

# 公路混凝土桥梁体外预应力 加固设计与实践

牛 宏

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司 桥梁维修养护与加固技术研究所 陕西西安 710075)

**摘 要:** 根据多年的桥梁加固工程实践,详细介绍了体外预应力加固混凝土桥梁的具体方法及其在设计和防护方面所应注意的一些问题。最后分析了两座典型桥梁加固案例的具体特点,为采用体外预应力方法加固同类型桥梁提供了一定的借鉴。

**关键词:** 混凝土桥梁 体外预应力 加固设计 案例

随着时间的推移,受气候,环境因素的影响,桥梁结构材料逐渐产生劣化,材料性能下降;同时由于设计、施工质量的缺陷和超载等因素,使得建成后的许多桥梁出现了不同程度的损伤,导致其承载能力降低、耐久性不足。有些病害严重的桥梁已经不能正常运营,因此必须对其进行维修与加固。在工程中常见的桥梁加固方法有黏贴钢板或粘贴纤维材料、增大截面法、体外预应力加固法等,前几种方法基本上属于被动加固,仅能达到限制结构病害的发展、维持结构的正常使用的目的,对结构的承载能力的提高幅度很有限;而体外预应力是一种主动加固桥梁的方法,是将预应力筋布置于梁体截面外并通过锚固块及转向块来对结构物施加预应力的一种结构体系。它由体外预应力孔管(高密度聚乙烯管HDPE等)、浆体(防腐油脂或水泥浆体)、锚固体体系和转向块等部件组成。运用体外预应力方法加固桥梁结构时,根据桥梁结构的受力特性,在梁体外部布设预应力钢束或预应力粗钢筋并施加预应力,从而改变原结构的内力分布,改善各截面的应力状态,起到减小或消除裂缝、减小梁体下挠、大幅度提高结构的承载能力的作用,因此在桥梁加固工程中得到了广泛的应用。目前体外预应力方法主要用于对混凝土梁式桥(包括简支梁、悬臂梁、连续体系梁桥等)的整体或局部加固,也可以用于对桥梁下部结构及索塔等的加固。

笔者从事桥梁加固工作多年,在许多桥梁加

固工程中都采用了体外预应力方法,经过荷载试验及多年的运营检验,这些桥梁的加固效果均很理想。以下就从混凝土桥梁体外预应力加固设计方面谈谈自己的体会:

## 1 体外预应力设计

### 1.1 体外预应力筋的布设方式

体外预应力筋的布设形式和布设位置直接影响着桥梁结构的内力分布,因此,在实际工程中应根据加固桥梁结构的实际受力特性和加固目的选择不同的布束形式。用体外预应力加固桥梁时通常有两种布筋方式:直线筋和折线筋。直线筋一般难以适应结构的受力特性,通常只用于结构的局部加固或简支梁桥的加固;采用体外预应力方法加固连续梁(连续刚构)桥时,体外预应力筋布设一般采用折线型,以适应结构正负弯矩交替变化的特性。在具体设计时应对所加固桥梁的几何尺寸及结构构造了如指掌,在有限的布筋空间内使体外筋产生的偏心距为最大,使所布设的体外预应力筋的主动加固效果得到最大限度的发挥。应尽可能的让体外预应力筋的转向及锚固块靠近腹板与顶、底板的交接部位设置,这样做既便于锚固,又能降低张拉体外预应力筋后所引起的应力集中程度;同时要将体外索的弯曲角度及半径控制在一定范围,一般以弯起角以 $5 \sim 15$ 度为宜,半径应大于2.5米。因为过大的角度和过小的半径都将增加转向块处钢束的弯曲应力,导致体外索因疲劳而过早破坏;过小的弯起角度和过

大的半径将增大转向块的长度。因此在设计时应根据桥梁结构的具体情况确定出合理的起弯角与半径。

### 1.2 体外预应力筋数量的选择

由于需要加固的梁体本身存在一定的缺陷,故在加固设计前应对桥梁的技术状况及承载能力状态有较准确的把握,在考虑桥梁损伤程度的基础上分析桥梁结构的实际受力状况,以此来确定所需体外预应力筋的数量。具体设计时可根据桥梁加固前的实际承载能力及加固后所应达到的承载力的期望值,按照部颁现行《公路桥梁加固设计规范》的相关规定进行计算。一般先确定控制截面(跨中及支点断面)所需体外预应力筋数量,其它截面所需的体外预应力筋则在体外预应力束界范围内通长布设,其预应力筋数量可在各控制截面数量的基础上根据各截面的受力情况及转向块、锚固块的布置情况进行微调。设计时最终所采用的体外预应力数量最好有所富余,这样也便于在施工时根据施工控制测试情况对控制应力进行调整。在条件允许的情况下应采用比计算值稍大的控制应力,以增强结构的抗裂性,使梁体的承载力得以显著提高,但需注意检查及分析张拉体外索后对梁体的其它部分受力是否存在不利影响。

### 1.3 体外预应力筋的控制应力

因体外预应力筋在张拉过程中仅在转向块及锚固块处与原结构变形相协调,其它部分则呈现出明显的非线性特征,它的应力发展不同于体内预应力筋,受外界因素的影响较大,比如冲击及振动、火灾及人为破坏等,这些都将严重影响体外预应力筋的使用寿命,因此应该采用比体内预应力筋较低的控制应力值,以避免因体外预应力失效对桥梁结构产生较大的损伤;现行部颁《公路桥梁加固设计规范》(JTJ/T22-2008)中规定:在使用阶段体外预应力筋的最大控制拉应力不应大于预应力筋材料抗拉标准值的0.65倍;精轧螺纹钢最大控制拉应力不应大于预应力筋材料抗拉标准值的0.85倍。对于具体的桥梁加固工程,由于实际布筋空间的限制,转向块处的钢束的弯起角度过大或钢束半径过小,将导致体外预

应力筋的强度下降,故在设计体外预应力筋时宜尽量降低其张拉控制应力,一般张拉控制应力可取钢束标准强度的0.4~0.65。在施工张拉时宜以强度控制为主、引伸量控制为辅。

### 1.4 体外预应力损失

体外索的加固设计不同于体内索,在进行具体计算时除了遵循现行部颁《公路桥梁加固设计规范》(JTJ/T22-2008)的相关规定外,还需考虑体外预应力筋的受力特点及所加固桥梁的实际技术状况。采用体外预应力技术加固桥梁在结构体系、构造形式、施工方法等方面与常规的体内有粘结和无粘结预应力结构有较大的差别,因此,其预应力损失的计算方法也有相应的差别。例如在计算预应力损失时体外预应力筋主要考虑转向块及锚固块处的摩擦损失;对于由混凝土收缩、徐变所产生的应力损失则根据所加固桥梁的建成年限,根据其混凝土收缩、徐变进行的程度再确定预应力损失的大小。采用体外预应力加固既有混凝土桥梁应考虑以下几个方面的预应力损失:①体外预应力筋在转向和锚固块处的摩擦引起的预应力损失;②体外预应力筋的锚具变形、筋(束)回缩和接缝压密引起的预应力损失;③体外预应力筋(束)分批张拉所引起的梁体弹性压缩而产生的先张拉筋(束)中的分批张拉损失;④若所加固桥梁为预应力混凝土结构,还需考虑由于施加体外预应力所引起的原结构预应力筋(束)的弹性压缩损失;⑤体外预应力筋(束)由于钢筋松弛引起的预应力损失终极值。

### 1.5 锚固块与转向块

锚固块与转向块是体外预应力加固的关键部位,受力较复杂,因此要求其有较大的刚度及极高的可靠度。在具体设计时既要考虑桥梁结构混凝土的局部受力,又要考虑锚固块及转向块的锚固方式问题。对每一项工程来说,若原结构混凝土强度较高、混凝土表面未出现裂缝,因此宜优先考虑使用钢结构。钢锚箱和钢转向块的优点是刚度、强度较大,施工快速方便,受力较明确,缺点是易生锈,防护要求较高;若原结构混凝土强度较低或要设置锚固块及转向块的区域混凝土存在裂缝,则宜考虑使用混凝土结构,这种转向

块及锚固块施工相对难度大,受力较复杂,优点是刚度大,不需要特殊防护。

在设计钢结构锚固块及转向块时所解决的主要问题是钢结构与原结构混凝土的结合问题。钢锚固块与转向块焊接成型后再现场安装,一般采用自切底式高强、大吨位锚栓或高强、大吨位化学锚栓进行锚固。这两种锚栓承载力大、膨胀较小、承受动荷载的能力比较强,其中第一种锚栓通过旋转锚栓底部的刀口切割侧面混凝土以形成锥型体来进行锚固;第二种锚栓则通过化学粘合剂使锚栓与混凝土之间产生强烈的粘合作用进行锚固。锚栓的布置间距、数目、布置形式不仅与锚固块、转向块的受力大小及方向有关、而且与原结构混凝土的强度及有无裂缝出现有关,具体设计时需做详细的分析计算,在满足受力要求的前提下要留有足够的安全度。

在桥梁体外预应力加固工程中,钢筋混凝土锚固块及转向块也是最为常见一种构造形式。混凝土锚固块及转向块需要在原结构混凝土梁体上设置,当然也存在新旧混凝土的结合问题。具体设计时大致有两种方式:第一种是在原结构混凝土内植筋,然后绑扎钢筋以形成钢筋骨架,再浇筑混凝土形成锚固块及转向块;第二种是凿出原结构的受力主钢筋,将锚固块及转向块钢筋与原结构钢筋焊接或绑扎起来,形成钢筋骨架,再浇筑锚固块及转向块的混凝土。第一种方式对原结构混凝土截面削弱较小,且在混凝土体内植筋已是一项较成熟的施工工艺,故这种方式在国内外桥梁加固工程中应用较为广泛。但须注意两个问题:其一,在植筋之前须凿毛原结构混凝土接触面,必要时需做剪力槽,以使新老混凝土结合紧密;其二,植筋用结构胶的性能必须满足现行部颁《公路桥梁加固设计规范》(JTJ/T22-2008)第4章A级胶的各项指标,以使所植入的钢筋与混凝土能够变形协调、共同受力。第二种方式风险较大,因为需要加固的桥梁一般存在较严重的缺陷,若锚固块、转向块布置过多,需凿除的混凝土数量较大,这将严重削弱原结构断面、给桥梁结构造成极大损伤,降低其承载能力,存在较大的安全隐患,对一些不中断交通进行加固的桥

梁尤其不能采取此方式。

另外,无论锚固块、转向块采用钢结构还是混凝土结构,都必须在梁体内合理布置。其中锚固块宜布置在原结构混凝土受压区,以避免体外预应力筋张拉后锚固块处出现过大的拉应力;锚固、转向块宜靠近腹板与顶、底板的承托处,若采用混凝土结构,则在保证安全可靠的前提下应尽可能减小锚固块、转向块的尺寸,使混凝土体积能够达到最小,尽量减轻新增混凝土重量对结构受力的不利影响。

### 1.6 体外预应力体系及选择

体外预应力有永久式与可换式两种基本形式,具体采用哪种形式,应根据所加固桥梁的结构形式、病害程度、使用要求、加固后所要达到的荷载等级等有关。对于一些因设计或施工缺陷需采用体外预应力加固的桥梁,考虑到加固后的桥梁应有较长的使用寿命,在设计时宜采用可换索式体外索,以备日后体外预应力筋失效后能及时更换;相反对于一些年久失修的旧桥则采用永久式体外预应力筋。

永久式体外索的锚固体系中的锚具、钢束在张拉完工后将不需要进行调整及更换,因此在齿板及转向块的设计时体系不需要将钢束与之隔离开,而在该处将钢束与原结构固结。可换索式体外索锚固体系的锚具、钢束在张拉完工后,需要根据体外预应力筋使用过程中的状况及时进行调整及更换,因此在齿板及转向块的设计时需将钢束与之隔离开。这种类型的体外预应力筋对锚具、夹片,以及锚固块、转向块有较强的依赖性,如果上述其中一个出现问题,都会导致整根体外预应力筋失效。因此可换式体外预应力筋的锚具及夹片比普通钢绞线具有更高的安全可靠度及抗疲劳的能力,锚固块及转向块必须保证具有很高的强度和刚度。

常用的体外预应力筋一般分三种:普通钢绞线、环氧涂层钢绞线以及带HDPE套的无粘结环氧涂层钢绞线。前者主要用于有水泥浆或混凝土保护的永久性体外索;而后两种均可用于永久性可换式体外索,与普通钢绞线相比,环氧涂层钢绞线的物理及力学特性无明显差别,但具有优

异的防腐能力,所以在体外预应力桥梁加固工程中的应用较为广泛。对于中小跨径的桥梁最好采用专业厂家制作的成品索,其防护质量能够保证,运输及安装成本也不高;大跨径梁式桥的体外预应力筋常采用带PE套的无粘结环氧涂层的单根钢绞线,施工时再根据设计所要求的根数组合成束,这样既降低了预应力筋的运输成本,又便于施工安装。

体外索的锚具也分为永久式与可换索式两大类,可根据不同工程的要求选择锚具。例如对于一些要通过特殊、超重荷载的桥梁,采用临时体外索来提高桥梁的承载能力,可采用可换式锚具,这样便于拆除;对于一些需要进行多次张拉体外预应力筋来调整原结构的受力及变形的桥梁,须采用可调整索力、可多次张拉的可换式锚具。可换式体外索的锚具因其长期承受动荷载,预应力筋及锚具始终处于高应力状态下,必须提高锚固单元自锁的可靠、安全性,因此常采用防松装置来预防夹片在施加预应力后出现松动。

### 1.7 体外预应力筋的防护与减震

体外预应力筋防护方法的选用应综合考虑环境条件、是否需要重新张拉或更换以及结构类型等因素。体外预应力筋的防护通常有两种做法:

①在镀锌或者有环氧涂层的体外预应力筋的表面挤PE套,此种做法的体外索可以不再设套管进行防护而单独使用;②在体外预应力筋的外面套以套管,套管与力筋之间填充灌浆材料进行防腐,套管可以采用刚性管、可弯曲的塑料管或用薄钢管加强的可弯曲塑料管。锚具则采用专门加工的钢护套进行防护,将其安装在已张拉锚固的锚具外面,并在钢护套内注入专用的防腐油脂。

在体外预应力施工完工后,应在预应力筋全长范围内设置减震器,将预应力筋和梁体混凝土固定起来,避免共振对梁和索产生的不利影响,延长预应力筋的使用寿命。

## 2 体外预应力加固实例

### 2.1 预应力混凝土连续曲线箱梁桥加固

某高速公路匝道桥桥型为 $4 \times 28 + 2 \times 40.5 + 5 \times 28$ m预应力混凝土连续曲线箱梁,其中第3~

11跨位于半径125m及800m的同向曲线上,桥梁全长333m。下部构造采用桩柱式结构,其中3、7号墩采用双柱式桥墩,其余为独柱式。主梁采用单箱单室断面,顶宽12m,底宽6m。中间两孔40.5m跨为变高度截面,箱梁根部高2m,跨中梁高1.5m,按二次抛物线变化。其余28m跨均采用等高截面,梁高1.5m。箱梁底板厚25cm,腹板厚40cm和50cm,各墩墩顶均设1.5m厚横隔板。该桥在建成不久就发现了大量裂缝;主要有支点附近处腹板的斜向裂缝、跨中附近处的横向裂缝、翼板的横向裂缝、底板的纵向裂缝等。经分析该桥在设计中对弯桥的弯扭耦合效应没有引起足够的重视,原预应力束配置明显不足,普通钢筋数量和直径均偏小,再加上施工时张拉顺序、张拉误差等原因,致使建成不久就出现了大量裂缝。

针对该桥的设计、施工及开裂现状,经综合比选后认为采用体外预应力进行加固为较佳方案:即在箱梁两侧腹板上各增设了2束 $15 \phi^{15.24}$ 体外预应力钢绞线,其布置方式见图1;然后再植筋绑扎钢筋,浇筑20cm厚的外包混凝土,形成新的箱梁断面,见图2。

与其它采用体外预应力技术加固的桥梁工程相比,该桥的加固设计有以下特点:采用普通钢绞线作为体外预应力筋,设置钢结构转向块及克服径向力的锚卡,采用混凝土锚固块。先施加预应力使其直接、有效作用在混凝土梁体上,然后浇筑新增腹板加厚混凝土,将体外预应力筋用混凝土直接包裹起来,这样既保护钢束,又使新增混凝土部分参与原结构共同受力,成为桥梁结构的组成部分。这种布索方式使得钢束在施工时为体外索,施工后则变成了永久的体内索,当然这种体内索从严格意义上来讲与新建桥梁所采用的体内索在计算理论及受力状况上是有区别的。

该桥加固完成后进行的荷载试验结果表明,桥梁的强度与刚度得到了较大的改善和提高。加固竣工后至今已近十年运营状况良好,梁体未出现新的裂缝。成功地将体外预应力应用到了小半径的曲梁桥的加固工程,这在国内尚属首次,加固效果十分显著。

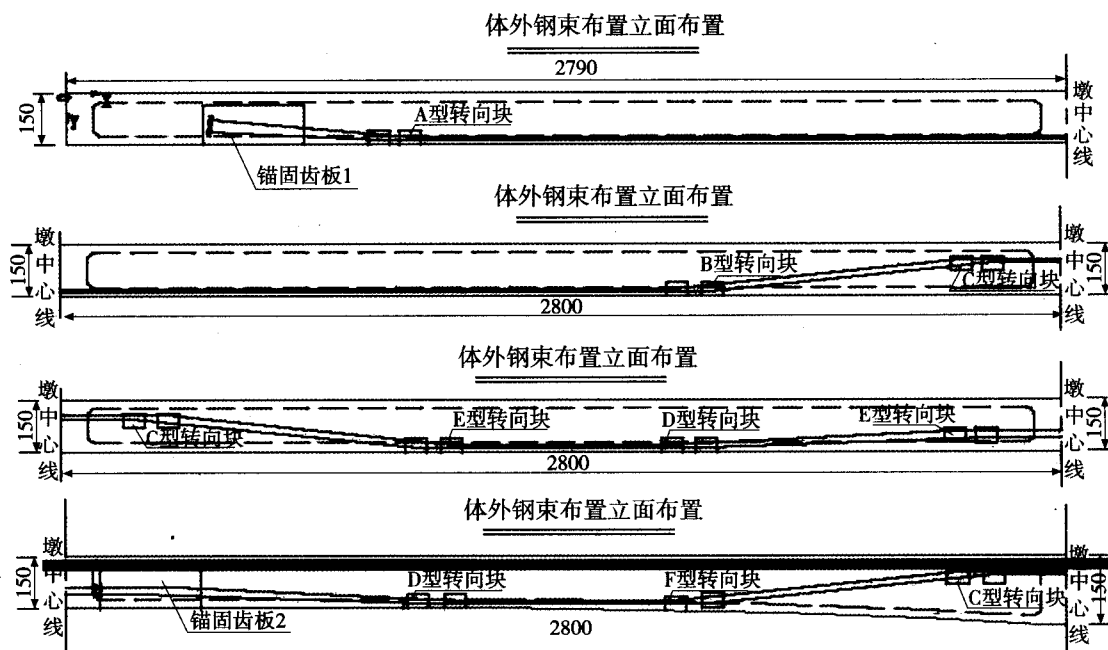


图1 体外预应力束布置

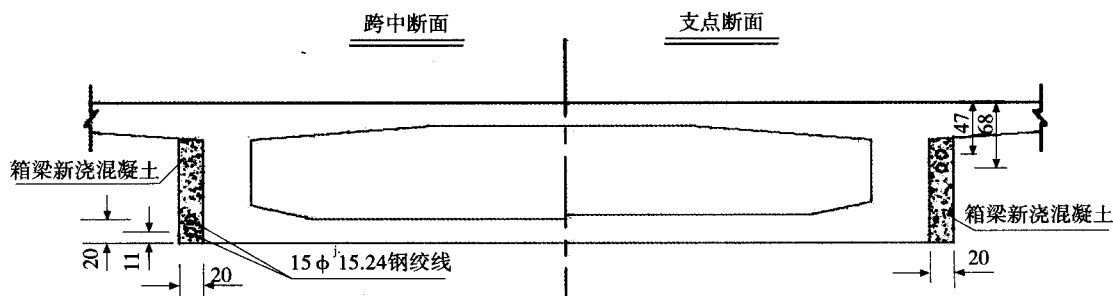


图2 加固后箱梁典型断面示意

## 2.2 预应力混凝土连续刚构桥加固

某长江公路大桥的主桥结构型式为140+240+140m连续刚构桥，桥梁净宽21.5m，为4车道；设计荷载：汽车-超20级，挂车-120，人群3.5kN/m<sup>2</sup>。箱梁为三向预应力结构，采用单箱单室截面，顶板宽22m，底板宽11.5m。箱梁跨中及边跨支架现浇段梁高4.01m，箱梁根部及0#梁段梁高13.5m。主墩采用双薄壁墩身，群桩基础。该桥的主要病害如下：①主梁中跨跨中出现持续下挠，2006年下挠为31.7cm，2008年下挠为33.0cm。②箱梁开裂，箱梁开裂主要表现为三个方面：其一是箱梁腹板大范围内纵向开裂，且无规律；其二是跨中合拢段箱梁底板裂缝横向贯通，顶板纵向裂缝较多；其三是两边跨端部箱梁顶板、端横隔板裂缝较多。经深入分析后认为该桥对大跨径梁式桥混凝土收缩、徐变效应重视不

够；梁跨中压应力储备不足，预应力束设置偏少，且无腹板下弯钢束；另外竖向预应力损失较大，主拉应力超限造成腹板开裂。

为延缓该桥跨中继续下挠和适当恢复桥面线形，增强腹板截面的抗剪能力，抑制裂缝的扩展，经多方案比选，最后选择采用体外预应力对该桥进行加固处理。体外预应力束设置在主桥中跨，两端分别锚固于两个0号块横隔板的边跨侧，整个中跨共设置12束19 $\phi$ <sup>15.24</sup>的体外预应力束，每个腹板对应6束，通过4个转向板分三批进行下弯，锚下控制应力为1116 MPa，见图3。

本桥在加固施工过程中进行了施工监测，体外预应力加固施工监测结果表明：

①中跨主梁跨中截面向上产生约2.0cm的位移，对桥梁线形有所改善；

(下转第28页)

裂纹等情况时,应及时进行处理。

(5) 每道涂装施工前应对上道涂层进行检查,上道涂层检查合格后才能进行下一道涂层施工。

(6) 涂装后应进行涂层外观目视检查。涂层表面应厚度和色泽均匀、无气泡、无针孔、裂缝等缺陷。

(7) 表湿区涂层应在无流水、水珠、水迹的状态下进行施工。及时清理、清洁受污染的混凝土表面。

(8) 涂装现场环境和相对湿度,必须满足涂料适应的范围条件下才能进行施工。并做好涂装环境条件的记录。

## 6 结语

邕江大桥作为已运营40余年的旧桥,其中所出现的几种主要病害具有一定的典型性,并

且对结桥的耐久性产生了不可小视的负面影响,因而具有很高的研究价值。从试验检测结果和现场监督的工程质量情况来看,该桥中所采取的各种加固技术可以满足设计和规范各项要求。由于在短期内无法看到该工程耐久性加固的效果,因此不对其效果进行评定。在后续的工作中对其进行定期检测,以期得出客观评价,从而为这类加固项目的设计与施工提供参考。

### 参考文献

- [1] 王钧利. 影响桥梁结构耐久性的主要因素及应对措施[J]. 中外公路, 2004, (6): 61-64.
- [2] 刘凤山. 长沙湾大桥立柱耐久性加固与综合防腐技术[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2009, (1): 24-28.
- [3] JTG/T B07-01-2006. 公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [4] 广西大学设计研究院. 邕江大桥加固工程施工监控竣工报告[R]. 广西: 2009.

(上接第22页)

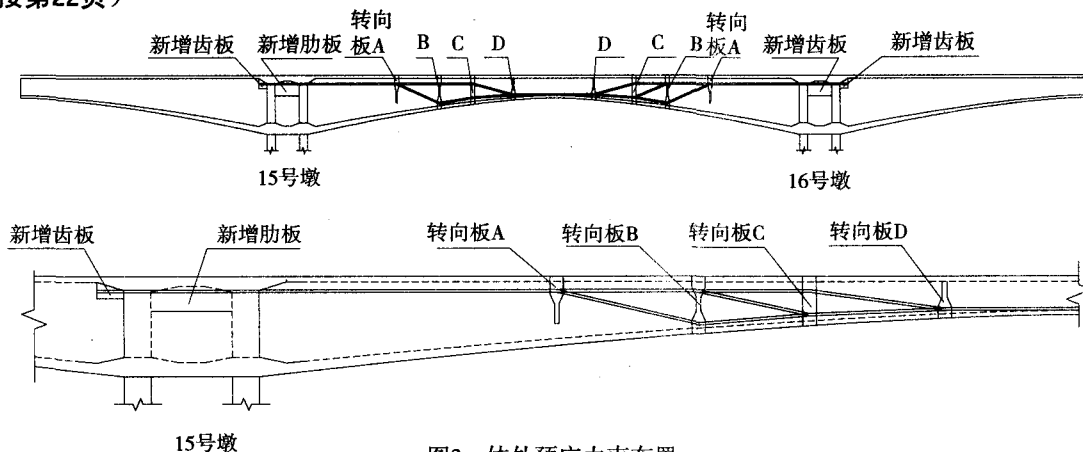


图3 体外预应力束布置

②体外预应力束张拉前后主梁底板、顶板混凝土压应力均有不同程度的增加,其中跨中底板混凝土应力最大增加了2.25MPa,顶板混凝土应力最大增加了0.66MPa;

③在体外预应力束张拉过程中,跨中底板横向裂缝有不同程度的闭合。

## 3 结语

体外预应力作为一种主动加固技术,因其具有施工方便、自重轻、便于检测、可维修更换的优点,因此在桥梁加固中得到广泛的应用。它不仅能够有效地抑制大跨径梁式桥跨中持续下挠,而且能够有效地改善结构关键截面的应力状

态,减小或闭合结构原有裂缝,大幅度提高桥梁结构的安全储备。我国需要加固的桥梁结构较多,应用体外预应力技术将会降低工程成本,加快施工周期,将会推动我国桥梁加固技术的快速发展,有着较大的社会、经济效益。

### 参考文献

- [1] 熊学玉. 体外预应力结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] 体外预应力混凝土梁桥的延性和强度研究[R]. 西安: 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 2008.2.
- [3] JTG/T J22-2008 公路桥梁加固设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [4] JTG/T J23-2008 公路桥梁加固施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.