

东海大桥平曲线预应力混凝土顶推连续梁的设计与施工

任明飞 刘晓霞

(中铁大桥局集团二公司 江苏 南京)

摘要: 东海大桥在大乌龟岛附近由于特殊的地理条件而采用预应力混凝土顶推连续梁结构, 桥梁处于半径2500米的圆曲线上, 顶推梁全长400米。本文介绍了该段工程的结构设计特点; 使用平面分析程序对结构的施工阶段进行了结构安全验算; 重点介绍了施工工艺的设计以及在施工中为满足曲线顶推的要求所采取的一些特殊施工措施。

关键词: 东海大桥 平曲线 顶推连续梁 导梁 高性能海工混凝土 台座 滑道 OVM多点自动连续顶推液压系统 落梁

1. 概述

东海大桥起始于上海浦东南汇区的芦潮港镇, 跨越杭州湾北部海域, 在大乌龟岛附近依岛而过, 沿填海海堤段, 经颍珠山岛跨其东深沟、到达浙江省嵊泗县崎岖列岛的小洋山深水港港区, 全长32.7公里。经大乌龟岛时, 因桥位处是陡峭的斜坡, 桥梁轴线基本与岛岸线平行, 两幅桥一半在岛上, 一半在海水里, 地势复杂, 常规桥式施工难度很大, 经业主、设计单位在支架现浇、移动模架、顶推法、预制架设等施工方案中比选, 认为本段工程采用顶推法施工比较合适。桥梁中心轴线位于 $R=2500m$ 的圆曲线上, 为一联 $8 \times 50m$ 等跨预应力混凝土连续箱梁, 起于

PM451墩, 终于PM459台, 全长400米。

2. 主要技术条件

2.1 车辆荷载等级

汽车-超20设计

挂车-120验算

以集装箱拖挂车重车密集型排列(前后车辆轴距为10米)进行校核。

2.2 恒载

一期恒载为14.85m顶板宽的箱梁自重, 顶推时每幅箱梁平均为288.1kN/m。

二期恒载: 120 kN/m

2.3 桥面宽度: 六车道+紧急停车带的高速公路标准。横断面布置如图1。

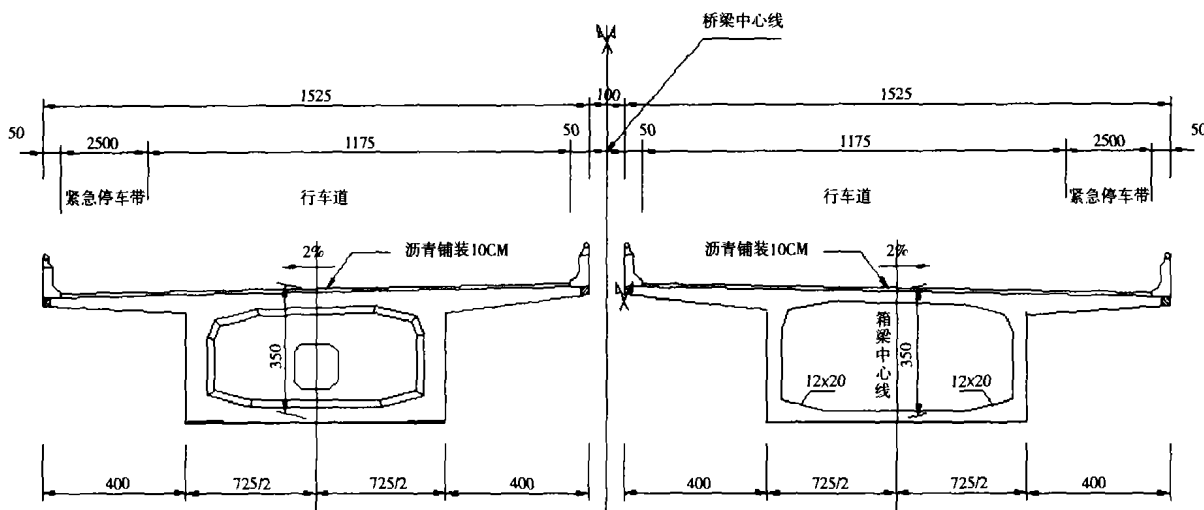


图1 桥梁横断面图

2.4 设计基准期: 100年

3. 结构设计

3.1 箱梁主要结构尺寸

该段桥式为50m等跨、3.5m等高(箱梁中心线处)的直腹板连续箱梁,高跨比1/14.3,箱梁在墩顶共设横隔墙9道,边墩横隔墙厚为1.0m,中墩横隔墙厚为1.3m,隔墙设置1.2×1.2m进人孔。

桥墩横隔墙横断面为双幅,每幅箱梁顶板宽15.25m,两翼悬臂长4m,顶推时顶板宽14.85m,待箱梁全部顶推到位后,顶板两端各有0.2m后浇带封锚(横向预应力索)。顶板按2%的结构找坡,顶板厚0.28m,在距横隔墙2.65m时变化为0.4m;底板宽7.25m,厚0.3m,在距横隔墙2.65m时变化为0.4m;腹板厚0.4m,根据梁内剪力变化的规律,在距横隔墙2.65m时变化为0.5m、0.6m。腹板开通风孔,直径8cm,水平间距1.5m,距梁底1.5m。由于桥轴线处于半径2500m的圆曲线上,所以两幅箱梁四条腹板的边长各不相同,但都共用一个圆心。

为便于顶推过程中脱内模及减轻顶推梁的自重,箱梁的中隔板均为二次浇注,中隔墙上留有0.4×0.4m的进灰孔,待箱梁全部顶推到位后再浇注隔墙混凝土。

本桥设计为多点顶推,以使牵引力的方向和梁的前进轴向尽量一致,减少墩身根部弯距。

3.2 细部构造设计

有报道说,顶推梁“十顶九裂”,经过研究发现问题在于箱梁在墩顶完全由两条长方形的滑道支承,梁体局部承压,这里是预应力管道布置最密的地方,断面消弱严重,预加应力集中,而且又有竖向蹬筋的存在,多个方向的应力集中一起,状态比较复杂。本桥在设计时参考一些文献和以往工程的经验,特意加大了梗腋的尺寸,加强梗腋处构造配筋,加密网片间的联结。同时要求施工时尽量加大滑道的尺寸,降低局部承压应力;设计要求灌注混凝土时加强此处混凝土的振捣,避免出现空洞或松散的情况。在本桥施工过程中,经仔细检查,

未发现此处有任何方向的裂纹。

3.3 导梁的设计

导梁的长度直接影响到施工阶段的悬臂弯距。由于本桥是为曲线梁,导梁也设计成与砼箱梁同曲率的曲线梁,以免在顶推过程中导梁通过墩顶时产生横向偏移,从而形成横向(径向)水平力,导致受力复杂。其全长37.5米,与主跨比为0.75;高度2250~3570mm;每套导梁由两片I形断面的钢板梁通过上下平联及横联连接而成,上下平联及横联为焊接H形杆件。导梁总重量95t。

在导梁与混凝土箱梁的连接设计上,本桥没有采用传统的埋入式的做法,而是通过张拉砼梁体内预留 $\Phi 32$ 纵向预应力粗钢筋使导梁和砼箱梁连接,导梁钢结构的端部设承压板,板上设有156颗 $\phi 22 \times 150$ mm剪力钉并和砼梁浇注在一起;在结合面的顶部设置剪力梁,剪力梁一端使用箱梁的竖向蹬筋锚固,一端通过导梁上增设的竖向蹬筋锚固,剪力梁与钢导梁之间设石棉垫,与箱梁之间通过高强度环氧树脂砂浆找平。需要注意的是这种设计必须在预应力和抗剪能力的提供上留有充分的安全系数,因为第一段梁中连接导梁的预应力筋暂时没有压浆,在不同的受力状况下会有应力应变的变化,预应力筋与箱梁混凝土管道产生相对滑移,结合面变形不协调,这样会造成剪力钉的受拉,是非常危险的。另外还要注意细部诸如剪力钉、剪力梁的构造和可靠性,保证结构在刚度突变的情况下能够顺利传递剪力和弯距形成的拉力或压力以及曲梁(尽管半径大)的约束扭矩和翘曲变形,连接结构不能出现致命的应变或错动。导梁结构设计控制工况见表1。

表1 导梁结构设计控制工况

序号	项目	工况说明	
1	导梁前端最大挠度	最大悬臂状态下(导梁接近前方墩顶时)	$f_{max}=19.1\text{cm}$
2	箱梁与导梁连接处最大负弯矩	导梁全悬臂状态下	-21530KN-m
3	箱梁与导梁连接处最大正弯矩	导梁前端悬臂25m	35560KN-m
4	箱梁与导梁连接处最大剪力	导梁根部位于支承墩上时	6680KN

3.4 结构设计特点与验算分析

3.4.1 结构设计特点

顶推梁有个显著的特点,即桥梁的边界条件和荷载条件在各施工阶段均在发生变化,各施工阶段的结构体系与成桥阶段的结构体系是完全不同的。因此顶推梁的施工阶段分析是繁琐的。主梁在施工阶段主要承受一期恒载自重产生的内力以及在梁上施加的预加力和顶推动力(本桥考虑顶推动力系数1.2,运营阶段取消),其任一梁截面在不同的顶推阶段中都承受最大正弯距或最大负弯距,而大部分截面的最大正弯距或最大负弯距之值都基本相等。因此先期索的配置上可以按中心受压配筋,这样一来使得箱梁截面处于均匀受压的状况,二来避免了分析复杂的时间效用和体系改变所引起的二次力。顶推到位落梁后,连续梁主要承受二期恒载、活载、温度、支座沉降产生的内力及在连续梁上施加的预加力、预加力的次应力、徐变收缩次内力等。因此后期索均布置在支点、中跨、边跨的负弯距区,以弥补先期索的抗力不足。

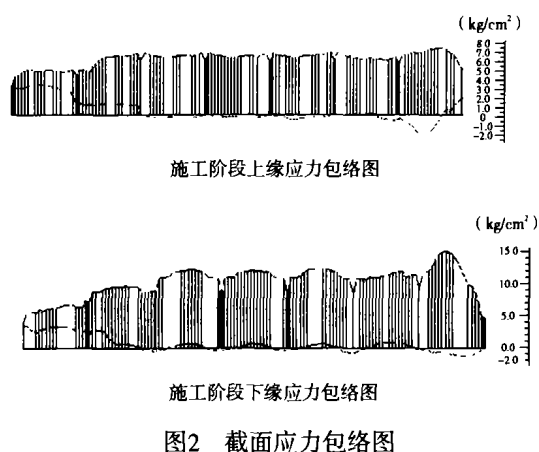
先期索采用精轧螺纹 $\Phi 32$ 粗钢筋,上缘62根,下缘42根,其中在下缘有12根为联结导梁用的临时筋,其余均为永久筋。与导梁联结的临时筋在完成顶推时,拆除不用,但与导梁联结的永久筋在完成顶推时,必须进行二次张拉,做使用阶段的永久筋使用。连续梁平面为曲线,纵向预应力粗钢筋应沿箱梁中心线敷设。预应力粗钢筋的标准强度 $R = 750\text{MPa}$,锚下张拉控制应力 $\sigma_k = 600\text{MPa}$,每根锚下张拉控制力 $N = 482.54\text{kN}$ 。后期索采用 $12-\phi^{15.24}$ 预应力钢绞线, $R_y^b = 1860\text{MPa}$, $E_y = 1.9 \times 10^5\text{MPa}$,按国标GB/T5224-1995的要求供货。锚下控制应力 $\sigma_k = 0.75R_y^b = 1395\text{MPa}$,锚外张拉控制应力不超过 $0.8R_y^b$ 。箱梁边跨下翼缘配置12束,中跨下翼缘配置8束,中跨支点弯距束8束。两端张拉。横向预应力筋采用 $3-\phi^{15.24}$ 预应力钢绞线,每米两束。竖向预应力采用精轧螺纹 $\Phi 32$ 粗钢筋,在梁端部附近区域加强竖向预应力筋布置。

3.4.2 结构验算分析

采用平面杆系系统进行纵向计算,全桥总体共分为175个单元,其中预应力混凝土160个单元,钢导梁15个单元。顶推施工阶段按施工程序,一步一步的计算,全桥施工阶段共分了177个工况。横隔墙作为集中力作用于结构上。计算结果表明,在各个施工阶段,任何截面的正应力都没有超过规范规定的施工阶段法向应力的限制(截面应力包络图见图2),结构是安全的。

值得注意的是顶推梁的分析和常规的结构不同,常规结构的节点位移在施工阶段分析中往往是累积的,而顶推梁的边界条件在施工阶段是变化的,节点为支承点时要回到初始位置(即顶推时梁体重新爬上墩顶临时支座),边界支承点的位移归零。所以在应用程序时要注意程序有没有这个功能,否则,分析出的结果将是不准确的。

横向的计算可以将横截面看作在腹板中心线下有弹性支承支撑的闭合框架,弹性支承刚度系数由总体纵向计算求的。但本文属于施工检算,没有对本桥的横向框架进行验算。



4. 结构耐久性

鉴于东海大桥地处腐蚀性较强的外海海域,而且东海大桥的设计基准期为100年,因此结构的耐久性至关重要,箱梁全部按A类构件预应力混凝土设计,不允许出现有害的裂纹。对应力加以限制,在永久荷载和设计荷载下,不允许出现拉应力,只在校验活载下,

允许出现1.5MPa的拉应力。

为使预应力混凝土箱梁自身具有较好的防腐性能,采用C50级高性能海工混凝土。高性能海工混凝土是一种具有高耐久性、高强度、高工作性的混凝土,特别是它具有高的抗氯离子渗透性,从根本上提高了混凝土的护筋性能。

增加钢筋的保护层,也是防止钢筋锈蚀的良好办法,东海大桥专门制定了新的保护层规定和更加严格的施工偏差标准,要求普通钢筋净保护层在箱梁的外侧为40mm,内侧30mm;预应力成孔管道净保护层在箱梁的外侧为70mm,内侧60mm,不能出现负误差。预应力管道采用真空压浆工艺。

5. 施工工艺设计

本桥顶推梁块段长度为12.5m+15×25m+12.5m(桥轴线长)。预制台座安排在PM448墩和PM449台之间,靠PM449台边,在PM447墩和PM448墩中间,设临时墩一座,以满足首段浇注和顶推时导梁的受力以及新老混凝土连接面箱梁的线形需要。

5.1 台座

制梁台座是制梁底模与底模基础的统称,是顶推梁的制梁基地,要求不能沉陷,并满足台座承载力要求,制梁台座的轴线与桥梁轴线重合,台座的纵坡与桥梁的纵坡一致。

台座设计时曾考虑过抛弃传统的使用油压千斤顶升降台座的方式,使用门型铰接的支撑杆连动体系(见图3)。这种新型的台座体系因为不需要使用大量的千斤顶而无疑降低了成本,且操作简便。但因在国内没有使用的先例和担心铰体系加工时达不到足够的精度而放弃了它,继续采用可升降的底模架和不动的滑道支墩。

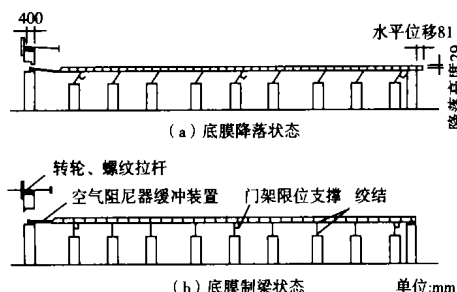


图3 国外某工程支撑杆连动体系台座

台座基础落于开掘的岩石上,基础条件比较好,采用混凝土整板基础找平后,就可浇注底模条形基础和滑动支墩。基础排水良好。所有底模安装完后,按规范要求进行了预压,以消除构件间的非弹性变形和间隙。

5.2 模板

模板必须正确地设置在顶推位置上,模板的长度要满足最大节段长度25m,要能适应腹板边缘平曲线线形,台座的纵坡与桥梁的纵坡一致。底模在滑动支座处设置了移动底模,以利于体系的转换。底模所有油压千斤顶系统共用一个控制系统,以达到动作一致。侧模采用轨道式支撑,设置了能在垂直方向、水平方向靠丝杆移动100mm的构造。内模是用液压控制的可伸缩机构,整体性好,并可以采用卷扬机沿轨道移动。

5.3 墩顶设施设计

顶推梁墩顶设施包括临时支座、滑道、墩顶千斤顶反力架、托架以及横向纠偏装置(见图4)。

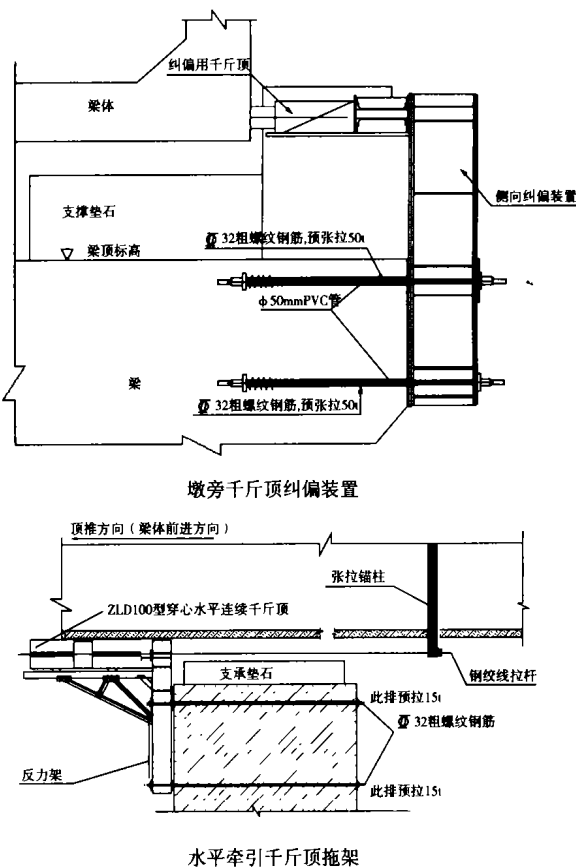


图4

滑道作为顶推梁的临时支座,在箱梁滑移时通常在临时支座上与梁体间不断喂塞“四氟乙烯滑板”以降低摩擦力,由于受支座垫石尺寸的限制,本桥滑板的尺寸只有 $1.2 \times 0.3\text{m}$,厚度为 13mm 。滑板的计算承压应力虽然低于厂家推荐的允许应力,但在施工中,滑板的损坏率还是很高,影响了顶推进度和浪费了成本。经过分析,认为除了尺寸误差、标高误差、曲线梁体“蠕动”径向碾滑造成多向剪切变形等原因外,主要还是四氟板的厚度过薄,抗剪切变形的能力差,承压应力过大。经过与四氟板厂家协商,提出一种新型的滑板内部结构设计,新结构构造的特点是加大了四氟板的厚度,在板内加入薄钢板,提高滑板的刚度和承压能力,由于多层钢板的存在,剪切变形得到了有效抑制。新结构滑板投入使用后,再没出现破损的现象,有效的解决了这一问题。

本工程的大吨位顶升、穿心水平连续千斤顶采用了OVM公司的液压提升顶推及转体成套技术。穿心水平连续千斤顶反力架是通过预应力精轧螺纹钢筋穿过预留在墩帽中的孔眼将其固定在墩帽上。根据计算,反力架的上层锚固筋须预拉 150kN ,下层锚固筋须预拉 500kN 的锚固力。

曲线顶推很重要的一点是控制梁体的轴线偏离,除了加强观测外,必须在墩旁设置强大的导向架和纠偏装置。导向架与梁侧面间设四氟板滑动面,顶推时交替转换四氟板,以起导向作用。横向纠偏装置采用牵引反力架同样的设计,需要纠偏时使用 100kN 千斤顶施力。

5.4 顶推施工

本桥采用了多点液压连续顶推系统进行顶推。纵向牵引拉杆采用 $12-7\phi 5$ 钢绞线制成,在已制梁上预留垂直孔,插入2根钢制锚柱,锚柱下设钢横梁与牵引拉杆相连。

由于梁体自重大,单幅每个墩位处横向布置两台 100t 的连续顶推千斤顶装置。为了保证横向两台顶推千斤顶出力均匀,不产生轴线偏差,两台千斤顶共用了一台大容量的供油泵

站,保证顶推达到一定速度。

全桥各墩位的顶推千斤顶装置,共用一个总控制台,控制系统运用电磁控制原理,对所有千斤顶装置实施供油、顶推前进、回程复位、接力交替作业,达到连续顶推。

顶推时,为避免出现箱体窜动的现象,保证每个墩子所受的水平力大致相等,采取了“集中控制、分级调压、差值限定”的方法。顶推前启动静阻系数按 8% ,动摩阻系数按 5% 来预计水平顶推的出力吨位,各墩液压站的五个挡位的施力值需要根据多种因素来考虑,一般一挡值主要用作预紧拉杆启动使用,其余二、三、四位则根据多种因素综合考虑使用。当各墩准备就绪,信号送回总控制台,总指挥通过总控制台发出顶推指令,各墩水平顶即同时动作,然后根据顶推需要逐步加大施力吨位,直到梁体开始前移,启动后摩阻系数下降摩擦力减小,此时就适当降低施力墩水平顶的出力等级来适应摩擦力的变化,使梁体平衡地向前推进,实现各墩同步顶推。

5.5 正式支座的安装和落梁

正式支座安装前,首要的工作是测定梁长,决定正式支座安装的位置,如果梁长误差较大,尚须纵向稍稍移动梁体,适度调整误差,使各个桥墩的支座偏心均在允许范围之内。

起顶梁体用YSD600-200千斤顶,各千斤顶底部用 $20\#$ 砂浆抄垫平整,砂浆厚度为不大于 10mm 。安装正式支座前,应拆除墩、台上的滑动装置,抽出临时支座顶四氟板、不锈钢板和型钢锚柱,然后卸落到永久支座上。起顶时各支点应均匀顶起,其顶力应按设计支点反力大小进行控制。

顶落梁体采用逐步落顶,逐步到位,规定相邻两墩支点高差任何时候不超过设计容许数值(根据设计院提供设计资料为 30mm)。顶落梁时从PM455开始,向PM451和PM459两个方向顶落梁体,逐墩依次卸落,直至最后达到设计高程。施工时梁底高程按设计高程加 30mm 高度落

(下转第34页)

7.5 从现场抽取的C2A-1 || -PR-05和C2A-1 || -PR-06测点的两组锚索应力观测情况看, 两组锚索截止至观测时的实际应力均超过设计值的约19%。而现场并未对这些情况进行相应的处理, 比如对锚索进行应力的适当释放等。这样的后果是锚索的安全性降低, 安全储备减少, 进而影响边坡的稳定与安全。随着坡体的逐渐形变, 锚索的实际应力将会继续增大, 这是比较危险的。

笔者认为对此边坡防护设计方面应该要改进的地方有以下几点:

7.6 从安全和防护的角度考虑, 锚索的结构可考虑采用防护好耐腐蚀的成品锚索, 此种锚索刚度相对大得多好下索, 再者其全长全封闭防护, 即使自由段有部分空隙未被浆体充填, 锚索也很安全。

7.7 从施工和整个锚孔不塌孔、浆体能充填整个孔道考虑可采取一次跟管不拔管的方式。

7.8 根据此坡体的实际情况, 对如此高(约400米)的整体滑移的大滑坡体, 可以在不同标高的位置上另设置大直径的抗滑桩, 以抵抗下滑的强大剪力, 桩径方向应与设置的锚索加固

方向一致, 笔者认为这样会更加有效的起到稳定整体边坡的作用。

7.9 鉴于锚索的实际应力值大于设计值太多, 应在外锚头封闭前先进行应力的一定释放, 以使锚索的受力处于安全范围之内。

8. 结束语

小湾工程规模宏大, 是目前世界上已建电站工程中最高的双曲拱坝, 坝址位于高地震烈度区, 坝区峡谷深高, 岸坡陡峻, 坝前分布规模较大的崩塌堆积体, 且地形狭窄, 开挖后将形成近700m的高边坡, 因此边坡开挖及永久支护的安全稳定成为小湾电站施工成败的关键。虽然经过会战山体是暂时保住了, 但边坡永久稳定和安全方面存在的不足始终是对电站安全的一种威胁, 也始终是我们最为担忧的地方。

参考文献

1. 佟强.《小湾电站引水沟堆积体边坡钻孔技术探讨》.人民交通出版社, 2004
2. 高申友等.《偏心跟管钻具的配套及其在使用中的改进》.《OVM通讯》, 2003年第2期

(上接第21页)

梁转载, 以利于顶推梁可以一次性顶落到位。

6. 结语

东海大桥近岛段在复杂的地形条件下选择顶推梁的施工方案是切合实际的, 结构设计合理。施工中对滑板的寿命低问题进行了专门的攻关, 提出的新型滑板结构具有很好的推广价值。建议主梁牵引锚点在以后的设计中采用梁内锚块和转向器的形式, 这样可以减轻现场的劳动强度和降低施工钢结构的用量。穿心水平连续千斤顶多点液压顶推系统大大减轻了顶推时千斤顶的起步和停止的频率, 提高了工作效率。建议在控制上, 能够开发出智能的管理控制系统, 各墩的牵引力, 摩阻力、桥墩受力能

够自动测量显示, 对千斤顶的供压能够自动调整, 提高施工技术的信息化程度。

参考文献

1. 中铁大桥勘测设计院, 东海大桥近岛段顶推连续梁施工图设计 2003 6
2. 陈湘林、刘乐辉, 《柔性墩多点顶推施工技术》, 中国公路学会桥梁和结构工程学会, 2002年全国桥梁学术会议论文集, 2002.10
3. 范立础, 《桥梁工程》, 人民交通出版社, 2002年。
4. 皇甫熹、徐强、俞海勇、王琼, 《高性能海工混凝土在东海大桥工程中的应用》, 世界桥梁2004年增刊, 2004.11
5. 毛建林, 顶推法施工PC连续梁的一种新型制梁台座系统, 世界桥梁, 2002年第3期
6. 刘晓霞、张建红、邱琼海, 顶推箱梁施工作业指导书, 中铁大桥局集团第二工程有限公司施工作业技术标准, 2004年