

薄壁空间结构的实验与 理论研究论文集

В. 3. 符拉索夫教授 主编



建 筑 工 程 出 版 社

薄壁空間結構的實驗與理論 研究論文集

鍾慕唐 鄧樹聖 鄧緒柏 等譯
梁楚冠 汪齊正

建築工程出版社出版

• 1959 •

內容簡介 本书系有关薄壁空間結構与 薄壳的实驗和理論研究的論文集。每篇論文都有概括的結論以及对設計和計算的具体建議。

本文集专供設計工程师、科学工作者以及研究生之用。

原本說明

书 名 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ПРО-
СТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

著 者 Н. Г. Добудогло и др.

出版者 Госстрой издат

出版地点 Москва—1952
及 日 期

**薄壁空間結構的实驗与
理論研究論文集**

鍾慕害 鄧樹聖 鄧緒柏 等譯
梁楚冠 汪齊正

1959年1月第1版 1959年1月第1次印刷 2,060册

850×1168 · $\frac{1}{32}$ · 170千字 · 印張7 $\frac{1}{8}$ · 定价 (10) 1.20元

建筑工程出版社印刷厂印刷 · 新华書店发行 · 書号: 864

建筑工程出版社出版 (北京市西郊百万庄)

(北京市書刊出版业营业許可証出字第052号)

目 录

序 言.....	4
一、 球形扁壳的試驗.....	6
二、 凸形双曲扁壳屋盖和楼盖的計算.....	21
三、 筒壳在集中力作用下的模型实验研究.....	60
四、 空間屋盖中預应力的应用.....	82
五、 应用 B.3. 符拉索夫教授的变分法計算具有圓形 軸綫的褶面薄壳.....	95
六、 应用薄壳的建筑力学方法計算組合杆件.....	122
七、 应用 B.3. 符拉索夫教授的理論研究梁式敞桥的 受压弦杆的空間稳定性.....	158
八、 具有 n -角曲綫形洞口的薄片的应力分布.....	192

序 言

苏联在研究薄壳理论方面的成就,引起了薄壳型屋盖和楼盖在建筑业中的广泛应用。1950年有两篇关于在建筑实践中运用薄壳的著作获得了斯大林奖金,这一事实就是最好的证明。从建筑工作者对于新型空间结构的注意来看,可以认为进一步扩大这种结构的理论和实验的研究工作是有充分根据的。

本论文集所刊载的几篇论文都是阐述重工业企业建造部中央工业建筑科学研究所建筑力学实验室在薄壳与薄壁杆件理论方面的实验及理论研究的結果,而斯大林奖金获得者,技术科学博士B.3.符拉索夫教授的一些著作,则为这个理论奠定了基础。

第一篇论文(Н.Г.多布多格洛和П.А.卢卡什)介绍了1950年中央工业建筑科学研究所进行的扁壳型楼盖试验的情况与結果。试验表明,由混凝土制成的扁壳具有与厚度大一倍的钢筋混凝土平板大致相同的强度和刚度。这就证实了薄壳是具有很大的经济意义的。

И.Е.米列依科夫斯基和B.C.华西里科夫的论文则阐述了利用单一级数解扁壳微分方程式的方法,并研究了壳与曲线侧边构件的连接问题。同时论文中还引用了一些实用的表格。所拟定出来的方法曾用来计算纺织工厂的薄壳屋盖,并且还由于在建筑中运用了这种薄壳而荣获了斯大林奖金。

И.Е.米列依科夫斯基和И.Д.列维特斯卡雅的论文介绍了用钢制成的筒壳模型在位于薄壳中央的集中荷载作用下的试验情况与結果。已进行的试验证明,B.3.符拉索夫教授所拟定的计算方法,在数量上和性质上都是与实验资料十分符合的。

B.C.华西里科夫的论文则介绍了带有预加应力体系的金属

空間屋蓋的計算方法。預应力造成了原始的翹升，这样就改善了施工并使得这种結構物易于安裝。

Н.Я. 格留別尔格的論文研究了如何应用B.3. 符拉索夫教授的方法来計算具有圓形軸綫的薄壁褶壳的問題。

И.Е. 米列依科夫斯基的論文是以薄壳計算的一般理論为根据来研究任意外荷載作用下組合薄壁杆件的計算方法的。

П.А. 卢卡什的論文研究了如所周知的、Ф.С. 雅辛斯基教授关于梁式敞桥的受压弦杆稳定性問題的总结。弦杆(与Ф.С. 雅辛斯基的問題提法不同)被当作是处在弹性界域內的抗位移和抗扭轉的空間結構。

Н.С. 柴烏索夫的論文属于弹性力学的平面問題。他根据Н.И. 穆斯赫里什維里的方法，解答了具有 n -角曲綫形洞口的薄片中的应力分布問題，得出了計算切綫应力和法向应力的公式。为了簡化計算，还編制了，用于曲綫的三角形和正方形洞口的表格，表明了沿周边上的应力分布；并指出了角点附近的很大的应力集中。

一、球形扁壳的試驗

技术科学碩士 H.Γ.多布多格洛

技术科学碩士 П.А.盧卡什

近来大家对于双曲扁壳型式的楼盖和屋盖更加注意了。在格魯吉亞,在程工師Я.А.戈戈別里捷领导下試建这种楼盖的成功,紡織工廠的大规模屋盖的建造(紡織工业部設計院設計并經中央工业建筑科学研究所試驗)以及其他等等,都証明了这种楼盖較之平楼盖在減輕結構和節約材料方面有更大的效果。此外,这种楼盖还具有許多建筑艺术上的优点,不会产生平楼盖所引起的那种压抑感觉。

因此重工业企业建造部委员会关于将这种屋盖和楼盖运用到建筑实践中去以及扩大对它們的科学研究工作的決議,乃是非常及时的。

理論上正高斯曲率扁壳型式的楼盖的优点,在于它們的工作与支承在弹性地基上的平板的工作相似,而地基的弹性系数与曲面的曲率半径有关。在球形薄壳的特殊情况下,正如B.3.符拉索夫教授所指出的,这个弹性系数以下式表示:

$$k = \frac{Eh}{R^3},$$

式中: E ——材料的弹性模数;

h ——壳的厚度;

R ——曲率半径。

这种情形显著地增大了楼盖的刚度和强度。

在图1中以图形表明了平面为正方形的四周支承的球形薄壳的挠度以及內力与比值 $\frac{f}{h}$ (f ——薄壳的矢高)間的理論关系。图

1, a 为壳中央挠度的系数 $\overline{w}$ 的图形(根据 $w = \overline{w} \times \frac{a^4 q}{D} \times 10^{-3}$);
 图 1, b 为壳中央弯矩的系数 $\overline{M}$ 的图形(根据 $M = \overline{M} \times a^2 \times q \times 10^{-3}$);
 图 1, c 为壳中央法向力的系数 $\overline{N}$ 的图形(根据 $N = -\overline{N} \times \frac{a^2 q}{h} \times 10^{-3}$),
 而图 1, d 为边缘上剪力的系数 $\overline{S}$ 的图形($S = -\overline{S} \times \frac{a^2 q}{h} \times 10^{-3}$)。
 这些图形都证明了挠度和力矩随着 $\frac{f}{h}$ 的增大而急剧地减小。

相当大的压力的出现,使得薄壳几乎在全部表面上都成为受压的,因而不需要加受力钢筋。沿周边产生的剪力特别大,为了担负这种剪力,需要做成有足够刚度的周边,但不降低楼盖的效率。

上述理论上的见解需要直接的实验的证明。为此,中央工业建筑科学研究院在 1950 年曾对两种楼盖试件(钢筋混凝土平板和混凝土扁壳)进行了比较试验。两个试件具有相同的:

- a) 平面尺寸——300×300公分;
- б) 支承梁的截面和钢筋;
- в) 构造高度——33.5公分(图 2)。

系梁内所采取的钢筋截面比计算需要的截面大 10 倍,以使得楼盖的破坏分明是由于薄壳(或平板)本身的破坏,而不是由于系梁的破坏而发生的。

薄壳的外形为一非常扁的球形,球的半径 $R = 1254.5$ 公分,这样就使薄壳在支承面上的矢高 $f = 18$ 公分。薄壳的厚度为 3 公分。钢筋混凝土平板厚为 6 公分,并按普通方式配筋。两个试件采取的計算荷载为 400 公斤/平方公尺。按极限平衡法进行板的计算,得出破坏荷载为 1465 公斤/平方公尺。

楼盖是用水灰比为 0.50、配合比为 1:2.1:3.6 的混凝土制成的。混凝土的立方体强度(在试验的前一天),对于薄壳为 352 公斤/平方公分,对于平板为 280 公斤/平方公分。楼盖在 1 平方公尺投影面积上的材料耗費,在平板中:钢筋——5.89 公斤,混凝土——0.06 立方公尺;在薄壳中:钢筋——2.89 公斤,混凝土——0.03 立

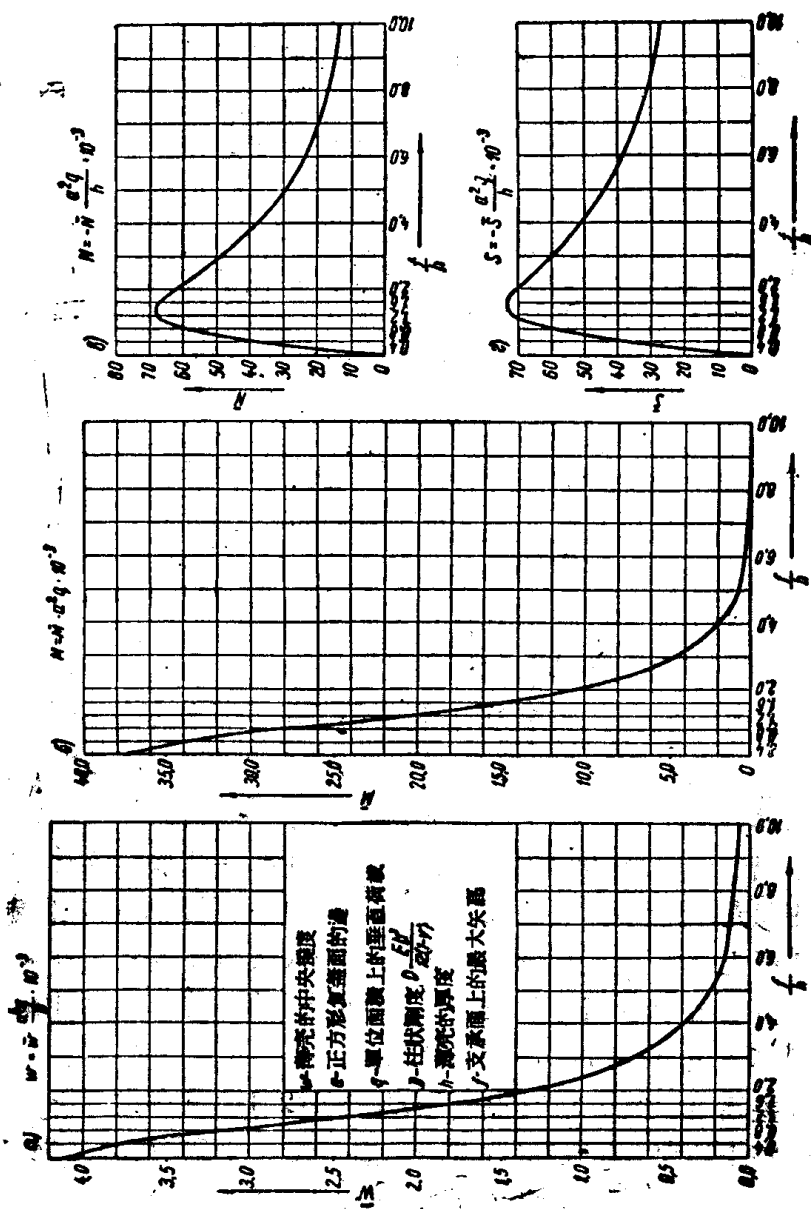
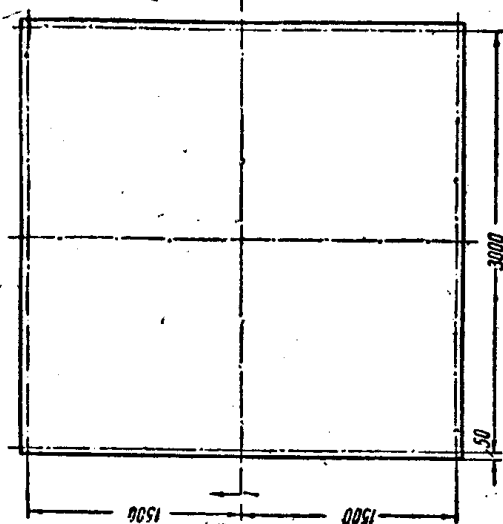
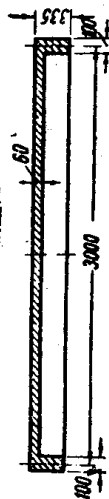


图 1 球形扁壳的变形和内力图

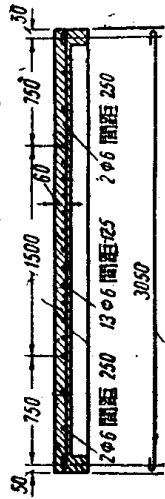
試件 1 和 2 平面圖



第二試件 1-1 剖面圖



第二試件平板的鋼筋(1-1 剖面圖)



第三試件邊梁與第 1 試件一樣配筋

a) 鋼筋

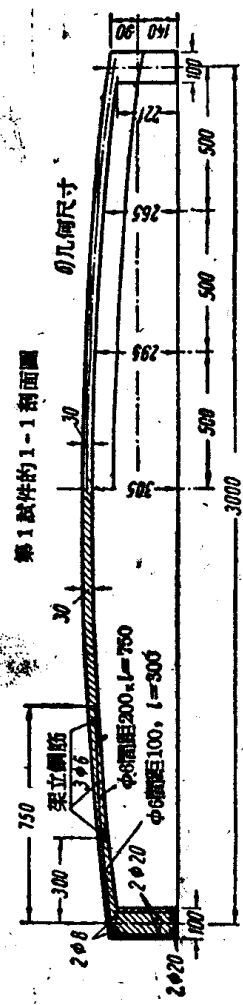


圖 2 試驗樓蓋的
施工圖

方公尺。

球形薄壳的模板系用按圆弧极精确地制成的木拱架样板做成。在拱架上钉上厚 2.5 公分的窄板条。这就使我们能够很精确地做成薄壳的球面。

为了进行试验,建造了一个空间钢筋混凝土框架式的试验架,其平面尺寸为 300×300 公分,高为250公分。荷载系用四个杠杆装置来传递。加载系以均布荷载进行(图3),这均布荷载实际上是以稠密布置的集中力系(计64个力)来实现的。

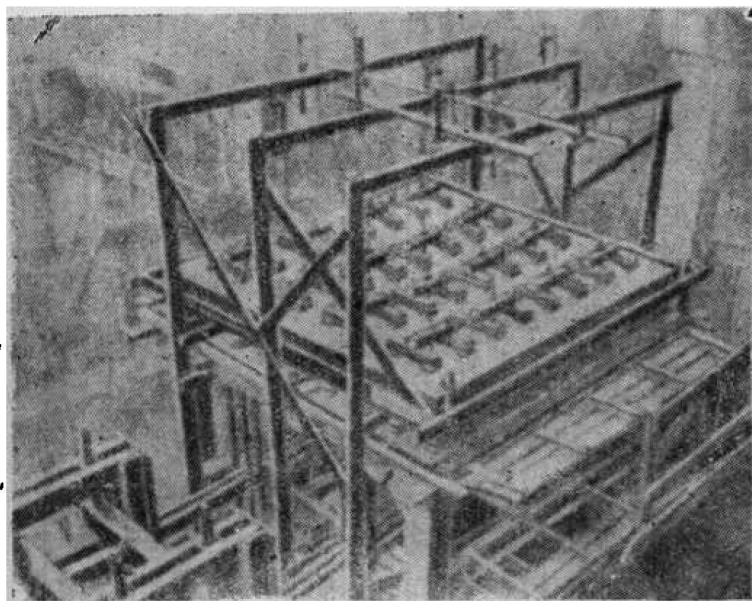


图3 试验装置全视图

试验时,测量了:-

- 1) 试件上10个点的挠度;
- 2) 支座的沉陷;
- 3) 边梁的拉伸;
- 4) 边梁的水平挠度及转动;
- 5) 钢筋内及混凝土表面上各点的应力。

薄壳在弹性限度内经受了多次的加载,而后进行到破坏。薄

壳中央挠度的綜合图表(图4)是在考虑永久变形的条件下制成的。在第三次試驗的时间內,当荷載为1235公斤/平方公尺时,沿四边在壳与边梁連接处的外壳面上,呈现了裂縫。这就是在試驗中卸載后看到相当大的永久变形的原因。挠度图表为許多折綫,其中某些綫段是彼此平行的。重复荷載的綫段与卸載的綫段重合。

图表表明,当荷載为1605公斤/平方公尺时,薄壳开始破坏。繼續加載到超过这个荷載时,薄壳的变形就非常迅速地增长而破坏。

在試驗的时候,楼盖有两种支承方法:

- 1) 沿全部周边支承——支承于稠密布置的鋼球上;
- 2) 四角支承——支承于四个鋼球上。

試驗一开始就发现,边梁并不如所意料的那样,向下挠曲,而是向上挠曲(图5)。因此,沿周边的支承条件不具有重要的意义。在不同支承型式下的挠度图形实际上是以同一的直綫来表示的。

当薄壳破坏时,側边构件更加明显地向上弯曲,这一点可以从图5的图表中清楚地看出,图中左侧表示了側边构件中点的挠度的图形。这时,支承側边构件中部的鋼球完全不受荷載,角上的鋼球則承受了全部荷載。

壳的这一特征(側边构件向上挠曲)可解释如下。沿壳的周边出现很大的剪力。这种剪力使边梁与薄壳相連接的頂部区域受拉。在試驗試件所具有的、壳与側边构件的相对位置的情况下,拉应力不仅使梁完全卸却了压应力,而且还足以使頂部区域受拉并使边梁向上挠曲。由此可以得出結論:薄壳側边构件較之平楼盖的側边构件,是在更有利的条件下工作的。

薄壳由于沿周边及四角处与周綫成 45° 角的裂縫的出现而破坏,而且裂縫綫几乎形成了一个画在正方形內的正八角形。沿周边的裂縫是由壳对边梁的剪切所引起的,四角的裂縫由于薄壳的弯曲而引起(图6和图7)。

試驗平板时,挠度的曲綫(其中也包括平板中心的挠度曲綫,

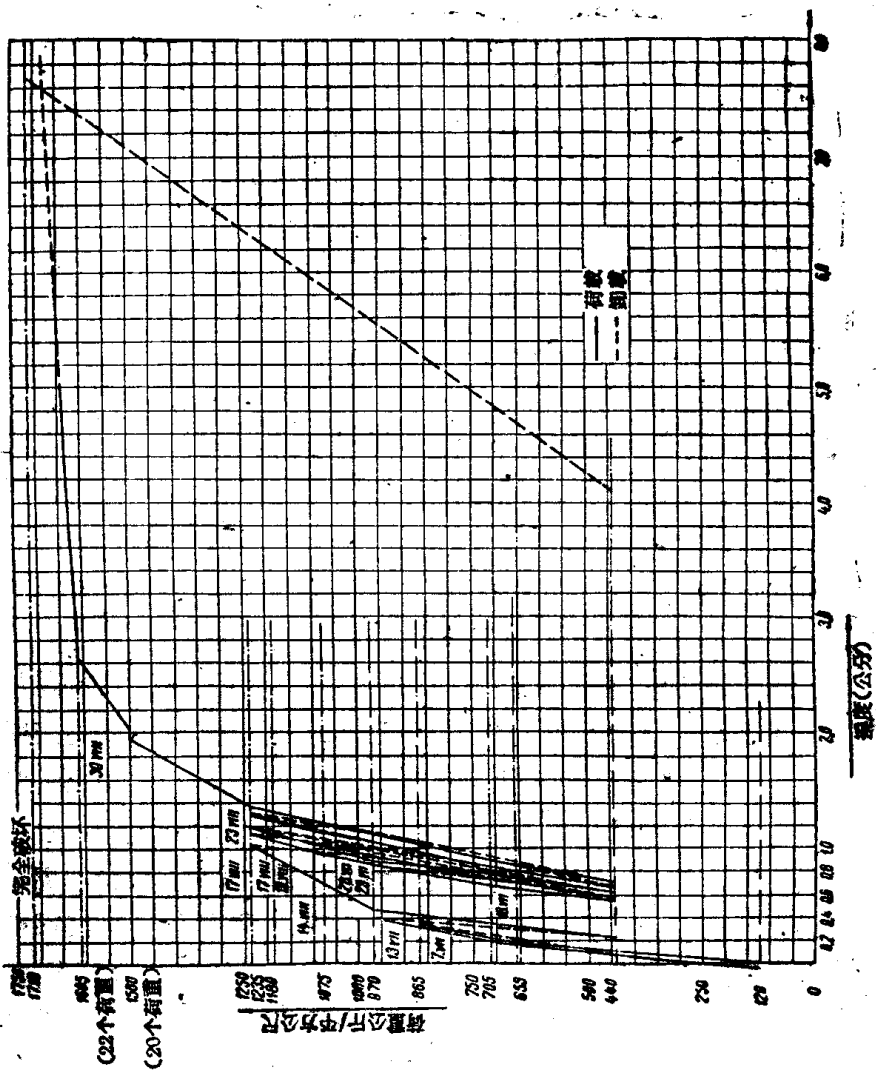


图 4 扁壳中央撈
度综合图表

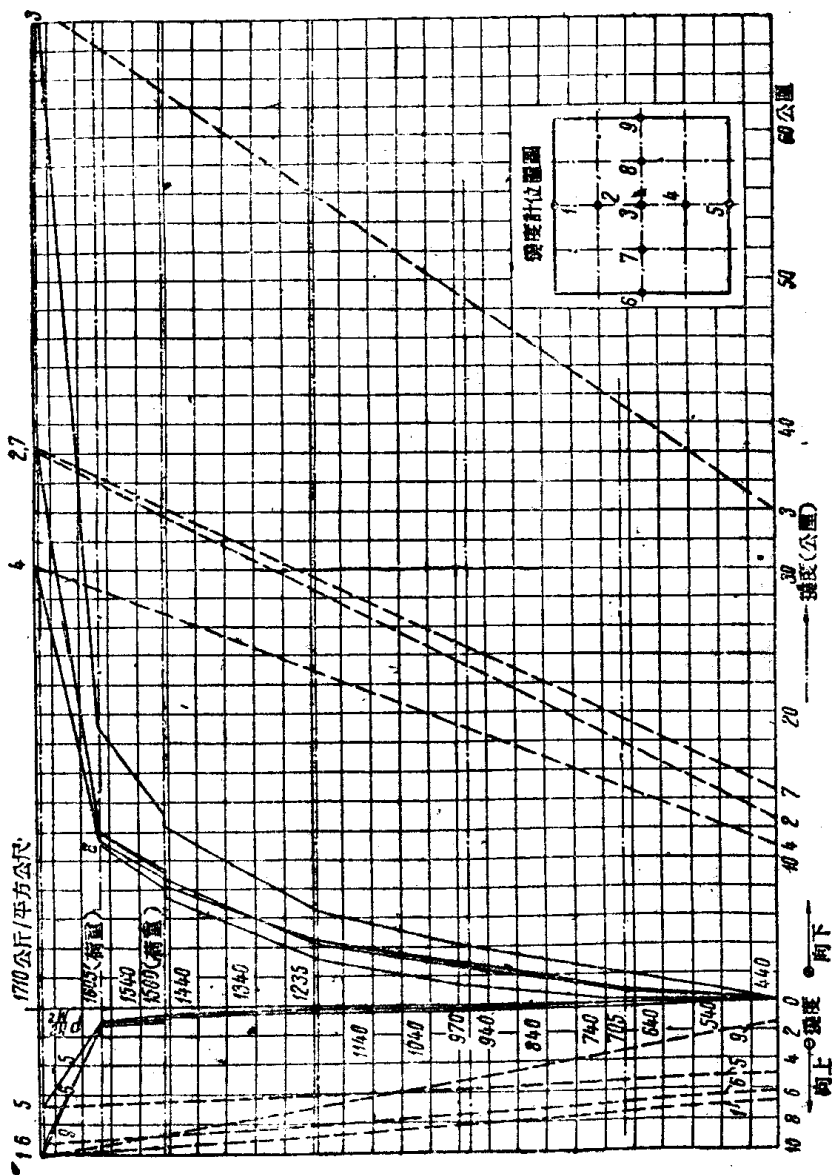


图 5 沿周边支承的薄壳的模度图表

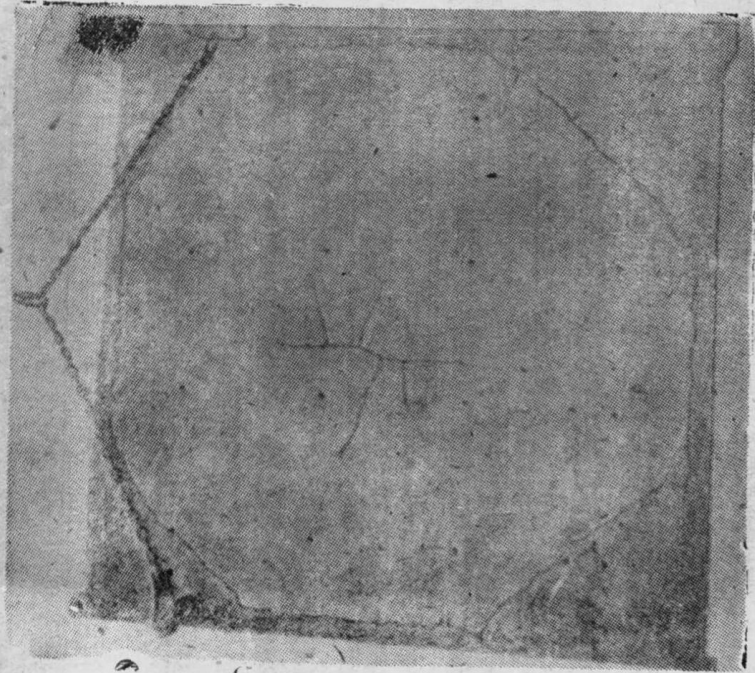


图 6 破坏后薄壳上表面的全视图

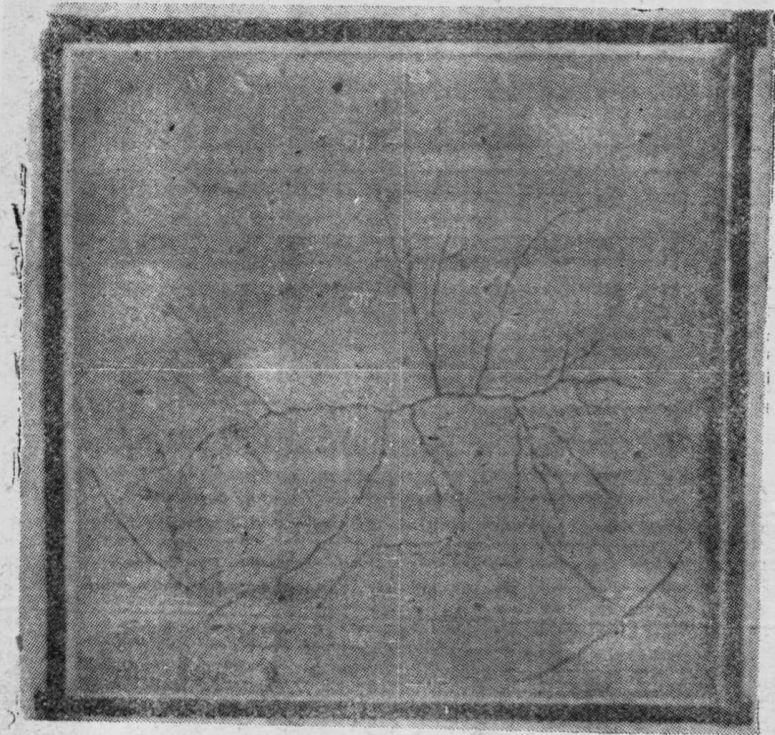


图 7 破坏后薄壳下表面的全视图

图8)都没有明显表现出可以用来确定临界荷载的转折点。平板保持了达到3063公斤/平方公尺荷载的承载能力。但是由于下述理由只可以采取1580公斤/平方公尺作为破坏荷载。

1. 挠度曲线及其导数(图9)的分析表明,荷载的增大超过1580公斤/平方公尺时,挠度大大地增加。加载超过1580公斤/平方公尺后(图9),增大1公厘挠度所必需的荷载急剧地减少。

2. 当荷载为1580公斤/平方公尺时,配置在平板中央的某些钢筋的应力已达到了流限。

3. 当荷载为1580公斤/平方公尺时,平板中央的挠度为17.1公厘,或为跨度的1/175,其中考虑了最初荷载520公斤/平方公尺所引起的挠度(该挠度在图8上没有表明)。这个挠度值大大地超过了楼盖的容许挠度。

4. 实验的临界荷载数值与按极限平衡法计算出来的理论数值(1465公斤/平方公尺)的差别很小。

破坏图形(图10及图11)所示为顶面沿周边的裂缝和底面对角线的裂缝。侧边构件向下挠曲。

将球形扁壳的受力与平板的受力,根据所做的实验结果比较后,得出如下的结论。

1. 球形扁壳的强度与平板的强度的比较。

上面已指出,当荷载为1605公斤/平方公尺时,球形扁壳开始破坏。平板的临界荷载确定为1580公斤/平方公尺。

因此,厚3公分、矢高18公分、平面尺寸为 300×300 公分的不用钢筋做成的球形扁壳,实际上具有与厚度大一倍的配筋平板相同的强度。

2. 球形扁壳的刚度与平板的刚度的比较。

所试验的两个试件的刚度的比较已示于图12,该图表示了以下的曲线(随着荷载的变化):

- a) 薄壳中央挠度的曲线;
- b) 平板中央挠度的曲线;
- b) 薄壳挠度与平板挠度比值的曲线;

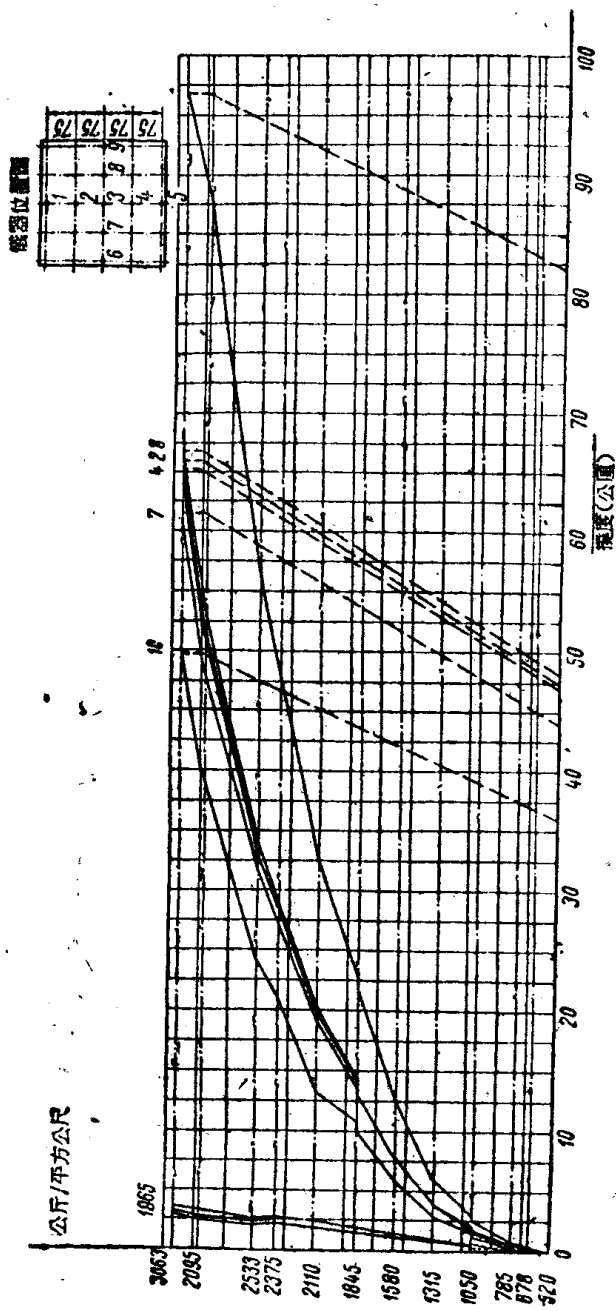


图 8 四角支承的钢筋混凝土平板的挠度图表