

英标桥梁结构计算概述

肖磊

(中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 以海外项目斯里兰卡南部高速延长线项目为实例, 按现行英国标准 BS5400-2-2006 及 BS5400-4-1990 为设计标准, 进行预应力混凝土简支桥梁的结构计算。内容包括极限状态设计、荷载取值、荷载组合、结构内力设计等方面, 将设计流程详细地展示出来, 为采用英国标准的海外项目提供设计思路。

关键词: 英国标准; 高速公路; 桥梁结构计算

中图分类号: U442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2021) 12-0157-04

1 引言

随着经济实力的增长, 中国企业“走出去”、全球化布局已成为常态, “一带一路”建设也正有序地推进。中国基建企业已经布局全球五大洲, 屡屡斩获亿元订单。昔日是全球最大投资地的中国, 如今正在积极对外投资。

英国作为曾经强大的殖民国, 在全球仍有很多国家沿用英标进行公路设计, 因此也成为国际上主要使用的规范之一。学习英标, 对于日后设计院扩展海外业务具有重要意义, 可以优化设计从而降低工程成本, 提高中资企业对外竞争力, 促进中国与发展中国家在工程建设标准化领域的深层次合作, 快速地使我国的设计和建水平向国际化并轨。

英国标准^[1-2]在荷载取值、计算方法、评价体系均与国内标准存在很大差异。其中荷载规范 BS5400-2 对于荷载的分类、活载取值^[3-5]、荷载组合^[6]等规定上有一套完备的体系, 而 BS5400-4 中关于材料性能^[7]、极限状态理论、结构设计^[8]与中国标准也存在一定的差异。本文依托斯里兰卡南部高速延长线项目对英标体系下桥梁计算方法进行研究, 细致地将计算全过程进行论述。

2 结构设计理论

桥梁设计按照 BS5400-4 规范要求执行, 按照分项系数法确定设计荷载 Q^* 和设计荷载效应 S^* 。

$$Q^* = \gamma_{fk} Q_k, \quad S^* = \gamma_{f3}(Q^* \text{的效应})$$

$$\text{而设计抗力 } R^* \text{ 为: } R^* = f(f/\gamma_m)$$

BS5400-4 规范的结构设计方法是基于极限状态法进行设计, 可分为承载能力极限状态 (ULS) 和正常使用极限状态 (SLS)。

各状态下的设计荷载分项系数 γ_{fk} 按照 BS5400-2: 2006, 4.1.2 条, 表 1 执行。

另外, ULS 下收缩徐变效应: $\gamma_{fn}=1.2$; 预应力对结构抗力产生不利作用时, $\gamma_{fn}=1.15$; 其它情况下 $\gamma_{fn}=0.87$; 超静定结构预应力二次效应, $\gamma_{fn}=1.0$ 。SLS 下的混凝土收缩和徐变以及预应力 (包括超静定结构预应力的二次效应): $\gamma_{fn}=1.0$ 。

设计荷载效应分项系数, ULS 下: $\gamma_{f3}=1.1$; SLS 下: $\gamma_{f3}=1.0$ 。

3 工程概况及荷载取值

本项目桥梁采用 30m 预应力混凝土装配式 T 梁, 桥梁宽 11.75m, 梁间距 2.5375m、湿接缝宽 1.3375m。

3.1 结构材料属性

正常使用极限状态 (SLS) 下材料分项系数如下表:

表 1 SLS 下材料分项系数

材料	应力类型	结构类型	
		钢筋混凝土	预应力混凝土
混凝土	(近) 三角形压应力分布, 如弯曲状态	1.0	1.25
	(近) 均布压应力分布, 如轴心受压	1.33	1.67
	受拉	-	1.25(先张) 1.55(后张)
钢筋	受拉/压	1.0	-
预应力筋	受拉	-	不要求

承载能力极限状态 (ULS) 下材料分项系数: 对混凝土取 1.50, 钢筋和预应力筋取 1.15。

3.2 典型荷载取值

主梁自重、桥面铺装荷载、预应力荷载效应计算方式并无差异, 本文不再赘述。

3.2.1 汽车荷载 (HA/HB)

公路桥梁的设计应遵循：①所有的桥梁设计需能抵抗相关规范中明确的“HA 活载作用力”；②对于 A 和 B 级高速公路，桥梁需能抵抗 30 单元的“HB 活载作用力”。为满足当地条件，应考虑 HB 车辆总是横跨 2 个车道宽。

验算结构及其构件抵抗下列两种工况的最不利效应：HA 荷载单独作用，或 HA 荷载与 HB 荷载共同作用。

3.2.1.1 车道划分

行车道共划分 3 个计算车道。

3.2.1.2 HA 荷载

HA 荷载由均布荷载 (UDL) 及一个集中荷载 (KEL) 组成，均布荷载取值与加载长度有关。即：

当加载长度不大于 50m 时， $w = 336\left(\frac{1}{L}\right)^{0.67}$

当加载长度大于 50m 时， $w = 36\left(\frac{1}{L}\right)^{0.1}$

W：UDL 加载集度，单位 kN/m。

L：加载长度，单位 m。

每一个车道集中荷载 (KEL) 取 120kN。

3.2.1.3 HA 单独加载

利于影响线的方法，确定最不利时 UDL 的加载长度和 KEL 加载的位置，并考虑每个车道荷载的折减 (计算程序自动考虑)。每个车道系数 β 取值如下表。

表 2 车道系数 β 取值

加载长度 L (m)	车道 1 β_1	车道 2 β_2	车道 3 β_3
$0 < L \leq 20$	1.0	1.0	0.6
$20 < L \leq 40$	1.0	1.0	0.6

3.2.1.4 HB 荷载

一个单位的 HB 汽车轴载为 10kN，即每个轮压为 2.5kN。取 30 个 HB 单位荷载，总重量 $30 \times 40 = 1200\text{kN}$ ，共 16 个轮载，每个轮载重 75kN，中间两排轮载的间距可分别取 6、11、16、21、26m，程序自动取最不利效应。

3.2.1.5 制动力 (F_B)

HA 制动力： $\min(8 \times L + 250, 750) = \min(8 \times 30 + 250, 750) = 490\text{kN}$ ，平行于车道作用于全桥长度的一个车道。

HB 制动力：单个轮载为 $2.5 \times 30 \times 0.25 = 18.75\text{kN}$ ，作用于距离为 1.8m 的 8 个轮载共为 $18.75 \times 8 = 150\text{kN}$ ，仅考虑一个车道。

3.2.1.6 滑动力 (F_S)

根据规范取集中力 300kN，作用于桥面上任意一点。

3.2.2 风荷载 (F_w)

(1) 无活载下最大风速： $V_d = S_g V_g$ 。现场平均风速：

$V_g = V_b S_p S_a S_d$ 。 S_g 为阵风系数， $S_g = S_b T_g S_h$ ， $S_b = S'_b K_F$ 。

其中， $V_b = 33.5\text{m/s}$ ，地区基本风速，可从当地等风速线图得到。 $S_p = 1.05$ ，风重现期系数，对高速公路桥梁取 1.05，以 120 年为重现期。 $S_a = 1 + 0.001\Delta = 1.005$ ，海拔系数，本项目高出平均海平面 $\Delta = 5\text{m}$ 。 $S_d = 1.0$ ，方位系数，以最不利计。 $S'_b = 1.78$ ，风阻系数，考虑风荷载受阻长度 30m，距海岸 10km，查表可得。 $K_F = 0.96$ ，校正系数，桥梁高度 15m 查表可得。 $T_g = 0.94$ ，城镇折减系数，本项目距城镇约 3km，查表可得。 $S_h = 1.0$ ，地形系数，平原地区一般可取 1.0。

横向风荷载： $P_t = q A_1 C_D$

对于无活载下风荷载：

$P_t = q A_1 C_D = 1.976 \times 97.5 \times 1.4 = 269.7\text{kN}$ (无活载下)

(2) 有活载下最大风速： $V_d = \min(56.77, 35) = 35\text{m/s}$

对于高速公路桥梁不超过 35m/s)。

因而， $q = 0.613 V_d^2 = 0.751\text{kN/m}^2$

对于有活载下风荷载： $b = 11.35\text{m}, d_3 = 2.15 + 2.5 = 4.65\text{m}$

计算 A_1 时， $d = \max(d_2, d_3) = 4.65\text{m}$

$A_1 = d \times L = 4.65 \times 30 = 139.5\text{m}^2$

计算 C_D 系数时， $d = d_1 = 2.5\text{m}$

$b/d = 4.54$ 查表得 $C_D = 1.35$ 。

$P_t = q A_1 C_D = 0.751 \times 139.5 \times 1.35 = 141.4\text{kN}$ (有活载下)

3.3 荷载组合

根据上面设计基础提供的荷载及荷载效应分项系数数值，为便于结果的提取，列出荷载组合效应表达式如下 (代码所代表荷载见上文)：

ULS 荷载组合：

ULS - 1: $1.1[A + ENV(1.5HA, 1.3HA \& HB)]$

ULS - 2: $1.1[A + ENV(1.25HA, 1.1HA \& HB) + 1.1F_w]$

ULS - 3: $1.1[A + ENV(1.25HA, 1.1HA \& HB) + 1.3T_s + 1.0T_d]$

ULS - 4: $1.1[A + ENV(1.25HA, 1.1HA \& HB) + ENV(1.25F_B, 1.25F_S)]$

($A = 1.15DL + 1.75DSL + 1.2SDL + 1.0P + 1.2CS$)

SLS 荷载组合：

SLS - 1: $1.0[B + ENV(1.2HA, 1.1HA \& HB)]$

SLS - 2: $1.0[B + ENV(1.0HA, 1.0HA \& HB) + 1.0F_w]$

SLS - 3: $1.0[B + ENV(1.0HA, 1.0HA \& HB) + 1.0T_s + 0.8T_d]$

SLS - 4: 1.0[B+ ENV(1.0HA,1.0HA&HB)+ENV(1.0 F_B,1.0 F_S)]
(B=1.0DL+1.2DSL+1.0SDL +1.0P+1.0CS)

4 桥梁结构分析

上部构造根据线弹性理论按梁格法建模，力学分析软件采用 Midas/Civil 进行。根据实际的构造尺寸，上部结构分为若干纵横向单元。纵向单元按实际尺寸计入自重，横向单元按虚拟单元仅计算其刚度，其余荷载按等效荷载加载于各单元。

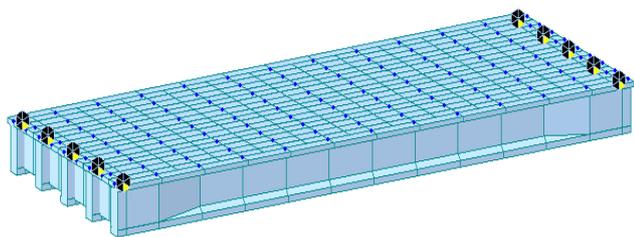


图 1 结构模型图

提取模型结构如下表：

表 3 ULS 组合下的最大弯矩与剪力

	最大弯矩 (kN.m)	最大剪力 (kN)
ULS-1	9719	1335
ULS-2	9093	1260
ULS-3	9318	1264
ULS-4	9116	1272

5 承载力验算

5.1 抗弯承载力验算

计算基于以下假定：

平截面假定，全部受压区的混凝土应力取 $0.4f_{cu}=20$ MPa，不考虑混凝土的抗拉强度，不计受压区钢筋的作用；预应力钢筋的总损失为 25%（模型计算结构）。

钢束的承载能力为： $f_{pd}=f_{pu}/1.15=1860/1.15=1617.4$ MPa。

普通钢筋与钢束需进行换算，试算得混凝土截面的受压区高度 $x=127$ mm。设计抗弯承载力为：

$$M_u=f_{pd} \times A \times (d-d_0)=14924 \text{ kN.m}$$

中梁跨中： $d_0=88.5$ mm

设计抗弯承载力为： $M_u=f_{pd} \times A \times (d-$

$d_0)=15270 \text{ kN.m}$

边梁与中梁的承载能力均大于跨中最大弯矩，满足要求。

5.2 抗剪承载力验算

支点附近的剪力设计值最大，故对支点附近的抗剪承载力进行验算。对距离支撑位置距离为 d 的位置进行验算。

截面特性如下：

腹板宽度： $b=640$ mm，截面高度： $h=2000$ mm， $d=1900$ mm，截面面积： $A_c=1405000 \text{ mm}^2$ ，截面惯性矩： $I=5.17 \times 10^{11}$ ，质心距离开裂边缘的距离： $y=928$ mm，混凝土的立方体抗压强度： $f_{cu}=50$ MPa。

预应力作用的轴力为（预应力损失按 25% 计， $\gamma_m=1.15$ ）：

$$N_p = \sum_{i=1}^{n=3} (1395 \times 0.75 / 1.15 \times A_{pi}) = 4457935 \text{ N}$$

预应力产生的弯矩为（结果为正则向上）：

$$M_p = \sum_{i=1}^{n=4} (1395 \times 0.75 / 1.15 \times A_{pi} \times d_i) = -2089879826 \text{ N}\cdot\text{m}$$

验算截面设计内力： $V_d=1335$ kN, $M_d=5047$ kN.m

(1) 按不开裂截面计算：

$$\text{抗剪承载力为: } V_{co} = 0.67bh\sqrt{f_c^2 + f_{cp}f_c} = 2465 \text{ kN}$$

(2) 按开裂截面计算（2 类构件）：

$$\text{抗剪承载力不小于: } V_{cr,min} = 0.1bd\sqrt{f_{cu}} = 860 \text{ kN}$$

对于验算截面，开裂截面的抗剪承载力为：

$$V_{cr,A} = 0.037bd\sqrt{f_{cu}} + \frac{M_{cr}}{M_d} V_{dA} = 593 \text{ kN} < V_{cr,min}$$

则抗剪承载力为：

$$V_c = \min(V_{c0}, V_{cr,A}) = 593 \text{ kN} < V_{dA} = 1532 \text{ kN}$$

需要抗剪钢筋面积为为：

$$\frac{A_{sv}}{S_v} = \frac{V_d + 0.4bd_i - V_c}{0.87f_y d_i} = 0.931 \text{ mm}^2 / \text{mm}, \text{ 其中, } d_i=2000-60=1940 \text{ mm}$$

$$\text{纵向受拉钢筋的面积应为: } A_s \geq \frac{V_d}{2 \times 0.87f_{yv}} = 1524 \text{ mm}^2$$

设置箍筋 2d12，间距为 100mm，提供抗剪钢筋 $2.262 \text{ mm}^2/\text{mm}$ ，满足要求；设置纵向钢筋 5d25，提供纵向钢筋 2454 mm^2 ，满足要求。

5.3 抗扭承载力验算

模型中提取梁端扭矩 $T_e=113$ kN.m，梁中扭矩 $T_m=31$ kN.m。

梁跨中截面：

$$\sum (h_{\max} h_{\min}^3) = 1200 \times 200^3 + 1330 \times 200^3 + 640 \times 470^3 = 8.67 \times 10^{10}$$

$$\text{对梁翼缘板, } T_1 = \frac{T_e (h_{\max} h_{\min}^3)}{\sum (h_{\max} h_{\min}^3)} = \frac{31 \times 1200 \times 200^3}{8.67 \times 10^{10}} = 3.43 \text{ kN.m}$$

$$\text{扭剪应力: } v_1 = \frac{2T}{h^2_{\min}(h_{\max} - \frac{h_{\min}}{3})} = 0.15\text{MPa}$$

$$v_1 < v_{\min} = 0.42 \text{ MPa,}$$

顶板无需单独设置抗扭钢筋。

对梁腹板同样进行扭剪应力校核, 无需单独设置抗扭钢筋。

$$\text{对下马蹄, } T_3 = \frac{T_e(h_{\max}h_{\min}^3)}{\sum(h_{\max}h_{\min}^3)} = 23.76\text{kN}\cdot\text{m}$$

$$\text{扭剪应力: } v_3 = \frac{2T}{h^2_{\min}(h_{\max} - \frac{h_{\min}}{3})} = 0.45\text{MPa}$$

箍筋短边长度 $x_1 = 470 - 2 \times 60 = 350\text{mm}$, 箍筋长边长度 $y_1 = 640 - 2 \times 60 = 520\text{mm}$ 。

抗扭钢筋需按如下条件布置:

$$\frac{A_{st}}{S_v} \geq \frac{T}{1.6x_1y_1(0.87f_{yt})} = 0.204\text{mm}^2/\text{mm}$$

设计配筋为 $2(\pi \times 12^2/4)/150 = 1.508 \text{ mm}^2/\text{mm}$, 满足要求。

同样的计算梁端截面, 均符合抗扭设计要求。

5.4 SLS 验算

在 SLS 组合下, 受弯构件的混凝土压应力限值为

$$0.4f_{cu} = 20\text{MPa};$$

对于 2 级构件, 后张法预应力混凝土构件的混凝土的应力限值不应超过混凝土的设计弯拉强度 $0.36\sqrt{f_{cu}} = 2.55\text{MPa}$ 。计算可知 S 组合上缘最大压应力 -12.7MPa , 下缘最大压应力 -12.3MPa , 规范允许值 -20.0MPa , 满足要求。SLS 组合上缘最大拉应力 1.6MPa , 下缘最大拉应力 1.8MPa , 规范允许值 2.55MPa , 满足要求。

6 结语

经以上验算, 本设计下桥梁主梁在 ULS 状态下的承载能力(抗弯、剪、扭)满足要求, SLS 下的应力均满足规范要求。

参考文献:

[1] BRITISH STANDARD BS5400-2:2006.

[2] BRITISH STANDARD BS5400-4:1990.

[3] 方华, 成立涛. BS5400 公路桥梁汽车荷载研究 [J]. 中外公路, 2015, 35:181-185.

[4] 吴腾, 葛耀君, 熊洁. 现行国内外公路桥梁汽车荷载及其响应的比较 [J]. 结构工程, 2008, 24(5):130-136.

[5] 周勇军, 孙婧, 梁玉照. 公路桥梁汽车荷载标准值对比分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(3):102-108.

[6] 周勇军, 孙婧, 梁玉照. 公路桥梁设计荷载基本组合的分项系数值及其效应对比 [J]. 公路, 2012(1):103-107.

[7] 徐超, 李嵩, 罗齐. 中英桥梁规范材料力学指标对比研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2019(1):96-100.

[8] 贾聪惠. 基于英标规范体系的混凝土桥梁设计方法研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2019(6):99-103.

