

文章编号: 1000-7598-(2008)02-437-05

土钉墙面层位移和内力的计算分析

王立峰^{1,2}, 朱向荣^{2,3}

(1. 浙江大学 宁波理工学院, 宁波 315104; 2. 浙江科技学院 土木系 杭州 310012; 3. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310027)

摘 要: 面层对于土钉墙的稳定以及通过土钉把土压力传递到稳定的土体中去具有非常重要的意义。土钉墙面层承受一定比例的水土压力已是不争的事实, 然而, 在目前的土钉墙设计中往往把面层按照构造进行配筋而不作计算, 因此设计中没有体现到面层应有的作用。对土钉墙面层的受力情况进行了简化分析, 把面层看作是文克尔地基上的有限长梁, 将土钉作为作用在面层上的集中力系, 得到了土钉墙面层位移和内力的解析解。计算结果表明, 面层位移的最大值不在坡顶, 而是在坡顶靠下的位置, 其位置随着基坑开挖深度的增加而下移, 呈现出中间大两头小的变化规律, 与实测结果较为相近; 位移的大小对土体的内摩擦角和黏聚力较为敏感, 因此在基坑开挖过程中应做好降水工作, 以防止水渗透到土体中, 降低土体的物理力学性质指标。解析解也揭示了土钉墙面层内的弯矩和土压力的分布特征: 面层内的弯矩随着基坑深度的增加而增加, 但靠坡顶增加平缓, 而在坑底稍上弯矩曲线斜率增大, 同时达到最大值, 且呈现出中间大两边小的现象, 而靠近坑底的位置渐渐演变成负弯矩, 其原因是坑底被动区面层上作用有较大的被动土压力; 而面层内的土压力分布性状与位移具有相似分布规律和性状特征。以严谨的弹性力学理论为基础提供了研究土钉墙的实用方法, 得到的结论为土钉墙的设计提供参考, 并加深对土钉墙支护结构的理解和认识。

关 键 词: 土钉墙; 位移; 弯矩; Winkler 地基; 土压力

中图分类号: TU 471.8

文献标识码: A

Analysis of displacement and inner force in soil-nailing walls

WANG Li-feng^{1,2}, ZHU Xinag-rong^{2,3}

(1. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315005, China; 2. Department of Civil Engineering of Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310012, China; 3. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of, Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Facing is significantly important for stability of soil-nailing walls and for transferring earth pressure to stabilized soils. It is absolutely sure that the facing bear against water and earth pressure. However present designers of soil-nailing walls consider the facing as accessory structure rather than the main one. Facing isolated and considered as finite beam on winkler foundation simply, solutions of displacement and inner force of soil-nailing walls are gained through analyzing soil-nailing interaction. The results show maximal value of displacement is on the lower side of slope instead of the top. The location moves down with the pit depth. The law is that displacement is larger in the middle than the two sides in agreement with the actual measurement data. Internal friction angle and cohesive strength have large effects on the displacement, so preventing water from flowing to the vacation is very important. The analytic solutions also disclosure characteristics of moment and lateral earth pressure. Facing moment is increased with depth, the gains are small at the top slope and large at bottom of pit, and reaches its maximal value at lower side of slope. The moment is developed into negative one because of passive earth pressure at the bottom of pit. Earth pressures have similar characteristics and behaviors with inner facing displacement. The paper puts forward a method of exploring soil-nailing walls based on precise Elasticity Theory, the results are also referenced by designer and give people throughout comprehension of soil-nailing walls.

Key words: soil-nailing wall; displacement; bending moment; Winkler foundation model; earth pressure

1 引 言

土钉墙具有造价低廉、施工速度快等优点被广

泛应用于基坑围护、边坡加固等工程中, 国内外学者对土钉墙的性状和作用机理做了大量的研究和探索, 深化了对土钉墙的认识和理解。在众多文献资

收稿日期: 2007-04-09

作者简介: 王立峰, 男, 1968 年生, 博士后, 主要从事岩土工程材料特性、地基处理和软黏土力学方面的教学和科研工作。E-mail: wanglfzust@163.com

料和对土钉墙的设计中把土钉墙面层作为构造处理不考虑其作用,然而,面层上土压力的存在则是一个不争的事实,如德国按 85 % 主动土压力设计永久面层;法国 Clouterre 项目研究,其研究结论是不超过土钉最大拉力的 30 %~40 %;国内清华大学提出面层土压力与面层的刚度有关。

本文把面层的受力状态简化为 Winkler 地基上的有限长梁来处理,以探讨土钉墙面层内土压力、弯矩等内力和位移的变化规律及分布特征。

2 模型的建立和问题的解答

设土钉在面层上均匀分布,水平间距为 s_h , 垂直间距为 s_v , 忽略面层本身的重量。地基为弹性地基,梁宽为土钉横向间距 s_h , 梁高为喷射混凝土面层厚度。土钉轴力施加在面层上,受力分析如图 1 所示。土钉墙面层上所受的力有:(1) 集中力,即土钉给予面层的拉力,个数为土钉的道数;(2) 墙后土体给予面层的侧向土压力,可把面层等效为有限长梁上受集中荷载 $T_1, T_2, \dots, T_i$ ($i=1, \dots, n$, n 为土钉道数) 和所有外力对土钉面层上某一点的弯矩 M_0 , 如图 2 所示。

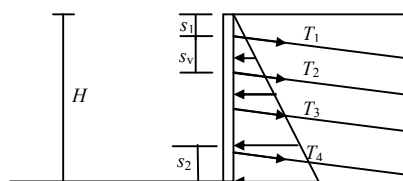


图 1 土钉墙受力示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of soil-nailing wall

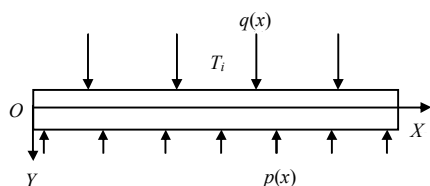


图 2 土钉墙受力简化图

Fig.2 Simplified sketch of soil-nailing wall

图 3 为一有限长梁,其上作用集中力 T_0 和弯矩 M_0 。Hetenyi (1946 年) 直接给出了挠度、弯矩和剪力的表达式见式 (1)~(7)。

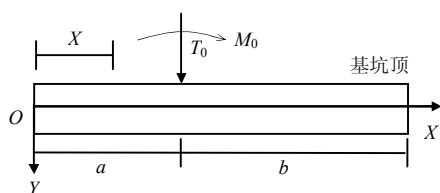


图 3 有限长梁

Fig.3 Finite beam

$$\left. \begin{aligned} y(x) &= \frac{T_0 \lambda}{kB [\sinh^2(\lambda l) - \sin^2(\lambda l)]} I_{3T} + \\ &\quad \frac{M_0 \lambda^2}{kB [\sinh^2(\lambda l) - \sin^2(\lambda l)]} I_{3M}; \\ M(x) &= \frac{T_0}{2\lambda [\sinh^2(\lambda l) - \sin^2(\lambda l)]} I_{1T} + \\ &\quad \frac{M_0}{kB [\sinh^2(\lambda l) - \sin^2(\lambda l)]} I_{1M}; \\ Q(x) &= -\frac{T_0}{\sinh^2(\lambda l) - \sin^2(\lambda l)} I_{2T} + \\ &\quad \frac{M_0 \lambda}{\sinh^2(\lambda l) - \sin^2(\lambda l)} I_{2M} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\lambda = \sqrt[4]{\frac{kB}{4EI}}$; k 为基床系数 (kN/m^3); B 为梁宽。

$$\begin{aligned} I_{1T} &= 2 \sinh(\lambda x) \sin(\lambda x) (\sinh(\lambda x) \cosh(\lambda x) \cosh(\lambda b) - \\ &\quad \sin(\lambda l) \cosh(\lambda a) \cos(\lambda b)) - \left[\frac{\sinh(\lambda x) \cos(\lambda x) - \cosh(\lambda x) \sin(\lambda x)}{\sinh(\lambda l) \{ \sin(\lambda a) \cosh(\lambda b) - \cos(\lambda a) \sinh(\lambda b) \} + \right. \\ &\quad \left. \sin(\lambda l) \{ \sinh(\lambda a) \cos(\lambda b) - \cosh(\lambda a) \sin(\lambda b) \} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} I_{2T} &= [\cosh(\lambda x) \sin(\lambda x) + \sinh(\lambda x) \cos(\lambda x)] \\ &\quad [\sinh(\lambda l) \cos(\lambda a) \cosh(\lambda b) - \sin(\lambda l) \cdot \\ &\quad \cosh(\lambda a) \cos(\lambda b)] + \sinh(\lambda x) \sin(\lambda x) \cdot \\ &\quad [\sinh(\lambda l) \{ \sin(\lambda a) \cosh(\lambda b) \cos(\lambda a) \cdot \\ &\quad \sinh(\lambda b) \} + \sin(\lambda l) \{ \sinh(\lambda a) \cos(\lambda b) - \\ &\quad \cosh(\lambda a) \sin(\lambda b) \}] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} I_{3T} &= 2 \cosh(\lambda x) \cos(\lambda x) \left[\frac{\sinh(\lambda l) \cos(\lambda a) \cosh(\lambda b)}{-\sin(\lambda l) \cosh(\lambda a) \cos(\lambda b)} \right] + \\ &\quad [\cosh(\lambda x) \sin(\lambda x) - \sinh(\lambda x) \cos(\lambda x)] \cdot \\ &\quad \left[\frac{\sinh(\lambda l) \{ \sin(\lambda a) \cosh(\lambda b) - \cos(\lambda a) \sinh(\lambda b) \} + \right. \\ &\quad \left. \sin(\lambda l) \{ \sinh(\lambda a) \cos(\lambda b) - \cosh(\lambda a) \sin(\lambda b) \} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} I_{1M} &= \sinh(\lambda x) \sin(\lambda x) [\sinh(\lambda l) \{ \cosh(\lambda a) \sin(\lambda b) + \\ &\quad \sin(\lambda a) \cosh(\lambda b) \} + \sin(\lambda l) \{ \cosh(\lambda a) \sin(\lambda b) + \\ &\quad \sinh(\lambda a) \cos(\lambda b) \}] + \{ \sinh(\lambda x) \cos(\lambda x) - \\ &\quad \cosh(\lambda x) \cdot \sin(\lambda x) \} \{ \sin(\lambda l) \cos(\lambda a) \cdot \\ &\quad \cosh(\lambda b) + \sin(\lambda l) \cosh(\lambda a) \cos(\lambda b) \} \end{aligned} \quad (5)$$

$$I_{2M} = \{ \cosh(\lambda x) \sin(\lambda x) + \sinh(\lambda x) \cos(\lambda x) \} \cdot \\ [\sinh(\lambda l) \{ \cos(\lambda a) \sinh(\lambda b) + \\ \sin(\lambda a) \cosh(\lambda b) \} + \sin(\lambda l) \{ \cosh(\lambda a) \cdot \\ \sin(\lambda b) + \sinh(\lambda a) \cos(\lambda b) \}] - 2 \sinh(\lambda x) \cdot \\ \sin(\lambda x) \{ \sinh(\lambda l) \cos(\lambda a) \cosh(\lambda b) \} \quad (6)$$

$$I_{3M} = \cosh(\lambda x) \cos(\lambda x) \{ \sinh(\lambda l) \cos(\lambda a) \sinh(\lambda b) + \\ \sinh(\lambda l) \sin(\lambda a) \cosh(\lambda b) + \sin(\lambda l) \cosh(\lambda a) \cdot \\ \sin(\lambda b) + \sin(\lambda l) \sinh(\lambda a) \cos(\lambda b) \} - \\ \{ \cosh(\lambda x) \sin(\lambda x) + \sinh(\lambda x) \cos(\lambda x) \} \cdot \\ \{ \sinh(\lambda l) \cos(\lambda a) \cosh(\lambda b) + \\ \sin(\lambda l) \cosh(\lambda a) \cos(\lambda b) \} \quad (7)$$

应用叠加法, 就可以给出面层在土钉集中力作用下解答, 经整理如下:

$$\left. \begin{aligned} y(x) &= \sum_{i=1}^n \frac{T_i \lambda}{kB [\sinh^2(\lambda l) - \sin^2(\lambda l)]} I_{3Ti} + \\ &\quad \frac{M_0 \lambda^2}{kB [\sinh^2(\lambda l) - \sin^2(\lambda l)]} I_{3M}; \\ M(x) &= \sum_{i=1}^n \frac{T_i}{2\lambda [\sinh^2(\lambda l) - \sin^2(\lambda l)]} I_{1Ti} + \\ &\quad \frac{M_0}{kB [\sinh^2(\lambda l) - \sin^2(\lambda l)]} I_{1M}; \\ Q(x) &= - \sum_{i=1}^n \frac{T_i}{\sinh^2(\lambda l) - \sin^2(\lambda l)} I_{2Ti} + \\ &\quad \frac{M_0 \lambda}{\sinh^2(\lambda l) - \sin^2(\lambda l)} I_{2M} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: n 为土钉道数; 系数 I_{Ti} 中的 a 和 b 为相应土钉所在位置离坑底和坑顶的位置。

3 计算参数的标定

3.1 侧向土压力

在自重应力和地表均布荷载的作用下, 每一根土钉的最大拉力 $N_{\max}$, 可按下式确定:

$$N_{\max} = \frac{p S_v S_h}{\cos \theta}; \quad p = p_q + p_m \quad (9)$$

式中: θ 为土钉的倾角; p 为土钉长度中点处深度位置上的侧向土压力; p_m 为土体自重引起的侧向土压力; p_q 为地表均布荷载引起的侧向土压力, $p_q = K_a q = (1 - \sin \varphi) q$, K_a 为主动土压力系数, φ 为土体的内摩擦角。由自重引起的侧向土压力 p_m 取值如下:

对于 $\frac{c}{\gamma H} \leq 0.05$ 的砂土和粉土,

$$p_m = 0.55 K_a \gamma H \quad (10)$$

对于 $\frac{c}{\gamma H} > 0.05$ 的砂土和粉土,

$$p_m = K_a \left(1 - \frac{2c}{\gamma H \sqrt{K_a}} \right) \gamma H \leq 0.55 K_a \gamma H \quad (11)$$

3.2 土钉端部拉力

作用在面层上的土钉拉力可按土钉最大拉力的 30%~40%, 文献[1]的建议取值为

当土钉间距为 1 m 时,

$$p = 0.6 N_{\max} \quad (12)$$

当土钉间距为 3 m 时,

$$p = N_{\max} \quad (13)$$

当土钉间距为 1~3 m 时可用线性插值得到。

3.3 面层弯矩

弯矩可由图 1 中的侧向土压力和由式 (13) 中确定的土钉拉力对土钉墙顶部的弯矩和来确定, 如果地表还有均布荷载, 则应该把这部分的弯矩计算在内。

3.4 面层刚度

面层是柔性层, 它由喷射混凝土和由其中配置的钢筋网组成, 其刚度可由复合材料计算而得到。

4 算例及结果分析

基坑挖深 6.5 m, 凝聚力 $c = 15$ kPa, 内摩擦角 $\varphi = 15^\circ$, 考虑超载 15 kPa, 5 道土钉, 在横向和竖向间距均为 1.2 m, 土钉安置角度为 10° , 土的弹性模量为 200 MPa, 土的抗力系数按经验值为 1.5×10^4 kN/m³。

4.1 面层位移

土钉的位移曲线如图 4 所示。可以看出, 随着深度的增加, 土钉面层位移最大值出现在坑顶靠下的位置, 而随着深度的增加, 最大值的位置向下移动, 与实际观测到的实际情况是相符的。

面层位移对土体的黏聚力较为敏感, 如图 5 所示, 黏聚力下降 5 kPa, 土钉位移大致增加 15 mm, 这是由于黏聚力的大小直接影响到作用到面层上的侧向土压力的大小, 黏聚力大则作用在面层上的侧向土压力小, 土体的自承能力强, 反之侧向土压力变大, 土体的自承能力减弱。

土体内摩擦角对面层位移的影响与黏聚力对其的影响规律相似, 如图 6 所示。内摩擦角的减小会

增加土体对面层的侧向土压力, 因此表现为位移增加。

4.2 面层内弯矩

面层内的弯矩随着深度的增加而较平缓的增加, 基坑坑底靠上的位置曲线斜率较大, 弯矩增加较快, 在坑底稍上的位置达到最大值, 而在坑底减少, 并转化成为负弯矩, 这是因为坑底内侧作用有被动土压力, 相当于集中力的作用, 而坑底面层内的剪力值较大, 面层内的弯矩值随深度的变化如图 7 所示。

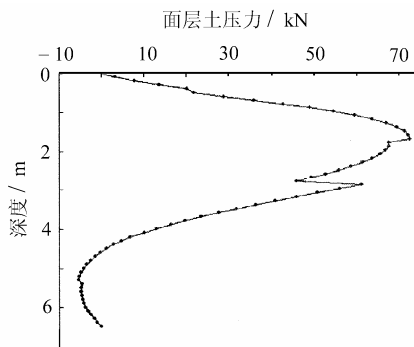


图 4 面层位移沿深度的分布
Fig.4 Facing displacement with depth

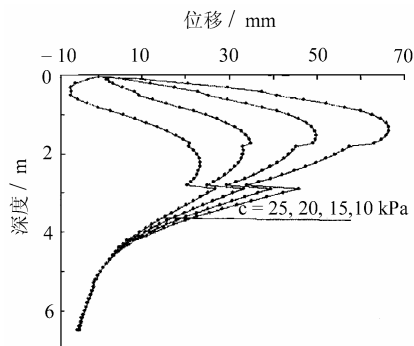


图 5 面层位移与黏聚力的关系曲线
Fig.5 Displacement variation with cohesion

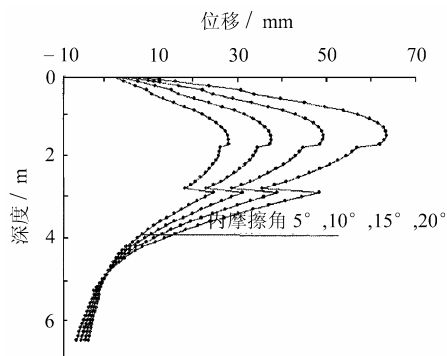


图 6 面层位移与内摩擦角的关系曲线
Fig.6 Displacement variation with internal friction angle

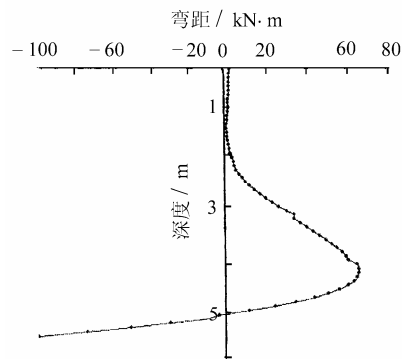


图 7 面层弯矩随深度的变化曲线
Fig.7 Moment variation with depth

4.3 面层内土压力分布

面层土压力的分布如图 8 所示, 它的曲线形状与位移曲线形状相似, 坑底稍下的位置为最大, 与实测结果相同, 图 9 为实测的面层土压力分布。

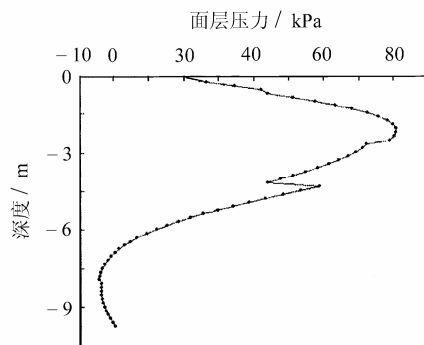


图 8 面层内土压力分布
Fig.8 Distribution of facing earth pressure

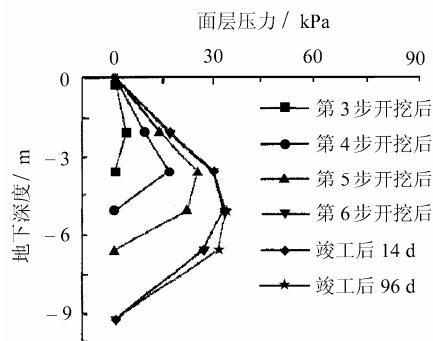


图 9 实测面层土压力沿深度的分布
Fig.9 Measurement datum of earth pressure with depth

5 结 论

(1) 由于土钉在面层上均匀分布, 把土钉墙面层简化为有限长梁来处理, 得到的结果与实测结果较为吻合 (性状方面)。

(2) 土体的内摩擦角和黏聚力对面层位移较为敏感, 因此在基坑开挖过程中特别是软黏土层中要注意保护土钉墙的坡顶不要让雨水渗入而降低

土性指标,造成面层位移过大。

(3)土钉靠基坑下部弯矩达到最大值,在设计过程中要以此作为设计的依据,可适当增大基坑底部面层的刚度,以使土钉将土压力均匀地传递到稳定土层中。

参考文献

- [1] 陈肇元,崔京浩.土钉支护在基坑工程中的应用[M].北京:中国建筑工业出版社,1997:1—78.
- [2] 贾洪.钉土相互作用的剪滞力理论分析[J].工程地质学报,2002,10(2):28—42.
- JIA Hong. Shear theoretical analysis of soil-nail interaction[J]. **Journal of Engineering geology**, 2002, 10(2): 28—42.
- [3] 杨茜,张明聚,孙铁成.复合土钉支护面层设计分析方法研究[J].岩石力学与工程学报,2005,4(7):1259—1266.
- YANG Qian, ZHANG Ming-Ju, SUN Tie-Cheng. A method composite facing of composite soil nailing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 4(7): 1259—1266.
- [4] 段建立,谭跃虎,樊有维,等.复合土钉支护的现场测试研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(12):2128—2132.
- DUAN Jian-li, TAN Yue-hu, FAN You-wei, et al. Field testing study on composite soil nailing [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 23 (12): 2128—2132.
- [5] 杨茜,张明聚,孙铁成.软弱土层复合土钉支护试验研究[J].岩土力学,2004,25(9):1401—1408.
- YANG Qian, ZHANG Ming-ju, SUN Tie-cheng. Study on composite soil nailing in soft subsoil by model test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(9):1401—1408.
- [6] 张季容,朱向荣.简明建筑基础计算与设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1997:41—51.
- [7] 黄义,何芳社.弹性地基上的梁、板、壳[M].北京:科学出版社,2005:26—45.
- [8] NG C W W, LEE G T K. A three-dimensional parametric study of the use of soil nails for stabilising tunnel faces[J]. **Computers and Geotechnics** 2002, 29: 673—697.
- [9] CHEUK A CY, NG D C W W, SUN C H W. Numerical experiments of soil nails in loose fill slopes subjected to rainfall infiltration effects[J]. **Computers and Geotechnics** 2005, 32: 290—303.
- [10] PALK K H, SAIGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects[J]. **Geotechnique**, 2003, 53: 643—653.
- [11] ZDRAVKOVIC L, POTTS D M, ST JOHN H D. Modeling of a 3-D excavation in finite element analysis [J]. **Geotechnique**, 2005, 55: 497—513.
- [12] Lok-Man CHU, Jian-Hua YIN. Comparison of interface shear strength of Soil nails measured by both direct shear box tests and pullout tests[J]. **Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2005, 131: 1097—1107.
- [13] Mingju Zhang, Erxiang Song, Zhaoyuan Chen. Ground movement analysis of soil nailing construction by three-dimensional (3-D) finite element modeling (FEM) [J]. **Computers and Geotechnics**, 1999, 25: 191—204.
- [14] OFANG Farzaneh, FARADJOLLAH Askari. Three-dimensional analysis of nonhomogeneous Slopes [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2003, 129: 137—145.
- [15] BAKEER H R. A second look at Taylor's stability chart[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering**, 2003, 129: 1102—1108.
- [16] READ R S, Albert. 20 years of excavation response studies at AECL's underground research laboratory[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2004, 41: 1251—1275.
- [17] THOMAS C Sheahan, CARLTON L Ho. Simplified trial wedge method for soil nailed wall analysis[J]. **Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2003, 129: 117—124.
- [18] TOSHIHISA Adachi, MAKOTO Kimura, KIYOSHI Kishida. Experimental study on the distribution of earth pressure and surface settlement through three-dimensional trapdoor tests[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 2003, 18: 171—183.