

# 自复位剪力墙弯矩-转角理论分析模型研究

吴平川<sup>1,2</sup>, 王恒博<sup>1</sup>, 齐虎<sup>3</sup>

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038; 2. 河北省装配式结构技术创新中心, 邯郸 056000;  
3. 防灾科技学院 中国地震局建筑物破坏机理与防御重点实验室, 三河 065201)

**摘要:** 为研究自复位剪力墙弯矩受力特点, 对剪力墙弯矩-转角进行理论推导, 算出消压点、屈服点、极限点、卸载点弯矩和转角公式以及耗能能力公式。选取两个自复位剪力墙试验模型, 将得到的荷载和初始刚度数值与试验值对比, 结果表明: 消压荷载理论分析结果与试验结果差值在 21% 以内; 屈服荷载理论分析结果与试验结果差值在 12% 以内; 极限荷载理论分析结果与试验结果差值在 5% 以内; 初始刚度二者相差 24% 以内。总体而言二者符合较好, 证明了理论分析模型的准确性, 为同类工程设计和理论研究提供了参考。

**关键词:** 自复位; 剪力墙; 理论分析; 骨架曲线; 抗震性能

**中图分类号:** TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 02-0157-07

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.024

## Research on the Theoretical Analysis Model of Moment Rotation Angle for Self Resetting Shear Walls

WU Pingchuan<sup>1,2</sup>, WANG Hengbo<sup>1</sup>, QI Hu<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;  
2. Hebei Province Prefabricated Structure Technology Innovation Center, Handan 056000, China;  
3. Key Laboratory of Building Failure Mechanism and Disaster Prevention, China Earthquake Administration, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China)

**Abstract:** In order to study the bending moment characteristics of self-centering shear wall, the bending moment-rotation angle of shear wall is deduced theoretically, and the formulas of bending moment and rotation angle of pressure relief point, yield point, limit point, unloading point and energy dissipation capacity are calculated. Two self-centering shear wall test models were selected, the obtained load and initial stiffness values were compared with the test values. The results show that the difference between the theoretical analysis results and the experimental results is within 21%. The difference between the theoretical analysis and the test results of the yield load is within 12%. The difference between the theoretical analysis results of ultimate load and the test results is within 5%. The initial rigid diversity is within 24% of each other. On the whole, they coincide well, that proves the theoretical analysis model is accurate, this provides a reference for the design and theoretical research of similar projects.

**Key words:** self-reset; shear wall; theoretical analysis; skeleton curve; seismic performance

项目来源: 河北省自然科学基金资助项目 (E2020402079)。

作者简介: 吴平川 (1979—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 结构抗震。

通信作者: 齐虎 (1982—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 防灾减灾工程。

收稿日期: 2024-07-06

## 研究与应用

## 0 引言

传统地震工程以抗震为主,通过开发高强材料、高性能构件、高性能体系抵抗地震对结构的破坏,但这种方式往往伴随着结构或构件的破坏。随后,科研人员发展了减震技术,即把非承重部位做成耗能构件,在风或地震作用下进行能量耗散。近年来学者们又提出自复位结构,是指在地震作用下通过自重、预应力构件使结构自行复位,耗能构件消耗地震的能量,其滞回曲线为旗帜形<sup>[1]</sup>。自复位结构既能减轻地震对结构的破坏,又可实现自复位,提高结构的韧性与安全性。剪力墙作为框架剪力墙结构中的重要构件,其受力机制需要深入探讨,明确影响抗震性能的主要参数,并采取有效措施进一步提高结构抗震性能。

Kurama 等<sup>[2]</sup>提出由多个砼墙片组合而成的自复位剪力墙,预应力筋和墙体自重共同提供恢复力; Restrepo 等<sup>[3]</sup>将钢棒阻尼器布置在墙内,结果发现这种方式大幅提高剪力墙耗能能力; Marriott 等<sup>[4]</sup>在墙体的侧面放置软钢阻尼器,这种布置在地震作用后方便更换耗能器; 陈适才等<sup>[5]</sup>在剪力墙模型开缝,通过水平缝进行耗能,发现剪力墙模型变形能力强,损伤小; 党像梁等<sup>[6]</sup>对自复位剪力墙进行有限元模拟,发现模拟结果与试验结果相近; 杨惠迪<sup>[7]</sup>对带暗支撑的底部全开缝自复位剪力墙进行试验研究,结果发现带暗支撑自复位剪力墙比现浇结构残余位移小,表明结构有良好的自复位能力,而耗能稍差这是因为接缝断开了钢筋与基础的连接,钢筋耗能缺失,同时预应力钢绞线约束了裂缝的发展和构件的拉应力,使得自复位结构耗能能力比现浇结构小。谢新莹<sup>[8]</sup>对外置耗能部件进行分析,通过对刚摩擦片、黄铜摩擦片、复合材料摩擦片进行研究,发现复合材料更稳定磨损也最小; 党隆基<sup>[9]</sup>提出一种 X 形阻尼器,对带有 X 形阻尼器的四个自复位剪力墙进行试验研究,发现破坏只发生在阻尼器处,只需更换阻尼器便可恢复正常使用状态; 刘尤森<sup>[10]</sup>提出一种新型自复位剪力墙结构,对三个不同核心区厚度嵌入式核心板耗能构件进行试验研究,发现耗能构件初始刚度较大、残余位移较小,构件有良好的耗能能力; 钱华莹<sup>[11]</sup>对内置碟簧自复位剪力墙进行改进,提出带 CFRP (碳纤维增强复合材料) 筋的剪

力墙和外包钢板自复位剪力墙,发现带有 CFRP 筋的剪力墙承载力比原剪力墙提高 36%,残余位移降低 48.1%; 肖水晶等<sup>[12]</sup>设计的自复位剪力墙,利用摩擦装置进行耗能,碟簧使结构具有自复位能力。结果发现普通剪力墙承载力比自复位剪力墙承载力大,二者极限承载力基本一致,且震后残余位移角很小,结构损伤很小; Palermo 等<sup>[13]</sup>对剪力墙和梁柱节点进行研究,发现集中塑性铰单元计算效率高,多弹簧模型可以准确模拟局部反应,如中和轴的位置; Marriott<sup>[14]</sup>提出一种以直接位移为基础的设计方法; 解琳琳<sup>[15]</sup>用非线性分析软件 OpenSees 对剪力墙进行模拟,结果发现当高宽比较大时,剪切效应对构件影响特别小,此时采用基于位移的单元能够很好模拟剪力墙受力; 对于有限元模型模拟,采用通用有限元软件,可以实现精细化建模,建模过程可视化,能够反映剪力墙真实受力情况,缺点是材料参数和单元数量多,导致计算效率低下,建模复杂,耗时长<sup>[16]</sup>。孙治国等<sup>[17]</sup>在桥墩模型接缝处建立三种模型,结果发现模型 1 和模型 3 的滞回曲线、摇摆变形等均和试验比较吻合; 钟正午<sup>[18]</sup>发现采用多弹簧模型建模时,对于常见桥墩弹簧数量达到 12~20 时即可在很大程度上保证结果稳定; 多弹簧模型需通过多个弹簧模拟复杂构造,且预应力筋需单独建立单元进行模拟,因此该模型不适用于大型结构和复杂结构。

目前对于剪力墙结构,学者大多进行试验研究或者建立有限元模型进行模拟或者将两者结合进行对比分析,而关于剪力墙与基础接缝受力研究较少。因此研究了自复位剪力墙接缝处弯矩-转角关系,主要推导了消压点弯矩、屈服点弯矩、破坏点弯矩、卸载点弯矩表达式和对应的转角公式。

## 1 接缝构造

自复位剪力墙上部结构为现浇,剪力墙结构中心及两侧均留置金属波纹管(穿筋孔道)。中间位置布置预应力筋,左右两侧各布置两根耗能钢筋,接缝构造如图 1 所示。钢筋局部削弱并进行无黏处理来提高变形及耗能能力。因结构和钢筋布置均对称,在往复循环作用下,弯矩-转角曲线呈旗帜形图形。接缝构造优点:穿筋孔道为预留,生产效率高,现场只需浇筑混凝土;预应力筋为多根钢绞线,其抗拉强度和屈服强度远高于普通预应力筋,因此自复

位能力强；耗能钢筋进行局部削弱并进行无黏处理，提高剪力墙变形与耗能能力。结构与钢筋对称，施工方便受力清晰。

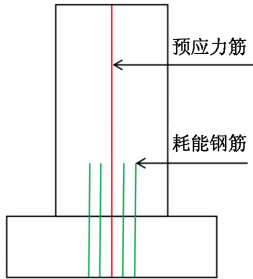


图1 自复位剪力墙模型

Fig. 1 Self-resetting shear wall model

## 2 剪力墙弯矩转角关系

正向加载过程中：当荷载处于点1时，接缝处压力为零，此时剪力墙承担弯矩为消压弯矩。随着荷载不断增加，剪力墙与下部结构分开，受压区范围不断减小最后趋于稳定。荷载达到点2时，耗能钢筋屈服，此时剪力墙承担弯矩为屈服弯矩。当荷载增加到点4时，受拉区耗能钢筋被拉断，此时剪力墙承担弯矩为极限弯矩。若在点3进行卸载，耗能钢筋拉力减小、压力增大，至点5时耗能钢筋再次屈服。继续卸载，弯矩基本不变，随后上部剪力墙与下部结构接触。由于结构对称，耗能钢筋对称布置，预应力筋布置在构件中心处，正向加载弯矩和负向加载弯矩大小相等、方向相反，以下只考虑正向加载情况。剪力墙弯矩 - 转角关系如图2所示。

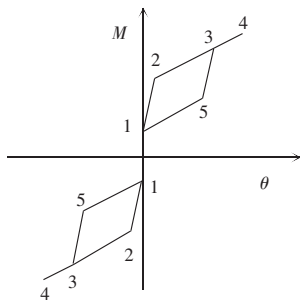


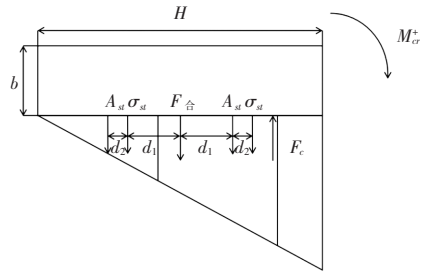
图2 自复位剪力墙弯矩 - 转角关系图

Fig. 2 Moment-rotation relationship diagram of self-resetting shear wall

### 2.1 消压弯矩

当发生的转角非常小时，剪力墙承担消压弯矩，此时结构处于弹性阶段，结构应力、应变很小，预应力筋应变增量可以忽略，计算简图如图3所示。根

据力平衡条件分析如下：



注：H为剪力墙宽度； $d_1$ 、 $d_2$ 分别为第一根耗能钢筋、第二根耗能钢筋距预应力筋的距离；b为剪力墙厚度； $F_{\text{合}}$ 为上部结构竖向力的合力。

图3 消压点弯矩计算简图

Fig. 3 Simplified diagram for calculating bend moment at pressure relief point

根据整体受力平衡：

$$F_{\text{合}} = 4A_{st}\sigma_{st} - F_c \quad (1)$$

此时耗能钢筋应力为零，对预应力筋处取矩：

$$M_{cr}^+ = \frac{1}{6} F_c H \quad (2)$$

式中： $F_{\text{合}} = A_{pt}\sigma_p + G$ ， $A_{pt}$ 为预应力筋面积； $\sigma_p$ 为预应力筋应力； $G$ 为结构自重； $A_{st}$ 为耗能钢筋面积； $\sigma_{st}$ 为耗能钢筋应力； $F_c$ 为接触面混凝土总压力； $M_{cr}^+$ 为开裂弯矩。

### 2.2 屈服弯矩

剪力墙屈服过程中，接触面中和轴右移，截面刚度降低，右侧保护层混凝土逐渐剥落。屈服点计算简图如图4所示，节点变形如图5所示。

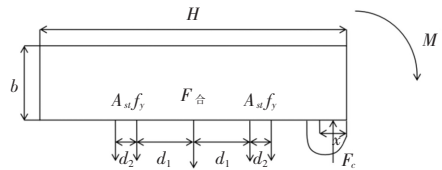


图4 屈服点弯矩计算简图

Fig. 4 Schematic diagram for calculating yield point bending moment

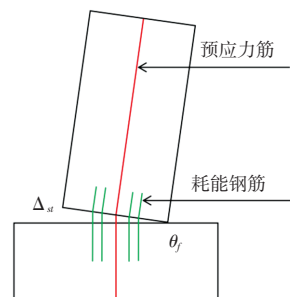


图5 节点变形图

Fig. 5 Node deformation diagram

## 研究与应用

混凝土受压区应力分布等效为矩形分布:

$$F_{\text{合}} = 4A_{st}f_y = f_{cc}b(x-c) + f_cbc \quad (3)$$

根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》，中和轴高度等于等效矩形应力分布的受压区高度除以 0.8。钢筋伸长量  $\Delta_{st} = \frac{f_y l_{st}}{E_s}$ ， $l_{st}$  为钢筋变形长度，包含无黏结长度  $l_0$  和应力渗透长度  $l_{sp}$ ，其中  $l_{sp} = 0.22f_y d$ ，此时转角计算：

$$\theta_f = \frac{f_y l_{st}}{E_s} \left/ \left( \frac{H}{2} - d_1 - d_2 - \frac{x}{0.8} \right) \right. \quad (4)$$

预应力筋应变：

$$\Delta\varepsilon_{pt} = \frac{\theta_f}{l_{pt}} \left( \frac{H}{2} - \frac{x}{0.8} \right) \quad (5)$$

$$\sigma_p = \sigma_{p0} + \Delta\varepsilon_{pt} E_{pt} \quad (6)$$

由于预应力筋布置在结构中心点，轴向变形很小并且预应力筋无黏结长度较长，可认为  $\Delta\varepsilon_{pt}$  为 0，设计时不考虑箍筋约束作用 ( $f_{cc}$ ) 对混凝土的影响，根据整体结构受力分析，此时：

$$F_{\text{合}} = 4A_{st}f_y = f_c b x \quad (7)$$

$$M_y^+ = f_c b x \frac{H-x}{2} \quad (8)$$

整理得屈服点弯矩：

$$M_y^+ = \begin{cases} (F_{\text{合}} + 4A_{st}f_y) \\ \times \left( \frac{f_c b H - F_{\text{合}} 4A_{st}f_y}{2f_c b} \right) \end{cases} \quad (9)$$

式中： $A_{pt}\sigma_p = A_{pt}\sigma_{p0}$ ， $\sigma_{p0}$  为预应力筋初始预应力； $E_s$  为耗能钢筋弹性模量； $E_{pt}$  为预应力筋弹性模量； $f_{cc}$  为约束混凝土强度； $f_c$  为非约束混凝土强度； $f_y$  为耗能钢筋屈服应力； $c$  为混凝土保护层厚度； $d$  为耗能钢筋直径； $x$  为受压区高度； $M_y^+$  为屈服点弯矩。

### 2.3 屈服后弯矩

随着剪力墙转角增大，保护层混凝土剥落，受拉区耗能钢筋被拉断时，结构到达极限状态，此时剪力墙承担弯矩为极限弯矩。

$$\theta_{fu} = \begin{cases} \frac{f_{yu} l_{st}}{E_s} \\ \div \left( \frac{H}{2} - d_1 - d_2 - \frac{x}{0.8} - c \right) \end{cases} \quad (10)$$

$$\sigma_p = \sigma_{p0} + \theta_{fu} \left( \frac{H}{2} - \frac{x}{0.8} - c \right) \frac{E_{pt}}{l_{pt}} \quad (11)$$

$$F_{\text{合}} + 4A_{st}f_{yu} = f_{cc}bx \quad (12)$$

对预应力筋处取弯矩，

$$M_u^+ = f_{cc}bx \left( \frac{H-x}{2} - c \right) \quad (13)$$

整理得：

$$M_u^+ = \begin{cases} \frac{1}{2}(F_{\text{合}} + 4A_{st}f_{yu}) \\ \times \left( H - 2c - \frac{F_{\text{合}} + 4A_{st}f_{yu}}{f_{cc}b} \right) \end{cases} \quad (14)$$

式中： $\theta_{fu}$  为剪力墙极限转角； $f_{yu}$  为耗能钢筋极限应力； $c$  为保护层厚度； $M_u^+$  为极限弯矩。

### 2.4 卸载弯矩

当耗能钢筋未达到屈服状态时，此时卸载，弯矩曲线按原路返回；当耗能钢筋屈服后，耗能钢筋由受拉变为受压。

$$\theta_f = \begin{cases} \frac{f_y l_{st}}{E_s} \\ \div \left( \frac{H}{2} - d_1 - d_2 - \frac{x}{0.8} - c \right) \end{cases} \quad (15)$$

$$\sigma_p = \sigma_{p0} + \theta_f \left( \frac{H}{2} - \frac{x}{0.8} - c \right) \frac{E_{pt}}{l_{pt}} \quad (16)$$

$$F_{\text{合}} - 4A_{st}\sigma_{st} = f_{cc}bx \quad (17)$$

$$M_{un}^+ = f_{cc}bx \left( \frac{H-x}{2} - c \right) \quad (18)$$

此时  $\sigma_{st} = f_y$ ，整理得卸载点弯矩：

$$M_{un}^+ = \begin{cases} \frac{1}{2}(F_{\text{合}} - 4A_{st}f_y) \\ \times \left( H - 2c - \frac{F_{\text{合}} - 4A_{st}f_y}{f_{cc}b} \right) \end{cases} \quad (19)$$

自复位结构耗能能力一般用耗能系数  $\beta_E$  表示， $\beta_E$  代表自复位结构滞回环面积与相同抗弯承载力的双线性弹塑性节点滞回面积之比<sup>[19]</sup>。耗能系数是评价自复位能力的重要指标。本结构滞回曲线为典型的对称旗帜形曲线。 $\beta_E$  可用如下公式表示<sup>[20]</sup>：

$$\beta_E = \frac{M_y^+ - M_{un}^+ - (M_y^- - M_{un}^-)}{2(M_y^+ - M_y^-)} \quad (20)$$

式中： $M_y^+$ 、 $M_{un}^+$ 分别为正向加载时屈服弯矩、卸载弯矩； $M_y^-$ 、 $M_{un}^-$ 分别为负向加载时屈服弯矩、卸载弯矩。由于结构对称，预应力筋在结构中心点处，耗能钢筋两侧对称布置，故  $M_y^+$  与  $M_y^-$ ， $M_{un}^+$  与  $M_{un}^-$  大小相等方向相反。可简化为：

$$\beta_E = \frac{M_y^+ - M_{un}^+}{2M_y^+} \quad (21)$$

为简化计算，假定混凝土保护层没有破坏，且不考虑约束混凝土作用（下同），则（17）、（18）可简化为：

$$F_{\text{合}} = f_c b x + 4A_{st}f_y \quad (22)$$

$$M_{un}^+ = f_c b x \left( \frac{H - x}{2} \right) \quad (23)$$

整理得：

$$M_{un}^+ = \begin{cases} (F_{\text{合}} - 4A_{st}f_y) \\ \times \left( \frac{f_c b H - F_{\text{合}} + 4A_{st}f_y}{2f_c b} \right) \end{cases} \quad (24)$$

最终得到耗能系数公式：

$$\beta_E = \frac{4A_{st}f_y(f_c b H - 2F_{\text{合}})}{(F_{\text{合}} + 4A_{st}f_y)(f_c b H - F_{\text{合}} - 4A_{st}f_y)} \quad (25)$$

### 3 试验模型分析

#### 3.1 模型 1

选取孙文笑<sup>[21]</sup>矩形自复位剪力墙试验模型。试件高度为3 800 mm，宽度为2 000 mm，厚度为180 mm。预应力钢绞线位于构件中心，将5根直径为15.2 mm（面积为700 mm<sup>2</sup>）的钢绞线放入预先留设的穿筋通道内，钢绞线的初始预应力为900 MPa，钢绞线强度标准值为1 875 MPa。预应力钢绞线左右两侧各设置两根直径14 mm的耗能钢筋，与预应力筋距离分别为90、60 mm。采用C40混凝土，耗能钢筋屈服强度为446 MPa，极限强度为624 MPa。通过分析得到开裂点、屈服点、极限点弯矩和转角与试验结果进行对比见表1。消压弯矩二者相差11.84%，屈服弯矩二者相差11.60%，极限弯矩二者相差1.49%。

表1 试验、理论弯矩数值对比

Table 1 Comparison of experimental and theoretical bending moment values

数值	消压点	屈服点	极限点
试验弯矩/(kN·m)	238.20	759.66	1 242.49
试验转角/%	0.00	0.33	2.70
理论弯矩/(kN·m)	210.00	847.80	1 261.01
理论转角/%	0.00	0.42	2.44
弯矩差值/(kN·m)	28.20	88.14	18.52
弯矩差值/试验弯矩 × 100%	11.84	11.60	1.49

由表2可知，二者相差3.9%。

表2 试验、理论初始刚度对比

Table 2 Comparison of experimental and theoretical initial stiffness

试验值 /(kN·m/%)	理论值 /(kN·m/%)	差值 /(kN·m/%)	差值/试验值 × 100%
1 580.18	1 518.57	61.61	3.90

由于结构对称、耗能钢筋对称布置，因此只取正向加载时试验和理论弯矩 - 转角曲线进行对比。由图6可知，试验值、理论值消压点、屈服点、极限点数值符合较好。

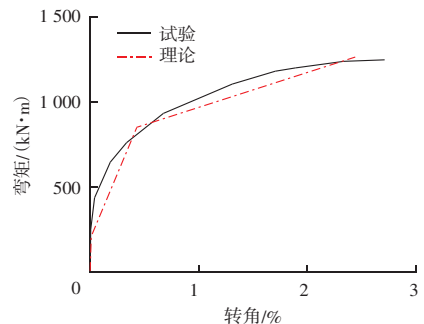


图6 试验、理论弯矩 - 转角对比

Fig. 6 Experiment and theoretical moment - angle

## 研究与应用

### 3.2 模型 2

为进一步验证公式推导的准确性,吴浩等<sup>[22]</sup>对试件进行研究。由表 3 可知,消压点荷载二者相差 20.74%,屈服点荷载二者相差 5.29%,极限点荷载二者相差 4.91%。

表 3 试验、理论水平荷载数值对比

Table 3 Comparison of experimental and theoretical load values

数值	消压点	屈服点	极限点
试验荷载/kN	127.03	491.90	505.41
试验转角/%	0.00	1.48	1.82
理论荷载/kN	100.69	465.87	530.24
理论转角/%	0.00	1.20	1.84
荷载差值/kN	26.34	26.03	24.83
荷载差值 试验荷载 × 100%	20.74	5.29	4.91

由表 4 可知,二者相差 23.44%。

表 4 试验、理论初始刚度对比

Table 4 Comparison of experimental and theoretical initial stiffness

试验数值 /(kN/%)	理论数值 /(kN/%)	差值 /(kN/%)	差值 试验值
246.53	304.32	57.79	23.44

由图 7 可知,二者吻合较好。

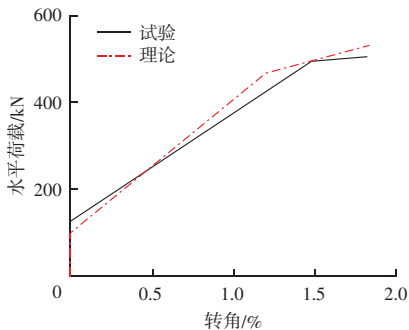


图 7 试验、理论荷载-转角对比

Fig. 7 Comparison of experimental and theoretical load-rotation

## 4 结论

针对自复位剪力墙主要力学性能进行了理论分析,推导了消压点、屈服点、极限点、卸载点弯矩公式、转角公式和耗能能力公式,并与试验模型结果进行了对比。主要研究结论如下:

(1) 理论分析:由于自复位剪力墙结构对称,耗能钢筋在两侧对称布置,预应力筋布置在结构中心线处,因此在推导弯矩-转角公式时仅分析了正向加载卸载过程,负向加载卸载过程与正向加载卸

载过程一致。在往返循环荷载下,剪力墙弯矩-转角关系呈典型的旗帜形。推导了滞回曲线中关键点(消压点、屈服点、极限点、卸载点)的表达式,建立了完整的弯矩-转角理论分析模型,并给出了耗能系数的计算公式。

(2) 采用推导的理论分析模型对两个自复位剪力墙进行了计算,从消压点荷载、屈服点荷载、极限点荷载、初始刚度四个方面对比了试验结果与理论结果。结果表明:消压荷载理论分析结果与试验结果差值在 21% 以内;屈服荷载理论分析结果与试验结果差值在 12% 以内;极限荷载理论分析结果与试验结果差值在 5% 以内;初始刚度二者相差 24% 以内。总体而言,理论分析结果和试验结果吻合较好。

## 参 考 文 献

- [1] 邱灿星,杜修力.自复位结构的研究进展和应用现状[J].土木工程学报,2021,54(11):11-26.
- [2] KURAMA Y, SAUSE R, PESSIKI S, et al. Lateral load behavior and seismic design of unbonded post-tensioned precast concrete walls[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(4):622-632.
- [3] RESTREPO J I, RAHMAN A. Seismic performance of self-centering structural walls incorporating energy dissipators[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(11):1560-1570.
- [4] MARRIOTT D, PAMPANIN S, BULL D, et al. Dynamic testing of precast, post-tensioned rocking wall systems with alternative dissipating solutions[C]//2008 New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference. New Zealand: New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2008.
- [5] 陈适才,闫维明,李振宝,等.底部开缝预应力剪力墙结构力学性能的有限元分析[J].防灾减灾工程学报,2010,30(6):631-636.
- [6] 党像梁,吕西林,钱江,等.自复位预应力剪力墙抗震性能实体和平面单元有限元分析[J].建筑结构学报,2014,35(5):17-24.
- [7] 杨惠迪.带暗支撑的底部全开缝自复位剪力墙抗震性能研究[D].长沙:湖南大学,2019.
- [8] 谢新莹.外置摩擦耗能部件自复位剪力墙试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [9] 党隆基.竖向耗能接缝装配式剪力墙抗震性能与机理研究[D].南京:东南大学,2021.
- [10] 刘尤森.新型自复位可修复剪力墙数值模拟及其耗能组件的试验研究[D].深圳:深圳大学,2022.
- [11] 钱华莹.内置碟簧自复位 RC 剪力墙抗震性能提升方法研究[D].北京:北京交通大学,2022.
- [12] 肖水晶,冯鹏.新型装配式自复位 RC 剪力墙设计与性能研究

- [J]. 工程力学, 2024, 41 (11): 116-124.
- [13] PALERMO A, PAMPANIN S, CARR A J, et al. Efficiency of simplified alternative modelling approaches to predict the seismic response of precast concrete hybrid systems [Z]. Budapest: FIB Symposium, 2005: 6.
- [14] MARRIOTT D. The development of high-performance post-tensioned rocking systems for the seismic design of structures [D]. Christchurch: University of Canterbury, 2009.
- [15] 解琳琳. 基于 OPENSEES 的 RC 构件抗震性能数值模拟及验证 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [16] 周威, 刘洋, 郑文忠. 自复位混凝土剪力墙抗震性能研究进展与展望 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50 (12): 1-13.
- [17] 孙治国, 赵泰儀, 石岩, 等. 摇摆-自复位桥墩抗震性能数值建模方法研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27 (6): 1357-1369.
- [18] 钟正午. 摇摆-自复位桥墩的抗震性能及设计方法研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- [19] SONG L L, GUO T, CAO Z L. Seismic response of self-centering prestressed concrete moment resisting frames with web friction devices [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2015, 71: 151-162.
- [20] KOSHIKAWA T. Moment and energy dissipation capacities of post-tensioned precast concrete connections employing a friction device [J]. Engineering Structures, 2017, 138: 170-180.
- [21] 孙文笑. 预制预应力钢筋混凝土自复位剪力墙抗震性能试验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [22] 吴浩, 吕西林, 蒋欢军, 等. 预应力预制混凝土剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37 (5): 208-217.

(上接第 156 页)

- [4] 申彦利, 吴刚. X 型骨架的装配式钢骨混凝土剪力墙抗震性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (2): 1-6, 64.
- [5] 谷峪, 段国伟, 高辉, 等. 绿色再生轻骨料混凝土短肢剪力墙承载力的研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (3): 33-36.
- [6] 朱艳峰, 曾令权. 煤矸石保温钢筋混凝土剪力墙结构力学与能耗性能分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2019, (2): 82-85.
- [7] 袁玉杰, 牟凤飞, 史艳莉, 等. 型钢混合连接装配式混凝土剪力墙结构受力机理研究 [J]. 建筑结构进展, 2024, 26 (1): 65-76.
- [8] 李一松, 陈文. 型钢混凝土低矮剪力墙抗震性能试验及开裂荷载计算方法 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (增刊 1): 738-748.
- [9] 张国伟, 安佳宁, 高海智, 等. M 型钢-混凝土组合剪力墙抗震性能有限元分析 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (3): 21-26, 63.
- [10] 白翔宇, 杨鹏辉. 不同配筋形式高性能混凝土剪力墙抗震性能对比研究 [J]. 混凝土, 2021, (8): 20-23, 29.
- [11] 柯晓军, 苏益声, 王晓燕. 双肢型钢混凝土短肢剪力墙抗震性能试验及数值模拟 [J]. 建筑结构, 2021, 51 (14): 69-74.
- [12] 柯晓军, 罗达, 莫自庆, 等. 预应力组合斜撑型钢混凝土短肢剪力墙抗震性能数值模拟 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29 (3): 680-690.
- [13] 李莹辉, 蒋欢军. 型钢混凝土剪力墙基于性能的有害层间位移角限值研究 [J]. 结构工程师, 2020, 36 (3): 19-27.
- [14] 彭修宁, 邓敬旻, 林焯铭, 等. 型钢混凝土 T 形截面剪力墙基于性能的变形限值研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44 (4): 89-103.
- [15] 王玉镯, 高希虎, 许德建, 等. 不同支撑形式的型钢混凝土剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40 (5): 44-53.
- [16] 吕西林, 阳菊华, 蒋欢军. 型钢混凝土 T 形截面剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35 (3): 46-52.