による粗間隙の減少と微細間隙の増加により間隙構造が大きく変化し、これにより保水性は向上するが遮水性は大きく低下する。また、強度的には細粒化による密度の増加が締固め土の強度を増すが、これは最適含水比の範囲の含水比（ $80\sim 100\%$ ）で締固めた場合に顕著である。ただし、最適含水比は、自然含水比の約半分であるため乾

燥処理にかなりの問題が残る。

今回の結果を踏まえて鹿沼土の利用を考えて見た場合、一軸圧縮強度 100 kN/m^2 以上が確保できることは一つの指標となり得るが、上述の理由で乾燥処理以外の方法での土質改良を図った方が有利である。すなわち、改良材の添加による土質改良が簡便な改良法として考えられるが、これについてはセメント等を用いて現在検討を進めている。

参考文献

- 1) 高速道路調査会：関東ロームの土工，共立出版，pp. 78～113, 1973.
- 2) 佐々木竜男・前田 隆ほか：北海道における火山性土の物理的性質に関する研究Ⅰ，軽石の孔ゲキについて，農業土木学会論文集，27号，pp. 57～60, 1969.
- 3) 前田 隆・佐々木清一・佐々木竜男：北海道における火山性土の物理的性質に関する研究Ⅱ，軽石の水分的特性，農業土木学会論文集，31号，pp. 25～28, 1970.
- 4) 谷口秀男：締固めによる粗粒火山灰の粒子破碎が締固め密度に及ぼす影響，土と基礎，Vol. 27, No. 6, pp. 29～34, 1979.
- 5) 谷口秀男・佐野昭彦：風化火山礫を混合した火山礫土の粒子破碎が締固め密度に及ぼす影響，土と基礎，Vol. 29, No. 8, pp. 3～6, 1981.
- 6) 関東ローム研究グループ：関東ローム，その起源と性状，築地書館，pp. 157～165, 201～206, 1965.
- 7) 八幡俊雄：土壌の物理学，東京大学出版会，1977.
- 8) 富田平四郎・中野政詩：鹿沼土の圧縮性と構造変化，農業土木学会論文集，167号，pp. 1～10, 1993.
- 9) 富田平四郎ほか：地域，深さによる鹿沼土の物理的構成と各種物理性の差異について，土壌の物理性，第69号，pp. 11～21, 1994.

(原稿受理 1997.9.19)