

DOI: 10.11779/CJGE2014S1031

土岩组合基坑安全风险预警标准探讨

鲍树峰^{1, 2, 3}, 莫海鸿³, 王友元^{1, 2}, 杨春山³, 黄海滨³, 侯明勋³, 陈凌伟³

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;
3. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘要: 土岩组合基坑的安全风险预警标准目前主要沿用现有相关规范中的监控标准, 这种做法缺乏针对性。为了更有效地指导土岩组合基坑施工, 对土岩组合基坑的破坏模式进行了定性分析, 并对依托工程典型施工断面进行了三维有限元分析和现场监测, 然后, 深入对比分析了有限元分析结果和现场监测结果。研究指出: ①围护墙的水平位移可作为主要的安全风险预警指标, 支撑/土钉/锚杆轴力可作为辅助指标; ②围护墙水平位移最大值、水平位移最大值变化速率、水平位移最大值与基坑开挖深度的比值、支撑/土钉/锚杆轴力值与开挖深度范围内土压力的比值等四个特征参数可作为土岩组合基坑安全风险预警指标特征参数; ③建立了相应的安全风险预警标准体系, 同时认为该依托工程土岩基坑的设计过于保守, 从而导致过高的施工成本, 因此有必要进行优化设计。

关键词: 土岩组合基坑; 破坏模式; 安全风险预警指标; 安全风险预警标准

中图分类号: TU473.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S1-0180-06

作者简介: 鲍树峰(1982-), 男, 江西省婺源人, 博士研究生, 工程师, 主要从事软基处理、桩基工程以及基坑工程方面的研究工作。E-mail: bshufeng@gzucc.com。

Warning standards of safety risk for foundation pits of soil and weathered rock stratum

BAO Shu-feng^{1, 2, 3}, MO Hai-hong³, WANG You-yuan^{1, 2}, YANG Chun-shan³, HUANG Hai-bin³,
HOU Ming-xun³, CHEN Lin-wei³

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 2. CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation, Guangzhou 510230, China; 3. School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 51064, China)

Abstract: For the foundation pit consisting of soil and weathered rock stratum, at present, the warning standards of safety risk follow the existing related specifications. They lack pertinence. To more effectively guide the construction of the foundation pit consisting of soil and weathered rock stratum, the failure modes are qualitatively analyzed. Based on an related project, a typical cross section is computed using the three-dimensional finite element method and field monitoring. After synthetic analysis of the monitoring and calculated results, it is pointed out that: (1) the horizontal displacement of retaining structures is a major warning index, and the axial force of inner bracing / soil nailing / anchor bar is auxiliary; (2) the characteristic parameters of warning indexes are the maximum horizontal displacement of retaining structures, the maximum rate, the ratio of the maximum horizontal displacement to excavation depth, the ratio of axial force to earth pressure in the range of excavation depth; (3) the appropriate warning system is established, and compared with the existing related warning index, the design of the above-mentioned foundation pit is too conservative, resulting in high cost of construction, so it is necessary to optimize the design.

Key words: foundation pit of soil and weathered rock stratum; failure mode; warning index; warning standard

0 引言

基坑工程(特别是大型基坑工程)项目的建设, 既是传统工程技术的应用, 又是现代科学技术的一个重要载体, 建设过程中涉及到了大量的不确定因素。随着基坑开挖深度的增加、规模的增大, 面临的风险也越来越多, 而且这些风险因素之间的交叉影响使风

险呈现出多层次性, 风险所导致的损失规模也越来越大^[1]。

基坑工程安全风险预警的关键是获取准确有效的预警指标及其预警值。通过研究基坑工程的失效模式来确定合理的基坑安全风险预警指标, 可使风险预警

指标满足对风险事故具有指向性、可行性和敏感性的要求^[2]。

土岩组合基坑的失效模式不完全相同于一般基坑(包括软土基坑)。然而, 目前, 对于土岩组合基坑而言, 其安全风险预警标准仍然是沿用现有相关规范中的监控标准^[3]。工程实践表明: 这种做法针对性不强, 致使监测工作缺乏重点, 从而导致过高的施工成本。

鉴于此, 下文先对土岩组合基坑的失效模式进行分析, 确定此类基坑工程安全风险指向性最强、可行性最好、最敏感的安全风险预警指标及其特征参数, 然后, 以贵广铁路佛山隧道为依托工程, 对其境内的土岩组合基坑典型断面的施工过程进行三维有限元分析, 并结合现场相关监测数据, 建立该工程土岩组合基坑的预警标准体系, 拟为后续的施工监测工作以及同类工程的施工监测工作提供借鉴。

1 土岩组合基坑安全风险预警指标及其特征参数的确定

1.1 安全风险预警指标的确定

土岩组合基坑一般位于有一定厚度的第四系地层覆盖的基岩区域。地势高的地方, 覆盖有薄层的第四系地层; 地势低洼处, 发育有较厚的第四系地层。其地下水类型一般以基岩裂隙水和第四系潜水为主, 水量一般不多。土岩组合基坑开挖至一定深度后, 基础持力层为强风化带、中风化带或微风化带岩体, 属于岩质基坑。

此类基坑的稳定性主要受以下几方面影响: ①上覆土层厚度。②下卧岩体的风化程度和成因类型。当基坑下卧岩体为强风化时, 一般接近于散体状态, 基坑边坡稳定性较差; 当基坑下卧岩体为泥质的碎屑沉积岩或片状的浅变质岩时, 如泥岩、黏土岩、千枚岩、片岩、板岩等构成的基坑, 边坡稳定性较差, 且受地下水的软化影响较大。③基坑支护类型。④止水帷幕施工, 尤其是在第四系地层和基岩接触面位置。⑤岩体部分的开挖或爆破方式^[4-8]。

基坑可能的破坏模式在一定程度上揭示了基坑的失稳形态和破坏机制, 是基坑稳定分析和施工监测的基础^[4]。结合上述土岩组合基坑的特点可知, 其破坏模式与土质基坑不完全相同, 主要有: ①支撑/土钉/锚杆的设计强度不够、支撑架设偏心较大、支撑架设不及时或围护墙自由面过大使已加支撑/土钉/锚杆轴力过大, 导致围护墙向坑内发生倾倒破坏。②设计不当造成围护墙强度不足而使围护墙发生剪切破坏或折断, 导致基坑整体失稳。③高估了基坑下卧岩体的强度, 围护墙嵌岩深度不够致使基坑发生踢脚破坏。这3类破坏模式有些是设计不当引起, 有些是施工不当

造成, 但事故的表征均涉及到围护墙发生过大变形和支撑/土钉/锚杆轴力过大2个方面。

综上所述, 土岩组合基坑围护墙的水平位移对其安全风险状态具有很好的指向性, 对风险事故也十分敏感, 且工程中对它的测量相对更加普遍和可行, 因此, 应重点对土岩组合基坑的围护墙水平位移进行分析, 了解其变化规律, 并以此分析土岩组合基坑的安全性。另外, 也需要对敏感性较强的监测项目, 如支护结构应力(如支撑/土钉/锚杆轴力), 给予适当的关注。

1.2 安全风险预警指标特征参数的确定

围护墙的水平位移可以看成是由整体位移和基本变形两部分复合而成, 即为复合变形模式。基本变形模式一般为正三角形、倒三角形或抛物线型, 因此, 围护墙的水平位移一般符合以下3种复合模式, 见图1。

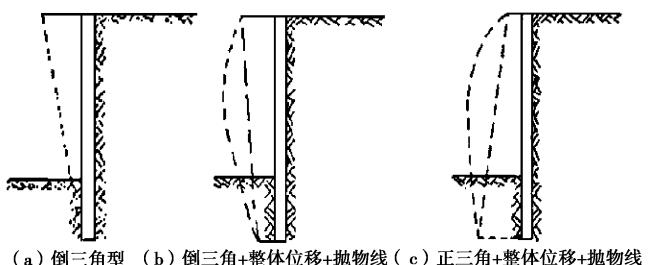


图1 围护墙复合变形模式示意图

Fig. 1 Composite deformation modes of retaining structures

然而, 实际工程的围护墙变形是很复杂的, 它受多种因素的影响, 图1只是一种近似的描述。但总体说来, 围护墙变形的衡量指标主要包括围护墙的最大水平位移及其位置, 以及围护墙顶部和底部的水平位移。

也有很多研究资料表明, 基坑失效前进入可预警阶段时, 围护墙的变形模式主要反映在围护墙水平位移值较大, 或者位移速率突然增大。因此, 为了更好地反映围护墙的变形特征, 以便及时地了解基坑的安全状态, 可将围护墙水平位移最大值 δ_{hm} 、水平位移最大值变化速率以及“水平位移最大值 δ_{hm} 与基坑开挖深度 H_e 的比值 δ_{hm}/H_e ”3个特征参数作为土岩组合基坑安全风险预警指标特征参数。

另外, 基坑开挖过程中支撑/土钉/锚杆轴力的大小与开挖深度密切相关, 因此, 类似地, 可将支撑/土钉/锚杆受力的特征参数定义为“支撑/土钉/锚杆轴力值与开挖深度范围内土压力的比值”, 并以此作为土岩组合基坑安全风险的辅助预警指标特征参数。

2 工程应用

2.1 工程概况

贵广铁路佛山隧道基坑里程段 DK799+450~

表 1 典型施工断面土层分布及物理力学参数

Table 1 Soil distribution of typical cross section and physical and mechanical parameters

土层编号	土层名称	厚度 /m	天然重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	弹性模量 /MPa	泊松比
① ₂	素填土	2.1	17	12	12	8	0.38
② ₁	淤泥	3.9	17	8	4	4	0.42
② ₂ -2	粉砂	1.6	18	0	26	22	0.32
② ₂ -2	淤泥质土	0.9	17	12	5	6	0.38
② ₃ -2	粉质黏土	2.3	20	29	16	20	0.34
⑦ ₂ -2	强风化泥质粉砂岩	5.6	22	100	32	200	0.28
⑦ ₂ -3	微风化泥质粉砂岩	9.8	24	150	34	350	0.25

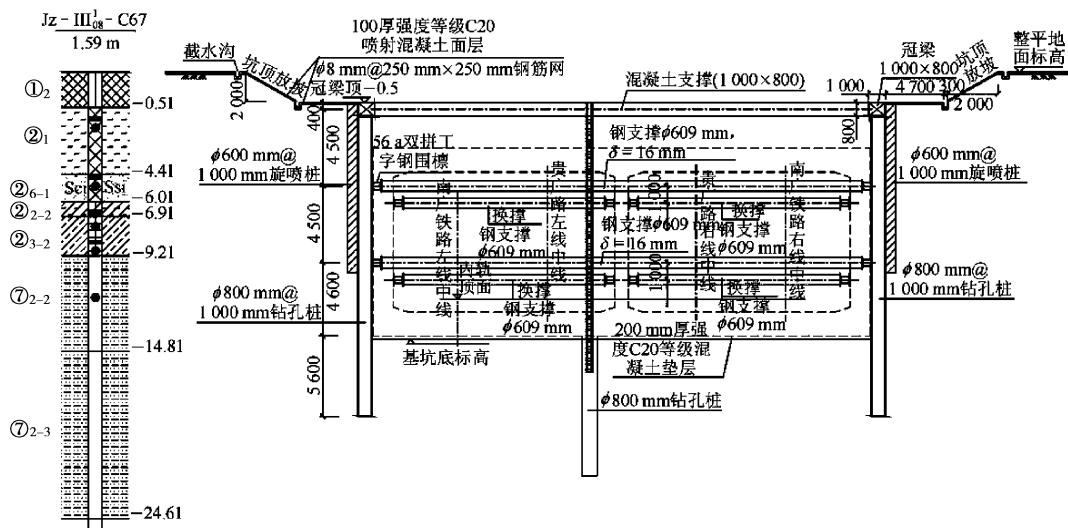


图 2 典型施工断面剖面图

Fig. 2 Profile of typical cross section

DK800+750 为土岩组合基坑, 采用明挖顺作法进行施工, 建筑长度为 1 300 m, 开挖深度为 7.023~14.642 m(未计坑顶以上基坑放坡高度), 基岩顶面标高高出坑底标高 0.827~15.649 m, 钻孔灌注桩嵌岩深度 5.530~25.960 m。

相对而言, 上述里程段中 DK800+510~DK800+750 范围内的工程水文地质较差, 其土层分布详见表 1。因此, 本文选取该里程段中典型施工断面 DK800+542.5 进行相关分析。

由于现场施工多方面原因, 该典型断面钢支撑是在超挖一定深度后进行安装的, 未严格按照设计要求进行, 表 2 为支撑安装时现场施工情况和设计要求的对比表。

表 2 支撑安装时开挖深度

Table 2 Depth of excavation of construction for inner bracing

支撑名称	支撑安装时设计开挖深度/m	支撑安装时实际开挖深度/m
混凝土支撑	0.0	0.0
第一道钢支撑	5.4	6.4
第二道钢支撑	9.9	11.0

注: 以混凝土支撑顶面标高为起算点。

2.2 典型施工断面数值模拟分析与现场监测数据对比分析

鉴于基坑开挖施工中许多情况下其周围的土体处于塑性工作状态, 土体采用理想弹塑性模型进行模拟。由于 Mohr-Coulomb 模型参数选取较简单且具有较好的精确性, 因此, 本文基于有限元程序 Midas GTS 采用 Mohr-Coulomb 模型对典型施工断面 DK800+542.5 进行施工模拟分析。

为了较为真实的模拟基坑开挖的实际情况, 采用三维模型进行有限元数值模拟分析, 其土层主要物理力学参数见表 1。计算所选取的基坑开挖深度为 14 m(不含 2 m 的基坑放坡高度), 计算剖面图见图 2。

钻孔灌注桩、钢筋砼支撑、砼冠梁和砼腰梁, 均采用 C30 砼浇筑, 计算模型和计算参数为: 线弹性模型, 弹性模量 $E=3.0\times 10^4 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu=0.22$ 。

钢支撑和钢腰梁均采用 Q235, 计算模型和计算参数为: 线弹性模型, 弹性模量 $E=2.0\times 10^5 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu=0.3$ 。

(1) 不同工况下围护结构水平位移

根据表 2、图 3~4 可知:

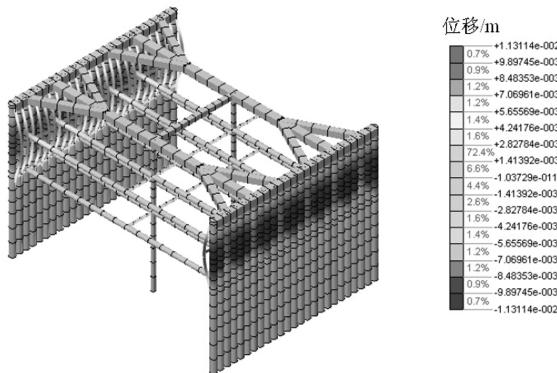


图 3 基坑开挖到坑底时, 主体结构变形计算结果

Fig. 3 Computed deformation of main structure after excavation of foundation pit

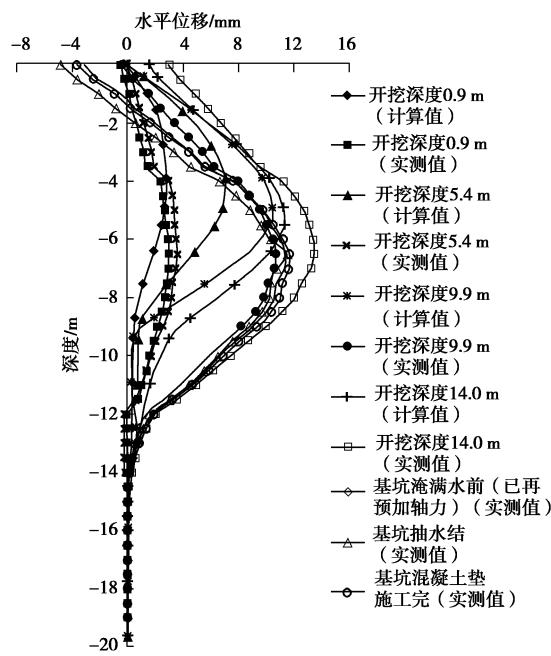


图 4 不同工况下围护墙侧向位移对比

Fig. 4 Lateral displacement of guard piles under different working conditions

a) 当“及时安装支撑”时, 开挖深度为 14.0 m 时, 围护桩桩顶以下 5.5 m 深度处向坑内发生最大水平位移计算值为 11.27 mm; 而根据现场实际施工情况 (如表 2 所示, 超挖 1.0 m 左右安装支撑), 开挖深度为 14.0 m 时, 围护桩桩顶以下 6.5 m 深度处向坑内发生最大水平位移实测值为 13.47 mm, 未超出设计警戒值 50 mm。

b) 当考虑“坑底未进行混凝土垫层施工 (即坑底完全暴露) 时, 突降暴雨致使基坑内积水 14 m 深 (即水面与基坑混凝土支撑顶面标高平齐), 然后坑内积水完全被抽干”这一最不利工况时, 围护桩桩顶以下 6.5 m 深度处向坑内发生最大水平位移实测值为 11.53 mm。

c) 对于“基坑坑底混凝土垫层施工完”这一工况,

围护桩桩顶以下 6.5 m 深度处向坑内发生最大水平位移实测值为 11.69 mm。

(2) 不同工况下支撑轴力

基坑开挖到坑底, 主体结构的受力计算结果如图 5 所示, 不同开挖深度下的支撑轴力如图 6 所示, 不同深度下的支撑轴力 (实测值) 如图 7 所示。

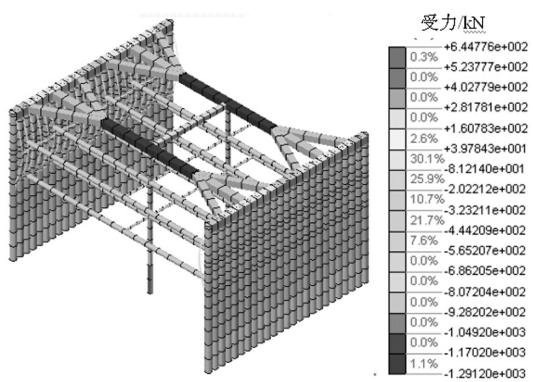


图 5 基坑开挖到坑底, 主体结构的受力计算结果

Fig. 5 Computed force condition of main structure after excavation of foundation pit

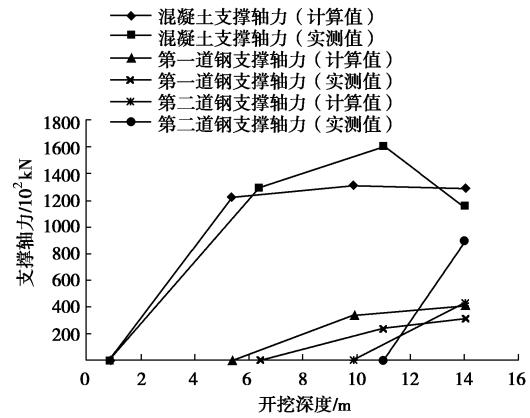


图 6 不同开挖深度下的支撑轴力

Fig. 6 Axial force of inner bracing at different excavation depths

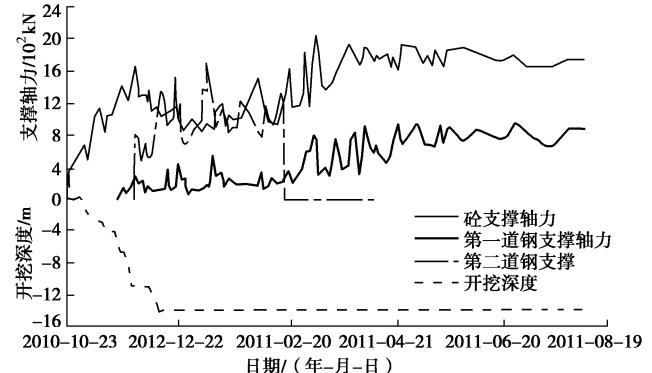


图 7 不同深度下的实测支撑轴力时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of measured supporting axial force at different excavation depths

根据图 5~7 可知:

a) 支撑轴力计算值与实测值不是很吻合, 主要原因是: 实测值反映的是“超挖 1.0 m 左右再安装钢支撑时”的情况, 而计算值反映的是及时安装钢支撑时的情况。但二者均表明: 该基坑开挖过程中, 混凝土支撑和第二道钢支撑的轴力均较第一道钢支撑的大, 混凝土支撑和第二道钢支撑起主导作用。

b) 当安装混凝土支撑后进行基坑挖方过程中, 其支撑轴力随开挖深度增大而增大; 但当架设第一道钢支撑后继续进行基坑开挖时, 第一道钢支撑分担了混凝土支撑的一部分支撑轴力; 在后续支撑施工时, 同理类推。

c) 基坑底板施工完后, 随着基坑主体结构施工的进行, 第二道钢支撑先拆除。如图 7 所示, 第二道钢支撑拆除后(支撑轴力降为 0 kN), 混凝土支撑第一道钢支撑的轴力明显有所增长; 随着基坑主体结构的继续施工, 主体结构分担了一份支撑轴力, 2 道支撑轴力的增长趋势逐渐变缓, 最后均趋于稳定, 而其中几次测试值波动较大主要是由于基坑两侧的施工活动引起的, 如机械行走等。

d) 2011 年 6 月 13 日~2011 年 6 月 23 日, 基坑坑内积满水至基坑坑内抽水结束这一阶段的支撑轴力先是减小, 然后, 随着坑内积水不断被抽走, 支撑轴力又逐渐增大。2011 年 6 月 28 日, 基坑底板施工完后, 混凝土支撑的轴力显著降低, 第一道钢支撑的轴力增长趋势明显变缓。2011 年 7 月 28 日以后, 2 根支撑的轴力值趋于稳定, 2 根支撑的轴力值分别为 1 600 和 813 kN, 略大于计算值, 但均未超出设计警戒值。

2.3 安全风险预警标准探讨

根据第 1.2 节分析可知, 基坑安全预警指标的特征参数为围护结构水平位移最大值 δ_{hm} 、水平位移最大值变化速率、水平位移最大值 δ_{hm} 与基坑开挖深度 H_e 的比值 δ_{hm}/H_e 、支撑轴力值与开挖深度范围内土压力的比值, 因此, 该典型施工断面 DK800+542.5 的监测数据可通过这 4 个参数来建立预警标准体系。

根据第 2.2 节的分析, 基坑开挖过程中:

(1) 围护桩水平位移最大值 δ_{hm} 为 13.47 mm(小于现行规范中的规定值和设计值 50 mm), 位于桩顶以下 6.5 m 处;

(2) 水平位移最大值 δ_{hm} 与基坑开挖深度 H_e 的比值 δ_{hm}/H_e 为 0.096% (数值计算的比值为 0.081%);

(3) 水平位移最大值 δ_{hm} 的变化速率最大值为 0.81 mm/d(12 月 9 日~12 月 12 日, 5.57~8.01 mm)。

根据图 6~7, 基坑开挖过程中:

(1) 砼支撑轴力与开挖深度范围内土压力的比值在 0.70~7.22 之间 (数值计算的比值为 1.09~9.06,

可作为基坑开挖前的预警标准参考值);

(2) 第一道钢支撑轴力与开挖深度范围内土压力的比值在 0.06~0.81 之间 (数值计算的比值为 0.34~0.57);

(3) 第二道钢支撑轴力与开挖深度范围内土压力的比值在 0.58~1.47 之间 (数值计算的比值为 0.36)。

根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)第 4.2.4 条考虑安全系数为 2.0, 贵广铁路佛山隧道基坑里程段 DK799+450~DK800+750 土岩组合基坑的安全预警标准体系建议为如下:

(1) 围护桩水平位移

① $\delta_{hm} < 30 \text{ mm}$; ② $\delta_{hm}/H_e < 0.20\%$ (数值计算的比值为 0.17%, 可作为基坑开挖前的预警标准参考值); ③ δ_{hm} 的变化速率最大值 $< 2.0 \text{ mm/d}$ 。

(2) 支撑轴力

① 砼支撑轴力与开挖深度范围内土压力的比值 < 15 (数值计算的比值 < 18 , 可作为基坑开挖前的预警标准参考值); ② 第一道钢支撑轴力与开挖深度范围内土压力的比值 < 1.6 (数值计算的比值 < 1.1 , 可作为基坑开挖前的预警标准参考值); ③ 第二道钢支撑轴力与开挖深度范围内土压力的比值 < 3.0 (数值计算的比值 < 0.7 , 可作为基坑开挖前的预警标准参考值)。

不难发现, 上述建立的安全预警标准体系中的报警值小于现有规范中相关监测报警值的下限值, 换句话说, 该依托工程土岩基坑的设计过于保守, 从而导致过高的施工成本, 因此有必要进行优化设计。

3 结 论

(1) 通过对土岩组合基坑的失效模式进行了深入分析, 确定了围护墙的水平位移作为此类基坑的主要安全风险预警指标, 并以支撑/土钉/锚杆轴力作为辅助指标。

(2) 基于土岩组合基坑的安全风险预警指标, 确定了“围护墙水平位移最大值 δ_{hm} 、水平位移最大值变化速率、水平位移最大值 δ_{hm} 与基坑开挖深度 H_e 的比值 δ_{hm}/H_e 、支撑/土钉/锚杆轴力值与开挖深度范围内土压力的比值”等 4 个特征参数作为土岩组合基坑安全风险预警指标特征参数。

(3) 对依托工程土岩组合基坑的典型施工断面进行了有限元分析和现场监测, 并结合其三维有限元分析结果和现场监测结果建立了该依托工程土岩组合基坑的安全预警标准体系。然后, 与现有规范中的相关监测报警值进行了对比, 指出: 该依托工程土岩基坑的设计过于保守, 从而导致过高的施工成本, 因此有

必要进行优化设计。

参考文献:

- [1] 张瑾. 基于实测数据的深基坑施工安全评估研究[D]. 上海: 同济大学, 2008. (ZHANG Jin. Safety evaluation analysis of deep excavating foundation based on the field measured data[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese))
- [2] 顾雷雨. 深基坑施工中的安全风险预警研究[D]. 上海: 同济大学, 2009. (GU Lei-yu. Study on safety risk early-warning standard during construction of the deep excavation engineering[D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese))
- [3] GB50497—2009《建筑基坑工程监测技术规范》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (GB50497—2009 Technical code for monitoring of building foundation pit engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))
- [4] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))
- [5] 常士彪, 张苏民. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (CHANG Shi-biao, ZHANG Su-min. Project geology manual[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007. (in Chinese))
- [6] 肖树芳, 杨淑碧. 岩体力学[M]. 北京: 地质出版社, 1987. (XIAO Shu-fang, YANG Su-bi. Rock mechanics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987. (in Chinese))
- [7] 沈明荣, 陈建峰. 岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006. (SHEM Ming-rong, CHEN Jian-feng. Rock mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2006. (in Chinese))
- [8] 唐大雄, 张文殊. 工程岩土学[M]. 北京: 地质出版社, 1999. (TANG Da-xiong, ZHANG Wen-shu. Rock and soil engineering[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. (in Chinese))

(本文责编 明经平)