

文章编号: 1000-7598 (2010) 09-2755-05

MC 桩组合支护结构稳定性分析

黄广龙, 杨 波

(南京工业大学 土木工程学院, 南京 210009)

摘 要: 针对按照传统水泥土挡墙稳定性分析方法来计算 MC 桩组合支护结构稳定性的不足, 根据极限平衡理论, 结合 MC 桩组合支护结构的特点, 建立了新的抗倾覆稳定性计算方法, 分析了不同因素对组合支护结构抗倾覆稳定性的影响。结果表明, C 桩宜布置在组合支护结构前侧, 转动点位置宜选取在 C 桩桩端以上, 并可适当增加 M 桩的长度、宽度以及 C 桩长度来提高稳定性。最后, 运用分析的结果和实际工程经验, 建议了 MC 桩组合支护结构的设计参数。

关 键 词: MC 桩组合支护结构; 稳定性分析; 抗倾覆稳定性

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Stability analysis of MC composite support structure

HUANG Guang-long, YANG Bo

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

Abstract: Aimed at the lack in traditional analysis method used in soil-cement wall stability, when it is applied to stability analysis of MC composite support structure, a new computing way for anti-overturning stability was developed based on the limit equilibrium theory in combination with the characteristics of MC piles. According to the new method, various factors affected anti-overturning stability of MC piles were analyzed. The results indicate that, C pile is reasonably located in front side of the composite support structure; and the rotation point of overturning is reasonably located above on the end of C pile. Furthermore, the length and width of M pile, length of C pile can be properly increased to enhance the stability of MC piles. Finally, some advices on designing parameters of MC piles are given in terms of the conclusions of analysis and actual experiences in practices.

Key words: MC composite support structure; stability analysis; anti-overturning stability

1 引 言

水泥土挡墙是适宜于较浅软土基坑支护的一种有效方式, 主要借助其自重、墙底与地基土之间的摩擦力, 以及墙体在开挖面以下被动土压力来平衡墙后的水土压力。实际工程中水泥土挡墙的位移往往偏大, 有时甚至会影响基坑工程的正常施工或给周围环境造成危害。为减小和控制水泥土挡墙的位移和变形, 已经出现了许多改良方法^[1-5]。

MC 桩 (M 指柔性桩, 一般为水泥土搅拌桩; C 指刚性桩, 一般为混凝土桩) 组合支护结构是近年来在水泥土挡墙支护形式的基础上发展而来的一种新型支护形式, 它在实践中得到了一定的应用, 且对支护结构变形及位移的控制效果好^[6]。笔者曾对其工作性状进行数值分析, 并探讨了 MC 桩组合

支护结构的设计计算方法^[7]。但目前对其稳定性方面的研究甚少, 缺乏适合于 MC 桩组合支护结构的稳定性计算方法, 因而在设计计算时仍采用的重力式挡土结构的稳定性分析方法, 其存在的问题也是显而易见: (1) 传统的重力式挡墙与 MC 桩组合支护结构工作机制不同, 不能直接采用传统的重力式挡墙稳定性分析方法。(2) 由于 C 桩的加入, 在挡墙破坏的过程中, 转动点不再是绕挡墙底部的某处, 而是沿着混凝土桩上的某点转动, 且 C 桩的位置以及其他一些因素也影响着稳定性分析结果, 但对稳定性安全系数的影响仍然不明确, 须进一步研究。

2 MC 桩组合支护结构的型式

MC 桩组合支护结构是水泥土搅拌桩与混凝土

收稿日期: 2009-03-03

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 (No. 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

桩的组合,在水泥土挡墙的格栅之中插入混凝土桩,使柔性的水泥土挡墙具备了刚性支护的特点,且C桩的长度大于M桩挡墙的入土深度,可以适当减少挡墙的宽度和入土深度。C桩的位置也可以根据格栅的布置灵活调整,从而到达最佳的控制变形的效果^[8]。

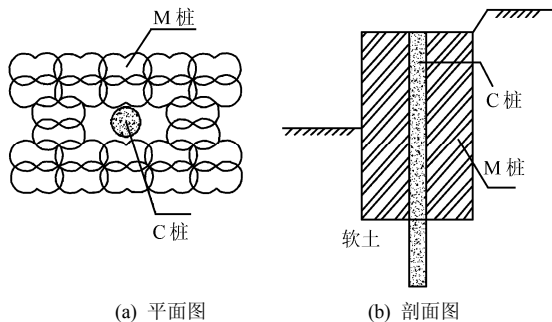


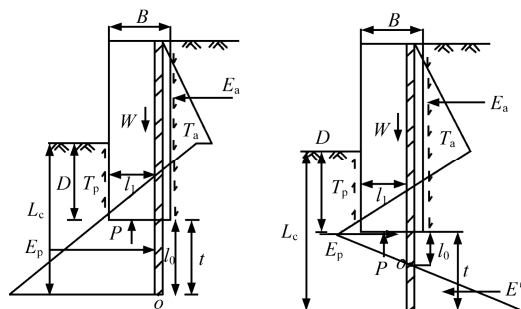
图1 MC桩平面及剖面布置图
Fig.1 Plan and profile of MC piles

3 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,即应对组合支护结构稳定性进行验算。

实际工程中,多数重力式挡土结构的失稳属倾覆失稳,而倾覆失稳机制复杂,失稳形态多样化,转动中心模糊不易确定,抗倾覆原理不够明确,设计中不易控制^[9],因此有必要建立更为合理的抗倾覆稳定验算方法,以下针对MC组合支护结构的抗倾覆稳定性进行分析和验算。

由于组合支护结构不同于水泥土挡墙,当C桩较短时,组合支护结构会绕着桩端转动,而当C桩较长时,组合支护结构倾覆转动点将位于M桩桩端以下C桩桩端以上任意点,因此针对倾覆转动点位置的不同,从两方面进行讨论,如图2所示。



(a) 转动点位于C桩桩端 (b) 转动点位于M桩以下C桩上的任意点

图2 MC桩组合支护结构抗倾覆稳定分析示意图

Fig.2 Sketch of analysis about anti-overturning stability of MC composite support structure

3.1 倾覆破坏转动点位于C桩桩端

抗倾覆稳定安全系数定义为:抵抗倾覆的最大力矩与实际引起的倾覆力矩之比。而在极限状态下,抵抗倾覆的最大力矩在数值上就等于极限平衡状态下抗倾覆力矩,因此根据倾覆破坏时的极限平衡表达式,可以得出组合支护结构的抗倾覆稳定安全系数 K_q 的计算式:

$$l_1 < \frac{B}{2}: K_q = \frac{M_u}{M_t} = \frac{E_p h_p + T_p l_1 + T_a (B - l_1) + P \frac{l_1}{2} + W (B/2 - l_1)}{E_a h_a} \quad (1)$$

$$l_1 \geq \frac{B}{2}: K_q = \frac{M_u}{M_t} = \frac{E_p h_p + T_p l_1 + T_a (B - l_1) + P \frac{l_1}{2}}{W (l_1 - B/2) + E_a h_a} \quad (2)$$

式中: l_1 为C桩与墙趾间的距离(m); B 为挡墙宽度(m); W 为挡墙自重(kN); P 为地基土反力的合力(kN); T_a 、 T_p 为墙体与地基土之间的摩擦力的合力(kN); E_a 为主动土压力的合力(kN); h_a 为主动土压力的合力矩(m); E_p 为被动土压力的合力(kN); h_p 为被动土压力的合力矩(m); M_u 为抗倾覆力矩(kNm); M_t 为倾覆力矩(kNm); K_q 为抗倾覆稳定安全系数。

3.2 倾覆破坏转动点位于M桩以下C桩上任意点

在MC桩组合支护结构的实际工作状态中,发生倾覆破坏时的转动点不仅限于C桩的底端O点,而可能是在C桩位于M桩以下部分的任意点,这时组合支护结构的受力模型明显不同于图2(a)的情况。

同理,根据组合支护结构倾覆破坏时的极限平衡,可以得出安全系数 K_q 的计算式:

$$l_1 < \frac{B}{2}: K_q = \frac{M_u}{M_t} = \frac{E_p h_p + T_p l_1 + T_a (B - l_1) + P \frac{l_1}{2} + W \left(\frac{b}{2} - l_1 \right) + E'_p h'_p}{E_a h_a} \quad (3)$$

$$l_1 \geq \frac{B}{2}: K_q = \frac{M_u}{M_t} = \frac{E_p h_p + T_p l_1 + T_a (B - l_1) + P l_1 / 2 + E'_p h'_p}{W (l_1 - B/2) + E_a h_a} \quad (4)$$

式中: E'_p 为被动土压力的合力(kN),其余符号意义同前。

针对C桩位置的不同,M桩自重力矩的作用不

同: 当 C 桩位于 M 桩的前端时, 墙体自重力矩为抗倾覆力矩; C 桩恰好位于 M 桩中部, 墙体自重力矩对桩端无影响; C 桩位于 M 桩的后侧时, 墙体自重力矩为倾覆力矩。

4 MC桩组合支护结构稳定性影响因素

为分析不同因素对 MC 组合支护结构抗倾覆稳定性的影响, 用上述改进的计算方法进行分析, 取倾覆作用转动点位于 C 桩桩端。在以下算例中, 基坑开挖深度 $H=5$ m, 挡墙宽度 $B=3.2$ m, 入土深度 $D=5$ m, C 桩超过 M 桩底部 2 m, 组合支护结构的水泥土挡墙重度 $\gamma_0=20.0$ kN/m³; 场地土层的平均重度 $\gamma=18.5$ kN/m³, $c=10$ kPa, $\varphi=15^\circ$, C 桩设置间距为 2 m。用朗肯土压力公式计算组合支护结构土压力。按照规范规定^[10], 对圆形桩计算宽度: $B=0.9(1.5d+0.5)=0.9(1.5\times0.8+0.5)=1.53$ m。因此, 对于 M 桩以下部分 C 桩上的被动土压力, 均乘以折减系数 $1.53/2=0.765$ 。

4.1 C 桩位置对稳定性的影响

为了研究 C 桩位置对组合支护结构稳定性的影响, 采用不同的 l_1 值, 分别取 l_1 为 0、0.4、0.8、1.2、1.6、2.0、2.4、2.8 m 和 3.2 m 来计算抗倾覆稳定安全系数 K_q 。从图 3 可以看出, K_q 值随 l_1 的增大而逐渐降低。实际应用中 C 桩的位置并不能任意放置, 但从其位置与抗倾覆稳定安全系数 K_q 的关系可见, C 桩应尽量设置在组合支护结构的前侧。

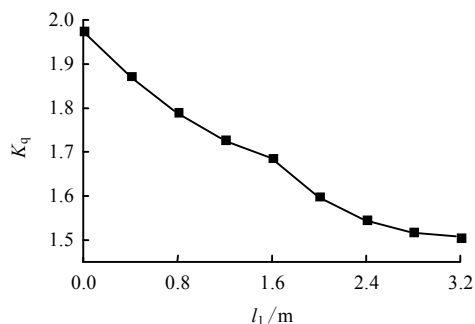


图3 K_q 与 l_1 的关系曲线
Fig.3 Curve of K_q versus l_1

4.2 C 桩长度对稳定性的影响

工程实践经验表明, 增加 C 桩的长度可以提高组合支护结构的稳定性, 这主要是由于 C 桩的增长也就增大了墙前侧土体的被动土压力, 以此来减小支护结构的平移和转动, 对抗倾覆稳定性也是一样, 依靠被动土压力增量来提高安全系数。

假定组合支护结构转动点位于 C 桩桩端, 分析

C 桩长度对 MC 桩组合支护结构抗倾覆稳定性的影响, 分别取 C 桩超出 M 桩底端长度 t 为 2~9 m (间隔 1 m) 来计算其对应的 K_q 值, 其余参数不变, 并比较了 $l_1=1.0$ 、1.6、2.0 m 时的不同情况。由图 4 可知, C 桩位于墙前时 ($l_1=1.0$ m), K_q 随着 C 桩长度的增加呈现的是先减小后增加的趋势。C 桩位于墙中时 ($l_1=1.6$ m), 在 C 桩超出挡墙深度 $t=3.0$ m 之内, K_q 随着随 C 桩长度的增加增长较缓; 在 $t>3.0$ m 时, K_q 随着随 C 桩长度的增加而表现出较快的增长。C 桩位于墙后时 ($l_1=2.0$ m), K_q 随着随 C 桩长度的增加而表现为较大幅度的增长。

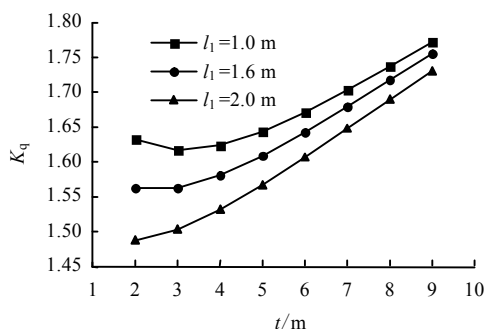


图4 K_q 与 t 的关系曲线
Fig.4 Curves of K_q versus t

4.3 M 桩入土深度对稳定性的影响

C 桩的入土深度取 9 m, M 桩的入土深度分别取 2、3、4、5、6、7、8、9 m, 分析 M 桩入土深度 D 对支护结构变形的影响。由图 5 可知, MC 桩组合支护结构的抗倾覆稳定性安全系数 K_q 随 M 桩挡墙入土深度的增加而增加。

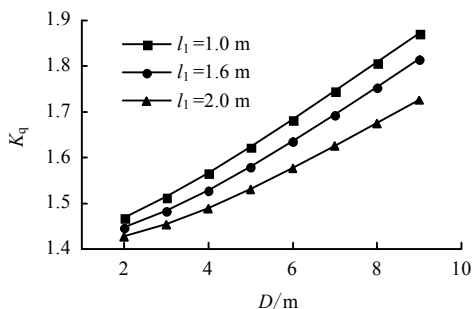


图5 K_q 与 D 的关系曲线
Fig.5 Curves of K_q versus D

虽然依靠增加挡墙深度来提高支护结构的稳定性取得一定的效果, 但是墙体嵌固越深, 施工质量越难保证, 实际工程中挡墙的嵌固深度不宜过大。

4.4 M 桩挡墙宽度对稳定性的影响

将 C 桩入土深度取为 9 m, 挡墙宽度分别取 2.7、3.2、3.7、4.2、4.7、5.2、5.7、6.2 m, 桩的中心位置在挡墙中部, 其余计算参数不变, 计算 K_q 值, 以研究 M 桩挡墙宽度对组合支护结构抗倾覆稳定性的影响。由图 6 可知, M 桩挡墙宽度的增加对组合支护结构抗倾覆稳定性的影响是比较有利的。这主要是由于挡墙宽度增加而导致挡墙底部所受地基土反力的范围增加而形成的。但挡墙宽度受周围环境限制较大, 同时影响支护结构的经济性, 因此不宜过大。

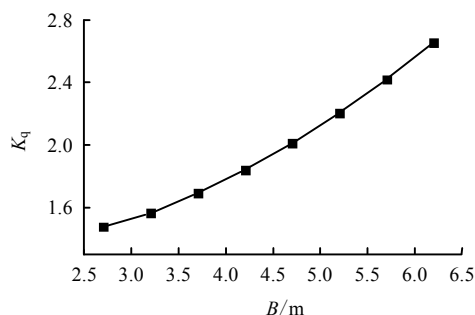


图 6 K_q 与 B 的关系曲线
Fig.6 Curve of K_q versus B

4.5 转动点位置不同的分析

将组合支护结构应用于实际工程时, 当 C 桩的长度较短, 超出 M 桩挡墙底部不多时, 倾覆转动点可能位于挡墙底部; 当 C 桩长度较长而超出 M 桩挡墙底部较多时, 倾覆破坏的转动点就很可能位于 C 桩上的某一点, 由于倾覆转动点位置的不同将导致抗倾覆稳定安全系数结果的差异。

计算的过程中将倾覆破坏的转动点分别取在 $l_0=0$ 、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 m 处, 比较其对抗倾覆稳定安全系数的影响。

由图 7 可知, MC 组合支护结构的抗倾覆稳定安全系数随转动点位置的不同而有较大变化, 转动点的入土深度越深, K_q 值越大。进一步分析可见:

(1) 图 4、5 中, $t=2$ m, $D=5$ m, 其余基本参数相同的情况, 比较 C 桩位于 $l_1=1.0$ m 与 2.0 m (墙前与墙后) 所得的 K_q 差值, 所得结果与图 3 的 C 桩位置对 K_q 值的影响结果一致, 其增量 $\Delta K_q \approx 0.15$; (2) 除 t 以外, 其余基本参数条件不变, $t=9$ m 的情况下, 对图 4 中 $l_1=1.0$ m 与 $l_1=2.0$ m 时的 K_q 变化值 $\Delta K'_q \approx 0.05$ 。

这两差值的区别在于 C 桩的入土深度不同, 因

此该结果表明, C 桩长度不同时, C 桩位置对稳定性安全系数的影响效果也不一样。在实际的工程设计中就需要根据具体的情况来确定设计参数, 以达到最优的效果。另外, 在基本参数条件下所得比较结果的一致性, 也从一定程度上证明了利用改进后公式计算抗倾覆稳定安全系数的可行性。

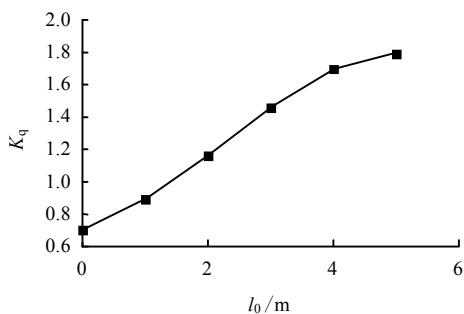


图 7 K_q 与 l_0 关系曲线
Fig.7 Curve of K_q versus l_0

5 MC 桩组合支护结构设计参数确定

5.1 M 桩设计参数

根据土质情况和基坑开挖深度等, 可按一定的经验来确定 M 桩的宽度 B 和入土深度 D :

$$B = (0.5 \sim 0.7)H \quad (5)$$

$$D = (0.6 \sim 1.0)H \quad (6)$$

式中: H 为基坑开挖深度。

与传统的水泥土挡墙相比, 由于 C 桩的布置可使 M 桩的宽度和入土深度适当减小。

5.2 C 桩设计参数

C 桩位置的确定: 从整体上说, C 桩位于 M 桩前侧时, 对支护结构的抗倾覆稳定性是有利的。(1) 在 C 桩桩长较短时, C 桩位置对支护结构的抗倾覆稳定性影响较大, C 桩宜布置于支护结构的前侧;

(2) 在 C 桩桩长较长时, C 桩位置对支护结构的抗倾覆稳定性影响减小, 桩设置于挡墙前后差别不大。

由于 MC 组合支护结构倾覆作用的机制比较复杂, 转动点的位置模糊, 从组合支护结构抗倾覆稳定性的角度出发, 可以根据倾覆稳定安全系数的要求来确定 C 桩的长度, 按照经验, 取 $K_q \geq 1.3$, 取 $t/H=0.7 \sim 1.2$ 。

则
$$L_C = (1.7 \sim 2.2)H \quad (7)$$

式中: L_c 为 C 桩的嵌固深度 (m)。

6 结 论

(1) 运用改进的计算方法分析了各种因素对 MC 桩组合支护结构的抗倾覆稳定性的影响。计算结果表明, C 桩宜布置在 M 桩挡墙的前侧, 以提高支护结构的稳定性。当 C 桩的入土深度超过一定值时, 组合支护结构抗倾覆稳定安全系数随 C 桩超出 M 桩挡墙的长度、M 桩挡墙的入土深度及挡墙宽度的增加而增大。

(2) 在设计计算的过程中, 考虑组合支护结构失稳的倾覆破坏转动点时, 若将其假定在 C 桩底部, 所得的安全系数值偏大。为安全起见, 结合实际工程, 可以考虑整个组合支护结构绕 C 桩底端以上的某点转动。

(3) 结合工程应用经验并满足抗倾覆稳定安全系数要求, 提出 MC 组合支护结构设计参数。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 朱家祥, 吴继敏. 混凝土芯水泥土搅拌桩在基坑支护中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34 (2): 185—188.
ZHU Jia-xiang, WU Ji-min. Application of concrete cored deep cement mixing piles to foundation pit supporting[J]. **Journal of Hohai University(Natural Sciences)**, 2006, 34(2): 185—188.
- [3] 丁永君, 李进军, 李辉. 劲性搅拌桩的发展现状[J]. 低温建筑技术, 2005, 108(6): 100—101.
- [4] 王健, 夏明耀, 傅德明. H 型钢与水泥土搅拌桩围护结构设计及计算[J]. 同济大学学报, 1998, 26(6): 636—639.
- WANG Jian, XIA Ming-yao, FU De-ming. Design and calculation of composite structure with H shaped and cemented-soil-pile[J]. **Journal of Tongji University**, 1998, 26(6): 636—639.
- [5] 刘松玉, 席培胜, 储海岩, 等. 双向水泥土搅拌桩加固软土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 560—561.
LIU Song-yu, XI Pei-sheng, CHU Hai-yan, et al. Research on practice of bidirectional deep mixing cement-soil columns for reinforcing soft ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(3): 560—561.
- [6] 黄广龙, 惠刚, 方乾. MC 桩组合支护结构工作性状的有限元分析[J]. 南京工业大学学报, 2008, 30(3): 1—6.
HUANG Guang-long, HUI Gang, FANG Qian. A analysis on performance of MC composite retaining structure by finite element method[J]. **Journal of Nanjing University of Technology**, 2008, 30(3): 1—6.
- [7] 黄广龙, 惠刚, 方乾, 等. MC 桩组合支护结构设计与应用研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2697—2702.
HUANG Guang-long, HUI Gang, FANG Qian, et al. Design and application research on MC composite retaining structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(9): 2697—2702.
- [8] 惠刚. MC 桩组合支护结构工作机理及应用研究[硕士学位论文 D]. 南京: 南京工业大学, 2007.
- [9] 黄广龙, 李勇, 徐敏, 等. 水泥土挡墙稳定安全系数与变形的经验关系分析[J]. 工程勘察, 2008, (3): 23—26.
HUANG Guang-long, LI Yong, XU Ming, et al. Analysis on the relations between the displacement and the stability factors of the cement-soil gravity retaining wall[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2008, (3): 23—26.
- [10] 中国建筑科学研究院. JGJ 120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑出版社, 1999.