Coal Geology & Exploration

Volume 47 | Issue 4

Article 20

8-25-2019

Inversion analysis of earth pressure for limited soil between oblique support retaining foundation pit and adjacent basement

ZHANG Guomao

School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China; Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring(Central South University), Ministry of Education, Changsha 410083, China

PENG Wenxiang School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China; Key

Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring(Central South University), Ministry of Education, Changsha 410083, China

Follow this and additional works at: https://cge.researchcommons.org/journal

Part of the Earth Sciences Commons, Mining Engineering Commons, Oil, Gas, and Energy Commons, and the Sustainability Commons

Recommended Citation

Z P. (2019) "Inversion analysis of earth pressure for limited soil between oblique support retaining foundation pit and adjacent basement," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 47: Iss. 4, Article 20. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.019 Available at: https://cge.researchcommons.org/journal/vol47/iss4/20

This Hydrogeology, Engineering Geology, Environmental Geology is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact 380940179@qq.com.

文章编号:1001-1986(2019)04-0124-07

斜支撑支护基坑与相邻地下室有限 土体土压力反演分析

张国茂^{1,2}, 彭文祥^{1,2}

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院,湖南 长沙 410083; 2. 有色金属成矿预测与 地质环境监测教育部重点实验室(中南大学), 湖南 长沙 410083)

摘要:为探讨斜支撑支护基坑与相邻地下空间有限土体土压力分布规律,对某基坑现场监测数据 进行反演分析。研究基于试算法改进后的三次样条法,运用 Matlab 软件进行反演计算得到支护结 构弯矩值和桩后土压力值,结果表明:受有限土体位移模式、非极限状态、边界条件的影响,有 限土体主动土压力在开挖面以上,呈现明显的"R"字形分布,比经典土压力计算值小约16.3%;被 动土压力与主动土压力差值在开挖面以下,呈现近似矩形分布,比经典土压力计算值 小约 65%,分析结果可为该类工程支护设计及计算提供依据和参考。

关键 词: 有限土体;土压力;反演分析;三次样条法



DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.019 中图分类号: TU43 文献标识码: A

Inversion analysis of earth pressure for limited soil between oblique support retaining foundation pit and adjacent basement

ZHANG Guomao^{1,2}, PENG Wenxiang^{1,2}

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring(Central South University), Ministry of Education, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to study the distribution of earth pressure for limited soil between oblique support retaining foundation pit and adjacent basement, back analysis of site monitoring data of a foundation pit was studied. Based on the improved cubic spline method of the trial algorithm, Matlab software was used to calculate the bending moment value of the supporting structure and the earth pressure value behind the pile. The results show the earth pressure of limited soil is influenced by displacement mode, non-limit state and boundary conditions. The active earth pressure of limited soil above the excavation surface shows a distinct "R" shape distribution. The active earth pressure is about 16.3% smaller than that of the calculated value of classical earth pressure. The difference between the passive earth pressure and the active earth pressure below the excavation surface shows approximately rectangular distribution. The difference is about 65% smaller than that of the calculated value of classical earth pressure. The above analysis results provide the basis and reference for the design calculation of this type of engineering. Keywords: limited soil; earth pressure; inversion analysis; cubic spline method

随着城市建筑用地愈发紧张,临近已有建筑物 地下室墙体的拟开挖基坑数量愈发增加,拟开挖基 坑与已有建筑物地下室墙体之间构成有限土体。形 成有限土体的大面积基坑限制了锚杆的使用,选择 排桩+斜支撑支护方案成为一大趋势。

土压力是基坑支护工程的主要载荷来源[1]。有

限土体支护结构一般具有以下特征: 支护结构大 多为柔性支护结构; 土压力往往处于非极限状 边界条件不满足半无限土体条件。因此,大 态: 量学者针对前述特征分别研究了有限土体土压力分 布规律,如杨明辉等^[2]对考虑土拱效应的有限土体 土压力计算方法进行研究;朱伟[3]利用水平薄层单

收稿日期:2018-11-15

第一作者简介:张国茂,1994 年生,男,安徽安庆人,硕士,研究方向为岩土工程,E-mail:463493988@qq.com 引用格式:张国茂,彭文祥.斜支撑支护基坑与相邻地下室有限土体土压力反演分析[J].煤田地质与勘探,2019,47(4):124-130. ZHANG Guomao, PENG Wenxiang. Inversion analysis of earth pressure for limited soil between oblique support retaining foundation pit and adjacent basement[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 124-130.

元法对 RT、RB 和鼓形变位模式的有限土体土压力 计算方法进行研究;徐杨等^[4]研究了直线和对数螺 旋线滑裂面对土压力的影响;杨明辉等^[5]、戴夏斌^[6]、 郭萌萌^[7]对刚性挡墙后有限土体土压力进行试验研 究。但已有研究并未综合考虑上述 3 个特征,因此, 对于有限土体土压力的进一步研究十分必要^[8]。

原位监测是目前保证基坑支护安全可靠最直接 的方法。因此,大量学者针对原位监测进行研究, 如张会远等^[9]、李寻昌等^[10]分别依据监测数据建立 了抗滑桩弯矩计算公式和 Elman 神经网络动态预测 模型;赵峰^[11]基于 BIM 模型研发了基坑工程自动化 监测平台。本文以长沙某基坑工程为背景,基于试 算法改进后的三次样条法,运用 Matlab 软件计算结 果,并与经典土压力计算结果进行对比,为今后类 似的基坑支护设计提供依据和参考。 1 工程概况

1.1 工程简介

长沙某基坑位于长沙市滨江新城片区内,拟建 建筑物设3层地下室,地下室基坑底标高为29.55~ 31.0 m,本基坑开挖深度为12.0~17.4 m。基坑支护 设计为临时支护设计,支护形式主要为桩锚和斜支 撑支护,其中基坑侧壁安全等级为一级,支护结构 使用期限为竣工后不超过2 a。基坑平面分布见示意 图1。

1.2 工程地质条件

场地原始地貌属湘江河流侵蚀阶地地貌,基坑支 护深度内主要为:素填土 (Q_{ml}) ,素填土 (Q_{ml}) , 粉质黏土 (Q_{al}^4) ,粉质黏土 (Q_{el}) ,全风化泥质 板岩 (P_t) ,强风化泥质板岩 (P_t) ,中风化泥质板 岩 (P_t) 。基坑支护范围内各岩土层参数见表 1。



图 1 基坑平面示意图

Fig.1 Schematic plane of foundation pit

	表1 基坑支护范围各宕土层参数
Table 1	Geotechnical parameters of support range of foundation pi

I I I I I I I I I I I I I I I I I I I						
岩土层	天然容重 γ/(kN·m ⁻³)	内摩擦角 <i>φ/</i> (°)	黏聚力 c/kPa	锚固体的岩土层黏结强度 τ/kPa		
① 素填土	18.0	10.0	15.0	25.0		
② 素填土	18.5	15.0	15.0	40.0		
③ 粉质黏土	19.2	15.0	25.0	55.0		
④ 粉质黏土	19.8	20.0	30.0	75.0		
⑤ 全风化泥质板岩	20.0	22.0	35.0	85.0		
⑥ 强风化泥质板岩	21.5	30.0	50.0	160.0		
⑦ 中风化泥质板岩	23.0	40.0	60.0	190.0		

1.3 基坑支护方案

由于 BC 段(图 1)位于基坑东侧近似中间位置, 距离已建建筑物地下室墙体仅有 3.4 m,且支护结构 采用旋挖桩+斜支撑支护方式,有利于本文对斜支撑 支护基坑与相邻地下室间有限土体土压力进行研 究,因此,选取该段支护结构为例进行分析。支护 桩桩长 22.4 m,其中嵌固段 10.4 m,桩径 1.2 m,桩 间距 2.0 m,桩身混凝土强度为 C30;桩顶下-4.0 m 处设一道斜支撑,斜支撑采用双拼焊接 HN 型钢, 斜支撑倾角为 30°,水平间距为 10.0 m;桩顶处设 置一道冠梁,截面尺寸1200mm×800mm,混凝土 强度等级为 C30, BC 段基坑支护方案见图 2。



图 2 BC 段基坑支护方案及地层柱状图(单位:m) Fig.2 Support scheme and stratigraphic histogram of section BC of the foundation pit

1.4 监测方案

图 3

分别使用测斜仪和表面智能数码弦式表面应变 计,监测桩身深层水平位移和斜支撑内力,BC段共 使用 6 个表面应变计(选取 3 个型钢斜支撑),测斜 管和表面应变计安装位置见示意图 3、图 4。











1.5 监测结果

依据 BC 段内的 7 号测斜孔(图 1),得到 BC 段 支护结构位移监测结果,如图5所示。由图5可知, 随着基坑开挖工况的进行和时间推移,支护结构水 平位移逐渐增大, 位移监测曲线由线性关系逐渐趋 于"大肚形", 位移最大值由支护结构顶部逐渐向深

处移动,达到稳定状态时,位移最大值出现在桩身 -5.5 m 位置, 桩顶最大水平位移 11.21 mm, 桩身最 大水平位移 24.04 mm, 位移监测图整体呈现出两头 小、中间大的规律。



BC 段支护结构水平位移监测结果图 图 5



表面应变计通过与型钢斜支撑共同变形,测得 斜支撑任意时间的应变值。由于斜支撑主要为轴向 压缩受力,应用材料力学公式^[12]即可得到任意时间 的斜支撑轴力值, BC 段斜支撑水平作用力 Q 监测 结果见图 6。

由图 6 可知,随着基坑开挖深度的增加,斜支 撑水平作用力 Q 总体呈增大趋势, 但随着时间的推 移,斜支撑水平作用力Q逐渐达到稳定状态,3个 型钢斜支撑的平均水平作用力 Q=847 kN。



- 图 6 BC 段支护结构斜支撑水平作用力 Q 监测结果图
- Fig.6 Monitoring results of the horizontal force Q of sidestay of support structure in section BC

2 支护结构上土压力反演计算方法

2.1 计算原理示意图

本文以支护桩为研究对象,支护桩上作用有 3 个力,分别为斜支撑作用力、主动土压力和被动土压 力,计算原理见示意图7。由于支撑竖向作用力对支 护桩水平位移作用很小,可忽略不计,同时将开挖面 以下支护桩两侧土压力简化为被动土压力与主动土 压力差值,得到计算原理简化示意图,见图 8。



图 7 计算原理示意图





图 8 计算原理简化示意图

Fig.8 Simplified schematic diagram of calculation principle

2.2 三弯矩法

"三弯矩法"是指把结点 x_j 处待求函数 S(x)的二 阶导数 $S''(x_j)=M_j$ 作为基本未知量^[13], $S(x_j)$ 、 M_j 分别 为支护桩在 x_j 截面处的位移值和弯矩值,并且 M_j 只与相邻两截面的弯矩值 M_{j-1} 、 M_{j+1} 有关。

设 $S''(x_j)=M_j$, $S''(x_{j+1})=M_{j+1}$, 则 $S''(x_j)$ 在 $[x_j, x_{j+1}]$ 上的表达式为:

$$S_{j}''(x) = \frac{x - x_{j+1}}{x_{j} - x_{j+1}} M_{j} + \frac{x - x_{j}}{x_{j+1} - x_{j}} M_{j+1} = -\frac{x - x_{j+1}}{h_{i}} M_{j} + \frac{x - x_{j}}{h_{i}} M_{j+1}$$
(1)

式中 $j=0,1,2,\dots, n-1$; x_j 为插值点, m; $h_j=x_{j+1}-x_j$ 为插值点间距, m; $S(x_j)=y_i$ 为支护桩位移值, m; M_j 为支护桩弯矩值, kN·m。

对式(1)分别进行一次积分和二次积分,并将 $S(x_i)=y_i$, $S(x_{i+1})=y_{i+1}$ 代入积分式^[14]得:

$$S'_{j}(x) = -\frac{(x - x_{j+1})^{2}}{2h_{j}}M_{j} + \frac{(x - x_{j})^{2}}{2h_{j}}M_{j+1} + \frac{y_{j+1} - y_{j}}{h_{j}} - \frac{h_{j}}{6}(M_{j+1} - M_{j})$$

$$S_{j}(x) = -\frac{(x - x_{j+1})^{3}}{6h_{j}}M_{j} + \frac{(x - x_{j})^{3}}{6h_{j}}M_{j+1} + \frac{(y_{j+1} - \frac{M_{j+1}h_{j}^{2}}{6})\frac{x - x_{j}}{h_{j}} - (3)$$

$$(y_{j} - \frac{M_{j}h_{j}^{2}}{6})\frac{x - x_{j+1}}{h_{j}}$$

根据插值点处的转角连续性,即 $S'_{j}(x_{j})=S'_{j}(x_{j}^{-})=S'_{i}(x_{j}^{+})$,得到连续方程为:

$$\alpha_{j}M_{j-1} + 2M_{j} + \beta_{j}M_{j+1} = d_{j} \quad (j = 1, 2, \dots, n-1) \quad (4)$$
其中, $\alpha_{j} = \frac{h_{j-1}}{h_{j-1} + h_{j}}$, $\beta_{j} = \frac{h_{j}}{h_{j-1} + h_{j}}$, $d_{j} = -\frac{6\beta_{j}}{h_{j}h_{j-1}}$

$$(y_{j} - y_{j-1}) + \frac{6\alpha_{j}}{h_{j}h_{j-1}}(y_{j+1} - y_{j})$$
由式(4)得到三弯矩方程为:

$$\begin{cases} \alpha_{1}M_{0} + 2M_{1} + \beta_{1}M_{2} = d_{1} \\ \alpha_{2}M_{1} + 2M_{2} + \beta_{2}M_{3} = d_{2} \\ \alpha_{3}M_{2} + 2M_{3} + \beta_{3}M_{4} = d_{3} \\ \cdots \\ \alpha_{n-1}M_{n-2} + 2M_{n-1} + \beta_{n-1}M_{n} = d_{n-1} \end{cases}$$
(5)

2.3 基于试算法改进的三次样条法

确定边界条件的合理性直接影响支护结构弯矩 值反演结果的准确性。支护结构顶部一般有冠梁作 用,桩底一般有一定的位移和转角,支护结构两端 均不能简单确定为自由端或固定端^[15]。为避免将支 护结构两端的约束确定为一种简单的约束,选用两 插值点的中点位移值构建边界条件方程。

$$M_0 + M_1 = \frac{8(y_0 + y_1)}{h_1^2} - \frac{16y(\frac{x_0 + x_1}{2})}{h_1^2}$$
(6)

$$M_{n-1} + M_n = \frac{8(y_{n-1} + y_n)}{h_n^2} - \frac{16y(\frac{x_{n-1} + x_n}{2})}{h_n^2}$$
(7)

联立式(5)、式(6)、式(7),简化为 AM=d。 其中:

$$\boldsymbol{d} = [d_0 \ d_1 \ d_2 \cdots d_n] \tag{8}$$

$$d_{0} = \frac{8(y_{0} + y_{1})}{h_{1}^{2}} - \frac{16y(\frac{x_{0} + x_{1}}{2})}{h_{1}^{2}}$$
(9)

$$d_n = \frac{8(y_{n-1} + y_n)}{h_n^2} - \frac{16y(\frac{x_{n-1} + x_n}{2})}{h_n^2}$$
(10)

$$\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & & & \\ \alpha_1 & 2 & \beta_1 & & \\ & \alpha_2 & 2 & \beta_2 & \\ & \alpha_3 & 2 & \beta_3 & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & \alpha_{n-1} & 2 & \beta_{n-1} \\ & & & 1 & 1 \end{pmatrix}$$
(11)

由式(11)可知:系数矩阵 A 只随插值点位置的 改变而改变。因此,在不改变插值点位置的情况下, 通过试算得到不同的常数矩阵 d,即式(8),进而得 到不同的 M,将弯矩值 M 代回到式(3),并计算理 论位移值与实测位移值最小二乘法差值。其差值最 小的一组弯矩值即为最优弯矩值反演值,据此来尽 量减小实测位移误差对反演结果的影响。

2.4 支护结构上土压力反演计算公式

根据材料力学可知,支护结构上土压力值 q(x) 与弯矩值 M(x)的关系式和弯矩值 M(x)与位移值 S(x) 的关系式相一致,均呈二次导数关系式。因此,将 基于试算法改进的三次样条法类比到弯矩反演土压 力得:

$$M''_{j}(x) = \frac{x - x_{j+1}}{x_{j} - x_{j+1}} q_{j} + \frac{x - x_{j}}{x_{j+1} - x_{j}} q_{j+1} = -\frac{x - x_{j+1}}{h_{j}} q_{j} + \frac{x - x_{j}}{h_{j}} q_{j+1}$$
(12)

$$M'_{j}(x) = -\frac{(x - x_{j+1})^{2}}{2h_{j}}q_{j} + \frac{(x - x_{j})^{2}}{2h_{j}}q_{j+1} + \frac{M_{j+1} - M_{j}}{h_{j}} - \frac{h_{j}}{6}(q_{j+1} - q_{j})$$
(13)

$$M_{j}(x) = -\frac{(x - x_{j+1})^{3}}{6h_{j}}q_{j} + \frac{(x - x_{j})^{3}}{6h_{j}}q_{j+1} + q_{j+1}h_{i}^{2} - x - x_{j}$$

$$(M_{j+1} - \frac{q_{j+1}n_j}{6})\frac{x - x_j}{h_j} -$$
(14)

$$(M_{j} - \frac{q_{j}h_{j}^{2}}{6})\frac{x - x_{j+1}}{h_{j}}$$
(15)

$$\boldsymbol{D} = [D_0, D_1, D_2, \cdots, D_n]$$
(16)

$$D_0 = \frac{8(M_0 + M_1)}{h_1^2} - \frac{16M(\frac{x_0 + x_1}{2})}{h_1^2}$$
(17)

$$D_{j} = -\frac{6\beta_{j}}{h_{j}h_{j-1}}(y_{j} - y_{j-1}) + \frac{6\alpha_{j}}{h_{j}h_{j-1}}(y_{j+1} - y_{j}) \quad (18)$$

$$D_n = \frac{8(M_{n-1} + M_n)}{h_n^2} - \frac{16M(\frac{x_{n-1} + x_n}{2})}{h_n^2}$$
(19)

式中 $j=0, 1, 2, \dots, n-1$; x_j 为插值点, m; $h_j=x_{j+1}-x_j$ 为插值点间距, m; $M(x_j)=M_j$ 为支护桩弯矩值, m; q_j 为桩后土压力值, kPa。

根据材料力学可知,在集中力作用点处 *M'(x_j)* 会发生突变,其连续性方程为:

$$M'(x_i^{-}) + Q = M'(x_i^{+})$$
(20)

式中 x_i为集中力作用点; Q 为斜支撑水平作用力。

3 计算结果及分析

3.1 计算模型

支护桩桩身混凝土弹性模量 *E*=30 GPa,斜支撑 的支撑位置为桩身-4.0 m,设桩顶处 *x*=0,选取 *x*=4、 5、8、12、13.8、16、20、22.4 m,作为插值点。

3.2 计算结果及分析

图 5 中的 2018-10-15 位移曲线为基坑开挖到坑底 后达到稳定状态下的监测数据,本文对此进行反演分 析。稳定状态下东侧 BC 段支护结构位移量、弯矩反 演值、桩后土压力反演值,分别见图 9—图 12。



图 9 BC 段支护结构水平位移反演对比



由图9可知:实测位移曲线总体呈现两头小、中 间大的规律,桩顶水平位移为11.21 mm,最大水平 位移为24.04 mm。由于现场一些不可控因素,导致 实测位移出现波动现象,因此对其进行拟合处理。 采用基于试算法改进后的三次样条法,对拟合曲线 进行反演弯矩值计算(图10),得到弯矩反推位移曲 线与拟合曲线基本吻合,保证弯矩反演值的正确性。

由图10可知,位移反算弯矩曲线在 x=16 m 处出 现了一个明显转折点,负弯矩最大值在 x=0 m 处, 为-2 625.17 kN·m,正弯矩最大值在 x=16 m 处,为 1 371.38 kN·m。采用式(11)—式(18),对弯矩曲线进 行反演土压力计算(图11),得到土压力反推弯矩曲 线与位移反算弯矩曲线基本吻合,保证土压力反演 值的正确性。



图 10 BC 段支护结构弯矩反演值

Fig.10 Inversion value of bending moment of support structure in section BC



图 11 BC 段支护结构弯矩反演土压力值



由图 11 可知:弯矩反演土压力值在 x=0、4、5、 8、13.8、16、20、22.4 m 处分别为-1.28、81.28、 22.37、51.71、-201.04、-195.88、-237.8、-218 kPa。 支护结构上主动土压力在开挖面以上,呈现明显的 "R"字形分布,反映了支护结构顶部土拱效应对斜支 撑作用下支护结构有限土体土压力分布的影响;支 护结构上被动土压力与主动土压力差值在开挖面以 下,呈现近似矩形分布。弯矩反演土压力值与黄争 胜等[1]、陆培毅等[16]、朱伟[3]、杨明辉等[5]的研 究结果趋势基本一致。

为便于分析,将根据经典土压力计算公式[17] 和表1得到的经典主动土压力和经典被动土压力, 结合图11得到的弯矩反演土压力曲线,绘制成一个 图,如图12所示。

由图 12 可知:弯矩反演主动土压力值在开挖面 以上比经典土压力计算值小约 16.3%,被动土压力与 主动土压力差值在开挖面以下比经典土压力计算值 小约 65%。导致斜支撑支护基坑与相邻地下空间有 限土体土压力出现上述分布规律的原因有以下几 点: 支护结构为柔性支护结构,在斜支撑作用下



图 12 BC 段支护结构上土压对比图

Fig.12 Comparison of earth pressure of support structure in section BC

发生两头小、中间大的位移模式; 土压力处于非 极限状态; 有限土体受边界条件影响显著,已有 建筑物地下室墙体限制了破坏面的充分发展。若仍 采用经典理论,必然进一步加大土压力计算值的误 差,造成工程浪费。

4 结论

a. 基于试算法改进后的三次样条法,运用 Matlab 软件计算,利用某基坑现场监测数据反演 得到支护结构弯矩值和桩后土压力值,为现场土 压力的准确获取提供了思路。

b. 斜支撑支护基坑与相邻地下室间有限土体主动土压力在开挖面以上,呈现明显的"R"字形分布,被动土压力与主动土压力差值在开挖面以下,呈现近似矩形分布。

c. 受有限土体位移模式、非极限状态、边界 条件的影响,弯矩反演主动土压力值在开挖面以 上比经典土压力计算值小约16.3%,被动土压力与 主动土压力差值在开挖面以下比经典土压力计算 值小约65%。

参考文献

[1] 黄争胜,刘成禹.根据桩身侧向位移反演非极限状态下土压力 分布[J].土工基础,2012,26(3):54-56.

HUANG Zhengsheng , LIU Chengyu. Pre-limit earth pressure distribution along piles back analyzed form the pile horizontal displacements[J]. Soil Engineering and Foundation ,2012 ,26(3) : 54–56.

[2] 杨明辉,汪罗成,赵明华. 有限土体主动土压力计算的土拱效 应分析[J]. 建筑结构,2013,43(2):71–75.

YANG Minghui, WANG Luocheng, ZHAO Minghua. Calculation of active earth pressure for finite soils based on the soil arching theory[J]. Building Structure, 2013, 43(2): 71–75.

- [3] 朱伟. 考虑有限土体及挡墙变位影响的土压力试验与理论研 究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- [4] 徐杨,阎长虹,姜玉平,等. 滑裂面形状对挡土墙主动土压力的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(4):69–74.
 XU Yang, YAN Changhong, JIANG Yuping, et al. Effect of slip surface on active earth pressure upon retaining wall[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(4):69–74.
- [5] 杨明辉,戴夏斌,赵明华,等. 墙后有限宽度无黏性土主动土 压力试验研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(1):131-137.
 YANG Minghui, DAI Xiabin, ZHAO Minghua, et al. Experimental study on active earth pressure of cohesionless soil with limited width behind retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(1):131-137.
- [6] 戴夏斌. 墙后有限宽度无黏性土主动土压力试验及数值模 拟[D]. 长沙:湖南大学, 2016.
- [7] 郭萌萌. 有限填土挡土墙土压力的 PIV 模型试验研究[D]. 郑 州:华北水利水电大学, 2016.
- [8] 赵轩,马淑芝,唐为民,等.非极限状态下有限土体土压力计 算方法探究[J]. 长江科学院院报,2017,34(12):89–93.
 ZHAO Xuan, MA Shuzhi, TANG Weimin, et al. A computation method for earth pressure of limited soils under non-limit state[J].
 Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(12):89–93.
- [9] 张会远,吴锐,靳喆菲,等. 某滑坡抗滑桩治理效果监测 分析[J]. 煤田地质与勘探,2015,43(5):69-73.
 ZHANG Huiyuan, WU Rui, JIN Zhefei, et al. Monitoring and analysis of reinforcement effect of anti-slide pile of a slope[J]. Coal Geology & Exploration, 2015,43(5):69-73.
- [10] 李寻昌,叶君文,李葛,等.基于滑坡监测数据的 Elman

神经网络动态预测[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(3): 113-120.

LI Xunchang , YE Junwen , LI Ge , et al. Elman neural network dynamic prediction based on landslide monitoring data[J]. Coal Geology & Exploration , 2018 , 46(3) : 113–120.

[11] 赵峰. 基于 BIM 的基坑工程自动化监测平台研发[J]. 煤田地 质与勘探, 2018, 46(2): 151–158.

ZHAO Feng. Development of BIM-based automatic monitoring platform for foundation pit engineering[J]. Coal Geology & Exploration , 2018 , 46(2): 151–158.

- [12] 刘鸿文. 材料力学第 5 版[M]. 北京:高等教育出版社, 2010.
- [13] 李庆扬,王能超,易大义.数值分析第5版[M].北京:清华 大学出版社,2008.
- [14] 张冬青. 基坑排桩支护水平位移反演结构内力和土压力的方 法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014.
- [15] 张冬青,刘计顺,王志佳,等. 某深基坑支护改进三次样条法 反演分析[J]. 路基工程,2015(5):43-47.
 ZHANG Dongqing, LIU Jishun, WANG Zhijia, et al. Back analysis of improved cubic spline method for deep excavation support[J]. Luji Gongcheng Subgrade Engineering, 2015(5): 43-47.
- [16] 陆培毅,严驰,顾晓鲁. 砂土基于室内模型试验土压力分布形式的研究[J]. 土木工程学报,2003,36(10):84-88.
 LU Peiyi, YAN Chi, GU Xiaolu. Sand model test on the distribution of earth pressure[J]. China Civil Engineering Journal,2003,36(10):84-88.
- [17] 中华人民共和国建设部.建筑基坑支护技术规程: JGJ 120-2012[S].北京:建筑工业出版社, 2012.

(责任编辑 周建军)