



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.03.024

章宏生, 沈振中, 徐力群, 等. 新型装配扶壁式挡土墙结构特性有限元分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 145-150, 189. ZHANG Hong sheng, SHEN Zhen zhong, XU Li qun, et al. Finite element analysis of the structural characteristics of new assembly buttressed retaining wall[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 145-150, 189. (in Chinese)

新型装配扶壁式挡土墙结构特性有限元分析

章宏生¹, 沈振中¹, 徐力群¹, 周志杰¹, 叶兴成², 刘益志²

(1. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 2. 宿迁市水务局, 江苏 宿迁 223800)

摘要: 新型装配扶壁式挡土墙具有环保美观, 施工速度快的优点, 但存在新老混凝土结合面及拼接缝, 影响结构整体性。结合宿迁市马陵河整治工程, 采用有限元法, 分析研究了该挡土墙结构的应力、位移和变形特性及新老混凝土结合面参数对结构受力性能的影响。结果表明, 新老混凝土结合面剪应力小于抗滑力, 剪切变形很小, 属弹性变形, 结合面黏结良好; 拼接缝处面板拉应力远小于混凝土抗拉强度; 新型装配扶壁式挡土墙拉应力较大区域分布于扶壁上端与预制板连接处、扶壁前端与底板连接处及面板与底板连接处, 最大值为 1.15 MPa, 小于混凝土抗拉强度设计值; 挡土墙变形及位移均很小, 满足应用要求; 不考虑结合面黏聚力时, 结合面摩擦系数在 0.5 以上, 结构强度均能满足要求。该工程新型装配扶壁式挡土墙安全性满足要求, 技术方案是可行的, 可推广应用, 成果可供设计和施工参考。

关键词: 装配扶壁式挡土墙; 结合面; 拼接缝; 结构特性; 有限元法

中图分类号: TU471 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)03-0145-06

Finite element analysis of the structural characteristics of new assembly buttressed retaining wall

ZHANG Hong-sheng¹, SHEN Zhen-zhong¹, XU Li-qun¹, ZHOU Zhi-jie¹, YE Xing-cheng², LIU Yi-zhi²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Suqian Water Authority, Suqian 223800, China)

Abstract: New assembly buttressed retaining wall is environmentally friendly, beautiful, and can be constructed rapidly, but the adjoining faces between the old and new concrete and the joints can affect the integrity of the structure. Based on the renovation project of Maling river in Suqian city, we analyzed the characteristics of the stress, displacement, and deformation of the wall and the influence of different parameters of the adjoining faces on the loading behavior of the structure using the finite element method. The results showed that the shear stress of the adjoining faces is smaller than the anti-sliding force and that the elastic shear deformation is very small and belongs to the elastic deformation. The tensile stress in the joint is far less than the tensile strength of the concrete. There is greater tensile stress in the junctions between the upper end of the buttress and the precast slab, between the front end of the buttress and the floor, and between the panel and floor. The maximum tensile stress is 1.15 MPa, less than the design tensile strength of the concrete. The deformation and displacement of the retaining wall are small and meet the application requirements. Without regard to the cohesion of the adjoining face, the friction coefficient of the adjoining face is more than 0.5. The new assembly buttressed retaining wall of the project meets the safety requirements. The technical scheme is feasible and applicable. The analysis results can provide reference for design and construction.

Key words: assembly buttressed retaining wall; adjoining face; joint; structural characteristics; finite element method

收稿日期: 2016-03-11 修回日期: 2016-07-24 网络出版时间: 2017-05-07
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170507.0919.007.html>
基金项目: 国家自然科学基金项目(51279054); 江苏省水利科技项目(20168048916)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51279054); Jiangsu Water Conservancy Science and Technology Project(20168048916)

作者简介: 章宏生(1991-), 男, 安徽安庆人, 主要从事水工结构设计分析理论及试验技术方面研究。E-mail: 907037493@qq.com

通讯作者: 沈振中(1968-), 男, 江苏苏州人, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构工程方面研究。E-mail: zhzhshen@hhu.edu.cn

新型装配扶壁式挡土墙符合建筑工业化的大趋势,可以实现绿色施工,是一种具有广阔应用前景的结构型式,与传统挡土墙采用现场立模浇筑不同,新型装配扶壁式挡土墙则被分解为底板、面板和扶壁板等分离式结构,底板为现场浇筑,面板和扶壁板为预制双面叠合混凝土板,在现浇底板上安装后浇筑内芯混凝土,形成完整的装配扶壁式挡土墙。这种新型装配式挡土墙在结构上存在新老混凝土结合面及拼接缝^[4],结构的整体性存在不确定因素,安全性存在隐患。目前对装配式混凝土结构的研究主要集中于框架结构、剪力墙结构^[5-13],对这种新型装配扶壁式挡土墙结构性态的研究几乎为空白,对如何设计装配式挡土墙、评价其安全性缺乏理论依据,严重制约了该类挡土墙的应用推广。

鉴于此,针对装配扶壁式挡土墙的结构特点,即挡土墙新老混凝土结合面及拼接缝是可能的薄弱面,根据宿迁市马陵河整治工程的实际情况,采用三维有限元法,以软件 ANSYS 的内置接触面^[14-17]模拟新老混凝土结合面,应用 Mohr-Coulomb 模型^[18-19]控制接触面之间的黏结和滑动,建立新型装配扶壁式挡土墙的三维有限元模型,分析研究新型装配扶壁式挡土墙结构的应力及变形特性,评价其结构安全性和设计合理性,为该类挡土墙设计、评价和应用提供理论依据。

1 新型装配扶壁式挡土墙结构型式

宿迁市马陵河整治工程根据景观设计 & 施工进度要求,拟采用新型装配扶壁式挡土墙,该新型装配扶壁式挡土墙被分解为底板、面板和扶壁板等分离式结构,底板为现场浇筑,面板和扶壁板为预制双面叠合混凝土板,在现浇底板上安装后浇筑内芯混凝土,形成完整的装配扶壁式挡土墙,设计结构尺寸见图 1,底板、面板、扶壁板的连接方式见图 2。

如图 1(b) 所示,预制双面叠合混凝土板每块长度为 6 m,包括面板预制双面叠合板、扶壁板预制双面叠合板,两块预制双面叠合混凝土板在拼接时存在拼接缝,浇筑二期混凝土时需封闭,以防止浇筑内芯混凝土时发生漏浆,拼接缝处面板与扶壁板的厚度实际为二期浇筑混凝土板厚度。挡土墙扶壁侧填土至墙顶,另一侧为河道。如图 1 所示,挡土墙左侧为填土侧,右侧为河道侧,并约定:面板预制双面叠合板填土侧的预制板称为填土侧预制板;河道侧的预制板称为河道侧预制板;二期浇筑的内芯混凝土称为二期浇筑混凝土板。如图 2 所示,河道侧预制板直接插入底板、填土侧预制板及扶壁板预制双面

叠合板下端均预留钢筋插入底板,现场浇筑混凝土后,内芯混凝土与底板为整浇,面板及扶壁板与底板连接性能良好,连接处可视为固结;扶壁板预制双面叠合板插入面板预留孔中,现场浇筑混凝土后,扶壁板与面板内芯混凝土为整浇,扶壁板与面板连接性能良好,连接处可视为固结。

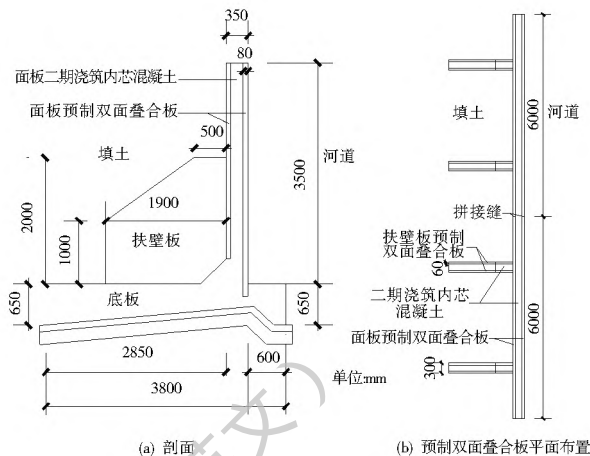


图 1 新型装配扶壁式挡土墙结构

Fig. 1 Structure of new assembly buttressed retaining wall



图 2 连接方式

Fig. 2 Connection mode

2 有限元模型及计算参数

根据该新型装配扶壁式挡土墙结构的对称性,以拼接缝为对称面,取相邻两块预制双面叠合混凝土板各一半结构建立三维有限元模型,即所取挡土墙轴线方向长度为 6 m,见图 3。坐标系为右手系,规定为: x 轴方向为挡土墙横剖面的水平方向,指向河道为正; y 轴方向为垂直向,指向上方为正,与高程一致; z 轴方向为挡土墙轴线方向,符合右手法则。沿挡土墙轴线截断面是结构对称面,该两侧截断边界及底板底面取为法向约束。

采用 ANSYS 中的 SOLID65 单元来模拟钢筋混凝土结构的挡土墙^[20]。假定混凝土和钢筋之间黏结良好,无相对滑移,采用整体式建模方式,即将

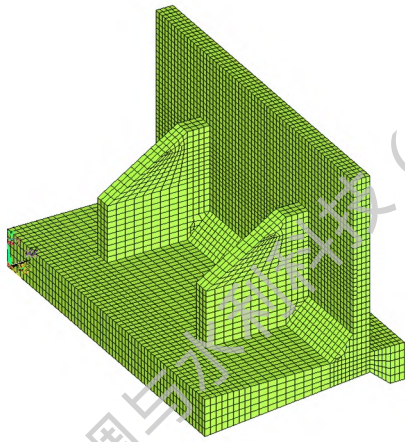


图3 三维有限元模型

Fig. 3 Three dimensional finite element model

钢筋连续均匀地分布于单元中,视单元为连续均匀材料。钢筋对结构的贡献,采用根据刚度矩阵 EI 等效的原则提高材料的弹性模量的方法来实现。考虑到挡土墙面板的预制混凝土双面叠合板存在拼接缝,该处有效厚度实际为二期浇筑混凝土板的厚度。底板、扶壁板、面板连接性能良好,视为固结。

根据预制双面叠合混凝土板生产厂家对结合面强度的室内试验测定,各试样预制双面叠合板与二期浇筑混凝土之间的结合良好,直至试样破坏时,结合面均未出现错动滑移,见图4。



(a) 试样破坏情况 (b) 局部放大

图4 结合面强度试验结果

Fig. 4 Results of adjoining face strength test

二期浇筑混凝土板和面板预制叠合板之间的结合面采用接触面模拟,两个接触体都是变形体,是柔体-柔体接触,接触方式采用面-面接触^[21],应用 ANSYS 内嵌的三维接触面单元 TARGE170 和 CONTA173 形成接触对来模拟,并采用 Mohr Coulomb 模型来控制接触面之间的黏结和滑动,表达式为

$$\tau \leq c + f p \quad (1)$$

式中: τ 为接触面间的等效剪应力; c 为黏聚力; f 为接触面摩擦系数, $f = \tan \varphi$, φ 为内摩擦角; p 为接触部位的压应力。当接触面间的等效剪应力 $\tau < c + f p$ 时,两接触面处于黏结状态;当接触面间的等效剪应力 $\tau \geq c + f p$ 时,两接触面处于滑动状态。计算

时程序默认一最大的接触摩擦应力,即当接触面间的等效剪应力达到此最大值时,则不论压应力多大,滑动都会发生。结合面参数由双减法试验确定,模型材料参数见表 1^[22]。

表1 材料参数

Tab. 1 Parameters of materials

材料	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	泊松 比	黏聚 力/kPa	摩擦 角($^{\circ}$)	抗压强 度/MPa	抗拉强度 /MPa
混凝土	25.0	30	0.20	/	/	14.3	1.43
钢筋	76.9	200	0.30	/	/	360	360
填土	18.0	0.015	0.36	11.2	30	/	/
地基	19.0	0.017	0.31	20.4	30	/	/
结合面	/	/	/	1000	38	/	/

3 新型装配扶壁式挡土墙结构特性分析

新型装配扶壁式挡土墙结构特性分析的计算工况包括施工期和运行期。限于篇幅,这里仅给出最不利工况(施工期完建情况,或检修时河道抽干情况)的成果,分析挡土墙的应力和变形特性。该工况下,荷载有自重、填土压力、地下水压力及车行荷载。填土侧填土高度至墙顶,车行荷载取 $7.5 \text{ kN/m}^{2[23]}$,河道侧水位为地面高程,地下水水位为河道平均水位。

3.1 结合面受力特性分析

新型装配扶壁式挡土墙新老混凝土结合面是可能的薄弱面,故分析填土侧预制板与二期浇筑混凝土板结合面、河道侧预制板与二期浇筑混凝土板结合面的应力变形特性。为方便起见,约定:填土侧预制板与二期浇筑混凝土板结合面为结合面 1;河道侧预制板与二期浇筑混凝土板结合面为结合面 2。

图5为挡土墙面板两结合面剪应力图,可见,受挡土墙扶壁的影响,两结合面剪应力较大的区域呈花瓣形分布。结合面 1 的最大剪应力为 0.17 MPa ,结合面 2 的最大剪应力为 0.09 MPa ,均未超过结合面的黏聚力,显然该挡土墙结合面不会发生剪切破坏。图6为挡土墙面板两结合面剪切变形图,可见,结合面剪切变形分布与剪应力分布一致,剪切变形较大的区域呈花瓣形分布。结合面 1 最大剪切变形为 0.0135 mm ,结合面 2 最大剪切变形为 0.0074 mm ,均很小,为剪切弹性变形。从挡土墙两结合面的应力和变形来看,挡土墙结合面的胶结良好,在设计荷载作用下,结合面不会发生破坏,面板结构是整体的,安全满足要求。

3.2 二期浇筑混凝土板应力变形特性分析

新型装配扶壁式挡土墙的面板由预制双面叠合

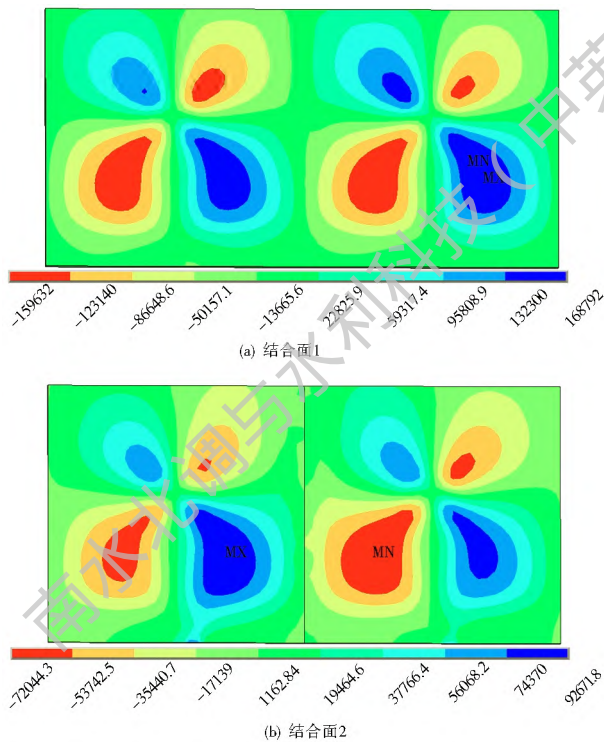


图 5 面板结合面剪应力(单位: Pa)

Fig. 5 Shear stress of the adjoining face of slabs (unit: Pa)

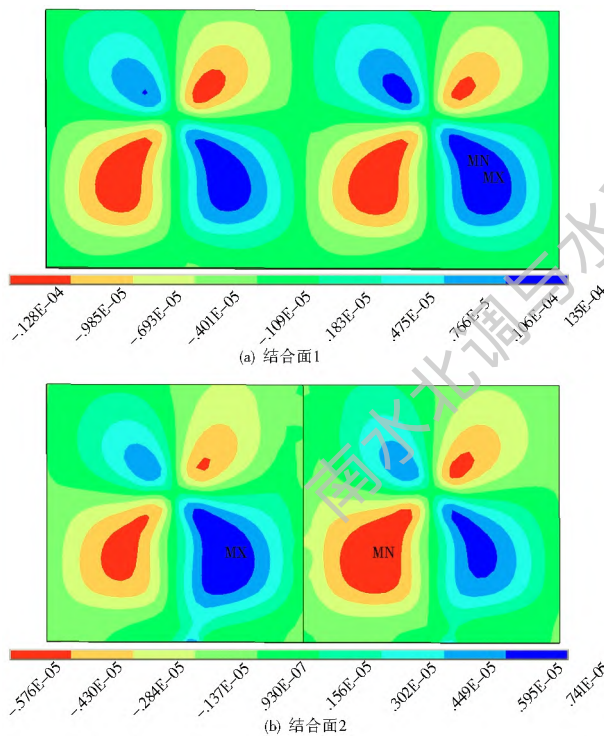


图 6 剪切变形(单位: m)

Fig. 6 Shear deformation of the adjoining face of slabs (unit: m)

板拼接后浇筑内芯混凝土形成,浇筑内芯混凝土时,为了防止漏浆,在拼接缝处需要采取止浆措施,因此面板拼接缝处面板的实际厚度应为二期浇筑混凝土的厚度,即面板设计厚度应扣除两侧叠合板的厚度,本工程面板设计厚度为 0.35 m,叠合板厚度为 0.08 m。因此,面板拼接缝处是挡土墙结构薄弱部位,这里分析该部位的应力。二期浇筑混凝土板靠近河道侧的面为正面,靠近填土侧的面为背面。

图 7 为二期浇筑混凝土板正面第一主应力图,可见受挡土墙扶壁的影响,二期浇筑混凝土板正面在扶壁处处于受压状态,在拼接缝处处于受拉状态,最大拉应力为 0.63 MPa。该拉应力小于二期浇筑混凝土 C30 的抗拉强度设计值,因此,拼接缝处面板强度满足要求。

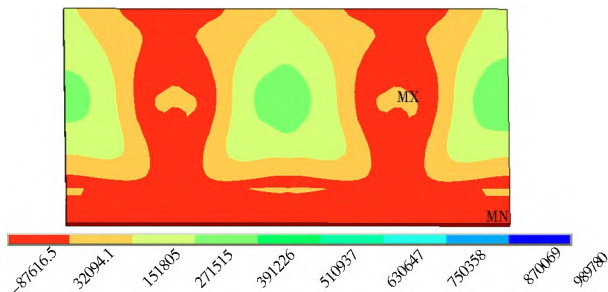


图 7 二期浇筑混凝土板正面第一主应力(单位: Pa)

Fig. 7 The first main stress on the front of the second stage concrete slab (unit: Pa)

3.3 新型装配扶壁式挡土墙整体应力变形特性分析

新型装配扶壁式挡土墙预制双面叠合板与二期浇筑混凝土板的结合面在设计荷载作用下黏结良好,未发生剪切破坏,因此,该新型装配扶壁式挡土墙整体性良好,除拼接缝处面板表面存在结构缝以外,挡土墙可带缝工作。

图 8 为挡土墙第一主应力图,可见,新型装配扶壁式挡土墙拉应力较大的区域出现在扶壁上端与预制板连接处、扶壁前端与底板连接处及面板与底板连接处,拉应力最大值为 1.15 MPa,该拉应力小于挡土墙混凝土 C30 抗拉强度设计值。图 9 为挡土墙沿 x 方向(垂直挡土墙轴线)的水平向位移图,可见,受挡土墙扶壁约束的影响,挡土墙沿 x 向位移由墙底到墙顶逐渐增大,位移最大值为 0.238 mm,出现在两扶壁的跨中、墙顶拼接缝处;图 10 为挡土墙变形放大 3 000 倍后的变形图,受扶壁的约束作用,面板变形呈现波浪状,同一高度,拼接缝处变形最大。总体来看,挡土墙变形很小,可满足应用要求。

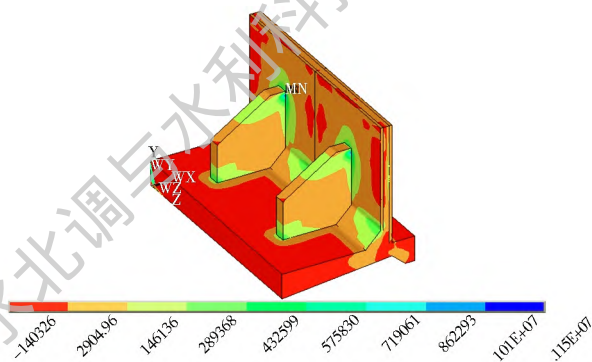


图 8 挡土墙第一主应力图(单位: Pa)

Fig. 8 The first main stress of the retaining wall (unit: Pa)

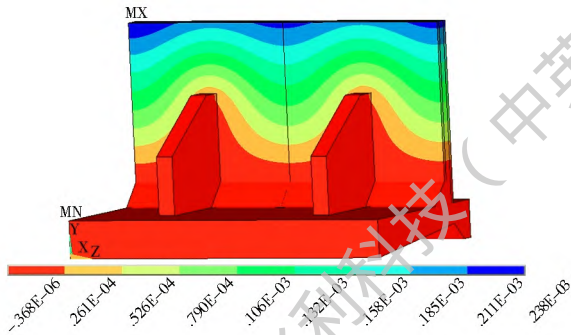


图9 挡土墙沿 x 方向位移图(单位:m)
Fig. 9 The displacement along x direction of the retaining wall (unit: m)

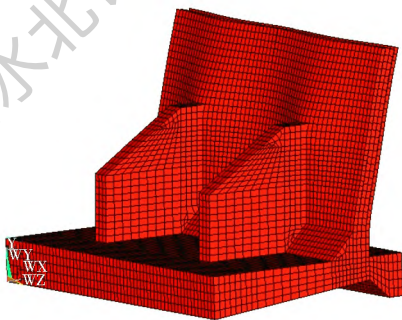


图10 挡土墙变形图(放大3 000倍)
Fig. 10 The deformation of the retaining wall (magnified 3 000 times)

3.4 结合面强度参数对挡土墙应力变形特性的影响

正常情况下二期浇筑混凝土板与预制叠合板的结合面胶结良好,不会出现剪切破坏,挡土墙的整体性可以得到保证。但是,由于施工的不确定性,施工质量往往存在差异,因此,考虑结合面不同强度参数,研究其对新型装配扶壁式挡土墙应力变形特性的影响。实际情况下,浇筑二期内芯混凝土时,面板可能存在由内芯混凝土收缩产生的结合面开裂,因此将二期浇筑混凝土板与预制叠合板结合面黏聚力设为0。结合面的摩擦系数分别取0.8、0.7、0.6、0.5、0.4,计算分析挡土墙在最不利工况下的应力和变形,并与整体浇筑的挡土墙进行对比。计算成果见表2,其变化曲线见图11。

由表2和图11可以看出:(1)随着结合面摩擦系数逐渐降低,结合面剪应力、压应力均逐渐降低,填土侧预制板承担的土压力逐渐增大,挡土墙最大拉应力逐渐增大。(2)只要结合面的摩擦系数在0.5以上,新型装配扶壁式挡土墙拉应力均小于混凝土的抗拉强度设计值,可满足要求。(3)整体浇筑的挡土墙与不考虑结合面黏聚力、结合面摩擦系数为0.8的新型装配扶壁式挡土墙相比,最大拉应力稍小,但差别不大。

表2 结合面不同参数计算成果

Tab. 2 Calculation results of different parameters of the adjoining face

摩擦系数	结合面最大剪应力/MPa		结合面最大压应力/MPa		结合面状态		挡土墙最大拉应力/MPa
	结合面1	结合面2	结合面1	结合面2	结合面1	结合面2	
0.8	0.168	0.089	0.36	0.18	未滑动	未滑动	1.20
0.7	0.165	0.087	0.34	0.17	未滑动	未滑动	1.27
0.6	0.163	0.085	0.33	0.16	未滑动	未滑动	1.31
0.5	0.162	0.070	0.32	0.14	未滑动	微小错动	1.41
0.4	0.124	0.052	0.31	0.13	微小错动	微小错动	1.65
整体浇筑	/	/	/	/	/	/	1.14

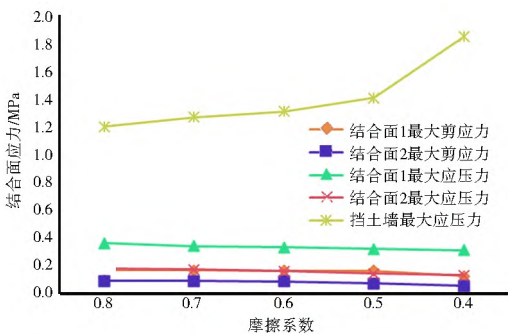


图11 结合面最大应力及挡土墙最大拉应力随摩擦系数变化曲线

Fig. 11 Variation of the maximum stress of the adjoining face and the maximum tensile stress of the retaining wall with the friction coefficient

4 结论

新型装配扶壁式挡土墙具有环保美观,施工速度快的优点,但存在新老混凝土结合面及拼接缝,影响结构整体性。结合宿迁市马陵河整治工程,采用有限元法,分析、研究了挡土墙新老混凝土结合面、拼接缝处的应力、变形特性,论证了该新型装配扶壁式挡土墙结构的整体性。在最不利情况下,该挡土墙结合面胶结良好,不会发生剪切破坏,拼接缝处混凝土拉应力小于挡土墙混凝土C30的抗拉强度设计值,挡土墙安全性满足要求,设计方案在技术上是合理的。该成果可供设计和施工参考,此挡土墙的

建造工艺可推广应用。

该新型装配扶壁式挡土墙在竣工期拉应力较大的区域分布于扶壁上端与预制板连接处、扶壁前端与底板连接处及面板与底板连接处, 建议在这些部位配置必要的钢筋。

不考虑结合面的黏结力, 随着结合面摩擦系数逐渐降低, 结合面剪应力、压应力均逐渐降低, 填土侧预制板承担的土压力逐渐增大, 挡土墙最大拉应力逐渐增大; 只要结合面的摩擦系数在 0.5 以上, 新型装配扶壁式挡土墙拉应力均小于混凝土的抗拉强度设计值, 可满足要求。建议施工过程中确保结合面保持粗糙, 以提高结合面摩擦系数。

参考文献 (References):

- [1] 靳利娜, 王山山, 任青文, 等. 新老混凝土结合面抗剪性能试验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(5): 611-619. (JIN Lina, WANG Shan shan, REN Qing wen, et al. Experimental study of shear performance of new to old concrete interface [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(5): 611-619. (in Chinese))
- [2] 陈芳芳. 拱坝培厚加固新老坝体结合面工作性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2014. (CHEN Fangfang. Study on structural behavior of interface between fresh and old concrete for thickening project of arch dam [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese))
- [3] 刘运林. 双向叠合楼板拼缝处受力机理试验研究与数值模拟[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014. (LIU Yunlin. Experimental research and numerical analysis on stress mechanism in the joint of two way superimposed slab [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [4] 丁克伟, 陈东, 刘运林, 等. 一种新型拼缝结构的叠合板受力机理及试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(10): 64-69. (DING Ke wei, CHEN Dong, LIU Yunlin, et al. Theoretical and experimental study on mechanical behavior of laminated slabs with new type joints [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(10): 64-69. (in Chinese))
- [5] 郭正兴. 新型预制装配混凝土结构规模推广应用的思考[J]. 施工技术, 2014, 43(1): 17-22. (GUO Zhengxing. Thinking on generalization and application of new prefabricated concrete structure [J]. Construction Technology, 2014, 43(1): 17-22. (in Chinese))
- [6] 程蓓, 苗小燕, 徐建伟. 一种新型装配式混凝土框架结构连接节点试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(12): 94-198. (CHENG Bei, MIAO Xiaoyan, XU Jianwei. Experimental study on a new type of column to beam joints in assembled reinforced concrete frame structures [J]. Industrial Construction, 2015, 45(12): 94-198. (in Chinese))
- [7] 吴函恒, 周天华, 吕晶. 钢框架装配式混凝土抗侧力墙板结构受力性能[J]. 东南大学学报, 2016, 46(1): 118-125. (WU Hanheng, ZHOU Tianhua, LYU Jing. Mechanical behavior of steel frame fabricated concrete lateral force resisting wall structures [J]. Journal of Southeast University, 2016, 46(1): 118-125. (in Chinese))
- [8] 缪俊, 程万鹏, 宋玉普. 预制装配式部分钢骨混凝土框架梁柱节点有限元分析[J]. 大连理工大学学报, 2014, 54(5): 568-574. (MIAO Jun, CHENG Wair peng, SONG Yur pu. Finite element analysis for prefabricated parts of SRC frame beam column joints [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2014, 54(5): 568-574. (in Chinese))
- [9] Divan M, Madhkan M. Determination of behavior coefficient of prefabricated concrete frame with prefabricated shear walls [J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 3229-3236.
- [10] Han J Q, Zhang J Y. Joint's connected forms of prefabricated concrete frame structure [C]// Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, 2012, 256: 811-814.
- [11] 陈建伟, 苏幼坡. 预制装配式剪力墙结构及其连接技术[J]. 世界地震工程, 2013, 29(1): 38-48. (CHEN Jianwei, SU Youpo. Prefabricated concrete shear wall structure and its connecting technology [J]. World Earthquake Engineering, 2013, 29(1): 38-48. (in Chinese))
- [12] Kang S H, Kim S J, Shin E S. A smart interfacing method based on domain/boundary decomposition for efficient thermo elastoviscoplastic damage and contact analysis [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(3): 927-940.
- [13] 陈彤, 郭惠琴, 马涛, 等. 装配整体式剪力墙结构在住宅产业化试点工程中应用[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 26-30. (CHEN Tong, GUO Huiqin, MA Tao, et al. Engineering application on housing industrialization of precast reinforced concrete shear wall structure [J]. Building Structure, 2011, 41(2): 26-30. (in Chinese))
- [14] 唐世斌, 唐春安, 梁正召. 接触面损伤演化过程的数值模型[J]. 计算力学学报, 2011, 28(1): 146-151. (TANG Shirbin, TANG Churan, LIANG Zhengzhao. Numerical model for damage evolution of contact interface of solid [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, 28(1): 146-151. (in Chinese))
- [15] 姜东, 吴邵庆, 史勤丰, 等. 基于薄层单元的螺栓连接结构接触面不确定性参数识别[J]. 工程力学, 2015, 32(4): 220-227. (JIANG Dong, WU Shaoping, SHI Qin feng, et al. Contact interface parameter identification of bolted joint structure with uncertainty using thin layer element method [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(4): 220-227. (in Chinese))
- [16] 梁培新, 郭正兴. 不对称混合连接梁柱接触面力学性能研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(10): 84-88. (LIANG Peixin, GUO Zhengxing. Study on the performance of unsymmetrical hybrid connection interface of the beam and column [J]. Building Structure, 2011, 41(10): 84-88. (in Chinese))
- [17] 杨阳, 肖明. 考虑接触面损伤及连续脱开的堵头稳定计算[J]. 四川大学学报, 2011, 43(1): 86-91. (YANG Yang, XIAO Ming. Stability calculation of diversion tunnel plug considering interface damage and continuous crack [J]. Journal of Sichuan University, 2011, 43(1): 86-91. (in Chinese))

(下转第 189 页)

- Fractal behaviour of the microseismic energy associated with immediate rockbursts in deep, hard rock tunnels [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2016, 58: 98-107. DOI: 10.1016/j.tust.2015.10.002
- [17] Aki K. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress strain drop from the G wave spectrum [J]. Bulletin of Earthquake Research Institute, 1966, 44(12): 73-88.
- [18] Cook N G W, Hoek E, Pretorius J P G, et al. Rock mechanics applied to the study of rockbursts [J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1966, 66(10): 436-528.
- [19] 苏国韶, 冯夏庭等. 高地应力下地下工程稳定性分析与优化的局部能量释放率新指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2453-2460. (SU Guo shao, FENG Xia ting, et al. Study on new index of local energy release rate for stability analysis and optimal design of underground rockmass engineering with high geostress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2453-2460. (in Chinese))
- [20] Chen B R, Feng X T, Li Q P. Rock burst intensity classification based on the radiated energy with damage intensity at Jinping II hydropower station, China [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(1): 289-303. DOI: 10.1007/s00603-013-0524-2
- [21] 郑恒斌, 黄仕平, 颜全胜, 等. 考虑压剪组合作用力的双粗糙表面接触模型[J]. 华南理工大学学报, 2013, 41(2): 101-128. (ZHENG Heng bin, HUANG Shi ping, YAN Quar sheng, et al. Contact model of two rough surfaces under combined compress shear load [J]. Journal of South China University of Technology, 2013, 41(2): 101-128. (in Chinese))
- [22] 王振领, 林拥军, 钱永久. 新老混凝土结合面抗剪性能试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(5): 600-604. (WANG Zhen ling, LIN Yong jun, QIAN Yong jiu. Experimental research on shear properties of new-to-old concrete interface [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(5): 600-604. (in Chinese))
- [23] 城市道路交通规划设计规范[M]. 北京: 中国计划出版社, 1995. (Specifications on urban road traffic planning and design [M]. Beijing: China Planning Press, 1995. (in Chinese))

(上接第 150 页)

- [18] 王晓军, 王琪. 含非对称摩擦平面运动刚体动力学 LCP 方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(11): 2023-2028. (WANG Xiao-jun, WANG Qi. An LCP method for dynamics of planar motion rigid body with non symmetric friction [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(11): 2023-2028. (in Chinese))
- [19] 李翠华. 三维弹塑性和接触问题的非线性互补方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014. (LI Cui-hua. Research on the nonlinear complementary method for 3D elastoplasticity problems and contact problems [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese))
- [20] Cao B Z, Zhang Y C, Yu H J, et al. Experiment and ANSYS finite element analysis on concrete filled thir walled steel tube joints [J]. Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, 2007, 24(2): F4.