

DOI: 10.11779/CJGE2024S10030

钢板桩加固岸坡变形与桩土相互作用机理研究

张健^{1,2}, 杨立功^{*1,2}, 张宇亭^{1,2}, 赵跃^{1,2}, 刘勇军³, 吴文华³

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所岩土工程研究中心, 天津 300456; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所港口水工建筑技术国家工程研究中心, 天津 300456; 3. 湖州市港航管理中心, 浙江 湖州 313000)

摘要: 针对航道开挖过程中护岸边坡板桩变形及桩土相互作用机制, 通过选取典型断面进行现场试验的方法, 对板桩结构位移、土压力及临近土体变形等关键物理量参数进行监测, 并结合理论计算方法对板桩结构及后方岸坡土体稳定性进行了详细分析, 探究了复杂地质条件下桩后土体变形与主动土压力的内在关联, 得到了部分有益结论。板桩护岸后方边坡土体水平位移随开挖进行逐渐增加, 边坡达到平衡状态时不同深度土体位移约为 0.8~1 mm, 板桩桩顶水平位移变化量约为 1.2 mm。航道开挖过程中板桩主动侧土压力随开挖的进行逐渐减小, 不同埋深位置桩侧土压力减小值约为 1 kPa, 与理论计算结果比较发现现场试验结果均较小, 说明上述理论计算方法对于本试验结构形式而言土压力计算略偏保守。

关键词: 钢板桩; 岸坡加固; 现场试验; 土体位移; 桩土相互作用

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S1-0202-05

作者简介: 张健(1991—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事岩土工程防灾减灾方面的研究工作。E-mail: 201521601031@stu.hebut.edu.cn。

Deformation and pile-soil interaction mechanism of bank slopes reinforced by steel sheet piles

ZHANG Jian^{1,2}, YANG Ligong^{1,2}, ZHANG Yuting^{1,2}, ZHAO Yue^{1,2}, LIU Yongjun³, WU Wenhua³

(1. Geotechnical Engineering Research Center, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China; 2. National Engineering Research Center of Port Hydraulic Construction Technology, Tianjin Research Institute for Water

Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China; 3. Huzhou Port and Shipping Management Center, Huzhou

313000, China)

Abstract: In view of the deformation of sheet piles and the pile-soil interaction mechanism of revetment slopes during channel excavation, the key physical parameters such as displacement of sheet piles, earth pressure and deformation of the adjacent soils are monitored by selecting typical sections for the field tests. Combined with the theoretical calculation, the stability of the sheet piles and the bank slope is analyzed, and the interaction mechanism between the soil deformation behind the piles and the active earth pressure with complex geological conditions is explored, and some useful conclusions are drawn. The horizontal displacement of the soils behind the sheet piles increases gradually with the excavation. When the slope reaches stability, the soil displacement at different depths is about 0.8~1 mm, and the horizontal displacement at the top of the sheet piles is about 1.2 mm. During channel excavation, the active earth pressure of the sheet piles gradually decreases with the excavation, and the reduction value of the earth pressure at pile side at different depths is about 1 kPa. Compared with the theoretical results, the field test results are small, indicating that the theoretical calculation is slightly conservative for the field tests. The conclusion can provide a useful reference for the revision of the existing related specifications for the sheet piles.

Key words: steel sheet pile; bank revetment reinforcement; field test; soil displacement; pile-soil interaction

0 引言

随着内河航运的不断发展, 部分既有航道等级将不能满足大吨位船舶的通行, 通过对既有航道的疏浚加深来提升航道等级进而满足更大吨位船舶通行将成为今后一段时期较为常见内河航道整治工程。然而,

在内河航道疏浚加深整治工程中, 存在大量内河航道

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (TKS20240401)

收稿日期: 2024-04-29

*通信作者 (E-mail: 65481875@qq.com)

穿越城市区域, 其沿岸较近区域存在大量住宅、永久性农田、厂房及道路等设施, 航道等级提升过程中需要对岸坡进行特别加固, 因此板桩护岸结构开始被提出并使用。

国内外部分学者对于板桩关问题已进行了大量研究工作。Milligan^[1]较早通过模型试验的手段发现了挡土墙后的土拱效应, 并针对该问题进行了详细研究。蔡正银^[2]通过对板桩与土相互作用的系列研究, 以经典土压力理论为基础, 提出了多种新型码头板桩形式。徐光明等^[3]开展了多组土工离心模型试验, 对于新型板桩码头群桩基础不同空间分布位置桩基受力变形情况进行了研究。针对板桩护岸结构后方土压力计算、结构受力变形机理以及抗震性能等多方面问题已有学者进行了研究工作^[4-11]。此外, 杨斌等^[12]通过大量模型试验结合数值模拟分析, 得出挡墙位移与土压力是一个连续渐变的过程。张常光等^[13-14]针对挡墙位移与土压力间内在联系机理问题进行了大量模型试验、数值分析及理论计算工作, 并提出了一种考虑挡墙位移的土压力数学拟合新方法。

综上所述, 国内外学者针对码头板桩的相关研究已经取得了大量成果, 其中绝大多数计算方法的提出及验证都是基于缩尺模型试验及数值模拟结果, 其在实际工程中的适用性有待进一步确认。此外, 新建板桩在内河航道的加固机理尚不明确、土压力及稳定性计算方法也不尽合理。为此, 本文结合东宗线湖州段四改三航道整治工程, 利用现场原型试验的方法, 揭示板桩-原有护岸结构受力变形机理, 为实现更加科学合理的内河限制性航道板桩加固目标提供科学参考。

1 计算方法

在考虑板桩靠土侧和开挖侧土压力主被动情况时, 通常按照 Rankine 或 Coulomb 理论来计算极限土压力。但实际工程中板桩一般难以达到极限状态, 尤其是被动极限土压力导致的极限位移远超设计允许值。因此, 本文采用了张常光等^[14]提出的数学拟合新方法, 通过对板桩结构土压力与土体位移之间关系的研究对现场试验进行计算分析。

板桩结构作为挡土结构的一种, 其后方土体位移与土压力之间的关系曲线趋势已基本确定 (图 1)。其中板桩无位移发生时受到静止土压力 p_0 作用, 当板桩向临空面一侧移动时, 土压力逐渐减小, 最终极限状态达到主动土压力 p_a , 对应的位移为主动极限位移 ξ_a , 当板桩向挡土面一侧移动时, 土压力逐渐增大, 最终极限状态达到被动土压力 p_p , 对应的位移为被动极限位移 ξ_p 。

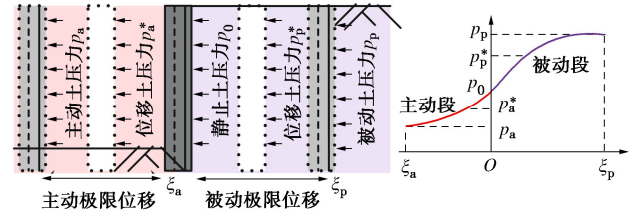


图 1 板桩位移-土压力关系示意图

Fig. 1 Relationship between displacement and earth pressure of sheet pile

当板桩受到土压力或外部荷载作用超过静止土压力时, 板桩随即会发生移动。根据板桩受到主、被动土压力情况将这一低于或高于静止土压力的作用力定义为松弛应力 p_r 或挤压应力 p_e , 二者也是土体内部变形的宏观表现, 关系如下:

$$p_r = p_0 - p_a^* \quad , \quad (1)$$

$$p_e = p_p^* - p_0 \quad . \quad (2)$$

式中: p_a^* 为主动段位移土压力; p_p^* 为被动段位移土压力。

通过引入位移函数, 松弛应力和挤压应力可表示为

$$p_r = k_{a\xi 1}(p_0 - p_a) \quad , \quad (3)$$

$$p_e = k_{p\xi 1}(p_p - p_0) \quad . \quad (4)$$

式中: $k_{a\xi 1}$, $k_{p\xi 1}$ 分别为主、被动状态下引入的位移函数。

将式 (3), (4) 分别代入式 (1), (2), 可得

$$p_a^* = p_0 + k_{a\xi 1}(p_p - p_0) \quad , \quad (5)$$

$$p_p^* = p_0 + k_{p\xi 1}(p_p - p_0) \quad . \quad (6)$$

式 (5), (6) 可统一表达为

$$p^* = p_0 + k_{\xi 1}(p_{a,p} - p_0) \quad . \quad (7)$$

式中: p^* 为位移土压力, $p_{a,p}$ 为主动或被动土压力, $k_{\xi 1}$ 为统一表达的位移函数。

采用 Sigmoid 位移函数拟合得到 $k_{\xi 1}$ 表达式为

$$k_{\xi 1} = \frac{n}{1 + m e^{b\left(\frac{\xi}{\xi_{a,p}}\right)}} + \frac{l}{1 + m} \quad . \quad (8)$$

式中: m , l , n , b 均为与土体黏聚力和內摩擦角有关的函数; ξ 为板桩位移; $\xi_{a,p}$ 为板桩极限位移。

将静止土压力和极限土压力条件下板桩位移作为边界条件, 进一步整理式 (8) 可得

$$k_{\xi 1} = \frac{\left[1 - e^{b\left(\frac{\xi}{\xi_{a,p}}\right)}\right](1 + e^b)}{\left[1 + e^{b\left(\frac{\xi}{\xi_{a,p}}\right)}\right](1 - e^b)} \quad . \quad (9)$$

将式 (9) 代入式 (7), 整理得

$$p^* = p_0 + \frac{\left[1 - e^{b\left(\frac{\xi}{\xi_{a,p}}\right)}\right](1 + e^b)}{\left[1 + e^{b\left(\frac{\xi}{\xi_{a,p}}\right)}\right](1 - e^b)}(p_{a,p} - p_0) \quad (10)$$

2 工程概况

2.1 航道整治与板桩加固

工程起自京杭运河东宗支线南浔东迁, 终于练市戴家村, 以湖嘉申线与京杭运河四家村航段为界, 划分 3 个设计分段, 航道整治总里程约 23.7 km, 护岸 42.20 km, 其中新建护岸 2.05 km, 加固护岸 40.15 km (图 2)。

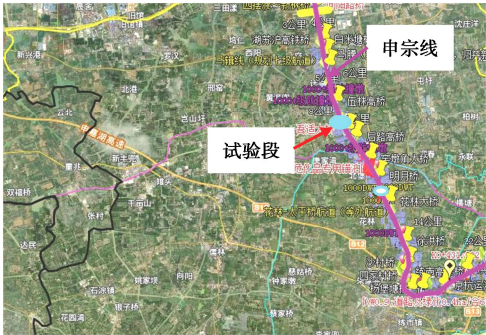


图 2 航道整治工程示意图
Fig. 2 Waterway regulation

2.2 地质条件

航道沿线浅部主要分布杂填土、塘泥、粉质黏土、海积淤泥质粉质黏土, 局部分布冲海积粉土、海积软塑粉质黏土等 (图 3), 各层土体物理力学指标如表 1 所示。对航道影响最大的是海积淤泥质粉质黏土及淤泥质粉质黏土, 该层属高含水率、高压缩性、高灵敏度的软土, 对岸坡的抗滑稳定、抗冲稳定、抗震稳定均存在不利影响, 易发生滑坡、坍塌、垮塌崩岸等工程地质问题。

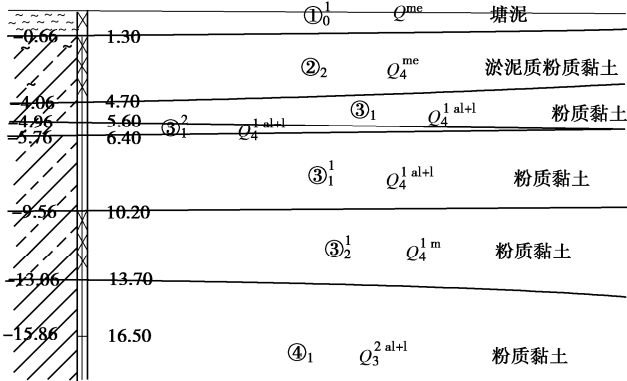


图 3 典型试验段地质剖面图
Fig. 3 Geological profile of test section

表 1 土体物理、力学指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soils					
分层 代号	层厚/ m	含水率/ %	密度/ (g·cm ⁻³)	固结快剪	
				黏聚力/ kPa	φ / (°)
① ₀ ¹	1.30	57.3	1.76	10.6	7.3
② ₂	3.40	39.9	1.83	13.0	9.2
③ ₁	0.90	23.6	1.94	51.0	17.3
③ ₁ ²	0.80	23.6	1.96	32.0	15.2
③ ₂ ¹	3.50	37.8	1.81	26.0	14.0
④ ₁	3.50	22.6	1.96	74.0	20.6

2.3 现场监测方案

本项目为老护岸结构的板桩加固工程, 新老结构组合后受力情况复杂, 护岸加固结构内力和位移、结构所受土压力和土体位移是影响加固方案安全性的重要因素。因此, 本项目拟开展结构位移、板桩土压力、土体深层水平位移监测。其中, 板桩所受土压力和土体深层水平位移是重点监测内容。

结合上述情况, 现场试验选取整体工程试验段中的一个典型断面进行监测。该断面板桩不同深度位置布设土压力计、岸坡土体变形通过布置侧斜管监测(如图 4)。现场传感器布置如图 5 所示。

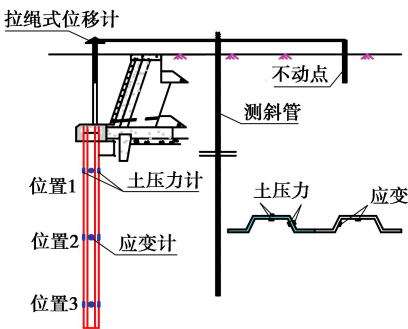


图 4 现场试验方案设计
Fig. 4 Field test scheme design



图 5 现场传感器布置
Fig. 5 Field layout of sensors

另外, 板桩桩顶水平位移也是监测的重点, 由于板桩没于水中, 因此可以在板桩顶的帽梁上进行植筋并露出水面, 然后通过拉线式传感器对其进行位移监测。由于现场试验过程拉绳式位移计容易受外界影响产生异常, 为保证桩顶位移数据采集可靠, 布置了两组拉绳式位移计, 试验段设计工况及测点布置如表 2 所示。

表 2 试验段设计工况及测点位置

桩型	桩长/m	航道开挖深度/m		桩身监测点距桩顶/m	岸坡土体变形监测
		航道中心线	航道坡脚		
钢板桩	6.0	0.75~0.9	2.1~2.2	1, 3, 5	1 个测斜管

3 现场试验分析

3.1 岸坡土体及桩顶位移

钢板桩护岸边坡土体位移监测结果如图 6 所示。开挖过程中土体出现了一定程度的变形，且浅层变形较深层更为显著。开挖完成后较短时间内不同深度边坡土体均发生了较为显著的变化，考虑产生该现象的主要原因是临近断面航道开挖对试验段的影响。随着时间的持续边坡土体变形基本趋于稳定，这也验证了上述临近断面开挖对试验段的影响情况。在试验后期一段时间内不同深度边坡土体位移基本区域稳定，埋不同埋深位置附近土体最终位移量分别约为 1.0，0.8 mm。

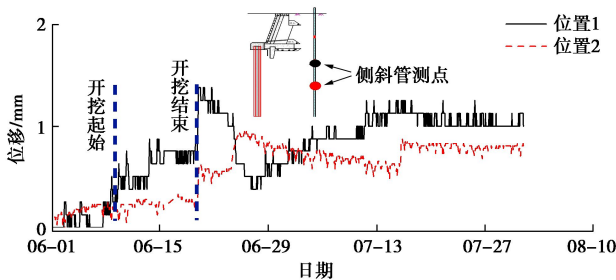


图 6 岸坡土体位移

Fig. 6 Soil displacements of bank revetment

图 7 给出了板桩顶部位移随试验段开挖变化情况，结合上述土体位移及位置#2 处桩顶位移可以推断出位置#1 处的拉绳位移计数据异常，因此，主要通过位置#2 处数据对桩顶位移进行分析。通过分析可发现桩顶位移在整个开挖以及之后的较长时间内均未出现较大变化，且在试验后期基本区域稳定，和上述边坡土体位移变化规律基本类似，互相验证了数据的准确性，桩顶最终位移约为 1.2 mm。

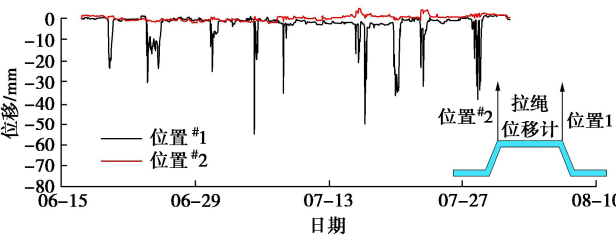


图 7 桩顶位移

Fig. 7 Displacements of pile top

航道开挖过程中、开挖后岸坡土体、桩顶位移均较小，一方面与航道开挖深度较小有关，另一方面航道静水压力对板桩位移有约束作用，另外，桩顶面以上

老挡墙及后方长期固结土体对板桩位移也有限制作用。

3.2 桩侧土压力

钢板桩板桩土压力监测结果如图 8 所示。通过观察可以发现桩侧土压力随着埋深的增加成规律性增加。开挖过程中不同土层土压力出现了一定幅度的减小，且浅层土体土压力减小趋势最为明显。随着埋深的增加土压力随开挖进行而减小的态势逐渐降低。这与上文中提到的土压力与位移关系相吻合，具体规律在后文进行讨论。

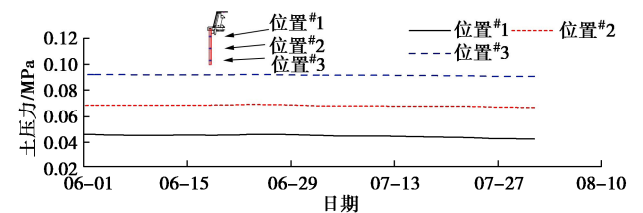


图 8 板桩土压力

Fig. 8 Earth pressures on sheet pile

3.3 理论分析

根据极限土压力理论分别计算式 (10) 中的静止土压力 p_0 和极限土压力 $p_{a,p}$ ，板桩极限位移 $\xi_{a,p}$ 可根据《基坑工程手册》确定。式中参数 b 根据张常光等^[24] 学者的研究表明，可在主动段采用函数的形式进行表示如下：

$$b = 2 \ln \left[\frac{3}{\tan^2 \left(\frac{\pi - \varphi}{4} \right) - 1} + 1 \right] \quad (11)$$

结合式 (10)，(11) 对板桩现场试验过程中的桩侧土压力与位移进行计算，并与上述试验结果进行对比（如图 9）。可以发现不同深度位置处现场试验与理论计算得出的桩侧土压力随土体位移变化趋势相符性较好。但理论计算得出的桩侧土压力随土体位移变化全过程均大于现场试验记录结果。且随位移的增大理论计算与试验偏差有增大趋势。浅层和深层土压力偏差量分别约为 1.88% 和 1.22%。

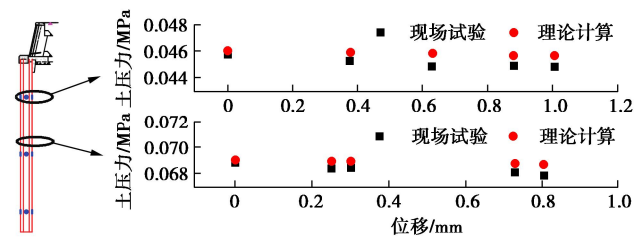


图 9 现场试验与理论计算位移-土压力对比

Fig. 9 Comparison of displacement-earth pressure between field tests and theoretical calculations

4 结 论

本文以东宗线航道提升改造工程为背景，通过现场试验的手段，对航道试验段典型断面板桩临近土体

及结构本身的受力变形监测,分析了岸坡土体变形及板桩受力变形规律,并结合理论计算方法对比了现场试验与理论计算结果的相符性,得到以下4点结论。

(1) 板桩护岸后方边坡土体水平位移随开挖进行逐渐增加,在开挖结束时最大位移达到约1.5 mm。开挖结束后边坡达到平衡状态时浅层土体位移约1 mm,深层土体位移约0.8 mm,表明边坡整体稳定性较好。

(2) 板桩桩顶水平位移在开挖结束后出现增大的趋势,但后期逐渐区域稳定,且最终位移变化量约为1.2 mm。

(3) 航道开挖过程中板桩主动侧土压力随开挖的进行逐渐减小,且减小趋势在开挖结束较长时间内持续存在。不同埋深位置桩侧土压力减小值均在1 KPa左右,表明航道开挖完成后一段时间内的边坡稳定性监测应根据工程具体情况进行考虑。

(4) 位移-土压力理论计算得出的桩侧土压力随土体位移变化全过程均大于现场试验记录结果,说明现有理论计算方法对于本试验结构形式而言土压力计算略偏保守,且实际位移条件下桩侧土压力远未达到主、被动土压力。因此,在后期研究中需对该问题进行更加全面细致研究,为现有板桩相关规范修订提供理论基础。

致谢:感谢湖州市港航管理中心对于本研究的支持与资助。

参考文献:

- [1] MILLIGAN G W E. Soil deformations near anchored sheet-pile walls[J]. *Géotechnique*, 1983, **33**(1): 41-55.
- [2] 蔡正银. 板桩结构土压力理论的创新发展[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(2): 201-220. (CAI Zhengyin. Innovation and development of earth pressure theories for sheet-pile structures[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(2): 201-220. (in Chinese))
- [3] 徐光明, 任国峰, 顾行文, 等. 新型板桩码头群桩基础被动段桩侧压力试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(3): 502-511. (XU Guangming, REN Guofeng, GU Xingwen, et al. Experimental study on lateral pile-soil pressure on passive part of pile groups in innovative sheet-pile wharf[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(3): 502-511. (in Chinese))
- [4] 应宏伟, 蒋波, 谢康和. 考虑土拱效应的挡土墙主动土压力分布[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(5): 90-95. (YING Hong-wei, JIANG Bo, XIE Kang-he. Distribution of active earth pressure against retaining walls considering arching effects[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(5): 90-95. (in Chinese))
- [5] 蒋国栋. 多层地基石板桩墙计算方法与有限元分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009. (JIANG Guodong. The Analysis Research on Computing Method and Finite Element of Sheet-pile Wall in Multi-layer[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese))
- [6] TAN Y, PAIKOWSKY S G. Performance of sheet pile wall in peat[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2008, **134**(4): 445-458
- [7] BILGIN O. Numerical studies of anchored sheet pile wall behavior constructed in cut and fill conditions[J]. *Computers & Geotechnics*, 2010, **37**(3): 399-407.
- [8] CHRISTIE S R. Seismic Design Methods for Anchored Sheet Pile Bulkheads[C]// 12th Triannual International Conference on Ports, Reston, 2010.
- [9] GAZETAS G, GARINI E, ZAFEIRAKOS A. Seismic analysis of tall anchored sheet-pile walls[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, **91**: 209-221.
- [10] JACOBS F, RUIKEN A, ZIEGLER M. Investigation of kinematic behavior and earth pressure development of geogrid reinforced soil walls[J]. *Transportation Geotechnics*, 2016, **8**: 57-68.
- [11] KO Y Y, YANG H H. Deriving seismic fragility curves for sheet-pile wharves using finite element analysis[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, **123**: 265-277.
- [12] 杨斌, 胡立强. 挡土结构侧土压力与水平位移关系的试验研究[J]. *建筑科学*, 2000, **16**(2): 14-20. (YANG Bin, HU Liqiang. Test study on relationship between lateral earth pressure acting on retaining structures and horizontal displacement[J]. *Building Science*, 2000, **16**(2): 14-20. (in Chinese))
- [13] 张常光, 单冶鹏, 高本贤, 等. 刚性挡墙位移土压力的数学拟合公式研究综述[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, **42**(6): 19-30. (ZHANG Changguang, SHAN Yepeng, GAO Benxian, et al. State-of-the art review on displacement-dependent earth pressure formulations of rigid retaining walls via mathematical fitting functions[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, **42**(6): 19-30. (in Chinese))
- [14] 张常光, 单冶鹏, 高本贤. 考虑挡墙位移的土压力数学拟合新方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, **40**(10): 2124-2135. (ZHANG Changguang, SHAN Yepeng, GAO Benxian. A new mathematical fitting formulation of earth pressure considering the displacement of retaining walls[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, **40**(10): 2124-2135. (in Chinese))

(编校: 孙振远)