

盐渍土渗透模型

林清华¹⁾ 李长洪¹⁾ 吴昌群²⁾ 张吉良¹⁾ 张永生³⁾ 方雪松⁴⁾

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083 2) 北京建工京精大房工程监理公司, 北京 100037

3) 中国地质科学院矿产资源所, 北京 100037 4) 中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013

摘要 在对盐渍土现场与室内渗水实验结果差异分析的基础上, 对西藏扎布耶盐湖盐渍土的渗透性进行了研究. 为使所测渗透系数更能接近实际, 提出了用原位渗透实验方法来评价土层垂直渗透性能. 利用数学模型得到了计算渗透系数的相应公式. 结合实际工程证明该测试方法和计算公式是可行的.

关键词 盐田; 盐渍土; 渗透实验; 数学模型

分类号 TU 472

岩土中易溶盐含量大于 0.3%, 并具有溶陷、盐胀、腐蚀等工程特性时, 应判定为盐渍岩土^[1]. 我国的盐渍土主要分布在西北干旱地区的低平盆地和平原、华北平原, 以及大同盆地和青藏高原的一些湖盆洼地中, 不仅地区之间的差异很大, 同一地区也有很大差别^[2]. 盐田堤岸场地土层为第四纪湖相松散沉积物、湖泊化学沉积的盐层及盐渍土组成^[3], 盐渍土渗漏问题是盐田建造中重要的工程地质问题. 本文结合国家科技攻关项目——西藏扎布耶盐湖卤水制取碳酸锂精矿工业化实验研究——黄羊滩盐田 363 万 m² 晒池建造的工程实例, 重点介绍了通过原位渗透实验方法及其推导出的计算公式进行盐田渗透性评价的合理性和可行性, 以了解盐田建设区内土层的渗透性能, 并对盐田卤水渗漏量做出准确评价, 为盐田工艺设计提供了必要的数据.

在西藏扎布耶盐田渗透性测试工作初期, 采用了钻孔渗水实验方法, 但由于贯入时的扰动, 尤其是卤水的侧向漫流, 使野外观测渗流量偏高, 最大值可达 8.59 cm·d⁻¹, 实验结果远远超出设计允许值, 这直接影响到二期盐田建设的可行性. 因此在完成 30 个钻孔渗水实验工作后, 提出改用原位渗透实验^[4]. 该实验模拟工程建设的实际情况, 较好地反映了场区土层的垂直渗透性, 该方法的提出对工程建设及今后类似盐田建造具有深远意义.

1 原位渗透实验方法

收稿日期: 2005-12-22 修回日期: 2006-05-29

基金项目: 国家科技攻关项目(No. 2001BA602B-02)

作者简介: 林清华(1978-), 男, 博士研究生; 李长洪(1962-), 男, 教授, 博士生导师

1.1 实验仪器

(1) 采用圆管壁厚为 0.3 cm, $\phi 50$ cm, 高度分别为 200 cm 和 260 cm, 且管内外刷防锈漆两遍, 防止管壁受到腐蚀; (2) 水位测针、温度计.

1.2 实验步骤

原位渗透实验点位于原钻孔渗水实验点附近.

首先, 在实验点附近挖井, 深度至地下水位, 详细描述地层剖面, 并每隔 20 cm 取扰动样测其天然含水量和塑性极限. 然后, 在钢管周边搭设架子, 用人工将钢管贯入预定深度并向管内注入卤水, 保持 100 cm 水头, 测定并记录原始水位和水温, 塑料管上用塑料膜密封防止卤水蒸发. 每天定时观测各实验点处渗流量随时间变化的结果, 直至渗流量趋于稳定. 该法与上述塑料管渗水实验不同之处在于: 塑料管渗水实验管内无一残留土柱, 而原位渗透实验管内仅除去盐壳部分, 残留有 150 cm 土柱, 如图 1 和图 2 所示.

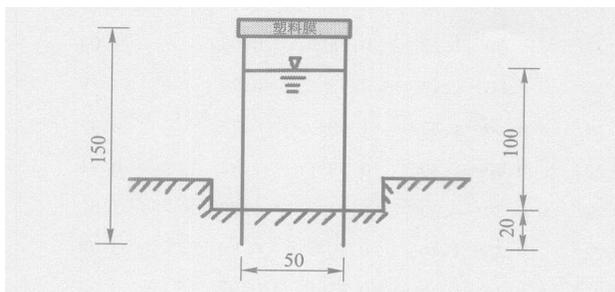


图 1 塑料管渗水实验简图(单位: cm)

Fig. 1 Sketch map of well permeability test (unit: cm)

为了实验更能与实际相接近, 实验装置共设置 24 个渗透实验点, 测试结果如表 1 所示.

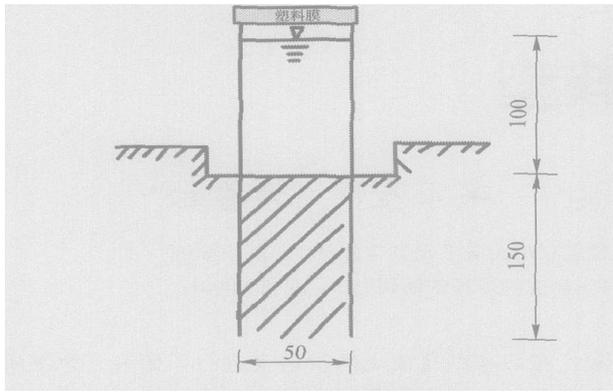


图 2 原位渗水实验简图(单位:cm)

Fig.2 Sketch map of in-situ permeability test (unit:cm)

表 1 渗透实验测试结果统计表

Table 1 Results of permeability test

实验点 编号	实验深 度/m	卤水侵入 深度/m	地下水位 深度/m	稳定日渗水量/ (mm·d ⁻¹)
1#	0.20~1.50	0.70	0.85	0.31
2#	0.20~1.40	0.55	0.90	1.25
3#	0.20~1.40	0.68	1.00	2.35
4#	0.20~1.40	0.56	1.00	2.23
5#	0.00~1.50	0.89	1.56	0.55
6#	0.00~1.50	0.88	1.60	1.78
7#	0.00~1.40	0.45	1.45	0.79
8#	0.00~1.00	0.63	0.60	0.98
9#	0.30~1.50	1.02	0.66	0.61
10#	0.30~1.40	0.90	0.60	0.39
11#	0.30~1.50	0.87	1.72	1.56
12#	0.20~1.50	0.48	1.70	2.45
13#	0.00~1.20	0.69	1.70	0.35
14#	0.20~1.30	1.00	2.00	3.21
15#	0.00~1.40	0.60	2.03	0.83
16#	0.40~1.50	0.64	2.11	1.27
17#	0.30~1.20	0.75	0.65	1.03
18#	0.00~1.10	0.72	0.78	4.19
19#	0.40~1.30	1.00	0.75	0.47
20#	0.40~1.40	0.59	1.82	0.91
21#	0.30~1.20	0.83	1.70	1.33
22#	0.35~1.40	0.70	0.80	3.78
23#	0.30~1.20	0.81	0.97	0.24
24#	0.00~1.40	0.73	1.08	2.15

表 1 为渗透实验测试结果统计表. 从表中可以看出:

(1) 盐田底板渗水量普遍较小, 最大日水位降不超过 $5\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 平均渗水量仅为 $1.01\sim$

$2.00\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$.

(2) 日水位降大小与地层岩性、地下水位埋深、土柱厚度有关. 从野外记录可以看出, 粉质粘土层较厚且土质均匀无夹层时日水位降小, 而粉土层较厚时日水位降大. 在其他条件相同的情况下地下水位埋藏较深者, 日水位降较大.

(3) 实验深度亦是影响渗漏量的重要因素. 当钢管贯入深度较小时, 卤水的垂直渗透路径较短, 卤水渗出管底后则会沿地层的水平方向渗漏, 致使渗漏量较大. 实验结果表明, 贯入深度大的钢管日渗漏量小, 贯入深度小的钢管日渗漏量大.

(4) 卤水渗漏稳定后, 一种情况是未渗入地下水位线以下, 即整个渗水过程在包气带中进行; 另一种情况是卤水下渗补给地下水, 即钢管内卤水浸入深度达到地下水面. 从实验前后的含水量(质量分数)对比情况求出卤水浸入深度(图 3), 结果表明卤水浸入深度绝大多数不超出管底.

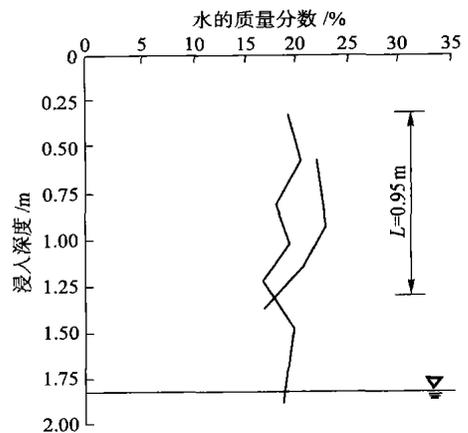


图 3 按含水量求浸入深度示意图

Fig.3 Sketch map of seepage depth calculated according to water content

2 渗透系数模型的建立

为了提供所需的岩土渗透性参数, 通常将野外实验结果代入相应的经验公式中求得渗透系数值^[5]. 对于首次采用原位渗透实验方法计算渗透系数时并没有现成的公式可采用. 下面探讨如何利用野外实验资料来评价土壤的渗透性能, 即渗漏过程中各个变化量之间的关系式.

2.1 数学模型建立的条件

当卤水浸入深度未过压入钢管下端时, 水的渗透流动视为一维运动; 当湿润峰面超出钢管下端时将产生侧向漫, 此时水流运动需考虑各向异性的影响. 由野外实验资料可知, 场区内各原位渗透实验

处卤水浸入深度绝大多数未超出钢管下端, 因而此处将卤水的渗流视为一维运动进行研究. 建立数学模型其基本假设条件如下:

(1) 卤水视为不可压缩的均匀水体, 水流运动服从达西定律^[5];

(2) 剖面上土层的渗透性是均匀的, 毛细水上升高度不随时间改变;

(3) 渗流区域内土层为均质各向同性的, 影响范围局限于土柱内.

基于上述假设, 可将场区内卤水入渗问题概化为一维非稳定流问题.

2.2 模型的建立

无论是卤水渗入地下水还是未达到地下水位线, 卤水的运动均可按潜水含水层考虑^[6]. 就潜水含水层来说, 一维非稳定流应满足下述微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(KH \frac{\partial H}{\partial z} \right) = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式中, 当潜水面上升时 μ 为饱和差, 下降时为给水度; K 为渗透系数; 坐标轴选在地表, z 轴向下为正. 这是一个二阶非线性偏微分方程, 求解解析困难. 由于 ΔH 值相对于整个含水层厚度值较小, 故 H 可近似当作常数考虑, 上式变为:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{KH}{\mu} \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \quad (2)$$

令

$$\alpha^2 = \frac{KH}{\mu} \quad (3)$$

根据实验区实际情况, 可简化为下述模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} = \alpha^2 \frac{\partial^2 H}{\partial z^2}, & z > 0, t > 0 \\ H|_{t=0} = 0 \\ H|_{z=0} = f(t) \end{cases} \quad (4)$$

2.3 模型的求解

首先对方程两端对变量 t 取 Laplace 变换^[7], 得:

$$\frac{d^2 H(z, p)}{dz^2} = \frac{p}{\alpha^2} H(z, p) \quad (5)$$

再对式(4)中 $H|_{z=0} = f(t)$ 取同样的变换:

$$H(z, p)|_{z=0} = F(z, p) \quad (6)$$

上式通解为:

$$H(z, p) = c_1 e^{-\frac{\sqrt{p}}{\alpha} z} + c_2 e^{\frac{\sqrt{p}}{\alpha} z} \quad (7)$$

由上式可知, 当 $z \rightarrow \infty$ 时, $H(z, t)$ 有界, 所以 $H(z, p)$ 有界, 故 $c_2 = 0$, 再由式(6)可得 $c_1 = F(p)$, 从而得:

$$H(z, p) = F(p) e^{-\frac{\sqrt{p}}{\alpha} z} \quad (8)$$

最后, 由拉氏变换的卷积积分性质, 得:

$$H(z, t) = \frac{2 \alpha f(t) (4 \alpha^2 t^{\frac{3}{2}} - t^{\frac{1}{2}}) e^{(-z^2/4\alpha^2 t)}}{\sqrt{\pi z}} \quad (9)$$

因为 $f(t) = H(z, t)$, 上式变为:

$$\frac{2 \alpha (4 \alpha^2 t^{\frac{3}{2}} - t^{\frac{1}{2}}) e^{\frac{z^2}{4\alpha^2 t}}}{\sqrt{\pi z}} - 1 = 0 \quad (10)$$

两边求导得:

$$K = \frac{1 - 2t^2 + \sqrt{4t^2 z^4 + 20t z^2 + 1}}{24tL_w} \quad (11)$$

式中, K 为渗透系数, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; t 为观测时间, s ; L_w 为湿润峰面的深度, cm ; z 为卤水入渗影响深度, cm . 按上式将各原位渗透实验点的渗透系数计算结果如表 2.

表 2 原位渗透实验渗透系数计算结果

Table 2 Results of permeability coefficient by insuit permeability test

布置 点号	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	布置 点号	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	2.99×10^{-7}	7	3.49×10^{-6}
2	4.09×10^{-6}	8	1.69×10^{-6}
3	2.23×10^{-6}	9	5.33×10^{-8}
4	1.47×10^{-6}	10	1.88×10^{-7}
5	5.55×10^{-6}	11	3.15×10^{-6}
6	3.96×10^{-6}	12	1.36×10^{-7}

2.4 模型验证

实验现场卤水渗入分为两种情况: 一是卤水入渗未及地下水位; 二是卤水入渗补给地下水.

当卤水入渗未及地下水位时, 根据达西定律 $K = V/I$, 其中 V 采用现场所测的日水位降, 计算土层渗透系数. 式(11)反映出的是入渗初期和稳定后的平均渗透能力, 而根据达西定律所计算的是稳定后的渗透能力, 因此前者高一些, 但对于渗透系数来说相差并不是很大.

当卤水浸入深度超过地下水水面时, 无法确定卤水入渗影响深度, 此时宜采用下述公式计算^[4]:

$$K = 1.157 \times 10^{-6} \frac{Q(l + l' - z)}{(h + z)} \quad (12)$$

式中, K 为渗透系数, $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$; Q 为现场所测的日水位降, $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$; l 为塑料管内土柱长度, cm ; l' 为塑料管下端埋深, 即实验深度下界值, cm ; z 为稳定地下水埋深, cm ; h 为塑料管内卤水高度, cm .

通过计算可知, 两种计算公式所得结果数量级

相同,因此式(11)完全可以用来评价场区土层的渗透性能.

3 结论

(1) 在野外将近两年的岩土工程勘察、设计和重点性收集实验资料基础上,对扎布耶盐湖盐渍土进行了原位渗透实验.将钢管垂直击入盐田底板 150 cm 深,管内仅除去盐壳,管内有残留土柱,并注入 100 cm 深的卤水,较符合该盐田实际运营机制.原位渗透实验方法是更好地评价场区土层垂直渗透性能的有效手段.

(2) 通过对原位渗透实验和初步建立数学模型,得到了渗透系数与时间、卤水入渗影响深度之间

的关系式,为原位渗透实验在盐田工程中的广泛使用提供了可靠的分析方法.

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国建设部. GB50021—2001 岩土工程勘察规范. 北京:中国建筑工业出版社, 2002: 82
- [2] 徐攸在. 盐渍土地基. 北京:中国建筑工业出版社, 1993: 32
- [3] 郑绵平. 青藏高原盐湖. 北京:北京科学技术出版社, 1989: 84
- [4] 林清华, 张永生. 盐渍土渗透性初步研究. 勘察科学技术, 2005(3):47
- [5] 陈仲颐. 土力学. 北京:清华大学出版社, 1992: 29
- [6] 薛禹群. 地下水动力学. 北京:地质出版社, 1979: 18
- [7] 南京学院数学教研组. 数理方程. 北京:高等教育出版社, 1999: 22

Seepage model of salt field

LIN Qinghua¹⁾, LI Changhong¹⁾, WU Changqun²⁾, ZHANG Jiliang¹⁾, ZHANG Yongsheng³⁾, FANG Xuesong⁴⁾

1) Civil and Environment Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Beijing Jiangong Jingjing-Dafang Engineering Construction Supervision Co., Beijing 100037, China

3) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

4) Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China

ABSTRACT The permeability of saline soil in Zabuye salt lake in China was studied based on the analysis of difference between the results of saline soil in-site test and indoor seepage test. In order to make the tested values of permeability coefficient more accurate, an in-site permeability test method was proposed to evaluate the vertical permeability of soil. The formula for calculation of permeability coefficient was established from a mathematical model. An engineering application demonstrated the applied testing method and the formula were reliable.

KEY WORDS salt field; saline soil; permeability testing; mathematical model