

# 雨蓬和悬臂楼梯试验研究

宋 雅 涵 \*

(设计院)

## 提 要

钢筋混凝土雨蓬和悬臂楼梯是砖石混合结构常用的构件,关于此类悬挑构件倾覆破坏的形式和机理,有关教材和规范未作规定。为了配合砌体设计规范的修订工作,我们对雨蓬和悬臂楼梯进行了一些试验研究工作,本文通过试验分析,对雨蓬等构件的设计方法提出建议。文尾附有详细数据及图形。

为了探讨和研究雨蓬、悬臂楼梯等平面外受力构件的倾覆破坏的性能,我们于1984年3月在我院结构实验室内作了两个雨蓬和一个悬臂楼梯的抗倾覆破坏试验,通过试验使我们对这一类悬挑构件的倾覆性质有一些新的认识。现将试验结果整理如下:

## 一、试 验 情 况

1、试件尺寸,为了得到雨蓬等构件倾覆破坏的真实情况,试验构件的尺寸取实际工程中常用的尺寸,试件均埋入24厘米的砖墙砌体中,雨蓬宽度为2米,挑出长度为1米,悬臂楼梯挑出为1.2米。试件断面的详细尺寸见图1、2、3。为了不使试件中钢筋混凝土部分过早破坏,其配筋设计比通用图集的配筋量有所提高。两个雨蓬板的受力筋均为 $\phi 8$ 间距120毫米,雨蓬梁配筋为4 $\phi 12$ ,箍筋为 $\phi 8$ 间距120毫米。悬臂楼梯踏步板主筋为1— $\phi 12$ 。试件使用材料:混凝土200号、I级钢筋、砖为100号,砂浆:试件YP—1为40号(二组平均强度为40公斤/平方厘米)试件YP—2为62号(四组平均强度为61.75公斤/平方厘米),悬臂踏步34号(三组平均强度为34公斤/平方厘米)各试件强度指标见表1。

试 件 强 度 指 标

表 1

构 件 称	砖 号 抗 压 强 度	砂 浆 试 块 强 度	砌 体 抗 压 强 度 R	砌 体 抗 拉 强 度 RL	弹性模量E
YP—1	109	40	28kg/cm <sup>2</sup>	2.4kg/cm <sup>2</sup>	700×28=19600kg/cm <sup>2</sup>
YP—2	109	62	34kg/cm <sup>2</sup>	3.1kg/cm <sup>2</sup>	800×34=27200kg/cm <sup>2</sup>
T B	109	34	28kg/cm <sup>2</sup>	2.3kg/cm <sup>2</sup>	19600kg/cm <sup>2</sup>

2、仪表布置:采用手持式应变仪(标距为250毫米)量测雨蓬梁(或踏步)下砌体的垂直应变,手持应变仪表脚的间距在10~15厘米左右,其位置尺寸详见图1、4、5。此外还用百分表量测墙体变位及雨蓬梁的扭转情况,其位置参见图4、5。在试件YP—1试验中雨蓬梁跨中安放一只倾角仪。在试验方案中,还计划量测雨蓬中钢筋应力变化情况,但因电阻片的焊线被人损坏,钢筋应力未能测出结果。

\* 张保善同志参加了试验研究工作。

3. 施加荷载: 悬臂楼梯试验是用千斤顶在加荷架上进行的, 以集中力的形式加在悬臂踏步板上, 悬臂楼梯试验每级荷载为100公斤, 当荷载加到470公斤(六级)砌体倾覆, 试验结束。雨蓬试验时, 需要两付加荷架(4个立柱), 但加荷架的立柱影响仪表量测读数。因此, 雨蓬试验加载采用了红砖直接放在雨蓬板上的加载方式, 在雨蓬板上铺一皮红砖折合均布荷载为55公斤/平方米(每皮红砖为48块, 每块平均重量为2.3公斤), 每加一级荷载, 持续10分钟再进行读数。试件YP—1荷载加至316公斤/平方米时, 墙体倾覆。试件YP—2同YP—1仍用红砖直接加载, 加一皮砖仍为55公斤/平方米, 前两级荷载为165公斤/平方米(三皮砖), 第三级荷载为110公斤/平方米(两皮红砖重), 以后每次加载均为55公斤/平方米(一皮砖重)。一直加到708公斤/平方米(近十三皮砖重)雨蓬倾覆。试件YP—2因墙体增加了两个垛子( $240 \times 500$ )大大提高了砌体的抗倾覆能力。

## 二、试验结果分析

1、破坏特征, 雨蓬、(悬臂楼梯)当受到外荷载作用时, 雨蓬梁下(悬挑踏步下)砌体就有不同的变形发生。在构件上加荷载的一边(正面)梁下发生压应变, 在加荷载的另一边(背面)梁下则发生拉应变, 随着荷载的增大, 拉、压应变中和轴逐渐向施加荷载边移动。见图6。当背面受拉边的应力超过弯曲抗拉强度时, 就会出现裂缝, 我们这次试验, 第一批裂缝都是在雨蓬梁支座下靠洞边(或踏步下)的水平灰缝中首先出现。明显观察到裂缝时的外荷载为倾覆荷载的60%左右, 裂缝随外荷载的增加而逐渐加宽并向外延伸, 裂缝基本上是沿水平灰缝发展。见图1、2、3。同时砖墙顶部变形也逐渐加大(向加载方向倾斜)。直到使裂缝延伸到墙砌体两终端, 砌体失去抗倾覆能力, 试验结束。通过试验可以证明: 雨蓬和悬臂楼梯其倾覆破坏不是沿雨蓬梁(踏步板)两端的垂直面(与水平呈90度)。倾覆基本上是沿水平方向而破坏的。试验表明: 砌体的几何特征对抗倾覆能力有较大的影响。如试件YP—1砌体是一个单片砖墙, 当荷载加到316公斤/平方米时, 墙体就倾倒了, 试件YP—2在砌体中加了两个 $24 \times 50$ 的垛子(见图2)增加了墙体的几何特征和刚度。试验荷载加到708公斤/平方米时, 墙体才发生倾覆, 抗倾覆能力提高了2.2倍。通过试验证明, 过去认为雨蓬倾覆破坏是沿雨蓬梁两端垂直剪断墙体, 用雨蓬梁两端垂直砌体重量来平衡外部荷载的假设是不符合实际情况的。

### 2、试验数据分析

由于砖砌体是各向异性材料, 很难准确测定其弹性模量值, 我们想从应变的变化规律来推断应力分布情况。下面分别就拉、压区应变的数据进行分析:

a、雨蓬(踏步)下砌体裂缝出现前后几级荷载的拉应变分布情况(见图7、9、11)从图中可以看出, 在雨蓬支座下(或悬臂踏步下)应变值较大, 这说明砌体的拉应变主要是由雨蓬梁在外荷载作用下的转动而引起的。在支座外各测点的拉应变(如YP—1, 20, 29点)迅速降低。甚至出现压应变。试件YP—2因有墙垛测点19、23、24, 故其应变值也有所提高。从图7中还可以看出, 当荷载不断增加时, 受拉作用的范围也在向支座外继续延伸。延伸部分砌体的拉应变是由于墙体位移而引起的。图9中YP—2左边支座因为测点35~40恰在裂缝以上, 故未能反映出象右边拉应变值的变化。

b、试验表明,在试件加载一边,混凝土与砌体界面上均产生压缩变形。压应变分布情况见图8、10、12,从图中可明显看出,变形主要集中于雨蓬梁支座(或踏步)下,支座以外测点变形迅速减小。但几个试件均表明,压应变范围延伸距离较远,本次试验结果,每边延伸长度大于支座长度。支座外砌体压应变也随外荷载增加而不断增大。从图10中可以看出在支座下压应变的数值是比较均匀的,试件YP—2测点1~3在荷载660公斤/平方米时,压应变均为 $1400\mu\epsilon$ ,8、9、10三点最大差值也只有 $80\mu\epsilon$ (不到1%),我们可假定支座下应力为均匀分布。悬臂踏步外7、8测点压应变值没有明显减小,这可能是因为两个踏步断面不对称,对测点7、8有平面内扭转而引起的。从以上试验结果说明支座内外的砌体,随外荷载的增加,都产生不同的变形,说明雨蓬梁支座两端内外砌体是一个连续地整体结构,因而能够共同抵抗外荷载的倾覆力矩,过去假设沿雨蓬梁两端垂直破坏而不考虑支座外砌体参加抗倾覆工作是不合适的。

c、试验还表明,从开始加荷到试件倾覆,雨蓬梁以上未发现裂缝,从雨蓬梁中两边百分表和墙顶百分表的读数,可求得雨蓬(踏步)及墙体的转角。从图13可以看出梁和墙体转角值两者的数值是十分接近的,YP—1为 $9'12''$ 与 $8'28''$ YP—2为 $11'29''$ 与 $12'32''$ 。这说明墙体本身变形较小,可以把雨蓬以上墙体看作整体性比较好的刚体。在外荷载作用下雨蓬以上的墙体形成一个整体,可以共同抵抗倾覆。

3、关于砂浆的抗倾覆作用。如前所述试件受拉边(背面)裂缝发展基本上都是沿水平方向延伸,不象挑梁是沿梁尾某个角度发展。这说明雨蓬与砌体界面砂浆是受弯曲抗拉。下面通过计算试件的倾覆力矩( $M_{倾}$ )和砌体的抗倾覆力矩( $M_{抗}$ ),来分析砂浆的抗倾覆作用。抗倾覆力矩系根据试验破坏情况,砌体的抗倾覆面积取裂缝平均高度以上面积。

$$\text{YP—1} \quad M_{倾} = 316 \times 2 \times 0.5 + 0.08 \times 2500 \times 2 \times 0.5 = 516 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{抗} = 4.25 \times 1.76 \times 0.24 \times 1800 \times 0.12 = 388 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{倾} - M_{抗} = 128 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$\text{YP—2} \quad \text{砌体截面几何重心距墙边19厘米(计算从略)}$$

$$M_{倾} = 708 \times 2 \times 0.5 + 0.08 \times 2500 \times 2 \times 0.5 = 908 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{抗} = (4.25 \times 1.7 \times 0.24 + 2 \times 0.24 \times 0.5 \times 1.7) \times 1800 \times 0.19 = 732 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{倾} - M_{抗} = 176 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$\text{TB板} \quad \text{砌体截面几何重心距墙边18.5cm}$$

$$M_{倾} = 470 \times 1.23 + 2(0.04 \times 0.3 + 0.05 \times 0.15) \times 1.26 \times 2500 \times \frac{1}{2} \times 1.26 \\ = 655 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{抗} = (2.85 \times 1.65 \times 0.24 + 2 \times 0.25 \times 0.37) \times 1800 \times 0.185 = 437 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{倾} - M_{抗} = 218 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

以上计算说明,试件倾覆时荷载产生的力矩,要比裂缝以上砌体重量产生的抗倾覆力矩大2~3级荷载,两者相差的数值即是砂浆的抗倾覆能力。根据各试件的材料标号,我们可以求出砌体的弹性模量,从而可以得出砌体达到抗拉强度时的应变值。

$$\text{YP—2} \quad \epsilon = \frac{R_t}{E} = \frac{3.1}{27200} = 114\mu\epsilon$$

$$\text{YP—1} \quad \varepsilon = -\frac{2.4}{19600} = 122\mu\varepsilon$$

$$\text{TB} \quad \varepsilon = -\frac{2.3}{19600} = 118\mu\varepsilon$$

从图六可知,当砌体拉应变为 $120\mu\varepsilon$ 左右时,截面的中和轴约在墙中,因此我们将砂浆的抗倾覆计算简图如下:

$$\begin{aligned} M_{\text{砂}} &= \frac{1}{2} R_l \times \frac{d}{2} \times \frac{2}{3} d \times 2L \cdot \mu \\ &= \frac{1}{3} R_l \cdot d^2 \cdot L \cdot \mu \quad (1) \end{aligned}$$

式中:  $M_{\text{砂}}$  为砂浆的抗倾覆力矩。

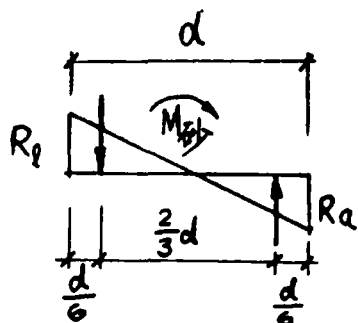
$L$  为雨蓬两端支座长度,以米计。

$d$  为墙厚,以厘米计。

$\mu$  为灰缝饱满系数,通过试验 $\mu$ 可取为0.5。

$$\text{YP—2} \quad M_{\text{砂}} = \frac{1}{6} 3.1 \times 24^2 \times 0.74 = 220 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$\text{YP—1} \quad M_{\text{砂}} = \frac{1}{6} 2.4 \times 24^2 \times 0.74 = 170 \text{ kg} \cdot \text{m}$$



用(1)式计算出砂浆的抗倾覆力矩,与 $M_{\text{倾}}-M_{\text{抗}}$ 数值基本接近,说明可用此式估算砂浆的抗倾覆能力。

4、砌体抗倾覆面积的确定。以往计算雨蓬的抗倾覆力矩的方法,是按雨蓬梁两端垂直范围内(与水平成90度角)的砌体重量对墙边的力矩,通过试验证明:雨蓬梁两旁的砌体是有一定强度的整体结构,雨蓬并不是沿梁两端垂直面倾覆破坏,雨蓬两边一定范围内的砌体对雨蓬扭转有一定的约束作用。我们认为,将雨蓬梁两端垂直面以上砌体与梁两旁砌体割裂开的假定是不符合实际情况的。雨蓬的抗倾覆作用从梁两端有一定扩散作用。下面我们探讨一下砌体扩散角(与垂线的夹角)的问题。

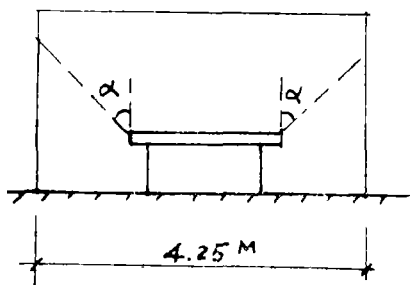
以YP—1为例,砌体容重按1800公斤/平方米

为了便于分析,均以墙边取矩。

若按梁端为90度时,扩散角为零度。墙高 $H$ 应为

$$H = \frac{516}{2 \times 0.24 \times 1800 \times 0.12} = 4.98 \text{ M}$$

若考虑扩散角 $\alpha$ 为30度,墙高



$$H = \frac{516 + \operatorname{tg} 60 \times 1.5 \times 1.5 \times 1800 \times 0.24 \times 0.12}{4.25 \times 0.24 \times 1800 \times 0.12} = 3.26 \text{ 米}$$

墙高降低  $4.98 - 3.26 = 1.72$  米约为 35%

若考虑扩散角  $\alpha$  为 45 度, 墙高

$$H = \frac{516 + \operatorname{tg} 45 \times 1.5 \times 1.5 \times 1800 \times 0.24 \times 0.12}{220} = 2.87 \text{ 米}$$

墙高降低  $4.98 - 2.87 = 2.11$  约为 42%

若考虑扩散角  $\alpha$  为 60 度, 墙高

$$H = \frac{516 + \operatorname{tg} 30 \times 1.5 \times 1.5 \times 1800 \times 0.24 \times 0.12}{220} = 2.65 \text{ 米}$$

墙高降低  $4.98 - 2.65 = 2.33$  米约为 47%

若按雨蓬水平以上砌体全部考虑抗倾覆则需墙高 2.35M

墙高降低  $4.98 - 2.35 = 2.63$  米约为 53%

从以上计算可以看出, 砌体的抗倾覆力矩若考虑雨蓬两边砌体的整体性, 即按某个扩散角计算时, 满足抗倾覆的砌体高度有相当大的降低, 至于扩散角  $\alpha$  值则影响不是太大。当扩散角按 30 度墙高就减小 35%, 而从 30 度到 90 度 (即水平线) 仅减小 18%。因此我们认为取雨蓬梁两端 45 度扩散角的砌体重量计算抗倾覆力矩还是可行的。这样计算除了满足一定的可靠度, 也和挑梁等悬挑构件的扩散角一致, 便于计算。

5、关于倾覆点位置问题。如上所述, 随着外荷载的不断增大, 试件背面受拉区裂缝在不断加宽延伸, 但一直到构件倾覆, 裂缝在墙厚方向始终未见裂通, 从墙厚方向观察裂缝开展离加载的墙边约有 2~3 厘米。这说明砌体在墙厚度方向仍有一小部分受压 (或受拉而未达到其抗拉强度), 试验中未发现墙边有压碎现象。苏联学者郭尔布诺夫利用级数近似求解弹性地基梁的方法, 并考虑雨蓬常用材料, 可导出雨蓬倾覆点的近似公式 (详见参考资料 3)。

$$X = 0.13d$$

式中:

$d$  为雨蓬梁的宽度或墙厚, 以厘米计。

设雨蓬梁宽及墙厚为 24cm

$$\text{则倾覆点 } X = 0.13 \times 24 = 3.12 \text{ cm}$$

此数与试验中未开裂长度是基本吻合的。因实际试验与理论计算条件不尽相同, 上面公式计算出的数值可能偏大。我们认为雨蓬的倾覆点取进入墙内 2 厘米, 还是比较可行的。

### 三、几点建议

1、通过以上分析我们知道, 雨蓬 (悬臂楼梯) 其抗倾覆性能包括两个因素。一是砌体自重, 二是砂浆的抗拉强度。因为试验数量较少, 砂浆的抗倾覆能力目前尚提不出成熟的计算方法。我们认为, 砂浆的抗倾覆能力可作为安全储备不予考虑。砌体重量的抗倾覆力矩, 可按雨蓬梁两端上部 45 度扩散角范围内的砌体自重 (若有楼面荷载也应考虑) 对倾覆点取

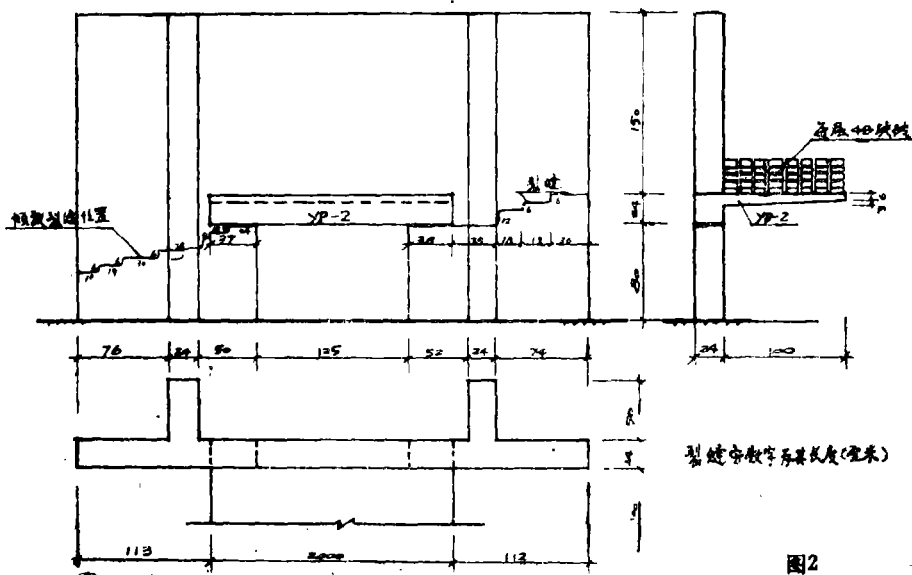
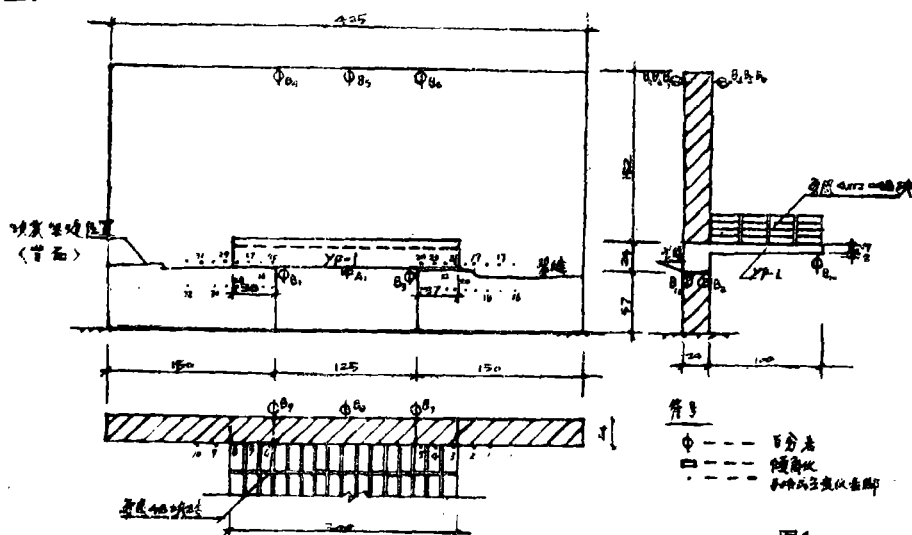
矩。当扩散角遇有窗洞口时,则不再向外扩散。但需注意,雨蓬梁上砌体不准有咬岔施工,以保证以上砌体抗倾覆的整体性。

2、雨蓬的倾覆点建议取离墙边(荷载侧)2厘米。这样考虑比以墙边作为倾覆点是偏于安全的。

### 参 考 资 料

- [ 1 ] “砖石结构设计规范”GBJ3-73
- [ 2 ] “五机部第六设计院技术资料”1979年9月
- [ 3 ] 郑州工学院挑梁专题组“挑梁倾覆试验研究报告”
- [ 4 ] 郑州工学院挑梁专题组“砌体中悬臂挑梁计算方法的研究与建议”

附图:



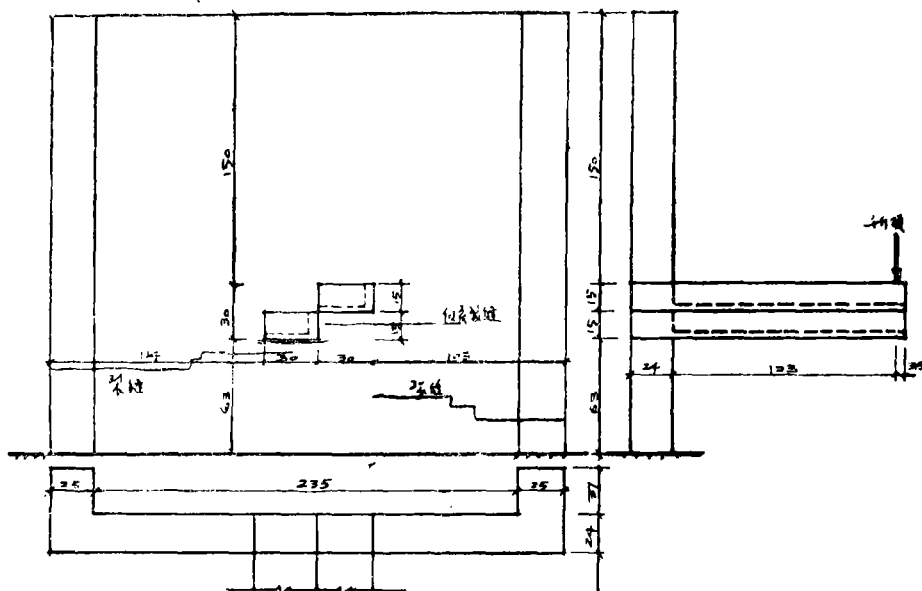


图 3

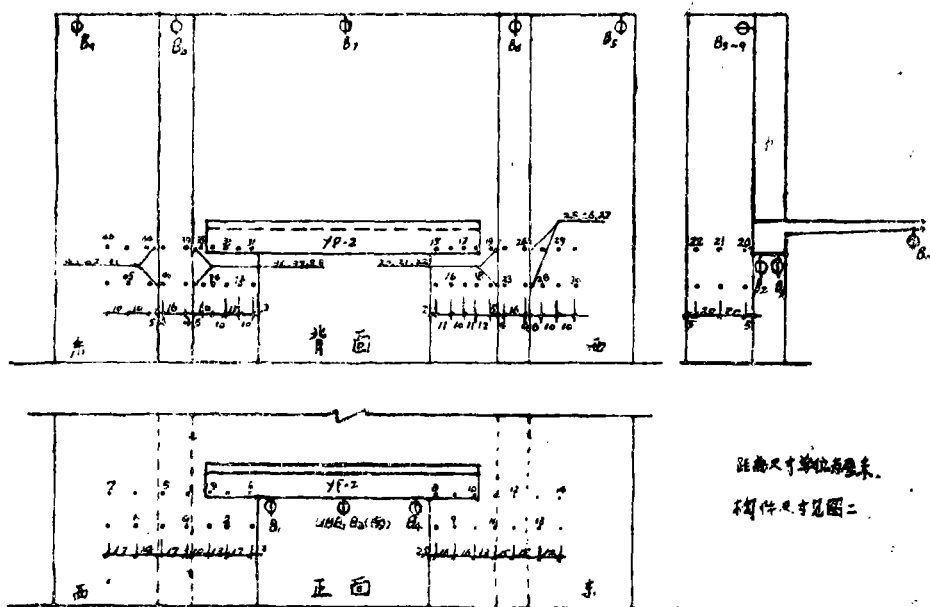


图 4

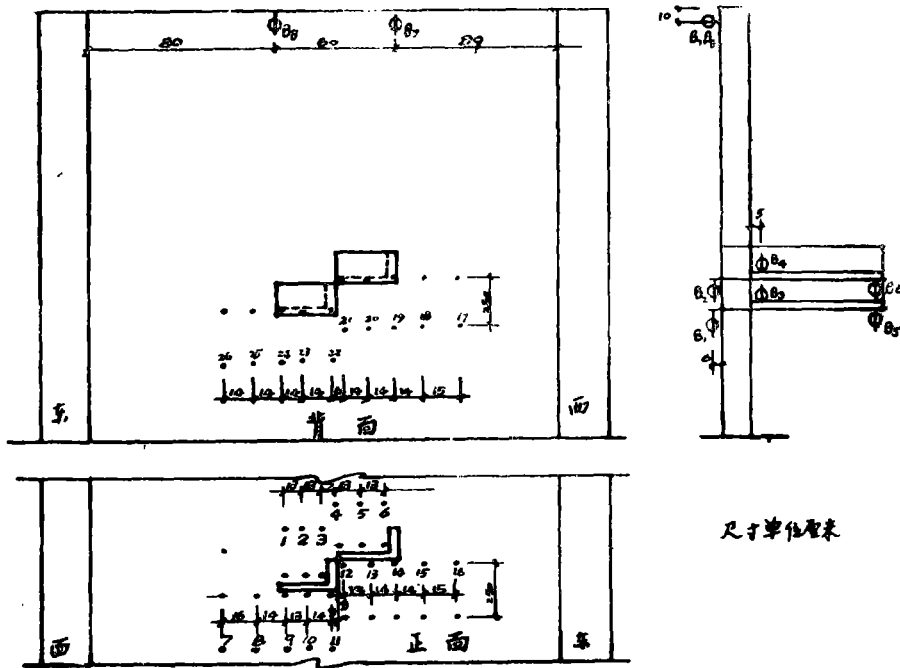


图 5

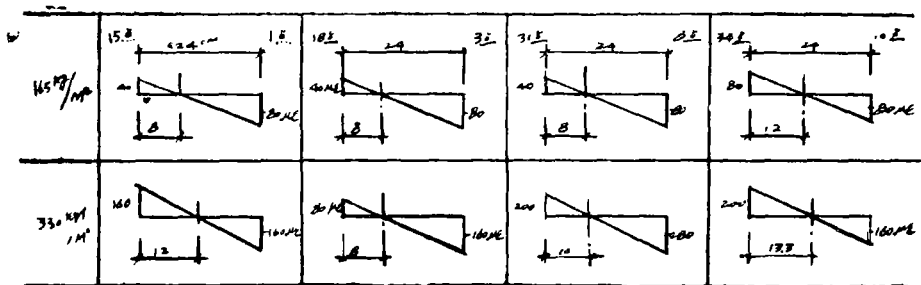


图 6

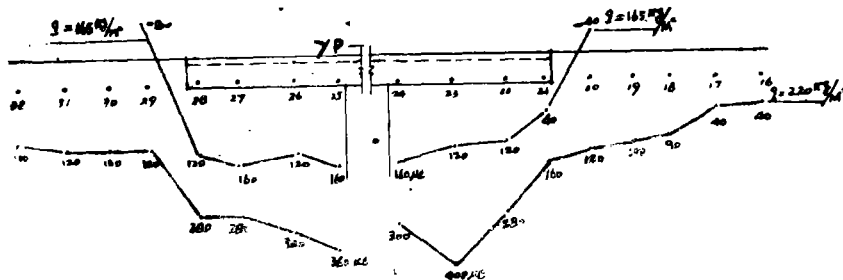


图 7

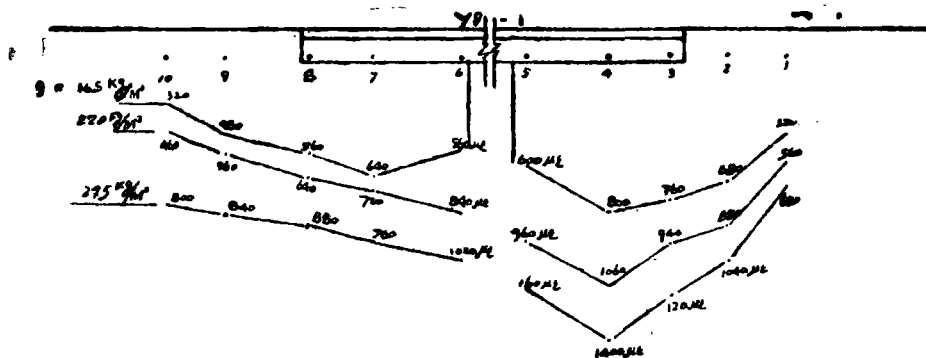


图 8

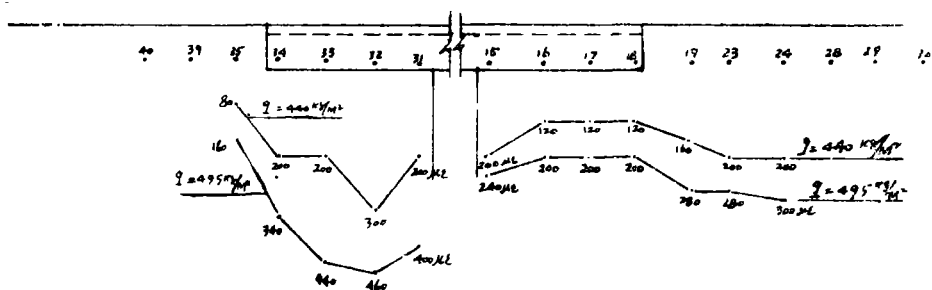


图 9

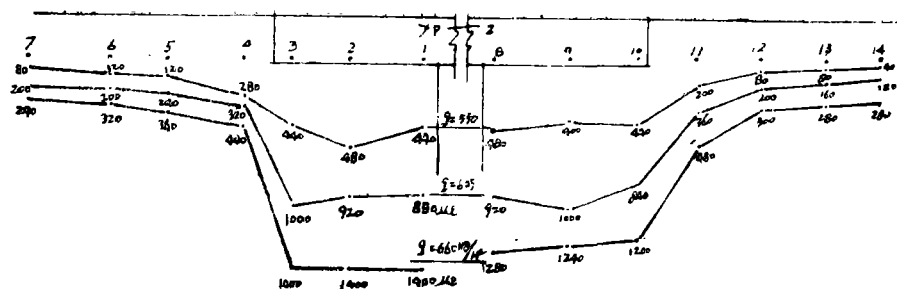


图 10

