文章编号:1672－9331(2017)04－0030－06

水胶比、级配对砂基透水砖透水系数及强度的影响

杨三强，黄士周

(河北大学 建筑工程学院，河北 保定　071002)

摘　要：为了解决城市内涝问题以及快速补充城市地下水，通过室内试验以及现场生产实践，开展了水胶比、级配对砂基透水砖透水系数及强度影响研究，研制出了高强度、高透水性砂基透水砖，以解决上述社会问题。研究结果表明，在砂基透水砖配合比设计中，砂基透水砖所用集料的级配设计粒径为 S12，S14，S15 三挡单配或混合掺配，水胶比应控制在 0.24～0.28 之间，集灰比应控制在 3.5～4.5 之间，水泥用量应控制在 390～450 kg/m^3 之间，增强剂用量为水泥用量的 10%～15%之间；随着砂基透水砖强度的增加，透水系数呈指数递减趋势。通过对比分析大量的试验数据，模拟出了砂基透水砖透水系数和水胶比、孔隙率以及强度之间的数学模型。

关键词：砂基透水砖；水胶比；级配；透水系数；强度；影响

中图分类号：TU528.19　　**文献标识码**：A

Permeability coefficient and intensity of water glue ratio and stage matching sand base

YANG San-qiang，HUANG Shi-zhou

(Architectural Engineering Institute，Hebei University，Baoding 071002，China)

Abstract：In order to solve the problem of urban waterlogging and rapid urban groundwater，through indoor experiment and field production practice，the combination of water/cement ratio and sand level matching base permeable coefficient and strength influenced the permeable brick，the high strength and high permeability sand base permeable brick was developed，in order to solve the social problems.The research results show that the sand base mixture ratio design of permeable brick，sand base permeable brick aggregate gradation design size used for speed S12，S14，S15 three monogamous or mixed blending，water-binder ratio should be controlled in 0.24～0.28，set cement ratio should be controlled in 3.5～4.5，dosage of cement should be controlled in 390～450 kg/m^3，strengthening agent dosage of cement dosage of 10%～15%. With the increase of sand base permeable brick intensity，permeable coefficient exponentially decreasing trend，through the analysis of a large number of experimental data，the sand base permeable brick permeable coefficient and water/cement ratio，the mathematical model between porosity and strength were simulated.

Key words：sand-base permeable brick；water glue ratio；grade distribution；permeability coefficient；intensity；influence

收稿日期:2017－10－17

基金项目:河北省教育厅科研重点项目(ZD2016073)；教育部中西部能力综合提升工程高层次引进人才项目

作者简介:杨三强(1980－)，男，四川绵阳人，河北大学教授，博士，主要从事公路路基和路面材料等方面的研究。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

大量研究结果表明，粗骨料的级配和粒径对沙基透水砖的性能影响显著。赵晶等[1]研究了不同水灰比、浆集比、孔隙率的透水混凝土强度，确定了最佳配合比参数。贺图升等[2]研究了底层配合比设计参数对复合结构透水砖的有效孔隙率、透水系数与抗压强度等性能的影响，确定了最佳水灰比，在此比例下复合结构透水砖抗压强度最高，降低集灰比、提高细集料掺量或减小集料粒径均可以提高复合结构透水砖的抗压强度，但同时会降低其有效孔隙率和透水系数。徐向舟等[3]研究得出，增加粗骨料可以显著提高透水砖的抗压强度，将砂率控制在 70%～85%之间，既能有效地增加透水砖抗压强度，又能充分利用沙漠沙。孙宏友[4]对不同的配合比设计方法进行了比较，分别考虑了目标孔隙率、水胶比、骨料种类、硅灰惨量、粉煤灰惨量、搅拌方式六个因素的三种变化水平，讨论了影响透水混凝土强度和透水性的主要因素和次要因素。王萍萍等[5]以沙漠中的风积沙为骨料、环氧树脂为胶黏剂，研制了砂基透水砖，确定了环氧树脂添加量、配重块质量、振动时间等最佳工艺参数。

而目前的研究仅对砂基透水砖性能的影响因素进行了对比分析，并没有研究影响因素对砂基透水砖性能的影响机理，也没有建立其数学模型，因此理论成果很难应用于实际工程。为此，作者通过测定砂基透水砖原材料的各种物理性能指标，对比分析不同配合比设计的砂基透水砖在强度、透水系数、保水率等指标上的差异，进而确定砂基透水砖的最佳配合比设计。通过分析大量试验数据，建立透水系数与水胶比、孔隙率、强度等之间的数学模型，以此研发出一种新型的高强度、高透水性砂基透水砖，并结合实际工程验证此新型砂基透水砖在解决城市内涝中的效果。

1　工程背景

石家庄鹿泉区在地形上属低洼地区，年平均降雨量在 600～800 mm，雨水主要集中于 7～9 月份。当强降雨来临时，由于不透水路面铺筑过多，导致雨水无法下渗，聚集在道路表面，严重堵塞交通，带来诸多安全隐患。基于此，高强度、高透水性砂基透水砖的研究意义重大。本研究所选用的砂基透水砖是用廉价的原材料经振动搅拌以及振动压实成型，具有连续的蜂窝状孔隙结构，能快速渗透雨水，进而解决城市内涝问题，其经济价值与社会价值显著。

2　砂基透水砖原材料

2.1　水泥

本研究沙基透水砖面层结构所用水泥为曲寨 PO42.5 普通硅酸盐水泥，底层结构所用水泥为鼎鑫 PO52.5 普通硅酸盐水泥[6]，试验检验结果如表 1 所示。

表 1　PO42.5 以及 PO52.5 水泥试验检验结果

Table 1　Test results of PO42.5 and PO52.5 cement

标号	7 d		28 d		比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)	初凝时间/min	终凝时间/min
	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa			
42.5	34.4	6.3	45.5	7.2	425	198	294
52.5	44.4	6.9	55.3	9.8	486	203	286

2.2　减水剂

减水剂采用早强型聚羧酸减水剂。减水剂试验检验结果如表 2 所示。

2.3　粉煤灰

粉煤灰采用Ⅱ级粉煤灰。粉煤灰试验检验结果如表 3 所示。

2.4　集料

本研究所用集料为玄武岩碎石[7]，其筛分结果及物理性能试验检验结果如表 4 和表 5 所示。

由表 4 和表 5 可知，砂基透水砖所用集料的级配设计粒径为 S12，S14，S15 三挡单配或混合掺配，所用碎石的压碎值以及针片状指标均较低，对于提高透水砖的强度以及透水系数有很大的作用。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2 减水剂试验检验结果

Table 2 Test results of water reducing agent

含固量/%	pH值	密度/(g·cm^{-3})	泌水率/%	减水率/%	凝结时间差	
					初凝/min	终凝/min
23	6.2	1.088	54.80	32.50	−32	−24

表3 粉煤灰试验检验结果

Table 3 Technical indexes of fly ash

型号	细度	烧失量/%	需水量比/%	含水率/%	安定性/mm
Ⅱ级	9.7	4.42	105	0.50	3.0

表4 碎石筛分结果

Table 4 Results of gravel screening

规格	公称粒径/mm	通过筛孔(mm)的百分率/%								
		13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
S12	5～10	100.0	92.5	6.5	1.0	—	—	—	—	—
S14	3～5	—	100.0	93.5	4.5	2.0	—	—	—	—
S15	0～5	100.0	100.0	89.6	54.4	18.0	12.6	5.3	—	—

表5 碎石指标检验结果

Table 5 Test results of crushed stone

指标	指标值
石料压碎值/%	8.60
洛杉矶磨耗损失/%	16.40
吸水率/%	4.80
坚固性/%	11.30
针片状颗粒含量/%	5.80
水洗法<0.075 mm颗粒含量/%	0.05
软石含量/%	1.20
表观相对密度/(g·cm^3)	2.86

3 砂基透水砖配合比设计

砂基透水砖的配合比设计不同于普通混凝土,其内部具有连续的蜂窝状孔隙结构[8],这就需要水泥浆全部裹附在碎石表面而不能有多余,裹好水泥浆的碎石彼此接触,经振动压实成型制成砂基透水砖。本次研究采用分型理论将不同粒径碎石按形状相似归纳分类,从中选取单级配或多级配混合掺配,再按不同配合比配置砂基透水砖,测定其透水系数、强度、空隙率等指标。通过分析对比试验数据,进而确定砂基透水砖最佳级配设计及配合比方案,再经现场流水线施工进行配合比验证,最终得出砂基透水砖配合比设计方案(如表6所示)。

分析表6可知,砂基透水砖的透水性能与粗集料的级配有直接的关系,单级配粗集料制成的透水砖透水性能要大于两组级配和三组级配;在砂基透水砖生产过程中,水泥用量不能过多,过多会导致孔隙堵塞,生产出来的砖不具备透水性,但也不能过少,过少会导致强度不够,水泥用量控制在390～450 kg/m^{3}之间为宜,水胶比控制在0.24～0.28之间为宜。

砂基透水砖面层结构采用粒径为1.18～2.36单级配河沙,不仅透水性较好,强度也较高。对比分析方案1,2可知,在集料用量相同的情况下,水泥用量越多其强度越高,但保水率和孔隙率相应降低。对比分析方案3,4可知,在胶结料以及用水量相同的情况下,粒径为2.36～4.75 mm和4.75～9.5 mm的双级配砂基透水砖在强度、透水系数、保水率以及孔隙率等性能上要优于粒径为2.36～4.75 mm的单级配砂基透水砖。

4 砂基透水砖透水系数影响因素

4.1 水胶比对砂基透水砖透水系数的影响

水胶比是影响砂基透水砖透水系数的一个重要因素[9],水胶比的大小影响水泥浆体的流动性能、砂基透水砖内部孔隙大小以及水泥浆是否能均匀包裹集料而不流动。在集料用量确定的情况下,水胶比是决定砂基透水砖透水系数的主要因素。在集料粒径、胶结料用量、目标孔隙率不变的条件下,改变水胶比,经振动压实成型、标准养护后测定砂基透水砖的透水系数,结果如图1所示。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 6　砂基透水砖配合比设计方案

Table 6　Sand-base permeable brick mix design scheme

方案	结构	水胶比	集灰比	减水剂用量/(kg·m⁻³)	水泥用量/(kg·m⁻³)	粉煤灰用量/(kg·m⁻³)	增强剂用量/(kg·m⁻³)	集料(mm)用量/(kg·m⁻³) 1.18～2.36	2.36～4.75	4.75～9.5	透水系数/(×10⁻³ cm·s⁻¹)	7 d 抗压强度/MPa	保水率/(g·cm⁻³)	孔隙率/%
1	面层	0.24	3.5	10.50	420	0	0	1 470(砂)	0	0	0.528	21.7	0.18	24.5
	底层	0.26	4.1	8.06	399	42	21	0	0	1 890.0				
2	面层	0.25	3.5	10.50	420	0	0	1 470(砂)	0	0	0.516	24.3	0.16	22.3
	底层	0.26	3.9	8.83	437	26	23	0	0	1 890.0				
3	面层	0.26	3.5	10.50	420	0	0	1 470(砂)	0	0	0.489	24.8	0.13	21.6
	底层	0.26	4.2	14.90	414	35	46	0	753.0	1 317.0				
4	面层	0.25	3.5	10.50	420	0	0	1 470(砂)	0	0	0.453	23.4	0.08	19.5
	底层	0.28	4.2	14.90	414	35	46	0	2 070.0	0				
5	面层	0.26	3.5	10.50	420	0	0	1 470(砂)	0	0	0.483	23.9	0.16	23.6
	底层	0.28	4.3	16.38	440	30	15(SR)	0	0	2 047.5				
6	面层	0.24	3.5	10.50	420	0	0	1 470(砂)	0	0	0.454	22.6	0.09	20.1
	底层	0.27	4.3	16.38	440	30	15(SR)	0	2 047.5	0				

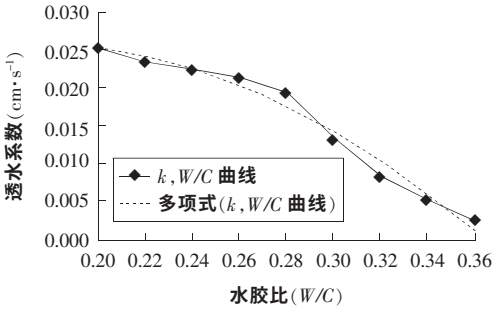

图 1　透水系数与水胶比的关系

Fig. 1　Relationship between water permeability coefficient and water glue ratio

分析图 1 可以得出，随着水胶比的增加，砂基透水砖的透水系数逐渐减小。当水胶比高于 0.28 时，透水砖的透水系数明显减小；当水灰比高于 0.32 时，透水砖的透水系数显著减小。水胶比增大时，水泥浆流动性增加，碎石集料表面充分被水泥浆体包裹，水泥浆向底部流动，堵塞了集料之间的孔隙。水胶比过大，水泥浆会流淌淤积在试件的底部，从而堵塞砂基透水砖内部孔隙，破坏砂基透水砖的透水能力。

结合图 1 分析可知，砂基透水砖最佳水胶比 w/c 的范围为 0.24～0.30。通过拟合砂基透水砖透水系数和水胶比散点图，可得其数学模型为 $k=0.0003\left(\frac{w}{c}\right)^2-0.0004\left(\frac{w}{c}\right)+0.026$。本次非线性回归方程的相关系数计算公式为：

$$\gamma=\sqrt{1-\frac{\sum(k-\hat{k})^2}{\sum(k-\bar{k})^2}}。\tag{1}$$

式中：k 为实测透水系数；$\bar{k}$ 为实测透水次数平均值；$\hat{k}$ 为透水系数拟合值。

将实测透水系数、实测透水次数平均值和透水系数拟合值代入公式(1)，通过计算分析可得砂基透水砖透水系数与水胶比回归方程相关系数($\gamma_{k,\frac{w}{c}}=0.987$)。

4.2　孔隙率对砂基透水砖透水系数的影响

砂基透水砖具有连续蜂窝状孔隙结构，其孔隙率的大小决定着砂基透水砖透水系数的高低[10]。本研究测定砂基透水砖孔隙率后，再测定其透水系数，结果如图 2 所示。

分析图 2 可以得出，随着孔隙率的增加，砂基透水砖的透水系数逐渐增加。当孔隙率大于 11.3%时，透水系数显著增加，砂基透水砖孔隙率宜控制在 16%～30%之间。通过拟合砂基透水砖透水系数和孔隙比的散点图，可得其数学模型为

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$k=-0.0003n^2+0.0057n-0.0044$。本次非线性回归方程的相关系数 $\gamma_{k,n}=0.976$。

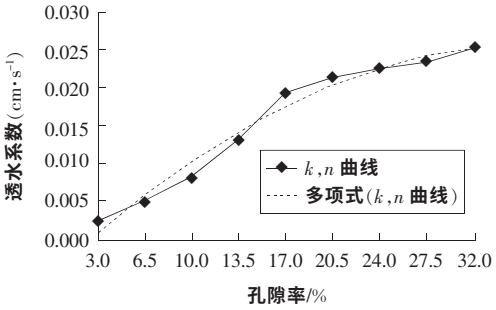

图2 透水系数与孔隙率的关系

Fig. 2 Relation between permeability coefficient and porosity

4.3 级配设计对砂基透水砖透水系数的影响

级配设计是指将不同粒径的集料充分混合,使细集料填充粗集料间的空隙[11],不同量、不同粒径的集料彼此融合,形成开级配、半开级配、密级配等级配设计形式。砂基透水砖的透水系数与集料的级配设计有直接的关系,在水、减水剂、胶结料以及外加剂等用量相同的情况下,运用分型理论数学模型对砂基透水砖进行级配设计,实验室制作3组不同级配设计的砂基透水砖,分别测试其透水系数,结果如图3所示。

分析图3可知,在砂基透水砖材料用量相同的情况下,级配设计为开级配成型的透水砖其透水系数最优,半开级配次之,都符合设计要求。

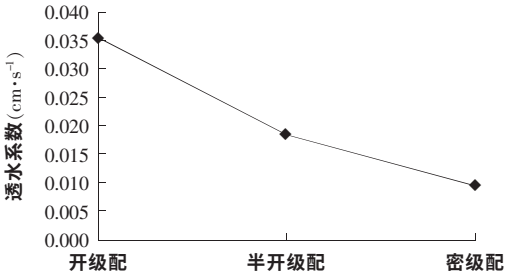

图3 透水系数与级配设计的关系

Fig. 3 Relationship between permeability coefficient and grade distribution design

4.4 强度对砂基透水砖透水系数的影响

强度和透水系数作为砂基透水砖最重要的两个技术参数,两者处于对立的状态,强度增高则透水系数降低,强度降低则透水系数增高[12]。为研究强度与透水系数之间的具体关系,本研究进行了大量试验,通过对数据进行分析整理,得出强度与透水系数之间的关系如图4所示。

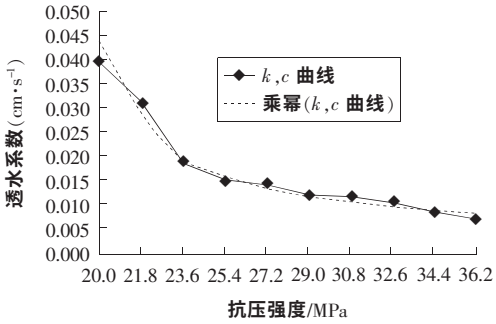

图4 透水系数与强度的关系

Fig. 4 Relationship between permeability coefficient and intensity

分析图4可知,随着砂基透水砖强度的增加,透水系数呈逐渐递减的趋势。当透水砖强度由21.3 MPa增加至24.6 MPa时,透水系数降低显著;当透水砖强度由24.6 MPa增加至35.6 MPa时,透水系数降低缓慢。通过拟合砂基透水砖透水系数与抗压强度散点图,可得其数学模型为 $k=0.0438c^{-0.719}$。本次非线性回归方程的相关系数 $\gamma_{k,n}=0.985$。

5 结论

通过试验研究,作者得出了砂基透水砖具体配合比设计方案以及透水砖透水系数影响因素的影响机理,具体研究结论如下。

1)砂基透水砖配合比设计中,砂基透水砖所用集料的级配设计粒径为S12,S14,S15三挡单配或混合掺配,水胶比应控制在0.24~0.28之间,集灰比应控制在3.5~4.5之间,水泥用量应控制在390~450 kg/m³之间,增强剂用量为水泥用量的10%~15%之间。

2)通过对比分析大量的试验数据,可得砂基透水砖透水系数和水胶比之间的数学模型为:$k=0.0003\left(\frac{w}{c}\right)^2-0.0004\left(\frac{w}{c}\right)+0.026$;砂基透水砖透水系数和孔隙率之间的数学模型为:$k=-0.0003n^2+0.0057n-0.0044$。

3)随着砂基透水砖强度的增加,透水系数呈

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

逐渐递减的趋势，砂基透水砖透水系数和强度之间的数学模型为：$k=0.0438c^{-0.719}$。

〔参考文献〕

[1] 赵晶，胡立国，张长福.透水混凝土配合比设计实验研究[J].大连交通大学学报，2014，35(1)：57-59.
ZHAO Jing，HU Li-guo，ZHANG Chang-fu. Experimental study on the design of water permeable concrete ratio design[J]. Journal of Dalian Jiaotong University，2014，35(1)：57-59.

[2] 贺图升，赵旭光，赵三银，等.复合结构透水砖配合比参数研究[J].武汉理工大学学报，2014，36(1)：34-38.
HE Tu-sheng，ZHAO Xu-guang，ZHAO San-yin，et al. Research on the combination of water brick in composite structures[J]. Journal of Wuhan University of Technology，2014，36(1)：34-38.

[3] 徐向舟，朱晓斌，刘璐，等.混凝土砂基透水路面砖制备及物理性能测试[J].大连理工大学学报，2014，54(3)：315-322.
XU Xiang-zhou，ZHU Xiao-bin，LIU Lu，et al. Preparation of brick preparation and physical properties of concrete sand base permeable pavement[J]. Journal of Dalian University of Technology，2014，54(3)：315-322.

[4] 孙宏友.基于正交试验法的透水混凝土配合比设计和试验研究[D].成都：西南交通大学，2016.
SUN Hong-you. Design and experimental study of permeable concrete mix based on orthogonal test method[D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2016.

[5] 王萍萍，徐向舟.砂基透水砖的制备及性能优化研究[J].新型建筑材料，2013，40(8)：44-47.
WANG Ping-ping，XU Xiang-zhou. Preparation and performance optimization of sand-based permeable brick[J]. New Construction Materials，2013，40(8)：44-47.

[6] William D Martin，Nigel B Kaye，Bradley J Putman. Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete[J]. Construction and Building Materials，2014，59(21)：78-84.

[7] 刘娜，黄士周，杨三强，等.管廊工程钢渣配重混凝土材料设计与结构受力仿真分析[J].长沙理工大学学报：自然科学版，2017，14(2)：26-32.
LIU Na，HUANG Shi-zhou，YANG San-qiang，et al. Analysis on the design and structural stress of reinforced concrete materials for steel slag in canal corridor[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology：Natural Science，2017，14(2)：26-32.

[8] 张丽.废弃织物增强型水泥基复合透水砖的研制与性能分析[D].天津：天津工业大学，2013.
ZHANG Li. Development and performance analysis of reinforced concrete composite permeable brick for abandoned fabrics[D]. Tianjin：Tianjin University of Technology，2013.

[9] Bingxing QIN，Liping YAO，Zhiqiang ZHOU，et al. Changes of the physiological and berberine content in phellodendron amurense seedlings under drought stress[J]. Medicinal Plant，2013，4(09)：13-16.

[10] 张贤超.高性能透水混凝土配合比设计及其生命周期环境评价体系研究[D].长沙：中南大学，2012.
ZHANG Xian-chao. Research on the design and life cycle environmental evaluation system of high performance permeable concrete.[D]. Changsha：Central South University，2012.

[11] 王忠文.透水混凝土的配合比设计及其性能研究[J].江西建材，2016(3)：2-3.
WANG Zhong-wen. Research on the mix design and performance of water permeable concrete[J]. Jiangxi Building Materials，2016(3)：2-3.

[12] 韩媛.基于海绵城市理念下的透水砖及铺装设计[D].成都：西南交通大学，2017.
HAN Yuan. Water permeable brick and pavement design based on sponge city concept[D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2017.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net