

DOI: 10.11779/CJGE202004010

# 黄土自重湿陷变形的多地层离心模型试验方法

米文静<sup>1,2</sup>, 张爱军<sup>\*1</sup>, 刘争宏<sup>3</sup>, 刘宏泰<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 商洛学院, 陕西 商洛 726000;  
3. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 黄土的自重湿陷变形对上部建筑物具有较大的危害, 现有的黄土室内湿陷试验方法和现场浸水试验方法, 难以同时满足工程建设对试验结果在经济性、期限和准确性方面的要求。在之前提出的黄土湿陷变形的典型层离心模型试验方法的基础上, 以咸阳渭城区布里村自重湿陷性黄土地基为对象, 开展了包含地基多个地层的单线法和双线法自重湿陷变形离心模型试验, 提出了黄土自重湿陷变形的多地层离心模型试验方法, 并与室内湿陷试验和现场浸水试验结果进行了对比; 同时分析了Q<sub>2</sub>和Q<sub>3</sub>黄土自重湿陷的分层变形特征。研究结果表明: 多地层离心模型试验结果得到的地区修正系数 $\beta_0$ 值与现场浸水试验测得的 $\beta_0$ 值相差0.04, 其相对误差为2.5%。证明多地层离心模型试验方法可以得到与现场浸水试验相近的结果, 且具有费用少、试验周期短的优势, 在一定情况下可以取代现场浸水试验进行黄土自重湿陷变形的测定。

**关键词:** 湿陷性; 黄土; 自重湿陷变形; 离心模拟; 修正系数

中图分类号: TU444 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)04-0678-10

作者简介: 米文静(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事湿陷性黄土研究。E-mail: miwenjing@nwafu.edu.cn。

## Multi-stratigraphic centrifugal model test method for determination of self-weight collapsible deformation of loess

MI Wen-jing<sup>1,2</sup>, ZHANG Ai-jun<sup>1</sup>, LIU Zhen-hong<sup>3</sup>, LIU Hong-tai<sup>3</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Shangluo University, Shangluo 726000, China; 3. Machine Industry Investigation Design Institute Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

**Abstract:** The self-weight collapsible deformation of loess is harmful to the upper buildings. The existing indoor collapsibility and on-site water immersion test method for loess are difficult to satisfy the requirements of the project construction in terms of the economy, duration and accuracy of the test results. Based on the typical-stratigraphic centrifugal model test method, with the self-weight collapsible loess foundation of Buli Village, Weicheng District, Xianyang City as the object, a multi-stratigraphic centrifugal model test method for determination of loess self-weight collapsible deformation is proposed, and the results of the indoor collapsibility tests and on-site water immersion tests are compared. The stratified deformation characteristics of Q<sub>2</sub> and Q<sub>3</sub> loess self-weight collapsibility are also analyzed. The results show that the value of the regional correction coefficient  $\beta_0$  obtained from the multi-stratigraphic centrifugal model test is different from that obtained from the on-site water immersion tests with a difference of 0.04, and the relative error is 2.5%. It is proved that the multi-stratigraphic centrifugal model test method can be used to obtain similar results with the on-site water immersion test, and has the advantages of low cost and short test cycle. Thus, under some circumstances, it can replace the on-site immersion tests to determine the self-weight collapsible deformation of loess.

**Key words:** collapsibility; loess; self-weight collapsible deformation; centrifuge modelling; correction

## 0 引言

湿陷是黄土最为典型的特征, 指在自重应力或自重应力加附加应力, 以及浸水到饱和共同作用下, 土体产生除压缩变形以外的附加变形的现象。黄土湿陷具有突发性、不连续性和不可逆性。湿陷对黄土地区工程建设危害巨大, 会造成地基、路基的大面积开裂

下陷, 房屋、储油罐等构筑物的倾斜和倒塌。因此, 研究黄土湿陷具有十分重要的工程实际意义。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFC0405103); 陕西省重点研发计划项目(2017ZDXM-SF-074); 国家自然科学基金项目(51978572); 陕西省水利科技计划项目(2013slkj-10)

**收稿日期:** 2019-05-24

**\*通信作者** (E-mail: zaj@nwafu.edu.cn)

《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB50025—2018)中黄土湿陷变形的试验方法有室内湿陷试验和现场浸水试验。室内试验是取原状土样, 测定土样侧限下的湿陷系数和自重湿陷系数, 计算场地的湿陷量和自重湿陷量。室内湿陷试验研究成果颇丰, 李涛等<sup>[1]</sup>对非饱和重塑和结构性黄土的湿陷试验开展了三维离散元模拟分析; 杨玉生等<sup>[2]</sup>研究了原状和压实黄土的结构性与湿陷性关系。由于取样扰动损伤原状结构, 室内试验限制了侧向变形, 且饱和度高于现场实际等原因, 室内试验得到的自重湿陷系数、湿陷系数、场地自重湿陷量和湿陷量值与场地实际差别较大, 需要进行经验修正。张爱军等<sup>[3-5]</sup>开展了大量的室内湿陷试验, 分析黄土湿陷变形的原因, 研究了室内湿陷试验结果与现场实际的差异性; 杨生彬<sup>[6]</sup>对兰州黄土开展了室内和现场浸水试验, 对 $\beta_0$ 规范取值进行了修正。现场浸水试验的测试结果较为可靠, 但试验周期长, 资金投入大。如: 宁夏扬黄引水工程 11 号泵站现场浸水试验历时 251 d, 浸水天数 162 d, 耗水 12.40 万 m<sup>3</sup><sup>[7]</sup>; 新疆昭苏现场浸水试验历时 374 d, 耗水 1.15 万 m<sup>3</sup><sup>[8-9]</sup>。鉴于室内湿陷试验和现场浸水试验难以同时满足工程建设对经济性、期限、准确性的要求, 探索黄土自重湿陷变形其他测试方法非常必要。

离心模型试验是岩土工程领域重要的物理模拟试验方法。它是在高速旋转的离心机上, 对模型施加超过重力 N 倍的离心惯性力, 来模拟原型因缩尺 1/N 所造成的自重应力损失, 达到与地基原型相同的应力水平。离心模型试验已经在地基沉降分析、边坡稳定、水坝漫顶破坏等方面得到应用。张建红等<sup>[10]</sup>采用离心模拟试验研究了冻土地基在荷载作用下的温度场和应力场的变化规律; 侯瑜京等<sup>[11]</sup>、贾杰等<sup>[12]</sup>利用土工离心模型试验研究了垃圾土和黄土边坡的破坏机理及失稳变形; 杜延龄等<sup>[13]</sup>提出了土坝的漫顶破坏和饱和砂土地基液化的离心模拟技术。

业界公认, 土工离心模型试验最擅长解决自重作用下土体的压缩变形问题, 离心模型试验中浸水技术也基本成熟, 而黄土的湿陷恰恰是浸水和自重共同作用下的变形问题, 因此, 用离心模型试验研究黄土的湿陷将非常有效。安鹏等<sup>[8]</sup>、邢义川等<sup>[9]</sup>针对新疆伊犁黄土地带, 在场地黄土地层中, 选取一层最具有代表性的典型土层的原状土样制作模型, 开展了黄土湿陷变形的离心模型试验, 利用地区修正系数 $\beta_0$ 值为桥梁, 对比了离心模型试验结果与室内试验、现场浸水

试验结果的差异, 验证并提出了基于离心模型试验的黄土湿陷试验新方法, 该方法为黄土湿陷变形的“典型层”离心模型试验方法。但该方法未考虑实际地基均由多个地层组成, 不同地层的湿陷性与应力不同, 相应的湿陷变形量也不同的实际情况, 需要进一步完善。

本文以咸阳渭城区布里村自重湿陷性黄土地基为对象, 采用原状黄土土样开展了包含地基多个地层的单线法和双线法自重湿陷变形离心模型试验, 完善了试验技术, 并将试验结果与室内湿陷试验、现场浸水试验结果进行了对比, 验证了方法的可行性和可信性。

## 1 场地地层与土体性质概况

### 1.1 场地地层岩性分布

本试验场地位于陕西省咸阳市渭城区布里村附近, 北距渭河约 8.0 km, 南距西安咸阳机场 3.0 km, 地貌单元属渭河三级阶地黄土塬区, 场地地势较平坦, 地下水位较深。

在场地周边人工开挖探井, 探井揭露场地地层由上到下为:  $Q_4^{\text{dl}}$ 耕植层, 深度 0.5 m, 黄褐色, 稍湿, 含大量植物根系;  $Q_3^{\text{eol}}$ 黄土层, 深度 0.5~10.4 m, 黄褐—褐黄色, 稍湿, 硬塑, 虫孔及大孔隙发育, 土质均匀;  $Q_3^{\text{el}}$ 古土壤层, 深度 10.4~12.9 m, 棕红色, 硬塑, 大孔隙及针孔状孔隙较发育, 含白色钙质条纹及钙质结核;  $Q_2^{\text{eol}}$ 老黄土层, 深度 12.9~27.5 m, 黄褐—褐黄色, 硬塑, 局部可塑, 土质均匀, 针状孔隙及大孔隙发育, 偶含钙质结核。从地质勘察可以看出, 耕作层较薄且需要挖除, 场地主要地层由  $Q_3$  新黄土层、古土壤层和  $Q_2$  老黄土层 3 层组成。

### 1.2 室内试验

每米采取原状土样进行室内物理力学指标测试, 测得场地土样基本物理性质指标见表 1。

在现场 15 m 深度内, 每 1 m 取 1 个原状土样, 开展室内黄土湿陷试验。原状土取样按 I 级原状土样要求进行, 用双线法测定每米深度处的自重湿陷系数, 室内湿陷试验结果见表 2。由表 2 可知, 该场地黄土在 0~8 m 处湿陷性较强烈, 自重湿陷系数最小值为 0.021, 最大值达 0.047; 深度 9~10 m 处, 自重湿陷系数减小至 0.007; 深度 11~15 m 处, 自重湿陷系数随着深度增加逐渐而减小, 且在 14 m 深处以下, 不具自重湿陷性。计算得出自重湿陷量为 345.6 mm, 场地为自重湿陷性黄土地带, 湿陷等级为 IV 级。

### 1.3 现场浸水试验

现场浸水试验布置在咸阳市渭城区布里村湿陷性

表 1 土样的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of loess

土样埋深/m	天然含水率/%	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	天然孔隙比	饱和度/%	相对密度 G <sub>s</sub>	土的分类
1~15	14.5~16.1	1.20~1.44	0.88~1.26	33.11~47.32	2.71	CL

表 2 黄土湿陷性试验结果

Table 2 Indoor test results

深度 /m	层厚 /m	土层类型	含水率 /%	干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	自重湿陷系数	饱和密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	饱和自重压力/kPa	自重湿陷量 /mm
1	1	Q <sub>3</sub> 新黄土	14.5	1.30	0.023	1.74	17.423	20.7
2	1	Q <sub>3</sub> 新黄土	14.7	1.23	0.037	1.69	34.365	33.3
3	1	Q <sub>3</sub> 新黄土	15.5	1.25	0.021	1.71	51.444	18.9
4	1	Q <sub>3</sub> 新黄土	15.7	1.26	0.047	1.71	68.592	42.3
5	1	Q <sub>3</sub> 新黄土	15.4	1.38	0.043	1.80	86.563	38.7
6	1	Q <sub>3</sub> 新黄土	15.6	1.20	0.040	1.67	103.300	36.0
7	1	Q <sub>3</sub> 新黄土	15.4	1.27	0.046	1.72	120.516	41.4
8	1	Q <sub>3</sub> 新黄土	16.0	1.28	0.040	1.73	34.502	36.0
9	1	Q <sub>3</sub> 新黄土	16.1	1.36	0.009	1.78	121.134	0.0
10	1	Q <sub>3</sub> 新黄土	15.4	1.30	0.007	1.74	138.556	0.0
11	1	Q <sub>3</sub> 古土壤	15.2	1.44	0.033	1.84	156.940	29.7
12	1	Q <sub>3</sub> 古土壤	15.4	1.44	0.033	1.84	175.323	29.7
13	1	Q <sub>3</sub> 古土壤	15.6	1.41	0.021	1.82	193.501	18.9
14	1	Q <sub>2</sub> 老黄土	15.6	1.41	0.007	1.81	211.645	0.0
15	1	Q <sub>2</sub> 老黄土	15.8	1.42	0.005	1.82	229.808	0.0
$\Sigma$						自重湿陷量 (mm)		345.6

黄土较厚的场地上, 试坑内按照  $120^\circ$  夹角将试坑划分为 3 个区域, 分别布设表面变形观测点、土壤水分观测点和分层沉降观测点, 监测场地表面沉降量和土体的水分。浸水试验平面布设图见图 1。沉降结果显示布里村场地最终沉降随深度增加逐渐减小, 分层沉降自上而下逐渐减小, 沉降量主要发生在 10 m 以上的新黄土层中, 10~12 m 的古土壤层和 12 m 以下的老黄土层累计沉降量较小。场地 Q<sub>3</sub> 黄土的最大自重湿陷量值为 425 mm, Q<sub>2</sub> 黄土的最大自重湿陷量值为 129 mm, 场地自重湿陷量最大值为 554 mm。

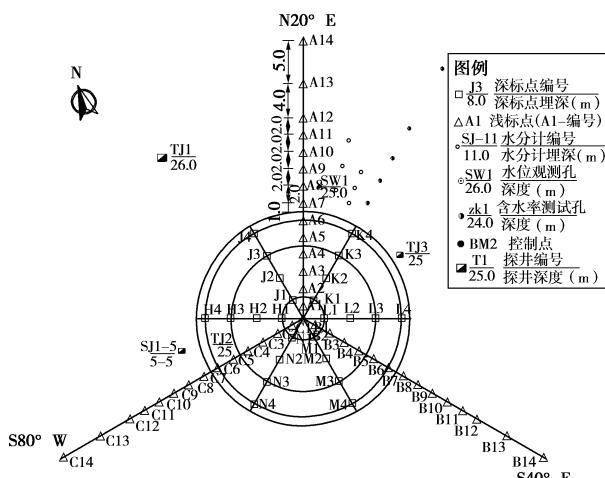


图 1 浸水试验平面布置图

Fig. 1 Layout of soaking test plan

## 2 多层地基离心试验的方法

### 2.1 离心模型试验原理

离心模型试验是将与实际相同或相似材料制成的土工模型放置在高速旋转的离心加速场中, 通过对模型施加  $N$  倍的离心加速度, 增加模型的重度, 来补偿

原型因缩尺到原来的  $1/N$  所造成的自重损失, 使模型各处的应力  $\sigma_m$  与原型的应力  $\sigma_p$  相等。

由  $\sigma_m = \sigma_p$ , 可得

$$\rho h_m a = \rho h_p g , \quad (1)$$

即

$$a = \frac{h_p}{h_m} g = Ng , \quad (2)$$

式中,  $\sigma_m$  为模型应力,  $\sigma_p$  为原型应力,  $h_m$  为模型高度,  $h_p$  为原型高度,  $\rho$  为密度,  $g$  为重力加速度,  $a$  为离心加速度,  $N$  为缩尺倍数, 也就是模型率。

从式(2)可知, 模型的缩尺倍数为  $N$  时, 在模型上施加  $a=Ng$  的离心加速度可以使得模型与原型的应力状态一致。

依据以上类似的原理可推算出土工离心模型试验测得的模型物理量与原型的换算的相似律见表 3。由表 3 可知, 原型土层的厚度为模型土层厚的  $N$  倍, 原型的自重为模型自重的  $N$  倍, 原型的位移是模型的  $N$  倍。本文试验的模型率  $N=50$ 。

表 3 离心模型试验中物理量的相似律

Table 3 Scaling law of physical quantity in centrifuge model test

符号	名称	量纲	相似比
$g$	重力加速度	$LT^{-2}$	$N$
$v$	速度	$LT^{-1}$	1
$s$	位移	L	$1/N$
$L$	几何尺寸	L	$1/N$
$w$	含水率	1	1
$S_r$	饱和度	1	1
$\sigma$	应力	$ML^{-1}T^{-2}$	1
$\varepsilon$	应变	1	1
$k$	渗透系数	$LT^{-1}$	$N$

注: 表中 L 为长度量纲, T 为时间量纲, M 为质量量纲, N 为模型率。

## 2.2 试验思路及方法

湿陷性黄土地基的自重湿陷量计算值  $\Delta_{zs}$  的计算公式为

$$\Delta_{zs} = \beta_0 \sum_{i=1}^n \delta_{zsi} h_i \quad . \quad (3)$$

式中  $\delta_{zsi}$  为第  $i$  层土的自重湿陷系数;  $h_i$  为第  $i$  层土的厚度 (mm);  $\beta_0$  为因地区土质而异的修正系数。

$\beta_0$  值为现场浸水试验湿陷实测值  $\Delta$  与室内试验湿陷量计算值  $\Delta_{zs}$  的比值。即

$$\beta_0 = \Delta / \Delta_{zs} \quad . \quad (4)$$

《湿陷性黄土地区建筑规范》规定了缺乏资料时各地区修正系数  $\beta_0$  的取值。其中: 陇西地区取 1.50; 陇东—陕北—晋西地区取 1.20; 关中地区取 0.90; 其他地区取 0.50。公式中实际上假设  $\beta_0$  在各个地层中均相等, 根据这一假设, 邢义川等<sup>[9]</sup>提出了利用离心模型试验取代现场浸水试验求取  $\beta_0$  值的两种方法, 完全模拟实际法和典型层模拟法。完全模拟实际的方法是按照实际土层的土性和厚度将一定倍数缩尺后的原状土样模型薄层按原场地的顺序紧密叠合而制成模型, 把模型放入离心机中施加指定的加速度模拟场地湿陷; 该方法能够较好的反映工程实际, 但土层多, 模型制作困难。典型层模拟的方法是根据场地实际选取一个典型层, 按照典型层的密度和含水率等情况制作模型, 将模型放入离心机中施加指定的加速度模拟场地湿陷情况, 其中模型试验值要与引起该典型层黄土湿陷的上覆饱和自重压力的实际值相等; 该方法制作模型较为容易, 但只有在  $\beta_0$  的特性在各个地层中均相等的假设成立下, 试验结果才能与实际相符, 而实际上由于应力状态不同、土性不同, 各层土的  $\beta_0$  值均有区别, 因此完全模拟实际的方法应该是值得推荐的方法。

完全模拟实际的方法最好是每 1 m 设置 1 片原状土样, 将之叠加在一起进行离心模型试验来测定土体的自重湿陷量, 但是模型缩尺后每 1 片土样太薄, 制样困难, 不切合实际。本文的思路是: 根据场地土层的含水率、干密度、土层类型将场地地层进行概化, 确定出 3~5 层的地基典型地层, 每层选用与实际土层较为相似的典型原状土样制作模型层, 最后按照原场地的顺序将各层紧密叠合在一起制成模型, 把制作好的模型安置在离心模型试验机上, 旋转到指定的加速度, 利用湿陷试验的单线法和双线法分别测定自重湿陷性黄土的湿陷变形, 根据离心模型试验得到的湿陷值比室内试验湿陷计算值得到修正系数  $\beta_0$  值, 分析试验结果的可靠性。这一方法既避免了典型层方法的缺陷, 又简化了完全模拟实际方法的复杂过程, 并可以代表地基总体的湿陷变形特性, 这里称为“黄土自重

湿陷变形的多地层离心模型试验方法”。

试验中采用了单线法与双线法两种方法, 其原理与室内湿陷试验相同。单线法是将高度为 30 cm 的天然含水率的叠合土样模型逐级施加到 50g 的离心加速度, 之后浸水, 测得的浸水前后模型顶部的沉降差乘以  $N=50$  就为原型地基的自重湿陷量。而双线法要用两个模型, 分别为天然含水率模型和饱和含水率模型。两个模型土样、高度和控制条件一致, 只是初始含水率不同。分别施加 50g 的离心加速度, 两个模型顶部的沉降差乘以  $N=50$  就为原型地基的自重湿陷量。

分析认为: 单线法与现场浸水试验较为符合, 对于大厚度黄土地基而言, 可以反映浸水入渗深度对自重湿陷的影响, 其缺点是精度会受到浸水不均匀、浸水时间等因素的影响。双线法不需要在施加加速度时浸水, 因此不受浸水的影响, 但会受到两个模型土样差别的影响。本文原型地基湿陷性土层厚度为 15 m, 现场浸水时整个土层均能够浸透, 且土样均匀性好, 因此也可采用双线法, 且测值稳定可靠。本文分析中主要依据双线法的结果进行。

## 2.3 地层的概化

根据表 2 可知: 场地 Q<sub>3</sub> 新黄土层深度为 1~10 m 附近, 干密度平均值为 1.28 g/cm<sup>3</sup>, 干密度差为 0.18 g/cm<sup>3</sup>, 天然含水率平均值为 15.4%, 含水率差为 1.6%; Q<sub>3</sub> 古土壤层深度为 10~13 m 附近, 干密度平均值为 1.43 g/cm<sup>3</sup>, 干密度差为 0.04 g/cm<sup>3</sup>, 天然含水率平均值为 15.4%, 含水率差为 0.4%; Q<sub>2</sub> 老黄土层深度为 14~15 m 附近, 干密度平均值为 1.42 g/cm<sup>3</sup>, 干密度差为 0.01 g/cm<sup>3</sup>, 天然含水率平均值为 15.7%, 含水率差为 0.2%。通过比较, 同一土层类型黄土的干密度、天然含水率变化幅度均较小, 因此按照土层类型将场地地层概化为 3 层。根据 3 种土层类型的干密度、含水率均值, 从对应类型中选取与均值最接近的土层作为模拟对象, 制作模型。选取 7 m 处黄土作为 Q<sub>3</sub> 新黄土层的模拟对象; 选取 12 m 处黄土作为 Q<sub>3</sub> 古土壤层的模拟对象; 选取 14 m 处黄土作为 Q<sub>2</sub> 老黄土的模拟对象。

## 2.4 试验方案

### (1) 试验组数

第一组为天然含水率下的离心模型试验, 即: 将天然含水率的多层黄土模型安置在离心机上旋转到指定的重力加速度  $g$  值, 待压缩变形稳定后浸水, 使模型饱和, 测定模型的压缩变形和湿陷变形, 即得到单线法的湿陷变形; 第二组为饱和含水率的离心模型试验, 同样施加指定的重力加速度  $g$  值, 测定模型的沉降变形。将第二组测得的沉降变形减去第一组的压缩

表 4 试验基本内容

Table 4 Test design

模型试样	尺寸(长×宽×高) /(cm×cm×cm)	初始离心加速度/g	终级离心加速度/g	度步长/g	试验过程	备注
天然含水率模型	20×20×30	0	80	5	离心加速度分级加至 50g— 浸水至饱和一分级加至 80g	每级离心加速度待变形稳定后再 加下一级; 当离心加速度至 50g 时, 运行较长时间。连续拍摄照 片观察变形, 稳定标准为连续多 张照片位移无变化。
饱和模型	20×20×30	0	80	5	模型饱和, 密封静置 48 h— 离心加速度分级加至 80g	

注: 模型率为 50, 在离心加速度为 50g 时浸水, 离心加速度为 50g, 对应场地土层厚度为 15 m, 但为了保证数据的完整性, 离心加速度最大到 80g, 离心加速度为 80g 时, 对应场地土层厚度为 24 m。

表 5 模型基本情况

Table 5 Basic conditions of models

模型土样	层数	模型土层类型	模型层高 /cm	代表场地深度 /m	尺寸(长×宽×高) /(cm×cm×cm)	初始含水率 /%	干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )
天然含水率模型	第一层	Q <sub>3</sub> 新黄土	20.80	0.00~10.40		15.4	1.27
	第二层	Q <sub>3</sub> 古土壤	5.00	10.40~12.90	20×20×30	15.4	1.44
	第三层	Q <sub>2</sub> 老黄土	4.20	12.90~15.00		15.6	1.41
饱和模型	第一层	Q <sub>3</sub> 新黄土	20.80	0.00~10.40		15.4	1.27
	第二层	Q <sub>3</sub> 古土壤	5.00	10.40~12.90	20×20×30	15.4	1.44
	第三层	Q <sub>2</sub> 老黄土	4.20	12.90~15.00		15.6	1.41

变形, 即得到双线法的湿陷变形, 试验基本内容见表

4。模型高 0.3 m, 场地黄土深 15 m, 模型率 N=50。

## (2) 试验设备

本次试验在清华大学 50g·t 土工离心试验机上进行, 离心机采用不等臂的梁式设计, 转臂负荷中心至旋转中心距离为 2 m, 最大离心加速度为 250g, 挂斗有效空间为 75 cm×50 cm×60 cm。离心试验机如图 2 所示。试验用模型箱净空尺寸为 50 cm×35 cm×20 cm, 模型箱一侧为 5.8 cm 厚的有机玻璃板, 其余均为铝合金板, 模型箱底盘安装两根木条, 形成排水通道, 木条上安装透水板, 并铺设土工布。



图 2 离心模型试验机

Fig. 2 50 g·t centrifuge

## (3) 量测仪器

模型的位移场通过非接触量测系统测定, 摄像装置设置在离心机挂斗一侧。试验过程中, 摄像系统高速采集高质量的照片和视频, 记录模型土体的变化。试验结束后, 从视频和照片中选取不同离心加速度时的照片, 采用清华大学开发的软 GIPSv3.4 对照片进行分析, 得到模型土体在各离心加速度下, 标志点的位置变化, 进而计算土体的累计位移。非接触量测系统可采集模型侧面任意点任意时刻的位移。

## (4) 模型设计和制备

黄土地由 3 层不同性质的黄土组成, 根据场地实际, 模型由 3 层组成, 基本情况见表 5。天然含水率模型和饱和模型的制作方法相同。先将典型层原状土样按照预定的尺寸切削平整, 为了保证每层土样的高度和平整度符合要求, 削样时当土样接近目标尺寸时, 将土样放入提前制作好的模具中修整, 模具的高度与土样目标高度相同, 长、宽比土样目标尺寸略大。然后卸下模型箱有机玻璃板, 按照原场地顺序将 3 层模型原状土样叠合整齐, 放置在模型箱中间位置, 放置时原状样长边一侧要与模型箱底板外边界处在同一平面上, 放好原状土样后装好有机玻璃板, 并确保原状样长边贴紧有机玻璃板内侧, 在原状土样其余三侧用相同含水率和密度的重塑土填充, 重塑土采用分层压实的方法, 每 2 cm 为一层, 逐层压实填充。该方法

具有较好的压实效果, 且对原状土样模型的扰动小。土样模型装好后, 卸下模型箱有机玻璃板, 在与有机玻璃板接触的土样表面贴一层湿纸巾, 然后用大头针将一定厚度的泡沫板嵌入模型中, 使模型侧面形成具有较大色彩差 (RGB 值) 的量测区域, 以便挂斗侧壁的摄像系统在离心机运转时, 记录模型箱中土体的位移变化, 最后, 装好有机玻璃板, 进行下一步试验。饱和模型采用抽气饱和法饱和, 将制好的模型放入抽气饱和箱进行饱和, 密封静置 48 h, 使模型饱和充分。制作好的饱和模型和天然含水率模型见图 3, 4。



图 3 饱和土样模型

Fig. 3 Saturated model



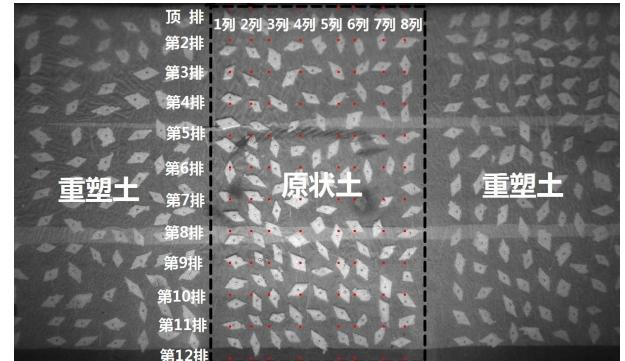
图 4 天然含水率土样模型

Fig. 4 Model made of soil with natural moisture content

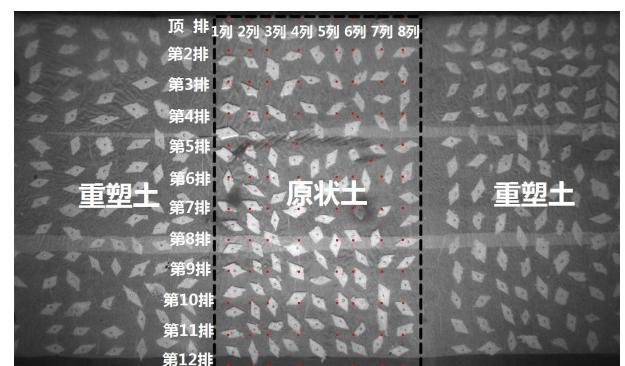
### 3 试验结果分析

#### 3.1 天然含水率模型的压缩变形特性

图 5 为摄像系统采集的天然含水率模型在试验前后的压缩变形情况, 图 5 (a) 为天然含水模型在试验前的情况, 图 5 (b) 为天然含水率模型在离心加速度加至 50g, 变形稳定时的情况。由图可见, 在离心加速度加至 50g 时, 模型的原状土和重塑土在试验前后肉眼几乎看不出有变形产生, 说明在自重压力下, 土样的压缩性较小。



(a) 试验前



(b) 试验后

图 5 天然含水率模型压缩变形情况

Fig. 5 Compressive deformations of natural moisture content model

在天然含水率模型的原状土样上标注 12 排、8 列位移标志点, 每排标志点的沉降情况代表对应原状土层的变形情况, 顶层标志点的位移代表场地的总变形。将天然含水率模型试验的离心加速度逐级加至 50g, 待变形稳定后, 将模型在顶排, 2, 4, 6, 8, 10 排的位移标志点的压缩变形值绘图 6 (a), 将模型在第 1 至 8 列的位移标志点的压缩变形值绘图 6 (b), 天然含水率模型的原状土在离心加速度为 50g 时的变形, 模拟现场 15 m 厚黄土地基的压缩变形情况, 由图 6 (a) 可知, 各层的压缩变形较为均匀, 由图 6 (b) 可知, 随着模型深度的增加, 压缩变形整体呈减小的趋势变化, 在 10.23 cm 深度处模型的压缩变形骤然减小, 最小值为 0.029 mm。

根据图 6 (a) 可知, 模型顶层稳定压缩变形均值为 1.82 mm, 按离心模型率  $N=50$  计算, 可得该场地的压缩变形值为 91.00 mm。

#### 3.2 浸水沉降变形分析

##### (1) 沉降变形随加速度变化规律

天然含水率模型离心加速度加至 50g, 压缩变形稳定后开始浸水, 由于施加离心加速度后模型土层的渗透系数是原型土层的  $N$  倍, 模型土层可在较短的时间内达到饱和状态, 饱和后, 继续运行较长时间, 待

变形稳定后，继续逐级增加离心加速度至80g。天然含水率模型、饱和模型在离心加速度加至80g时的沉降变形情况见图7。由图7可知，沉降变形随离心加速度的增加呈阶梯状增大，天然含水率模型试验的单线法与饱和模型试验的双线法在离心加速度为50g时变形沉降情况与室内试验相近，说明单线法和双线法同样适合离心模型试验，且离心模型试验的饱和湿陷量与增湿路径无关。模型在离心加速度至50g，变形稳定后，继续增加离心加速度至80g，饱和模型与天然含水率模型均继续发生沉降变形，且离心加速度在50g至80g间的沉降变形量约为50g饱和稳定时沉降变形量的40%~50%。

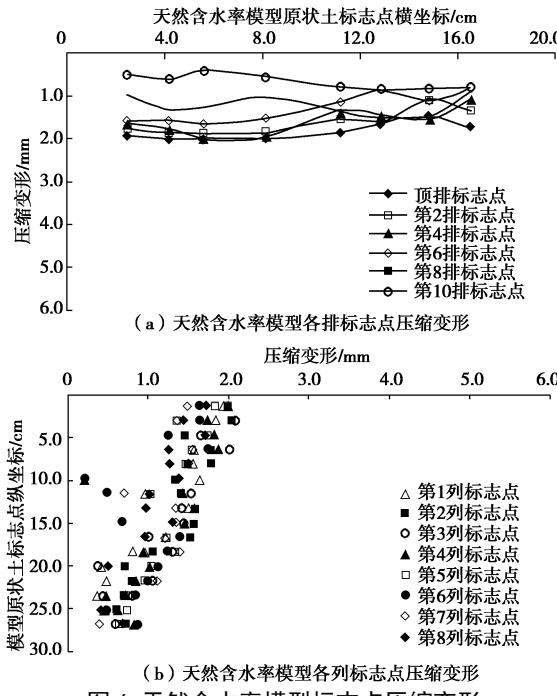


图6 天然含水率模型标志点压缩变形

Fig. 6 Compressive deformations of markers for natural moisture content model

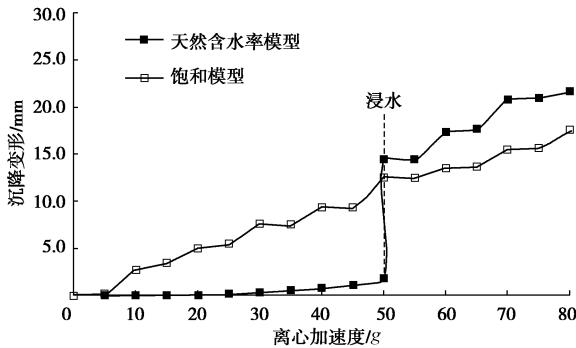


图7 沉降变形与离心加速度的关系

Fig. 7 Displacement-centrifugal acceleration curves

## (2) 分层沉降变形

在饱和模型的原状土样上标注12行位移标志点，将模型的顶排，2, 4, 6, 8, 10排的位移标志点在离心加速度逐级加至50g, 80g时的沉降变形值绘图8

(a), (b)。由图8可知，各层土样的沉降变形较为均匀，随着深度的增加，各排标志点的沉降变形逐渐增大。顶排至第8排位移标注点间，各排之间的沉降变形差较小，第8排与第10排的沉降变形差值较大，因为浅层处土样自重压力较小，随着深度增加，自重压力逐渐增大，土体结构破坏产生了较大的变形。

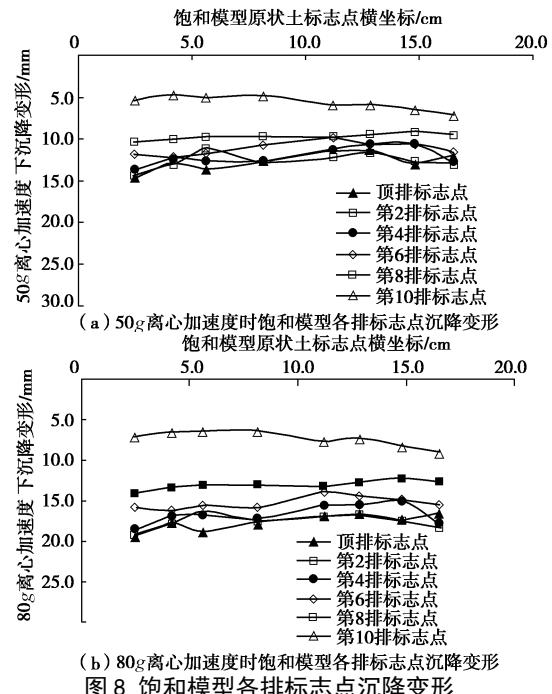
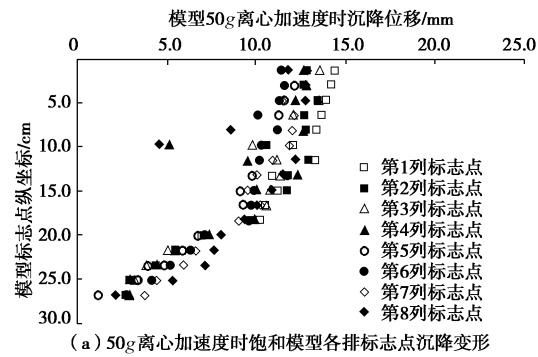


图8 饱和模型各排标志点沉降变形

Fig. 8 Displacements of markers for saturated model

## (3) 沉降变形分布形态

在饱和模型的原状土样上标注8列位移标志点，将各列位移标志点在离心加速度逐级加至50g, 80g时的沉降变形值绘图9(a), (b)。由图9可知，饱和模型的沉降变形与天然含水率模型的压缩变形表现出相似的变化趋势，均随深度增加而减小，且在10.23 cm深度处沉降变形骤减。对比图9(a), (b)可知，80g离心加速度下模型总沉降变形平均值17.61 mm, 50g离心加速度下模型总沉降变形平均值12.60 mm, 80g离心加速度下总沉降变形是50g的1.4倍，说明土体在50g离心加速度下仍在发生变形，未达到变形稳定的固结阶段。



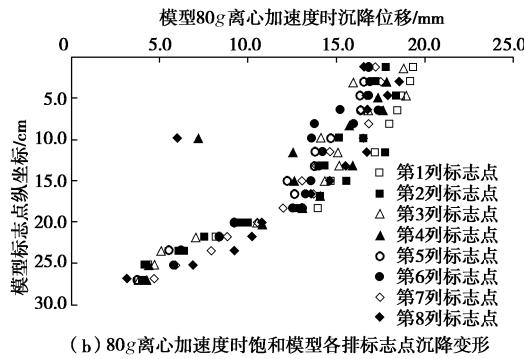


图 9 饱和模型各列标志点沉降变形

Fig. 9 Displacements of markers for saturated model

### 3.3 湿陷变形分析

采用双线法离心模型试验的结果对湿陷变形规律进行分析。离心模型试验中的双线法原理与室内湿陷试验原理相同, 采用天然含水率和饱和含水率两个土样模型。天然含水率模型在 50g 下的压缩变形的 50 倍, 就是原型地基在天然含水率时的自重作用下的压缩变形值; 饱和模型在 50g 下的压缩变形的 50 倍, 就是原型地基在饱和自重作用下的压缩变形值, 两者相减就是原型地基的自重湿陷量。

模型顶排, 2, 4, 6, 8, 10 排的位移标志点在离心加速度为 50g, 80g 时的湿陷变形情况见图 10 (a), (b)。由图 10 可知, 模型下部土层的湿陷变形比上部土层均匀, 第 8 至第 10 排土层的湿陷变形值较大, 与总沉降变形规律相似。模型第 1 至 8 列的位移标志点在离心加速度为 50g, 80g 时的湿陷变形情况见图 11 (a), (b)。由图 11 可知, 随着深度的增加, 黄土的湿陷变形逐渐减小, 当深度小于 20 cm 时, 湿陷变形减小缓慢, 当深度大于 20 cm 时, 湿陷变形减小的速度较快, 且在 10.23 cm 深度时, 湿陷变形发生骤减。

由图 10 (a) 可知, 双线法得到的模型在 50g 离心加速时的湿陷变形均值为 10.78 mm, 结合比尺关系计算可得该场地的自重湿陷量为 539.00 mm, 属 IV 级自重湿陷性场地。

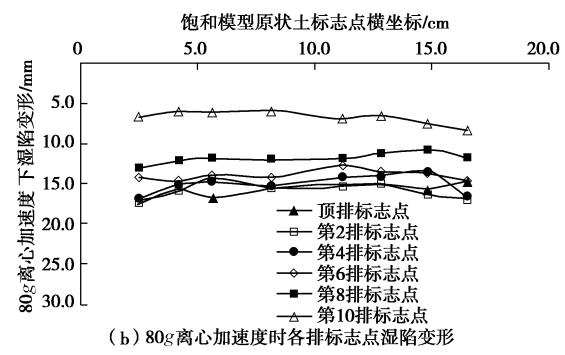
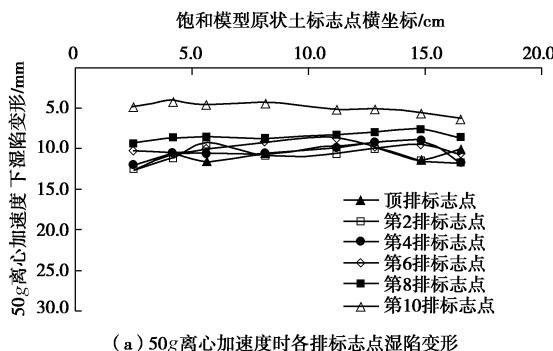


图 10 各排标志点湿陷变形

Fig. 10 Collapsibile deformations of markers

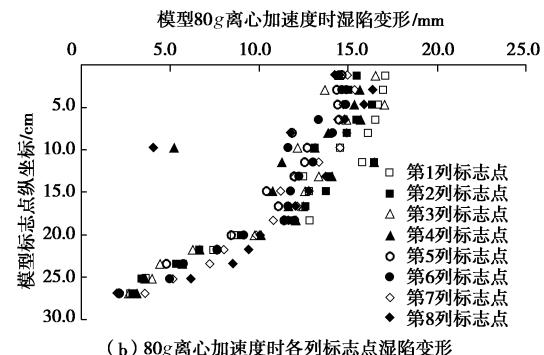
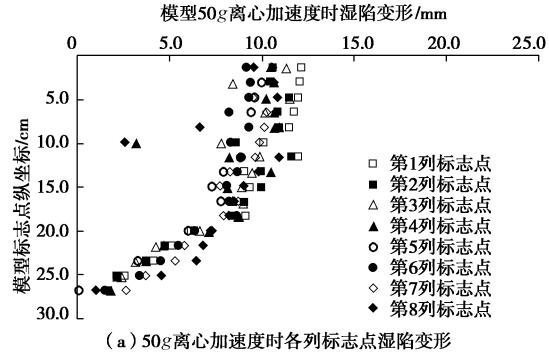


图 11 各列标志点湿陷变形

Fig. 11 Collapsibile deformations of markers

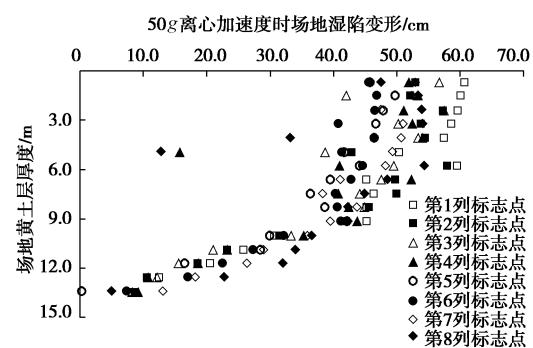


图 12 场地地基深度与总沉降变形关系

Fig. 12 Relationship between total settlement and foundation

场地自重湿陷量随深度变化情况如图 12 所示, 由图可知, 场地的湿陷变形随着深度的变化表现为由浅到深逐步减小的趋势。10.4 m 以上自重湿陷量较大,

其以下湿陷量急剧减小。场地 10.4 m 以上为 Q<sub>3</sub> 新黄土, 其干密度小, 含水率低, 自重湿陷量较大; 而 10.4 m 以下为 Q<sub>3</sub> 古土壤和 Q<sub>2</sub> 老黄土, 其干密度大, 湿陷量较 Q<sub>3</sub> 新黄土小。

### 3.4 地层变形分析

布里村黄土地由 Q<sub>3</sub> 新黄土、Q<sub>3</sub> 古土壤、Q<sub>2</sub> 老黄土 3 种土层类型组成, 各土层类型因形成年代和成因不同而具有不同的变形特性, 模型和场地各土层类型变形情况见表 6。由表 6 可知, Q<sub>3</sub> 新黄土层具有较大的湿陷性, 且压缩性较小, 该土层湿陷变形占场地总湿陷变形的 51%, 压缩变形占该层总变形的 14%, 这是由于 Q<sub>3</sub> 新黄土地质疏松, 大孔隙结构发育, 具有较强的湿陷敏感性。Q<sub>3</sub> 古土壤层的湿陷性较 Q<sub>3</sub> 新黄土层小, 压缩性小, 该土层的湿陷变形占场地总湿陷变形的 29%, 压缩变形占该层总变形的 6%; 这是由于 Q<sub>3</sub> 古土壤层质地密实, 具有较大的结构强度。Q<sub>2</sub> 老黄土层较密实, 由于上覆压力较大, 在高压下 Q<sub>2</sub> 老黄土层产生了一定的湿陷变形和压缩变形, 该土层湿陷变形占场地总湿陷变形的 19%, 压缩变形占该层总变形的 25%, Q<sub>2</sub> 老黄土层的离心试验的自重湿陷量结果与室内试验结果存在差异, 分析其原因主要有两方面: 一是室内湿陷试验结果由于土样扰动等影响与实际湿陷情况存在一定差异, 离心模型试验其实与现场浸水试验情况类似, 也会与室内湿陷试验存在不相符的情况, 两者出现矛盾是正常的。二是大量研究显示, Q<sub>2</sub> 黄土在高压力下存在湿陷性, 很多 Q<sub>2</sub> 黄土的现场浸水试验测得的湿陷量较小, 其主要原因是现场黄土中存在多层古土壤的隔水作用, 使得水分渗入深度受限所致。而本试验中的 Q<sub>2</sub> 黄土土样中没有古土壤, 模型中的古土壤实为 Q<sub>3</sub> 黄土, 因此, 离心模型试验的湿陷性较大。

表 6 各地层变形情况

Table 6 Deformations of soil layers

类别	土层	地层 类型	50g 离心加速度时		
			压缩量 /mm	沉降量 /mm	湿陷量 /mm
模型	第一层	Q <sub>3</sub> 黄土	0.94	6.49	5.55
	第二层	Q <sub>3</sub> 古土壤	0.19	3.32	3.13
	第三层	Q <sub>2</sub> 黄土	0.69	2.79	2.10
	$\Sigma$		1.82	12.60	10.78
原型 场地	第一层	Q <sub>3</sub> 黄土	47.00	324.50	277.50
	第二层	Q <sub>3</sub> 古土壤	9.50	166.00	156.50
	第三层	Q <sub>2</sub> 黄土	34.50	139.50	105.00
	$\Sigma$		91.00	630.00	539.00

### 3.5 离心模型试验方法论证

(1) 室内试验结果得出咸阳渭城区布里村自重湿陷性黄土 15 m 深度的总自重湿陷量为 345.6 mm, 现

场浸水试验得出场地自重湿陷量最大值为 554.0 mm, 从而计算出其地区修正系数  $\beta_0$  值为 1.60。本次离心模型试验结果得出该场地 15 m 深度的自重湿陷性黄土总自重湿陷量为 539.0 mm, 与室内计算的自重湿陷量 345.6 mm 相比得出, 离心模型的  $\beta_0$  值为 1.56。离心模型试验与现场浸水试验求得的  $\beta_0$  值相差 0.04, 其相对误差为 2.5%, 说明多地层离心模型试验方法结果较接近现场浸水试验实测值, 能够较好地评价场地的自重湿陷性。

(2) 离心模型试验结果与现场实测值是否相近, 主要由模型与现场的相似程度决定。本试验模型中间为原状土样, 其余三侧用相同密度和含水率的重塑土分层填筑而成。试验过程中, 重塑土样的变形相比原状土样呈现出变形快, 沉降量大的特点, 对原状土样的沉降有一定带动影响。因此, 有条件时应该全部采用原状样进行。

(3)  $\beta_0$  值是黄土地自重湿陷性评价的重要参数, 黄土规范规定关中地区取 0.90, 主要针对低阶地的平原区。而本试验场地位于渭河北边高阶地的黄土塬区, 得到的  $\beta_0$  值为 1.60, 该值可为关中高阶地黄土塬区场地参考。

## 4 结 论

(1) 对比咸阳渭城区布里村自重湿陷性黄土的室内湿陷试验、现场浸水试验和离心模型试验果表明: 室内试验历时短, 费用低, 但误差较大; 现场浸水试验最为直观和可靠, 但工程量大、历时长, 资金花费大; 离心模型试验结果与现场浸水试验基本接近而费用小和周期短, 是进行重要工程场地自重湿陷性评价的有效手段。

(2) 黄土自重湿陷变形的典型层离心模型试验法存在假定场地各个地层的  $\beta_0$  值均相同的缺陷, 而本文提出的包含地基多个地层的多地层离心模型试验方法放弃了以上假定, 试验结果得到的  $\beta_0$  值与现场浸水试验的相对误差为 2.5%, 说明本文提出的多地层离心模型试验方法优于典型层法。

(3) 双线法离心模型试验求得的场地在不同深度下的自重湿陷量变化趋势与室内双线法试验结果基本一致, 说明黄土湿陷试验的双线法对离心模型试验同样适用。

## 参考文献:

- [1] 李 涛, 蒋明镜, 张 鹏. 非饱和结构性黄土侧限压缩和湿陷试验三维离散元分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊 1): 39 - 44. (LI Tao, JIANG Ming-jing, ZHANG Peng.

- DEM analyses of oedometer and wetting tests on unsaturated structured loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S1): 39 - 44. (in Chinese))
- [2] 杨玉生, 李 靖, 邢义川, 等. 压实黄土增湿变形性质及其影响因素试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(4): 626 - 635. (YANG Yu-sheng, LI Jing, XING Yi-chuan, et al. Experimental study on moistening deformation characteristics of compacted loess and their influencing factors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(4): 626 - 635. (in Chinese))
- [3] 张爱军, 邢义川, 胡新丽, 等. 伊犁黄土强烈自重湿陷性的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(增刊2): 117 - 122. (ZHANG Ai-jun, XING Yi-chuan, HU Xin-li, et al. Influence factors of strong self-weight collapsibility of Ili loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(S2): 117 - 122. (in Chinese))
- [4] 张爱军, 王毓国, 邢义川, 等. 伊犁黄土总吸力和基质吸力水特征曲线拟合模型[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(6): 1040 - 1049. (ZHANG Ai-jun, WANG Yu-guo, XING Yi-chuan, et al. SWCC fitting models of total and matrix suction for Ili loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(6): 1040 - 1049. (in Chinese))
- [5] 张爱军, 邢义川, 汪海涛, 等. 基于增湿变形的渠道工程黄土渠基湿陷性评价方法[J]. 水利学报, 2017, **48**(1): 41 - 51, 60. (ZHANG Ai-jun, XING Yi-chuan, WANG Hai-tao, et al. Evaluation method for collapsibility of channel engineering with loess foundation based on moistening deformation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, **48**(1): 41 - 51, 60. (in Chinese))
- [6] 杨生彬. 兰州某工程黄土湿陷性室内与现场试验对比分析[J]. 工程勘察, 2017(增刊2): 301 - 305. (YANG Sheng-bing. Comparative study on laboratory test and field tests of collapsible loess in Lanzhou[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2017(S2): 301 - 305. (in Chinese))
- [7] 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(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(3): 382 - 389. (in Chinese))
- [8] 安 鹏, 邢义川, 张爱军, 等. 基于离心模型试验的深厚湿陷性黄土自重湿陷性评价研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, **48**(6): 23 - 30. (AN Peng, XING Yi-chuan, ZHANG Ai-jun, et al. Research on evaluation of self-weight collapsibility for large-thickness collapsible loess using centrifugal model test[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, **48**(6): 23 - 30. (in Chinese))
- [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 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))
- [10] 张建红, 孙国亮, 鲁晓兵. 离心机中动冰荷载的模拟[J]. 岩土工程学报, 2005(4): 474 - 477. (ZHANG Jian-hong, SUN Guo-liang, LU Xiao-bing. Centrifuge modeling of copper ion migration in unsaturated silty clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005(4): 474 - 477. (in Chinese))
- [11] 侯瑜京, 彭 仁, 张雪东, 等. 垃圾土边坡失稳离心模拟试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, **15**(4): 241 - 249. (HOU Yu-jing, PENG Ren, ZHANG Xue-dong, et al. Centrifuge modeling of municipal solid waste slope failure[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017, **15**(4): 241 - 249. (in Chinese))
- [12] 贾 杰, 裴向军, 谢 睿, 等. 延安市阳崖黄土边坡开挖破坏离心模拟试验研究[J]. 工程地质学报, 2016, **24**(1): 1 - 9. (JIA Jie, PEI Xiang-jun, XIE Rui, et al. Centrifugal simulation experiment for a loess cutting slope at Yangya, Yanan city, China[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, **24**(1): 1 - 9. (in Chinese))
- [13] 杜延龄, 韩边兵. 土工离心模型试验技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (DU Yan-ling, HAN Lian-bing. Geotechnical Centrifuge Model Test Technology[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2010. (in Chinese))