

[文章编号] 1002-8528(2008)09-0106-05

对《矩形钢管混凝土技术规程》 (CECS159:2004) 有关问题的探讨

黄用军, 尧国皇, 谭伟, 孙素文 (中建国际(深圳)设计顾问有限公司, 广东 深圳 518033)

[摘要] 针对《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS159:2004) 有关问题, 如矩形钢管混凝土截面高宽比限值、轴压强度和抗剪强度的计算方法、钢管的焊接规定和混凝土工作承担系数限值规定, 进行了探讨, 提出了一些合理的建议。本文的研究成果可供有关专家在修订《矩形钢管混凝土结构技术规程》时参考。

[关键词] 矩形钢管混凝土; 规程; 有限元法; 探讨

[中图分类号] TU398; TU202 [文献标识码] A

Discussion on Some Issues of Technical Specification for Structures with Concrete-Filled Rectangular Steel Tube Members (CECS159:2004)

HUANG Yong-jun, YAO Guo-huang, TAN Wei, SUN Su-wen

(China Construction (Shenzhen) Design International, Shenzhen 518033, Guangdong, China)

[Abstract] Aimed at some issues of Technical specification for structures with concrete-filled rectangular steel tube members (CECS159:2004), such as limitation of height-to-width ratio, calculation method of axial-compression strength and shearing capacity of concrete filled steel tube with rectangular sections, specification for steel tube welding and limitation of working coefficients of concrete, the relevant specifications are discussed in this paper, and some rational proposals are presented. The research in this paper may be referred for relative researchers when modifying Technical specification for structures with concrete-filled rectangular steel tube members.

[Keywords] concrete filled steel tube with rectangular sections; specification; finite element method; discussion

1 前言

矩形钢管对核心混凝土的约束效果不如圆钢管显著, 但仍有很好的效果, 可以提高构件的延性, 而且矩形钢管混凝土具较好的抗弯能力和抗扭能力, 与圆钢管混凝土相比, 矩形钢管混凝土构件连接构造简单, 与墙体连接方便, 建筑室内便于使用, 并容易采用价格便宜的平板式防火板材, 因此矩形钢管混凝土在工程实践中的应用也越来越广泛。

2004 年由中国工程建设标准化协会颁布的《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS159:2004)^[1] (以下简称《规程》) 对促进矩形钢管混凝土在工程实践中的应用起到了积极的作用。笔者从事建筑结构设计多年, 也曾设计过矩形钢管混凝土结构的高层建

筑, 在应用 CECS159:2004 规程中, 发现一些问题值得商榷, 本文的有关结论可供有关专家在修订《规程》时参考。

2 截面高宽比限值探讨

《规程》4.4.1 条规定: 矩形钢管混凝土构件的高宽比不宜大于 2。本文基于现有的矩形钢管混凝土轴压短柱的实验数据, 研究矩形截面钢管混凝土截面长短边之比 (D/B) 对矩形钢管混凝土中钢管对核心混凝土约束效果的影响。图 1 给出了矩形钢管混凝土轴压短试件中承载力提高系数 $k-D/B$ 关系, $k = N_{ue}/N_w$, 其中 N_{ue} 为轴压强度实验值, N_w 为钢管和混凝土轴压强度的简单叠加。

从图 1 可见, 矩形钢管混凝土承载力提高系数 k 随截面高宽比 (D/B) 的增大而减小, 在现有的实验数据参数范围内, D/B 从 1 变化到 2, k 值大约下降了 10%, 即, k 比 1 大的部分 (提高作用) 就下降了

[收稿日期] 2007-10-31

[作者简介] 黄用军 (1962-) 男, 硕士, 高级工程师

[联系方式] huang.yongjun@ccdi.com.cn

约 50 % ,因此,随着 D/B 的增加,矩形钢管和核心混凝土之间相互作用,随之减弱。当实际工程中采用的矩形截面钢管混凝土截面长短边之比较大时,需采用保证钢管和混凝土之间相互作用的措施,如约束拉杆等。

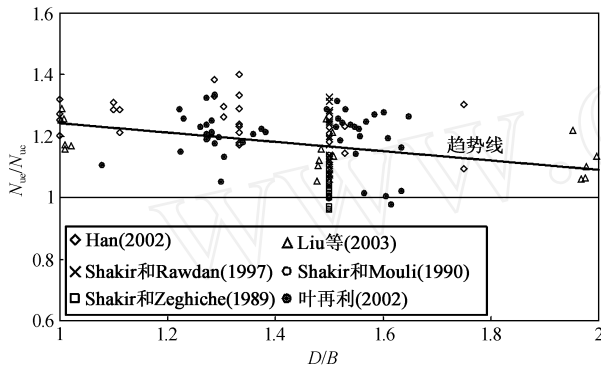


图 1 矩形钢管混凝土 $N_{uc}/N_{ue} \sim D/B$ 关系

3 构件承载力计算方法

3.1 轴压强度承载力

CECS159:2004《规程》中给出了矩形钢管混凝土轴心受压截面承载力的计算公式如下:

$$N_u = f A_s + f_c A_c \quad (1)$$

式中, f 为钢管钢材屈服强度设计值, f_c 为混凝土抗压强度设计值, A_s 为钢管截面面积, A_c 为混凝土截面面积。

从式(1)可见,《规程》采用了钢管强度和核心混凝土强度简单叠加的方式来计算矩形钢管混凝土的轴压强度承载力,《规程》中表 E6.1.1 中给出了式(1)计算值与 91 个试验值的比较结果,所有计算值与试验值比值的平均值为 0.8966,方差为 0.0095。为了进一步研究式(1)在计算矩形钢管混凝土轴压强度的准确性,笔者将公式计算值与收集到的 295 个方、矩形钢管混凝土轴压实验结构进行了比较,比较结果见表 1。计算时,钢材和混凝土强度指标均取为标准值。

表 1 矩形钢管混凝土轴压强度承载力计算值与实验值的比较

序号	$D(B)/t$	f_y (MPa)	f_{cu} (MPa)	试件 数量	有限元法			数据来源
					N_{uc}/N_{ue}	μ	COV	
1	15 ~ 24	300 ~ 439	47.6 ~ 113	13	0.805 ~ 0.969	0.888	0.050	Cederwall 等(1997) ^[2]
2	20.5 ~ 36.5	321.1 ~ 330.1	16.3 ~ 54.1	20	0.802 ~ 0.967	0.917	0.043	Han 等(2001) ^[3]
3	21.1 ~ 52.4	222.6 ~ 227.7	59.3	24	0.714 ~ 0.913	0.796	0.047	Han(2002) ^[4]
4	21 ~ 55.6	316.5 ~ 767.3	32.8 ~ 92.4	26	0.769 ~ 1.095	0.915	0.084	Kato(1996) ^[5]
5	10.5 ~ 24.4	289 ~ 400	30.8 ~ 98.9	10	0.839 ~ 1.199	0.975	0.099	Lam 和 Williams(2004) ^[6]
6	18.4 ~ 74	262 ~ 835	27.3 ~ 95.6	48	0.762 ~ 1.065	0.942	0.065	Nishiyama 等(2002) ^[7]
7	34.9 ~ 75	294 ~ 341	22.9 ~ 44.3	9	0.873 ~ 0.948	0.903	0.028	Tomii 等(1977) ^[8]
8	23.5 ~ 45.5	194 ~ 339.1	37.4 ~ 57.5	8	0.828 ~ 0.922	0.887	0.037	Tomii 和 Sakino(1979) ^[9]
9	45.8 ~ 49.2	300 ~ 395	30.4 ~ 70.5	9	0.724 ~ 0.950	0.843	0.083	Yamamoto 等(2002) ^[10]
10	40 ~ 60	227	32.65 ~ 46	6	0.694 ~ 0.876	0.788	0.065	余勇等(2000) ^[11]
11	20 ~ 50	284.5 ~ 403.7	40.45	20	0.587 ~ 0.924	0.741	0.091	张素梅和周明(1999) ^[12]
12	30 ~ 133.7	282 ~ 404	50.9 ~ 81	24	0.792 ~ 0.982	0.887	0.049	尧国皇(2006) ^[13]
13	42 ~ 102	300	38.9 ~ 59.1	8	0.847 ~ 0.970	0.899	0.050	Uy(2000) ^[14]
14	22 ~ 42	750	34.4 ~ 38.9	6	0.983 ~ 1.182	1.041	0.085	Uy(2001) ^[15]
15	24 ~ 48	550	70.8 ~ 82.1	21	0.775 ~ 0.948	0.862	0.053	Liu 等(2003) ^[16]
16	30	330.8 ~ 368	42.9 ~ 45.9	23	0.753 ~ 0.943	0.851	0.060	Shakir 和 Rawdan(1997) ^[17]
17	24 ~ 30	340 ~ 362.5	39.5 ~ 44.8	13	0.877 ~ 1.002	0.954	0.049	Shakir 和 Mbuli(1990) ^[18]
18	24	343.3 ~ 386.3	38 ~ 42.8	7	0.959 ~ 1.040	0.993	0.029	Shakir 和 Zeghiche(1989) ^[19]
19	24.4 ~ 81.9	255.1 ~ 347.3	71.8 ~ 90	44	0.750 ~ 1.023	0.837	0.064	叶再利(2002) ^[20]
总计	10.5 ~ 133.7	194 ~ 750	16.3 ~ 98.9	339	0.587 ~ 1.199	0.881	0.095	—

表 1 中 $D(B)/t$ 为方、矩形钢管混凝土截面宽厚比, f_y 为钢管屈服强度标准值, f_{cu} 为混凝土立方抗压强度标准值, N_{uc} 为规程计算值, N_{ue} 为实验值, μ 和 COV 分别为计算值与实验值比值的平均值和

均方差,所有比值的平均值和均方差分别为 0.887 和 0.091,即计算值比实验值低 12 % 左右,因此,笔者建议矩形钢管混凝土轴压强度计算公式中可适当考虑钢管对混凝土的约束作用,这样也更能体现矩

形钢管混凝土的经济效益。

表 1 中的比较没有区分普通钢材和高强钢材(目前,国内外对高强钢材还没有很明确的定义,暂定义钢材屈服强度不小于 450MPa 的钢材为高强钢材^[21]),为了更好的了解《规程》在计算采用普通强度和高强度钢材的矩形钢管混凝土轴压强度的准确程度,图 2 分别给出了普通钢材和高强钢材的比较结果,其中采用普通强度钢材的试件数量为 271 个,采用高强钢材的试件数量为 68 个。

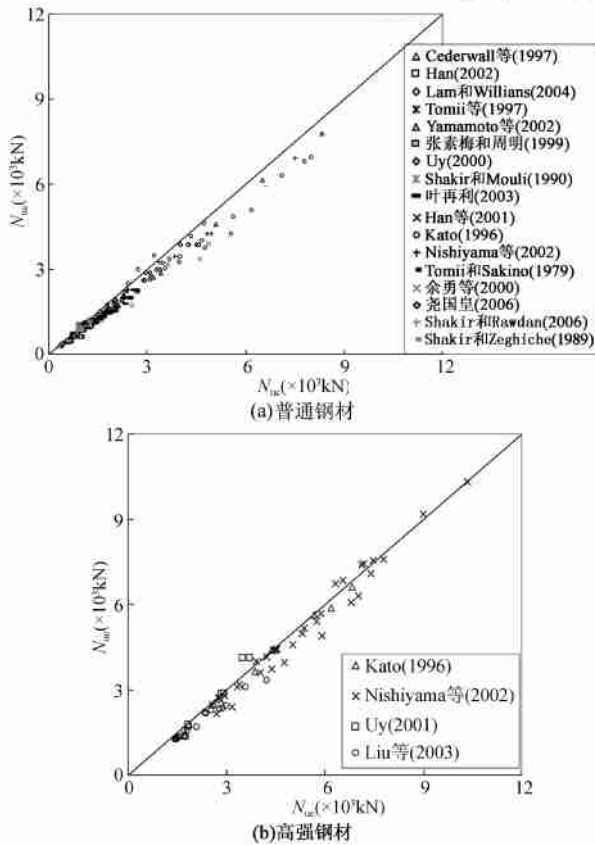


图 2 矩形钢管混凝土轴压强度承载力计算值与实验值的比较

计算结果表明,对于普通强度钢材的试件,所有计算值与实验值比值的平均值和均方差分别为 0.874 和 0.089;对于高强钢材的试件,所有计算值与实验值比值的平均值和均方差分别为 0.933 和 0.083,可见,《规程》对于高强钢材的试件具有较好的适用性,但由于其实验数据较少,因此需要更进一步的实验验证。

3.2 抗剪承载力

《规程》给出了矩形钢管混凝土的抗剪承载力计

算公式如下:

$$V_x = 2t(b - 2t)f_v \tag{2a}$$

$$V_y = 2t(h - 2t)f_v \tag{2b}$$

式中, V_x 和 V_y 分别为矩形钢管混凝土柱中沿主轴 X 轴、主轴 Y 轴的最大剪力设计值, b 和 h 分别为矩形钢管沿主轴 X 轴和主轴 Y 轴方向的边长, f_v 为钢材的抗剪强度设计值。由上式可见,《规程》在计算矩形钢管混凝土抗剪强度时忽略了核心混凝土的抗剪作用。

韩林海(2007)^[22]在选取了合理的钢材和混凝土的本构关系模型的基础上,采用大型通用有限元软件对钢管混凝土受剪时的荷载-变形关系曲线进行了计算,计算结果得到了有关实验结果的验证,在此基础上,通过参数分析,韩林海提出了方钢管混凝土的抗剪强度的计算公式如下:

$$V_u = v A_{sc} s_{cy} \tag{3}$$

式中, v 为抗剪承载力计算系数,按下式计算:

$$v = 0.9537 + 0.1615 \ln(\) \tag{4}$$

式(3)的适用参数范围为:C30-C90 混凝土, Q235-Q420 钢材,含钢率 = 0.05 - 0.2。

图 3 给出了式(2)和式(3)计算矩形钢管混凝土的抗剪承载力的比较情况。

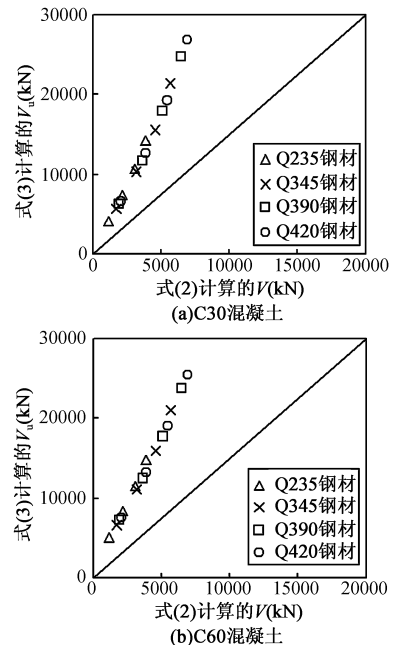


图 3 矩形钢管混凝土抗剪强度计算结果的比较

典型算例的计算条件为:矩形钢管混凝土 $D = B = 400\text{mm}$; C30-C60 混凝土, Q235-Q420 钢材,含钢

率 = 0.05 - 0.2。图3的比较结果可得,式(2)计算值仅为式(3)计算值的30%左右,当然,这些公式的准确程度还应该得到实验值的进一步验证。

韩林海^[1]研究结果表明,对于钢管混凝土受剪构件,由于核心混凝土受到了外钢管的约束,不但提高了其强度,而且使其塑性性能大为改善,因此即使剪跨比很小时,钢管混凝土受剪构件仍然不会突然破坏,表现出较好的塑性性能。因此,笔者建议在矩形钢管混凝土抗剪强度计算时应适当考虑核心混凝土的“贡献”,尤其对于矩形钢管混凝土用作加强层或转换层桁架时,抗剪承载力验算显得更为重要。

4 钢管的焊接规定

《规程》7.1.12条规定:抗震设计时,当梁与矩形钢管混凝土刚接,且钢管为四块钢板焊接时,钢管角部的拼接焊缝在框架梁上、下600mm范围内应采用全熔透焊缝,其余部位可采用部分熔透焊缝。本文以矩形钢管混凝土轴压试件为例,采用了有限元软件ABAQUS对于全熔透和部分熔透对矩形钢管混凝土受力性能的影响进行了研究。

4.1 有限元模型的建立

钢管的钢材采用ABAQUS软件中提供等向弹塑性模型,满足Von Mises屈服准则,这种模型多用于模拟金属材料的弹塑性性能。用连接给定数据点的一系列直线来平滑地逼近金属材料的应力—应变关系。该模型采用任意多个点来逼近实际的材料行为,因此,就非常接近真实的材料行为。

核心混凝土采用ABAQUS软件中的塑性损伤模型^[23]。文献[1]在总结以往有关研究者采用ABAQUS对钢管混凝土进行有限元分析结果的基础上,考虑到核心混凝土受钢管被动约束的特点,通过大量钢管混凝土轴压算例的计算分析,修正了素混凝土单轴应力—应变关系曲线的峰值应变和下降段,最终提出适用于ABAQUS软件有限元分析的钢管混凝土中核心混凝土单轴应力—应变关系表达式^[1]如下:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{(x-1) + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (5)$$

式中,各参数的具体含义详见文献[1]。

钢材和核心混凝土均采用了八节点减缩积分格式的三维实体单元(C3D8R)。单元网格采用细分网

格的网格实验方法,确定合适的网格,图4给出了典型的矩形钢管混凝土单元划分的示意图,由于矩形钢管混凝土轴心受压,其几何边界和力学边界条件的对称性,取1/8模型进行计算。

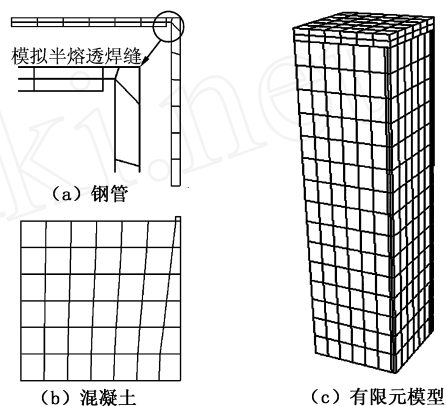


图4 典型的单元划分示意图

参考文献[1]的研究成果,采用库仑摩擦模型^[1]来模拟外钢管与核心混凝土界面切向力的传递。在有限元计算模型加载端设置一刚度很大垫块模拟加载端板,采用三维实体单元(C3D8R)模拟,其弹性模量取为 1×10^{12} MPa,泊松比取为0.0001。在对矩形钢管混凝土轴压荷载—变形关系曲线进行计算时,由于试件轴心受压,计算时采用一端自由,一端固定的边界条件,在对称面施加对称面边界条件,在自由端施加荷载。计算时,采用位移加载方式,并采用增量迭代法求解非线性方程。

4.2 有限元计算结果与讨论

采用以上的有限元计算模型,可方便计算出矩形钢管混凝土轴压试件的荷载—变形关系曲线,如图5所示,包括钢管角部全熔透和半熔透两种情况。

图中矩形钢管混凝土算例的计算条件为: $D = B = 600$ mm; Q345 钢材; C60 混凝土,壁厚由图6中的混凝土工作承担系数确定。计算结果表明,钢管角部全熔透和半熔透对矩形钢管混凝土轴压强度承载力几乎没有影响。

从图5的比较结果还可以看出,钢管角部全熔透和半熔透对矩形钢管混凝土后期延性有一定影响,这种影响幅度随着混凝土工作承担系数增加而增大,尤其对于承担系数为0.7的情况,钢管角部半熔透对矩形钢管混凝土轴压试件的荷载—变形关系曲线后期延性影响较大。

因此,为了保证建筑结构中矩形钢管混凝土柱

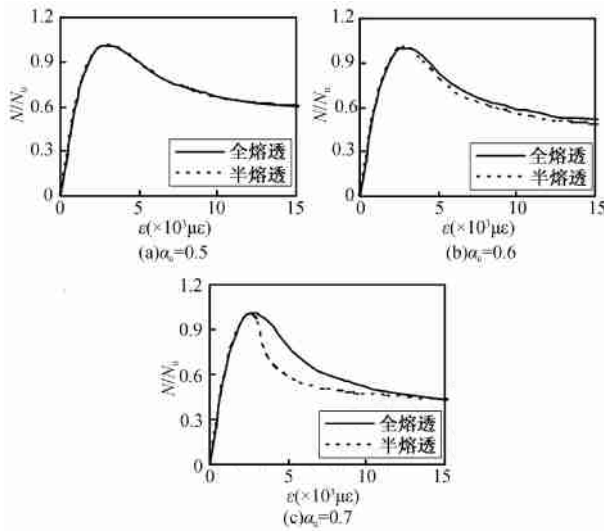


图 5 全熔透和部分熔透对矩形钢管混凝土受力性能的影响

的延性,笔者建议对于混凝土工作承担系数大于 0.6 的矩形钢管混凝土柱宜采用钢管角部全熔透的焊接方式。需要指出的是,本文的采用 ABAQUS 模拟全熔透和半熔透研究方法有一定程度的近似,研究结果的合理性也有待于实验结果的进一步验证。

5 混凝土工作承担系数限值

《规程》^[4] 7.1.12 条规定:在抗震设计时,混凝土工作承担系数应该满足以下规定:

$$\alpha_c \leq [\alpha_c] \quad (6)$$

该《规程》表 7.12 给出了 $[\alpha_c]$ 的取值规定,此数值与构件长细比和轴压比有关。这条规定主要的目的在于确保:当矩形钢管混凝土构件用于抗震设防区的多层和高层框架结构的柱子时,为了保证结构具有一定的抗震性能,矩形钢管混凝土柱必须具有较好的延性^[4]。

文献[16]采用 ABAQUS 软件对钢管混凝土压弯构件的力学性能进行了较为深入的研究,研究结果表明,由于钢管对核心混凝土的约束作用,使其具有较好的承载能力和延性。图 6 给出了不同混凝土工作分担系数情况下矩形钢管混凝土压弯构件的 $P-\Delta$ 关系曲线,算例的基本计算条件为: $D = B = 400\text{mm}$; $t = 9.3\text{mm}$; C60 混凝土; Q345 钢材; $\lambda = 14$; 轴压比 $n = 0.4$ 。从图 6 可见,当轴压比为 0.4 时,即使混凝土工作分担系数为 0.7 的情况下,矩形钢管混凝土构件仍然具有较好的延性性能。

关系曲线,算例的基本计算条件为: $D = B = 400\text{mm}$; $t = 9.3\text{mm}$; C60 混凝土; Q345 钢材; $\lambda = 14$; 轴压比 $n = 0.4$ 。从图 6 可见,当轴压比为 0.4 时,即使混凝土工作分担系数为 0.7 的情况下,矩形钢管混凝土构件仍然具有较好的延性性能。

因此,笔者建议,当矩形钢管混凝土构件的轴压比不大于 0.4 时,可不限制混凝土工作承担系数。

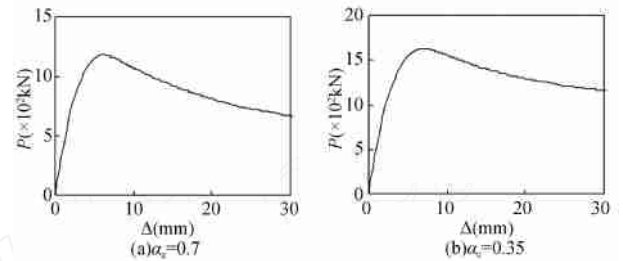


图 6 不同混凝土工作分担系数时矩形钢管混凝土压弯构件的 $P-\Delta$ 关系曲线

6 结 语

结合笔者的工程实践经验,针对《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS159:2004)有关问题,包括矩形钢管混凝土截面高宽比限值、轴压强度和抗剪强度的计算方法、钢管的焊接规定和混凝土工作承担系数限值规定,进行了探讨,提出了一些较为合理的建议。本文提出的有关建议可供有关专家在修订《矩形钢管混凝土结构技术规程》时参考。

随着现代建筑结构形式的不断复杂化、多样化,用于建筑结构中的矩形钢管混凝土柱的受力状态也越来越复杂,对矩形钢管混凝土结构理论的发展提出了新的要求,因此,深入研究矩形钢管混凝土构件在复杂受力状态(压、拉、弯、扭、剪及其复合受力)下的工作性能和承载力设计方法显得尤为重要。

[参考文献]

[1] CECS159:2004. 矩形钢管混凝土结构技术规程[S].

[2] Cederwall K., Engstrom, B. and Gauers, M., 1997. High-strength concrete used in composite columns [M]. High-Strength concrete, SP 121 ~ 11, 195 ~ 210.

[3] Han L. H., Zhao, X.L. and Tao, Z. (2001). Tests and Mechanics Model for Concrete-Filled SHS Stub Columns[J]. Columns and Beam-Columns, Steel and Composite Structures-An International Journal, Vol. 1, No. 1, pp.51 ~ 74.

[4] Han L. H. (2002). Tests on stub columns of concrete-filled RHS sections[J]. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 58, No. 3, pp.353 ~ 372.

[5] Kato B. (1996). Column Curves of Steel-Concrete Composite Members[J]. Journal of Constructional Steel Research, 39 (2) : 121 ~ 135.

(下转第 122 页)

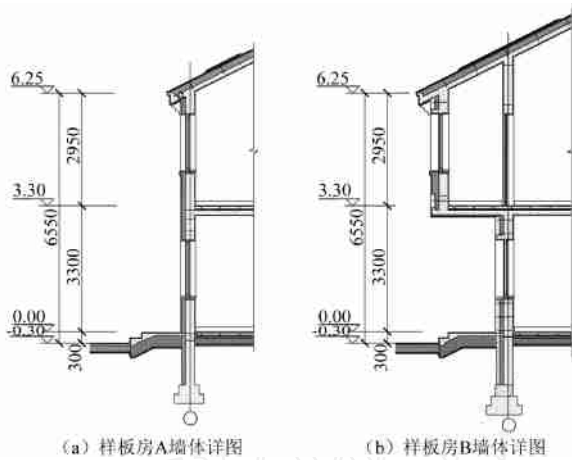


图 10 样板房墙体详示意图

(2) 外墙:由两个样板间,样板房 A 粘贴 100 厚聚苯板外墙外保温,做法参照 88J2-9 外墙 51M2,样板房 B 为夹芯保温墙,240mm 粉煤灰砖 + 100mm 聚

苯板 + 115mm 青砖,见图 10。外墙传热系数约为 $0.40\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,比北京市节能 65% 要求传热系数 $0.45\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 低 11%,此项措施可以节约能源 $1.34\text{W}/\text{m}^2$;

(3) 门窗:外门窗为节能型塑钢中空玻璃门窗,外窗传热系数为 $2.8\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,气密性为 级。

通过以上保温加强措施,尽量平衡经济性和舒适性之间的矛盾。

5 结 语

节地节能是国家的大方针。新型农宅设计是一个新领域、新课题,一定要发挥专业优势,设计出有指导意义的作品;为使设计作品有根基有出发点,做好现场调研,了解当地实情和使用者的需求,从每一处细节着手,切实做到节能、节材、节地,是成败关键。目前尚停留在设计阶段,有待建成后实践检验。

(上接第 110 页)

- [6] Lam D. and Christopher A. Williams (2004). Experimental study on concrete filled square hollow sections [J]. Steel and Composite Structures, Vol. 4, No. 2:95 ~ 112.
- [7] Nishiyama, I., Morino, S., Sakino K., et al. 2002. Summary of Research on Concrete-Filled Structural Steel Tube Column System Carried out under the US-Japan Cooperative Research Program on Composite and Hybrid Structures[R]. BRI Research Paper No. 147, Building Research Institute, Japan.
- [8] Tomii, M., Yoshimaro, K., and Morishita, Y. (1977). Experimental studies on concrete filled steel tubular stub column under concentric loading [A]. Proceedings of the International Colloquium on Stability of Structures under Static and Dynamic Loads [C]. SSRC/ASCE/(Washington), 718 ~ 741.
- [9] Tomii, M. and Sakino, K. (1979). Experimental studies on the ultimate moment of concrete filled square steel tubular beam-columns [J]. Trans. of A. I. J. No. 275, Tokyo, Japan, 55 ~ 63.
- [10] Yamamoto, T., Kawaguchi, J. and Morino, S. (2002). Size effect on ultimate compressive strength of concrete-filled steel tube short columns[A]. Proceedings of the SEWC2002[C]. Yokohama, Japan
- [11] 余勇, 吕西林, Tanaka Kiyoshi, Sasaki Satoshi. 轴心受压方钢管混凝土短柱的性能研究: 分析[J]. 建筑结构. 2000, 30 (2):
- [12] 张素梅, 周明. 方钢管约束下混凝土的抗压强度[J]. 哈尔滨建筑大学学报增刊, 1999 (3): 14 ~ 18.
- [13] 尧国皇. 钢管混凝土构件在复杂受力状态下的工作机理研究 [D]. [博士学位论文]. 福州:福州大学, 2006.
- [14] Uy, B. (2000). Strength of concrete filled steel box columns incorporating local buckling [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 126 (3): 341 ~ 352.
- [15] Uy, B. (2001). Strength of short concrete filled high strength steel box columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 57 (2): 113 ~ 134.
- [16] Liu, D. L., Cho, W. M., Yuan, J., 2003. Ultimate capacity of high-strength rectangular concrete-filled steel hollow section stub columns [J], Journal of Constructional Steel Research, 59 (12): 1499 ~ 1515.
- [17] Shakir-Khalil, H and Al-Rawdan, A. (1997) Experimental Behaviour and Numerical Modelling of Concrete-Filled Rectangular Hollow Section Tubular Columns. Composite Construction in steel and concrete [A]. Proceedings of an Engineering Foundation Conference [C]. Irsee, Germany, 1997, pp. 222 ~ 235.
- [18] Shakir-Khalil, H. and Mbuli, M. (1990). Further tests on concrete-filled rectangular hollow-section columns[J]. Structural Engineer, 68 (20): 405 ~ 413.
- [19] Shakir-Khalil, H. and Zeghiche, J. (1989). Experimental behaviour of concrete filled rolled rectangular hollow-section columns [J]. Structural Engineer, 67 (19): 346 ~ 353.
- [20] 叶再利. 2001. 方形、矩形钢管高强混凝土轴压短柱基本力学性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学.
- [21] 尧国皇, 韩林海. 2007. 高强钢管混凝土构件承载力计算方法初探[J]. 工业建筑, 37(2): 96 ~ 99.
- [22] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践(第二版) [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [23] Hibbitt, Karlson, Sorenson. ABAQUS Version 6.4: Theory manual, users' manual, verification manual and example problems manual. Hibbitt [J]. Karlson and Sorenson Inc, 2003.