

文章编号: 1000-7598(2009)09-2697-07

MC 桩组合支护结构设计与应用研究

黄广龙, 惠 刚, 方 乾, 徐洪钟

(南京工业大学 土木工程学院, 南京 210009)

摘 要: 水泥土重力式挡墙与混凝土桩组合支护结构(MC 桩)近年来开始在支护工程中得到应用, 但由于缺乏对其工作机理和变形特性进行研究, 实际工程多采用经验设计法, 缺乏理论依据。通过对组合支护结构相关问题的研究, 特别是对 MC 桩组合支护结构设计中几个关键问题进行分析, 提出了 M 桩、C 桩的设计方法; 结合 MC 桩组合支护结构的特点, 建议了新的稳定性计算方法, 可供组合支护结构设计时参考。通过将此设计方法应用于实际工程, 验证了其可行性。

关 键 词: MC 桩; 深基坑工程; 组合支护结构; 设计方法; 稳定性分析

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Design of MC composite retaining structure and its application

HUANG Guang-long, HUI Gang, FANG Qian, XU Hong-zhong

(College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: The composite retaining structure of soil-cement pile and concrete pile (named MC pile) is applied to the projects in recent years. Due to lack of researches in view of service mechanisms and deformation characteristics of the composite retaining structure, experience design method that lacks of theoretical basis is usually applied to design composite retaining structure in practical project. Through studying some problems of composite retaining structure, especially several key issues about designing MC pile retaining structure, the methods to design M pile and C pile are put forward; with the characteristics of the MC pile composite retaining structure, a new stability calculation method for the composite structure design is proposed. Finally, applying the design method to actual project, the results demonstrate the feasibility of the method.

Key words: MC pile; deep excavation engineering; composite retaining structure; design methodology; stability analysis

1 引 言

水泥土重力式挡土结构具有施工简单、造价经济的特点, 既可挡土又可止水, 因此在软土深基坑支护中被广泛使用。但在实际工程中这种支护结构的位移一般都较大, 往往会对地下结构的正常施工或周围环境造成不利影响^[1]。实践中为了减小和控制水泥土重力式支护结构的位移变形, 出现了各种对水泥土挡墙进行改良的方法^[2-5], 如在水泥土桩中插毛竹、钢管、预制桩等, 对水泥土挡墙支护结构变形和桩顶位移起到了一定改善作用, 但效果不甚理想。水泥土桩(M 桩)与混凝土桩(C 桩)组合支护结构(简称 MC 桩)是在工程实践基础上发展而来的一种经济有效的新的基坑支护形式, 这种

组合支护结构对基坑变形控制效果明显。但由于理论研究的滞后, 目前组合支护结构的设计只能采用经验设计方法, 设计人员对相关设计参数缺乏必要的认识, 导致设计不合理, 甚至出现工程事故。

MC 桩组合支护结构是水泥土桩和混凝土桩支护相结合而成的, 它兼有了两种支护方式的优点, 同时, 对于这两种支护方式的研究及应用已相对成熟, 各自均已形成了一套完整的设计计算方法^[6]。本文的研究是在水泥土挡墙和悬臂桩支护基础上, 根据组合结构的实践经验和自身特点, 结合数值模拟结果来进行的。由于目前相关组合支护结构室内和现场试验研究较少, 深入研究还存在一定的困难, 本文只能是对该种支护方式的设计方法和工程应用进行初步探讨。

收稿日期: 2008-04-25

基金项目: 江苏省普通高校自然科学研究计划资助项目(No.05KJB560040); 江苏省基础研究计划资助项目(BK2006565)。

第一作者简介: 黄广龙, 男, 1967 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程教学与科研工作。E-mail: glhuang6710@163.com

2 MC 桩的结构形式

MC 桩组合支护结构是在水泥土重力式挡墙的基础上发展起来的, C 桩通常被布置在 M 桩的格栅内, 如图 1 所示。由于 C 桩的作用, M 桩的墙宽和墙深均可比常规的水泥土重力式挡墙小。C 桩的设置改变了 M 桩的工作状态, 两者有机地结合在一起, 兼备了两种支护结构的优点。C 桩的位置也可以根据格栅的布置灵活调整, 从而到达最佳控制变形的效果。

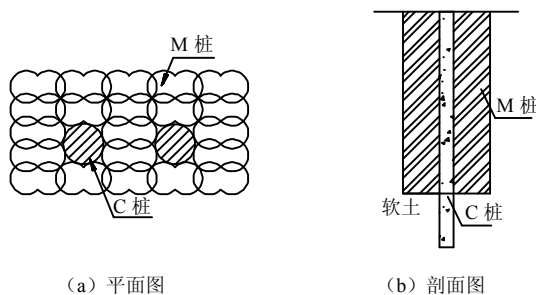


图 1 MC 桩平面及剖面图
Fig.1 Plan and profile of MC pile

MC 桩组合支护结构的施工顺序为先施工 M 桩, 然后在 M 桩格栅中施打 C 桩。基坑开挖后 M 桩受到土压力作用产生位移, 挡墙部分力转嫁于 C 桩, 使 C 桩受力。

3 M 桩设计

3.1 M 桩入土深度确定

传统的水泥土重力式挡墙围护结构嵌固深度与基坑抗隆起稳定性、抗滑动稳定性、整体稳定性有关, 当作为止水帷幕时还与抗渗透稳定有关^[7]。因此, 确定重力式围护结构嵌固深度时应通过稳定性验算取最不利情况下所需的嵌固深度。对 MC 桩组合支护结构来说, 如果不考虑 C 桩间距对于组合支护结构变形的影响, 水泥土挡墙入土深度对于组合结构的变形、坑内隆起及坑外地面沉降的影响相对较小^[8]。从支护结构的经济性出发, 一般 M 桩入土深度的设计从以下两种情况来考虑: 一种是基坑土体的渗透性较小, 并且土层赋水较少, 无须考虑基坑降水与止水; 另一种是土层渗透性较大, 含水丰富, 基坑开挖需要进行降水与止水。

当 M 桩不作为止水结构时, 支护结构的稳定性最不利情况应由 C 桩长度来确定, 挡墙嵌固深度可以比传统重力式水泥土挡墙的嵌固深度略短。为了能够发挥挡墙底部土体承载能力, 减小 C 桩桩身弯矩, M 桩嵌固深度宜超过 C 桩桩身最大弯矩点位

置。对于组合支护结构, M 桩底部土体反力对于整个支护结构有非常重要的作用, 它不仅减小支护结构的变形, 同时还能减小 C 桩桩身弯矩, 因此应尽量将挡墙底部设置于较好土层上^[8]。

由于 M 桩能够有效减小 C 桩桩身弯矩, 当 C 桩弯矩较大时, 可考虑适当加大部分 M 桩入土深度以减小桩身弯矩, 或在土质条件较差的土体中由于 C 桩间距的存在而使得桩侧土压力不能被完全发挥时, 可加长 C 桩周围部分 M 桩的入土深度。

当 M 桩作为止水帷幕时, 桩的入土深度主要由抗渗流稳定性确定。当渗透力较大时, 基坑底部可能发生流沙、管涌等渗流稳定破坏现象, 危及支护结构的安全。渗流引起的基坑底部不稳定现象一般发生在宽度为支护墙插入深度 D_M 的 1/2 范围内, 如图 2 所示。为了防止基底流砂发生, 可以按照式

(1) 确定 M 桩的入土深度 D_M , 或者把 M 桩加长至不透水层。

$$D_M = \frac{K_s \gamma_w h_w}{2 \gamma'} \quad (1)$$

式中: K_s 为基坑抗渗透安全系数; h_w 为基坑内外水头高差 (m); γ' 为土体有效重度 (kN/m^3); γ_w 为水的重度 (kN/m^3)。

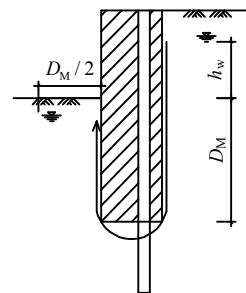


图 2 M 桩入土深度计算简图
Fig.2 Diagram of calculating embedded depth of M pile

当 M 桩为了止水而加大入土深度时, 并不需要所有 M 桩都加长, 一般加长 1~2 排 M 桩即可满足止水的要求。M 桩一般可以有以下两种加长方式, 见图 3。对于图 3 (a) 而言, 加长 C 桩前后各一排 M 桩, 这样可以在止水同时起到减小桩身弯矩的作用。加长段挡墙平面布置如图 4 所示。相邻 C 桩之间便形成了一个非加筋区。组合结构的加筋区和非加筋区承担着同样的水土压力。但在加筋区, 由于 C 桩和 M 桩的共同作用, 组合结构刚度较大, 变形较小, 可以视为非加筋区的支点。C 桩间距越大, 加筋区和非加筋区交界面上所承受的剪力就越大。

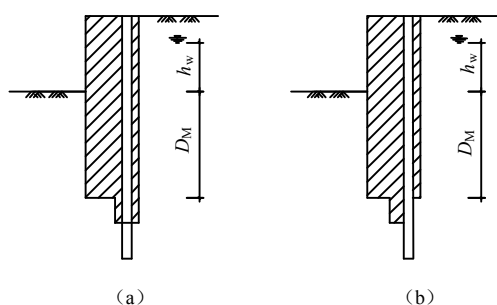


图3 M 桩的布置形式
Fig.3 Disposal form of M pile

当 C 桩间距增大到一定程度, 该交界面的挡墙可能发生剪切破坏, 因此须验算该交界面处 M 桩的抗剪能力 (如图 4), 最危险交界面上的剪应力应该满足下式:

$$\tau = \frac{3Q}{2A} = \frac{3ql'd}{2hd} = \frac{3ql'}{2h} \leq \tau_{cr} \quad (2)$$

$$\text{即} \quad h \geq \frac{3ql'}{2\tau_{cr}} \quad (3)$$

式中: h 为 M 桩的有效厚度 (m); l' 为相邻交界面之间距离 (m), $l' = l - D$, D 为 C 桩直径; q 为设计最大侧压力 (kN/m^2); τ_{cr} 为 M 桩抗剪强度设计值 (kPa); d 为 M 桩单位深度。

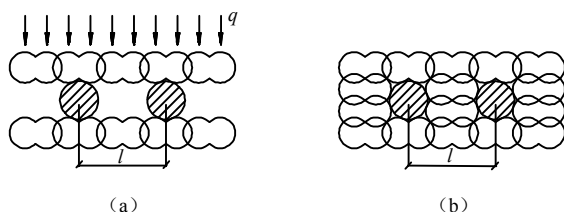


图4 M 桩布置简图
Fig.4 Layout diagram of M piles

如果式 (2) 式不能满足, 则可采用图 4 (b) 所示的形式, 但 M 桩的数量有所增加, 或可采用如图 3 (b), 其中加长的是 C 桩前侧的两排 M 桩。两种方式均能够充分发挥加长部分桩侧被动土压力的发挥。

3.2 M 桩挡墙宽度确定

研究表明^[8], M 桩宽度对组合支护结构的变形影响较大。M 桩挡墙底部、C 桩前侧土体由于支护结构平移而受到支护结构水平向挤压, 同时由于支护结构绕桩端某点转动时又向下挤压土体, 致使该部分土体反力得以充分发挥。M 桩挡墙底部土体的反力对于支护结构的变形及 C 桩桩身弯矩都有影

响。因此, 在场地条件允许情况下应使 M 桩挡墙保持一个较大的宽度, 考虑 C 桩的作用, 一般可根据水泥土挡墙的设计方法, 按经验取 $B = 0.6h$ (h 为基坑挖深)。当挡墙宽度较大时, 为节省造价, 还可以在挡墙中布置适当的格栅。

4 C 桩设计

4.1 C 桩在挡墙中位置

C 桩在支护结构中的位置对于支护结构变形有一定的影响, C 桩设置于邻近基坑开挖侧还是远离基坑开挖侧, 与 M 桩底土质条件有关。其受力分析如图 5。

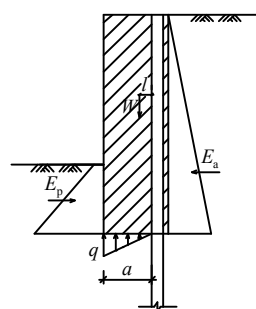


图5 挡墙受力示意图

Fig.5 Schematic diagram of force on retaining wall

从其受力分析来看, C 桩位置变化, 对其受力最明显的改变是支护结构重心位置变化, 以及桩底挡墙土体反力范围 a 的变化。土体与 M 桩的摩擦力, 由于其与土体参数、墙背粗糙程度及两者接触关系有关, 并且随着支护结构的变形不断进行应力重分配, 对于它的确定目前尚有一定难度, 因此, 在此不考虑摩擦力的影响, 同时在以下计算 C 桩长度及桩身弯矩时也不予考虑, 仅作为安全储备。组合支护结构的倾斜变形一般是绕 C 桩桩端或桩端以上某个点转动产生的。

假定 C 桩位置对墙前后主、被动土压力不产生影响, 当 C 桩在挡墙中处于后侧时, 支护结构自重对转动点产生一个倾覆力矩, 而在前侧时重力产生一个抗倾覆力矩。当 C 桩处于后侧时净抗倾覆力矩 (墙底土体反力产生的抗倾覆力矩减去结构自重产生的倾覆力矩) 大于 C 桩在前侧时结构自重产生的抗倾覆力矩时, C 桩应设置在支护结构后侧, 否则应将 C 桩设置在前侧。这样 C 桩设置位置与 M 桩桩底以下一定深度范围内土体性质有关。

$$\frac{qa}{2} \frac{2a}{3} - Wl = \frac{qa^2}{3} - Wl' > Wl' \quad (4)$$

式中: W 为支护结构自重; l 为 C 桩位于后侧时, 支护结构重心到 C 桩的距离; l' 为 C 桩位于前侧时, 支护结构重心到 C 桩的距离; q 为地基土反力, 为大偏心荷载, 故近似成三角形分布^[9]。

4.2 C 桩桩长确定

C 桩桩长应按照悬臂式支护结构抗倾覆稳定性来确定。

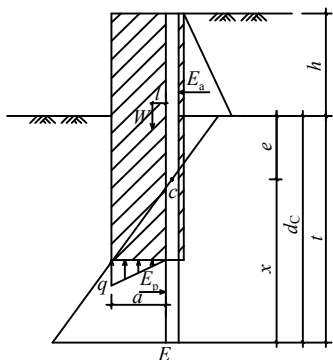


图 6 桩长计算简图

Fig.6 Diagram of calculating pile length

先假设埋深 H , 然后分层 (也可对土层的 c 、 φ 采用加权平均值方法计算) 计算结构两侧的主动和被动土压力, 土压力的计算采用朗肯土压力理论计算:

$$e_a = (\sum \gamma_i h_i + q) K_a - 2c\sqrt{K_a} \quad (5)$$

$$e_p = \sum \gamma_i h_i K_p + 2c\sqrt{K_p} \quad (6)$$

然后再对 C 桩桩端 E 点取矩, 抗倾覆力矩须 $\geq$ 倾覆力矩。即应满足下式:

$$E_a h_a \pm wl \leq E_p h_p + \frac{qa^2}{3} \quad (7)$$

式中: 正负号由 C 桩所处位置决定; E_a 为墙侧所受的净主动土压力; E_p 为墙侧所受的净被动土压力; W 为支护结构自重, 由于暂时不能确定 C 桩的长度及直径, 这里可认为仅为 M 桩自重。当得出 C 桩设计参数后可进行重新验算。

当 C 桩处于前侧时, 由于桩前侧承受地基土反力的面积较小, 也即图中 x 较小, 可不考虑该部分土体反力对桩身弯矩的影响。当 d_c 满足式 (7) 式的等号要求时, d_c 值是临界深度, 实际上还应考虑安全储备的要求。实际埋深 t 值可按下式计算:

$$t = e + 1.2x = e + 1.2(d_c - e) \quad (8)$$

式中: e 为坑底至土压力 0 点距离; x 为土压力 0

点至临界深度处。

4.3 C 桩桩径、桩间距的确定

对于 C 桩而言, 决定其桩径最重要因素是桩身所受的弯矩, 同时又要考虑土质条件的影响。

在计算桩身最大弯矩时, 首先需要找出最大弯矩点, 也即桩身剪力 0 点。先假设在坑底以下 z 处桩侧主动土压力与被动侧土压力相等, 即 $E_a = E_p$, 计算方法如悬臂式支护结构。这里不考虑挡墙底水平向摩擦力等因素的影响。然后对该点取矩, 即可求得最大弯矩, 当最大弯矩点位于 M 桩挡墙范围以下时, 最大弯矩可按以下公式计算:

$$M_{\max} = E_a h_a + Wl - \frac{qa^2}{3} - E_p h_p \quad (9)$$

$$M_{\max} = E_a h_a - Wl - E_p h_p \quad (10)$$

当 C 桩处于挡墙后侧时按式 (9) 计算, 而处于前侧时则按式 (10) 计算。

当桩身弯矩在挡墙范围内时, 求得桩身最大弯矩后, 需按 C 桩和 M 桩挡墙刚度进行分配。

先根据弯矩初步确定混凝土桩桩径 D 和桩距 t , 将混凝土桩折算成宽为 $D+t$ 的水泥土桩:

$$E_c I_c = \frac{1}{12} E_m (D+t) h^3 \quad (11)$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{12 E_c I_c}{E_m (D+t)}} \quad (12)$$

式中: E_c 、 I_c 分别为 C 桩弹性模量和惯性矩; E_m 为 M 桩弹性模量; h 为 C 桩折算成水泥土桩后的厚度; H 为水泥土挡墙的宽度。

计算 C 桩弯矩分担系数:

$$\xi = \frac{h}{H+h} \quad (13)$$

C 桩所承担的弯矩为: 计算挡墙以下部分桩身最大弯矩, 取两者较大值进行配筋, 同时调整 D 和 t , 直到取得一个合理的桩径、桩间距及配筋。求得弯矩后, 计算弯矩设计值, 然后按照圆形截面受弯承载力公式进行配筋。

对不同土质条件, C 桩间距对于桩侧被动土压力的发挥有很大影响。桩间距越大, 桩在土体产生位移后, 对桩产生反力的那部分土体就越少, 土中产生应力集中, 土体产生同样反力时, 所需位移量也就越大, 同时被动侧产生的土压力要小于按朗肯土压力公式的计算值。而在计算土压力及桩身弯矩时, 一般都采用等值梁法或静力平衡法, 该方法基于极限平衡状态理论, 按照支挡结构两侧受极限状

态的主、被动土压力来考虑的。因此, 过大的桩间距将对支护结构变形及稳定性产生不利影响。在根据弯矩确定桩间距后还要根据考虑不同土性参数 c 、 φ 、 E 等因素的影响。目前尚无可以确定桩间距与土反力之间关系的较好的计算方法, 只能根据经验来确定。一般建议桩间距 l 不宜大于 $3.5D$ (D 为 C 桩直径), 当土质条件很好或 M 桩长度加长时, 桩间距可以适当增大。

5 MC 桩组合结构稳定性计算

MC 桩组合支护结构同其他任何支护结构一样应该满足稳定性要求, 亦即应对组合支护结构整体稳定性、抗倾覆稳定性、抗隆起稳定性以及抗渗稳定性等进验算。组合支护结构中 M 桩长度即已满足抗渗的要求, 因此无须进行验算。组合支护结构整体稳定性及抗隆起稳定性安全系数可参照传统重力式水泥土挡墙计算, 这里只对抗倾覆稳定安全系数计算加以讨论。

MC 桩组合支护结构受力与水泥土重力式挡墙相似, 因此可以借鉴其稳定验算方法。在土压力作用下可认为支护结构绕桩端 O 点转动而发生倾覆破坏, 则抗倾覆安全系数为:

$$K_q = \frac{M_R}{M_0} = \frac{E_p h_p + \frac{1}{2} q a^2}{E_a h_a + Wl} \quad (14)$$

式中: M_R 为抗倾覆力矩; M_0 为倾覆力矩; 当 C 桩位于支护结构前侧时, 结构自重应为抗倾覆力矩上式应为:

$$K_q = \frac{M_R}{M_0} = \frac{E_p h_p + \frac{1}{2} q a^2 + Wl}{E_a h_a} \quad (15)$$

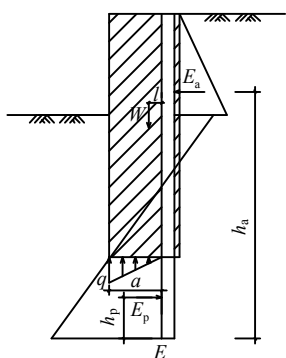


图 7 抗倾覆稳定计算简图

Fig.7 Diagram of calculating safety factor resisting overturn of wall

由于抗倾覆计算是对支护结构的一种极限平衡

状态的计算, M 桩挡墙底土体反力在结构发生倾覆破坏前应达到最大值, 反力分布应为矩形, 而不同于桩身弯矩计算时的土体反力。文献[10]经过对数个工程实例抗倾覆稳定系数与挡墙位移的关系后得出: 随着抗倾覆安全系数的提高, 支护结构顶部变形随之减小。当 $K_q < 1.4$ 时, 变形变化幅度很大, 当 $K_q \geq 1.4$ 后, 变形变化范围较小, 并且位移均小于 $1.5\%H$ 。因此, 从控制变形角度出发, 抗倾覆安全系数 K_q 应 ≥ 1.4 。

6 工程实例

为了验证 MC 桩组合支护结构设计方法的可行性, 将以上设计方法在一深基坑中进行了应用。

6.1 工程概况

南京金鼎湾花园 II 期工程位于南京市建邺区, 北临秦淮河支流, 西侧为市政道路, 东侧和南侧为规划道路, 周围建筑物离基坑 20.0 m 以上。基坑实际开挖 6.0~7.0 m, 局部挖深达到 10.0 m。

基坑东侧、南侧及西侧均采用复合土钉墙支护结构, 北侧由于临近秦淮河水无法施工, 故不能采用复合土钉墙支护结构。

6.2 组合支护结构设计

基坑挖深为 6.3 m, 按常规水泥土重力式挡墙设计墙宽为 3.7~4.8 m 左右, 由于场地条件限制无法施工如此宽的水泥土挡墙。另外常规重力式水泥土挡墙变形控制不理想, 该段支护紧靠秦淮河驳岸, 不允许产生过大变形。因此决定采用 MC 桩组合支护结构。该段支护结构的剖面如图 8。

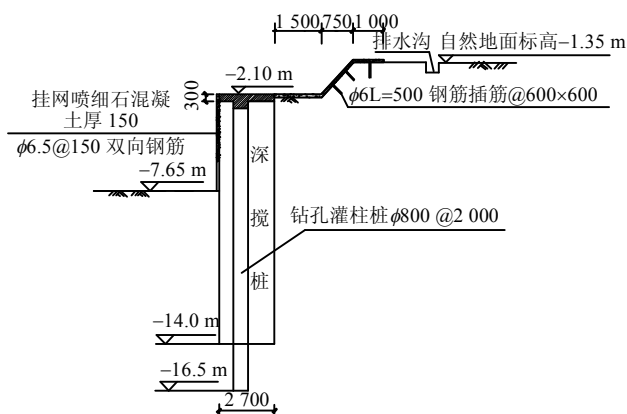


图 8 支护结构剖面图

Fig.8 Cross-section of support structure

采用上述设计方法, MC 桩组合支护结构设计计算成果: M 桩取 5 排 $\phi 700@1200$ 双轴深搅桩, 宽度为 2.7 m, 入土深度为 6.35 m; C 桩设于支护结

构前侧,采用如图 4(b)形式,入土深度取 8.35 m,桩身最大弯矩 $M_{\max}$ 按刚度折算后取 328.7 kN·m,选择钻孔灌注桩 $\phi 1\ 000@2\ 000$ (mm),混凝土等级为 C25。主筋选用 10 ϕ 22HRB335 钢筋。稳定性验算结果:抗倾覆稳定性系数 $K_q=1.6>1.2$,整体稳定性系数 $K=1.64>1.25$,均满足要求。

6.3 实测支护结构变形结果

从基坑土方开挖到地下室施工至结构±0.00 侧壁回填的过程中,对其进行为期 6 个月的基坑监测工作,在此过程中,对挡墙侧的测斜管、圈梁的水平位移及周围环境进行了严密监测。MC 桩组合支护结构深层水平位移和顶部水平位移监测结果如图 9、10 所示。

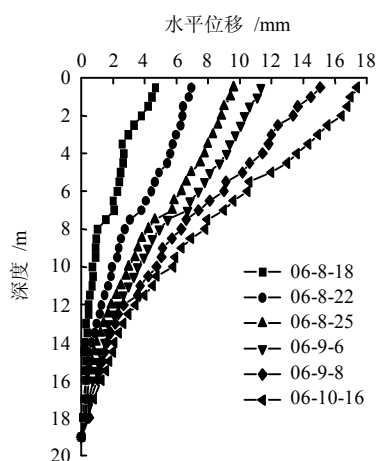


图 9 挡墙深层水平位移曲线

Fig.9 Curves of displacements of retaining structure

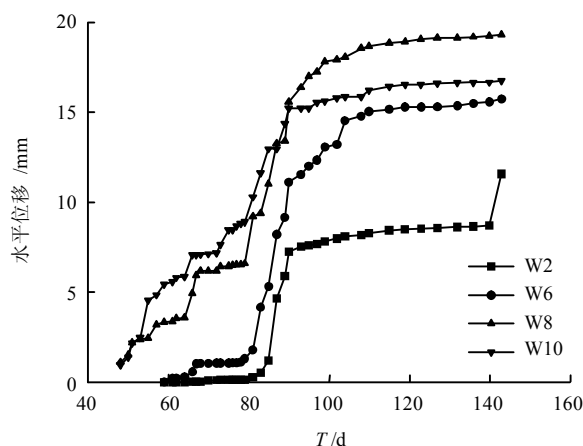


图 10 墙顶水平位移曲线

Fig.10 Curves of displacements on the top of the retaining structure

在土方开挖过程中,先从基坑东侧开始开挖,基本是一次开挖到底的,从支护结构深层水平位移和墙顶水平位移监测结果来看,支护结构的变形在开挖初期,变形较大,然后变形速率逐渐趋缓,基坑中部的变形要比两侧大。

整个基坑在开挖及地下室施工期间,基坑稳定,变形较小。实践证明,MC 桩组合支护结构对控制基坑变形效果较好,从而验证了上述设计方法的可行性。

7 结 论

(1) M 桩入土深度对基坑变形影响不显著。考虑基坑止水时桩入土深度可按基坑抗渗透要求确定,不考虑基坑止水时 M 桩入土深度可按有利于 C 桩弯距分担来考虑。

(2) M 桩挡墙宽度对减小支护结构变形效果明显,由于墙宽增大,墙底土体反力增加,墙身弯矩随之减小,由于 C 桩的作用,M 桩宽度可适当减小,设计时一般可按 $0.6h$ (h 为基础挖深) 宽度来确定。

(3) C 桩在挡墙中的设置位置与 M 桩底土体性质有关,土体较好时,C 桩应设置于支护结构后侧,土质较差时应设置于支护结构的前侧。

(4) C 桩长度可按悬臂式支护结构抗倾覆稳定性来确定。C 桩设置间距与土质条件有关,C 桩桩径取决于其本身所受弯距大小,MC 桩组合支护结构应考虑 M 桩的分担作用。

(5) 组合支护结构稳定性分析可按水泥土重力式挡墙稳定性计算方法进行,C 桩的存在使转动点后移,由于桩底土体反力作用,抗倾覆稳定性安全系数有所提高。

(6) 实际工程应用效果表明,MC 桩组合支护结构对控制基坑变形、增加基坑稳定性效果明显。与水泥土重力式挡墙相比,MC 桩组合支护结构中 M 桩宽度可相应减小,以适应狭小的施工场地环境并节省工程造价。

参 考 文 献

- [1] 张小平,胡明亮,吴庆令,等. 南京地区典型失稳基坑分析及预警系统的探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, (增1): 1880—1884.
ZHANG Xiao-ping, HU Ming-liang, WU Qing-ling, et al. Analysis of typical failure foundation pits and their warning system[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(Supp.1): 1880—1884.
- [2] 董平,秦然,陈征宙. 混凝土芯水泥土搅拌桩在软土地基中的应用[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 204—207.
DONG Ping, QIN Ran, CHEN Zheng-zhou. Use of concrete-cored DCM pile in soft ground[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(2): 204—207.