超星·期刊

第 25 卷第 2 期　　华 东 交 通 大 学 学 报　　Vol. 25 No. 1
2008 年 4 月　　Journal of East China Jiaotong University　　Apr. ,2008

文章编号: 1005 - 0523(2008)01 - 0016 - 06

短肢剪力墙结构力学性能分析

杨正华,张　敏,李松峰

(华东交通大学 土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要: 在分析整体小开口剪力墙结构、壁式框架结构和联肢剪力墙结构受力特点的基础上,提出了一种合理的短肢剪力墙结构形式,既克服了整体小开口剪力墙结构和传统联肢剪力墙墙肢净距受限的缺点,又克服了壁式框架结构连梁刚度过高的不足,同时短肢剪力墙还具有较佳的弹性力学性能.

关　键　词: 短肢剪力墙; 联肢剪力墙; 壁式框架; 整体小开口剪力墙

中图分类号: TU375　　**文献标识码**: A

钢筋混凝土短肢剪力墙是我国提出的一种新型结构形式,该结构体系布置灵活,结构自重轻,克服了普通框架结构露梁露柱的缺点,满足人们对住宅空间的使用要求,因此,受到了建筑师和用户的广泛欢迎.

我国现行《高层建筑混凝土结构技术规程》规定: 短肢剪力墙是指墙肢截面高度与厚度比(肢高厚比)为 5 ~ 8 的剪力墙,即满足 $5 \leqslant h_w/b_w \leqslant 8$,$h_w$ 为墙肢截面高度,b_w 为墙肢截面厚度.

但是,由于满足上述要求的各种结构形式,其力学性能差异较大,因而造成短肢剪力墙结构设计的混乱. 因此,分析短肢剪力墙结构的力学性能,提出一种力学性能较佳的结构形式,是建筑工程设计中急需解决的课题.

东南大学程文瀼教授从经济与安全的角度出发,提出将短肢剪力墙设计成联肢墙. 并提出用联肢墙的整体性参数 α 和另一个表征墙肢强弱的系数 Z 来界定短肢剪力墙,即 $\alpha < 10$,$I_A/I \leqslant Z$.

结合图 1、图 2,根据《高层建筑混凝土结构技术规程》给出的定义,短肢剪力墙结构有下列三种方案:

(O 为组合截面形心,O_1、O_2 分别为墙肢 1、2 的截面形心,A_1,A_2 分别为墙肢 1、2 的截面面积)

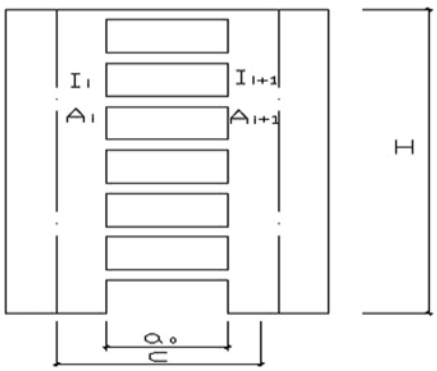

图 1　双肢剪力墙结构图

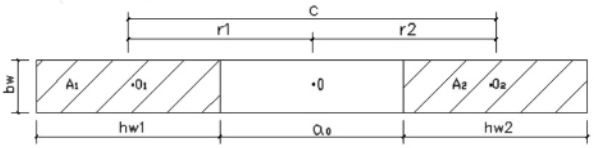

图 2　双肢剪力墙组合截面

(1) 整体小开口墙结构方案: 满足 $5 \leqslant h_w/b_w \leqslant 8$,同时满足

$$\alpha \geqslant 10, \frac{I_A}{I} \leqslant Z$$

其中: $I_A = \sum A_i r_i^2$, $I = I_A + \sum_{i=1}^{k+1} I_i$

式中

α——整体参数

收稿日期: 2007 - 10 - 20

基金项目: 江西省自然科学基金项目(2007GZC0841)

作者简介: 杨正华(1984 -),男,河南周口人,硕士研究生,从事结构设计理论计算.

超星·期刊

Z——表征墙肢强弱的系数

I_i——i 墙肢截面惯性矩

这种结构，整体墙受力如同竖向悬臂，当剪力墙墙肢较长时，在水平荷载作用下，截面正应力呈线性分布，破坏形态似偏心受压柱，大部分楼层中没有反弯点.

(2) 壁式框架结构方案：满足 $5 \leqslant h_w/b_w \leqslant 8$，同时满足

$$\alpha \geqslant 10,\quad \frac{I_A}{I} > Z$$

这种结构连梁刚度比较大，对墙肢的约束作用显著，结构整体性强，墙肢在水平荷载作用下，多数楼层出现反弯点，墙肢最大弯矩较联肢剪力墙结构小得多，剪力墙内力分布接近框架，但由于各构件截面高度相对较大，其剪切变形影响不应忽略，并且应考虑梁柱交接区刚域的影响.

(3) 联肢剪力墙结构方案：满足 $5 \leqslant h_w/b_w \leqslant 8$，同时满足

$$\alpha < 10,\quad \frac{I_A}{I} \leqslant Z$$

这种结构，连梁对墙肢的约束作用不强，结构整体性较整体小开口剪力墙和壁式框架弱，各墙肢弯曲作用较为显著，墙体的变形基本呈弯曲型，大多数楼层未出现反弯点，但侧向荷载作用下墙肢弯矩较大.

1　公式推导

推导连梁高度的取值范围如下：

$$\alpha^2 = \frac{6H^2}{Th\sum_{i=1}^{n+1} I_i}\sum_{i=1}^{n} D_i,$$

其中：

$$D_i = \frac{2c_i^2 \tilde{I}_{bi}}{a_i^3}$$

$$T = \frac{I_A}{I}$$

假设各连梁采用相同的跨高比，可得

$$\frac{\tilde{I}_{bi}}{a_i^3} = \frac{\alpha^2 T\sum_{i=1}^{n+1} I_i}{12HN\sum_{i=1}^{n} C_i^2}$$

式中　N——结构总层数

n——结构总跨数

$n+1$——墙肢总数

a_i——墙肢间净距

h——结构层高

C_i——墙肢间形心间距

H——墙肢总高

T——肢距系数

考虑连梁剪切变形的影响，则

$$\tilde{I}_{bi} = \frac{I_{bi}}{1 + 2.8\left(\frac{h_{bi}}{a_i}\right)^2}$$

根据以上公式得

$$\frac{h_{bi}}{a_i} = \delta\left(\frac{\alpha^2 A(1-T)\sum_{i=1}^{n+1}(\mu_i \cdot \beta_i^2)}{12HN\psi \cdot b_w\sum_{i=1}^{n}\lambda_i^2}\right)^{1/3}$$

其中

$$\delta = \left(1 + 2.8\left(\frac{h_{bi}}{a_i}\right)^2\right)^{1/3}$$

$$\gamma_i = \frac{D_i}{\sum_{i=1}^{n} D_i},\mu_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^{n+1} A_i},\lambda_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^{n} r_i},\beta_i = \frac{l_{ti}}{\sum_{i=1}^{n+1} l_{ti}}$$

$$\psi = \frac{1}{12}\sum_{i=1}^{n+1}(\mu_i\beta_i^2)\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{\gamma_i\eta_i}{\lambda_i^2}\left[\frac{1}{\mu_i}\left(1 - \frac{\eta_{i-1}}{\eta_i}\cdot\frac{\lambda_i}{\lambda_{i-1}}\right) + \frac{1}{\mu_{i+1}}\left(1 - \frac{\eta_{i-1}}{\eta_i}\cdot\frac{\lambda_i}{\lambda_{i+1}}\right)\right]\right\}$$

$$A = \sum_{i=1}^{n+1} A_i$$

式中　δ——连梁剪切变形影响系数

A——短肢剪力墙各墙肢的总截面面积

h_{bi}——i 墙肢连梁高

b_w——墙肢截面厚度

(1) 整体小开口墙结构方案

根据 $\alpha \geqslant 10$，可得

$$\frac{h_{bi}}{a_i} \geqslant 2.03\delta \cdot \left[\frac{A(1-T)\sum_{i=1}^{n+1}(\mu_i \cdot \beta_i^2)}{HN\psi \cdot b_w\sum_{i=1}^{n}\lambda_i^2}\right]^{1/3} \quad (1)$$

同时满足：$T \leqslant Z$

作为实用方法，考虑各墙肢均匀分布，取

$$\mu_i = \beta_i = \frac{1}{n+1},\lambda_i = \frac{1}{n},$$

$$\psi = \frac{n}{12(n+1)}(\eta_1 + \eta_n)$$，可得：

$$\frac{h_{bi}}{a_i} = \delta \cdot \left[\frac{\alpha^2 A(1-T)}{HN(\eta_1 + \eta_n)(n+1) \cdot b_w}\right]^{1/3}$$

近似取 $\eta_1 = \frac{D_1\psi_1}{\sum_{i=1}^{n} D_i\psi_i} = \frac{1}{n},\eta_n = \frac{D_n\psi_n}{\sum_{i=1}^{n} D_i\psi_i} = \frac{1}{n}$

作为估算，可考虑墙肢厚 $b_w = 0.2$ m，层高 $h = 3$ m，取 $\alpha \geqslant 10$，得

$$\frac{h_{bi}}{a_i} \geqslant 4.368\delta\sqrt[3]{\frac{A(1-T)}{N^2} \cdot \frac{n}{n+1}} \quad (2)$$

超星·期刊

同时满足: $T \leqslant Z$

A 的单位取为 m^2,故对于给定 A、T,N、n、a_i 可以确定连梁高度 h_b 的取值范围.

(2) 壁式框架结构方案

根据 $\alpha \geqslant 10$,可得

$$\frac{h_{bi}}{a_i} \geqslant 2.03\delta \cdot \left[\frac{A(1-T)\sum_{i=1}^{n+1}(\mu_i \beta_i^2)}{HN\psi b_w \sum_{i=1}^{n} \lambda_i^2} \right]^{\frac{1}{3}} \tag{3}$$

同时满足: $T > Z$

作为估算,可考虑墙肢厚 $b_w = 0.2$ m,层高 $h = 3$ m,取 $\alpha \geqslant 10$,得

$$\frac{h_{bi}}{a_i} \geqslant 4.368\delta \sqrt[3]{\frac{A(1-T)}{N^2} \cdot \frac{n}{n+1}} \tag{4}$$

同时满足: $T > Z$

A 的单位取为 m^2,故对于给定 A、T,N、n、a_i 可以确定连梁高度 h_b 的取值范围.

(3) 联肢墙结构方案

根据 $\alpha < 10$,可得

$$\frac{h_{bi}}{a_i} < 2.03\delta \cdot \left[\frac{A(1-T)\sum_{i=1}^{n+1}(\mu_i \beta_i^2)}{HN\psi b_w \sum_{i=1}^{n} \lambda_i^2} \right]^{\frac{1}{3}} \tag{5}$$

同时满足: $T \leqslant Z$

作为估算,可考虑墙肢厚 $b_w = 0.2$ m,层高 $h = 3$ m,取 $\alpha < 10$,得

$$\frac{h_{bi}}{a_i} < 4.368\delta \sqrt[3]{\frac{A(1-T)}{N^2} \cdot \frac{n}{n+1}} \tag{6}$$

同时满足: $T \leqslant Z$

A 的单位取为 m^2,故对于给定 A、T,N、n、a_i 可以确定连梁高度 h_b 的取值范围.

2 采用 MATLAB 软件对上述三种结构进行受力性能分析

如图 3 所示倒三角荷载作用下的 12 层剪力墙结构,荷载顶部 $q = 1\ 000$ N/m,取墙肢截面,$b_w \times h_w = 200$ mm $\times$ 1 200 mm,层高 $h = 3\ 000$ mm,连梁截面宽度 $b = 200$ mm,混凝土强度等级为 C30.

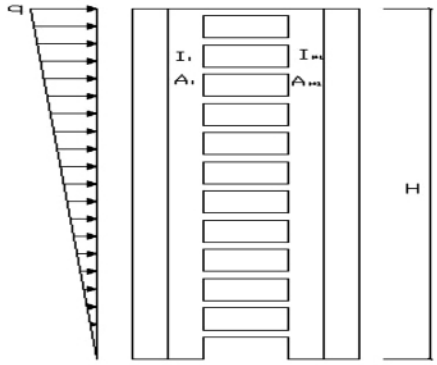

图 3 剪力墙结构受力图

参考文献[1~3],通过控制取 $\alpha = 4$、6、12、14,分析相同整体参数下,结构的弯矩、侧移和剪跨比随墙肢系数 T 的变化规律如下.

(1) 整体小开口剪力墙结构方案

单肢墙弯矩沿墙高度分布如图 4 所示,楼层侧移沿墙高度分布如图 5 所示.

由图 4、图 5 可见,①当 α 不变时,墙肢弯矩随 T 增大而减小. ②当 α 不变时,楼层侧移随 T 增大而减小. ③由计算可知,各楼层基本不出现反弯点,其剪跨比 $\lambda = M/Vh_{w0} > 2$,不形成矮墙.

(2) 壁式框架结构方案

单肢墙弯矩沿墙高度分布如图 6 所示,楼层侧移沿墙高度分布如图 7 所示.

由图 6、图 7 可见,①当 α 不变时,墙肢弯矩随 T 增大而减小. ②当 α 不变时,楼层侧移随 T 增大而减小. ③由计算可知,几乎每个楼层均出现反弯点,其剪跨比 $\lambda = M/Vh_{w0} \leqslant 2$,形成矮墙.

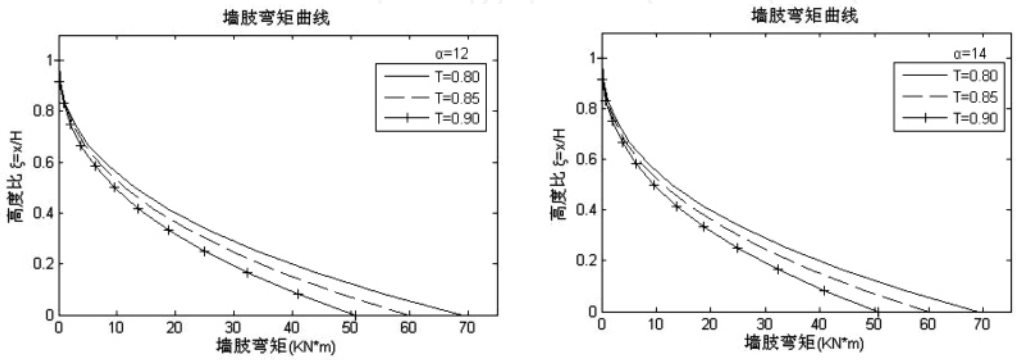

图 4 整体小开口单肢墙肢弯距分布图

超星·期刊

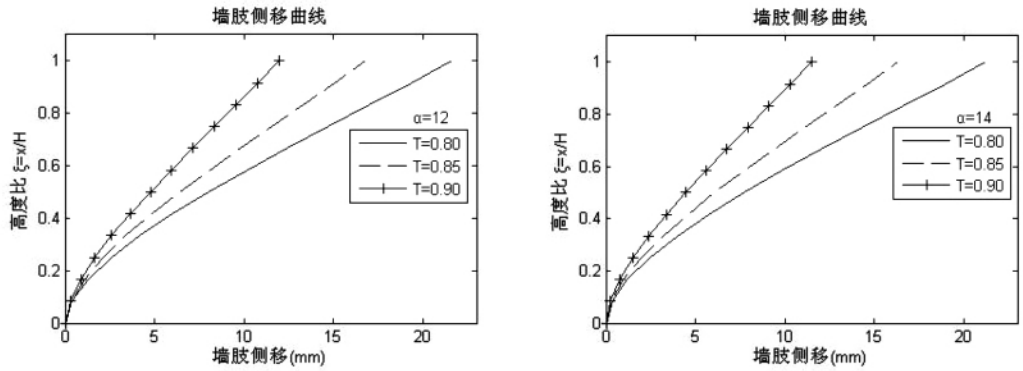

图 5　整体小开口墙楼层侧移分布图

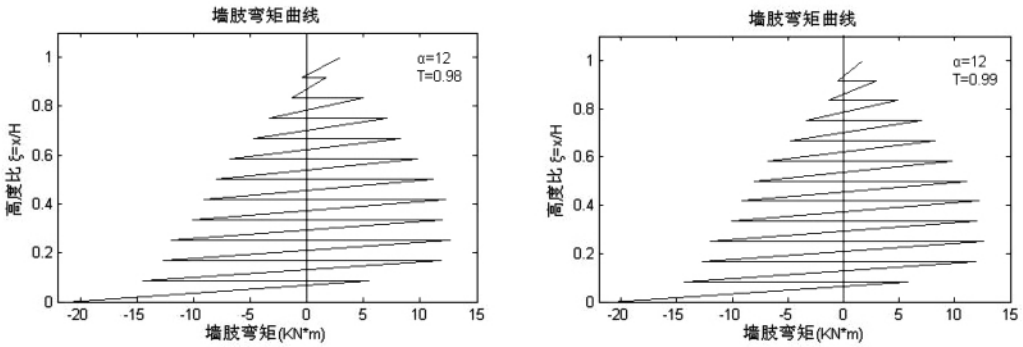

图 6　壁式框架结构单肢墙肢弯距分布图

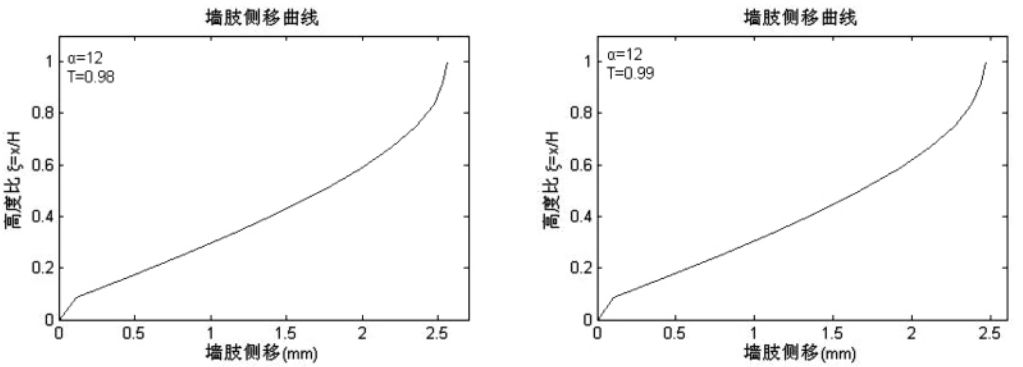

图 7　壁式框架结构楼层侧移分布图

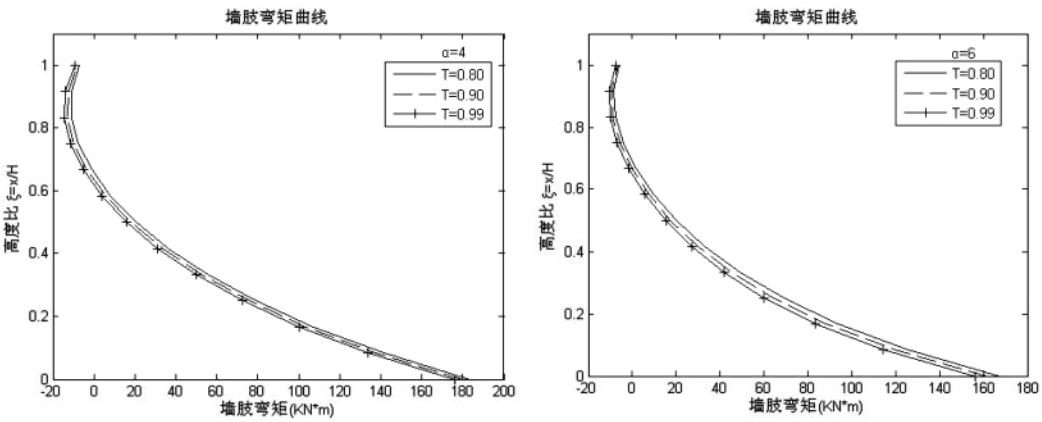

图 8　联肢剪力墙结构单肢墙肢弯距分布图

超星·期刊

(3) 联肢剪力墙结构方案

单肢墙弯矩沿墙高度分布如图 8 所示,单肢墙轴力沿墙高度分布如图 9 所示,楼层侧移沿墙高度分布如图 10 所示.

由图 8、图 9、图 10 可见,①当 α 不变时,墙肢弯矩随 T 增大而减小. ②当 α 不变时,楼层侧移随 T 增大而减小. ③当 α 不变时,墙肢轴力随 T 增大而减小.

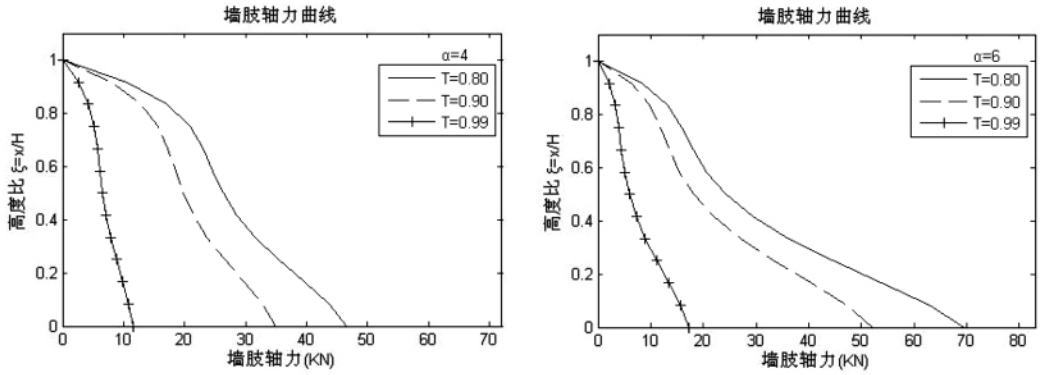

图 9 联肢剪力墙结构单肢墙肢轴力分布图

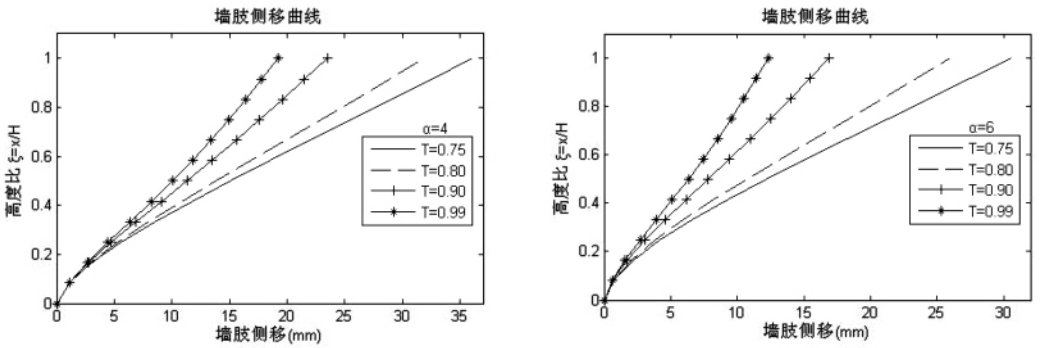

图 10 联肢剪力墙结构楼层侧移分布图

分析单肢墙肢沿高度方向上的剪力,随 T 的变化规律如下:

由联肢剪力墙墙肢剪力计算公式 $V_{\varepsilon i} = V_{P\varepsilon} \cdot \tilde{I}_i / \sum_{i=1}^{n+1} \tilde{I}_i$ 可知,各层墙肢剪力与 $V_{P\varepsilon}$ 有关,而 $V_{P\varepsilon}$ 与墙肢系数 T 无关,因此 T 对联肢剪力墙墙肢剪力无影响.

$\tilde{I}_i$——i 墙肢的折算惯性矩

$V_{\varepsilon i}$——x 截面处 i 墙肢剪力

$V_{P\varepsilon}$——外荷载对 x 截面处总剪力

分析剪跨比 $\lambda = M/V \cdot h_{w0}$,$h_{w0}$ 为墙肢截面有效高度,λ 沿墙肢高度分布如图 11 所示

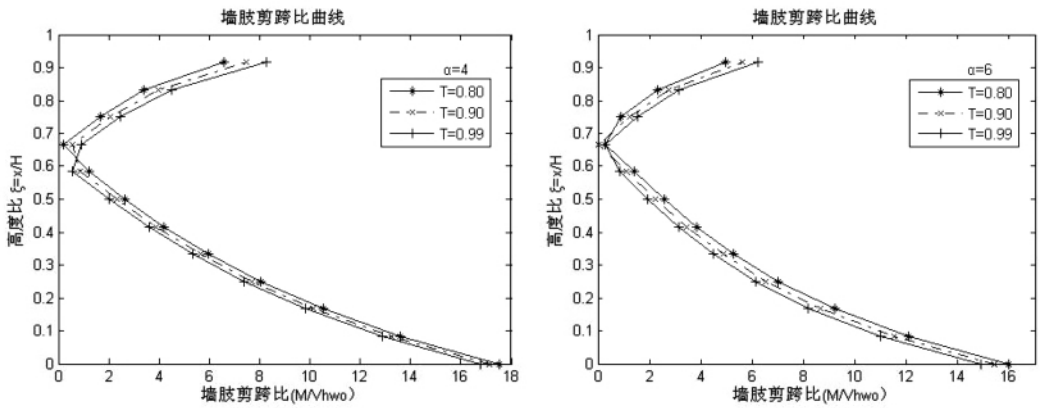

图 11 联肢剪力墙结构楼层剪跨比分布图

超星·期刊

由图 11 可见,受剪力较大的墙肢中下部,各楼层剪跨比随 T 增大而稍有减小,而在受剪力较小的中上部,各楼层剪跨比随 T 增大而稍有增大,但是 $\lambda \leqslant 2$ 的楼层数受 T 的影响不大,一般为 3 ~ 4 层.

3　结论

通过对三种结构力学性能的分析,得到如下结论:

(1) 在同一的整体参数 α 下,三种结构体系在水平荷载作用下弯矩、轴力和侧移随墙肢系数 T 的增大而减小.

(2) 整体小开口剪力墙结构方案与联肢剪力墙结构方案相比,在水平荷载作用下,弯矩和侧移明显减小. 整体小开口剪力墙各楼层剪跨比一般大于 2,不形成矮墙,但受 $\alpha \geqslant 10$,$T \leqslant Z$ 的限制,导致墙肢间净距较小,较难满足使用要求.

(3) 壁式框架结构方案与联肢剪力墙结构方案相比,在水平荷载作用下,弯矩和侧移明显减小,墙肢间的净距可灵活控制,但较多楼层出现反弯点,剪跨比一般小于 2,形成矮墙,同时,连梁高度一般较高,较难满足使用要求.

(4) 联肢剪力墙结构方案,在水平荷载作用下,虽然墙肢弯矩和水平侧移与上两种结构相比有所增加,但与整体小开口剪力墙相比,墙肢间净距增加,与壁式框架结构相比,连梁截面高度降低很多. 传统联肢剪力墙结构一般控制 $\alpha < 10$、$T \leqslant Z$,当 α 不变时,由于要满足 $T \leqslant Z$ 的条件,导致了墙肢净距受限制.

对于肢高厚比为 5 ~ 8 的联肢剪力墙,由上述分析可见,随 T 的增大,其墙肢截面弯矩、轴力和侧移均减小,并且,剪跨比 $\lambda \leqslant 2$ 的楼层数受 T 的影响不大,但在剪力墙较大的中下部墙肢,楼层剪跨比随 T 增大而稍有减小,若能采取措施充分保证墙肢具有足够延性的条件下,在该短肢剪力墙结构中,仅控制 $\alpha < 10$,取消 $T \leqslant Z$ 的条件,对结构力学性能是有利的.

综上所述,笔者认为,在采取措施充分保证墙肢具有足够延性的条件下,将短肢剪力墙设计成 $5 \leqslant h_w/b_w \leqslant 8$,同时,$\alpha < 10$ 的结构体系,既克服了整体小开口剪力墙结构和传统联肢剪力墙中墙肢净距受限制的毛病,又克服了壁式框架结构体系中,连梁截面过大的缺点,并且适当增大 T,有助于减小结构在水平荷载作用下的弯矩、轴力和侧移,因此,其弹性受力性能较为合理.

但该结构有些楼层剪跨比 $M/V \cdot h_{w0} \leqslant 2$,形成矮墙,并且 T 增大时,中下部楼层剪跨比稍有减小,这在一定程度上影响了结构延性. 如何采取措施提高该短肢剪力墙结构的延性性能,是保证其抗震性能优劣的关键,这是下一步研究应重点解决的问题.

参考文献:

[1] 包世华,张铜生. 高层建筑结构设计和计算(上) [M]. 北京: 清华大学大学出版,2005.

[2] 黄东生. 剪力墙结构分析与计算 [M]. 北京: 中国水利水电出版社,2006.

[3] 方鄂华,钱稼茹,叶列平. 高层建筑结构设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2003.

Analysis of Mechanics Property of Short – pier Shearing Wall Structure

YANG Zheng – hua, ZHANG Min, LI Song – feng

(School of Civil Engineering and Architecture East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: According to the property of small – open monolithic shearing wall structure, wall – frame structure and coupled shearing wall structure, a new type of short – pier shearing wall has been advanced rationally, which overcomes the weakness of the limited clear distance between various wall limbs in small – open monolithic shearing wall structures and traditional coupled shearing wall structures, and conquers the shortcoming of much higher coupling beams in wall – structures. Besides, the short – pier shearing wall structures have very good elastic mechanics characteristic.

Key words: short – pier shearing wall; coupled shearing wall; wall – frame; small – open monolithic shearing wall

(责任编辑: 王全金)