

混凝土室内及原位渗透系数检测方法的现状分析与探究

高宏志

中国水电基础局有限公司 天津 301700

【摘要】：渗透系数是混凝土防渗性能中的重要指标，工程中常根据渗透系数设计值进行混凝土室内试验和现场原位试验。本文已混凝土防渗墙为例，指出目前在设计指标、室内及现场原位渗透检测中，在混凝土结构尺寸、试验方法、计算公式及渗流方式等方面均存在差异，势必产生检测结果的偏差，而均以相同的设计标准进行评判，尚缺乏合理性。本文对混凝土室内及原位渗透系数检测方法的现状进行了分析，从渗流理论和施工实践两方面入手分析混凝土渗透系数测值偏差产生的原因，并通过构建理想的渗流模型，推导了“混凝土中心钻孔注（压）水渗透系数试验公式”，以求使混凝土室内及原位渗透系数检测更具一致性，以供同行们参考和探讨。

【关键词】：混凝土室内；原位渗透系数；检测方法；分析；探讨

前言

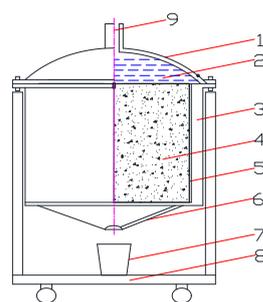
渗透系数是混凝土防渗性能中的重要指标，工程中常根据渗透系数设计值进行混凝土室内试验和现场原位试验。本文已混凝土防渗墙为例，指出目前在设计指标、室内及现场原位渗透检测中，在混凝土结构尺寸、试验方法、计算公式及渗流方式等方面均存在差异，势必产生检测结果的偏差，而均以相同的设计标准进行评判，尚缺乏合理性。本文对混凝土室内及原位渗透系数检测方法的现状进行了分析，从渗流理论和施工实践两方面入手分析混凝土渗透系数测值偏差产生的原因，并通过构建理想的渗流模型，推导了“混凝土中心钻孔注（压）水渗透系数试验公式”，以求使混凝土室内及原位渗透系数检测更具一致性，以供同行们参考和探讨。

1. 混凝土室内渗透性试验

1.1 渗透系数试验

无论是刚性还是塑性混凝土，其室内渗透系数试验都是根据达西定律原理进行的。刚性及塑性混凝土室内渗透系数检测可分别根据《水工混凝土试验规程》（SL352-2006 中全级配混凝土）和《水工塑性混凝土试验规程》（DL/T5303-2013）中的渗透系数检测方法进行。

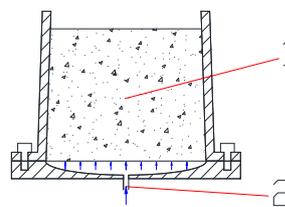
在 SL352-2006 中，刚性混凝土渗透系数测定仪器由水压稳定系统和试件箱密封容器两部分组成，水压稳定系统可供给试件箱较高的额定水压，试件箱容器下设有收集和测量试件渗出水量的容器（见图 1），试件尺寸为 $\phi 450\text{mm} \times 450\text{mm}$ 或 $\phi 300\text{mm} \times 300\text{mm}$ 圆柱体。试验按照规范进行，试件渗水稳定后，渗透系数计算公式为“ $K=QL/AH$ ”（ K -混凝土渗透系数， m/s ； Q -通过混凝土的平均流量， m^3/s ； A -试件截面积， m^2 ； L -试件高度， m ； H -作用水头， m 。）。



1-缸盖；2-水；3-缸筒；4-试件；5-止水缝材料；6-有机玻璃漏斗；7-量杯；8-小车；9-进水阀

图 1：刚性混凝土渗透系数试验示意图

在 DL/T5303-2013 中，塑性混凝土渗透系数试验时，试件可安装在混凝土抗渗仪上，试件尺寸为上口 $\phi 175\text{mm} \times$ 下口 $\phi 185\text{mm} \times$ 高 150mm 的截头圆锥体（见图 2）。试验按照规范进行，试件渗水稳定后，渗透系数计算公式为“ $KT=VL/AHt$ ”（ KT -水温 $T^\circ\text{C}$ 时试件的渗透系数， cm/s ； V -时间 t 秒内的渗透水量， cm^3 ； L -试件渗水高度， 15cm ； H -试件渗水时的水压力， cm ； t -间隔时间， s ； A -试件平均截面积， cm^2 。）。



1-抗渗试件；2-进水口

图 2：塑性混凝土渗透系数试验示意图

由渗透系数公式可知，渗透系数表示在一定水压力下的，水穿透一定尺寸试件时，在试件内部的稳定渗流速度。试验必须产生稳定的渗透水，否则无法计算渗透系数。刚性和塑性混凝土渗

透系数计算公式化简后一致。从公式“ $K=QL/AH$ ”可见，透系数数决定于试件渗水后的流量与水压力两个变量。如果在规定水压下试件始终未产生渗透水，则对于该试件整体而言，其透系数数可视为零。

1.2 抗渗等级试验

无论刚性或塑性混凝土，其抗渗等级试验均可使用混凝土抗渗仪，抗渗仪结构见图2。试验是将6个抗渗试块(上口 $\phi 175\text{mm}$ ×下口 $\phi 185\text{mm}$ ×高 150mm 的截头圆锥体)侧面密封后，安装在抗渗仪上，试验时水从下口渗入，水压从 0.1MPa 开始，每隔8h增加 0.1MPa 水压，直至有部分试件出现渗水。混凝土抗渗等级公式为“ $W=10H-1$ ”(W-抗渗等级；H-6个试件中有规定个数试件渗水时的水压力值，MPa。刚性混凝土根据SL352-2006，H取值以2个试件渗水时的最大水压力表示；塑性混凝土根据DL/T5303-2013，H取值以3个试件渗水时的最大水压力表示。详见规范)。例如刚性混凝土， 1MPa 试验水压下，加压8h，6个试件出现2个试件表面渗水，则 $W=10*1-1=9$ 。

由试验可知，混凝土抗渗等级表示混凝土抗水压防渗的能力，其值越大混凝土抗水压防渗能力越强。从公式“ $W=10H-1$ ”可见，抗渗等级大小决定于水压力一个变量，未考虑渗水量。

2. 混凝土原位钻孔常水头注水试验简述与分析

2.1 钻孔常水头注水试验简述

以混凝土防渗墙为例，现场原位透系数检测多采用钻孔注水法，即向钻孔内一定长度的孔段注水，根据水头和注入流量的关系计算透系数。目前一般按照《水利水电工程注水试验规程》SL345-2007中的钻孔常水头注水法进行，分为试验段位于地下水位以下及以上两种情况。

(1) 试验段位于地下水位以下

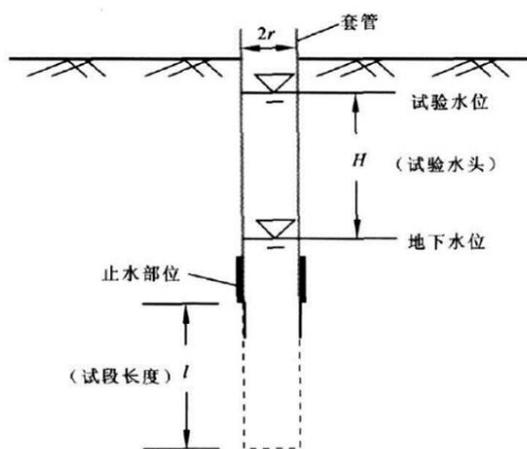


图3：注水试段位于地下水位以下

当注水试段位于地下水位以下(见图3)，计算公式为“ $K=16.67Q/AH$ ”(K-透系数，cm/s；Q-注入流量，L/min；H-试验水头(试验水位与地下水位之差)，cm；A-形状系数，cm；形状系数A取值见表1。

表1 钻孔注水形状系数A取值规定(引自规范SL345-2007)

试验条件	结构简图	形状系数A
第三 种 情况 试段位于地下水位以下，止水材料安装至试验段顶部，试验段裸露或下花管，孔壁和孔底进水。		$2\pi L / \ln(mL/r)$
第四 种 情况 试段位于地下水位以下，止水材料安装至试验段顶部，试验段裸露或下花管，孔壁和孔底进水，试验段顶部为不透水层。		$2\pi L / \ln(2mL/r)$

注：第三、四种情况考虑了各向异性和含水层性质，应满足 $L/r > 8$ ；形状系数A公式中：L为试段长，r为注水孔半径，m为传导比； $m=(K_h/K_v)1/2$ ， K_h 、 K_v 分别为试验土层的水平、垂直透系数。传导比m可根据工程经验确定，有条件时也可通过试验取得。

(2) 试验段位于地下水位以上

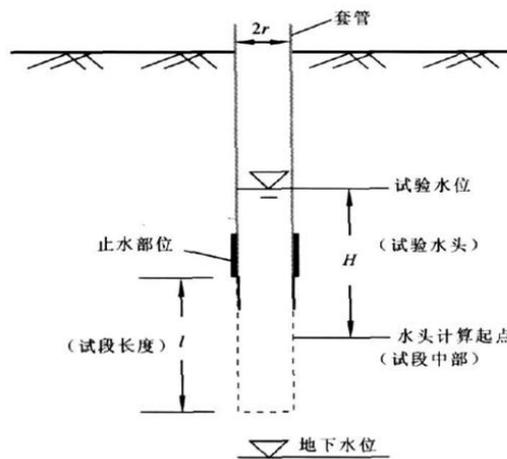


图4：注水试段位于地下水位以上

当试段位于地下水位以上，即“干孔注水”(见图4)，且 $50 < H/r < 200$ 、 $H \leq L$ 时，计算公式为“ $K=(7.05Q/LH) * \lg(2L/r)$ ”(r—钻孔内半径，cm；L—试段长度，cm；H—试验水头，H取值

在 SL345-2007 中未能表述清楚, 应参照《水电工程钻孔注水试验规程》NB/T35104-2017, H 计算零线取试段中点。)

2.2 钻孔常水头注水法适用性及合理性分析

(1) 适用性分析

钻孔常水头注水试验计算公式, 已使用多年。在 SL345-2007 中明确“钻孔常水头注水试验适用于渗透性比较大的壤土、粉土、砂土和砂卵砾石层, 或不能进行压水试验的风化、破碎岩体、断层破碎带等透水性较强的岩体。”若受检混凝土内部孔隙较大、透水性较强、使用该方法还基本合理, 但当混凝土足够致密且防渗性能较强时, 该方法的合理性有待商榷。

(2) 传导比 m 取值的探讨

进行钻孔常水头注水时, 地下水水位以下试段, 渗透系数公式中提到传导比 m , $m=(K_h/K_v)^{1/2}$ (K_h 、 K_v 分别为试验土层的水平、垂直渗透系数), m 取值影响计算结果。对于均匀、各向同性的混凝土, 如室内试件, 可取 $m=1$ 计算。而对现场实际浇筑的混凝土结构而言, m 取值受浇筑工艺、钻孔扰动等因素影响, 难以确定, 为方便计算, 通常取 $m=1$ 。现实当中, 混凝土墙体厚度一般在 $0.4\text{m}\sim 1.3\text{m}$ 范围, 而墙深或轴线长度往往在几十米至几百米不等, 从墙整体结构考虑, 钻孔注水时, 垂直方向和水平轴线方向的渗水是难以穿透巨厚混凝土的, 渗水基本都从墙体上下游侧一定区域渗出。为此, 从墙体渗水效果考虑 $K_h>K_v$, 则 $m>1$ 。若 $m>1$ 时 (相比 $m=1$ 时) 渗透系数 K 的计算值更大。

(3) 干孔注水试验难以适应深孔检测

《水利水电工程注水试验规程》SL345-2007 中, 常水头干孔注水试验条件苛刻, 需满足“ $50<H/r<200$ 、且水头 $H\leq$ 试段长 L ”。以 10cm 孔径为例, 半径 $r=5\text{cm}$, 若满足条件, 则 $2.5\text{m}<H<10\text{m}$ 、且 $H\leq L$, 导出 $5\text{m}<L<20\text{m}$, 且 $H(L/2)<L$ 。若按此要求, 对深孔段注水, 例如对 $90\sim 100\text{m}$ 孔段注水, 当 $r=5\text{cm}$ 、 $L=10\text{m}$ 时, 需满足水头 $H\leq 10\text{m}$, 则试验水位应在孔深 $85\sim 90\text{m}$ 深度范围 (以试段中点 95m 处作为水头 0 点)。可见, 对深孔段进行干孔注水时, 其水位观测点位于深孔内试段上部, 无专用水位观测设备时, 从地表无法观测。对于一定厚度的墙体, 不可能使注水孔径过大, 即便 $r=10\text{cm}$, 要满足 $H/r<200$, 水头 $H<20\text{m}$, 此时 $L<40\text{m}$, 同样难以进行深孔水位观测。墙体注水孔径过大, 造成孔壁厚度减小, 试验失去意义, 且破坏了墙体。施工实际钻孔孔径一般在 $5\sim 15\text{cm}$, 只适合浅孔注水试验 (孔深一般不超过 30m)。若能进行孔内水位观测时, 也可进行深孔段注水试验, 而此时的水柱压力可能比该深度墙体承受的上游侧水头压力要小 (与工程实际情况不符)。

3. 混凝土防渗墙室内、原位渗透试验与设计情况三者对比与分析

3.1 混凝土厚度 (渗径) 对比

(1) 设计情况: 混凝土防渗墙 (刚性或塑性) 的设计墙厚一般在 $0.4\text{m}\sim 1.3\text{m}$ 范围。

(2) 室内试验: 混凝土渗透试件厚度 (渗径) 一般在 $15\sim 45\text{cm}$, 且绝大多数为 15cm 。

(3) 原位试验: 防渗墙中心钻孔注水时, 受注水孔径影响, 最小渗透厚度 $<$ 墙体厚度的一半。

3.2 试验水压对比

(1) 设计情况: 墙体承受上游侧水平向水头压力 (随墙深增加), 最大水压为设计最大水头。

(2) 室内试验: 试件承受竖直向上水压由小到大逐级增加, 直到试件上表面稳定渗水。

(3) 原位试验: 当进行原位常水头 (水平向) 干孔注水时, 注水压力随孔深增加, 最大水压为相应水柱高度。当试验段位于地下水水位以下时, 注水压力为注水孔内外水头差, 此时试验水压效果受地下水水位影响 (如地下水水位较高时, 孔内外水头差较小难以满足渗水条件, 就要通过 PVC 管等材料将注水孔内的水位延伸至更高位置, 操作较繁琐)。还有种特殊情况, 即墙体两侧存在水位差时 (注水孔某部分出现上游侧有水, 下游侧无水), 对此情况本文暂不做讨论。

3.3 试验渗水方式对比

混凝土室内渗透系数试验, 渗透水流从试件一端面向另一端面加压, 水流渗入面积和渗出面积基本相等。现场原位钻孔注水试验渗透水流由孔内向孔壁外侧加压, 渗入面积与渗出面积相差较大。

(1) 设计情况: 在水压力 (随水深增加而增加) 作用下, 由墙体上游侧向下游侧渗透。

(2) 室内试验: 在水压力 (逐级增加) 作用下, 由试件下端面向上端面渗透。

(3) 原位试验: 在注水孔内水压力的作用下, 由孔内壁向孔外侧渗透。

3.4 混凝土防渗墙设计情况、室内及原位试验三者对比分析

通过对混凝土室内、原位渗透试验及设计情况三者之间的对比, 发现目前对混凝土防渗墙渗透系数的检测, 在结构厚度、试验水压及试验条件等方面尚不统一。对于混凝土材料而言, 若结

构尺寸、试验水压及渗水方式不统一,检测结果可比性不强。当混凝土厚度不同、承受水压力也不同的时候,通过试验求得的混凝土的渗透系数可比性不强。理论上说,室内试件厚度与设计墙厚(或实体墙厚)相同时,配比试验才有说服力。即便室内试件与墙体厚度一致,采用钻孔注水法时的渗透厚度与实际墙厚也不一致。对混凝土墙体进行原位垂直墙面的渗透试验(或水平取芯),因墙体多深埋地下,也难以进行。此外,采取现有注水试验方法,受公式制约条件限制,很难使注水压力与墙体设计水头相一致,这样无法模拟墙体在实际运行当中情况。综上所述,目前还没有一种比较便捷,且较为合理的混凝土原位渗透系数检测方法。

4. 混凝土渗流理论及发展分析

4.1 达西定律简介

1856年,法国水力工程师亨利·达西(Henry Darcy)在解决城市供水问题过程中,通过对均质砂土进行大量渗流试验研究,得出孔隙介质的渗流能量(水力坡度)与渗流速度之间呈线性正比关系,即达西定律。达西定律是反应流体在多孔介质内运动的基本规律,也是从宏观角度描述渗流过程的统计规律。试验示意图见图5。

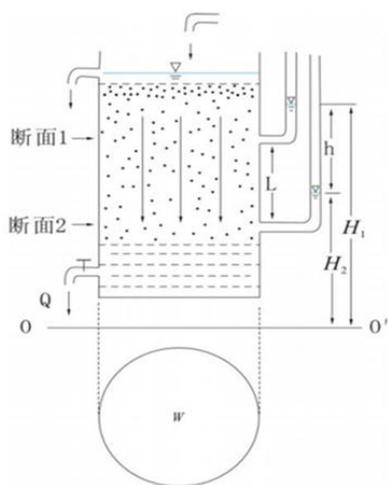


图5: 达西定律试验示意图

达西定律的公式表达式为“ $Q=KW(h/L)=KWJ$ ”,式中: Q -渗透流量(出口处流量,即为通过砂柱各断面的流量); W -过水断面(砂柱横断面面积); h -水头损失($h=H_1-H_2$,即上下游过水断面的水头差); L -渗径(上下游过水断面的距离); J -水力梯度,也称水力坡降或比降(等于 h/L ,即水头差除以渗径); K -渗透系数(也称水力传导系数)。因为流量 Q 等于流速 V 与过水断面 W 的乘积,即 $Q=VW$ ($V=Q/W$),所以达西定律常写为“ $V=KJ$ ”。混凝土室内渗透系数公式就源于达西公式。

4.2 达西定律适用条件及发展

达西定律是由砂质土体试验得到的,后来推广应用于其他土体如粘土和岩体等。一百多年来,众多学者对渗流定律进行了研究,基本均认为达西定律对渗流属于层流状态的地层是适宜的。研究发现在某些条件下渗流偏离了线性达西定律,出现非线性渗流规律。诸多学者研究成果也有不同,本文列举其中几个以示说明。

(1) 达西定律的适用条件

达西定律适用于层流状态下的渗流,当流速逐渐增大,层流向紊流过渡,流速增大到一定值后变为紊流。判别流态的无量纲数即雷诺数(Reynolds数),雷诺数是流体(此处指水)流动时的惯性力与粘性力之比,用符号 Re 表示,公式 $Re=Vd/\nu$ (V 为渗流断面的平均流速, d 为土体颗粒的有效粒径, ν 为流体的运动粘性系数)。流体流动出现两种不同流态,是惯性扰动和粘性稳定之间对比抗衡的结果。雷诺数越小则粘性力影响越显著,当粘性力远大于惯性力时,水的运动属层流。雷诺数越大则惯性力影响越显著,当惯性力远大于粘性力时,水的运动属紊流(也称湍流)。经诸多学者研究统计,适用于达西定律的层流流态下的雷诺数上限值约在 $1\sim 10$ 范围(参见表2和图6)。

表2 雷诺数与流态对应关系参考表

雷诺数范围	$Re < "1\sim 10"$ 某	"1~10" 某值 $< Re$	$Re > 100$
流态	层流区	过渡区	紊流区
"J-V" 曲线	线性段(达西定)	非线性段	非线性段

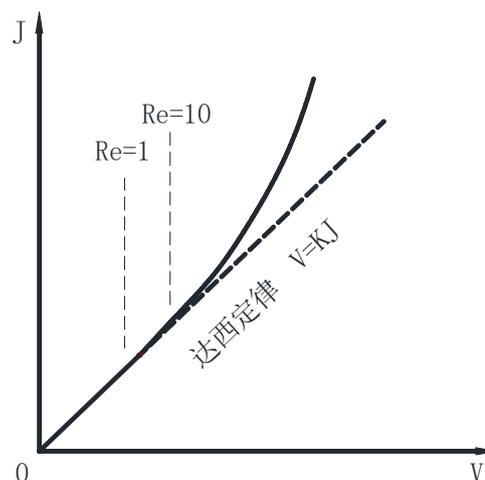


图6: 雷诺数与流态关系示意图

(2) 非线性渗流定律及发展

1901年,法国科学家福希海默(P.Forchheimer),通过研究非线性渗流问题,提出著名的福希海默渗流二项式: $J=aV+bV^2$

(J 为压力梯度; V 为渗流速度; a 和 b 是决定于流体和介质性质的常数, 由试验确定)。1912年, 克拉斯诺波里斯基提出紊流公式 $V=KJ^{1/2}$, 且发现层流区粘性力占优势(达西定律成立), 过渡区主要是被惯性力制约的层流(非线性), 紊流区惯性力占优势(非线性)。1958年伊尔梅指出: 当雷诺数 $Re < 1$ 时, 渗流中主要是黏滞力起主导作用, 此时可忽略二项式中的第二项 bV^2 , 而得到达西定律, 其中 $a=1/K$; 当 $Re > 1$ 时, 惯性力与黏滞力的作用大体相当时, 出现非线性的渗透; 当 $Re > 100$ 时, 水流具有紊流的特点; 当 Re 非常大时, a 接近于零, 可以得到紊流定律。

20世纪80-90年代, 我国大批低渗油田开发, 促进我国学者发展了低渗透非线性渗流理论。1990年, 西安石油学院闫庆来等人通过室内试验证明了启动压力梯度的存在。后来, 中国科学院渗流流体力学研究所黄延章建立了新的综合毛管模型和边界理论的多孔介质渗流模型, 提出渗流流体概念, 推导了多孔介质中流体粘度公式和低渗透多孔介质非线性渗流方程, 论证了此范围内非线性渗流仍属于层流范畴, 为此后数学模拟方法提供了理论依据。

4.3 达西定律的下限研究

随着人们对渗透规律研究的深入, 发现在渗流速度很低时, 流体与介质的表面分子力作用更重要, 部分液体的滞流现象使孔隙度发生变化, 从而引起渗透率的相应变化。以黏性土为例, 人们发现水在细粒土尤其是密实的黏性土中, 渗流规律偏离了达西定律, 当实际水力坡降超过一定值时, 渗透速度(V)和水力坡降(J)之间才近似呈线性关系, 这就是“黏性土的达西定律”, 也有人称之为“低渗非达西渗流”。

土体中的孔隙大小对土体的渗透性影响很大, 黏性土中结合水孔隙(孔径小于 $1.0\mu\text{m}$)占其孔隙的绝大部分。由于黏性土颗粒细小, 当孔隙中的水与土颗粒表面接触时, 细小土颗粒表面的静电引力把被极化的水分子吸附在土颗粒的周围, 形成一层水膜, 结合水孔隙中的水膜重叠时堵塞了颗粒之间的结合水孔隙, 制约了水在黏性土中的流动。只有当水力坡降达到一定值时, 水流的渗透压力才可以驱使结合水发生流动。可见, 要使水在密实的黏性土中流动, 需一部分水头用于克服薄膜水产生的阻力, 而导致存在起始水力坡降(或理解为启动坡降 J_0)。当实际水力坡降大于启动坡降时, 即 $J > J_0$ 时, 水才开始流动。使用时可将曲线简化为图中(见图7)密实黏性土 J - V 曲线所示的直线关系, 截距 J_0 称为起始水力坡降, 此时达西公式可改写为“ $V=K(J-J_0)$ ”, 对应于起始坡降 J_0 的水头称为起始水头(或理解为启动水头 H_0), $H_0=J_0L$ 。

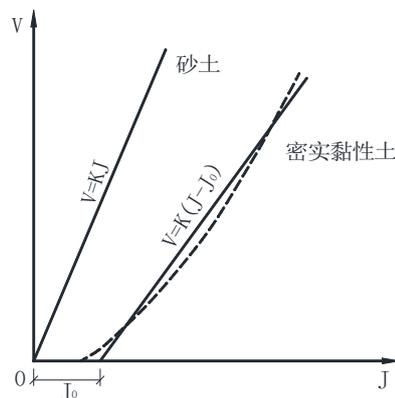


图7: 砂土与密实黏性土 J - V 曲线对比示意图

4.4 混凝土材料渗流理论分析

混凝土的种类很多, 也有“透水型混凝土”, 其结构内的孔道很多, 这种透水混凝土中的渗流可能属于层流也可能属于紊流, 不涉及启动坡降问题。本节所讨论的混凝土是结构足够致密的混凝土, 其密度接近或超过细粒黏土, 所以可称为低渗混凝土。

由“低渗非达西渗流”理论可知, 对于某低渗混凝土材料存在启动坡降 J_0 , 那么对应其不同的渗径厚度, 要使水渗出, 则对应不同的启动水头, 且伴随厚度(渗径)的增加启动水头也随之增大。简言之, 对于具有足够密实性的低渗混凝土结构, 当 $J > J_0$ 时, 对应有 $H > H_0$ (H 为实际水头, H_0 为启动水头)时, 才能产生渗流; 当 $J < J_0$, 即 $H < H_0$ 时, 对该混凝土结构来说渗流速度 $V=0$ 。

目前混凝土渗透系数检测中, 一般情况下, 室内试件厚度小于原位混凝土墙体厚度(渗径), 如果混凝土材料相同, 根据“低渗介质启动坡降理论”混凝土墙体要比室内试件承受的水压更大时才会渗水; 对于同种混凝土材料, 在同水压条件下, 室内试件渗水时, 混凝土墙体可能不渗水。考虑“启动坡降”的影响, 混凝土墙体中心钻孔注水试验渗透系数测值不足以代表实际墙体厚度下的墙体渗透性能, 实际墙体防渗性能应更好。

5. 施工对混凝土渗透性能的影响

在混凝土防渗墙施工中, 会遇到到室内试件渗透系数检测合格, 而现场原位钻孔注水试验渗透系数检测不合格的情况。举例说明, 某工地混凝土(强度 C25, 厚度 1.0m, 抗渗等级 W8)墙深 30m, 设计渗透系数 $K < 2 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 。试验结果如下: 室内试件达龄期后, 在 1.0MPa 水压下透水稳定, 测得渗透系数 $K_{\text{室}} = 3.2 \times 10^{-9} \text{cm/s}$, 满足设计要求; 现场某位置原位渗透系数检测时, 严格按照 SL345-2007 进行钻孔注水试验, 钻孔孔径 10cm, 孔深 15m, 孔口高程为试验水位(全孔段注水), 约 3 小时完成原位渗

透试验,测得原位渗透系数 $K_{原}=5.4 \times 10^{-7} \text{cm/s}$,不符合设计要求。

由举例内容可知,设计提出的渗透系数,主要是对混凝土墙体而言,室内渗透试件的厚度(渗径)为 15cm,而墙体厚度 100cm,注水孔直径 10cm,注水试验时墙体最小渗径为 $(100-10)/2=45\text{cm}$ 。墙体原位注水试验与室内试件渗透试验对比见图 8。

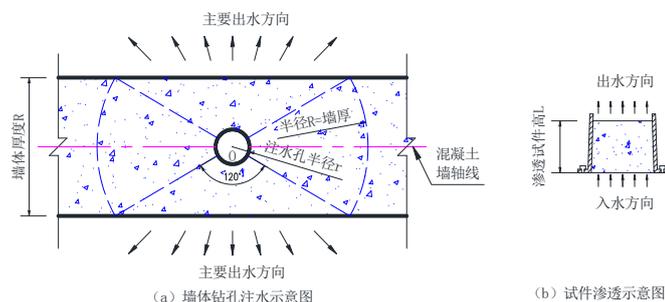


图 8: 墙体原位注水与室内试件渗透试验对比示意图

从“启动坡降”的理论考虑,墙体钻孔注水时,孔壁最小厚度大于室内试件厚度,且墙体最大注水压力小于室内试件渗透试验水压力,厚度(渗径)更厚且水压更小,墙体应更难以渗水才合理,原位渗透系数应不会大于室内检测结果。关于混凝土墙体原位渗透系数测值偏大有如下分析:

(1) 混凝土浇筑成型工艺及养护条件对混凝土密实度有一定影响。混凝土室内试件采用人工插捣或振捣,内部结构均匀致密,养护条件优越。混凝土墙体浇筑成型采取泥浆下直升导管法浇筑,混凝土靠自流密实,其均匀性和密实度相对较差,且局部可能存在缺陷或微细裂隙等。

(2) 钻孔施工对混凝土墙体产生一定破坏。钻注水孔时,孔壁会被扰动,完整性会降低,且钻孔孔斜偏差过大会使局部孔壁变薄,甚至穿透墙体,导致渗水量变大。

(3) 本次原位孔注水平均水头 7.5m(注水段最大水头 15m,即 0.15MPa 水压),试验约 3 小时完成测试,检测结果不合格。对于抗渗等级 W8 的混凝土试件(厚 15cm)要在 0.9MPa 水压下才会渗水,且试验水压从 0.1MPa 开始逐级升高,每级升高 0.1MPa,每级持续 8h。简单的讲,抗渗等级 W8 的混凝土(厚度 $\geq 45\text{cm}$),在短时间低水压($\leq 0.15\text{MPa}$)情况下,是不可能渗水的。此情况也说明实际墙体的均匀性密实度普遍要比室内试件差。

(4) 混凝土室内渗透试验和原位注水试验采取的计算公式不同,两者之间存在一定偏差,《水利水电工程注水试验规程》SL345-2007 中钻孔注水法公式对结构致密的混凝土材料适用性不强,可能导致渗透系数测值偏大。

6.混凝土“钻孔注(压)水渗透系数试验公式”的推导与分析

对混凝土防渗墙现场原位渗透系数检测,目前没有更好的方法,采用中心钻孔注水法是相对方便和灵活的,所以一直被采用。SL345-2007 中钻孔注水方法适合透水性强的地层,用于致密的混凝土结构尚缺乏合理性,且公式条件苛刻适用性差。因此,根据室内渗透系数检测公式对现场原位钻孔结构进行渗透系数公式推导,是很有意义的。

6.1 桩柱体混凝土竖直钻孔注(压)水结构模型

桩柱体混凝土中心竖直钻孔注(压)水试验在竖直方向上因混凝土巨厚,可视为不透水层,注水或压水试验结构模型参见图 9、图 10。

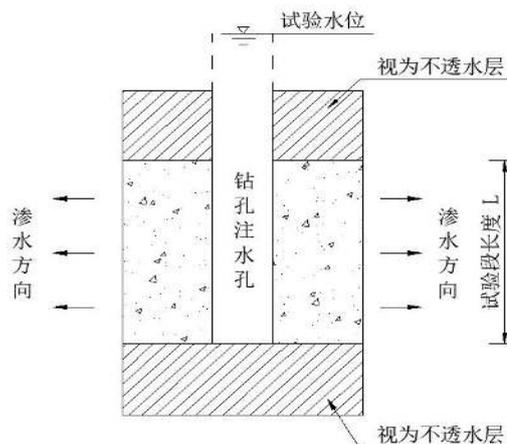


图 9: 桩柱体混凝土竖直钻孔注(压)水结构模型示意图

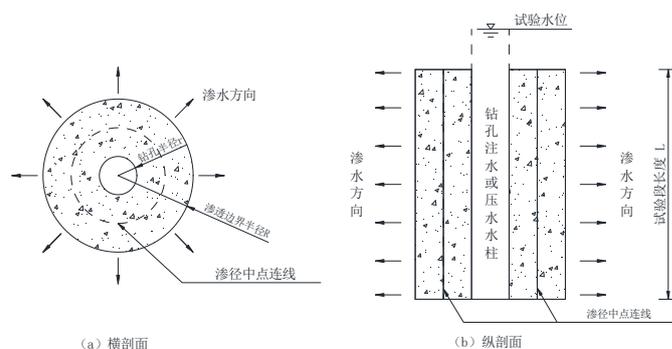


图 10: 桩柱体混凝土中心钻孔注(压)水法渗水模型示意图

6.2 桩柱体混凝土中心钻孔注(压)水法试验公式推导

根据《水工塑性混凝土试验规程》DL/T5303-2013 中渗透系数计算公式“ $KT=Vh/Aht$ ”(KT—水温 $T^{\circ}\text{C}$ 时试件的渗透系数, cm/s ; V—时间 t 秒内的渗透水量, cm^3 ; L—试件渗水高度, 15cm;

H—试件渗水时的水压力, cm; t—间隔时间, s; A—试件平均截面积, cm²。), 结合图9和图10结构, 对桩柱体混凝土采用中心钻孔注(压)水法检测渗透系数, 有如下计算结果:

(1) 渗水距离(渗径)h。h=R-r; (h为原室内渗透系数试验公式中试件高度, 即渗透距离; R、r分别为桩柱体渗水模型半径及钻孔半径)。

(2) 平均渗水面积A。A取渗径中点连线所形成的圆在试段长L下构成的圆柱体侧面积, 或理解为渗入面积“2πrL”与渗出面积“2πRL”的平均值, 即A=(2πrL+2πRL)/2=π(R+r)L。(取平均渗水面积的做法是参照规范, 其合理性有待商榷)

(3) 将渗水距离h与平均渗水面积A带入渗透系数计算公式(不考虑温度影响), 得到桩柱体中心钻孔注(压)水渗透系数计算公式:

$$K_{\text{桩}} = \frac{VR-r}{\pi R+rLHt} \quad (\text{公式1})$$

“公式1”中, V为时间t秒内的渗透水量, cm³; L为试验段长度, cm; H为水压力, cm; t为间隔时间, s; R、r分别为桩体半径及钻孔半径, cm。另Q=V/t, cm³/s, 并带入“公式1”则得到“公式2”:

$$K_{\text{桩}} = \frac{R-rQ}{\pi R+rLH} = \quad (\text{公式2})$$

6.3 混凝土结构“钻孔注(压)水法渗透系数检测公式”的意义

(1) 对于有固定结构尺寸的材料, 如混凝土桩柱体, 当中心注(压)水孔半径r相对于桩柱体截面半径R占比增大时, 公式1或公式2中的“(R-r)/(R+r)”变小, 渗透系数K计算值也变小。桩柱体中心注(压)水孔径r取值范围为“0<r<R(R为桩柱体截面半径)”, 则“0<(R-r)/(R+r)<1”。在防渗墙体轴线中心钻孔时, 注(压)水孔径r取值范围为“0<r<R/2(R为墙体厚度)”, 此时鉴于对防渗墙体实际厚度R与周围(上下游侧)地层形成综合防渗体的考虑, 将公式1或公式2中的“渗水模型半径R”计为墙体厚度, 则公式1或公式2中的“1/3<(R-r)/(R+r)<1”。由此可见, 对于有固定结构的防渗体, 有必要考虑公式1或公式2中“钻孔半径r”与“平均渗水R取值”对渗透系数计算结果的影响。

(2) 公式1或公式2推导过程是以“桩柱体中心注(压)水渗流模型”为基础。而混凝土实体结构多样, 且与混凝土结构接触的物质(如原始地层、回填土层或其它材料)也能起到阻渗的作用, 所以混凝土原位渗透系数检测是对混凝土结构及周边地层的综合检测, 推导公式1或公式2中“理想模型半径R”的取

值应考虑混凝土实体结构及与周边地层情况综合确定。

(3) 混凝土结构原位钻孔注(压)水试验公式是由室内渗透系数试验公式推导得到, 将室内试验与原位试验较好的统一起来, 其合理性及对工程的指导性更强。新公式规避了SL345-2007中不适合弱透水地层的“钻孔常水头注水法”, 也规避了苛刻的公式使用条件, 且注水或压水均可采用, 对不同墙体深度采取不同的水压, 便于与设计指标或实际情况一致, 具有更强的适用性和灵活性。采取钻孔注(压)水法进行原位渗透检测时, 水压值确定应按相关现行标准规范的规定执行。

6.4 防渗墙“钻孔注(压)水法渗透系数推导公式”与标准规程公式的计算值对比

采用“钻孔注(压)水法渗透系数推导公式”, 即“公式1或公式2”与《水利水电工程注水试验规程》SL345-2007中有相关公式进行计算值对比, 以了解“新推导公式”与“规程公式”的计算值差距。对比分为“试验段位于地下水位以上”和“试验段位于地下水位以下”两种情况。

(1) 试验段位于地下水位以上时的对比

当试验段位于地下水位以上(即干孔注水)时, 某混凝土防渗墙厚R=60cm, 钻孔注水试验孔径r=5cm; 试验段选择孔口至孔深15m段, 即试验段长L=15m=1500cm; 试验水位为孔口高程, 取试验水头H=L/2=750cm; 试验过程中t=30min=1800s, 共注入水量V=250ml(cm³), 即注入流量Q=V/t=250cm³/1800s。将以上数据代入公式, 进行“推导公式(公式2)”与“规程公式”渗透系数K计算值对比, 公式及计算结果见表3。

表3 试验段位于地下水位以上“推导公式”与“规程公式”K值对比表

序号	分类	计算公式	K值(cm/s)
1	推导公式(公式2)	$K=[(R-r)/\pi(R+r)]*(Q/LH)$	3.33×10^{-5}
2	SL345-2007公式	$K=[7.05*1g(2L/r)]*(Q/LH)$	2.42×10^{-5}

(2) 试验段位于地下水位以下时的对比

当试验段位于地下水位以下时, 假设某混凝土防渗墙厚R=60cm, 钻孔注水试验孔径r=5cm; 试验段长L=15m=1500cm; 试验水位高于地下水位750cm, 取试验水头H=750cm; 试验过程中t=30min=1800s, 共注入水量V=250ml(cm³), 即注入流量Q=V/t=250cm³/1800s。将以上数据代入公式, 进行“推导公式”与“规程公式”渗透系数K计算值对比, 公式及计算结果见表4。

表4 试验段位于地下水位以下“推导公式”与“规程公式”K值对比表

序号	分类	计算公式	K 值 (cm/s)
1	推导公式 (公式 2)	$K = [(R-r) / \pi (R+r)] * (Q/LH)$	3.33×10^{-6}
2	SL345-2007 注水试验 (第三种情况)	$K = [16.67 * \ln(mL/r) / 2 \pi] * (Q/LH)$ (取传导比 $m=1$)	1.87×10^{-6}
3	SL345-2007 注水试验 (第四种情况)	$K = [16.67 * \ln(2mL/r) / 2 \pi] * (Q/LH)$ (取传导比 $m=1$)	2.10×10^{-6}

通过“推导公式 (公式 2)”与“规程公式 (SL345-2007 中相关公式)”渗透系数计算值的对比,发现“推导公式”比“规程公式”计算 K 值要小几十倍不等,该现象可能证明了“规程公式”适用性的不足。推导公式由混凝土室内渗透系数试验公式在理想渗流模型的基础上推导得来,在理论上与室内试验方法基本保持一致,但推导公式的合理性及适用性也有待进一步研究。

7 结论

(1) 混凝土原位渗透系数检测采用现有规范 SL345-2007 中适用于强透水地层的公式尚缺乏合理性。目前关于混凝土渗透系数的检测在设计、室内及原位检测三者之间尚不统一,主要体现在厚度 (渗径)、水压、渗透方式方面。按照混凝土结构设计厚度及实际浇筑工艺制作室内渗透试件,可基本实现设计与配比试验的统一,但与现场检测也难统一,目前对于混凝土原位渗透性能检测方法有待研究与改善。

参考文献:

- [1] 《水工混凝土试验规程》SL352-2006;
- [2] 《水工塑性混凝土试验规程》DL/T5303-2013;
- [3] 《水利水电工程注水试验规程》SL345-2007;
- [4] 《水电工程钻孔注水试验规程》NB/T35104-2017;
- [5] 肖红宇、黄英、孙宏波、金克盛.考虑起始水力坡降时粘土渗透系数的确定[J].铁道科学与与工程学报, 2006.3(1):31-35;
- [6] 罗赛虎、徐维生、低渗非达西渗流研究综述[J] 灾害与防治工程, 2007.(1):38-44.
- [7] 刘俊丽 谈谈渗流[J] 力学与实践, 2019.(2):249-252.

(2) 足够致密的混凝土材料应属于“低渗混凝土”,其渗流过程中应存在“启动坡降”,当实际坡降 $J > J_0$,即实际水头 $H > H_0$ (启动水头)时,混凝土结构才会渗水,且启动水头随混凝土厚度 (渗径) 增大而增大。考虑“启动坡降”的影响,混凝土墙体中心钻孔注水试验渗透系数测值不足以代表实际墙体厚度下的墙体渗透性能,实际墙体防渗性能应更好。

(3) 受浇筑工艺、养护条件、钻孔扰动、钻孔偏差等影响,原位混凝土可能存在平均密实度低于室内试件的情况。《水利水电工程注水试验规程》SL345-2007 中钻孔注水法公式对结构致密的混凝土材料适用性不强,可能是导致原位渗透试验测值偏差的原因之一,有待进一步研究。

(4) 通过构建理想的桩柱体中心钻孔注 (压) 水渗流模型,推导出了桩柱体中心钻孔注 (压) 水渗透系数公式,即文中推导公式“公式 1 或公式 2”。推导公式将室内试验与原位试验较好的统一起来,其合理性及对工程的指导性更强。新公式规避了 SL345-2007 中不适合弱透水地层的“钻孔常水头注水法”,也规避了苛刻的公式使用条件,且注水或压水均可采用 (可针对不同墙体深度采取不同的水压,与设计目的一致),具有更强的适用性和灵活性。

(5) 通过“推导公式 (公式 2)”与“规程公式 (SL345-2007 中相关公式)”渗透系数计算值的对比,发现“推导公式”比“规程公式”计算 K 值要小几十倍不等,该现象可能证明了“规程公式”适用性不足。推导公式由混凝土室内渗透系数试验公式在理想渗流模型的基础上推导得来,在理论上与室内试验方法基本保持一致,但推导公式的合理性及适用性也有待进一步研究。