

悬臂褶皱薄壳雨篷设计实例

安徽省建筑厅设计院编著

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书主要叙述某一薄壳雨篷工程的设计计算实例，同时简单地介绍了设计理论和应力分析，以及在设计过程中所考虑到的一些问题及其处理方法等，可供建筑结构工程设计人员等作为经验交流和参考之用。

悬臂薄壳雨篷设计实例

安徽省建筑厅设计院 編著

上海科学技术出版社出版

(上海南京西路2004号)

上海市书刊出版业营业许可证出093号

上海市印刷四厂印刷 新华书店上海发行所总经售

开本 850×1168 1/32 • 印张 1 3/8 • 插页 2 • 字数 32,000

1959年7月第1版 1959年7月第1次印刷

印数 1—2,000

统一书号：15119.1303

定 价：0.32 元

前 言

1958年夏季，由于客观的需要，安徽省建筑厅设计院设计了一个挑出9.20公尺的钢筋混凝土悬臂褶薄壳屋盖，可以说是一项大胆的尝试。由于薄壳结构的设计资料目前尚很缺乏，当时对该项工程的设计工作，感到非常困难，但在党和领导的大力支持下，终于基本上完成了该项任务。

去年九月初华东协作区四省一市在南京市召开建筑技术经验交流会议。会议内容是如何贯彻社会主义建设时期的总路线，多快好省地建设我们的祖国，而薄壳结构恰好符合好、省的精神，因此我院即将该项悬臂褶薄壳结构设计中的一体会作为我省交流资料之一。会后我们把这份交流材料整理了一下，同时又补充了一些新的内容，才写成这本小册子。

小册子的内容，主要是介绍一个褶薄壳雨篷设计中所考虑到的一些问题，以及我们怎样解决这些问题，所采取的方法。在后面还附了该工程褶薄壳部分的计算实例。

在这本小册子中，没有详述薄壳的构造和公式的推导，只简单地叙述了基本假设和计算时应用的公式。关于这方面的资料，在许多书中已可找到，而且讲得很详细，因此不再重复。

最后我们觉得这本小册子所介绍的材料可能是不够成熟而存在着不少缺点。为了抛砖引玉，仍予发表，希望读者提出批评意见。

安徽省建筑厅设计院 1959年3月

目 录

前言

一、建筑要求的简单介绍	1
二、薄壳结构形式的选择	2
三、应力分析的基本假设	4
四、褶薄壳的法线应力及剪力计算	5
五、偏心荷重作用下的弯曲和扭转	8
六、横向应力的分析	10
七、薄壳裂缝的处理	11
八、剪力钢筋的布置	11
九、边波的处理	12
十、基础对褶薄壳的影响	13
十一、支承的处理	14
十二、落水问题	15
十三、局部稳定性	16
十四、计算实例	16

一、建筑要求的简单介绍

該工程为某运动場的司令台，是一座三层鋼筋混凝土結構，底层为正厅和會議室、接待室，并附有公用電話間、廁所等。二层主要为首长及来宾休息室。三层为看台，要求可容納四百人左右，上盖雨篷，挑出长达 9.20 公尺。为使看台上任何一个位置都可以看到全場的活动，看台左右前三面 9.20 公尺內一律不允許設置墙柱支承雨篷(图 19)。

雨篷支承在框架上。框架高 13.80 公尺，分为三层。框架前后两柱間距离仅为 3.00 公尺，形成一座很不稳定的結構(图 19)。框架与框架之間距为 4.00 公尺。在这本小冊子內主要介紹褶薄壳雨篷的設計过程，不准备介紹框架的計算。

根据建筑的要求，前面 9.20 公尺的屋盖必須做成悬臂。在这样一个大跨度的悬臂屋盖与整体結構形式来看，采用木材結構是有許多困难的；同时，为了节约鋼材，亦不适宜采用鋼結構；磚石結構是沒有可能性；剩下的目前可能采用的就只有鋼筋混凝土結構了。但一般較大跨度的鋼筋混凝土肋形楼盖(梁版式楼盖)或屋盖，由于混凝土自重很大，往往荷重虽很小，仍需采用很大的截面来担負其本身重量，故鋼筋混凝土肋形楼盖，当梁或版的跨度到达一定限度时，就会造成不經濟，而对于悬臂形式的則更甚。如果一定要采用肋形楼盖，必然会将梁版的截面設計得很大，屋盖的重量很重，那么对整个結構物的平衡(图 19)，将更难于处理，故从經濟造价和整个建筑物的合理性来講都是不允許的。因此我們就不得不从薄型結構来考虑，薄壳結構是一种良好的形式。

二、薄壳结构形式的选择

薄壳是属于一种空间结构物，它最大的优点是壳体壁薄，自重轻，在不用预加应力条件下，仍能应用在较大的跨度上去，在某些方面可以代替钢结构，节省钢材，降低造价，且有刚度大、耐久性好等优点。二十世纪以前这种结构很少得到发展，主要由于它在计算上极为繁复，直到苏联 B. E. 符拉索夫教授的理论公布及补充了某些几何假定，从计算方法上得到简化后，薄壳结构才逐渐被人们采用于建筑物中，并得到重视和推广。

最普通的长薄壳结构形式有二种：一种是圆柱形薄壳，另一种是褶薄壳（图 1）。在这二种形式中，我们采取了后一种褶薄壳形

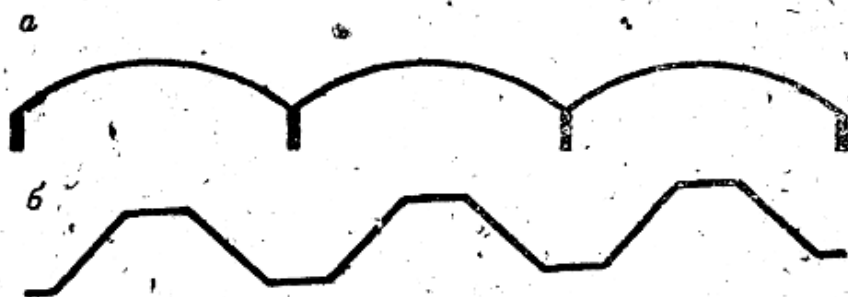


图 1

式。因圆柱形薄壳如为两端支承成简支梁形状者，则纵向弯矩中间最大，两端无弯矩，截面上部受压，下部受拉，纵向主钢筋放置在下部壳体的梁内，在上面可以得到较宽的承压面积，对壳体的上部产生压力的局部稳定性较好（图 2）。同时压力中心提高，内力臂

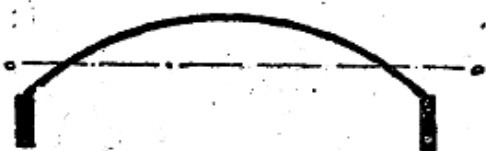


图 2

增长,增加抗弯矩,可减少纵向主钢筋。对横向截面来讲,由于形状为圆弧形,有拱的作用,所以壳体壁虽然很薄,但一波之间的距离可做得较大,减少边梁数量,又减轻自重。有这许多优点,因此常被人们所采用。但如果将圆柱形薄壳作为悬臂结构,情况就显然不同。由于悬臂结构在纵向截面内最大负力矩是在支承处,上部受拉,纵向主钢筋必须放置在上部,下部边梁受压,因梁薄,局部受压稳定性差,必须加厚梁的宽度,增加薄壳自重,中性轴向上移,内力臂减小,对于抗弯曲不利。再从横截面来讲,圆弧形壳体部分受拉,而混凝土不能赖以抵抗拉应力,必须加钢筋,此外,形状亦不美观。在本工程建筑上的要求,波长仅为 4.00 公尺,如用褶薄壳,同样可以将壳体壁厚做得很小以抗横向应力;再从施工观点来看,褶薄壳都是平板组合而成,比圆柱形薄壳为简单,在施工条件较差的地方亦能浇筑,模板的损耗亦较圆柱形薄壳的为少,当侧版的倾斜角在 45° 时,用干硬性混凝土浇筑亦能用单面模板施工。这些都说明在本工程的具体情况下,采取褶薄壳较圆柱形薄壳为适宜,所以我们最后决定采用褶薄壳结构作此屋盖。

在褶薄壳结构的截面形式上亦采取了一些措施。根据应力变化的规律,我们采取纵横截面均为变截面。悬臂构件在悬臂端其弯矩为零,向支点逐渐增大,其纵向的弯矩变化曲线近似为抛物线(长薄壳)。根据这一应力的变化规律,我们选取褶板厚度在悬臂端处仅为 5 公分,其横截面高仅为 55 公分,按理论还可以薄些和矮些;但考虑到高空现场操作及建筑上的美观,又恐壳体壁过薄不易保证施工质量,因而选定了这样一个截面尺寸。在支座处为了保证其刚度,壳体厚度采用 8 公分,其横截面高为 118 公分。整个壳体壁平均厚度仅为 6.5 公分,这就创造了很大跨度的建筑物可以采用薄壳的条件。

采取变截面的措施的优点是:1. 减少可以不需要的混凝土,减轻自重;2. 由于端点处壁薄支座处壁厚,构件的重心向支座处移

近,总的目的在減輕构件自重、减少支座弯矩,有利于构件工作,同时可节约鋼材、水泥,节省造价,又有利于整个結構物的平衡。按理論还可以做成等强度构件,壳体弯矩还可减少,但等强度薄壳构件在計算上是有困难的,在施工技术上亦复杂,故不采用。

三、应力分析的基本假設

薄壳应力的計算,虽然有彈性应力阶段和塑性应力阶段的两种基本理論,但到目前为止,大都还是根据彈性应力阶段作为計算基础。从严格限制薄壳的裂縫方面来看,尤其是暴露在大氣中的悬臂薄壳,裂縫出现在上面,易受雨水等侵蚀,如采用塑性应力阶段来計算是不够妥当的,所以我們基本上仍用彈性应力阶段理論来計算。

薄壳应力分析,从彈性平衡上可得六个微分方程,其中包含十个未知数,虽然有一些边界条件可使方程簡化一些,但計算仍是相当繁复的。

本工程的悬臂褶薄壳,跨长与波长之比大于2,属于长薄壳类型,可以近似地采用长梁理論。虽然薄壳的纵向弯曲不能符合长梁弯曲时的平面假設,不能与长梁的基本假設完全吻合,但由于下列的一些假設,使計算方法大大的簡化,从而使采用长梁理論成为可能。

薄壳长梁理論的計算基本假設是:1. 在变形前(即結構物承受荷重前)它的正剖面为一平面,变形后(即結構物承受荷重后)它的正剖面上产生的翘曲仍服从平面定律。2. 由于壳体的壁很薄,故可以假設纵向法綫应力 σ 沿壁的厚度的变化可以略去,剪应力 τ 沿壁的变化亦可以略去。3. 再根据剪应力的成对定律,在壳体的正剖面內,根据边界条件,靠近表面的应力向量在垂直于表面的方向不应有剪应力,剪力的向量必然与正剖面的外形切綫方向相符

(图3)。由于上述的基本假设，简化了薄壳的计算，尤其是假设1，与梁的平面假设是很相似的，因而长薄壳纵向弯曲的计算方法，基本上可以适用一般长梁的理论。



图 3

四、褶薄壳的法线应力及剪力计算

前面讲过，这本小册子内不准备把计算用的公式的推导过程写出来。但为了使读者在后面阅读计算例题时容易明了起见，这里把计算时应用到的公式先作一简要的介绍。至于这些公式的推导及来源，请参阅有关薄壁结构书本及高等数学。

计算时可以取出一波作为计算单元。下面是对称荷重作用时纵向弯曲的计算公式：

1. 体积：

$$V_n = \int y_n \delta_n dx \quad (1)$$

式中： δ_n ——褶薄壳中各版的厚度；

y_n ——褶薄壳中各版的宽度；

x ——褶薄壳的长度， dx 即取长度很小的一段。

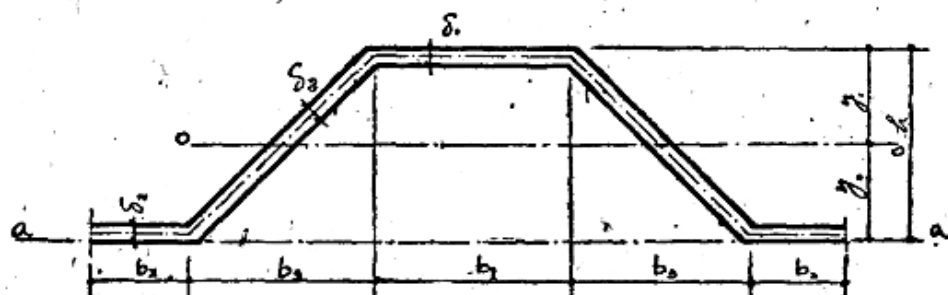


图 4

由于褶薄壳是变截面的，各块版的厚度及宽度均随纵向长度

的变化而变化,故它們都是 x 的函数。

$$\therefore y_n = f(x)$$

$$\delta_n = \varphi(x)$$

2. 重心:

$$\bar{x}_n = \frac{\int_F y_n \delta_n x dx}{\int_F y_n \delta_n dx} \quad (2)$$

式中: $\bar{x}_n$ —— 褶薄壳重心沿 X 軸的座标。

3. 弯矩:

$$M_n = w V_n \bar{x}_n \quad (3)$$

式中: w 为钢筋混凝土单位体积重量,浇筑时如用震动器者为每立方公尺 2600 公斤,如不用震动器者为 2400 公斤。

4. 截面积:

$$F = b_1 \delta_1 + b_2 \delta_2 + 2 \frac{b_3}{\sin \theta} \delta_3 \quad (4)$$

式中: b_n —— 褶薄壳各版的宽度;

θ —— 褶薄壳側版的傾斜角。

5. 慣性矩:

$$I_{a-a} = b_1 \delta_1 h^2 + 2 \frac{b_3 \delta_3}{\sin \theta} \frac{h^3}{3} \quad (5)$$

$$I_{o-o} = I_{a-a} - F \bar{y}^2$$

式中: $\bar{y}$ —— 褶薄壳横截面重心沿 Y 軸的座标 (原点在 $a-a$)。

6. 褶薄壳混凝土的纵向法线应力与钢筋面积计算:

拉应力

$$\sigma_1 = \frac{M y_1}{I_{o-o}} \quad (6)$$

压应力

$$\sigma_2 = \frac{M y_2}{I_{o-o}} \quad (7)$$

鋼筋面積

$$F_a = \frac{N}{1.1[\sigma]} \quad (8)$$

式中: y_1, y_2 — 壳体橫截面重心至上、下邊緣的距离;

$[\sigma]$ — 鋼筋的允許应力;

1.1 — 因大部拉力鋼筋集中于頂面而增大內力臂的系数;

N — 壳体橫截面中全部拉应力, 其計算的公式如下:

$$N = \frac{MS_{(0)}}{I_{o-o}} \quad (9)$$

$S_{(0)}$ — 壳体橫截面至重心靜矩。

7. 剪应力:

$$\tau = \frac{QS_{(0)}}{2\delta_3 I_{o-o}} \quad (10)$$

式中: Q — 最大剪力。

五、偏心荷重作用下的弯曲和扭轉

薄壳的中間波除在对称荷重作用下产生縱向弯曲外, 我們还考虑到由雪荷重及其他不对称荷重作用所产生的弯曲和扭轉, 其計算公式如下:

1. 扇性綫靜矩:

$$S_{\omega y} = \int_F \bar{\omega}_0 y dF \quad (11)$$

式中: ω_0 — 扇性面积。

2. 扇性慣性矩:

$$I_{\omega} = \int_F \bar{\omega}_0^2 dF \quad (12)$$

3. 弯曲扭转双力矩:

$$B = -\frac{qe}{\alpha^2 \operatorname{ch} \alpha L} [\alpha L \operatorname{sh} \alpha(L-x) - \operatorname{ch} \alpha L + \operatorname{ch} \alpha x] \quad (13)$$

当 $x=0$ 时, B 为最大。

式中: q ——单位长度内作用的荷重;

e ——作用荷重的偏心距;

L ——壳体长度;

α ——壳体的弹性弯曲扭转特性,其计算公式为

$$\alpha = \sqrt{\frac{GI_{\kappa}}{E_0 I_{\omega}}}$$

E_0 ——受拉弹性模量,可用 $\frac{1}{6}$ 受压弹性模量;

G ——剪切弹性模量,混凝土的剪切弹性模量

$G=0.425E$ (E 为受压弹性模量);

I_{κ} ——扭转时断面的惯性矩。

4. 弯曲扭转力矩:

$$M_{\omega} = \frac{qe[\alpha L \operatorname{ch} \alpha(L-x) - \operatorname{sh} \alpha x]}{\alpha \operatorname{ch} \alpha L} \quad (14)$$

当 $x=0$ 时, M_{ω} 为最大。

5. 纯扭矩:

$$M_{\kappa} = \frac{qe[\alpha(L-x) \operatorname{ch} \alpha L + \operatorname{sh} \alpha x - \alpha L \operatorname{ch} \alpha(L-x)]}{\operatorname{ch} \alpha L} \quad (15)$$

当 $x=L$ 时, M_{κ} 为最大。

式(12)、(13)、(14)仅适用于均布荷重的悬臂构件中(图5)。

6. 属性垂直应力的计算:

因为外力形成绕 X 轴旋转之力偶,所以这些力引起了平衡内力体系,所产生的应力如(图5e)

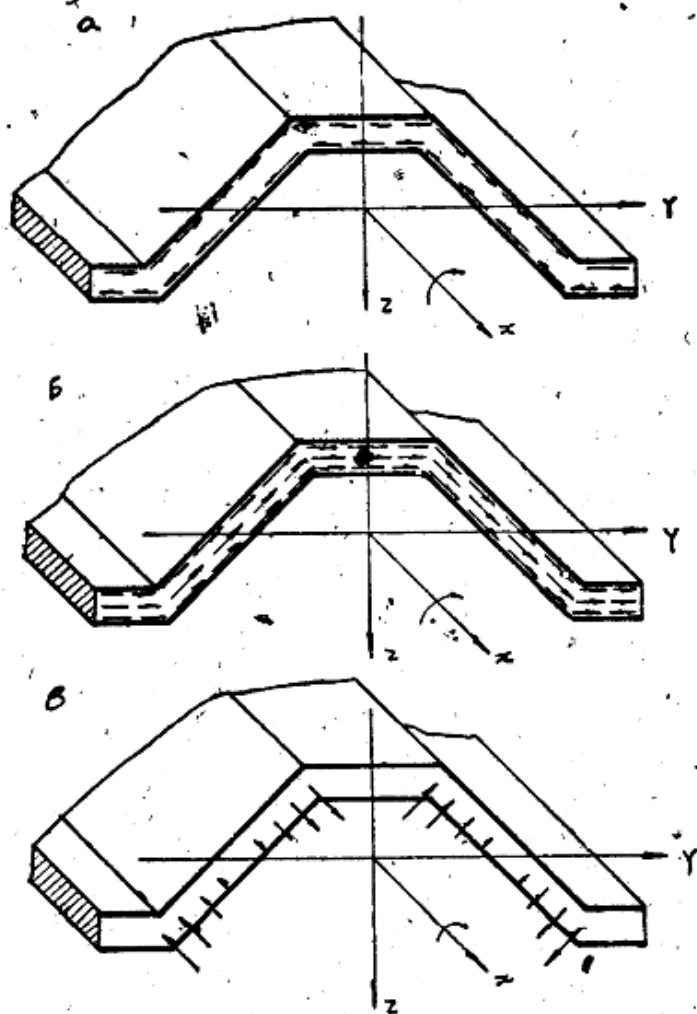


图 5

$$\sigma_{\omega} = \frac{B_{\omega} \omega}{I_{\omega}} \quad (16)$$

7. 扇性切力計算:

对壳体所产生的应力,在一般情况下,都是很小的,其形状如(图 56).

$$\tau_{\omega} = \frac{M_{\omega} S_{\omega}}{I_{\omega} \delta} \quad (17)$$

8. 由于扭转力矩产生的切应力:

計算可以按非圓断面杆件在純扭轉時所用的近似方法來進行,對壳体所產生的應力情況如(圖 5a)

$$\tau_k = \frac{M_k \delta}{I_k}$$

其中 δ 為被研究的那一點断面壁之厚度。

邊波或断面不對稱及邊界條件不對稱時,壳体內的應力計算,亦可用上列公式。

六、橫向應力的分析

長褶薄壳的橫向應力,可以象普通梁版一樣來分析。對於它,可以假設每塊版支承在相鄰版的邊棱上,所有的版彼此相連。因此可以將褶版沿水平方向拉直作為連續版來計算,但同時要考慮斜面上荷重垂直于版面的分力(圖 6)。在上部邊緣肋 A 內所得的負力矩應該乘以表 1 中的系數。

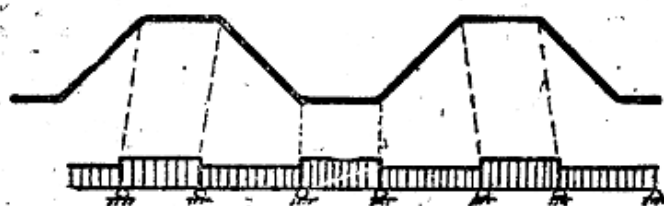
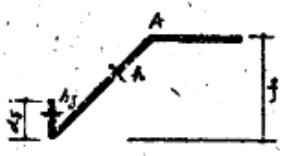
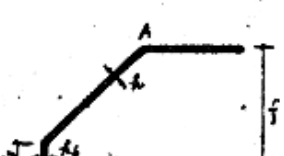


圖 6

表 1

							
$\frac{ds}{f} \backslash \frac{h}{h}$	0.3	0.45	0.6	$\frac{ds}{f} \backslash \frac{h}{h}$	0.3	0.45	0.6
1-A	2.50	2.00	1.50	1-A	1.50	1.00	0.7

七、薄壳裂縫的处理

薄壳結構大都用在大跨度工程中,由于跨度較大,在弯矩最大处受拉的一面能出現很大的裂縫,倘裂縫寬超过 0.2 公厘时,就会腐蝕混凝土內鋼筋,影响工程寿命。尤其是悬臂薄壳屋盖的裂縫出現在上面,更会使混凝土內的鋼筋直接受到雨水及大气的侵蝕,因此对裂縫的出現,應該严格加以限制。为了避免裂縫出現,对建筑物发生危害,最理想的是在混凝土的受拉一面預加应力,可是目前我处暂时还没有这样的施工設備,还没有足够条件設計成預应力混凝土。在解决支座处上面裂縫的問題上,我們不得不一方面加大断面,提高构件的刚度,增加抗弯力矩,造成有利条件,使邊緣拉应力减低,同时尽量不采用高流限应力的鋼筋,提高混凝土标号,以避免裂縫的过早出現及裂縫过寬。根据苏联技术規范規定:如建筑物裂縫的出現足以危害鋼筋,則邊緣拉应力不应超过 $2R_p$ (R_p 为混凝土受拉极限);在毛細裂縫出現时对鋼筋危害不大的建筑物中,不应超过 $3R_p$;在任何情况下不得超过 $4R_p$ 。本工程的悬臂褶薄壳,按理混凝土邊緣拉应力应控制在 $2R_p$ 內,但由于建筑上条件的限制,邊緣拉应力要控制在 $2R_p$ 內是有相当困难的,所以只得将其最外邊緣拉应力控制在 $3R_p$ 內,并按穆拉謝夫教授的理論,将裂縫的寬限制在 0.2 公厘內。如在拆模后或在竣工后,发现有裂縫出現时,将再設法用純水泥砂浆加 5% 避水浆,拌成避水砂浆,把裂縫嵌补完整。

八、剪力鋼筋的布置

在薄壳結構中,由于壳体壁很薄,往往会由于剪应力超过 R_p/k 很多而达到破損。尤其当悬臂薄壳支承的前后兩柱之間距离很小

时(图 19),因力的平衡原理,在两支承之間在壳体中会出现很大的剪应力(見例题),所以剪应力是薄壳结构中主要应力之一。倘設計时在这方面考虑得不够妥当,很容易发生工程事故。当壳体内剪应力超过 R_p/k 时,一般都設計斜鋼筋以抗剪应力。这次我們沒有采用斜鋼筋,因为悬臂薄壳最大弯曲应力、剪应力、扭轉应力都在支承处为最大,在这块很薄的側版上,应力情况比較复杂,不但有剪应力,还有上部的拉应力,下部的压应力,横向弯曲应力及由不对称荷重产生的扭轉应力等。上述这些应力有一部分可以由混凝土承受,有一些应力必須由鋼筋承担,加以根据长梁理論計算剪应力的方法来計算壳体中剪应力,是与实际情况有些出入的,其

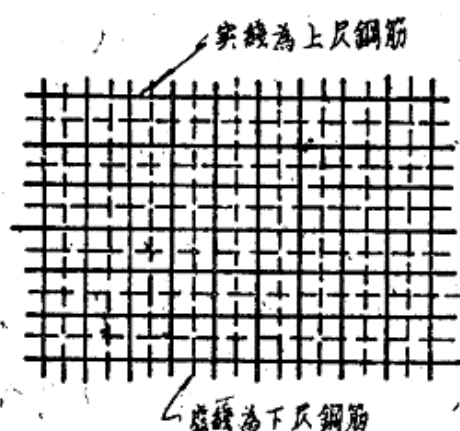


图 7

裂縫的傾斜角亦有出入,如机械地按 45° 放置斜鋼筋,是不够妥当的。为了能較好地抵抗側版上的这些复杂应力,所以将剪力鋼筋設計成网状。剪力鋼筋网分上下二层交錯放置如(图 7),鋼筋网的格子(网眼)建議不小于 10×10 公分,俾便于操作。这样設計虽然多用了

一些鋼材,但是从結構的合理性来講要比斜鋼筋优越得多,同时便于施工,容易保証工程质量,这点对薄壳結構講是相当重要的。

九、边波的处理

长薄壳纵向法綫应力按长梁理論計算,横向应力的分析按連續版計算,这样的方法仅可适用于中間波而不适宜用于边波。因为中間波两旁都与邻波相連接,因此它的側边有足够的剛度,截面上各点仅可垂直移动,所以其本身工作,实际上是接近于梁的工

作。而边波則由于一边沒有約束，它的邊緣不仅可以垂直移动，而且亦能沿水平方向移动，故采用长梁理論的計算方法是不够准确的。边波的計算可以应用符拉索夫教授有弯矩理論或吉里曼的近似計算方法。但这二种計算方法还是很繁复的。

为了克服薄壳边波橫向剛度差的缺点，我們在边波采用了封閉箱式(图 8)，这样处理不但加强了边波水平剛度，同时亦有利于边波抵抗由于它自己的不对称断面引起的偏心扭力矩，各方面大大地有利于它的工作。



图 8

十、基础对褶薄壳的影响

薄壳結構是空間結構，如果某一向的应力受到破坏，势必增加其他方向的应力，以达到結構物內力的平衡。有时能由于某向应力的意外增加而造成結構物的不安全甚至破坏。因此基础的沉陷对薄壳結構的影响是一个重要的問題。

对每对框架的基础設計，我們采用了前后两只柱互相联合起来的联合基础。为了使一樑框架的整个結構物能够获得平衡起見，将基础向前端伸长一段，使在仅有呆重时整个結構物重心与基础底面形心基本上能吻合或相差不多，同时又使在有活重及风荷重时，基础邊緣的最大压应力不超过土壤允許耐压力。如另一端基础邊緣已达到有与地基脱离的趋势时，則要求保証基础底面承压部分(即与地基接触部分)不小于基础长度的 75%，这样可以使