

预埋波纹管钢筋约束浆锚连接的预制 剪力墙有限元分析

陈昕^{1,2}, 侯世伟¹, 刘明^{1,2}, 杨永生³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁省现代建筑产业工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110168; 3. 沈阳建筑大学学报编辑部, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 基于预埋波纹管钢筋约束浆锚连接预制混凝土剪力墙的抗震性能试验结果, 研究不同参数对其受力性能的影响规律。**方法** 合理地选用混凝土和钢筋的本构关系, 采用有限元软件 ABAQUS 对该种浆锚连接预制剪力墙进行数值模拟。以轴压比、搭接长度和灌浆料强度为变量进行扩展分析, 研究墙体的承载力及延性、刚度、耗能能力。**结果** 轴压比 0.4 时, 剪力墙峰值承载力比轴压比 0.2 试件增加了 13.2%; 轴压比增加至 0.6 时, 墙体试件峰值承载力下降至轴压比 0.2 试件的 90%。当钢筋搭接长度从 $0.7 l_a$ 增至 $1.6 l_a$ 时, 墙体承载力有所提高, 但延性和耗能逐渐降低; 与钢筋直锚连接的剪力墙试件相比, 搭接长度 $0.9 l_a$ 的试件与直锚试件延性相近。增大灌浆料强度未对该种连接方式预制剪力墙的力学性能产生明显影响。**结论** 预埋波纹管钢筋约束浆锚连接预制混凝土剪力墙的抗震性能良好, 说明采用预埋波纹管和螺旋箍筋约束的组合连接形式可靠。

关键词 预制剪力墙; 波纹管成孔; 约束浆锚; 抗震性能; 有限元分析

中图分类号 TU375

文献标志码 A

Finite Element Analysis of Precast Shear Walls Connected by Pre-embedded Corrugated Pipes and Restrained Grouting-anchor of Steel Bars

CHEN Xin^{1,2}, HOU Shiwei¹, LIU Ming^{1,2}, YANG Yongsheng³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Research Center of Engineering Technology of Modern Construction Industry in Liaoning Province, Shenyang, China, 110168; 3. Editorial Department of Journal, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: Based on the experimental results of the seismic performance of the precast concrete shear walls connected with the pre-embedded corrugated pipes and restrained grouting-anchor of

收稿日期: 2021-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51738007); 辽宁省教育厅青年科技人才“育苗”项目(lnqn201906)

作者简介: 陈昕(1982—), 女, 博士, 主要从事装配式混凝土剪力墙抗震性能等方面研究。

steel bar, the influence of axial load ratio, steel bar lap length and grouting strength on their mechanical properties is studied. Reasonably select the constitutive relationship between concrete and steel bars, the precast shear wall connected with the grout anchor is numerically simulate by the finite element software ABAQUS. Using axial load ratio, lap length and grouting strength as variables for extended analysis, the bearing capacity and ductility, stiffness and energy consumption of the wall are studied. The research results show that when the axial load ratio is 0.4, the peak bearing capacity of the shear wall increases by 13.2% compared with the axial load ratio of 0.2. When the axial load ratio increased to 0.6, the peak bearing capacity of the specimen decreases to 90% of the specimen of axial load ratio 0.2. When the lap length of the steel bar increases from $0.7 l_a$ to $0.9 l_a$, the bearing capacity of the wall increases, but the ductility and energy consumption gradually decreases. Compared with the shear wall connected with the steel bar straight anchors, the ductility of the specimens with a lap length of 0.9 is similar to that of the straight anchor specimens. Increasing the strength of the grouting material don't have a significant impact on the mechanical properties of the precast shear wall with this connection method. The anti-seismic performance of the pre-embedded corrugated pipe and restrained spiral stirrup of grouting anchor connection of the precast concrete shear wall is good, it indicated that the combined connection form of the embedding corrugated pipe and spiral stirrup restraint is reliable.

Key words: precast shear wall; the way of hole by corrugated pipe; grouting-anchor connection; seismic performance; finite element analysis

目前,我国推广应用的装配整体式剪力墙结构体系主要由竖向构件剪力墙和水平构件梁、楼板等组成。竖向构件间的连接节点有现浇带连接、套筒灌浆连接和浆锚连接等方式。其中,浆锚连接技术采用抽芯成孔约束浆锚连接、波纹管浆锚连接、预埋波纹管螺旋箍筋浆锚连接。国内外诸多学者对这些连接方式的工作机理及构件间的连接性能进行了研究。S. J. A. Hosseini^[1-2]对灌浆螺旋钢筋连接的粘结性能进行了研究,包括力传递的机理,钢筋与灌浆料之间的粘结-滑移关系、螺旋钢筋直径变化所产生的影响,以及轴向和弯曲拉拔试验之间粘结应力的比较。陈再现^[3-4]通过对一个3层足尺模型进行拟静力试验,研究了预制钢筋混凝土剪力墙结构的抗震性能。陈云钢^[5]设计了两个装配式和1个现浇的足尺试件并进行低周反复荷载试验,评价了装配式混凝土剪力墙水平拼缝采用竖向钢筋浆锚搭接的抗震性能。在对约束浆锚连接的研究基础上,朱张峰等^[6-8]提出了竖向钢筋采用金属波纹管浆锚的连接技

术,并对采用该种连接的预制剪力墙进行了轴压比为0.1和0.15条件下的低周反复荷载试验,并与现浇混凝土试件对比。

结合约束浆锚连接和波纹管浆锚连接方式的优点,将预埋波纹管与螺旋箍筋组合成改进型约束浆锚连接方式(Corrugated Pipe Spiral Stirrup, CPSS)。武章印^[9]和武守晗^[10]设计制作了6组18个试件,并对其进行单向拉拔试验,分析混凝土强度,钢筋直径和搭接长度对该种连接方式的影响规律。刘家彬等^[11-12]研究了矩形螺旋箍筋约束波纹管浆锚连接方式下装配式混凝土剪力墙的抗震性能试验。陈昕等^[13-15]开展了CPSS浆锚连接和简化CPSS浆锚连接预制剪力墙的拟静力试验,分析CPSS浆锚连接的可靠性;同时对比研究CPSS连接和简化CPSS连接预制剪力墙抗震性能的差异。试验结果表明,在低周反复荷载的作用下,CPSS预制混凝土剪力墙的延性及耗能较好。在已有试验研究的基础上,为研究CPSS浆锚连接预制剪力墙连接参数的影响,笔者通过有限元软

件 ABAQUS 进一步对 CPSS 预制混凝土剪力墙进行参数扩展的模拟分析,从多角度研究该种预制墙体的抗震性能。研究表明,随着搭接长度的增加,CPSS 预制剪力墙的承载力有所提高;轴压比在 0.2 ~ 0.4 时,CPSS 预制剪力墙的承载力有所增加,但继续增加轴压比对剪力墙承载力起着不利的作用;增大灌浆料强度未对 CPSS 浆锚连接预制剪力墙的力学性能产生明显影响。

1 有限元模型

1.1 模型设计

预制剪力墙试件的宽 × 高 × 厚为 2 000 mm × 2 800 mm × 200 mm,墙体内顶部设置暗梁,暗梁截面宽 × 高为 200 mm × 400 mm;为设计上下层墙体的连接,在剪力墙底部设置底梁,底梁截面宽 × 高为 400 mm × 550 mm,将墙体和底梁采用 CPSS 约束浆锚连接,接缝处采用凿毛处理。模型设计参数见表 1,墙体连接构造如图 1 所示。

表 1 试件模型参数

Table 1 Model parameters of specimen

试件编号	钢筋搭接长度/mm	轴压比	灌浆料抗压强度/MPa
Z2B2	0.9 l_a	0.2	80
Z3B2	0.9 l_a	0.3	80
Z4B2	0.9 l_a	0.4	80
Z5B2	0.9 l_a	0.5	80
Z6B2	0.9 l_a	0.6	80
ZM	—	0.2	—
Z2B-0.7	0.7 l_a	0.2	80
Z2B-0.9	0.9 l_a	0.2	80
Z2B-1.1	1.1 l_a	0.2	80
Z2B-1.2	1.2 l_a	0.2	80
Z2B-1.6	1.6 l_a	0.2	80
Z2B-55	0.9 l_a	0.2	55
Z2B-60	0.9 l_a	0.2	60
Z2B-80	0.9 l_a	0.2	80
Z2B-90	0.9 l_a	0.2	90

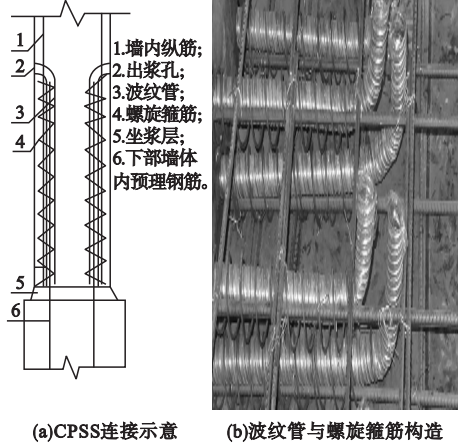


图 1 预埋波纹管螺旋箍筋约束的浆锚连接方式

Fig. 1 Restrained grouting anchor connection pre-buried corrugated pipe and spiral stirrup

1.2 材料本构关系

CPSS 预制混凝土剪力墙由钢筋和混凝土等材料组成。混凝土采用清华大学过镇海等人提出的混凝土本构关系模型,重点关注混凝土在单轴应力作用下的应力-应变关系,按照《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)要求进行计算,其中弹性模量 $E_c = 3.35 \times 10^4$ Pa,混凝土的剪切变形模量 G_c 按照 0.4 E_c 取值。混凝土塑性损伤模型的参数见表 2。构件的本构选取直接影响计算结果,考虑往复荷载作用下的 Bauschinger 效应与刚度退化特性,钢筋的应力-应变关系采用双折线随动强化模型。混凝土采用 Drucker-Prager 屈服准则,钢筋采用 von Mises 屈服准则。

1.3 单元选取与网格划分

根据墙体中各个材料单元的特性和构件实际的变形特点,选择合适的单元类型。对于混凝土材料,选用 ABAQUS/Standard 中的 C3D8R 实体八节点减缩积分单元;对于钢筋材料,因其在墙体主要承担拉压应力作用,故选用 B31 梁单元;对于波纹管,因其厚度较薄,故采用减缩积分二次单元 S4R;灌浆料属于水泥基材料,其材料属性与混凝土类似,采用实体八节点减缩积分单元。

表2 混凝土塑性损伤模型参数

Table 2 Concrete plastic damage model parameters

密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ 10^4 Pa	泊松比	膨胀角/($^\circ$)	偏心率	f_{bo}/f_{co}	投影参数	黏性参数
2 400	3.35	0.2	35	0.1	1.16	0.666 7	0.00 5

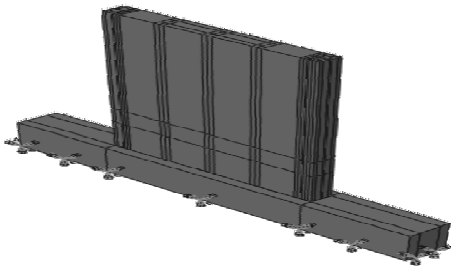
笔者采用结构化网格划分方法进行单元网格划分。由于墙体连接区域内波纹管及其内部灌浆料的构造复杂性,充分考虑构件内波纹管及其内部应力集中的影响,对 CPSS 预制剪力墙墙身选用 150 mm 的网格尺寸,底梁采用 200 mm 网格(非重点研究区域,未参与墙体受力),同时将墙体与底梁连接区域内的灌浆料再进行细分,划分后模型的单元总数达 16 034。

1.4 边界条件和加载方式

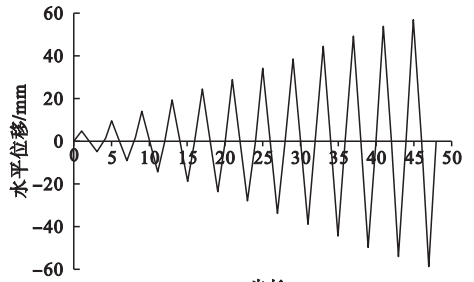
CPSS 浆锚连接预制剪力墙与底梁是通

过浆锚连接将其连接在一起,因此墙体与底梁之间设为接触;为更直观地了解钢筋的应变变化情况,采用内置约束(Embedded region)进行桁架单元与实体单元的耦合,使钢筋与混凝土共同作用,但未考虑其粘结滑移作用。在墙体底部连接区域的波纹管,其内外表面与混凝土、灌浆料设置接触。

考虑试验加载的特点,在数值模拟中先在模型顶部施加竖向均布荷载,然后对模型施加水平低周反复荷载。模型边界条件和加载制度如图 2 所示。



(a)边界条件



(b)加载制度

图2 数值模型的边界条件与加载制度

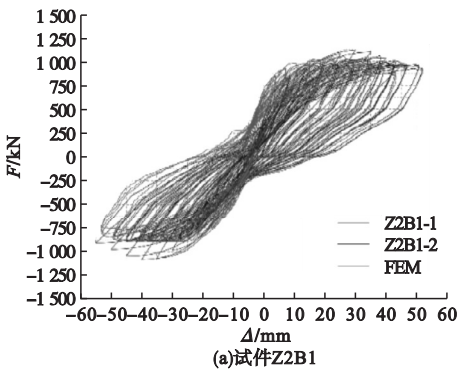
Fig. 2 Boundary conditions and loading regime of numerical models

2 有限元分析结果

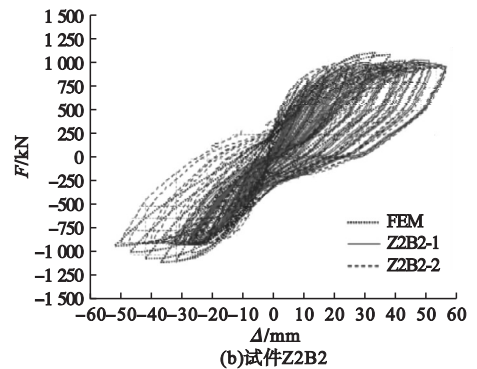
2.1 荷载-位移曲线分析

在建立 CPSS 预制剪力墙的有限元模型

后,对其施加往复荷载,得到墙体荷载-位移曲线,以试件 Z2B1 和 Z2B2 为例,对有限元计算结果和试验结果进行对比,结果见图 3。



(a)试件Z2B1



(b)试件Z2B2

图3 CPSS 预制剪力墙有限元数值模型的滞回曲线对比

Fig. 3 Comparison of hysteretic curves of finite element models of shear walls

从图3可以看出,模型的荷载-位移曲线在达到承载力峰值前呈梭形,峰值荷载后开始向反S形发展,这与试验得到的滞回环较为接近。分析原因是由于有限元中对材料的定义偏于理想,曲线推拉双向均匀对称,使得有限元数值模型在双向耗能方面表现得更为出色。有限元数值模型所选择的混凝土和钢筋本构关系、设置的接触条件、约束作用及其计算方法可靠,可有效模拟 CPSS 预制剪力墙全过程受力及其变形演化,并以此为基础,进行下一步的参数扩展分析。

2.2 骨架曲线分析

将有限元数值模拟结果与试验骨架曲线

进行对比,结果见图4。从图中可以看出,有限元模型的骨架曲线与试验曲线走势基本相同。在弹性阶段,有限元模型的骨架曲线呈线性,与试验骨架曲线基本重合;随着荷载的不断增大,CPSS 预制剪力墙进入弹塑性阶段,有限元中设置了有限自由度,如底梁与地面设定为固定全约束,剪力墙与底梁设置为“面-面”接触,只考虑剪力墙与底梁的剪切摩擦,有限元模型的刚度小于试验构件。在模型达到极限荷载后,其骨架曲线下降段的斜率较试验骨架曲线略大,有限元模型的延性略低于试验试件。

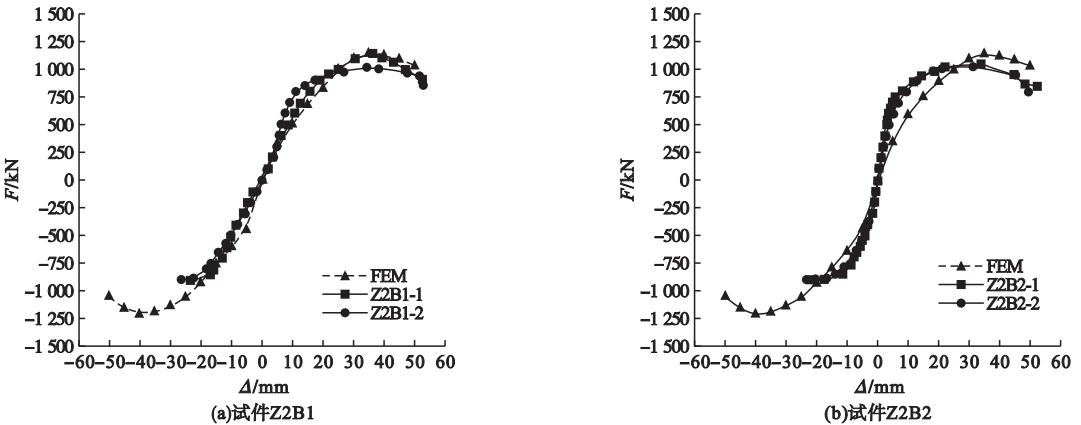


图4 CPSS 预制剪力墙有限元数值模型骨架曲线

Fig. 4 Skeleton curves of the finite element model of CPSS shear walls

将预制剪力墙模型进行有限元模拟分析,得到墙体在各个关键加载点承载力及其对应位移(见表3)。有限元模拟值与试验值对比,有限元模型与试验试件的承载力基本相近,误差介于2%~20%。多数试件的有

限元模拟值高于试验值,这是因为在试验中,试件存在一定的初始缺陷以及试验过程中产生的误差累积等因素,使得试验结果低于数值模拟结果。

表3 预制剪力墙在各关键加载点承载力及其对应位移

Table 3 Bearing capacity and corresponding displacement of precast shear walls at each key loading points

试件编号	屈服荷载 $P_y^{\text{FEM}}/\text{kN}$	屈服位移 $\Delta_y^{\text{FEM}}/\text{mm}$	峰值荷载 $P_p^{\text{FEM}}/\text{kN}$	$P_p^{\text{FEM}}/P_p^{\text{EXP}}$	破坏荷载 $P_u^{\text{FEM}}/\text{kN}$	极限位移 $\Delta_u^{\text{FEM}}/\text{mm}$	$\Delta_p^{\text{FEM}}/\Delta_p^{\text{EXP}}$
Z2B1	650	15.5	1 120	1.02	952	46.33	0.91
Z2B2	750	15	1 119	1.08	1 007.3	50.21	0.98
Z4B1	810	10.8	1 140	0.95	1 097.4	49.54	1.13
Z4B2	875	16.3	1 188	0.93	1 009.8	50.23	1.11

2.3 破坏形式分析

以模型 Z2B1 和 Z2B2 为例,CPSS 预制剪力墙达到峰值承载力时的主应力云图见图 5,图中 S11 为 X 轴方向的应力。当轴压比为 0.2 时,墙内边缘构件的钢筋应力增加明显,钢筋成为主要承担水平剪力作用(见图 5(a)、图 5(d)),这与图 5(c)中裂缝产生的位置相一致。从沿试件宽度方向的混凝土应力云图上看(见图 5(b)、图 5(e)),试件最大拉压应

力出现在试件底部两侧,这与试验中试件的最终破坏模式相吻合。墙体表面中部混凝土的主拉应力增加,应力分布主要集中在墙体中心;在试验构件上,墙体表面上表现为斜裂缝与水平方向的夹角逐渐增大,墙体裂缝主要集中在墙体中部的对角线方向(见图 5(c)、图 5(f))。可以看出,剪力墙有限元模型在低周往复荷载下的破坏形态以剪弯破坏为主,墙体表面应力分布与试验现象表现较为吻合。

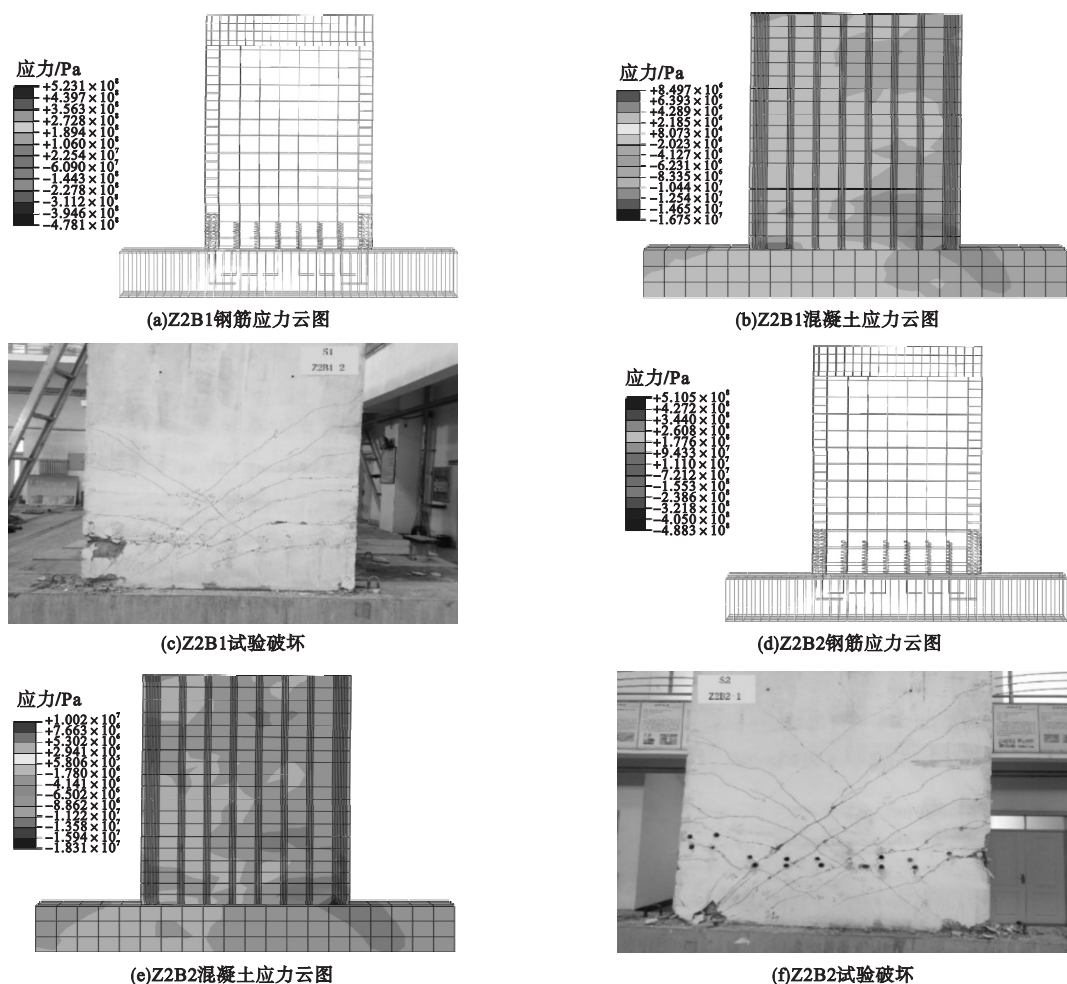


图 5 轴压比 0.2 工况下 CPSS 试件应力云图和试验破坏对比

Fig. 5 Comparison of stress contour plots and experimental failure of CPSS specimens under the axial compression ratio 0.2

3 影响因素分析

3.1 轴压比

依据《建筑抗震设计规范》(GB50011—

2010)对抗震墙在重力荷载代表值作用下轴压比限值的要求:抗震墙在重力荷载代表值作用下墙肢的轴压比,抗震设防烈度为 7 度、8 度时不宜大于 0.5;抗震等级为二、三级时

不宜大于0.6。将轴压比0.2~0.6时墙体承载力的计算结果列于表4,墙体骨架曲线如图6所示。

表4 不同轴压比CPSS预制剪力墙承载力计算结果

Table 4 Calculation results of bearing capacity of CPSS precast shear walls with different axial compression ratio

试件编号	轴压比	正向峰值荷载/kN	反向峰值荷载/kN
Z2B2	0.2	1 185	-1 156
Z3B2	0.3	1 220	-1 211
Z4B2	0.4	1 291	-1 233
Z5B2	0.5	1 124	-1 168
Z6B2	0.6	1 065	-1 075

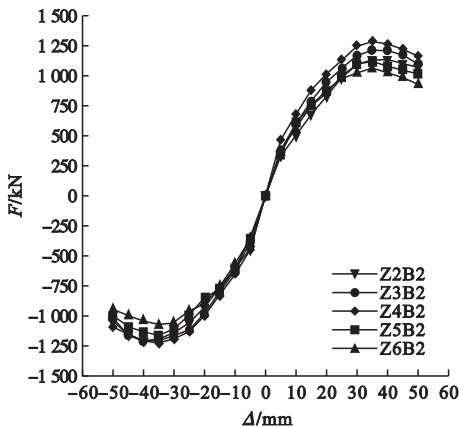


图6 轴压比对CPSS预制剪力墙承载力的影响

Fig. 6 Influence of axial compression ratio on bearing capacity of CPSS precast shear walls

从图6可以看出,试件在达到峰值荷载后出现了较为明显的下降段,轴压比的持续增加对剪力墙承载力起着不利的作用。通过分析轴压比对墙体承载力影响可知,轴压比在0.2~0.4时,CPSS预制剪力墙的承载力由1 140 kN提高至1 291 kN,CPSS预制剪力墙的峰值承载力增加了13.2%;当轴压比取值上升到0.6时,CPSS预制剪力墙的峰值承载力反而下降至轴压比0.2试件的90%左右。

3.2 搭接长度

为研究CPSS钢筋间接搭接与钢筋直接

锚入的方式对预制剪力墙承载力的影响,在其他参数均为相同的工况下,将CPSS预制剪力墙与直锚式墙体进行对比。直锚式墙体是指剪力墙构件的连接钢筋直接锚入到下部墙体,需满足规范对于锚固长度的要求。

通过有限元分析,得到连接钢筋搭接长度分别为 $0.7 l_a$ 、 $0.9 l_a$ 、 $1.1 l_a$ 、 $1.2 l_a$ 、 $1.6 l_a$ 时,CPSS预制剪力墙和直锚试件承载力的有限元结果(见表5),骨架曲线如图7所示。

表5 CPSS连接和钢筋直锚连接预制混凝土剪力墙承载力及延性计算

Table 5 Calculation of bearing capacity and ductility of CPSS and direct anchoring connection of precast shear walls

试件编号	连接钢筋搭接长度/mm	正向峰值荷载/kN	反向峰值荷载/kN	延性系数
ZM	—	1 037	-1 003	3.01
Z2B-0.7	$0.7 l_a$ (26 d)	1 120	-1 083	3.33
Z2B-0.9	$0.9 l_a$ (33 d)	1 185	-1 156	3.02
Z2B-1.1	$1.1 l_a$ (40 d)	1 240	-1 196	2.80
Z2B-1.2	$1.2 l_a$ (43 d)	1 252	-1 224	2.63
Z2B-1.6	$1.6 l_a$ (56 d)	1 313	-1 292	2.56

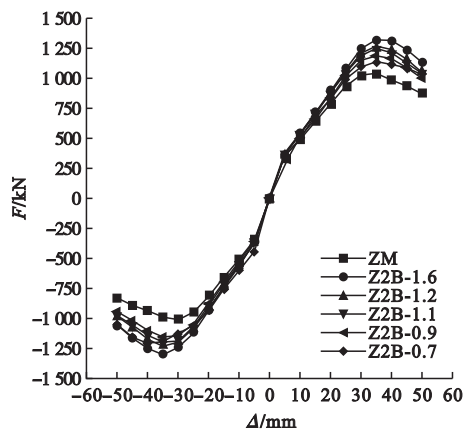


图7 CPSS预制剪力墙与直锚式剪力墙骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curves of CPSS precast shear walls and direct anchor shear walls

由表5可以看出,CPSS预制剪力墙试件的正向(推力方向)承载力在1 120~1 313 kN,其承载力平均值为1 222 kN,高于直锚

式墙体试件约 17.8%。由图 7 可以看出,在 CPSS 预制剪力墙中,连接钢筋搭接长度为 $0.7 l_a \sim 1.6 l_a$ 时,CPSS 墙体承载力随连接钢筋搭接长度的增加而逐渐提高,提高幅度为 8%、14%、19%、20% 和 26%,表明连接钢筋搭接长度对 CPSS 预制剪力墙承载力有着明显影响。当搭接长度达到 $1.1 l_a$ 时,随着连接钢筋搭接长度的增加,CPSS 预制剪力墙承载力增加幅度变缓。搭接长度 $0.9 l_a$ 的 CPSS 试件与直锚连接的剪力墙试件延性相近。

3.3 灌浆料强度

当灌浆料强度分别为 55 MPa、60 MPa、80 MPa、90 MPa 时,CPSS 预制剪力墙的承载力有限元计算结果见表 6,灌浆料强度对预制剪力墙承载力的影响曲线如图 8 所示。

表 6 灌浆料强度对 CPSS 连接预制剪力墙承载力计算

Table 6 Calculation of bearing capacity of grouting strength to CPSS precast shear walls

试件编号	灌浆料强度/MPa	正向峰值荷载/kN	反向峰值荷载/kN
Z2B-55	55	1 122.85	-1 083.65
Z2B-60	60	1 128.89	-1 086.44
Z2B-80	80	1 135.33	-1 092.72
Z2B-90	90	1 165.65	-1 132.35

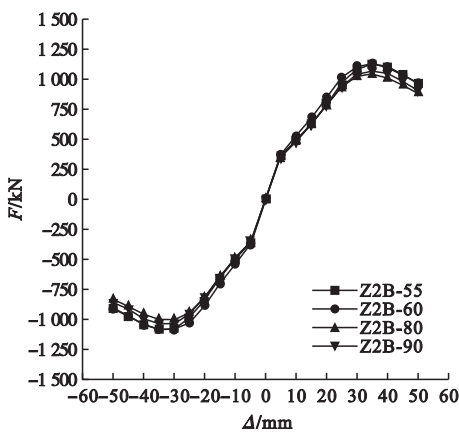


图 8 灌浆料强度对预制剪力墙承载力的影响

Fig. 8 Influence of grouting strength on the bearing capacity of CPSS precast wall

由表 6 和图 8 可知,当轴压比为 0.2、在

其他参数条件均为相同时,随着灌浆料强度的增大,CPSS 浆锚连接预制剪力墙的正向水平峰值荷载由 1 122.85 kN 增加至 1 165.65 kN,递增幅度分别为 0.8%、1.4% 和 4.1%。由此可见,增加灌浆料强度对于提高 CPSS 浆锚连接预制混凝土剪力墙承载能力有限。由图 8 可以看出,模型试件的水平层间位移相近,未表现出明显差异,体现了良好的延性特征。当灌浆料强度为 60MPa 时,即可满足承载力要求。

4 结论

(1) 采用有限元软件 ABAQUS 对 CPSS 浆锚连接预制剪力墙进行数值模拟,验证了数值模型的材料本构关系、单元模型、边界条件、约束作用及计算方法的准确性。

(2) 在轴压比 0.4 的工况下,CPSS 预制剪力墙峰值承载力较轴压比 0.2 试件增加了 13.2%;当轴压比增加至 0.6,CPSS 试件峰值承载力下降至轴压比 0.2 试件的 90%。

(3) 与钢筋直锚连接的剪力墙试件对比得出,当 CPSS 预制剪力墙的搭接长度逐渐增大时,其承载力有所增加,增加幅度在 8%~26%,但延性和耗能逐渐降低。钢筋搭接长度 $0.9 l_a$ 的 CPSS 试件与直锚连接的剪力墙试件延性相近。

(4) 当灌浆料强度取值为 55 MPa、60 MPa、80 MPa、90 MPa 时,提高灌浆料强度未对 CPSS 浆锚连接预制剪力墙的力学性能产生明显影响。当灌浆料强度为 60 MPa 时,即可满足承载力要求。

参考文献

- [1] HOSSEINI S J A, RAHMAN A B A, OSMAN M H, et al. Bond behavior of spirally confined splice of deformed bars in grout [J]. Construction and building materials, 2015, 80: 180 - 194.
- [2] HOSSEIN S J A, RAHMAN A B A. Analysis of spiral reinforcement in grouted pipe splice connectors [J]. Heythrop journal, 2013, 65 (6): 537 - 546.
- [3] 陈再现,姜洪斌,张家齐,等. 预制钢筋混凝土

- 剪力墙结构拟动力子结构试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 41-50.
(CHEN Zaixian, JIANG Hongbin, ZHANG Jiaqi, et al. Pseudo-dynamic substructure test on precast reinforced concrete shear wall structure [J]. Journal of building structures, 2011, 32(6): 41-50.)
- [4] 姜洪斌, 陈再现, 张家齐, 等. 预制钢筋混凝土剪力墙结构拟静力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 34-40.
(JIANG Hongbin, CHEN Zaixian, ZHANG Jiaqi, et al. Quasi-static test of precast reinforced concrete shear wall structure [J]. Journal of building structures, 2011, 32(6): 34-40.)
- [5] 陈云钢, 刘家彬, 郭正兴, 等. 装配式剪力墙水平拼缝钢筋浆锚搭接抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(6): 83-89.
(CHEN Yungang, LIU Jiabin, GUO Zhengxing, et al. Test on seismic performance of precast shear wall with reinforcements grouted in holes and spliced indirectly in horizontal connections [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2013, 45(6): 83-89.)
- [6] 朱张峰, 郭正兴, 朱寅, 等. 不同连接构造的装配式混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(3): 55-60.
(ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing, ZHU Yin, et al. Experimental investigation on seismic performance of precast concrete shear walls with different connections [J]. Journal of Hu'nan university (natural sciences), 2017, 44(3): 55-60.)
- [7] 朱张峰, 郭正兴, 汤磊. 不同无粘结长度新型混合装配式混凝土剪力墙抗震性能试验[J]. 工程力学, 2016, 33(8): 52-57.
(ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing, TANG Lei. Experiment on seismic performance of new hybrid-assembly precast concrete shear walls with various unbonded lengths [J]. Engineering mechanics, 2016, 33(8): 52-57.)
- [8] 朱张峰, 郭正兴. 不同轴压比新型混合装配式混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(12): 143-149.
(ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing. Experimental research on the seismic performance of new hybrid precast concrete shear walls under various axial compression ratios [J]. Engineering mechanics, 2016, 33(12): 143-149.)
- [9] 武章印. 波纹管预成孔钢筋约束浆锚搭接连接力学性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
(WU Zhangyin. Study on mechanical properties of prefabricated hole with embedded metal bellows for constraint grout-filled lap connection of steel bar [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.)
- [10] 武守哈. 预制装配式混凝土构件钢筋约束浆锚搭接试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
(WU Shouhan. Experimental study on constraint grout-filled lap connection of steel bar of prefabricated concrete structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.)
- [11] 刘家彬, 陈云钢, 郭正兴, 等. 螺旋箍筋约束波纹管浆锚装配式剪力墙的抗震性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(11): 92-98.
(LIU Jiabin, CHEN Yungang, GUO Zhengxing, et al. Seismic behavior of precast shear wall with rectangular spiral stirrups-constraint grouted corrugated pipe connection [J]. Journal of south China university of technology (natural science), 2014, 42(11): 92-98.)
- [12] 刘家彬, 陈云钢, 郭正兴, 等. 竖向新型连接装配式剪力墙抗震性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(4): 16-24.
(LIU Jiabin, CHEN Yungang, GUO Zhengxing, et al. Test on the seismic performance of precast shear wall with vertical reinforcement lapping in pore-forming on steel plate [J]. Journal of Hu'nan university (natural sciences), 2014, 41(4): 16-24.)
- [13] 陈昕, 刘明, 姚大鹏, 等. 考虑波纹管组合钢筋浆锚搭接长度的装配式剪力墙拟静力试验[J]. 大连理工大学学报, 2016, 56(6): 616-623.
(CHEN Xin, LIU Ming, YAO Dapeng, et al. Quasi-static experiments on lap length of precast concrete shear walls assembled with grouting anchor connection and corrugated pipes [J]. Journal of Dalian university of technology, 2016, 56(6): 616-623.)
- [14] 陈昕, 刘明, 丁浩爽. 轴压比取值对考虑波纹管组合钢筋浆锚连接预制剪力墙抗剪性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(6): 968-975.
(CHEN Xin, LIU Ming, DING Haoshuang. Experiment on shear behavior influence of prefabricated shear walls with grouting anchor connection by corrugated pipes [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33(6): 968-975.)
- [15] 陈昕. 改进约束浆锚连接(CPSS)的预制剪力墙抗震性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
(CHEN Xin. Research on seismic behavior of improved grouting-anchor connection of precast shear walls [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)