

大跨度三主桁连续钢桁梁桥受力特性研究

肖 容

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 为研究横向构件布置与截面设计对3主桁受力均衡性的影响,以宁波市三官堂大桥主桥 160 m+465 m+160 m=785 m 的大跨径钢桁架连续梁桥为例,采用 Midas/Civil 软件建立钢桁架梁模型,分析比较对称荷载与偏载作用下主桁结构支反力、轴力和位移等静力效应,得出了3主桁连续钢桁梁桥的内力分布特性。

关键词: 钢桁梁桥;3主桁;受力分析

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)06-0238-04

0 引言

宁波市三官堂大桥位于宁波市东部,采用2榀钢桁梁桥,主桥跨径布置为160 m+465 m+160 m=785 m,现已成为世界上跨径最大的连续钢桁梁桥。其比选方案为3榀钢桁梁,2种方案的立面布置基本一致,仅桁架榀数及桥宽不同。根据三官堂大桥初步设计报告,2榀钢桁梁方案总体用钢量稍低,杆件少,现场拼接及后期养护工作量较少,视野通透,行车舒适度高,故选用2榀钢桁梁桥。但在方案比选阶段,要求系统分析2榀和3榀连续桁梁的空间受力特性,故在此工程背景下,需研究横向构件布置与截面设计对3主桁受力均衡性的影响,从而做出比选。

3主桁采用变高桁,桁式采用“N”形桁,跨中桁架高度14.5 m,边墩顶桁高15.0 m,中墩墩顶附近桁高42.0 m;桁架基本间距15.0 m,在中墩顶附近为18.75 m。主桥总体布置见图1。

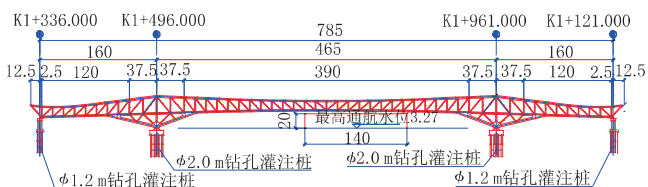


图1 主桥总体布置图(单位:m)

在对称荷载与偏载作用下,3主桁中横向构件布置对各主桁内力的分配都会存在差异性影响。从结构布置上采取措施来减少主桁间内力分配的差异,将使结构受力状态得以改善,结构设计与安装控制得以优化^[1-2]。2主桁的内力横向分配有可靠的计

算公式,而3主桁的内力横向分配要比2主桁复杂得多,现国内研究只有一种近似计算^[3]。因此,本文以3主桁连续钢桁梁桥为例,采用 Midas/Civil 对3主桁钢桁架梁建立模型,分析比较在对称荷载与偏载作用下横向构件布置对主桁受力均匀性的影响,研究3主桁连续钢桁梁桥的受力特性。

1 主要设计参数

1.1 主桁计算模型

主桁标准段上弦杆采用矩形断面,宽1500 mm,高1600 mm,顶、底板及腹板厚16 mm;下弦杆采用矩形断面,宽1500 mm,高1600 mm,板厚20 mm;上平联撑杆采用工字形断面,高600 mm,宽600 mm,翼缘厚16 mm,腹板厚12 mm。桁架式横联采用工字形断面,腹杆高400 mm,宽400 mm,翼缘厚16 mm,腹板厚12 mm。

采用结构空间分析软件 Midas/Civil 建立钢桁梁模型,桥面板采用板单元模拟,其余构件采用梁单元模拟。计算模型见图2。



图2 计算模型

1.2 横向构件布置形式

内力的横向分配机理是3主桁桥的最大特性,其内力横向分配和位移协调主要靠横向联结系的刚度来保证^[4]。分析横向联结系的刚度对结构内力横向分配以及位移差的影响,可以通过不设横向联结系和增加横向构件的刚度来反衬横向联结系的效果,故选取以下3种形式来研究横向构件布置形式对主桁受力

收稿日期: 2020-12-22

作者简介: 肖容(1989—),女,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

均匀性的影响。

布置形式 1: 只在墩顶处设桁架式横联和下平联,跨内无横联,且无上平联(见图 3)。

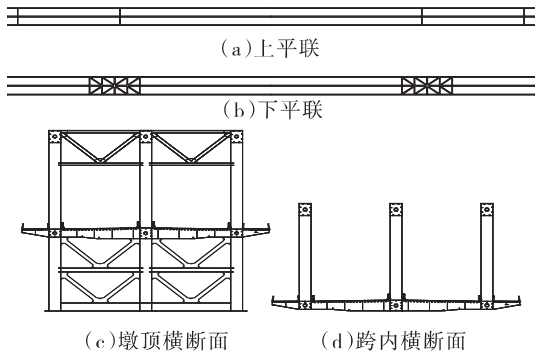


图 3 横向构件布置形式 1 断面图

布置形式 2: 在墩顶处设桁架式横联和下平联,跨内设一字型横联兼做上平联撑杆,上平联不设斜杆(见图 4)。

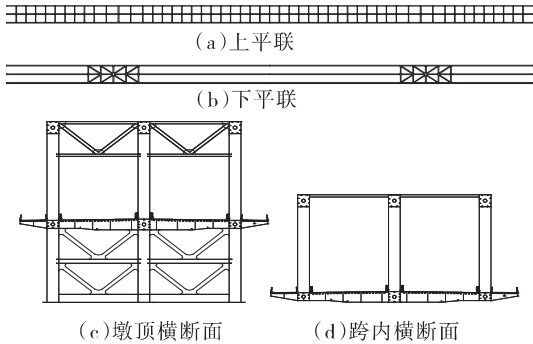


图 4 横向构件布置形式 2 断面图

布置形式 3: 在墩顶处设带斜撑横联和下平联,跨内设一字型横联兼做上平联撑杆,上平联不设斜杆;撑杆材料弹性模量提高 10 倍,即刚度提高 10 倍(见图 5)。

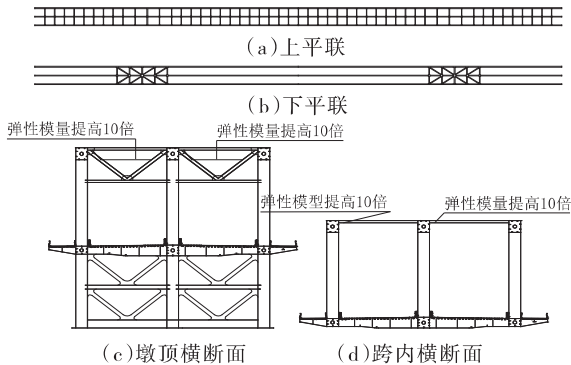


图 5 横向构件布置形式 3 断面图

1.3 加载工况

为了揭示 3 主桁连续钢桁梁的空间受力特性,探讨不同工况下主桁内力的分布规律,建立空间力学模型,考虑 3 种加载工况。

工况 1:2 期恒载(对称加载),在中桁跨中节点作用 10 000 kN 集中荷载(见图 6)。

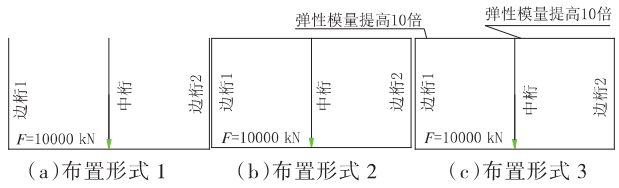


图 6 工况 1 下,横向构件 3 种布置形式加载横断面图

工况 2: 偏活(偏载),在边桁 1 跨中节点作用 10 000 kN 集中荷载(见图 7)。

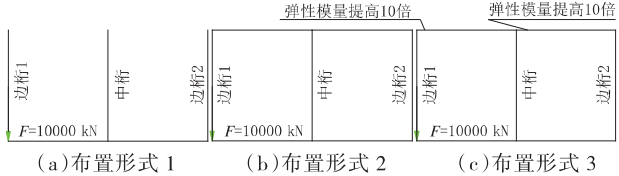


图 7 工况 2 下,横向构件 3 种布置形式加载横断面图

工况 3: 百年横风,基本风速取 100 a 一遇, $V_{10}=31.3$ m/s(见图 8)。

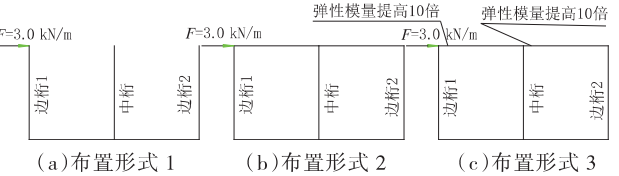


图 8 工况 3 下,横向构件 3 种布置形式加载横断面图

2 内力分配影响因素分析

对布置形式 1、形式 2 和形式 3 这 3 种横向构件布置形式进行 3 种工况加载,相应主桁下弦杆竖向位移、支点反力和轴力分配见图 9~ 图 11。

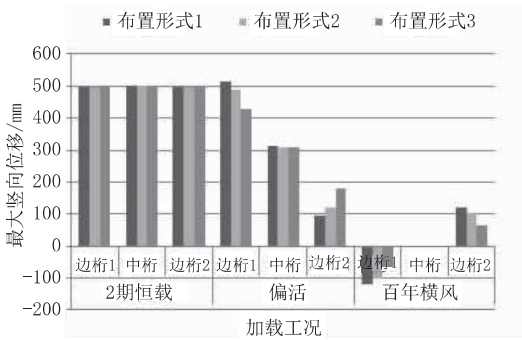


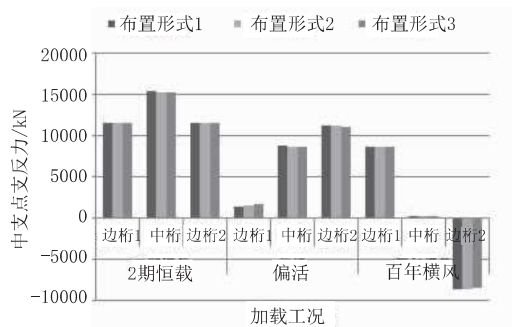
图 9 3 种加载工况下,边、中桁下弦杆最大竖向位移

2.1 不均衡系数

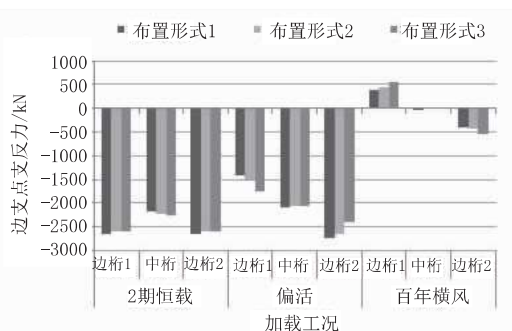
3 主桁桥梁结构受力性能复杂,空间效应明显,中、边桁荷载分摊比不同。为了直观地描述和讨论横向联结及其刚度对中、边桁内力横向分配以及位移差的影响,引入不均衡系数 η 。

$$\eta = \frac{\Delta S_i}{0.5 \times (S_{i中} + S_{i边})} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $S_{i中}$ 为中桁构件的效应(内力和位移); $S_{i边}$ 为边桁对应构件的效应(内力和位移); $\Delta S_i = S_{i中} - S_{i边}$,为中、边桁对应构件效应(内力和位移)之差。



(a)中支点



(b)边支点

图 10 3种加载工况下,边、中桁的边支点和中支点反力

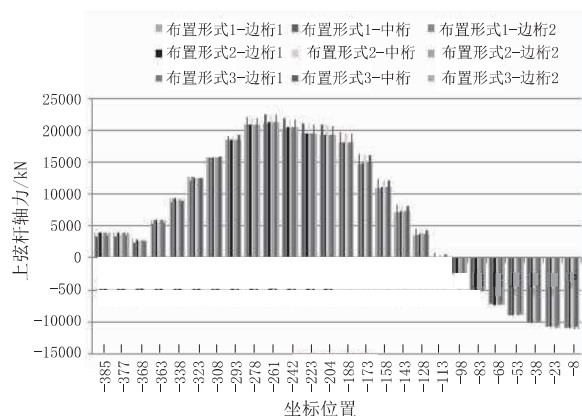
不平衡系数 η 反映了中、边桁对应构件内力和位移横向分配的均衡程度, η 值越大, 中、边桁受力越不平衡, 反之亦然。不平衡系数 η 的正负反映了中、边桁对应构件内力和位移大小关系, $\eta > 0$ 时, 表明中桁构件受力大于边桁; $\eta < 0$ 时, 表明中桁构件受力小于边桁。

2.2 竖向位移

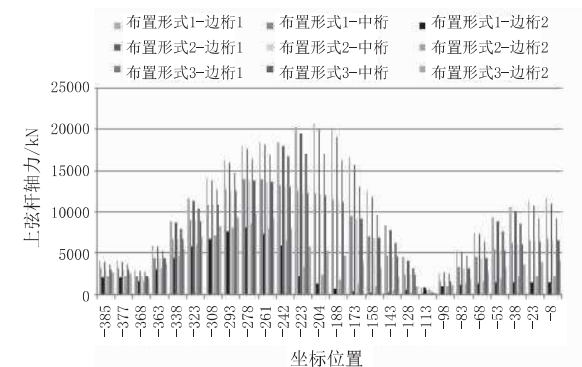
图 9 为不同加载工况下, 3 种横向构件布置形式的边、中桁下弦杆最大竖向位移。由图 9 可知:

(1) 在 2 期恒载作用下, 布置形式 2 和形式 3 的边、中桁下弦杆最大竖向位移与布置形式 1 相差无几, 控制在 0.6% 以内, 故在对称荷载作用下, 横向刚度对各主桁下弦杆竖向位移值的影响不大; 对于 3 种横向构件布置形式, 中桁和边桁的不平衡系数 η 分别为 1.2%、0.6% 和 0.6%, 故在对称荷载作用下, 3 主桁下弦杆竖向位移值边、中桁分配较均衡。

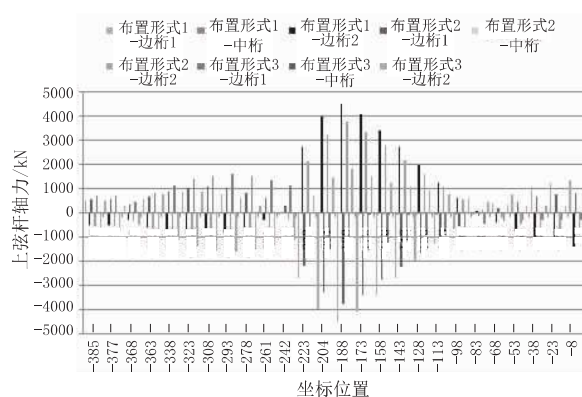
(2) 在偏活(偏载)作用下, 布置形式 2 的边桁 1、中桁和边桁 2 下弦杆最大竖向位移相较布置形式 1 分别减小 4.5%、1.3% 和增大 27.7%; 布置形式 3 的边桁 1、中桁和边桁 2 下弦杆最大竖向位移相较布置形式 1 分别减小 16.6%、1.6% 和增大 93.6%。故在偏载作用下, 横向刚度对各主桁下弦杆竖向位移值的影响较大, 且横向刚度越大, 影响效果更明显。对于 3 种横向构件布置形式, 中桁和边桁 1 的不平衡系数 η



(a) 2期恒载下边、中桁上弦杆轴力



(b) 偏活作用下边、中桁上弦杆轴力



(c) 百年横风下边、中桁上弦杆轴力

图 11 3种加载工况下,边、中桁的上弦杆轴力

分别为 -48.7%、-45.6% 和 -32.9%; 中桁和边桁 2 的不平衡系数 η 分别为 107.4%、87.9% 和 51.1%。故在偏载作用下, 3 主桁下弦杆竖向位移值边、中桁分配不均, 且横向刚度越大, 起到的约束作用越大, 从而限制这种不均匀性的倾向。

(3) 在百年横风作用下, 对于 3 种横向构件布置形式, 边桁 1 和边桁 2 的下弦杆竖向位移方向相反, 数值相等, 中桁下弦杆竖向位移值为 0。布置形式 2 的边桁下弦杆最大竖向位移相较布置形式 1 减小 14.2%, 布置形式 3 的边桁下弦杆最大竖向位移相较布置形式 1 减小 46.7%。故在百年横风作用下, 横向刚度对各主桁下弦杆竖向位移值的影响较大, 且横

向刚度越大,影响效果更明显。

2.3 支点反力

图 10 为不同加载工况下,3 种横向构件布置形式的边、中桁边支点和中支点反力。由图 10 可知:

(1)在 2 期恒载作用下,布置形式 2 和形式 3 的边、中桁中支点反力与布置形式 1 相差无几,控制在 0.6%以内;布置形式 2 的边桁和中桁边支点反力相较布置形式 1 分别减小 1.3%和增大 3.1%,布置形式 3 的边桁和中桁边支点反力相较布置形式 1 分别减小 1.9%和增大 4.5%。故在对称荷载作用下,横向刚度对各主桁中支点反力的影响不大,对边支点反力则略有影响。对于 3 种横向构件布置形式,中桁和边桁中支点反力的不均衡系数 η 分别为 28.8%、28.0%和 27.8%;边支点反力的不均衡系数 η 分别为 -19.9%、-15.5%和 -13.6%。故在对称荷载作用下,横向刚度对中桁和边桁支点反力的不均衡系数 η 影响较小。

(2)在偏活(偏载)作用下,布置形式 2 的边桁 1、中桁和边桁 2 中支点反力相较布置形式 1 分别减小 0.1%、1.1%和增大 6.7%,其边桁 1、中桁和边桁 2 边支点反力相较形式 1 分别减小 2.7%、0.6%和增大 5.8%;布置形式 3 的边桁 1、中桁和边桁 2 中支点反力相较形式 1 分别减小 1.5%、1.6%和增大 20.5%,其边桁 1、中桁和边桁 2 边支点反力相较形式 1 分别减小 12.2%、减小 0.8%和增大 24.2%。故在偏载作用下,横向刚度对各主桁下弦杆竖向位移值的影响较大,且横向刚度越大,影响效果更明显。对于 3 种横向构件布置形式,中桁和边桁 1 中支点反力的不均衡系数 η 分别为 -24.7%、-25.7%和 -24.6%;边支点反力的不均衡系数 η 分别为 -26.7%、-24.6%和 -14.7%;中桁和边桁 2 中支点反力的不均衡系数 η 分别为 145.3%、141.6%和 135.1%;边支点反力的不均衡系数 η 分别为 38.6%、32.6%和 16.5%。故在偏载作用下,3 主桁支点反力边、中桁分配不均,且横向刚度越大,起到的约束作用越大,从而限制了这种不均匀性的倾向。

(3)在百年横风作用下,3 种横向构件布置形式中,布置形式 1 的边桁 1 和边桁 2 支点反力方向相反,数值相等,中桁下弦杆支点反力为 0;布置形式 2 的边桁中支点反力相较布置形式 1 减小 0.2%,其边桁边支点反力相较形式 1 增大 9.0%;布置形式 3 边桁中支点反力相较形式 1 减小 1.0%,其边桁边支点反力相较形式 1 增大 38.2%。故在百年横风作用下,横

向刚度对各主桁中支点反力的影响较小,对边支点反力的影响较大,且横向刚度越大,影响趋势更明显。

2.4 轴力分配

图 11 为不同加载工况下,3 种横向构件布置形式的边、中桁上弦杆轴力。

由图 11 可知,沿桥跨方向:

(1)在 2 期恒载作用下,布置形式 2 和形式 3 的边、中桁上弦杆最大轴力与布置形式 1 相差无几,控制在 0.5%以内,故在对称荷载作用下,横向刚度对各主桁上弦杆轴力的影响略小;对于 3 种横向构件布置形式,中桁和边桁的不均衡系数 η 分别为 6.2%、5.5%和 5.4%。故在对称荷载作用下,3 主桁上弦杆轴力边、中桁分配较均衡。

(2)在偏活(偏载)作用下,布置形式 2 的边桁 1、中桁和边桁 2 上弦杆最大轴力相较布置形式 1 分别减小 4.3%、1.2%和增大 5.7%;布置形式 3 的边桁 1、中桁和边桁 2 上弦杆最大轴力相较形式 1 分别减小 17.9%、减小 1.5%和增大 21.4%。故在偏载作用下,横向刚度对各主桁上弦杆轴力的影响较大,且横向刚度越大,影响效果更明显。对于 3 种横向构件布置形式,中桁和边桁 1 的不均衡系数 η 分别为 -39.5%、-36.5%和 -21.7%;中桁和边桁 2 的不均衡系数 η 分别为 53.2%、46.8%和 33.3%。故在偏载作用下,3 主桁上弦杆轴力边、中桁分配不均,且横向刚度越大,起到的约束作用越大,从而限制了这种不均匀性的倾向。

(3)在百年横风作用下,对于 3 种横向构件布置形式,布置形式 1 的边桁 1 和边桁 2 上弦杆轴力方向相反,数值相等,中桁上弦杆轴力为 0;布置形式 2 的边桁上弦杆最大轴力相较布置形式 1 减小 16.6%;布置形式 3 的边桁上弦杆最大轴力相较形式 1 减小 59.7%。故在百年横风作用下,横向刚度对各主桁上弦杆轴力的影响较大,且横向刚度越大,影响效果更明显。

3 结 语

(1)对称荷载作用下,3 主桁各自承担其 2 期恒载的自重,3 种横向构件布置形式的下弦杆竖向位移、支反力、上弦杆轴力相差不大。即在对称荷载作用下,横向刚度对各主桁内力和位移分配的影响不大,分配较均匀。

(2)在偏载作用下,3 主桁分担的比例不同,当 3
(下转第 269 页)

- [12] 谷玉杰, 吕剑. 高纯度单硬脂酸甘油酯的合成 [J]. 应用化工, 2004, 33(2):27-28, 51.
- [13] 刘晓艳, 刘珊. 单甘酯的功能特性及其在面制品中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2004(6):110-114.
- [14] 张贞发. 食品添加剂单甘酯的合成研究进展[J]. 化工中间体, 2010(9):7-11.
- [15] HJ 637—2018, 水质石油类和动植物油的测定红外光度法[S].
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [17] Obi Chidi, Idowu Victor Adebayo. Determination of critical micelle concentration and thermodynamic evaluations of micellization of GMS[J]. Modern Chemistry & Applications, 2018, 6(2):251.
- [18] 李莎莎, 孙玉焕, 胡学锋, 等. 表面活性剂对土壤中石油类污染物的洗脱效果研究[J]. 土壤, 2016, 48(3):516-522.
- [19] 王琦, 郭书海, 李刚, 等. 表面活性剂 - 无机电解质 - 石油烃的匹配性与石油污染土壤清洗[J]. 环境工程, 2020, 2020-06-11.
- [20] Mata-Sandoval, J. C., Karns, J., etc. Influence of rhamnolipids and Triton X-100 on the desorption of pesticides from soils[J]. Environmental science & technology, 2002, 36(21):4669-4675.
- [21] 马浩, 刘元元, 肖文燕, 等. 表面活性剂 CMC 对石油烃污染土壤的增溶[J]. 环境工程学报, 2016, 10(12):7333-7338.
- [22] 何泽能, 李振山, 籍国东. 油田污染土壤中石油回收的模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(2):136-145.
- [23] Wenjun Zhou, Lizhong Zhu. Efficiency of surfactant-enhanced desorption for contaminated soils depending on the component characteristics of soil-surfactant - PAHs system[J]. Environmental Pollution, 2007, 147(1):66-73.
- [24] 舒梦, 陈萍华, 蒋华麟, 等. 十二烷基硫酸钠的临界胶束浓度的测定及影响分析[J]. 化工时刊, 2014, 28(3):1-3, 15.
- [25] 巩赫, 秦冰, 赵锐. 原油污染土壤中石油烃含量的测定及洗脱实验[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(3):281-286.
- [26] 马满英, 施周, 刘有势. 鼠李糖脂洗脱土壤中多氯联苯影响因素的研究[J]. 环境工程学报, 2008, 2(1):83-87.
- [27] 杨娟娟, 楼林洁, 周文军. 皂角苷对芘的增溶作用及影响因素[J]. 环境科学学报, 2011, 31(1):172-176.
- [28] Peng, Sheng, Wei Wu, Jiajun Chen. Removal of PAHs with surfactant-enhanced soil washing: influencing factors and removal effectiveness[J]. Chemosphere, 2011, 82(8):1173-1177.
- [29] Wang, Maoxin, Bo Zhang, etc. Efficient remediation of crude oil-contaminated soil using a solvent/surfactant system [J]. RSC advances, 2019, 9(5):2402-2411.
- [30] Trelu, Clément, Oleksandra Ganzenko, etc. Combination of anodic oxidation and biological treatment for the removal of phenanthrene and Tween 80 from soil washing solution [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 306:588-596.
- [31] 黄昭露, 陈泉源. 五种表面活性剂对柴油污染土壤清洗效果的比较[J]. 环境工程, 2015, 33(2):168-172.
- [32] P. Canizares, R. Lopez-Vizcaino, C. Saez. The use of a combined process of surfactant-aided soil washing and coagulation for PAH-contaminated soils treatment[J]. Separation and Purification Technology, 2012, 88:46-51.
- [33] 李一川, 王栋, 王宇, 等. 热化学清洗法洗涤油泥 - 回收石油的工艺条件研究[J]. 清洗世界, 2008, 24(11):34-38, 45.
- [34] Rosen, M. J., Fang Li. The Adsorption of Gemini and Conventional Surfactants onto Some Soil Solids and the Removal of 2-Naphthol by the Soil Surfaces[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2001, 234(2):418-424.
- [35] Brownawell, Bruce J., Hua Chen, etc. Sorption of nonionic surfactants on sediment materials[J]. Environmental science & technology, 1997, 31(6):1735-1741.
- [36] Li, Fang, M. J. Rosen. Adsorption of gemini and conventional cationic surfactants onto montmorillonite and the removal of some pollutants by the clay[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2000, 224(2):265-271.

(上接第 241 页)

主桁变形与内力出现不均匀时, 横向构件起到约束作用, 限制这种不均匀性的倾向与效应, 横向刚度是影响各主桁内力和位移分配的主要因素。

(3) 横向刚度对 3 主桁受力的均衡性有较大影响, 且随着横向刚度的增大, 横向 3 桁受力趋于均衡。

(4) 由于桥梁结构在使用期间经常承受对称荷载和偏载作用, 在 3 主桁连续梁桥的设计中, 应考虑采用适当加大横向刚度以改善主桁受力状态、提高桥梁经济指标和优化结构设计。

参考文献:

- [1] 朱志虎, 易伦雄, 高宗余. 南京大胜关长江大桥三主桁结构受力特性分析与施工控制措施研究[J]. 桥梁建设, 2009(3):1-4.
- [2] 鲍利霞. 三主桁结构内力分配影响因素研究[J]. 桥梁建设, 2010(4):40-42.
- [3] 余宏. 大跨度三主桁四线铁路变高度连续钢桁梁桥的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [4] 尹一平. 大跨度三主桁高速铁路桥梁静力特性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.