

文章编号:1673-9469(2024)06-0058-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.06.009

堵塞对碎石渗井渗透性能影响试验研究

刘正锋^{1,2},冯怀平^{1,2*},辛恩泽^{1,2},马德良^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院,河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室,河北 石家庄 050043)

摘要: 为提升透水网格承载能力,砖体下方常采用水泥硬化措施,造成铺装渗透性下降,为解决该问题,在透水网格中添加了碎石渗井。碎石渗井因截留外来环境中的颗粒物导致渗井-透水网格渗透性能下降。研究了不同类型堵塞物对碎石渗井堵塞的影响规律,并通过改变碎石粒径的方式对碎石渗井的构造进行了优化。结果表明,碎石粒径会影响其抗堵塞性能,当粒径为20~30 mm时,碎石渗井在堵塞影响下可以保持较好的渗透能力。

关键词: 碎石渗井;堵塞;渗透性;透水铺装

中图分类号:TU992

文献标识码:A

Experimental Study on the Effect of Clogging on the Permeability Performance of Gravel Seepage Wells

LIU Zhengfeng^{1,2}, FENG Huaiping^{1,2*}, XIN Enze^{1,2}, MA Deliang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: To enhance the bearing capacity of permeable pavers, cement hardening measures are often used below the brick, resulting in a decline in permeability. To solve this problem, permeable pavers with stone infiltration wells were added. The stone infiltration wells have a decreased permeability due to the retention of particulate matter from the external environment. The influence of different types of blockages on the clogging of stone infiltration wells was studied, and the structure of the stone infiltration wells was optimized by changing the grain size of the stone. The results show that the grain size of the stone affects its resistance to clogging. When the grain size is from 20 mm to 30 mm, the stone infiltration well can maintain good permeability under the influence of clogging.

Key words: gravel seepage wells; clogging; permeability; permeable paving

透水网格路面能有效清除路面积水,减轻排水设施的负担,是城市雨水管理的重要手段,也是中国城市化的战略要求。为增强透水网格的承载能力,砖体下部多采用水泥硬化措施,使其渗透性能大大降低^[1-2]。

为解决该问题,梁萌等^[3]提出了一种新型渗井-透水网格铺装,该铺装利用碎石渗井高孔隙率的特性提高了透水网格的渗透性。刘艳磊^[4]研究了碎石渗井对透水网格铺装表面入渗速率的影

响,研究表明,在透水网格内部添加碎石渗井可以在确保承载能力的前提下提高表面入渗速率。然而,碎石渗井直接暴露在环境中,容易受到堵塞物的影响造成渗井-透水网格渗透性的降低。因此,通过碎石渗井的堵塞及渗透试验,研究堵塞对碎石渗井的影响,并对碎石渗井的结构进行优化,对提高其抗堵塞性能和渗透性具有重要意义。朱平华等^[5]通过设计暴雨堵塞试验研究了新型再生透水混凝土的抗堵塞性能,结果表明,新型再生混

收稿日期:2023-11-06

基金项目:中央引导地方科技发展资金项目(236Z5409G)

作者简介:刘正锋(1999-),男,河北保定人,硕士研究生,主要从事海绵城市低影响开发方面的研究。

* 通信作者:冯怀平(1975-),男,河北石家庄人,博士,教授,主要从事岩土工程方面的研究。

土形成的堵塞主要由孔径 d 和堵塞物粒径 r 的比值决定。宋亚霖等^[6]通过室内试验测定了透水砖在堵塞条件下的渗透系数,结果表明,透水砖在使用一段时间以后便会会出现明显的堵塞问题,严重时失去透水功能。Rao 等^[7]分析了堵塞对入渗产流过程的影响,结果表明,距离透水混凝土表面 5~15 cm 的堵塞物是导致径流的主要因素。张皓东^[8]针对 5 种不同孔隙率的透水沥青开展了抗堵塞性能试验研究,结果表明,5 种孔隙率的透水沥青堵塞后的透水系数均降低至初始值的 50%~60%,且堵塞主要集中在表层 16 mm 范围内。成智文等^[9]进行了透水砖堵塞试验,结果表明,在相同径流量和径流水深条件下,透水砖堵塞主要归结于雨水径流中的颗粒物在砖表面和内部的滞留。

目前针对大粒径竖向碎石渗井在堵塞条件下渗透性能变化情况的研究还尚不充分。本文通过搜集路面堵塞物,分析了路面常见堵塞物的类型及粒径分布;针对碎石渗井开展了堵塞条件下的渗透试验,分析了堵塞对碎石渗井渗透性能的影响及堵塞机理。

1 堵塞物分析

在石家庄市不同路面进行了堵塞物的收集,剔除落叶等大型有机物后对收集到的堵塞物进行筛分,堵塞物粒径分布曲线如图 1 所示。根据筛分结果和国内常见泥沙颗粒分布曲线可知,不同路面上堵塞物的粒径分布相似,大多数颗粒粒径在 0.30~2.36 mm 之间。以联盟路为例,粒径在 0.30~2.36 mm 之间的路面堵塞物占总量的 97.75%。石家庄地处华北平原,路面常见堵塞物主要由黏土和砂组成。因此,本试验所用的堵塞物分别为黏土、0.30~0.60 mm 石英砂、0.60~1.18 mm

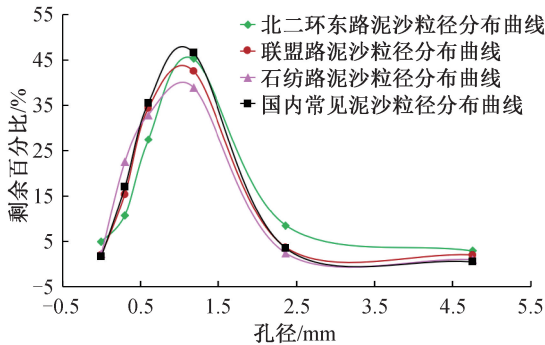


图 1 堵塞物粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of blockage

石英砂、1.18~2.36 mm 石英砂及真实堵塞物,其中真实堵塞物掺配的黏土、0.30~0.60 mm 石英砂、0.60~1.18 mm 石英砂、1.18~2.36 mm 石英砂的质量比为 50 : 12 : 14 : 24。

2 试验装置与方法

2.1 试验装置

为确保水分渗透到土壤深层,碎石渗井通常由高 400 mm、直径 100 mm 的空心且侧壁开孔的亚克力圆管和 0~10 mm 碎石组成,为便于试验操作,本次碎石渗井堵塞试验采用的装置为高 500 mm、底部密封、上部开口的亚克力圆管,圆管底部侧面设有出水阀,且管壁未开孔。试验装置如图 2 所示。

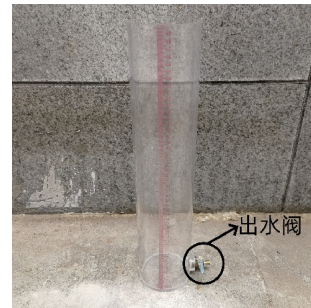


图 2 试验装置

Fig. 2 Test setup

2.2 试验方案

用不同类型的堵塞物对 0~10 mm 的碎石渗井进行堵塞试验并测试堵塞后渗透性。真实堵塞物、黏土、0.30~0.60 mm 石英砂、0.60~1.18 mm 石英砂、1.18~2.36 mm 石英砂影响下的碎石渗井编号如表 1 所示。通过对比堵塞前后渗透性的改变以及堵塞物在渗井内部的分布情况,来分析不同堵塞物质对碎石渗井的影响。

表 1 不同堵塞物影响下的碎石渗井编号

Tab. 1 Numbers of gravel seepage wells under the influence of different blockages

碎石渗井编号	碎石粒径/mm	堵塞物类型
S ₁	0~10	真实堵塞物
S ₂	0~10	黏土
S ₃	0~10	0.30~0.60 mm 石英砂
S ₄	0~10	0.60~1.18 mm 石英砂
S ₅	0~10	1.18~2.36 mm 石英砂

2.3 试验流程

将 400 mm 厚的 0~10 mm 碎石均匀的铺装到试验装置内并分层压实,如图 3 所示。试验开始前

先对碎石渗井进行预湿,随后在碎石表面快速注水,直至水位高度超过碎石表面 60 mm 处停止注水。使用量筒从试验装置底部收集渗水,记录收集 392.5 mL 渗水所需时间。由于碎石渗井具有较大的孔径及孔隙率,水的入渗发生得很快,因此,整个试验过程需通过视频记录,以准确计算时间。在测量完碎石渗井堵塞前的渗透性后,将堵塞物分 8 次均匀地撒在碎石渗井表面,每次撒 25 g,每撒一次堵塞物在碎石渗井表面注水 3 次,并记录每次注水后从装置底部收集 392.5 mL 渗水所需时间,取平均值为最终试验结果。



图3 碎石渗井

Fig. 3 Gravel seepage wells

3 堵塞物类型对碎石渗井的影响

3.1 堵塞物类型对削峰性能的影响

本节通过引入削峰时间来表征堵塞对碎石渗井削减径流能力的影响程度,计算方法见式(1)。

$$W_p = T_i - T_0 \quad (1)$$

式中: W_p 为削峰时间,s; T_i 碎石渗井表面水位达到最高位置时所用时间,s; T_0 碎石渗井表面没有流

动水时所用时间,s。

图4为不同类型堵塞物作用下碎石渗井削峰时间随堵塞量变化情况,由图可知, S_1 和 S_2 削峰性能的影响较为明显,当堵塞物质量达到150 g时,碎石渗井的削峰时间相较初始削峰时间分别增长了15.06倍和25.34倍, S_3 、 S_4 、 S_5 削峰时间分别为7.51、11.41、12.04 s,相较初始削峰时间分别增长了1.05倍、1.60倍、1.71倍,可以看出石英砂对碎石渗井削峰时间的影响相对较小。真实堵塞物和黏土对碎石渗井造成的堵塞更为明显,原因可能是堵塞物中都含有黏土,黏土具有一定的保水性能,水分不容易从中通过,且黏性堵塞物容易在碎石渗井内堆积并结团,进而导致渗透性大大降低,延长了水分的入渗时间。

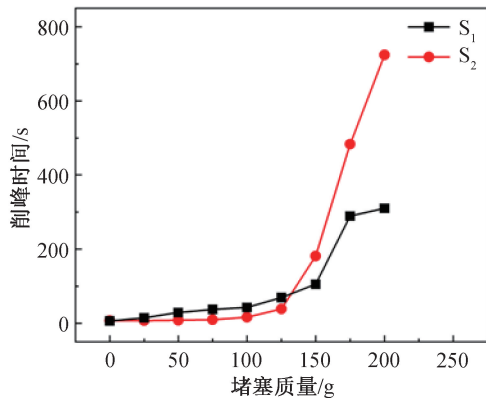
3.2 堵塞物类型对渗透系数的影响

渗透系数作为渗透性的表征参数,表示饱和和多孔介质单位水势梯度时的渗流速度,是反映透水性强弱的重要指标^[10],可用来判别碎石渗井在不同堵塞物影响下流体通过孔隙骨架的难易程度。计算方法见式(2)。

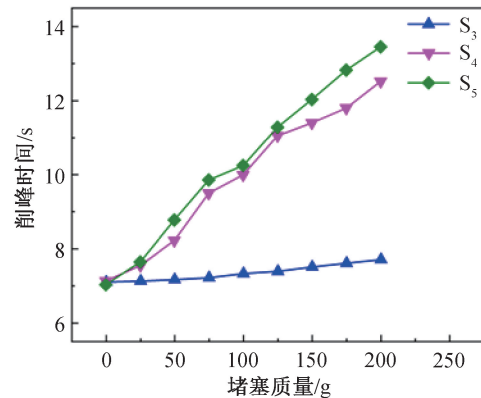
$$K = \frac{QL}{A\Delta H} \quad (2)$$

式中: K 为渗透系数,mm/s; Q 为单位时间内通过碎石渗井的水流量,mm³/s; L 为碎石渗井的高度,mm; A 为碎石渗井的横截面积,mm²; ΔH 为水头差,mm。

图5为不同类型堵塞物作用下碎石渗井渗透系数随堵塞量变化情况。从图中可以看到, S_1 渗透系数下降更为迅速,原因可能是真实堵塞物中



(a) 真实堵塞物和黏土影响下削峰时间变化



(b) 石英砂影响下削峰时间变化

图4 堵塞影响下碎石渗井的削峰时间变化

Fig. 4 Variation of clipping time for gravel seepage wells under the influence of clogging

不同粒径的石英砂及黏土会在碎石渗井内部形成一种填充效应,粒径较大的石英砂会滞留在碎石渗井孔隙中,造成孔隙孔径减小,此时粒径较小的石英砂及黏土会填充其余较小的孔隙,导致碎石渗井的透水面积进一步减小,从而使渗透系数急剧下降。此外, S_4 、 S_5 的渗透系数下降速度在前期较为迅速,后期较为缓慢,这可能是由于粒径为0.60~1.18 mm、1.18~2.36 mm的石英砂和碎石渗井内部孔径较为接近,石英砂颗粒可以更快地在碎石渗井内部滞留,并填满碎石渗井上部孔隙,最终导致碎石渗井在较少质量堵塞物影响下渗透系数迅速降低。由于孔隙堵塞发生较早,其余堵塞颗粒难以进入碎石渗井内部并滞留在碎石渗井表面,因此在堵塞后期渗透系数下降速度逐渐降低。相比之下,0.30~0.60 mm石英砂由于粒径较小,大部分石英砂可以穿过碎石渗井结构层,且在碎石渗井内部的分散性较好,难以影响碎石渗井的贯通性,所以, S_3 的渗透系数下降得更慢更均匀。朱平华等^[5]提出堵塞由孔径和堵塞物粒径的比值共同决定,结合试验现象可以推断出,石英砂对碎石渗井渗透性的影响主要与其粒径和碎石渗井内部孔径有关,二者越接近,碎石渗井的前期堵塞速度越快,渗透系数下降也就越严重。

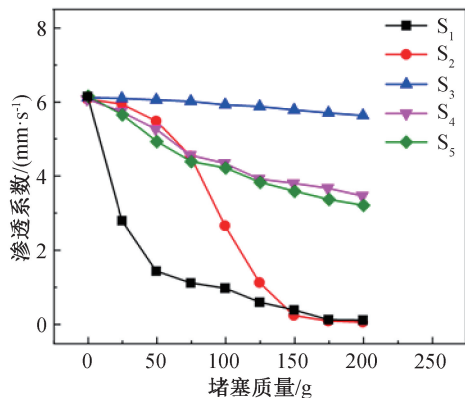


图5 堵塞影响下碎石渗井的渗透系数变化

Fig. 5 Variation of permeability coefficient of gravel seepage wells under the influence of clogging

3.3 堵塞物类型对堵塞率的影响

堵塞率代表着碎石渗井的堵塞程度,可以很好地反映渗透系数的衰减及碎石渗井的堵塞情况,计算方法如式(3)所示。

$$B = \left(1 - \frac{K_i}{K_s}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: B 为堵塞率,%; K_i 为经过*i*次堵塞后的渗透

系数, mm/s ; K_s 为初始渗透系数, mm/s 。

研究堵塞率对于理解碎石渗井的抗堵塞性能具有重要意义,图6为不同类型堵塞物作用下碎石渗井堵塞率随堵塞量变化情况,随着堵塞量的增加,碎石渗井的堵塞率逐渐上升。其中, S_2 堵塞后的堵塞率最大,为99.01%,这意味着此时碎石渗井基本上已经彻底丧失了渗透能力。 S_3 堵塞后堵塞率最小,为7.84%。 S_4 和 S_5 在堵塞影响下的堵塞率分别为43.02%和47.73%,其堵塞率要远小于 S_1 和 S_2 。这是因为石英砂虽然会滞留并堆积在碎石渗井内部,但不会完全将其孔隙密封,碎石渗井内依然存在孔径较小的孔隙允许水分通过。

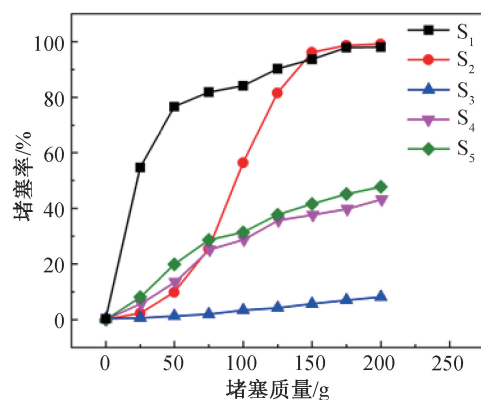


图6 堵塞影响下碎石渗井的堵塞率变化

Fig. 6 Variation of clogging rate of gravel seepage wells under the influence of clogging

综上所述,不同类型的堵塞物对碎石渗井的堵塞程度具有一定的差异性,黏性堵塞物对碎石渗井的堵塞最为严重。

3.4 堵塞物分布情况

为了优化碎石渗井的结构使其拥有更好的抗堵塞效果,堵塞试验完成后对被堵塞的碎石渗井进行了拍照记录,见图7。

图7(a)为真实堵塞物堵塞后的碎石渗井 S_1 ,可以看出大部分堵塞物集中分布在碎石渗井的上部,原因是石英砂及黏土会快速填充碎石渗井表层孔隙,进而造成渗透性能快速降低,并导致后续堵塞物堆积在碎石渗井表层,难以进入碎石渗井深层;图7(b)为黏土堵塞物堵塞后的碎石渗井 S_2 ,小部分堵塞物均匀地分布在碎石渗井整个结构层内,大部分堆积在碎石渗井上部,原因可能是堵塞开始时黏土颗粒在碎石渗井内部的分散性较好,颗粒之间产生的粘结力较弱,且碎石渗井内部

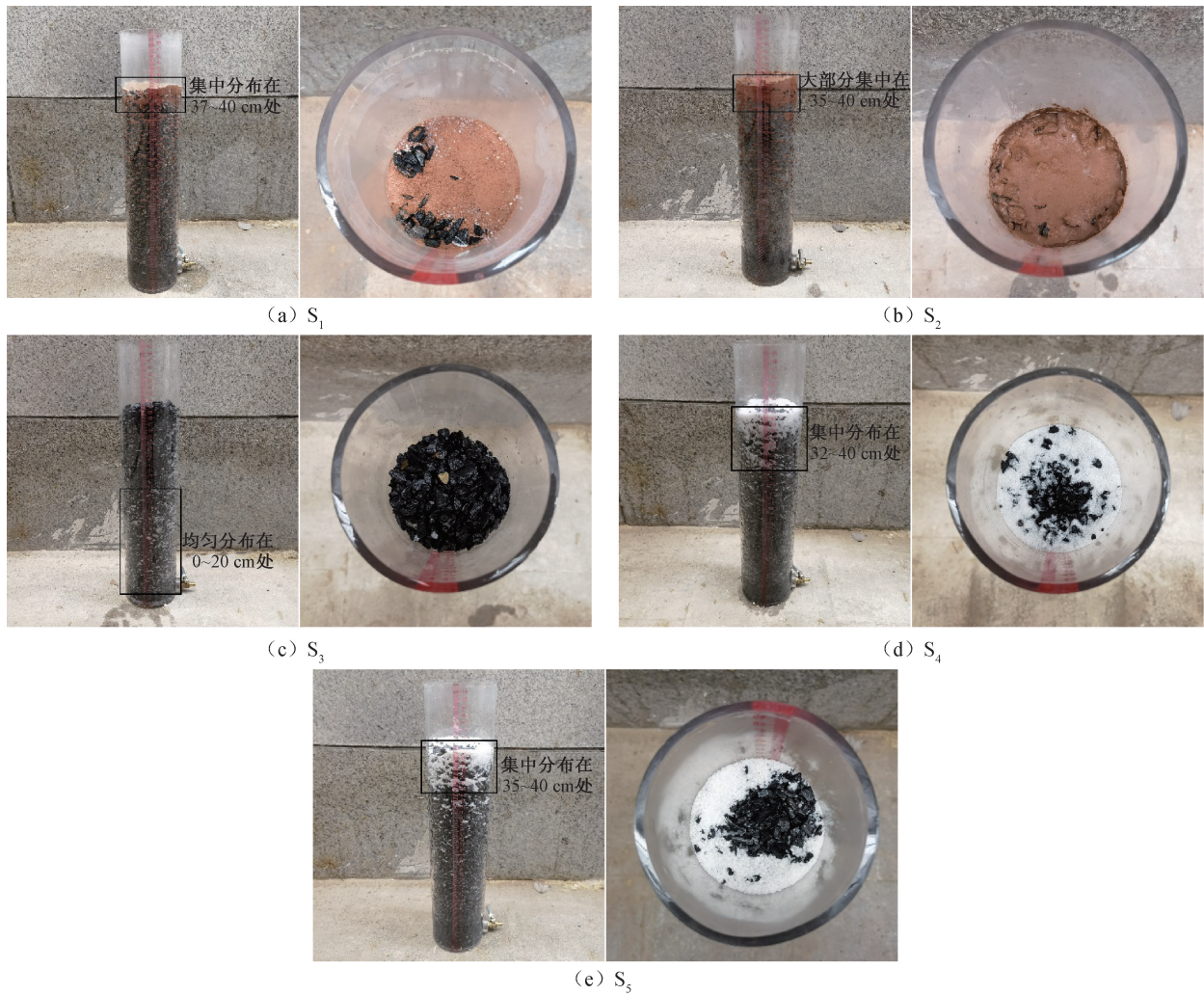


图7 不同堵塞物堵塞后的碎石渗井

Fig. 7 Gravel seepage wells after clogging with different clogging materials

孔径还未出现明显变化,不足以影响黏土颗粒进入碎石渗井的内部,所以黏土可以随着水流进入到碎石渗井较深的位置,随着堵塞物的累加,黏土颗粒逐渐在碎石表面聚集并且具有一定的粘结作用,最终导致黏土颗粒均匀地沉积在碎石渗井表层;根据图7(c),0.30~0.60 mm石英砂堵塞后的堵塞物集中均匀分布在碎石渗井的中下部分,原因是石英砂粒径较小,不容易在碎石渗井的孔隙中滞留,且石英砂在碎石渗井内的流通性较好,在水的冲刷作用下更容易进入到更深层的结构层内;根据图7(d)(e),0.60~1.18 mm与1.18~2.36 mm石英砂堵塞后的堵塞物集中分布在碎石渗井的上部,原因是这两种的石英砂粒径较大,容易滞留在碎石渗井的孔隙中,影响后续堵塞物的进入,从而在碎石渗井表面堆积。可以看到0.60~1.18 mm与1.18~2.36 mm石英砂对碎石渗井堵塞的区别是,0.60~1.18 mm石英砂进入碎石渗井

结构层的位置较深,可以到达表层以下8 cm,而1.18~2.36 mm石英砂大部分集中进入到距离碎石渗井表层5 cm就无法再继续深入了,据此可知,1.18~2.36 mm石英砂在碎石渗井表层积聚的更多,对渗透性的影响更严重。

4 碎石粒径对碎石渗井的影响

4.1 碎石粒径对堵塞条件下渗透系数的影响

根据堵塞物在碎石渗井内的分布情况可知,对碎石渗井渗透性影响严重的堵塞物都容易被碎石渗井内的孔隙截留,造成孔隙率降低,导致堵塞物在碎石渗井表面堆积,进而影响了水分的入渗。为解决该问题,本文对碎石渗井内的碎石粒径进行了改良,将原来碎石渗井内置的0~10 mm的碎石更换为10~20 mm和20~30 mm粒径的碎石,并进行了在真实堵塞物影响下的渗透试验。3种碎石渗井的编号如表2所示。

表 2 不同粒径分布碎石渗井编号

Tab. 2 Numbers of gravel seepage wells for grading aggregates of different grain sizes

碎石渗井编号	碎石粒径	堵塞物类型
S ₁	0~10 mm	真实堵塞物
S ₆	10~20 mm	真实堵塞物
S ₇	20~30 mm	真实堵塞物

图 8 为 3 种不同粒径碎石渗井在真实堵塞物影响下渗透系数随堵塞量变化情况,可以看出, S₁、S₆、S₇ 的初始渗透系数分别为 6.18、8.01、8.28 mm/s,在经历 8 次循环堵塞后, S₁、S₆、S₇ 的渗透系数分别下降为初始渗透系数的 2.27%、65.29%、92.48%。在增大碎石粒径的同时,碎石渗井的初始渗透性能也得到进一步的提高,当堵塞物质量达到 200 g 时 S₁ 基本上已经彻底丧失渗透能力, S₆ 和 S₇ 的渗透性依旧良好,其中 S₇ 在堵塞后的渗透系数最高,据此可以推断,随着渗井碎石粒径的增大,碎石渗井的抗堵塞能力在逐渐变强。

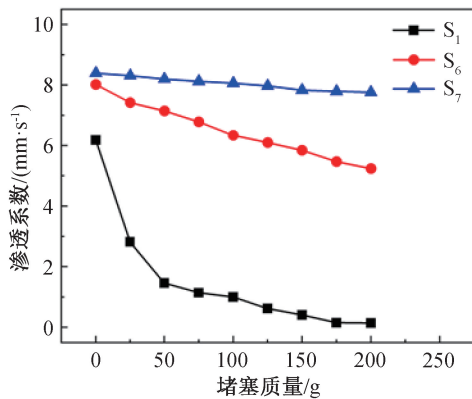


图 8 不同粒径碎石渗井在堵塞影响下渗透系数变化情况

Fig. 8 Variation of permeability coefficient of different graded gravel seepage wells under the influence of clogging

4.2 碎石粒径对堵塞条件下堵塞率的影响

图 9 为 3 种不同粒径碎石渗井在真实堵塞物影响下堵塞率随堵塞量变化情况,随着堵塞量的增加, S₁、S₆、S₇ 的堵塞率都在逐渐上升。其中, S₁ 的堵塞率上升速度最快,最终堵塞率逐渐稳定在 97.74%; S₆ 碎石渗井的堵塞率上升速度较慢,但仍有逐渐增大的趋势,意味着随着堵塞量的增加, S₆ 的堵塞率会进一步提高,进而影响其渗透性能; S₇ 的堵塞率上升速度缓慢且逐渐趋于平稳,说明堵塞质量的增加并不会对 S₇ 的渗透性有过于明显的影响, S₇ 相比另外两个碎石渗井更适合长期使用。

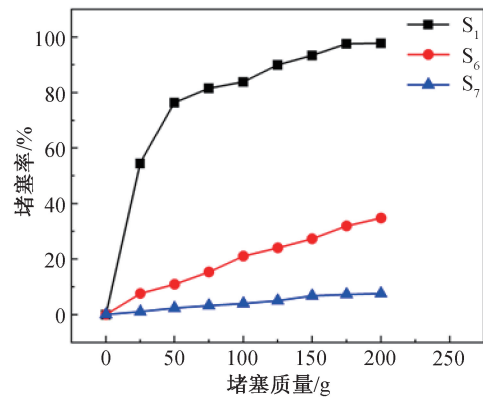


图 9 不同粒径碎石渗井在堵塞影响下堵塞率变化情况

Fig. 9 Variation of clogging rate for different graded gravel seepage wells under the influence of clogging

4.3 碎石粒径对堵塞物分布情况的影响

图 10 为堵塞物在碎石渗井内的分布情况。根据图 10(a),堵塞物主要均匀地分布在 S₆ 的中下部结构层,这意味着虽然堵塞对 S₆ 的影响较小,但是,大部分堵塞物并不能穿透结构层进入土壤深处,随着堵塞物的积累, S₆ 内部的孔隙终将被堵塞物填满并形成堆积,最后影响其渗透性能;图 10(b)



图 10 堵塞后的碎石渗井

Fig. 10 Gravel seepage wells after clogging

展示了堵塞物在 S_7 内的分布情况,可以看到堵塞物主要集中在 S_7 的底部,且结构层内滞留的堵塞物较少,表明堵塞物在水流的携带作用下,绝大部分可以穿过 S_7 结构层并进入土壤深处,意味着随着堵塞量的积累, S_7 仍然可以保持较好的渗透性,其长期抗堵塞效果要远优于 S_6 。

5 结论

本文对碎石渗井开展了不同类型堵塞物条件下的渗透试验,为解决堵塞物在碎石渗井表面堆积的问题,改变碎石渗井内置碎石粒径,开展了在真实堵塞物条件下的渗透试验,分析了堵塞物、碎石粒径对碎石渗井渗透性的影响,得到以下结论:

1)不同类型的堵塞物对碎石渗井渗透性的影响有一定的差异性,黏土对碎石渗井的影响最明显,0.30~0.60 mm 石英砂的影响最轻微,石英砂对碎石渗井渗透性的影响,主要与其粒径有关,石英砂粒径和碎石渗井内部孔径越接近,碎石渗井的前期堵塞速度越快,渗透系数下降越严重。

2)0~10 mm 碎石渗井在真实堵塞物影响下,堵塞率上升迅速;10~20 mm 碎石渗井在真实堵塞物影响下,堵塞率上升速度明显减缓;20~30 mm 碎石渗井在真实堵塞物影响下,堵塞率上升缓慢且逐渐趋于平稳,且20~30 mm 碎石渗井在真实堵塞物影响下其内部孔隙可以保持较好的连通性,其长期抗堵塞能力是3种碎石渗井中最好的,这表明增大碎石粒径可以减轻碎石渗井对堵塞物的截留效果,提高其抗堵塞性能。

参考文献:

- [1] 董祥,沈正. 我国城市道路透水路面建设的工程选址与类型选择分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(3): 145-150+160.
- [2] 李美玉,张守红,王玉杰,等. 透水铺装径流调控效益研究进展[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(12): 105-112+130.
- [3] 梁萌,薛明星,冯怀平. 新型渗井-透水网格措施的径流调控效果研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(3): 114-122.
- [4] 刘艳磊. 渗井-透水网格铺装的渗透及承载性能研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
- [5] 朱平华,史志浩,严先萃,等. 暴雨作用下新型再生透水混凝土的抗堵塞性能[J]. 建筑材料学报, 2023, 1-12.
- [6] 宋亚霖,杜新强,刘文娜,等. 海绵城市透水砖堵塞规律试验[J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 56-59.
- [7] RAO Y K, ZHANG J Y, YANG T, et al. Effect of bottleneck-causing clogging on infiltration-runoff of pervious concrete pavement system[J]. Road Materials and Pavement Design, 2022, 23(12): 2751-2764.
- [8] 张皓东. 不同孔隙率透水沥青混合料路用性能及堵塞衰变规律研究[J]. 公路, 2022, 67(9): 115-121.
- [9] 成智文,耿康,陈晓薇,等. 陶瓷透水砖堵塞及其控制方法研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(7): 116-121.
- [10] 宿辉,王晓伟,石明宇. 砂砾土孔隙特征对渗透系数的影响研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2013, 30(4): 82-86.

(责任编辑 张爱丽)