

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.042

# 考虑砂率和骨胶比的透水混凝土配合比设计及其性能研究

卫亚洲,冀荣庆

(河南省濮卫高速公路有限公司,河南 濮阳 457000)

**摘要:**考虑砂率和骨胶比的影响,对传统配合比设计方法——体积法进行了改进,并基于改进的方法研究了砂率、骨胶比、养护方式对透水混凝土力学性能和透水系数的影响。结果表明:砂率为15%时显著提高了混凝土的抗压强度同时不影响其透水性;骨胶比为3.0~3.1时可兼顾混凝土的抗压强度和透水系数;相比于标准养护,高温水养护并不是改善透水混凝土综合性能(抗压强度和透水性)的有效手段。采用改进的配合比设计方法,可制备抗压强度超过30 MPa、透水系数6 mm/s左右的性能优良的透水混凝土。透水混凝土透水系数 $K$ 与28 d抗压强度 $S$ 成反比例关系,可用 $K=1/(0.0478+0.00402S)$ 表示;有效空隙率可解释混凝土抗压强度和透水系数随砂率、骨胶比和养护方式变化的原因。

**关键词:**配合比设计方法;砂率;骨胶比;养护方式;有效空隙率

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## 0 引言

透水混凝土作为生态环保型建筑材料越来越广泛地应用在城市建设中。透水混凝土具有良好的水文特性<sup>[1]</sup>,可减少洪水径流并形成天然的排水系统,在缓解城市积水和改善地下水水质的同时,还可使空气中的热量与水有效交换,缓解“热岛效应”<sup>[2]</sup>。透水混凝土以其内部孔隙实现透水性,但同时降低了结构强度,其强度普遍低于普通混凝土且耐久性差<sup>[3]</sup>,这严重限制了透水混凝土的推广应用。

关于透水混凝土的配合比设计方法及性能研究,国内外已开展了一定的研究工作<sup>[4-6]</sup>。透水混凝土的力学性能与原材料性能、空隙率以及骨料与胶凝材料或浆体间的黏结强度有关<sup>[7-8]</sup>,而透水性主要取决于混凝土的空隙率。研究表明:适当的砂率可以增大骨料间的黏结面面积<sup>[9]</sup>,进而提升透水混凝土的力学性能。调整骨料间堆积状态,改变其堆积密实度对混凝土的力学性能和透水性也有重要影

响<sup>[10]</sup>。然而目前透水混凝土主要基于体积法进行配合比设计<sup>[11]</sup>,这是一种不考虑砂且主要根据粗骨料堆积密度确定骨料用量的配合比设计方法,无法充分发挥砂以及粗骨料间的堆积效应。此外,体积法的主要设计参数为目标空隙率和水胶比<sup>[12]</sup>,无法灵活调整骨料与胶凝材料的比例(骨胶比),因此无法充分考虑其对水泥混凝土性能的作用,如骨料与浆体的界面黏结强度<sup>[13]</sup>。

基于此,本文在配合比设计时考虑砂率、骨胶比的影响,对传统配合比设计方法——体积法进行了改进。并基于改进的配合比设计方法,研究了砂率、骨胶比、养护方式对透水混凝土力学性能和透水系数的影响,建立了力学性能和透水系数的关系,同时测定了混凝土的有效空隙率,解释了其力学性能和透水性变化的原因。

## 1 试验概况

### 1.1 原材料

水泥采用P.O42.5硅酸盐水泥;矿物掺合料为硅

收稿日期:2022-01-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878622)

作者简介:卫亚洲,男,大学本科,高级工程师.E-mail:363380543@qq.com

灰;粗骨料为石子和陶粒体积比 2:1 的混合骨料,其中石子为玄武岩碎石,陶粒为页岩陶粒(1 h 吸水率为 5%);细骨料为陶砂,骨料物理性能见表 1;外加剂为聚羧酸系高效减水剂,减水率为 25%~35%。

表 1 骨料物理性能

集料类型	粒径范围/ mm	表观密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	堆积密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
碎石	5~10	2 580	1 330
陶粒	9~16	1 836	842
陶砂	0~5	1 788	873

## 1.2 配合比设计

研究砂率、骨胶比、养护方式 3 个因素对透水混

凝土性能的影响,每个因素均设定 6 个水平,具体见表 2,其中对照组的砂率为 10%、骨胶比为 2.7,养护条件为标准养护。各组透水混凝土的目标空隙率均为 10%,水胶比均为 0.17。透水混凝土配合比如表 3 所示。

表 2 试验影响因素及水平

水平	砂率/%	水平	骨胶比	水平	养护方式
1	0	7	2.7	13	标准养护
2	5	8	2.8	14	20℃水养护
3	10	9	3.0	15	30℃水养护
4	15	10	3.1	16	40℃水养护
5	20	11	3.3	17	50℃水养护
6	25	12	3.5	18	60℃水养护

表 3 透水混凝土配合比

水平	编号	配合比/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )					
		水泥	硅灰	陶砂	碎石	陶粒	水
1	S0	512	32.68	0	1 085	386	92.70
2	S5	509	32.49	73	1 024	364	92.02
3	S10	501	31.98	144	955	340	90.54
4	S15	498	31.80	215	896	319	90.04
5	S20	492	31.38	282	833	297	88.91
6	S25	488	31.15	350	776	276	88.26
7	A27	502	32.04	144	957	341	90.78
8	A28	489	31.20	146	967	344	88.46
9	A30	465	29.70	149	986	351	84.20
10	A31	454	28.98	150	994	354	82.17
11	A33	433	27.66	152	1 011	360	78.43
12	A35	414	26.40	154	1 023	364	74.87
13	CS	501	31.98	144	955	340	90.54
14	CW20	501	31.98	144	955	340	90.54
15	CW30	501	31.98	144	955	340	90.54
16	CW40	501	31.98	144	955	340	90.54
17	CW50	501	31.98	144	955	340	90.54
18	CW60	501	31.98	144	955	340	90.54

## 1.3 试验方法

### 1.3.1 成型工艺

透水混凝土的搅拌工艺采用“水泥裹石法”:①在 2 min 内将经过预湿处理的粗细骨料搅拌均匀,之后与含有水泥、硅灰的混合粉体继续搅拌 3 min;②在拌和物中加入 1/3 的水搅拌 2 min,并另取 1/3 的水与减水剂充分混合后倒入拌和物中继续搅拌;③将剩余水倒入,人工搅拌 5 min 左右,使粗骨料表面完

全被水泥浆均匀包裹。

试验成型方式为“人工插捣+一次机械振动(时间为 3 s)”。养护方式分别采用 20~60℃的水养护和标准养护,以研究养护方式对透水混凝土性能的影响。

### 1.3.2 抗压强度

根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)<sup>[14]</sup>测试透水混凝土 3 d、7 d、28 d 的

抗压强度(图1)。



图1 透水混凝土抗压强度测试

### 1.3.3 透水系数

采用图2自制透水系数测定仪测定混凝土的透水系数。透水混凝土试块尺寸为100 mm×100 mm×100 mm。

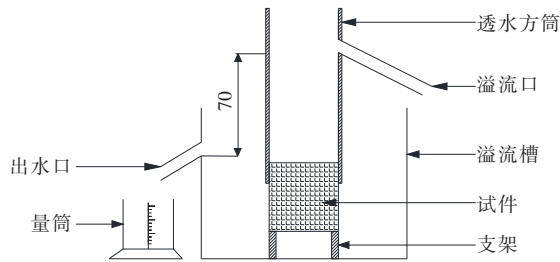


图2 透水混凝土透水系数测定装置示意图(单位:mm)

透水系数测定步骤:①对透水混凝土侧面进行滚蜡和保鲜膜密封包裹处理;②将透水方筒套在试块顶部,用橡皮泥密封试块与方筒的接口,并将其放置在底部支架上;③向溢流槽中注水,使水位至溢流槽出水口位置;④向透水方筒中注水,水位始终维持在溢流口位置,测定试块的透水系数。

测得平均水头70 mm下透水混凝土试块的渗流速度,用以表征其透水性。透水系数的计算公式为:

$$K = 10 \frac{QL}{AHt} \quad (1)$$

式中: $K$ 为透水系数(mm/s); $Q$ 为 $t$ 时间内的渗出水量(mL); $L$ 为试块厚度(cm); $A$ 为试块的上表面积( $\text{cm}^2$ ); $H$ 为水位差(cm),取7 cm; $t$ 为渗流时间(s)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 考虑砂率和骨胶比的配合比设计

透水混凝土多采用体积法进行配合比设计<sup>[11]</sup>。

体积法根据骨料堆积密度确定骨料用量,通过预设空隙率保证混凝土透水性并确定 $1 \text{ m}^3$ 体积下水泥浆体的体积,进而根据水灰比确定水泥和水的体积。由于骨料用量仅取决于其堆积密度,使得体积法无法充分发挥粗细骨料间堆积效应以及骨胶比(或骨浆比)等参数对透水混凝土性能的影响。

基于此,本文在配合比设计时以体积法为基础引入砂率和骨胶比,以目标空隙率、水胶比、砂率、骨胶比为设计参数,通过预设目标空隙率保证混凝土的透水性,并调整各个参数以满足透水混凝土的力学性能要求。改进的 $1 \text{ m}^3$ 透水混凝土配合比设计方法如下:

设定 $1 \text{ m}^3$ 透水混凝土的目标空隙率为 $P$ ,则原材料体积与 $P$ 的关系可用下式表示:

$$\frac{m_G}{\rho_G} + \frac{m_T}{\rho_T} + \frac{m_S}{\rho_S} + V_j + P = \frac{m_G}{\rho_G} + \frac{m_T}{\rho_T} + \frac{m_S}{\rho_S} + V_b + V_w + P = 1 \quad (2)$$

式中: $m_G$ 、 $m_T$ 、 $m_S$ 分别为 $1 \text{ m}^3$ 透水混凝土中石子、陶粒、陶砂的质量(kg); $\rho_G$ 、 $\rho_T$ 、 $\rho_S$ 分别为对应骨料的表观密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $V_j$ 为水泥-硅灰复合浆体体积( $\text{m}^3$ ); $P$ 为目标空隙率(%); $V_b$ 、 $V_w$ 分别为胶凝材料和水的体积( $\text{m}^3$ )。

骨料与胶凝材料总量的比例用骨胶比 $\beta$ 表示:

$$m_G + m_T + m_S = \beta m \quad (3)$$

砂子与骨料的比例用砂率 $S$ 表示:

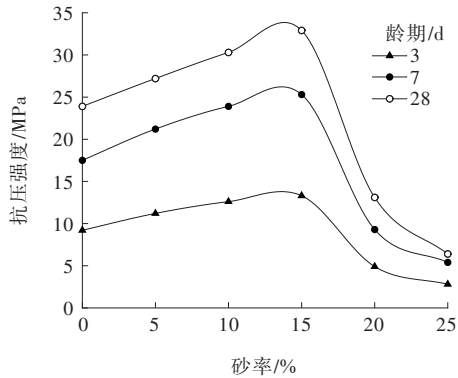
$$m_S = S(m_G + m_T + m_S) \quad (4)$$

设混合骨料中碎石体积( $V_G$ )与陶粒体积( $V_T$ )之比为 $a:b$ (本文为2:1),在目标空隙率、骨胶比、水胶比、砂率4个参数确定后,联立式(3)、(4)与式(2)即可得到各材料用量,从而确定试验配合比。改进的配合比设计方法考虑了砂子和骨胶比对透水混凝土性能的影响,且计算方法简便准确。基于改进的配合比设计方法,下文研究砂率、骨胶比、养护方式对透水混凝土性能的影响。

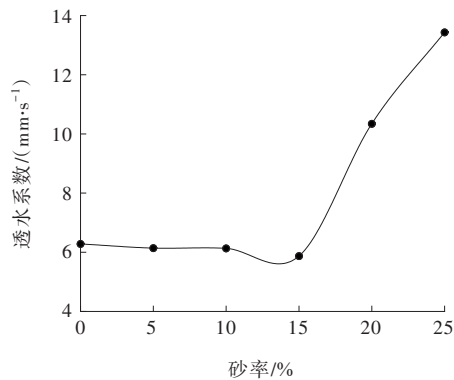
### 2.2 砂率对透水混凝土抗压强度、透水系数影响

图3为透水混凝土抗压强度、透水系数随砂率的变化。

由图3(a)可知:不同龄期的透水混凝土抗压强度均随砂率的增加先增大后减小,且均在15%砂率时达到峰值。这是因为初始掺入一定量砂子填充了粗骨料之间的空隙,增加了骨料间的接触面积,提



(a) 抗压强度



(b) 透水系数

图 3 砂率对透水混凝土抗压强度、透水系数的影响

升了骨料间的堆积密实度和相互作用<sup>[15]</sup>,进而提升了混凝土的抗压强度。但当砂率高于15%,砂含量较高时,继续增加砂率降低了透水混凝土的抗压强度,这可能是因为砂率为15%时混凝土已达到了较好的颗粒堆积状态,继续增加砂子反而不利于骨料间的堆积填充<sup>[16]</sup>;同时由于砂子的比表面积大于石子的比表面积,提高砂率增大了骨料的总比表面积,减小了包裹骨料的水泥浆厚度<sup>[17]</sup>,从而减弱了其对骨料的胶结作用,导致其抗压强度逐渐下降。

随龄期的增加,不同砂率的透水混凝土其抗压强度均逐渐增加。因为水泥颗粒的水化程度随着时间的延长不断增大,生成的C—S—H凝胶含量也逐渐增加。研究表明:C—S—H凝胶是水泥混凝土形成强度的主要部分<sup>[18]</sup>,因此随着龄期的增加,混凝土的抗压强度逐渐提高。

由图3(b)可以看出:随砂率的增加,透水系数先减小后增大,砂率为15%时,混凝土的透水系数最小。砂率小于15%时,混凝土的透水系数变化较小,而砂率大于15%时,随砂率增加,透水系数显著增加。透水混凝土的透水系数与其空隙率密切相关,

而空隙率又与颗粒间的堆积密实度相关。研究表明:当小颗粒的量少于大颗粒时,增加小颗粒有助于颗粒堆积,可提高颗粒群整体密实度,此时小颗粒发挥“填充效应”;若继续增加小颗粒,则此时小颗粒发挥“楔入效应”,将降低颗粒群整体密实度<sup>[16]</sup>。同时由于砂的密度小于石子,增加砂率提高了骨料整体的体积,而骨料与浆体的总体积是一定的,因此增加砂率不仅增大了骨料的体积同时减小了浆体的体积,进而减少了骨料间填充的浆体体积,增加了混凝土的空隙率。这解释了砂率较大时,透水混凝土透水系数增大的现象。

结合图3(a)、(b)可知:砂率为15%时,相比于未掺砂子及砂率为10%的透水混凝土,其透水系数仅有轻微的减小而抗压强度则明显提高,抗压强度超过30 MPa,透水系数保持为6 mm/s左右。因此15%的砂率可在轻微影响透水混凝土透水性的同时显著提高其抗压强度,可推荐在配合比设计中使用15%的砂率。

### 2.3 骨胶比对透水混凝土抗压强度、透水系数影响

图4为透水混凝土抗压强度、透水系数随骨胶比的变化。

由图4(a)可知:不同龄期的透水混凝土抗压强度均随骨胶比的增加而降低。透水混凝土的抗压强度除了与原材料本身的强度有关,还与骨料和胶凝材料之间的黏结强度有很大的关系,一定范围内增加骨胶比,骨料之间黏结面的厚度相对变薄,黏结强度降低<sup>[13]</sup>,透水混凝土的抗压强度随之下降。此外,骨胶比从2.7增加到3.5,3 d、7 d、28 d龄期的抗压强度分别降低了67.2%、67.1%、65.9%,没有明显的差别。

由图4(b)可知:透水混凝土的透水系数随骨胶比的增加而增大。这与骨胶比增加,混凝土抗压强度降低的原因相似。水胶比相同时,骨胶比的增加使得混凝土中浆体体积及其后期水化产物的量均减少,从而无法充分填充骨料之间的空隙,降低了混凝土的密实度,增大了混凝土的空隙率和透水系数。结合图4(a)、(b)可知:骨胶比为3.0~3.1时,透水混凝土的透水系数可明显提升至6.31~8.25 mm/s,且28 d抗压强度在20 MPa左右,能满足工程应用要求<sup>[11,19]</sup>,且兼顾混凝土的抗压强度和透水性。

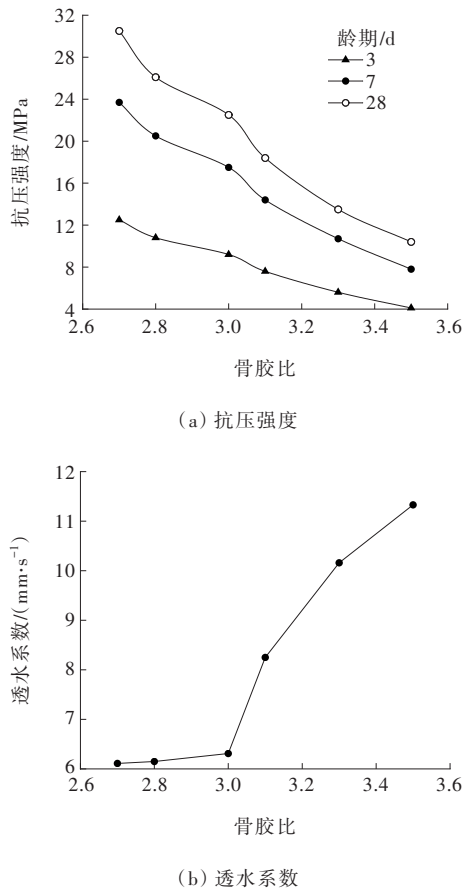


图4 骨胶比对透水混凝土抗压强度、透水系数的影响

#### 2.4 养护方式对透水混凝土抗压强度、透水系数影响

不同养护方式改变了混凝土所处的温湿环境,从而对水泥水化有重要影响,进一步影响了混凝土的性能。相比普通混凝土,透水混凝土因内部具有孔隙,增加了与空气、水的接触面积,从而对养护条件更为敏感<sup>[20]</sup>。图5为养护方式对透水混凝土性能的影响。

由图5可知:各养护条件下,随龄期的增加透水混凝土的抗压强度均逐渐增加,正如前文所述,随着龄期的增加,混凝土中生成的C—S—H凝胶数量和强度均不断增长<sup>[21]</sup>,从而增加了透水混凝土的抗压强度。随着水养护温度的增加,混凝土的抗压强度先增加后减小,20℃、30℃、40℃水养护的混凝土3 d、7 d、28 d抗压强度均高于标准养护,而50℃、60℃水养护的混凝土3 d、7 d、28 d抗压强度均低于标准养护。这是因为混凝土的抗压强度与水泥的水化密切相关,一定范围内提高水养护温度可以促进混凝土中水泥颗粒等胶凝材料的水化,从而在较短的时间内生成更多的C—S—H凝胶<sup>[22]</sup>,进而提高混凝土

的抗压强度。但当水养护温度过高时,水泥水化的速率过快导致水化产物来不及扩散,透水混凝土内部孔隙得不到足够的填充,内部结构疏松,从而降低了透水混凝土的抗压强度<sup>[23]</sup>。

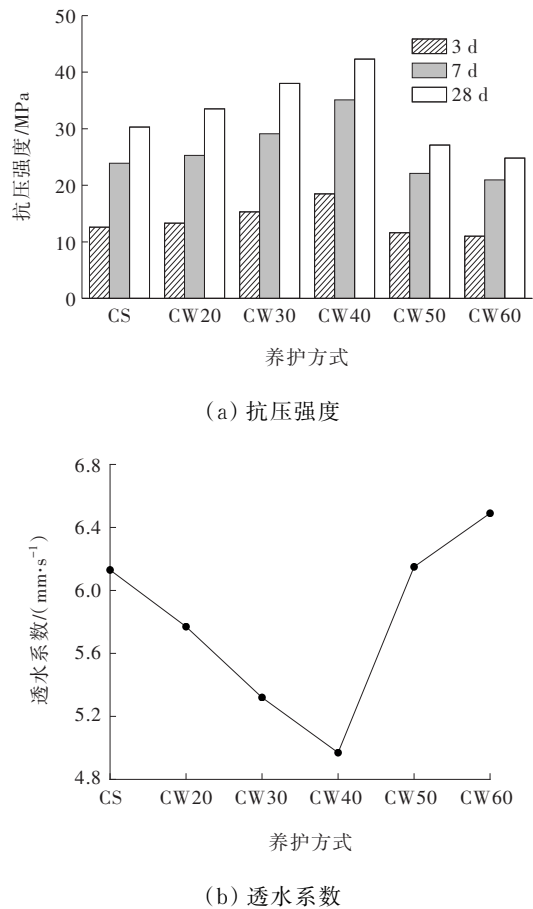


图5 养护方式对透水混凝土抗压强度、透水系数的影响

由图5可知:随着水养护温度的提高,混凝土的透水系数先降低后增加,40℃水养护的混凝土透水系数低于标准养护,50℃、60℃水养护的混凝土透水系数高于标准养护。结合图5(a)、(b)可知:40℃水养护的透水混凝土显著提高了28 d抗压强度,但也明显降低了混凝土的透水系数。而50℃水养护的透水混凝土可在轻微损失28 d抗压强度的条件下保证混凝土的透水系数。总的来说,相比于标准养护,高温水养护并不是改善透水混凝土综合性能(抗压强度和透水性)的有效手段。

结合图3~5可知:采用改进的配合比设计方法,可制备抗压强度超过30 MPa、透水系数6 mm/s左右或抗压强度20 MPa左右、透水系数接近8 mm/s的性

能优良的透水混凝土,证明了改进的配合比设计方法的有效性。

### 2.5 透水混凝土透水系数、28 d 抗压强度与有效空隙率关系

由前文分析可知:不同影响因素下(砂率、骨胶比、养护方式)透水混凝土的抗压强度基本与透水系数的变化相反。图 6 建立了透水混凝土透水系数与 28 d 抗压强度的关系,可以看到:透水系数与 28 d 抗压强度成反比例关系,可用  $K=1/(0.0478+0.00402S)$  表示,其中  $K$  为透水混凝土的透水系数 (mm/s); $S$  为透水混凝土 28 d 抗压强度(MPa)。

由于透水混凝土的空隙率可直接表征其透水性 与强度的变化,本文基于重量法测定了透水混凝土

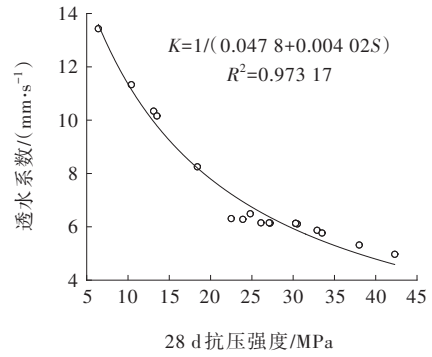


图 6 透水混凝土透水系数与 28 d 抗压强度关系的空隙率<sup>[24]</sup>。试件的有效空隙率可通过下式计算:

$$P = \left(1 - \frac{m_2 - m_1}{V}\right) \times 100\% \quad (5)$$

得到各组透水混凝土的有效空隙率如表 4 所示。

表 4 透水混凝土有效空隙率

水平	试样编号	有效空隙率/%	水平	试样编号	有效空隙率/%	水平	试样编号	有效空隙率/%
1	S0	9.34	7	A27	9.02	13	CS	9.06
2	S5	9.08	8	A28	9.10	14	CW20	8.22
3	S10	9.06	9	A30	9.39	15	CW30	6.56
4	S15	8.49	10	A31	11.77	16	CW40	6.24
5	S20	13.47	11	A33	13.34	17	CW50	9.10
6	S25	15.42	12	A35	14.15	18	CW60	9.69

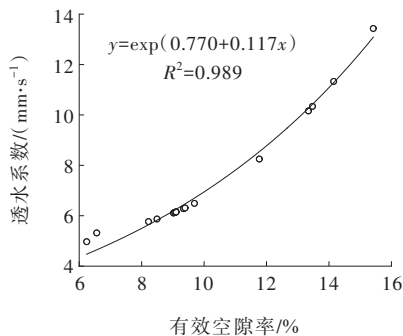
由表 4 可知:透水混凝土的有效空隙率随砂率、骨胶比和养护方式的变化规律与透水系数一致。图 7 建立了透水系数、28 d 抗压强度与有效空隙率的关系。可以看到:透水系数与有效空隙率呈正指数相关;28 d 抗压强度与有效空隙率呈负线性相关,这与期望的结果一致。对比图 7(a)、(b)可知:有效空隙率与透水系数的相关性高于其与抗压强度的相关性,说明透水混凝土的有效空隙率更直接决定了其透水性,但也对抗压强度有显著的影响。总的来说,

有效空隙率解释了混凝土抗压强度和透水性随砂率、骨胶比和养护方式变化的原因。

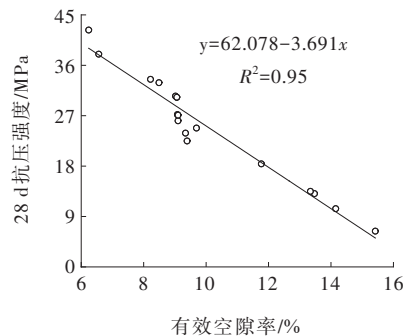
### 3 结论

(1) 在传统配合比设计方法——体积法的基础上引入了砂率、骨胶比两个参数进行透水混凝土配合比设计,改进的设计方法计算简便准确。

(2) 砂率为 15% 时可在保证透水混凝土透水性



(a) 透水系数



(b) 28 d 抗压强度

图 7 透水系数、28 d 抗压强度与有效空隙率的关系

的条件下显著提高其抗压强度;随骨胶比增大,透水混凝土抗压强度逐渐降低,透水系数逐渐增加,骨胶比为3.0~3.1时可兼顾混凝土的抗压强度和透水系数;相比于标准养护,高温水养护不是改善透水混凝土综合性能(抗压强度和透水性)的有效手段。

(3) 采用改进的配合比设计方法,可制备抗压强度超过30 MPa、透水系数6 mm/s左右或抗压强度20 MPa左右、透水系数接近8 mm/s的性能优良的透水混凝土,证明了改进的配合比设计方法的有效性。

(4) 透水系数与28 d抗压强度明显相关且成反比例关系,可用 $K=1/(0.0478+0.00402S)$ 表示。相比于抗压强度,透水混凝土的有效孔隙率更直接决定了其透水性。有效空隙率解释了混凝土抗压强度和透水性随砂率、骨胶比和养护方式变化的原因。

#### 参考文献:

- [1] LIN W G, PARK D G, RYU S W, et al. Development of permeability test method for porous concrete block pavement materials considering clogging[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 118: 20-26.
- [2] ASADI S, HASSAN M M, KEVERN J T, et al. Development of photocatalytic pervious concrete pavement for air and storm water improvements[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2012, 2290(1): 161-167.
- [3] US-ACI. Report on Pervious Concrete[S], 2010.
- [4] 孙家瑛, 黄科, 蒋华钦. 透水水泥混凝土力学性能和耐久性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2007, 10(5): 583-587.
- [5] CHEN S K, ZHAO Y P, BIE Y J. The prediction analysis of properties of recycled aggregate permeable concrete based on back-propagation neural network[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 124187.
- [6] 陈守开, 刘新飞, 郭磊, 等. 再生骨料掺配比再生透水混凝土性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(6): 1590-1598.
- [7] CHINDAPRASIRT P, HATANAKA S, MISHIMA N, et al. Effects of binder strength and aggregate size on the compressive strength and void ratio of porous concrete[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2009, 16(6): 714-719.
- [8] HUANG B S, WU H, SHU X, et al. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(5): 818-823.
- [9] 徐仁崇, 桂苗苗, 刘君秀, 等. 透水混凝土配合比参数选择及设计方法研究[J]. *混凝土*, 2011(8): 109-112.
- [10] 程娟. 透水混凝土配合比设计及其性能的实验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2007.
- [11] 江苏省建工集团有限公司, 河南省第一建筑工程集团有限责任公司. 透水水泥混凝土路面技术规程: CJJ/T 135—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [12] 亓转玲. 粉煤灰透水混凝土配合比设计及其性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [13] WANG Z Z, ZOU D J, LIU T J, et al. Influence of paste coating thickness on the compressive strength, permeability, and mesostructure of permeable concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 299: 123994.
- [14] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [15] 姜骞, 周华新, 崔巩, 等. 骨料和配合比参数对透水混凝土基本性能影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2018(8): 1-5.
- [16] MEHDIPOUR I, KHAYAT K H. Understanding the role of particle packing characteristics in rheo-physical properties of cementitious suspensions: A literature review[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 161: 340-353.
- [17] 焦登武, 安晓鹏, 史才军, 等. 骨料裹浆厚度对混凝土流变性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2017, 45(9): 1360-1366.
- [18] ROUSSEL N, OVARLEZ G, GARRAULT S, et al. The origins of thixotropy of fresh cement pastes[J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(1): 148-157.
- [19] 建筑材料工业技术情报研究所, 陕西四季风景园林绿化工程有限公司, 上海城建物资有限公司. 透水混凝土: JC/T 2558—2020[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2020.
- [20] SHI H S, XU B W, ZHOU X C. Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(5): 1980-1985.
- [21] ROUSSEL N. Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(9): 1656-1664.
- [22] HUANG H, HUANG T J, YUAN Q, et al. Temperature dependence of structural build-up and its relation with hydration kinetics of cement paste[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 201: 553-562.
- [23] 谭克锋, 刘涛. 早期高温养护对混凝土抗压强度的影响[J]. *建筑材料学报*, 2006, 9(4): 473-476.
- [24] 黄大伟, 魏姗姗, 王原原, 等. 透水混凝土孔隙率快速检测方法[J]. *建材发展导向(下)*, 2014(12): 51-52, 53.