

# Research and Application on Frost Resistance of Permeable Brick Based on Sponge City Concept

Guoning Zhou<sup>1</sup> Yunbo Wang<sup>1\*</sup> Qi Zhang<sup>2</sup> Yunna Shi<sup>3</sup>

1. Pingliang Sponge City Construction Technical Service Center, Pingliang, Gansu, 744000, China

2. Pingliang City Construction Engineering Service Center, Pingliang, Gansu, 744000, China

3. Pingliang Fumin Transportation Development Co., Ltd., Pingliang, Gansu, 744000, China

## Abstract

Frost heave damage of pervious brick in cold areas is an important factor affecting durability. This paper studies the change of mass loss rate and compressive strength reduction rate of pervious brick under the influence of different water saturation factors through experiments, and proposes targeted solutions such as increasing permeability coefficient, enhancing drainage measures, strengthening basic treatment, auxiliary stress release, and reasonably setting expansion joints. Provide strong support for engineering practice.

## Keywords

sponge city; permeable brick; freeze-thaw cycle; saturation

## 基于海绵城市理念下透水砖抗冻性能研究及应用

周国宁<sup>1</sup> 王云波<sup>1\*</sup> 张淇<sup>2</sup> 史云娜<sup>3</sup>

1. 平凉市海绵城市建设技术服务中心, 中国·甘肃 平凉 744000

2. 平凉市建筑工程服务中心, 中国·甘肃 平凉 744000

3. 平凉市富民交通运输发展股份有限公司, 中国·甘肃 平凉 744000

## 摘要

寒冷地区透水砖冻胀损坏是影响耐久性的重要因素, 论文通过实验研究不同水饱和度因素影响下透水砖质量损失率和抗压强度削减率变化情况, 有针对性地提出增大透水系数、增强排水措施、强化基层处理、辅助应力释放、合理设置伸缩缝等解决措施, 为工程实践提供有力支撑。

## 关键词

海绵城市; 透水砖; 冻融循环; 饱和度

## 1 引言

2013年12月, 习近平总书记提出要建设自然积存、自然渗透、自然净化的“海绵城市”, 走出了一条具有中国特色的绿色生态城市发展道路。透水砖以其独特的多孔结构及较强的渗透能力, 对削减地表径流、降低径流污染、补充地下水具有积极作用, 成为海绵城市建设中广泛采用的铺装方式。但在寒冷地区, 在冬季雪水反复冻融影响下, 透

水砖易发生低温脆化现象, 使用寿命显著缩短, 表面剥蚀、骨料裸露、局部起鼓、断裂松动现象频发。国内外学者虽然对透水砖的冻胀机理开展了系列研究, 但透水砖抗冻性能研究依然缺少实验数据支撑。为此, 论文通过开展透水砖冻融循环实验, 研究不同水饱和度因素影响下透水砖质量损失率和抗压强度削减率变化情况, 提出寒冷地区透水砖防冻技术措施。

## 2 实验方案

### 2.1 实验材料

实验材料选用平凉兴庆建材有限公司生产的规格为300×150×60mm透水砖, 主要物理性能见表1, 实验用水为普通自来水。

### 2.2 实验仪器

根据建材行业标准GB/T25993—2010《透水路面砖和透水路面板》有关要求, 称重设备选用电子计重秤(型号JSB30-1), 烘干设备选用电子鼓风干燥箱(型号101-2),

【基金项目】甘肃省住房和城乡建设厅2022年建设科技项目《基于海绵城市理念下寒冷地区透水铺装抗冻性能研究》(项目编号: JK2022-27)。

【作者简介】周国宁(1993-), 男, 中国甘肃静宁人, 硕士, 工程师, 从事海绵城市建设相关技术研究。

【通讯作者】王云波(1988-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事平凉市海绵城市建设管理研究。

抗冻试验机选用混凝土快速冻融试验箱（型号 TDRF-2），TYE-2000H），精度等级 1 级，试件的预期抗压破坏值不小于抗压强度测试设备选用全自动混凝土压力试验机（型号 于压力机全量程的 20%，且不超过最大量程的 80%。

表 1 透水砖的主要物理性能指标

规格 /mm	尺寸偏差 /mm	孔隙率 /%	透水系数 / (cm/s)	初始抗压强度 /MPa	初始质量 / (kg/ 块)
300×150×60	≤ 3	15.0~25.1	2.2×10 <sup>-2</sup>	≥ 30	5.610~5.774

### 2.3 实验方法

实验根据 GB/T50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性实验方法标准》、GB/T25993—2010《透水路面砖和透水路面板》相关内容，挑选外观完好，无缺损、裂纹的透水砖进行标记<sup>[1]</sup>。每组实验条件下设置三组平行实验<sup>[2]</sup>。为有效控制透水砖的水饱和度，将每块透水砖置于自来水中浸泡 24 小时，浸泡温度控制在 (20±10)℃，水面淹没透水砖 2cm 以上，保证透水砖完全饱和，再通过控制透水砖的静置时间来调整每个透水砖的水饱和度。对不同水饱和度的透水砖进行冻融实验。每个循环时间为 3 小时，其中融化时间不小于整个循环的 1/4；每 25 个冻融循环测一次透水砖的质量及抗压强度，当循环次数达到规定次数、透水砖的质量损失率超过 5% 或者抗压强度损失率超过 20% 时停止实验，记录统计相关数据<sup>[3]</sup>。

### 2.4 计算方法

#### 2.4.1 抗压强度

在透水砖抗压试验时应设置钢质垫压板，厚度 ≥ 30mm，硬度 > HB200，表面应平整光滑，抗压强度按以下公式计算：

$$R_c = \frac{P}{A}$$

式中， $R_c$ ——抗压强度 (MPa)；

$P$ ——破坏荷载 (N)；

$A$ ——透水砖受压面积 (mm<sup>2</sup>)。

#### 2.4.2 抗压强度损失率

按照透水砖水饱和度 70.2%、75.2%、80.3%、85.1%、

89.7%、95.1%、99.1% 分组进行冻融实验，每冻融循环 25 次按组取透水砖进行抗压实验，加荷速度控制为 0.4MPa/s，得到不同冻融循环次数下不同水饱和度透水砖试件的抗压强度  $R_D$  ( $D$  为冻融次数)。抗压强度损失率计算公式为：

$$\Delta R = \frac{R - R_D}{R} \times 100$$

式中， $\Delta R$ ——冻融循环后的抗压强度损失率 (%)；

$R$ ——抗压强度试验结果的平均值 (MPa)；

$R_D$ ——冻融试验后，试样抗压强度平均值 (MPa)。

#### 2.4.3 质量损失率

按照透水砖水饱和度 70.2%、75.2%、80.3%、85.1%、89.7%、95.1%、99.1% 分组测定质量损失，每冻融循环 25 次按组取透水砖进行烘干、称重，测量质量并记录，得到不同冻融循环次数下不同水饱和度透水砖试件的质量。透水砖质量损失率计算公式为：

$$\alpha = \frac{M_0 - M_n}{M_0} \times 100\%$$

式中， $\alpha$ ——透水砖质量损失率 (%)；

$M_0$ ——透水砖质量初始值 (kg)；

$M_n$ —— $n$  次冻融循环后透水砖质量 (kg)。

### 2.5 实验结果及分析

每经过 25 次冻融循环后对试件进行抗压强度损失及质量损失进行测量，试件冻融次数达到 175 次后三种水饱和度的透水砖质量损失超过 5% 以上，因此取 175 次冻融循环次数结束实验，以研究不同水饱和度对透水砖抗冻性能的影响。相关实验数据见表 2 至表 5。

表 2 不同冻融循环次数下水饱和度对透水砖质量损失影响

冻融循环次数 \ 质量 /kg	水饱和度 70.20%	水饱和度 75.20%	水饱和度 80.30%	水饱和度 85.10%	水饱和度 89.70%	水饱和度 95.10%	水饱和度 99.10%
0	5.725	5.736	5.745	5.739	5.754	5.765	5.774
25	5.725	5.736	5.742	5.728	5.726	5.734	5.738
50	5.722	5.736	5.739	5.711	5.695	5.707	5.708
75	5.719	5.730	5.731	5.689	5.659	5.665	5.658
100	5.717	5.728	5.720	5.663	5.615	5.621	5.605
125	5.711	5.719	5.709	5.633	5.562	5.573	5.553
150	5.705	5.705	5.695	5.610	5.497	5.504	5.470
175	5.697	5.694	5.678	5.577	5.444	5.412	5.381

表 3 不同冻融循环次数下水饱和度对透水砖质量损失率影响

质量 /kg \ 冻融循环次数	水饱和度 70.2%	水饱和度 75.2%	水饱和度 80.3%	水饱和度 85.1%	水饱和度 89.7%	水饱和度 95.1%	水饱和度 99.1%
25	0.00%	0.00%	0.05%	0.20%	0.48%	0.53%	0.62%
50	0.05%	0.00%	0.10%	0.49%	1.02%	1.01%	1.15%
75	0.10%	0.10%	0.24%	0.88%	1.65%	1.73%	2.01%
100	0.15%	0.15%	0.44%	1.32%	2.42%	2.51%	2.92%
125	0.25%	0.29%	0.63%	1.85%	3.34%	3.33%	3.83%
150	0.34%	0.54%	0.88%	2.24%	4.46%	4.53%	5.27%
175	0.49%	0.73%	1.17%	2.83%	5.38%	6.12%	6.80%

表 4 不同冻融循环次数下水饱和度对透水砖抗压强度损失影响

抗压强度 /MPa \ 冻融循环次数	水饱和度 70.2%	水饱和度 75.2%	水饱和度 80.3%	水饱和度 85.1%	水饱和度 89.7%	水饱和度 95.1%	水饱和度 99.1%
0	34.36	34.57	34.91	34.87	34.12	34.65	34.08
25	34.31	34.53	34.67	34.63	33.55	33.97	33.38
50	33.94	34.08	34.24	33.97	33.01	33.29	32.67
75	33.16	33.24	33.31	33.02	32.11	31.97	31.22
100	32.23	32.13	32.32	32.03	30.97	30.66	29.97
125	31.49	31.18	31.28	30.96	29.18	28.87	28.33
150	30.42	30.17	30.53	29.46	27.22	27.21	26.87
175	29.56	29.37	29.93	27.93	25.08	24.49	24.12

表 5 不同冻融循环次数下水饱和度对透水砖抗压强度损失率影响

抗压强度 /MPa \ 冻融循环次数	水饱和度 70.2%	水饱和度 75.2%	水饱和度 80.3%	水饱和度 85.1%	水饱和度 89.7%	水饱和度 95.1%	水饱和度 99.1%
25	0.15%	0.12%	0.69%	0.69%	1.67%	1.96%	2.05%
50	1.22%	1.42%	1.92%	2.58%	3.25%	3.92%	4.14%
75	3.49%	3.85%	4.58%	5.31%	5.89%	7.73%	8.39%
100	6.20%	7.06%	7.42%	8.14%	9.23%	11.52%	12.06%
125	8.35%	9.81%	10.40%	11.21%	14.48%	16.68%	16.87%
150	11.47%	12.73%	12.55%	15.51%	20.22%	21.47%	21.16%
175	13.97%	15.04%	14.27%	19.90%	26.49%	29.32%	29.23%

2.5.1 水饱和度对透水砖质量损失率影响

不同饱和度的透水砖在冻融循环条件下质量变化及损失率变化规律如图 1、图 2 所示，由质量损失的实验结果和质量损失率变化关系可知，透水砖在水饱和度为 70.2%、75.2%、80.3%、85.1%、89.7%、95.1%、99.1% 时，质量初始值分别为 5.725、5.736、5.745、5.739、5.754、5.765、5.774kg；当冻融循环为 25 次时，不同水饱和度条件下透水砖质量损失较小，水饱和度为 70.2%、75.2%、80.3%、85.1%、89.7%、95.1%、99.1% 对应的质量损失率分别为 0、0、0.05%、0.20%、0.48%、0.53%、0.62%；随着冻融循环次数的增加，透水砖的质量损失逐步增大，同时水饱和度超过 85% 的透水砖质量损失增加程度明显高于水饱和度低于 85% 的透水砖质量损失。当冻融循环达到 150 次时，对应的质量损失率分别为 0.34%、0.54%、0.88%、2.24%、4.46%、

4.53%、5.27%，当冻融循环达到 175 次时，对应的质量损失率分别为 0.49%、0.73%、1.17%、2.83%、5.38%、6.12%、6.8%，其中水饱和度为 95.1%、99.1% 透水砖质量损失最快，水饱和度为 70.2%、75.2% 的透水砖质量损失最小，损失率均低于 1%。

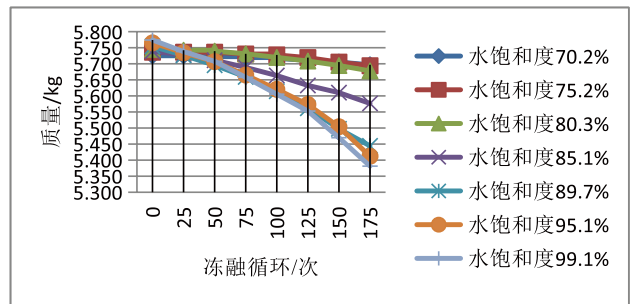


图 1 不同冻融循环次数下水饱和度对透水砖质量损失影响情况

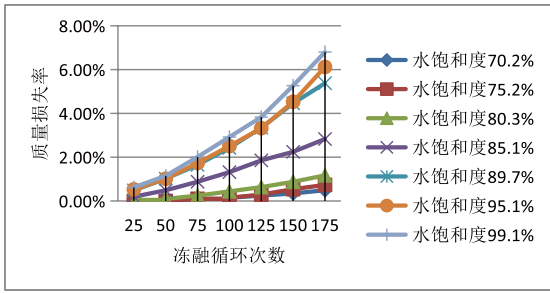


图2 不同冻融循环次数下水饱和度对透水砖质量损失率影响情况

### 2.5.2 水饱和度对透水砖抗压强度损失率影响

不同饱和度的透水砖在冻融循环条件下抗压强度值及损失率变化规律如图3、图4所示，当透水砖水饱和度为70.2%、75.2%、80.3%、85.1%、89.7%、95.1%、99.1%时，其透水砖抗压强度初始值分别为34.36、34.57、34.91、34.87、34.12、34.65、34.08MPa。当冻融循环为25次时，不同水饱和度透水砖的抗压强度损失值均较小；随着冻融循环次数的增加，不同水饱和度的透水砖抗压强度损失率均逐渐增大，当冻融循环达到100次时，对应的抗压强度损失率分别为6.20%、7.06%、7.42%、8.14%、9.23%、11.52%、12.06%；当冻融循环达到175次时，水饱和度为70.2%、75.2%、80.3%、85.1%、89.7%、95.1%、99.1%的透水砖抗压强度分别为29.56、29.37、29.93、27.93、25.08、24.49、24.12MPa，损失率为13.97%、15.04%、14.27%、19.9%、26.49%、29.32%、29.23%，其中水饱和度为89.7%、95.1%、99.1%透水砖抗压强度损失率均超过20%。

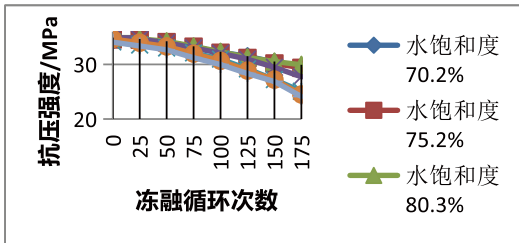


图3 不同冻融循环次数下水饱和度对透水砖抗压强度影响

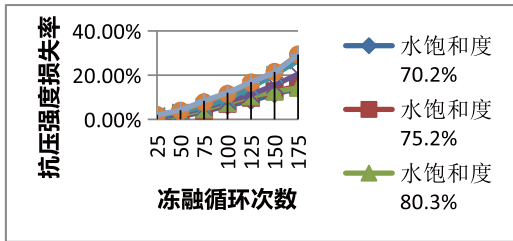


图4 不同冻融循环次数下水饱和度对透水砖抗压强度损失率影响情况

### 2.6 小结

通过实验研究，水饱和度超过85%后透水砖质量损失和抗压强度损失明显增大，当水饱和度达到90%后，透水

砖质量损失线斜率明显加大且趋于一致，显著影响透水砖冻胀损坏程度，且透水砖水饱和度越高抗冻性能越差，负相关趋势明显。由此证明水饱和度90%为影响透水砖冻胀损坏的临界值。因此，通过工程措施增加面层基层渗透系数、缩短水分排空时间、减小透水砖水饱和度可有效防止透水砖冻胀损坏。

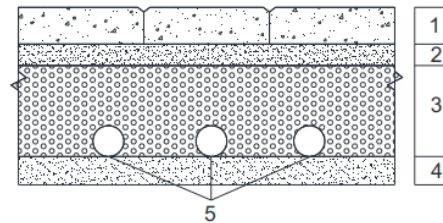
## 3 透水砖防冻技术措施

### 3.1 增大透水系数

水饱和度是透水砖产生冻胀的决定性因素，增加透水砖透水系数、控制水饱和度是实现冻胀削减或消除冻胀损坏的有效途径，在冻融循环较为频繁的寒冷地区，应选择透水等级为A级，透水系数大于等于 $2.0 \times 10^{-2}$ 。

### 3.2 增强排水措施

良好的排水措施可减少水分排空时间、降低水饱和度，是减缓透水砖冻胀的又一关键措施，在透水铺装设计、施工时，应在透水砖路面结构中设置盲管或排水盲沟，并采取防止堵塞措施，避免盲管或排水盲沟堵塞失效。同时，增大道路纵横坡向，确保排水系统畅通，有效增强结构排水能力<sup>[4]</sup>。具体如图5所示。

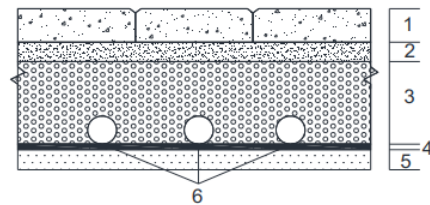


说明：1—透水砖面层；2—找平层；3—透水基层；4—透水路基；5—透水盲管（防止底部存水）。

图5 增加透水盲管型铺装结构

### 3.3 强化基层处理

路面基层结构应具有一定的排水能力，路基土透水系数应大于等于 $710^{-5} \text{cm/s}$ ，当路基土为软弱土、黏性土、湿陷性黄土、膨胀土等特殊地质条件或者路基土透水系数不满足要求时，不应采用全透水路路面结构，应采用半透水路路面结构，且在不透水层与透水层之间增加防水结构封层或设置不透水垫层，防止渗入路基水或者地下水因毛细现象导致透水砖冻胀。半透水路路面结构示意图如图6所示。

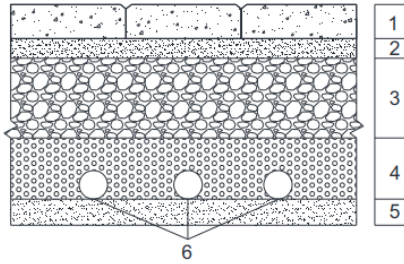


说明：1—透水砖面层；2—找平层；3—透水基层；4—防水层；5—路基；6—透水盲管（防止底部存水，必要时设置）。

图6 半透水路路面结构示意图

### 3.4 辅助应力释放

增加辅助设施释放冻胀缓冲能力，在设计、施工中，垂直方向可通过扩大基层和垫层结构，增加等级配碎石基层、砂砾基层、砂基层，并设置基层排水管、排水带等方式提高透水铺装垂直方向冻胀缓冲能力。同时，在临近区域增设植草沟、下沉式绿地、生物滞留设施等，将透水砖内局部水分进行疏导，有效分散冻胀效应，减小透水砖整体位移，防止冻胀损坏。辅助应力释放型全透水路面结构如图7所示。



说明：1—透水砖面层；2—找平层；3—透水基层；4—透水底基层；5—透水路基；6—透水盲管（防止底部存水）。

图7 辅助应力释放型全透水路面结构

### 3.5 合理设置伸缩缝

透水砖冻胀损坏过程中主要原因是水结冰体积增大，应力无法释放，导致砖块相互挤压破坏，若在施工过程中，合理留设伸缩缝，预留透水砖体积膨胀空间，亦可有效缓解砖块冻胀损坏，透水砖拼缝宜控制在7~10mm，不应<5mm，缝隙率不<7%，拼缝用砂级配筛余百分率符合有关要求。透水砖拼缝用砂级配筛余百分率见表6。

表6 透水砖拼缝用砂级配筛余百分率

筛孔尺寸 (mm)	5.0	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16
累计筛余百分率 (%)	0	0~5	0~20	15~75	60~90	90~100

### 3.6 加强运行维护

透水砖路面结构排水措施堵塞极易造成砖体饱和，在冻融条件下将造成砖块产生严重破坏，因此有效运维是延长透水砖耐久性的重要措施。寒冷地区在秋季和冬季要增加运维频率。秋季时，要防止落叶堆积堵塞透水孔隙。冬季时，应于降雪停止后24小时内采用人工或机械清除积雪，路面结冰时不宜机械除冰，并不得撒砂或者灰渣，不得使用对透水材料有溶解效果的化学物质，不得采用有腐蚀作用的化学物质；当采用融雪剂时，应采用现行国家标准GB/T 23851《融雪剂》中非氯化物有机融雪剂<sup>[5]</sup>。

## 4 结语

通过实验研究，发现水饱和度是影响透水砖抗冻性能的重要因素，经过数据分析，找出影响透水砖抗冻性能的水饱和度临界值，提出了增大透水系数、增强排水措施等一系列防冻措施，并在平凉市泾河干流综合治理一期工程和天通路、华明路、南环路等道路工程进行实际应用，取得了良好效果。

### 参考文献

- [1] GB/T 25993—2010 中华人民共和国国家标准.透水路面砖和透水路面板[S].
- [2] 郭晓鹏,李俊奇.透水砖铺装面层抗冻性能实验[J].环境工程,2020,38(4):53-58.
- [3] GB/T50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性实验方法标准[S].
- [4] DB61/T 1364—2020 海绵城市透水铺装设计规范[S].
- [5] 赵乐军,宋现财,王静,等.DB/T 29-275—2019《天津市海绵城市设施运行维护技术规程》解读[J].天津建设科技,2020,30(6):1-16.