

文章编号: 1000-7598(2014)增 2-0393-05

土钉墙地基承载力问题探讨

秦会来¹, 周同和², 郭院成³, 杜 超⁴

(1. 中国建筑股份有限公司技术中心, 北京 101300; 2. 郑州大学 综合设计研究院, 郑州 450002;
3. 郑州大学 土木工程学院, 郑州 450002; 4. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 成都 610081)

摘 要: 土钉墙墙底地基土的承载力验算是土钉墙支护设计的一项重要内容。国内的工程实践中, 通常将土钉墙地基承载力与坑底土抗隆起验算合并考虑。针对具体案例, 通过 Plaxis3D 有限元数值模拟, 分析研究了土钉墙底部土体发生地基承载力失稳的破坏模式、破坏荷载以及土钉墙墙底应力分布特点等, 探讨了依据我国相关规程进行土钉墙坑底隆起或地基承载力计算可能存在的问题。借鉴国外加筋土挡墙地基承载力计算的一般方法, 将土钉墙作为荷载倾斜、偏心的刚性基础对待, 利用荷载倾斜、偏心条件下传统刚性浅基础的地基承载力的 Meyerhof 解和 Vesic 解, 对土钉墙地基承载力进行了计算和对比, 通过对比发现, Meyerhof 解更接近实际, 据此, 提出了土钉墙地基承载力计算的合理模式。

关 键 词: 地基承载力; 土钉墙; 有限元法
中图分类号: TU 432 **文献标识码:** A

Study of basal bearing capacity for soil nailing walls

QIN Hui-lai¹, ZHOU Tong-he², GUO Yuan-cheng³, DU Chao⁴

(1. Technical Center, China State Construction Engineering Corporation, Beijing 101300, China;
2. Comprehensive Design Institute, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;
3. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;
4. China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610081, China)

Abstract: Basal bearing capacity calculation is one of the important issues for soil nailing wall design. In Chinese excavation engineering, the bearing capacity of soil nailing walls is usually taken into consideration with the basal stability analysis. Soil nailing wall models are established in the Plaxis3D. Finite element method is employed to study the foundation soil's failure mode, the failure loads and the basal stress distribution of the soil nailing wall. The analysis mode in Chinese excavation codes for bearing capacity of soil nailing walls is examined based on the results from the finite element method; and some problems are detected. Referring to the bearing capacity calculation mode for the mechanically stabilized earth walls, and based on the stress distribution under the soil nailing wall, the soil nailing walls are considered as rigid footings with inclined and eccentric loads. The solutions for rigid footings with inclined and eccentric loads proposed by Meyerhof and Vesic are used to calculate the bearing capacity of soil nailing walls. Calculation results show that the solutions by Meyerhof are more consistent with the truth; so that the bearing capacity analysis mode for soil nailing walls is presented.

Key words: bearing capacity; soil nailing walls; finite element method

1 引 言

土钉墙自上世纪 70 年代出现以来, 在基坑工程中得到广泛应用, 并在基坑工程实践中发展了与止水帷幕、微型桩以及预应力锚杆等相结合的复合土钉支护形式。由于土钉墙支护机制的复杂性, 目前对其认识尚未完全清楚。土钉墙与加筋土类似, 当

前国内外相关设计标准对加筋类挡墙的安全性往往通过验算内部稳定性和外部稳定性来保证^[1]。通过内部稳定性验算确定加筋体的强度和长度以及加筋体与面层的连接等。外部稳定性一般进行抗滑移、抗倾覆和地基承载力等项目的验算。国内的相关规程中通常将土钉墙地基承载力和坑底抗隆起验算合并进行^{[2][3]}。

收稿日期: 2014-06-14

基金项目: 中建股份科技资助 (No. CSCEC-2010-Z-01)。

第一作者简介: 秦会来, 男, 1979 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事深基坑支护方面的设计与科研工作。E-mail: huilaiqin@163.com

国外加筋土挡墙的地基承载力验算通常将加筋区域作为刚性体对待,考虑荷载的偏心按传统刚性基础地基承载力问题验算^[14],有些规范还考虑荷载倾斜对地基承载力的影响^{错误!未找到引用源。}。我国土钉墙底地基承载力或抗隆起验算采用的是近似公式^[2]。

本文将针对具体案例,分析我国相关规程计算时可能存在的问题。采用数值模拟分析土钉墙基底地基承载力破坏模式、破坏荷载以及土钉墙底应力分布特点等,探讨其地基承载力计算的合理模式。借鉴加筋土地基承载力计算模式,将土钉墙作为荷载倾斜、偏心的刚性基础对待,利用荷载倾斜、偏心条件下传统刚性浅基础的地基承载力计算模式,对土钉墙底地基承载力进行了计算和对比,通过对比寻求土钉墙底地基承载力计算的合理方法。

2 土钉墙底土体地基承载力破坏模式

某土钉墙支护基坑挖深为 9 m,土钉水平间距为 1.0 m,竖向间距为 1.2 m,第 1 层土钉距地表为 0.8 m。地基土以基底水平面为界分为上、下两层。基坑开挖深度范围内土层的强度参数取为 $\varphi=25^\circ$, $c=20$ kPa,重度 $\gamma=20$ kN/m³;土钉长度取为 9.0 m,倾角均为 5° 。支护面层厚度为 15 cm。土钉墙不考虑放坡。以下考虑两种情况计算,情况 1,坑底土层强度初始参数取为 $\varphi=15^\circ$, $c=17$ kPa,重度 $\gamma=20$ kN/m³,通过增加地面超载使土钉墙发生地基承载力破坏。情况 2,坑底土层内摩擦角 $\varphi=20^\circ$,重度 $\gamma=20$ kN/m³,地面超载 10 kPa,初始黏聚力 $c=10$ kPa,通过降低黏聚力使土钉墙发生地基承载力破坏。不考虑地下水作用,上述强度指标为有效应力指标。为探讨土钉墙底地基承载力计算的合理模式,本节中将采用 Plaxis3D 对具体案例进行计算。

在 Plaxis3D 中建立有限元模型,模型中垂直土钉墙剖面方向取为 1 m,也即土钉的水平间距,模型左右边界距离 70 m,上、下边界距离 24 m。为方便分析发生地基承载力破坏时,土钉墙底部应力分布特点,在模型中土钉墙底面设置了接触面,接触面强度同下部土体强度。模型有限元网格如图 1 所示,土钉墙底面区域的土体网格进行了加密,基坑待开挖土体在土钉墙的左侧。有限元模型中,上层土体采用 HS 模型,下层土体采用了以 Mohr-Coulomb 为屈服(破坏)准则的理想弹塑性模型。土钉采用 Plaxis3D 中的 embedded pile 单元模拟。

数值分析结果表明,对于情况 1,当超载增加到 23 kPa 时,土钉墙底土层发生地基承载力破坏,

此时土体塑性区分布见图 2(a),图中红色点代表土体屈服点,粉色线为土钉体;对于情况 2,通过反复试算发现,当下层土体的黏聚力由 10.0 kPa 降低到 4.9 kPa 时,土钉墙底部土体发生地基极限承载力破坏,此时土体塑性区分布见图 2(b)。情况 1 和 2 中,当土钉墙底部土体发生地基极限承载力破坏时的增量位移场如图 3 所示,增量位移场可以反映土钉墙底部土体发生地基承载力破坏时的破坏模式,为清晰观察土钉墙地基承载力的破坏模式,图 3 中仅给出了土钉墙区域内的增量位移场。

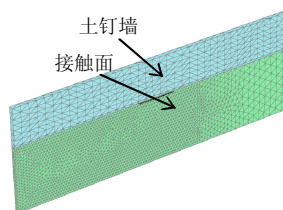


图 1 土钉墙地基承载力计算的有限元模型
Fig.1 Finite element model for soil nailing wall to calculate bearing capacity

由图 2、3 可见,土钉墙底地基发生承载力破坏时,土钉墙产生显著的倾向坑内的斜向下位移,在开挖侧形成地基破坏塑性区,土体的地基承载力失稳模式是单侧的,土钉墙犹如一偏心受压的基础。

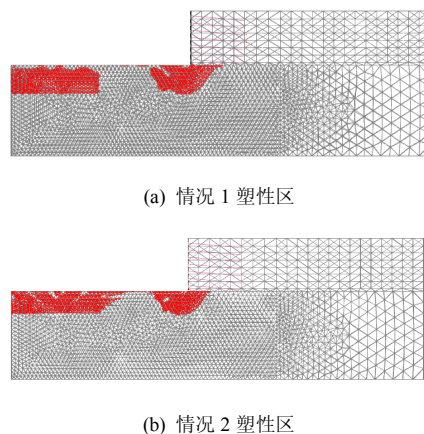


图 2 土钉墙地基破坏塑性区型
Fig.2 Plastic zones for bearing capacity failure of the soil nailing wall

图 4 给出了发生地基承载力破坏时,接触面上的正应力分布情况,图中的坐标 0 点为土钉墙在坑内一侧的脚点。由图 4 可以发现,土钉墙底的正应力分布由土钉墙外侧向坑内逐步加大,靠近面层时,由于挖土卸载,正应力减小,显然正应力的合力作用点相对于土钉墙中线是偏心的,靠近开挖侧。图 5 给出了发生地基承载力破坏时,接触面上的剪应

力分布情况, 由图可以发现, 土钉墙底面有较大的剪应力存在, 剪应力合力远大于 0。由图 4、5 中接触面上正应力和剪应力分布和大小可知, 土钉墙作用于底部土体上的荷载是偏心 and 倾斜的。

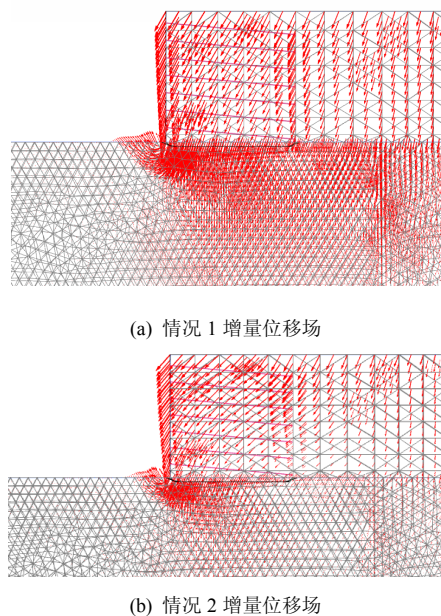


图 3 土钉墙地基破坏增量位移场
Fig.3 Incremental displacements for bearing capacity failure of the soil nailing wall

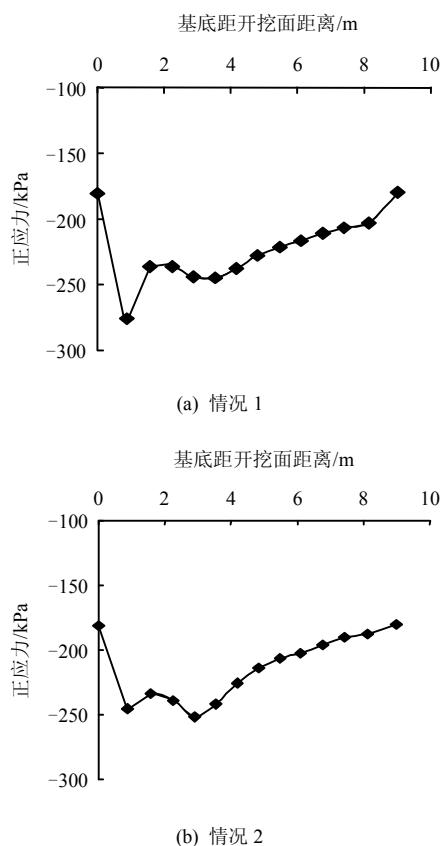


图 4 接触面上的正应力分布

Fig.4 Normal stress distribution on the contact interface

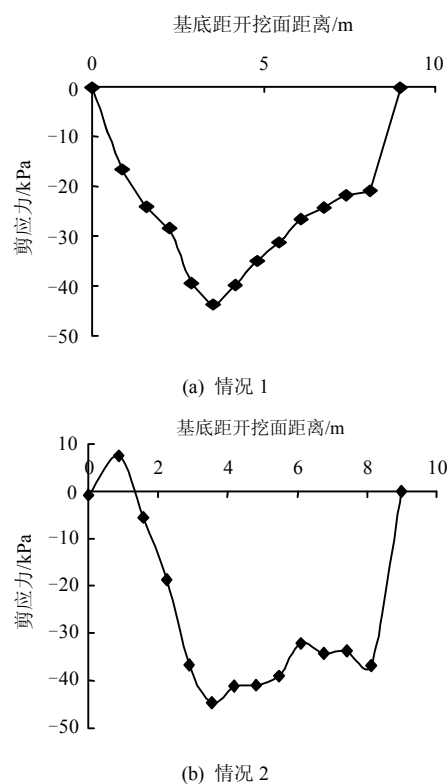


图 5 接触面上的剪应力分布
Fig.5 Shear stress distribution on the contact interface

3 土钉墙底土体地基承载力计算

我国的工程实践中, 通常将土钉墙底地基失稳和坑底隆起一起考虑。文献[2]规定基坑底面下有软弱土层的土钉墙需进行坑底抗隆起验算, 验算方式采用地基承载力模式, 按下式(1)进行计算, 公式中各符号的含义可参见文献[2]中的 71~72 页, 限于篇幅不再给出。

$$\frac{\gamma_{m2}DN_q + cN_c}{(q_1b_1 + q_2b_2)/(b_1 + b_2)} \geq K_b \quad (1)$$

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi \quad (3)$$

式(1)是我国基坑工程中验算刚度较大的撑或锚板墙式支护结构坑底隆起稳定性时采用的, 式(1)中的分子项应为不经任何修正的地基承载力计算公式 $cN_c + \gamma DN_q + \gamma BN_\gamma/2$, 由于抗隆起验算时, 不能确定隆起失稳破坏范围, 就忽略了宽度影响项 $\gamma BN_\gamma/2$ 。采用此式计算土钉墙地基承载力时, 不能反映土钉墙荷载倾斜、偏心的特点。由于忽略了 $\gamma BN_\gamma/2$ 项, 坑内开挖后也无超载影响项, 极有可能给出偏小的计算结果。如对于情况 2, $D=0$, $b_1=0$, 分子项为

进行土钉墙的地基承载力计算:

$$\frac{q_u B'}{W + qB} \geq K_b \quad (8)$$

通过对基础宽度折减考虑荷载偏心影响, 通过修正系数 i_c 、 i_q 、 i_γ 考虑荷载倾斜影响, 由 (4) ~ (7) 计算; B 为土钉墙宽度, $B' = B - 2e$ 。土钉墙后的侧阻影响较小, 可以忽略不计。

5 结 论

(1) 土钉墙底部发生基底承载力破坏时, 土钉墙产生显著的倾向坑内的斜向下位移, 在开挖侧形成地基破坏塑性区, 土钉墙底部土体的地基承载力失稳模式是单侧的, 土钉墙犹如一偏心受压的基础。

(2) 土钉墙作用于基底土体上的荷载是偏心和倾斜的。

(3) 文献[2]中验算土钉墙底软弱土层隆起失稳的计算公式, 当用来计算土钉墙底地基土的承载力时, 不能反映土钉墙荷载特点, 也很有可能给出太保守的计算结果, 合理性有待进一步探讨。

(4) 采用 Meyerhof^[9]计算倾斜、偏心荷载作用下刚性基础地基承载力模式计算土钉墙底地基承载力比较合适。

参 考 文 献

- [1] BS8006-1. Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and Other Fills[S]. [S.I.]: British Standard Institution, 2010.
- [2] 中华人民共和国建设部. JGJ120-2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [3] 山东省住户与城乡建设厅. GB 50739—2011 复合土钉墙基坑支护技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [4] Federal Highway Administration. FHWA-NHI-10-024 Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes[S]. Washington D C: [s.n.], 2009.
- [5] German Geotechnical Society. Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures Using Geosynthetic Reinforcements-EBGEO[M]. [S.I.]: Ernst & Sohn, 2011.
- [6] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册, 第2版[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 272—282.
- [7] LESHCHINSKY D, VAHEDIFARD F, LESHCHINSKY B A. Revisiting bearing capacity analysis of MSE walls[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2012, 34: 100—107.
- [8] LESHCHINSKY D, MARCOZZI G F. Bearing capacity of shallow foundations: rigid versus flexible models[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1990, 116(11): 1750—1756.
- [9] MEYERHOF G G. Some recent research on the bearing capacity of foundations[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1963, 1(1): 16—26.
- [10] WINTERKORN H F, FANG H Y. Foundation engineering handbook[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1990, 121—147.