



美国土木工程师协会圬工及钢筋混凝土结构委员会薄壳设计小组编著

張 秋 波 譯

圓柱形混凝土壳体屋頂设计

中 国 工 业 出 版 社

圓柱形混凝土壳体屋頂設計

美国土木工程师协会圬工及鋼筋混凝土結構委员会薄壳設計小組編著

張 秋 波 譯

江苏工业学院图书馆
藏 书 章

中 国 工 业 出 版 社

本书原是美国土木工程师协会組織編制的計算手册。

全书分两部分：第一部分說明圓柱壳体的具体設計法，并編列了一系列的薄膜应力及位移等数值表；第二部分闡明圓柱形壳体的彈性理論。

本书所引用的計算方法，与一般超靜定結構的計算法相似，先用薄膜理論計算壳体內的正应力及切应力，然后考虑边界条件加以修正。計算时可直接查表。

书中只局限于介紹美国的建筑实例，而对于社会主义国家在壳体結構的研究和实践中所获得的最新成就則沒有提及，这是本书的偏見。

本书可供土建結構工程師及高等土建院校師生参考。

DESIGN OF CYLINDRICAL CONCRETE SHELL ROOFS

The Committee on Masonry and Reinforced Concrete of
the Structural Division, through its Subcommittee on
Thin Shell Design

American Society of Civil Engineers
New York-1952

圓柱形混凝土壳体屋頂設計

張秋波 譯

中国工业出版社建筑图书編輯室編輯（北京佟園內10号）

中国工业出版社出版（北京佟園內10号）

（北京市书刊出版业許可証出字第110号）

中国工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

开本787×1092 1/32·印張11·字數247,000

1962年5月北京第一版·1962年5月北京第一次印刷

印數0,001—2,700·定价（11-8）1.70元

統一书号：15165·1573（建工-215）

譯 者 序

壳体結構是近二、三十年所发展起来的一种用料較省的新型結構;用鋼筋混凝土建造这种薄壳結構可以节省大量鋼材和水泥。圓柱形壳体是壳体結構的体型之一,在材料的經濟指标方面,虽然在某些情况下赶不上双曲扁壳,但由于它具有結構簡單和便于施工的优点,二十多年来已比較广泛地应用于建筑工程中,估計今后它仍有一定的应用范围。

壳体彈性理論的建立和运算,在力学中是一个比較复杂的問題。苏联著名学者弗·茲·弗拉索夫(В.З.Власов)教授等及其他社会主义国家的一些学者們,对于壳体理論都曾經作了不少卓越的貢獻,其成就远远超过了資本主义国家学者在这方面的研究工作。

采用力矩理論,对于双曲扁壳或圓柱形壳体都需要建立八阶偏微分方程式。过去,各国学者以不同的方式考虑圓柱形壳体的彈性变形而分別建立了大同小異的各种微分方程式;不过,根据边界条件来解算一个八阶偏微分方程,实际运算工作依然是十分繁重的。

为了推广圓柱形壳体結構的应用,簡化計算是一个重要而迫切的任务。將由微分方程式解算所得的一些参数数据列成数字表,根据这些数据考虑边缘构件(边梁)来計算圓柱形壳体的內力,可使計算工作大大簡化。目前所看到的根据这一观念所做的数字表格,有德意志民主共和国盧迪戈尔和烏尔本(Rüdiger-Urban)所著的“圓柱形壳体計算表”及美国土木工程师协会所編的“圓柱形混凝土壳体屋頂設計”(即本書)两書。前者理論比較完整,参数数字表也做得很細致,但应用时計算手續比較繁瑣;后者在理論上作了一些簡化,数字表格也比較簡單,应用时較为簡便。不过在应用范围的广泛性和計算結果的准确度方面則有一定的缺陷。

由美国土木工程师协会編的这本书是一本計算手册,实际应用比較方便,可簡化設計工作,尚有参考价值。为此將此書譯成中文,供設計工程师及研究人員参考之用。下面就此手册的优点和缺点略做介紹,也可以說是譯者对于原書的一些看法和批判。优点:(1)計算手續簡便,一般对壳体比較熟悉者用本手册計算一个普通長壳約需一至三个工作日,用盧迪戈尔和烏尔本的“圓柱形壳体計算表”一書来計算約需三至五个工作日;(2)用本手册所得壳体內力的准确度虽然略差(詳下),但对混凝土截面的选择及鋼筋配置几乎无影响;(3)本手册用一般超靜定观念說明設計程序,使讀者易于掌握。缺点:(1)由于所得壳体的某几部分的內力例如橫向弯矩等偏差較大,对于重要結構應該用盧迪戈尔和烏尔本的計算表的計算方法来校对;(2)本手册理論的推导系自对称圓柱形壳体出发,如果两边的边梁尺寸不同,只能近似地应用,边梁尺寸差得过多时不能应用;(3)本手册的第2节所介紹的壳体結構情况及附录I所列举的参考文献,只局限于

資本主义国家部分，所附图片也都是在美国的一些建筑物，絲毫沒有提到社会主义国家学者和工程师們在壳体理論上和實踐中的卓越的成就，这是資本主义国家資產階級学者的偏見，應該說不仅帶有片面性，而且是很不完善的；（4）本手冊在說明加勁肋的設計的計算方面在程序上尚欠妥善。

本手冊中所有單位系采用英制的，但其中数字表对公制也可适用，故未化为公制；此外，因譯者水平所限，翻譯不妥之处在所难免，热望讀者随时指正。

本手冊譯稿承紡織工业部設計院第一設計室主任薛振东撥冗校閱，使原譯稿的不少缺点得以改善，謹于此向薛振东同志致以衷心的謝意。

張 秋 波

前 言

本手冊主要包括两个独立的部分。第一部分討論圓柱形壳体屋盖的实用設計。第二部分，在附录Ⅱ內，研究这种型式的壳体的数学理論推导。

为了簡化壳体的設計工作，手冊中首先列出成套的图表，使工程师在研究壳体問題时，无需在繁琐的数字計算上耗費无数的時間。为了說明各种类型的簡單設計程序，手冊中引用了一些数字实例，此外，还提出了一些基本公式，以便分析設計表范围以外的壳体。

小組委员会請大家注意这样一个事实，即大跨度的薄壳屋盖的設計是一个比較大的工程問題。因为在壳体屋盖設計中所概括的物理和几何关系的清晰理解是不可缺少的，所以必須利用正确的工程判断来对待所提出的数据。

正如在分析超靜定結構时应將末端約束的影响加在靜定結構的应力之內一样，壳体設計問題也要通过將沿支承或无支承边缘（或壳的边界）上的条件所产生的应力加在靜定应力（薄膜应力）內来解算。沿边缘作用以滿足靜力学和連續性要求的剪力和反力，在壳体内产生了控制性質的弯曲应力和直接应力。边界条件的这些影响的确定，在壳体的設計中产生了困难的数学問題，这个問題的解决，將借助于本書中的图表来簡化。

設計表 1 A 至 3 B 可用以計算由于靜荷載和活荷載的应力及用以决定由縱向边缘条件所产生的应力。由橫向支承引起的应力可以用第 8 节的公式来計算，这个应力必需和用設計表計算出的应力相叠加。組合这两个来源的应力，就可以得到壳体在所有情况下应力分布的一个完整图形。

由縱向和橫向边缘产生的应力之間的相对重要性，取决于壳体的半徑 r 与橫向支承間的距离（亦即跨長 l ）的比例。半徑与跨長比例小（ $r/l < 0.6$ ）的壳体，其受力情况与具有弯曲截面的梁相近似。在这种型式的壳体中由于橫向支承（加勁肋、端梁）的变形所产生的应力消逝得很快，而由于縱向边缘的变位所产生的应力在整个壳体中都可觉察到，并且显著地影响了壳体的应力分布。

当半徑和長度的比例增加到超过 0.6 时，由边缘所生的应力的相对影响則相反。在壳体极短（例如用于長跨拱之間者），其半徑和跨長的比例可以达到 10 的情况下，由橫向支承（通常称为“肋”的柔性拱）产生的应力并不衰退得那么快，而可以由一个肋伸展到另一个肋。在这种情况下，由肋所产生的弯矩可以認為是主要的作用。另一方面，在这个情况下，因縱向边缘变位而产生的应力却迅速地衰退，只在壳体的小块面积上可觉察到。

和其他超靜定結構一样，在壳体的設計中，除均布靜荷載和活荷載的影响外，对于次应力應該給予慎重的考慮。形成次应力的各种原因是肋和壳体的均匀体积变化、肋和

壳体間差異的体积变化、肋的縮短以及基脚的不均匀沉陷。例如，由于肋和壳体在厚度上的差別以及溫度和收縮的变化，在这两个結構部件引起差異的伸長或收縮。这些差異的移动受到剪力的阻碍，而这种剪力在某种情況下可以在壳体和肋的接合处引起相当大的弯矩。因此，这些可以按第 8 节所叙述 的程序 来計算的“次內力”是不應該被忽視的。

附录 II 自簡支圓柱形壳体的一个新的分析解法开始。接着，将这个解法簡化，以便求得各个应力的較短的表达式，同时仍可保留很高的准确度。这个理論可推广到連續于橫向支承上的壳体。在資料中还附有关于圓柱形壳体設計和建造的丰富的文献目录。

小組委員會深信本手冊将提供永久的資料来源，它将有助于人們对加筋混凝土壳体更好的理解，并使之得到更广泛的应用。

目 录

譯 者 序

前 言

1. 緒論	(1)
2. 壳体設計理論的历史	(2)
3. 設計程序	(10)
筒支壳体	(10)
符号	(11)
步驟 1 表面荷載	(11)
表 1 A —— 在筒支圓柱壳体中的薄膜力和位移; 荷載均布于筒壳的跨長	(12)
表 1 B —— 在筒支圓柱壳体中的薄膜力和位移; 荷載在縱向分布, 中央为最大正值, 两端为零	(13)
表 1 C —— 在筒支圓柱壳体中的薄膜力和位移; 荷載沿軸向为正弦曲綫分布, 在中央为最大值, 两端为零	(14)
步驟 2 沿縱向邊緣的綫荷載	(16)
表 2 A —— 在筒支圓柱壳体中对称邊緣荷載	(18)
表 2 B —— 在筒支圓柱壳体上对称邊緣荷載 (在 $\phi = 0$ 处的邊緣位移)	(31)
表 3 A —— 在筒支圓柱壳体上的邊緣荷載	(34)
表 3 B —— 筒支圓柱壳体的邊緣位移	(41)
設計公式	(43)
表 4 A —— 在筒支壳体上用于面荷載的設計公式 (方程編号在附录 I 中)	(44)
表 4 B —— 在筒支壳体上用于綫荷載的設計公式 (方程編号在附录 I 中)	(44)
表 5 —— 用于連續壳体的設計公式 (方程編号在附录 I 中)	(45)
連續于支座上的壳体	(46)
4. 筒支長壳的設計实例	(46)
实例 1 筒支單波壳体	(46)
表 6 A —— 在筒支單个筒壳的內力 (例 1)	(49)
表 6 B —— 在例 1 中全跨筒支筒壳上关于各种 x/l ($=0, 1/8, 1/4, 3/8$ 及 $1/2$) 的內力分量	(49)
表 6 C —— 在筒支單个筒壳中的主拉力 T (例 1)	(53)
表 7 —— 在多波筒壳中的內力 (例 2)	(53)
实例 2 筒支多波壳体	(54)
带边梁的壳体	(55)
实例 3 带边梁的單波筒支壳体	(57)
实例 4 带边梁的多波壳体	(58)

表 8 —— 在具有边梁的筒支筒壳中的内力 (例 3)	(59)
表 9 —— 具有边梁的多波壳体的内力 (磅/呎) (例 4)	(62)
实例 5 用公式设计筒支多波壳体	(63)
表 10 A —— 计算系数的顺序 (例 5)	(65)
表 10 B —— 三角和指数函数 (例 5)	(68)
表 10 C —— 用来组合对称和反对称线荷载的函数 (例 5)	(69)
表 10 D —— 筒支多波筒壳力和位移分量的方程 (例 5)	(70)
表 10 E —— 在筒支多波筒壳中力的分量的最后计算 (例 5)	(72)
5. 连续于支座上的长壳的设计实例	(73)
实例 6 两等跨连续单波壳体	(73)
表 11 A —— 在筒壳中力的分量 (例 6)	(74)
表 11 B —— 在连续壳中力的分量 (例 6)	(74)
6. 筒支短壳设计实例	(76)
实例 7 利用数字表格设计短筒壳体	(76)
(a) 当 $\phi = 35^\circ$, 亦即 $(\phi_k - \phi) = 30^\circ$ 时的上壳体	(76)
(b) 当 $\phi = 35^\circ$, 亦即 $(\phi_k - \phi) = 30^\circ$ 时的下壳体	(78)
(c) 当 $\phi_k - \phi = 65^\circ$ 时	(79)
注	(80)
表 12 A —— 上壳体在 $\phi = 35^\circ$ 处由线荷载产生的各内力分量	(83)
表 12 B —— 下壳体在 $\phi = 35^\circ$ 处由线荷载产生的各内力分量 (实例 7)	(84)
表 12 C —— 下壳体在 $\phi = 0^\circ$ 处由线荷载产生的各内力分量 (例 7)	(85)
表 12 D —— 在筒壳中的力的分量 (例 7)	(86)
7. 横向加劲肋的设计	(88)
8. 壳体和横向肋连续性的影响	(90)
a. 无限刚性加劲肋的影响	(91)
b. 壳体参与肋的弯曲作用的影响	(92)
c. 壳体和加劲肋之中微差应变的影响	(93)
9. 壳体的弹性稳定	(93)
长筒体	(94)
短筒体	(94)
附录 I —— 筒形壳体设计参考文献	(96)
附录 II —— 理论	(105)
1. 筒支壳体	(105)
表 13 —— 系数 a 、 b 、 c 、 d 的比较	(132)
2. 连续于支承上的壳体	(142)
3. 横向加劲肋和壳体之间的相互作用	(161)
附录 III —— 符号	(165)

1. 緒 論

薄壳可以定义为荷载系由弯曲的板来支承的结构。当板在两个方向弯曲时，这个结构一般称为穹隆；而当板只在一个方向弯曲时，则称为壳体。本文论述支承于横向加劲肋上并和加劲肋相整体结合的筒体（如图1a所示），并且着重论述那些在全宽度范围内曲度为常数的筒体或其变曲度能用曲度为常数的弧段来近似表示的筒体。

壳体作用的特性是荷载基本上由直接应力传递而仅有相当小的弯曲应力。圆柱形壳体的这个独特的性质是由壳体在横向的作用所建立的。为了表示出壳体工作情况的清晰图形并和平板的作用相对比，由一个板和一个壳体所切出的典型的条段示于图1b和1c。

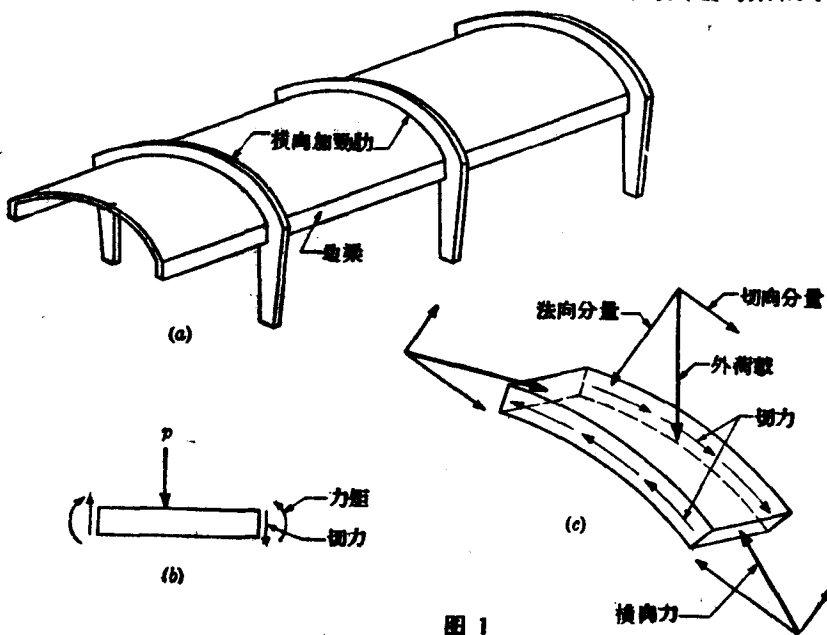


图 1

考虑图1b的条段为自由体，显然需要剪力和力矩来维持与外荷载的平衡。相反地，在图1c的条段中，外荷载的法向分量由在径向截面上的横向力（法向应力）来抵抗，而切向分量是由在横向截面上的剪力来抵抗的。这些剪力的存在把壳体作用和拱作用区别开来。由于这些剪力，壳体可以不管它的形状如何，可用直接应力来支承任何型式的荷载，而拱用直接应力只能承受一种型式的荷载。

壳体只有当在它边界上的横向力和剪力由相等而反向的反力来平衡时，将由直接应力承受荷载。不能过于强调，不管边缘位移如何，只要它的支承提供所需要的反力，壳体将用直接应力来承受荷载。边缘位移可以在壳体中引起弯曲力矩；但是由于这样的弯曲是由应变而不是由荷载所引起的，它们并不影响壳体的极限强度。当边缘没有提供必要的反力时（例如，在自由边缘的情况下），便需要径向剪力和力矩来维持平衡。

虽然壳体在橫向的作用的性質构成一种突出的作用，它們在縱向的性質常常和具有弯曲橫截面的梁的性質是相同的。因此，縱然它有三維性質，圓柱形壳体在性質上可以按簡支梁理論作为二維結構来考虑。例如，使作用在由壳体橫向切出的截面上內力的力矩和外力及反力的力矩相等，即使壳体的形状复杂一些，長壳的最外纖維應力的大小，也可以在應力直綫分布的假設下来决定。这个假設只对支承間長度（ l ）超过半徑（ r ）五倍的筒体来說是正确的。此外，对于長度和半徑比例等于4的壳体，由于直綫分布的变化是不很显著的。但是当支承間的距離再縮減时，壳体的縱向纖維應力将变得較簡支梁理論所得出者为大。图2示此應力分布当半徑和長度的比例发生变化时的轉变（ t = 壳体厚度）。由于在自由邊緣范围應力的增加，壳体設計問題已成为如何在邊緣提供一些为平衡所需要的力的問題。

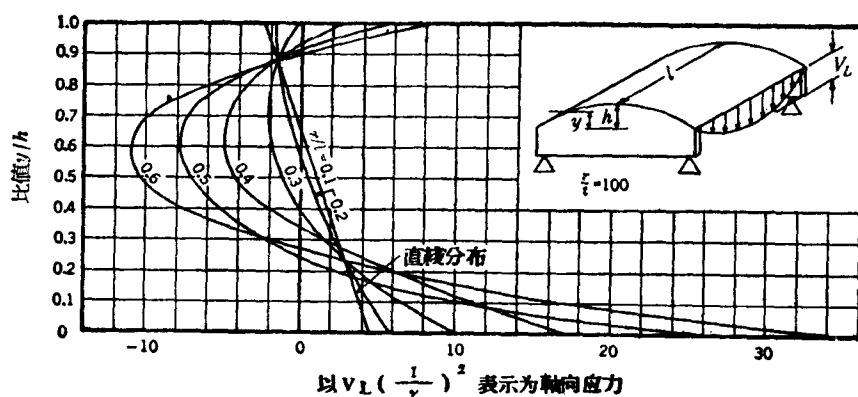


图 2

2. 壳体設計理論的历史

壳体設計理論的研究已經由各学者开展了許多年。壳体設計的第一个近似分析是由拉梅（G. Lamé）和克拉潑隆（E. Clapeyron）在1828年提出的^①。不过，他們的理論是完全以直接應力系統为根据的，因而只适用于所有各边支承着的圓柱形壳体。拉甫（A. E. H. Love）于1892年在这方面作出了下一步重要的貢獻，在他的理論^②中包括徑向剪力和力矩，因而为以后理論的发展提供了基础。不过，直到鋼筋混凝土設計的迅速发展，有需要应用他的推导到实际結構中去以前，他的方程式並沒有得到实用价值。第一个应用拉甫理論的功績属于蔡司（Carl Zeiss）^③，他于1924年应用这些公式在德国吉那（Jena）的蔡司工厂中設計了一个小型混凝土壳体屋頂。此后，不少学者（大多数是德国人）对壳体理論，主要在壳体分析程序的簡化和系統化方面作出了貢獻。这方面的

① G. Lamé 及 E. Clapeyron; "Memoires Sur L'Equilibre Interieur Des Corps Solides Homogenes", Memoires Presentes A L'Academie Des Sciences De L'Institut De France, second series, Vol. 4, 1828, pp. 465~562.

② A. E. H. Love; "A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity", Cambridge, 1892.

③ Pfettenlooses Eisenbeton-Tonnendach, firma Carl Zeiss in Jena (Deutschen Reiche Patent 431629, Klasse 37a, Gruppe 6, Vom. 22, Januar 1924ab).

早期学者中以芬斯德华尔特 (U. Finsterwalder) 和狄辛盖尔 (F. Dischinger) 最为著名^①。1930年芬斯德华尔特提出了一个所得位移和实验结果基本相符的新的近似计算理论。几年以后狄辛盖尔改善了芬斯德华尔特的解答; 而其他的学者中杰可勃逊 (Aas Jacobsen) 则将这个理论推广到圆柱形以外的壳体。在美国, 肖瑞尔 (H. Schorer) ^② 进一步简化了芬斯德华尔特的解答 (1936)。在20世纪的40年代里, 对壳体设计作了广泛的研究, 虽然发表的研究结果并不多。除本章所列几个注脚可供参考外, 其他各种参考文献列于附录 I 中。

当对壳体理论的知识 and 了解有所扩展时, 许多混凝土壳体结构也就迅速地增加起来; 因为没有其他结构系统能象壳体这样经济地使用材料。此外, 壳体可能使结构布置广阔开敞, 这使得设计者能够满足许多各种不同的功能上的要求。只要改变筒体的半径和宽度对长度的关系, 就可以得到各种型式不同的结构。

在应用交叉的圆柱形混凝土壳体的效果上取得有趣和惊奇的实例是兰伯特 (Lambert) 圣路易市航空港的房屋 (图 3)。三对相同的交叉筒体提供了一个净面积为 415×123 呎的地面, 屋顶矢高离抹光地面的高度为 32 呎。壳体的厚度自顶部 4.5 吋到边缘 8 吋变化着^③。

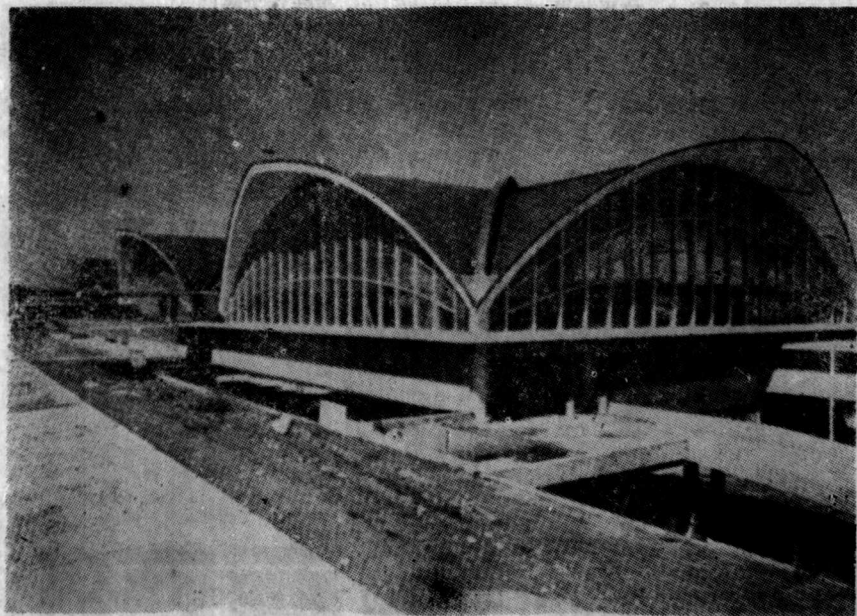


图 3 密苏里州圣路易市航空港办公用房屋

壳体对满足功能上的要求具有适应性的例证如图 4 所示, 图中为密歇根州迪尔崩市 (Dearborn) 的埃德赛尔·福特高等学校的外貌^④。

① Fr. Dischinger 及 U. Finsterwalder: "Eisenbeton-schalendacher System Zeiss-Dividag", Der Bauing, 1928, Vol. 9.

② Herman Schorer: "Line Load Action on Thin Cylindrical Shells", Transactions, ASCE, Vol. 101(1936), pp. 767~810.

③ "Arches Make Spectacular Air Terminal", Engineering News-Record, June 30, 1955.

④ "Large High School is Both Practical and Inspiring", Architectural Record, May, 1955.

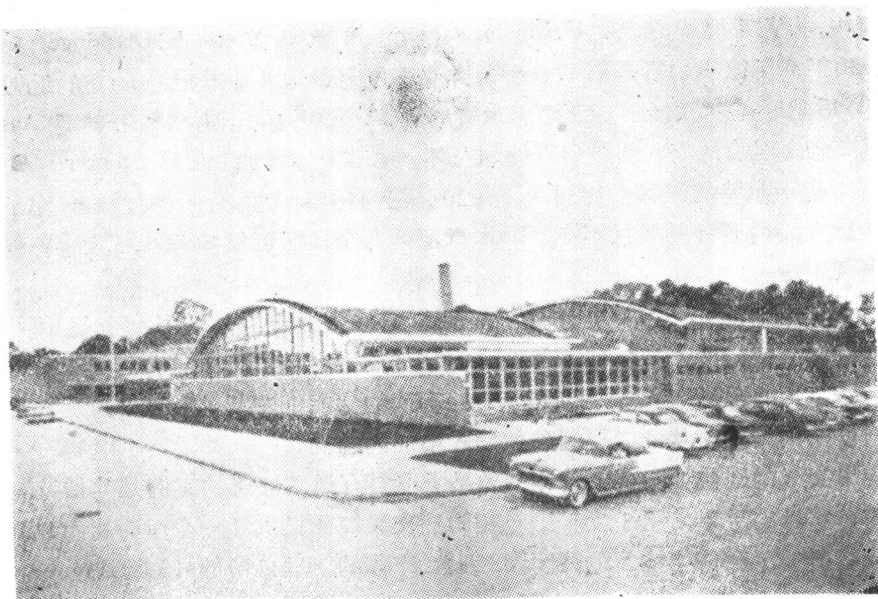


图 4 密歇根州迪尔崩市埃德赛尔·福特高等学校

在体育馆和游泳池的上面仅有 5 吋厚的混凝土壳体跨越了两个支承拱之间 65 呎的距离。这些壳体的弦宽为 130 呎。图 5 为乔治亚州阿特兰塔市 (Atlanta) 浴堂房屋高度經

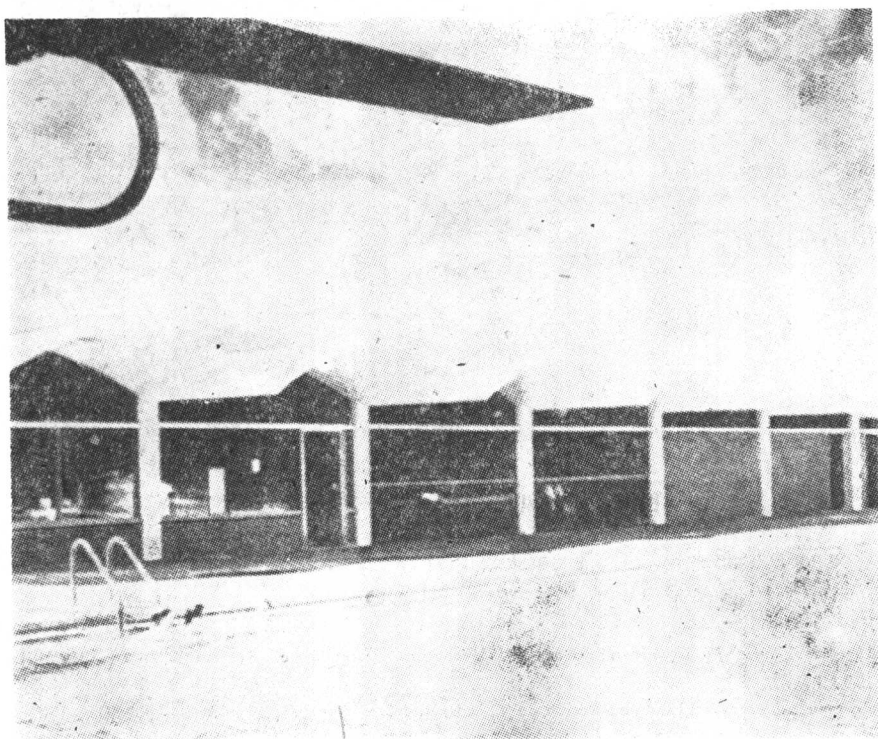


图 5 乔治亚州阿特兰塔市的浴堂

济地使用壳体屋頂的实例^①。壳体屋頂在縱向跨度为36呎，沿房屋長度的柱子間距为16呎。

在美国有許多应用于工业房屋的混凝土壳体屋頂的实例。其中典型的是維琴尼亞州(Virginia)雷奇蒙市(Richmond)的两个仓库(图6)(原文为Deep Water Terminal Warehouses, 因譯音太長故从略。——譯者)。二个結構的宽度均为130呎，由三个具有柱子橫向間距为42呎6吋的筒体所构成壳頂的厚度为 $3\frac{5}{8}$ 吋，厚度逐漸增大，至天沟处約为8吋。

以上后面三个壳体属于長筒体型式，因为支架間的縱向距离超过了橫向的柱子間距。在另一种壳体型式已經变为十分普遍地应用于象飞机庫、礼堂等这样的要求极大空間的建筑中去，支承間的距离較小，因而这些壳体属于短筒体型式。

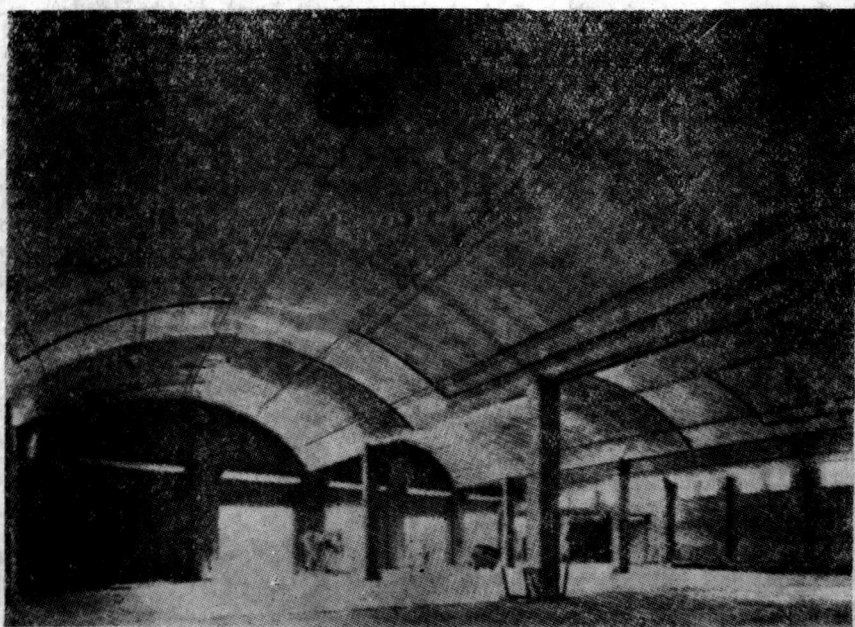
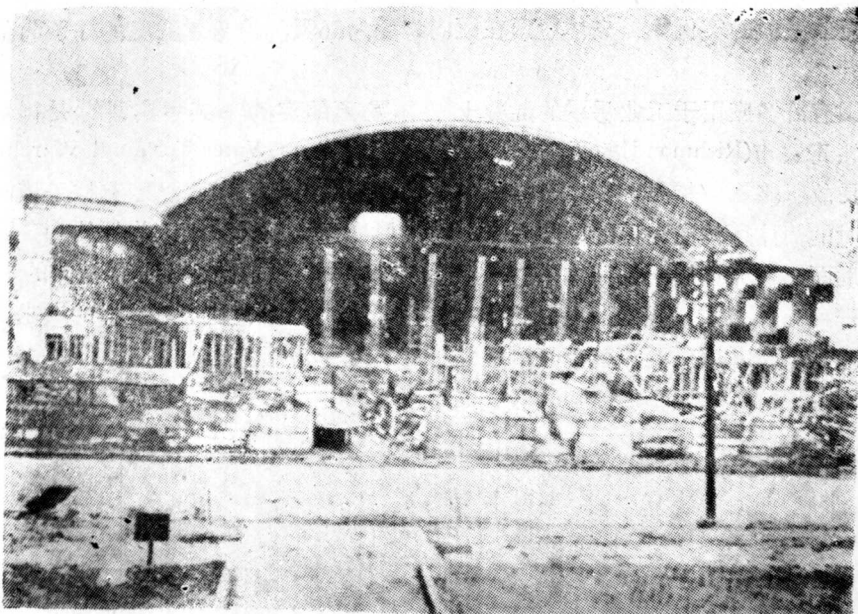


图6 維琴尼亞州雷奇蒙市的仓库

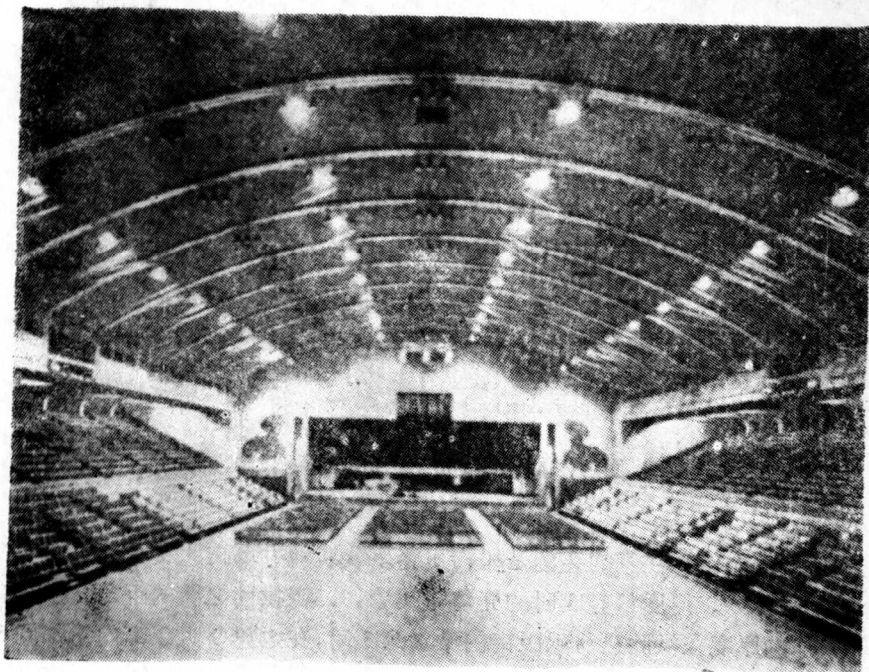
短筒壳体的一个值得注意的实例是紐約州賽罗秋斯地方奧諾达戈(Onondaga)县的战争紀念館(图7)。厚度只有3吋的壳体跨越着19.5呎拱肋之間的距离，拱具有淨跨度204呎。壳体的厚度在拱肋 $3\frac{1}{2}$ 呎距离內增加到5吋，在边梁9呎距离內增加到5吋。在壳板的頂和底設有鋼絲網作为配筋^②。

① "The Shell is Handsome and Economical", Dixie Contractor, June 22, 1955.

② F.S. Merritt, "War Memorial to Serve Many Purposes", Engineering News-Record, Vol. 145, No. 120, Nov. 16, 1950.



(a)



(b)

图 7 紐約州賽羅秋斯地方奧諾達戈县战争紀念館

壳体屋頂适用性的另一实例見图 8 所示^①，图中为来姆斯东（曼納州）（Limestone (Maine)）空军基地的飞机庫。这个壳体 跨越着 拱肋之間25呎 的距离。拱具有淨跨度

① J.E. Allen: "Construction of Long-Span Concrete Arch Hangar at Limestone Air Force Base", Journ. American Concrete Institute, Vol. 21, No. 6, Feb, 1950, pp.405~414.

340呎和淨高度90呎。壳頂的厚度为 5 吋，在起拱綫处增加到 7 吋。

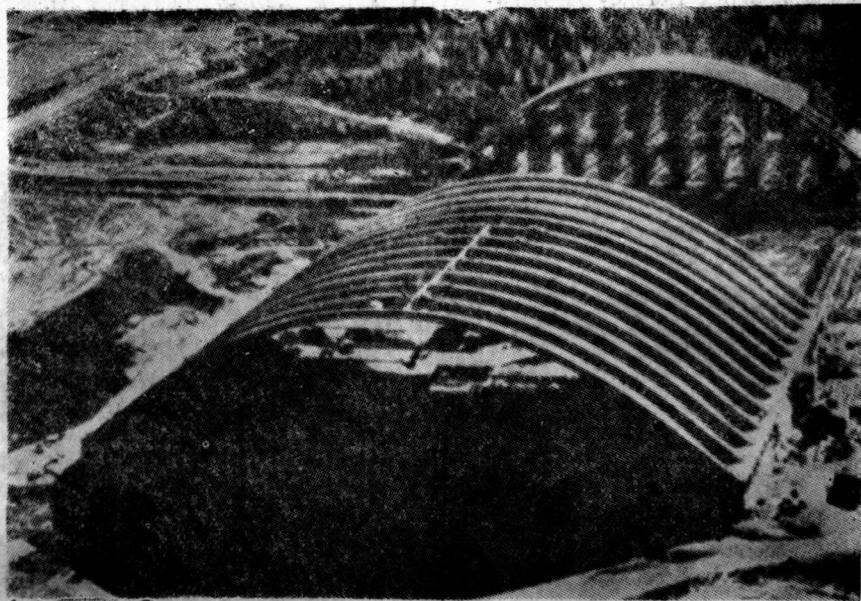


图 8 曼納州来姆斯东空軍基地

图 9 为美国航空公司在芝加哥市航空港的飞机庫。支承拱的跨度为257呎，各拱中心相距28呎 $11\frac{1}{2}$ 吋。除拱和边梁的邻近范围外，壳体厚 $3\frac{1}{2}$ 吋。壳体厚度在長度 4 呎內自 $3\frac{1}{2}$ 吋逐渐增加到在拱肋处的 $5\frac{1}{2}$ 吋。在縱向边梁的邻近，壳体厚度在15呎距离內增加到边梁处的 6 吋^①。

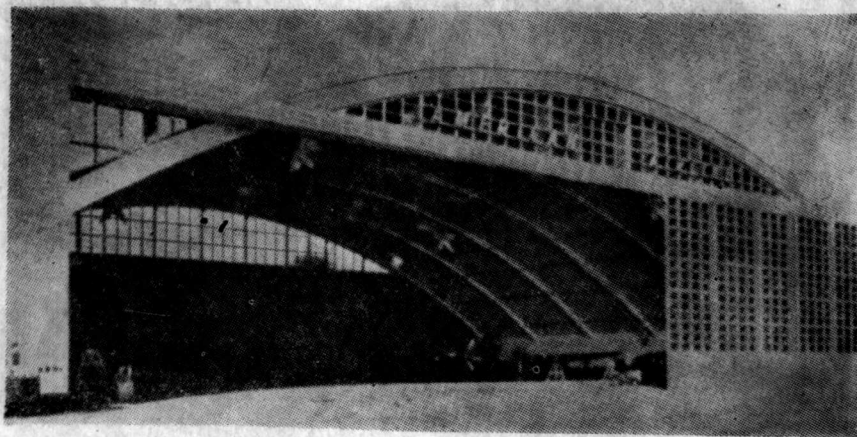


图 9 美国航空公司在芝加哥市航空港的飞机庫

① Boyd G. Anderson; "Thin Shell Arch Hangars Span 257 Ft", Engineering News-Record, Vol. 141, No. 4, July 22, 1948, pp. 55~57

短筒型式^①的壳体构造的早期实例见图10和图11所示。这是本薛文尼亚州 (Pennsylvania) 赫尔塞市 (Hershey) 1936年 建筑的 赫尔塞 运动场。拱的理論上的跨度为222呎，矢高为81呎。各拱間的距离为39.17呎。图11所示的一个单元由两个带有長19.58呎悬臂的壳体的拱所組成。因此，伸縮縫的中距为78.33呎。除下面边缘厚6吋外，壳体厚度为3¹/₂吋。

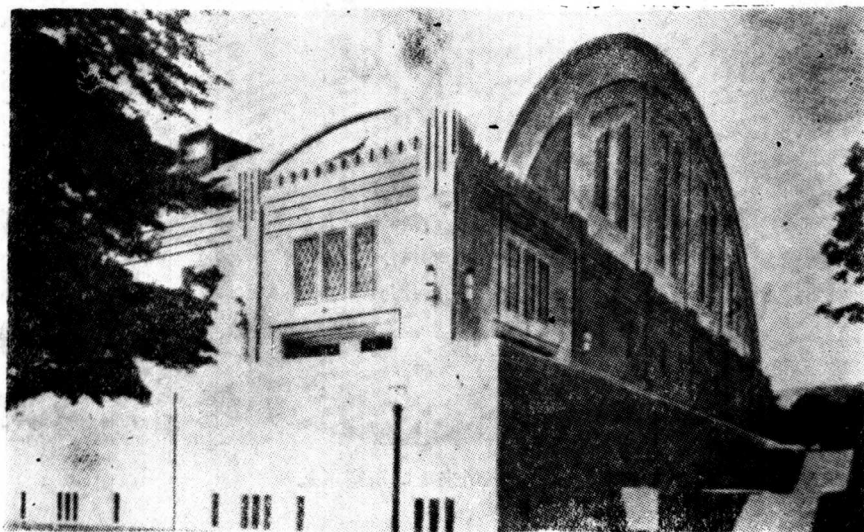


图 10 本薛文尼亚州赫尔塞市的运动場

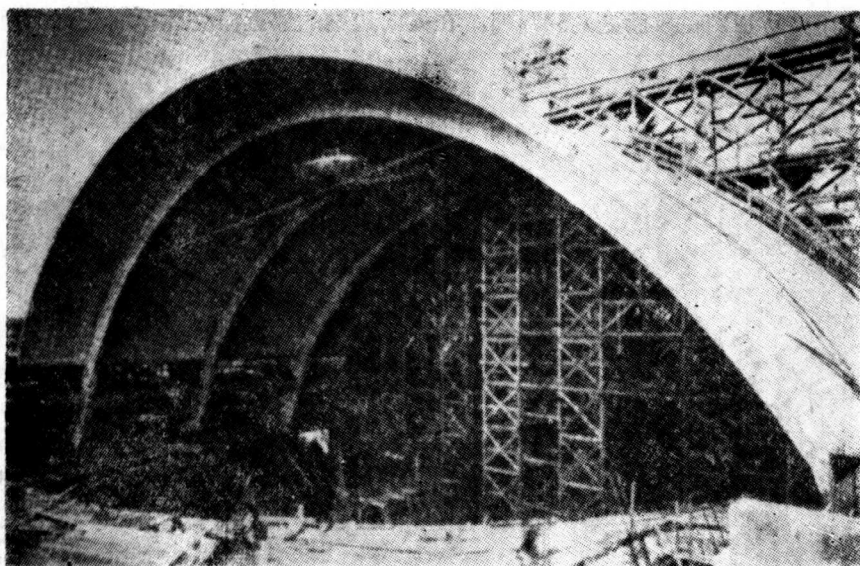


图 11 本薛文尼亚州赫尔塞市运动場的典型屋頂單元

① Anton Tedesko: "Large Concrete Shell Roof Covers Ice Arena", Engineering News-Record, Vol. 118, April 8, 1937, pp.505~510.