

新型装配式悬臂混凝土挡土墙承载性能试验

刘曙光¹, 方琦¹, 钟桂辉¹, 王军^{2,3}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200062;

3. 上海市水务局防汛减灾工程技术研究中心, 上海 200062)

摘要: 为了探究叠合型挡土墙的合理性和叠合面的有效连接方式, 提出了3种新型装配式悬臂混凝土挡土墙(键槽叠合型、桁架筋叠合型和螺旋筋叠合型), 并针对3种新型挡土墙和两组对照挡土墙进行了静力加载试验。结果表明, 3种新型挡土墙较现浇挡土墙的承载性能劣化程度有限(15%以内), 叠合型挡土墙是装配式挡土墙的有效形式, 具有良好的适用性与可行性。其中桁架筋叠合型的叠合面连接可靠, 抗裂性能好, 整体性强, 具有更佳的承载性能, 故桁架筋是提高叠合面连接性能的有效方式。

关键词: 装配式悬臂挡土墙; 叠合型; 叠合面连接方式; 承载性能; 静力加载试验

中图分类号: TV334

文献标志码: A

Experimental Investigation on Bearing Capacity of Novel Precast Cantilever Concrete Retaining Wall

LIU Shuguang¹, FANG Qi¹, ZHONG Guihui¹,
WANG Jun^{2,3}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Water Engineering Design and Research Institute Co., Ltd, Shanghai 200062, China; 3. Engineering Research Center on Flood Control and Disaster Reduction of Shanghai Water Authority, Shanghai 200602, China)

Abstract: To investigate the rationality and the effective connection mode of the superimposed surface of the superimposed type retaining wall, three types of new precast cantilever concrete retaining wall (the keyway superimposed type retaining wall, the truss bar superimposed type retaining wall and the spiral bar superimposed type retaining wall) were proposed. Static loading tests were carried out for three kinds of new precast retaining walls and two groups of control retaining

walls. The results show that the deterioration degree of bearing capacity of the three new retaining walls is limited (within 15%) compared with the cast-in-place retaining wall. The superimposed type retaining wall is an effective mode of precast retaining wall, which has good applicability and feasibility. Among three kinds of the precast retaining wall, the truss bar superimposed type retaining wall has a reliable superimposed surface, strong crack resistance, good integrity, and better bearing capacity. Therefore, the truss bar is an effective way to improve the connection performance of the superimposed surface.

Key words: precast cantilever concrete retaining wall; superimposed type; connection of superimposed surface; bearing capacity; static loading tests

挡土墙是抵抗墙后土压力、提高墙后土体和工程结构稳定性的一种工程构筑物, 常常应用于公路、铁路、水利、防洪、市政等工程领域^[1]。挡土墙预制化、装配化是提高工程结构施工质量和效率、降低现场施工人员劳动强度和减少环境污染的重要途径, 在国内外得到了广泛的发展和應用。预制装配式混凝土结构体系最初起源于1875年的英国, 经过了140多年的发展和完善, 已成功应用于工业厂房、停车场、民用住宅等建筑之中。在欧美等发达国家和地区, 其占总土木工程数量的比例分别为: 美国35%、俄罗斯50%、欧洲35%~40%^[2]。由此可见, 预制装配式混凝土结构在基础建设领域中有着举足轻重的地位。

随着装配化研究的快速发展, 装配式结构的整体性能、构件间的连接构造和结构的耗能机制成为

收稿日期: 2019-11-15

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD1100401)

第一作者: 刘曙光(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为水利工程、防洪工程、岩土工程。

E-mail: liusgliu@tongji.edu.cn

通信作者: 钟桂辉(1971—), 女, 高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为流域防洪、水利工程。

E-mail: guihui_zhong@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

装配式结构的重要环节,国内外学者对此开展了积极的探索^[3]。张延年等^[4]针对装配式混凝土阶梯钢板式节点的应力应变规律进行了分析。赵勇等^[5]研究了采用两种新型构造的装配整体式混凝土框架顶层节点的破坏形态、滞回曲线、骨架曲线、位移延性和承载力等性能。蒋梅东^[6]在讨论了多种节点装配方式的基础上,提出了一种多级装配式挡土墙,通过大比例模型试验和数值模拟,探究了装配式挡土墙的结构特性。此外,美国的 Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI)^[7]和中国的住建部^[8]均已推出了相应的装配式混凝土设计规范。相较于梁、板、框架等装配式混凝土结构,装配式挡土墙的发展相对滞后。虽然目前装配式挡土墙已有一些成功的应用经验^[9],但是,绝大多数是简单地将悬臂式或扶壁式挡土墙改为分段预制,装配化程度不高。所以,如何提高高装配化程度、高承载性能的挡土墙结构形式及有效连接方式等关键问题仍有待研究。

叠合板装配式方法由预制底板和后浇层叠合而成,具有较为良好的承载性能,且在施工周期和经济性方面具有较大优势,是一种值得推广的装配方法。近年来在叠合楼板^[10]、叠合框架^[11]、叠合剪力墙^[12]等方面得到广泛的研究与应用,但是对于挡土墙而言,叠合型结构却鲜有关注,只有一些初步研究成果。Bui等^[13]提出了一种基于预制板的新型土钉墙,并通过现场试验和数值模拟对其承载性能进行了分析。章宏生等^[14]以扶壁式挡土墙为基础,对叠合型挡土墙进行了研究。叶兴成等^[15]还对这种挡土墙结构进行了有限元分析,认为这种结构在新老混凝土间的剪应力、拼接缝处面板拉应力等方面均可以满足工程需求。

本文参考叠合板装配式方法,针对挡土墙墙身采用双叠合面装配,提出了3种新型装配式悬臂混凝土挡土墙。为验证新型装配式悬臂混凝土挡土墙的合理性和叠合面连接方式的有效性,针对3种新型装配式悬臂混凝土挡土墙和两组对照混凝土挡土墙进行静力加载试验,探究新型装配式悬臂混凝土挡土墙的承载性能演化规律,并分析挡土墙在整个加载过程中的开裂情况、破坏形态、极限承载能力和关键部位的应力应变演化过程,为结构装配化研究和工程应用提供试验依据和理论基础。

1 模型提出

本文共提出了3种新型装配式悬臂混凝土挡土

墙。新型装配式悬臂混凝土挡土墙与现场立模浇筑的传统挡土墙不同,采用叠合式装配,即基础底板为现场浇筑,墙身部分为两个预制叠合混凝土夹板,在基础底板上安装后浇筑中间层内芯混凝土,形成完整的挡土墙。为了提高预制混凝土夹板与现浇混凝土间的连接性能,本文将预制夹板分别设置为键槽叠合型、桁架筋叠合型和螺旋筋叠合型。

3种新型装配式悬臂混凝土挡土墙的试件示意图见图1。试件外形尺寸为1 000 mm×1 700 mm×2 400 mm,混凝土强度等级为C30,钢筋保护层厚度底板40 mm,墙身30 mm。墙身钢筋主筋采用14@150,分布钢筋采用12@200;底板主筋采用16@150,分布钢筋采用12@200。键槽装配式挡土墙(A类)的预制夹板上有均匀分布的键槽;桁架筋装配式挡土墙(B类)的预制夹板上设置B100型桁架钢筋,上弦钢筋直径10 mm,下弦钢筋直径8 mm,腹杆钢筋直径6 mm,桁架高度100 mm,每米挡土墙设置3组桁架钢筋;螺旋筋装配式挡土墙(C类)的预制夹板上设置螺旋钢筋,螺旋钢筋直径6 mm,螺纹间距100 mm,每米挡墙设置3组螺旋筋。

由于混凝土试验具有较大的材料、施工和试验等方面的不确定性,故每组试验设置3个挡土墙试件进行重复性试验,以尽量消除不确定性。为了对比不同类型预制夹板对挡土墙整体承载性能的影响,还设置了整体插入式混凝土挡土墙(D类)和现浇混凝土挡土墙(E类)两个对照组。故共设置5组试验,每组试验包括同类挡土墙试件3个,即总共15次试验。所有试验均为破坏性试验,且均在同济大学土木工程防灾国家重点实验室振动台实验室中完成。

2 试验方法

2.1 材料性能试验

材料性能试验表明,本批次混凝土平均强度为38.3 MPa,符合C30标准。钢筋的规格、屈服强度、抗拉强度、断后伸长率和总伸长率的实测结果也符合HRB400普通热轧钢筋质量标准,此处不赘述。

2.2 加载方式

试验采用在顶部施加集中水平荷载的方式进行加载,试验加载装置如图2所示。试验中,采用前后两根钢梁(前压钢梁和后压钢梁)将混凝土挡土墙试件的底板固定。在试件顶部以下150 mm位置处,施加集中水平荷载,直至试件破坏。为避免局部应力集中,在加载位置上安装球铰。试验加载采用20 t

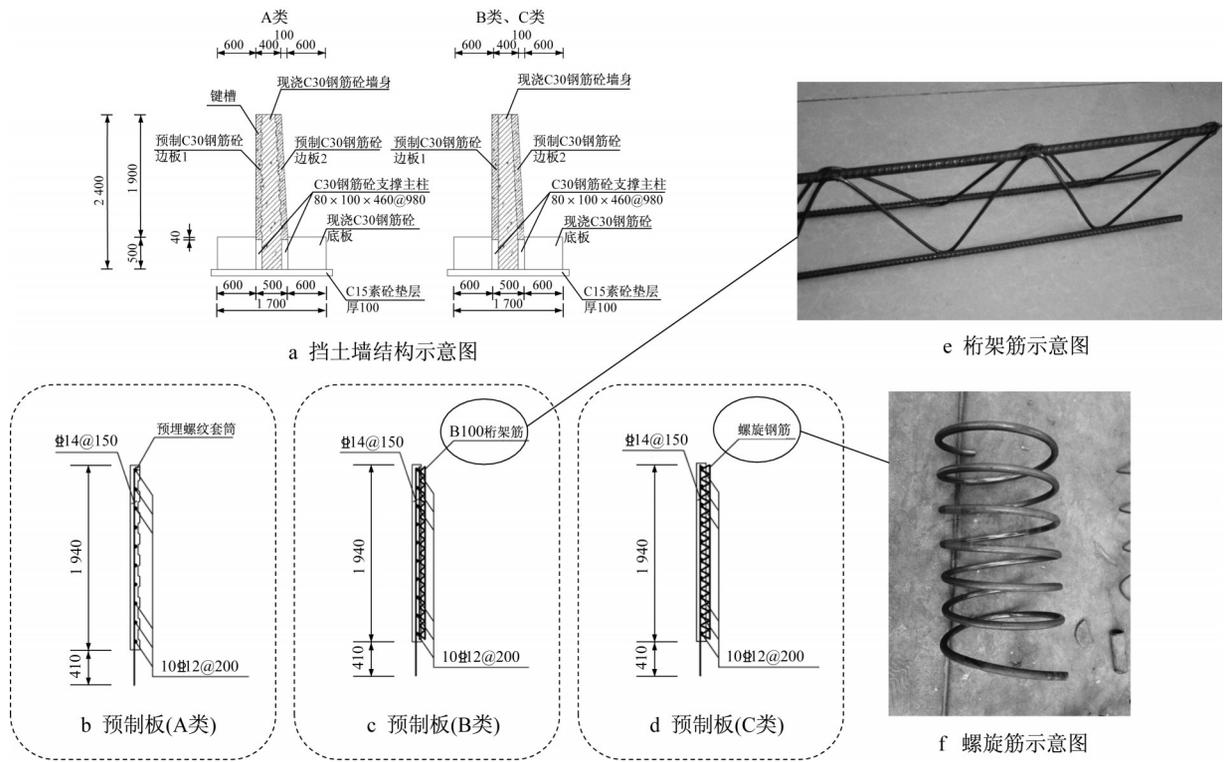


图1 新型装配式悬臂混凝土挡土墙示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of new precast cantilever concrete retaining walls (unit: mm)

液压千斤顶,行程250 mm。试验采用单调静力分级加载,加载过程依据混凝土结构试验方法标准(GB/T 50152—2012)^[16]。荷载加载增量为 $0.10P_{u,c}$ ($P_{u,c}$ 为理论推算的最大水平荷载),每级维持荷载3 min,且在邻近开裂荷载时,减小加载的每级增量至 $0.05P_{u,c}$ 。加载至试件出现荷载回退或出现受压侧混凝土压碎的情况时,停止加载,记此时的荷载为试件极限水平荷载 P_u 。

测试系统,频响范围为1~200 Hz,本试验研究的采样频率为2 Hz。位移采用拉线式位移计测量,应变采用5 cm应变片测量,最大裂缝宽度采用简易裂缝量测仪测量。挡土墙上部结构的下半部分用石灰刷白,用于观察裂缝的发展情况。具体测点布置见图3。

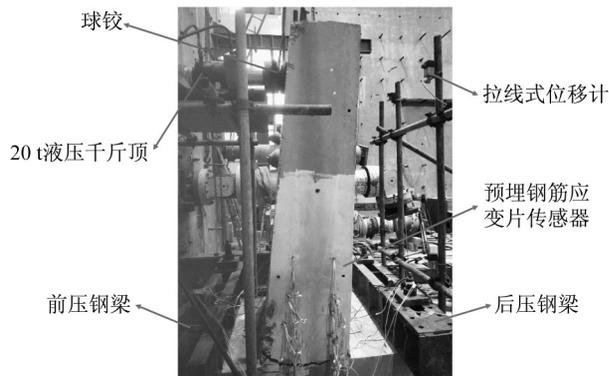


图2 加载装置

Fig.2 Loading device

2.3 传感器布置及测量

数据采集系统采用DH3820高速静态测试分析

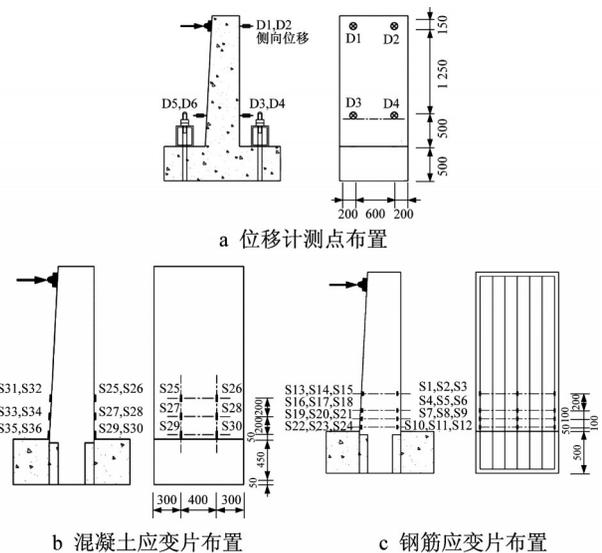


图3 测点布置(单位:mm)

Fig.3 Layout of measuring points (unit: mm)

3 试验现象与破坏特征

3.1 破坏形态

从试验现象可知,5类混凝土挡土墙试件的破坏均呈典型的受弯破坏,如图4所示。当加载至 $0.2P_u$ 左右时,A~D类装配式挡土墙中内部钢筋的应变部分发生突变,此时内部微裂缝开展;加载至 $0.4P_u$ 左右时,墙身预制夹板与底板结合处出现第一条肉眼可见的受弯裂缝,初始裂缝宽度在 0.10 mm 左右。相比之下,现浇的E类挡土墙则在 $0.3P_u$ 左右时出现内部微裂缝,且在 $0.5P_u$ 左右时出现第一条肉眼可见的裂缝,现浇的E类挡土墙的开裂荷载要大于所有装配式试件。

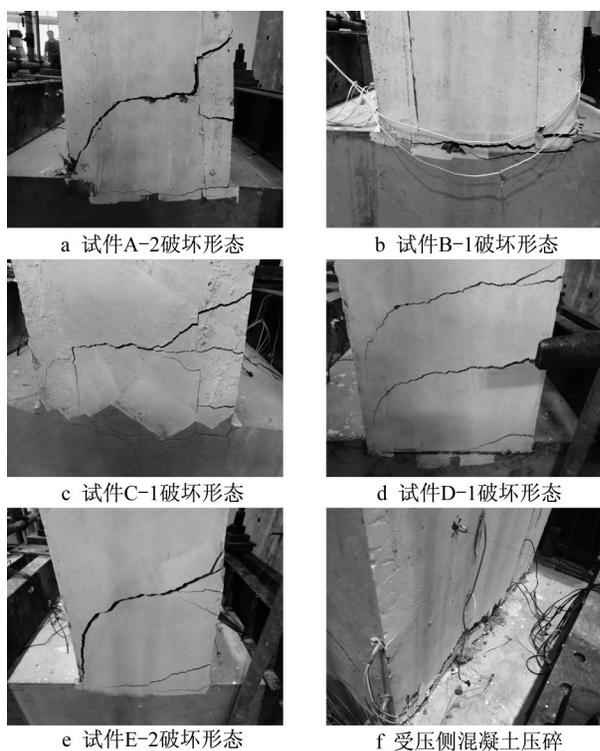


图4 试件的破坏形态

Fig.4 Failure patterns of specimens

加载至 $0.8P_u$ 左右时,A~D类装配式挡土墙墙身底部出现多条弯曲裂缝、斜裂缝和竖向裂缝,并且A~C类装配式挡土墙的预制夹板与后浇的混凝土之间的结合面开裂(其中A类更为严重,B、C类开裂较轻)。此时,现浇的E类挡土墙的破坏现象与装配式类似。加载至 P_u 时,挡土墙的斜裂缝进一步加宽,并出现新的斜裂缝,墙身受拉侧出现多条受拉裂缝,且有部分受拉裂缝已经延伸至混凝土受压区,墙身底部混凝土受压区混凝土压碎剥落,挡土墙发生受弯破坏。其中A类挡土墙的预制夹板与后浇的混凝土

之间的结合面的开裂程度十分严重,几乎剥离,见图4a;相比之下,B类和C类挡土墙的结合面剥离程度相对较轻,见图4b和4c;D类挡土墙的底部结合面开裂程度较重,但仍呈现出典型的墙身受弯破坏,见图4d;现浇挡土墙的破坏形态见图4e。

3.2 破坏机理分析

挡土墙的受力特征类似于一根竖直变截面悬臂梁(不考虑重力影响),在顶端水平荷载的作用下,挡土墙受力侧受拉,另一侧受压,沿对角线方向受到斜压力,垂直于对角线方向受到斜拉力,斜拉力使得墙身产生对角线方向的斜裂缝。挡土墙试件的破坏是因为裂缝宽度和高度较大而发生钢筋受拉屈服,进而引起混凝土挡土墙试件的整体破坏。

挡土墙试件均设置了箍筋和插筋,加强了对混凝土的约束,同时也保证了斜截面的受弯承载性能。A类挡土墙通过设置槽键来加强预制夹板与后浇的混凝土之间的连接,连接效果较差,当混凝土的变形和位移较大时,此结合面容易开裂,且最终破坏时的剥离程度也较为严重;B类和C类挡土墙分别通过设置桁架钢筋和螺旋钢筋的方式来加强预制夹板与后浇的混凝土之间的连接,连接效果较优,直至挡土墙最终破坏时,此结合面的开裂程度一般,未见明显的剥离;D类挡土墙则通过将预制的墙身深入底板一定深度来完成预制部分与后浇部分的连接,虽然此结合面受力时最先开裂,且开裂情况较严重,但是挡土墙的最终破坏没有在此处发生,而是发生在墙身底部。

4 试验结果及分析

4.1 开裂荷载

本文使用两种方法确定开裂荷载:①观察钢筋应变片和混凝土应变片随荷载的演化过程,应变片第一次发生突变时表明内部出现微裂缝,将此时的荷载视为开裂荷载。②将肉眼观测到第一条裂缝时的对应荷载,视为开裂荷载。这两种开裂荷载对应着不同的开裂状态,开裂荷载如图5所示。

由图5可知:①应变片第一次突变对应荷载明显小于观测开裂荷载。②相比于现浇的E类试件,装配式试件更容易开裂。③除B类试件具有相对较大的开裂荷载外,其余装配式试件的开裂荷载之间区别不大,无明显规律。

与常规现浇混凝土挡土墙的观测开裂荷载相比较,A、C、D类试件均下降了 21.2% ,B类下降了

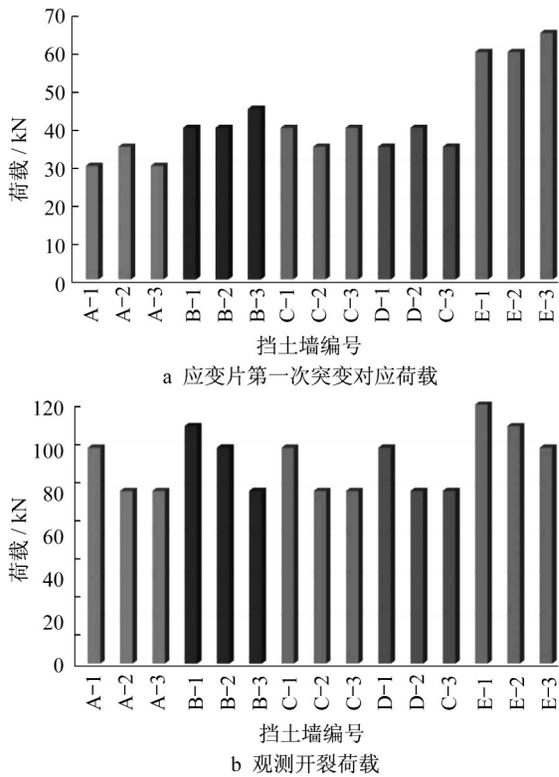


图5 试件的开裂荷载
Fig.5 Cracking load of specimens

12.1%。预制装配式挡土墙的开裂荷载均有不同程度的降低,其中B类开裂荷载下降相对较少,这是由于桁架筋中纵向构造钢筋(该钢筋约占总受力钢筋的50%,但又未锚入底板)承受部分荷载。

4.2 抗侧刚度

混凝土结构设计规范(GB 50010—2010)^[17]中给出了纯弯状态下叠合构件短期刚度的计算公式,由于本文提出的叠合型挡土墙有两个预制板,还存在对拉钢筋,不是理想的纯弯状态,故本文未选择该公式进行计算验证,取而代之选择更为简易的抗侧刚度进行对比研究。抗侧刚度是指抵抗侧向变形的能力,为施加于结构上的水平力与其引起的水平位移的比值。故在本文中,选择10 kN之后,观测开裂荷载之前的D1和D2位移计示数的平均值除对应荷载的倒数作为该试件的初期抗侧刚度(弹性阶段)。5种试件的抗侧刚度平均值如图6所示。

由图6可知:①现浇挡土墙试件的初期抗侧刚度最佳,3种新型装配式挡土墙的初期抗侧刚度均有不同程度的降低,分别降低了18.62%,16.66%和33.05%。②新型装配式试件中,A类和B类试件的加载初期抗侧刚度相对较高。这是由于A类试件设置的槽键咬合形状和B类试件设置的桁架筋加固了

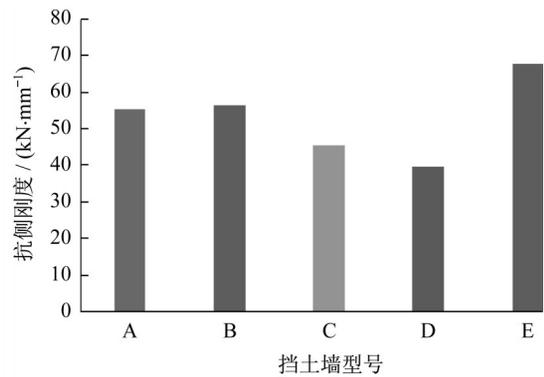


图6 每种试件的抗侧刚度平均值
Fig.6 Average values of lateral stiffness of specimens

新老混凝土之间的黏结,尽管C类试件也设置了螺旋筋来加固,但是由于其布置形式的原因,加强程度一般。③D类试件的下降程度最大,为41.26%,这是由于墙身下部新老混凝土之间的黏结不紧密,也没有可靠的连接方式,其抗侧刚度相对较低。

选择5个典型试件(A-2、B-1、C-1、D-1、E-2)的具体演化过程作研究分析,5类挡土墙典型试件的顶端位移随荷载的演化过程如图7所示。

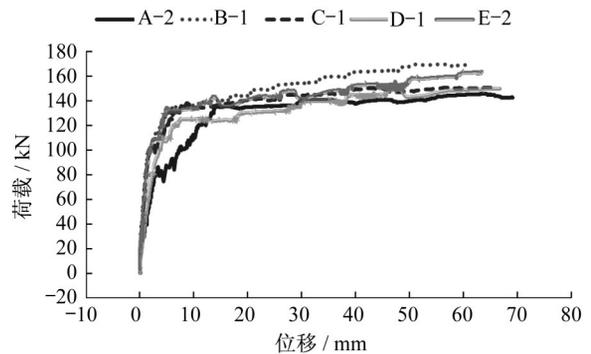


图7 典型试件的荷载-顶端位移曲线
Fig.7 Load-top displacement curves of specimens

由图7可知:①A类试件最早出现较大突变,这说明随着加载荷载的逐渐增大,A类试件最容易出现裂缝,抗侧刚度最先下降,故A类试件的整体性较差。②现浇的E类试件最终的承载性能不一定比装配式试件好。B类、C类和E类试件的初期演化规律相似,但是当试件产生大位移后,B类试件展示出了更好的承载性能,这是因为B类试件在新旧混凝土结合面设置了加强新旧混凝土黏结情况的桁架筋,其中的纵向桁架筋可以承受部分荷载,从而增强了承载性能。而同样设置了钢筋的C类试件,由于其布置形式为螺旋状,在纵向上没有直接受力的钢筋,

对于承载性能增强不大。

4.3 裂缝情况

5个典型试件的最大裂缝宽度-荷载曲线如图8所示。由图8可知:①由于最初的开裂都发生在预制夹板底部(预制墙身底部)与后浇底板的结合处,故在加载初期,所有试件的开裂情况相似。②由于D类试件的最薄弱部位位于预制墙身与后浇底座的结合部位,D类试件的裂缝最先发育,且发展速度较快。③试件一旦开裂,A类试件的墙身新旧混凝土的黏结情况最不牢固,黏结面逐渐被破坏,从而造成墙身裂缝快速发育。④B类、C类和D类试件的最大裂缝发展规律相似。

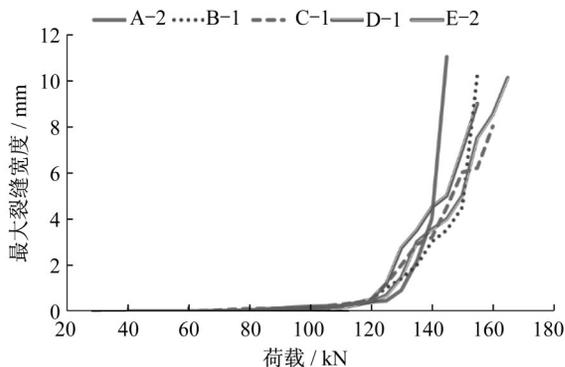


图8 典型试件的最大裂缝宽度-荷载曲线

Fig.8 Maximum crack width-load curves of typical specimens

4.4 纵筋应变和混凝土应变

选取典型试件(A-2、B-1、C-1、D-1、E-2)受拉侧同一高度的S19、S20和S21纵筋应变片的应变演化规律进行分析,这3个应变片的平均值演化情况如图9所示。

由图9可知:①A类和C类试件的墙身受拉侧纵

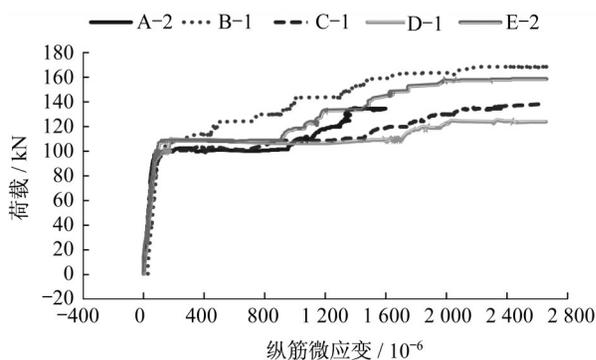


图9 典型试件的荷载-部分纵筋微应变曲线

Fig.9 Load-micro strain of partial longitudinal steel bar curves of typical specimens

筋最先发生突变(100 kN),这是由于新老混凝土结合面相对薄弱的原因,而B类试件纵筋的突变与现浇试件相似,发生较晚(110 kN)。②D类试件由于初期的主要受力和破坏位置为墙身与底板结合处,而墙身整体性较好,故其受拉侧的纵筋的突变相对滞后。③3种新型挡土墙的受拉侧钢筋受力情况演化特征不同,可以看出B类试件由于桁架筋的存在,纵筋的受拉发展相对滞后,且应变大小与现浇挡土墙相当。

此外,选取典型试件受压侧同一高度的S27和S30混凝土应变片的应变演化规律进行分析,这两个应变片的平均值演化规律如图10所示。

由图10可知:①A类、B类和C类试件的受压侧混凝土的应变突变(100 kN)先于D类和E类试件(110 kN)。②相同水平荷载作用下,3种新型装配式试件的受压侧混凝土的受压程度相对较大。其中,A类试件的受压侧混凝土的应变突变程度大于其他装配式试件,这是由于A类试件的新旧混凝土的结合面更易开裂。

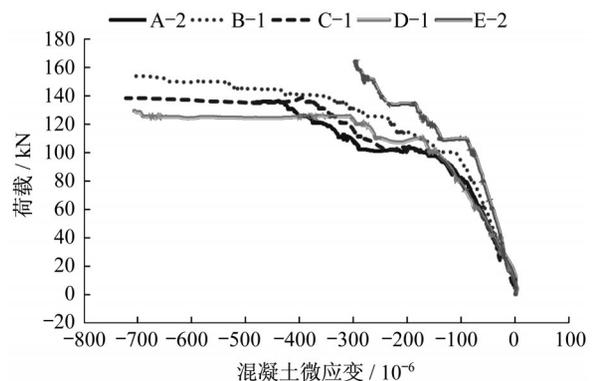


图10 典型试件的荷载-部分混凝土微应变曲线

Fig.10 Load-micro strain of partial concrete curves of specimens

通过以上对比分析可知,就墙身部分而言,新型装配式的墙身承载性能略低于现浇试件,但下降程度有限,其中B类试件体现出了一定的优越性。

4.5 极限荷载

根据混凝土结构设计规范(GB 50010—2010)^[17],本文挡土墙的最小配筋率为 $\rho_{\min}=0.20\%$,实际配筋率为 0.21% ,略大于最小配筋率 ρ_{\min} 。故本试验中,挡土墙相当于变截面悬臂适筋梁。计算的基本假定如下:①截面平均应变仍符合平截面假定;②不考虑受拉区混凝土的抗拉作用。

首先,针对受弯正截面进行受弯计算。易知,挡土墙试件的破坏状态为受拉钢筋屈服但受压钢筋未

屈服,且混凝土受压区高度 $x < 2a'$ 。挡土墙的极限弯矩为

$$M_u = f_y A_s (h - a - a' \sec \theta) \quad (1)$$

式中: f_y 为受拉钢筋屈服强度设计值; A_s 为受拉钢筋截面面积; h 为垂直于受拉钢筋的截面高度; a 和 a' 分别为受拉钢筋和受压钢筋中心线到混凝土边缘的距离; θ 为斜边与竖直边的夹角。计算得,极限弯矩为 $M_u = 156.11 \text{ kN}\cdot\text{m}$,对应的极限荷载为 89.20 kN 。

然后,针对斜截面进行受剪计算。箍筋的最小配筋率为 $\rho_{\min,sv} = 9.53 \times 10^{-4}$,本文中的挡土墙箍筋配筋率为 $\rho_{sv} = 1.13 \times 10^{-3}$ 。挡土墙的斜截面剪力承载力为

$$V_{cs} = \alpha_{cv} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (2)$$

式中: V_{cs} 为挡土墙斜截面上混凝土和箍筋的受剪承载力设计值; α_{cv} 为斜截面混凝土受剪承载力系数; f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值; b 为矩形截面宽度; h_0 为截面有效高度; f_{yv} 为箍筋的抗拉强度设计值; A_{sv} 为配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积; s 为沿墙身长度方向的箍筋间距。计算得,剪力承载力为 515.25 kN ,对应的极限荷载为 515.25 kN 。

最后,选取较小值为挡土墙试件的极限荷载,即挡土墙的计算极限荷载为 89.20 kN 。挡土墙试件的极限承载力试验值和计算值如表1所示。

表1 试件的极限承载力试验值与计算值

Tab.1 Test and calculated values of limit bearing capacity of specimens

试件编号	极限荷载 试验值/kN	计算值/试验值	极限荷载试验 值平均值/kN
A-1	135.0	0.66	124.3
A-2	117.2	0.76	
A-3	120.7	0.74	
B-1	135.1	0.66	131.8
B-2	134.6	0.66	
B-3	125.6	0.71	
C-1	134.2	0.66	125.1
C-2	120.2	0.74	
C-3	120.9	0.74	
D-1	119.5	0.75	113.0
D-2	118.4	0.75	
D-3	101.1	0.88	
E-1	135.3	0.66	134.2
E-2	131.7	0.68	
E-3	135.5	0.66	

由表1可知:①装配式试件均发生墙身受弯破坏,即极限承载力计算值取正截面受弯破坏的极限

荷载,且计算极限荷载与试验值之比为 $0.66 \sim 0.88$,具有较高的安全度。②A类、B类、C类和D类装配式试件的极限荷载略低于E类现浇试件,但差异不大。主要原因是由于装配式试件中存在大量的新旧混凝土裂缝,使得其处于复合弯剪受力状态,承载力有所下降。③3类新型装配式试件中,B类试件由于其桁架筋的存在,无论是结合面的黏结情况还是桁架筋自身对墙身受弯的贡献,均使得其极限承载性能较优。

与现浇混凝土挡土墙相比,A类、B类、C类和D类挡土墙的极限荷载分别下降了 7.38% 、 1.79% 、 6.78% 和 15.80% 。相对于现浇挡土墙来说,3种新型装配式挡土墙的极限荷载均有下降,但幅度较小,且明显优于D类整体插入式。其中,B类挡土墙由于桁架筋中纵向钢筋配筋的贡献,相对于其他装配式挡土墙来说,其极限荷载下降幅度稍小。

4.6 综合分析

本文提出的3种新型装配式悬臂混凝土挡土墙在开裂荷载、抗侧刚度和极限荷载方面较现浇混凝土挡土墙均有不同程度的下降,裂缝也较为发育,但总体上承载性能的劣化程度有限(15% 以内)。所以,叠合型挡土墙是装配式挡土墙的有效形式,具有良好的适用性与可行性。不同试件类型之间的承载性能比较如表2所示。

针对A类试件而言,由于键槽的存在,使得其在新旧混凝土结合面处易于开裂,但由于键槽的咬合形状导致其在加载初期具有较强的刚度。但是裂缝一旦开展,其发育程度与扩展速度都是较大的,从而导致其抗侧刚度快速下降,且极限承载力相对较差。

针对B类和C类试件而言,由于在新旧混凝土结合面布置了钢筋,结合面的黏结性能较好。这两种装配式试件的承载性能类似,且较E类现浇试件极限承载力下降有限,甚至个别试件的承载力还高于E类。其中,B挡土墙由于桁架筋中纵向钢筋配筋的因素,B类的桁架筋的布置形式能承受部分荷载,更能加强结合面的黏结性能,所以B类试件具有更好的抗侧刚度与承载性能。

针对D类试件而言,其新旧混凝土结合面处于墙身与底板的结合处,此处弯矩较大,导致结合面在加载初期就极易开裂,其抗侧刚度全阶段均较低。但是随着荷载的逐渐增加,墙身的抗弯性能起决定作用,尽管结合面开裂情况较严重,但是最终的破坏发生在墙身底部,呈现出典型的受弯破坏。

在3种新型挡土墙中,桁架筋叠合型的叠合面

表2 不同试件类型的承载性能比较

Tab.2 Comparison of bearing capacity of different kinds of specimens

试件类型	开裂荷载	初期抗侧	后期抗侧	裂缝情况	极限荷载
		刚度	刚度		
A	低	较高	低	较差	较低
B	低	较高	高	较好	较高
C	低	较低	较高	较好	较低
D	低	低	低	较差	低
E	高	高	高	较好	高

连接可靠,抗裂性能好,整体性强,具有更佳的承载性能,故B类挡土墙(桁架筋叠合型)为较优的装配式混凝土挡土墙形式,桁架筋是提高叠合面连接性能的有效方式。

5 结论

本文提出了3种新型装配式悬臂混凝土挡土墙(键槽叠合型、桁架筋叠合型和螺旋筋叠合型),并对3种新型挡土墙和两组对照混凝土挡土墙进行了静力加载试验,验证结构形式的可行性和连接方式的有效性,为结构装配化研究和工程应用提供试验依据和理论基础。本文得到以下几点结论:

(1)5类混凝土挡土墙的破坏均呈典型的受弯破坏,且新型装配式挡土墙的开裂荷载均有不同程度的降低,A、C类试件下降了21.2%,B类下降了12.1%,其中B类开裂荷载下降相对较少。

(2)现浇试件的初期抗侧刚度最佳,3种新型装配式挡土墙的初期抗侧刚度均有不同程度的降低,分别降低了18.62%,16.66%和33.05%。A类和B类试件的加载初期抗侧刚度相对较高,但A类试件最容易出现裂缝,混凝土一旦开裂,抗侧刚度迅速下降,且幅度较大。

(3)3种新型装配式挡土墙的极限荷载均有下降,但幅度较小。与现浇混凝土挡土墙的极限荷载相比,A类、B类、C类和D类挡土墙的极限荷载分别下降了7.38%、1.79%、6.78%和15.80%。B类试件由于其桁架筋的存在,无论是结合面的黏结情况还是桁架筋自身对墙身受弯的贡献,均使得其承载性能较优。

(4)综合分析可知,本文提出的3种新型装配式悬臂混凝土挡土墙在开裂荷载、抗侧刚度和极限荷载方面较现浇混凝土挡土墙均有不同程度的下降,且裂缝也较为发育,但总体上劣化程度有限(15%以内)。所以,叠合型挡土墙是装配式挡土墙的有效形式,具有良

好的适用性与可行性。其中,桁架筋叠合型挡土墙的叠合面连接可靠,抗裂性能好,整体性强,具有更佳的承载性能。综上所述,桁架筋是提高叠合面连接性能的有效方式,值得进一步的研究。

参考文献:

- [1] 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]. Urban Construction Theory Research, 2018 (6): 88.
- [2] 武江传. 混凝土预制装配框架结构梁柱柔性连接初探[J]. 安徽建筑, 2011, 18(4): 159.
WU Jiangchuan. Study on connection of beam-column joints in prefabricated concrete frames [J]. Anhui Architecture, 2011, 18 (4): 159.
- [3] 黄宇星,祝磊,叶桢翔,等. 预制混凝土结构连接方式研究综述 [J]. 混凝土, 2013(1): 120.
HUANG Yuxing, ZHU Lei, YE Zhenxiang, *et al.* Summary of precast concrete structural connection [J]. Concrete, 2013 (1): 120.
- [4] 张延年,郭晓磊,刘晓阳,等. 装配式混凝土阶梯钢板式节点应力应变分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(4): 598.
ZHANG Yannian, GUO Xiaolei, LIU Xiaoyang, *et al.* Study on stress and strain of the ladder-plate-type prefabricated concrete joint [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2016, 32(4): 598.
- [5] 赵勇,李永波,毕琼,等. 装配式混凝土框架顶层节点抗震性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 600.
ZHAO Yong, LI Yongbo, BI Qiong, *et al.* Experimental investigation on seismic performance of knee joints for monolithic precast concrete frame [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(5): 600.
- [6] 蒋梅东. 装配式挡土墙结构设计与试验研究[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.
- [7] Precast/Prestressed Concrete Institute. PCI design handbook [R]. 8th ed. Chicago: Precast/Prestressed Concrete Institute, 2017.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土结构技术规程: JGJ 1—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for precast concrete structures: JGJ 1—2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.