DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.02.35

台背新填土水泥碎石桩复合路基路用性能试验研究

谭博盛[1], 邓 超[2]
(1.广东省长大公路工程有限公司 第四分公司, 广东 广州 511431; 2.中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 对湖南省某高速公路盖板通道台背新填土路基水泥碎石桩处置前后路用指标进行现场试验,比较分析水泥碎石桩施工前后路基回弹模量及重型动力触探锤击数变化规律。试验表明:水泥碎石桩可提高新填土路基回弹模量,复合路基回弹模量满足高等级公路回弹模量大于30 MPa的要求;复合路基载荷试验中回弹变形主要发生在第一级卸载和最后一级卸载时,中间各级卸载时回弹变形差异较小,具有类土石混合体路基变形性质;复合路基载荷试验中的总回弹变形均值和中间各级回弹变形均值预测复合路基回弹模量与桩土面积置换率下桩土材料模量得到的复合模量差异较大;水泥碎石桩施工一定程度上增加路基深部土体强度,但桩顶下部1.0~1.5 m范围内,由于桩体施工能量大且上覆土压力不足而发生路基土体扰动破坏。

关键词: 新填土路基; 水泥碎石桩; 回弹模量; 动力触探
中图分类号:U416.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2019)02-0225-06

Experimental study on road performance of retailing backwall new filling subgrade reinforced with cement-gravel pile

TAN Bosheng[1], DENG Chao[2]
(1. *Fourth Branch, Guangdong Provincial Changda Highway Engineering Co., Ltd, Guangzhou* 511431, *China*;
2. *School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha* 410083, *China*)

Abstract: This paper introduces a field test of retailing backwall new filling subgrade reinforced with cement-gravel pile of expressway in Hunan province. The change law of subgrade resilient modulus and data of heavy dynamic penetration were analyzed and contrasted, the tests results indicated that construction of cement-gravel pile can increase subgrade resilient modulus and composite subgrade can meet requirement of high grade highway with resilience modulus greater than 30 MPa. The main rebound deformation were produced in the first and last unloading in loading test of composite foundation, and other unloading performed similar, its deformation property was similar to the soil-rock subgrade. The composite modulus, predicted by the mean value of total rebound deformation or middle-level rebound deformation in the composite subgrade loading test, are greater different to predict under the replacement rate of pile-soil area. The construction of cement-gravel pile increases the soil strength of deep roadbed, but the disturbance and destruction of roadbed soil occur in the range of 1.0 ~ 1.5m under the pile top due to the large construction energy and insufficient overburden soil pressure.

Key words: new filling subgrade; cement-gravel pile; resilience modulus; dynamic penetration

1 研究背景

碎石桩适用于提高软土地基抗液化性能在工程中得到广泛应用,近10年碎石桩土复合地基理论与实践取得了丰硕成果,并在实践研究中得到改进,如包括筋箍碎石桩土复合地基[1]、格栅加筋碎石桩土复合地基[2]的加筋碎石桩土复合地基[3-5]、端夯扩碎石桩土复合地基[6-8]及水泥粉煤灰碎石桩复合地基[9-11]。改进的碎石桩土复合地基的工程应用更加广泛,如建筑领域软土地基加固[12]、交通领域路

收稿日期:2018-09-10; **修回日期**:2018-11-30
基金项目:中南大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017zzts178)
作者简介:谭博盛(1987-),男,湖南涟源人,工程师,主要从事岩土工程方面的科研工作。
通讯作者:邓 超(1989-),男,湖北广水人,工程师,主要从事岩土工程等方面的科研工作。

基沉陷、翻浆、桥头跳车、路基滑移等问题的处置。前述大多是碎石桩软土地基处理加固理论与实践成果,与碎石桩软土复合地基高速公路新填土及预防桥头跳车相比,路基加固碎石桩土复合路基有其独有的特点:如交通领域和建筑领域对碎石桩土复合地基的设计、质量控制指标[13]及地基承载力、变形要求存在差异,能否直接应用于路基加固技术还需进一步研究。路基的回弹模量和弯沉值是路面结构厚度设计的敏感参数之一[14],对高等级路面的设计指标和路面性能影响较大,因此合理的评价和确定路基回弹模量和弯沉意义重大。针对湖南省某高速公路盖板通道台背新填土路基即填即用且尚未完成自重固结的特点,鉴于浆固碎石桩处置地基具有总沉降小、工期短、桩体置换作用明显、工后次固结沉降小等优点[15],本文通过对湖南省某高速公路盖板通道台背新填土路基水泥碎石桩处置前后路基强度指标进行现场试验,研究水泥碎石桩加固处理台背新填土路基的增强效果,可为类似工程提供借鉴。

2 工程概况及现场试验方案

2.1 工程概况

湖南某高速公路是湖南省高速公路规划网中的重要区间,本文试验区选择该高速 K14 + 277 盖板通道台背右幅新填方路基,地基处理若采用异地借方或换填则需高昂的费用,并使工程进度滞后,因此选择开挖土作为路基填料。路基填料经颗粒分析及液塑限试验确定为黏土质砾(GC),级配试验结果如表 1 示,薄片试验及 XRD 衍射试验结果表明黏土质砾由松散块状构造,黑云母不规则片状,粒径较大,出现细粒片状集合产出的伊利石,石英含量14.6%,高岭石 9.9%,地开石 18.6%,云母含量37.6%,斜绿泥石 11.4%,长石 7.9%,如图 1、2 所示。室内试验得到其天然含水率为 23.51% ~ 24.42%,塑限 27%,液限 53%,最佳含水率 14.8%,最大干密度 1.847 g/cm^3,掺配少量碎石等,且该路段路基顶的回弹弯沉设计值为 200(0.01 mm),压实度符合要求,但弯沉无法满足路基设计要求。设计采用桩径 500 mm 振动沉管水泥碎石桩(P.O32.5 水泥掺量 5%,碎石粒径 20 ~ 50 mm,质地坚硬、具有一定的强度、水稳定性好、不易风化且级配良好的石料)进行加固处理,水泥碎石桩对路基土具有置换、改良、排水、约束作用,以提高台背新填土路基强度和有效预防桥头跳车,桩长 6.5 ~ 7.2 m,桩位平面布置及路基剖面图如图 3 所示。

2.2 现场测试试验方案

试验路基为新填土路堤,由黏土质砾(含少量碎石)作为路基填料,填料在最佳含水率下按 0.15m 分层填筑压实至路基设计标高,填筑压实过程严格按照规范要求以控制路基压实质量,故不考虑地下水影响,近似认为基顶下同深度处一定平面范围内路基土具有相同的物理力学特性。同时,为避免水泥碎石桩施工前路基土相关测试对水泥碎石桩施工后路基土测试产生影响,水泥碎石桩施工前后路基土试验对比测试点距离为 0.5 m。各试验点布置如表 2、图 3 示。

表 1 路基填料级配筛分试验结果

试验组数	各粒组(mm)的平均质量/g						砾粒质量分数/%	砂粒质量分数/%	细粒质量分数/%
	≥5	(2,5)	(0.5,2)	(0.25,0.5)	(0.075,0.25)	<0.075			
5	1.44	109.34	244.08	77.58	76.62	240.27	14.8	53.1	32.1

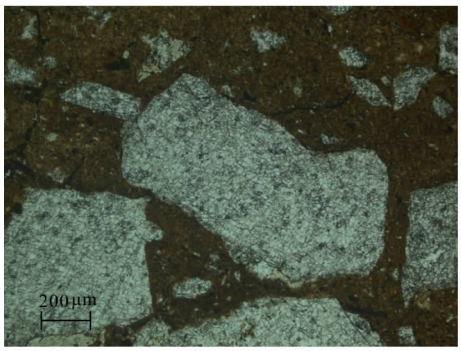


图 1 黏土质砾薄片图

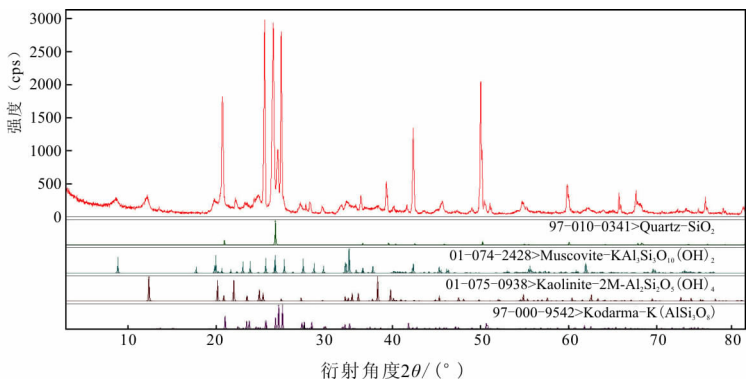
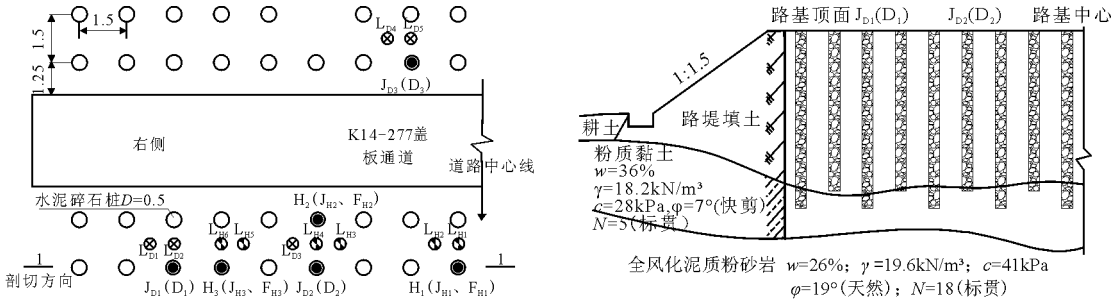


图 2 黏土质砂 XRD 粉晶衍射曲线图



(a)桩位平面图　　(b)路基1-1剖面图

图 3　桩位平面及路基剖面图(单位:m)

表 2　试验点布置

测试名称	测试编号			
	工前路基土	工后路基土	龄满水泥碎石桩	单桩复合路基
回弹模量测试	H_1、H_2、H_3	L_{H1}、L_{H2}、L_{H3}、L_{H4}、L_{H5}、L_{H6}	J_{H1}、J_{H2}、J_{H3}	F_{H1}、F_{H2}、F_{H3}
动力触探	D_1、D_2、D_3	L_{D1}、L_{D2}、L_{D3}、L_{D4}、L_{D5}	J_{D1}、J_{D2}、J_{D3}	

注:工前路基土测试试验为路基土填筑压实完成后,水泥碎石桩施工前,对路基土进行的现场相关测试试验;工后路基土测试试验为水泥碎石桩施工龄满后,对路基土进行的相关测试试验;单桩复合路基为测试试验水泥碎石桩龄满后形成的复合路基的相关测试试验。

2.2.1　回弹模量测试　在路基压实填筑完成,依据《公路路基路面现场测试规程》(JTG E60-2008)[16],采用承载板法测试水泥土碎石桩施工前后路基土回弹模量,为防止填筑路基表面受外界条件影响,测试点选在基顶以下 300 mm。水泥碎石桩施工前,在桩体施工布置点进行回弹模量测试,水泥碎石桩施工完成至龄满后对桩体进行回弹模量测试,工后路基土回弹模量测试时,为减小施工扰动对测试结果的影响,测试深度为基顶下 1.0 m。

(1)试验设备及加载方法。试验采用千斤顶附设加劲横梁反力法,由标准测试车一台(后轴重 100 kN)、弯沉仪(2 台)、百分表(精度 0.01 mm)、现场测试装置(直径 300 mm 厚 20 mm 的承载板、千斤顶测力环、垫块、加劲横梁)组成。将现场测试装置安放于标准测试车尾部车底横梁中间下方,构成加载反力系统,两台弯沉仪测头分别置于承载板两侧立柱上。荷载采用油压千斤顶提供,并由测力环读数控制,如图 4 示。

(2)加载及结果处理。试验装置安装完毕,预压 0.05 MPa,持续时间 1 min,卸载预压后百分表对零,再进行分级加载和卸载。采用规范规定最大施加荷载达 0.70 MPa,加载分为 9 级,第一级为 0.05 MPa,每级增加 0.05 MPa 至第四级荷载 0.20 MPa,以后每级增量 0.10 MPa,换算后控制测力环读数变动,当荷载等级达到 0.70 MPa 或回弹变形值大于 1 mm 时试验停止。测试结果利用文献[16]中公式 T0943-1~5 计算得到回弹模量值。



图 4　回弹模量测试试验



图 5　动力触探试验

在考虑现场加载条件下,近似以桩土单元体[1,17]来进行水泥碎石桩土复合地基变形分析,对单桩复合地基回弹模量测试,即以现场静载荷试验尺寸为 1.0 m×1.0 m×0.02 m 刚性承载板进行复合地基承载力测试,利用每级卸载回弹变形均值,通过半无限弹性空间体方形刚性承载板沉降计算公式反算近似得到回弹模量。采用混凝土堆载法构成加载反力系统,加载采用一个油压千斤顶,千斤顶的中心位于承压板中心,加载量通过油压传感器控制,变形通过对称布置于承压板的 4 个量程为 50 mm 位移传感器测量,其分辨力不小于 0.01 mm,4 个测试结果取均值。回弹模量测试前承载板采用 100~200 mm 中砂找平,使荷载板紧贴所测试的复合地基。预估最大加载值为 300 kN,分为 8 级加载,每级加载量为 37.5 kN。卸载级数可为加载级数的一半,等量进行,每卸一级,间隔 30 min,读记回弹量,待卸完全部荷载后间隔 3 h 读记总回弹量,本次试

验卸载级数为 5 级,每级卸载值为 60 kN。

2.2.2 重型动力触探 根据《铁路工程地质原位测试规程》(TB 10018 -2018)[18]对水泥土碎石桩施工前后路基土及龄期满 30 d 水泥碎石桩进行重型动力触探。现场测试时采用地质钻机起吊重锤,如图 5 所示,锤重 63.5 kg ±0.5 kg,落距 76 cm ±2 cm,探头直径 74 mm,锥角 60°,探头截面积 43 cm^2,探杆直径 42 mm,贯入深度 10 cm 时的锤击数 $N_{63.5}$,测试路基土及水泥碎石桩承载性能。

3 试验结果及分析

3.1 回弹模量测试结果

路基土填筑完成,在水泥碎石桩预施工位置进行回弹模量测试,荷载式 P 与回弹变形 L 的关系如图 6 所示。图 6 表明较低荷载等级下回弹变形超过 1.0 mm,该类新填土路基回弹模量不满足规范规定高速路基回弹模量不小于 30 MPa 的要求。水泥碎石桩施工后,同区域路基土回弹模量测试结果见图 7 所示,图 7 表明水泥碎石桩施工振动一定程度上可提高路基土顶下 1.0 m 范围路基土回弹模量。

为探究水泥碎石桩施工龄满后形成的桩土复合路基复合回弹模量,通过承载板法加卸载测试单桩复合路基的荷载 -沉降变化,得到 $P-S$ 曲线及分级卸载 60 kPa 下分级回弹变形,如图 8、9 所示。对比复合路基 F_{H1}、F_{H2}、F_{H3}分级卸载下的回弹变形 L 表明该新填土单桩复合路基回弹变形主要发生在第一级卸载和最后一级卸载时,中间各级卸载回弹变形差异较小,具有类土石混合体路基沉降变形性质[19]。

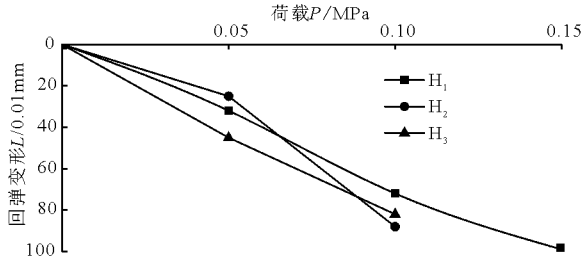


图 6 荷载 P 与回弹变形 L 的关系

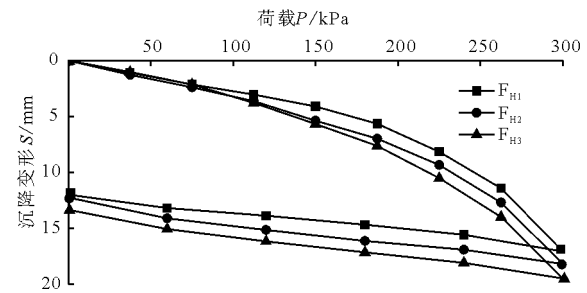


图 8 单桩复合路基载荷试验曲线

利用各级卸载回弹变形均值,通过半无限弹性空间体方形刚性承载板沉降计算公式反算近似得到回弹模量。当采用承载板法进行复合路基回弹模量测试时,考虑总回弹变形大于 1.0 mm 与规范中 d =300 mm 承载板回弹变形值不超过 1.0 mm 的差异,同时考虑承载板法复合路基 $P-S$ 测试过程中塑性变形对弹性变形的影响,可用中间各级卸载回弹变形均值近似计算得到回弹模量。即:

$$E_{复} \approx \frac{1-u^2}{\bar{L}}\omega_r p b \tag{1}$$

式中:u 为泊松比;ω_r 为沉降影响系数;p 为分级荷载;b 为荷载板宽或直径;$\bar{L}$ 为总回弹变形均值或中间各级卸载回弹变形均值。将公式(1) 计算结果与利用桩土面积置换率 m 概念下桩土材料模量 E_p、E_s 得到的 $E_{复}=mE_p+(1-m)E_s$[2-3] 进行对比。因此回弹模量测试时需对多根水泥碎石桩进行回弹模量测试。按规范要求测试 J_{H1}、J_{H2}、J_{H3}单桩荷载 -回弹变形,其结果如图 10 所示,图 10 表明水泥碎石桩施工后,利用复合路基强度测试荷载板法 $P-S$ 测试结果预估复合路基回弹模量,均满足高速公路路基回弹模量不小于 30 MPa 的要求,最小值为 45 MPa,近似反算弯沉显然满足设计弯沉 200(0.01 mm)的要求,但总回弹变形均值和中间各级回弹变形均值预测复合路基回弹模量与当前桩土面积置换率 m 概念下桩土材料模量得到的复合模量差异较大,后者为前者的 2.0 倍左右,这是由于前者在测试过程中桩土体弹塑性变形使得回弹变形过大,因此反算得到回弹模量较小。

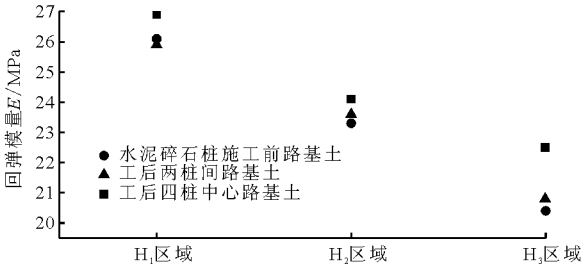


图 7 施工前后路基土回弹模量 E 测试结果

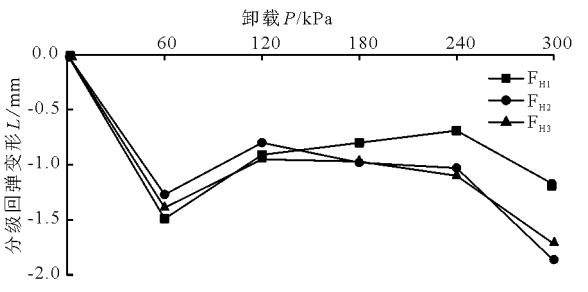


图 9 分级回弹变形

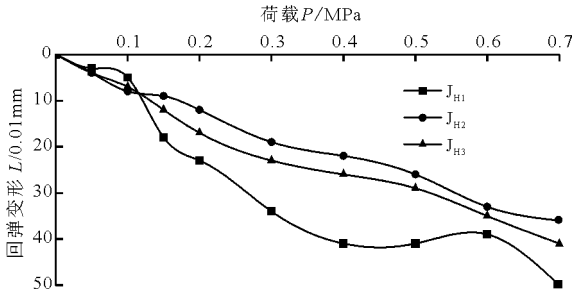


图 10　水泥碎石桩荷载 – 回弹变形关系曲线

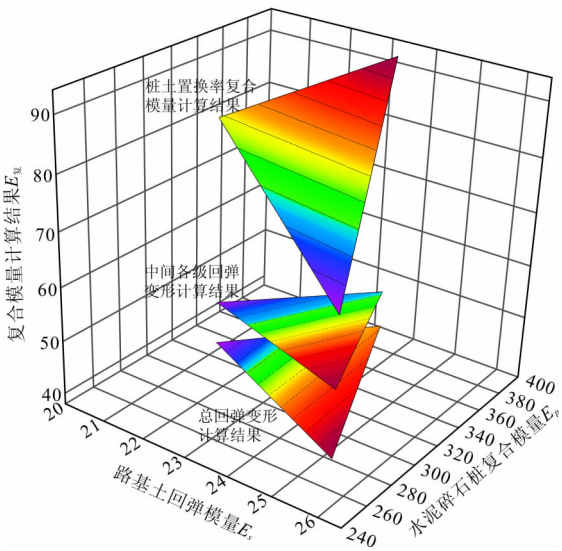


图 11　不同预估方法下的计算结果对比

3.2　动力触探

路基填筑完成，在水泥碎石桩预施工位置 D_1、D_2、D_3（图 3（a）所示）进行重型动力触探试验，结果如图 12 所示，该新填土路基动力触探锤击数在 2、3 击分布点较多，少量达到 4 击，分析认为是新填土中夹杂少量碎石的原因。

水泥碎石桩施工龄满后对 J_1、J_2、J_3（图 3（a）所示）水泥碎石桩进行动力触探试验，结果如图 13 所示，图 13 表明水泥碎石桩施工质量满足设计要求锤击数大于 7 击的要求，桩顶 1.0 m 范围内动力触探锤击数与桩体下部差异较大，即水泥碎石桩的桩顶强度高，符合水泥碎石桩复合路基的受力变形规律[12,15]对水泥碎石桩的强度要求。

水泥碎石桩施工完成龄满后，分别在原动力触探测试点 D_1、D_2、D_3 附近的 L_{D1}、L_{D2}、L_{D3}、L_{D4}、L_{D5}（图 3（a）所示）进行路基土动力触探试验，比较施工前后路基土动力触探锤击数变化情况。比较图 12、13 可知水泥碎石桩施工后，由于碎石桩的置换、改良、排水作用使得路基土强度提高，因此动力触探锤击数在 3、4 分布点比较多，甚至局部点锤击数达到 5、6。

为更好的比较同区域路基土施工前后动力触探锤击数变化情况，分别在图 15、16、17 中表示同区域（图 3（a）所示）地基土动力触探锤击数，结果表明水泥碎石桩的施工一定程度上增加了路基深部土体的强度，锤击数分布较高点更多，但桩顶下部 1.0 m 范围内，最大可达 1.5 m，路基土动力锤击数较未施工前分布锤击数偏低 2 分布点更多，局部点锤击数仅 1 击，这与文献[6]中 0.8 m 结论基本一致。主要是因为水泥碎石桩施工时能量大，上覆路基土压力不足，产生局部隆起变形，路基土受到施工等因素的影响发生扰动破坏，导致挤密作用不明显，上部路基土变得松散，因此在水泥碎石桩施工过程中可采取一定措施防止桩体上部土体的扰动，如钢套筒水泥碎石桩或格栅钢套筒水泥碎石桩[20]。

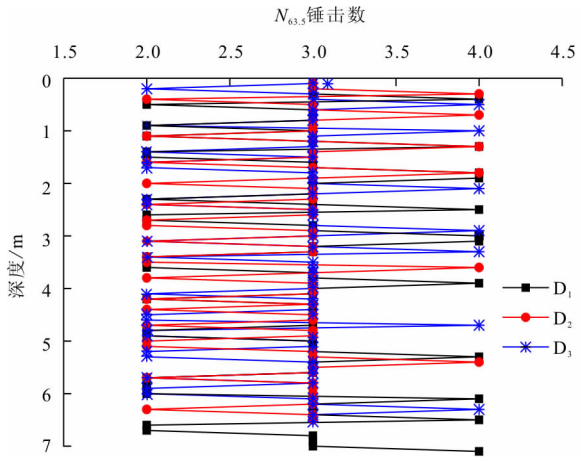


图 12　水泥碎石桩施工前路基土动力触探结果

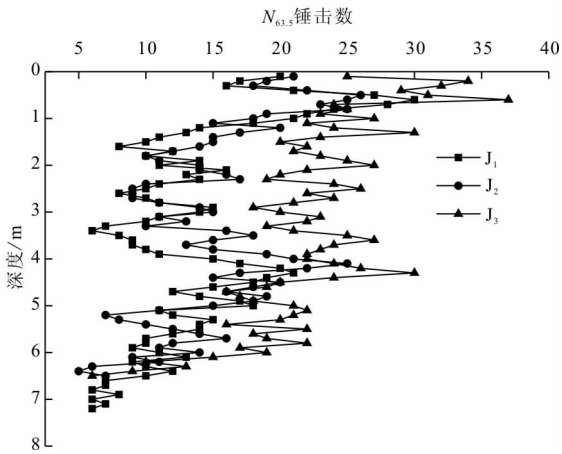


图 13　水泥碎石桩动力触探结果

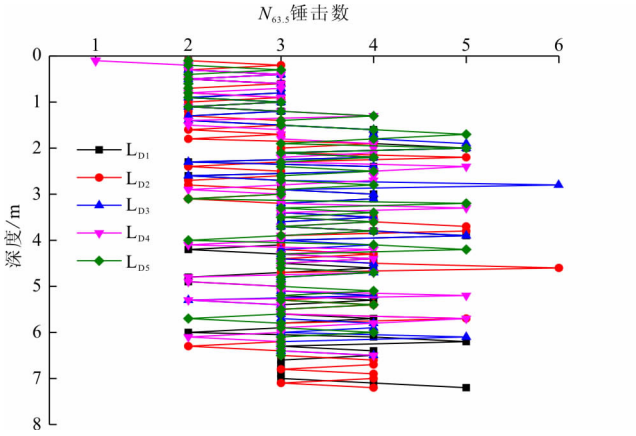


图 14 水泥碎石桩施工后路基土动力触探结果

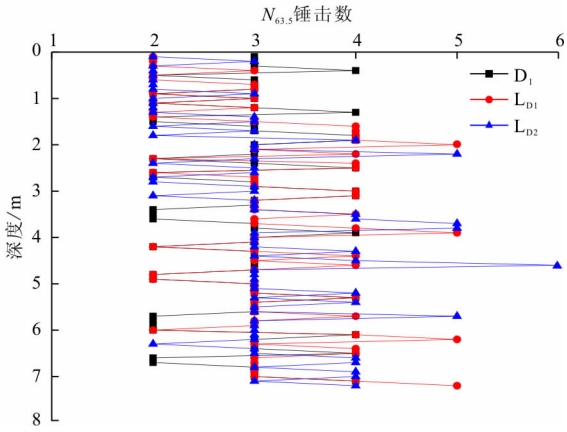


图 15 D_1 区域路基土动力触探结果

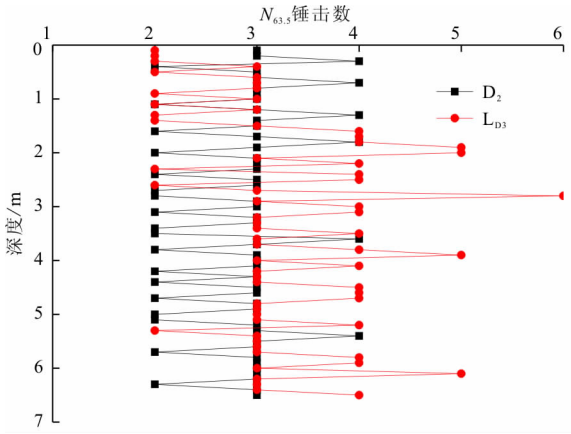


图 16 D_2 区域路基土动力触探结果

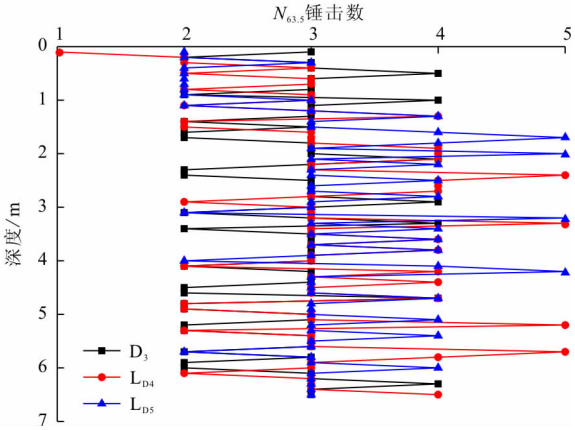


图 17 D_3 区域路基土动力触探结果

4 结 论

对湖南省某高速公路盖板通道台背新填土路基水泥碎石桩处置前后路用指标进行现场试验，比较分析水泥碎石桩施工前后路基回弹模量及重型动力触探锤击数变化规律，得到如下结论：

(1)水泥碎石桩的施工振动一定程度上可提高路基土面下 1.0 m 范围路基土回弹模量；

(2)新填土水泥碎石桩复合路基载荷试验中回弹变形主要发生在第一级卸载和最后一级卸载时，中间各级卸载回弹变形差异较小，具有类土石混合体路基沉降变形的性质；

(3)水泥碎石桩施工后的新填土复合路基回弹模量满足高等级公路不小于 30 MPa 的要求，反算弯沉满足设计弯沉 200(0.01 mm)的要求，但总回弹变形均值和中间各级回弹变形均值预测复合路基回弹模量与当前桩土面积置换率 m 概念下桩土材料模量得到的复合模量差异较大，后者为前者的 2.0 倍左右。

(4)水泥碎石桩施工在一定程度上增加了路基深部土体强度，$N_{63.5}$ 锤击数分布较高点更多。在桩顶下部 1.0～1.5 m 范围内，可采用格栅钢套筒或钢套筒水泥碎石桩以防止由于桩体施工时发生路基土体扰动破坏。

参考文献：

[1] 曹文贵，赵聚才，贺 敏，等. 柔性基础下筋箍碎石桩复合地基变形机理及其沉降分析方法[J]. 岩土工程学报，2014，36(5)：818－826.

[2] 高明军，刘汉龙，丁选明，等. 竖向管式格栅加筋碎石桩承载力计算方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版)，2011，12(6)：649－653.

[3] 陈建峰，王 波，魏 静，等. 加筋碎石桩复合地基路堤模型试验[J]. 中国公路学报，2015，28(9)：1－8.

[4] CHUNGSIK Y . Performance of geosynthetic－encased stone columns in embankment construction：numerical investigation. [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering，2010，136(8)：1148－1160.

(下转第 238 页)

大,灌水定额 450 m^3/hm^2 和施氮量 138 kg/hm^2 等水氮耦合处理平均耗水强度最大。

参考文献:

[1] 钟 芹. 打瓜籽蛋白的提取及理化性质和应用[D]. 石河子:石河子大学, 2015.

[2] 张义晖, 田丽萍, 薛 琳,等. 打瓜干皮中多糖的含量测定及降血糖作用机制[J]. 医药导报, 2017, 36(5):477 - 480.

[3] 常 成. 塔城地区打瓜产业发展调研报告[J]. 新疆农机化, 2011(6):40 - 42.

[4] 郝邵英. 浅析阿勒泰地区打瓜种植技术[J]. 农民致富之友, 2016(18):176.

[5] 苏宏超, 沈永平, 韩 萍,等. 新疆降水特征及其对水资源和生态环境的影响[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3):343 - 350.

[6] 田 龙, 李锡铜, 邝海菊. 基于农业用水的新疆水资源利用策略研究[J]. 山西科技, 2017,32(5):30 - 32.

[7] 毛国新, 李 源. 寒冷区高密度种植籽瓜膜下滴灌技术[J]. 水利科技与经济, 2008, 14(4):263 - 266.

[8] 刘程惠, 胡文忠, 宋颖凡, 等. 超声波提取打瓜籽油工艺优化[J]. 食品与发酵工业, 2014,40(12):223 - 229.

[9] 张 芮, 王旺田, 吴玉霞,等. 水分胁迫度及时期对设施延迟栽培葡萄耗水和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017,33(1):155 - 161.

[10] 谭军利, 田军仓, 王西娜,等. 底墒差异对压砂地西瓜耗水规律的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014,32(1):94 - 99.

[11] 高慧娟. 厚皮甜瓜耗水规律与调亏灌溉效应研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2010.

[12] 宋 文, 张玉龙, 韩 巍,等. 渗灌灌水定额对温室黄瓜产量和水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8):61 - 66.

[13] 桑艳朋. 膜下滴灌条件下甜瓜田间需水规律的研究[D]. 石河子:石河子大学, 2005.

[14] 郑国保, 张源沛, 孔德杰,等. 不同灌水量对日光温室黄瓜需水规律和水分利用的影响[J]. 节水灌溉, 2012(1):22 - 24 + 27.

[15] 孔德杰, 郭生虎, 张源沛,等. 不同灌水次数对温室黄瓜耗水规律及水分利用效率的影响[J]. 长江蔬菜, 2011(4):43 - 46.

[16] 郭生虎, 孔德杰, 张源沛,等. 不同灌水量对日光温室黄瓜耗水规律及水分利用效率的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 29(36): 20568 - 20570.

[17] 庞秀明. 干旱荒漠绿洲区西瓜耗水规律与调亏灌溉模式的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2005.

[18] 陈凯丽, 赵经华, 黄红建,等. 不同滴灌灌水定额对小麦的耗水特性和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(3):65 - 68 + 84.

[19] 艾鹏睿, 赵经华, 马英杰,等. 不同灌水定额下北疆地区滴灌打瓜耗水规律的研究[J]. 节水灌溉, 2016(11):39 - 43.

(上接第 230 页)

[5] KHABBAZIAN M , KALIAKIN V N , MEEHAN C L . 3D numerical analyses of geosynthetic encased stone columns[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2012,35(12):61 - 68.

[6] 叶朝良,刘尧军,冯怀平. 端夯扩碎石桩复合地基现场试验研究[J]. 长江科学院院报,2016,33(2):62 - 66.

[7] 陈建峰,韩 杰. 夯扩碎石桩单桩载荷试验数值模拟[J]. 岩土工程学报,2009,31(9):1366 - 1370.

[8] 陈建峰,韩 杰. 夯扩碎石桩群桩承载性状研究[J]. 中国公路学报,2010,23(1):26 - 31.

[9] XIAO D, JIANG G L, LIAO D, et al. Influence of cement - fly ash - gravel pile - supported approach embankment on abutment piles in soft ground[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018,10(5):977 - 985.

[10] ZHANG Chonglei, JIANG Guanlu, LIU Xianfeng, et al. Lateral displacement of silty clay under cement - fly ash - gravel pile supported embankments: Analytical consideration and field evidence. Journal of Central South University ,2015,22(4):1477 - 1489.

[11] 刘 创,张可能,刘 源. 红黏土地层微型 CFG 桩复合地基试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(1):194 - 196 + 202.

[12] 王 双,王 睿,杨 彪,等. 变荷载作用下碎石桩复合地基固结简化分析[J]. 岩土力学,2015,36(1):34 - 40.

[13] 马培建,徐陆军. 城镇道路路基质量主控指标符合性研究[J]. 黑龙江交通科技,2017,40(9):9 - 10.

[14] 黄 拓,昌振东,漆 帅. 路面结构的路基刚度提高方法[J]. 中南大学学报(自然科学版),2017,48(10):2777 - 2782.

[15] 闻世强,陈育民,丁选明,等. 路堤下浆固碎石桩复合地基现场试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(5):1559 - 1563.

[16] 中华人民共和国运输部. 公路路基路面现场测试规程:JTG E60 - 2008[S]. 北京:人民交通出版社,2008.

[17] ALAMGIR M, MIURA N, POOROOSHASB H B, et al. Deformation analysis of soft ground reinforced by columnar inclusions [J]. Computers and Geotechnics, 1996, 18(4):267 - 290.

[18] 国家铁路局. 铁路工程地质原位测试规程:TB 10018 - 2018[S]. 北京:中国铁道出版社,2018.

[19] 邹团结,周德泉,栗小祜,等. 隧道弃碴压实变形规律试验研究[J]. 公路工程,2016,41(2):191 - 195.

[20] 贺成斌,赵明华,马缤辉,等. 格栅套筒加筋碎石桩复合地基沉降计算方法[J]. 水利水电科技进展,2017,37(2):88 - 94.