

IFCO BAT 系统测试地基孔压及原位渗透系数

卢鹏程¹,柯 瀚²

(1. 丽水学院 建筑工程系,浙江 丽水 323000 2. 浙江大学 建筑工程系,浙江 杭州 310027)

摘 要: 总结介绍了 IFCO BAT 系统测试地基孔隙水压力和原位渗透系数的理论,及其在吹填土大型模型槽试验中的应用。实践证明,IFCO BAT 系统的渗流分析理论及其渗透系数求取是正确、合理的,有很高的工程使用价值。

关键词: IFCO BAT 系统;现场测试;孔隙水压力;地基原位渗透系数;渗流分析理论;流阻

中图分类号: TU413 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-8798(2005)02-0122-04

Theories for in-situ testing of pore pressure and permeability by IFCO BAT system and its applications

LU Peng-cheng¹, KE Han²

(1. Department of Civil Engineering and Architecture, Lishui University, Lishui 323000, China;

2. Department of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The theories for in-situ testing of pore pressure and permeability by IFCO BAT system are generally introduced. The applications in model test of dredged clay show that the theories are correct and the in-situ testing results are accurate, and IFCO BAT-system is valuable for geotechnical engineering.

Key words: IFCO BAT system; in-situ test; pore pressure; in-situ permeability of soil; theory of permeability; resistance of water-flow

土的渗透性和土中渗流对土体的强度和土体变形有重要影响,由地下水条件影响土体性质而引起的工程问题是岩土工程师必须面对的问题。对于诸如堤坝或地基的沉降估算、基坑开挖降水设计、地基和边坡的稳定分析和垃圾填埋场的环境分析等,地下水条件起着控制性的影响,分析这些问题必须详细、准确地了解地下水的排水条件和土体渗透性等。土体的渗透系数是直接反映土体渗透性的参数,是岩土工程计算分析或设计中的关键参数,它们的准确获取有重要的工程实际意义。

国内 IFCO BAT 系统测试地基孔压及原位渗透系数的应用极少,尚无人系统总结介绍该系统的测试理论。本文将总结前人研究成果,系统介绍 IF-

CO BAT 系数测试地基孔压及原位渗透系数的理论,以及其在吹填土模型试验中的应用情况。

1 IFCO BAT 渗透系数测试系统

IFCO BAT 渗透系数测试系统主要由滤头、玻璃容器、电子压力传感器、控制系统和套管等设备组成。测试简单、方便、速度快。根据地下孔隙水流,IFCO BAT 系统测试渗透系数方法可分为抽水试验和压水试验两种。当玻璃容器内的压力小于地下孔隙水压力时,由于压力差,周围土体中孔隙水将向滤头方向发生渗流,并通过滤头进入 BAT 系统的玻璃容器内,这种情况称为抽水试验;当玻璃容器内的压力大于地下孔隙水压力时,同样由于压力差缘故,

收稿日期: 2004-11-05

作者简介: 卢鹏程(1975—),男,浙江丽水人,讲师,主要从事建筑工程学科的教学与科研。

玻璃容器内的水将通过滤头向四周土体渗流,这种情况称为压水试验。BAT 系统与土体之间的压力差使得土体中发生渗流,测量渗流过程中的容器内压力变化情况,可以估算土体的原位渗透系数。

2 孔隙水压力测试原理

读测的压力稳定值,减去现场的大气压力,再加上滤头水柱压力值,可以得到地基孔隙水压力:

$$p_{gr} = p_b - p_a + p_h$$

式中: p_{gr} 为孔隙水压力, Pa; p_b 为实测绝对压力, Pa; p_a 为大气压力, Pa; p_h 为滤头水柱压力值, Pa, IFCO BAT 系统取值为 2.15 kPa。

3 原位渗透系数测试理论

由于事先给玻璃容器抽取真空或者给予注水加压,因此,初始阶段玻璃容器内的压力和土体孔隙水压力之间存在压力差。该压力差将使孔隙水渗流并通过滤头流入玻璃容器内(抽水试验)或玻璃容器内的水通过滤头深入周围土体中。因此,通过玻璃容器内的压力变化曲线及玻璃容器内水的体积变化可以求取地基的原位水平渗透系数。

3.1 问题的数学模型

由于测试系统内部压力与其周围土体的孔隙水压力不相等,土体中(或玻璃容器内)的水将向压力低的方向发生流动,如图 1 所示。这一过程可以描述

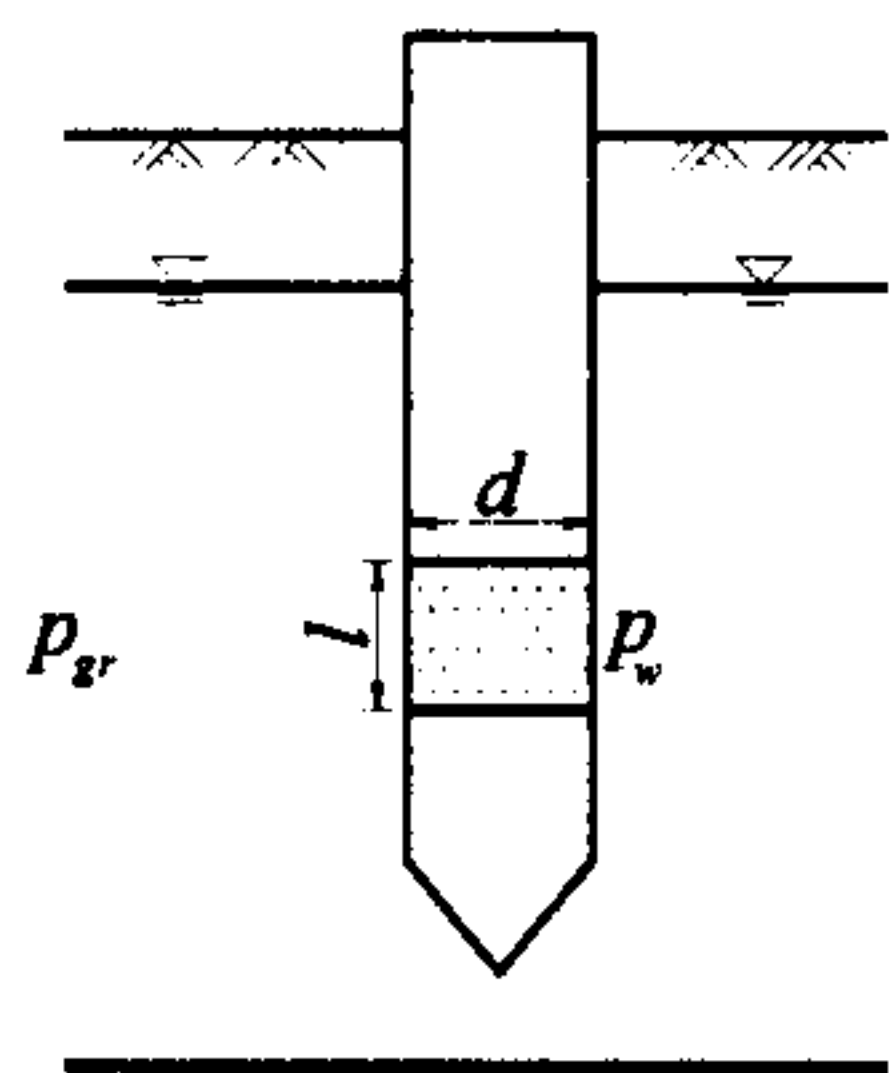


图 1 原位渗透试验示意图

为如下的数学表示形式。土体中孔隙水的流量为:

$$Q = Fk(p_{gr} - p_w) \quad (1)$$

式(1)中: Q 为地下水流量, m^3/s ; k 为土体渗透系数, m/s ; p_{gr} 为土中孔隙水压力 Pa; p_w 为滤头壁处的压力, Pa; F 为水流函数,由式(2)计算得到:

$$F = \frac{2\pi l}{\ln\left(\frac{l}{d} + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{d}\right)^2}\right)} \quad (2)$$

由于水流入或流出玻璃容器,玻璃容器内的空气体积和压力将发生变化,空气体积的变化等于流

入或流出水的体积。玻璃容器内空气的压力与体积关系满足 Boyle 状态方程:

$$p_i V_i = C \quad (3)$$

式(3)中: p_i 为 t 时刻对应的容器内空气压力, Pa; V_i 为 t 时刻对应的容器内空气体积, m^3 ; C 为常数。

当 $p_{gr} \geq p_w \geq p$ 或 $p_{gr} \leq p_w \leq p$ 时,滤头壁处的压力 p_w 可用玻璃容器内的压力 p_i 表示:

$$p_w = g(p_i) \quad (4)$$

将式(4)代入式(1),可得:

$$P\left(V_0 - \int_{t_0}^t Fk(p_{gr} - g(p_i))dt\right) = p_0 V_0 \quad (5)$$

$$\text{同时: } V_w p_i + v_{w \text{ int}} p_i = p_0 V_0 \quad (6)$$

式(6)中 V_w 为水体积变化, m^3 ; $V_{w \text{ int}}$ 为容器内初始水体积, m^3 。

式(5)即为 IFCO BAT 系统测试土体原位渗透系数的渗流控制方程,式(6)为渗流过程中玻璃容器内的水体积的变化。求解式(5)就可得到玻璃容器内的压力 p_i 与土体渗透系数的关系,从而可以根据玻璃容器内的压力变化曲线估算土体的原位渗透系数。

3.2 数学模型的求解

求解式(5)的关键在于确定压力 p_w 与 p_i 的关系,即 $g(p_i)$ 。下面将就 p_w 与 p_i 之间不同关系下容器内压力 p_i 和渗透系数 k 及时间 t 关系进行讨论。

(1)N-N 基本假设:①滤头与玻璃容器之间的连接阻力为零;②忽略滤头及容器内的水柱影响。当压力差 $p_{gr} - p_0$ 较小时,得玻璃容器内压力随时间变化的近似解:

$$p_i = p_{gr} - (p_{gr} - p_0) \exp\left(-\frac{kFp_{gr}t}{V_0}\right) \quad (7)$$

(2)L-N 基本假设:①滤头与玻璃容器之间的连接阻力为线性;②忽略滤头及容器内的水柱影响。根据初始条件(当 $t=0$ 时, $p_i = p_0$),得:

$$k_{\text{eff}} = \frac{V_0}{Fp_{gr}t} p_0 \left(\frac{1}{p_0} - \frac{1}{p_i} + \frac{1}{p_{gr}} \ln \left(\frac{p_0 - p_{gr}}{p_0} - \frac{p_i}{p_i - p_{gr}} \right) \right) \quad (8)$$

土体的渗透系数为:

$$k = \frac{k_{\text{eff}} R_l}{R_l - Fk_{\text{eff}}} \quad (9)$$

(3)NL-N 基本假设:①滤头与玻璃容器之间的连接阻力为非线性;②忽略滤头及容器内的水柱影响。Torstensson^[1]通过试验研究发现针两端压力差和流量之间的关系是非线性的,压力差和流量之间的关系曲线如图 2 所示。

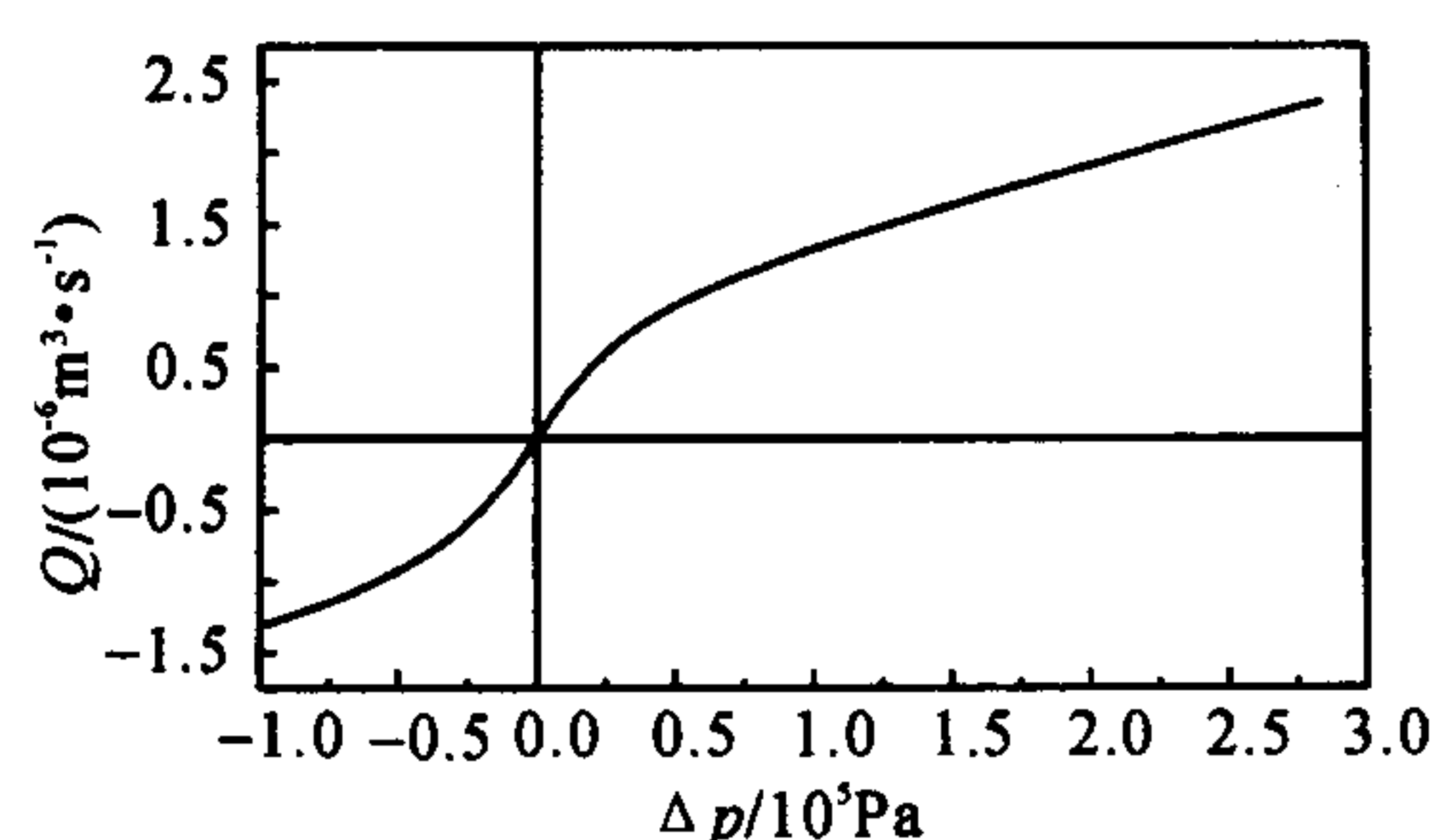


图 2 BAT 系统针头中水流动特性(Torstensson^[1])

可以通过数值方法求得 p_t 随时间和渗透系数的变化情况。

(4)N-C 基本假设:①滤头与玻璃容器之间的连接阻力为零;②考虑滤头及容器内的水柱影响。根据初始条件:当 $t=0$ 时, $p=p_0$, 可得玻璃容器内空气压力和渗透系数 k 之间的关系式:

$$k = \frac{V_0}{F p_{gr} t} p_0 \left(-K_1 \ln \left(\frac{p_t}{p_0} \right) + K_2 \ln \left(\frac{p_t - a_1}{p_0 - a_1} \right) + K_3 \ln \left(\frac{p_t - a_2}{p_0 - a_2} \right) \right) \quad (10)$$

(5)L-C 基本假设:①滤头与玻璃容器之间的连接阻力为线性;②考虑滤头及容器内的水柱影响。根据初始条件(当 $t=0$ 时, $p_t=p_0$), 得:

$$k_{eff} = \frac{V_0}{F p_{gr} t} p_0 \left(-K_1 \ln \left(\frac{p_t}{p_0} \right) + K_2 \ln \left(\frac{p_t - a_1}{p_0 - a_1} \right) + K_3 \ln \left(\frac{p_t - a_2}{p_0 - a_2} \right) \right) \quad (11)$$

因此,土体的渗透系数为:

$$k = \frac{k_{eff} R_l}{R_l - F k_{eff}} \quad (12)$$

(6)NL-C 基本假设:①滤头与玻璃容器之间的连接阻力为非线性;②考虑滤头及容器内的水柱影响。结合初始条件($t=0, p_t=p_0, V_t=V_0$)用数值方法可计算容器内的压力随时间和渗透系数的变化。

3.3 算例分析

以上得到了 6 种不同情况下 IFCO BAT 系统的玻璃容器内的压力和水体积与渗透系数及时间的变化关系,现通过算例分析讨论各因素对容器内的压力和水体积与渗透系数及时间的变化关系的影响。计算中采用的参数如下:容器内初始水体积为 $V_{w \text{ int}}$;容器内空气压力初始压力 $p_t=0.6 \text{ Pa}$;容器容积 $V_t=35.4 \text{ mL}$;土体中的孔隙水压力 $p_{gr}=1.2 \text{ Pa}$;土体渗透系数 $k=1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$;线性流阻参数 $R_l=2.89 \times 10^{-11} \text{ m}^5/(\text{N} \cdot \text{s})$;非线性流阻参数 $R_{n/1}=5.1 \times 10^{-12} \text{ m}^5/(\text{N} \cdot \text{s})$, $R_{n/2}=6.15 \times 10^{-7} \text{ m}_3/\text{s}$, $R_{n/3}=3.88 \times 10^{-5} \text{ m}_2/\text{N}$;滤头水柱校正值 $p_h=2.15 \text{ kPa}$ 。根据上述计算参数,分别计算并比较 6 种不同情况下玻璃容器内的压力和水体积随时间的变化。

图 3 和图 4 分别为 6 种不同情况下,IFCO BAT 系统中玻璃容器内的空气压力与水体积变化情况的对比。从算例计算分析中可知,针头对流经水的流阻对玻璃容器内的空气压力 p_t 和容器内水体积的变化影响较大。考虑流阻时,容器内的空气压力随时间的变化速度明显减慢,同样,容器内水体积变化速度也是明显减慢。故在理论分析现场测试曲线时,如果不考虑针头对流经水的流阻,将低估地基的原位渗透系数,造成测试结果与真实值之间的差异。在初始压力差不很大的情况下,线性流阻对容器内空气压力和容器内水体积变化的影响跟非线性流阻对容器内空气压力和容器内水体积变化的影响相差不大。因此,在现场测试中,只要通过认为控制 IFCO BAT 系统的玻璃容器中初始压力,使其与地基孔隙水压力差不过大,这是分析时可以不考虑针头对流经水的流阻的非线性,根据线性流阻分析实测压力变化曲线就能比较准确地得到地基的渗透系数,这样可以降低理论分析的难度。

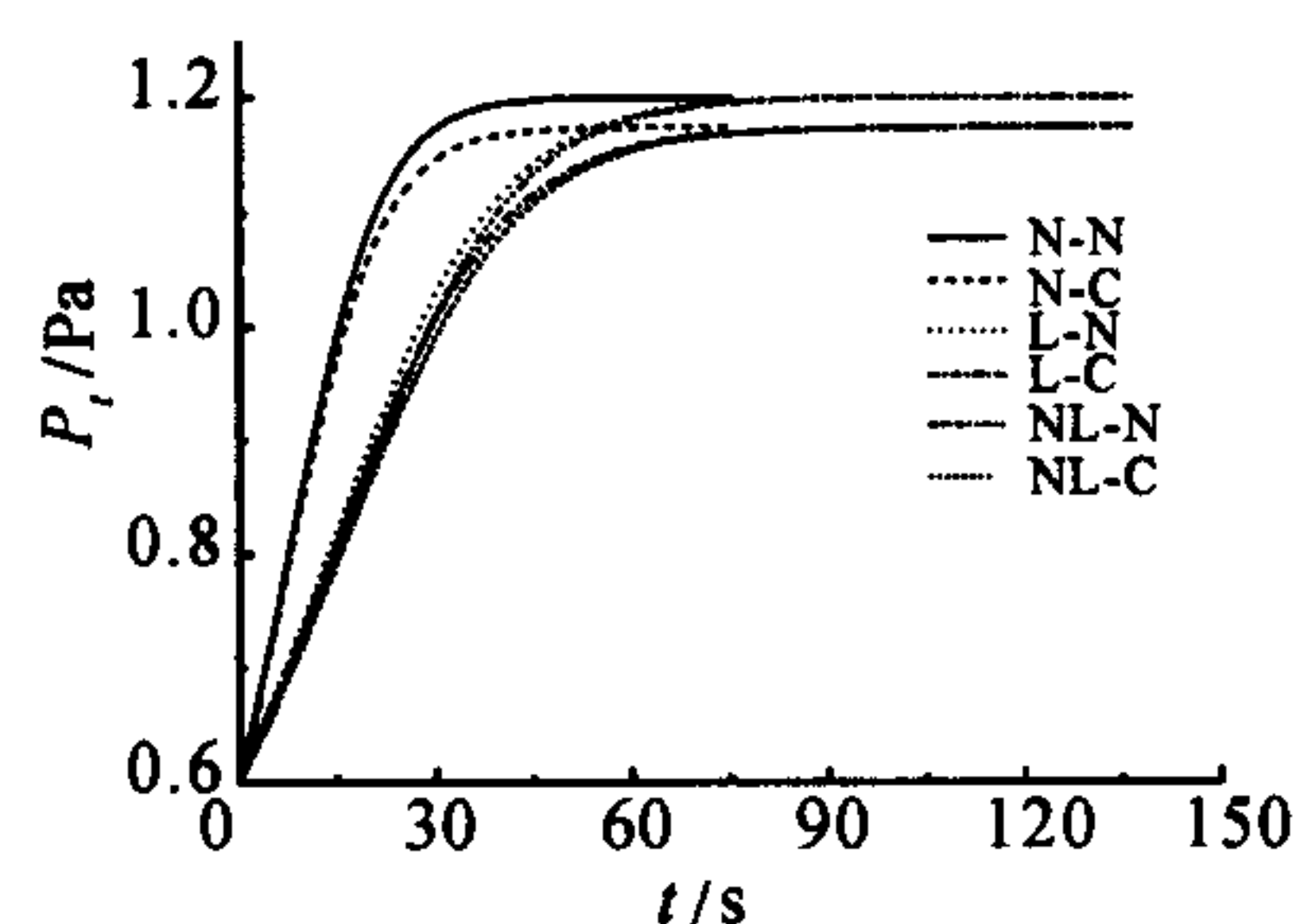


图 3 容器内压力随时间变化曲线

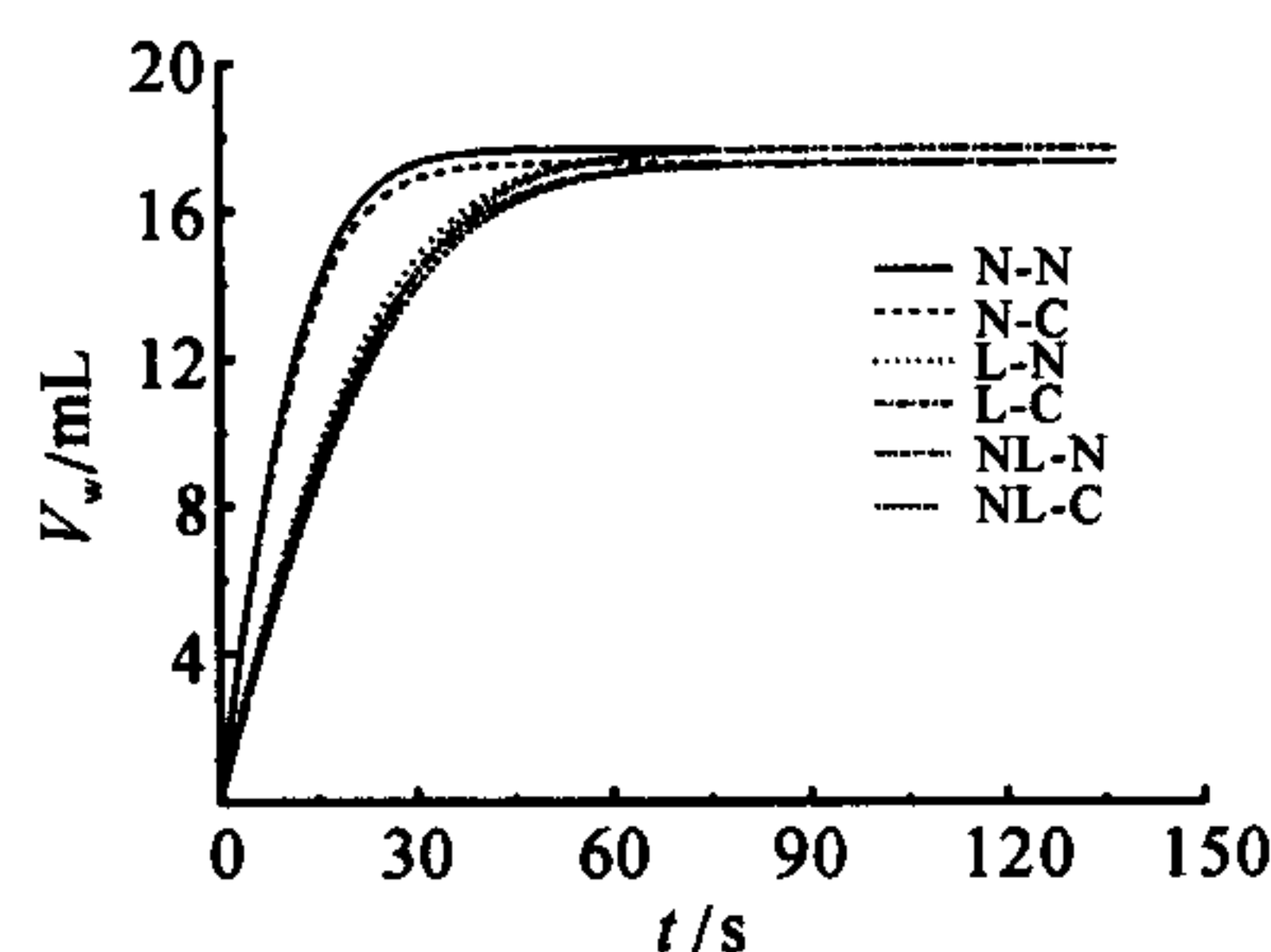


图 4 容器内水体积随时间变化曲线

IFCO BAT 系统中滤头和玻璃容器内水柱对容器内的空气压力和水体积变化有影响。考虑滤头和玻璃容器内水柱的影响,玻璃容器内的空气压力和水体积变化速度变缓,开始阶段影响不大,随着时间的推移,水柱的影响表现得越来越明显。由于水柱的影响,玻璃容器内的最终空气压力值和水体积小于不考虑水柱影响时的最终压力值和水体积,它们之间的差值就

是渗流完成时滤头和玻璃容器内的水柱高度。忽略水柱的影响,也将低估地基的渗透系数。

4 模型试验应用

吹填淤泥在自重和真空负压作用下的固结有其特性,一般产生较大的固结沉降。设计大型模型槽对吹填淤泥在真空负压作用下固结特性进行试验研究。利用 IFCO BAT 系统可以测试吹填淤泥在固结过程中的渗透系数、孔压变化,因此,联合 IFCO BAT 系统和大型模型试验槽,对吹填淤泥在真空作用下的固结性状进行研究,试验装置如图 5 所示。

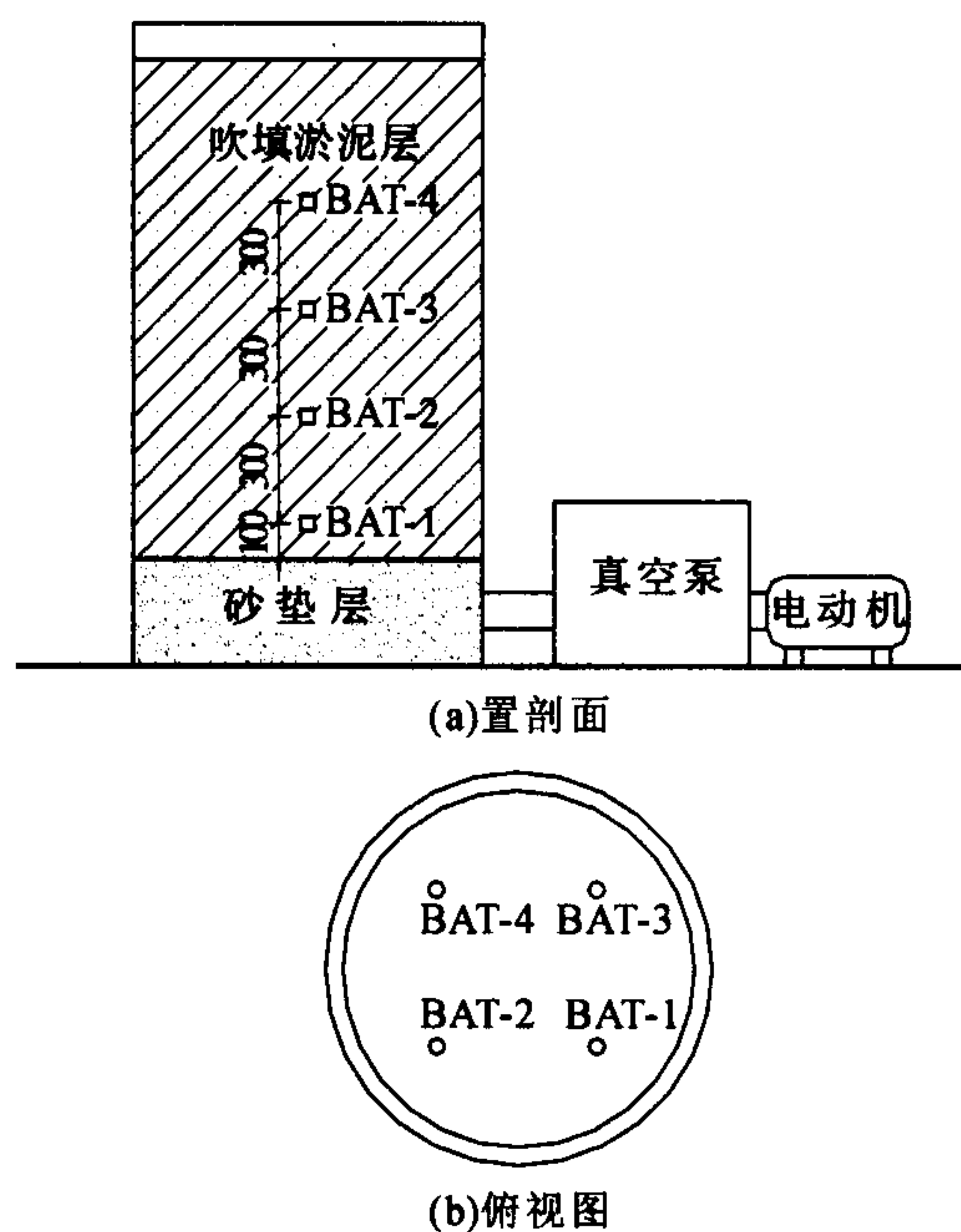


图5 模型试验槽示意图

模型试验槽高 1.8 m, 直径 1.0 m, 底部真空压力 -9.81 kPa 。土样用淤泥加水搅拌均匀, 初始高度 1.7 m, 初始孔隙比 5.0, 土颗粒相对密度 2.71。试验槽内放置了 4 个 IFCO BAT 探头(位置为图 5 所示), 各点距砂垫层顶面分别为: 0.15 m (BAT-1)、0.45 m (BAT-2)、0.75 m (BAT-3) 和 1.05 m (BAT-4), 测试土中的孔隙水压力和土的渗透系数。

图 6 和图 7 分别为 BAT-2 和 BAT-3 IFCO BAT 系统测试的压力曲线图和计算分析的压力曲线, 计算曲线和实测曲线符合程度较好, 说明 IFCO BAT 渗透系数测试理论比较合理, 能够较好地模拟实际测试过程中容器内压力和水体积的变化。由图 8 和图 9 可知, 孔隙水压力随着时间不断减小, 渗透系数也是如此。由于自重和自由水的作用, 孔隙水压力随高度分布情况如同一弓字形, 孔隙水压力底部

消散速度明显比上部快, 说明在负压和自重作用下吹填土的固结是从下而上的。底部的渗透性系数比上部的渗透系数小, 这是因为底部固结发展速度快, 有效应力大于上部的有效应力。

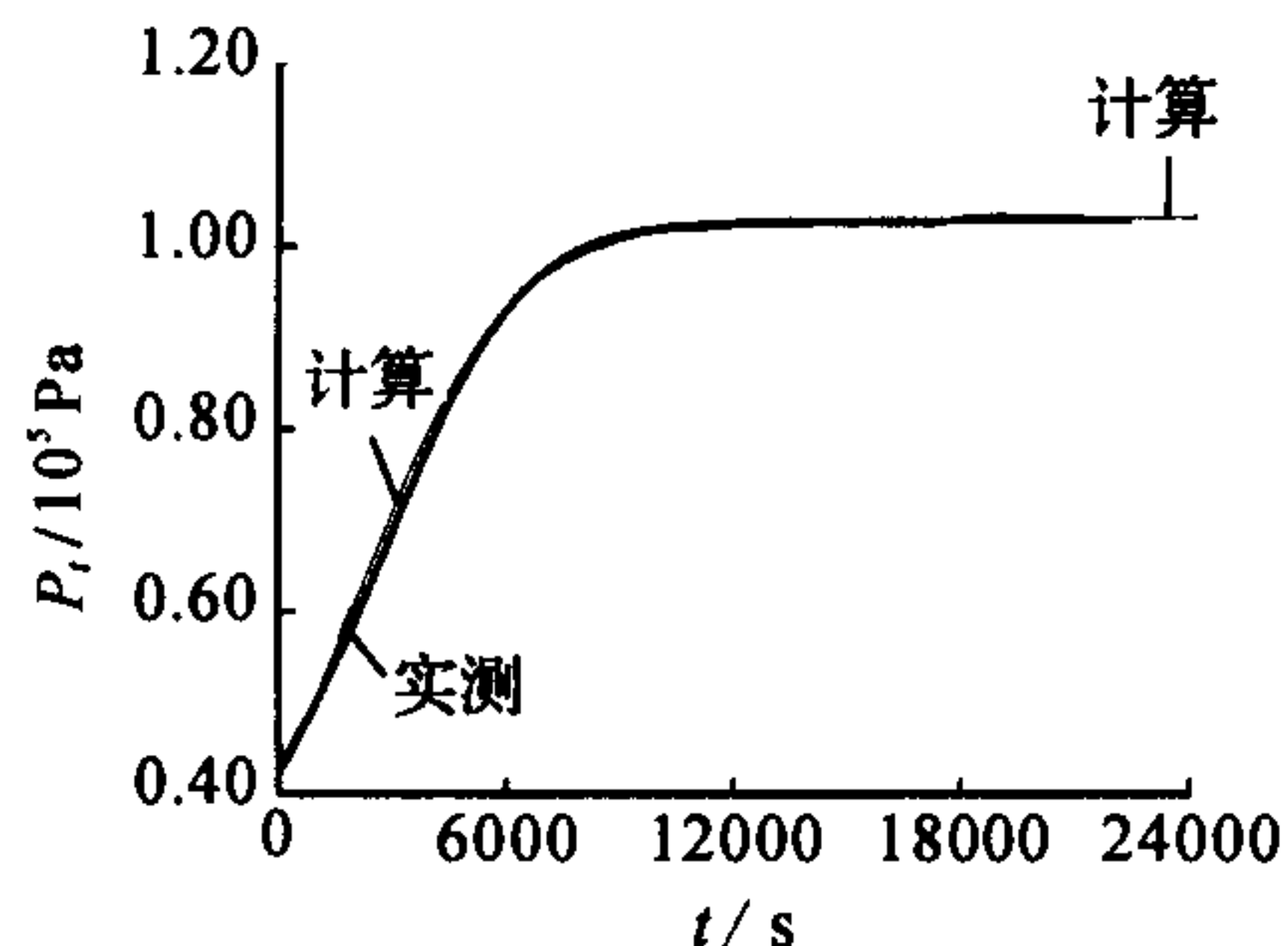


图6 BAT-2 渗透试验压力曲线
(52 d, $k=3.92 \times 10^{-9} \text{ m/s}$)

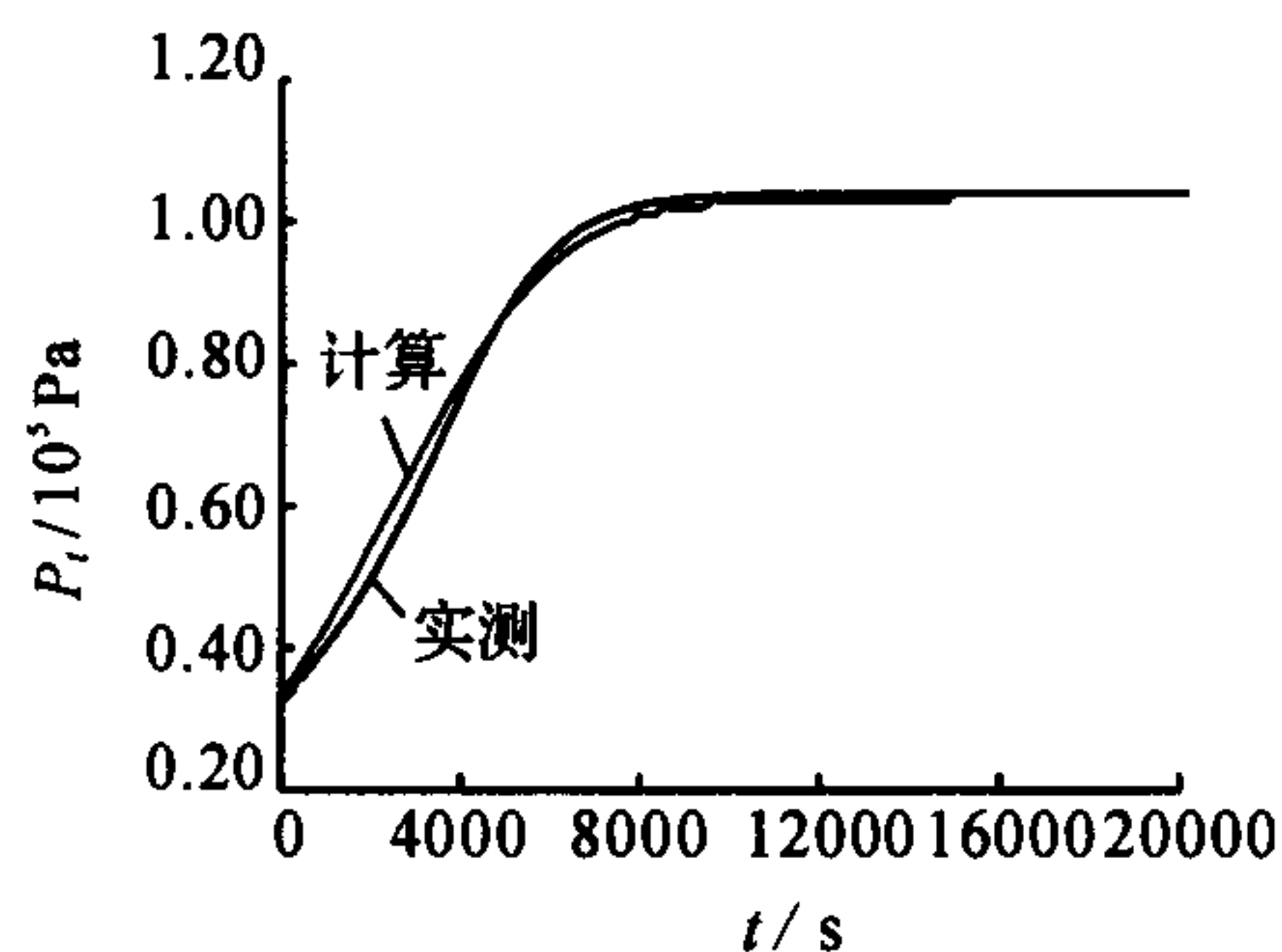


图7 BAT-3 渗透试验压力曲线
(64 d, $k=4.08 \times 10^{-9} \text{ m/s}$)

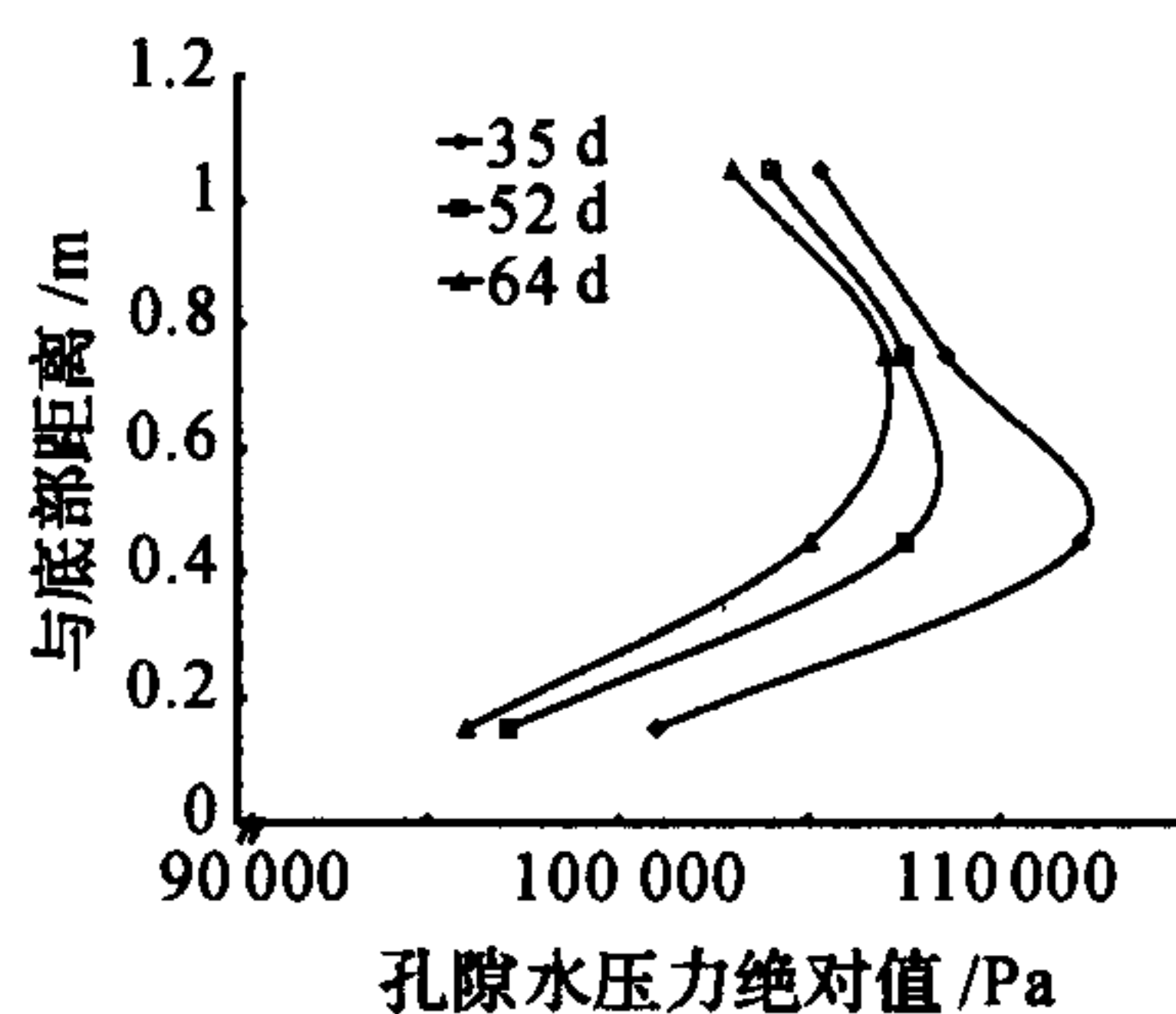


图8 孔隙水压力随时间变化图

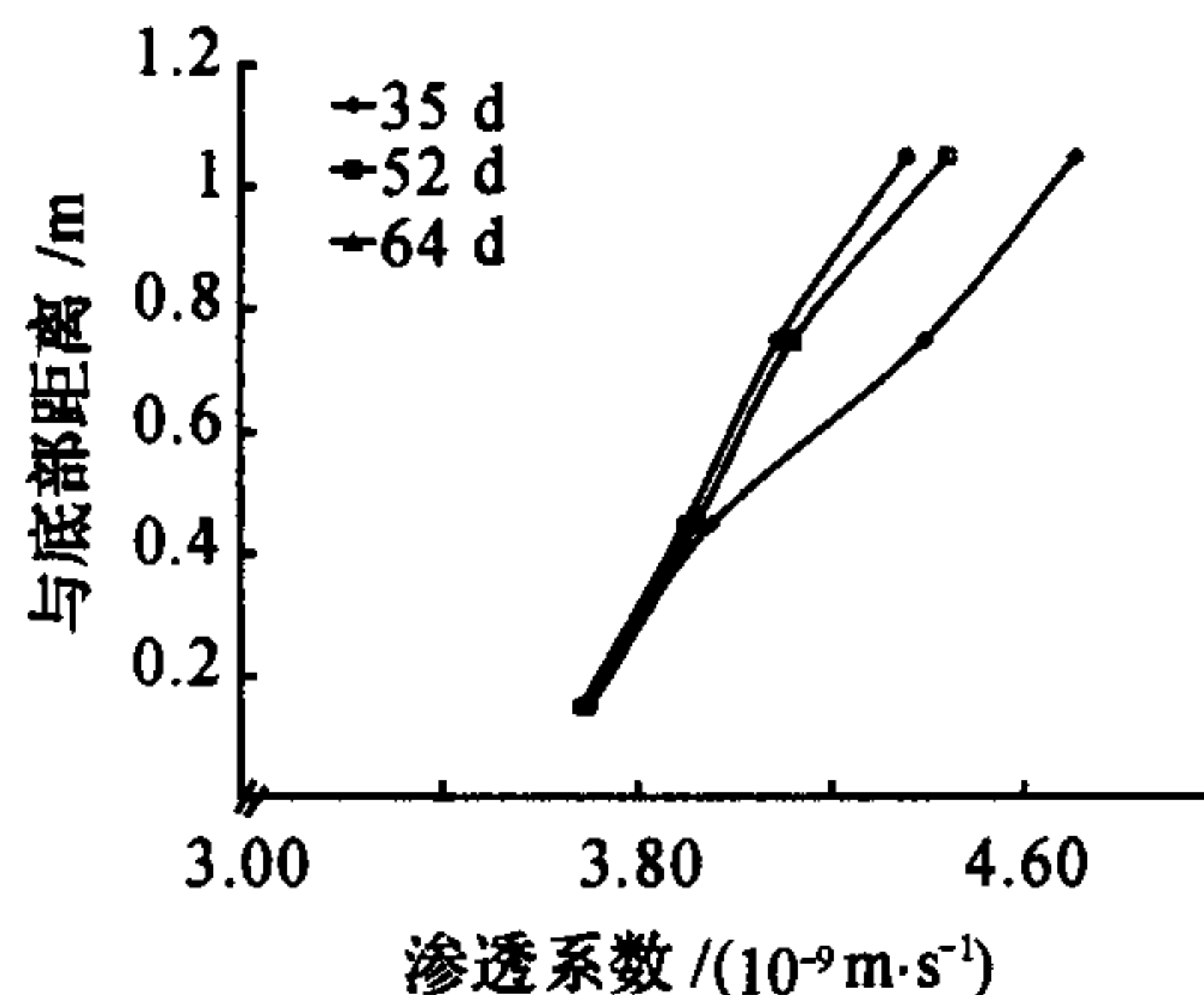


图9 渗透系数随时间变化

(下转第 130 页)