

下承式空腹桁架拱渡槽的整体分析*

刘 建 丁自强

(郑州工学院水环系)

摘 要: 本文从组合结构式渡槽的一般情况出发, 考虑槽身与下部承重结构之间的耦合作用, 提出了组合结构式渡槽整体分析的两种基本方法: 柔度法和刚度法。并针对下承式空腹桁架拱渡槽的构造特点, 考虑其平面及空间特性, 分析槽身刚度和槽身承载对下承式空腹桁架拱的影响, 给出了5种整体分析计算模型。计算结果表明, 本文提出的5种计算模型, 比目前设计所采用的计算模型合理和经济。

关键词: 渡槽, 分析, 模型法

中国图书分类号: TV332.14

1 整体分析的计算原理

在实际工程中经常遇到三种结构物: 地基上的结构物, 弹性支承上的结构物和组合结构物, 例如: 支承在地基上的重力坝和支承在主梁上的次梁以及组合式渡槽等。从整体分析的角度看, 这三种结构物在形式上虽有区别, 但在分析方法上是有共同之处的。以组合结构为例, 如果将下部结构视为上部结构的弹性支承, 支承下部结构的地基视为刚性地基, 那么地基上的结构物, 弹性支承上的结构物和组合结构物就可完全联系起来。这里从一般意义出发, 给出考虑地基与结构, 弹性支承与结构, 结构与结构之间耦合作用的两种分析方法。

1.1 柔度法

考虑图1所示的结构系统, 图中B为结构物(或局部弹性地基), A为支承在B上的结构物, B的下部为刚性地基。

根据变形几何条件, 分别考察A和B的接触面处各自的位移, A在接触面上的位移为:

$$\{\delta_A\} = [f]\{R\} + \{\delta_p\} \quad (1)$$

B在接触面上的位移为:

$$\{\delta_B\} = [g]\{R\} + \{\delta_w\} \quad (2)$$

在A和B的接触面上应满足变形连续条件:

$$\{\delta_A\} + \{\delta_B\} = \{0\} \quad (3)$$

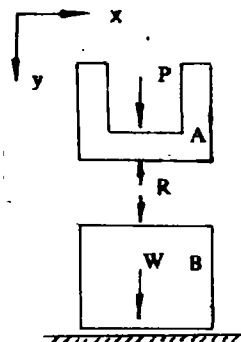


图 1

* 收稿日期: 1990.08.02

将(1)和(2)式代入(3)式得: $([f] + [g])\{R\} + \{\delta_p\} + \{\delta_w\} = \{0\}$ (4)

式中: $\{R\}$ 为接触面上的结点反力列阵;

$[f]$ 和 $[g]$ 分别为 A 和 B 在接触面上的结点柔度矩阵;

$\{\delta_p\}$ 和 $\{\delta_w\}$ 分别为荷载 P 在 A 的接触面上和荷载 W 在 B 的接触面上产生的结点位移列阵。

由方程(4)可求得接触面上的结点反力 $\{R\}$, 然后可分别计算 A 和 B 的位移和内力。

1.2 刚度法

仍考虑图 1 所示的结构系统, 用有限单元法进行分析, 分别建立 A 的刚度方程:

$$\begin{bmatrix} K_{11}^A & K_{12}^A \\ K_{21}^A & K_{22}^A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{A1} \\ \delta_{A2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 - R \end{bmatrix} \quad (5)$$

和 B 的刚度方程:
$$\begin{bmatrix} K_{11}^B & K_{12}^B \\ K_{21}^B & K_{22}^B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{B1} \\ \delta_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 + R \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $[P_2]$ 和 $[P_1]$ 分别为荷载 P 在 A 的接触面上和 A 的其它处产生的结点荷载列阵; $[W_2]$ 和 $[W_1]$ 分别为荷载 W 在 B 的接触面上和 B 的其它处产生的结点荷载列阵; $\{\delta_{A2}\}$ 和 $\{\delta_{A1}\}$ 分别为 A 的接触面上和 A 的其它处的结点位移列阵; $\{\delta_{B2}\}$ 和 $\{\delta_{B1}\}$ 分别为 B 的接触面上和 B 的其它处的结点位移列阵; $[K_{ij}^A]$ 和 $[K_{ij}^B]$ 分别为 A 和 B 的子刚度矩阵。

在 A 和 B 的接触面上应满足变形连续条件: $\{\delta_{A2}\} = \{\delta_{B2}\} = \{\delta_2\}$ (7)

将(7)式分别代入方程(5)和(6), 扩阶后将两式合并, 消去 $\{R\}$ 得:

$$\begin{bmatrix} K_{11}^A & K_{12}^A & 0 \\ K_{21}^A & K_{22}^A + K_{22}^B & K_{21}^B \\ 0 & K_{12}^B & K_{11}^B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{A1} \\ \delta_2 \\ \delta_{B1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 + W_2 \\ W_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

解方程(8), 得 A 和 B 的各结点位移 $\{\delta\} = \{\delta_{A1} \ \delta_2 \ \delta_{B1}\}^T$, 进而可求得接触面上的结点反力 $\{R\}$ 和内力。

2 下承式空腹桁架拱渡槽整体分析的计算模型

针对下承式空腹桁架拱渡槽这一特殊的结构形式见图 2, 根据槽身是否分段和施工时的具体情况, 将桁架拱渡槽的整体分析分为两类情况, 共 5 种计算模型分别进行论述。

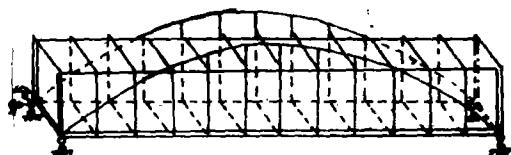


图 2(a)

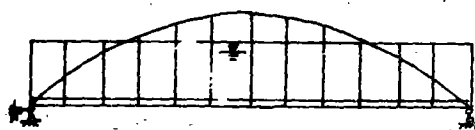


图 2(b)

2.1 第一类: 槽身为一整体, 考虑槽身的承载作用

这类情况下的桁架拱渡槽的整体分析, 根据计算时是否考虑其整体空间作用, 给出以下两种计算模型。

2.1.1 空间计算模型 I-1

考虑桁架拱渡槽的整体空间作用, 将槽身看作为通过有限个刚性链杆支承在桁架拱的下横梁, 竖杆及拱圈上的结构物 (见图 3), 采用有限条法和空间杆系有限元法结合柔度法对桁架拱渡槽进行整体分析。

这里采用如下基本假定:

①桁架拱端部的两个横向框架在自身平面内无限刚硬, 槽身端部简支在两端的横向框架上;

②槽身是由各向同性或正交异性材料组成;

③在刚性链杆处满足变形连续条件;

④叠加原理仍然适用。

在上述假定下, 假想将槽身与桁架拱在除端部支承外的各链杆处分开, 它们之间的相互作用用约束力 $\{r\} = \{r_1 \ r_2 \ \dots \ r_n\}^T$ 来代替, 这样槽身和桁架拱就各自成为在荷载和约束力作用下的单一空间基本结构见图 3。

基本结构在荷载和约束力作用下将发生变形, 在链杆处应满足变形连续条件:

$$\{\delta_r^s\} + \{\delta_r^u\} + \{\delta_p\} + \{\delta_w\} = \{0\} \quad (9)$$

式中, $\{\delta_p\}$ 和 $\{\delta_w\}$ 分别为槽身和桁架拱在各自的荷载作用下, 在各链杆处产生的位移列阵, $\{\delta_r^s\}$ 和 $\{\delta_r^u\}$ 分别为槽身和桁架拱在约束力 $\{r\}$ 作用下, 在各链杆处产生的位移列阵。

上式即为位移协调方程, 式中的 $\{\delta_p\}$ 可用有限条法求得, $\{\delta_w\}$ 可用空间杆系有限元法求得, $\{\delta_r^s\}$ 和 $\{\delta_r^u\}$ 借助有限条法和空间杆系有限元法可分别表示为:

$$\{\delta_r^s\} = [\eta]\{r\} \quad (10)$$

$$\{\delta_r^u\} = [g]\{r\} \quad (11)$$

式中, $[\eta]$ 和 $[g]$ 分别为槽身和桁架拱的柔度矩阵。

将(10)和(11)式代入位移协调方程(9)得: $([\eta] + [g])\{r\} + \{\delta_p\} + \{\delta_w\} = \{0\} \quad (12)$

解方程(12), 可求得约束力 $\{r\}$, 然后用有限条法和空间杆系有限元法分别计算槽身和桁架拱各自的位移和内力。

2.1.2 平面计算模型 I-2

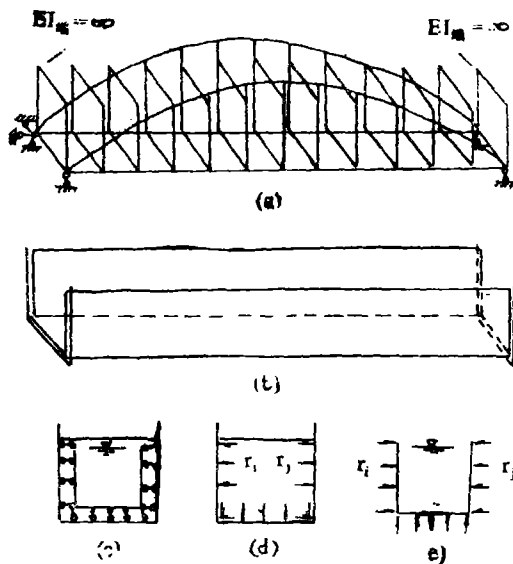


图 3

只考虑桁架拱渡槽的纵向弯曲作用,将槽身看作为通过刚性链杆支承在桁架拱下弦杆上的槽形梁。按平面问题进行计算,计算简图和所取基本结构如图4所示,采用平面杆系有限元法结合柔度法对桁架拱渡槽进行整体分析。

根据链杆处的变形连续条件,可建立桁架拱渡槽的柔度方程。

$$\sum_{i=1}^n (f_j + g_j)x_i + \Delta_p + \Delta_{pw} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

式中, x_i 为链杆 i 的内力, f_j 和 g_j 分别为槽身和桁架拱各自的柔度系数, Δ_p 和 Δ_{pw} 分别为槽身和桁架拱在各自的荷载作用下,沿 x_j 方向产生的位移。

解方程(13),可求得链杆内力 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$)。然后分别计算槽身和桁架拱各自的位移和内力。

2.2 第二类:槽身分段,考虑槽身刚度对桁架拱的影响

对于这类情况下的桁架拱渡槽,假定槽身是通过刚性链杆分段支承在桁架拱下弦杆上的槽型梁。采用结构力学中的混合法和平面杆系有限元法解决此类问题,按槽身分为2段、3段和4段这三种情况,分别给出计算模型II-1、II-2和II-3,其计算简图和计算公式分别见图5和表1。现以计算模型II-3为例,来说明建立此类模型的基本方法。

计算模型II-3适用于槽身等分为4段的情况,利用对称性,可取半跨来研究。为建立计算模型,在梁A的左端和梁B的右端各增加一个约束来限制两截面的转动,在梁B的右端还要增加一个约束来限制它的竖向位移,与此同时切断全部链杆构成基本结构见图5。基本未知量为梁A左端的转角 φ_0 (顺时针方向为正),梁B右端的转角 φ_1 (逆时针方向为正)和竖向位移 C_0 (向下为正),以及各链杆内力 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 和 y_i ($i = 1, 2, \dots, m$)。根据链杆处的变形连续条件可建立梁A和梁B的柔度方程(20)和(21),根据平衡条件可建立梁A和梁B的刚度方程(22)和(23),联立求

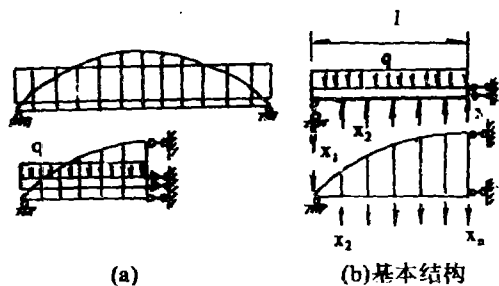


图4

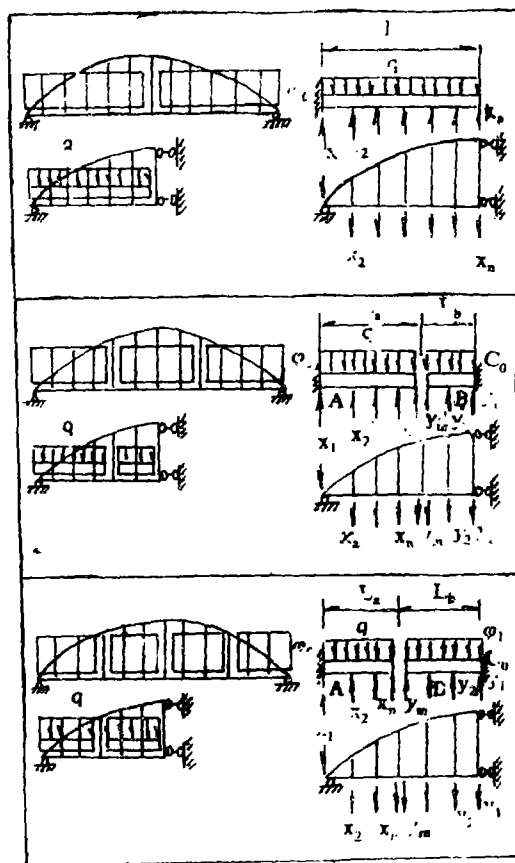


图5 第二类情况计算模型的计算简图

解方程(20)~(23), 可求得全部未知量, 然后分别计算槽身和桁架拱各自的位移和内力。

表1 第二类情况的计算模型的计算公式

计算模型 II-1	$\sum_{i=2}^n F_j x_i - a_j \varphi_0 + \Delta_p + \Delta_{jw} = 0 \quad j=2, 3, \dots, n \quad (14)$ $\left. \begin{aligned} - \sum_{i=2}^n a_i x_i + \frac{1}{2} q L^2 &= 0 \\ - \sum_{i=1}^n x_i + q L &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$
计算模型 II-2	$\sum_{i=2}^n (F_j + G_j) x_i - a_j \varphi_0 + \Delta_p + \Delta_{jw} + \sum_{i=1}^m H_j y_i = 0$ $j=2, 3, \dots, n \quad (16)$ $\sum_{i=1}^m (f_j + g_j) y_i - C_0 + \delta_p + \delta_{jw} + \sum_{i=2}^n h_j x_i = 0$ $j=1, 2, \dots, m \quad (17)$ $\left. \begin{aligned} - \sum_{i=2}^n a_i x_i + \frac{1}{2} q L_a^2 &= 0 \\ - \sum_{i=1}^n x_i + q L_a &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$ $- \sum_{i=1}^m y_i + q L_b = 0 \quad (19)$
计算模型 II-3	$\sum_{i=2}^n (F_j + G_j) x_i - a_j \varphi_0 + \Delta_p + \Delta_{jw} + \sum_{i=1}^m H_j y_i = 0$ $j=2, 3, \dots, n \quad (20)$ $\sum_{i=1}^m (f_j + g_j) y_i - b_j \varphi_1 - C_0 + \delta_p + \delta_{jw} + \sum_{i=2}^n h_j x_i = 0$ $j=1, 2, \dots, m \quad (21)$ $\left. \begin{aligned} - \sum_{i=2}^n a_i x_i + \frac{1}{2} q L_a^2 &= 0 \\ - \sum_{i=1}^n x_i + q L_a &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (22)$ $\left. \begin{aligned} - \sum_{i=2}^m b_i y_i + \frac{1}{2} q L_b^2 &= 0 \\ - \sum_{i=1}^m y_i + q L_b &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (23)$

表1中, F_j 和 f_j 分别为梁 A 和梁 B 的柔度系数; G_j 和 g_j 分别为梁 A 和梁 B 下桁架拱的柔度系数; Δ_p 和 δ_p 分别为荷载 q 在梁 A 和梁 B 的 j 点处产生的位移; Δ_{jw} 和 δ_{jw} 分别为桁架拱自重梁 A 和梁 B 下的桁架拱的 j 点处产生的位移; H_j 和 h_j 分别为作用在梁 B 和梁 A 下桁架拱的 i 点处的单位荷载, 在梁 A 和梁 B 下桁架拱的 j 点处产生的位移; L_a 和 L_b 分别为梁 A 和梁 B 的长度; a_i 为梁 A 的 i 点距左端的距离; b_i 为梁 B 的 i 点距右端的距离。

3 计算结果与成果分析

根据以上提出的5种整体分析计算模型,分别编制了相应的计算程序,并结合河南陆浑灌区西村渡槽进行了计算和对比。

西村渡槽为下承式空腹桁架拱渡槽,结构简图如图2,跨度为27.3m,槽上口净宽3.64m,设计水深3.3m,已建成。原设计只考虑桁架拱承载,不考虑槽身刚度的影响,水和槽身重按等节点荷载作用在桁架拱下弦杆节点上。为便于施工,槽身在跨中分缝。在施工过程中,对该渡槽进行两次原型观测试验⁽¹⁾⁽²⁾,获得了大量的试验资料。

计算结果表明:考虑槽身刚度影响的计算结果较不考虑槽身刚度影响的计算结果更符合实测资料见图6。由图6可知,桁架拱的实测挠度,无论是空槽或设计荷载情况,均与较符合实际情况的计算模型Ⅱ-1的计算结果接近,尤其是跨中最大挠度。不考虑槽身刚度影响的计算值较实测值偏小较多。计算值小于实测值的主要原因是计算时未考虑材料的非线性。

实际上,槽身是按设置止水的多少进行分段,一般分段较少。这样,槽身刚度和分段多少就会影响荷载在桁架上的分布见图7,桁架拱承受的并不是等节点荷载,只有槽身按节间分段时,情况才是如此。且以槽身分三段时,荷载分布为最不利,应予以避免。

若槽身在跨内为一整体,不但槽身可以承担部分荷载,使桁架拱承担的荷载减少,而且可以提高了桁架渡槽的整体刚度。槽身和桁架拱各承担多少荷载,与二者的刚度比有关。根据计算分析,对于下承式空腹桁架拱渡槽,建议用下式表示槽身与桁架的整体刚度比S:

$$S = \frac{E_b I_b}{E_T (A_T^u + A_T^d) f^3 / L} \quad (24)$$

式中, E_b 为槽身材料的弹性模量; I_b 为槽身正截面的惯性矩; E_T 为桁架拱材料的弹性模量; A_T^u 为桁架拱上弦杆的截面面积; A_T^d 为桁架拱下弦杆的截面面积; f 为桁架拱的矢高; L 为桁架拱的跨度。

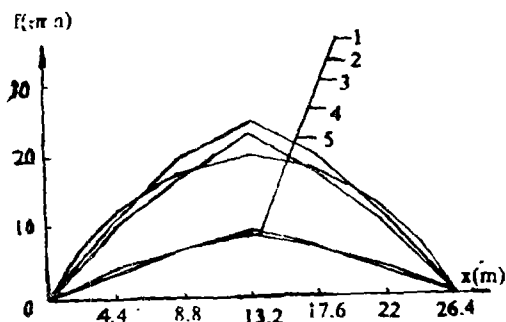


图6 西村钢筋砼桁架拱下弦节点位移

注:图中①和⑤分别为设计荷载和空槽时的试验值;

②和④分别为设计荷载和空槽时计算模型Ⅱ-1的电算值;

③为不考虑槽身刚度影响,设计荷载时的电算值。

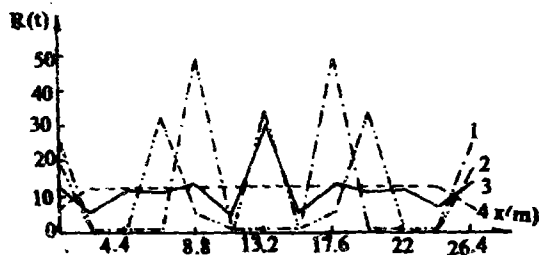


图7 设计荷作用下, 槽身分段时, 荷载
在桁架拱下弦杆上的分布图

注: 图中①-槽身分为3段; ②槽身分为4段
③槽身分为2段; ④槽身分为等节间段

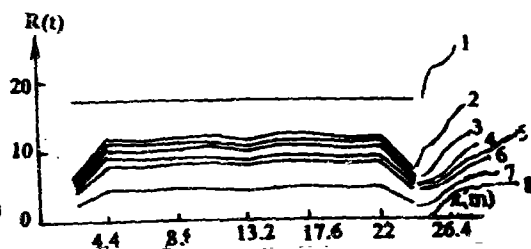


图8 设计荷载作用下, 槽身为一整体, 不同刚度
比 S 时, 荷载在桁架拱下弦杆上的分布图

注: 图中① $S=0.0$; ② $S=0.2685$; ③ $S=0.3205$;
④ $S=0.3933$; ⑤ $S=0.5185$; ⑥ $S=0.6319$;
⑦ $S=1.5554$; ⑧ $S=\infty$

以西村渡槽的实际情况为依据, 假设槽身为一整体, 按整体分析计算模型 1-2 进行计算, 可求得不同刚度比 S 时桁架拱下弦杆上的荷载分布 (见图 8)。由图 8 可知, 当 $S=0$ 时, 桁架拱承担全部荷载; 当 $S=\infty$ 时, 桁架拱不承载, 槽身承担全部荷载; 当 $0 < S < \infty$ 时, 槽身和桁架拱共同承担荷载。西村渡槽的刚度比是 $S=0.5185$, 若槽身为一整体, 则槽身可分担全部荷载的 45% 左右, 其经济意义是显然的。

考虑结构的整体作用而产生的荷载分摊问题涉及到结构的优化设计问题, 不在本文讨论的范围。在结构布置和尺寸已经选定的情况下, 按本文建议的计算模型和有关程序计算, 当能得到较精确的解答, 不必事先考虑如何分摊荷载。为了简化设计计算, 考虑经济和安全两方面的要求, 在槽身为钢筋混凝土整体结构时, 建议暂取槽身承受总荷载的 10~20% 是可以接受的。这样, 桁架拱承受总荷载的 80~90%, 可以象常用的结构分析方法那样单独进行设计计算。

4 结 论

根据以上对桁架拱渡槽进行的整体分析与计算, 以及计算结果与试验结果的对比, 得出如下结论:

- 4.1 对于桁架拱渡槽, 不考虑槽身承载和槽身刚度的影响的设计方法不能正确反映结构的实际受力情况, 计算结果与实测结果相差较大, 建议对这种设计方法进行改进。
- 4.2 对于槽身分段的桁架拱渡槽, 受槽身刚度和分段数目的影响, 荷载在桁架拱上的分布可能出现极不均匀的情况, 这对桁架拱是不利的, 为考虑这一不利影响, 建议设计时可根据分段的多少, 采用第二类计算模型进行计算。
- 4.3 对于槽身为一整体的桁架拱渡槽, 由于槽身可以承担部分荷载, 从而减少了桁架拱承担的荷载并提高了桁架拱渡槽的整体刚度, 比槽身分段的桁架拱渡槽合理, 建议实际工程中采用这种结构形式的桁架拱渡槽。
- 4.4 本文针对下承式空腹桁架拱渡槽提出的 2 种基本方法和 5 种计算模型, 也适用于

其它类型的组合结构式渡槽(例如: 肋拱渡槽, 双曲拱渡槽等)的整体分析, 分析时只需用其它承重结构来取代下承式空腹桁架拱就可以了。

参 考 文 献

- (1) 李树瑶等. 钢筋混凝土桁架拱渡槽的厚型试验分析. 人民长江, 1985年第3期
- (2) 葛友庭, 丁自强. 大型预应力桁架拱渡槽原型试验与分析. 水利水电技术, 1986年第11期
- (3) 苏甘龙, 王有成. 广文地基上结构物的有限元分析. 水利学报, 1984年第10期
- (4) 陈尧隆. 用有限条法计算薄壳渡槽. 水利学报, 1983年第8期
- (5) Cheung, Y.K. and Nag, D.K. Plates and Beams on Elastic Foundation—Linear Non-Linear Behaviour. Geotechnique, Vol.18, No.2, 1968

The Integral Analysis of Spandrel Braced Arch Flume

Liu Jian Ding Ziqiang

(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract: From the general condition of the flume with the lower bearing structure, this paper gives consideration to the coupling effect between the flume and the lower bearing structure, and suggests two basic methods for the integral analysis to flume with the lower bearing structure: ie. softness method and stiffness method. Considering the structure characteristics of the spandrel braced arch flume and its characteristics on plane and space, this paper also analysis the influence of flume stiffness and flume bearing on the spandrel braced arch, and gives out five kind of calculation models to the integral analysis of the spandrel braced arch flume. The calculation result shows that the five kind of calculation models pointed out in this paper are more reasonable and more economic than the calculation models used in the past designd.

Keywords: flume, analysis, modeling