

文章编号: 1002-0268 (2006) 12-0045-05

强夯法处理石灰岩碎石路基试验研究

胡振南¹, 王桂尧¹, 黄 庆², 赵娟芳¹, 孔祥兴¹

(1. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410076; 2. 湖南常吉高速公路建设开发公司, 湖南 常德 415100)

摘要: 结合常吉高速公路路基强夯的工程实践, 对石灰岩碎石路基进行了强夯试验研究, 分析了强夯法处理石灰岩碎石路基的效果, 提出了该段路基强夯设计参数。现场进行了夯沉量、压实度和弯沉测试, 以及碎石土级配分析和素土含量试验。根据理论分析和试验结果, 路基在 1 200 kN·m 夯击能作用下夯击 3 锤, 夯沉量可达到 30 cm 以上, 压实度可提高 5%, 达 95% 以上, 达到规范和建成后的安全使用要求; 路基填料的级配及素土含量情况直接影响路基的夯沉量, 碎石级配越好, 素土含量适当, 路基的夯沉量就越小。

关键词: 强夯法; 路基; 有效影响深度; 压实度; 夯沉量; 弯沉

中图分类号: U416.1⁺64

文献标识码: A

Experimental Research for Dynamic Compaction to Improve Crushed Limestone Embankment

HU Zhen nan¹, WANG Gui yao¹, HUANG Qing², ZHAO Juan fang¹, KONG Xiang xing¹

(1. Changsha University of Science and Technology, Hunan Changsha 410076, China;

2. Hunan Changji Expressway Construction and Development Company, Hunan Changde 415100, China)

Abstract: Based on the construction of the expressway of Changde Jishou, the effect of dynamic compaction on the improvement of crushed limestone embankment was studied. The results of spot experiment confirm the effect of dynamic compaction and indicate the design parameter of dynamic compaction. The spot experiment of the settlement of dynamic compaction, degree of compaction and deflection were carried out as well as the gradation analysis of crushed stones and the soil content test. The theoretical analysis and the result of the test showed that the settlement can reach 30 cm and the degree of compaction increased by five percent, up to more than 95%, with the roadbed tamped over three times under 1 200 kN·m. The results meet with the safety requirement of specification. Moreover, the gradation of crushed stones and the soil content directly influenced the settlement of roadbed. So with good gradation and appropriate soil content, the settlement of the roadbed would be small.

Key words: dynamic compaction; embankment; effective reinforcing depth; degree of compaction; settlement of dynamic compaction; deflection

0 前言

强夯法处理路基是 20 世纪 60 年代末由法国 Menard (梅纳) 技术公司首先创用的。这种方法是将很重的锤 (一般 100~400 kN) 从高处自由落下 (落距一般为 6~40 m) 给路基以强大冲击力和振动, 从

而达到提高路基土的强度并降低其压缩性的目的。此法在开始时仅用于加固砂土和碎石土路基。经过几十年来的应用与发展, 它已拓展了应用范围, 适用于加固从砾石到粘性土的各类路基土^[1]。

常吉高速公路存在较多的高填方路基, 路基回填的高度在 4~20 m 之间, 最高的可达 58 m。路基填土

收稿日期: 2005-07-14

作者简介: 胡振南 (1977—), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 从事地基基础与边坡工程研究. (bony_hzn@163.com)

主要为红砂岩、石灰岩, 碎石含量达 70%~90%, 虽然进行了大规模的改石工作, 但路基填筑后孔隙仍然较大, 压实质量难以控制, 极易产生较大的工后沉降和不均匀沉降。同时, 新实施的《公路路基设计规范》对路堤压实度要求有所提高, 下路堤和上路堤压实度分别从原来的 90% 和 93%^[2] 提高到 93% 和 94%^[3], 而该段路基填筑在新规范实施以前均按旧规范要求进行填筑。考虑该段高速公路的特殊性, 采用强夯机械对路基进行强夯处理, 以提高路基的压实度, 减少路基的工后沉降和不均匀沉降。为能够在强夯施工中有据可依, 做到用数据说话, 特此选取一个试验段进行强夯试验研究。

1 强夯法处理碎石路基作用机理及强夯施工工序

1.1 强夯法处理碎石路基作用机理^[1]

强夯法加固机理研究主要侧重于夯击能对路基土所产生的作用及其在路基土体中的传递过程。但由于强夯法适用的路基土范围广泛, 且不同路基土之间存在显著差别, 因此关于强夯法加固路基的机理, 目前国内外尚未形成统一认识。

从加固机理与作用来看, 强夯法加固路基的机理按路基土的类别可分为动力夯实、动力固结、动力置换 3 种情况, 其共同特点是: 通过破坏土的天然结构并达到新的稳定状态。对非饱和土, 尤其是孔隙多、颗粒粗大的土, 巨大的夯击能量所产生的冲击波和动应力在土中传播, 使颗粒破碎或使颗粒产生瞬间的相对运动, 土体孔隙中的气体迅速排出或压缩, 孔隙体积减少, 从而使路基土形成较密实的结构。

对于本路段, 从土的结构来看, 碎石土具有散粒结构, 孔隙大, 透水性强, 孔隙水很容易排出的工程特点, 在荷载作用下压密过程很快。强夯机理属动力夯实(动力压密), 即强夯产生的冲击荷载使土体中的孔隙体积减小, 土体变得密实, 从而提高土的强度, 减少路基的工后沉降。它的夯实过程就是土中气体被挤出的过程, 其变形主要由土颗粒的相对位移引起, 有时浅层块石、碎石可能还伴随有局部的击碎。

1.2 强夯施工工序

(1) 清理并平整场地, 测量路基在夯击前场地平均高程, 并检测路基弯沉值、压实度(或干密度)。

(2) 放线并标出夯点的位置。

(3) 设备就位, 使夯锤对准夯点位置, 测量夯前锤顶高程。

(4) 将夯锤吊起到预定高度(夯锤提升高度由锤质量和强夯级别确定), 待夯锤脱钩自由下落后, 测

量夯后锤顶高程。

(5) 重复步骤(4), 按设计规定的夯击次数及控制标准完成一个夯点的夯击。

(6) 整个场地夯击完成后, 用推土机整平并用光轮压路机压实, 然后测量场地高程。

(7) 强夯效果的检测, 主要包括弯沉值、压实度(或干密度)、承载力和触探测试。

2 强夯试验及结果分析

2.1 试验段工程概况

为分析强夯的效果, 指导全线的强夯施工, 选取 35A 标 K223+140~K223+230 路段作为试验段进行了现场试验。

试验段长 90 m, 宽 28 m, 该处路基位于一山坡上, 路基左侧填筑厚度大, 最高处达 19 m, 右侧填筑厚度较少, 路基横段面从左至右填筑厚度逐渐减少, 搭接在自然边坡上。填筑材料以石灰岩碎石为主, 夹带部分素土, 碎石含量达 70%~80%。石灰岩平均抗压强度为 107 MPa, 平均吸水率为 0.41%, 根据公路工程石料技术标准(M0201 94)^[4], 该石料属 I 级石料。填筑时, 碎石控制粒径为 34 cm, 但个别粒径可达 60 cm, 粒径小于 80 mm 的碎石土级配情况见图 3。由于填筑厚度不均, 碎石土级配不理想, 填筑后孔隙率较大, 极易产生较大工后沉降和不均匀沉降。

2.2 强夯设计参数及有效影响深度的确定

本次强夯试验的设计参数为: 夯锤重 12 t, 落距为 10 m, 夯击能为 1 200 kN·m, 夯锤直径 2 m, 单点夯击 3 锤, 夯击间距取 3.5 m, 点位布置采用 3.5 m×3.5 m 矩形布置(图 1 所示)。

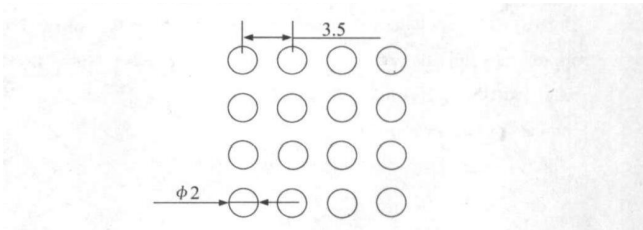


图 1 夯点布置示意图 /m

Fig 1 Sketch of compacting points (unit: m)

强夯有效影响深度研究的实际工程意义重大。强夯创始人 Megard 提出的有效影响深度的计算公式为

$$H = \sqrt{Wh}, \quad (1)$$

式中, H 为加固影响深度, m; W 为夯锤重, t; h 为落距, m。

采用式(1)计算出来的有效影响深度与工程中

实测的有效影响深度相差较大, 且均偏大。近年来众多学者建议对上式进行修正^[5], 从而提出了修正的 Megard 公式

$$H=\alpha \sqrt{Wh}, \tag{2}$$

式中, α 为修正系数, 与多种因素有关。这方面的资料很多, Leonards 建议对砂土地基乘以 0.5 的修正系数^[5]; 王成华收集整理了 40 项强夯工程或试验实测的 α 值, 夯击能一般为 1 000~2 500kN·m, α 值的范围为 0.2~0.95, $\alpha=0.4\sim0.7$ 的频率约为 80%, 均值为 0.579^[6]。本次试验取 $\alpha=0.50$, 可算得在 1 200 kN·m 夯击能作用下有效影响深度约为 5.5 m。

另外, 我国《建筑地基处理技术规范》规定^[7], 强夯的有效影响深度应根据现场试验或当地经验确定。在缺少试验资料或经验时可按表 1 预估。由表 1 可得, 在 1 200 kN·m 夯击能作用下, 碎石土有效影响深度为 5.0~6.0 m。由此, 可将本次强夯的有效影响深度设定为 5.5 m。

表 1 强夯的有效影响深度

Tab 1 Effective reinforcing depth versus various compacting energy

单击夯击能/(kN·m)	有效影响深度/m	
	碎石土、砂土等	粉土、粘性土、湿陷性土等
1 000	5.0~6.0	4.0~5.0
2 000	6.0~7.0	5.0~6.0
3 000	7.0~8.0	6.0~7.0
4 000	8.0~9.0	7.0~8.0
5 000	9.0~9.5	8.0~8.5
6 000	9.5~10.0	8.5~9.0

2.3 试验结果

我国《建筑地基处理技术规范》规定^[7], 夯点的夯击次数应按现场试夯得到的夯击次数与夯沉量关系曲线图确定, 且应满足: 当单击夯击能小于 4 000 kN·m 时, 最后两击的平均夯沉量不大于 5cm; 夯坑周围地

面不应发生过大的隆起。公路部门尚未对路基强夯做出相关要求。本次试验过程主要进行了夯沉量、压实度和弯沉测试, 以及碎石土级配分析和素土含量试验。

2.3.1 夯沉量试验

为确定适宜的夯击次数, 评价夯击效果, 在试验区选择了 3 个具有代表性的点进行单点夯击试验, 进行了夯坑单点沉降量的观测。其部分结果列于表 2, 相应的沉降曲线如图 2 所示。

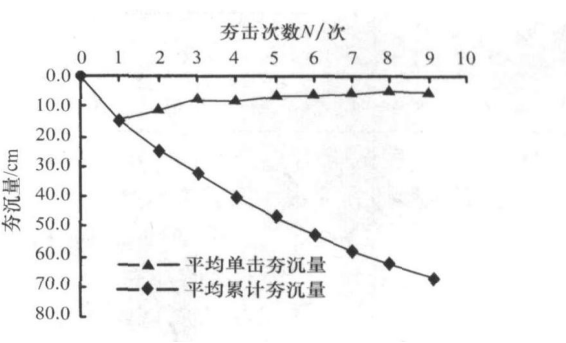


图 2 夯沉量与夯击次数曲线图

Fig 2 Relation curves the number of compacting nun and settlement

从单点夯击试验的夯沉量与夯击次数的关系曲线(图 2)可以看出:

- (1) 单击夯沉量随夯击次数的增加呈减少趋势, 反映了强夯法处理地基的一般规律。
- (2) 前 3 击夯沉量较大, 且每击夯沉量急剧减少, 其累计夯沉量可达总沉降的 50% 左右 (32 cm); 3 击以后, 虽然单击沉降仍然呈减少趋势, 但变化很小, 沉降趋向稳定, 说明其总夯击能量趋向饱和。
- (3) 夯击次数达到 7~8 次, 最后两击平均夯沉量小于 5 cm, 达到房建强夯的一般要求。

取 3 个夯点的单击夯沉量和累计夯沉量的平均值

表 2 单点夯击沉降量试验数据

Tab. 2 Expenitment results of settlement of dynamic compaction

夯击次数 N/次	1 号 (K223+148)			2 号 (K223+172)			3 号 (K223+208)			平均值		
	单击夯沉量/cm	累计夯沉量/cm	累计夯沉量百分数/%	单击夯沉量/cm	累计夯沉量/cm	累计夯沉量百分数/%	单击夯沉量/cm	累计夯沉量/cm	累计夯沉量百分数/%	单击夯沉量平均值/cm	累计夯沉量/cm	累计夯沉量百分数/%
1	16	16	21	15	15	25	13	13	23	14.7	14.7	22
2	12	28	37	10	25	42	9	22	39	10.3	25.0	37
3	9	37	49	7	32	53	6	28	49	7.3	32.3	48
4	8	45	60	8	40	67	7	35	61	7.7	40.0	59
5	7	52	69	5	45	75	7	42	74	6.3	46.3	69
6	7	59	79	6	51	85	6	48	84	6.3	52.7	78
7	6	65	87	5	56	93	4	52	91	5.0	57.7	86
8	5	70	93	4	60	100	5	57	100	4.7	62.3	93
9	5	75	100							5.0	67.3	100
Σ	75			60			57			67.3		

(如表 2、图 2 所示), 并采用最小二乘法对平均单击夯沉量曲线进行拟和, 拟和公式为:

$$h_0=14.45\times N^{-0.51},\tag{3}$$

式中, N 为夯击次数, 次; h_0 为单击夯沉量, cm。

采用拟和公式 (3) 对单击夯击次数与夯沉量关系进行预测, 如表 3 所示。

表 3 拟和公式 (3) 预测的单击夯击次数与夯沉量关系

Tab 3 Forecasted relation of the number of compacting run and settlement by fomula (3)										
夯击次数/次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
单击夯沉量/cm	14.45	10.22	8.34	7.23	6.46	5.90	5.46	5.11	4.82	4.57

2.3.2 压实度试验

整个试验段在完成 1 次普夯 (1 200 kN·m 夯击能作用下单点夯击 3 锤, 夯点布置见图 1) 后, 在夯实面以下 15 cm 处作了 10 个点的压实度试验, 并与夯前压实度进行对比。本次压实度试验采用 $\phi 15$ mm 灌沙仪, 夯击前后压实度检测结果如表 4 所示。从夯击前后的压实度检测结果可以看出, 路基压实度都得到了明显的提高, 提高量均超过 5%, 最高可达 9.1%, 且夯后压实度均超过了 95%, 达到规范和建成后的安全使用要求。

表 4 夯实面以下 15 cm 处土样压实度检测结果

Tab. 4 Compactness test results for soil specimen 15 cm underneath compaction surface										
点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
夯前压实度/%	90.2	91.2	91.7	91.7	91.1	90.7	90.8	91.3	91.8	90.4
夯后压实度/%	99.1	99	97.9	98.1	97	99.8	98.4	99	98.9	98.7
压实度提高值/%	8.9	7.8	6.2	6.4	5.9	9.1	7.6	7.7	7.1	8.3

2.3.3 颗粒级配及素土含量试验

为分析夯沉量与颗粒级配及素土含量的关系, 我们在单点夯击试验的夯坑下取得土样进行了颗粒级配及素土含量的试验分析, 试验结果如图 3 和表 5 所示。

由表 5 和图 3 可看出: 1[#] 试验点素土含量最小, 级配最差; 3[#] 试验点素土含量最大, 级配最好; 2[#] 介于其中。结合单点夯击沉降量试验数据 (表 2) 可得: 素土含量越大, 级配越好, 夯沉量越小。

表 5 试验点素土含量

Tab 5 Percentage of soil content	
试验点	素土含量/%
1 [#] (K 223+148)	19
2 [#] (K 223+172)	25
3 [#] (K 223+208)	30

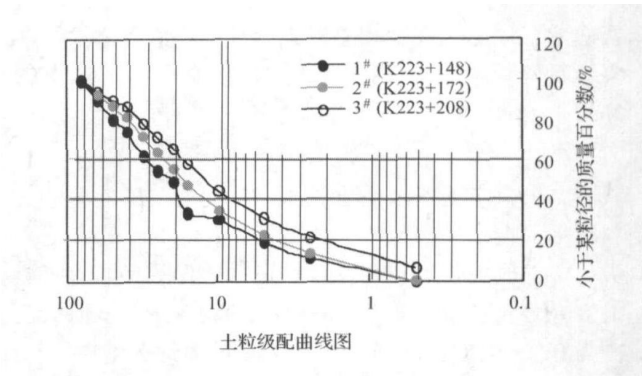


图 3 颗粒级配曲线图

Fig 3 Gradation analysis curves

分析认为: 碎石土颗粒级配及素土含量情况直接影响填料的孔隙率, 而强夯法加固粗粒土的原理是: 在冲击荷载作用下使颗粒产生瞬间的相对运动和使部分颗粒破碎, 土体孔隙中的气体迅速排出或压缩, 孔隙体积减少, 从而使路基土形成较密实的结构^[8 9]。碎石级配越好, 素土含量适当, 填料的夯前孔隙率就少, 在夯击能作用下, 路基的夯沉量就越小。

2.3.4 弯沉检测

在本次试验前后, 采用标准弯沉车进行了弯沉检测, 但强夯前后路基的弯沉值均比较离散, 强夯前的一些弯沉结果甚至优于强夯后的弯沉结果。部分弯沉检测数据列于表 6。

表 6 弯沉检测数据表

Tab 6 Experiment results of deflection					
桩号	车道	夯前弯沉值/0.01 mm		夯后弯沉值/0.01 mm	
		左侧	右侧	左侧	右侧
K223+200	单车道	150	25	39	53
K223+204		17	23	140	24
K223+208		18	12	128	33
K223+212		16	14	17	22
K223+216		43	42	45	91
K223+220		69	20	16	43
K223+220	2车道	31	21	18	11
K223+216		34	20	32	32
K223+212		22	55	55	78
K223+208		12	40	36	8
K223+204		21	15	69	30
K223+200		17	16	99	21
K223+200	3车道	42	30	22	63
K223+204		63	75	41	71
K223+208		27	16	19	19
K223+212		34	26	31	32
K223+216		17	22	50	44
K223+220		179	71	28	21
K223+220	4车道	21	14	21	24
K223+216		46	26	6	9
K223+212		16	25	25	46
K223+208		19	11	37	37
K223+204		24	23	89	122
K223+200		109	250	35	38

根据强夯的波动理论, 对于夯点间的表层土, 强夯时会对其产生振松效果。由于本次强夯试验没有进行满夯, 只是进行点夯, 夯点之间的表层土在夯击时被振松, 而且, 弯沉影响深度一般只有表面土层, 对于下部土体无法检测。所以, 当弯沉测量点落在夯点之间土层时弯沉值必然较大; 当弯沉测量点落在夯点上时弯沉值就小, 检测结果必然非常离散。因此, 分析认为采用弯沉结果来评价强夯效果是不适宜的。

3 夯沉量与压实度及夯击能相互关系

一般的强夯工程设计多以承载力为依据, 但对公路路基而言, 我们更关心的是沉降量和压实度。通过计算分析, 要达到规定的沉降标准, 在需要用强夯进行补强加固处理的路段, 其平均夯沉量应达到 20 ~ 36 cm。但如何预估夯沉量却没有一个公认合理的方法。试验发现该段碎石土路基强夯时周边土的隆起量很少, 可以认为夯坑的体积就等于土体夯后孔隙比减小的体积, 据此, 可导出夯前有效影响深度、沉降量及压实度之间的关系。设夯坑上面的直径为 D_0 , m; 夯锤的直径为 D , m; 夯前、夯后土体的加权平均干重度为 γ_0 、 γ_1 , kN/m^3 ; 夯后土体的有效加固半径为 R , m; 有效影响深度为 H , m; 夯沉量为 h_0 , m; 则

$$H=\frac{(D_0^2+D^2+D_0D)}{12R^2(\gamma_1-\gamma_0)}h_0\gamma_0。$$
 (4)

令 $D_0=D=2R$, 则

$$h_0=\frac{(\gamma_1-\gamma_0)}{\gamma_0}H。$$
 (5)

又由于重度可由压实度 K 和最大干重度来表示, 设 K_0 、 K_1 分别为夯实前后的平均压实度, 则式(5)可表示为

$$h_0=\frac{(K_1-K_0)}{K_0}H。$$
 (6)

联立式(2)、式(6), 可得夯击能量和夯沉量之间的关系式为

$$E=10\times\left[\frac{h_0\cdot K_0}{(K_1-K_0)\cdot\alpha}\right]^2,$$
 (7)

式中, α 为修正系数; E 为夯击能量, $\text{kN}\cdot\text{m}$, 其值为 $E=10Wh$; W 为夯锤重, t; h 为夯锤落距, m。

由于本路段中的强夯处理是属于路基的补强加固, 强夯只用来提高路基的压实度。根据更新前公路路基设计规范对路基压实质量的要求, 其平均压实度应普遍在 90% 以上, 然后在此基础上再用强夯进行补强加固, 以此来提高路基的压实度。因此, 取平均

压实度 $K_0=90\%$, 根据式 (6) 可以求得不同有效影响深度、不同的夯沉量下土体的平均压实度, 其计算结果见图 4。

同理, 取平均压实度 $K_0=90\%$, 修正系数 $\alpha=0.51$, 根据式 (7) 可以求出在 $1\,200\text{kN}\cdot\text{m}$ 夯击能量作用下, 也就是有效影响深度为 5.5 m 时, 不同平均压实度所需要的夯沉量, 计算结果如表 7 所示。

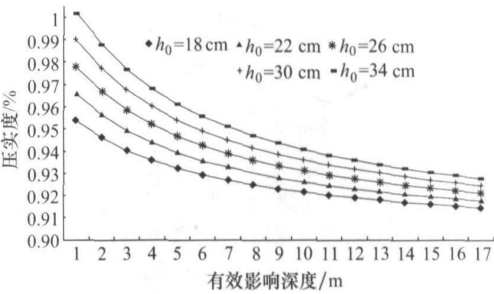


图 4 压实度与有效影响深度关系

Fig 4 Relation of degree of compaction and effective reinforcing depth

表 7 不同压实度所需要的夯沉量
($E=1\,200\text{ kN}\cdot\text{m}$, $\alpha=0.51$)

Tab 7 Required settlement by various degree of compaction
($E=1\,200\text{ kN}\cdot\text{m}$, $\alpha=0.51$)

平均压实度 /%	93	94	95	96
夯沉量 h_0 /m	0.18	0.24	0.30	0.37

由图 4 和表 7 可以看出, 要使在有效影响深度范围内 (5.5 m) 土体的平均压实度提高 3% (也就是平均压实度达到 93% 以上), 其平均夯沉量应该控制在 18 cm 以上。同理, 要使有效影响深度范围内 (5.5 m) 土体的平均压实度提高 5 个百分点 (也就是平均压实度达到 95% 以上), 其平均夯沉量应该控制在 30 cm 以上。结合夯沉量试验结果, 在 $1\,200\text{ kN}\cdot\text{m}$ 夯击能作用下, 夯击数为 3 锤时, 路基的夯沉量超过了 30 cm。在有效影响深度范围内 (5.5 cm), 其平均压实度将达到 95%, 此时的路基压实度应该符合规范和建成后的安全使用要求。同时, 从夯击前后的压实度检测结果 (表 4) 可以看出, 路基压实度都得到了明显的提高, 提高量均超过 5%, 最高可达 9.1%, 且夯后压实度均超过了 95%。试验结果很好的说明了压实度和夯沉量之间的关系, 理论分析和试验结果相吻合。

4 结论

(1) 利用强夯法处理石灰岩碎石路基, 进行补强加固是有效的, 且效果显著。 (下转第 53 页)

组石灰剂量衰减试验, 结果如表 2 所示。

表 1 2 个试验段不同时间灰剂量检测成果

Tab. 1 The measured data of lime content on two test spots during different time period

试验段编号	二次掺灰后 2 d			二次掺灰后 25 d			二次掺灰后 41 d		
	测点数 /个	含灰量均值 /%		测点数 /个	含灰量均值 /%		测点数 /个	含灰量均值 /%	
		原标准	改进标准		原标准	改进标准		原标准	改进标准
K170+680~K170+840	10	5.4	5.4	7	2.4	5.3	11	1.7	4.6
K173+600~K173+740	8	4.6	4.6	10	2.1	4.7	13	1.5	4.3

表 2 石灰土不同龄期石灰剂量测定数据汇总表

Tab. 2 Lime content data of lime stabilized soil of various ages

样品	天数/d									
	4	8	12	16	26	30	37	44	51	58
A	8.3	7.9	6.9	7.2	6.8	5.8	5.8	5.9	5.7	4.6
B	8.1	7.9	7.1	6.9	6.3	6.6	5.6	5.8	5.5	4.4
C	7.8	8.1	6.8	7	6.8	5.7	5.1	5.3	5.3	4.3
D	7.9	7.5	6.7	6.6	6.4	5.5	5.6	5.8	5.2	4.1

表 2 中不同龄期石灰剂量实际上是在掺灰后不同时间测定标准试样的 EDTA 消耗量, 然后在按照规范方法作出的石灰标准曲线上查出对应的灰剂量, 因此其灰剂量变化实际上反映的是 EDTA 消耗量的变化。由表 2 及前述方法可得, 灰土 EDTA 消耗量随掺灰后时间的对数呈线性变化规律。

6 结论

制定高含水量的膨胀土采用二次掺灰施工工艺的灰剂量标准曲线时应该考虑由于石灰与土发生反应后, 不同时间用 EDTA 滴定法测量灰剂量, 消耗的 EDTA 标准溶液体积随时间延长会不断减少的因素。本文试验表明一定含灰量的土体 EDTA 消耗量随掺灰后时间的对数衰减变化规律呈线性关系。采用考虑时间因素后的改良标准曲线, 既能够在任意需要的时间

随时进行改良土中灰剂量的检测, 而且操作方法简单, 总体试验工作量增加不多, 检测结果精度高。

在灰剂量检测过程中, 影响灰剂量检测精度的主要因素是石灰剂量标准曲线的准确性, 而影响石灰剂量标准曲线准确性的最重要的因素是标准试样的制备方法, 因此标准试样的制备程序和方法必须符合改良土实际施工过程。

参考文献:

[1] 莫红艳. 高等级公路路基膨胀土土性改良及施工技术研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2002.

[2] 缪林昌, 钟晓晨, 殷宗泽. 非饱和膨胀土变形规律的试验研究 [J]. 大坝观测与土工测试, 1999, 23 (3): 36—39.

[3] 李健, 孙英学. 高等级公路中的膨胀土研究 [J]. 水利水电科技进展, 1998, 18 (1): 41—46.

[4] 李春华, 孙宇飞, 韩毅. 粘土掺灰的理论及掺拌方法 [J]. 黑龙江交通科技, 2004, 128 (10): 3—5.

[5] JTJ057-94. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程 [S].

[6] 郭大进, 程霞, 陈君, 莫远春, 王太固. 稳定土中水泥或石灰剂量衰减问题的研究 [J]. 公路交通科技, 2002, 19 (5): 39—41.

[7] 向文俊, 刘爱兰, 吴育琦, 等. 改良土二次掺灰工艺的石灰剂量检测方法 [J]. 河海大学学报, 2004, 32 (3): 313—315.

[8] 韩艳芬, 赵蔚东. 关于公路路基石灰土施工中石灰剂量衰减规律的探讨 [J]. 内蒙古林业调查设计, 2000, (增刊): 120—122.

(上接第 49 页)

(2) 根据检测结果, 试验段路基石在 1 200 kN·m 夯击能量下夯击 3 锤, 路基平均夯沉量为 32.3 cm, 路基压实度都得到了明显的提高, 提高量均超过 5%, 最高可达 9.1%, 且夯后压实度均超过了 95%, 达到规范和建成后的安全使用要求。试验结果与理论分析吻合。

(3) 路基填料的级配及素土含量情况直接影响路基的夯沉量, 碎石级配越好, 素土含量适当, 填料的夯前孔隙率就少, 在夯击能作用下, 填土的夯沉量就越小。

(4) 采用弯沉检测来评价强夯效果是不适宜的。

参考文献:

[1] 《地基处理手册》编写委员会. 地基处理手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.

[2] JTJ 013-95. 公路路基设计规范 [S].

[3] JTG D30-2004. 公路路基设计规范 [S].

[4] JTJ 054-94. 公路工程石料试验规程 [S].

[5] 叶书麟. 地基处理工程实例应用手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.

[6] 王成华. 强夯地基加固深度估算方法述评 [J]. 地基处理, 1991, (3): 20—24.

[7] JGJ79-2002. 建筑地基处理技术规范 [S].

[8] 龚晓南. 地基处理新技术 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.

[9] 徐至钧, 张亦农. 强夯与强夯置换法加固地基 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.