



一种新型悬索桥主缆锚固系统设计概念综述

崔冰,董萌,贾立峰,宋颖彤

(中交公路规划设计院有限公司,北京 100088)

[摘要] 区别于预应力锚固系统,在传统钢框架后锚梁锚固系统的基础上,南京长江第四大桥采用一种新型悬索桥主缆锚固系统——分布传力式锚固系统。钢框架后锚梁锚固系统依靠后锚梁刚性承载,应力集中明显,有一定的结构和安全风险。分布传力式锚固系统锚固区域通过布置多排钢筋混凝土桩剪力键(PBL),变刚性承压承载为柔性承载,索力渐次传递至锚体混凝土;变集中承载为分布传力式承载,扩大了传力区域,减小应力集中,降低结构风险;利用PBL良好的延性,同时通过设置末端承压板,为结构整体提供足够的安全储备。本文对这种新型锚固系统的设计作了简要介绍。

[关键词] 主缆;锚固系统;分布传力式;南京长江第四大桥

[中图分类号] U442.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)08-0012-06

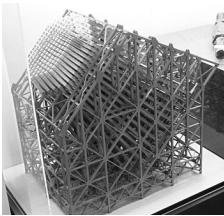
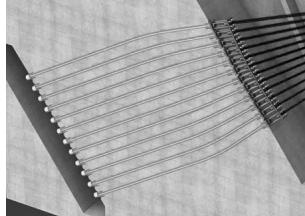
1 前言

大跨度悬索桥主缆锚固系统通常有两种形式:钢框架后锚梁锚固系统和预应力锚固系统。两种锚固形式均有较为广泛的应用,其对比情况如表1所示。钢框架后锚梁锚固系统有近百年的使用历史,耐久性良好且受力可靠,国外有大量的工程实

例,国内也有虎门大桥和西陵长江大桥采用了该系统,但后锚梁承载过于集中,造成钢结构和混凝土结构难以避免的应力集中,结构处理难度大。预应力锚固系统主要由国内发展并推广使用,经过多座桥的工程实践,其设计方法和施工工艺日臻成熟,但该系统后期维护工作量大,需定期监测,由于使用历史较短,其使用性能尚需时间检验。

表1 两种传统锚固系统对比

Table 1 The comparison of two conventional anchor systems

项目	钢框架后锚梁锚固系统	预应力锚固系统
实例	国内:虎门大桥、西陵长江大桥 国外:明石海峡大桥、金门大桥等	广州黄埔大桥、舟山西堠门大桥、贵州坝陵河大桥、 湖北四渡河大桥、武汉阳逻大桥等
实例照片		
受力特点	通过设置于后锚梁前端的钢拉杆将主缆拉力沿索股扩散方向分散传递至后锚梁;后锚梁锚固位置钢结构和混凝土结构应力集中明显	主缆索股采用连接器与预应力前锚面锚固连接,通过预应力前、后锚面压力差与索股拉力平衡完成主缆力的传递;后锚面混凝土结构应力集中明显

[收稿日期] 2013-05-19

[作者简介] 崔冰(1966—),男,河北枣强市人,教授级高级工程师,研究方向为桥梁设计;E-mail:nj3q@vip.sina.com

项目	钢框架后锚梁锚固系统	预应力锚固系统
后期维护	仅需对外露至前锚室部分钢结构进行防腐维护,考虑到主缆索股本身除湿防护的要求,锚固系统无需额外增加维护工作量	目前多采用无粘结可更换预应力锚固体系,需定期监测,必要时更换部分预应力
可靠性	受力可靠	受力可靠
耐久性	有近百年使用历史,耐久性良好	国内发展并推广,目前普遍采用的是无粘结可更换预应力锚固体系,从可更换的角度,耐久性较好;但由于使用历史较短,耐久性能尚需时间检验
施工难度	需整体性较好的钢支架系统,施工难度小,精度易保证	预应力管道定位难度较大,需钢支架系统

2 分布传力式锚固系统构思

钢框架后锚梁锚固系统依靠后锚梁承压刚性承载,应力集中现象明显,有一定结构风险和安全隐患。为克服该缺陷,设计提出了一种全新的主缆锚固系统——分布传力式锚固系统。该系统主要由3个部分构成:钢锚箱、钢拉杆和锚固区域(见图1)。主缆索股锚固于钢锚箱,通过钢拉杆将索力传递至锚固区域。相对于钢框架后锚梁锚固系统(见图2),锚固区域通过布置多排钢筋混凝土桩剪力键(PBL),变刚性承压承载为柔性承载,索力渐次传递至锚体混凝土;变集中承载为分布传力式承载,扩大了传力区域,减小应力集中,降低结构风险;利用PBL良好的延性,同时通过设置末端承压板,为结构整体提供足够的安全储备。

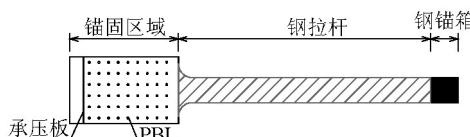


图1 分布传力式锚固系统单元件示意图

Fig.1 Stress distributed transforming anchor system sketch

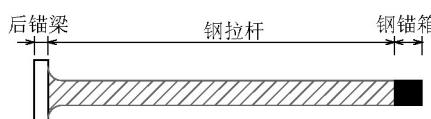


图2 钢框架后锚梁锚固系统单元件示意图

Fig.2 Steel framed anchor system sketch

3 总体设计

图3为南京长江第四大桥分布传力式锚固系统总体布置图(以北锚碇为例)。单侧锚体共9块锚固

板,锚固板厚28 mm,采用Q345D材质。索股通过锚固箱与锚固板连接,分四索股锚固、双索股锚固和单索股锚固3种锚固方式。B1~B4锚固板后部布置12排0.35 m(索股方向)×0.4 m(高度方向)间距PBL。前两排仅在锚固板两侧布置,钢筋直径为16 mm,钢板开孔45 mm;后10排钢筋直径20 mm,钢板开孔60 mm。B5锚固板后部设置10排0.35 m(索股方向)×0.4 m(高度方向)间距PBL,钢筋直径20 mm,钢板开孔60 mm。锚固板后端沿板宽方向左、右各设一条宽250 mm、厚28 mm的承压板,并设置厚20 mm承压板加劲,以分担部分荷载,同时提供强大的安全储备(以B2锚固钢板例,见图4及图5)。

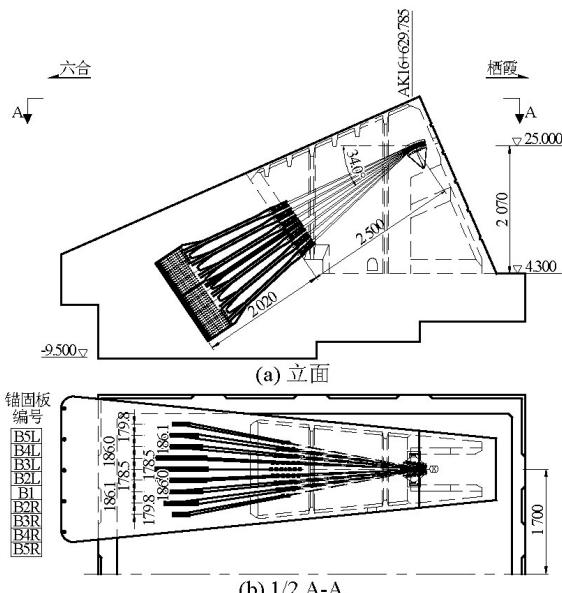


图3 新型锚固系统总体布置(单位:cm)

Fig.3 General layout of the new anchor system (unit: cm)

为确保锚固板与混凝土无粘结接触,使索股力顺畅传递至锚固区域,除PBL锚固区域外,混凝土

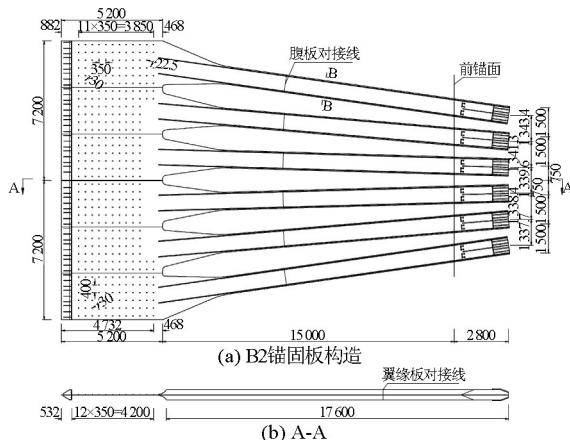


图4 B2锚固钢板一般构造(单位:mm)
Fig.4 Typical section of steel plate B2(unit: mm)

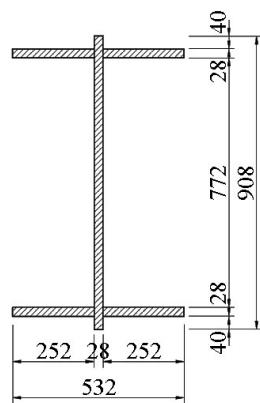


图5 钢拉杆标准断面(单位:mm)

Fig.5 Typical cross section of steel tie rod (unit: mm)

内锚固板均设置钢板防护设施。钢板表面贴附10 mm厚氯丁橡胶板,外包2 mm厚钢板,边缘用M6螺栓夹紧固定。橡胶板在螺栓位置每200 mm贴附一条,宽200 mm。为防止水分沿防护钢板渗入锚固区域,在靠近锚固区域端将防护钢板弯起并形成封闭止水槽,槽内附设BW遇水膨胀橡胶止水带。

PBL钢筋应居于钢板开孔中心,以保证剪力连接键充分发挥性能。为此,设计了剪力钢筋定位桁架,定位桁架由40 mm×40 mm×4 mm和75 mm×75 mm×8 mm角钢组成网片并两两连接,并与锚固钢板锚固区域钢结构通过螺栓连成整体(见图6)。

4 结构受力特点

4.1 剪力键选型

PBL具有弹性阶段刚度大、弹塑性阶段延性好的优点,适用于分布式渐次传力的锚固系统。经过

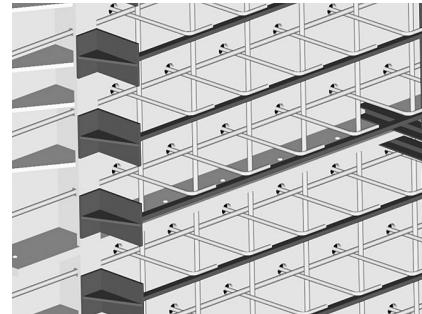


图6 PBL钢筋定位桁架示意
Fig.6 PBL reinforced steel fixing truss sketch

前期47组PBL的对比试验研究,优选采用60-20(钢板开孔直径60 mm,芯棒钢筋直径20 mm)和45-16(钢板开孔直径45 mm,芯棒钢筋直径16 mm)两种形式剪力键,其荷载滑移曲线如图7和图8所示(对应C30混凝土)。

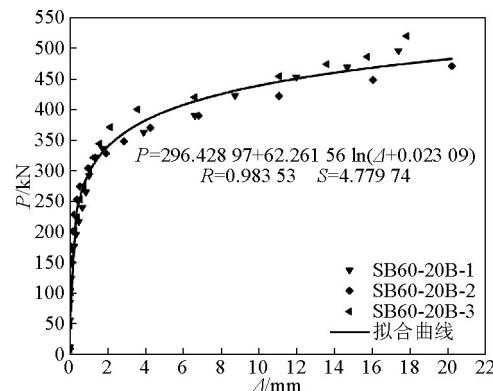


图7 SB60-20B荷载滑移对数函数回归曲线
Fig.7 SB60-20B load-slip logarithmic function regression curve

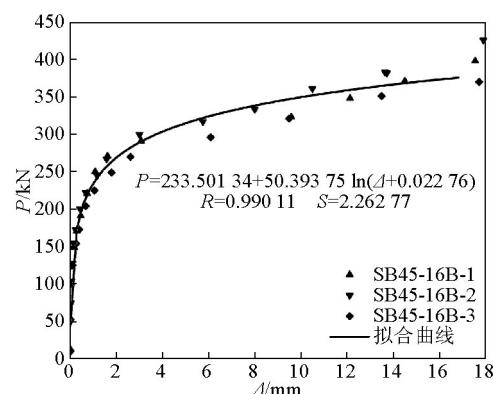


图8 SB45-16B荷载滑移对数函数回归曲线
Fig.8 SB45-16B load-slip logarithmic function regression curve

按照PBL处于弹塑性状态而未进入屈服状态考虑,60-20剪力键正常使用状态容许承载力为300 kN,对应滑移量为1.03 mm;45-16剪力键正常使用状态容许承载力为250 kN,对应滑移量为1.36 mm。

4.2 剪力键布置

最优的剪力键布置是由剪力键承载能力、刚度、锚固钢板应力控制水平、混凝土抗拉强度等共同决定的。本项目的剪力键布置有以下3个关键点。

1)为简化施工难度,提高剪力键钢筋定位精度,单个锚固系统单元件剪力键按照等间距阵列布置;单个锚固单元所需剪力键数量需要根据剪力键正常使用状态容许承载力并结合有限元计算分析确定,综合考虑剪力的传递及分配。

2)锚固板的总体尺寸是根据锚固系统总体结构受力需要确定的,对于本项目,单个锚固系统单元件锚固区域宽度为2.4 m;原则上,剪力键布置间距应大于200 mm,单个锚固系统单元件在2.4 m宽度范围内最多可布置12列剪力键,但列数过多宜造成前排剪力键承载比例过高,后排剪力键难以发挥作用,同时造成局部应力集中。设计按照6列进行布置,间距400 mm,通过有限元分析验证,合理可靠。

3)按照单个锚固系统单元件锚固区域布置6列剪力键,共需布置10排。排与排纵向间距增大,其前排剪力键相对滑移量增大,承载比例增加;纵向间距减小,其前排剪力键相对滑移量减小,承载比例降低,但过于集中同样会造成应力集中。合理选择纵向间距,控制在正常使用状态下前排剪力键的滑移量,对改善锚固区域受力十分重要。设计按照纵向10排,间距350 mm进行控制,通过有限元分析验证,合理可靠。

4.3 结构分析

4.3.1 计算模型

计算采用Ansys®程序。如图9和图10所示,取1/2锚体构建有限元模型,为便于单元划分,提高解析精度,锚固系统相应实体部分采用SOLID92单元,其余部分采用SOLID45单元;锚固板采用SHELL63壳单元,与实体无粘结,通过剪力键和后锚承压板传递荷载。假定混凝土和钢材均处于弹性工作阶段。PBL采用非线性单元模拟,其参数采用实验回归荷载滑移曲线。

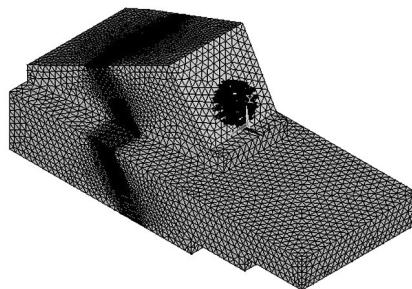


图9 锚体总体有限元模型

Fig.9 Finite element model of anchor structure

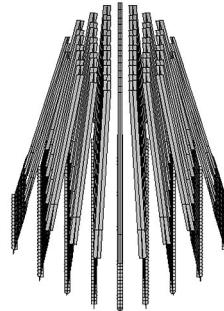


图10 锚固钢板有限元模型

Fig.10 Finite element model of steel anchor plate

4.3.2 锚体受力

为验证分布式锚固系统对改善锚体混凝土受力的作用,在同一模型的基础上,取消剪力键的分布传力连接,仅依靠锚固钢板端部承压板传递主缆荷载,进行对比。图11为传统钢框架后锚梁锚固系统作用下锚体内部主拉应力,后锚梁区域存在较大拉应力区域,局部位置超过2.5 MPa。图12为分布传力式主缆锚固系统作用下锚体内部主拉应力,由图可知,锚体混凝土应力集中大大减小,最大不超过1 MPa。

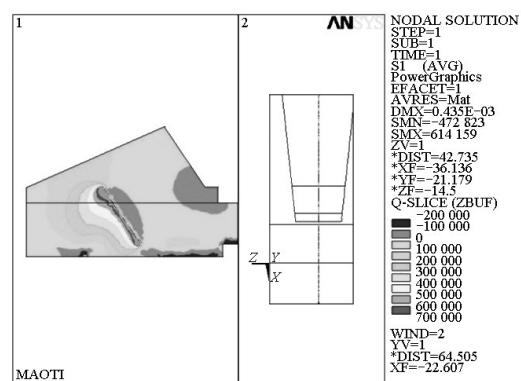


图11 后锚梁锚固系统锚体主拉应力(单位:Pa)

Fig.11 Principle tensile stress of steel framed anchor structure(unit: Pa)

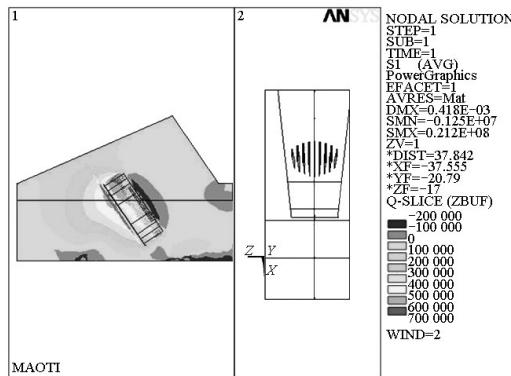


图12 分布传力式锚固系统锚体主拉应力(单位:Pa)

Fig.12 Principle tensile stress of stress distributed anchor structure(unit: Pa)

分布传力式锚固系统通过多排PBL完成对主缆索股拉力的渐次传递,相对于钢框架后锚梁锚固系统,变刚性承压承载为柔性承载,索力渐次传递至锚体混凝土;变集中承载为分布传力式承载,扩大了传力区域,减小了应力集中。

4.3.3 剪力传递规律

以B2锚固板为例。B2锚固板为双列索股锚固,6个锚固型钢,均为四索股锚固,是锚固系统中受力最大的锚固板,剪力键各排平均最大剪力为234 kN,对应滑移量为0.32 mm,对应60-20剪力键形式。第12排为45-16剪力键形式,最大平均剪力为208 kN,对应滑移量为0.52 mm(见图13)。需要说明的是,由于单排剪力键纵向受力差异非常小,此处仅对平均剪力进行说明。从纵向受力上来看,前6排剪力键承担了73 %的外荷载,承压板承担了3.98 %的外荷载。由于索股的传力方向与锚固板锚固区域有夹角,加上锚固型钢传力扩散影响,因此,剪力键在横向也受力,横向明显受力的是第8~12排,剪力键的受力是纵向与横向受力的叠加,设计中已考虑这种因素(见图14)。

5 结语

分布传力式主缆锚固系统通过布置多排PBL

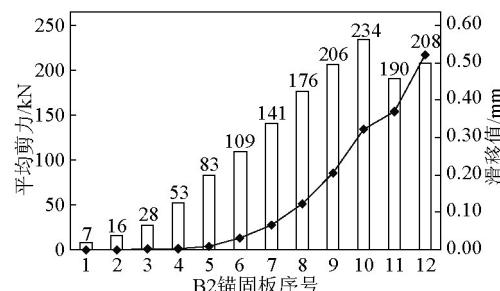


图13 B2锚固板各排剪力键平均剪力及滑移量

Fig.13 Average shear stress and slippage of steel plate B2 shear connector of each row

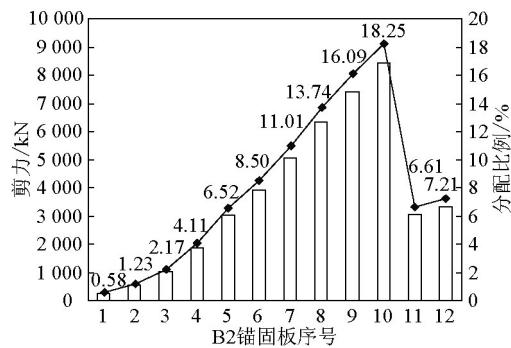


图14 B2锚固板各排剪力键承载分配比例

Fig.14 Stress distributed ratio of steel plate B2 shear connector of each row

实现了巨大主缆拉力的逐次分布扩散,索力渐次传递至锚碇混凝土中,大大降低了锚碇锚固系统中各组件的应力集中;由多排PBL和末端小型刚性承压板组成的锚固区域拥有巨大的安全储备,可靠性与耐久性良好。同时,由锚固系统单元件组成的锚固板整体性较好,施工简单,定位精准。

参考文献

- [1] 娄学全,武焕陵,崔冰,等.悬索桥主缆分布传力锚固系统设计与施工[M].北京:人民交通出版社,2012.
- [2] 崔冰,娄学全,武焕陵,等.一种新型悬索桥主缆锚固系统及其原件:中国,ZL201120412962.X[P].2011-11-30.



Overview of a new anchorage system design concept of cable-stayed bridge

Cui Bing, Dong Meng, Jia Lifeng, Song Yingtong
(CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China)

[Abstract] Superior to conventional pre-stressed anchorage system, a new anchorage system design concept of cable-stayed bridge, the stress distributed transmitting anchorage system, is adopted to the Fourth Nanjing Yangtze River Bridge referencing to the design of conventional steel framed anchorage system. The conventional steel framed system relies on the back anchorage beam, which provides rigid bearing supports and results in large concentrated stress, and has certain risks on both structural and safety aspects. However, the stress distributed transmitting anchorage system is arranged with several rows of reinforced concrete tenon-joint shear connector (PBL) in anchoring area in order to transform the rigid bearing supports to flexible bearing supports which helps cable stress gradually delivering to concrete anchorage block, changes the pattern of stress distribution from concentrated to distributed, enlarges the stress region, decreases the degree of stress concentration, minimizes the structural risks, and provides plenty of emergency capacity by taking advantage of the ductility of PBL and allocating end bearing plates. The design concept of the new anchor system is briefly introduced in this paper.

[Key words] main cable; anchorage system; stress distributed transforming; the Fourth Nanjing Yangtze River Bridge