

长跨柔性悬索桥风致抖振响应分析

詹刚毅¹ 冯利坡²

(1 中铁上海设计院集团有限公司南昌院 江西南昌 330000

2 常州市轨道交通发展有限公司 江苏常州 213022)

摘要:以某主跨500 m的大跨度悬索桥为工程背景,对长跨柔性悬索桥在脉动风荷载作用下的抖振响应进行了分析和计算,得到了一些有借鉴性的结论。模态分析表明,大跨度悬索桥的自振频率较低,为典型的风敏感柔性结构。当同时考虑抖振力和自激力时,根据极值理论可以得到悬索桥主梁的抖振位移响应极值,结果表明,竖向、水平和扭转方向的最大抖振位移响应极值均发生在主跨跨中处,且数值较大,在结构设计中不容忽略。

关键词:悬索桥 动力响应极值 脉动风荷载 抖振

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2016.06.004

随着科技的进步,人类生产生活的需要,桥梁结构向大跨、轻质、高柔方向发展。目前,世界斜拉桥的最大跨径已达1088m,为我国的苏通长江大桥;悬索桥的最大跨径达1991m,为日本的明石海峡大桥;而正在规划建设中的意大利墨西拿海峡大桥,主跨则达到惊人的3300m。跨径的增大必然导致结构刚度的迅速下降,对于桥梁这样一类处于大气边界层中的结构,受自然界中风荷载的影响显著,在设计中需对其风致抖振响应进行认真分析^{[1][2]}。19世纪60年代,Davenport^[3]最先将随机振动理论引入到土木工程领域,并用于解决脉动风引起的抖振问题。根据Davenport抖振分析理论,大跨度桥梁的抖振响应分析需考虑抖振力和由于脉动风的非平稳性所引起的气动导致的影响;Scanlan^[4]认为在大跨度桥梁的抖振分析中自激力的影响不容忽略,必须同时考虑自激力和抖振力的影响。后来A. Jain^{[5][6]}、N.P Jones^[7]、陈甦人^[8]、丁泉顺^[9]等学者相继提出了相似的桥梁抖振理论。本文以某主跨500m的大跨度悬索桥为研究对象,对其脉动风荷载作用下的抖振动力响应极值进行了计算分析,得到了一些有意义的结论,可供类似工程参考。

1 大跨度悬索桥动力特性分析

本文算例中的桥梁为双塔三跨悬索桥,跨径组合160 + 500 + 160=820m,主跨垂跨比为

1/10.5,主梁宽26m、高2.5m,主梁断面及悬索桥总体布置分别如图1和图2所示。

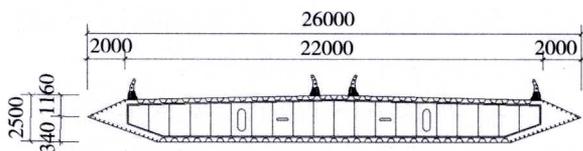


图1 三跨悬索桥主梁断面示意图(单位: mm)

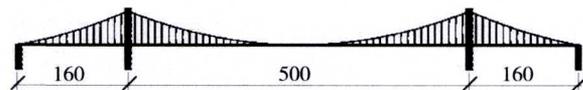


图2 三跨悬索桥跨径整体布置图(单位: m)

采用离散结构的有限单元法建立悬索桥有限元模型,结构主要参数如表1所示。本文分析采用的是ANSYS,其中主梁和桥塔采用空间两单元Beam4模拟,主缆和吊索采用空间索单元Link10模拟,计算中暂不考虑桩土共同作用。经模态分析后得悬索桥主梁前60阶振形,其一阶振形如图3所示。

通过模态分析可以发现,三跨悬索桥结构的刚度较低,主梁的一阶对称侧向弯曲振型仅0332 Hz,为典型的风敏感柔性结构,需对其脉动风荷载作用下的抖振响应进行计算分析,以确保结构的设计安全。

表1 三跨悬索桥有限元模型主梁基本参数

竖弯刚度 (MPa·m ⁴)	侧弯刚度 (MPa·m ⁴)	扭转刚度 (MPa·m ⁴)	单位长度 质量 (kg/m)	单位长度 质量惯矩 (kg·m ² /m)
2.6 × 10 ⁶	9.5 × 10 ⁶	1.6 × 10 ⁶	14,000	1.3 × 10 ⁶

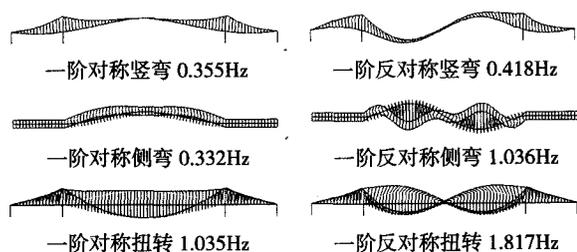


图3 三跨悬索桥主梁一阶振型

2 脉动风荷载作用下结构动力响应分析

脉动风是一种随机性很强的动力荷载,通常情况下被描述为零均值的平稳高斯过程,其作用下的结构计算涉及结构动力学和随机振动理论,是一件非常复杂的工作^[4]。脉动风引起的结构动力响应通常采用其动力响应极值表示,计算的主要参数有结构的力学特性和风荷载参数。结构的力学特性包括动力特性和静力特性,其中动力特性已在第1节中做了介绍,静力特性是结构工程师非常熟悉的内容,此处不再给出。下面将对与脉动风荷有关的参数进行介绍,并在上述参数的基础上计算三跨悬索桥的风致抖振响应极值。

(1) 脉动风谱的选择

脉动风谱是结构抖振计算中的一个重要参数,本文悬索桥抖振计算中同时考虑水平和竖向的脉动风作用,其功率谱密度函数采用《公路桥梁抗风设计规范》^[1]中建议的形式。

水平脉动风谱的表达式为:

$$\frac{nS_u(n)}{u_*^2} = \frac{200f}{(1+50f)^{5/3}} \quad (1)$$

式中, $S_u(n)$ 为水平向脉动风谱; n 为脉动风的频率 (Hz); $f = \frac{nz}{U(z)}$, 为相似律坐标, 又称为莫宁坐标; z 为主梁离地面或水面的高度; $U(z)$ 为高度 z 处的平均风速; $u_* = \frac{KU(z)}{\ln(\frac{z}{z_0})}$, 为气流摩擦速度, 也可以称之为剪切速度, 与地面粗糙长度相关; $K \approx 0.4$, 为Karman常数; z_0 为地面粗糙长度。

竖向脉动风谱可以表达为:

$$\frac{nS_w(n)}{u_*^2} = \frac{6f}{(1+4f)^{5/3}} \quad (2)$$

式中, $S_w(n)$ 为竖向脉动风谱, 其它符号的含义与式 (1) 中的规定相同。

本文算例中的三跨悬索桥跨度较大, 作用在不同位置处的脉动风既非相互独立, 也不是全相关, 通常为部分相关。在工程实践中, 脉动风的空间相关性通常采用指数形式表达, 本文计算中采用《公路桥梁抗风设计规范》给出的建议形式:

$$S(x_i, x_j, n) = S(n) e^{-\frac{\lambda n}{U} |x_i - x_j|} \quad (3)$$

其中, $7 \leq \lambda \leq 21$, 为风场相关系数, 本文计算中取中间值 $\lambda = 14$; x_i 和 x_j 为主梁沿跨度方向的坐标, 其它参数的含义与上述定义相同。

(2) 其它计算参数的确定

除了脉动风谱外, 抖振计算中还涉及到其它一些参数, 下面将对其进行简要介绍。本文计算中风攻角仅以 0° 为例给出抖振响应极值, 其它角度的计算方法与之相同。此时主梁的升力系数、阻力系数和升力矩系数分别为 $C_L = -0.0132$, $C_D = 0.148$, $C_M = -0.00432$, 上述系数在 0° 风攻角时的变化率分别为 $dC_L/d\alpha = 3.929$, $dC_D/d\alpha = 1.244$ 和 $dC_M/d\alpha = 1.196$ 。本文算例中的悬索桥处于A类场地, 主梁离水面的高度 $z = 45\text{m}$, 地面粗糙长度为 $z_0 = 0.01\text{m}$, 风剖面指数取 $\alpha = 0.12$, 主梁高度处的计算风速为 $U_{45} = 50\text{m/s}$, 空气密度取 $\rho = 1.225\text{kg/m}^3$ 。为考虑脉动风的非定常性, 引入气动导纳函数对脉动风谱进行修正, 此处气动导纳采用Sears函数的Liepmann简化表达式^[10]; 结构各阶模态的阻尼比按照《公路桥梁抗风设计规范》取 0.005 。抖振响应的积分频率范围为 $0.002\text{Hz} \sim 2.0\text{Hz}$, 频率间隔为 0.002Hz 。

(3) 三跨悬索桥抖振位移响应RMS值

作用在悬索桥上的气动力主要包括抖振力和自激力。其中抖振力采用Davenport的抖振力计算模型^[4], 根据Davenport理论可以表达为:

$$\begin{aligned} L_b &= \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[2C_L \chi_{Lu} \frac{u}{U} + (C_L + C_D) \chi_{Lw} \frac{w}{U} \right] \\ D_b &= \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[2C_D \chi_{Du} \frac{u}{U} + C_D' \chi_{Dw} \frac{w}{U} \right] \\ M_b &= \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[2C_M \chi_{Mu} \frac{u}{U} + C_M' \chi_{Mw} \frac{w}{U} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中, L_b 、 D_b 和 M_b 分别表示单位长度的抖振升力、抖振阻力和抖振升力矩; χ_{Lu} 、 χ_{Du} 和 χ_{Mu} 分别表示主梁升力、阻力和扭矩的气动导纳函数, 本文取为Sears函数的简化表达式; u 和 w 分别代表水平和竖向的脉动风速; 其它参数如

$$\begin{aligned}
 L_{ae} &= \frac{1}{2} \rho U^2 (2B) (KH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B}) \\
 D_{ae} &= \frac{1}{2} \rho U^2 (2B) (KP_1^* \frac{\dot{p}}{U} + KP_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 P_3^* \alpha + K^2 P_4^* \frac{p}{B}) \\
 M_{ae} &= \frac{1}{2} \rho U^2 (2B^2) (KA_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B})
 \end{aligned} \tag{5}$$

式中, L_{ae} 、 D_{ae} 和 M_{ae} 分别表示主梁单位长度的自激升力、自激阻力自激升力矩; $K = \omega B/U$ 为折算频率; ω 为结构振动圆频率; h , p , α 分别为主梁的竖向、水平和扭转位移; H_i^* 、 P_i^* 、 A_i^* 为颤振导数, 与桥梁断面的几何构形和来流有关。本文根据强迫振动原理采用Fluent软件^{[11][12]}计算悬索桥主梁断面的颤振导数 H_i^* 、 A_i^* 和三分力系数, 分别如图4和图5所示, P_i^* 采用准定场理论推理得到; 其它参数的意义如前所述。

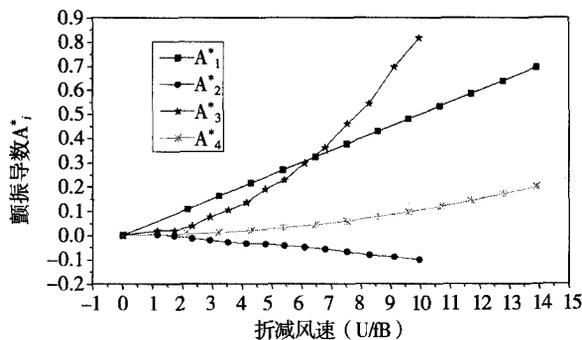
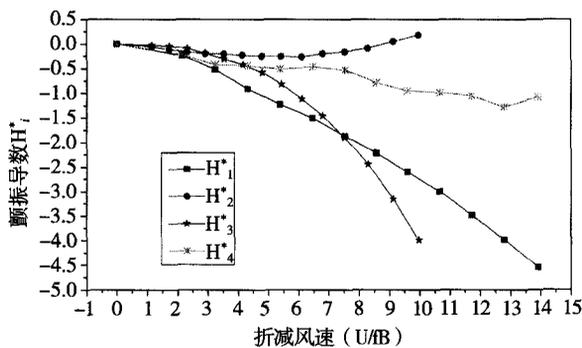


图4 悬索桥主梁断面0°风攻角时的颤振导数 H_i^* 和 A_i^* ($i=1, 2, 3, 4$)

前面所述。

为了更加准确的计算悬索桥的抖振响应, 抖振分析中有必要同时考虑作用在主梁上的自激力作用。根据Scanlan理论^[4], 悬索桥主梁竖向、水平和扭转方向的自激力可分别表达为:

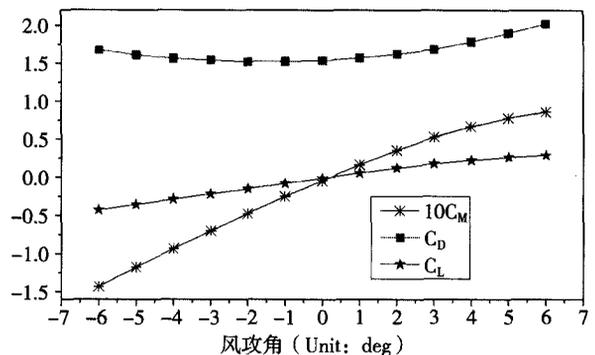
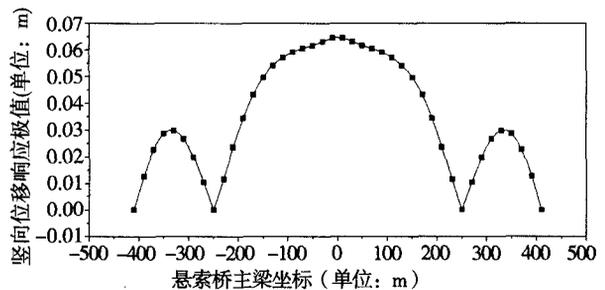
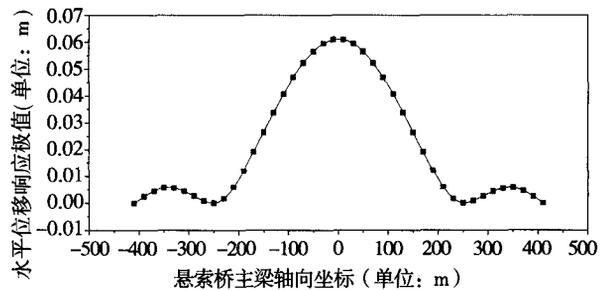


图5 悬索桥主梁断面静力三分力系数

同时考虑抖振力和自激力, 当采用上述计算参数, 采用耦合抖振计算方法^[9]考虑悬索桥的前60阶振型, 计算得主梁竖向、水平和扭转方向的抖振位移响应RMS值如图6所示。



(a) 竖向位移响应RMS值



(b) 水平位移响应RMS值

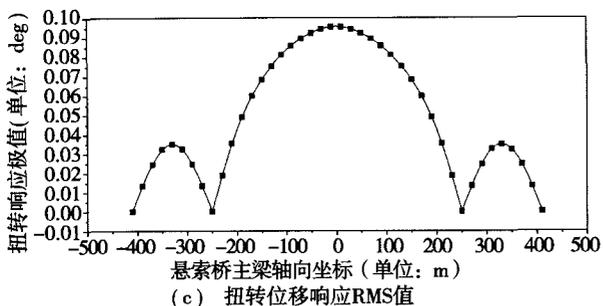


图6 三跨悬索桥主梁抖振位移响应RMS值

(4) 三跨悬索桥抖振位移响应极值

根据Davenport的研究，脉动风荷载下的结构动力响应极值可以表达为如下简化形式^[13]：

$$\hat{Y} = \bar{Y} + g\sigma_Y \quad (6)$$

式中， \hat{Y} 为风荷载作用下的结构动力响应极值， \bar{Y} 为平均风荷载引起的平均响应， σ_Y 为脉动风荷载引起的结构动力响应RMS值， g 为峰值因子，通常情况下可以取为3.5。

作用在大跨度悬索桥主梁上的平均风荷载可采用静力三分力系数表达为：

$$\begin{aligned} F_L &= \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 C_L B \\ F_D &= \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 C_D B \\ F_M &= \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 C_M B^2 \end{aligned} \quad (7)$$

式中， F_L 、 F_D 和 F_M 分别为作用在悬索桥主梁单位长度的水平升力、阻力和扭矩，其方向如图7所示； C_L 、 C_D 和 C_M 分别为主梁的升力系数、阻力系数和扭矩系数； B 为主梁的参考计算宽度。

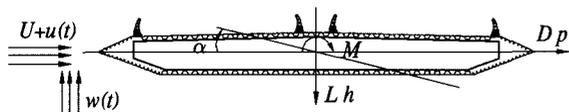
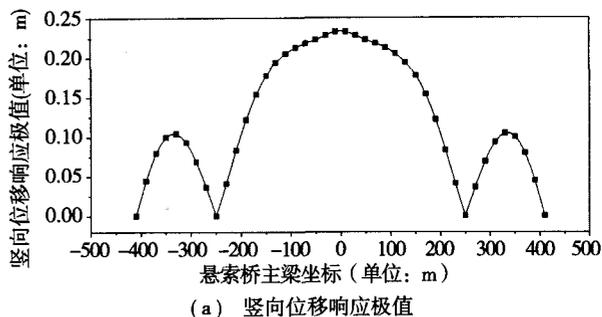


图7 悬索桥主梁平均风荷载方向示意

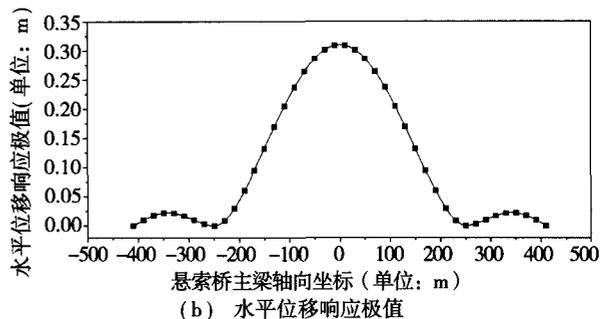
根据公式(6)，同时考虑平均风荷载和脉动风荷载作用，可得三跨悬索桥主梁的位移响应极值如图8所示。

3 结论

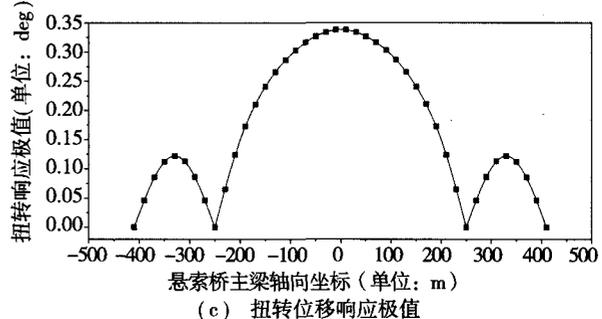
通过上述计算分析可以发现，本文算例中的大跨度悬索桥柔性较大，一阶对称侧弯振型仅0.332Hz，为典型的风敏感结构。当同时考虑作用在主梁上的抖振力和自激力时，可得脉动风荷



(a) 竖向位移响应极值



(b) 水平位移响应极值



(c) 扭转位移响应极值

图8 三跨悬索桥主梁抖振位移响应极值（0°风攻角）

载作用下悬索桥主梁在竖向、水平和扭转方向的最大抖振位移响应极值分别为0.233m、0.310m和0.339°。无论对于竖向、水平和扭转方向，悬索桥主梁的最大位移响应极值均发生在主跨跨中位置处，由于两边跨的跨度较小、刚度相对较大，所以引起的边跨抖振位移响应相对较小。0°风攻角下的计算结果表明，大跨度柔性悬索桥刚度较小，其结构设计中必须考虑脉动风引起的抖振响应才能保证结构的设计安全。本文仅以0°风攻角为例对长跨柔性悬索桥的风致抖振响应极值进行了分析计算，如果计算中需要其它角度的抖振响应极值，可以采用与本文相同的处理方式获得。

参考文献

[1] 中华人民共和国交通部. 公路桥梁抗风设计规范(JTG/T D60-01-2004)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Ministry of Communications of the People's Republic of China. Wind-resistant design specification for highway bridges (JTG/T

- D60-01-2004) [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [2] 项海帆等. 公路桥梁抗风设计指南[S]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
Xiang haifan et al. Wind-resistant design specification of highway bridges[S]. Beijing: China Communications Press, 1996.
- [3] Davenport A G. The application of statistical concepts to the wind loading of structures[C]. Proc. Inst. Civil Eng. 1961, 19: 449-471.
- [4] E. Simiu, R.H. Scanlan. Wind Effects on Structures (Third Edition) [M]. John Wiley & Sons, Inc. 1996.
- [5] A. Jain, N.P. Jones, R.H. Scanlan. Coupled aeroelastic and aerodynamic response analysis of long-span Bridges [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996(60): 69-80.
- [6] A. Jain, N.P. Jones, R.H. Scanlan. Coupled Flutter and Buffeting Analysis of Long-span Bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1996(6): 716-725.
- [7] N.P. Jones, R.H. Scanlan. Theory and Full-bridge Modeling of Wind Response of Cable-supported Bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2001(6), 6: 365-375.
- [8] 陈甦人. 考虑参数不确定性及多模态气动耦合的桥梁风致振动控制系统的研究[D]. 博士学位论文, 上海: 同济大学, 2000.
Chen suren. Study on wind-induced vibration control system of bridges based on the modal coupling and uncertainty parameters [D]. Doctoral dissertation of Tongji University, Shanghai: Tongji University, 2000.
- [9] 丁泉顺. 大跨度桥梁耦合颤抖振响应的精细化分析[D]. 同济大学博士学位论文, 上海: 同济大学, 2001.
Ding quanshun. Refinement of coupled flutter and buffeting analysis for long-span bridges[D]. Doctoral dissertation of Tongji University, Shanghai: Tongji University, 2001.
- [10] Liepmann H. W. On the application of statistical concepts to the buffeting problem. Journal of Aeronautical science, 1952, 19(12): 793-800.
- [11] 周俊杰, 徐国权, 张华俊. Fluent工程技术与实例分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
Zhou junjie, Xu guoquan, Zhang huajun. Technical analysis of Fluent software in engineering field and case study[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010.
- [12] 温正, 石良臣, 任毅. Fluent 流体计算应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
Wen zheng, Shi liangchen, Ren yi. Fluid computing application tutorial of Fluent software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [13] Davenport, A .G. Gust loading factors[J]. Journal of Structural Division, ASCE93(ST3), 1967: 11-34.

(上接第21页)

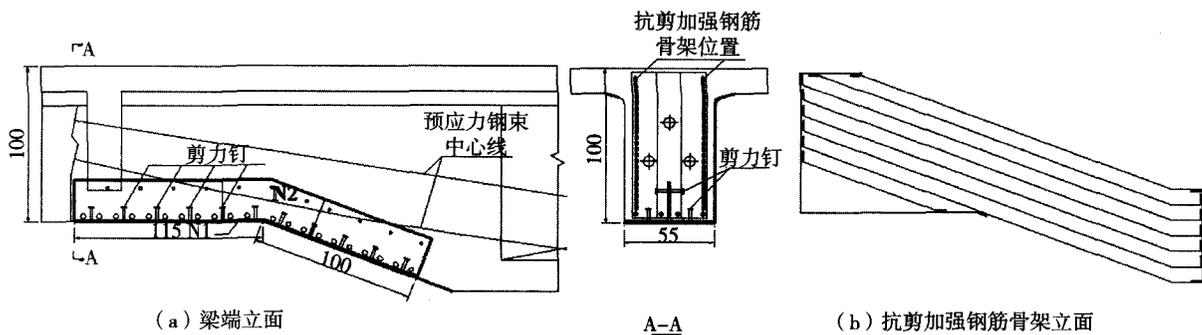


图9 变高度T梁的端部加强构造(尺寸: cm)

参考文献

- [1] Benaim R. The design of prestressed concrete Bridges—concepts and principles [M]. Taylor and Francis, 2008.
- [2] Cohn M. and Lounis Z. Optimal design of structural concrete bridge systems[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(9): 2653-2674.
- [3] 张彬, 朱栋, 徐建炜, 等. 浙江省中小跨径混凝土桥梁整体状况与典型病害研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版)2013, 32(S1): 742-745.
Zhang Bin, Zun Don, Xu Jianwei, et al. Overall situation and typical diseases of medium and small span concrete bridges in zhejiang province[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2013, 32(S1): 742-745. (in Chinese)
- [4] Dowe H R K, Smith J W. Structural tests of precast, prestressed concrete deck panels for california freeway bridges[J]. PCI Journal. 2006, 51(2): 76-87.
- [5] 王亚军, 于坤, 蔡仕强. 公路预应力空心板梁桥单梁试验及评定[J]. 桥梁建设, 2011, (5): 36-39
Wang Yajun, Yu Kun, Cai Shiqian. Testing and evaluation of single beam of highway prestressed concrete hollow slab beam bridge[J]. Bridge Construction, 2011, (5): 36-39. (in Chinese)
- [6] 赵卓, 蒋晓东, 霍达. 基于破坏荷载试验的预应力混凝土空心板单梁受力分析[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33 (5): 498-501.)
Zhao Zhu, Jling Xiaodon, Huo Da. Single slab load analysis of prestressed concrete hollow slab based on destructive test[J]. Journal of Beijing University of technology, 2007, 33 (5): 498-501. (in Chinese)
- [7] Scollm'd C R, Bartlett F M. Rehabilitation criteria for post-tensioned voided-slab bridges[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004, 31(6): 977-987.
- [8] 黄民水, 朱宏平. 空心板梁桥“单板受力”病害机理及其加固处治研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(2): 118-121.
Huang Minshu, Zhu Hongping. Study on mechanism and reinforcement processing of “Single slab beating” disease of hollow core slab beam bridge[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology(Natural Science Edition). 2008, 36 (2): 118-121. (in Chinese)
- [9] 中交公路规划设计院 JTG D62--2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
CCCC Highway Consult Co., Ltd. JTG D62--2004 Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts[S]. Beijing: Communications Press, 2004. (in Chinese)