

细集料掺量对透水混凝土性能的影响

孙荣晓, 赵峰, 马凯凯, 黄世梅

山东省交通工程监理咨询有限公司, 山东 济南

收稿日期: 2024年5月28日; 录用日期: 2024年6月17日; 发布日期: 2024年6月25日

摘要

为研究细集料掺量对透水混凝土性能的影响, 制备透水混凝土混合料, 选用I型普通硅酸盐水泥、级配类型为II的细集料和四种粒径的粗集料(即4.75 mm~9 mm、9 mm~12.5 mm、12.5 mm~16 mm、16 mm~19.5 mm), 采用水灰比为0.34, 水泥掺量为400 kg/m³, 集灰比为4.75:1。以质量范围为0%~50%的细集料代替粗集料, 对混合料的各种力学性能(抗压强度、抗弯强度、劈裂抗拉强度)进行评价, 基于试验数据建立棱角指数与集料强度、抗磨耗性、渗透性、间隙率的关系, 通过探究透水混凝土的抗压强度与渗透性之间的平衡关系确定了最佳混合料: 粗集料粒径分别为16.0~19.5 mm、13.5~16 mm, 细集料掺量为30%的混合料, 以及粗集料粒径分别为9.0~12.5 mm、4.75~9.0 mm, 细集料掺量为20%的混合料。混合料具有更好的路用性能, 为透水混凝土作为路面材料的适宜性提供科学依据。

关键词

透水混凝土, 渗透性, 棱角指数, 最佳配合比, 抗压强度, 间隙率

Effect of Fine Aggregate Content on Performance of Pervious Concrete

Rongxiao Sun, Feng Zhao, Kaikai Ma, Shimei Huang

Shandong Traffic Engineering Supervision Consulting Co., Ltd., Jinan Shandong

Received: May 28th, 2024; accepted: Jun. 17th, 2024; published: Jun. 25th, 2024

Abstract

In order to study the effect of fine aggregate content on the performance of permeable concrete, the permeable concrete mixture was prepared, and type I ordinary Portland cement, fine aggregate

gate with gradation type II and coarse aggregate with four particle sizes (*i.e.*, 4.75 mm~9 mm, 9 mm~12.5 mm, 12.5 mm~16 mm, 16 mm~19.5 mm) were selected, and the water-cement ratio was 0.34, the cement content was 400 kg/m³, and the ash collection ratio was 4.75:1. The fine aggregate with a mass range of 0%~50% was used instead of coarse aggregate, and various mechanical properties (compressive strength, bending strength, splitting tensile strength) of the mixture were evaluated, and the relationship between the angular index and the aggregate strength, abrasion resistance, permeability and clearance rate was established based on the test data, and the optimal mixture was determined by exploring the balance relationship between the compressive strength and permeability of permeable concrete: the particle size of the coarse aggregate was 16.0~19.5 mm and 13.5~16 mm, and the fine aggregate content was 30%. The mixture, as well as the mixture with a coarse aggregate particle size of 9.0~12.5 mm, 4.75~9.0 mm, and a fine aggregate content of 20%. The mixture has better road performance, which provides a scientific basis for the suitability of permeable concrete as a pavement material.

Keywords

Permeable Concrete, Permeability, Angular Index, Optimal Mix Ratio, Compressive Strength, Clearance Rate

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于城市化的迅速发展,大部分地方都被水泥混凝土等不透水层覆盖,这对地下水产生了重大影响,我国在海绵城市规划中使用了透水混凝土[1],透水混凝土路面可以有效减小地表径流量、延迟产流时间、降低地表径流系数及削减洪峰流量[2][3],透水混凝土路面还具有降低路面噪声、提高行车安全指数等作用[4],因此透水混凝土在路面的应用是减少这一问题的有效途径。

蒋勇、杨婷惠[5][6]等通过对比试验发现骨料粒径、级配对透水混凝土的力学性能和渗透性能均有较大影响,刘李斌[7]等提出选择合适的骨料有助于平衡强度与渗透性间的关系,通过选取最优的骨料粒径,实现强度与渗透性能的平衡,增强透水混凝土复合材料的综合性能。

影响混合料间隙的重要参数是棱角指数[8][9],如果集料呈角状,则集料中的间隙将增加,这种性质在评价集料间隙率方面是非常重要的[10][11][12],目前国内还没有系统地研究集料的棱角指数对透水混凝土力学性能和渗透性的影响,本文通过改变细集料的掺量,重点研究棱角指数与强度、抗磨耗性、渗透性、间隙率的关系[13],对强度性能和渗透性进行综合评价,并确定透水混凝土集料的最佳配合比类型。

2. 试验程序

2.1. 材料与性能

材料采用 I 型硅酸盐水泥、碎石、细集料、水和四种粒径的粗集料,即 4.75 mm~9 mm、9 mm~12.5 mm、12.5 mm~16 mm、16 mm~19.5 mm,水灰比 0.34、水泥掺量 400 kg/m³、集灰比 4.75:1,试验中使用的细集料符合 IS: 383-2016 要求。材料的比重见表 1。

Table 1. Specific gravity of material**表 1.** 材料的比重

材料	比重
粗集料	2.71
粗集料	2.70
细集料	2.62
水泥	3.15

2.2. 透水混凝土配合比设计

选用四种尺寸的粗集料,依据 JGJ55-2019 按绝对体积法组成配合比设计分别以符号 M1FC, M2FC, M3FC 和 M4FC 表示,如表 2 所示(M 代表粗集料, F 代表细集料掺量。),选取上述混合料中细集料含量作为研究参数之一,调整细集料掺量在 0%~50%之间变化,研究细集料掺量对混合料性能的影响。本文共设计 24 种配比,透水混凝土配比类型见表 2。

Table 2. Pervious concrete mix type**表 2.** 透水混凝土配合比类型

细集料掺量(%)	粗集料规格			
	16.0~19.5 mm	12.5~16.0 mm	9.0~12.5 mm	4.75~9.0 mm
	M1FC	M2FC	M3FC	M4FC
50	M1F50	M2F50	M3F50	M4F50
40	M1F40	M2F40	M3F40	M4F40
30	M1F30	M2F30	M3F30	M4F30
20	M1F20	M2F20	M3F20	M4F20
10	M1F10	M2F10	M3F10	M4F10
0	M1F0	M2F0	M3F0	M4F0

2.3. 试样的制备和试验

2.3.1. 集料总间隙

集料总间隙率采用气体置换法测定。

2.3.2. 抗压强度

抗压强度试验按照 ASTM C 39 进行。每次混合制备尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试样。24 小时后,试样脱模,在水中固化,直至测试。

2.3.3. 抗弯强度

根据 ASTM C 78 的三点法获得弯曲强度,试验在尺寸为 100 mm × 100 mm × 500 mm 的梁样上养护 28 天后进行试验。

2.3.4. 劈裂抗拉强度

劈裂拉伸强度根据 ASTM C 496,浇筑 100 mm × 200 mm 的圆柱形试样,养护 28 天后进行试验。

2.3.5. 抗磨损性

根据 IS:2386 part-4, 通过浇铸尺寸为 60 mm × 60 mm × 25 mm 的试件, 并在养护 28 天后测试透水混凝土的耐磨性。

2.3.6. 渗透率

试样采用变渗水高度法测定渗透率。

3. 试验结果与讨论

3.1. 基于棱角指数的总间隙

表 3 列出了四种粒径粗集料的棱角指数。棱角指数的增加会导致混合料中的间隙百分比上升。从表 3 中可以观察到, 从混合料 M1F0 至 M4F0, 棱角指数呈现下降趋势。表 4 显示, 细集料颗粒较小, 能够填充在粗集料之间的空隙中。随着细集料掺量的逐步提升, 更多的空隙被填充, 从而减少了总间隙率。同时, 细集料有助于混合料颗粒之间形成更紧密的堆积, 颗粒之间的接触点增多, 使得颗粒间的空隙减小, 从而降低了总间隙率。

Table 3. Angular index of aggregates of different particle sizes

表 3. 不同粒径集料的棱角指数

混合料类型	棱角指数
M1F0	8
M2F0	7
M3F0	6
M4F0	4

Table 4. Mixture clearance rate

表 4. 混合料间隙率

混合料类型	M1	M2	M3	M4
	间隙率(%)			
F0	40.91	39.51	39.34	37.42
F10	39.54	37.55	37.45	35.81
F20	37.04	35.67	35.63	33.93
F30	33.46	33.08	32.70	31.84
F40	31.19	30.67	30.67	30.01
F50	28.88	28.30	28.19	28.13

3.2. 强度特性

不同龄期的透水混凝土标准抗压强度值见表 5, 不同细集料掺量透水混凝土的抗压强度见表 6。细集料掺量的增加导致混合料抗压强度提高, 这是因为在水泥砂浆中, 砂与水泥浆相互渗透共同作用, 随着粗集料用量的减少, 细集料用量的增加, 集料与水泥浆的接触面积增加, 从而强度提高, 从 7 天到 28 天, 抗压强度平均增加 27%; 从 28 天到 56 天, 抗压强度增加了 24%。

Table 5. Standard strength test results of pervious concrete**表 5.** 透水混凝土标准强度测试结果

混合料类型	抗压强度 N/mm^2			抗弯强度 N/mm^2	抗拉强度 N/mm^2
	7 d	28 d	56 d	28 d	28 d
M1FC	24.9	34.4	42.7	3.8	3.7
M2FC	25.2	34.6	43.1	4.0	2.8
M3FC	25.5	36.6	44.7	4.4	3.9
M4FC	27.6	41.9	48.4	5.2	4.2

Table 6. Compressive strength of different mixtures at different ages**表 6.** 各种混合料配合比不同龄期的抗压强度

调整后混合料类型	抗压强度 N/mm^2		
	7 d	28 d	56 d
M1F0	5.00	9.60	11.53
M1F10	7.17	10.30	14.80
M1F20	9.30	11.13	19.33
M1F30	11.60	16.50	23.57
M1F40	11.90	21.56	28.07
M1F50	14.43	23.60	31.77
M2F0	6.20	10.03	12.17
M2F10	7.21	11.00	16.97
M2F20	10.40	13.00	20.83
M2F30	12.20	18.80	23.37
M2F40	14.40	23.00	28.10
M2F50	15.20	24.26	34.40
M3F0	6.53	10.30	12.07
M3F10	7.36	11.23	15.30
M3F20	10.90	15.20	20.27
M3F30	13.20	22.00	25.70
M3F40	15.30	23.70	29.07
M3F50	16.23	24.80	34.33
M4F0	6.60	11.00	12.70
M4F10	8.10	12.00	15.90
M4F20	11.30	16.00	20.67
M4F30	13.40	23.12	28.13
M4F40	15.60	24.32	29.57
M4F50	18.10	26.20	35.47

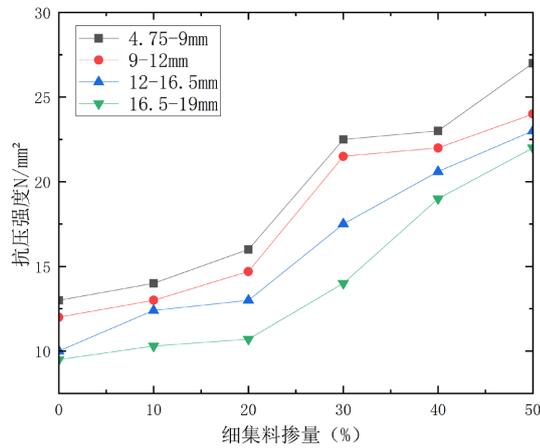


Figure 1. Compressive strength (28 days) with the amount of fine aggregate
图 1. 抗压强度(28 天)随细集料掺量的变化

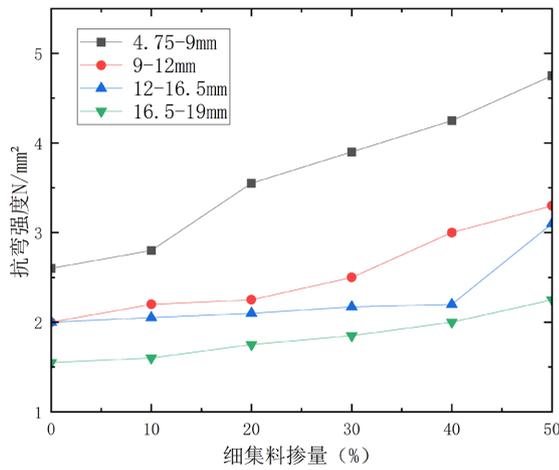


Figure 2. The bending strength (28 days) varies with the amount of fine aggregate
图 2. 抗弯强度(28 天)随细集料掺量的变化

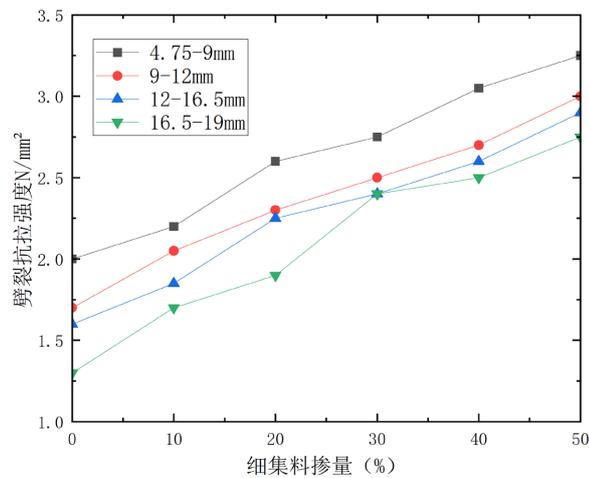


Figure 3. The splitting tensile strength (28 days) varies with the amount of fine aggregate
图 3. 劈裂抗拉强度(28 天)随细集料掺量的变化

细集料掺量的变化会导致透水混凝土强度的变化,从图 1 可以看出, M1F0 到 M3F0, 粗集料粒径减小, 导致棱角指数逐渐减小, 从而影响抗压强度, 抗压强度恒定增加约 0.5 N/mm^2 , 抗弯强度和劈裂抗拉强度的变化趋势类似。如图 1、图 2、图 3 所示, 当细集料的掺量从 0% 增加到 50% 时, 混凝土的抗压强度平均提高 40%。这是因为细集料的掺入可以填充混凝土中的空隙, 其更加均匀和致密。与抗压强度类似, 细集料掺量从 0% 增加到 50% 时, 混凝土的抗弯强度平均提高 45%, 细集料的掺入可以改善混凝土的内部结构, 增加混凝土的黏结性和抗裂性能。与前者不同的是, 细集料的掺量对于劈裂抗拉强度的影响相对较小, 细集料掺量从 0% 增加到 50% 时, 混凝土的劈裂抗拉强度平均提高 27%。适量的细集料掺入可以对透水混凝土力学性能起到一定的增强作用。

3.3. 渗透性

透水混凝土混合料渗透性测试结果见表 8, 细集料掺量多的透水混凝土比细集料掺量少的透水性差。透水混凝土的渗透性主要取决于集料颗粒相互连通的间隙的大小。由表 7 可知, 混合料 M1、M2 和 M3 的渗透性逐渐降低, 混合料 M4 的渗透性最低。由试验结果可知, 棱角指数与渗透性高度相关, 渗透性受集料粒径的影响。通过观察混合料渗透性情况, 可以发现棱角指数的减小导致渗透率的降低。

Table 7. Permeability test results of pervious concrete

表 7. 透水混凝土渗透性试验结果

细集料掺量百分比	渗透率(%)			
	M1	M2	M3	M4
0%	1.258	1.182	1.094	0.907
10%	1.175	1.106	0.984	0.726
20%	1.096	1.029	0.940	0.705
30%	0.876	0.862	0.834	0.597
40%	0.771	0.741	0.671	0.480
50%	0.579	0.533	0.508	0.401

3.4. 抗磨耗性

抗磨耗性是路面的基本特性, 抗磨耗性试验结果见表 8, 结果表明, 细集料掺量越多, 棱角指数越小, 磨损率越高, 这是由于试样和磨损表面之间的接触面积较大导致。细集料掺量增加, 混合料磨损率从 4% 增加到 6.67% 不等。

Table 8. Experimental results of wear resistance of pervious concrete

表 8. 透水混凝土抗磨耗性实验结果

细集料掺量(%)	磨损率(%)			
	M1	M2	M3	M4
0	4.00	4.47	4.47	4.55
10	4.23	4.92	4.93	4.74
20	4.71	4.95	4.98	5.29
30	4.96	5.68	5.58	5.88
40	5.51	5.73	5.80	6.19
50	5.73	6.19	5.96	6.67

3.5. 集料间隙率和渗透性

图 4 为集料间隙率与透水混凝土渗透率的关系。间隙率增加透水混凝土的渗透性，且无论粗集料粒径和细集料的掺量如何，间隙率都增加透水混凝土的渗透性，渗透率随间隙率呈指数增长。

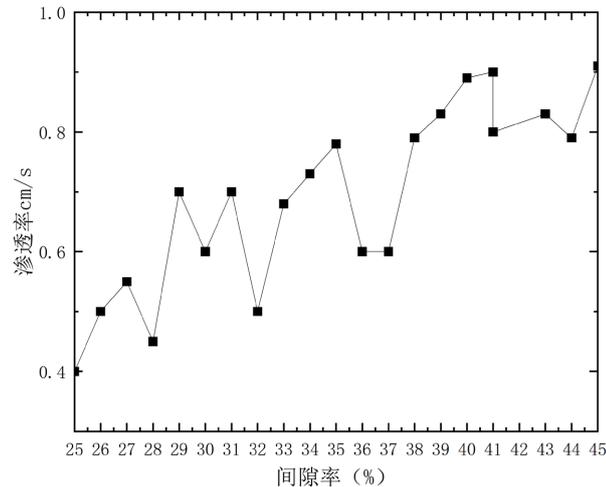


Figure 4. Effect of aggregate clearance rate on permeability

图 4. 集料间隙率对渗透率的影响

3.6. 集料间隙率和渗透性

集料间隙率与抗压强度的关系如图 5 所示。结果表明，随着间隙率的增加，透水混凝土的抗压强度减小，掺加细集料可提高透水混凝土的抗压强度。抗压强度变化范围为 $9.6 \text{ N/mm}^2 \sim 26.2 \text{ N/mm}^2$ ，间隙率在 $28.13\% \sim 40.91\%$ 之间。

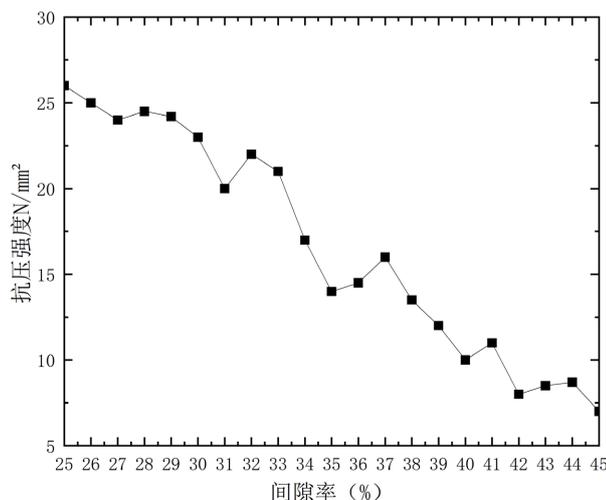


Figure 5. Effect of aggregate gap ratio on compressive strength

图 5. 集料间隙率对抗压强度的影响

3.7. 集料渗透性和抗压强度

图 6 为透水混凝土抗压强度、渗透率与间隙率之间的关系。结果表明，间隙率增大 20%，抗压强度

减小 75%，渗透性增大 35%，棱角指数增加，混合料中存在的间隙也增加，通过掺加细集料来减小间隙体积从而提高抗压强度和降低渗透率，平衡抗压强度和渗透率，确定最佳配合比，抗压强度在 15 N/mm²~20 N/mm² 之间，渗透率在 0.6 cm/sec~0.8 cm/sec，参照上述数值，确定 M1F30、M2F30、M3F20 和 M4F20 为最佳混合料。

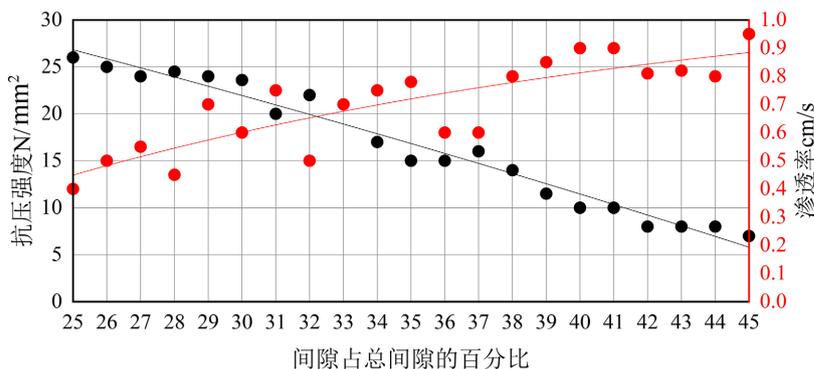


Figure 6. Effect of aggregate gap ratio on compressive strength and permeability

图 6. 集料间隙率对抗压强度和渗透率的影响

4. 结论

本文研究了棱角指数对透水混凝土力学性能和渗透性的影响，对集料间隙率、抗压强度和渗透率进行综合评价，结果表明如下。

(1) 适量的细集料掺入可以填充混凝土中的空隙，增加混凝土的密实性，提高混凝土的抗压强度，还可以阻止裂缝的扩展，增加混凝土的韧性。

(2) 透水混凝土中使用具有较高棱角指数的集料，可以增加混凝土的渗透性能但导致混凝土的内部结构较为疏松，从而降低了混凝土的抗压强度。

通过平衡抗压强度和渗透率，确定了最佳混合料为：细集料掺量为 30%，粗集料粒径为 16.0~19.5 mm、13.5~16.0 mm 的混合料；细集料掺量为 20%，粗集料粒径为 9.0~12.5 mm、4.75~9.0 mm 的混合料。

参考文献

- [1] Wang, Y.T., Sun, M.X. and Song, B.M. (2017) Public Perceptions of and Willingness to Pay for Sponge City Initiatives in China. *Resources, Conservation & Recycling*, **122**, 3-5. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.002>
- [2] 韩天宇, 宋璐逸, 潘尚昆, 等. 透水铺装控制和净化地表径流的研究进展[J]. 建筑节能, 2019, 47(6): 98-101.
- [3] 徐凯国. 海绵城市透水混凝土施工技术[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(16): 56-57.
- [4] 王俊岭, 宋健, 魏胜, 等. 透水混凝土路面对径流量削减试验[J]. 环境工程, 2016, 34(3): 22-26.
- [5] 蒋勇, 牛云辉, 贾陆军, 等. 高强度透水混凝土试验研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(3): 16-19.
- [6] 王波, 李成. 透水性铺装与城市生态及物理环境[J]. 工业建筑, 2002, 32(12): 29-31.
- [7] 刘李斌, 徐清, 赵鹏辉, 等. 基于正交试验的透水混凝土性能试验研究[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(7): 10-13.
- [8] 李博楠. 再生集料透水混凝土基层配合比设计研究[J]. 交通节能与环保, 2023, 19(5): 177-180.
- [9] 董尧韡, 陈昭. 透水混凝土配合比及物理性能综述[C]//中冶建筑研究总院有限公司. 2022 年工业建筑学术交流会论文集: 2022 年卷. 2022: 1140-1145. <https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2022.060510>
- [10] 李明琛, 周新刚, 苏智慧. 骨料空隙率对混凝土流动性与强度的影响分析[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2017, 30(4): 335-340.
- [11] 钟远伟. 市政道路透水混凝土的配合比设计研究[J]. 城市道桥与防洪, 2022(5): 209-211+231+25.

<https://doi.org/10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.05.052>

- [12] 王宝强, 廖芳珍. 透水混凝土配合比优化设计试验研究[J]. 人民珠江, 2023, 44(11):123-131.
- [13] 黄志强, 李峰, 王耀强, 柳策, 卢嘉轩. 基于响应面法的透水混凝土配合比优化设计[J]. 沈阳工业大学学报, 2023, 45(5): 587-593.