

用石灰改良高速铁路路基黄土填料化学机理分析

王先龙

(郑西铁路客运专线有限责任公司, 陕西西安 710043)

【摘要】通过分析某高速铁路客运专线路基黄土填料土质改良试验成果,对采用石灰改良黄土的化学机理进行了分析探讨,指出经过改良的黄土能够作为高速铁路路基的填料,土质改良试验的主要任务是确定经济合理的配合比及最佳含水量。

【关键词】高速铁路;黄土;改良;化学机理

【中图分类号】TU 411

Chemical Mechanism Analysis on Lime Improvement for High Speed Railway Loess Filling

Wang Xianlong

(Zheng-Xi Railway Passenger Dedicated Line Co., LTD, Shanxi Xi'an 710043 China)

【Abstract】Based on the soil improvement testing results of loess filling in one Passenger Dedicated Line Project, the chemical mechanism for lime improved soil is investigated. It is pointed out that the improved loess is qualified as filling material for subgrade of the high speed railway project, and the major task of the soil improvement tests is to determine the economic rational mix ratio as well as the optimum water content.

【Key Words】high speed railway; loess; improvement; chemical mechanism

0 引言

高速重载是现代铁路发展的两大方向^[1],在高速铁路路基填筑时尽可能使用优质的填料,这是学术界和工程界的共识。然而,路基工程土方数量一般都很大,而优质填料往往很缺乏,世界上许多国家在高速铁路建设中都遇到了这个问题。通过土质改良,使部分 C 组或 D 组填料能够满足高速铁路路基填料要求的作法被广泛采用。法国就曾在 TGV 东南线建设中利用改良的高含水量黏土填筑路堤取得了成功并降低工程造价。日本在高速铁路建设中也采用了水泥或石灰改良土。我国在高速公路中已经广泛使用土质改良技术,铁路部门在秦沈客运专线上对路堤基床以下填土地基系数 $K_{30} < 90 \text{ MPa/m}$ 的部分 C 组粉黏土填料进行了物理改良和化学改良的试验和研究^[2],在京沪高速铁路路基结构形式及填料改良优化研究项目中,对粉黏土、下蜀黏土、粉土的化学改良做了大量的室内外试验研究,并已应用于实际工程。

黄土在我国西北、华北的广大地区广泛分布,总面积达 64 万 km^2 ^①。黄土作为一种特殊土,具有易湿陷、大孔隙、易压缩等特性,属于 C 组填料,不能

直接作为高速铁路路基填料。正在建设的某高速铁路客运专线就位于黄土地区,在设计过程中进行了有关黄土土质的水泥或石灰改良试验研究。在无机质黄土中掺入水泥或石灰后发生的物理化学反应是比较复杂的,本文通过分析某铁路客运专线有关黄土土质的石灰改良试验的一些成果,对采用石灰改良黄土的化学机理进行了探讨。

1 石灰改良黄土的化学机理

1.1 高速铁路路基填料的基本要求

高速铁路对路基、桥涵、隧道等结构物的变形控制提出了非常严格的要求,特别是对高速无碴轨道铁路,提出了工后“零沉降”的设计理念,要求路基工后沉降严格控制在 15 mm 以内,相邻结构物之间的工后差异沉降控制在 5 mm^[3]。路堤填料的性能将是控制路基工后沉降的主要因素之一。一般情况下,用于高速铁路路堤部分的填料需要满足以下三个方面的基本要求:

1) 具有足够的强度,在列车荷载和路堤自重荷载作用下能够保持长期的稳定;

2) 压缩性小,且路堤本体的压密沉降能较快完成(一般为半年时间);

作者简介:王先龙,1974年生,男,汉族,甘肃人,工程师,主要从事铁路工程勘察、地基处理设计、支挡结构设计等岩土工程以及高速铁路建设技术管理工作。E-mail: liangzhouxl@163.com

①罗宇生.《湿陷性黄土地区建筑规范》的现状与展望[G].全国黄土学术论文集.1994.

3) 在不利因素(降水、温差等)影响下能保持稳定。

设计规范^[3]规定要优先采用A、B组填料。对于C组细粒土填料一般通过物理或化学改良后具备上述的基本要求。秦沈客运专线基床底层部分采用了5%水泥改良土^[2]。物理改良主要有两条途径:一是掺入粗颗粒土,以改善其级配;二是掺入较细颗粒(黏粒),通过提高黏粉比以增强其强度。化学改良主要是通过向填料里加入掺和料,促使土与掺和料之间发生物理、化学反应,使土的结构和性质得到改良,掺和料主要采用石灰、水泥、粉煤灰、土壤固化剂中的一种或几种。

1.2 石灰改良黄土的试验成果^①

改良方案为:在黄土中掺入3%、5%、7%、9%的石灰(干重比)。首先对消石灰进行了性能试验,对无机质黄土、改良黄土进行了室内重型击实试验

(求出其最大干密度、最优含水量),液塑限及颗粒分析试验;不同压实密度条件下压缩系数、压缩模量、粘聚力、内摩擦角及无侧限抗压强度试验;试件7d、14d、28d的无侧限抗压强度试验;试件养生28d的干湿循环强度试验。

消石灰性能试验结果表1。

表1 消石灰性能试验结果

试验项目	w(有效钙)/%	w(MgO)/%	w(未消化残渣)/%
试验结果	78.46	3.39	7.09

颗粒分析试验结果见表2。从试验结果可以看出:掺入3%石灰后,其粉粒增加,黏粒减少,砂粒变化不明显;掺入5%、7%、9%石灰后粉粒减少,黏粒、砂粒增加,且随石灰掺量的增加这种颗粒级配改良的效果较为明显。

表2 颗粒分析试验结果汇总表

改良土类型	粒 径/mm						黏粒/mm	粉粒/mm	砂粒/mm
	0.25~0.075	0.075~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	<0.005	<0.002			
素 土	10.4	24.4	50.9	5.8	4.6	3.9	8.5	56.7	34.8
3%石灰	6.9	27.4	59.6	1.4	3.3	1.4	4.7	61.0	34.3
5%石灰	3.6	36.5	48.5	1.2	5.2	5.0	10.2	49.8	40.1
7%石灰	3.5	33.5	47.7	2.1	6.8	6.4	13.2	49.7	37.0
9%石灰	6.0	34.9	43.0	1.2	7.5	7.4	14.9	44.2	40.9

养生龄期为7d的重型击实试验结果见表3。可以看出,加入石灰后,改良土的液限、塑限均明显增加,液限增加幅度比塑限的增加幅度大,即塑性指

数增大,这说明土体的可塑性增强,土颗粒之间的结合力提高,其强度必然增加。

表3 击实试验结果汇总表

改良土类型	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	重 型 击 实	
				最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水量/%
素 土	29.2	19.8	9.4	1.880	14.3
3%石灰	36.6	22.9	13.7	1.760	15.6
5%石灰	36.1	22.5	13.6	1.772	15.9
7%石灰	36.0	23.5	12.5	1.740	15.8
9%石灰	36.1	23.8	12.3	1.753	15.8

不同配合比、不同压实系数、不同的浸水条件下、不同养生龄期的无侧限抗压强度试验结果见表4。从试验结果看出,加入石灰后,无侧限抗压强度都明显增大。相同养生龄期不浸水条件下的强度为浸水条件下的1.3~2倍;浸水条件下,石灰改良土的强度随石灰掺量的变化趋势不明显,5%石灰掺量改良土

能达到一个相对高点的强度;素土在浸水情况下基本上没有强度;95%击实度的强度基本上为90%击实度的强度的1.2~1.5倍,提高击实度,能明显加大改良土的强度;石灰改良土的强度随养生龄期的增加而上升的趋势较为明显,石灰改良土初期强度较低,养生龄期对石灰改良土的强度有较大的影响。

①王先龙. 郑西客运专线陕西段填料设计[R]. 铁道第一设计院, 2004.

表 4 石灰改良土无侧限抗压强度试验结果汇总表

kPa

工况	无侧限抗压强度									
	养生 6d, 浸水 1d 压实度		养生 7d 压实度		养生 13d, 浸水 1d 压实度		养生 14d 压实度		养生 27d 浸水 1d 压实度	
	0.95	0.90	0.95	0.90	0.95	0.90	0.95	0.90	0.95	0.90
素土			386.8	247.0						
3%石灰	337.2	285.6	604.8	398.0	450.9	371.0	622.6	503.5	501.4	371.3
5%石灰	426.1	341.1	781.9	623.2	485.6	440.1	814.5	684.2	668.7	632.6
7%石灰	416.0	323.8	842.7	642.5	465.7	424.4	850.6	712.4	642.8	508.9
9%石灰	378.1	311.1	855.4	707.1	459.1	416.3	873.2	798.6	621.9	551.5

压缩剪切试验结果(见表 5)表明, 相同压实度条件下, 无机质黄土压缩系数一般大于 0.1 MPa⁻¹, 属于中压缩性土, 改良后, 其压缩系数均有不同程度

的降低, 均小于 0.1 MPa⁻¹, 属于低压缩性土, 压缩模量均有增加。

表 5 压缩、剪切试验结果统计表

改良土类型	养生时间 / d	压实度 / %	压缩(固结)试验				直剪快剪		三轴快剪	
			压缩系数 压缩模量 (100—200kPa)		压缩系数 压缩模量 (100—300kPa)		内摩擦角 φ/(°)	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	粘聚力 c/kPa
			a _v /MPa ⁻¹	E _s /MPa	a _v /MPa ⁻¹	E _s /MPa				
素土	7	90	0.11	14.1	0.08	19.4	43.9	21		
素土	7	95	0.09	16.2	0.07	20.9				
3%石灰	7	90	0.08	21.3	0.06	28.3	42.4	83	30.5	33.7
5%石灰	7	90	0.09	18.6	0.07	23.9	51.1	72	32.3	150.5
7%石灰	7	90	0.07	23.6	0.06	27.5	46.2	99	32.1	180.1
9%石灰	7	90	0.09	18.8	0.06	28.2	56.3	52	42.5	103.5
3%石灰	7	95	0.08	20.1	0.06	26.8			36.5	83.5
5%石灰	7	95	0.08	20.3	0.07	23.1			36.9	221.7
7%石灰	7	95	0.06	27.0	0.06	27.0			39.7	124.7
9%石灰	7	95	0.07	22.9	0.06	26.8			45	121.3

干湿循环试验结果(见表 6)表明, 3%掺量改良土由于水稳定性差, 干湿循环后几乎崩解, 5%掺量的改良土具有相对较高的干湿循环强度系数。

综合上述试验结果可以得出结论: 5%掺量的石灰改良黄土具有良好的工程性能, 能够满足高速铁路路基填料的基本要求。

表 6 干湿循环强度统计表

改良土类型	压实度 / %	无侧限抗压强度 / kPa							干湿强度系数 K
		5 次干湿循环后试验				直接烘后试验			
		平均值	C _v / %	强度代表值	样品损失率 / %	平均值	C _v / %	强	
3%石灰土	90	0.0		0.0	63.1	1361.8	5.2	1246.2	0.00
	95	0.0		0.0	79.0	1902.8	6.2	1708.7	0.00
5%石灰土	90	1756.9	7.7	1533.5	95.8	1629.2	9.4	1377.7	1.11
	95	2727.1	7.6	2385.1	95.5	2816.7	7.0	2493.1	0.96
7%石灰土	90	472.2	25.6	273.3	88.8	1393.1	6.9	1235.0	0.22
	95	2041.0	36.9	800.7	97.9	2764.6	6.4	2472.8	0.32
9%石灰土	90	935.4	38.7	340.2	97.0	1913.9	7.3	1683.6	0.20
	95	2817.4	19.4	1917.3	98.6	2515.3	4.4	2333.4	0.82

1.3 黄土的主要化学成分分析

要对黄土的化学改良机理进行分析探讨,就要先分析研究黄土的化学成分。黄土是第四纪以来覆盖于地球表面的特殊沉积物,是一种具有大孔隙结构的弱粘结土,其主要矿物成分是石英、长石、方解石、云母和粘土矿物。黄土的微结构表现为以粉土

为主要骨料,由胶结物胶结而成的蜂窝状结构和由粘土粒自身胶结而成的类似蜂窝状的架空团粒互相胶结在一起的絮状结构物的混合体。黄土的这种微结构与黄土的成因及本身的化学成分息息相关,并决定了黄土的工程特性。从文献资料中收集的全国各地黄土化学成分质量分数见表7。^{①-③}

表7 黄土化学成分质量分数汇总表

地区	化学成分质量分数							
	w(SiO ₂)/%	w(Al ₂ O ₃)/%	w(CaO)/%	w(K ₂ O)/%	w(Na ₂ O)/%	w(MgO)/%	w(Fe ₂ O ₃)/%	w(其它)/%
新疆	58.50	18.55	8.22	2.33	2.76	2.75	4.57	2.32
	59.32	18.1	6.98	2.16	2.35	2.66	4.46	3.97
	63.01	6.25	13.09	2.86	3.36	3.93	1.78	5.72
	58.22	17.82	9.03	2.26	2.87	3.03	4.87	1.9
山西	66.98	11.43	7.03	2.16	1.83	1.42	3.03	6.12
	57.02	12.20	9.19	2.42	1.57	2.83	2.56	12.21
兰州	57.55	12.01	8.24	2.45	1.56	2.79	2.47	12.93
	56.91	12.25	8.53	2.43	1.79	2.86	2.77	12.46
	57.76	12.35	7.63	2.53	1.64	2.58	3.15	12.36
平均	59.47	13.44	8.66	2.40	2.19	2.76	3.30	7.78

从这些数据可以看出,黄土的化学成分主要为SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、Na₂O、K₂O等,虽然各地黄土组成成分含量有差异,但SiO₂、Al₂O₃、CaO三者质量分数和的平均达到80%以上。表7中其它成分主要为Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻等。文献资料还显示,黄土中含有氯化物盐类、硫酸盐(Na₂SO₄、MgSO₄)、易溶的碳酸盐(Na₂CO₃、NaHCO₃)及难溶的碳酸钙(CaCO₃)。

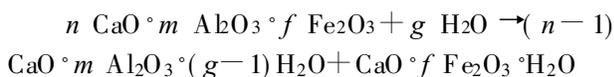
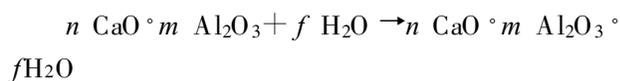
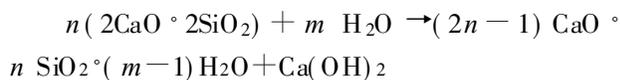
碳酸钙是黄土中含量最高的无机盐,质量分数通常在10%左右,肉眼可以清楚看见。碳酸钙在黄土中有两种赋存状态,一是以粗粒存在并构成黄土的部分骨料,二是与细粘粒混为一体形成黄土的胶结料。由于碳酸钙较难溶于水且硬度大,对于黄土的力学性能起加强的作用。

石膏(CaSO₄·2H₂O)是黄土中常见的中等水溶性的无机盐,氯化物盐类、重碳酸及硫酸盐也是黄土中的易溶于水的盐,这些易溶盐一般对黄土的力学性能起削弱的作用。

1.4 石灰改良黄土的化学机理

石灰改良黄土的机理主要表现为黄土矿物之间的水化反应、生石灰(CaO)的水化反应和消石灰(Ca(OH)₂)的胶凝和碳化反应^④。

黄土矿物之间的水化反应主要表现为CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃等氧化物与水反应生成水化硅酸钙、水化铝酸钙、水化铁酸钙和氢氧化钙等水化物。发生的化学反应如下:



生石灰具有强烈的水化反应能力,与水发生水化反应生成消石灰,发生的化学反应如下:
CaO+H₂O→Ca(OH)₂

消石灰与黄土掺和吸收土体水分后发生胶凝反

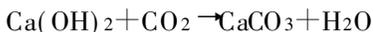
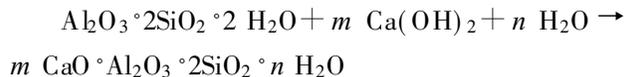
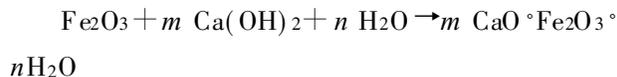
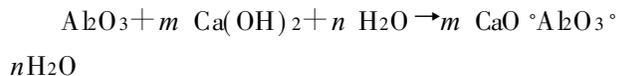
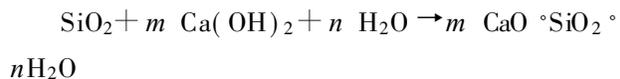
①陈剑杰. 新疆某地新近堆积黄土物理力学性质室内试验研究[G]. 全国黄土学术论文集, 1994.

②朱瑞成, 余雄飞. 天山北麓黄土状土的分布特征及其岩土工程性质[G]. 全国黄土学术论文集, 1994.

③白凤龙, 商日媛. 兰州西津村黄土及其地球化学环境[G]. 全国黄土学术论文集, 1994.

④马越, 董银建, 马登榜. 矿渣黄土水化与硬化机理探讨[G]. 全国黄土学术论文集, 1994.

应形成胶体,胶体 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 并不稳定,经再结晶后构成合成结晶使之紧密胶结而具有强度,在石灰造成的碱性环境下, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 胶体与黄土矿物及胶体状态的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等氧化物反应生成 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 系列的硅酸石灰水化物和 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ 系列的石灰水化物,这些水化物与土粒结合能提高土体强度。同时,土体表面的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与空气中的 CO_2 发生碳化反应生成 CaCO_3 , CaCO_3 结晶与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 结晶相结合构成 $\text{CaCO}_3 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$ 合成结晶,这种碳化作用使土体表层形成强度较高的硬壳,能增加土体的强度和水稳定性。发生的化学反应如下:



以上化学反应表明:在土质改良过程中,需要足

够的水和有效钙。如果不能供给足够的水化水,或者石灰中有效钙的含量不足,各种氧化物就得不到充分的水化,也不可能形成难溶的钙盐水化物,也就达不到预期的改良效果。因此,需要通过试验确定改良配合比及最佳的含水量。

2 结 论

1) 试验结果表明,掺加石灰后,黄土的强度、压缩性以及水稳定性均得到明显的提高。可以通过对石灰的性能试验和对改良土体的土工试验,确定一个合理的改良配合比方案。经过改良的黄土能够作为高速铁路路基的填料。

2) 石灰改良黄土的化学机理分析表明,改良效果与水化水的供给、石灰中有效钙的含量密切相关。土质改良试验的主要任务是确定经济合理的配合比及最佳的含水量。

参 考 文 献

- [1] 蔡庆华. 中国铁路技术创新工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000.
- [2] 秦沈客运专线技术总结编委会. 秦沈客运专线技术总结[G]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [3] 铁道科学研究院. 客运专线无碴轨道铁路设计指南[G]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.

收稿日期: 2007-09-28

欢迎订阅 2008 年 《岩土工程技术》双月刊

中国科技核心期刊

《岩土工程技术》是中国兵器工业集团公司主管、国防机械工业工程勘察科技情报网主办、国内外公开发行的中国科技核心期刊。本刊的办刊宗旨是促进学科理论发展和学术交流,传播知识创新和技术创新,加速科技创新成果向现实生产力的转化。本刊的主要栏目有:技术开发与创新、综述性论文、技术探索与研究、深基坑工程技术、复合地基技术、桩基技术、地基处理技术、工程技术试验研究、工程测试技术、隧道工程技术、地下水、环境岩土工程技术、岩土地震工程技术、信息报道等。

中国标准连续出版物号: $\frac{\text{ISSN } 1007-2993}{\text{CN } 11-3813/\text{TU}}$ 代号: $\frac{\text{国内邮发 } 82-677}{\text{国外发行 } 4736\text{Q}}$

定 价: 每期 10 元, 全年 60 元。

收款单位:《岩土工程技术》杂志社

读者可从邮局订阅,也可随时直接汇款到编辑部订阅。

本刊地址:北京 573 信箱《岩土工程技术》编辑部 邮 编:100053

电 话:(010) 83164702 (010) 63038601-2263 传 真:(010) 63017582

技术的创新 市场的需求 科技的决策
《岩土工程技术》是您占有市场的好帮手