

文章编号: 1000-7598 (2010)增刊 2-0260-05

隧道近接桩基的安全系数研究

王 成¹, 徐 浩¹, 郑颖人²

(1. 重庆交通大学 隧道及岩土工程系, 重庆 400074; 2. 后勤工程学院 建筑工程系, 重庆 400041)

摘 要: 针对近年来隧道近接建筑桩基的情况较多, 且施工控制难度大和造价高的问题十分突出。运用有限元强度折减法, 基于 Mohr-Coulomb 强度准则, 计算了多种不同情况下桩基础与隧道相互影响的隧道安全系数, 包括桩基距隧道水平距离的影响、桩基埋深的影响和桩基荷载的影响。总结并提出了有实际意义的安全系数变化规律, 计算表明, 隧道近接桩基的临界距离为 1 倍洞径, 当隧道与桩基水平距离大于 1 倍洞径时, 桩基与隧道之间的相互影响可以忽略不计; 桩基荷载的变化对隧道安全系数有较大影响, 荷载增大 1 倍, 安全系数约减小 1/4。结论为隧道近接桩基工程建设提供参考依据。

关 键 词: 隧道近接桩基; 有限元强度折减法; 安全系数; 浅埋隧道

中图分类号: U 452

文献标识码: A

Study of safety factor of tunnel close to pile foundation

WANG Cheng¹, XU Hao¹, ZHENG Ying-ren²

(1. Department of Tunnel and Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Department of Architectural Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 400041, China)

Abstract: Recently, cases of excavation tunnel close to pile foundations have significantly increased. Problems are arising with its difficult construction controlling and high costs. In this paper, the safety factors of interaction between the tunnel and pile foundation are computed by using the strength reduction FEM in a variety of different cases based on the Mohr-Coulomb strength criterion. Those cases include the level distant between the pile and the tunnel, the imbedded depth of pile and the loads of pile. Practical rules of the variation of the safety factors are summarized from the computed results. It is shown that the critical level distance of pile away from the side wall of tunnel is one time width of tunnel. The influences of the pile-tunnel interaction can be ignored while the level distant of the pile-tunnel is more than one time width of tunnel. The loads on the pile foundation have important influences on the safety factor of the tunnel. The safety factor will decreased about 1/4 while the loads on the pile is increased about one time. The conclusions provide strong references for constructions of excavation tunnel close to piles.

Key words: excavation tunnel close to pile; strength reduction FEM; safety factor; shallow tunnel

1 引 言

随着城市轨道交通工程建设的增多, 浅埋隧道开挖对周围环境影响问题越来越受到关注, 其中由于线路、空间的限制所造成的浅埋隧道穿越楼房桩基础的问题尤具有代表性。浅埋隧道开挖不可避免地会引起周围地层的变形, 从而引起隧道顶部或临近桩基的变形, 产生轴向或侧向的附加应力, 但目前对于隧道开挖引起上部桩基变形和承载特性的变化的研究较少, 因此, 对此问题进行探讨具有重要的实际意义。影响桩与隧洞相互作用的因素十分复杂, 荷载作用下隧洞的稳定性问题还没有一个较好

地分析方法, 也没有提出一个合适的评判标准, 国内在这方面虽有研究^[1-5], 但还很不成熟, 设计过程中主要根据已有的经验对桩与隧洞的距离提出一些控制原则。由于实际工程的复杂性与差异性, 这种缺乏严格理论计算的有经验设计方法有可能导致一些工程出现安全问题, 或是在设计时采用了相对保守的设计方案, 造成浪费^[4]。因此, 针对高层建筑密集地区浅埋隧洞设计与安全稳定性分析提出一种科学的计算方法与合理的评判指标, 对于城市的建设规划与确保长期安全都有重要的意义^[5]。有限元强度折减法在边(滑)坡、地基稳定性分析中得到了应用推广^[6-11], 目前在隧洞稳定性分析中的应用也

收稿日期: 2010-04-28

第一作者简介: 王成, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程科研与教学方面的工作。E-mail: wch62@qq.com

在不断探索^[1-3]。本文将有限元强度折减法应用到桩基荷载作用下隧洞稳定性分析中是一种较好的探索思路。

2 有限元强度折减法理论

传统的边坡稳定性极限平衡法计算采用的安全系数是 1955 年由 Bishop 提出的, 他将安全系数 ω 定义为沿整个滑动面的抗剪强度与实际荷载所产生的剪应力之比, 即

$$\omega = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{\int_0^l (c + \sigma \tan \varphi) dl}{\int_0^l \tau dl} \quad (1)$$

式中: τ_f 为滑动面的抗剪强度; τ 为实际荷载所产生的剪应力; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; σ 为应力。

式 (1) 两边同时除以 ω , 则变为

$$1 = \frac{\int_0^l \left(\frac{c}{\omega} + \sigma \frac{\tan \varphi}{\omega} \right) dl}{\int_0^l \tau dl} = \frac{\int_0^l (c' + \sigma \tan \varphi') dl}{\int_0^l \tau dl} \quad (2)$$

式中: $c' = \frac{c}{\omega}$; $\varphi' = \arctan \left(\frac{\tan \varphi}{\omega} \right)$ 。

由此可见, 传统的极限平衡方法是将岩土体的抗剪强度指标 c 和 $\tan \varphi$ 折减为 c/ω 和 $\tan \varphi/\omega$, 迫使岩土体达到极限平衡状态, 此时的 ω 值即为安全系数^[6]。

有限元强度折减法是岩土体的弹塑性理论力学基础, 通过有限元数值模拟求出岩土体的应力、应变等力学状态量, 而通过强度折减求出岩土体的极限破坏状态^[9]。其基本思想与传统极限平衡法的思想是一致的, 先将岩土体强度参数进行不断折减, 而后再将折减后新的强度参数代入进行有限元计算分析, 如果有限元计算表明岩土体达到极限破坏状态, 则此时的折减系数就是强度储备安全系数^[10]。在给定的迭代次数范围内, 最大位移或不平衡力的残差值不满足所要求的收敛条件, 则认为岩土体发生破坏。研究表明, 当岩土体内单元节点塑性应变或位移突变时, 静力平衡有限元计算也正好表现出计算不收敛, 因此, 也可将有限元静力计算是否收敛作为隧洞失稳的判据^[11]。最新计算和分析表明, 当采用平面应变方法来求解空间问题时, 采用 2/3 的实际荷载求出的安全系数与实际空间状态下安全系数相近^[12], 为便于工程应用, 可将空间问题简化成平面问题进行分析, 计算时只需将计算荷载取 2/3 实际荷载进行计算即可。

3 隧道近接桩基的安全系数分析

3.1 隧道-桩基模型的建立

鉴于我国城市轨道交通建设中隧洞与桩基采用的尺寸规律, 参考重庆的建设情况, 模型采用直墙半圆拱形隧道, 其跨度为 11.5 m, 侧墙高 1.75 m, 埋深 10 m, 计算选用理想弹塑性本构模型, 采用平面应变关联法则下 Mohr-Coulomb 匹配准则。计算范围底部以及左右两侧各取 5 倍洞室跨度, 向上取到地表; 边界条件左右两侧为水平约束, 下部为固定约束, 上部为自由边界。计算所采用的岩体参数是将工程勘察得到的岩块参数, 依据重庆市地方标准《地质灾害防治工程设计规范》^[13]经折减而得。砂岩弹性模量取 2.85 GPa, 泊松比为 0.3, 密度为 2.70 g/cm³, 凝聚力取 0.7 MPa, 内摩擦角为 39°, 初衬厚度取 20 cm, 桩直径取 2 m。

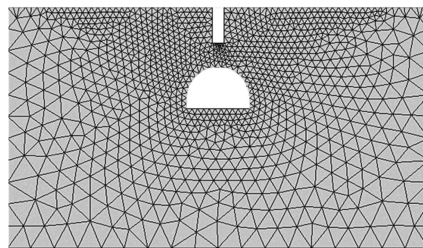


图 1 桩-隧模型单元划分

Fig.1 Elements division of pile-tunnel model

3.2 桩与隧洞水平距离对安全系数的影响分析

取桩基底部荷载 1 000 t, 桩埋深 5 m, 变换桩与隧洞之间的水平距离(桩位于隧道跨度范围之内)设计方案见表 1, 计算结果如图 2 所示。

表 1 桩基与隧道不同水平距离的安全系数
Table 1 Safety factors of deferent horizontal distances of pile and tunnel

方案	有无底部衬砌	桩基与隧道 水平距离/ m	计算的安全系数
1	无	0	2.36
		2	2.31
		3	2.28
		7	2.36
		9	2.41
		11	2.44
2	有	0	2.51
		2	2.88
		3	2.92
		7	2.93
		9	2.97
		11	3.01

两种方案计算桩基础位于隧道范围内时 (0~5 m), 随桩与隧道水平距离的变化对应的隧道安全系

数变化。当隧道底部没有衬砌时安全系数随桩与隧道水平距离的增大而减小,而方案 2,当底部有衬砌时,安全系数随着桩基与隧道水平距离的增大而增大。这是因为两种情况下隧洞破裂面形成的过程不同,隧洞底部无衬砌约束,拱脚处围岩容易在力的作用下发生较大变形,当桩偏离隧洞中心线时,破裂面从桩底贯通至拱脚处,如图 2 所示,而隧洞底部衬砌形成刚性支护,拱脚处围岩不会发生较大变形,破裂面沿着最短的路径从桩底贯通至隧洞拱肩,如图 3 所示。



(a) 桩基位于隧道顶部的等效塑性应变图



(b) 桩基距隧道顶部 2 m 的等效塑性应变图

图 2 桩基对隧道的影响
Fig.2 Influences while pile



(a) 桩基位于隧道顶部的等效塑性应变图



(b) 桩基距隧道顶部 2 m 的等效塑性应变图

图 3 桩基对隧道的破坏图
Fig.3 Damages while pile

从表 1 可以看出,底部有衬砌约束的隧道安全系数比没有衬砌约束的隧道高,当隧道与桩基的水平距离为 3 m 时,有底部衬砌的隧道的安全系数比无底部衬砌隧道大 0.6 以上。

当桩基础位于隧道范围外(>6 m)时,随着桩与隧道的距离加大,不论隧道底部有无衬砌,计算的安全系数都越来越大,桩对隧道的影响减小。通过计算可知,当桩与隧道侧墙的距离超过 1 倍洞径后,安全系数变化很小,超过此距离后模型由隧道的破坏转变成桩基发生破坏,此时桩基发生破坏,此距离理解为桩基与隧道相互影响的临界距离。

3.3 桩埋深对安全系数的影响分析

当桩基位于隧道范围内桩底荷载取 10 MN、桩径 2 m 时,随着桩埋深的增大,计算的安全系数越来越小,见表 2,这是由于桩与隧道的距离越来越小,桩基对隧道的影响也就越来越大,隧道的安全系数就越来越小。将表 2 中数据绘成图,如图 4 所示。

表 2 不同桩基埋深的隧道安全系数
Table 2 Tunnel safety factors of different depth of pile

桩与隧道水平距离 / m	桩的埋深 / m	安全系数计算值
0	5.0	2.36
	6.0	2.16
	7.0	2.00
3	5.0	2.28
	6.0	2.00
	7.0	1.90
15	5.0	2.96
	6.0	2.98
	7.0	3.03

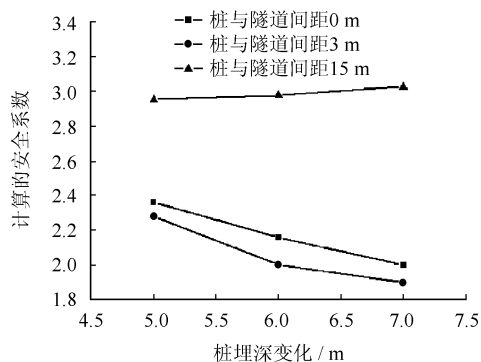


图 4 安全系数随桩基埋深变化图
Fig.4 Safety factor variation with the depth of pile foundation

当桩基距隧道的距离超过隧道 1 倍洞径后,桩基的埋深对隧道安全系数影响很小,此时桩基础的

破坏与隧道安全系数基本无关。

3.4 桩基荷载变化对安全系数的影响分析

当桩埋深 5.0 m、桩径为 2.0 m 时, 桩底荷载变化。桩位于隧道范围内时计算的隧道安全系数见表 3, 变化如图 5 所示。从计算结果可以看出, 随着桩底荷载增大安全系数越来越小, 荷载从 10 MN 增大到 15 MN 时, 两种方案安全系数减小的幅度都很大, 在 0.5 以上, 当荷载从 15 MN 增大到 20 MN 时, 两种方案安全减小幅度变小在 0.3 左右。随着荷载的增大, 隧道安全系数降低很大, 变得越来越不安全, 应该引起重视。

表 3 不同桩基荷载时隧道安全系数
Table 3 Tunnel safety factors of different loads of pile

桩与隧道水平距离 / m	桩底荷载 / MN	安全系数
0	10	2.36
	15	1.85
	20	1.56
3	10	2.28
	15	1.79
	20	1.52

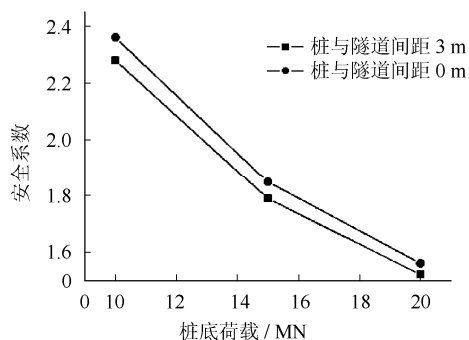


图 5 安全系数随桩基荷载变化图

Fig.5 Safety factor variation with the loads of pile foundation

4 结 论

(1) 桩基与隧道的影响存在一个临界距离, 当超过此临界距离后, 破坏模式由隧道的破坏变为桩基的破坏。计算表明, 桩基与隧道影响的临界距离为距隧道侧墙约 1 倍洞径。

(2) 桩基荷载的变化对隧道安全系数有较大影响, 荷载增大 1 倍, 安全系数约减小 1/4, 隧道的安全性降低, 建议浅埋隧道上不宜修建高层, 避免对隧道造成安全隐患。

(3) 当桩位于隧道围岩范围内时随着桩埋深的增加, 隧道接近桩基时, 隧洞安全系数减小; 当桩与隧道的距离大于某临界值时, 桩对隧道的影响

小; 当桩基位于隧道围岩范围时, 建议桩底与隧道拱顶的距离至少大于 5 m, 以保证隧道的安全。

(4) 对于初衬隧洞, 当桩位于洞跨范围以内时, 随着桩与隧洞中心线距离的增大安全系数减小; 当桩位于隧洞跨度范围之外时, 随着桩与隧洞中心线距离的增大安全系数增大。对于二次衬砌的隧洞, 安全系数都是随着桩与隧洞中心线距离的增大安全系数增大。建议隧道上方有桩基荷载情况下, 尽快进行二衬施工。

参 考 文 献

- [1] 黄茂松, 张宏博, 陆荣欣. 浅埋隧道施工对建筑物桩基的影响分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1 379—1 383.
HUANG Mao-song, ZHANG Hong-bo, LU Rong-xin. Analysis of pile responses caused by tunneling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(8): 1 379—1 383.
- [2] 杨永平, 周顺华, 庄丽. 软土地区地铁盾构区间隧道近接桩基数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(4): 561—565.
YANG Yong-ping, ZHOU Shun-hua, ZHUANG Li. Numerical Simulation Analysis of influence of shield excavation tunnel close on the piles of a building[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2006, 2(4): 561—565.
- [3] 王炳军, 李宁, 柳厚祥. 地铁隧道盾构法施工对桩基变形与内力的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3(3): 35—40.
WANG Bing-jun, LI Ning, LIU Hou-xiang. Effects of shield tunneling on adjacent existing loaded pile foundations[J]. **Journal of Rail Way Science and Engineering**, 2006, 3(3): 35—40.
- [4] NANUEL Melis, LUIS Medina, JOSE Na Rodriguez. Prediction and analysis of subsidence Induced by shield tunneling in the Madrid metro extension[J]. **J. Can. Geotech.**, 2002, 139: 26—35.
- [5] OLIVER Deck et al. Taking the soil-structure interaction into account in assessing the loading of a structure in a mining subsidence area[J]. **Engineering Structures**. 2003, 25: 435—448
- [6] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343—346.

- ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, et al. Analysis of safety factors of slope by strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(3): 343—346.
- [7] 徐干成, 郑颖人. 岩石工程中屈服准则应用的研究[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(2): 93—99.
- XU Gan-cheng, ZHENG Ying-ren. Study of yield criteria of rock engineering[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1990, 12(2): 93—99.
- [8] 赵尚毅, 郑颖人, 邓卫东. 用有限元强度折减法进行岩质滑坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 254—260.
- ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, DENG Wei-dong. Stability analysis of rock slope by strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(2): 254—260.
- [9] 张鲁渝, 时卫民, 郑颖人. 平面应变条件下的土坡稳定的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 487—490.
- ZHANG Lu-yu, SHI Wei-min, ZHENG Ying-ren. Finite element analysis of slope stability under plane strain condition[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(4): 487—490.
- [10] GRIFFITHS D V. Lane PA slope stability analysis by FEM[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(3): 387—403
- [11] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332—336.
- ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, ZHANG Yu-fang. Study on the slope failure criterion in strength reduction finite element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(2): 332—336.
- [12] 邱陈瑜, 郑颖人. 基于有限元强度折减法的隧洞安全系数研究与应用[硕士学位论文D]. 重庆: 后勤工程学院, 2009.
- [13] 重庆市地质环境检测总站. DB50/5029—2004 地质灾害防治工程设计规范[S]. 重庆市: [出版者不祥], 2004.
-
- 上接第 259 页
- LIU Han-dong. Analysis and computation of sliding wedge in rockmass considered influence of earthquake historical time[J]. **Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power**, 1991, (4): 35—40.
- [12] 王思敬, 薛守义. 岩体边坡楔形体动力学分析[J]. 地质科学, 1992, (2): 177—182.
- WANG Si-jing, XUE Shou-yi. Dynamic analysis of wedge sliding on rock slopes[J]. **Scientia Geologica Sinica**, 1992, (2): 177—182.
- [13] 薛守义, 王思敬, 刘建中. 块状岩体边坡地震滑动位移分析[J]. 工程地质学报, 1997, 5(2): 131—136.
- XUE Shou-yi, WANG Si-jing, LIU Jian-zhong. Analysis of sliding displacements of rockmass on slopes earthquake[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1997, 5(2): 131—136.
- [14] PAUL B, THOMAS T, PETER M, et al. Structural and hydrogeological characterization of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay (Mont Terri Project, Switzerland)[J]. **Applied Clay Science**, 2004, 1—20
- [15] SHENG Q, YUE Z Q, LEE C F, et al. Estimating the excavation disturbed zone in the slopes of the Three Gorges Project China[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 2002, 39: 165—184.
- [16] 肖明, 龚玉锋, 俞裕泰. 西龙池抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定三维非线性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 557—561.
- XIAO Ming, GONG Yu-feng, YU Yu-tai. Three dimensional stability analysis on surrounding rock of underground house of Xilongchi pumped storage hydro-power station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(5): 557—561.
- [17] 祁生文. 考虑结构面退化的岩质边坡地震永久位移研究[J]. 岩土工程学报, 2007, (3): 452—457.
- QI Sheng-wen. Evaluation of the permanent displacement of rock mass slope considering deterioration of slide surface during earthquake[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, (3): 452—457.