

梁运毅等编

平铰双曲拱桥

模型试验和设计计算方法

交通部科学研究院
江苏省革命委员会交通局
无锡县革命委员会交通局

一九七六年一月

毛主席语录

阶级斗争是纲，其余都是目。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

备战、备荒、为人民。

我们的方针要放在什么基点上？放在自己力量的基点上，叫做自力更生。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

抓革命，促生产，促工作，促战备。

要认真总结经验。

前 言

在毛主席的革命路线指引下，在党的社会主义建设总路线的光照耀下，我国工人阶级发扬了自力更生，艰苦奋斗的革命精神，破除迷信，解放思想，创造了具有民族特色的新型的双曲拱桥已经十余年了。十余年来双曲拱桥发展很快。广大建桥职工对双曲拱桥的设计和施工方面积累了不少经验。为了进一步通过试验研究，使双曲拱桥的设计计算方法更为切合实际，交通部于一九七二年下达了“双曲拱桥设计计算方法的研究”科研任务，“双曲拱桥支承条件”的试验研究为其中项目之一。并由江苏省革命委员会交通局主持，交通部科学研究院派员指导和协作，无锡县革命委员会交通局参加，组成了工人、干部和技术人员“三结合”小组，在无锡县开展了工作。

研究双曲拱桥支承条件的由来是因为初期的双曲拱桥的拱脚构造通常是这样的：在拱座上对应于拱脚截面的拱肋部位预留浅槽，以插入预制拱肋，然后平贴台帽，用砂浆砌筑拱波并浇筑拱板混凝土，并沿用圬工拱桥的经验在拱脚截面上缘不配置与拱座锚固的钢筋。上述支承情况的双曲拱桥在拱脚与拱座联接处形成一个薄弱截面，但在附加力较小的情况下拱脚往往也观察不到有平缝出现，而在软土地基出现支座位移或当温差和混凝土收缩较大时则会出现一条平缝。通过多年实际行车考验，当这条平缝的张开宽度在一定限度内时并不影响结构物的正常使用，也不引起钢筋锈蚀问题。通过多个实桥加载试验，得出这类拱脚支承状况的双曲拱桥是介于无铰拱和双铰拱之间的概念，但不能确定其拱脚的锚制程度和判别条件究竟如何。为此进行了研究工作。

三年来，“三结合”研究小组认真学习无产阶级专政理论，提高了阶级斗争和路线斗争的觉悟，进一步明确了科学研究为无产阶级政治服务，为社会主义建设服务的方向，遵照毛主席“**理论的基础是实践**”的教导，通过对模型测试资料（两个裸拱和一个有拱式拱上建筑的拱的模型取得了比较系统的资料，另外几个裸拱模型也取得了部份资料）的分析，还用盐城地区模型试验资料予以验证，认识到拱脚出现平缝后结构内力的状况和其基本规律。为了对这种拱脚上缘未配置钢筋和拱座锚固的双曲拱桥的支承条件与理想的无铰拱和双铰拱有所区别，现将上述这种支承条件的拱称之为“平铰拱”。经验证明，采用简单的平铰拱拱脚构造，由于它具有一定程度“铰”的作用，可以放松拱脚弯矩，因之对温差、混凝土收缩和桥台位移的适应性比无铰拱好。

通过模型试验资料的分析，现在提出了平铰拱内力的计算方法。这种方法是在按现行的弹性理论无铰拱计算的基础上，引用模型试验所得的实验曲线，从而确定平铰拱在设计组合荷载作用下的支承条件，采用简单的折减系数，对无铰拱拱脚弯矩进行修正计算，称为“拱脚弯矩修正法”。

经过试验和计算分析，对于平铰拱结构内力状况的规律有了一些认识，提出了以实验曲线为基础的设计计算方法，并通过实桥检验认为是实用可行的。但由于我们的思想水平和工作水平比较低，对于平铰拱设计计算的一些看法还很粗浅，有待于进一步完善和深化。

本报告中的错误和缺点，恳请提出批评指正。

目 录

一、模型及试验项目	
(一) 模型情况	(1)
(二) 试验项目	(1)
二、试验概况	
(一) 试验过程	(10)
(二) 荷载的模拟	(12)
三、实测结果及分析	
(一) 平铰拱的拱脚弯矩	(13)
(二) 平铰拱的拱顶弯矩	(13)
(三) 平铰拱的 1/4 截面弯矩	(18)
(四) 平铰拱拱脚承压面高度及下缘压应力	(18)
(五) 裸拱—I 及有拱式拱上建筑的拱试验结果的一些对比	(22)
(六) 平铰拱拱脚区段的应力分布情况	(29)
四、平铰拱的计算方法	
(一) 计算方法概述	(35)
(二) 拱脚弯矩修正系数 α 的由来	(37)
(三) 用拱脚弯矩修正法计算平铰拱的程序和方法	(39)
(四) 用拱脚弯矩修正法分析模型的结果及其与实测结果的对比	(45)
五、平铰拱的特性、适用范围及设计注意事项	
(一) 关于平铰拱的概念	(51)
(二) 平铰拱的特性	(51)
(三) 平铰拱的适用范围	(56)
(四) 平铰拱设计的注意事项	(57)

六、等截面悬链线平铰拱设计示例

（一）设计资料.....	（ 59 ）
（二）主拱圈尺寸及截面特征值的计算.....	（ 59 ）
（三）确定拱轴系数.....	（ 60 ）
（四）按无铰拱进行内力计算.....	（ 65 ）
（五）平铰拱的内力计算.....	（ 67 ）
（六）平铰拱截面应力验算.....	（ 77 ）
附录 以弹性支承拱法计算拱脚弯矩修正系数.....	（ 80 ）

一、模型及试验项目

(一) 模型情况

模型的尺寸按照 $L_0 = 40$ 米,荷载等级为汽—13、拖—60,双车道的实桥,以1/10的比例设计的,并依照应力相等原则来建立模型与实桥的各项物理量的相似关系,以此确定附加模拟恒载及活载(折算成集中荷载)。共做了三个模型试验,这三个模型分别称为裸拱—I、裸拱—II、有拱式拱上建筑的拱(边腹孔小拱为三平铰拱),三个模型的构造及尺寸见图1—1~3。为了便于制作模型和毋须测定荷载在结构中的横向分布情况,拱的截面采用单波形式,全桥设有七道横隔板,三个模型的主要技术标准见表1—1。拱的截面形状见图1—4,截面尺寸见表1—2,截面的力学特性见表1—3。

模型的主要技术标准 表1—1

模型种类 技术标准项目	裸 拱—I	裸 拱—II	有拱式拱上建筑的拱
跨 径(厘米)	400	400	400
矢 跨 比	1/8	1/6	1/8
拱 轴 线	圆 弧 线	悬链线($m = 2.24$)	圆 弧 线
模 型 材 料	200号微粒混凝土	200号水泥砂浆	200号微粒混凝土
实测弹性模量	$2.66 \times 10^5 \text{ Kg/Cm}^2$	$2.60 \times 10^5 \text{ Kg/Cm}^2$	$2.70 \times 10^5 \text{ Kg/Cm}^2$
极限抗压强度 (Kg/Cm^2)	484.0	438.0	384.88
极限抗拉强度 (Kg/Cm^2)	28.7	24.3	21.2

注: 1.三个模型材料的实测应力(σ)—应变(ϵ)关系曲线见图1—6~8。

2.裸拱—I及有拱式拱上建筑的拱均用200号微粒混凝土,因级配不同故抗压、抗拉强度和弹性模量略有不同。

(二) 试验项目

三个模型的试验项目主要是量测在附加模拟恒载作用下拱脚、拱顶, $L/4$ 截面的内力(弯矩及轴向力)和挠度,以及桥台无位移时和桥台逐级位移(每级位移0.40毫米,相当于跨径的1/10000)后拱脚、拱顶、 $L/4$ 截面的弯矩和挠度影响线(用集中荷载100公斤)。为了了解平铰拱的支承情况,还量测了拱脚截面的受压区高度。对有拱式拱上建筑的拱,在离拱脚 $3t$ (t 为拱的高度)段范围内加测了三个截面的受力情况,以了解拱脚截面局部受压到全截面受力的内力过渡长度。同时还量测了拱式拱上建筑参与拱的联合作用的效果,这是由量测裸拱和有拱式拱上建筑后拱的几个主要截面的弯矩影响线并加以对比而得到的。并且还量测了拱

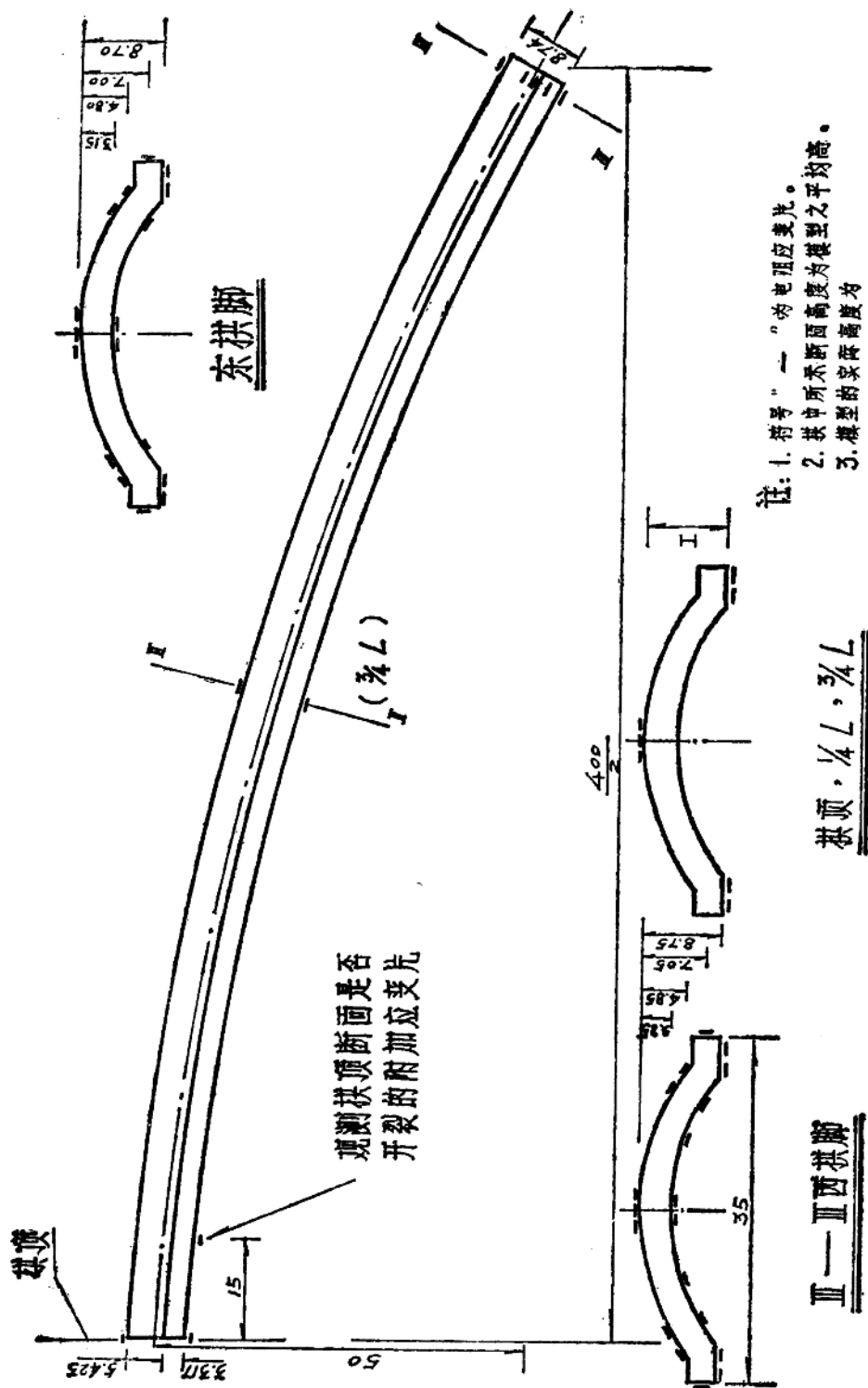


图1——I 拱拱——I 的模型构造、尺寸及电测点布置

截面尺寸表

表 1—2

分项尺寸 模型种类	t(厘米)	d(厘米)	B(厘米)	h(厘米)	b ₁ (厘米)
裸拱——I	8.74	3.24	35	3.317	3.45
裸拱——II	10.195	3.15	30	4.00	4.00
有拱式拱上建筑的拱	8.78	3.10	35	3.500	3.45

注：表中数值为模型实测值。

截面的力学特性表

表 1—3

分项力学特性 模型种类	F(厘米) ²	y _F (厘米)	y _上 (厘米)	I(厘米) ⁴	W _F (厘米) ³	W _上 (厘米) ³
裸拱——I	121.64	4.6397	4.1003	633.78	136.600	154.569
裸拱——II	118.151	5.219	4.976	956.614	183.295	192.246
有拱式拱上建筑的拱	122.893	4.6712	4.1008	680.582	145.691	165.640

注：y_F——为截面重心至下缘的距离。

式拱上建筑的端立柱及离桥台第二腹孔小拱拱顶的弯矩影响线。对于裸拱阶段时和有拱式拱上建筑后，相应的桥台水平位移产生在拱中的附加内力和拱的挠度也进行了测试对比。

测点布置原则：量测内力是用电阻应变仪来测定截面的应变，测定截面的弯矩时只需在截面的上下缘布置二行应变片，测量轴向力时，在截面的高度上布置的应变片要增加 2~3 行，即需 4~5 行。拱的挠度、桥台位移和桥台的微量转角是用百分表及千分表量测的，拱的挠度全跨共测量了七个截面并对称布置，根据挠度记录可以检验结构是否符合弹性体的变位相等原则。

三个模型的电测点布置见图 1—1~3，挠度测点布置见图 1—5。

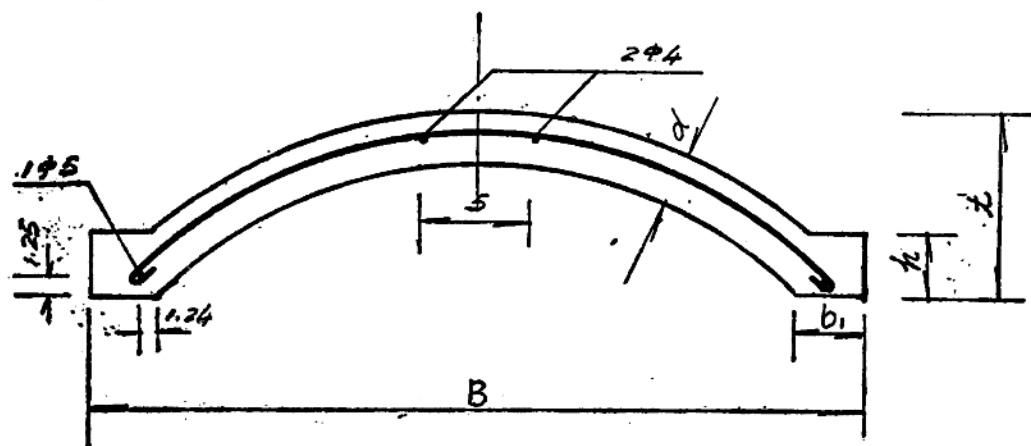
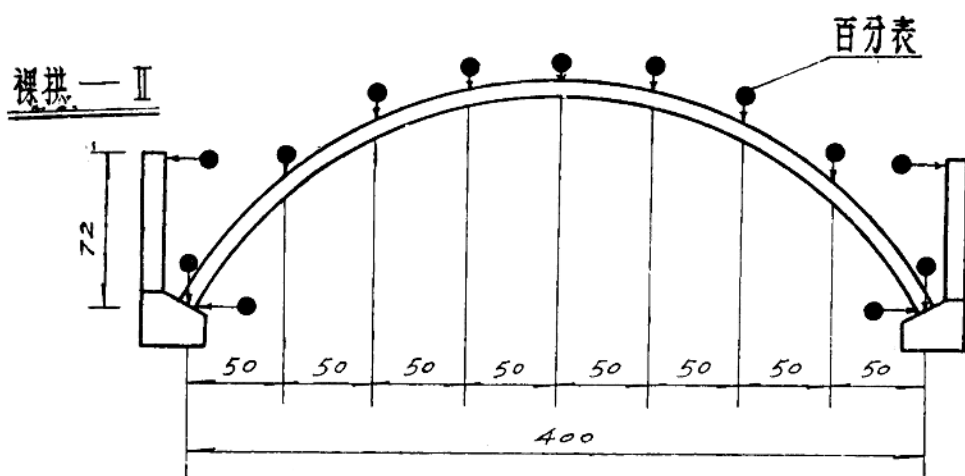
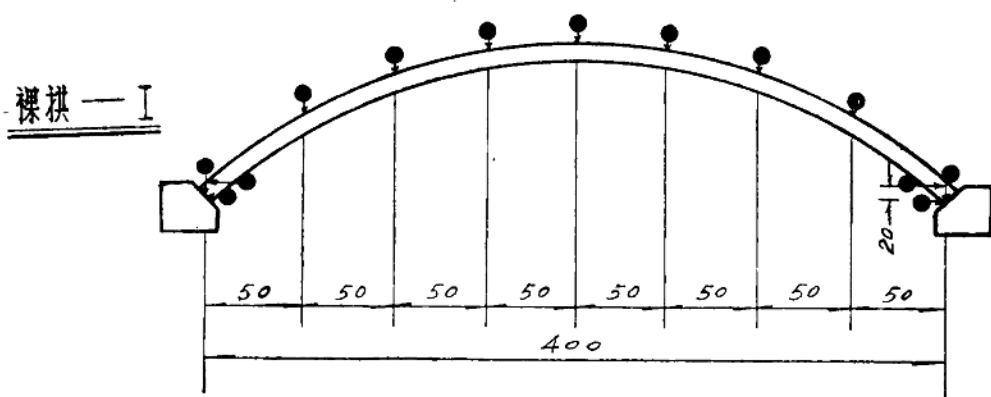


图 1—4 模型截面(单位：厘米)



拱式桥上建筑的拱

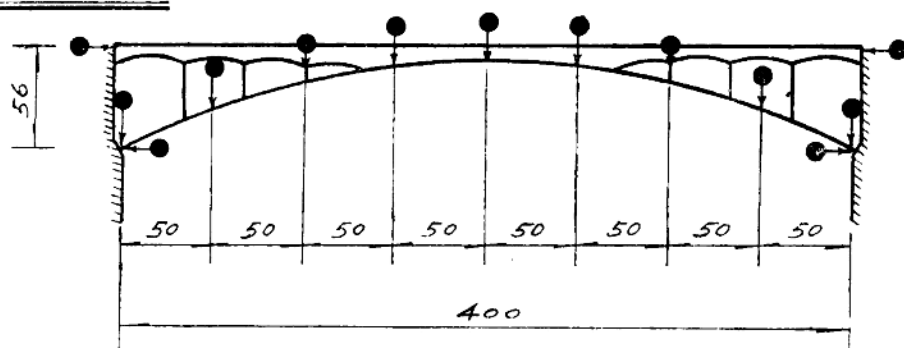


图1 — 5 挠度测点布置(单位: 厘米)

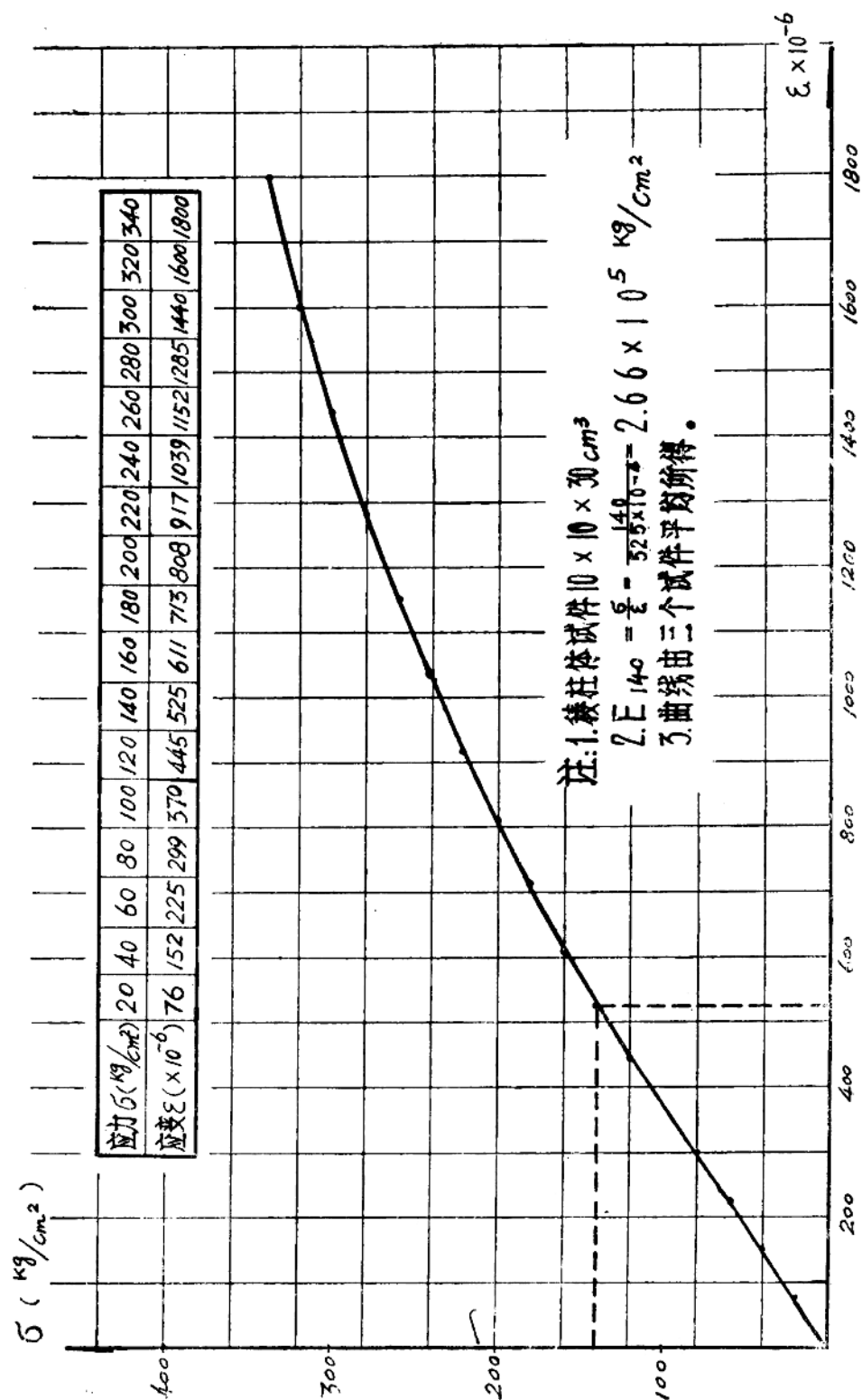
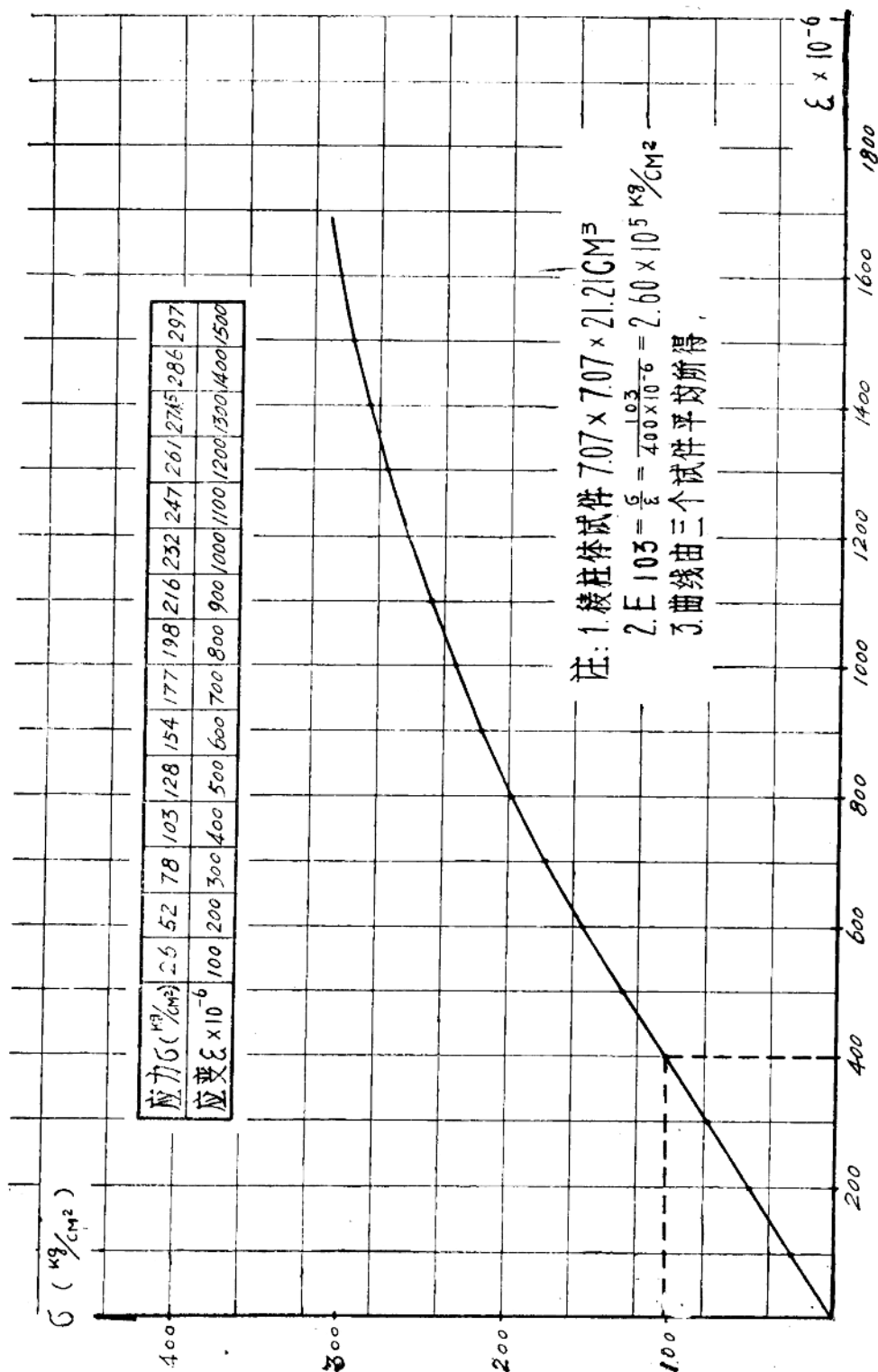


图 1——6 裸拱——I 的模型试块应力 σ ——应变 ϵ 关系曲线

图1——7 裸拱——II 的模型试块应力 σ ——应变 ϵ 关系曲线

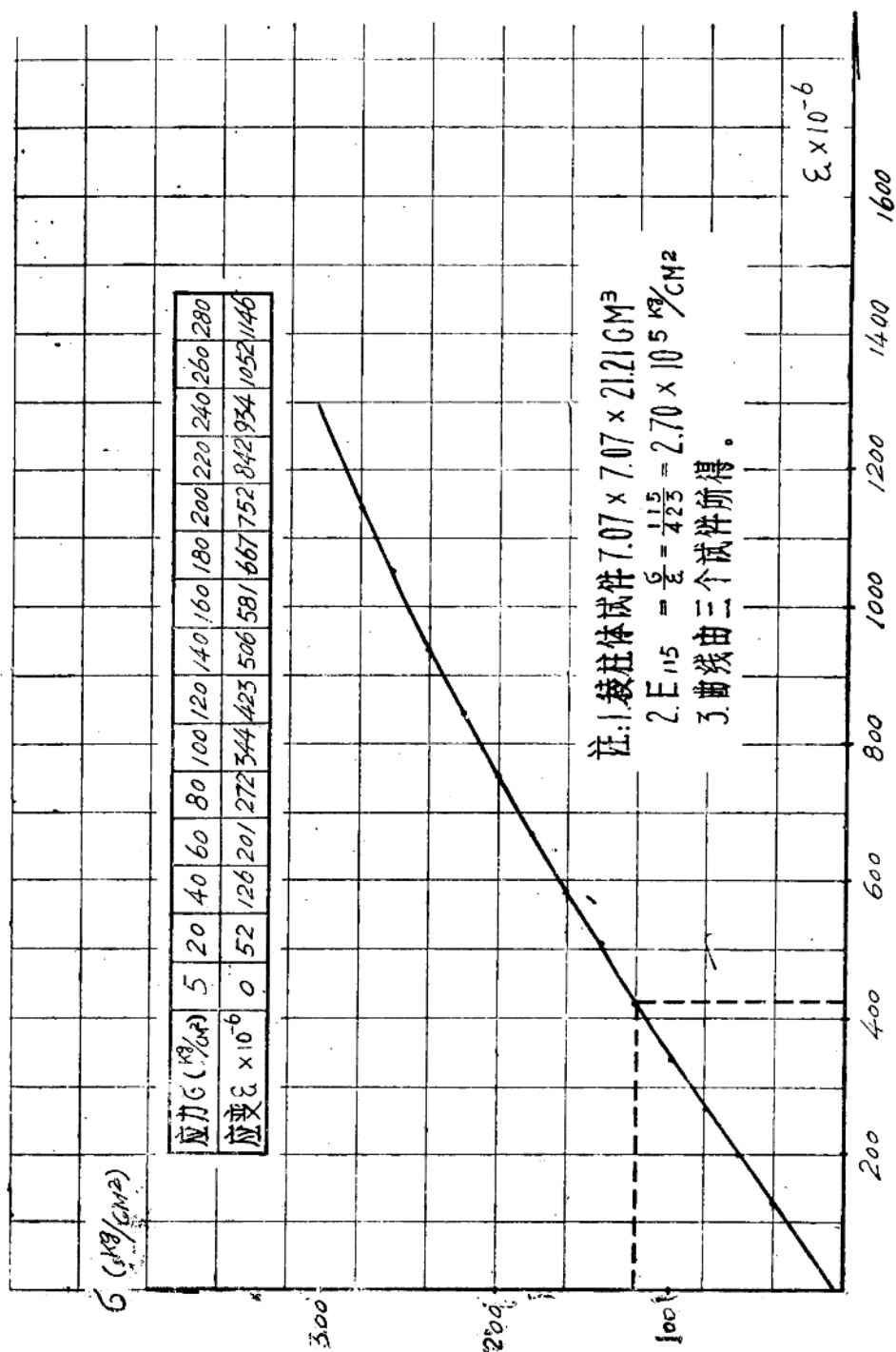


图 1——8 有拱式拱上建筑的模型试块应力 σ ——应变 ϵ 关系曲线

二、试验概况

(一) 试验过程

三个模型的试验经过是这样的:

1. 在无位移情况下(为了避免桥台中的位移机械装置因加载而使螺丝间隙产生移动,在固定台座和活动台帽之间浇筑了膨胀水泥混凝土,先行封固),进行附加模拟恒载试验,量测拱中几个主要截面的内力(弯矩及轴向力),并用集中荷载 $P=100$ 公斤进行裸拱内力(弯矩)及挠度影响线试验。

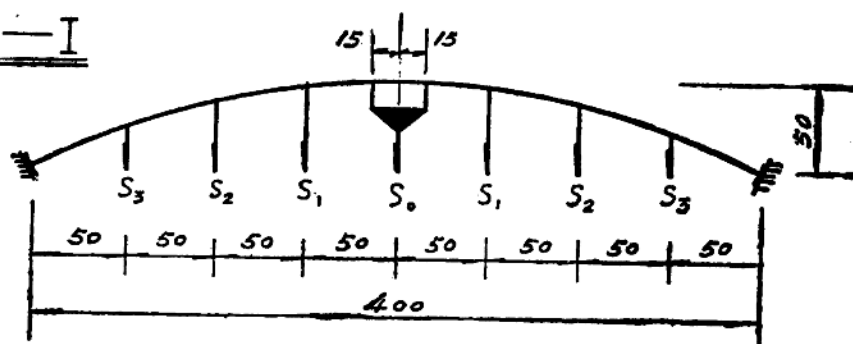
2. 将东拱脚向跨中顶进(活动台帽水平位移)0.5毫米,凿除预浇之膨胀水泥混凝土后退回原处,为鉴别凿除膨胀水泥混凝土后对结构有无影响,再做一次用集中荷载 $P=100$ 公斤进行裸拱内力及挠度影响线试验,二次的实测结果比较一致。

3. 进行逐级位移,每级0.4毫米($L/10000$)。裸拱—I逐级位移至十八级,每级位移后,用集中荷载 $P=100$ 公斤进行结构的弯矩及挠度影响线试验。当第一级位移后加载量测结构的影响线时,发觉拱顶下缘压应变储备较少,为了避免拱顶过早开裂而影响测试资料的搜集,将拱顶附加模拟恒载 S_0 (参见图2—1)卸除100公斤。二级位移后,又发觉四分点截面下缘压应变储备较少,又将四分点荷载 S_2 (参见图2—1)卸除50公斤,采取这些措施后,模型在东拱脚水平位移到第十七级时(为跨径的 $L/583$)拱顶截面下缘才开裂。裸拱—II及有拱式拱上建筑的拱的附加模拟恒载加载试验时,已扣除了上述位置的卸载值,因此裸拱—II至第十三级位移时拱顶下缘才开裂,有拱式拱上建筑的拱至第七级位移时拱顶下缘开裂(由表1—1可知,有拱式拱上建筑的拱的混凝土极限抗拉强度较低,故第七级位移时拱顶下缘即开裂)。对于裸拱—I还量测了拱脚每级水平位移后引起拱截面的内力数值。裸拱—II每级位移后也量测位移引起的结构内力,在第一、二级拱脚水平位移后并用集中荷载 $P=100$ 公斤进行结构的弯矩及挠度影响线试验,第三级位移起用集中荷载 $P=100$ 公斤仅在结构的 $L/8$ 、 $7L/8$ 、 $L/2$ 三点加载,以测定结构的内力及挠度。有拱式拱上建筑的拱,裸拱阶段时,拱脚一级位移后用集中荷载 $P=100$ 公斤做了一次拱截面的内力及挠度影响线试验。之后,拱脚顶回原处,安装拱式拱上建筑,在无位移情况下,进行附加模拟恒载加载试验,量测拱中几个主要截面的内力,并用集中荷载 $P=100$ 公斤进行有拱式拱上建筑后拱的几个主要截面的弯矩及挠度影响线试验,以与裸拱时拱脚无水平位移时相应的拱截面的实测弯矩及挠度影响线比较,了解其拱式拱上建筑参与主拱联合作用的效果。接着再进行拱脚水平位移试验,每级0.4毫米($L/10000$),以测量拱脚水平位移引起的结构内力,共位移十二级,当位移到第三、七、十二级后用 $P=100$ 公斤做了结构的弯矩及挠度影响线试验(第七级拱脚水平位移后拱顶已开裂)。

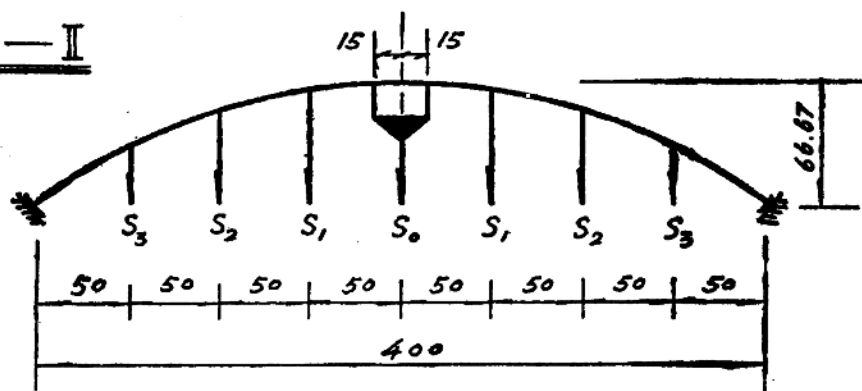
4. 为了了解平铰支承对拱脚段内力的分布规律,在有拱式拱上建筑的拱的西拱脚段离拱脚截面弧长为 $0.75t$ (西—1)、 $1.5t$ (西—2)、 $3.0t$ (西—3)截面处补充设置了电测点,以判定应力较为集中的区段及局部受压到全截面受力的内力过渡长度。

5. 超载试验:裸拱—I当拱脚水平位移至第十八级后($L/555$)。在 $L/4$ 处加集中荷

裸拱—I



裸拱—II



拱式拱上建筑的拱

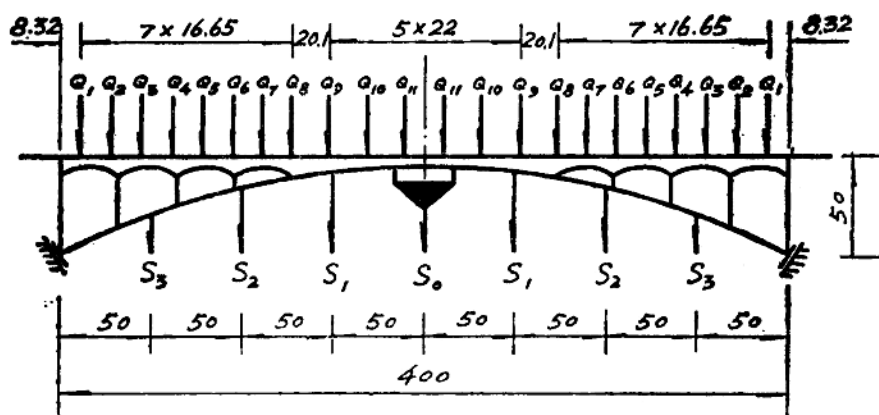


图2——1 模拟恒载分布(单位:厘米)

载到1000公斤结构仍未破坏。有拱式拱上建筑的拱,当拱脚水平位移至第十二级时($L/835$),在 $L/8$ 、 $7L/8$ 、 $L/2$ 三处分别加载390公斤,拱脚、拱顶仍未破坏,由此可见,平铰双曲拱桥的潜力仍是相当大的。

(二) 荷载的模拟

1. 附加模拟恒载:附加模拟恒载的大小是按模型截面与实桥截面的恒载应力相等原则计算的。附加模拟恒载在模型上的分布是以恒载压力线与拱轴线多点重合计算的。裸拱—I及裸拱—II的附加模拟恒载分八点加载,有拱式拱上建筑的拱的附加模拟恒载,分两部分,一部分为裸拱结构的附加模拟恒载,另一部分为拱式拱上建筑的附加模拟恒载,三个模型的附加模拟恒载分布见图2—1,附加模拟恒载数量见表2—1。

附 加 模 拟 恒 载 计 算 数 量 表

表 2—1

附加模拟恒载数量		$S_0(Kg)$			$S_1(Kg)$			$S_2(Kg)$			$S_3(Kg)$		
结构型式													
裸拱—I		697.80			472.90			594.30			669.70		
裸拱—II		617.372			415.49			588.29			761.53		
拱式拱上建筑的拱	主拱圈部分	137.0			137.8			140.8			146.3		
	拱上建筑部分	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7	Q_8	Q_9	Q_{10}	Q_{11}	
		138.35	138.35	125.15	125.15	114.50	114.50	106.90	106.90	137.0	137.0	133.6	

2. 模拟活载:模型上应加之活载值是按实桥与模型因活载引起的截面弯曲应力相等原则计算的,此时,实桥与模型的活载弯矩比例为1000:1,以拱脚负弯矩作为控制值,把实桥由活载引起的拱脚负弯矩值与模型拱在 $L/8$ 处加集中荷载算得之拱脚负弯矩值相对应,则求得模拟活载 $P=390$ 公斤。模型其它截面因活载引起的内力也以集中荷载 $P=390$ 公斤作用在该截面处计算而得。

3. 作结构的内力及挠度影响线试验的加载量:量测模型结构的弯矩及挠度影响线时,起先曾用集中荷载 $P=120$ 公斤进行加载,为了避免截面过早开裂,以后改用集中荷载 $P=100$ 公斤进行加载试验,荷载的作用位置为: $0.5L/8$ 、 $L/8$ 、 $2L/8$ 、 $3L/8$ 、 $3.7L/8$ 、 $4.3L/8$ 、 $5L/8$ 、 $6L/8$ 、 $7L/8$ 、 $7.5L/8$ 。测量结构的内力及挠度影响线,如果作用荷载大些,则测得的精度要高些,通过试验可以看出,用集中荷载100公斤来加载测量结构的内力(弯矩)及挠度影响线已基本准确。