

文章编号: 0451-0712(2006)05-0099-06

中图分类号: U448.25

文献标识码: B

平胜大桥独塔自锚式悬索桥的设计与关键技术

胡建华, 向建军, 刘 榕, 廖建宏, 张贵明

(湖南省交通规划勘察设计院 长沙市 410008)

摘 要: 介绍了世界第一座独塔自锚式悬索桥平胜大桥的建设条件、方案构思及桥型总体设计, 综述了自锚式悬索桥设计的关键和新技术。

关键词: 桥梁工程; 自锚式悬索桥; 桥梁设计; 设计方法

1 项目概况

平胜大桥是广东省佛山市快速环线上的一座特大型桥梁, 全长 2 475.60 m。桥梁宽度为 2×26.1 m, 双向 10 车道, 中央分隔带宽 8 m, 两侧各设 2.75 m 人行道。桥梁跨越西江航运干线平洲水道, 桥轴线与河流交角约为 68° , 通航净空要求为 $150 \text{ m} \times 18 \text{ m}$ 。

桥址位于珠江三角洲, 属台风影响区, 设计基准风速 $U_{10} = 34 \text{ m/s}$; 地震动参数 50 年 10% 超越概率峰值加速度为 0.113 g 。桥位区覆盖层以中细砂、粉质粘土、砾砂夹卵石等为主, 厚约 10~18 m; 下伏基岩为粉砂质泥岩, 强风化层厚 2~4 m, 其下为弱风化、微风化岩; 微风化岩岩石较坚硬, 饱和单轴极限抗压强度大于 12 MPa 。

2 桥型总体设计

主桥独塔悬索桥桥跨总体布置为: $39.64 \text{ m} +$

$5 \times 40 \text{ m} + 30 \text{ m}$ (混凝土加劲梁及锚跨) + 350 m (钢加劲梁) + $30 \text{ m} + 29.60 \text{ m}$ (混凝土锚跨)。桥型总体布置见图 1 所示。

3 结构设计

3.1 基础与索塔

索塔采用分离式群桩基础, 桩径为 2.5 m, 桩长 43 m。索塔为三柱门式塔柱, 采用 C50 混凝土, 自承台以上高 146.37 m, 仅设上、下两道横梁。索塔布置见图 2 所示。

塔柱中心距为 $2 \times 26.75 \text{ m}$, 边塔柱横桥向等宽 4.5 m, 中塔柱横桥向等宽 6.0 m, 顺桥向宽均由塔顶 6.0 m 渐变为 8.0 m, 索塔底部 6 m 范围由 8.0 m 变为 10.0 m。

塔柱上设有四氟滑板横向抗风支座, 下横梁上设置 $4 \times 1\,500 \text{ t}$ 摩擦系数为 0.07 的双曲面球形减隔

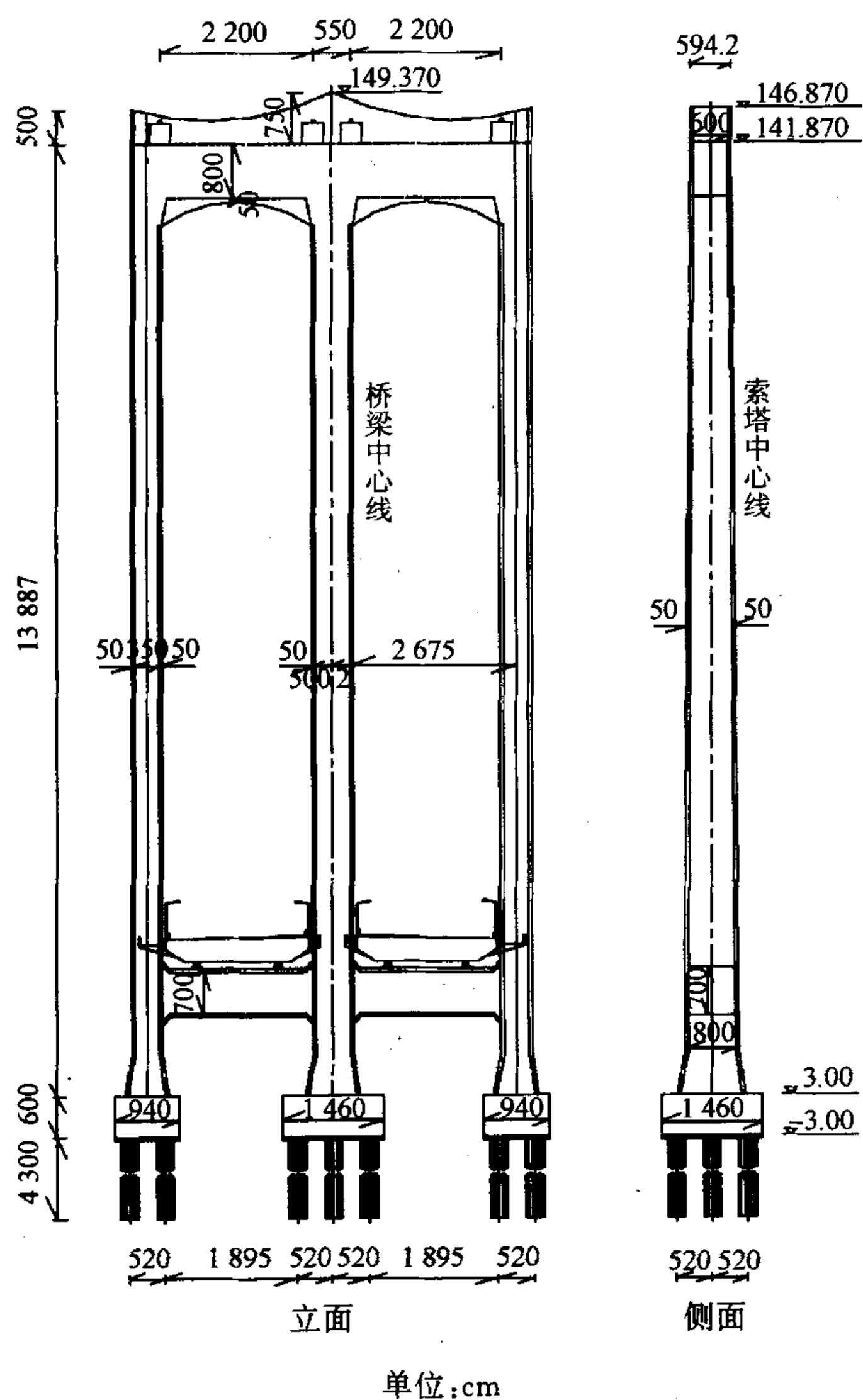
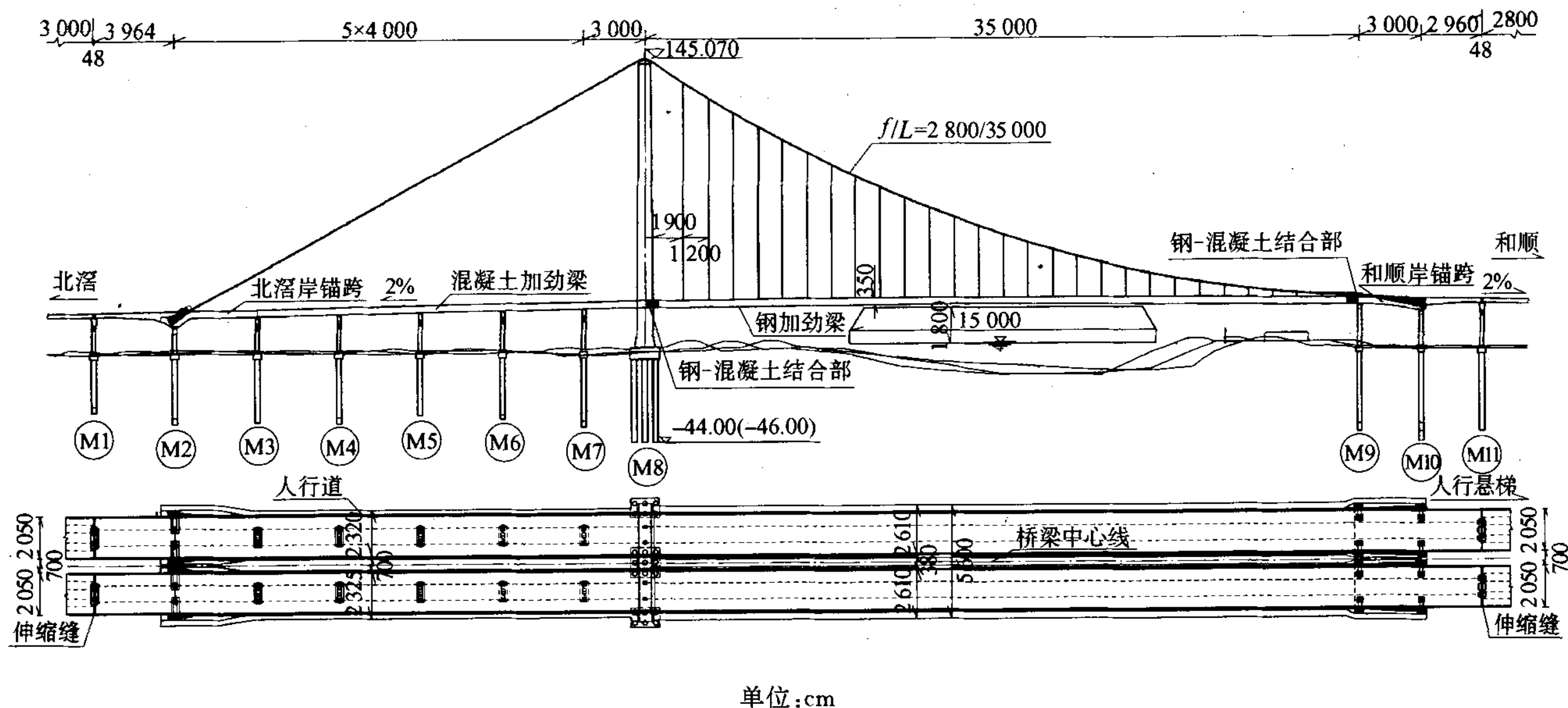
收稿日期: 2006-02-20

制, 到 1988 年交通部颁发部标准《公路桥梁板式橡胶支座规格系列》(JT3132-88), 以及随着公路、市政桥梁建设的发展, 桥梁支座得到广泛的发展及应用。由于多种原因, 现大多数桥梁橡胶支座受到不同程度的损伤, 有的甚至危及桥梁的行车、行人安全, 对其进行更换是势在必行的。桥梁支座更换是一项非常繁琐且非常重要的工作。同时, 由于交通运输的需要, 不中断交通或尽量缩短变道时间又对支座更换施工提出了更高要求, 因此对桥梁支座的整体更换显得极其重要。

随着旧桥加固改造步伐的加快, 一些主梁尚好的桥梁仍需利用, 桥梁支座的更换就迫在眉睫, 而支座更换新技术的应用就大有市场。

6 结语

利用“超低高度气囊式千斤顶”进行桥梁支座整体更换, 具有操作简便, 经济实用, 施工工期短, 施工成本低等特点, 它极大地提升了我国在同类型桥梁加固中的水平, 具有很高的经济价值和应用价值, 是一种值得推广和应用的全新施工工艺。



震支座。

3.2 缆吊系统

主缆采用预制平行钢丝索股逐根架设的施工方法,全桥共4根。每根主缆由48股每股127 ϕ 5.1的镀

锌高强钢丝组成,每根主缆共6 096丝。索股锚头直接锚固在锚跨的锚固面上,采用套筒式热铸锚。

吊索分柔性和刚性吊索,标准间距为 12 m。柔性吊索采用 73 ϕ 5.1 高强镀锌平行钢丝为索体,刚性吊索采用材质为 40CrNiMoA 的钢棒。柔性吊索的上接头采用铰销接头,以减少吊索的弯折,下接头采用锚头直接锚固在加劲梁的锚箱上,并设有球面锚垫板,以适应吊索的变形。刚性吊索分两节,上节上下端均采用铰销接头,下节上端为叉形耳板与上节连接,下端采用螺母锚固在锚垫板上,并设置球面锚垫板。吊索上下锚头均采用冷铸锚,上锚头由锚杯与连接板螺纹连接,下锚头采用张拉端锚具与加劲梁锚箱连接。

主索鞍采用全铸型结构,分前后两半。散索套的作用是将主缆由一根整体索股分散成48股单束,其上下套体均采用全铸结构,下套体与底座板间设不锈钢滑板副,以适应施工中的滑移和成桥后主缆在活载作用下的微量滑移。

3.3 钢加劲梁

钢加劲梁见图 3 所示,为全焊单箱三室钢箱梁,其上、下翼缘为正交异性板结构。

加劲梁高 3.50 m, 设单向 2% 的横坡, 顶板宽为 20.5 m, 底板宽 13.7 m, 人行道宽 3.0 m, 风嘴宽 1.0 m, 检修道宽 1.6 m, 总宽 26.1 m。标准梁段顶板厚 16 mm, 底板厚 14 mm, 两端局部梁段顶底板加厚至 20 mm, 钢—混结合段顶底板加厚至 28 mm。标准梁段腹板厚 16 mm, 两端局部梁段和钢—混结合段 20 mm。顶、底板 U 形加劲肋厚 10 mm, 高 280 mm,

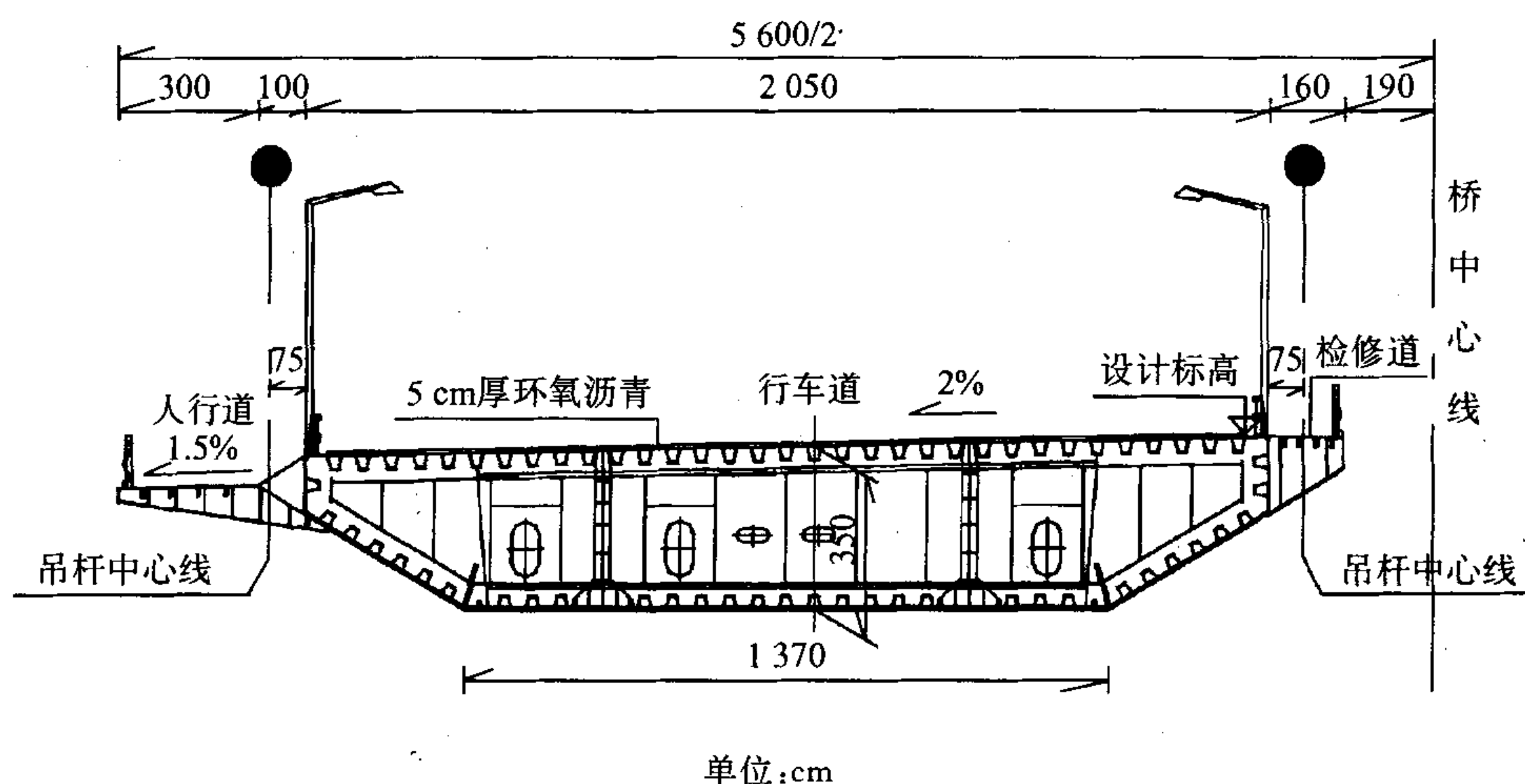


图3 单幅钢加劲梁断面

间距600 mm;加劲扁钢厚10 mm,高200 mm。横隔板间距3.0 m,板厚为10 mm(无吊索处)和12 mm(吊索处及钢—混结合段);纵隔板采用实体式,厚为16 mm。

3.4 混凝土加劲梁

混凝土加劲梁断面见图4所示,采用C50混凝土

土,其外形与主跨钢加劲梁一致,梁高为3.50 m。半幅桥标准断面采用单箱三室,顶板全宽2325 cm,底板全宽1370 cm,腹板厚为45 cm,顶底板厚均为26 cm,为方便混凝土加劲梁与钢—混结合段的连接,在距索塔中心线10 m的范围内顶底板加厚至50 cm。

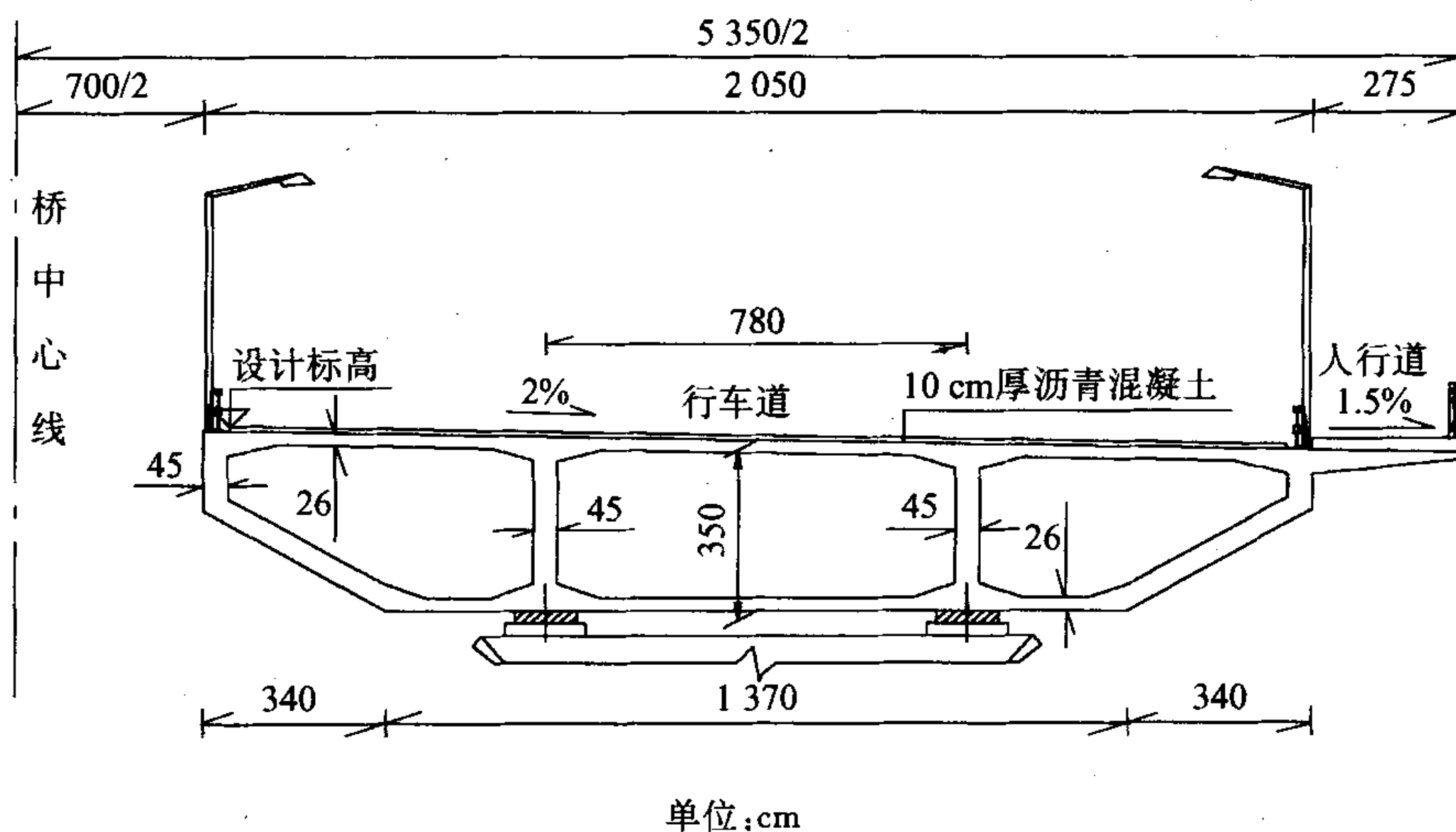


图4 单幅混凝土加劲梁断面

混凝土加劲梁承受了约160 MN的水平轴向力,从而使其上下缘有较大的压应力储备,在成桥和运营阶段均不出现拉应力,这样便省掉了大量预应力束的布置,仅需在顶板厚度为26 cm的区域布置少量横向预应力束。

3.5 钢—混凝土结合段

钢—混凝土结合段的作用,是保证钢加劲梁和混凝土加劲梁之间刚度过渡的匀顺性和力传递的顺畅性。钢—混结合面设在主跨距M8和M9号墩中心线各250 cm处。结构设计见图5所示。

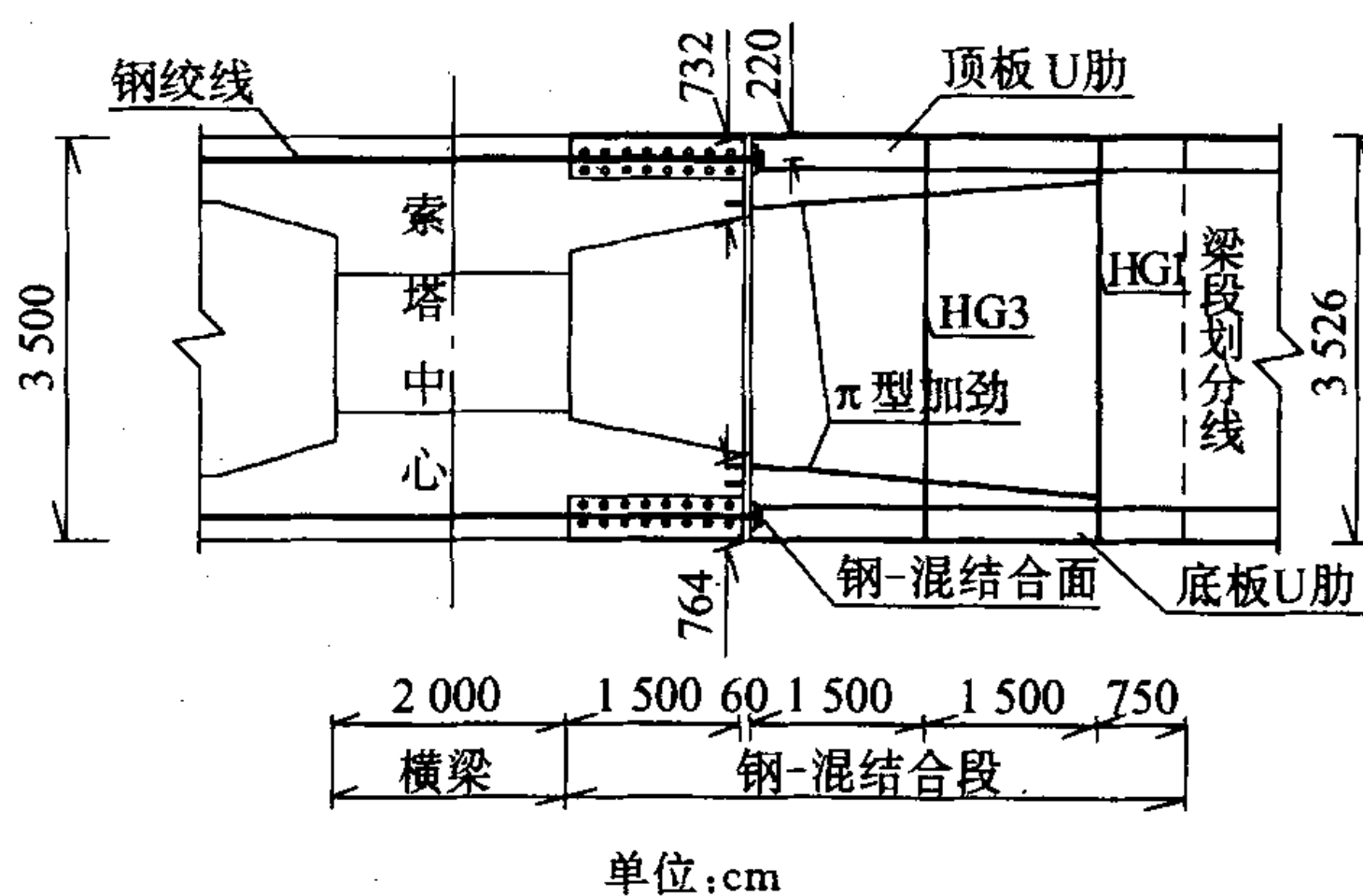


图5 钢混凝土结合段构造

过渡段钢箱梁采用U肋上加Π型加劲的方式,长3 750 mm;顶、底板厚28 mm,纵隔板及外腹板厚16 mm;结合段内设两道横隔板,间距为1 500 mm;顶底板和腹板带肋条,都伸入混凝土梁,在肋条上开孔,穿钢筋形成PBL剪力键,通过PBL剪力键和混凝土梁连接;此外钢梁和混凝土梁间设厚为60 mm的钢板作为承压板,并通过剪力钉和纵向预应力束与混凝土梁连接。

3.6 锚跨

本桥设计巧妙,利用两岸的混凝土加劲梁作为锚碇,且称之为锚跨。

北岸锚跨见图6所示,跨径布置为39.64 m+40 m,除考虑承受强大的水平力外,还需承受较大的上拔力,因此在主缆的锚固位置,锚跨梁高由3.5 m渐变至7.5 m,再由7.5 m渐变至2.0 m与引桥顺畅连接。考虑到主缆锚固所需空间,半幅桥桥宽由23.25 m渐变至29.25 m,由此增加的恒载自重足以抵抗主缆所产生的上拔力。

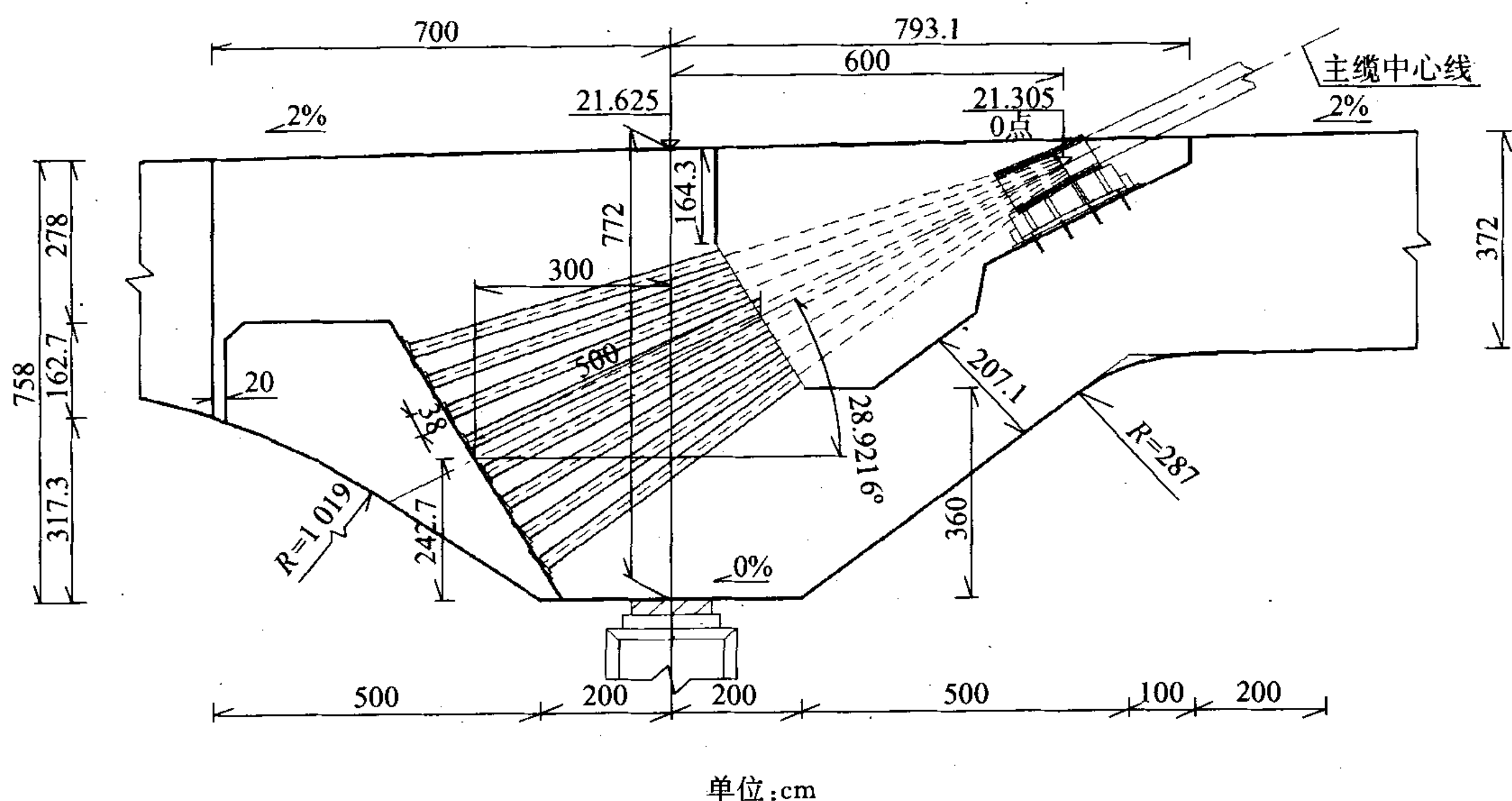


图6 北岸锚体

和顺岸锚跨跨径布置为30 m+29.60 m,同样锚跨的中心梁高由3.5 m渐变至6.0 m,再由6.0 m渐变至2 m与引桥顺畅连接,半幅桥桥宽由23.25 m渐变至29.25 m。

4 施工

自锚式悬索桥由于需要由加劲梁来承担主缆的拉力,因此决定与常规地锚式悬索桥不同,施工时必须先架设好主梁,然后架设主缆,安装吊索再逐步进行吊索张拉,使加劲梁自重逐步传递至主缆、主跨、主梁,从而形成悬吊结构。特有的结构特性决定其有着独特的施工方法。

4.1 顶推法架设加劲梁

混凝土梁顶推法施工工艺,自20世纪70年代发展到今天已经相当成熟,但钢箱梁的顶推法架设目前国内尚无先例。本桥鉴于桥位处的通航要求,决定采用多点顶推法架设加劲梁,见图7所示。顶推临时墩的跨径布置为30.5 m+2×78 m+45 m+

37.5 m;因桥轴线与水流交角为68°,且桥宽达56 m,考虑到为尽量减少顶推跨径和施工难度,以适应航运,减少船舶撞击风险,临时墩分两幅呈斜交布置。

由于航运要求临时墩最大跨径为78 m,从而使得临时墩顶反力达1 500 t,这对钢箱梁的局部受力是个严峻考验。顶推设计时在尽量减少一期恒载的前提下,还对钢箱梁进行了局部加劲处理,并对滑道设计进行了重点研究,一方面尽量加大滑道尺寸,增加接触面以减少面荷载,另一方面根据钢箱梁的允许变形,设计了能适应这一变形的滑道副。计算结果和现场施工均验证了以上措施达到了设计目标。

4.2 自锚式悬索桥的调索

自锚式悬索桥主缆属柔性结构,主梁又是弹性结构,因此在吊索的张拉过程中,由于主缆的非线性变形和梁的弹性变形,以及结构体系的改变(支架支承逐渐改变为悬索支承),梁、塔、缆和吊索在施工过程中将发生内力重分配,这种内力重分配将对最终的结构状态产生影响。

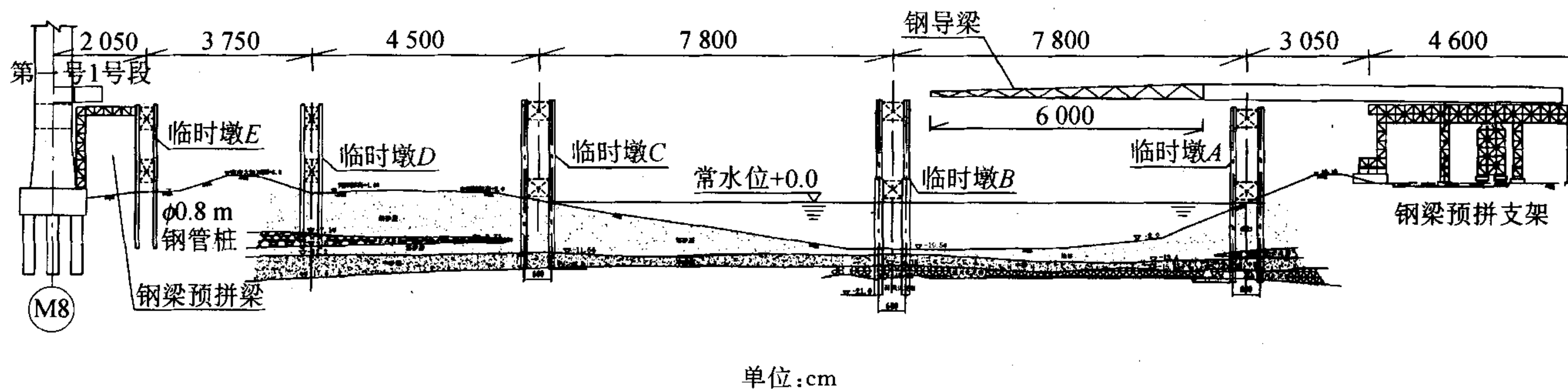


图7 钢加劲梁顶推施工

与斜拉桥类似,自锚式悬索桥的设计也是以合理成桥状态为目标的。平胜大桥的主梁目标线形是反拱30 cm,主缆目标线形是垂度28 m。自锚式悬索桥的巨大缆力全部由主梁承担,而平胜大桥的边跨是混凝土结构,在轴力作用下混凝土的收缩、徐变效应不可忽视,桥塔也是如此。收缩徐变会造成主梁梁段缩短、塔顶标高降低,影响主缆线形、钢主梁线形和内力。本桥钢主梁和主缆的线形以收缩、徐变完成以后的线形(即设计线形,反拱30 cm)为控制值,所以必须考虑混凝土收缩、徐变,并把其影响记入刚成桥时的线形(即成桥线形)中。平胜大桥加劲梁和顺岸收缩、徐变位移值为7 mm,北滘岸为68 mm,桥塔为42 mm。计算表明,混凝土的收缩、徐变使跨中主梁标高下降23 cm,所以成桥线形为在反拱30 cm的基础上,再反拱23 cm,共53 cm。

调索的初始状态由目标状态确定,可通过目标状态倒拆求得。对于本桥的初始状态控制值有以下几个方面。

主梁线形即为顶推线形,既是主梁的制作线形,也是无应力线形。主缆线形由线形计算程序计算,主索鞍的预偏量为1.447 m,主跨跨中标高65.037 m,比成桥跨中标高58.119 m高出了6.918 m。主梁长度必须考虑轴力作用下的弹性压缩量和混凝土的收缩徐变量,平胜大桥和顺岸弹性压缩量为132 mm,北滘岸弹性压缩量为33 mm,主梁的“预长值”为弹性压缩值+收缩徐变值,和顺为139 mm,北滘岸为101 mm,共240 mm。塔顶标高与主梁长度一样,必须考虑弹性压缩和收缩徐变,桥塔最后的“预高值”为70 mm。

5 关键技术研究

平胜大桥是世界上首座独塔单跨自锚式混合梁悬索桥,350 m的跨径规模令世人瞩目。该桥所采用的整体索塔分离式加劲梁桥型结构、框架式钢加劲

梁、钢—混凝土结合段构造型式、钢箱顶推技术、吊索调索方案等均为原创性技术成果。结合设计研究,本项目开展了几项关键技术的试验研究。

5.1 全桥模型试验研究

通过结构的静力特性试验、结构稳定性和超载试验研究、吊索张拉施工方法与张拉过程模型试验研究和推荐施工方案的验证性试验研究,得到以下主要结论。

对于自锚式悬索桥,在活载作用下,迭加原理是成立的。自锚式悬索桥主缆锚固在加劲梁上,短吊索处主缆与加劲梁的相对纵向位移比较小,因此短吊索的疲劳问题比地锚式悬索桥小。自锚式悬索桥有吊索的悬吊跨在面内不存在整体失稳的问题,结构的极限状态正常情况下是在吊索应力达到极限强度后发生。不管采用何种吊索张拉过程,结构的最终状态是一致的。

5.2 钢—混结合段研究

钢—混结合段的作用是保证钢箱梁与混凝土箱梁之间刚度过渡的匀顺和力传递的顺畅,不产生过大的应力集中和折角,确保桥面经久耐用和车辆行驶平稳舒适。通过PBL键和栓钉的对比,结合钢—混结合段1:4的缩尺模型试验,可以得出以下主要结论。

PBL剪力键承载力受孔洞直径、PBL筋直径、混凝土强度及箍筋强度影响较大,而PBL筋的角度误差、钢板开坡口与否、钢板厚度(须保证在达到极限承载力时钢板不屈曲)等对PBL键的承载力影响不大。钢—混结合段采用PBL连接或采用栓钉连接都是可行的,PBL剪力键的延性较好。钢—混凝土结合段试验和破坏试验中,试验测得和有限元分析结果都表明钢箱梁和混凝土箱梁顶底板正应力横桥向分布不均匀,剪滞效应明显。

5.3 钢箱梁局部稳定研究

平胜大桥加劲梁在最不利荷载作用下承受强大

轴力, $N_{\max} \approx 165 \text{ MN}$ 。由于我国规范均未对钢箱梁承压翼板的局部稳定计算做出明确的规定,通过模型试验研究,对局部稳定承载能力和极限承载能力做出评价是最直接有效的方法。

钢箱梁原型的局部屈曲应力(未考虑安全系数)高于 235 MPa 。模型试验显示应特别注意在各板件交界处采取相应的构造措施,以减小应力集中。试验证明,残余应力对局部稳定性能影响较大。模型及实桥钢箱梁的制作需严格控制加工质量,减小残余应力和初始缺陷。

5.4 抗风性能研究

平胜大桥设计为整体索塔,分离式加劲梁,四索面缆吊系统,其净距仅为 3.8 m 的两幅加劲梁之间的遮挡效应也有可能影响桥梁的整体抗风性能,因此有必要开展抗风性能研究。

(1)节段模型颤振试验表明:单幅桥面和双幅桥面的颤振临界风速远大于颤振检验风速,但双幅桥面的颤振临界风速小于单幅桥面的颤振临界风速。

(2)节段模型涡激共振试验表明:单幅桥面没有出现竖向及扭转涡激共振现象;在 $+3^\circ$ 攻角时,桥位处桥面风速为 8 m/s 左右时,双幅桥面的上游桥面发生竖向涡激振动,其他攻角未发生竖向及扭转涡激共振现象。在不发生涡激共振时,下游桥面的振动响应明显大于上游桥面的振动响应。

(3)全桥模型风洞试验表明:在 0° 和 $+3^\circ$ 攻角状态下,对应实桥桥面处风速为 123.5 m/s 时,结构未发生发散性振动,具有较好的颤振稳定性;在设计基准风速下,平胜大桥的抖振振幅较小;随风速的增大,抖振位移响应也逐渐增大,且上、下游桥面抖振位移响应不一致。

(4)串列双桥面颤振稳定性试验表明:在一定的 D/B (D 两桥面净距, B 单幅桥宽)范围内,串列双桥面之间会存在明显的气动相互作用,它将使双桥面的颤振临界风速与单桥面相比有所降低,且双桥面的颤振临界风速随 D/B 值的增大而增大,表明串列双桥面之间的气动相互作用将随两桥面距离 D 的增加而减弱;同时,双桥面之间的气动相互作用会对单

幅桥面的颤振导数有影响,可能会明显改变单幅桥面的颤振导数,而且颤振导数的变化与 D/B 值有关系。

(5)串列双主缆弛振稳定性试验表明:当 W/D (W 为两缆索中心距, D 为缆索直径)较小时,下游缆索会出现明显的尾流弛振现象,且随着 W/D 值的减小,发生尾流弛振的临界风速会降低,而上游缆索受气动干扰影响较小;当风偏角 $\beta = 0^\circ$ (气流垂直于缆索)时,下游缆索发生尾流弛振的临界风速最低,是相同索间距下的最不利情形。

5.5 抗震性能研究

根据桥址场地安全评估报告中相应设防标准的地震动参数,采用 100 年超越概率 10%、100 年超越概率 2% 两种地震动水平,对平胜大桥主桥进行了反应谱及时程分析。

在比较、评价主梁与桥塔、桥墩之间各种边界与连接条件的优化参数分析后,确定平胜大桥主桥采用摆式滑动支座+滑动支座+拉力索方案,有效地控制了塔、梁在地震作用下的响应值。在此情况下,又对桥梁结构的抗震性能进行了非线性时程分析,结果表明:桥塔、加劲梁在设计地震和罕遇地震作用下,其纵桥向、横桥向的抗震性能满足抗震设防要求。

6 结语

平胜大桥作为世界第一座独塔单跨四索面自锚式悬索桥,且第一次在悬索桥上采用混合加劲梁,这是桥梁建设史上富有挑战性的一次尝试。大桥的建成将使我们全面认识自锚式悬索桥的力学行为、构造特性以及施工工艺等,该桥型必将随着人们认识的加深得到快速发展。

参考文献:

- [1] J F Klein. 瑞士日内瓦湖上的新型悬索桥方案[A]. 哥本哈根 IABSE 学术会议论文集[C]. 1996.
- [2] 尼尔斯 J. 吉姆辛(原著). 缆索支承桥梁[M]. 北京:人民交通出版社, 2002.