

冲击碾压处理滨海粉细砂地基试验研究

谭 鹏¹, 杨 戈¹, 吕 奋², 资西阳²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 海南省公路勘察设计院, 海南 海口 570206)

摘要: 依托海南省某滨海旅游公路, 利用标准贯入试验、重型动力触探试验等原位测试和压实度、弯沉等检测结果, 以及地下水位、孔隙水压力和地表沉降等实时监测数据, 对滨海粉细砂地基进行冲击碾压的试验研究, 探讨冲击碾压处理滨海粉细砂地基的有效性以及合理的施工工艺。研究结果表明, 采用冲击碾压有效处理粉细砂地基的关键在于以浅层饱和粉细砂地基中超静孔隙水压力消散率至少达到70%作为实施下一轮次冲碾的控制标准。合理的施工工艺不仅能有效提高粉细砂地基强度, 而且可消除浅层粉细砂地基的液化。冲击碾压后, 2 m深度范围内粉细砂地基土的压实效果显著。

关键词: 粉细砂地基; 冲击碾压法; 施工工艺; 监测数据; 原位测试

中图分类号: TU441

文献标志码: A

Experimental Research on Treatment of Silty-fine Sand Foundation with Impaction and Grind Method(IGM)

TAN Peng¹, YANG Ge¹, LÜ Fen², ZI Xiyang²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Hainan Provincial Highway Survey and Design Institute, Haikou 570206, China)

Abstract: Based on a coastal tourism highway of Hainan Province, an experimental research was made into the treatment of silty-fine sand foundation with impaction and grind method (IGM). In-situ tests (SPTs, DPTs), compaction test, deflection test and real-time monitoring data of groundwater level, pore water pressure and surface settlement were adopted to discuss the effectiveness and construction technology of the silty-fine sand foundation with the impact roller compaction method. The results show that the key to an effective treatment of silty-fine sand foundation with impaction and grind method is to take the excess pore water pressure dissipation rate at least 70% in saturated silty-

fine sand shallow foundation as the control standard of next round of the impact roller compaction. The reasonable construction technology not only can effectively improve the strength of silty-fine sand foundation, but also can eliminate liquefaction shallow silty-fine sand foundation. After the treatment, the subsoil up to the depth of 2 m is well improved.

Key words: silty-fine sand foundation; impaction and grind method(IGM); construction technology; monitoring data; in-situ testing

滨海地区的公路建设多位于粉细砂地基之上。天然的粉细砂地基承载力较低, 在一定的外部荷载作用下易产生过大的变形或不均匀沉降; 此外, 滨海地区地下水位较高, 粉细砂地基受到地下水影响处于饱水状态, 加之上部交通动载作用, 很可能产生地基液化现象。因此, 如何处理粉细砂地基是滨海地区公路建设面临的一个共同难题。

滨海地区粉细砂地基分布广泛, 传统的强夯、振冲或者水泥搅拌桩等地基加固技术无疑会大幅度增加工程造价, 延长工期。冲击碾压技术是利用冲击轮的连续夯实作业对碾压面施加冲击作用以及冲击轮举升过程中角部对碾压面施加巨大揉搓作用, 来实现压实填料或加固地基的目的^[1]。冲击与揉搓的复合作用使得压实厚度或加固深度明显大于振动压路机等传统振动压实设备的处理效果。粉细砂地基经过冲击碾压处理, 可在粉细砂地基浅层形成一个硬壳层, 从而为其上的公路路基和路面结构提供必要的强度和刚度。此外, 冲击碾压法比强夯法等传统的动力压实技术更高效、更经济, 因此已广泛应用于黄土、粉土、软土等地基处理^[2-3]。

目前, 尚无有关公路冲击碾压方面的规范以及应用冲击压路机大规模处理滨海粉细砂地基的先

收稿日期: 2013-02-26

基金项目: 海南省交通科技项目(JT20120898010)

第一作者: 谭 鹏(1984—), 男, 博士生, 主要研究方向为道路与机场工程。E-mail: tanpeng339@126.com

通讯作者: 吕 奋(1966—), 男, 研究员, 主要研究方向为公路勘察和设计。E-mail: xiaoyao0405@163.com

例。现行的《公路冲击碾压应用技术指南》(2005)^[4]

对粉细砂地基冲击碾压具体施工参数(包括运行速度、碾压遍数、冲压机型号等)没有明确要求,因此在大规模对滨海粉细砂地基进行冲击碾压处理前,拟选择代表性区域进行现场试验,在试验过程中进行地下水位、孔隙水压力和地表沉降的监测,并进行标准贯入试验、重型动力触探试验以及压实度和弯沉检测,以检验地基处理效果。通过现场试验段的冲击碾压效果,探讨冲击碾压处理滨海粉细砂地基的有效性,并在此基础上提出相应的施工工艺。

1 冲击碾压方案

1.1 试验段概况

经过勘测^[5],滨海地区地表大量覆盖第四系阶地粉土质砂、含细粒土细砂等海相沉积层,主要成分为石英质细砂、粉粒,含少量中砂及黏粒。综合考虑场地等因素,选取长约100 m,宽约30 m的路段为试验段。试验段地基分为3层,各层的详细土质特征和土层的物理力学参数如表1和表2所示。

表1 试验段地基土质特征

Tab.1 Soil characteristics of the test section

土层编号	土质类型	地层厚度	土质特征	F/kPa
①	粉土质砂	2.0 m左右	灰白色,松散,以石英质细砂为主,含10%左右粉粒和少量植物根系	130
②	粉土质砂	3.2 m左右	灰白色,湿,稍密,以石英质中细砂为主,含较多砾砂和15%左右黏粒、粉粒	150
③	含砂高液限粉土		青灰色,湿,可塑,以粉粒为主,含30%左右石英质中细砂,见少量砂岩碎块	150

注:F指地基土的承载力基本容许值。

表2 试验段土层的物理力学特性指标

Tab.2 Indexes of physico-mechanical properties of the test section

层号	湿密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙比	液限/%	塑性指数	压缩模量/ MPa
①	1.9~2.2	1.5~1.7	0.45~0.68	14.6~23.0	6.8~11.2	6.2~27.1
②	2.0~2.1	1.6~1.8	0.56~0.69	19.8~23.3	8.9~13.2	20.1~34.2
③	2.0~2.2	1.7~1.9	0.49~0.88	52.7~86.9	17.9~26.4	6.1~9.8

1.2 试验方案

选定试验路段并进行清表工作以后,在粉细砂地基上铺筑40 cm厚的碎石土,并在试验段两侧开挖了深1 m,宽1 m的临时排水沟。40 cm厚的碎石土层主要起到3个作用:①天然粉细砂地基的承载力较低,冲压机无法正常冲碾,碎石土层可形成施工作业平台,便于冲压机正常工作;②40 cm厚的碎石土层可有效防止冲碾过程中地下水位过快地溢出地

表而影响施工;③公路建成之后,40 cm厚的碎石土层能有效阻断地下毛细水的入渗,防止基底含水量过大。为实时掌握冲碾过程中地基土的状态,冲碾前在试验段地基内埋设了地下水位管和孔隙水压力计,孔压监测点共12个,每个监测点分别沿2,4,7 m深度埋设孔压计,地下水位监测点共4个,埋深为10 m。试验段监测元件的详细埋设情况如图1所示。

考虑到粉细砂的渗透性比黏性土大以及现场排

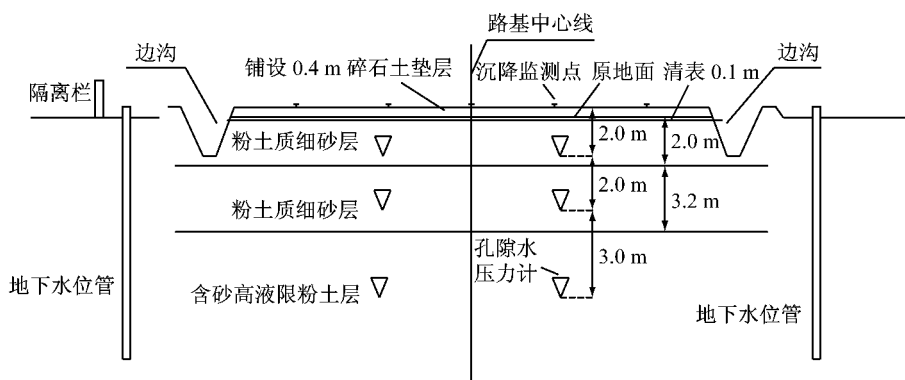


图1 监测元件埋设位置

Fig.1 The position of the embedded monitoring element

水问题,提出了“冲碾轮次+冲碾遍数+冲碾间隔时间”的试验方案,具体的冲碾轮次、每轮次的冲碾遍数以及每轮次间的间隔时间通过现场监测数据和地基土的现场情况确定。每轮次结束后,监测沉降观测点的沉降值。在轮次间隔期间,多次监测地下水位和孔隙水压力,及时掌握超静孔压消散率,确定冲碾间隔时间。试验段共进行了3轮(3遍+5遍+3遍)冲击碾压试验。为检测冲击碾压对粉细砂地基的压实效果,在冲击碾压试验前后对试验段进行了标准贯入试验和重型动力触探试验,并在试验结束后对地表进行了压实度和弯沉检测。

试验段选择3边轮冲击压路机作为碾压工具,

该设备重34 t,压实轮重16 t,最大振幅22 cm,碾压轮宽0.9 m,两轮间隙1.2 m。由于轮隙间距为1.2 m,为防止漏压,冲碾过程中完成一次全轮宽范围内(3 m)的碾压至少需要3次错轮,每次错轮重叠20 cm。为尽可能降低冲击碾压可能导致的粉细砂振动液化风险,冲压过程中将冲压机的行驶速度严格控制在 $10\sim 12\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

2 监测结果与分析

2.1 地下水位监测结果与分析

地下水位监测结果如表3所示。

表3 冲击碾压过程中地下水位的变化

Tab.3 The variations of underground water level during IGM treatment

轮次	遍数	工况	水位标高/cm				平均值
			K21+620 断面		K21+680 断面		
			地基左侧	地基右侧	地基左侧	地基右侧	
1	3	冲碾前	-92.5	-114.0	-95.5	-130.5	-108.1
		冲碾后	-38.0	-67.0	-63.0	-91.0	-64.8
		上升高度/cm	54.5	47.0	32.5	39.5	43.4
2	5	冲碾前	-73.0	-97.0	-71.0	-107.0	-87.0
		冲碾后	-44.0	-64.0	-57.0	-86.0	-62.8
		上升高度/cm	29.0	33.0	14.0	21.0	24.2
3	3	冲碾前	-83.0	-100.0	-87.0	-120.0	-97.5
		冲碾后	-62.0	-83.0	-62.0	-105.0	-78.0
		上升高度/cm	21.0	17.0	25.0	15.0	19.5

冲碾第1轮与第2轮之间间隔24 h,因天气因素第2轮与第3轮之间间隔48 h。由地下水位监测数据可知,冲碾前地下水位基本保持在冲碾工作面下1 m左右。冲碾过程中,地下水位上升明显。每轮次冲碾后地下水位分别上升了43.4、24.2和19.5 cm。此外,K21+620断面路基左侧在第1轮冲碾结束后,地下水位距冲碾面仅38 cm,说明此监测点地下水位已经进入了碎石土垫层中,因此第1轮次在冲碾3遍后停止。碎石土渗透系数较粉细砂小,40 cm厚的碎石土层不仅可以在冲碾过程中防止地下水位溢出地表,而且可以在公路运营期间有效阻断地下毛细水的入渗。

2.2 孔隙水压力监测结果与分析

每轮冲碾前后各监测点孔隙水压力监测结果如表4所示;每轮次后,各监测点超静孔隙水压力消散率的计算结果如表5所示。试验期间,为确定孔隙水压力随时间的消散情况,在第2轮结束后,多次对孔隙水压力进行监测,监测结果如图2所示。

由表4和表5可知,2 m和4 m深度处的孔隙水压力在冲碾过程中变化显著,且间隔24 h后超孔隙

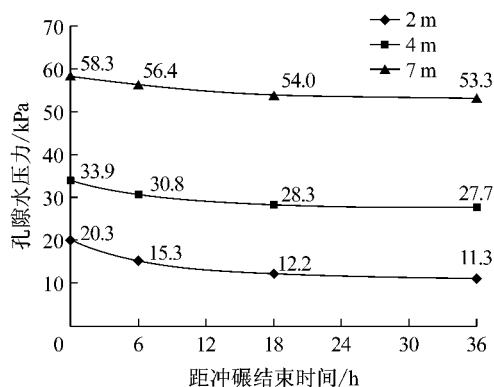


图2 冲碾后孔隙水压力随时间的消散情况(第2轮)

Fig.2 Pore water pressure dissipation situation over time after IGM treatment(Second round)

水压力消散率均在70%以上;而7 m深度处的孔隙水压力变化较小。结合冲击碾压过程中现场碎石土施工作业面情况分析,当超孔隙水压力消散不够时,继续进行冲击碾压会导致地下水位快速上升,碎石土表面会逐渐出现纵向和横向裂缝,若继续冲压,粉细砂地基局部出现振动液化的可能性增大;当超孔隙水压力消散率到70%后再进行冲击碾压,碎石土表面几乎不会出现开裂现象。因此,对于滨海粉细砂

地基,可采用超静孔隙水压力消散率是否达到 70% 作为能否进行下一轮次冲碾的标准。根据现场试验数据可知,在地基两侧设置了 1 m 深临时排水沟的前提下,冲击碾压的间隔时间为 1 d。

随着冲碾轮次的增加,2 m 和 4 m 深度处孔隙

水压力在冲碾过程中的上升幅度明显减小,说明在孔隙水压力消散良好的情况下,冲碾对粉细砂地基起到了加固作用。粉细砂渗透系数较黏性土大,但现场排水通道仅限于地基两侧的临时排水沟,因此粉细砂地基土的孔隙水压力消散明显偏慢。

表 4 冲击碾压孔隙水压力监测结果

Tab.4 The monitoring results of pore water pressure during IGM treatment

轮次	遍数	孔压计 深度/m	监测 时间点	孔隙水压力/kPa			
				K21+620 断面		K21+680 断面	
				地基左侧	地基右侧	地基左侧	地基右侧
1	3	2	冲碾前	14.70	8.70	7.20	3.00
			冲碾后	30.51	24.62	23.39	23.46
		4	冲碾前	29.50	26.60	25.30	19.10
			冲碾后	40.45	37.96	41.79	31.07
		7	冲碾前	52.80	54.20	51.30	45.10
			冲碾后	59.19	59.56	59.15	52.05
2	5	2	冲碾前	17.31	10.93	10.80	6.83
			冲碾后	24.42	19.22	19.03	18.90
		4	冲碾前	31.68	28.55	28.54	22.23
			冲碾后	37.85	35.50	33.41	28.80
		7	冲碾前	54.83	56.88	54.25	47.77
			冲碾后	60.04	61.62	59.51	52.20
3	3	2	冲碾前	16.51	10.20	8.98	4.83
			冲碾后	21.26	14.79	13.84	10.82
		4	冲碾前	30.78	28.01	27.28	20.54
			冲碾后	34.55	31.26	30.44	23.89
		7	冲碾前	53.97	56.25	52.55	46.22
			冲碾后	56.65	57.81	55.26	48.49

表 5 超孔压消散率计算结果

Tab.5 The calculation results of the excess pore water pressure dissipation rate

计算 时间	孔压计 深度/m	超孔压消散率/%			
		K21+620 断面		K21+680 断面	
		地基左侧	地基右侧	地基左侧	地基右侧
第 1 轮后	2	83.5	86.0	77.8	81.3
	4	80.1	82.8	80.4	73.8
	7	68.2	56.4	62.4	61.7
第 2 轮后	2	>100	>100	>100	>100
	4	>100	>100	>100	>100
	7	>100	>100	>100	>100

注:超(静)孔隙水压力消散率是指第 n 轮冲碾结束时的孔隙水压力 B 与 $(n+1)$ 轮冲碾前孔隙水压力 C 的差值,与第 n 轮冲碾过程中产生的超静孔隙水压力的比值,即 $(B-C)/(B-A)$; A 为第 n 轮冲碾前的孔隙水压力值。

2012 年 10 月 18 日上午第 2 轮(5 遍)冲碾结束后,于当日中午 12 时、当日傍晚 18 时、次日早晨 6 时、次日傍晚 18 时测试了试验段地基土孔隙水压力。经计算可知,在冲碾结束 6 h 后,2,4,7 m 深度处的超孔隙水压力消散率分别为 56.8%,50.0%,38.0%;在冲碾结束 12 h 后,2,4,7 m 深度处的孔隙水压力消散率分别达到 71.6%,69.5%,66.0%;在

冲碾结束 18 h 后,2,4,7 m 深度处的超孔隙水压力消散率分别为 92.0%,90.3%,86.0%。对比 2,4,7 m 深度处的超孔隙水压力消散率可知,粉细砂地基土越深,孔隙水压力消散越慢。在 10 月 19 日早晨测得超孔压消散率均已超过 70%,但因突遇降雨,故冲碾试验延后 1 d。尽管降雨会对粉细砂地基中超孔隙水压力的消散产生一定的负面影响,但在降雨期间仍可以浅层饱和粉细砂地基中超孔压消散率达到 70% 作为实施下一轮次冲碾的控制标准。

2.3 地表沉降监测结果与分析

试验段每隔 20 m 设置 1 个地表沉降监测断面,共设置 4 个监测断面。每个断面上布置了 5 个监测点。在每轮次开始前和结束后,对试验段地表的沉降进行了监测,每个监测断面在各轮冲碾后的平均沉降量如表 6 所示。

沉降量的观测结果表明,地表沉降量随着冲击轮次的增加而减小,并呈现收敛的趋势,说明冲击碾压对地基起到了加固作用。第 1 轮冲碾后,地基土中空隙被压缩,导致孔隙水压力急剧增大,随着时间的推移,孔隙水压力逐渐减小,地基土结构强度增加,从而起到加固地基的作用。由于第 1 轮冲碾的孔隙

水压力变化最大,因此,沉降量也最大,而之后两轮冲碾,孔隙水压力上升幅度减小,对土空隙的压缩作用减弱,因此沉降量也变小.第 3 轮冲击碾压施工结束后,地表沉降已不足 1 cm.经过上述 3 轮次的冲击碾压施工,粉细砂地基土已达到加固的目的,因此试验结束.

表 6 冲击碾压沉降量统计表

Tab.6 Average settlement after different passes of IGM

断面	沉降量/cm		
	第 1 轮(3 遍)	第 2 轮(5 遍)	第 3 轮(3 遍)
K21+620 断面	5.5	2.6	0.6
K21+640 断面	4.9	2.3	0.7
K21+660 断面	5.7	2.5	0.7
K21+680 断面	5.1	2.2	0.8
平均值	5.3	2.4	0.7

3 检测结果与分析

3.1 重型动力触探试验

为掌握粉细砂地基承载力的变化情况,在试验前后对 3 m 深度范围内的粉细砂地基进行了 5 组重型动力触探试验,其中 1 组重型动力触探试验结果如图 3 所示,其余 4 组重型动力触探试验均呈现相同的规律.

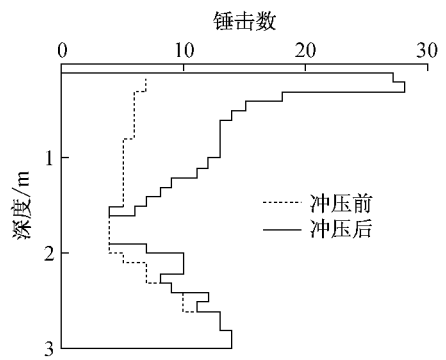


图 3 冲压前后 3 m 深度范围内动力触探试验对比图
Fig.3 DPT curves before and after IGM treatment in 3-meter-depth range

由图 3 可知,粉细砂地基经过冲击碾压处理以后,碎石土层的锤击数提高 2 倍多,其下至 2 m 深度范围内的锤击数提高 1 倍有余,2~3 m 范围内锤击数略有增加,说明冲击碾压处理粉细砂地基能大幅度提高 2 m 深度范围内地基土的承载力,对于提高 2 m 以下地基土的承载力效果不明显.

3.2 标准贯入试验

为进一步掌握粉细砂地基的加固效果,在试验前后对粉细砂地基进行了标准贯入试验,试验结果

如表 7 所示.《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[6]规定砂土的密实度根据标准贯入试验锤击数实测值 N 划分为密实、中密、稍密和松散.

表 7 碾压前后标准贯入试验成果对比表

Tab.7 Comparison of SPT results before and after IGM treatment

深度/m	锤击数/击		密实度	
	处理前	处理后	处理前	处理后
0~1.0	7	30	松散	密实
1.0~2.0	8	14	松散	稍密
2.0~3.0	11	11	稍密	稍密

由表 7 可知,粉细砂地基经冲击碾压处理后,1 m 深度范围内的地基土由松散状态变成密实状态,1 m 以下均处于稍密状态,1~2 m 范围内地基土密实度有一定程度的提高,2 m 以下地基土处理前后变化不大.

结合文献[2-3]的研究成果可知:黄土、粉土、粉细砂等地基经过冲击碾压处理之后,均显示出 2 m 深度范围内的地基土压实效果明显.冲击碾压处理地基的有效深度与冲击碾压的施工参数有密切关系,与地基土的工程特性关系不明显.

3.3 压实度检测

试验结束后,对试验段碎石土层进行了压实度检测,检测结果如表 8 所示.

表 8 压实度检测结果

Tab.8 Compaction test results

断面	碎石土层压实度/%		
	左	中	右
K21+620 断面	97.8	98.3	96.4
K21+640 断面	98.1	97.7	97.7
K21+660 断面	97.3	98.0	98.4
K21+680 断面	98.2	98.3	97.6

从碎石土材料的颗粒筛分试验结果可知,碎石土的不均匀系数为 7.358,曲率系数为 1.352;根据《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)^[7],该碎石土为级配良好的砂.由碎石土击实曲线可知,碎石土最大干密度为 $1.99 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,最佳含水率为 11.0%.

从表 8 可知,试验段经过冲击碾压处理之后,碎石土层的压实度能达到 97% 以上,满足《公路路基设计规范》(JTG D30—2004)^[8]高速公路和一级公路有关压实度的要求.

3.4 弯沉检测

试验段地表弯沉由监理单位采用 5.4 m 贝克曼梁弯沉仪检测,测点总计 10 个.经计算,弯沉代表值为 230.27(0.01 mm),小于该标段公路的设计弯沉

值 258.5(0.01 mm),满足基底承载力的要求。

滨海地区的公路建设存在低填浅挖路段和一般的填方路段,不论是哪种路段的粉细砂地基,试验段现场检测的结果均表明,采用合理的冲击碾压施工工艺能有效提高粉细砂地基的强度,且试验段的压实度和弯沉检测结果均满足设计要求。鉴于本文重点探讨冲击碾压处理滨海粉细砂地基的有效性,因此,有关碎石土层部分,不做过多叙述。

4 结论

(1) 采用合理的冲击碾压施工工艺可以有效地处理粉细砂地基,达到提高粉细砂地基强度,消除浅层粉细砂地基液化的目的。

(2) 采用冲击碾压法处理粉细砂地基时,粉细砂地基土在冲击碾压过程中产生的超静孔隙水压力,必须给予足够的时间消散。当超静孔隙水压力消散率达到70%以上时,方可进行下一轮次的施工。

(3) 结合本文孔压的监测数据以及有关文献^[2~3]可知,地基土经过冲击碾压处理之后,2 m 深度范围内的压实效果显著。冲击碾压处理地基的有效深度与冲击碾压的施工参数密切相关,与地基土的工程特性关系不明显。

(4) 受高地下水位、排水通道不畅等因素影响,现场必须设置良好的排水通道以便超孔隙水压力尽快消散。

参考文献:

[1] 王仁芝. 专家解惑之冲击碾压技术篇[J]. 中国公路, 2005(8): 80.

- WANG Renzhi. Some problem in impact compaction technology [J]. China Highway, 2005(8): 80.
- [2] 王吉利, 刘怡林, 沈兴付, 等. 冲击碾压法处理黄土地基的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 755.
- WANG Jili, LIU Yilin, SHEN Xingfu, et al. Experimental investigation on treatment of loess subgrade with impact and grind method(IGMD)[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 755.
- [3] 徐超, 陈忠清, 叶观宝, 等. 冲击碾压法处理粉土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 389.
- XU Chao, CHEN Zhongqing, YE Guanbao, et al. Experimental research on ground improvement of silt using impact roller compaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 389.
- [4] 交通部公路科学研究院. 公路冲击碾压应用技术指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- Research Institute of Highway of the Ministry of Transport. Highway impact rolling application guide[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [5] 韩善剑. 文昌航天发射场地配套道路东郊至龙楼公路详细工程地质勘察报告[R]. 海口: 海南省公路勘察设计院, 2011.
- HAN Shanjian. Engineering geological investigation report in detail for Wenchang space launch site support road called DongLong road[R]. Haikou: Hainan Province Highway Survey and Design Institute, 2011.
- [6] 中华人民共和国建设部. GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB50021-2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [7] 中华人民共和国交通部. JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG E40—2007 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [8] 中华人民共和国交通部. JTG D30—2004 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D30—2004 Specification for design of highway subgrades[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.