

钢桁梁桥纵梁和横梁的受力分析^①

陈玉骥 叶梅新
(长沙铁道学院建工系, 长沙 410075)

伍洪泽
(中南工业大学资开系, 长沙 410083)

摘 要 对全桥、横梁采用两次有限元离散计算方法, 考虑桥面系、主桁架相互作用问题, 研究了单线和双线钢桁梁桥的实际受力状态和设计者常采用的简化计算方法存在的问题, 对《铁路桥跨结构设计规范》(初稿) 中有关纵、横梁的计算条文提出了建议, 它们对各类钢桁梁桥的设计均有参考价值。

关键词 桥面系 主桁架 纵、横梁 相互作用 约束方程

以铁路桥梁为例, 现行《铁路桥涵设计规范》(以下称老桥规) 中, 关于桁架桥的设计, 是将整个桥跨结构分成若干个平面结构, 再按承受各自平面上的荷载计算杆件内力。对于桥面系, 假定纵梁简支在横梁上, 横梁简支在主桁架上。这种方法不能考虑桥面系中纵、横梁和主桁架的相互作用问题。正在制定的《桥跨结构设计规范》(以下称新桥规) 初稿中规定: “在计算桥面系强度时, 除需按纵、横梁单独受载的情况计算外, 还应计算主桁弦杆或主梁翼缘共同受力引起的纵梁轴力和横梁面外弯矩。计算时, 可假定纵梁铰结于横梁; 横梁与联结系水平结点板相连的一侧与主桁(主梁) 固结, 另一侧则与主桁(主梁) 铰结”。新桥规初稿讨论会上有人建议将这一部分条文取消。但是, 实践表明, 由于桥面系、主桁架的相互作用, 纵梁中存在轴力; 横梁, 尤其是端横梁存在较大面外弯矩。鉴此, 有必要对该问题进行如下研究。

1 单线桥的受力分析

1.1 计算方法

采用有限元两步离散法进行计算。

第一步: 将全桥作为空间结构、每一杆件作为一个空间杆单元进行计算, 如图1所示。这一步计算主要是为了得到各结点的位移及纵

梁内力, 并为下一步计算作准备。

第二步, 取横梁为隔离体单独计算, 腹板和翼缘采用三角形板单元, 横肋采用空间

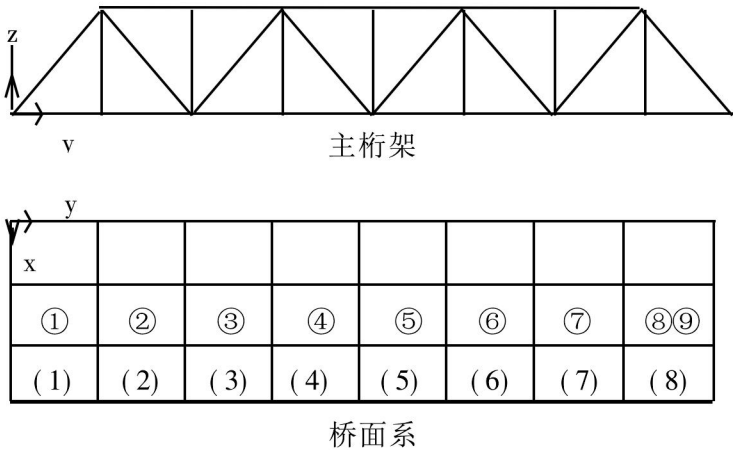


图1 64mm单线桥全桥计算网格图

梁单元。考虑到纵梁是与横梁固连在一起共同受力与变形, 故在横梁上与纵梁联结处设置一条与纵梁等高的横肋, 以反映此共同作用, 此附加横肋也采用空间梁单元。此外, 在横梁端部, 与腹板相连的竖向结点板及与下翼缘相连的水平结点板均划分为梁元。因结点板的另一端是与主桁架连接在一起的, 故结点板另一端的位移可由上一步计算出的相关结点位移给出。

由于第一步计算时, 横梁端部与主桁架相连的结点板为一个结点。而第二步计算中, 此

① 收稿日期: 1995- 10- 25; 修回日期: 1995- 12- 10 陈玉骥, 男, 34岁, 讲师

处则设置了几个结点,故第一步算出的此处的结点位移可按平截面假定转化为第二步计算中相应的几个结点的结点位移。以上处理方法即可保证第二步计算中横梁的变形与全桥的变形相协调。

横梁的荷载取上一步计算结果中与横梁相连的纵梁杆端力,反向后施加于横梁。由于横梁沿高度方向有几个结点,故这些集中荷载要经过处理化为分布荷载。纵梁的扭矩若是横梁的面内弯矩则转化为沿横梁高度线性分布的荷载。同样,纵梁的面内弯矩也转化为沿横梁高度线性分布的荷载,而纵梁的面外弯矩则转化为沿翼缘宽度线性分布的荷载。此外纵梁的轴力转化为沿横梁高度均布的荷载,而纵梁的面内、面外剪力则转化为沿横梁高度按抛物线分布的荷载。

根据以上方法,对现有的64 m 单线钢桁梁桥进行了计算。计算结果见表1和表2。

1.2 纵梁的受力分析

由表1可以看出,纵梁的六个内力中,轴力 N_y 、面内剪力 Q_z 和面内弯矩 M_x 较大,是纵梁的主要内力;而面外剪力 Q_x 、扭矩 M_y 和面外弯矩 M_z 较小,是纵梁的次要内力。若按老桥规的计算方法^[3],每根纵梁内力相同,而且只计算面内弯矩,最大弯矩在跨中,为 $M_x = 0.664 \text{ MN}\cdot\text{m}$,由此引起的最大正应力 $\sigma_{\max} = 95.66 \text{ MPa}$ 。按本文的计算结果,各纵梁内力不同,最大弯矩出现在(1)号纵梁跨中,为 $M_x = 0.5174 \text{ MN}\cdot\text{m}$,相应的最大正应力为 $\sigma_M = 74.54 \text{ MPa}$,而(1)号纵梁轴力引起的应力为 $\sigma_N = N_y/A = 4.73 \text{ MPa}$,两者合成 $\sigma = \sigma_M + \sigma_N = 79.27 \text{ MPa}$,小于老桥规的计算结果。

1.3 横梁的受力分析

计算表明,横梁的面内、面外弯矩是主要内力。而其它内力引起的应力很小,可以不予计算。

表1 64 m 单线桥纵梁单元端点内力

纵梁号	Q_x / MN	N_y / MN	Q_z / MN	M_x / MN·m	M_y / MN·m	M_z / MN·m
(1)	0.005 34 - 0.005 34	- 0.095 9 0.095 9	0.284 6 0.336 2	0.000 3 - 0.206 6	0.000 096 - 0.000 009 6	- 0.002 38 - 0.001 89
(2)	0.003 09 - 0.003 09	- 0.154 5 0.154 5	0.213 4 0.225 4	0.206 6 - 0.254 4	- 0.000 001 3 0.000 001 3	- 0.001 29 - 0.001 19
(3)	0.002 00 - 0.002 00	- 0.195 7 0.195 7	0.245 0 0.193 9	0.254 4 - 0.050 1	- 0.000 001 4 0.000 001 4	- 0.000 89 0.000 71
(4)	0.000 61 - 0.000 61	- 0.221 7 0.221 7	0.192 5 0.246 3	0.050 1 - 0.265 4	0.000 001 8 - 0.000 001 8	- 0.000 33 - 0.000 15
(5)	- 0.000 74 0.000 74	- 0.211 9 0.211 9	0.246 4 0.192 4	0.265 4 - 0.049 1	- 0.000 002 1 0.000 002 1	0.000 21 0.000 38
(6)	- 0.002 10 0.002 10	- 0.189 6 0.189 6	0.175 6 0.215 2	0.049 1 - 0.207 3	0.000 000 8 - 0.000 000 8	0.000 75 0.000 93
(7)	- 0.003 12 0.003 12	- 0.150 3 0.150 3	0.201 3 0.189 5	0.207 3 - 0.160 4	- 0.000 000 2 0.000 000 2	0.001 20 0.001 29
(8)	- 0.005 24 0.005 24	- 0.094 6 0.094 6	0.215 4 0.175 4	0.160 4 - 0.000 1	- 0.000 007 1 0.000 007 1	0.001 86 0.002 34

表2 64 m 单线桥横梁最大应力

横梁号	M_y / MN·m	$\sigma_1 = M_y/W_y$ / MPa	M_z / MN·m	$\sigma_2 = M_z/W_z$ / MPa	$\sigma_{\max} = \sigma_1 + \sigma_2$ / MPa	最大应力位置
①	0.072 9	7.20	0.08 21	178.09	185.29	端部截面
②	0.946 0	83.53	0.048 8	97.18	180.71	纵横梁交点处靠
③	0.738 0	72.90	0.030 2	65.47	137.17	横梁端部截面

因端横梁受力较大, 故表2中只列出了端部三根横梁的最大应力计算结果。虽然, 有些横梁的面外弯矩 M_z 比面内弯矩 M_y 小很多, 但由于其面外抗弯截面模量 W_z 比面内抗弯截面模量 W_y 小很多, 故 M_z 引起的应力与 M_y 引起的应力相当, 甚至更大。

若按老桥规的方法^[3], 把横梁当作简支梁, 纵梁的荷载转化为横梁上的集中力, 只计面内弯曲, 则由此求出的最大应力发生在梁中部, 为 $\sigma_{\max} = 99.72 \text{ MPa}$ 。而本文求出的结果, 横梁按双向弯曲引起的最大应力则发生在梁端部, 为 $\sigma_{\max} = 185.29 \text{ MPa}$ 。可见老桥规的结果偏小。

2 双线桥的分析

2.1 计算方法

第一步: 全桥离散。主桁架和上、下平纵联的网格划分与单线桥一样, 仅桥面系网格划分与单线桥不同, 见图2。在双线桥中, 由于纵、横梁不等高, 纵梁的高度小于横梁的高度且它们的上翼缘平齐, 故纵梁结点与横梁结点不重合, 纵梁结点在上, 横梁结点在下(图3)。由于纵、横梁是固连在一起的, 故纵梁结点位移与相应横梁结点位移之间存在一定的约束关系, 此关系在计算上可用约束方程来表示。即

$$\begin{aligned} u^B &= u^A + H \varphi, \\ v^B &= v^A - H \varphi_x, \\ w^B &= w^A, \\ \varphi_x &= \varphi_x, \\ \varphi_y &= \varphi_y, \\ \varphi_z &= \varphi_z \end{aligned}$$

其中, 上标 A 和 B 分别表示结点 A 和 B 的结点位移。

计算时, 上式右边的位移视为独立位移, 需求解确定, 而左边的位移则属于被约束的位移, 故不予分配自由度。

第二步: 取横梁为隔离体单独计算, 其网格划分及计算原理与单线桥类似, 不同之处在

于以下两点:

y							
x							
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧⑨
(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)

桥面系

图2 64 m 双线桥桥面系网络图

图3 纵、横梁连接处示意图

- (1) 由纵梁转化而来的横肋较单线桥多两根, 且此附加横肋高度与横梁高度不同。
- (2) 横梁受到的扭矩, 除了纵梁的面内弯矩外, 还包括由于纵、横梁不等高导致纵梁轴力 N_y 引起的扭矩, 此扭矩值为 $N_y \times H$ 。

按上述方法计算了双线铁路64 m 简支桁梁桥纵、横梁的内力, 荷载取恒载加中活载在双线上满跨布置但反向。即, 在第一线上, 车头在左; 在第二线上, 车头在右。主要计算结果见表3和表4。

2.2 纵梁的受力分析

由于荷载是反对称的, 故表3只给出了第一线纵梁的内力。由表3可见, 与单线桥一样, 纵梁的主要内力也是 M_x 、 Q_z 、 N_y 。由于纵、横梁不等高, 双线桥中纵梁的扭矩较单线桥纵梁扭矩要大, 但与主要内力相比, 此扭矩仍很小, 故扭矩仍是次要内力。若按老桥规的方法, 双线桥的内力与单线桥的内力是一样的,

表3 64 m 双线桥纵梁单元中点内力

纵梁号	Q_x / MN	N_y / MN	Q_z / MN	M_x / MN•m	M_y / MN•m	M_z / MN•m
(1)	0.004 16 - 0.004 16	- 0.197 1 0.197 1	0.238 0 0.312 0	- 0.067 5 - 0.228 7	0.000 049 7 - 0.000 049 7	- 0.001 69 - 0.001 64
(2)	0.003 59 - 0.003 59	- 0.420 7 0.420 7	0.169 7 0.198 3	0.151 4 - 0.265 9	- 0.000 008 0 0.000 008 0	- 0.001 49 - 0.001 39
(3)	0.002 39 - 0.002 39	- 0.612 4 0.612 4	0.205 4 0.162 6	0.199 8 0.030 7	- 0.000 020 6 0.000 020 6	- 0.001 07 - 0.000 85
(4)	0.008 2 - 0.000 82	- 0.698 2 0.698 2	0.162 8 0.205 2	- 0.000 7 - 0.168 6	0.000 036 9 - 0.000 036 9	- 0.000 43 - 0.000 26
(5)	- 0.000 74 0.000 74	- 0.703 7 0.703 7	0.206 2 0.161 8	0.166 6 0.010 7	- 0.000 021 8 0.000 021 8	0.000 19 0.000 40
(6)	- 0.002 29 0.002 29	- 0.628 9 0.628 9	0.139 1 0.180 9	0.015 1 - 0.182 6	0.000 025 4 - 0.000 025 4	0.000 81 0.001 03
(7)	- 0.003 61 0.003 61	- 0.459 7 0.459 7	0.187 1 0.132 9	0.241 0 - 0.024 4	0.000 005 7 - 0.000 005 7	0.001 38 0.001 51
(8)	- 0.004 56 0.004 56	- 0.233 2 0.233 2	0.137 2 0.182 8	0.102 5 0.080 2	- 0.000 007 52 0.000 075 2	0.001 77 0.0018 7
(9)	0.001 01 - 0.001 01	0.023 8 - 0.023 8	0.254 6 0.295 4	0.008 3 - 0.171 2	0.000 007 7 - 0.000 007 7	- 0.000 42 - 0.000 39
(10)	0.000 77 0.000 77	0.039 2 - 0.039 2	0.179 0 0.189 0	0.176 4 0.216 1	0.000 006 6 - 0.000 0006 6	- 0.000 32 - 0.000 29
(11)	0.000 52 - 0.000 52	0.062 3 - 0.062 3	0.208 2 0.158 9	0.224 1 - 0.030 1	- 0.000 006 2 0.000 006 2	- 0.000 23 - 0.000 19
(12)	0.000 20 - 0.000 20	0.060 8 - 0.060 8	0.170 8 0.197 2	0.032 1 - 0.137 7	0.000 001 9 - 0.000 001 9	- 0.000 10 - 0.000 05
(13)	- 0.000 21 0.000 21	0.070 2 - 0.070 2	0.199 5 0.168 5	0.138 4 - 0.014 7	- 0.000 002 6 0.000 002 6	0.000 06 0.000 11
(14)	- 0.000 55 0.000 55	0.066 4 - 0.066 4	0.135 5 0.184 5	0.013 4 - 0.209 1	0.000 001 1 - 0.000 001 1	0.000 20 0.000 24
(15)	- 0.000 84 0.000 84	0.051 4 - 0.051 4	0.181 7 0.138 3	0.204 0 - 0.030 4	0.000 008 8 - 0.000 008 8	0.000 32 0.000 36
(16)	- 0.001 03 0.001 03	0.028 1 - 0.028 1	0.161 6 0.158 4	0.022 3 - 0.009 5	- 0.000 004 0 0.000 004 0	0.000 41 0.000 43

表4 64 m 双线桥横梁最大应力

横梁号	M_y / MN • m	$\sigma_1 = M_y / W_y$ / MPa	M_z / MN • m	$\sigma_2 = M_z / W_z$ / MPa	M_x / MN • m	$\tau = M_x / W_x$ MPa	$\sigma_{\max} = \sigma_1 + \sigma_2$ MPa	最大应力位置
①	0.009 62	0.33	0.224 4	159.04	0.000 442	1.63	159.37	端部
②	0.046 93	1.61	0.269 0	190.64	0.000 094	0.35	192.25	端部
③	0.046 40	1.59	0.214 0	151.67	0.000 042	0.15	153.26	端部

最大弯矩为 $M_{\max} = 0.664 \text{ MN} \cdot \text{m}$ ，由此引起的最大应力 $\sigma_{\max} = 80.50 \text{ MPa}$ 。而按本文的计算结果，最大应力发生在(1)号纵梁中部，为 $\sigma = \sigma_M + \sigma_N = M_x / W_x + N_y / A = 67.25 \text{ MPa}$ ，小于老桥规的结果。可见，对于双线桥，纵梁按简支梁设计在强度上是偏于安全的。

2.3 横梁的受力分析

横梁主要受双向弯曲作用，面内、面外弯矩是主要内力。虽然受到的扭矩包括纵梁的面内弯矩及纵梁轴力引起的扭矩，但计算表明，此两部分扭矩共同作用下，横梁中的扭矩与面内、面外弯矩相比，仍很小，故扭矩也是次要内力。

若按老桥规的方法，最大面内弯矩为 $M_{\max}$

相应的最大正应力为 $\sigma_{\max} = 105 \text{ MPa}$, 小于本文按实际情况算出的最大正应力 192.25 MPa 。

3 结语

(1) 纵梁相当于弹性支承上的连续梁, 不管是单线桥还是双线桥, 主要内力均为轴力、面内弯矩和面内剪力。面内弯矩和轴力共同作用引起的最大正应力, 小于按老桥规方法求出的最大正应力。

(2) 横梁主要受面内、面外双向弯矩作用, 尽管面外弯矩小于面内弯矩, 但由面外弯矩引起的应力与面内弯矩引起的应力相当甚至更大。两者之和在不少区域超过了按老桥规求出的最大正应力。

(3) 对于一般设计人员, 要按新桥规初稿规定的方法或本文的数值方法分析纵、横梁的受力状态是比较困难和费时的。建议在初步设计时, 对纵、横梁都按简支梁计算(只计面内弯矩)。所得的最大应力, 纵梁不必修正, 而横梁应再乘以修正系数。该修正系数应根据进一步的计算或测试确定。

参考文献

- 1 张冗真, 曹富新. 弹性力学及其有限元法. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- 2 万明坤, 王俭槐. 铁路钢桁梁桥计算. 北京: 中国铁道出版社, 1988.
- 3 铁路桥涵设计规范(TBJ2-85). 北京: 人民铁道出版社, 1985.

THE STRESS ANALYSIS OF LONGITUDINAL AND TRANSVERSE BEAMS OF RAILWAY STEEL TRUSS BRIDGES

Chen Yuji, Ye Meixin

Department of Architectural Engineering, Changsha Railway Institute, Changsha 410075

Wu Hongze

*Department of Resources Exploitation Engineering,
Central South University of Technology, Changsha 410083*

ABSTRACT Using two step finite element method and allowing for the interact between the main truss and the floor system of the railway steel truss bridges, the actual stresses of the single-lined bridge and double-lined bridge, as well as the problems existing in the simple method often used by designers have been analyzed. The suggestions were put forward to the calculation of longitudinal and transverse beams in the "Railway Bridge Design Code".

Key words floor system main truss longitudinal and transverse beam interact restraining equation

(编辑 吴家泉)