

公路工程

GONGLU GONGCHENG

2

2021

ISSN 1674-0610
CN 43-1481/U



港珠澳大桥·人工岛通道高韧超薄沥青磨耗层罩面工程——华运通达（广东）道路科技有限公司

HIGHWAY ENGINEERING

双月刊 1975年创刊
Bimonthly Since 1975
第46卷 第2期 总第207期
Vol.46, No.2 Serial No.207

全国中文核心期刊
中国科技核心期刊
RCCSE中国核心学术期刊

ISSN 1674-0610



主办：湖南省交通科学研究院

目次

科学研究

- 钢-UHPC组合桥面板 UHPC 层受力性能研究 马 帅, 张士红, 邵旭东(1)
- 体外预应力加固钢筋混凝土简支梁的设计参数研究 ... 毛德均, 许 鹏, 陈 旭, 莫南明(8)
- 半穿式钢桥梁桥面铺装面外稳定性研究 程 高, 张之恒, 姬子田, 刘小平(15)
- 钢梁桥-混凝土组合式拱桥计算方法研究
..... 谢飞翔, 张海君, 田仲初, 王祺顺, 陈耀章(20)
- 考虑地震效应的山区大跨度拱桥静风稳定性分析 唐翠兰, 杨 飞, 刘志文(27)
- 基于模态分析的拱桥地震易损性分析 申彦利, 陈伟湖(34)
- 基于模态分析的拱桥地震效应主塔力学响应特征
..... 周孝飞, 侍永生, 雷顺成, 李 谦(41)
- 强震地震动对钢-混凝土组合桥地震易损性的影响分析 孔令才, 王 华, 刘世建(48)
- 正交异性钢桥面板疲劳寿命分析及改进措施研究 陈 辉, 于 力, 要荆荆(54)
- 基于钢桥面板的桥梁结构损伤识别 张子东, 马春艳, 陈鹏一(60)
- 基于组合梁-TOB 的桥梁方案优选 方成成, 张义平, 池恩安, 雷 振(65)
- 组合木梁桥面板受压力学性能试验研究 朱厚源, 刘佳桐, 王解军(71)
- 再生骨料对桥面板混凝土性能影响 王二兵, 杜西江, 徐 良, 胡 靖(77)
- 桥面铺装材料对桥面板性能影响研究 周志刚, 李 刚, 韩 乐, 曹长斌, 林有贵(82)
- 高寒地区桥面铺装与 SBS 复合改性沥青混合料配合比设计及性能研究
..... 童 浩, 金光来, 豆莹莹(89)
- 改性沥青 SBS 含量红外光谱试验的影响因素研究
..... 俞喜兰, 朱木峰, 魏子亮, 王 超, 刘 栋(96)
- 回收橡胶颗粒 SBS 改性沥青及混合料性能与应用研究 朱曲平, 黄 刚(103)
- 制备工艺对冷拌环氧沥青相容性的影响研究
..... 符 适, 吉泽中, 虞 浩, 王俊彦, 詹 贺(112)
- 基于加速加载试验的花岗岩沥青混合料水温稳定性研究
..... 王立业, 杨永富, 张黎明, 庄传仪(117)
- 基于吸震试验的沥青-集料黏附性量化研究
..... 李仁君, 王丽静, 黄婷婷, 胡芙蓉, 罗 蓉(124)
- 公路生命周期碳排放评估及其敏感性分析 李 慧, 彭夏清, 张静晓(132)
- 混合非机动车交通流路段的车道宽度设计方法 张卫华, 王雅奇, 周 畅(139)

工程设计

- 基于三维摩擦-接触模型的连续梁桥地震碰撞效应分析 郑祖恩, 王宏祥(145)
- 基于神经网络算法的大跨径斜拉桥随机地震效应主梁动力可靠度研究
..... 王思伟, 陈双庆, 雷顺成, 王祺顺(152)
- 钢-UHPC 组合桥面板界面抗剪理论及设计方法 张士红, 李斐然, 邵旭东(157)
- 钢管混凝土桥墩环梁式节点动力响应及结构优化研究
..... 肖俊生, 江 锁, 卢春亭, 李 杨, 王建军(164)
- 预应力混凝土箱梁非均匀收缩效应分析与简化 莫 迪, 张柳煜, 王 龙(169)
- 剪力钉倾斜对其力学性能影响分析 张柳煜, 金 鑫, 苏 举, 孙武云, 黄乐州(176)

工程材料

- 速生草植物纤维沥青混合料路用性能研究 聂思宇, 李 泉, 李 佩, 吴庆定, 刘克非(183)
- 超高性能混凝土直接拉伸试验装置的研究 修义军, 何湘峰, 李芳园, 刘琼伟, 邵旭东(188)
- 稳定型胶粉与 SBS 复合改性沥青及沥青混合料性能研究 颜 鑫, 郑翔南(195)
- 基于快速与常规试验方法的沥青技术指标回归关系 张海涛, 王 莹(201)
- 净化路面径流用大孔隙沥青混合料长期性能研究
..... 甘文霞, 罗子彪, 程 刚, 胡小弟, 潘 攀(205)
- PE 改性沥青混合料路用性能试验研究 万 钰, 徐 朔, 吴文朋(212)
- 冻融循环对废旧刹车片粉沥青混合料路用性能的影响研究
..... 赵怡程, 胡小弟, 王 宁, 甘文霞, 潘 攀(217)

其他

- 沪通长江大桥北引桥公铁合建段双层混凝土箱梁立体施工关键技术研究
..... 曾 炜, 李 隆, 汪建群(222)
- 火灾环境下桥梁混凝土动、静弹性模量试验研究 申雁鹏(228)
- 开口加劲板件的稳定极限承载力研究 甘采华, 王 华, 刘世建(234)
- 改进遗传算法在预应力快速检测中的应用研究 邹国庆, 魏曙安, 谭 鹏, 刘国坤(241)
- 基于 Vague 集的山岭重丘区公路选线绿色度评价研究 石振武, 孙钰泽(246)

公路工程

GONGLU GONGCHENG

全国中文核心期刊
中国科技核心期刊
(中国科技论文统计源期刊)
RCCSE 中国核心学术期刊

双月刊

1975 年创刊

第 46 卷 第 2 期 (总第 207 期)

出版日期 2021 年 4 月 20 日

主管单位

湖南省交通运输厅

主办单位

湖南省交通科学研究院

本刊编委会

主任委员 吴亚中

副主任委员 (以姓氏笔画为序)

万剑平 王 维 杨航宇

郑健龙 (院士) 赵明华

龚晓南 (院士) 彭建国 蔡 长

委 员 (以姓氏笔画为序)

卫 军 肖汝诚 陆化普 邵旭东

张建仁 施耀忠 徐 岳 徐 建

黄立葵 黄晓明 符铨砂 曾梦澜

廖朝华

特邀编委 (以姓氏笔画为序)

方联民 王解军 宁夏元 刘银生

胡柏学 赵等层 黄向京

顾 问 (以姓氏笔画为序)

王国鼎 朱若常 张起森 林 建

龚赛群 程翔云

主 编 李志勇

责任编辑 李 梓 唐 敏 曾亚林

出版单位 《公路工程》编辑部

地 址 湖南省长沙市芙蓉中路三段 472 号

电 话 (0731) 85221546

邮 编 410015

投稿网址 <http://zgl.cbpt.cnki.net>

E-mail glgcz@163.com

印刷单位 湖南敦昊彩色印务有限公司

发行单位 湖南省报刊发行局

发行范围 国内外公开发行

国际标准连续出版物号 ISSN 1674-0610

国内统一连续出版物号 CN 43-1481/U

广告发布登记号: 湘市监广登字[2019]第 45 号

国内邮发代号 42-301

国外发行代号 Q 1870

国内定价 20 元

JOURNAL OF HIGHWAY ENGINEERING

A Chinese Core Journal
A Source Journal for Chinese
Scientific and Technical Papers and
Citations

Bimonthly since 1975

Vol. 46, No. 2 (Serial No. 207)

April 20, 2021

Administration: Department of
Transportation of Hunan Province

Sponsor: Hunan Communications research
Institute

Director: WU Yazhong

Associate Directors:

WAN Jianping

WANG Wei

YANG Hangyu

ZHENG Jianlong (Academician)

ZHAO Minghua

GONG Xiaonan (Academician)

PENG Jianguo

CAI Chang

Chief Editor: Li Zhiyong

Executive Editors: LI Zi TANG Min

ZENG Yalin

Publishing Unit: Editorial Department of
Journal of Highway Engineering

Address: 472 Furong Road Middle, Section
3, Changsha, Hunan 410015, People's
Republic of China

Telephone: (0731) 85221546

Web site: <http://zgjl.cbpt.cnki.net>

E-mail: glgcz@163.com

Composing and Printing: Hunan Dunhao
Colour Printing Co. Ltd.

Distributor: Hunan Newspaper Board

Domestic Distribution Code: 42-301

International Distribution Code: Q 1870

ISSN 1674-0610
CN 43-1481/U

Serial Parameters: CN 43-1481/U * 1975 * B * 16 * 252 * zh * P * ¥20.00 * 40 * 2021-4

Scientific Research

- Mechanical Behaviors of UHPC Layer for Steel - UHPC Composite Bridge Deck MA Shuai et al (1)
Research on Design Parameters of Reinforced Concrete Simple-supported Beam Strengthened by
External Prestressing MAO Dejun et al (8)
Analysis on External Stability of Upper Chord in Half-through Truss Bridge CHENG Gao et al (13)
Research on Calculation Method of Steel Bellows-Concrete Composite Arch Culvert XIE Feixiang et al (20)
Analysis of Terrain Effects on the Aerostatic Stability of Long-span Suspension Bridge Located
in Mountainous Area TANG Cuilan et al (27)
Seismic Vulnerability Analysis of Hollow Pier Based on Shaking Table Test SHEN Yanli et al (34)
Mechanical Response Characteristics of Main Tower With Random Seismic Effect on Long-
span Cable-stayed Bridge Based on Virtual Incentive Method ZHOU Xiaofei et al (41)
Effects of Vertical Ground Motions on Seismic Vulnerabilities of Steel-concrete Bridges ... KONG Lingcai et al (48)
Fatigue Disease Analysis of Orthotropic Steel Bridge Deck and Research on Improvement
Measures CHEN Hui et al (54)
Analysis of Bridge Structure Damage Identification Based on Vehicle-bridge Coupling Vibration
..... ZHANG Yudong et al (60)
Blasting Scheme Optimization Based on Combination Weighting-Topsis FANG Chengcheng et al (69)
Experimental Study on the Eccentric Compression Performance of Glulam Hollow Columns
..... ZHU Houyuan et al (71)
Effect of Crushing Behavior on the Road Performance of Asphalt Mixture Containing Recycled
Aggregate WANG Erbing et al (77)
Study on Influence of Segregation Against Road Performance of Hot Rolled Asphalt ZHOU Zhigang et al (82)
Design and Performance Research of Modified Asphalt Mixture Based on High Ash BRA and
SBS TONG Hao et al (89)
Study on Influencing Factors of FTIR Test for Measuring SBS Content in Modified Asphalt YU Xilan et al (96)
Research on Performance and Application of Recycled Plastic Compound SBR Modified Asphalt
and Mixture ZHU Quping et al (103)
Study on the Effect of Preparation Technology on Compatibility of Cold-mixed Epoxy Asphalt FU Shi et al (112)
Structural Performance Evaluation of Granite Asphalt Mixture Pavement Based on Accelerated
Loading Test WANG Liye et al (117)
Quantitative Study on Asphalt-aggregate Adhesion Based on Net Adsorption Test LI Renjun et al (124)
The Life Cycle Carbon Emission Assessment and Sensitivity Analysis of Highway LI Hui et al (133)
Design Methods for the Width of Non-motorized Lane in Mixed Traffic Flow Sections ... ZHANG Weihua et al (139)

Engineering Design

- Analysis of Seismic Impact Effect of Continuous Beam Bridge Based on Three-dimensional
Friction-contact Model ZHENG Zuen et al (145)
Random Seismic Effect of Long-span Cable-stayed Bridge on Dynamic Reliability of Main Beam
Based on Neural Network Algorithm Study WANG Siwei et al (152)
Theory and Design Method of Interfacial Shear Resistance for Steel-UHPC Composite Bridge
Deck ZHANG Shihong et al (157)
Study on Dynamic Response and Structural Optimization of Ring Beam Joints of Concrete Filled
Steel Tubular Bridge Piers XIAO Junsheng et al (164)
Analysis and Simplification of Non-uniform Shrinkage Effect of Prestressed Concrete Box Girder
..... MO Di et al (169)
Analysis on the Influence of the Tilted Shearing Stud on Its Mechanical Properties ZHANG Liuyu et al (176)

Engineering Materials

- Pavement Performance of Fast-growing Grass Fiber Asphalt Mixture NIE Siyu et al (183)
Design and Research of Direct Tensile Test Method for Ultra-high Performance Concrete XIU Yijun et al (188)
Study on Properties of Stabilized Rubber Powder and SBS Composite Modified Asphalt and Asphalt
Mixture YAN Xin et al (193)
Regressive Relationship of Asphalt Technical Index Based on Rapid and Conventional Test
Method ZHANG Haitao et al (201)
The Durability of Pavement Rainwater Runoff of Macroporous Asphalt Mixture Mixed with
Activated Carbon Purifies GAN Wenxia et al (208)
Application Research of PE Modified Asphalt Mixture on Airport Runway Wan Yu et al (214)
The Long Term Performance of Asphalt Mixture Using Brake Pads Waste as Filler After
Freezing-thawing Cycles ZHAO Yicheng et al (220)

Miscellaneous Topics

- Research on the Three-dimensional Construction Key Technology of Double-layer Concrete Box
Girder of the North Approach Section of Hu-tong Yangtze River Bridge ZENG Wei et al (228)
Experimental Research on Dynamic and Static Elastic Modulus of Bridge Concrete Under Fire
Environment SHEN Yanpeng et al (234)
Research on the Stable Ultimate Bearing Capacity of Open-stiffened Plates GAN Caihua et al (240)
Research on the Application of Improved Genetic Algorithm in the Rapid Detection of Prestress
..... ZOU Guoqing et al (246)
Study on Green Degree Evaluation of Highway Route Selection in Mountain Heavy Hilly Area
Based on Vague SHI Zhenwu et al (252)

Doi:10.19782/j.cnki.1674-0610.2021.02.003

半穿式钢桁梁桥上弦杆面外稳定性研究

程 高^{1,2,3}, 张之恒¹, 姬子田¹, 刘小平⁴

(1. 长安大学, 陕西 西安 710064; 2. 公路大型结构安全教育部工程研究中心, 陕西 西安 710064; 3. 公路桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064; 4. 长庆工程设计有限公司, 陕西 西安 710000)

[摘 要] 为研究半穿式钢桁梁桥上弦杆的面外稳定性, 采用能量法, 基于势能驻值原理建立了上弦杆的稳定平衡方程, 推导出上弦杆面外屈曲荷载的解析表达式, 提出了上弦杆面外屈曲荷载的简化计算公式, 以某半穿式钢桁梁桥为例进行参数分析和结果比较。研究结果表明: 半穿式钢桁梁桥上弦杆的侧向屈曲荷载主要和上弦杆抗弯刚度、侧向支撑刚度、节间长度和节间数有关; 目前规范提供的屈曲荷载计算结果非常保守; 当侧向支撑刚度较大时, 屈曲荷载可近似于欧拉临界荷载; 当侧向支撑刚度较小时, 屈曲荷载计算式是随节间数变化的函数表达式; 限制腹杆高度可显著提高半穿式钢桁梁桥面外稳定性; 该研究可指导半穿式钢桁梁桥的腹杆设计, 为该类桥型面外稳定性的研究提供参考。

[关键词] 桥梁工程; 面外稳定性; 能量法; 半穿式钢桁梁桥; 屈曲荷载

[中图分类号] U 448.36

[文献标志码] A

[文章编号] 1674-0610 (2021) 02-0015-05

Analysis on External Stability of Upper Chord in Half-through Truss Bridge

CHENG Gao^{1,2,3}, ZHANG Zhiheng¹, JI Zitian¹, LIU Xiaoping⁴

(1. Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 2. Large Structures Highway Safety Engineering Research Center of the Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 3. Shaanxi Provincial Major Laboratory for Highway Bridge & Tunnel, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 4. Changqing Engineering Design CO., LTD, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

[Abstract] To analyze the out-of-plane critical buckling load of upper chord in half-through truss bridge. Based on stationary potential energy principles, the balance equations of the upper chord were established by using the energy method. The analytic expressions of out-of-plane critical buckling load of upper chord were derived and the simplified calculation formulas of out-of-plane critical buckling load of upper chord were put forward. A half-through truss bridge was taken as an example to analyze the parameters and compare the results. The results show that the out-of-plane critical buckling load is mainly related to the bending stiffness of the upper chord, lateral stiffness, internode length and internode number. The out-of-plane critical buckling loads provided by the current codes are very conservative. When the lateral stiffness is large, the buckling load tends to the Euler load. When the lateral stiffness is small, the buckling load varies with the internode number. Limiting the height of the web members can significantly improve the external stability of half-through truss bridge. The results of this work can guide the design of web members and serve as a reference for future studies of external stability.

[Key words] bridge engineering; external stability; energy method; half-through truss bridge; out-

[收稿日期] 2020-12-28

[基金项目] 中国博士后科学基金第67批面上资助项目(2020M673601XB); 陕西省交通运输科技项目(17-30T、19-14K)

[作者简介] 程 高(1988—), 男, 河南泌阳人, 高级工程师, 博士, 硕士, 工学博士(后), 主要从事钢混组合结构桥梁的研究工作。

[引文格式] 程 高, 张之恒, 姬子田, 等. 半穿式钢桁梁桥上弦杆面外稳定性研究[J]. 公路工程, 2021, 46(2): 15-19, 26.

CHENG G, ZHANG Z H, JI Z T, et al. Analysis on external stability of upper chord in half-through truss bridge[J]. Highway Engineering, 2021, 46(2): 15-19, 26.

of-plane critical buckling load

0 引言

半穿式钢桁梁桥因桥面净空不受限且经济性好等优点而被广泛应用于中小跨径桁梁桥,然而半穿式钢桁梁桥上弦杆的面外稳定性问题一直是制约该桥型发展应用的关键因素,近年来得到了广泛的关注,1875年俄罗斯克夫达敞式桥就因上弦杆受压失稳而引起全桥倒塌。因此,研究上弦杆的面外稳定性对半穿式钢桁梁桥的发展具有重要意义。

现有研究主要集中在半穿式钢桁梁桥的横向刚度。文献[1]对列车准高速通过半穿式钢桁梁桥的横向振动性能进行研究,以实桥为例证明了横向刚度能保证列车运行安全性。文献[2]理论分析了某实桥提速后横向振幅超限原因,提出了增大主桁下弦和下平纵联斜撑截面面积以增大横向刚度的方法。文献[3]根据轮轨摩擦与车辆横向振动性能的相关性原理,对润滑前后半穿式钢桁梁桥的横向振动进行对比分析,证明了轮轨润滑对横向拍波振动能起明显抑制作用。文献[4]提出了一种研究半穿式钢桁梁桥与列车系统空间振动的分析方法,采用计算机模拟,检算了刚度和运营平稳性。文献[5]

通过有限元建模分析了半穿式钢桁梁桥的动力特性和横向振动,对比实测资料,提出了稳定性的合理加固措施。上述研究成果均说明了半穿式钢桁梁桥的横向刚度对上弦杆面外稳定性影响显著,为本文的研究奠定了基础。

本文在上述研究成果基础上,采用能量法,通过 Maple 数学计算软件给出了不同节间数下屈曲荷载的简化计算公式,该方法计算简便,与现有论文研究计算结果拟合良好,揭示了半穿式钢桁梁桥上弦杆面外稳定性的主要影响因素。以 G211 国道甘肃甜水桥为例,进一步分析了半穿式钢桁梁桥腹杆高度对上弦杆面外稳定性的影响,为半穿式钢桁梁桥腹杆设计提供了依据。

1 基于能量法的屈曲荷载分析

半穿式钢桁梁桥的端腹杆侧向支撑一般很强,将端腹杆对上弦杆的支撑作用等效为铰接边界条件。中间腹杆对上弦杆的支撑作用等效为弹簧,弹簧刚度为腹杆侧向支撑刚度。半穿式钢桁梁桥的上弦杆发生侧向屈曲时,根据受力状态,可简化为中间带弹簧支撑的简支梁计算模型如图 1 所示,图中上弦杆总长度为 L ,节间长度都为 l ,节间数为 N ,

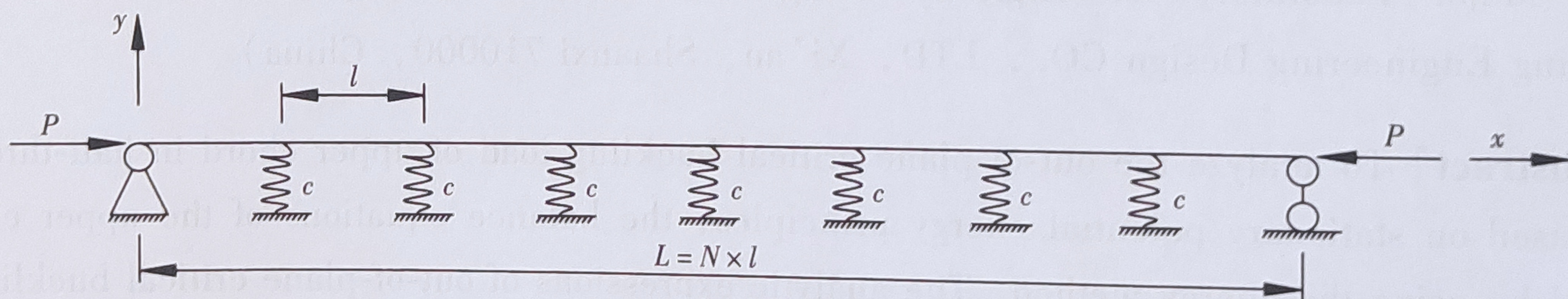


图 1 简化力学模型

Figure 1 Simplified mechanical model

弹簧刚度为 c , 屈曲荷载为 P , 以左端点为原点, 建立如图所示的直角坐标系。

1.1 基本假定

为方便计算,半穿式钢桁梁桥上弦杆的简化力学模型满足如下假定:①端腹杆侧向刚度很大可简化为铰接;②中腹杆尺寸相同,每个弹簧刚度均相同;③上弦杆各节间长度相同;④上弦杆沿跨长方向为等截面;⑤上弦杆沿跨长方向轴力不变。

1.2 理论计算方法

半穿式钢桁梁桥横截面简化模型如图 2 所示,图中 b 为横梁长度; h 为腹杆中心高度; I_b 为横梁截面惯性矩; I_c 为单榀桁架截面惯性矩。根据结构力学,双榀桁架侧向挠度 Δ 可表示为:

$$\Delta = \sum \int \frac{\overline{M} M_p}{Ei} ds = \frac{2h^3}{3EI_c} + \frac{bh^2}{EI_b} \quad (1)$$

式中: \overline{M} 为结构虚拟单位力下内力; M_p 为屈曲荷载 P 下结构内力; E_i 为结构抗弯刚度; E 为钢材弹性模量; i 为结构截面惯性矩。

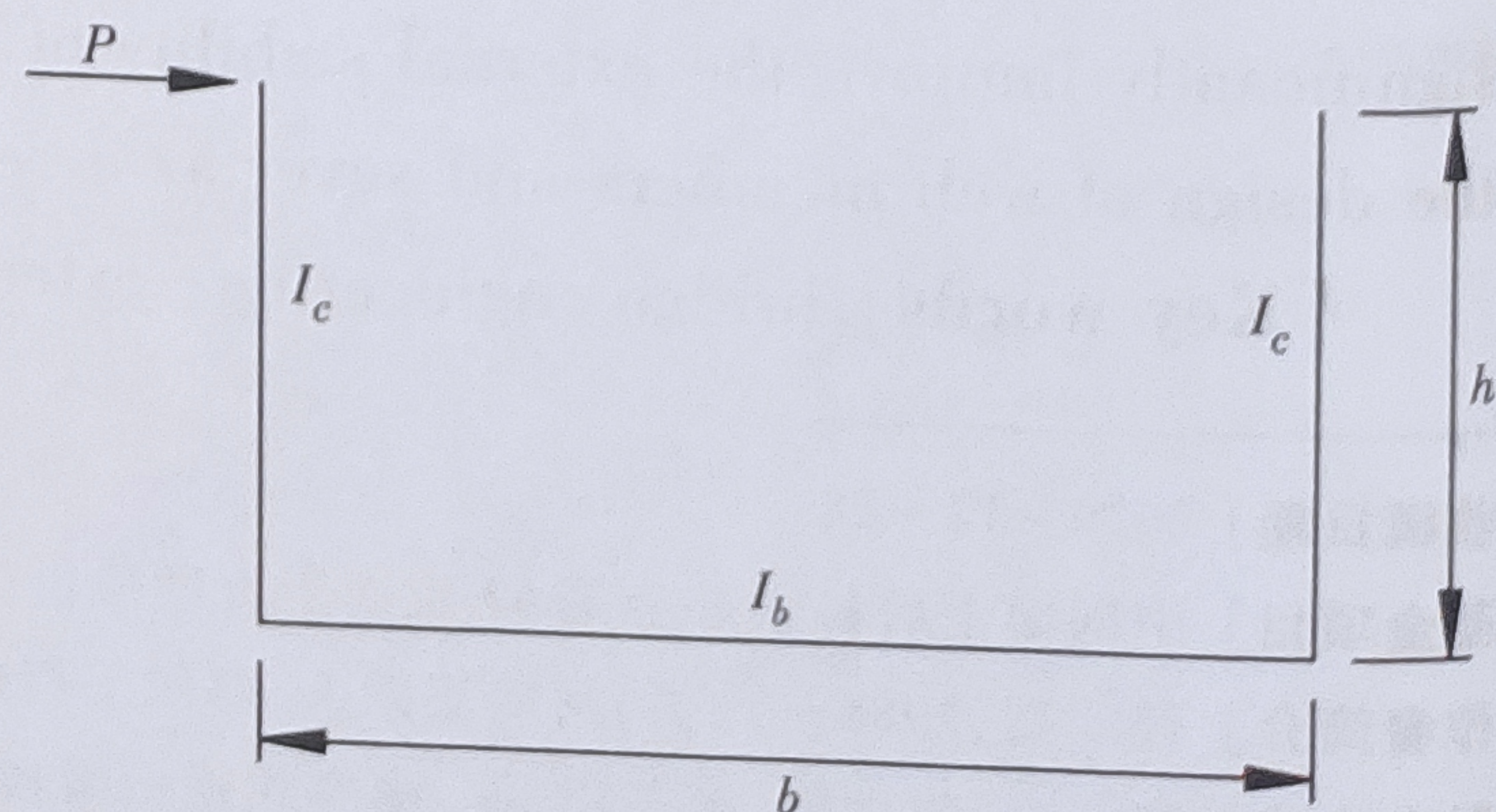


图 2 横截面简化模型

Figure 2 Cross-section model

弹簧刚度 c 是腹杆提供的侧向支撑刚度, 与腹杆高度有很大关系, 其数值为单榀桁架侧向挠度的倒数, 弹簧刚度 c 可表示为:

$$c = \frac{1}{\Delta/2} = \frac{1}{h^3 / (3EI_c) + bh^2 / (2EI_b)} \quad (2)$$

为满足几何边界条件和静力边界条件, 上弦杆屈曲时变形曲线可假设为:

$$y = \sum_{n=1}^B a[n] \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{N \cdot l}\right) \quad (3)$$

式中: x 为上弦杆顺桥向位置; y 为上弦杆屈曲变形; n 为形函数待定参数; B 为形函数数量。

根据式(3)可以得到 y 对 x 的一阶导数和二阶导数:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\pi}{N \cdot l} \cdot \sum_{n=1}^B n \cdot a[n] \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{N \cdot l}\right) \quad (4)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{\pi^2}{(N \cdot l)^2} \cdot \sum_{n=1}^B n^2 \cdot a[n] \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{N \cdot l}\right) \quad (5)$$

上弦杆的弯曲应变能为:

$$U_b = \frac{EI}{2} \int_0^{Nl} \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx = \frac{EI}{2} \cdot \frac{\pi^4}{(N \cdot l)^4} \times \int_0^{Nl} \left[\sum_{n=1}^B n^2 \cdot a[n] \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{N \cdot l}\right) \right]^2 dx \quad (6)$$

式中: I 为上弦杆截面惯性矩。

弹簧位置的屈曲变形可表示为:

$$y_c = \sum_{n=1}^B a[n] \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot k \cdot l}{N \cdot l}\right) \quad (7)$$

式中: k 为屈曲变形待定参数。

上弦杆中弹簧应变能为:

$$U_d = \sum_{k=1}^{N-1} \frac{1}{2} \cdot c \cdot y_c^2 = \frac{c}{2} \times \sum_{k=1}^{N-1} \left(\sum_{n=1}^B a[n] \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot k \cdot l}{N \cdot l}\right) \right)^2 \quad (8)$$

外荷载所做的功:

$$W = \frac{P}{2} \int_0^{Nl} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx = \frac{P \cdot \pi^2}{2 \cdot (N \cdot l)^2} \times \int_0^{Nl} \left[\sum_{n=1}^B n \cdot a[n] \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{N \cdot l}\right) \right]^2 dx \quad (9)$$

根据能量法, 该结构的总能量为:

$$U = U_b + U_d - W \quad (10)$$

式中: U 为结构总能量。

根据势能驻值原理, 总势能的变分可表示为:

$$\delta U = \sum_{n=1}^B \frac{\partial U}{\partial a[n]} \delta a[n] \quad (11)$$

结构达到屈曲状态, 由稳定的能量准则, 应满足下式:

$$\frac{\partial U}{\partial a[n]} = 0 \quad (12)$$

由式(12)可得 n 个线性齐次方程组, 可用矩阵形式表达为下式:

$$D = C \cdot \begin{pmatrix} a[1] \\ a[2] \\ \vdots \\ a[n] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a[1] \\ a[2] \\ \vdots \\ a[n] \end{pmatrix} \quad (13)$$

式中: 矩阵 D 为稳定方程矩阵; 矩阵 C 为方程组系数矩阵; 结构达到屈曲状态; 矩阵 C 对应的行列式应为 0, 可表示为式 (14):

$$\begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{vmatrix} = 0 \quad (14)$$

由式 (14) 可得到屈曲荷载 P 。对于屈曲荷载 P 的求解, 所取的形函数数量 B 越大, 所得到的近似解越精确。根据计算方法可知当形函数数量 B 等于节间数 N 时, 第 N 个方程所求得的荷载恰好为欧拉临界荷载 P_{cr} , 继续增加形函数数量对屈曲荷载 P 的影响已经很小。

1.3 简化计算公式

半穿式钢桁梁桥上弦杆节间数通常在 4~12 之间, 不同节间数 N 对应的屈曲荷载 P 表达式有较大差别, 采用上述理论计算方法, 通过 Maple 数学计算软件, 经大量编程计算, 对不同上弦杆节间数的半穿式钢桁梁桥进行计算分析, 提出了屈曲荷载 P 的简化计算公式如表 1 所示。从表 1 可看出弹簧刚度 c 对屈曲荷载 P 的影响很大, 当弹簧刚度 c 较大时, 对应的屈曲荷载 P 为单个杆件的欧拉临界荷载 P_{cr} ; 当弹簧刚度 c 较小时, 对应的屈曲荷载 P 计算式为含有多个参数的函数表达式。腹杆高度

屈曲荷载
为钢材



h 是弹簧刚度 c 的主要影响因素, 对半穿式钢桁梁桥上弦杆的面外稳定性具有重要意义。

表 1 简化计算公式
Table 1 Simplified formulas

节间数 N	弹簧刚度 c	屈曲荷载 P
4	$> \frac{63EI\pi^4}{256l^3}$	$\frac{\pi^2 EI}{l^2}$
4	$< \frac{63EI\pi^4}{256l^3}$	$\frac{81EI\pi^4 + 256cl^3}{144\pi^2 l^2}$
5	$> \frac{144EI\pi^4}{625l^3}$	$\frac{\pi^2 EI}{l^2}$
5	$< \frac{144EI\pi^4}{625l^3}$	$\frac{256EI\pi^4 + 625cl^3}{400\pi^2 l^2}$
6	$> \frac{275EI\pi^4}{1296l^3}$	$\frac{\pi^2 EI}{l^2}$
6	$< \frac{275EI\pi^4}{1296l^3}$	$\frac{625EI\pi^4 + 1296cl^3}{900\pi^2 l^2}$
7	$> \frac{117EI\pi^4}{600.25l^3}$	$\frac{\pi^2 EI}{l^2}$
7	$< \frac{117EI\pi^4}{600.25l^3}$	$\frac{324EI\pi^4 + 600.25cl^3}{441\pi^2 l^2}$
8	$> \frac{735EI\pi^4}{4096l^3}$	$\frac{\pi^2 EI}{l^2}$
8	$< \frac{735EI\pi^4}{4096l^3}$	$\frac{2401EI\pi^4 + 4096cl^3}{3136\pi^2 l^2}$
9	$> \frac{1088EI\pi^4}{6561l^3}$	$\frac{\pi^2 EI}{l^2}$
9	$< \frac{1088EI\pi^4}{6561l^3}$	$\frac{4096EI\pi^4 + 6561cl^3}{5184\pi^2 l^2}$
10	$> \frac{144EI\pi^4}{625l^3}$	$\frac{\pi^2 EI}{l^2}$
10	$< \frac{144EI\pi^4}{625l^3}$	$\frac{256EI\pi^4 + 625cl^3}{400\pi^2 l^2}$
11	$> \frac{1620EI\pi^4}{7320.5l^3}$	$\frac{\pi^2 EI}{l^2}$
11	$< \frac{1620EI\pi^4}{7320.5l^3}$	$\frac{6561EI\pi^4 + 14641cl^3}{9801\pi^2 l^2}$
12	$> \frac{275EI\pi^4}{1296l^3}$	$\frac{\pi^2 EI}{l^2}$
12	$< \frac{275EI\pi^4}{1296l^3}$	$\frac{625EI\pi^4 + 1296cl^3}{900\pi^2 l^2}$

2 算例及分析

2.1 甜水桥算例

以 G211 国道甘肃甜水桥为例, 对半穿式钢桁梁桥上弦杆的面外稳定性进行计算。甜水桥为简支半穿式钢桁梁桥, 主跨 71 m, 桁高 5.95 m, 桥宽 14.8 m, 高跨比为 1/12, 宽跨比为 1/4.8, 上弦杆节间数为 8, 节间长度为 8 m, 甜水桥立面布置图和横截面布置图如图 3 和图 4 所示。甜水桥上弦杆为圆形钢管混凝土, 截面尺寸为 $\phi 1000 \times 24$ mm, 下弦杆为方钢管混凝土, 截面尺寸为 $900 \text{ mm} \times 900 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 腹杆为圆形空钢管, 截面尺寸为

$\phi 630 \times 26$ mm, 钢管采用 Q390E 钢材, 管内混凝土采用 C50 自密实补偿收缩混凝土, 杆件截面如图 5 所示。

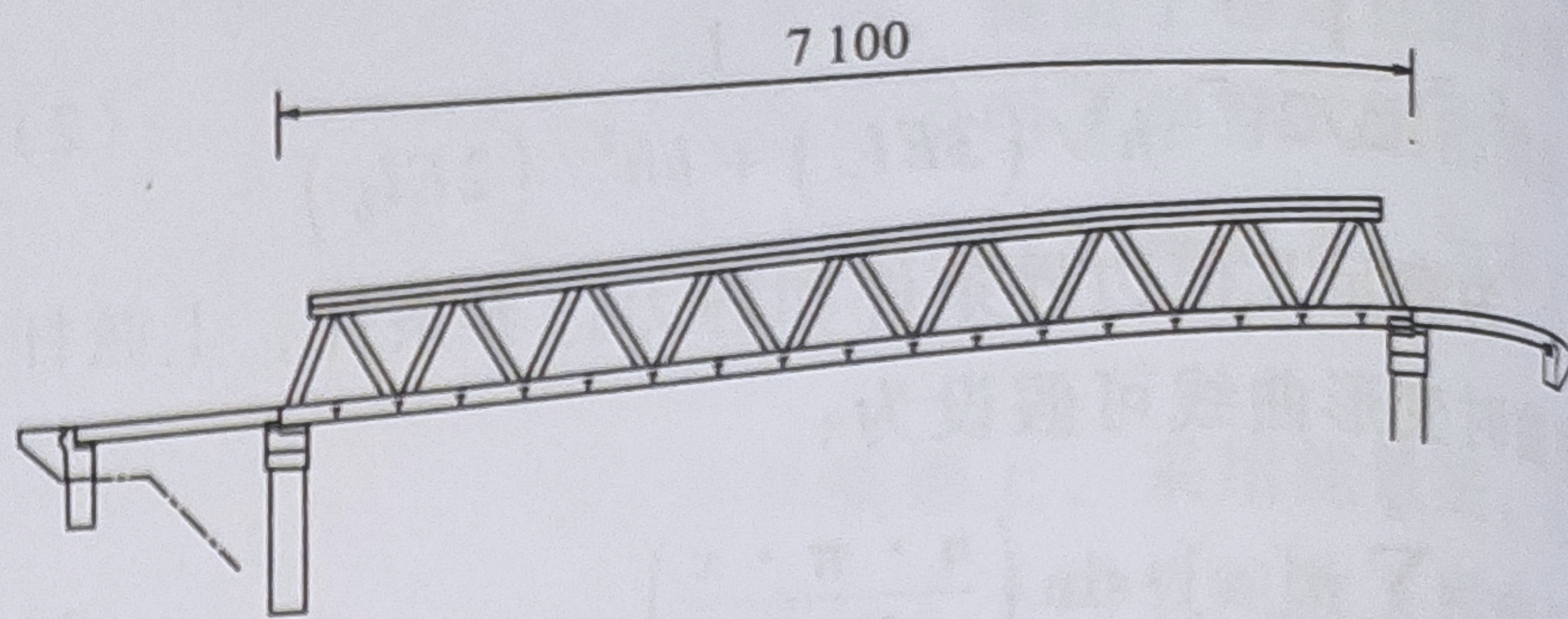


图 3 甜水桥立面布置图 (单位: cm)

Figure 3 Elevation arrangement of the bridge (Unit: cm)

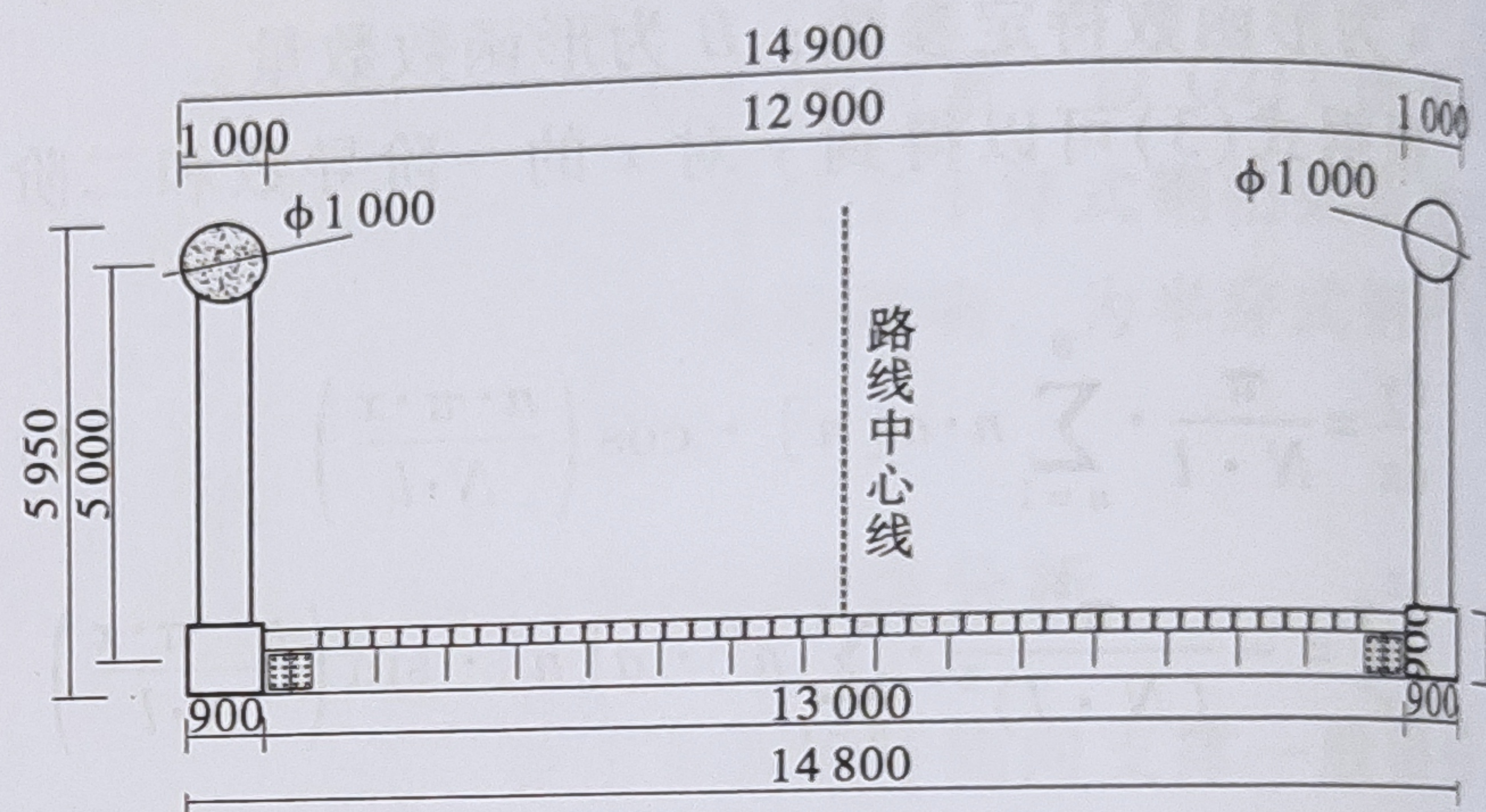
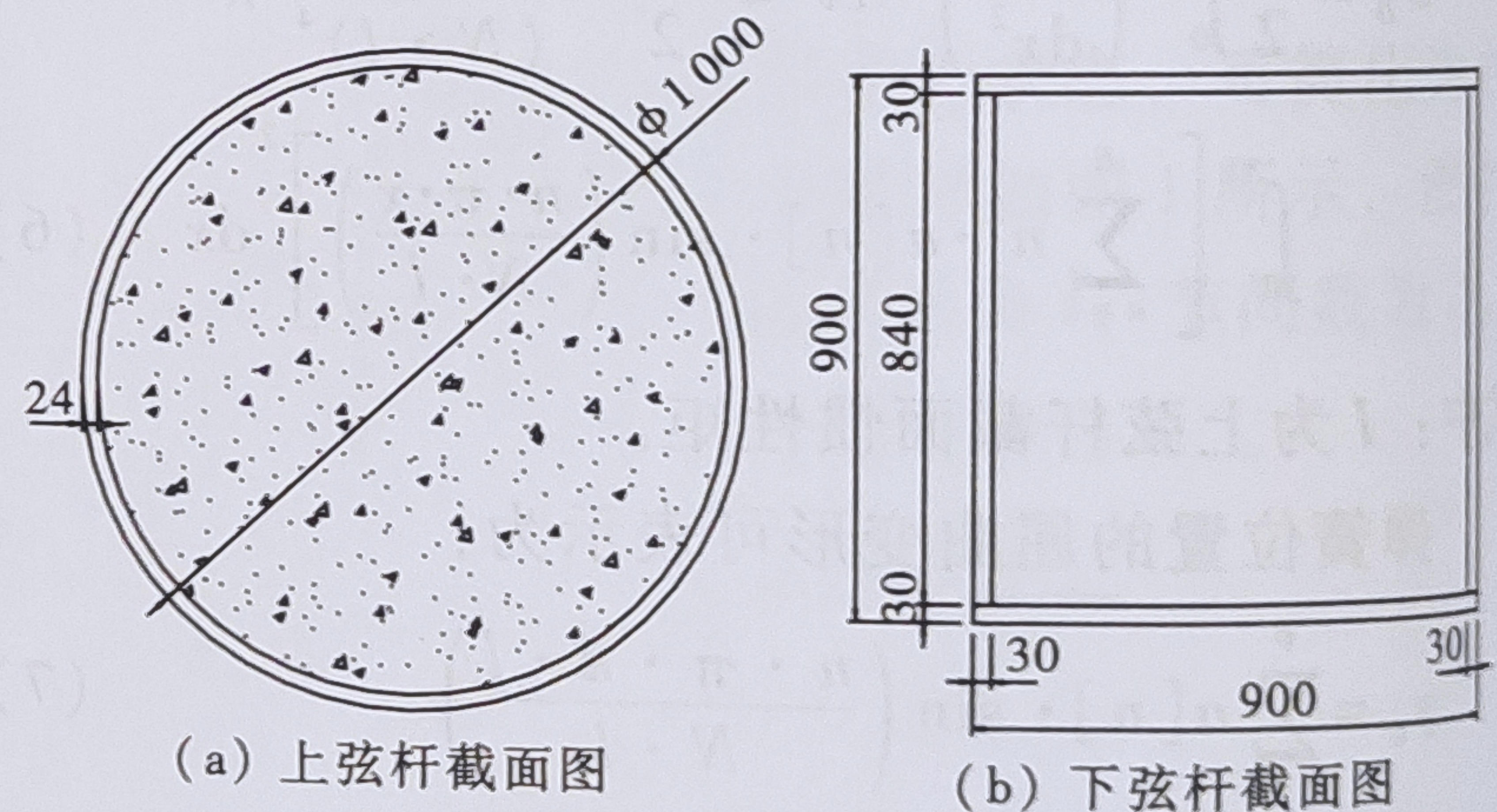


图 4 甜水桥横截面图 (单位: mm)

Figure 4 Transverse arrangement of the bridge (Unit: mm)



(a) 上弦杆截面图

(b) 下弦杆截面图

(c) 腹杆截面图

图 5 杆件截面图 (单位: mm)

Figure 5 Cross-section (Unit: mm)

以甜水桥为例进行上弦杆面外稳定性计算, 侧向支撑刚度可由式 (2) 计算, 各抗弯刚度按照结构力学计算, 得到结构参数如表 2 所示。

2.2 计算结果比较分析

半穿式钢桁梁桥上弦杆屈曲荷载 P 的现有计算方法如下: 规范及书籍主要包括《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB 10091-2017)^[6]、《水运工程

钢结构设计规范》(JTS 152-2012)^[7]、《港口工程钢结构设计规范》(JTJ 283-99)^[8]和《钢桥》(小西一郎)^[9]中相关内容,规范及书籍都是引入计算长度的折减系数以考虑面外稳定性,通过查表

表2 结构参数表

Table 2 Structural Parameters

名称	符号	单位	数值
节间数	N		8
节间长度	l	mm	8 000
腹杆中心高度	h	mm	5 000
横梁长度	b	mm	13 000
钢材弹性模量	E_s	MPa	$2.06 \cdot 10^5$
混凝土弹性模量	E_c	MPa	$3.45 \cdot 10^4$
横梁截面惯性矩	I_b	mm ⁴	$2.761 5 \cdot 10^{11}$
单榀桁架截面惯性矩	I_e	mm ⁴	$3.588 22 \cdot 10^{12}$
上弦杆截面惯性矩	I	mm ⁴	$1.552 023 \cdot 10^{10}$
弹簧刚度	c	N/mm	3 443 303.247 2

可进一步计算屈曲荷载 P 。理论计算方法都较复杂,主要包括 SHOU-NGO TU 的差分法^[10]和孙纲廷提出的计算方法^[11],如下所示:

SHOU-NGO TU 通过差分法,提出屈曲荷载计算式:

$$\cos\left(\frac{2i\pi}{N}\right) - \left[2 + 2\cos T - \frac{S}{T^3}(T - \sin T)\right] \times \cos\left(\frac{i\pi}{N}\right) + \left[1 + 2\cos T + \frac{S}{T^3}(\sin T - T\cos T)\right] = 0 \quad (15)$$

其中, i 为 1 到 N 的正整数; S 为弹簧刚度参数; T 为屈曲荷载参数。

孙纲廷采用能量法,提出屈曲荷载计算式:

$$\frac{1}{1 - \cos\left(\pi \frac{Q}{N}\right)} + \frac{\sin T}{T \left[\cos\left(\pi \frac{Q}{N}\right) - \cos T \right]} = \frac{2T^2}{S} \quad (16)$$

其中, Q 为 1 到 N 的正整数; S 为弹簧刚度参数; T 为屈曲荷载参数。

以甜水桥为例,对以上计算方法进行整理,计算结果如表 3 所示。从表 3 可看出,采用规范及书籍计算得到的屈曲荷载 P 都非常保守;本文基于能量法所得计算结果和 SHOU-NGO TU 差分法、孙纲廷算法所得结果相同。

以甜水桥为例,其腹杆中心高度 h 和屈曲荷载 P 的关系如图 6 所示。从图 6 可看出,在一定范围内,屈曲荷载 P 随腹杆高度的增大而减少且影响显著,两者呈指数函数分布,当腹杆高度从 4 000 mm 降为 2 000 mm,降幅为 100%,对应的屈曲荷

表3 屈曲荷载 P 比较

Table 3 Comparison of buckling load

参考文献	屈曲荷载 P /kN
《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB 10091-2017)	19 385.831
《水运工程钢结构设计规范》(JTS 152-2012)	21 122.524
《港口工程钢结构设计规范》(JTJ 283-99)	20 123.926
《钢桥》(小西一郎)	17 771.663
SHOU-NGO TU 差分法	493 043.248 3
孙纲廷算法	493 043.248 3
本文简化计算公式	493 043.248 3

载 P 从 947 585.6 kN 升为 2 675 742.6 kN,增幅约为 182%。从图 6 还可看出,屈曲荷载 P 随腹杆高度增大而成为单个杆件的欧拉临界荷载 P_{cr} ,此临界荷载非常小,说明限制腹杆高度是提高半穿式钢桁梁桥上弦杆面外稳定性的有效途径,腹杆高度设计可参考本文提供的屈曲荷载 P 简化计算公式如表 1 所示。

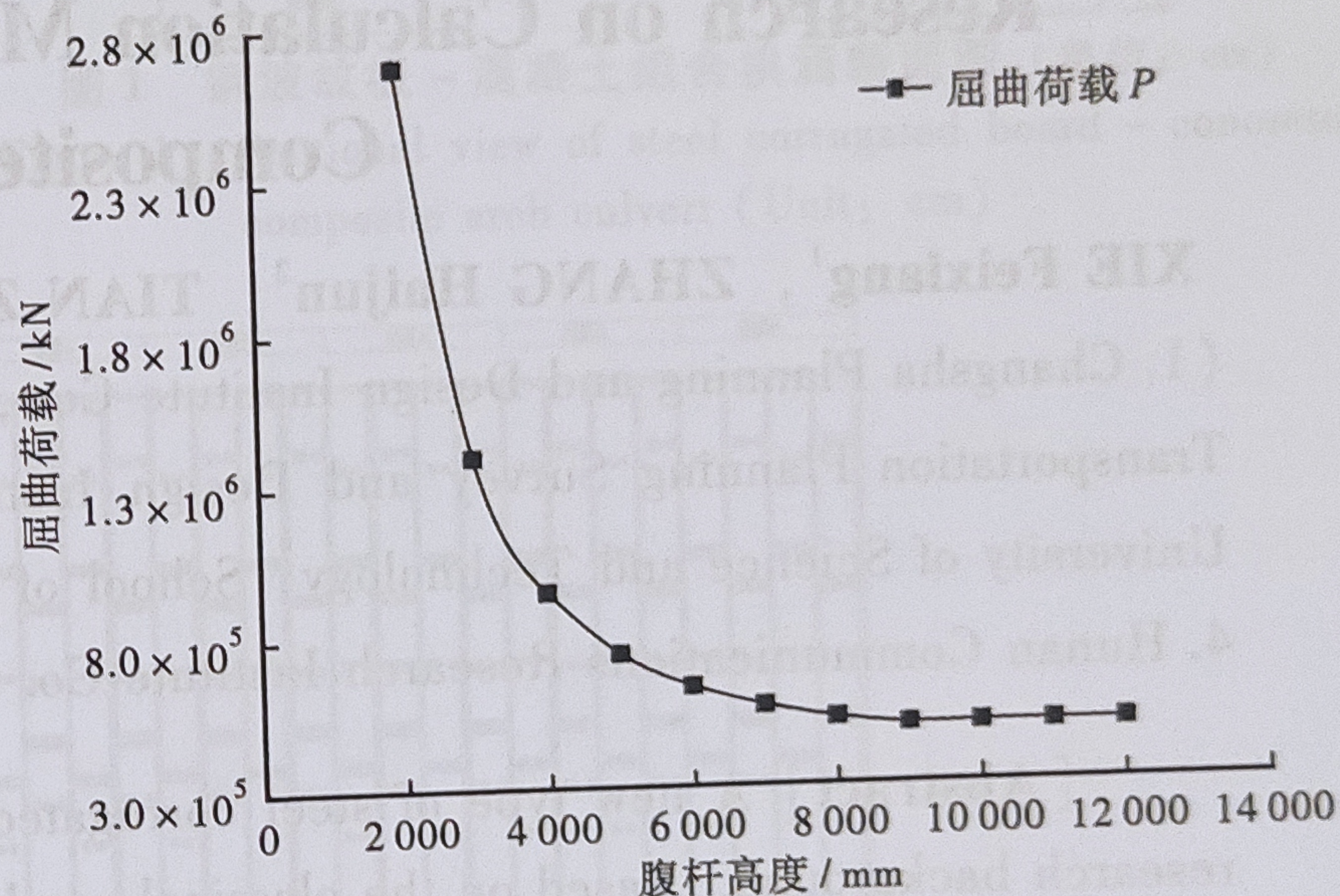
图6 腹杆高度和屈曲荷载 P 关系

Figure 6 The relationship between web members and buckling load

3 结语

本文采用能量法,通过 Maple 数学计算软件对半穿式钢桁梁桥上弦杆的面外稳定性进行研究,提供了上弦杆屈曲荷载 P 的简化计算公式,结合 G211 国道甘肃甜水桥进行计算结果分析,可以得到如下结论:

a. 半穿式钢桁梁桥上弦杆的面外稳定性主要和上弦杆抗弯刚度、侧向支撑刚度、节间长度和节间数有关。

b. 不同节间数下上弦杆屈曲荷载的简化计算公式如表 1 所示。当弹簧刚度 c 较大时,对应的屈曲荷载 P 为欧拉临界荷载 P_{cr} ;当弹簧刚度 c 较小时,对应的屈曲荷载 P 计算式为含有多个参数的函数表达式。

(下转第 26 页)

	系数	系数	系数	系数
1	1 719.70	1 777.00	1 783.10	1 809.40
2	2 141.30	2 172.00	2 187.40	2 195.40
3	479.18	198.53	479.65	481.13
4	198.52	198.53	198.73	199.26
5	126.51	126.52	126.64	126.98

计算结果表明:

a. 从工况 1 ~ 到工况 5, 结构第 1 阶屈曲特征系数在混凝土浇筑工况达到最大, 最大值为 1 719.7, 成桥工况最小, 最小值为 126.5; 从工况 1 ~ 到工况 5, 结构前 4 阶屈曲特征系数均随填土高度的增大而逐渐减小, 变化呈曲线关系, 且三者变化趋势基本一致; 从工况 1 ~ 到工况 5, 结构第 1 阶失稳均为面外失稳。

b. 结构临界荷载系数较大, 分析原因是因为: 钢波纹管的波形板部分, 对受压区有“嵌固”作用, 可有效约束结构横向变形, 具有良好的“刚化”效果。

6 结论

本文基于经典力学理论, 以某新型钢波纹管-混凝土组合式拱涵为研究对象, 推导了其内力、强度及稳定性计算公式, 并使用有限元软件进行仿真模拟, 可得到以下结论:

a. 对于该类结构的计算, 可将其转化为平面

(上接第 19 页)

c. 以 G211 国道甘肃甜水桥为例, 对现有屈曲荷载的计算方法进行比较, 发现目前规范提供的计算方法非常保守; 本文基于能量法所得简化计算结果与现有论文计算结果相同。

d. 腹杆高度对半穿式钢桁梁桥的面外稳定性影响显著, 通过限制腹杆高度可提高该类桥型的面外稳定性, 本文提供的简化计算公式可用于指导半穿式钢桁梁桥的腹杆设计。

[参考文献]

- [1] 马坤全, 曹雪琴, 吴定俊. 列车准高速通过半穿式钢桁梁桥横向振动分析[J]. 上海铁道大学学报, 1996(3): 1-10.
- [2] 张维超. 跨度 48 m 半穿式钢桁梁横向刚度加固研究[J]. 国防交通工程与技术, 2007(2): 24-27.

合段处, 混凝土最大拉应力位于拱顶位置, 应力均随工况后移而增大, 在填土至设计标高工况达到峰值。

c. 钢混结合段存在一定应力集中现象, 但随着工况后移逐渐减轻。

d. 钢波纹管的波形板部分, 对受压区有“嵌固”作用, 可有效约束结构横向变形, 保证结构的稳定性。

[参考文献]

- [1] 邓莉. 在役钢筋混凝土拱桥承载潜力研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- [2] 季文玉. 金属波纹管涵洞受力行为理论分析与试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2004.
- [3] 蒋雪梅, 雷俊卿. 波纹钢管涵洞的力学机理分析与试验研究[J]. 北京交通大学学报, 2006, 30(增刊).
- [4] 李祝龙. 公路钢波纹管涵洞设计与施工技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.
- [5] 李祝龙, 刘白来, 李白武. 钢波纹管涵洞力学性能现场试验研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(3): 79-82.
- [6] 赵卫国, 李祝龙, 李创军. 公路钢波纹管涵洞的研究与应用展望[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2007, (8): 167-170.
- [7] 蒋雪梅. 公路钢波纹拱涵和管涵的试验研究与计算分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.

- [3] 刘汉夫, 黎国清, 宣言. 轮轨润滑对 40 m 半穿式钢桁梁横向拍振抑制效果的试验研究[J]. 中国铁道科学, 2001(4): 61-65.
- [4] 郭文华, 曾庆元. 半穿式钢桁梁桥与列车系统空间振动分析[J]. 长沙铁道学院学报, 2002(1): 36-40.
- [5] 孙颖, 顾萍. 既有铁路钢桁梁桥动力特性及横向刚度加固研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2007(1): 10-13.
- [6] TB 10091-2017, 铁路桥梁钢结构设计规范[S].
- [7] JTS 152-2012, 水运工程钢结构设计规范[S].
- [8] JTJ 283-99, 港口工程钢结构设计规范[S].
- [9] 小西一郎. 钢桥[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- [10] SHOU-NGO TU, Column with Equal-Spaced Elastic Support[J]. Journal of the Aeronautical Science, January, 1944: 67-72.
- [11] 孙纲廷, 崔玉辉, 张方银. 半穿式桁架上弦杆的侧向稳定性研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 1992(4): 50-55.