

闷料时间及掺料次序对固化土路基无侧限抗压强度的影响研究

李寒¹, 刘姝², 王娟²

(1. 宁波交通工程建设集团有限公司, 浙江 宁波 315000; 2. 宁波诺丁汉大学, 浙江 宁波 315000)

摘要: 本文以宁波市软土地区工程渣土泥浆脱水后形成的含水率为 30% 左右的细粒土为原材料, 采用几种常见固化剂(水泥、石灰、粉煤灰)对其进行固化, 分析了闷料时间及固化剂掺料次序对固化土的 7 天无侧限抗压强度的影响, 并分析其强度形成机理。结果表明, 未经闷料的固化土 7 天无侧限抗压强度高于闷料后击实的固化土强度; 当先掺水泥或不掺加水泥时, 1~7h 的闷料时间不会对固化土的 7 天无侧限抗压强度造成明显影响; 后掺水泥时, 存在最优闷料时间, 使得固化土 7 天无侧限抗压强度达到最高, 且闷料时间过长或过短都会对强度造成不利影响。研究结果可为软土地区渣土泥浆资源化再生利用作为固化改良土路基施工方法的选择提供参考。

关键词: 岩土工程; 闷料时间; 掺料次序; 固化土; 无侧限抗压强度

中图分类号: U41

文献标识码: B

我国东南沿海地区广泛分布淤泥质土, 其具有含水率高、强度低等特点, 无法直接满足路基及地基建设等要求。目前, 国内外的常见的处理方法是在土中添加合适的固化剂, 通过固化反应降低其含水率, 提高其强度, 从而满足设计要求。化学固化常见的无机型固化剂包括水泥、石灰、粉煤灰、石膏等及有机型液体固化剂。

工程中常存在固化土的搅拌和压实在时间和空间上不同步的情况, 例如, 固化土在搅拌完成后运送至施工场地期间, 固化剂已经开始发挥作用, 固化土含水率逐渐降低, 内部产生一定的固化强度, 在后期施工中应先对其固化程度进行判断, 对于已经明显形成一定强度的固化土应将其破碎再压实。在室内试验研究中, 可用‘闷料时间’来表示搅拌和压实之间的时间差。对于含水率较高的淤泥及泥浆等, 闷料时间的增长降低了固化土的含水率, 从而为固化土压实构建更有利的条件, 获得更高强度。对于含水率较低的土体, 闷料会使固化土内部会形成了一定的初始强度, 压实会使其内部结构发生破坏, 致使固化土的强度降低。如白玉恒利用粉煤灰对含水量 23% 淤泥进行固化, 研究结果表明, 当闷料时间由 1 天增长至 7 天时, 固化土的 28 天无侧限抗压强度降低 8.6%。Huang 等指出重塑固化土的无侧限抗压强度仅为原状固化土强度的 40%~60%。该研究中未考虑闷料时间的影响。赵子荣等等表示, 当闷料时间由 4h 增至 168h, 重塑水泥固化土的强度降低

约 22%~46%, 且水泥掺量越高, 闷料时间越长, 固化土的强度降低比例越大。由此可见, 闷料时间对于固化土强度的影响十分的明显。但是以上研究中均考虑较长的闷料时间的影响, 在许多工程中, 可以就地取材, 就近施工, 搅拌与压实间的时间差仅在几小时之内, 因此有必要对闷料时间小范围变化对固化土强度的影响进行研究。此外, 此前的研究中, 多考虑固化剂单掺的情况, 固化机理也相对比较简单, 但在实际工程中, 常采用多种固化剂混合的模式对土进行固化。由于各种固化剂的固化机理与反应速率不同, 固化剂掺入次序也会对固化土的强度产生影响, 这在此前的研究中较为少见。

综上, 本文以宁波地区某高速公路施工路段获得的细粒土为原材料, 研究 0~7 小时的闷料时间及固化剂的掺料次序对固化土强度的影响, 并分析其影响机理, 从而为固化土的工程施工方法的选择提供参考和依据。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

本文中采用的细粒土的液塑限通过液塑限联合测定仪按《JTG E40-2007 公路土工试验规程》测定, 液限为 24%, 塑限为 14.3%, 塑性指数为 9.7。粒分布通过 Bettersize2000 粒度仪测定。泥浆粒径分布曲线如图 1 所示。根据《JTG E40-2007 公路土工试验规程》规范中所述分类, 属于低液限黏土。该

基金项目: 宁波市科技创新 2025 重大专项(2019B10048); 宁波市海曙区科技计划项目(海科[2018]40 号)。

土体的最大干密度为 $1.81 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 最优含水率在 9.4% 左右。在实验中, 控制其含水率为 20%。

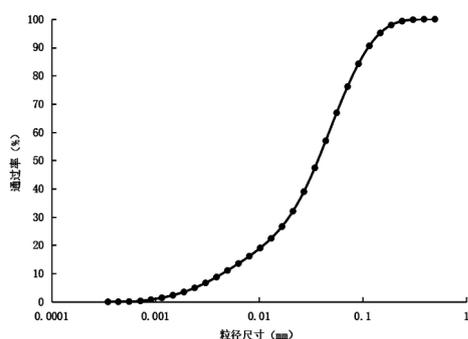


图1 废弃泥浆中土的级配分布曲线

1.2 固化材料及固化机理

研究选取 42.5# 普通硅酸盐水泥、生石灰(主要成分 CaO) 以及二级粉煤灰为固化材料。三者均有助于固化土强度的提高, 但机理不同。

水泥是常见的固化剂, 掺入水泥的固化土其初期的强度来自主要依靠水泥中的硅酸三钙与硅酸二钙等物质与土中的水发生水化反应, 形成水化硅酸钙(CSH)、铝酸钙(CAH)及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等, CSH, CAH 等胶体的不断凝结使得水泥初始强度显著增高; 而后期的强度主要是源于前期水化反应所生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与细粒土中被激活的 SiO_2 及 Al_2O_3 发生火山灰反应, 生成的水化硅酸钙及水化硅酸铝, 它们与土颗粒共同形成支撑结构, 从而提高固化土的整体强度。

生石灰可以快速与土中的水发生反应, 生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 从而达到快速降低土体的含水率的目的; 此后, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 可与土中被激活的硅铝酸盐矿物质发生反应, 形成硅酸钙及铝酸钙, 使得土中部分水分子转化为结晶水被吸入硅酸钙及铝酸钙形成的结晶骨架中, 逐渐形成具有水硬性的凝胶材料。此外, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与土颗粒表面吸附的 K^+ 或 Na^+ 发生的离子交换以及与空气中的 CO_2 发生的碳化反应都可以为固化土贡献一定强度, 但两者的贡献相对较小。由此可知, 当在固化土中同时添加水泥和生石灰时, 生石灰遇水生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 可以促进水泥火山灰反应的发生, 从而快速提高土体强度。

粉煤灰属于人工火山灰质混合材料, 能够提供更多活性的 SiO_2 及 Al_2O_3 , 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生火山灰反应, 生成胶凝性物质, 从而对土体起到固化作用, 但相较于水泥而言, 粉煤灰的反应速率相对较慢。此外, 由于粉煤灰颗粒较细, 属于粉土范畴, 其与细粒土混合后形成的新的骨架结构可能会对固化土的整体性能造成一定的影响。

1.3 试验流程

无侧限抗压强度是固化土力学性能的重要评价指标。本文研究闷料时间和掺料次序对 7 天无侧限抗压强度的影响。分别设计了三组试验, 如图 2 所示。细粒土含水率控制在 20%, 图中水泥、石灰及粉煤灰的掺量百分比均为相对干土质量的百分比。三组试验考虑的闷料时间均为 0、2、3、5、7h。无侧限抗压强度试验的固化土样品直径为 50mm, 高度为 $100 \pm 2\text{ mm}$ 。

试验流程图如图 2 所示。具体的实验流程可归纳为:

(1) 烘干: 取出一定量的样品, 平铺在深度在 2cm 左右的不锈钢盘中, 放于预热至 120°C 的鼓风干燥箱中 24h 以上进行烘干;

(2) 粉碎及过筛: 利用粉碎机将烘干后的细粒土粉碎, 并过 0.2mm 筛去除大颗粒, 并密封待用;

(3) 搅拌及闷料: 根据图 2 准备三组试验, 第 1 组及第 2 组试验的差别在于是否在固化剂中掺加水泥; 第 2 组试验及第 3 组试验的区别在于水泥的掺加时间节点的不同。在本文中, 闷料阶段所消耗的时间即为闷料时间。

(4) 击实: 根据《JTG E40 - 2007 公路土工试验规程》要求, 本文中的试样采用分层击实法进行制备; 每层击实结束后, 层表面拉毛处理;

(5) 脱模: 利用电动脱模器将试样脱模;

(6) 套袋养护: 测量试样的高度及重量, 再将其放入薄膜塑料袋中, 排出空气, 利用标签纸将试样密封, 并做好信息记录。根据《T0845 - 2009 无机结合料稳定材料养生试验方法》的规定, 将密封的样品放入到温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 相对湿度为 $95 \pm 1\%$ 的养护箱中进行养护, 养护龄期均为 7d。

(7) 测试: 采用 MTS 万能试验机 Model E45 测定固化土的无侧限抗压强度, 依照《T0805 - 2009 无机结合料稳定材料无侧限抗压强度试验方法》展开, 压缩轴向应变率取 1 mm/min , 当观测到应力应变曲线峰值后, 停止试验。

为提高准确度, 每组试验至少开展四个平行试验, 最终取强度平均值, 每组数据的标准差值已在图 3 及图 4 中给出。

2 试验结果及讨论

2.1 闷料时间的影响

由图 3 可知, 添加水泥的固化土的强度明显高于未添加水泥的固化土强度。但无论是否添加水

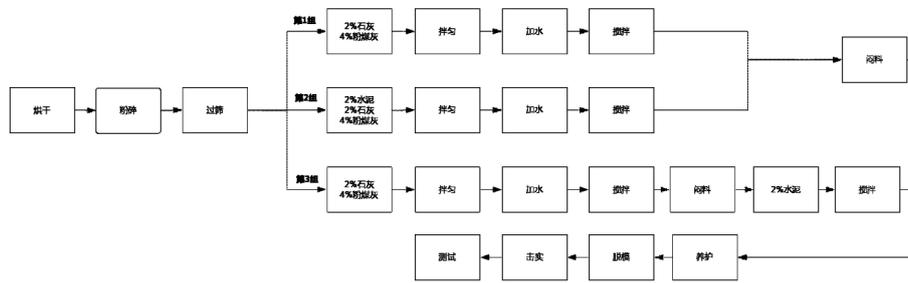


图2 试验流程图

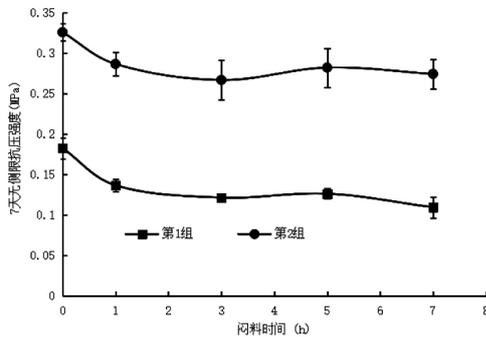


图3 闷料时间及固化剂类型对固化土7天无侧限抗压强度的影响

泥。本研究中闷料时间对于固化土抗压强度的影响趋势呈先显著减小,后趋于平稳,最后再略微减小的趋势。在不闷料的情况下直接进行击实,试样的7天无侧限抗压强度最大。这是由于闷料期间的化学反应消耗掉部分活性物质,形成胶结物质,使得土颗粒连接形成具有一定结构强度的土团,但随后的击实作用破坏了该胶结结构,致使固化土的抗压强度部分损失。同时,值得注意的是,固化土的强度一般随干密度的增加而增加,固化剂特别是石灰的添加使得固化土的含水率逐渐降低,更加接近最优含水率,即干密度增加,从而一定程度上抑制了整体强度的降低,因此呈现出较为平稳的趋势。当生石灰完全反应后,该抑制效应减弱,但固化土结团效应仍然随着时间增长,击实造成的强度损失增加,材料整体的固化性能会随之减弱。此外,实验发现,对于闷料前掺加水泥且闷料不小于3h的情况,土体结团明显,导致其在相同击实功作用下较难被压实。在实际工程中,土团破碎不但会消耗较多的功,其均匀程度亦不易控制。因此,对于添加了水泥的固化土,建议在0~3h内完成施工,以确保均匀性和压实度;对于未掺加水泥的固化土,由于粉煤灰和石灰反应相对较慢,固化土结团速度相对较慢,因此在1~7h范围内施工,并不会对固化土整体强度造成明显的影响,放置7h以上在施工是否会对其强度产生明显的

影响还需要进一步的研究。

2.2 掺料次序影响

图4比较了第2组(先掺水泥)和第3组(后掺水泥)固化土强度。结果表明,第3组试验结构呈现明显波动。在闷料时间较短(如1h)的情况下,先掺水泥所得固化土的强度明显优于后掺水泥。这是由于先掺水泥可以保证水泥分散的均匀性,有利于整体强度的形成。随着闷料时间的增长,如闷料时间为3~5h时,后掺水泥的固化土强度优于先掺水泥的固化土强度。这是由于水泥的火山灰反应是固化土强度的主要强度来源,该过程需要 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的参与。对于后掺水泥的固化土,闷料阶段产生 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 为水泥发生火山灰反应提供了更有利的反应条件,水泥的火山灰反应阶段相对提前,固化土强度明显增强。但当闷料时间相对较长时,如图4中的闷料7h,后掺水泥固化土的强度明显低于先掺的情况。这是由于生石灰与水反应速率快,闷料阶段会消耗了土中一部分自由水,当掺入的水泥时,有限的自由水无法使水泥快速全面地发生水化反应,致使固化土强度偏低。由此可知,在工程中,如果搅拌设备可以保证后掺水泥的拌合均匀性,可在确定较优闷料时间后,选用后掺水泥的方式进行施工。值得注意的是,本文仅对固化土的7天无侧限抗压强度进行了研究,掺料次序和闷料时间对固化土长期强度的影响还需要进一步的研究。

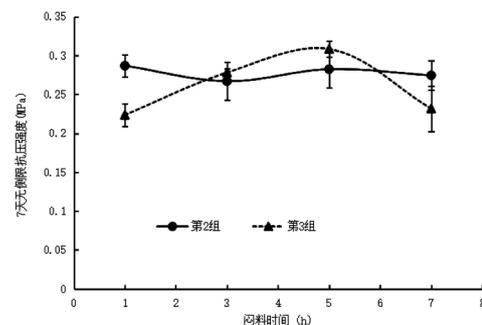


图4 闷料时间及固化剂掺料次序对固化土7天无侧限抗压强度的影响

3 结论

本文通过展开固化土的7天无侧限抗压强度试验,探究了闷料时间和掺料次序对于固化土的无侧限抗压强度的影响,试验中获得的主要结论可以归纳为:

(1) 未经闷料直接击实所得固化土的7天无侧限抗压强度高于闷料后击实的固化土强度。

(2) 当先掺水泥(即水泥分布均匀)或不掺水泥时,由于土团破碎和含水率变化的共同作用,1~7h闷料时间对固化土的7天无侧限抗压强度影响并不显著;但对于先掺水泥的情况,3h后土体明显结团,相同击实功作用下较难被压实。

(3) 后掺水泥时,固化土强度在多重因素作用下随闷料时间变化显著;存在最优闷料时间,使得固化土强度达到最高,且高于先掺水泥的情况;闷料时间过长或过短都可能会造成不利影响。

依据试验结果,给出的工程施工建议如下:

(1) 建议在将土与固化剂拌和立即进行施工。

(2) 如果由于空间及时间的限制导致不能立即展开施工,对于先掺水泥的固化土,宜在3h内完成施工。

(3) 当掺入的固化剂的固化速率相对较慢时(如掺入石灰、粉煤灰等),固化土整体强度形成速率较慢,1~7h内完成施工不会对固化土强度造成明显的

影响。

(4) 当施工现场的搅拌技术良好时,在确定较优闷料时间以后,可考虑采用后掺水泥的施工方法。

参考文献:

- [1] 黄英豪. 固化淤泥的流动性及压实后的力学性能. 河海大学, 2011.
- [2] Zhu W, Huang Y H, Zhang C L et al. Effect of curing time on mechanical behavior of crushed solidified dredged material [C]// New Orleans, Louisiana: GeoCongress 2008, 597-604.
- [3] 桂跃, 高玉峰, 李振山, 等. 高含水率疏浚淤泥材料化土击实时机选择研究. 地下空间与工程学报, 2010(5): 194-198.
- [4] 丁飞鹏. 钻孔灌注桩泥浆固化处理以及在路基填筑中的应用研究. 浙江大学 2015.
- [5] 周大勇, 黄筱璐, 朱学峰, 等. 钻孔灌注桩泥浆固化填料化利用技术研究. 施工技术, 2017(22): 47-50.
- [6] 黄英豪, 朱伟, 张春雷, 等. 固化淤泥重塑土力学性质及其强度来源. 岩土力学, 2009(5): 155-159.
- [7] 白玉恒. 粉煤灰固化淤泥路用性能及填筑技术研究. 上海交通大学, 2009.
- [8] Huang Y, Zhu W, Qian X, et al. Change of mechanical behavior between solidified and remolded solidified dredged materials. Engineering Geology, 2011, 119(3/4): 112-119.
- [9] 赵子荣, 徐建勇, 陈永辉, 等. 压实时间对固化土强度影响试验. 河海大学学报: 自然科学版, 2016, 44(6): 531-535.
- [10] JTG E40-2007 公路土工试验规程.
- [11] JTG E5-T0845-2009, 无机结合料稳定材料养生试验方法.