

DOI: 10.11779/CJGE2018S1012

人工制备湿陷性黄土地基地下连续墙浸水试验研究

张延杰^{1,2}, 李建东¹, 王旭¹, 李凡³, 李盛¹, 马学宁¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070;

3. 陕西交通职业技术学院, 陕西 西安 710018)

摘要: 为研究湿陷性黄土地基地下连续墙基础竖向极限承载特性及浸水后负摩阻力分布特征, 选用石英粉、砂、膨润土、石膏和工业盐制备了人工湿陷性黄土, 对人工制备湿陷性黄土的物理力学特性进行分析; 采用人工制备湿陷性黄土填筑模型试验, 进行地下连续墙基础承载特性试验研究。研究表明: 人工制备湿陷性黄土的物理力学参数与天然黄土基本一致, 可用于湿陷性黄土与构筑物相互作用模型试验相似材料。地下连续墙竖向承载力达到其极限时, 外墙和内墙总侧摩阻力荷载分担比为67%, 确定地下连续墙为端承摩擦型基础。地基浸水湿陷后, 中性点深度比为0.64~0.73, 试验结果与桩基浸水试验测试结果较为一致。由于地下连续墙基础具有良好的整体性和防渗性, 芯土不受水的影响, 内墙侧摩阻力与承台土反力能够得以发挥, 有效减小地下连续墙基础的沉降。

关键词: 基础工程; 负摩阻力; 模型试验; 地下连续墙; 人工制备湿陷性黄土

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)S1-0073-08

作者简介: 张延杰(1985-), 男, 甘肃定西人, 博士, 副教授, 主要从事土工理论及桩基础方面的研究与教学工作。

E-mail: shuizhongdelantian@163.com。

Soaking test on underground diaphragm wall in artificially prepared collapsible loess foundation

ZHANG Yan-jie^{1,2}, LI Jian-dong¹, WANG Xu¹, LI Fan³, LI Sheng¹, MA Xue-ning¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. National and Provincial Joint Engineering

Laboratory of Road & Bridge Disaster Prevention and Control, Lanzhou 730070, China; 3. Shaanxi College of Communication Technology,

Xi'an 710018, China)

Abstract: The tests on the bearing behavior of diaphragm wall foundation are conducted to study the vertical ultimate bearing capacity of diaphragm wall and distribution characteristics of negative skin friction after water immersion in collapsible loess foundation. The artificial collapsible loess is prepared by using quartz powder, sand, bentonite, gypsum and industrial salt, and its physical and mechanical properties are analyzed. The tests on the bearing capacity of diaphragm wall foundation are carried out with the artificially prepared collapsible loess as the model filling soil. The results show that the physical and mechanical parameters of artificial loess have a high coherence with those of natural loess, which can be applied to the model tests on the interaction between collapsible loess and structure as similar materials. The total load sharing ratio of side frictional resistance for outer wall and inner wall is 67% as the vertical bearing capacity of the diaphragm wall reaches its limit, which comes to the conclusion that the diaphragm wall is a kind of end-bearing friction foundation. After foundation soaking, the depth ratio of neutral points ranges from 0.64 to 0.73, which is in good agreement with the test results of soaking tests on pile foundation. The core soil is not influenced by water because the diaphragm wall foundation has good integrity and anti-permeability, which exerts side friction of inner wall and reaction force of bearing-stage soil and reduces the foundation settlement of diaphragm wall effectively.

Key words: foundation engineering; negative skin friction; model test; diaphragm wall; artificially prepared collapsible loess

0 引言

湿陷性黄土是广泛分布在中国干旱与半干旱地区的一种典型风成堆积物, 由于其特定的生成环境和赋存环境, 形成了疏松、多孔的亚稳定结构。受结构性

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402252, 41662017, 41562014);

甘肃省科技计划资助项目(1506RJYA063)

收稿日期: 2018-02-24

*通讯作者(E-mail: publicwang@163.com)

影响,一方面天然黄土在取样过程中不可避免产生的扰动容易使土的结构性释放,一方面天然黄土的力学特性与重塑黄土之间存在显著差异。

人工制备湿陷性黄土通过控制和改变材料中黏结成分、排列方式和形成过程等显著影响湿陷性的一系列变量,可更好地从矿物成分、制备过程、影响因素等多方面研究湿陷性黄土的工程性质,试验结果具有可重复性和可控性。Assallay^[1]基于 Monte Carlo 原理,证明了空中自由下落法能够合理地模拟天然风成黄土的结构性和湿陷性,并选用兰州黄土和石英粉混合料,制备了人工湿陷性黄土。Basma 等^[2]选用黏土和粉土混合料,压实填满环刀,施加一定的上部荷载模拟特定深度的黄土,人工制备黄土的湿陷性由含水率和压实度决定。Zourmpakis 等^[3]选取黏土和石英粉,采用空中自由下落法制备了人工湿陷性黄土,探讨了毛细水上升法、蒸汽法和喷雾法对试样增湿到一定含水率的湿陷特征。Jefferson 等^[4]总结了 3 种制备人工湿陷性黄土的方法,并对试验结果和优缺点进行了讨论。国内最早由 Jiang 等^[5]、胡再强等^[6]在黄土颗粒中掺入 Ca(OH)₂, 通入 CO₂ 气体形成 CaCO₃ 胶结,制备了结构性、湿陷性黄土试样。陈昌禄等^[7]在重塑黄土中添加 CaO、高岭土、CO₂、水泥和 CaCl₂, 利用 CaCO₃ 和水泥的胶结作用,模拟结构性黄土的联结特征,制备人工结构性黄土。骆亚生等^[8]在黄土中加入水泥,混合均匀压制制备了人工结构性黄土试样。

地下连续墙基础与传统桩基础相比,具有整体刚度大,承载性能好,抗震能力强等特点。1995 年,中国在宝中铁路一座栈桥的墩基础首次采用了圆形地下连续墙桥梁基础^[9]。2006 年,高等级公路桥梁中首次采用了矩形地下连续墙作为桥梁基础,孟凡超等^[10]、程谦恭等^[11]、文华等^[12-13]通过现场试验、模型试验、数值分析和理论研究,对闭合型地下连续墙基础的承载特性、荷载传递机理、负摩阻力等开展了卓有成效的研究,对同类工程有着重要的参考价值和指导意义。但现场试验未开展浸水后负摩阻力研究,负摩阻力模型试验研究过程中,采用的是重塑黄土。

本文以高等级公路桥梁基础中首次采用的矩形闭

合型地下连续墙作为原型结构^[11],通过人工制备的湿陷性黄土填筑模型,模拟天然原状黄土的湿陷性,进行地下连续墙基础极限承载特性和负摩阻力研究。

1 人工制备湿陷性黄土性质分析

1.1 人工制备湿陷性黄土物理力学性质

黄土中的矿物可分为无黏性粗粒矿物和胶结性黏土矿物两大类,粗粒矿物如石英、长石等,与水不起作用,不影响湿陷过程。黏土矿物如伊利石、高岭石、蒙脱石等,在一定程度上体现着土体的湿陷性。根据对黄土矿物成分分析,选用石英粉和砂作为无黏性材料,膨润土、石膏和工业盐作为胶结性材料,材料基本性质见表 1。通过大量配比试验,确定混合材料配比为:砂:石英粉:膨润土:石膏:工业盐=0.25:0.3:0.3:0.1:0.05(质量比)^[14]。搅拌均匀,通过控制含水率和密度,进行人工湿陷性黄土制备。

表 1 材料基本性质

Table 1 Basic properties of similar materials								
性质	膨润土		石英粉		砂			
	塑限	液限	塑限	液限	粒径范围		C _c	C _u
	/%	/%	/%	/%	/mm			
数值	27.78	73.65	19.83	27.51	0.075~1		1.03	3.47

根据《土工试验规程 SL237—1999》,采用液塑限联合测定法,取 76 g 圆锥入土深度为 2 mm 时所对应的含水率为塑限,入土深度为 17 mm 时所对应的含水率为液限。采用轻型击实试验,测定其最大干密度和最优含水率。进行不排水不固结三轴剪切试验,测定其内摩擦角和黏聚力。进行标准固结试验,测定其压缩系数和压缩模量,试验结果见表 2,其液塑限指标、抗剪强度指标、压缩性指标均满足黄河中游地区天然黄土的参数范围^[15]。

1.2 人工制备黄土湿陷性分析

人工制备黄土的湿陷性主要受含水率、压实度和浸水压力的影响,选取含水率、压实度和浸水压力 3 个主要影响因素,进行 3 因素 4 水平正交试验设计,见表 3,制备 2 组平行试样,进行湿陷试验。根据《湿

表 2 人工制备湿陷性黄土物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of artificial collapsible loess												
名称	含水率 /%	干密度 /(g·cm ⁻³)	土粒 比重	液限 /%	塑限 /%	最优含 水率/%	最大干 密度 /(g·cm ⁻³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	压缩 系数 /(MPa ⁻¹)	压缩模 量/MPa	湿陷系 数
人工制备 黄土	12	1.45	2.67	26.02	16.25	14.38	1.96	25.83	16.17	0.11	1.77	0.152
黄河中游 地区黄土	10.7~23.4	1.10~1.68	—	15.4~20.5	15.4~20.5	—	—	20.6~33.6	20.6~33.6	0.02~0.90	—	—

陷性黄土地区建筑规范》^[16], 湿陷程度与湿陷系数的关系, 可判定湿陷程度依次为强烈湿陷、中等湿陷和非湿陷, 对试验结果进行极差分析和方差分析。

表 3 正交试验设计

Table 3 Design of orthogonal tests					
编号	含水率 <i>A</i>	压实度 <i>B</i>	浸水压力 <i>C</i>	湿陷 系数	湿陷 程度
1	<i>A</i> ₁ (6%)	<i>B</i> ₁ (0.70)	<i>C</i> ₁ (50 kPa)	0.124	强烈湿陷
2	<i>A</i> ₁ (6%)	<i>B</i> ₂ (0.75)	<i>C</i> ₂ (100 kPa)	0.102	强烈湿陷
3	<i>A</i> ₁ (6%)	<i>B</i> ₃ (0.80)	<i>C</i> ₃ (200 kPa)	0.076	强烈湿陷
4	<i>A</i> ₁ (6%)	<i>B</i> ₄ (0.85)	<i>C</i> ₄ (300 kPa)	0.070	中等湿陷
5	<i>A</i> ₂ (9%)	<i>B</i> ₁ (0.70)	<i>C</i> ₂ (100 kPa)	0.152	强烈湿陷
6	<i>A</i> ₂ (9%)	<i>B</i> ₂ (0.75)	<i>C</i> ₁ (50 kPa)	0.079	强烈湿陷
7	<i>A</i> ₂ (9%)	<i>B</i> ₃ (0.80)	<i>C</i> ₄ (300 kPa)	0.127	强烈湿陷
8	<i>A</i> ₂ (9%)	<i>B</i> ₄ (0.85)	<i>C</i> ₃ (200 kPa)	0.070	中等湿陷
9	<i>A</i> ₃ (12%)	<i>B</i> ₁ (0.70)	<i>C</i> ₃ (200 kPa)	0.168	强烈湿陷
10	<i>A</i> ₃ (12%)	<i>B</i> ₂ (0.75)	<i>C</i> ₄ (300 kPa)	0.138	强烈湿陷
11	<i>A</i> ₃ (12%)	<i>B</i> ₃ (0.80)	<i>C</i> ₁ (50 kPa)	0.013	非湿陷
12	<i>A</i> ₃ (12%)	<i>B</i> ₄ (0.85)	<i>C</i> ₂ (100 kPa)	0.011	非湿陷
13	<i>A</i> ₄ (15%)	<i>B</i> ₁ (0.70)	<i>C</i> ₄ (300 kPa)	0.078	强烈湿陷
14	<i>A</i> ₄ (15%)	<i>B</i> ₂ (0.75)	<i>C</i> ₃ (200 kPa)	0.068	中等湿陷
15	<i>A</i> ₄ (15%)	<i>B</i> ₃ (0.80)	<i>C</i> ₂ (100 kPa)	0.059	中等湿陷
16	<i>A</i> ₄ (15%)	<i>B</i> ₄ (0.85)	<i>C</i> ₁ (50 kPa)	0.006	非湿陷

(1) 极差分析

极差可作为评价因素显著性的参数, 其大小表明该因素的水平改变对试验结果的影响程度。极差分析结果见表 4, 为直观分析各因素水平变动时湿陷系数的波动情况, 绘制直观变化图 1~3。

表 4 湿陷系数极差分析

Table 4 Extreme difference analysis of collapsibility coefficient			
指标	含水率 <i>A</i>	压实度 <i>B</i>	浸水压力 <i>C</i>
k_{1j}	0.37	0.50	0.22
k_{2j}	0.43	0.39	0.32
k_{3j}	0.33	0.27	0.38
k_{4j}	0.21	0.16	0.41
\overline{k}_{1j}	0.09	0.13	0.06
\overline{k}_{2j}	0.11	0.10	0.08
\overline{k}_{3j}	0.08	0.07	0.10
\overline{k}_{4j}	0.05	0.04	0.10
\overline{R}_j	0.06	0.09	0.05

对试验结果进行极差分析, $R_b > R_a > R_c$, 影响人工制备黄土湿陷性的主要因素依次为: 压实度>含水率>浸水压力。湿陷系数随含水率的增大先增大后减

少, 主要是混合材料需一定水分润湿后, 才能激活黏

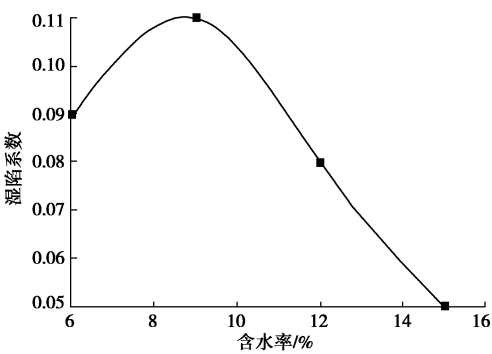


图 1 湿陷系数与含水率的关系曲线

Fig. 1 Curve of collapsibility coefficient vs. water content

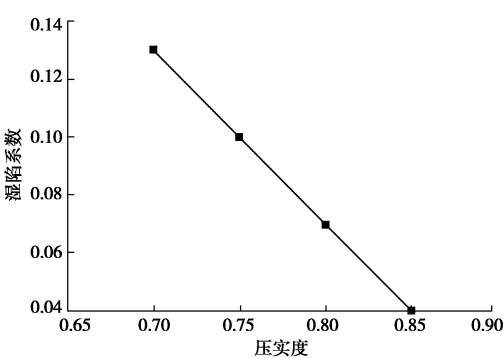


图 2 湿陷系数与压实度的关系曲线

Fig. 2 Curve of collapsibility coefficient vs. compactness

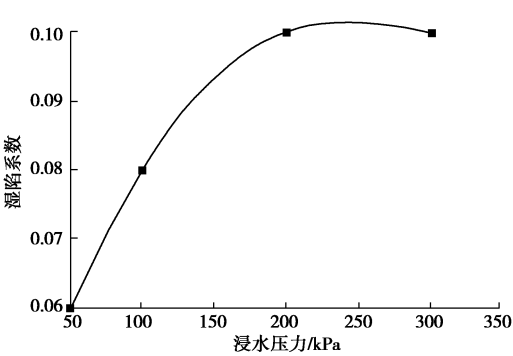


图 3 湿陷系数与浸水压力的关系曲线

Fig. 3 Curve of collapsibility coefficient vs. submerged pressure
土矿物(如膨润土)与粗粒矿物胶结形成亚稳定的多孔隙结构, 当含水率大于 9%后, 人工制备黄土与天然黄土的湿陷规律相一致, 即湿陷系数随含水率的增大而减小^[15]。随压实度的增大, 试样的密实程度增大, 孔隙比减小, 湿陷系数接近似线性规律减小, 满足湿陷系数与压实度成反比例关系^[15]。湿陷系数随浸水压力的增大而增大, 存在峰值湿陷压力为 300 kPa, 与胡再强等^[6]制备的人工结构性黄土的规律相一致。

(2) 方差分析

方差分析是将数据的总变异分解成因素引起的变

异和误差引起的变异两部分，构造 F 统计量，作 F 检验，即可判断因素作用是否显著，极差分析结果见表 5。

表 5 湿陷系数方差分析

Table 5 Variance analysis of collapsibility coefficient

方差来源	变动平方和	自由度	F 值	临界值 F
含水率	0.0063	3	7.00	$F_{0.05}(3,6)=4.76$
压实度	0.0128	3	14.33	$F_{0.01}(3,6)=9.78$
浸水压力	0.0034	3	3.67	$F_{0.1}(3,6)=3.29$
误差	0.0021	6		

对试验结果进行方差分析，压实度 $F=14.33$ 大于 $F_{0.01}(3, 6)=9.78$ ，压实度的影响最显著；含水率 $F=7.00$ 大于 $F_{0.05}(3, 6)=4.76$ ，含水率的影响较显著；浸水压力 $F=3.67$ 大于 $F_{0.1}(3, 6)=3.29$ ，浸水压力的影响不显著，与极差分析结果相一致。

2 地下连续墙模型试验概况

2.1 模型填土及控制

试验采用模型箱尺寸为 120 cm（长）×120 cm（宽）×120 cm（高），模型箱底部铺设 20 cm 厚碎石作为反滤层，然后铺设 30 cm 厚中粗砂作为墙底持力层，密度为 1.75 g/cm³，模型墙进入砂层 2 cm，高出填土层 1 cm。墙体周围采用人工制备湿陷性黄土填筑，通过大量配比试验确定，选取压实度为 0.7，含水率为 9%，即密度为 1.50 g/cm³ 的人工湿陷性黄土，100 kPa 时其湿陷系数为 0.152，达到强烈湿陷。砂层与人工制备湿陷性黄土层之间铺设土工布，防止土颗粒入渗进入砂层。

2.2 地下连续墙基础模型制作

借鉴矩形地下连续墙桥梁基础实际工程^[11]，按照几何相似比 17：1，选取有机玻璃制作模型墙体。模型墙外侧尺寸 20 cm×20 cm，内侧尺寸 15 cm×15 cm，厚 25 mm，墙高 57 cm，承台高 40 mm。模型墙表面采用环氧树脂黏细砂做粗糙处理。

2.3 测试原件布置

（1）应变片布置

在模型墙外表面和内表面黏贴 12 对应变片进行墙身轴力和墙侧摩阻力测试，具体布置见图 4。

（2）土压力盒布置

在承台下和墙端埋设 8 个土压力盒进行墙端阻力和承台土反力测试，具体布置见图 5。

（3）沉降标布置

在土层不同深度布设沉降标测定墙周土层位移，沉降标布置见图 5，自土层面以下 5 cm，每隔 10 cm

布设。沉降标由圆形铁质垫片、细铁丝、铝管和百分表组成。

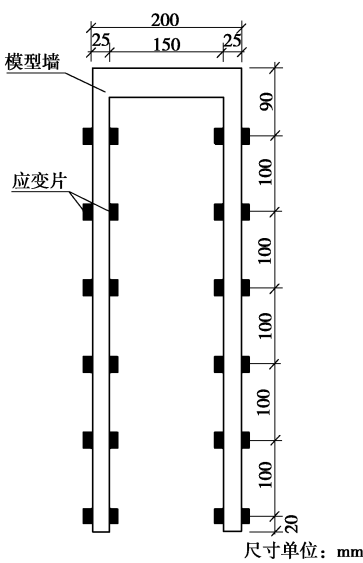


图 4 模型墙应变片布置图

Fig. 4 Layout of strain gauges

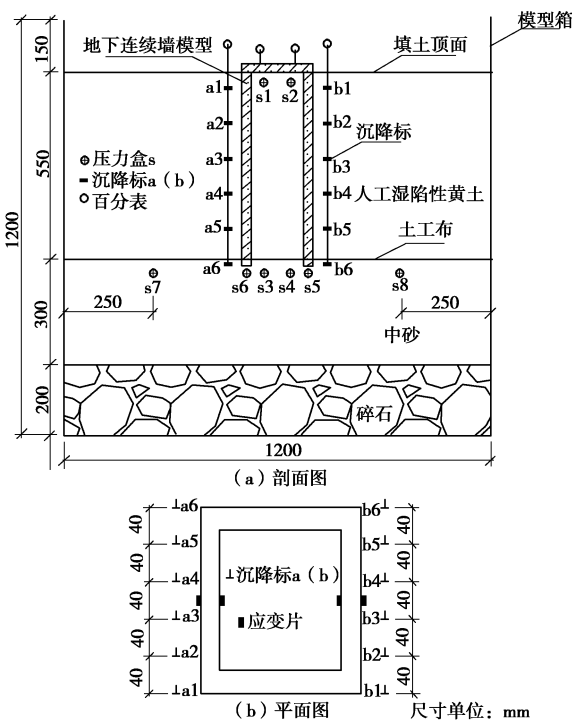


图 5 土压力盒与沉降标布置图

Fig. 5 Layout of earth pressure cells and settlement marks

（4）百分表布置

在模型墙墙顶和沉降标顶部布置 14 个百分表用于测量墙顶和土体位移，见图 6。

2.4 试验方案与过程控制

分别进行地下连续墙极限承载特性和浸水承载特性试验。浸水时采用“少量多次”的方法^[13]，先后 3 次浸水，每次加水量为 100 kg，浸水后进行测试，待

土体与模型墙沉降达到相对稳定后, 再进行下一次加水。



图 6 百分表布置
Fig. 6 Layout dial indicator

3 模型试验结果分析

3.1 地下连续墙极限承载特性分析

(1) 荷载 - 沉降关系分析

地下连续墙基础 $Q-s$ 关系曲线为陡降型, 破坏特征点明显, 见图 7。荷载在 0~21 kN 区间时, 荷载—沉降近似线性变化, 侧摩阻力逐渐发挥。荷载大于 21 kN 后增加的荷载主要由墙端阻力承担, 当荷载超过 24 kN 时, 地下连续墙产生较大的沉降而破坏, 确定地下连续墙基础的极限承载力为 24 kN。

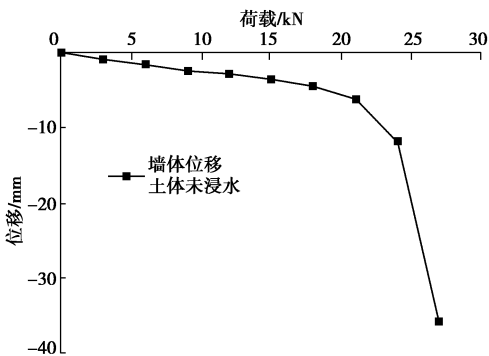


图 7 $Q-s$ 关系曲线
Fig. 7 $Q-s$ relationship curve

(2) 墙身轴力分析

墙身轴力分布见图 8, 地下连续墙受竖向荷载后, 墙身产生向下位移, 墙侧摩阻力发挥, 使墙身轴力沿深度递减, 墙身 25 cm 以下轴力递减程度降低, 说明墙身上部土体侧摩阻力较先发挥, 随着荷载的增加, 下部土体侧摩阻力也得到发挥。

(3) 侧摩阻力分析

a) 外墙侧摩阻力分析

外墙侧摩阻力分布见图 9, 由于模型墙尺寸较小, 墙端嵌入密实的砂土层, 所以地下连续墙受力特性类似于嵌岩桩性质^[16]。侧摩阻力沿深度自上而下发挥,

在埋深 18 cm 附近, 上部侧摩阻力达到最大值, 随着荷载的增大, 下部侧摩阻力开始发挥, 当荷载加到 12 kN 时, 下部侧摩阻力开始迅速增加, 最大为 60 kPa。

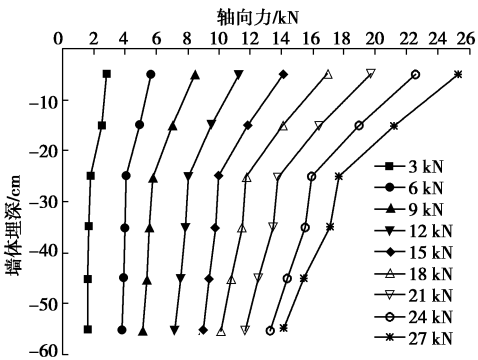


图 8 轴力分布曲线
Fig. 8 Distribution curves of axial force

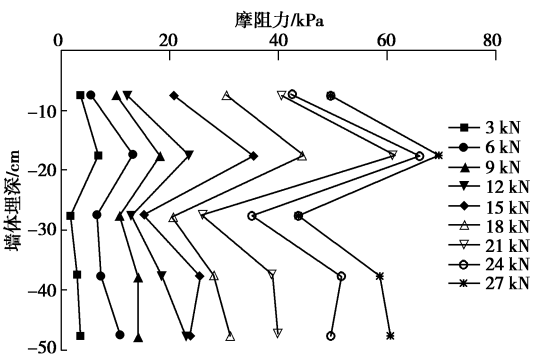


图 9 外墙侧摩阻力分布曲线
Fig. 9 Distribution curves of side friction of exterior wall

b) 内墙侧摩阻力分析

内墙侧摩阻力分布见图 10, 内墙侧摩阻力在呈自下而上发挥, 当荷载小于 9 kN 时, 埋深为 0~38 cm 墙段内的芯土受到承台的“削弱效应”, 侧摩阻力发挥较小。随着荷载的增大, 内侧摩阻力逐渐发挥, 且随埋深的增加, 侧摩阻力增加。在墙端处, 内侧摩阻力达到最大值。分析可得, 随竖向荷载的增大, 墙端刺入砂层的发展使得部分墙底砂土挤入闭合墙内部, 受竖向压缩的土芯在底部砂土的挤压作用下, 产生较大的竖向应力, 在内壁产生较大的侧摩阻力。

(4) 墙土荷载分担性状分析

荷载分担比见图 11, 初始加载 3 kN 时, 外墙侧摩阻力分担荷载所占比例最大, 为 60%, 内墙侧摩阻力和端阻力分担荷载次之, 承台土反力分担荷载所占比例最小。随着荷载的增加, 外墙、内墙侧摩阻力分担比例逐渐下降, 端阻力和承台土反力分担比例逐渐增大。加载至极限荷载 24 kN 时, 外墙侧摩阻力分担比为 47.2%, 内墙侧摩阻力分担比为 21.4%, 墙端阻力和承台土反力分担比分别为 23.3%、8.1%。说明外墙、内墙侧摩阻力、端阻力、承台土反力不是同步发挥。

表 6 墙土沉降位移

Table 6 Subsidence displacements of diaphragm wall and foundation soil

浸水情况	模型墙周土层沉降标累计浸水位移/mm						闭合墙位移/mm	
	1	2	3	4	5	6	本次浸水位移	累计浸水位移
	(5 cm)	(15 cm)	(25 cm)	(35 cm)	(45 cm)	(55 cm)		
浸水 1	25.49	16.57	6.87	1.07	0.59	0.58	1.28	1.28
浸水 2	40.30	25.71	10.56	2.31	1.64	1.12	1.67	2.95
浸水 3	54.08	29.50	16.68	6.54	4.70	2.96	2.49	5.44

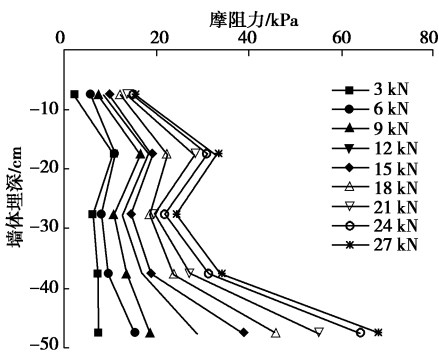


图 10 内墙侧摩阻力分布曲线

Fig. 10 Distribution curves of side friction of interior wall

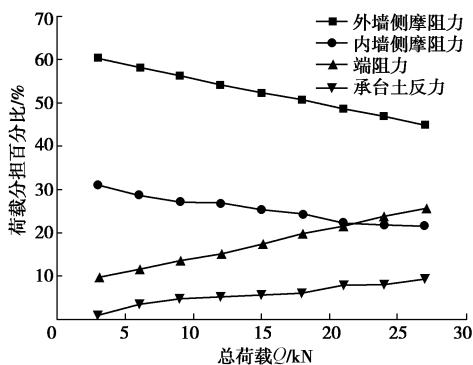


图 11 荷载分担比

Fig. 11 Load sharing ratios

3.2 浸水条件下地下连续墙承载特性分析

(1) 模型墙及土层沉降

重新填筑模型，地下连续墙分级加载至 15 kN 后开始加水，加水后墙周土体与模型墙的沉降见表 6，第 3 次加水后，土层发生较大湿陷，终止加水。

如表 6 所示，表中 1~6 分别表示布设在墙周第 1 层至第 6 层底面的沉降标 ($a_1\sim a_6$ 、 $b_1\sim b_6$) 沉降读数平均值。由于在土层表面加水，土体的湿陷由上向下发展。第 1 次浸水后，表层土体 15 cm 范围内湿陷变形明显，埋深 5 cm 以内土层的湿陷量占总湿陷量的 47%，埋深 15 cm 以内土层的湿陷量占总湿陷量的 56%，表层土体浸水后会立刻湿陷，其湿陷量占总湿陷量的 50%左右。由于水还未渗入下部土层，所以埋深 35 cm 以下的土层几乎没有发生湿陷变形。第 2 次

浸水后，埋深 15~35 cm 处的土层开始产生较大湿陷，墙底土层的变形量很小。第 3 次浸水后，埋深 45 cm 以下土层开始产生湿陷变形，说明水已经渗入下部土层，湿陷性土层完整浸水，地下连续墙浸水后的附加沉降为 5.44 mm。

(2) 中性点确定

忽略墙身压缩变形，墙周土体湿陷变形量与墙体位移量相等的位置可确定为中性点的位置，见图 12。

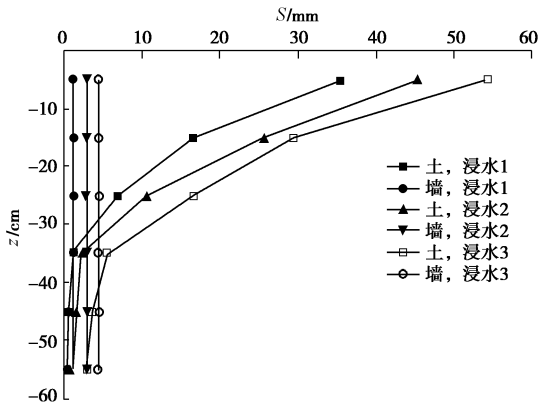


图 12 墙土相对位移曲线

Fig. 12 Curves of diaphragm wall vs. foundation soil

第 1 次和第 2 次浸水后，中性点深度在 35 cm 左右，第 3 次浸水稳定后，中性点降至 40 cm 左右，中性点位置由浅到深，中性点深度与墙体埋深的比例在 0.64~0.73 之间。参考文献[13]试验中性点深度比为 0.38~0.64，桩基负摩阻力实测资料表明^[17]，中性点位置一般为桩长的 0.70~0.75 倍，试验结果与桩基实测结果较为接近。

(3) 模型墙轴力分布

墙身轴力分布见图 13，浸水前轴力沿墙体埋深逐渐减小，墙侧摩阻力均为正值。浸水后，沿墙深各测点轴力均有不同程度的增大。轴力最大的截面即为中性点位置，3 次浸水后最大轴力均出现在墙体埋深 35 cm 左右，中性点位置与根据墙、土体位移相等原则确定的基本一致。

(4) 模型墙摩阻力分布

a) 外墙侧摩阻力分布

外墙侧摩阻力分布见图 14，浸水之前，墙体沉降

大于土体沉降, 摩阻力为正。土体浸水后, 土体从表面至下部逐渐湿陷, 土体湿陷变形逐渐增大, 墙侧正摩阻力逐渐减小, 当土体沉降大于墙体沉降时, 摩阻力变为负值。负摩阻力分布呈现抛物线型, 在负摩阻力过渡到正摩阻力时, 摩阻力为零的点即为中性点。随着加水量的增大, 中性点下移, 从第 1 次浸水后的 30 cm 处下移至 40 cm 处, 与轴力最大点的分布较为一致。

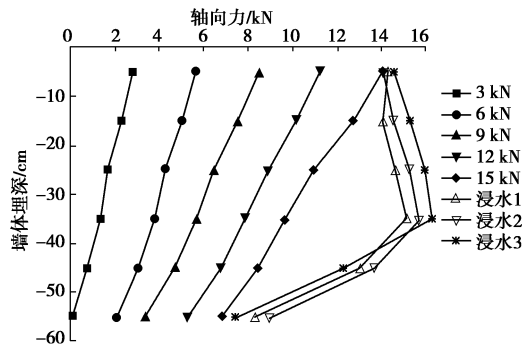


图 13 墙身轴力分布曲线

Fig. 13 Curves of axial force of diaphragm wall

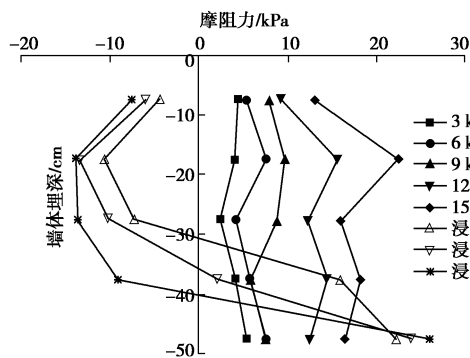


图 14 外墙侧摩阻力分布曲线

Fig. 14 Distribution curves of side friction of exterior wall

b) 内墙侧摩阻力分布

内墙侧摩阻力分布见图 15, 由于芯土不受外部浸水的影响, 闭合墙的内摩阻力分布与竖向载荷试验的分布趋势相同, 上部墙端内摩阻力较小, 下部逐渐增大, 最大值出现在墙端附近。

(5) 负摩阻力作用下模型墙墙土荷载分担

负摩阻力作用下荷载分担比见图 16, 浸水前模型墙外侧摩阻力主要承担荷载, 占 48%, 其次为内墙侧摩阻力及墙端阻力, 承台土反力发挥最小, 仅占 6%。浸水后, 外墙侧正摩阻力从上至下逐渐被削弱, 在 3 次浸水后承担荷载降低至 26.4%。由于负摩阻力对墙体产生的下拽作用和墙顶荷载的共同作用, 墙身轴力变大, 墙端压力增大, 同时墙的下沉又促进了内墙侧摩阻力、墙端阻力和承台土反力的发挥, 三者的荷载承担百分比分别增加了 10.3%, 12.6%, 7.1%。

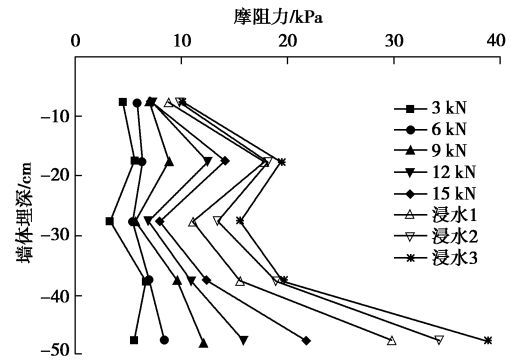


图 15 内墙侧摩阻力分布曲线

Fig. 15 Distribution curves of side friction of interior wall

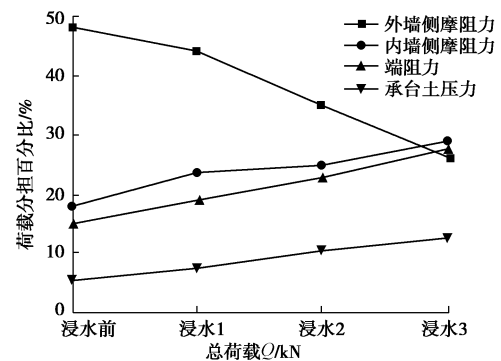


图 16 荷载分担比

Fig. 16 Load sharing ratios

4 结 论

(1) 选用石英粉、砂、工业盐、石膏和膨润土制备的人工湿陷性黄土, 其物理力学参数与天然黄土基本一致, 浸水后产生较大的湿陷变形, 可用于湿陷性黄土与构筑物相互作用模型试验相似材料。

(2) 地下连续墙竖向承载力由外墙侧摩阻力、内墙侧摩阻力、墙端阻力、承台土反力组成, 四者不是同步发挥。当达到其极限承载力时, 侧摩阻力荷载分担比为 67%, 承担了大部分荷载, 地下连续墙为端承摩擦型基础。

(3) 地基浸水湿陷后, 墙身轴力沿墙深均有不同程度的增大, 中性点深度比在 0.64~0.73 之间, 试验结果与桩基负摩阻力实测结果较为接近。

(4) 由于负摩阻力的存在, 外墙侧摩阻力荷载分担比由 48% 降至 26.4%, 但芯土不受水的影响, 内墙侧摩阻力与承台土反力能够得以发挥, 有效减小地下连续墙基础的沉降。

参考文献:

- [1] ASSALLAY A M, ROGERS C D F, SMALLEY I J. Formation and collapse of metastable particle packings and open structures in loess deposits[J]. Engineering Geology, 1997, 48:

- 101 - 115.
- [2] BASMA A A, TUNCER E R. Evaluation and control of collapsible soils[J]. *Geotech. Engrg. ASCE*, 1992, **118**(10): 1491 - 1504.
- [3] ZOURMPAKIS A, BOARDMAN D I, ROGERS C D F. Creation of artificial loess soils[C]// *Proc of the Int Conf from Experimental Evidence Towards Numerical Modeling of Unsaturated Soils*. Springer, 2005, **1**: 123 - 134.
- [4] JEFFERSON Ian, AHMAD Mufida. Formation of artificial collapsible loess[C]// *Problematic Soils and Rocks and In Situ Characterization*. ASCE, 2007.
- [5] JIANG Ming-jing, SHEN Zhu-jiang. Preparation of artificial structured collapsible loess and its behavior in oedometer test[C]// *2nd International Conference on Unsaturated Soils*. Beijing, 1998: 374 - 378.
- [6] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 结构性黄土的变形特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, **23**(24): 4142 - 4146. (HU Zai-qiang, SHEN Zhu-jiang, XIE Ding-yi. Deformation properties of structural loess[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(24): 4142 - 4146. (in Chinese))
- [7] 陈昌禄, 邵生俊, 张 喆. 人工制备结构性黄土的真三轴试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, **34**(8): 2231 - 2237. (CHEN Chang-lu, SHAO Sheng-jun, ZHANG Zhe. Study of artificial structural loess under true triaxial tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(8): 2231 - 2237. (in Chinese))
- [8] 骆亚生, 谢定义, 邵生俊, 等. 非饱和黄土的结构变化特性[J]. *西北农林科技大学学报*, 2004, **32**(8): 114 - 118. (LUO Ya-sheng, XIE Ding-yi, SHAO Sheng-jun, et al. Variation characteristics of Soil structure of unsaturated loess[J]. *Journal of Northwest A & F University*, 2004, **32**(8): 114 - 118. (in Chinese))
- [9] 李 涛. 铁路桥梁连续墙挖井基础设计方法的试验研究[J]. *中国铁道科学*, 1997, **18**(2): 46 - 53. (LI Tao. Test and research on the design method for diaphragm wall-type digging well foundation of railway bridge[J]. *China Railway Science*, 1997, **18**(2): 46 - 53. (in Chinese))
- [10] 孟凡超, 陈晓东, 程谦恭, 等. 黄土地区地下连续墙桥梁基础试验研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010. (MENG Fan-chao, CHENG Xiao-dong, CHENG Qian-gong, et al. Test on diaphragm wall as bridge foundation in loess area[M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese))
- [11] 程谦恭, 文 华, 宋 章. 地下连续墙桥梁基础承载机制[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (CHENG Qian-gong, WEN Hua, SONG Zhang. Bearing Mechanism of diaphragm wall as bridge foundation[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [12] 文 华, 程谦恭, 陈晓东, 等. 矩形闭合地下连续墙桥梁基础竖向承载特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(12): 1823 - 1830. (WEN Hua, CHENG Qian-gong, CHENG Xiao-dong, et al. Study on bearing performance of rectangular closed diaphragm walls as bridge foundation under vertical loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(12): 1823 - 1830. (in Chinese))
- [13] 文 华, 程谦恭, 宋 章. 矩形闭合地下连续墙基础负摩阻力模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, **30**(4): 541 - 548. (WEN Hua, CHENG Qian-gong, SONG Zhang. Model tests on negative skin friction of rectangular closed diaphragm wall foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(4): 541 - 548. (in Chinese))
- [14] 张延杰, 王 旭, 梁庆国, 等. 人工制备强湿陷性黄土物理力学性质试验研究[J]. *兰州交通大学学报*, 2015, **34**(6): 27 - 31. (ZHANG Yan-jie, WANG Xu, LIANG Qing-guo, et al. Experimental study of physic-mechanical properties of artificial serious collapsible loess[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2015, **34**(6): 27 - 31. (in Chinese))
- [15] 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. Loess mechanics and engineering[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [16] 赵明华, 曹文贵, 刘齐建, 等. 按桩顶沉降控制嵌岩桩竖向承载力的方法[J]. *岩土工程学报*, 2004, **26**(1): 67 - 71. (ZHAO Ming-hua, CAO Wen-gui, LIU Qi-jian, et al. Method of determination of vertical bearing capacity of rock-socketed pile by the settlement of pile top[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, **26**(1): 67 - 71. (in Chinese))
- [17] 黄雪峰, 陈正汉, 哈 双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土中灌注桩承载特性与负摩阻力的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(3): 338 - 346. (HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, HA Shuang, et al. Large area field immersion tests on characteristics of deformation of self-weight collapse loess under overburden pressure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(3): 338 - 346. (in Chinese))