

闭合型地下连续墙基础竖向承载性能数值模拟

张 波¹, 陈晓东²

(1. 甘肃水文地质工程地质勘察院, 甘肃 兰州 730020; 2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

摘要: 基于室内模型试验, 就闭合型与单片地下连续墙基础在竖向承载性能上的差异进行了对比分析, 并采用FLAC-3D软件进行数值分析来丰富室内模型试验, 探讨了土体变形模量、密度、内聚力以及内摩擦角对闭合型地下连续墙竖向承载力的影响。结果表明: 闭合型地下连续墙基础外侧摩阻力的发挥过程与单片地下连续墙基础大致相同, 但由于土芯的存在, 其内侧摩擦阻力发挥机理更复杂; 闭合型与单片地下连续墙基础均可视为端承摩擦型基础; 随着墙周土变形模量的增加, 闭合型地下连续墙基础竖向位移显著减少, 墙体轴力也减少; 密度对闭合型地下连续墙基础沉降的影响不显著; 内聚力对侧摩擦阻力的影响程度受地下连续墙和土体之间相对位移量的控制; 只有闭合型地下连续墙基础的沉降量超过20 mm时, 土体内摩擦角才对基础的竖向承载力有较大影响。

关键词: 地下连续墙; 黄土; 竖向承载力; 数值模拟; FLAC-3D

中图分类号: P642; TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)03-0311-05

Numerical Simulation of Vertical Bearing Capacity of Closed Underground Diaphragm Wall

ZHANG Bo¹, CHEN Xiao-dong²

(1. Gansu Investigation Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Lanzhou 730020, Gansu, China;

2. CCCC Highway Consultants Company Limited, Beijing 100088, China)

Abstract Based on the indoor test of model, the differences of vertical bearing capacity of closed and single underground diaphragm walls were discussed, the software FLAC-3D was used in numerical simulation in order to supply the indoor test of model, the influences of deformation modulus, density, cohesion and internal frictional angle on vertical bearing capacity of closed underground diaphragm walls were studied. The result showed that the mechanism of outside friction resistance in closed and single underground diaphragm walls were mostly the same, but the mechanism of inside friction resistance in closed underground diaphragm wall was more complex because of the existence of core; closed and single underground diaphragm walls could be considered as end support friction type; vertical displacement and wall axial force decreased significantly with the increase of deformation modulus in soil around the wall; the influence of density on sedimentation of closed underground diaphragm wall was not significant; effect of cohesion on lateral friction drag was controlled by relative displacement between the soils of underground diaphragm wall; internal frictional angle had considerable influence on the vertical bearing capacity of underground diaphragm wall only when the sedimentation of underground diaphragm wall was more than 20 mm.

Key words: underground diaphragm wall; loess; vertical bearing capacity; numerical simulation; FLAC-3D

0 引言

地下连续墙发展初期仅作为施工时承受水平

荷载的挡土墙或防渗墙来使用, 随后建筑、地铁等部门逐渐把地下连续墙用作高层建筑的地下室、地下停车场以及地铁等建筑的外墙结构, 承担部分或

收稿日期: 2009-11-20

基金项目: 交通部国家西部交通建设项目(200331849457)

作者简介: 张 波(1968-)男, 河南荥阳人, 工程师, 从事水文地质与工程地质勘察研究, E-mail: zhangbo192002@yahoo.com.cn

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

全部的建筑物竖向荷载^[1-3]。近年来,地下连续墙在公路工程中也得到一定应用,主要用作悬索桥锚碇基坑的施工支护结构,同时作为基础的一部分参与受力^[3-7]。地下连续墙与其他深基础相比,侧摩阻力大、刚性大、断面形式多样化、施工安全便捷、社会效益和经济效益较好等优点^[8-12]。

所谓闭合型地下连续墙基础是相邻的地下墙体采用刚性接头连接,形成平面闭合的矩形框架,并设置顶板(承台)的基础形式(图 1)^[4]。目前对闭合型地下连续墙基础竖向承载特性以及该连续墙与地基共同工作的机理和性状尚缺乏深入研究。考虑到黄土地区土层直立性好,垂直开挖方便,方便进行地下连续墙基础施工,交通部于 2003 年成立了“黄土地区大跨度桥梁地下连续墙和箱型基础的应用研究”课题组,对其进行专题研究。课题组采用现场试验、室内模型等多种手段对闭合型地下连续墙基础竖向承载性状进行了研究。

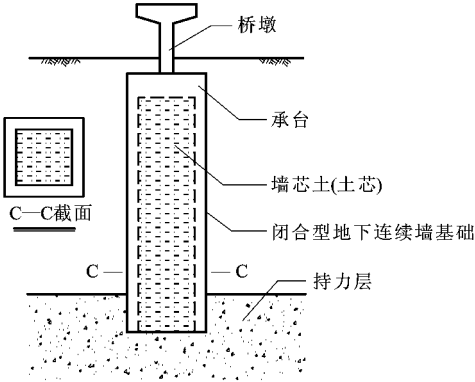


图 1 闭合型地下连续墙基础

Fig. 1 Closed Underground Diaphragm Wall

1 模型试验

1.1 模型试验概况及设计

课题组首次进行了针对闭合型地下连续墙桥梁基础的室内模型试验,对其竖向荷载传递机理和墙体内外侧摩阻力以及承台土反力的分布规律与发挥发展过程等展开了深入研究。为了考察单片地下连续墙基础与闭合型地下连续墙基础在竖向承载性状上的差异,分析闭合型地下连续墙所具有的竖向承载特性(图 2),在模型槽里同时设置单片地下连续墙基础模型和闭合型地下连续墙基础模型进行对比分析试验。

1.1.1 地下连续墙基础模型制作

地下连续墙基础模型采用有机玻璃材料,厚度

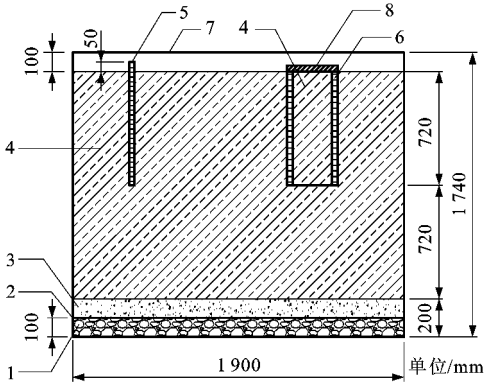


图 2 模型剖面

Fig 2 Layout of Model

32 mm。单片地下连续墙横截面为 380 mm × 32 mm,墙高 770 mm;闭合型地下连续墙横截面为“回”字型,外侧横截面为 380 mm × 380 mm,内侧横截面为 316 mm × 316 mm,厚 32 mm,墙高 720 mm。在有机玻璃模型表面均匀粘一层细砂粒,增加表面粗糙度,砂粒直径为 1~3 mm。

1.1.2 模型土参数及铺设

模型土采用山西万荣的 Q₄ 扰动黄土模型土铺设在模型槽底部,用碎石(粒径小于 12 mm)设置反滤层,厚度为 10 cm。在反滤层上设置双层钢丝网(孔径为 0.4 mm),再铺上厚度为 10 cm 的砂。然后将准备好的模型土按照要求的密度分层铺填在箱内,并压密找平。模型入土深度及墙底土层厚度均为 72 cm。

1.1.3 测试元件的布设

在单片地下连续墙顶部和闭合型地下连续墙顶部分别布设 2 只百分表(量程为 30 mm),量测墙顶部的位移。在单片地下连续墙底部和闭合型地下连续墙底部分别埋设 2 个 BY-3 型微型土压力盒,量测墙端阻力。此外,为了测量承台底的土反力,在闭合型地下连续墙承台底还埋设 3 个微型土压力盒,分别量测承台底角点处、边点处和中心点处的土反力。墙身竖向应变用 BF120-5AA 箔式应变片量测,共布设 42 片应变片。

1.1.4 加载装置及数据采集

模型加载设备采用简单易操作的杠杆加载法,墙身和土压力应变值由 YE2539 静态应变仪测得。墙顶沉降由布设的百分表(30 mm 量程)读取。

1.2 试验结果分析

通过室内模型试验认为^[4]：

(1)单片地下连续墙基础竖向承载力是由侧摩阻力和端阻力组成的，侧摩阻力大体呈自上而下发
挥，墙体轴力由地表向下逐渐减小，其竖向承载特
性与灌注桩十分类似。闭合型地下连续墙基础外
侧摩阻力和单片地下连续墙基础侧摩阻力的发挥
过程大致相同，但闭合型地下连续墙内由于土芯
的存在，内侧摩擦阻力发挥机理更复杂。

(2)单片地下连续墙和闭合型地下连续墙的侧
摩阻力都承担了大部分荷载，因此单片地下连续墙
和闭合型地下连续墙均可视为端承摩擦型基础。

2 数值分析模型简介

本模型试验采用扰动黄土作为模型土，而扰动
黄土和天然黄土的力学性质差别较大，且室内模型
试验很难考虑黄土物理力学参数的变化对基础竖
向承载性状的影响。因此，需要通过数值分析模型
来丰富室内模型试验。

2.1 数值分析软件简介

FLAC-3D 软件采用了“显式”有限差分格式来
求解场的控制微分方程，并应用混合单元离散模型
准确模拟材料的屈服、塑性流动、软化乃至大变形
过程，尤其在材料的弹塑性分析、大变形分析以及
模拟施工过程等方面有其独特的优点^[13-14]。

由于混凝土墙体和土体两种材料力学性能相差
很大，其接触面上可能产生错动或开裂，FLAC-3D
软件可通过设置无厚度的接触单元来处理接触问
题。由于地下连续墙的竖向荷载不仅由外侧墙体的
摩擦力承担，内墙壁与内部土芯之间也可能存在一
定的侧摩阻，所以在墙体内外侧均布设了接触单元，
选取接触力学参数主要参考了文献[13, 15-18]。

2.2 模型建立及参数的选取

地下连续墙体厚度 0.5 m，内部闭合土芯
2.5 m×2.5 m，墙体入土深度 20 m，承台高 3 m。
为了消除边界对结果的影响，模型尺寸 30 m×
30 m×50 m。根据对称原理取单个模型为计算对
象，单元划分及坐标轴方向的规定见图 3。模型底
面为固定约束，顶面为自由面，其余各面为铰接。
地下连续墙周土体选用 Mohr-Coulomb 模型，地下
连续墙体和承台采用各向同性弹性模型，物理力学
参数选取见表 1。竖向荷载施加于承台的上表面，
以面力的形式施加。

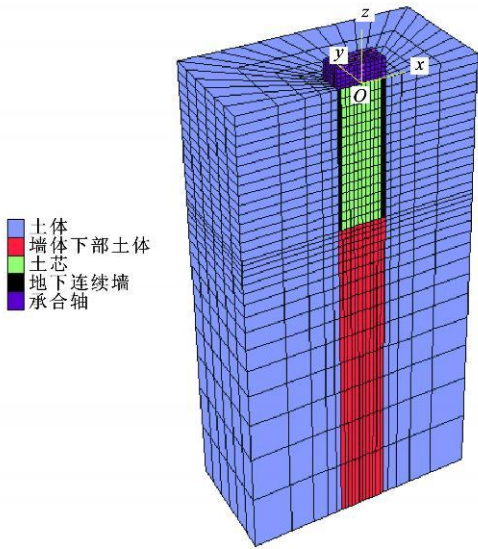


图3 数值模拟模型

Fig.3 Numerical Simulation Model

表 1 数值模拟模型的物理力学参数

Tab. 1 Parameters of Physical Mechanics in Numerical Simulation Model

材 料	密度/ (10 ³ kg·m ⁻³)	体积模量/ MPa	剪切模量/ MPa	内聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
土体	1.5	18.52	7.58	60	30
墙体	2.5	15.01	12.85		
承台	2.5	15.01	12.85		

3 地下连续墙竖向承载力分析

通过改变变形模量(E)、密度(ρ)、内聚力(c)、
内摩擦角(φ)等土体参数来分析土体参数对基础承
载性状的影响，探讨其工作性状。

3.1 变形模量对竖向承载力的影响

通过改变墙周土的变形模量来分析其对基础
竖向承载性状的影响。 E 分别取 10、15、30 MPa，
承台上所加的竖向荷载(Q)为：0.18~7.2 MN，其
他参数不变，观察竖向位移量(S)。图 4a 为闭合型
地下连续墙基础的 Q - S 曲线，图 5 为基础及周边土
体竖向应力云图，分析可见：

(1)在相同大小荷载作用下，随着墙周土变形
模量的增加，基础的竖向位移随之显著减小。

(2)变形模量的增大对基础及墙体的应力分布
和大小有明显影响，表现为随着模量增加，墙体的
轴力随之减小。

3.2 密度对竖向承载力的影响

通过改变墙周土的密度来分析其对基础竖向

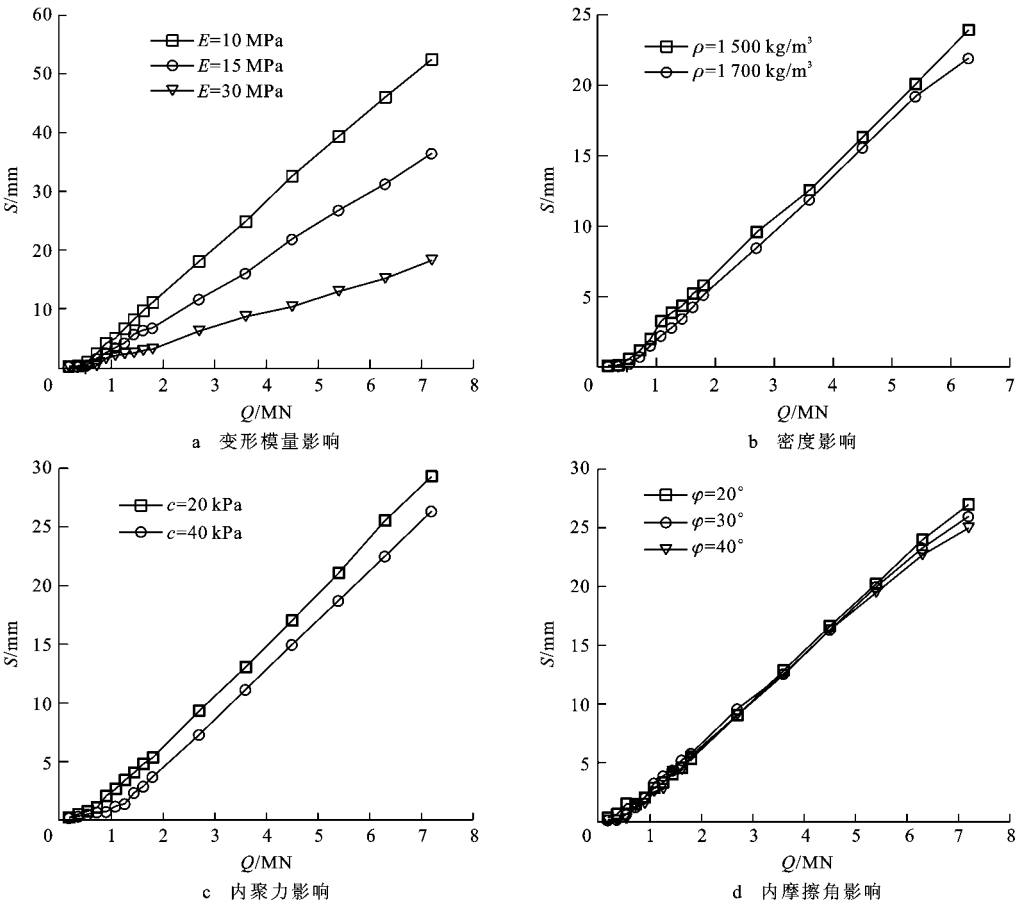
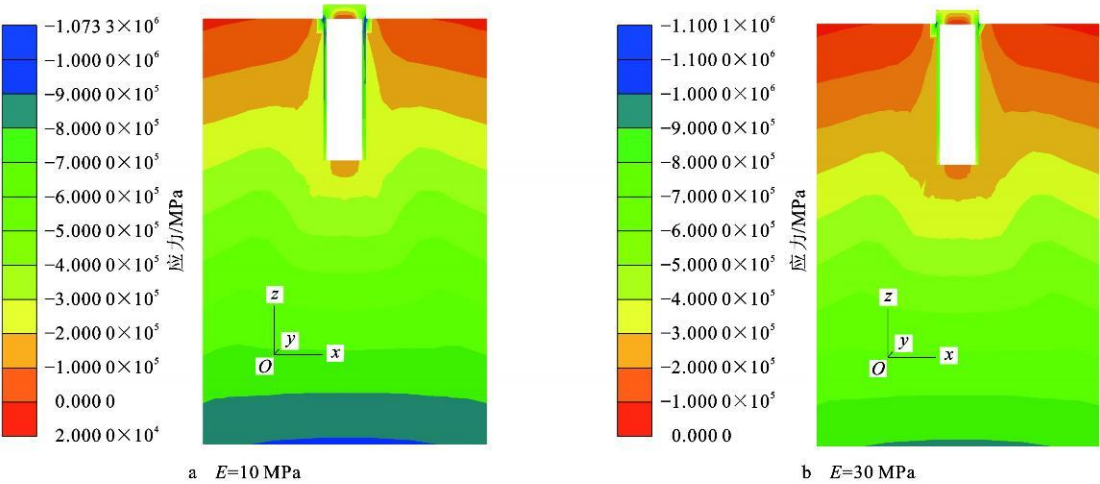


图 4 不同条件下闭合型地下连续墙基础竖向荷载与竖向位移的关系

Fig. 4 Relationship Between Vertical Load and Displacement of Closed Underground Diaphragm Wall in Different Conditions



竖向荷载为 6.3 MN

图 5 闭合型地下连续墙基础及周边土体竖向应力云图

Fig. 5 Nephogram of Vertical Stress in Soil of Closed Underground Diaphragm Wall and Its Periphery

承载性状的影响。 ρ 分别取 1.5×10^3 、 $1.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，其他参数不变。竖向荷载为 0.18 ~ 6.30 MN。由图 4b 可见相同荷载下， ρ 对基础沉降的影响不显著。

3.3 内聚力对竖向承载力的影响

通过改变墙周土的内聚力来分析其对闭合地下连续墙基础承载性状的影响。 c 分别取 20、40 kPa，竖向荷载为 0.18 ~ 7.20 MN。

由图 4c 可知, 闭合型地下连续墙基础的竖向位移随着土体 c 的增加而减小, 当施加的竖向力较小时, c 对基础沉降的影响不显著。随着荷载增大, 其影响程度才逐渐明显。这也反映了 c 对侧摩擦阻力的影响程度受地下连续墙和土体之间相对位移大小的控制。

3.4 内摩擦角对竖向承载力的影响

φ 分别取 20° 、 30° 和 40° , 其他参数保持不变, 竖向荷载为 $0.18 \sim 7.20 \text{ MN}$ 。从图 4d 来看, 闭合型地下连续墙基础的竖向位移随着内摩擦角的变大而减小, 但在基础沉降量小于 20 mm 时, 其影响不显著; 当沉降量大于 20 mm 后, φ 对基础竖向承载性状的影响才显著增强, 反映了墙周土体的内摩擦角对基础承载能力的影响程度受基础沉降量的控制。以上结论和文献[18]在大直径预应力混凝土空心桩承载力研究中所获得的结果类似, 即只有基础的沉降量超过某一定值时, 土体的内摩擦角才对地下连续墙的竖向承载能力有较大影响。

4 结语

(1) 黄土地区地下连续墙基础侧摩阻力承担了大部分荷载, 其竖向承载机理类似端承摩擦型基础, 竖向承载能力随着土体模量的增大而显著提高, 这表明在较坚硬的老黄土地层采用闭合型地下连续墙基础具有一定优势。

(2) 土体的内聚力在竖向荷载较小时, 其值对闭合型地下连续墙基础的竖向承载性状影响不显著, 随着竖向荷载的加大, 其值的影响程度才逐渐加强。

(3) 土体的内摩擦角对闭合型地下连续墙基础的竖向承载力也有较显著的影响, 其影响程度受基础沉降变形大小的控制。

(4) 由闭合型地下连续墙基础的施工方法及流程来看, 黄土具有优越的直立性能, 一般可利用人工开挖墙槽, 墙周土体受扰动很小, 其力学参数没有遭受较大劣化, 因此在黄土地区桥梁基础采用闭合型地下连续墙基础具有一定可行性。

参考文献:

- [1] 丛诤森. 地下连续墙的设计施工与运用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [2] 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.
- [3] 于书翰. 黄土地区拱桥桥台人工开挖地下连续墙基础[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(4): 32-35.
- [4] 中交公路规划设计院有限公司. 黄土地区大跨度桥梁地下连续墙和箱型基础的应用研究[R]. 北京: 中交公路规划设计院有限公司, 2007.
- [5] 周建军, 饶思礼, 张有光, 等. 虎门大桥西锚碇大型混合基础的设计与施工[J]. 桥梁建设, 1995(2): 44-47.
- [6] 郭慧光, 孙旻, 徐伟. 地墙“巨无霸”——武汉阳逻长江公路大桥 45 m 埋深的南锚碇圆形地下连续墙施工及受力特性分析[J]. 建筑施工, 2004, 26(3): 188-190.
- [7] 常红, 郑越. 竖向承载地下连续墙的沉降计算[J]. 中国公路学报, 2003, 16(3): 74-77.
- [8] 傅德明, 王庆国, 夏明耀. 地下连续墙垂直承载力现场试验研究[J]. 地下工程与隧道, 1997(2): 24-31.
- [9] 常红, 夏明耀, 傅德明. 地下连续墙垂直承载力室内模拟试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1998, 26(3): 279-283.
- [10] 李农. 地下连续墙垂直承载力试验研究[D]. 上海: 同济大学, 1993.
- [11] 周生华. 地下连续墙垂直承载机理试验研究[D]. 上海: 同济大学, 1991.
- [12] 王卫东. 承重地下连续墙与高层建筑桩箱基础及地基共同作用的理论和实测研究[D]. 上海: 同济大学, 1996.
- [13] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [14] 杨治国, 侯恩科, 李琰庆. FLAC-3D 与理正软件在基坑支护设计中的应用[J]. 西安科技大学学报, 2007, 27(2): 224-227.
- [14] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 14-22.
- [16] 朱泓, 殷宗泽. 土与结构材料接触面性能研究综述[J]. 河海科技进展, 1994, 14(4): 1-8.
- [17] 机械工业勘察设计院. 黄土地区大跨度桥梁地下连续墙和箱型基础的应用研究[津—临猗一级公路 K23+385 天桥湿陷性黄土的试验研究报告[R]. 西安: 机械工业勘察设计院, 2005.
- [18] 李晋, 谢永利, 冯忠居. 土体参数对大直径空心桩承载性状影响的仿真分析[J]. 工程地质学报, 2005, 13(1): 129-134.