

# 高速公路下穿既有铁路桥桥墩基底承载力验算<sup>\*</sup>

席超波<sup>1</sup>, 杨冰清<sup>1</sup>, 赵一博<sup>2</sup>, 傅鹤林<sup>2</sup>

(1. 长沙市公共工程建设中心, 湖南 长沙 410007; 2. 中南大学, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 随着交通建设的飞速发展, 越来越多的高速公路下穿铁路桥。而先行建设的铁路, 设计和施工时并没有考虑后续高速公路建设及其荷载的影响, 高速公路下穿铁路桥会给铁路桥安全带来隐患。文中以某高速公路下穿铁路桥为例, 考虑桥墩除承受来自上部铁路桥的行车荷载、风荷载等作用外, 还受到新建高速公路路基带来的桥墩基础上覆填土荷载和高速公路行车荷载的综合作用, 对不均匀土压力作用下桥墩倾覆稳定性进行分析, 对可能出现的不利情况进行预判。

**关键词:** 桥梁; 铁路桥; 桥墩; 高速公路下穿; 基底承载力

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)01-0095-07

如今新建高速公路与已建桥梁、铁路交叉的情形越来越多<sup>[1-3]</sup>, 一般情况下采用拟建公路上跨或下穿已建桥梁、铁路的方案。在下穿方案中, 须考虑高速公路及荷载对既有建筑的影响<sup>[4-6]</sup>。对于既有铁路桥, 桥墩承载力是桥梁稳定的关键, 有必要对高速公路下穿既有铁路桥桥墩基底承载力进行验算, 并提出安全控制措施<sup>[7-8]</sup>。学者们对高速公路下穿既有铁路桥桥墩基底承载力进行了一些研究, 如陈卜通过分析改建工程对临近高速铁路桥梁桩基的影响, 提出道路改建工程设计方案, 并依据该下穿方案对铁路受公路拓宽改建施工影响的桥墩桩基进行了验算<sup>[9]</sup>; 张博结合案例工程的施工特点, 对跨既有高速公路系杆拱桥的关键施工技术进行了研究<sup>[10]</sup>。但每个工程有其特点, 现有研究成果不具有普适性<sup>[11]</sup>。本文以某高速公路下穿铁路桥为例, 对既有铁路桥桥墩基底承载力进行验算。

## 1 工程背景

某高速公路 K181+270 同田垄高架桥位于湖南怀化市同田垄, 怀化侧台尾后面路基段下穿渝怀(重庆—怀化)铁路, 高速公路与渝怀铁路交叉角度为 86°, 交叉点处桩号为公 K181+308.06(铁 K610+816.36), 下穿处渝怀铁路位于半径  $R=1\ 200\text{ m}$  的缓和曲线上。

公路从既有铁路桥第二孔和第三孔之间下穿, 铁路桥 2# 桥墩位于公路中央分隔带中。2# 桥墩除

承受来自上部铁路桥的行车荷载、风荷载等作用外, 还受到由新建高速公路路基带来的桥墩基础上覆填土荷载和高速公路行车荷载的作用, 相邻 3# 桥墩在不均匀土压力作用下出现倾覆稳定性问题。因此, 对 2# 桥墩基底承载力进行验算, 对 3# 桥墩进行基础倾覆稳定性验算, 对可能出现的不利情况进行预判。

## 2 2# 桥墩基底承载力验算

收集相关设计资料, 如尺寸、标高、水文地质情况等, 根据 TB 10002—2017《铁路桥涵设计规范》, 采用静力计算方法计算不利荷载组合作用下 2# 桥墩基底承载力。

### 2.1 主力计算

#### 2.1.1 恒载

(1) 梁及桥上线路上部建筑、双侧人行道荷载为:

$$N'_1 = 2\ 212.22 + 32.73 \times 36.6 = 3\ 410.14\text{ kN}$$

$$N'_2 = 1\ 672.18 + 24.74 \times 36.6 = 2\ 577.66\text{ kN}$$

$$N_1 = \frac{N'_1 + N'_2}{2} =$$

$$\frac{3\ 410.14 + 2\ 577.66}{2} = 2\ 993.90\text{ kN}$$

式中: 32.73 为左边梁全长与接缝长度之和(m); 24.74 为右边梁全长与接缝长度之和(m)。

(2) 顶帽与墩身质量。顶帽荷载为:

$$N_2 = \frac{1}{2} \times 2.7 \times 6 \times 0.5 \times 25 + 2.7 \times 6 \times$$

$$0.5 \times 25 = 303.75\text{ kN}$$

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(51538009); 长沙科技局课题(SZ201525-ZX11)

托盘荷载为:

$$N_3 = \frac{1}{2} \times (5.6 + 3.2) \times 1.5 \times 23 = 151.80 \text{ kN}$$

墩身体积  $V$  为:

$$V = 2.3 \times 3.6h + \left( \frac{3.6}{59} + \frac{2.3}{42} \right) h^2 + \frac{4}{3 \times 59 \times 42} h^3 = 8.28h + 0.116h^2 + \frac{h^3}{1858.5}$$

式中:  $h$  为墩身高度(m)。

墩身质量  $N_4 = \gamma V = 23V \text{ kN}$  ( $\gamma$  为混凝土重度, 取  $23 \text{ kN/m}^3$ ), 计算结果见表 1。

表 1 墩身质量计算结果

墩身高 度 $h/\text{m}$	$8.28h/m$	$0.116h^2/m^2$	$h^3/m^3$	体积 $V/m^3$	质量/ kN
0.00	0.00	0.000	0.000 0	0.000 0	0.00
2.00	16.56	0.464	0.004 3	17.028 3	391.65
3.68	30.47	1.571	0.026 8	32.067 8	737.56
6.00	49.68	4.176	0.116 2	53.972 2	1 241.36
9.00	74.52	9.400	0.392 3	84.312 3	1 939.18
12.00	99.36	16.700	0.929 8	116.989 8	2 690.77
14.00	115.92	22.740	1.476 5	140.136 5	3 223.14

### 2.1.2 活载

离心力率  $C$  按下式计算:

$$C = \frac{V^2}{127R} = \frac{140^2}{127 \times 1200} = 0.128 6 < 0.15$$

(1) 单孔轻载时活载分布见图 1。静活载反力  $R_1$  见式(1); 静活载反力对桥墩中心的偏心弯矩  $M_{R1}$  见式(2); 离心力  $P_y$  见式(3); 作用点至墩身顶的力臂  $C_y$  见式(4)。

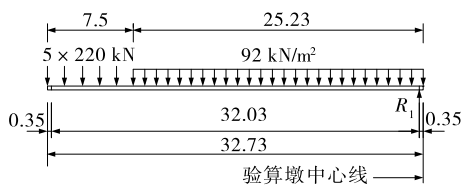


图 1 单孔轻载示意图(单位: m)

$$R_1 = \frac{1}{32.03} \times [5 \times 220 \times (3 - 0.35) + 92 \times 25.23 \times (32.73 - 0.35 - \frac{25.23}{2})] = 1523.34 \text{ kN}$$

$$M_{R1} = R_1 \times 0.35 = 1523.34 \times 0.35 = 533.17 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$P_y = R_1 C = 1523.34 \times 0.128 6 = 195.90 \text{ kN}$$

$$C_y = 2 + 0.15 + 3.1 + 2 = 7.25 \text{ m}$$

(2) 单孔重载时活载分布见图 2。静活载反力  $R_2$  见式(5); 静活载反力对桥墩中心的偏心弯矩  $M_{R2}$  见式(6); 离心力  $P_y$  见式(7); 作用点至墩身顶的力臂  $C_y$  见式(8)。

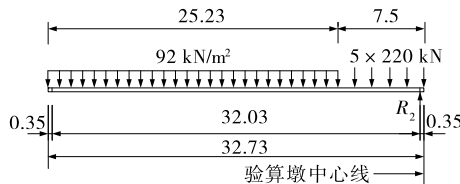


图 2 单孔重载示意图(单位: m)

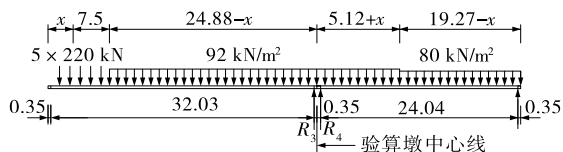
$$R_2 = \frac{1}{32.03} \times [5 \times 220 \times (32.73 - 0.35 - 3) + 92 \times 25.23 \times (\frac{25.23}{2} - 0.35)] = 1897.82 \text{ kN}$$

$$M_{R2} = R_2 \times 0.35 = 664.24 \text{ kN}$$

$$P_y = R_2 C = 1897.82 \times 0.128 6 = 244.06 \text{ kN}$$

$$C_y = 2 + 0.15 + 3.1 + 2 = 7.25 \text{ m}$$

(3) 双孔重载时荷载分布见图 3。2<sup>#</sup> 桥墩两侧为不等跨梁,  $G_1/32.38 = G_2/24.39$  ( $G_1$ 、 $G_2$  分别为桥墩两侧梁的质量), 其中  $G_1 = 5 \times 220 + 92 \times (24.88 - x)$ ,  $G_2 = 92 \times (5.12 + x) + 80 \times (19.27 - x)$ ,  $24.39 \times [5 \times 220 + 92 \times (24.88 - x)] = 32.38 \times [92 \times (5.12 + x) + 80 \times (19.27 - x)]$ , 得  $x = 6.64 \text{ m}$ 。静活载反力  $R_3$ 、 $R_4$  见式(9)~(11); 静活载反力对桥墩中心的偏心弯矩  $M_R$  见式(12); 离心力  $P_y$  见式(13); 作用点至墩身顶的力臂  $C_y$  见式(14)。



$x$  为最大弯矩时的力臂

图 3 双孔重载示意图(单位: m)

$$R_3 = \frac{1}{32.03} \times [5 \times 220 \times (6.64 + 3) + 92 \times 18.24 \times (32.38 - \frac{18.24}{2})] = 1549.68 \text{ kN}$$

$$R_4 = \frac{1}{24.04} \times [80 \times 12.63 \times \frac{12.63}{2} + 92 \times 11.76 \times (24.39 - \frac{11.76}{2})] = 1\,098.46 \text{ kN} \quad (10)$$

$$R_3 + R_4 = 1\,549.68 + 1\,098.46 = 2\,648.14 \text{ kN} \quad (11)$$

$$M_R = (R_3 - R_4) \times 0.35 = (1\,549.68 - 1\,098.46) \times 0.35 = 157.93 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (12)$$

$$P_y = (R_3 + R_4)C = (1\,549.68 + 1\,098.46) \times 0.128\,6 = 340.55 \text{ kN} \quad (13)$$

$$C_y = 2 + 0.15 + 3.1 + 2 = 7.25 \text{ m} \quad (14)$$

(4) 双孔空载时活载分布见图4。静活载反力  $R_5$ 、 $R_6$  见式(15)~(17);静活载反力对桥墩中心的偏心弯矩  $M_R$  见式(18);离心力  $P_y$  见式(19);作用点至墩身顶的力臂  $C_y$  见式(20)。

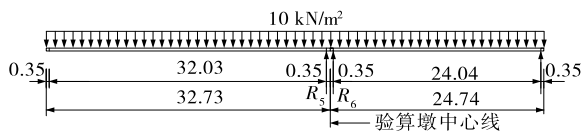


图4 双孔空载示意图(单位:m)

$$R_5 = \frac{1}{32.03} \times [10 \times 32.73 \times (\frac{32.73}{2} - 0.35)] = 163.65 \text{ kN} \quad (15)$$

$$R_6 = \frac{1}{24.04} \times [10 \times 24.74 \times (\frac{24.74}{2} - 0.35)] = 123.70 \text{ kN} \quad (16)$$

$$R_5 + R_6 = 163.65 + 123.70 = 287.35 \text{ kN} \quad (17)$$

$$M_R = (R_5 - R_6) \times 0.35 = (163.65 - 123.7) \times 0.35 = 13.98 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (18)$$

$$P_y = (R_5 + R_6)C = (163.65 + 123.7) \times 0.128\,6 = 36.95 \text{ kN} \quad (19)$$

$$C_y = 2 + 0.15 + 3.1 + 2 = 7.25 \text{ m} \quad (20)$$

## 2.2 附加力计算

### 2.2.1 制动力或牵引力

单孔轻载时列车制动力  $P_x$  见式(21),制动力作用点至墩身顶的高度即支座中心至墩身顶高度  $c$  见式(22);单孔重载时列车制动力  $P_x$  见式(23),  $c = 0.32 + 2 = 2.32 \text{ m}$ ;双孔重载时列车制动力  $P_x$  包括通过固定支座传递的制动力和通过滑动支座传递的制动力,通过固定支座传递的制动力  $= 0.1 \times (5 \times 220 + 82 \times 18.24) = 259.57 \text{ kN}$ ,通过滑动支座传递的制动力  $= 0.1 \times (5 \times 220 + 82 \times 11.76) \times 0.5 =$

$103.22 \text{ kN}$ ,两项之和为  $259.57 + 103.22 = 362.79 > 342.12 \text{ kN}$ ,双孔重载时制动力采用  $342.12 \text{ kN}$ ;双孔空载时制动力  $P_x$  包括通过固定支座传递的制动力和通过滑动支座传递的制动力,通过固定支座传递的制动力  $= 0.1 \times 10 \times 32.73 = 32.73 \text{ kN}$ ,通过滑动支座传递的制动力  $= 0.1 \times 10 \times 24.74 \times 0.5 = 12.37 \text{ kN}$ ,双孔空载时制动力  $P_x = 32.73 + 12.37 = 45.10 \text{ kN}$ 。

$$P_x = 0.1 \times (5 \times 220 + 92 \times 25.23) = 342.12 \text{ kN} \quad (21)$$

$$c = 0.32 + 2 = 2.32 \text{ m} \quad (22)$$

$$P_x = 0.1 \times (5 \times 220 + 92 \times 25.23) = 342.12 \text{ kN} \quad (23)$$

### 2.2.2 风力

风荷载强度,有车时为  $0.8 \text{ kN/m}^3$ ,无车时为  $1.0 \text{ kN/m}^3$ 。

(1) 列车风力。因  $x$  值不大,按两孔满布列车计算风力略偏大,按左孔计算。已知列车高  $3 \text{ m}$ ,列车风力  $P_{y1}$  见式(24),列车风力作用点至墩身顶的力臂  $C_{y1}$  见式(25)。

$$P_{y1} = 3 \times 32.73 \times W = 3 \times 32.73 \times 0.8 = 78.55 \text{ kN} \quad (24)$$

式中:  $W$  为墩的厚度(m)。

$$C_{y1} = 2 + 0.15 + 3.1 + 2 = 7.25 \text{ m} \quad (25)$$

(2) 梁上风力。有车时梁上风力  $P_{y2}$  见式(26),无车时梁上风力  $P'_{y2}$  见式(27),梁上风力作用点至墩身顶的力臂  $C_{y2}$  见式(28)。

$$P_{y2} = (2.7 + 0.15) \times 32.73 \times 0.8 = 74.62 \text{ kN} \quad (26)$$

$$P'_{y2} = (2.7 + 0.15) \times 32.73 \times 1.0 = 93.28 \text{ kN} \quad (27)$$

$$C_{y2} = \frac{1}{2} \times 2.85 + 0.4 + 2 = 3.83 \text{ m} \quad (28)$$

(3) 顶帽风力。顶帽纵向风力  $P_{x1}$  见式(29),风力作用点至托盘底截面的力臂  $C_{x1}$  见式(30);有车时顶帽横向风力  $P_{y3}$  见式(31),无车时顶帽横向风力  $P'_{y3}$  见式(32)。

$$P_{x1} = 6 \times 0.5 \times 0.8 = 2.40 \text{ kN} \quad (29)$$

$$C_{x1} = \frac{1}{2} \times 0.5 + 1.5 = 1.75 \text{ m} \quad (30)$$

$$P_{y3} = 2.7 \times 0.5 \times 0.8 = 1.1 \text{ kN} \quad (31)$$

$$P'_{y3} = 2.7 \times 0.5 \times 1.0 = 1.4 \text{ kN} \quad (32)$$

(4) 托盘风力。托盘纵向风力  $P_{x2}$  见式(33),风力作用点至托盘底截面的力臂  $C_{x2}$  见式(34);有

风时托盘横向风力  $P_{y4}$  见式(35), 无车时托盘横向风力  $P'_{y4}$  见式(36), 风力作用点至托盘底截面的力臂  $C_{y4}$  见式(37)。

$$P_{x2} = \frac{1}{2} \times (5.6 + 3.2) \times 1.5 \times 0.8 = 5.28 \text{ kN} \quad (33)$$

$$C_{x2} = \frac{1.5}{3} \times \frac{2 \times 5.6 + 3.2}{5.6 + 3.2} = 0.82 \text{ m} \quad (34)$$

$$P_{y4} = 2.3 \times 1.5 \times 0.8 = 2.8 \text{ kN} \quad (35)$$

$$P'_{y4} = 2.3 \times 1.5 \times 1.0 = 3.5 \text{ kN} \quad (36)$$

$$C_{y4} = \frac{1}{2} \times 1.5 = 0.75 \text{ m} \quad (37)$$

(5) 墩身风力。墩身纵向风力  $P_{x5}$  见式(38), 风力作用点至验算截面的距离  $c$  见式(39), 验算截面的墩身风力弯矩  $M_y$  见式(40); 墩身横向风力  $P_{y5}$  见式(41), 风力作用点至验算截面的距离  $c$  见式(42), 验算截面的墩身弯矩  $M_x$  见式(43)。墩身风力计算结果见表 2、表 3。

$$P_{x5} = \frac{1}{2} \times (3.6 + d) h W \quad (38)$$

式中:  $d = 3.6 + 0.047 \ 6h$ 。

$$c = \frac{h}{3} \times \frac{7.2 + d}{3.6 + d} \quad (39)$$

$$M_y = P_{x5} c = \frac{1}{6} \times (7.2 + d) h^2 W \quad (40)$$

$$P_{y5} = \frac{1}{2} \times (2.3 + b) b W \quad (41)$$

式中:  $b$  为墩的宽度(m),  $b = 2.3 + 2 \times h/59 = 2.3 + 0.033 \ 9h$ 。

$$c = \frac{h}{3} \times \frac{4.6 + b}{2.3 + b} \quad (42)$$

$$M_x = P_{y5} c = \frac{1}{6} \times (4.6 + b) h^2 W \quad (43)$$

表 2 墩身纵向风力计算结果

墩高 $H/\text{m}$	墩身高 $h/\text{m}$	$d/\text{m}$	$P_{x5}/\text{kN}$	$7.2+d/\text{m}$	$M_y/(\text{kN} \cdot \text{m})$
4.00	2.00	3.695 2	5.84	10.895 2	5.81
5.68	3.68	3.775 2	10.86	10.975 2	19.82
8.00	6.00	3.885 6	17.97	11.085 6	53.21
11.00	9.00	4.028 4	27.46	11.228 4	121.27
14.00	12.00	4.171 2	37.30	11.371 2	218.33
16.00	14.00	4.266 4	44.05	11.466 4	299.66

表 3 墩身横向风力计算结果

墩高 $H/\text{m}$	墩身高 $h/\text{m}$	$b/\text{m}$	$P_{y5}/\text{kN}$		$4.6+b/\text{m}$	$M_x/(\text{kN} \cdot \text{m})$	
			有车	无车		有车	无车
4.00	2.00	2.367 8	4.42	5.53	6.967 8	3.72	4.65
5.68	3.68	2.424 8	4.58	5.73	7.024 8	12.68	15.86
8.00	6.00	2.503 4	4.81	6.01	7.103 4	34.10	42.62
11.00	9.00	2.605 1	5.11	6.39	7.205 1	77.82	97.27
14.00	12.00	2.706 8	5.42	6.78	7.306 8	140.29	175.36
16.00	14.00	2.774 6	5.63	7.04	7.374 6	192.72	240.90

### 2.2.3 列车横向摇摆力

单孔轻载时列车横向摇摆力  $P_y$  见式(44), 单孔重载时列车横向摇摆力  $P_y$  见式(45), 双孔重载时列车横向摇摆力  $P_y$  见式(46)。不考虑双孔空载情况。根据验算结果, 列车横向摇摆力均小于离心力与风力之和, 故不考虑列车横向摇摆力。

$$P_y = 32.73 \times 5.5 \times \frac{1}{2} = 90 \text{ kN} < 195.90 + 78.55 = 274.45 \text{ kN} \quad (44)$$

$$P_y = 32.73 \times 5.5 \times \frac{1}{2} = 90 \text{ kN} < 244.06 + 78.55 = 322.61 \text{ kN} \quad (45)$$

$$P_y = \frac{1}{2} \times (32.73 \times 5.5 + 24.74 \times 5.5) = 158.04 \text{ kN} < 78.55 + 3 \times 24.74 \times 0.8 + 340.55 = 478.48 \text{ kN} \quad (46)$$

### 2.2.4 流水压力

桥位区水文地质条件较简单, 地表水及地下水均不太发育, 不考虑流水压力。

### 2.2.5 基础上部高速公路路基填土压力

填土平均高度为 7.227 m, 填土黏聚力  $c = 10 \text{ kPa}$ , 内摩擦角  $\varphi = 10^\circ$ , 重度  $\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$ 。取填土影响范围为基础两端以上  $45^\circ + \varphi/2$  延伸线内的填土体积质量(见图 5)进行验算。桥墩中心线

左边填土体积(包含桥墩部分) $V_{左}$ 见式(47),桥墩中心线右边填土体积(包含桥墩部分) $V_{右}$ 见式(48),总填土体积 $V_{总}$ 见式(49)。

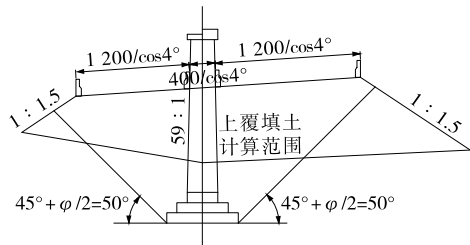


图 5 上覆填土计算范围示意图

$$V_{左} = [14.79 \times 14.34 - \frac{1}{2} \times 11.57 \times 13.79 - \frac{1}{2} \times 0.82 \times 0.55 - \frac{1}{2} \times 14 \times \tan 4^\circ \times 14] \times 8.67 = 125.24 \times 8.67 = 1\,085.79 \text{ m}^3 \quad (47)$$

$$V_{右} = [14 \tan 4^\circ \times 14 + (14 \tan 4^\circ + 16.14) \times$$

$$1.45 + (3.22 + 16.14) \times 10.94] \times \frac{1}{2} \times$$

$$8.67 = 125.16 \times 8.67 = 1\,085.14 \text{ m}^3 \quad (48)$$

$$V_{总} = V_{左} + V_{右} = 1\,085.79 + 1\,085.14 = 2\,170.93 \text{ m}^3 \quad (49)$$

由表 1 可知  $V_{桥墩} = 140.136\,5 - 32.067\,8 = 108.07 \text{ m}^3$ ,  $V_{基础} = 6.44 \times 8.67 \times 1.0 + 4.44 \times 6.67 \times 1.0 + 3.21 \times 6.67 \times 1.0 = 100.44 \text{ m}^3$ , 计算得  $V_{填土} = V_{总} - V_{桥墩} - V_{基础} = 2\,170.93 - 108.07 - 100.44 = 1\,962.42 \text{ m}^3$ 。根据设计资料,原桥墩明挖基础的上覆填土分为 3 层,从表层到基底分别为砂黏土、砂岩夹泥岩、砂岩夹泥岩,土层参数见表 4。根据不同地层情况,基础上覆填土质量计算中, $\gamma$  取基础上部各土层的加权重度  $\gamma_{加权}$  [见式(50)]。填土质量  $N_{填土}$  见式(51),方向为竖直向下,以集中力形式作用于基础。

表 4 明挖基础土层参数

土层名称	土层厚度/m	天然重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	摩擦角 $\varphi/(\circ)$	基本承载力 $\sigma_0/\text{kPa}$	摩擦系数 $f/$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ )	地基系数 $C_0$
砂黏土	1.50	19.2	17	150	3.0	8 000
砂岩夹泥岩	3.89	17.8	26	350	3.5	10 000
砂岩夹泥岩	1.00	20.0	33	500	4.0	15 000

$$\gamma_{加权} = \frac{18.5 \times 7.227 + (19.2 - 10) \times 1.5 + (17.8 - 10) \times 3.89 + (20 - 10) \times 1.2}{7.227 + 1.5 + 3.89 + 1.0} = 13.94 \text{ kN/m}^3 \quad (50)$$

$$N_{填土} = V_{填土} \gamma_{加权} = 1\,962.42 \times 13.94 = 27\,356.13 \text{ kN} \quad (51)$$

### 2.2.6 高速公路行车荷载计算

根据《公路沥青路面设计规范》,标准轴载 BZZ-100 的轮载  $P = 100/4 \text{ kN}$ ,单个轮胎所受压强  $p = 700 \text{ kPa}$ ,车轮荷载计算图示为双圆。将车轮荷载简化为当量圆形均布荷载,并采用轮胎内压力作为轮胎接触压力  $P$ 。对于双轮组车轴,双圆荷载的当量直径  $d = \sqrt{4P/(\pi p)} = 0.213 \text{ m}$ 。将其转换为等效车道均布荷载,根据荷载等效转换原则(见图 6),车道均布荷载  $q$  按式(52)计算,线性分布均布荷载对基础的垂直压力  $\sigma_z$  按式(53)计算。由式(53)可得垂直压力的分布近似呈抛物线(见图 7)。为方便计算,将其简化为图 8 所示梯形线性分布形式,求得高速公路行车荷载传递给地基的等效集中力  $P_q$  为  $321.61 \text{ kN}$  [见式(54)]。

$$q = \frac{1/4 \times \pi \times 0.213^2 \times 700 \times 2 \times 2 \times 2}{(12/\cos 4^\circ) \times 2 \times 1}$$

$$8.3 \text{ kN/m}^2 \quad (52)$$

$$\sigma_z = \frac{2q}{\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos^2 \theta d\theta = \frac{q}{\pi} [\sin(\theta_2 - \theta_1) \cdot \cos(\theta_2 + \theta_1) + (\theta_2 - \theta_1)] \quad (53)$$

式中: $\theta_1, \theta_2$  为过  $N$  点的垂线与  $N$  点至荷载两侧点连线的夹角。

$$P_q = \frac{1/2(5.65 + 5.86) \times 3.22 \times 2}{6.44} \times 6.44 \times 8.67 = 321.61 \text{ kN} \quad (54)$$

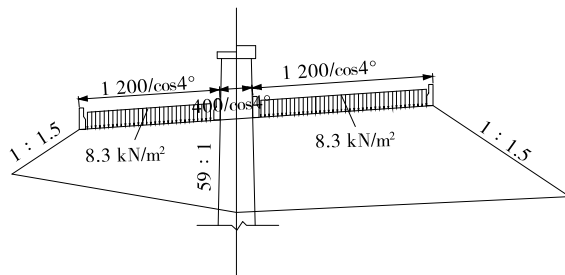


图 6 高速公路行车荷载等效均布荷载示意图

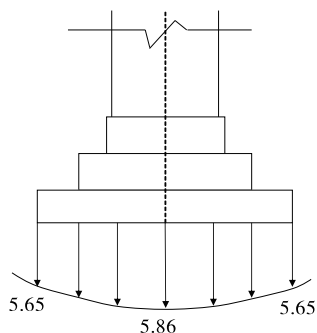


图7 高速公路行车荷载引起的基底压力(单位:kN/m²)

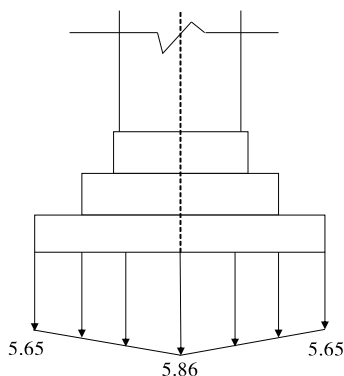


图8 高速公路行车荷载的等效梯形分布荷载(单位:kN/m²)

### 3 3# 桥墩基础倾覆稳定性验算

如图9所示,桥墩左边承受 90.27 kN/m² 的均布荷载,由两部分组成,分别为高速公路行车荷载传递下来的均布荷载 1.15 kN/m²、基础左端以上  $45^\circ + \varphi/2$  延伸线内的填土体积质量传递下来的均布荷载 89.12 kN/m²。 $\gamma_1 = 13.8 \text{ kN/m}^3$ ,  $\gamma_2 =$

$$K_0 = \frac{\text{稳定力矩}}{\text{倾覆力矩}} = \frac{2\,468.14 \times 2.94}{2\,468.14 \times 0.35 + 1/3 \times 8.68 \times 1/2 \times (58.7 - 7.17) \times 8.68 + 23.23 \times 8.68 \times 8.68/2} = 2.96 > 1.5$$

3# 桥墩的基础满足倾覆稳定性要求。

### 4 计算结果检验

根据竣工资料,2# 桥墩采用 3 层扩大基础,基础位于砂岩夹泥岩中,基底处地基初始承载力  $\sigma_0 = 500 \text{ kPa}$ ,地下水较丰富。地基宽度  $b$  超过 2 m、基础底面的埋置深度  $h$  超过 3 m、 $h/b \leq 4$  时,地基的容许承载力  $[\sigma]$  须考虑宽、高修正,按下式计算:

$$[\sigma] = \sigma_0 + k_1 \gamma_1 (b - 2) + k_2 \gamma_2 (h - 3) = 500 + 4 \times 10 \times (6.44 - 2) + 10 \times 8.47 \times (6.39 - 3) = 964.73 \text{ kN/m}^2$$

$8.47 \text{ kN/m}^3$ ,  $\varphi = 20^\circ$ ,  $c = 15 \text{ kPa}$ 。

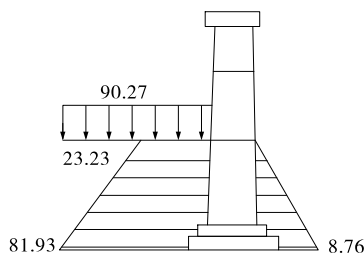


图9 3# 桥墩土压力作用示意图(单位:kN/m²)

左边填土表面处的主动土压力  $P_a$  为:

$$P_a = (\gamma_1 z + q) \times \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \times \tan \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = (90.27 + 13.8 \times 0) \times \tan^2 35^\circ - 2 \times 15 \times \tan 35^\circ = 23.23 \text{ kN/m}^3$$

式中:  $z$  为土层厚度(m)。

左边基底处土压力  $P_{a1}$  为:

$$P_{a1} = (\gamma_1 z + q) \times \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \times \tan \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = (90.27 + 13.8 \times 8.68) \times \tan^2 35^\circ - 2 \times 15 \times \tan 35^\circ = 81.93 \text{ kN/m}^3$$

右边基底处土压力  $P_{a0}$  为:

$$P_{a0} = (\gamma_1 z + q) \times \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \times \tan \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = (0 + 8.47 \times 7.17) \times \tan^2 35^\circ - 2 \times 15 \times \tan 35^\circ = 8.76 \text{ kN/m}^3$$

倾覆稳定系数  $K_0$  为:

式中:  $k_1 = 4$ ;  $k_2 = 10$ ;  $\gamma_1 = 10 \text{ kN/m}^3$ ;  $\gamma_2$  取  $\gamma'_2$  (有效重度),  $\gamma'_2 = 8.47 \text{ kN/m}^3$ 。

$$[\sigma]_{\text{主力+附加力}} = 1.2[\sigma] = 1\,157.68 \text{ kN/m}^2$$

考虑最不利荷载组合即双孔重载(主力+纵向附加力)和双孔重载(主力+横向附加力)两种情况,求得主力+纵向附加力下最大应力  $\sigma_{\max} = 766.75 \text{ kPa/m}^2$ 、最小应力  $\sigma_{\min} = 638.63 \text{ kPa/m}^2$ ,主力+横向附加力下  $\sigma_{\max} = 754.53 \text{ kPa/m}^2$ 、 $\sigma_{\min} = 650.69 \text{ kPa/m}^2$ ,最大、最小应力均小于 2# 桥墩的容许地基承载力  $[\sigma] = 964.73 \text{ kPa/m}^2$  和  $[\sigma]_{\text{主力+附加力}} = 1\,157.68 \text{ kPa/m}^2$ ,2# 桥墩的基底承载力满足要求。

3<sup>#</sup>桥墩基础的倾覆稳定系数  $K_0 = 2.96$ , 远大于 1.5, 倾覆稳定性满足要求。

## 5 结论

本文对既有铁路桥梁 2<sup>#</sup>桥墩基础可能面临的基底承载力不足及 3<sup>#</sup>桥墩基础面对不均匀土压力可能出现倾覆的问题进行理论计算, 结论如下: 2<sup>#</sup>桥墩的最大、最小应力皆小于容许地基承载力, 满足基底承载力要求; 3<sup>#</sup>桥墩基础的倾覆稳定系数远大于 1.5, 满足基础倾覆稳定性要求。该高速公路下穿既有铁路桥可行。

## 参考文献:

- [1] 冯忠居, 何静斌, 董芸秀, 等. 刚性长短桩软基预处理对堆载邻近桩基的变位影响分析及处理效果评价[J]. 公路交通科技, 2019, 36(8): 67-77.
  - [2] 中铁三局集团有限公司. 铁路混凝土与砌体工程施工规范: TB 10210—2001[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
  - [3] 苏雷, 唐亮, 凌贤长, 等. 液化侧扩流场地桩基动力反应振动台试验数值模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(2): 227-235.
  - [4] 中交第二公路勘察设计研究院. 公路路基设计规范: JTG D30—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
  - [5] 许四法, 陈浩, 刘继状, 等. 超大直径单桩埋深对桩身变形的影响研究[J]. 浙江工业大学学报, 2019, 47(2): 129-134.
  - [6] 汤庭杰. 典型强风化边坡开挖稳定性分析与加固方案设计[J]. 公路工程, 2010, 35(6): 70-72+98.
  - [7] 刘超, 臧延伟, 甘鹏路, 等. 电力盾构隧道近接侧穿施工时立交桥桩基的变形特征分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(增刊 2): 679-687.
  - [8] 朱莉. 具有软弱夹层的边坡场地中桩的地震响应分析[J]. 公路工程, 2010, 35(5): 148-150.
  - [9] 陈卜. 基于下穿既有铁路线的公路拓宽改建施工影响分析[J]. 交通世界, 2022(36): 80-84.
  - [10] 张博. 跨既有高速公路下承式铁路系杆拱桥施工关键技术研究[J]. 工程与建设, 2022, 36(5): 1491-1494.
  - [11] 刘建华, 赵明华, 段少华. 条形桩基承台梁随机优化分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2005, 32(6): 15-19.
- \*\*\*\*\*
- (上接第 90 页)
- (2) 相同掺量时, 与掺加 P.C 42.5 水泥相比, 掺加 P.O 42.5 水泥的乳化沥青冷再生混合料的抗弯拉强度较大、最大弯拉应变和弯曲应变能密度较小。掺加水对乳化沥青冷再生混合料的柔性不利, 可能导致乳化沥青冷再生混合料在低温下开裂, 建议在低温地区严格控制乳化沥青冷再生混合料中的水泥掺量。
- (3) 水泥掺量小于 1.5% 时, 乳化沥青冷再生混合料的浸水飞散损失随水泥掺量的增加显著下降, 但随水泥掺量增加, 乳化沥青冷再生混合料的黏附性对水泥掺量的增加不再敏感。冻融劈裂强度随着水泥掺量的增加而增大。
- (4) 应综合考虑路用性能需求确定乳化沥青冷再生混合料中水泥掺量, 在满足高温性能、早期强度、黏附性和水稳定性等路用性能要求的前提下, 可采用较低的水泥掺量, 水泥掺量不宜大于 1.5%, 使乳化沥青冷再生混合料具有更优越的抗裂性能。
- \*\*\*\*\*
- ## 参考文献:
- [1] 梅朝阳, 吴超凡, 梁勇. 厂拌冷再生沥青混合料生产工艺与质量控制[J]. 公路工程, 2017, 42(5): 256-261.
  - [2] 胡时永. 乳化沥青冷再生技术在沥青面层维修中的应用[J]. 淮北职业技术学院学报, 2010, 9(1): 12-13.
  - [3] 钟梦武, 吴超凡, 于永生, 等. 掺加水泥的乳化沥青冷再生沥青混合料设计方法研究[J]. 公路, 2008, 53(1): 195-199.
  - [4] 李昊隆. 乳化沥青冷再生混合料早期强度发展规律研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
  - [5] 王杰, 秦永春, 徐剑, 等. 水泥乳化沥青-旧沥青界面微尺度力学性质原位表征[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(2): 288-298.
  - [6] TIAN Y G, LU D, MA R H, et al. Effects of cement contents on the performance of cement asphalt emulsion mixtures with rapidly developed early-age strength[J]. Construction and Building Materials, 2020, 244: 118365.
  - [7] YANG Y H, YANG Y, QIAN B T. Performance and microstructure of cold recycled mixes using asphalt emulsion with different contents of cement[J]. Materials, 2019, 12(16): 2548.
  - [8] 孙岩松. 水泥掺量对乳化沥青冷再生混合料性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(4): 45-48.
  - [9] 郑俊秋. 乳化沥青冷再生混合料性能提升研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- \*\*\*\*\*

收稿日期: 2023-01-20

收稿日期: 2022-12-16