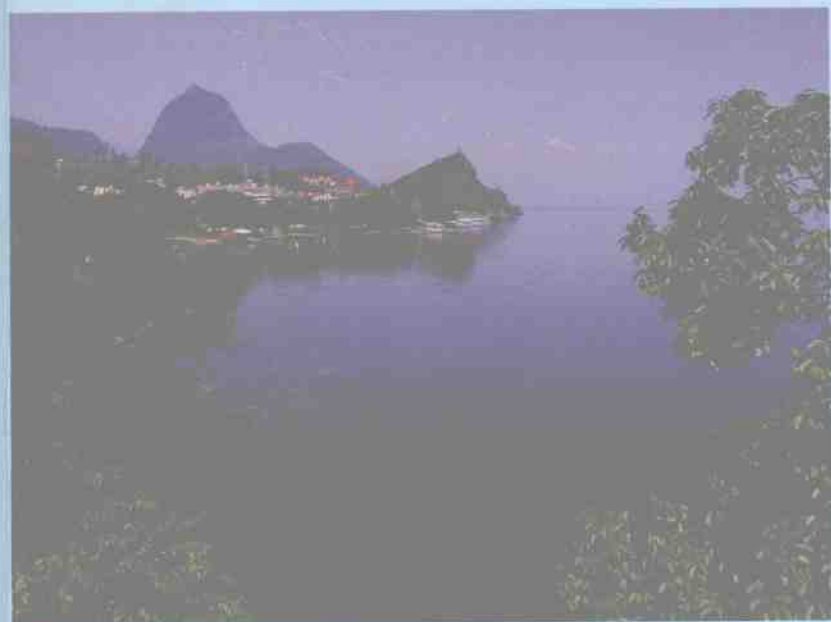


SHUILIGONGCHENG
SHEJI
JISUANSOUCE

水力工程设计计算手册

第三卷



中国水利水电出版社

水力工程设计计算手册

主编 马如龙 $\sqrt{13-62}$
23

第三卷

水利水电出版社

目 录

第九节 无压隧洞——定型衬砌	(889)
第十节 无压隧洞——半圆拱等厚度的圈门形衬砌	(912)
第十一节 有压圆隧洞——组合衬砌	(957)
第十二节 水工隧洞的有限单元分析法	(978)
第二章 隧洞水流的计算	(1026)
第一节 隧洞的水流流态及其判别	(1026)
第二节 隧洞有压流的基本水力计算	(1030)
第三节 隧洞无压流的基本水力计算	(1032)
第四节 隧洞半有压流的基本水力计算	(1039)
第五节 进口段设置有压短洞的无压泄流隧洞的水力计算	(1042)
第三章 隧洞各种过渡段的型式	(1046)
第一节 有压进口的边界曲线	(1046)
第二节 进口有压短洞的体型	(1049)
第三节 渐变段的体型	(1050)
第四节 出口及其急流连接段的型式	(1052)
第五节 转弯半径	(1054)
第六节 分岔的型式	(1054)
第四章 水工隧洞的某些特殊水力学问题	(1056)
第一节 通气管问题	(1056)
第二节 平板闸门的门槽型式	(1058)
第三节 平板闸门上的动水压力	(1059)
第四节 泥沙压力计算问题	(1063)
第五节 过流表面不平整度控制	(1063)
第六节 不衬砌和部分衬砌岩石隧洞的糙率	(1064)

第九篇 河道的水力计算

第一章 河道恒定流水面曲线计算	(1069)
第一节 水面曲线计算的基本方程式	(1069)
第二节 水面曲线计算的基本方法	(1076)
第三节 水面曲线计算的方法及资料准备	(1081)
第二章 河道非恒定流水面曲线计算	(1104)
第一节 非恒定流水面曲线计算的基本方程	(1104)
第二节 明槽非恒定流的直接差分法	(1108)
第三节 非恒定流的特征线法	(1118)
第四节 一维洪水演进的数值计算	(1127)
第五节 数值计算实例	(1129)
第三章 弯道水流及裁弯工程的水力计算	(1141)
第一节 弯道水流特性	(1141)
第二节 弯道水流的水力特征值	(1143)
第三节 最优取水口的位置选择	(1151)
第四节 裁弯工程的水力计算	(1154)
第四章 防护工程及河工建筑物的水力计算	(1165)
第一节 抛石防护	(1165)
第二节 护坡防护	(1170)
第三节 丁坝的水力计算	(1172)
第四节 潜坝的水力计算	(1178)
第五节 锁坝的水力计算	(1183)
第六节 河工建筑物的冲刷计算	(1187)
第五章 溃坝的水力计算	(1194)
第一节 溃坝水力计算的目的	(1194)
第二节 溃坝水力计算的内容及条件	(1197)
第三节 溃坝水流的基本方程式	(1199)
第四节 溃坝水流的分析及坝址最大流量的计算	(1205)
第五节 坝址流量过程线的推求	(1225)



第六节 溃坝洪水向下游演进的简化计算 (1228)
第七节 溃坝洪水向下游演进的一维数值计算 (1232)

第十篇 渗流计算

第一章 渗流计算常用方法 (1237)
第一节 概述 (1237)
第二节 渗流的基本微分方程 (1250)
第三节 稳定渗流情况的直接解法 (1268)



七、拱圈的内力

把式 (1-430) 的 X_1 、 X_2 、 X_3 代入下列各式, 可求得拱圈任意断面的内力:

$$\left. \begin{aligned} M_z &= M_{pz} + X_1 + X_2 y - X_3 x \\ N_z &= N_{pz} + X_2 \cos \phi + X_3 \sin \phi \\ Q_z &= Q_{pz} - X_2 \sin \phi + X_3 \cos \phi \end{aligned} \right\} \quad (1-431)$$

$$\left. \begin{aligned} M_y &= M_{py} + X_1 + X_2 y + X_3 x \\ N_y &= N_{py} + X_2 \cos \phi - X_3 \sin \phi \\ Q_y &= Q_{py} + X_2 \sin \phi + X_3 \cos \phi \end{aligned} \right\} \quad (1-432)$$

式中, x 、 y 代表任意断面形心的坐标, 以拱顶断面形心 O 为原点; ϕ 代表任意断面对垂直面的倾角。 M 、 N 、 Q 的正方向与前面规定的 X_1 、 X_2 、 X_3 的正方向相同, 反方向则为负。

八、校核计算

可以利用下列各式来校核计算的正确性:

$$\left[\int \frac{M_z ds}{EI} + \int \frac{M_y ds}{EI} \right] + (\beta_z + \beta_y) = 0 \quad (1-433)$$

$$\left[\int \frac{M_z y ds}{EI} + \int \frac{M_y y ds}{EI} \right] + f (\beta_z + \beta_y) + (u_z + u_y) = 0 \quad (1-434)$$

$$\left[\int \frac{M_z (-x) ds}{EI} + \int \frac{M_y x ds}{EI} \right] + \frac{l}{2} (\beta_y - \beta_z) + (v_z + v_y) = 0 \quad (1-435)$$

九、边墙底的压强

边墙底部的应力可按公式 (1-380) 计算, 如果这些应力小于边墙材料和地基的许可强度, 即属安全。 σ_1 和 σ_2 不能为负值; 如出现负值, 就表示边墙底面将与地基脱开, 故不符合边墙的稳定条件, 如果出现这种情况, 须



重行规定断面尺寸，再作计算。

此外，边墙还应满足公式 (1-361) 所表示的稳定性条件。

十、底板的内力

底板为一个弹性地基梁，左右对称，两端为建筑缝，故初参数都等于零。梁上只受到均匀的水重和梁的自重，设每米梁上的水重和自重的和为 q ，可用下式求出任意断面的内力：

$$M_x = -\frac{q}{\lambda^2} F_3(\lambda x) \quad (1-436)$$

$$Q_x = -\frac{q}{\lambda} F_2(\lambda x) \quad (1-437)$$

式中 λ ——弹性标值，见附录 B 式 (B-12)；
 $F_2(\lambda x)$ ， $F_3(\lambda x)$ ——数值见附表 G 附表 G-1；
 q ——每米梁上的水重和自重的总和。

十一、计算例题

(一) 设计资料

设计一个通过半山坡的隧洞出口段，尺寸如图 1-73 所示，用挖填方法建成，按四级建筑物设计。

填土容重为 18kN/m^3 ，内摩擦角 $\phi = 40^\circ$ ，填土和衬砌之间的摩擦系数 $\mu = 0.3$ 。侧面弹性压缩系数 $\kappa = 1.0 \times 10^5 \text{kN/m}^3$ ，墙底弹性压缩系数 $k_1 = 1.25\text{k}$ 。

拱圈用标号 150 的混凝土建筑，容重 24kN/m^3 ，弹性模量 $E = 24 \times 10^6 \text{kPa}$ ，边墙和洞底用浆砌块石建成，容重 23.5kN/m^3 ，弹性模量 $E = 9 \times 10^6 \text{kPa}$ 。

拱圈中心角 180° ，厚度 0.5m ，内半径 2.0m ，外半径 2.5m 。顶宽 0.5m ，底宽 1.0m 。右侧墙宽 1.5m ，高 3m 。洞底板厚 0.5m 。

拱圈上部填土的坡度，中线以左 1:1.5，中线以右 1:3。

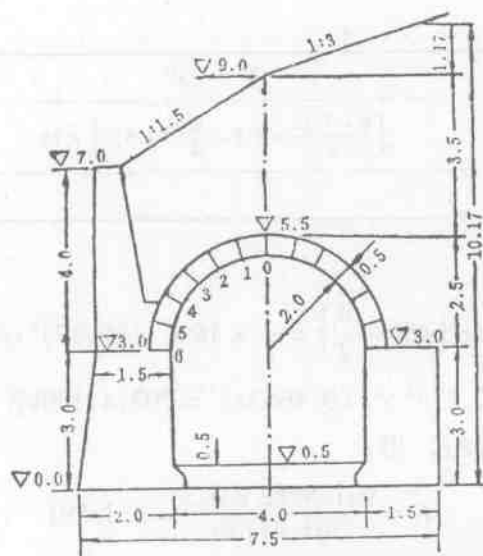


图 1-73 偏压圆形衬砌尺寸图

(二) 稳定校核

用下式校核洞内无水情况下衬砌的整体稳定安全度：

$$K = \frac{\mu \sum V}{\sum H} \quad (1-438)$$

式中 $\sum V$ ——作用在隧洞衬砌上的垂直荷载；

$\sum H$ ——作用在隧洞衬砌上的水平荷载。

1. $\sum V$ 的计算 (如表 1-78)

表 1-78 $\sum V$ 的计算表

荷载名称	算式	重量 (kN)
左侧墙	$3 \times \frac{2+1.5}{2} \times 23.5$	123.375
右侧墙	$3 \times 1.5 \times 23.5$	105.750
耳墙	$4 \times \frac{0.5+1}{2} \times 23.5$	70.500
底板	$4 \times 0.5 \times 23.5$	47.000
拱圈	$\pi \times 2.25 \times 0.5 \times 24$	84.8232
左侧填土	$\left[\frac{4+6}{2} \times 3 - \frac{1}{2} \times 0.5 \times 4 - \frac{\pi}{4} (2.5)^2 \right] \times 18$	163.6425

续表

荷载名称	算式	重量 (kN)
右侧填土	$\left[\frac{6+7.17}{2} \times 3.5 - \frac{\pi}{4} (2.5)^2 \right] \times 18$	326.4975
共计		921.5882

2. ΣH 的计算

$$P = \frac{1}{2} \gamma_1 h^2 t g^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) = \frac{1}{2} \times 18 \times (10.17)^2 t g^2 \left(45^\circ - \frac{40^\circ}{2} \right)$$

$$= 9 \times (10.17)^2 \times (0.46631)^2 = 202.41139 \text{ kN}$$

代入公式 (1-438), 得:

$$K = \frac{921.5882 \times 0.3}{202.41139} = 1.36591$$

证明衬砌的稳定性是可以保证的。

(三) 拱圈上荷载的静力矩、垂直力和水平力

将每半个拱圈分成 6 个楔块, 每个楔块的圆心角为 15° , 按外半径 2.5m 计算土重和土压力, 按中半径 2.25m 计算自重。

土重的计算, 如表 1-79 所列。

表 1-79 土重计算表

分缝	圆心角 ϕ	分缝上点		土块宽 (m)	地面高 (m)	土层厚度 (m)	平均土厚 (m)	土体积 (m^3)	土重 (10kN)
		x (m)	y (m)						
0	0°	0	0		9.00	3.5			
左 1	15°	0.64705	0.08517	0.64705	8.82747	3.41264	3.45632	2.23641	4.62554
2	30°	1.25	0.33492	0.60295	8.66667	3.50159	3.45712	2.08447	3.75205
3	45°	1.76778	0.73222	0.51778	8.52859	3.76081	3.63120	1.88016	3.38429
4	60°	2.16508	1.25	0.39730	8.42265	4.17265	3.96673	1.57598	2.83676
5	75°	2.41488	1.85295	0.24975	8.35605	4.70906	4.44083	1.10910	1.99638
6	90°	2.50	2.50	0.08517	8.16667	5.16667	4.93783	0.42055	0.75699
0	0°	0	0		9.0	3.5			
右 1	15°	0.64705	0.08517	0.64705	9.26568	3.85085	3.67543	2.37819	4.28074
2	30°	1.25	0.33492	0.60295	9.41667	4.25159	4.05122	2.44268	4.39682

续表

分 缝	圆 心 角 ϕ	分 缝 上 点		土块宽 (m)	地面高 (m)	土层厚度 (m)	平均土厚 (m)	土体积 (m ³)	土 重 (10kN)
		x (m)	y (m)						
3	45°	1.76778	0.73222	0.51778	9.58926	4.82148	4.53654	2.84893	4.22807
4	60°	2.16508	1.25	0.39730	9.72169	5.47169	5.14659	2.04474	3.68053
5	75°	2.41483	1.85295	0.24975	9.80434	6.15729	5.81449	1.45205	2.61369
6	90°	2.50	2.50	0.08517	9.83333	6.83333	6.49531	0.55321	0.99578

半个拱圈轴线的长度为 $\frac{1}{2} \pi r = \frac{\pi}{2} \times 2.25 = 3.5343\text{m}$, 每个楔块长 0.58905m , 厚 0.5m , 故体积为 0.29453m^3 , 重量为 $0.29453 \times 24 = 7.06872\text{kN}$ 。

为计算简单起见, 把每楔块的土荷载和自重相加 (如表 1-80), 并近似地以楔块中点为形心, 定出力臂长度。对于分缝 n 到荷载 P 的力臂长度, 可用下式求得:

$$\alpha_n^P = \alpha_{n-1}^P + x_n - x_{n-1}$$

式中 α_n^P ——从 n 分缝到荷载 P 的力臂;

α_{n-1}^P ——从 $n-1$ 分缝到荷载 P 的力臂;

x_n 、 x_{n-1} ——分别代表 n 分缝和 $n-1$ 分缝形心的横坐标。

对于水平荷载 Q , 可仍用上式, 只须把 Q 代替式中的 P , y 代替式中的 x 。

兹列表计算荷载对各分缝引起的弯矩, 如表 1-80 和表 1-81。

表 1-80 各楔块的垂直荷载 (10kN)

荷 载	左楔块 1	左楔块 2	左楔块 3	左楔块 4	左楔块 5	左楔块 6
土 重	4.026	3.752	3.384	2.837	1.996	0.757
自 重	0.708	0.708	0.708	0.708	0.708	0.708
共 计	$P_1 = 4.734$	$P_2 = 4.460$	$P_3 = 4.092$	$P_4 = 3.545$	$P_5 = 2.704$	$P_6 = 1.465$
荷 载	右楔块 1	右楔块 2	右楔块 3	右楔块 4	右楔块 5	右楔块 6
土 重	4.281	4.397	4.228	3.681	2.614	0.996
自 重	0.708	0.708	0.708	0.708	0.708	0.708
共 计	$P_1 = 4.989$	$P_2 = 5.105$	$P_3 = 4.936$	$P_4 = 4.389$	$P_5 = 3.322$	$P_6 = 1.704$

表 1-81 楔块上垂直荷载引起的弯矩 (10kNm)

分缝	力臂 α (m) 弯矩 M (10kNm)	$P_1 = 4.734$ (10kN)	$P_2 = 4.460$ (10kN)	$P_3 = 4.092$ (10kN)	$P_4 = 3.545$ (10kN)	$P_5 = 2.704$ (10kN)	$P_6 = 1.463$ (10kN)	总计 M_p (10kNm)
左 1	α	0.324						1.534
	M	1.534						
2	α	0.927	0.302					5.735
	M	4.388	1.347					
3	α	1.445	0.820	0.259				11.558
	M	6.841	3.657	1.060				
4	α	1.842	1.217	0.656	0.199			17.537
	M	8.720	5.428	2.684	0.705			
5	α	2.092	1.467	0.906	0.449	0.125		22.084
	M	9.904	6.543	3.707	1.592	0.338		
6	α	2.177	1.552	0.991	0.534	0.210	0.043	23.807
	M	10.306	6.922	4.055	1.893	0.568	0.963	
右 1	α	0.324						-1.616
	M	1.616						
2	α	0.927	0.302					-6.167
	M	4.625	1.542					
3	α	1.445	0.820	0.259				-12.673
	M	7.209	4.186	1.278				
4	α	1.842	1.217	0.656	0.199			-19.514
	M	9.190	6.213	3.238	0.873			
5	α	2.092	1.467	0.906	0.449	0.125		-24.784
	M	10.437	7.489	4.472	1.971	0.415		
6	α	2.177	1.552	0.991	0.534	0.210	0.043	-26.791
	M	10.861	7.923	4.892	2.344	0.698	0.073	

表 1-82 拱圈填土的侧压力

楔块	左缝土厚 (m)	右缝土厚 (m)	平均土厚 h (m)	h^2	侧压力 (10kN) $p = 0.19562h^2$
左 1	3.41264	3.5	3.45632	11.94615	2.83691
2	3.50159	3.41264	3.45712	11.95168	2.33799
3	3.76081	3.50159	3.63120	13.18561	2.57934
4	4.17265	3.76081	3.96673	15.73495	3.07807
5	4.70906	4.17265	4.44086	19.72124	3.85787
6	5.16667	4.70906	4.93787	24.38256	4.76972
右 1	3.5	3.85102	3.67551	13.50937	2.64270
2	2.85085	4.25159	3.55122	12.61116	2.46700

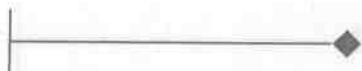
续表

楔块	左缝土厚 (m)	右缝土厚 (m)	平均土厚 h (m)	h^2	侧压力 (10kN) $p = 0.19562h^2$
3	4.25159	4.82149	4.53654	20.58020	4.02590
4	4.82148	5.47169	5.14659	26.48739	5.18146
5	5.47169	6.15729	5.81449	33.80829	6.61358
6	6.15729	6.83333	6.49531	42.18905	8.25302

表 1-84 中第 2 栏的数值系取自表 1-81 中第 9 栏；表 1-84 中第 3 栏的数值系取自表 1-83 中的第 9 栏；表 1-84 中的第 4 栏系第 2 栏和第 3 栏之和；表 1-84 中第 5 栏的数值系取自表 1-80 中第 3 行中的各值，是各该分缝以上作用于各楔块上的土压力之和；表 1-84 中第 6 栏的数值系取自表 1-82 中第 6 栏的值，它是各该分缝以上作用于各楔块上的土重和自重之和；表 1-84 中第 7 栏和第 8 栏中的 ϕ 值为各分缝断面的中心角，可根据表 1-79 中第 3 栏计算；表 1-84 中第 8 栏系第 6 栏和第 7 栏之和；表 1-84 中第 11 栏是第 9 栏和第 10 栏之和。

表 1-83 侧土压力对各分缝引起的弯矩

分缝	力臂 α (m)	$Q_1 = 2.337$	$Q_2 = 2.338$	$Q_3 = 2.579$	$Q_4 = 3.078$	$Q_5 = 3.858$	$Q_6 = 4.770$	M_q (10kNm)
	弯矩 M (10kNm)							
左 1	α	0.043						-0.100
	M	-0.100						
2	α	0.293	0.125					-0.977
	M	-0.685	-0.292					
3	α	0.690	0.522	0.199				-3.346
	M	-1.613	-1.220	-0.513				
4	α	1.208	1.040	0.717	0.259			-7.901
	M	-2.823	-2.432	-1.849	-0.797			
5	α	1.811	1.643	1.322	0.862	0.302		-15.300
	M	-4.232	-3.841	-3.409	-2.653	-1.165		
6	α	2.458	2.290	1.969	1.509	0.949	0.324	-26.027
	M	-5.744	-5.354	-5.078	-4.645	-3.661	-1.545	
分缝	力臂 α (m)	$Q_1 = 2.643$	$Q_2 = 2.467$	$Q_3 = 4.026$	$Q_4 = 5.181$	$Q_5 = 6.614$	$Q_6 = 8.253$	M_q (10kNm)
	弯矩 M (10kNm)							
右 1	α	0.043						-0.114
	M	-0.114						



续表

分缝	力臂 α (m)		$Q_1 = 2.643$	$Q_2 = 2.467$	$Q_3 = 4.026$	$Q_4 = 5.181$	$Q_5 = 6.614$	$Q_6 = 8.253$	M_q (10kNm)
	弯矩 M (10kNm)								
2	α		0.293	0.125					-1.082
	M		-0.774	-0.308					
3	α		0.690	0.522	0.199				-3.913
	M		-1.824	-1.288	-0.801				
4	α		1.208	1.040	0.717	0.259			-9.988
	M		-3.193	-2.566	-2.887	-1.342			
5	α		1.811	1.643	1.322	0.882	0.302		-20.624
	M		-4.786	-4.053	-5.322	-4.466	-1.997		
6	α		2.458	2.290	1.969	1.509	0.949	0.324	-36.841
	M		-6.496	-5.649	-7.927	-7.818	-6.277	-2.674	

表 1-84 弯矩的总和 (10kNm) 和轴向力 (kN)、剪力 (kN)

分缝编号	土自重 M_p (10kNm)	侧土压力 M_q (10kNm)	合 计 M (10kNm)	分缝以上	分缝以上	$\sum P \sin \phi$ (10kN)	$\sum Q \cos \phi$ (10kN)	N_p (10kN)	$\sum P \cos \phi$ (10kN)	$\sum Q \sin \phi$ (10kN)	Q_p (10kN)
				的垂直力 $\sum P$ (10kN)	的水平力 $\sum Q$ (10kN)						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
左 1	-1.534	-0.100	-1.634	4.734	-2.337	1.225	-2.257	-1.032	4.573	0.605	5.178
2	-5.735	-0.977	-6.712	9.194	-4.675	4.597	-4.049	0.548	7.962	2.338	10.300
3	-11.558	-3.346	-14.904	13.286	-7.254	9.395	-5.129	4.266	9.395	5.129	14.524
4	-17.537	-7.901	-25.438	16.831	-10.332	14.576	-5.166	9.410	8.416	8.948	17.364
5	-22.084	-15.300	-37.384	19.535	-14.190	18.869	-3.673	15.196	5.056	13.706	18.762
6	-23.807	-26.027	-49.834	21.000	-18.960	21.000	0	21.000	0	18.960	18.960
右 1	-1.616	-0.114	-1.730	-4.989	-2.643	1.291	-2.553	-1.262	-4.819	-0.684	-5.503
2	-6.167	-1.082	-7.249	-10.094	-5.110	5.047	-4.425	-0.622	-8.742	-2.555	-11.297
3	-12.673	-3.913	-16.586	-15.030	-9.136	10.628	-6.460	4.168	-10.628	-6.460	-17.088
4	-19.514	-9.988	-29.502	-19.419	-14.317	16.817	-7.159	9.659	-9.710	-12.399	-22.109
5	-24.784	-20.624	-45.408	-22.741	-20.931	21.966	-5.417	16.549	-5.886	-20.218	-26.104
6	-26.791	-36.841	-63.632	-24.445	-29.184	24.445	0	24.445	0	-29.184	-29.184

从上表可知 $M_{Ax} = -498.34\text{kNm}$, $M_{Ay} = 636.32\text{kNm}$; $V_{Ax} = 210.00\text{kN}$; $V_{Ay} = -244.45\text{kN}$; $H_{Ax} = -189.60\text{kN}$; $H_{Ay} = -291.84\text{kN}$ 。

1 表 1-84 的符号规定如下:

弯矩: 左半拱以反时针方向为正, 右半拱以顺时针方向为正。

垂直力: 左半拱以向下为正, 右半拱以向上为正。

水平力: 左半拱以向左为正, 右半拱以向右为正。



轴向力：以受压为正，以受拉为负。

(四) 左边墙的荷载

1. 由拱座传来的

$$M_{Az} = -498.34 \text{ kNm}$$

$$V_{Az} = 210.00 \text{ kN} \quad d_i = 0.625 \text{ m}$$

$$H_{Az} = -189.60 \text{ kN} \quad h_{1z} = 3.0 \text{ m}$$

2. 直接作用于墙顶的垂直力 P_{0z}

耳墙 $\frac{1+0.5}{2} \times 4 \times 24 = 72 \text{ kN}$

填土 $\frac{0.5}{2} \times 4 \times 18 = 18 \text{ kN}$

$$P_{0z} = 72 + 18 = 90 \text{ kN}$$

$$d_{0z} = 0.208 \text{ m}$$

3. 作用于墙背的被动抗力及摩擦力

$$Q = 0$$

$$S = 0$$

4. 作用于墙背的土压力及摩擦力

$$E = 0$$

$$S' = 0$$

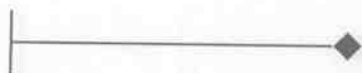
5. 边墙的自重

$$G_z = \frac{1.5+2.0}{2} \times 3 + \frac{0.25+0.5 \times 24}{2} \times 0.25 \times 24$$

$$= 126.00 + 2.25 = 128.25 \text{ kN}$$

将边墙划分为三角形和矩形面积，然后根据边墙各部分重量对边墙底部左端点的力矩与边墙总重乘边墙重心到边墙底面左端点的距离 l 相等的原则，即可求得 l ，而边墙重心到边墙底面形心的距离 d_g 减边墙底面宽度之半，即：

$$d_g = \frac{\frac{1}{2} \times 0.5 \times 3 \times \frac{2}{3} \times 0.5 + 1.5 \times 3 \times \left(\frac{1.5}{2} + 0.5 \right)}{\frac{1.5+2}{2} \times 3 + 0.25 \times 0.25 + \frac{1}{2} \times 0.25 \times 0.25}$$



$$\begin{aligned}
 & + \frac{0.25 \times 0.25 \times \left(2 + \frac{0.25}{2}\right) + \frac{1}{2} \times 0.25 \times 0.25 \times \left(2 + \frac{0.25}{3}\right)}{\frac{1.5+2}{2} \times 3 + 0.25 \times 0.25 + \frac{1}{2} \times 0.25 \times 0.25} - \frac{2.25}{2} \\
 & = \frac{0.25 + 5.625 + 0.133 + 0.065}{5.25 + 0.063 + 0.031} - \frac{2.25}{2} \\
 & = \frac{6.073}{5.344} - 1.125 = 1.136 - 1.125 = 0.011\text{m}
 \end{aligned}$$

6. 墙底的反力 R_1

$$\sum V = P_0 + V_A + G = 90.00 + 210.00 + 128.25 = 428.25\text{kN}$$

$$R_1 = \sum V = 428.25\text{kN}$$

(五) 左边墙的变位

利用公式 (8-20) 可得:

$$\begin{aligned}
 I_{Cx} &= \frac{1}{12} (4h^2 + 3h^2 b\mu + nb^3) = \frac{1}{12} \times (4 \times 3^2 + 3 \times 3^2 \times 2.25 \times 0.3 + 1.25 \times 2.25^3) \\
 &= \frac{1}{12} \times (108 + 18.225 + 14.238) = \frac{1}{12} \times 140.463 = 11.70527
 \end{aligned}$$

$$K_{1z} I_{Cx} = 1.25 \times 10^5 \times 11.70527 = 14.63159 \times 10^5$$

边墙上的荷载对边墙底面中心点 C 的力矩为:

$$\begin{aligned}
 M_{Cx} &= M_{Az} + H_{Az} h_{1z} + V_{Az} dz + G_z dg + P_{0z} d_{0z} \\
 &= -498.340 - 189.60 \times 3.0 - 210.00 \times 0.625 - 128.25 \times 0.011 + 90.00 \\
 &\quad \times 0.208
 \end{aligned}$$

$$= -498.34 - 568.800 - 131.25 - 1.411 + 18.72 = -1218.521$$

边墙上的垂直荷载:

$$\sum V_z = P_{0z} + V_{Az} + G_z = 90.00 + 210.00 + 128.25 = 428.25\text{kN}$$

$$\beta_{1z} = \frac{1}{k_{1z} I_{Cx}} = \frac{1}{14.63159 \times 10^5} = 0.68345 \times 10^{-6}$$

$$\beta_{2z} = h_{1z} \times \beta_{1z} = 3 \times 0.68345 \times 10^{-6} = 2.05035 \times 10^{-6}$$

$$\beta_{3z} = -d_z \beta_{1z} = -0.625 \times -0.68345 \times 10^{-6} = -0.42716 \times 10^{-6}$$

$$\beta_{pz} = M_{Cx} \beta_{1z} = -1218.521 \times 0.68345 \times 10^{-6} = -832.79817 \times 10^{-6}$$

$$u_{1z} = h_{1z} \beta_{1z} = 3 \times 0.68345 \times 10^{-6} = 2.05035 \times 10^{-6}$$

$$u_{2z} = h_{1z}^2 \beta_{1z} = 3^2 \times 0.68345 \times 10^{-6} = 6.15105 \times 10^{-6}$$

$$u_{3z} = -h_{1z}d_z\beta_{1z} = -3 \times 0.625 \times 0.68345 \times 10^{-6} = -1.28147 \times 10^{-6}$$

$$u_{pz} = h_{1z}M_{Cz}\beta_{1z} = 3 \times (-832.79817 \times 10^{-6}) = -2498.3945 \times 10^{-6}$$

$$v_{1z} = -d_z\beta_{1z} = -0.625 \times 0.68345 \times 10^{-6} = -0.42716 \times 10^{-6}$$

$$v_{2z} = -d_{1z}d_z\beta_{1z} = -3 \times 0.625 \times 0.68345 \times 10^{-6} = -1.28147 \times 10^{-6}$$

$$v_{3z} = -d_zM_{Cz}\beta_{1z} + \frac{\sum V_z}{k_{1z}b_z} = -0.625 \times (-832.79817 \times 10^{-5}) + \frac{1}{0.125 \times 10^6 \times 2.25}$$

$$= (0.26697 + 3.55556) \times 10^{-6} = 3.82253 \times 10^{-6}$$

$$v_{pz} = -d_zM_{Cz}\beta_{1z} + \frac{\sum V_z}{k_{1z}b_z} = -0.625 \times (-832.79817 \times 10^{-6})$$

$$+ \frac{428.25}{0.125 \times 10^6 \times 2.25}$$

$$= (520.49885 + 1522.6666) \times 10^{-6} = 2043.1655 \times 10^{-6}$$

(六) 右边墙的荷载

1. 拱座传来的 M_{Ay} 、 V_{Ay} 、 H_{Ay}

$$M_{Ay} = -636.32\text{kNm}$$

$$V_{Ay} = -244.45\text{kN} \quad d_g = 0.375\text{m}$$

$$H_{Ay} = -291.84\text{kN} \quad h_{1y} = 3.0\text{m}$$

2. 墙顶的垂直力 P_{0y}

垂直力 P_{0y} 等于直接作用在 1.0m 顶宽上的土柱重量，也就等于墙顶上土柱平均高度 7.003m 乘墙顶 1.0m 再乘土的容重 18.0kN/m³，即：

$$P_{0y} = 7.03 \times 1 \times 18.0 = 126.054\text{kN}$$

$$d_{0y} = 0.375\text{m}$$

3. 被动土压力和摩擦力

作用于墙背的被动抗力 Q 和摩擦力 S

Q 和 S 暂时为未知数，但 $S = Q\mu = 0.3Q$ 。

4. 主动力压力和摩擦力

作用于墙背面的主动土压力 E 和摩擦力 S' 。

平均土厚 $h = 7.17 + 1.5 = 8.67\text{m}$ ，土压强为 $3.91397h = 33.93412\text{kN/m}$ ，墙面积为 $3 \times 1 = 3\text{m}^2$ ，故：

$$E = 33.93412 \times 3 = 101.80236\text{kN}$$

$$S' = \mu \cdot E = 0.3 \times 101.80236 = 30.54071\text{kN}$$



5. 边墙的自重 G_y

$$G_y = \left[1.5 \times 3 + 0.25 \times \frac{(0.25 + 0.5)}{2} \right] \times 24 = 110.25 \text{ kN}$$

$$d_{ey} = \frac{1.75}{2}$$

$$\begin{aligned} & \frac{0.25 \times 0.25 \times \left(\frac{0.25}{2} + 1.5 \right) + \frac{1}{2} \times 0.25 \times 0.25 \times \left(\frac{0.25}{3} + 1.5 \right) + 1.5 \times 3 \times \frac{1.5}{2}}{0.25 \times (0.25 + 0.5) \times \frac{1}{2} + 1.5 \times 3.0} \\ & = 0.875 - \frac{0.102 + 0.049 + 3.375}{4.594} = 0.875 - \frac{3.526}{4.594} = 0.875 - 0.768 = 0.107 \text{ m} \end{aligned}$$

此 d_{ey} 值系在 C 点之右。

6. 墙底的反力 R_1 和摩擦力 S_1

R_1 和 S_1 暂时为未知数, 但 $S_1 = \mu R = 0.3R$ 。

上面的荷载中存在着 Q 、 R_1 两个未知数, 这可由公式 (1-376) 求得:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{\sum H + \mu \sum V}{1 + \mu^2} = \frac{(H_{Ay} + E) + \mu \times (P_{ey} + V_{Ay} + G_y - S')}{1 + \mu^2} \\ &= \frac{(-291.840 - 101.802) + 0.3 \times (-126.054 - 244.45 - 110.25 + 30.541)}{1 + 0.09} \\ &= \frac{-393.642 + 0.3 \times (-450.213)}{1.09} = \frac{-393.642 - 135.064}{1.09} \\ &= \frac{-528.706}{1.09} = -485.051 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{Q - \sum H}{\mu} = \frac{-485.051 + 393.642}{0.3} = \frac{-91.409}{0.3} \\ &= -304.698 \text{ kN} \end{aligned}$$

(七) 右边墙的变位

利用公式 (1-364) 可得:

$$\begin{aligned} I_{ey} &= \frac{1}{12} (4h^3 + 3h^2 b\mu + nb^3) \\ &= \frac{1}{12} \times (4 \times 3^3 + 3 \times 3^2 \times 1.75 \times 0.3 + 1.25 \times 1.75^3) \end{aligned}$$