

堤坝渗漏广义示踪法室内试验研究

姚斌斌^{1,2}, 陈亮^{1,2}, 李月奇^{1,2}, 高为壮^{1,2}, 何健健^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098, 2. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 以堤坝填筑材料中常见细砂、中砂、粗砂为试验材料, 以食盐溶液为示踪剂, 通过测试各材料中示踪剂电导率随时间的变化规律, 计算其渗透水平流速。经试验传统点稀释公式计算得出的渗透水平流速在各砂层中对比流量法测试得到的流速偏大, 在同一砂样不同水力梯度下两流速比值基本为一恒定值, 而在不同砂层中比值不尽相同。对原点稀释计算公式进行了修正, 并给出了修正系数实验值。

关键词: 堤坝渗漏; 流速测试; 示踪法; 稀释公式; 水头差

中图分类号: TV223.4

文献标识码: A

Experimental study on generalized tracing method for dam leakage

YAO Bin-bin, CHEN Liang, GAO weizhuang, LI Yue-qi, HE Jian-jian

(Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

Abstract: With laboratory testing rig and testing program designed, the fine sand, medium sand and coarse sand are chosen as test material respectively, and the salt solution is chosen as tracer agent, then the seepage velocity is calculated through the relationship between the conductivity of tracer agent in different test material and time. The value of seepage velocity calculated through traditional dilution formula in all sand layers is a little larger than that by testing discharge method. The specific value of them is constant in the same hydraulic gradient, while it is imparity in different sand layers. The dilute tracer correction coefficient is proposed as well as the modified dilution formula, meanwhile the experimental value of dilute tracer correction coefficient is given.

Key words: dam leakage seepage velocity tracer method dilution formula head difference

坝体渗漏问题在世界各地都有出现, 在坝体中找到渗漏通道并测试渗透流速, 才能对坝体进行及时的加固防止险情发生。确定渗漏通道所在的位置及渗透流速的测试有多种方法, 其中包括: 自然电位法、高密度电阻率法、瑞利波法、地雷达法、连通试验法以及示踪法。示踪法包括天然示踪方法和人工示踪方法。以往的研究大多基于点稀释公式以不同示踪剂在工程实例中的应用为主^[1-8], 而工程实例中因地质条件较为复杂, 大多只能是进行定性的分析。对于不同性质的土层, 在不同水力梯度下渗

透水平流速的定量分析需要进一步研究。本文通过自行设计室内试验对稀释示踪法的测试流速与实际流速对比, 对原稀释计算公式提出了稀释示踪修正系数, 并分别给出了细砂、中砂、粗砂中稀释示踪修正系数的试验值。

1 试验原理及计算模型

试验基本原理是, 在测试区域预先钻探下设的花管测试孔中投放一定量的示踪剂, 用于对测试深

度区域的水体进行标记,透水层中由于地下水的流动,在水平方向上,测试管上游不被标记的地下水通过花管钻孔不断进入测试孔中,而被标记的水体将逐渐被带出测试管。在这一持续的过程中,用于标记水体的示踪剂持续地被带出,随着时间的推移,测试孔水体中的示踪剂浓度不断降低。而测试孔中示踪剂浓度降低的速率与时间和地下水流速大小等有关。通过计算模型,求得测试孔中示踪剂浓度的变化与时间和地下水流速之间的函数关系,进而得到测试水平流速,并与实际通过测试流量与时间变化的实际水平流速进行对比。

本文计算采用的是 Moser 等人建立的单孔稀释模型, Moser 等人记初始时刻 t_0 测试管内示踪剂的浓度为 C_0 , 到达时刻 t 试管内示踪剂的浓度记为 C_t , 经试验研究由于渗漏水流动, 滤水管内示踪剂浓度的递减可用下述基本方程式表示:

$$C_t = C_0 e^{-Bt} \tag{1}$$

其中: B 系数与流量以及滤水管半径有关, $B=Q/V$; Q 为单位时间内流经测试管内示踪剂标记段的水量, $Q=2rhv_w$; V 为测试管内被示踪剂标记水柱的体积, $V=\pi r^2 h$; r 为测试管内半径; h 为被示踪剂标记水柱高度; v_w 为流经测试孔水流的流速, 将以上各参数代入的 B 表达式中,

$$B = \frac{Q}{V} = \frac{2v_w}{\pi r} = \frac{2\alpha v_f}{\pi r} \tag{2}$$

其中 α 为流场畸变矫正系数取 2, v_f 为水平渗透速度。

$$v_f = \frac{\pi r}{2\alpha t} \ln \frac{C_0}{C_t} \tag{3}$$

由氯化钠溶液浓度与电导率关系测试试验可知, 氯化钠溶液浓度与电导率呈线性相关, 即 $C_0/C_t = N_0/N_t$, 带入 (3) 中得到流速计算公式:

$$v_f = \frac{\pi r}{4t} \ln \frac{N_0}{N_t} \tag{4}$$

2 试验部分

2.1 试验装置

图 1 为试验装置示意图。模型槽使用 11 mm 厚透明有机玻璃板粘制而成, 选用透明有机玻璃可以看清内部试样情况, 同时 11 mm 厚有机玻璃可以有效防止模型槽变形, 模型槽的主体尺寸为 320 mm × 89 mm × 600 mm (内部尺寸长宽高)。I 部分为装样室, 用来装填试验砂样, 是整个模型槽

的主体部分; II 部分是进/出水室, 该部分分为上游进水室与下游出水室两部分, 上游进水室与稳定的水源连接, 为试验提供稳定的上游水头。III 部分为水头调节装置, 用于调节上下游水头差, 使试验中产生不同的水平流速用于对比分析。模拟现场的钻孔及滤水管情况, 砂样填筑时在实验槽中间部位布置一内径 17 mm 的 PVC 管, PVC 管底部插入试样部分 450 mm 开孔, 开孔率为 30%, 上部 350 mm 不开孔, 外部包裹渗透系数大于 10^{-1} cm/s 的滤网两层, 以隔离细砂进入测试管。示踪剂数据采集使用 DDBJ-350 型便携式电导率仪, 电极探头为 DJS-1C 系列电导电极, 电导率测量范围为 0 uS/cm 至 310⁴ uS/cm。每次试验前使用氯化钾校正液对电极探头进行校正, 试验结束后使用去离子水进行冲洗。示踪剂置换前预先将电导电极放置在测试管距模型槽底部 200 mm 位置处, 即试验砂样中下部。

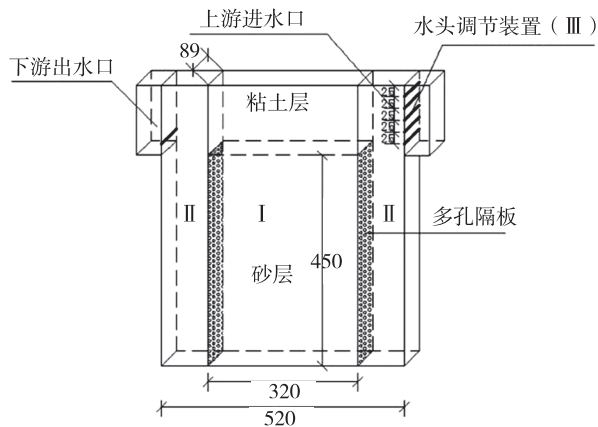


图 1 试验装置示意图 (单位 mm)
Fig.1 Schematic diagram of the apparatus(mm)

2.2 试验过程

为了更好的模拟自然界中不同深度范围内点稀释法测试地下水流速的情况, 本论文共对细砂、中砂、粗砂三种砂样进行试验研究 (表 1)。

表 1 实验所用土样
Tab.1 Soil samples for experiments

砂样名称	细砂	中砂	粗砂
粒径范围 /mm	0.075~0.25	0.25~0.5	0.5~2

各试样的渗透系数是使用 70 型渗透仪根据常水头试验规范试验测得的。对细砂、中砂、粗砂三种试样各进行 5~6 次平行试验, 并取各试样相差不大的 3 次平行试验测得的渗透系数的平均值作为该试样的渗透系数 (表 2)。

表2 土样渗透系数
Tab.2 Penetration coefficient of soil sample

砂样名称	细砂	中砂	粗砂
渗透系数 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	2.2×10^{-3}	1.92×10^{-2}	1.61×10^{-1}

2.2.1 装样与饱和

试验采用水下抛填的方法进行试样装样, 先将试验槽内水位提升至一定高度(略低于填筑该层砂样的高度), 然后将一定质量的干砂填入砂槽中, 压实至预定高度, 按此方法装填下一层, 直至土样装填完成。

2.2.2 提升上游水头

试验前根据试验方案设定好的水力梯度, 调整好上下游水头差, 使水力梯度维持在一个稳定的值, 从而使渗流为稳定水平渗流。本次试验设置的上下游水头差共5个, 分别为25、50、75、100及125 mm, 渗流渗径为图1中试验装置装样室部分的长度320 mm, 从而水头差及水力梯度如表3所示:

表3 试验水头差及水力梯度
Tab.3 Head difference and hydraulic gradient

水头差(mm)	25	50	75	100	125
水力梯度	0.078	0.156	0.234	0.313	0.391

2.2.3 示踪剂投放与采集

示踪剂采集频率为5 s/个, 为去除示踪剂投放对周围水流影响对试验造成的误差, 当示踪剂投放完成稳定一定时间再对示踪剂进行数据采集。

2.2.4 出水量的量测

在电导率采集期间对下游出水流量进行量测, 且量测次数不少于3次, 并对此量测的流量取平均值进行数据分析。由此对点稀释测试流速与实际达西渗透流速进行对比分析, 因此试验中就应测量土层中的实际流速, 其测量是根据传统的流量法, 即测量一定时间间隔 t 的下游出水口的出水量 Q 及过

水断面面积 A , 根据计算公式 $v=Q/A$ 即可计算得出实际达西流速大小。

3 试验结果及分析

粗砂在25、50、75 mm三个水头差下电导率随时间的变化关系分别如图4所示。100及125 mm下由于渗流速度较快, 投放示踪剂较难采集, 故在此试样中没有进行100及125 mm水头差下的试验。

由图2—图4可以看出, 细砂多次试验的 $N-t$ 关系曲线基本服从 $N_t=N_0e^{-Bt}$ 指数衰减规律, 试验结果与对应指数拟合非常接近, 试验指数拟合 R^2 都在0.98以上。通过以上稀释示踪法在各砂样中不同水头差下的试验研究, 在每一砂样每一水头差下共得到两个水平渗透流速, 分别为: 通过流量法测试计算得到的水平渗透流速, 该流速基本与达西渗透流速大小相同, 为砂样中真实的渗透流速大小, 记为 v_1 ; 通过稀释示踪法测试试验孔中电导率的变化规

律, 并根据计算模型中的公式 $v_f = \frac{\pi r}{4t} \ln \frac{N_0}{N_t}$ 得到的水平渗透流速, 记为 v_2 。将各砂样中测试得到的流速汇总, 其结果如表4所示。在三个砂样中, 每一个水力梯度下通过稀释示踪法测试得到的水平渗透流速的大小均比通过流量法测试得到的水平渗透流速的大小偏大。

通过分析在细砂中通过稀释示踪法测试得出的各水力梯度下的水平渗透流速随对应的流量法测试得到的水平渗透流速的增大而增大, 对应流速之间呈正的线性相关性。在稀释示踪法测试细砂渗透流速试验中各级水力梯度下两流速 v_1 与 v_2 之间的关系基本均符合 $v_2=1.1605v_1$ 相关关系, v_2/v_1 的比值不随试验时砂层之间真实渗透流速的变化而变化。同样得到中砂及粗砂中 v_2/v_1 分别为1.5492与1.6318。从以上的结果可以看出, 对于同一种类型的砂土而

表4 稀释示踪法中各水平流速结果
Tab.4 Horizontal seepage velocity of dilution tracer method

水头差/mm	水力梯度	细砂流速/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)		中砂流速/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)		粗砂流速/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	
		v_1	v_2	v_1	v_2	v_1	v_2
25	0.078	1.223×10^{-4}	1.335×10^{-4}	1.376×10^{-3}	2.068×10^{-3}	1.165×10^{-2}	2.02×10^{-2}
50	0.156	3.035×10^{-4}	3.336×10^{-4}	3.039×10^{-3}	4.737×10^{-3}	2.56×10^{-2}	3.983×10^{-2}
75	0.234	4.881×10^{-4}	5.338×10^{-4}	4.532×10^{-3}	7.206×10^{-3}	3.44×10^{-2}	5.718×10^{-2}
100	0.313	6.392×10^{-4}	7.340×10^{-4}	6.022×10^{-3}	9.608×10^{-3}	—	—
125	0.391	8.340×10^{-4}	1.001×10^{-3}	7.498×10^{-3}	1.128×10^{-2}	—	—

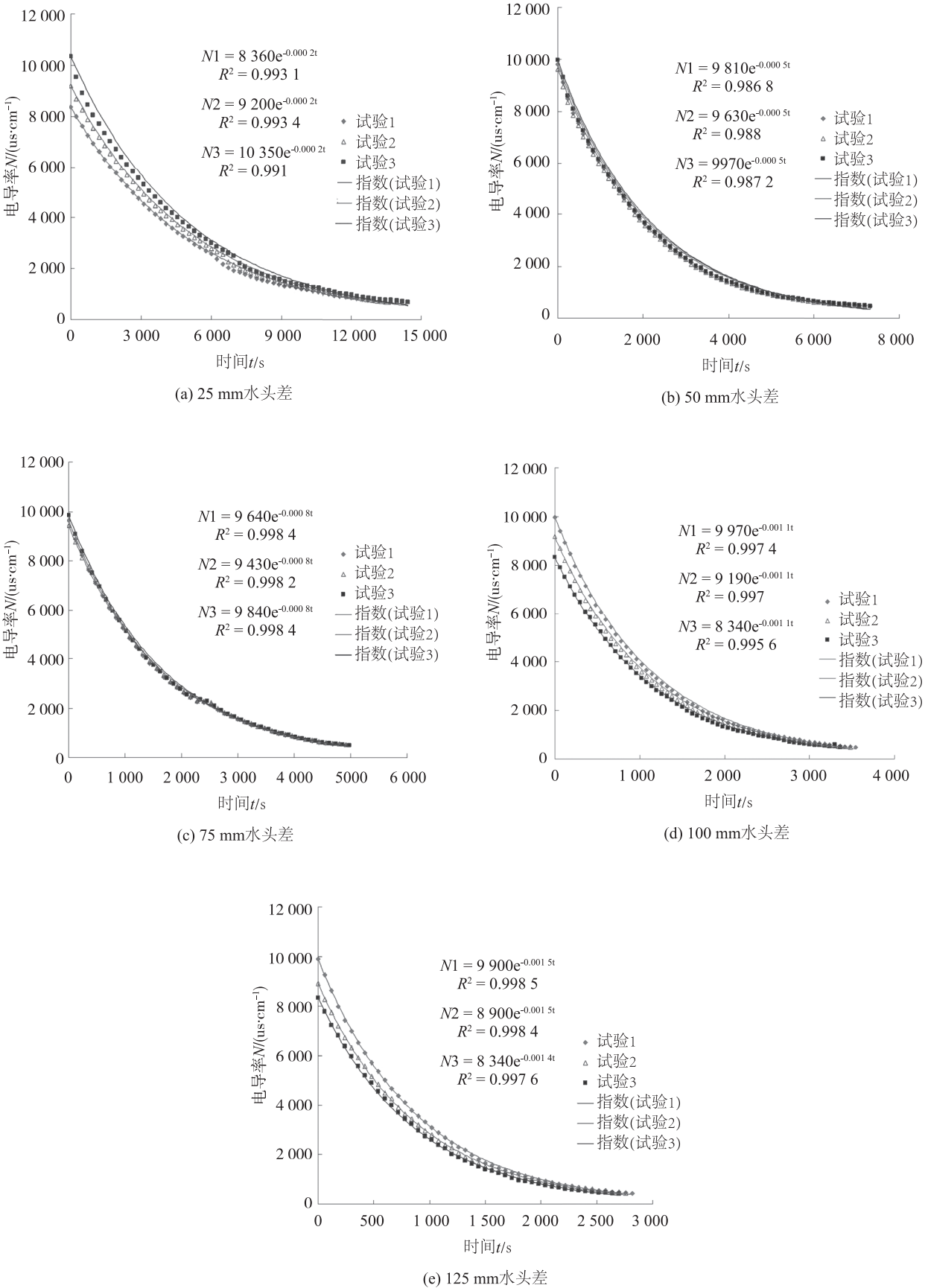
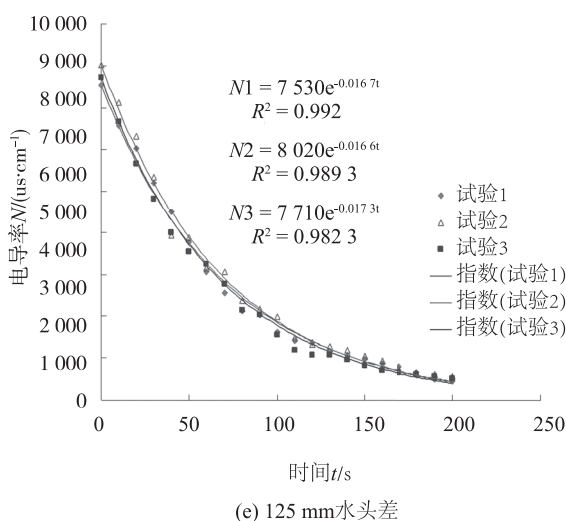
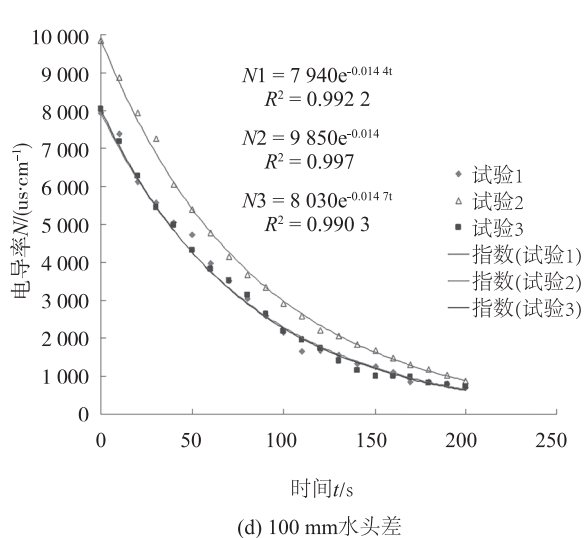
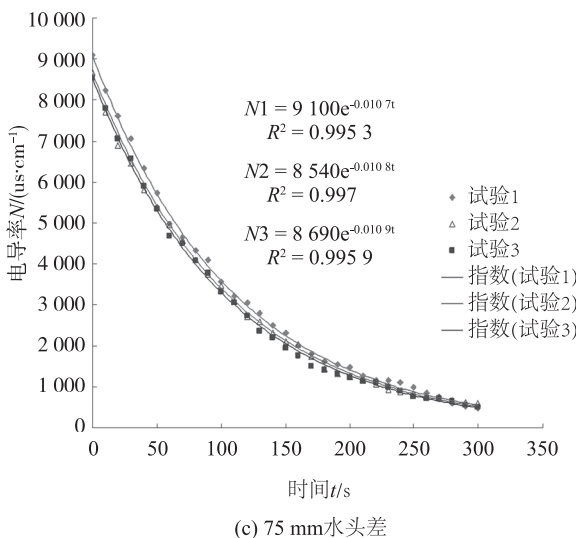
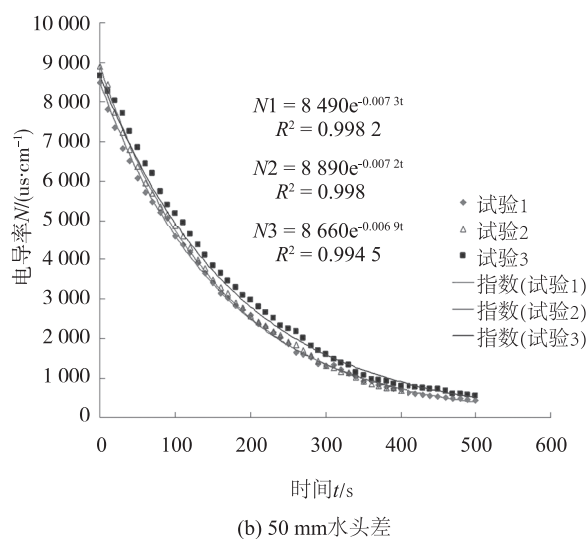
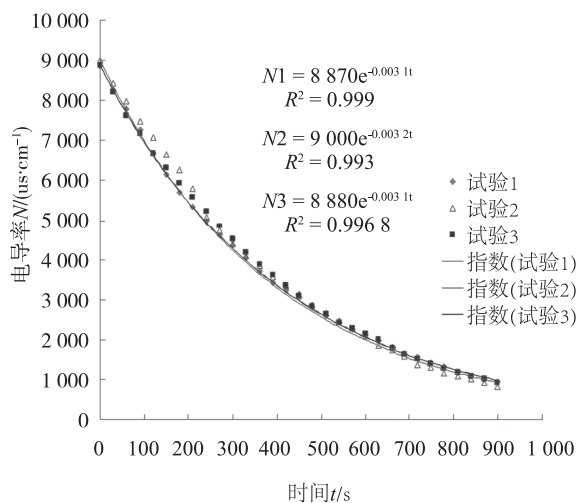


图2 稀释试验细砂在水头差下 N - t 关系

Fig.2 N - t relationship of fine sand in dilution test at head difference

图3 稀释试验中砂在水头差下 $N-t$ 关系Fig.3 $N-t$ relationship of medium sand in dilution test at head differences

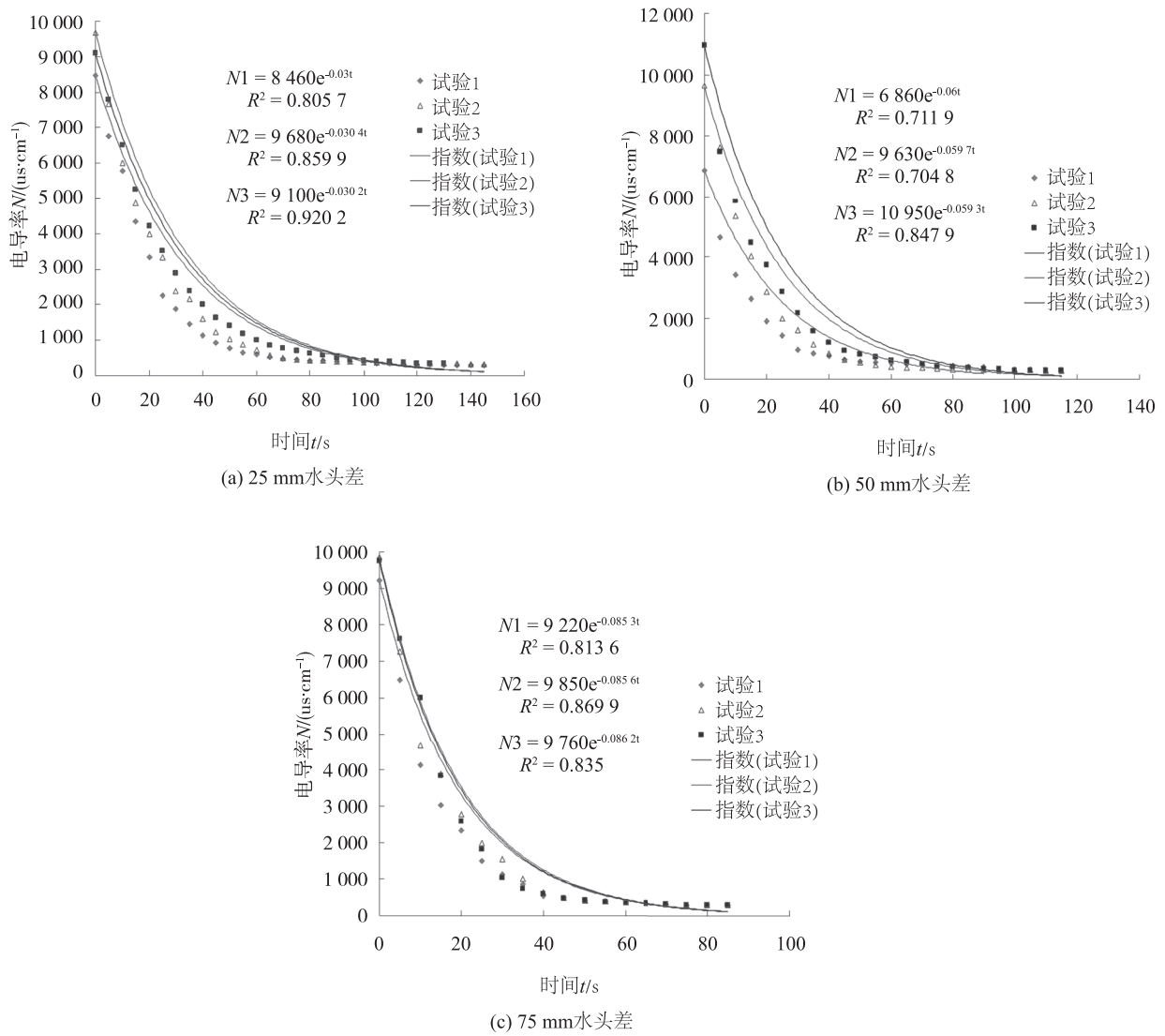


图4 稀释试验粗砂在水头差下 $N-t$ 关系
Fig.4 $N-t$ relationship of coarse sand in dilution test at head differences

言，通过稀释示踪法测试得到的水平方向渗透流速 v_2 与砂层中真实的渗透流速 v_1 之间的比值基本上是恒定的，为此引入系数 β_1 ，称其为稀释示踪法修正系数，则稀释公式修正为以下式： $v_f = \frac{\pi r}{4\beta_1 t} \ln \frac{N_0}{N_i}$ 。稀释示踪法试验中所用的细砂、中砂和粗砂的修正系数取值分别为 1.160 5、1.549 2 与 1.631 8。

4 结论

- 1) 各土层试验中溶液电导率大小基本服从指数衰减规律，点稀释定理在细砂层、中砂层、粗砂层中均具有较好的适应性。
- 2) 在细砂层、中砂层、粗砂层三个砂样不同水力梯度下，通过稀释示踪法测试得到的渗透流速大

小均比达西渗透流速偏大。
3) 同一砂样中，不同水力梯度下测试流速与实际达西流速的比值基本为定值，此比值在不同砂样中差别较大。本文引入稀释示踪法修正系数 β_1 ，并得出细砂、中砂及粗砂稀释示踪法修正系数 β_1 的试验值分别为：1.160 5、1.549 2、1.631 8。

参考文献：

[1]陈建生，董海洲. 堤坝渗漏探测示踪新理论与技术研究[M]. 北京：科学出版社，2007：9-11.
[2]MOSER H, NEUMAIER F, RAUERT W. Die Anwendung radioaktiver Isotopen in der Hydrologie[J]. Atomkernenergie, 1957(2): 225-231.
[3]DOUGHT Y C, TSANG C F. Signatures in flowing fluid

electric conductivity logs[J]. Journal of Hydrology, 2005, 3(10): 157-180.

- [4] SERGE BROUYÈRE, JORDI BATLLE-AGUILAR, Pascal Goderniaux, et al. A new tracer technique for monitoring groundwater fluxes: The Finite Volume Point Dilution Method[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2008, (95): 121-140.

- [5] TINGWU L, YAN Y, SHI X N, et al. Measuring velocity of water flow within a gravel layer using an electrolyte tracer method with a Pulse Boundary Model[J].

Journal of Hydrology, 2013, (500): 37-44.

- [6] 陈建生, 赵维炳. 单孔示踪方法测定裂隙岩体渗透性研究[J]. 河海大学学报, 2000, 28(3): 44-50.
- [7] 高正夏, 徐军海, 王建平. 同位素技术测试地下水流速流向的原理及应用[J]. 河海大学学报, 2003, 31(6): 655-658.
- [8] 任宏微, 刘耀炜, 孙小龙, 等. 单孔同位素稀释示踪法测定地下水渗流速度、流向的技术发展[J]. 国际地震动态, 2013, (2): 5-15.

(责任编辑 王利君)

(上接第29页)

减小, 即荷载较大时, 初始含水率对膨胀率的影响较小。

2) 不同含水率下膨胀率与上覆荷载均呈半对数线性相关关系。

3) 初始膨胀速度 v 与最终膨胀率 δ_{ep} 呈正相关, 用二次函数拟合相关性较好, 在工程中通过应用此关系可由短期监测预测长期膨胀变形量。

4) 膨胀率与饱和抗剪强度参数呈负相关。重塑样的膨胀率及强度参数均大于原状样, 不宜将此膨胀岩重塑后作为回填土覆盖。

参考文献:

- [1] 温春莲. 初始含水率、容重及载荷对膨胀岩特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(3): 304-311.
- [2] 刘静德, 李青云, 龚壁卫. 南水北调中线膨胀岩膨胀特性研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 826-830.
- [3] 朱珍德, 邢福东, 刘汉龙等. 红砂岩膨胀力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 33(5): 826-830.
- [4] 张计, 黄斌, 饶锡保, 等. 结构性对膨胀岩膨胀特性

影响试验研究[C]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2011, 47: 283-286.

- [5] 何晓民, 黄斌, 饶锡保, 等. 膨胀岩击实样胀缩特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(11): 14-19.
- [6] 赵二平, 李建林. 南水北调中线膨胀岩膨胀特性试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 171-178.
- [7] 何建新, 刘亮. 膨胀岩抗剪强度特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(6): 92-94.
- [8] 徐晗, 黄斌, 何晓民. 膨胀岩工程特性试验研究[J]. 水利学报, 2007: 716-722.
- [9] CECS 239-2008, 岩石与岩体鉴定和描述标准[S].
- [10] GB/T 50123-1999, 土工试验方法标准[S].
- [11] 曹雪山. 非饱和膨胀土的弹塑性本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 832-836.
- [12] 曹雪山, 殷宗泽, 凌华. 非饱和土受压变形的简化计算研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 61-65.
- [13] 曹雪山, 殷宗泽. 非饱和土二维固结简化计算的研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2575-2580.
- [14] 曹雪山, 殷宗泽. 一维非饱和土固结简化计算的改进方法[J]. 公路交通科技, 2009, 26(10): 1-5.

(责任编辑 王利君)