

聚丙烯纤维加筋对高岭土固结压缩特性影响试验研究

陈 乐^{1,2}, 刘志彬^{1,2}, 周书中¹

(1. 东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 工程中为了改良压实黏土的强度和抗干裂性能, 将分散的聚丙烯纤维均匀掺入土体中制成纤维加筋土。利用聚丙烯纤维与高岭土在室内人工拌和并压制成纤维加筋土样, 基于一维固结试验研究了控制干密度条件下纤维加筋掺量与长度对加筋高岭土固结、压缩特性的影响规律。研究表明, 在控制干密度和纤维长度条件下, 随着纤维掺量的增加, 加筋土的固结系数和压缩模量均先增大后减小; 掺量为 0.2% 时固结系数最大, 掺量为 0.1%~0.15% 时压缩模量最大; 在控制干密度和纤维掺量条件下, 随着纤维长度的增加, 加筋土的固结系数先减小后增大, 纤维长度为 10 mm 时固结系数最小; 当固结压力较高 (≥ 400 kPa) 时, 加筋土的压缩模量随纤维长度增大而减小。此外, 加筋土的压缩指数总体上随纤维掺量和纤维长度的增大而增大, 但纤维掺量为 0.15%~0.20% 以及纤维长度为 10 mm 时压缩指数有一极小值。

关 键 词: 纤维加筋土; 聚丙烯纤维; 高岭土; 固结试验; 压缩特性

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 增 1-0372-05

Influence of polypropylene fiber-reinforcement on consolidation and compression characteristics of kaolin

CHEN Le^{1,2}, LIU Zhi-bin^{1,2}, ZHOU Shu-zhong¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering & Environmental Safety, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: To improve the strength and resistance to desiccation cracking of clayey soils in engineering practice, fiber-reinforced soils are made by mixing polypropylene fibers together with soils. The polypropylene fibers and kaolin are mixed together and statically compacted into fiber-reinforced kaolin in the laboratory. Then the influences of fiber incorporation on the consolidation and compression characteristics of the fiber-reinforced soil are studied by one-dimensional compression experiments. Test results indicate that both the coefficient of consolidation and compression modulus first increases and then decreases with the increase of the fiber content, under constant dry density and fiber length. When the fiber content is 0.2%, the coefficient of consolidation will reach a peak value. When the fiber content is 0.1%-0.15%, the compression modulus will arrive at a peak value. The coefficient of consolidation first decreases and then increases with the increase of the fiber length under constant dry density and fiber content. When the fiber length is 10 mm, a minimum value of coefficient of consolidation will be achieved. When the vertical pressure is relatively high (≥ 400 kPa), the compression modulus of the fiber-reinforced kaolin will decrease with the increase of the fiber length. Furthermore, generally the compression index of the fiber-reinforced kaolin increases with the increase of the fiber content. However, a minimum value of the compression index is found when the fiber content is 0.15%-0.2%, or the fiber length is 10 mm.

Keywords: fiber-reinforced soil; polypropylene fiber; kaolin; consolidation test; compressibility

1 引 言

纤维加筋土是将连续的纤维丝或者一定长度的

短纤维采用机械、气压或水压等方式随机掺入到土中形成的一种人工复合土体材料^[1], 由于纤维的掺入, 使加筋土体形成三维结构, 可使纤维与土颗粒

有效接触，破裂面上纤维可发挥其抗拉能力，阻止破裂面发展，提高了土体的抗剪强度，其抗冲刷性能也会得到加强。法国建筑师 Henri Vidal 在 20 世纪 60 年代成功地设计出第一个加筋构筑物，我国 70 年代末和 80 年代初引进加筋土技术，如今这种技术已得到巨大的发展，被广泛地运用到路基、挡墙、抗震、边坡等领域^[2]。近些年来，国内外学者也先后围绕纤维加筋土的工程性质开展了一系列试验和理论研究。唐朝生等^[3]开展龟裂试验发现，在土体中加入适量聚丙烯纤维能够改变黏性土干缩裂缝的发展规律，降低土体裂隙率，提高土体结构物的稳定性和防渗性能。Gumuser 等^[4]以不同含量的聚丙烯纤维掺入粉煤灰，试验发现其“桥梁”作用能抑制土体的张拉裂缝和变形，并增加土体的承载力和韧性。Miller 等^[5]通过试验得出，当纤维掺量介于 0.4%~0.5% 时，能减少约 50% 裂隙；当纤维掺量达到 0.8% 时，最多能减少约 90% 的裂隙。Harianto 等^[6]开展干燥试验得出纤维的拉筋作用可以降低压实试样的体积收缩应变和表面裂隙数量，其中纤维掺量为 0.2% 时较无纤维土表面裂隙密度因子从 2.75% 降到了 0.2%。Manbeian^[7]、Mohamed^[8]、A 等^[9]以植物纤维为加筋材料，通过直剪试验发现土体的抗剪强度明显加强，且有一个最佳掺量。Muntohar 等^[10]开展了一系列不固结不排水三轴试验和耐久性试验发现，纤维能提高土的抗压、抗拉和抗剪性能，从而进一步增强土体的稳定性和耐久性，最佳纤维掺量为 0.4%~0.8%。吴景海等^[11]进行直剪试验和拉拔试验，确定了各种国产土工合成材料与填料的界面作用特性。姚代禄等^[12]进行剪切试验及现场加筋拉拔试验，分析得到土与加筋之间的剪切性质可用摩尔-库仑强度包线表示。Mirzababaei 等^[13]以废弃地毯为加筋材料，通过试验发现其能有效提高土体的无侧限抗压强度，并同时增加土体的韧性，在纤维掺量为 5% 时效果最明显。Akbulut 等^[14]由无侧限抗压强度结果得到，当使用橡胶纤维时，最佳掺量在 2%，最佳纤维长度为 10 mm；当使用聚丙烯纤维时，最佳掺量在 0.2%，最佳纤维长度为 15 mm。

目前国内外有关纤维加筋的研究主要是针对砂土、水泥、水泥土等，关于纯素土的研究相对较少，现有研究工作主要侧重于纤维加筋土的抗压强度、抗拉强度、抗剪强度、胀缩干裂性能等，关于其固结渗透、压缩特性等研究较少。实际上，作为防渗垫层材料，纤维加筋黏土在较大的工程荷载作用下必然产生一定的压缩变形，将影响到上部排水导气

等系统的安全性，且垫层自身的防渗隔污性能也会随之改变。基于此，本文以聚丙烯纤维为加筋材料，对纤维加筋高岭土开展了一系列一维固结压缩试验，旨在探讨纤维掺量和纤维长度 2 个设计参数对纤维加筋土固结系数、压缩模量以及压缩指数的影响。

2 试验材料

本次试验所用黏土为徐州夹河高岭土矿生产的商业高岭土，基本物理参数见表 1，测试方法参照《土工试验方法标准》^[15]。根据《土的工程分类标准》^[16]，由于 $\omega_L < 50$ 且 $I_p > 0.73(\omega_L - 20)$ ，确定该高岭土属低液限黏土(CL)。试验中采用的纤维材料直径为 0.048 mm 的聚丙烯纤维丝，物理力学参数见表 2。

表 1 高岭土的物理参数
Table 1 Physical parameters of Kaolin

天然含 水率/%	土粒相 对密度	天然密度 /(g/cm ³)	最优含 水率/%	最大干密度 /(g/cm ³)	液限 /%	塑性指数
7.20	2.65	1.96	15.7	1.71	34.2	0.173

表 2 聚丙烯纤维的物理力学参数
Table 2 Physico-mechanical parameters of
polypropylene fiber

类型	密度 /(g/cm ³)	直径 /mm	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /MPa	熔点 /℃	燃点 /℃	耐酸 碱性	分散性
束状 单丝	0.91	0.048	350	3500	165	590	极强	极好

3 试验设备与方法

本次试验所用固结仪为南京土壤仪器厂生产的 WG 型单杠杆固结仪。试验参照《土工试验方法标准》^[15]，采用压样法制样，控制土样干密度为 1.5 g/cm³，含水率为 17.4%，样品直径为 61.8 mm，高 20 mm。制样时，先将干土与纤维充分搅拌，遇到纤维结团时手工将其撕开。然后将土与水拌和，确保纤维在土样中均匀分散，控制含水率 17.4%，在塑料袋内密封养护 24 h。最后在环刀内压实成干密度为 1.5 g/cm³ 的土样。

试验设计分为 2 组：一组控制纤维的长度一定，改变土样中纤维掺量，另一组控制纤维的掺量一定，改变土样中纤维的长度。第一组试样控制纤维长度为 8 mm 和 10 mm 两种情况，掺量分别为 0、0.1、0.15、0.2、0.3%。第二组试样控制掺量 0.3%，长度分别为 8、10、12、14 mm。固结试验前，首先采用抽气饱和法对试样进行预饱和，再在固结仪

上进行一维固结试验。

4 试验结果分析

4.1 纤维掺量对加筋黏土固结压缩特性影响

图 1 为 8 mm 和 10 mm 两种长度纤维的加筋高岭土固结系数与纤维掺量间关系曲线。从图中可以看出,当纤维长度一定时,纤维加筋高岭土的固结系数在各相同荷载级别下一般随纤维掺量的增加表现为先增大后减小的趋势。在各级荷载下,当纤维掺量为 0.2% 的时候,纤维加筋土的固结系数达到峰值,因此,纤维掺量在 0.2% 时纤维加筋土的固结速率最快。换言之,纤维掺量在 0%~0.2% 之间时,纤维掺量的增大不仅有利于提高其抗剪强度和抗干裂性能,也会加速其排水固结;当掺量高于 0.2% 后,固结系数会随掺量的增大而降低。从图 1 还可以看出,纤维长度为 8 mm 时,固结系数测试结果规律性相对较差,可能是由于相对较短的纤维在土样中不易达到良好的拌和均匀性所致。相比之下,纤维长度为 10 mm 时,测试结果稳定性明显较好。此外,固结压力高于 400 kPa 后,加筋土的固结系数受纤维掺量影响相对较弱,即在较高荷载下掺量变化对加筋土的固结系数影响程度有限。

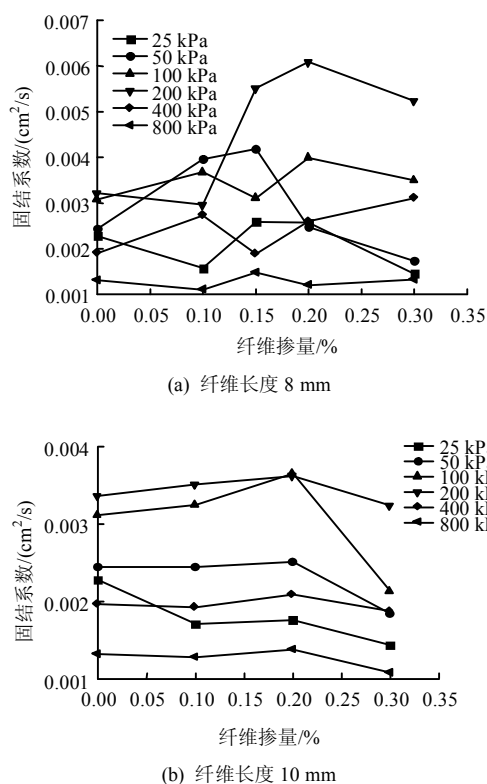


图 1 加筋高岭土在不同纤维掺量时的固结系数
Fig.1 Coefficients of consolidation of fiber-reinforced Kaolin with different fiber contents

图 2 为 8 mm 和 10 mm 两种长度纤维的加筋高岭土压缩模量与纤维掺量间关系曲线。从图中可以看出,当纤维长度一定时,纤维加筋高岭土的压缩模量在相同荷载下一般随纤维掺量的增加表现为先增大后减小的趋势。在各级荷载下,掺量为 0.10%~0.15% 的时候,纤维加筋土的压缩模量达到峰值。当竖向压力较大时 (>400 kPa),这一规律尤其明显,即当纤维掺量为 0.10%~0.15% 的时候,相同压力下纤维加筋土的压缩性最小。从图中还可以看出,当竖向压力较小时 (≤ 400 kPa),纤维长度对加筋高岭土压缩模量影响不明显。另一方面,图中还显出高压下的压实作用对于纤维加筋高岭土的压缩模量提高有着重要作用,如 0.2% 掺量条件下纤维加筋高岭土在 400 kPa 下的压缩模量不足 7.5 MPa,而在 800 kPa 时则增大至 25 MPa 左右。为保证现场条件下纤维加筋黏土的低压缩性,应当确保加筋土达到足够高的压实度标准。

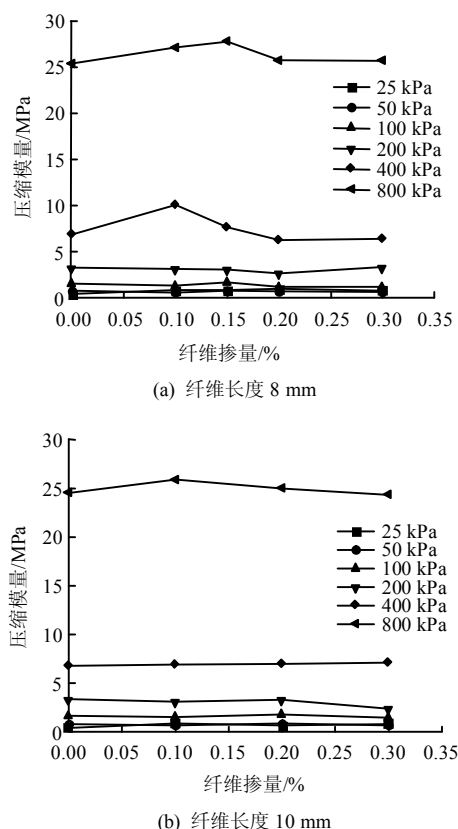


图 2 加筋高岭土在不同纤维掺量时的压缩模量
Fig.2 Compression moduli of the fiber-reinforced kaolin with different fiber contents

图 3 为 8 mm 和 10 mm 两种长度纤维的加筋高岭土的压缩指数随纤维掺量变化曲线。从图中可以看出,当控制纤维长度一定的时,各级荷载下纤维加筋高岭土的压缩指数在 0.18~0.26 之间变化;随

着纤维掺量的增加, 压缩指数也相应增大。但在纤维掺量为 0.15%~0.20% 时有一谷值; 纤维长度为 8 mm 的加筋土的压缩指数较 10 mm 情况下更高。

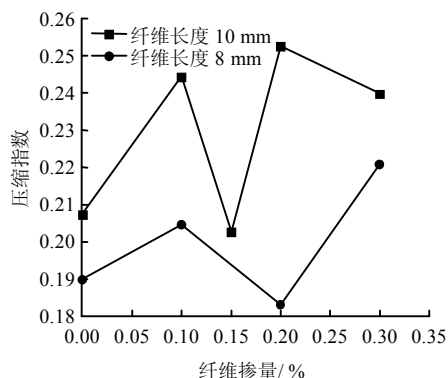


图 3 加筋高岭土在不同纤维掺量时压缩指数
Fig.3 Compression index of fiber-reinforced kaolin with different fiber contents

4.2 纤维长度对加筋黏土固结压缩特性影响

根据已有文献中常用的纤维掺量, 该组试验中纤维加筋高岭土的纤维掺量选择 0.3%, 选取的长度为 8、10、12、14 mm。图 4 为 0.3% 纤维掺量的加筋高岭土固结系数与纤维长度间关系曲线。从图中可以看出, 当纤维掺量一定时, 纤维加筋高岭土的固结系数在相同荷载级别下随纤维长度的增加表现为先减小后增大的趋势。在各级荷载下, 当纤维长度为 10 mm 时, 纤维加筋土的固结系数达到一个极小值, 即纤维长度为 10 mm 时纤维加筋土的固结速率较慢, 表明工程中同一掺量条件下, 纤维较长和较短时纤维加筋高岭土的固结速率均比较快, 但在某一中间长度时纤维加筋土的固结性能最差。

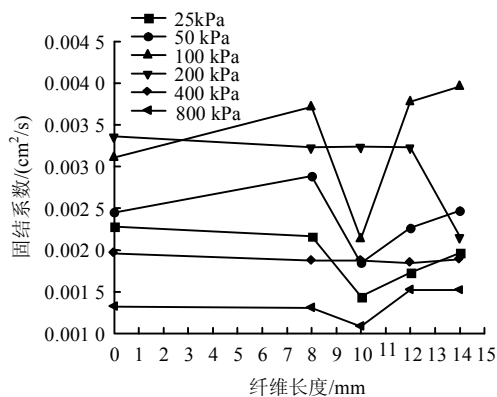


图 4 加筋高岭土在不同纤维长度时固结系数
Fig.4 Coefficients of consolidation of fiber-reinforced Kaolin with different fiber lengths

图 5 为 0.3% 纤维掺量的加筋高岭土压缩模量与

纤维长度间关系。从图中可以看出, 由于孔隙比减小, 土样变得越来越密实, 加筋土的压缩模量随荷载的增加而变大。荷载水平较低时 (<400 kPa), 纤维长度对纤维加筋黏性土的压缩模量影响不明显; 当荷载水平较高时 (≥ 400 kPa), 随着纤维长度增大加筋高岭土的压缩模量呈降低的趋势。

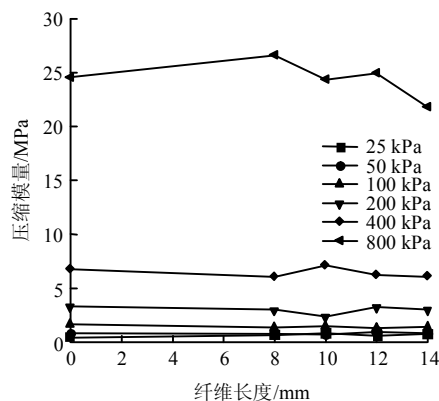


图 5 加筋高岭土在不同纤维长度下的压缩模量
Fig.5 Compression moduli of fiber-reinforced Kaolin with different fiber lengths

图 6 为加筋高岭土在不同纤维长度时压缩指数。由图中可以看出, 总体上纤维加筋高岭土的压缩指数随纤维长度的增大呈增大的趋势, 在纤维长度为 10 mm 的时候其压缩指数为一谷值; 加筋土的压缩指数数值在 0.203~0.233 之间。

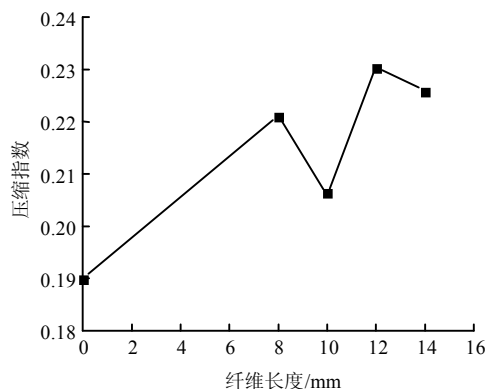


图 6 加筋高岭土在不同纤维长度时压缩指数
Fig.6 Compression index of consolidation of fiber-reinforced Kaolin with different fiber lengths

5 结 论

(1) 控制土体干密度和纤维长度一定时, 随着纤维掺量的增加, 加筋高岭土的固结系数、压缩模量均呈先增大后减小的规律。掺量为 0.2% 的时, 固结系数达到峰值; 掺量为 0.10~0.15% 左右时, 压缩模量达到峰值; 固结压力超过 400 kPa 后, 掺量

变化对加筋土的固结系数影响不明显,但此时荷载水平的提高对加筋土的压缩模量提高显著。此外,随纤维掺量的增加,压缩指数总体呈增大趋势,但在纤维掺量为 0.15~0.20% 时有一谷值。

(2) 当控制土体干密度和纤维掺量一定时,纤维加筋高岭土的固结系数随纤维长度的增加先减小后增大,当纤维长度 10 mm 时固结系数达到最小值;固结压力较小时 (<400 kPa),纤维长度对加筋土的压缩模量影响不明显,但当压力较高时 (≥ 400 kPa),随纤维长度的增大加筋土的压缩模量呈减小趋势;纤维加筋高岭土的压缩指数随纤维长度的增大总体表现为增大的趋势;在纤维长度为 10 mm 的时候其压缩指数为一谷值。

参考文献

- [1] 包承纲, 丁金华. 纤维加筋土的研究和工程运用[J]. 土工基础, 2012, 26(1): 80—83.
BAO Cheng-gang, Ding Jin-hua. Researches and applications of fiber reinforced soils[J]. **Soil Engineering and Foundation**, 2012, 26(1): 80—83.
- [2] HEJAZI S M, SHEIKHZADEH M, ABTAHI S M, et al. Shear modeling of fiber reinforced soil composite on the base of fiber pull-out test[J]. **Fibers and Polymers**, 2013, 14(2): 277—284.
- [3] 唐朝生, 施斌, 刘春, 等. 影响黏性土表面干缩裂缝结构形态的因素及定量分析[J]. 水利学报, 2007, 38(10): 1186—1193.
TANG Chao-sheng, SHI Bin, LIU Chun, et al. Factors affecting the surface cracking in clay due to drying shrinkage[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2007, 38(10): 1186—1193.
- [4] GUMUSER C, SENOI A. Effect of fly ash and different lengths of polypropylene fibers content on the soft soils[J]. **International Journal of Civil Engineering**, 2014, 12(2B): 167—178.
- [5] MILLER C J, RIFAI S. Fiber reinforcement for waste containment soil liners[J]. **Journal of Environmental Engineering, ASCE**, 2004, 130(8): 891—895.
- [6] HARIANTO T, HAYASHI S, DU Y J, SUETSUGU D. Effects of fiber additives on the desiccation crack behavior of the compacted Akaboku soil as a material for landfill cover barrier[J]. **Water, Air, and Soil Pollution**, 2008, 194(1—4): 141—149.
- [7] MANBEIAN T. The influence of soil moisture suction, cyclic wetting and drying, and plant roots on shear strength of cohesive soil[D]. Berkeley: University of California, 1973.
- [8] MOHAMED A E M K. Improvement of swelling clay properties using hay fibers[J]. **Construction and Building Materials**, 2013, 38: 242—247.
- [9] AL A A, AZZAM R, SPAGNOLI G, SCHRAER J. Strength of soil reinforced with fiber materials (papyrus)[J]. **Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 2012, 48(6): 241—247.
- [10] MUNTOHAR A S, WIDIANTI A, HARTONO E, et al. Engineering properties of silty soil stabilized with lime and rice husk ash and reinforced with waste plastic fiber[J]. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2013, 25(9): 1260—1270.
- [11] 吴景海, 陈环, 王玲娟, 等. 土工合成材料与土界面作用特性的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 89—93.
WU Jing-hai, CHEN Huan, WANG Ling-juan, et al. Study on soil interaction characteristics of geosynthetics[J]. **Chinese Journal Geotechnical Engineering**, 2001, 23(1): 89—93.
- [12] 姚代禄, 张光羽. 加筋土挡墙中加筋与土之间的摩擦性质初探[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(1): 49—54.
YAO Dai-lu, ZHANG Guang-yu. Study on friction character between soil and reinforcement in reinforced earth retaining wall[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1989, 11(1): 49—54.
- [13] MIRZABABAEI M, MIRAFAT M, MOHAMED M, et al. Unconfined compression strength of reinforced clays with carpet waste fibers[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2013, 139(3): 483—493.
- [14] AKBULUT S, ARASAN S, KALKAN E. Modification of clay soils using scrap tire rubber and synthetic fibers[J]. **Applied Clay Science**, 2007, 38(1—2): 23—32.
- [15] 南京水利科学研究院. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [16] 南京水利科学研究院. GB/T 50145—2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.