

# 井筒式地下连续墙水平承载能力模型试验研究

戴国亮, 周香琴, 刘云忠, 刘立基, 龚维明

(东南大学 土木工程学院, 南京 210096)

**摘 要:** 井筒式地下连续墙利用构造接头把地下连续墙段连接成一个平面为封闭形状挡土结构, 其刚度大, 承载力高。由于基础内部含有大面积的土芯, 存在墙内土芯、墙体以及外部土体的相互作用。采用水平单向单循环维持荷载法, 通过 3 个不同截面尺寸的单孔闭合墙水平静载试验, 研究闭合地下连续墙基础的水平承载特性。基于墙身内力及位移测试结果, 研究了井筒式地下连续墙基础在水平荷载作用下的承载机理, 分析了水平荷载-位移特性、墙身位移、墙身弯矩、剪力、转角随深度的分布规律。试验结果表明, 闭合墙基础呈整体倾斜破坏特性, 墙身弯矩随墙深呈非线性变化, 墙身剪力在加载处最大, 在墙身弯矩极大值处墙身剪力为 0, 0 点以下, 墙身剪力随深度呈“大肚形”变化, 并且闭合墙的承载力随着闭合墙边长的增大, 深度的提高而提高。

**关 键 词:** 闭合地下连续墙; 水平荷载; 模型试验; 承载能力

**中图分类号:** TU 473

**文献标识码:** A

## Model test research on horizontal bearing capacity of closed diaphragm wall

DAI Guo-liang, ZHOU Xiang-qin, LIU Yun-zhong, LIU Li-ji, GONG Wei-ming

(School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Closed diaphragm wall foundation is a new type foundation which is constructed by connecting wall elements into a closed shape with structural connector. It has great stiffness and high bearing capacity. For its large soil core, there is interaction among soil core, walls and external soil. Based on lateral one-way loop load maintaining tests on three single chamber model walls with different sizes, the bearing characteristics of closed diaphragm wall foundation are studied. Base on the results of internal forces and displacements of the wall, this paper analyzes the mechanism of bearing capacity under the lateral load, the load-displacement characteristics of the wall, the distribution of the wall displacement, bending moments, shear forces and rotation of the wall along the depth. The test results can be concluded that closed diaphragm wall fails as rigid failure mode; the bending moment changes nonlinearly with the depth; the shear force reaches the maximum value at the loading point, and decreases zero at the maximum bending moment point, and changes as “belly-shaped” below the point. And the horizontal bearing capacity of closed rectangular diaphragm wall increases with the increase of the side length and depth of the wall.

**Key words:** closed diaphragm wall; horizontal load; model test; bearing capacity.

## 1 引 言

地下连续墙自从 20 世纪出现以来, 以其自身整体刚度大、强度高、防渗挡土等优点在国内外很多工程中都得到了应用。50 年代末地下连续墙技术传入我国和日本, 并先后开始在世界各国迅速发展。目前日本是地下连续墙技术最发达的国家, 在设计和施工方面均处于世界领先水平, 虽然地下连

续墙在大型桥梁基础中应用较多, 但在我国尚未系统的理论研究, 在公路桥涵地基与基础设计规范中也未列出其具体的设计参考准则<sup>[1]</sup>。水平荷载下地下连续墙的受力过程较为复杂<sup>[2-10]</sup>, 其受力是一个复杂的墙土相互过程。国内已经有不少实际工程都进行了单片地下连续墙的现场载荷试验, 研究竖向以及水平向承载性能<sup>[2,8-9]</sup>, 国外, 如 Bengt H., Fellenius<sup>[3]</sup>等曾采用 O-cell 法对一根壁板桩进行了

竖向静载试验。对于闭合地下连续墙国内外还没有进行现场试验,对于水平承载性能,包括土芯的作用机制的研究还很缺乏。本次进行了水平荷载下单孔闭合地下连续墙的室内模型载荷试验,研究了闭合地下连续墙的水平受力变形机制,探讨了在墙顶各级荷载下墙身的水平变位、弯矩、剪力以及转角沿墙深的变化规律。

## 2 模型概况

在单一均匀土体中进行试验更有利于准确探求一般规律,试验选择在独立的  $3.0\text{ m} \times 3.0\text{ m} \times 4.5\text{ m}$  的混凝土池中进行,如图 1 所示。模型土选用细砂,分层铺填在混凝土池内,砂的相对密度控制在 0.8 左右。砂土物理力学参数由试验确定,见表 1。

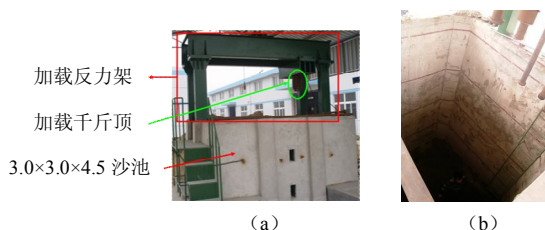


图 1 试验池实物图 (单位:m)

Fig.1 Test pool map(unit:m)

表 1 模型土的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil

| 土层 | 黏聚力<br>/kPa | 内摩擦角<br>/(°) | 变形模量<br>/MPa | 重度<br>/(kN/m <sup>3</sup> ) | 含水率<br>/% |
|----|-------------|--------------|--------------|-----------------------------|-----------|
| 砂土 | 0           | 18           | 222          | 11.70                       | 3.0       |

模型墙采用有机玻璃制作,由有机玻璃生产厂家专业制作。将剪裁好的有机玻璃板进行贴片、接线以及表面处理后,再进行拼接。拼接时,先将板材钻孔并用螺栓将 4 块板拼接成筒状,然后向板与板的连接处注入进口高强药剂,使 4 块板牢固地粘在一起,确保地下连续墙模型具有较大的连接刚度和良好的整体性。为了测定井筒式地下连续墙基础在水平荷载作用下墙内外侧土水平抗力、内外侧摩阻力随荷载作用下的分布变化,将正面受力墙设为双层有机玻璃墙,每层玻璃墙厚度为 20 mm,间隔 5 mm。试验测得有机玻璃的弹性模量约为 2.787 GPa。

为了观测不同截面大小墙基承载性状,制作了 3 种截面尺寸的有机玻璃模型墙,具体模型工况见图 2 和表 2。



图 2 单孔闭合墙模型 B

Fig.2 Single closed model diaphragm wall B

表 2 模型工况

Table 2 Model conditions

| 墙型      | 墙体尺寸(长×宽×高×墙厚)<br>/(mm×mm×mm×mm) | 土芯面积比率<br>/% |
|---------|----------------------------------|--------------|
| 单孔闭合墙 A | 163×163×725×25                   | 31           |
| 单孔闭合墙 B | 205×205×1450×25                  | 42           |
| 单孔闭合墙 C | 266×266×1450×25                  | 54           |

## 3 试验概述

### 3.1 测试元件布设

将闭合墙置于槽中,闭合墙的平面中心与槽中点重合,墙身露出泥面深度为 75、150、150 mm。由于基础水平向承载力一般较竖向要小得多,因此,闭合式地下连续墙基础水平向试验的加载装置量程不能太大,否则,加载过程中的荷载精度难以保证。为此,针对本次水平向模型试验,制作了加载量程为 10 kN 的小千斤顶提供水平荷载。

试验中每组闭合墙采用 5 只电子位移传感器测量墙顶与施力点的水平位移。闭合墙的每片墙都布设了 14 个应变片,测定墙体在墙顶水平荷载作用下的内力变化。水平荷载试验中对每片墙位于泥面下 150 cm 范围内区域的应变片进行加密,应变片布置如图 3 所示。

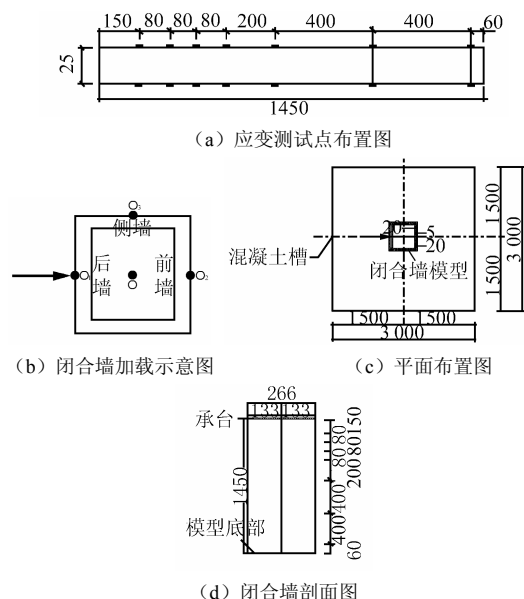


图 3 墙体及应变片布置示意图 (单位: mm)

Fig.3 Layout of wall and strain gauges (unit: mm)

### 3.2 测试方法

水平向荷载试验加载方法可分为单循环连续加载法和多循环加载法两大类。采用多循环加载法是为了模拟实际结构物的受力形式,但由于实际荷载情况异常复杂,很难达到预期目的。此外多循环荷载的施加给位移特别是内力的测量带来许多不稳定的因素,大大影响测试精度。本试验采用单循环连续加载法,每级荷载加载量为预估最大荷载的 1/10,每级卸载量为加载量的 2 倍。加载每级维持 1 h,每级加载后在 5、15、30、60 min 测读一次,卸载每级维持 30 min,在 5、15、30 min 测读一次。

## 4 测试数据分析

### 4.1 位移传感器数据分析

因闭合型地下连续墙的整体刚度很大,墙顶各点的水平位移基本相同。根据布设在试验墙顶的位移传感器在各级荷载作用下的实测水平位移值,绘制出 3 组闭合墙的墙顶  $H$  与荷载水平位移  $Y$  曲线,并整理出荷载  $H$  与水平位移梯度  $(\Delta Y/\Delta H)$  曲线,如图 4 所示。

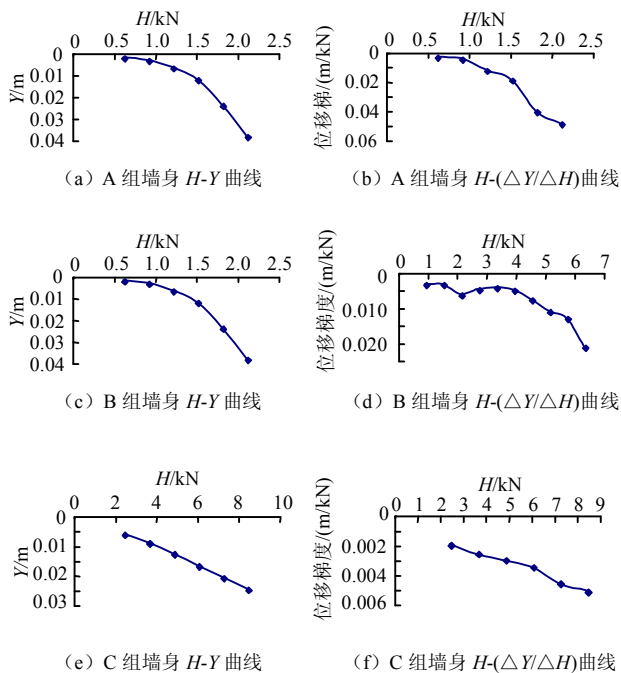


图 4 墙顶荷载位移曲线

Fig.4 Load displacement curves of wall head

由图 4 可见,墙顶荷载下水平位移有如下特点:①从整体上看,墙顶的  $H$ - $Y$  曲线呈非线性性质。3 组闭合墙的变形量最大值分别为 37.7、57.64 mm 和 24.31 mm。② $H$ - $Y$  曲线呈缓变型,在较小的墙顶荷载下水平位移曲线呈线性变化,当荷载超过一定

值后,  $\Delta Y/\Delta H$  增加。③据《建筑桩基技术规范》<sup>[11]</sup>和图 1(a)、1(b)中可以看出,对于 A 闭合墙,1.8 kN 引起的位移量比前一级荷载 1.5 kN 有明显的增加,故取 1.5 kN 为试验墙的水平临界荷载,即  $H_{cr} = 1.5$  kN。与此相类似的判断,可得 B 墙  $H_{cr} = 3.9$  kN, C 墙  $H_{cr} = 4.8$  kN。

### 4.2 闭合墙墙身的水平变位、弯矩、剪力及角位移性状分析

由位移传感器可测得每级荷载作用下的力作用点的位移,同时根据桩身各截面应变片的数据,按桩的挠曲线可推导出式 (1),计算出墙身各测量截面的转角及水平位移值。

$$\left. \begin{aligned} \theta_{i+1} &= \theta_i - (\Delta \varepsilon_{i+1} + \Delta \varepsilon_i) \frac{l_i}{2b_0} \\ y_{i+1} &= y_i + \theta_i l_i - (\Delta \varepsilon_{i+1} + 2\Delta \varepsilon_i) \frac{l_i^2}{6b_0} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $\Delta \varepsilon_i$ 、 $\Delta \varepsilon_{i+1}$  为  $i$ 、 $i+1$  断面弯曲应变;  $\theta_i$ 、 $\theta_{i+1}$  为  $i$ 、 $i+1$  断面转角;  $y_i$ 、 $y_{i+1}$  为  $i$ 、 $i+1$  断面横向位移;  $b_0$  为  $i$ 、 $i+1$  断面间距;  $l_i$  为  $i$  单元的长度。

由测试得到的各断面弯曲应变按式 (1) 可推算得墙身的水平变位,图 5 为闭合墙墙身的水平位移随深度变化的  $Y$ - $z$  曲线(水平位移为正值表示位移方向与加载方向相同,负值表示位移方向与加载方向相反)。由图可知,水平荷载下的闭合墙绕墙身某一点发生转动,基础呈整体倾斜破坏特性。墙身的水平位移随墙顶荷载的增加而增大,随入土深的增加基本呈线性衰减,墙身水平位移相对 0 点深度对于 3 组闭合墙分别为 0.725、0.800、0.885。试验过程中,墙身质量完好,没有开裂。根据壳弯曲理论和惯性矩的定义,由各测试断面所测得的弯曲应变,按式 (2) 计算墙体各截面间的弯矩:

$$M_i = EI \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_c}{b_0} \quad (2)$$

式中:  $b_0$  为拉、压应变测点的间距;  $E$  为试验墙体的弹性模量;  $I$  为墙身全截面对中性轴的惯性矩;  $\varepsilon_s$ 、 $\varepsilon_c$  为墙身各截面各测点的实测拉、压应变值。

如图 6(a) 所示,水平荷载下闭合墙整体墙身截面的弯矩随墙顶荷载的增加而增加,随入土深度的增加先递增,后减小,呈非线性变化,在地面以下深度  $0.4L$  左右(B、C 组墙在  $0.6L$ 、 $0.7L$  处,  $L$  为墙体高度),墙身弯矩达到最大值,且随着墙顶荷载的增加,弯矩最大值位置点有向下移动的趋势,在整个墙身范围内,墙身弯矩未出现 0 值点,说明对于刚性大的闭合墙基础来说,水平荷载下基础一般发生倾斜破坏。

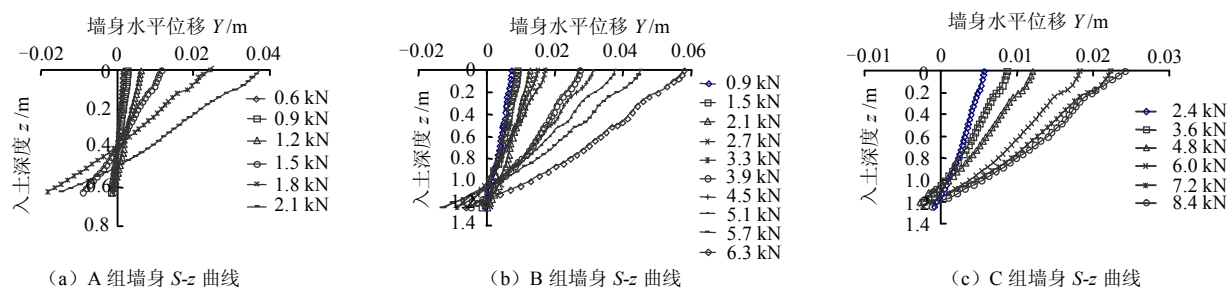


图 5 墙身位移曲线

Fig.5 Displacement-depth curves of wall

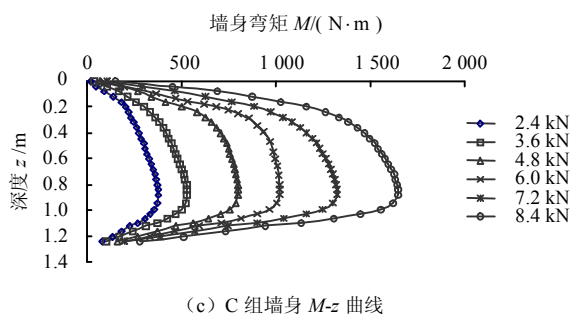
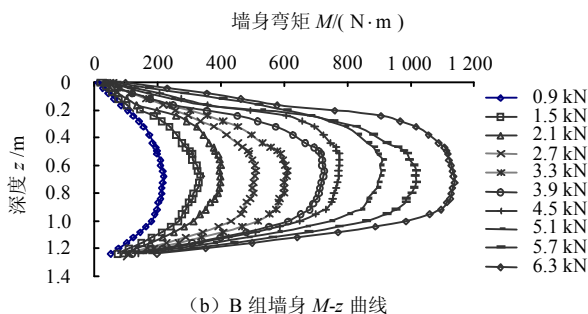
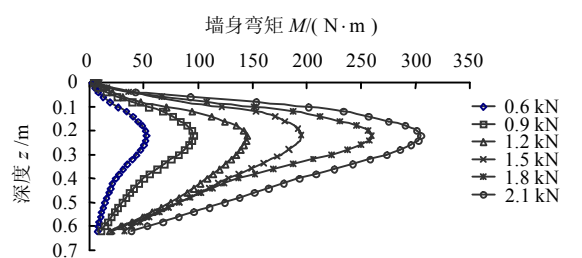


图 6 闭合墙身弯矩与深度曲线

Fig.6 Bending moment-depth curves of wall

根据墙身弯矩分布曲线,以墙顶的水平位移和墙底的水平位移作为边界条件,由式(3)可分别求出各级荷载作用下墙身剪力  $Q(z)$ ,即

$$Q(z) = \frac{dM}{dz}; \quad \theta(z) = \int \frac{M}{EI} dz \quad (3)$$

根据式(3)可以得到闭合墙身的  $Q-z$ 、 $\theta-z$  关系曲线,分别如图 7、8 所示。闭合墙身的剪力分

布,在墙顶受力处其剪力值最大,随墙顶水平荷载的增加而增大。随入土深度的增加,墙身剪力值近似线性减小,在墙体截面弯矩最大处,墙身剪力为 0。剪力 0 值点以下墙身剪力沿深度呈“大肚形”分布,在墙端附近墙身剪力有所减小,这是因为在墙端附近土体出现塑性状态,土中应力部分释放,对墙体的作用减小,导致墙身剪力效应有所减弱。

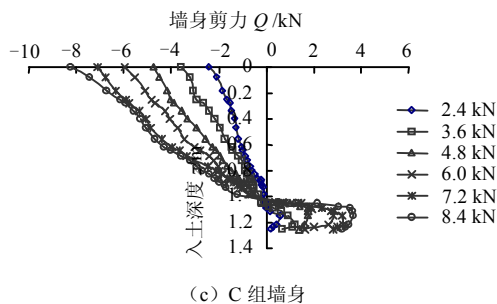
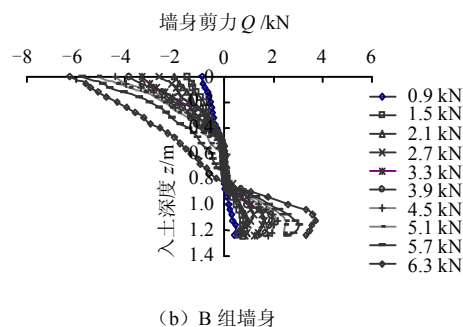
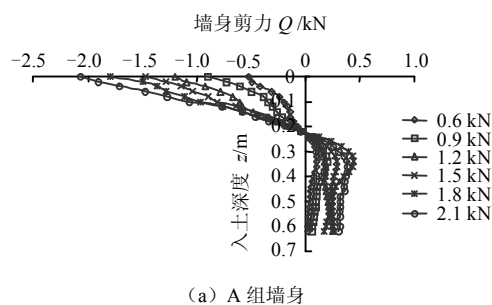


图 7 闭合墙身剪力分布图

Fig.7 Shear force-depth curves of wall

墙顶水平荷载作用下, 闭合墙自身的弯曲很小, 呈刚体状态, 如图 8 所示, 因闭合墙的整体刚度大, 基础呈整体倾斜破坏特征, 故随入土深度的增加, 墙体的角位移变化甚小。墙身的角位移随墙顶水平受荷的增加而增大, 增加幅度比较缓慢。

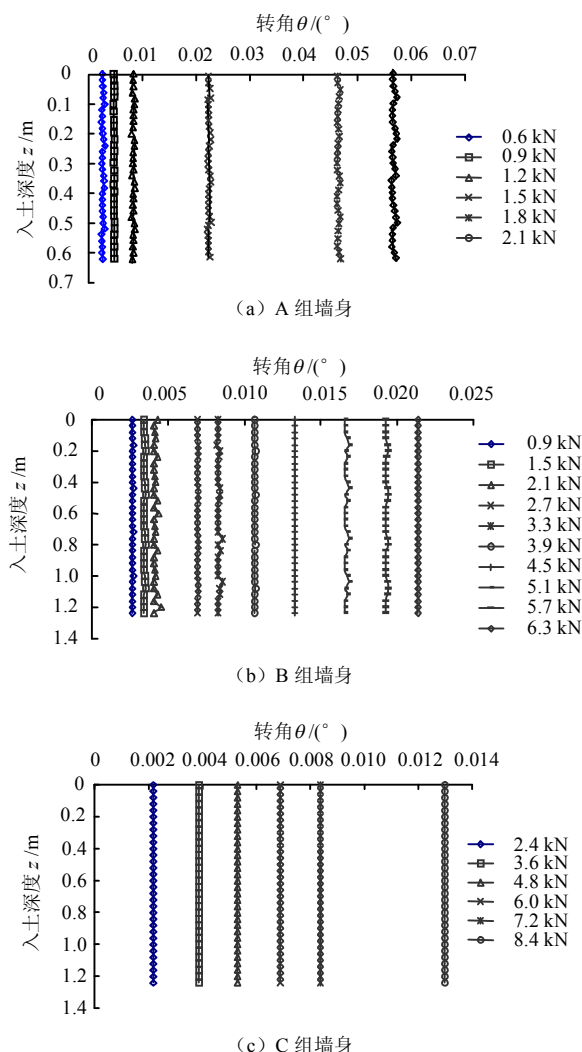


图 8 闭合墙角与位移曲线  
Fig.8  $\theta$ - $z$  curves of wall

## 5 墙身截面尺寸和墙深对闭合墙水平承载性状的影响分析

表 3 为模型墙体深度为 0.65 m 的 A 组墙以及模型墙体深度为 1.3 m 的 B 组和 C 组不同墙身截面尺寸的最大水平荷载  $H$ 、墙身变位  $S$ 、弯矩  $M$  及角位移值。由表中可知, 墙身截面尺寸大的闭合墙, 与墙侧土体的接触面积增大, 故其水平承载能力  $H$  也增大, 墙身最大弯矩也随之增大。

从图 5 水平荷载下不同墙身截面尺寸和墙深时的曲线可见, 闭合墙基础的水平承载能力随墙身截

面尺寸的增大而增长的较快, 墙身截面尺寸越大, 墙深越深, 承载能力越高。不同墙身截面尺寸的闭合墙, 其墙身水平变位规律相似, 即水平受荷下墙体以墙深某一点为转点呈整体倾斜破坏, 但墙体截面尺寸越大, 其转点位置距墙端越近, 3 组墙的水平位移 0 值点相对深度分别为 0.725、0.800、0.885。从图 6  $M$ - $z$  分布曲线可见, 不同墙身截面尺寸的闭合墙基础, 墙顶水平荷载下具有相似的墙身弯矩分布规律。最大弯矩值分布于墙身的中下部, 随着墙顶荷载的增加, 墙身最大弯矩值位置点沿墙深逐渐下移的趋势。图 7 为水平荷载下不同截面尺寸和墙深时的墙身剪力随墙深的  $Q$ - $z$  分布曲线。由图可知, 墙身截面尺寸不同时, 墙身剪力的分布规律相似, 即墙身剪力最大, 0 点以上, 剪力随墙深线性衰减; 0 点以下, 墙身剪力随深度呈“大肚形”变化。截面尺寸越大, 深度越深, 0 点位置越低, 3 组墙的剪力 0 值点相对深度分别为 0.38、0.64、0.81。

表 3 3 组闭合墙水平承载力结果

Table 3 Results of horizontal bearing capacity of three walls

| 截面外边长尺寸/墙深<br>/[(m×m)/m] | 刚度 $EI$<br>/( $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ ) | $H_{\max}$<br>/kN | $S_{\max}$<br>/mm | $M_{\max}$<br>/( $\text{kN} \cdot \text{m}$ ) | $\theta_{\max}$<br>/(°) |
|--------------------------|----------------------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------------------|-------------------------|
| (0.163×0.163)/0.65       | 125.4                                        | 1.5               | 37.70             | 0.355 2                                       | 0.056 7                 |
| (0.205×0.205)/1.3        | 275.9                                        | 3.9               | 57.63             | 1.123 5                                       | 0.021 4                 |
| (0.266×0.266)/1.3        | 657.2                                        | 4.8               | 24.31             | 1.649 8                                       | 0.012 9                 |

## 6 结 论

(1) 水平荷载下闭合墙基础呈整体倾斜破坏特性, 其水平承载能力的大小取决于墙侧土体的屈服强度及基础上部结构所允许的水平位移量。

(2) 闭合墙墙身弯矩随墙深呈非线性变化, 墙身剪力在加载处最大, 且墙身弯矩极大值墙身剪力为 0, 0 点以下, 墙身剪力随深度呈“大肚形”变化。

(3) 闭合墙埋深较浅时, 刚体性状表现的比较明显, 墙身自身的弯曲能力较小。墙身埋深增加, 闭合墙逐渐会表现出弹性性状, 墙身自身的弯曲能力增强。

## 参 考 文 献

- [1] 丛蓓森. 地下连续墙的设计施工与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 323—326.
- [2] 孟凡超, 李涛, 陈晓东, 等. 黄土地区单片地下连续墙水平承载特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(11): 132—136.

MENG Fan-chao, LI Tao, CHEN Xiao-dong, et al. Test