

扶壁式挡墙受力特性及稳定性分析

陈星光

(中国煤炭科工集团重庆设计研究院 重庆 400042)

摘要: 受限于土压力理论发展的滞后性,扶壁式挡土墙的相关理论难以满足工程计算及设计要求。为研究扶壁式挡土墙的受力特性及稳定性,本文结合某建筑基坑工程,建立相关数值模型,分析并研究扶壁式挡土墙所受土压力、内力分布规律、位移演化特征及不同工况下的挡墙失效模式,研究结果表明:(1)墙后填土与既有基坑边坡间发生相对位移,土体产生卸载,挡墙所受土压力整体呈“M”形。(2)随着墙后填土高度的增加,扶壁式挡土墙墙身首先绕靠近基底处某一点转动,随后整体向临空侧平移,墙顶水平位移呈先增大后减小的趋势。(3)扶壁式挡墙肋板对于墙身剪力分布影响较大,肋板处剪力远大于其他部位,而弯矩所受影响较小,水平走向上内力分布规律与连续简支梁相仿。(4)墙后填土容重变化使得墙身以转动为主,入渗深度改变下墙身则以平动为主,但位移幅值均较小,墙身内力则均增加10~20%。

关键词: 扶壁式挡土墙;土压力;结构内力;失效模式

中图分类号: TU432 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:

Stress characteristics and stability analysis of buttress retaining wall

CHEN Xingguang

CCTEG CHONGQING ENGINEERING(GROUP) CO.,LTD., Chongqing400042, China;

Abstract: Due to the lag of earth pressure theory, the related theories of buttress retaining wall can not meet the requirements of engineering calculation and design. In order to study the mechanical characteristics and stability of the buttressed retaining wall, this paper established relevant numerical models based on the foundation pit engineering of a building to analyze and study the earth pressure, internal force distribution, displacement evolution characteristics and failure modes of the buttressed retaining wall under different working conditions. The results show that: (1) There is a relative displacement between the soil behind the wall and the existing foundation pit slope, and the soil is unloaded. The earth pressure on the retaining wall is in the shape of "M". (2) With the increase of the fill height behind the wall, the wall body of the buttresses retaining wall rotates around a point near the base first, and then shifts to the air side as a whole. The horizontal displacement of the top of the wall increases first and then decreases. (3) The rib plate of buttonhole retaining wall has a great influence on the shear force distribution of the wall body. The shear force at the rib plate is much larger than other parts, while the bending moment is less affected. The distribution law of internal force on the horizontal direction is similar to that of the continuous simply supported beam. (4) The change of soil fill density behind the wall makes the wall body mainly rotate, while the change of infiltration depth makes the wall body mainly translational, but the displacement amplitude is small, and the internal force of the wall body increases by 10~20%.

Key words: Buttress retaining wall; Earth pressure; Structural internal force; Failure mode

1 引言

挡土墙是为了保证填方或挖方位置稳定而修筑的一种永久或临时性构造物,根据其结构特点、材料及工作环境的异同,具有不同的受力特性及稳定性^[1-3]。经典土压力理论只能计算挡土墙位移达到极限状态时的土压力^[4],且忽略了诸如土拱效应^[5-6]、加筋^[7]、墙身位移^[8-11]等因素的影响,已有试验研究表明实际工程中挡土墙墙身所受土压力及位移演化规律不同于经典土压力理论下的变化规律^[12-14]。受限于土压力理论的发展,挡墙承载力及稳定性特性目前依然没有较为精确的解答。对于扶壁式挡墙而言,还由于肋板对墙后土体的影响,作用于墙面板上的

土压力将显著减少,现有的计算方法难以满足挡土结构物的设计要求,更不适用于扶壁挡土结构上土压力、内力及稳定性的计算^[15]。

挡土墙的研究是一个古典的课题,时至今日,由于挡土墙新型结构的不断涌现及土压力理论的发展受限,国内外大量学者仍对其保持高度的关注。魏元友^[16]汇总分析了扶壁式墙和L型墙等多种结构模型,在不同填料、不同条件下进行试验,得到扶壁式墙立板和底板土压力减少的分布规律,提出了比较合理的土压力近似计算公式和简易的计算图式。马石城等^[17]对国内外两种不同土压力计算模式下悬扶壁式挡土墙的抗倾覆稳定

性进行了分析,认为在同一安全系数的水平下,我国规范采用库仑土压力计算悬扶壁式挡土墙的抗倾覆稳定安全度,比国外标准采用朗金土压力计算的安全度高,只有在墙后填土水平且无粘聚力时,我国规范的安全度稍低。沈宇鹏等^[18]讨论了盾构下穿高速公路扶壁式挡土墙的变形分析,认为挡墙竖向位移变形与挡墙到两侧桥台距离之间呈现"中间大、两边小"的抛物线型变化趋势,其沉降主要发生在第一次盾构穿越施工时。葛苗苗等^[19]设定不同水位降幅比 n 来模拟不同情形下挡土墙前后水位的动态变化,提出了扶壁式挡土墙水位骤降情况下的稳定性和受力不利水深与墙高比取值的建议范围,给出了不同形式扶壁式挡土墙在水位骤降情况下的最大拉应力区。梳理前人的研究工作可以发现,目前针对扶壁式挡土墙缺乏基础的破坏模式、力学特征、机理分析的系统性研究,典型的工程案例也鲜有报道。

本文以某邻近建筑基坑的扶壁式挡土墙为对象,通过运用有限差分软件,综合分析挡墙墙身所受土压力、位移、结构内力及应力演化规律,总结挡墙失效模式与设计要点,阐明不同填土容重及降雨入渗下扶壁式挡墙与天然工况下的异同,同时提出相应的设计改进措施。本案例可以为同类扶壁式挡土墙的力学行为特征、变形机理分析、处置措施确定等提供借鉴。

2 工程概况与数值模型

该扶壁式挡土墙位于某建筑基坑外侧,其临空侧为城市主干路,填土回填后的挡墙稳定性对道路交通及建筑结构安全有着较为重要的影响。根据设计资料,挡墙邻近土层较为单一,主要为圆砾和人工填土,挡墙肋板间距为 3.4m,墙身高 7.7m,面板厚 0.35m,凸榫尺寸为 0.8*0.3m,底板尺寸为 4.5*0.4m。数值分析采用有限差分软件对不同工况下的扶壁式挡土墙支护体系的工作性状进行了模拟,数值模型的地层、本构及其参数参考地勘资料,并在模型建立时进行适当的简化。为避免边界约束效应,模型计算宽度取两倍肋板间距,如图 1。

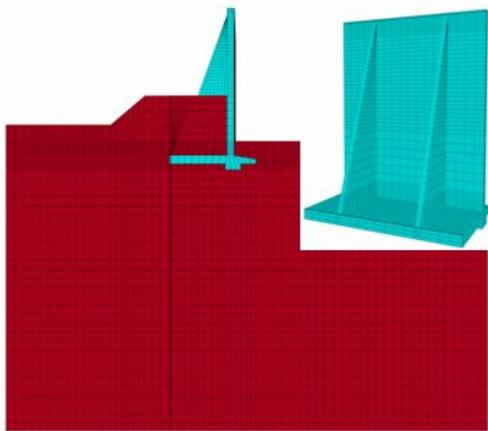


图 1 扶壁式挡墙数值模型

Fig.1 Numerical model of buttress retaining wall

对于扶壁式挡墙等支挡结构而言,一般是由于挡墙因转动、平移发生整体大位移而影响建构筑物地使用功能,此时,挡墙墙身本身的挠度很小,近似处于弹性变形阶段。因此,计算分析中采用的本构模型,挡土墙墙身采用 Elastic 弹性本构模型,人工填土和原有土层采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型,相关参数见表 1。

表 1 计算参数取值表

名称	E/MPa	ν	C/KPa	$\phi(^\circ)$	ρ /kgm-3
挡土墙	30000	0.2	\	\	25
填土	4	0.26	2	24	20
圆砾	50	0.25	5	35	21.5

3 土压力及位移演化分析

由于既有基坑边坡与新近填土间存在不同的应力历史,产生差异沉降,墙身邻近填土存在向基坑内部位移的趋势,土压力产生一定卸载,导致既有基坑边坡与新近填土接触界面处墙身所受土压力较小,挡墙所受土压力整体呈“M”形,如图 2 所示。随着填土高度的增加,基坑边坡与新近填土间土压力有所上升,但幅值变化相对整体土压力较小;墙后填土高度较大时,既有基坑边坡坡面与填土间发生剪切破坏,土体进一步卸载,导致既有基坑边坡坡顶高度以下部分墙身所受土压力反而有所下降。

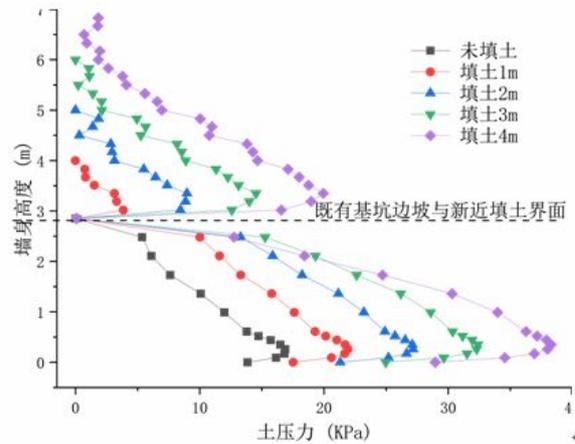


图 2 挡墙墙身所受土压力

Fig.2 Earth pressure on retaining wall body

由于挡墙的墙身材质为钢筋混凝土,其结构刚度相对邻近土体较大,墙身与土体的位移变化趋势存在较为明显的差异,挡墙墙身各点处水平位移的变化趋势具有较强的线性,如图 3;随着墙后填土高度的增加,墙顶处水平位移呈先增后减,填土初时有向墙内运动的趋势,当填土高度超过 3m 时,墙顶位移开始减小,有向墙外运动的趋势;随着墙后填土高度的增加,基底处水平位移逐渐增大,且位移增量也在逐渐增大;当墙后

填土高度较小时, 墙身整体各处位移最大值一般发生在墙顶处, 随着墙后填土高度的增加, 基底处的总位移增量逐渐变大。

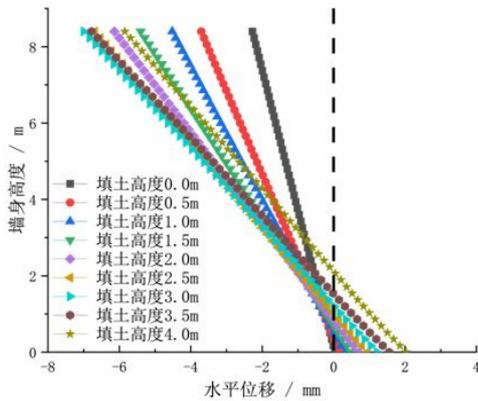


图3 挡墙墙身水平位移演化

Fig.3 Evolution of horizontal displacement of retaining wall body

结合墙身各点处的水平位移变化趋势, 该扶壁式挡土墙支撑结构由于墙身相较于墙周土体的刚度存在较大差异, 挡墙墙身各点处水平位移的变化趋势具有较强的线性规律; 随着墙后填土高度的增加, 扶壁式挡土墙墙身首先绕靠近基底处某一点转动, 随后整体向临空面处平移, 导致墙顶水平位移呈先增大后减小的趋势。

4 墙身结构内力及应力演化分析

4.1 墙身结构内力分析

扶壁式挡土墙墙身面板中间和肋板处剪应力随着墙后填土高度的增加逐渐增大, 且均在挡墙前方地面的下方一定高度处达到最大值, 如图 4、图 5 所示; 随着墙后填土高度的增加, 峰值剪应力逐渐增加; 由于挡墙前方土层对挡墙转动趋势的抑制与抵抗, 负方向的剪应力均出现在挡墙基底处, 与桩前抗力相仿; 且随着墙后填土高度的增加, 负方向的峰值剪应力基本一致; 其中, 由于新近填土与既有基坑边坡间发生相对滑移, 土压力有所卸载, 墙身后方原有地面高度墙身中间处剪力出现了较为显著的极大值。

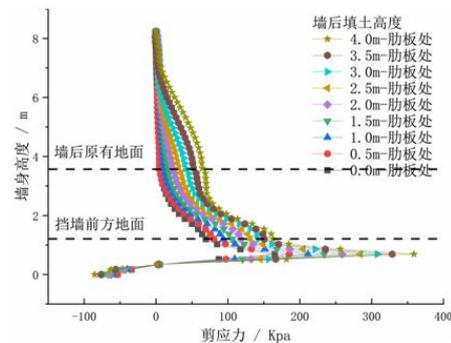


图4 墙后不同填土高度下墙身肋板处剪应力分布

Fig.4 Shear stress distribution at the rib plate of the wall body

under different filling thickness behind the wall

图5 墙后不同填土高度下墙身面板中间处剪应力分布

Fig.5 Shear stress distribution in the middle of the wall body under different filling thickness behind the wall

墙身在面板中间和肋板处的剪应力分布存在较大差异, 主要表现为肋板处墙身所受剪应力均大于两肋板中间处, 且在峰值剪应力(挡墙前方地面高度处)具有十分显著的差异, 但两者负方向峰值剪应力幅值差异较小, 说明扶壁式挡墙较大的基底面积能够有效调节基底处剪应力分布。

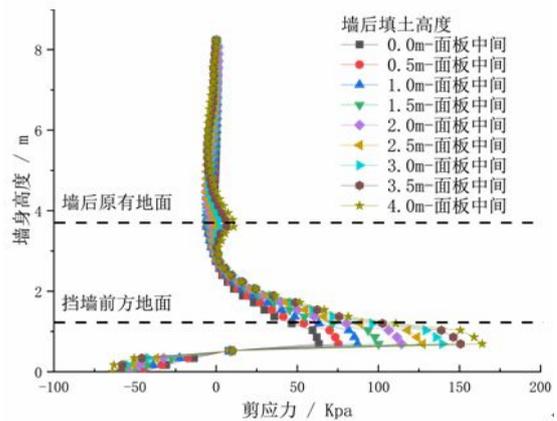


图6 不同墙后填土高度下墙身两肋板中间处弯矩分布

Fig.6 Bending moment distribution in the middle of two rib plates of the wall body under different backfill thickness

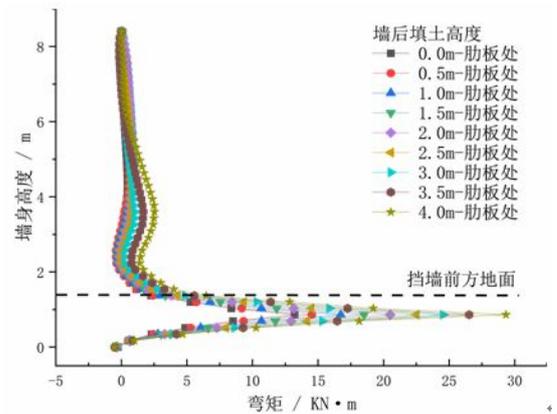


图7 不同墙后填土高度下墙身肋板处弯矩分布

Fig.7 The bending moment distribution at the rib plate of the wall body under different backfill thickness

扶壁式挡土墙墙身面板中间和肋板处弯矩随着墙后填土高度的增加逐渐增大, 且均在挡墙前方地面的下方一定高度处达到最大值, 而后在基底处达到最小值, 如图 6、图 7 所示; 随着墙后填土高度的增加, 挡墙墙身峰值弯矩有所增大, 且幅值差异较大; 任意填土高度下, 墙身底部肋板处弯矩均小于墙身其它部位。

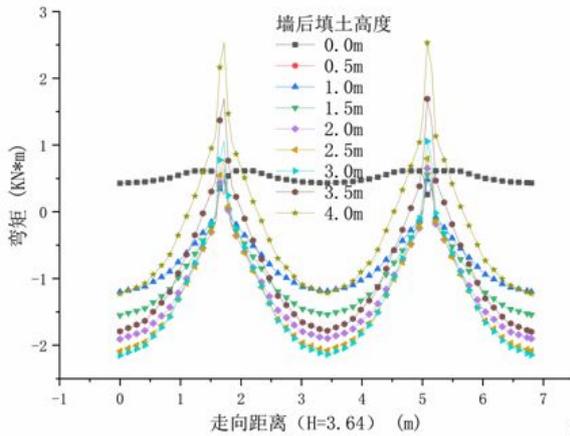


图8 不同墙后填土高度下墙身走向上弯矩分布 (H=3.64)

Fig.8 The bending moment distribution of the wall body under different backfill heights (H=3.64)

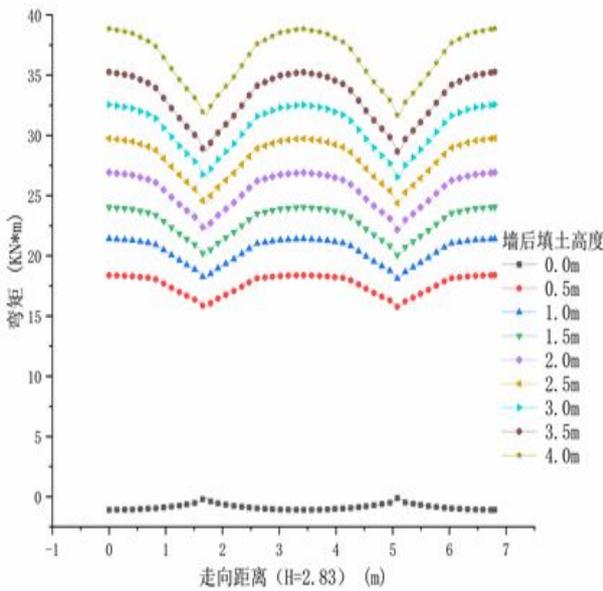


图9 不同墙后填土高度下墙身走向上弯矩分布 (H=2.83)

Fig.9 The bending moment distribution of the wall body under different backfill heights (H=2.83)

结合墙身竖向、走向的剪应力分布及弯矩分布，土压力在走向上可近似为均布线荷载，肋板则近似为“支座”，使得扶壁式挡墙墙身水平面上内力分布与简支梁相仿，应当加强面板中间处的抗弯措施及肋板处的抗剪措施；而在垂直方向上，靠近基底处的墙身，即挡墙前方地面以下一定深度处容易出现应力集中、内力值较大，实际设计、施工过程中，应基于此结果加强此处配筋或采取相应的构造措施。

4.2 墙身应力分析

随着墙后填土高度的增加，挡墙墙身内拉应力逐渐发育，且集中于肋板中间高度处，如图 10 所示；填土初时，由于挡墙以转动为主，引发底板出现拉应力，拉应力主要出现在底板一

侧；填土中期，拉应力在肋板上逐渐集中、发育；填土末期，土压力促使挡墙以平动位移为主，但挡墙上侧所受土压力逐渐增大，引起肋板拉应力集中；值得注意的是，填土后峰值拉应力较填土初期增长了一倍有余。

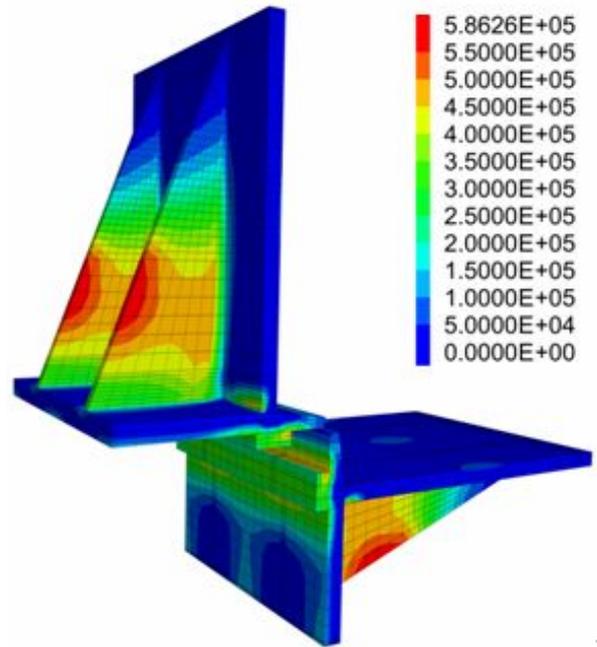


图10 墙后填土 4.0m 时墙身最小主应力分布

Fig.10 The tensile stress distribution of the wall body is 4.0m when the soil behind the wall is filled

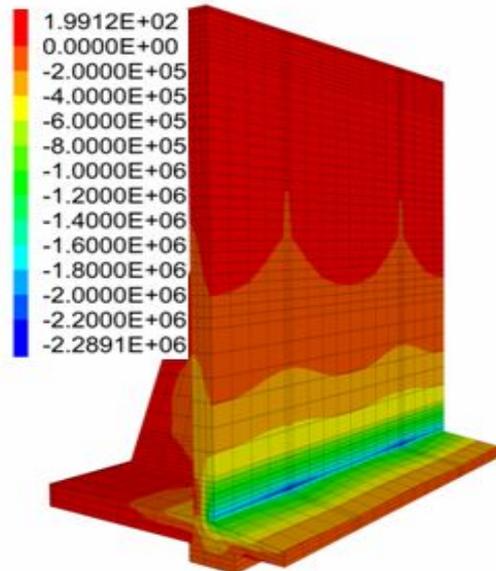


图11 墙后填土 4.0m 时墙身最大主应力分布

Fig.11 The maximum principal stress distribution of the wall body when 4.0m soil is filled behind the wall

随着墙后填土高度的增加，挡墙墙身内最大主应力逐渐发育，且主要集中于挡墙墙身外侧、底板以上，如图 11 所示；结

合挡墙墙身最小主应力分布, 此时挡墙的墙身正承受着填土自重传递过来的土压力, 使得挡墙墙身有向外翻转的趋势, 但挡墙整体仍未失效, 处于静止土压力与主动土压力间的非极限平衡状态。

5 墙后填土容重及入渗深度对挡墙稳定性影响分析

5.1 不同容重下挡墙墙身位移及内力演化分析

墙后填土由于碎石含量、含水量及级配等因素影响, 其容重等相关参数具有显著差异, 本节针对填土容重变化开展了相关分析; 随着墙后填土容重的增加, 挡墙呈现出发生转动的趋势, 但就幅值而言, 填土容重对其位移影响较小, 如图 12 所示。

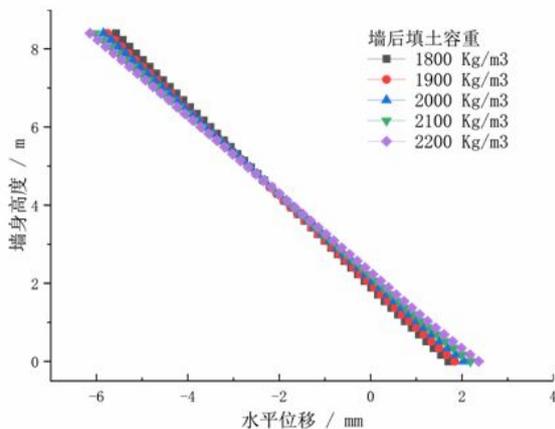


图 12 墙后填土不同容重下挡墙水平位移

Fig.12 Horizontal displacement of retaining wall under different bulk density of backfill

墙后填土不同容重下挡墙墙身结构内力如剪应力、弯矩等仅在峰值处存在较大差异, 其他高度处基本一致, 如图 13 所示; 当填土容重达到 2200Kg/m³ 时, 墙身峰值弯矩增加了约 10.53%, 墙身峰值剪应力增加了约 13.33%, 在设计、施工时应当考虑容重变化带来的影响。

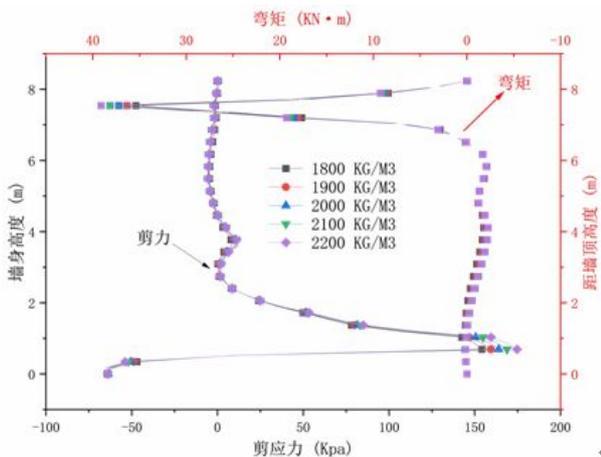


图 13 墙后填土不同容重下挡墙墙身内力演化

Fig.13 Horizontal displacement of retaining wall under different density of backfill

随着填土容重的变化, 挡墙墙身剪应力、轴应力及弯矩的分布规律基本一致, 均在挡墙前方地面以下一定深度内达到峰值; 因此, 在实际设计、施工过程中, 挡墙位于前方地面高度至底板之间应加强配筋, 或采取设置牛腿构造等方法。

5.2 不同入渗深度下挡墙位移及内力演化

根据该工程岩土工程详细勘察报告及相关文献资料, 原有土层及回填土层的水力参数取值为: $k_1=1.736 \times 10^{-4}$ m/s (圆砾), $k_2=5 \times 10^{-5}$ m/s (填土); 根据水文监测资料, 初始水位设置在地面以下 5m 处。随着降雨入渗深度的增加, 由于土体饱和度变化及强度软化等原因, 土体所传递的土压力愈发加大, 挡墙整体发生向临空侧的平移滑动, 但幅值有限, 如图 14 所示, 挡墙处于稳定状态。

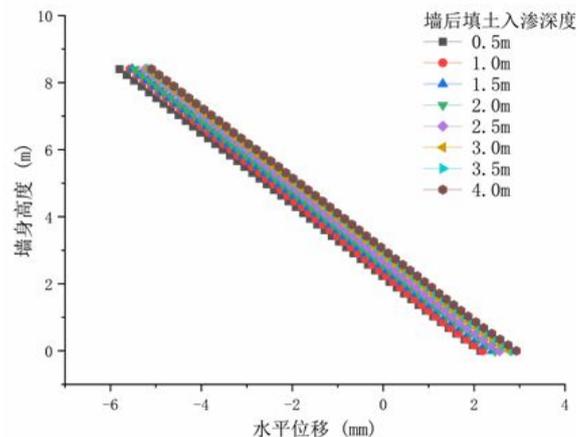


图 14 墙后填土不同入渗深度下墙身水平位移演化

Fig.14 Evolution of peak internal force under different infiltration depth of backfill

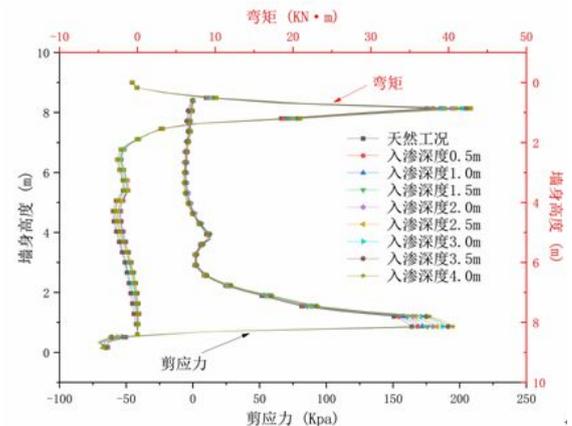


图 15 墙后填土不同入渗深度下墙身内力演化

Fig.15 Evolution of peak internal force under different infiltration depth of backfill

随着降雨入渗深度的增加, 挡墙墙身峰值内力基本呈线性增加, 从墙身整体内力变化趋势来看变化不大, 但峰值内力增加较多, 如图 15 所示; 当入渗深度达到 4m 时, 墙身峰值弯矩

增加了约 15.1%，墙身峰值剪应力增加了约 18.86%，在设计施工时应重点考虑结构内力在持续降雨等工况下的放大效应。

6 结论

本文通过对某扶壁式挡墙墙后回填下墙身所受土压力、结构内力及其位移演化过程的特征分析，合理抽取地质模型，系统开展了该挡墙的稳定性评价、变形破坏仿真和机理分析工作，得出以下结论。

(1) 新填填土与原有基坑边坡间发生相对滑移，土压力产生一定卸载，挡墙墙身所受土压力整体呈“M”型。

(2) 由于墙身相较于墙周土体的刚度相对较大，挡墙墙身各点处水平位移的变化趋势具有较强的线性；随着墙后填土高度的增加，扶壁式挡土墙墙身首先绕靠近基底处某一点转动，随后整体向临空面处平移，导致墙顶水平位移呈先增大后减小的趋势。

(3) 不同填土高度下挡墙肋板处剪应力均远大于其他部位，墙身底部肋板处弯矩均小于面板中间处，肋板在墙身水平走向上发挥了支座效应，挡墙水平走向上内力分布与连续简支梁相仿。

(4) 随着墙后填土容重的增加，挡墙呈现出转动的趋势；随着降雨入渗深度的增加，挡墙呈现出向临空侧平动的趋势；填土容重及降雨入渗深度等因素影响下，墙身峰值内力基本呈线性增加，从墙身整体内力变化趋势来看变化不大，但峰值内力增加较多，约 10~20%，在设计施工时应重点考虑结构内力在特殊工况下的放大效应。

参考文献(References):

- [1] 王卫华. 重力式、悬臂式、扶壁式挡土墙结构优化设计与选型[D]. 兰州理工大学, 2005. (SUN Guangzhong. Rock mass structural mechanics[M]. Science press, 1988. (in Chinese))
- [2] 李昀. 格宾加筋挡土墙动力特性试验研究及数值分析[D]. 中南大学, 2010.
- [3] 王元战, 李蔚, 黄长虹. 墙体绕基础转动情况下挡土墙主动土压力分布[J]. 岩土工程学报, 2003(02):208-211.
- [4] 徐日庆, 廖斌, 吴渐, 畅帅. 黏性土的非极限主动土压力计算方法研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(01):148-154. DOI:10.16285/j.rsm.2013.01.004.
- [5] 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(05):717-722.

[6] 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(05):717-722.

[7] 刘华北, Ling HI. 土工格栅加筋土挡土墙设计参数的弹塑性有限元研究[J]. 岩土工程学报, 2004(05):668-673.

[8] 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(02):553-557. DOI:10.16285/j.rsm.2009.02.043.

[9] 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(07):695-700.

[10] 徐日庆, 龚慈, 魏纲, 王景春. 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(01):120-123.

[11] 王元战, 李蔚, 黄长虹. 墙体绕基础转动情况下挡土墙主动土压力分布[J]. 岩土工程学报, 2003(02):208-211.

[12] 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(02):19-26.

[13] 王元战, 李新国, 陈楠楠. 挡土墙主动土压力分布与侧压力系数[J]. 岩土力学, 2005(07):1019-1022. DOI:10.16285/j.rsm.2005.07.003.

[14] 章为民, 赖忠中, 徐光明. 加筋挡土墙离心模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2000(03):84-91. DOI:10.15951/j.tmgxb.2000.03.016.

[15] 王多垠, 吴友仁, 周世良. 高大扶壁式挡土墙墙后土压力特性有限元分析[J]. 中国港湾建设, 2006(02):14-17.

[16] 魏元友. 扶壁式及 L 式挡土墙模型土压力试验[J]. 岩土力学, 1994(01):20-27. DOI:10.16285/j.rsm.1994.01.003.

[17] 马石城, 邹银生, 王贻荪. 不同土压力下悬扶壁式挡土墙抗倾覆稳定比较[J]. 建筑科学, 2000(06):48-50. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2000.06.012.

[18] 沈宇鹏, 王辉煌, 黄乐艺, 褚满帅. 盾构下穿高速公路扶壁式挡土墙的变形分析[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(01):27-31+37.

[19] 葛苗苗, 李宁, 朱才辉, 丁燕. 扶壁式挡土墙水位骤降情况下稳定性及受力研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(06):1667-1675.