

掺加橡胶颗粒透水混凝土的路用性能

裴福才¹, 李强¹, 李峰²

1. 山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250014; 2. 山东汇通建设集团有限公司, 山东 济南 250002

摘要:为研究掺加橡胶颗粒透水混凝土的性能, 选用粒径分别为 2.00、0.60、0.18 mm 的等体积橡胶颗粒替代粒径为 2.36~4.75 mm 的细集料, 制备透水混凝土, 橡胶颗粒与水泥的质量比分别为 0.05、0.10、0.15, 研究橡胶颗粒对透水混凝土透水性、力学性能及抗冻性能的影响。试验结果发现: 随橡胶颗粒与水泥质量比的增大, 透水混凝土试件的连通空隙率、透水速率及抗冻融性提高, 抗压强度和抗变形能力减小; 随橡胶颗粒粒径的减小, 透水混凝土试件的连通空隙率、透水速率减小, 抗压强度提高, 抗冻性能变化不大。粒径为 0.18 mm 的橡胶颗粒与水泥的质量比为 0.05 时, 透水混凝土试件的抗压强度和抗变形能力最佳。掺橡胶颗粒透水混凝土的抗冻融性能明显优于普通透水混凝土, 粒径为 0.18 mm 的橡胶颗粒与水泥的质量比为 0.10 时透水混凝土的抗冻融性能最好。

关键词:橡胶颗粒; 透水混凝土; 透水性能; 抗压强度; 抗冻融性; 抗变形能力

中图分类号: U416.216

文献标志码: A

文章编号: 1672-0032(2024)01-0037-06

引用格式: 裴福才, 李强, 李峰. 掺加橡胶颗粒透水混凝土的路用性能[J]. 山东交通学院学报, 2024, 32(1): 37-42.

PEI Fucui, LI Qiang, LI Feng. Pavement performance of permeable concrete mixed with rubber particles [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(1): 37-42.

0 引言

随海绵城市的蓬勃发展, 透水混凝土因透水、透气等优点应用广泛, 可缓解城市内涝, 补充地下水, 调节城市温湿度, 有效缓解城市的热岛效应, 研究透水混凝土的性能具有重要的现实意义^[1]。

通过加入硅粉、外加剂、纤维等材料可改善透水混凝土的路用性能。刘秋美等^[2]发现橡胶颗粒可提高透水混凝土的弹性模量, 但抗压强度和透水性降低。Ganjan 等^[3]研究表明透水混凝土的抗拉压强度随橡胶颗粒用量的增大而先增大后减小。陈永锋等^[4]发现掺入橡胶颗粒使透水混凝土的抗压强度大幅减小, 柔韧性提升, 对透水性的影响不明显。张登祥等^[5]试验研究表明橡胶颗粒与水泥的质量比显著影响透水混凝土的耐磨耗性能。毛阿妮^[6]研究橡胶颗粒的粒径及其与水泥的质量比对透水混凝土的耐磨耗性能及抗冻融性能的影响, 发现橡胶颗粒与水泥的质量比为 0.03 时, 透水混凝土的路用性能最好。解伟等^[7]发现透水混凝土的透水性能和力学性能随橡胶颗粒与水泥的质量比的增大而减弱。范程程^[8]研究橡胶再生透水混凝土, 结果表明掺入橡胶颗粒后透水混凝土的力学性能降低, 韧性明显提高。杨春峰等^[9]发现较细的橡胶颗粒能提高透水混凝土的抗压强度。秦金洲等^[10]研究透水混凝土性能的影响因素, 发现橡胶颗粒细度显著影响透水混凝土的抗压强度及透水系数, 其次为锤击次数、透水混凝土增强剂与水泥的质量比。Su 等^[11]采用 3.0、0.5、0.3 mm 3 组单种橡胶颗粒样品和连续尺寸分级的样品, 等体积代替 20% 的天然细骨料, 研究发现与单一尺寸的橡胶颗粒相比, 连续分级的橡胶混合物的透水性更好。

收稿日期: 2022-04-25

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2021ME004); 住房和城乡建设部科技项目 (2020-K-063)

第一作者简介: 裴福才 (1982—), 男, 山东菏泽人, 高级工程师, 大学本科, 主要研究方向为高速公路建设, E-mail: 747082124@qq.com。

Zhang 等^[12]、Li 等^[13]发现橡胶颗粒的柔软特性有利于减少水泥砂浆的干收缩,提高透水混凝土的耐冻性。Gupta 等^[14]将橡胶聚合物加入透水混凝土,减小透水混凝土在酸腐蚀环境中的质量损失。

为提高橡胶颗粒透水混凝土的性能,可对橡胶进行化学处理。周游^[15]采用 NaOH 溶液和氧化-尿素改性废旧橡胶,发现改性后的橡胶与水泥浆的黏结作用更好,界面裂缝明显缩小。陈永锋等^[16]发现采用硅烷偶联剂对废旧橡胶颗粒改性可极大地改善橡胶透水混凝土的抗压强度。Pelisser 等^[17]发现将橡胶经 NaOH 溶液处理后再加入硅粉,有助于恢复透水混凝土的抗压强度。Khern 等^[18]同时用 NaOH 溶液和次氯酸钙溶液处理废弃轮胎橡胶,可明显改善透水混凝土的抗压强度。已有文献多研究掺入橡胶及橡胶混合物对透水混凝土性能的影响,但未系统研究橡胶颗粒粒径及质量对透水混凝土力学性能的影响。

本文研究掺加橡胶颗粒不同粒径、不同用量时,透水混凝土试件的透水性、抗压强度及抗冻融性能的变化规律,以期提高透水混凝土的路用性能,扩大应用领域。

1 试件制备

试验采用 P. O 42.5 硅酸盐水泥,粗集料为临沂产玄武岩碎石,集料粒径分别为 2.36~4.75、>4.75~9.5、>9.5~13.2 mm,3 个梯度集料的质量比为 2:7:10。橡胶颗粒的密度为 1.12 g/cm³,吸水率小于 10%。

依据实际施工经验,水灰比通常为 0.25~0.40,设定本试验水灰比为 0.30。为确保透排水功能正常,设定目标空隙率为 18%。确定骨料间空隙率,依据目标空隙率采用体积法确定水泥及用水量。选用粒径 d 分别为 2.00、0.60、0.18 mm 的橡胶颗粒,设计 3 种制备方案,橡胶颗粒与水泥的质量比 m 分别为 0.05、0.10、0.15,等体积取代粒径为 2.36~4.75 mm 的细集料,每 m³ 透水混凝土水的用量为 99.59 kg,水泥的用量均为 331.95 kg,未掺橡胶颗粒的集料的用量为 1 676.38 kg。透水混凝土材料用量如表 1 所示。

按材料配比称出各材料用量,采用二次投料法充分混合各原材料,将集料与 1/3 的水倒入搅拌机混合,搅拌 30 s 后倒入水泥、橡胶颗粒等材料,搅拌 60 s 后将剩余的水加入搅拌机中,再搅拌 60 s 后停止。为使混合料中的集料充分嵌锁,装料后对试件进行击实成型,试件的长、宽、高分别为 100、100、100 mm,保证材料处于紧密堆积状态。将密实后的试件在标准养护条件下养护 24 h 后脱模,标准养护条件下养护 7、28 d 后进行相关试验测试。

表 1 透水混凝土材料用量

d/mm	m	每 m ³ 透水混凝土 集料用量/kg	每 m ³ 透水混凝土 橡胶用量/kg
2.00	0.05	1 635.87	16.60
	0.10	1 595.36	33.20
	0.15	1 554.85	49.80
0.60	0.05	1 630.10	16.60
	0.10	1 583.81	33.20
	0.15	1 537.52	49.80
0.18	0.05	1 625.40	16.60
	0.10	1 574.42	33.20
	0.15	1 523.44	49.80

2 透水性能

对养护 28 d 的试件进行空隙率和渗水能力测试,采用无压力渗水仪测试渗水,模拟自然降水条件下试件的透水能力,不同试件的连通空隙率和透水速率如表 2 所示。未掺橡胶颗粒的透水混凝土试件的连通空隙率为 14.96%,透水速率为 7.75 mm/s。

由表 2 可知:橡胶颗粒粒径对透水混凝土的连通空隙率有较大影响,橡胶颗粒用量一定时,随橡胶颗粒粒径的减小,连通空隙率减小, $m=0.05$ 时的透水速率增大, $m=0.10,0.15$ 时的透水速率减小。橡胶颗粒粒径为 2.00 mm 时,透水混凝土的连通空隙率、透水速率随橡胶颗粒用量的增大而增大;橡胶颗粒粒径为 0.60、0.18 mm 时,透水混凝土的连通空隙率、透水速率随橡胶颗粒用量的增大而减小。粒径较小(粒

度较细)的橡胶颗粒不利于透水混凝土试件密实成型,橡胶颗粒变形大,对成型功起缓冲耗散作用,影响骨料的嵌锁密实。粒径目数较小的橡胶颗粒对骨料间空隙起填充作用,减小空隙率^[19-20]。

表2 不同试件的连通空隙率和透水速率

m	连通空隙率/%			透水速率/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	$d=2.00 \text{ mm}$	$d=0.60 \text{ mm}$	$d=0.18 \text{ mm}$	$d=2.00 \text{ mm}$	$d=0.60 \text{ mm}$	$d=0.18 \text{ mm}$
0.05	15.07	14.73	14.57	7.41	7.47	7.56
0.10	15.57	14.54	13.37	8.23	7.30	7.07
0.15	16.10	14.05	12.91	8.64	7.11	6.64

3 力学性能

3.1 抗压强度

测试分别养护7、28 d的透水混凝土试件的抗压强度,分析橡胶颗粒粒径及用量对透水混凝土性能的影响,结果如表3所示。未掺橡胶颗粒的透水混凝土养护7、28 d的抗压强度分别为17.60、21.60 MPa。

表3 不同养护龄期下不同试件的抗压强度

m	7 d 抗压强度/MPa			28 d 抗压强度/MPa		
	$d=2.00 \text{ mm}$	$d=0.60 \text{ mm}$	$d=0.18 \text{ mm}$	$d=2.00 \text{ mm}$	$d=0.60 \text{ mm}$	$d=0.18 \text{ mm}$
0.05	15.50	16.51	16.51	19.51	21.20	22.90
0.10	11.70	12.20	14.90	14.04	12.70	16.50
0.15	7.20	7.11	7.09	9.35	11.50	11.50

由表3可知:制备方案、养护龄期相同时,透水混凝土试件的抗压强度基本随橡胶颗粒粒径的减小而增大;养护龄期相同、橡胶颗粒粒径相同时,透水混凝土试件的抗压强度随橡胶颗粒用量的增大而减小,且橡胶颗粒用量越大,试件的抗压强度减小幅度越大。

橡胶颗粒的粒径为0.18 mm、 $m=0.10$ 时制备的透水混凝土试件,养护7 d后的抗压强度与未掺橡胶颗粒的试件相比变化不大,养护28 d后前者的抗压强度却有一定程度增大。随橡胶颗粒与水泥质量比的继续增大,透水混凝土试件的抗压强度快速减小。主要原因是适量的细橡胶颗粒能填充透水混凝土粗集料间的空隙,使混凝土更密实,增大粗集料间的黏结面积,增大透水混凝土的抗压强度。橡胶颗粒刚度小,与水泥的结合能力差,橡胶颗粒较多时,大量水泥浆裹覆在橡胶颗粒表面,集料周围的水泥浆包裹厚度减小,透水混凝土的抗压强度减小^[21]。

3.2 抗变形能力

不同透水混凝土的破坏形态如图1所示,掺橡胶颗粒试件的破坏形态有明显的塑性特征。橡胶颗粒粒径为0.18 mm时, $m=0.05$ 时制备的透水混凝土试件的抗压强度最大。透水混凝土多应用在非机动车道、广场和停车场等地,路面作用荷载较小,变形能力对透水混凝土的开裂有重要影响。研究养护7 d、橡胶颗粒粒径为80目的透水混凝土试件在荷载作用下的抗变形能力,结果如图2所示。

由图2可知:各透水混凝土试件的位移均随荷载的增大而增大,荷载增大到一定范围后位移继续增大,荷载减小;透水混凝土试件的位移随橡胶颗粒用量的增大在加载初期基本相同,随荷载继续增大而迅速增大,且位移-荷载曲线差异显著,最大荷载对应的试件位移随橡胶颗粒用量的增大而显著增大。 $m=0.05$ 时制备的试件的位移-荷载曲线与未掺加橡胶颗粒的试件相似,二者在加载初期差异明显,前者的初始位移增大较快,随荷载继续增大,前者的荷载-位移曲线的斜率与后者接近。因此,掺入少量橡胶颗

粒可提高透水混凝土的抗变形能力。

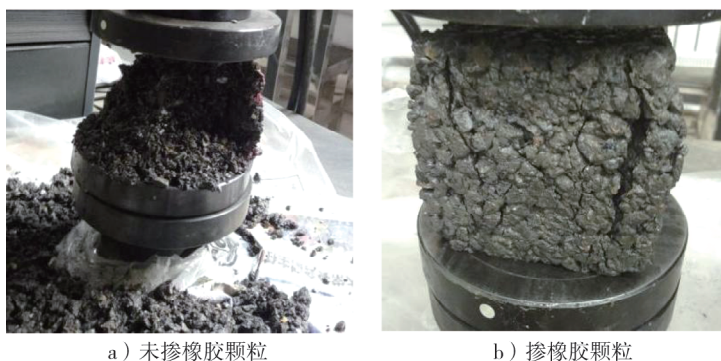


图 1 不同透水混凝土的破坏形态

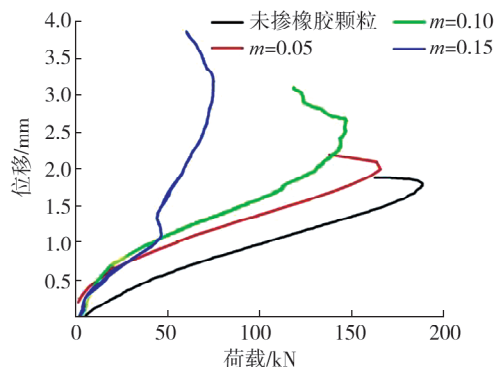


图 2 掺 80 目橡胶颗粒试件的位移-荷载曲线

掺加橡胶颗粒可提升透水混凝土的韧性,提高抗变形能力。橡胶颗粒的弹性模量比骨料和硬化水泥浆体小,但变形恢复能力强。透水混凝土中的橡胶颗粒被水泥浆体包裹形成水泥胶浆,橡胶颗粒较少时,橡胶颗粒间距较大,水泥胶浆的性质主要由水泥硬化产物性质决定;橡胶颗粒较多时,橡胶颗粒间逐渐形成骨架,水泥胶浆的性质明显受橡胶颗粒影响。橡胶颗粒的用量有合理范围,掺加粒径为 80 目的橡胶颗粒 $m=0.10$ 时有利于提升透水混凝土的抗压强度和抗变形能力。

3.3 抗冻性能

对制备的试件进行冻融试验,比较不同冻融循环次数下,橡胶颗粒粒径和用量对透水混凝土抗冻性能的影响。冻融试验前测试各组试件的初始抗压强度。不同冻融循环次数后的抗压强度与初始抗压强度之比为残留冻融强度比,作为抗冻融能力的评价指标。透水混凝土的空隙率较大,空隙被水填满的情况较少,试件先浸水 24 h,取出放置 10 min,使部分水自由流出后再进行冻融试验,不同透水混凝土试件的残留冻融强度比如表 4 所示。未掺橡胶颗粒的透水混凝土试件冻融 50、100、150 次的残留冻融强度比分别为 0.94、0.89、0.82。

表 4 不同透水混凝土试件的残留冻融强度比

m	冻融循环 50 次的残留冻融强度比			冻融循环 100 次的残留冻融强度比			冻融循环 150 次的残留冻融强度比		
	$d=2.00\text{ mm}$	$d=0.60\text{ mm}$	$d=0.18\text{ mm}$	$d=2.00\text{ mm}$	$d=0.60\text{ mm}$	$d=0.18\text{ mm}$	$d=2.00\text{ mm}$	$d=0.60\text{ mm}$	$d=0.18\text{ mm}$
0.05	0.96	0.96	0.98	0.92	0.93	0.95	0.87	0.88	0.89
0.10	0.97	0.98	0.98	0.94	0.95	0.96	0.89	0.90	0.92
0.15	0.97	0.97	0.99	0.94	0.94	0.96	0.87	0.89	0.89

由表 4 可知:掺橡胶颗粒试件的残留冻融强度比均比未掺加橡胶颗粒的试件大,掺加橡胶颗粒明显改善透水混凝土的抗冻性能;同一制备方案、橡胶颗粒粒径相同时,透水混凝土试件的残留冻融强度比均随冻融次数的增大而减小;橡胶颗粒粒径相同、冻融循环次数相同时,随橡胶颗粒用量的增大,试件的残留冻融强度比变化不大;同一制备方案、冻融循环次数相同时,随橡胶颗粒粒径的减小,试件的残留冻融强度比变化不大。 $m=0.15$ 时透水混凝土试件的残留冻融强度比最大。

透水混凝土中宏观空隙较多,冻融过程中可消耗一部分水分体积膨胀造成的压力,但水泥硬化浆体及其与骨料间的界面过渡区产生冻融微细观损伤。加入橡胶颗粒后,橡胶颗粒受力发生弹性变形,消耗部分水泥浆体内微小空隙及浆体间的封闭空隙中由水分结冰膨胀造成的压力,减少浆体及界面的破坏。橡胶颗粒太多时,水泥浆体对橡胶颗粒的包裹厚度较小,二者的界面黏结作用变弱,冻融作用下易在水泥浆-橡胶颗粒材料界面产生损害,透水混凝土的抗冻性能降低。

4 结论

1) 橡胶颗粒粒径和用量对透水混凝土的连通空隙率和透水能力均有明显影响。随粒径目数相对较小的橡胶颗粒用量的增大,透水混凝土的连通空隙率显著减小,透水能力降低。随粒径目数相对较大的橡胶颗粒用量增大时,透水混凝土试件不易密实成型,透水混凝土的连通空隙率增大。

2) 随橡胶颗粒用量的增大,透水混凝土的抗压强度逐渐减小。橡胶颗粒用量相同时,粒径为 80 目的橡胶颗粒的透水混凝土抗压强度较高;橡胶颗粒用量较小时,透水混凝土的抗变形能力显著提高。

3) 橡胶颗粒用量相同时,透水混凝土试件的抗压强度随冻融次数的增大而减小,一定量的橡胶颗粒可提高透水混凝土的抗冻融能力。冻融环境下,综合考虑透水混凝土的抗压强度和残留冻融强度比,应掺加粒径为 80 目的橡胶颗粒,与水泥的质量比为 0.10。

后续应进一步研究更细橡胶颗粒的合理用量,分析橡胶颗粒与水泥浆体的相互作用机理。

参考文献:

- [1] 李斌. 掺橡胶颗粒透水混凝土的性能研究[D]. 青岛:山东科技大学,2017.
- [2] 刘秋美,皮亮,杨艳萍,等. 稻壳灰橡胶透水混凝土的制备及性能研究[J]. 贵州农机化,2021(1):18-21.
- [3] GANJIAN E, KHORAMI M, MAGHSOUDI A A. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(5):1828-1836.
- [4] 陈永锋,袁松年,任隽丰,等. 谈硅烷偶联剂对橡胶透水混凝土强度提升效果[J]. 山西建筑,2021,47(5):108-110.
- [5] 张登祥,毛阿妮. 废旧橡胶微粒对透水混凝土耐磨耗性能影响试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(2):57-61.
- [6] 毛阿妮. 乳胶粉及橡胶对透水混凝土磨耗及冻融性能的影响研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2019.
- [7] 解伟,范程程,陈爱玖,等. 再生骨料和橡胶颗粒对透水混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2017,36(5):1492-1498.
- [8] 范程程. 橡胶再生透水混凝土基本性能试验研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2017.
- [9] 杨春峰,孙明博,王培竹. 废旧橡胶集料透水混凝土强度和透水性能试验[J]. 沈阳大学学报(自然科学版),2014,26(3):227-229.
- [10] 秦金洲,梁晓晖. 废旧橡胶颗粒再生骨料透水混凝土抗压强度和透水性能正交试验研究[J]. 中国建材科技,2021,30(5):55-58.
- [11] SU H, YANG J, LING T C, et al. Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 91:288-296.
- [12] ZHANG Y M, CHEN S X, CHEN B, et al. Dry shrinkage, frost resistance and permeability of rubber included concrete[J]. Key Engineering Materials, 2006(302/303):120-124.
- [13] LI Y, ZHANG S, WANG R, et al. Potential use of waste tire rubber as aggregate in cementconcrete: a comprehensive review[J]. Construction and Building Materials, 2019, 225:1183-1201.
- [14] GUPTA T, SIDDIQUE S, SHARMA R K, et al. Behaviour of waste rubber powder and hybrid rubber concrete in aggressive environment[J]. Construction and Building Materials, 2019, 217:283-291.
- [15] 周游. 改性废旧橡胶透水混凝土基本性能研究[D]. 吉林:东北电力大学,2021.
- [16] 陈永锋,袁松年,任隽丰,等. 橡胶颗粒对透水混凝土强度和透水性能影响研究[J]. 山西建筑,2020,46(15):3-5.
- [17] PELISSER F, ZAVARISE N, LONGO T A, et al. Concrete made with recycled tire rubber: effect of alkaline activation and silica fume addition[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(6/7):757-763.
- [18] KHERN Y C, PAUL S C, KONG S Y, et al. Impact of chemically treated waste rubber tire aggregates on mechanical, durability and thermal properties of concrete[J]. Frontiers in Materials, 2020, 7:90.
- [19] 路沙沙,麻凤海,邓飞. 橡胶颗粒掺量、粒径影响橡胶混凝土性能的试验分析[J]. 硅酸盐通报,2014,33(10):2477-2483.
- [20] 张茂林,杜红秀. 聚丙烯纤维及橡胶颗粒对透水混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2018,37(4):1303-1308.
- [21] 陈永锋,袁松年,任隽丰,等. 橡胶颗粒对透水混凝土强度和透水性能影响研究[J]. 山西建筑,2020,46(15):3-5.

Pavement performance of permeable concrete mixed with rubber particles

PEI Fucui¹, LI Qiang¹, LI Feng²

1. Shandong Luqiao Group Co., Ltd., Jinan 250014, China; 2. Shandong Huitong Construction Co., Ltd., Jinan 250002, China

Abstract: To study the performance of permeable concrete with rubber particles, rubber particles with diameters of 2.00, 0.60, and 0.18 mm are selected and mixed with concrete. The mass ratios of rubber particles to cement are 0.05, 0.10, and 0.15, respectively. The fine aggregate with particle size of 2.36 to 4.75 mm is replaced with equivalent volume by rubber particles. The effects of rubber particles on the permeability, mechanical properties, and freeze-thaw resistance of permeable concrete are investigated. Experimental results show that as the mass ratio of rubber particles to cement increases, the connected void ratio, permeability rate, and freeze-thaw resistance of the concrete specimens improves, while the compressive strength and deformation resistance decreases. As the particle size of rubber particles decreases, the connected void ratio and water permeability rate of the permeable concrete specimens decreases, while the compressive strength increases slightly, and the freeze-thaw performance remains relatively stable. When the mass ratio of 0.18 mm rubber particles to cement is 0.05, the compressive strength and deformation resistance of the permeable concrete specimens are the best. The freeze-thaw resistance of rubber particle-modified permeable concrete is significantly better than that of ordinary permeable concrete. When the mass ratio of 0.18 mm rubber particles to cement is 0.10, the freeze-thaw resistance of permeable concrete is the highest.

Keywords: rubber particle; permeable concrete; permeability; compressive strength; freeze-thaw resistance; deformation resistance

(责任编辑:王惠)

(上接第 36 页)

three-dimensional soil foundation model of a rectangular prism is established using the finite element software ABAQUS. The mechanical response of stone-filled roadbeds compacted with 36-ton and 22-ton rollers under two different vibratory forces of 500 kN and 700 kN is simulated and analyzed. In the field test section, 36-ton roller compactor are used to compact stone-filled roadbeds with loose thicknesses of 75 cm and 85 cm, while a 26-ton roller is used to compact a stone-filled roadbed with a loose thickness of 40 cm. Soil pressure is measured using soil pressure sensors, and compaction quality is controlled based on pore ratio and settlement difference. The results show that the stresses in the compacted roadbeds using 36-ton roller are 1.9 times and 1.5 times higher than those using 22-ton roller under the two different vibratory forces. Soil pressure is mainly generated by the vibration of the roller compactors, which decreases with increasing depth from the road surface. The decrease in soil pressure with depth becomes smaller as the depth from the ground surface increases. The field test results matches the numerical simulation results. After six passes of compaction by the roller compactor, the pore ratio of the roadbeds with both loose thicknesses is less than 22%. The recommended control index for settlement difference is 3.0 mm. The optimal working efficiency of compacting the roadbed with a loose thickness of 85 cm using a 36-ton roller is 60% higher than that of a 26-ton roller, leading to a 36% reduction in construction cost.

Keywords: numerical simulation; rock-filled roadbed; rapid construction; soil pressure; porosity; settlement difference

(责任编辑:王惠)