

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.06.005

非洲滨海地区粉细砂路基砂芯压实施工技术

袁建¹, 李曼容¹, 罗志刚¹, 钱劲松²

(1. 中国路桥工程有限责任公司, 北京 100011; 2. 同济大学 道路与交通教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为了研究粉细砂的压实性能以保证其压实度, 使其更好地应用于滨海地区的路基工程, 针对“侧限+砂芯”粉细砂路基结构, 采用室内击实试验和颗粒流数值模拟方法, 辅以现场试验段测试验证, 分析了粉细砂的压实机理, 明确了外力大小、压实方式、碾压遍数对粉细砂压实的作用效果, 结果表明: 粉细砂填筑宜采用“静载+振动”的压实组合, 压实遍数存在最优值, 一般压实遍数控制在10遍, 压实时应选择合理的施工含水率, 通常控制在10%。同时, 结合粉细砂松散不易压实成型、透水性强材料特点, 分析总结了粉细砂运输、摊铺、洒水、碾压等工序各自的施工要点及注意事项, 尤其应注意防止路基基底积水和表层失水松散。对“砂芯+土质包边”结构, 推荐提出了砂芯-包边同步施工方法, 以保证砂芯边缘的压实与二者界面的紧密结合。总之, 粉细砂砂芯压实施工的关键, 在于使施工工艺充分匹配粉细砂的材料特点。具体的工程参数与工序组织则应依据室内试验与路基试验段测试确定。
关键词: 道路工程; 砂芯压实技术; 颗粒流分析; 填砂路基; 粉细砂

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2019)06-0031-10

Compaction Construction Technique for Sand Core of Silty Sand Subgrade in Africa Coastal Area

YUAN Jian¹, LI Man-rong¹, LUO Zhi-gang¹, QIAN Jin-song²

(1. China Road and Bridge Corporation, Beijing 100011, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to study the compaction performance of silty sand to ensure the subgrade compactness and make silty sand better used in subgrade engineering in coastal areas, for “side limit + sand core” subgrade structure, on the basis of indoor compaction test and particle flow numerical simulation, we analysed the compaction mechanism and made clear the compaction effect of force size, compaction mode and rolling pass number on silty sand, which are verified by the trial subgrade tests in situ. The result indicates that (1) The “static load + vibration load” compaction mode is suitable for silty sand filling whose optimal value of rolling pass is usually 10 times, and reasonable water content of construction should be controlled by 10%. (2) According to silty sand material characteristic that is loose, permeable and not easy to be compacted, we summarized the respective key points of construction and attentions of silty sand during transportation, paving, sprinkling and rolling compaction, in particular, attention should be paid to prevent subgrade from water accumulation at subgrade bottom and water loss in subgrade surface. (3) A “sand core + surrounding” synchronous construction method is proposed for “sand core + soil surrounding” structure, which ensures the sand core edge compaction and the interface combination tightness. In a word, the key of silty sand core compaction construction is that construction technology should fully match the silty sand material

收稿日期: 2017-12-14

基金项目: 财政部施工新技术研究与开发资金项目(2012MF001)

作者简介: 袁建(1978-), 男, 湖南邵阳人, 高级工程师。(yuanj@crbc.com)

characteristics. The specific engineering parameters and working procedure should be determined according to the laboratory test and field subgrade test.

Key words: road engineering; sand core compaction technique; particle flow analysis; sand-filled subgrade; silty sand

0 引言

非洲滨海地区旅游资源丰富,高速公路、旅游公路等建设需求广泛。若采用黏质土填筑路基,生态环保和耕地保护压力大;利用普遍分布的粉细砂,则可避免远距运土,减小生态影响,降低工程造价。然而,传统认识将粉细砂归类于不良路基填料,用于填筑路基须事先处理^[1-2]。所以,许多研究人员针对粉细砂的工程特性,提出了“侧限+砂芯”这一新型滨海粉细砂路基构型,即“(两侧)包边+顶封层+底封层+砂芯”的箱体复合结构^[3]。土质包边、顶封层、底封层等参照规范相应方法施工即可。但砂芯如何压实施工,当前的国内外施工规范或技术指南尚无明确的条文说明。因此,采用什么样的砂芯压实施工工艺,是实现新型滨海粉细砂路基构型设计的关键,也是确保粉细砂成功应用于公路工程的基础。

1 粉细砂压实机理

1.1 粉细砂击实特性

在具备侧限(围压)的条件下,粉细砂才可以

压实成型。所以,通过击实试验分析粉细砂的击实特性应该考虑侧限条件——压实筒规格的影响。常规采用的击实筒分为大小两种,大击实筒内径为152 mm,小击实筒内径为100 mm。已有研究表明^[4]:大筒重型击实所确定的最大干密度明显小于小筒重型击实所确定的最大干密度,其原因在于大筒重型击实条件下,击锤更容易对粉细砂松散体产生冲击剪切作用,进而对下部与旁侧已密实砂体产生扰动,故难以获得良好的击实效果。如果按大筒重型击实确定的最大干密度施工,在振动压路机作用下压实度可以轻易达到,甚至出现压实度超过100%的现象。因此,适宜采用小筒重型击实试验分析粉细砂的击实特性。

选取两个滨海地区的5种砂样进行粉细砂击实特性分析。粉细砂筛分试验结果见表1,可知:两个地区的滨海粉细砂颗粒均呈现颗粒粒径单一的特征,大多在0.075~0.3 mm之间,不均匀系数 C_u 均小于5,曲率系数 C_v 在0.92~1.83之间,属于级配不良的特细砂(细度模数 $M_x < 1.6$)。

表1 滨海粉细砂筛分试验结果

Tab. 1 Screening test result of coastal silty sand

砂样	通过百分比/%					d_{60}/mm	d_{30}/mm	d_{10}/mm	C_u	C_v	M_x	
	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075							
C _I 区	A	100	99.1	74.9	24.5	6.1	0.248	0.168	0.094	2.64	1.21	1.015
	B	100	99.4	84.2	45.9	3.2	0.187	0.118	0.081	2.30	0.92	0.705
	C	100	100.0	100.0	67.4	16.6	0.139	0.098	0.045	3.09	1.54	0.326
C _{II} 区	D	100	100.0	99.5	69.2	18.4	0.136	0.096	0.041	3.32	1.65	0.313
	E	100	100.0	100.0	71.5	20.2	0.133	0.095	0.037	3.59	1.83	0.285

注: d_{60} , d_{30} , d_{10} 分别为累计通过率为60%, 30%, 10%时对应的控制粒径。

5种砂样的小型击实筒测试结果见表2及图1,可知:粉细砂存在“多峰”和“双峰”两种击实特征曲线。究其原因可以归结为级配组成的差异。呈现“多峰”曲线的C_{II}区砂样,细粒及粉粒两种粒组的含量占绝大多数,中砂粒组较少;而呈现“双峰”曲线的C_I区砂样,中砂粒组含量相对较多。当粉细砂中含有一定中砂粒组时,击实过程中发生颗粒重新排列,细颗粒可进入大颗粒的空隙之间更好地形成密实嵌锁效果。C_{II}区“多峰”砂样由于

缺少中砂粒组,所以颗粒之间的填充嵌锁效应不及“双峰”砂样明显,而且C_{II}区砂样含泥量较大,使颗粒之间的滑动及滚动摩阻力减小,削弱了颗粒间的咬合。这些都使其在击实过程中易发生松动,导致击实曲线出现较多的波动,也降低了整体密实性。这一点从干密度的大小就可体现,呈现“双峰”曲线砂样的最大干密度均值为 $1.91 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,而呈现“多峰”曲线砂样的最大干密度均值为 $1.69 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。不过,“多峰”砂样干密度随含水

率变化而波动的幅度并不显著, 这种特性被解读为该类砂样可在多种含水率条件下良好压实, 施工时可压实含水率范围大, 不易受雨水等天气影响^[5-6]。

表 2 滨海粉细砂击实试验结果 (小型击实筒)

Tab. 2 Compaction test result of coastal silty sand (small-scale compaction mold)

砂样	含泥量/ %	波峰数	最佳	最大干密度	推荐施工 含水率/%	
			含水率 $w_{opt}/\%$	$\rho_{d\max}/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)		
C _I 区	A	3.6	2	9.7	2.009	10 ~ 12
	B	6.7	3	10.4	1.812	
	C	13.8	5	14.0	1.635	
C _{II} 区	D	11.3	4	13.9	1.693	
	E	8.9	3	11.6	1.742	

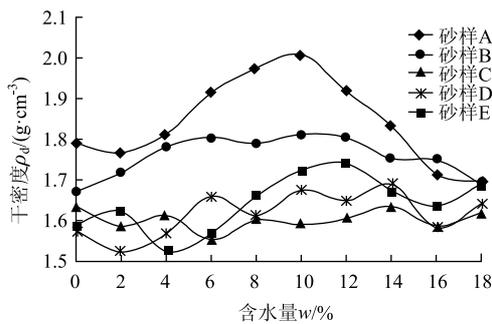


图 1 滨海粉细砂击实曲线 (小型击实筒)

Fig. 1 Compaction test curves of coastal silty sand (small-scale compaction mold)

1.2 外力对粉细砂压实的影响

粉细砂是一种散体类材料, 可以采用离散元颗粒流模型进行压实过程模拟, 进而分析外力大小、压实方式、碾压遍数等对粉细砂压实的影响。本研究所用离散元程序为 ITASCA 公司开发的二维颗粒流

程序 PFC2D (Particle Flow Code in 2 Dimensions)。分析过程中考虑以下几种工况 (最佳含水率): (1) I-1 遍静载 ($1.374 \times 10^5 \text{ N}$) 压实模拟; (2) II-1 遍 2 倍静载 ($2.744 \times 10^5 \text{ N}$) 压实模拟; (3) III-1 遍振动 ($1.374 \times 10^5 \text{ N}$) 压实模拟; (4) IV-“1 遍静载+8 遍振动”压实模拟 (单次荷载 $1.374 \times 10^5 \text{ N}$)。

图 2 给出了部分工况砂样中部代表区域 (模型箱正中心 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 范围) 的截图。从图 2 直观来看: 在压实前状态相同的情况下, 将压实方式从静载换成振动, 粉细砂的密实程度要好一些。为了进一步比较压实效果, 沿模型箱中轴线深度方向取点: 以点周围 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的范围作为计算该点孔隙率的代表区域, 压实前后的孔隙率差值即为该点的孔隙率变化, 见图 3; 以点周围 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的范围作为统计分析颗粒长轴方向定向排列的代表区域, 计算颗粒长轴的定向频率函数 $F(\theta_i)$, 见图 4。由图 3 给出的孔隙率变化曲线可知, 不同压实力、压实方式作用下, 粉细砂压实前后的孔隙率差值 (减小量) 呈现出大致相似的变化规律。对比图 3 (a)、(b)、(c), 表明: 增加静载作用力或将压实方式由静载改变为振动, 都有利于减小粉细砂的孔隙率, 但后者对压实过程中孔隙率的减小作用更为明显。由图 4 给出的定向频率分布变化图可以看出: 外力压实后, 粉细砂颗粒的长轴方向逐渐由竖直方向向水平方向调整, 颗粒定向角的分布集中程度也有一定增加, 说明压实后颗粒排列的定向程度有一定提升, 但到达一定深度后, 外力对颗粒定向排列的影响将逐渐减弱。在距离荷载源 19 cm 深度位置, 2 倍静载对颗粒定向排列的影响基本消失, 而振动荷载对颗粒定向排列的影响还明显存在, 表明相较于静载压实, 振动压实对颗粒定向性排列的影响深度更大。

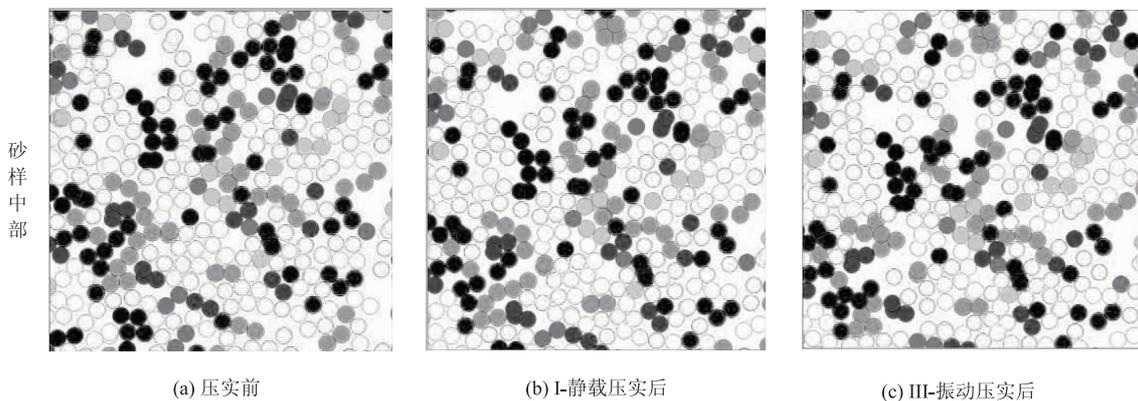


图 2 粉细砂颗粒流模型代表区域截图

Fig. 2 Representative area screenshots of silty sand particle flow model

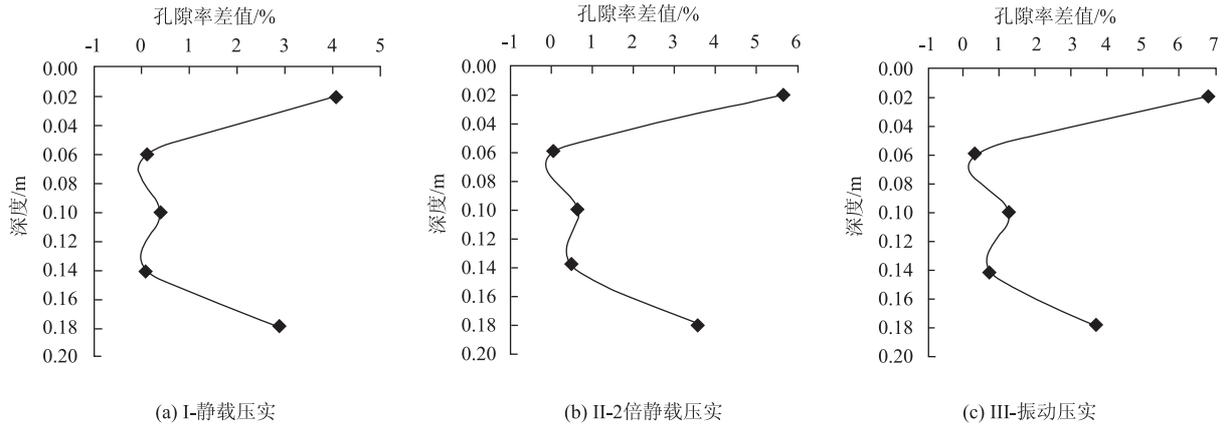


图3 距荷载源不同深度处的孔隙率变化曲线

Fig. 3 Curves of porosity distance at different depths from load source

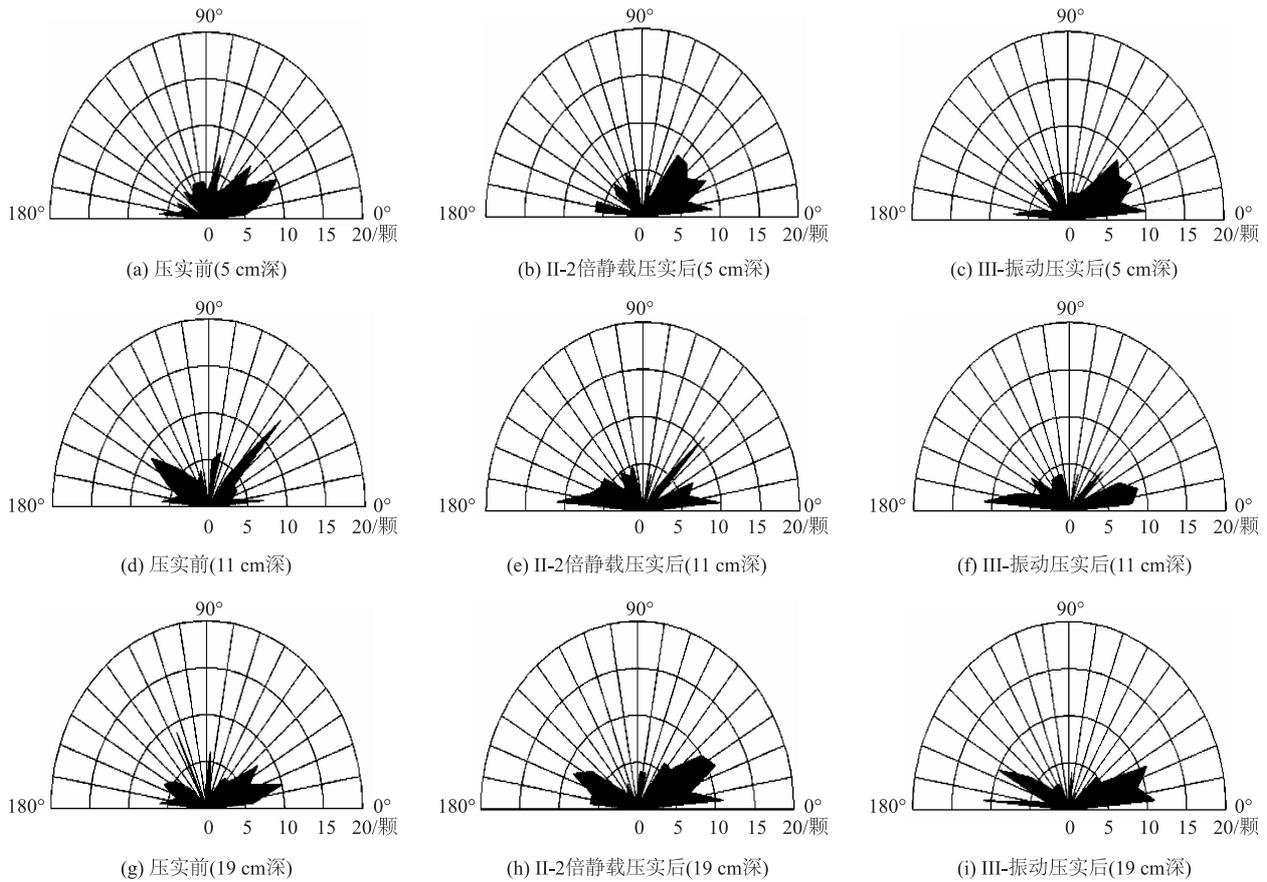


图4 距荷载源不同深度处颗粒的定向频率分布图

Fig. 4 Directional frequency distributions of particles at different depths from load source

综合图3与图4的分析结果可知：对于粉细砂，不建议采用增大静载作用力的方式来提升压实效果，而应将压实方式由静载压实改变为振动压实。

执行工况IV后，计算不同压实遍数时模型中轴线某处及整个颗粒流模型的孔隙率，如图5所示。模型中轴线某处的孔隙率，仍取该点周围 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的范围作为计算区域。图5中横轴“碾压遍

数”为0表示压实前的初始状态，为1表示第1遍压实，为2表示第2遍压实，以此类推。第1遍压实采用静载，其后采用振动压实。由图5可知，随着碾压遍数的增加，距离荷载源不同深度处的孔隙率与颗粒流模型的孔隙率均逐步减小，表明粉细砂趋于密实；但是，当碾压遍数超过7遍以后，距离荷载源不同深度处的孔隙率与颗粒流模型的孔隙率基

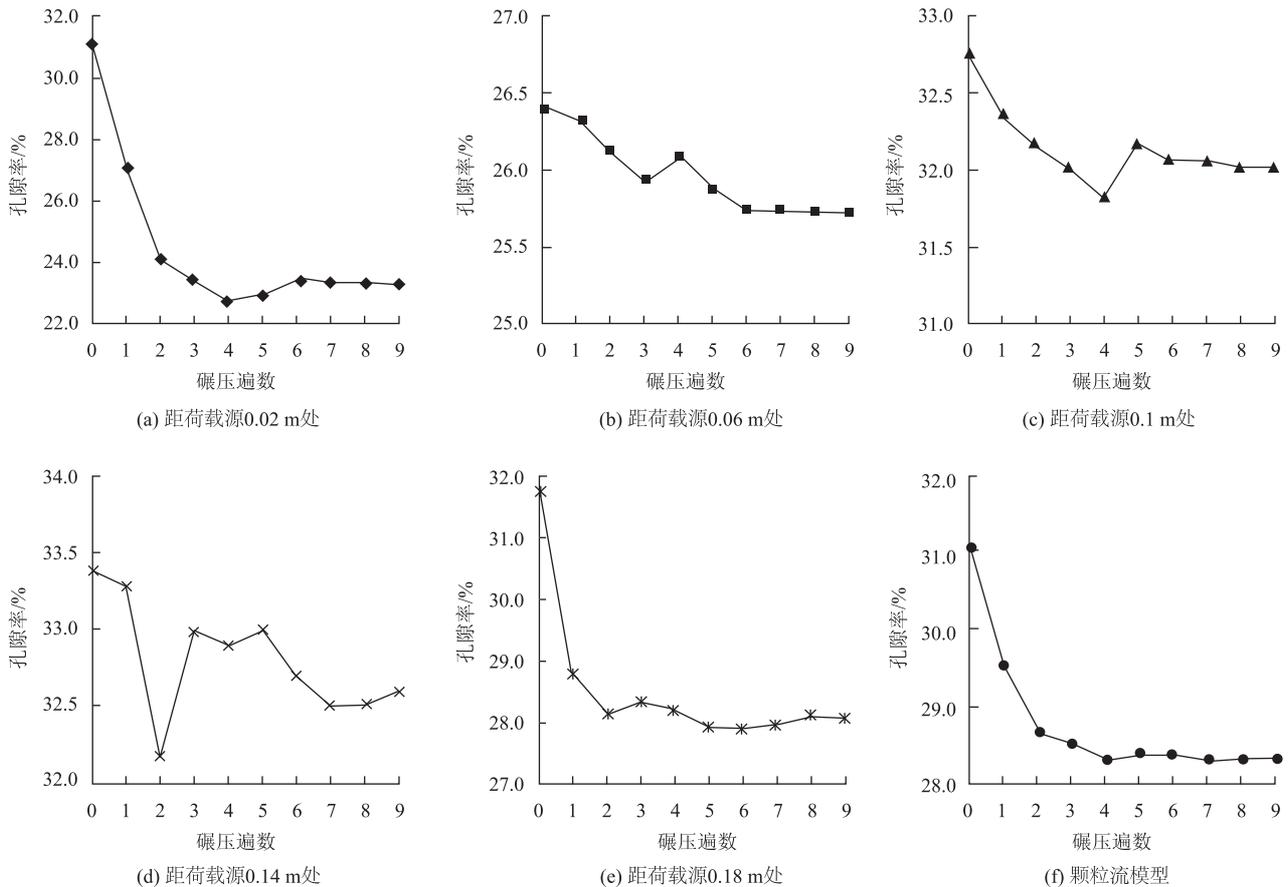


图 5 孔隙率与碾压遍数的关系

Fig. 5 Relationship between porosity and rolling pass number

本不再减小, 表明再施加振动压实, 粉细砂将难以被继续压密。因此, 理论上粉细砂压实最优的碾压遍数为 7 遍, 相应最优的压实方式为“1 遍静载 + 6 遍振动”的压实组合。

1.3 现场压实试验

为检验颗粒流模型分析的结果, 在 C_{II} 区进行粉细砂路基试验段填筑压实试验。试验段路基先采用 8 ~ 10 t 光轮压路机静压, 初压后采用 14 ~ 24 t 振动压路机振动碾压 (选用 28 Hz 频率、1 mm 振幅), 最后再静压。压路机的组合方式及达到的压实度见表 3。填料选用 D 砂, 现场压实含水率按 10% 控制。

由表 3 可知, 在碾压方式和遍数相同的情况下: (1) 当松铺厚度为 30 cm 时, “DD - 80 + YZ20JC” 组合的压实度较 “DD - 80 + YZ14JC” 组合的压实度增长幅度不大; (2) 当松铺厚度为 40 cm 时, “DD - 100 + YZ20JC” 组合较 “DD - 100 + YZ24JC” 组合更不易压实; (3) 即使增加了压路机作用力, 松铺厚度 40 cm 的粉细砂也更难压实。因此, 要达到路床的

压实度要求, C_{II} 区粉细砂路基宜采用 30 cm 的松铺厚度, 并使用 “DD - 80 + YZ14JC” 组合碾压 11 遍。

2 砂芯压实工艺

粉细砂路基结构能否具备足够的刚度和强度, 重点取决于粉细砂砂芯能否被充分压实。因此, 砂芯的压实工艺是否科学合理而又行之有效是粉细砂路基施工的关键。粉细砂填料压实的主要施工工序包括运输、摊铺、洒水、碾压 4 个步骤, 如图 6 所示^[7-8]。需要指出的是, 粉细砂透水性强, 其路基底部易于积水, 所以在设计和施工过程中应注意选取合适的方式引导出多余的水分, 以免自由水积聚在基底而影响路基的长期稳定性。除采取通常的临时或永久路基排水措施外, 建议在填筑粉细砂前, 先于基底设置纵横碎石盲沟, 并铺设土工布以防粉细砂因渗流冲刷带走^[9-10]。

2.1 粉细砂运输

为便于施工, 运料车辆的选择除了考虑装载量外, 还应选掉头灵活的车型。通常宜采用双后桥自

表3 粉细砂路基试验段碾压方案及结果
Tab.3 Compaction scheme and result of silty sand subgrade test section

松铺厚度	碾压方案	碾压遍数	压实度/%
30 cm	DD-80 静压 2 遍, YZ14JC 再振动碾压 2 遍, 最后静压 2 遍	6	90.5
	DD-80 静压 2 遍, YZ14JC 再振动碾压 3 遍, 最后静压 2 遍	7	91.6
	DD-80 静压 2 遍, YZ14JC 再振动碾压 4 遍, 最后静压 2 遍	8	93.3
	DD-80 静压 2 遍, YZ14JC 再振动碾压 5 遍, 最后静压 2 遍	9	94.5
	DD-80 静压 2 遍, YZ14JC 再振动碾压 6 遍, 最后静压 2 遍	10	95.2
	DD-80 静压 2 遍, YZ14JC 再振动碾压 6 遍, 最后静压 3 遍	11	96.4
30 cm	DD-80 静压 2 遍, YZ20JC 再振动碾压 2 遍, 最后静压 2 遍	6	90.7
	DD-80 静压 2 遍, YZ20JC 再振动碾压 3 遍, 最后静压 2 遍	7	91.8
	DD-80 静压 2 遍, YZ20JC 再振动碾压 4 遍, 最后静压 2 遍	8	93.6
	DD-80 静压 2 遍, YZ20JC 再振动碾压 5 遍, 最后静压 2 遍	9	94.8
	DD-80 静压 2 遍, YZ20JC 再振动碾压 6 遍, 最后静压 2 遍	10	95.7
	DD-80 静压 2 遍, YZ20JC 再振动碾压 6 遍, 最后静压 3 遍	11	96.6
40 cm	DD-100 静压 2 遍, YZ24JC 再振动碾压 2 遍, 最后静压 2 遍	6	88.2
	DD-100 静压 2 遍, YZ24JC 再振动碾压 3 遍, 最后静压 2 遍	7	91.0
	DD-100 静压 2 遍, YZ24JC 再振动碾压 4 遍, 最后静压 2 遍	8	91.3
	DD-100 静压 2 遍, YZ24JC 再振动碾压 5 遍, 最后静压 2 遍	9	93.4
	DD-100 静压 2 遍, YZ24JC 再振动碾压 6 遍, 最后静压 2 遍	10	93.9
	DD-100 静压 2 遍, YZ24JC 再振动碾压 7 遍, 最后静压 2 遍	11	94.3
	DD-100 静压 2 遍, YZ24JC 再振动碾压 7 遍, 最后静压 3 遍	12	95.8
	DD-100 静压 2 遍, YZ24JC 再振动碾压 7 遍, 最后静压 4 遍	13	96.3
40 cm	DD-100 静压 2 遍, YZ20JC 再振动碾压 2 遍, 最后静压 2 遍	6	88.2
	DD-100 静压 2 遍, YZ20JC 再振动碾压 3 遍, 最后静压 2 遍	7	90.1
	DD-100 静压 2 遍, YZ20JC 再振动碾压 4 遍, 最后静压 2 遍	8	91.3
	DD-100 静压 2 遍, YZ20JC 再振动碾压 5 遍, 最后静压 2 遍	9	92.4
	DD-100 静压 2 遍, YZ20JC 再振动碾压 6 遍, 最后静压 2 遍	10	92.9
	DD-100 静压 2 遍, YZ20JC 再振动碾压 7 遍, 最后静压 2 遍	11	93.3
	DD-100 静压 2 遍, YZ20JC 再振动碾压 7 遍, 最后静压 3 遍	12	94.8
	DD-100 静压 2 遍, YZ20JC 再振动碾压 8 遍, 最后静压 3 遍	13	95.2
DD-100 静压 2 遍, YZ20JC 再振动碾压 8 遍, 最后静压 4 遍	14	96.3	

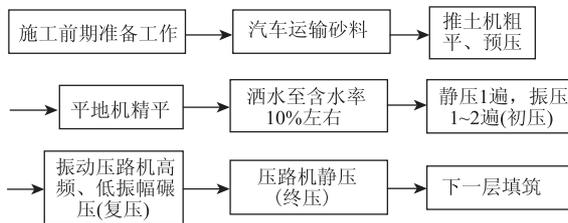


图6 粉细砂砂芯压实施工工序

Fig.6 Compaction process for silty sand core

卸车。沿线应修筑施工便道, 尽量避免运输车辆在碾压成型的粉细砂砂层上行驶。如在其上行驶, 应

缓慢匀速、掉头半径大一些。在已验收合格的砂层上继续填筑上一层时, 应根据现场实际情况, 及时洒水保持已填筑砂层表面湿润 (含水率可控制在10%左右, 砂层外观不沁水、不松散), 以方便运砂车进出与卸料。否则, 车辆在失水的砂层上行走很容易扰动表层而形成车辙。当出现较深车辙时, 需用推土机及时推平、并碾压平整。在坡度较大地段, 可铺垫钢板以保证粉细砂的正常运输。

2.2 粉细砂摊铺

(1) 砂层摊铺

填砂摊铺可采用推土机粗平并配合平地机精平。

先用推土机按“路中心高、两侧低”进行粗平、预压,横坡控制在1.5%~2.0%,然后用平地机由两侧向中央刮平整形(局部区域可辅以人工整平),就基本能保证较好的砂层平整度。如果在天然含水率(例如5%~8%)状态下的平整效果欠佳,可以粗平后洒水至砂的表层含水率略高于最佳含水率,再用平地机初步刮平,随后立即用压路机在初平的砂层上快速碾压2遍,最后用平地机再平整一次,以得到预期的坡度和路拱^[11]。

由于粉细砂的黏聚力小,推土机功率宜适中。功率太大,使用效率不高、浪费,太小则起不到初步预压的效果。平地机宜采用双后桥式,以便能在初步压实的砂层上作业。

(2) 摊铺厚度

粉细砂的松铺厚度不宜过厚,否则难以保证充分压实,而过多增加碾压遍数以保证厚层压实时,不仅会带来施工效率问题,还可能引起表层砂过压和松散现象。松铺厚度是根据压路机的表面静压力和振动能量在填砂中的衰减情况确定的。已有经验表明,就常用的YZ18~YZ20 t振动压路机而言,松铺厚度不宜超过40 cm(高速、一级公路)或50 cm(二级及以下公路)。如设有黏土下封层,其上铺筑第1层砂的松铺厚度不宜小于40 cm,主要是为防止运料车在砂面上行走形成较深车辙而对下封层造成破坏。粉细砂的松铺厚度宜通过试验段测试确定,一般压实遍数控制在10遍左右(不含粗平及精平),过多应考虑减小层厚。通常,粉细砂填料松铺厚度,路床部分可取30 cm,上路堤部分可取35 cm。

(3) 作业段长度

根据施工经验,一个作业段的长度宜为400~500 m^[12-13]。作业段太长,显然不利于机械设备的调度。而且,运输车辆进出与卸料的时间将增加(砂层上不能快速行驶),砂层保湿、平整的工作量也将增大。再者如采用接管洒水,潜水泵或其他压力泵的泵送距离有限,太长则水压力不够。受限于洒水能力时,可考虑半幅挂线施工。

2.3 粉细砂砂芯洒水

由于粉细砂保水性差,所以相较其他填料,洒水工序对其压实更为重要,并且反复出现、贯穿于砂芯压实的全过程——对于将要或正在压实的砂层,洒水是为了利于工程机械作业并达到最好的压实效果;对于已压实的砂层,洒水是为了保湿以方便后续施工。洒水工序重点要解决好以下问题:

(1) 洒水方式

在天然含水率(例如5%~8%)状态下推平的砂层,不一定能供装满水的洒水车在其上直接行走,需通过其他方法或措施来解决洒水问题。根据工程实践,可采取以下两种方案^[14]:①沿路基中线铺设橡胶管,连接大扬程、大功率潜水泵在附近水源中抽水,每20 m安装一个三通,再连接消防水带人工逐段洒水;②洒水车装满水后停在路基端部,从洒水车上接管人工洒水,洒一段,压实一段,逐步推进。当然,无须等到砂层完全压实后再洒下一段,洒水至砂层含水率到10%左右,用振动压路机静压1遍、振压2遍,就可让洒水车上砂层行驶至下一段洒水。为减少现场洒水的工作量,可以将粉细砂在料场洒水充分湿润后再运送至施工现场。

(2) 洒水作业参数

洒水作业要求做到均匀、透彻、及时。必要时可以分格洒水,以防止漏洒、过洒。洒水作业参数主要包括控制湿度(施工含水率)、洒水量、洒水时间,宜通过路基试验段测试确定。

施工含水率应以粉细砂的最佳含水率为基准,综合考虑地表湿度、气候环境(蒸发)、现场实际情况等因素来确定。粉细砂的最佳含水率通常在8%~15%之间,见表2。由于粉细砂强烈的透水性,使得按照高含水率控制施工显得较为不便(需要大量补水甚至灌水),而且实际施工中发现,当粉细砂含水率大于12%时,易粘结在压路机钢轮上,导致砂层表面平整度不好,严重影响压实。所以现场施工含水率以控制在8%~12%之间为宜。通常,施工含水率通常控制在10%左右。

单位面积洒水量可根据粉细砂的初始含水率、施工含水率、砂层厚度等来计算,然后即可估算相应的供水设施数量。洒水时间以洒水均匀至层底为准。碾压过程中,应及时检查砂层的含水率,若含水率不足则应及时补水。

2.4 粉细砂砂芯压实

(1) 压实机械

压实机械应选用振动压路机(亦可静压)。建议一个作业段至少配备2台。初压时,碾压轮挤出的松砂壅积于前轮下,后轮碾压过的表面发生剪切错动,都会造成压路机行走困难;若粉细砂含水率偏低,还会出现压路机打滑、深陷其中的现象。因此,碾压宜采用前后轮驱动的振动压路机。

(2) 施工参数

施工参数应依据室内试验与路基试验段测试确定。工程参数经验值可供试验段测试方案参考使用。

粉细砂砂芯压实度标准、最大干密度与最佳含水率应由小筒重型击实试验确定。粉细砂现场压实度检测,建议采用修正环刀法(环刀内径8~10 cm、高6~8 cm、壁厚1.5 mm)^[1]。机械最优组合、机械作业参数(如:频率、振幅、碾压速度与遍数)、松铺厚度、施工控制含水率等由试验段测试确定。基于试验段施工,还应优化粉细砂运输、摊铺、洒水等工序的施工组织方案。

(3) 工序及要点

粉细砂砂芯压实工序如图7所示,宜在砂层有效持水时长内完成。初压起平整稳定砂芯的作用,使用振动压路机静压1遍、弱振1~2遍。复压起压实作用,是关键压实工序,使用振动压路机高频、低振幅碾压;碾压时先慢后快(例如:碾压速度开始2遍采用1.5~1.7 km/h,以后为2.0~2.5 km/h^[15-16]),碾压时轨迹重叠宽度不小于1/3轨迹宽。终压起整理作用,可消灭轮迹等,使用振动压路机静压1~2遍。

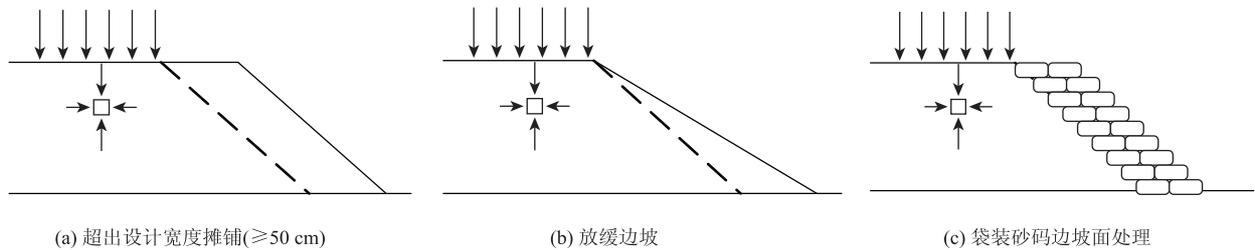


图7 粉细砂砂芯边缘压实的途径

Fig. 7 Means for compacting edge of silty sand core

3 砂芯-包边同步压实

砂芯不是孤立存在的,它和土质包边共同构成了粉细砂路基的主体结构。然而,砂芯和土质包边是由不同工程特性的填料组成的,且对结构尺寸、功能定位的要求也不一样。这些差异必然会在压实工艺上得以体现,且相互关联、相互影响,从而给粉细砂路基整体施工造成不便,并影响路基的长期性能。因此,有必要采用有效的工法以降低这些差异带来的负面影响,使砂芯和土质包边的填筑工序协调一致、连续统一,进而保证砂芯和土质包边形成真正意义上的共同承载体。本研究以协同理论为指导,提出了砂芯-包边同步压实方法,见图8与图9:测量放线后,在路基左右两侧摊铺第1层包边土,碾压至压实度达标,然后在包边内侧设置防渗土工布,接着进行第1层粉细砂的摊铺和碾压;当第1层包边和砂芯施工达标后,再进行下一层施工。当现场

当含水率过大,碾压时会出现弹簧现象,可晾晒或待多余水分下渗后(粉细砂透水性强),再对出现弹簧现象的局部路段进行碾压,直至达到要求的密实度。

压路机碾压时,直线段由两边向中间,小半径曲线段由内侧向外侧,纵向进退式进行。前后相邻两个区段应纵向重叠碾压2 m以上。压路机碾压不到的地方,可采用小型压(夯)实机具进行补压。

压实过程中,靠近路堤中部的部位,填料处于有侧限受压状态,压实较为容易。而在路堤边缘,填料处于无侧限(或弱侧限)受压状态,压实困难,采用增加压实功的方法容易造成路堤边缘下陷、边坡局部失稳^[17]。要保证路基边缘压实,关键在于为边缘部位的填料提供足够的侧向压力,除采用土质包边外,还可通过以下3种途径提供侧向压力,如图7所示。

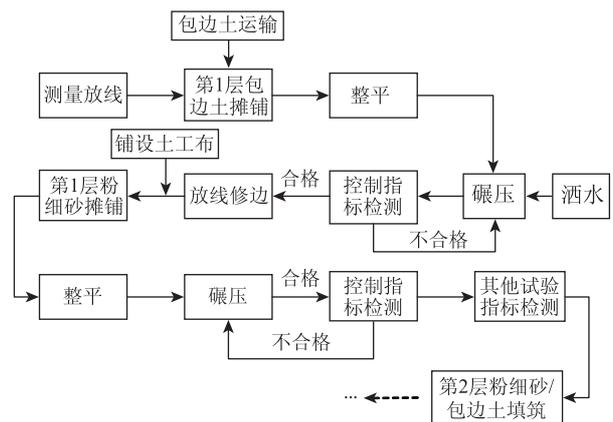


图8 砂芯-包边同步压实工序

Fig. 8 Synchronous compaction process for sand core and surrounding

施工设备和人员充足时,也可实行同一层包边和砂芯同时施工,这有助于加快工程进度,但需注意在包边和砂芯之间预留适当的空间以便于铺设土工布。

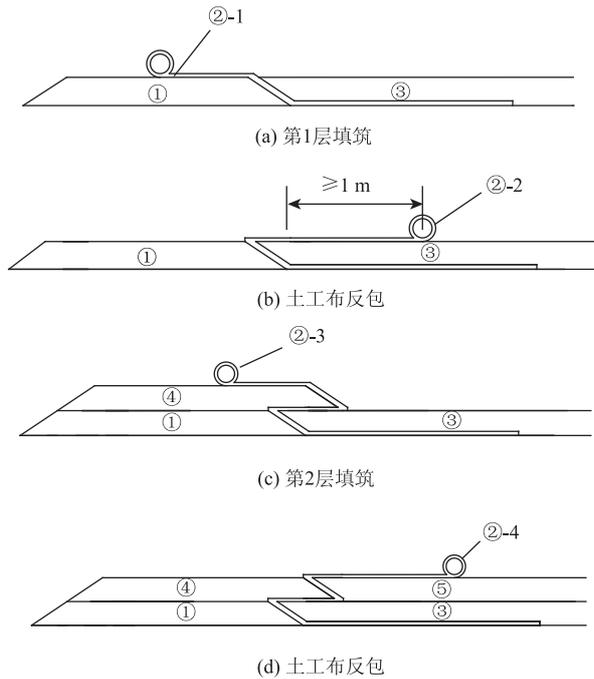


图9 砂芯-包边同步施工组织

Fig. 9 Synchronous compaction organization for sand core and surrounding

注: ①第1层包边土的松铺和碾压; ②-1 铺设土工布; ③第1层粉细砂的松铺和碾压; ②-2 土工布反包; ④第2层包边土的松铺和碾压; ②-3 铺设土工布(从第1层粉细砂路基顶面反包至第2层包边土上方); ⑤第2层粉细砂的松铺和碾压; ②-4 土工布反包。

砂芯和包边之间的土工布,既确保了二者的紧密联结,也降低了粉细砂路基发生渗透和漏砂破坏的风险。

砂芯-包边同步施工,保证了砂芯和土质包边碾压的连贯性以及压实质量,压实过程中有各自分层碾压,也有结合部重叠碾压,对压实度和界面结合都有保障。同步施工层次明确,对路基标高、宽度、横坡、平整度等各项指标容易掌控,工程机械的作业空间增大、利用率提高,这些都有利于施工组织 and 缩短工期,施工成本较低^[18]。但需要注意的是:(1)为避免压实厚度差异造成的错台,宜通过试验段测试确定粉细砂和包边填土各自的合理松铺厚度;(2)粉细砂碾压受雨水等天气的影响相对较小,而包边填土碾压则需严格控制施工含水率,所以在雨季要注意避免因土质包边施工进度滞后而引起怠工。

4 结论

滨海粉细砂是一种无黏性的散体类材料,颗粒

粒径单一、级配差,透水性强,需在侧限(围压)条件下成型。这些材料特点决定了粉细砂不能像普通黏质土那样压实,而必须选择适合其自身特点的压实工艺。本研究基于室内击实试验和颗粒流数值模拟,辅以现场试验段测试验证,得出如下主要结论:

(1)粉细砂路基适合采用振动方式压实,压实遍数存在最优值,一般压实遍数控制在10遍左右,宜通过现场试验确定;

(2)粉细砂路基压实应选择合理的施工含水率,通常控制在10%左右;

(3)粉细砂路基透水性强,施工时应注意防止路基基底积水和表层失水松散;

(4)如选用“砂芯+土质包边”结构,宜采用砂芯-包边同步压实方法,以保证砂芯边缘的压实与二者界面的紧密结合。

总之,粉细砂砂芯压实施工的关键,在于使施工工艺充分匹配粉细砂的材料特点,用其长、避其短。具体的工程参数与工序组织则应依据室内试验与路基试验段测试确定。

参考文献:

References:

- [1] 凌建明,钱劲松,罗志刚,等.滨海地区粉细砂路基修筑与长期性能保障技术[R].上海:同济大学,2015. LING Jian-ming, QIAN Jin-song, LUO Zhi-gang, et al. Construction and Long-term Performance Guarantee Technology for Silty-sand Subgrade in Coastal Area [R]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- [2] 薛兴亮.高速公路填砂路基压实施工技术的应用[J].交通世界,2016(10):60-61. XUE Xing-liang. Application of Compaction Construction Technology for Sand Filling Subgrade in Expressway [J]. Transpo World, 2016(10):60-61.
- [3] 罗志刚,李志强,袁建,等.非洲滨海地区粉细砂路基结构体系综合设计[J].公路,2017,62(8):7-11. LUO Zhi-gang, LI Zhi-qiang, YUAN Jian, et al. Comprehensive Design of Silty Sand Subgrade Structure System in Africa Coastal Area [J]. Highway, 2017, 62(8):7-11.
- [4] 张宏,钱劲松,戴清,等.长江口细砂作为路基填料的工程特性研究[J].建筑材料学报,2012,15(2):236-240. ZHANG Hong, QIAN Jin-song, DAI Qing, et al. Engineering Properties of the Fine Sand of Yangtze Estuary

- for Subgrade Filling [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15 (2): 236-240.
- [5] 谭鹏, 曹长伟, 资西阳, 等. 滨海细砂作为公路路基填料的工程特性研究 [J]. 公路工程, 2014, 39 (1): 94-98.
TAN Peng, CAO Chang-wei, ZI Xi-yang, et al. Engineering Properties of the Fine Sand of Coastal Area for Highway Subgrade Filling [J]. Highway Engineering, 2014, 39 (1): 94-98.
- [6] 曹长伟, 罗志刚. 非洲滨海公路沿线粉细砂工程特性研究 [J]. 公路, 2015, 60 (9): 78-83.
CAO Chang-wei, LUO Zhi-gang. Study on Engineering Characteristics of Fine Sands along Coastal Highway in Africa [J]. Highway, 2015, 60 (9): 78-83.
- [7] 曹长伟, 罗志刚. 滨海细砂路基施工及质量控制技术 [R]. 北京: 中国路桥工程有限责任公司, 2014.
CAO Chang-wei, LUO Zhi-gang. Construction and Quality Control Technology for Coastal Fine Sand Subgrade [R]. Beijing: China Road and Bridge Corporation, 2014.
- [8] 戴清. 填砂路堤的压实特性与质量控制研究 [D]. 上海: 同济大学, 2009.
DAI Qing. Study on Compaction Characteristics and Quality Control of Sand Filled Subgrade [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [9] 蒋鑫, 凌建明, 李进. 高速公路填砂路基设计若干关键问题 [J]. 地下空间工程学报, 2011, 7 (3): 570-575.
JIANG Xin, LIN Jian-ming, LI Jin. Some Critical Problems on Sand Embankment Design for Expressway [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7 (3): 570-575.
- [10] 姚松柏. 崇明岛接线工程填砂路基施工技术 [D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
YAO Song-bai. Construction Technology of Sand-filled Subgrade in Chongming Island Wiring Project [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [11] 王学芹, 付士刚. 高速公路细砂填筑路基施工技术 [J]. 中国港湾建设, 2011 (3): 73-75.
WANG Xue-qin, FU Shi-gang. Construction Technology of Freeway Roadbed Filling of Fine Sands [J]. China Harbour Engineering, 2011 (3): 73-75.
- [12] 王丽. 高速公路拓宽填砂路基施工工艺与质量控制 [J]. 湖南交通科技, 2008, 34 (1): 72-73, 112.
WANG Li. Construction Technology and Quality Control of Widening Sand Filled Subgrade in Expressway [J]. Hunan Communications Science and Technology, 2008, 34 (1): 72-73, 112.
- [13] 王武平. 浅析填砂路堤施工工艺控制 [J]. 山西建筑, 2009, 35 (22): 312-313.
WANG Wu-ping. Analysis on Construction Technology Control of Sand-filled Subgrade [J]. Shanxi Architecture, 2009, 35 (22): 312-313.
- [14] 吴建强. 高速公路填砂路基施工工艺研究 [J]. 交通标准化, 2010 (10): 96-98.
WU Jian-qiang. Technology Filling Sand Subgrade in Freeway [J]. Transport Standardization, 2010 (10): 96-98.
- [15] 亢凯. 填砂路基施工工艺研究 [J]. 安徽建筑, 2011, 18 (5): 159-161, 94.
KANG Kai. Research on Construction Technology of Sand-filled Subgrade [J]. Anhui Architecture, 2011, 18 (5): 159-161, 94.
- [16] 李振, 谢耿. 粉细砂填筑路基施工工艺分析 [J]. 西部交通科技, 2017, 119 (6): 25-28.
LI Zhen, XIE Geng. Analysis on Construction Technology of Roadbed Filling with Fine Sand [J]. Western China Communications Science of Highway, 2017, 119 (6): 25-28.
- [17] 程培峰, 徐云哲. 基于 ABAQUS 的包边粉砂土路堤边坡稳定性分析 [J]. 公路, 2011 (11): 21-24.
CHENG Pei-feng, XU Yun-zhe. Stability Analysis of Edging Silt Soil Subgrade Slope Based on ABAQUS [J]. Highway, 2011 (11): 21-24.
- [18] 李兵. 填砂路基施工技术要点和质量控制研究 [J]. 工程建设与设计, 2011 (3): 126-129.
LI Bing. Study on the Main Points of Construction Technology and Quality Control for Natural Sand Embankment [J]. Construction & Design for Project, 2011 (3): 126-129.