

含砾黏土压实及强度特性的实验研究^①

费 康^{1,2}, 张永强¹, 闻 玮¹

(1. 扬州大学 岩土工程研究所, 江苏 扬州 225127; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:采用室内重型击实实验对含砾黏土的压实特性进行分析, 结合 CT 断层扫描研究材料整体干密度、最优含水率及黏土的压实程度与掺砾量、含水率等因素之间的关系。根据无侧限抗压强度实验结果, 比较不同掺砾量和不同含水率下的无侧限抗压强度大小。结果表明: 掺砾量较低时砾粒与黏土之间就已出现粒间空隙; 含水率较高时, 这些空隙及黏土孔隙中的水在击实过程中难以排出, 同时水还阻碍了封闭气泡的逸出, 造成黏土的压实效果明显降低; 随着含砾量的增加砾粒逐渐起到骨架作用, 减小了作用在黏土上的击实能量, 也造成黏土的压实程度差于纯黏土。含砾黏土的无侧限抗压强度主要由黏土成分的密实程度控制, 因而受到砾粒含量和含水率的影响, 整体上随着含砾量的增加而降低, 含水率较高时的下降幅度更明显。

关键词: 含砾黏土; 最大干密度; 最优含水率; 不排水强度

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)增刊 1-0012-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0563

Experimental Study of Compaction Characteristics and Strength Behavior of Gravelly Clay

FEI Kang^{1,2}, ZHANG Yong-qiang¹, WEN Wei¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Heavy compaction tests were conducted to investigate the compaction characteristics of gravelly clay. Combining the results of a CT scan, the effects of gravel content and water content on maximum dry density, optimum water content, and clay's compaction degree were studied in detail. The undrained shear strength of gravelly clay with different gravel content and water content were also studied. It was found that there were extra voids between gravel and clay even when the gravel content was relatively low. Consequently, it was difficult for the pore water to flow throughout the soil and the air in the inter gravel voids was blocked by the water so that the dry density of the clay was significantly reduced. Simultaneously, the compaction effort applied to the clay was also reduced because of the existence of the gravel skeleton, thus the degree of compaction of the clay decreased with the increase of gravel content. The results of the compressive tests also showed that the undrained shear strength of gravelly clay depended on the gravel and water content. As the gravel content increased, the undrained shear strength decreased, especially in the case of high water content.

Key words: gravelly clay; maximum dry density; optimum water content; undrained shear strength

① 收稿日期: 2015-04-01

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20141279); 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室开放基金(GH201304); 江苏省“青蓝工程”
作者简介: 费 康(1978-), 男, 江苏如皋人, 博士, 副教授, 主要从事地基基础工程研究. E-mail: kfei@yzu.edu.cn

0 引言

含砾黏土在自然界中广泛存在,工程中也有较多应用,如塌积土、泥石流地区的土石混合体、土石坝的掺砾心墙料、道路工程中的土石混合体填料等。这类复合土体的颗粒粗细相差悬殊、级配分布广,不均匀系数通常可达 100 以上,压实及力学性能与一般的细粒黏土或粗粒料有较大区别。为了保证压实质量及相关土工构筑物的性能,对含砾黏土的压实性能和强度特性进行研究有重要意义。国内外学者利用室内重型击实或现场碾压实验对影响含砾黏土压实效果的主要因素进行了研究。如陈志波等^[1]通过重型击实实验指出:随掺砾量或粗料含量的增大,宽级配砾质土的最大干密度呈先升后降的变化趋势。Ham 等^[2]认为粗颗粒含量会影响混合土体的孔隙比及密实度。Zhao 等^[3]通过分析试样断面的图片,提出了不同粗颗粒含量下材料细观结构的概念模型,分析了相应的孔隙分布。刘丽萍和折学森^[4]认为粗粒含量是影响土石混合料最大干密度的主要因素,当粗粒含量小于 75% 时,最大干密度随粗粒含量增加而急剧增大,当粗粒含量超过 75% 时,最大干密度增加缓慢。Hsu 和 Saxena^[5]根据拟合室内实验数据,给出了包含粗颗粒的土体干密度计算经验公式。许锡昌等^[6]根据现场实验,指出当粗料含量逐渐增加时干密度呈逐渐增大趋势,粗粒料达到 90% 左右后,干密度离散性较大。

现有研究主要关注材料的整体最大干密度随含砾量等因素的变化关系,对含砾黏土中黏土部分的压实程度的研究还较少。而 Mollamahmutoglu 和 Yilmaz^[7]通过含砾黏土的三轴实验指出,含砾量小于 50% 时材料的强度主要取决于黏土成分,此时黏土的密实度对材料的力学性能影响很大。本文通过室内重型击实实验、CT 断层扫描和无侧限抗压强度实验,重点分析不同含砾量、不同含水率下黏土的压实程度及其对含砾黏土整体压实效果及力学性能的影响。

1 含砾黏土的重型击实实验

1.1 实验材料及方案

本次实验为重型击实实验,单位体积击实功为 2 684.9 kJ/m³,锤质量 4.5 kg,落距 457 mm,分 5 层击实,每层 56 击。试样直径 15.2 cm,高度 11.6 cm。

实验所用黏土取自江苏宝应,土粒比重 $d_s =$

2.7,液限 $w_L = 54\%$,塑限 $w_p = 29\%$,塑性指数 $I_p = 25$,压缩系数 $C_c = 0.159$,回填系数 $C_s = 0.012$ 。所掺加的粗颗粒为经筛选的砾粒,粒径在 19~26.5 mm 之间,平均粒径约 25 mm。实验得到的砾粒松散体的最大孔隙比为 0.79。

考虑到实际工程中粗颗粒的质量含量一般在 30%~70% 之间,如张丙印等^[8]建议糯扎渡堆石坝的心墙采用掺入 35% 花岗岩碎石的风化混合土料,瀑布沟大坝心墙料的粗颗粒含量平均为 48.4%^[9]。因此本次实验中砾粒含量 P (砾粒质量与干土质量的比值) 初步选为 0%、15%、25%、35%、45%、55% 和 65%,每一含砾量按纯土的质量控制 5 个含水率。

1.2 实验结果分析

1.2.1 含砾黏土压实性能

对于含砾黏土,其整体的干密度 ρ_d 表达为:

$$\rho_d = \frac{m_{sc} + m_g}{V} \quad (1)$$

式中: m_{sc} 为黏土土颗粒的质量; m_g 为砾粒的质量; V 为土样总体积。

若忽略砾石的吸水率,含砾黏土的整体含水率 ω 表达为:

$$\omega = \frac{m_w}{m_{sc} + m_g} \quad (2)$$

式中 m_w 为水的质量。

图 1 给出了不同含砾量下整体干密度随整体含水率变化关系。由图可见,实验得到的纯黏土击实曲线符合一般规律:(1) 击实曲线存在峰值,实验得到的黏土最大干密度为 1.74 g/cm³,相应的最优含水率为 18.1%;(2) 击实曲线的左段(低于最优含水率)比右段的坡度陡,即偏干状态时含水率对干密度的影响较大;(3) 偏湿状态下,随着含水率的提高,孔隙气体体积减小,压实性下降,击实曲线位于饱和线下方。掺加砾粒后,实验得到的击实曲线形态与纯黏土类似,也呈上凸曲线状,同样存在最优含水率和最大干密度。与纯黏土相比,含砾黏土的击实曲线向左上方有不同程度的移动,表明最大干密度随掺砾量的增加而增加,最优含水率随掺砾量的增加而减小。砾粒含量 P 为 65% 时的最大干密度增加为 2.12 g/cm³,最优含水率减小为 5.2%。

假设砾粒均匀分布在黏土中,且击实后黏土达到了最优干密度,则含砾黏土的最大干密度 $\rho_{d \max}$ 与掺砾量 P 之间的理论关系为:

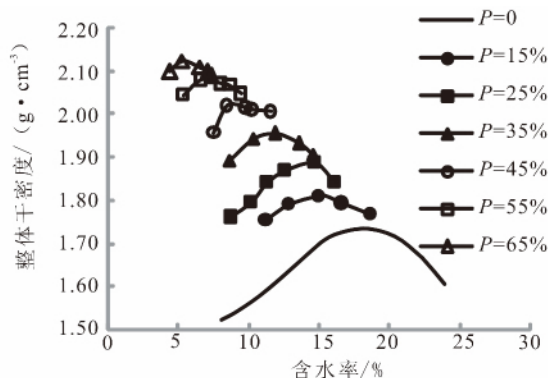


图1 不同含砾量下干密度与含水率的关系

Fig. 1 Relationship between dry density and water content with different gravel contents

$$\rho_{d \max} = \frac{1}{\frac{1-P}{\rho_{d \max c}} + \frac{P}{\rho_w d_{sg}}} \quad (3)$$

式中: d_{sg} 是砾粒的相对密度, 近似取 2.7; ρ_w 是水的密度; $\rho_{d \max c}$ 是黏土的最大干密度。

最优含水率 ω_{op} 与掺砾量 P 之间的理论关系为:

$$\omega_{op} = \omega_{opc}(1-P) \quad (4)$$

式中 ω_{opc} 是纯黏土的最优含水率。

根据实验结果, 纯黏土的最大干密度取为 1.74 g/cm^3 , 纯黏土的最优含水率为 18.1% , 则按式(3)和(4)计算得到的含砾黏土最大干密度和最优含水率与掺砾量的理论关系如图2和图3所示。为进行对比, 实验得到的结果也一并给出。由图可见, 当含砾量低于 35% 时, 最大干密度随含砾量增加而增加的幅度与理论值基本一致; 当含砾量高于 35% 之后, 实验曲线的斜率小于理论值, 增幅变缓。 P 为 65% 时, 最大干密度理论值为 2.26 g/cm^3 , 比实验值约大 7% 。

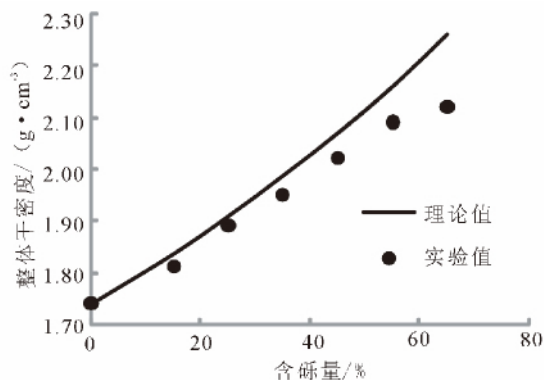


图2 最大干密度与含砾量的关系

Fig. 2 Relationship between gravel content and maximum dry density

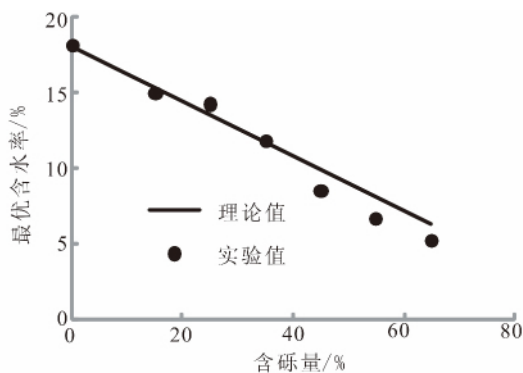


图3 最优含水率与含砾量的关系

Fig. 3 Relationship between gravel content and optimum water content

最优含水率随含砾量的变化也有相似的规律, 当含砾量较小时 ($P \leq 35\%$) 时, 最优含水率理论值与实验值基本吻合, 反映了含砾黏土中黏土的压实程度与纯黏土的情况接近; 含砾量较高时, 实验值与理论值之间的差距逐渐显现。 P 为 65% 时, 最优含水率理论值为 6.3% , 比实验值约大 20% 。这是因为掺砾黏土中黏土成分的压实程度与纯黏土之间存在区别。

1.2.2 含砾量对黏土密实程度的影响

一般认为^[1], 含砾黏土的压实干密度与含砾量之间的关系与材料的细观结构特征密切相关。按含砾量 P 从小到大, 含砾黏土的细观结构特征可分为“悬浮-密实结构”、“密实-骨架结构”和“骨架-空隙结构”。“悬浮-密实结构”时砾粒彼此不接触, 并被黏土紧密包裹, 由于砾粒的质量大于同体积的纯黏土, 掺砾干密度将随 P 着值的增加而增加。“密实-骨架结构”则是指当 P 值增加到一定程度, 砾粒形成骨架结构, 若黏土的体积正好等于砾粒骨架之间的孔隙的体积, 对应的含砾量可称为最优含砾量, 此时含砾黏土的干密度将达到最大值, 这是因为值进一步增加后, 黏土将不能填满砾粒骨架之间孔隙, 即所谓的“骨架-空隙结构”, 这将造成材料的干密度随 P 值的增加而减小。因此式(3)只适用于 P 小于最优含砾量的情况。

最优含砾量可近似按纯砾粒在自然状态下所能获得最大孔隙比估计。本次实验中测得的纯砾粒土最大孔隙比为 0.74 , 则对应的最优含砾量约为 68% 左右, 高于本次实验中的含砾量上限。理想情况下本次实验中砾粒与黏土之间不应存在空隙, 但通过对试样的 CT 电子扫描发现, 在含砾量较小时 ($P = 25\%$), 砾粒的局部骨架之间就已存在额外空隙(图

4 中黑色部分)。另一方面,含砾黏土中粗颗粒的存在将会减小作用在黏土上的击实能量,这也会造成黏土的压实程度下降。为了印证这一点,将含砾黏土中黏土成分的干密度与黏土含水率之间的关系绘制于图 5。图中黏土部分的干密度是指:

$$\rho_{dc} = \frac{m_{sc}}{V_c} \quad (5)$$

式中 $V_c = V - V_g$, V_g 是砾粒的总体积。不考虑砾粒的吸水,则黏土的含水率表达为

$$\omega_c = \frac{m_w}{m_{sc}} \quad (6)$$

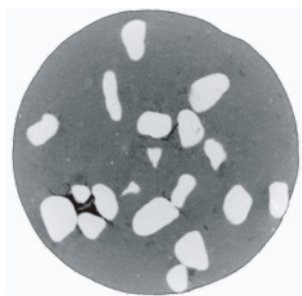


图 4 含砾黏土的 CT 扫描图 ($P=25\%$)

Fig. 4 CT scan image of clay-gravel mixture ($P=25\%$)

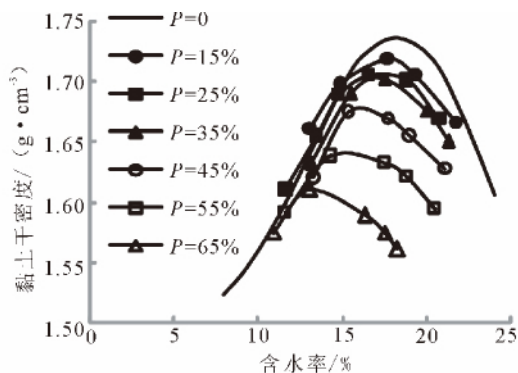


图 5 不同含砾量下黏土干密度与含水率的关系

Fig. 5 Relationship between clay's dry density and water content with different gravel contents

由图 5 可见,掺砾量 P 较小时,黏土最大干密度的变化不大,当 P 为 0%、15%、25% 和 35% 时黏土的最大干密度分别为 1.74、1.72、1.71 和 1.70 g/cm^3 。当掺砾量较大时,黏土最大干密度随的增加而减小的趋势相对较明显,当 P 为 45%、55% 和 65% 时黏土的最大干密度分别为 1.68、1.64 和 1.61 g/cm^3 。另一方面,高含砾量的情况下黏土成分的最优含水率与纯黏土也有较大区别, $P=65\%$ 时其为 13.1%,明显小于纯黏土的 18.1%。

图 5 同时还表明,掺砾量 P 对黏土压实程度的

影响与含水率也有较大关系。在含水率较低时(小于最优含水率),黏土颗粒表面的吸着水水膜较薄,粒间引力较大,黏土颗粒移动相对困难,压实效果不好。此时掺入较低含量的砾粒,能起到分隔黏土颗粒的作用,压实程度会有所提高,这是 P 等于 15% 和 25% 时黏土的干密度大于纯黏土的主要原因。当含砾量进一步增加,作用在黏土上的击实能量会有所减小,相应的黏土干密度有所下降。在含水率较大时(大于最优含水率),含砾黏土中黏土部分的干密度随 P 的增加而下降的趋势要更明显一些,这除了由于击实能量的下降之外,还是因为 P 越大,砾粒与黏土之间的额外空隙越大。击实时,这些额外空隙中的水分来不及排出,阻止了黏土颗粒之间的相互接近。同时,额外空隙中也有可能存在封闭的气泡,这部分气体由于水的阻碍未能及时排出,在击实过程中气泡体积暂时减小,吸收了部分击实能量,黏土颗粒间承受的击实力减小,减小了压实效果。

2 含砾黏土的无侧限抗压强度实验

2.1 实验方案

无侧限抗压强度是黏土的重要力学性能,也是道路工程中含砾黏土设计的关键指标。本小节主要分析含砾量对含砾黏土无侧限抗压强度的影响。实验在万能材料实验机上进行,试样采取击实成型后的土样,黏土部分的含水率控制为 13% 和 21%,分别代表偏干和偏湿状态,含砾量分别为 0%、15%、25%、35%、45% 和 55%。

2.2 实验结果分析

图 6 给出了无侧限抗压强度与含砾量之间的关系。由图可见,在重型击实下纯黏土的密实度较高,13% 和 21% 含水率下的无侧限抗压强度 q_u 分别达到了 1.13 MPa 和 0.95 MPa。这是因为土样在击实过程中收到了远超过自重应力的压力作用,在无侧限抗压强度实验时处于较强的超固结状态,峰值破坏强度较大。若根据剑桥桥模型理论^[10],饱和黏土的无侧限抗压强度与其孔隙比密切相关,其在不排水条件下土体能承受的最大偏应力为:

$$q_u = M \exp\left(\frac{e_1 - e_0}{\lambda}\right) \left(\frac{2\xi - 1}{2\xi}\right)^\xi \sqrt{\frac{1}{2\xi - 1}} \quad (7)$$

式中, $\xi = 1 - \kappa/\lambda$, λ 和 κ 分别是 $e \sim \ln p'$ 坐标系中正常压缩线和回弹线的斜率,分别取 $C_c/2.3$ 和 $C_s/2.3$, 即 0.07 和 0.005; M 是临界状态线的斜率,根据土体摩擦角 φ' 确定 $M = 6 \sin \varphi' / (3 - \sin \varphi')$, 取 1.2;

e_1 是正常固结压缩曲线在 e 轴上的截距, 即 $\ln p' = 0$ 时的孔隙比, 为 1.05; e_0 是黏土的孔隙比。该式只适用于饱和土体, 对于含水率为 21% 时, 孔隙比为 0.58, 对应的饱和度为 96%, 可近似认为饱和, 则按式(7)估计的 q_u 为 0.82 MPa, 与实验值较为吻合。若将式(7)中 e_0 取为各试样的实际值, 可得到完全饱和情况下无侧限抗压强度随掺砾量的变化趋势, 计算结果如图 6 中的实线所示。从结果可以看出, 含砾黏土的无侧限抗压强度主要受到黏土压实程度的影响, 在较低含水率时 ($\omega_c = 13\%$), 由于低含砾量时的黏土干密度与纯黏土较为接近, 对应的 q_u 值变化不大。随着含砾量的增加, 黏土的压实效果下降, q_u 值开始下降, $P = 45\%$ 时的 $q_u = 0.85$ MPa, 比纯黏土下降了约 25%; 在较高含水率时 ($\omega_c = 21\%$), 由于黏土的干密度随含砾量的增加而减小的幅度更大(图 5), q_u 减小得更明显, $P = 45\%$ 时的 $q_u = 0.26$ MPa, 比纯黏土下降了约 67%。

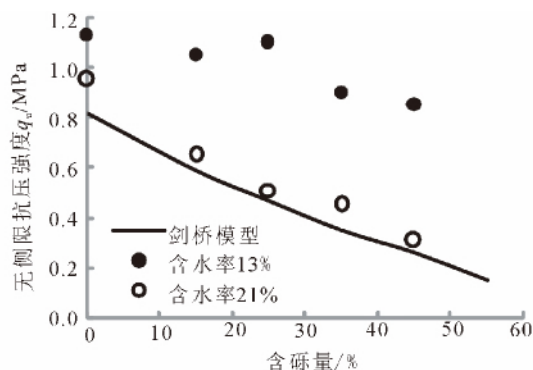


图 6 无侧限抗压强度与掺砾量之间的关系

Fig. 6 Relationship between gravel content and unconfined compressive strength

3 结论

(1) 含砾黏土的整体最优含水率随含砾量的增加而减小, 最大干密度随含砾量的增加而增加, 但含砾量高于 35% 之后增速放缓。

(2) 砾粒与黏土之间的额外空隙在含砾量较低时就已出现, 含砾量越大, 空隙体积越大。在高含水率的情况下, 空隙及黏土孔隙中的水在击实过程中

难以排出, 同时水还阻碍了封闭气泡的逸出, 造成黏土的压实效果明显降低, 含砾量越高降低得越明显。在低含水率的情况下, 黏土压实程度的下降主要是由于砾粒骨架的存在减小了作用在黏土上的击实能量。

(3) 含砾黏土的无侧限抗压强度主要由黏土成分的密实程度控制, 主要受到砾粒含量和含水率的影响, 其整体上随着含砾量的增加而降低, 含水率较高时的下降幅度更明显, 这与黏土干密度随含砾量与含水率的变化关系相一致。

参考文献 (References)

- [1] 陈志波, 朱俊高, 王强. 宽级配砾质土压实特性实验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 446-449.
- [2] Ham T G, Nakata Y, Orense R P, et al. Influence of Gravel on the Compression Characteristics of Decomposed Granite Soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(11): 1574-1577.
- [3] Zhao H F, Zhang L M, Chang D S. Behavior of Coarse Widely Graded Soils under Low Confining Pressures [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 139(1): 35-48.
- [4] 刘丽萍, 折学森. 土石混合料压实特性实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 206-210.
- [5] Hsu T S and Saxena S K. A General Formula for Determining Density of Compacted Soils with Oversize Particles [J]. Soils and Foundations, 1991, 31(3): 91-96.
- [6] 许锡昌, 周伟, 韩卓, 等. 土石混合料的压实特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(S2): 114-118, 148.
- [7] Mollamahmutoglu M, Yilmaz Y. Fine Gravel Content Effect on the Undrained Shear Strength Characteristics of Highly Plastic Clayey Soil [C]//Proceeding of 2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Nicosia, North Cyprus, 2009: 314-319.
- [8] 张丙印, 袁会娜, 孙逊. 糯扎渡高心墙堆石坝心墙砾石土料变形参数反演分析[J]. 水力发电学报, 2005, 24(3): 18-23.
- [9] 宁全纪. 瀑布沟水电站堆石坝砾石土心墙压实质量检测[J]. 水电与新能源, 2010, (4): 61-63.
- [10] Wood D M. Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.