

基于 CPTU 的海相黏土固结状态和灵敏度估算方法

季 凯,吴跃东,刘 坚,王维春

(河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

摘要:由于用传统的方法(室内试验和原位试验)确定海相黏土的固结状态及灵敏度有较大误差,基于 CPTU 孔压消散曲线的末端无限逼近原位初始孔压且末端实测孔压与时间的倒数近似呈线性关系的特点,采用时间倒数外推法计算原位初始孔压,通过比较原位初始孔压和静水压力的大小,对海相黏土的固结状态进行定量分析和评价。现场试验结果表明,采用时间倒数外推法可以快速判断海相黏土的固结状态。采用固结状态参数对该土的欠固结程度进行定量评价,固结状态参数越小,欠固结程度越高。利用 CPTU 的锥尖阻力和侧摩阻力(剔除由夹层产生的异常参数)对海相黏土的灵敏度进行估算,并与原位十字板剪切试验的结果进行对比。结果表明:原位十字板剪切试验易受夹层的影响,灵敏度偏低;CPTU 试验确定的灵敏度能判断出夹层所在位置,计算结果更加灵敏,因此可用 CPTU 估算海相黏土的灵敏度。

关键词:孔压静力触探;孔压消散曲线;欠固结土;固结状态;灵敏度

中图分类号:TU413 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2012)05-0047-05

An estimation method of consolidation state and sensitivity for marine clayey soil based on piezocone penetration test//JI kai, WU Yuedong, LIU Jian, WANG Weichun (*Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: As traditional methods (laboratory tests and in situ tests) cause large errors in estimation of the consolidation state and sensitivity for structural marine clayey soil, based on the characteristics that the end part of the CPTU pore pressure dissipation curve approximates the in situ initial pore pressure, and the measured pore pressure of the end part of the dissipation curve is found to be linearly correlated to the inverse of time, this paper puts forward a new method of extrapolating the inverse of time to calculate initial pore pressure. Through comparison of in situ initial pore pressure and hydrostatic pressure, quantitative analysis and assessment of the consolidation state of marine clayey soil was carried out. In situ test results show that, with the new method, it can be quickly judged whether the marine clayey soil is consolidated completely. The consolidation state parameter is used to evaluate the degree of underconsolidation of marine clayey soil; the smaller the consolidation state parameter is, the higher the degree of underconsolidation. Meanwhile, the cone resistance and side friction (rejecting the unusual parameter caused by the interlayer) measured by CPTU are employed to estimate the sensitivity of marine clayey soil. Comparison with their in situ test and CPTU shows that the result of the in situ test is readily influenced by the interlayer and its sensitivity is lower; the higher sensitivity based on CPTU can be used to judge the location of the interlayer. Hence, the method based on CPTU is proven to be suitable for estimating the sensitivity of marine clayey soil.

Key words: piezocone penetration test (CPTU); pore pressure dissipation curve; underconsolidated soil; consolidation state; sensitivity

固结状态和灵敏度是岩土工程设计和确定软土结构性的两个主要参数。目前,土的固结状态主要通过室内固结试验^[1]确定,灵敏度主要通过室内无侧限抗压强度试验^[1]和原位十字板剪切试验^[2]确定。对于海相黏土等流塑性软土,这两个参数的确定很困难,因为该类土结构性非常强。室内试验不

可避免地会对原状土样构成扰动,原位试验又易受夹层的影响,导致对海相黏土固结状态和灵敏度的判断误差较大。孔压静力触探(CPTU)作为一种简捷、连续、灵敏和可靠的新型原位测试技术,相对于一般静力触探(CPT)而言,不仅可以量测出土的瞬间孔压及孔压消散过程,判断软土的固结状态,还能

在预定深度确定土体的灵敏度^[3],避免室内外试验对原状软土产生不利影响。本文基于孔压消散曲线的末端无限逼近原位初始孔压且末端实测孔压与时间的倒数呈线性关系的特点,采用时间倒数外推法计算连云港海相黏土原位初始孔压,通过比较原位初始孔压和静水压力的大小,快速判断该地区海相黏土的固结状态。同时,利用 CPTU 锥尖阻力和侧摩阻力(剔除由夹层产生的异常参数)对海相黏土的灵敏度进行估算,并与原位十字板剪切试验结果进行对比,对两者的差异进行探讨。

1 固结状态分析

土体的固结状态一般通过室内压缩试验获得。对于天然土,当超固结比大于 1 时,该土是超固结土;当超固结比等于 1 时,则为正常固结土。对于欠固结土,其现有有效应力即为前期固结压力,因此超固结比等于 1^[4]。Baligh 等^[5]建议利用 CPTU 在土体贯入过程中产生的超孔压与锥尖阻力组成测试参数,对黏土的固结状态作出评价。Cruz 等^[6]基于孔压消散曲线提出时间倒数外推法,快速判定土体是否固结。

地下水位线以下未扰动土层的孔隙水压力称为初始孔压。Lim 等^[7]通过大量的试验,认为初始孔压 u_0 由静水压力 u_w 和残余孔压 u_f 两部分构成,即

$$u_0 = u_w + u_f \tag{1}$$

u_f 为欠固结土中当前上覆有效应力作用下未完全消散的超孔压。在欠固结土中, $u_f > 0$; 在正常固结土和超固结土中, $u_f = 0$, 可以用 u_f 来判断土体是否固结。 u_f 可以由 CPTU 孔隙水压力的消散曲线求出,如图 1 所示。在理想状态下,某测试点的孔隙水压力由瞬时孔压 u_i 逐渐消散,初始阶段孔压消散较快,曲线的曲率较大。随着时间的增长,消散曲线趋近于一条直线(图 1 虚线框部分),无限逼近至稳定的初始孔压 u_0 。静水压力 u_w 为该点到地下水位之间的距离与水的密度和重力加速度的乘积。通过式(1)可求出残余孔压 u_f 。

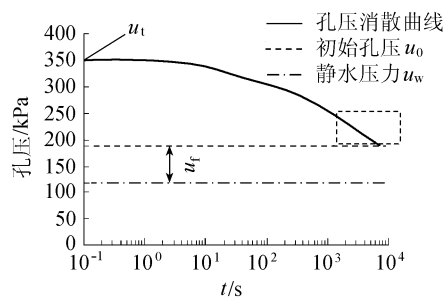


图 1 孔压消散曲线

饱和和软黏土的渗透系数很小,导致孔压消散过程非常缓慢,完全消散至初始孔压 u_0 有时需要十几

个小时。Torstensson^[8]基于孔穴扩张理论对孔压消散规律进行分析,认为消散水平达 50% 时可用于求取水平固结系数。Cruz 等^[6]认为孔压消散曲线中趋近于直线的一段已处于孔压消散曲线的末端,提出时间倒数外推法,即将图 1 中的时间坐标 t 变成时间的倒数坐标 t^{-1} ,利用线性回归直线连接虚线框中的孔压消散点反推交孔压坐标于一点,这一点被近似认为是初始孔压 u_0 ,如图 2 所示。

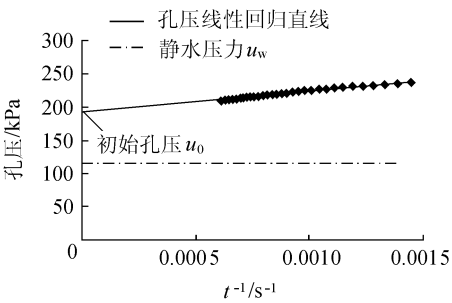


图 2 初始孔压计算示意图

通常利用前期固结应力(采用室内 Casagrande 法求出)与现有有效应力的比值来判断软土的欠固结程度,比值越小,欠固结程度越高。采用固结状态参数 U 对软土的欠固结程度进行判断^[7]:

$$U = \frac{u_i - u_0}{u_i - u_w} \tag{2}$$

对于欠固结土, $U < 1$ 且 U 越小,土的欠固结程度越高。

2 灵敏度分析

采用室内无侧限抗压强度试验求取灵敏度虽然可以人为控制加压条件,但原状土取样困难,尤其是对海相黏土等流塑性软土,将不可避免地产生扰动现象,严重影响软土灵敏度的判断。原位十字板剪切试验虽避免了对原状土的扰动及应力释放,但易受夹层的影响,导致数据的准确性及可靠性不高。因此,利用原位试验求土层的灵敏度,既不能破坏原状土的结构性,也要分析出是否有夹层的影响。

不同类型土体的孔压是不同的,夹层的存在使孔压的反应异常,因此孔压已被认为是判断夹层的重要因素^[9]。CPTU 贯入土体中,对不同土体产生的孔压具有非常有效的灵敏反应,这一点已被国外学者通过大量的试验验证。基于该结论,国外已利用 CPTU 的修正锥尖阻力和孔压参数比对土层进行详细的分类,形成相应的图形规范^[10]。本文利用 CPTU 对夹层孔压的灵敏反应判断夹层所在位置。在此基础上,利用 CPTU 对土层的灵敏度进行分析。Schmertmann^[11]利用静力触探的摩阻比 R_f 求出软土的灵敏度 S_l :

$$S_t = \frac{N_s}{R_f} \quad (3)$$

式中:参数 N_s 为固定值 (Schmertmann^[11] 建议该值为 15;Robertson 等^[12] 建议取 6;Rad 等^[13] 对饱和软黏土等不同类型的土质进行研究,发现 N_s 在 5~10 之间变化,并建议取 7.5); R_f 为静力触探的侧摩阻力 f_s 和锥尖阻力 q_c 的比值,由于夹层易对锥尖阻力和侧摩阻力产生异常影响,一般通过求取每层参数的平均值作为该层的代表值,具有一定的误差。

基于上述研究,首先根据 CPTU 测出的孔压变化判别出夹层所在位置,剔除在夹层范围内引起的锥尖阻力和侧摩阻力,然后在每米深度范围内利用算术平均法求出该范围内的锥尖阻力和侧摩阻力,再算出灵敏度。同时与原位十字板剪切试验所测出的值进行比较,对两者的差异性进行探讨,并分析夹层对十字板灵敏度的影响,具有一定的工程实际意义。

3 试验研究

3.1 试验场地

拟建的洋桥变电站工程位于连云港徐圩镇以南区域,该区域为海陆交互沉积的滨海平原,地形较为平坦,地势较低。场地内水系发育,交通条件较为便利。地基土层主要由素填土、黏土、淤泥、粉质黏土等组成。通过室内试验,得出各土层的基本物理力学性质指标,见表 1。其中,淤泥层通过 Casagrande 法求出的前期固结应力小于现有有效应力,可判断该淤泥为欠固结土。对于欠固结土,其现有有效应力即为前期固结压力,因此淤泥层超固结比 (OCR) 取值 1.00。根据设计要求,在该场地布置 2 个 CPTU 试验孔 K1 和 K2,并在 K1 和 K2 附近各布置 1 个原位十字板剪切试验孔位,方便结果对比。

表 1 各土层的主要物理力学性质指标

土 层	层厚/ m	密度 ρ / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率 $w/\%$	孔隙 比 e	塑性指 数 I_p	液性指 数 I_L	室内 OCR
素填土	1.5	1.82	37.8	0.9	19.8	0.67	1.31
黏 土	1.1	1.80	39.8	1.1	21.1	0.78	1.07
淤 泥	12.2	1.63	63.0	1.7	26.0	1.36	1.00
粉质黏土	3.2	1.93	28.1	0.8	15.3	0.51	1.29

3.2 仪器设备

试验采用河海大学岩土工程科学研究所引进的美国 Hogentogler 多功能数字式车载 CPTU 系统,配备了最新的功能测试探头。系统由钻探车、CPT 系统及 E4FCS 实时数据采集计算机软件与 CONELOT 等数据处理软件,能测得锥尖阻力、侧摩阻力、孔压、地震波和电阻率等数据。探头规格符合国际标准:锥角为 60° ,锥底截面积为 10 cm^2 ,侧壁摩擦筒表面积为 150 cm^2 ,透水石厚度为 5 mm ,位于

锥肩位置。CPTU 贯入速度为 2 cm/s ,贯入深度为 16 m ,每 5 cm 记录 1 次数据。

3.3 固结状态试验结果

主要研究海相淤泥土的次固结程度,在淤泥层进行 CPTU 孔的孔压消散试验,K1 和 K2 的消散深度分别为 12 m 和 8 m 。K1 和 K2 孔压消散曲线见图 3,从图 3 可以看出,在该深度范围内初始孔压较高,随着时间的增长孔压消散幅度较小,表明该地区海相黏土含水率较大,渗透系数低,孔隙水不易消散。

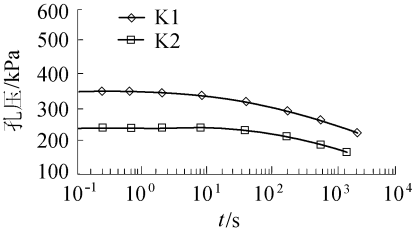
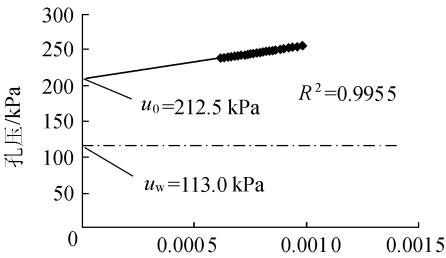
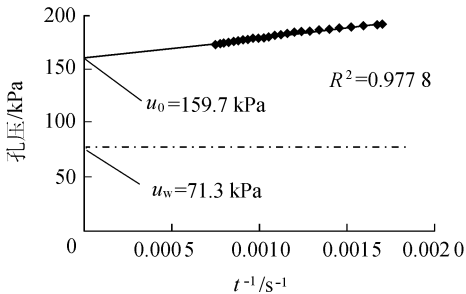


图 3 K1 和 K2 孔压消散曲线

采用时间倒数外推法求出初始孔压,并与静水压力进行对比,对海相淤泥土的固结状态作出判断,结果如图 4 所示。图 4 对 2 个孔的消散曲线末端进行线性回归处理,相关性很好 (复相关系数 $R^2 = 0.9778, 0.9955$),得出初始孔压 u_0 均比静水压力 u_w 大,表明该深度范围内土层当前上覆有效应力作用下存在未完全消散的超孔压,即存在残余孔压 u_f ,根据前文所述,可判定该海相淤泥土为欠固结土。利用式 (2) 求出该土层的固结状态参数 U ,判断土层的欠固结程度,结果见表 2。从表 2 可知,孔位的固结状态参数均在 0.5 左右变动。对比前期固结应力 p_c 和现有有效应力 p'_0 的比值,两者具有较好的



(a) K1



(b) K2

图 4 K1 和 K2 初始孔压计算示意图

一致性,表明该海相淤泥土属于欠固结程度较高的土。以上分析表明,采用 CPTU 消散试验数据判别软土固结状态和欠固结程度是合理可行的。

表 2 各点固结状态参数

CPTU 试验孔	瞬时孔压 u_t /kPa	初始孔压 u_0 /kPa	静水压力 u_w /kPa	残余压力 u_f /kPa	固结状态参数 U	p_c/p'_0
K1	351.2	212.5	113.0	99.5	0.58	0.64
K2	240.6	159.7	71.3	88.4	0.48	0.57

3.4 灵敏度试验结果

利用 CPTU 测出孔压随深度的变化,结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,K1 和 K2 中孔压在 0~5 m 素填土和黏土层之间成呈规律性增大,没有较大的突变,土质分布较均匀;在 6~13 m 淤泥层中孔压呈密集的锯齿形分布,其中包括几次较大的突变现象,且突变层很薄弱,表明探头在该层贯入的过程中遇到了与该层土性不同的薄弱层,导致孔压传感器所测得的孔压不相同。由此可以得出以下结论:在淤泥层中出现夹层,有些夹层的渗透性极好,会导致孔压值迅速降低,该类夹层可能为粉砂类土层,这与钻孔试验的结果是一致的。

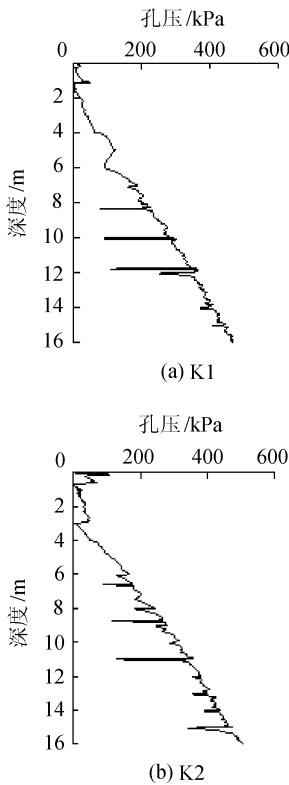


图 5 孔压随深度的变化

在 CPTU 孔压突变的基础上确定夹层位置,剔除夹层产生的锥尖阻力和侧摩阻力,然后在每米深度范围内利用算术平均法求出该范围内的锥尖阻力和侧摩阻力,算出摩阻比。Rad 等^[13]对饱和和软黏土等场地进行大量的研究,建议 N_s 取 7.5,认为该数值对包含海相黏土在内的大部分饱和软黏土具有普

遍适用性。结合式(3)估算出土体的灵敏度,同时利用十字板沿深度方向每隔 1 m 分别对原状土和扰动土进行剪切强度试验,求出相应的灵敏度,结果如图 6 所示。

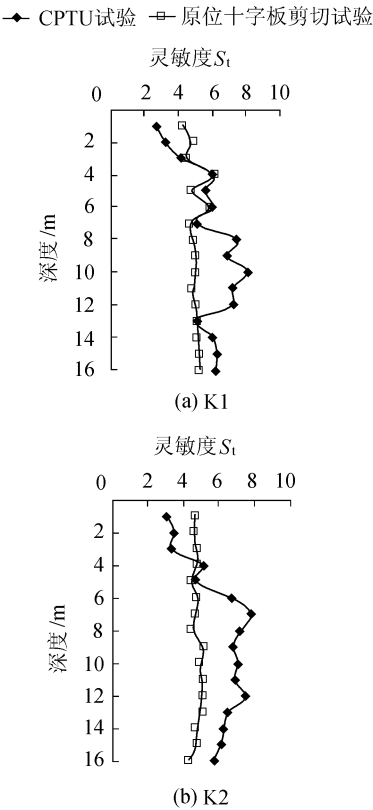


图 6 原位十字板剪切试验和 CPTU 试验确定的灵敏度比较

从图 6 可知,在素填土、黏土、淤泥层中,原位十字板剪切试验测得的灵敏度在 4~5 之间变化,各土层之间没有明显的区别。樊向阳等^[14]对上海地区土的灵敏度做过研究分析,得出上海地区不同土层的灵敏度。基于上海地区和连云港地区海相黏土的成因相似,与上海地区推荐值相比,可发现原位十字板剪切试验在连云港淤泥土层的结果偏小。根据本文前述,连云港地区淤泥层为饱和、流塑性土层的成因相似,与上海地区推荐值相比,可发现原位十字板剪切试验在连云港淤泥土层的结果偏小。根据本文前述,连云港地区淤泥层为饱和、流塑性土层的成因相似,与上海地区推荐值相比,可发现原位十字板剪切试验在连云港淤泥土层的结果偏小。天然含水量极高,孔隙比很大,属于欠固结程度较高的土层。由室内颗粒筛分可知,原状土层中含有粉砂、云母碎屑及贝壳碎屑等夹层,导致十字板在该层不排水抗剪强度偏高。当原状土被扰动破坏后,夹层与黏土充分搅拌混合,夹层中的粉砂及贝壳碎屑类似于混凝土中的砂石骨料起黏结作用,能增强土体的抗剪强度,同时粉砂等夹层构成的排水通道能使淤泥土的含水率迅速降低,有效应力得到增加,从而使整个重塑土的十字板抗剪强度变得更高。当原状土的抗剪强度增幅小于重塑土的抗剪强度增幅时,两者的比值变小,将导致该层土中灵敏度偏小。CPTU 试验测出的灵敏度比原位十字板剪切试验测

出的灵敏度略大,并有较好的区分度。在素填土和黏土层中,灵敏度保持在2~3之间。在淤泥层中,灵敏度保持在6~8之间。由CPTU试验分析出夹层所在位置,剔除夹层所产生的锥尖阻力和侧摩阻力异常值,使得测出的淤泥灵敏度比原位十字板剪切试验的灵敏度更高。因此可以得出:夹层对原位十字板剪切试验结果产生一定影响,CPTU试验所测出的灵敏度比原位十字板剪切试验测得的结果更加灵敏。

4 结 论

a. 地下水位线以下未扰动土的初始孔压由静水压力和未消散的残余孔压组成。对于欠固结土,土体中存在残余孔压,利用残余孔压可以迅速判断土体的固结状态。

b. CPTU 孔压消散曲线的末端无限逼近初始孔压且末端实测孔压与时间的倒数近似呈线性关系,基于此采用时间倒数外推法计算海相黏土的初始孔压,进一步得出残余孔压值。采用固结状态参数对该土的欠固结程度进行定量评价,结果表明固结状态参数越小,欠固结程度越高。

c. 夹层对原位十字板剪切试验测出的灵敏度有一定的影响,尤其是海相黏土中的粉砂、云母碎屑及贝壳碎屑导致原位十字板剪切试验测出的灵敏度偏低。

d. CPTU 试验利用摩阻比估算海相黏土的灵敏度,既能保证原状土的结构性,也能判断出夹层所在位置,剔除受夹层影响的参数后,计算结果更加灵敏,因此可用CPTU试验估算土体的灵敏度。

参考文献:

[1] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S].
[2] GB/T 50021—2001 岩土工程勘察规范[S].
[3] 刘松玉,吴燕开.论我国静力触探技术(CPT)现状与发展[J].岩土工程学报,2004,26(4):553-556.
[4] 卢廷浩.土力学[M].南京:河海大学出版社,2005:123-124.
[5] BALIGH M M, VIVATRAT V, LADD C C. Cone penetration in soil profiling[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1980, 106(4):447-461.
[6] CRUZ R I, MAYNE P W. Interpretation of CPTU tests carried out in lacustrine Mexico City soft clay [C]// Proceedings of Sessions of Geology. Shanghai: ASCE, 2006:24-31.
[7] LIM B S, TUMAY M T, SLAUGHTER S H. Estimation of stress history by partial piezocone dissipation tests [C]// The 2009 International Foundation Congress and

Equipment Exposition. Orlando: ASCE, 2009: 15-19.
[8] TORSTENSSON B A. The pore pressure probe [C]// Proceedings of Geoteknik Kedagen. Norway: [s. n.], 1977:1-15.
[9] 马淑芝,汤艳春,孟高头,等.孔压静力触探测试机理方法及工程应用[M].武汉:中国地质大学出版社,2007:67-68.
[10] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone penetretion testing in geotechnical praction [M]. London: Blackie Academic and Professiona, 1997:51-56.
[11] SCHMERTMANN J H. Guidelines for cone penetration test, performance and design [M]. Washington D. C. :US Federal Highway Administration, 1977:51-56.
[12] ROBERTSON P K, CAMPANELLA R G. Guidelines for geotechnical design using CPT and CPTU [M]. Vancouver: University of British Columbia, 1988.
[13] RAD N S, LUUNE T. Correlations between piezocone results and laboratory soil properties [R]. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute, 1986.
[14] 樊向阳,顾国荣,黄宏伟.上海地区土体灵敏度的研究 [J]. 岩土工程技术, 2004, 18(3):130-132.

(收稿日期:2012-02-13 编辑:骆超)

(上接第23页)

[7] 张小康,杨建东.水头损失的CFD计算[J].中国农村水利水电,2009(5):105-107.
[8] 陈祥荣,范灵,鞠小明.锦屏二级水电站引水系统水力学问题研究与设计优化[J].大坝与安全,2007(3):1-7.
[9] 陈祥荣,沈家俊.锦屏二级水电站调压室型式选择及水力计算[J].水力发电,1997(10):37-40.
[10] 向英,刘德祥.阻抗式调压室流场的数值模拟[J].中国农村水利水电,2006(9):125-127.
[11] 李向宾,侯靖,吴旭敏,等.调压室非对称孔口阻抗特性的数值模拟[J].华北电力大学学报,2011,38(4):91-95.
[12] 朱永忠,索丽生.随机分析方法及其在水击和调压室涌浪中的研究进展[J].水利水电科技进展,2007,27(3):90-94.
[13] 鞠小明,陈家远.阻抗差动式调压室的水力计算研究[J].水力发电学报,1996(4):54-60.
[14] 华富刚,秦柳燕.水电站调压室内三维湍流场数值模拟[J].水利水电科技进展,2007,27(5):47-49.
[15] 陈云良,张林,张锦堂,等.过水围堰溢洪的全域三维数值模拟[J].四川大学学报:工程科学版,2009,41(6):28-35.
[16] 丁果,鞠小明,陈祥荣,等.复杂结构差动式调压室阻力系数试验研究[J].四川水力发电,2010,29(5):151-154.

(收稿日期:2012-02-23 编辑:周红梅)