

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.02.07

# 压实黄土变形影响因素与计算模型研究

马 闫<sup>1,2</sup>, 王家鼎<sup>1</sup>, 李 彬<sup>1</sup>, 彭淑君<sup>3</sup>

(1. 西北大学/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 佐治亚理工学院/土木与环境工程学院, 亚特兰大 GA30318; 3. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 为研究压实黄土的压缩特性和沉降计算模型, 开展了不同压实度、不同含水量下的压实黄土侧限压缩试验, 分析了压力、含水量、压实度以及结构性对压实黄土压缩变形量及变形过程的影响, 提出了结构性的表示方法及结构强度的计算方式, 引入割线模量表达法并推导出了压实黄土加压过程的结构性本构模型及增湿本构模型。结果表明: 压实黄土的压缩性随着压实度的增大而减小且压力越大减小越明显; 压缩性随着初始含水量的增大而增大且塑限前后差别明显; 压实黄土具有增湿变形性质, 增湿变形系数随压实度的增大而减小、随增湿含水量的增大而增大; 高压实度下的黄土具有结构性且结构强度随着含水量的增大而减小、随着压实度的增大而增大, 据此推导出的加压结构性本构模型和增湿本构模型精度更高、物理意义更加明确。

**关键词:** 压实黄土; 压缩变形; 增湿变形; 结构性

中图分类号: TU411.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665 (2016) 02-0044-10

## Influence factors on the compressibility of compacted loess and empirical constitutive models

MA Yan<sup>1,2</sup>, WANG Jiading<sup>1</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, PENG Shujun<sup>3</sup>

(1. Department of Geology, Northwest University/ State Key Laboratory of Continental Dynamics, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta GA30318, USA; 3. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Series of compression tests were conducted with various compactness and water content for compressibility studies and constitutive modeling of compacted loess. The results indicate that the compressibility of compacted loess decreases with the increasing compactness. The higher the load, the larger the deduction is. Furthermore, the compressibility of compacted loess increases with the increasing water content, while large difference in results was observed before and after the plastic limit. Compacted loess is subjected to wetting induced deformation. The coefficient of the wetting induced deformation decreases with the increasing compactness and increases with the increasing water content. Loess subjected to high compactness has the following structural properties. The structure yield strength decreases with the increasing water content, and decreases with the increasing compactness. The loading constitutive model and wetting constitutive model were derived based on the test results and analyses. Compared with the previous studies, this model performs better physical relationships and obtains more accurate solutions.

**Keywords:** compacted loess; compress deformation; wetting deformation; structure property

收稿日期: 2015-06-09; 修订日期: 2015-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (41372269); 高等学校博士学科点专项科研基金项目资助 (20116101130001)

第一作者: 马闫 (1989-), 男, 博士研究生, 研究方向为黄土工程地质性质。E-mail: myan1989@163.com

通讯作者: 王家鼎 (1962-), 男, 博士, 教授, 从事黄土工程地质性质及黄土地质灾害研究。E-mail: wangjd@nwu.edu.cn

随着中西部黄土高原地区城市建设速度不断加快,黄土地区特有的塬梁峁地貌地形条件限制了城市的发展空间,为解决这一人地矛盾,延安、兰州等城市陆续开展了大规模的削山填沟、人工造地工程,另外黄土地区公路、铁路、机场路基修建过程中同样面临着需要用填方来补足建设用地的情况。近年的黄土填方工程有面积增大、厚度增高、下伏地层复杂性增强的发展趋势。

在填方工程中,最主要的岩土工程问题是填方体的沉降变形问题。黄土地层一般较厚,所以填方土体的地基往往同样为黄土,填方黄土体既是沉降介质也是下伏地层的荷载,下伏地基的沉降变形以及填方土体本身的沉降变形共同决定了最终的沉降变形。为降低地基沉降量,填方施工过程中一般采取原位碾压或者强夯的方式处理地基黄土,而填方黄土体则是将散土在一定的压实能和含水量下重塑到一定的压实度。但是,由于现场填方施工中填料含水量、施工机械、及地形条件等各种限制,使得地基黄土和填方黄土无法全部且均匀地达到理想的含水量和压实度。

为揭示这一问题对填方沉降量的影响,一些研究者开展了相应的研究工作,认为压实黄土的沉降变形特性很大程度上取决于压实能<sup>[1]</sup>、含水量和压实度<sup>[2-3]</sup>这3个主要因素的影响,若考虑到长期沉降稳定性问题,压实黄土的龄期<sup>[4-5]</sup>对增湿压缩特性同样具有较大的影响。另外,压实黄土在不同的制样含水量和试验含水量下表现出了一定的结构性<sup>[6]</sup>,这种结构性同样影响了黄土的压缩变形特性。目前的研究中对于压实度的影响已经取得了较为明确的结论,对增湿过程的影响研究尚不充分,同时对于压实黄土结构性影响的研究还比较少。

对压实黄土变形主要影响因素的研究旨在为沉降量化计算做理论铺垫,进一步的研究课题则是填方体沉降量化计算模型的研究。相比于对压实黄土变形因素的研究,目前关于计算模型方面的研究相对较少。一些研究者在魏汝龙<sup>[7]</sup>基于黏土试验数据提出的割线模量表达法基础上,分别从各自的试验数据出发开展黄土的建模工作,并逐渐由最初的线性模型<sup>[8]</sup>发展为更为普适的非线性幂函数模型<sup>[3]</sup>和Gunary模型<sup>[9]</sup>,虽然精度逐渐提高、适用性逐渐增强,但是模型构建过程中都缺少对模型物理意义的探讨,且与压缩变形的影响因素之间缺乏联系。

为探索这一工程问题并尝试解决前人研究中的不足,本文通过不同压实度、不同含水量压实黄土侧限

压缩试验结果,详细分析探讨了压实度、含水量、增湿过程及结构性4种因素对压实黄土压缩特性的影响,分析了压实黄土结构性产生的原因和结构强度的获取方式,进一步利用割线模量表达法构建了考虑压实黄土结构性的加压本构模型,以及考虑含水量变化对压缩性影响的增湿本构模型。

## 1 试验方案

### 1.1 试验用土基础物理指标

试验所用黄土样取自山西中西部某机场建设工程填方料场,均为附近山体削方产生的散土样,为 $Q_2$ 和 $Q_3$ 黄土的混合体,主要物理指标如下:塑限 $w_p = 15.3\%$ ,液限 $w_L = 28.5\%$ ,塑性指数 $I_p = 13.2$ ,土粒密度 $G_s = 2.71$ ,天然含水量 $8.2\% \sim 11.3\%$ ,整体为淡黄色粉质黏土,混有棕色黏土块(古土壤)。对土样开展了5组重型击实试验<sup>[10]</sup>,试验结果如图1所示,测得该土样的最大干密度 $\rho_{dmax} = 1.88 \text{ g/cm}^3$ ,最优含水量为 $w_{op} = 14.1\%$ 。

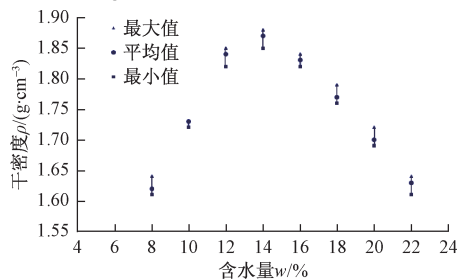


图1 土样击实曲线

Fig. 1 Compaction curve of backfill loess

### 1.2 压实黄土侧限压缩试验

选取3种压实度进行研究,分别为85%, 90%, 95%,对应的干密度为 $1.60, 1.69, 1.79 \text{ g/cm}^3$ 。按照土的三相比例关系计算各级压实度下的饱和含水量,从 $w = 11\%$ 开始,以3%为一级,分别调制从11%~饱和和各级含水量下的散土备用。为了精确控制试样含水量、减少试验过程中滤纸和透水石对试样含水量的干扰,首先将散土调拌至预定含水量盛放在保鲜盒中,而后将滤纸和透水石埋于调制好的土中封存24 h,利用滤纸和透水石自身的基质吸力使水分平衡。制样时,按照预定压实度对应的干密度计算出在该级含水量下所需散土的质量,利用压样仪将散土直接压进内置的环刀中,环刀高 $h = 2 \text{ cm}$ ,面积 $s = 50 \text{ cm}^2$ 。各级压实度下的饱和试样首先以最优含水量散土按上述方法制取,而后在试样上下分别放置滤纸和透水石置于水中浸泡2 d后开展试验。试验加载分为10级,加载顺序依次为12.5, 25, 50,

100, 200, 400, 600, 800, 1 000, 1 200 kPa, 方法参照文献 [10]。各试样压缩试验结束后测试该试样中心的

含水量, 若  $\Delta w < \pm 0.5\%$ , 则判为有效数据计入试验结果, 否则重新试验。试验方案见表 1。

表 1 压缩试验方案

Table 1 Compression test plan

| 编号                       | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 含水量 $w/\%$               | 11   | 14   | 17   | 饱和   | 11   | 14   | 17   | 20   | 饱和   | 11   | 14   | 17   | 20   | 23   | 饱和   |
| 压实度 $C/\%$               | 95   | 95   | 95   | 95   | 90   | 90   | 90   | 90   | 90   | 85   | 85   | 85   | 85   | 85   | 85   |
| 干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$ | 1.79 | 1.79 | 1.79 | 1.79 | 1.69 | 1.69 | 1.69 | 1.69 | 1.69 | 1.60 | 1.60 | 1.60 | 1.60 | 1.60 | 1.60 |

## 2 试验结果分析

### 2.1 压实度对压实黄土压缩性的影响

不同压实度下黄土颗粒排列的紧密程度有所不同, 将对压实黄土压缩性质产生决定性的影响, 基于试验分别分析了最优含水量  $w_{op}$ 、不同压实度下, 试样轴向应变  $\varepsilon$ 、孔隙比  $e$ 、割线模量  $E_{soi}$  随压力的发展以及由压实度提高引起的轴向应变差  $\Delta\varepsilon$  随压力的发

展情况。轴向应变为  $\varepsilon = \Delta h/h_0$ , 孔隙比分别为  $e = e_0$

$$+ \varepsilon (1 + e_0), e_0 = \frac{(1 + w_0)\rho_w G_s}{\rho_0} - 1, \text{割线模量为 } E_{soi}$$

$= p_i/\varepsilon_i$ , 其中  $\Delta h$  为该级压力下的下沉量,  $h_0$  为试样原始高度,  $e_0$  为初始孔隙比,  $w_0$  为初始含水量,  $\rho_0$  为初始密度,  $G_s$  为土粒密度,  $p_i$ 、 $\varepsilon_i$  分别表示某一级压力及该级压力对应的应变, 据此计算数据绘制

图 2。

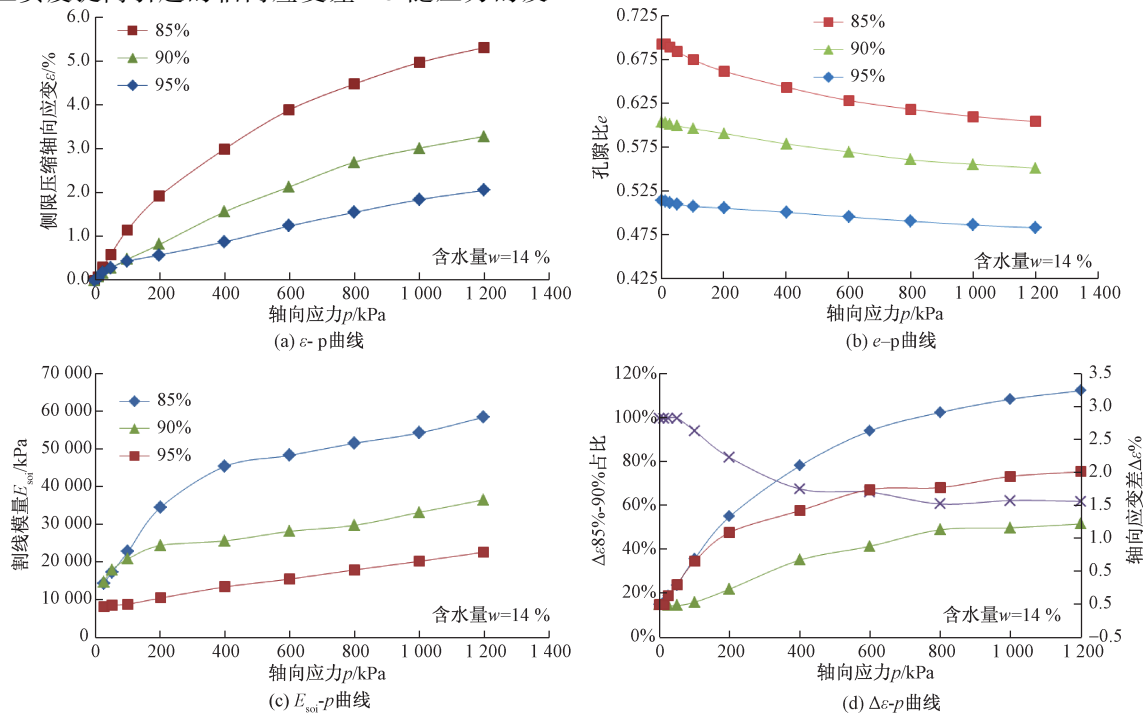


图 2 压实度对压实黄土压缩性的影响

Fig. 2 Effect of compactness on the compressibility of compacted loess

(1) 由图 2a, 2b 可见, 各级压实度下黄土的轴向应变都随着压力的增大而增大, 孔隙比随着压力的增大而减小; 在各级压力下, 85% 压实度黄土的压缩应变最大, 相邻两级压力间的应变增幅也最大, 95% 压实度黄土压缩应变最小, 相邻两级压力间的应变增幅也最小, 90% 压实度黄土的压缩性质介于两者之间。观察曲线可以发现, 随着压实度的增大, 曲线随压力的发展越发趋近于线性。

(2) 从  $E_{soi}$  的计算方式可看出, 该参数反映了土从  $\varepsilon_0$ - $p_0$  状态到  $\varepsilon_i$ - $p_i$  状态的割线模量, 反映了土体随压力增大而硬化的发展过程。由图 2c 可见, 在各级压力下压实度越大的土体割线模量越大、压缩性越低, 在各级压实度下割线模量均随着压力的增大而增大, 表明土体是由于压密而不断硬化, 但是不同压实度的土体硬化过程有所不同, 压实度较小土体的割线模量从低压力至高压均呈线性平稳增长, 而随着压

实度的增大  $E_{\text{soi}}-p$  曲线表现出低压力下呈非线性快速上涨, 超过一定压力值后转变为线性增长的特性。这种现象表明压实黄土随着压实度的增大具有了一定的结构性, 下文将就其结构性详细论述。

(3) 压实度的提高将明显降低土体的压缩性, 不同的压实度提高程度将有不同的效果, 从图 2d 可见, 压实度从 85% 提高到 95%, 在各级压力下土体应变大幅降低。但是同样为 5% 的压实度提高率, 压实度从 85% 提高到 90%, 和从 90% 提高到 95% 的效果有所不同, 若以  $\Delta \varepsilon_{85-95}$  为总量,  $\Delta \varepsilon_{85-90}$  所占比例在低压力段几乎达到 100%, 从图中可以看出 200

kPa 以内, 压实度从 90% 提高到 95% 所产生的效果比较微弱, 因此在低压力下以 90% 作为控制压实度是比较经济且技术可行的。

## 2.2 含水量对压实黄土压缩性的影响

含水量对土的物理力学性质具有重要影响, 压实黄土施工时的含水量以及填方完成后由于降水、地下水以及人为因素引起的土体含水量变化将改变压实黄土的压缩性质。通过试验分析了不同含水量、90% 压实度下, 试样轴向应变  $\varepsilon$  随压力  $p$  的发展以及各级压力下  $E_{\text{soi}}$ ,  $\varepsilon$ ,  $e$  随含水量的发展情况, 各参数的计算方式同前, 结果见图 3。

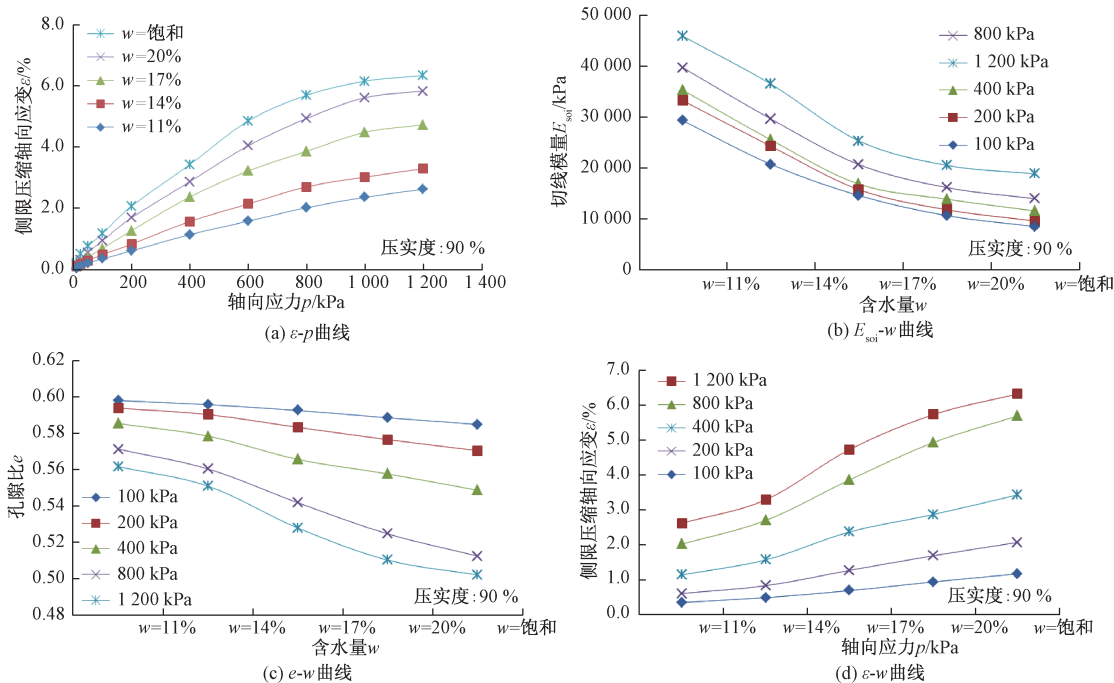


图3 含水量对压实黄土压缩性的影响

Fig. 3 Effect of water content on the compressibility of compacted loess

(1) 从图 3a 可见, 各级含水量下土样的轴向应变均随着压力的增加而增长, 低含水量土样应变随应力增长的速度与幅度均小于高含水量土样, 说明相同压实度下, 土样含水量越低其压缩性也越低。本次试验所用土样的最优含水量  $w_{\text{op}} = 14.1\%$ , 塑限为 15.3%, 从图中 14% ~ 17% 的应变增幅可以看出, 土样在最优含水量下压缩性较低, 当含水量超过塑限之后压缩性明显增大。

(2) 从图 3b 可见, 在相同的压力下, 含水量越低土体割线模量越大、土体压缩性越低, 随着含水量的增大土体逐渐软化, 另外从图 3b, 3c 可以看出, 在相同的压力下, 土样的轴向应变随含水量的增加而增长, 增幅随着压力的增大而增大, 当压力大于 200

kPa 以后, 含水量 14% ~ 17% 之间的增幅明显增大, 并且压力越大这一级的增幅越明显。因此从减小填方压实黄土沉降变形的角度考虑, 填方施工时的土体含水量应控制在塑限以下。

## 2.3 增湿变形性性质

黄土骨架颗粒及胶结物中含有一定量的易溶盐和可溶盐, 加之黄土特殊的架空孔隙结构, 使得黄土具有遇水易沉降的特性。黄土经重塑压实后物质成分不变, 结构虽然遭到破坏, 但其破坏程度将受到压实度和制样含水量的影响<sup>[6]</sup>, 因此压实度不足的重塑黄土同样具有湿陷的可能性, 另外由于黄土地区干旱少雨, 使大面积黄土体饱和的情况极少出现, 最为普遍的情况是令黄土非饱和增湿。

通过试验分析了各压实度下, 从最优含水量  $w_{op}$  增湿至不同目标含水量时, 增湿变形系数  $\delta$  随压力变化以及湿陷系数随压实度的变化规律。其中: 通过计算相同压力下不同含水量土样间的变形差作为相应

$\Delta w$  的增湿变形量, 再除以试样原始高度 ( $h_0$ ) 得到增湿变形系数  $\delta$ , 即  $\delta = (h_{wi} - h_{wop}) / h_0$ , 而湿陷系数  $\delta_s = (h_s - h_{wop}) / h_0$ , 据此计算数据绘制图 4。

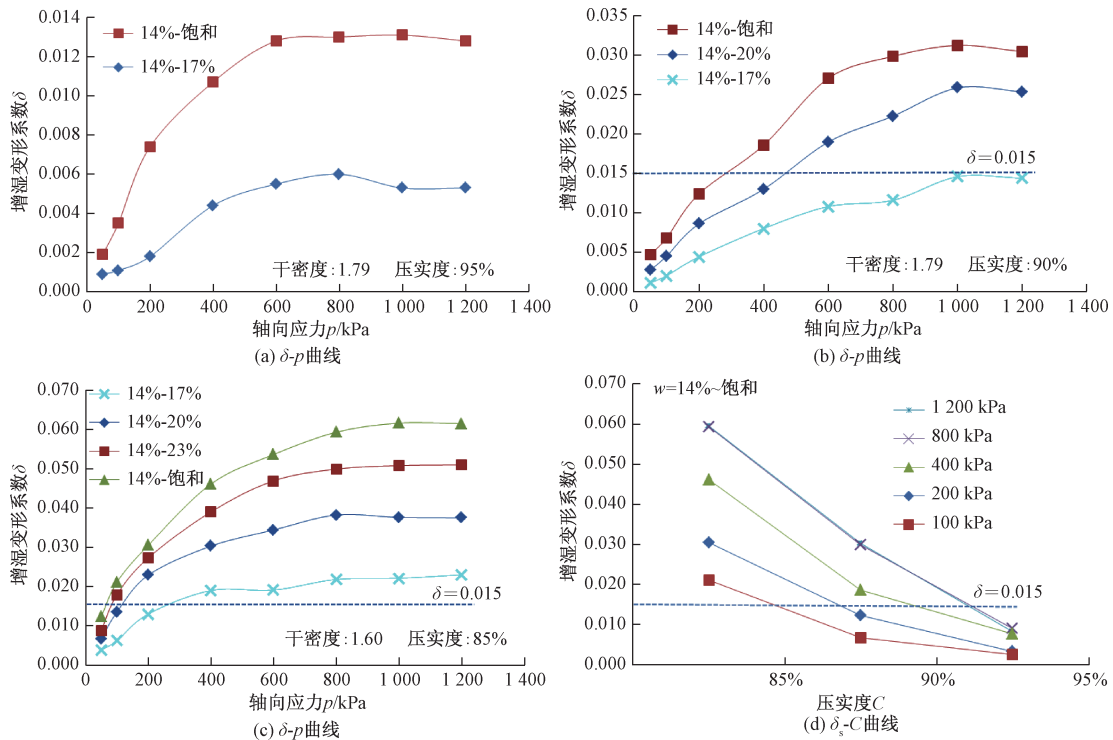


图 4 压实黄土增湿变形性质

Fig. 4 Moistening deformation property of compacted loess

(1) 综合对比图 4a, 4b, 4c 可以看出, 从最优含水量开始增湿时, 相同压实度下增湿含水量  $\Delta w$  越大, 增湿变形系数越大;  $\Delta w$  相同, 压实度越低, 增湿变形系数越大。整体上, 增湿变形系数随着压力的增大而增长, 在高压实度下具有峰值, 压实度为 95% 时为 800 kPa, 随着压实度降低, 峰值压力增大, 压实度为 90% 时为 1 000 kPa, 直至压实度降为 85% 时 1 200 kPa 内无峰值。

(2) 若以增湿变形系数  $\delta > 0.015$  为 (增湿) 湿陷性判别标准, 则本试验中 95% 压实度下的压实黄土不具有湿陷性; 90% 压实度下的黄土  $w_{14\% \sim 17\%}$  段不具有增湿湿陷性,  $p > 600$  kPa 时  $w_{14\% \sim 20\%}$  段具有增湿湿陷性,  $p > 400$  kPa 时具有湿陷性; 85% 压实度下的黄土  $p > 400$  kPa 时  $w_{14\% \sim 17\%}$  段具有增湿湿陷性,  $p > 200$  kPa 时  $w_{14\% \sim 20\%}$  段具有增湿湿陷性,  $p > 100$  kPa 时  $w_{14\% \sim 23\%}$  段具有增湿湿陷性及湿陷性, (增湿) 湿陷起始压力随着  $\Delta w$  的增大而减小。

(3) 从图 4d 可见, 同样从最优含水量  $w_{op}$  增湿至饱和含水量  $w_s$ , 土样湿陷系数随着压实度增大而减小, 95% 压实度下压实黄土不具有湿陷性, 90% 压实度时, 400 kPa 以下不具有湿陷性, 85% 压实度时, 100 kPa 起即具有湿陷性。综上, 填方施工时, 若填方高度较小应力水平较低, 90% 的压实度是最低标准; 若填方厚度较大导致基底压力较高, 压实度应严格控制在 95% 及以上。

## 2.4 压实黄土的结构性及其对压缩性的影响

前文提到高压实度的压实黄土具有一定的结构性, 表现为图 2c 中  $E_{soi}$  随压力的增加首先呈非线性增长, 超过某一特定压力值后转变为线性增长的特征。将试验所得  $e-p$  关系绘制成  $e-\log p$  曲线 (图 5), 可以更加明显地看出压实黄土的结构性。

(1) 从图 5 可见, 95% 及 90% 压实度下, 压实黄土  $e-\log p$  曲线明显分为两段, 即随着压力的增加孔隙比首先以较平缓的速度下降, 当压力达到某一特定值后孔隙比开始急剧下降, 两段过程的试验点可以分



别连成直线, 两段直线的交点即为该土样的结构屈服强度  $p_{sy}$ 。将黄土视为结构性土与不具有结构性土组成的二元介质体<sup>[11]</sup>, 当  $p < p_{sy}$  时, 土中具有结构性的部分由于刚度相对较大, 分担了更多的应力, 使土体表现出较低的压缩性; 当  $p > p_{sy}$  时, 土中具有结构性的部分屈服破坏, 土体压缩性随即增大。

(2) 对比图 5 可以发现, 压实度越大、含水量

越高的土体结构性越明显, 表现为结构强度  $p_{sy}$  前后的  $e$ - $\log p$  关系都明显地分布于两条直线上, 没有过渡点, 如图 5a 中 11% 含水量土样即存在过渡点, 图 5b 中 11% 和 14% 含水量的土样也存在过渡点, 具有结构性特征且存在过渡点的情况表明土体的结构性部分屈服破坏并非在某一级压力下快速完成, 而是随着压力的增长逐步屈服。

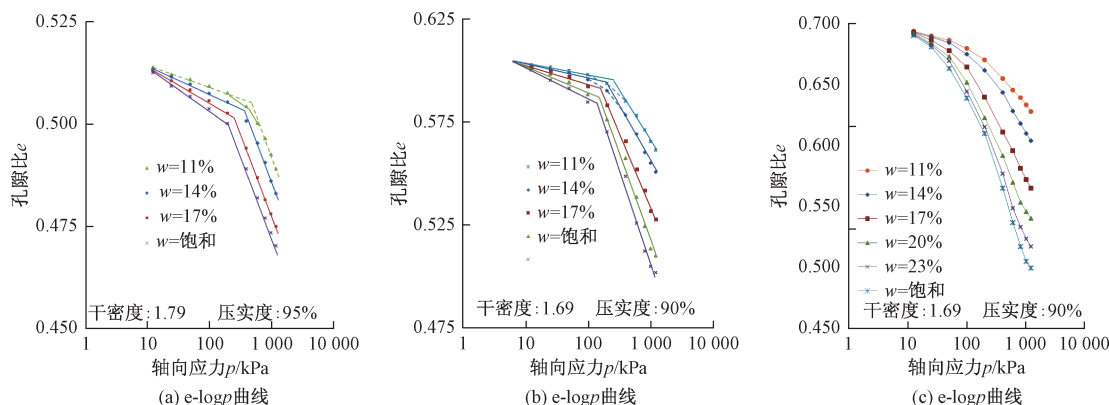


图 5 压实黄土的结构性

Fig. 5 Structure property of compacted loess

(3) 含水量在压实黄土的结构屈服过程中扮演了润滑颗粒的角色, 土样含水量越大结构性越容易快速屈服破坏, 因此表现出明显的结构性, 但含水量较大的土体结构强度相对较低。而压实度决定了土体是否具有结构性, 从图 5c 中可见 85% 压实度的土体  $e$ - $\log p$  关系随压力增长缓慢过渡, 不存在高压实度下的结构性。

(4) 从图 6 可以看出, 相同压实度下, 含水量越大土体的结构强度越小; 在相同含水量的情况下, 压实度越大土体结构强度越大。对比图 6 和图 2c 可见,  $E_{soi} - p$  图中割线模量从非线性过渡到线性的拐点压力对应于  $e$ - $\log p$  图中土的结构强度, 而低压实度下土体的割线模量从一开始即线性增长, 不存在过渡

点。相应地, 其  $e$ - $\log p$  曲线亦表现出均匀过渡发展的特点, 不存在直线交点。因此综合分析  $E_{soi} - p$  和  $e$ - $\log p$  曲线, 可以判别土体是否具有结构性, 并可以相互验证结构强度值  $p_{sy}$  的准确性。

### 3 压实黄土经验本构模型

#### 3.1 目前计算方法的缺陷

目前计算沉降量的方式基于侧限压缩试验的  $e$ - $p$  曲线, 从土体受压孔隙变化这一压缩变形本质出发, 通过不同轴向应力下的孔隙比变化量来计算沉降量, 但这一方法有以下几个缺点:

(1) 计算沉降量不够直观, 需要进一步进行  $\varepsilon$ - $e$  换算, 因此可用更加直接的  $\varepsilon$ - $p$  关系计算。

(2)  $\varepsilon$ - $e$  换算基于  $e_0$ , 而  $e_0$  没有直接测量的方法, 需要间接测量  $w_0$ ,  $\rho_0$ ,  $G_s$  计算获得, 测量误差和计算误差难以避免,  $\varepsilon$ - $p$  法不存在这样的问题。

(3) 传统  $e$ - $p$  法仅考虑力的作用, 不考虑水与黄土间的相互作用 (增湿), 以及黄土本身的物理特性 (结构性), 因此不是很适用于黄土计算。

前文基于大量压实黄土压缩试验结果分析了压实度、含水量、增湿过程以及结构性对压缩性的影响机理与影响程度, 若将这些影响因素尤其是结构性定量引入现有计算模型, 进而建立起物理意义更明确、计算结果精度更高、模型参数更易求取的压实黄土变形

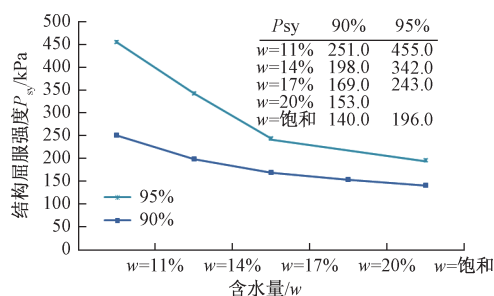


图 6 压实黄土结构屈服强度与含水量关系

Fig. 6 Microstructure yield strength versus water content

计算模型, 将对黄土填方工程的设计与施工具有重要的实用价值<sup>[12]</sup>。

### 3.2 压实黄土变形过程的割线模量表达方法

魏汝龙<sup>[7]</sup>和刘保健<sup>[8]</sup>分别基于软黏土和压实黄土的侧限压缩试验结果, 总结认为其  $\varepsilon$ - $p$  关系符合双曲线的形式, 即  $\varepsilon_i = p_i / (a + bp_i)$ , 而割线模量的计算方式为  $E_{soi} = p_i / \varepsilon_i$ , 因此推论  $E_{soi} = a + bp_i$  即  $E_{soi}$ - $p_i$  之间符合 Linear 模型。但后期大量的压实黄土侧限压缩试验结果证明这种模型并不普适, 陈开圣<sup>[5]</sup>和黄雪峰<sup>[9]</sup>的研究中注意到了  $E_{soi}$ - $p_i$  关系的非线性特征, 利用形如  $E_{soi} = ap_i^b$  的幂函数模型描述这种非线性关系, 但这一模型默认压力为 0 时土样割线模量也为 0, 这不符合物理规律, 模型无法表征初始割线模量, 并且该模型对于低压实度的黄土变形过程描述效果较差。黄雪峰则利用形如  $E_{soi} = a + bp_i + c \sqrt{p_i}$  的 Gunary 模型来表征  $E_{soi}$ - $p_i$  间的非线性关系, 该模型构造上更为先进、适应性较强, 但是缺少基础研究铺垫, 并未解释非线性段存在和消失的结构本质, 且对低压实度下加压变形过程的描述参数过多。

从前述试验结果与分析可看出, 高压实度的压实黄土具有结构性, 结构性的存在影响了压实黄土的受力变形过程, 从图 2c 的 3 条曲线可看出, 具有结构性的压实黄土其  $E_{soi}$ - $p_i$  曲线明显分为非线性和线性两个阶段, 转变点对应的压力值即为其  $e$ - $\log p$  曲线上读取的结构强度值, 同时结构强度随着压实度的降低而减小, 结构强度点前移, 至 85% 压实度时结构强度已经消失,  $E_{soi}$ - $p_i$  曲线退化为直线。

基于上述特点及前人研究的不足, 提出了考虑结构性的变形计算表达模型 (Structure Model):

$$\begin{cases} \varepsilon_i = \frac{P_i}{a + bP_i + c \ln P_i} & (P < P_{sy}) \\ \varepsilon_i = \frac{P_i}{\alpha + \beta P_i} & (P > P_{sy}) \end{cases} \quad (1)$$

利用该模型对图 2c 中 3 条  $E_{soi}$ - $p_i$  曲线进行拟合, 并利用文献 [3], [8], [9] 中的方法对本文数据进行拟合, 对拟合效果进行对比, 结果列于表 2 中, 从表 2 中的图和数据可以看出, 本模型可以更加准确地描述压实黄土的受力变形特性。

### 3.3 考虑结构性的压实黄土加压本构模型

在确定的含水量  $w$  和压实度  $C$  下, 当压力小于结构强度  $P_{sy}$ , 轴向压力由  $P_i$  上升至  $P_j$  时, 相应的

割线模量由  $E_{soi} = P_i / \varepsilon_i$  变为  $E_{soj} = P_j / \varepsilon_j$ , 应变由  $\varepsilon_i = P_i / E_{soi}$  变为  $\varepsilon_j = P_j / E_{soj}$ , 则这一过程中的加压变形量为:

$$\begin{aligned} \Delta h &= \Delta \varepsilon h_0 = (\varepsilon_j - \varepsilon_i) h_0 = \\ &\left( \frac{P_j}{E_{soj}} - \frac{P_i}{E_{soi}} \right) h_0 = \left( \frac{P_j E_{soi} - P_i E_{soj}}{E_{soi} E_{soj}} \right) h_0 = \\ &\left( \frac{P_j (a + bP_i + c \ln P_i) - P_i (a + bP_j + c \ln P_j)}{E_{soi} E_{soj}} \right) h_0 = \\ &\left( \frac{a (P_j - P_i) + c (P_j \ln P_i - P_i \ln P_j)}{E_{soi} E_{soj}} \right) h_0 \end{aligned} \quad (2)$$

当压力大于结构强度  $P_{sy}$ , 轴向压力由  $P_i$  上升至  $P_j$  时的加压变形量为:

$$\begin{aligned} \Delta h &= \Delta \varepsilon h_0 = (\varepsilon_j - \varepsilon_i) h_0 = \\ &\left( \frac{P_j}{E_{soj}} - \frac{P_i}{E_{soi}} \right) h_0 = \left( \frac{P_j E_{soi} - P_i E_{soj}}{E_{soi} E_{soj}} \right) h_0 = \\ &\left[ \frac{P_j (\alpha + \beta P_i) - P_i (\alpha + \beta P_j)}{(\alpha + \beta P_j) (\alpha + \beta P_i)} \right] h_0 = \\ &\frac{\alpha h_0 (P_j - P_i)}{(\alpha + \beta P_j) (\alpha + \beta P_i)} \end{aligned} \quad (3)$$

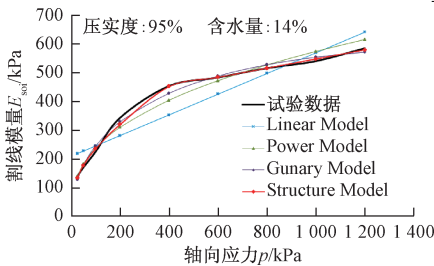
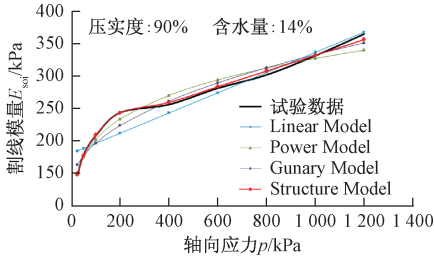
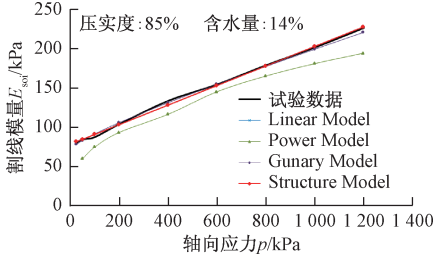
至此, 基于图 2、图 5、表 2 以及式 (1) ~ (3) 构造出考虑压实黄土结构性且计算精度更高的压实黄土加压本构模型:

$$\begin{cases} \varepsilon_i = \frac{P_i}{a + bP_i + c \ln P_i} & (P < P_{sy}) \\ \varepsilon_i = \frac{P_i}{\alpha + \beta P_i} & (P > P_{sy}) \\ E_{soi} = a + bP_i + c \ln P_i & (P < P_{sy}) \\ E_{soi} = \alpha + \beta P_i & (P > P_{sy}) \\ \Delta h = \left( \frac{a (P_j - P_i) + c (P_j \ln P_i - P_i \ln P_j)}{E_{soi} E_{soj}} \right) h_0 & (P < P_{sy}) \\ \Delta h = \frac{\alpha h_0 (P_j - P_i)}{(\alpha + \beta P_j) (\alpha + \beta P_i)} & (P > P_{sy}) \end{cases} \quad (4)$$

结构强度随着压实度的增大而减小, 85% 压实度时结构强度已经减小为 0, 因此从开始加载即  $P > P_{sy}$ , 无结构性的情况为本模型的一种特例, 满足判别条件  $P > P_{sy}$  后结构性模型退化成线性模型。模型中的参数只需要开展预计工况压力下的压缩试验即可获得, 其中  $P_{sy}$  为结构屈服强度,  $a$  和  $\alpha$  分别为有结构性和无结构性压实黄土的初始割线模量,  $b$ ,  $c$  和  $\beta$  为拟合参数。

表 2 压实黄土本构模型对比

Table 2 Comparison of several secant modulus models

|                                                                                     | 模型              | 拟合公式                                                     | 相关系数 $R^2$ | 备注           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------|------------|--------------|
|    | Linear Model    | $E_{soi} = 0.3581 * p + 211.17$                          | 0.8626     | 刘保健          |
|                                                                                     | Power Model     | $E_{soi} = 41.514 * p^{0.3803}$                          | 0.9835     | 陈开圣          |
|                                                                                     | Gunary Model    | $E_{soi} = -4.886 - 0.3455 * p + 28.61 * \text{sqrt}(p)$ | 0.9894     | 黄雪峰          |
|                                                                                     |                 | $E_{soi} = 0.5374 * p + 43.96 * \ln(p) - 19.33$          | 0.9936     | $P < P_{sy}$ |
|                                                                                     | Structure Model | $E_{soi} = 0.1592 * p + 388.77$                          | 0.9911     | $P > P_{sy}$ |
|   | Linear Model    | $E_{soi} = 0.1568 * p + 180.6$                           | 0.9261     | 刘保健          |
|                                                                                     | Power Model     | $E_{soi} = 76.938 * p^{0.2099}$                          | 0.9763     | 陈开圣          |
|                                                                                     | Gunary Model    | $E_{soi} = 128.9 - 0.01342 * p + 6.905 * \text{sqrt}(p)$ | 0.9557     | 黄雪峰          |
|                                                                                     |                 | $E_{soi} = 13.14 + 0.0595 * p + 41.27 * \ln(p)$          | 0.9996     | $P < P_{sy}$ |
|                                                                                     | Structure Model | $E_{soi} = 0.1218 * p + 210.96$                          | 0.9831     | $P > P_{sy}$ |
|  | Linear Model    | $E_{soi} = 0.1243 * p + 78.76$                           | 0.9979     | 刘保健          |
|                                                                                     | Power Model     | $E_{soi} = 21.79 * p^{0.3168}$                           | 0.9409     | 陈开圣          |
|                                                                                     | Gunary Model    | $E_{soi} = 69.53 + 0.0868 * p + 1.362 * \text{sqrt}(p)$  | 0.9972     | 黄雪峰          |
|                                                                                     |                 |                                                          |            |              |
|                                                                                     | Structure Model | $E_{soi} = 0.1243 * p + 78.76$                           | 0.9979     | $P_{sy} = 0$ |

3.4 压实黄土增湿本构模型

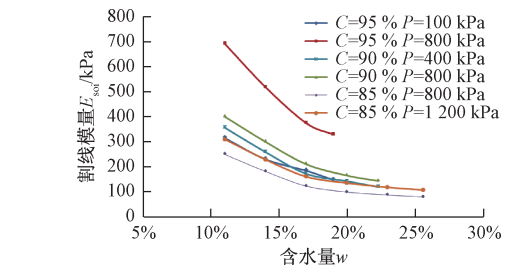
表 3 的图中绘制了 6 种不同压实度、不同压力组合下由于增湿引起的土体割线模量变化过程, 可见在确定的压实度  $C$  和压力  $P$  下, 压实黄土割线模量随着含水量的增大而减小, 压实黄土有增湿软化的性质

并且随含水量增大呈非线性特征, 从低含水量向高含水量增湿过程中, 塑限以前土体软化速度较快, 大于塑限以后软化速度减缓, 整个发展过程可以用 Power 函数来模拟:

$$E_{soi} = Aw_i^B \tag{5}$$

表 3  $E_{soi} - w$  关系的 Power 模型拟合效果

Table 3 Imitative effect of the Power model on  $E_{soi} - w$  relationship

|                                                                                     | 压实度/% | 压力/kPa | 拟合关系式                                  | $R^2$  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------|----------------------------------------|--------|
|  | 95    | 100    | $E_{soi} = 15.64 * p^{\wedge} - 1.361$ | 0.9908 |
|                                                                                     | 95    | 800    | $E_{soi} = 31.88 * p^{\wedge} - 1.399$ | 0.9946 |
|                                                                                     | 90    | 400    | $E_{soi} = 10.60 * p^{\wedge} - 1.595$ | 0.9929 |
|                                                                                     | 90    | 800    | $E_{soi} = 14.48 * p^{\wedge} - 1.512$ | 0.9952 |
|                                                                                     | 85    | 800    | $E_{soi} = 10.26 * p^{\wedge} - 1.432$ | 0.9846 |
|                                                                                     | 85    | 1200   | $E_{soi} = 16.80 * p^{\wedge} - 1.307$ | 0.9885 |



相比于文献 [3] 中的线性模型更符合物理规律, 相比于文献 [13] 中的指数函数模型计算更加简便。

由此可以推导在确定的压实度  $C$  和压力  $P$  下压实黄土增湿本构模型, 当含水量从  $w_k$  增湿至  $w_m$  时, 相应的割线模量从  $E_{sok} = w_k / \varepsilon_k$  变为  $E_{som} = w_m / \varepsilon_m$ , 应变从  $\varepsilon_k = w_k / E_{sok}$  变为  $\varepsilon_m = w_m / E_{som}$ , 则这一过程中的增湿变形量为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta h &= \Delta \varepsilon h_0 = (\varepsilon_m - \varepsilon_k) h_0 = \\ &\left( \frac{P_m}{E_{som}} - \frac{P_k}{E_{sok}} \right) h_0 = \left( \frac{P_m E_{sok} - P_k E_{som}}{E_{sok} E_{som}} \right) h_0 \\ &= \left( \frac{P_m A w_k^B - P_k A w_m^B}{A^2 w_m w_k} \right) h_0 \\ \text{由于 } P_k &= P_m \\ \Delta h &= \frac{h_0 P_k |w_k^B - w_m^B|}{A w_m w_k} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

因此, 基于表 3 和式 (5) ~ (6), 可推导出在确定的压实度  $C$  和压力  $P$  下压实黄土增湿本构模型:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_i &= \frac{P_i}{A w_i^B} \\ E_{soi} &= A w_i^B \\ \Delta h &= \frac{h_0 P |w_k^B - w_i^B|}{A w_j w_k} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

模型参数可通过相同压实度、不同含水量土样的压缩试验获得。

### 3.5 讨论

(1) 相比于规范中地基沉降的  $e-p$  计算模式, 本模型基于更加直观的  $\varepsilon-p$  计算模式, 借助割线模量表达法推导而来, 计算中不需要初始孔隙比  $e_0$ , 消除了测量和计算误差。另外模型中所有的参数获取都较为简便。

(2) 相比于前人的同类工作<sup>[3,8,9,14]</sup>, 本文基于试验揭示了压实黄土的结构性, 并在构建的加压本构模型中考虑了结构性的影响, 通过对试验数据计算还原准确度的对比可见, 本文所构建的模型精度更高、物理意义更加明确。增湿模型中考虑了塑限引起的非线性软化过程, 相比于前人的线性模型更加符合物理规律, 相比于前人的指数模型计算更加简便。

(3) 模型由侧限压缩试验数据导出, 适用于有侧限的例如 V 型沟谷填方的沉降量预测计算, 若应用于低侧限或无侧限的沉降计算中, 会由于没有考虑到侧向挤出效应而使计算值偏小。另外, 模型仅考虑

了加压或者增湿这种单一路径的工况, 不能用于计算卸荷、减湿或者循环加载工况的填方沉降, 但由于单向加压和增湿工况最为常见, 所以并不妨碍模型的实用价值。

## 4 结论与展望

(1) 相同含水量下, 压实黄土的压缩性随着压实度的增大而减小, 且压力越大压缩性随压实度增长而减小的趋势越明显, 在低压力 ( $< 200$  kPa) 下  $C_{90\%}$  的压缩性与  $C_{95\%}$  的压缩性差距微弱, 在低压工况下以 90% 作为控制压实度比较经济且技术可行。

(2) 相同压力下, 压实黄土的压缩性随初始含水量的增大而增大, 含水量在塑限前后压缩性增加明显, 因此从减小沉降量的角度考虑, 填方施工中填料含水量宜小于塑限含水量。

(3) 压实黄土具有增湿变形性质, 在相同含水量下, 压实黄土的增湿变形系数随压实度的增大而减小、随增湿含水量的增大而增大; 以 0.015 为湿陷性判别标准, 则压实黄土的湿陷起始压力随增湿含水量的增大而减小、随压实度的增大而增大。

(4) 高压实度下的黄土具有结构性, 判别方式是  $E_{soi}-p$  曲线分为明显的非线性段和线性段, 且  $e-\log p$  发展过程分为明显的两条直线二者的交点对应的压力即结构强度; 压实黄土的结构性随着压实度和含水量的增大而表现的更加明显, 结构强度随着含水量的减小而增大, 随着压实度的减小而减小, 低于一定压实度后结构强度减小为 0。

(5) 基于割线模量表达法和压实黄土的结构性, 推导了压实黄土加压过程的结构性本构模型, 以结构强度为判别标准, 在低压实度下模型可自动退化为线性, 同时还推导了压实黄土增湿本构模型, 与前人同类工作相比, 本文模型的理论基础更强、计算结果更加精确。

本文的数据和结论均基于即时压缩试验得出, 没有考虑时间效应即龄期和蠕变对最终沉降量的影响。文献 [4] 和 [5] 中都提到了龄期对压实黄土湿陷性的影响, 参考胡再强的研究成果<sup>[15]</sup>与本文的结论, 可以推测龄期的影响应该首先作用于结构强度, 而后表现在湿陷性上, 这里包含了结构性形成机理的问题, 值得进一步研究。

本文的写作过程完成于笔者在美国 Georgia Institute of Technology 的联合培养期间, 感谢国家留学基金委对本文的资助。

## 参考文献:

- [1] 杨晶, 白晓红, 王林浩, 等. 基于不同初始含水量的压实黄土力学特性试验研究 [J]. 太原理工大学学报, 2012, 43 (6): 669 - 673. [YANG J, BAI X H, WANG L H, *et al.* Research on Mechanical Properties of Compaction Loess with Different Initial Water content [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2012, 43 (6): 669 - 673. (in Chinese)]
- [2] 周勤, 赵发章, 张洪亮. 压实度和含水量对于压实黄土力学特性的影响 [J]. 公路, 2006 (1): 67 - 70. [ZHOU Q, ZHAO F Z, ZHANG H L. Influence of compactness and water content on Mechanical Properties of Compacted Loess [J]. Highway, 2006 (1): 67 - 70. (in Chinese)]
- [3] 陈开圣, 沙爱民. 压实黄土变形特性 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (4): 1023 - 1029. [CHEN K S, SHA A M. Study of Deformation Characteristic of Compacted Loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (4): 1023 - 1029. (in Chinese)]
- [4] 张贵发, 邱慧玲. 龄期对压实黄土湿陷性影响的试验 [J]. 水资源与水工程学报, 1990, 10 (4): 66 - 68. [ZHANG G F, QIU H L. Influence of age on collapsibility of compacted loess [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 1990, 10 (4): 66 - 68. (in Chinese)]
- [5] 陈开圣, 沙爱民. 压实黄土湿陷变形影响因素分析 [J]. 中外公路, 2009, 29 (3): 24 - 28. [CHEN K S, SHA A M. Influence factors on collapsible deformation of compacted loess [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, 29 (3): 24 - 28. (in Chinese)]
- [6] 陈存礼, 蒋雪, 杨炯, 等. 结构性对压实黄土侧限压缩特性的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (9): 1939 - 1944. [CHEN C L, JIANG X, YANG J, *et al.* Influence of Soil Structure on Confined Compression Behavior of Compacted Loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (9): 1939 - 1944. (in Chinese)]
- [7] 魏汝龙. 直剪固快试验结果的整理和分析 [J]. 地基处理, 1999, 10 (4): 15 - 18. [WEI R L. Test data preparation and results analysis methods of quick consolidate direct shear test [J]. Journal of Ground Treatment, 1999, 10 (4): 15 - 18. (in Chinese)]
- [8] 刘保健, 张军丽. 土工压缩试验成果分析方法与应用 [J]. 中国公路学报, 1999, 12 (1): 39 - 43. [LIU B J, ZHANG J L. Application and Analyzing Method for Soil Compression Test [J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12 (1): 39 - 43. (in Chinese)]
- [9] 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 (增刊2): 37 - 44. [HUANG X F, KONG Y, LI X D, *et al.* Study and Application of Deformation Characteristics of Compacted Loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (Sup2): 37 - 44. (in Chinese)]
- [10] 交通部公路科学研究院. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. [Standard for soil test method GB/T 50123—1999 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese)]
- [11] 沈珠江, 陈铁林. 岩土破损力学-结构类型与荷载分担 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (13): 2137 - 2142. [SHEN Z J, CHEN T L. Breakage Mechanics of Geomaterial-Structure Type and Load Sharing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (13): 2137 - 2142. (in Chinese)]
- [12] 余文龙, 张健, 张顺峰, 等. 黄土结构性定量研究新进展 [J]. 水文地质工程地质, 2011, 38 (5): 120 - 127. [YU W L, ZHANG J, ZHANG S F, *et al.* Advances in quantitative structural research of loess [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38 (5): 120 - 127. (in Chinese)]
- [13] 刘保健, 谢定义, 郭增玉. 黄土地基湿变形的实用算法 [J]. 岩土力学, 2004, 25 (2): 270 - 274. [LIU B J, XIE D Y, GUO Z Y. A Practical Method for Moistening Deformation of Loess Foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (2): 270 - 274. (in Chinese)]
- [14] 谢星, 王东红, 赵法锁. 单轴压缩下结构性  $Q_2$  黄土的损伤本构模型研究 [J]. 水文地质工程地质, 2008, 35 (3): 47 - 50. [XIE X, WANG D H, ZHAO F S. Study on damage constitutive model of structural  $Q_2$  loess under uniaxial compression [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35 (3): 47 - 50. (in Chinese)]
- [15] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 结构性黄土的变形特性 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (24): 4142 - 4146. [HU Z Q, SHEN Z J, XIE D Y. Deformation Properties of Structural Loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (24): 4142 - 4146. (in Chinese)]

责任编辑: 张明霞