

DOI: 10.11779/CJGE2022S1026

膨胀土增湿水平膨胀力的研究现状综述

张四化, 原崇轩, 刘云龙*, 夏妍妍

(郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 膨胀土是一种富含蒙脱石、伊利石及高岭石的高塑性黏土, 在增湿作用下会发生体积膨胀。若其横向膨胀变形受到约束, 将会产生水平膨胀力, 对岩土工程设施造成巨大危害。近年来, 为减少相关损失, 学者们通过大量室内试验, 开发了新型理论方法及预测模型对水平膨胀力进行了深入研究。归纳总结并分析了膨胀土膨胀特性的影响因素和各因素对膨胀特性的影响规律, 并从微观结构角度分析了各因素的影响机理。最后提出了降低侧向水平膨胀力的实用措施, 分析了研究裂隙膨胀土水平膨胀力的重要性, 并对其未来研究方向进行了展望。

关键词: 膨胀土; 侧向膨胀力; 膨胀特性; 膨胀机理

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S1-0143-05

作者简介: 张四化(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事复合地基理论与工程应用研究工作。E-mail: zsh19801113@126.com。

Review on researches on horizontal swelling pressure of expansive soils after humidification

ZHANG Si-hua, YUAN Chong-xuan, LIU Yun-long, XIA Yan-yan

(Department of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The expansive soil is a kind of high plastic clay rich in montmorillonite, illite and kaolinite, in which volume expansion will occur under humidification. If the lateral swelling deformation is constrained, the horizontal swelling pressure will be generated, which will cause great harm to geotechnical engineering facilities. In recent years, in order to reduce the relative losses, domestic and foreign scholars have performed a large number of laboratory tests and developed new theoretical methods and prediction models for horizontal swelling pressure. The influence factors of swelling characteristics of expansive soils and the influence laws of various factors on the swelling characteristics are analyzed, and the influence mechanism of various factors is studied from the perspective of microstructure. Finally, the practical measures to reduce the lateral horizontal swelling force are proposed, the importance of studying the horizontal swelling force of fissured expansive soils is analyzed, and the future research direction is prospected.

Key words: expansive soil; lateral swelling pressure; expansion characteristic; swelling mechanism

0 引言

世界七大洲中广泛分布着大量的膨胀土, 膨胀土中富含蒙脱石及其混合黏土矿物, 因此对由渗透和蒸发引起的含水率的变化异常敏感。当含水率增加时, 膨胀土体积显著膨胀, 若膨胀变形受到约束, 会对周围土体或结构物产生膨胀力。在渗透过程中, 当膨胀土的侧向体积膨胀受到挡土墙等外部结构的限制时, 结构体除了承受土体自重和超载引起的一般的土压力, 还要承受墙后膨胀土因含水率增大而产生的附加应力。研究表明, 水平膨胀力会对建筑物基础、铁路和公路路基、护坡、挡土墙和桩等结构造成损害^[1]。如对于支撑膨胀土路堤的挡土墙, 常因水平膨胀力导致路堤产生了一定的水平位移, 后续的修复成本很高;

中国每年都有大量工程建筑遭受膨胀土的严重破坏, 其中水平膨胀力对建筑物、结构体的危害占据了很大部分。在过去的 40 a 里, 仅美国与膨胀土相关的损失即从 23 亿美元增加到 130 亿美元^[2]。因此, 在膨胀土的地质基础设施设计中, 应充分考虑水平膨胀力的影响。

本文归纳总结了近年来水平膨胀力的相关试验、理论研究, 最后分析水平膨胀力的影响因素和各因素下水平膨胀力的变化规律和影响机理。阐述了水平膨胀力对于膨胀土地区的实际工程意义, 并对其未来研究方向进行了展望。

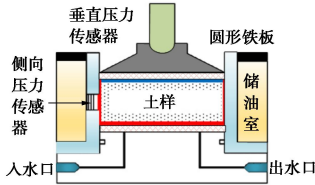
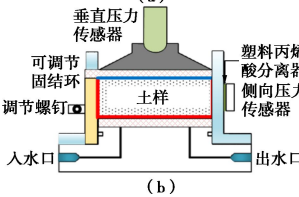
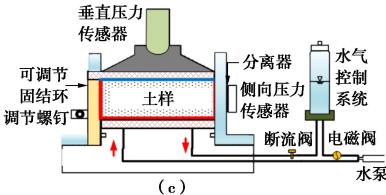
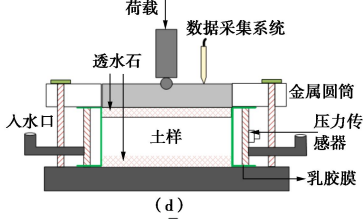
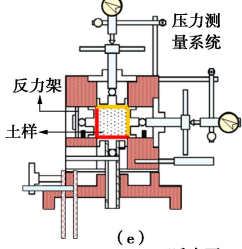
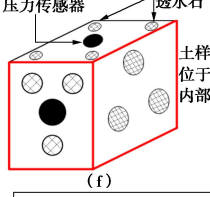
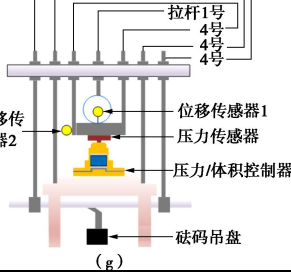
基金项目: 国家自然科学基金项目(42107196); 河南省自然科学基金项目(212300410280)

收稿日期: 2022-10-01

***通信作者** (E-mail: liuyunlongzzu@hotmail.com)

表 1 水平膨胀力测量的试验装置

Table 1 Test devices for measuring horizontal swelling prossure

来源	仪器类型	仪器示意图	创新点	要点
Bag 等 ^[7]	改进的固结仪		增加了加热装置	适用于膨胀土温度剧烈变化的工程情况，如膨胀土作核废料处置库时。
Zhang 等 ^[8]	改进的固结仪		设计了可调节固结环，使用塑料丙烯酸分离器	静态压实后会产生初始径向应力，固结环可以消除静态压实产生的误差，分离器可提高传感器的精度
Liu 等 ^[9]	改进的固结仪		通过气泵和水泵控制孔隙气压和孔隙水压	可测量特定净法向应力和基质吸力作用下的垂直膨胀应变和水平膨胀力，适用于深入非饱和土力学机理的膨胀试验研究
Puppala 等 ^[3]	改进的液压三轴仪		使用乳胶膜将土水隔离，并用实心金属圆筒进行校准	可测量不同围压下的体积应变
谢云等 ^[4]	改进的三维胀缩仪		采用薄钢板作为平衡膨胀力的测力元件	可同时量测三向的变形和膨胀力
Ikizler 等 ^[5]	改进的三维胀缩仪		设计了一个刚性钢制立方体盒	可测量恒体积下横向和垂直方向的膨胀力，所测值即为不容许地基发生变形条件下建筑物所受膨胀力，较符合工程实际。
李胜杰等 ^[6]	改进的三维胀缩仪		添加了边界条件切换系统	通过调整仪器拉杆松紧可模拟恒体积、恒应力和柔性等刚度边界条件。如恒体积条件为固定所有拉杆，恒应力条件控制拉杆 1 号、3 号，松开拉杆 2 号、4 号，柔性等刚度边界条件为松开拉杆 1 号，固定其余拉杆。

1 相关试验

近年来，世界各地的学者对膨胀土膨胀力的确定展开了大量研究，研究表明，通过改进传统的仪器来提升水平膨胀力的测量水平颇为高效。用于确定水平

膨胀力的试验装置可分为改进的固结仪、改进的液压三轴仪和三维胀缩仪 3 类，如表 1 所示^[3-9]。

2 水平膨胀力的理论与预测模型

近年来，相关研究人员建立了不同条件下的膨胀

表 2 半经验和经验模型相关理论方法
Table 2 Theoretical methods of semi-empirical and empirical models

参考文献	公式	要点
Jiang 等 ^[10]	$P_L = \alpha_j \beta_j P_{\max}$	为了确定含水率系数, 需进行系列试验; 变形系数是一个经验参数, 因土壤而不同。
Hong 等 ^[11]	$P_{LS} = \left(\frac{3}{2}\right) \sigma_i 10^{-(2\xi_h)/[\gamma_\sigma(1-f_H)]} \left(\frac{h_i}{h_f}\right)^{\gamma_h/\gamma_\sigma} - \frac{\gamma_i z}{2}$	半经验公式较为可靠, 可用于工程实践, 但参数的确定复杂。
Nelson 等 ^[12]	$P_{LS} = P_0 + \alpha_1 P_{sv} \leq P_0 + P_p$	仅用于忽略摩擦表面上的侧向土压力的估算
Liu 等 ^[13]	$P_L = \frac{(1-\mu-2\mu^2)P_s}{1-\mu^2-\frac{P_s}{E_s}(1+\mu)(1-\mu-2\mu^2)} + \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_s$ $\sigma_{l(a-b)} = \frac{(1-\mu-2\mu^2)}{1-\mu^2-\frac{P_{s(a-0)}}{E_{(a-0)}}(1+\mu)(1-\mu-2\mu^2)} -$	可预测自由膨胀下考虑水平膨胀力的侧向土压力, 但从初始不饱和状态到饱和状态的垂直膨胀压力难以预测。
Liu 等 ^[14]	$\frac{(1-\mu-2\mu^2)}{1-\mu^2-\frac{P_{s(b-0)}}{E_{(b-0)}}(1+\mu)(1-\mu-2\mu^2)} + \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_s,$ $P_s = P_{s0} + \beta_c \cdot \psi \cdot \left(\frac{S_r}{100}\right)^2$	仅需土水特征曲线 (SWCC) 和少量土壤性质 (饱和土的弹性模量、最大干密度、泊松比), 即可预测非饱和状态的水平膨胀力。
Abdollahi 等 ^[15]	$P_L = P_{LS} + \sigma_l = \left(\frac{1-2\mu}{1-\mu}\right)(\sigma_{\text{final}}^s - \sigma_{\text{initial}}^s) + \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_v,$ $P_{LS} = \left(\frac{1-2\mu}{1-\mu}\right)(\sigma_{\text{final}}^s - \sigma_{\text{initial}}^s)$	只需要土壤水分特征曲线、泊松比以及初始和最终土壤含水率, 即可预测非饱和状态下的水平膨胀力。但未考虑弹性模量随基质吸力的变化。

式中, P_{LS} 为侧向土压力; P_{sv} 为防止垂直膨胀所需的最小应力; P_L 为非饱和条件下的 LSP; α_j 为含水率系数, 即当前含水率与最大 LSP 的含水率之比; β_j 为变形系数, 即当前变形与最大 LSP 时的变形之比; P_{\max} 为试验中的最大 LSP; σ_i 为平均主应力的初始值; ξ_h 为水平膨胀应变; γ_σ 为平均主应力压缩指数; f_H 为饱和度从 1/ θ ~1 的系数; θ 为体积含水率; γ_i 为土壤的单位重量; z 为计算点的深度; P_0 为静止土压力; P_p 为被动土压力; α_1 为参数, 取值为 0.7~1; E_a 为随基质吸力变化范围的平均弹性模量, μ 为泊松比, P_s 为恒定体积的垂直膨胀压力 (VSP); S_r 为饱和度, P_{s0} 为吸力为零时的垂直膨胀压力 (压实膨胀土建议取 55 kPa), β_c 为拟合参数; $\rho_{d,\max}$ 为土的最大干密度, I_p 为塑性指数, ψ 为土的吸力; σ_l 为上覆压力引起的水平压力; σ_{final}^s , $\sigma_{\text{initial}}^s$ 分别为最终吸力和初始吸力。

力预测模型。现有模型可分为经验/半经验模型、扩散双层 (DDL) 模型及新兴的人工智能方法。

首先, 半经验和经验模型中的大部分理论方法来自有限的试验研究, 经验参数相对难以确定, 表 2 总结了相关理论模型的研究成果^[10, 15]。

扩散双电层 (DDL) 模型是微观层面解释膨胀特性的研究方法, 即当给定两个黏土片层距离时, 可以由两个片层中轴线处的离子浓度来求取渗透压力, 也取得了显著的进展^[18-21]。Schanz 等^[18]提出了一种基于扩散双电层理论的方法来预测压实膨润土的膨胀压力; Bharat 等^[19]在非相互作用和相互作用的土-水-电解质系统的电势之间建立关系, 并推导出膨胀压力和孔隙比之间的关系; Mitchell 等^[20]提出了一种完全解析的方法, 通过使用 Hamaker 常数、板厚来计算范德华力。但其未能考虑 Hamaker 常数随黏土矿物和离子条件下的变化; Guo 等^[21]也指出采用完全解析法计算双电层的排斥力时, 很难精确确定计算黏土矿物表面

的电荷密度。

人工神经网络 (ANN)、自适应神经模糊推理系统、基因表达式编程方法也是新近水平膨胀力研究的重要方法。Ikizler 等^[16]利用试验数据开发了一种预测模型, 采用了人工神经网络和自适应神经模糊推理系统的方法, 可很好地估计膨胀土的侧向和垂直膨胀压力; 随后利用试验数据开发了一种新的压力预测模型, 采用了人工神经网络和自适应神经模糊推理系统的方法, 可以很好地估计膨胀土的侧向和垂直膨胀压力; Jalal 等^[17]以 145 篇国际发表的研究论文为基础, 建立了试验数据库, 研究表明基因表达式编程方法对膨胀强度特性的预测在模拟和实验结果中具有相当高的精确度, 可应用于工程实际中, 并随着后续数据的充实扩大使用范围。

3 膨胀特性的影响因素

由于存在蒙脱石、伊利石等黏土矿物, 膨胀土中

的结构内部中膨胀势以内应力的形式存在,当水渗入并引发体积膨胀时,膨胀土的基质吸力降低。若水平方向的体积膨胀受到限制,水平膨胀力就会发生变化,其发展过程如图1所示。

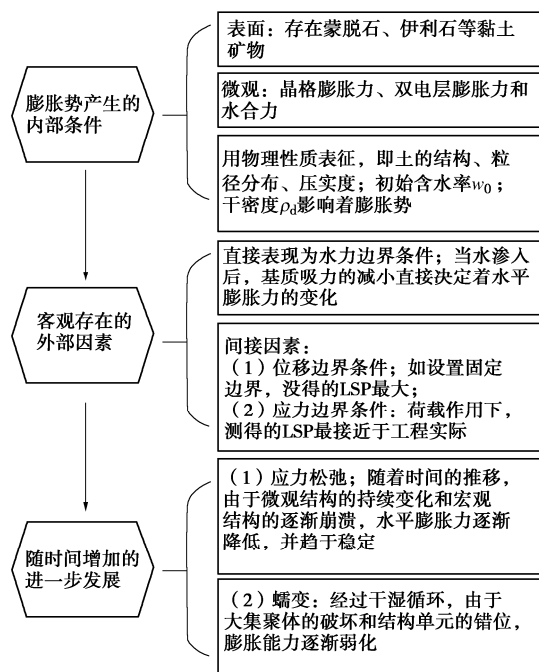


图1 水平膨胀力的发展流程图

Fig. 1 Development process of horizontal swelling pressure

膨胀特性的影响因素主要有物理性质指标（如粒径分布、压实度、初始干密度、初始含水率等），外部因素（温度、物理化学因素等），微结构等方面。

从微观角度来说，膨胀土的内部孔隙分为层间孔隙、集合体内孔隙和集合体间孔隙。如图2所示，膨胀土的膨胀过程可以分为3个阶段：①第一阶段为晶层膨胀，膨胀土中的层叠体自相集聚构成黏土基质；②第二阶段为双电层形成阶段，阳离子由于水合作用离开表面，晶体表面的负电荷会使水分子弥散定向排列，水中的阳离子和晶层中的负电荷形成扩散双电层（DDL）；③第三阶段为扩散双电层的膨胀，由于双电层的相互作用，厚层叠体分裂成为薄层叠体，阳离子水化作用减弱，晶体膨胀结束。总之，微观膨胀力由晶格膨胀力、双电层膨胀力和水合力组成，由于黏土矿物颗粒的表面特性和水分子的极性，膨胀土与水分子相互作用时，在颗粒周围形成水膜将颗粒推开，引起土的体积膨胀。

初始干密度、初始含水率对于膨胀力的影响机理也可从微观角度解释^[22]，随着初始含水率的增加，弱结合水膜的厚度变大，当土中含有较多的弱结合水时，土体表现为高塑性和易胀缩性，因此膨胀力增大；当初始含水率达到一定值，弱结合水膜的厚度不再变大，此时膨胀力最大；随着初始含水率的继续增加，土颗

粒集聚体间在外力作用下发生相对滑动而使试样的孔隙结构发生变化，导致膨胀力逐渐减少。

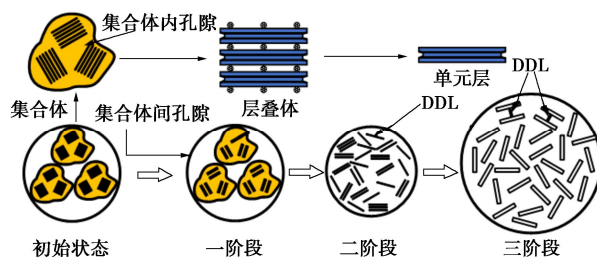


图2 膨胀特性微观机理图

Fig. 2 Microscopic mechanism of swelling characteristics

根据研究，降低水平膨胀力的最佳方法是对膨胀土的土性进行改良，现有改良方法主要分为物理、改良法以及微生物法^[23]。物理改良法较为直接，主要为换填法、机械法和隔水法，通常是采用机械施工和混合填料等方式改良。化学改良法最为常见，通常以掺粉煤灰、水泥、石灰等材料与土体进行化学反应来改善膨胀土的胀缩性。微生物改良法通常利用微生物或生物酶在膨胀土中反应诱导产生土体中的矿物沉淀，对膨胀土体的胀缩特性进行改良，改善土体性能。

4 结 语

本文归纳总结了近年来侧向水平膨胀力的国内外相关试验、理论研究及预测模型，但还有诸多新问题亟待解决。

事实上，数值模拟在岩土的各个领域正在蓬勃发展，但在水平膨胀力的相关研究中却相当有限。首先因为膨胀过程受多种因素控制，边界条件难以设置；其次，由于经验参数高度依赖膨胀土的类型，实际使用受限，材料属性难以确定。但随经验模型适用性的进一步发展，数值模拟中存在的一些问题可能得以解决，有待用于水平膨胀力的研究。

着力于工程实际，未来对非饱和膨胀土水平膨胀力研究仍需侧重于膨胀土的结构特性和工程力学特性的影响因素方面。①需加强结构性特征参数试验技术的开发和试验设备的研制，通过改进传统仪器来提升水平膨胀力的测量水平；②建立能同时反应膨胀土膨胀干缩特征和多相态多场作用的本构模型，以便描述其胀缩变形特征和应力应变特性，并利用这一模型进行膨胀土建筑物设计和安全评价研究。

参考文献：

- [1] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984. (LIAO Shi-wen. Expansive Soil and Railway Engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984. (in Chinese))

- [2] PUPPALA A J, CERATO A. Heave distress problems in chemically-treated sulfate-laden materials[J]. *Geo-Strata*, 2009, **10**(2): 28 – 32.
- [3] PUPPALA A J, PEDARLA A, HOYOS L R, et al. A semi-empirical swell prediction model formulated from ‘clay mineralogy and unsaturated soil’ properties[J]. *Engineering Geology*, 2016, **200**: 114 – 121.
- [4] 谢云, 陈正汉, 孙树国, 等. 重塑膨胀土的三向膨胀力试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, **28**(8): 1636 – 1642. (XIE Yun, CHEN Zheng-han, SUN Shu-guo, et al. Test research on three-dimensional swelling pressure of remolded expansive clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, **28**(8): 1636 – 1642. (in Chinese))
- [5] IKIZLER S B, VEKLI M, DOGAN E, et al. Prediction of swelling pressures of expansive soils using soft computing methods[J]. *Neural Computing and Applications*, 2014, **24**(2): 473 – 485.
- [6] 李胜杰, 唐朝生, 王东伟, 等. 多边界条件下缓冲/回填材料的膨胀特性[J]. *岩土工程学报*, 2019, **41**(4): 700 – 706. (LI Sheng-jie, TANG Chao-sheng, WANG Dong-wei, et al. Effects of boundary conditions on swelling behavior of buffer/backfill materials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(4): 700 – 706. (in Chinese))
- [7] BAG R, RABBANI A. Effect of temperature on swelling pressure and compressibility characteristics of soil[J]. *Applied Clay Science*, 2017, **136**: 1 – 7.
- [8] ZHANG R, LIU Z, ZHENG J, et al. Experimental evaluation of lateral swelling pressure of expansive soil fill behind a retaining wall[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, **32**(2): 04019360.
- [9] LIU Z N, ZHANG R, LIU Z J, et al. Experimental study on swelling behavior and its anisotropic evaluation of unsaturated expansive soil[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, **2021**: 1 – 13.
- [10] JIANG Z X, QIN X L. A new method for calculating lateral swell pressure in expansive soil[C]// *Proc 7th Int Conf on Expansive Soils*, ASCE, Reston, 1991: 233 – 238.
- [11] HONG G T. *Earth Pressures and Deformations in Civil Infrastructure in Expansive Soils*[D]. Texas: Texas A & M University, 2008.
- [12] NELSON J D, CHAO K C, OVERTON D D. *Foundation Engineering for Expansive Soils*[M]. John Wiley & Sons, 2015.
- [13] LIU Y L, VANAPALLI S K. Influence of lateral swelling pressure on the geotechnical infrastructure in expansive soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, **143**(6): 04017006.
- [14] LIU Y L, VANAPALLI S K. Load displacement analysis of a single pile in an unsaturated expansive soil[J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, **106**: 83 – 98.
- [15] ABDOLLAHI M, VAHEDIFARD F. Prediction of lateral swelling pressure in expansive soils[C]// *Geo-Congress 2020*. Minneapolis, 2020: 367 – 376.
- [16] IKIZLER S B, VEKLI M, DOGAN E, et al. Prediction of swelling pressures of expansive soils using soft computing methods[J]. *Neural Computing and Applications*, 2014, **24**(2): 473 – 485.
- [17] JALAL F E, XU Y F, IQBAL M, et al. Predictive modeling of swell-strength of expansive soils using artificial intelligence approaches: ANN, ANFIS and GEP[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **289**: 112420.
- [18] SCHANZ T, KHAN M I, AL-BADRAN Y. An alternative approach for the use of DDL theory to estimate the swelling pressure of bentonites[J]. *Applied Clay Science*, 2013, **83/84**: 383 – 390.
- [19] BHARAT T V, SIVAPULLAIAH P V, ALLAM M M. Novel procedure for the estimation of swelling pressures of compacted bentonites based on diffuse double layer theory[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **70**(1): 303 – 314.
- [20] MITCHELL J, SOGA K. *Fundamentals of Soil Behavior*[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [21] GUO Y, (BILL) YU X. Characterizing the surface charge of clay minerals with Atomic Force Microscope (AFM)[J]. *AIMS Materials Science*, 2017, **4**(3): 582 – 593.
- [22] 叶云雪, 邹维列, 韩仲, 等. 考虑初始状态影响的膨胀土一维膨胀特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(8): 1518 – 1525. (YE Yun-xue, ZOU Wei-lie, HAN Zhong, et al. One-dimensional swelling characteristics of expansive soils considering influence of initial states[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(8): 1518 – 1525. (in Chinese))
- [23] 刘海明, 赵超, 姚美良. 膨胀土改良技术研究进展[J]. *低温建筑技术*, 2016, **38**(11): 95 – 96, 100. (LIU Hai-ming, ZHAO Chao, YAO Mei-liang. Advances in the research on the improvement of expansive soil[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2016, **38**(11): 95 – 96, 100. (in Chinese))