

一种涵闸软基加固技术

景宏彬¹, 陈国龙², 王红洲³, 邓友生⁴, 景宏君⁴, 孔祥东⁵, 崔福平⁶

(1. 陕西省水务集团有限公司, 陕西 西安 710068;

2. 陕西省汉中公路管理局, 陕西 汉中 723000;

3. 陕西省安康公路管理局汉滨公路管理段, 陕西 安康 725000;

4. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054;

5. 陕西省交口抽渭管理局, 陕西 渭南 714000;

6. 中铁一局集团有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 以陕西某水利涵闸软基加固工程为研究载体, 从加固机理、加固方法和施工应用三方面较为详细地介绍了该方法的研究技术成果。研究表明, 采用该方法加固水利工程涵闸软基效果好, 现场观测结果显示: 沉降量最大区域位于软基加固区中心, 沉降量达 1.99 m; 沉降量最小区域位于软基加固区边缘 (即距中心 30 m 处) 为 1.22 m, 即沉降量分布呈现“凹盆”趋势; 抽真空初期沉降值较大, 曲线变化趋势较陡, 至沉降稳定逐渐趋于平缓; 真空预压过程中, 加固区不同深度土体孔隙水压力值变化趋势与土体固结规律相同, 即随着真空预压时间的增长, 其大小与联合堆荷载值呈正相关增长趋势, 而后逐渐趋于平稳; 与加固前相比, 加固后土体地基承载力和抗剪强度均大幅提高, 提高比例分别达到 57% ~ 85% 和 148% ~ 173%; 从加固区纵深分析, 上层土地基承载力变化明显大于下层土, 相比而言, 低塑性粉质黏土抗剪强度提高效果优于其他土质。

关键词: 水利工程; 真空堆载; 联合预压; 涵闸; 加固技术

中图分类号: TV671

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2018)04—0164—06

A Soft Soil Foundation Reinforcement Technology in Culverts and Water Gates

JING Hongbin¹, CHEN Guolong², WANG Hongzhou³, DENG Yousheng⁴, JING Hongjun⁴,

KONG Xiangdong⁵, CUI Fuping⁶

(1. Shaanxi Water Affair Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710068, China;

2. Hanzhong Highway Bureau of Shaanxi Province, Hanzhong, Shaanxi 723000, China;

3. Ankang Highway Bureau of Shaanxi Province, Ankang, Shaanxi 725000, China;

4. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

5. Jiaokou Irrigation Management Bureau of Shaanxi Province, Weinan, Shaanxi 714000, China;

6. China Railway First Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: This paper took culverts and water gates of Shaanxi' water conservancy reinforcement soft foundation engineering as an example, technical achievements of this method are introduced in detail which includes three aspects of strengthening mechanism, strengthening methods and construction application. Research results show that it is a significant method for reinforcement soft foundation of Culverts and water gates, site observation results show that the largest settlement area is located in the center of the soft foundation reinforcement area, and the settlement amount is up to 1.99m. The minimum settlement area is located on the edge of the soft foundation reinforcement area (that is, the center of 30m), which is 1.22m, that is, the settlement distribution presents a "concave basin" trend. The large settlement value corresponds to the early stage of vacuum pumping, the curve trend is steep, and end the settlement stability gradually

收稿日期: 2018-03-14

修稿日期: 2018-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41672308)

作者简介: 景宏彬 (1968—), 男, 陕西吴堡人, 高级工程师, 主要从事水利工程新技术研究与管理工作。E-mail: 424689213@qq.com

通讯作者: 陈国龙 (1970—), 男, 陕西汉中, 高级工程师, 主要从事土木工程新技术研发与管理工作。E-mail: 13689101111@163.com

tends to be gentle. In vacuum preloading process, as time goes on, the pore water pressure in different depths of reinforcement area is similar to the consolidation law of soil in the vacuum preloading process, the values is positively related to the combined surcharge load value, and then end to the gradually stabilized. Compared with previous reinforcement, the bearing capacity and shear strength of the soil foundation are improved greatly, and the ratio of the soil foundation is 57% to 85% and 148% to 173% respectively. From the depth analysis of the reinforcement area, the bearing capacity of the upper soil foundation is significantly larger than that of the lower soil, compared with the lower soil, the shear strength of the low plasticity silty clay is better than that of the other soil.

Keywords: water conservancy engineering; vacuum and surcharge; combined preloading; culverts and water gates; reinforcement technology

在土木工程软基处理过程中,采用何种加固方法,首先要分析研究软基类型,然后确定采用合适的方法。涵闸等水利工程与公路软基加固等不同之处在于:①前者需卸除堆土荷载来进行后续工序,有可能出现地基回弹现象,而后者为加固结束后不卸除堆载,地基回弹现象不会出现;②前者要求加固区域内沉降均一,为均匀沉降,而后者加固后沉降趋势为凹曲线型,即加固区域中间沉降值较大,边缘沉降值较小,即呈现不均匀沉降。正是由于涵闸工程地基的特殊要求,目前已经采用的典型方法有:如张华^[1]衍应用松木桩加固涵闸工程淤泥软土地基;宋平等^[2]采用土工织物加固处理万泉河涵闸软基;薛峰等^[3]分析了高压旋喷桩及高喷连续墙在加固水库坝体与涵闸地基上的应用,并探讨设计中的相关问题;刘继伟等^[4]采用水泥土搅拌法加固处理涵闸软土地基;左梓芳等^[5]应用水泥粉喷桩加固涵闸基础工程,论述在实际应用中影响水泥粉喷桩质量的因素以及质量控制的方法;王吉水等^[6]以北江大堤乐排河水闸采用钻孔灌注桩施工为例,介绍涵闸软基钻孔灌注桩的施工方法和施工中值得注意的一些问题;也有采用土壤固化剂,压密桩,但报道较少。

真空一堆载联合预压法处理涵闸工程软基应用较少,王强等^[7]和吴跃东等^[8]分别研究了该方法在淮河入海水道涵闸软基处理工程中的应用,均认为加固效果明显、加固深度大、有效减少了工后沉降等优点,但该方法的后续研究应用也未见报道,因此运营期的加固效果如何也是未知。由于水利工程与其他行业不同的特点,质量要求不同,所采用的工程处治方法也不尽相同。该方法所具有的明显减少工后沉降、稳定的填筑过程和显著缩短工期等特点,是否适合在水利工程中大面积推广,还需进一步研究探索。本文从真空堆载联合预压法加固机理、加固方法和施工应用方面入手,结合陕西省某电站涵闸软基加固工程,系统研究该方法在水利工程涵闸软基加固中的适用性,为进一步大面积推广应用该方法

提供详细资料。

1 加固机理

瑞典皇家地质学院杰尔曼教授(Professor w. kjellman)1952年最早提出真空预压法,其视加固区域为一个密封体,真空泵为负压源将需加固土体中孔隙水和孔隙气抽出,达到土体固结、地基承载力提高的目的。堆载法较简单也较常用,即在加固区域上部进行堆载,达到地下水位降低、土体固结的目的。一般真空预压法所产生荷载效果有限(一般80 kPa左右,相当于4 m~5 m填土荷载),需与堆载法联合应用,才能达到理想效果^[9]。即真空堆载联合预压法由真空负压和堆载正压使软基土体中孔隙水压力产生压力差,通过排水系统将水向外排出,达到土体固结变形目的。软基土体在真空负压作用下发生收缩变形,与堆载引起的土体挤出变形相抵消,加固区不易产生失稳现象,可极大提高加荷速率,缩短工期。相对于加固土体而言,不论是真空预压、堆载预压,还是真空一堆载联合预压法,都为加固土体内部结构不断重组的过程。真空预压条件下,真空压力是直接作用在加固土体中孔隙流体上,然后间接作用于土颗粒上;而堆载预压力是直接作用于土骨架上而引起孔压变化并发生固结,两者的作用步骤相反,虽然最终结果接近,但直接作用的堆载预压略优于真空预压;真空一堆载联合预压兼具真空预压和堆载预压优点,轴向变形大于真空预压,加固效果优于堆载预压,总体加固效果更好^[10]。

2 应用研究

2.1 工程概况

陕西省某电站涵闸工程位于渭北平原废渭河冲积平原区,土质主要以松散沉积物为主,全部为软基加固区,总面积达8 150 m²,现场钻孔勘测地层分布自上而下为:淤泥质土层—低塑性粉质黏土—砂混黏土,表1可以看出,每层土含水率高,均超过

35%;十字板剪切强度低,介于 18 kPa ~ 23 kPa 之间;中间层厚度较大,达 12.2 m。对于该涵闸工程而言,中间低塑性粉质黏土层厚度大,剪切强度较小,地基承载力较低,工程性质较差,为控制涵闸基础变形和稳定的关键层。为了保证工期,短时间内达到加固软基目的,施工中采用打设塑料排水板,作为竖向排水通道的真空—堆载联合预压加固方案。

表 1 软基加固区地基土层基本参数

土层名称	厚度 /m	含水率 /%	承载力 /kPa	抗剪强度 /kPa
淤泥质土	2.8	35	66	18
低塑性粉质黏土	12.2	49	72	22
砂混黏土	3.5	50	75	23

2.2 施工技术方案

首先进行加固区场地清表、平整,压实达到规定要求,同时开挖压膜沟,顺序铺筑土工布和密封滤膜,在其 10 m 范围内,回填 30 cm 厚砂垫层压实,以防漏气;软基区打设塑料排水板,软基顶层和排水板顶部高程相同;其次,软基顶层上按矩形排列方式,均距布置铺设 PVC 硬质排水滤管后,铺筑 40 cm 砂砾垫层作为横向排水体,要求滤管埋深 20 cm;第三,采用抽真空装置抽吸膜下和软基中水气,在负压 80 kPa 状态下运行 100 d,即可达到预期目的;第五,随时观测加固区地表面沉降、分层沉降和孔隙水压力等指标,掌握软基沉降变化规律和加固效果,图 1 为塑料排水板平面示意图,图 2 为施工工艺。

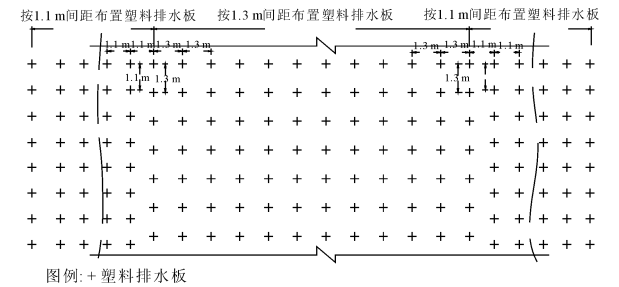


图 1 塑料排水板平面示意

2.3 现场观测结果分析

施工现场分别采用分层沉降仪、真空表和孔隙水压力计,进行加固区软基表面沉降、分层沉降、孔隙水压力等指标的跟踪监测。各种检测仪器具有如下功能和特点:

(1) 分层沉降仪。一般由探头、磁铁环、数值指示器和探头护管等组成。安装顺序为:待测土体钻孔→磁铁环埋置所测层位→孔中注入砂浆→填充护管与孔壁之间空隙。其测试原理为:将磁铁环埋置

于待测土体所测部位,当待测位置土体产生形变时,该位置土体和磁铁环会产生同步的回弹或下沉,此时外部指示器显示所测应变值,即为磁铁环位移值(回弹值)。

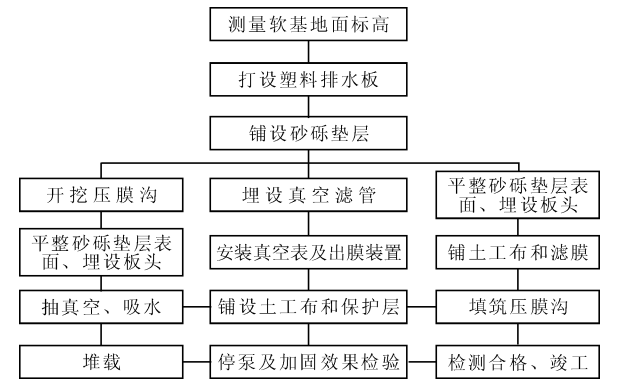


图 2 施工工艺图

(2) 真空表。其表征值为真空度,即所测空间气体的稀薄程度,一般用“真空度高”(“好”)和“真空度低”(“差”)表示。真空表所测结果为总压力,包括气体和蒸汽的压力,其与被测气体种类、成分及其性质无关,使用时应注意测量范围、使用温度、垂直安装、避免震动和碰撞等问题,以确保测量精度。

(3) 孔隙水压力计。即渗压计,一般埋置于所测位置,用于测定孔隙间水压力。本文在施工前预先将其埋设于所测软基不同深度,测定施工前后和施工过程中孔隙水压力变化。孔隙水压力对地基危害较大,施工前一般可采用插入塑料排水板法减压。

2.3.1 地基表面沉降

由固结沉降相关理论知识可知,由打设塑料排水板产生的沉降量和真空—堆载联合产生的沉降量组成地基表面总沉降。由图 3 地基表面沉降与时间关系曲线可以看出,软基加固区中心沉降量最大,沉降值为 1.99 m;而沉降量最小区域位于软基加固区边缘(即距中心 30 m 处),沉降量为 1.22 m,即沉降量分布呈现“凹盆”趋势,表明该方法具有显著预压效果。同时,也可以看出,沉降值较大所对应为抽真空初期,曲线变化趋势较陡,至沉降稳定逐渐趋于平缓,可以表明该方法加固软基效果好,土体固结变化相对稳定。

2.3.2 分层沉降

图 4 为软基加固区中心点内部区域的分层沉降曲线,与图 3 相比可知,各层沉降曲线变化趋势与地表面沉降曲线趋势相同,尤其在深度大于 10 m 以上区域,加固效果好。

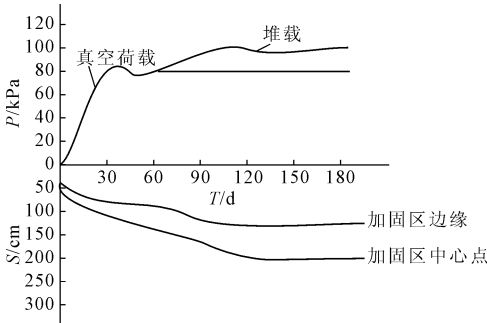


图 3 地表面沉降 - 时间曲线

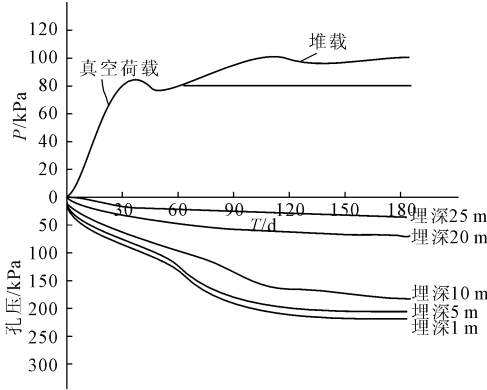


图 4 分层沉降 - 时间曲线

2.3.3 孔隙水压力

孔隙水压力能直接掌握土体固结状态,根据其变化规律可以知道软基土体强度增长规律。由软基加固中心区不同深度孔隙水压力变化曲线(见图 5)可以看出,随着时间的增长,加固区不同深度土体孔

隙水压力值,在真空预压过程中变化趋势与土体固结规律相同,大小与联合堆载荷载值呈正相关增长趋势,而后逐渐趋于平稳。

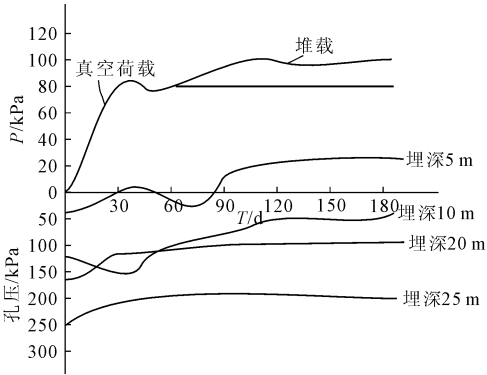


图 5 孔隙水压力 - 时间曲线

2.3.4 地基承载力

表 2 为软基加固区加固前与加固后承载力试验结果。由表 2 可以看出,与加固前相比,加固后土体地基承载力提高约 57% ~ 85%,抗剪强度提高约 148% ~ 173%。从加固区纵深角度分析,上层土地基承载力变化明显大于下层土,相比而言,低塑性粉质黏土抗剪强度提高效果优于其他土层土质。

2.4 施工质量保障措施

要获得较好的加固效果,必须从加固所需原材料、施工工艺等方面把关。本次涵闸软基加固工程采取如下相应保障措施。

表 2 加固前后承载力和抗剪强度试验值

土层名称	承载力/kPa		承载力 提高率 /%	抗剪强度/kPa		抗剪强度 提高率 /%
	加固前	加固后		加固前	加固后	
淤泥质土	66	122	85	18	45	150
低塑性粉质黏土	72	113	57	22	60	173
砂混黏土	75	120	60	23	57	148

2.4.1 排水系统

排水系统主要为塑料排水板,加固过程中要求:(1) 塑料排水板外观质量和各项性能指标,应严格遵守相关设计要求或规范,确保性能合格、质量可靠;(2) 塑料排水板施工时,打设间距、深度和垂直度应满足设计要求,尤其确保桩管垂直度偏差不大于 ±1.5%;(3) 塑料排水板打设过程中不能出现断带、扭结以及撕破滤布现象,并将高出砂砾垫层部分剪断或弯于砂砾垫层中(不小于 30 cm)。

2.4.2 真空滤管

因软基加固场地条件有限,要求:(1) 滤管材料

采用 PVC 硬质管(其上有孔,主滤管直径 Φ90 mm,壁厚 2.6 mm,支滤管直径 Φ50 mm,壁厚 2.3 mm),按设计要求布置为矩形排列式(间距 1.2 m,局部间距 1.1 m,梅花形布置),并牢固连接,确保能适应地基不均匀沉降变化,在径向真空压力下不变形;(2) 选用与排水砂砾垫层渗透系数相当的无纺土工布滤膜包于滤管外,防止孔眼堵塞和反滤;(3) 滤管埋设深度需 ≥20 cm,且尽量埋置于砂砾垫层中部,确保滤水孔排水通畅。

2.4.3 真空密封膜

真空密封膜材料及施工要求:(1) 膜的密封性

和韧性要好;(2)膜的抗老化能力和抗穿透能力要强;(3)需使用工厂一次热合成型的专用土工膜;(4)需在砂砾垫层上铺覆一层土工布(规格为 300 g/m²),用来保护真空密封膜;(5)按先后顺序铺设三层密封膜;(6)铺设过程中及时清理膜上残留砂砾颗粒,随时检查密封膜完整性,及时用专用胶粘补破损和漏洞;(7)密封膜上铺覆一层土工布(现场缝制,规格同前),在其上再铺 50 cm 砂砾垫层,以缓冲后续施工对密封膜的影响,最后按设计要求用静压法压实素土至规定标高。

2.4.4 压膜沟

压膜沟施工技术要求如下:(1)按设计要求开挖压膜沟,深度≥1.5 m,人工用铁锹修整压膜沟壁至光滑、无凸起效果;(2)人工将真空密封膜顺沟壁压入,并人工分层回填踩实黏素土至设计高程,及时覆水于压膜沟内,确保真空膜周边达到密封效果。

2.4.5 真空泵及射流箱

(1)严格按操作规程进行真空预压;(2)采用射流真空泵进行空气抽吸,要求空抽真空吸力须达到 90 kPa 以上,且密封膜下真空度应稳定在 80 kPa 以上;(3)采取适当措施密封处理好止回阀等各接头,确保设备正常运行,达到预期加固效果。

2.4.6 施工动态监测

按照设计要求,安置好各种监测仪器,及时进行加固区地基表面沉降、分层沉降等动态监测,确保涵闸加固工程施工达到预期效果。

2.5 施工技术难点

本次真空堆载联合预压加固涵闸软基施工工期紧、难度大,为了确保能达到预期加固效果,在施工过程中主要解决了以下两方面技术难点:

(1)塑料排水板导管靴口的质量控制。一般在打插塑料排水板过程中较易出现回带现象,本文主要采取了如下措施:①选择有经验的施工队伍进行打插;②管靴按设计要求施工压住排水板头,由水泵往管靴内注水增加管靴内压力,达到防止回带,克服导管口进泥现象。

(2)真空射流装置的技术改进。大多数真空堆载预压法加固时采用离心泵式真空射流装置进行抽水,本文经过反复比较试验,确定改造为潜水泵式真空射流装置,并采用防水绝缘型密封电缆、将真空泵与射流箱安装在一起的技术改进方案,这样既有效缩短抽水途径,又极大地提高雨季和多水区域的施工工作效率。

2.6 经济效益分析

表 3 为本文方法与其他典型方法工期费用对比,可以发现,真空一堆载联合预压加固涵闸软基施工工期最短,尽管超载预压单价最低,但其施工工期较其长约 3 倍,即长约 10 个月,若考虑节约工期所带来的收益,采用真空一堆载联合预压法带来的经济效益远超过超载预压法,而且根据现场施工发现,该方法具有简易快速、过程管控和质量监督简单等显著特点。

表 3 不同加固方法工期费用对比

加固方法	加固处理单价/(元·m ⁻²)	施工工期/d
真空一堆载联合预压(抽真空 100 d)	150(不含铺设砂砾垫层费用)	110
超载预压(4.5 m 高填土,2.5 m 超载)	85(1 层土工格栅、1 层土工布,填土方单价 25)	400
CFG 复合地基(粉喷桩按 10 m 计算)	320(间距 1.5 m、粉喷量 50 kg/m)	150

3 结 论

(1)真空一堆载联合预压加固软基的方法,具有施工方便,加固效果显著的特点。在加固过程中,真空预压可产生负压,使被加固土体产生向内收缩变形,抵消因外部堆载引起的向外挤出变形,加固土体在较短时间内固结,地基较难出现因填土速率快而产生失稳现象,故堆载速度可不受限制,能使地基至少提前半年达到稳定,相比其他方法而言大大缩短了工期,工程进度加快、工程造价降低作用非常显著。

(2)从经济角度考虑,真空一堆载联合预压工

程费用较一般超载预压偏高,但可提前近 10 个月工期,相比也较为经济;再与 CFG 桩等软基处理方案相比,尽管工期相差不大,但其费用仍显著降低。

(3)因深淤土地基边界条件较为复杂,计算工况与实际工况有偏差,故采用该法进行软基处理时应考虑:①计划工期要充足;②要较大的施工作业场地,尤其堆土时还要考虑土源;③防止卸载后地基回弹,卸载后应及时浇筑垫层、底板,较短时间内加上荷载,防止回弹后二次沉降;④排水板头设计应考虑封堵问题,若不进行封堵,地下水仍会沿排水板上溯,会影响已加固地基;⑤因加固区内地下土层快速固结沉降,在加固区与非加固区结合部位容

易产生不规则裂缝,故设计应考虑周围裂缝的处理措施;⑥ 采用该法加固水利工程涵闸软基,应根据涵闸工程的特点,在主体工程施工结束后,分级加载回填土,避免沉降过快,沉降量过大,地基出现失稳的现象。

(4) 真空—堆载联合预压法由于其施工中的过程管理和质量监测简单易行,故可以大力推广。

参考文献:

[1] 张华衍. 松木桩在涵闸软基处理中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2010(12):68.

[2] 宋平原,张 鹏,肖明恩. 土工织物在万泉河涵闸软基加固处理中的应用[J]. 河南水利, 2002(5):54.

[3] 薛 峰,张 亚,王莉莉. 高喷法在处理水库坝体及涵闸地基中的应用[J]. 治淮, 2016(6):25-27.

[4] 刘继伟,张 众. 水泥土搅拌法在涵闸地基加固处理中的应用[J]. 河南水利与南水北调, 2010,9(8):142-143.

[5] 左梓芳,王 胜. 粉喷桩在涵闸基础工程中的应用[J]. 安徽水利水电职业技术学院学报, 2005,5(3):33-34, 40.

[6] 王吉水,钟灵峰. 涵闸软基的钻孔灌注桩施工方法[J]. 水利科技, 2004(2):47-58.

[7] 王 强,顾长存,侯新宇. 真空—堆载联合预压法在水利工程中的应用与研究[J]. 北京水利, 2004(1):21-23, 60.

[8] 吴跃东,殷宗泽,郭纪中. 真空联合堆载预压法加固水工建筑物软基效果检验[J]. 岩土力学, 2007,28(4):738-742.

[9] 王 强,顾长存,张伟东. 真空—堆载联合预压加固区

形状对加固效果的影响[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(1):64-66.

[10] 彭 劼,刘汉龙,丰土根,等. 真空预压法及真空—堆载联合预压法的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2005,26 (S2):103-106.

[11] 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.

[12] 顾龙声,顾长存,吴跃东. 关于胶州湾地区真空—堆载联合预压沉降计算的研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(23):5918-5922.

[13] 柴玉卿. 真空堆载联合预压法的固结与渗流研究[D]. 南京:河海大学, 2001.

[14] 龚晓南,岑仰润. 真空预压加固软土地基机理探讨[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002,35(2):7-10.

[15] 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.

[16] Kjellman W. Consolidation of Atmospheric Pressure. Proc Conference on Soil Stabilization MIT[M]. Boston: [s. n], 1952:55-59.

[17] 彭 劼,刘汉龙,陈永辉. 真空—堆载联合预压法加固机理讨论[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003,31 (5):560-563.

[18] 刘 贺,高明军,王 剑. 真空—堆载联合预压加固海域吹填土地基的适用性及特点探讨[J]. 科学技术与工程, 2017,17(7):224-227.

[19] 刘汉龙,李 豪,彭 劼,等. 真空—堆载联合预压加固软基室内试验研究[J]. 岩土力学, 2004,25(1):145-149.

[20] 向 军. 真空联合堆载预压法加固软土路基的施工技术[J]. 科学技术与工程, 2007,7(14):3614-3616.



(上接第 119 页)

[11] 戴 悦. 基于信息量模型的三峡库区滑坡区域危险性评价方法研究[D]. 北京:清华大学, 2013.

[12] 齐 识,宁 娜,马金珠. 甘肃南部武都区滑坡危险性评价[J]. 长江科学院院报, 2015,32(4):28-34.

[13] 刘树林,强 菲,聂守智. 勉县地质灾害分布与影响因素的相关性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2017,15 (1):165-170.

[14] 赵 森,黄 磊. 秭归县三分田滑坡成因分析及稳定性评价[J]. 水利与建筑工程学报, 2016,14(3):113-117.

[15] 吕世民,吴 凯,杜光波,等. 宁夏隆德县地质灾害发育特征及形成条件分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2015(6):42-47.

[16] 邓 辉,何政伟,陈 晔,等. 信息量模型在山地环境地质灾害危险性评价中的应用——以四川泸定县为例[J]. 自然灾害学报, 2014,23(2):67-76.

[17] 张 俊. 三峡库区万州区滑坡灾害风险评估研究[D]. 北京:中国地质大学, 2016.