

中心岛法实用设计计算方法研究

顾问天, 陈敏华

(中国铁道科学研究院 深圳研究设计院, 广东 深圳 518034)

摘 要: 在城市建设中越来越多的大面积深基坑采用中心岛顺作、周边预留土台逆作的开挖支护方式。该法不仅节约工程造价, 而且节省大量工期, 但目前仍缺乏简单、合理的设计计算方法。基于 Rankine 土压力理论, 采用图解法得到中心岛被动土压力的分布模式, 该土压力分布在单一土质条件下随埋深呈现为 3 段折线。根据上述土压力分布和基坑工程手册^[1]有关悬臂结构的设计思路, 提出中心岛法围护结构的设计计算方法, 并提供一个算例。经算例验证该法简单实用, 便于工程师使用。

关 键 词: 基坑开挖; 中心岛法; 预留土台; 土压力分布; 设计方法

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Study of practical design and calculation method for central island method

GU Wen-tian, CHEN Min-hua

(Shenzhen Research and Design Institute, China Academy of Railway Sciences, Shenzhen, Guangdong 518034, China)

Abstract: For the urban construction, the method of “Central island by bottom-up and peripheral part by top-down” has been used more and more in large deep excavation of foundation pit. In the help of this method, construction cost and project time can be saved a lot. However, there is a lack of simple and reasonable calculation method for it. Central island distribution pattern of passive earth pressure are put forward in this article which is based on and Rankine's earth pressure theory. In the condition of single soil, the pattern was described in 3 polygonal lines with the corresponding depth. The practical method for central island method of retaining structures is proposed according to the above-mentioned distribution pattern and the design method of cantilever structure from excavation engineering handbook, and a case was given. It is proved by the example that the method was simple and practical, and convenient for using to the engineer.

Key words: excavation of foundation pit; central island method; mound width remained; earth pressure distribution; design method

1 引 言

随着城市建设的发展, 深基坑的周边环境变得越来越复杂, 早些年间惯用的土钉墙、桩锚等支护方法往往因周边条件受到很大限制, 迫使基坑开挖支护方式不断发展与转变。对于超宽、超大的基坑, 采用中心岛顺作, 周边预留土台逆作的方法可达到降低工程造价、节约工期的效果。中心岛结合预留土台逆作法的主要特点是: 首先, 明挖基坑中心部分的土方至基底并顺作地下室结构, 沿围护结构内侧一定范围预留平衡土台, 确保基坑的安全与稳定, 待中心部分的地下室顺作完成后再挖周边预留平衡土台逆作该范围的地下室。中心岛法设计与施工中的关键问题是预留土台宽度, 合理的土台宽度要求在确保基坑安全与稳定的前提下尽可能的小一点, 以便节约工程造价及工期。目前国内已有许

多成功的工程实例, 也有很多学者研究中心岛法预留土台宽度和相关土压力问题。邸国恩等^[2]针对某个工点, 采用有限元进行分析设计出预留土台宽度的尺寸。包旭范等^[3]采用离心试验, 模拟出中心岛法围护结构及预留土台的破坏模式。金亚兵等^[4]提出了将桩前反压或预留土体视为整体的分析方法。黄泰等^[5]提出在支护结构的计算中采用折减的弹性地基模型(m 法)的计算方法。庞小朝等^[6]根据库仑土压力原理, 提出预留土体的极限抗力的计算方法。本文基于 Rankine 土压力模式, 提出中心岛预留土台的极限抗力分布模式和计算公式, 是一种较为简单、实用的设计方法。

2 预留土台被动土压力

中心岛法的预留土台对围护结构墙(桩)产生 3 个作用, (1) 加深了围护结构的嵌固深度, 使得

围护结构更加稳定；(2) 预留土台本身具有一定的水平抗力，为围护结构提供一定的被动土压力；(3) 预留土体增加被动区土体重力，增加了基坑底面以下的被动区土体的极限抗力。

2.1 分析方法

为简化分析过程, 设桩前预留土台及基底为均质黏性土体, 预留土台宽度为 B , 土台高度为 H , 土台斜坡倾角为 α , 土体内摩擦角为 φ , 深度 h 处的被动破裂面与预留土台 (或地面) 面的交点为 Q 点, 如图 1、2 所示。

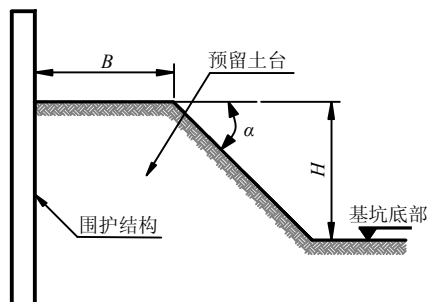


图 1 中心岛预留土台示意图
Fig.1 Sketch of mound width remained for central island construction

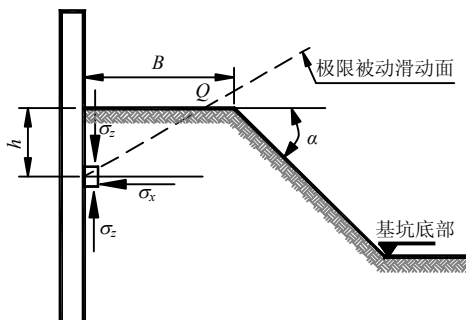


图 2 第 1 段 Rankine 极限平衡状态示意图
Fig.2 First piece of limit equilibrium state for Rankine's earth pressure

根据 Rankine 被动土压力理论, 土体被动破坏角为 $45^\circ - \varphi/2^{[1]}$, 而 Q 点位置存在 3 种可能, (1) 位于预留土台宽度内, (2) 位于土台斜坡面上, (3) 在预留土台外。根据上述 3 种情况, 预留土台被动土压力可分别简化为 3 段分别求解。

第 1 段, 当 $0 < h \leq B \tan(45^\circ - \varphi/2)$ 时, 见图 2, Q 点始终在预留土台宽度范围内, 该范围内被动土压力不受土台斜坡影响, 与 Rankine 被动土压力相同, 即

$$\sigma_x = \gamma h K_p + 2c\sqrt{K_p} \quad (1)$$

式中: K_p 为被动土压力系数; γ 为土体重度; c 为土的黏聚力。

第 2 段, 当 $B \tan(45^\circ - \varphi/2) < h \leq H + (B+H/$

$\tan \alpha) \tan (45^\circ - \varphi/2)$ 时, Q 点位于预留土台斜坡面, 如图 3 所示。该范围内不再直接沿用经典 Rankine 被动土压力。根据图 3, 沿 Q 点作水平辅助虚线, 虚线以上的预留土体简化为附加荷载, 虚线以下视为预留土台顶面。

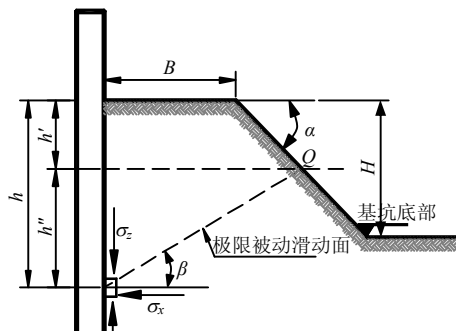


图3 第2段 Rankine 极限平衡状态示意图
Fig.3 Second piece of limit equilibrium state for Rankine's earth pressure

简化后的模型如图 4 所示。图中, q 为虚线以上土体的等效荷载, 其分布模式为梯形。 q 对围护结构产生附加水平压力设为 q_x , q_x 的分布模式也呈梯形^[3]。

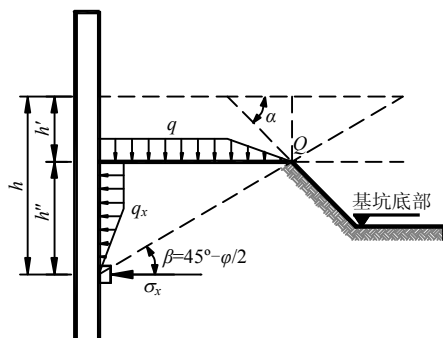


图 4 第 2 段土压力简化计算模型
Fig.4 Computation model for the second piece of simplified earth pressure

该分布可根据图 5 推导出。根据图 4、5, h' 范围的土体可视为竖向附加荷载, 其引起的水平土侧压力 q_x 在自土台面以下深度为 h 处的附加水平压力为 0 (可根据图 5 解得)。因此, 土台面以下 h 深度处的被动土侧压力与 Q 辅助水平线以下深度 h'' 处的 Rankine 被动土压力等同。该范围的极限被动土压力可简化为

$$\sigma_x = \gamma(h'')K_p + 2c\sqrt{K_p} = \gamma(h - h')K_p + 2c\sqrt{K_p} \quad (2)$$

$$h' = \frac{(h \cot(\beta) - B) \sin(\beta)}{\cos(90^\circ - \alpha - \beta)} \sin \alpha \quad (3)$$

$$\beta = 45^\circ - \varphi/2 \quad (4)$$

式中: h' 适用范围为 $[0, H]$ 。

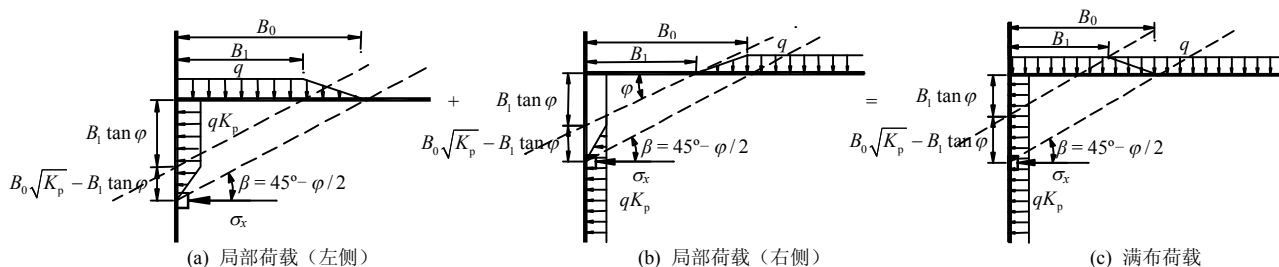


图 5 上部附加荷载分解分布示意图

Fig.5 Sketch of distribution for upper additional load

第 3 段, 当 $h > H + (B+H/\tan\alpha)\tan(45^\circ - \varphi/2)$ 时, Q 位于预留土台外侧的基坑底面, 如图 6 所示。根据图示, 沿 Q 点作水平辅助虚线, 辅助虚线位于基坑底面, 将基底面以上部分即预留土台简化为附加荷载。简化后的模型如图 7 所示。根据图 7, 预留土体可视为竖向附加荷载, 其引起的水平土侧压力 q_x 在基坑底以下深度为 h'' 处的附加水平压力为 0, 自土台面以下深度 h 处将不受到 q_x 附加水平压力的影响。因此, 土台面以下 h 深度处的被动土侧压力与基坑底部以下深度 h_1 处的 Rankine 被动土压力等同。该范围的极限被动土压力可简化为

$$\sigma_x = \gamma h_1 K_p + 2c\sqrt{K_p} = \gamma(h-H)K_p + 2c\sqrt{K_p} \quad (5)$$

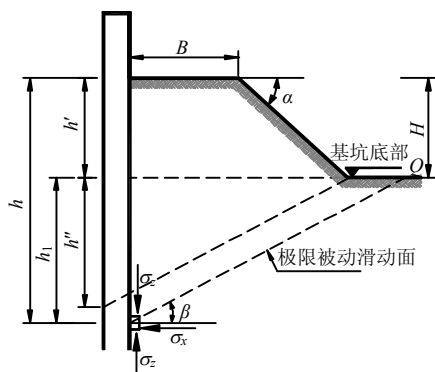


图 6 第 3 段 Rankine 极限平衡状态示意图

Fig.6 Third piece of limit equilibrium state for Rankine's earth pressure

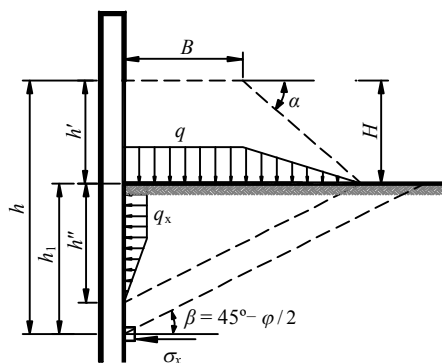


图 7 第 3 段土压力简化计算模型

Fig.7 Computation model for third piece of simplified earth pressure

2.2 土压力计算公式

将 3 段的极限被动土压力整合后, 可表达为

$$\sigma_x = \begin{cases} \gamma h K_p + 2c\sqrt{K_p}, & (h = (0, B\tan\beta]) \\ \gamma(h-h')K_p + 2c\sqrt{K_p}, & \left(h = \left(B\tan\beta, \left(B + \frac{H}{\tan\alpha}\right)\tan\beta\right)\right] \\ \gamma(h-H)K_p + 2c\sqrt{K_p}, & \left(h = \left(\left(B + \frac{H}{\tan\alpha}\right)\tan\beta, \infty\right)\right] \end{cases} \quad (6)$$

式 (6) 可以利用高级程序语言编程计算。通过计算易得土压力分布模式, 如图 8 所示。

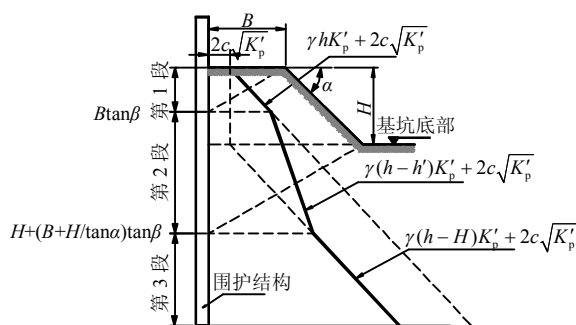


图 8 中心岛法预留土体被动土压力分布模式

Fig.8 Passive earth pressure distribution for remaining mound in central island construction

3 中心岛法围护结构设计

当前中心岛法的相关设计理论还不够完善, 国家及地方规范、规程^[7]均没有给出具体的设计与计算公式。本文结合上文中的土压力分布模式和国家规范中关于悬臂桩的设计思路, 提出中心岛法围护结构设计的实用计算方法。

3.1 预留土台

中心岛法预留土台共有 3 个参数, 即土台高度 H 、土台宽度 B 、土坡倾角 α 。土台高度可根据基坑深度和建筑地下室结构确定, 一般情况下土台面与基坑顶部的高差不大于 6 m, 即地下室负 1 层的高差。土坡倾角可视基坑土质情况确定, 一般情况下

不大于 45° , $30^\circ \sim 40^\circ$ 在实际工程中比较常见。中心岛法预留土台宽度与工程的安全、造价、工期均有密切的关系, 宽度不足影响基坑安全与稳定, 但宽度过大又会使造价增加、施工工期延长。为此, 预留土台宽度是中心岛法设计与施工的关键参数, 该宽度与围护结构深度又相互影响, 土台宽度较大时, 围护结构深度可适当减小, 反之, 则深度应增加。因此, 首先结合场地条件初步设定预留土台参数, 再根据工程造价等相关经济指标反复调整计算, 使结果趋于合理。

3.2 围护结构长度

在基坑设计中, 围护结构必须有一定的嵌固深度以满足整体、抗倾覆、抗隆起、抗管涌、抗滑移等相关稳定性。根据文献[2]离心试验提供的相关资料, 中心岛法破坏以倾覆破坏为主, 因此围护长度可先由抗倾覆稳定性验算确定。首先, 初步设定围护结构长度后, 根据式(7)多次试算, 确定长度设计值, 据此进行其他相关稳定性验算校核。

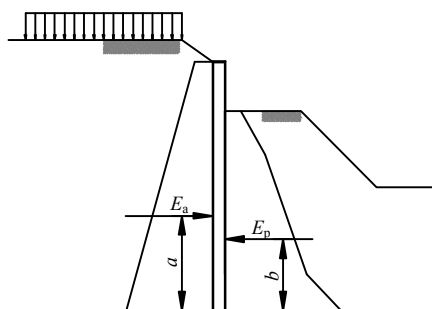


图9 围护结构长度计算简图

Fig.9 Sketch of length calculation for enclosure structure

根据图9, 设围护结构底部为转轴点, 根据力矩平衡原理可得

$$kE_a a = E_p b \quad (7)$$

式中: E_a 为主动土压力合力; a 为主动土压力合力作用点至围护结构底的距离; b 为被动土压力合力作用点至围护结构底的距离; k 为安全系数, 取 $1.3 \sim 1.5$ 。

3.3 围护结构内力计算

根据文献[6], 通过围护结构土压力分布求得主动土压力和被动土压力0点(A点), A点以下采用土弹簧模拟, 弹簧刚度可根据“m”或“K”法求得, A点以上部分将主动土压力与被动土压力合力见图10。图中, E_{a1} 为土台面以上主动土压力合力; E_{a2} 为土台面以下至A点的之间的主动土压力合力; E_p 为土台面以下至A点的之间的被动土压力合力。根据图10, 在常用结构设计软件或有限元软件中建立

立杆系有限元模型, 易得围护结构内力和变形。

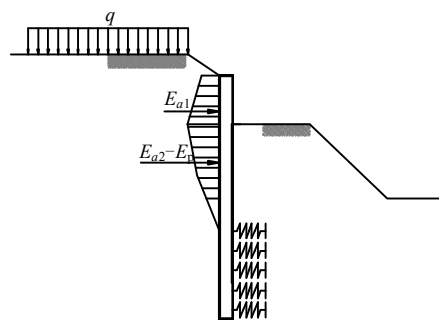


图10 围护结构内力计算模型

Fig.10 Computation model of internal force for enclosure structure

4 设计算例

某场地拟建2层地下室, 基坑开挖深度约为10 m, 场地地层自上而下分布有人工填土、砾质黏土、强风化岩。基坑开挖面积较大, 支护方案采用中心岛预留土体逆作法, 如图11所示。

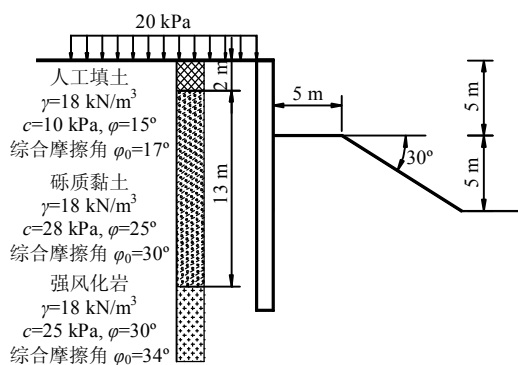


图11 某基坑支护示意图

Fig.11 Sketch of foundation pit support

预留土台高度根据地下开挖层数和施工条件确定为5 m, 预留土体基本为砾质黏土, 破面倾角设计为 30° , 预留土台宽度暂定为5 m, 围护桩长暂定为16 m。

4.1 围护桩长校核验算

为简化计算过程土工参数采用综合摩擦角 ϕ_0 , 根据式(6)和Rankine主动土压力公式, 可以求得围护结构两侧的土压力分布, 如图12所示。

围护桩长16 m时, 经计算 $E_a = 880 \text{ kN}$, $E_p = 2430 \text{ kN}$, 代入式(7), 可得 $k = 1.68$ 。

安全系数 k 偏大, 可适当调整围护桩长或土台宽度, 针对该工程情况减短围护桩长更具有经济性。因此, 再次调整围护桩长为14.5 m, 经再次计算 k 约为1.40, 故选定围护桩长确定为14.5 m, 其余整体、抗隆起等相关的稳定性计算, 此处不再给出。

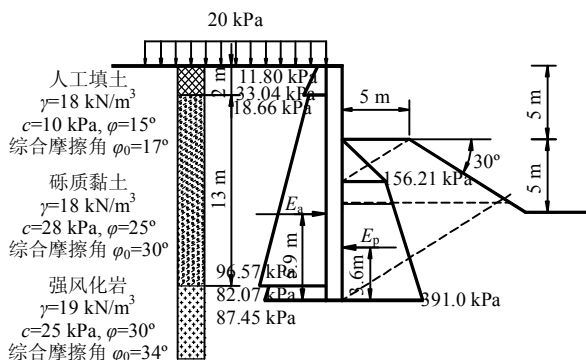


图 12 土压力分布简图

Fig.12 Sketch of earth pressure distribution

4.2 围护桩内力计算

初步设定为围护桩截面采用 $D800$ mm, 间距为 $1\ 200$ mm, 围护桩混凝土强度设计等级为 C30。

根据图 13 计算模型, 在通用结构软件 Sap2000 中建立模型, 其中土体抗力采用“K”法模拟, 水平基床系数 K 值取 $30\ 000$ kN/m³。经计算得结构内力, 如图 14 所示。预设围护桩截面尺寸 800 mm 满足承载力要求, 故选定桩截面为 $D800$ mm。

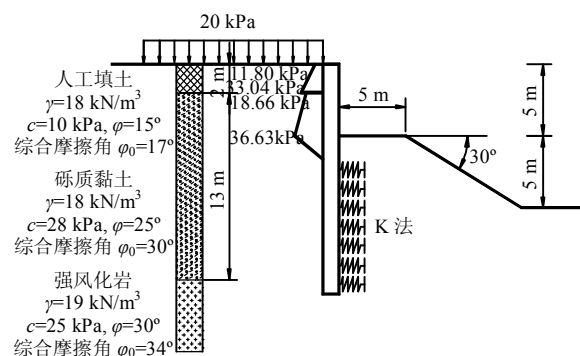
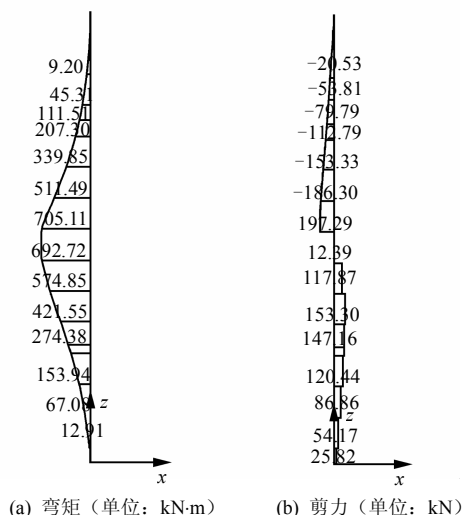


图 13 围护桩内力计算模型

Fig.13 Computation model of internal force for supporting pile



(a) 弯矩 (单位: kN·m) (b) 剪力 (单位: kN)

图 14 围护桩内力分布图

Fig.14 Distribution of internal force for supporting pile

根据上述计算结果, 预留土台宽度、坡面倾角初步设定较为合理, 不作二次调整。

5 结 语

基于 Rankine 土压力理论, 提出中心岛法预留土体的被动土压力分布模式和计算公式。在同一种土质条件下该土压力分布随埋深呈现为 3 段折线。

目前中心岛法缺乏明确的简单实用的设计计算方法。本文基于手册^[6]中关于悬臂桩设计思路, 提出一种较简单实用的设计计算方法, 以方便工程设计人员使用或参考。

参 考 文 献

- [1] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [2] 邸国恩, 王卫东. 中心岛顺作、周边环板逆作的设计方法在单体 $50\ 000$ m² 深基坑工程中的实践[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊): 1633—1637.
DI Guo-en, WANG Wei-dong. Application of “Central part by bottom-up method and peripheral part by top-down method” design method in single deep excavation engineering of $50\ 000$ m²[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(Supp.): 1633—1637.
- [3] 包旭范, 庄丽, 吕培林. 大型软土基坑中心岛法施工中土台预留宽度的研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1208—1212.
BAO Xu-fan, ZHUANG Li, LÜ Pei-lin. Study on mound width remained during the construction of central island for large foundation pits in soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1208—1212.
- [4] 金亚兵, 周志雄. 挡土墙(桩)前堆载反压或预留土体分析与计算[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 57—60.
JIN Ya-bing, ZHOU Zhi-xiong. Analysis and calculation method of surcharge reaction and remaining soils near retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(3): 57—60.
- [5] 黄泰, 蔡健. 中心岛法在某大型基坑设计中的应用[J]. 建筑结构, 2006, 35(7): 16—19.
HUANG Tai, CAI Jian. Application of center island method in a large-scale building foundation excavation[J]. Building Structure, 2006, 35(7): 16—19.
- [6] 庞小朝, 刘国楠, 陈湘生. 深大基坑中心岛法墙前被动土压力的计算方法[J]. 铁道建筑, 2009, 49(5): 79—83.
PANG Xiao-chao, LIU Guo-nan, CHEN Xiang-sheng. The passive earth pressure calculation method of large deep excavation by central island construction[J]. Railway Engineering, 2009, 49(5): 79—83.
- [7] 中国建筑科学研究院. JGJ 120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.