

软岩改良土特性的室内试验研究

胡 萍¹, 王永和¹, 卿启湘²

(1.中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075; 2.湖南大学 机械与汽车工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 研究基于对石灰和水泥改良土强度形成机理的分析, 开展了软岩改良土大量的室内实验研究, 将生石灰和水泥分别按不同比例, 与不同含水量的软岩人工拌和均匀, 进行击实试验, 确定最大干密度和最佳含水率, 比较不同掺灰量、不同龄期、不同压实度改良土的无侧限抗压强度, 并根据生石灰和水泥的加固机理, 进一步分析改良土密实度随掺灰比变化的规律, 以及其强度与掺灰比、龄期、压实度的关系, 从而确定改良方法及最佳掺灰比, 旨在为客运专线路基的设计、施工进一步的研究和工程应用提供参考。

关键词: 改良土; 生石灰; 水泥; 击实试验; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2007)02-0096-04

Study on Indoor Tests of the Characteristics of Modified Weathered Soft Rock

Hu Ping¹, Wang Yonghe¹, Qing Qixiang²

(1.College of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China;

2.College of Mechanical Engineering and Automobile, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract In order to sure the stability of the embankment and sub-grade, it is necessary to improve the weathered soft rock which is used as the filling of embankment. Research is carried out such as part in different proportion quick-lime or cement, with soft rock of different water contents being artificial to mix and stir evenly, go on compaction test, work the biggest dry density and optimum water content, then unconfined compression strengths of the samples at different proportions, different curing ages and different compactness were compared. The relationships between strengths and contents of quick lime, ages as well as compactness of improved soil were further analyzed based on improving mechanism of quick lime and cement. Thus the best modified way and the best content of quick lime or cement were assured, the aim is to provide reference to further study and engineering application.

Key words: modified soil; quick lime; cement; compaction test; unconfined compression strength

武广客运专线是京广铁路主干线的重要组成部分, 是国家及湖南、湖北、广东省的重点建设项目, 全长 800 km, 穿越众多的风化软岩区。这些软岩弃碴的抗风化能力、抗水性及抗变形能力与其母岩一样, 性能不稳定、变异性大, 遇水或风化作用后其强度会急剧降低^[1, 2]。如果这类土石作为武广客运专线路堤的填料或路桥的地基, 就可能对路基、桥基的稳定性构成威胁。为了保证该工程能够高速、经济、安全地建设, 必须开展风化软岩经过处理后

的设计、施工与质量监控方法的研究, 其研究成果对于公路、水坝等其它工程的建设将具有实用参考价值 and 理论意义。

由于软质岩块作为路堤填料与硬质岩碴填料不同, 其粒径组成会随碾压过程、裸露时间长短和含水量的不同而变化, 既不能像硬石质填料那样采取控制颗粒级配来达到最优密实度, 也不易将弃碴全部破碎成细粒土而通过最优含水量来控制。解决途径之一是对不合格填料进行改良, 使其达到所要求的质量标准。

收稿日期: 2007-01-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50678177)

作者简介: 胡 萍 (1983-), 女, 湖南常德人, 中南大学硕士研究生, 主要研究方向为路基加固处理。

1 石灰、水泥改良土强度的形成机理

1.1 石灰改良土强度的形成机理

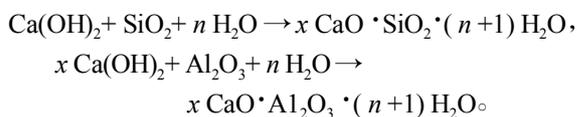
石灰改良土强度的形成机理国内外已经有比较多的研究^[1], 归结起来, 石灰土强度形成的物理化学过程大致如下。

1) 离子交换作用 土的微小颗粒具有一定的胶体性质, 它们一般带有负电荷, 表面吸附一定数量的钠、氢、钾等低价阳离子 (Na^+ 、 H^+ 、 K^+)。石灰是一种强电解质, 在土中加入石灰后, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水化生成的钙离子 (Ca^{2+}) 与粘土矿物中的钠、氢、钾离子产生离子交换作用, 原来的钠 (钾) 土变成钙土, 土颗粒表面所吸附的离子由一价变成了二价, 减少了土颗粒表面吸附水膜的厚度, 使土粒相互之间更为接近, 分子引力增加, 许多单个土粒聚成小团粒, 组成一个稳定结构。

2) 结晶作用 在石灰土中只有一部分熟石灰 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 进行离子交换作用, 绝大部分饱和的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 自行结晶。熟石灰与水作用生成熟石灰结晶网格, 其化学反应式为:

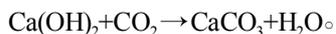


3) 火山灰作用 火山灰作用即是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与土中的活性氧化硅 (SiO_2) 和氧化铝 (Al_2O_3) 之间发生化学反应, 生成水化硅酸钙凝胶和水化铝酸钙, 其反应式为:



熟石灰结晶网格和水化硅酸钙、铝酸钙晶体在土微粒团外围形成一层稳定保护膜, 填充颗粒空隙, 使颗粒间产生结合料, 减少了颗粒间的空隙与透水性, 同时提高密实度, 这是石灰土获得强度和水稳定性的基本原因, 但这种作用缓慢。

4) 碳化作用 在土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与空气中的二氧化碳 (CO_2) 作用, 其化学反应式为:



CaCO_3 是坚硬的晶体, 它和其生成的复杂盐类把土粒胶结起来, 从而大大提高土的强度和稳定性。因此, 石灰改良土的早期强度相对低一些, 到 28 d 龄期时, 石灰改良土的强度只能达到 30% 左右。它的强度增长期很长, 可达 8 年~10 年以上。石灰宜改良粘粒 ($d < 0.002 \text{ mm}$) 含量大于 10% 及 $I_p > 12$ 的粘性土。掺加石灰将使粘土液限降低、塑限增加, 从而降低塑性指数, 最终使得天然含水量的粘土容易压实。

1.2 水泥改良土强度的形成机理

普通硅酸盐水泥主要是由 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 及 SO_3 等组成。将水泥搅拌入软岩后, 水泥颗粒表面

的矿物很快与软岩中的水发生水解和水化反应并生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等水化物, 逐渐使土中水饱和形成胶体。水泥水化物中的一部分 CaO 、 $2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 自身继续硬化, 形成早期水泥土的骨架; 另一部分及其溶液与软岩颗粒发生反应, 形成土团粒后进而结合成粒结构, 同时进一步凝聚反应, 形成水稳性水化物。随着水泥水化反应的深入, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的碱性作用和矿渣水泥水化作用又生成水化物, 最终形成水泥与土颗粒相互连结、难以彼此分辨的致密空间网络结构, 使水泥土具有足够的强度和水稳定性。原则上水泥可改良任意的粘性土^[4], 但从经济技术方面考虑, 水泥适用于改良不均匀系数 $C_u > 10$ 、 $I_p < 12$ 、 $W_L < 40\%$ 的粘性土。当被改良的土质不能满足要求时, 可添加部分石灰或用部分石灰代替部分水泥, 能明显增加水泥改良土的强度。

2 室内实验

2.1 试验材料

试验所用泥质粉砂岩强风化和全风化体取自武广客运专线 DK1577+350~DK1577+550 工点, 泥质粉砂岩呈褐色, 其液塑限指标见表 1。

表 1 软岩的液限塑限联合测定试验结果

Table 1 The results of liquid and plastic limits

| 岩性 | 土力相对密度 G_s | 液限 $w_L/\%$ | 塑限 $w_p/\%$ | 塑性指数 $I_p/\%$ |
|----------|-----------------|----------------|----------------|------------------|
| 强风化泥质粉砂岩 | 2.76 | 30.1 | 20.10 | 11.0 |
| 全风化泥质粉砂岩 | 2.76 | 37.4 | 22.83 | 14.5 |

原状泥质粉砂岩的压缩系数在 $0.0875 \sim 0.0965$ (MPa)⁻¹ 之间变化, 属低压缩性土, 水稳定性较差。试验时水泥为 325 号普通硅酸盐水泥, 其物理性质指标见表 2。

试验时石灰为过 2 mm 筛的新鲜生石灰粉末。

表 2 水泥的物理性质指标

Table 2 The physical properties of cement

| 细度 /% | 初凝时间 /min | 终凝时间 /min | 安定性 | 抗折强度 /MPa | 抗压强度 /MPa |
|----------|--------------|--------------|-----|--------------|--------------|
| 1.3 | 160 | 230 | 合格 | 8.8 | 44.5 |

2.2 室内试验与分析

2.2.1 击实试验

土的最大干密度和最优含水率随击实功能和击实条件而变化, 因此, 各国都将某一击实功能作为击实试验的标准。该试验击实时按照《铁道工程土工试验规程》(TB10102-2004) 标准重型击实 II 和《土工试验规程》(水利部)(SL237-055-1999) 的大型击实试验标准^[5-6], 击实仪的技术性能指标参见表 3, 试验结果见图 1、2。

表3 击实仪的技术性能指标

Table 3 The indices of different compact conditions

| 仪器 型式 | 击锤质量 /kg | 击锤底直径 /cm | 落高 /cm | 击实筒尺寸 | | | 装土层次 | 每层击数 | 单位体积功能 /(kJ·m ⁻³) | 单位面积冲量 /(kPa·s) |
|----------|-------------|--------------|-----------|-------|-------|--------------------|------|------|----------------------------------|--------------------|
| | | | | 直径/cm | 高度/cm | 体积/cm ³ | | | | |
| 大型 II | 35.34 | 15 | 60 | 30 | 28.75 | 20 322 | 3 | 88 | 2 740 | 7 |
| 重型 II | 4.5 | 5.08 | 45.7 | 10.16 | 11.64 | 943.9 | 5 | 25 | 2 740 | 7 |
| 重型 I | 2.5 | 5.08 | 30.48 | 10.16 | 11.64 | 943.9 | 3 | 25 | 604 | 3 |

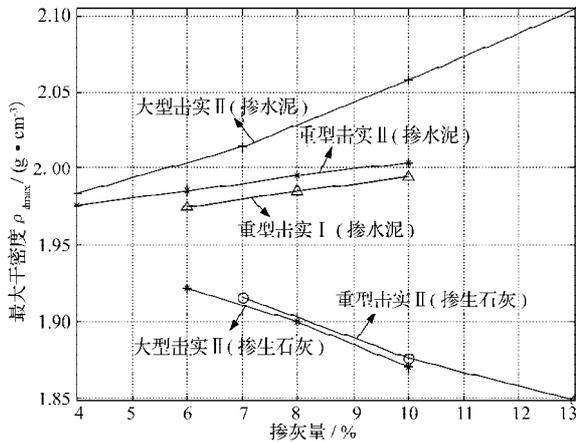
图1 不同击实条件下改良土的最大干密度 ρ_{dmax} 与掺量关系

Fig. 1 The relationships between biggest dry density and mixings in different compact condition

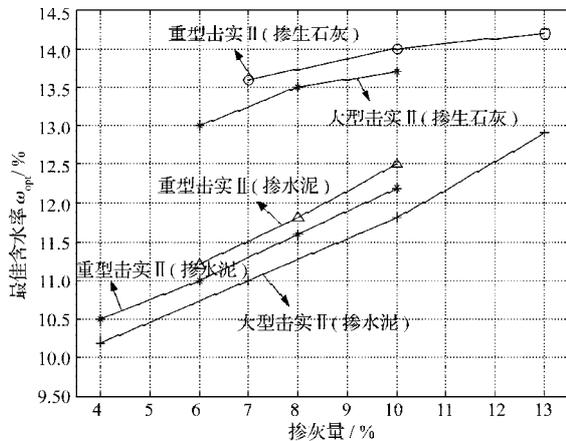
图2 不同击实条件下改良土的最佳含水量 ω_{opt} 与掺量关系

Fig. 2 The relationships between optimum water content and mixings in different compact condition

从试验结果可以看出, 石灰土的最优含水量随土中生石灰掺入量的增加而增加, 而最大干密度 ρ_{dmax} 反而减小。这是因为试验过程中, 一旦将石灰与土拌和, 基于细小颗粒的凝聚和絮聚, 使得土结构即刻发生变化, 成为较大颗粒, 这种变化影响了土的压实性能^[7]。另外, 随着掺灰比的增加, 石灰土的最大干密度和最佳含水量并不是成比例变化的。掺灰比在 10%~13% 范围内, 曲线斜率减小, 即其变化速度减慢, 这一特点反映出合理掺灰比的确定必须以系统试验资料为基础, 盲目地加大或减少石灰的掺入量, 不一定能达到最佳的工程效果。

随着水泥掺入量的增加, 水泥土的最大干密度和最佳含水率均有所增加, 且曲线斜率随着水泥掺入量的增加而不断增加, 即掺入水泥量越多, 改良土的最大干密度和最佳含水量对水泥的敏感度越高。

比较图 1、2, 水泥的掺入对改良土的最大干密度影响更大, 而生石灰的掺入对改良土的最佳含水量影响更大。

2.2.2 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度是改良土的一个重要物理力学指标^[8], 考虑到路基的变形与破坏主要是长期的暴晒和降雨反复作用条件下引起的强度降低。实际工程配比方案的选定主要考虑两个因素: 一是饱水后的无侧限抗压强度指标; 一是技术经济指标。因此, 室内试验时, 将土样掺入不同比例的生石灰或水泥, 按不同压实度制样, 分别标准养护 7 d、28 d 后, 浸水饱和 1 d, 测其饱水后的无侧限抗压强度, 其结果如图 3、4、5。

由图可以看出, 改良土的强度随压实度的增加而不断增加。因此, 施工时必须保证一定的压实度。

饱水养护条件下, 水泥土的强度随水泥掺入量的增加而增大, 而掺入生石灰的改良土存在一个峰值。石灰含量较低时, 石灰主要起稳定作用, 会使土的塑性、膨胀性降低, 初步具有水稳性, 密实度和强度得到稳定。随着掺灰比的增大, 强度和稳定性均提高。但石灰的掺入量超过一定数量后, 过多的石灰将沉积在土孔隙中而不参加反应, 导致石灰土强度降低。

试验结果表明, 采用质量分数为 6% 的石灰作掺合料时, 泥质粉砂改良土的无侧限抗压强度优于其它配比的试验成果, 而采用质量分数为 6% 的水泥作掺合料时, 其改良土的无侧限抗压强度达 2.1 MPa, 优于同等掺入量掺石灰改良土的强度。因此, 对于石灰改良土而言, 存在最佳石灰掺入量。现场泥质粉砂岩全风化和强风化混合物可以采用石灰或水泥进行改良, 根据现场试验结果及经济性等因素, 确定掺入料及掺入量。

从图 5 不难发现, 改良土的强度随着养护龄期的增大而增大, 尤其在 7~10 天时增长迅速。水泥土一般以 90 d 的强度作为水泥土的标准强度, 28 d 的强度一般可以达到标准强度的 60%~80%。基于这样的分析, 建议实际工程中, 在施工 28 d 后进行质量检测, 并以 28 d 的强度作为基本检测标准, 用 1.2 倍的 28 d 强度作为评价施工质量是否满足设计要求的准则。这样,

既可以避免养护龄期过短带来的参数变化不稳定的影响, 又易于对不合格部位及时补救、排除施工隐患。

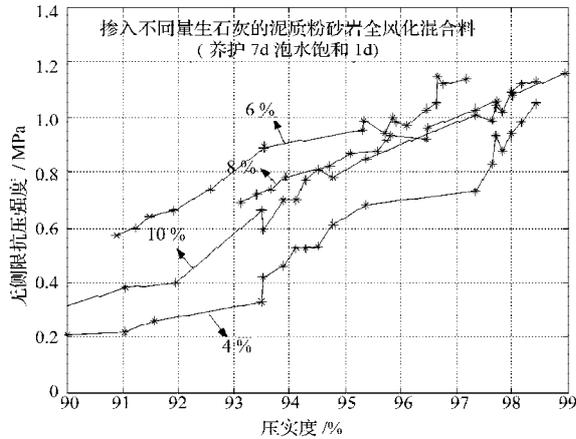


图3 石灰土无侧限抗压强度与压实度的关系的比较
Fig.3 The comparison between unconfined compression strength and compactness of lime soil

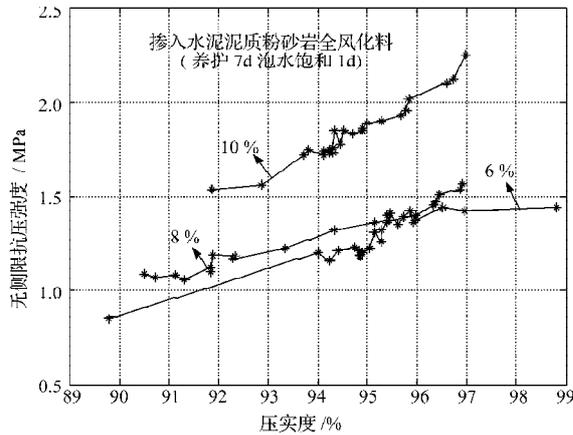


图4 水泥土无侧限抗压强度与压实度的关系的比较
Fig.4 The comparison between unconfined compression strength and compactness of cement soil

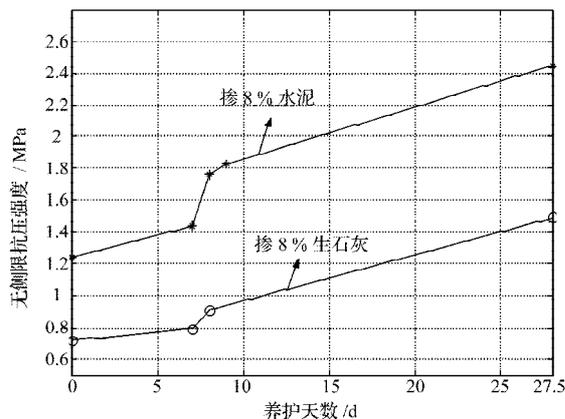


图5 改良土无侧限抗压强度随龄期的变化
Fig.5 Relationship between unconfined compressive strength and curing ages for improved soil

3 结论

1) 泥质粉砂岩的生石灰或水泥改良土均可直接用作基底层及以下路堤的填料;

2) 石灰改良软岩土随着掺和比的增加, 最佳含水率逐渐增大, 最大干密度逐渐减小; 水泥改良软岩土随着掺和比的增加, 最大干密度和最佳含水率均逐渐增加;

3) 石灰改良软岩土和水泥改良软岩土强度受密实度、掺和比以及养护龄期的影响。石灰改良土存在着最佳掺和比, 在大量应用之前应进行试验, 以确定合理的配比。泥质粉砂岩水泥改良土也是一种较好的路基基床填料, 且强度随水泥掺量的增加而增加。所以, 应用时应考虑经济方面的因素综合确定;

4) 借鉴我国和日本国的经验, 在施工质量得到保证的前提下, 武广客运专线经过的软岩地区可采用掺入6%的上述软岩的石灰改良土填筑路堤; 而在路堤中上部也可采用5%石灰改良土填筑。

参考文献:

- [1] 叶国静. 路面永久变形的实验研究[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(1): 113-116.
- [2] 卿启湘, 王永和, 李光耀, 郭建湖. 软岩填筑高速铁路路堤的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1119-1128.
- [3] 贺建清. 石灰改良土路堤填料的动力特性及应用研究[D]. 长沙: 中南大学土木建筑学院, 2005.
- [4] 林 青. 水泥稳定级配碎石机床结构的动力特性分析[D]. 成都: 西南交通大学土木工程学院, 2006.
- [5] TB10102-2004, 铁道工程土工试验规程[S].
- [6] SL237-1999, 土工试验规程[S].
- [7] 林 彤, 刘祖德. 粉煤灰与生石灰加固软土的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 1049-1052.
- [8] 邓剑辰, 马学宁. Q4黄土改良土填筑高速铁路基床的试验研究[J]. 兰州交通大学学报: 自然科学版, 2006, 25(3): 44-51.