

混凝土桥梁几个基本计算 及设计问题的再认识

徐 栋

(同济大学桥梁工程系 上海 200092)

摘 要:本文深入讨论了桥梁结构的指标应力、混凝土箱梁及钢砼结合梁的分析方法、大跨径预应力混凝土梁桥的开裂下挠问题及体外预应力加固方式、主动利用体外预应力钢束提高箱梁结构的抗裂性等几个混凝土桥梁的基本计算与设计方面的问题,指出了目前结构分析与配筋方法的缺失和缺陷,希望对桥梁结构的受力特征以及配筋方法的本质有较完整和深入的揭示,以为我国桥梁结构的设计更精细、更完善,促进桥梁结构的工程安全与耐久提供有益建议。

关键词:桥梁 箱梁 剪切 剪切配筋 开裂下挠 体外预应力

1 引言

桥梁结构的安全和耐久是业内非常关注的问题,避免和处理结构性开裂是其重要组成部分。而厘清桥梁结构的受力特征、了解现行配筋设计方法的局限,是避免和处理桥梁结构性开裂、确保结构安全耐久的重要基础。

本文结合作者近年最新研究成果,讨论以下几个混凝土桥梁的基本计算与设计问题:

- 桥梁指标应力
- 箱梁及钢砼结合梁的分析方法
- 开裂下挠问题及体外预应力加固方式讨论
- 主动利用体外预应力钢束提高箱梁结构的抗裂性

2 桥梁指标应力

由于受桥梁结构设计规范建立时结构特点的影响,现行规范的配束配筋计算体系是针对柔细梁的,与规范相关的指标应力一般仅为三个,即截面上缘正应力、截面下缘正应力和腹板主应力。实际上,这三个指标应力仅是针对一根薄腹窄梁的,并不能反映现代复杂桥梁结构的真实受力情况,也就是说,现行规范体系关注的、大家早已习以为常的计算结果本身是存在漏洞的。

实际上桥梁结构可以分解为有规律受力的基本构件。基本上所有复杂的桥梁结构断面可以离散成“板”构成,例如一个箱梁可以分解为顶板、底板以及多块腹板构成,如图1所示。这些板可以是钢的,可以是混凝土的,或其他任意材

料的。于是,这些板元便可以“组合”成全混凝土截面、全钢截面、部分是钢的部分是混凝土的截面(钢-混凝土结合梁)、以及其他任意几种不同材料组成的截面。

一个板元又可以由十字交叉的正交梁格来表达,一片正交梁格就像是一张“网”,一个结构有多少块板构成,就可以用梁格表示成多少张“网”。这样,空间桥梁结构可以用替代板元的空间网格来表达。

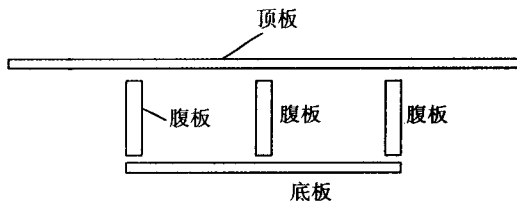


图1 由“板”表达的单箱双室箱梁截面

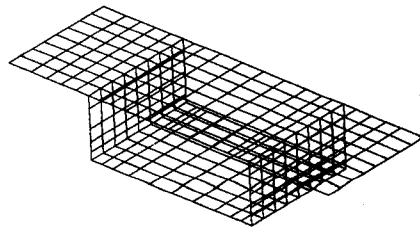


图2 由空间网格表达的单箱双室箱梁截面

表1为一个单箱单室箱梁结构应该关注的9个指标应力,其中箱梁顶板和底板的内应力在现行规范计算体系下常被遗漏,也造成相应的结构计算和配筋方法的缺失。

当然,箱梁腹板在腹板温差或其他荷载作用

下产生畸变,在腹板的内外侧也有一维应力,但通常相对较小,这里不作为必须关注的指标应力。一维应力与二维应力的区别是:一维应力产生的裂缝是从截面边缘开始的,并不会贯穿板厚,剪应力照样可以传递;而二维应力产生的裂缝是全截面的,是贯穿板厚的,剪应力无法传递。

图3表达了箱梁各块板的三层指标应力,中间层面内应力是薄壁应力,是二维应力,它表达

了由外荷载产生的整体效应;每块板的上下层面外应力表达了局部荷载产生的局部效应,是一维应力,如桥面板计算中的车轮荷载以及变高度箱梁的底板纵向预应力钢束产生的外崩力。图4所示的箱梁腹板底板螺旋型裂缝是二维主拉应力产生的,即中间层面内的薄壁应力,这种剪切裂缝是在板厚方向通透型的裂缝。

表1 箱梁结构应该关注的9个指标应力

构件	受力方向	应力特征	与传统关注应力比照
箱梁顶板	纵向面外上缘	一维应力	整体截面上缘应力
	横向面外上缘	一维应力	另外进行桥面板局部计算
	横向面外下缘	一维应力	另外进行桥面板局部计算
	中间层面内	二维应力	常被遗漏
箱梁底板	纵向面外下缘	一维应力	整体截面下缘应力
	横向面外上缘	一维应力	主要为计算底板钢束的外崩力,简化计算方法仍不完善
	横向面外下缘	一维应力	
	中间层面内	二维应力	常被遗漏
箱梁腹板	中间层面内	二维应力	腹板主应力

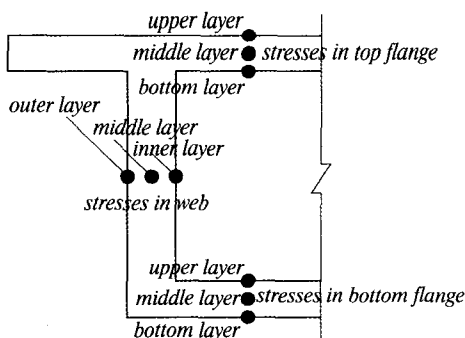


图3 各块板的三层应力

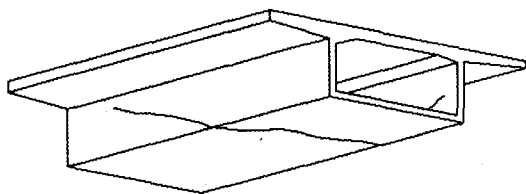


图4 箱梁截面螺旋状裂缝

3 箱梁及钢砼结合梁的分析方法

3.1 箱梁分析方法综述

规范建立时的结构计算结果与规范的要求是协调的,当时桥梁结构基本均由柔细窄梁组成,如由多道简支T梁或空心板组成的梁格结构,构件形式与规范协调。随着桥梁结构的发展,特别是箱型截面梁开始使用后,结构越来越大型化,

截面构成与结构体系也越来越复杂。这些桥梁的结构形式和受力类型已经远远超出了规范“原型结构”所定义的结构特征。于是,规范和设计计算只能采用“两边靠拢”的方法,使现行规范体系继续适用于不同的桥梁结构体系。

由于计算的最根本目的是为了配筋,而国内外现行规范体系均针对梁式结构,所以只有采用梁系计算方法,才能够与规范连通,其计算结果可直接用于配筋。可以说,在可预见的未来,规范的梁系本质不会改变。但是,如果我们把主梁称为内部,主梁之外的结构统称为外部,根据适用范围和解除超静定的能力,梁系计算方法也是不同台阶的,如表2所示:

平面杆系分析方法无法将复杂的空间结构简化到一个平面上去,所以其外部、内部均是超静定的,解决的方法是用各种系数或近似方法去简化。

准空间分析方法可以将复杂的空间结构在计算框架内建立计算模型(例如主梁采用单梁的“鱼骨”模型),所以其外部是“静定”的,计算结果是直接的。但是,这种方法对于主梁本身却仍然无法“解构”超静定,解决的途径依然与平面杆系计算方法相同,即采用各种系数或近似方法去简化,也就是说,其分析结果仍然是三个

力、三个力矩的六种受力特征。

空间网格分析方法和七自由度单梁计算方法是真正的空间分析，同时“解开”了桥梁空间结构的外部超静定和内部超静定，计算结果直接面向配筋，是较为完整的空间分析，也是与配筋方法能够连通的计算方法。

这里应该特别指出，空间网格分析实际上是板单元分析的替代，图2所示的空间网格模型可以得到表1中所有需要关注的一维应力和二维应力为代表的指标应力。

表2 梁系计算方法的本质

分类	分析方法	主梁以外的结构	主梁自身	主梁模型
第一台阶	平面杆系	平面分析(外部超静定)	平面分析(内部超静定)	三自由度单梁
第二台阶	准空间分析	空间分析(外部静定)	平面分析(内部超静定)	六自由度单梁
第三台阶	空间分析	空间分析(外部静定)	空间分析(内部静定)	空间网格(板)七自由度单梁

3.2 钢砼结合梁的分析方法

图5为同济大学设计研究院桥梁分院承担的浙江省台州市的椒江二桥，该桥为双塔双索面结合梁斜拉桥，主跨为70+140+480+140+70m，总长900米，桥面总宽度39.5m。图6为该桥采用的半封闭钢箱组合梁截面。

图7是目前对结合梁常用的计算分析思路，其基本思路仍然想适用现行规范体系，即将如此复杂的截面“整理”成一根柔细薄腹窄梁，这样便可以应用现行规范中熟知的方法。

但问题是，按照图7的方法混凝土桥面板只能计算竖向的剪应力，这种方法“忽略”了这种

许多采用块单元的大型有限元软件在计算方面非常先进，但对于施工过程复杂的预应力混凝土桥梁结构，并没有完全适用。特别是块单元分析的计算结果将整体效应和大量局部效应混淆在一起，无法提炼出表1中的指标应力，也难以直接用来交付配筋，故目前大多往往被作为局部分析时采用。

只有建立针对三维应力的配筋方法，才能够将块单元分析与配筋连通，也就是改变规范的梁系配筋本质，涵盖桥梁结构的整体效应配筋和局部效应配筋，但目前似乎尚看不到前景。

结构最重要的受力特征：混凝土桥面板的面内剪应力（主拉应力）。

表3是该桥可以建立的整体计算模型以及相应的关注点。前二种计算模型无法考虑截面中混凝土桥面板的面内剪应力，而采用独立的桥面板局部分析只能得到桥面板面外的一维正应力，故无法支持该截面需要特别关注的桥面板面内配筋。只有计算模型C能够得到表1中所有的9个指标应力。图8为该截面采用的网格分离方式，从而连通了分析与配筋，并为“拉应力域”剪切配筋理论建立了应力来源^{[2][3][4]}。

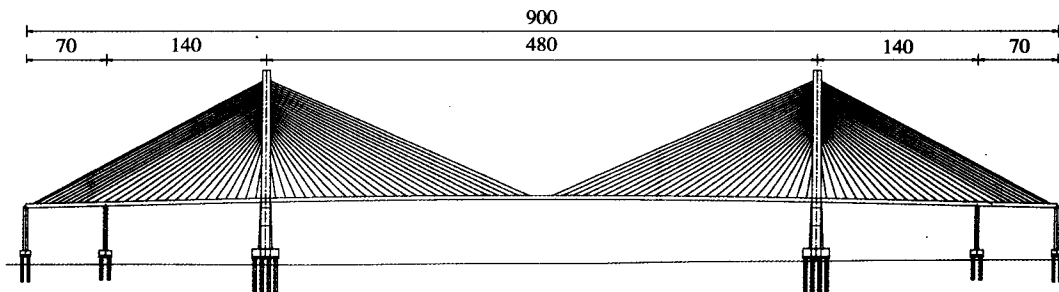


图5 椒江二桥跨径布置

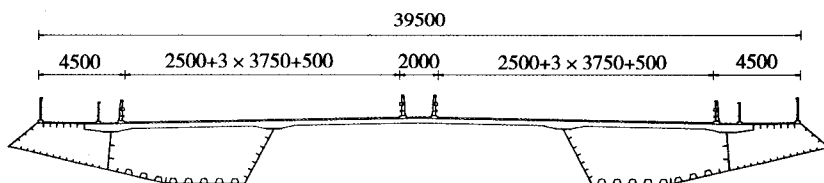


图6 椒江二桥采用的半封闭钢箱组合梁截面



图7 现行方法常用的习惯思路



图8 面向配筋的空间网格模型

表3 椒江二桥整体分析的建模方式

计算模型	截面划分	有限元网格	模型及关注点
A			单梁鱼骨模型, 关注截面上下缘正应力及位移
B			平面梁格模型, 考虑了剪力滞效应, 关注截面上下缘正应力及位移
C			空间网格模型, 基本反映了所有空间效应, 关注所有指标应力和位移

4 开裂下挠问题及体外预应力加固方式讨论

4.1 箱梁截面腹板的剪切配筋

表4 混凝土构件中腹板的剪切配筋方式

国际主要规范比较	抗剪钢筋图示
美国ACI、中国(只有箍筋)	
欧洲规范、美国AASHTO (箍筋+主纵筋)	
提出的抗剪配筋新方法	

图9为区别于我国规范“原型试验结构”的破坏形态。这些情况里混凝土的抗剪贡献极小，甚至没有。中国规范采用的脱离体理论，严重高估混凝土的抗剪贡献，造成剪切配筋不足，一旦出现剪切裂缝钢筋马上屈服，造成较宽的斜裂缝宽度，继而破坏了预应力的传递路径，削弱了结构刚度，引发持续下挠！



图9 其他规范的剪切破坏模型——腹剪破坏

4.2 箱梁截面剪切构件的广义化

对于箱梁截面，实际上顶板、腹板和底板均会承受主拉应力，都是抗剪构件，都需要抗剪配筋，如图11所示。图8中的钢砼结合梁的顶板，实际上也是抗剪构件，在水平面内方向需要抗剪配筋。

这样，箱梁截面中剪应力关注位置不仅仅在腹板，而应包括顶板和底板。图10中的A、B、C、D四点中，A、B、C点是常被重视的剪应力计算位置，竖向预应力可以减小这里的主拉应力。底板的D点也应该是主拉应力的重要位置，但时常被忽视，是竖向预应力照顾不到的“盲区”，

也是图4中的箱梁截面螺旋型裂缝中底板开裂的原因，在设计中必须特别引起注意。

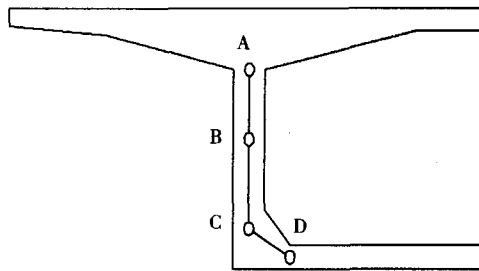


图10 箱梁截面上的关注位置

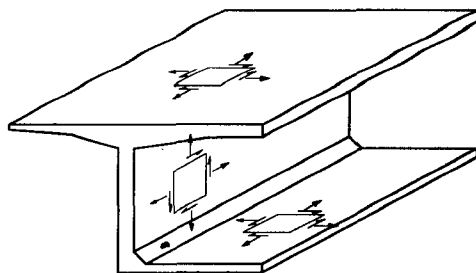


图11 箱梁截面的剪切构件

4.3 大跨径混凝土梁桥的开裂下挠机理讨论

有了以上分析，可以在理论上探讨大跨径预应力混凝土箱梁桥的开裂下挠机理。这里不讨论由于徐变系数以及其他计算参数的差异引起的、可以由计算确定的、可预计的小幅挠度误差，而是针对结构受力问题引起的“加速下挠”或“持续下挠”的问题。

各种徐变收缩的数学模型都是有一定程度的误差的，但却是有或接近有终极值的，也就是说，不管徐变如何误差，总归会接近停滞的，而不会呈现“加速下挠”或“持续下挠”现象。在施工和材料都满足相应标准的基础上，“持续下挠”的动力应该来自于结构开裂。但到底是下挠引起开裂、或开裂引起下挠，作者更倾向于后者，并对其发展脉络有这样的基本判断：

- 没有建立箱梁底板也需要剪切配筋的概念，对箱梁底板剪切配筋重视不够，往往采用较为薄弱的构造配筋。混凝土一旦剪切开裂，部分混凝土底板退出工作，主拉应力传至钢筋，但配筋不足致使此处钢筋迅速屈服退出工作。箱梁截面在该位置附近的闭口剪力流被打断，截面成为

开口截面,腹板剪应力突然增大,可能致使腹板开裂。同时由于部分结构退出工作,局部的平面假定被打破,底板纵向预应力在此处向全截面的传递减弱;

●除此之外,或有其他原因导致腹板主拉应力超过混凝土承受能力,箱梁腹板开裂。若腹板剪切钢筋配筋不足(尤其我国采用的脱离体理论高估了混凝土贡献),箍筋便会屈服,外观表象为较宽的斜裂缝;

●由于剪切裂缝是沿板厚方向贯通的,而箱梁底板或腹板中的抗剪钢筋配置不足,造成斜裂缝处抗剪钢筋屈服位置的部分截面推出工作,纵向预应力效应在开裂位置传递减弱,结构抗弯能力偏离计算时的平截面假定,结构刚度降低,导致下挠、再开裂、再下挠、再开裂恶性循环发生,结构“持续下挠”或“加速下挠”。

对于大跨径预应力混凝土箱梁桥的开裂下挠问题,业界有过长期的探索,有些学者以某些特殊“状态”或某些“判别式”做判别工具,但问题在于,是否违背这些“状态”或“判别式”(特别在中小跨径桥梁里),便会导致开裂下挠?显然这点并没有得到有效的验证。这里将大跨径预应力混凝土箱梁桥的开裂下挠这样的“疑难病害”与指标应力和剪切配筋这样的基本计算和设计问题联系在一起,是普遍适用的。目前计算方法无法对箱梁剪应力(主拉应力)进行完整的计算,致使经常出现问题后却发现计算是“没有问题”的,而箱梁照样开裂下挠的现象;同时,没有建立箱梁顶板、底板与腹板一样也是承重构件的概念,所以其根本问题在于我们现行的规范体系中指标应力的缺失和剪切配筋的缺陷,前者导致在箱梁各板件或结合梁混凝土桥面板中出现贯穿板厚的斜裂缝,后者导致出现的斜裂缝较宽、斜裂缝处的抗剪钢筋屈服。所以,大跨径预应力混凝土箱梁桥的开裂下挠病害不光是一个弹性阶段开裂的问题,同时更是极限阶段钢筋屈服的问题,必须对顶板、底板和腹板的面内剪切配筋重点关注。

4.4 开裂下挠问题的加固方式讨论

由上分析,在对大跨径预应力混凝土箱梁桥的开裂下挠问题进行基本判断之后,就可以考虑如何对症下药进行加固的问题。

同样回到抗剪配筋问题:

图12是欧洲规范中作为剪切配筋基础的变角桁架模型基本图示。其基本理论认为,在混凝土剪切开裂后,混凝土的主压应力是未开裂之前的2倍!也就是说,混凝土剪切开裂后,裂缝位置的主压应力大幅增大了。这样,对二维主拉应力产生的面内开裂的加固就要非常小心:必须通过精细的计算分析,并重点关注加固后的效应,特别是二维应力的效应,否则有可能反而得到负面效果。所以,采用通长的体外预应力钢束进行加固并不是一个好方案,建议应该采用沿主拉应力方向的短体外索加固。

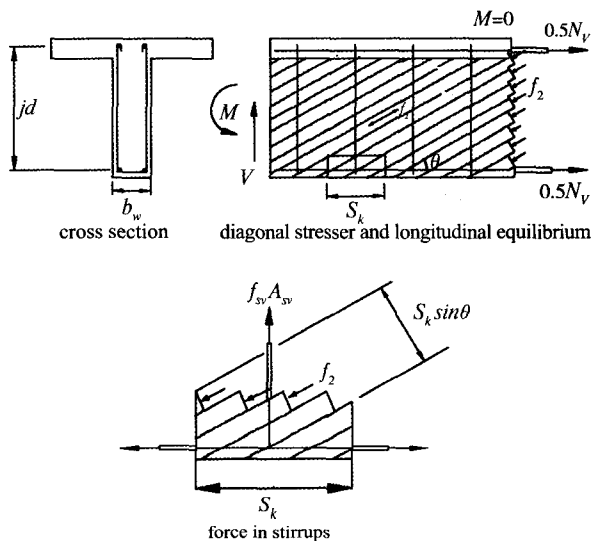


图12 变角桁架模型基本图示

4.5 主动利用体外预应力钢束提高箱梁结构的抗裂性

能够结合箱梁结构的抗裂性需要是体外预应力钢束需要关注的优点。由于采用了体外预应力钢束,便可以“腾出”箱梁腹板来布置一些上弯的体内预应力钢束。其基本布筋特点为:墩顶及负弯矩区段由下弯的I期体内钢束与具有较大转向角度的体外束共同提供预剪力,边跨和中跨的正弯矩区段由II期体内上弯束提供预剪力。这样,全桥预剪力可以由可靠的纵向预应力钢束提

供,从而减小了全断面的剪应力及主拉应力,这种体内、体外混合配束方式能够替代竖向预应力筋的作用。

对于承受正应力 σ_x 、 σ_y 和剪应力 τ 的构件,主拉应力计算方法为:

$$\sigma_{\pm} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (1)$$

从上式可以看出,减小主拉应力,要么增大 σ_x 或 σ_y ,要么减小 τ 。增大 σ_y 即采用竖向预应力,但有时竖向预应力的施工质量难以保证,使其打了较大的折扣。同时更为重要的是: σ_y 只对减小腹板的主拉应力有用,而对减小箱梁顶底板的主拉应力没有作用。

增大 σ_x 即是目前国内有些专家提出的“零弯矩”法的理论实质,这种方法也是对于箱梁开裂下挠问题最主要的“状态”判别法之一。它强调不依靠竖向预应力,而是依靠大量增加纵向预应力 σ_x 提供来减小主拉应力。从计算分析角度来说,“零弯矩”法的优点是该方法减小的主拉应力是箱梁全断面的,而不仅仅是腹板的,对预防箱梁底板的剪切开裂是有利的。同时,纵向预应力的施工是可靠的,其效应基本是有保证的。但是, σ_x 和 τ 相比,对减小主拉应力的贡献“迟钝”许多。为了容纳更大的纵向预应力钢束提供更多的 σ_x ,就需要更多的非结构受力需要的构造尺寸,所以“零弯矩”法会走入不断消耗材料的恶性循环,导致只能寻求更大直径的钢束。

采用体内体外混合配束方法,是通过减小剪应力 τ 来减小主拉应力,方法是寻找桥梁全长范围内最优的预剪力分布,从而通过减少自重剪

力、提高预应力钢束预剪力的方法将桥梁全长范围内的剪应力降下来。如前所述,主拉应力对于剪应力 τ 非常敏感,采用这种新方法不会增加截面尺寸,也不用增加耗费预应力材料,重点在于配束方式的优化,是更为合理的箱梁结构配束方法,并具有更为可靠的抗裂性。

5 结束语

项海帆院士指出^[1]:中国人口众多,桥面宽度比欧美各国要大,有必要率先发展基于空间应力水平的精细化桥梁设计方法,以避免由于安全度不足造成的早期破坏和蜕化所带来的损失,或者因过于保守造成的浪费。

本文通过对混凝土桥梁几个基本计算及设计问题的再认识,解析桥梁结构的空问受力特征以及与配筋的关系,也指出了目前配筋方法的缺失和缺陷(这些缺失或缺陷可能就是一些“疑难杂症”的根源),希望对桥梁结构的空问受力特征以及配筋方法的本质有较完整和深入的揭示,以为我国桥梁结构的设计更精细、更完善,促进桥梁结构的工程安全与耐久提供有益建议。

参考文献

- [1] 项海帆,潘洪萱,张圣城,范立础.中国桥梁史纲[M].上海:同济大学出版社,2009.9
- [2] 徐栋.桥梁体外预应力设计技术[M].北京:人民交通出版社,2008.10
- [3] 徐栋.混凝土桥梁设计中的几个关键问题[J].桥梁,2009.8
- [4] 徐栋,刘超,赵瑜.混凝土桥梁结构分析与配筋设计的精细化.第十九届全国桥梁学术会议论文集[C].北京:人民交通出版社,2010.6

(上接第31页)

点,建议采取有效措施确保作为防护防腐用的高分子材料不参与结构的同步变形。

5.6 对特大桥建立结构健康安全监测与评估系统,以便连续、有效的对结构健康安全进行监测与评估,为工程运营和管养提供科学依据。

最后,向对本文提出宝贵意见的项海帆院士、王守海先生、罗志恭先生表示感谢。

参考文献

- [1] 龙跃等.OVMLZM拱桥吊杆体系[R].项目研究报告.2004.4
- [2] 中华人民共和国国家标准.GB/T 14370-2007 预应筋用锚具、夹具和连接器[S].中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.2007
- [3] Acceptance of stay cable systems using prestressing steels[J]. fib Bulletin No.30
- [4] 葛耀君,项海帆.桥梁工程可持续发展的理念与使命[C].第十九届全国桥梁学术会议论文集,2010.8,上海