

王培,于中茹.基于有限元的钢管束混凝土短肢剪力墙判定依据[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(2):43-49.  
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.02.007

WANG P, YU J R. Judgment Basis of Short-limb Concrete-filled Steel Tube Shear Wall Based on the Finite Element Method[J].  
Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022,37(2):43-49. doi:10.13582/j.cnki.  
1672-9102.2022.02.007

# 基于有限元的钢管束混凝土短肢剪力墙 判定依据

王培<sup>1,2\*</sup>, 于中茹<sup>3</sup>

(1.青岛理工大学 土木工程学院,山东 青岛 266033;2.青岛理工大学 理学院,山东 青岛 266033;  
3.青岛酒店管理职业技术学院 酒店工程学院,山东 青岛 266100)

**摘要:**近年来,在钢管束混凝土剪力墙的实际设计中,多将其视为普通钢筋混凝土剪力墙,仅以截面高厚比作为判定短肢剪力墙的依据,没有考虑其构造的特殊性.为探究适应其特点的钢管束混凝土短肢剪力墙判定依据,利用 ABAQUS 有限元软件对 20 个钢管束混凝土剪力墙试件的抗震性能进行研究.试验结果表明:钢管束混凝土短肢剪力墙的判定与墙厚、钢板厚度及截面高厚比 3 个因素有关.推导的相关公式可为钢管束混凝土剪力墙结构的实际设计应用提供参考.

**关键词:**钢管束混凝土短肢剪力墙;判定方法;有限元分析;曲线拟合

中图分类号:TU398.9 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2022)02-0043-07

## Judgment Basis of Short-limb Concrete-filled Steel Tube Shear Wall Based on the Finite Element Method

WANG Pei<sup>1,2</sup>, YU Jinru<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;

2. School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;

3. Hotel Engineering Department, Qingdao Vocational and Technical College of Hotel Management, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** In recent years, concrete-filled steel tube shear wall is generally regarded as an ordinary reinforced concrete shear wall in actual design. Whether it is short-limb shear wall is judged only according to its section height-thickness ratio, without considering the particularity of its structure. In order to explore the judgment basis of short-limb concrete-filled steel tube shear wall with its characteristics, 20 specimens of concrete-filled steel tube shear wall are studied by ABAQUS finite element software in terms of their seismic performance. The curve fitting based test shows that the judgment of short-limb concrete-filled steel tube shear wall is related to three factors, i.e. wall thickness, steel plate thickness, and section height-thickness ratio. The derived formulas can provide references for the practical design and application of concrete-filled steel tube shear wall structure.

**Keywords:** short-limbed steel tube bundle composite shear wall; judgment method; finite element analysis; curve fitting

收稿日期:2019-10-30 修改日期:2022-01-05

基金项目:山东省重点研发计划项目资助(2018GSF120004)

\*通信作者,E-mail:463209657@qq.com

随着我国城市建设从粗放型向环境友好型的转变,国内外学者提出多种低能耗、低环境负荷的新型结构并应用于实际工程,取得了较好的环境效益.其中,钢管束剪力墙结构以其装配率高、施工速度快的特点逐渐受到工程建设者的青睐,多位学者对其抗震性能进行了试验研究.Tong 等<sup>[1]</sup>、Li 等<sup>[2]</sup>通过试验证明,相较于普通钢筋混凝土剪力墙,钢管束混凝土剪力墙具有更好的延性和承载能力,其短肢剪力墙的判定依据可适当放松;李文葛<sup>[3]</sup>以截面高厚比为变量设计钢管束短肢剪力墙试件,并对其抗震性能进行了试验研究,结果表明钢管束短肢剪力墙的延性系数在 2.7 左右,小于 3,延性略差,其短肢剪力墙的判定与截面高厚比有关;江志武等<sup>[4]</sup>以截面高厚比为短肢剪力墙的判定依据,将钢管束剪力墙应用于实际工程,探讨了 SATWE 中各项参数的设置并验算了层间位移、侧向刚度等性能指标,试验证实,上述判定依据满足实际工程的需求.

多位学者的研究证明:钢管束剪力墙结构具有良好的抗震性能,满足工程设计及施工<sup>[5]</sup>的要求,并已在全国多地开展试点.但是,在工程设计及试验设计的过程中,研究人员多依据普通混凝土剪力墙结构的相关规范,以剪力墙截面高厚比 4~8 作为评判短肢剪力墙的标准,未考虑钢管束混凝土剪力墙构造的特殊性.因此,参考相关文献,利用 ABAQUS 有限元软件对钢管束短肢剪力墙的判定方法进行研究.

## 1 模型设计

考虑实际工程的经济性,选用 C30 混凝土及 Q235 钢材进行钢管束剪力墙试件的相关设计.参考民用建筑的层高,将试件的墙高设为 3 000 mm.试验以墙厚  $h$ 、钢板厚度  $t$  及截面高厚比  $\beta$  为变量设计试件,以各试件的延性性能作为判定其是否为短肢剪力墙的标准,研究钢管束短肢剪力墙的判定范围与变量之间的关系.试件示意图及试件构造尺寸如图 1 和表 1 所示.

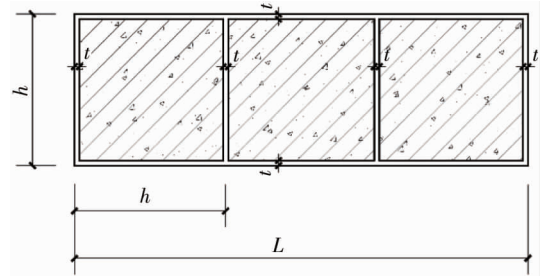


图 1 试件

表 1 试件构造尺寸

试件编号	试件尺寸( $L \times h$ )/mm <sup>2</sup>	钢板厚度 $t$ /mm	$\beta(\beta=L/h)$
GGS120-4-4	480×120	4	4
GGS120-4-5	600×120	4	5
GGS120-4-6	720×120	4	6
GGS120-4-7	840×120	4	7
GGS120-4-8	960×120	4	8
GGS120-6-4	480×120	6	4
GGS120-6-5	600×120	6	5
GGS120-6-6	720×120	6	6
GGS120-6-7	840×120	6	7
GGS120-6-8	960×120	6	8
GGS120-8-4	480×120	8	4
GGS120-8-5	600×120	8	5
GGS120-8-6	720×120	8	6
GGS120-8-7	840×120	8	7
GGS120-8-8	960×120	8	8
GGS130-4-4	520×130	4	4
GGS130-4-5	650×130	4	5
GGS130-4-6	780×130	4	6
GGS130-4-7	910×130	4	7
GGS130-4-8	1040×130	4	8

## 2 有限元参数设置及验证

### 2.1 混凝土本构模型

混凝土采用塑性损伤本构模型<sup>[6]</sup>,弹性模量为 30 000 N/mm<sup>2</sup>,泊松比为 0.2,膨胀角为 37°,偏心率为 0.1,双轴受压与单轴受压混凝土抗压强度之比 $f_{b0}/f_{c0}$ 为 1.167,混凝土拉伸子午线与压缩子午线应力不变量之比  $K$  为 0.666 7,黏性参数为 0.09.

#### 2.1.1 混凝土受压本构模型

为了提高四面约束下混凝土的抗压强度<sup>[7]</sup>,参考文献[8]并依据类似结构的试验数据<sup>[9]</sup>对部分系数进行修正,选用的受压本构模型如式(1)所示.

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & x \leq 1; \\ \frac{x}{\beta_0(x-1)^\eta + x}, & x > 1. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $y = \frac{\sigma}{\sigma_{c0}}$  ( $\sigma$  为混凝土压应力;  $\sigma_{c0}$  为混凝土的极限压应力,  $\sigma_{c0} = f'_c$ ,  $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度);

$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}}$  ( $\varepsilon$  为混凝土压应变;  $\varepsilon_{c0}$  为混凝土的极限压应变,  $\varepsilon_{c0} = \varepsilon_c + 800\xi^{0.2} \times 10^{-6}$ ,  $\varepsilon_c = (1\ 300 + 12.5f'_c) \times$

$10^{-6}$ ,  $\xi = \frac{f_y A_s}{f_{ck} A_c}$ ,  $f_{ck}$ ,  $f_y$  分别为混凝土立方体轴心抗压强度、钢材屈服强度,  $A_c$ ,  $A_s$  分别为混凝土截面面积和

钢材截面面积);  $\beta_0 = \frac{(f'_c)^{0.1}}{1.35\sqrt{1+\xi}}$ ;  $\eta = 1.6 + \frac{1.5}{x}$ .

受压本构模型的示意图如图 2 所示.

#### 2.1.2 混凝土受拉本构模型

由于钢管束提供的侧约束对混凝土抗拉强度的影响有限,因此,采用一种与普通混凝土相近的受拉本构模型<sup>[10]</sup>,其受拉应力-应变关系如式(2)所示.

$$y = \begin{cases} 1.2x - 0.2x^6, & x \leq 1; \\ \frac{x}{0.31\sigma_{t0}^2(x-1)^{1.7} + x}, & x > 1. \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{t0}$  为混凝土的极限拉应力,  $\sigma_{t0} = 0.26 \times (1.25f'_t)^{\frac{2}{3}}$ .

$\varepsilon_{t0}$  为混凝土的极限拉应变,  $\varepsilon_{t0} = 0.1 \times 10^{-5} \sigma_{t0}$ . 受拉本构模型的示意图如图 3 所示.

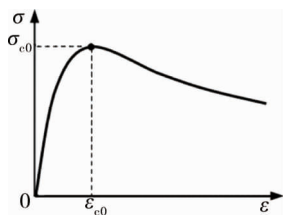


图 2 混凝土受压本构模型

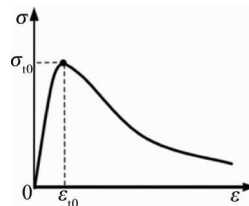


图 3 混凝土受拉本构模型

### 2.2 钢材本构模型

钢材以屈服荷载及屈服位移为控制点,采用“双折线”本构模型,泊松比取 0.3,钢材本构模型如图 4 所示,图 4 中,  $\varepsilon_y$  为钢材屈服应变.

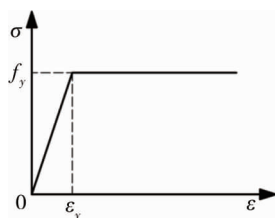


图 4 钢材本构模型

### 2.3 本构模型与试验验证

李文葛<sup>[3]</sup>设计钢管束短肢剪力墙试件 YZQ-2, 利用低周往复抗震试验对其延性性能进行了研究. 试件 YZQ-2 的墙高 2 500 mm, 截面尺寸为 804 mm×130 mm, 截面高厚比为 6.2, 轴压比取 0.5. 低周往复荷载及水平荷载均由液压千斤顶提供. 采用上述材料本构建立试件 YZQ-2 的有限元模型, 并将模拟值与试验值进行对比, 对比曲线如图 5 所示. 由图 5 可知: 模拟值与试验值的骨架曲线相近. 通过几何作图法<sup>[11]</sup>求得的屈服位移、极限位移及延性系数等基本相同, 误差不超过 10% (表 2). 由此证明该本构模型可用于钢管束混凝土剪力墙的有限元分析.

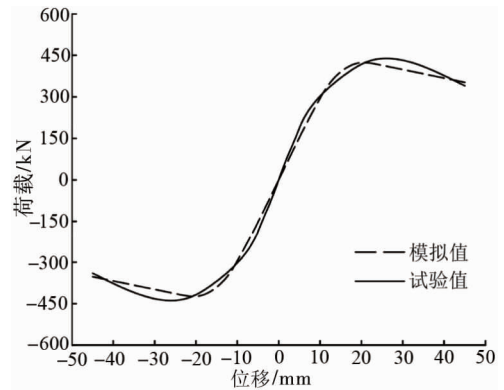


图 5 模拟值与试验值骨架曲线对比

表 2 模拟值与试验值的误差分析

项目	极限荷载/kN	极限位移/mm	屈服位移/mm	延性系数
试验值	439	42.06	15.83	2.66
模拟值	423	42.46	14.64	2.90
误差	4%	1%	8%	9%

### 2.4 接触、边界条件及载荷

钢材与混凝土的接触界面在法向使用“硬”接触, 并允许两界面脱离分离<sup>[12]</sup>; 切向接触用罚函数定义, 将钢材设置为主界面, 摩擦系数取 0.5<sup>[13]</sup>. 由于钢管束剪力墙的延性性能随轴压比的增大而减小<sup>[14]</sup>, 考虑最不利的情况, 轴压比采用规范<sup>[15]</sup>规定的最大轴压比 0.6. 耦合剪力墙顶面施加轴压比控制下的竖向荷载, 剪力墙底面设置为刚接.

### 2.5 加载制度

试验采用位移控制加载. 在层间位移角达到 1/600 (即 5 mm) 之前取级差为 1 mm, 循环 1 次, 随后取级差为 5 mm, 每级荷载循环 3 次<sup>[16]</sup>. 加载制度如图 6 所示.

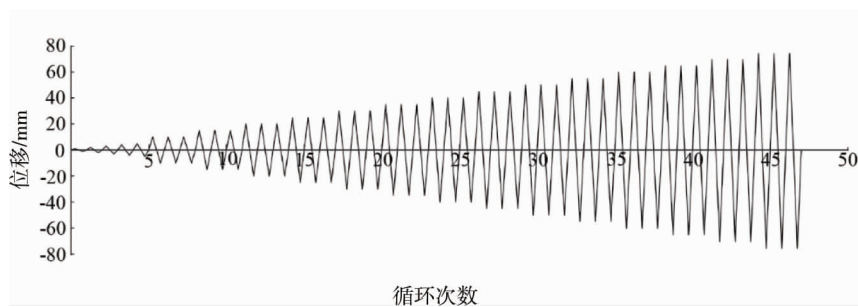


图 6 加载制度

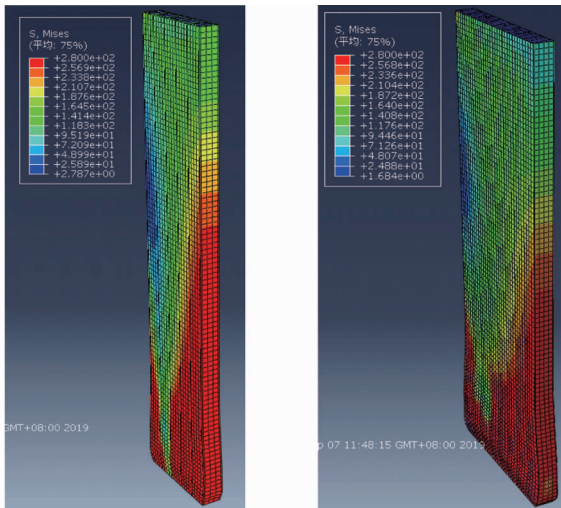
## 3 破坏现象及数据整理

### 3.1 破坏现象

钢管束剪力墙破坏云图如图 7 所示, 钢管束剪力墙抗震试验试件破坏如图 8 所示. 由图 7 和图 8 的数值试验结果可知: 不论是否为短肢剪力墙, 钢管束剪力墙的破坏方式均以“底部钢板屈曲后混凝土被压碎”为主 (见图 7), 与李文葛<sup>[3]</sup>、张晓萌<sup>[17]</sup>的试验结果相同 (见图 8).

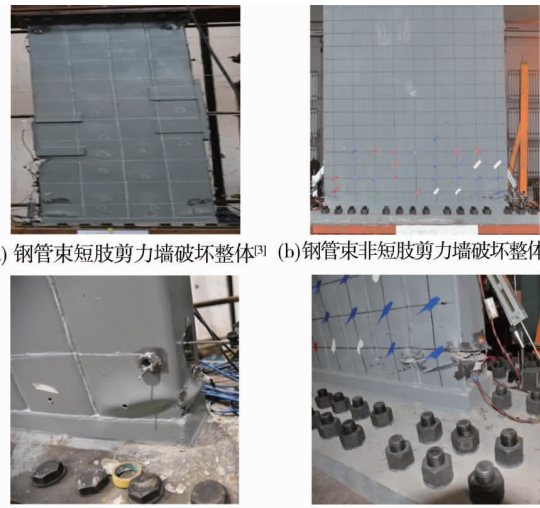
### 3.2 骨架曲线

将滞回曲线中每级循环的极值点相连, 可得各试件的骨架曲线如图 9 所示<sup>[18]</sup>. 依据各试件墙厚及板厚的不同进行归纳整理: 当墙厚为 120 mm, 板厚分别为 4, 6, 8 mm 时, 各试件的骨架曲线随高厚比的变化规律如图 9a、图 9b、图 9c 所示; 当墙厚为 130 mm, 板厚为 4 mm 时, 各试件的骨架曲线随高厚比的变化规律如图 9d 所示.



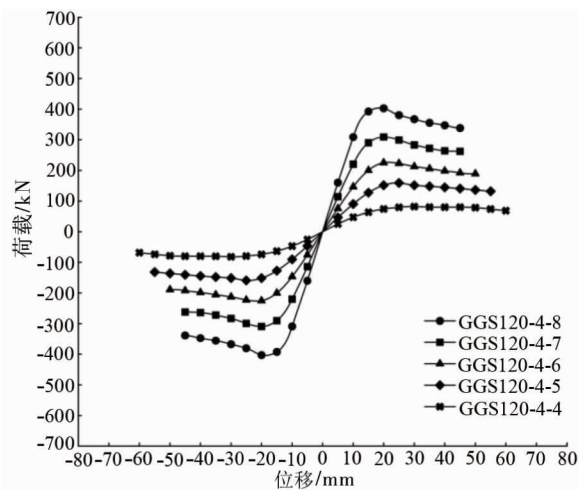
(a) 钢管束短肢剪力墙破坏云图 (b) 钢管束非短肢剪力墙破坏云图

图 7 钢管束剪力墙破坏云图

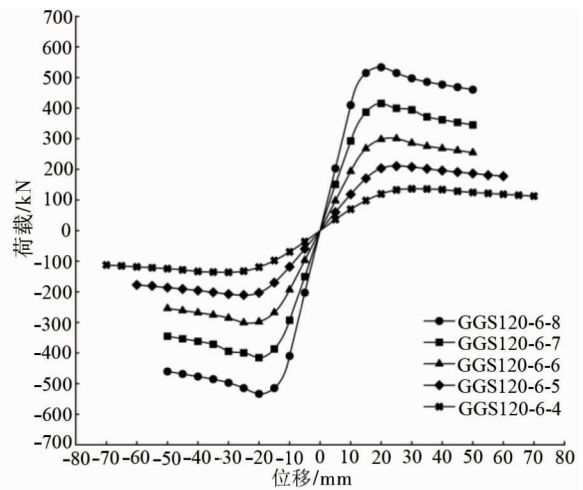


(a) 钢管束短肢剪力墙破坏整体<sup>[3]</sup> (b) 钢管束非短肢剪力墙破坏整体<sup>[17]</sup>  
(c) 钢管束短肢剪力墙破坏局部<sup>[3]</sup> (d) 钢管束非短肢剪力墙破坏局部<sup>[17]</sup>

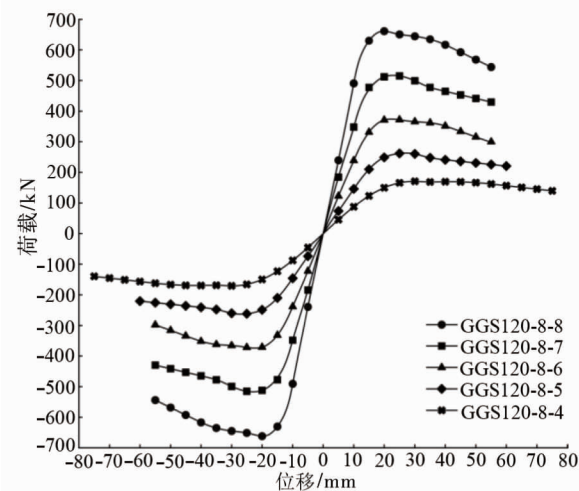
图 8 钢管束剪力墙抗震试验试件破坏



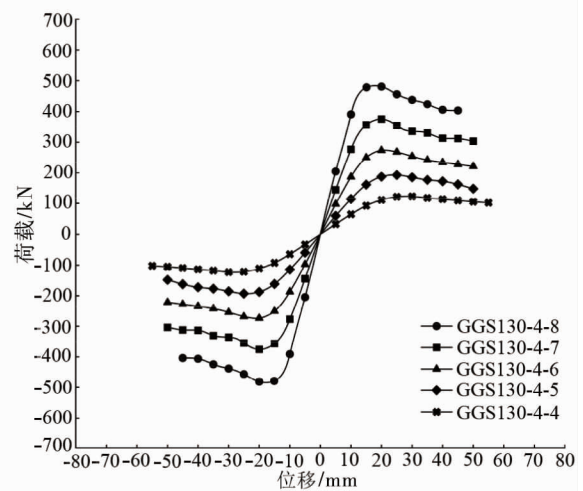
(a) GGS120-4-4~GGS120-4-8骨架曲线



(b) GGS120-6-4~GGS120-6-8骨架曲线



(c) GGS120-8-4~GGS120-8-8骨架曲线



(d) GGS130-4-4~GGS130-4-8骨架曲线

图 9 各试件骨架曲线

### 3.3 延性系数

采用几何作图法<sup>[11]</sup>对各试件的骨架曲线进行分析处理,可得各试件的极限位移  $\Delta_u$  和屈服位移  $\Delta_y$ ,



进而求得各试件的延性系数 $\mu(\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y})$ ,如表3所示.

表3 各试件屈服位移、极限位移及延性系数

试件编号	屈服位移/mm	极限位移/mm	延性系数
GGS120-4-4	18.92	59.20	3.13
GGS120-4-5	18.38	51.04	2.78
GGS120-4-6	15.80	45.00	2.85
GGS120-4-7	14.14	41.68	2.95
GGS120-4-8	13.07	41.81	3.20
GGS120-6-4	20.34	66.86	3.29
GGS120-6-5	18.35	57.20	3.12
GGS120-6-6	15.80	45.64	2.89
GGS120-6-7	14.23	45.27	3.18
GGS120-6-8	14.21	48.39	3.41
GGS120-8-4	21.06	70.18	3.33
GGS120-8-5	18.38	57.92	3.15
GGS120-8-6	15.87	49.43	3.11
GGS120-8-7	14.83	51.16	3.45
GGS120-8-8	13.47	51.22	3.80
GGS130-4-4	20.04	50.78	2.53
GGS130-4-5	17.35	44.27	2.55
GGS130-4-6	14.90	40.95	2.74
GGS130-4-7	13.59	37.68	2.77
GGS130-4-8	12.41	38.12	3.07

由表3可知:当板厚一定时,随着高厚比的增加,试件的延性系数先减小后增加;而当高厚比一定时,随着板厚的增加,试件的延性系数单调递增.若以延性系数 $\mu < 3$ 作为判定试件为短肢剪力墙的标准,可得以下结论:当板厚较小时,与普通混凝土剪力墙相同,可以截面高厚比在4~8作为判定短肢剪力墙的标准;但是随着板厚的增大,钢管束短肢剪力墙高厚比的判定范围会逐渐缩小;当板厚达到一定厚度时,不论截面高厚比如何变化,均不再出现短肢剪力墙.

## 4 理论分析

利用最小二乘法对表3中的试验数据进行三元二次曲线拟合<sup>[19]</sup>,得到各试件延性系数 $\mu$ 与墙厚 $h$ 、钢板厚度 $t$ 及截面高厚比 $\beta$ 之间的关系如式(3)所示.

$$\mu = f(h, t, \beta) = 0.078\beta^2 - 0.858\beta - 0.025h + 0.097t + 7.784, (R^2 = 0.90). \quad (3)$$

求解 $f(h, t, \beta) \geq 3$ , 并进行配方整理得

$$0.078(\beta - 5.5)^2 + 0.097(t - \frac{h}{3.88} + 25) \geq 0. \quad (4)$$

由式(4)可知:当 $t - \frac{h}{3.88} + 25 \geq 0$ 时,等式恒成立,即当钢板厚度 $t > (\frac{h}{3.88} - 25)$ 时,不论高厚比如何变化,试件的延性系数均大于3,不存在短肢墙的问题.在这种情况下,钢管束剪力墙的墙肢长度将不再受到高厚比的限制,布置方式更加灵活.

## 5 结论

1)与普通混凝土剪力墙不同,钢管束混凝土剪力墙的抗震性能不仅与截面高厚比有关,还与钢板厚

度有关.因此,传统的混凝土短肢剪力墙的判定方法不再适用.

2) 钢管束混凝土剪力墙的延性系数  $\mu$  与墙厚  $h$ 、钢板厚度  $t$  及截面高厚比  $\beta$  之间的关系可用式(3)来表示.考虑钢管束混凝土剪力墙在构造上的特殊性,可以将式(3)算得的延性系数是否大于 3 作为判定钢管束混凝土短肢剪力墙的标准.

3) 当钢板厚度  $t > (\frac{h}{3.88} - 25)$  时,钢管束混凝土剪力墙结构中不再出现短肢墙,剪力墙的布置方式更加灵活.

#### 参考文献:

- [1] Tong G S, Hu Z Z, Chen Y. Study on the moment capacity of a connection joining an I-beam to concrete-filled multicellular steel tube walls[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 182: 106643.
- [2] Li H B, Sun H, Zhang W L, et al. Study on Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete and Its Filled in-Line Multi-Cavity Steel Tube Bundle Shear Wall[J]. Energies, 2019, 12(18): 3466.
- [3] 李文葛. 钢管束混凝土短肢墙抗震性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [4] 江志武, 谢优胜, 傅蓉, 等. 高层钢管束混凝土组合结构住宅设计[J]. 建筑结构, 2018, 48(s1): 84-87.
- [5] 刘晓光, 胡立黎, 李庆刚, 等. 钢管混凝土束剪力墙内自密实混凝土浇筑试验研究[J]. 施工技术, 2018, 47(15): 26-28.
- [6] Bhartiya R, Sahoo D R, Verma A. Modified damaged plasticity and variable confinement modelling of rectangular CFT columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 176: 106426.
- [7] 耿国永, 崔双双, 陈伟宏. 用无机胶粘贴 CFRP 布加固损伤 RC 连续梁受弯性能试验[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2017, 32(4): 38-43.
- [8] Han L H, Yao G H, Tao Z. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion[J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(1): 24-36.
- [9] 张鹏, 周新刚, 苗志华, 等. 剪跨比 1.5 的钢管束混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(5): 109-115.
- [10] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元板壳极限分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [11] 张国伟, 张品, 陈博珊, 等. 蒸压加气混凝土板位移延性研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(12): 106-110.
- [12] Zhu J Y, Chen J B, Chan T M. Analytical model for circular high strength concrete filled steel tubes under compression[J]. Engineering Structures, 2021, 244: 112720.
- [13] Jung H S, Bae B I, Choi H K, et al. Experimental and Numerical Study on the Compression Behavior of Square Concrete-Filled Steel Tube Stub Columns with Steel Fiber-Reinforced High-Strength Concrete[J]. International Journal of Polymer Science, 2018(4): 1-13.
- [14] 刘昕旭. 钢管束混凝土组合剪力墙抗震性能影响参数试验及数值模拟分析[D]. 烟台: 烟台大学, 2019.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010[S]. 2010.
- [16] 李健, 罗永峰, 郭小农, 等. 双层钢板组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(11): 1636-1643.
- [17] 张晓萌. 钢管束组合剪力墙抗震性能试验及理论研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [18] 舒兴平, 彭妍, 刘泽龙. 不锈钢芯板梁受弯性能有限元分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2019, 34(1): 36-41.
- [19] 常晓丽, 兰爱玉, 帖利民, 等. 大兴安岭西坡多年冻土地温变化模拟[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(2): 21-27.