

DOI: 10.11779/CJGE2014S2059

基坑开挖对坡顶建筑物沉降及稳定性影响

沈 简, 邱子峰, 徐晓瑜

(武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 某边坡顶部有一多层建筑物, 建筑物距边坡坡肩边缘的最小距离为 5.9 m, 边坡采用“双排桩”支护, 但其嵌固深度不足。由于坡脚开发住宅楼, 平整场地, 在距离既有边坡坡脚 9 m 处开挖地下室基坑(深度 4 m), 诱发了边坡滑动, 导致建筑物变形。对建筑物进行变形观测, 分析监测结果, 得出了“建筑物发生显著不均匀沉降、倾斜率超过允许值, 基坑开挖导致既有边坡产生了较明显的变形”的结论; 采用双曲线法、指数曲线法和灰色理论等方法进行沉降预测, 根据预测结果得出了“既有边坡需采取支护措施, 否则会发生破坏”的结论; 采用“排桩式锚杆挡墙”支护对既有边坡进行二次治理, 根据坡体可能产生圆弧滑动或折线滑动模式, 对其进行稳定性计算, 以及支护结构的内力与变形计算, 为既有边坡的治理方案提供了依据。

关键词: 基坑开挖; 坡顶; 建筑物; 沉降预测; 稳定性分析; 灰色理论

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0337-06

作者简介: 沈 简(1991-), 男, 湖北武汉人, 主要从事边坡及桩基理论方面的研究。E-mail: slshm@qq.com。

Effect of excavation of foundation pits on settlement and stability of buildings at top of slopes

SHEN Jian, QIU Zi-feng, XU Xiao-yu

(School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A multi-storey building is located at the top of a slope, and the minimum distance between the building and the slope is 5.9 m. The slope adopts double-row piles, but the embedded depth is deficient. Due to the need of construction of residential buildings, the pit excavation is done at the slope toe and obvious subsidence and deformation of building is caused. The monitoring results show that the building appears uneven subsidence, the tilt rate significantly exceeds the allowable values, and the slope has obvious deformation. The deformation and subsidence monitoring results are analyzed and predicted by using the grey theory method. According the forecast results, the supporting measures should be taken for the slope, otherwise sliding failure will happen. So, the pile-anchor retaining wall is taken to support the slope. Since a circular sliding or a fold line sliding is possible, both the circular sliding method and the fold line method are used to analyze the slope stability. The stability of pile-anchor retaining wall is also analyzed to verify the rationality of the supporting measures for the slope.

Key words: pit excavation; slope top; building; settlement prediction; stability analysis; grey theory

1 工程概况

随着城市圈的扩张, 土地资源有限性的问题日益严重, 建设部门需提高土地利用率, 因而城市开挖地下室基坑、坡顶修筑建筑物等日益增多^[1-3]。而基坑开挖可能造成既有建筑物失稳, 影响其正常使用。

某边坡长度约 262.4 m, 坡高 5.5~10.2 m(东低西高), 边坡原采用双排桩支护, 桩间注浆(见图 1)。坡顶有某建筑物, 距离边坡坡肩的最小距离为 5.9 m, 建筑物为 6 层框架结构, 面积 5017 m², 采用柱下独立桩基础。建筑物地基土层类型自上而下分别为杂填土、黏土夹碎石、泥质砂岩。杂填土土层较厚, 为 10.5~

12.8 m, 且松散, 含地下水, 其下黏土层不透水。

坡脚原高程约 35.50 m, 由于需在坡脚开发 4 栋 15 层住宅楼, 进行场地平整, 开挖至高程 33.15~33.5 m, 自西向东的开挖深度为 2.6~1.8 m, 再在距离坡脚 9 m 处开挖一层地下室基坑(深度 4 m), 从而诱发了边坡滑动, 导致坡顶建筑物变形。因此, 对边坡进行二次治理, 采用排桩式锚杆挡墙支护, 桩后土体采用旋喷加固(见图 1, 2)。同时对建筑物及边坡进行

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2014BAL05B07); 国家自然科学

基金项目(51378403)

收稿日期: 2014-07-28

变形监测, 监测点平面布置见图 3。

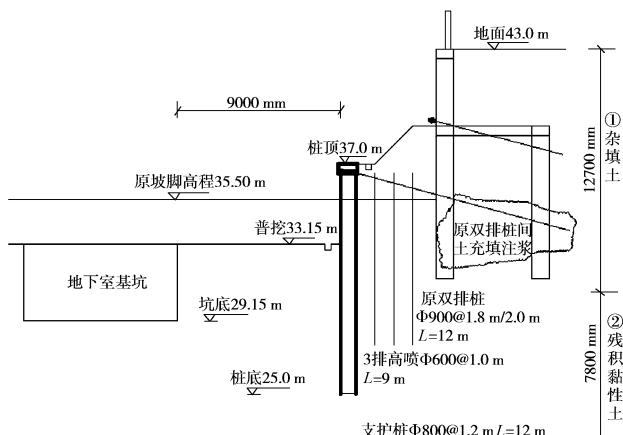


图 1 边坡支护方案

Fig. 1 Support program for slope



图 2 二次支护竣工图

Fig. 2 Completion site

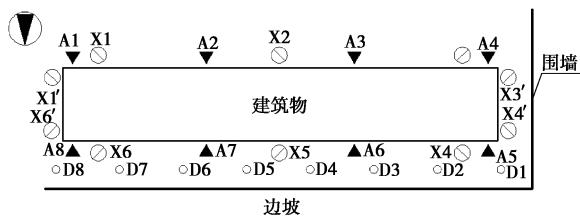


图 3 建筑物及边坡变形监测点平面布置

Fig. 3 Layout of deformation monitoring points

2 变形监测

2.1 建筑物变形监测

建筑物的纵轴轴线上设置 8 个建筑沉降观测点, 自东向西编号为: 南轴测点为 A1~A4, 北轴测点为 A8~A5。共进行 16 次观测, 各测点的累计沉降曲线见图 4。建筑物之四角、中部共设置 10 个倾斜观测点 X1~X6, 进行 8 次建筑物倾斜观测, 最终倾斜率及倾斜方向见图 5。

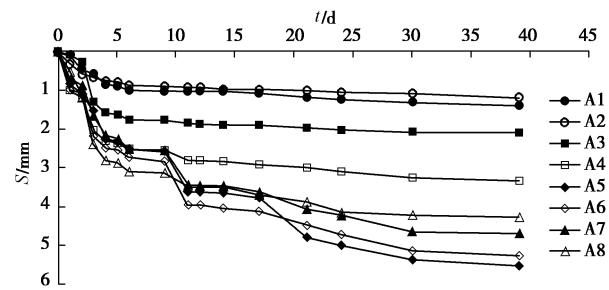


图 4 建筑物沉降 - 时间曲线

Fig. 4 Variation curves of settlement with time

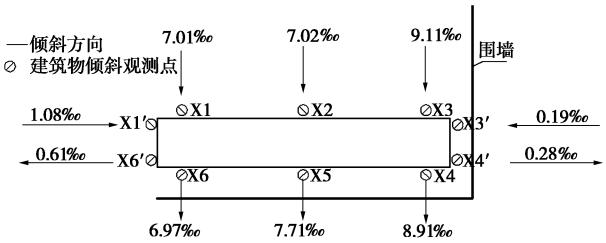


图 5 建筑物各测点的最终倾斜率及倾斜方向

Fig. 5 Final tilt rate and direction of building at each measuring point

建筑物变形监测成果分析如下:

(1) 基坑开挖导致建筑物产生了明显的不均匀沉降, 但建筑物的沉降速率不断减小, 已达到稳定。A1 测点位于建筑的东南角, 累计沉降最小, 为 1.41 mm; A5 测点位于建筑的西北角, 累计沉降最大, 为 5.54 mm。建筑物为独立桩基, 桩端持力层为黏土夹碎石, 由于观测时距建筑物正常使用达 8 个月, 上部建筑及基础荷载产生的沉降已经完成, 因此尽管本次观测的沉降值较小, 但对于桩基而言仍属较明显的附加沉降。

(2) 建筑物整体向北倾斜, 倾斜率远大于允许值, 已成危房, 应采取有效的纠偏或加固措施。根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2011) 5.3.4 条款^[4], 建筑物为 6 层宿舍楼, 建筑的整体倾斜率允许值为 4‰, 建筑物向北的整体倾斜率约为 7‰~9‰, 远大于允许值。

2.2 边坡变形监测

北侧边坡的坡肩设置了 8 个沉降、水平位移观测点, 自西向东编号为 D1~D8, 共进行 16 次沉降观测、15 次水平位移观测。各测点的累计沉降曲线见图 6, 最终水平位移及其方向见图 7。边坡变形监测结果分析如下:

(1) 各测点的累计沉降量较大, 为 8.05~30.22 mm, 其中 D8 测点的累计沉降最小, 为 8.05 mm; D3 测点的沉降最大, 为 30.22 mm。坡肩整体下陷, 表明基坑开挖使得坡体产生了较明显向北方向的滑移。

(2) 各测点的最终水平位移为 3~11 mm, 较为明显。坡肩整体产生向北方向的水平位移, 与坡体向

北滑移的特征一致。

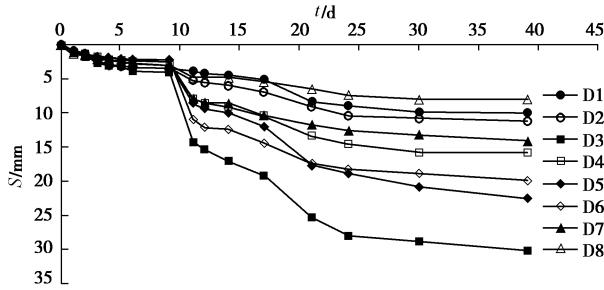


图 6 坡肩沉降 - 时间曲线

Fig. 6 Variation curves of slope shoulder with time

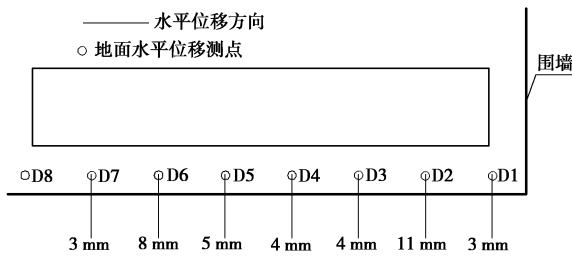


图 7 坡肩最终水平位移及方向

Fig. 7 Final horizontal displacement and direction at slope shoulder at each measuring point

3 沉降预测

根据《建筑变形测量规范》(JGJ 8—2007) 8.3.2、8.3.3 的相关要求^[5], 选取各观测点分别建立数学模型, 进行其沉降预测。

建立沉降量与时间因子关系的数学模型时, 根据《建筑变形测量规范》及经验, 选用与实际情况较吻合的双曲线法、指数曲线法和灰色理论方法, 建立沉降量与时间的模型。

3.1 计算模型^[6-13]

(1) 双曲线法

假设沉降曲线近似为双曲线, 可以用以下方程进行描述:

$$S_t = \frac{t}{\alpha + \beta \times t} \times \frac{\sigma}{\sigma_{\max}}, \quad (1)$$

式中, t 为自土方开工以来时间 (d), S_t 为 t 时刻的沉降 (mm), σ 为 t 时刻的荷载 (kPa); $\sigma = h \times \gamma$, σ_{\max} 为设计最大荷载 (kPa), h 为填方高度 (m), γ 为填方材料重度 (kN/m³), α 、 β 为从实测值求得的系数。当 $t \rightarrow \infty$, 最终沉降量 S_∞ 可用下式求得:

$$S_\infty = \frac{1}{\beta}. \quad (2)$$

(2) 指数曲线法

假定地基荷载稳定后, 沉降是按指数曲线规律变化, 则其基本方程式为

$$S_t = S_0 + \alpha(1 - e^{-\frac{t-t_0}{b}}). \quad (3)$$

令 $t_m = t + \frac{\Delta t}{2}$, 将上式对 t 求导, 写成增量形式:

$$\frac{\Delta S_t}{\Delta t} = \frac{\alpha}{b} \times (1 - e^{-\frac{t_m-t_0}{b}}). \quad (4)$$

将上式两边取对数, 并令 $y = \ln \frac{\Delta S_t}{\Delta t}$,

$$A = \ln \frac{\alpha}{b} + \frac{t_0}{b}, \quad B = -\frac{1}{b}, \quad \text{可得}$$

$$y = A + B \times t_m. \quad (5)$$

在实测沉降曲线上确定拐点 (t_0, S_0) 和 (t_{mi}, y_i) 点, 对这些点进行线性拟合, 并利用最小二乘法求出参数 A 、 B , 进而求出 α 、 b 。且当 $t \rightarrow \infty$ 时, 最终沉降量

$$S_\infty = S_0 + \alpha. \quad (6)$$

(3) 灰色系统 GM (1, 1) 算法

灰色系统算法是一种综合运用数学方法对信息不完整的系统进行预测、预报的理论和方法。其预测的思路是: 把随时间变化的随机正的数据列, 通过适当的方式累加, 使之变成非负递增的数据列, 用适当的方式逼近, 以此曲线作为预测模型, 对系统进行预测。这里使用单一变量的 GM (1, 1) 模型, 该模型要求时序数据是平稳变化的。设有 n 个沉降增量 (等时间距 Δt): $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$, 经过一次累加产生新的数列: $x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)}, \dots, x_n^{(1)}$ 。

对 $x_i^{(1)}$ 建立白化形式的微分方程:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b, \quad (7)$$

其解为

$$\hat{x}_i^{(1)}(t+1) = (x_i^{(0)} - \frac{b}{a})e^{-at} + \frac{b}{a}. \quad (8)$$

根据最小二乘法, 有

$$(a, b)^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_n, \quad (9)$$

式中

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x_1^{(1)} + x_2^{(1)}) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x_2^{(1)} + x_3^{(1)}) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x_{n-1}^{(1)} + x_n^{(1)}) & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$Y_n = (x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})^T. \quad (11)$$

将参数 a 、 b 代入式 (8) 中, 即得各时间点的沉降量。

3.2 沉降预测结果

(1) 建筑物沉降预测结果

建筑物 A1~A8 测点的最终沉降量、剩余沉降量

和已发生沉降量见表 1, 预测曲线见图 8。

从以上预测结果可知: 各测点的最终沉降量预测值为 1.42~6.68 mm, 剩余沉降量为 0.14~0.87 mm。建筑物采用柱下独立桩基础, 因此尽管各测点最终沉降量值不大, 但对桩基沉降而言仍较显著。

(2) 边坡沉降预测结果

边坡坡肩 D1~D8 测点的最终沉降量预测结果、剩余沉降量和已完成沉降量见表 2。

从以上预测结果可知: 各测点的最终沉降量预测值为 10.56~45.95 mm, 剩余沉降量为 2.31~15.73

mm。由于各测点的沉降预测值大、剩余沉降值较小, 表明若不在观测截止时及时采取有效的边坡支护措施, 该边坡将发生滑移破坏。

4 边坡稳定性计算

4.1 边坡稳定性分析^[14]

建筑物下杂填土土层较厚, 为 10.5~12.8 m, 边坡高约 9.85 m, 因此可能在该土层中产生圆弧滑动。由于杂填土层松散、饱水, 下伏残积黏性土相对隔水,

表 1 建筑物各测点的剩余沉降量

Table 1 Residual subsidence of building at each measuring point

项目	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
最终沉降量 S/mm	1.75	1.42	2.27	3.71	6.68	6.10	5.58	4.81
已完成沉降 S_1/mm	1.41	1.18	2.11	3.33	5.54	5.27	4.71	4.29
剩余沉降 ($S-S_1$) /mm	0.24	0.24	0.15	0.28	0.14	0.83	0.87	0.52

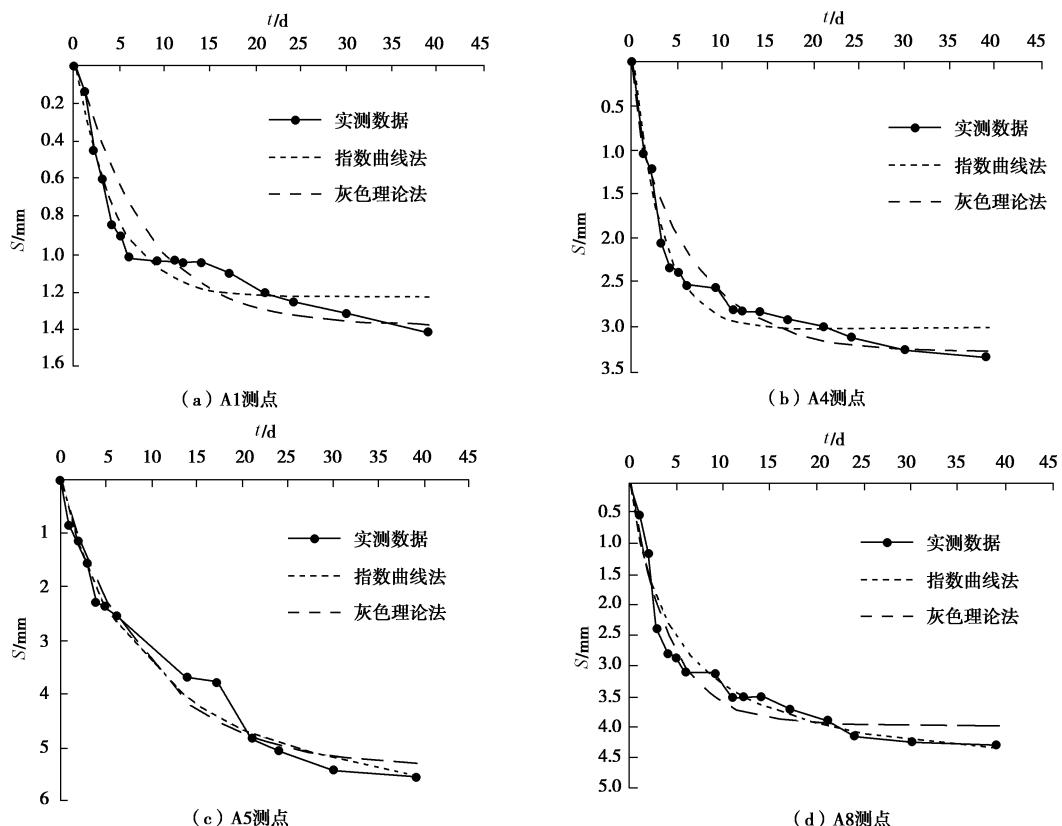


图 8 建筑物四角的预测沉降 - 时间曲线

Fig. 8 Variation curves of settlement monitoring and prediction of building with time

表 2 边坡坡肩各测点的剩余沉降量

Table 2 Residual subsidence at slope shoulder at each measuring point

项目	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
最终沉降量 S/mm	12.34	16.71	45.95	22.68	32.32	27.53	17.57	10.56
已完成沉降 S_1/mm	10.03	11.23	30.22	15.86	22.49	19.91	14.11	8.05
剩余沉降 ($S-S_1$) /mm	2.31	5.48	15.73	6.82	9.83	7.62	3.46	2.51

因此两土层的分界面长期浸水软化, 也可能沿此面产生折线滑动。两种滑动均应进行计算, 根据相关规范, 采用折线滑动法计算, 边坡稳定系数允许值 $[K]=1.35$; 采用圆弧法计算, 边坡稳定系数允许值 $[K]=1.30$ 。

各土层物理力学参数取值如下: ①杂填土: $\gamma_{\text{sat}}=19.0 \text{ kN/m}^3$, $c_{\text{cu}}=8 \text{ kPa}$, $\varphi_{\text{cu}}=18^\circ$; ②残积黏性土: $\gamma_{\text{sat}}=20.4 \text{ kN/m}^3$, $c_{\text{cu}}=35 \text{ kPa}$, $\varphi_{\text{cu}}=15^\circ$ 。

原支护为双排桩支护, 桩间注浆。板桩墙嵌固深度不足, 稳定计算时其抗滑力不予考虑, 偏于安全。坡体采用注浆加固, 因此计算时该加固范围内的杂填土层的黏聚力 c 由 8 kPa 提高到 18 kPa , 其余参数不变。

(1) 边坡沿折线滑动的稳定安全系数

暴雨工况下, 边坡沿折线滑动 (分析见图 9) 的稳定性安全系数 $K=1.353$ 。表明该段边坡折线滑动的稳定安全系数符合规范要求, 不会产生沿土层分界面的滑动破坏。

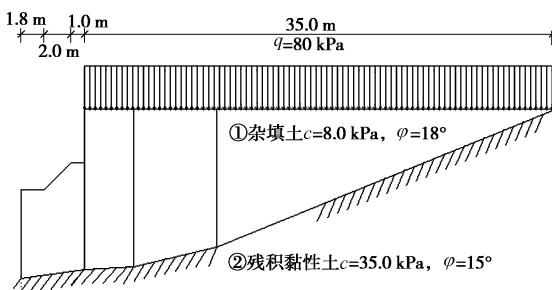


图 9 折线滑动条块划分图

Fig. 9 Sliding method of broken line

(2) 边坡在人工填土层中圆弧滑动的稳定安全系数

边坡稳定性安全系数计算结果为 $K=0.884$ (分析如图 10)。计算结果表明边坡若不加以支护, 在暴雨工况下将产生滑动, 滑动面发生在杂填土土层中。与边坡变形沉降结果吻合。

4.2 排桩式锚杆挡墙结构验算^[15]

边坡原采用双排桩支护, 基坑开挖诱发滑动后, 进行二次治理, 采用排桩式锚杆挡墙支护, 桩后土体采用旋喷加固。支护桩为人工挖孔桩 $\Phi 800 @ 1.2 \text{ m}$; 冠梁上的锚杆钻孔 $\Phi 150 @ 1.5 \text{ m}$, 倾角 15° , 设置高程 36.75 m , 长度 16 m ; 桩后的斜坡体采取 3 排旋喷桩加固 (见图 1)。

计算得边坡圆弧滑动下滑力 $S=540.66 \text{ kN/m}$ 。则作用在排桩式锚杆挡墙上的圆弧滑动剩余下滑力

$$E = [K] \sum G_{1i} \sin \alpha_i - C \left(\sum l_i + \sum l_j \right) - \tan \varphi \left(\sum G_{1i} \cos \alpha_i + \sum G_{2j} \cos \alpha_j \right) - \sum G_{2j} \sin \alpha_j = 224.09 \text{ (kN/m)} \quad (12)$$

式中, $[K]$ 为规范要求安全系数, 取 1.3。排桩的计算结果见图 11。

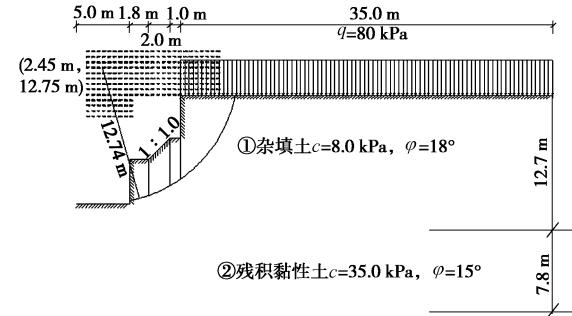


图 10 暴雨工况下边坡最危险滑裂面图

Fig. 10 Most dangerous sliding surface

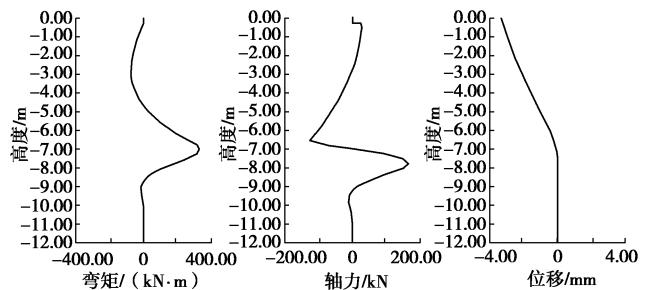


图 11 排桩内力及变形计算结果图

Fig. 11 Calculated results

桩身最大水平位移为 6.26 mm ; 桩身背侧最大弯矩 $348.32 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 面侧最大弯矩 $77.50 \text{ kN}\cdot\text{m}$; 桩身的最大剪力为 292.96 kN ; 锚杆水平拉力为 48.69 kN 。

(1) 桩身最大水平位移为 6.26 mm , 符合一级基坑支护桩水平位移不超过 40 mm 的要求。

(2) 该边坡安全等级为一级, 锚杆为永久性锚杆, 由锚杆水平压力计算出锚杆钢筋截面面积应满足: $A_s > 348.23 \text{ mm}^2$ 。支护桩的锚杆为 HRB3352Φ22, 满足要求。

计算结果表明: 结构设计满足要求, 支护方案合理。

5 结 论

(1) 由监测结果可知, 坡脚开挖基坑, 会引诱发边坡滑动及坡顶建筑物的变形。

(2) 结合监测结果, 选用相关方法建立模型, 进行沉降预测。根据预测结果, 可对已得的结论进行论证及补充。

(3) 对原边坡进行稳定性分析, 对支护结构进行验算, 可进一步验证支护方案的必要性以及合理性。

本文围绕由于坡脚开挖基坑而发生变形的某坡顶建筑物, 进行变形监测、沉降预测、稳定性分析、支

护结构验算, 为类似实际工程提供了参考。

参考文献:

- [1] 刘永良, 刘永莉, 彭小毛. 坡顶建筑物对坡下公路安全影响研究[J]. 土工基础, 2011, 25(6): 1 - 3. (LIU Yong-liang, LIU Yong-li, PENG Xiao-mao. The effect of buildings at the slope crest on a roadway at the toe[J]. Soil Engineering and Foundation, 2011, 25(6): 1 - 3. (in Chinese))
- [2] 郑朝炜. 某护坡工程边坡塌方成因浅析及处理措施[R]. 广州: 广州市市政工程设计院, 2013. (ZHEN Chao-wei. Slope landslide causes analyses and treatment measures of a slope protection project[R]. Guangzhou: Guangzhou Municipal Engineering Design Institute, 2013. (in Chinese))
- [3] 简立文. 某边坡稳定性分析与评价[J]. 岩土工程界, 2000, 12(3): 59 - 61. (JIAN Li-wen. Stability analysis and evaluation of a slope[J]. Geotechnical Engineering, 2000, 12(3): 59 - 61. (in Chinese))
- [4] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (GB 50007—2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))
- [5] JGJ 8—2007 建筑变形测量规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (JGJ 8—2007 Code for deformation measurement of building and structure[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese))
- [6] 柳治国, 陈善雄, 徐海滨. 沉降预测的非等步长灰色时变参数模型[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 101 - 105. (LIU Zhi-guo, CHEN Shan-xiong, XU Hai-bin. Unequal step lengths grey time-varying parameters model for settlement prediction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12): 101 - 105. (in Chinese))
- [7] 李洪然, 张阿根, 叶为民. 参数累计估计灰色模型及地面沉降预测[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3417 - 3421. (LI Hong-ran, ZHANG A-gen, YE Wei-min. Accumulating method GM (1, 1) model and prediction of land subsidence[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3417 - 3421. (in Chinese))
- [8] 杨涛, 李国维, 杨伟清. 基于双曲线法的分级填筑路堤沉降分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1532 - 1535. (YANG Tao, LI Guo-wei, YANG Wei-qing. Settlement prediction of stage constructed embankment on soft ground based on the hyperbolic method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1532 - 1535. (in Chinese))
- [9] 陈善雄, 王星运, 许锡昌. 路基沉降预测的三点修正指指数曲线法[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3355 - 3360. (CHEN Shan-xiong, WANG Xing-yun, XU Xi-chang. Three-point modified exponential curve method for predicting subgrade settlements[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3355 - 3360. (in Chinese))
- [10] 许锡昌. 土压力问题与基坑变形分析[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2004. (XU Xi-chang. Earth pressures and deformation analysis of deep excavation[D]. Wuhan: Institute of Rock & Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese))
- [11] 张正禄, 汪宏晨, 邓勇. 滑坡变形分析与预报的新方法[J]. 武汉大学学报, 2009, 34(12): 1387 - 1389. (ZHANG Zheng-lu, WANG Hong-chen, DENG Yong. New method for landslide deformation analysis and prediction[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2009, 34(12): 1387 - 1389. (in Chinese))
- [12] 易庆林, 胡大儒, 代天凡. 基于小波分析的滑坡变形规律研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(5): 91 - 94. (YI Qing-lin, HU Da-ru, DAI Tian-fan. Deformation law for a landslide in the Three Gorges reservoir area based on wavelet analysis[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(5): 91 - 94. (in Chinese))
- [13] 柏俊磊, 王乐华. 最优加权组合模型在边坡变形预测中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 125 - 128. (BAI Jun-lei, WANG Le-hua. Application of optimal weighted combination model in prediction of slope deformation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(6): 125 - 128. (in Chinese))
- [14] 海震, 梁梁, 付调金. 上新田滑坡稳定性分析[J]. 土工基础, 2013, 27(5): 20 - 22. (HAI Zhen, LIANG Liang, FU Diao-jin. Analyses of Shangxintian Landslide[J]. Soil Eng. and Foundation, 2013, 27(5): 20 - 22. (in Chinese))
- [15] 肖荣军, 史宏彦, 杨雪强. 深基坑排桩支护结构设计方法研究进展[J]. 土工基础, 2013, 27(3): 50 - 53. (XIAO Rong-jun, SHI Hong-yan, YANG Xue-qiang. Developments of the tiered wall with anchor pile system for deep excavation support[J]. Soil Engineering and Foundation, 2013, 27(3): 50 - 53. (in Chinese))

(本文责编 明经平)