

文章编号:1673-2049(2018)01-0033-07

砂土潮湿状态下悬臂式挡土墙 RBT 模型试验

张宏博^{1,2}, 崔兵兵^{1,2}, 陈 奇^{1,2}, 孟庆宇^{1,2}, 宋修广^{1,2}

(1. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061;

2. 山东大学 山东省路基安全工程技术研究中心, 山东 济南 250061)

摘要: 鉴于悬臂式挡土墙在实际运营过程中受外界因素影响多呈现为挡土墙平移和绕墙底转动的组合位移(RBT)变形模式,且墙背填料经常处于潮湿状态,经典土压力理论不能合理反映其实际受力状态。为了揭示土体潮湿状态及 RBT 模式下悬臂式挡土墙墙后土压力分布规律,设计制作了基于 RBT 模式的悬臂式挡土墙模型试验装置,并开展了不同 RBT 转动位移量下的模型试验,得到了 RBT 模式下悬臂式挡土墙墙后土压力分布规律,并与现有理论对比,验证了试验结果的可靠性。依据测试结果,进行了理论公式验证。结果表明:对悬臂式挡土墙施加向外转动位移时,由于潮湿砂土存在较为明显的假性黏聚力,墙背土压力随墙体转动位移的增大而呈现较为明显的先减小后增大的趋势;随着转角增大,水平土压力减小,且下部土体减小趋势较缓,墙体中部位置水平土压力计算值大于实测值。

关键词: RBT 模式;砂土潮湿状态;悬臂式挡土墙;模型试验;土压力

中图分类号: TU411

文献标志码: A

Experiment on RBT Model Test of Cantilever Retaining Wall Based on Sand Wet State

ZHANG Hong-bo^{1,2}, CUI Bing-bing^{1,2}, CHEN Qi^{1,2}, MENG Qing-yu^{1,2}, SONG Xiu-guang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China;

2. Shandong Engineering & Technology Research Center for Subgrade Safety,
Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: In the actual operation process, the cantilever retaining wall was mostly combined with shift of retaining wall and rotation around the bottom of wall (RBT) deformation mode caused by external factors, and the wall back packing was often in the wet state, so the classical earth pressure theory could not reasonably reflect the actual force state. In order to reveal the earth pressure distribution law of cantilever retaining wall under soil moist and RBT mode, the cantilever retaining wall test device based on RBT mode was designed and fabricated, and the model tests of different RBT rotation displacements were carried out. According to the test results, the theoretical formula was verified. The results show that when the cantilever retaining wall exerts an outward rotation displacement, the wet sand has a more obvious pseudo cohesion, the earth pressure of the wall appears obvious trend of decreasing first and then increasing with the increase of wall rotation displacement, with the angle increasing, the horizontal earth pressure decreases, and the lower soil decreases more slowly. The calculation values of horizontal

收稿日期:2017-07-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51208284);山东省科技发展计划项目(2013GSF11603)

作者简介:张宏博(1977-),男,山东济宁人,副教授,工学博士,E-mail:zhanghongbo@sdu.edu.cn。

central soil pressure are greater than the measured values.

Key words: RBT model; sand wet state; cantilever retaining wall; model test; earth pressure

0 引 言

悬臂式挡土墙作为一种常见的支挡结构,广泛用于土木、水利、交通等行业的相关工程中,但在实际运营过程中易受外界环境因素影响,不少学者^[1-6]研究发现其位移状态与墙背填料性质处于动态变化过程中,多呈现为挡土墙平移和绕墙底转动的组合位移(RBT)变形模式,且墙背填料经常处于潮湿状态。这些问题的出现对悬臂式挡土墙墙背土压力的影响较大,目前经典土压力理论难以合理反映。国内外学者进行了相关的研究,如王元战等^[7-8]系统地推导了挡土墙平移、绕墙底转动和绕墙顶转动时土压力的分布,得到了位移模式对土压力的合力无影响,但对土压力分布和合力作用点位置影响显著的结论。张吉全等^[9]对绕墙顶转动位移模式下的挡土墙被动土压力进行了研究,用水平层分析法给出了墙体绕墙顶转动时的土压力解析公式,并且与库仑极限土压力进行了比较,结果显示:土压力计算值小于库仑极限土压力,合力作用点在 0.27 倍墙高处。马文国等^[10-11]用水平层分析法详细推导了 3 种位移模式下土压力与位移的关系,得到主动、被动土压力的解析式,并得到试验数据的验证。

以上研究多集中在刚性挡土墙平动位移、绕墙底转动和绕墙顶转动这 3 种典型位移模式,而对于组合位移模式 RBT 则研究较少。同时,关于潮湿状态的墙背填料对土压力影响的研究也相对较少。因此,本文设计制作了基于 RBT 模式的悬臂式挡土墙模型试验装置,开展了不同 RBT 转动位移量下的模型试验,揭示了土体潮湿状态及 RBT 模式下悬臂式挡土墙墙后土压力分布规律,其研究结果具有一定的工程应用价值。

1 方案设计

1.1 模型结构组成

参考文献[12]~[18]设计了如图 1,2 所示的室内模型试验装置,试验装置尺寸为 2.4 m×1.0 m×0.8 m。悬臂式挡土墙由围护墙、底座、位移控制系统及监测系统组成。模型槽各部分均采用厚度为 2 cm 的钢板制作而成。模型槽内侧布置有机玻璃板,用于观察土体位移。



图 1 RBT 模式悬臂式挡土墙模型装置实体图
Fig. 1 Entity Diagram of RBT Model Cantilever Retaining Wall Model Device

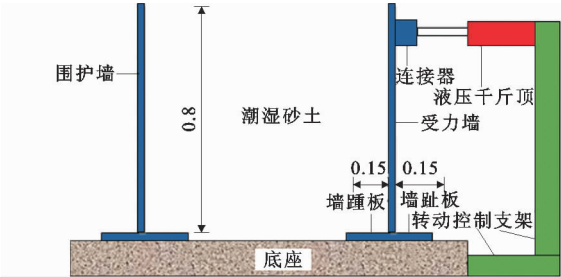


图 2 RBT 模式悬臂式挡土墙装置构造简图(单位:m)
Fig. 2 Schematic Diagram of RBT Model Cantilever Retaining Wall Device Structure (Unit:m)

1.2 模型填料

以含水率为 4% 的潮湿砂土作为研究对象。按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)要求测试填料相关的物理、力学指标,得到墙后填土颗粒筛分曲线,如图 3 所示。通过计算可知,砂土的细度模数 $M_x=2.435$,为中砂。

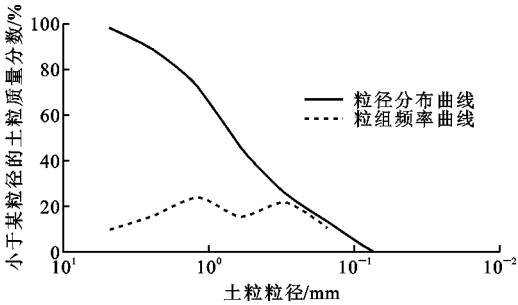


图 3 颗粒分析试验曲线

Fig. 3 Particle Analysis Test Curves

由图 3 可知,有效粒径 d_{10} 为 0.12 mm,限定粒径 d_{60} 为 0.82 mm, d_{30} 为 0.36 mm。不均匀系数

$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 6.83$, 曲率系数 $C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}} = 1.32, C_u \geq 5$ 且 $C_c = 1 \sim 3$, 因此土的级配良好, 为不均匀土。

通过测试得到试验用砂的基本力学参数(表 1)。

表 1 试验用砂的基本力学性能

Tab. 1 Basic Mechanical Performance of Test Sand

细度模数	土体压缩模量/MPa	含水率/%	泊松比	土粒相对密度	土体黏聚力/kPa	土体内摩擦角/(°)	最大干密度/(g·m ⁻³)	最小干密度/(g·m ⁻³)	实测重度/(kN·m ⁻³)
2.4	30	4.01	0.35	2.67	3	38	1.82	1.17	16.85

表 2 分级加载工况

Tab. 2 Graded Loading Conditions

工况	第 1 级	第 2 级	第 3 级	第 4 级	第 N 级
侧向位移 ΔS/mm	2	4	6	8	2N

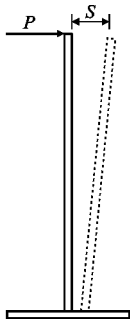


图 4 位移加载示意

Fig. 4 Sketch of Displacement Loading

1.4 监测方案设计

1.4.1 土压力盒的布设

为监测不同工况下挡土墙墙背侧向土的受力特性,在悬臂式挡土墙沿高度方向间隔 100 mm 布设 8 个土压力盒,沿挡土墙中部左右两侧各 50 mm 处布设 2 排,土压力盒布置如图 5 所示。

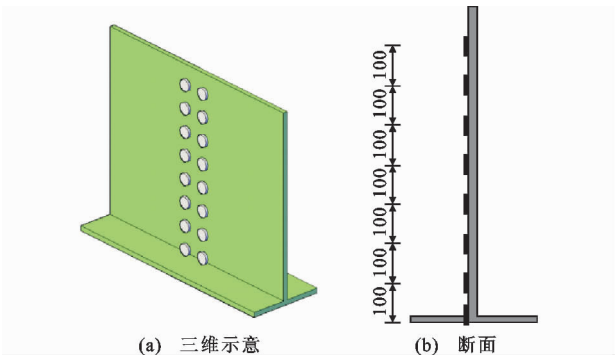


图 5 土压力盒布置(单位:mm)

Fig. 5 Arrangement of Soil Pressure Boxes (Unit:mm)

1.4.2 位移计的布设

为了研究悬臂式挡土墙转动角度与侧向土压力之间的关系,在挡土墙外侧布设位移计监测墙体侧向位移,在挡土墙外侧两侧沿高度方向每隔 0.2 m

1.3 试验工况设计

本试验采用分级加载的方式对墙体施加转动位移,加载工况如表 2 所示,加载示意如图 4 所示,其中, P 为侧向力, S 为墙体位移。

布设 1 个位移计,位移计布置如图 6 所示。

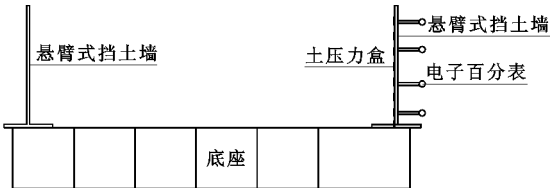


图 6 位移计布置

Fig. 6 Arrangement of Displacement Sensors

2 土压力分布规律

2.1 土压力分布规律研究

依据模型试验结果,绘制 RBT 模式下悬臂式挡土墙位移变化曲线以及墙背土压力-位移的关系曲线,如图 7~9 所示,其中 H 为墙体总高度, h 为墙体高度, ΔS_{\max} 为墙体最大侧向位移。

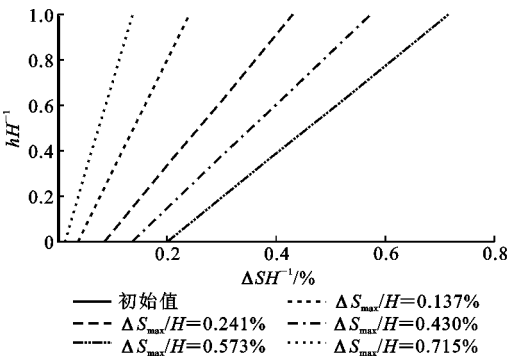


图 7 墙体水平位移、转动角度沿墙高的变化规律

Fig. 7 Change Laws of Horizontal Displacement of Wall, Rotation Angle Along Wall

由图 7 可知,悬臂式挡土墙发生 RBT 转动时,墙身变形底部小、上部大,主要原因在于基底摩擦阻力的存在极大限制了挡土墙变形,因此,墙体近似于悬臂板结构,在较小侧向位移条件下,墙身变形近似线性分布。

由图 8 可知,随着墙体侧向位移的增大, $0 \sim 1/3H$ 范围内墙背土压力呈现较为明显的先减小后增大趋势,这与已有刚性挡土墙位移与土压力关系

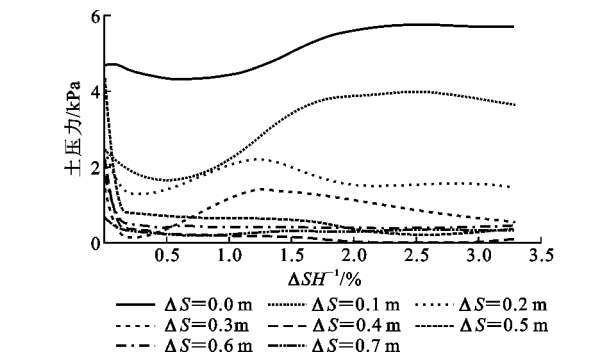


图 8 不同高度处墙背土压力-位移关系

Fig. 8 Relationship Between Soil Pressure and Displacement of Wall Back at Different Heights

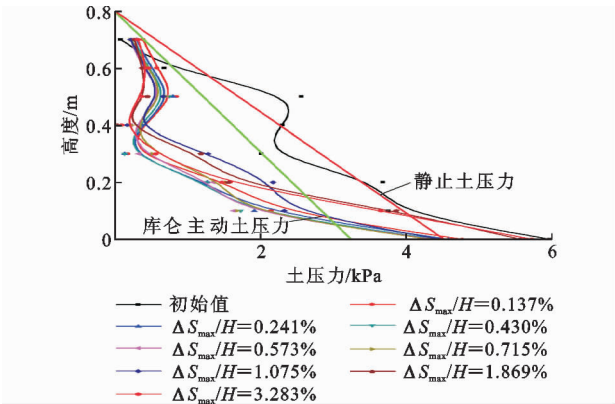


图 9 墙背侧向土压力变化规律

Fig. 9 Change Law of Lateral Soil Pressure on Wall Back

表 3 不同墙高处土压力分析

Tab. 3 Analysis of Earth Pressure at Different Wall Heights

墙高/m	P_0/kN	波谷处			波峰处		
		P_{\min}/kN	$\Delta SH^{-1}/\%$	P_{\min}/P_0	P_{\max}/kN	$\Delta SH^{-1}/\%$	P_{\max}/P_0
0.0	4.69	4.30	0.610	0.917	5.750	2.270	1.226
0.1	2.43	1.63	0.473	0.670	3.950	2.250	1.626
0.2	2.43	1.27	0.343	0.523	2.426	0.000	1.000
0.3	1.43	0.14	0.185	0.098	1.470	1.245	1.028
0.4	2.16	0.00	2.270	0.000	2.160	0.000	1.000
0.5	4.33	0.19	2.600	0.044	4.330	0.000	1.000
0.6	1.76	0.38	1.869	0.216	1.760	0.000	1.000
0.7	0.65	0.23	0.473	0.354	0.650	0.000	1.000

综上所述,在 RBT 模式与假性黏聚力共同影响下,土压力变化可划分为 3 个阶段:阶段Ⅰ,初始状态至主动极限位移状态,土压力呈减小趋势;阶段Ⅱ,主动极限位移至土压力二次峰值状态,土压力呈增大趋势;阶段Ⅲ,二次峰值后的衰减阶段,土压力再次呈减小并趋缓的发展趋势。

2.2 土压力合力与合力作用点变化

根据土压力分布规律,进一步整理得到墙背土压力合力 P_a 与库仑主动土压力 P_c 的比值 P_a/P_c 、

的研究成果相吻合。在 $2/3H\sim H$ 范围内,土压力一直呈现较为明显的衰减趋势。结合试验现象分析发现,由于潮湿砂土假性黏聚力的存在,造成墙背填料并未随墙体变形而发生塑性流动,而是仅少量土体发生了侧向位移,即此处出现了张拉裂缝。

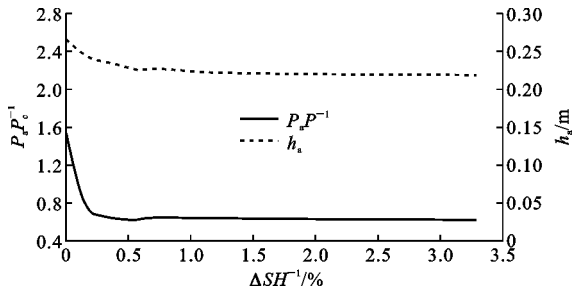
由此可知悬臂式挡土墙达到主动极限状态所需位移量 $S_c\approx 0.5\%H$,这与文献中所得到的 RBT 位移模式挡土墙 S_c 为 $0.1\%H\sim 0.5\%H$ 相吻合。

不同墙高处土压力如表 3 所示。由表 3 可知,在 $0\sim 1/3H$ 范围内随着墙高的增加,墙背侧向土压力达到波谷所需的位移量越来越小,波谷处对应的土压力 P_{\min} 与初始土压力 P_0 的比 P_{\min}/P_0 越来越小。这是由于挡土墙绕墙底转动,挡土墙下部达到主动极限状态所需的顶部位移量更大。中部土体脱空使得随着墙高的增加,土压力减小的越来越多。

由图 9 可知,当填土完成后,墙背侧向土压力沿高度近似呈直线分布,这与半无限空间体条件下静止土压力分布基本一致。当墙体产生主动侧向位移后,墙体上部由于位移量较大,墙背侧向土压力迅速衰减至主动土压力;墙体中部由于试验用砂为湿砂,存在假性黏聚力,当产生位移后,墙后土体产生裂缝,中部土体脱空,因此墙体中部侧向土压力小于库仑主动土压力;墙体底部由于位移量相对较小,因此墙背侧向土压力略有减小。

合力作用点高度 h_a 随 RBT 位移量的变化规律,如图 10 所示。

由图 10 可知,随着墙体侧向位移量的逐渐增大,挡土墙墙背侧向土压力合力呈现先急剧减小后趋向稳定的变化规律。当墙体 $\Delta S_{\max}/H$ 达到 0.1% 后,墙背侧向土压力合力达到库仑主动土压力,由于墙体中部土体脱空,随着墙体侧向位移的继续增大,墙背上部及中部侧向土压力继续减小,当墙体 $\Delta S_{\max}/H$ 达到 0.2% 后,墙体侧向土压力合力趋向

图 10 P_a/P_c 与 h_a 随墙体转动位移量变化规律Fig. 10 Change Laws of P_a/P_c and h_a with Wall Rotation Displacement

稳定,约为 0.6 倍库仑主动土压力。

填土完成后,墙背侧向土压力合力接近静止土压力,土压力合力作用点高度为 0.25 m (1/3H),符合静止土压力分布规律。随着墙体侧向位移量的逐渐增大,土压力合力作用点高度逐渐下降,当墙体 $\Delta S_{\max}/H$ 达到 0.2% 后,墙体侧向土压力与合力作用点高度基本稳定不变,作用点高度为 0.22 m (约 1/4H)。

3 模型试验结果验证

3.1 RBT 模式下主动土压力与挡土墙位移的近似关系

为反映 RBT 模式下悬臂式挡土墙墙背土压力的变化,选取龚慈等^[19]和卢坤林等^[20]的计算方法,分别计算墙体不同位移下墙后土压力沿墙身高度的分布规律,与试验数据进行对比分析。

文献[16]计算方法为

$$p_{hm} = \gamma z \left[\frac{1}{\cos(\varphi_m)} + \sqrt{\tan^2(\varphi_m) + \tan(\varphi_m)\tan(\delta_m)} \right]^{-2}$$

其中

$$\tan(\varphi_m) = \tan(\varphi_0) + K_d [\tan(\varphi) - \tan(\varphi_0)]$$

$$\tan(\delta_m) = \tan(\delta_0) + K_d [\tan(\delta) - \tan(\delta_0)]$$

式中: p_{hm} 为挡土墙任一转角时的主动土压力; φ_0, φ_m 分别为填土内摩擦角初始值和发挥值; δ_0, δ_m 分别为墙土接触面上外摩擦角初始值和发挥值; γ 为砂土重度; z 为距墙顶距离; K_d 为影响系数。

文献[17]计算方法为

$$p_a^* = \begin{cases} \frac{[\exp(K_{am}) - 1](S_a - S)K_0 \gamma h + \exp(K_{am})SK_a \gamma h}{[\exp(K_{am}) - 1]S_a + S} & 0 \leq S \leq S_a \\ K_a \gamma h & S \geq S_a \end{cases}$$

其中

$$K_{am} = \tan^2(45^\circ - \varphi_m/2)$$

式中: p_a^* 为挡土墙任一位移时的主动土压力; S_a 为达到主动状态时的挡土墙位移量,一般采用实测的方法得到; K_a 为朗肯主动土压力系数。

3.2 计算结果对比分析

分别采用文献[16],[17]的计算方法计算挡土墙位移比分别为 0, 0.35, 0.6, 1, 4 时沿墙身高度分布的墙后侧向土压力,并与相应状态下试验测得的数据进行对比分析,结果如图 11,12 所示,其中 S_m 为墙体处土体水平位移, S 和 S_c 分别为文献[16],[17]定义某点土体达到主动状态所需的水平位移, S_m/S_c 和 S_m/S 为墙体位移比。

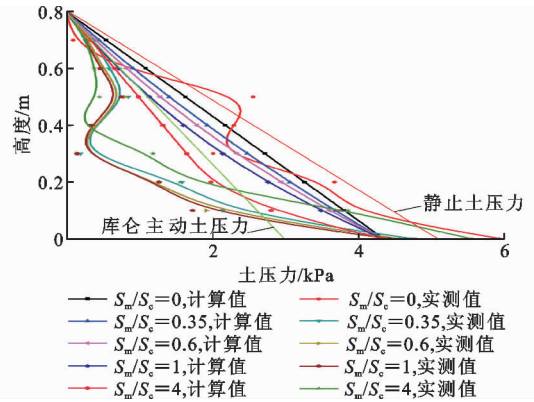


图 11 文献[16]计算方法与试验结果对比

Fig. 11 Comparison Between Calculation Method in Reference [16] and Experimental Results

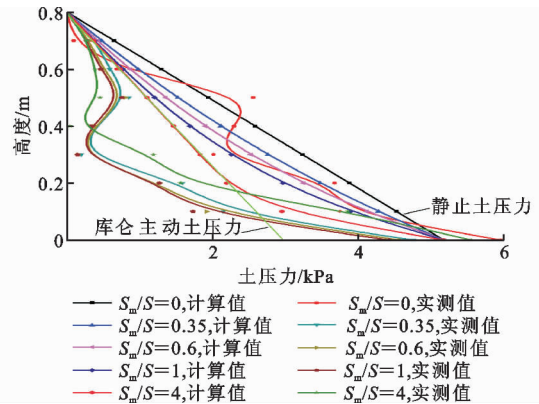


图 12 文献[17]计算方法与试验结果对比

Fig. 12 Comparison of Calculation Method in Reference [17] and Experimental Results

由图 11,12 可知,在墙顶与墙下部处,使用文献[16],[17]计算方法的计算结果与试验结果比较一致,而其余部分有一定差异,主要原因在于假性黏聚力的影响。

4 结 语

(1)悬臂式挡土墙发生 RBT 转动时,墙身变形

底部小、上部大。墙体近似于悬臂板结构,在较小侧向位移条件下,墙身变形近似线性分布。

(2)随着墙体侧向位移的增大, $0\sim 1/3H$ 范围内墙背土压力呈现较为明显的先减小后增大趋势。但在 $2/3H\sim H$ 范围内,由于潮湿砂土假性黏聚力的存在,造成墙背填料并未随墙体变形而发生塑性流动,而是仅少量土体发生了侧向位移,土压力一直呈现较为明显的衰减趋势。

(3)在 RBT 模式与假性黏聚力共同影响下,土压力变化可划分为 3 个阶段:即阶段 I,初始状态至主动极限位移状态,土压力呈减小趋势;阶段 II,主动极限位移至土压力二次峰值状态,土压力呈增大趋势;阶段 III,二次峰值后的衰减阶段,土压力再次呈减小并趋缓的发展趋势。

(4)随着墙体转动量的逐渐增大,挡土墙墙背侧向土压力合力呈现先急剧减小后趋向稳定的变化规律,土压力合力作用点高度逐渐下降。

(5)在不同转动位移量下水平土压力计算值与实测值比较接近。随着转角增大,水平土压力减小,且下部土体减小趋势较缓,墙体中部位置水平土压力计算值大于实测值。

参考文献:

References:

- [1] TERZAGHI K. Record Earth Pressure Testing Machine[J]. Engineering News Record, 1932, 109(29): 365-369.
- [2] TERZAGHI K. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1943.
- [3] 周应英,任美龙. 刚性挡土墙主动土压力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(2): 19-26.
ZHOU Ying-ying, REN Mei-long. An Experimental Study on Active Earth Pressure Behind Rigid Retaining Wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(2): 19-26.
- [4] 岳祖润,彭胤宗,张师德. 压实粘性填土挡土墙土压力离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(6): 90-96.
YUE Zu-run, PENG Yin-zong, ZHANG Shi-de. Centrifuge Model Tests on Lateral Pressure on Walls Retaining Compacted Clayey Backfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(6): 90-96.
- [5] 梅国雄,宰金珉. 考虑位移影响的土压力近似计算方法[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 83-85.
MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min. Earth Pressure Calculating Method Considering Displacement [J]. Rock

and Soil Mechanics, 2001, 22(4): 83-85.

- [6] 卢国胜. 考虑位移的土压力计算方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 586-589.
LU Guo-sheng. A Calculation Method of Earth Pressure Considering Displacement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(4): 586-589.
- [7] 王元战,唐照评,郑 斌. 墙体绕墙顶转动情况下挡土墙主动土压力分布[J]. 应用数学和力学, 2004, 25(7): 695-700.
WANG Yuan-zhan, TANG Zhao-ping, ZHENG Bin. Distribution of Active Earth Pressure of Retaining Wall with Wall Movement of Rotation About Top [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2004, 25(7): 695-700.
- [8] 王元战,黄长虹. 关于挡土墙主动土压力计算问题[J]. 港工技术, 2003(2): 22-27.
WANG Yuan-zhan, HUANG Chang-hong. For Active Earth Pressure on Retaining Wall[J]. Port Engineering Technology, 2003(2): 22-27.
- [9] 张吉全,孔 亮. 刚性挡土墙绕墙顶转动时的被动土压力分布[J]. 宁夏工程技术, 2005, 4(1): 22-24.
ZHANG Ji-quan, KONG Liang. Distribution of Passive Earth Pressure with Top Rotation of Rigid Wall Movement [J]. Ningxia Engineering Technology, 2005, 4(1): 22-24.
- [10] 马文国,张 刚. 非极限平动变位模式下挡土墙上的土压力计算[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(19): 75-79.
MA Wen-guo, ZHANG Gang. Analysis of Earth Pressure on Retaining Wall with Non-limit Translation Mode[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(19): 75-79.
- [11] 马文国,孔 亮,王燕昌,等. 挡土墙绕墙底转动下非极限主动土压力的研究[J]. 宁夏大学学报:自然科学版, 2007, 28(4): 330-333.
MA Wen-guo, KONG Liang, WANG Yan-chang, et al. Research of Active Earth Pressure on Retaining Wall with Mode of Rotation About Base Under Non-limit State[J]. Journal of Ningxia University: Natural Science Edition, 2007, 28(4): 330-333.
- [12] 张宏博,孟庆宇,岳红亚,等. 对拉式挡土墙侧向土压力分布规律试验研究[J]. 公路, 2016(2): 6-11.
ZHANG Hong-bo, MENG Qing-yu, YUE Hong-ya, et al. Test and Study of Lateral Earth Pressure Distribution Law for Mutual Anchoring Retaining Wall[J]. Highway, 2016(2): 6-11.
- [13] 张宏博,解全一,岳红亚,等. 对拉式挡土墙稳定性模型试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(4): 85-89.

ZHANG Hong-bo, XIE Quan-yi, YUE Hong-ya, et al. Study on the Stability Model of the Pull-type Retaining Wall[J]. China Concrete and Cement Products, 2016(4): 85-89.

[14] 王娅娜. 悬臂式挡土墙力学特性及结构优化研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.

WANG Ya-na. Research on the Mechanical Properties and Structure Optimization of Cantilever Retaining Wall[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

[15] 张 勇. 悬臂式挡土墙土压力研究[D]. 太原:太原理工大学, 2013.

ZHANG Yong. Study of Earth Pressure on Cantilever Retaining Wall[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013.

[16] 张 波. 山西省科技馆锚定板挡土墙分析[J]. 山西建筑, 2015, 41(35): 81-83.

ZHANG Bo. Analysis on Anchoring Plate Retaining Wall of Shanxi Science and Technology Museum[J]. Shanxi Architecture, 2015, 41(35): 81-83.

[17] 薛志超, 宋修广, 陈宝强, 等. 压力分散型挡土墙支护高填土路基施工过程的受力特征[J]. 公路交通科技, 2013, 30(4): 11-16.

XUE Zhi-chao, SONG Xiu-guang, CHEN Bao-qiang, et al. Stress Characteristics of Pressure Dispersive Retaining Wall for Supporting High-filling Embankment During Construction[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(4): 11-16.

[18] 宋修广, 吴建清, 张宏博, 等. 对拉式挡土墙受力特性试验研究[J]. 铁道建筑, 2014(9): 79-83.

SONG Xiu-guang, WU Jian-qing, ZHANG Hong-bo, et al. Experimental Study on the Stress Characteristics of the Ram-type Retaining Wall[J]. Railway Engineering, 2014(9): 79-83.

[19] 龚 慈, 俞建霖, 徐日庆, 等. 绕墙底向外转动刚性挡土墙的土压力计算[J]. 浙江大学学报:工学版, 2005, 39(11): 1690-1694.

GONG Ci, YU Jian-lin, XU Ri-qing, et al. Calculation of Earth Pressure Against Rigid Retaining Wall Rotating Outward About Base[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(11): 1690-1694.

[20] 卢坤林, 杨 扬. 考虑位移影响的主动土压力近似计算方法[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 553-557.

LU Kun-lin, YANG Yang. Approximate Calculation Method of Active Earth Pressure Considering Displacement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 553-557.