

DOI: 10.11779/CJGE201703001

# 基于离心模型试验的黄土湿陷试验新方法研究

邢义川<sup>1</sup>, 金松丽<sup>1</sup>, 赵卫全<sup>1</sup>, 张爱军<sup>2</sup>, 安 鹏<sup>3</sup>, 张 博<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;  
3. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 黄土湿陷试验方法主要有室内试验和现场浸水试验两种: 室内试验方法, 大部分情况试验结果很难反映工程实际; 现场浸水试验, 试验周期长, 费用昂贵, 因此需要另辟蹊径。以新疆伊犁强烈自重湿陷性黄土为对象, 开展了湿陷特性的离心模型试验, 并将离心模型试验成果与现场浸水试验成果以及室内试验成果进行了对比, 提出了一个基于离心模型试验的黄土湿陷试验新方法。研究表明: 黄土湿陷的离心模型试验同样可以采用双线法和单线法进行, 离心模型试验得到的侧压力系数变化规律同室内试验得到的侧压力系数变化规律相一致, 通过离心模型试验求得的修正系数  $\beta_0$  值与现场浸水试验得到的值相近, 证明了基于离心模型试验的黄土湿陷试验新方法可以得到与现场大型浸水试验相近的结果。

**关键词:** 黄土; 湿陷性; 离心模型试验; 地区修正系数; 侧压力系数

**中图分类号:** TU43      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000 - 4548(2017)03 - 0389 - 10

**作者简介:** 邢义川(1956 - ), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水利工程与岩土力学问题研究。E-mail: xingych@iwhr.com。

## New experimental method for loess collapsibility using centrifugal model tests

XING Yi-chuan<sup>1</sup>, JIN Song-li<sup>1</sup>, ZHAO Wei-quan<sup>1</sup>, ZHANG Ai-jun<sup>2</sup>, AN Peng<sup>3</sup>, ZHANG Bo<sup>2</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydro-power Research, Beijing 100048, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. College of Geology Engineering & Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The methods for loess collapsibility mainly include field immersion testing method and laboratory testing method. A majority of the results of laboratory testing method differ greatly from the engineering practice. The disadvantages of field immersion testing method are high cost and long testing period. Therefore, a different approach is required. A type of strong collapsible loess under overburden pressure from Ili, Xinjiang is tested based on centrifugal model tests. The results of centrifugal model tests are compared with those of field immersion tests and conventional laboratory collapsible loess tests. The experimental study demonstrates that the Single-line and double-line methods are applicable in measuring the loess collapsibility using centrifugal model tests. The coefficient of lateral earth pressure obtained from the centrifugal model tests is comparable with the value measured by the conventional laboratory tests. The results obtained from the centrifugal model tests are proposed using the correction parameter  $\beta_0$ . The good agreement in the experimental study using centrifugal model tests and the field immersion tests shows that the proposed method can be used as an effective method in measuring loess collapsibility.

**Key words:** loess; collapsibility; centrifugal model test; area correction factor; coefficient of lateral earth pressure

## 0 引言

黄土的湿陷性是指黄土在力和水共同作用下能够发生湿陷变形, 若湿陷变形是由自重引起, 称为自重湿陷性, 若湿陷变形由重力和附加荷载共同引起称为非自重湿陷性。目前判定黄土湿陷性的试验方法有室内湿陷试验和现场浸水试验两种。在室内湿陷试验方法中主要有  $K_0$  应力状态的试验和三轴压缩应力状态

试验<sup>[1]</sup>,  $K_0$  应力状态的试验是《湿陷性黄土地区建筑规范》(简称黄土规范)规定的方法<sup>[2]</sup>, 该类试验的优点是: 第一, 试验方法简单, 便于工程应用; 第二, 黄土规范经过 50 多年的应用和 5 次修订, 积累了丰富

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379220, 51279171)

收稿日期: 2016-06-16

的实践经验。缺点是土样的取样和运输产生一定扰动，应力状态与工程实际有一定差别，大部分情况试验结果很难反映实际情况，实际应用中需要乘一个因地区土质而异的修正系数  $\beta_0$ 。三轴压缩应力状态试验是克服  $K_0$  应力状态试验存在的不足而提出来的，也开展了不少研究工作，取得了一定研究成果<sup>[3-5]</sup>，但该类试验同样存在土样的取样和运输产生一定扰动，而且试验复杂等问题，迄今为止未在工程中广泛应用。

现场浸水试验是对湿陷性黄土地基进行浸水，同时测定该地基湿陷变形规律，对于大型或重要工程都要进行此类试验。其优点是较好地反映实际，缺点是费时费钱，做一个试验少则需要几个月，多则需要几年，试验费用相应昂贵，对于有些场地可能无法开展此类试验。

离心模型试验是岩土工程领域最佳的物理模拟试验。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。对于土性材料，为满足应力和应变的相似定律，一般采用原型材料，按原型的密度制作模型<sup>[6]</sup>。离心模型试验由于其巨大的优势，被广泛应用在岩土工程领域各个方面，在黄土的地基工程、边坡工程和洞室工程都有应用<sup>[7-9]</sup>。但是由于黄土的湿陷性比较复杂，目前鲜见有该方面离心模型试验研究的报道。

本文以新疆伊犁强烈自重湿陷性黄土为对象，开展了湿陷特性的离心模型试验，并将离心模型试验成果与现场浸水试验成果以及室内试验成果进行了对比，提出了一种基于离心模型试验的黄土湿陷试验新方法。

## 1 黄土湿陷的离心模型试验方法描述

黄土规范中，计算自重湿陷量的公式如下所示：

$$\Delta p = \beta_0 \sum_{i=1}^n \delta_{si} h_i \quad (1)$$

式中  $\Delta p$  为自重湿陷量 (mm)； $\delta_{si}$  为第  $i$  层土在饱和自重压力下的湿陷系数； $h_i$  为第  $i$  层土的土层厚度 (mm)； $\beta_0$  地区修正系数。

式 (1) 中  $\beta_0$  可由现场浸水试验和室内湿陷试验得到

$$\beta_0 = \Delta / \sum_{i=1}^n \delta_{si} h_i \quad (2)$$

表 1 伊犁黄土物理参数表

Table 1 Parameters of Ili loess

粒组含量			比重	液限	塑限	塑性指数	土的分类
砂砾(>0.075 mm)	粉粒 0.075~0.005 mm	黏粒<0.005 mm	$G_s$	$w_L$	$w_p$		
0.60%	76.40%	23.00%	2.72	29.2%	19%	10.2	CL

式中  $\sum_{i=1}^n \delta_{si} h_i$  为各土层室内试验湿陷计算值之和； $\Delta$  为黄土地基现场浸水试验湿陷实测值。

本文依据  $\beta_0$  系数的这些特性，提出利用离心模型试验取代现场浸水试验求取该系数的两种方法：

(1) 完全模拟实际的方法：对于存在多层不同性质的黄土的地基，可以根据实际土层的厚度和分布，制作缩尺  $n$  倍的分层原状土样薄片；将各薄片按照实际上下排列的顺序水平向紧密叠合在一起制成模型；把模型放入离心机中施加  $ng$  的加速度进行黄土地基的湿陷模拟；由式 (2) 将模型试验湿陷值与室内试验湿陷计算值之比得到  $\beta_0$ 。这种方法能完全模拟工程实际，但一般黄土层较多，各层的密度和湿度不同，模型制作有一定难度。

(2) 黄土地基典型层模拟方法：若离心模型试验不能模拟整个地基的湿陷性，但根据式 (1) 含义，可以设想以地区修正系数  $\beta_0$  值为桥梁，通过黄土代表层土体离心模型试验达到与现场浸水试验相同的效果。即在多层的黄土地基中选出一个典型层，按照该层原状土的密度和湿度制作模型，并放入离心机中施加  $ng$  的加速度进行黄土地基的湿陷试验；将引起该层黄土湿陷的上覆饱和自重压力的实际值与模型试验值相等，求取离心模型试验的湿陷变形；由式 (2) 将该值与室内试验湿陷计算值进行比较得到  $\beta_0$ 。

## 2 新疆伊犁黄土的湿陷试验

本文以新疆伊犁强烈自重湿陷性黄土为对象，开展了室内湿陷试验、现场浸水试验和离心模型湿陷试验，以下逐一介绍。

### 2.1 室内湿陷试验简介

#### (1) 试验土样情况

土样取自新疆伊犁某河 IV 级阶地设计的一条渠道地基处，属于  $Q_3^{col}$  地层。土层从上到下分别为：0~0.4 m 腐殖质黑土；0.4~30 m 风成黄土，土质较均匀，存在大孔隙，属于典型的  $Q_3$  风成原生黄土；30 m 以下为冰积砂砾石层。该场地土样的物理参数见表 1 所示。

#### (2) 室内湿陷试验内容

a) 结合现场浸水试验测定各层黄土自重湿陷系数：在试坑浸水试验前，在现场 30 m 深度内每 1 m 取一个原状土样开展室内自重湿陷系数试验，每米自重湿陷系数试验值见表 2 所示。

表 2 试验结果和现场湿陷量计算值

Table 2 Test results and calculated values of self-weight collapse

深度/m	层厚/m	含水率/%	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	自重湿陷系数	自重湿陷量/m	饱和密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	饱和自重应力/kPa
1	1	7.4	1.24	0.0622	0.0622	1.78	17.468
2	1	8.9	1.24	0.0626	0.0626	1.78	34.936
3	1	10.4	1.22	0.0620	0.0620	1.77	52.280
4	1	10.0	1.22	0.0621	0.0621	1.77	69.624
5	1	8.7	1.22	0.0621	0.0621	1.77	86.968
6	1	9.0	1.19	0.0711	0.0711	1.75	104.127
7	1	14.2	1.21	0.0388	0.0388	1.76	121.409
8	1	8.5	1.33	0.0408	0.0408	1.84	139.434
9	1	6.7	1.34	0.0558	0.0558	1.85	157.520
10	1	7.4	1.39	0.0578	0.0578	1.88	175.915
11	1	7.3	1.40	0.0506	0.0506	1.88	194.373
12	1	7.2	1.41	0.0638	0.0638	1.89	212.892
13	1	7.2	1.41	0.0518	0.0518	1.89	231.411
14	1	7.7	1.36	0.0726	0.0726	1.86	249.621
15	1	6.7	1.40	0.0726	0.0726	1.88	268.078
16	1	7.7	1.39	0.0492	0.0492	1.88	286.474
17	1	9.5	1.36	0.059	0.0590	1.86	304.683
18	1	7.4	1.40	0.0724	0.0724	1.88	323.141
19	1	6.6	1.42	0.0701	0.0701	1.90	341.722
20	1	7.3	1.36	0.0701	0.0701	1.86	359.932
21	1	6.5	1.34	0.0660	0.0660	1.85	378.018
22	1	7.8	1.31	0.0910	0.0910	1.83	395.919
23	1	14.0	1.31	0.0870	0.0870	1.83	413.819
24	1	16.9	1.25	0.0870	0.0870	1.79	431.349
25	1	10.9	1.32	0.1090	0.1090	1.83	449.312
26	1	12.6	1.31	0.1090	0.1090	1.83	467.212
27	1	11.3	1.33	0.0890	0.0890	1.84	485.237
28	1	18.3	1.18	0.1160	0.1160	1.75	502.334
29	1	15.8	1.24	0.0900	0.0900	1.78	519.801
30	1	12.8	1.37	0.0900	0.0900	1.86	538.073
$\Sigma$				2.1415			

b) 室内侧压力系数测定: 在进行湿陷系数试验的同时, 测定黄土试样湿陷后的侧压力, 并换算出不同竖向压力下的侧压力系数值, 见表 3 所示。由于试验仪器顶部排水, 所以表 3 中的压力为有效应力。

表 3 室内试验侧压系数变化表

Table 3 Test results of coefficient of lateral earth pressure

竖向压力/kPa	侧压力/kPa	侧压力系数
50	21.5	0.43
100	42	0.42
200	94	0.47
400	180	0.45
600	288	0.48

## 2.2 现场浸水试验简介

### (1) 现场浸水试坑布置

浸水试坑布置在湿陷性黄土较厚的渠线上, 试坑

为圆形, 直径为 30 m, 试坑深度为 1 m, 在试坑底部铺设 10 cm 厚砂砾石层作为缓冲材料, 防止水流冲刷黄土。为了加速浸水湿陷, 按照 120° 夹角将试验坑划分为 3 个区域, 两个区域布设注水孔。注水孔直径 13 cm, 孔深 20 m, 数量 35 个, 密实填充砂砾石。监测内容包括表面沉降量和土体水分, 表面变形观测点沿半径 3.5, 6.5, 9.5, 12.5 m 布设觇标, 角度方向上由试坑圆心分别按 30° 间隔布设, 总计 35 个。为了确保数据的精度, 布设国家二级测量控制网, 采用水准测量法观测表面的变形。土体水分传感器 (TDR-3 型) 采用自制的 PVC 套筒安装并下沉到一定深度, 共计 4 个孔, 分别布设在距圆心 12.5 m 和 14 m 位置, 沿深度共埋设 32 个, 最深传感器可达 30 m。试验详情见文献[10]。

### (2) 试坑浸水观测结果

表 4 模型的初始情况

Table 4 Initial conditions of models

模型编号	取样深度 /m	模型类型	削样后尺寸 长×宽×高/(cm×cm×cm)	初始含水率 /%	干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	比重
1	12.5~13	天然含水率模型	22×15×26	7.27	1.40	2.72
2	15.5~16	饱和模型	20×13.5×27.5	8.24	1.42	2.72

试验的具体时间为：2012年11月~12月开挖试坑并建设供水系统，2013年5月~7月埋设仪器，2013年8月~2014年4月进行浸水和观测工作，2014年6月取样验证浸水效果，历时18个月。由土体水分传感器观测结果看坑内30 m深度范围已达到饱和；土体湿陷变形观测结果看东南区域湿陷量最大值为353.3 cm，西北区域湿陷量最大值为352.3 cm。

## 2.3 黄土湿陷的离心模型试验

### (1) 离心模型试验方案

a) 模拟方法选择：按照本文第1章描述，黄土湿陷的离心模型试验有两种方法，由于土样的限制无法开展第1种方法（完全模拟实际方法），为此本文采用第2种方法（黄土地基典型层模拟方法）。

b) 典型层确定：在表2中可见现场黄土地基厚30 m，其中深度1~9 m，干密度范围为1.19~1.34 g/cm<sup>3</sup>，平均值为1.246 g/cm<sup>3</sup>，干密度差为4.5%~7.5%，天然含水率范围为6.7%~14.2%，平均值为9.31%，含水率差为2.61%~4.89%；深度10~19 m干密度范围为1.36~1.42 g/cm<sup>3</sup>，平均值为1.394 g/cm<sup>3</sup>，干密度差为2.4%~1.87%，天然含水率范围为6.6%~9.5%，平均值为7.47%，含水率差为0.87%~2.03%；深度20~30 m干密度范围为1.18~1.37 g/cm<sup>3</sup>，平均值为1.302 g/cm<sup>3</sup>，干密度差为9.4%~5.2%，天然含水率范围为6.5%~18.3%，平均值为12.2%，含水率差为5.7%~6.1%。通过比较，10~19 m这层黄土的天然含水率和干密度变化幅度较小，土质较为均匀，因此选这10 m厚的黄土作为模拟对象。

c) 湿陷试验的单线法和双线法离心模型模拟：室内湿陷试验有单线法和双线法两种，单线法试验是将几个土样（一般为5个样）在不同上覆压力状态下浸水（先加压后浸水），得到一条压力和湿陷系数的变化曲线；双线法是采用两个土样，其中一个土样在天然含水率下进行压缩试验，得到压缩变形量，另外一个土样饱和后进行压缩试验（先浸水后加压），将相同压力下后一组试验的压缩变形量减去前一组的值就可以得到相应的湿陷量。这两种方法各有特点，但都可以用于工程，具有等价性<sup>[11~12]</sup>。单线法和双线法的区别主要是加压和浸水的先后顺序，根据这一特点拟做两个模型，即天然含水率的模型和饱和模型，开展两组

离心模型试验。第一组试验是将天然含水率的模型安置在离心机上旋转到指定的加速度（100g），待压缩变形稳定后浸水使模型饱和，试验过程中分别测定模型的压缩变形和湿陷变形，用直接测得的湿陷变形模拟黄土湿陷试验的单线法（先加压后浸水）；第二组试验是把制作的模型预先饱和，然后将饱和模型安置在离心机上旋转到指定的加速度（100g），试验过程中测定模型的沉降变形，将第二组试验的沉降变形减去第一组试验的压缩变形得到第二组的湿陷变形，以此模拟湿陷试验的双线法（先浸水后加压）。

d) 两个模型的基本属性：天然含水率模型与饱和模型土样在黄土地层中所处的位置、模型削制后的尺寸、初始含水率、干密度以及土样比重等参数见表4所示，两个模型的深度虽相差2 m，但密度和湿度比较接近，为了保持原状土样最大尺寸<sup>#1</sup>模型没有削成<sup>#2</sup>模型尺寸。

### (2) 试验设备及测量仪器

试验在清华大学50 g·t土工离心试验机上完成，试验采用的模型箱净空尺寸为50 cm×35 cm×20 cm，模型箱一侧为厚5.8 cm的玻璃板，其余边界为铝合金；位移量测采用模型箱玻璃面一侧的图像采集进行，图像采集为非接触式位移测量系统，可测定土体侧面任一点的时空位移，测量精度可达亚像素级；土压力观测采用溧阳市超源仪器厂生产的土压力传感器，量程0.3 MPa，直径12 mm，厚度5 mm，可以在饱和水介质中工作，土压力传感器的光洁面是受力面，另一面是支撑面。

### (3) 模型设计和制作

a) 模型制作：天然含水率模型与饱和模型的制作方法相同。将块状的原状样切削平整，沿模型箱边界放置到模型箱中，然后在模型箱剩余空间用重塑土样填充，重塑土填充采用分层压实，其湿度和密度与原状土相同，示意图见图1。模型制作时预先将镶嵌有土压力传感器的有机板放置在土样C1面左侧，量测试验过程中侧向土压力的变化情况。在土样的A面，沿垂直方向和水平方向，按照2 cm间距安插大头针作为位移标志点，以测量土样不同部位的沉降变形和侧向变形，制作完成的模型见图2。

b) 模型饱和：对于饱和模型，曾采用了3种方法。

第一种抽气饱和法, 把制备好的模型, 放入抽气饱和箱进行饱和, 至少密封静置 48 h; 第二种低水头饱和法, 将模型箱后壁底部的进水口与高于模型箱 30 cm 的水箱连接, 使土样在水头差作用下逐渐饱和, 饱和完成后至少密封静置 48 h; 第三种水膜转移法, 首先根据原状土样与重塑土样的初始含水率与体积, 计算使得土体饱和所需的加水量。然后用滴管在土样表面缓慢均匀的滴入计算的水量, 为防止土样的水蚀破坏需在土样表面铺放滤纸。最后把试样密封静置数天, 使水分在水膜压力作用下逐渐转移, 并最终均匀分布于土样内部。这 3 种方法, 第一和第二种方法对模型土样都有一定的破坏作用, 试验效果不佳, 第三种方法从试验结果看效果较好, 本文主要叙述该种试验。

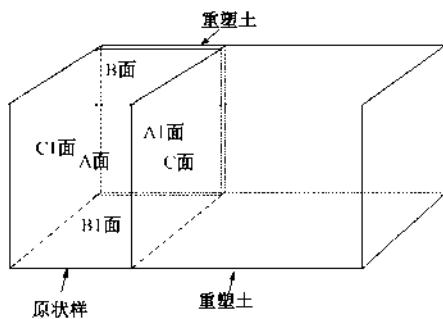


图 1 制作模型的示意图

Fig. 1 Model box for centrifuge tests



图 2 制作完成的模型

Fig. 2 Displacement marks of sample

#### (4) 模型试验

##### a) 天然含水率模型试验

①试验方法: 在离心机上对天然含水率模型进行分级加载, 每级 10g, 待每级加载稳定后再加下级荷载, 直至到最终荷载 100g; 待模型变形稳定后, 保持 100g 的离心加速度不变对模型浸水; 当模型饱和且变形稳定后停机, 同时测定模型的最终湿度和密度。在整个试验过程中测定模型的变形和应力。

②变形测量和整理方法: 变形量测采用坐标标点法。坐标标点法是在模型试验开始前和过程中对模型的 A 面位移标志点进行拍照, 根据模型变形前后的照

片信息确定出各坐标点的变形量。资料整理时, 首先选取不同加速度变形稳定时刻所拍摄的照片, 然后使用 Getdata 软件获取这些照片中大头针的位置坐标 ( $X_{ij}, Y_{ij}$ ) 其中下角标  $i$  为大头针所在的排数, 模型顶端排数最小。 $j$  为大头针所在的列数, 模型左端列数最小。沉降变形与侧向变形分开计算, 即计算沉降变形时, 假定横坐标不变, 不同加速度与 1g 时位移标志点的纵坐标值差值, 即为此加速度情况下该位移标志点的沉降变形, 下沉为正。

③侧向土压力量测: 共埋设 6 个土压力传感器, 编号分别为 #9, #10, #11, #12, #13, #14, 对应埋深依次为 15.5, 5.5, 18.5, 10.5, 24.5, 21.5 cm, 试验过程中测定模型湿陷后的侧向土压力值。

④试验后模型的湿度和密度: 试验结束后, 沿深度方向分层取样测量了原状土的含水率及密度, 测量结果见表 5。结果表明: 模型底部的密度最大, 表面密度最小; 模型表面的含水率最大, 底部的含水率最小。原状样饱和度均值大于 94%, 说明试验后土体达到饱和状态。表 5 序号这列中的原状-1、原状-2、原状-2'等表示模型试验结束后, 取湿陷后原状土样做密度和含水率试验的土样编号。

##### b) 饱和模型试验

①试验方法: 在离心机上对水膜转移法饱和模型进行分级加载, 每级 10g, 待每级加载稳定后再加下级荷载, 直至到最终荷载 100g, 当变形稳定后停机, 在整个试验过程中测定模型的变形和应力, 试验结束测定模型的最终湿度和密度。

②沉降变形量测: 水膜转移法饱和模型共埋设 12 层位移标志点, 试验过程中分别测定这些标点的变形值。

③侧向土压力量测: 共埋设 6 个土压力传感器, 编号分别为 #9, #10, #11, #12, #15, #14 在模型中对应埋深依次为 23, 20, 17, 12, 7, 2 cm, 试验过程中测定模型湿陷后的侧向土压力值。

④试验后模型的湿度和密度: 试结束后, 分层取样测量了原状土的含水率及密度, 测量结果见表 6。结果表明: 模型底部的密度最大, 表面密度最小, 而含水率沿模型高度呈不规则变化, 原状样饱和度已达到饱和。表 6 序号这列中的原状-1、原状-1'等表示模型试验结束后, 取湿陷后原状土样做密度和含水率试验的土样编号。

## 3 试验结果分析

### 3.1 离心模型试验的黄土湿陷变形特性

#### (1) 天然含水率模型试验变形特性

表5 试验结束后土体的湿度和密度

Table 5 Values of moisture and density of soils after tests

序号	取样深度/cm	湿土重量/g	干土重量/g	含水重量/g	土样体积/cm <sup>3</sup>	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	湿密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/%	孔隙比	饱和度/%
原状-1	1	111.18	83.51	27.67	60	1.39	1.85	33.13	0.95	94.81
原状-2	6	111.48	83.89	27.59	60	1.40	1.86	32.89	0.94	94.99
原状-2'	6	111.71	83.21	28.5	60	1.39	1.86	34.25	0.95	97.29
原状-3	13	118.66	91.51	27.15	60	1.53	1.98	29.67	0.78	103.50
原状-3'	13	112.55	84.95	27.6	60	1.42	1.88	32.49	0.91	96.32
原状-4	20.5	125.54	99.62	25.92	60	1.66	2.09	26.02	0.63	111.53
原状-4'	20.5	118.50	91.65	26.85	60	1.53	1.98	29.30	0.77	102.56
原状平均值						1.47	1.93	31.11	0.85	100.14

表6 试验结束后土体饱和度测量表

Table 6 Values of saturation of soils after tests

序号	取样深度/cm	湿土重量/g	干土重量/g	含水重量/g	土样体积/cm <sup>3</sup>	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	湿密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/%	孔隙比	饱和度/%
原状-1	1	115.25	88.50	26.75	60	1.48	1.92	30.23	0.84	97.83
原状-1'	1	116.34	88.99	27.35	60	1.48	1.94	30.73	0.83	100.69
原状-2	10.9	121.51	91.31	30.20	60	1.52	2.03	33.07	0.78	114.80
原状-2'	10.9	121.52	93.18	28.34	60	1.55	2.03	30.41	0.75	110.63
原状-3	20.5	122.45	96.20	26.25	60	1.60	2.04	27.29	0.69	107.13
原状-4	23.5	124.90	98.01	26.89	60	1.63	2.08	27.44	0.66	112.82
平均值						1.54	2.01	29.86	0.76	107.32

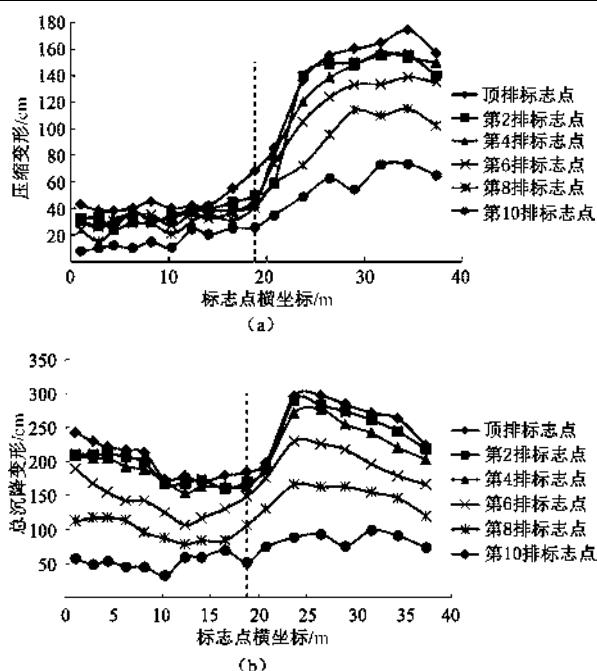


图3 天然含水率模型

Fig. 3 Model for natural moisture content

该模型共埋设12排位移标志点,将模型的顶排,2,4,6,8,10排各位移标志点,在加速度100g情况下浸水前的压缩变形值绘图3(a),将浸水饱和后

总变形试验值绘图3(b),图中虚线所示位置为原状土与重塑土的分界线。

a)由图3(a)可见:天然含水率状态的原状黄土,在加速度100g时,模拟约26 m厚黄土地基,各层土压缩变形较为均匀,顶层稳定压缩变形值约40 cm;而同密度同湿度的重塑黄土地基的压缩变形值顶排最大值超过160 cm,是原状土同层的4倍多。

b)由图3(b)可见:在加速度100g时浸水饱和后,相同情况下重塑土与原状土相比,沉降变形值明显要大,原状黄土约231.1 cm,重塑土黄土约300 cm,是原状土变形的1.25倍。

### (2) 饱和模型试验变形特性

水膜转移法饱和模型共埋设12排位移标志点,将模型的顶排、2,4,6,8,10,12排各位移标志点,在加速度100g下的沉降变形值绘图4,图中虚线所示位置为原状土与重塑土的分界线。图中模拟27.5 m厚黄土地基沉降变形曲线,可见,重塑土的各排均比原状土的对应值明显要大。

### (3) 黄土的两种湿陷性离心模型试验的等价性

天然含水率模型试验是采用单线法模拟26 m深湿陷性黄土地基的湿陷变形规律,在图3(a)中可以

看到 26 m 地基压缩变形量为 0.397 m, 在图 3(b) 中可以看到 26 m 地基浸水饱和变形稳定后总沉降变形为 2.311 m, 其自重湿陷量为 1.914 m。

饱和模型试验是采用双线法模拟 27.5 m 深湿陷性黄土地基的湿陷变形规律, 将不同加速度的沉降量与模拟的不同地基深度对应总沉降变形值绘图 5, 由图 5 可得 26 m 深地基沉降量为 2.35 m, 再减去天然含水率模型地基的压缩变形量 0.397 m, 其自重湿陷量为 1.953 m。由此可见尽管两种模型试验方法不同, 对于模拟同一深度的黄土地基可以得到相近的湿陷变形值, 误差在 2% 以内, 可以证明湿陷试验的单线法和双线法同样适用于离心模型试验。

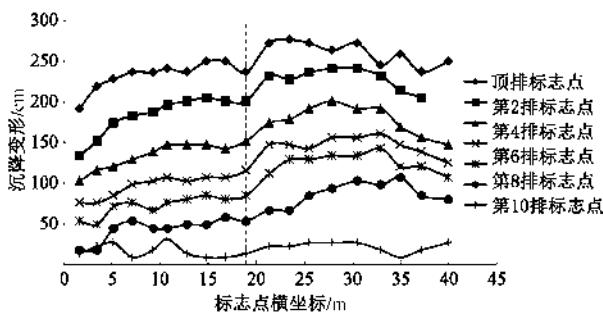


图 4 水膜转移法饱和模型

Fig. 4 Saturation model for water film transfer

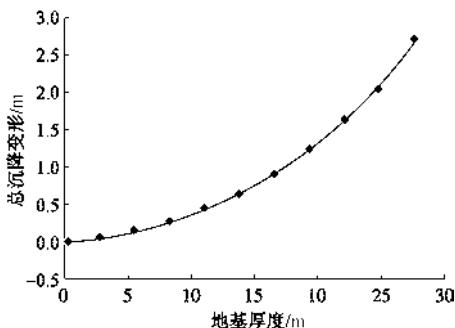


图 5 饱和模型地基深度与总沉降变形

Fig. 5 Relationship between total settlement and foundation thickness

### 3.2 黄土湿陷侧压力特点

#### (1) 天然含水率模型试验侧压力特点

天然含水率模型共埋设 6 个土压力传感器, 编号分别为 #9, #10, #11, #12, #13, #14, 对应埋深依次为 15.5, 5.5, 18.5, 10.5, 24.5, 21.5 cm, 所得加载过程土侧压力变化曲线见图 6。可见在加载过程中土压力传感器所测土压力数据有较大波动, 说明埋设的土压力传感器与土体接触不实, 当浸水后基本稳定, 数值符合规律。

#### (2) 饱和模型试验侧压力特点

饱和模型共埋设 6 个土压力传感器, 编号分别为 #9, #10, #11, #12, #15, #14 对应埋深依次为 23, 20,

17, 12, 7, 2 cm, 所得加载过程土压力变化曲线见图 7。可见 #9, #10, #11, #15 传感器的测量结果较符合加载规律, 但是当加速度达到 90g 之后, 在变形稳定的过程中, 全部土压力传感器测量值突然大幅度降低。

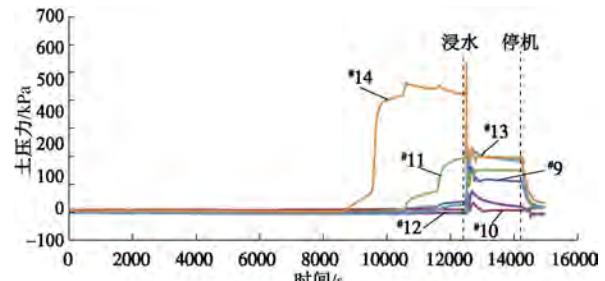


图 6 天然含水率模型土压力变化曲线

Fig. 6 Variation of earth pressure from model tests for natural moisture content

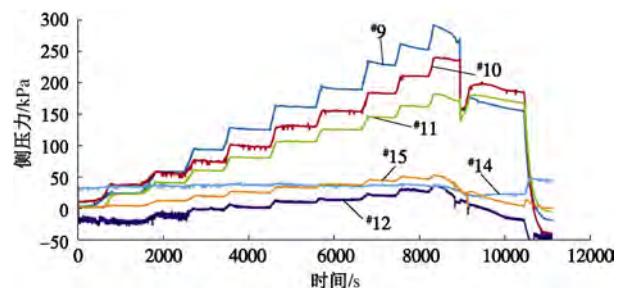


图 7 水膜转移法饱和模型试验过程中土压力变化

Fig. 7 Values of coefficient of lateral earth pressure of model for natural moisture content

#### (3) 黄土湿陷侧压力系数变化规律

a) 天然含水率模型试验与室内湿陷试验的侧压力系数比较。天然含水率模型侧压力实测值见图 6, 将每个测值对应的地基深度和竖直压力计算出一同列表 7, 表中侧压力系数随深度变化值为 0.42~0.51, 均值为 0.452; 室内湿陷试验时测得的侧压力见表 3, 表 3 中侧压力系数随竖向压力变化值为 0.42~0.48, 均值为 0.45。由比较可见, 这两种试验的侧压力系数值随竖向压力变化不大, 而且平均值几乎相等。这主要是室内试验是在  $K_0$  条件下进行的试验, 而离心模型试验土压力传感器布置在模型箱内侧与模型 C 面接触, 试验过程中由于模型箱的约束, 模型边界同样处在  $K_0$  条件, 所以两种试验的实测值和规律相同。

表 7 天然含水率模型侧压力系数变化表

Table 7 Values of coefficient of model for earth pressure of natural moisture content

埋深/m	侧压力/kPa	竖向压力/kPa	侧压力系数
5.5	42.9	102.6	0.42
10.5	85.7	195.9	0.43
15.5	121.4	289.2	0.42
18.5	157.1	345.2	0.46
21.5	189.3	401.2	0.47
24.5	235.7	457.2	0.51

表 8 饱和模型侧压力系数变化表  
Table 8 Values of coefficient of lateral earth pressure of saturation model

埋深/m	侧压力 /kPa	竖向压力 /kPa	孔隙水压力 /kPa	有效侧压力 /kPa	有效竖直压力 /kPa	侧压力系数	有效侧压 力系数
5.6	45.8	104.5	30.2	15.6	74.3	0.44	0.210
13.6	160.9	253.8	109.3	51.6	144.5	0.63	0.357
16.0	209.0	298.5	141.8	67.2	156.7	0.70	0.429
18.4	251.9	343.3	181.4	70.5	161.9	0.73	0.435

b) 两种离心模型试验的侧压力系数比较。饱和含水率模型的侧压力实测值见图 7, 从该图可见, 在加速度  $90g$  后, 由于仪器失灵原因以后的试验值未测出, 所以本文采用  $80g$  时的值。将每个测值对应的地基深度和竖直压力计算出一同列表 8。

从表 7 和表 8 看: 两种模型试验的侧压力系数都随仪器埋深的增大有所增大, 但其值相差较大, 主要原因是饱和含水率模型试验时, 由于模型底部不排水, 存在一定的孔隙水压力作用。将表 8 中测得侧压力和竖向压力与表 3 中的侧压力和竖向压力比较, 计算出孔隙水压力列入表 8。当消除孔隙水压力的影响, 有效侧压力系数值与天然含水率模型相应值较接近, 随竖向应力在  $0.210\sim0.435$  之间变化, 平均值为 0.360, 略低于天然含水率模型试验值。

从试验结果看, 该黄土地基湿陷时, 侧压力系数随地基深度增加略有增大, 平均值约为 0.45。

### 3.3 基于离心模型试验的黄土湿陷试验新方法论证

在本文第 1 章提出了黄土湿陷的离心模型试验的两种方法, 即完全模拟实际的方法和黄土地基典型层模拟方法, 第 1 种方法完全模拟黄土地基实际情况, 无需验证其正确性, 只是地层较多时, 模型试验相当复杂。本节主要验证第 2 种方法的可行性, 为此, 第 2 章以新疆伊犁某黄土地基为对象开展了室内湿陷试验、现场浸水试验和离心模型试验。验证的主要思路是: 以  $\beta_0$  值为桥梁, 通过式(2)先由现场浸水试验得到整个土层的  $\beta_0$  值, 再由典型层离心模型试验求得  $\beta_0$  值, 将其进行比较, 如果两者值接近, 可以验证离心模型试验可以模拟黄土地基的湿陷性。

#### (1) 由现场浸水试验确定 $\beta_0$

a) 现场浸水试验湿陷量确定: 在现场浸水试验湿陷区中, 两个最大湿陷量的观测点过程曲线, 其中东南区域湿陷量最大值为  $353.30\text{ cm}$ , 西北区域湿陷量最大值为  $352.30\text{ cm}$ 。在计算  $\beta_0$  值的式(2)中首先要确定现场浸水试验的湿陷量, 该值的确定方法一般采用取最大值的方法, 因为最大值代表地基完全饱和; 为了防止试验中的奇异值, 更确切的方法是取两个相近

最大值的平均值。本文取两个区域最大值的平均值  $352.80\text{ cm}$ 。

b) 室内试验计算湿陷量: 表 2 是室内湿陷试验结果, 在该表中还计算了该现场  $30\text{ m}$  地基自重湿陷量, 其值为  $214.15\text{ cm}$ 。

c)  $\beta_0$  值计算: 由式(2)计算得到  $\beta_0$  为 1.647。

(2) 由离心模型试验确定  $\beta_0$

a) 典型地层参数: 选定的典型地层参数在表 2 中可以查到, 典型地层从  $10\sim19\text{ m}$  共  $10\text{ m}$  厚, 平均干密度  $1.394\text{ g/cm}^3$ , 上覆饱和自重压力从  $175.915\sim341.722\text{ kPa}$ 。

b) 典型地层模型试验湿陷量确定: 对于天然含水率模型通过图 3 确定, 由上覆饱和自重压力  $175.915\sim341.722\text{ kPa}$ , 模型干密度  $1.40\text{ g/cm}^3$  对应的饱和密度  $1.883\text{ g/cm}^3$ , 计算得到该典型层在模型地基中的位置为  $9.53\sim18.52\text{ m}$ ; 由图 3(a) 中曲线插值得到相应位置的压缩量  $30\text{ cm}$  和  $19\text{ cm}$ ; 由图 3(b) 中曲线插值得到相应位置的总湿陷量为  $147.80\text{ cm}$  和  $47.66\text{ cm}$ ; 计算得到该层的湿陷量为  $100.14\text{ cm}$ 。

对于饱和模型通过图 4 确定, 由上覆饱和自重压力  $175.915\sim341.722\text{ kPa}$ , 模型干密度  $1.420\text{ g/cm}^3$  对应的饱和密度  $1.896\text{ g/cm}^3$ , 计算得到该典型层在模型地基中的位置为  $9.47\sim18.39\text{ m}$ ; 由图 3(a) 中曲线插值得到相应位置的压缩量  $27\text{ cm}$  和  $20\text{ cm}$ ; 由图 4 中曲线插值得到相应位置的总湿陷量为  $122.80\text{ cm}$  和  $26.66\text{ cm}$ ; 计算得到该层的湿陷量为  $96.14\text{ cm}$ 。

c) 典型层室内试验计算湿陷量: 将表 2 中  $10\sim19\text{ m}$  (阴影部分) 范围内共  $10\text{ m}$  厚地基自重湿陷量进行求和, 其值为  $61.99\text{ cm}$ 。

d)  $\beta_0$  值计算: 由式(2), 对于天然含水率模型计算得到  $\beta_0$  为 1.615; 对于饱和模型计算得到  $\beta_0$  为 1.551。

综上可见, 用离心模型试验的单线法和双线法求得的  $\beta_0$  值相近, 相差 4% 以内, 说明两种方法等价; 离心模型试验的单线法与现场浸水试验求得的  $\beta_0$  值相差 2%, 双线法与现场浸水试验求得的  $\beta_0$  值相差 5.8%, 说明这两种方法都可用于离心模型试验; 与现

场浸水试验相比, 单线法比双线法差值更小的主要原因是单线法的含水率 7.27%, 干密度  $1.40 \text{ g/cm}^3$  更接近现场浸水试验典型层的平均含水率 7.47%, 平均干密度  $1.394 \text{ g/cm}^3$ , 说明试验时, 应该保证模型与选择的黄土地基典型层的湿度和密度尽量相近。

### 3.4 试验分析讨论

(1) 地区修正系数  $\beta_0$  值实际是一个很复杂的系数, 它与黄土的沉积历史、颗粒级配、应力条件和试验条件有关。各地区值不同, 主要是黄土的颗粒粗细、级配和结构不同, 在浸水和力的作用下产生的侧向挤出变形与室内湿陷试验侧限的影响程度不同而引起的, 一般情况粗颗粒黄土的黏聚力小, 浸水过程变形较快, 侧向挤出变形比较大, 侧限对它的影响程度也相应较大,  $\beta_0$  值也较大<sup>[13]</sup>。 $\beta_0$  值是黄土自重湿陷性评价的一个重要参数, 规范规定陇西地区取 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; 新疆伊犁试验资料较少, 没有该修正系数参考值, 本文试验得到该值为 1.64 为宜。

(2) 黄土的湿陷变形主要体现了体积力与水的作用结果, 应该更适合采用离心模型试验去进行模拟, 但是黄土的分层较多模型试验难度较大, 所以在该方面鲜见有报道。本文设想以地区修正系数  $\beta_0$  值为桥梁, 通过黄土典型层土体离心模型试验达到与现场浸水试验相同的效果, 并通过试验得到初步验证, 还需更多的试验成果才能支持这一结论。

## 4 结 论

(1) 以地区修正系数  $\beta_0$  值为桥梁, 提出了一个基于离心模型试验的黄土湿陷试验新方法, 通过现场浸水试验与离心模型试验得到的  $\beta_0$  值比较, 初步证实了这种方法的可行性。

(2) 中国大部分黄土地区都有  $\beta_0$  的确定值, 新疆伊犁研究资料较少, 没有该修正系数参考值, 本文根据现场浸水试验和离心模型试验得到该值为 1.64。

(3) 单线法和双线法是黄土湿陷试验的两种方法, 这两种方法区别在于黄土湿陷过程中力和水作用的路径, 不少研究成果证明这两种方法是等价的。本次试验也证明了此观点, 说明黄土湿陷试验的单线法和双线法同样适合离心模型试验。

(4) 侧压力系数是土体的一个重要参数, 对于黄土湿陷来说, 湿陷完成后, 维持土体稳定状态, 侧压力占竖向压力的比例。由于离心模型试验测得的侧压力位置和应力条件与室内试验接近, 所以两者试验得到的侧压力系数具有相同的规律和相近的数值。即侧

压力系数随地基深度的增加略有增大, 其平均值约为 0.45。

(5) 在黄土湿陷的离心模型试验中, 模型制作质量是成败的关键, 特别是湿陷性黄土模型的饱和方法, 要尽量减少对原状黄土模型的扰动, 试验表明水膜转移法的效果优于抽气饱和法和低水头饱和法。

### 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: Shannxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [2] GB 50025—2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. (GB 50025—2004 Code for building construction in collapsible loess regions[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004. (in Chinese))
- [3] 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 collapsible deformation of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(2): 1 - 12. (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 Yi-chuan, XIE Ding-yi, LI Yong-hong. Effective stress and collapse process of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1100 - 1103. (in Chinese))
- [5] 邢义川, 李京爽, 李 振. 湿陷性黄土与膨胀土的分级增湿变形特性试验研究[J]. 水利学报, 2007, 38(5): 546 - 551. (XING Yi-chuan, LI Jing-shuang, LI Zhen. Deformation characteristics of collapsible loess and expansive soil under the condition of wetted in stages[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(5): 546 - 551. (in Chinese))
- [6] 杜延龄, 韩连冰. 土工离心模拟试验技术[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's Water Conservancy and Hydropower Press, 2010. (in Chinese))
- [7] 翁效林. 强夯黄土地基震陷性离心试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1094 - 1097. (WENG Xiao-lin. Studies on seismic subsidence of loess by centrifugal model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1094 - 1097. (in Chinese))

- [8] 王玉峰, 程谦恭, 黄英儒. 不同支护模式下黄土高边坡开挖变形离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 1032 - 1046. (WANG Yu-feng, CEHGN Qian-gong, HUANG Ying-ru. Centrifuge tests on excavation of high loess slope with different reinforcement modes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 1032 - 1046. (in Chinese))
- [9] 龚成明, 程谦恭, 刘争平. 黄土边坡开挖与支护效应的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3481 - 3486. (GONG Cheng-ming, CHENG Qian-gong, LIU Zheng-ping. Centrifuge model tests on excavation and reinforcement effect of loess slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3481 - 3486. (in Chinese))
- [10] 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,
- [11] 刘保健, 支喜兰, 谢永利, 等. 公路工程中黄土湿陷性问题分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(4): 27 - 31. (LIU Bao-jian, ZHI Xi-lan, XIE Yong-li, et al. Analysis of problems on loess hydrocompaction in highway engineering[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(4): 27 - 31. (in Chinese))
- [12] 张苏民, 郑建国. 力和水作用先后次序对湿陷性黄土力学形状的影响[J]. 勘察科学技术, 1990(3): 10 - 14. (ZHANG Su-min, ZHENG Jian-guo. Sequence effect of load application and water saturation on the mechanical behavior of collapsible loess[J]. Site Investigation Science and Technology, 1990(3): 10 - 14. (in Chinese))
- [13] 焦五一. 我国各地黄土湿陷系数的不等价问题[J]. 工程勘察, 1982(4): 62 - 64. (JIAO Wu-yi. The inequitable problems of coefficient of collapsibility of loess in our country[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1982(4): 62 - 64. (in Chinese))

## 2017年《岩土工程学报》黄文熙讲座（20讲）学术报告会通知

2017年《岩土工程学报》黄文熙讲座（20讲）学术报告会将于2017年4月16日（星期日）在清华大学大礼堂举行。2017年黄文熙讲座主讲人为香港科技大学吴宏伟教授，讲座题目为“大气-植被-土体相互作用：理论与机理”。讲座文稿已刊登在《岩土工程学报》2017年第1期的黄文熙讲座栏目。吴宏伟教授研究了大气-植被-土体的相互作用机理，建立了一套科学合理的理论框架与测试方法。

2017年黄文熙讲座学术报告会由清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室和水利水电工程系承办。黄文熙讲座学术报告会期间，还将邀请有关学者专家做学术报告。参会

人员请于2017年4月16日上午8:00~9:00在清华大学大礼堂报到。

4月15日（星期六）晚8时召开《岩土工程学报》编委会全体会议。《岩土工程学报》编委会委员请于2017年4月15日下午14:00~20:00在西郊宾馆（北京市海淀区王庄路18号）报到。

联系人：张嘎教授 13641165835, zhangga@tsinghua.edu.cn；杨莉女士 01062785593, thgeo@tsinghua.edu.cn。会议回执请发送到：thgeo@tsinghua.edu.cn 或传至：010-62785593；请您在2017年4月1日前返回会议回执。

（本刊编辑部）