

钢栈桥结构安全计算与分析

陈笑男

中交第一航务工程局有限公司 天津 300000

摘要: 某公路项目, 为了便于项目施工和车辆通行, 在水上修筑一座钢栈桥。该栈桥使用钢管桩、工字钢、槽钢、贝雷片等材料进行修筑。本文综合考虑动荷载、静荷载、风荷载、水流横向推力等, 对钢栈桥结构安全进行分析和计算, 并得出结论, 为设计和使用提供依据。

关键词: 钢栈桥; 荷载; 强度; 刚度

1 结构设计与荷载

1.1 结构设计简介

(1) 技术标准: 钢栈桥长 120m, 宽 8m; 设计使用寿命 3 年, 应注意钢管桩冲刷部位防腐; 设计车速: 20km/h; 施工控制荷载: 50t (12m³) 混凝土罐车满载会车。(2) 钢栈桥结构形式: 主栈桥设计宽度 8m, 双向车道, 车道宽度 4 米。基础为扩大基础, 每排采用三根直径 0.63m 壁厚 10mm 的钢管桩, 桩间距 3.3m, 桩的横向用槽钢 [20 作水平支撑和斜向支撑, 栈桥跨径最大为 12 米, 桩顶上部采用双拼 I36a 型工字钢, 纵梁 8 榀 321 贝雷片, 采用 2 排单层贝雷梁作为主梁共 4 组, 每组之间用支撑架进行交叉斜撑。贝雷梁上铺层结构为 I22b 分配横梁, 每 75cm 架设一道; I12a 作为分配纵梁, 每 20cm 架设一道; 6mm 厚的钢板作为桥面板。在桥面两侧, 设置内外两道钢管护栏。(3) 栈桥主梁: 栈桥采用多跨连续梁方案, 主梁结构由四组贝雷桁架组成, 沿栈桥断面方向间距 1300mm 布置四组贝雷桁架, 分别为 2 排单层+2 排单层+2 排单层+2 排单层贝雷梁。贝雷桁架结构型式如图 1-3 所示。(4) 桩顶分配梁: 贝雷梁支承在 2I 36a 工字钢分配梁上, 为保证分配梁横向稳定性, 分配梁与桩顶结构施作焊缝。(5) 桩间连接系: 为保证栈桥整体稳定性, 在每排钢管桩之间设置横向连接系, 连接采用槽钢 [20 作为水平支撑和斜向支撑。(6) 钢管桩: 主栈桥采用 $\Phi 630 \times 10$ mm 钢管桩, 排架间距为 12m, 沿栈桥横断面方向布置三根桩, 桩间距 3.3m。

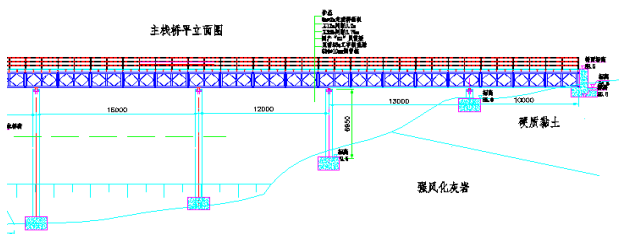


图1-1 主栈桥纵断面图

1.2 结构荷载

(1) 恒载: 恒载主要为结构自重。(2) 活载: 混凝土搅拌车荷载、人群及施工荷载。(3) 风荷载和水流横向力在后续计算中描述。

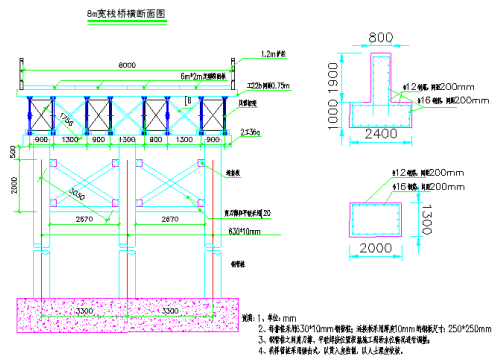


图1-2 主栈桥横断面图

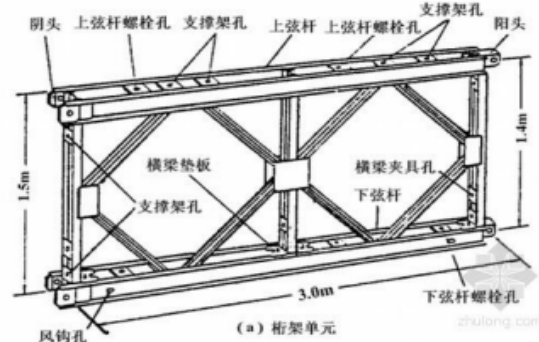


图1-3 贝雷桁架示意图

2 荷载计算

2.1 $\Delta 6$ mm 厚钢板 (取顺桥向 1m)

(1) 恒载: $q = 78.5 \times 10 / 1000 = 0.471 \text{ kN/m}$ 。(2) 活载: 50t 砼罐车。混凝土运输车取 50t, 车轮轴距为 4.0m、1.5m, 轮距为 2.5m, 车轮尺寸 0.3m \times 0.2m, 一个罐车 10 个车轮每个所分担的力为 50kN。则荷载大小 $q_{\text{活}} = \frac{50}{0.3} = 166.67 \text{ kN/m}$ 。施工及人群荷载。施工及人群荷载: 3.0 kN/m^2 , 则线荷载大小为 $q_{\text{活}} = 3 \text{ kN/m}$ 。选择荷载组合为, 恒载+50t 罐车+施工及人群荷载。(3) 强度检验。根据《建筑施工计算手册》(第二版)¹, 将各项数据代入公式, 求得弯矩和剪力为

$$M = 1.2 \times \frac{1}{8} \times 0.785 \times 0.2^2 + 1.4 \times \frac{1}{8} \times (166.67 + 3) \times 0.2^2 = 1.19 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Q = 1.2 \times \frac{1}{2} \times 0.785 \times 0.2 + 1.4 \times \frac{1}{2} \times (166.67 + 3) \times 0.2 = 23.85 \text{ kN}$$

钢板截面特性为

$I = \frac{1}{12} \times 0.01^3 \times 1 = 8.3 \times 10^{-8} \text{m}^4, S = 0.005 \times 1 \times 0.0025 = 1.25 \times 10^{-5}, y = 0.005 \text{m}, b = 1 \text{m}$
应力大小为

$$\sigma = \frac{My}{I} = \frac{1.19 \times 0.005 \times 10^{-3}}{8.3 \times 10^{-8}} = 71.7 \text{MPa} < [\sigma] = 215 \text{MPa}$$

$$\tau = \frac{QS}{Ib} = \frac{23.85 \times 10^3 \times 1.25 \times 10^{-5} \times 10^6}{8.3 \times 10^{-8} \times 1} = 3.59 \text{MPa} < [\tau] = 125 \text{MPa}$$

(4) 刚度检验

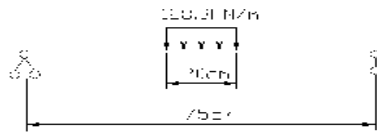
$$f = \frac{5ql^4}{384EI} = \frac{5 \times (0.785 + 166.67 + 3) \times 200^4}{384 \times 2.06 \times 10^5 \times 8.3 \times 10^4} = 0.23 \text{mm} < \frac{200}{250} = 0.8 \text{mm}$$

钢板的强度和刚度满足要求。

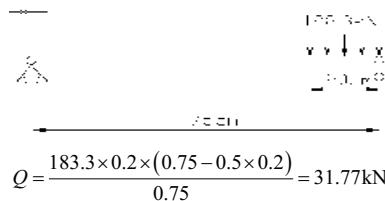
2.2 I12a分配梁

(1) 恒载。钢板 $q_1 = 78.5 \times 0.01 \times 8 = 6.28 \text{kN/m}$, I12a分配梁 $q_2 = 0.14 \text{kN/m}$, 总恒载集度 $q = 6.28 + 0.14 = 6.42 \text{kN/m}$ 。则内力大小 $M_{\text{恒}} = \frac{1}{8} \times 6.42 \times 0.75^2 = 0.45 \text{kN} \cdot \text{m}$ $Q_{\text{恒}} = \frac{1}{2} \times 6.42 \times 0.75 = 2.41 \text{kN}$ 。

(2) 活载: ①50kN 砼车。车梁后轮并排着地面面积 $0.60 \text{m} \times 0.20 \text{m}$, I12分配梁间距为 20cm , 则一个车轮的荷载由三根I12分配梁承担, 跨度为 0.75m , 考虑桥上会车, 计入冲击系数 1.1 后, 均布线荷载大小为 $100 \div 0.2 \div 3 \times 1.1 = 183.3 \text{kN/m}$ 。荷载布置在跨中, 弯矩最大, 计算图示如图。



节点反力 $F = \frac{183.3 \times 0.2}{2} = 18.33 \text{kN}$ $M = 18.33 \times \frac{0.75}{2} = 6.78 \text{kN} \cdot \text{m}$
荷载布置在支座附近, 剪力最大。



②人群及施工荷载。施工及人群荷载: 3.0kN/m^2 , 则线荷载大小为 $q_{\text{活}} = 3 \times 8 = 24 \text{kN/m}$, $M = \frac{1}{8} \times 24 \times 0.75^2 = 1.69 \text{kN} \cdot \text{m}$, $Q = \frac{1}{2} \times 24 \times 0.75 = 9 \text{kN}$ 荷载组合, 恒载+50t罐车会车+施工及人群荷载。

(3) 强度检验。将各项数据代入公式, 求得弯矩和剪力为 $M = 1.2 \times 0.45 + 1.4 \times (6.78 + 1.69) = 12.4 \text{kN} \cdot \text{m}$, $Q = 1.2 \times 2.41 + 1.4 \times (31.77 + 9) = 59.97 \text{kN}$ 。钢板截面特性为 $I = 488 \text{cm}^4, I/S = 10.848 \text{cm}, W = 77.5 \text{cm}^3, b = 0.005 \text{m}$ 应力大小为 $\sigma = \frac{M}{W} = \frac{12.4 \times 10^3}{77.5 \times 10^{-6}} = 160 \text{MPa} < [\sigma] = 215 \text{MPa}$,

$$\tau = \frac{QS}{Ib} = \frac{59.97 \times 10^3}{10.848 \times 10^{-2} \times 0.005} = 110.56 \text{MPa} < [\tau] = 125 \text{MPa}$$

(4) 刚度检验。均布荷载产生的挠度:

$$f = \frac{5ql^4}{384EI} = \frac{5 \times (6.42 + 24) \times 200^4}{384 \times 2.06 \times 10^5 \times 488 \times 10^4} = 0.063 \text{mm}$$

集中荷载产生

的挠度: $f = \frac{Pl^3}{48EI} = \frac{100 \times 750^3 \times 10^3}{48 \times 2.06 \times 10^5 \times 488 \times 10^4} = 0.87 \text{mm}$ 。总挠度:

$$f = f_1 + f_2 = 0.063 + 0.79 = 0.93 \text{mm} < \frac{750}{400} = 1.87 \text{mm}$$

挠度满足要求。

2.3 贝雷梁

(1) 恒载。钢板: $7.85 \times 15 \times 8 \times 0.01 \times 1000 = 9420 \text{kg}$; I12工字钢 $40 \times 14.23 \times 15 = 8538 \text{kg}$; I22b分配梁: $20 \times 36.4 \times 8 = 5824 \text{kg}$; 贝雷梁: $90 \times 15 \times 8 = 10800 \text{kg}$ 。线荷载为:

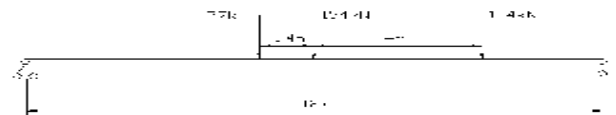
$$q = \frac{(7536 + 6830 + 4659.2 + 8640) \times 0.01}{15} = 23 \text{kN/m}$$

内力大小为

$$M = \frac{1}{8} \times 23 \times 15^2 = 646.9 \text{kN} \cdot \text{m}$$

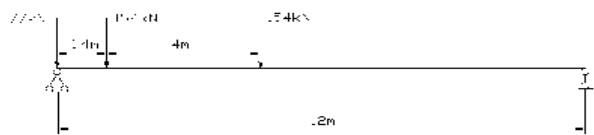
$$Q = \frac{1}{2} \times 23 \times 15 = 172.5 \text{kN}$$

(2) 活载。①500kN 砼运输车, 考虑两车会车。按下图布置时, 弯矩最大。



$$M_{\text{max}} = \frac{1}{4} \times 440 \times 15 + \frac{15}{2} \times \frac{7.5 - 1.4}{15} \times 440 + \frac{15}{2} \times \frac{7.5 - 4}{15} \times 220 = 3377 \text{kN} \cdot \text{m}$$

按下图布置, 剪力最大



$$Q_{\text{max}} = 220 + 220 \times \frac{15 - 1.4}{15} + 110 \times \frac{15 - 5.4}{15} = 489.9 \text{kN}$$

②施工及人群荷载。均布荷载 3.0kN/m , 荷载组合, 恒载+50t罐车会车+施工及人群荷载。③强度检验。内力大小:

$$M_{\text{max}} = 1.2 \times 646.9 + 1.4 \times (3377 + 3) = 5508.3 \text{kN} \cdot \text{m}$$

小: $Q_{\text{max}} = 1.2 \times 172.5 + 1.4 \times (489.9 + 3) = 897.1 \text{kN}$ 。对于321型贝雷梁, 一片梁能承受的最大弯矩为 $788.2 \text{kN} \cdot \text{m}$, 最大剪力为 245.2kN 。对于本栈桥, 一共8片贝雷梁, 总的弯矩承载力为 $788.2 \times 8 = 6305.6 \text{kN} \cdot \text{m} > 5508.3 \text{kN} \cdot \text{m}$, 弯矩承载力满足要求。总的剪力承载力为 $245.2 \times 8 = 1961.6 \text{kN} \cdot \text{m} > 897.1 \text{kN} \cdot \text{m}$, 剪力承载力满足要求。

④刚度检验。分三部分进行计算: 均布荷载产生的挠度:

$$f_1 = \frac{5ql^4}{384EI} = \frac{5 \times (19.12 + 18) \times 15000^4}{384 \times 2.06 \times 10^5 \times 7 \times 250500 \times 10^4} = 6.77 \text{mm}$$

。作用在跨中的集中荷载: 产生的挠度

$$f_2 = \frac{Pl^3}{48EI} = \frac{184 \times 12000^3 \times 10^3}{48 \times 2.06 \times 10^5 \times 7 \times 250500 \times 10^4} = 3.58 \text{mm}$$

。错孔挠度:

$$q = 3 \times 1.3 = 3.9 \text{kN/m}$$

$$f_{\text{错}} = \eta \frac{(N^2 - 1)}{8} = 3.52 \frac{(3^2 - 1)}{8} = 3.52 \text{mm}$$

(式中, $N=3$; 交通部推荐公式估计间隙挠度, $\eta = 3.52$;) 总挠度为 $f_{\text{总}} = f_1 + f_2 + f_{\text{错}} = 6.77 + 3.58 + 3.52 = 13.87 \text{mm} < \frac{15000}{400} = 37.5 \text{mm}$, 刚度满足要求。

2.4 钢管桩

(1) 恒载。钢板: $7.85 \times 15 \times 8 \times 0.01 \times 1000 = 9420 \text{kg}$; I12工字钢 $40 \times 14.23 \times 15 = 8538 \text{kg}$; I22b分配梁: $20 \times 36.4 \times 8 = 5824 \text{kg}$; 贝雷梁: $90 \times 15 \times 8 = 10800 \text{kg}$ 。

双拼 I36a 工字钢: $2 \times 67.6 \times 8 = 1081.6 \text{ kg}$ 。

$$F_{\text{恒}} = (9420 + 8538 + 5824 + 10800 + 1081.6) \times 0.01 = 356.6 \text{ kN}$$

(2) 活载。500kN 砼运输车, 考虑两车会车, 考虑 1.1 冲击系数: $F_{\text{活}} = 1000 \times 1.1 = 1100 \text{ kN}$ 。两车行走至钢管桩轴线处受力最大, $F_{\text{max}} = \frac{F_{\text{恒}}}{2} + F_{\text{活}} = \frac{356.6}{2} + 1100 = 1278.3 \text{ kN}$ 。设计一排三根钢管桩, 单根桩最大力为 426.1kN, 钢管桩设计时按最不利条件的桩所在位置进行设计。查阅武鸣河大桥图纸后, 确定跨中桩为最不利位置桩, 由图中看出, 桩顶标高为 86.65m, 桩底标高为 73m。

(3) 强度检验。轴心受压构件所受正应力计算公式如下
$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{426.1 \times 10^3}{194.78 \times 10^2} = 21.38 \text{ MPa} < [\sigma] = 215 \text{ MPa}$$
, 强度满足要求。

(4) 稳定性检验。钢管桩惯性矩
$$I = \frac{\pi D^4}{64} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] = \frac{\pi \times 630^4}{64} \left[1 - \left(\frac{610}{630} \right)^4 \right] = 9.37 \times 10^8 \text{ mm}^4$$
, $A = 19478 \text{ mm}^2$
则 $i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{9.37 \times 10^8}{19478}} = 220 \text{ mm}$, $\lambda = \frac{l}{i} = \frac{15400}{220} = 69.91$ 。查阅《钢结构设计规范》²得, 轴心受力构件稳定系数 $\phi = 0.793$, 则
$$\sigma = \frac{N}{\phi A} = \frac{426.1 \times 10^3}{0.793 \times 194.78 \times 10^2} = 26.96 \text{ MPa} < [\sigma] = 215 \text{ MPa}$$
, 满足要求。

2.5 钢栈桥抗 9 级风稳定性验算

本便桥要承受台风所产生的横向水平推力, 按单孔 15m 筒支梁独立稳定模式计算。钢管桩 $\phi 630 \times 10 \text{ mm}$ 。按《公路桥涵设计通用规范》(JTJ021-89)³附录, 迎风面积: $A = 15 \times (0.51 + 1.5 + 0.36) \times 0.5 + 15 \times 3.5 = 56.22 \text{ m}^2$ 。设计风速 $V = 24.4 \text{ m/s}$ 则 $W_0 = V^2 / 1.6 = 24.42 / 1.6 = 372.1 \text{ Pa}$ 。根据《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)⁴, 风力 $P = K_1 K_2 K_3 K_4 W_0 A = 1 \times 0.8 \times 1.0 \times 1.3 \times 372.1 \times 56.22 = 21859.2 \text{ N}$, $M = 21.86 \times 12.2 = 266.69 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。由 6 根 $\phi 630 \text{ mm}$ 、壁厚 10mm 钢管桩共同承受, 则单根钢管桩承受的弯矩 $M = 44.45 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。桩身应力: $\sigma = M/W = 44.45 / (2110.95 \times 10^{-6}) = 21056.87 \text{ Kpa}$

$= 21.06 \text{ MPa}$, $\sigma < [\sigma W] = 145 \text{ Ma}$ 故栈桥横向稳定性满足规范要求。

2.6 钢栈桥抗水流横向稳定性验算

本便桥要承受水流所产生的横向水平推力, 按单孔 15m 筒支梁独立稳定模式计算。钢便桥按照最大洪水位水平顶面高程 82.13m 计算, 水流速 $V = 1.5 \text{ m/s}$ 。河床底标高为 70.76m (取最不利位置 5#墩计算), 钢管桩自由长度 11.37m 考虑。钢管桩阻水面积 $A = 0.6 \times 2 \times 1 \times 11.37 = 13.644 \text{ m}^2$, $P_1 = K A_1 (rV^2/3g) = 1.3 \times 22.4 \times [1 \times 1.5 \times 1.5 / (3 \times 9.8)] = 2.23 \text{ t} = 22.3 \text{ kN}$, 流水力冲击力 P 作用在设计水位线 (82.13m) 以下 1/3 水深处。按照 5#墩计算, 高度 = 11.37m, 作用点离地面 (覆盖层顶面) 高度 $h = 11.37 - 11.37/3 = 7.58 \text{ m}$, 则 $M_1 = 22.3 \times 7.58 = 169.034 \text{ t}\cdot\text{m}$, 由 6 根 $\phi 630 \text{ mm}$ 、壁厚 10mm 钢管桩共同承受, 则单根钢管桩承受的弯矩 $M = 28.17 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 桩身应力: $\sigma = M/W = 28.17 / (2110.95 \times 10^{-6}) = 13344.71 \text{ Kpa} = 13.34 \text{ MPa}$, $\sigma < [\sigma W] = 145 \text{ MPa}$ 故栈桥横向稳定性满足规范要求。

3 结论

经过对使用过程的分析, 对钢管桩、贝雷片、分配梁、桥面钢板等的恒载、活载、风荷载行计算, 在各工况下, 钢栈桥各部位的强度、刚度均满足要求。

参考文献:

- (1) 《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)
- (2) 《钢结构设计规范》(GB50017-2017)
- (3) 《建筑施工计算手册》(第二版)
- (4) 《公路桥涵设计通用规范》(JTJ021-89)

作者简介: 陈笑男, 1986 年 11 月, 男, 汉族, 河北省衡水市, 中级工程师, 本科, 中交一航局总承包分公司下属项目部, 项目安全总监职务, 负责项目部的职业健康安全工作。