

# 海绵城市建设中的透水混凝土性能及应用效果

石立国<sup>1</sup>, 杜 焱<sup>1</sup>, 文 韬<sup>1</sup>, 王 鹏<sup>2</sup>, 吴 昊<sup>3</sup>

(1. 中国建筑第二工程局有限公司, 北京 100160; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 3. 瓦地工程设计咨询 <北京> 有限公司, 北京 100022)

**摘 要:** 海绵城市面源雨水主要通过透水介质材料渗透, 达到解决城市内涝、积水问题的目的, 渗透是海绵城市建设的第一步, 随着海绵城市的发展, 透水混凝土、透水砖、透水 EPDM、透水介质土等得到大量应用。为此, 对透水混凝土的水胶比、添加剂、孔隙率与透水性进行了试验, 得到了满足设计条件的最佳配合比, 并应用于玉溪海绵城市建设中。在人行道和车行道施工中整体成型质量好, 克服了透水混凝土掉粒等质量问题, 并通过对粗骨料石子进行染色配制出彩色透水混凝土, 同时满足了景观和透水性要求。

**关键词:** 海绵城市; 透水混凝土; 成型方式; 透水性能

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)12-0039-05

## Performance and Application of Permeable Concrete in Sponge City Construction

SHI Li-guo<sup>1</sup>, DU Yao<sup>1</sup>, WEN Tao<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>2</sup>, WU Hao<sup>3</sup>

(1. China Construction Second Engineering Bureau Ltd., Beijing 100160, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 3. Wadi Engineering Design Consulting <Beijing> Co. Ltd., Beijing 100022, China)

**Abstract:** The non-point source rainwater of sponge city mainly penetrates through the permeable medium material, which can solve the problem of urban water logging and accumulation. Infiltration is the first step in the construction of sponge city. Water permeable concrete, permeable brick, permeable EPDM, permeable medium soil are widely used to the construction of sponge city. Therefore, the water-binder ratio, additives, porosity and permeability of permeable concrete were tested. The optimal mixture ratio meeting the design requirement was found and applied to the construction of Yuxi sponge city. In the construction of pavements and roadways, the overall molding quality was good, which overcame the quality problems of permeable concrete such as granulation and so on. The color permeable concrete was prepared by dyeing the coarse aggregate stones, which could meet the requirements of landscape and water permeability.

**Key words:** sponge city; permeable concrete; molding method; permeable performance

玉溪市为全国第二批海绵城市试点, 改造内容主要包括建筑与小区、道路与管网、广场与公园。海绵城市改造过程中大量运用透水混凝土、透水砖、透水 EPDM、透水介质土等透水材料, 将面源雨水通过

透水面层传递至透水基层。改造工程中基层一般为级配碎石, 碎石层中埋设有盲管, 主要是收集渗透到基层的雨水, 通过盲管流向新建雨水管网, 最后进入小区或广场内的调蓄系统, 当雨量过大时, 直接排入

市政管网。作为与雨水接触的第一载体,透水材料的透水性、耐久性等性能均对海绵改造效果影响较大,而玉溪作为一个雨水集中的城市,其影响更是巨大。

透水混凝土是一种具有生态功能的混凝土,对于缓解城市内涝、降低噪声、加强水资源循环利用等有显著作用<sup>[1]</sup>。随着人们对环境要求越来越高,为缓解城市热岛效应,开展海绵城市建设,透水混凝土在城市建设中的应用越来越广泛<sup>[2-4]</sup>。玉溪海绵城市建设中透水混凝土主要用于人行道及小区内车行道,为了达到海绵化改造对地面径流的控制以及行车要求,对透水混凝土的透水率及透水混凝土抗压强度均有较高的要求<sup>[5-6]</sup>。透水混凝土由骨料、胶结料等混合而成,多孔结构,具有透水、透气、密度小的特点,与普通混凝土相比,透水混凝土的力学性能、工作性及耐久性存在较大差异,普通混凝土配合比设计方法在透水混凝土生产应用中并不适用。

为保证透水混凝土的透水性能好、抗压强度高及造价低的要求,进行了透水混凝土配合比、强度与透水性试验,通过对比试验研究,寻求满足设计条件的最佳配合比。

## 1 试验概况

试验用水泥为玉溪市某公司生产的 P. O42.5 级水泥,以 2.35 ~ 4.75 mm 碎石为骨料,堆积密度为 1 670 kg/m<sup>3</sup>,表观密度为 2 655 kg/m<sup>3</sup>。抗压试件尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm,每组为 3 个。抗折试件尺寸为 150 mm × 150 mm × 550 mm,每组为 3 个。透水试件为圆柱体,高为 50 mm,直径为 100 mm,每组 3 个。

透水混凝土由骨料、胶结材料、水及添加剂等混合而成,混凝土搅拌采用水泥裹石法,先按照比例将骨料、水泥及矿粉按比例混合,加水湿润表面后搅拌 3 min,之后再加水搅拌均匀。

搅拌过程如图 1 所示。

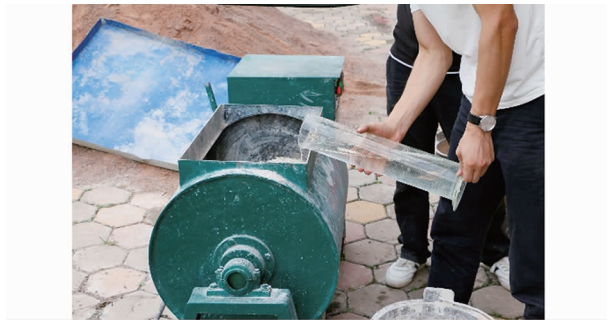


图 1 混凝土搅拌

Fig. 1 Concrete mixing

其配合比计算公式如下:

$$\frac{m_g}{\rho_g} + \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_w}{\rho_w} + \frac{m_a}{\rho_a} + P = 1 \quad (1)$$

式中  $m_g$ 、 $m_c$ 、 $m_w$ 、 $m_a$ ——分别为单位体积混凝土中粗骨料、水泥、水、外加剂用量,kg/m<sup>3</sup>

$\rho_g$ 、 $\rho_c$ 、 $\rho_w$ 、 $\rho_a$ ——分别为粗骨料、水泥、水、外加剂表观密度,kg/m<sup>3</sup>

$P$ ——孔隙率

测定孔隙率时先将试件完全浸泡在水中 24 h,测试试件在水中质量  $m_1$ ,然后将试块放置于恒温烘箱中完全烘干,测试试件质量  $m_2$ ,孔隙率计算公式如下:

$$P = \left(1 - \frac{m_1 - m_2}{V}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中  $V$ ——试件体积

试验过程中透水率的测定方法参照《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009),抗压强度的测试采用 SYE-2000 型压力试验机,孔隙率的测试方法参照《透水砖》(JC/T 945—2005)。

## 2 试验结果

### 2.1 水胶比对透水混凝土性能影响

水胶比是影响混凝土强度的重要因素,水胶比为 0.28 ~ 0.34 的透水混凝土性能见表 1。

表 1 不同水胶比透水混凝土试验结果

Tab. 1 Test results of permeable concrete with different water-binder ratios

编号	配合比					结果数据			
	骨料/ (kg · m <sup>-3</sup> )	水泥/ (kg · m <sup>-3</sup> )	外加剂/ (kg · m <sup>-3</sup> )	水/ (kg · m <sup>-3</sup> )	水胶比	抗压强度/MPa			透水系数/ (cm · s <sup>-1</sup> )
						3 d	7 d	28 d	
S1	1 560	360.0	12.5	100.8	0.28	11.8	19.0	21.4	1.85
S2	1 560	360.0	12.5	108.0	0.30	13.4	19.8	22.1	1.64
S3	1 560	360.0	12.5	115.2	0.32	20.9	23.0	27.2	1.47
S4	1 560	360.0	12.5	122.4	0.34	5.9	15.7	16.8	1.12

由表 1 可见,水胶比为 0.32 时,抗压强度达到最大。透水混凝土的水胶比增大将降低混凝土的透水性。当水胶比过小时拌和物工作性差,影响施工质量,不利于混凝土强度的提高。推测因为水胶比

增大,水泥不能包裹骨料,产生离析,使孔隙率降低。

2.2 添加剂对透水混凝土性能影响

为改善透水混凝土性能,在混凝土内添加了胶粉和硅粉,不同添加剂透水混凝土试验结果见表 2。

表 2 不同添加剂透水混凝土试验结果

Tab. 2 Test results of permeable concrete with different additives

编号	配合比						结果数据			
	骨料/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	胶粉/ (kg·m <sup>-3</sup> )	硅粉/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水胶比	抗压强度/MPa			透水系数/ (cm·s <sup>-1</sup> )
							3 d	7 d	28 d	
T1	1 560	360.0	0	0	115.2	0.32	20.9	23.0	27.2	1.47
T2	1 560	351.0	6.9	0	115.2	0.32	21.3	26.9	28.7	1.32
T3	1 560	330.0	6.9	15.8	115.2	0.32	22.7	26.5	29.1	1.27
T4	1 560	353.0	8.0	0	115.2	0.32	21.9	27.2	28.9	1.31
T5	1 560	338.0	8.0	15.8	115.2	0.32	22.5	26.9	29.3	1.25
T6	1 560	332.0	8.0	20.3	115.2	0.32	23.1	28.3	29.5	1.23

T1、T2、T3 组试样的设计孔隙率为 20%,实际孔隙率为 16.3%、15.1% 和 14.3%。通过 T1、T2、T4 组试样对比可发现,随着胶粉含量增加,不同龄期的透水混凝土试件强度均有所增大,但透水系数降低。通过 T4、T5、T6 组试样对比可发现,随着硅粉含量增加,不同龄期的透水混凝土试件强度均有所增大,但透水系数降低。通过 T1、T2、T3 组试样的设计孔隙率与实际孔隙率对比,可发现添加剂含量影响实际孔隙率,添加剂含量增大,实际孔隙率降低。推测其原因,可能为透水混凝土中细骨料含量少,因此黏结力主要是粗骨料表面的胶结材料。胶粉溶解后分散,在水分挥发后形成黏结膜,增加了胶

结材料的黏结力,从而提高了抗压强度。胶粉的颗粒起到了表面活性剂作用,改善了透水混凝土的和易性。硅粉具有火山灰效应,与水泥水化物产生氢氧化钙,发生二次水化反应,其表面积大,形成的胶凝物可填充透水混凝土内部结构。相同水胶比工况下,添加入硅粉和胶粉后,密实性及强度有所提高,黏结力增大,孔隙率降低,透水性也降低。

2.3 孔隙率对透水混凝土性能影响

为研究孔隙率对透水混凝土性能影响,将设计孔隙率为 10.0%、15.0%、20.0%、25.0%、30.0% 的五组混凝土试件分别做孔隙率试验与透水性试验,结果见表 3。

表 3 不同孔隙率透水混凝土试验结果

Tab. 3 Test results of permeable concrete with different porosities

编号	配合比				设计孔隙率/%	实际孔隙率/%	结果数据			
	骨料/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水胶比			抗压强度/MPa			透水系数 (cm·s <sup>-1</sup> )
							3 d	7 d	28 d	
T1	1 560	360.0	115.2	0.32	10.0	14.1	23.9	25.8	29.7	0.49
T2	1 560	351.0	115.2	0.32	15.0	17.2	21.1	24.3	28.6	0.87
T3	1 560	330.0	115.2	0.32	20.0	24.2	20.9	23.0	27.2	1.47
T4	1 560	353.0	115.2	0.32	25.0	27.1	15.5	21.8	25.4	2.34
T5	1 560	332.0	115.2	0.32	30.0	31.2	7.2	8.5	9.7	4.26

由表 3 中数据可知,随着设计孔隙率的增加,透水混凝土 3、7、28 d 龄期抗压强度逐渐降低,而透水系数逐渐增加。推测其原因,透水混凝土为多孔结构,其破坏发生在骨料与骨料接触点,或者浆体与骨料接触点,浆体的强度和厚度对其抗压性能影响比较大。孔隙率增大,透水能力增大,浆体与骨料黏结力降低,因此混凝土试件抗压强度随之降低。

3 应用概况

在玉溪市海绵城市改造项目中,兼顾景观及透水性能要求,在广场及运动场内部大量使用了彩色透水混凝土,且部分图案为曲线,施工定位放线难以精准,染色控量等不便于计算。考虑到以上因素,本次透水混凝土施工过程中预先对粗骨料石子进行染色,再通过 BIM 技术解决色差的问题,定量控制染



色剂的添加,其中分别采用铁红和铁黄制作红色透水混凝土及黄色透水混凝土。根据设计图纸,采用 REVIT 软件进行排版,确定定位、标高、混凝土工程量,以及相应外加剂的添加量(见图 2)。

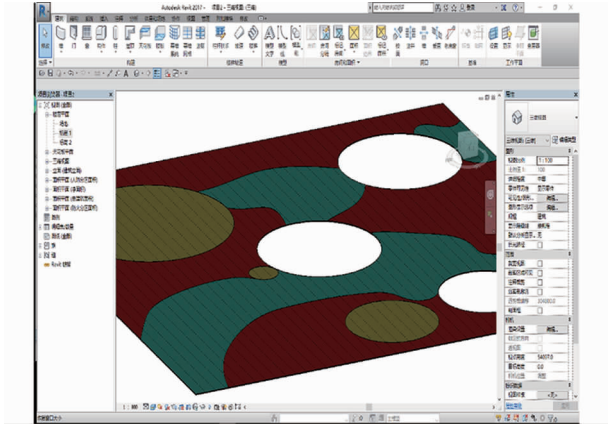


图 2 REVIT 软件进行排版

Fig. 2 Typography of REVIT software

施工时通过 REVIT 统计的标高设置激光发射器(见图 3),并按照间距要求安装激光整平机的激光接收器。施工面积超过  $150.0 \text{ m}^2$  时需重新设置激光发射器以减小误差。设置好激光发射器后,先进行标高检测校准以保证标高准确无误,然后进行高精度施工。

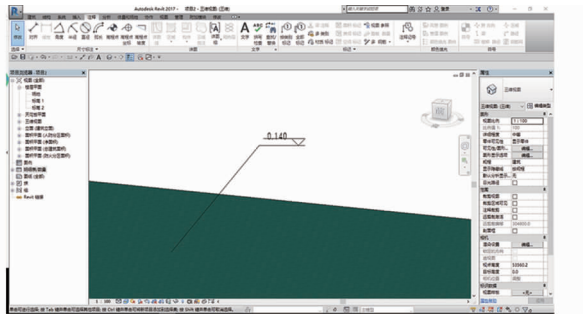


图 3 不同位置标高测量

Fig. 3 Measure elevation in different positions

玉溪海绵城市建设中应用的透水混凝土分为人行道、车行道透水混凝土,其中人行道透水混凝土碎石层为  $200 \text{ mm}$  厚级配碎石,车行道透水混凝土碎石为  $300 \text{ mm}$  厚级配碎石,在碎石层中埋设有 DN100 的盲管,盲管外包裹透水土工布,当雨水从透水混凝土路面往下渗透至碎石层时,雨水进入盲管内,盲管有一定坡度,排至道路两侧的 LID 设施中,由 LID 设施汇水至蓄水模块或调蓄池中,净化后重新利用。

彩色透水混凝土的实际效果如图 4 所示。



图 4 彩色透水混凝土实际效果

Fig. 4 Actual effect of color permeable concrete

玉溪市海绵城市建设中通过优化水胶比,降低混凝土外加剂用量,在保证不掉粒的情况下增加透水性能, $1 \text{ m}^3$  混凝土外加剂用量由  $45.0 \text{ kg}$  优化为  $30.0 \text{ kg}$ 。 $1 \text{ kg}$  外加剂费用为 10 元。本项目共使用透水混凝土  $5\,091 \text{ m}^3$ ,优化后节约 76.37 万元。

#### 4 结论

为保证玉溪市海绵城市建设中使用的透水混凝土透水性能好、抗压强度高、造价低,进行了对比试验,得到了最佳配合比。

① 研究发现最佳水胶比确定在  $0.28 \sim 0.34$  时,透水混凝土面层可远超设计要求强度与透水率,水胶比为  $0.32$  时,各方面性能达到最佳。

② 粉胶和硅胶的含量增大时,透水混凝土抗压强度增加,但透水性能降低。设计孔隙率增大,则透水混凝土抗压强度降低,透水性能增加。

实际应用中,透水混凝土施工成型整体质量好,克服了透水混凝土掉粒等质量问题,并通过对粗骨料石子进行染色配制出彩色透水混凝土,同时满足了景观和透水性要求,其经验可在云南其他区域的海绵城市改造中推广应用。

#### 参考文献:

- [1] 何鑫,曹霞,张欣红,等. 浅谈透水人行道结构的设计及工程应用[J]. 城市道桥与防洪,2008(6):19-21.  
He Xin, Cao Xia, Zhang Xinhong, et al. Discussion on the design and engineering application of permeable sidewalk structure[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2008(6):19-21 (in Chinese).
- [2] Schlüter W, Jefferies C. Modelling the outflow from a porous pavement[J]. Urban Water, 2002, 4(3):245-253.

- [3] 范士锦,刘筱玲,陈代果,等. 透水混凝土矿渣微粉改性试验研究及渗流模拟[J]. 混凝土与水泥制品,2017(11):6-9,15.  
Fan Shijin, Liu Xiaoling, Chen Daiguo, et al. Experimental study of pervious concrete slag powder modification and seepage simulation[J]. China Concrete and Cement Products,2017(11):6-9,15(in Chinese).
- [4] 龚平,谢先当,李俊涛. 成型工艺对再生骨料透水混凝土性能的影响研究[J]. 施工技术,2015,44(12):65-68.  
Gong Ping, Xie Xiandang, Li Juntao. Effects study of molding method on properties of porous pervious concrete with recycled aggregates[J]. Construction Technology, 2015,44(12):65-68(in Chinese).
- [5] 姜勇,陈雄志,洪月菊. 武汉市建设项目的海绵城市规划管控方法与技术探索[J]. 中国给水排水,2018,34(2):1-6.  
Jiang Yong, Chen Xiongzi, Hong Yueju. Sponge city planning control method and technology exploration in Wuhan[J]. China Water & Wastewater,2018,34(2):1-6(in Chinese).
- [6] 李俊奇,王文亮,车伍,等. 海绵城市建设指南解读之降雨径流总量控制目标区域划分[J]. 中国给水排水,

2015,31(8):6-12.

Li Junqi, Wang Wenliang, Che Wu, et al. Explanation of Sponge City Development Technical Guide: Regional division for total rainfall runoff volume capture target[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(8):6-12(in Chinese).



作者简介:石立国(1971-),男,河北丰润人,硕士,教授级高级工程师,中建二局西南分公司总工程师,从事建筑工程施工技术管理工作。

E-mail:252658207@qq.com

收稿日期:2018-10-22

## · 信息 ·

### 历经十届的海峡两岸人工湿地研讨会回顾与展望

第十届海峡两岸人工湿地研讨会,已于2019年5月5日圆满闭幕。这个研讨会最初是由中国科学院水生生物研究所的吴振斌研究员与(台湾)中山大学海洋环境及工程学系的杨磊教授所发起,于2008年在湖北省武汉市举办第一届海峡两岸人工湿地研讨会,至今已历经十届,共12载。其中,2012年第四届海峡两岸人工湿地研讨会与台湾湿地学会的第三届台湾湿地生态系研讨会联合举行,首次将自然湿地保育及修复与人工湿地的研究工作相结合。2016年第七届海峡两岸人工湿地研讨会,除了与第七届台湾湿地生态系研讨会持续结合外,更扩大将第二届海峡两岸湿地保护交流研讨会(由台湾湿地学会与中国湿地保护协会发起合办)及第一届全国公园湿地研究成果发表会结合在一起,称为“两岸湿地联合研讨会”,完全将海峡两岸从事于自然湿地保育及修复与人工湿地等两大领域,紧密地结合在一起。

历届研讨会的分项议题,包括人工湿地数值模拟、规划与设计、人工湿地多元功能分析与评价、人工湿地之操作维护与经营管理、人工湿地生态系恢复指标之研究、人工湿地对都会区水环境生态治理之应用、人工湿地实际案例探讨、海岸人工湿地及海岸湿地生态修复,以及人工湿地的碳汇机制与功能等。

总之,海峡两岸人工湿地研讨会的召开,可提供海峡两岸从事于人工湿地研究及实务方面学者专家及业界之间彼此交流的平台,延续两岸在人工湿地方面的研究成果及开发案例,彼此交换经验,以使海峡两岸在人工湿地方面的运用更顺畅,提高成功的几率。

( <台湾> 中山大学海洋环境及工程学系教授兼水资源研究中心主任 杨磊 供稿)