

复合剪力墙板弯曲开裂强度计算方法的探讨

李升才 江见鲸

(清华大学 土木工程系 北京 100084)

胡建宏 于庆荣

(中新建筑体系有限公司 天津 300191)

摘要:对CL体系中复合墙板的抗剪试验测得的弯曲开裂强度的结果与理论公式计算值进行了对比分析,从而提出CL体系中复合剪力墙板的弯曲开裂强度理论计算公式,并由试验结果确定了公式中的系数。为确定暗柱的大小和配筋提供依据。这对正确而合理的设计CL体系中复合剪力墙是非常有用的。

关键词:复合剪力墙板 弯曲开裂强度 计算公式 系数

AN INQUIRY INTO CALCULATION APPROACHES TO BENDING CRACKING STRENGTH OF COMPOSITE SHEAR WALL SLAB

Li Shengcai Jiang Jianjing

(Civil Engineering Department of Tsinghua University Beijing 100084)

Hu Jianhong Yu Qingrong

(China New Building System Co., Ltd. Tianjin 300191)

Abstract: In this paper, compared with calculated values of theoretical formula, bending cracking strength results of shear test of composite wall slab with hidden frame (it is used in CL building system) are analyzed, thus a theoretical calculation formula of bending cracking strength of composite shear wall slab in CL building system is put forward, and coefficients in the formula are determined by test results, which provides a basis for determining the size and reinforcement of embedded column, and therefore is very useful to proper and rational design of composite wall slab in CL building systems.

Keywords: composite shear wall slab bending cracking strength calculation formula coefficients

0 引言

CL体系是针对应用广泛的多层建筑研制开发的,其结构形式为:复合墙板作外墙、隔户墙及楼板,预应力轻质隔板作隔墙;复合墙板交接处设异型暗柱,复合墙板和楼板交接处设圈梁,形成带边框的复合剪力墙结构。

复合墙板作为该体系的核心,是一种新的承重剪力墙。该墙板以三维空间钢丝网作骨架,内含5cm厚保温隔音材料(聚苯乙烯泡沫板)为芯材,内、外侧分别浇筑6cm厚混凝土层,并由空间斜插筋连接协同工作,共同承担剪力、大部分竖向荷载及部分弯矩。体系中暗含的边框承担部分竖向荷载及绝大部分整体弯矩,另外还对墙板形成约束作用以提高其承载能力。可见,CL体系传力途径明确,受力合理,结构整体性好。

研制和开发CL体系旨在替代目前主要用于多层建筑的砌体结构,研究表明,CL体系的经济指标优于砌体结构;通过对CL体系7层楼房1/2模型试验研究表明,CL体系的受力性能、抗震性能方面更

明显优于砌体结构;并且CL体系设计简单、施工方便快速。因此,用CL新体系替代砌体结构前景非常光明。

为了将CL体系推广应用,应该建立CL体系中复合剪力墙板合理的、符合实际的计算模式,从而正确计算其配筋,达到合理设计CL墙板的目的。为达此目的,首先应该确定该复合墙板的弯曲开裂强度,从而为确定边柱(即暗柱)的大小及配筋、保证墙板在剪切破坏之前不发生弯曲破坏做准备。

1 CL体系中复合剪力墙板抗剪试验测得的弯曲开裂强度的结果

为了建立CL体系中复合剪力墙板合理的、符合实际的计算模式,我们对不同类型的复合剪力墙板进行抗剪试验,本次试验的试件为14片墙板,1/2模型,分7组,编号为SW1~SW7,每组内以SW#-1、SW#-2区分。SW1-1、SW1-2、SW2-1、SW2-

2、SW4 - 1、SW4 - 2、SW6 - 1、SW6 - 2、SW7 - 1、SW7 - 2 的边柱为矩形;SW3 - 1、SW3 - 2 的边柱为 T 形;SW5 - 1、SW5 - 2 无边柱,其中,SW2 的内侧浇筑 1.5 cm 厚砂浆层,外侧浇筑 4.5 cm 厚混凝土层;其余均为内、外分别为 3 cm 厚混凝土层,但 SW6 为装配式,SW4 无聚苯夹层,且无空间斜插筋;对 SW7 - 1 和 SW7 - 2 分别施加 300 kN 和 200 kN 的竖向力。

混凝土强度等级为:底梁 C30、墙板 C20。试件尺寸、钢筋级别及布置见图 1 及表 1。

试验测得墙板的弯曲开裂强度结果如表 2 所示。

2 弯曲开裂强度的理论公式计算值

从实心墙板和复合墙板的试验过程及试验结果

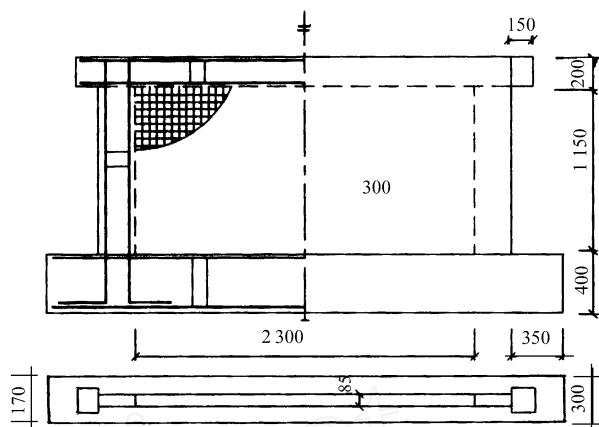


图 1 试件示意

表 1 试件基本情况一览表

试件	暗柱尺寸	配筋			
		墙板	暗柱	基础	上梁
SW1、SW2、SW4、SW6、SW7	250 mm × 85 mm	SW4 为双层 2.2 @ 50 × 50 mm 钢丝网,无空间斜插筋;其余为双层 2.2 @ 50 × 50 mm 空间钢丝网	纵筋内外各 2 10 mm 箍筋 4 @ 100 mm	纵筋上下各 4 16 mm 腰筋 2 10 mm 箍筋 8 @ 100 mm	纵筋上下各 2 10 mm 箍筋 4 @ 100 mm
SW3	T 形:翼宽:250 mm、腹板:250 mm × 85 mm	同上	暗柱顶、底部及上梁两端 200 mm 内箍筋加密,间距为 50 mm;基础两端 700 mm 内箍筋加密,间距为 60 mm 纵筋:翼缘外侧 4 10 mm 内侧 2 10 mm 腹板 2 10 mm;箍筋:同上	同上	同上
SW5	无暗柱	同上	试件外侧两端分别焊上 2 10 mm 的纵筋	同上	同上

表 2 弯曲开裂强度试验值

墙板	边柱形式	f_{cu}/MPa	N/kg	弯曲开裂强度/kN
SW1	矩形	22.6	无	162.3
		25.1		179.0
SW2	矩形	29.1	无	80.8
		29.8		79.8
SW3	T 形	23.9	无	277.9
		28.9		198.8
SW4	矩形	22.0	无	118.9
		29.5		63.0
SW5	无	23.7	无	120.5
		29.4		98.4
SW6	矩形	33.1	30 000	339.1
		280.3	20 000	280.3

可知,复合墙板可以当作实心墙板看待。因而,本文用实心墙板的弯曲开裂强度计算公式对 CL 复合剪力墙板进行了计算。

用日本规范中的有关公式计算弯曲开裂强度

(cQ_{BC}):

$$cQ_{BC} = \frac{1}{h} (1.8 \sqrt{F_c} Z_c + ND/6) \quad (1)$$

式中 F_c ——混凝土抗压强度,取混凝土立方体抗压强度的 0.8 倍, kg/cm^2 ;

$$Z_c = I_c / \frac{D}{2} (\text{cm}^3),$$

$$I_c = I (\text{cm}^4), \quad = 1 + 3.8 n P_t;$$

P_t ——墙身垂直配筋率;

n ——钢筋与混凝土弹性模量之比, $n = \frac{E_s}{E_c}$,

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + 34.74/f_{cu}} (\text{MPa});$$

D ——墙截面高度, cm;

N ——竖向力, kg;

h ——加载点到基础顶面的高度, cm。

各墙板的弯曲开裂强度理论公式计算值如表 3。

表 3 弯曲开裂强度理论公式计算值

墙板	$f_{cu}/$ MPa	$I/$ ($10^7 \times \text{cm}^4$)	$E_c/$ ($10^4 \times \text{MPa}$)	n	ϕ	$I_e/$ ($10^7 \times \text{cm}^4$)	$Z_e/$ ($10^5 \times \text{cm}^3$)	$cQ_{bc}/$ t	1	2
SW1	22.6	1.301 45	2.68	7.46	1.072	1.395 15	0.996 54	19.296(192.96)	1.13	
	25.1									
SW2	29.1	1.301 45	2.95	6.78	1.065	1.386 04	0.990 03	21.752(217.52)		
SW3	29.8	1.818 53	2.97	6.73	1.065	1.936 73	1.383 38	30.758(307.58)	1.17	
	23.9									
SW4	28.9	1.301 45	2.94	6.80	1.065	1.386 04	0.990 03	21.667(216.67)	0.75	
SW5	22.0	0.608 35	2.65	7.55	1.073	0.652 76	0.466 26	8.907(89.07)		
	29.5									
SW6	23.7	1.301 45	2.73	7.33	1.070	1.392 55	0.994 68	19.723(197.23)		
SW7	33.1	1.301 45	3.08	6.49	1.062	1.382 14	0.987 24	34.334(343.34)	0.97	0.26

注:括号内的数据单位为 kN。

3 弯曲开裂强度实验结果与理论公式计算值的对比分析

将弯曲开裂强度实测结果与理论公式计算值对比可以发现:

(1) 计算值普遍偏高,但是除 SW2、SW5、SW6 外,其它墙板的计算值和实测值相差的规律性基本一致。这是因为 SW2 为两侧不等厚复合墙板,两侧混凝土板一厚一薄的复合墙板的两侧刚度不同,共同工作性能不好,其相互锚固连接性、协同工作性不好,弯曲开裂强度得不到充分发挥;SW5 为无边柱(暗柱)复合墙板,无边柱(也无纵筋),则对复合墙板无约束,使复合墙板不能很好的共同工作,另外无纵筋,容易形成水平裂缝引起试件的弯曲开裂;SW6 为装配式复合墙体,采用销键连接,致使墙板根部容易产生水平裂缝,因而降低了墙板的弯曲开裂强度,这只能说明这种销键连接不尽合理有待改进。计算值偏高说明该理论计算公式对 CL 复合墙板不尽合理,应该改进。

(2) 分析上述理论计算公式可以发现:该公式与混凝土的抗压强度、墙的横截面惯性矩、钢筋与混凝土弹性模量之比、墙身垂直配筋率、竖向力、横截面高度以及加载点到基础顶面的高度有关。本文认为墙身垂直配筋率这一概念不够明确,应分别定义为暗柱纵筋配筋率和墙身自身(不包括暗柱)垂直配筋率,并且这两种配筋率在公式中所起的作用不同,前者所起的作用较大,而后者所起的作用较小。这也是该公式不够合理的原因之一。

4 CL 体系中复合剪力墙板弯曲开裂强度理论计算公式

根据上述分析,本文认为,CL 体系中复合剪力

墙板弯曲开裂强度主要与暗柱纵筋配筋率、墙身自身垂直配筋率、墙(含暗柱)横截面惯性矩、混凝土抗压强度、钢筋与混凝土弹性模量之比、竖向力、横截面高度以及加载点到基础顶面的高度有关。弯曲开裂强度的理论计算公式采用日本公式(式(1))的形式,但用式(1)计算 CL 体系中复合剪力墙板弯曲开裂强度,其计算值偏高,因此式(1)应改进,改进方法如下:首先,将墙身垂直配筋率修改为暗柱纵筋配筋率和墙身自身(不包括暗柱)垂直配筋率,并且,暗柱纵筋配筋率的影响按 100%考虑,而墙身自身垂直配筋率的影响按 30%考虑。其次,公式中的系数应由试验确定。这样,CL 体系中复合剪力墙板弯曲开裂强度(Q_{bc})理论计算公式可表达为:

$$Q_{bc} = \frac{1}{h} (\mu_1 \sqrt{F_c} Z_e + \mu_2 ND) \quad (2)$$

式中 $Z_e = I_e / \frac{D}{2}$, $I_e = I$,

$$= 1 + 3.8n(\mu_c + 0.3\mu_t);$$

μ_t ——墙身自身垂直配筋率;

μ_c ——暗柱纵筋配筋率;

I ——墙(含暗柱)横截面惯性矩;

μ_1, μ_2 ——系数,由试验确定,如表 3;

其它符号同前。

综合考虑各种因素,取 $\mu_1 = 1.16$, $\mu_2 = 0.16$ 。这样按 SW4 试验结果确定的 μ_1 显得偏小,原因是 SW4 是实心墙板,公式中的各影响因素中,惯性矩发生了变化,在复合墙板中由于有空间斜插筋连接两片混凝土板,这会使横截面惯性矩有所增大,因而弯曲开裂强度有所提高,公式中虽然没有考虑这一惯性矩的增大,但系数 μ_1 中已经暗含这一增大因素。所以该公式不适于实心墙板弯曲开裂强度的计算。

(下转第 35 页)

2 影响填土地基容许承载力和变形模量的因素及其控制措施

影响填土地基容许承载力和变形模量的因素很多,但主要应是回填地基材料的均匀性和密实度,因此应选择合适的夯实方法、夯实机械和回填层厚度,并使回填夯实后的地基不受有害影响(挖沟及流动地下水等)。

根据现场试验和工程实践,要达到一定的容许承载力和变形模量,可参考以下数据进行施工控制:

(1)对风化石夹少量土填土地基,如采用 120kN 压路机碾压 3 遍,分层碾压厚度为 300mm,其变形模量约为 45MPa,容许承载力约在 0.4MPa。

(2)对碎石土填土地基,如采用 45kN 重的半圆底重锤夯实一遍,落距为 6m,回填厚度为 0.5m,其变形模量约为 13.5MPa、比例界限约为 0.15MPa,如夯实遍数增加, E_0 值和 p_0 值还可继续增大。

(3)对砂卵石回填地基,如用 6m^3 翻斗汽车边回填边均匀压实,大功率推土机边推平边压实,每层回填厚度为 1m,其地基容许承载力约为 0.3MPa,如再用 120kN 压路机碾压 3~4 遍或用振动打夯机夯一遍,或用平板振动器夯实两遍并稍加水撼处理,其容许承载力可达到 0.5MPa 左右。

(4)矿渣回填地基

如采用 40kN 重锤夯 6 遍,落距为 4m,一次回填厚度为 2m,这时的矿渣回填地基承载力约为 0.3MPa,变形模量约为 35MPa。

如采用 180kPa 的压力静载预压 3h,回填厚度为 2m,这时的矿渣回填地基容许承载力约为 0.3MPa,变形模量约为 45MPa。

如采用 40kN 重锤夯实 6 遍,落距为 5m,再用 150kN 波兰吊车碾压 5 遍,回填矿渣厚度为 2m,其容许承载力约为 0.35MPa,变形模量约为 55MPa。如上述 p_0 值和 E_0 值不满足要求,可增加夯实(碾压)遍数或减少回填层厚度或增加夯实(或碾压)的

荷载。

3 几个问题的探讨

(1)对低压缩性($a_{1-2} < 0.01$) 回填地基的容许承载力,可按 $p-s$ 曲线拐点 A 求得比例界限 p_0 ,比例界限取 $p-s$ 曲线上直线段的终点压力 p_A ,即 $[p] = p_0 = p_A$ 。

(2)用砂卵石做回填地基的沉降稳定很好,回填层的沉降在整个工程施工中完成 80%~85% 左右。

(3)用散料做回填地基材料时,回填施工完毕以后,不得使其受失稳等有害影响(如在回填层附近挖沟槽等扰动回填层,或有流动的地下水的不利影响)。

(4)用砂卵石做回填地基,经水浸渗之后,会使地基沉降稳定更快;用矿渣做回填地基,遇水被浸泡并在表面受冻后,再将水排出,对其容许承载力和变形模量未见受影响。

(5)用散料回填地基的总厚度,应大致相同,否则,应采取有效措施;如不采取措施,会产生不均匀下沉。

(6)利用煤矸石作为回填材料是一种尝试,我们既有成功也有失败。拌和或灌以粘性土只是解决膨胀或自燃的方法之一。在具体使用时尚需对煤矸石的成分、已风化程度及当地地质情况和粘土性质等进行试验研究以便找出可靠的比例再决定能否采用。

(7)应进一步研究回填材料本身的强度、性质、材料的级配程度、卵石夹砂量、风化岩中允许的最大夹土量等对地基强度的影响。

(8)我们的所有数据均是由现场用压板试验求得,而压板一般仅能获得持力层的承载力等,对深层土的承载力则不能求得。同时,用半圆底重锤夯实时,因有侧向挤压变形,其夯实作用不如平底锤,但对深层的影响差异则较小。这些方面也值得研究。

(上接第 23 页)

5 结 论

(1)用本文提出的弯曲开裂强度计算公式可以计算 CL 体系中复合剪力墙板的弯曲开裂强度,从而可以计算该墙板的弯曲开裂弯矩,为确定暗柱的大小和配筋提供依据。

(2)要保证 CL 体系中的复合剪力墙充分发挥抗剪作用,暗柱的大小和配筋是决定因素,所以弯曲

开裂强度对正确而合理的设计 CL 体系中复合剪力墙是非常有用的。

参考文献

- 1 日本建筑学会. 铁筋コンクリート构造计算规范. 同解说. 1982. 389~403
- 2 雅也. 既往の鉄筋コンクリート构造耐震壁に关す实验资料とその解析. 建筑研究资料. 建设省建筑研究所, 1975. 33~37
- 3 过镇海. 钢筋混凝土原理. 北京: 清华大学出版社, 1999. 13~18