

斜拉索足尺疲劳试验的关键问题

刘 辉, 石雪飞

(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要: 随着斜拉桥建设的增多, 斜拉索的疲劳问题越来越突出。作为研究斜拉索疲劳性能的主要手段, 拉索足尺疲劳试验因其规模大、成本高等原因, 在世界范围尤其是国内所进行的次数并不多。在研究国内外相关文献的基础上, 提出了斜拉索疲劳的安全度准则及试验抽样方法, 总结了疲劳试验参数的确定方法并比较了国内外规范的相关规定, 研究并总结了目前为止国内外主要的拉索足尺疲劳试验, 并介绍了疲劳试验常用的加载方式。

关键词: 斜拉索; 足尺试验; 疲劳试验; 试验参数; 疲劳加载系统

中图分类号: U448.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2013)03-0008-06

从20世纪50年代开始, 由于高强度材料及预应力技术的广泛应用、施工方法的改进和结构分析理论的发展, 斜拉桥有了飞速发展, 成为200~800 m跨径范围内最具竞争力的桥梁结构形式之一, 并且这一范围仍有扩大的趋势^[1]。作为斜拉桥的关键承重构件, 斜拉索直接承受桥面恒、活载。因此, 在满足拉索的静力安全储备大于或等于其他上部构件的同时, 由于拉索的持续振动和桥面活载的直接作用, 其疲劳强度必须不低于其他上部构件的疲劳寿命。拉索的疲劳强度与成索工艺、锚固方式、腐蚀状况及外部荷载密切相关, 即使是在有限元技术充分发展的今天也难以从理论上准确计算。因此, 作为直观而准确的研究方法, 拉索的足尺疲劳试验逐渐成为研究拉索疲劳性能的必经途径之一。

1 斜拉索疲劳安全度准则与试验抽样控制

1.1 疲劳安全度准则

拉索索体经过钢丝卷盘解卷、展丝、编丝、扭角、挤塑等工艺过程形成, 制索工艺可能造成钢丝的刻痕、扭伤及接触应力峰值点等缺陷(制索效应), 使单根钢丝的疲劳强度一定程度的降低; 同时, 拉索锚固部位局部应力集中, 锚具易使钢丝遭受损伤(锚固效应), 使得钢丝的疲劳强度进一步降低^[2]。因此, 拉索的疲劳强度要低于单根钢丝或钢绞线的疲劳强度。文献[3]中所述美国后张法协会给出的拉索疲劳设计安全度准则如图1所示。

图中(1)表示单根钢丝或钢绞线验收标准值, (2)表示拉索试验标准值, (3)为设计限值; Δ_1 为质量保证数(有接头钢筋取17.24 MPa, 钢绞线和无头钢筋取68.95 MPa, 钢丝取103.43 MPa), Δ_2 为长度效应和锚具效应的安全裕量(取34 MPa)。拉索的疲劳试验应力幅

$$\Delta\sigma_{\text{索}} = \Delta\sigma_{\text{钢丝/钢绞线}} - \Delta\sigma \quad (1)$$

式中 $\Delta\sigma_{\text{索}}$ 为拉索试验应力幅; $\Delta\sigma_{\text{钢丝/钢绞线}}$ 为单根钢丝或钢绞线具有95%可靠度、200万次加载寿命的应力幅; $\Delta\sigma$ 为考虑拉索制索效应和锚固效应的应力幅降低值, 对钢丝取140 MPa, 对钢绞线取105 MPa。

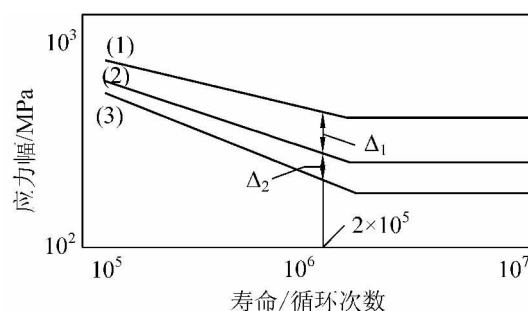


图1 疲劳安全度准则

收稿日期: 2012-12-23

作者简介: 刘辉 男 1985年出生 硕士研究生

因此,在对拉索组装件进行疲劳试验之前,尚应按照一定的抽样方法,完成单根钢丝或钢绞线的疲劳试验测试。一般公路斜拉桥拉索疲劳试验应力幅取 200 MPa,则单根钢丝疲劳应力幅不低于 340 MPa,单根钢绞线疲劳应力幅不低于 305 MPa。

1.2 疲劳试验抽样控制

一座大型斜拉桥,用于制索的钢丝多在 300、400 t 以上,这些钢丝可能来自几个批号甚至几个炉号。如此巨大的钢丝集合体,只有采用正确的抽样程序、试验方法和适当的试验数据统计方法方能保证拉索的疲劳性能。

试验用钢丝和钢绞线应进行正确抽样,否则可能成为疲劳试验失败的重要原因。美国 CTL 实验室 1992 年进行克拉克大桥拉索疲劳试验,试验分为由 17 股、37 股和 46 股钢绞线组成的三根拉索试件。46 股试件共进行了 3 次试验,前 2 次试验都没有达到规范验收标准,在进行第 3 次试验前,对取自 6 个不同炉号的 24 根钢绞线做了 200 万次疲劳加载试验,试验发现从 48 号线盘中取出的 4 个试件中的 2 个分别在 76 万次及 125 万次循环时破坏,究其原因,是 48 号线盘试件的外层钢丝有先期存在的腐蚀。排除原因重新抽样后第 3 次试验达到了规范的验收标准^[4]。

关于钢丝疲劳试验的抽样,文献[5]规定钢丝疲劳试样每 2 000 t 抽取 1 根;文献[6]和文献[7]规定每批或每 500 t 做一次疲劳试验。而美国 PTI 规范规定每炉钢材,每 10 t 取一段 4.88 m 长钢丝或钢绞线留作疲劳试验^[3]。相比之下,我国标准抽样率过低,难于控制疲劳强度的质量。建议进行拉索疲劳试验前先进行钢丝或钢绞线的疲劳测试,如果条件不允许,则仅进行静力性能抽样测试,测试合格的钢丝和钢绞线方可进行拉索疲劳试验,抽样标准可参照美国 PTI 规范。

2 斜拉索足尺疲劳试验参数的确定

引起斜拉索应力变化的主要因素有拉索振动、主梁振动、汽车荷载和环境温度等。以苏通大桥为例,拉索的轴向疲劳主要由主梁振动和桥面移动荷载引起,其 200 万次等效疲劳应力幅(峰峰值)分别为 46.38 MPa 和 37.15 MPa,两者按线性疲劳累积损伤等效组合后对应于应力幅(峰峰值)60.67 MPa 的 200 万次疲劳效应,考虑试验值和设计值的差别及额外的安全系数后,拉索的轴向疲劳荷载为 140 MPa^[8]。

斜拉索疲劳设计一般不用汽车活载满值,而是取 0.5~0.6 倍的活载应力幅,尤其是公路活载,一般实测活载强度仅大设计活载的 13%,特殊情况下达 37%^[3]。铁路活载则大不相同,活载强度和加载频率均接近于设计活载值,因此,铁路斜拉桥的疲劳设计应充分考虑富余量。

在早期的疲劳试验研究中,一般只考虑轴向疲劳效应,随着桥梁跨径的增大,拉索弯曲效应产生的附加应力更加显著。文献[3]认为,对于大于 21 MPa 的弯曲附加应力必须计入。这种附加弯曲应力可由拉索自振、桥面振动及汽车荷载引起。拉索的弯曲应力^[9]

$$\sigma = 2\theta \sqrt{E\sigma_1} \quad (2)$$

假设斜拉索转角疲劳幅值为 10 mrad(约合 0.6°),拉索恒载轴向应力设计值为 500 MPa,弹性模量取 2×10^5 MPa,则拉索弯曲应力为 200 MPa,占恒载轴向应力的 40%,已经相当可观,不容忽视。

因此,各国规范在对拉索疲劳试验的参数规定时,对轴向疲劳和弯曲疲劳荷载多有考虑。例如:法国公路部门(SETRA)2002 年颁布的《法国预应力部际委员会斜拉索标准》第 11.2.2.2 条规定:高强钢丝斜拉索疲劳试验的轴向应力幅为 200 MPa,并且考虑弯曲应力效应,在锚固端同步产生转角幅值为 10 mrad,峰值应力为 $0.45 f_{\text{class}}$,评判标准为钢丝断丝数不大于总数的 2%^[10]。

欧洲混凝土委员会与国际预应力混凝土协会(CEB-FIP)2005 年公布的《预应力斜拉索标准》第 6.2.1.2 条规定:高强度钢丝斜拉索疲劳试验对应 200 万次的轴向应力幅为 200 MPa,并且考虑弯曲应力影响,根据试验条件可采用同定偏转角为 10 mrad 的试验方法,也可采用同步变化的偏转角 ± 5 mrad^[11]。

欧洲规范《受拉构件结构设计》表 2.1 根据斜拉索的疲劳荷载形式和拉索所处的自然环境将拉索划分为 5 个类别,斜拉索属于第 5 个类别。根据该规范附录 A.4.1 规定,斜拉索疲劳试验最大应力为 $0.45 \sigma_{\text{uk}}$,应力幅值为 200 MPa,弯曲角度为 0~10 mrad,疲劳荷载加载次数为 200 万次^[12]。

美国后张协会(PTI)《斜拉索设计、试验与安装规范》(2001第四版)4.2规定拉索试样的最小长度为3.5 m,试验索在200万次疲劳荷载作用下承受应力上限 $0.45f_s$,应力幅根据表3-1确定,试验后断丝率不超过钢丝总数的2%。根据3-1规定,钢绞线的疲劳应力幅为159 MPa^[3]。

值得注意的是,美国PTI未对拉索疲劳试验的弯曲效应进行考虑,这和美国斜拉桥跨径不大有关,而欧洲三本规范全面考虑了拉索疲劳试验的轴向和弯曲效应,其工程背景为法国诺曼底大桥,该桥跨径大、拉索较长,弯曲效应显著。

我国2001年颁布的《斜拉桥热挤聚乙烯高强钢丝拉索技术条件》(GB/T18365—2001)中第6.4.2.2条规定:疲劳试验斜拉索对应200万次循环加载的轴向应力幅为 $0.28\sigma_b \sim 0.4\sigma_b$,评判标准为钢丝断丝数不大于总数的5%^[13],该规范对拉索的弯曲疲劳并没有做出规定。2009年,以苏通大桥的建成通车为工程背景,交通部颁布的《无粘结钢绞线斜拉索技术条件》(JT/T 771—2009)规定:斜拉索应满足上限应力为 $0.45f_{ptk}$,应力幅为200 MPa,循环次数为200万次疲劳性能试验,弯曲效应通过在锚具下放置斜垫块产生10 mrad的固定偏角,或者利用横向助推器使端部产生 ± 5 mrad的角度进行考虑^[14]。

3 主要的斜拉索足尺疲劳试验

斜拉索足尺疲劳试验因其试验设备复杂、试验费用高昂等原因,在国内外进行的次数并不多。大型的斜拉索足尺疲劳试验多是以斜拉桥跨径的新突破,或者新型拉索锚固系统的应用为契机进行的,主要的试验列举如下:

3.1 诺曼底大桥足尺静载和疲劳试验

诺曼底大桥建于1994年,主跨856 m,桥塔高203 m,大桥全长2 141 m。法国道桥试验中心对该桥拉索进行了足尺静载试验和考虑弯曲效应的足尺疲劳试验研究。在疲劳试验中,加载频率为1.3~1.5 Hz,每200万次疲劳试验耗时15~18 d。为模拟斜拉索在锚固区的弯曲效应,在拉索的锚固端加入了楔型块以产生10 mrad的转角,疲劳试验完成后对拉索进行了强度试验,并在强度试验中继续使用楔型块以考虑弯曲效应。在整个静载试验和疲劳试验中,通过声发射装置对斜拉索钢丝的断裂进行监测和计数。

3.2 昂船洲大桥拉索动载试验

香港昂船洲大桥主跨1 018 m,为了验证斜拉索的疲劳性能,选取 $\Phi 7 \times 187$ 、241、295、361、421等5种规格的斜拉索试验进行了200万次,应力上限为 $0.45f_{ptk}$ (796 MPa),应力幅为200 MPa的动载疲劳试验。随着斜拉索长度及重量的增加,斜拉索在锚头位置会产生更大的二次弯曲应力,为了模拟斜拉索的二次弯曲应力对斜拉索动载性能的影响,在斜拉索的疲劳试验的同时,导入一个二次弯曲应力。

3.3 苏通大桥拉索拉弯组合疲劳试验

苏通大桥主桥为双塔斜拉桥,主跨达1 088 m,在世界同类大桥中位居第一。经试验参数分析,采用轴向应力幅200 MPa,横向弯曲角度 0.6° ,荷载循环次数为200万次的试验方案。试验时在拉索轴向设置一大吨位水平作动器,用于模拟斜拉索的轴向疲劳应力,同时在试验索的中部设置一垂直试验索的竖直作动器,用于模拟斜拉索的弯曲疲劳应力。试验过程中,2个作动器协调动作,使拉索轴向和横向应力同时达到最大或最小。试验研究证明,苏通大桥斜拉索结构设计合理,制作工艺先进,能够满足苏通大桥斜拉索50 a疲劳使用寿命的要求。

3.4 美国老玻璃城桥拉索疲劳强度测试

美国老玻璃城桥斜拉索采用新型的鞍座锚固系统,除进行拉索单向疲劳试验之外,还进行了鞍座疲劳试验及钢绞线与分丝管之间摩擦系数的测定,以保证分丝管提供足够的摩擦力来平衡桥塔两侧的不平衡索力。

总结拉索疲劳性能的试验结果,可以得到以下结论^[15]:

(1) 钢丝断裂均出现在拉索最外层钢丝上,且拉索的直径越大,其疲劳强度越低。

(2) 应力幅不同,疲劳断裂发生的位置也不一样:当应力幅195 MPa时,断裂出现在锚固区前后;当应力幅为245 MPa时,断裂出现在锚固区及其与非锚固区交界处;当应力幅为295 MPa时,断裂在非锚固

区、非锚固区和锚固区交界处和锚固区均有发生。由于实桥上拉索应力幅均低于 200 MPa,且荷载作用频率远低于试验频率,因此实桥上拉索疲劳断裂集中在锚固区。

(3) 失效概率为 5% 时,拉索疲劳寿命为对数正态分布: 127 丝拉索, $S_r = 12.800N_f^{-0.27}$; 95 丝拉索: $S_r = 10.640N_f^{-0.27}$ 。其中, S_r 是应力幅(峰峰值), N_f 是失效概率为 5% 的疲劳寿命。

4 斜拉索足尺疲劳试验加载系统

疲劳试验要求拉索在一定的荷载水平上(称之为静载),以固定的加载频率施加一定的应力幅(一般为 200 MPa,称之为动载)完成。根据加载方式的不同,可分为静载锁定技术和静载控制技术。静载锁定技术是指通过静载加载装置将斜拉索巨大的静载索力锁定在反力装置上,疲劳荷载则通过液压伺服作动器施加。静载控制技术是指动静载均通过液压伺服作动器施加,利用液压伺服作动器的控制技术保持斜拉索静载索力的稳定性^[8]。下面以两个拉索疲劳试验的实际加载装置为例,对两种加载方式予以说明。

4.1 静载控制加载

安徽某斜拉桥跨径布置为 246 m + 125 m,主梁采用主跨钢箱梁、边跨混凝土的混合梁,斜拉索采用新型的斜置鞍座锚索系统,即钢绞线通过埋置在主塔内的分丝管而锚固在桥塔同一侧的主梁上,如图 2。拉索在分丝管内的弯曲半径较小,且在出口处钢绞线的磨蚀严重,同济大学桥梁工程系对拉索进行了足尺鞍座疲劳试验,试验原理图如图 3。

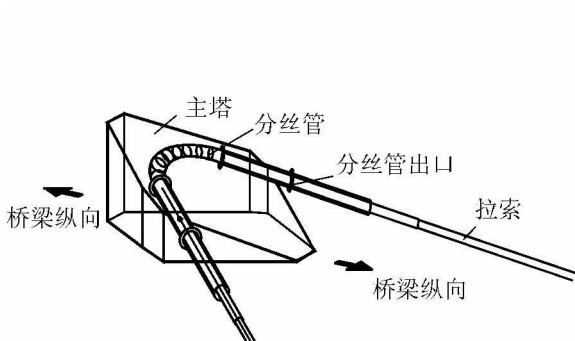


图2 斜置鞍座锚索系统

试验采用静载控制加载,即先通过液压作动器使钢绞线达到应力上限($0.45 f_{ptk}$),然后回油使钢绞线应力到达下限($0.45 f_{ptk} - 200$,单位: MPa),试加载几次,待系统稳定后确定作动器加载频率,如图 4。静载控制技术的静载稳定性受控制技术和作动器机械性能的影响有一定的波动性,由于动静载均采用液压伺服作动器加载,故疲劳试验效率较低,但该技术对静载采用实时控制,因此,不需要多次调整静载索力。

4.2 静载锁定加载

苏通大桥主桥为双塔斜拉桥,主跨 1 088 m,最长的斜拉索长度达 577 m,拉索弯曲疲劳问题突出,重庆交通科研设计院对试验索进行了 200 万次的拉弯疲劳试验,如图 5^[16]。试验采用静载锁定拉弯耦合疲劳试验加载技术,其核心是轴向荷载动静载分离技术,如图 6^[8]。

试验时先用千斤顶将拉索加载至静载吨位并锁定,如图 6(a);然后通过横向作动器使拉索弯曲至指定转角(5 mrad),如图 6(b);最后是轴向拉伸和横向弯曲疲劳

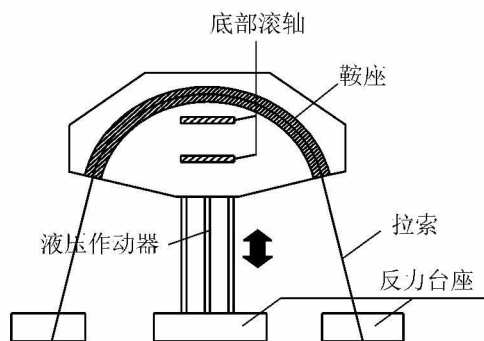


图3 拉索疲劳试验平面示意图



图4 索鞍系统疲劳试验

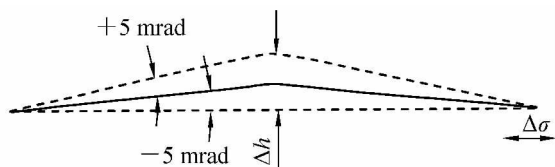


图5 斜拉索拉弯疲劳试验原理图

加载,使拉索在轴向和横向同时达到最大或最小,如图 6(c)。静载锁定技术的静载稳定性好,疲劳试验效率高,但在初始 10 万次疲劳试验中,可能会因为松弛现象而需要多次补充或调整静载索力。

5 结论

(1) 关于斜拉索疲劳试验,国内外都采用应力上限为 0.45 倍拉索强度、应力幅为 200 MPa、循环次数为 200 万次等一致的试验参数。

(2) 除美国外,其他国家规定拉索疲劳试验同时考虑轴向疲劳效应和横向疲劳效应,横向疲劳应力的加载既可以采用使锚固端产生 10 mrad 固定转角的形式,也可以利用横向作动器使锚固端产生幅度为 5 mrad 的拉弯耦合试验形式。

(3) 以往的疲劳试验表明:钢丝的断裂多数发生在拉索的最外层钢丝上,且拉索直径越大,其疲劳强度越低。

(4) 进行拉索疲劳试验之前,应按一定的抽样标准进行单根钢丝或钢绞线的静力测试和疲劳测试,满足要求后才能进行足尺疲劳试验。

(5) 静载控制加载技术和静载锁定加载技术各有利弊,静载加载技术试验效率低但静载索力稳定,而静载锁定加载技术试验效率高但可能因松弛需要补充或调整静载索力。

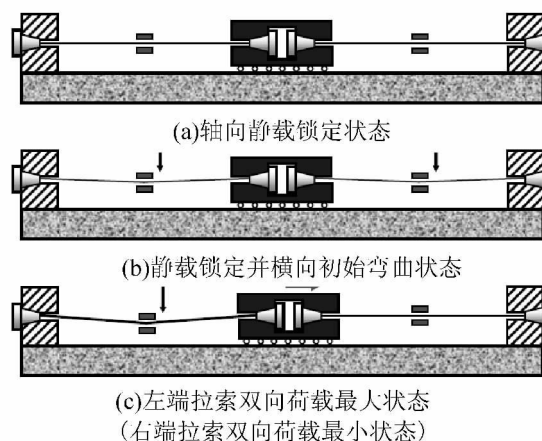


图 6 静载锁定疲劳试验加载方案示意图

参 考 文 献

- [1] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 党志杰. 斜拉索的疲劳抗力[J]. 桥梁建设, 1999(4): 18-21.
- [3] PTL. Recommendations for stay cable design, testing and installation[S]. USA: PTI, 2001.
- [4] 龚志刚, 党志杰. 奥尔顿克拉克大桥斜拉索的疲劳强度[J]. 世界桥梁, 1997(1): 37-41.
- [5] 国家技术监督局. GB/T 17101—97 桥梁缆索用热镀锌钢丝[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [6] 上海市市政工程设计研究院. CJ3077—1998 建筑缆索用钢丝[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [7] 上海市市政工程设计研究院. CJ3058—96 塑料护套半平行钢丝拉索[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [8] 重庆交通科研设计院. 苏通大桥斜拉索拉弯作用下的疲劳试验[R]. 重庆: 重庆交通科研设计院, 2007.
- [9] 严国敏. PC 双线铁路斜拉桥第二千曲川桥的设计[J]. 国外桥梁, 1995(1): 1-16.
- [10] SETRA. Cable stays Recommendations of French inter-ministerial commission on Prestressing[S]. Paris: SETRA, 2002.
- [11] CEB-FIP. Acceptance of stay cable systems using prestressing steels[S]. [S. l.]: CEB-FIP, 2005.
- [12] CEN. EN1993-4-11 Design of structures with tension components[S]. [S. l.]: CEN, 2006.
- [13] 交通部重庆公路科学研究所. GB/T18365—2001 斜拉桥热挤聚乙烯高强钢丝拉索技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [14] 威胜利工程有限公司. JT/T 771—2009 无粘结钢绞线斜拉索技术条件[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [15] 向雅娟, 宋世樟. 斜拉桥大直径斜拉索的疲劳强度[J]. 世界桥梁, 1994(1): 25-32.
- [16] 郑万山, 唐光武. 苏通大桥斜拉索拉弯疲劳试验研究[J]. 公路交通技术, 2010(4): 73-76.

(下转第 17 页)

限墩高影响较大的因素有墩底横桥向宽度、单肢墩纵桥向长度、墩壁厚度、材料强度等级以及主跨跨径。双肢墩净间距、横桥向几何缺陷比例、纵桥向几何缺陷比例以及风荷载放大系数对极限墩高影响较小。

(4) 如果要进一步增大墩高,可以采用的措施有: 增加高墩结构墩底横桥向、宽度单肢墩纵桥向长度和墩壁厚度,提高混凝土材料强度等级以及减小主跨跨径等。

参 考 文 献

- [1] 刘志宏, 詹建辉, 黄宏力. 高墩大跨径连续刚构桥的稳定性分析[J]. 中外公路, 2005(6): 63-66.
- [2] 杨昀, 周列茅, 周勇军. 弯桥与高墩[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 233-239.
- [3] 丁作常, 陈冠桦, 唐志. 温泉特大桥高墩稳定性分析[J]. 中外公路, 2011(4): 117-123.
- [4] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994: 6-10.
- [5] 罗玉科, 冯鹏程. 龙潭河特大桥设计[J]. 桥梁建设, 2005(2): 29-32.
- [6] 吴勇往, 张运波. 高墩大跨连续刚构桥施工过程稳定性分析[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2012, 25(4): 43-47.
- [7] 顾祥林. 混凝土结构基本原理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2007: 25-26.
- [8] 杜进生, 康景亮, 罗小峰. 考虑施工缺陷和初始偏心的高墩稳定性分析[J]. 工程力学, 2011(4): 115-118.
- [9] 沈炯伟. 大跨度桥梁稳定全过程分析与结构安全性研究[D]. 上海: 同济大学桥梁工程系, 2011.

Study on Ultimate Pier Height of Long-span Continuous Rigid Frame Bridge Based on Stability

Shi Xuefei, Bai Wulong

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: On the basis of the pier structure of Longtanhe Bridge in Hubei, establishing numerical model with ANSYS, the ultimate pier height of Long-span continuous rigid frame bridge with high pier is discussed in this paper on the condition of certain section form, structural parameters and stability. The result shows that the ultimate pier height of continuous rigid frame bridge is about 205 m using the pier structure of Longtanhe Bridge. The ways to enhance the ultimate pier height are also discussed.

Key words: stability; continuous rigid frame bridge; ultimate pier height (责任编辑 车轩玉)

(上接第12页)

Key Problems of Full-scale Fatigue Tests of Stayed-cables

Liu Hui, Shi Xuefei

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: With the increase of the cable-stayed bridge construction, stayed-cable fatigue is becoming more prominent. As the primary means to study the fatigue properties of the stayed-cable, the full-scale fatigue test is conducted rarely, especially inside China, because of its huge size and high cost. On the basis of relevant literature, the paper summarizes the fatigue test parameter determining methods and compares the relevant provisions of domestic and international codes, and introduces the main full-scale fatigue tests conducted so far.

Key words: stayed-cables; full-scale tests; fatigue tests; test parameters; fatigue loading systems

(责任编辑 车轩玉)