

深厚人工填土地基处理效果评价

吉建华

(化工部郑州地质工程勘察院,河南郑州 450002)

【摘要】 在深厚填土地区进行工程建设,面临的主要问题是地基处理方法的选用和处理效果检测评价。通过对强夯法在工程中应用效果的检测实例,证明强夯法可以有效处理深厚填土地基,效果较好。通过回归分析,建立了线性回归方程,可以初步评价地基承载力,对类似工程应用具有参考价值。

【关键词】 深厚填土;强夯处理;检测;承载力

【中图分类号】 TU 472

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2017.04.010

Evaluation on Treatment Effect of Deep Artificial Filled Ground

Ji Jianhua

(MCI Zhengzhou Geological Engineering Investigation Institute, Zhengzhou 450002, Henan, China)

【Abstract】 During the engineering construction in the deep fill areas, the major problems are the selection of the ground treatment methods and the evaluation of the effects. Through the detection cases of the engineering application of the dynamic consolidation, it is proved that the dynamic consolidation can improve the deep fill ground effectively. By the regression analysis, the linear regression equation is established, which can be used in the preliminary assessment of the ground bearing capacity. This method has important reference value to the similar engineering applications.

【Key words】 deep fill; dynamic consolidation; testing; bearing capacity

0 引言

强夯法是通过反复将重锤提到一定的高度使其自由落下,对地基土进行冲击以加固土体,使土体结构被破坏,孔隙被压缩,提高地基的承载能力和压缩性能。强夯处理广泛用于填土、黄土等的深层加固处理,其优点是可以有效提高地基土的强度、降低土的压缩性、消除湿陷性,同时还可提高土层的均匀程度,减少不均匀沉降等,而且通过对填土的有效利用,达到减少垃圾排放节能环保的目的^[1-3]。

在山区丘陵地区进行工程建设,普遍需要开山填谷进行场地整平,填土厚度一般会达到几米至十几米。对人工填土地基进行强夯加固处理是行之有效的地基处理方法^[4-10]。强夯处理地基效果检测一般采用静载荷试验确定地基承载力,通过取土试验计算压实系数,并根据需要配合动力触探、静力触探、瑞利波测试等评价地基土的强度和均匀性。文献[4-10]对强夯地基加固的加固机理、技术参数、施工要求、效果检测等方面从不同角度进行了评价及

分析,但对强夯加固技术理论研究特别是测试数据与检测指标(承载力、压实系数等)之间的相关关系研究较少。作者结合工程实例对浅层平板载荷试验、圆锥动力触探、静力触探、土工试验等测试结果采用 SPSS 统计软件进行相关回归分析,建立了对应的回归方程。

1 工程概况及地质条件

1.1 工程概述

拟建工程为 60 万 t/a 甲醇项目,本工作区为除盐水处理厂房及室外设备和循环水变电所装置区,框架结构,建筑高度最高约 11.0 m。该区块南北长约 140 m,东西宽约 85 m,占地面积约为 12 000 m²。场地地处丘陵地区,沟壑发育,高差最大 16 m 左右。根据工程需要,按照设计标高进行整平,利用开挖出的土方对沟壑进行回填处理,填土厚度从北往南约 0.8~16.0 m。采用震动式压路机分层碾压压实,经勘察检测,压实处理效果不理想,达不到设计要求。前期设计直接采用桩基础,穿越填土层,但工

期长造价高,经综合评估建议采取对既有压实填土地基进行强夯夯实处理。

1.2 工程地质条件

场地地貌单元为太行山山前剥蚀准平原-丘陵地貌,地面标高在 179.64~195.40 m 之间,场地高差在 15.7 m 左右。本场地地下水为上层滞水,主要赋存于浅部粉土和碎石土中,以粉质黏土和风化泥岩为隔水层。

根据勘探结果,压实填土深度从西北往东南约 0.8~16.0 m,检测深度范围内地基土分布情况如下:

①压实填土:层底埋深 0.8~10.6 m,层厚 0.8~10.6 m,层底标高 196.27~200.51 m。其组成主要为粉质黏土,偶见有结核、泥质砂岩岩块等,性质不均匀。该层强夯处理效果较好,平均压实系数 0.993。但局部存在压实效果欠佳的①₁层填土。

②压实填土:层底埋深 3.7~16.0 m,层厚 0.7~8.2 m,层底标高 190.58~198.81 m,该层在土方施工中经过压实,在强夯影响深度之下,受强夯影响有限,其密实性比第①层较差,平均压实系数 0.945。组成主要为粉质黏土,含结核及岩屑等。

③粉质黏土(Q₃^{pl}):黄褐色,可塑—硬塑,偶见有植物根茎、小虫孔等,为原状土,天然地基承载力特征值 250 kPa。

2 强夯地基设计及施工工艺参数

设计要求地基承载力特征值 ≥ 200 kPa,压实系数 ≥ 0.97 。

强夯施工前,在有代表性区域进行现场试夯和试验性施工,确定最优施工参数。试验分别进行了单点强夯和多点强夯试验。单点强夯试验主要用于测试夯击下沉量及影响半径、影响深度和有效加固深度等,确定最优夯击能和最佳夯击数。多点强夯试验选择有代表性的区域进行,通过对比夯击前后标准贯入试验击数、静力触探阻力确定强夯有效影响深度;通过载荷试验 p - s 曲线分析承载力是否满足设计要求;对地基土取土试验,检测湿陷处理和压实效果,最终确定最佳强夯施工参数。

强夯施工设计采用点夯夯点间距 5.5 m \times 5.5 m,间隔跳打,夯击能 3000 kN \cdot m,分两遍进行,第一、二遍点夯夯击次数 8~10 击,且最后两击平均夯沉量 ≤ 50 mm;第三遍夯击能 1000 kN \cdot m 满夯,每夯点夯击 2 击,要求搭接不少于 1/4 圆环。

施工工艺流程为:平整场地 \rightarrow 测放夯点点位 \rightarrow 夯机就位 \rightarrow 测量锤顶标高 \rightarrow 吊锤夯击 \rightarrow 测量每一击夯沉量(达到收锤标准 50 mm 后移至下一点夯击) \rightarrow 完成全部夯点施工 \rightarrow 推平夯坑 \rightarrow 间歇期后满夯 \rightarrow 质量检测。

3 强夯地基检测

强夯地基处理完成后,按设计要求进行地基检测。采用静力触探测试、重型动力触探试验、室内土工试验、静载荷试验等手段对强夯处理地基处理效果进行综合评价。

3.1 静力触探测试

静力触探测试采用 LT-20A 静力触探工程车施工,双桥探头,完成静力触探试验检测点 54 个,测试结果见表 1 及图 1。

表 1 静力触探测试结果表

层号	指标	样本数	最大值	最小值	平均值	小均值	p_s /MPa(换算值)
①	q_c /MPa	54	6.13	3.96	5.06	4.51	5.47
	f_s /kPa	54	275.29	167.55	207.78	187.66	
① ₁	q_c /MPa	3	2.88	2.44	2.64	2.54	3.05
	f_s /kPa	3	155.73	97.61	124.58	111.10	
②	q_c /MPa	32	3.68	2.74	3.11	2.92	3.52
	f_s /kPa	32	178.77	119.23	157.50	138.36	
③	q_c /MPa	25	2.71	1.35	2.14	1.74	2.07
	f_s /kPa	25	138.27	65.64	91.7	78.67	

注: p_s 按《河南省建筑设计研究院统一技术措施》经验公式 $p_s = 1.227q_c - 0.0613$ 换算

从静力触探成果看,局部位置稍欠密实,分析原因主要是填料含水量不均匀,填料分选不符合要求,

对地基整体均匀性有一定影响,但其厚度较小,影响有限,经分析可以满足地基变形要求。

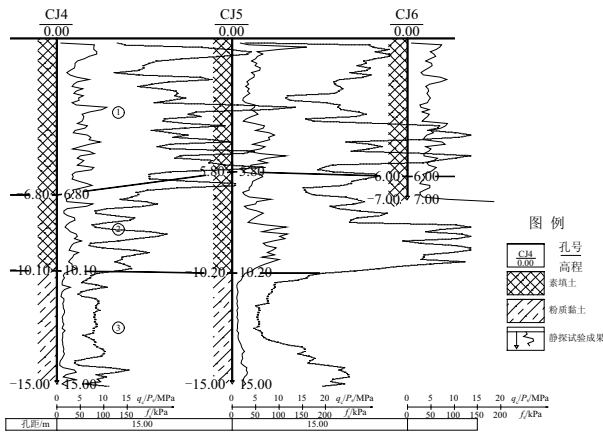


图1 代表性静探测试剖面

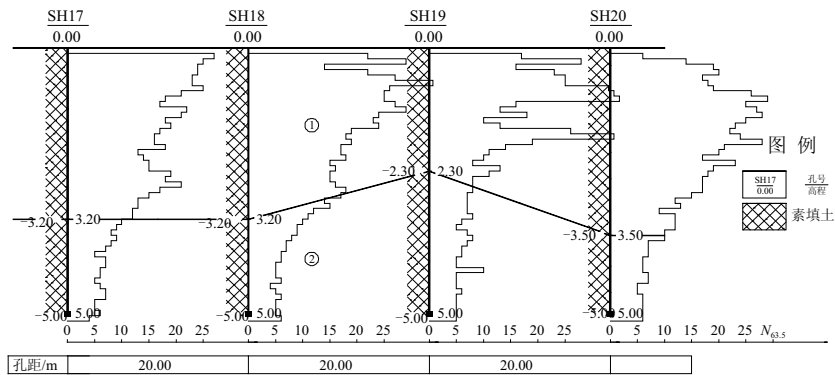


图2 代表性动力触探测试剖面

3.2 重型动力触探测试

重型圆锥动力触探锤的质量为 63.5 kg, 落距为 76 cm, 探头直径为 74 mm, 锥角为 60°, 探杆直径为 42 mm, 读取贯入 10cm 的击数 $N_{63.5}$, 测试结果见表 2 及图 2。从图 2 中可以看出, 动探击数呈分层现象且具随深度具衰减现象^[4]。

表 2 地基土分层动力触探击数 $N_{63.5}$ 统计表

层号	$N_{63.5}$ 平均值	杆长修正后 $N_{63.5}$ 平均值
①	17.7	16.8
②	6.1	5.7

3.3 土工试验

土工试验主要目的是测求夯实土的压实系数, 评价填土的密实度, 了解地基处理的均匀性。

对 6 组填土土样进行轻型击实试验, 获得最大干密度 1.71~1.74 g/cm³, 平均最大干密度 1.723 g/cm³, 最优含水量 16.9%~18.8%, 平均最优含水量 17.7%。完成 6 个探井取样, 根据土工试验及击实试验结果, 计算压实系数 λ_c 。压实系数统计结果见表 3。

表 3 压实系数 λ_c 测试成果统计表

层号	最大值 λ_c	最小值 λ_c	平均值 λ_c	$\lambda_c \geq 0.97$	$0.97 > \lambda_c \geq 0.95$	$\lambda_c < 0.95$
①	1.00	0.95	0.993	22	2	0
① ₁	0.94	0.87	0.890			4
②	0.99	0.86	0.945	13	7	16

从压实系数试验结果看出, 处理地基 $\lambda_c > 0.95$ 的占 85.7%, 个别位置压实系数 $\lambda_c < 0.95$, $\lambda_c < 0.95$ 的占 14.3%, 且主要分布在深部位置, 说明处理效果较好。

3.4 浅层平板载荷试验

按照文献[11], 浅层平板载荷试验要求采用慢速加荷沉降相对稳定法, 压板尺寸: 500 mm×500 mm 正方形承压板, 根据静探曲线选择抽检测点位置, 抽

检数量为每单位工程 3 个点, 合计 9 个点。

试验加载等级分 8~12 级, 最大加载压力不应少于设计要求压力值的 2 倍, 9 个点载荷试验分级荷载为 50 kPa ($p-s$ 曲线见图 1)。在满足设计承载力要求前提下, 对 1#~7# 点按设计要求压力值的 2 倍即 400 kPa 加载, 对 8#、9# 两个测试点加载至 950 kPa, 以求了解地基极限承载能力。结果显示, 两个点地基均未达破坏状态, 最大沉降量分别为 18.25 mm 和 32.95 mm, 按 $s/b = 0.01 \sim 0.015$ 所对应的荷载确定强夯地基承载力特征值分别为 310 kPa 和 335 kPa, 说明地基尚具有一定的承载潜力, 处理效果较好。

3.5 强夯地基承载力特征值的确定

本次强夯地基检验共进行了 9 个点的载荷试验, 根据文献[11]附录 C.0.7 条规定, 9 个点土层地基承载力特征值的平均值为 227.2 kPa, 极差为 135 kPa, 极差超过平均值的 30%, 不能取其平均值作为该土层地基承载力特征值 f_{ak} , 但 9 个点土层地基承载力特征值都 ≥ 200 kPa, 满足设计要求各试验点载荷试验概况见表 4, 浅层平板载荷试验沉降典型 $p-s$ 曲线见图 3。

表4 浅层平板载荷试验结果表

试验点号	最大加载量 /kPa	最大沉降量 /mm	残余沉降量 /mm	$s/b = 0.01 \sim 0.015$ 所对应的荷载/kPa	强夯地基承载力特征值/kPa
JC1	400	5.98	3.67	>200	200
JC2	400	11.07	6.51	>200	200
JC3	400	7.00	3.31	>200	200
JC4	400	11.44	4.12	>200	200
JC5	400	7.86	2.60	>200	200
JC6	400	11.34	7.13	>200	200
JC7	400	5.82	1.42	>200	200
JC8	950	18.25	8.20	310	310
JC9	950	32.95		335	335

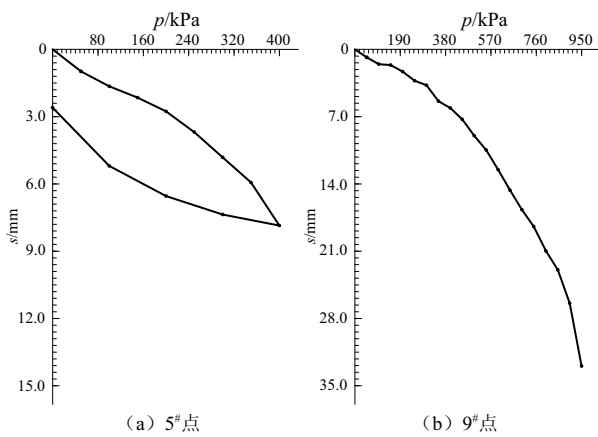


图3 典型载荷试验 p-s 曲线

3.6 处理效果综合评价

对强夯处理地基采用了载荷试验、静探测试、动弹试验及土工试验综合测试手段,分别评价其均匀性、压实度和承载力,结果见表5。

表5 强夯地基综合测试结果表

评价指标	p_s /MPa	压实系数	承载力特征值 f_{ak} /kPa
评价结果	5.4	0.993	≥ 200
评价结论	满足设计要求		

表7 土体的主要物理力学参数

土层	弹性模量 E /MPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)	黏聚力 c /kPa	材料的硬化参数 K	泊松比 ν	密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	网格尺寸/m	时间步距/s
填土	15.9	10.2	5.0	1.0	0.30	1800	1.0	0.002
粉质黏土	29.34	15.1	18.6	1.0	0.33	1950	1.0	0.002

运用非线性动力有限元软件 Abaqus 软件对强夯过程进行了数值模拟,夯锤为高 0.8 m、直径 2.0 m 的圆柱,由于其刚度远大于土体,在模拟时将其假定为刚体,地基假定为均质体,有限元尺寸为长、宽为 40 m,高为 15m 的立方体,为了避免有限元模型边界对夯击振动的反射而造成模拟的失真,

3.7 相关性分析

通过对 9 个载荷试验点、54 个静探点实验数据进行相关性分析,结合土工试验成果,通过大量的强夯数据及对强夯后地基承载力特征值的分析(见表6),从中找出其规律,为类似工程作指导、积累经验。选用国际通用的 SPSS 统计软件对强夯后地基承载力特征值(f_{ak})与静探曲线 p_s 值之间的关系,压实系数与静探曲线之间的关系进行了一元线性回归分析,建立了一元线性回归方程。

承载力	回归方程	相关系数
f_{ak}	$f_{ak} = 42.667 + 0.036 p_s$	0.980
压实系数	回归方程	相关系数
λ_c	$\lambda_c = 0.922 + 0.011 p_s$	0.860 (适用于 $p_s \geq 3$ 时)

表6 拟合模型汇总

模型	R	R^2	调整 R^2	标准估计的误差
1	0.980	0.960	0.952	15.484

3.8 强夯效果的数值模拟

根据室内土工试验,获得了填土和粉质黏土的主要物理力学参数,见表7。

地基模型的四周和底部边界采用无限元。

在有限元模拟时,通过给夯锤施加竖向重力加速度和下落高度来模拟整个夯击过程。考虑到目前仍没能提出一个适合地基分析使用的土体弹性模量随夯击次数变化的规律,加固区内土体弹性模量随夯击次数变化的规律就沿用了钱家欢等^[12]提出的

经验公式:

$$E = E_0 \times N^{0.516} \quad (1)$$

式中: E 为夯击 N 次后加固区内土体的弹性模量; E_0 为原始的弹性模量(其数值见表7); N 为夯击次数。

整个模拟过程中,按上述方法不断调整加固区内土体(即填土)的弹性模量。

取第8击,给出了地基土的位移云图,见图4。

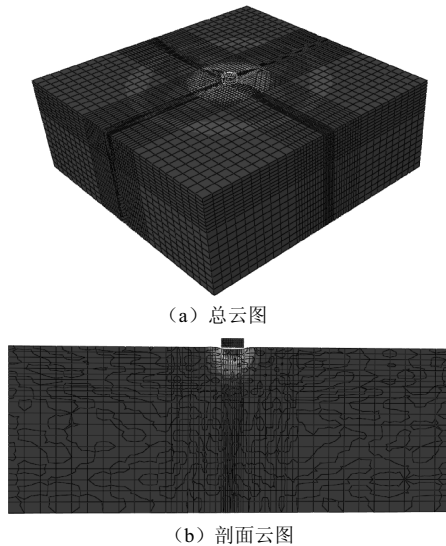


图4 地基的典型位移云图

图4表明:夯锤下部的位移有一定的影响区域,其形状接近于竖直放置的椭圆。

根据图4,得到了离夯点中心点不同水平位置处的竖向位移(即夯沉量)沿深度的变化曲线,见图5。

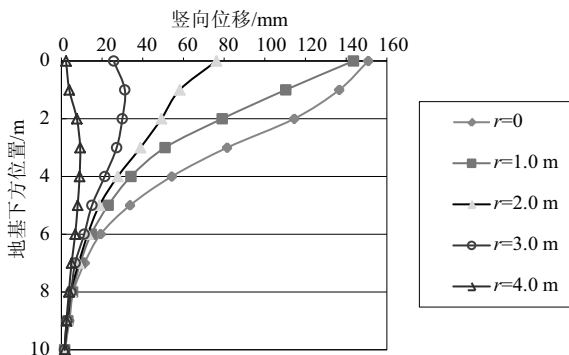


图5 竖向位移沿深度的变化曲线

由图5可以看出,由于夯锤的半径为1.0 m,且夯锤的材料比地基硬得多,所以离夯点中心点1.0 m处和夯点中心点的表面的竖向位移应该基本相同,而由于1.0 m处的节点太靠近夯锤的边缘,故实际模拟的结果,两者相差6 mm。从整体来看,离夯点中心点越远,竖向位移特别是8.0 m以上范围的竖向位移越

来越小,但是当深度超过8.0 m以后,夯点中心点2.0 m范围内的竖向位移基本相同,当深度达到10.0 m后,竖向位移已经小于0.5 mm,此处可以完全认为已经不再受夯击的影响,如果定义产生竖向位移大于20 mm为强夯的影响深度,则3000 kN·m的强夯的影响深度为6.0 m,另外从图5还可以看出,在埋深小于6.0 m,离夯击中心点水平距离3.0 m范围内的竖向位移都超过了20 mm,这说明,强夯的水平影响范围已经超过3.0 m。

根据图4进一步绘制了夯沉量等值线,见图6。

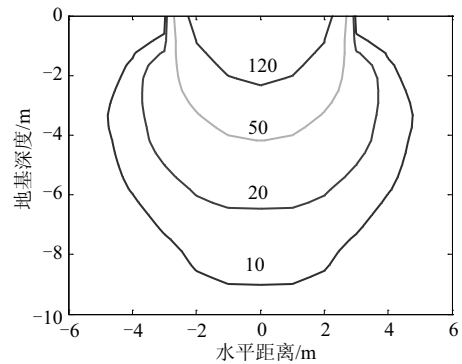


图6 夯沉量等值线

从图6可以明显看出,若以夯沉量20 mm为有效夯击效果判定标准,则3000 kN·m的强夯深度影响范围为6.0 m、水平影响范围为3.0 m。

4 结语

1)根据检测结果,强夯地基上部约5.5~7.6 m厚的地基土强夯效果显著,下部土层强夯效果稍差,有效加固深度6.0 m左右,这与数值模拟结果基本一致。从强夯效果看,强夯地基的承载力、变形及均匀性均满足规范和设计需要,且具有一定的承载潜力。

2)局部存在欠压密段,分析原因可能与填料的含水量和填料分选性有关,因此强夯地基施工需严格执行技术要求,并以信息化施工方法指导设计施工。

3)本工程地形起伏较大,存在大面积深厚回填地基,经过全面评估,该场地其他装置区域填土区全面采用分层强夯法处理,收到较好的效果。

4)应用国际通用的SPSS统计分析软件,对强夯后地基承载力特征值(f_{ak})、压实系数(λ_c)与静探比贯入阻力 p_s 值进行了一元线性回归分析,建立了线性回归方程: $f_{ak} = 42.667 + 0.036 p_s$, $\lambda_c = 0.922 + 0.011 p_s$ 。可以初步评价地基承载力,为初步设计提供参考,对类似工程在全国的应用具有一定参考价值。

参 考 文 献

- [1] 中国建筑科学研究院. JGJ 79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [2] 闫明礼. 地基处理技术[M]. 北京:中国环境出版社,1996.
- [3] 龚晓南. 地基处理技术发展展望[M]. 北京:中国水利水电出版社,知识产权出版社,2005.
- [4] 蔡剑波,刘良贵,黎友添. 强夯地基加固效果检测的分析[J]. 岩土工程技术,2010,24(3):109-113.
- [5] 刘序鹏. 强夯法在处理填土地基中的应用[J]. 勘察科学与技术,2005(4):36-37.
- [6] 王国胜,骆胜辉. 强夯法在碎石填土地基处理中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,1997,16(2):188-192.
- [7] 王 科,吴华平. 超深回填土强夯处理新成果[J]. 岩

土工程,2006,26(4):77-79.

- [8] 张艳涛,王 兵,董艳平. 强夯法在人工填土地基处理中的应用[J]. 资源环境与工程,2010,24(3):275-279.
- [9] 丁新洲,陆 新,郑颖人. 强夯法在山区填土地基中的应用和检测[C]//第七届全国地基处理学术讨论会论文集. 北京:中国土木工程学会,2002:41-45.
- [10] 穆 磊,李连营,郭 猛. 强夯技术处理回填土的效果分析[J]. 岩土工程技术,2016,30(4):189-192.
- [11] 中国建筑科学研究院. GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [12] 钱家欢,钱学德,赵维炳. 动力固结的理论与实践[J]. 岩土工程学报,1986,8(6):1-17.

收稿日期:2017-02-20

(上接第169页)

土对水非常敏感,一旦吸水饱和和承载力将会有明显的降低,强度损失约70%。水的作用不仅造成地基土膨胀也影响其强度,因此膨胀性和增湿强度衰减现象是安哥拉膨胀岩土体的显著特征。

参 考 文 献

- [1] 徐永福. 膨胀土地基承载力研究[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(3):387-390.
- [2] 王国强. 安徽省江淮地区膨胀土的工程性质研究[J]. 岩土工程学报,1999,21(1):119-121.
- [3] 姚海林,郑少河,陈守义. 考虑裂隙及雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报,2001,23(5):606-609.
- [4] 孔令伟,陈建斌,郭爱国,等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(7):1065-1073.

- [5] 唐朝生,崔玉军,Anh-minh Tang,等. 膨胀土收缩开裂过程及其温度效应[J]. 岩土工程学报,2012,34(12):2181-2186.
- [6] 蓝日彦,刘宝东,魏 金,等. 膨胀土地基承载力确定方法研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2008,3(1):24-26.
- [7] 贾永刚,刘红军,单红仙,等. 苏丹膨胀土工程性质研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),2000,40(1):70-73.
- [8] GB 50112-2013 膨胀土地区建筑技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [9] G50007-2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [10] 常士骠,张苏民,等. 工程地质手册(第四版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.

收稿日期:2017-04-11