

文章编号: 1000-7598 (2011)增刊 1-0285-05

# 渗流作用对砂砾石层灌浆的影响试验研究

宁 博<sup>1,2</sup>, 吴时强<sup>2</sup>, 谢兴华<sup>2</sup>, 严忠民<sup>1</sup>

(1. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 南京 210029)

**摘 要:** 通过在试验砂槽中进行灌浆试验, 研究了渗流作用对砂砾石层灌浆的影响。首先, 在选定水泥浆作为灌浆材料的前提下, 验证了砂砾石材料的可灌性, 确定了灌浆的有关参数, 包括浆液水灰比、灌浆时间、灌浆压力、灌浆深度等; 其次, 在无渗流作用下, 研究了灌浆压力、浆液水灰比与浆液扩散范围之间的关系; 最后, 在有渗流作用下, 通过调整上下游水位差, 研究了灌浆压力、渗流强度与浆液扩散范围之间的关系。研究表明, 渗流作用对灌浆压力与浆液扩散范围所呈的线性关系无明显影响, 不同灌浆压力条件下, 渗流强度与浆液扩散范围之间呈明显的非线性关系。

**关 键 词:** 渗流; 砂砾石; 灌浆; 扩散范围

中图分类号: O 354

文献标识码: A

## Experimental study of influence of seepage on grouting in sandy gravels

NING Bo<sup>1,2</sup>, WU Shi-qiang<sup>2</sup>, XIE Xing-hua<sup>2</sup>, YAN Zhong-min<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** By the grouting test in sandbox, the influence of seepage on grouting in sandy gravels is studied. First, the groutability of sandy gravels is verified on condition that the slurry is chosen as grouting material; and the relevant parameters, including water cement ratio, grouting time, grouting pressure and grouting depth are determined. Second, in the absence of seepage, the relationship between grouting pressure, water cement ratio and grout diffusion distance is studied. Finally, under seepage, the relationship between grouting pressure, hydraulic gradient and grout diffusion distance is studied by adjusting water head difference between the upstream and downstream. It is shown that there is no significant influence of seepage on the linear relationship between grouting pressure and grout diffusion distance; and that the relationship between hydraulic gradient and grout diffusion distance shows nonlinear behavior under the different grouting pressures.

**Key words:** seepage; sandy gravel; grouting; diffusion distance

## 1 概 述

灌浆技术因具有成本低、见效快、施工简便等优点被广泛应用于地基、路基、堤坝、边坡等多种工程的防渗加固处理。砂砾石层是第四纪沉积物中的一种具有鲜明特征的松散粗碎屑堆积层, 在砂砾石地层中灌浆, 往往要求灌入的浆液能形成连续、稳定的胶结体, 这时灌浆孔的距离必须合理确定。灌浆孔距依赖于浆液的扩散范围, 而在目前的灌浆设计和施工中, 灌浆孔距主要是根据经验、现场试验确定的, 如何确定浆液的扩散范围是亟待解决的

技术难题之一。

针对灌浆参数、浆液性能、地层条件的单因素或多因素对浆液扩散范围的影响规律及它们之间的相互关系, 一些学者在理论与试验方面开展了广泛的研究。Maag 首先推导出牛顿型浆液在砂层的球面扩散公式<sup>[1]</sup>; 胡焕校等<sup>[2]</sup>采用颗粒有效粒径和浆液黏滞度来表示压力流量和扩散半径之间的关系, 采用 Matlab 进行数值积分对原有的 Maag 公式做了进一步改进; 阮文军<sup>[3]</sup>基于浆液的流变性、可灌性和可重复注浆性等基本性能研究, 尤其是黏度时变性规律, 建立了稳定性浆液注浆扩散模型; 杨秀竹等<sup>[4]</sup>

收稿日期: 2010-12-07

基金项目: “十一五”科技支撑项目 (No. 2008BAB29B04-3-4); “973”项目 (No. 2007CB714100); 南京水利科学研究院科学基金项目 (No. Y10802)。  
第一作者简介: 宁博, 男, 1983 年生, 博士研究生, 主要从事岩土渗流力学、地表水与地下水相互作用方面的研究工作。E-mail: ningbo.lc@163.com

基于广义达西定律及球形扩散理论模型,推导出幂律型浆液在砂土中进行渗透注浆时有效扩散半径计算公式;邹金锋等<sup>[5]</sup>针对劈裂注浆,推导出在一定的劈裂注浆压力作用下浆液的最大扩散半径、注浆压力的衰减规律以及单一裂缝中注浆量的理论计算公式;孙锋等<sup>[6]</sup>基于流体流变方程和平板窄缝模型,推导出致密土体劈裂注浆扩散半径计算公式;李哲等<sup>[7]</sup>依据高压注浆渗流数学模型,推导出高压注浆过程中浆体区和原水体区的压力分布,以及停止注浆后井底压力消退情况,分析了注浆井底压力与黏度、渗透率的关系;叶飞等<sup>[8]</sup>对盾尾注浆和管片注浆两种情况下的浆液渗透范围进行了理论推导,得到了浆液扩散半径与注浆压力间关系的表达式;杨坪等<sup>[9]</sup>通过在模拟的砂卵石层中进行注浆试验,得出浆液扩散距离与注浆介质结构(渗透系数、孔隙度)、注浆压力、注浆时间、水灰比等影响因素之间的关系。

从灌浆介质上看,已有成果主要为裂隙岩体介质或致密低渗的砂土介质,对砂砾石层的灌浆关注较少。研究方法以理论推导居多,模型试验较少,同时考虑地下水流动作用下的灌浆研究也并不多见。为此,本文通过砂砾石层灌浆模拟试验,考虑地下水渗流作用对灌浆浆液扩散的影响,利用回归分析拟合试验数据,得到浆液扩散范围与灌浆压力、渗流强度之间的关系。

## 2 试验装置

模型由砂槽、水循环系统、浆液制备与输送系统组成,详见图1。



图1 试验装置  
Fig.1 Experimental setup

砂槽由上游槽首、槽身、下游槽尾3部分组成,槽首与槽尾均设有溢水设备,以控制上下游的水位,槽身为槽主体,内置模型试验的渗透介质。砂槽外形尺寸长70 cm(槽身长50 cm,槽首、槽尾长均为10 cm),宽30 cm,高30 cm,详见图2。水循环系统由供水水箱、潜水泵、进水管路和出水管路组成,主要为模型试验提供持续稳定的上下游水位。浆液制备与输送系统由空气压缩机、制浆压力桶、高压油管、注浆枪头组成,试验过程中主要提供持续稳定的动力源,进行浆液的制备与输送。



图2 试验砂槽  
Fig.2 Experimental sandbox

## 3 材料与参数选定

试验选用的砂砾石材料,其颗粒组成见表1,级配曲线见图3。

选定纯水泥浆作为本次试验的灌浆材料,水泥采用马鞍山海螺水泥有限责任公司生产的海螺牌P.O32.5水泥,水取用一般的自来水。最终算出的可灌比值 $M = 18.75^{[1]}$ ,符合文献[1]给出的 $M > 15$ 的条件,故认为本次试验选用纯水泥浆对砂砾石层进行灌浆,具有可灌性。

根据前人已有的经验<sup>[1]</sup>,本次试验水泥浆液的水灰比依次选用0.6:1、0.7:1、0.8:1、0.9:1共4个级级;结合砂槽尺度,经过大量灌浆试验比对后,最终选定灌浆时间为15 s,灌浆压力分别为30、40、50、60 kPa,注浆深度为10 cm。

## 4 试验设计与方法

### 4.1 试验设计

试验过程中对砂砾石层进行渗透灌浆,每次灌

表1 砂砾石材料颗粒组成  
Table 1 Particle-size distribution of sandy gravels

土粒组成	砾石			砂粒			粉粒与黏粒
	粗	中	细	粗	中	细与极细	
粒径大小/mm	$\geq 20$	$\geq 5, < 20$	$\geq 2, < 5$	$\geq 0.5, < 2$	$\geq 0.25, < 0.5$	$\geq 0.075, < 0.25$	$< 0.075$
含量/%	3.9	71.5	8.0	6.4	3.8	5.8	0.6

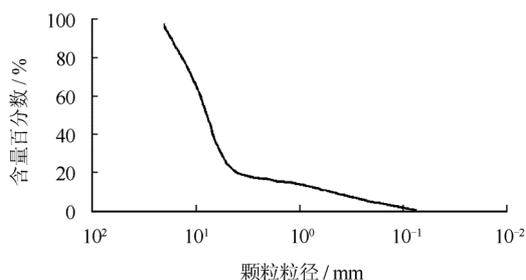


图 3 砂砾石材料级配曲线  
Fig.3 Grading curve of sandy gravels

浆的时间、深度维持不变，砂砾石地层条件尽量保持一致。试验分有渗流作用和无渗流作用两组进行，每组灌浆条件见表 2。有渗流作用下灌浆时，按不同水流条件分 3 组进行，具体参数见表 3。

表 2 灌浆试验工况  
Table 2 Modes of grouting test

工况	灌浆试验类别	灌浆条件			
		水灰比	灌浆压力 /kPa	灌浆时间 /s	
1	无渗流作用	0.6:1, 0.7:1	30, 40,	15	
		0.8:1, 0.9:1	50, 60		
2	有渗流作用	0.7:1	30, 40,	15	
			50, 60		5
					10
				15	

表 3 有渗流作用灌浆试验工况  
Table 3 Modes of grouting test under seepage

工况	上游水头 /cm	下游水头 /cm	上下游水位差 /cm	渗透比降	出口流量 /(mL/s)	出口断面平均流速 /(cm/s)	灌浆压力 /kPa
2-1	26.5	21.5	5.0	0.1	207.8	0.32	30, 40,
2-2	26.5	16.5	10.0	0.2	349.5	0.71	
2-3	27.0	12.0	15.0	0.3	362.2	1.01	50, 60

4.2 试验方法

有渗流作用下灌浆试验方法具体如下：

(1) 首先在砂槽中称装砂砾石材料，为了尽量保持砂砾石地层条件一致，每次称装的砂砾石材料质量相同，并经人工振捣密实。开启水循环系统，调整砂槽上下游水位并记录相关数据。连接灌浆设

备，检查管道通畅情况，按设计的浆液水灰比配置好水泥浆，准备灌浆。

对砂砾石层进行灌浆，灌浆压力采用试验设计中的定压，可通过安装在空气压缩机上的压力表监测灌浆压力，通过调压阀维持压力恒定。灌浆过程中通过调节上游的出水阀门和下游出水管口的高度维持上下游水位差恒定。

灌浆完毕后，关闭水循环系统，清洗设备与管道，静置 1 d 待浆液凝固后挖出结石体，拍照并量测其各方向尺寸。其中，水平向、横向、垂向分别代表砂槽长度方向、宽度方向和高度方向。

无渗流作用下试验过程中无需开启水循环系统，除此之外，其试验方法与有渗流作用下完全相同。

5 试验结果分析

5.1 取样观察分析

全部灌浆结束后，取样观察可见，浆液在其扩散到的范围内充填密实，与砂砾石胶结良好，如图 4 所示。结石体具有一定的强度，且绝大多数具有椭球形。



图 4 灌浆后结石体  
Fig.4 Calculus after grouting

5.2 无渗流作用试验结果

图 5 反映了无渗流作用时，不同水灰比下结石体各个方向尺寸随灌浆压力变化情况。可以看出：在一定的浆液水灰比下，灌浆压力与结石体各方向

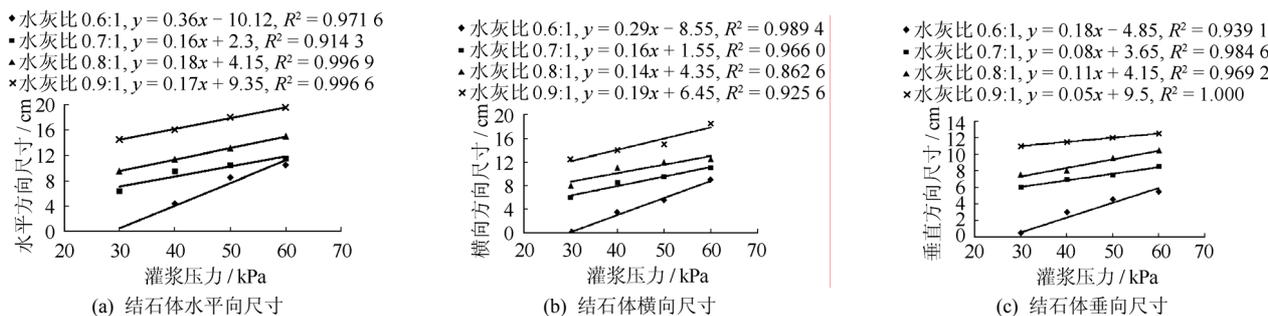


图 5 不同水灰比条件下无渗流作用结石体尺寸随灌浆压力变化情况

Fig.5 The dimension of calculus varying with the grouting pressures in different water-cement ratios without seepage

尺寸呈较良好的线性关系，结石体各方向尺寸随着灌浆压力的增加而增大。

石体各个方向尺寸随浆液水灰比变化情况，可以看出：在灌浆压力一定的条件下，结石体各方向尺寸随着浆液水灰比的增加而增大。

图 6 反映了无渗流作用时，不同灌浆压力下结

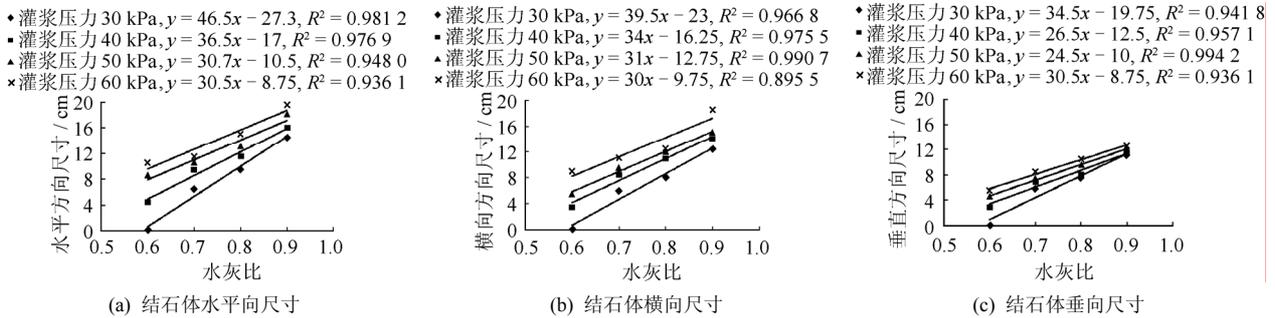


图 6 不同灌浆压力条件下无渗流作用结石体尺寸随水灰比变化情况

Fig.6 The dimensions of calculus varying with the water-cement ratios in different grouting pressures without seepage

### 5.3 有渗流作用试验结果

图 7 反映了有渗流作用时，不同渗透比降下结石体各个方向尺寸随灌浆压力变化情况，可以看出：

在一定的渗透比降下，灌浆压力与结石体各方向尺寸呈较良好的线性关系，结石体各方向尺寸随着灌浆压力的增加而增大。

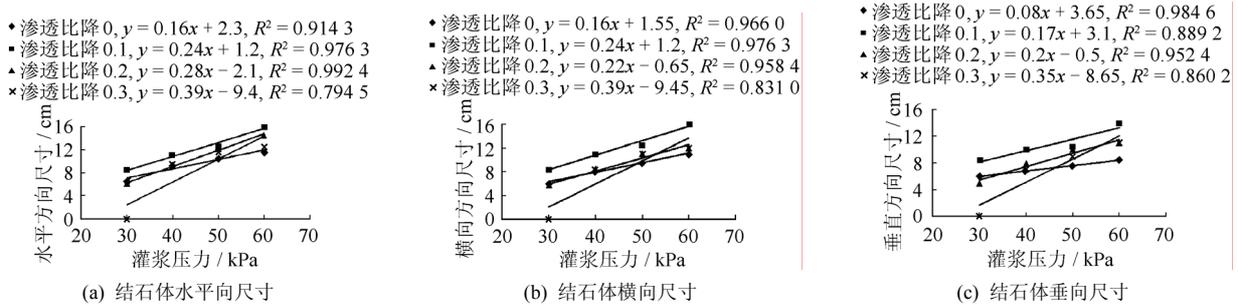


图 7 不同渗透比降条件下有渗流作用结石体尺寸随灌浆压力变化情况

Fig.7 The dimensions of calculus varying with the grouting pressures in different hydraulic gradient under seepage

图 8 反映了不同灌浆压力下结石体各个方向尺寸随渗透比降变化情况，可见，当渗透比降为 0.1 时，浆液扩散范围均比无渗流作用时明显增大，灌浆后形成的结石体各方向尺寸均显著大于无渗流作用时。当渗透比降为 0.2 时，浆液扩散范围有所减小，灌浆后形成的结石体各方向尺寸在灌浆压力较大（50、60 kPa）条件下仍大于无渗流作用时结石体尺寸，而较小灌浆压力（30、40 kPa）条件下，

则基本等同于无渗流作用时的结石体尺寸。当渗透比降达到 0.3 时，灌浆压力为 30 kPa 条件下，浆液被冲散，灌浆后无法形成结石体；灌浆压力为 40 kPa 条件下，渗流作用对浆液扩散范围、灌浆后形成的结石体各方向尺寸的影响较小，基本与无渗流作用时的结石体尺寸相当；较大灌浆压力（50、60 kPa）条件下，浆液扩散范围减小，灌浆后形成的结石体各方向尺寸均相应减小，但仍大于无渗流作用时同

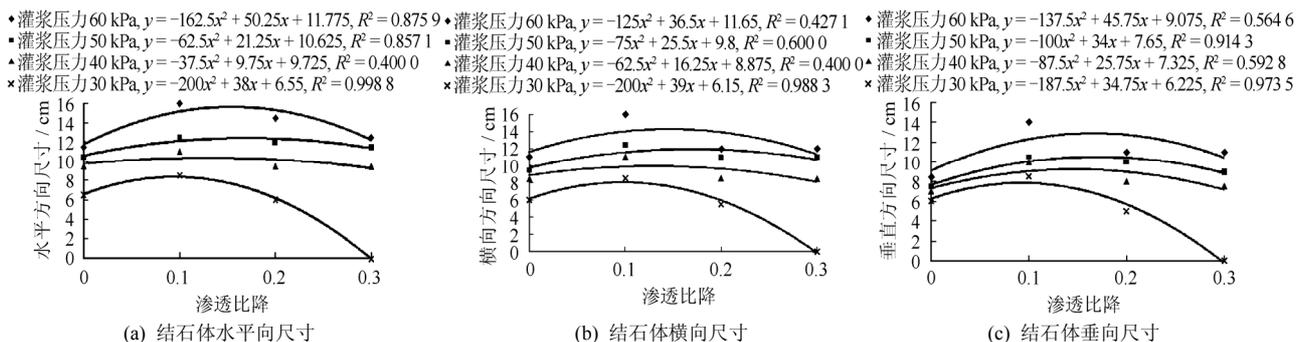


图 8 不同灌浆压力条件下有渗流作用结石体尺寸随渗透比降变化情况

Fig.8 The vertical dimensions of calculus varying with the hydraulic gradient in different grouting pressures under seepage

等灌浆压力条件下的结石体尺寸。

## 6 结 论

本文对有渗流作用和无渗流作用下砂砾石层灌浆效果进行了对比试验研究, 比较了水灰比、灌浆压力、渗透比降等因素对浆液扩散范围的影响, 结果表明: 灌浆后形成的结石体形状绝大多数呈椭球形, 有渗流作用和无渗流作用对其形状无明显影响; 无渗流作用时, 在灌浆压力一定的条件下, 浆液扩散范围随浆液水灰比(变化范围为 0.6:1~0.9:1)的增加而增大; 有渗流作用和无渗流作用下, 灌浆压力与浆液扩散范围均呈现良好的线性关系, 两者没有明显差异; 有渗流作用时, 不同灌浆压力条件下, 渗流强度与浆液扩散范围之间呈明显的非线性关系。由于本项研究工作是在限定灌浆时间条件下进行, 故未考虑浆液参数的时变性对浆液扩散范围的影响; 同时, 由于试验用砂与砾石未进行不同配比的组合, 故试验是在砂砾石层一定的条件下进行, 未考虑介质渗透系数对浆液扩散范围的影响。因此, 这些方面有必要在今后的研究中深入探讨。

## 参 考 文 献

- [1] 岩土注浆理论与工程实例协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 胡焕校, 唐良智, 周立祥, 等. 黏时变流体在砂砾层中的渗透扩散机理研究[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(4): 60—64, 69.  
HU Huan-xiao, TANG Liang-zhi, ZHOU Li-xiang. Study on mechanism of penetration of time-varying viscous fluid in gravel layer[J]. **Journal of Water Resources & Water Engineering**, 2010, 21(4): 60—64, 69.
- [3] 阮文军. 注浆扩散与浆液若干基本性能研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 69—73.  
RUAN Wen-jun. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(1): 69—73.
- [4] 杨秀竹, 雷金山, 夏力农. 幂律型浆液扩散半径研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1803—1806.  
YANG Xiu-zhu, LEI Jin-shan, XIA Li-nong. Study on grouting diffusion radius of exponential fluids[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(11): 1803—1806.
- [5] 邹金锋, 李亮, 杨小礼. 劈裂注浆扩散半径及压力衰减分析[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 314—319.  
ZOU Jin-feng, LI Liang, YANG Xiao-li. Penetration radius and pressure attenuation law in fracturing grouting[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2006, 37(3): 314—319.
- [6] 孙锋, 陈铁林, 张顶立, 等. 基于宾汉体浆液的海底隧道劈裂注浆机理研究[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(4): 1—6.  
SUN Feng, CHEN Tie-lin, ZHANG Ding-li. Study on fracture grouting mechanism in subsea tunnel based on Bingham Fluids[J]. **Journal of Beijing Jiaotong University**, 2009, 33(4): 1—6.
- [7] 李哲, 仵彦卿, 张建山. 高压注浆渗流数学模型与工程应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1972—1976.  
LI Zhe, WU Yan-qing, ZHANG Jian-shan. Mathematical model of high pressure injection cement liquid and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(12): 1972—1976.
- [8] 叶飞, 朱合华, 何川. 盾构隧道壁后注浆扩散模式及对管片的压力分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1307—1312.  
YE Fei, ZHU He-hua, HE Chuan. Back-filled grouts diffusion model and its pressure to segments of shield tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1307—1312.
- [9] 杨坪, 唐益群, 彭振斌, 等. 砂卵(砾)石层中注浆模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2134—2138.  
YANG Ping, TANG Yi-qun, PENG Zhen-bin, et al. Study on grouting simulating experiment in sandy gravels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(12): 2134—2138.