

DOI: 10.11779/CJGE201910022

卸荷条件下黄土湿陷系数的计算方法及验证

金鑫, 王铁行, 赵再昆, 罗扬

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 自重湿陷性黄土场地桩间土在浸水作用下存在卸荷与湿陷的伴生过程, 考虑卸荷作用的黄土湿陷变形还难以计算。首先探讨了卸荷湿陷与传统湿陷的差异性, 分析了湿陷完成比、卸荷应力比等因素对黄土卸荷湿陷变形的影响, 然后考虑各影响因素进行了卸荷湿陷试验, 采用湿陷完成比、卸荷湿陷比和卸荷应力比来描述原状黄土的卸荷湿陷过程。由于逐级多次卸荷试验更符合工程实践中的连续卸荷工况, 重点进行了多次卸荷试验。基于单次卸荷与多次卸荷试验结果, 建立了考虑卸荷作用的湿陷系数计算方法。进一步采用卸荷湿陷系数, 得到了考虑卸荷作用的自重湿陷性黄土场地桩间土自重湿陷量的计算方法, 并通过室内验证试验与工程实例计算, 论证了卸荷条件下黄土湿陷系数计算方法的合理性。

关键词: 卸荷; 黄土湿陷; 湿陷系数; 卸荷

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)10-1959-08

作者简介: 金鑫(1988—), 男, 陕西西安人, 博士研究生, 主要从事黄土、冻土工程设计理论和方法等方面的科研工作。E-mail: jinx_geomech@163.com。

Method for calculating coefficient of collapsibility of loess under unloading

JIN Xin, WANG Tie-hang, ZHAO Zai-kun, LUO Yang

(College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The concomitant process of unloading and collapse exists in the loess between piles of self-weight collapse loess site subjected to inundation. It is difficult to calculate the collapse deformation of loess under unloading. The difference between unloading collapse and traditional collapse is discussed firstly, and the effects of collapse completion ratio and unloading ratio on unloading collapse deformation of loess are analyzed. Then, the unloading collapse tests are carried out considering the above-mentioned factors. The unloading collapse process is described by the collapse completion ratio, unloading collapse ratio and unloading ratio. Because they are more in accordance with the continuous unloading conditions in engineering practice, the multiple-unloading tests are mainly carried out. Based on the results of single- and multiple-unloading tests, the method for calculating the coefficient of collapsibility considering unloading effect is established. Further, the method for calculating the self-weight loess between piles is obtained by using the coefficient of collapsibility under unloading. The rationality of the proposed method for unloading collapse is demonstrated through laboratory verification tests and project cases.

Key words: unloading; loess collapse; coefficient of collapsibility; unloading

0 引言

随着“一带一路”倡议和城镇化战略的综合实施, 建设在自重湿陷性黄土场地上的高层建筑日益增多, 因其对承载力要求较高, 除桩基础外, 素混凝土桩复合地基得到广泛应用^[1-3]。由于自重湿陷性黄土场地桩间土浸水湿陷过程的受力状态和湿陷特征不同于天然场地, 桩间黄土浸水后发生湿陷下沉, 其竖向应力受桩的分担作用和负摩阻力影响^[4-7], 桩间土湿陷过程伴随竖向荷载减小, 属于卸荷湿陷。因此, 在自重湿陷性黄土场地, 复合地基桩间土、灌注桩桩间土以及预制桩桩间土均存在卸荷湿陷问题。

受此影响现有方法得到的湿陷变形和湿陷类别将发生变化, 这势必影响湿陷等级的合理判定, 若严格按黄土规范^[8]计算湿陷量来进行湿陷性评价, 很可能造成误判, 使大量地基处理的合理性受到质疑。目前规范^[8]计算黄土湿陷量的公式为

$$\Delta_s = \sum_{i=1}^n \beta \delta_{si} h_i \quad (1)$$

即宏观上仅通过乘以地区土质差异修正系数及规定湿陷系数小于0.015的土不参与计算两种方式对黄

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41807282, 41702298)

收稿日期: 2018-10-12

土湿陷量的计算值进行调节,但经调节后按式(1)得到的计算值与实测值仍存在较大差异,暴露出规范调节手段的局限性。为此黄雪峰等^[9-10]、杨校辉等^[11]对于计算自重湿陷量与规范值差异的问题,给出湿陷下限深度评价系数 ζ 来减小二者之间的差异。姚志华等^[12]在进行自重湿陷量计算时引入深度修正系数 ξ ,使自重湿陷量的计算值接近实测值。邵生俊等^[13]依据大量的黄土地基浸水现场试验和室内湿陷性试验结果,用平均自重湿陷系数 δ_{zsi} 对黄土湿陷变形的计算值进行修正。郑建国等^[14]用湿陷土不连续分布效应系数 k 来缩小自重湿陷量的计算值与实测值之间的差异。《工程地质手册》^[15](第5版)通过引入地基浸水几率系数 α 来使湿陷量计算值与实测值接近,并在一定程度上达到减小地基处理深度的目的。

以上研究中,在计算自重湿陷量时仍采用自重湿陷系数或湿陷系数^[16-18],并没有考虑湿陷过程中应力变化对湿陷变形的影响。例如,桩间土湿陷下沉时,桩身受到负摩阻力作用,负摩阻力使桩间土竖向应力减小,亦即:桩间土湿陷过程伴随竖向应力减小,属于卸荷湿陷。而现有黄土湿陷性评价主要考虑自重应力、总应力作用下的湿陷变形,未考虑湿陷过程中应力变化对湿陷变形的影响。另外,在原状黄土试坑浸水试验中自试坑中心至边缘外的土层因湿陷变形不均匀发展形成错台,导致其天然自重应力场发生变化^[19-20],错台两侧黄土体在湿陷变形过程中亦存在卸荷湿陷现象。式(1)对黄土湿陷变形的计算仅是恒压条件下湿陷量的简单叠加,不能体现这种普遍存在的卸荷效应对湿陷变形产生的影响,从而造成了计算值与实测值之间的误差。并且目前尚缺乏黄土湿陷过程中考虑应力变化的湿陷变形问题的相关研究工作。

本文提出卸荷湿陷变形的计算方法并对其进行验证,希望对桩间土湿陷问题进行科学评价,实现自重湿陷性黄土地基桩间土湿陷量的计算分析,为自重湿陷性黄土地基桩基、复合地基桩土相互作用问题提供分析依据,并有利于克服目前黄土地基湿陷变形计算中存在的盲目保守及不经济作法,研究成果也可作为黄土地区桩基及试坑浸水试验提供合理参考。

1 卸荷湿陷系数的计算方法

根据图1所示的自重湿陷性黄土地基卸荷湿陷工况,当桩间黄土浸水湿陷时,由于桩间黄土的竖向湿陷变形大于桩的竖向压缩变形,黄土与桩界面的相对位移会引起界面摩擦,该作用会抑制桩间土由于浸水引起的湿陷变形发展。该现象类似于桩间黄土在湿陷下沉过程中受到沿桩长向上的拖拽作用,也可称之为

“卸荷”效应。此时该拖拽力 τ 与桩所受的负摩阻力互为一对作用力与反作用力。实际工况中,“浸水湿陷”与“卸荷”效应是同时发生的(如图2中线段 ac 所示),桩间原状黄土浸水湿陷时其湿陷变形与桩相对位移不同即负摩阻力对桩间土的反作用使桩间土原有应力发生不同程度的卸荷。

由于逐级多次卸荷更符合工程实践中桩间土连续卸荷工况,因此室内试验采用在黄土湿陷过程中进行逐级多次卸荷以对黄土的卸荷湿陷变形规律进行总结。根据图2所示,室内卸荷湿陷试验当试样每完成湿陷变形 S_{1i} 时进行竖向卸荷 Δp_i ,当完成湿陷量 S_1 时(此时竖向卸荷总量为 $\Delta p = \sum \Delta p_i$)卸荷终止,记录试样在 p_r ($p_r = p_1 - \Delta p$)作用下的湿陷变形 S_2 (线段 bc)。

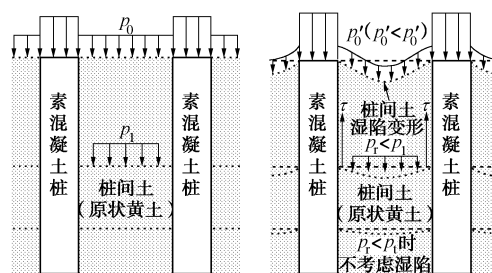


图1 桩间土卸荷湿陷工况示意图

Fig. 1 Unloading collapse condition of loess between piles

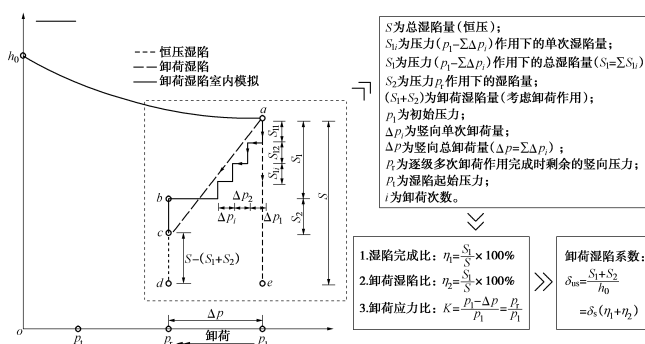


图2 卸荷湿陷示意图

Fig. 2 Process of loess collapse under unloading

根据以上对卸荷湿陷过程的描述,最终目的是要得到黄土湿陷变形过程中受卸荷作用影响下的黄土湿陷变形量 $S=S_1+S_2$,并已知 S_1 ,重点求 S_2 。因此以原状黄土湿陷变形过程中受到卸荷作用最终的湿陷变形量为参照点,按下式计算考虑卸荷作用的黄土湿陷系数:

$$\delta_{us} = \frac{S_1 + S_2}{h_0}, \quad (2)$$

式中, δ_{us} 为考虑卸荷作用的湿陷系数, h_0 为试样的初始高度。卸荷湿陷系数 δ_{us} 反映了原状黄土在卸荷作用下可能发生的单位湿陷量,或者是原状黄土在卸荷湿陷过程中已经发生的单位湿陷量。

根据图2所示的卸荷湿陷过程, 式 (2) 又可写为

$$\delta_{us} = \frac{S}{h_0}(\eta_1 + \eta_2) = \delta_s(\eta_1 + \eta_2) \quad (3)$$

由于卸荷作用的影响使 $S_1+S_2<S$, 故 δ_{us} 实质上是对 δ_s 的折减。逐级多次卸荷湿陷试验拟定了不同湿陷完成量及卸荷量, 旨在总结黄土卸荷湿陷变形特性及计算方法。实际工程中桩间土卸荷幅度是一个未知量, 受桩间距、土性、浸水时间、浸水历史等因素影响, 应收集资料按实际工况确定, 然后将其代入本文方法。

2 逐级多次卸荷湿陷试验

2.1 试验用土样

试验用原状黄土试样取自陕西铜川某施工基坑, 取土深度为5.0~8.5 m, 呈褐黄色, 硬塑状态, 其物理性质参数见表1。试验采用内径61.8 mm, 高20 mm 的环刀切取原状黄土试样, 并保证同一组原状黄土试样间的密度差值不超过0.03 g/cm³, 含水率之差不大于±1%。

表 1 试验用原状黄土的物理性质

Table 1 Physical properties of intact loess								
含水率 $w/\%$	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	颗粒含量/%		
						>0.05	0.05~0.005	<0.005
13.6	1.35	1.27	27.3	17.9	9.4	19.32	63.56	17.12

当 p_1 在0~200 kPa范围内, 测得试验用原状黄土试样的湿陷起始压力为75 kPa。根据表1得出试样上覆土的饱和密度为 $\rho_s=1.67 g/cm^3$ 。当取土深度为5 m时, 上覆土的饱和自重应力为83.5 kPa, 大于湿陷起始压力, 故所取土样为自重湿陷性黄土, 并且 $p_1=200$ kPa时, $\delta_s=0.098>0.07$, 根据规范^[8]判定所取原状黄土湿陷性强烈。

2.2 逐级多次卸荷试验方案

卸荷湿陷试验仪器采用南京土壤仪器厂WG型单杠杆固结仪。为精确测量湿陷变形, 采用准确度为全量程0.2%的位移传感器, 并加工与卸荷量相对应砝码以满足湿陷过程中不同卸荷需求。

根据图2所示的连续卸荷工况, 在常规湿陷性试验的基础上设计逐级多次卸荷湿陷变形试验如图3所示。即在 p_1 作用下, 将试样先在天然湿度下压缩稳定。将上述压缩稳定的试样在浸水饱和状态下使其发生湿陷变形, 每当其完成总湿陷量的 η_1 时, 卸去竖向荷载 Δp_i , 当完成湿陷总量的 η_1 时, 停止卸荷 (此时竖向卸荷总量为 Δp), 并记录试样在 $p_r (=p_1-\Delta p)$ 作用下完成的湿陷量 S_2 , 试验终止 (终止标准按照规范^[8]中4.3.2要求每小时下沉量不大0.01 mm), 不同初始压力 p_1 及卸荷应力比 K 下需进行逐级多次卸荷湿陷试验的编号为 N 。

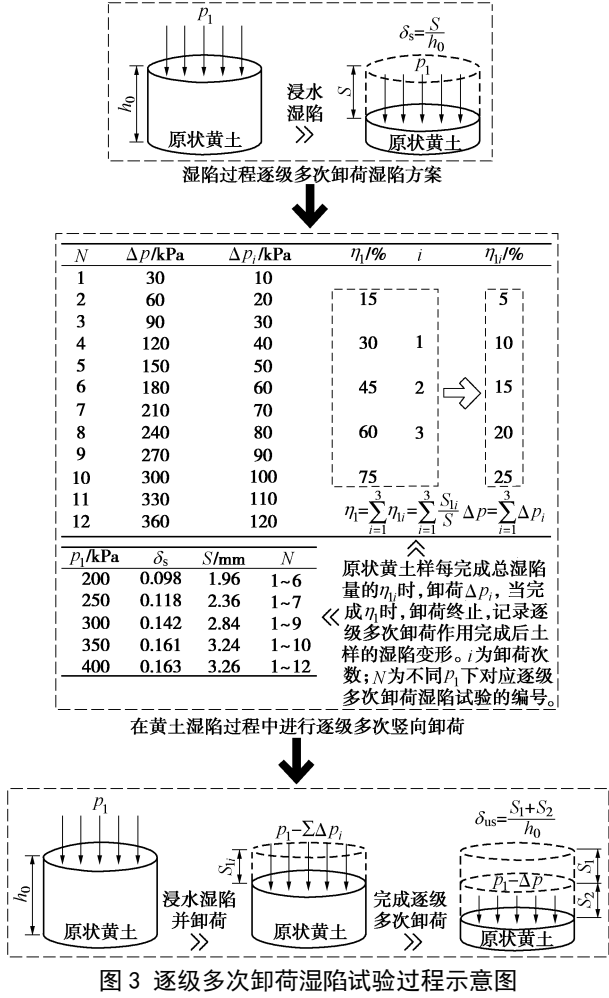


图 3 逐级多次卸荷湿陷试验过程示意图

Fig. 3 Diagram of multiple-unloading collapse tests

2.3 逐级多次卸荷湿陷试验结果及分析

不同初始压力 p_1 作用下, 在黄土湿陷过程中进行不同程度的逐级多次竖向卸荷并量测卸荷湿陷量 S_2 , 计算出卸荷湿陷比 η_2 ($\eta_2=S_2/S$, S 为土样在恒压作用下的湿陷量), 绘出不同 p_1 及 η_1 条件下, K 与 η_2 的关系曲线如图4所示。

从图 4 可以看出:

(1) 在相同初始压力 p_1 下, η_2 的取值随 K 的减小而减小, 说明卸荷后黄土的湿陷变形 S_2 均随着竖向卸荷幅度的增大而减小。并且随着卸荷应力比 K 的减小, 曲线的斜率逐渐减小。当 K 小于0.5时, η_2 的变化趋于稳定, 说明小于该卸荷段, 卸荷作用对黄土卸荷后的湿陷变形影响减弱; 当 K 大于0.5时, 由于卸荷程度较小, 竖向剩余较大的竖向应力使黄土中大孔性骨架颗粒接触关系遭破坏的程度较高, 故该卸荷段内黄土卸荷后的湿陷变形对竖向荷载的减小较为敏感。

(2) 在相同卸荷应力比 K 下, η_2 随 η_1 的增大而减小, 且随着 K 的减小 η_2 随 η_1 的变化程度呈现降低的趋势。由于原状黄土在卸荷前随着湿陷变形程度的发展, 土体压密结构比例不断升高, 孔隙减小, 致使卸荷后黄土的湿陷变形空间变小。

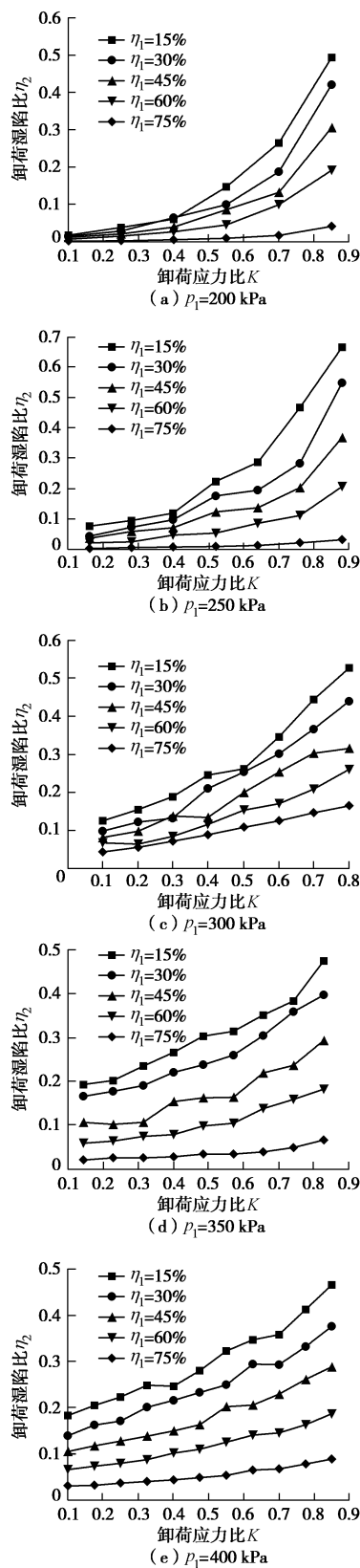


图 4 η_2 与 K 关系曲线

Fig. 4 Relationship between η_2 and K

(3) 根据不同初始压力下曲线的疏密分布, p_1 较小(小于 300 kPa)时曲线较为紧凑, p_1 较大时曲线较为分散, 且竖向卸荷幅度较小时曲线更为分散, 卸荷幅度较大时曲线较为密集, 说明黄土的卸荷湿陷变

形在初始压力较高的情况下对卸荷的敏感度较低压下显著。并且当初始压力大于 300 kPa 时, η_2 随 K 的减小趋于线性递减关系, 反映出原状黄土若先在较大初始压力下发生一定程度的湿陷, 土体结构破坏, 除颗粒间的相对滑移外, 大量土颗粒落入大孔隙中, 使土样卸荷前的湿陷变形迅速增加并逐步转变为压密变形。卸荷后, 黄土湿陷变形增量减缓, 并随竖向卸荷量的增大湿陷变形逐渐消退。

2.4 逐级多次卸荷条件下 δ_{us} 表达式的确定

根据图 4, 黄土在逐级多次卸荷后的湿陷变形随着竖向卸荷量的增加呈减小趋势。并且当卸荷应力比 K 较小或初始压力 p_1 较大时二者关系趋于线性, 这是因为原状黄土在湿陷过程中若先发生较小幅度的竖向卸荷, 剩余较大的竖向荷载导致大孔隙结构的塌陷程度增大, 使土体的原生结构大量破损, 其卸荷后的湿陷变形性质已接近重塑压密土。根据黄土逐级多次卸荷湿陷变形规律, 用文献[21]中式(19)表示卸荷条件下 δ_{us} 的表达式:

$$\delta_{us} = \delta_s [1 - (1 - \eta_1)(1 - aK^b)] \quad (4)$$

式中, a , b 为与试验有关的参数。根据文献[21]中式(4)在单次卸荷条件下: $a=1.067$, $b=1.695$ 。在该参数条件下, 逐级多次卸荷湿陷试验中 δ_{us} 的计算值与试验值的离散程度高。为使式(4)更为准确地反映逐级多次卸荷条件下原状黄土的卸荷湿陷变形规律, 根据图 4 的试验结果对 δ_{us} 的表达式进行参数优化, 其结果如表 2 所示。

表 2 不同参数条件下 δ_{us} 表达式的离散系数 C_v

Table 2 C_v of expression for δ_{us} under different parameters

参数		p_1	$\eta_1/\%$				
a	b		/kPa	15	30	45	60
1.067	1.695	200	0.177	0.141	0.099	0.069	0.071
		250	0.142	0.117	0.090	0.072	0.074
		300	0.222	0.116	0.085	0.046	0.026
		350	0.305	0.187	0.117	0.077	0.059
		400	0.330	0.210	0.132	0.089	0.056
0.7	1.5	200	0.150	0.107	0.066	0.037	0.044
		250	0.124	0.093	0.057	0.036	0.046
		300	0.127	0.042	0.031	0.012	0.004
		350	0.147	0.109	0.061	0.038	0.036
		400	0.132	0.127	0.070	0.046	0.031

根据表 2, 经参数优化后 δ_{us} 表达式其变异系数均小于 0.2, 说明该参数条件下 δ_{us} 的计算值相对试验值离散程度低且相关性高^[22]。因此, 得到逐级多次卸荷条件下原状黄土卸荷湿陷系数 δ_{us} 的表达式:

$$\delta_{us} = \delta_s [1 - (1 - \eta_1)(1 - 0.7K^{1.5})] \quad (5)$$

式中, δ_{us} 为卸荷湿陷系数, δ_s 为湿陷系数, η_1 为湿陷完成比, K 为卸荷应力比。根据自重湿陷性黄土地桩间土基底压力及桩基负摩阻力条件, 应用上述卸荷湿陷系数计算方法, 可进行考虑卸荷作用的黄土湿陷变形计算。

3 公式验证

3.1 室内试验验证

为进一步验证式 (5) 对黄土卸荷湿陷变形的预测能力, 选取与原卸荷湿陷试验不同的卸荷应力比 K 和湿陷完成比 η_1 进行室内验证试验, 结果如图 5 所示。

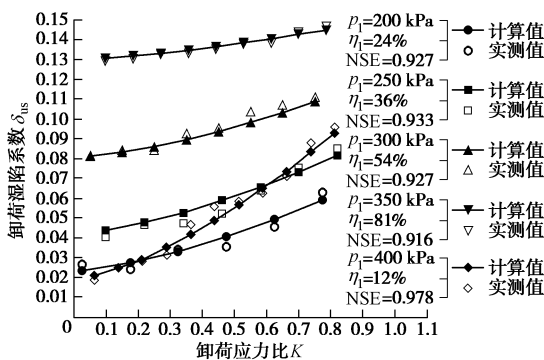


图 5 δ_{us} 计算值与实测值对比

Fig. 5 Comparison between calculated and measured values of δ_{us}

由图 5 可知, 黄土卸荷湿陷系数 δ_{us} 的计算结果与试验数据基本吻合, 两者间的纳什系数 (NSE) 均接近于 1, 说明用式 (5) 描述黄土的卸荷湿陷变形与竖向卸荷量的关系可信度高且对卸荷湿陷变形的预测误差小^[23-24]。由于验证用黄土与原试验黄土存在湿陷完成程度及卸荷幅度的差异, 故模型预测值与实测数据存在微小偏差。

3.2 工程实例验证

对于自重湿陷性黄土地复合地基桩间土浸水湿陷变形问题, 多数工程迫于黄土层之厚, 湿陷等级之高, 湿陷量之大等因素, 机械地按照规范^[8]计算湿陷量, 导致先采用素土挤密桩消除湿陷性, 然后再按一般地区素混凝土桩复合地基进行设计或者直接采用桩基穿透湿陷性土层来消除地基的全部湿陷性, 以上作法的必要性受到质疑且易造成极大浪费。因此, 文献^[15]对于现行黄土规范中考虑基底下土体受水浸湿可能性等因素的修正系数 β 不明确问题, 建议湿陷量的计算值按下式计算:

$$\Delta_s = \sum_{i=1}^n \alpha \beta \delta_{si} h_i \quad , \quad (6)$$

式中, δ_{si} 为第 i 层土的湿陷系数, β 为考虑基底下地基土的受力状态及地区等因素的修正系数, α 为不同深度地基土浸水几率系数。

本文根据桩间土在浸水和受荷过程竖向应力的变化特点, 用卸荷湿陷系数 δ_{us} 计算考虑卸荷作用的桩间土湿陷量如下:

$$\Delta_s = \sum_{i=1}^n \beta \delta_{usi} h_i \quad . \quad (7)$$

式 (7) 在计算 Δ_s 时, 土质修正系数 β 取值与规范^[8]一致。计算 δ_{us} 时, δ_s 取初始压力 p_1 对应的湿陷系数。由于卸荷作用与湿陷变形是同时发生, 因此 $\eta_1 \approx 0$ 。在卸荷应力比 K 计算中 Δp 取桩侧负摩阻力平均值。

文献^[9~11]中不同地区的自重湿陷性黄土地桩基浸水湿陷试验结果如表 3 所示, 运用卸荷湿陷系数 δ_{us} 计算相应的桩间土湿陷量并与文献^[15]的推荐方法以及按黄土规范^[8]方法计算的湿陷量相比较, 其结果如图 6 所示。

表 3 湿陷性黄土地桩基负摩阻力现场试验汇总表

Table 3 Tests on negative skin friction of piles in collapse loess

site						
试验地点	测点编号	桩长/m	桩径/m	桩类型	负摩阻力均值/kN	中性点深度/m 中性比 L_n/L_0
陕西蒲城	A1	40.00	1.2	钻孔桩	27.4	17.5 0.50
	A2	40.00	2.5	钻孔桩	43.6	25 0.72
	B1	32.00	1.0	钻孔桩	27.3	12 0.35
	B2	32.00	2.2	钻孔桩	44.9	21 0.60
陕西宝鸡	甲3	23.00	0.6	灌注桩	23.0	12.0 0.60
	甲1	23.0	0.8	灌注桩	49.0	17.0 0.85
	乙1	22.90	0.8	灌注桩	37.9	11.0 0.55
	乙3	22.90	1.2	灌注桩	37.4	15.0 0.75
	S3	60.00	0.8	灌注桩	23.0	17.0 0.89
陕西潼关	S4	50.00	0.8	灌注桩	29.0	16.0 0.89
	S5	60.00	0.8	灌注桩	25.0	24.0 0.89
河南灵宝	S3	60.00	0.8	灌注桩	18.0	18.0 0.74
	S4	50.00	0.8	灌注桩	28.0	18.0 0.74
	S5	60.00	0.8	灌注桩	24.0	28.0 0.74

注: L_n 为中性点深度; L_0 为湿陷性黄土层厚度。

从图 6 可以看出, 考虑卸荷作用的湿陷变形计算值均小于规范计算值。因为式 (1) 中, 首先测定 δ_s 时的应力为自重应力或总应力, 未考虑湿陷过程中可能出现的应力变化对湿陷变形造成的影响, 并且式 (1) 是黄土湿陷量的机械叠加, 不能体现卸荷作用对湿陷变形的影响; 其次规范仅对土质差异进行修正, 未考虑桩对黄土湿陷变形的抑制作用, 使规范计算值偏大。文献^[15]中采用不同深度地基土浸水几率系数 α 对按规范计算的湿陷量进行适当折减, 在一定程度上减小了地基处理厚度。用式 (7) 计算的桩间土湿陷变形与

文献[15]中对桩间土湿陷变形的计算总体趋势保持一致,二者湿陷量计算产生差异的原因有以下几点:

(1)本文试验用黄土取自铜川新区与蒲城地区地理位置接近土性相似,因此图6(a)中用式(6),(7)的湿陷量计算值接近。

(2)文献[15]中规定,在自重湿陷性黄土地,基底25 m以下至非湿陷性黄土层顶面,统一取 $\alpha=0.5$,因此当湿陷土层厚度较大时,用式(6)计算的湿陷量偏小。

(3)式(6)在计算湿陷量时湿陷系数仍采用 δ_s ,而式(7)依据桩间土湿陷时的竖向应力变化特点,采用卸荷湿陷系数 δ_{us} ,使式(7)的湿陷量计算值总体偏小。

(4)在灵宝地区的湿陷量计算中,由于浸水载荷试验地点的中性点深度及中性比相同,按规范及文献[15]计算的测点S3和S4对应的湿陷量相同。但由于S3和S4两测点的桩侧摩阻力存在较大差异,用式(7)计算湿陷量时, δ_{us} 合理地考虑了卸荷作用对湿陷变形的影响,使两测点的湿陷量计算出现差异。

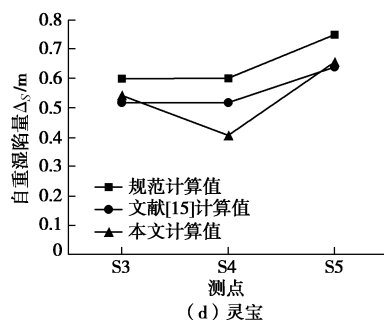
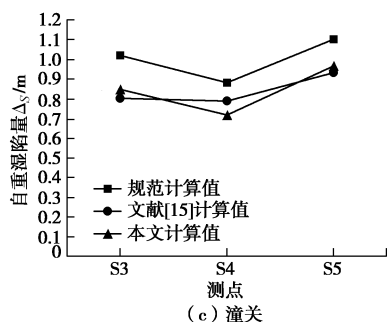
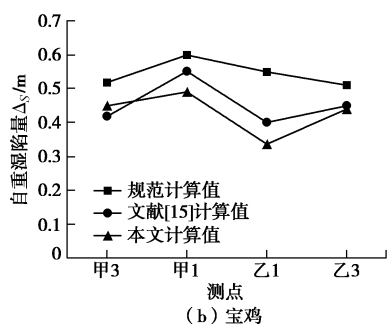
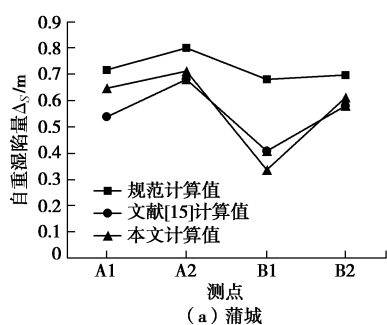


图6 不同地区的桩间土计算湿陷量比较

Fig. 6 Comparison of calculated collapses between piles in different regions

通过以上分析,表明 δ_{us} 能根据实际工况中应力变化特点较为科学地评价桩间土的湿陷变形,有助于黄土地基处理趋于合理,因此有必要在自重湿陷性黄土地桩间土湿陷变形中考虑卸荷作用的影响,并总结针对更多地区及工况下式(5)的优化系数,以期使湿陷量的计算值更接近于实际。

4 结 论

针对自重湿陷性黄土地桩间土受荷浸水过程中卸荷湿陷现象,室内试验采用黄土逐级多次卸荷湿陷试验以模拟桩间土连续卸荷工况,研究了原状黄土的卸荷湿陷变形特性及其在对应工况湿陷量计算中的应用,得到以下结论:

(1)原状黄土所受的初始压力 p_1 ,湿陷完成比 η_1 ,卸荷应力比 K 是影响卸荷湿陷系数 δ_{us} 取值的主要因素。

(2)原状黄土的卸荷湿陷变形随竖向卸荷幅度的增大而减小,随卸荷前湿陷变形完成程度的增大而减小。黄土的卸荷湿陷变形对卸荷作用的敏感程度在较高初始压力下较低压力下显著。

(3)计算 δ_{us} 时, δ_s 取初始压力 p_1 对应的湿陷系数;由于实际工况中卸荷作用与湿陷变形是同时发生,取 $\eta_1 \approx 0$ 。在卸荷应力比 K 计算中 Δp 取桩侧负摩阻力平均值。

(4)在桩间土湿陷量计算中,考虑卸荷作用的湿陷变形较黄土规范计算值偏小并在同一场地中可体现出桩侧摩阻力的差异对湿陷变形的影响,使湿陷量的取值趋于合理。在后续研究中,应总结针对更多地区及工况下卸荷湿陷系数 δ_{us} 的计算方法,以期使湿陷量的计算接近实际。

参考文献:

- [1] 朱彦鹏,杜晓启,杨校辉,等. 挤密桩处理大厚度自重湿陷性黄土地区综合管廊地基及其工后浸水试验研究[J]. 岩

- 土力学, 2019, **40**(8): 1 - 12. (ZHU Yan-peng, DU Xiao-qi, YANG Xiao-hui, et al. Research on utility tunnel foundation treated by compaction piles and post-work immersion test in the self-weight collapsible loess area with large thickness[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(8): 1 - 12. (in Chinese))
- [2] 朱彦鹏, 杨校辉, 马天忠, 等. 黄土塬地区大直径长桩承载性状与优化设计研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(4): 1012 - 1023. (ZHU Yan-peng, YANG Xiao-hui, MA Tian-zhong, et al. Study on bearing behaviors and optimization design of large-diameter long pile foundation in loess subsoil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(4): 1012 - 1023. (in Chinese))
- [3] 冯忠居, 王航, 魏进, 等. 黄土冲沟斜坡桥梁桩基竖向承载特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(12): 2308 - 2314. (FENG Zhong-ju, WANG Hang, WEI Jin, et al. Model tests on vertical bearing performance of bridge pile foundation in loess gulch slope area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(12): 2308 - 2314. (in Chinese))
- [4] 赵明华, 胡倩, 杨超炜, 等. 考虑地基土非线性固结的桩侧负摩阻力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(8): 1417 - 1424. (ZHAO Ming-hua, HU Qian, YANG Chao-wei, et al. Negative skin friction of piles considering nonlinear consolidation of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(8): 1417 - 1424. (in Chinese))
- [5] 武崇福, 郭维超, 李雨农, 等. 考虑负摩阻力的刚性桩复合地基中性面深度及桩土应力比计算[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(2): 278 - 287. (WU Chong-fu, GUO Wei-chao, LI Yu-nong, et al. Calculation of neutral surface depth and pile-soil stress ratio of rigid pile composite foundation considering influence of negative friction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(2): 278 - 287. (in Chinese))
- [6] MASHHOUR I, HANNA A. Drag load on end-bearing piles in collapsible soil due to inundation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**(12): 2030 - 2038.
- [7] CAO W, CHEN Y, WOLFE W E. New load transfer hyperbolic model for pile-soil interface and negative skin friction on single piles embedded in soft soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2014, **14**(1): 92 - 100.
- [8] GB50025—2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 2004. (GB50025—2004 Code for building construction in collapsible loess regions[S]. 2004. (in Chinese))
- [9] 黄雪峰, 陈正汉, 哈双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土中灌注桩承载性状与负摩阻力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(3): 338 - 346. (HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, HA Shuang, et al. Research on bearing behaviors and negative friction force for filling piles in the site of collapsible loess with big thickness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(3): 338 - 346. (in Chinese))
- [10] 黄雪峰, 杨校辉, 殷鹤, 等. 湿陷性黄土场地湿陷下限深度与桩基中性点位置关系研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(增刊2): 296 - 302. (HUANG Xue-feng, YANG Xiao-hui, YIN He, et al. Study of relationship between maximum collapsing depth and neutral point position of pile foundation in collapsible loess ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(S2): 296 - 302. (in Chinese))
- [11] 杨校辉, 黄雪峰, 朱彦鹏, 等. 大厚度自重湿陷性黄土地基处理深度和湿陷性评价试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(5): 1063 - 1074. (YANG Xiao-hui, HUANG Xue-feng, ZHU Yan-peng, et al. Experimental study on collapsibility evaluation and treatment depths of collapsible loess upon self weight with thick depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(5): 1063 - 1074. (in Chinese))
- [12] 姚志华, 黄雪峰, 陈正汉, 等. 关于黄土湿陷性评价和剩余湿陷量的新认识[J]. 岩土力学, 2014, **35**(4): 998 - 1006. (YAO Zhi-hua, HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, et al. New recognition of collapsibility evaluation and remnant collapse of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(4): 998 - 1006. (in Chinese))
- [13] 邵生俊, 李骏, 李国良, 等. 大厚度自重湿陷黄土湿陷变形评价方法的研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(6): 965 - 978. (SHAO Sheng-jun, LI Jun, LI Guo-liang, et al. Evaluation method for self-weight collapsible deformation of large thickness loess foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(6): 965 - 978. (in Chinese))
- [14] 郑建国, 邓国华, 刘争宏, 等. 黄土湿陷性分布不连续对湿陷变形的影响[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(1): 165 - 170. (ZHENG Jian-guo, DENG Guo-hua, LIU Zheng-hong, et al. Influence of discontinuous distribution of collapsible loess on its deformation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(1): 165 - 170. (in Chinese))
- [15] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 5版. 北京:

- 中国建筑工业出版社, 2017. (Editorial Board of 《Geological Engineering Handbook》. Geological engineering handbook[M]. 5th ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017. (in Chinese))
- [16] LIU Z, LIU F, MA F, et al. Collapsibility, composition, and microstructure of loess in China[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, **53**(4): 673 - 686.
- [17] 邢义川, 金松丽, 赵卫全, 等. 基于离心模型试验的黄土湿陷试验新方法研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(3): 389 - 398. (XING Yi-chuan, JIN Song-li, ZHAO Wei-quan, et al. New experimental method for loess collapsibility using centrifugal model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(3): 389 - 398. (in Chinese))
- [18] 武小鹏, 王兰民, 房建宏, 等. 原状黄土地基渗水特性及其与自重湿陷的关系研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(6): 1002 - 1010. (WU Xiao-peng, WANG Lan-min, FANG Jian-hong, et al. Seepage characteristics and their relationship with self-weight collapse of intact loess ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(6): 1002 - 1010. (in Chinese))
- [19] 马 闫, 王家鼎, 彭淑君, 等. 大厚度黄土自重湿陷性场地浸水湿陷变形特征研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(3): 537 - 546. (MA Yan, WANG Jia-ding, PENG Shu-jun, et al. Immersion tests on characteristics of deformation of self-weight collapsible loess under overburden pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(3): 537 - 546. (in Chinese))
- [20] 邵生俊, 李 骏, 李国良, 等. 大厚度湿陷性黄土隧道现场浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(8): 1395 - 1404. (SHAO Sheng-jun, LI Jun, LI Guo-liang, et al. Field immersion tests on tunnel in large-thickness collapsible loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(8): 1395 - 1404. (in Chinese))
- [21] 王铁行, 金 鑫, 罗 扬, 等. 考虑卸荷作用的黄土湿陷性评价方法研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(4): 1281 - 1290. (WANG Tie-hang, JIN Xin, LUO Yang, et al. Evaluation method for loess collapse potential of unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(4): 1281 - 1290. (in Chinese))
- [22] GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999. (GB/T50123—1999 Standard for soil test method[S]. 1999. (in Chinese))
- [23] TANNY J, COHEN S, ASSOULINE S, et al. Evaporation from a small water reservoir: direct measurements and estimates[J]. Journal of Hydrology, 2008(351): 218 - 229.
- [24] FOX G, MUÑOZ-CARPENA R, PURVIS R A. Controlled laboratory experiments and modeling of vegetative filter strips with shallow water tables[J]. Journal of Hydrology, 2018(556): 1 - 9.