

文章编号: 1002-0268 (2000) 05-0009-04

水泥石灰土稳定碎石配比与碎石级配研究

商庆森¹, 房建国²

(1. 山东工业大学, 山东 济南 250061; 2. 山东省公路管理局, 山东 济南 250002)

摘要: 根据砂性粉土与粘性土的水泥石灰土稳定碎石室内试验结果与路用效果, 分析影响两类半刚性材料强度、水稳性的主要因素, 探讨强度形成机理。这两类半刚性材料强度影响最显著的因素是碎石用量, 掺粘性土时, 集料级配比水泥用量影响大; 掺粉性土时, 水泥用量比集料级配影响大, 初期强度受误差干扰较大, < 0.3mm 细颗粒含量多有降低强度和水稳性作用。

关键词: 稳定土; 配比; 级配; 正交试验

中图分类号: U416.11 **文献标识码:** A

Research on the Proportion of the Aggregate Stabilized by Cement Lime and Soil and Gradation of Aggregate

SHANG Qing-sen¹, FANG Jian-guo²

(1. Shandong Technology University, Shandong Jinan 250061, China;

2. Shandong Highway Management Department, Shandong Jinan 250002, China)

Abstract: According to the test indoors and the effect in highway use of sand silt soil and clay soil's stabilized aggregate by cement lime and soil, the primary and second factors influencing two kinds of semi-rigid material's strength water stabilization are discussed in this paper. The factor influencing two kinds of semi-rigid material's strength most is aggregate content. Adding in clay soil, aggregate gradation has more effect than the content of cement; Adding in silt soil, the result is adverse. And the early strength is easy to be influenced by errors. In the graded aggregate, the fine sorted material whose diameter is smaller than 0.3mm should be reduced.

Key words: Stabilized soil; Proportion; Gradation; The orthogonal test

近年来, 在缺乏砂石料的平原地区, 水泥石灰土稳定碎石较多地用作二级路上基层。特别是黄泛平原区, 水泥石灰砂性粉土稳定砂、碎石作二级路上基层, 应用总里程达 600km。在使用 3 至 5 年后, 局部路段裂缝有唧浆现象。取芯观察, 基层顶面存在 0.5cm 厚的软泥层。为进一步提高其力学强度和水稳性, 采用正交试验方法, 选择广泛分布的黄河冲积砂性粉土和塑性指数为 16 的代表性粘性土, 从土的颗粒组成, 矿物成分, 掺入水泥石灰碎石后发生的填充、嵌挤、凝胶硬化、胶结形成强度, 提高抗裂性和水稳性方面确定了 3 种级配 G₁、G₂、G₃。石子用量选定 40%、50%、62%。水泥用量 (指占混合料总重

百分比) 粉性土时选定 4%、5%、6%; 粘性土时选定 3%、4%、5%。以 7 天无侧限抗压强度为考核指标, 研究了土质、碎石用量与碎石级配, 石灰和水泥剂量对强度、水稳性的影响。并将室内试验配比用于 009 线商河段二级路上基层, 强度水稳性明显提高。

1 实验材料与实验方法

石灰采用 II 级钙质消石灰; 水泥采用 425 # 普通硅酸盐水泥; 土采用黄河冲 (淤) 积砂性粉土和冲洪积粘性土, 塑性指数分别为 9 和 16; 碎石符合现行技术规范的要求, 实验方法执行文献 [1]。

2 水泥石灰砂性粉土稳定砂碎石配比与碎石级配

室内试验配比与强度见表 1。

标准养生的水泥石灰土砂、碎石配比强度 表 1

试验 编号	水泥:石灰: 土:砂、碎石	7 天标准 养生强度		14 天标准 养生强度 MPa	最佳 含水量 %	最大干 密度 g/cm ³
		强度 MPa	偏差 %			
A ₁	3:7:35:55	1.01	7.4	1.70		
A ₂	4:6:35:55	1.22	5.8	1.79	9.6	2.07
A ₃	5:5:35:55	1.39	5.6	1.81		
B ₁	3:7:30:60	1.36	3.5	1.54		
B ₂	4:6:30:60	1.52	1.5	2.32	9.36	2.11
B ₃	5:5:30:60	1.82	12.8	2.05		
C ₁	4:6:25:65	1.60	2.3	1.82	8.64	2.17
C ₂	5:5:25:65	1.59	7.4	2.09		
D ₁	5:5:20:70	2.05	4.6	2.58	8.07	2.22

注: 1. B₃ 组配比的试件 7 天不浸水强度 $R=2.2MPa$;
2. 砂、碎石级配(占砂、碎石干重, %) 10~30mm 碎石占 30%; 5~15mm 碎石占 25%; 3~8mm 碎石占 25%; 中砂占 20%。

由表 1 可见,影响强度的主要因素是碎石用量,其次为水泥用量,再次为碎石级配。取表中 B₂ 和 B₃ 组作施工配合比,1995 年用于国道 327 菏泽—巨野段及省内 5 条二级路。通车 3~4 年后,春融期,局部路段出现了裂缝唧浆现象,取芯观察,芯样顶部有 0.5cm 软泥层。为提高强度和分析影响强度与水稳定性的主次因素,进行了正交试验研究。

3 水泥石灰土稳定碎石的正交试验

3.1 正交试验设计

正交表及材料配比

表 3

试验号	A 碎石含量 (%)	空列		C 水泥用量(%)		配比(水泥:石灰:土:碎石)	
				B 碎石级配	粘性土	粉性土	粘性土
1	1(40)	1	3(G ₃)	2(5)	2(4)	5:7:48:40	4:8:48:40
2	2(52)	1	1(G ₁)	1(4)	1(3)	4:6:38:52	3:7:38:52
3	3(62)	2	2(G ₃)	3(6)	3(5)	6:5:27:62	5:5:28:62
4	1(40)	2	2(G ₂)	1(4)	1(3)	4:7:49:40	3:8:49:40
5	2(52)	2	3(G ₃)	3(6)	3(5)	6:6:36:52	5:6:37:52
6	3(62)	2	1(G ₁)	2(5)	2(4)	5:5:28:62	4:6:28:62
7	1(40)	3	1(G ₁)	3(6)	3(5)	6:7:47:40	5:8:47:40
8	2(52)	3	2(G ₂)	2(5)	2(4)	5:6:37:52	4:6:38:52
9	3(62)	3	3(G ₃)	1(4)	1(3)	4:5:29:62	3:6:29:62

3.3 强度试验与试验结果分析

水泥石灰土碎石混合料的最大干密度与最佳含水

考核指标:标准养生 6 天,浸水 1 天的无侧限抗压强度。

考察的因素与水平:水泥石灰土碎石混合料中,石灰剂量按石灰土最佳剂量加上碎石的裹覆用量。

(1)碎石用量。为水泥石灰土碎石混合料中,碎石所占混合料的重量百分比,考虑经济许可,拟定了 3 个水平 40%、52%和 62%。

(2)碎石级配。从对水泥石灰砂性粉土稳定砂碎石配比分析,考虑黄河冲积砂性粉土和粘性土的颗粒特点和施工可操作性,拟定了 3 种级配 G₁、G₂、G₃。其中,G₁ 为充填连续型,良好级配;G₂ 为粗骨料连续型;G₃ 为粗骨料不填充型。所拟定的因素及水平见表 2。

因素及其水平

表 2

水 平	A 碎石用量 (%)	B 集料级配	C 水泥含量(%)	
			粉性土	粘性土
1	40	G ₁	4	3
2	52	G ₂	5	4
3	62	G ₃	6	5

3.2 正交表的选用与材料配比的确定

根据选定的因素及水平,采用 L₉(3⁴)正交表。配比确定方法以粉性土时 1 号配比为例。已知碎石含量 40%,水泥用量 5%,石灰和土的总量则为 55%。其中石灰含量为由试验定的石灰土中 12%石灰剂量加上 3%裹覆碎石的石灰量。配比中土的用量为 (55%—40%×3%)/(1+12%)=48%,石灰用量则为 55%—48%=7%。得配比为水泥:石灰:土:碎石=5:7:48:40。2 种土的水泥石灰土碎石配比见表 3。

量,参照文献[2]的方法确定,其值见表 4。

水泥石灰碎石混合料的最大干密度和最佳含水量

表 4

试验组号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
粉性 $r_{\max}(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.90	1.99	2.11	1.91	2.01	2.07	1.92	2.00	2.07
土时 $W_0(\%)$	11.2	9.5	8.2	11.4	9.3	8.4	11.9	9.4	8.4
粘性 $r_{\max}(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.98	2.03	2.10	1.96	2.05	2.09	1.96	2.03	2.10
土时 $W_0(\%)$	12.1	10.0	8.3	10.6	9.8	8.7	11.2	10.0	8.8

级配集料平均视密度, G_1 为 2.70; G_2 为 2.71; G_3 为 2.73。无侧限抗压强度试件为 $15\times 15\text{cm}$ 圆柱体, 均按 97% 压实度成型, 装入开口的塑料袋中, 放入标准养护室内养生 6 天, 浸水 1 天后进行无侧限抗压强度试验, 在偏差系数不大于 15% 的条件下, 将各试件试验结果的平均值作为该组配比的强度。

3.3.1 试验结果与极差分析

下文中 R_i 表示第 i ($i=1, 2, \dots, 9$) 号试验(配比)的抗压强度, $\overline{I_j}$ 、 $\overline{II_j}$ 、 $\overline{III_j}$ ($j=1, 2, 3, 4$) 分别表示第 j 个因素第 1、2、3 水平的平均抗压强度。极差计算时, 计算每一因素在不同水平条件下的平均强度和多因素不同水平的极差值。试验结果与计算结果见表 5。

试验结果与极差分析 表 5

试验号	A	空列	B	C(%)		试验结果(MPa)	
				粉性土	粘性土	粉性土	粘性土
1	40	(1)	G3	5	4	0.90	1.37
2	52	(1)	G1	4	3	1.25	2.59
3	62	(1)	G2	6	5	2.69	2.88
4	40	(2)	G2	4	3	0.84	0.71
5	52	(2)	G3	6	5	1.78	2.48
6	62	(2)	G1	5	4	2.52	3.20
7	40	(3)	G1	6	5	1.02	2.25
8	52	(3)	G2	5	4	1.37	2.00
9	62	(3)	G3	4	3	1.39	2.67
$\overline{I_j}$	0.92	1.61	1.60	1.16		粉	
$\overline{II_j}$	1.47	1.71	1.63	1.60		性	
$\overline{III_j}$	2.20	1.26	1.36	1.83		土	
极差	1.28	0.45	0.27	0.67			
$\overline{I_j}$	1.44	2.28	2.68		1.99	粘	
$\overline{II_j}$	2.36	2.13	1.86		2.19	性	
$\overline{III_j}$	2.92	2.31	2.17		2.54	土	
极差	1.48	0.18	0.82		0.55		

由表 5 可知, 影响水泥石灰土碎石 7 天龄期抗压强度结果的主次顺序是: 粉性土时, 碎石用量> 水泥用量> 试验误差> 级配; 粘性土时, 碎石用量> 级配> 水泥用量> 试验误差。两类水泥石灰土稳定碎石, 碎石集料的用量对强度的影响最大, 用量越多, 强度越高, 取 3 水平效果最好。砂性粉土时, 水泥用量对强度的

影响比集料级配来的大, 水泥用量越多, 强度就越高, 取 3 水平效果最好。这与水泥石灰砂性粉土稳定砂、碎石结果相同。粘性土时, G_1 级配的强度最高。砂性粉土时, G_1 的强度反比 G_2 级配的低 1.8%。

3.3.2 方差分析

为估计试验过程及试验结果测定中误差的大小和分析的精度, 通过方差分析, 将因素水平变化所引起的试验结果间的差异与误差波动所引起的试验结果间的差异区分开。方差分析的计算过程参照文献[3] 进行, 结果见表 6。

方差分析结果 表 6

方差来源	偏差平方和	自由度	平均偏差平方和	F 值	显著性
粉性土	A	22.2752/9	2	11.1376/9	8.10 显著
	B	1.2194/9	2	0.6097/9	
	C	6.2462/9	2	3.1231/9	2.27 有影响
	误差	4.2826/9	2	1.07065/9	
	误差 Δ	5.5020/9	4	1.3755/9	
粘性土	A	29.8664/9	2	14.9332/9	60.98 显著
	B	9.1778/9	2	4.5889/9	18.74 较显著
	C	4.1312/9	2	2.0656/9	8.43 有影响
	误差	0.4898/9	2	0.2449/9	

已知: $F_{0.05}(2,4)=6.94$ $F_{0.10}(2,4)=4.32$ $F_{0.25}(2,4)=2.00$

$F_{0.05}(2,2)=19.0$ $F_{0.10}(2,2)=9.00$ $F_{0.25}(2,2)=3.00$

由方差分析可知, 不论是砂性粉土还是粘性土的水泥石灰土稳定碎石配比, 碎石集料用量对其强度的影响, 在 $\alpha=0.05$ 的置信水平下均是显著的。砂性粉土时, 水泥用量的影响比集料级配的影响大, 但也仅在 $\alpha=0.25$ 的置信水平下显著, 而集料级配的影响还不及试验误差的影响大, 这表明试验误差对其 7 天强度的干扰较严重。粘性土时, 集料级配对强度的影响比水泥用量大, 两者分别在 $\alpha=0.10$ 和 $\alpha=0.25$ 的置信水平下是显著的, 它们对强度的影响都超过试验误差的影响, 表明了试验误差对强度的影响已比砂性土时减少, 7 天强度结果较为可靠。

4 路用效果

将粉土的水泥石灰土稳定碎石室内 5 号试验配比, 于 1998 年 7 月用于省道 009 线商河段(155k+400—156k+00)。路面结构为 2cm 沥青混凝土+4cm 沥青碎石+17cm 水泥石灰土稳定碎石+15cm12% 石灰土+15cm10% 石灰土, 设计强度 $\geq 1.5\text{MPa}$, 设计总弯沉 579 μm 。

1999 年 8 月 14 日雨季末, 路面温度 33.2 $^{\circ}\text{C}$ 时, 用日本谷藤株式会社生产的落锤式自动弯沉仪(FWD),

路面冲击荷载设定为 50kN, 与贝克曼梁在 BZZ-100 条件下测得的结果相当, 测得盆中心代表弯沉 119.19 μ m。取出的 8 个 15 $\times$ 15cm 芯样, 浸泡 24 小时后的强度见表 7。

芯样无侧限抗压强度

表 7

编号	芯样高度(cm)	无侧限抗压强度(MPa)
1	13.98	4.79
2	14.83	4.14
3	14.09	3.75
4	14.63	5.73
5	15.70	4.47
6	15.10	4.34
7	14.13	4.09
8	14.81	4.45
$R=4.47\text{MPa}$		$S=0.59\text{MPa}$
		$C_v=13.3\%$

该路段经过春融、夏雨期, 路表弯沉远小于设计弯沉, 1 年龄期强度增长到 4.47MPa。春融、夏雨期路面裂缝冒出清水, 说明水稳性有了明显提高。

5 机理分析

水泥石灰土稳定碎石的强度、板体性、水稳性、耐久性, 靠混合料中颗粒填充、颗粒与填充在颗粒之间的胶结物接触界面吸附与接触摩擦能力产生。碎石含量越多, 摩擦强度越大。因此, 碎石含量是最显著的影响因素。对黄河冲积形成的砂性粉土, 0.074~0.005mm 粒径的粉粒 $>90\%$, 粒度均匀, 不良级配, 皆为无胶凝活性的惰性颗粒^[4], 混合料间产生的填充与胶结作用较差, 初期强度主要靠水泥水化产生的胶凝物对粒料表面的机械粘着力。因此, 水泥用量对强度的形成产生明显影响。因碎石含量 $\leq 62\%$, 碎石级配的作用相对较弱。在混合料凝结阶段, 由于产生的凝胶物量少, 颗粒间的连接力弱, 试验结果受试验误差干扰严重。因混合料凝结过程中, 集料颗粒的惰性表面起着便于晶胚形成的基底作用, 而粉土中无胶凝活性的粉粒含量高, 惰性细粒多, 因此, 碎石级配中, 应尽量减少 $<0.3\text{mm}$ 细粒含量。细粒料越多, 越不利于晶胚的形成和生长, 越影响水泥石灰土活性凝胶结晶网架的穿插连晶, 不仅影响强度的提高, 而且也降低了形成的半刚性基层材料的板体性和水稳性。这个结论已被水泥石灰砂性粉土稳定砂、碎石和水泥石灰砂性粉土稳定碎

石路用效果证实。

对粘性土的水泥石灰土稳定碎石而言, 由于粘性土中 $<0.002\text{mm}$ 粘粒占 $20\% \sim 30\%$, 粘粒矿物以伊利石、蒙脱石、高岭石为主, 不均匀系数 $C_u>10$, 级配良好。水泥石灰土所形成的凝胶物紧紧包围在集料颗粒的表面上, 混合料之间能充分发挥填充、胶结粘附摩擦作用, 碎石级配比水泥用量对强度的形成影响大而试验误差干扰较弱。上述分析与极差和方差分析相吻合。

6 结论

(1) 不论是掺粉性土还是粘性土, 影响水泥石灰土稳定碎石强度的最显著因素均是碎石集料的用量, 用量越多, 强度越高。因此, 在进行水泥石灰土碎石的组成设计或施工质量管理过程中, 首先应重视集料用量。

(2) 对粘性土的水泥石灰土稳定碎石而言, 集料级配比水泥用量对强度的影响更大。如正交表中 2 号与 5 号配比相比, 前者水泥用量虽然少用了 2% , 但因采用了 G_1 级配反使强度增大 4.4% ; 3 号与 6 号配比相比, 前者水泥用量少用 1% , 同样的原因, 强度却增大了 11.1% 。因此, 在集料用量确定的前提下, 应严格控制碎石集料级配, 其次才是水泥用量。坚决纠正只用强度控制材料组成而忽视集料级配影响的做法, 这对工程实践具有重要的经济意义。

(3) 对粉性土的水泥石灰土稳定碎石而言, 水泥用量比集料级配对强度的影响更大, 其试验误差对 7 天强度的影响也较大。 $<0.3\text{mm}$ 细粒含量起到降低强度、水稳性的作用。在确定混合料组成设计时, 一方面要考虑水泥掺量对产生干缩裂缝的影响, 另一方面要考虑试验误差的影响, 采用较长龄期, 受试验误差影响较小的试验结果。

参考文献:

[1] 公路无机结合料稳定材料试验规程(JTJ 057-94). 北京: 人民交通出版社, 1994.

[2] 同济大学道路与交通工程研究所. 半刚性基层沥青路面. 人民交通出版社, 1991.

[3] 高允彦. 正交及回归试验设计方法. 北京: 冶金工业出版社, 1988.

[4] 商庆森. 黄河三角洲地区道路用土的特性研究. 北京: 公路交通科技, 1996, 13(3).