

DOI: 10.11779/CJGE201501020

黄土湿陷性分布不连续对湿陷变形的影响研究

郑建国¹, 邓国华², 刘争宏¹, 陈冉升¹, 范寒光¹, 李开超¹

(1. 机械工业勘察设计研究院, 陕西 西安 710043; 2. 西安市地下铁道有限责任公司, 陕西 西安 710018)

摘 要: 分析导致湿陷量计算值与实测值差异的原因对黄土湿陷性的准确评价具有重要作用, 目前相关研究的深度和系统性还不足。以西安黄土塬区的黄土现场试坑浸水试验为依托, 采用数值计算手段, 对湿陷土与非湿陷土不同比例、排列方式和湿陷程度下土体的湿陷变形特征进行了对比研究, 揭示了黄土中湿陷土分布不连续对湿陷变形产生的抑制作用是导致湿陷量计算值和实测值差异的重要原因之一。当黄土体中湿陷土单元和非湿陷土单元分布越杂乱, 非湿陷土单元所占的比例越高时, 这种抑制作用越明显; 而湿陷土单元的湿陷程度对抑制作用的影响相对较弱。在计算湿陷量时, 应考虑黄土湿陷性不连续效应的影响, 并在工程实践中逐渐积累反映这种效应影响的经验数据。

关键词: 湿陷性黄土; 试坑浸水试验; 湿陷变形; 数值计算

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2015)01 - 0165 - 06

作者简介: 郑建国(1964 -), 男, 教授级高级工程师, 主要从事湿陷性黄土及岩土工程测试、监测相关的工程实践与研究。E-mail: zhengjg@jk.com.cn。

Influence of discontinuous distribution of collapsible loess on its deformation

ZHENG Jian-guo¹, DENG Guo-hua², LIU Zheng-hong¹, CHEN Ran-sheng¹, FAN Han-guang¹, LI Kai-chao¹

(1. China JK Institute of Engineering Investigation and Design, Xi'an 710043, China; 2. Xi'an Metro Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: Investigating the difference between the calculated and measured values of the collapsible settlement is useful and necessary to accurately evaluate the loess collapsibility. Although the difference has been noted by many researches, it has not yet been examined deeply and systematically. Based on the results of two field loess immersion tests in Xi'an loess tableland area, the numerical method is used to compare the collapsible deformations of loess foundation with different proportions and arrangements of collapsible and non-collapsible soils as well as with different collapsible degrees of collapsible soils. The results reveal that the inhibition effect on collapsible deformation, which is caused by the discontinuous distribution of collapsible loess, is one of the main reasons for the discrepancy between the calculated and measured values of the collapsible settlement. In addition, this inhibition effect is more significant for the cases with more random distribution of collapsible and non-collapsible soils, or with higher proportion of non-collapsible soils. Through comparison, the impact on the inhibition effect caused by the collapsible degree of collapsible soils is not very strong. The inhibition effect should be taken into account in calculating the collapsible deformation, and the related data should be collected and summarized in future engineering practice.

Key words: collapsible loess; immersion test; deformation; numerical simulation

0 引 言

黄土是中国分布较广的区域性特殊土, 分布面积约 64 万 km², 其中湿陷性黄土约占 60%^[1]。湿陷性黄土在天然湿度下压缩性较低, 强度较高; 受水浸湿后强度降低, 在压力作用下土体结构迅速破坏, 并发生显著的沉陷。湿陷性黄土场地地基处理的原则和具体方式直接受湿陷性评价结果控制, 黄土湿陷性评价准确与否是影响工程建设投资的关键因素之一。

工程实践中, 黄土的湿陷性评价手段主要包括室内试验和现场试验两种, 作为场地湿陷类型评价指标

的自重湿陷量, 可根据室内压缩试验测定的自重湿陷系数计算获得(称为“计算值”), 也可根据现场试坑浸水试验实测获得(称为“实测值”)。但由于黄土的特殊性和复杂性, 自重湿陷量的计算值与实测值之间往往存在差异; 由于现场试坑浸水试验测定的土体范围大, 能反映微观、宏观结构对土性的影响, 代表性好, 一般认为其获得的自重湿陷量(实测值)更为准确可靠^[2]。

为使同一场地自重湿陷量的实测值与计算值接近或相同, 现行黄土规范^[2]计算自重湿陷量的公式为

$$\Delta_{zs} = \beta_0 \sum_{i=1}^n \delta_{zsi} h_i \quad (1)$$

式中 β_0 为因地区土质而异的修正系数, 按地区不同取 0.5~1.5; δ_{zsi} 为第 i 层土的自重湿陷系数, 小于 0.015 时不参与计算; h_i 为第 i 层土的厚度。

即通过乘以修正系数 β_0 以及规定湿陷系数小于 0.015 的土属非湿陷性土不参与计算两种方式对自重湿陷量的计算值进行调节。然而即便是进行了调节, 按式 (1) 得到的计算值与实测值间往往仍存在较大差异^[3-11]。显示现有调节手段仍存在一定局限性。

现场试坑浸水试验费用大、周期长, 黄土湿陷性评价难以大量采用, 通过室内试验结果进行评价仍应是主要手段, 因而有必要进一步改进式 (1) 使得计算值更接近实测值。改进式 (1), 首先需要明确造成计算值与实测值差异的原因, 目前认为造成两者差异的可能原因较多, 包括应力状态、渗透深度、取样扰动、饱和状态、边界条件、试样面积、浸水时间、土层不均匀、层拱效应等^[9, 11-13], 但大多是定性和宏观的分析, 有待于开展进一步深入和系统的研究。

本文以西安南郊黄土塬场地的黄土室内湿陷性资料和试坑浸水试验结果为基础, 以数值分析为手段, 探索了黄土湿陷性分布不连续对湿陷变形的影响。

1 黄土湿陷分布不连续现象

1.1 室内外试验结果对比

本研究依托的两个试验场地分别位于西安少陵塬的阳村和高望堆村。该区内黄土厚度超过 80 m, 夹不少于 9 层古土壤^[14]。室内试验显示晚更新世黄土和古土壤的自重湿陷系数较小, 自重湿陷性黄土集中在中更新世的 Q_2 离石黄土中, 场地地层结构 (黄土与古土壤均为粉质黏土), 以及探井 (每个场地两个) 取样试验获得的自重湿陷系数随深度变化结果见图 1。

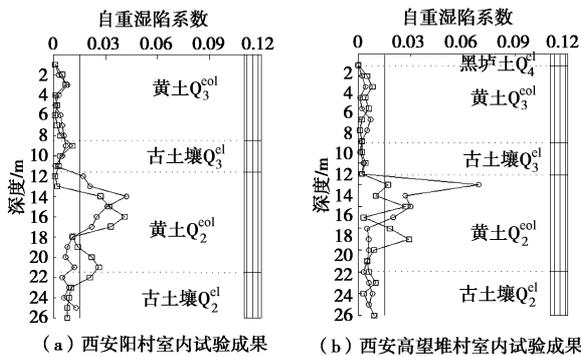


图 1 两组场地室内自重湿陷性试验成果

Fig. 1 Results of self-weight collapsibility tests

对该两个场地进行的现场试坑浸水试验, 试坑均布置为圆形, 在阳村场地设置了加速土体饱和的渗水孔。经钻孔取样测试, 停水时可能产生自重湿陷量的土层均已达到 80% 以上的饱和度。表 1 是试验的主要参数和结果, 在试验过程中, 浸水阶段两个场地均发生了几个毫米的抬升变形, 停水后产生了少量的下降变形, 与文献^[3, 9]反映的变形规律相同。

表 1 两组场地现场浸水试验成果

Table 1 Field loess immersion tests results

场地	试坑直径/m	浸水历时/d	浸水量/m ³	自重湿陷量/mm	
				计算	实测
西安阳村	25	34	12034	162	-3
西安高望堆村	25	43	17902	107	2

注: 表中自重湿陷量计算值按式 (1), β_0 取 0.9 获得; 实测值中负值表示停止观测时总变形为抬升变形。

1.2 考虑湿陷分布不连续因素影响的理由

根据表 1 结果, 两个场地的自重湿陷量实测值非常小, 甚至还测得了微弱抬升, 若按式 (1) 反算本地地区的 β_0 , 则 β_0 接近于零, 显然该值不能作为地区经验系数加以推广应用, 否则按黄土规范^[2]计算湿陷量的计算值时, 将得出不管附加压力多大, 10 m 以下地基土都不会浸水产生湿陷这一有悖于常理的结论。该区的黄土湿陷性评价方法, 必须综合一些其它因素, 湿陷分布不连续可能是因素之一。

从图 1 中可以看出, 自重湿陷性土层中自重湿陷系数大小较为离散。为进一步精细查明地基土自重湿陷系数的分布情况, 在阳村场地开挖了 3 个探井 (编号 TJ1、TJ2、TJ3), 平面上“一”字排开, 间距 2 m; 每个探井中间隔 0.2 m 并排取双样, 共取样 734 件进行了室内自重湿陷系数试验, 试验结果如图 2 所示, 其中 Q_2 黄土和古土壤层不同自重湿陷系数段所占比例的统计结果见表 2。

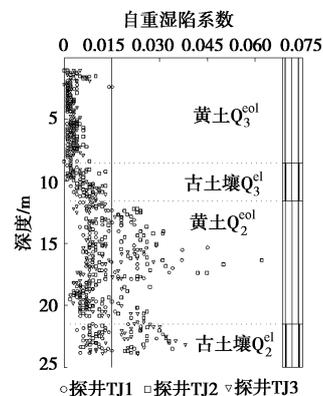


图 2 西安阳村室内自重湿陷性试验成果

Fig. 2 Results of self-weight collapsibility tests in Yangcun village, Xi'an

从图 2 和表 2 可以更清楚地看出, 场地 Q_2 黄土和古土壤层自重湿陷系数离散, 分别为 0.002~0.062 (平

均值 0.013) 和 0.002~0.038 (平均值 0.016), 表明宏观上不同湿陷程度的黄土“单元”分布杂乱; 若以湿陷系数 0.015 作为湿陷土和非湿陷土的分界^[2], 则非湿陷土所占的比例分别为 67.0%和 53.2%, 湿陷土单元在纵向和横向上均不连续分布。

表 2 自重湿陷系数分段比例统计结果

Table 2 Proportions of different coefficient intervals of self-weight collapsibility (%)

土层	$\delta_{zs} < 0.015$	$0.015 \leq \delta_{zs} < 0.030$	$\delta_{zs} \geq 0.030$
黄土 Q_2^{col}	67.0	28.8	4.2
古土壤 Q_2^{cl}	53.2	35.1	10.6

宏观上分析, 湿陷程度强弱不一的黄土体在浸水以后, 湿陷性强的土单元会因湿陷产生松弛, 作用在其上的应力将部分分担给周边湿陷性弱的土单元, 也即湿陷时会产生应力重新分布, 湿陷性弱的土单元最终将承担更大的上覆应力, 湿陷性强的土单元承担更少的上覆应力。现场试坑浸水试验中产生的湿陷沉降是这种应力调节达到平衡, 湿陷强弱不同土单元相互作用后所表现的一种综合结果; 特别的, 当湿陷分布不连续, 即湿陷土单元与非湿陷土单元夹杂分布时, 非湿陷土单元将对湿陷土单元湿陷的发生产生抑制作用。然而, 式(1)是湿陷土单元产生湿陷的简单叠加, 不能体现这种湿陷土单元分布不连续对湿陷变形产生的影响, 造成计算值和实测值产生一定差异。

为明确湿陷分布不连续对湿陷变形会产生多大程度的影响, 采用了数值模拟计算的手段进行了分析。

2 数值模拟试验设计

2.1 数值模拟试验模型

将自然界湿陷程度强弱不一的土单元简化为湿陷性土单元和非湿陷土单元两种, 利用数值模拟可以灵活变化工况, 以及快速、直观的特点, 按湿陷土与非湿陷土分布的杂乱程度不同, 共建立了 3 类有限差分模型: 试验模型 1 (编号 M1): 湿陷土与非湿陷土间隔成层分布, 如图 3 (a)。试验模型 2 (编号 M2): 纵向上湿陷土与非湿陷土随机杂乱分布, 横向上均匀分布 (可简化为二维平面应变问题), 如图 3 (b)。试验模型 3 (编号 M3): 横向和纵向上湿陷土与非湿陷土均随机杂乱分布, 如图 3 (c)。

建立的模型中, 二维模型 (M2) 尺寸为 $60 \text{ m} \times 30 \text{ m}$, 三维模型 (M1 和 M3) 尺寸为 $60 \text{ m} \times 60 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高), 模型底部横向和纵向约束, 四周横向约束。为便于计算和数据处理, 模型单元设置为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的立方体。3 类模型均将湿陷性土含量从 100%按照 5%递减至 0%分别建立多个模型, 分析不同湿陷性土含量对湿陷变形的影响(共建立 60 种工

况下的模型并进行计算分析)。

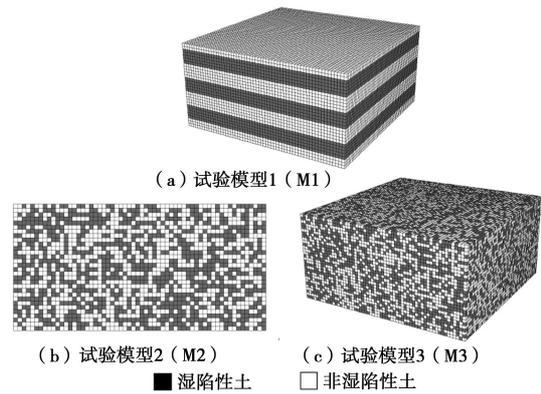


图 3 3 种类型的计算模型

Fig. 3 Three types of computational models

在分析计算了以上 3 类模型后, 为分析湿陷分布不连续条件下, 湿陷土单元湿陷程度不同对湿陷变形的影响, 利用湿陷土单元在空间随机分布的模型 3, 通过调节计算参数, 另又计算了 60 种工况的结果, 记为试验模型 4 (M4)。

2.2 计算原理

黄土湿陷变形的本质是原状黄土微结构在水和外力作用下失稳, 结构强度降低至剩余强度再稳定的过程^[15-16]。利用黄土遇水后强度和模量降低的特性, 计算时利用强度和模量折减的方法模拟湿陷, 对湿陷性土采用“湿陷前”和“湿陷后”两种参数。对非湿陷性土, 在计算过程中参数维持不变。

为模拟出自重湿陷量实测值和计算值的差异, 将数值模拟计算得到沉降称为“模拟实测值”, 按照黄土规范^[2]自重湿陷量计算原则计算得到的湿陷量值称为“规范计算值”。

“规范计算值”按如下方式计算: 先建立湿陷性土所占比例为 100%的模型, 计算各节点竖直方向的变形量, 可得到各个单元在自重作用下产生的应变, 将应变视为“自重湿陷系数”, 即可得出不同深度对应的自重湿陷系数 (其大小只与深度相关)。当湿陷土所占比例不为 100%时, 根据计算模型中湿陷土单元所处的深度, 及相应的自重湿陷系数, 按式(1)即可得到模型中各列单元的“自重湿陷量” (不考虑 β_0 修正, 非湿陷土单元自重湿陷系数取 0.000), 再取各列单元“自重湿陷量”的算术平均值作为“规范计算值”。

“模拟实测值”为数值计算得到的模型顶部各节点竖向位移的算术平均值。

计算中仅关注湿陷引起的变形量值, 不考虑土体浸水之后重度增加引起的压缩变形。

2.3 计算参数

数值计算采用莫尔-库仑弹塑性模型, 根据阳村试验场地土性指标参数, 以及计算需要, 综合选定的计算参数如表 3 所示。

表 3 数值计算采用的参数及对应的自重湿陷系数

Table 3 Parameters for numerical calculation and corresponding coefficients of self-weight collapsibility

参数	密度 /(kg·m ⁻³)	体积模量 /MPa	剪切模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	自重湿陷系数		
						范围值	平均值	
非湿陷性土	1780	12.22	9.17	38	32	—	—	
湿陷性土(浸水前)	1770	11.11	8.33	35	28	—	—	
浸水后	S1 湿陷性土	1770	1.79	1.23	12	19	0.000~0.034	0.015
	S2 湿陷性土	1770	1.37	0.94	10	16	0.000~0.063	0.029
	S3 湿陷性土	1770	1.19	0.82	8	13	0.000~0.095	0.046
	S4 湿陷性土	1770	0.89	0.62	8	13	0.000~0.126	0.061

表 3 中 4 种湿陷性土(湿陷后)参数分别代表 4 种湿陷程度不同的土体。它们的自重湿陷系数平均值依次递增,作为试验 4(M4)的计算参数,编号 S1~S4。模型 M1、M2、M3 中浸水后湿陷性土计算参数为表 3 中的“S1 湿陷性土”。

3 计算结果分析

3.1 3 种模型(M1、M2、M3)计算结果

图 4 为模型 1(M1)计算结果。由图可知,两种方法计算的湿陷变形量均随着湿陷土含量的增大呈近线性增加,且二者的数值相差很小。这说明地基土是由湿陷性土和非湿陷性土均质成层组成的假设条件下,“模拟实测值”和“规范计算值”较为接近。

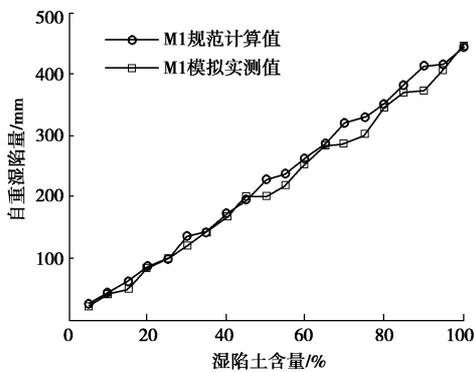


图 4 模型 1(M1)计算自重湿陷量

Fig. 4 Self-weight collapse settlement of Model 1 (M1)

图 5 为模型 2(M2)和模型 3(M3)的计算结果。由图可知,两种模型自重湿陷量的“规范计算值”一致,并且随着湿陷土含量的增加呈线性增加。两种模型(M2和M3)计算的“模拟实测值”均小于“规范计算值”。湿陷土两个方向都随机分布的模型 3(M3)计算的“模拟实测值”小于只有一个方向(纵向)随机分布的模型 2(M2)的计算结果。

模拟计算的结果也较好地表现了湿陷性土分布不连续造成的土体浸水后应力重分布现象,如图 6(a)、(b)分别为模型 1 和模型 3(湿陷土单元含量均为

50%)计算得到的竖向应力分布图。模型 1(M1)湿陷土与非湿陷土规律成层分布,相应的应力场分布均匀;而模型 3(M3)湿陷土与非湿陷土杂乱分布,湿陷后应力等值线呈锯齿状。从数值计算角度表明了湿陷性土的不连续分布会造成湿陷时产生应力重分布,按规范计算时因不能反映应力重分布的影响,从而导致按照规范计算的自重湿陷量与现场实测的自重湿陷量存在差异,称这种现象为“湿陷土不连续分布效应”。

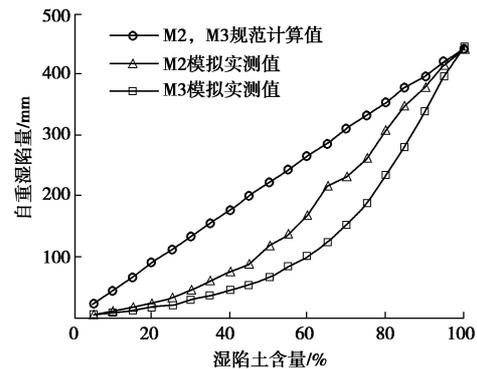
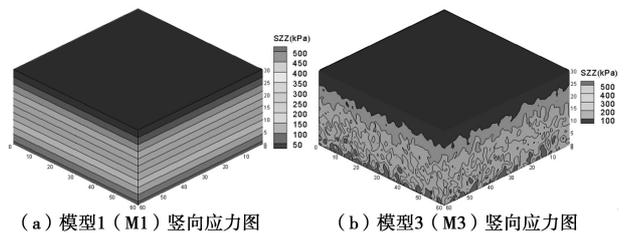


图 5 模型 2(M2)及模型 3(M3)计算自重湿陷量

Fig. 5 Self-weight collapse settlement of Model 2 and Model 3



(a) 模型 1 (M1) 竖向应力图 (b) 模型 3 (M3) 竖向应力图

图 6 模型 1 和模型 3 计算的竖向应力分布

Fig. 6 Distribution of vertical stresses of Model 1 and Model 3

3.2 湿陷土不连续分布效应系数

为统一对比分析 3 种模型的计算结果,将“模拟实测值”与“规范计算值”之比表示为 k ,并称之为“湿陷土不连续分布效应系数”,用以反映湿陷土不连续分布对湿陷变形产生的影响。图 7 为 3 种模型计算的 k 值的对比情况。

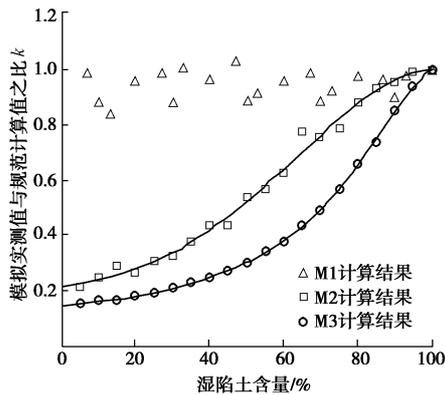


图 7 湿陷土不连续分布效应系数计算结果

Fig. 7 Calculated results of effect coefficient of discontinuous distribution

模型 1 (M1) 计算结果显示, 比值 k 在一定范围内波动, 但均不小于 0.8。而模型 2 (M2) 和模型 3 (M3) 计算结果中 k 值均随湿陷土含量降低呈持续减小的趋势, 当湿陷土含量为 60% 时, 计算得到的 k 值分别为 0.63 和 0.38; 而当湿陷土含量为 30% 时, 对应的数值分布为 0.33 和 0.21。从湿陷土均质成层分布的模型 1 (M1), 到湿陷土一个方向上随机分布的模型 2 (M2), 再到湿陷土在两个方向上均随机分布的模型 3 (M3), 湿陷土的分布是一个从有序到无序发展的过程, 与此对应的是比值 k 越来越小。反映出地基中湿陷性土是成层分布时, 采用式 (1) 计算自重湿陷量相对合适; 而当湿陷性土分布不连续时, 由于其对湿陷变形的发生具抑制作用, 自重湿陷量“规范计算值”与“模拟实测值”的差异较大, 前者不能准确反映实际土体的湿陷变形, 因而湿陷土的不连续分布效应值得引起重视。

3.3 湿陷程度不同对湿陷不连续分布效应的影响

图 8 为模型 4 (M4) 计算结果。图中 4 种湿陷土计算出的 k 值均随着湿陷土含量降低而减小。总体上, 当湿陷土含量趋近于 0 时 k 值还不到 0.2。

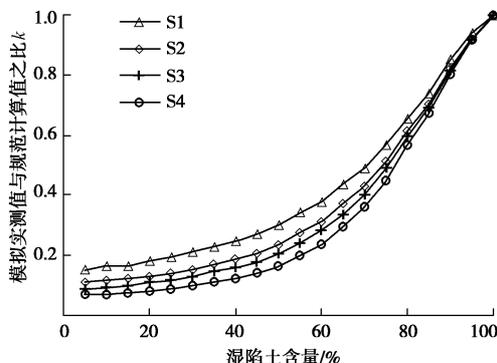


图 8 湿陷程度对湿陷性不连续分布效应的影响

Fig. 8 Impact of collapsible degree on discontinuous distribution effect of collapsibility

从 S1 到 S4 工况, 湿陷土的湿陷程度不断增强 (见表 2), 相同湿陷土含量下 k 值减小, 反映出其他条件

不变的情况下, 湿陷土单元的湿陷程度越强, 则湿陷土不连续分布的效应越强。但总的说来, 湿陷程度对湿陷不连续分布效应的影响不及湿陷土含量对其的影响。

4 考虑湿陷不连续分布效应的湿陷量计算

根据前述数值计算结果, 黄土中湿陷不连续分布对湿陷变形的发挥具有重要影响, 因此在进行自重湿陷量的计算时应考虑湿陷土不连续分布效应, 进而可将式 (1) 改进为

$$\Delta_{zs} = k \beta_0 \sum_{i=1}^n \delta_{zsi} h_i \quad (2)$$

式中, k 为湿陷土不连续分布效应系数。

针对前文提及的阳村场地, 按图 1 间隔 1 m 取样试验得到的自重湿陷系数结果, 根据式 (1) 计算得的自重湿陷量计算值为 162 mm, 按自重湿陷系数小于 0.015 确定的自重湿陷下限深度约 22 m (图 1 (a)), Q_2 古土壤基本不属于自重湿陷性土。然而按图 2 间隔 0.2 m 取样的试验结果, 相同原则得到的自重湿陷量计算值为 88 mm (计算至探井开挖深度), 自重湿陷下限深度超过 24 m (图 2, Q_2 古土壤也属于自重湿陷性土)。显示出取样间隔或者土样代表性对湿陷性评价结果的影响。

当进一步考虑湿陷土不连续分布效应时, 根据表 2 统计的湿陷土含量 (自重湿陷系数不小于 0.015 土样所占比例), 对 Q_2 黄土层和对 Q_2 古土壤层分别为 33% 和 47%, 对照图 7 中 M3 计算结果, 湿陷土不连续分布效应系数分别取 0.21 和 0.30, 代入式 (2) 得到的自重湿陷量计算值为 18 mm。对照表 1 实测结果, 虽然仍有差距 (还有其它因素的影响), 但自重湿陷量“计算值”与“实测值”之间的差异显著减小。

5 结 论

本文以西安黄土塬区的两个试坑浸水试验为依托, 采用数值分析的手段研究了黄土不连续分布对湿陷变形的影响, 得到以下 4 点结论。

(1) 西安塬区黄土自重湿陷量实测值远小于计算值, 与该区黄土湿陷分布不连续, 即湿陷土单元和非湿陷土单元混杂分布的特征有关, 不宜仅采用因地区土质而异的修正系数 β_0 对计算值进行修正。

(2) 当黄土湿陷性分布不连续时, 土体浸水后, 土体中会发生应力重分布, 使得湿陷土单元承受的部分竖向应力转移到非湿陷土上, 从而对湿陷变形的发生具抑制作用。产生这种抑制作用的黄土湿陷分布不连续效应是导致湿陷量的实测值与计算值往往存在差异的重要原因之一。

(3) 黄土体中湿陷与非湿陷土单元的分布越杂

乱,非湿陷土单元所占的比例越大,黄土湿陷分布不连续效应越显著,相应的自重湿陷量实测值与计算值差别也越大。数值分析表明极端情况下两者的比值可小于0.2。湿陷土单元的湿陷程度对黄土湿陷分布不连续效应也有一定影响,但相对较弱。

(4)有必要在湿陷量计算公式中加入反映黄土湿陷分布不连续效应的系数,并在工程实践中总结其经验数据,以期使湿陷量的计算值更接近于实际。

参考文献:

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. (LIU Zu-dian. Mechanics and engineering of loess[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [2] GB 50025—2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 2004. (GB 50025—2004 Code for building construction in collapsible loess regions[S]. 2004. (in Chinese))
- [3] 李大展, 何颐华, 隋国秀. Q₂ 黄土大面积浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(2): 1 - 11. (LI Da-zhan, HE Yi-hua, SUI Guo-xiu. Study and test on immersion of Q₂ loess in large area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(2): 1 - 11. (in Chinese))
- [4] 黄雪峰, 陈正汉, 哈 双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土场地湿陷变形特征的大型现场浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 382 - 389. (HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, HA Shuang, et al. Large area field immersion tests on characteristics of deformation of self weight collapse loess under overburden pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 382 - 389. (in Chinese))
- [5] 任海波. 某黄土场地试坑浸水试验[J]. 陕西建筑, 2008(158): 29 - 30. (REN Hai-bo. An in-site immersion test of loess site[J]. Shaanxi Architecture, 2008(158): 29 - 30. (in Chinese))
- [6] 马侃彦, 张继文, 刘争宏, 等. 自重湿陷性黄土场地的试坑浸水试验[J]. 勘察科学技术, 2009(5): 33 - 36. (MA Kan-yan, ZHANG Ji-wen, LIU Zheng-hong, et al. Immersion test of test pit at self weight collapse loess site[J]. Site Investigation Science and Technology, 2009(5): 33 - 36. (in Chinese))
- [7] 杨庆义. 湿陷性黄土现场浸水试验研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(6): 58 - 60. (YANG Qing-yi. Field immersion tests of collapsible loess[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(6): 58 - 60. (in Chinese))
- [8] 王小军, 米维军, 熊治文, 等. 郑西客运专线黄土地基湿陷性现场浸水试验研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(1): 83 - 90. (WANG Xiao-jun, MI Wei-jun, XIONG Zhi-wen, et al. Water immersion field tests of collapsibility of loess foundation of Zhengzhou-Xi'an passenger dedicated line[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(1): 83 - 90. (in Chinese))
- [9] 石怀清, 张继文, 王东红. 西安塬区中更新世 Q₂ 黄土场地浸水试验研究[J]. 岩土工程技术, 2012, 26(4): 177 - 180. (SHI Huai-qing, ZHANG Ji-wen, WANG Dong-hong. In-situ tests and analysis of MedioPleistocene Q₂ loess at Xi'an Tableland[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2012, 26(4): 177 - 180. (in Chinese))
- [10] 黄雪峰, 杨校辉, 朱彦鹏, 等. 大厚度自重湿陷性黄土现场浸水和地基处理深度综合试验研究[C]// 第十二届全国地基处理学术讨论会论文集. 昆明: 云南人民出版社, 2012: 31 - 43. (HUANG Xue-feng, YANG Xiao-hui, ZHU Yan-peng, et al. Combined experimental study of loess immersion test and foundation treatment thickness for collapse loess with lager thickness[C]// The 12th China Symposium on Foundation Treatment. Kunming: Yunnan People's Publishing House, 2012: 31 - 43. (in Chinese))
- [11] 王延辉, 张希宏, 袁勤刚. 大厚度黄土自重湿陷性试验分析研究[J]. 勘察科学技术, 2013(3): 5 - 8. (WANG Yan-hui, ZHANG Xi-hong, YUAN Qin-gang. Analysis and study on self-weight collapsible test of big thickness loess under overburden press[J]. Site Investigation Science and Technology, 2013(3): 5 - 8. (in Chinese))
- [12] 黄雪峰, 杨校辉. 湿陷性黄土现场浸水试验研究进展[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 222 - 228. (HUANG Xue-feng, YANG Xiao-hui. A study progress on in-situ soaking test on collapsible loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 222 - 228. (in Chinese))
- [13] 武小鹏, 楚华栋, 屈耀辉, 等. 自重湿陷性黄土下限深度判定方法探讨[J]. 西北地震学报, 2011, 33(增刊): 218 - 222. (WU Xiao-peng, CHU Hua-dong, QU Yao-hui, et al. Discussion on judging methods for the maximum depth of collapsible loess under overburden pressure[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(S0): 218 - 222. (in Chinese))
- [14] 彭建兵. 西安地裂缝灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (PENG Jian-bing. Ground fissures disaster in Xi'an[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [15] 陈正汉, 刘祖典. 黄土的湿陷变形机理[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(2): 1 - 12. (CHEN Zheng-han, LIU Zu-dian. Mechanism of collapse deformation of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(2): 1 - 12. (in Chinese))
- [16] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 1 - 10. (GAO Guo-rui. A structure theory for collapsing deformation of loess soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(4): 1 - 10. (in Chinese))