

矿粉和骨料对白水泥透水混凝土性能的影响

文 韬¹, 刘嘉豪², 周亚超¹, 张 耀¹, 李雅雯², 冯晓楠²

(1. 中国建筑第二工程局有限公司, 北京 100160; 2. 华中科技大学 环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 采用矿粉等量代替白水泥的方法进行改性, 研究考察不同矿粉掺量和不同骨料粒径对白水泥透水混凝土孔隙率、透水性能及抗压强度的影响, 并分析其作用机理, 以改善白水泥透水混凝土的综合性能。结果表明, 相比于单一粒径骨料透水混凝土, 级配粒径骨料透水混凝土的抗压强度较高, 透水性能较差。掺加矿粉能够有效促进白水泥透水混凝土强度增加, 且最佳掺加量为30%。同一矿粉掺加量下, 三种骨料组合中的4.75~9.50 mm与2.35~4.75 mm两种粒径级配骨料的白水泥透水混凝土强度最高, 且当矿粉掺加量为30%时, 试块综合性能最佳, 抗压强度为22.18 MPa, 透水系数为0.453 cm/s。

关键词: 透水混凝土; 白水泥; 矿粉; 掺加量; 骨料粒径; 抗压强度; 透水性

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)12-0049-06

Influence of Mineral Powder and Aggregate on Performance of White Cement Permeable Concrete

WEN Tao¹, LIU Jia-hao², ZHOU Ya-chao¹, ZHANG Yao¹, LI Ya-wen²,
FENG Xiao-nan²

(1. China Construction Second Engineering Bureau Ltd., Beijing 100160, China; 2. School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to improve comprehensive performance of white cement permeable concrete, the equal replacement of cement by mineral powder was tested to modify its performance. The influence of different mineral powders and aggregate sizes on porosity, water permeability and compressive strength of white cement permeable concrete were studied and the mechanism was analyzed. The results showed that the compressive strength of graded aggregate permeable concrete was greater and the permeable property was worse than those of mono-sized permeable concrete. Adding mineral powder could improve comprehensive performance of white cement permeable concrete and the best dosage was 30%. When aggregate of permeable concrete was graded by macadam of 4.75-9.50 mm and 2.35-4.75 mm, its strength was the best among three kinds of aggregate at the same dosage of mineral powder. The comprehensive performance of the test block was the best when dosage was 30%. Its compressive strength was 22.18 MPa and permeability coefficient was 0.453 cm/s.

Key words: permeable concrete; white cement; mineral powder; dosage; aggregate size; compressive strength; permeability

透水混凝土作为一种绿色透水铺装材料,随着海绵城市理念的推广而得到广泛应用。其中彩色透水混凝土由于兼具优良的透水性和美化效果,成为海绵城市建设和景观工程中大量使用的无机材料^[1-2]。彩色透水混凝土是在普通透水混凝土配合比基础上,通过掺加一定量的彩色颜料拌和而成^[3]。在彩色透水混凝土的实际生产过程中,白水泥由于其高白度的特点而被广泛应用于浅色系透水混凝土制备,以提高彩色透水混凝土的美观性,同时兼具减少调色时颜料用量、降低混凝土单位生产成本的优点。

国内外学者在透水混凝土综合性能的优化方面进行了一系列研究,以提高透水混凝土的力学性能、抗堵塞性和透水性为重点。国内的相关研究主要集中在透水铺装路面结构、原料配合比、污染物控制与径流削减等方面,其中,黄杨程等^[4]、郑雯等^[5]进行了矿粉改性普通水泥透水混凝土的相关研究,结果表明一定范围内矿粉的掺加量可以提高普通水泥透水混凝土的力学性能并降低单位产品成本。国外学者 Bandyopadhyay J 等^[6]和 Ibrahim H A 等^[7]、Zaetang 等^[8]在配合比、制备方法、骨料及多种掺和料对透水混凝土综合性能的影响方面研究较多。但目前国内外针对白水泥透水混凝土的相关研究很少。

针对玉溪海绵城市建设过程中白水泥透水混凝土力学性能较差以及地面铺装单位成本高的问题,

以矿粉为掺加剂,探讨了不同矿粉掺量和不同骨料粒径对白水泥透水混凝土抗压强度和透水性能的影响,以期优化白水泥透水混凝土综合性能,降低其生产成本并应用于实际生产。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

① 水泥。P. W42.5 白水泥,广西名燕牌,密度为 $3\ 200\text{ kg/m}^3$ 。

② 石子。玉溪江城石料厂,天然山石,粒径分别为 $2.35\sim 4.75$ 、 $4.75\sim 9.50\text{ mm}$,表观密度分别为 $2\ 500$ 、 $2\ 583\text{ kg/m}^3$,堆积密度分别为 $1\ 600$ 、 $1\ 511\text{ kg/m}^3$,堆积空隙率分别为 36.5% 、 41.5% ;两种粒径 $1:1$ 等质量均匀混合后,表观密度、堆积密度、堆积空隙率分别为 $2\ 465\text{ kg/m}^3$ 、 $1\ 570\text{ kg/m}^3$ 、 36.3% 。

③ 减水剂。液体减水剂,主体为聚羧酸成分,山东新大地有限公司,密度为 $1\ 000\text{ kg/m}^3$ 。

④ 矿粉。磨细矿粉取自云南某铁尾矿,表观密度为 $2\ 728\text{ kg/m}^3$,主要化学成分见表 1。

表 1 矿粉主要化学成分

Tab. 1 Main chemical composition of mineral powder

| 成分 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | SO ₃ |
|----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------|-------------------|------------------|-----------------|
| 占比 | 52.50 | 5.25 | 12.38 | 9.66 | 15.87 | 1.31 | 1.34 | 0.56 |

%

1.2 配合比设计

配合比实验方案设计如表 2 所示。

表 2 设计配合比

Tab. 2 Design mix proportion

| 粗骨料组合 | 组别 | 骨料掺加量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 水掺加量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 减水剂掺加量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 水泥掺加量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 矿粉掺加量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 矿粉在水泥中的占比/% |
|--|----|---|--|--|---|---|-------------|
| $2.35\sim 4.75\text{ mm}$ (G_1) | 1 | 1 568 | 109.9 | 3.663 | 384.8 | 0 | 0 |
| | 2 | 1 568 | 109.9 | 3.663 | 348.2 | 36.6 | 10 |
| | 3 | 1 568 | 109.9 | 3.663 | 311.5 | 73.3 | 20 |
| | 4 | 1 568 | 109.9 | 3.663 | 274.9 | 109.9 | 30 |
| | 5 | 1 568 | 109.9 | 3.663 | 238.3 | 146.5 | 40 |
| $4.75\sim 9.50\text{ mm}$ (G_2) | 6 | 1 481 | 133.2 | 4.440 | 444.3 | 0 | 0 |
| | 7 | 1 481 | 133.2 | 4.440 | 399.9 | 44.4 | 10 |
| | 8 | 1 481 | 133.2 | 4.440 | 355.5 | 88.9 | 20 |
| | 9 | 1 481 | 133.2 | 4.440 | 311.0 | 133.3 | 30 |
| | 10 | 1 481 | 133.2 | 4.440 | 266.6 | 177.7 | 40 |
| $1:1$ 混合 (G_3) | 11 | 1 539 | 108.78 | 3.620 | 362.6 | 0 | 0 |
| | 12 | 1 539 | 108.78 | 3.620 | 326.3 | 36.3 | 10 |
| | 13 | 1 539 | 108.78 | 3.620 | 290.1 | 72.5 | 20 |
| | 14 | 1 539 | 108.78 | 3.620 | 253.8 | 108.8 | 30 |
| | 15 | 1 539 | 108.78 | 3.620 | 217.6 | 145.0 | 40 |

采用两种不同粒径的碎石为骨料。设计 5 个不同矿粉掺加比例(等质量替换水泥的比例分别为 0%、10%、20%、30%、40%),3 种不同的粗骨料组合形式(100% 的 2.35 ~ 4.75 mm、100% 的 4.75 ~ 9.50 mm、50% 的 2.35 ~ 4.75 mm + 50% 的 4.75 ~ 9.50 mm),共计 15 组配合比。

1.3 试块制作及养护

在试块制作过程中,采用二次加料法和机械强制搅拌^[9-10],实际制作工艺流程如图 1 所示。混合料搅拌完成后,分两次将混凝土拌和物装填入模具成型,同时辅以钢管插捣^[11]及压实抹平,接着覆膜洒水养护 2 ~ 3 d 后进行标准养护^[12]。

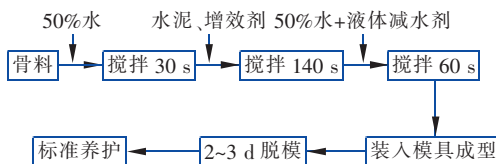


图 1 透水混凝土制作工艺

Fig. 1 Production process of permeable concrete

二次加料法总搅拌时长约为 230 s,为防止水分蒸发应尽量缩短暂停时间,其基本步骤如下:①将 100% 骨料和 50% 水加入搅拌机,启动搅拌 30 s 后暂停;②将混合均匀的 100% 水泥及 100% 粉末增效剂加入搅拌机,搅拌 140 s 后暂停;③加入 100% 液体减水剂与 50% 水的混匀液,搅拌 60 s,结束。

1.4 试验方法

主要测试透水系数、抗压强度、孔隙率 3 个指标,测试方法所参照规范及试块规格如表 3 所示。

表 3 各指标测试方法

Tab. 3 Test methods of indexes

| 项目 | 测试方法 | 试块 |
|------|---------------------------------|---------------------------|
| 透水系数 | 《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009) | 圆柱体试块直径为 100 mm,高度为 50 mm |
| 抗压强度 | 《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009) | 正方体试块边长为 150 mm |
| 孔隙率 | 《透水路面板和透水路面板》(GB/T 25993—2010) | 正方体试块边长为 150 mm |

2 结果与讨论

2.1 矿粉和骨料粒径对透水性能的影响

考察了矿粉对透水性能的影响,实验结果见图 2~4。对于 3 种粒径的骨料,随着矿粉掺加量的增

加,白水泥透水混凝土的孔隙率和透水系数数值略有波动,但基本保持稳定,说明矿粉掺加量对白水泥透水混凝土的孔隙率和透水系数没有明显影响。

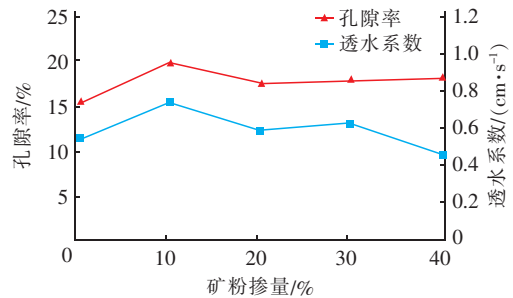


图 2 2.35 ~ 4.75 mm 骨料的透水性能

Fig. 2 Permeability: aggregate size of 2.35 - 4.75 mm

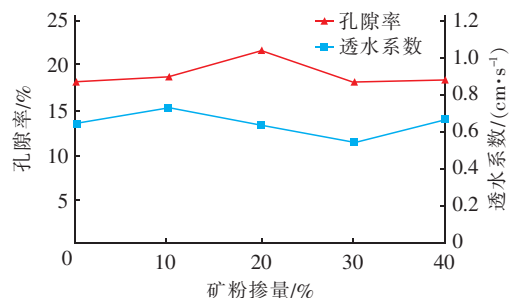


图 3 4.75 ~ 9.50 mm 骨料的透水性能

Fig. 3 Permeability: aggregate size of 4.75 - 9.50 mm

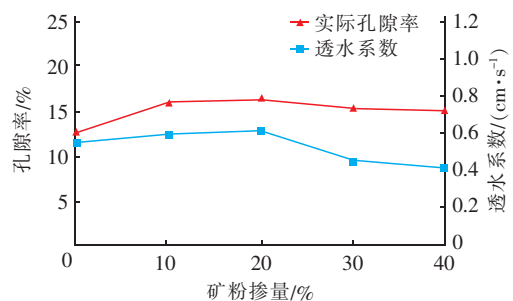


图 4 级配骨料的透水性能

Fig. 4 Permeability: graded aggregate

三组试块透水系数曲线的变化规律与孔隙率曲线的变化规律基本一致,说明透水混凝土透水系数与孔隙率呈正相关。这与透水混凝土内部结构有关,透水混凝土孔隙率越大,内部可透水的有效孔隙就越多,透水能力就越强。

考察骨料粒径对透水性能的影响,实验中各组试块均按照 15.0% 的设计孔隙率进行设计,制作及养护工艺相同。2.35 ~ 4.75 mm (G_1 组)、4.75 ~ 9.50 mm (G_2 组)、级配粒径 (G_3 组) 粗骨料制作的透水混凝土试块透水系数均值分别为 0.595、0.644、0.526 cm/s,实际孔隙率均值分别为 17.8%、

19.0%、15.1%。可以看出,相较于单一粒径骨料透水混凝土,级配粒径骨料透水混凝土的透水性能较差,而对于单一粒径,4.75~9.50 mm 粒径骨料透水混凝土的透水性能更好。

G₃ 组试块采用级配粒径骨料制作,实际孔隙率(15.1%)接近设计孔隙率(15.0%),且明显小于单一粒径骨料制作的 G₁、G₂ 组试块的实际孔隙率(17.8%、19.0%)。这主要是因为不同粒径的骨料实现了级配,小粒径骨料可以填充大粒径骨料的孔隙,使骨料堆积更紧密,孔隙率更低^[11]。

G₁ 组透水混凝土透水系数相对于 G₂ 组较低,这是因为小粒径骨料在搅拌制作时,混合料和易性更佳,有利于胶凝浆体充分包裹粗骨料、填充骨料间的空隙,堆积更为密实,使成型后试块孔隙率更低,透水系数较低。

不同粒径组合和不同矿粉掺加量条件下,实验试块的透水系数均在 0.4 cm/s 以上,远大于 0.05 cm/s 的行业标准,具有优异透水性能,满足《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009)要求,可应用于实际生产。

2.2 矿粉和骨料粒径对抗压强度的影响

矿粉和骨料粒径对抗压强度的影响见图 5~7。

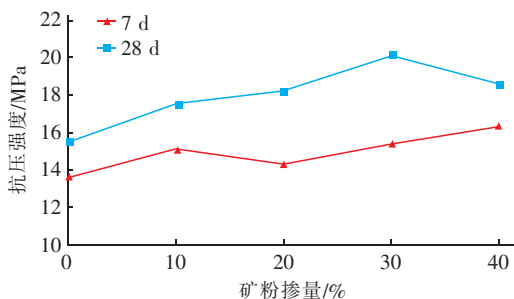


图 5 2.35~4.75 mm 骨料的抗压强度

Fig. 5 Compressive strength: aggregate size of 2.35-4.75 mm

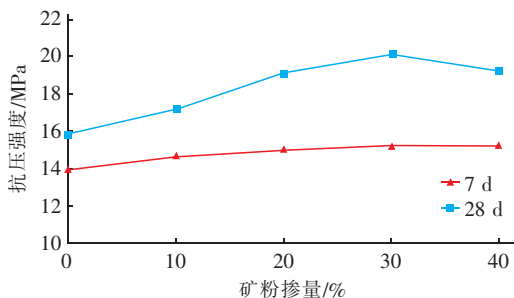


图 6 4.75~9.50 mm 骨料的抗压强度

Fig. 6 Compressive strength: aggregate size of 4.75-9.50 mm

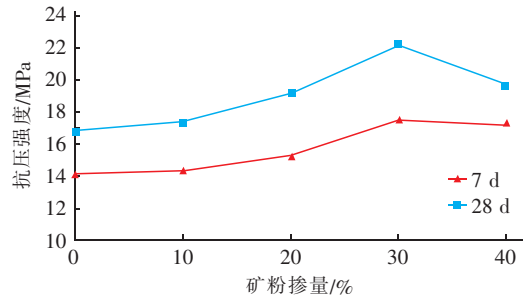


图 7 级配粒径的抗压强度

Fig. 7 Compressive strength of grading particle size

对于 3 组试块 G₁、G₂、G₃,随着矿粉掺加量的增加,白水泥透水混凝土抗压强度先增加后降低,强度曲线呈现“驼峰”变化,且当矿粉掺加量为 30% 时,抗压强度最大,均在 20 MPa 以上。

矿粉掺加改善了透水混凝土强度,主要是基于矿粉的火山灰效应、填充效应与微集料效应^[13]:

① 火山灰效应(即活性效应),矿粉是高活性掺和料,矿粉中的 SiO₂ 和 Al₂O₃ 等活性成分与水泥水化后的产物 Ca(OH)₂ 发生二次水化反应,生成水化硅酸钙和水化铝酸钙,促进混凝土强度增加。

② 矿粉颗粒比水泥颗粒更小,在搅拌过程中水泥颗粒间的空隙被矿粉颗粒大量填充,胶结料的级配性及和易性得到改善,使水泥浆能够更加充分地包裹在骨料表面,同时使拌和物料混合更加均匀,试块能够在成型过程中堆积得更密实,获得更大的抗压强度。

③ 矿粉填充于空隙后将束缚在其中的水分置换出来,这部分水分可以继续与水泥反应,促进水泥充分水化,提高混凝土最终的结构强度。

当矿粉掺加量由 0% 增加到 30% 时, R₇/R₂₈ 值(R₇、R₂₈ 分别是 7 d 和 28 d 的试块抗压强度)逐渐减小,这说明掺加矿粉能够有效促进白水泥透水混凝土后期强度增加。主要原因是矿粉参与二次水化反应以及微集料效应,延长了混凝土凝结时间,在凝结后期有效地维持了混凝土强度的增长^[9]。

当矿粉掺加量由 30% 增加到 40% 时,白水泥透水混凝土 28 d 抗压强度降低,但 G₁、G₂ 的 7 d 抗压强度仍有增长。这可能是因为过量的矿粉掺加所置换出来的水分在混凝土凝结早期已经与水泥反应充分,有效促进了早期强度的增长,但是后期强度增长幅度小。

根据图 5~7,虽然各组抗压强度差别不大,可

以看出当矿粉掺加量相同时,各组的强度基本规律是 $G_3 > G_2 > G_1$,结合图2~4分析, G_3 组透水混凝土不同粒径的骨料实现了级配,堆积最密实,骨料之间的点、面粘结作用最强,所以强度最高。随着骨料粒径的增大,除了骨料之间的点、面粘结形成一定的粘结强度之外,骨料之间的桥接作用增加了其相互咬合力,从而使透水混凝土整体强度提高^[9],所以 G_2 组透水混凝土强度比 G_1 组大。 G_1 组骨料粒径为2.35~4.75 mm,此时较细骨料作为结构主体,其抗压强度整体偏低,同时由于孔隙率低不能发挥优异的透水性能,但具有更好的抗堵塞性能和美观效果,可以作为面层^[14]。

当采用混合粒径级配骨料、矿粉掺加量为30%时,抗压强度最高(22.18 MPa),同时透水系数为0.453 cm/s,可应用于实际生产。

3 结论

① 矿粉掺加量对白水泥透水混凝土的孔隙率和透水性能没有明显影响。级配粒径骨料透水混凝土的透水性能比单一粒径骨料透水混凝土差,而在单一粒径中,4.75~9.50 mm粒径骨料透水混凝土的透水性能比2.35~4.75 mm粒径的好。

② 所有试块透水系数均在0.4 cm/s以上,透水性能优异,其中4.75~9.50 mm粒径骨料的透水混凝土透水性能最佳,透水系数均值为0.644 cm/s。

③ 掺加矿粉能够有效促进白水泥透水混凝土后期强度增长。矿粉掺加量增加时,白水泥透水混凝土抗压强度先增加后降低,当矿粉掺加量为30%时,抗压强度最大。

④ 同一矿粉掺加量下,三种骨料组合中混合粒径级配骨料的白水泥透水混凝土强度最高,且当矿粉掺加量为30%时透水混凝土强度有最大值(22.18 MPa)。因此建议采用30%矿粉掺加量和混合粒径级配骨料,此时综合性能最佳,可用于实际生产。

参考文献:

[1] 王玥,闫滨,李成林. 透水混凝土制备及性能研究综述[J]. 硅酸盐通报,2017,36(3):864-869.
Wang Yue, Yan Bin, Li Chenglin. Review on preparation and properties of permeable concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(3):864-869 (in Chinese).

[2] 代铮. 彩色露骨料透水混凝土研制及在景观工程的应用[J]. 混凝土,2016(12):158-160.
Dai Zheng. Study on colorized exposed aggregate permeable concrete and application in landscape engineering[J]. Concrete, 2016(12):158-160 (in Chinese).
[3] 范超群,方金秋,唐森. 海绵城市彩色透水混凝土设计及性能研究[J]. 混凝土世界,2018(107):77-82.
Fan Chaoqun, Fang Jinqu, Tang Sen. Study about the design and performance of color pervious concrete in sponge city[J]. China Concrete, 2018(107):77-82 (in Chinese).
[4] 黄杨程,罗璐,曾冠博. 矿粉和硅灰及乳胶粉对透水混凝土性能的影响[J]. 山西建筑,2010,36(32):154-155.
Huang Yangcheng, Luo Lu, Zeng Guanbo. Influence of previous concrete performance on mineral powder and silica ash and emulsion powder [J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(32):154-155 (in Chinese).
[5] 郑雯,王仕威,杨钱荣. 掺合料对钢渣透水混凝土性能的影响[J]. 粉煤灰综合利用,2014(6):3-6.
Zheng Wen, Wang Shiwei, Yang Qianrong. Influence of admixtures on the properties of steel slag pervious concrete[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2014(6):3-6 (in Chinese).
[6] Bandyopadhyay J, Chakraborty R, Deb S. Comparative study on various parameters of pervious concrete for different size of coarse aggregates[J]. Int J Res Anal Rev, 2015, 2:123-129.
[7] Ibrahim H A, Razak H A. Effect of palm oil clinker incorporation on properties of pervious concrete [J]. Constr Build Mater, 2016, 115:70-77.
[8] Zetang Y, Wongs A, Sata V, et al. Use of coal ash asgeopolymer binder and coarse aggregate in pervious concrete[J]. Constr Build Mater, 2015, 96:289-295.
[9] 刘肖凡,白晓辉,王展展,等. 粉煤灰改性透水混凝土试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,2014(1):20-23.
Liu Xiaofan, Bai Xiaohui, Wang Zhanzhan, et al. The influence of fly ash on cement pervious concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2014(1):20-23 (in Chinese).
[10] 甘冰清. 透水混凝土的配合比设计及其性能研究[D]. 合肥:安徽理工大学,2011.
Gan Bingqing. A Study on Mix Proportions Design and

- Performance of Porous Concrete [D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2011 (in Chinese).
- [11] 张巨松,张添华,宋东升,等. 影响透水混凝土强度的因素探讨[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2006(5):759-763.
- Zhang Jusong, Zhang Tianhua, Song Dongsheng, *et al.* Several factors of effect on strength of porous concrete [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2006(5):759-763 (in Chinese).
- [12] 程智龙,文韬,张耀,等. 云南玉溪海绵城市白水泥透水混凝土配比优化研究[J]. 硅酸盐通报,2018,37(11):3707-3711.
- Cheng Zhilong, Wen Tao, Zhang Yao, *et al.* Research on mix proportions of the white cement pervious concrete in the Yuxi sponge city of Yunnan Province [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(11):3707-3711 (in Chinese).
- [13] Pratt C J. Use of permeable, reservoir pavement constructions for stormwater treatment and storage for reuse[J]. Water Sci Technol, 1999, 39(5):145-151.
- [14] 刘明乐,樊毅,宋军,等. 骨料粒径对透水混凝土性能的影响[J]. 混凝土世界,2007(97):82-85.
- Liu Mingle, Fan Yi, Song Jun, *et al.* Effect of aggregate size on pervious concrete properties [J]. China Concrete, 2007(97):82-85 (in Chinese).



作者简介:文韬(1987-),男,四川渠县人,大学本科,工程师,主要从事建筑施工及管理工作。

E-mail:512199847@qq.com

收稿日期:2018-10-22

· 信息 ·

《中国给水排水》杂志入选2019—2020年度中国科学引文数据库(CSCD)核心库

经过中国科学引文数据库(Chinese Science Citation Database,简称CSCD)定量遴选、专家定性评估,2019—2020年度中国科学引文数据库共收录来源期刊1231种,其中中国出版的英文期刊229种,中文期刊1002种。中国科学引文数据库来源期刊分为核心库和扩展库两部分,其中核心库908种(以备注栏中C为标记);扩展库323种(以备注栏中E为标记)。详见http://sciencechina.cn/cscd_source.jsp。《中国给水排水》杂志入选CSCD核心库。

中国科学引文数据库来源期刊每两年遴选一次。每次遴选均采用定量与定性相结合的方法,定量数据来自于中国科学引文数据库,定性评价则通过聘请国内专家定性评估对期刊进行评审。定量与定性综合评估结果构成了中国科学引文数据库来源期刊。

(本刊编辑部)