

DOI: 10.11779/CJGE20240063

## 西安市區黃土濕陷特性研究

康 佐<sup>1</sup>, 兮佳伟<sup>2</sup>, 邓国华<sup>\*2,3</sup>, 郑建国<sup>4</sup>, 王丽琴<sup>2</sup>, 高虎艳<sup>1</sup>

(1. 西安市轨道交通集团有限公司, 陕西 西安 710018; 2. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 3. 西安黄土地下工程技术咨询有限公司,  
陕西 西安 710000; 4. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043)

**摘要:** 基于西安市轨道交通工程建设过程中开展的 12 组黄土大型试坑浸水试验和室内湿陷试验, 系统研究了西安市區黃土的湿陷特征。研究表明: ①西安市區范围内, 各地貌单元的湿陷性由强到弱依次为渭北黄土塬>浐河三级阶地>塬前洪积台塬>黃土梁洼>少陵塬(杜陵塬、神禾塬)、渭河三级阶地。自重湿陷性黄土地占试验场地总数的 50%, 自重湿陷最大下限深度 20 m; 市区南部黄土塬均为非自重场地, 与以往室内试验认识不同; ②自重湿陷变形主要发生在 Q<sub>3</sub> 黄土地层中, 现场试验实测得到自重湿陷底界多位于 Q<sub>3</sub> 古土壤层, 仅 2 组试验中的 Q<sub>2</sub> 黄土表现出弱湿陷性。现行规范中提供的关中地区统一的修正系数高估了 Q<sub>2</sub> 黄土的湿陷量。③区分地貌单元和地层沉积时代, 给出了修正系数建议值; ④浸水湿陷的平面影响范围与自重湿陷深度和湿陷量相关, 一般不超过 1 倍的试坑半径和 1 倍的实测自重湿陷深度, 可作为工程周边浸水设防边界; ⑤黃土湿陷变形发展过程主要包括快速下沉、缓慢下沉、下沉稳定、停水后快速下沉和停水后下沉稳定 5 个阶段。实测自重湿陷量越大, 下沉阶段单日沉降速率越大。停水后固结沉降量最大可达 95.1 mm。

**关键词:** 黄土; 自重湿陷变形特征; 浸水试验; 变形修正系数; 地貌类型; 沉积时代

**中图分类号:** TU411      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2025)05-0914-12

**作者简介:** 康 佐(1978—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事黄土力学及地铁工程等方面的研究工作。E-mail: akhebi@163.com。

## Self-weight collapsible characteristics of loess in Xi'an urban area

KANG Zuo<sup>1</sup>, KANG Jiawei<sup>2</sup>, DENG Guohua<sup>2,3</sup>, ZHENG Jianguo<sup>4</sup>, WANG Liqin<sup>2</sup>, GAO Huyan<sup>1</sup>

(1. Xi'an Rail Transit Group Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Xi'an Loess

Underground Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Xi'an 710000, China; 4. China Jikan Research Institute of Engineering

Investigations and Design Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

**Abstract:** Based on the results of 12 large test pit immersion tests of loess and indoor collapsibility tests conducted during the construction process of Xi'an Rail Transit project, the self-weight collapsible deformation characteristics of loess in Xi'an urban area are systematically studied. The results show that: (1) Within the urban area of Xi'an, the collapse of each landform unit, from strong to weak, is in the following order: Weibei Loess Plateau>Chanhe Tertiary Terrace>pluvial tableland>loess ridge and depressiona>Shaoling Plateau (Duling Plateau, Shenhe Plateau), and Weihe Tertiary Terrace. The self-weight collapsible loess site accounts for 50% of the total number of test sites, and the maximum depth of the self-weight collapsible bottom limit is 20 m. The loess plateau in the southern part of the city is a non self-weight collapsible site. (2) The deformation of the self-weight collapse occurs mainly in the Q<sub>3</sub> loess layer. Based on the immersion tests, the bottom boundary of self-weight collapse is mostly located in the Q<sub>3</sub> ancient soil layer. Only Q<sub>2</sub> losses in two sets of tests exhibit weak collapse. The uniform correction coefficient provided in the current regulations for the Guanzhong region overestimates the collapsibility of Q<sub>2</sub> losses. (3) Distinguishing between geomorphic units and sedimentary ages of strata, the recommended values for the self-weight collapsible deformation correction coefficients of loess in Xi'an urban area are provided. (4) The measured area of settlement diffusion due to loess immersion and collapse is typically related to the depth and amount of self-weight collapse. It usually does not exceed 1.0 times the radius of the test pit and 1 times the measured collapsible limit depth. This can serve as a boundary for water accumulation around the project. (5) The development process of collapsible deformation of loess mainly

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52178355); 陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2022JM-216)

收稿日期: 2024-01-19

\*通信作者(E-mail: gh\_deng@163.com)

includes five stages: rapid deformation, slow deformation, stable deformation, rapid deformation after water interruption, and stable deformation after water interruption. The larger the measured self-weight collapses, the greater the daily settlement rate during the sinking phase. The maximum consolidation settlement after water interruption is 95.1 mm.

**Key words:** loess; self-weight collapse deformation characteristic; immersion test; deformation correction coefficient; landform type; depositional age

## 0 引言

湿陷性是黄土的基本特性, 正确认识和评价黄土的湿陷性是工程制定处理措施、保障建筑物地基稳定和长期运营安全的基础。

当前, 确定黄土湿陷性的方法主要有两种: 室内压缩试验和现场浸水试验<sup>[1]</sup>。受地层结构<sup>[2]</sup>、取样扰动、试验应力条件<sup>[3]</sup>、浸水条件<sup>[4]</sup>、颗粒组成<sup>[5]</sup>等因素的影响, 两种试验方法得出的结论往往存在差异, 有时甚至差异较大<sup>[6-7]</sup>。为此, 规范也给出了区域修正系数, 以提高室内试验湿陷量预测的准确性<sup>[1]</sup>。毫无疑问, 现场试坑浸水试验采用原位测定湿陷的方法, 回避了室内试验的缺点, 预测的结果更为准确, 得到了广大学者和工程技术人员的青睐。为适应工程建设的需要, 国内外学者开展了大量的现场浸水试坑试验<sup>[8-11]</sup>, 准确评价了黄土的湿陷特征, 研究了与室内试验的差异, 提出了更为合理、更加准确、更适应工程具体工况的评价方法<sup>[12-15]</sup>, 为工程安全和投资节约提供了支撑。

西安市地处关中地区, 是湿陷性黄土分布的主要地区之一, 其湿陷特征与地貌密切相关, 自重湿陷性黄土和非自重湿陷性黄土均有分布, 湿陷厚度一般小于35 m, 自地面起算地基湿陷等级多为II级~III级, 少部分区域可达IV级。西安城市轨道交通工程是西安市最大的工程建设项目, 黄土的湿陷性是其三大岩土工程问题之一。与工业与民用建筑相比, 城市轨道交通工程多为地下工程, 地基无附加荷载, 深层(一般大于15 m)黄土的自重湿陷特征与工程密切相关。自2012年以来, 建设者在轨道交通线网范围内开展了12组大型现场试坑浸水试验, 遍及西安市区主要的地貌单元和湿陷地层。本文结合项目组已开展的浸水试验, 系统分析西安市区黄土的自重湿陷特征, 为本地区工程建设提供依据。

## 1 浸水试验

西安城区范围内具备湿陷性的土层有: 全新统的黄土状土( $Q_4^{ml}$ )、上更新统新黄土( $Q_3^{eol}$ )、古土壤( $Q_3^{el}$ )及中更新统风积( $Q_2^{eol}$ )老黄土和古土壤。全新统的黄土状土( $Q_4^{ml}$ ), 其成因比较复杂, 一般厚度不大, 主要分布在区内各条河流一级阶地的表层及梁

洼坡脚地带; 上更新统新黄土( $Q_3^{eol}$ )主要分布在河流二、三级阶地、黄土梁洼、黄土塬和黄土台塬区的浅层; 中更新统风积( $Q_2^{eol}$ )老黄土主要分布在三级阶地、黄土塬及黄土台塬区。

### 1.1 试验基本情况

为真实获取黄土地层的自重湿陷变形特征, 准确判定场地湿陷类型、自重湿陷量和下限深度, 从而回答是否需要地基处理的问题, 西安地铁工程建设过程中, 选择西安城区黄土湿陷性强、厚度大的区域开展了12组大型现场试坑浸水试验, 包括东南郊8组、渭河以北2组、灞河以东2组, 地貌单元主要包括二、三级阶地、梁洼地貌、黄土塬等, 如图1, 2所示。

试验场地的选择在各条线初步勘察的基础上确定, 当初勘阶段自重湿陷量较大且湿陷下限深度超过地铁主体结构底板深度时, 则开展现场浸水试验。试验场地一般位于线路两侧100~500 m内的同一地貌单元。试验前对其地层结构、湿陷量进行室内试验对比, 确保场地具有代表性。试验场地平面分布见图1。

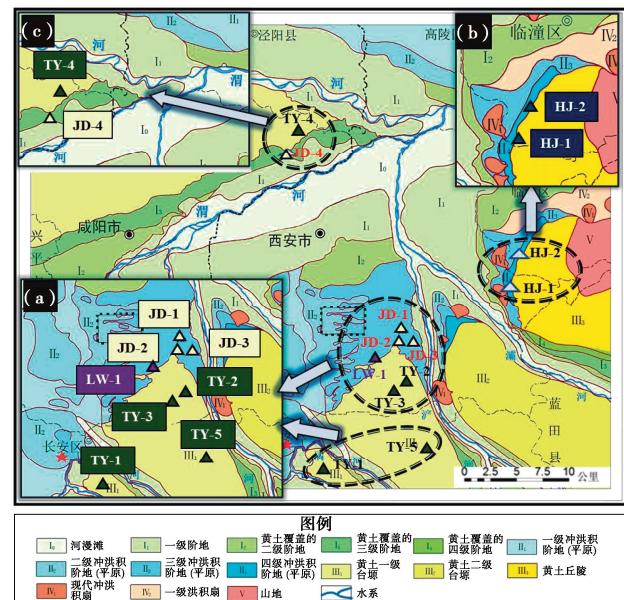


图1 西安地铁工程建设期间完成的试坑浸水试验平面分布图  
Fig. 1 Layout of large test pit immersion test site completed during construction of Xi'an metro project

为保证试坑底面以下全部湿陷性土层受水浸湿达到饱和, 充分反映场地自重湿陷特征, 试坑直径均大于各场地室内试验得到的自重湿陷变形底界, 一般在



图 2 浸水试验现场

Fig. 2 Photos of soaking test site

20~30 m 以内, 平均为 25 m。试坑开挖深度为 80 cm, 在坑底铺设一层厚度为 10 cm 的圆砾, 粒径为 1~3 cm。

为查明场地遇水湿陷所引起的分层变形特征和地表湿陷变形影响范围, 在试坑内外侧布置了一系列的深、浅变形标点(图 3(a))。其中, 浅标点变形测线沿试坑中心向坑边 3 个方向呈放射状布置, 平面监测范围约 1.0~2.0 倍试坑直径。观测标点采用  $\Phi 25$  mm 的镀锌管, 试坑外浅标点的标杆长 2.5 m, 试坑内浅标点的标杆长 3.0 m, 标杆上部固定一根钢卷尺, 作为沉降观测标尺, 底座为 300 mm  $\times$  300 mm 的正方形钢板, 厚 5 mm, 试坑内浅标点埋深为坑底以下 0.8 m, 试坑外浅标点埋深为地面以下 0.8 m。

深标点装置均布置在试坑内部, 最大埋置深度大于室内试验确定的自重湿陷下限深度。为保证地层分层变形测试结论可靠, 各测试深度均布设 2 组深标点, 其主要由内外管组成(图 3(e))。其中, 内管用于测量各层土的湿陷变形量, 采用镀锌钢管, 直接位于拟埋设的土层顶面; 内管长度为相应的钻孔深度再上延 2.5 m, 即内管出露地面 2.5 m。深标点外管采用 PVC 管, 地面出露 100 cm, 距孔底距离为 50 cm, 用于保

护内管, 当各土层产生自重湿陷时, 内管可以随着自由下沉而不受孔壁土层的影响。

为系统监测深层黄土的水分入渗状态, 在试坑内部特征深度处布置了一系列的水分计, 最大埋设深度不小于深标点测试深度。水分计选用长沙亿拓传感科技有限公司生产的 YT-DY-0100 型传感器。各组浸水试验开始前, 利用各场地的原状土样对进行水分计标定, 得到质量含水率和体积含水率之间的线性对应关系。水分计采用人工探井埋设方式, 在预定深度处将水分计插入土中, 确定水分计工作正常后, 利用预先筛好的素土进行回填并分层夯实, 保证浸水过程中, 不会由于钻孔内渗透速度的增大, 加快水分计的变化速率。

浸水期间, 保持水源稳定, 当最后 5 d 各测点最大变形量小于 1 mm/d 时, 停止注水。继续观测至稳定或停水后持续观测不少于 30 d, 终止试验。

## 1.2 试验成果

分析各组试验的试坑直径、地理位置、注水历时、地貌单元、自重湿陷量(室内及现场)、自重湿陷下限深度(室内及现场)和场地湿陷类型等测试成果, 如表 1 所示。

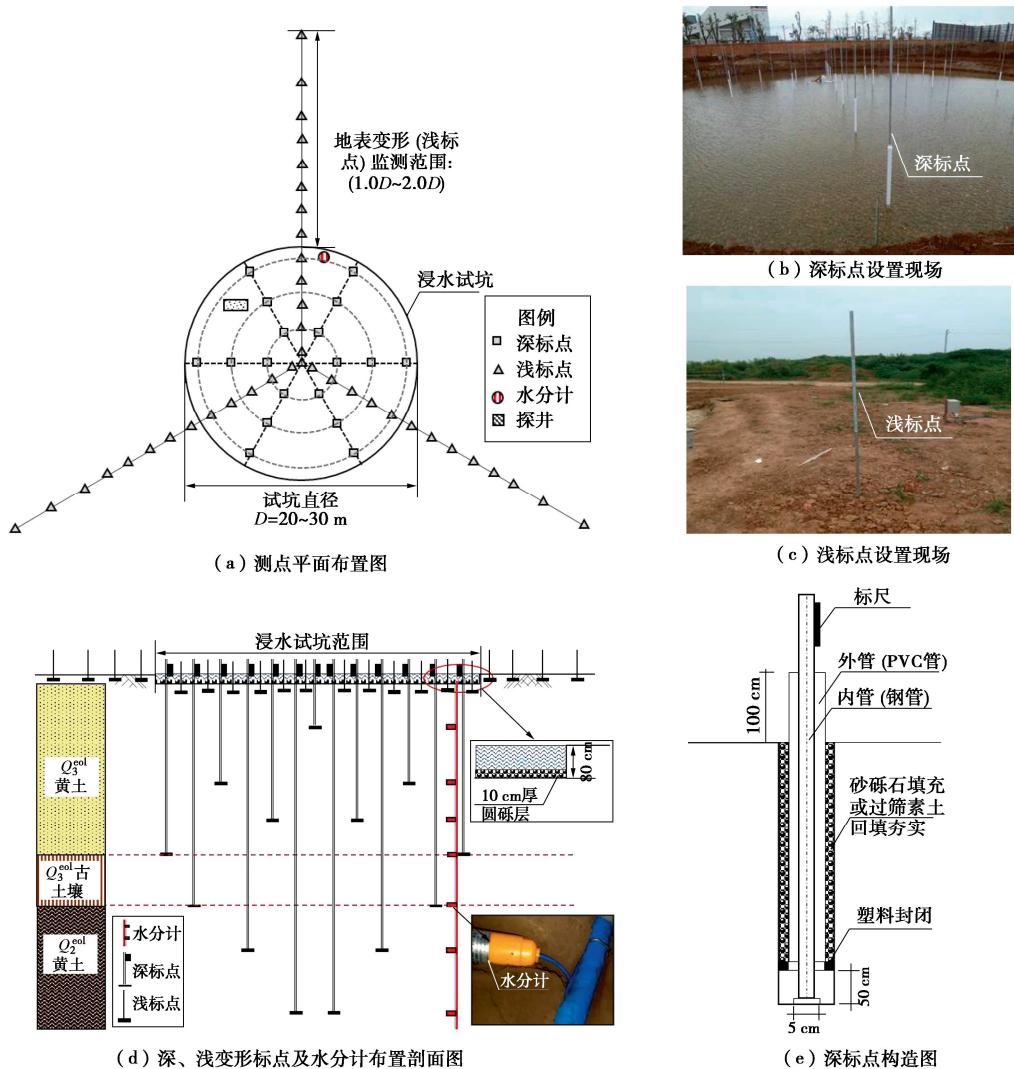


图3 试坑平面布置、观测点及探井位置示意图

Fig. 3 Arrangement of water pool, monitoring instruments and inspection wells

表1 西安地铁工程建设期间已完成的大型试坑浸水试验成果汇总表

Table 1 Summary of large test pit immersion test site completed during construction of Xi'an metro project

序号	场地编号	线路名称	试验场地位置	地貌类型	试坑直径/m	注水历时/d	自重湿陷量/mm		自重湿陷深度/m		湿陷类型*
							室内	实测	室内	实测	
1	JD-1	西安地铁6号线	华山铁道技师学院	咸宁路东段沿线的浐河三级阶地	20	42	334~426.9	285.4	18.5	11.3	自重
2	JD-2	西安地铁5号线	月登阁	长鸣路一月登阁段浐河三级阶地	26	51	461~617	208.7	27.5	20	自重
3	JD-3	西安地铁8号线	月幸路	等驾坡村—南三环段浐河三级阶地	30	43	360~447	92.8	29.5	12	自重
4	LW-1	西安地铁5号线	黄渠头村	黄土梁洼区	23	43	170~190	74.1	18.0~21.5	9.5	自重
5	TY-4	西安地铁14号线	布里村	渭河北黄土塬	25	48	209~410	380.5	20.5	10.6	自重
6	HJ-1	西安地铁9号线	田洪北街以东	灞河以东铜仁塬前洪积台塬	20	51	168.3	107.6	19	19	自重
7	HJ-2	西安地铁9号线	芷阳五路	灞河以东铜仁塬前洪积台塬	20	42	148~302	52.3	21.5	0	非自重
8	TY-2	西安地铁4号线	阳村	杜陵塬	25	34	143~182	8(抬升)	23	0	非自重
9	TY-3	西安地铁4号线	高望堆村	杜陵塬	25	43	74~112	4(抬升)	23	0	非自重
10	TY-5	西安地铁15号线	神舟二路	少陵塬	25	35	103~132	0	17	0	非自重
11	TY-1	西安地铁2号线	神禾三路	神禾塬	30	35	413	32	32.9	0	非自重
12	JD-4	西安地铁14号线	摆旗寨村	渭河三级阶地	20	33	301~425	1~2	18	0	非自重

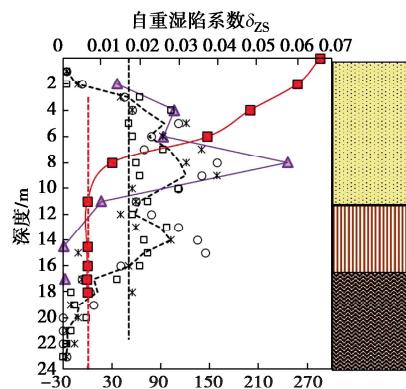
注: \*湿陷类型由现场浸水试验确定。

由表 1 可知:

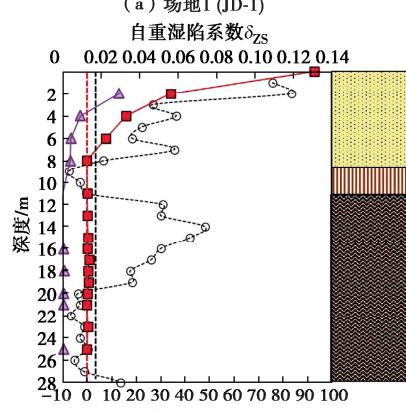
(1) 在 12 个测试场地中, 根据室内试验均为自重湿陷性黄土场地。依据现场浸水试验结果仅有 6 个场地为自重湿陷性场地, 6 个场地为非自重湿陷性黄土场地。尤其是西安东南郊的黄土塬(杜陵塬、少陵塬、神禾塬)地层结构稳定, 在现场试验中基本未发生沉降, 与以往认识有较大区别。

(2) 6 组自重湿陷性黄土场地, 其现场试验实测自重湿陷量均小于室内试验计算值, 部分差异较大。

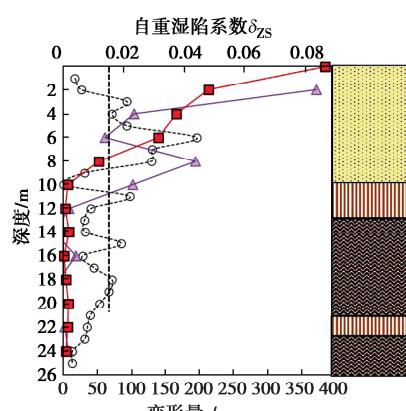
(3) 6 组自重湿陷性黄土场地中, 有 4 组 (JD-1、JD-3、LW-1 和 TY-4) 自重湿陷下限深度大幅度提升, 对应地层结构, 可以发现, 自重湿陷深度位于  $Q_3$  黄土底界, 仅有 2 组试验  $Q_2$  黄土 (JD-2、HJ-1) 发生了自



(a) 场地1 (JD-1)



(c) 场地3 (JD-3)



(e) 场地5 (TY-4)

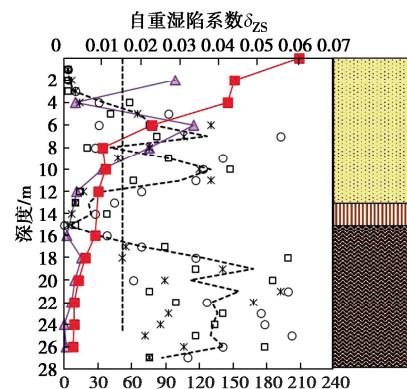
重湿陷。

(4) 从浸水变形稳定时间看, 各组试验一般需要 35~50 d 即可稳定, 其与自重湿陷量的大小有关, 自重湿陷量越大, 所需的稳定时间越长。

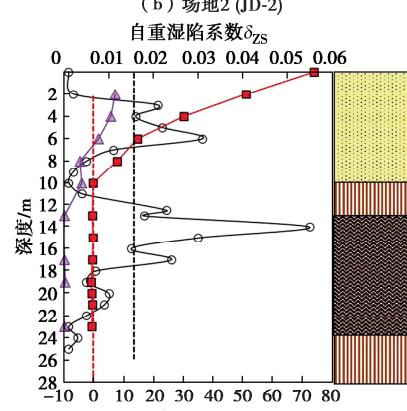
(5) 从地貌单元看, 各地貌单元的湿陷性由强到弱依次为渭北黄土塬>浐河三级阶地>塬前洪积台塬>黄土梁洼>少陵塬(杜陵塬、神禾塬)、渭河三级阶地。

### 1.3 实测分层变形特征

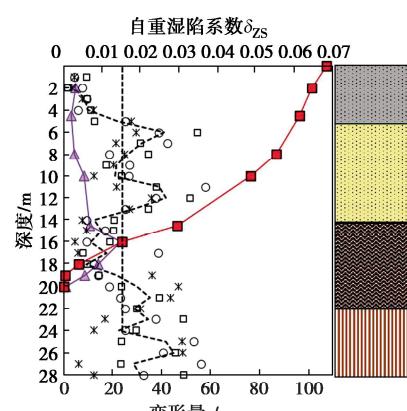
各组试验停止观测时, 利用实测分层变形量除以土层厚度, 计算得到该层土的现场试验平均自重湿陷系数。分析室内外试验得到自重湿陷系数和实测变形量沿深度的变化曲线如图 4 所示。(HJ-2 组试验虽未达到自重湿陷的沉降量, 但地层发生了变形, 为此分



(b) 场地2 (JD-2)



(d) 场地4 (LW-1)



(f) 场地6 (HJ-1)

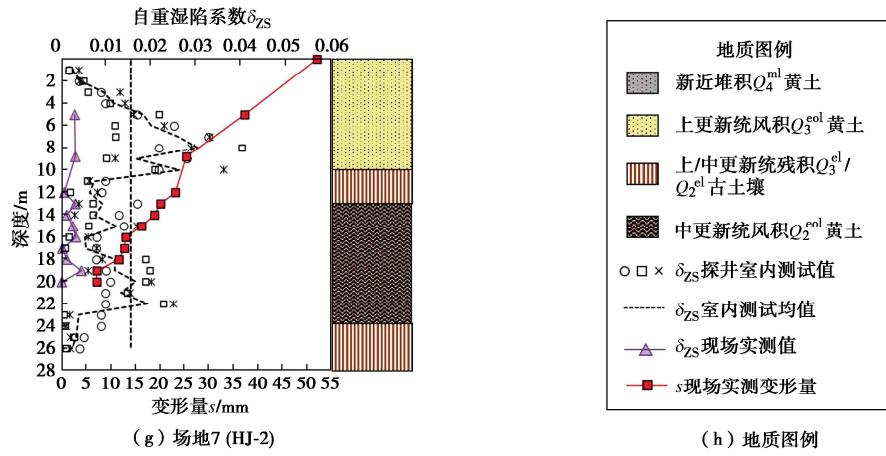


图 4 室内自重湿陷系数和现场实测分层变形沿深度变化曲线

Fig. 4 Variation curves of indoor self-weight collapse coefficient and on-site measured deformation settlement of layered along depth  
层变形统计时也进行考虑)。

以  $Q_3$  黄土底界对地层深度进行归一化分析, 得到各试验场地(场地 1~5, 7)的分层沉降曲线如图 5 所示。

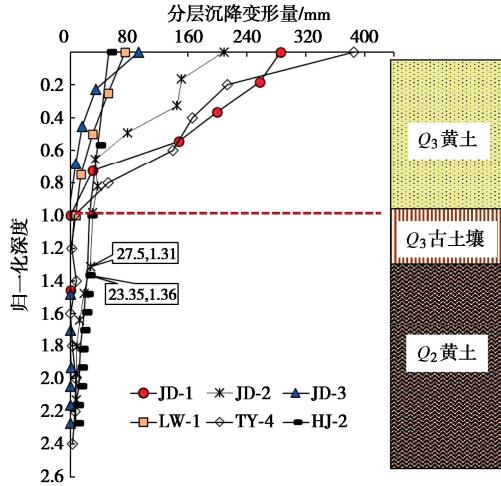


图 5 典型试验场地内实测分层变形量归一化曲线

Fig. 5 Normalization curves of measured deformation of layered settlement in typical test sites

结合图 4, 5 可知:

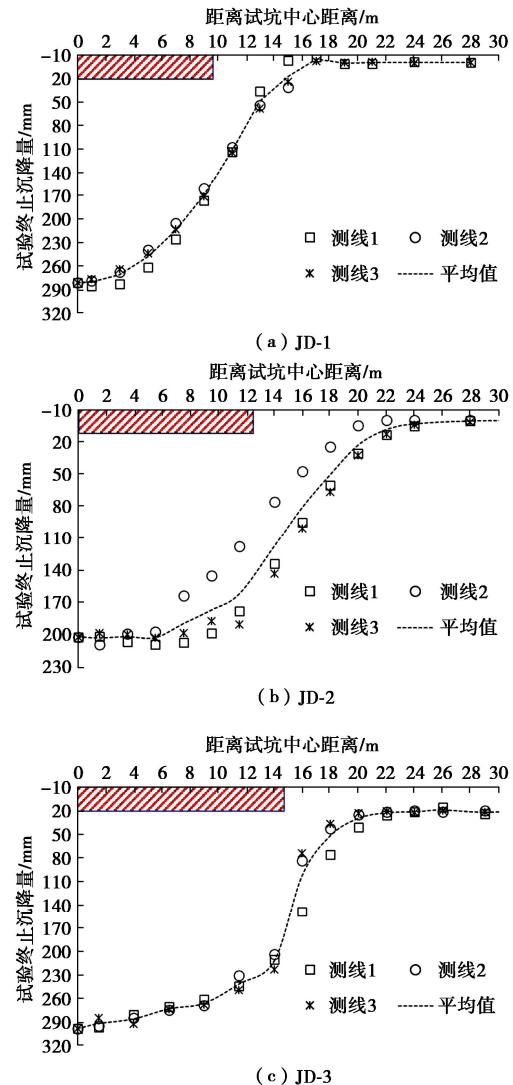
(1) 在 JD-1, JD-3, LW-1, TY-4 场地中, 试坑浸水所引起的地层变形主要发生在  $Q_3$  黄土内, 收敛于  $Q_3$  黄土底界, 深标点变形量处于  $\pm 2$  mm 以内。依据水分计实测结果,  $Q_3$  古土壤和浅层  $Q_2$  黄土均经历了充分的浸水饱和, 但其未发生明显变形, 基本保持稳定。仅在 JD-2, HJ-1, HJ-2 场地中, 浅部  $Q_2$  黄土发生了 27.5, 22.35, 23.35 mm 的变形。

(2) 分析各场地中室内试验和现场实测得到平均自重湿陷系数, 可以得到: ①  $Q_3$  黄土现场试验平均自重湿陷系数为 0.003~0.058, 在浐河三级阶地 (JD-1) 场地位置处 6~8 m 深度内达到最大, 分层沉降变形量为 116.9 mm。浐河三级阶地 (JD-1, JD-2 和 JD-3) 和渭河以北黄土塬 (TY-4) 地貌单元中部分深度处的现场试验平均自重湿陷系数大于 0.015, 最大为 0.058,

呈现中等湿陷性。②  $Q_2$  黄土现场试验平均自重湿陷系数普遍小于 0.015, 即  $Q_2$  黄土主要以压密变形为主。

#### 1.4 试坑周边变形扩散特征

利用布置在试坑内外侧的 3 条浅标点测线的测试成果, 得到试验停止观测时试坑周边地表变形扩散曲线如图 6 所示。



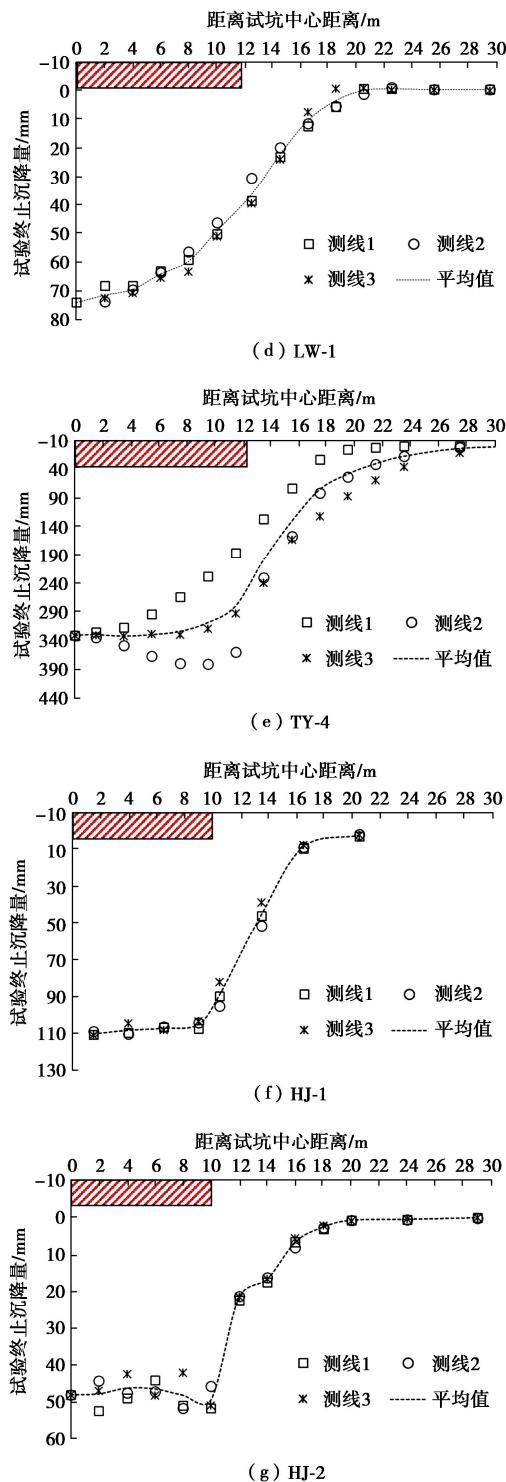


图 6 各组浸水试验中试坑内外侧浅标点变形扩散特征

Fig. 6 Diffusion characteristics of shallow punctuation deformation morphology at inner and outer sides of test pit in various immersion tests

由图 6 可知, 布置在试坑周边的各条浅标点沉降测线具有相近的变形形态, 即以试坑为中心, 地表沉降大致对称发展, 距离试坑中心越远, 实测地表变形量越小。

利用试坑半径对浅标点与试坑中心的距离进行归

一化分析, 得到各组试验的地表变形曲线如图 7 所示。各组试验具有相似的地表变形扩散形态。在浸水试坑以内, 地表变形量达到最大值。在  $0 \sim 0.5D$  ( $D$  为试坑半径) 区域内, 地表沉降曲线较陡, 是地面裂缝发展的主要区域。在  $0.5D$  位置处, 实测地表变形量均小于试坑中心点处的 30%; 在  $0.5D \sim 1.0D$  区域内, 地表变形量缓慢减小; 在  $1.0D$  区域以外, 地表沉降变形基本稳定。

以各组试验的实测自重湿陷下限深度对浅标点与试坑边缘的距离进行归一化分析, 得到各组试验内地表变形形态曲线如图 8 所示。试坑浸水湿陷的平面影响范围主要集中在  $1.0H$  以内, 其与湿陷量的大小密切相关。实测自重湿陷下限深度越大, 湿陷量越大, 则平面影响范围越大, 反之亦然。考虑到浸水影响范围和地铁工程的特点, 建议在自重湿陷性黄土区域, 轨道交通结构外侧 1 倍自重湿陷深度内, 应严格控制地表水下渗。

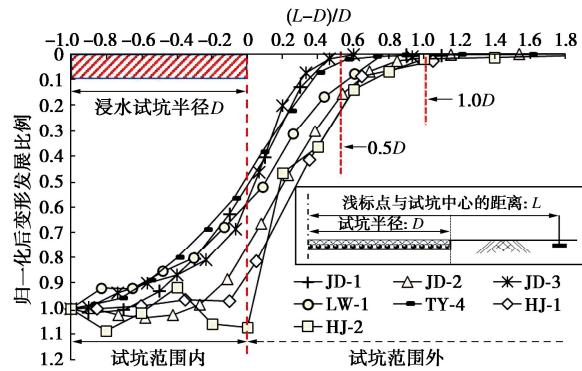


图 7 基于试坑半径的试坑周边地表变形归一化曲线

Fig. 7 Normalized curves of deformation around test pit (Based on radius of test pit)

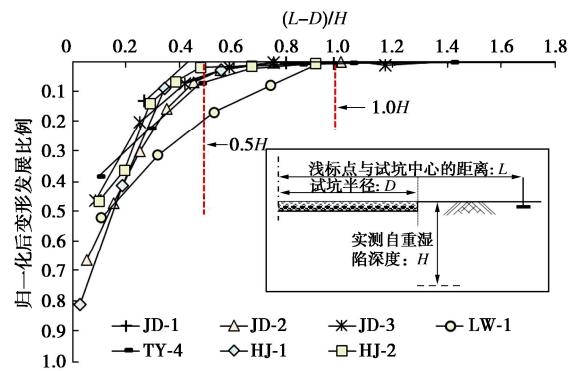


图 8 基于实测自重下限深度的试坑周边地表变形归一化曲线

Fig. 8 Normalized curve of deformation around the test pit (Based on the measured self weight collapsible limit depth)

### 1.5 湿陷变形速率

分析浸水试验过程中不同深度处深标点的变形发展速率历程曲线如图 9 所示。

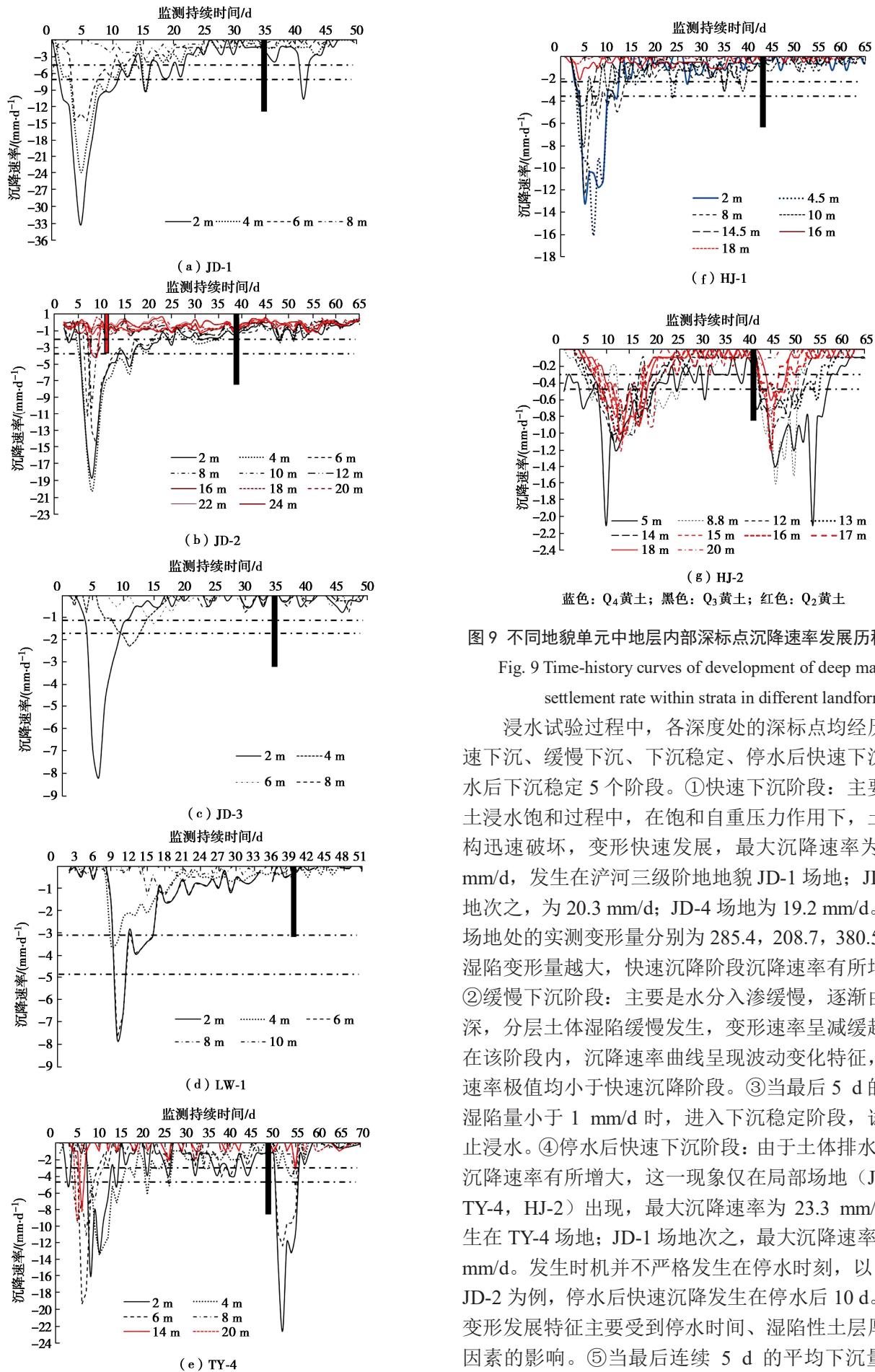


图9 不同地貌单元中地层内部深标点沉降速率发展历程曲线

Fig. 9 Time-history curves of development of deep mark settlement rate within strata in different landform units

浸水试验过程中, 各深度处的深标点均经历了快速下沉、缓慢下沉、下沉稳定、停水后快速下沉和停水后下沉稳定5个阶段。①快速下沉阶段: 主要是黄土浸水饱和过程中, 在饱和自重压力作用下, 土体结构迅速破坏, 变形快速发展, 最大沉降速率为33.2 mm/d, 发生在浐河三级阶地地貌JD-1场地; JD-2场地次之, 为20.3 mm/d; JD-4场地为19.2 mm/d。前述场地处的实测变形量分别为285.4, 208.7, 380.5 mm, 湿陷变形量越大, 快速沉降阶段沉降速率有所增加。②缓慢下沉阶段: 主要是水分入渗缓慢, 逐渐由浅入深, 分层土体湿陷缓慢发生, 变形速率呈减缓趋势。在该阶段内, 沉降速率曲线呈现波动变化特征, 沉降速率极值均小于快速沉降阶段。③当最后5 d的平均湿陷量小于1 mm/d时, 进入下沉稳定阶段, 试坑停止浸水。④停水后快速下沉阶段: 由于土体排水固结, 沉降速率有所增大, 这一现象仅在局部场地(JD-1, TY-4, HJ-2)出现, 最大沉降速率为23.3 mm/d, 发生在TY-4场地; JD-1场地次之, 最大沉降速率10.63 mm/d。发生时机并不严格发生在停水时刻, 以JD-1, JD-2为例, 停水后快速沉降发生在停水后10 d。这一变形发展特征主要受到停水时间、湿陷性土层厚度等因素的影响。⑤当最后连续5 d的平均下沉量小于

1 mm/d 时, 进入停水后下沉稳定阶段, 浸水试验停止观测。

区分试坑注水阶段和停水阶段, 分析试坑中心位置处浅标点的沉降变形量如图 10 所示。

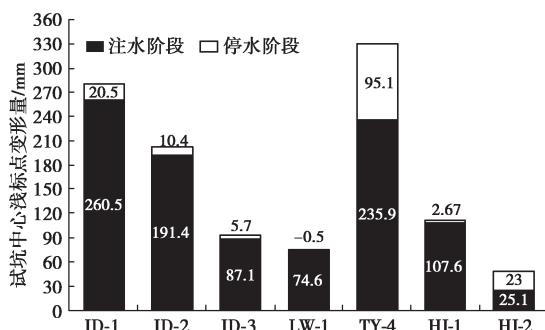


图 10 各组试验中特征阶段试坑中心位置处浅标点变形汇总图  
Fig. 10 Summary of shallow punctuation deformation at center of test pit during characteristic stage of various groups of tests

停水后, 在渭北塬地貌 JD-4 场地内固结沉降量最大, 接近 95.1 mm, 占到总湿陷变形量的 28.7%; 洪积台塬地貌单元 HJ-2 内固结沉降量为 23 mm, 占到总湿陷变形量的 47.8%; 其余组试验的固结沉降量均在 20.5 mm 以内, 小于总湿陷变形量的 7%。

## 2 室内外湿陷变形特征讨论

### 2.1 室内外试验湿陷变形量对比

以试坑中心处的浅标点沉降作为“自重湿陷量的实测值”(以下简称“实测值”); 试验前在各场地处探井取样, 依据现行规范建议方法, 基于室内压缩试验获得自重湿陷系数, 进一步计算得到“自重湿陷量的计算值”(以下简称“计算值”)。汇总得到不同地貌单元场地的实测值和计算值的对应关系如图 11 所示。

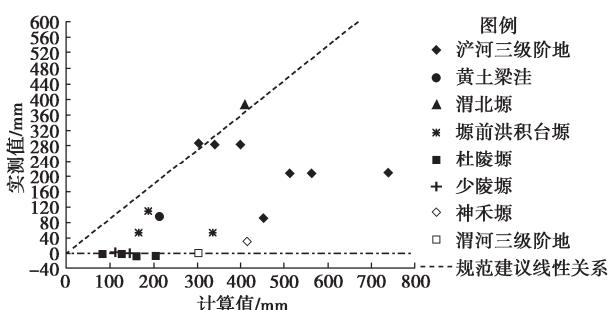


图 11 不同地貌单元中自重湿陷变形实测值与计算值的关系  
Fig. 11 Relationship between measured and calculated values of self-weight collapse deformation in different geomorphic units

由图 11 可知, 各场地实测值基本处于规范建议线性关系以下, 即规范中的修正系数取值可以基本满足工程安全性的要求, 但实测变形普遍偏小, 即现行规范高估了西安城区湿陷性黄土的变形发展能力, 且实测值和计算值分布相对离散, 无明确的对应关系。当

计算值相近, 为 150~200 mm 时, 实测值为 32~107.6 mm。当实测值相近, 为 200~285 mm 时, 计算值为 300~740 mm, 差异显著。

### 2.2 地区变形修正系数

利用实测值和计算值得到各场地的实测变形修正系数, 具体计算为

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

式中:  $\beta_0'$  为变形修正系数;  $\Delta_{zs}$  为试坑中心位置处浅标点实测变形值 (mm);  $\delta_{zsi}$  为室内试验测试得到的第  $i$  层土的自重湿陷系数;  $h_i$  为第  $i$  层土的厚度 (mm)。

区分不同地貌单元, 分析场地 1~7 的变形修正系数, 如图 12 所示。

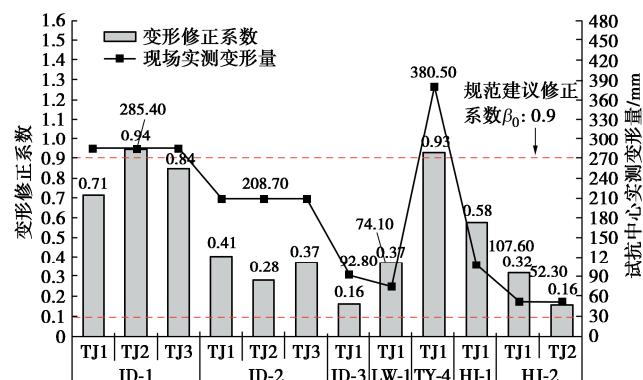


图 12 各组试验变形修正系数和实测变形量汇总图

Fig. 12 Summary of deformation correction coefficients and measured deformation amounts for various tests

由图 12 可知:

(1) 不同地貌单元中, 变形修正系数  $\beta_0'$  整体呈现渭北塬 > 渭河三级阶地 > 塬前洪积台塬 > 黄土梁洼 > 杜陵塬 / 少陵塬 / 神禾塬 / 渭河三级阶地的基本规律。其中, 渭北塬、渭河三级阶地 (JD-1)、洪积台塬 (HJ-1) 的变形修正系数在 0.58~0.94; 黄土梁洼、渭河三级阶地 (JD-2, JD-3)、洪积台塬 (HJ-2) 地貌单元的变形修正系数为 0.16~0.41。

(2) 同一地貌单元中, 邻近分布的多组场地的变形修正系数  $\beta_0'$  存在明显差异。以渭河三级阶地 (JD-1, JD-2, JD-3) 为例, 其平面位置相近, 实测值为 92.8~285.4 mm, 湿陷变形底界为 11.3~20 m, 变形修正系数  $\beta_0'$  为 0.16~0.94。

目前现行规范中所给出的变形修正系数, 在邻近场地的推广应用性较差, 无法对具体场地的自重湿陷特征进行合理评价。

### 2.3 考虑沉积时代的室内外自重湿陷变形量对比

利用分层沉降标点计算得到各特征土层处的分层

变形量, 结合室内试验计算结果, 区分3种特征土层( $Q_3$ 黄土、 $Q_3$ 古土壤和 $Q_2$ 黄土)、四类地貌单元(阶地、梁洼、黄土塬及洪积台塬), 分析实测值和计算值的对应关系见图13。

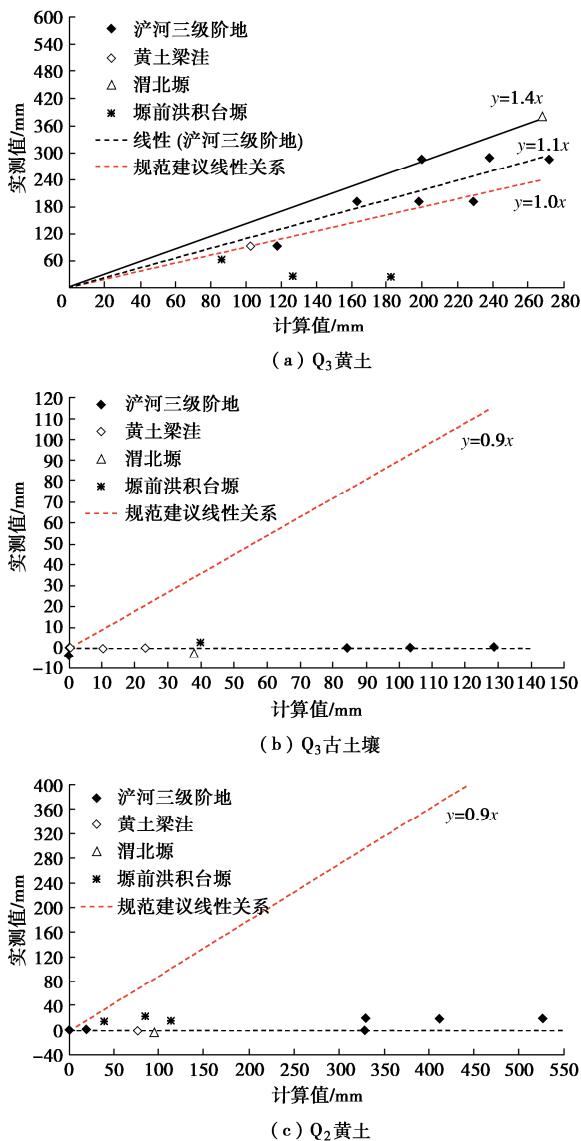


图13 不同地貌单元中3类特征土层的自重湿陷变形实测值与计算值的关系

Fig. 13 Relationship between measured and calculated values of self-weight collapse deformation of various characteristic soil layers in different geomorphic units

由图13可知:

(1)  $Q_3$ 黄土的现场实测变形量和地貌类型、室内计算值存在一定的对应关系。在浐河三级阶地中, 实测值和计算值近似呈现线性关系, 即计算值越大, 实测分层沉降量越大, 大致集中在(0.9~1.4)倍计算值以内。在塬前洪积台塬地貌中, 实测值和计算值无对应关系, HJ-1, HJ-2 场地中计算值分别为87, 125~182 mm, 实测值为63.15, 26.7 mm。HJ-1 场地

中计算值偏小, 而实测值反而偏大, 这一现象在浐河三级阶地地貌内具有相似表现。这一结果说明: 同一地貌单元内,  $Q_3$ 黄土的湿陷变形发展能力仍受到局部沉积环境和形成历史的影响。

(2)  $Q_3$ 古土壤的现场实测值与室内计算值无明显的对应关系。由图4可知, 室内试验得到 $Q_3$ 古土壤的自重湿陷系数仍可能大于0.015, 局部接近0.04, 具备自重湿陷特征, 室内湿陷变形计算值最大为128.6 mm。现场试验过程中, 实测变形量为-3~0.45 mm。试坑浸水过程中,  $Q_3$ 古土壤层基本稳定, 未发生显著变形。

(3)  $Q_2$ 黄土仅在洪积台塬、部分浐河三级阶地(JD-2)场地中变形有所发展。其余组试验测试得到的 $Q_2$ 黄土分层沉降量为-0.4~0.3 mm, 基本稳定。结合图13c)和图4可知, 在浐河三级阶地地貌(JD-2)中, 位于 $Q_3$ 古土壤层以下的第一层 $Q_2$ 黄土, 其自重湿陷系数 $\delta_{zs}$ 普遍大于0.015, 最大为0.072, 具备强自重湿陷特征, 室内分层沉降计算值为329~526.5 mm; 孔隙比 $e$ 最大为1.2, 表现出典型欠压密特征, 存在相对充分的可变形空间。然而,  $Q_2$ 黄土实测变形量仅为19.5 mm。在洪积台塬(HJ-1, HJ-2)场地中, 第一层 $Q_2$ 黄土的自重湿陷系数 $\delta_{zs}$ 最大为0.041, 室内湿陷变形计算值分别为85, 39~113 mm, 实测值分别为23.95, 16.15 mm, 室内外试验得到的自重湿陷特征存在明显差异。

综上,  $Q_3$ 黄土、 $Q_3$ 古土壤和浅层 $Q_2$ 黄土的浸水湿陷特征存在明显差异, 会对自重湿陷变形量预测和场地类型判定产生影响。

## 2.4 考虑沉积时代的变形修正系数确定方法

为评价不同地貌单元中各类特征土层的湿陷变形能力, 提出考虑地层沉积时代的变形修正系数, 具体计算如式(2)。分析3类特征土层的变形修正系数、室内计算变形量和现场实测变形量的对应关系如图14所示。

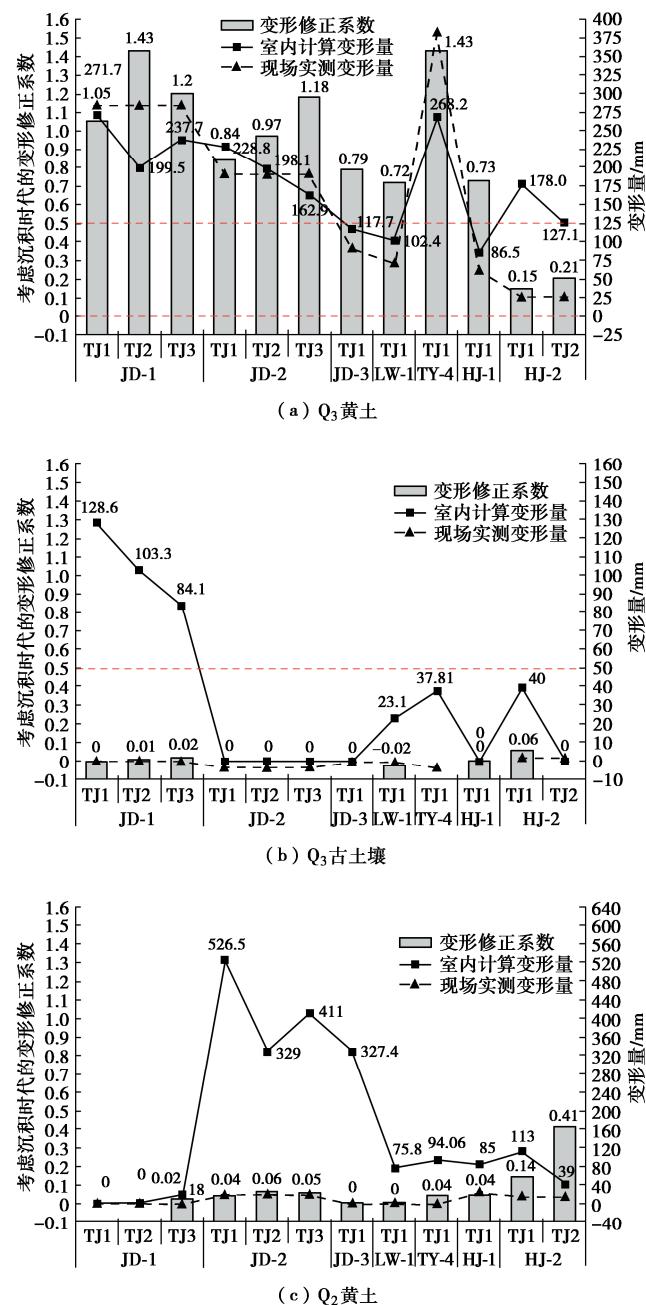
$$\beta'_{j0} = \frac{\Delta_{zsj}}{\sum_{i=1}^n \delta_{zsi} h_i} \quad (2)$$

式中:  $\beta'_{j0}$ 为考虑地层沉积时代的变形修正系数;  $\Delta_{zsj}$ 为浸水试验实测得到的第 $j$ 层土的分层变形量, 取试坑范围内对应层位范围各标点变形差值。其余参数含义同上。

各典型地貌单元内, 考虑地层沉积时代的变形修正系数整体呈现 $Q_3$ 黄土> $Q_2$ 黄土> $Q_3$ 古土壤的基本特征。区分地貌类型和沉积时代, 对各类特征土层的变形修正系数进行详细分析, 具体如下。

(1)  $Q_3$ 黄土的变形修正系数和地貌单元类型之

间存在一定对应关系，整体呈现渭河北黄土塬>浐河三级阶地地貌>梁洼地貌>洪积台塬地貌的特征。其中，浐河三级阶地和渭河以北黄土塬内  $Q_3$  黄土的变形修正系数为 0.79~1.43，梁洼地貌为 0.72，洪积台塬的变形修正系数为 0.15~0.73。



注：当室内试验计算值为0时，考虑沉积年代的变形修正系数计算值错误，不予统计。

图 14 各类地貌单元中考虑土层沉积时代的湿陷变形修正系数

Fig. 14 Correction coefficients for collapsible deformation considering depositional age of soil layers in various geomorphic units

(2) 不同地貌单元内， $Q_3$  古土壤的变形修正系数为-0.02~0.06。

(3) 在梁洼、浐河三级阶地和渭北塬地貌内，

$Q_2$  黄土的变形修正系数普遍小于 0.06；在洪积台塬地貌 (HJ-1, HJ-2) 中，其变形修正系数有所增加，最大为 0.41。

综上，通过区分沉积时代和地貌单元两个关键影响因素，可以合理地评价西安市黄土的湿陷变形特征。考虑地层沉积时代的变形修正系数，其数值差异小，推广应用性好。结合本文研究结果，建议西安市黄土自重湿陷变形修正系数  $\beta_0$  的确定原则如下：① 神禾塬、少陵塬和杜陵塬：非自重湿陷性场地；②  $Q_3$  黄土：梁洼区和洪积台塬可取 0.9；浐河三级阶地：1.1；渭北塬：1.5；③  $Q_3$  古土壤：统一取 0.1；④ 第一层  $Q_2$  黄土：梁洼区、浐河三级阶地和渭北塬取 0.1，洪积台塬可取 0.5；⑤ 第一层  $Q_2$  黄土以下的土层不考虑自重湿陷变形。

### 3 结 论

基于西安市轨道交通建设过程中完成的 12 组大型现场浸水试验和室内试验，系统分析评价了西安市黄土的湿陷规律。

(1) 西安市区范围内，各地貌单元的湿陷性由强到弱依次为渭北黄土塬>浐河三级阶地>塬前洪积台塬>黄土梁洼>少陵塬(杜陵塬、神禾塬)、渭河三级阶地。自重湿陷性黄土地场占试验场地总数的 50%，自重湿陷下限深度最大 20 m；市区南部黄土塬均为非自重湿陷场地，与以往室内试验认识不同。

(2) 黄土自重湿陷变形主要发生在  $Q_3$  黄土内，收敛于  $Q_3$  黄土底界。个别场地  $Q_2$  黄土发生了自重湿陷，湿陷变形量为 22~28 mm。

(3) 区分黄土沉积时代、土性类型和地貌单元，给出了西安市范围内黄土自重湿陷变形修正系数建议值。

(4) 黄土浸水湿陷变形影响范围一般不超过 1.0 倍的试坑半径和 1.0 倍的实测自重湿陷深度。建议在自重湿陷性黄土区域，轨道交通结构外侧 1 倍自重湿陷深度内，应严格控制地表水下渗。

(5) 黄土湿陷变形发展过程主要包括快速下沉、缓慢下沉、下沉稳定、停水后快速下沉和停水后下沉稳定 5 个阶段。实测自重湿陷量越大，下沉阶段单日沉降速率越大。停水后固结沉降量最大可达 95.1 mm。

### 参考文献：

- [1] 湿陷性黄土地区建筑标准: GB 50025—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. (Standard for Building Construction in Collapsible Loess Regions: GB 50025—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.)

- (in Chinese))
- [2] 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研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 165-170. (ZHENG Jianguo, DENG Guohua, LIU Zhenghong, 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))
- [3] 李同录, 冯文清, 刘志伟, 等. Q<sub>2</sub>黄土湿陷系数试验压力取值的讨论[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 59-68. (LI Tonglu, FENG Wenqing, LIU Zhiwei, et al. A discussion of the test pressure of collapsible coefficient for Q<sub>2</sub> loess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 59-68. (in Chinese))
- [4] 邢义川, 谢定义, 李永红. 非饱和黄土湿陷过程中有效应力变化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1100-1103. (XING Yichuan, XIE Dingyi, LI Yonghong. Effective stress and collapse process of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1100-1103. (in Chinese))
- [5] 方祥位, 成培江, 申春妮, 等. 陕西蒲城Q<sub>2</sub>黄土物质组成试验研究[J]. 后勤工程学院学报, 2012, 28(1): 1-6. (FANG Xiangwei, CHENG Peijiang, SHEN Chunni, et al. The matter composition tests of Q<sub>2</sub> loess in Pucheng, Shaanxi Province[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2012, 28(1): 1-6. (in Chinese))
- [6] 李大展, 何颐华, 隋国秀. Q<sub>2</sub>黄土大面积浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(2): 1-11. (LI Dazhan, HE Yihua, SUI Guoxiu. Study and Test on immersion of Q<sub>2</sub> Loess in Large Area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(2): 1-11. (in Chinese))
- [7] 石怀清. 西安塬区中更新世Q<sub>2</sub>黄土地浸水试验与研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008. (SHI Huaiqing. Immersion Test and Study on the Middle Pleistocene Q<sub>2</sub> Loess Site in Xi'an Plateau[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008. (in Chinese))
- [8] 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 Xuefeng, CHEN Zhenghan, 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))
- [9] 王治军, 潘俊义, 马闫, 等. 董志塬大厚度自重湿陷性黄土地浸水试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 75-82. (WANG Zhijun, PAN Junyi, MA Yan, et al. Immersion test on the self-weight collapsible loess in the Dongzhiyuan Area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(2): 75-82. (in Chinese))
- [10] 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 Jiading, PENG Shujun, 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))
- [11] 武小鹏, 熊治文, 王小军, 等. 郑西高速铁路豫西段黄土现场浸水自重湿陷特征研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1769-1773. (WU Xiaopeng, XIONG Zhiwen, WANG Xiaojun, et al. Study of immersion collapsible characteristics under overburden pressure of Western Henan loess along Zhengzhou-Xi'an high-speed railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1769-1773. (in Chinese))
- [12] 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 Shengjun, LI Jun, LI Guoliang, 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))
- [13] 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 Zhihua, HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, et al. New recognition of collapsibility evaluation and remnant collapse of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 998-1006. (in Chinese))
- [14] 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 Yichuan, JIN Songli, ZHAO Weiquan, 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))
- [15] 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 Tieying, JIN Xin, LUO Yang, et al. A method for evaluation of loess collapse potential of unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1281-1290. (in Chinese))