

文章编号: 1000-7598(2009)11-3435-06

真空预压条件下地下水位和出水量现场测试研究

周琦^{1,2}, 刘汉龙^{1,2}, 顾长存^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210098)

摘要: 为研究真空预压期间地下水位和出水量的变化规律, 采用研发的新方法对地下水位和出水量开展了现场监测, 并对测试结果进行了分析。分析结果表明, 真空预压初期加固区内地下水位下降较快, 之后处于相对稳定下降状态, 停止抽真空后地下水位快速回升。在此期间, 加固区外的地下水不断向加固区内渗流补给, 形成了一个以加固区为中心一定范围的降水漏斗, 直至加固区内外水位趋于动平衡为止。塑料排水板对真空预压条件下地下水位的变化影响显著。真空预压初期平均出水量较大, 随后迅速减少并趋于稳定, 加固区中央区域出水量要大于边缘区域出水量。

关键词: 真空预压; 地下水位; 出水量

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

Field tests on groundwater level and yield of water under vacuum preloading

ZHOU Qi^{1,2}, LIU Han-long^{1,2}, GU Chang-cun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Field tests on groundwater level and yield of water was carried out for researching the varying process of groundwater level and yield of water under vacuum preloading. It is concluded that the groundwater level descends rapidly at the beginning of vacuum preloading and then becomes relatively stable; it ascends rapidly after the end of vacuum preloading; there is groundwater recharge from the outside to the inside of the reinforced area during and after vacuum preloading, which forms a depression-cone, until the outside and inside groundwater level become balanceable in motion; the plastic drain has a great effect on the movement of groundwater; the average yield of water is large at the beginning of vacuum preloading and then decreases rapidly until it becomes stable; the average yield of water of the center area is larger than that of the margin area.

Key words: vacuum preloading; groundwater level; yield of water

1 引言

地下水位的变化是真空预压加固地基效果的重要反映, 同时也是真空预压加固机制研究的重要内容和依据。地下水位的变化问题一直以来都是争论和分歧的焦点, 很多学者对此课题开展了广泛的理论和试验研究。归纳起来存在3种观点, 即认为真空预压时地下水位可能会上升、不变或下降, 其中前两种观点目前只停留在理论研究层面上, 尚缺乏充分的试验验证, 而大多数人认为真空预压期间地下水位会下降, 这种观点也得到大量现场实测资料的支持^[1-7]。据文献[4]的统计分析, 若干真空预压

工程地下水位下降1.33~5.5 m不等, 并认为下降极限深度为6 m, 这其中固然有不同工程情况不同的原因, 但测试方法引起的误差也不容忽视。根据文献[8]的分析以及现场对比试验, 说明常规敞口式水位测管法无法测得真空预压条件下真实的地下水位。在此, 介绍一种适合于真空预压条件下地下水位测试的新方法^[8-9], 其测试装置由内外管、磁环浮标、限位器、卡口、密封帽、电感器等部分组成, 构造示意图如图1所示。新方法具有工作原理清晰、装置制作简单、测量时无真空压力泄露、测试结果直观可靠等优点, 用该法可以测得负压条件下加固区内的真实地下水位。

收稿日期: 2008-01-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50379010)。

第一作者简介: 周琦, 男, 1979年生, 博士研究生, 从事地基基础工程研究。E-mail: nickvictory@163.com

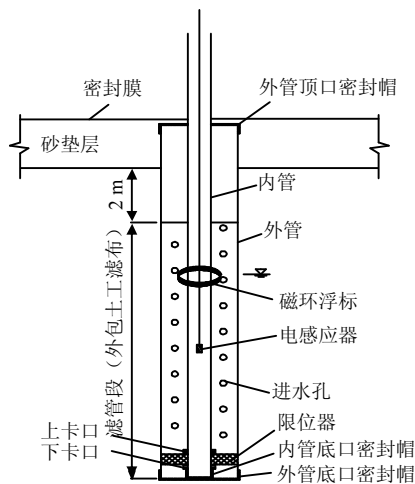


图1 新型地下水位测试装置构造示意图

Fig.1 New apparatus for measuring groundwater level

此外,真空预压期间出水量是地下水位变化结果的直接反映,两者关系密切,但有关这方面的研究文献很少。有学者认为,真空预压条件下加固区地下水位不变或上升。但大量工程实践表明,真空预压期间射流泵出水量很大,且抽水体积远大于地基沉降变形量。这明显与该观点相矛盾,因为无法解释出水的来源,也许可以解释为加固区周围有充足的地下水补给,但前提是土体的渗透性良好才能做到及时补给,然而加固区土层存在强透土层将会大大降低真空预压效果,在工程上必须加以处理^[10]。

本文对南京滨江大道新建工程 2.1 标段真空预压中地下水位和出水量进行了较全面的现场监测,在此基础上探讨和分析了真空预压过程中地下水位和出水量的变化规律。

2 现场试验概况

2.1 工程概况

本试验区位于南京滨江大道新建工程 2.1 标段真空预压加固区内,加固面积约为 1 3155 m²。场地地形呈东高西低,西邻长江,东侧为施工道路,比加固区高出 2 m 左右。塑料排水板打设深度为 18 m,呈梅花型分布,间距为 1.2 m,场地北端从边缘向内约 5 m 范围内未打设塑料排水板。加固区共布置 12 台射流泵,一般开 8~10 台泵。2007 年 8 月 30 日开始抽真空,10 月 16 日停止抽真空并开始堆载。真空预压期间受到停电、密封膜修补以及“韦帕”强台风等因素的影响,膜下真空度出现过短暂下降,其余大部分时间内真空度保持在 -80 kPa 左右。

2.2 工程地质及水文地质条件

加固区处于长江漫滩上,地层自上而下依次为:①素填土,软塑,亚黏土夹少量碎石填积,层厚 0.7~

5.0 m;②亚黏土,软~流塑,局部流失,层厚 0.7~2.7 m;③淤泥质亚黏土,流塑,局部为亚黏土,下部夹薄层亚砂土、粉砂;④亚黏土,灰色,流塑,局部为软塑状态,与粉细砂呈交互层,层厚 1.2~7.2 m;⑤粉细砂,稍~中密,夹亚砂土。

试验区地下水为浅层潜水,其中③淤泥质亚黏土层及④亚黏土层饱含地下水,但透水性较弱;⑤粉细砂层含水丰富,为场地主要含水层。地下水位稳定埋深在 0.2~1.2 m 之间,直接受大气降水和地表水系的入渗补给,水位受季节性影响,水位年变化幅度为 0.5~1.0 m。场地地下水为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ ($\text{K}^+ + \text{Na}^+$) 型水,对混凝土无腐蚀性。

2.3 现场试验方案

现场监测项目包括:表面沉降、分层沉降、水平位移、膜下真空度、孔隙水压力、地下水位和出水量,实测平面布置图见图 2。这里只重点介绍有关地下水位和出水量的现场试验监测方案。

为了解真空预压期间加固区内地下水位的变化过程,地下水位的测试采用上述介绍的新方法,在加固区内共设置 5 根新型水位管,埋设深度为 6 m,其中 NP1、NP2 和 NP3 处于加固区中央同一断面,均埋设在梅花形布置的排水板之间的中心位置,NP5 位于场地北端未打设排水板区域内,NP4 由于埋设过程中内管底部密封破损,未进行测量。同时,为与常规方法作对比,对应于 NP1、NP2 埋设了两根常规水位管 CP1、CP2,对比结果已在文献[8]详细介绍过。此外,距加固区边缘向外 3 m 和 20 m 处埋设了两根常规水位管 CP3、CP4,以监测真空预压期间加固区外地下水位的变化情况。开始抽真空和停止抽真空当天,地下水位分别取测试期间最低值和最高值,其余时间取上下午两次测量的平均值。

测试地下水位同时,对不同区域的 6 个循环水箱 SX1、SX3、SX6、SX7、SX9、SX10 的出水量进行了监测。测试方法如下:将容积 266 L 的塑料集水箱置于循环水箱较低一侧,利用密封膜将循环水箱的溢出水引入集水箱,测量水注满集水箱所需时间再反算出流速。测试过程中应将连接排水沟的循环用水管拔出,避免将循环用水计入出水量。

3 测试成果及分析

3.1 地下水位

3.1.1 加固区内地下水位

图 3 为加固区中央横断面地下水位与时间关系曲线。从图中可以看出,抽真空之前地下水位线比

较平缓, 东侧较西侧略高。2007 年 8 月 30 日开始抽真空后, 地下水位开始快速下降, 之后处于缓慢下降阶段。由于抽真空初始阶段 NP3 附近的侧面密封膜出现严重漏气致使局部真空度很低, 且排水沟水位很高已漫上密封膜, 造成其水位下降有限, 待密封膜修补完毕后水位下降速度加快。9 月 7 日由于停电导致膜下真空度由 -80 kPa 左右迅速降至 -30 kPa 左右, 期间加固区内地下水位有所回升。恢复供电开启射流泵后, 水位重新开始下降。其后长时间内膜下真空度保持在 -80 kPa 左右, 加固区中心地下水位下降速度较快, 抽真空 1 个月后进入相对稳定状态, 而加固区边缘处地下水位则相对平缓下

降。整体而言, 真空预压期间加固区中心地下水位下降幅度大于加固区边缘, 前者下降了 3.644 m , 后者为 1.971 m , 主要是因为边缘处较中心处更容易受到排水沟积水及加固区周围地下水的补给。10 月 16 日停止抽真空开始堆载, 由于拆除密封膜导致膜下真空度迅速降至 0, 地下水位均快速回升, 这同样说明真空预压期间地下水位是下降的。至于中心处水位与边缘处水位相差较多 (常规水位管 CP1 中水位回升正常), 可能是因为大量空气通过进水孔进入内外管之间并封闭于其中, 迫使管内水位不能继续上升, 而边缘处水位未降至水位管滤管段以下且水位回升较快, 所以没有空气进入内外管之间。

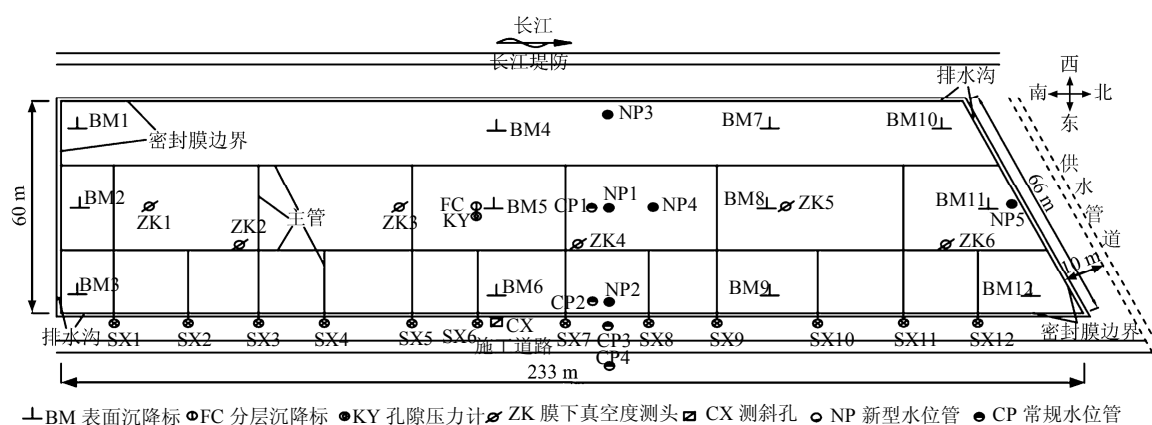


图 2 现场试验监测平面布置图

Fig.2 Layout of field tests

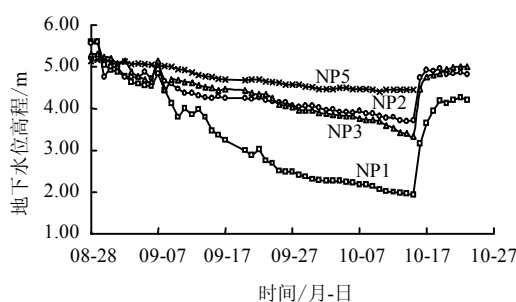


图 3 加固区内地下水位变化与时间关系曲线图

Fig.3 Variation of groundwater with time inside the reinforced area

本次试验对加固区内地下水位在开始抽真空当天的下降过程以及停止抽真空当天的回升过程进行了高频率监测, 测试结果分别见图 4、5。由于处于加固区不同位置, 所以受排水沟积水及加固区周围地下水补给的影响程度不同。加固区中心由于地下水渗流路径较远, 在开始抽真空后地下水位下降速度较快, 在停止抽真空后水位回升则有些滞后, 而

加固区边缘处地下水位的变化情况则基本相反, 但地下水位的变化均趋向于相对稳定地下水位或上升状态。值得注意的是, 图 5 中常规方法与新方法测得的结果虽都显示水位上升, 但在上升幅度、速度以及时间方面存在较大差异, 这可能与常规水位管水位较低以及两种水位管周围土体中的孔隙水压力不同有关。

此外, 对比两图可以发现, 在相同时间内开始抽真空后水位的下降幅度要小于停止抽真空后的上升幅度, 出现此现象的原因: ①抽真空初期由于受到停电、密封膜破损以及开启射流泵数量较少等因素的影响, 膜下真空度上升缓慢且不稳定, 不利于水位下降; ②根据补充勘察现场岩性描述资料, 加固区地层浅部存在粉砂、亚砂土薄夹层, 而在塑料排水板范围内下部地层 (埋深 11.0 m 以下) 为亚黏土和粉细砂交互层和粉砂层, 上述地层很有可能贯穿整个场地, 这种地层则有利于加固区外地下水向加固区内的渗流补给而使地下水位快速回升。

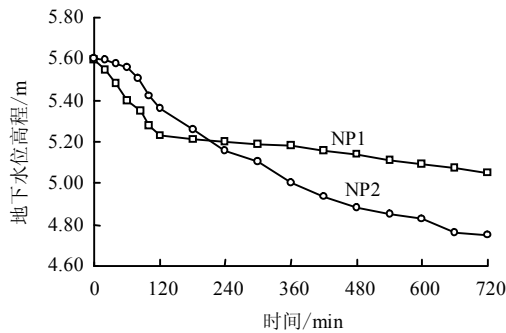


图4 开始抽真空后加固区内地下水位下降与时间关系曲线图

Fig.4 Descent of groundwater with time inside the reinforced area at the beginning of vacuum preloading

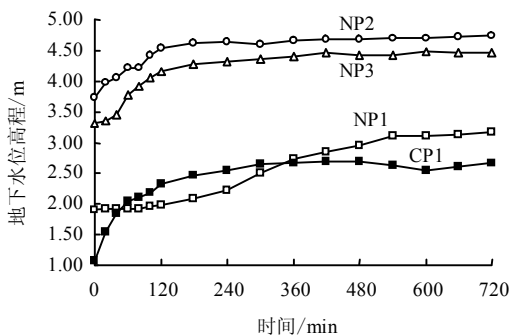


图5 停止抽真空后加固区内地下水位回升与时间关系曲线图

Fig.5 Ascent of groundwater with time inside the reinforced area after the end of vacuum preloading

3.1.2 加固区外地下水位

图6为真空预压期间加固区外地下水位测试结果。如图所示,位于距加固区边界3 m处的CP3在抽真空的前2 d内水位下降了0.913 m,之后受其旁边排水沟积水影响水位逐渐回升,然后又缓慢下降,停止抽真空后水位出现小幅波动后继续下降直至稳定。开始抽真空和停止抽真空后当天加固区外地下水位(CP3)变化情况见图7。相对而言,CP4在真空预压期间地下水位呈缓慢下降趋势,说明真空预压对加固区外地下水平面影响范围可以达到20 m,但季节、天气等因素对此处水位影响较大,如9月18~19日由于“韦帕”台风带来的强降雨,水位快速上升了0.665 m,所以单纯受真空预压影响,此处水位降幅可能要小于图6显示的差距(最大降幅0.837 m)。结合同期加固区内地下水位的变化情况,说明真空预压期间及其后一段时间内形成了一个以加固区为中心一定平面范围内的降水漏斗,加固区外的地下水不断向加固区内渗流补给,直至加固区内外水位趋于动平衡为止。

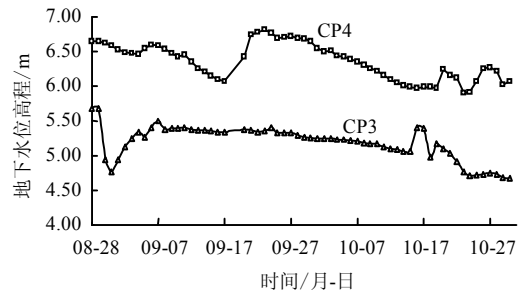


图6 加固区外地下水位变化与时间关系曲线图

Fig.6 Variation of groundwater with time outside the reinforced area

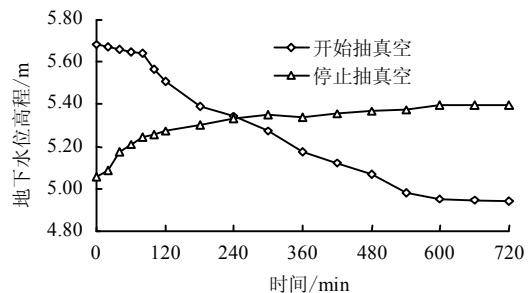


图7 开始和停止抽真空后加固区外地下水位变化与时间关系曲线图(CP3)

Fig.7 Variation of groundwater with time outside the reinforced area at the beginning and after the end of vacuum preloading(CP3)

3.1.3 塑料排水板对地下水位的影响

真空预压加固地基前都需事先打设塑料排水板或袋装砂井作为竖向排水体,其目的是传递真空压力,增加孔隙水排出的途径,缩短排水距离,加速土体固结^[10]。为研究塑料排水板对真空预条件下地下水位变化的影响,在场地北端未打设排水板区域设置了水位管NP5。从图3可以看出,同加固区中央区域相比,此区域地下水位在抽真空初期下降非常缓慢,说明排水板对地下水位的变化影响显著。9月10日NP5旁边的排水沟被回填,为防止附近的供水管道沉降过多并方便在其上填筑路基,开始在供水管道两侧10 m范围内对其下部土体进行了压力注浆处理,注浆深度为20 m,如此就切断了周围地下水对加固区内的补给。在此情况下,该区域的地下水位下降速度有所加快并逐渐趋于稳定,究其原因有两个:一方面,土体中孔隙水在压力差作用下发生竖向渗流,但由于浅层土体渗透性较低,其传递真空压力效果较差,所以由这种原因引起的地下水位下降有限;另一方面,由于排水板的传递作用,附近土体中形成的真空压力较高,地下水位较低,未打设排水板区域地下水会向该区域发生补给渗流直至平衡稳定。

3.2 出水量

本次现场试验在真空预压期间对 6 个循环水箱 SX1、SX3、SX6、SX7、SX9、SX10 的出水量进行了连续监测, 分别取 6 个循环水箱出水量的平均值、SX1 与 SX3 出水量的平均值、SX6 与 SX7 出水量的平均值作为总体平均出水量、边缘区域平均出水量和中央区域平均出水量, 测试结果见图 8。从图中可以看出, 真空预压期间单个水箱出水量变化波动很大, 且不同水箱出水量变化规律不尽相同。除 SX7 外, 其他水箱出水量基本呈下降趋势。相对而言, 总体平均出水量变化规律性较好, 抽真空初期

平均出水量较大, 可以达到 $145 \text{ m}^3/\text{d}$, 随后迅速减少并趋于相对稳定, 后期有所上升。9 月 7 日因停电没有出水量, 在 9 月 8 日的测试过程中发现出水量增长幅度较大。一般工程实践表明, 真空预压后期出水量会明显减少, 但由于本次真空预压时间相对较短, 只有 47 d, 所以未观测到此现象。此外, 由图 8 (d) 还可以发现, 加固区中央区域平均出水量曲线在大部分时间内都处于边缘区域平均出水量曲线上方, 且后期出水量增长较快, 说明中央区域出水量大于边缘区域出水量, 这与中央区域土体沉降大、地下水位降深大情况相符。

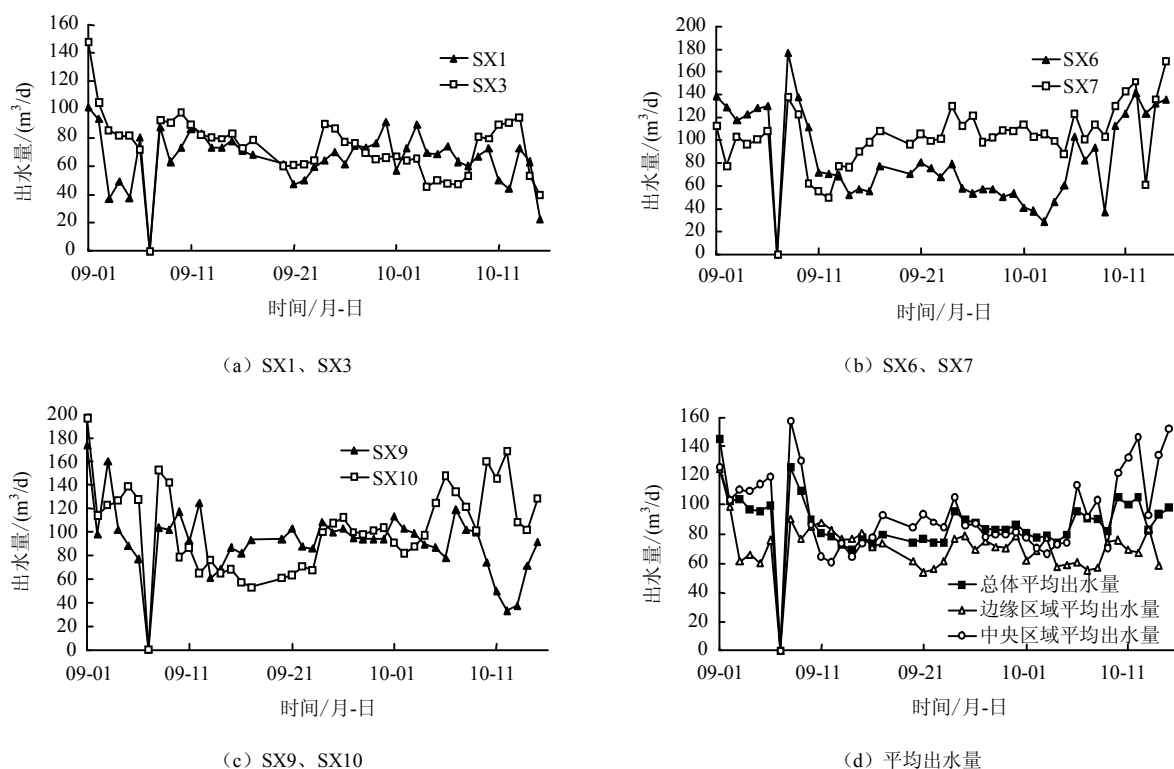


图 8 加固区出水量与时间关系曲线图
Fig.8 Yield of water of the reinforced area with time

5 结 论

(1) 若不考虑因天气、停电等干扰因素引起的地下水位波动, 真空预压初期加固区内地下水位下降较快, 之后处于相对稳定下降状态。停止抽真空后, 地下水位快速回升。处于加固区不同位置, 受排水沟积水和周围地下水补给影响不同, 所以加固区中心和边缘处地下水位的变化过程有所不同。

(2) 真空预压期间及其后一段时间内, 加固区外的地下水不断向加固区内渗流补给, 形成了一个

以加固区为中心一定平面范围内的降水漏斗, 直至加固区内外水位趋于动平衡稳定为止。

(3) 塑料排水板作为竖向排水体有利于传递真空压力, 增加孔隙水排出的途径, 缩短排水距离, 对真空预压条件下地下水位的变化影响显著。

(4) 真空预压期间单个水箱出水量变化波动很大, 但基本呈下降趋势。相对而言, 总体平均出水量变化规律性较好, 抽真空初期平均出水量较大, 随后迅速减少并趋于相对稳定状态。此外, 加固区中央区域出水量要大于边缘区域出水量。

参考文献

- [1] 张功新, 董志良, 莫海鸿, 等. 真空预压中地下水位测试技术探讨与改进[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1899—1903.
ZHANG Gong-xin, DONG Zhi-liang, MO Hai-hong, et al. Discussion and reform of groundwater level measuring technique in soft soil reinforced by vacuum preloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(9): 1899—1903.
- [2] 董志良. 堆载及真空预压法加固地基地下水位及测管水位高度的分析与计算[J]. 水运工程, 2001, (8): 15—19.
DONG Zhi-liang. Analysis and calculation of the soil foundation's groundwater level and measuring tube's water level under the situations of surcharge preloading and vacuum preloading[J]. **Port & Water Engineering**, 2001, (8): 15—19.
- [3] 彭劼, 刘汉龙, 陈永辉, 等. 真空-堆载联合预压软基加固对周围环境的影响[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 656—659.
- [4] 岑仰润. 真空预压加固地基的试验及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003: 40—43.
- [5] 朱建才, 李文兵, 龚晓南. 真空联合堆载预压加固软基中的地下水位监测成果分析[J]. 工程勘察, 2004, (5): 27—30.
- [6] 邱青长, 莫海鸿, 董志良, 等. 真空预压地基非饱和带探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 2): 3539—3544.
- QIU Qing-chang, MO Hai-hong, DONG Zhi-liang, et al. Discussion on unsaturated zone in soft ground improved by vacuum preloading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.2): 3539—3544.
- [7] 金小荣, 俞建霖, 龚晓南, 等. 含承压水软基真空联合堆载预压试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 789—794.
JIN Xiao-rong, YU Jian-lin, GONG Xiao-nan, et al. Field tests on soft soil with confined underground water by vacuum-surcharge preloading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(5): 789—794.
- [8] 刘汉龙, 周琦, 顾长存. 真空预压条件下地下水位测试新方法及其应用[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 48—51.
LIU Han-long, ZHOU Qi, GU Chang-cun. New method for measuring groundwater under vacuum preloading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(1): 48—51.
- [9] 顾长存, 王桂珍, 刘汉龙, 等. 一种真空预压地基加固区内水位测量装置与方法: 中国, 200610085337.2[P]. 2006—11—15.
- [10] 娄炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

第 3 届全国水工岩石力学学术会议第 1 号通知（征文通知）

由中国岩石力学与工程学会主办的“第 3 届全国水工岩石力学学术会议”将于 2010 年 8 月 28~29 日在上海市召开，现发出会议的第 1 号征文通知。

主办单位：中国岩石力学与工程学会

承办单位：同济大学等

协办单位：中国岩石力学与工程学会岩体物理与数学模拟专业委员会；中国岩石力学与工程学会测试专业委员会；中国岩石力学与工程学会青年工作委员会；《岩石力学与工程学报》编辑部

会议主要议题：①岩石、结构面力学和渗流性质；②岩体工程勘察、测试、探测与试验新技术、新方法、新设备；③岩体工程物理与数值模拟方法与工程应用；④岩体工程数字化技术与健康诊断理论；⑤高坝坝基设计理论与分析方法；⑥岩质边坡工程稳定性分析与治理；⑦大型地下洞室群设计与安全控制；⑧深埋长隧洞及 TBM 施工中的岩石力学问题；⑨岩体及坝基和边坡的动力特性及响应；⑩环境岩土工程问题。

会议论文与出版：提交的论文组织专家评审，对评审合格的论文，出版在论文集上。经专家评审后录用的优秀论文将在《岩石力学与工程学报》2010 年正刊和增刊上发表。论文请严格按照《岩石力学与工程学报》投稿要求编排（登陆网站：<http://www.rockmech.org>，点击“投稿须知”一栏，下载论文模板。

重要安排日期：2010 年 1 月 10 日，提交论文全文的截止日期；2010 年 3 月 31 日，论文评审结果返回作者；2010 年 4 月 20 日，正刊和增刊论文返回修改稿的截止日期；2010 年 5 月 20 日，会议论文集返回修改稿的截止日期。

大会秘书处：胡威，谢雄耀，陈建峰，张国柱

主办单位联系方式：1000029 北京市朝阳区北土城西路 19 号中国岩石力学与工程学会

联系人：方祖烈，胡威 **联系电话：**010—82998163，010—82998164 **传真电话：**010—82998163

电子信箱：csrme@vip.sina.com **学会网址：**www.csrme.com

承办单位联系方式：200092 上海市杨浦区四平路 1239 号同济大学地下建筑与工程系

(1) 联系人：张国柱，夏才初 **电话：**021—65980670，**传真：**021—65985140

手机：15921736198，13601726265 **E-mail:** zhangguozhu240101@163.com, tjxiacbb@126.com

(2) 联系人：谢雄耀，张子新 **电话：**021—65982986，**传真：**021—65985017

手机：13601681538，13501782144 **E-mail:** xiexiongyao@mail.tongji.edu.cn, zxzhang@mail.tongji.edu.cn