

狭窄黏性填土刚性挡墙主动土压力研究

应宏伟^{1, 2}, 朱伟^{1, 2}, 黄东³, 谢新宇^{1, 2}, 李冰河⁴

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;
3. 华润置地(成都)有限公司, 四川 成都 610066; 4. 浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310008)

摘要: 对于临近既有地下室或竖直基岩面的挡土墙, 由于墙后填土宽度有限, 采用经典的库伦、朗肯土压力理论计算挡土墙主动土压力是不合适的。采用有限元分析软件 ABAQUS, 对狭窄黏性填土刚性挡土墙的主动土压力问题进行研究, 探讨了墙后土体的临界裂缝深度和滑裂面的发展规律。考虑墙土之间的黏着力和填土竖向裂缝, 建立新的理论分析模型, 得到了挡土墙水平主动土压力合力的求解方法和主动土压力分布的解析公式。土压力合力系数与土压力强度的理论解和数值解吻合较好, 验证了本文理论解的合理性。研究表明, 主动极限状态下, 填土表面两侧均将产生竖向裂缝, 且临界裂缝深度不随填土宽度变化, 其值与朗肯裂缝深度接近; 随着填土宽度的减小, 填土内将产生一道甚至多道滑裂面, 挡土墙主动土压力也从基于半无限土体假定的广义库伦土压力值逐渐减小。

关键词: 刚性挡墙; 主动土压力; 黏性填土; 数值分析; 解析方法

中图分类号: TU476 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0013-06

作者简介: 应宏伟(1971-), 男, 江西萍乡人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程的教学与科研工作。E-mail: ice898@zju.edu.cn。

Active earth pressures against rigid retaining walls with narrow cohesive backfill

YING Hong-wei^{1, 2}, ZHU Wei^{1, 2}, HUANG Dong³, XIE Xin-yu^{1, 2}, LI Bing-he⁴

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. MOE, Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. China Resources Land (Chengdu) Limited, Chengdu 610066, China; 4. Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou 310008, China)

Abstract: In the case of a retaining wall adjacent to an existing basement or a vertical rock face, the width of backfill is limited. So it is not appropriate to use the Coulomb or Rankine theory to calculate the active earth pressures on the retaining wall. The software ABAQUS is used to execute the numerical simulation of active earth pressures on the rigid retaining wall with narrow cohesive backfill. The critical depth of the vertical cracks and the slip surfaces in the backfill are discussed. Based on the numerical analysis results, a new theoretical model is presented considering the adhesion between the wall and the fill as well as the vertical cracks in the fill. The formulae of the resultant force coefficient and the distribution of the active earth pressures on the retaining wall are put forward. The comparison between the theoretical and the numerical results demonstrate the rationality of the proposed theory. It is shown that the vertical cracks will appear at both sides of the fill, and the critical depth of the cracks, which do not change with the fill width, is approximately equal to the magnitude obtained by the Rankine theory. It is also shown that the one or multiple slip surfaces will occur in the fill as the width of the fill decreases. Furthermore, the active earth pressures on the retaining wall will decrease gradually from the magnitude obtained by the generalized Coulomb theory, which is based on the semi-infinite boundary assumption, to zero when the width of the fill decreases continuously.

Key words: rigid retaining wall; active earth pressure; cohesive backfill; numerical simulation; analytical method

0 引言

土压力问题是土力学中的经典课题, 土压力的确定是各类挡土墙和基坑支挡结构设计的关键, 目前工程界仍然主要采用经典的库伦、朗肯土压力理论, 假定挡土墙后填土为半无限体。随着经济建设的快速发

展, 工程建设中往往出现挡墙后填土宽度有限的情况, 如道路工程中的挡土墙临近竖直基岩面, 或者基坑挡

基金项目: “十一五”国家科技支撑项目(2008BAJ06B01); 浙江省重点创新团队支持计划资助项目(2009R50050)

收稿日期: 2012-08-25

墙距离既有地下室很近(图 1), 此时采用经典土压力理论进行土压力计算显然是不合适的。

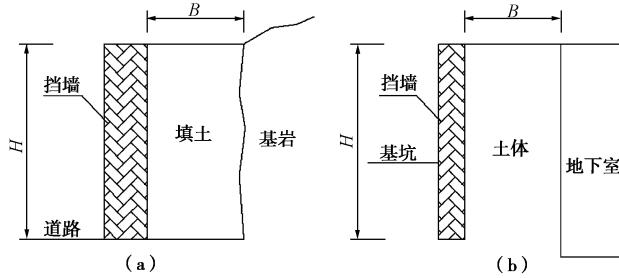


图 1 狹窄填土的挡土墙

Fig. 1 Retaining wall of narrow backfill

已有学者对于有限填土的刚性挡土墙土压力问题进行了初步研究^[1-5], 指出采用常规的土压力理论进行计算是不合理的。其中 FRYDMAN^[1]采用谷仓土压力公式计算临近基岩面挡土墙的无黏性土主动和静止土压力, TAKE^[2]采用离心模型试验与文献[1]理论解进行对比; 马平^[4]基于极限分析法及平面滑裂面假定, 考虑土的黏聚力, 推导出了有限土体滑裂面剪切破坏角的数学表达式, 并研究了剪切破坏角与各种因素之间的关系; 谢小荣^[5]基于能量理论推导出了有限土体主动侧压力计算公式。然而这些研究尚存在一些不足, 主要在于多研究无黏性填土的情况, 或者未考虑黏性填土与墙面间的黏着力和填土表面开裂的问题, 也未考虑邻近竖直基岩面或地下室侧墙的反力, 更未深入研究这种情况下滑裂面的分布与半无限填土情况下的差别, 从而导致计算结果不甚合理。而顾慰慈^[6]、卢廷浩^[7]对半无限黏性填土的研究结果表明墙土之间的黏着力以及填土裂缝深度对主动土压力有重要的影响。本文首先采用有限元软件 ABAQUS, 对狭窄黏性填土刚性挡墙主动土压力问题进行数值模拟, 探讨了填土裂缝深度以及塑性区的发展规律; 然后根据数值分析揭示的规律, 考虑墙土之间的黏着力以及填土表面的裂缝, 建立新的理论分析模型, 得到了挡土墙主动土压力系数的求解方法, 同时采用水平薄层单元法, 得到了挡土墙主动土压力分布的解析公式; 最后通过理论解与数值分析结果的对比验证本文方法的合理性。

1 有限元分析模型

采用 ABAQUS 有限元软件, 在 FANG^[8]、徐日庆^[9]、陈贲开^[10]和蔡奇鹏^[11]等研究半无限土体刚性挡墙土压力问题的试验和数值模型的基础上建立如图 2 所示的有限元分析模型, 在填土右侧增加刚性边界以模拟邻近的竖直基岩面或既有地下室外墙。

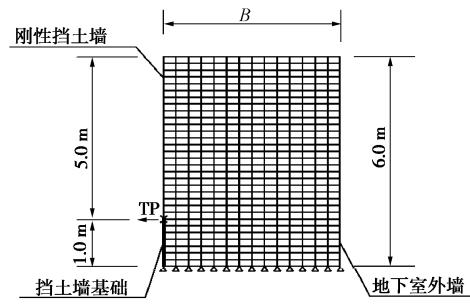


图 2 数值分析模型

Fig. 2 Numerical analysis model

分析时作如下假定: ①刚性挡墙和地下室外墙墙背均竖直, 填土表面水平; ②挡土墙变位模式为平动(T)模式; ③填土为各向同性的黏性土, 满足莫尔-库仑塑性准则。

图中 TP 点表示刚性挡墙的基底参考点, 挡墙从 TP 点开始逐渐朝左侧平移, 当挡墙土压力逐渐减小到稳定值时即认为达到主动极限状态。为了确保填土高度大于填土表面裂缝深度, 取土体高 6.0 m, 刚性挡墙高 5.0 m, 挡墙基础位于刚性挡墙下, 高 1.0 m。土体参数为: $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, $E_s = 18 \text{ MPa}$, $K_0 = 0.6$, $\mu = 0.3$, $\varphi = 15^\circ$, $c = 10 \text{ kPa}$; 假定挡墙、地下室外墙与填土的接触面性质相同, 墙土外摩擦角 $\delta = 10^\circ$ 。为探讨填土宽度的影响, 分别取 $B = 0.5, 1.0, 1.5, 2.5$ 和 4.0 m 。

在计算黏性土的土压力时, 不仅应考虑墙土间的摩擦角 δ , 而且还应考虑墙土间的黏着力 c_a , 墙土间存在竖直向上的黏着力, 这已经被一些工程的拔桩试验所证实^[12]。根据莫热菲基洛夫的研究^[6], 墙土黏着力强度 c_a 与 c , φ 和 δ 之间存在以下关系:

$$c_a = c \tan \delta / \tan \varphi, \quad (1)$$

代入以上数值模型中相应的 c , δ 和 φ 的值, 可得 $c_a = 6 \text{ kPa}$ 。

2 裂缝深度和滑裂面发展规律

由朗肯理论可知, 主动状态下, 由于填土内黏聚力作用, 填土表面将出现竖向裂缝。本文数值分析发现, 竖向裂缝不仅出现在左侧挡土墙与填土界面, 同样也出现在右侧边界面上。图 3 为数值分析得到的临界裂缝深度与朗肯理论计算结果的对比, 其中朗肯临界裂缝深度 h_{cmax} 按式(2)计算:

$$h_{cmax} = \frac{2c \tan(45^\circ + 0.5\varphi)}{\gamma}. \quad (2)$$

由图 3 可以看出, 当 c , φ 取定值时, 不同填土宽度得到的裂缝深度基本相同, h_{cmax} 与填土宽度无关, 临界裂缝深度与朗肯理论计算值基本相同。

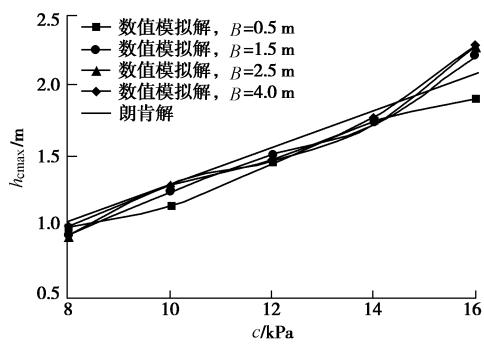


图 3 临界竖向裂缝深度

Fig. 3 Critical depth of vertical cracks

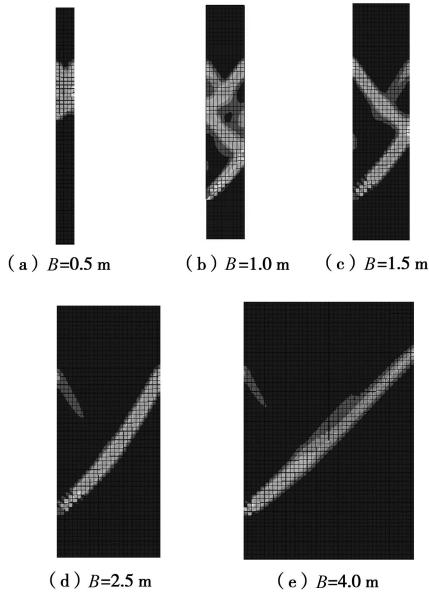


图 4 填土塑性区

Fig. 4 Plastic zone in fill

应宏伟等^[13]研究了狭窄无黏性填土挡土墙的主动土压力, 发现在主动极限状态下, 随着填土宽度的减小, 无黏性填土内将产生一道甚至多道滑裂面, 直至滑裂面贯通土体直达地面为止。图 4 给出了黏性填土情况下的塑性区分布图, 由图可见, 当填土宽度 $B \geq 1.0 \text{ m}$ 时, 填土内塑性区的发展规律与之类似(图 4 (b) ~ (e))。但不同的是, 由于填土表面存在竖向裂缝, 最上面一道滑裂面未贯通至地面, 而是发展到临界裂缝深度 h_{cmax} 后, 不再产生新的滑裂面。

当填土宽度较小时 ($B = 0.5 \text{ m}$), 此时填土黏着力接近于填土的自重, 则挡土墙水平主动土压力接近于零, 因此下半部分填土并未发生塑性变形, 仍处于弹性状态, 塑性区仅存在于竖向裂缝深度以下局部范围之内, 如图 4 (a) 所示, 这也验证了文献[6]的观点。

3 主动土压力合力

建立挡墙理论计算模型, 将临界裂缝深度范围的填土等效为均布荷载 q_k , 如图 5 所示, 其中 q_k 由下式

确定:

$$q_k = \gamma h_{\text{cmax}} = 2c \tan(45^\circ + \frac{1}{2}\varphi) \quad . \quad (3)$$

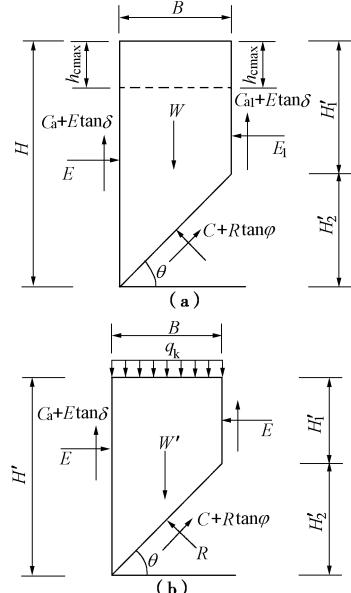


图 5 简化理论分析模型

Fig. 5 Simplified theoretical analysis model

图 5 中填土等效高度为

$$H' = H - h_{\text{cmax}} \quad , \quad (4)$$

记距墙踵为 H' 处的填土面为等效填土表面。

3.1 填土内仅一道滑裂面的情形

对于挡土墙仅出现一道滑裂面的情形, 可视作墙后填土为半无限体的情形, 建立如图 6 所示的计算简图。作用在土楔体上的力主要有: 挡土墙的反力 E , 挡土墙与填土间的黏着力合力 C_a ; 下部静止土体对滑裂面的反力 R 和土内黏聚力合力 C , 以及土楔体的自重 W' 和等效均布荷载 $q_k H' \cot \theta$ 。根据力的平衡条件, 可得

$$\sum X = 0: E + (C + R \tan \varphi) \cos \theta - R \sin \theta = 0 \quad , \quad (5)$$

$$\sum Z = 0: C_a + E \tan \delta + R \cos \theta + (C + R \tan \varphi) \sin \theta - W' - q_k H' \cot \theta = 0 \quad . \quad (6)$$

式中 C 为滑裂面上的内黏聚力合力, $C = cH' / \sin \theta$; C_a 为挡土墙与填土间的黏着力合力, $C_a = c_a H'$; W' 为土楔体自重, $W' = \frac{1}{2} \gamma H'^2 \cot \theta$; γ 为填土重度。

求解上述平衡方程式, 可得到挡土墙反力:

$$E = a_2 / a_1 \quad , \quad (7)$$

式中, $a_1 = \tan \delta + \frac{1 + \tan \varphi \tan \theta}{\tan \theta - \tan \varphi}$, $a_2 = \frac{1}{2} \gamma H'^2 \cot \theta +$

$$q_k H' \cot \theta - c_a H' - \frac{cH'(\cot \theta + \tan \theta)}{\tan \theta - \tan \varphi} \quad .$$

理论解能很好地反映数值分析结果的变化趋势, 当 $\delta > 0^\circ$ 时, 随着 n 的增大, 理论解和数值解得到的 K_{\min} 均逐渐增大, 直至接近广义库仑土压力系数。当 $n=0.1$ 时, 由于墙土黏着力接近于填土自重, 理论解与数值解均接近于零。数值解在墙底处存在保持较高应力值的“死区”^[8], 因此数值结果较理论解略偏大。

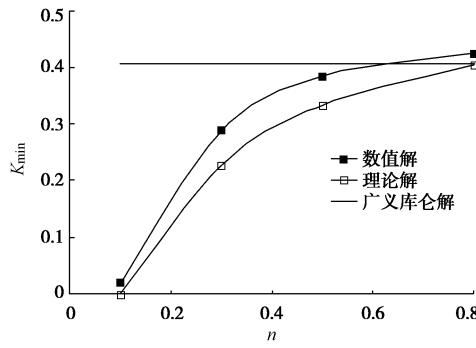


图 8 主动土压力系数随 n 的变化

Fig. 8 Variation of active earth pressure coefficient with n

4 主动土压力分布

由库仑强度理论可知无黏性土的抗剪强度为

$$\tau = \sigma \tan \varphi \quad (15)$$

对于黏性土:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c = \left(\sigma + \frac{c}{\tan \varphi} \right) \tan \varphi, \quad (16)$$

式中, τ 为土的抗剪强度, σ 为土中任一点破坏面上的正应力。

对比式 (15) 和式 (16) 可以发现, 这两个公式的基本形式是一致的。式中 $\frac{c}{\tan \varphi}$ 可以称作黏性土内结

构压力^[6], 记为 Δ 。因此, 采用水平薄层单元法推导黏性填土挡墙的主动土压力分布时, 可将黏性土的黏聚力 c 的贡献作为一种内结构压力 Δ 作用在土楔体的四周, 则该土体可转化为无黏性土来进行计算。典型片体单元形状与受力如图 9 所示。

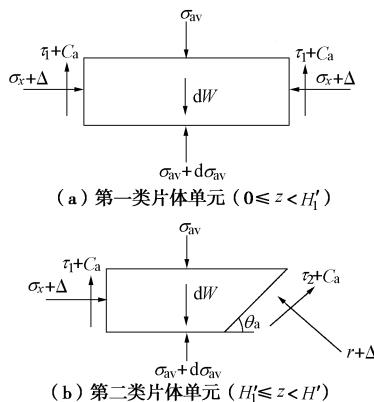


图 9 典型片体单元分析模型

Fig. 9 Typical models of horizontal differential elements

对第一类片体单元 ($0 \leq z < H'_1$) 和第二类片体单

元 ($H'_1 \leq z < H'$), 分别由竖向静力平衡条件和 $z=0$, $z=H'_1$ 处的边界条件, 经推导 (受篇幅限制, 推导过程略), 得到墙后填土水平主动土压力分布基本方程为

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = \frac{\gamma B}{2 \tan \delta} [1 - \exp(-2k \frac{z}{B} \tan \delta)] + \\ \quad k(q_k + \Delta) \exp(-2K_a \frac{z}{B} \tan \delta) - \Delta \quad (0 \leq z < H'_1) \\ \sigma_x = k \left[(Q - \frac{\gamma}{Ak - 2} H'_2) \left(\frac{H' - z}{H'_2} \right)^{Ak - 1} + \right. \\ \quad \left. \frac{\gamma}{Ak - 2} (H' - z) \right] - \Delta \quad (H'_1 \leq z < H') \end{array} \right. \quad (17)$$

式中 $k = (\sigma_x + \Delta) / \sigma_{av}$, 为侧向土压力系数; A 为中间系数, $A = \frac{\sin \theta_a \cos(\theta_a - \delta - \varphi)}{\cos \delta \cos \theta_a \sin(\theta_a - \varphi)}$; B 为填土宽度; Q 为 $z=H'_1$ 时的竖向平均压力, $Q = \frac{\gamma B}{2k \tan \delta}$

$$[1 - \exp(-2k \frac{H'_1}{B} \tan \delta)] + (q_k + \Delta) \exp(-2k \frac{H'_1}{B} \tan \delta)。$$

图 10 为挡土墙主动土压力分布图。其中计算参数参见前述数值模型。由图可见, 根据本文理论解求得

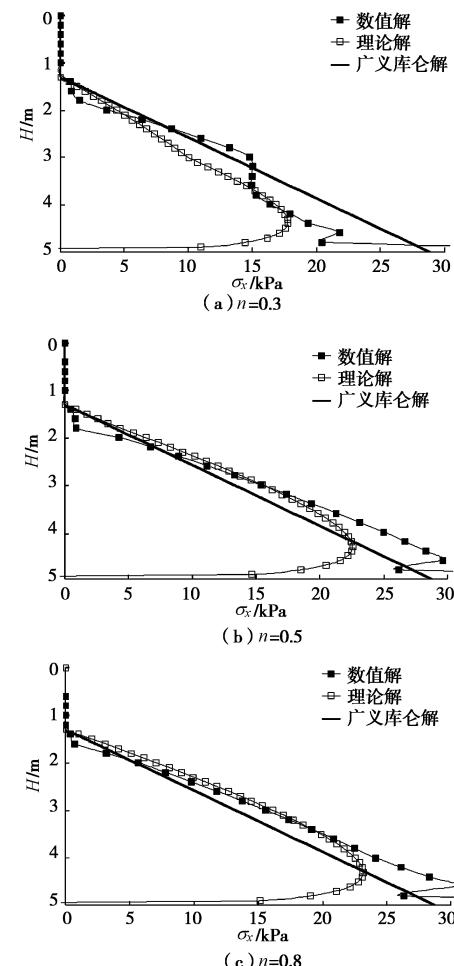


图 10 水平主动土压力分布

Fig. 10 Distribution of horizontal active earth pressures

的土压力分布与前文数值模拟结果基本吻合, 随着 n 的增大, 理论解与数值解的吻合程度更好。

由式(17)可见, 由于黏性土内结构压力的作用, 当 n 较小时(如 $n=0.1$), $\sigma_x < 0$, 土压力出现拉应力, 这与数值模拟得出的当 $n=0.1$ 时挡土墙土压力接近于零一致。

当 $z=H'$ 时, 理论解得到的 $\sigma_x = -\Delta < 0$, 可见在挡土墙墙踵处会出现微小拉裂区, 与数值分析结果有明显区别。但由图 10 可以看出, 挡土墙墙踵拉裂区范围很小, 工程应用时可忽略不计。

5 结 论

(1) 有限元数值分析发现, 主动状态下, 狹窄黏性填土表面两侧均产生深度相同的竖向裂缝, 裂缝深度接近于朗肯裂缝深度; 填土塑性区的发展规律与无黏性土基本相似, 随着填土宽度的逐渐减小, 填土内出现一道甚至多道滑裂面, 但滑裂面仅延伸到开裂区底面。

(2) 根据数值分析揭示的规律, 考虑墙土之间的黏着力以及填土表面的裂缝, 建立狹窄黏性填土刚性挡墙主动土压力理论分析模型, 得到了主动土压力系数 K_{\min} 的求解方法。当 $\delta > 0^\circ$ 时, K_{\min} 值随填土宽度的增大而逐渐增大, 并逐渐趋近于广义库伦解。

(3) 利用水平薄层单元法, 获得了挡土墙水平主动土压力分布的理论公式。挡土墙土压力为非线性鼓形分布; 由于填土内结构压力作用, 在墙踵处, 理论解会出现微小拉裂区, 有别于数值分析结果。

参 考 文 献:

- [1] FRYDMAN S, KEISSAR I. Earth pressures on retaining walls near rock faces[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1987, 113(6): 586 - 599.
- [2] TAKE W A, VALSANGKAR A J. Earth pressures on unyielding retaining walls of narrow backfill width[J]. Journal of Canadian Geotechnical, 2001, 38: 1220 - 1230.
- [3] 高印立. 极限分析法计算有限范围土体土压力[J]. 建筑结构, 2001, 31(8): 66 - 68. (GAO Yin-li. Calculation of finite earth pressure by limit analysis[J]. Building Structures, 2001, 31(8): 66 - 68. (in Chinese))
- [4] 马 平, 秦四清, 钱海涛. 有限土体主动土压力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 3070 - 3074. (MA Ping, QIN Si-qing, QIAN Hai-tao. Calculation of active earth pressure for limited soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 3070 - 3074. (in Chinese))
- [5] 李 峰, 郭院成. 基坑工程有限土体主动土压力计算分析研究[J]. 建筑科学, 2008, 24(1): 15 - 18. (LI Feng, GUO Yuan-cheng. Analytical study on active soil pressure from finite soil body in construction pit[J]. Building Science, 2008, 24(1): 15 - 18. (in Chinese))
- [6] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2001: 243 - 276. (GU Wei-ci. Calculation of earth pressures of retaining wall[M]. Beijing: China Building Materials Industry Publishing House, 2001: 243 - 276. (in Chinese))
- [7] 卢廷浩. 考虑黏聚力及墙背黏着力的主动土压力公式[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 470 - 473. (LU Ting-hao. A formula of active earth pressure including cohesion and adhesion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4): 470 - 473. (in Chinese))
- [8] FANG Y S, ISHIBASHI I. Static earth pressures with various wall movement[J]. Geotechnical Engineering, ASCE, 1986, 112(3): 317 - 333.
- [9] 徐日庆, 龚 慈, 魏 纲, 等. 考虑平动位移效应的刚性挡土墙土压力理论[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(1): 119 - 122. (XU Ri-qing, GONG Ci, WEI Gang, et al. Theory of earth pressure against rigid retaining walls considering translational movement effect[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(1): 119 - 122. (in Chinese))
- [10] 陈页开. 挡土墙上土压力的试验研究与数值分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2001. (CHEN Ye-kai. Model test and numerical analysis of earth pressures on retaining wall[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese))
- [11] 蔡奇鹏. 刚性与柔性挡墙的主动土压力研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (CAI Qi-peng. A study on the earth pressure against rigid and flexible retaining walls[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))
- [12] 朱碧堂, 杨 敏. 抗拔桩的变形与极限承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(3): 120 - 129. (ZHU Bi-tang, YANG Min. Calculation of displacement and ultimate uplift capacity of tension piles[J]. Journal of Building Structure, 2006, 27(3): 120 - 129. (in Chinese))
- [13] 应宏伟, 黄 东, 谢新宇. 考虑邻近地下室外墙侧压力影响的平动模式挡土墙主动土压力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 2970 - 2978. (YING Hong-wei, HUANG Dong, XIE Xin-yu. Study on active earth pressure on retaining wall subject to translation considering lateral pressure of adjacent existing basement wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2970 - 2978. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)