

深层搅拌石灰桩加固软土地基

宋 宇¹, 吴协兴²

(1. 黑龙江省公路局; 2. 龙建路桥股份有限公司五公司)

摘 要: 讨论了深层搅拌石灰桩强度形成机理, 加固处理公路软基的有效性和应用条件。该方法具有设备简单、施工方便、经济效益好的特点。

关键词: 公路软基; 复合地基; 深层搅拌石灰桩

中图分类号: U419 **文献标识码:** C **文章编号:** 1008 - 3383(2003)01 - 0026 - 02

Rabbling lime pile at the deep level to reinforce soft ground foundation

SONG Yu, WU Xie - xing

Abstract: The paper discusses the intensity forming mechanism of Rabbling lime pile at the deep level, validity and application condition of reinforcing soft ground foundation. The method has the characters that is equipment simplicity, construction convenience and yield good economic returns.

Key words: highway soft ground foundation; compound foundation; rabbling lime pile at the deep level

在高等级公路中,遇到不少涵洞、通道、挡土结构等结构物置于软弱地基上或较厚的杂填土之上,施工期短,成为不少建设单位和设计单位的棘手问题。针对这个问题,采用生石灰喷粉深层搅拌桩(简称石灰搅拌桩)进行软土地基处理,具有技术简单可行,且经济合理的特点,能有效地加固软弱地基,减少软土层沉降和整体工程工后沉降,提高软土层的承载力。

1 生石灰对软粘土地基的基本作用

根据设计确定石灰搅拌桩钻机的位置,启动搅拌机,钻进时喷射压缩空气,准备加固的土在原位受到扰动。随着钻进到设计标高,钻机钻头反向旋转,边提升,边由压缩空气输送生石灰,向着由钻头搅拌叶片旋转产生的空隙部位喷入被搅拌的土体中,使土体和石灰进行充分拌和,形成具有整体性好,水稳定性好和一定强度的石灰土桩。

通过机构搅拌,将软土重塑的同时掺入适量的石灰,石灰与软土矿物发生化学反应,形成一种复杂的不溶于水的、将土颗粒粘结在一起的硅酸钙凝胶,硅酸钙凝胶起到包裹和联结的作用,形成网状结构,在土颗粒间相互穿插,使土颗粒联系得很牢固,改善了土的物理力学性质,发挥了石灰固化剂的强化作用。

要形成硅酸钙凝胶,只有在有足够的水使 Ca^{2+} 和 OH^{-} 离子能够转移到粘土颗粒表面时才能实

现,利用土颗粒、水和石灰之间的化学反应达到这一目的,以改善土的性质,具体来说,石灰对软土的基本作用如下:

(1) 生石灰与地基软粘土通过强制做拌均匀,很快产生水化作用,形成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。在这生石灰变为熟石灰的过程中,产生的热量促进水分蒸发,使软土地基的含水量降低,同时石灰体积产生膨胀,此时膨胀力所作的功转化为周围土的变形位能。

(2) 熟石灰的 Ca^{2+} 离子在水的作用下与软土颗粒产生絮凝反应作用,这一反应过程使软土颗粒结合水膜厚度减薄,土的塑性降低,土粒间的粘结力增加,土体强度和水稳定性提高。

上述两种化学反应过程,主要发生在生石灰与软土强制搅拌混合后的数小时内,是石灰对软粘土的早期基本作用。

(3) 熟石灰与粘土颗粒中的活性硅铝矿物进一步缓慢地产生化学作用,过程中又吸收熟石灰浆中的水分,形成结晶和生成铝酸盐和水化硅酸钙,改变了粘土的结构。这一反应过程将持续数年,是石灰对软粘土的后期作用。

2 石灰搅拌桩身的排水固结作用

通过对一些工程施工的石灰搅拌桩观测,发现施工期桩体含水量总是很高,直观表现在桩顶的垫层上有明显的圆形湿痕,表明桩体含水量及渗透系数均大于桩间土。由于桩身材料拌合不均匀,

以及配合比、掺合料不同,测得桩身渗透系数在 $4.07 \times 10^{-3} \sim 4.07 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 之间,相当于粉砂、细砂的渗透系数,较粘土、亚粘土的渗透系数大 10 ~ 100 倍,说明石灰桩身排水固结作用较好。

生石灰作为固化剂时,软粘土的渗透性系数随着时间而直线上升;而用 10 % 的水泥作为固化剂时,软粘土的渗透系数随着时间而直线下降。石灰适合于塑性指数较高的软粘土地基,水泥适合于塑性指数较低的软土地基。在相同条件下,用石灰处理的临时加固效果在前数小时内比水泥处理的要明显来得快。

值得注意的是,当石灰搅拌桩渗透系数 k 值足够小(如软粘土地基),而桩的直径 d 又足够大(例如 $d = 50 \text{ cm}$ 时),即使桩处于水下,也不能形成充分供水的条件,石灰搅拌桩的含水量仍然较初始含水量大幅度减小。

3 石灰搅拌桩与桩间土的复合地基效应

生石灰加固软弱地基后,石灰搅拌与未加固部分地基土形成复合地基,复合地基的强度包括搅拌桩桩体的强度和桩周土粘聚力增加后的强度,石灰搅拌桩与周围地基相比具有更高的抗剪强度。与生石灰搅拌桩邻接的桩周土,由于拌合时产生的高温和凝聚反应形成厚度达数厘米的高度硬壳,此层硬壳的存在影响了石灰搅拌桩的吸水和排水,尤其是后期排水,但在施工期内此层硬壳尚未形成,排水作用是可以发挥的。从对一些工程的天然土和单桩复合地基荷载试验中,发现石灰搅拌桩复合地基的加荷后稳定时间较天然土基为短,也就证实了石灰搅拌桩的排水固结作用。

石灰搅拌加固后的地基,桩体强度高于桩间土。因此,在工程结构荷载和车辆荷载作用下,土体被压缩,承载力主要靠桩体承担。由于土相对于桩有向下滑动的趋势,桩面对桩周土产生一向上的摩擦阻力,故靠近桩周土的压力值为向下的施工荷载值与向上的摩擦力两部分之和。因此,靠近桩边的土承受的压力最小,桩间地基土应力降低,而石灰搅拌桩桩体产生应力集中现象,根据基础底面桩和桩间土上埋设的土压力盒测定结果,得出桩体和桩间土的荷载应力分担比 $n = P/S = 3 \sim 15$ (为石灰搅拌承担的应力,为桩间土承担的应力)。在用石灰搅拌桩加固公路软基时,一般采用 $n = 3 \sim 5$ 较适宜。

据资料介绍,某一路堤地基用深层搅拌石灰桩处理软土地基,该地基由高灵敏度的粉质软粘土构成,厚度 6 ~ 12 m,抗剪强度 10 kPa,含水量 60 %,经室内试验表明,用制备的石灰加固试样测试其抗剪强度,在 10 d 后增加到 50 kPa,3 个月后测试强度增加到 100 kPa,在试验路堤 4 m 高的下面,石灰搅拌

桩的设计间距为 1.0 ~ 1.2 m,桩长 10 m。经现场测试的沉降曲线表明,用石灰搅拌桩加固的地基沉降减少了大约 60 %,其沉降量为 20 ~ 25 mm,设计计算值与实测值吻合较好。

4 生石灰剂量对石灰搅拌桩强度的影响

在同一生石灰含量的条件下,不同的土类具有明显不同的抗压强度,根据室内试验表明:(1)当生石灰含量在 6 % ~ 18 % 的范围内变化时,石灰搅拌桩仍保持原来土壤的特性;(2)不同土性的石灰粉掺入量各有最佳掺入量区间,大于或小于这一区间的掺入量,都得不到经济的加固效果。

生石灰的膨胀力与生石灰的含量成正比,但膨胀应力的方向,则与生石灰有效氧化钙含量、约束力的大小和方向、熟化的快慢有关,如采用有效氧化钙含量为 85 % ~ 89 % 的生石灰,让其在近似完全约束的条件下熟化,测得其轴向膨胀应力最高可达 11.6 MPa,随着周围约束的放松,轴向膨胀应力急剧减少,膨胀力所做的功已转化为周围土的变形位能而趋于平衡。总之,对于一般的地基(特别是软土),当生石灰用量超过一定界限时,其约束力绝对不可能阻止石灰搅拌桩的膨胀,巨大的膨胀力必将在相当范围内传布,这就是石灰搅拌桩直径增大的原因。

5 石灰搅拌桩的强度取决于软粘土的含水量

石灰搅拌桩的强度能否形成和强度高,与软粘土的含水量有关。生石灰转变为熟石灰以及继续水化,都要吸收和蒸发软粘土中的水份。因此,必须要有足够的水供石灰水化,否则无法形成强度。另一方面水又不能过多,以使处于饱和状态的软粘土能够因脱水而转变成三相状态,软土中的空气才能为碳酸化反应提供足够的二氧化碳,从而形成使灰土反应生成有一定强度的胶结物质条件,形成较高的强度。由于石灰搅拌桩中的水分在强度形成中得到消耗,灰土含水量就会大幅度减少,甚至由流动状态转变为硬塑乃至坚硬状态,从而大大提高石灰土的强度。

6 石灰搅拌桩适宜的土质条件

石灰搅拌桩是靠石灰与土之间发生一系列物理化学反应而形成强度的,不同的土质会产生不同的加固效果,可用于公路工程的软粘土中的挡土结构,开挖护坡、桥涵通道结构地基等。

粘土颗粒粒径小,表面积大,分散性大,稳定性差,容易和石灰发生反应,并且粘土较小的渗透系数常可使石灰搅拌桩含水量降低,所以石灰搅拌桩适宜处理软粘土地基。在软粘土矿物成份中,高岭土、伊利土和蒙脱土为三种主要的粘土矿物成分,而从结构、能量和成份三个方面又可以说明蒙脱土最容

(下转第 29 页)

由于一些沥青对水的敏感性,特别是在车辆和孔隙水压力的作用下,引起沥青的粘附性丧失和路面坍塌。

为了发挥乳化沥青养护的优点,目前正在研究几种重要的养护方法,稀浆封层、石屑罩面和喷射坑洞修补等方法是比较好的乳液养护方法。

2.1 稀浆封层

稀浆封层是一种冷拌沥青混合料,具有骨料和沥青混合的优点,在通常情况下,相似的级配稀浆封层具有比热拌沥青混合料高的模量,所以常用它来填充路面车辙。稳定度较高的具有较高的抗变形能力。

混合料通常是由较硬的细骨料级配和耐磨的具有高砂当量的骨料组成,特别是微观封层和聚合物改性封层这种情况极大地增加了路面的强度和完整性。这使路面具有高磨损阻力和极好的变形阻力。

乳化沥青乳液也容易在移动的稀浆封层摊铺机上使用,在该机器上进行拌和及运用掺加剂进行化学控制来满足养护的需要。

2.2 石屑罩面

目前,世界上有各种各样的道路表面处治方法,其中石屑罩面、撒布封层是最常用的路面养护方法。

石屑罩面是在道路面层上使用一种标准的沥青撒布机洒布一层粘结料,然后铺一层同粒径的比较好的骨料。这种方法可以根据交通类型进行调整,粘结料和石料两者的撒布率必须符合设计要求,所采用的粘结料和石料必须经过严格的筛选(粘结料在粘度、附着力、模量和适当的弹性及石屑的形状、结构、大小和干净程度等方面都应严格要求)。

石屑罩面的复合封层如果在比较好的道路基层上进行,处理后的道路表面可承受的交通量将达到 40 000 辆/d,同时也能够通行大型载重车。

石屑罩面是一个高沥青含量的薄表面处治层,但是这种处治层是柔性的和耐磨的。掺加聚合物能够增加粘结力、粘附性、耐磨性和路面的抗裂性能。

这使石屑罩面既能够用于道路养护,又可以用于道路重建,尤其是在道路的抗裂方面有重要作用。另外,使用 SBR 或 SBS 改性能够进行道路封层和桥梁裂缝修补,尤其重要的是可以减少路面的反射裂缝。

由于乳液具有极好的潮湿性、化学粘附性和乳化剂系统以及对路面的修补养护性质,所以乳液比较适合用于路面撒布。根据天气和交通情况,路面洒布时要求比较好的交通控制及比较好的封层条件。

2.3 喷射修补坑洞

喷射修补坑洞是采用一种特殊的机器对路面坑洞和凹地及破裂地带进行修补。

首先,修补机中的压缩空气将坑洞吹干净,除去坑洞里任何松散的材料,得到一个干净的表面。然后,将坑洞的内表面涂上一层乳液。再利用修补机上的操作装置,向坑洞里填上骨料,从喷嘴中喷出的热乳液和骨料混合,坑洞填充料,采用该方法修补的坑洞既防水又具有比较好的强度。修补坑洞的骨料要求单个尺寸为 7 mm、10 mm 或 14 mm 的石料,这也是进行封层时常使用的骨料级配。最后在坑洞上面铺一层干骨料,使它有一个表面封层,这样就完成了封层工作,但是也有再铺一层细砂的情况。

采用这种方法几乎不需要进行任何压实工作。

如果经常使用快凝型乳液和改性聚合物乳液,就能够使修补的坑洞具有比较高的强度,或者在冬季条件下,比较快地修补路面坑洞。

3 结 论

(1) 一种合适的养护方案加上良好的检测系统或 PMS 系统能够明显地延长路面的使用寿命。

(2) 乳化沥青是一种便利的和有效的粘结料。

(3) 稀浆封层、石屑罩面、喷射坑洞修补被证明是路面养护的好方法,只要进行合适的设计,路面的损坏就能够鉴定和进行处治。

(4) 以上的路面处治方法是比较经济的,从一开始就具有最少的投资成本。

收稿日期:2002-10-23

(上接第 27 页)

易与石灰发生反应,例如对于淤泥质粘土土样用 X 射线衍射矿物分析,稳定性好的矿物石英含量在 40 % 以上,高岭土和伊利土含量为 40 %,把其中一段大气干燥的淤泥粘土石灰搅拌桩钻取试样放入水中,约一个多小时就完全崩解为泥浆,崩解速度与一般粘土十分接近,说明了这类粘土恰恰缺少蒙脱土类粘土矿物,石灰较难与土发生化学反应,不能大量生成碳酸钙等胶结物质,致使石灰搅拌桩强度较低,也揭示了石灰搅拌桩适宜于蒙脱土类矿物含量高的

粘土地基。

7 结 语

通过分析,可见石灰搅拌桩处理软粘土和淤泥质粘土地基的效果是明显的,用石灰搅拌桩处理后的地基,渗透性增大,石灰搅拌桩有助于排水固结,经处理后复合地基降低了软土含水量,增大了粘聚力,复合地基的强度得到了提高,可以取得较好的经济效益,适宜用于高等级公路的挡土结构、桥涵、通道的软土地基中。

收稿日期:2002-11-23