

# 简支墙梁工作特性和计算方法的 实验研究和有限元分析

龚绍熙 唐克强

(土木建筑工程系)

**提要:** 本文给出18个墙梁实验研究结果, 讨论了墙梁组合结构的受力特性和破坏形态。通过有限元计算进一步分析了墙梁界面应力状态和托梁内力变化规律。给出了强度计算公式和设计建议。供修订砌体结构设计规范参考和在设计中试用。

**关键词:** 墙梁、工作特性、破坏形态、有限元分析、强度计算。

## 1 引 言

钢筋混凝土托梁及其以上计算高度范围内的墙体形成的组合构件, 称为墙梁。其中, 非承重墙梁如工业厂房的基础梁、连系梁。承重墙梁如商店住宅等多层混合结构房屋中的简支墙梁、连续墙梁、框支墙梁等。墙梁在工业与民用建筑中应用十分广泛。

但是, 墙梁的合理计算方法仍是一个没有解决的问题。目前国内通用的全部荷载法, 部分荷载法(如两墙三板荷载)、弹性地基梁法(靠边两个三角形荷载)、过梁法(跨中一个三角形荷载)等, 立论各一, 计算结果相差很大。主要问题是没有考虑托梁与墙体组合作用, 或考虑不够; 托梁作为受弯构件设计, 断面过大, 配筋过多。而又往往忽略墙体强度验算而可能不安全。

Wood 通过若干 $l=3m$ ,  $h_w=2m$ 无洞口及有洞口墙梁实验。研究了墙梁组合作用问题。对于  $h_w/l \geq 0.6$  及  $h_b/l = \frac{1}{15} \sim \frac{1}{20}$  的简支墙梁, 建议采用当量弯矩法, 即:

对于靠近支座设有门窗洞口的墙梁

---

\* 参加实验工作的有李天玉、范立群、解德生、秦常明、李喜梅、张增荣等。电算工作在北京钢铁设计研究总院顾怡荪等协助进行, 苏克俭参加了电算结果的整理分析。

$$M_D = \frac{1}{50} q l^2 \text{ (或 } M_D = \frac{M_G}{6.25} \text{)}$$

对于无洞口或跨中有洞口墙梁

$$M_D = \frac{1}{100} q l^2 \text{ (或 } M_D = \frac{M_G}{12.5} \text{)}$$

式中,  $M_D$ 为当量弯矩,  $M_G$ 为简支梁弯矩,  $q$ 为托梁承受的全部均布荷载。此法计算简单, 但仍将托梁当作受弯构件设计, 与实际不符, 并可能导致不安全。

作者建议的另一种方法为极限力臂法, 即将墙梁看作组合深梁, 托梁作为拉杆。极限内力臂取  $Z = \frac{2}{3} h_w$ , 但有  $Z \leq 0.7l$ 。

Rosenhaupt 通过 4 组 12 个,  $l = 1.85 \text{ m}$ , 加气混凝土墙梁试验, 研究了墙高, 配筋率。砌体材料及边缘加劲杆对组合作用的影响, 建议内力臂取  $Z = 0.5 h_w$ 。

Burhouse 通过 10 个  $l = 3.66 \text{ m}$  墙梁试验研究不同高跨比 ( $h_w/l = 0.33, 0.58, 0.83, 1.04$ ) 及配筋率影响, 认为内力臂与  $h_w/l$  及托梁强弱有关。

国内早期的研究工作有西安冶金建筑学院进行的砖墙梁试验, 浙江大学进行的大尺寸墙梁试验等。郑州工学院土建系曾完成两栋商店——住宅墙梁内力和变形测定, 证实托梁与砌体的组合作用是很大的, 中和轴位于墙中, 托梁处于组合深梁的拉区。明确提出托梁在沿界面端部集聚的竖向压力与水平剪力作用下应按拉弯构件设计。并在国内最先采用有限元方法来分析墙梁。

本文给出 18 个简支墙梁试验研究及部分有限元分析结果。讨论了墙梁受力特点与破坏形态, 以及使用阶段强度计算和施工阶段强度验算。指出了简支墙梁设计的初步建议。

## 2 实验研究

第一批墙梁构件如图 1 所示。第二批构件如图 2 所示。主要参数为:  $l = 2 \sim 2.4 \text{ m}$  墙厚  $240 \text{ mm}$ ,  $h_w/l = 0.39 \sim 0.785$ ,  $h_b/l = \frac{1}{8} \sim \frac{1}{48}$  托梁配筋率  $\rho = 1.07 \sim 5.38\%$ 、砼立方体抗压强度  $f_{cu,20} = 15.9 \sim 31.6 \text{ kg/cm}^2$ 、砌体抗压强度  $f = 18.6 \sim 45.7 \text{ kg/cm}^2$ 。

试验在 500 t 压力弯曲试验机上进行。主要量测了托梁钢筋应力及中断面砼应变墙体中断面水平应变, 界面应变, 跨中挠度及水平变位。试验中注意观察了梁及墙体开裂荷载, 裂缝图形及破坏形态和破坏荷载。

实验表明: 墙梁从加荷到破坏经历了弹性、带裂缝工作及破坏等工作阶段。对于不开洞墙梁, 梁开裂约在破坏荷载的 60% 以后, 墙开裂约在破坏荷载的 70% 以后, 弹性工作阶段较长。典型的  $P-f$  曲线见图 3。

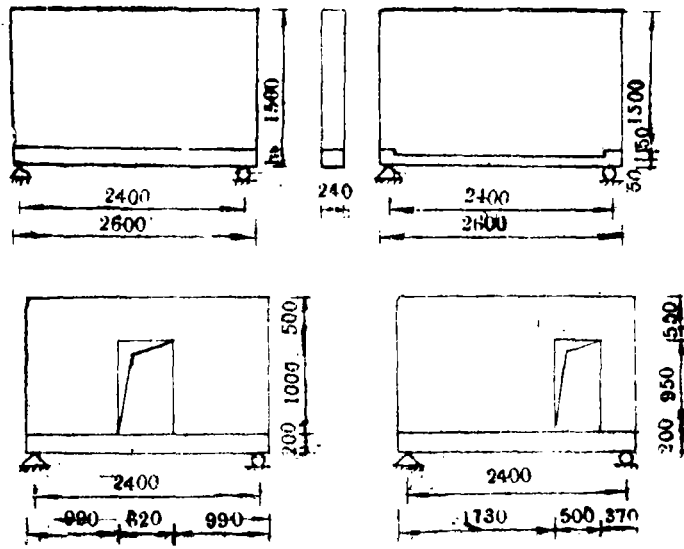


图 1

实验证明: 从加荷到破坏, 墙梁如同组合深梁一样地工作。从中断面应力分布(图 4)看出, 托梁大部分或全部处于受拉区, 中和轴位于墙中或随着荷载增加上升到墙中。

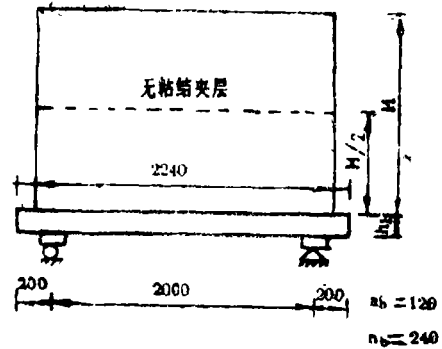


图 2

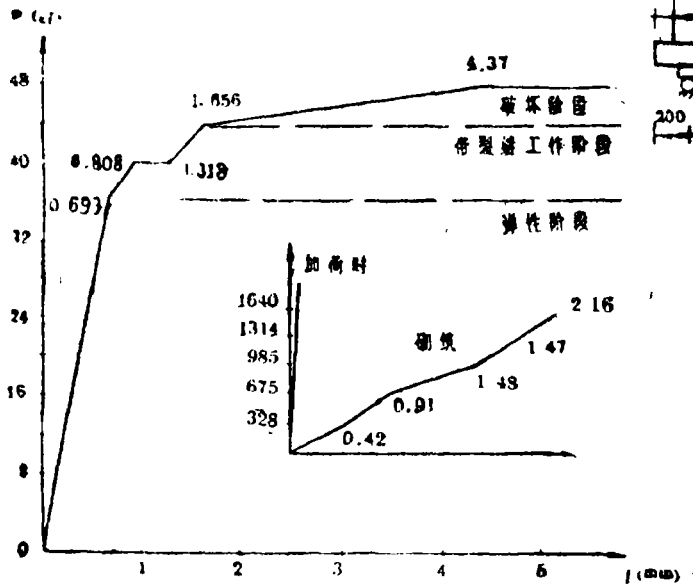


图 3 荷载—跨中挠度曲线

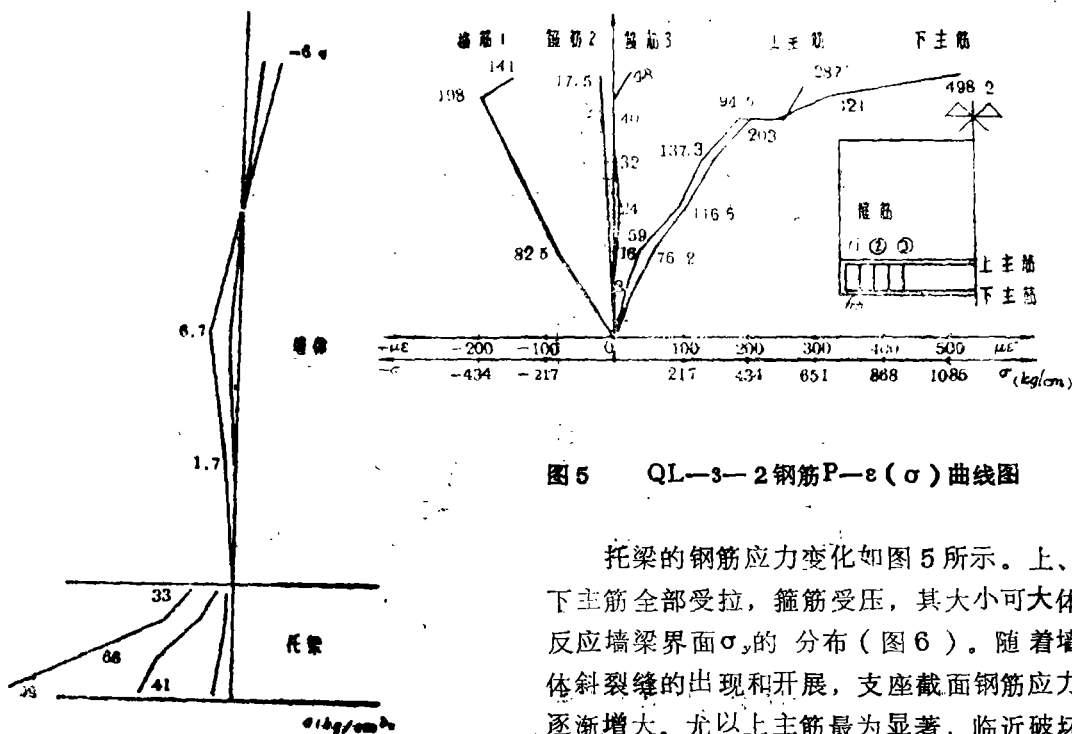


图5 QL-3—2钢筋P—ε(σ)曲线图

图4 QL1—2跨中垂直断面水平应力

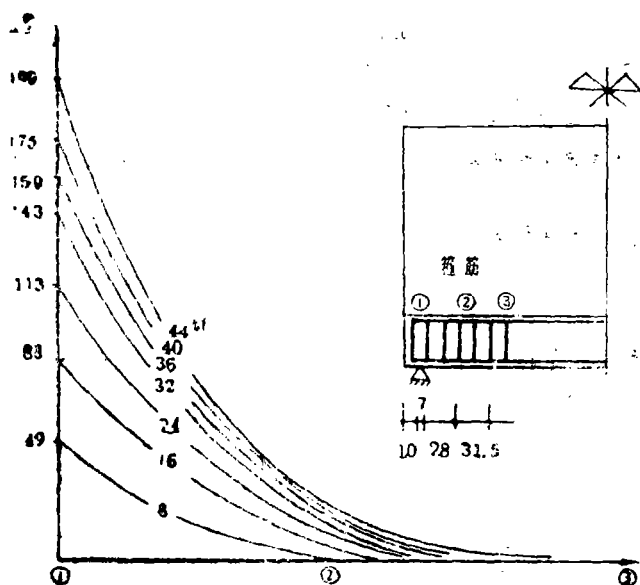


图6 QL—3—2钢筋压应变分布图

托梁的钢筋应力变化如图5所示。上、下主筋全部受拉，箍筋受压，其大小可大体反应墙梁界面 $\sigma_x$ 的分布(图6)。随着墙体斜裂缝的出现和开展，支座截面钢筋应力逐渐增大。尤以上主筋最为显著，临近破坏时有可能超过跨中截面。墙梁形成组合拱受力模型。主要试验结果汇总见表1。

取决于 $h_w/l$ 、 $h_b/l$ 、 $\rho$ 及 $f_{cu,20}$ 、 $f$ 和加荷方式的不同，墙梁可能发生下述破坏：

1.1 弯曲破坏：托梁主筋达到流限引起的破坏，主要发生于墙体较强托梁较弱，一般 $h_w/l$ 稍小的情况。

1.2 剪切破坏：由于墙体斜裂缝引起的墙体剪切破坏或延伸至托梁而引起斜截面破坏，主要发生于托梁较强，墙体较弱， $h_w/l$ 适中的情况。破坏形态又分为：



1.3 局压破坏。支座上方托梁以上的砌体由于局压强度不足引起的破坏,一般发生在托梁较强,砌体很弱且 $\frac{h_v}{l}$ 较大时。

当墙梁开偏洞时,破坏发生于洞口上边砌体剪切破坏及洞口边砌体的斜向偏压(图10)。

当墙梁带有无粘结夹层时(模拟墙梁中夹有装配式楼板的情形),破坏形态并无很大影响(图11)。抗剪承载能力有所降低。破坏时沿无粘结夹层可能产生推移推出现象。

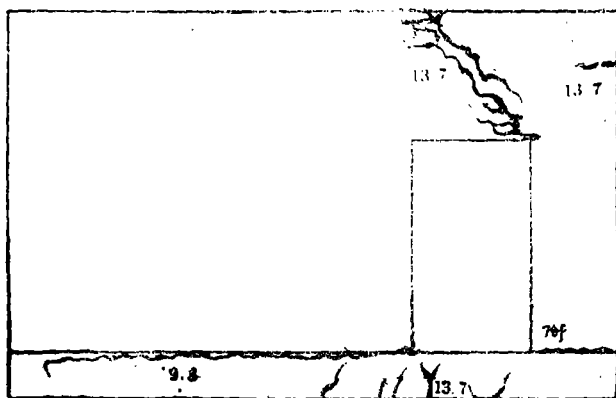


图10 QL-2-4 裂缝图

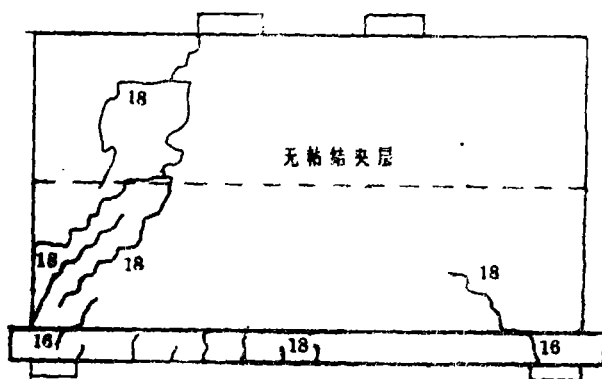


图11 QL16-4 裂缝图

### 3 有限元分析

由于墙梁弹性工作阶段较长,对墙梁进行有限元法弹性应力分析是有意义的,可以近似反映墙梁在使用阶段的工作性能。

本文采用四边形单元自动形成网格的平面问题墙梁计算程序对表1所列序号1—10的构件进行有限元法分析。 $\frac{h_b}{l} = \frac{1}{8} \sim \frac{1}{24}$ ,  $\frac{E_c}{E} = 4.05 \sim 12.96$ ,  $\frac{h_v}{l} = 0.625$ 。单元划分如图12所示。其界面应力分布如图13所示。 $\sigma_y$ 的分布如同抛物线形,变化较大的范围在端部 $\frac{1}{4}\sigma_y$ 峰值随托梁刚度的增加而减少。根据有限元分析结果进行回归, $\sigma_y$ 峰值可用下式表示

$$\delta y = 4.2 \left( 1 - 2.5 \frac{h_b}{l} \right) \left( 1.1 - 0.01 \frac{E_c}{E} \right) \frac{q}{b_b} \quad (1)$$

则分布压力峰值为

$$P = 4.2 \left( 1 - 2.5 \frac{h_b}{l} \right) \left( 1.1 - 0.01 \frac{E_c}{E} \right) q \quad (2)$$

$\tau_{xy}$  峰值可用下式表示:

$$\tau_{xy} = 1.7 \left( 1 - 4.32 \frac{h_b}{l} \right) \frac{q}{b_b} \quad (3)$$

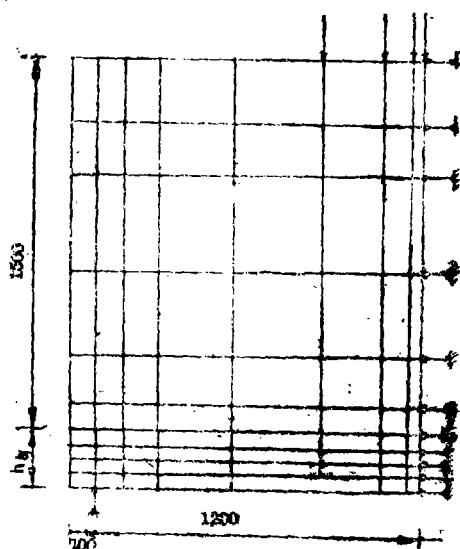


图12

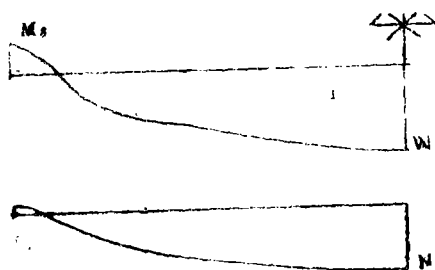


图14

$\tau_{xy}$  峰值离支座的距离  $X_0$  约为  $\frac{1}{12}l$ ,

可用下式表示

$$X_0 = \left( 0.0075 + 0.588 \frac{h_b}{l} \right) l \quad (4)$$

在界面力作用下, 在托梁中产生拉力  $N$  和弯矩  $M$ , 其示意图如图 14 所示。随着  $\frac{h_b}{l}$  的减少,  $\sigma_N$  呈线性增加, 但  $N$  变化不大。跨中拉力  $N$  可用下式计算:

$$N = 0.264 \left( 1 + 0.81 \frac{h_b}{l} \right) \left( 0.623 + 0.236 \frac{1}{h_w} \right) \left( 0.91 + 0.11 \frac{E_c}{E} \right) ql \quad (5)$$

跨中弯矩  $M$  随着托梁高跨比  $\frac{h_b}{l}$  的增加而很快增大, 随着  $\frac{E_c}{E}$  的增加也很快增大。说明托梁刚度愈大, 托梁跨中弯矩愈大。支座负弯矩  $M_s$ , 随  $\frac{h_b}{l}$  和  $\frac{E_c}{E}$  的增加变化较缓慢。

根据有限元分析结果回归得出:

$$M_0 = \frac{ql^2}{14.35} \left( \frac{h_b}{l} - 0.0517 \right) \left( 0.143 + 0.105 \frac{E_c}{E} \right)$$

$$\times (1 \ 2 \ 6 \ 3 - 0 \ 4 \ 2 \ 1 \frac{h}{l})$$

(6)

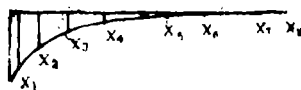


图13 (a)

构 件 编 号	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>
QL-1-1	26.25	10.16	9.88	4.60	1.53	1.33	1.12	0.98
QL-1-2	29.23	19.14	10.91	3.94	1.09	0.77	0.71	0.16
QL-2-1	30.99	18.76	10.47	4.04	1.28	0.47	0.22	0.10
QL-2-2	32.76	20.81	10.74	3.28	0.73	0.39	0.24	0.11
QL-3-1	34.63	23.13	10.50	2.68	1.10	0.79	0.73	0.61
QL-3-2	34.50	22.80	10.43	0.47	0.23		0.04	+0.15
QL-4-1	36.22	24.72	10.01	2.25	0.32	0.08	0.22	+0.50
QL-4-2	36.20	24.21	10.25	2.25	0.15	0.08	0.22	+0.51

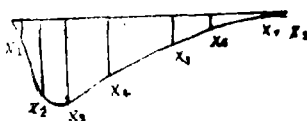


图13 (b)

构 件 编 号	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>
QL-1-1	3.51	7.72	9.61	7.55	4.55	2.12	0.69	0.18
QL-1-2	2.96	7.27	9.16	6.64	3.68	1.84	0.69	0.17
QL-2-1	2.72	9.82	11.54	7.30	3.98	1.76	0.52	0.06
QL-2-1	2.30	9.36	10.89	6.27	3.33	1.65	0.59	0.15
QL-3-1	0.20	11.62	11.88	11.5	2.94	1.43	0.52	0.14
QL-3-2	0.18	11.62	11.86	5.73	2.93	1.42	0.51	0.14
QL-4-1	4.00	16.90	13.16	5.35	2.53	1.06	0.32	0.09
QL-4-2		16.94	12.99	5.22	2.46	1.01	0.29	0.08



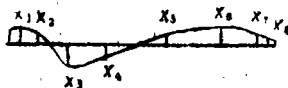


图13 (c)

构件编号	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>
QL-1-1	+0.78	+0.15	-4.24	-5.96	-3.87	-4.00	-6.00	-6.25
QL-1-2	+0.59	+0.58	-1.55	-0.72	+3.24	+5.36	+5.47	+5.49
QL-2-1	+3.66	+3.45	-3.17	-3.43	+2.99	+4.90	+2.52	+2.04
QL-2-2	+3.46	+4.08	-1.81	+1.09	+7.61	+10.57	+10.37	+10.33
QL-3-1	+6.78	+7.62	-1.93	+4.15	+12.55	+18.31	+16.16	+16.14
QL-3-2	+5.62	+7.61	-1.89	+4.19	+12.58	+18.36	+16.24	+16.18
QL-4-1	+14.26	+14.48	-2.64	+9.65	+20.94	+26.33	+26.15	+25.95
QL-4-1	+16.65	+16.78	-1.64	+9.91	+22.05	+26.31	+26.02	+25.76

$$M_s = -\frac{q_1^2}{160} \left( \frac{h_b}{l} + 0.102 \right) (0.926 + 0.0085 \frac{E_c}{E}) \dots\dots (7)$$

## 4 使用阶段强度计算

作用在墙梁上的荷载可分为作用在托梁顶面的荷载 $q_1$ 、 $g_1$ 、 $P_1$ 以及作用在墙梁顶面的荷载 $q_2$ 、 $g_2$ 两部分(图15)。墙梁在使用阶段应分别进行托梁正截面强度,斜截面强度,以及墙体斜截面强度和托梁上部砌体局部承压强度计算。

### 4.1 正截面强度计算:

4.1.1. 托梁按钢筋混凝土偏心受拉构件设计。其中弯矩包括两部分:作用在托梁顶面上的荷载产生的简支梁弯矩 $M_1$ 以及作用在墙梁顶面荷载产生的弯矩 $M_0$ 。按(6)式计算。拉力 $N_0$ 按(5)式计算。

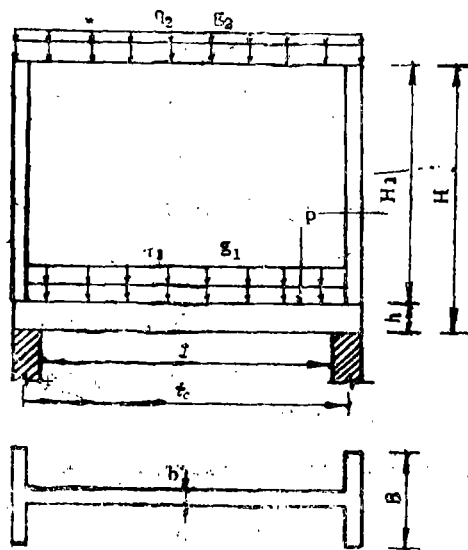


图15

支座截面在  $M_s$  (按(7)式计算)作用下接受弯构件设计。

#### 4.1.2、作为简化计算方法,可按组合深梁的拉弯杆件设计托梁。

(1) 在  $q_1$ 、 $g_1$ 、 $P_1$  作用下求得  $M_1$  接受弯构件确定钢筋面积  $A_{s1}$ ;

(2) 在  $q_2$ 、 $g_2$  作用下求得简支梁弯矩设计值  $M_2$  按下式计算  $A_{s2}$ :

$$M_2 \leq A_{s2} f_y Z \quad (8)$$

$Z$ ——内力臂,根据32个构件实验资料,回归结果

$$Z = 0.062(10.6H_0 + 1) \quad (9)$$

偏于安全建议取

$$Z = 0.1(5H_0 + 1) \quad (10)$$

式中  $H_0 = h_w + h_b/2$

当  $H_0 \geq 1$  时,取  $Z = 0.6L$ 。

由(8)式算出的  $A_{s2}$  中,20~40%配在托梁上边60~80%配在托梁下边。

#### 4.2、斜截面强度计算

##### 4.2.1、墙体抗剪强度根据38个构件回归结果并偏于安全,按下式计算。

$$V_2 \leq k_1 k_2 (0.16 + 1.44 \frac{h_b}{l}) b h_w f \quad (11)$$

式中  $k_1$ ——集中荷载影响系数,均布荷载时, $k_1 = 1$ ,集中荷载时

$$k_1 = \frac{2}{1 + 2.6 \frac{a}{h_w}} \quad (12)$$

$a$ ——集中荷载剪跨;

$k_2$ ——无粘结夹层影响系数·当  $h_w \leq 1$  取两个楼层高度时,

$$k_2 = 0.7。$$

##### 4.2.2、托梁抗剪强度计算:按钢筋砼拉剪构件设计时,其中 $V_b$ 和 $N_s$ 按下式取值。

$$V_b = V_1 + 0.4 V_2 \quad (13)$$

$$N_s = 0.3 N_0 \quad (14)$$

式中,  $N_0$  按(5)式计算,  $V_1$  为  $q_1$ 、 $g_1$ 、 $P_1$  产生的支座边缘剪力设计值,  $V_2$  为  $q_2$ 、 $g_2$  产生的支座边剪力设计值。

##### 4.3、托梁上部砌体局部受压强度计算

$$\xi P \leq \alpha b_b f \quad (15)$$

式中,  $P$  按(2)式计算,  $\alpha$  为砌体局压强度提高系数,可取1.5

$\xi$ ——纵向翼缘对压力峰值影响系数

$$\xi = \frac{1}{1 + 0.25 \frac{B}{b}} \quad 1 \leq \frac{B}{b} \leq 5 \quad (16)$$

## 5 施工阶段托梁强度验算

托梁在施工阶段承受的砌体重量由于砌体不断增强和具有一定的起拱作用而可以大大折减。托梁在施工阶段的挠度变化情况如图 16 所示。可以看出挠度增量逐渐减小。根据挠度反算出当量均布荷载相当于砌体实际重量的  $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}$  (表二)。因此可以取高度为  $\frac{1}{3}$  跨度的砌体自重及其他施工荷载按钢筋混凝土受弯构件验算强度。

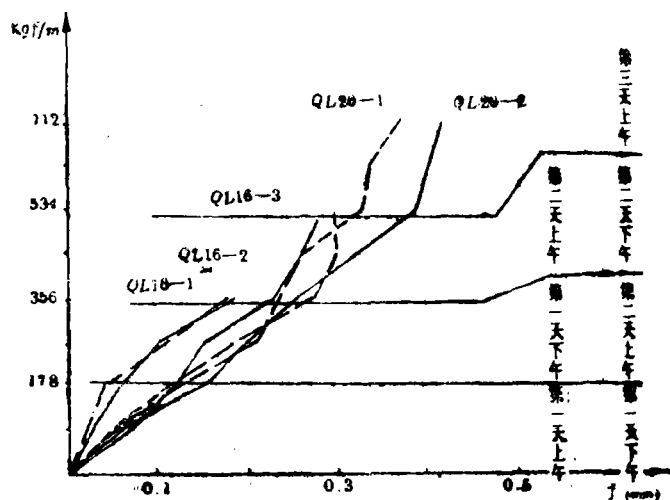


图 16

单位: kgf/m

表 二

编 号	砌体实际重 $q_1$	托梁中点挠度 (cm)	按砼截面算 $q_2$	$q_2/q_1$	按折算截面算 $q_3$	$q_3/q_2$	备 注
QL 16—1	356	0.0185	99.1	1/3.59	108.1	1/3.29	
QL 16—2	356	0.0175	63.8	1/3.8	102.3	1/3.48	
QL 16—3	534	0.028	157.5	1/3.39	171.8	1/3.11	
QL 16—4	534	0.0295	165.9	1/3.22	181.0	1/2.95	
QL 20—1	712	0.042	213.2	1/3.34	234.7	1/3.03	
QL 20—2	712	0.037	187.8	1/3.79	206.7	1/3.44	
平 均				1/3.51		1/3.2	
推算至 $H=L$	890	0.044	223.4	1/3.98	245.8	1/3.6	

## 参 考 文 献

- [1] Б.Н.ЖЕМОМКИН鞍钢设计院编译 “承墙梁及过梁计算” 1972.
- [2] 汪齐正、胡秋谷：“悬墙设计原理及其应用的探讨” 土木工程学报1960.1.
- [3] Wood, R. H. 孙明译“组合结构的研究” 四川建工局科研所 四川工业建筑设计院 1973.8.
- [4] “墙梁的实验研究” 郑州工学院土建系托墙梁研究组编译, “托墙梁译文选”(一)
- [5] P. Burhouse: “Composite action between brick panell walls and their supporting beams” the Institution of Civil Engineers proceedings 1969.
- [6] 郑州工学院土建系托墙梁研究组、结构实验室龚绍熙执笔: “墙梁的实验测定与分析” 郑州工学院“科技”1975.1.
- [7] 郑州工学院土建系托墙梁研究组寿楠楠执笔: “墙梁组合结构的矩阵分析” 1974.5.
- [8] 简支墙梁的实验研究(一)(二) 郑州工学院土建系 1977.7及1980.11.
- [9] 墙梁试验研究报告(I)、(II)、(III) 华南工学院建工系1976.8—1979.4
- [10] 西安冶金建筑学院建工系 墙梁剪切实验研究报告 1978.1
- [11] 浙江大学土木系 墙梁试验研究报告——跨中开有洞口墙梁
- [12] 北京钢铁设计研究总院 洛阳有色金属设计院  
长沙有色冶金设计院 西南建筑设计院 兰州有色冶金设计院 单层厂房形梁设计与计算

# EXPERIMENTAL RESEARCH AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF BEHAVIOUR AND CALCULATION FOR SIMPLY SUPPORTED WALLBEAMS

Gong Shaoxi      Tang Keqiang

(Department of civil Engineering and Architecturc)

**AbStract:** In this paper the test results on 18 specimens of the walls on simply supported beams (simple wall-beams) are given. The behaviour and the modes of failure for the composite members of the walls with the beams are discussed. The distribution of stresses of the interface between

walls and beams and calculation of the internal forces for trimmer beams are presented by finite element analysis. At last the calculated formulas of strength and design suggestions for the wall-beams are also given. It may be used in the practice of the building engineering and handed over to revise the design code for the masonry structures.

**keywords:** wall-beams, behaviour modes of failure, finite element analysis, strength calculation.