



古土壤层间富水对黄土场地湿陷性的影响

李琳, 王家鼎, 谷琪, 张登飞, 焦少通

(西北大学地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要 黄土地层中往往交替分布着多层红色古土壤层, 由于其硬度相对较高, 遇水不易湿陷, 对黄土地层湿陷量的测量结果有很大的影响。然而, 对于古土壤对湿陷量的控制作用目前还缺乏相关研究, 导致对湿陷地层湿陷量的科学取舍缺乏理论依据。为此该文统计了黄土高原区的浸水试验结果, 分析了不同区域湿陷量室内外差异特征, 并以西安地区两个试验场地的大型浸水试验为研究对象, 进行了不同试验条件下土体中水分的扩散、含水率的变化、土压力变化以及累计湿陷量等测量工作。最终结果表明, 古土壤层的存在阻碍湿陷进程, 在阻止水分下渗的同时, 阻碍深部地层湿陷量传递至地表, 使得湿陷量实测值与计算值之间的差异与古土壤层数呈现正相关的趋势。该文将为普遍存在古土壤的黄土地层自重湿陷机理的研究提供参考。

关键词 古土壤; 浸水试验; 湿陷性; 湿陷系数; 黄土

中图分类号: S157 **DOI:** 10.16152/j.cnki.xdxbr.2024-01-009

The influence of moisture-rich interlayers in palesol strata on the collapsibility of loess terrain

LI Lin, WANG Jiading, GU Qi, ZHANG Dengfei, JIAO Shaotong

(State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract In loess formations, multiple layers of reddish ancient soil often alternate. Due to their relatively high hardness, they are resistant to collapsing when exposed to water, which significantly impacts the measurement results of the collapsibility of loess formations. However, there is currently a lack of research on the controlling role of ancient soils in collapsibility, leading to a lack of theoretical basis for making scientific decisions on the collapsibility of geological formations. To address this gap, this study compiled the results of inundation tests in the Loess Plateau region, analyzed the indoor and outdoor differences in collapsibility characteristics in different areas, and focused on large-scale inundation tests in two experimental sites in Xi'an. Various aspects were measured under different test conditions, including moisture diffusion in the soil, moisture content changes, soil pressure variations, and cumulative collapsibility. The final results indicate that paleosol layers hinder the collapsibility process by impeding water infiltration and preventing the transmission of deep-seated collapsibility to the surface. This leads to a positive correlation between the measured collapsibility val-

收稿日期: 2023-10-30

基金项目: 国家自然科学基金重大仪器研制项目(42027806); 国家自然科学基金重点项目(4160639); 西北大学研究生创新项目(CX2023012)。

第一作者: 李琳, 女, 从事工程地质研究, linlinli2000@126.com。

通信作者: 王家鼎, 男, 教授, 从事黄土地质灾害研究, wangjiading029@163.com。

ues and the number of ancient soil layers. This study aims to provide insights into the self-weight collapsibility mechanisms in loess formations where ancient soil layers are commonly found.

Keywords paleosol; inundation test; collapsibility; collapsibility coefficient; loess

黄土是第四纪特殊的沉积物,与同期的其他沉积物相比,具有独特的内部结构和外部形态特征。广泛分布于世界各地^[1-2],尤其是我国中西部地区^[3]。然而,作为主要的持力层和建筑材料,黄土易在降雨和灌溉等因素影响下产生强度骤降、变形剧增的现象^[4-5]。随着西部大开发的深入,基础设施建设、资源开发利用等工程无可避免的会遇到黄土湿陷性这一特殊岩土工程问题,对场地的选址和已建设施的安全运营构成巨大的挑战^[6]。而场地湿陷类型是湿陷性黄土最基本的工程属性,由于未能准确评估黄土场区的湿陷类别,提前消除湿陷性从而在工程建设中引发的危害屡见不鲜(见图1)。



(a)湿陷性黄土导致路基沉降,兰州 (b)湿陷性黄土导致建筑物开裂,兰州

图1 黄土在中国的分布及湿陷性黄土危害

Fig.1 Distribution of loess in China and the hazards of collapsible loess

国内外学界对黄土湿陷特性的研究方法主要有2种。①室内单轴或三轴压缩试验。试验相对简单,条件易于控制。②现场浸水试验。通过原位试验直接得出地基的湿陷变形量和湿陷变形的时空分布,据此判定黄土场地的湿陷类型,相比而言准确可靠,但费用较高,费工费时^[7],因此工程中常以室内试验为主,但室内试验结果往往与浸水试验结果差异较大。许多地质科学家也注意到了这一点,并进行了研究^[8]。邢义川等^[9]、米文静等^[10]提出了基于离心模型试验的单线法和双线法的方法测黄土的湿陷量,拟提高室内试验结果的精度,但结果与现场试验相比仍有一定的误差。邵生俊等^[11]基于大量现场试验和室内试验对比,提出了不同地层深度给予不同的修正系数并修改自重湿陷系数的起始门槛值,并发现关中地区室内试验与现场试验结果相关性较差,但并未展开深入研究。除此之外也有不少学者提出了

诸如不同地层赋予不同的修正系数、基于神经网络的判定等理论方法。

黄土与古土壤交互式层状分布,构成了黄土地层的主要架构^[12]。受沉积环境的影响,古土壤与黄土在物理力学性质上有明显的差异。雷祥义^[13]在黄土高原南部晚更新世黄土的研究中发现,古土壤结构致密、力学性能优于黄土。随后诸多学者对古土壤的力学性能研究也证明了这一观点^[14-15]。在现场浸水试验的开展中,也有不少学者发现了黄土-古土壤交互地层湿陷量的特殊性,如李大展等^[16]通过对 Q_2 黄土大面积浸水试验时认识到 Q_2 黄土与古土壤交互分布对地基土和一般自重湿陷性黄土的湿陷特性有很大区别,这为分析室内外试验结果的差异性的研究开辟了新的途径。赵金刚等^[17]研究了黄土-古土壤地层的水分运移规律,确定了古土壤层阻碍水分垂直入渗,但并未探究古土壤的这种隔水性对湿陷量的控制作用。

上述理论研究并未从古土壤入手探究古土壤对湿陷量的控制作用。因此本文通过对黄土高原区开展的大量现场浸水试验的统计,分析不同场区自重湿陷量室内外差异的特征,并从古土壤层入手分析不同古土壤层数对湿陷量的影响。依托西安地区的两个大型浸水试验,并通过岩土工程勘察及动态监测的方法,在获得不同地层累计沉降量、沉降断面形态以及水分入渗规律的基础上,对古土壤影响湿陷的机理进行解释,以期为基础理论的发展提供一定的参考,为重要设施的安全运营提供保障。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文统计的浸水试验场区主要分布在我国境内的黄土高原地区,位于北纬 $34^{\circ} \sim 38.5^{\circ}$ 与东经 $102^{\circ} \sim 112^{\circ}$ 之间(见图2)。自西北向东南地形高程逐渐递降,此区间黄土分布连续,地层发育完整厚度大^[18]。该地区属半干旱大陆性季风气候区,多年平均气温和降水量在空间分布上总体呈现自东南向西北逐渐递减的趋势,年平均降水量

在 140 ~ 737 mm 之间, 多年平均气温在 -3 ℃ ~ 15 ℃ 之间。

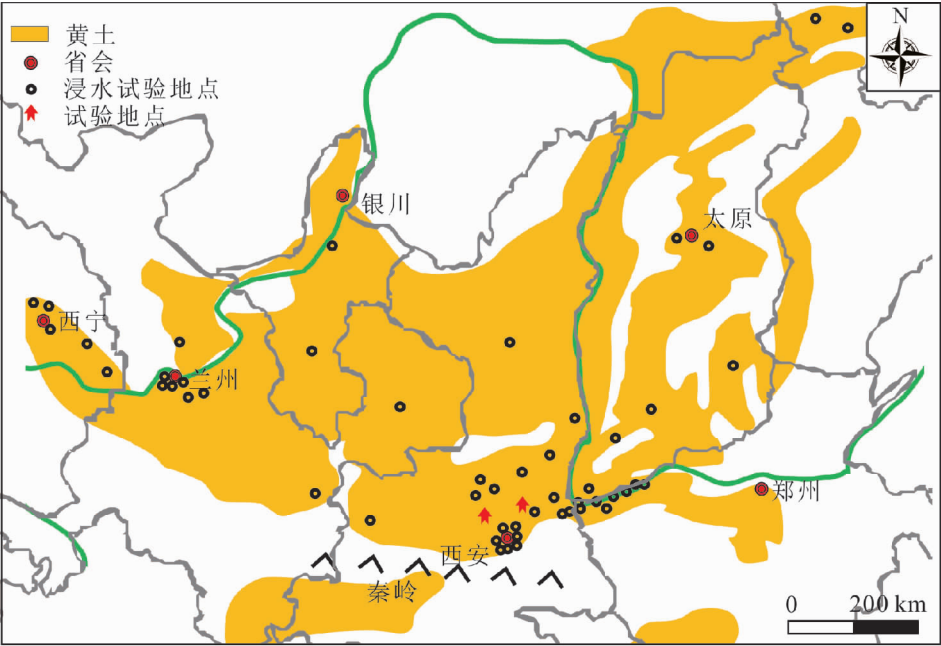


图 2 浸水试验场地点位分布图

Fig. 2 Inundation site location distribution map

由于西安处于黄土高原东南部, 古土壤最为发育且厚度大, 将两个现场浸水试验点选择在陕西省西安市咸宁东路(试验点 1: 经度 109. 06°, 纬度 34. 24°), 陕西省西安市长安区(试验点 2: 经度 109. 94°, 纬度 34. 15°)。试验点属暖温带半湿润大陆性气候。夏季受东南季风影响, 降雨相对集中(7—9 月), 且多暴雨天气。冬季受西北季风影响, 气候干燥、寒冷。地层自上而下依次为杂填土(Q_4^{ml})、新黄土(Q_3^{eol})和古土壤(Q_3^{el})、老黄土(Q_2^{eol})、古土壤(Q_2^{el})等。由于区域地貌单元的不断演化, 现代构造活动强烈, 多有地裂缝等灾害的发育。

1. 2 研究方法

众多学者在黄土高原的不同场地上开展了尺度各异的原位浸水试验^[16, 19-27], 由于试验成本高, 再现性差, 因此对不同场地数据进行对比分析变得尤为关键。因此, 本文将在黄土高原地区进行的大型现场浸水试验结果进行统计, 通过对不同地区的自重湿陷量实测值和计算值的比较, 可以得出不同地区自重湿陷量的特征及实测值和计算值之间的差异。并根据地层中古土壤层的存在与否及层数不同对试验地点进行分类, 深入研究古土壤对这种室内外试验结果差异性的影响。

为了探究原始场水分运移规律, 分析黄土自重发展特征以及古土壤层在该过程中的作用, 特用未布设渗水孔的试验点 1 及布设渗水孔的试验点 2 两组现场浸水试验做对比分析。通过岩土工程勘察的方法查明场地内各地层的分布特征及场地黄土的物理力学特性, 为了测得浸水过程中各地层含水量变化, 结合地层结构, 埋设水分传感器。对比分析试验结果中土体自重湿陷时各地层沉降量、以及过程中各地层含水率变化, 利用弹塑性力学中的简支梁模型对古土壤影响自重湿陷的机理进行解释。

本次试验的两试验点试坑皆为圆形, 根据岩土工程勘察得到场地的自重湿陷下限深度为依据, 确定试坑直径分别为 20 m(试验点 1)、30 m(试验点 2), 深度皆为 50 m。并根据地层情况的不同, 分别对两试验点进行测点布设, 即浅、深标点、水分传感器、渗水孔以及土压力盒(见图 3)。其中试验点 2 在距离试坑中心 7 m 的圆周上均匀布有 6 个渗水孔以促进水分入渗, 试验点 1 未布设渗水孔。试验过程中进行沉降观测、土层含水量土压力监测, 采用远程自动化数据采集系统的方法进行数据采集。

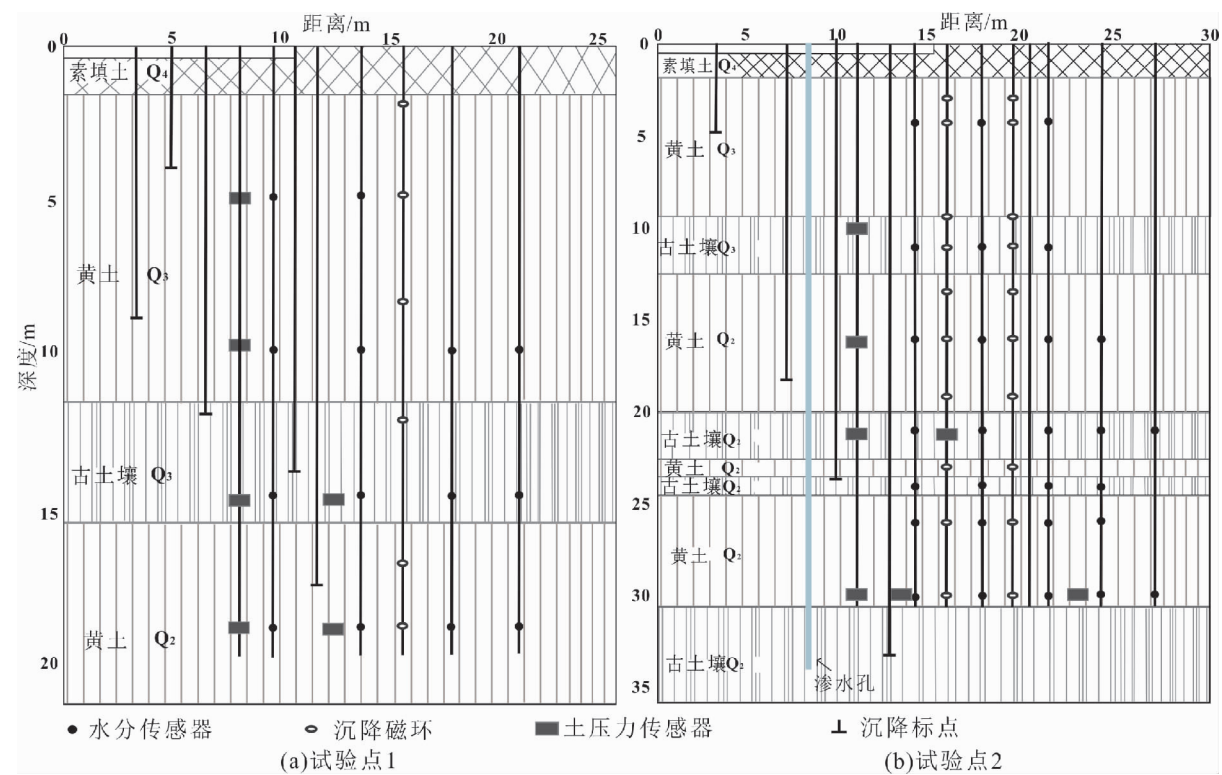


图 3 传感器埋设剖面图
Fig. 3 Sensor burial cross-section diagram

2 结果与分析

2.1 统计结果

2.1.1 自重湿陷量分区结果

图 4 展示了黄土高原地区浸水试验的实测修正系数比值的分布,即现场实测湿陷量与计算湿陷量的比值。从图 4 中可看出陇西地区和陇东-陕北-晋西地区的实测湿陷量大于计算值,而关中地区及其他地区的实测值小于计算值。此外,现场实测修正系数与规范值存在较大的差异,并且这些差异在不同地区之间表现出特定的大小关系。

图 4 显示了在甘肃地区进行了数量可观的浸水试验,而这些试验中测得自重湿陷量实测值明显高于计算值,因而两者的比值均大于 1,在某些情况下,这一比值甚至接近于 4,也就是说甘肃某些地区的实测自重湿陷量几乎是计算值的 4 倍之多。在青海也呈现出类似的趋势。在该地区进行的浸水试验中实测值大约维持在计算值的 1.6 倍左右,与现行规范给出的修正系数基本吻合。而陕西等地则呈现出不同的趋势,陕西地区与甘肃和青海地区不同,实测自重湿陷量均小于计算值。

其中大量浸水试验中出现了自重湿陷量计算值远大于实测值的情况,导致两者之比接近于 0,表明这些地区实测无湿陷,但计算出存在湿陷量,这种情况在其他地区较为少见。这种差异可能受地质和土层特性的影响,需要进行更加深入的研究。

2.1.2 不同地层的自重湿陷量结果

为了探究古土壤对室内外试验差异性的影响,本文统计了不同地层的场区试验结果。由于不同地貌单元古土壤层数不同,根据古土壤层的数量多少,将其按照无古土壤、单层古土壤、双层古土壤及多层古土壤进行自重湿陷量的统计。其中地层相似的场地都展现出了类似的规律,在此选择典型场地进行描述,结果如图 5 所示。图 5 涵盖了多个地区,从左至右分别为无古土壤层、单层古土壤、双层古土壤和多层古土壤下湿陷量计算值和实测值随深度的变化趋势,图的底部为场地的地层情况。从图中不难看出,实测曲线和计算曲线的差异随着地层中古土壤的出现而开始显现,且该差异随着古土壤层的增多而逐渐增加。从图 5(a)中可明显看出在没有古土壤层的情况下,实测湿陷量和计算湿陷量之间的差异相对较小,两者趋势较为接近。而图 5(b)反映了单层古土壤时场地现场浸水试验及计算自重湿陷量,此

类型计算湿陷量大于现场试验实测湿陷量。两条曲线在古土壤层出现之前趋势基本一致,在古土壤层顶部,实测曲线出现一个明显的拐点。该点后,古土壤层与其下部地层几乎无湿陷量,而在计算曲线中却有一定的湿陷量。图 5(c)反映了多

层大厚度古土壤存在时场地现场浸水试验及计算自重湿陷量,地层中多层古土壤与黄土互层,此类型计算湿陷量大于现场浸水试验实测湿陷量,现场浸水试验实测湿陷量数值接近于 0,即非自重湿陷。

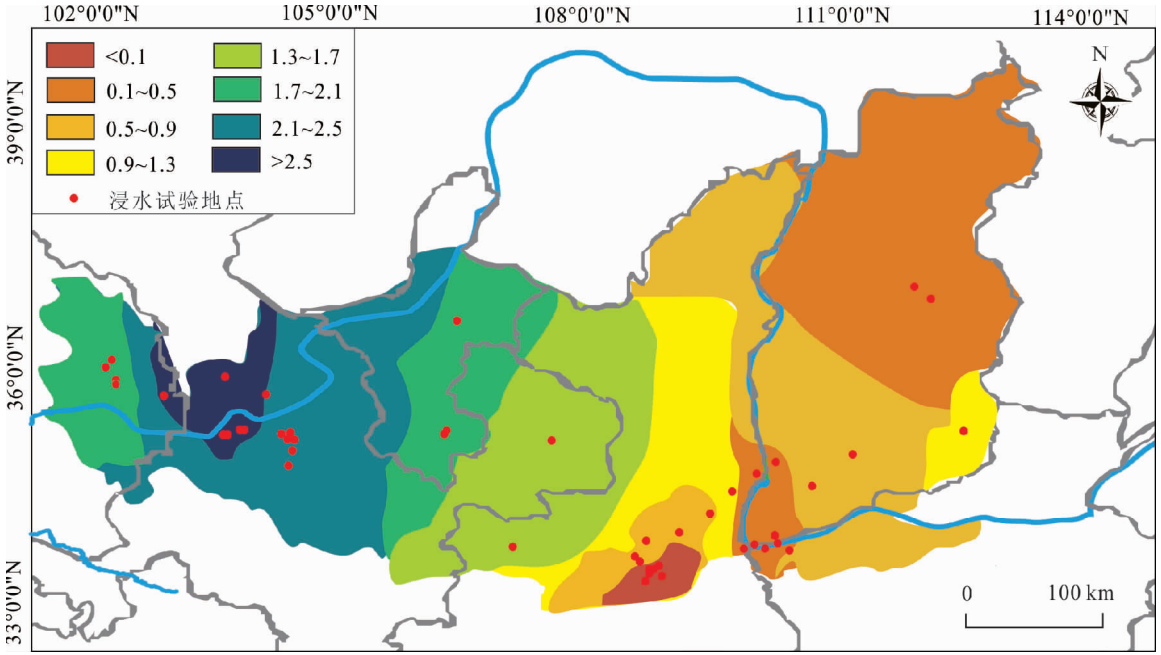


图 4 不同地区黄土实测与计算比值分布图

Fig. 4 Distribution map of measured and calculated ratios of loess in different areas

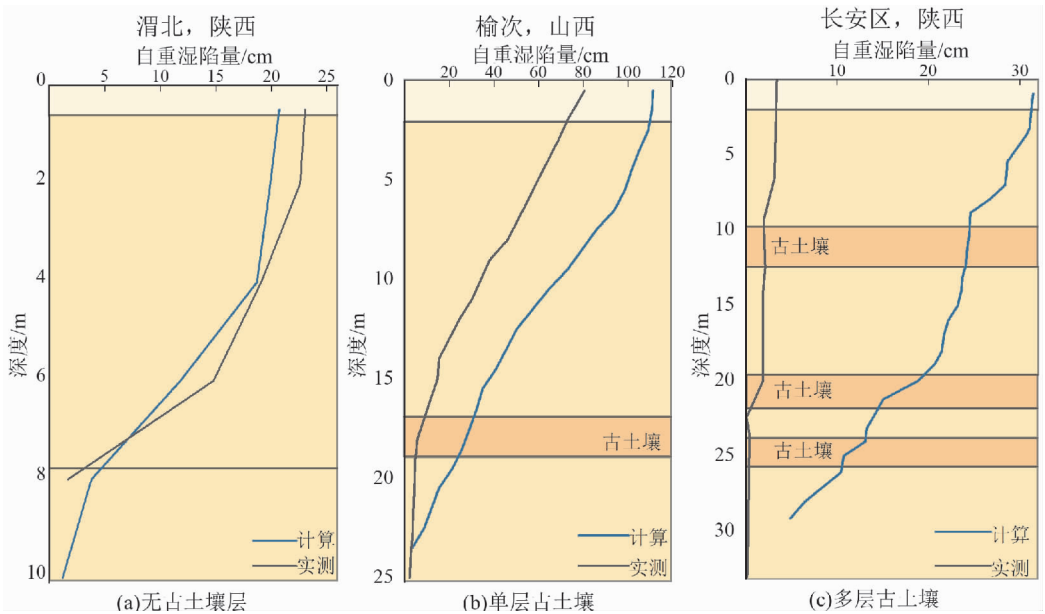


图 5 不同古土壤层室内外自重湿陷量对比图

Fig. 5 Comparison chart of indoor and outdoor self-weight collapsible volumes in different ancient soil layers

2.2 试验结果

2.2.1 试验中地层水分变化

图 6 展示了不同试验点的土层垂直渗透系数

以及浸水前后含水率随深度的变化关系。其中试验点 1 无注水孔,在这个试验点中,古土壤层的垂直渗透系数小于上部地层,而且古土壤层、中部和

下部的地层土壤渗透系数一直在减小。由于古土壤层与黄土地层的交界处的垂直渗透系数较小,导致该界面处的含水量增幅更大。在该试验点中,0~23 m 深度范围内的土体含水率在浸水前为 17.01%~23.03%,在长时间大面积浸水后,土体含水率增加了 3.97%~12.38%。最大的变化出现在 0.5~11.0 m 深度范围内,增长了 7.62%~13.02%。古土壤层及下部过渡段的土体含水率增幅较小,增长了 3.97%~8.39%。这表明在没有渗水孔的情况下,土壤的自重湿陷性

在地层中的不同深度存在显著差异。对于有多个注水孔的试验点 2 中,渗水孔的存在使得水分能够更容易地进入地层深部,从而导致了更大范围内的土体含水率变化。土体含水率在浸水前为 14.50%~26.60%,在浸水后增加了 2.13%~15.29%。古土壤层的土体含水率变化仍相对较小,其他地层的含水率变化相对一致。说明渗水孔的存在可以改变水分的渗透路径,导致更广泛的土体含水率变化,尤其是在地层深部。

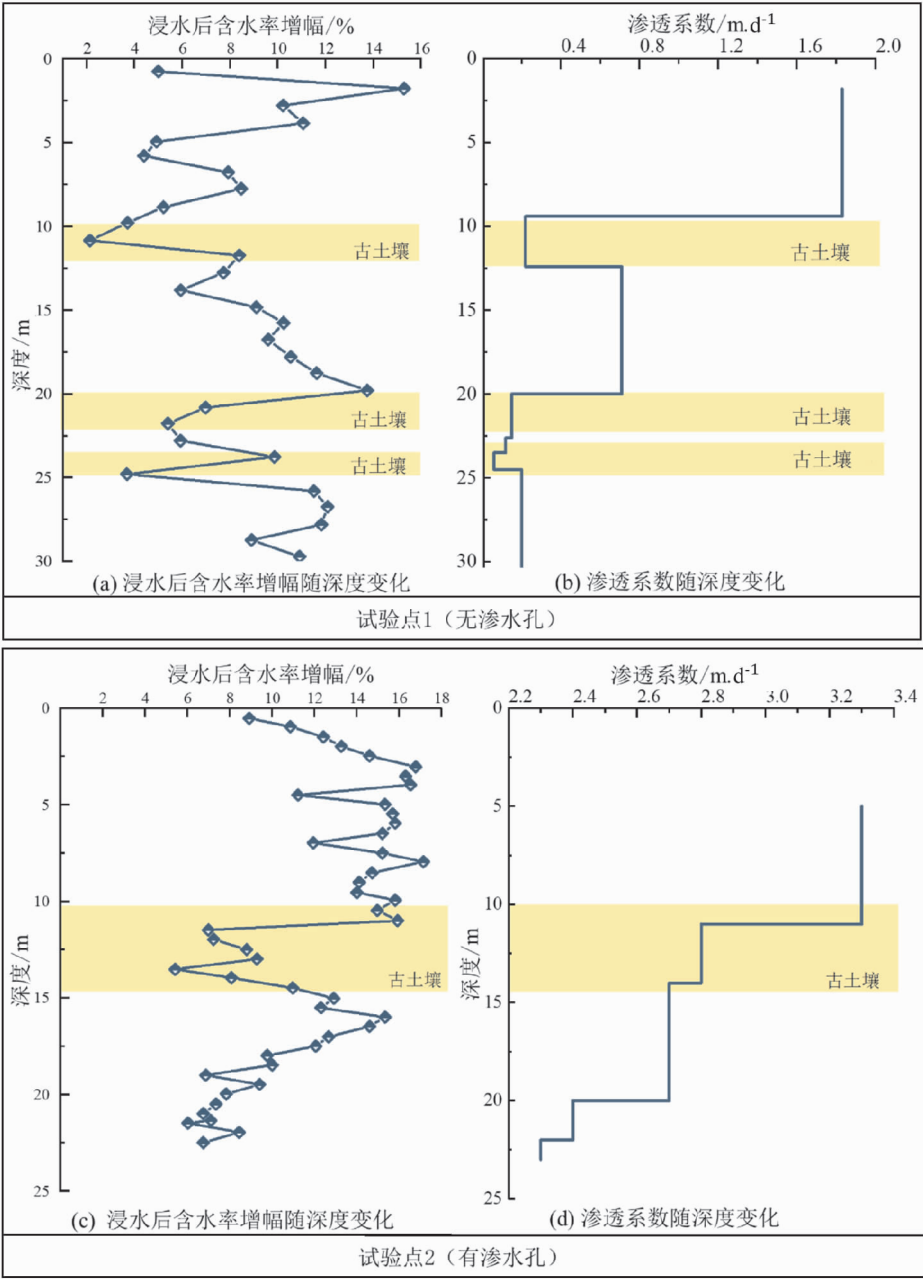


图 6 不同深度地层渗透系数、含水率变化图

Fig. 6 Permeability coefficient and moisture content variation diagram for different depths of geological strata

2.2.2 试验中地层土压力变化结果

将浸水试验中监测的不同深度、不同地层土压力进行统计分析,得到了土压力的传递关系,详见图 7。坐标轴原点为不同深度的初始土压力,以便分析土压力变化规律。其中,试验点 1 地层中含单层古土壤[见图 7(a)],可以看到古土壤上部土层的土压力随着注水量的增加而逐渐增加,这表明上部土层受到了湿陷的显著影响,可能导致地面沉降以及地面裂缝的形成。而古土壤中土压力出现了轻微的局部增加,但之后趋于稳定,这表明古土壤层只发生了微小的形变,并在湿陷过程中承担了支撑作用,限制了湿陷向下传递的程度。下部老黄土地层的土压力几乎保持不变,这表明下部地层的湿陷变形相对较小,这可能是由于上部土层和古土壤层的支撑作用。土压力变

化特征与实测湿陷土层深度吻合。

试验点 2 含多层古土壤[见图 7(b)],土压力随着深度及注水量的增大而增大,第 1 层古土壤由于上覆土体及注水量的增加,其结构破坏,其土压力随着注水量的变化而变化,下覆 Q_2 黄土地层也呈现类似的规律,但第 2 层古土壤处土压力随注水量的增大出现了很小的局部增大后逐渐保持不变,说明古土壤层仅以微小的形变起作用。下覆 Q_2 黄土地层土压力随着注水量的增大出现先增后减的变化,但是此变化幅度不大,说明此过程是由于上部水体的下渗以及上部地层的变形所导致,停止注水后, Q_2 黄土湿陷过程结束,土压力保持不变,上部古土壤的土压力逐渐减小,呈现“卸荷回弹”趋势。

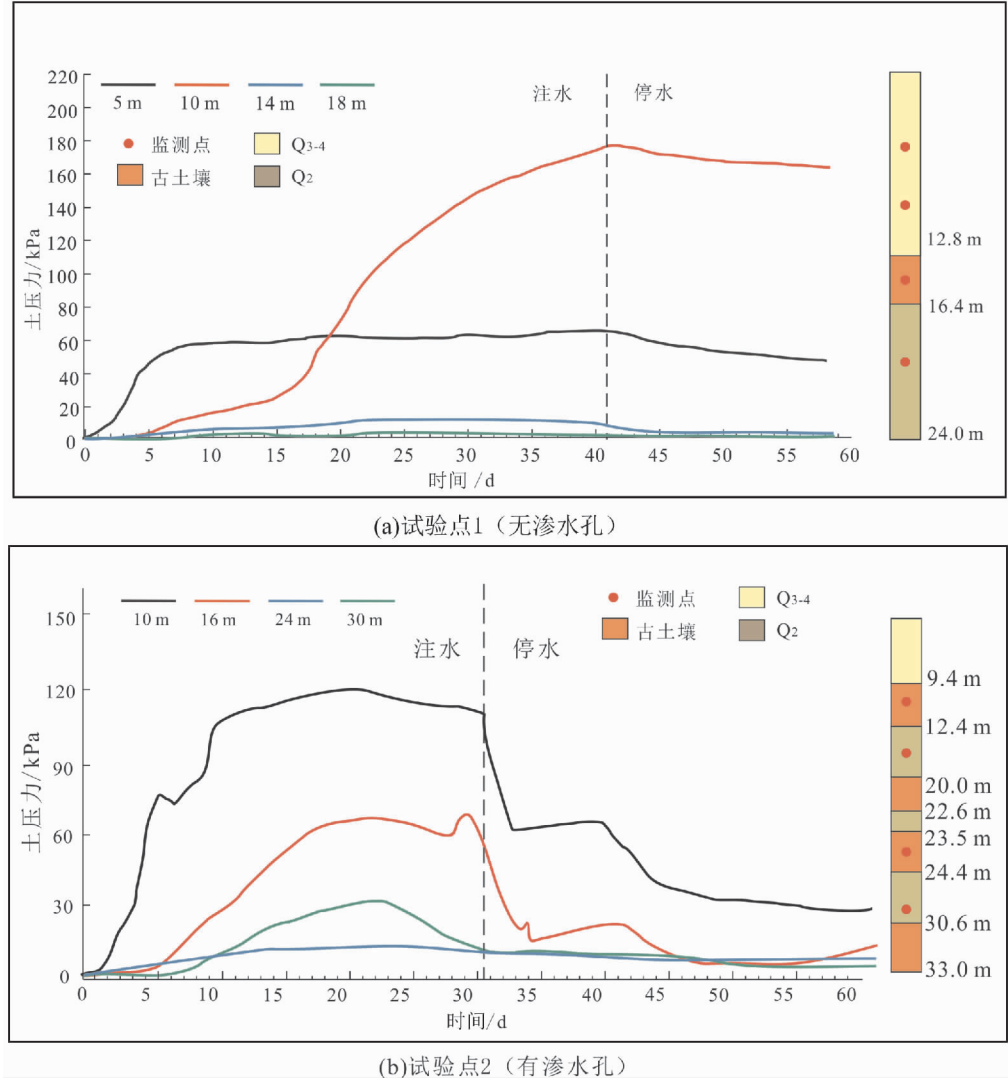


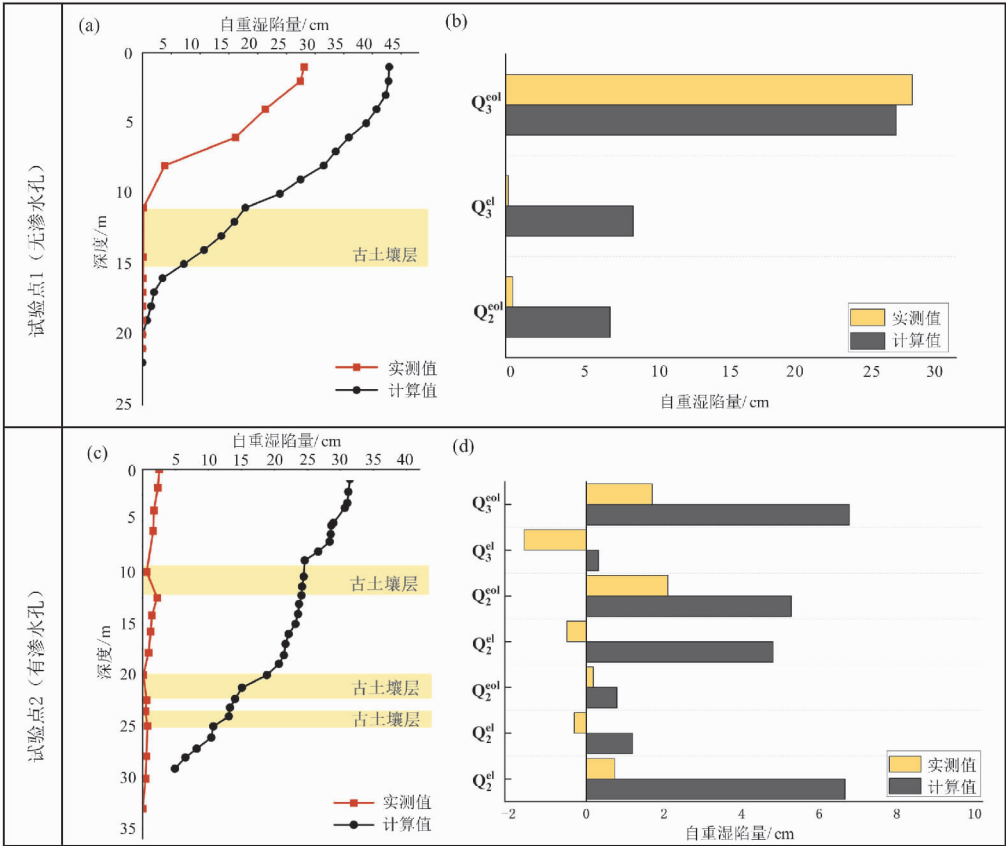
图 7 地层土压力变化统计图

Fig. 7 Stratigraphic soil pressure variation statistics chart

2.2.3 试验中古土壤层影响下的沉降结果

两试验点实测的累计自重湿陷量及分层自重湿陷量的结果如图 8 所示。其中,图 8(a)和图 8(b)为试验点 1 现场实测和室内试验得到的自重湿陷量实测值和计算值,图 8(c)和图 8(d)为分层自重湿陷量实测值与计算值对比图。其中未设置渗水孔的试验点 1,在 11.5 ~ 15.2 m 有单层古土壤,从图中可看出,现场实测曲线自重湿陷主要发生在 11 m 以上的 Q_3 黄土中,古土壤及其下部地层基本上没有发生自重湿陷,这也是实测值和计算值差异之处。因此,可以认为在未布设渗水孔加速入渗时,古土壤起到了一定的隔水作用,阻止了水分的继续下渗,使古土壤层及下卧黄土未

产生湿陷,使得实测值与计算值不相符。而设置了多个渗水孔的试验点 2,在 10 ~ 12.4 m、20.2 ~ 22.6 m、23.5 ~ 25.2 m 处都有古土壤层分布。从图中可得,在这种古土壤与黄土交替分布的地层中,实测值与计算值差异巨大,现场实测曲线几乎无自重湿陷,而计算曲线却有 31.4 cm 的湿陷量。除此之外,在现场实测曲线中上部土层的湿陷量并不等于下部土层湿陷沉降量之和,主要体现在实测曲线经过古土壤层时会减小,导致古土壤层湿陷量出现负值。也就是说,由于古土壤强度较大并未出现湿陷变形,或者变形量比较小,所以未把下层的湿陷量传递到上部地层。



注: (a)(b)分别为实测与计算自重湿陷量随深度变化及分层对比图(无渗水孔); (c)(d)分别为实测与计算自重湿陷量随深度变化及分层对比图(有渗水孔)。

图 8 自重湿陷量随深度变化及分层沉降量统计图

Fig. 8 Self-weight collapsible volume variation with depth and layered settlement statistics chart

2.3 机理分析

通过上述试验结果可以认为在古土壤层不存在的情况下,上部浸水试验通过连续注水使下覆地层逐渐饱和。地层在土压力和后续注水作用下发生弯曲变形。由于上部土、水压力大于下伏地层的支撑力,使地层呈条状沉降。另外,作用在上

部地层单元上的重力和压力分量超过了土的抗拉强度,导致地面裂缝的形成[见图 9(a)]。

当地层中存在古土壤层,但没有有利的通道时,水从顶部向下渗入地层。上层地层经历下沉,然后下沉传递到下伏的古土壤层的顶部。虽然古土壤层具有一定的隔水作用,但水在一定程度上

继续向下渗透。在这一过程中,下层在土壤的力和水的作用下会不断塌陷,但塌陷的量相对较小。同时,古土壤在不同的水土压力作用下发生轻微的变形,阻碍了力的向下传递。其结果是,古土壤层以上的黄土完全饱和塌陷,而其以下的黄土没有完全饱和沉降。这一现象解释了为什么在某些浸水试验中,实测曲线在古土壤层上方出现拐点〔见图 9(b)〕。

当地层中存在优势时,水可以通过渗流孔迅速渗透到整个地层中,并在地层中分散。这些水通过这些通道从上到下、从下到上、从内到外水平地垂直传播。上层黄土以〔见图 9(a)〕所示的方式沉降到古土壤层上部。由于古土壤渗透性低,

强度高,在上部土压力和水压力的作用下,古土壤层只发生轻微的变形。它起到支撑层的作用,有效地防止了力继续向下传递。当存在多层古土壤时,其性能更佳。同时,下部地层在水的作用下开始塌陷变形,上部古土壤因变形与下部黄土层接触,使其在一定时间内具有相等的土压力。下黄土沉降结束后,上层古土壤仍保持原有的变形,但不能继续与下黄土接触。两者保持一定的土压力,造成地层之间的空洞。因此,下黄土层产生的塌陷量不能通过古土壤层传递到地表,导致上层不能完全产生等于下黄土层塌陷量之和的塌陷变形。这也解释了地层中存在多层古土壤时,实测湿陷性远小于计算值的现象〔见图 9(c)〕。

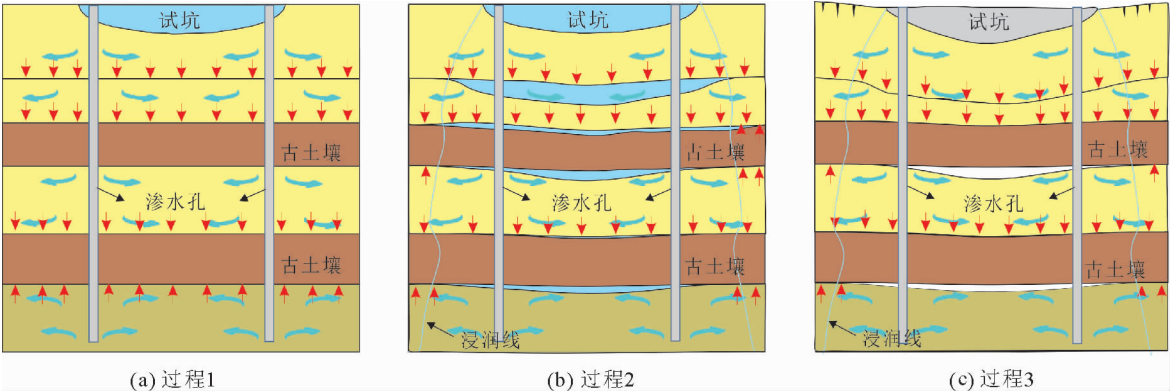


图 9 古土壤地层湿陷模式图

Fig. 9 Collapsible soil strata model diagram

由于浸水试验时古土壤下部有时会产生一定程度的空腔,这种空腔正是造成室内外湿陷量差异的原因。为研究这种空腔的成因,在此我们先设置一定的力学模型,如图 10 所示,我们先假设存在一定长度的古土壤(力学中代表简支梁),抗弯刚度为 EI (公式中以 E_{EI} 来表示),两端受到下部地层反力作用于 A 、 B 两处,古土壤与下覆地层之间产生的湿陷区最大高度为 H 。

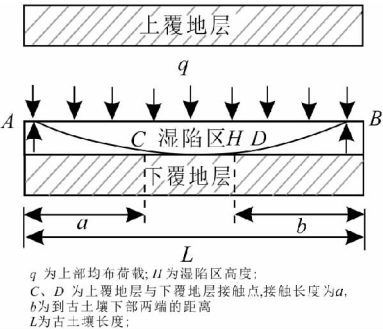


图 10 古土壤下覆空腔区空间力学计算模型图

Fig. 10 Spatial mechanics calculation model of the overlying cavity of paleosol

假设土体单元受上部的均布载荷 q 作用时,中点的挠度(沉降量)最大且为

$$W_{0max} = \frac{5qL^4}{384E_{EI}} \tag{1}$$

当 $H \geq \frac{5qL^4}{384E_{EI}}$ 也即载荷 $q \leq \frac{384E_{EI}H}{5L^4}$ 时,古土壤最多只有中点与下部地层接触,此时古土壤与下部地层的接触长度为 0,而古土壤下部两端地层提供的反力为 $R_A = R_B = qL/2$ 。

当 $< \frac{5qL^4}{384E_{EI}}$ 也即载荷 $q > \frac{384E_{EI}H}{5L^4}$ 时,古土壤将有一段与下部地层接触,假设接触点为 C 、 D 点,接触长度为 a ,根据对称性可知 C 、 D 对称,其到古土壤下部两端的距离均为 b 。由于 AC 段受均布荷载并且两端受集中力作用,且有条件

$$M_C = 0, W_A = H(\text{向上}) \tag{2}$$

同时,由 $M_C = \frac{qb^2}{2} - R_A b = 0$,得 $R_A = \frac{qb}{2}$ 。

自由端的挠度可由叠加法得

W_A = \frac{R_A b^3}{3EI} - \frac{qb^4}{8E_{EI}} = Hb = \sqrt[4]{\frac{24E_{EI}H}{q}} \tag{3}

于是,古土壤与下部地层接触长度为

a = L - 2b = L - 2\sqrt[4]{\frac{24E_{EI}H}{q}} \tag{4}

古土壤两端提供的反力为

R_A = R_B = \frac{qb}{2} = \frac{1}{2}\sqrt[4]{24E_{EI}Hq^3} = \sqrt[4]{\frac{3E_{EI}Hq^3}{2}} \tag{5}

从图 5 土压力变化曲线我们可知,古土壤层所受土压力呈现先增后减的规律,

1) 若 $q_{max} \leq \frac{384E_{EI}H_{min}}{5L^4}$,即存在空腔,将致使室内计算与现场实测湿陷量误差很大,此时若利用室内试验结果对场地湿陷类别进行修正,则结果极其不准确甚至出现相反的结果。

2) 若 $q_{min} > \frac{384E_{EI}H_{max}}{5L^4}$,即不存在空腔,将致使室内计算与现场实测湿陷量有一定的差别,此时若利用室内试验结果对场地湿陷类别进行修正,则结果有一定误差。

2.4 公式修正

由于古土壤作用导致室内计算沉降量和现场实测沉降量之间存有差异,在考虑到古土壤的形变以及下覆地层空腔现象的发生,笔者认为若利用室内湿陷试验结果进行场地的判别时,应该将古土壤层单独考虑,即无古土壤层时的修正方法和有古土壤层时的修正方法。

无古土壤层时的修正方法为

\Delta_{zs} = \beta_0 \sum_{i=1}^n \delta_{zsi} h_i \tag{6}

式中: δ_{zsi} 为第 i 层土的自重湿陷系数; h_i 为第 i 层土的厚度(mm); β_0 为因地区土质而异的修正系数,具体取值详见规范。

有古土壤层时的修正方法为

\Delta_{zs} = \beta_0 \sum_{i=1}^n \delta_{zsi} h_1 + \beta'_0 \sum_{j=1}^n \delta_{zsj} h_j + \beta''_0 \sum_{k=1}^n \delta_{zsk} h_k \tag{7}

式中: δ_{zsi} 为第一层湿陷黄土层的自重湿陷系数; δ_{zsj} 为第 j 层古土壤层的自重湿陷系数; δ_{zsk} 为除第 1 层之外的第 k 层黄土层的自重湿陷系数; h_1 为第 1 层湿陷黄土层的厚度(mm); h_j 第 j 层古土壤的厚度(mm); h_k 为除第 1 层之外的第 k 层黄土层的

厚度(mm); β_0 为因地区土质而异的修正系数(第 1 层湿陷黄土层); β'_0 为因地区土质而异的修正系数(古土壤层), $\beta'_0 \in [0.07, 1.01]$; β''_0 为因地区土质而异的修正系数(除第 1 层湿陷黄土层外的第 k 层黄土层), $\beta''_0 \in [0.01, 0.54]$ 。

2.4.1 工程实例验证

在所有的浸水试验场地中,对于用古土壤层的多少来区分岩桥,其仅有单岩桥和多岩桥,在对场地进行修正时,根据上述修正公式,对该类型的场地室内试验结果中各地层的土体进行修正。从表 1 可以看出,古土壤的湿陷量非常小,最终湿陷量的大小取决于第 1 层黄土的湿陷量。利用此方法进行修正,试验判定结果的准确性相比未修正或整体修正结果准确度较高,故此证明其应用于工程当中是可行的。

表 1 工程实例修正统计

Tab. 1 Engineering case revision statistics

工程名称 (地层类型)	试验方法	地层湿陷量/mm		场地 判别	结果 准确性
		黄土	古土壤		
西安财经 学院新校 区工程 (多层古土壤)	实测	20.0		非自重	修正后 与实测 结果 一致
	室内	302	127.5	自重	
	修正后	42.2	14.1	非自重	
西安市地 铁二号线 二期工程 (多层古土壤)	实测	26.3		非自重	修正后 与实测 结果 一致
	室内	168.0	23.0	自重	
	修正后	64.6	2.5	非自重	
西安市地 铁六号线 二期工程 (单层古土壤)	实测	283.0		自重	修正后 与实测 结果 一致
	室内	301.0	159.0	自重	
	修正后	260.0	17.0	自重	

3 结论

通过对不同场区浸水试验结果的以及现场大型浸水试验中监测结果的分析主要得到以下结论。

1) 黄土高原西北部的宁夏、甘肃等地实测自重湿陷量大于计算值,而黄土高原东南部的关中地区及其他地区实测值小于计算值。在陕西一些地区,出现了实测值远小于计算值的情况,地层中古土壤层的存在或许是该现象出现的诱因。

2) 古土壤层垂直渗透性低,在浸水阶段往往阻止水分继续下渗,水分一定程度上水平扩散,使

得古土壤与黄土交界往往形成富水带,使得湿陷主要发生在古土壤上覆黄土层中,因而实测湿陷量曲线的拐点往往出现于古土壤与黄土交界处。

3) 优势通道的存在改变水分扩散方式,水分从上下往中间扩散,而古土壤层的存在阻碍湿陷进程,无法将下部黄土的湿陷量传递至地表,降低了对场地湿陷类别的判定准确度。

4) 浸水试验时,古土壤与下覆地层之间有空腔的存在,力学模型给出了此空腔存在的条件,即空腔的大小与上部荷载和湿陷区的高度有关。最终考虑到工程应用,完善了现行规范中未考虑古土壤层的不足,并将其进行了验证,验证结果进一步证实此方法可以有效的减小因古土壤作用而产生的误差。

该研究成果能完善以前针对现场浸水试验古土壤作用机制的解释,扩充该领域的理论成果。

参考文献

- [1] LIN Z G, LIANG W M. Distribution and engineering properties of loess and loesslike soils in China. Schematic map of engineering geological zoning[J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, 1980, 21(1): 112-117.
- [2] PYE K. Preface[M]//Aeolian dust and dust deposits. Amsterdam: Elsevier, 1987.
- [3] DERBYSHIRE E. Geological hazards in loess terrain, with particular reference to the loess regions of China[J]. Earth-Science Reviews, 2001, 54, 12(1/2/3): 231-260.
- [4] LUTENEGGER A J. Stability of loess in light of the inactive particle theory[J]. Nature, 1981, 291(5813): 291-360.
- [5] 刘祖典, 张伯平. 关于黄土和黄土状土湿陷性评价问题[J]. 岩土工程学报, 1980(4): 23-33.
LIU Z D, ZHANG B P. Regarding the issues of loess and the evaluation of loess-like collapsibility[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1980(4): 23-33.
- [6] PENG J B, FAN Z J, WU D, et al. Heavy rainfall triggered loess-mudstone landslide and subsequent debris flow in Tianshui, China[J]. Engineering Geology, 2015, 186: 79-90.
- [7] 黄雪峰, 张广平, 姚志华, 等. 大厚度自重湿陷性黄土湿陷变形特性水分入渗规律及地基处理方法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 100-108.
- HUANG X F, ZHANG G P, YAO Z H. Research on deformation, permeability regularity and foundation treatment method of dead-weight collapse loess with heavy section[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 100-108.
- [8] WANG L Q, SHAO S J, SHE F T. A new method for evaluating loess collapsibility and its application[J]. Engineering Geology, 2020, 264: 105376.
- [9] 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 Y C, JIN S L, ZHAO W Q, et al. New experimental method for loess collapsibility using centrifugal model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(3): 389-398.
- [10] 米文静, 张爱军, 刘争宏, 等. 黄土自重湿陷变形的多层离心模型试验方法[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(4): 678-687.
MI W J, ZHANG A J, LIU Z H. Multi-stratigraphic centrifugal model test method for determination of self-weight collapsible deformation of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(4): 678-687.
- [11] 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 S J, LI J, LI G L. Evaluation method for self-weight collapsible deformation of large thickness loess foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 965-978.
- [12] HELLER F, TUNGSHENG L. Magnetism of Chinese loess deposits[J]. Geophysical Journal International, 1984, 77(1): 125-141.
- [13] 雷祥义. 黄土高原南部晚更新世黄土地层划分、显微结构及力学性质特征[J]. 第四纪研究, 1992, 12(2): 128-135, 194.
LEI X Y. Microstructure and mechanical properties of late pleistocene loess in the southern part of the loess plateau. [J]. Quaternary Research, 1992, 12(2): 128-135, 194.
- [14] PENG X L, FAN W, SUN C, et al. Physical and mechanical properties of interface transition zone between loess and paleosol[J]. Annales de Chimie Science des Matériaux, 2018, 42(4): 521-531.
- [15] 张奇莹, 徐盼盼, 钱会. 泾阳原状黄土-古土壤序列抗剪强度各向异性及其机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(11): 2365-2376.
ZHANG Q Y, XU P P, QIAN H. Study on shear

- strength anisotropy of undisturbed loess-paleosol sequence in Jing-yang county [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38: 2365-2376.
- [16] 李大展,何颐华,隋国秀. Q_2 黄土大面积浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(2): 1-11.
LI D Z, HE Y H, SUI G X. Q_2 Study and test on immersion of Q_2 loess in large area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(2): 1-11.
- [17] 赵金刚,吕远强,晁军,等. 典型黄土-古土壤系列浸水渗透及湿陷变形规律[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(3): 152-159, 168.
ZHAO J G, LYU Y Q, ZHAO J, et al. The law of soaking infiltration and collapse deformation in typical-loess-paleosol series [J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(3): 152-159, 168.
- [18] 张宗祜. 我国黄土高原区域地质地貌特征及现代侵蚀作用[J]. 地质学报, 1981, 55(4): 308-320, 326.
ZHANG Z G, Regional geological and morphological characteristics and development of soil erosion in the loess plateau, China[J]. Acta Geologica Sinica, 1981, 55(4): 308-320, 326.
- [19] 程方方,张吉宏,董忠级. 某自重湿陷性黄土地场试坑浸水试验研究[J]. 勘察科学技术, 2016(1): 40-43.
CHENG F F, ZHANG J H, DONG Z J. Study on immersion test in test pit of a self weight collapse loess site. [J]. Exploration Science and Technology 2016 (1): 40-43.
- [20] 丁文士. 现场实测黄土自重湿陷量与室内试验湿陷量的相关分析[J]. 工程勘察, 1981, 9(4): 19-20.
DENG W S. Correlation analysis between the field measured collapsibility of loess and the laboratory test collapsibility [J]. Engineering Site Investigation, 1981, 9(4): 19-20.
- [21] 黄雪峰,陈正汉,哈双,等. 大厚度自重湿陷性黄土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 X F, CHEN Z H, HA S. 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.
- [22] 吕玉芳,孙伟,曹郁文,等. 自重湿陷性黄土层预浸水处理的现场试验与设计[J]. 水利与建筑工程学报, 1991(2): 17-25.
LYU Y F, SUN W, CAO Y W. Field test and design of pre-immersion treatment of self-weight collapsible loess [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 1991(2): 17-25.
- [23] 罗晓锋,王艳艳,崔光辉. 大厚度湿陷性黄土路基浸水试验与沉降变形研究[J]. 兰州交通大学学报, 2014, 33(1): 124-130.
LUO X F, WANG Y Y, CUI G H. Study on immersion test and settlement deformation of large thickness collapsible loess subgrade [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2014, 33(1): 124-130.
- [24] 罗宇生. 湿陷性黄土地基评价[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 90-94.
LUO Y S. Wetland loess ground foundation evaluation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(4): 90-94.
- [25] 苏忍,张恒睿,张稳军,等. 兰州地铁大厚度湿陷性黄土地层的现场浸水试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 186-193.
SU R, ZHANG H R, ZHANG W J. Immersion tests on self-weight collapsible loess site with large depth of Lanzhou metro line [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S1): 186-193.
- [26] 王治军,潘俊义,马闫,等. 董志塬大厚度自重湿陷性黄土地场浸水试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 75-82.
WANG Z J, PAN J Y, MA Y. Immersion test on the self-weight collapsible loess in the Dongzhiyuan Area. [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(2): 75-82.
- [27] 姚志华,黄雪峰,陈正汉,等. 兰州地区大厚度自重湿陷性黄土地场浸水试验综合观测研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 65-74.
YAO Z H, HUANG X F, CHEN Z H. Comprehensive soaking tests on self-weight collapse loess with heavy section in Lanzhou Region. [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 65-74.

(编辑 邵煜)