

1010

公路桥涵研究

G O N G L U Q I A O H A N Y A N J I U

张一工 张晓洁 光同文等 著

丁克伟 主审



北京师范大学出版集团

BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP

安徽大学出版社

公路桥涵研究

张一工 张晓洁 光同文等 著

丁克伟 主审



NLIC 2970696301



北京师范大学出版集团

BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP

安徽大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

公路桥涵研究/张一工等著. —合肥:
安徽大学出版社, 2010. 8

ISBN 978-7-81110-803-3

I. ①公... II. ①张... III. ①公路桥—桥涵工程
—文集 IV. ①U448.14-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 135648 号

公路桥涵研究

张一工 张晓洁 光同文等 著 丁克伟 主审

出版发行: 北京师范大学出版集团
安徽大学出版社
(安徽省合肥市肥西路 3 号 邮编 230039)
www.bnupg.com.cn
www.ahupress.com.cn

印 刷: 合肥创新印务有限公司
经 销: 全国新华书店
开 本: 170mm×240mm
印 张: 10
字 数: 188 千字
版 次: 2010 年 8 月第 1 版
印 次: 2010 年 8 月第 1 次印刷
定 价: 26.00 元
ISBN 978-7-81110-803-3

责任编辑: 李镜平

装帧设计: 孟献辉

特约编辑: 罗季重 胡 鹏

责任印制: 陈 如 韩 琳

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 0551-5106311

外埠邮购电话: 0551-5107716

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 0551-5106311

前 言

书中 20 篇论文都是针对公路桥涵设计和施工过程中存在现实问题进行的研究和探讨,这些问题既涉及整体设计的理论和方法,也包括一些具体问题的解决及新材料、新技术的运用。

拱桥(双曲拱桥)因其造型美观、施工简便和造价低廉而备受人们青睐,在上世纪七八十年代,我国修建了大量拱桥,一时期形成了“拱桥热”。但也出现不少问题,如桥台水平位移和桥台向岸倾斜、主拱和腹拱的严重开裂等现象。从而人们对拱桥桥型产生了疑虑和否定。经调查研究发现,拱桥(双曲拱桥)失败的主要原因是设计时没有考虑桥台位移(变位),《土基拱桥桥台变位计算方法和拱桥设计改进的意见》一文在深入研究的基础上得出了有效的解决办法。

斜交桥梁在斜交角 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 时,其桥台锥坡在外观上很不美观,且存在局部坡度小于 1:1 的不稳定情况,《斜交桥锥坡设计及其改进的意见》一文对此进行了深入探讨。

为了解决公路桥梁设计中的“肥梁胖墩”中的“胖墩”问题,《地基变形对墩(台)抗推刚度的影响》一文论证了地基变形对墩(台)抗推影

响很大,对此不能忽略。考虑地基变形后的桥墩抗推刚度远小于桥台的抗推刚度,桥墩承担水平制动力很小,完全可以“减肥”设计成薄壁墩。

软基公路桥普遍存在桥头跳车现象,《软基桥台型式和桥头跳车问题的探讨》一文建议采用可以适当沉降的空箱式桥台,以减少桥头跳车现象,提高行车的舒适性。

在采用贝雷片组合的便桥上,水平拖拉 30m 预制 T 梁时,曾出现侧向失稳落梁事故,《桁架梁侧向稳定计算》一文提出了相应的对策。

随着施工机械化水平的提高,泵送混凝土的采用,混凝土结构早期收缩裂缝显著增加,《几种常见混凝土早期收缩裂缝的分析和控制》一文对此进行了有益的探讨。

科学的发展必须有科学理论指导,而理论来自实践,又必须经过实践的检验而不断加以完善。以上研究成果都是在公路桥涵设计、施工实践基础上取得的,仍然需要在进一步的实践与研究中加以完善与充实。本书供从事公路桥涵的设计、施工和研究人员参考,谬误之处请予指正。

全书由张一工高级工程师统稿,丁克伟教授主审。

参加本书撰写的还有朱玉虎、吴海清、陈孝琴、李斌等同志。

张一工

2010 年 3 月

目 录

前 言	(I)
土基拱桥桥台变位计算和拱桥设计改进的意见	(1)
软土地基大跨径拱桥设计	(20)
斜交桥锥坡设计及其改进意见	(26)
地基变形对墩(台)抗推刚度的影响	(31)
桥墩(台)作为基础梁的计算	(45)
软基桥台型式和桥头跳车问题探讨	(55)
土基钢筋混凝土箱涵横向受力计算	(62)
钢筋混凝土箱式涵洞的纵向计算	(68)
桁架梁侧向稳定计算	(75)
怀洪新河特大桥墩柱模板设计	(84)
滁宁高速公路混凝土桥台模板设计	(90)

现浇箱梁支架荷载和预压方案	(98)
消除公路桥预制板支座脱空问题的探讨	(103)
公路桥 20m 长 T 梁二次现场浇筑	(107)
无管座圆管涵洞的讨论	(115)
圆管涵洞设计施工中的问题	(119)
关于圆管涵管座设计的讨论	(124)
公路倒虹吸设计的探讨	(131)
公路倒虹吸防渗的关键问题	(143)
几种常见混凝土早期收缩裂缝的分析和控制	(147)

土基拱桥桥台变位计算和 拱桥设计改进的意见

拱桥是具有推力体系的跨变结构,上部结构和墩台是互相作用、互相制约的。拱跨结构支撑于墩台,作用于墩台以水平力、垂直力和力矩,使墩台产生线变位(水平变位、垂直变位)和角变位。反过来,墩台的线变位和角变位也必然引起拱跨结构的变形和附加内力。桥台变位对拱桥结构引起的变形和附加内力已有较成熟的计算方法,而墩台的变位还没有任何计算方法,因而拱桥设计时往往不考虑桥台变位,或仅考虑桥台的水平变位。目前拱桥桥台设计计算方法有两种。

1 重力式 U 型桥台设计方法

重力式 U 型桥台设计计算方法认为桥台无水平变位和角变位。桥台设计主要考虑地基承载能力,桥台滑动稳定、倾覆稳定和台身截身应力。台背土压力按主动土压力计算,这种设计法显然不合理的地方有两个:

(1) 桥台变位是不可避免的,因为地基和台背土体在桥台作用下,总是要产生变形的,也必然引起桥台的变位,而桥台变位呈平行移动的可能性很小,故桥台一般都带有角变位。因此,认为桥台无水平变位和角变是不妥的。据一些资料介绍,国外有人对已建成很久的拱桥桥台进行测量,在车辆通过时仍有位移。车辆过后又恢复原位。

(2) 既认为桥台无水平移位和角位移,而台背土压力又取主动土压力,这与主动土压力的概念是不相符的,从而加大了桥台尺寸和重量,按此设计的桥台既笨重又不合理。

2 轻型桥台设计计算方法

轻型桥台设计方法与上述方法不同的是:假定桥台基础面无水平位移,适当考虑桥台台口(拱脚处)水平位移,台背土压力按静止土压力加土抗力计算。此法也存在着一些缺点:

(1) 认为桥台基础面无水平位移是无根据的。从理论上来说,土基上的任何建筑物,在水平力的作用下,总是要产生水平位移的。

(2) 认为桥台台口有一水平位移,基础面无水平位移,桥台必然产生一转角,如桥台台口水平位移为 ΔH_j , 台口同基础面的高差为 h_1 , 其转角值以弧度计为 $\Delta H_j/h_1$, 这一角变位也必然引起拱跨结构的变形和附加内力, 其影响有时是很大的。轻台拱桥设计计算方法忽视了这一影响, 按此法设计的拱桥曾出现了不少问题。此法只能用于次要桥梁的设计, 《公路桥涵地基与基础设计规范》^[1] (以下简称《桥规》) 规定轻台拱桥的跨径不大于 13m。

两种桥台设计方法都没有考虑桥台角变位的影响, 为了说明桥台线变位和角变位对拱跨结构的影响, 把各种荷载(包括拱脚变位)作用下, 其拱顶、拱脚截面内力列表 1.1。(表列数值按 $L_0 = 30\text{m}$, $f_0 = 6\text{m}$, $EI = 1768000 \text{ kN} \cdot \text{m}$)

从表 1.1 中可以看出, 拱桥水平位移和角位移对拱跨结构的影响都很大, 特别是角位移的影响是不容忽视的。

表 1.1 拱圈内力表

荷 载	拱 顶	右拱脚		
	弯矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	弯矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	水平力 (kN)	垂直力 (kN)
静荷载	210	-434	6520	6742
二行汽-15+人群	444	616	166	427
桥台相对水平位移 2cm	1242	2558.5	-819	
右拱脚下沉 5.5cm	0	-257		-67
温降 15℃	134	-276	-67	
两台向岸转动 5×10^{-3} (弧度)	1518	-6313	1318	

根据江苏省、湖南省交通局的双曲拱桥调查报告, 已建双曲拱桥发生脚拱弯矩裂缝和拱顶正弯矩裂缝的桥占 30%~50%。其原因很多, 除施工上的问题和拱跨结构组合强度低外, 在拱桥设计时没有考虑桥台水平位移, 或仅考虑桥台水平位移而忽略了桥台角位移对拱跨结构的影响, 是一个重要原因。《桥规》对

桥台角位移也无明确限制。^[1]

笔者认为桥台和桥台基础面都不是不动的,都存在着有垂直变位、水平变位和角变位,其变位值可采用垂直基床抗力系数和剪切(滑动)抗力系数计算,还应考虑台背回填土重对桥台变位的影响以及台基水平变位时的伴生角变位,以确定桥台的总变位。

桥台变位引起拱跨结构的附加内力。有的变位对拱跨结构是不利的,如桥台水平变位和桥台向岸转动,其引起的附加内力同静载、活载产生拱跨弯矩累加。有的变位对拱跨结构是有利的,如桥台向河心转动引起的拱跨弯矩同静载、活载、水平位移引起的弯矩异号,互相抵消;利用这一有利因素,使拱跨结构受力条件最佳。合理地利用台基和台背土抗力,使拱桥设计优化(合理)是本文讨论的内容之一。

从这一概念出发,桥台设计成向河心转动某一角度,台背土压力按主动土压力与土抗力计算,而桥台台口至台基中心的垂直距离变得很小,桥台台口和台基前缘的水平距离也很近。在《双曲拱桥设计和施工》一书中,对土质较好的桥台,建议桥台台口至台基的垂直距离为桥台高度的五分之一(而不是三分之一),和本文使拱脚下置的意见有相似之处。桥台和拱跨布置时采取下列措施:

第一,在地基土质较好时,满足地基承载力、冲刷和冰冻要求的前提下,桥台台基适当浅埋以缩小台口至台基的垂直距离。满足地基承载力的要求,意味着沉降量不会太大。应该指出,如桥台沉降量大一些,拱跨的两端沉降相同时,拱跨结构也不产生附加内力,地基极限承载能力和地基允许承载力的比值一般大于2.5,拱桥墩台的允许承载力可以取大一些,只要地基不发生塑性挤出和沉降过大影响使用还是可以的。另外从表1.1还可以看出,一跨拱桥的两端不均匀下沉,对拱跨结构的影响不是太大,对拱跨两端的地基不必苛求完全一致。

第二,拱跨结构的矢跨比可适当大一些,以减少拱跨作用于桥台的水平推力,增加其垂直力。

第三,若桥台基础下面附近有软弱土层,台基必须深埋时,可以加大拱跨和加大矢跨比的方法使台口下置。如某桥 $f_0/L_0 = 1/5$,拱轴系数 $m = 3.5$,拱跨 L_0 加长2m,矢跨比不变,其拱脚下置1.03m。拱跨增加2m所增加的工程量不大,可使拱跨受力情况大加改善。

第四,台背路堤回填土引起桥台向岸转动,为了减少其影响,可以采用预压,尽量减少台背路堤的挖填土方或加做岸孔的办法。加做岸孔的办法,增加投资多,一般不采用。

3 土基桥台变位计算

3.1 基本假定

土基圬工桥台的变位主要是由地基土层和台背土体压缩变形以及地基土层的剪切变形引起的,其影响因素很多,很难求出精确值。为了解决这类问题,不得不做一些假定,使问题简化。桥台本身刚度很大,其变形可以忽略。桥台变位计算的假定如下:

(1) 地基反力按直线分布假定。

(2) 地基和台背土体变形和应力成正比假定——基床抗力系数假定(文克尔假定)。

(3) 平面变形假定。

这些假定都有一定近似性。即使绝对刚性的基础,其反力也不是成直线分布的,基础边缘反力总是很大,出现塑性变形区;文克尔假定认为边荷载和基础变位无关。这显然也是不对的,需要加以修正。该假定只有在压缩层很薄时才是正确的,另外用文克尔假定推出的基床抗力系数不仅和地基土壤的性质有关,还和基础的刚度与基础底面尺寸有关,另外,还同荷载作用的位置有关;平面假定也是近似的,因为桥台基础的长宽比一般都不是很大。

按基床抗力系数假定,基础底面某点反力和其法向位移成正比,切向反力与其切向位移成正比:

$$\sigma_y = K_y \delta_y, \quad \sigma_\tau = K_\tau \delta_\tau,$$

式中, δ_y 、 δ_τ —分别为基础底面某点的法向位移和切向位移; K_y —相应于 δ_y 的基床抗力系数; K_τ —相应于 δ_τ 的基床剪切抗力系数。

台背上某点反力为主动土压力或土抗力,其土抗力和该点水平位移成正比,即

$$\sigma_x = K_x \delta_x.$$

3.2 基础抗力系数 K_y 、 K_x 和 K_τ 的确定

(1) K_y 的确定。基床抗力系数不仅决定于土壤的性质,也决定于桥台基础底面尺寸与荷载的大小。各种文献中给出的抗力系数都有局限性和特定条件,选用时一定要慎重。如《桥规》中的抗力系数仅适用于桩基或桥台尺寸很小且埋置很深时^[1],魏琰的《地下结构衬砌计算》给出的抗力系数,也有其特定条件。

当地基上单位压力不太大,下沉与荷载强度成直线关系时,其下沉量用基床抗力系数

$$\delta_y = \frac{\sigma}{K_y} = \frac{P}{FK_y},$$

下沉量用弹性理论公式计算为

$$\delta_y = \frac{\Omega P \sqrt{F}}{E} (1 - \mu^2),$$

使两式相等便可求得

$$K_y = \frac{E}{\Omega F^{\frac{3}{2}} (1 - \mu^2)},$$

式中, Ω —系数, 与基础面长短边之比有关, 其比值为 1、2、5、10 时, Ω 相应等于 0.95、0.92、0.82、0.71; E, μ —分别为基土的变形模量和泊桑比; F —基础底面积。

从而可以看出, 同一地基上, 基础底面形状相同, 其抗力系数和它们基础底面 F 的关系为

$$\frac{K_{y1}}{K_{y2}} = \frac{F_2^{\frac{3}{2}}}{F_1^{\frac{3}{2}}}.$$

对于地基上单位压力较大、下沉量与荷载强度为非线性关系, 可以根据相同地基类似桥台沉降观测资料或分层总和法计算的最终沉降 S , 以下式确定,

$$K_y = \frac{\sigma_y}{S};$$

还可以根据地基土的标准贯入击数推算土的抗力系数^[15]

$$K_y = 0.4 E_0 B^{-3/4} (\text{kg/cm}^3),$$

$$E_0 = 25 N (\text{kg/cm}^2),$$

$$B = \sqrt{A} (\text{cm}),$$

式中, E_0 —地基土的变形模量 (kg/cm^2); N —标准贯入击数 (次); A —基础底面积 (cm^2)。

对于下卧压缩土层很薄时, 抗力系数可按下式计算:

$$K_y = \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \cdot \frac{E^{[1]}}{H},$$

式中, H —压缩土层厚变, 其余符号同前。

(2) 台背土体侧向抗力系数 K_x 的确定。对于原状土体的侧向抗力系数, 根据《拱桥组合式桥台设计》介绍, 现场试验的加荷面积为 $0.585 \times 0.585 \text{m}^2$, 试验结果和《桥规》桩基计算的抗力系数相近。

对于扰动土的侧向力系数, 《轻型桥台圬工拱桥》^[2]一书中介绍了一些重塑土的侧向抗力试验, 重塑土有黏性土和砂性土, 试验是在有侧限的模型槽内进行的, 试验挡土板高度为 72cm。试验结果表明, 其抗力系数在高度上的分布规律可以这样概括: 砂性土或黏性土其侧向抗力系数除地表附近稍偏小外基本为一常数, 不随深度变化。

如台背土体和地基土质相同,都为未经扰动的原状土时,考虑地基土受侧向限制大,台背土体一般为路堤其侧向限制小,建议土的侧向抗力系数取 $K_x = 0.8K_y^{[2]}$,且 K_x 为一常数,不随深度变化。如果台背土体为回填土时,从安全考虑不计其土抗力。

(3) 地基土剪切(滑动)抗力系数 K_r 的确定。如地基土垂直抗力系数已知,可由下式确定:

$$K_r = \frac{1 - \mu}{1 + \mu \nu} K_y^{[1]},$$

式中, ν 一和桥台基础长宽比有关的系数,按表 1.2 中的值采用。

表 1.2 ν 同基础长宽比关系表

基础长宽比	0.1	0.7	1	2	3	4
系数 ν	0.53	0.52	0.5	0.42	0.37	0.33

关于地基土剪切抗力试验,《华东公路》(1984 年第 5 期)《组合式桥台》一文介绍了一个荷载面积为 0.272 m^2 的现场试验,由于其荷载面积很小,剪切抗力系数偏大。水利部门为了取得水闸底板与地基土的摩擦系数曾多次做过现场试验。

3.3 桥台上各点变位之间的关系

由于台身刚度大,对变形一般不予考虑。若以 Δ_{V_0} 、 Δ_{H_0} 和 α_0 分别表示桥台基面中心的垂直变位、水平变位和角变位,桥台上其他中点的变位皆可以几何关系求出,现垂直变位以向下为正,水平变位向岸为正,角变位向河心转动为正,参见图 1.1 所示(顺时针)。

桥台台口(拱脚中心)的垂直和水平变位分别为

$$\Delta_{V_j} = \Delta_{V_0} + \alpha_0 d_1, \quad (1)$$

$$\Delta_{H_j} = \Delta_{H_0} - \alpha_0 h_1, \quad (2)$$

式中, d_1 — 台基中心和台口中心的水平距离; h_1 — 台基中心和台口中心的高差。

台基上 y 点的水平变位为

$$\Delta_{H_y} = \Delta_{H_0} - \alpha_0 y = \Delta_{H_j} - \alpha_0 (y - h_1)。$$

令桥台上水平变位为零的点与台基中心的距离为 h_2 , 由上式得

$$h_2 = \frac{\Delta_{H_j}}{\alpha_0} + h_1, \quad (3)$$

令桥台高度为 H , 台顶的水平变位为

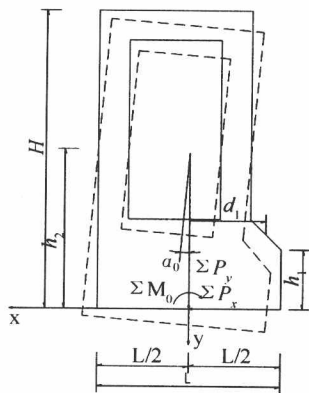


图 1.1 桥台变位示意图

$$\Delta_{H_d} = \Delta_{H_j} - \alpha_0 (H - h_1)。 \quad (4)$$

由于桥台本身可作刚体看待,台身各点转角皆为 α_0 ,根据上列各式,由已知台基中心变位推求台身其他各点变位。

3.4 平底桥台台基中心的变位计算

若以 $\sum P_x$ 表示作用台基中心的水平合力,以 $\sum P_y$ 表示作用于台基中心的垂直合力,以 $\sum M_0$ 表示作用台基中心合力矩,则台基中心水平变位、垂直变位和角变位分别由下列各式表示

$$\Delta_{H_0} = \frac{\sum P_x}{K_x BL}, \quad (5)$$

$$\Delta_{V_0} = \frac{\sum P_y}{K_y BL}, \quad (6)$$

$$\alpha_0 = \frac{12 \sum M_0}{K_y BL^3}。 \quad (7)$$

4 拱桥设计的优化方向

如前所述,桥台变位对拱跨结构的影响是很大的。如何合理地利用桥台变位对拱跨结构的有利影响,以改善拱的受力状况,减少桥跨结构和整个拱桥的工程数量。先看一下在桥台向河心转动某一角度和拱脚水平位移时拱跨结构的弯矩图(取 $L_0 = 30\text{m}$ 、 $f_0 = 6.0\text{m}$ 、 $EI = 1.768 \times 10^5 \text{kN} \cdot \text{m}^2$)

从图 1.2 所示可以看出,拱脚向河心转动和拱脚水平位移引起的拱圈弯矩是异号的,可以设想在某一角变位时拱圈的受力状况最好,这时的桥台角变位即最优角变位。

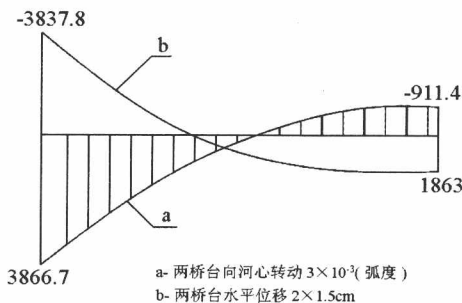


图 1.2 拱脚变位拱圈弯矩图

4.1 桥台最优角的变位计算

两桥台向河心角变位 α_1 , 引起的拱顶、拱脚弯矩分别为

$$M_{s_1} = 2\alpha_1 \left[\frac{1}{\delta_{11}} + \frac{(f - y_s)y_s}{\delta_{22}} \right], \quad (8)$$

$$M_{k_1} = 2\alpha_1 \left[\frac{1}{\delta_{11}} + \frac{(f - y_s)^2}{\delta_{22}} \right]. \quad (9)$$

两拱脚相对水平位移为 $2\Delta_{H_j}$ 时, 引起的拱顶、拱脚弯矩分别为

$$M_{s_2} = \frac{2\Delta_{H_j}}{\delta_{22}} y, \quad (10)$$

$$M_{k_2} = -\frac{2\Delta_{H_j}}{\delta_{22}} (f - y_s). \quad (11)$$

式中, δ_{11} 、 δ_{22} — 分别为弹性中心的施加单位力偶和单位水平力时, 弹性中心的角变位和水平变位; f 、 y_s — 分别为拱矢高和弹性中心至拱顶距离。

另外, 在静荷载和活荷载的作用下, 其拱顶弯矩分别为 M_{s_3} 、 M_{s_4} , 拱脚弯矩分别为 M_{k_3} 、 M_{k_4} 。在拱脚角变位、水平变位、静载、活载共同作用下, 拱顶、拱脚的弯矩分别为

$$\sum M_s = M_{s_1} + M_{s_2} + M_{s_3} + M_{s_4},$$

$$\sum M_k = M_{k_1} + M_{k_2} + M_{k_3} + M_{k_4}.$$

由于拱桥的施工方法不同, 拱脚可以承担的弯矩有所不同, 拱桥的施工方法大致有两种:

(1) 预制安装拱肋的双曲拱桥, 拱肋和桥台没有可靠的连接, 拱桥不能承担正弯矩。

(2) 现浇拱肋的拱桥和现浇箱形拱桥, 有足够的钢筋伸入桥台, 拱顶和拱脚可以承担正弯矩。

对第(1)种情况, 拱脚不承受弯矩, 如使 $\sum M_k = 0$, 则

$$M_{k_1} = -(M_{k_2} + M_{k_3} + M_{k_4}),$$

代入(9)式, 便可推出最优桥台转角位移

$$\alpha_1 = -\frac{(M_{k_2} + M_{k_3} + M_{k_4})}{2 \left[\frac{1}{\delta_{11}} + \frac{(f - y_s)^2}{\delta_{22}} \right]}, \quad (12)$$

对于第(2)种情况, 若拱顶、拱脚可以承担相等的正弯矩, 可将(8)和(9)式代入 $\sum M_k$ 和 $\sum M_s$ 两式, 并使之相等, 可以求出最优桥台转角

$$\alpha_1 = \frac{(M_{s_2} + M_{s_3} + M_{s_4}) - (M_{k_2} + M_{k_3} + M_{k_4})}{\frac{2f(f - y_s)}{\delta_{22}}}. \quad (13)$$

由于计算桥台变位时是按基床抗力系数法进行的,还应考虑相邻荷载(台背回填土重)引起的桥台向岸转动和台基水平位移时引起的伴生转动角,这些都有现成的计算方法。

如台背回填土可简化成矩形均布荷载,其引起的桥台转动角 α_2 , 如图 1.3、1.4 所示。

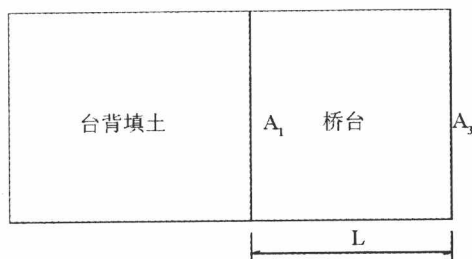


图 1.3 回填土引起桥台转动示意图

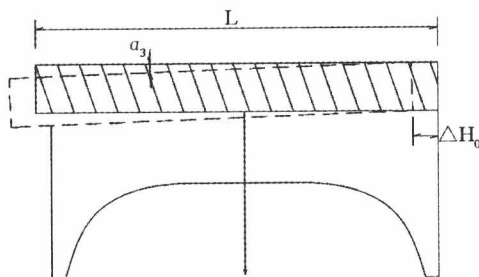


图 1.4 水平位移时刚性基础倾斜示意图

$$\tan \alpha_2 = -\frac{S_1 - S_3}{L}, \quad (14)$$

式中, S_1 、 S_3 —分别为回填土引起桥台基础 A_1 、 A_3 两点的沉降。

桥台台基水平位移 ΔH_0 , 则伴生桥台转角

$$\tan \alpha_3 = -\frac{\Delta H_0}{4KL}, \quad (15)$$

其中, $K = \frac{2}{\pi} \left[\text{arch} 2n - \frac{1}{2(1-\mu)} \frac{n}{\sqrt{\frac{1}{4} + n^2}} \right]$, $n = \frac{z}{b}$ —土体中水平位移实际等于零的断面位置相对深度。

还应考虑桥台转动角 $(\alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3)$ 后, 桥台重心偏移引起的附加转角

$$\tan \alpha_4 = \frac{12P(\alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3)t}{K_y L^3}, \quad (16)$$

式中, P —作用于桥台上垂直力的合力; t —垂直力合力中心至台基中心的竖距。

因此, 桥台最优设计角变位

$$[\alpha_0] = \alpha_1 + \alpha_4 - (\alpha_2 + \alpha_3)。(17)$$

4.2 桥台变位计算和拱桥优化设计步骤

从桥台最优角变位出发进行桥台计算和拱桥设计是一个比较繁琐的问题, 只能用试算、逐步迭代逼近的方法, 以平底桥台的单孔拱桥为例, 其步骤大致如下:

(1) 根据桥位情况和施工方法, 初步选定拱桥结构和桥台的形状和尺寸。

(2) 按照《桥规》初步选定拱脚水平位移 $\Delta_{H_i} (\leq \frac{1}{2} 0.5 \sqrt{L} \text{ cm})$, 计算在静荷、活荷、水平位移 Δ_{H_i} 的拱顶弯矩 M_{s_2} 、 M_{s_3} 、 M_{s_4} 和拱脚弯矩 M_{k_2} 、 M_{k_3} 、 M_{k_4} 再根据拱脚所能承担的弯矩用式(5)或式(6)计算拱脚最优角变位 α_1 。

(3) 假定桥台台基中心水平变位 $\Delta_{H_0} = \Delta_{H_i}$, 按式(14)、(15)、(16)计算台背回填土重引起的桥台倾斜角 α_2 、台基水平位移的伴生桥台倾斜角 α_3 和重心偏移引起的桥台倾斜角 α_4 。桥台的转角 $[\alpha_0] = \alpha_1 + \alpha_4 - (\alpha_2 + \alpha_3)$ 。

(4) 计算在静荷、活荷、拱脚水平位移 Δ_{H_j} 和拱脚变位 α_1 共同作用下, 施加于桥台上的垂直力 $\sum P_{x_1}$ 和 $\sum P_{y_1}$ 合力线靠近台基中心, 以初步拟定桥台台口位置(拱脚中心)。

(5) 由式(2)计算台基的水平位移 $[\Delta_{H_0}]$, 至此, 桥台重量、侧土压力(按主动土压力)、土抗力等也可以求出。桥台上各力对台基中心简化得 $\sum P_y$, $\sum P_x$, $\sum M_0$ 。

(6) 由式(5)、(6)、(7), 计算 Δ_{v_0} 、 Δ_{H_0} 和 α_0 。

(7) 若所计算的 $\Delta_{H_0} \neq [\Delta_{H_0}]$, $\alpha_0 \neq [\alpha_0]$, 则可以改变 h_1 、 d_1 、 L 或 B (台宽), 然后重新进行第(6)项计算。

有时出现 $\alpha_0 = [\alpha_0]$, 而 $\Delta_{H_0} \neq [\Delta_{H_0}]$ 的情况, 可以根据拱跨结构受力情况最佳的原则选择调整。

(8) 根据调整后所得出拱圈内力, 并考虑温度应力, 和拱脚不均匀沉降引起的内力、设计拱圈断面。这是计算的第一顺序。

然后根据所算出的拱圈断面和桥台尺寸重复以上计算, 直到满意为止。

5 算 例

[算例 1] 空箱式平底桥台

上部结构参照《拱桥设计计算手册》上册第 335 页的算例。