

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.04.019

饱和原状素填土的压缩特性研究 及结构性效应初探

扈胜霞, 杨磊, 王梦南, 陈义乾, 刘登杨

(延安大学 建筑工程学院, 陕西 延安 716000)

摘要: 为研究已有建筑物地基在上部荷载作用下的变形特性, 运用从已有建筑物地基下取得的原状素填土, 开展了饱和原状土样的一维高压固结试验, 分析了其压缩特性、回弹特性和蠕变特性。结果表明: 饱和原状素填土的压缩曲线可分为陡降段和缓平段, 其屈服强度因土样的结构性出现差异; 可用经典的双曲线模型表示其应力应变关系; 土样回弹及后继压缩时的孔隙率变化与其所经历的应力历史密切联系, 即土样在经历较大压力后再次进入明显塑性变形发展的应力水平有所提高; 不同孔位土样在相同的蠕变时间下其应力-应变曲线线型相似。饱和原状素填土在不同应力条件的压缩、回弹及蠕变特性受其内部结构性影响。

关键词: 原状素填土; 压缩; 回弹; 蠕变; 结构性

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)04-0094-05

Compression Characteristics and Structural Effects of Saturated Untouched Plain Fill

HU Shengxia, YANG Lei, WANG Mengnan, CHEN Yiqian, LIU Dengyang

(Architectural and Civil Engineering Institute, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China)

Abstract: In order to study the deformation characteristics of foundation soil under upper load, one-dimensional high pressure consolidation tests were carried out on saturated untouched soil samples by using the untouched plain fill obtained from the existing building foundation. The compression characteristics, re-compression properties and creep characteristics were analyzed. Results are as follows: the compression curves of saturated undisturbed plain fill can be divided into steep and slow parts; the yield strength is different due to the structure of soil samples; the stress-strain relationship can be expressed by the classical hyperbolic model. The change rate of porosity of the soil sample has close relationship with stress experience during re-compression and the subsequent compression. The stress level of soil sample was improved when has another obvious plastic deformation development after experiencing greater pressure. The stress-strain curves of different drilling location are similar in the same creep time. The compression, expansion and creep characteristics of saturated untouched plain fill in different stress conditions are affected by its internal structure.

Keywords: untouched plain fill; compression; expansion; creep; structural characteristics

素填土是陕北地区比较常见的地基土, 尤其以素填黄土为多。黄土在我国西北地区分布广泛, 关于黄土的各类变形特性及规律, 已有许多学者进行了大量研究。黄雪峰^[1], 扈胜霞^[2], 李旭东^[3], 孔洋等^[4]通过室内压缩固结、增湿变形及控制吸力固结试验, 对非饱和和压实黄土进行了变形特性研究, 其研

究成果对于工程实践起到了一定的指导作用。葛苗苗等^[5]基于控制含水率和压实度的压实黄土长期蠕变试验研究, 提出了相关压实黄土变形规律的经验蠕变模型, 然而对饱和和黄土的适用性值得探究。章为民等^[6]通过重塑土和原状土加卸荷循环试验, 研究了固结系数、回弹系数在试验过程中的变化规律,

收稿日期: 2018-03-09

修稿日期: 2018-04-17

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2014KTDZ03-01); 大学生创新训练计划项目(D2016120)

作者简介: 扈胜霞(1974—), 女, 甘肃临夏人, 副教授, 主要从事软弱土地基处理方面的教学及科研工作。E-mail: sxhu06@163.com

研究认为回弹是固结的逆过程,但其极限加载水平仅为 1 600 kPa。王松鹤等^[7]和黄志全等^[8]提出了适用于取土地区黄土的固结蠕变特性及固结系数与固结压力之间的定量关系。陈存礼等^[9]通过控制含水率的原状黄土压缩固结试验表明,土的结构对黄土的力学特性有显著影响^[10]。由上述可见,对黄土的变形特性已有一定的实验积累和理论研究。但对素填土的变形特性和实验研究鲜见有文献发表。因此从原状素填土结构性对其力学特性参数影响的考虑出发,对于能够全面反映非饱和原状素填土在浸湿饱和状态下的应变、回弹及蠕变特性的试验研究无论从理论研究或工程实践方面而言都显得尤为重要而紧迫。

同时如何评价和预估非饱和原状素填土在降雨入渗等浸湿路径下形成的饱和土地基承载力及变形沉降特性是解决处理原建筑地基土亟待解决的关键性问题,基于此本文通过对已有建筑物下原状浸水饱和土样的高压固结、不同应力路径的高压回弹及不同应力水平的蠕变试验探究了相关力学特性,以期对相关理论研究和工程处理提供参考和借鉴。

1 试验方案

1.1 试验土样

本试验土样取自延安市一栋已有多层建筑物地基 15 m 深度处。现场通过打钻设备钻取同一深度处不同孔位(1#, 2#)的原状土样,土样呈褐黄色,天然结构完整。根据土工试验相关规定测得试验土样基本物理力学参数性质见表 1。

表 1 试验土样基本物理参数

孔号	塑限 /%	液限 /%	最优含水率 /%	土粒相对密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最大干密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
1#	15.5	24.8	13.5	2.72	1.92
2#	16.0	25.6	15.0	2.70	1.89

1.2 试验方案

实验采用 YCDG 型三联高压固结仪。实验的开展按照《土工试验规程》^[11](SL 237—1999)进行。实验土样的制取是将原状土样采用标准环刀进行削样、浸水饱和,同一钻孔处土样设置四个平行土样。

(1) 高压固结实验。从 50 kPa 逐级施加荷载至 4 MPa,记录竖向变形,绘制 $e-p$ 曲线和 $e-\lg p$ 曲线。

(2) 回弹试验。原状饱和素填土样其中两组高

压固结实验在常规压缩试验的过程中,开展了部分荷载区间的回弹实验。包括 5 次加载和卸载试验,各级加载或卸载时间均控制为 12 h。

(3) 蠕变试验。原状饱和素填土样中另外两组在高压固结实验在常规压缩试验的过程中,记录了超常规实验要求的土样变形,以探究高压状态及不同荷载加载时间下的蠕变特性,其试验方式分为两种:① 添加荷载从 50 kPa 至 4 000 kPa 逐级施压(50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa、800 kPa、1 600 kPa、3 200 kPa、4 000 kPa)过程中土样在每级荷载下固结 36 h;② 添加荷载从 50 kPa 至 4 000 kPa 逐级施压(50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa、800 kPa、1 600 kPa、3 200 kPa、4 000 kPa)土样在每级荷载下固结 48 h。为使试验过程中土样始终处于饱和状态,向水槽中注入无气水且液面浸没土样上表面。

2 试验结果及分析

饱和原状素填土的固结压缩、回弹及蠕变特性研究并在其基础上的沉降量计算是已有建筑物地基加固纠偏工程和沉降量控制中十分关注的问题。其中,土体的压缩特性可从不同竖向应力条件及经历不同应力历史的饱和原状土压缩变形特性两个方面进行对比、分析和探讨。

2.1 不同孔位饱和原状黄土压缩试验

室内试验得到了不同孔位的饱和原状素填土的 $e-\lg p$ 曲线。刘孟飞等^[10]用高压固结仪试验,得出了黄土固结的变形和强度特性。如图 1 所示。

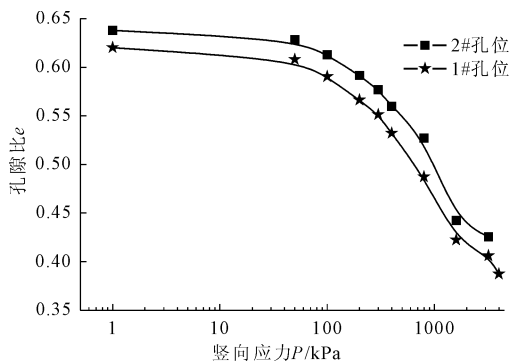


图 1 不同孔位饱和原状黄土 $e-\lg p$ 压缩曲线

从图 1 可以看出:饱和原状素填土在竖向应力的作用下土样的孔隙比变化分为两个阶段:“平缓段”和“递降段”。在竖向应力不超过 100 kPa 时,1#、2# 孔位土样的孔隙比虽均有所较少,但其较小速度缓慢。在竖向应力不断增大(增加范围:300

kPa ~ 1 200 kPa)的过程中,土样孔隙比减小的速率随竖向应力的增长呈递增态势。当竖向应力在 1 200 kPa ~ 3 200 kPa 范围内时,孔隙比的减小速度趋缓,而后随着竖向应力增至 4 000 kPa 时其孔隙比减小速率再一次提升。而造成这种现象的原因是由于同一深度的土在地质运动、风化沉积等过程中所受的应力历史条件的不同,进而造成了不同孔位原状土结构性差异及土样在相同试验应力条件下其 $e - \lg p$ 曲线变化特征出现差异,在竖向应力状态不超过 1 200 kPa 时,土样在平缓段孔隙比的变化及递降段土样孔隙比减小的速度,随竖向应力的增大呈递增现象,每级竖向应力下速度的增量均表现出差异性。当竖向应力增至 1 200 kPa 时土样孔隙比减小速度减缓,增大至 3 200 kPa 以后其减小速度又增大,说明土样的结构性在竖向应力为 1 200 kPa 时已遭到部分破坏,而当竖向应力达到 3 200 kPa 时土样的结构性已完全破坏。本文根据卡萨格兰德确定先期固结压力的方法,得到了黄土的压缩结构屈服应力 p_{sc} , 1 # 孔位土样屈服应力为 300 kPa, 2 # 孔位土样屈服应力为 200 kPa。

笔者计算了 1 #、2 # 孔位的饱和原状黄土在不同竖向应力作用下的压缩系数。

通过对 1 #、2 # 孔位土样在不同竖向应力状态作用下的压缩系数进行研究对比,发现在竖向应力较低时其压缩系数较小。当竖向应力增大到 800 kPa ~ 1 600 kPa 时土样的压缩系数都达到最大值,说明在此竖向应力状态下土样的结构性开始破坏,土样的变形速率较大。此后随着竖向应力的不断增大,压缩系数又呈减小态势。

为探究饱和原状黄土应力应变关系的基本模型,笔者通过对土样的压缩 $e - \lg p$ 曲线进行坐标变换,发现其符合经典的双曲线模型,并拟合曲线如图 2 所示。公式:

$$\varepsilon = \frac{P}{a + bP} \quad (1)$$

经坐标变换后可为

$$\frac{P}{\varepsilon} = a + bP \quad (2)$$

式中: P 为竖向应力; ε 为轴向应变; a 、 b 为土样参数。

2.2 饱和原状黄土回弹压缩特性

1 #、2 # 孔位的饱和原状黄土土样在不同的竖向应力状态下进行卸载回弹及再压缩 $e - p$ 曲线如图 3 所示。方勇^[13]通过对原状黏土不同预压荷载

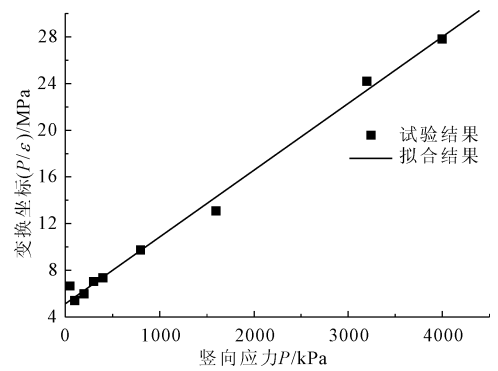


图 2 饱和原状黄土应力 - 应变双曲线模型拟合曲线

不同卸荷比的试验研究,得出了回弹变形特性。朱俊高等^[14]通过对软土进行反复荷载下的固结试验,得到了固结系数的变化规律。由图 3 可看出,1 #、2 # 孔位的土样卸载后孔隙比变化较小(卸载回弹时孔隙比增大不明显),回弹线近似为水平直线,说明土样的压缩应变以塑性变形为主。卸载再加载的应力水平超过回弹终载后,在不超过回弹前最高应力水平情况下,土样即进入再次变形发展。特别当应力荷载低于 1 600 kPa 时,再加载孔隙比变化较大,当再次加载到 1 600 kPa 时,1 #、2 # 土样孔隙比分别减小 0.048 762 和 0.057 33,说明土样受应力历史中最大荷载应力影响较小。直到加载应力高达 400 kPa 以后再加载变形较小,表明此时土样的结构强度遭到完全破坏。1 #、2 # 土样对于加载一回弹一再加载的力学响应基本一致,但经历相同应力路径后的孔隙比之差再次拉大(从 0.018 0 增至 0.041 6),说明 1 #、2 # 土样间存在结构性差值。

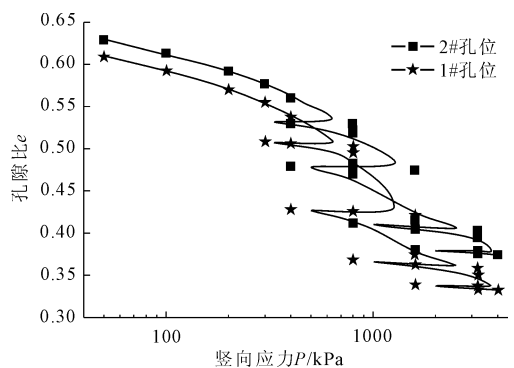


图 3 饱和原状黄土回弹试验曲线

2.3 饱和原状黄土蠕变试验

2.3.1 基于不同蠕变时间的压缩试验

为探究蠕变时间对饱和原状黄土 $e - \lg p$ 曲线的影响,取 2 # 孔位的土样在各级竖向应力的作用下分别经历 36 h、48 h 的压缩变形时间效应,其 $e -$

lgp 曲线如图4所示。陈志辉等^[15]通过试验得到了压缩-蠕变变形特性。由图4可看出:在竖向应力水平较低时(不超过100 kPa),时间效应对孔隙比的变化影响较为明显。当竖向应力增大为200 kPa~400 kPa时,孔隙比变化量基本一样(时间效应为36 h、48 h的孔隙比变化量分别为0.050 942、0.058 968)。在竖向应力不断增加(增加范围:800 kPa~1 200 kPa)的状况下,土样孔隙比随着竖向应力的增大为线性减小,但时间效应为48 h的土样孔隙比减小速度快于时间效应36 h的土样。随着竖向应力的再次增加孔隙比变化的两条曲线已趋于平行。说明了在竖向应力较小时(竖向应力不超过100 kPa)土样对压缩变形时间效应反应明显,其孔隙比差值达到了0.011 22。在竖向应力不断增大(增加范围:300 kPa~1 200 kPa)的过程中,孔隙比的变化可视为随竖向应力的增大线性减小。竖向应力的再增大(至3 200 kPa)的过程中,土样孔隙比减小速度相同,进一步说明了当竖向应力达到1 200 kPa时,土样的结构性开始破坏,同时土样开始发生塑性变形,所以造成了在不同的压缩变形时间状况下,土样孔隙比减小速度相同的这一现象。

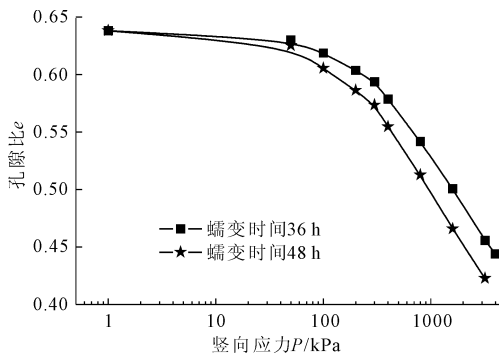


图4 基于不同加载时间的饱和原状黄土蠕变曲线

2.3.2 蠕变时间效应下的孔隙比差值变化特征分析研究

为研究时间效应对饱和原状饱和黄土压缩变形量的影响,用蠕变时间为48 h的每级竖向应力累计压缩量减去蠕变时间为36 h的每级竖向应力累计压缩量,其结果如图5所示。由图5可看出:当竖向应力不超过50 kPa时孔隙比差值 Δe 缓慢增长。在竖向应力增大到100 kPa~1 200 kPa范围内孔隙比差值 Δe 增长与竖向应力增大呈近似线性关系。然后随着竖向应力的增大其孔隙比差值 Δe 又逐渐减小。说明在竖向应力未达到1 200 kPa之前,土样在结构性的作用下对蠕变时间效应的响应为其压缩量

基本呈线性增大模式。再一次说明了当竖向应力达到1 200 kPa时土样的结构性遭到破坏。而后随着竖向应力的增大土样发生塑性变形。

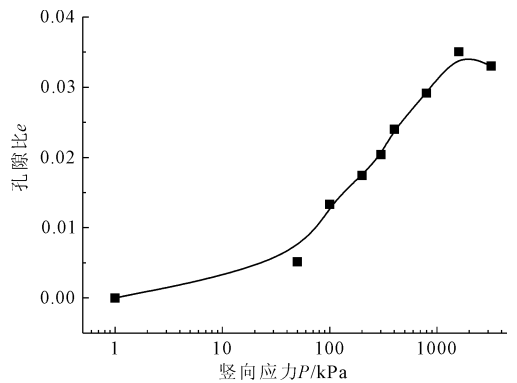


图5 土样在不同时间效应下的孔隙比差值

2.3.3 不同孔位处同一蠕变时间的压缩试验

1#、2#孔位饱和原状黄土在同一蠕变时间效应下的 $e - lgp$ 曲线如图6所示。由图6可看出2#孔位土样在竖向应力的作用下孔隙比的变化相较于1#孔位土样总体变化趋势较为平缓。1#、2#孔位土样在竖向应力不超过100 kPa时土样孔隙比变化较小。当竖向应力增大至200 kPa~300 kPa时土样的孔隙比减小速度呈递增式变化。在竖向应力不断增加(增加范围:300 kPa~1 200 kPa)的状况下,土样孔隙比随着竖向应力的增大为线性减小,但1#孔位土样 $e - lgp$ 曲线斜率明显大于2#孔位土样 $e - lgp$ 曲线斜率。竖向应力的再增大(至3 200 kPa)的过程中,土样孔隙比减小速度均降低,且1#孔位比2#孔位土样速度减小更为明显。反映了不同孔位的土样在形成过程中其结构性上存在的差异,表现在结构性未遭到破坏以前,土样孔隙比减小速率的不同(1#孔位孔隙比减小速率大于2#孔位),以及当竖向荷载达到1 200 kPa后结构性破坏孔隙比变小速度幅度的不同(1#孔位孔隙比变小幅度大于2#孔位),造成了在同一竖向应力作用过程下1#、2#孔位土样产生不同的压缩总量。

2.4 不同应力水平的应变-时间压缩特性

饱和原状黄土在不同应力水平下的应变-时间压缩特性如图7所示。熊雄等^[16]通过试验测定了土样在固结过程中的沉降量和孔隙比,得出了其曲线大致分为两个阶段,自重沉降阶段;自重固结阶段-平衡阶段。由图7可看出饱和原状黄土在每级竖向应力在作用下的应变可分为两个阶段:第一阶段为压缩变形快速递增段,为瞬时沉降变形;第二阶段为压缩变形缓慢增加阶段,应变速率逐渐减小并趋

于零,以次固结变形为主。在竖向应力不超过 400 kPa 时,压缩变形量较小,且应变在经历第一阶段进入第二阶段后其应变速率逐渐变小并接近于零,压缩变形量不断发展并最终趋于稳定。当竖向应力增大时(400 kPa < P < 3 200 kPa)时,土样在应变第一阶段压缩变形量呈递增现象不断增加,随着竖向应力的不断增大压缩变形第二阶段的变形量也不断增加,且完成第二阶段主要压缩过程所需的时间逐渐缩短(当竖向应力为 3 200 kPa 时为 4 h),当第二阶段的主要压缩变形过程完成后,其压缩总量仍以缓慢且逐渐减小的速度继续发展,最终增加速度为零。

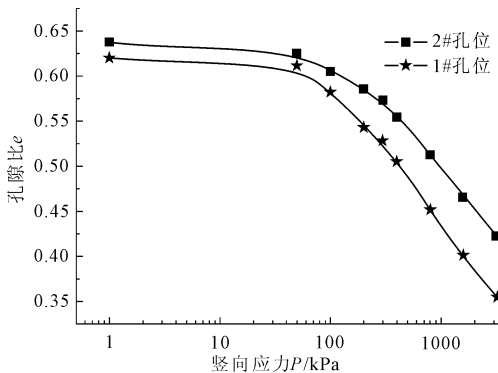


图 6 不同孔位土样加压时间 48 h 压缩曲线

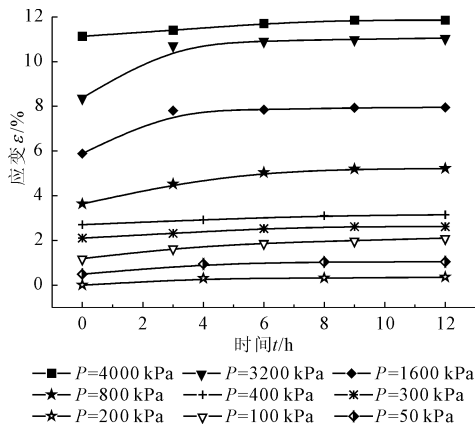


图 7 土样在不同竖向压力下的应力-应变曲线

当竖向应力为 4 000 kPa 时,土样的应变变化很小,且可近似认为第一阶段的压缩变形量就是其最终的压缩变形量。从而验证了该土样在竖向应力为 3 200 kPa 时土样的结构性完全破坏。

3 结 论

(1) 饱和原状黄土的压缩 $e - \lg p$ 曲线可分为“平缓段”和“递降段”。不同孔位原状黄土的结构性差异引起土样在相同应力条件下,压缩曲线“平缓段”和“递降段”的变化特征均出现差异。

(2) 饱和原状黄土的加载—回弹—再加载特性与土样的结构性存在关联^[17]。

(3) 饱和原状黄土的蠕变特性与加载时间存在联系。当应力条件较小($P < 100$ kPa)时,加载时间对土样的压缩变形影响效应明显,说明土样在加载初期存在着一定水平的塑性变形,并随着加载时间的延长而得以发展。

参考文献:

- [1] 黄雪峰,孔 洋,李旭东,等. 压实黄土变形特性研究与应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 37-44.
- [2] 扈胜霞,张 栋,杨 瑞,等. 非饱和重塑黄土固结特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(4): 55-58.
- [3] 李旭东,黄雪峰,杨宝山,等. 延安新区压实 Q_2 黄土增湿高压压缩变形特性[J]. 后勤工程学院学报, 2015, 31(1): 11-16.
- [4] 孔 洋,黄雪峰,阮怀宁,等. 基于 Gunary 模型的侧限条件下土体结构性参数研究[J]. 防震减灾工程学报, 2016, 36(4): 520-527.
- [5] 葛苗苗,李 宁,郑建国,等. 基于一维固结试验的压实黄土蠕变模型[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3164-3171.
- [6] 章为民,顾行文,王 芳,等. 土的卸荷回弹试验及其时间过程的计算方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 979-987.
- [7] 王松鹤,骆亚生,李 焱. 黄土固结蠕变特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(5): 643-647.
- [8] 黄志全,李小慧,孙 怡,等. 魏家沟滑坡滑带土非饱和蠕变特性试验研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 47-50.
- [9] 陈存礼,何军芳,杨 鹏. 考虑结构性影响的原状黄土本构关系[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2284-2290.
- [10] 谢定义,姚仰平,党发宁. 高等土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [11] 土工试验规范: SL 237—1999[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [12] 刘孟飞,姚仰平,孔得泉. 饱和结构性 K_0 固结黄土试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 2008(2): 238-248.
- [13] 方 勇. 卸载回弹特性及计算方法研究[J]. 水利与建筑工程学院, 2013, 11(4): 199-202.
- [14] 朱俊高,冯志刚. 反复荷载作用下软土次固结特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 341-345.
- [15] 陈志辉,程晓辉. 饱和土体固结压缩和蠕变的热力学本构理论及模型分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 489-498.
- [16] 熊 雄,彭 劼,张 坤,等. 温州吹填土的沉降特性研究[J]. 水利与建筑工程学院, 2012, 10(6): 78-82.
- [17] 冯 超. 饱和重塑黏性土流变固结与卸荷回弹特性试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017: 1-81.