

科學譯叢

理論及應用力學：第7種

水工建築物的輕型空間結構 型式及其計算方法

B. 3. 符拉索夫

科學出版社出版

第一版 第一版

（原稿）（原稿）（原稿）（原稿）

水工建築物之靜力學與材料學

形式及其計算方法

（原稿）（原稿）（原稿）（原稿）

（原稿）（原稿）（原稿）（原稿）

科學譯叢

理論及應用力學：第7種

水工建築物的輕型空間結構型式 及其計算方法

B. 3. 符拉索夫 著

胡海昌 譯

科學出版社出版

1954年12月

內 容 介 紹

本文敘述了水工建築物(水壩、擋土牆、閘門)的輕型空間結構的理論和計算方法,並提供了扁壳理論在渦輪葉計算中的應用。水壩及擋土牆的輕型結構型式乃是開口或閉合側面的壳型空間系統,壳體的曲面可以是稜柱形、柱形、球形、拋物線形以及其他形式的曲面。由於蘇聯科學在薄壁及厚壁空間系統的結構力學方面的近代成就,這些型式在水工建設的應用中展開了技術上和經濟上的合理化。根據本文的理論,工程師進行的初步研究指出,在水工建築物中採用輕型空間結構可以節省達30%的建築材料。

水工建築物的輕型空間結構型式 及其計算方法

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ОБЛЕГЧЕ-
НЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ФОРМЫ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕ-
НИЙ И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА

原 著 者	В. З. В Л А С О В
譯 者	胡 海 昌
出 版 者	科 學 出 版 社 北京東西區順兒胡同二號
印 刷 者	新 中 央 印 刷 所 上海康定路158號
總 經 售	新 華 書 店

(譯) 54069	1954年12月第一版
自然: 075	1954年12月第一次印刷
(通) 0001—3,240	開本: 787×1092 1/25
字數: 39,000	印張: 2 14/25

定價: 道林本 6,000 元
報紙本 4,200 元

目 錄

緒 言	1
一、開口薄壁壳型桿件型式的閘門、擋土牆和堤壩	4
柱壳型閘門的彎曲和扭轉	4
輕型擋土牆	11
辛可夫壩	27
二、閉合側面稜柱形壳體的輕型水壩和擋土牆	28
變分方法的基本方程	28
輕型壳體構造的溢水壩計算示例	30
彈性地基上壩的計算	37
三、扁壳。靜水壓力和溫度的作用。數學相似性	39
基本方程	39
靜水壓力和溫度的作用	43
數學相似性	45
矩形扁壳的計算	48
扁壳理論在水工方面的應用	54
結 論	58
參考文獻	60

水工建築物的輕型空間結構型式 及其計算方法^{*}

В. 3. 符拉索夫

緒 言

偉大的共產主義建設事業在工程師們面前提出了一個十分重要的問題：爲堤壩、擋土牆、閘門、船閘以及其他水工建築物尋找新的、合理而經濟的結構型式。正如在工業及民用建築的設計及建造中採用了新的薄殼空間型式的房蓋和樓板的經驗所證明的那樣，這樣一個在國民經濟中具有重大意義的問題的解決，可以成功地利用蘇聯學者在薄壁及厚壁結構力學方面的成就，將橢圓殼型、球殼型、拋物殼型、柱殼型以及稜柱殼型的輕型結構型式有效地推廣到各種水工建築物實際中去。

水壩本來是巨型的混凝土建築物，它由下列三個主要部分組成：а)壩的基礎或底板，б)壩身，в)溢水道。壩身橫截面的尺寸以數十米計，而混凝土體積在百萬立方米以上。因此減小壩截面尺寸，可能使每米壩長節省數萬立方米的混凝土。

在巨型實體的壩身中，應力的分佈情形是很不均勻的。除

^{*} 原文載於 Известия Академии Наук СССР, Отделение Технических Наук, 1951 №. 10, стр. 1443—1482.

了某些承受巨大應力的區域之外，存在着只負擔着很小的應力，因而材料沒有被充分利用的部分。要創造一種結構型式，使各部分材料可以被最充分合理地利用，那就必須採用壳型的空心壩身，使它在工作中成為具有雙向工作性能的薄壁空間結構。

若干年來，蘇聯在薄壁空間結構和壳體桿件的理論和實驗研究工作表明，這種類型的結構比之普通的平面桿件系統，具有遠為經濟的優點。

壳型空間結構的優越性在於它將所承擔的外力同時由兩個方向傳遞到支承上去，並且由於結構的曲率，保證了內力的基本性質為軸向內力。如果壳體結構在截面中具有一個或若干個閉合環，那末它的剛度和強度便可顯著地提高。

採用壳型結構的設計，可以使建築材料得到最合理的分佈，最大程度地發揮它們的能力，結果就可以節省巨額材料和建築投資。

這些在文獻(2,3,4,6,7,8)中所發揮的理論，已被工業及民用建築事業中的實踐所完全證實。

例如，在1950年曾建造紡織工廠，它們的頂蓋，由於作者的建議，採用了卓越的鋼筋混凝土橢圓扁壳型結構，其跨度為 $l_1 = 12$ 米和 $l_2 = 21$ 米。計算工作是由 Б. С. 瓦西耳柯夫 (Васильков) 和 И. Е. 米列考夫斯基 (Милейковский) 按作者的方法完成的。建造和工業施工方法是由 Л. Н. 蓋尼什脫 (Геништ), Я. М. 里濱別因 (Рипенбеин) 和 А. И. 奧奇耶維契 (Огиевич) 等擬訂。圖1便是某一房蓋折去模板後的照片。

1950年，在 А. А. 格伏慈捷夫 (Гвоздев) 和作者的指導下，

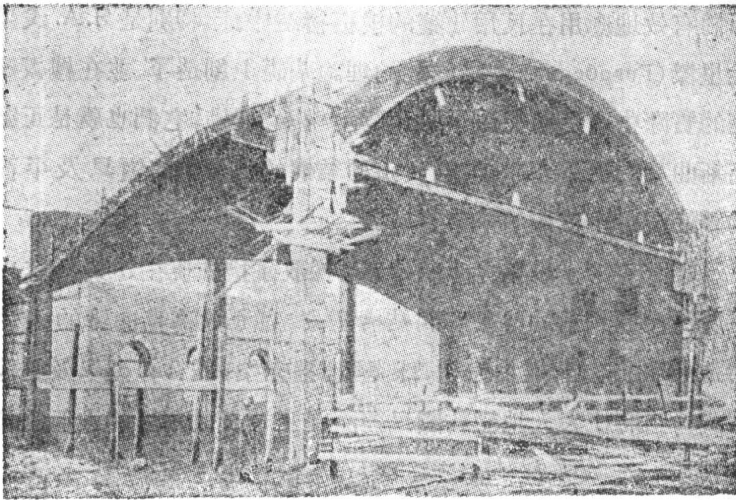


圖 1

А. П. 瓦西耳也夫 (Васильев), Б. С. 瓦西耳柯夫和 И. Е. 米列考夫斯基就造成後的橢圓扁壳型房蓋進行了實地試驗工作。

研究表明，作者所建議的房蓋和樓板的新結構型式——正號高斯曲率的壳體，其中包括橢圓壳體，是屬於最有利的薄壳空間系統；比之普通的平面桿件系統，具有遠為經濟的優越性。例如這裏敘述的橢圓壳型房蓋的厚度僅 6 厘米，每平方米所用的鋼筋僅 19 千克。如用普通的平面鋼結構，則在跨度為 $l_1 = 12$ 米和 $l_2 = 21$ 米的場合，將需要鋼料 55 千克/平方米。

所以，用鋼筋混凝土正號高曲率的壳型結構來代替普通的鋼結構，並應用我們的薄壳空間系統的一般性技術理論來設計，可以在工業及民用建築的房蓋方面，大大地（例如 2—2.5 倍）節省鋼材的使用。

扁平的正號高斯曲率的壳型結構，在近年來還被建築工程

師們有效地應用在民用建築的樓板構造中。特別是 Я. А. 戈果比里傑 (Гогоберидзе) 在我們的理論基礎上創造了、並在樓板建築的實際中廣泛地使用了所謂“Дарбази”構造, 它們也就是正號高斯曲率的磚造殼體結構。這種結構的重量和造價只及平面的鋼筋混凝土樓板的一半。

1950 年秋, 根據作者的建議, 採取了措施使在建築事業中更廣泛地應用新的薄壁空間結構型式, 即正號高斯曲率的殼體構造 (橢圓壳型, 拋物壳型, 球壳型, 柱壳型, 稜柱壳型以及其他型式), 這將使大大地節約國民經濟在工業及民用建築方面的投資。

一、開口薄壁壳型桿件型式的閘門、擋土牆和堤壩

柱壳型閘門的彎曲和扭轉

1. 圖 2 表示溢水閘門的構造簡圖。這是一個屬於中等長度的柱形壳體, 通常在縱向的兩端有緣件加勁。壳體可繞着對稱平面中的固定軸 BB' 旋轉。這種結構, 由於橫向肋材的存在, 可視為側面不可變形的開口薄壁桿件。溢水閘門在上游面承受豎向為三角形分佈的、而水平向為均佈的靜水壓力。在一般情況下, 作為薄壁桿件型式的閘門是處在複雜應力狀態中, 即在兩個主平面 (水平的和豎向的) 中產生彎曲和扭轉的組合作用。

桿形壳體中曲面上任意一點的位置, 可由兩個坐標規定: 縱坐標 z 和橫坐標 s (見圖 2)。根據我們的理論⁽²⁾, 任意點的縱

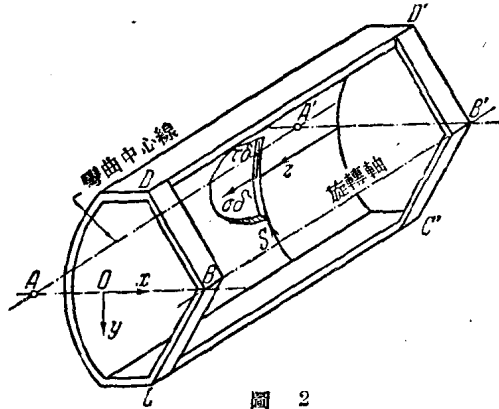


圖 2

向法應力可由下列三項組成式決定：

$$\sigma(z, s) = -\frac{M_y(z)}{J_y} x(s) + \frac{M_x(z)}{J_x} y(s) + \frac{B(z)}{J_\omega} \omega(s). \quad (1.1)$$

這裏 $x(s)$ 和 $y(s)$ 是壳體側面上任意一點沿主中心軸 Ox 和 Oy 的坐標； $\omega(s)$ 是主扇面積，這個面積等於側面周線弧和兩條直線 AM_0 ， AM 所圍成的扇形面積的兩倍。圖 3a 和 3b 表示側面上各點至主中心軸 Oy 和 Ox 的距離，亦即坐標 $x(s)$ 和 $y(s)$ 的圖形。圖 3c 則表示各點扇面積 $\omega(s)$ 的圖形。

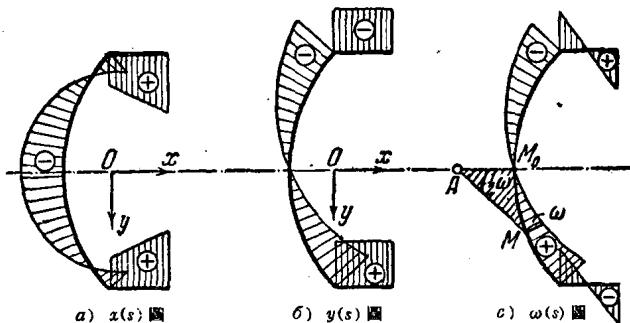


圖 3

扇面積 $\omega(s)$ 的正負號根據下列規則決定：如果朝 z 坐標起點的方向觀察殼體的截面（例如在圖 2 中朝起點截面 $A'B'$ 觀看），那末以流動向徑 AM 作順時針向旋轉所掃成的面積為正。

公式 (1.1) 中的 J_y, J_x, J_ω 各為殼體截面關於在兩個主縱平面中作彎曲、和繞彎曲中心軸作扭轉的主幾何特性，這些特性是圖 3a, b, c, 所表示的 $x(s), y(s), \omega(s)$ 的函數，它們的計算公式為：

$$\left. \begin{aligned} J_y &= \int_F x^2 dF, \\ J_x &= \int_F y^2 dF, \\ J_\omega &= \int_F \omega^2 dF. \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

其中 $dF = \delta ds$ 是殼體截面的面積微分，它等於殼體厚度 $\delta = \delta(s)$ 乘以側面周線的弧長微分。首兩式決定殼體截面的主慣性矩，而第三式決定殼體的主扇慣性矩。

數量 $M_y(z), M_x(z), B(z)$ 各為所考慮的截面 $z = \text{const}$ 上的廣義縱內力。其中 $M_y(z), M_x(z)$ 為關於 Oy, Ox 兩軸的撓矩，而 $B(z)$ 為縱雙力矩。廣義內力 $M_y(z), M_x(z), B(z)$ 與跟它們對應的撓度 $\xi(z), \eta(z)$ 以及 $\theta(z)$ 之間存在着下列簡單的微分關係：

$$\left. \begin{aligned} M_y &= EJ_y \xi'', \\ M_x &= -EJ_x \eta'', \\ B &= -EJ_\omega \theta''. \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

式中 ξ'', η'', θ'' 各為撓度 $\xi = \xi(z), \eta = \eta(z)$ 和扭轉角 $\theta = \theta(z)$ 的二次導數。

撓度 ξ 和 η 視爲正號，假使截面 $z = \text{const}$ 在壳體彎曲時順水平軸 Ox 和豎向軸 Oy 的正向移動（圖 2）。

扭轉角 θ 視爲正號，假使自截面 AB 觀看起點截面 $A'B'$ 時，壳體截面 $z = \text{const}$ 作順時針向的旋轉。

主坐標系統滿足下列正交條件：

$$\left. \begin{aligned} \int_F x dF &= \int_F y dF = \int_F xy dF = 0, \\ \int_F \omega dF &= \int_F x \omega dF = \int_F y \omega dF = 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

在這主坐標系統中，函數 $\xi(z)$, $\eta(z)$, $\theta(z)$ 可由求積下列微分方程

$$\left. \begin{aligned} EJ_y \xi^{IV} - q_x &= 0, \\ EJ_x \eta^{IV} - q_y &= 0, \\ EJ_\omega \theta^{IV} - GJ_d \theta'' - m &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

和相關的邊界條件來決定（見 [2] 第 46 頁）。

在方程 (1.5) 中， q_x , q_y 爲壳體每公尺長的橫向分佈載荷，它們以沿 Ox , Oy 的正向作用者爲正； m 爲每公尺長的分佈扭力矩，它是由於橫向分佈載荷 q_x , q_y 對於彎曲中心軸有偏心所引起。

關於扇面積 $\omega(s)$ ，扭轉角 $\theta(z)$ ，和外界分佈扭力矩 $m(z)$ 的正負規則可作如下的統一規定：倘順縱坐標 z 的負向觀看（自 AB 端向 $A'B'$ 端觀看）所考慮的截面，那末上述各量作順時針向旋轉者爲正；倘順 z 軸的正向觀看（自 $A'B'$ 端向 AB 端觀看），則作逆時針向旋轉者爲正。

在 (1.5) 式的最後一式中， GJ_d 爲壳體桿件作自由扭轉時

的抗扭剛度。就壳形閘門來說，它可以被略去不計。設 $GJ_s = 0$ ，並用微分的方法從方程 (1.3) 和 (1.5) 中消去函數 $\xi(z)$ ， $\eta(z)$ ， $\theta(z)$ ，得

$$\left. \begin{aligned} M_y'' &= q_x, \\ M_x'' &= -q_y, \\ B'' &= -m. \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

2. 由於沿着閘門的長度方向上，靜水壓力的數值不變，因此閘門上的分佈載荷 q_x ， q_y ， m 都是常數：

$$\left. \begin{aligned} q_x &= \text{const}, \\ q_y &= \text{const}, \\ m &= \text{const}. \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

注意到溢水閘門在兩端是鉸支承，因此端截面 ($z=0$ 和 $z=l$) 上的法應力 σ ，不論是由於閘門的彎曲或扭轉所產生的，都等於零。由公式 (1.1) 可知當 $z=0$ 和 $z=l$ 時，撓矩 M_y ， M_x 和雙力矩 B 都應該等於零。

於是我們便可求得簡單的並且彼此相似的三個計算基本內力的公式：

$$\left. \begin{aligned} M_y(z) &= -\frac{q_x z(l-z)}{2}, \\ M_x(z) &= \frac{q_y z(l-z)}{2}, \\ B(z) &= \frac{m}{2} z(l-z). \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

這些公式可用以計算任何截面內的撓矩 $M_y(z)$ ， $M_x(z)$ 和

雙力矩 $B(z)$ 。它們的最大值都產生在跨度的中央截面內，並各等於

$$\left. \begin{aligned} \max M_y &= -\frac{q_x l^2}{8}, \\ \max M_z &= \frac{q_y l^2}{8}, \\ \max B &= \frac{m l^2}{8}. \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

將 (1.8) 式代入 (1.1) 式，得

$$\sigma(z, s) = \frac{z(l-z)}{2} \left[\frac{q_x}{J_y} x(s) + \frac{q_y}{J_z} y(s) + \frac{m}{J_\omega} \omega(s) \right]. \quad (1.10)$$

式中函數 $x(s)$, $y(s)$, $\omega(s)$ 的變化如圖 3 所示。上式表示壳体閘門在靜水橫壓力的作用下，在兩個主平面上產生彎曲同時又有約束扭轉的一般場合中，壳体縱向法應力的答案。在這裏所考慮的三種均佈載荷作用下，每種載荷所產生的法應力都在跨度中央截面 $\left(z = \frac{l}{2}\right)$ 處達最大值，因而

$$\max \sigma(s) = \frac{l^2}{8} \left[\frac{q_x}{J_y} x(s) + \frac{q_y}{J_z} y(s) + \frac{m}{J_\omega} \omega(s) \right]. \quad (1.11)$$

沿壳體的長度，這些應力依照二次拋物線法則變化，並在兩端截面 ($z=0$ 和 $z=l$) 上等於零。

在閘門的橫截面上，除了法應力 σ 之外，還產生了剪應力 τ 。如果 $GJ_d=0$ ，那末在壳壁的厚度中 τ 是均勻分佈的，並可由下式計算（見[2]第 51 頁，[3]譯文第 9 頁）：

$$\tau(z, s) = -\frac{1}{\delta(s)} \left[\frac{Q_x(z) S_y(s)}{J_y} + \frac{Q_y(z) S_x(s)}{J_z} + \frac{K(z) S_\omega(s)}{J_\omega} \right], \quad (1.12)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} Q_z &= -M'_y = \frac{q_z}{2}(l-2z), \\ Q_y &= M'_z = \frac{q_y}{2}(l-2z), \\ K &= B' = \frac{m}{2}(l-2z). \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

將 (1.13) 式代入 (1.12) 式得

$$\tau(z,s) = -\frac{l-2z}{2\delta(s)} \left[\frac{q_z}{J_y} S_y(s) + \frac{q_y}{J_z} S_z(s) + \frac{m}{J_\omega} S_\omega(s) \right]. \quad (1.14)$$

這裏，以及在 (1.12) 式中， $S_y(s)$ ， $S_z(s)$ ， $S_\omega(s)$ 各為截面截去部分的靜力矩和扇矩：

$$\left. \begin{aligned} S_y(s) &= \int_{s_G}^s y dF = \int_s^{s_D} y dF, \\ S_z(s) &= \int_{s_G}^s x dF = \int_s^{s_D} x dF, \\ S_\omega(s) &= \int_{s_G}^s \omega dF = \int_s^{s_D} \omega dF; \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

其中 s_G ， s_D 各為側面周線兩端的弧坐標； s 為要根據 (1.14) 式計算剪應力的那點的流動坐標。

從公式 (1.14) 可知剪應力 τ 在兩端截面 ($z=0$ ， $z=l$) 上達最大值：

$$\tau(s) = \pm \frac{1}{2\delta(s)} \left[\frac{q_z}{J_y} S_y(s) + \frac{q_y}{J_z} S_z(s) + \frac{m}{J_\omega} S_\omega(s) \right], \quad (1.16)$$

其中括號前的負號(-)相應於端截面 $x=0$ ，而正號(+)相應於端截面 $x=l$ 。

我們還列出中央截面的撓度和扭轉角的公式：

$$\left. \begin{aligned} \max \xi &= \frac{5}{384} \cdot \frac{q_x l^4}{EJ_y}, \\ \max \eta &= \frac{5}{384} \cdot \frac{q_y l^4}{EJ_x}, \\ \max \theta &= \frac{5}{384} \cdot \frac{ml^4}{EJ_\omega}. \end{aligned} \right\} \quad (1.17)$$

它們可由我們創立的相似性導得。

以上我們敘述了計算壳體溢水閘門的一般性方法。公式(1.10)和(1.14)具有一般性，它們可用以計算閘門任意一點上的法應力 σ 和剪應力 τ ，不論此點相對於旋轉軸 BB' 的位置如何。顯然公式中的橫載荷 q_x, q_y, m 和閘門沒水的深度以及上游的水位有關。當水壓力的合力恰通過截面的彎曲中心時，橫載荷中的扭力矩等於零。這時壳體便處在純橫向彎曲的狀態中，而應力 σ 和 τ 將由上述公式中的首兩項之和來決定，它們相應於普通的平截面彎曲公式。

輕型擋土牆

1. 現在來研究較為複雜的、具有扶垛的輕型擋土牆的計算問題(圖4)。這種牆是由稜柱形及柱形壳體和在縱向端的加勁翼緣組成的薄壁空間系統。因為兩個相鄰扶垛的縱向間距和壳體橫向截面的基本尺度相去不遠，所以如果沒有補助的加勁橫肋，這類牆便不能視為具有剛性(不可變形)側面的壳體。

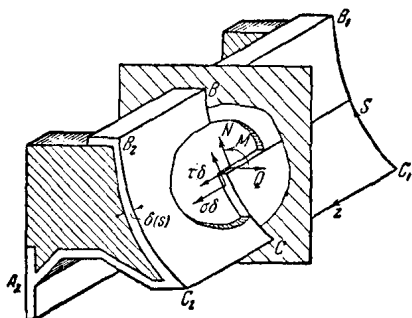


圖 4

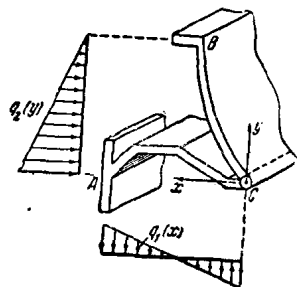


圖 5

下面敘述的方法，就某種程度來說，是屬於我們的薄壁桿件理論的推廣。這個推廣是指在這個問題上，我們將避免採用作為薄壁桿件理論基礎的關於殼體側面不可變形的假定，而認為在側面的彎曲中，殼體側面有一度自由的變形。以後我們將假定下緣 C_1C_2 的各點在豎向或橫向的撓度都等於零。殼體發生變形時，下緣 C_1C_2 仍保持為直線，它只可能伸長或縮短。

沿下緣 C_1C_2 的全長解放這結構，僅使它有一個可轉動的聯系，亦即沿 C_1C_2 變為鉸接，使結構成為一個由 AC 和 BC 兩個鉸接殼體所組成的空間系統（圖 5）。每一個組成殼體被看作是一個薄壁桿件，當它繞不動緣 C_1C_2 作扭轉時，截面將產生扭曲，並以 C 點為扇扭曲的極點（見[2]第 234, 246 頁）。我們取 $\theta_1 = \theta_1(z)$ 和 $\theta_2 = \theta_2(z)$ 為未知待求的基本函數。函數 $\theta_1(z)$ 為下部殼體 AC 的扭轉角（圖 6a），而函數 $\theta_2(z)$ 為上部殼體 BC 的扭轉角（圖 7a）。這些角度被定為正號，假使沿坐標 z 的負向觀看所考慮的截面 $z = \text{const}$ 時，亦即在圖 4 中從支承端