

DOI:10.11918/202310049

基于材料应变的新型装配式剪力墙变形指标限值

樊禹江^{1,2}, 陈玉喜², 李寰芳¹, 许锦宝², 葛俊²

(1. 长安大学 建筑学院, 西安 710061; 2. 长安大学 建筑工程学院, 西安 710061)

摘要: 为研究新型装配式剪力墙的抗震性能及其变形指标限值, 基于课题组所做新型装配式剪力墙抗震性能试验, 采用析因法, 共设计 216 个不同剪跨比、轴压比、边缘构件纵筋配筋率等新型装配式剪力墙模型, 完成相应的单推性能研究; 基于有限元破坏形态识别, 将构件破坏形态划分为弯曲破坏、弯剪破坏和剪切破坏 3 类, 提出墙体破坏形态划分准则。参考 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》, 对弯曲破坏和弯剪破坏划分 6 个性能状态, 对剪切破坏划分两个性能状态, 基于构件极限状态下混凝土、钢筋应变和承载力, 确定墙体性能状态判定准则。通过线性回归分别得到弯曲破坏、弯剪破坏和剪切破坏形态下构件各塑性位移角限值的回归方程, 并提出各破坏形态下具有 90% 保证率的构件变形指标限值标准, 为基于性能的新型装配式剪力墙抗震设计提供参考。

关键词: 钢筋混凝土; 装配式剪力墙; 有限元模拟; 破坏形态; 变形指标限值

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)02-0104-09

Deformation index limits of a novel prefabricated shear wall based on material strain

FAN Yujiang^{1,2}, CHEN Yuxi², LI Huanfang¹, XU Jinbao², GE Jun²

(1. School of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to study the seismic performance and deformation index limits of a new assembled shear wall, based on the seismic performance test of the new assembled shear wall made by the research group, a total of 216 wall models with different shear span ratio, axial compression ratios and longitudinal reinforcement ratios of edge members were designed using factor analysis method. The corresponding single push performance experiment was performed to investigate the structural behavior. Based on the recognition of failure modes using finite element analysis, the failure modes were divided into three categories: bending failure, bending shear failure and shear failure. A criterion for classifying the failure modes of the shear wall was put forward. Referring to "Code for seismic design of buildings" (GB 50011—2010), six performance states were defined for flexural failure and flexural-shear failure, while two performance states were defined for shear failure. Based on the strain and bearing capacity of concrete and steel bars under the limit state of the component, the criterion of the performance state of the wall was determined. Finally, regression equations were derived through linear regression to determine the limit values of plastic displacement angles for components under bending failure, bending shear failure and shear failure modes. Furthermore, deformation index limits with 90% guarantee rate were proposed for each failure mode, providing a reference for performance-based seismic design of new assembled shear walls.

Keywords: reinforced concrete; prefabricated shear wall; finite element simulation; failure mode; deformation index limit

现阶段装配式结构获得了较大的发展, 尤其是各类新型装配式结构层出不穷。Wu 等^[1]设计了局部现浇的预制双肢剪力墙试件并开展了拟静力试验, 预制墙体表现出更好的变形能力; Jiang 等^[2]提出了一种螺栓连接装配式剪力墙的新形式, 以提高

装配式剪力墙的施工效率和结构完整性; 陈彬彬等^[3]设计了不同参数的 T 形 RC 剪力墙试件, 研究了 T 形钢筋混凝土 (RC) 剪力墙的抗震性能及其变形指标限值。季静等^[4]以剪跨比和弯剪比为参数确定了构件破坏形态的判断标准。目前, 针对新型

收稿日期: 2023-10-20; 录用日期: 2023-12-15; 网络首发日期: 2024-01-30

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240129.1625.004>

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51808046); 陕西省重点研发计划(2023-YBSF-315, 2021SF-521); 陕西省自然科学基金(2023-JC-YB-470)

作者简介: 樊禹江(1987—), 男, 博士, 副教授

通信作者: 樊禹江, fanyujianghd@163.com

装配式结构的研究更多地集中在节点连接技术上, 而对于相应基于性能的设计方法有待深入和扩展。本文提出了一种新型装配式剪力墙结构, 该结构采用箱型钢表面预焊锚固短筋, 并将其与上部墙体纵筋端部焊接连接, 再整体浇筑混凝土, 最后通过 U 型钢和螺栓连接装配; 剪力墙受到水平荷载时, 内外型钢发生相对转动, 实现荷载传递与摩擦耗能功能, 构造设计见图 1。基于其抗震性能试验及有限元模拟方法^[5-7], 共设计了 216 个不同剪跨比、轴压比、边缘构件纵筋配筋率等的墙体模型; 采用有限元破坏形态识别, 划分构件破坏形态, 提出相应的破坏形态划分准则。最后, 通过线性回归分别得到弯曲破坏、弯剪破坏和剪切破坏形态下构件各塑性位移角限值的回归方程, 并提出了各破坏形态下具有 90% 保证率的构件变形指标限值标准。

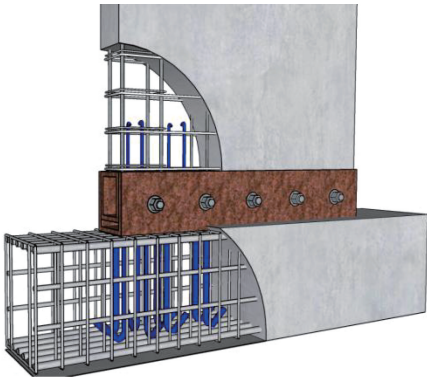


图 1 新型装配式剪力墙构造

Fig. 1 Structural design of new prefabricated shear wall

1 新型装配式剪力墙破坏形态划分

1.1 有限元模型及参数设置

基于课题组相关试验及有限元模拟分析^[5-7], 采用析因法, 以剪力墙的剪跨比 λ 、设计轴压比 u_d 、边缘构件纵筋配筋率 ρ_{sv} 、边缘构件配箍特征值 λ_v 、水平分布筋配筋率 ρ_{sh} 和弯剪比 m 为参数, 共设计了 216 ($4 \times 3 \times 3 \times 3 \times 2$) 个新型装配剪力墙结构模型, 具体参数如表 1 所示。

表 1 模型设计参数

Tab. 1 Model design parameters

剪跨比 λ	轴压比 u_d	边缘构件纵筋配筋率 $\rho_{sv}/\%$	边缘构件配箍特征值 λ_v	水平分布筋配筋率 $\rho_{sh}/\%$
1.0(1 300)	0.10	0.98	0.11	0.42
1.5(1 950)	0.25	1.90	0.20	0.65
2.0(2 600)	0.40	3.20	0.32	
2.5(3 250)				

注: 括号里是相应剪跨比下对应的墙高, 单位 mm; 空白表示无此项。

采用 ABAQUS 建立新型装配式剪力墙实体模型。除墙体内部钢筋采用 T3D2 单元以外, 其余实体部件均采用 C3D8R 单元。混凝土本构塑性损伤模型, 根据试验实测数据输入参数: 弹性模量取 30.8 GPa, 泊松比取 0.2, 膨胀角取 37° , 黏性参数取 0.000 5, 偏心率取 0.1, 双轴抗压强度与单轴抗压强度比值取 1.16, 屈服形态影响参数取 0.666 7。剪力墙构件的墙体配筋、高强螺栓、钢垫片、箱型钢和 U 型钢均采用双折线模型, 钢材屈服强度和抗拉强度依据试验实测确定。典型模型网格划分如图 2 所示。对其进行单调位移加载控制(见图 3), 所得的模拟曲线与试验荷载 - 位移曲线总体吻合良好, 能够反映出新型装配式剪力墙的摩擦滑动特征和变形特点, 如图 4。将其试验破坏形态与有限元云图结果进行对比, 如图 5 所示, 建立的有限元模型可以有效地模拟新型装配式剪力墙的受力状态和破坏形态, 从而验证了采用 ABAQUS 模拟的可靠性。

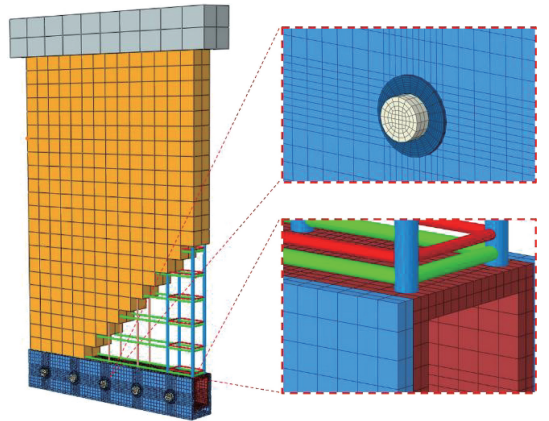


图 2 典型模型网格划分示意

Fig. 2 Typical model grid division diagram

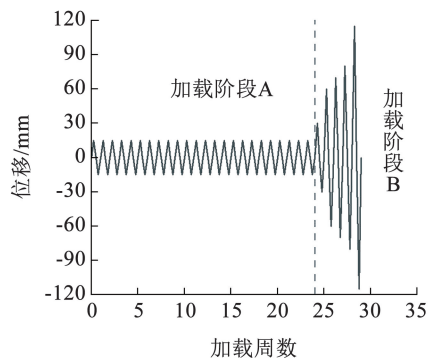


图 3 加载制度

Fig. 3 Loading history

1.2 破坏形态划分准则

轴压比、边缘构件纵筋配筋率、配箍特征值和水平分布筋配筋率对于剪力墙构件的破坏形态产生一定影响,但总体上遵循仅考虑剪跨比单一参数时的影响规律,且在某些特定剪跨比下,这 4 项参数对构件破坏形态的占比与仅考虑剪跨比单一参数时占比相差不大。此外,弯剪比对构件最终破坏形态的影响规律呈现一定独立性,也在一定程度上反映了构件的配筋形式。因此,选择剪跨比和弯剪比作为划分新型装配式剪力墙破坏形态的参数较为合理。

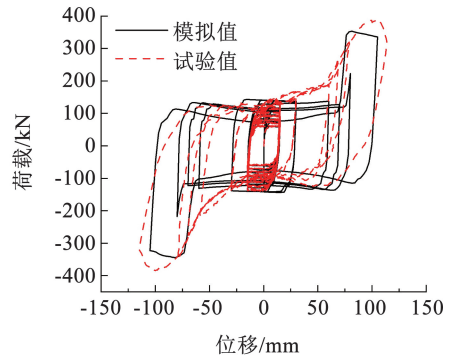


图 4 荷载-位移曲线对比

Fig. 4 Comparison of load-displacement curves

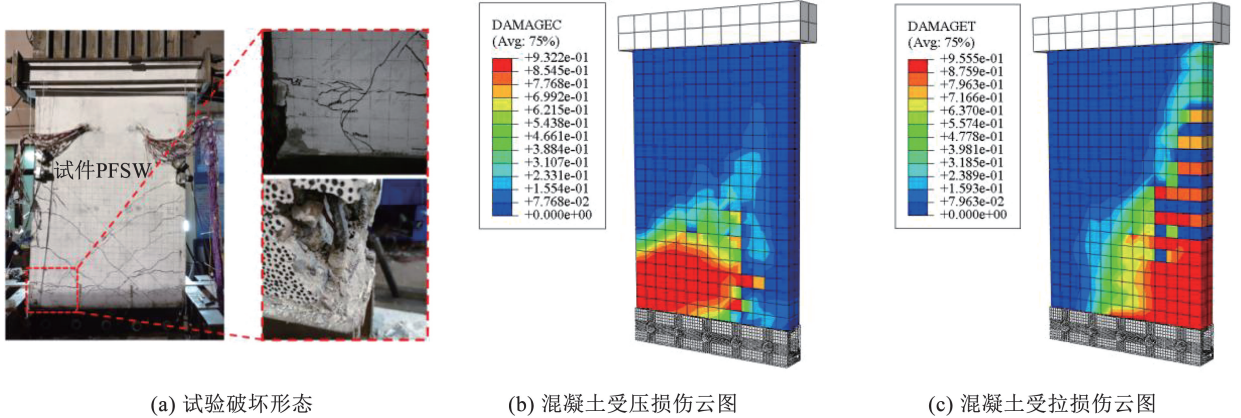


图 5 试验破坏形态与有限元云图对比

Fig. 5 Comparison of test failure mode and finite element cloud diagram

确定新型装配式剪力墙的弯剪比划分界限时,采用以破坏形态集中分布区间为基础,相邻破坏形态间以偏向构件受弯曲控制破坏为调整的划分方案。弯剪比 m 反映构件计算截面上抗弯承载力与抗剪承载力之间的相对关系,是判断构件破坏形态的重要指标^[4],定义如下:

$$m = \frac{M_u}{V_u L} \quad (1)$$

式中: M_u 为根据实际配筋计算的截面抗弯承载力, V_u 为根据实际配筋计算的截面抗剪承载力, L 为水平集中荷载至剪力墙底部的距离。

弯剪比数据均由式(1)计算得到,构件弯剪比参数分布情况如图 6 所示。

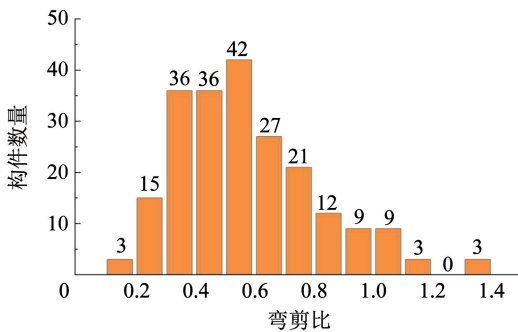


图 6 各弯剪比区间构件数量分布

Fig. 6 Quantity distribution of components in each flexural shear ratio interval

选取弯剪比限值的两个原则:1)当存在明确破坏形态界限时,弯剪比限值主要依据构件破坏形态的界限确定。2)当不存在明确破坏形态界限时,从偏向结构或构件安全的角度确定弯剪比限值,将其偏向于受弯曲控制的破坏形态,即在弯曲破坏和弯剪破坏之间取值偏向于弯曲破坏,在弯剪破坏和剪切破坏之间的取值偏向于弯剪破坏。在不同剪跨比下,新型装配式剪力墙构件破坏形态累计数量随弯剪比变化曲线如图 7 所示,取 F(弯曲破坏)、FS(弯剪破坏)和 S(剪切破坏)。

如图 7(a)所示,当剪跨比为 1.0 时,构件基本只发生剪切破坏,从构件安全角度考虑,认为剪跨比为 1.0 的剪力墙构件全部发生剪切破坏。

如图 7(b)所示,当剪跨比为 1.5 时,弯剪破坏的集中分布区间为 $[0.35, 0.55]$,剪切破坏的集中分布区间为 $[0.55, 0.85]$,弯剪破坏和剪切破坏之间有明确界限,该弯剪比限值 $m_{1.5,FS-S} = 0.55$ 。

如图 7(c)所示,当剪跨比为 2.0 时,弯曲破坏的集中分布区间为 $[0.25, 0.50]$,弯剪破坏的集中分布区间为 $[0.45, 0.60]$,剪切破坏和集中分布区间为 $[0.65, 0.80]$ 。根据两相邻破坏形态间的弯剪比限值取平均值的方法^[8],式(2)、(3)分别为计算得到的弯曲破坏和弯剪破坏之间、弯剪破坏和剪切

破坏之间的初始弯剪比限值:

$$m_{2.0,F-FS} = \frac{(0.50 + 0.45)}{2} = 0.475 \quad (2)$$

$$m_{2.0,FS-S} = \frac{(0.60 + 0.65)}{2} = 0.625 \quad (3)$$

分析发现,弯剪比在区间 $[0.45, m_{2.0,F-FS}]$ 内发生弯曲破坏构件的累计数量不变,而发生弯剪破坏的构件累计数量呈增多趋势,偏向构件安全考虑,取 $m_{2.0,F-FS} = 0.45$ 。弯剪比为 $[0.60, 0.65]$ 区间内发生弯剪破坏和剪切破坏的累计数量均呈增多趋势,考虑到发生弯剪破坏构件的累计数量在弯剪比为0.65时达到峰值,且弯剪比为0.60时剪切破坏构件累计数量为0,取 $m_{2.0,FS-S} = 0.65$ 。

如图7(d)所示,当剪跨比为2.5时,构件仅发生弯曲破坏和弯剪破坏,两者的集中分布区间分别为 $[0.25, 0.65]$ 和 $[0.60, 0.65]$ 。划分弯剪破坏和弯曲破坏的初始弯剪比限值由式(4)计算得

$$m_{2.5,F-FS} = \frac{(0.65 + 0.60)}{2} = 0.625 \quad (4)$$

弯剪比在区间 $[0.6, 0.65]$ 内发生弯曲破坏和

弯剪破坏构件的累计数量均有所增长,但该区间内发生弯曲破坏的构件数量少于弯剪破坏构件,偏向构件安全考虑,取 $m_{2.5,F-FS} = 0.60$ 。此时,弯剪破坏构件和弯曲破坏构件的累计数量占比分别为89.58%和10.42%,较为合理。

综上,以弯剪比和剪跨比参数为判别条件的新型装配式剪力墙破坏形态划分准则如表2所示。

表2 新型装配式剪力墙破坏形态的划分准则

Tab.2 Division criteria of failure modes of new assembled shear wall

剪跨比	弯剪比	破坏形态
1.0		剪切破坏
1.5	$m \leq 0.55$	弯剪破坏
	$m > 0.55$	剪切破坏
2.0	$m \leq 0.45$	弯曲破坏
	$0.45 < m \leq 0.65$	弯剪破坏
2.5	$m \leq 0.60$	弯曲破坏
	$m > 0.60$	弯剪破坏

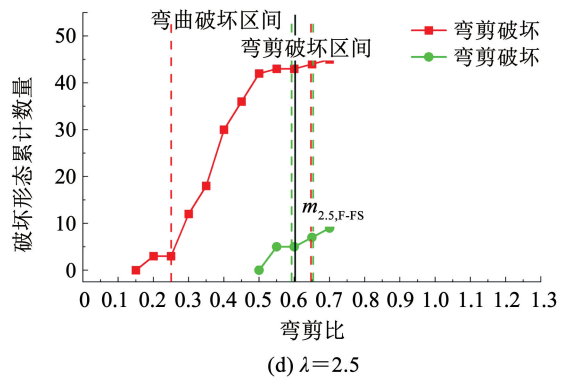
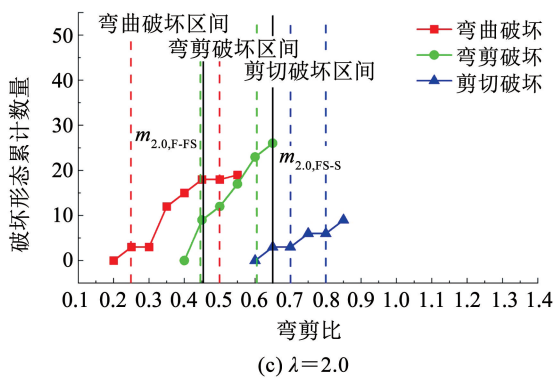
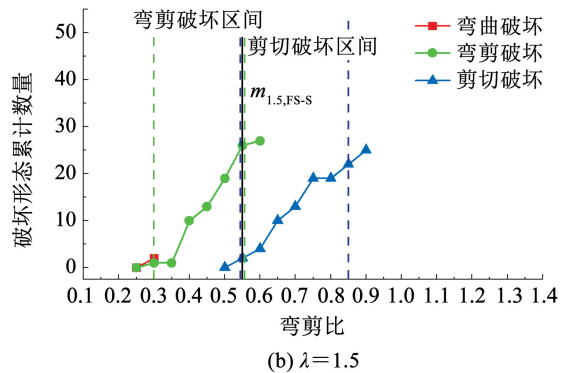
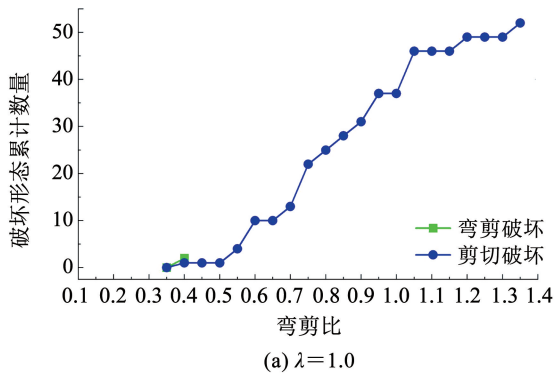


图7 不同剪跨比下构件破坏形态随弯剪比累计数量曲线

Fig.7 Cumulative quantity curves of component failure modes with varying shear-span ratios

2 新型装配式剪力墙变形指标限值研究

2.1 性能状态的确定

GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[9]对地

震作用下的结构构件划分了完好、基本完好、轻微损坏、轻中等损坏、中等损坏和不严重破坏共6个性能状态,并在相邻的性能状态之间区分了以承载力和弹塑性变形为主要判别依据的各性能限值。但根据

众多试验研究发现,水平承载力的下降并不意味着构件失效或结构倒塌,试件达到极限状态以后仍具有可靠的承载力,大部分弯曲破坏构件也表现出较好的变形能力。对此,将 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[9]中不严重破坏状态调整为较严重破坏状态和严重破坏状态,以此更为准确地判断构件是否失效。

2.1.1 弯曲破坏/弯剪破坏

1)完好。完好状态对应于构件未达到屈服之前的性能状态,构件仅发生弹性变形,试件表面可能存在微小裂缝,卸载后构件的变形和表面裂缝均可完全恢复。

①边缘约束区纵筋应变小于屈服应变^[10];②混凝土压应变小于开裂应变^[11]。

2)轻微损坏。轻微损坏状态对应于部分承重构件产生轻微塑性变形,少数非承重构件发生明显破坏,表层混凝土没有脱落,受力纵筋屈服,残余裂缝的宽度相对较小。

①边缘约束区纵筋应变小于 0.015^[11];②混凝土压应变小于剥落应变^[12]。

3)轻中等损坏。文献[8,13]表明,剪力墙构件的表面裂缝一般可达到 2 mm,试件通过涂抹纤维材料或加设钢板进行修复。轻中等损坏状态下,纵筋拉应变和混凝土压应变限值如下:

①纵向钢筋应变小于 0.030;②混凝土压应变小于 0.005。

4)中等破坏。中等破坏状态对应构件损伤加剧,伴有明显的塑性变形,多数构件出现轻微裂缝,部分非承重构件出现明显裂缝,构件需要加固修复。

①纵筋拉应变小于极限拉应变的 60%^[14];

②混凝土压应变小于极限压应变^[15]。

5)较严重破坏。较严重破坏对应结构主要承重构件产生明显塑性变形,混凝土保护层大量剥落,核心区混凝土损伤加剧,结构构件需大修才可恢复使用。

①纵筋拉应变同时不超过 0.08 和钢筋极限拉应变的 90%;②混凝土压应变小于极限压应变的 150%。

为偏向保守考虑,将构件承载力指标作为基于材料应变判定较严重破坏状态的补充判定依据,根据试验经验,认为:③构件承载力下降至峰值承载力的 85%时,构件达到不严重状态阈值。

6)严重破坏。严重破坏状态是结构构件处于濒临失效或倒塌的前期状态,其中,大多数承重构件严重破坏,部分非承重构件出现倒塌,结构无修复必要,亟待拆除。

①纵筋拉应变不超过 0.10^[8];②混凝土压应变小于极限压应变的 180%^[13]。

与较严重破坏状态类似,认为:③构件承载力下降至峰值承载力的 70%时,构件达到严重状态阈值。

2.1.2 剪切破坏

1)完好。在完好状态下,认为构件始终处于弹性状态,其划分标准与前述弯曲/弯剪破坏状态下的标准一致。

2)较严重破坏。

①混凝土单元剪应变小于 0.015^[8,13]。

将上述各性能状态下构件的材料应变限值及部分性能点的承载力限值汇总,得到新型装配式剪力墙性能状态划分标准,见表 3。

表 3 新型装配式剪力墙性能状态划分标准

Tab. 3 Performance state classification standards of new prefabricated shear wall

判别指标	弯曲/弯剪破坏						剪切破坏	
	完好	轻微损坏	轻中等损坏	中等破坏	较严重破坏	严重破坏	完好	较严重破坏
混凝土应变限值	0.002	0.004	0.005	0.020	$1.5\varepsilon_{cu}$	$1.8\varepsilon_{cu}$	0.002	0.015
钢筋应变限值	ε_y	0.015	0.030	0.072	0.080 $0.9\varepsilon_{su}$	0.100	ε_y	
承载力限值					$85\%P_m$	$70\%P_m$		

注: ε_{cu} 、 ε_{su} 分别为混凝土极限压应变和钢筋极限拉应变, ε_y 为钢筋屈服应变, P_m 为剪力墙峰值承载力;空白表示无此项。

2.2 性能指标的选取

从所建 216 个新型墙体有限元模型的破坏形态分布来看,弯曲破坏构件仅占比 30.56%,而弯剪破坏和剪切破坏构件共占比 69.44%。因此,选取结构塑性位移角表征构件不同性能状态下的变形较为合理。

3 塑性位移角限值计算公式的建立

3.1 自变量线性回归

选取剪跨比、轴压比、边缘构件纵筋配筋率、配箍特征值和水平分布筋配筋率作为自变量进行线性回归。通过线性回归分别得到弯曲破坏、弯剪破坏

和剪切破坏形态下构件各塑性位移角限值的回归方程, 见表 4 ~ 6。

以相关系数 R 、显著性 P 、共线性指数 F_{VI} 和 F 统计量为判断指标, 一般认为在 $R > 0.6$, $P < 0.05$ 和 $F_{VI} < 7$ 时回归系数具有显著意义。由表 4、5 可

知, 对于发生弯曲破坏和弯剪破坏的构件, 塑性位移角限值的回归模型整体较好, 相关系数 R 普遍在 0.85 左右; 由表 6 可知, 发生剪切破坏的构件, 塑性位移角限值回归模型的相关系数为 0.623, 在可接受的范围内。

表 4 弯曲破坏构件塑性位移角限值线性回归结果

Tab. 4 Linear regression results of plastic displacement angle limit value of bending failure member

限值	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	F	P_{max}	R
δ_{2F}	0.004 28	0.002 5	-0.006 8	-0.001 3	0	0	41.638	0	0.881
δ_{3F}	0.004 64	0.002 9	-0.008 0	-0.001 4	0	0	45.349	0	0.889
δ_{4F}	0.014 45	0.003 3	-0.018 6	-0.001 4	0.007 7	0	51.622	0	0.901
δ_{5F}	0.022 23	0	-0.032 3	0	0.014 6	0.006 1	32.503	0.046	0.855
δ_{6F}	0.035 62	0	-0.017 6	0	0.011 2	0	8.902	0.015	0.653

注: $\delta_2 \sim \delta_6$ 依次表示轻微损坏、轻中等损坏、中等破坏、较严重破坏和严重破坏状态下的塑性位移角限值, β_0 为线性回归得到的常量非标准化系数, $\beta_1 \sim \beta_5$ 依次为剪跨比、轴压比、边缘构件纵筋配筋率、配箍特征值和水平分布筋配筋率的线性回归非标准化系数, F 表示检验统计量, P_{max} 表示可接受的显著性水平最大值, R 表示线性相关系数。

由表 4 可知弯控 RC 剪力墙的位移角限值回归公式如下。

轻微损坏: $\delta_{2F} = 0.004 28 + 0.002 5\lambda - 0.006 8u_d - 0.001 3\rho_{sv}$

轻中等损坏: $\delta_{3F} = 0.004 64 + 0.002 9\lambda - 0.008 0u_d - 0.001 4\rho_{sv}$

中等损坏: $\delta_{4F} = 0.014 45 + 0.003 3\lambda - 0.018 6u_d - 0.001 4\rho_{sv} + 0.007 7\lambda_v$

较严重损坏: $\delta_{5F} = 0.022 23 - 0.032 3u_d + 0.014 6\lambda_v + 0.006 1\rho_{sh}$

严重损坏: $\delta_{6F} = 0.035 62 - 0.017 6u_d + 0.011 2\lambda_v$

式中: λ 为剪力墙的剪跨比, u_d 为设计轴压比, ρ_{sv} 为边缘构件纵筋配筋率, λ_v 为边缘构件配箍特征值, ρ_{sh} 为水平分布筋配筋率。

表 5 弯剪破坏构件塑性位移角限值线性回归结果

Tab. 5 Linear regression results of plastic displacement angle limit of flexural-shear failure members

限值	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	F	P_{max}	R
δ_{2FS}	0.006 31	0	-0.004 5	-0.000 9	0	0	8.891	0	0.669
δ_{3FS}	0.007 24	0	-0.005 7	-0.001 2	0	0	12.000	0	0.722
δ_{4FS}	0.014 17	0.002 8	-0.017 3	-0.001 2	0.005 1	0	25.035	0.019	0.834
δ_{5FS}	0.015 61	0.006 1	-0.038 2	-0.001 4	0.013 0	0.009 3	54.875	0.003	0.913
δ_{6FS}	0.033 81	0	-0.035 8	0	0.013 3	0	33.946	0.003	0.869

由表 5 可知弯剪控 RC 剪力墙的位移角限值回归公式如下。

轻微损坏: $\delta_{2FS} = 0.006 31 - 0.004 5u_d - 0.000 9\rho_{sv}$

轻中等损坏: $\delta_{3FS} = 0.007 24 - 0.005 7u_d - 0.001 2\rho_{sv}$

中等损坏: $\delta_{4FS} = 0.014 17 + 0.002 8\lambda - 0.017 3u_d - 0.001 2\rho_{sv} + 0.005 1\lambda_v$

较严重损坏: $\delta_{5FS} = 0.015 61 + 0.006 1\lambda - 0.038 2u_d - 0.001 4\rho_{sv} + 0.013 0\lambda_v + 0.009 3\rho_{sh}$

严重损坏: $\delta_{6FS} = 0.033 81 - 0.035 8u_d + 0.013 3\lambda_v$

表 6 剪切破坏构件塑性位移角限值线性回归结果

Tab. 6 Linear regression results of plastic displacement angle limit of shear failure members

限值	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	F	P_{max}	R
δ_{5S}	0.004 74	0.001 5	0	0	-0.000 6	0	9.610	0.002	0.623

由表 6 可知剪控 RC 剪力墙的位移角限值回归公式如下。

较严重损坏: $\delta_{5S} = 0.004 74 + 0.001 5\lambda - 0.000 6\rho_{sv}$

3.2 变形指标限值标准的确定

通过选取轴压比和弯剪比这两项参数,对弯曲破坏和弯剪破坏下各性能指标限值进行统计区间划分。轴压比和弯剪比的上下限值由在不同轴压比和弯剪比下发生弯曲破坏和弯剪破坏构件的集中分布情况确定,最后,通过数理统计的方法确定各统计区间内的性能指标限值。对于受轴压比和弯剪比影响较弱的剪切破坏构件,则直接对发生该破坏的全体构件进行统计。

在各区间内统计服从标准正态分布下分位点取 -0.100 (保证率 90%) 对应的性能指标限值标准,

即

$$P(\delta \geq \delta_{-0.100}) = \int_{\delta_{-0.100}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\delta}} e^{-\frac{(x-u_{\delta})^2}{2\sigma_{\delta}^2}} = u_{\delta} - 1.282\sigma_{\delta} \quad (5)$$

式中: P 表示概率, δ 表示性能指标, $\delta_{-0.100}$ 表示标准正态分布下分位点取 -0.100 对应的性能指标限值分位点, σ_{δ} 表示性能指标限值的标准差, u_{δ} 表示性能指标限值的均值。

表 7 分别为划分不同轴压比和弯剪比统计区间的弯曲破坏和弯剪破坏构件的各变形指标限值标准,表 8 为剪切破坏构件的各变形指标限值标准。

表 7 弯曲破坏构件变形指标限值标准 ($u_d \leq 0.10, m \leq 0.30$)

Tab. 7 Limit value standards of deformation index of bending failure member ($u_d \leq 0.10, m \leq 0.30$)

区间	统计项目	δ_{1e}	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5	δ_6
$u_d \leq 0.10$ $m \leq 0.30$	平均值	0.037 200	0.008 444	0.009 816	0.020 910	0.028 159	0.031 939
	标准差	0.001 072	0.001 212	0.001 484	0.001 612	0.002 769	0.003 537
	限值标准	0.035 826	0.006 890	0.007 914	0.018 843	0.024 609	0.027 405
$u_d \leq 0.10$ $m \geq 0.35$	平均值	0.038 861	0.007 470	0.008 510	0.020 634	0.029 037	0.033 686
	标准差	0.000 292	0.000 388	0.000 420	0.000 700	0.002 639	0.003 582
	限值标准	0.038 487	0.006 973	0.007 972	0.019 737	0.025 654	0.029 094
$u_d \geq 0.25$ $m \leq 0.30$	平均值	0.036 524	0.007 490	0.008 396	0.018 224	0.024 784	0.032 745
	标准差	0.000 564	0.000 692	0.000 802	0.001 879	0.005 124	0.002 859
	限值标准	0.035 801	0.006 603	0.007 368	0.015 815	0.018 215	0.029 080
$u_d \geq 0.25$ $m \geq 0.35$	平均值	0.038 075	0.006 163	0.007 145	0.016 434	0.022 784	0.029 817
	标准差	0.001 785	0.001 330	0.001 345	0.002 215	0.004 342	0.003 634
	限值标准	0.035 787	0.004 458	0.005 421	0.013 594	0.017 218	0.025 158
$u_d \leq 0.10$ $m \leq 0.45$	平均值	0.037 806	0.006 622	0.007 617	0.017 500	0.027 340	0.034 498
	标准差	0.000 881	0.000 355	0.000 679	0.001 029	0.001 561	0.002 379
	限值标准	0.036 677	0.006 167	0.006 746	0.016 181	0.025 339	0.031 448
$u_d \leq 0.10$ $m \geq 0.50$	平均值	0.038 321	0.006 094	0.006 992	0.017 746	0.026 848	0.036 053
	标准差	0.000 818	0.000 854	0.001 037	0.001 814	0.003 886	0.004 858
	限值标准	0.037 272	0.004 999	0.005 663	0.015 421	0.021 866	0.029 825
$u_d \geq 0.25$ $m \leq 0.45$	平均值	0.035 571	0.006 479	0.007 802	0.015 123	0.021 080	0.028 293
	标准差	0.002 245	0.001 062	0.001 189	0.000 738	0.003 682	0.002 060
	限值标准	0.032 693	0.005 117	0.006 278	0.014 177	0.016 360	0.025 652
$u_d \geq 0.25$ $m \geq 0.50$	平均值	0.038 009	0.005 173	0.005 997	0.013 584	0.018 952	0.025 572
	标准差	0.002 238	0.000 984	0.001 083	0.001 387	0.002 720	0.002 272
	限值标准	0.035 140	0.003 912	0.004 609	0.011 806	0.015 465	0.022 659

注: δ_{1e} 表示完好状态的位移角限值;表中限值标准由式(5)计算得到,下同。

表 8 剪切破坏构件变形指标限值标准

Tab. 8 Limit standards of deformation index of shear failure members

统计项目	δ_{1e}	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5	δ_6
平均值	0.035 923				0.005 250	
标准差	0.002 289				0.001 324	
限值标准	0.032 989				0.003 553	

注:空白表示无此项。

对表 7、8 中构件变形指标限值标准进行汇总, 得到新型装配式剪力墙变形指标限值标准, 见表 9。

由表 9 可知, 新型装配式剪力墙在各性能状态下均表现出较好的变形性能, 相比矩形截面 RC 剪力墙^[16], 其位移角限值标准有显著提升。从完好状态的位移角限值 δ_{ie} 来看, 对于剪力墙的 3 种破坏形态, δ_{ie} 普遍可达到 0.035 左右, 这是因为当输入的螺栓预紧作用较弱时, 构件变形主要受到高强螺栓与

U 型槽钢之间摩擦滑移的影响。从塑性位移角限值 $\delta_2 \sim \delta_6$ 来看, 发生弯曲破坏构件的变形能力对轴压比的敏感程度随弯剪比水平的提高而增强, 对弯剪比的敏感程度同样随轴压比水平的提高而增强, 而发生弯剪破坏构件的变形能力对轴压比的敏感程度总体随弯剪比水平的提高而减弱, 对弯剪比的敏感程度则随轴压比水平的提高而增强。

表 9 新型装配式剪力墙变形指标限值标准

Tab. 9 Limit value standards of deformation index of new assembled shear wall

位移角限值	轴压比	弯剪比	完好	轻微损坏	轻中等损坏	中等破坏	较严重破坏	严重破坏
	≤ 0.10	≤ 0.30	0.035 83	0.006 89	0.007 91	0.018 84	0.024 61	0.027 45
弯曲破坏下位移角限值	≤ 0.10	≥ 0.35	0.038 49	0.006 97	0.007 97	0.019 74	0.025 65	0.029 09
	≥ 0.25	≤ 0.30	0.035 80	0.006 60	0.007 37	0.015 81	0.018 21	0.029 08
	≥ 0.25	≥ 0.35	0.035 79	0.004 46	0.005 42	0.013 59	0.017 22	0.025 16
弯剪破坏下位移角限值	≤ 0.10	≤ 0.45	0.036 68	0.006 17	0.006 75	0.016 18	0.025 34	0.031 45
	≤ 0.10	≥ 0.50	0.037 27	0.005 00	0.005 66	0.015 42	0.021 87	0.029 83
	≥ 0.25	≤ 0.45	0.032 69	0.005 12	0.006 28	0.014 18	0.016 36	0.025 65
	≥ 0.25	≥ 0.50	0.035 14	0.003 91	0.004 61	0.011 81	0.015 46	0.022 66
剪切破坏下位移角限值			0.032 99				0.003 55	

注: 完好状态的变形指标为位移角, 其余性能状态下变形指标为塑性位移角; 对于表中划分范围以外的轴压比和弯剪比区间, 允许采用线性差值法获取相应变形指标限值。

4 结 论

1) 通过变参设计了 216 片新型装配式剪力墙模型, 将构件破坏形态划分为弯曲破坏、弯剪破坏和剪切破坏 3 类, 采用 ABAQUS 判定全体模型的破坏形态, 并且提出了以弯剪比和剪跨比为判别指标的新型装配式剪力墙破坏形态划分准则。

2) 根据新型装配式剪力墙的破坏机制, 在现有规范基础上对弯剪破坏和弯曲破坏构件各划分了 6 个性能状态, 对剪切破坏构件划分了两个性能状态。选取位移角作为性能指标进行量化, 以材料应变限值和承载力为判别条件的全体模型变形指标限值。

3) 在 3 种破坏形态下, 以剪跨比、轴压比、边缘构件纵筋配筋率、配箍特征值和水平分布筋配筋率为自变量的各塑性位移角限值计算公式, 较好地预测新型装配式剪力墙的变形。对 216 个模型的位移角数据进行分析, 提出了各破坏形态下具有 90% 保证率的构件变形指标限值标准, 为实现基于性能的新型装配式剪力墙抗震设计提供参考。

参 考 文 献

[1] WU Suiwen, LI Huaqiang, WANG Xu, et al. Seismic performance of a novel partial precast RC shear wall with reserved cast-in-place base and wall edges [J]. Soil Dynamics and Earthquake

Engineering, 2022, 152: 107038. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.107038

[2] JIANG Shaofei, SONG Hualin, BIAN Zhihai, et al. Experimental and numerical study on the shear strength of new bolted connection assembled shear wall [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 69: 106139

[3] 陈彬彬, 季静, 谢舜光, 等. T 形 RC 剪力墙抗震变形指标限值试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(6): 64

CHEN Binbin, JI Jing, XIE Shunguang, et al. Experimental study on seismic deformation index limits of T-shaped RC shear walls [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(6): 64. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201711107

[4] 季静, 曹源, 李伟琛, 等. 工字形截面 RC 剪力墙变形指标限值研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(2): 285

JI Jing, CAO Yuan, LI Weichen, et al. Research on performance level and limits of I-section RC shear walls [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(2): 285. DOI: 10.11990/jheu.201709027

[5] 樊禹江, 葛俊, 艾斌平, 等. 新型装配式剪力墙抗震性能试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(5): 79

FAN Yujiang, GE Jun, AI Binping, et al. Experimental study on seismic behavior of a new fabricated shear wall [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(5): 79. DOI: 10.11918/202112059

[6] 樊禹江, 余滨杉, 葛俊, 等. 新型装配式剪力墙摩擦抗剪机理 [J]. 山东大学学报(工学版), 2023, 53(1): 76

FAN Yujiang, YU Binshan, GE Jun, et al. Friction and shear resistance mechanism of a new prefabricated shear wall [J]. Journal

of Shandong University (Engineering Science), 2023, 53(1): 76.
DOI: 10.6040/j.issn.1672-3961.0.2022.244

[7] FAN Yujiang, CHEN Yuxi, XU Jinbao, et al. Research on the resilience model of a new prefabricated shear wall structure [J]. Structures, 2023, 55: 2060

[8] 李伟琛. 基于材料应变的工字形 RC 剪力墙变形指标限值研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016
LI Weichen. Research on deformation limits of I-section RC shear walls based on material strain [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010

[10] 李健. 基于材料应变的钢筋混凝土剪力墙变形性能指标研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012
LI Jian. Research on deformation limits of RC shear wall based on material strain [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012

[11] PRIESTLEY M J N, KOWALSKY M J. Direct displacement-based seismic design of concrete buildings [J]. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 2000, 33(4): 421

[12] 蒋欢军, 王斌, 吕西林. 钢筋混凝土梁和柱性能界限状态及其变形限值 [J]. 建筑结构, 2010, 40(1): 10
JIANG Huanjun, WANG Bin, LU Xilin. Performance limit states and deformation limits of RC beams and columns [J]. Building Structure, 2010, 40(1): 10. DOI:10.19701/j.jzjg.2010.01.003

[13] 王骛亚. 基于材料应变的 T 形钢筋混凝土剪力墙变形性能指标研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015
WANG Aoya. Research on deformation limits of T-shaped RC shear wall based on material strain [J]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015

[14] 韩小雷, 季静. 基于性能的超限高层建筑结构抗震设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013
HAN Xiaolei, JI Jing. Performance-based seismic design of out-of-codes high-rise buildings [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2013

[15] KOWALSKY M J. Deformation limit states for circular reinforced concrete bridge columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(8): 869

[16] 韩小雷, 陈彬彬, 崔济东, 等. 钢筋混凝土剪力墙变形性能指标试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(6): 1
HAN Xiaolei, CHEN Binbin, CUI Jidong. Experimental study on deformation performance indexes of RC shear walls [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(6): 1. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.06.001

(编辑 刘 彤)

封面图片说明

封面图片来自本期论文“污水生化处理中 N_2O 产生途径、影响因素及减排策略”, 是对污水生化处理过程中氧化亚氮产生水平主要影响因素的概括总结。 N_2O 产生与排放受到许多参数的影响, 如进水 N 负荷、DO、碳氮比、温度、微生物群落分布等。DO 质量浓度会对 N_2O 产生的途径产生重要影响, 随 DO 质量浓度升高, NH_2OH 氧化途径产生的 N_2O 呈现先增加后趋于稳定的趋势, HD 途径受到抑制, 产生的 N_2O 减少, ND 途径产生的 N_2O 则呈现先增加后减少的趋势; 不同类型的微生物 N_2O 产生水平差异显著, 以 AOA、Comanmmox 等作为优势菌群的体系相比以 AOB 作为优势菌群的体系 N_2O 产生水平更低; 碳源的种类与浓度均会对污水处理体系的 N_2O 产生水平产生重要影响。把握不同因素对 N_2O 产生水平的影响, 对最小化污水处理厂的碳排放具有重要指导意义。

(图文提供: 张石进, 丁晶, 王琨, 赵庆良, 杨红, 郜阔, 侯秉东。哈尔滨工业大学环境学院, 上海勘测设计研究院有限公司)