

基于承插和栓接组合的预制装配式悬臂挡土墙

袁胜强¹, 华 锋¹, 金忠良², 赵 勇¹, 赵伟华², 林景赐³, 沈 伟³

(1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092; 2. 建华建材(中国)有限公司, 江苏 镇江 212000;

3. 上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海 200433)

摘要: 为便于预制装配式悬臂挡土墙的推广及应用, 在对国内外研究及应用现状分析基础上, 提出了基于承插和栓接组合连接的预制装配式悬臂挡土墙, 研究了总体构型、结构计算及安装工艺, 从理论分析、试验验证和工程应用三方面进行了论证。提出的基于承插和栓接组合式连接的预制装配式悬臂挡土墙满足结构安全要求, 便于预制和安装, 施工速度快, 工艺完善, 具有较大的推广价值。

关键词: 承插栓接组合; 预制装配; 悬臂挡土墙; 安装工艺

中图分类号: U417.1+1

文献标志码: A

Prefabricated Cantilever Retaining Wall Based on Combination of Socket and Bolt Connection

YUAN Shengqiang¹, HUA Feng¹, JIN Zhongliang², ZHAO Yong¹, ZHAO Weihua², LIN Jingci³, SHEN Wei³

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Jianhua Construction Materials (China) Co., Ltd., Zhenjiang 212000, China; 3. Shanghai Road and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

Abstract: To facilitate the promotion and application of prefabricated retaining walls, this paper analyses current research and application status both domestically and internationally, and proposes a prefabricated cantilever retaining wall that utilizes combined connections using socket and bolt. The overall configuration, structural calculation, and installation process are studied, and three aspects including theoretical analysis, experimental verification, and engineering application are discussed. The proposed prefabricated cantilever retaining wall meets structural safety requirements while offering fast and convenient prefabrication and installation, and has significant value for widespread application.

Keywords: socket and bolted combination connection; prefabricated assembly; cantilever retaining wall; installation process

当前预制装配式技术在建筑结构、桥梁结构等专业领域得到了长足的发展及推广应用, 但在道路工程方向研究及应用较少。由于受建设用地限制, 城市道路工程中悬臂式挡土墙应用最为普遍, 目前多采用现浇施工方式, 但现浇方式存在施工工期较长、现场环境污染较大、构件强度难以控制、外观不佳等缺点, 并且周边居民对现浇施工意见颇大, 因此采用预制装配式悬臂挡土墙的需求越来越多。

已有工程技术人员对预制装配式挡土墙进行了若干尝试、研究和实践。赵御祺^[1]提出了双曲和锥面薄壳悬臂式挡土墙; 曾向荣^[2]提出的装配式钢筋混凝土挡土墙以及中国市政西南设计研究院^[3]编制的城市道路装配式挡土墙图集, 主要结构形式为部分预制装配式扶壁挡土墙; 文献[4]提出了采用锚栓连接的全预制装配式扶壁挡土墙; 文献[5-8]对二级垛式新型悬臂式挡土墙进行了研究分析; 蒋梅东^[9]进行了装配式挡土墙的结构设计与试验研究; 刘曙光等^[10]研究了新型装配式悬臂挡土墙的承载性能; 刘泽等^[11]对装配式悬臂挡土墙的连接进行了研究; 徐健等^[12-13]提出了基于锚栓连接的预制装配式挡土墙; 石雪飞等^[14]对挡土墙墙顶护栏车辆撞击进行了分析。上述研究促进了预制装配式悬臂挡土墙的技术发展, 但研究中的连接节点设计存在不足, 且未涉及构件的模数化及安装施工的便捷性。

本文基于理论分析、试验验证和工程应用三方面, 旨在对预制装配式悬臂挡土墙的构件总体构型、结构设计及安装工艺等方面进行创新, 提出结构安

收稿日期: 2023-07-14

基金项目: 上海市交通委员会资助项目(JT2018-KY-002)

第一作者: 袁胜强, 教授级高工, 管理学博士, 主要研究方向为道路交通、智能交通、BIM技术研发。

E-mail: yuan_sq@163.com

通信作者: 华 锋, 教授级高工, 工学硕士, 主要研究方向为道路交通。E-mail: 13918917024@139.com



论文
拓展
介绍

全性高、预制及安装便捷、速度快的预制装配式悬臂挡土墙。

1 总体构型

1.1 构件模数化

预制装配式悬臂挡土墙可分为若干个纵向预制节段,每个纵向预制节段又可拆分为预制底板和预制立壁两部分,底板和立壁在工厂生产,并预留吊点和连接件,运输至现场后,通过竖向连接、纵向连接依次拼装成型。悬臂式挡土墙预制立壁一端插入预制底板的承口内,并在缝隙内用填充材料密封,该方式称为承插式连接;通过将预制立壁预留孔洞的一端套入预制底板预埋螺栓并锁紧的连接方式称为栓接式连接;采用承插式连接和栓接式连接组合方式的连接形式称为承插和栓接组合式连接。承插和栓接组合式预制装配式悬臂挡土墙如图1所示,图中 B

为构件厚度, W 为底板长度, H 为立壁高度。

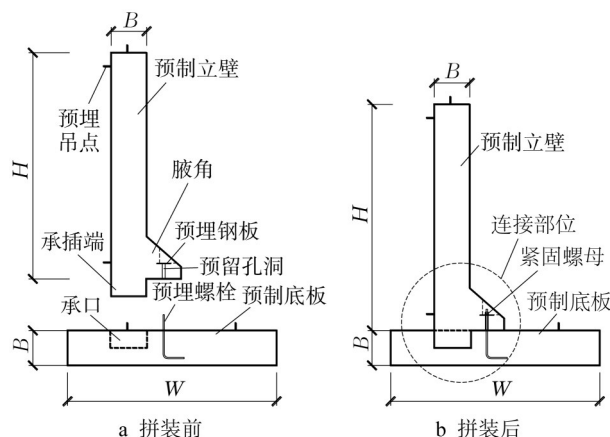


图1 承插和栓接组合式预制装配式悬臂挡土墙拼装图
Fig. 1 Prefabricated cantilever retaining wall with combined connections of socket and bolt

为便于生产、运输、吊装及安装,预制构件尺寸应满足表1所示的尺寸要求。

表1 预制构件尺寸要求

Tab. 1 Requirements for dimensions of prefabricated components

边界要求	设计	立壁高度 H (1.0~5.0 m) 底板长度 W (1.4~5.1 m)
强约束要求	运输 吊装	节段长度 ≤ 12.16 m, 节段高度 ≤ 2.70 m, 节段宽度 ≤ 2.80 m 预制构件质量 ≤ 26 t
弱约束要求	安装 模板	简便,减少二次浇筑 标准化、减量化

根据表1,可得出立壁高度 H 与节段长度 L 之间的关系为:① $H \leq 3.0$ m时, $L=5.0$ m;② $H > 3.0$ m时, $L=2.5$ m。根据预制模数化及挡土墙高差过渡要求, H 级差宜采用250 mm。经耦合计算,可得出各预制构件的尺寸,如表2所示。

表2 预制构件尺寸

Tab. 2 List of dimensions of prefabricated components

挡土墙代号	节段长度	立壁高度	底板长度	构件厚度/mm
H200	5 000	1 600	3 000	400
H250	5 000	2 100	3 300	400
H300	5 000	2 600	3 700	400
H350	2 500	3 500	4 000	400
H400	2 500	4 000	4 200	400
H450	2 500	4 500	4 600	400
H500	2 500	5 000	5 100	400

由表2可知,预制立壁最大尺寸为5.0 m \times 2.5 m \times 0.4 m,预制底板最大尺寸为5.1 m \times 2.5 m \times 0.4 m;立壁最大质量为13.0 t,底板最大质量为18.5 t,均满足常规车辆限重以及运输路线上桥

梁等构筑物限载的要求,同时,在吊装作业过程中,可选用汽车吊等小型吊装设备来完成。

1.2 构件间的连接

1.2.1 竖向连接

预制装配式悬臂挡土墙的关键是立壁和底板的竖向连接。本文提出采用承插和栓接组合方式进行连接:①底板设置U型承口,立壁相应位置设置承插端与承口匹配,底板承口及立壁承插端位置均需增加配筋对其结构进行加强,承口尺寸需略大于承插端尺寸,使得底板与立壁之间能够快速拼装定位,并需控制构件的安装精度,使拼装后预制立壁与预制底板之间的最大间隙不大于1 cm;②底板内设有预埋L型连接螺栓,连接螺栓作为连接立壁与底板的重要受力构件,其布置形式、强度等级、直径等指标须满足挡墙的受力要求,立壁下部内侧设置腋角,在腋角内设置与预埋连接螺栓相匹配的孔洞,腋角孔洞位置需考虑紧固螺母的操作空间,通过预埋连接螺栓上紧固螺母,使立壁与底板连接成整体结构,安装时在孔洞内填筑灌浆材料保护预埋螺栓。

1.2.2 纵向连接

为了避免路基不均匀沉降及混凝土热胀冷缩引起悬臂挡土墙结构发生破坏,现浇悬臂挡土墙一般每隔 10~20 m 设置一道沉降缝。而预制装配式悬臂挡土墙受运输及吊装等因素制约,节段长度为 2.5~5.0 m,每个节段之间的连接可按下述 2 种方式。

(1) 企口缝连接:在立壁间、底板间的边缘处宜预留孔洞,用对拉螺栓连接(图 2a),完成螺栓安装后应及时回填混凝土进行封闭。

(2) 后浇带连接:在立壁间、底板间的边缘处设置预留钢筋,现场通过铺设连接钢筋及后浇混凝土完成节段之间的纵向连接(图 2b)。

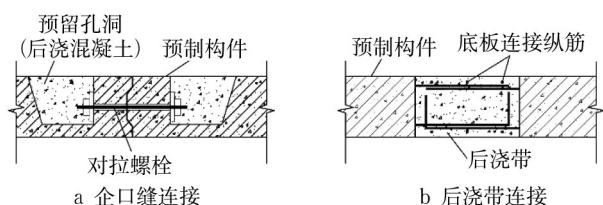


图 2 相邻预制构件之间的连接

Fig. 2 Connections between adjacent fabrication components

2 结构分析

和现浇悬臂挡土墙一样,预制装配式悬臂挡土墙整体结构设计采用极限状态设计的分项系数法,挡土墙墙体、墙趾、墙踵均按照悬臂梁计算,设计基本参数为地基土和填料土的常规物理力学性质、车辆和人群荷载、防撞墙水平撞击荷载等,依据各种工况确定荷载(图 3)组合,验算各种荷载组合下的挡土墙抗滑移稳定性、抗倾覆稳定性、地基承载力等^[9]。图中 N_t 为单个螺栓最大拉力设计值, N_v 为单个螺栓最大剪力设计值。

不同于现浇悬臂挡土墙,预制装配式悬臂挡土墙结构设计需考虑 2 个问题:① 防撞墙撞击荷载大小及分布;② 预制装配的连接部位的结构计算。

2.1 防撞墙碰撞模拟分析

根据《城市道路交通设施设计规范》(GB 50688—2011)的相关规定,防撞护栏的防撞等级分为五级。分析采用 SB 级大客车要求,车辆质量为 10 t,碰撞速度为 $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,撞击角度为 20° ,设计防护能量为 280 kJ。

建立车辆及防撞护栏的模型,采用 Ls-dyna 11.0 软件进行碰撞仿真分析底板螺栓的受力情况。假定挡土墙底板为全约束状态,且挡土墙构件不会

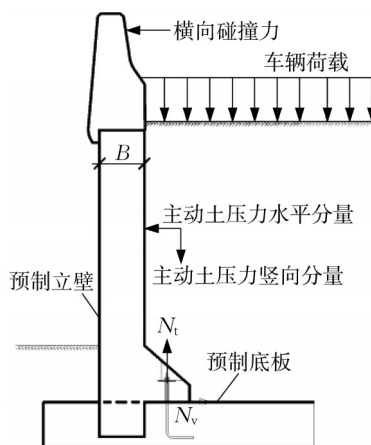


图 3 装配式悬臂挡土墙荷载

Fig. 3 Load of prefabricated cantilever retaining wall

因为撞击发生破坏。碰撞模型见图 4,碰撞工况分析见图 5。根据碰撞模拟分析,底板螺栓受力情况见表 3。

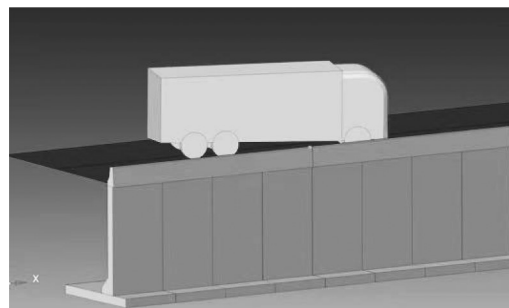


图 4 碰撞模型

Fig. 4 Impact model

根据碰撞模拟分析,撞击端部相对于撞击中部碰撞荷载分布长度略小,螺栓受力略大,碰撞模拟结果与实际情况吻合。

底板螺栓承受的最大轴向力为 100 kN,最大剪力值为 95 kN,远小于设计采用螺栓的设计值(受拉承载力 220 kN,受剪承载力 183 kN),螺栓连接能够承受车辆撞击所产生的偶然的作用力组合情形。

2.2 连接部受力的有限元分析

按照高度为 5 m 的组合式悬臂挡土墙实际设计尺寸建立有限元计算模型,实体部分采用 C3D8R(3 维 8 节点线性减缩积分单元)单元划分网格,网格尺寸为 50 mm。钢筋采用 T3D2(3 维 2 节点线性桁架单元)单元划分网格,网格尺寸为 100 mm。混凝土采用混凝土损伤塑性(Concrete Damaged Plasticity)本构模型,钢筋采用两折线本构模型。

模型的计算荷载包括作用于立壁上随深度变化

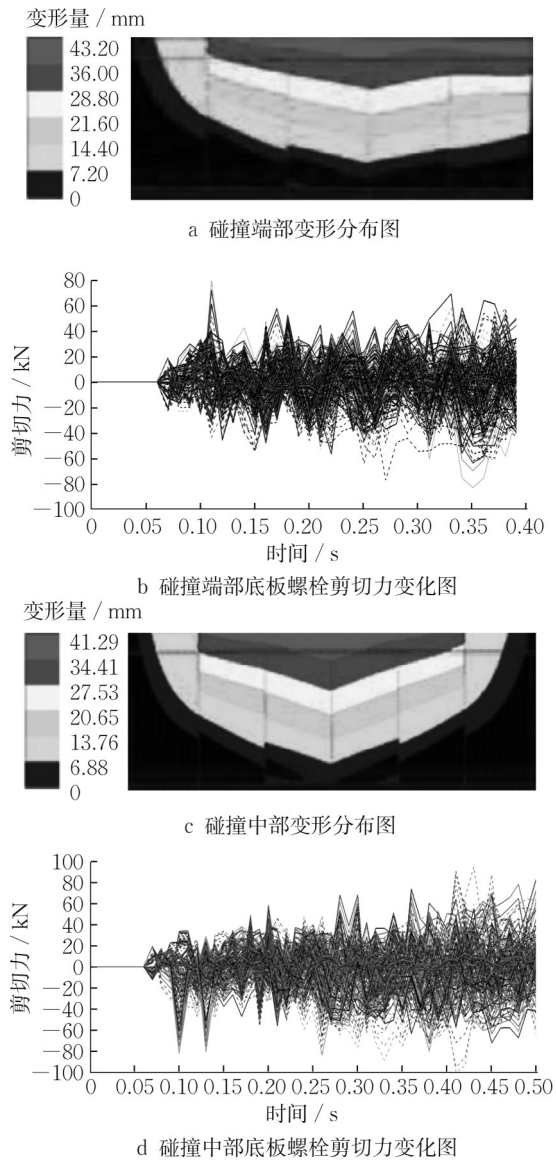


图5 碰撞工况分析

Fig. 5 Analysis of impact

表3 底板螺栓受力情况分析

Tab. 3 Analysis of force on bottom plate bolts

工况	螺栓最大轴向力/kN	最大剪切力/kN
撞击端部	100	95
撞击中部	60	80

的土压力,及立壁顶部防撞墙的水平力和竖向力。计算结果如图6所示。

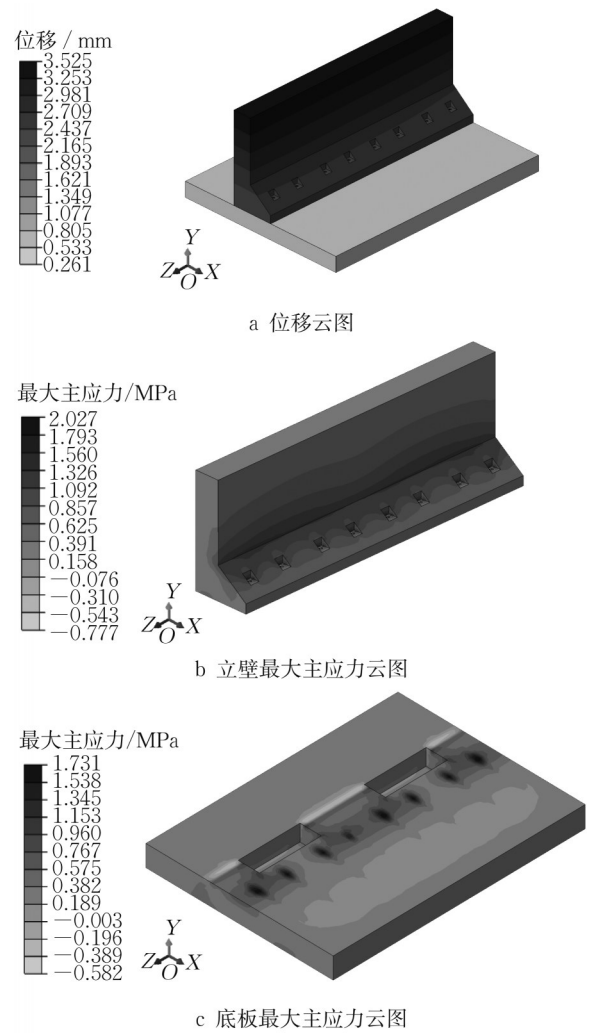


图6 有限元分析结果

Fig. 6 FEM analysis results

根据现行规范要求,提出计算荷载组合(表4),按最不利荷载组合IV,挡土墙立壁顶端的最大变形为3.525 mm,考虑到墙体本身高度为5 m,结构实际位移量不超过墙身高度的1%,结构偏安全。立壁最大主应力位于螺栓孔与螺栓垫板附近,最大值为2.027 MPa;底板最大主应力位于螺栓预埋点附近,最大值为1.731 MPa,小于C40混凝土的抗拉强度标准值2.39 MPa,结构偏安全。根据计算分析,该结构形式可满足设计使用要求。

表4 荷载组合

Tab.4 Load combination

组合	荷载组合名称
I	挡土墙结构重力、墙顶上的有效永久荷载、填土重力、填土侧压力荷载组合
II	组合 I 与车辆荷载引起的土侧压力、人群荷载、人群荷载引起的土侧压力组合
III	组合 II 与地震作用力组合
IV	组合 II 与作用于墙顶护栏上的车辆碰撞力组合

2.3 螺栓设计理论计算

2.3.1 计算模型

为便于理论计算,预制悬臂式挡土墙的计算模型如图4所示,计算假定如下:①不考虑被动土压力、承插作用力及摩擦力等有利作用;②所有螺栓具有足够的锚固长度;③螺栓群承受的剪力和拉力由每个螺栓均匀承担,单排布置时,同时达到极限状态;双排布置时,螺栓群承受的拉力与各排螺栓的力臂长度成正比,外排螺栓先达到极限状态。

2.3.2 计算方法

经推导,螺栓单排布置时,有

$$N_v = \gamma_0 L_b (Q + \gamma_Q E_x) \quad (1)$$

$$N_t = \frac{\gamma_0 L_b [2QH + \gamma_Q (2E_x C_a + E_y B)]}{B + 2s} \quad (2)$$

螺栓双排布置时,有

$$N_v = \frac{1}{2} \gamma_0 L_b (Q + \gamma_Q E_x) \quad (3)$$

$$N_t = \frac{\gamma_0 L_b (B + 2s_2) [2QH + \gamma_Q (2E_x C_a + E_y B)]}{(B + 2s_1)^2 + (B + 2s_2)^2} \quad (4)$$

2种螺栓布置形式下均需满足式(5):

$$\left(\frac{N_v}{N_v^b}\right)^2 + \left(\frac{N_t}{N_t^b}\right)^2 \leq 1 \quad (5)$$

式中: N_v 为单个螺栓最大剪力设计值,N; γ_0 为结构重要性系数; L_b 为螺栓的布置间距,mm; Q 为每延米车辆横向碰撞荷载标准值, $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$,依据道路线型、路侧危险度、运行速度、车辆构成等因素按照《公路交通安全设施设计细则》(JTG/T D81—2017)的相关规定选取; γ_Q 为可变荷载的分项系数,对结构起不利作用时, $\gamma_Q=1.5$; E_x 为由车辆荷载和土自重引起的每延米主动土压力标准值的水平分量, $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$; N_t 为单个螺栓最大拉力设计值,N; H 为挡土墙墙身高度,mm; C_a 为由车辆荷载和土自重引起的每延米主动土压力合力点至预制底板顶面的距离,mm; E_y 为由车辆荷载和土自重引起的每延米主动土压力标准值的竖向分量, $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$,计算设计值时分项系数按可变荷载考虑,当墙背竖直时,取为零; B 为挡土墙厚度,mm; s 为螺栓布置时至预制立板内边缘的距离,m; s_1 、 s_2 分别为第1排、第2排螺栓至预制立板内边缘的距离,mm; N_v^b 为单个螺栓抗剪承载力设计值,N; N_t^b 为单个螺栓抗拉承载力设计值,N。

2.3.3 计算结果

假定螺栓规格为高强螺栓M27,计算出不同挡土墙高度下含承插口部位的最大螺栓间距,如表5

所示。表中的计算条件未考虑地下水的影响,未考虑承插口的有利作用;护栏设计等级为SB级;采用库仑方法计算墙背的主动土压力,不考虑墙趾前的被动土压力;考虑结构重要性系数为1.05。

表5 螺栓布置验算结果

Tab. 5 Calculation results of bolt arrangement

挡土墙代号	螺栓布置形式	螺栓强度等级	螺栓直径/mm	最大螺栓间距/mm
H325	单排	8.8级	27	312
H350	单排	8.8级	27	283
H400	单排	8.8级	27	235
H450	单排	8.8级	27	198
H500	单排	8.8级	27	168
H400	双排	8.8级	27	401
H450	双排	8.8级	27	336
H500	双排	8.8级	27	285

由表5可知,当螺栓间距为250 mm时,H400以下挡土墙(不包括H400)宜采用单排布置,H400~H500挡土墙宜采用双排布置。

3 试验验证

为进一步检验连接的可靠性,分别选取承插式挡土墙、栓接式挡土墙和组合式挡土墙作为试验对象,验证挡土墙在运行期间连接部位的可靠性。

3.1 试验加载

试验加载系统由型钢立柱、斜柱、分配梁、水平梁和水平托架组合而成,2台千斤顶分别安装于水平托架上,可提供推力荷载并与挡墙形成自平衡系统。试验加载装置如图7所示。

3.2 试验结果



图7 挡土墙试验加载装置

Fig. 7 Loading device for retaining wall test

挡土墙破坏过程分弹性阶段、带裂缝工作阶段与最终破坏阶段,其中底板裂缝开展后钢筋应力迅速增加且最终屈服导致构件破坏。

当侧压力作用于挡土墙立壁时,槽口处混凝土

首先开始出现裂缝,此后立壁在等截面段将随着侧压力的逐渐增加而逐渐出现新的裂缝;底板尚未开裂前,立壁钢筋受拉侧钢筋应力较大,而底板处钢筋应力很小,随着侧压力由立壁传至底板且不断增大,底板与立壁承插端相接处将出现负弯矩引起底板顶面开裂,该处钢筋应力急剧增加,超过立壁受拉钢筋应力,伴随着荷载进一步增加,底板在填土外侧出现正弯矩引起底板底面开裂。

随着底板钢筋应力进一步增大,立壁钢筋应力相对较小,底板钢筋承担了较大的外力,此后底板主要裂缝相互贯通,钢筋最终屈服。

水平承载力试验值所得结果如下:采用承插式连接的挡土墙为159 kN,采用栓接式连接的挡土墙为255 kN,采用组合式连接的挡土墙为320 kN。

在最不利荷载组合作用下,5.0 m高的挡土墙水平设计荷载所得结果如下:人行道侧挡土墙为140 kN,车行道侧挡土墙为240 kN。

根据实验结果,为保障结构的安全,建议车行道侧挡土墙采用组合式挡土墙,3.0 m及以下的人行道侧挡土墙可采用承插式。

4 工程案例

以浙江省嘉兴市某工程为例,工程现场毗邻住宅小区,距小区围墙最近距离仅数米,施工用地极为紧张且工期较短,故选取该路段作为预制装配式悬臂挡土墙的试验段。挡土墙立壁与底板的连接方式为承插和栓接组合式。其中,挡土墙的最大设计挡土高度为2.75 m,节段宽度为5 m,主要的施工流程如下:

(1) 施工准备。先设置40 cm厚碎石垫层或混凝土垫层,地基承载力要求100 kPa以上。

(2) 吊装预制底板。使用汽车吊起吊预制底板(图8 a),吊运至设计位置,测量复核底板的平面位置和高程。

(3) 铺设承口砂浆垫层。在底板承口的四壁及底面上采用高强砂浆均匀抹面(图8 b)。砂浆采用高强度无收缩砂浆。

(4) 吊装预制立壁。预制立壁采用四点顶部起吊。与底板连接时,立壁承插端需对准底板承口且缓慢放下,并注意螺杆与螺栓孔的相对位置。

(5) 螺栓安装。立壁安装就位后,在螺栓空隙处先灌注高强砂浆。然后安装12 mm厚钢垫板和螺母用垫片,最后拧入螺母并使用扭力扳手确认拧紧力(图9 a)。



a 预制底板吊装

b 高强砂浆抹面

图8 预制底板施工

Fig. 8 Prefabricated base plate construction

(6) 底板和立壁均安装完成后(图9 b),应对挡土墙立壁螺栓孔开槽部位进行封闭处理,同时浇筑挡土墙连接段的现浇部分,后续按照常规挡土墙工程施工即可。



a 螺栓安装

b 试验段安装效果

图9 螺栓连接安装及试验段安装效果

Fig. 9 Bolt installation and installation renderings

该挡土墙工程全长80 m(左右各40 m),不含回填土工序的现场施工安装时间仅为3天,较现浇挡土墙缩短近91%的工期,现场用工较现浇挡土墙减少约93%的人工工日。工地现场干净整洁,施工时无需临时支撑,施工效率极高。目前挡土墙应用良好,表面整齐美观、无开裂痕迹。

5 结语

提出基于承插和栓接组合式连接的预制装配式悬臂挡土墙成套技术,进行了技术方案设计,建立了简化计算模型,通过有限元分析验证、试验验证及相关的工程应用,表明基于本技术的装配式悬臂挡土墙具有安全可靠、便于预制、运输且安装速度快的特点,依据本研究成果已编制出版了上海市工程建设规范《预制装配式悬臂挡土墙技术标准》(DG/TJ08-2389—2021),为预制装配式悬臂挡土墙的推广奠定了基础。

作者贡献声明:

袁胜强:论文整体构思及技术方案,论文审校。

华 锋:图表制作,论文写作与修改。

金忠良:资源提供,论文验证。
 赵 勇:数据处理,论文修改。
 赵伟华:数据获取,论文修改。
 林景赐:示范工程实施验证。
 沈 伟:示范工程实施验证。

参考文献:

- [1] 赵御祺. 悬臂式薄壳挡土墙[J]. 建筑结构, 1981(6):60.
 ZHAO Yuqi. Cantilevered thin shell retaining wall [J]. Building Structure, 1981(6):60.
- [2] 曾向荣. 部分预制装配式钢筋混凝土挡土墙在城市轨道交通工程中的应用技术[J]. 地铁与轻轨, 2001(4):24.
 ZENG Xiangrong. The application technology of partially prefabricated reinforced concrete retaining wall in urban rail transportation engineering [J]. Metro and Light Rail, 2001(4):24.
- [3] 中华人民共和国建设部. 城市道路—装配式挡土墙: 07MR402 [S]. 北京: 中国建筑标准设计研究院, 2008.
 Ministry of Construction of the People's Republic of China. Prefabricated retaining wall for urban roads: 07MR402 [S]. Beijing: China Institute of Building Standard Design & Research, 2008.
- [4] FARHAT M, LSSA M. Design principles of totally prefabricated counterfort retaining wall system compared with existing cast-in-place concrete structures [J]. PCI Journal, 2017(5):89.
- [5] 刘泽, 黄天棋, 蒋梅东, 等. 两级垛式悬臂挡土墙结构特性数值分析[J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(5):1.
 LIU Ze, HUANG Tianqi, JIANG Meidong, *et al.* A Numerical analysis of the structure characteristics of two-stage stacked cantilever retaining walls [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2019, 33(5):1.
- [6] 梁波, 王家东, 严松宏. 垛式新型悬臂式挡土的数值分析及应用探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1):3174.
 LIANG Bo, WANG Jiadong, YAN Songhong. Discussion on numerical analysis and application of new structure of cantilever retaining wall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1):3174.
- [7] 毛海君. 二级悬臂式挡墙振动台模型试验与动力分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015(S1):108.
 MAO Haijun. Shaking table model experiment and dynamic analysis of two-step cantilever retaining wall, [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015 (S1):108.
- [8] 梁桥, 陈翔, 周文权. 二级垛式新型悬臂式挡土结构分析探讨[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2016(3):76.
 LIANG Qiao, CHEN Xiang, ZHOU Wenquan. Analysis and discussion on the new cantilever retaining structure of the two-stage buttress [J]. Journal of Hunan Institute of Engineering (Natural Science), 2016 (3):76.
- [9] 蒋梅东. 装配式挡土墙结构与试验研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2017.
 JIANG Meidong. Structural design and experimental study of assembled retaining wall [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2017.
- [10] 刘曙光, 方琦, 钟桂辉, 等. 新型装配式悬臂混凝土挡土墙承载性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(7):937.
 LIU Shuguang, FANG Qi, ZHONG Guihui, *et al.* Test on bearing performance of new fabricated cantilever concrete retaining wall [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48 (7): 937.
- [11] 刘泽, 何帆, 黄天棋, 等. 装配式悬臂式挡土墙节点承载特性试验研究[J]. 公路交通科技, 2020(9):25.
 LIU Ze, HE Fan, HUANG Tianqi, *et al.* Experimental study on joint bearing characteristics of prefabricated cantilever retaining wall [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020 (9): 25.
- [12] 徐健, 刘泽, 黄天棋, 等. 装配式挡土墙设计与施工的关键问题研究[J]. 城市建设理论研究, 2018(6):88.
 XU Jian, LIU Ze, Huang Tianqi, *et al.* Research on the key problems of the design and construction of the assembled retaining wall [J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2018 (6): 88.
- [13] 徐健, 刘泽, 黄天棋, 等. 基于锚栓联接的装配式挡墙设计与施工工艺研究[J]. 土木工程, 2018, 7(3):350.
 XU Jian, LIU Ze, HUANG Tianqi, *et al.* Research on design and construction technology of assembly retaining wall based on anchor bolt connection [J]. Journal of Civil Engineering, 2018, 7 (3): 350.
- [14] 石雪飞, 苏昶, 张浩, 基于有限元仿真的挡土墙顶护栏车辆撞击分析[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(4):452.
 SHI Xuefei, SU Chang, ZHANG Hao. Vehicle crash analysis of retaining wall top barrier based on finite element simulation [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2022, 36 (4): 452.