

公路膨胀土路堤膨胀变形量预估模型

边加敏,蔡晓飞

(南京交通职业技术学院 路桥与港航工程学院,南京 211188)

摘要:为给膨胀土用于路基填筑的设计与施工提供参考,对膨胀土的膨胀变形量计算方法进行分析。通过对弱膨胀土在不同初始干密度、上覆压力下的一维线膨胀率试验,分析了膨胀土路基湿度平衡规律。结合其他学者的一维线膨胀率试验结果,提出了相对上覆压力和相对变形量的概念。试验结果显示弱膨胀土的相对膨胀变形量与相对线膨胀率呈幂指数关系,并依据试验结果及路基湿度平衡规律建立了膨胀土的湿胀变形模型及路堤填筑膨胀变形量的实用计算方法,解决了影响膨胀土线膨胀率3个主要因素的耦合问题,为膨胀土路堤填筑湿胀变形量的预测提供理论计算方法。

关键词:膨胀土;路堤;膨胀变形;相对变形量;线膨胀率

中图分类号:TU443 **文献标志码:**A

文章编号:1001-5485(2019)05-0086-05

Model of Estimating Bulging Deformation of Expansive Soil Subgrade

BIAN Jia-min, CAI Xiao-fei

(School of Road, Bridge, Port and Navigation Engineering, Nanjing Vocational Institute of Transport Technology, Nanjing 211188, China)

Abstract: In the aim of providing reference for the design and construction of expansive soil fill in subgrade, the calculation method for the bulging deformation of expansive soil was analyzed. First of all, one-dimensional linear expansive ratio test on weak expansive soil of different initial dry density under varying overburden pressure was conducted, and the law of moisture equilibrium of expansive soil fill in subgrade was expounded. With reference to the results of one-dimensional linear expansive ratio obtained by other scholars, the concepts of relative overburden pressure and relative deformation were put forward. Test results unveiled that the relative linear expansive deformation was in a power exponential relation with relative overburden pressure. In addition, the wet expansive deformation model was established and a practical calculation method for bulging deformation of expansive soil fill in subgrade was proposed to solve the coupling problem of three factors for the linear expansive ratio of expansive soil.

Key words: expansive soil; subgrade; bulging deformation; relative deformation; linear expansive ratio

1 研究背景

膨胀土在我国分布极为广泛,国内大多省份均发现有不同程度膨胀土的存在,膨胀土对于路堤建设的破坏作用十分明显。在膨胀土地区进行公路建设时,由于天然含水率较高难以压实且水稳定性差,采用包边法填筑的膨胀土路堤容易发生运营期的增

湿膨胀,导致土体干密度降低、承载力下降,从而导致路面的破坏。因此,掌握膨胀土的膨胀变形规律,正确预估膨胀土路堤的变形量,对于确保路堤的强度及长期稳定具有关键作用。

王年香等^[1]、姚海林等^[2]对路堤总变形量均给出了计算方法,这些方法建立在膨胀土湿胀模型的基础上。对于路堤填筑总湿胀变形量计算的前提是合理建立膨胀土随含水率、干密度及上覆压力等的

耦合变形模式,我国学者^[3-5]对此进行了较多的研究,建立了许多相关的湿胀变形模型。模型主要分为2大类:①采用普通固结仪或三轴仪测定不同初始条件下的膨胀变形量,建立膨胀变形量与各影响因素的回归模型;②采用控制吸力的方式进行相关试验,研究不同基质吸力与净法向应力作用下的膨胀土湿胀变形规律,建立线性或非线性弹塑性模型。这2种方式均存在一定的问题:模型①的试验方法简单,但拟合参数较多且意义不明确,影响因素之间的相互耦合作用考虑不够;模型②的试验方法复杂,很难在工程实际中推广。一维增湿膨胀试验的试验方法简单,容易在工程实际中广泛推广,因此本文采用一维试验的方法进行不同干密度下的增湿膨胀试验,建立膨胀变形模型,采用此模型对公路路堤的变形量进行预估。

2 试验土样及试验方案

2.1 试验土样

试验用土取自南京芜申线东坝镇航道段某边坡,取土深度为1 m左右,根据《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)的试验方法获得土样的液限为56%,塑限为27%,塑限指数为29%,土体的自由膨胀率为50%,土体重型击实的最大干密度为 1.83 g/cm^3 ,最优含水率为16.5%,土体 $<0.002 \text{ mm}$ 的黏粒含量为31.5%,按照文献^[6]判断为高液限弱膨胀土。

2.2 试验方案

2.2.1 一维线膨胀率试验

将土体破碎后测定含水率,按照土体的最优含水率16.5%向土体中加入剩余水,装入密封塑料袋中放置24 h,使土体中水分分布均匀。制作土样时复测含水率,当含水率为 $16.5\% \pm 0.05\%$ 认为含水率合格。分别按照1.80, 1.75, 1.70, 1.65, 1.60 g/cm^3 5种不同初始干密度制作小环刀样;将制作完成的环刀样放入固结仪中,分别在12.5, 50, 100, 200, 300 kPa下加水至膨胀稳定,计算土样的线膨胀率。

2.2.2 无荷线膨胀率试验

制作干密度分别为1.80, 1.75, 1.70, 1.65, 1.60 g/cm^3 、初始含水率为16.5%小环刀样若干组。取初始干密度为 1.80 g/cm^3 的小环刀样若干组,每组2个试样,分别装入无荷膨胀仪中。为保证进入不同土体的水分不同,用滴定管从第1组无荷膨胀仪的上部及下部滴入约5%的水量,在第2组仪器中加入约10%水量,以此类推,直至加水饱和为止。试验中每隔1 h测定土样的膨胀变形量,膨胀稳定的判定标

准为连续2 h测定的变形量 $<0.01 \text{ mm}$,试验分组的数量根据土体的初始含水率确定,待土体膨胀稳定后,取出环刀样测定土体的含水率,并确定含水率变化。以此方法测定干密度分别为1.75, 1.70, 1.65, 1.60 g/cm^3 土体不同增湿量下的线膨胀率。

3 试验数据分析

3.1 线膨胀率变化典型曲线分析

将第2.2.1节试验中膨胀土线膨胀率与时间关系典型的曲线绘于图1。

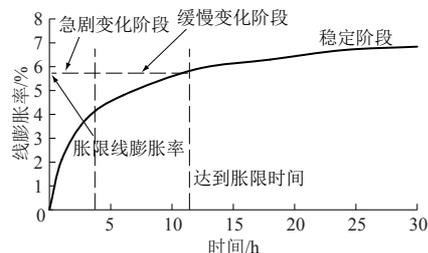


图1 线膨胀率的典型时间曲线

Fig.1 Typical curve of linear expansive ratio against time

由图1可知,土体的线膨胀率随着时间的增长而逐渐增加,呈明显的非线性关系,浸水至12 h左右时,膨胀变形基本趋于稳定,线膨胀率随着时间的变化量逐渐减小,土体的含水率达到胀限。

膨胀变形分为3个阶段:①急剧变化阶段,线膨胀率随着浸水时间迅速增加。膨胀土内部含大量吸水性较强的蒙脱石及混层黏土矿物,浸水时晶体矿物将水分子吸引至土体矿物晶格间,使得晶格间的距离增大,产生膨胀,膨胀变形速度较快;②缓慢变化阶段,此阶段主要是由于土体的膨胀变形是由水分进入土体的叠聚体之间产生;③稳定阶段,在此阶段土体处于饱和状态,进入土体的水较少。

3.2 不同上覆压力下的线膨胀率

将5种干密度土体在不同上覆压力下的线膨胀率列于图2。

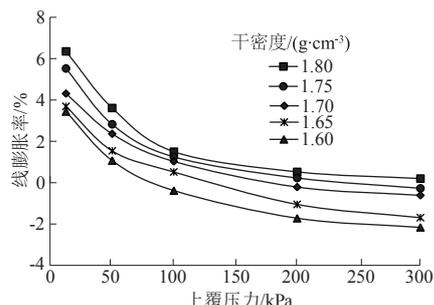


图2 不同干密度下的线膨胀率

Fig.2 Linear expansive ratio of expansive soil with varied dry density

由图 2 可见:

(1) 干密度越大, 相同上覆压力下的线膨胀率越大, 这一现象可以从膨胀土变形机理加以解释。膨胀土膨胀变形的产生主要由晶格间膨胀与颗粒间膨胀组成, 晶格间膨胀在膨胀变形中占主要部分。由于蒙脱石晶体具有较大的静电吸引力, 浸水时可将水分子吸附于晶层之间, 导致晶格间水分子层数增多, 从而体积产生膨胀。在相同的土体体积下, 试样的干密度越大, 试样中所包含的微颗粒越多, 土体的蒙脱石晶格也越多。由于吸水膨胀时单个晶格层间吸附的水分子层数相同, 因此, 干密度较大的膨胀土土体浸水饱和时的膨胀变形量也越大。

(2) 对相同干密度的膨胀土, 土体的膨胀变形量随着上覆压力的增大而逐渐减小, 呈明显的非线性关系。当上覆压力较小时, 上覆压力的变化对线膨胀率的影响较大; 而当上覆压力较大时, 上覆压力的变化对线膨胀率影响较小, 当上覆压力增大至一定程度时, 土体呈压缩状态。这主要是由于在较低的上覆压力下, 浸水后水分子进入蒙脱石晶层间时, 对层间施加一定排斥力使得晶层扩张、膨胀。如果排斥力远大于上覆压力, 膨胀土将会发生较大的膨胀变形量; 随着上覆压力的逐渐增大, 逐渐限制了层间排斥力所产生的膨胀作用, 膨胀土的膨胀量也随之减小, 线膨胀率会随上覆压力的增加而逐渐减小; 当上覆压力等于膨胀力时, 线膨胀率为 0。

4 基于 3 种因素耦合的增湿变形模式

4.1 相对线膨胀率与相对压力的关系

膨胀土的线膨胀变形率主要取决于初始干密度、初始含水率及上覆压力。膨胀力代表抑制膨胀变形最小力, 而无荷线膨胀率是土体的最大膨胀量, 2 种状态是膨胀土变形量的极端状态。此处定义相对线膨胀率为 $\varepsilon_s/\varepsilon_m$, 相对压力为 P/P_m 。其中: ε_s 为某一干密度下最大线膨胀率, ε_m 为同一状态下的无荷线膨胀率, P 为上覆压力, P_m 为膨胀力。膨胀力测定方法主要有 2 种, 即规范方法和美国规范 ASTM D4546-16 方法。本文选择美国规范 ASTM D4546-16 方法确定土体的膨胀力, 即采用图 2 中土体线膨胀率为 0 时的上覆压力为膨胀力, 将文中 5 种干密度土体的相对线膨胀率及相对压力的关系绘于图 3。

由图 3 可知, 土体的相对变形与相对压力呈明显的幂指数关系, 将膨胀土的幂指数函数关系进行化简可得式(1)。

$$\varepsilon_s = -0.332\varepsilon_m \ln(P/P_m), \quad R^2 = 0.9375 \quad (1)$$

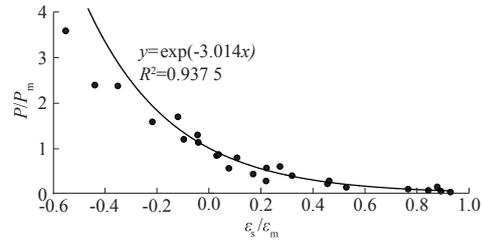


图 3 相对压力与相对线膨胀率关系

Fig.3 Relationship between relative pressure and relative linear expansive ratio

为分析含水率对膨胀土的相对变形与相对上覆压力的影响, 将文献[7]中河南及宁明 2 处膨胀土的相对线膨胀率及相对上覆压力的关系进行分析, 结果如图 4 所示。

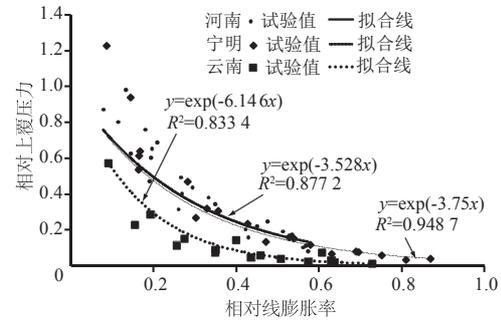


图 4 相对上覆压力与相对线膨胀率关系

Fig.4 Relationship between relative pressure and relative linear expansive ratio

3 种膨胀土的相对线膨胀率与相对上覆压力关系式如下所述。

(1) 河南膨胀土:

$$\varepsilon_s = -0.267\varepsilon_m \ln(P/P_m), \quad R^2 = 0.8772 \quad (2)$$

(2) 宁明膨胀土:

$$\varepsilon_s = -0.283\varepsilon_m \ln(P/P_m), \quad R^2 = 0.9487 \quad (3)$$

(3) 云南楚雄膨胀土:

$$\varepsilon_s = -0.1627\varepsilon_m \ln(P/P_m), \quad R^2 = 0.8334 \quad (4)$$

综上, 通过对不同初始干密度及含水率的膨胀土在不同上覆压力下, 相对线膨胀率与相对上覆压力关系的拟合函数分析后可以看出, 初始干密度及初始含水率对相对上覆压力及相对线膨胀率的关系影响不大, 均可以采用式(5)表示。

$$\varepsilon_s = a\varepsilon_m \ln(P/P_m) \quad (5)$$

式中 a 为拟合系数。

4.2 不同含水率增量的线膨胀率

图 5 为无荷膨胀试验(2.2.2 节)中典型的含水率与土体的线膨胀率的关系曲线。由图 5 可以看出, 含水率对土体膨胀变形的影响分为 2 个主要阶段: ①胀限前, 含水率变化对膨胀变形的影响较大; ②胀限后, 含水率对膨胀变形的影响不明显。相关学者^[8-9]对含水率与线膨胀率关系进行了研究, 认

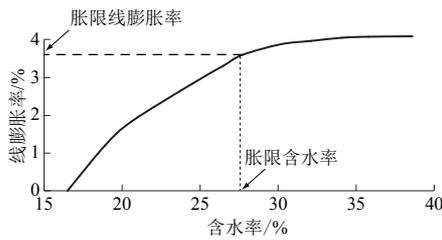


图 5 线膨胀率与含水率关系曲线

Fig.5 Relationship between linear expansive ratio and water content

为最终线膨胀率与初始干密度呈负线性关系,即初始含水率越大,土体的线膨胀率越小。这一结论的得出主要是由于土体初始含水率一般选择最优含水率,而最优含水率均小于胀限的原因。

当含水率达到胀限后,含水率的变化对土体线膨胀率的影响不明显,定义胀限时线膨胀率为最大线膨胀率。在胀限前,含水率变化对线膨胀率的影响极大,线膨胀率与浸水过程中的含水率变化密切相关。为分析胀限之前含水率变化对线膨胀率变化的影响,并确定增湿至胀限前某含水率时的线膨胀率,对本文无荷膨胀率试验结果进行分析。

分别采用式(6)、式(7)表示增湿比和线膨胀率比值,根据无荷线膨胀率的试验结果,取 3 种初始干密度(1.80, 1.75, 1.65 g/cm³)增湿比与线膨胀率比值的关系统绘于图 6。

$$R_{iw} = (w - w_0) / w_s \quad (6)$$

$$R_{ie} = \varepsilon / \varepsilon_s \quad (7)$$

式中: R_{iw} 为增湿比; w , w_0 分别为含水率及初始含水率(%); w_s 为土体的胀限含水率(%); R_{ie} 为线膨胀率比值; ε 为线膨胀率(%); ε_s 为最大线膨胀率(%)。

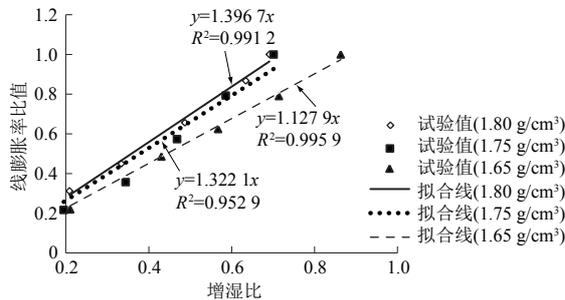


图 6 线膨胀率比值与增湿比的关系

Fig.6 Relationship between linear expansive ratio and humidity increasing ratio

由图 6 可见,在增湿膨胀过程中的线膨胀率与增湿比呈正比关系,即可以采用式(8)表示。

$$\varepsilon = b_1 R_{iw} \varepsilon_s \quad (8)$$

土体膨胀变形的三相体积与质量的关系采用式(9)表示。

$$w_s = (1 - \rho_0 / G_s + \varepsilon_s) / \rho_0 \quad (9)$$

式中 ρ_0 和 G_s 分别为土体初始干密度和土体相对密度。

将式(5)、式(6)、式(9)代入式(8)并化简得膨胀土在任一含水率下的线膨胀率,其计算式为

$$\varepsilon = \frac{b \rho_0 G_s \varepsilon_m (w - w_0) \ln(P/P_m)}{G_s - \rho_0 + a G_s \varepsilon_m \ln(P/P_m)} \quad (10)$$

式中: a 为式(5)的拟合系数; b 为 a 与 b_1 的乘积。

该模型采用单一曲线表达土体的湿胀变形,综合考虑了 3 种主要影响因素之间的耦合关系。

文献[3]、文献[5]均提出了膨胀土线膨胀率的计算模型,与本文构建的模型比较可知,本文模型只有 2 个计算参数,计算参数少,且考虑各影响因素的耦合作用,而文献[3]、文献[5]中模型的参数分别为 8, 12 个,且各影响参数之间的耦合作用考虑不完全。

5 膨胀土填筑路堤湿胀变形量预测分析

5.1 路堤的含水率变化分析

5.1.1 路堤的平衡含水率

膨胀土路堤的破坏是由于受大气环境的影响,内部含水率不断变化而导致土体产生变形。路堤内部由于受到大气的影响而产生湿热交换作用,使得土体的含水率在 6~8 a 内逐步达到平衡状态。

文献[7]对广西等地 10 种不同膨胀土的平衡含水率与塑限的关系进行了分析,结果显示,土体的平衡含水率与土样的塑限基本一致。对广西南明膨胀土的模拟试验结果也验证了这一点。可以看出,用于路堤填筑膨胀土在长时间的气候影响下,土样的最终含水率会稳定在土样的塑限附近。

5.1.2 路堤填筑的施工含水率

工程性质良好的土体常采用干法重型击实的最优含水率作为施工含水率,但对膨胀土采用干法重型击实的最优含水率常导致土体的膨胀变形量较大的问题,而采用较大含水率时土体强度常不足,且存在破碎困难的问题,因此,合理选择施工含水率对于膨胀土路堤填筑质量十分重要。近些年来,李献民等^[9]、王保田等^[10]提出了不同膨胀土施工含水率的确定方法,总体而言,膨胀土路堤填筑的实际施工含水率大于干法击实的含水率,但均低于土体的塑限,可见将膨胀土用于路堤填筑后的含水率处于增湿状态,且含水率由初始含水率 w_0 增至塑限 w_p 。

5.2 公路膨胀土总变形量预测

路堤采用分层填筑的方法进行,施工过程中初始含水率及压实度由设计方案确定,因此,填筑膨胀

土工作时的上覆压力主要由土体自重、行车荷载、路面自重产生。随着路堤填筑施工的进行,膨胀土的上覆荷载逐渐由小增大,具体分布见图 7。

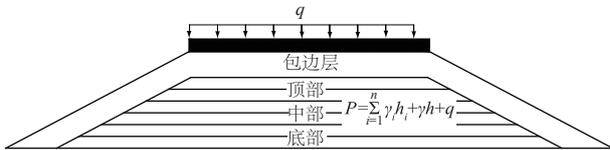


图 7 路堤分层填筑及受力示意图

Fig.7 Filling of subgrade by layers and stress state

对路堤含水率分析可知,随铺筑时间的增加,用于路堤膨胀土的含水率由设计含水率增加至平衡含水率。由于膨胀土的湿胀特性,土体含水率增加常导致土体的膨胀变形,第 i 层土由于含水率增加而产生的膨胀变形量 δ_i 可由式(11)表示。

$$\delta_i = \frac{b\rho_{i0}G_s\varepsilon_m(w_p - w_0)\ln(P_i/P_m)}{G_s - \rho_{i0} + aG_s\varepsilon_m\ln(P_i/P_m)}h_i \quad (11)$$

式中: ρ_{i0}, P_i, h_i 分别为第 i 层路堤土的初始干密度、上覆压力及层厚。

综合各层的膨胀变形量,可得膨胀土路堤的总变形量,采用式(12)表示。

$$\delta = \sum_{i=1}^n \frac{b\rho_{i0}G_s\varepsilon_m(w_p - w_0)\ln(P_i/P_m)}{G_s - \rho_{i0} + aG_s\varepsilon_m\ln(P_i/P_m)}h_i \quad (12)$$

路堤膨胀土的平衡含水率可以采用现场及数值模拟的方法进行统计综合确定,由此采用式(12)可以估算路堤的总膨胀变形量。

6 结 论

(1)在相同的初始干密度及含水率下,上覆压力越大,膨胀土的线膨胀率越小,在相同的初始含水率及上覆压力下,土体的初始干密度越大,土体的线膨胀率越大。当含水率低于土体胀限时,含水率的

变化对土体湿胀变形量影响较大,湿胀量与土体含水率的增湿比近似呈正比关系。

(2)相对上覆压力与相对线膨胀率呈对数关系,两者可以采用同一拟合公式表示,初始干密度及初始含水率对两者关系影响不大,借此提出膨胀土在不同初始状态下的线膨胀率耦合计算式。

(3)对土体内部的含水率分布进行分析,结合膨胀土线膨胀率的耦合计算式,提出膨胀土路堤的总膨胀变形量计算方法,为膨胀土路堤的设计与施工中总变形量的预测提供参考。

参考文献:

- [1] 王年香,章为民. 膨胀土地基膨胀变形计算方法研究[J]. 工业建筑,2008,38(6):58-61.
- [2] 姚海林,程平,吴万平. 基于收缩试验的膨胀土地基变形预测方法[J]. 岩土力学,2004,25(11):1688-1692.
- [3] 刘清秉,吴云刚,项伟,等. K_0 及三轴应力状态下压实膨胀土膨胀模型研究[J]. 岩土力学,2016,37(10):2795-2801.
- [4] 边加敏. 压实弱膨胀土的膨胀变形特征及计算模式研究[J]. 长江科学院院报,2016,34(9):1-5.
- [5] 黄斌,何晓民,谭凡. K_0 应力状态膨胀土膨胀模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(增1):442-447.
- [6] 李雄威. 膨胀土湿热耦合性状与路堑边坡防护机理研究[D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2008.
- [7] 郑健龙,张锐. 公路膨胀土路基变形预测与控制方法[J]. 中国公路学报,2015,28(3):1-10.
- [8] 李振,邢义川,张爱军. 膨胀土的浸水变形特性[J]. 水利学报,2005,36(11):1386-1391.
- [9] 李献民,王永和,杨果林,等. 击实膨胀土工程变形特性的试验研究[J]. 岩土力学,2003,24(5):826-830.
- [10] 王保田,武良金,向文俊,等. 改良膨胀土筑堤技术研究[J]. 岩土力学,2005,26(1):87-90.

(编辑:黄玲)

(上接第 85 页)

- [4] 朱赞成,孙德安,李呈宏,等. 基于晶层水化模型确定膨润土的相对密度[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(8):1688-1696.
- [5] 孙可明,张树翠,辛利伟. 膨润土干湿循环变形实验研究[J]. 非金属矿,2015,38(2):40-42.
- [6] 刘毅. 高庙子膨润土水化膨胀特性及其微观机理研究[J]. 工程地质学报,2016,24(3):451-458.
- [7] 张明,张虎元,贾灵艳,等. 缓冲回填材料的室内制样方法研究[J]. 建筑材料学报,2012,15(5):638-643.
- [8] 叶为民,赖小玲,刘毅,等. 高庙子膨润土微观结构时效性试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(12):2255-2261.
- [9] 赖小玲,叶为民,刘毅,等. 高庙子膨润土膨胀力时效性试验研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(3):574-579.

- [10] HE Y, YE W M, CHEN YG, et al. Influence of Pore Fluid Concentration on Water Retention Properties of Compacted GMZ01 Bentonite [J]. Applied Clay Science, 2016, 129: 131-141.
- [11] VILLAR M V, LLORET A. Influence of Temperature on the Hydro-mechanical Behaviour of a Compacted Bentonite [J]. Applied Clay Science, 2004, 26(1): 337-350.
- [12] 张虎元,彭宇,王学文,等. 冰-土混合法调配膨润土缓冲回填材料含水率研究[J]. 岩土力学,2016,37(增2):144-150.
- [13] 闫双斌,隆威,王祖平. 可控压密灌浆加固地基材料的试验研究[J]. 长江科学院院报,2012,29(9):82-85.

(编辑:王慰)