

装配式扶壁生态挡墙结构简化计算方法研究

——以重庆两江协同创新区六横线明月大道挡墙项目为例

陈 然, 王寒生, 褚肖肖, 卢志政

(四川宏洲绿高生态科技有限公司, 成都 610095)

摘要: 基于重庆六横线明月大道项目的装配式扶壁生态挡墙, 通过对该挡墙立板和扶壁迎土面的土压力计检测的原位试验, 以及现浇混凝土结构内的钢筋计的测试, 分析该挡墙现浇混凝土结构的受力模式, 并提出应用于装配式生态扶壁挡墙结构的简化结构计算的方法, 为将来应用该新型挡墙结构提供依据。

关键词: 装配式生态挡墙; 原位试验; 受力分析; 简化算法

中图分类号: TU431 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)06-0173-07

目前新型绿色装配式挡墙在实际工程中已得到广泛应用, 且推动装配式建筑的发展, 能够有效减少对碳排放的影响^[1], 但目前在市政工程中的装配化率目前还处于较低水平。国内有关装配式扶壁生态挡墙应用于实际工程的简化计算方法还较少, 杨晖等^[2]对预置拼装绿化的锚拉型挡墙进行检测研究; 张清晨和郭环宇^[3]对采用浆锚搭接连接的预制装配式挡土墙进行有限元分析; 王大伟^[4]通过国内外调研, 研发新型拼装式绿色挡墙, 并进行理论工况分析, 得出经验取值; 且有针对装配式生态挡墙的施工工艺和建设中的应用进行相关研究^[5-10]。而目前针对装配式扶壁生态挡墙结构的试验分析依然处于空白。

重庆市两江协同创新区六横线明月大道项目, 采用扶壁式^[11]挡墙作为路肩挡墙设计, 该挡墙结构立板替换为装配式生态挡墙, 而其他结构则与传统扶壁式挡墙相同, 由于该挡墙为新型挡墙支护结构, 目前国内研究现状仅针对其工法的讨论^[12], 暂未有基于原位试验的理论分析。

该挡墙将立板由传统的连续现浇砼结构, 替换为肋柱和腰梁组合而成的井字梁框架结构, 故无法采用现有扶壁式挡墙规范计算。本文通过结合项目立板墙背土压力以及现浇砼结构内钢筋内力的试验数据, 对适用于扶壁式挡墙的装配式生态挡墙

结构受力进行研究^[13], 提出可实际设计及应用的简化计算方法, 为使用装配式生态挡墙提供简化计算依据。

1 原位试验方法

该扶壁式挡墙总高为 7.65 m, 扶壁间距为 3.26 m, 装配式生态挡墙替代原扶壁式挡墙立板结构。在挡墙扶壁迎土面和立板墙背安装土压力计测试土压应力分布, 土压力布置方法如图 1 所示。在立板结构肋柱 7 根纵筋和腰梁 6 根纵筋, 均安装钢筋计测试钢筋受力情况, 钢筋计布置方法如图 2 所示。

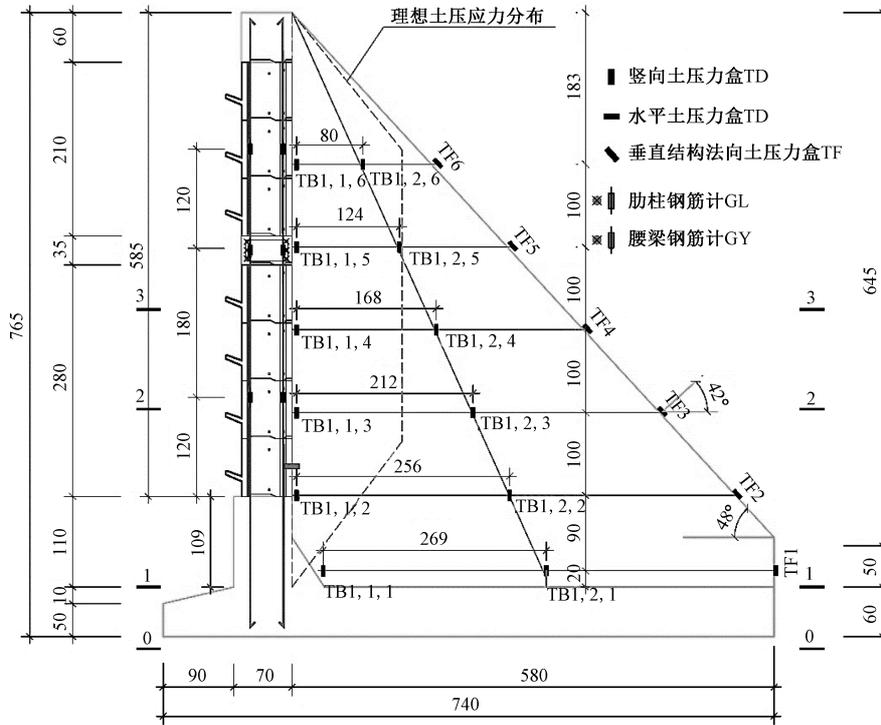
试验在墙背安装土压力计, 以检测墙背土压应力的分布情况, 布置方式如图 1 和图 2 所示, 立板面布置三列土压力计, 间距为 0.64 m, 分别距离扶壁分别为 0.1 m、0.74 m 和 1.38 m。扶壁面土压力计布置于扶壁迎土面。一组土压力计共计 4 个, 共布置 6 排, 每排间距为 1.0 m。

试验在肋柱和腰梁结构的纵筋安装钢筋计, 其中立板肋柱纵筋 7 根钢筋共安装 3 排, 距离基础顶面高度分别为 2.3 m、4.1 m 和 5.3 m。腰梁钢筋计布置于结构腰梁 6 根纵筋 2 列布置, 分别位于肋柱到两侧扶壁的中点, 两组间距为 1.5 m, 如图 3~图 5 所示。

最终所有传感器安装完成实景如图 6~图 8 所示。

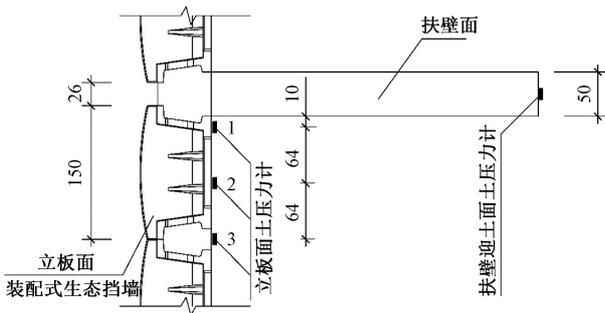
收稿日期: 2023-11-27

作者简介: 陈然(1989—), 男, 四川成都人, 硕士, 工程师, 研究方向为市政、公路岩土工程支挡装配化、生态化开发和设计; 王寒生(1989—), 男, 四川达州人, 研究方向为市政、公路岩土工程支挡装配化、生态化开发和设计; 褚肖肖(1995—), 男, 四川南充人, 研究方向为市政、公路岩土工程支挡装配化、生态化开发和设计; 卢志政(1995—), 男, 四川乐山人, 工程师, 研究方向为市政、公路岩土工程支挡装配化、生态化开发和设计。



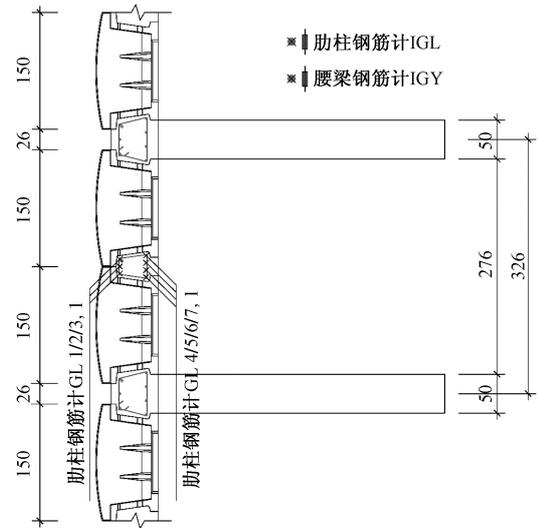
单位:cm

图 1 土压力计布置方法断面



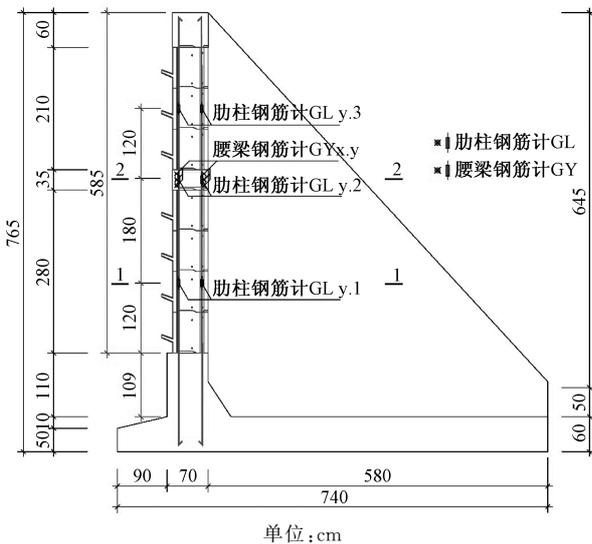
单位:cm

图 2 土压力计布置方法俯视图



单位:cm

图 4 肋柱钢筋计布置方法俯视图



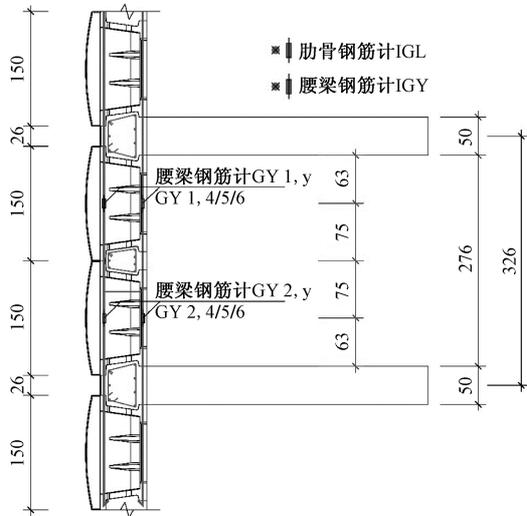
单位:cm

图 3 钢筋计布置方法断面

2 墙背荷载的确定

经过对扶壁迎土面和立板面土压应力的检测,经过 2 个月时间 11 次的数据采集测试,最终稳定后侧向土压应力分布如图 9 所示。

由图 9 可知,该扶壁式挡墙在迎土面土压应力基本呈上小下大的三角形分布,符合库伦理论,实测最大应力在基础顶面,为 66.42 kPa,相比该点库伦理论计算值(89.76 kPa),实测值偏小,原因是该



单位: cm

图 5 腰梁钢筋布置方法俯视图

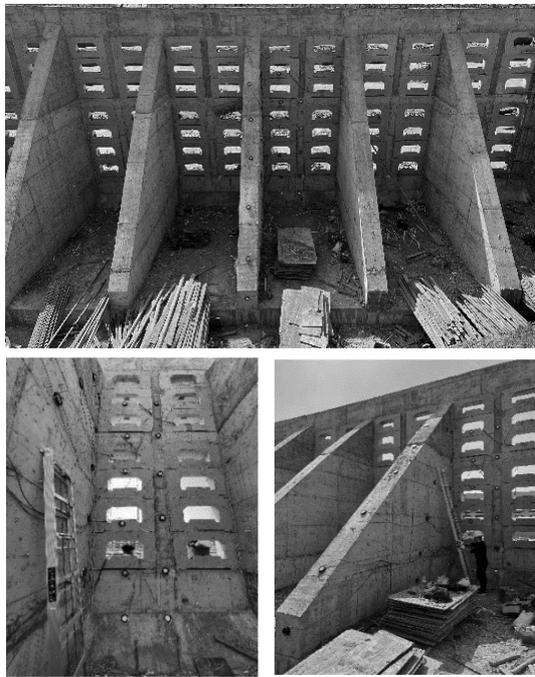
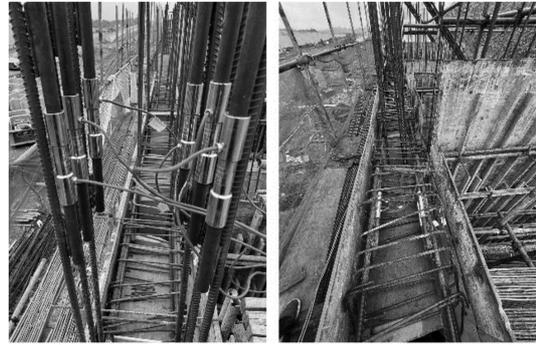


图 6 挡墙土压力计布置实景

挡墙为挖方段,中风化的泥质砂岩,基础踵板按照坡比 1:0.5 临时开挖,距离墙体较近,挡墙施工完成后再进行墙背回填,故土压力为有限范围,相比半无限空间的库伦经典理论值偏小。

扶壁立板内侧土压应力的分布与扶壁迎土方向的土压应力分布模型不同,实际并非为库伦理论提出的类三角形分布,整体呈现“两端小,中间大”的分布模式,这与规范中的立板侧压力分布图基本相符,如图 10(a),满足立板所受最大土压应力 $\sigma_p = \frac{1}{2}\sigma_H$,即为扶壁迎土面墙背理论库伦土压应力底部



(a) 肋骨钢筋计 (b) 腰梁钢筋计

图 7 钢筋计布置实景



图 8 装配式生态挡墙正面

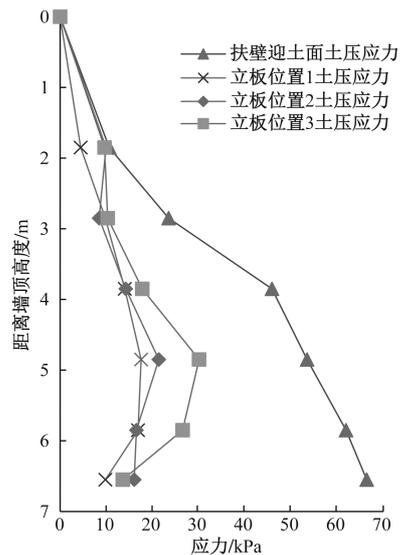


图 9 扶壁迎土面和立板面随墙高度土压应力曲线

最大值的 0.5 倍。且由图 9 可知,立板面土压应力在同一高度横向方向上,也呈现越靠近扶壁面越小的情况,这是由于该位置土体以扶壁端部为拱脚,

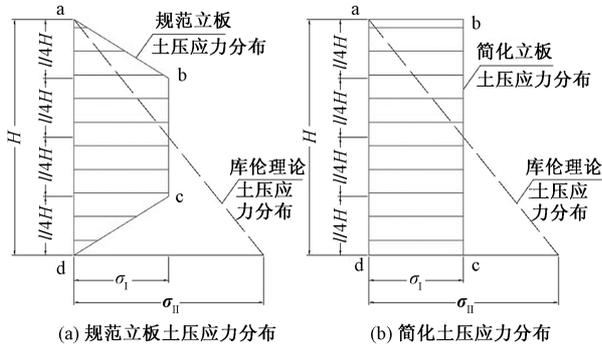


图 10 规范与应用于装配式生态挡墙简化土压应力分布

进而产生水平方向的土拱效应^[15]。扶壁间的土体与扶壁的侧壁产生摩擦,将一部分的垂直于立板的土压力传递至扶壁上,进而使作用于立板上的土压力降低,而越接近扶壁面的土体,土压力的传递效应则越明显。

实测该立板所受最大土压应力为 30.10 kPa,距离基础顶面 4.1 m,且处于两扶壁间距的中心。根据规范立板所受最大土压应力实测小于扶壁迎土面最大库伦土压应力的 0.5 倍,即 $30.10 \text{ kPa} < 0.5 \times 66.42 \text{ kPa} = 33.21 \text{ kPa}$,符合规范结论。

为使计算简便,同时保证结构安全,装配式生态挡墙应用于扶壁式挡墙立板结构时,系通过均布荷载的方式进行现浇结构计算,即将最大应力值作为全墙的均布荷载进行计算,如图 10(b)所示。根据本次试验数据,采用 30.10 kPa 的均布荷载对装配式生态挡墙立板结构进行现浇砼钢筋的受力验算。

3 现浇砼结构受弯分析

3.1 实测梁截面应力确定

钢筋计测得为该钢筋的力变量,其单位为 kN,需通过式(1)换算为该钢筋的应力值:

$$\sigma = F/S \quad (1)$$

式中: σ 为被测钢筋的应力,MPa; F 为被测钢筋的力变量,kN; S 为被测钢筋的截面积, mm^2 。

因传感器测试数据读数受拉为负,受压为正,处理过程中并未改变符号,故应力拉为负,压为正^[14]。

本次试验在受压和受拉截面所有纵筋均布置有钢筋计,将最终稳定数据提取,经式(1)换算应力。因混凝土同一 z 轴高度截面应力值相同,通过对多个纵筋应力取平均值,确定该截面的应力值,选取截面如图 11 所示。各钢筋稳定应力值如表 1 所示。

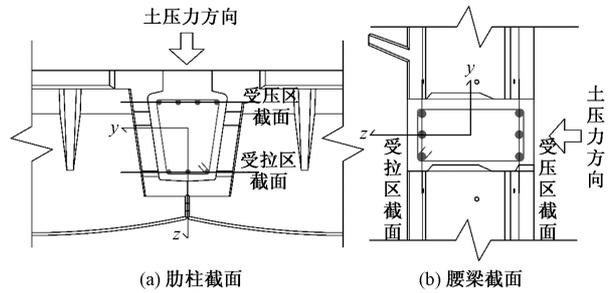


图 11 梁截面示意图

表 1 钢筋应力换算及截面应力计算

部位	钢筋计编号	截面区	稳定取值/kN	应力/MPa	
肋柱	GL1.1	受拉区	-8.78	-27.95	
	GL2.1		-8.53	-27.15	
	GL3.1		-7.50	-23.87	
	GL4.1	受压区	5.36	17.06	
	GL5.1		4.21	13.40	
	GL6.1		4.77	15.18	
	GL7.1		6.75	21.49	
	肋柱	GL1.2	受拉区	14.10	44.88
		GL2.2		22.00	70.03
		GL3.2		31.65	100.75
		GL4.2	受压区	-12.44	-39.60
		GL5.2		-27.63	-87.95
		GL6.2		-8.25	-26.26
		GL7.2		-12.39	-39.44
肋柱	GL1.3	受拉区	-3.82	-12.16	
	GL2.3		-5.49	-17.48	
	GL3.3		-2.58	-8.21	
	GL4.3	受压区	2.29	7.29	
	GL5.3		4.74	15.09	
	GL6.3		3.72	11.84	
	GL7.3		2.20	7.00	
腰梁	GY1.1	受拉区	-18.71	-38.12	
	GY1.2		-15.71	-32.01	
	GY1.3		-17.01	-34.65	
	GY1.4	受压区	19.45	39.62	
	GY1.5		17.98	36.63	
	GY1.6		17.23	35.10	
	GY2.1	受拉区	-18.90	-38.50	
	GY2.2		-14.27	-29.07	
	GY2.3		-13.39	-27.28	
	GY2.4	受压区	22.60	46.04	
	GY2.5		19.40	39.52	
	GY2.6		25.82	52.60	

3.2 实测钢筋内力换算墙体弯矩理论

通过钢筋计测出受拉区钢筋的拉应力平均值为 σ_{1s} ,同一高度测出的受压区钢筋的平均压应力为 σ_{2s} ,假定结构砼与钢筋具有相同的形变,即拉压应变相同,受拉和受压钢筋间距为 d ,砼弹性模量为 E_c ,钢筋弹性模量为 E_s ,混凝土截面惯性矩为 I_c 。

将该梁考虑为纯弯环境的等直梁条件,根据梁横截面上的正应力条件计算公式为

$$\sigma = \frac{My}{I_z} \quad (2)$$

式中: M 为横截面上的弯矩, $\text{kN}\cdot\text{m}$; y 为所求应力点的纵坐标, m ; I_z 为截面对中性轴 z 的惯性矩, m^4 。

根据式(2)对肋柱和腰梁混凝土截面受拉、受压钢筋截面应力为

$$\begin{cases} \sigma_{s1} = \frac{My_1}{I_z} \\ \sigma_{s2} = \frac{My_2}{I_z} \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ_{s1} 为受拉区测点处混凝土拉应力; σ_{s2} 为受压区测点处混凝土的压应力。钢筋计测试数据为负值代表受拉,数据处理时并未对其反号处理,故该数值负值代表拉应力。将式(3)两式相减得

$$\sigma_{s1} - \sigma_{s2} = \frac{M(y_1 - y_2)}{I_z} = \frac{Md}{I_z} \quad (4)$$

同截面上混凝土与钢筋具有相同的拉和压应变,即

$$\epsilon_c = \epsilon_s \quad (5)$$

故:

$$\begin{cases} \sigma_1 = E_c \epsilon_{s1} = E_c \frac{\sigma_{s1}}{E_s} \\ \sigma_2 = E_c \epsilon_{s2} = E_c \frac{\sigma_{s2}}{E_s} \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)带入式(4)可得

$$M = \frac{E_c I_z (\sigma_{s1} - \sigma_{s2})}{E_s d} \quad (7)$$

该挡墙肋柱和腰梁结构混凝土标号为C30,主筋型号均为HRB400,故 $E_c = 30.0 \text{ GPa}$, $E_s = 200.0 \text{ GPa}$, d 的取值由实际配筋截面形式测量,肋柱为 0.58 m ,腰梁为 0.53 m 。肋柱截面 I_z 值求解为 $1\,264\,215\,965 \text{ mm}^4$,腰梁 I_z 为 $6\,300\,000\,000 \text{ mm}^4$ 。将以上数值及表1所计算同截面钢筋平均应力值分别带入式(7),可计算得在该截面的混凝土弯矩值如表2所示。

由实测数据绘制的该扶壁式挡墙中,装配式生态挡墙立板结构,肋柱纵筋在腰梁GLy.2位置变为负弯矩,其弯矩值与基础至腰梁中点GLy.1位置数值相当,符号相反,基底因为固定端,出现负弯矩且底部不为零。随上部土压应力减小,腰梁至顶梁中点GLy.3位置,正弯矩值相对较小。腰梁纵筋位于扶壁和肋柱中点GY1.y和GY2.y位置均处于正弯

表2 挡墙立板结构弯矩计算

砼结构	截面编号	截面位置	正应力均/MPa	结构弯矩/(kN·m)
肋柱	GLy.1	受拉区	-26.33	-36.61
		受压区	16.78	
	GLy.2	受拉区	71.89	39.29
		受压区	-48.31	
	GLy.3	受拉区	-12.62	-7.49
		受压区	10.31	
腰梁	GY1.y	受拉区	-34.93	-11.16
		受压区	37.12	
	GY2.y	受拉区	-31.62	-12.03
		受压区	46.06	

矩,弯矩值相当且数值较小,腰梁位于该中点弯矩值较小,是由于扶壁链接位置为固定端,正弯矩减小所致。

3.3 实测挡墙结构弯矩分析

将表2数据结合测试点位绘制为该立板结构弯矩如图12所示。为方便分析,弯矩图中所有曲线段暂用直线示意,主要展现弯矩变化趋势。

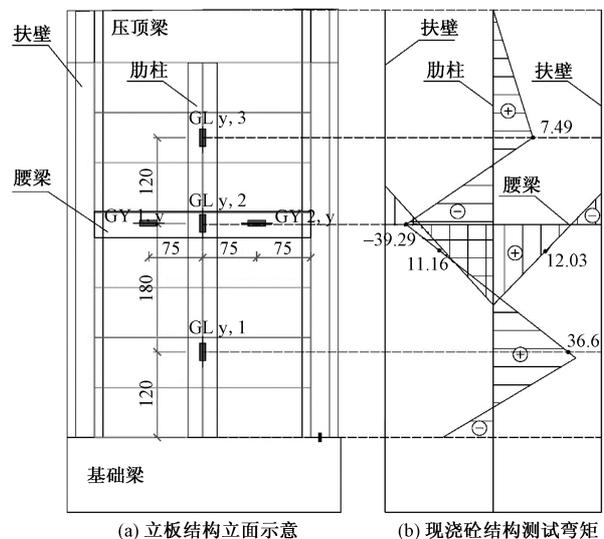


图12 立板测试点位弯矩

4 装配式生态现浇结构简化计算法

4.1 墙背荷载模型

应用于扶壁式挡墙的装配式生态挡墙立板结构,墙背土压应力模型采用均布荷载的形式且 $\sigma_p = \frac{1}{2} \sigma_H$,即取值为扶壁墙背库伦土压应力最大值的0.5倍,本次试算采用实测最大值 30.10 kPa 进行试算。

4.2 装配式生态挡墙模型试算方法

装配式生态挡墙应用于扶壁式挡墙立板结构,替换后由现浇的混凝土结构肋柱、腰梁和顶梁,分别与结构基础和扶壁链接,在该立板结构内形成并

字梁结构,简化算法拟采用井字梁计算模型,以分析该荷载条件下,肋柱和腰梁的受力情况,经过试算多种链接方法,目前符合实测数据趋势模型的计算方法共有以下两种。

方法一:假定基础和扶壁均为固定端约束,即立板三边固定,肋柱和腰梁的相交处为自由约束,肋柱与顶梁为简支约束,其分析模型与弯矩图如图13所示。

该方法计算后,弯矩趋势与实测基本相同,但因实际墙背所受土压应力分布与试算不同,数据值上有一定出入。其弯矩结果,肋柱在腰梁位置出现负弯矩 $-18.48\text{ kN}\cdot\text{m}$,其值小于腰梁至基础出现的最大正弯矩为 $36.17\text{ kN}\cdot\text{m}$,且与腰梁至顶梁中点出现最大正弯矩为 $17.57\text{ kN}\cdot\text{m}$ 数值相当。腰梁在扶壁和肋柱中点位置正弯矩值均为 $9.09\text{ kN}\cdot\text{m}$,处于较低水平。

方法二:假定基础为固定端约束,腰梁、顶梁与扶壁为简支约束,腰梁与肋柱相交处为简支约束,其分析模型与弯矩如图14所示。

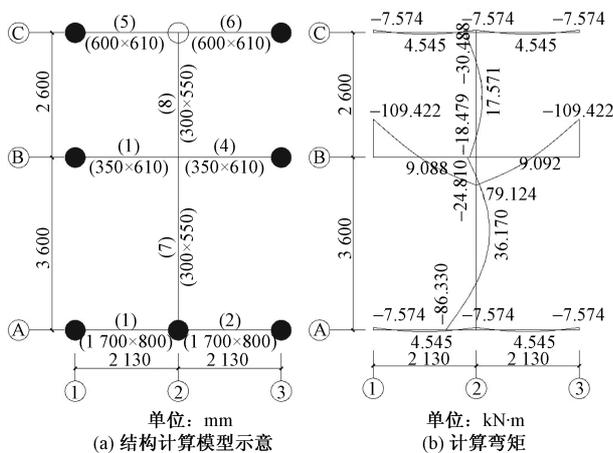


图13 方法一模型计算弯矩

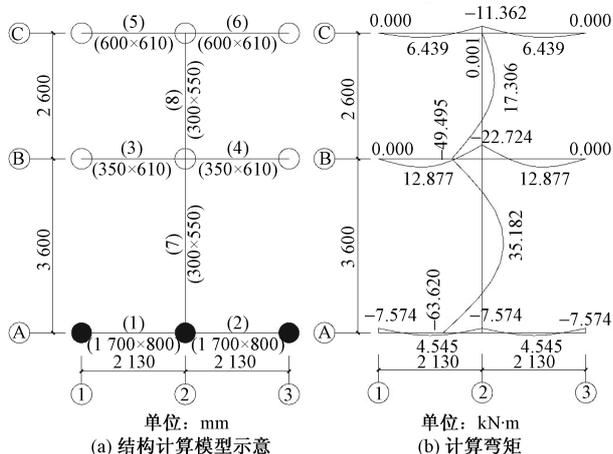


图14 方法二模型计算弯矩

该方法计算后,弯矩趋势与实测也基本相同,与方法一最大区别在于腰梁的弯矩分布出现负弯矩。弯矩结果,肋柱在腰梁位置出现负弯矩 $-49.50\text{ kN}\cdot\text{m}$,其值大于腰梁至基础出现的最大正弯矩值为 $35.18\text{ kN}\cdot\text{m}$,且远大于腰梁至顶梁中点出现最大正弯矩为 $17.31\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。腰梁在扶壁和肋柱中点位置正弯矩值均为 $12.88\text{ kN}\cdot\text{m}$,处于较低水平,而在与肋柱相交位置出现负弯矩,其值为 $-22.72\text{ kN}\cdot\text{m}$,而在扶壁两侧弯矩即为0。

综合方法一和方法二结论,考虑到规范要求和设计经验,方法一的简化计算方法更为推荐,理由如下:①从《建筑边坡工程技术规范》GB50330—2013的12.2.6中,建议立板可根据边坡约束条件三边固定一边自由进行计算,即基础和扶壁均可考虑为固定端,实际基础和扶壁不发生任何位移和转动;②该计算模型即假定肋柱和腰梁皆为连续梁,通常按照建筑井字梁设计要求,连续梁中间一般不采用铰接,这是由于井字梁在该处皆为连续通过,此处无扭矩,故无须点铰;③该简化计算模型假定墙背为实测土压应力最大值的均布荷载,和实际分布相比存在放大荷载。在同样放大荷载条件下,方法一相比方法二在计算值量级上更接近于实测数据,方法二可能会存在过量设计的情况,考虑到土压应力分布在实际理论计算已大于实测的情况下,方法一更符合实际且更经济。

5 结论与建议

重庆两江协同创新区六横线明月大道项目(图15),首次采用扶壁式装配式生态挡墙结构形式,装配式建筑施工方便,有效减少碳排放。同时可在装配式生态挡墙的PC构件中进行客土绿化,搭配灌木类植物,美化城市环境。但该挡墙目前有关结构设计计算方面的研究在国内依然是空白。

本文通过对装配式扶壁生态挡墙立板结构土压应力和钢筋内力的原位试验,提出土压应力的简化分布模型,并通过实测数据,对该挡墙立板结构的计算模型提出简化计算方法,即肋柱和腰梁采用三边固定,内部交点自由的约束方法进行计算,符合规范要求和实测数据规律,这为将来该挡墙应用提供结构计算依据。

目前缺少腰梁截面在肋柱交点上的内力数据,无法完全确定方法一和方法二的准确性,建议在未来试验中完善该点数据。简化算法受到扶壁间距和挡墙高度,即 y/h 的影响,本次试验仅讨论了 y/h 为0.43的简化模型,对其他比值并未讨论和研究。



图 15 重庆明月大道装配式生态扶壁挡墙实景

参考文献

- [1] 于洋,王奇,石振武. 装配式建筑物化阶段碳排放影响因素分析[J]. 科技和产业, 2023, 23(20): 144-151.
- [2] 杨晖,朱聪,黄天元. 装配式锚拉型格栅生态挡墙的工程应用与监测分析[J]. 勘察科学技术, 2023(2): 36-40.
- [3] 张清晨,郭环宇. 装配式挡土墙受力性能试验与有限元分析[J]. 低温建筑技术, 2023, 45(10): 83-86.
- [4] 王大伟. 预制拼装式绿色挡墙大型模型试验研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.
- [5] 张明丽. 边坡治理中装配式挡墙组合结构的应用研究[J]. 水利科技与经济, 2023, 29(6): 54-57.
- [6] 王新泉,于威,朱聪. 预制装配式可绿化生态挡墙施工技术[J]. 低温建筑技术, 2023, 45(5): 157-161.
- [7] 宁英杰,王新泉,王正军,等. 装配式可绿化挡墙设计及应用研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(1): 59-66.
- [8] 张昕升. 路堑边坡装配式绿化挡墙受力特性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2020.
- [9] 孟秀元. 装配式生态挡墙在绿色公路建设中的应用[J]. 中国公路, 2021(8): 116-119.
- [10] 白丽辉,朱聪,黄天元等. 装配式生态挡墙结构承载特性研究[J]. 岩土工程技术, 2022, 36(5): 345-352.
- [11] 陈秀平,刘泽,丁献英,等. 装配扶壁式挡土墙纵向分割方式的影响分析[J]. 建筑技术开发, 2023, 50(7): 120-122.
- [12] 曾冬霞,褚肖肖,罗鹏蛟,等. 公路工程半重力式装配式生态挡墙应用技术研究[J]. 中国水运, 2023(4): 151-153.
- [13] 刘长春,刘德稳. 空间滑动面准则下考虑土拱效应的挡土墙主动土压力研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(26): 10871-10874.

Research on Simplified Calculation Method of Eco-fabricated Counterfort Retaining Wall: Taking the Liuheng Line Mingyue Avenue Retaining Wall Project in Chongqing Liangjiang Collaborative Innovation Zone as an Example

CHEN Ran, WANG Hansheng, CHU Xiaoxiao, LU Zhizheng

(Sichuan Hongzhou Legoal Ecological Technology Co. LTD., Chengdu 610095, China)

Abstract: Based on the Eco-Fabricated Counterfort Retaining Wall of the Liuhang Lines of Chongqing Liuhengjie Mingyue Avenue Project, the earth pressure gauge was tested for the riser and buttress facing the earth. Through the in-situ test of the project, the detection data were collected in real time to analyze the distribution law of earth compressive stress on the back of the retaining wall structure, and an earth pressure calculation model was proposed for the calculation of the retaining wall structure. It provides the calculation basis for the future use of the eco-fabricated counterfort retaining wall.

Keywords: eco-fabricated retaining wall; in-situ test; force analysis; rapid design method