

土の締め固めエネルギーを用いた不飽和土の内部状態の推定

前橋工科大学 学生会員 ○吉田 教真
 前橋工科大学 正会員 森 友宏

1. 研究背景と目的

一般的に、土を突き固めによって締め固めた場合、含水比の増加に伴い最大乾燥密度が大きくなる事が知られている。しかし、飯田らの研究¹⁾によると、マサ土を用いた低エネルギー締め固めにおいて、低含水比の試料では、乾燥試料 (w=0%) よりも密度が小さくなる事が示された。この要因は、土粒子間に懸架するメニスカス水による液架橋付着力によるものと推察された。土粒子間に働く液架橋付着力により土粒子の移動が制限され、低い締め固めエネルギーでは土粒子を動かすエネルギーに達しないためであると思われる。本研究では、締め固めエネルギーを様々に制御して締め固めを行うことで、飽和度に応じて変化する不飽和土の内部に働く液架橋付着力を、締め固めエネルギーを用いて表現する。

2. 研究の流れ・試験方法

本研究では、砂質土を用いた低エネルギー締め固め試験を行い、低い締め固めエネルギーにおける充填率～1打あたりの締め固めエネルギー～累積締め固めエネルギーの関係性を求める。試験では一定の高さから重錘を落下し、供試体の沈下量を計測することで、乾燥密度、充填率、間隙率、飽和度、1打あたりの充填率増加分を算出する(図1参照)。また、締め固めエネルギーEは以下の式(1)より求める。

$$E = \frac{W_r \cdot H \cdot N_b \cdot N}{V} \quad (\text{kJ/m}^3) \quad \text{式(1)}$$

W_r : 重錘重量 (kN), H : 重錘落下位置 (m)

N_b : 1層当たりの締め固め数, N : 層数

V : 締め固めた供試体の体積 (m³)

3. 実験結果・考察

砂質土を初期含水比 5, 10, 15, 20, 25, 30%に調整し、それぞれ重錘質量 200g, 400g で締め固めを行った結果を図2, 図3に示す。締め固めを進める(フェーズ1, 2, 3)と、図中の点は下から上へと

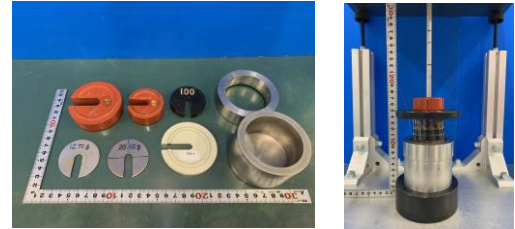


図1 使用器具及び実験装置

表1 使用重錘とA法との比較

	重錘		2.5kgランマー (締め固め試験:A法)
	200g	400g	
重量 (kg)	0.2	0.4	2.5
1発当たりの エネルギー(kJ/m ³) (落下高さ5cm)	0.867	1.733	7.35 (落下高さ30cm)
内径φ (cm)	6		10
供試体の違い 高さ h (cm)	4		12.73
体積V (cm ³)	113.1		1000

	フェーズ1	フェーズ2	フェーズ3
重錘落下高さ (cm)	5	10	木槌での打撃 200回
重錘落下回数 (回)	1~300	301~600	※最密充填を 求める

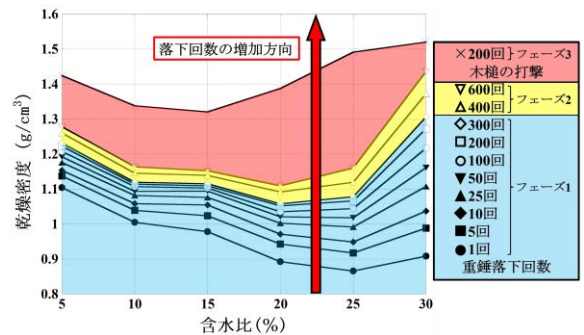


図2 等累積締め固めエネルギーの時の乾燥密度～含水比の関係 (重錘 200g)

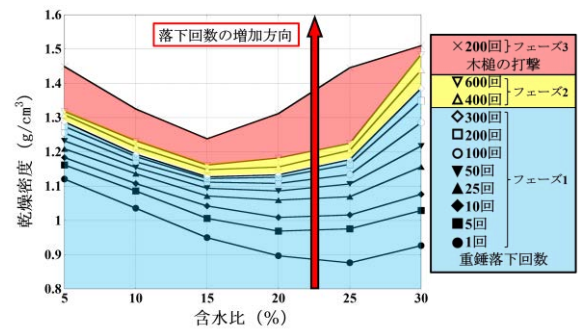


図3 等累積締め固めエネルギーの時の乾燥密度～含水比の関係 (重錘 400g)

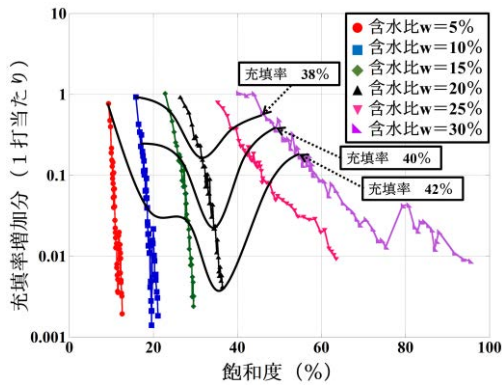


図5 飽和度と一打あたりの充填率増加分の関係 (重錘 200g)

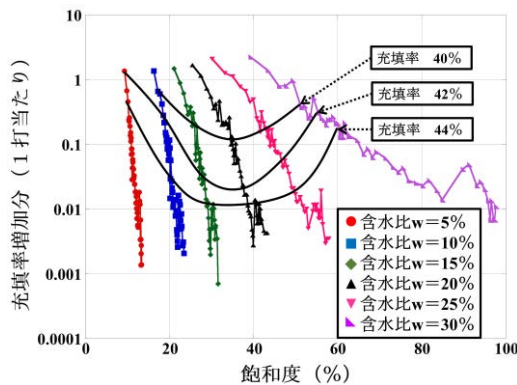


図6 飽和度と一打あたりの充填率増加分の関係 (重錘 400g)

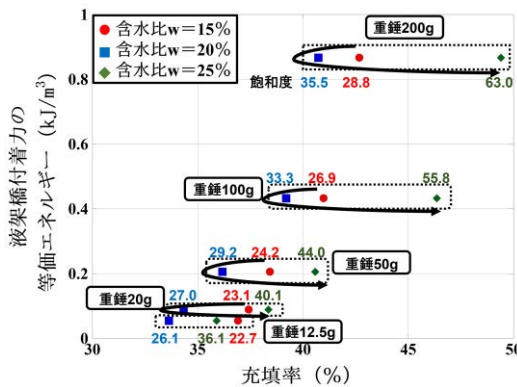


図7 砂質土における充填率と液架橋付着力の等価エネルギーの関係

移動していく。縦方向に並んだ点群が一連の試験結果である。1打あたりの締固めエネルギーが異なると、累積締固めエネルギーが等しくとも、含水比に応じて到達できる乾燥密度が異なっている。等しい累積締固めエネルギーを結んだ線は凹曲線を示しており、この凹曲線の下端部において各条件下での液架橋付着力が最大となっていることが推察される。

また、締固めエネルギーが小さいとき(重錘 200g)は、試料に水が混ざると、土粒子間の液架橋付着力の

影響により、締固めしにくくなるが、締固めエネルギーが大きくなると(重錘 400g)、土粒子間に働く液架橋付着力を打破可能となることで、乾燥密度は大きくなる。よって、1打あたりの締固めエネルギーによって締固めが可能な上限密度が存在し、締固めエネルギーを大きくすることで、再び締固め可能となる。

この結果から、締固めエネルギーが①液架橋付着力の打破及びメニスカス水の切断、②土粒子移動、③土粒子間の摩擦に使われると仮説を立て、検証を行った。ここでは①に関して考察する。図5、図6は飽和度と1打あたりの充填率増加分(以下 Δ 充増)の関数に等充填率の曲線を加えたグラフである。ある一定の締固めエネルギーのとき、それ以上締固めが困難となるときの試料の充填率は、試料の初期含水比や飽和度に応じて異なる。また、等充填率の曲線が凹曲線となったことから、この下端部において液架橋付着力が最大になると考えられる。液架橋付着力の影響がないとすると、 Δ 充増は密度(充填率)に依存し、緩ければ増分は大きく、密であれば小さくなるはずである。しかし、ある一定の充填率であっても、飽和度が適度に大きくなると、 Δ 充増は小さくなる。すなわち、液架橋付着力の影響が大きくなる。さらに飽和度が大きくなると、 Δ 充増は大きくなるので、液架橋付着力の影響が小さくなっていることになる。この関係は図7の飽和度が折り返すような挙動からも示唆される。等価エネルギーとは Δ 充増が0.01%となるときの1打あたりの締固めエネルギーである。

4. まとめ

液架橋付着力により乾燥密度、 Δ 充増のグラフで凹曲線となる。締固めエネルギーが粒子間の液架橋付着力、摩擦、土粒子移動で散逸されると仮定すると、内訳を分化することで、それぞれに使用されるエネルギーとして定量的に評価できると考えられる。

参考文献

1) 飯田崇斗, 土倉泰: マサ土の締固め曲線の形状に対する締固めエネルギーの影響, 2021年度 前橋工科大学 社会環境工学科 卒業論文, 2021.