

# CTSRC 楼板承载力计算及实荷试验

冯 鹏<sup>1</sup>, 初明进<sup>1,3</sup>, 林旭川<sup>1</sup>, 侯建群<sup>2</sup>, 刘彦生<sup>4</sup>

- (1. 清华大学 土木工程系, 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084;  
2. 清华大学 建筑设计研究院, 北京 100084; 3. 烟台大学 土木工程学院, 烟台 264005;  
4. 浙江清华长三角研究院, 嘉兴 314000)

**摘要:** 钢网构架混凝土复合结构体系(CTSRC)是一种新型结构体系,它由工厂预制的钢构骨架和现场浇筑其中的混凝土构成墙体和楼板,从而形成整体结构。为研究钢网构架混凝土复合结构楼板的受力性能并确定设计计算方法,进行了6块单向楼板的静载试验破坏;基于试验结果提出一种等效钢筋混凝土梁的计算方法和一种截面条带计算方法,进行了分析比较;建议采用基于截面条带法的承载力计算方法,并编写了计算程序。最后,对实际结构中此新型楼板体系进行堆载试验,获得实际结构中楼板的受力性能。试验结果表明:建议的设计计算方法可行,且此楼板具有较高的承载力安全储备。

**关键词:** 钢网构架混凝土复合结构(CTSRC); 楼板; 实荷试验

中图分类号: TU 398; TU 317

文献标志码: A

文章编号: 1000-0054(2010)09-1325-05

## Calculation and test for strengths of cold-formed thin-wall steel reinforced concrete slabs

FENG Peng<sup>1</sup>, CHU Mingjin<sup>1, 2</sup>, LIN Xuchuan<sup>1</sup>,  
HOU Jianqun<sup>3</sup>, LIU Yansheng<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of the Ministry of Education, Department of Civil Engineering Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China;

3. Architectural Design & Research Institute, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University Zhejiang, Jiaxing 314000, China)

**Abstract:** Cold-formed thin-wall steel reinforced concrete (CTSRC) structure is an emerging composite structure for residential buildings. A CTSRC structure has integrated walls and floors made of a prefabricated steel skeleton and *in-situ* infill of concrete. The mechanical behavior and strengths of 6 CTSRC slab specimens were tested to failure with static loads. Two calculation approaches were then developed based on an equivalent reinforced concrete beam and a stripped section based on the tests. Comparison with the experimental data shows that the stripped section approach gives

better results for the design. A computer program of the stripped section approach is developed. A CTSRC slab in a real structure was then tested with a stacked load. The structural behavior of the slab verifies calculational approach, showing that the CTSRC slab has a high strength safety margin.

**Key words:** cold-formed thin-wall steel reinforced concrete (CTSRC) structure system; floor slab; loading test in real structure

住宅产业化是建筑业发展的重要方向,其核心是建立适合工业化生产的结构技术体系。近年国内出现了一批新型住宅结构体系,主要有轻钢结构住宅体系<sup>[1]</sup>、CL结构体系<sup>[2]</sup>和配筋混凝土空心砌块体系<sup>[3]</sup>等。钢网构架混凝土复合结构体系(简称CTSRC结构)是一种采用工业化方式生产的新型住宅体系,它采用冷弯格构型钢、钢拉条/钢板网、保温板等在工厂里装配成轻钢模网构架(见图1a),同时完成建筑保温和建筑管线布置,然后在现场浇筑混凝土,完成建筑结构、维护、保温、管线工程等。采用CTSRC结构体系,工地现场不需要模板工程、脚手架工程、砌筑工程和保温工程等,浇筑混凝土时不需要振捣,施工方便,整体性好,兼具钢结构施工方面和混凝土结构受力方面的优点。

CTSRC结构体系所采用的格构钢是腹板上冷压冲孔和翼缘卷边处理的C形冷弯薄壁型钢(见图1b),腹板开孔可为圆孔、三角形孔或方孔;钢拉条为钢板或冷弯型钢,垂直于格构钢,以连接固定格构钢;钢模网采用热镀锌薄钢板制作,由菱形网孔和横向V形压肋构成(见图1c),充当永久模板。

收稿日期: 2009-08-02

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT00736);  
浙江省科技攻关计划项目(2006C31058);  
嘉兴市科技计划项目(2006AZ2003)

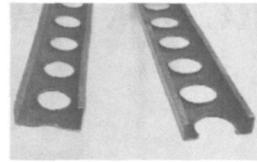
作者简介: 冯鹏(1977—),男(汉),陕西,副教授。

E-mail: fengpeng@tsinghua.edu.cn

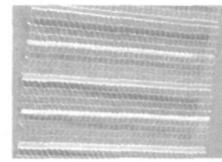
CTSRC 结构体系主要构件形式为墙<sup>[4]</sup>和楼板,楼板的构造示意图 1d。CTSRC 结构与传统的结构有较大的不同,其受力性能方面的研究尚处于空白。



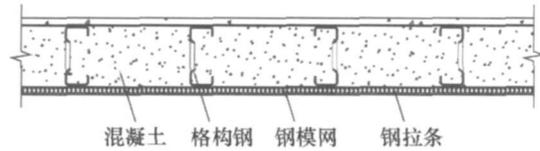
(a) 钢构骨架结构



(b) 格构钢



(c) 钢模网



(d) 楼板剖面示意图

图 1 CTSRC结构的构造

## 1 单向板受力性能研究

### 1.1 楼板构件试验结果

进行了 6 个单跨筒支板的试验<sup>[5]</sup>,主要参数见表 1。格构钢为冷弯薄壁 C 型钢,厚度为 2 mm,在腹板开三角形孔,同时卷边以提高刚度。钢模网面质量为 1.6 kg/m<sup>2</sup>,V 形肋间距为 100 mm,在 V 形肋部位用钢钉固定在格构钢上。单跨筒支板宽度为

1 230 mm,根据长度不同分为 2 组,所有楼板的板顶保护层 25 mm,板底 5 mm。试件中混凝土设计强度为 C20,试验时实测 150 mm 立方体抗压强度平均值为 31.5 MPa。在格构钢翼缘冷弯区域外取样,实测钢材抗拉屈服强度平均值为 315 MPa,极限强度平均值为 442 MPa。试验采用千斤顶加载,最终都发生了弯曲破坏,主要的试验结果如表 1 所示。

表 1 楼板构件试验及结果

试件	长度 mm	跨度 mm	板厚 mm	格构钢间距 mm	拉条间距 mm	极限荷载* kN·m <sup>-2</sup>	极限挠度 mm
B2	3 600	3 400	110	400	1 100	18.0	78.0
B8	3 600	3 400	110	200	1 100	27.3	64.8
B9	3 600	3 400	110	600	1 100	10.4	34.9
B10	3 600	3 400	110	400	660	17.1	157.8
B3	4 800	4 600	130	400	1 125	7.8	232.0
B4	4 800	4 600	130	400	1 125	8.7	275.0

\* 根据跨中弯矩相等的原则,将试件上施加的集中荷载换算为均布荷载。

### 1.2 受弯承载力计算方法

CTSRC 楼板中薄壁型钢的腹板上开有孔洞,可以提供足够的销栓力使其与混凝土共同抗弯,则有以下 2 种方法计算此楼板的抗弯承载能力:等效钢筋混凝土梁计算方法和条带法。

#### 1) 等效钢筋混凝土梁计算方法。

该方法是将楼板等效成宽度等于格构钢间距、高度等于楼板厚度的钢筋混凝土梁,把格构钢上下两部分分别等效成 2 根等面积的钢筋,只考虑格构钢的开口处的最小净截面积,忽略钢模网的结构作

用,来计算构件的极限承载力。

#### 2) 条带法。

根据格构型钢构造截面形状,基于以下假定可对组合楼板的受力全过程进行计算:楼板截面应变保持平面;以格构型钢的最小净截面考虑极限承载力;钢材的应力—应变关系采用理想弹塑性模型,考虑冷弯效应对钢材强度的影响,极限应变取 0.01;混凝土的受压应力—应变曲线采用抛物线—水平直线的规范建议曲线,忽略受拉;当混凝土受压边缘达到极限压应变或钢材受拉边缘达到极限拉应变,即认为构件破坏;在条带计算时,每个条带单元内部应力和

应变都相同, 以条带中心位置的高度计算。

由于格构钢为冷弯薄壁型钢, 腹板开孔冷作卷边, 钢材冷弯强化对其强度影响较大, 所以根据规范考虑冷弯效应对钢材强度的影响, 即

$$f' = \left[ 1 + \frac{\eta(12\gamma - 10)t}{l} \sum_{i=1}^n \frac{\theta_i}{2\pi} \right] f. \quad (1)$$

其中:  $f'$  为考虑冷弯效应的强度设计值;  $\eta$  为成型方式系数;  $\gamma$  为钢材抗拉强度和屈服强度比值, 对 Q235 钢可取 1.58, 对 Q345 钢可取 1.48;  $n$  为型钢截面所含棱角数目;  $l$  为型钢截面中心线的长度。

条带法的计算方法参照《混凝土结构设计规范 50010-2002》中附录 F “关于任意截面构件正截面承载力计算的方法”, 编写计算机程序进行迭代计算。

### 1.3 计算方法对比

采用等效钢筋混凝土梁计算方法和条带法分别计算单向板试件的承载力, 并与试验结果比较, 见表 2。可见, 2 种方法都可用于 CTSRC 结构楼板的设计计算, 条带法的计算结果略好于等效钢筋混凝土梁的计算结果, 且偏于保守。在实际设计中, 建议采用条带法进行计算。

表 2 单向板承载力试验值和计算值比较

试件	试验极限弯矩/kNm	等效钢筋混凝土梁法		条带法	
		计算值/kNm	误差/%	计算值/kNm	误差/%
B2	26.0	18.5	-28.8	22.2	-14.6
B3	20.6	25.9	25.7	25.8	25.2
B4	23.3	25.9	11.2	25.8	10.7
B8	39.0	32.4	-16.9	35.7	-8.5
B9	15.0	13.9	-7.3	17.2	14.7
B10	25.0	18.5	-26.0	22.2	-11.2

## 2 楼板结构试验研究

### 2.1 试件设计和试验方案

在实际结构中, 格构钢为楼板的受力骨架, 其间距一般为 300 mm; 与之垂直布置有钢拉条, 一般每块板在板底面和板顶面各设 2 道。设计计算时按照单向板考虑型钢的作用, 在端部断开时按照简支板计算。但实际中, 楼板格构钢端部伸入墙中, 会提供一定的嵌固作用, 如图 2 所示, 因此按照单向简支板进行设计计算与实际结构楼板的受力性能相比存在差异, 且较为保守。



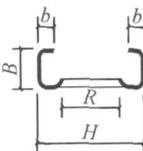
图 2 实际楼板型钢布置

为验证设计计算方法的可行性, 并得到实际结构楼板的受力性能, 进行了楼板结构的实荷堆载试验。楼板试验对象为某 3 层 CTSRC 结构的一层顶板<sup>[6]</sup>。试验结构为 3 层足尺结构模型, 在水平加载试验结束后, 进行楼板堆载试验。此时结构墙体开裂已比较严重, 一层、二层墙体发生错动, 同时一层顶板出现贯通裂缝, 因此一层顶板的整体性和墙体对其的约束作用都已经劣化。试验区域见图 3 阴影部分, 型钢布置见图 4。楼板跨度为 3 500 mm, 厚度为 110 mm, 格构钢间距 300 mm。楼板混凝土设计强度为 C20, 试验时混凝土标准立方体抗压强度实测值为 16.96 MPa。钢材的材料性能见表 3。楼板中格构钢截面高度为 90 mm, 厚度 2 mm, 截面尺寸见表 4; 拉条截面高度 45 mm, 厚度 2.0 mm, 翼缘宽度为 10.5 mm; 钢模网面质量为 1.32 kg/m<sup>2</sup>。

表 3 钢材的材料性能

	拉伸屈服强度/MPa	拉伸极限强度/MPa
楼板格构钢	317.0	430.6
拉条槽钢	312.9	423.2

表 4 格构钢截面尺寸

	$H$ mm	$B$ mm	$b$ mm	$R$ mm	$t$ mm
	90	44	9.3	46.6	2

试验主要量测内容包括格构钢、拉条的应变和楼板的竖向变形。位移计布置在楼板底面, 见图 5。量测数据由实时数据采集系统采集, 在计算机上实时显示并记录。试验采用铅块均布堆载方式在楼板上施加竖向均布荷载如图 6 所示。楼板荷载分 10 级施加, 各级控制荷载见表 5, 两级荷载间歇时间为 10 min; 最终荷载加至 10.8 kN/m<sup>2</sup>。保持 4 h 后开始卸载, 卸载过程与加载过程相反。

表5 楼板结构加载各级控制荷载

加载步	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
控制荷载/(kN·m <sup>-2</sup> )	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	5.8	7.0	8.3	9.5	10.8

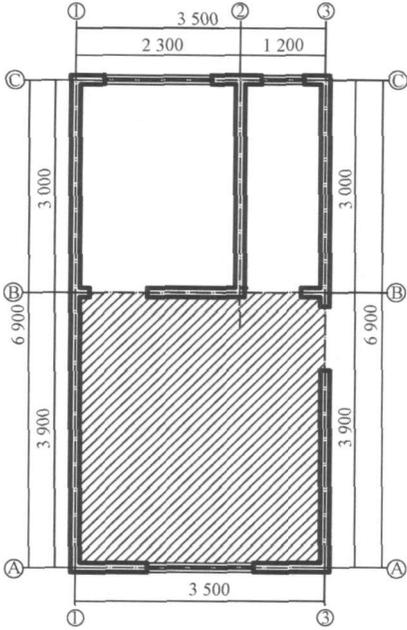


图3 楼板结构试验区域

单位: mm

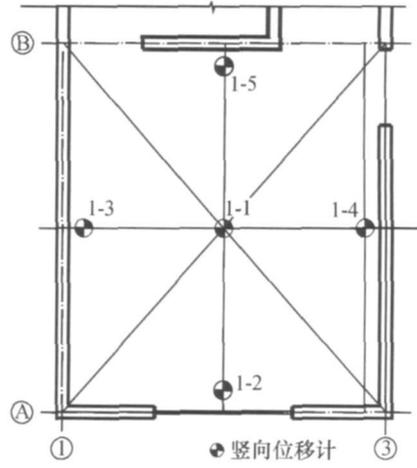
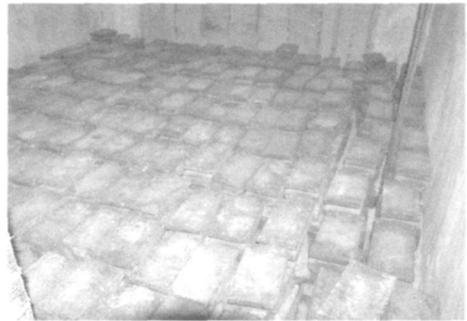


图5 位移计布置



(a) 开始加载



(b) 最大荷载

图6 楼板加载过程

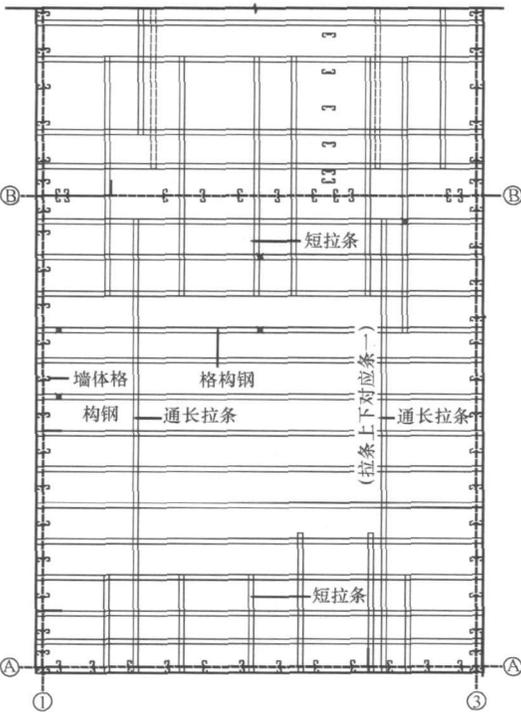


图4 试验区域型钢布置

### 2.2 试验结果与分析

实测楼板荷载一跨中位移曲线如图7所示,跨中最大变形为5.69 mm,为楼板跨度的1/615。卸载后残余变形为1.44 mm,为跨度的1/2431。在支座附近和跨中布置了17个应变片,实测得到楼板跨中最大应变为 $3.31 \times 10^{-4}$ ,支座最大应变为 $2.50 \times 10^{-4}$ ,都远小于屈服应变,因此该楼板结构承载潜力较大。

对比格构钢支座和跨中应变监测结果,可以发

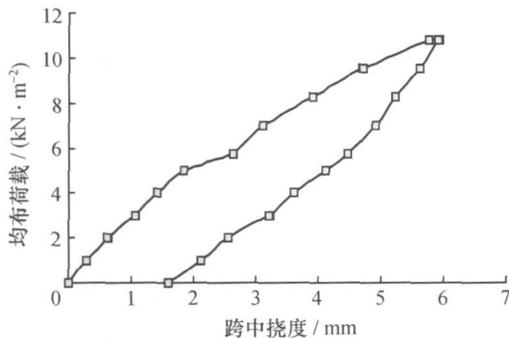


图7 楼板的荷载—挠度曲线

现靠近 ⑧轴的格构钢支座应变和跨中应变基本相同, 格构钢构造特殊性保证了其在支座处的锚固。而靠近 ①轴的格构钢支座应变比跨中应变相差较多。主要原因是在足尺模型结构水平加载试验时①轴墙体在 ①轴附近破坏很严重, 从而使支座墙体对格构钢端部的约束减弱。

采用条带法计算该楼板的极限承载力为  $4.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$  (楼板计算宽度为型钢间距), 则楼板破坏时外加荷载理论值为  $7.4 \text{ kN/m}^2$ 。根据试验应变监测结果, 当楼面荷载达到  $10.8 \text{ kN/m}^2$  时, 楼板格构钢的最大应变为  $3.31 \times 10^{-4}$ , 所以楼板结构的承载力仍有较大富余, 将实际结构楼板的计算模型简化为单跨简支板具有较高的可靠性。由应变片监测结果可知: 楼板结构支座处上部拉条和格构钢上部应变较大, 支座的嵌固作用比较明显, 使楼板的承载力大大提高。

### 3 复合楼板设计建议

为了适应工业化生产的需要, CTSRC 结构楼板中格构钢间距一般为  $300 \text{ mm}$ , 跨中钢拉条用来保证钢构架的刚度。在设计 CTSRC 结构楼板时一般将计算模型假定为单向简支板, 采用基于条带有限元的计算程序进行设计, 采用该假定进行设计可以满足住宅中一般跨度(不大于  $4200 \text{ mm}$ )楼板的工程需要。

根据楼板结构的试验结果可知: 与格构钢下翼缘相交的拉条能够承受拉力, 与格构钢上翼缘相交的拉条嵌固于支座上, 能够传递拉力; 格构钢支撑于混凝土墙体上, 墙体对其有一定的嵌固作用。因此将 CTSRC 结构楼板的计算模型假定为单向简支板安全性较高。

楼板支座处可以在楼板上部设置钢筋或者钢拉条来防止混凝土开裂, 在计算时不考虑其结构作用。当楼板跨度较大时如果按照单向简支板进行设计, 会使楼板的用钢量较大。在这种情况下可以通过在中间支座设置钢拉条或钢筋来抵抗支座负弯矩, 使

楼板成为单向连续板。

## 4 结 论

1) CTSRC 结构单向板具有较高的承载力和良好的延性; 减小格构钢的间距可以显著地提高楼板的承载力, 减小拉结角钢的间距可以提高楼板的延性。

2) CTSRC 结构单向板受弯承载力建议采用条带法进行计算。

3) 住宅结构中一般跨度的楼板可以假定为单向简支板进行计算。当楼板跨度较大时, 可以考虑中间支座的连续性, 按照单向连续板进行设计, 通过设置钢拉条或钢筋满足负弯矩区的承载力要求。

4) 实际结构楼板中, 混凝土墙体对格构钢端部有嵌固作用, 可以显著提高楼板的受力性能。

## 参考文献 (References)

- [1] 黄慧娟. 轻钢结构住宅产业化发展及其应用 [D]. 北京: 清华大学, 2006.  
HUANG Huijuan. Development and Application of the Industrialization of the Light-Steel Structure House in Hebei Province [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese)
- [2] 李云峰. CL 结构体系的抗震特点及其应用 [J]. 住宅产业, 2008, 6: 63—67.  
LI Yunfeng. Applications and seismic characteristics of CL structure system [J]. House Industry, 2008, 6: 63—67. (in Chinese)
- [3] 盖遵彬. 多层住宅结构方案对比分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.  
GAI Zunbin. Comparison and Analysis on Structural Styles for Multistory Residential Buildings [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [4] 初明进, 冯鹏, 侯建群, 等. 钢网构架混凝土复合结构多层住宅墙体抗震性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2009, 42(7): 36—45.  
CHU Mingjin, FENG Peng, HOU Jianqun, et al. Experimental study on the seismic behavior of innovated CTSRC composite shear walls for multi-story residences [J]. Journal of Civil Engineering, 2009, 42(7): 36—45. (in Chinese)
- [5] 冯鹏, 初明进. 楼板受力性能试验 [C]// 清华大学建筑设计研究院. TUS 住宅钢网构架混凝土住宅结构体系. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 44—51.  
FENG Peng, CHU Mingjin. Test on Mechanical Performance of CTSRC Floor [C]// Architectural Design & Research Institute of Tsinghua University. TUS Residence CTSRC Structure System. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 44—51. (in Chinese)
- [6] 冯鹏, 初明进, 侯建群, 等. 钢网构架混凝土复合结构多层住宅足尺模型抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2009, 30(3): 1—10.  
FENG Peng, CHU Mingjin, HOU Jianqun, et al. Experimental study on aseismic performance of a full-scale multi-story residential building of CTSRC structure [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(3): 1—10. (in Chinese)