

吴从晓,郑志鹏,吴从永,等.预制装配式消能减震复合墙板的设计方法[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(4):35-41.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.006

Wu C X, Zheng Z P, Wu C Y, et al. Study on the Design Method of Prefabricated Composite Wall Panel with Energy Dissipation and Shock Absorption[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019,34(4):35-41. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.006

预制装配式消能减震复合墙板的设计方法

吴从晓^{1,2*}, 郑志鹏¹, 吴从永¹, 黄青青²

(1.广州大学 土木工程学院,广东 广州 510006;2.广东技术师范大学天河学院 土木工程学院,广东 广州 510540)

摘要:对提出的通过钢板弯曲变形耗能的新型预制装配式消能减震墙板(MDW)性能进行了研究,给出了其设计方法,推导出了MDW的弹性刚度、屈服位移和屈服力的计算公式.采用有限元分析软件对MDW进行分析,在验证模型正确的基础上,对不同数量、不同尺寸的钢板及不同墙板尺寸的9组模型进行了数值仿真分析,将分析结果与设计结果进行对比.结果表明:弹性刚度的理论值与有限元分析结果较为接近,偏差在20%以内,当比例系数 α 为1~2时,屈服力和屈服位移的理论值与有限元分析结果吻合较好;增加耗能钢板的高度、厚度和数量,可以提高MDW的初始刚度和屈服力,墙板尺寸对弹性刚度影响较小,基于以上分析结果,为MDW的设计提供理论依据.

关键词:减震墙板;设计方法;消能减震;有限元分析

中图分类号:TU352.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2019)04-0035-07

Study on the Design Method of Prefabricated Composite Wall Panel with Energy Dissipation and Shock Absorption

Wu Congxiao^{1,2}, Zheng Zhipeng¹, Wu Congyong¹, Huang Qingqing²

(1.School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. School of Civil Engineering, TianHe College of GuangDong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510540, China)

Abstract: The performance of the proposed prefabricated energy dissipation damper (MDW) through the bending deformation of steel plate was studied, The design method was given to determine the elastic stiffness, yield displacement and yielding force of MDW. The finite element analysis software was used to analyze the MDW, On the basis of verifying the correct model, the models of the different steel plate numbers, sizes and wallboard dimensions were analyzed, and the analysis results were compared with the design results. The results show that the elastic stiffness of the theoretical value with the finite element analysis results is relatively close, within 20% deviation, basic conform to the requirements of the project preliminary design precision, when Ratio coefficient alpha is 1~2, the yield strength and the yield displacement and finite element analysis of the theoretical results are in good agreement, based on the above analysis result, provide theoretical basis for the design of new wall plate.

Keywords: damping panels; design method; energy dissipation and shock absorption; finite element analysis

收稿日期:2019-09-12

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(2018A030313027);广东省普通高校特色创新项目资助(2018KTSCX338;2018SJG01)

*通信作者,E-mail:wu-congxiao@163.com

填充墙是建筑中应用最为广泛的维护构件,通常被当作非结构构件,不参与结构的抗震计算.而墙体在历次地震中的倒塌、破坏却是造成人员伤亡的重要原因之一,在宜宾的“6.17”地震中,部分装配式墙体也发生了较大的破坏^[1].为了减轻填充墙在地震作用下的破坏,国内外学者做了大量的研究.卢林枫等^[2]对一榀带 GRC 墙板的钢框架结构进行了试验研究,发现填充墙与框架接触边缘由于挤压破坏较明显;金昊贵等^[3]采用 ABAQUS 有限元软件分析研究了填充墙体对框架结构抗震性能的影响,发现满布填充墙会对框架产生斜压杆效应,导致柱端出现剪切破坏;王满生等^[4]对带足尺轻质复合墙板的装配式结构进行了振动台试验研究,采用强连接的方式来抵抗地震作用,墙板破坏严重;Aref 等^[5-6]对带聚合物基复合材料填充墙板(PMC 墙板)的框架进行了试验研究,提高了框架的抗震性能;Shan 等^[7-8]建立了数值模型来分析填充墙在低周往复荷载下的力学性能,分析结果表明:填充墙的侧向变形较大,布置在结构中,需要预留较多的变形空间;唐伟等^[9]通过试验研究了节能墙板对混凝土框架抗震性能的影响,建议墙板与框架采用弱连接方式.综上所述,填充墙附加的刚度效应和约束效应,是导致填充墙破坏严重的最主要原因,以上学者对装配式复合墙板的研究主要集中在普通轻质墙体上,以“抗”为主要途径来加强墙板的抗震性能.为了提高墙板的抗震性能,减轻墙板的约束效应和刚度效应所带来的不利影响,周云等^[10]提出一种阻尼填充墙,并对带 SBS 层阻尼填充墙的混凝土框架进行了试验研究;吴从晓等^[11]提出了一种新型装配式金属耗能减震复合墙板.

预制装配式金属耗能减震复合墙板(MDW)主要由 2 块预制混凝土板、防水保温材料、耗能钢板及柔性防水填充材料(聚氨酯泡沫填缝剂)组成.2 块预制混凝土墙板叠合在一起,二者之间填充防水保温材料,并通过耗能钢板连接在一起.2 块预制混凝土墙板与梁通过预埋钢板或角钢连接,MDW 与框架柱之间以及 MDW 柔性端用柔性防水填充材料填充.吴从晓等^[12-13]对这种新型的墙板进行性能研究,试验和分析结果表明:在地震荷载作用下,2 块混凝土板产生相对位移,使拉结混凝土板的耗能钢板产生弯曲变形,当变形达到耗能钢板的屈服位移,即可通过钢板的塑性变形耗散地震输入结构的能量,以减轻或避免主体结构和墙板的破坏.为促进该墙板更好地应用于工程中,本文给出预制装配式耗能减震复合墙板的设计方法,并将设计结果与仿真分析结果进行了对比,验证了设计方法的可行性.

1 耗能钢板的截面设计公式

MDW 的 2 块混凝土板通过多个耗能钢板拉结在一起,多个具有耗能能力的耗能钢板成并联关系,所以 MDW 墙板沿耗能钢板弯曲变形方向的力学性能由耗能钢板和钢筋混凝土板决定.其中,单块耗能钢板为开菱形孔的矩形钢板,这主要是为了耗能钢板在不同厚度处沿截面高度同时达到屈服.定义耗能钢板的弹性刚度为 K ,屈服荷载为 F_y ,屈服位移为 Δ_y ;那么 n 块耗能钢板的弹性刚度为 K_d ,屈服荷载为 F_{dy} ,屈服位移为 Δ_{dy} .各块互相平行的耗能钢板之间为并联关系,故

$$K_d = nK; F_{dy} = nF_y; \Delta_{dy} = \Delta_y. \quad (1)$$

在耗能钢板上下两端发生水平相对错动时,耗能钢板的变形、受力状况及内力分布如图 1 所示.

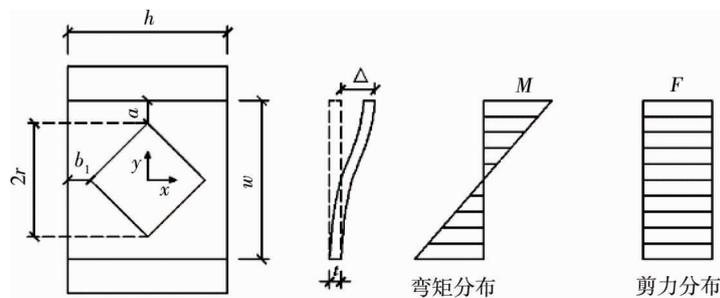


图 1 耗能钢板

1.1 弹性刚度

就受力机理而言,左右两端嵌于混凝土板中的耗能钢板相当于 1 根两端固支梁,考虑弯曲变形和剪切

变形的影响,可得耗能钢板变形量为

$$\Delta = \Delta_M + \Delta_V. \quad (2)$$

式中: Δ 为耗能钢板左右两端的相对水平位移; Δ_M , Δ_V 分别为耗能钢板的弯曲变形和剪切变形.

耗能钢板顶部受到水平荷载 F 和力矩 M 的作用,以耗能钢板的中心为原点,可得

$$\Delta_M = \int \bar{M}(y) d\theta = \int \frac{\bar{M}(y) M_p(y)}{EI(y)} dy; \quad (3)$$

$$\Delta_V = \int \bar{V}(y) d\eta = \int \frac{f_s \bar{V}(y) V_p(y)}{GA(y)} dy. \quad (4)$$

式中: $\bar{M}(y)$, $\bar{V}(y)$ 为单位荷载引起的内力; M_p , V_p 分别为实际荷载在耗能钢板中产生的弯矩和剪力; E , G 分别为钢材的弹性模量和剪切模量,取钢材泊松比 $\nu = 0.3$, $G = 0.4E$; I 为截面关于中性轴的惯性矩; f_s 为截面剪应力分布不均匀系数; A 为耗能钢板弯曲方向上横截面的截面积.

对于矩形截面 $f_s = 1.2$, 其中 $\bar{M}(y) = y$, $M_p(y) = Fy$, $\bar{V}(y) = 1$, $V_p(y) = F$, 由此可得

$$\Delta_M = \frac{F}{Et^3} \left(\frac{w^3 - 8r^3}{h} + \frac{3r(2B - h)}{C^2} - \frac{3r^2}{C} - \frac{\ln(2B - h + 2Cr) (12B^2 - 12Bh + 3h^2)}{2C^3} \right); \quad (5)$$

$$\Delta_V = \frac{3F}{Et} \left(\frac{w - 2r}{h} + 2Ctr^2 + 4btr + 4Btr \right). \quad (6)$$

式中: t 为钢板耗能部分的厚度; w 为耗能钢板的宽度; r 为耗能钢板在长度方向上开孔长度的一半; h 为耗能钢板的高度; a 和 b 分别为耗能钢板在长度和宽度方向上开孔后留余的长度; 为了使公式更为简洁,其中 $B = (h - 2b) / 2$; $C = -(h - 2b) / (w - 2a)$.

对比式(5)和式(6)可知 $\Delta_M \geq \Delta_V$. 综上所述,耗能钢板以弯曲变形为主, Δ_V 可忽略不计,故耗能钢板的弹性刚度为

$$K = \frac{F}{\Delta_M} = Et^3 \left(\frac{w^3 - 8r^3}{h} + \frac{3r(2B - h)}{C^2} - \frac{3r^2}{C} - \frac{\ln(2B - h + 2Cr) (12B^2 - 12Bh + 3h^2)}{2C^3} \right)^{-1}. \quad (7)$$

当 $b \approx 0$ 时,可得 n 块耗能钢板的弹性刚度为

$$K_d = nK = \frac{2nEht^3}{3w^3}. \quad (8)$$

1.2 屈服荷载

根据边缘屈服准则,当耗能钢板两端表面达到屈服时,从而可得

$$M_e = \frac{1}{6} \sigma_{\max} t^2 h = \frac{1}{6} f_y t^2 h. \quad (9)$$

式中: M_e 为弹性极限弯矩; σ_{\max} 为钢材的屈服应力; f_y 为钢材的屈服强度.

由力的平衡条件可得耗能钢板的弹性极限荷载为

$$F_e = \frac{M_e}{w/2} = \frac{f_y t^2 h}{3w}. \quad (10)$$

式中: F_e 为弹性极限荷载.

设弹性极限点与屈服点之间的参数关系式为

$$F_y = \alpha F_e; \Delta_y = \alpha \Delta_e. \quad (11)$$

式中: α 为屈服点与弹性极限点之间的比例系数 ($\alpha > 1$), 其经验取值须由有限元和试验研究确定.

将式(10)带入式(11),可得 n 块耗能钢板的屈服力.

$$F_{dy} = nF_y = \frac{n\alpha f_y t^2 h}{3w}. \quad (12)$$

1.3 屈服位移

由弹性刚度 K 和屈服荷载 F_y 可得

$$\Delta_y = \frac{F_y}{K}. \quad (13)$$

将式(8)和式(12)带入式(13)可得耗能钢板的屈服位移

$$\Delta_y = \frac{\alpha f_y h}{3Ewt} \left(\frac{w^3 - 8r^3}{h} + \frac{3r(2B - h)}{C^2} - \frac{3r^2}{C} - \frac{\ln(2B - h + 2Cr)(12B^2 - 12Bh + 3h^2)}{2C^3} \right). \quad (14)$$

当 $b \approx 0$ 时,公式可以简化为

$$\Delta_{dy} = \Delta_y = \frac{\alpha f_y w^2}{2Et}. \quad (15)$$

无开孔钢板发生平面外弯曲变形时,耗能部位集中于钢板上下两端,钢板中部一直处于弹性工作状态,没有充分利用整块钢板材料强度;而开孔后钢板的应力分布更加均匀,应力分布得到明显优化,且开孔不影响其屈服力。

通过以上这些理论公式,可以掌握其基本性能与尺寸构造参数之间的关系.开孔耗能钢板初始弹性刚度 K_d 与厚度 t 成正相关,屈服力 F_{dy} 与厚度 t 成正相关,屈服位移 Δ_{dy} 与厚度 t 成负相关.开孔耗能钢板初始弹性刚度 K_d 与高度 h 成正相关,屈服力 F_{dy} 与高度 h 成正相关,屈服位移 Δ_{dy} 与高度 h 几乎无关.开孔耗能钢板初始弹性刚度 K_d 与宽度 w 成负相关,屈服力 F_{dy} 与宽度 w 成负相关,屈服位移 Δ_{dy} 与宽度 w 成正相关。

2 有限元分析方法验证

2.1 模型信息

为了验证有限元建模的正确性,利用 ABAQUS 建立文献[14]中的有限元模型,使用其加载方式,并进行数值仿真分析,将数值计算结果与试验结果进行对比分析.钢筋混凝土板和耗能钢板均采用 S4R 单元来模拟,墙板的尺寸及配筋见图 2 所示.混凝土采用 C30,纵筋采用 HRB335,箍筋采用 HPB300,耗能钢板采用 Q235 钢材.钢筋以及钢材材料参数见表 1。

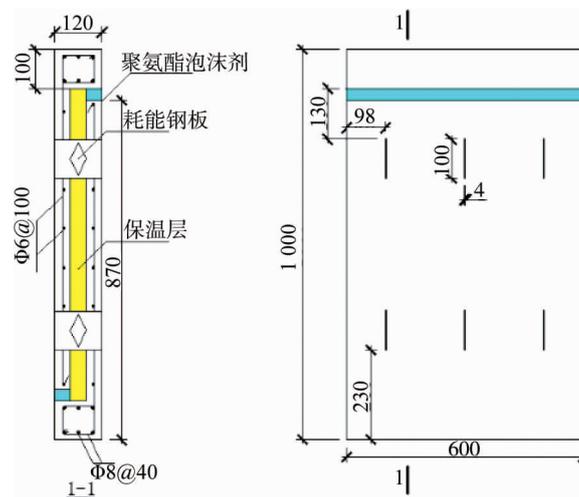


图 2 墙板尺寸及配筋(单位:mm)

表 1 钢材材料参数

材料	屈服应力/MPa	极限应力/MPa	弹性模量/GPa
HPB300	353	460	210
HRB335	398	512	236
Q235	275	359	226

混凝土本构采用 ABAQUS 提供的混凝土损伤塑性模型(CDP 模型),该模型可以很好地模拟在低周往

复荷载下混凝土的应力应变关系.钢材本构采用软件 ABAQUS 提供的金属材料在往复荷载作用下的力学模型,该模型考虑了钢材的随动硬化与等方硬化.该墙板中的墙体采用组合式建模,利用复合截面在壳单元中建立钢筋层.MDW 的 ABAQUS 模型如图 3 所示.

2.2 分析结果对比

图 4 为分析得出的骨架曲线,从图 4 中可看出:有限元模拟分析的骨架曲线与试验结果基本吻合,二者的屈服荷载及峰值荷载误差在 20%左右.有限元模拟分析的初始刚度大于试验值,主要是由于有限元分析中无法考虑钢筋与混凝土的粘结滑移效应.基于以上分析,该有限元模型可以很好地模拟 MDW 墙板的力学性能,可以用于后续的参数分析.

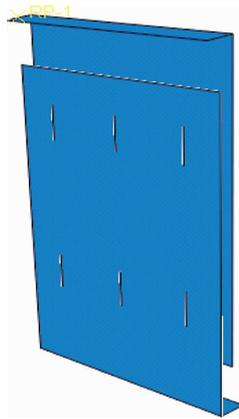


图3 有限元模型

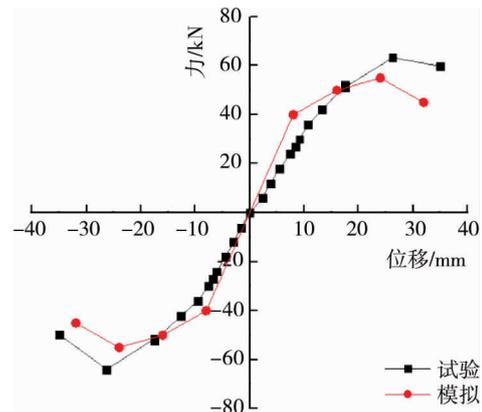


图4 骨架曲线对比

3 理论值与有限元值的对比以及比例系数的计算

MDW 可以近似为钢筋混凝土板与耗能钢板串联起来的简化模型,所以其弹性刚度由钢筋混凝土板和耗能钢板共同确定,屈服力仅由耗能钢板确定,屈服位移由弹性刚度、屈服力和屈服位移之间的关系来确定.

此外,《建筑消能减震技术规程》(JGJ 297-2013)^[15]第 7.3.3 条对消能器的支撑刚度作出规定:与速度线性相关型消能器连接的支撑、支墩、剪力墙的刚度应满足本规程第 6.3.1 条的要求,与其他类型消能器连接的支撑、支墩、剪力墙的刚度不宜小于消能器有效刚度的 2 倍.耗能钢板和钢筋混凝土板的刚度匹配应该满足规范要求,从而保证耗能钢板充分发挥作用,同时,保证耗能钢板对钢筋混凝土板不产生较大的破坏.

钢筋混凝土墙板考虑弯曲变形和剪切变形的刚度可按以下公式计算,也可通过以下公式初步确定所需的墙板尺寸:

$$K_b = \frac{3E\tilde{I}_b}{l_b^3}; \quad (16)$$

$$\tilde{I}_b = \frac{I_b}{1 + \frac{3\mu EI_b}{A_b G l_b^2}}. \quad (17)$$

式中: K_b 为钢筋混凝土墙板刚度; I_b 为普通钢筋混凝土墙板惯性矩; \tilde{I}_b 为考虑剪切变形后混凝土墙板的折算惯性矩; E, G 为混凝土弹性模量、剪切模量, $G = 0.425E$; l_b, A_b 为墙板的计算长度、横截面面积; μ 为截面形状剪切系数,矩形截面取 $\mu = 1.2$.

2 块混凝土板与耗能钢板串联而成,由刚度串联可知 MDW 墙板的等效刚度可按式(18)计算:

$$K_{MDW} = \frac{1}{\frac{2}{K_b} + \frac{1}{K_d}}. \quad (18)$$

式中: K_{MDW} 为减震墙板刚度; K_b 为钢筋混凝土墙板刚度; K_d 为耗能钢板刚度.

为了验证理论计算公式的合理性与可靠性,在上节验证模型的基础上,建立了9个MDW的有限元模型,其材料、本构和加载方式与上节一致,墙板厚度为40 mm,耗能钢板在墙板中以2行多列的形式排列,横向之间的间距为300 mm,并将有限元计算结果与理论值进行对比,结果如表2~表4所示.

由表4可知:由式(8)计算的理论与有限元分析结果较为接近,误差在20%以内,基本符合工程初步设计的精度要求.考虑到理论公式计算的屈服位移是钢板外边缘开始屈服时的钢板位移,而有限元计算结果是完全进入弹塑性阶段前的钢板位移,所以有限元分析出的屈服点和理论公式计算出的弹性极限点应存在一个比例系数.由表2和表3可知:当比例系数 α 为1~2时,9组模型的承载力与屈服位移的理论值与有限元分析结果吻合较好.增加耗能钢板的高度、厚度和数量,可以提高MDW的初始刚度和屈服力,墙板尺寸对弹性刚度影响较小.随着混凝土板的高度增加,屈服位移增大,主要是由于混凝土板高度增加,刚度减小,变形增大,从而降低了对耗能钢板的刚度贡献.

表2 屈服力理论计算与模拟结果对比

编号	钢板数量	钢板尺寸高×宽×厚/mm ³	墙板尺寸高×宽/mm ²	模拟结果/kN	理论结果/kN	比例系数
1	6	80×120×3	1 400×1 000	11.98	8.46	1.42
2	8	80×120×3	1 400×1 400	16.01	11.28	1.42
3	10	80×120×3	1 400×1 800	19.93	14.10	1.41
4	6	80×120×3	1 000×1 000	12.44	8.46	1.47
5	8	80×120×3	1 000×1 400	15.01	11.28	1.33
6	10	80×120×3	1 000×1 800	17.88	14.10	1.27
7	6	40×120×3	1 400×1 000	7.47	4.23	1.77
8	6	80×140×3	1 400×1 000	7.51	5.64	1.33
9	6	80×140×4	1 400×1 000	13.41	10.03	1.34

表3 屈服位移理论计算与模拟结果对比

编号	钢板数量	钢板尺寸高×宽×厚/mm ³	墙板尺寸高×宽/mm ²	模拟结果/mm	理论结果/mm	比例系数
1	6	80×120×3	1 400×1 000	0.68	0.58	1.17
2	8	80×120×3	1 400×1 400	0.70	0.49	1.42
3	10	80×120×3	1 400×1 800	0.76	0.45	1.70
4	6	80×120×3	1 000×1 000	0.80	0.45	1.78
5	8	80×120×3	1 000×1 400	0.56	0.40	1.38
6	10	80×120×3	1 000×1 800	0.50	0.39	1.28
7	6	40×120×3	1 400×1 000	0.61	0.42	1.47
8	6	80×140×3	1 400×1 000	1.12	0.90	1.24
9	6	80×140×4	1 400×1 000	0.97	0.88	1.10

表4 刚度理论计算与模拟结果对比

编号	钢板数量	钢板尺寸高×宽×厚/mm ³	墙板尺寸高×宽/mm ²	模拟结果/(kN/mm)	理论结果/(kN/mm)	误差/%
1	6	80×120×3	1 400×1 000	17.71	14.59	17.62
2	8	80×120×3	1 400×1 400	22.99	22.82	0.75
3	10	80×120×3	1 400×1 800	26.35	31.47	19.42
4	6	80×120×3	1 000×1 000	16.88	18.85	11.67
5	8	80×120×3	1 000×1 400	24.01	27.88	16.12
6	10	80×120×3	1 000×1 800	32.41	36.43	12.40
7	6	40×120×3	1 400×1 000	12.19	10.16	16.65
8	6	80×140×3	1 400×1 000	6.69	6.26	16.93
9	6	80×140×4	1 400×1 000	13.87	11.37	6.56

4 结论

1)给出了耗能钢板的性能参数计算公式,可以掌握其基本性能与尺寸构造参数之间的关系,对 MDW 的初步设计具有指导意义,可以通过调整耗能钢板的构造参数和块数来达到预期的性能目标.

2)弹性刚度的理论值与有限元分析结果较为接近,偏差在 20% 以内,基本符合工程初步设计的精度要求,当 α 为 1 ~ 2 时,屈服力和屈服位移的理论值与有限元分析结果吻合较好.

3)增加耗能钢板的高度、厚度和数量,可以提高 MDW 的初始刚度和屈服力,墙板尺寸对弹性刚度影响较小.

参考文献:

- [1] 四川省土木建筑学会建筑工业化专委会.宜宾市 6.17 震后装配式建筑调查报告[R].2019.
- [2] 卢林枫,张涛,孙凯.GRC 填充墙钢框架抗震试验研究[J].建筑结构学报,2010(s1):7-11.
- [3] 金昊贵,李鸿晶,孙广俊.地震作用下钢筋混凝土框架-填充墙相互作用分析[J].地震工程与工程振动,2017,1(4):31-41.
- [4] 王满生,李小午,张宁,等.轻质复合板装配式结构振动台试验研究[J].建筑结构,2017(10):17-21.
- [5] Aref A J, Jung W Y. Energy-Dissipating Polymer Matrix Composite-Infill Wall System for Seismic Retrofitting[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(4):440-448.
- [6] Jung W Y, Aref A J. Analytical and numerical studies of polymer matrix composite sandwich infill panels[J]. Composite Structures, 2005, 68(3):359-370.
- [7] Shuang L, Shan S, Zhai C, et al. Experimental and numerical study on progressive collapse process of RC frames with full-height infill walls[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 59:57-68.
- [8] Shan S, Li S, Xu S, et al. Experimental study on the progressive collapse performance of RC frames with infill walls[J]. Engineering Structures, 2016, 111:80-92.
- [9] 唐伟,胡夏闽,王家骥,等.节能墙板对 RC 框架抗震性能影响的试验研究[J].世界地震工程,2017,33(1):137-143.
- [10] 周云,郭阳照,廖奕发,等.SBS 层阻尼砌体填充墙钢筋混凝土框架结构抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2014(9):21-28.
- [11] 吴从晓,陈彬,李文军,等.一种装配式消能减震填充墙板:CN205557905U[P].2016-09-07.
- [12] 熊晓鹏,吴从晓,李哲明,等.新型消能减震复合墙板性能分析研究[J].低温建筑技术,2017(6):18-22.
- [13] 吴从晓,徐虎,吴从永.一种装配式消能减震填充墙板结构:CN207453187U[P].2018-06-05.
- [14] 熊晓鹏.新型预制装配式消能减震复合墙板抗震性能试验研究[D].广州:广州大学,2017.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.JGJ297-2013 建筑消能减震技术规程[S].2013.