

波形钢板桥涵结构物的应用设计

刘事莲

(广东省公路勘察规划设计院, 广州 510507)

摘要:本文简要介绍了波形钢板新型材料的特点,通过一个工程实例—广梧高速公路河口至双凤段 K66 + 265.5 波形钢板通道桥,详细介绍了波形钢板结构物的构造设计、计算分析过程,最后给出了波形钢板结构物与传统桥梁的比较结论。

关键词: 波形钢板;桥涵结构物

1 波形钢板简介

波形钢板指的是将一定大小的结构用钢板变成规定规格的波纹形状的定型金属板,然后用螺栓将多块波形钢板连接形成截面之后,利用土—结构物的相互作用承担上部荷载,这就形成了波形钢板结构物。

波形钢板结构物具有品质优良、生产定型化、施工速度快、建造周期短、结构类型适应性好、结构延性好、耐久性好(耐久寿命确保100年以上)、无行车杂音以及震动发生、乘车感优良等优点。它较适合景观性要求高、山区高速公路等的通道涵洞、小桥、隧道、棚洞。图1a~e是不同类型的波形钢板结构物。



图1a 圆形波形钢板

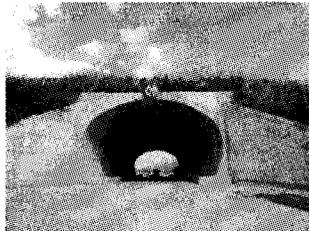


图1b 高拱形波形钢板

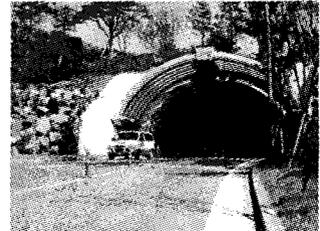


图1c 半弧形波形钢板生态隧道

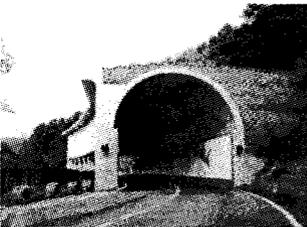


图1d 半弧形波形钢板棚洞

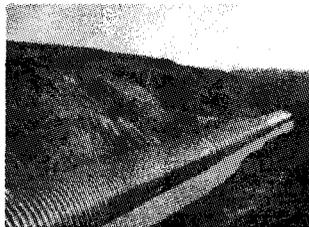


图1e 波形钢板涵洞



图2 K66 + 265.5 工点概貌

美国在二十世纪三十年代建造了最早的波形钢板结构物,并建立了美国波形钢管协会。韩国也早在二十世纪四十年代修建了波形钢板涵洞,但真正得到推广是在二十世纪八十年代后期。据大韩民国平山SI(株)提供的资料显示,波形钢板主要应用于通道、涵洞、生态隧道、小桥梁,从1999年~2005年期间,韩国共修建了1031座波形钢板结构物,经过几十年的发展,韩国已就波形钢板结构物形成了一套完备的设计和施工规范。而在我

国,仅在内蒙古省道103线成壕—大饭铺段设置了一座波形钢板涵洞(见图1e),其应用尚在起步阶段。本文要详细介绍的是在中国设计的第二座波形钢板结构物,即广梧高速公路河口至双凤段 K66 + 265.5 波形钢板通道桥。

2 工程概况

K66 + 265.5 波形钢板通道桥位于广东省云安县高村镇佛洞管理区,桥位地形地貌见图2。该通

道桥跨越一连接佛洞村和县道 X464 的地方道路,该地地势较为平坦,均为水田,地面标高约 53.8m。该地方路现宽 5.0m,为砂土路,当地要求地方道宽 7.0m,桥下净空 3.5m。

路线与地方道路正交,路基顶宽 24.5m,路堤边坡坡率为 1:1.5,填土高度 6.3m。

经钻孔揭示,该桥地层从上到下依次是 0.5m 厚的耕植土、3.7m 厚的卵石、4.3m 厚的全风化砾岩和 4.7m 厚的强风化砾岩。除表层耕植土的地基容许承载力为 130kPa 外,其余地层的容许承载力均不小于 280kPa。

3 设计标准

3.1 设计荷载

(1)恒载:上覆填土荷载、由拱效应增加的荷载;波形钢板结构物自重不考虑。

(2)活载:施工和运营期间汽车荷载;项目区虽为 6 度区,但考虑到在广东首次采用波形钢板结构物,此次设计考虑了地震荷载。

(3)桥梁设计荷载:公路 -I 级;

(4)地震动峰值加速度值:0.05g。

3.2 荷载系数

恒载系数:1.25;活载系数:1.70。

3.3 波形钢板强度减少系数

抗压强度减少系数:0.8;连接部强度减少系数:0.67;塑性铰减少系数:0.7。

2.4 土体按 95% 以上的压实度考虑,压缩模量 $E_s = 12\text{MPa}$,容重 19.6kN/m^3 。

2.5 设计洪水频率:1/100;最高洪水水位时,水位均位于基础地面下,不考虑水的影响。

4 构造设计

4.1 断面设计

结构采用低拱形,跨径 10.0m,波形钢板内高 3.96m,波形钢板顶最大填土高度按 2.15m 计算(考虑路面换算填土高度),波形钢板沿轴线方向的结构长度 31.35m。波形钢板结构断面见图 3。

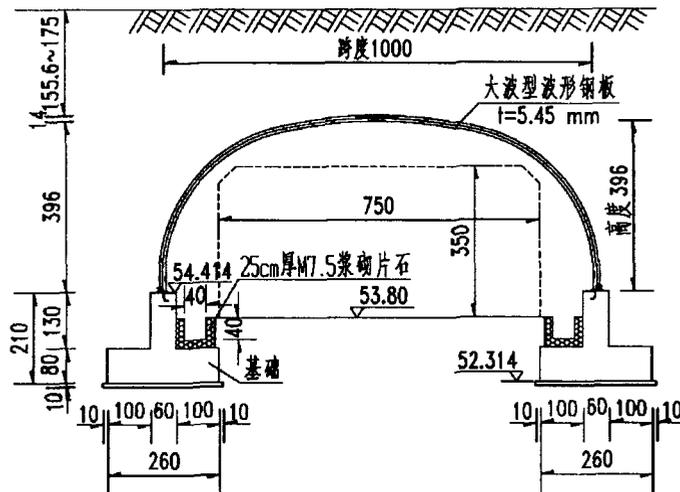


图3 K66+265.5 波形钢板通道桥横断面布置图

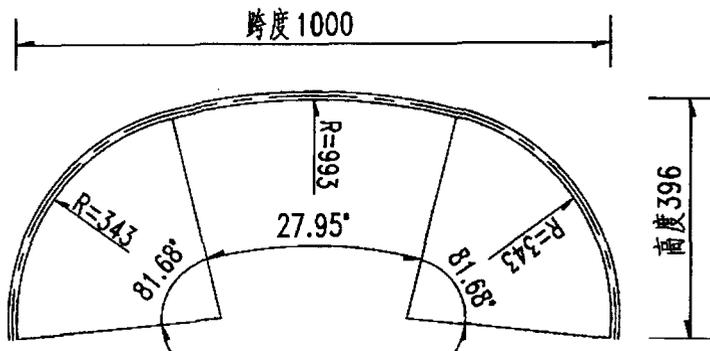


图4 K66+265.5 波形钢板断面图

4.2 波形钢板设计

(1) 波形钢板规格

鉴于本桥跨径大,荷载大,因此钢板规格,选用“大波型”波形钢板,其截面特性满足表1的要求。

(2) 波形钢板材料

①波形钢板原材料使用符合表2标准的构造用钢材,且要做熔融镀锌。波形钢板原材料标准

参照韩国标准 S D3503 普通构造用轧制钢材和 KS D3506 熔融镀锌钢板及钢带;镀锌附着量是以钢板两面镀锌计。

②波形钢板的相互搭接的长度和螺栓孔间的间距如表3。

③螺栓连接部强度

螺栓采用六角螺栓, M20, 强度区分 8.8。

表1 大波形规格表

厚度 t (mm)	波谷 P (mm)	波谷深度 d (mm)	弯曲半径 r (mm)	截面面积 A (cm ² /m)	截面系数 S (cm ³ /m)
5.45	380	140	76	76.28	241.38

注:①钢板厚度以镀锌之前为准;②波谷 P 和波谷深度 d 的容许误差为 ±3mm。

表2 波形钢板原材料的要求条件

化学成分			机械特性			
P (%)	S (%)	镀锌附着量	屈服强度	抗拉强度	延伸率 (%)	
		g/m ²			t ≤ 5	5 ≤ t ≤ 16
≤ 0.050	≤ 0.050	≥ 900	≥ 285	≥ 490	≥ 19	≥ 15

表3 钢板的螺栓孔间距

轴线方向搭接长度	圆周方向搭接长度	
l	ε ₁	ε ₂
38mm	38mm	76mm

表4 螺栓强度值表

钢板厚度 (mm)	连接部强度 (kN/m)	连接部容许强度 (kN/m)
5.45	1635	1095

4.3 基础设计

波形钢板通道桥采用钢筋混凝土基础,混凝土采用 C30。基础底设置在卵石中。基础厚 0.8 m, 底宽 2.6 m, 基底设置 10 cm 砂砾垫层。基础与波形钢板通过锚钉、槽钢垫板连接在一起。

4.4 波形钢板通道桥进出口端部设计

波形钢板通道桥进出口端部采用一字墙面壁式设计,采用 C30 钢筋混凝土,基础底设置在卵石中。墙高 6.5 m, 墙基础底宽 4.2 m, 墙基础厚 0.65 m, 墙顶宽 0.3 m, 墙底宽 0.7 m。

4.5 回填设计

回填材料选择压缩性小、耐久性强的碎石、砂砾或其混合物等材料。回填材料的最大粒径不能超过钢板波谷深度 d 的 1/2。

回填断面应该是:钢板壁两侧大于 1/2 跨径的区域。

5 波形钢板结构验算

5.1 荷载计算

(1) 恒载产生的压力:考虑拱以上填土荷载、结构物与地基的刚度比、结构物的形状和填土高度的影响系数,得 $P_1 = 318.95 \text{ kN/m}$ 。

(2) 活载产生的压力:采用等代荷载方法计算,得 $P_2 = 48.782 \text{ kN/m}$ 。

(3) 地震荷载产生的压力:

$$P_3 = A_v P_1 = 0.154 \times 318.95 = 49.12 \text{ kN/m}$$

式中, A_v —地震垂直加速度系数。

(4) 不考虑追加荷载引起的压力 P_4 。

(5) 总压力

压力计算公式如下:

$$P_{\text{总}} = \gamma_1 (P_1 + P_4) + \max \{ \gamma_2 P_2 (1 + \mu), P_3 \}$$

$$= 489.91 \text{ kN/m}$$

式中: $P_{\text{总}}$ —总压力;

P_1 —恒载引起的压力;

P_4 —附加荷载;

P_2 —活载引起的压力;

γ_1 —恒载系数;

γ_2 —活载系数;

μ —冲击系数, 经计算为 0.1。

5.2 抗弯强度验算

(1) 波形钢板的弯曲强度计算

① 当波形钢板设计下部的半径 R 小于波形钢板结构物的等价弯曲半径 R_e 时,

$$f_b = \phi_t F_m \{ F_y - [(F_y K R)^2 / (12 E r^2 \rho)] \}$$

$$= 123.69 \text{ MPa}$$

② 当波形钢板设计下部的半径 R 不小于波形钢板结构物的等价弯曲半径 R_e 时,

$$f_b = (3 \phi_t \rho F_m E) / (K R / r)^2 = 124.59 \text{ MPa}$$

上式中,

$$\lambda = 1.22 (1.0 + 1.6 (E / E_m R_c^3)^{1/4}) = 1.568$$

$$K = \lambda (E / E_m R^3)^{1/4} = 0.6210$$

$$\rho = (1000 H / R_c)^{1/2} = 0.4653$$

$$E_m = E_s (1 - (R_c / (R_c + 1000 H))^2)$$

$$= 3.891 \text{ MPa}$$

$$\text{因 } R_e = (r / K) (6 E \rho / F_y)^{1/2} = 3585.83 \text{ mm}$$

$$> R = 3430 \text{ mm, 则 } f_b = 123.69 \text{ MPa。}$$

上两式中:

f_b —波形钢板抗压强度;

E —波形钢板弹性系数;

E_s —回填土的割线弹性系数;

E_m —考虑到填土厚度的回填土的弹性系数;

K —有效长度系数;

ρ —考虑到填土厚度的强度减少系数;

R_c —波形钢板结构物上部的半径;

R_e —波形钢板结构物的等价弯曲半径;

F_m —多跨考虑系数;

ϕ_t —抗压强度减少系数;

r —旋转半径。

(2) 波形钢板断面验算

由荷载计算可知, 波形钢板所受总压力

$$P_{\text{总}} = 489.91 \text{ kN/m,}$$

则波形钢板所受压应力为:

$$\sigma = 489.909 / 7.628 = 64.23 \text{ MPa} < 123.69 \text{ MPa}$$

(波形钢板的弯曲强度), 满足要求。

5.3 连接部强度验算

(1) 连接部强度: 见表 4 中给定的值, 即 1635 kN/m。

(2) 波形钢板连接部容许强度

$$P = 0.67 \times 1635 = 1095.4 \text{ kN/m}^2$$

> 压力 $P_{\text{总}} = 489.91 \text{ kN/m}^2$, 满足要求。

5.4 施工过程验算

由于波形钢板结构物在施工中会发生变形, 产生过多的位移, 会产生塑性铰, 造成结构物的倒塌或者永久变形, 因此, 在对结构物进行施工时, 有必要考虑压力和弯距的组合, 来验算塑性铰的发生。对波形钢板结构物进行施工时, 最脆弱的时点是在填土到波形钢板结构物的顶点部、结构物的立起高度达到最高点时和施工机械最初通过结构物上部时。本次设计分为两种情况进行验算, 即填土到波形钢板结构物的顶点部和施工机械最初通过结构物上部时, 见图 5。

(1) 波形钢板的塑性强度计算

$$P_{pf} = \phi_b A F_y = 1521.71 \text{ kN/m}^2;$$

$$M_{pf} = \phi_b M_p = 67.82 \text{ kN} \cdot \text{m/m};$$

$$M_p = Z F_y = 96.88 \text{ kN} \cdot \text{m/m};$$

式中, P_{pf} —设计抗压强度;

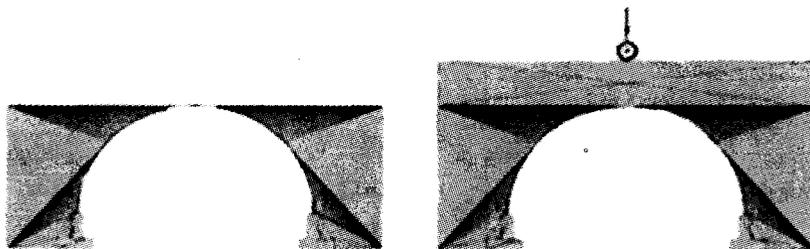


图 5 施工过程验算示意图

M_{pf} —设计抗弯强度;

F_y —波形钢板的屈服强度;

ϕ_b —塑性铰强度减少系数。

(2)判断塑性铰是否产生的条件

$$(P/P_{pf})^2 + (M/M_{pf})^2 < 1.0$$

(3)第一类施工情况:填土到波形钢板结构物的顶点部

①压力 $P = 74.10 \text{ kN/m}^2/\text{m}$;

②弯距 $M = 17.73 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{m}$;

③验算塑性铰的发生

$$(P/P_{pf})^2 + (M/M_{pf})^2 = 0.002 + 0.261 = 0.264 < 1.0, \text{ 所以塑性铰不会发生。}$$

(4)第二类施工情况:进行60cm填土后施工机械开始通行

①压力 $P = 181.03 \text{ kN/m}^2/\text{m}$;

②弯距 $M = 49.29 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{m}$;

③验算塑性铰的发生

$$(P/P_{pf})^2 + (M/M_{pf})^2 = 0.014 + 0.727 = 0.741 < 1.0, \text{ 所以塑性铰不会发生。}$$

5.5 最小填土高度计算

波形钢板结构物是柔性结构物,其上部荷载是由结构物-地基的相互作用来共同承担。在这种相互作用下,为了结构物的形状变化,根据结构物的形状或跨距的不同,结构物上部需要最小填土高度。

最小填土高度采用下列三个公式中计算出的最大值。但是对于大波形钢板结构物,根据实验结果,如果最小填土高度在1.5m以上时,将能避免波形钢板上部填土产生延伸破坏及楔形破坏,并且根据韩国规范,当用公式计算出的值超过1.5m,亦将1.5m作为最小填土高度规定值。

在本工程中,最小填土高度分别计算为:

$$h_{\min 1} = 0.6 \text{ m};$$

$$h_{\min 2} = (D_L/6) (D_L/D_V)^{1/2} \\ = (10/6) (10/7.244)^{1/2} = 1.958 \text{ m};$$

$$h_{\min 3} = 0.4 (D_L/D_V)^2 = 0.4 \times (10/7.244)^2 \\ = 0.762 \text{ m};$$

式中, D_L 、 D_V 表示结构物形状值;

取以上三者大值,得最小填土高度: $h_{\min} =$

$\text{MAX}(h_{\min 1}, h_{\min 2}, h_{\min 3}) = 1.958 \text{ m} > 1.5 \text{ m}$,满足要求。

6 波形钢板基础验算

波形钢板基础设计主要进行地基沉降计算、地基稳定性验算和地基承载力验算。由于本处地质条件较好,地基沉降非常小,这里不作计算。

(1)倾覆稳定性验算

$$K = M_{\text{抗倾覆}}/M_{\text{倾覆}} = 93.4/9.034 = 10.338 > 1.5, \text{ 满足要求。}$$

(2)偏心距 $e = B/2 - \bar{x} = -0.051 < B/2 = 0.433$,满足要求。

(3)基础抗滑稳定性验算

$$K = P_{\text{抗滑}}/P_{\text{滑动}} = 27.798/9.335 = 2.9779 > 1.3, \text{ 满足要求。}$$

(4)地基承载力验算

$$\sigma_{\max} = 268.4 \text{ kPa} < 280 \text{ kPa}, \text{ 满足要求。}$$

7 面壁验算

图6为波形钢板面壁结构分析造型图。面壁验算包括截面验算、裂缝验算、锚钉剪断强度验算、波形钢板抗拉强度验算。

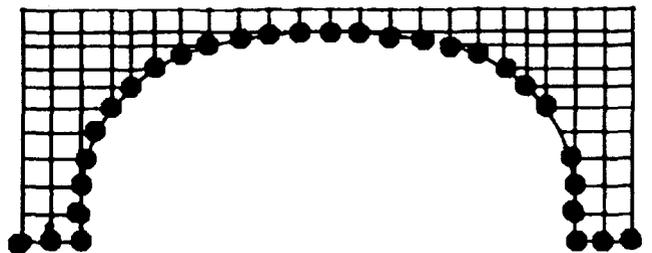


图6 波形钢板面壁结构分析造型图

(1)锚钉剪断强度验算

①最大弹性反力

$$P = 1.93 \text{ kN}$$

②锚钉螺栓剪断强度

$$\text{锚钉容许剪切强度 } V_{sa} = 8 \text{ MPa}$$

单个锚钉承受剪切力 $V = 3.98 \text{ MPa} < V_{sa}$, 满足要求。

(2)波形钢板抗拉强度验算

①波形钢板纵向抗拉应力

$$\text{波形钢板容许抗拉强度 } f_a = 19 \text{ MPa};$$

$$\text{波形钢板承受纵向抗拉应力 } f_t = 0.565 \text{ MPa}$$

$< f_a$, 满足要求。

②波形钢板纵向抗拉强度验算

5.45mm 厚大波形钢板的容许抗拉力 = 8.98kN/m。

作用于波形钢板每米长度的抗拉力 = 3.08 kN/m < 8.98 kN/m, 满足要求。

(3) 截面验算、裂缝验算均满足要求, 本文不

赘述。

8 波形钢板与空心板通道桥比选

波形钢板是近两年引进的新材料, 其性价比如何, 需要与常规的涵洞或小桥做经济技术比较。本文将 1-8m 空心板小桥与波形钢板通道桥进行经济技术比较, 结果见表 5。

表 5 波形钢板通道桥与空心板小桥比较表

主要项目内容	波形钢板通道桥	主要项目内容	空心板小桥
1、大波形钢板(m ²)	534	1、上部结构	
2、附属材料		C40 砼(m ³)	92.7
槽钢垫板(m ²)	62.0	普通钢筋(kg)	18112.5
3、基础		2、下部结构	
C15 砼(m ³)	17.7	(1) 台身、台帽等	
C30 砼(m ³)	179.3	C30 砼(m ³)	202.2
普通钢筋(kg)	14139.2	C25 砼(m ³)	110
4、护墙		普通钢筋(kg)	31054.4
C15 砼(m ³)	9.1	(2) D120cm 桩基	
C30 砼(m ³)	133.5	C25 砼(m ³)	250.9
普通钢筋(kg)	16324.8	普通钢筋(kg)	22543.9
5、面壁		(3) 搭板	
C30 砼(m ³)	29.3	C30 砼(m ³)	88.3
普通钢筋(kg)	7396.6	普通钢筋(kg)	13375.6
6、工程总造价(万元)	155.57	3、工程总造价(万元)	121.17

从表 5 中可以看出, 波形钢板在造价上高出 1-8m 小桥约 34 万元, 这主要是因为波形钢板需要从韩国运输到工地、运输成本及关税较高, 如果今后在国内能设置厂房, 将大幅度地将成本降低, 造价将低于常规的桥梁。另外, 对于今后山区高速公路高填土路段, 波形钢板结构物比常规的桥梁涵洞有更大的优势, 造价上将更加经济。如果从施工角度看, 波形钢板结构物施工投入更小、速度更快, 施工过程无污染。

9 结语

波形钢板在国内属于一种新材料、新技术, 虽然它在国外已有较为成熟的设计和施工工艺, 但在国内应用效果如何, 需要通过进一步的实体检验。我们寄希望通过本工程的设计与今后的

施工实践, 逐步建立适合于我国关于波形钢板结构物同类产品的设计、施工、检测、监测、维护管理标准。

在本波形钢板结构物的设计过程中, 我们得到了大韩民国平山 SI(株)朱明华经理、全承权课长和浦项(中国)投资有限公司李海虹女士的技术服务以及易巍、孙向东、梁志勇、刘汉隆等同事的鼎力支持, 在此深表感谢。

参考文献:

- [1] 广东省公路勘察规划设计院. 广梧高速公路河口至双凤段施工图设计文件[Z]. 广州: 广东省公路勘察规划设计院, 2006.
- [2] 大韩民国平山 SI(株). 波形钢板结构物设计及施工指南(2001)[S]. 2001. 12.