

# 海绵城市透水混凝土路面堵塞及渗透性能研究

朱润田<sup>1</sup>, 刘珊<sup>1</sup>, 张小明<sup>1</sup>, 刘富强<sup>2</sup>, 万正武<sup>1</sup>, 郑木莲<sup>2</sup>

(1. 珠海鹤港高速公路有限公司, 广东 珠海 519000;

2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:**针对海绵城市透水混凝土路面容易堵塞的问题,通过设计堵塞和渗透性能试验,研究堵塞物对不同级配面层、基层及面层基层组合透水混凝土结构渗透性能的影响规律及不同透水铺装结构层的堵塞物敏感粒径。结果表明:粗型级配下的透水混凝土面层和基层具有更好的抗渗透衰减性能;面层与基层组合结构下,透水残余系数主要取决于面层结构的选择,与基层结构几乎无关;面层、基层及面层基层组合结构的堵塞物敏感粒径占比较大的粒径范围是0.3~0.6 mm,在设计有级配的透水混凝土结构时,在保证强度的前提下适当提高9.5~16 mm集料含量;通过对不同结构透水残余系数衰减公式的回归,得到了透水铺装层渗透性能衰减规律,可指导透水铺装结构层进行真空吸附或压力吹扫清理维护的时机选择,从而保证其使用性能。

**关键词:**海绵城市; 透水混凝土; 渗透性能; 衰减规律; 敏感粒径

**中图分类号:** U416.216      **文献标志码:** A

为了缓解中国城镇化建设过程中出现的水环境问题,2017年提出了“海绵城市”新理念,透水铺装技术是从道路工程角度响应该理念的一种具体措施<sup>[1]</sup>。海绵城市透水铺装对雨水主要发挥“渗”和“蓄”的作用。通过已有学者及机构对海绵城市透水铺装的研究和应用表明,随着透水铺装结构使用时间的延长,其结构渗透性能会逐渐衰减<sup>[2-11]</sup>。通过对中国已有的透水铺装路面进行数据搜集可知,透水铺装结构使用5年后其渗透性能仅为道路初始渗透性能的10%<sup>[12]</sup>。由于路表面的灰尘或其他杂质通过路面结构孔隙进入路面结构内部,堵塞路面结构的连通孔隙,进而阻断水的渗流路径,最后造成透水铺装结构的渗透性能大大降低<sup>[13-15]</sup>。目前中国对透水混凝土路面的研究主要集中在结构层组合设计、结构层集料配比选取、不同结构层的渗透性能等方面<sup>[16-19]</sup>。DRAKE的研究表明<sup>[20]</sup>:路面结构在不维护的状态下,5~6年的使用可使85%以上的透水混凝土路面透水系数 $\leq 50$  mm/h。

该文通过室内堵塞试验分析透水混凝土铺装面层、基层及组合结构的渗透性能衰减规律及不同结构堵塞颗粒敏感粒径,为海绵城市透水混凝土路面铺装的建设提供理论指导。

## 1 材料与试验

### 1.1 透水混凝土路面原材料与级配

(1) 水泥。采用P.O42.5级普通硅酸盐水泥,其各项指标满足相关规范要求。

(2) 集料。粗集料采用干净的石灰岩碎石,技术指标满足JTGE42—2002<sup>[21]</sup>要求,试验室测得集料技术指标如表1所示。

表1 粗集料(石灰岩)技术指标实测值

粒径/ mm	表观密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	粒径/ mm	表观密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )
2.36~4.75	2.83	16~19.2	2.85
4.75~9.5	2.72	19.2~26.5	2.73
9.5~13.2	2.72	26.5~31.5	2.79
13.2~16	2.73		

(3) 外加剂。采用萘系减水剂,减水剂掺量为0.5%,符合GB/T 8077—2012《混凝土外加剂均质性试验方法》的相关规定<sup>[22]</sup>。

(4) 水。水是透水混凝土中必不可少的原料,参与水泥的水化反应,拌和用水一般不作特殊要求,水中保证无油污无有害杂质即可。

收稿日期:2021-05-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52078051);珠海交通集团有限公司科技项目(编号:JT-HG-2020-21)

作者简介:朱润田,男,硕士,工程师,E-mail: 741617642@qq.com

(5) 级配选择。集料级配是影响透水混凝土强度形成的重要因素。该研究选取级配如表 2、3 所示。

表 2 透水混凝土面层级配

筛孔尺寸/ mm	分计筛余百分率/%		
	M1	M2	M3
13.2~16	18	10	10
9.5~13.2	12	15	5
4.75~9.5	70	75	85

表 3 透水混凝土基层级配

筛孔尺寸/ mm	分计筛余百分率/%		
	G-1	G-2	G-3
26.5~31.5	0	0	0
16~26.5	20	20	0
9.5~16	80	20	25
4.75~9.5	0	60	75

1.2 堵塞材料

选择良好的天气,在西安市的不同路面收集堵塞物样品。堵塞物选取地点和场所如表 4 所示。

表 4 堵塞物选取地点及场所

场所类型	地点
快速路和主干路	二环南路、长安中路、友谊东路
次干路和支路	文艺南路、建设路、草场坡
停车场	百脑汇、赛格电脑城、长安大学校内
人行道	友谊东路、小寨东路、文艺南路

通过试验室对收集堵塞物样品的筛分可知,堵塞物粒径主要集中在 0.15~4.75 mm,故该文采用不同粒径的砂组合模拟堵塞物颗粒,模拟堵塞物的级配砂配比如表 5 所示。

表 5 砂级配组合

粒径/mm	级配/%	粒径/mm	级配/%
0.15~0.3	25	0.6~1.18	25
0.3~0.6	25	1.18~2.36	25

1.3 透水性能测试试验

采用自主研发设备进行模拟试验,试验设备如图 1 所示。保持模拟降雨的喷头喷洒强度不变,不断等量地向降雨中撒布级配砂,每次撒布砂的质量为 5 g,每次撒完砂后测试并记录该状况下的渗透系数,级配砂添加 20 次后终止试验。完成试验后,将试验用水经 0.15 mm 的筛过滤,然后将收集到的试验用砂放入不锈钢托盘中,并将其置于烘箱,等收集到试验用砂完全



图 1 渗透性能测试试验

干燥后进行筛分、称重<sup>[23]</sup>。

为了评价透水铺装结构的渗透性能衰减规律,将透水残余系数为评价指标研究透水铺装结构的渗透性能衰减规律。透水残余系数计算式见式(1):

$$C = \frac{K_{di}}{K_c} \times 100\% \tag{1}$$

式中:  $C$  为透水残余系数(%);  $K_c$  为未发生堵塞时的初始渗透系数(cm/s);  $K_{di}$  为每次堵塞后的渗透系数(cm/s)。

2 透水混凝土面层渗透性能衰减规律

2.1 面层渗透性能衰减规律

不同投入砂质量下,不同级配透水混凝土面层渗透系数变化情况如图 2、3 所示。

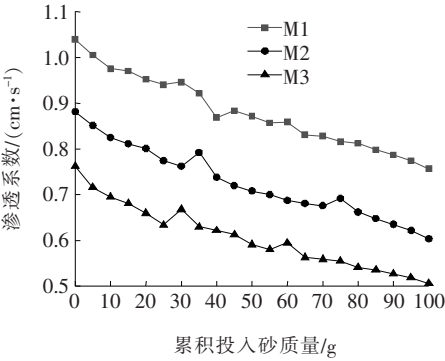


图 2 面层渗透系数衰减趋势

图 2 显示:随着累积投入砂质量的增加,面层的渗透系数均逐渐减小。由图 3 可知:当累计投入砂质量为 100 g 时,M1 级配透水混凝土面层的透水残余系数为初始值的 72.8%,而 M3 级配透水混凝土面层的透水残余系数为初始值的 66.4%。M1 型级配中 9.5~13.2 mm 及 13.2~16 mm 粒径的集料占比较 M3 型级配高。综合透水铺装面层结构的矿料级配及透水残余系数试验结果可知,透水混凝土面层级配越粗,其渗透性能衰减越缓慢。在进行结构设计时应适当增加粗集料的用量。

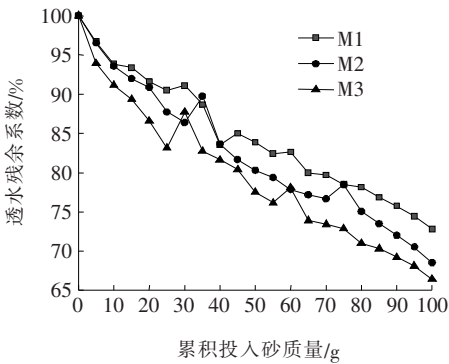


图 3 面层透水残余系数衰减趋势

透水混凝土面层透水残余系数与砂用量间具有良好的相关关系,M1、M2、M3 级配透水混凝土面层的透水残余系数衰减公式见式(2)~(4),通过该式可判断使用该路面面层结构路段的堵塞情况,从而制定相应的透水混凝土面层堵塞物清除措施。

$$C_{M1}=8.0\times10^{-10}m^6-3.0\times10^{-7}m^5+3.0\times10^{-5}m^4-0.002m^3+0.0551m^2-0.9469m+100$$
  
( $R=0.9879$ )

$$C_{M2}=1.0\times10^{-9}m^6-4.0\times10^{-7}m^5+5.0\times10^{-5}m^4-0.0027m^3+0.0747m^2-1.206m+100.36$$
  
( $R=0.9836$ )

$$C_{M3}=5.0\times10^{-10}m^6-2.0\times10^{-7}m^5+3.0\times10^{-5}m^4-0.002m^3+0.0689m^2-1.4331m+99.945$$
  
( $R=0.9842$ )

式中: $C_{M1}$ 、 $C_{M2}$  和  $C_{M3}$  分别为面层 M1、M2 和 M3 的透水残余系数(%); $m$  为累积投入砂质量(g)。

2.2 面层堵塞颗粒敏感粒径

透水混凝土面层堵塞材料筛分结果见表 6。不同面层级配堵塞砂占投入砂总量百分比情况见图 4。

表 6 面层堵塞砂材料筛分结果

粒径/ mm	烘干后筛分质量/g			实际堵塞质量/g		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3
1.18~2.36	23.55	24.16	24.35	1.45	0.84	0.65
0.6~1.18	17.07	17.24	17.61	7.93	7.76	7.39
0.3~0.6	13.77	12.81	11.96	11.23	12.19	13.04
0.15~0.3	21.54	20.13	19.43	3.46	4.87	5.57
总质量	75.93	74.34	73.35	24.07	25.66	26.65

图 4 显示:随着面层集料 9.5~16 mm 用量的增加,透水混凝土面层堵塞的砂粒敏感粒径增大,堵塞砂粒粗颗粒的质量占总体砂粒的比例也增大。经筛分试

验测定,引起透水混凝土面层不同级配下的砂粒敏感粒径为 0.3~0.6 mm。故在进行面层级配选择时,可适当提高 9.5~16 mm 集料的用量,进而在全寿命周期内保持较好的渗透性能,指导结构的优化和设计。

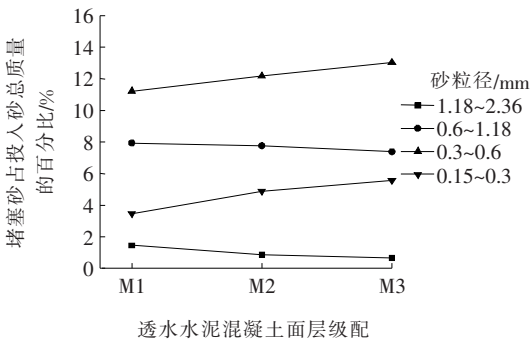


图 4 面层结构堵塞质量占比

3 透水混凝土基层渗透性能衰减规律

3.1 基层渗透性能衰减规律

不同投入砂质量下,不同级配透水混凝土基层渗透系数变化情况如图 5、6 所示。

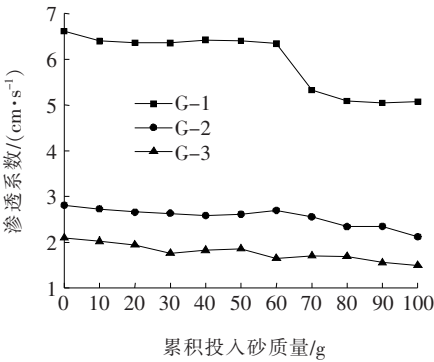


图 5 透水混凝土基层渗透系数衰减趋势

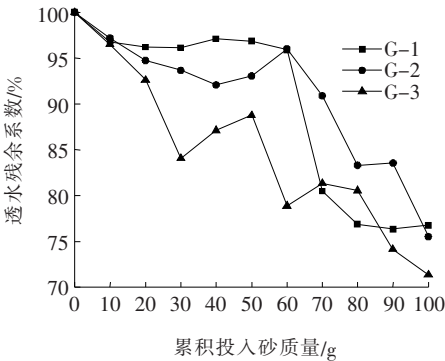


图 6 透水混凝土基层透水残余系数衰减趋势

图 5、6 显示:不同级配透水混凝土基层材料随着

累计投入砂质量的增加,渗透性能随之出现不同程度的衰减。当累计投入砂质量为 100 g 时,G-1 级配透水混凝土基层的透水残余系数为初始值的 76.8%,G-2、G-3 级配透水混凝土基层的透水残余系数分别为初始值的 75.5%和 71.4%。观察 G-1 可发现,累积投入砂质量在 60 g 之前,材料的渗透性能保持了较高的水平,几乎没有出现降低,而投入质量达到 70 g 时,材料的透水残余系数从 95.9%突然降低到 80.5%,出现断崖式的降低。在此种级配下形成的孔隙结构较为特殊,在模拟堵塞时,初期粗砂进入孔隙内部,颗粒间彼此嵌挤,由于粗砂粒径较大,颗粒间的间隙也较大,当进入孔隙的砂的质量未达到一定量时不会对结构的透水性能产生较大的影响。随着累积砂投入质量的增加,孔隙中的粗砂颗粒越来越多,水流的冲刷作用减弱,原本能随水流作用冲出的细颗粒随着孔隙中粗颗粒的累积越来越难被带出路面结构,细砂直接进入孔隙中已发生堵塞的粗颗粒间隙中,将渗透通路彻底堵塞,故造成结构渗透性能的突然下降。

透水混凝土基层透水残余系数与砂用量间具有良好的相关关系,G-1、G-2、G-3 级配透水混凝土基层的透水残余系数衰减公式见式(5)~(7),通过该式可判断使用该路面基层结构路段的堵塞情况,从而制定相应的透水混凝土基层堵塞物清除措施,保证其透水性能。

$$C_{G1} = -4.0 \times 10^{-9} m^6 + 1.0 \times 10^{-6} m^5 - 0.000 1 m^4 + 0.006 m^3 - 0.114 m^2 + 0.466 3 m + 99.762 (R = 0.970 1)$$

(5)

$$C_{G2} = -2.0 \times 10^{-9} m^6 + 6.0 \times 10^{-7} m^5 - 7.0 \times 10^{-5} m^4 + 0.003 7 m^3 - 0.082 3 m^2 + 0.345 5 m + 99.781 (R = 0.954)$$

(6)

$$C_{G3} = -2.0 \times 10^{-9} m^6 + 5.0 \times 10^{-7} m^5 - 6.0 \times 10^{-5} m^4 + 0.003 2 m^3 - 0.075 3 m^2 + 0.156 4 m + 100.03 (R = 0.928 3)$$

(7)

式中: $C_{G1}$ 、 $C_{G2}$  和  $C_{G3}$  分别为基层 G-1、G-2 和 G-3 的透水残余系数(%); $m$  为累积投入砂质量(g)。

3.2 基层堵塞颗粒敏感粒径

不同级配透水混凝土基层堵塞材料筛分结果见表 7。堵塞砂占投入砂总质量百分比结果见图 7。

图 7 显示:造成透水混凝土基层堵塞砂粒的粒径越大,则透水混凝土基层级配粒径也越粗。造成 G-1、G-2 和 G-3 级配透水混凝土基层堵塞的敏感粒径范围为 0.3~0.6 mm,G-1 级配透水混凝土基层中造成堵塞的敏感粒径还包括 0.6~1.18 mm,说明

表 7 透水混凝土基层材料堵塞砂筛分表

粒径/ mm	烘干后筛分质量/g			实际堵塞质量/g		
	G-1	G-2	G-3	G-1	G-2	G-3
1.18~2.36	19.10	23.25	24.07	5.90	1.75	0.93
0.6~1.18	15.45	18.02	17.62	9.55	6.98	7.38
0.3~0.6	14.20	13.50	13.23	10.8	11.50	11.77
0.15~0.3	19.37	21.99	20.61	5.63	3.01	4.39
总质量	68.12	76.76	75.53	31.88	23.24	24.47

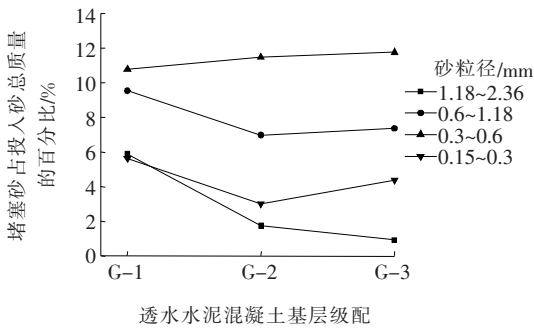


图 7 有级配基层结构堵塞质量占比

随着混合料中 9.5 mm 通过率的增加,透水混凝土基层堵塞砂粒的敏感粒径也增大。对比 G-2 与 G-3 的试验结果可知:造成堵塞时的砂粒质量分别为 23.24、24.47 g,质量占比分别为 30.28%、32.40%,折线较为平缓,未发生突变现象,表明集料粒径 9.5 mm 的通过率相差不大的基层级配下,堵塞物质量占比较大的粒径集中在 0.3~0.6 mm,而 0.6~1.18、0.15~0.3 和 1.18~2.36 mm 的占比较小,说明基层堵塞的敏感性较低。

通过对基层堵塞颗粒敏感粒径的研究可知,在保证透水结构层结构强度的前提下,适当增大 9.5 mm 集料的含量可有效提高透水铺装基层的渗透性能。

4 面层与基层组合透水混凝土结构渗透性能衰减规律

4.1 组合结构渗透性能衰减规律

为了研究面层与基层组合透水混凝土结构的堵塞衰减规律,将不同级配的透水水泥混凝土面层结构与 15 cm 厚的单粒级(9.5~16 mm)透水水泥混凝土组合(16s)进行堵塞试验测试,测试结果如图 8、9 所示。

由图 8 可知:透水水泥混凝土组合结构的渗透性能衰减规律与不同级配透水混凝土面层和基层渗透性能衰减规律相似。M1+16s 在累积投入砂的质量达



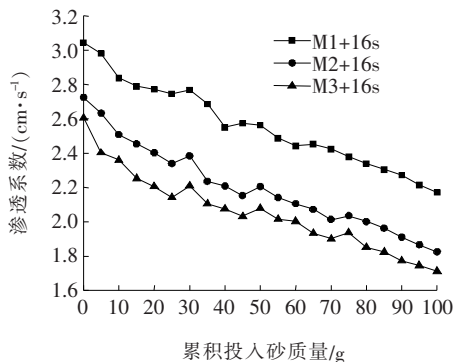


图 8 组合结构渗透系数衰减趋势

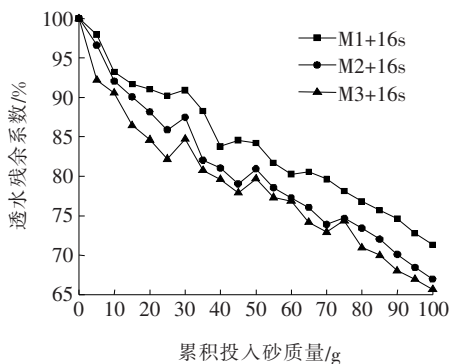


图 9 组合结构透水残余系数趋势

到 100 g 时,拥有 3 种组合内最大的透水残余系数,约为初始渗透性能的 71.33%,M2+16s 与 M3+16s 的透水残余系数分别为 66.99%和 65.70%,单一面层结构下 M1 的透水残余系数为初始值的 72.813%,M2 为 68.523%,M3 为初始值的 66.430%。

由试验结果可知:透水残余系数主要取决于面层结构的选择,与基层结构几乎无关。在投入砂质量相同时,组合结构的透水残余系数略低于单一面层结构。随着面层级配中粗颗粒的增大,结构的抗渗透衰减能力也有一定程度的增加。每经过一段时间,组合结构的渗透系数都会有一定程度的恢复,原本堵塞孔隙的细砂在水流的作用下从孔隙中流出。但组合结构在透水残余系数的突变点处高度要略低于单面层结构,原因是组合结构的厚度由原来的 15 cm 增加到 30 cm,随厚度的增加水流需要穿越的长度也增加,势必要消耗更多的能量,对堵塞颗粒的冲刷作用降低,导致组合结构的性能恢复程度低于面层透水结构<sup>[24-25]</sup>。

由图 9 可知:透水水泥混凝土组合结构透水残余系数与砂用量间具有良好的相关关系,M1+16s、M2+16s、M3+16s 组合结构的透水残余系数衰减公式见(8)~(10),通过该式可判断使用该路面结构路段的堵塞情况,从而制定相应的堵塞物清除措施。

$$C = 9.0 \times 10^{-10} m^6 - 3.0 \times 10^{-7} m^5 + 4.0 \times 10^{-5} m^4 - 0.002 2 m^3 + 0.065 3 m^2 - 1.129 1 m + 100.57 (R=0.987 8) \quad (8)$$

$$C = 4.0 \times 10^{-10} m^6 - 1.0 \times 10^{-7} m^5 + 2.0 \times 10^{-5} m^4 - 0.001 1 m^3 + 0.038 m^2 - 1.044 m + 100.22 (R=0.989 3) \quad (9)$$

$$C = 6.0 \times 10^{-10} m^6 - 2.0 \times 10^{-7} m^5 + 3.0 \times 10^{-5} m^4 - 0.001 9 m^3 + 0.071 m^2 - 1.591 2 m + 99.696 (R=0.986 9) \quad (10)$$

#### 4.2 组合结构堵塞颗粒敏感粒径

不同透水水泥混凝土组合结构的堵塞颗粒筛分结果如图 10 所示。

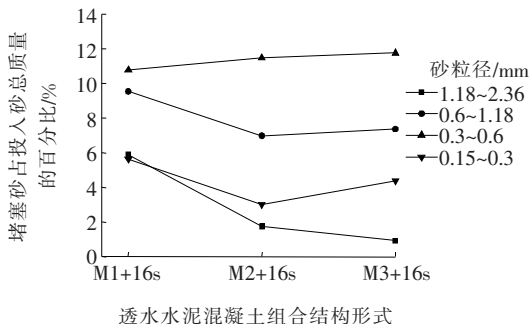


图 10 水泥混凝土组合结构堵塞质量占比

由图 10 可得:① 透水水泥混凝土组合结构的堵塞敏感粒径变化规律与透水水泥混凝土单一面层结构下的堵塞敏感粒径相似。基层结构相同时,随面层集料 9.5~16 mm 用量的增加,造成堵塞透水水泥混凝土组合结构的砂粒敏感粒径也增大;② 造成结构堵塞的颗粒基本集中在面层结构中,对基层结构几乎不产生影响;③ 组合结构内的砂粒质量一般略高于单一面层结构下的砂质量,原因是组合结构厚度大于单一面层结构,当孔隙被砂粒堵塞时由于结构的厚度较大使得砂粒一旦进入结构较难再次被水流携带而出,故堵塞砂粒质量高于单一面层结构。因此在进行结构组合设计时,应重点考虑设计合理的面层结构,以改善透水水泥混凝土组合结构渗透性能的衰减。

## 5 结论

通过设计不同路面结构层堵塞和渗透性能试验,分析了级配砂对不同级配面层、基层以及面层基层组合透水混凝土结构渗透性能的影响规律,同时还分析了不同结构层的堵塞物敏感粒径,得到以下结论:

(1) 透水混凝土面层级配选取时,适当提高 9.5~16 mm 集料用量,可使路面结构在全寿命周期内保持

较好的渗透性能。

(2) G-1级配透水混凝土的渗透系数和透水残余系数均优于G-2和G-3级配,表明要使透水混凝土基层具有良好的渗透性能,须选择粗型级配。

(3) 面层与基层组合结构下,透水残余系数主要取决于面层结构的选择,与基层结构几乎无关。在投入砂质量相同时,组合结构的透水残余系数略低于单一面层结构。

(4) 面层、基层及面层基层组合结构的堵塞物敏感粒径占比较大的粒径范围为 $0.3\sim 0.6\text{ mm}$ 。故在设计有级配透水混凝土结构时,在保证强度的前提下可以适当提高集料的粒径。

(5) 通过对不同结构透水残余系数衰减公式的回归,得到了透水铺装层渗透性能衰减规律,可指导透水铺装结构层进行真空吸附或压力吹扫清理维护的时机选择,从而保证其使用性能。

## 参考文献:

[1] 应君,张青萍.海绵城市理念下城市透水性铺装的应用研究[J].现代城市研究,2016(7):41-46.

[2] 赵丽华,杨志浩,王侃,等.基于透水性能的全透水沥青路面结构设计[J].中外公路,2019,39(4):26-32.

[3] 司建辉,午泽伟,许斌,等.海绵城市预制装配式钢筋混凝土渗井结构有限元优化研究[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(12):1 071-1 077.

[4] ZHAO Hui, MA Shengbin, BU Zehui, et al. Constructing a Risk-Sharing Framework for Sponge City PPP Projects from the Perspective of the Individual Participant[J]. Advances in Civil Engineering, 2020; 2 020.

[5] CHANG Hsueh-sheng, SU Qingmu. Research on Constructing Sponge City Indicator and Decision Evaluation Model with Fuzzy Multiple Criteria Method[J]. Water Environment Research, 2020, 92(11): 1 910-1 921.

[6] 孙会航,李俐频,田禹,等.基于多目标优化与综合评价的海绵城市规划设计[J].环境科学学报,2020,40(10): 3 605-3 614.

[7] CHEN De, WANG Si, SHEN Mingliang, et al. Aggregate Micro Tribological Properties of Sponge City Permeable Pavement Base Layer under Vehicle Loading [J]. Construction and Building Materials, 2020, 261: 120-124.

[8] 王泽阳.滨海地区市政道路海绵城市设计的反思与优化[J].中国给水排水,2020,36(20):133-136.

[9] 解铭,杨智,周杨军,等.上海临港新城道路改造海绵城市设计方案[J].中国给水排水,2020,36(20):137-142.

[10] 肖海文,孟令剑,成水平,等.海绵城市雨水湿地公园水

系统设计案例分析[J].中国给水排水,2020,36(20): 160-166.

- [11] 李静,杨允立,毛毅.海绵型建筑与小区综合雨量径流系数计算方法[J].环境工程学报,2020,14(10):2 876-2 881.
- [12] 张娜.透水混凝土堵塞机理试验研究[D].济南:山东大学,2014.
- [13] YANG Ping, ZHAO Zixin, LI Zhicheng, et al. Experimental Study on Long-Term Performance of New Urban Green Space Soil for Sponge City Construction[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 58: 126906.
- [14] 任南棋,张建业,王秀衡.全域推进海绵城市建设,消除城市内涝,打造宜居环境[J].环境科学学报,2020,40(10):3 481-3 483.
- [15] YIN Dingkun, CHEN Ye, JIA Haifeng, et al. Sponge City Practice in China: A Review of Construction, Assessment, Operational and Maintenance[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 280(Part 2): 124-136.
- [16] 徐仁崇,桂苗苗,龚明子,等.不同成型方法对透水混凝土性能的影响研究[J].混凝土,2011(11):129-131.
- [17] 张朝辉,杨江金,王沁芳,等.透水混凝土制备工艺研究[J].新型建筑材料,2008(9):1-4.
- [18] 薛丽皎,陈丽红,林友军.骨料对透水混凝土性能的影响[J].陕西理工学院学报(自然科学版),2010,26(1): 29-31.
- [19] 程娟,郭向阳.水灰比在采用体积法进行透水混凝土配合比设计中的作用[J].混凝土,2008(8):88-90.
- [20] DRAKE J, BRADFORD A, SETERS T V. Hydrologic Performance of Three Partial-Infiltration Porous Pavements in a Cold Climate over Low Permeability Soil[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(9): 159-169.
- [21] 交通部公路科学研究所.公路工程集料试验规程:JTG E42—2005[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2005.
- [22] 苏州混凝土水泥制品研究院.混凝土外加剂匀质性试验方法:GB/T 8077—2012[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [23] 崔新壮,张炯,黄丹,等.暴雨作用下透水混凝土路面快速堵塞试验模拟[J].中国公路学报,2016,29(10):1-11.
- [24] ZHANG Jiong, SHE Rui, DAI Zhaoxia, et al. Experimental Simulation Study on Pore Clogging Mechanism of Porous Pavement[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187: 803-818.
- [25] ZHANG Jiong, MA Guodong, DAI Zhaoxia, et al. Numerical Study on Pore Clogging Mechanism in Pervious Pavement [J]. Journal of Hydrology, 2018, 565: 589-598.