

薄壳桥

盛 贵 业

水利电力出版社

前 言

薄壳桥自问世以来，尚无一本综合地介绍薄壳桥的通俗读物。为了在农用桥梁建设中因地制宜地推广和使用好薄壳桥，根据本人几年来在薄壳桥结构试验研究中的体会，并将有关结构计算、试验成果和施工经验加以整理，编写成书，力图较全面地介绍薄壳桥的结构内力特性、设计要点、施工方法以及运用中存在问题与防治措施等，供各地修建和推广薄壳桥时参考。

本书是为基层单位相当于中等文化程度的水利技术人员和有施工经验的土建工作者编写的，期望本书能对他们所从事的工作有所裨益。此外，根据1984年2月17日国务院《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》规定，本书一律采用法定计量单位。为使读者阅读方便起见，在法定单位之后，仍注明过去习惯用的单位以供对照使用。

本书引用了一些山东省水科所课题研究成果，也收入了河南省水科所、安徽省水科所的部分试验资料和研究成果。

本书由河南省水科所胡煜鑫同志进行审核。水电部科技司陈川、李生田、肖嘉佑三位同志也提出了不少宝贵意见。在编写过程中，得到闻致中同志的热忱指导。李士秋同志协助完成部分计算工作，在此一并深表谢意。

由于编者水平所限和经验不足，恐怕难于满足读者要求。对于书中的错误和不妥之处，恳望读者批评指正。

作 者

1985年1月

薄 壳 桥

盛 贵 业

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

■

787×1092毫米 32开本 6.375印张 109千字

1986年1月第一版 1986年1月北京第一次印刷

印数0001—4630册 定价1.15元

书号 15143·5905

内 容 提 要

本书较全面地介绍薄壳桥的构造、建桥及运用经验。内容包括薄壳桥砌筑材料的选择、设计、施工、运用调查及其试验研究成果等。本书引用壳体有限元计算成果，阐述薄壳桥结构受力的基本性能。内容深入浅出，适合于中等文化程度的水利技术人员和基层水利、土建工作者使用，也可供修建中、小型农用薄壳桥时参考。

目 录

前 言

第一章 概论	1
第一节 薄壳桥的由来及其发展.....	1
第二节 薄壳桥的结构特点及其经济性.....	3
第三节 薄壳桥的计算荷载.....	5
第四节 壳体结构常用术语.....	8
第五节 计算假定与计算原理概述.....	14
第二章 砌筑材料的选用	18
第一节 砖砌体.....	18
第二节 砖砌与砂浆或混凝土组合砌体.....	26
第三节 混凝土、加筋混凝土.....	30
第三章 薄壳桥的特性	35
第一节 壳体与边肋变位.....	35
第二节 壳体与边肋内力.....	41
第三节 壳体与边肋对桥台的作用力.....	65
第四章 薄壳桥的设计	70
第一节 壳体与边肋设计.....	70
第二节 桥台设计.....	88
第三节 连拱侧墙及翼墙设计	103
第五章 薄壳桥的施工	106
第一节 基坑开挖及处理	106
第二节 桥台放样与砌筑	107

第三节	边肋与壳体的放样与砌筑	115
第四节	连拱侧墙及翼墙的放样与砌筑	121
第五节	桥面填土、养护与拆模	123
第六章	薄壳桥运用调查与试验研究	125
第一节	调查、问题与改进	125
第二节	薄壳桥的结构试验研究	133
第三节	薄壳桥的破坏试验研究	165
第四节	桥壳严重破坏后的修复加固	178
附录		180
(一)	混凝土配合比表	180
(二)	水泥砂浆配合比表	192
参考文献		196

第一章 概 论

第一节 薄壳桥的由来及其发展

早在六十年代初，薄壳桥已在我国公路桥梁建设中试用。一九六一年交通科学研究院和黑龙江省望奎县交通局，在望奎县建成一座三孔6m跨度的砖砌球面薄壳桥，属带纵向拉杆的无推力结构。一九六七年湖南省常德地区公路总段，在常德地区建成单孔10m的薄壳桥。此后，在河南、甘肃、陕西、河北及内蒙古等省、自治区的公路系统也相继建成10至20m跨度的钢筋混凝土薄壳桥多座，大多桥已取消纵向拉杆。山西省公路局还修建了数座钢丝网水泥薄壳桥。公路薄壳桥通常称为扁壳桥。

砖或混凝土薄壳桥在农田水利配套工程中的应用，最初是在河南省扶沟县。扶沟县水利局的技术人员根据以往建桥经验，于一九七四年四月建造了5m、8m跨度的砖砌农用薄壳桥。经河南省水科所试验鉴定，其设计承载能力为旧汽-6级，为农用桥梁建设增添了一种新的桥型。

农用薄壳桥问世不久，扶沟县的经验很快在河南部分地、县，在安徽、山东等省的部分平原地区的农田基本建设中采用，并促进了薄壳桥的结构试验研究工作。从一九七四年以来，河南、安徽、山东、河北等省的水利工作者，先后完成24座薄壳桥的原型试验和17座模型桥的试验，积累了大量资料，不仅为改进其壳桥结构型式、寻求较合理的构造尺

寸、摸清薄壳桥的极限承载能力提供可信数据，而且为探求切实可行的薄壳桥结构计算方法提供了依据。同时，在修建数以千计的薄壳桥的实践中，生产单位也积累了许多施工和运用方面的经验。这些工作和经验，均促进了薄壳桥的建设和发展。

薄壳桥在豫、鲁、皖等省的一些地区发展很快，据不完全统计，目前农用薄壳桥已达万座以上。从结构型式看，除“直墙式”（图1-1）薄壳桥外，安徽阜阳地区还创建了“悬网式”薄壳桥；桥壳的砌筑用材，除砖、混凝土外，还采用砖砌与混凝土组合材料、砖渣混凝土、水泥土块等多种圬工材料；桥的跨度逐步发展到12m、15m、最大跨度达18m，还有相当数量的多孔径的薄壳桥；农用薄壳桥的使用范围也有所扩大，有的已按公路桥荷载要求使用。如一九七五年五月在河南扶沟县境扶（沟）-开（封）公路上修建的双车道薄壳桥，跨度12m，采用砖壳钢筋混凝土边肋，至一九八〇年已通车十七万次，通过最大荷载为 $50 \times 9807\text{N}$ （即50t）平板挂车，至今运用正常。



图 1-1

还应指出，薄壳桥毕竟还是一种新发展起来的桥型。在它的发展初期，由于人们对它的结构受力特性还缺乏足够的了解，在薄壳桥的结构、构造处理和施工方法等难免有不妥之处，薄壳桥边肋出现轻微裂缝还是较普遍的。事实已表明，绝大多数薄壳桥至今运用正常。而且，边肋裂缝问题，在后来建造的薄壳桥中已逐步解决。今后，随着计算方法的日趋完善，人们对薄壳桥的认识逐步深化，加之施工工艺的不断革新，相信薄壳桥会获得更为健康的发展。

第二节 薄壳桥的结构特点及其经济性

桥梁是跨越河流、沟渠、交岔道路等的建筑物。它是由上部构造（包括主要承重结构和桥面系）、下部构造（包括桥台、桥墩）和附属构造（包括翼墙、护坡等）组成。通常是根据桥梁上部构造采用的不同结构型式，把桥梁区分为圬工拱桥、梁式桥、三铰拱桥、双曲拱桥、桁架拱桥、薄壳桥等，主要区别在桥梁承重结构的型式。

薄壳桥有两种，一种称为扁壳桥，另一种是本书介绍的农用薄壳桥。扁壳桥的承重结构是由双曲壳体、边肋、横向拉杆、端横隔等组成（图1-2）。双曲壳体薄而扁平，所谓“薄”指壳体的厚度与壳面的最小曲率半径之比不大于二十分之一；所谓“扁”指壳体的最大矢高与最小边长之比不大于五分之一，属扁平壳。扁壳桥多在公路桥梁上采用，主要用钢筋混凝土材料建造。农用薄壳桥的承重结构只有双曲壳体和边肋两部分，壳体的厚度与壳面的最小曲率半径之比小于二十分之一，但壳体的最大矢高与最小边长之比一般在三分之一左右，壳体薄而不扁，宜用圬工材料建造。农用薄壳

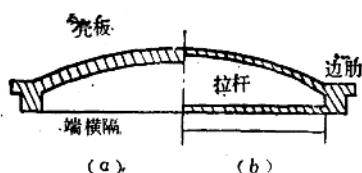


图 1-2 扁壳桥承重结构的组成部分
(a)壳端半横截面；(b)壳顶半横截面

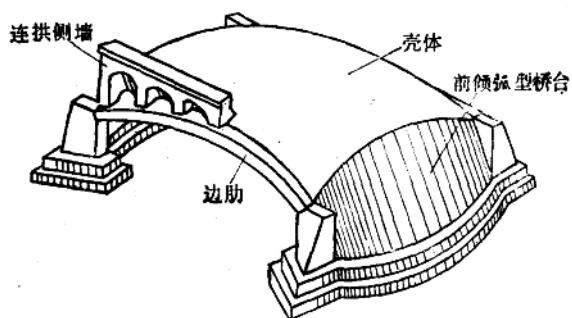


图 1-3 农用薄壳桥结构示意图

桥的壳上结构采用连拱侧墙，下部结构采用轻型桥台（图1-3）。整个桥体结构简单，受力合理，造型美观，节省工程材料。

薄壳桥主要适用于农用桥梁建设，桥宽多采用4 m至5 m，较适宜的跨度为5 m至12 m，桥壳矢跨比 $1/6$ 至 $1/8$ ，矢宽比 $1/8$ 至 $1/10$ ，荷载等级旧汽-6至汽-10级。薄壳桥是农用桥梁中较经济的桥型之一。

农用薄壳桥的经济性是由它的各部结构的合理组合所决定的。它的承受结构采用双曲壳体结构，截面力学性能好，

在满足设计强度和刚度要求情况下，壳体比板、拱结构所用的材料都省。自然界中的蛋壳、蚌壳、乌龟壳等都是以最少的材料造成坚强结构的例证。河南大李庄砖砌薄壳桥，跨度8 m，壳顶厚度仅8 cm（一平砖加砂浆抹面厚），壳顶承受的车轮压力达 $22.8 \times 9807 \text{ N}$ （即22.8t）。薄壳桥壳上的挡土侧墙采用连拱式挡土墙，较通常采用的重力式挡土墙其圬工体积减少50%，不仅节省了工程材料，而且还因恒载自重减小，降低了下部结构的负担。薄壳桥的下部结构采用轻型桥台，也是圬工体积减少的重要原因。采用重力式桥台的圬工拱桥，桥台约占全桥圬工体积的70~80%，而薄壳桥在上部结构圬工体积减少的情况下，桥台占全桥圬工总体积的50%左右。薄壳桥同旧式拱桥相比，圬工体积可减少70%以上，同轻台圬工拱桥相比，圬工体积一般可减少40%以上（表1-1）。

表 1-1 壳桥与拱桥工程量比较表

跨 度 (m)	工 程 量 (m ³)		薄壳桥较轻台 拱桥工程量减 少百分比(%)	备 注
	薄 壳 桥	轻台拱桥		
5	10~19.3			轻台拱桥工程量查山 东水利厅编《灌区设计 和施工》
8	22~27	81.7	73~67	
10	33~48	93.6	63~49	
12	54~58	99.4	47~42	

第三节 薄壳桥的计算荷载

计算荷载包括恒载和活载。

一、恒载

恒载是指薄壳桥结构各部分的自重、填土重、土压力等。计算桥壳内力时所考虑的恒载，包括承重壳体 and 边肋的自重、连拱侧墙自重和壳上填土重。根据所用材料的容重和体积，可以求算恒载的量值。表1-2列出了一般常用材料的容重，可供查用。

表 1-2 常用材料容重表

材料种类	容 重 [9807N/m ³ (即t/m ³)]	附 注
钢筋混凝土	2.50	
混凝土或片石混凝土	2.30	用机器震捣的混凝土容重可取 2.4 × 9807N/m ³ (即2.4t/m ³)
浆砌块石或料石	2.4~2.50	浆砌料石取2.5 × 9807N/m ³ (即 2.5t/m ³)
浆砌片石	2.30	
干砌块石和片石	2.10	
泥结碎(砾)石路面	2.10	
煤渣石灰填料(压实)	1.80	
填 土	1.70	含水量很大的土重也可取 1.8 × 9807N/m ³ (即1.8t/m ³)
填 石	1.90	
石灰三合土	1.75	石灰、黄砂与砾石
石 灰 土	1.75	石灰30%、土70%
砖 砌 体	1.80	

二、活载

活载包括人群荷载、汽车荷载、汽车荷载引起的冲击力、制动力、汽车荷载作用在桥台台背填土面时增加的土压力、以及拖拉机荷载、履带车荷载等。

薄壳桥一般不设人行道。计算桥壳内力时所考虑的活

表1-3 各级汽车荷载的主要技术指标

主要技术指标	单位	旧汽-6级		旧汽-8级		旧汽-10级		新汽-10级		新汽-15级	
		加重车	标准车	加重车	标准车	加重车	标准车	加重车	标准车	加重车	标准车
一辆汽车总重量	(t) 9807N	7.8	6.0	10.4	8.0	13.0	10.0	15.0	10.0	20.0	15.0
一行汽车车队 中车辆数	辆	1	不限制	1	不限制	1	不限制	1	不限制	1	不限制
后轴压力	(t) 9807N	5.7	4.2	7.6	5.6	9.5	7.0	10	7	13	10
前轴压力	(t) 9807N	2.1	1.8	2.8	2.4	3.5	3.0	5	3	7	5
轴距	m	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
轮距	m	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8
后轮着地宽度 及长度	m	0.2×0.2	0.2×0.2	0.3×0.2	0.3×0.2	0.4×0.2	0.3×0.2	0.5×0.2	0.5×0.2	0.6×0.2	0.5×0.2
前轮着地宽度 及长度	m	0.15×0.2	0.10×0.2	0.15×0.2	0.15×0.2	0.2×0.2	0.15×0.2	0.25×0.2	0.25×0.2	0.30×0.2	0.25×0.2
车辆外形尺寸 (长×宽)	m	8×2.7	8×2.7	8×2.7	8×2.7	8×2.7	8×2.7	7×2.5	7×2.5	7×2.5	7×2.5

载，包括汽车荷载及其冲击力。由于跨度一般不超过12m，故只考虑一辆加重车作用在桥跨上。

汽车荷载等级有旧汽-6、旧汽-8、新（旧）汽-10等。它们的主要技术指标规定见表1-3。

当汽车在桥面上行驶时，由于桥面不平整，会引起汽车颠簸，对桥面产生附加的冲击力。考虑冲击力后的汽车荷载，可用车辆的重量乘以冲击系数来求算。参考钢筋混凝土桥、混凝土桥和石拱桥的冲击系数规定（见表1-4），薄壳桥的主壳圈或边肋，冲击系数可选用1.2。

表 1-4 冲 击 系 数 表

结 构 种 类	跨度或荷载长度 (m)	冲击系数 (1 + μ)
梁、刚构、拱上构造、桩式或 柱式墩台	$L \leq 5$	1.30
	$L \geq 45$	1.00
拱桥的主拱圈或拱肋	$L \leq 20$	1.20
	$L \geq 70$	1.00

当汽车在刹车时，车轮与路面间发生的水平滑动摩阻力称为制动力。制动力可按一辆加重车的30%计算。

第四节 壳体结构常用术语

壳体结构是一种外形呈曲面状、厚度远较其它尺寸小的薄壁空间构造物。为便于描述壳体的几何形状，把平分壳体厚度的曲面称着中面，知道中面的坐标方程式和不同位置处

壳体厚度，壳体的形状尺寸就可以完全确定下来。

壳体按几何形状分类有移动面壳、旋转面壳等。壳体的曲面是由一竖向曲线（亦称母线）沿另一条竖向曲线平行移动而形成的称移动面壳。这两条竖向曲线若是圆弧曲线，则称圆弧线移动面壳，见图1-4；若是抛物线，则称抛物线移动面壳，见图1-5。壳体的曲面是由一平面曲线围绕其平面内的轴线旋转一周所形成的称为旋转面壳。这一平面曲线若是圆弧线，则称球面壳，见图1-6；若为双曲线，则称双曲线旋转面壳，见图1-7。

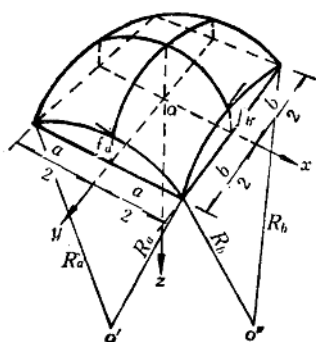


图 1-4

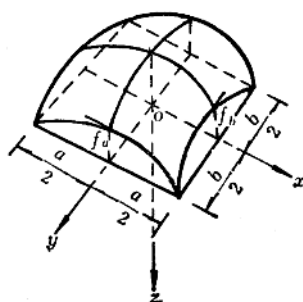


图 1-5

薄壳桥的承重壳体多采用圆弧线移动面壳和抛物线移动面壳，用直角坐标系确定的壳面方程式表示如下：

圆弧线移动面壳

$$Z = R_a + R_b - (f_a + f_b) - (\sqrt{R_a^2 - x^2} + \sqrt{R_b^2 - y^2}) \quad (1-1)$$

其中

$$R_a = \frac{f_a}{2} + \frac{a^2}{8f_a}$$

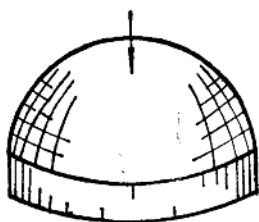


图 1-6

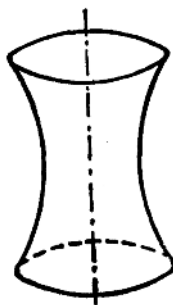


图 1-7

$$R_0 = \frac{f_b}{2} + \frac{b^2}{8f_b}$$

抛物线移动面壳

$$Z = \frac{4f_a}{a^2} \left(x^2 - \frac{a^2}{4} \right) + \frac{4f_b}{b^2} \left(y^2 - \frac{b^2}{4} \right) \quad (1-2)$$

式中 a —— 壳的横向 (x 轴) 宽度, 见图1-4、图1-5, 下同;

b —— 壳的纵向 (y 轴) 跨度;

f_a —— 壳的横向矢高;

f_b —— 壳的纵向矢高;

R_a —— 沿 x 轴方向的竖向圆弧线半径;

R_b —— 沿 y 轴方向的竖向圆弧线半径。

工程上习惯地把壳的横向矢高 f_a 与横向宽度 a 的比值 $\frac{f_a}{a}$ 称为壳的矢宽比; 把壳的纵向矢高 f_b 与纵向跨度 b 的比值 $\frac{f_b}{b}$ 称为壳的矢跨比。矢宽比和矢跨比可用来表示壳体的扁平

和弯曲程度。壳的跨度 b 与宽度 a 的比值 b/a 称为壳的跨宽比，薄壳桥跨宽比应满足： $b/a \leq 3$ 。

壳体的厚度薄，构造处理上把壳的边缘部位予以加强，沿壳体纵向边缘设置的侧边缘构件称为边肋，沿壳体横向边缘设置的端边缘构件称为端横隔，薄壳桥一般不设端横隔，壳端直接平铰结于桥台上。

薄壳桥在恒载和活载作用下，承重的壳体和边肋要产生变形，习惯上把垂直方向（ Z 轴指向）的变形量称为挠度，在壳体或边肋产生的最大挠度与跨度之比称为壳体或边肋的相对挠度。相对挠度值是判断结构物刚度大小的控制指标。结构物的刚度愈大，则相对挠度愈小。反之，刚度愈小，则相对挠度愈大。规范规定的一般板式桥相对挠度不大于 $1/600$ 、拱式桥相对挠度不大于 $1/1200$ ，薄壳桥不应低于拱式桥的规定。

壳体受力变形后，在壳体的截面上产生了内力。现任取一微元体，根据力的平衡条件，微元体各截面上内力的合力应等于作用在微元体上的荷载。壳体截面上的内力可分两大类：一类是只在中面里产生内力的称薄膜内力，包括正交于截面上的轴向力，标以 N_x 、 N_y 和沿截面作用的顺剪力，标以 N_{xy} ，如图1-8所示；另一类发生在中面两侧的内力称弯曲内力，包括沿 x 轴和 y 轴转动的弯矩，标以 M_x 和 M_y 和沿截面垂直向作用的横剪力，标以 Q_x 和 Q_y 以及扭矩 $M_{xy} = M_{yx}$ ，如图1-9所示。

薄膜内力实际上是由于中面的拉伸、压缩和剪切变形而产生的，内力在其作用截面上的分布，如同杆件的轴向力在其截面上的分布一样是均匀的，见图1-10。这种在单位面积上作用的内力称为应力，计量单位常用 P_0 表示。与轴向力