

DOI: 10.11779/CJGE2024S20023

黏性土中条壁式地连墙基础竖向承载特性研究

邓会元^{1,2}, 王仁贵¹, 宋二祥², 黄李骥¹, 刘晓东¹, 刘波¹

(1. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100010; 2. 清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘要: 条壁式地连墙基础长宽比较大, 承载性能优越, 施工速度快捷, 具有较好工程应用前景。但其承载机理尚不清晰, 通过建立条壁式地连墙基础数值模型, 研究了条壁式地连墙基础竖向承载特性及墙-土相互作用机理, 分析了墙体参数、土体参数等因素对条壁式地连墙基础竖向承载力的影响。计算结果表明, 单幅地连墙每增加 10 m 埋深可使承载力提高 34%~60%。每增加 12 m 墙长度可使承载力提高 14%~89%。地连墙承载力随土体黏聚力和内摩擦角增加而基本呈线性增长, 随土体弹性模量增加而呈对数增长。当墙顶荷载接近极限时, 墙端附近形成一个锥形的潜在滑移面。地连墙长度越长, 地连墙对周围土体影响范围越来越大, 墙幅间对周围土体影响存在叠加效应。

关键词: 条壁式地连墙; 竖向承载力; 数值分析; 墙-土相互作用机理; 滑移面

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S2-0200-05

作者简介: 邓会元(1989—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: 973730609@qq.com。

Vertical bearing characteristics of foundation with barrette diaphragm wall in cohesive soils

DENG Huiyuan^{1,2}, WANG Rengui¹, SONG Erxiang², HUANG Liji¹, LIU Xiaodong¹, LIU Bo¹

(1. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100010, China; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing

100084, China)

Abstract: The barrette diaphragm wall has a large aspect ratio, superior load-bearing performance, fast construction speed and good engineering application prospects. However, its bearing mechanism is not yet clear. By establishing a numerical model for the foundation with the barrette diaphragm wall, the vertical bearing characteristics and the wall-soil interaction mechanism are studied. The influences of wall parameters, soil parameters and other factors on the vertical bearing capacity of the barrette diaphragm wall are analyzed. The calculated results show that increasing the burial depth of a single diaphragm wall by 10 m can increase the bearing capacity by 34% to 60%. An increase of 12 m in the wall length can increase the bearing capacity by 14% to 89%. The bearing capacity of the diaphragm wall increases linearly with the increase of cohesion and internal friction angle of the soils, and logarithmically with the increase of elastic modulus of soils. When the load on the top of the wall approaches its limit, a potential conical sliding surface forms near the wall base. The longer the length of the diaphragm wall, the greater the impact of the diaphragm wall on the surrounding soils, and there are superimposed effects between the wall amplitudes on the surrounding soils.

Key words: barrette diaphragm wall; vertical bearing capacity; numerical analysis; interaction mechanism of wall-soil; sliding surface

0 引言

条壁式地下连续墙(简称条壁式地连墙)基础截面型式为矩形条状, 主要采用地下连续墙施工设备进行施工, 以泥浆护壁和现场灌注混凝土方式形成墙体。由于其施工过程除成槽设备与灌注桩成桩设备存在差异外, 其他施工工序基本相同, 因此, 国外很多文献也称其为“Barrette pile”, 译为“壁板桩”、“条形桩”、“槽壁桩”等。

很多学者认为壁板桩或条壁式地连墙的承载性能

优于圆形桩, 在保持承载力不变的话, 壁板桩比圆形桩节约 10%~15% 的混凝土, 提高效率(5~10)倍^[1]。在相同截面积条件下, 随着壁板桩长宽比增大, 承载力也越高。目前壁板桩在国外很多高层建筑基础中得到广泛应用, 如马来西亚双子塔的基础采用 40~105 m 深的壁板桩, 巴西国家石油公司的新总部大楼采用

基金项目: 中交集团重大科技研发项目(2021-ZJKJ-07); 中交公路规划设计院有限公司科技研发项目(C22052B)
收稿日期: 2024-06-21

嵌岩的壁板桩^[2]。

为了研究壁板桩或条壁式地连墙的承载特性, 国内外学者开展了大量试验、理论及数值模拟研究, 日本大林组技术研究所在东京都千代田区和千叶县进行了单片地下连续墙基础的荷载试验, 试验表明单片地下连续墙基础的承载性能优于灌注桩。李桂花等^[3]在国内首次开展了单片地连墙竖向静载试验, 研究了地连墙墙侧和墙端阻力发挥特性。Ng 等^[4]在香港开展了壁板桩现场静载试验。Lin 等^[5]在台北进行了压浆和未压浆的壁板桩竖向承载试验。Rafa 等^[6]对圆形桩和壁板桩进行了竖向承载特性数值分析。

虽然针对壁板桩承载特性已有大量研究, 但上述研究的壁板桩截面尺寸较小, 长度仅为 2.5~6 m, 而对于远大于 6 m 长的条壁式地连墙基础, 如应用于桥梁基础, 目前尚缺少相关研究。为了进一步探究条壁式地连墙竖向承载机理, 本文以黏性土为例, 建立三维数值模型, 研究不同影响因素对条壁式地连墙的竖向承载特性的影响。

1 条壁式地连墙基础竖向承载力影响因素数值分析

1.1 数值模型

为了研究黏性土中条壁式地连墙竖向承载影响因素, 以下通过 FLAC^{3D} 建立三维数值模型(如图 1), 土体及墙体均采用实体单元, 地连墙尺寸为 $a \times b \times h$ (长×厚×深), 墙-土界面设置接触面。墙底距离模型底 $25b$, 地连墙距离模型边界 $30b$, 满足边界效应要求^[7], 其中 $x-x$ 方向为地连墙长边方向, $y-y$ 方向为地连墙短边方向, $z-z$ 方向为墙深方向。

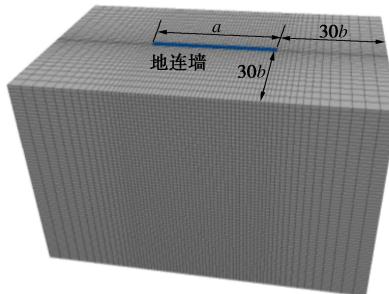


图 1 三维数值模型

Fig. 1 3D numerical model

1.2 模型参数取值

假设墙周土为单一均质黏性土, 土体材料服从 Mohr-Coulomb 屈服准则假定的均质弹塑性体, 地连墙为线弹性材料。一般标准墙幅长为 6 m, 厚度为 1.2 m, 地连墙混凝土等级为 C30, 弹性模量 $E_c=30$ GPa, 泊松比为 0.2。计算模型参数取值见表 1。

表 1 不同影响因素计算模型参数

Table 1 Parameters of different influencing factors

计算模型	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	c/kPa	$\phi/^\circ$	E/MPa	h/m	a/m	影响因素
M0	18	30	20	100	30	6	基准模型
M1			$h=10, 20, 30, 40, 50$				埋深影响
M2			$a=6, 12, 24, 36, 48, 60$				长度影响
M3			$c=10, 30, 50, 100, 200$				黏聚力影响
M4			$\varphi=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$				内摩擦角影响
M5			$E=10, 50, 100, 200, 500, 1000$				弹性模量影响

注: γ 为重度; c, φ 分别为土体黏聚力和内摩擦角; E 为弹性模量。

模型中接触面上的黏聚力 c 与内摩擦角 φ 取墙相邻土层的 c, φ 的 0.8 倍^[8]。

1.3 荷载沉降特性计算结果

为了研究黏性土中条壁式地连墙基础荷载沉降特性, 以下重点讨论了地连墙埋深、长度、土体参数等因素对地连墙基础竖向承载特性影响。

(1) 地连墙尺寸影响分析

a) 地连墙埋深影响

地连墙埋深为 10~50 m 时, 墙顶荷载沉降($Q-s$)曲线如图 2 所示。

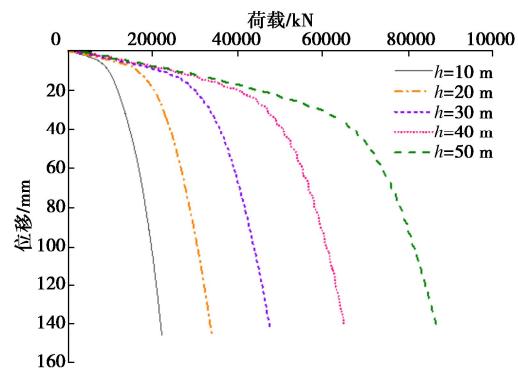


图 2 不同墙深计算结果

Fig. 2 Calculated results under different wall depths

从上述计算结果可知, 黏性土中不同埋深地连墙基础 $Q-s$ 曲线基本呈缓变形, 整个过程出现两个阶段(线性增长阶段和沉降加速阶段), 在初始阶段 $Q-s$ 近似线性增长, 随后出现沉降增长率变大。随着墙埋深的增加, 线性增长阶段的临界沉降也越大。根据建筑桩基规范中规定缓变形荷载沉降曲线可取为 40 mm 沉降对应的荷载作为承载力(Q_u), 此时每增加 10 m 埋深可使地连墙承载力提高 32%~66%, 且随着墙体埋深越大, 承载力提高幅度越小。若按照 AASHTO 规范^[9]规定的 0.05b 沉降进行控制时, 每增加 10 m 埋深可使地连墙承载力提高 34%~60%。

b) 地连墙长度影响

地连墙长度为 6~60 m 时, 墙顶 $Q-s$ 曲线如图 3 所示。

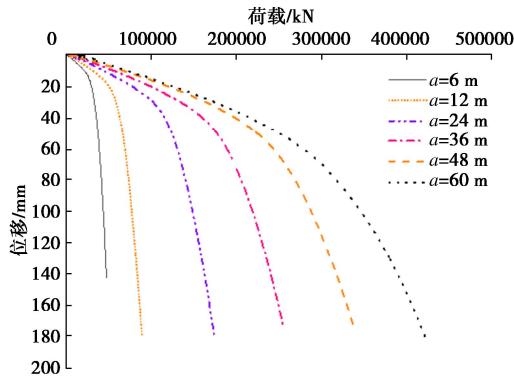


图 3 不同墙长度计算结果

Fig. 3 Calculated results under different wall lengths

从计算结果可知, 黏性土中不同长度地连墙基础 $Q-s$ 曲线基本呈缓变形, 随着墙长度的增加, $Q-s$ 曲线越平缓。对于不同沉降控制要求条件下, 承载力随墙长度增加而基本呈线性增长。若按照 $0.05b$ 沉降进行控制时, 每增加 12 m 墙长度可使地连墙承载力提高 $14\% \sim 89\%$, 且随着墙长度越大, 承载力提高幅度越小。

(2) 土体参数影响分析

a) 土体黏聚力影响

假设黏性土黏聚力为 $10\sim200\text{ kPa}$ 时, 墙顶 $Q-s$ 曲线如图 4 所示。

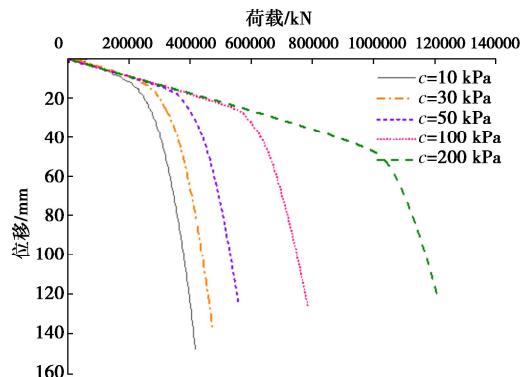


图 4 不同黏聚力影响计算结果

Fig. 4 Calculated results under different soil cohesions

从计算结果可知, 不同黏聚力的黏性土中地连墙 $Q-s$ 曲线基本呈缓变形, 在初始阶段均呈线性增长, 当沉降小于 10 mm 时, 黏聚力对 $Q-s$ 曲线影响较小。对于不同沉降控制要求条件下, 承载力随黏聚力增加而基本呈线性增长。若按照 $0.05b$ 沉降进行控制时, 土体黏聚力每增加 10 kPa 可使地连墙承载力提高 $5\% \sim 11\%$ 。且随着黏聚力越大, 承载力提高幅度越小。

b) 土体内摩擦角影响

假设黏性土内摩擦角为 $0\sim40^\circ$ 时, 墙顶 $Q-s$ 曲线如图 5 所示。

从计算结果可知, 当土体内摩擦角较小(如不高 10°)时, 地连墙基础 $Q-s$ 曲线呈 3 阶段变化, 第

1 阶段为线性增长阶段, 临界位移只有几个 mm 至 1 cm 左右, 且内摩擦角越小, 临界位移越小; 第 2 阶段为滑移阶段, 此过程墙侧摩阻力达到极限; 第 3 阶段为硬化增长阶段, 此过程墙端阻力逐渐发挥, 呈缓变形增长。当土体内摩擦角为 $20^\circ \sim 40^\circ$ 时, $Q-s$ 曲线呈缓变形增长, 当沉降小于 10 mm 时, 土体内摩擦角增加对 $Q-s$ 曲线影响较小。对于不同沉降控制要求条件下, 承载力随土体内摩擦角增加而基本呈线性增长。若按照 $0.05b$ 沉降进行控制时, 土体内摩擦角每增加 10° 可使地连墙承载力提高 $27\% \sim 41\%$ 。

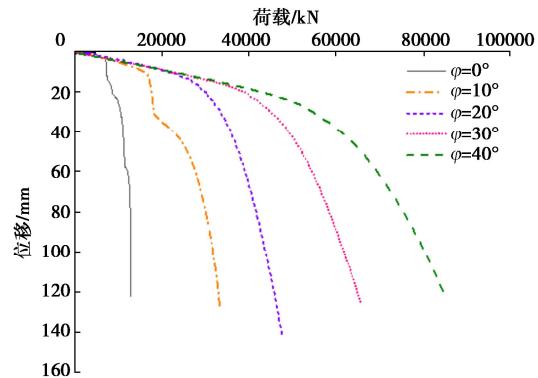


图 5 不同内摩擦角影响计算结果

Fig. 5 Calculated results under different soil frictions

c) 土体弹性模量影响

假设黏性土弹性模量为 $10\sim1000\text{ MPa}$ 时, 墙顶 $Q-s$ 曲线如图 6 所示。

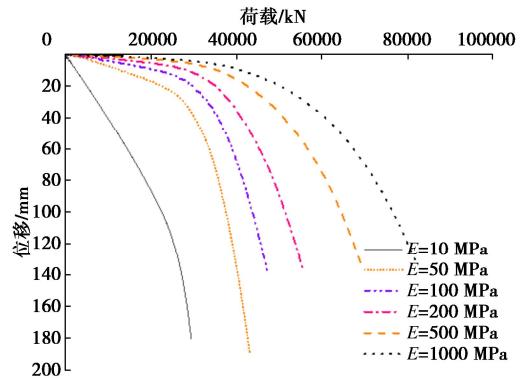


图 6 不同弹性模量影响计算结果

Fig. 6 Calculated results under different elastic moduli of soils

从上述计算结果可知, 当土体弹性模量越大, 地连墙基础 $Q-s$ 曲线越平缓。对于不同沉降控制要求条件下, 承载力随土体弹性模量增加而呈对数增长, 且增长速率越来越小。若按照 $0.05b$ 沉降进行控制时, 土体弹性模量每增加 100 MPa 可使地连墙承载力提高 $4\% \sim 18\%$ 。且随着土体弹性模量越大, 承载力提高幅度越小。

因此, 对于软黏土地基, 通过地基加固改良, 增大软黏土黏聚力、内摩擦角以及弹性模量, 有助于提高地连墙的承载力。

2 墙-土相互作用机理分析

为了分析墙周土体位移场变化规律, 以下以 a 为 6, 48 m 为例, 根据 $Q-s$ 曲线可知, 控制沉降 $s=0.05\text{m}$ 时, 对应的地连墙承载力 (Q_u) 分别为 39000, 240000 kN。则地连墙墙顶荷载为 $1/5Q_u \sim Q_u$ 时, 墙周土体位移场分布如图 7~10 所示, 图中位移单位均为 m。

从计算结果可知, 随着墙顶荷载增加, 墙侧土体位移及侧阻力从上到下逐渐发挥, 当 Q 达到 $3/5Q_u$ 时, 墙-土界面土体位移基本相同, 说明墙侧摩阻力基本达到极限, 之后随着荷载增加, 墙端阻力逐渐发挥作用, 且对墙端以上 10 m 范围墙侧土体位移产生影响。当 Q 接近极限时, 墙端短边附近形成一个锥形的潜在滑移

面(图 8(e)), 这与 Meyerhof^[10]提出的深基础破坏模式相似。而墙端长边附近形成一个倒梯形的硬核区, 这与陈亚东等^[11]从细观模型试验观测到的现象相似。

此外, 随着荷载增加, 地连墙对周围土体影响范围越来越大, 且 $y-y$ 剖面方向土体影响范围大于 $x-x$ 剖面方向, 如 $a=48\text{ m}$, $Q=3/5Q_u$ 时, $y-y$ 剖面方向土体位移在 10 mm 以上时最大影响距离为 8 m, 而 $x-x$ 方向土体位移在 10 mm 以上时最大影响距离达到 25 m。常红等^[12]通过模型试验也发现一字形地连墙长边一侧土体受加载影响大于短边一侧。此外, 对比 $a=6\text{ m}$ 和 $a=48\text{ m}$ 可以看出, 地连墙长度越长, 对周围土体的影响范围越大。说明墙侧面面积增大时对周围土体的影响, 墙幅间对周围土体影响存在叠加效应。

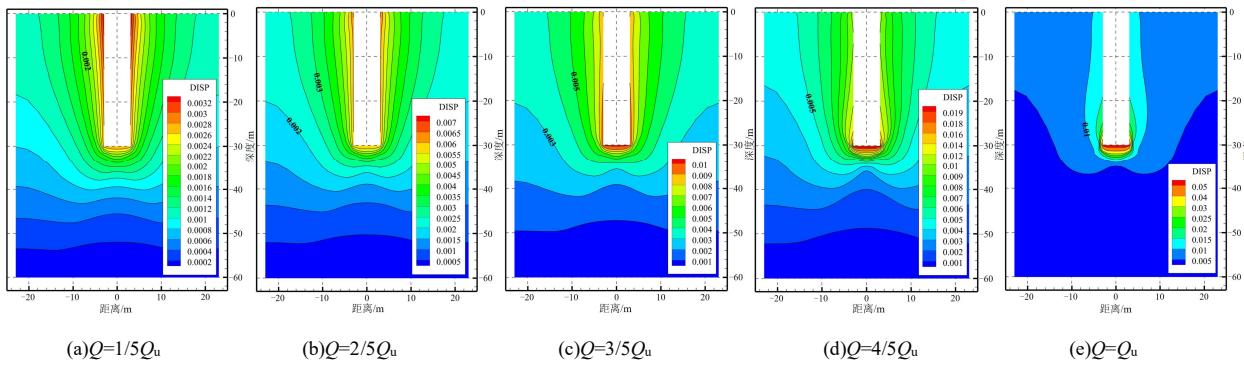


图 7 $a=6\text{ m}$ 时不同荷载作用下墙周土体位移场分布 ($x-x$ 剖面)

Fig. 7 Distribution of displacement field of soils around wall under different loads when $a=6\text{ m}$

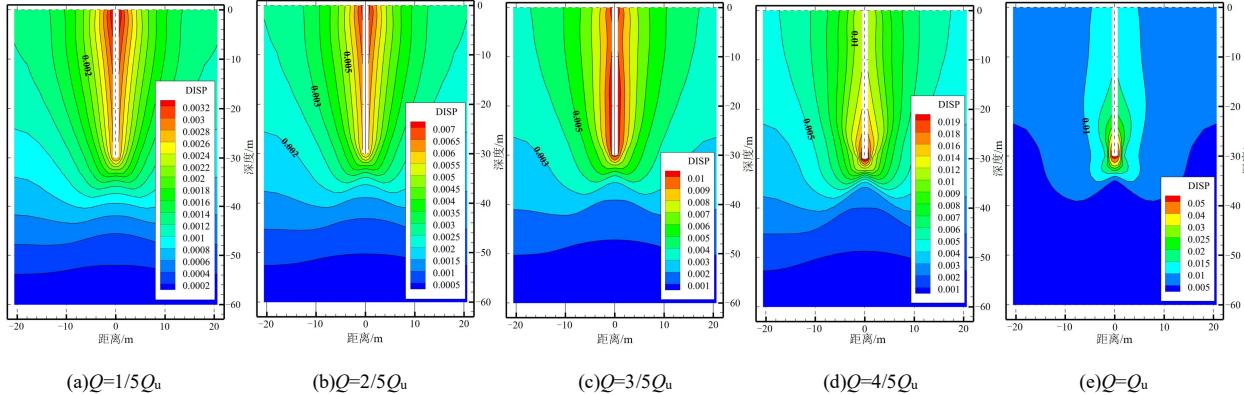


图 8 $a=6\text{ m}$ 时不同荷载作用下墙周土体位移场分布 ($y-y$ 剖面)

Fig. 8 Distribution of displacement field of soils around wall under different loads when $a=6\text{ m}$

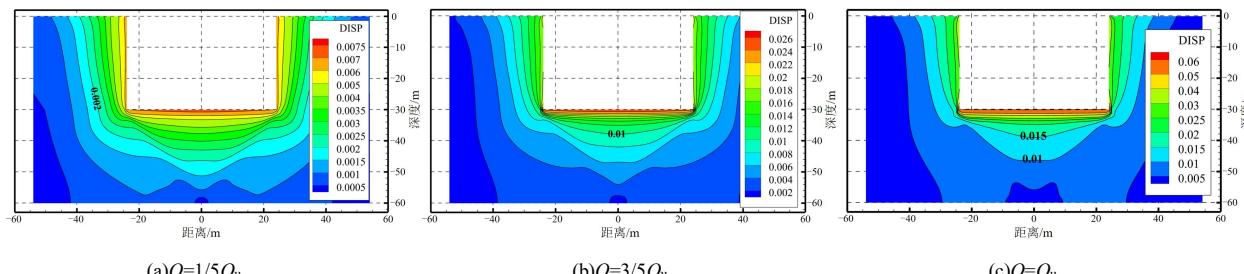


图 9 $a=48\text{ m}$ 时不同荷载作用下墙周土体位移场分布 ($x-x$ 剖面)

Fig. 9 Distribution of displacement field of soils around wall under different loads when $a=48\text{ m}$

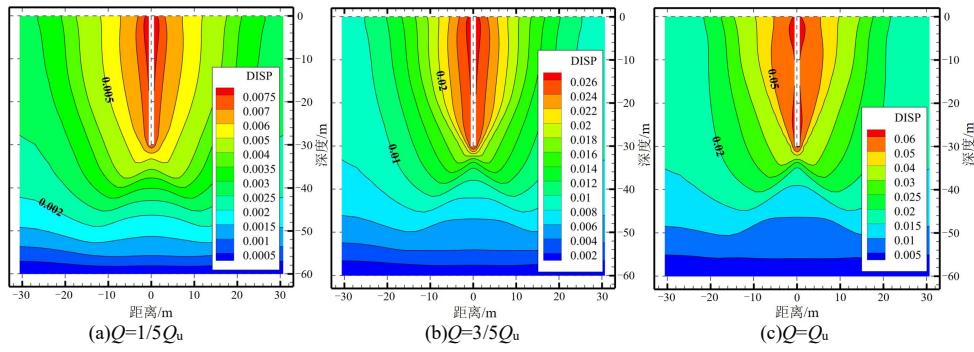


图 10 $a=48$ m 时不同荷载作用下墙周土体位移场分布 ($y-y$ 剖面)

Fig. 10 Distribution of displacement field of soils around wall under different loads when $a=48$ m

3 结 论

通过建立条壁式地连墙基础数值模型,研究了条壁式地连墙基础竖向承载特性。得到 4 点结论。

(1) 地连墙基础承载力受地连墙埋深以及长度影响较显著,单幅地连墙每增加 10 m 埋深可使承载力提高 34%~60%。每增加 12 m 墙长度可使承载力提高 14%~89%。

(2) 地连墙承载力随土体黏聚力和内摩擦角增加而基本呈线性增长,随土体弹性模量增加而呈对数增长,且增长速率越来越小。通过改良黏性土地基,有助于提高地连墙承载力。

(3) 随着墙顶荷载增加,墙侧土体位移及侧阻力从上到下逐渐发挥,当 Q 达到 $3/5 Q_u$ 时,墙侧摩阻力基本达到极限,墙端阻力逐渐发挥作用。当 Q 接近极限时,墙端附近形成一个锥形的潜在滑移面。

(4) 随着荷载增加,地连墙长度越长,地连墙对周围土体影响范围越来越大,墙幅间对周围土体影响存在叠加效应。

参 考 文 献:

- [1] 李卫民, 丛蔼森. 墙桩(条桩)的设计[J]. 西部探矿工程, 2006(7): 1-2. (LI Weiming, CONG Aisen. Design of wall pile (barrette pile)[J]. West-China Exploration Engineering, 2006(7): 1-2. (in Chinese))
- [2] MUSARRA M, MASSAD F. Static load tests in an instrumented rock socket barrette pile[J]. Soils and Rocks, 2015, **38**(2): 163-177.
- [3] 李桂花, 周生华, 周纪煜, 等. 地下连续墙垂直承载力试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1993, **21**(4): 575-580. (LI Guihua, ZHOU Shenghua, ZHOU Jiyu, et al. Vertical bearing test of the diaphragm wall[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1993, **21**(4): 575-580. (in Chinese))
- [4] NG C W W, RIGBY D B, NG S W L, et al. Field studies of well-instrumented barrette in Hong Kong[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, **126**(1): 60-73.
- [5] LIN S S, LU F, KUO C, et al. Axial capacity of barrette piles embedded in gravel layer[J]. Journal of Geoengineering, 2014, **9**(3): 103-107.
- [6] RAFA S A, MOUSSAI B. Three-dimensional analyses of bored pile and barrette load tests subjected to vertical loadings[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2018, **55**(3): 146-152.
- [7] COMODROMOS E M, PAPADOPOULOU M C. Response evaluation of horizontally loaded pile groups in clayey soils[J]. Géotechnique, 2012, **62**(4): 329-339.
- [8] 孙书伟, 林杭, 任连伟. FLAC^{3D}在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011. (SUN Shuwei, LIN Hang, REN Lianwei. Application of FLAC^{3D} in Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2011. (in Chinese))
- [9] STATES U. Standard specifications for steel highway bridges: adopted by the American Association of State Highway Officials and as approved by the Secretary of Agriculture for use in connection with federal-aid road work[M]. Washington D C: U S Dept of Agriculture, 1924.
- [10] MEYERHOF G G. The ultimate bearing capacity of foundations[J]. Géotechnique, 1951, **1**(4): 301-332.
- [11] 陈亚东, 陈思, 于艳, 等. 矩形基础地基破坏机理细观模型试验[J]. 科学技术与工程, 2015, **15**(5): 289-292. (CHEN Yadong, CHEN Si, YU Yan, et al. Mesoscopic model test on failure mechanism of rectangular foundation[J]. Science Technology and Engineering, 2015, **15**(5): 289-292. (in Chinese))
- [12] 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. (CHANG Hong, XIA Mingyao, FU Deming. Investigation of laboratory scale-down test of vertical-loaded diaphragm walls[J]. Journal of Tongji University, 1998, **26**(3): 279-283. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)