

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.013

李建东, 王旭, 张延杰, 等. 黄土地基地下连续墙基础竖向抗压特性试验研究[J]. 水利水电工程学报, 2018(5): 89-94. (LI Jiandong, WANG Xu, ZHANG Yanjie, et al. Experimental study on vertical compressive bearing capacity of underground diaphragm wall foundation in loess area[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(5): 89-94. (in Chinese))

黄土地基地下连续墙基础竖向抗压特性试验研究

李建东¹, 王旭¹, 张延杰¹, 李凡², 李盛¹, 罗浩洋¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 陕西交通职业技术学院, 陕西 西安 710018)

摘要: 地下连续墙基础是一种埋深相对较浅的摩擦性基础,在巨厚层黄土地基中具有广阔应用前景。为研究大厚度黄土地基闭合型地下连续墙竖向抗压承载特性,选用石英粉、砂、膨润土和石膏制备黄土相似材料,模拟天然原状黄土,选用有机玻璃制作模型墙,进行室内缩尺模型试验,研究地下连续墙基础荷载传递机理与竖向抗压承载特性。结果表明:地下连续墙基础在竖向荷载作用下的荷载-沉降关系曲线呈陡降型,存在显著破坏特征点。地下连续墙基础竖向承载力由内墙侧摩阻力、外墙侧摩阻力、承台土反力和墙端阻力共同组成。地下连续墙竖向承载力达到极限时,总侧摩阻力占62%,为端承摩擦型基础,芯土的存在可有效减小地下连续墙基础沉降。试验结果可为大厚度黄土地基地下连续墙基础的选型设计提供参考。

关键词: 基础工程; 承载特性; 模型试验; 地下连续墙; 黄土

中图分类号: TU41

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2018)05-0089-06

我国黄土分布广泛、成因类型复杂。天然原状黄土具有较强的结构性,在采样、运输、制样过程中,不可避免地都会对试样产生扰动,使土的结构性释放,造成天然原状黄土与重塑黄土之间存在显著差异。地质力学模型试验已成为岩土工程中最常用的手段。在黄土与构筑物相互作用的模型试验中,大部分都采用重塑黄土填筑试验模型,因此破坏了天然原状黄土的结构性。

正确选择模型试验相似材料是原型模拟的关键,模型材料选择的正确与否直接决定着模拟原型的正确与否。风成黄土是一种典型的空中下落沉积物,在自由下落过程中产生亚稳定的开放结构^[1]。参考岩石类模型试验相似材料的选材和制备方法,选用高岭石、石英粉、工业盐、石膏、膨润土等材料,基于蒙特卡罗原理,采用空中自由下落法,模拟材料颗粒随机自由选择堆积位置;然后在一定的恒温条件下烘干,模拟风成黄土的沉积方式和干旱与半干旱环境,形成多孔隙与大孔隙的疏松亚稳定结构^[2]。土样的制备和养护过程能模拟风成黄土的形成过程和沉积环境,试验结果具有较好的可控性和重复性,满足相似定理和相似条件的人工制备黄土,能为黄土地区模型试验的开展提供技术支撑。

随着我国中西部黄土地区铁路、公路等大规模基础设施的建设,桥梁基础不可避免要穿越大厚度的黄土地层,而巨厚的黄土地层中没有良好的持力层。地下连续墙基础是一种埋深相对较浅的摩擦性基础,在桥梁设计中,如果充分利用地下连续墙基础的摩擦特性,将会降低施工难度、减少造价,带来可观的经济效益^[3-4]。同时,黄土具有壁立性好、垂直开挖方便、易于进行连续墙基础施工等特点。地下连续墙在我国多用于沿海软土地区高层建筑的深基础、地下室外墙等基坑围护结构和防渗结构^[5-8]。20世纪90年代初,圆形地下连续墙基础在我国宝中铁路中作为一种新型桥基首次被试用,由于其造价低、承载力大等优点,取得了较明显的经济效益^[9-10]。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,程谦恭^[3]、吴九

收稿日期: 2018-01-12

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

作者简介: 李建东(1992—),男,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事土工理论相关研究。

E-mail: 1362165874@qq.com 通信作者: 王旭(E-mail: publicwang@163.com)

江^[5,11]、孟凡超^[10]等通过室内模型试验,结合数值分析,对闭合型地下连续墙基础的荷载传递机理和承载特性等开展了研究。虽然地下连续墙基础在国外已应用广泛,但在我国桥梁工程、高层与超高层建筑基础方面的应用还不多见,将会是今后深基础工程的发展方向^[12-14]。

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模型结构^[3],采用黄土模型试验相似材料来填筑模型,对矩形地下连续墙基础在黄土地基中的荷载传递机理和承载特性进行研究。

1 模型试验

1.1 地下连续墙基础模型制作

本试验依托实际工程矩形地下连续墙桥梁基础,边长为 3.4 m,埋深为 15.0 m,墙厚 0.8 m^[1]。几何相似比为 17:1,试验矩形地下连续墙外侧尺寸 20 cm×20 cm,厚 2.5 cm,墙高 57 cm,承台高 4 cm。选取有机玻璃为地下连续墙材料,试验实测弹性模量为 2.18 GPa,模型墙弹性模量与墙周土压缩模量之比为 1 305。实际采用 C20 混凝土地下连续墙基时,根据关文章^[15]对甘肃地区原状黄土压缩模量的实测,当 $I_L < 0$ 时,黄土的压缩模量平均值为 14.9 MPa,地连墙与土弹性模量比为 1 342,模型试验中地连墙与土弹性模量比值与实际工程基本一致。将裁剪好的有机玻璃板用亚克力专业黏合剂拼接,使其成为一个整体,再贴应变片、接线。最后,为了模拟墙土之间的摩擦力,在有机玻璃地下连续墙表面均匀粘一层细砂粒,砂径控制在 1~2 mm(见图 1)。

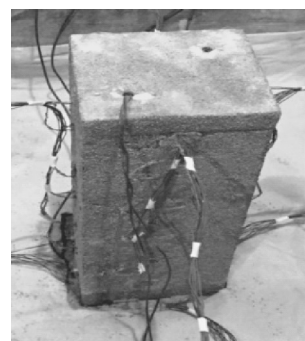


图 1 地下连续墙模型

Fig. 1 Underground diaphragm wall model

1.2 模型填筑及测试原件布置

试验采用模型箱尺寸为 1.2 m×1.2 m×1.2 m(见图 2)。模型箱底部铺设 20 cm 厚碎石,然后铺设 30 cm 厚中粗砂作为墙底持力层,密度为 1.75 g/cm³。地下连续墙进入砂层 2 cm,高出填土层 1 cm。墙周土体选取压实度为 0.82,含水率为 12%,即密度为 1.60 g/cm³的黄土模型试验相似材料;配比选用:砂:石英粉:膨润土:石膏=0.25:0.3:0.35:0.1(质量比),物理力学参数见表 1。

表 1 黄土模型试验相似材料物理性质指标

Tab. 1 Physical parameters of similar materials for loess model testing

名称	含水率/%	干密度/ (g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	土粒密度/ (g·cm ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/°	压缩系数/ MPa ⁻¹	压缩 模量/MPa
黄土相似材料	12.0	1.43	26.02	16.25	2.67	22.5	23.7	0.11	1.67
黄河中游地区黄土	10.7~23.4	1.10~1.68	15.40~20.50	15.40~20.50	—	20.6~33.6	20.6~33.6	0.02~0.90	—

在地下连续墙内外表面粘贴 24 个应变片(长 10 mm,宽 4.5 mm),用于墙身轴力测试,具体布置如图 3 所示。

在承台下和墙端埋设 8 个微型土压力盒(外径 28 mm,高 10 mm),用于测量墙端阻力和承台底土反力。在地下连续墙墙顶对称布置 2 个百分表测量墙顶位移,具体布置见图 2。

参考《建筑桩基检测技术规范(JGJ106—2014)》^[16],进行矩形地下连续墙竖向抗压静载试验,相对稳定标准为连续 2 h 内墙顶沉降量小于 0.1 mm/h。

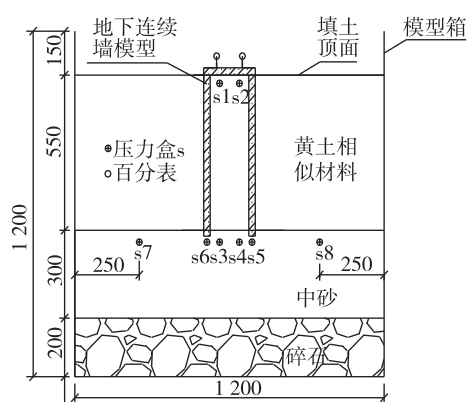


图2 土压力盒与百分表布置(单位:mm)

Fig. 2 Layout of pressure box and dial indicator (unit: mm)

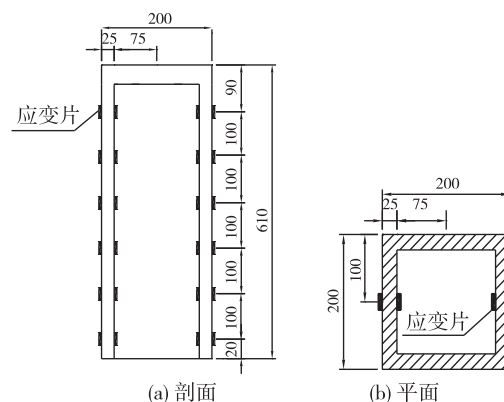


图3 地下连续墙应变片布置(单位:mm)

Fig. 3 Layout of strain gauges on underground diaphragm wall (unit: mm)

2 试验结果分析

2.1 荷载-沉降关系曲线

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4)。当墙顶荷载为0~27 kN时,荷载与沉降基本按线性规律变化;当荷载大于30 kN后,墙体沉降突然增大,地下连续墙产生较大沉降而破坏,确定地下连续墙基础的极限承载力为30 kN。

2.2 墙身轴力

由图5可见,地下连续墙受竖向荷载后,墙身向下位移,墙侧摩阻力开始发挥;当荷载小于12 kN时,墙侧摩阻力均匀发挥,轴力分布曲线几乎平行。当荷载大于12 kN后,墙身上部侧阻力率先发挥,轴力衰减较快,墙身25 cm以下轴力递减程度降低,当荷载达到极限承载力后,墙身下部侧阻力发挥显著。

2.3 侧摩阻力分布

地下连续墙外墙侧摩阻力分布如图6所示。由于地下连续墙尺寸相对较小,加载时墙端嵌入中砂层,则该地下连续墙受力特性类似于嵌岩桩^[17]。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96 kPa。随着荷载的增大,下部侧摩阻力开始迅速增加。

地下连续墙内墙侧摩阻力分布见图7,由于芯土被刚性墙体所包裹,类似于一维压缩,在竖向荷载作用下,主要以竖向压缩变形为主。当芯土底部承受较大反力时,芯土与内墙之间产生向上的相对位移,使内墙侧摩阻力由下向上发挥。随墙顶荷载的增大,内墙侧摩阻力沿深度逐渐发挥,在墙体埋深38 cm范围内,芯土受到承台的“削弱效应”,侧摩阻力作用很小。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,在距墙端1倍墙宽的深度范围内,芯土压缩变形与墙体相对增大,使内墙侧摩阻力得到充分发挥。

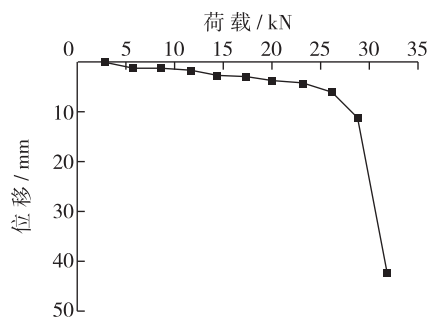
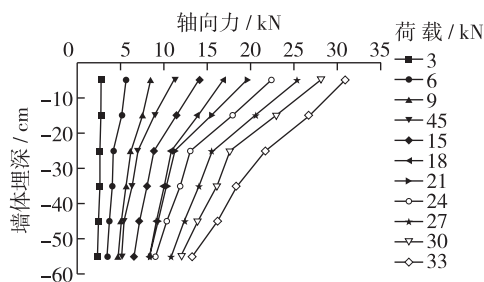
图4 $Q-s$ 关系曲线Fig. 4 $Q-s$ Relationship curves

图5 地下连续墙轴力分布曲线

Fig. 5 Axial force distribution curves of underground diaphragm wall

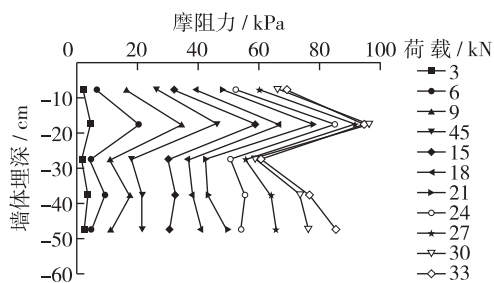


图 6 地下连续墙外侧墙摩阻力分布曲线

Fig. 6 Side friction distribution curves of exterior model wall

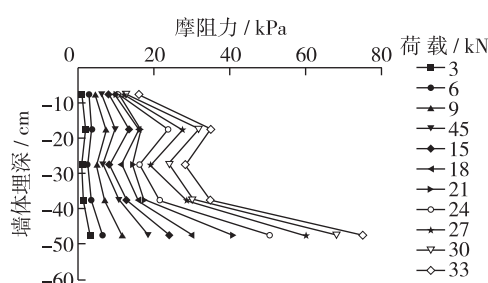


图 7 地下连续墙内侧墙摩阻力分布曲线

Fig. 7 Side friction distribution curves of interior model wall

2.4 墙土荷载分配

图 8 为黄土地基地下连续墙荷载分配曲线,当墙顶荷载小于 18 kN 时,外墙侧摩阻力发挥很快,内墙侧摩阻力和墙端阻力逐渐发挥,承台土反力发挥较小。当荷载大于 18 kN 后,外墙侧摩阻力的增幅减小,内墙侧摩阻力和墙端阻力较大发挥,承台土反力始终发挥较小,说明外墙侧摩阻力、内墙侧摩阻力、墙端阻力、承台土反力呈异步发挥。初始加载 3 kN 时,外墙侧摩阻力分担荷载所占比例最大,为 65%,内墙侧摩阻力和墙端阻力次之,承台土反力最小。随着荷载增加,外墙侧摩阻力、内墙侧摩阻力的荷载占比逐渐下降,墙端阻力和承台土反力的占比逐渐增大,荷载为 15 kN 时,内墙侧摩阻力和墙端阻力的荷载占比相等。当达到极限荷载 30 kN 时,外墙侧摩阻力的占比降至 45%。与初始时刻相比,内墙侧摩阻力、外墙侧摩阻力的荷载占比分别降低了 10% 和 20%,墙端阻力则增加了 15%,承台土反力增加了 9.6%。

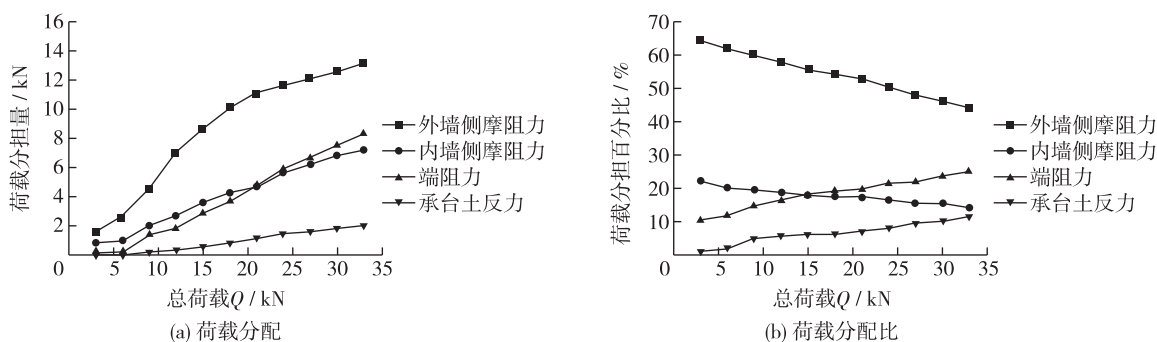


图 8 荷载分配曲线

Fig. 8 Relationship curves of load sharing ratio

3 结 语

(1) 选用石英粉、砂、石膏和膨润土制备的人工黄土模型试验材料,其物理力学参数满足黄河中游地区天然黄土的参数范围,可用于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、墙端阻力和承台土反力四部分组成,四者呈异步发挥。当达到其极限承载力时,侧摩阻力荷载占比为 62%,承担了大部分荷载,地下连续墙为端承摩擦型基础。

(3) 地下连续墙由于保留了芯土,随着荷载的增大,内墙侧摩阻力和承台土反力能较大发挥,可有效减小地下连续墙基础的沉降。

参 考 文 献:

- [1] 高国瑞. 近代土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (GAO Guorui. Neoteric soil geotechnology[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [2] 张延杰, 王旭, 梁庆国, 等. 湿陷性黄土模型试验相似材料研制与单桩负摩阻力模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(6): 857-863. (ZHANG Yanjie, WANG Xu, LIANG Qingguo, et al. Development of similar model material of collapsible loess and research on negative skin friction of pile foundation in collapsible loess region[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(6): 857-863. (in Chinese))
- [3] 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 Qiangong, WEN Hua, SONG Zhang. The bearing behavior of diaphragm walls as bridge foundation[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [4] 王银献, 刘军. 地下连续墙设计施工与案例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (WANG Yinxian, LIU Jun. The design and construction of diaphragm wall[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2014. (in Chinese))
- [5] 吴九江, 程谦恭, 文华. 地下连续墙基础在日本的多样化发展[J]. 工业建筑, 2013, 43(1): 144-149, 70. (WU Jiujiang, CHENG Qiangong, WEN Hua. Overview of the variety of diaphragm wall foundation developed in Japan in recent years[J]. Industrial Construction, 2013, 43(1): 144-149, 70. (in Chinese))
- [6] 高江林, 陈云翔. 基于渗流与应力耦合的防渗墙与坝体相互作用的数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2013(2): 58-63. (GAO Jianglin, CHEN Yunxiang. Numerical simulation of interaction between cut-off wall and earth-rock dam based on coupling of seepage and stress[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(2): 58-63. (in Chinese))
- [7] CHENG Q G, WU J J, SONG Z, et al. The behavior of a rectangular closed diaphragm wall when used as a bridge foundation[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2012, 6(4): 398-420.
- [8] WANG Z W, CHARLES W W, LIU G B. Characteristics of wall deflections and ground surface settlements in Shanghai[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(5): 1243-1254.
- [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 Fanchao, CHEN Xiaodong, CHENG Qiangong, et al. Test on diaphragm wall as bridge foundation in loess area[M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese))
- [11] 吴九江, 程谦恭, 文华, 等. 格栅式地下连续墙竖向载荷模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(12): 2580-2592. (WU Jiujiang, CHENG Qiangong, WEN Hua, et al. Model study of the vertical bearing behaviors of lattice shaped diaphragm walls as bridge foundations in soft soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(12): 2580-2592. (in Chinese))
- [12] 刘明虎, 付宇文. 井筒式地下连续墙基础设计及应用[J]. 公路, 2006(5): 52-56. (LIU Minghu, FU Yuwen. Design and application of closed diaphragm wall foundation[J]. Highway, 2006(5): 52-56. (in Chinese))
- [13] THASANIPAN N, MAUNG A W, BASKARAN G. Diaphragm wall and barrerte construction for thiam ruam mit station box, Mrt chaloem ratchamongkhon line, Bangkok[C] // An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, 2000: 19-24.
- [14] VERFEL J. Rock grouting and diaphragm wall construction[C] // Developments in Geotechnical Engineering. Amsterdam: Elsevier, 1989: 397-403.
- [15] 关文章. 湿陷性黄土工程性能新篇[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992. (GUAN Wenzhang. A new chapter of collapsible loess engineering properties[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1992. (in Chinese))
- [16] JGJ 106—2014 建筑桩基检测技术规范[S]. (JGJ 106—2014 Technical code for testing of building foundation piles[S]. (in Chinese))
- [17] 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 Minghua, CAO Wengui, LIU Qijian, 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))

Experimental study on vertical compressive bearing capacity of underground diaphragm wall foundation in loess area

LI Jiandong¹, WANG Xu¹, ZHANG Yanjie¹, LI Fan², LI Sheng¹, LUO Haoyang¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, China)

Abstract: The foundation of the underground diaphragm wall is a kind of frictional foundation with relatively shallow buried depth, which has a wide application prospects in the foundation with huge thick loess layer. In order to study the vertical compressive bearing characteristics of the underground closed diaphragm wall in the loess foundation with huge thick loess layer, the quartz powder, sand, bentonite and gypsum are chosen to prepare as the similar materials of loess, which simulate the natural undisturbed loess. And this model wall is made of the organic glass. Indoor scale model testing is carried out to analyze the load transfer mechanism and the vertical compression bearing capacity of the underground diaphragm wall foundation. The testing and analysis results show that the load settlement relationship curves of the underground diaphragm wall under the vertical loads belong to the type of steep fall, and there exist some significant failure points. The vertical bearing capacity of the underground diaphragm wall is composed of inner shaft resistance, outer shaft resistance, toe resistance and soil resistance under the cap, and the four kinds of the resistance are asynchronous. When the vertical bearing capacity of the underground diaphragm wall reaches its limit, the load sharing ratio of the total shaft resistance is 62%, and the underground diaphragm wall belongs to the end bearing friction foundation. The existence of the core soil can effectively reduce the settlement of the underground diaphragm wall foundation. The testing results can provide a technical reference for the type selection and design of the underground diaphragm wall foundation at large thickness loess sites.

Key words: foundation engineering; bearing capacity; model test; underground diaphragm wall; loess