

DOI: 10.11779/CJGE2018S2043

# 带撑双排地下连续墙支护结构在清远枢纽航道扩容工程中的应用研究

罗翔<sup>1</sup>, 永新<sup>1</sup>, 曾理菁<sup>1</sup>, 孔维美<sup>1</sup>, 刘少跃<sup>2</sup>, 潘健<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 广东省源天工程有限公司, 广东 广州 511340)

**摘要:** 正在紧张施工的广东省清远枢纽航道扩容之二线船闸的深基坑工程紧邻一线船闸, 覆盖层深厚, 地层性质较差, 地质条件复杂, 坑外设计洪水位较高。考虑到基坑开挖过程中已建船闸和基坑的相互作用, 为满足支护结构自身强度及变形要求, 避免由于基坑开挖过程中土体卸荷造成邻近已建船闸产生过大变形从而对船闸安全稳定和正常运行带来安全隐患, 二线船闸的闸室部分的基坑支护结构采用带撑双排地下连续墙方案。以带撑双排地下连续墙为研究重点, 利用迈达斯 GTS 有限元软件, 基于硬化土 (HS) 土体本构模型, 模拟清远二线船闸深基坑施工过程。有限元结果表明, 双排地下连续墙支护结构和邻近船闸闸室的水平位移特征与工程实测结果基本吻合, 带撑双排地下连续墙支护方案对于二线船闸深基坑工程是可行的。

**关键词:** 船闸; 深基坑; 支护结构; 地下连续墙; 应用研究

中图分类号: TU476 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S2-0215-05

作者简介: 罗翔(1995-), 男, 硕士研究生。E-mail: 18720967018@163.com。

## Application of braced retaining structures with double-row diaphragm walls in channel expansion project of Qingyuan junction

LUO Xiang<sup>1</sup>, Jaramillo A. Carlos E.<sup>1</sup>, ZENG Li-jing<sup>1</sup>, KONG Wei-mei<sup>1</sup>, LIU Shao-yue<sup>2</sup>, PAN Jian<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong

Yuantian Engineering Company, Guangzhou 511340, China)

**Abstract:** The deep foundation pit of the second-line ship lock in the channel expansion project of Qingyuan junction in Guangdong Province is under construction. It is close to the first-line ship lock, with deep overburden, poor formation property, complicated geological condition and high flood level. Considering the interaction between the ship lock and the foundation pit in the excavation process of the foundation pit, the braced retaining structures with double-row diaphragm walls are adopted as those of the foundation pit of the lock chamber part of the second-line ship lock. It is designed to meet the requirements of the strength and deformation of the retaining structures and to avoid the excessive deformation of the adjacent built ship lock, which will bring security risks to the stability and normal operation of the ship lock due to unloading during the excavation of the foundation pit. For the braced retaining structures with double-row diaphragm walls, based on the hardening soil constitutive model, the construction process of the deep foundation pit of the second-line ship lock of Qingyuan junction is simulated by means of the Midas GTS finite element software. The results show that the characteristics of horizontal displacement of the double-row diaphragm walls and the lock chamber of the adjacent ship lock in the excavation of the foundation pit are basically in accordance with the measured results. The scheme of the braced retaining structures with double-row diaphragm walls is feasible in the deep excavation project of the second-line ship lock.

**Key words:** ship lock; deep foundation pit; retaining structure; diaphragm wall; application

## 0 引言

目前国内外主要采用梯级渠化与航道整治相结合的方式升级航道, 其中, 旧闸重建、新建高等级船闸为最主要的建设内容。大部分新建二线船闸由于受通航水流条件及周边环境的限制, 闸址一般选择在与原

有已建船闸平行且距离较近的位置。因此, 在船闸扩建施工中, 基坑工程将对已建船闸产生一定程度上影响, 为保证基坑正常施工、主体结构安全及周围环境

不受危害, 支护结构的选型和布置显得尤为重要。

目前已有不少学者就邻近船闸的基坑开挖进行了研究。潘宣何<sup>[1]</sup>以采用排桩支护结构的株洲航电枢纽拟建二线船闸基坑工程为背景, 进行了室内模型试验, 得到了支护排桩和邻近一线船闸闸室的侧向、竖向位移特性, 并结合有限元数值模拟进行参数敏感性分析。凌威<sup>[2]</sup>以采用嵌岩双排桩支护结构的某二线船闸深基坑工程为背景, 通过有限元数值模拟得出了邻近船闸闸室的变形受力特征, 并以前排桩桩顶最大位移、邻近船闸墙顶最大位移作为评价指标, 进行参数优化。扈世龙<sup>[3]</sup>以采用坡桩支护结构形式的某航运枢纽衡重式闸室结构段邻近基坑开挖工程为研究背景, 进行室内概化模型试验, 探究了邻近船闸闸室墙和支护结构的水平位移特点。罗鹏飞等<sup>[4]</sup>通过建立邻近船闸首基坑放坡开挖平面二维有限元模型, 分析基坑船闸间距、基坑的坡度等因素对邻近船闸的影响, 提出了邻近船闸基坑开挖安全间距及基坑坡度的建议值。

清远枢纽航道扩容工程之二线船闸深基坑工程选用带撑双排地下连续墙作为其基坑支护方案, 旨在满足围护结构自身的强度及变形等要求, 避免基坑开挖过程中邻近已建船闸的过大变形, 保证船闸结构安全和正常运行。目前, 国内外有关邻近船闸深基坑工程中该支护结构的应用研究鲜有报导。本文以该工程为背景, 采用 MAIDAS GTS 软件, 基于硬化土 (HS) 土体本构模型, 对基坑开挖过程进行有限元分析, 并与工程实测数据进行对比, 得出该支护结构的水平位移和邻近船闸闸室的水平位移变化特征。

## 1 工程概况

### 1.1 周边环境条件

清远枢纽航道扩容工程之二线船闸工程在现有清远水利枢纽的基础上兴建, 布置在清远水利枢纽一线船闸的右侧滩地, 两闸平行, 中心距 90 m, 以上闸首上游面(轴线坝)对齐布置。上闸首长 50 m, 下闸首长 56 m, 闸室长 220 m, 建设规模为 220 m×34 m×4.5 m (闸室长×口门宽×槛上最小水深)。上闸首先位于清远水利枢纽右岸土坝处, 闸室与下闸首先位于一线船闸右岸减压塘处, 地面高程约 5.0 m。二线船闸右侧与清西围防洪堤间的滩地地面高程约 15.0 m, 基坑开挖深度 15 m。

### 1.2 工程地质与水文地质条件

项目区属沿线为剥蚀堆积河谷平原地貌。区内地形稍有起伏, 地貌形态单一, 地层层位较稳定, 土性较均匀, 覆盖层较深。据勘察资料, 本工程勘探深度内土层依次为第四系全新统填土、粉质黏土、淤泥质

粉质黏土、粉细砂、中粗砂、圆砾土及卵石土层。基岩为泥盆系天子岭组灰岩、炭质页岩及砂岩。

地下水类型主要为潜水、弱承压水和基岩岩溶含水。场区内孔隙含水层分布于河流两岸阶地及河床砂层和砂卵砾石层中, 浅部砂性土层为潜水含水层, 其下黏性土层渗透性较差, 形成相对隔水层。黏性土层分布不连续, 下伏砂性土层及砂卵石土层形成弱承压水层。勘察期间, 地下水位埋深一般 2.4~9.1 m, 最大埋深 16.9 m。上游 (以清远水利枢纽作为上下游分界) 地下水位稍高, 水位高程 12.7~14.2 m; 下游地下水位稍低, 水位高程 2.0~9.4 m。

## 2 闸室段基坑支护方案

### 2.1 基坑支护方案选择

基坑深度较大、地质条件复杂、坑外设计洪水位高, 同时涉及砂卵石层等强透水层, 一般直立式支护结构难以满足要求, 并且一线船闸结构紧邻二线船闸深基坑, 综合考虑这些场地条件、周边环境因素, 为控制基坑的变形并且减少对邻近一线船闸结构的影响, 二线船闸闸室段基坑中靠近一线船闸侧支护采用带撑双排地下连续墙这种侧向刚度较大的半重力式结构形式。

### 2.2 基坑支护剖面设计

闸室段基坑宽度 65 m, 深约 15 m, 支护形式采用地下连续墙+坑内 2 道钢筋砼支撑系统的方案 (见图 1)。

靠一线船闸侧支护结构采用带撑双排地下连续墙, 地下连续墙前后墙净间距 13.8 m, 地下连续墙墙顶高程 6.50 m, 基坑内侧地下连续墙厚 1200 mm, 基坑外侧地下连续墙厚 1000 mm, 内侧地下连续墙进入岩层止水, 外侧地下连续墙不入岩止水, 地下连续墙顶部通过 2 m 厚的混凝土连板相连, 连板宽度 16 m, 顶部高程 8.5 m。上部现浇胸墙结构 (与基坑支护结构结合作为围堰), 顶部高程为 13.91 m (坑外设计洪水位为 12.91 m), 厚 500 mm, 最低开挖面高程约为 -10 m。基坑右侧采用单排地下连续墙支护结构 (进入岩层止水), 墙厚 1200 mm, 墙顶高程为 5.00 m。墙后平台宽 15 m, 之后采用 1:2.5 斜坡与原地面衔接, 斜坡采用喷射混凝土+钢花管进行防护。

本工程基坑内支撑为钢筋混凝土支撑, 选用水平对撑、八角撑、连系梁组合桁架形式, 支撑沿基坑纵向间距为 4.25 m, 共设 2 层, 第一层截面 1.1 m×1 m (高×宽), 第二层为 1.2 m×1.1 m (高×宽)。沿支撑方向设置 5 排立柱, 跨度为 13.5 m。为减小地下连续墙的变形及对邻近一线船闸的影响, 在双排地下连

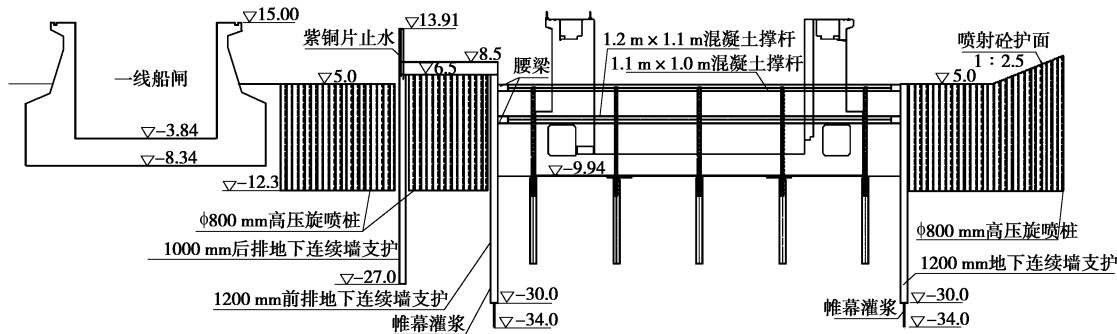


图 1 清远二线船闸闸室段基坑剖面图

Fig. 1 Excavation profile of sluice chamber section of second-line ship lock in Qingyuan

表 1 各土层硬化土模型取值

Table 1 Values of soil hardening model

土层	厚度/m	$\gamma /(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi /(^{\circ})$	$\psi /(^{\circ})$	$E_{50}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$m$	$R_f$
填砂	4.6	16.0	0.0	22.0	0.0	6.0	6.0	18.0	0.5	0.9
淤泥质粉质黏土混粉砂	11.2	17.4	12.1	5.1	0.0	3.6	3.6	18.0	0.8	0.9
粉细砂	9.7	17.0	0.0	28.0	0.0	9.0	9.0	27.0	0.5	0.9
卵石土	6.2	20.0	0.0	36.0	6.0	30.0	30.0	90.0	0.5	0.9
中风化岩	—	20.0	60.0	32.0	2.0	100.0	100.0	500.0	0.5	0.9
加固土体	17.3	18.0	30.0	24.0	0.0	30.0	30.0	90.0	0.5	0.9

续墙之间及基坑两侧主动区土体，采用格栅式平面布置的Φ800 mm 高压旋喷桩加固，桩底高程需保证穿透淤泥质粉质黏土混粉砂层 1.5 m 以上。

### 3 基坑开挖有限元建模

为准确地模拟带撑双排地下连续墙及邻近一线船闸闸室的受力及变形状况，以 MAIDAS GTS 有限元软件进行数值模拟分析，岩土体本构采用硬化土(HS)模型，根据实际情况建立二维平面有限元模型(见图 2)。

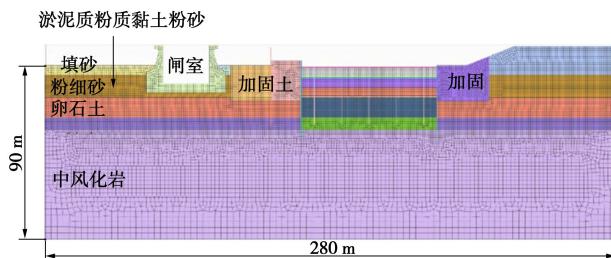


图 2 基坑支护二维有限元模型

Fig. 2 Two-dimensional finite element model for supports of foundation pit

#### 3.1 模型及参数选取

二线船闸基坑为长条形，基坑开挖长度和深度比为 21.7，长度与宽度比为 5，根据以往经验<sup>[5]</sup>，二维平面应变模型和三维模型的计算结果基本一致，故建立基坑中部剖面二维平面模型是合理的。基坑宽度为 65 m，开挖深度 15 m，为尽量消除模型边界条件对基

坑的影响，模型尺寸取 280 m×90 m，模型左右两端施加水平约束，底部施加水平和竖直约束。岩土体及船闸结构采用平面应变单元，地连墙、连板、砼支撑、立柱等采用梁单元模拟，并在地连墙、连板与土体之间设置界面单元来模拟支护结构与岩土体之间的接触行为。为了合理模拟基坑开挖过程中土体卸荷行为，减少基坑底部回弹对支护结构变形的影响，岩土体本构模型采用硬化土(HS)模型<sup>[6]</sup>。该模型可以模拟土体应力增量随应变逐渐减小的硬化现象，能更好反映土体卸荷时的应力-应变关系，对于基坑开挖过程中土体卸荷引起的结构和土体变形，能够给出比较合理的预测。根据地勘报告及硬化土模型参数取值方法<sup>[7-9]</sup>，并结合相关经验，各土层 HS 模型主要参数见表 1。

#### 3.2 计算工况

根据基坑开挖实际施工过程，开挖阶段分为 3 个工况：

工况 1：施工第一层内支撑(底部高程 3.8 m)，并挖土至第二层内支撑底(-1.34 m 高程)；

工况 2：施工第二层内支撑，并挖土至-6 m 高程；

工况 3：挖土至-10 m 高程。

## 4 数值计算结果及实测对比分析

#### 4.1 前排地下连续墙水平位移

双排地下连续墙支护结构中的前排地下连续墙有限元各工况水平位移数值及实际测斜值如图 3 所示。

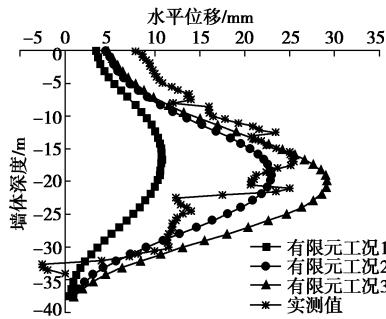


图3 前排地下连续墙水平位移

Fig. 3 Horizontal displacements of front diaphragm walls

有限元结果显示,前排墙各工况最大水平位移依次为10.7, 23.0, 29.1 mm, 最大位移为基坑开挖深度(15 m)的0.194%, 其中各工况的水平位移增量分别占最大水平位移的36.8%、42.3%、20.9%; 且随着基坑开挖, 水平位移最大值所处位置逐渐向下移动, 最终开挖阶段的水平位移发生在墙体深度-19.8 m处, 位于基坑底部(对应墙体深度-17.5 m处)附近; 各工况的墙体顶部位移量分别为3.4, 4.6, 4.7 mm, 其中各开挖步的水平位移增量分别占顶部总位移的72.4%、25.5%、2.1%; 前排墙的水平位移特性表现为中间大、两头小的弓形特征, 符合典型的深厚软土中内支撑开挖基坑变形的规律。

地下连续墙实际测斜数据显示, 其变形特性也符合有限元结果中的弓形特征, 最大位移发生在坑底附近, 为25.6 mm, 占基坑开挖深度的0.171%, 墙体顶部位移值为7.8 mm。有限元结果与实际测斜数据较接近, 整体上两者变形特征一致, 变形趋势大致吻合。

#### 4.2 后排地下连续墙水平位移

双排地下连续墙支护结构中的后排地下连续墙有限元各工况水平位移数值及实际测斜值如图4所示。

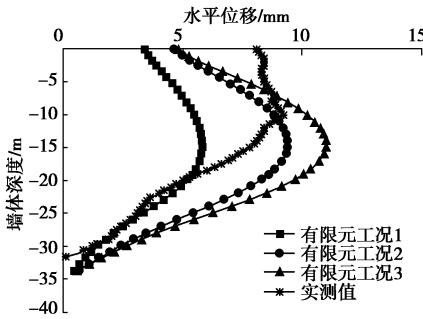


图4 后排地下连续墙水平位移

Fig. 4 Horizontal displacements of rear diaphragm walls

有限元结果显示, 后排墙水平位移特性也呈弓形, 位移量明显较前排墙小, 最大位移量发生在坑底附近, 大小依次为5.8, 9.4, 11.0 mm, 最大位移为基坑开挖深度(15 m)的0.073%, 其中各工况的水平位移增量分别占最大水平位移的52.7%, 32.7%, 14.5%; 各工况墙体顶部位移量分别为3.4, 4.6, 4.7 mm, 与前排墙顶部位移一致。

地下连续墙实际测斜数据显示, 顶部位移为8.1 mm, 与前排墙实测值相差不大, 最大位移值为9.2 mm, 比有限元计算结果略小, 发生在墙体深度约-10 m处, 位移趋势与有限元结果具有一定相似性。

#### 4.3 邻近一线船闸水平位移

邻近船闸闸室水平位移有限元云图如图5显示, 基坑开挖完毕时, 邻近一线船闸闸室产生向基坑内的水平位移, 水平位移在左右侧闸墙及船闸底板中沿高程呈规律性分布(高程越高, 位移值越大), 最大水平位移位置发生在闸室右侧闸墙的顶部。左侧闸墙顶部水平位移量为5.64 mm, 右侧闸墙为6.11 mm, 表明基坑开挖过程中土体卸荷引起的邻近一线船闸闸室水平位移量较小。

根据邻近船闸闸室顶部部分水平位移监测数据显示(部分邻近闸室顶部位移观测点平面示意图见图6所示, 水平位移监测值见表2), 左右侧闸墙顶部在大多数剖面呈向基坑内位移的形式, 其中最大位移值为YXC46测点的6.7 mm, 位移量较小。与有限元结果相比, 其位移趋势一致, 数值上在同一个数量级, 相差不大, 在实际情况中, 闸室变形除了受邻近基坑开挖卸荷影响, 还可能与温度应力等因素有关, 其结果表明在实际基坑开挖过程中, 邻近闸室顶部水平位移较小, 处于安全范围内。

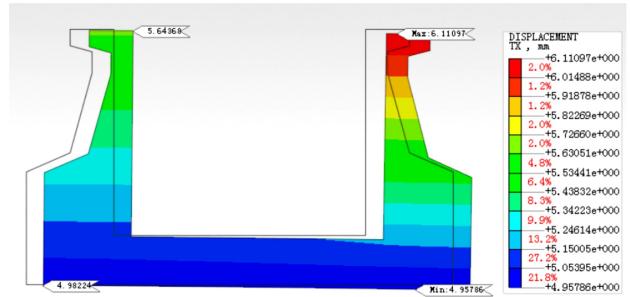


图5 一线船闸水平位移云图

Fig. 5 Nephogram of horizontal displacement of first-line ship lock

表2 一线船闸闸室顶部累计水平位移

Table 2 Horizontal displacements at top of lock chamber of first-line ship lock

点号	YXC47	YXC46	YXC45	YXC44	YXC43	YXC42	YXC15	YXC16	YXC17	YXC18	YXC19	YXC20
位移/mm	2.1	6.7	4.8	2.6	5.7	5.7	4.5	1.3	-0.2	0.2	-2.4	0.6

注: 位移量+表示向坑内位移, 位移量-表示向坑外位移

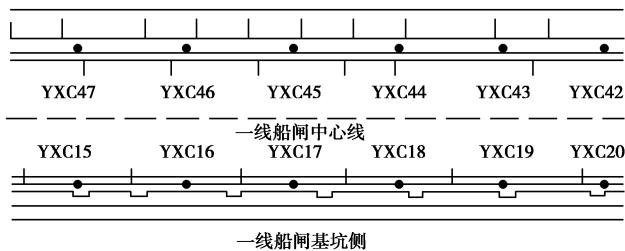


图 6 一线船闸闸室顶部位移观测点平面示意图

Fig. 6 Schematic diagram of displacement observation points at top of gate of first-line ship lock

## 5 结 论

针对带撑双排地下连续墙支护形式的清远二线船闸基坑工程实例, 基于硬化土本构, 采用 MAIDAS GTS 有限元软件对基坑支护工程开挖过程进行二维平面有限元分析并与实测数据对比, 得到如下结论:

(1) 有限元分析结果表明, 前排墙及后排墙的水平位移特征都呈中间大、两头小的弓形特征, 且前排墙的最大水平位移发生在基坑底面附近, 后排墙整体位移明显比前排墙小; 邻近船闸闸室产生向坑内的水平位移, 最大水平位移位置发生在闸室右侧闸墙的顶部。

(2) 采用硬化土本构模型模拟本基坑工程具有较好的精度, 有限元结果中的支护结构变形特性和邻近一线船闸闸室水平位移性能较好地符合实测值。

(3) 有限元分析结果及实测数据表明, 本基坑工程中的支护结构水平位移及邻近船闸闸室水平位移较小, 证明了带撑双排地下连续墙结构在本工程中的适用性。

## 参考文献:

- [1] 潘宣何. 采用排桩支护结构的基坑开挖对邻近船闸的影响研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010. (PAN Xuan-he. The impact analysis of a nearby navigation lock by soldier-piles supporting structure foundation pit excavation[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2010. (in Chinese))
- [2] 凌 威. 嵌岩双排支护桩在邻近船闸深基坑工程中的应用研究及数值分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013. (LING Wei. Application research and bumerical analysis of rock-socketed double-row retaining pile in deep foundation pit of neighboring lock[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2013. (in Chinese))

Wei. Application research and bumerical analysis of rock-socketed double-row retaining pile in deep foundation pit of neighboring lock[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2013. (in Chinese))

- [3] 厉世龙. 坡桩支护基坑开挖对邻近船闸的影响研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015. (LI Shi-long. The research on impact foundation pit excavation of neighboring lock with support of slopes and row-piles[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015. (in Chinese))
- [4] 罗鹏飞, 刘晓平, 曹周红, 等. 邻近船闸基坑开挖安全影响因素[J]. 水运工程, 2016, 14(4): 113 - 117. (LUO Peng-fei, LIU Xiao-ping, CAO Zhou-hong, et al. Influential factors on safe excavation of foundation pit near lock[J]. Port & Waterway Engineering, 2016, 14(4): 113 - 117. (in Chinese))
- [5] FINNO R J, BLACKBURN J T, ROBOSKI J F. Three-dimensional effects for supported excavations in clay[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(1): 30 - 36.
- [6] SCHANZ T, VERMEER P A, BONNIER P G. Beyond 2000 in computational geotechnics, chapter formulation and verification of the hardening-soil model[M]. Rotterdam: Balkema, 1999: 281 - 297.
- [7] 宋 广, 宋二祥. 基坑开挖数值模拟中土体本构模型的选取[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 86 - 94. (SONG Guang, SONG Er-xiang. Selection of soil constitutive models for numerical simulation of foundation pit excavation[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(5): 86 - 94. (in Chinese))
- [8] 谢建斌, 曾宪明, 胡井友, 等. 硬化土模型在桩锚与桩撑组合支护深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 2): 56 - 63. (XIE Jian-bin, ZENG Xian-ming, HU Jing-you, et al. Application of hardening soil model in deep excavations supported by pile-anchor and pile-braced composite supporting structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 56 - 63. (in Chinese))
- [9] 黄忠铭. 基坑双排桩计算模型的探讨[D]. 广州: 华南理工大学, 2016. (HUANG Zhong-ming. Discussion on calculation model of double-row piles[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese))

(本文责编 明经平)