

进水口漩涡缩尺效应研究综述

杜 敏 ,高学平 ,叶 飞

(天津大学建筑工程学院 ,天津 300072)

摘要 综合评述了国内外进水口漩涡缩尺效应的研究成果 ,包括模型相似准则的选取、克服缩尺效应的方法、原型观测和模型试验的对比以及研究手段这 4 个方面 ,最后从漩涡形成机理和原型观测方面对漩涡研究的动态和进展作了评述和预测。

关键词 进水口 ;漩涡 ;缩尺效应 ;综述

中图分类号 :TV131.2 文献标识码 :A 文章编号 :1006-764X(2007)S2-0016-03

水电站进水口漩涡现象很普遍。这种漩涡危害很大 ,如减小进流量、降低流量系数、引起机组或结构物的振动、降低机组效率、卷吸漂浮物、堵塞或损坏拦污栅等。为了防止和消除这些危害 ,人们对进水口漩涡进行了广泛的研究。水工模型试验作为主要研究手段 ,发挥了重要作用 ,但是 ,它存在从模型试验成果引伸至原型时可能出现“失真”即缩尺效应的问题。缩尺效应指由于采用仅按主要支配力相似律而忽略其他作用力相似的模型而产生的误差^[1]。当所有控制作用力不可能按同一倍数缩小时 ,缩尺效应就会发生。缩尺效应的发生 ,使得原型的情况可能比模型预测的结果更差。因此 ,缩尺效应影响着由水工模型试验预测漩涡严重程度的可靠性。本文将从模型准则的选取、克服缩尺效应的方法、原型与模型对比和研究手段这 4 个方面对国内外在缩尺效应方面的研究成果进行综述。

1 模型相似准则的选取

模型要同时满足重力、黏滞力、表面张力等作用力相似是非常困难的 ,应正确确定主要的作用力 ,合理地选取相似准则 ,使模型能最大限度地模拟原型。

1.1 重力的影响

进水口的漩涡运动是一种源于自由表面的流动现象 ,主要作用力是重力 ,因此模型应首先满足重力相似 ,并保证几何相似。模型试验应按佛汝德数 Fr 相似准则设计^[2]。

1.2 黏滞力的影响

黏滞力可用雷诺数 Re 反映。当 Re 超过临界

雷诺数时 ,黏性作用影响可忽略。福原华^[3]提出了掺气漩涡的雷诺数临界值 ,水平进水口 $Re = Q/\nu_s \geq 2 \times 10^4$ (Q 为流量 , ν 为运动黏滞系数 , s 为孔口中心淹没深度) ,垂直进水口 $Re = Q/\nu d \geq 4 \times 10^4$ (d 为底部孔口直径) 。Daggett 等^[4]用不同黏性的流体(水和甘油的混合液、不同种类的油)在圆筒中做试验 ,得出流量系数 C 与 Re 的关系 ,当模型管道 $Re = ud/\nu > 3 \times 10^4$ (u 为孔口流速) , C 仅是环量数的函数 ,黏性可以不用考虑。Amphlett^[5]认为 ,可以将 $Re = Q/\nu_s \geq 3 \times 10^4$ 作为水平取水口不受缩尺效应影响的界线。Jain 等^[6]在底孔出流的圆筒中用不同黏性的流体进行试验 ,发现当 $N_v = \sqrt{gdd}/\nu = Re/Fr \geq 5 \times 10^4$,产生的间歇吸气漩涡的临界淹没水深与 N_v 无关 ,临界雷诺数与 Fr 有关 , Fr 越大 ,临界雷诺数越大。Anwar 等^[7]用水、黏性不同的油以及水与甘油的混合物作为漩涡试验流体 ,对比分析得出如果按泄水孔过水断面计算的径向雷诺数 $Re_R = Q/\nu_s > 3 \times 10^4$,模型自由表面涡不受黏滞力影响。Padmanabhan 等^[8]得出 $Re = Q/\nu_s > 1.5 \times 10^4$ 时漩涡的缩尺效应可以忽略不计。Odgaard^[9]得到进水口相对临界淹没水深关于 Fr , N_F , Re , We 的函数式 ,推导出当环量增大 ,涡黏性 $\epsilon = k\Gamma \geq 5\nu$,临界雷诺数 $Re = Q/\nu d > 1.1 \times 10^5$ 时 ,可略去黏性作用。

总之 ,尽管各位学者提出的雷诺数极限值有差异 ,但多数都在 10^4 的数量级之内。这个差异除了由于试验的 Fr 范围不同以外 ,还与环量、进水口的形式等边界条件有关。

1.3 表面张力的影响

表面张力可以用韦伯数 We 反映。Daggett 等^[4]利用黏滞力相同但表面张力不同的液体研究漩涡,在他的试验范围内,表面张力对漩涡的形成没有影响。Jain 等^[6]用不同比例的酒精与水的混合液研究相同黏滞力不同表面张力时进口吸气涡的差别,发现当 $We = \rho V^2 d / \sigma \geq 120$ 时(ρ 为液体密度; V 为孔口平均流速; σ 为液体表面张力系数),表面张力可以忽略。Anwar 等^[7]给出的临界韦伯数为 10^4 。Padmanabhan 等^[8]给出的临界韦伯数为 600。Odgaard^[9]假定涡心的表面张力与该处的曲率半径成反比,并假定表面张力对临界淹没水深的影响比其他参数小得多(10%), $We > 720$ 时可忽略表面张力的作用。

由上可得,临界韦伯数的数值变幅较大,相对黏滞力的研究,表面张力的研究还很不成熟。过去的试验中, We 的变化主要依靠改变 V 与 d 来实现,这实际上同时改变了 Re 与 Fr 值,并不能说明只是表面张力的影响。要做到其他因素(Re 、环流、几何条件等)都不变,只改变表面张力,寻求表面张力和漩涡参数的关系,实际上困难还比较大。

目前模型试验通常采用的临界雷诺数大于或等于 3×10^4 ^[5,10-11],临界韦伯数大于或等于 120 ^[6,10]。

2 克服缩尺效应的方法

漩涡模拟研究中,提出过不少方法来克服可能产生的缩尺效应。Knauss^[12]认为可采用 3 种方法:①增大模型(模型缩尺 $L_r \leq 20$),模型 Re 和 We 超过一定的临界值;②提高模型运行水温来增大模型的 Re ;③允许存在一定的黏滞力影响,但需增加一个修正系数。

一种传统做法是采用不同缩尺的系列模型^[13]。大的模型在同一 Fr 下有较高的 Re 和 We 。更为常用和经济的做法是在模拟的淹没深度和出口尺寸不变的情况下,通过调节上游来流和下游泄流闸门开度增加模型的流量,从而可以按比例增加模型的流速。在英国迪诺威克电站模型试验中采用加大 3 倍流速以满足立轴漩涡运动的相似性。Hecker^[13]基于缩尺为 1:50 的按 Fr 准则设计的模型,将原型观测的结果和模型试验的结果进行比较,提出模型流量增加 2.0 ~ 2.5 倍,能较好地模拟原型的漩涡。Denny^[14]和 Denny & Young^[15]提出等流速准则(即模型流速等于原型流速)。很多人认为等流速准则只适应较大的模型,因为此时模型中的流量只要稍微增加到 Fr 准则要求的以上,就能达到模型和原型中流速相等的要求。

对于不同缩尺的模型,增加的流量将不同,但流速究竟应该增大多少才合适,至今尚无定论。笔者在进行某水电站进水口模型试验时发现,为消除缩尺对漩涡的影响,并非增加的流量越大越好,随着流量的增加,进水口处的环流亦加强,某些漩涡反而随环流的增强而减弱或者消失,使模拟完全失真。

3 原型观测和模型试验的对比

目前,模型设计较为通用的办法是:模型几何正态,按 Fr 准则设计,用黏滞力与表面张力相似条件加以校核,并在试验过程中适当增加流量(流速)作为补充观察。应当指出,增大流量,实际上是放弃了 Fr 准则,目的是增大原型的 Re 和 We ,减小黏滞力和表面张力的缩尺影响,对一些缩尺大、尺寸小的模型,它有一定的效果。当然,模型试验的效果最好应通过与原型观测的对比来加以检验。

Hecker^[13,16]对 9 个抽水蓄能电站取水口、7 个电站进水口与水库泄水道、6 个其他取水口的资料进行对比分析。其基本结论是:对于微弱漩涡和表面凹陷漩涡可按 Fr 相似准则模拟,缩尺效应可忽略,而对于模型中发生有空气核心的漩涡漏斗则存在一定的缩尺效应;为克服缩尺效应,模型流量应比按 Fr 准则所要求的流量大 2.0 ~ 2.5 倍。

Padmanabhan 等^[8]在研究某核电站冷却水取水口时,曾进行原型与两个缩尺模型(1:2 及 1:4)试验的对比工作,认为模型中径向雷诺数 $Re_R = Q / \nu s > 1.5 \times 10^4$,管道 $Re = ud / \nu > 7 \times 10^4$, $We = \rho u^2 d / \sigma > 600$ 时,按照 Fr 相似准则模拟自由表面漩涡,缩尺为 1:2 及 1:4 的模型没有发现明显的缩尺效应。

王水田^[17]在某水电站进水口(缩尺为 1:65)漩涡问题的试验研究中,按等 Fr 相似准则进行模拟,只发生了表面凹陷漩涡,而原型观测中却出现明显漏斗状立轴漩涡。分析原因发现,模型结果的失真主要是因为忽略了黏滞力的影响,可见按重力相似准则在大缩尺模型上是不能模拟原型情况的。在某些情况下,特别当模型缩尺较大时,按重力相似准则进行模拟,如不附加其他措施,模型是没有漏斗漩涡的,而工程原型则正好相反。

4 研究手段

4.1 现代化流速测量手段的应用

20 世纪 40 年代到 80 年代期间,毕托管、旋桨流速仪、热线热膜流速仪等传统测量仪器是流速测量的主要工具。这类仪器由于干扰流场,精度不高,同时在测点坐标、流速方向等方面的判断受人为因素的影响,加之漩涡运动本身不稳定,很难获得漩涡运

动较为准确的试验资料。

20 世纪 80 年代以后,出现了非接触式高精度流速测量工具,如超声波多普勒流速仪(ADV)、激光多普勒流速仪(LDA)、粒子成像测速系统(PIV)。ADV 是一种单点、高分辨率的三维声学多普勒流速仪,该仪器具有操作简单、无定期校准要求、数据处理方便等优点,可对水流进行精确和快速的三维速度测量,非常适宜于在复杂水流流场进行流速精确测量^[18-19]。LDA 空间分辨率高,能测量出直径 $10\mu\text{m}$ 的流体微团运动的三维速度,而且测速范围广,动态响应快,对流场坐标控制可由计算机自动完成,不受人为因素的干扰。PIV 精度高,功能强,特别是可以进行全场测量,通过流场图像数据的分析,得出全场流体运动的速度分布。因此对于涡轴游动的不稳定立轴漩涡,PIV 技术是测量流速最为理想的方法之一。美国 IOWA 大学 Rajendran 等^[20]在对水泵进水口漩涡方面的试验研究中,通过采用传统的染色法显示漩涡的发生,应用 PIV 等现代化量测技术来捕获漩涡的数目、位置、形状、大小及强度等定量信息,首次直观地再现并量化了漩涡的瞬时结构和时均结构的细节,揭示出漩涡并不是固定的,而是游离的,有一些是间断的特性。唐洪武等^[21]通过对粒子图像测速技术的改进,采用数字脉冲光照技术和象增强器,实现了在低功率激光照明下获得高像质的流动图像,提高流速测量的范围和精度。这一时期立轴漩涡的研究成果比较多,但由于试验边界条件各不相同,通过试验资料总结的规律,实用性也很有限。

4.2 数值模拟

近年来,随着计算流体力学和计算机技术本身的迅速发展,数值模拟开始成为一种研究漩涡的手段。文献^[22]完成了泵站流场及漩涡的三维数值模拟计算。赵永志等^[23]采用雷诺应力模型和 PISO 算法模拟了自由表面水涡的运动过程,运用流体体积(VOF)法处理自由表面的问题,通过模拟计算得到自由水涡的详细结构和运动方程,认为自由水涡由旋转能量的局部集中引起,是一种类兰金涡,具有兰金涡的旋转速度和压力分布。采用数值计算的方法对漩涡进行模拟,具有直观、改变方案快、成本低等优点,但是对于漩涡的发生和发展过程、涡轴游动现象的模拟都有很大的难度,模型试验和数值计算的结合将是研究漩涡的有效方式之一。

5 展望

a. 漩涡形成机理有待进一步探索。由于漩涡运动的复杂性,漩涡的理论研究在数学上存在较大

的困难,不得不做出某些假定,而这些假定又与实际不完全符合。漩涡的起动机理,漩涡运动如何导致吸气漩涡的发生,当吸气形成漏斗涡后如何发展演变等问题还需进一步研究。鉴于漩涡与速度梯度密切相关,应分析各方向的速度梯度,研究环量、淹没水深、 Re 、 Fr 等与漩涡产生的关系,重点分析漩涡形成前的进水口来流条件,如来流的速度梯度、速度环量达到什么临界值时将形成漩涡。此外,目前还没有方便工程设计使用的准确计算临界淹没水深的方法。

b. 利用系列模型,寻找模型缩尺的影响规律。国内外学者一直致力于模型相似律的研究,研究同一种体型在不同模型缩尺条件下水力特性的变化,从中寻找模型缩尺的影响规律。例如增大模型流速可以减小缩尺效应,对于不同缩尺的模型,增加的流量将不同,流速究竟应该增大多少才合适,至今尚无定论。流量增大后不满足 Fr 准则所造成的影响等问题也尚未解决。如果能提出增加流量与模型缩尺的关系,可进一步完善模拟进水口漩涡的模型设计和试验方法。

c. 原型观测。水力学研究的手段在现阶段主要以物理模型试验为主,由于受到模型中水流流速、边界条件和其他复杂因素的影响,存在模型相似率的问题,许多问题需要在工程的实际运行中得到验证。但目前与进水口漩涡相关的原型观测资料较少,不能很好地与试验资料相结合。进一步开展原型观测,将原型观测结果与模型试验成果相互对比,分析差异,这是消除缩尺效应有效的研究手段之一。

参考文献:

- [1] NOVAK P, CABELKA J. Models in hydraulic engineering physical principles and design applications[M]. Boston: Pitman Advanced Publishing Program, 1981.
- [2] SHARP J J. Hydraulic modelling[M]. Butter Worth & Co, Ltd, 1981.
- [3] 福原华一. 抽水蓄能电站进出口的水理设计[J]. 日本电力土木, 1959, 161: 48-57.
- [4] DAGGETT L L, KEULEGAN G H. Similitude in free-surface vortex formation[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1974(11): 1565-1581.
- [5] AMPHLETT M B. Air-entraining vortices at a horizontal intake [R]. England: Hydraulic Research Station, 1976.
- [6] JAIN A K, RANGA K G, GARDE R J. Vortex formation at vertical pipe intake[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1978, 104(10): 1429-1445.
- [7] ANWAR H O, WELL J A, AMPHLETT M B. Similarity of free-vortex at horizontal intake[J]. Journal of Hydraulic Research, 1978, 11(2): 95-105.

(下转第 134 页)

结果表明,离地面 5 m 的十字板强度由加固前的 6 kPa 提高到 18.9 kPa,约是原来的 3.15 倍,地基承载力提高明显。

所有位移控制桩均发现有不同程度的滑移,其中 5 月 30 日实测湖心 1 号桩由东向西南方向位移 2.4 m,2 号桩由东向西南方向位移 1.9 m,3 号桩由东向西南方向位移 3.3 m,但软基表面没有出现明显的贯通裂缝,也没有发现岸边坍塌现象,表明基础基本稳定。

3 月 22 日至 6 月 2 日施工期间共设立沉降板 30 个,截止到 2005 年 6 月 2 日,最大累计沉降达到 1.602 m,最大日沉降量达到 39 mm,各土层压缩变形都较大。从各个沉降磁环的沉降曲线可以得出,在第 1 级堆载(100 cm)下,深部的沉降磁环变形很小(略有上浮),第 1 级堆载的影响范围为碎石垫层下 7~8 m 淤泥层,第 2 级堆载较大,各沉降磁环沉降较大,最大沉降速率达到 2.6 cm/d。

根据施工需要,现场共布设排水井 70 个,纵横间距均为 20 m,井下口直接压在土工布上,井上口与土方压载同步加高,工地上配备 2~4 号水泵 20 台,固定专人日夜不间断排水。经实测,4 月 9 日至 5 月 29 日西区排水 16 440 m³,日均排水量 332 m³,东区 5 月 2 日至 5 月 29 日累计排水 6 511 m³,日均排水量 233 m³,至 6 月 5 日 2 个月内累计排水 2.71 万 m³,每平方米

排水量达 0.88 m³(不含地表雨水),排水效果明显。

分析超静孔隙水压力与时间变化曲线可知,堆载后超静孔隙水压力变大,荷载转换为超静孔压,间歇期孔压慢慢消散,土的有效应力增加。

通过对检测资料的分析得出,加固范围内各土层固结度均达到设计要求,加固后土层物理力学指标显著提高,地基承载力达到预期要求,取得了较好效果。

4 结 语

用土工布和碎石垫层作为持力层进行表层处理是解决淤泥质超软地基施工时承载力不足的好办法,与国外表层处理方法相比,该方法具有造价低、效果好、施工方便、就地取材等优点,可推广应用到类似地基处理工程中去。本工程由于施工难度大,使用了 200 g/m² 土工布铺设和 80 cm 厚碎石垫层填筑,安全系数偏高,推荐使用 150 g/m² 土工布,并适当减小碎石垫层厚度,以降低工程成本。

参考文献:

- [1] JTJ/T256—96 塑料排水板施工规程[S].
- [2] 李彰明.软土地基加固的理论、设计与施工[M].北京:中国电力出版社,2005:318-334.
- [3] 《地基处理手册》编委会.地基处理手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1988:108.
- (收稿日期 2006-12-20 编辑 骆超)
- (上接第 18 页)
- [8] PADMANABHAN M,HECKER G E. Scale effects in pump sump models[J]. Journal of Hydraulic Engineering,ASCE,1984,110(11):1540-1556.
- [9] ODGAARD A J. Free surface air core vortex[J]. Journal of Hydraulic Engineering,ASCE,1986,112(7):610-620.
- [10] 高学平,张效先,王志国,等.西龙池抽水蓄能电站竖井式进排水口水力学试验研究[J].水力发电学报,2002,17(1):52-60.
- [11] 倪汉根,杨玉庆.消除进水口前漩涡漏斗的一个方法[J].水利学报,1986(12):52-56.
- [12] KNAUSS J. Swirling flow problems at intakes[M]. IAHR Hydraulic Structures Design Manual,1987.
- [13] HECKER G E. 漩涡模拟的比尺效应[C]//国际水工模拟缩尺影响专题讨论会译文选.武汉:长江水利水电科学研究院,1985:219-237.
- [14] DENNY D F. An experimental study of air-entraining vortices in pump sumps[J]. Journal of the Institution of Mechanical Engineers,1956,170(2):106-116.
- [15] DENNY D F,YOUNG G A. The prevention of vortices and swirls at intakes[C]//Proceedings of the Seventh International Association of Hydraulic Research Congress, Lisbon, Portugal,1957.
- [16] HECKER G E. Model-prototype comparison of free surface vortices[J]. Journal of the Hydraulics Division,ASCE,1981,107(10):1243-1259.
- [17] 王水田.水工建筑物漏斗吸气旋涡问题研究与进展[R].南京:南京水利科学研究所,1964.
- [18] KRAUS N C,LOHRMANN A,CABRERA R. New acoustic meter for measuring 3D laboratory flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering,ASCE,1994,120(3):406-412.
- [19] 声学多普勒流速计(ADV)的工作原理[M].北京大学特赛流动测量研究中心,译.北京:北京大学出版社,2000.
- [20] RAJENDRAN V P,PATEL V C. Measurement of vortices in model pump-intake bay by PIV[J]. Journal of Hydraulic Engineering,ASCE,2000,126(5):322-334.
- [21] 唐洪武,徐夕荣,张志军.粒子图像测速技术及其在垂直进水口漩涡流场中的应用[J].水动力学研究与进展,1999,14(1):128-134.
- [22] CONSTANTINESEU S G,PATEL V C. Numerical model for simulation of pump-intake flow and vortices[J]. Journal of Hydraulic Engineering,ASCE,1998,124(2):123-134.
- [23] 赵永志,顾兆林,郝永章,等.自由水涡结构及运动特征的数值研究[J].西安交通大学学报,2003,37(1):85-88.
- (收稿日期 2006-11-15 编辑 骆超)