

第一节 增大截面加固法

一、概述

增大截面加固法又称为“外包混凝土”加固法，通过增大混凝土构件的截面和配筋，提高构件的强度、刚度、稳定性和抗裂性等。该方法可加固梁式桥，也可加固拱式桥梁。

该法可分为单侧、双侧、三侧或四周外包加固。根据加固目的和要求的不同，可以是以增大断面为主的加固，可以是增配钢筋为主的加固，也可以是两种同时采用的加固。

以增大断面为主时，为了保证补加混凝土正常工作，亦需适当配置构造钢筋。以增配钢筋为主时，为了保证配筋的正常工作，亦需按钢筋的间距和保护层等构造要求决定适当增大截面尺寸。加固中应将新旧钢筋以焊接，或用锚杆联结补强钢筋和原构件，同时将旧混凝土表面凿毛清洗干净，确保新旧混凝土良好结合。

该法使用普通混凝土，强度等级不低于 C20 号，当加固层较薄，钢筋较密时，可用细石子混凝土，在条件许可的情况下亦可采用钢纤维混凝土加固。

一、计算要点

外包混凝土加固桥梁，其承载力计算受到原构件应力应变的影响，不能简单地作为整体截面用有关公式计算。在加固计算中，首先应确定加固前构件的实际应力应变水平，并考虑新混凝土与原结构协同工作的程度，然后进行合理的计算。

1、受弯构件加固计算要点

受弯构件的外包混凝土加固设计，应根据现场结构的实际情况，分别采用受压区或受拉区两种不同的加固形式。

压区外包混凝土加固一般用于刚架拱、桁架拱等拱桥的斜腿、斜撑或弦杆的加固。采用受压区加固的受弯构件，其承载力、抗裂度、钢筋应力、裂缝宽度及变形计算和验算可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》（GB 50010-2002）中关于叠合构件的规定进行。

试验研究表明，在相同弯矩作用下，二次受力叠合梁的受拉筋应力、挠度和曲率都比相同截面与配筋的一次受力整浇梁的相应值大得多。其次，二次受力叠合梁在第一次受力时是由叠合前的原混凝土承受压力，而在二次受力时，主要由后浇混凝土承受压力。这使后浇混凝土受压应变比相应整浇梁小。因此，加固计算必须考虑叠合梁二次受力的特点进行较复杂的计算。

受拉区外包混凝土加固方法，一般用于梁式桥跨中部位、拱式桥的拱顶底面和拱脚顶面等受拉区。

对于在受拉区采用外包混凝土，增加钢筋加固的受弯构件，其截面受力可按规范中一般受弯构件的规定计算。但应考虑以下不同点：

1) 新加部分承载力应乘以共同工作系数一进行折减，对于正弯矩截面受弯构件中 $\psi=0.9$ ；对于斜截面受剪构件 $\psi=0.7\sim 0.9$ ；

- 2) 加固结构截面受压区高度与一般受弯构件的是不同的;
- 3) 当新加钢筋与原钢筋相距较远时, 受拉区混凝土可能会出现较大裂缝, 应采取适当措施, 满足使用要求。

2、偏心受压构件加固计算要点

当用外包混凝土法加固钢筋混凝土偏心受压构件时, 应按整体截面以现行国家标准中有关公式进行其正截面承载力计算。其中, 新增混凝土和纵向钢筋的强度设计值应按下列规定予以折减:

- 1) 受压区新增混凝土和纵向钢筋的抗压强度设计值乘以 0.9 的系数;
- 2) 受拉区新增纵向钢筋的抗拉强度设计值乘以 0.9 的系数。

三、施工要点

1、构造规定

- 1) 采用外包混凝土加固桥梁时, 新浇混凝土的最小厚度不应小于 40mm, 用喷射混凝土施工时不应小于 50mm;
- 2) 配制混凝土用的石子宜用坚硬耐久的卵石或碎石, 其最大粒径不宜大于 20mm;
- 3) 当采用钢筋补强时, 纵向受力钢筋的直径不宜小于 12mm; 封闭式箍筋直径不宜小于 8mm,U 型箍筋直径直与原有箍筋直径相同;
- 4) 当采用型钢和钢板补强时, 应将其和原结构的钢筋进行联结, 或采用锚栓与原结构联系, 切实保证力的有效传递和能够参与原结构共同受力;
- 5) 加固的受力钢筋与原构件的受力钢筋间的净距不应大于 20mm, 并应采用短筋焊接连接; 箍筋应采用封闭的或 U 形的箍筋, 并按以下构造要求进行设置:

(1) 加固的受力钢筋与构件的受力钢筋采用短筋焊接时, 短筋的直径不应小于 20mm, 长度不小于 5d(d 为新增纵筋和原有纵筋直径的最小值), 为新增纵筋和原有纵筋直径的小值), 各短筋的中距不大于 500mm;

(2) 当用混凝土围套进行加固时, 应设置封闭式箍筋;

(3) 当用单侧或双侧加固时, 应设置 U 型箍筋。U 型箍筋应焊在原有箍筋上, 单面焊缝长度为 10d, 双面焊缝为 5d(d 为 U 型箍筋直径)。U 型箍筋还可焊在增设的锚钉上, 或直接伸入锚孔内锚固, 锚钉直径 d 不应小于 10mm, 锚钉距构件边沿不小于 3d, 且不小于 40mm, 锚钉锚固深度不小于 10d, 并采用环氧砂浆或高标号水泥砂浆将锚钉锚固于原构件内, 钻孔直径应大于锚钉直径 4mm。

2、施工要求

外包混凝土加固桥梁的施工过程, 应遵循下列工序和原则:

1) 为了加强新、旧混凝土的结合, 应对原构件混凝土存在的缺陷清理至密实部位, 并将构件表面凿毛, 要求打成麻坑或沟槽, 沟槽深度不宜小于 6mm, 间距不宜大于箍筋的间距或 200mm;

2) 当采用三面或四面外包方法加固桥梁构件时, 应将构件的棱角敲掉, 同时应除去浮渣、尘土;

3)原有混凝土表面应冲洗干净,浇筑混凝土前,原混凝土表面应以水泥浆等界面剂进行处理,以加强新、旧混凝土的结合。

应对原有和新设受力钢筋应进行除锈处理。有条件时,在受力钢筋施焊前采取卸荷或支顶措施,并逐根分区分段分层进行焊接,以减少原受力钢筋的热变形,使原结构的承载力不致遭受较大影响。

外包混凝土加固法施工不如整浇混凝土构件方便,必须采取措施,保证模板搭设、钢筋安置以及新混凝土的浇筑和振捣的质量,以达到混凝土密实要求。同时,应加强新浇混凝土的养护,养护期最好达 14d 以上。

3、施工步骤

对于板梁桥,主要考虑增设板梁底面的加强主筋和截面;对于 T 型梁桥除考虑增设梁底主筋和截面外,还须考虑设置套箍。二者施工步骤有一定区别。

采用板梁桥增大截面和配筋加固法时主要应考虑梁的抗弯截面强度不足,需在其受拉区增设补强主筋,并使其与原主筋能够连结牢固,共同工作。施工步骤如下:

1) 凿槽、配设补强钢筋。先沿着原构件底部主筋部位下面凿槽。槽不宜过宽过深,以不影响补强钢筋的放置及焊接为度,并尽量减少原主筋周围混凝土的握裹力损失。凿好槽后,剪断原有钢筋,放入补强钢筋。

2) 将补强钢筋与原主筋焊接。焊接时一般可采用焊一段空一段的间断焊接方式(焊缝长约 6~8cm),以免温度过高影响混凝土质量。剪断的钢箍可焊在补强钢筋上,使其形成较为牢固的钢筋骨架。

3) 将板梁底部混凝土表面凿毛、洗净。(为保证新旧混凝土的结合,减少因变形而产生的接合裂缝,在喷涂砂浆或浇筑混凝土前,应用压力水冲除接合部位的余灰,并使其湿润)

4) 喷涂或浇筑砂浆或混凝土予以覆盖,以形成新旧钢筋混凝土结合良好的断面。混凝土或砂浆覆盖层不宜太薄,其厚度应符合钢筋混凝土截面保护层的要求。

5) 加强新浇水泥砂浆层或混凝土层的养生工作,避免因过早行车而影响工程质量。

6) 为避免影响桥下通航、车,还可采用悬挂式脚手架的形式进行施工。施工时,在桥的两侧钢筋混凝土栏杆上系绕直径为 20mm 左右的钢丝绳,并穿过泄水孔兜住桥面,桥下一头钢丝绳捆扎圆木,上面加方木再满铺 5cm 木板作为施工作业之用,脚手顶面距梁底 2m 左右为宜。

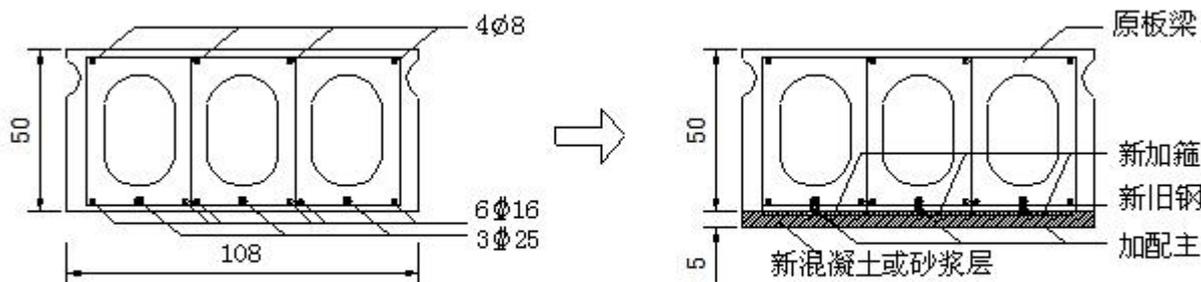


图5-2-1 某钢筋混凝土板梁加固断面示意图

图 7—1 给出了一个板梁桥加固思路，使用时可参照。

T 型梁增大截面和配筋加固一般是在梁底及腹板加设钢筋（梁的竖向设钢筋箍以加强抗剪能力），然后喷涂或浇筑一层砂浆或混凝土以增大梁截面，施工步骤如下：

1) 将梁底面的混凝土保护层凿去，将两侧腹板表面凿毛，要求将表面砂浆凿出粗纹，露出石子颗粒。凿毛后随即进行焊接钢筋及浇筑混凝土的工作，以免凿毛部位污染，影响新旧混凝土的结合。

2) 在暴露的原有主钢筋上焊接需要的补强钢筋，通过计算确定补强筋的尺寸与数量。

3) 在侧面腹板上加上需要补强的钢筋箍，通过计算确定钢筋箍的距离。

4) 用埋入梁中的销钉将钢筋箍固定，并用铁丝与纵向加固钢筋扎结起来(或焊接)。钢筋箍的上端应埋入桥板中去。

5) 立模浇筑混凝土，并恢复保护层。一般用小石子混凝土浇筑。

6) 加强新浇混凝土层的养生工作，避免因过早行车而影响工程质量。

用该法补强加固，设计中必须考虑结构分阶段受力的特点，需详细分析与计算。

该法只有在因补强加固所增加的恒载仍在原结构下缘受拉区强度许可范围内才可使用（原结构截面能承受原有恒载及因补强加固而增加的恒载；活载由最后的组合截面承受）。

第二节 桥面补强层加固法

一、概述

现有的许多中小跨径桥梁的桥面板为独立承受部分车辆荷载的构件，且采用小的横隔梁，使之存在固有的强度缺陷。由于横向刚度差（特别是桥梁超载时，桥面板由于挠曲开裂而首先损坏。另外，对于桥梁的承载能力来说，荷载的位置也是重要的，最佳的分布通常发生在荷载对称于纵向中心线。然而，由于横向体系不是无限刚性的，直接位于车辆下的纵向杆件较边杆件承受较大比例的荷载。

桥面补强层加固法先对桥面进行一定的处理（一般先凿除原桥的沥青混凝土和普通混凝土），重新浇筑一层钢筋混凝土补强层（如内掺钢纤维则更好），使其与原桥跨结构形成组合结构。其利用梁体截面的加高，增大了主梁有效高度和抗弯能力、拉压截面，改善了行车条件、桥梁横向分布荷载能力的目的。

二、施工要点

桥面补强加固的施工要点见图 7-3。

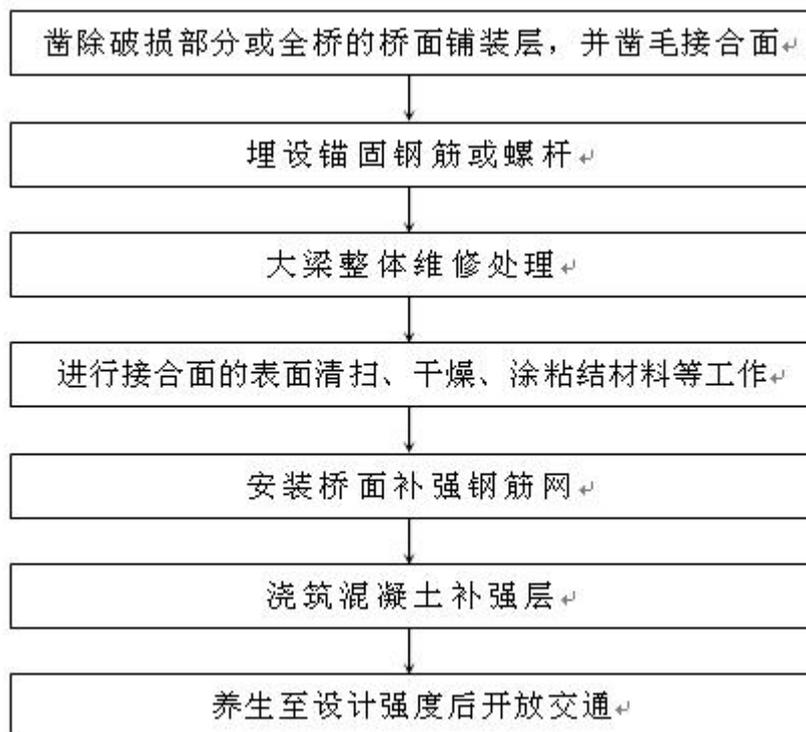


图 7-3 桥面补强层加固对策施工流程

三、设计要点及施工要求

1、设计要点

桥面补强层加固的常用方法有：加铺钢筋网与混凝土；加铺钢筋网与膨胀混凝土；加铺钢筋网与钢纤维混凝土等，其中加铺钢筋网与混凝土最为常用。桥面补强层常用加固方法及构造见表 7-1。

桥面补强层加固方法与构造

表 7-1

序号	构造图 (单位 cm)	补强层加厚方法	
		底面加厚	顶面加厚
1		-----	采用钢筋混凝土加厚,新老结合面凿毛并加设锚固钢筋
2		-----	钢纤维混凝土加厚,新老结合面凿毛并加设锚固钢筋
3		喷射钢纤维砂浆	聚合物混凝土加厚,新老结合面凿毛并加设锚固钢筋
4		焊接钢筋网并喷射钢纤维混凝土	膨胀钢筋混凝土加厚,结合面凿毛处理并加锚固钢筋
5		-----	膨胀钢筋混凝土加厚,结合面凿毛处理并加锚固钢筋
6		喷射 钢纤维砂浆	-----
7		焊接钢筋网并喷射钢纤维砂浆	-----

加固设计计算的前提是,补强层能与桥梁面板结合良好,能成为一个牢固的整体。加铺层的厚度与配筋视加固需要而定,一般补强层的厚度采用 8~20 厘米。加固设计时还应考虑补强层作为新增力的恒载及新、老混凝土引起的收缩差等。

2、施工要求

桥面补强层加固法能否达到预期效果,关键取决于新旧混凝土能否牢固形成一个整体。所以,补强层施工的关键就是从施工工艺和采取一定的有效措施来确保新旧结构层共同受力的可靠性和耐久性,具体措施如下:

- 1) 对桥梁面进行凿毛处理,先凿去桥面铺装,然后再凿去部分梁顶面混凝土,使表面粗糙,呈齿状形,箍筋外露,凹槽约 2cm 左右;
- 2) 加固前必须对梁顶病害进行处理,还需清扫、冲洗结合面并使之干燥;
- 3) 在预埋锚固筋时,先用钢筋探测器探测钢筋混凝土保护层厚度和钢筋位置(以避免钻孔时损坏梁的主筋),一般按纵横间距为 50cm 交叉布置,并按计算孔深用电钻钻孔,清孔并注入植物胶或化学锚固胶,最后埋入膨胀螺栓作为抗剪栓钉;
- 4) 为使新旧混凝土粘结良好,可在凿毛后的混凝土表面涂上一层环氧胶液胶结剂;
- 5) 按抗裂缝要求配备钢筋网,钢筋网的钢筋直径可视实际情况适当加大;
- 6) 可采用 C40 干硬性混凝土或 C35 钢纤维混凝土浇筑补强层,以减小新浇混凝土的收缩,从而减小新旧混凝土之间产生的差动收缩力,提高补强效果;
- 7) 补强层混凝土浇筑后,应加强养护,避免使补强层过早受力。

四、优缺点

桥面补强层加固法主要适用于中、小跨径的梁式桥和拱式桥;对于大跨径桥梁加固效果不十分明显,必须与其他加固方法配合使用;单车道桥梁使用该法时因需封闭交通,故应慎重选用。桥面补强层加固法的优、缺点如下:

- 1) 该方法有着施工简便,经济有效等优点。
- 2) 该方法可能会使桥面标高增加、引道坡度增大、以及恒载增加(应通过计算判断桥面增厚后是否可以提高桥梁的承载能力。若恒载的增加影响更大,则可考虑采用其他加固方法),为了减少补强层增加的恒载,往往需先将原有桥面铺装层凿除。
- 3) 该方法凿除原有铺装后,必须在原梁上植筋或埋设锚栓以保证新老混凝土结合良好;必须在新的桥面铺装上设置钢筋网,以解决新浇混凝土的收缩等问题;这两点使补强层与主梁良好结合,共同受力的措施较为繁琐。

第三节 粘贴钢筋加固法

粘贴钢筋加固法一般用在桥梁结构抗拉强度不足,受拉部位开裂时;该方法在受拉部位粘贴钢筋,以增强桥梁抗弯部位外纤维的抗拉能力;该方法一般用环氧砂浆来粘贴钢筋(环氧砂浆的厚度以不使钢筋外露为准);该方法常在原结构上设置一定间距的短钢筋锚杆,以便于施工并使加强钢筋与原结构更好地共同工作。

一、施工要点

粘贴钢筋加固法施工要点见图 7-4。

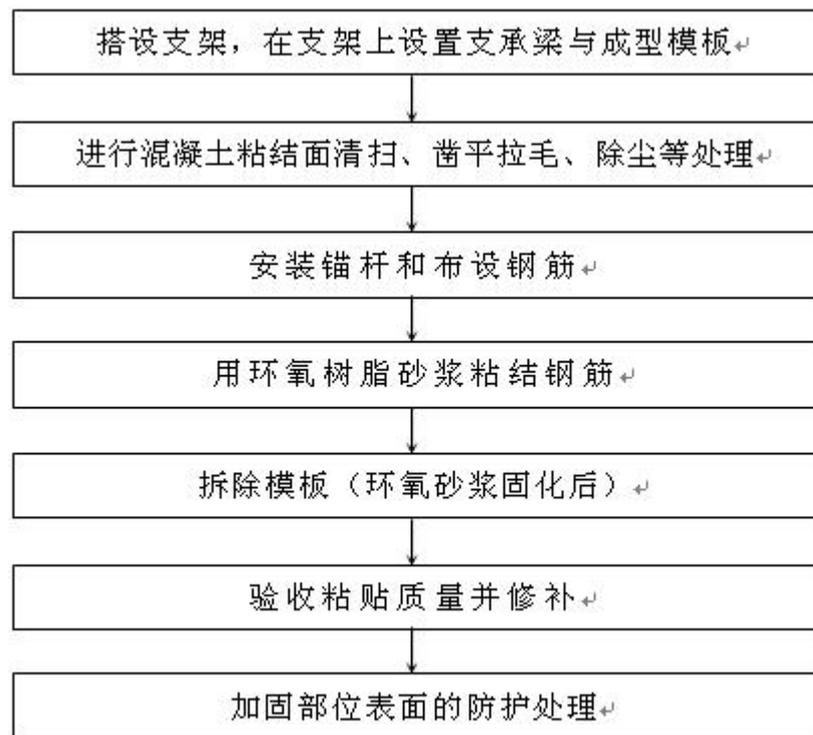


图 7-4 粘贴钢筋加固对策施工流程

二、施工要求

粘贴钢筋加固法对施工要求较高，应满足以下施工要求：

- 1) 严格控制施工温度,以 $15^{\circ}\text{C}\sim 28^{\circ}\text{C}$ 为宜, 温度偏低时, 应采用加温措施(紫外线灯)；
- 2) 严格控制胶结材料的配合比，必要时辅以稀释剂、增塑剂、固化剂等外加剂；
- 3) 钢筋布设前，应先除锈并用丙酮擦洗干净，放在模板上扎成排栅（或在桥下点焊成排栅），在钢筋排栅表面涂一层环氧树脂胶浆,用锚杆固定在构件的底面上；
- 4) 涂胶时应均匀用力刮平,及时将气泡挤出,以免形成空洞等缺陷；
- 5) 粘贴前应在模板上铺一层塑料薄膜（便于脱模），将环氧树脂砂浆均匀地摊铺在模板上，厚度稍大于设计值。粘贴时，在模板与支承梁间打入木楔，将模板顶起压在构件底面的补强钢筋上，使环氧砂浆压入钢筋间隙，与原结构混凝土粘为一体；
- 6) 应及时对加固部位表面进行防护处理,先清除补强钢筋表面的锈斑和尘污，然后涂一层环氧树脂薄浆罩面，再涂两层防锈漆在上面进行保护。也可在加固部位喷射一层混凝土保护层，以防止补强钢筋的锈蚀。

三、优缺点

粘贴钢筋加固法一般情况下用得不多，中小桥中比较常见，且和粘贴钢板可以互换，但这一加固方法有其自身的优缺点：

- 1) 施工简便、周期短；
- 2) 所占空间小，不减小桥梁净空；
- 3) 粘贴加固部位、范围与强度可视需要灵活设置；
- 4) 可在不影响或少影响交通的情况下施工；
- 5) 补强钢筋与结构物粘附性能较好；
- 6) 补强钢筋加工成型容易、用钢量少；
- 7) 补强钢筋容易锈蚀，必须对其作防锈处理。

第四节 粘贴玻璃钢加固法

粘贴玻璃钢加固法用环氧砂浆来粘贴玻璃纤维布以形成玻璃钢；该方法可以大大提高粘结层的抗拉强度。

一、施工要点

粘贴玻璃钢加固法的施工要点见图 7-5。

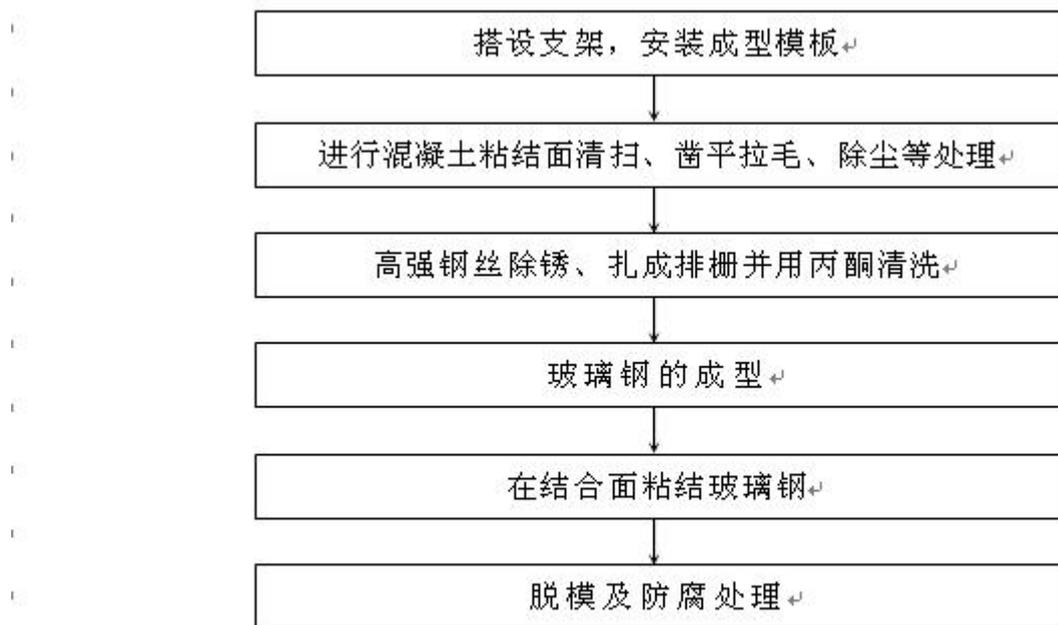


图 7-5 粘贴玻璃钢加固对策施工流程

二、施工要求

粘贴玻璃钢加固法的施工要求有如下几点：

- 1) 严格控制施工温度,以 $15^{\circ}\text{C}\sim 28^{\circ}\text{C}$ 为宜,温度偏低时,应采用加温措施(紫外线灯)；
- 2) 严格控制胶结材料的配合比，必要时辅以稀释剂、增塑剂、固化剂等外加剂；

3) 高强钢丝除锈后绑成排栅，用丙酮擦洗并涂上环氧树脂胶浆。

4) 应在成型模板上铺一层塑料薄膜，在其上先刷一层环氧胶浆，铺设第一层玻璃纤维布，压平挤出气泡再刷第二层环氧胶浆，铺第二层玻璃纤维布。当铺至所需厚度一半时，即可铺放加工好的高强钢丝排栅，并用环氧砂浆填平排栅的空隙，刮平后再铺设其余几层玻璃纤维布。

5) 粘贴成型的玻璃钢时，应先在玻璃钢顶面铺一层环氧砂浆，用支撑由中部向两端依次均匀地顶起模板，使玻璃钢紧贴在构件表面上，至环氧砂浆从缝隙中溢出，再用最外层宽玻璃纤维布将溢流的环氧砂浆包敷在梁的腹板上。

三、优缺点

粘贴玻璃钢加固法也有其自身的优缺点：

- 1) 施工简便、周期短；
- 2) 所占空间小，不减小桥梁净空；
- 3) 粘贴加固部位、范围与强度可视需要灵活设置；
- 4) 可在不影响或少影响交通的情况下施工；
- 5) 粘贴玻璃钢加固法可大大提高粘结层的抗拉强度；
- 6) 粘贴玻璃钢加固中，玻璃钢的弹性模量低于混凝土的，受力时前者的伸长度大于后者，因而其控制结构变形的能力较差。

第五节 粘贴钢板加固法

粘贴钢板加固法是用环氧树脂系列粘结剂将钢板粘贴在钢筋混凝土结构物的受拉缘或薄弱部位，使之与原结构物形成整体共同受力，以提高其抗弯、抗剪能力及刚度，改善原结构的钢筋及混凝土的应力状态，限制裂缝的进一步发展，从而提高桥梁的承载能力与耐久性。

一、施工要点

粘贴钢板加固法施工要点见图 7-6。



图 7-6 粘贴钢板加固对策施工流程

二、适用范围

在梁底粘贴钢板加固，可提高梁的抗弯能力。该加固方法施工简便，不减少桥下净空，可在不影响或少影响正常交通情况下进行梁底粘贴纵向钢板(或钢筋)加固，加固示例见图 7-7。

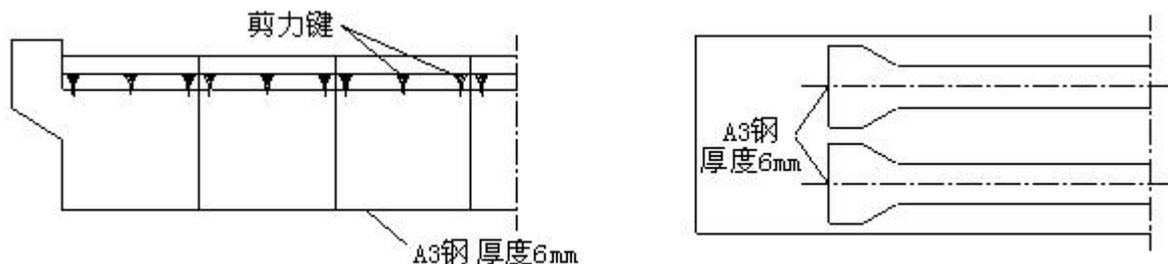


图 5-6-2 在梁底粘贴纵向钢板加固

在箱梁或 T 梁(或工字梁)梁腹粘结斜向钢板可使钢板与混凝土整体受力，提高梁的整体刚度与抗剪强度。为防止梁体内原有钢筋或预应力钢索的锈蚀，粘贴钢板前应先对裂缝处灌入环氧树脂浆液，先封闭裂缝后贴钢板，加固示例见图 7-8。

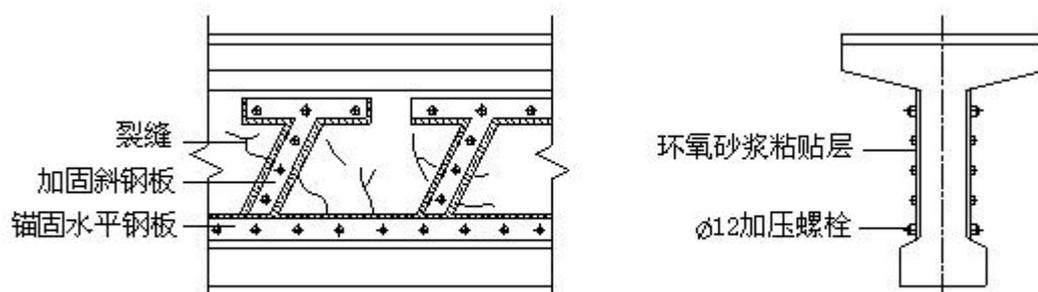


图 5-6-3 在梁腹粘贴斜向钢板

在悬臂梁牛腿处或挂梁端部粘贴钢板可增强构件的抗剪强度(支座、牛腿处出现裂缝时)，钢板通常为块状(A)或带状(B)。带状钢板设置方向一般与主拉应力方向平行(即与剪切裂缝方向重直)，跨缝布置上下端设水平锚固板，以提高端部的锚固强度，钢板厚度一般为 10~15mm。加固示例见图 7-9。

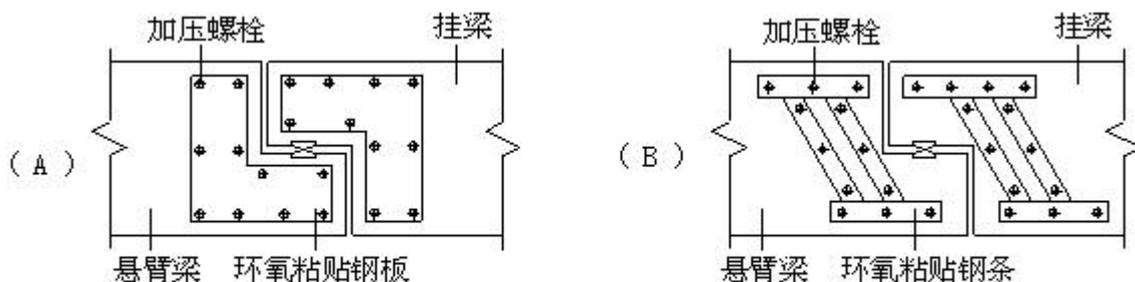


图 7-9 在悬臂梁牛腿处或靠近支座主梁腹板粘贴钢板(条)

三、材料要求

粘贴钢板加固法对材料要求较高，具体为：

- 1) 加固所用粘结剂，必须粘结强度高、耐久性好、具有一定弹性；
- 2) 加固所用钢板，一般以 3 号钢或 16 锰钢为宜。钢板、连接螺栓及焊缝的强度设计值，应按现行国家标准《钢结构设计规范》（GBJ 17—88）规定采用；
- 3) 粘贴钢板加固基层的混凝土强度等级不应低于 C15；
- 4) 粘结钢板在加固点外的锚固长度，除满足计算值外，尚应保证一定的构造要求。对于受拉区，不可小于 200t (t 为钢板厚度)，同时不可小于 600mm；对于受压区，不可小于 160t，亦不可小于 480mm。

四、施工要求

粘贴钢板加固法的施工要求比较严格，具体要求有：

- 1) 严格控制施工温度,以 15℃~28℃为宜,温度偏低时,应采用加温措施(紫外线灯)。
- 2) 严格控制胶结材料的配合比，必要时辅以稀释剂、增塑剂、固化剂等外加剂。
- 3) 需粘结钢板处的混凝土表面应清凿平顺(亦能看到混凝土粗骨料为宜)。
- 4) 用于粘贴的钢板可用钢丝刷或喷砂除锈(必须彻底)，并使表面有一定粗糙度。
- 5) 粘贴时应保证环氧砂浆饱满。一般在混凝土表面及钢板表面分别涂刷一层均匀的环氧砂浆薄层，合计层厚约 2mm，然后加压使之密贴并使之固定(粘结剂固化前应有措施使钢板固定并夹紧)。
- 6) 粘贴前应在混凝土上钻孔并安装锚固螺栓(兼作固定件和压紧件)，要求埋设牢固，具有可靠的抗拔力，以保持粘贴钢板时有效地加压，同时还可帮助钢板克服剪切，有利于粘贴的耐久作用。
- 7) 对钢板外表面进行防锈处理和被加固部位构件的外观处理。
- 8) 粘结剂应密封保存、远离火源并避免阳光直接照射(可配备灭火器)。
- 9) 施工人员应穿工作服，戴防护口罩和手套；施工现场应保护良好的通风，对于受压区粘钢加固，当采用梁侧粘钢时，钢板宽度不宜大于梁高的 1 / 3。

五、计算要点

1、受弯构件的计算

受弯构件截面强度不足时可在受拉区表面粘结钢板加固，如图 7-10 所示。其受压区高度和截面受弯承载能力可按式 (7-1)、(7-2) 确定。



图 7-10 正截面受拉区粘贴钢板加固

$$f_{y0} A_{s0} + 0.9 f_{qv} A_a - f_{y0}' A_{s0}' = f_{cm0} b_0 X \quad (7-1)$$

$$M = f_{cm0} \cdot b_0 X \left(h_0 - \frac{X}{2} \right) + f_{y0}' A_{s0}' (h_0 - a_{s0}') \quad (7-2)$$

式中 f_{y0} —— 原构件纵向钢筋抗拉强度设计值；

A_{s0} —— 原构件纵向受拉钢筋截面面积；

f_{qv} —— 加固钢板抗拉强度设计值；

A_a —— 加固钢板截面面积；

f_{y0}' —— 原构件纵向受压钢筋抗压强度设计值；

A_{s0}' —— 原构件纵向受压钢筋截面面积；

f_{cm0} —— 原构件混凝土弯曲抗压强度设计值；

X —— 混凝土受压区高度；

b_0 —— 原构件的宽度；

h_0 —— 原构件的有效高度；

a_{s0}' —— 原构件的受压区保护层厚度；

0.9 —— 考虑加固钢板的应力滞后、以及撕脱力影响等强度折减系数。

2、钢板锚固长度计算

受拉钢板加固点外锚固粘结长度 L_{aE} 的计算见下式：

$$L_1 \geq 2 f_{qv} t_a / f_{cv} \quad (7-3)$$

式中 t_a —受拉加固钢板厚度；

f_{cv} —被粘混凝土抗剪强度设计值；

2—锚固区剪应力分布不均匀系数，近似按三角形考虑。

若钢板粘结长度无法满足上述要求，可在其端部锚固区粘结 U 型箍板锚（或螺栓），如图 7-11 所示。此时，锚固区的长度应满足下列规定：

3、斜截面用粘接钢板加固计算

构件斜截面受剪承载力不足时，可按图 7-12 所示的方法粘接并联 U 型箍板进行加固。此时斜截面受剪承载力按式（7-6）计算：

$$V < V_0 + 2 f_{qv} A_{al} L_u / S \quad (7-6)$$

同时，必须满足以下条件：

$$L_u / S \geq 1.5 \quad (7-7)$$

式中 W —斜截面剪力设计值；

V_0 —原构件斜截面受剪承载力设计值；

A_{al} —单肢箍板截面面积；

S —箍板轴线间距。

六、优缺点

粘贴钢板加固法有如下的优缺点：

- 1) 施工简便、周期短；
- 2) 所占空间小，不减小桥梁净空；
- 3) 粘贴加固部位、范围与强度可视需要灵活设置；
- 4) 可在不影响或少影响交通的情况下施工；
- 5) 钢板起到了补强钢筋的作用，提高了桥梁的承载能力与耐久性。
- 6) 粘结剂的质量及耐久性是影响加固效果的关键因素，应充分重视。

第六节 粘贴碳纤维加固法

粘贴碳纤维加固法是利用粘结剂将碳纤维增强复合材料（CFRP）粘贴在混凝土构件表面，如图 7-13 所示。当结构荷载增加时，碳纤维布因与混凝土协调变形而共同受力，从而提高了混凝土构件的承载能力与刚度，对桥梁起到了加固作用。

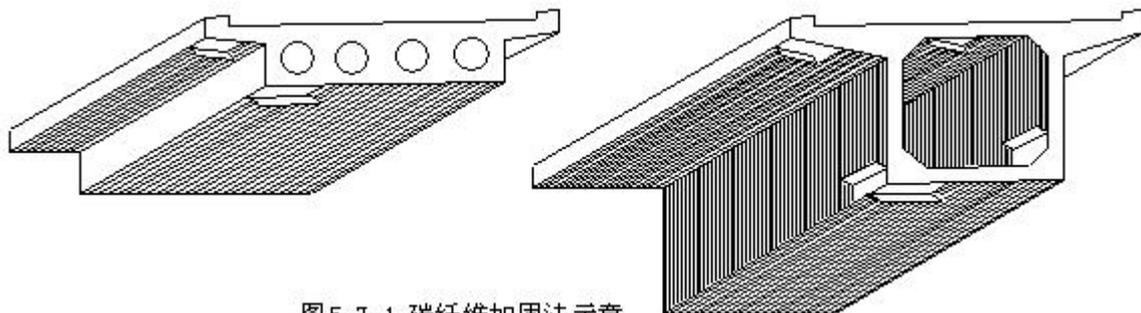


图 5-7-1 碳纤维加固法示意

该加固法采用了新材料、使用了新工艺，且粘贴效果良好，必将更广泛地应用于桥梁结构的加固之中。

一、适用范围

粘贴碳纤维加固法可用来加固主梁、墩台等承重构件，也可用来加固非承重构件，详见图 7-14。

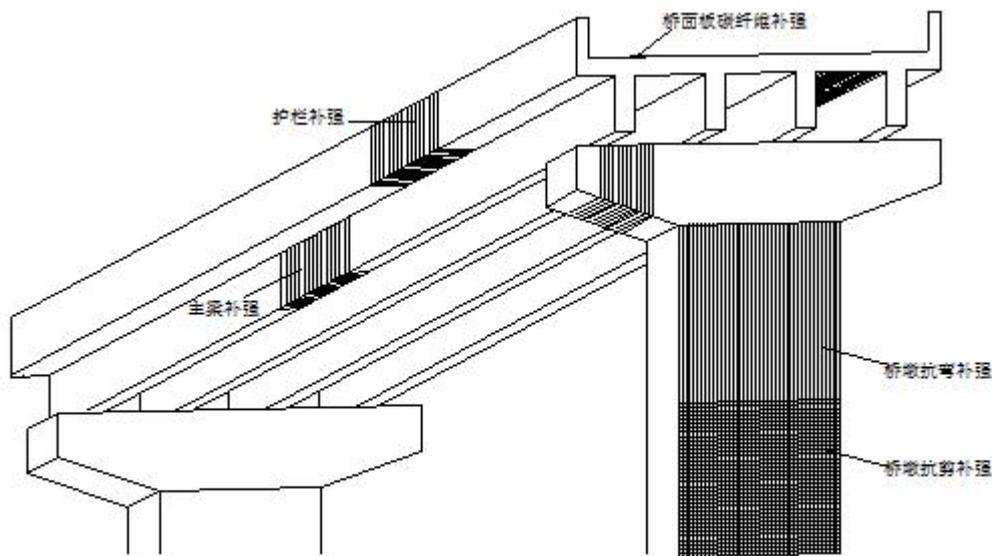


图 5-7-2 碳纤维加固混凝土的部位示意

碳纤维片材主要用于混凝土桥梁的基本构件和节点的加固补强以提高构件的抗弯承载力，抗剪承载力以及受压构件的轴向抗压承载力，提高构件的刚度以及延性等。此外可用于控制混凝土构件裂缝宽度的发展。

碳纤维片材（特别是碳纤维布）质量轻且厚度薄，具有一定柔度，可在混凝土桥的某些部位灵活粘贴加固，碳纤维布的适用的部位如图 5-7-2 所示。

二、施工要点

粘贴碳纤维加固法的施工要点见图 7-15。

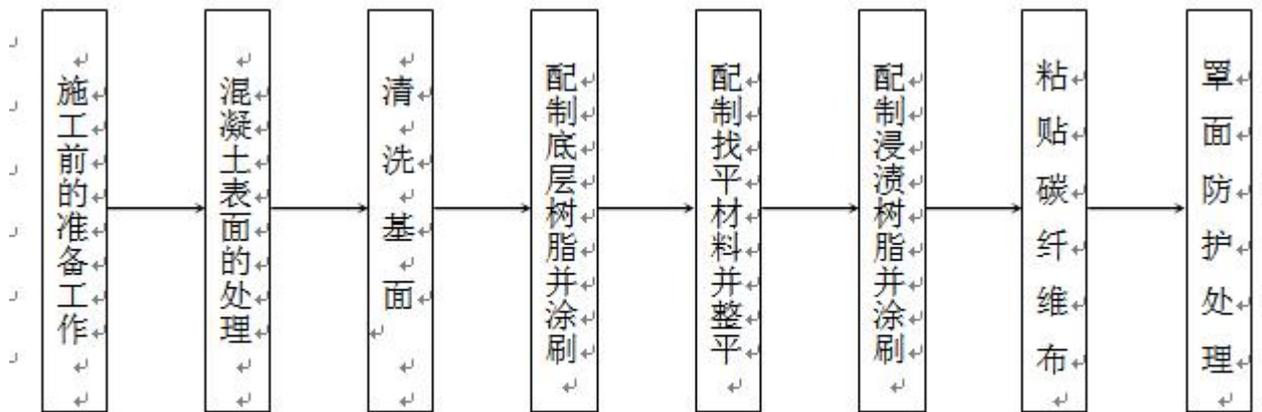


图 7-15 粘贴碳纤维加固对策施工流程

粘贴碳纤维加固法具体施工工艺说明如下：

1) 施工前的准备：熟悉施工现场和被加固构件混凝土的实际情况，拟出施工大纲；提前准备好所需的纤维布、配套树脂、机具等工作。

2) 混凝土表面的处理：用砂轮机清除和打磨混凝土表面的劣化层，凿除被加固构件表面的剥落、疏松、蜂窝、腐蚀等部分混凝土，并用修复材料将表面修复平整；在裂缝部分注入环氧树脂浆进行修补；基面的错位与凸出部分要磨平（可在锚固加强区每隔 5cm 刻痕一道，以加强粘贴效果），转角部位要进行倒角处理并打磨成圆弧状，圆弧半径不应小于 2cm；清除工作面的灰尘并保持干燥。

3) 清洗基面：用钢丝刷刷去表面松散浮渣，再用压缩空气除去粉尘；用丙酮或无水酒精擦拭表面，也可用清水冲洗，保证其充分干燥。

4) 配制底层树脂并涂刷：按比例准确配制好底胶并搅拌均匀，注意一次调和量在规定时间内用完（超过时间的绝不可使用，以确保粘接质量；用毛刷或特制将底层树脂均匀地涂抹在基面上，注意直横均匀涂抹，自然风干（冬季施工时胶的粘度较高，不能涂得太厚）；底胶硬化后，若表面有凸起部分，应用砂纸或磨光机打光；待底胶指触干燥后再进行下一道工序。

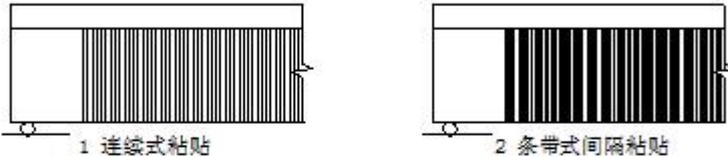
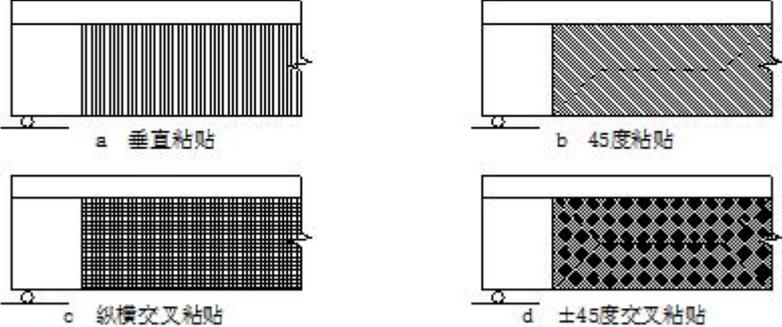
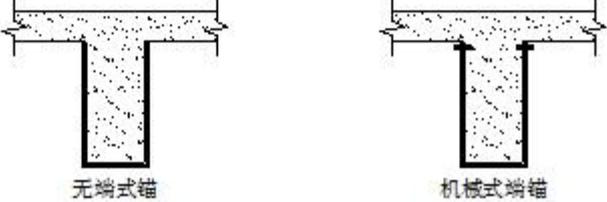
5) 配制找平材料并整平：用找平胶填补粘贴面上的凹陷部位，消除棱角；用找平材料将转角处修复为光滑的圆弧；待找平胶指触干燥后再进行下一道工序。

6) 配制粘结树脂。

7) 粘贴碳纤维布（碳纤维片）：待粘贴面上划出各层位置；按设计尺寸裁剪碳纤维布，根据现场施工经验和作业空间确定下料长度，若需接长时，接头的长度一般不小于 15cm；裁剪好的纤维布必须呈卷状妥善摆放，不得展开平铺放置；配制浸渍树脂并均匀涂抹于所要粘贴的部位；粘贴碳纤维布时，应依设计位置由上而下，由左至右有秩序地粘贴（见表 7-2），用一次性软毛刷或特制滚筒沿纤维方向多次涂刷，挤去气泡，并使浸渍树脂充分浸透纤维布，涂刷时不得损伤纤维布；多层粘贴重复上述步骤，待纤维表面指触干燥时即进行下一层的粘贴；即时观察贴片是否粘贴密实，若发现有间隙或气泡，应及时处理。

8) 罩面防护处理：粘贴完碳纤维布后，即时在最后一层的碳纤维布表面再直横均匀涂抹一层浸渍树脂，并使其自然风干；确保贴片表面已充分风干结合后，

在其表面涂抹罩面胶或采取其它措施处理,以保证防护材料与原有纤维布之间有可靠的粘结及其各层胶的耐久性。

横断面形式	 <p>1 单面贴 2 双面贴 3 U型包贴</p>
补强方式	 <p>1 连续式粘贴 2 条带式间隔粘贴</p>
粘贴纤维方式	 <p>a 垂直粘贴 b 45度粘贴 c 纵横交叉粘贴 d ±45度交叉粘贴</p>
端锚固定形式	 <p>无端式锚 机械式端锚</p>

三、施工材料

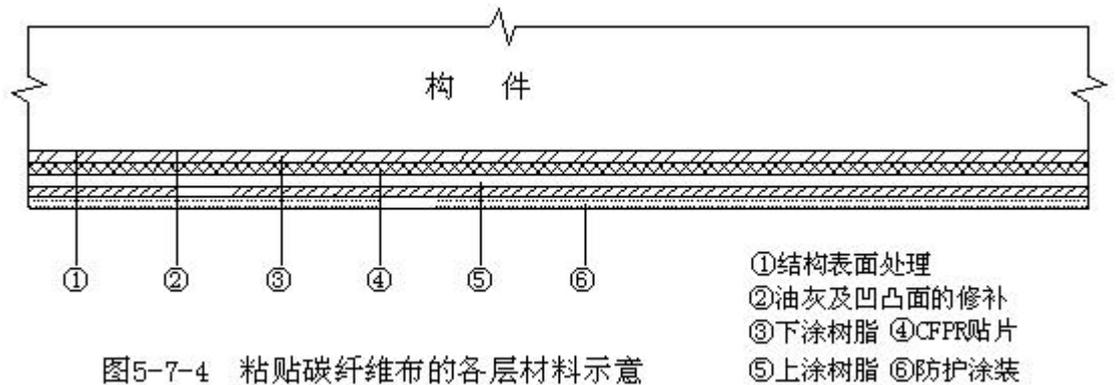
粘贴碳纤维加固法施工材料有以下几种:

1、碳纤维复合材料

加固混凝土构件所用的碳纤维布,是由碳纤维长丝经编织而制成的柔软片材。碳纤维布在编织时,将大量的碳纤维长丝沿一个主方向均匀平铺,用极少的非主方向碳纤维丝将主方向碳纤维丝编织连接在一起,形成很薄的以主纤维方向受力的碳纤维布。碳纤维布的抗拉强度一般应达到 3550MPa,弹性模量为 2.35×10^5 MPa。根据碳纤维布的品质不同,其厚度在 0.11~0.43mm,幅宽在 20~100cm,卷材长度为 50~100m。

2、粘结材料

粘结材料的性能是保证碳纤维布与混凝土共同工作的关键，也是两者之间传力途径中的薄弱环节。粘结材料应有足够的刚度与强度以保证碳纤维与混凝土间剪力的传递，同时应有足够的韧性以避免因混凝土开裂导致脆性粘结破坏。粘结材料还应能在一般气候条件下固化，且固化时间合适(一般保证有3小时左右)，对组分含量不敏感，具有适宜的流动性和粘度，固化收缩率小。粘结材料主要包括底涂胶、找平胶、浸渍树脂和罩面胶(见图7-16)等四种。



1) **底涂胶**：在处理好的混凝土表面上，涂一层很薄的底涂胶，既可以浸入混凝土表面，强化混凝土表面强度，又可以改进胶接性能，使混凝土与碳纤维布能够更好的粘接。底涂胶必须具有很低的粘度，以及与混凝土良好的粘结性能，以便涂刷后，胶粘剂能渗入混凝土结构中。(为保证性能，应尽量避免使用溶剂型胶)

2) **找平胶**：加固补强处的混凝土表面有锐利突起物、错位和转角部位等都可能降低碳纤维布补强效果。若经过基底处理仍未彻底清除，应在涂敷底层涂料指触干燥后，用找平胶进行找平。找平胶应具有优良的力学性能，以及良好的施工性能与触变性能。找平胶应易于施工操作，且不随时间的延长出现明显的变形。

3) **浸渍树脂(粘贴主胶)**：连接着底胶与碳纤维布，在粘结材料中起着至关重要的作用。浸渍树脂应具有一定的粘度，防止粘贴的碳纤维布塌落而形成空洞或空隙；浸渍树脂应具有良好的触变性，易于施工且不会发生明显的滴滴现象；浸渍树脂应具有良好的渗透性与相容性，以利于浸透碳纤维布，形成复合性整体，共同抵抗外力作用。

4) **防护涂装(罩面胶)**：保证施工表面的美观和碳纤维布的完好无损。所选材料应能涂敷在碳纤维布表面，并不脱层，不掉落，能长期在冷热干湿的空气中稳定，防止复合材料被紫外线直接照射。其选择范围较大，丙烯酸体系、聚氨脂体系、不饱和聚脂体系、有机硅、有机氟体系等都适合

四、施工要求

粘贴碳纤维施工的具体要求有：

1) 被加固构件的基面应平整且具有一定强度(一般基面混凝土强度不低于C15)。

2) 加固用的碳纤维布一般不宜采取沿主纤维方向的搭接(特别是对受拉构件和受弯构件受拉区的加固)；搭接部位应避开构件应力最大区段，搭接长度不应小于100mm，且搭接端部应平整无翘曲；多层搭接的各层接口位置不应在同一截面，每层接口位置的净距宜大于200mm。

- 3) 应注意底涂胶、找平胶、粘贴主胶、罩面胶等胶粘剂间的相容性。
- 4) 粘贴施工应在气温高于 5℃ 且为晴天时进行。
- 5) 施工人员应穿工作服,戴防护口罩和手套;施工现场应保护良好的通风。

五、力学要点

碳纤维复合材料 (CFRP) 通常由纤维和基体组成。碳纤维复合材料的力学特点是其应力应变完全弹性,不存在屈服点或塑性区。碳纤维材料具有高强、轻质、耐腐蚀、耐疲劳等优异的物理力学性能,但也存在着某些弊端。

抗拉性能优良的碳纤维布粘贴到梁体底面或箱梁内壁后,其与原结构内布置的钢筋一道共同承受拉力,提高了桥梁的承载能力。

沿桥梁的主拉应力方向(或与裂缝正交方向)粘贴碳纤维布,两端分别设置锚固端,可以约束裂缝的扩展,提高了构件的抗弯刚度、改善了梁体的受力状态。

试验研究证实,碳纤维布能够提高混凝土梁抗剪承载力,其作用机理与箍筋类似,同时还能明显改善构件的变形性能,增强构件的变形能力。

碳纤维布加固混凝土构件,在提高其受弯承载力的同时还可能影响到受弯构件的破坏形态。当碳纤维布用量过多时,构件的破坏形态将由碳纤维被突然拉断或剥离引起的破坏转变为混凝土被突然压碎破坏。因为这种破坏的突然性(拉断等脆性破坏),碳纤维加固的承载力极限状态不能按普通钢筋混凝土的定义,一般应按碳纤维抗拉强度的 2/3 进行抗弯承载力计算。

碳纤维为完全弹性材料,其与钢筋共同工作时会减弱钢筋塑性性能对构件延性的影响。碳纤维布用量过多,钢筋混凝土构件的延性将有所降低。

六、设计要点

采用碳纤维布加固桥梁,目前一般的计算方法是将碳纤维布按照一定的标准(例如强度或允许应力)近似换算成一定用量的钢筋,然后按照传统的钢筋混凝土受力分析模型进行理论分析。近似方法在一般情况下是适用的。

碳纤维布加固用量,可按式(7-8)估算:

$$A_{cf} = A_s (R_y / R_{cf}) \quad (7-8)$$

式中 A_{cf} ——碳纤维布用量(面积);

A_s ——为抵抗不足弯矩所需的钢筋面积;

R_y ——钢筋的抗拉设计强度;

R_{cf} ——碳纤维布抗拉设计强度。

除按上式估算的碳纤维布加固用量(面积)外,还必须考虑必要的锚固长度和搭接长度所需面积,以及必要的边、角废料等裁剪损耗等。

七、优缺点

与传统的加固方法相比,采用碳纤维布加固桥梁能最小程度的改变原有结构的应力分布,保证在设计荷载范围内与原结构共同受力。

碳纤维布的自重仅为 $200-300\text{g}/\text{m}^2$ ，设计厚度为 $0.111\sim 0.167\text{mm}$ ，几乎不增加结构自重和截面尺寸，几乎不改变桥下的净空高度，而且碳纤维布可以在一个部位重叠粘贴，充分满足补强的要求，这一点比传统加固方式更加优越。粘贴碳纤维加固法具有良好的适应性，可适应不同构件形状，成型很方便，如对斜、弯、坡及异型结构的补强，碳纤维布因随型性极强，可以随结构外形变化任意施工，降低了施工难度，缩短了施工工期；又如当箱梁内部加固作业因空间受到限制，无法安置大型设备、模板、夹具或支撑等，使用该方法，施工起来简单易行。加固时不必对原结构打孔和埋设锚固螺栓，因而对原结构不会造成新的损伤。粘贴碳纤维加固法具有良好的耐腐蚀性，寿命较长，可以在不利环境下使用，并便于养护。碳纤维会影响到受弯构件的破坏形态及其延性。

就目前来看，碳纤维材料价格偏高，加固时应进行经济技术比较；另外，粘贴碳纤维加固法对施工工艺要求很高，非专业施工单位难以承担。

第七节 体外预应力加固法

钢筋混凝土梁式桥通常包括简支梁(T型梁、少筋微弯板组合梁、 π 形梁及板梁等)、悬臂梁和连续梁等。当其存在结构缺陷，尤其是承载力不足或需要提高荷载等级，即需要对桥梁主要受力结构进行加固时，可考虑采用体外预应力加固对策，即在梁体外部(梁底与梁两侧)设置钢筋或钢丝束，并施加预应力，以改善桥梁的受力状况，达到提高桥梁承载能力的目的。

一、加固方法

体外预应力加固梁式桥，实际上亦是改变了梁体原有受力体系的加固方法。所以，根据加固对象的不同，该加固法又可分为预应力拉杆加固和预应力撑杆加固。

预应力撑杆加固主要用于提高轴心受压以及偏心受压钢筋混凝土柱的承载力，例如，排架桩式桥墩、桥台以及拱桥的柱式腹拱墩等。

预应力拉杆加固主要用于受弯构件，根据被加固结构受力要求不同，预应力拉杆加固法又分为三种，即水平拉杆加固、下撑式拉杆加固和组合式拉杆加固。

预应力水平拉杆加固适用于正截面受弯承载力不足的加固，同时，可减小梁的挠度，缩小原构架的裂缝宽度。对于钢筋混凝土T梁或I字梁桥，可采用在梁的受拉区，即在梁底增设水平的预应力拉杆的补强方法进行加固。当安装好拉杆并通过一定的装置进行收紧张拉，使得拉杆产生较大的纵向拉力并传至梁底，使梁底受拉区受到拉杆顶压应力的作用，梁中受拉应力也就相应减少。从加固原理看，这种补强加固法可提高梁体的正截面抗弯承载力，但不能提高支座附近斜截面抗剪承载能力。

预应力下撑式拉杆加固适用于斜截面受剪承载力、正截面受弯承载力均不足的受弯构件加固，同时又可减小梁的挠度，缩小原构件的裂缝宽度。该加固对策的主要特点是，将水平的补强拉杆在接近支座处向上弯起，然后将拉杆锚固于梁板支座的上部，弯起点处设置传力构造，再施加预拉应力。补强拉杆一般用粗钢筋做成，亦有用型钢的。由于预应力下撑式拉杆补强布置较为合理，拉杆中施加预应力后，通过拉杆弯起点的支托构件传力，于梁结构产生作用力，起到卸载作

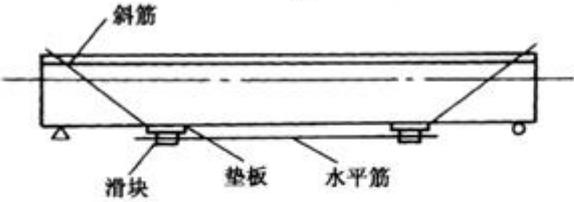
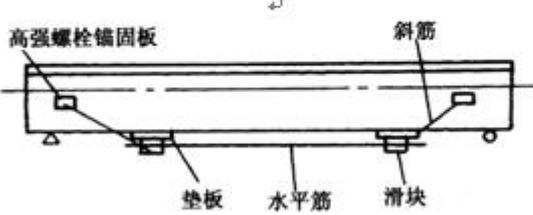
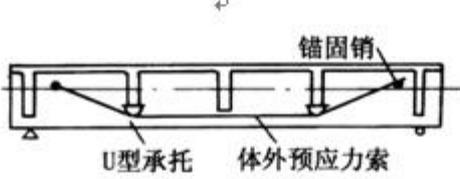
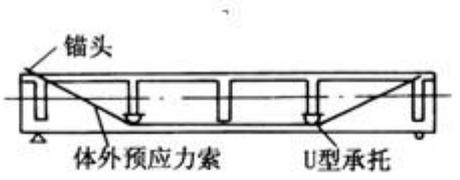
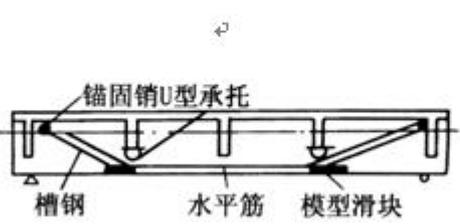
用。这种加固方法的优点是对受弯构件垂直截面上的抗弯强度和斜截面上的抗剪强度同时起到补强作用，构造做得妥善时可将原结构的承载能力提高较大。

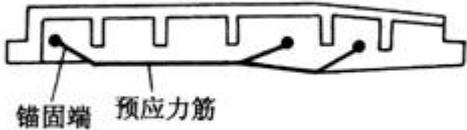
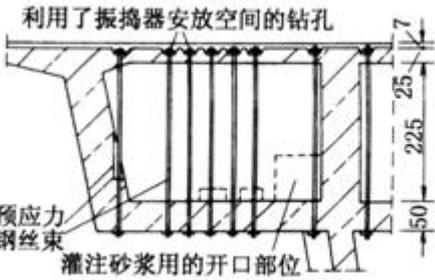
预应力组合式拉杆加固适用于正截面受弯承载力严重不足而斜截面受剪承载力略为不足的加固，同时亦可减小受弯构件的挠度，缩小裂缝的宽度。该对策一般使用两根水平拉杆，两根下撑式拉杆，因其即布置有水平补强拉杆，又布置有下撑式补强拉杆，使之能够同时提高桥梁结构的抗弯和抗剪强度，从而可大幅度地提高桥梁的承载能力。

加固方法详见表 7-3。

体外预应力加固对策常见形式及适用范围

表 7-3

对策及适用范围		简图	说明
钢筋混凝土板梁加固	锚固于梁顶		<p>水平拉杆和斜杆由二根粗钢筋组成，该项应力加固体系。斜杆与滑块固定，通常是水平筋牵动斜杆受力。杆的顶端多锚固在梁上，见上图，也有锚固在腹板上的，见下图。</p>
	锚固于梁腹		
钢筋混凝土T梁工字梁加固	锚固于梁腹		<p>采用钢丝绳或钢绞线作为预应力索，用葫芦张拉水平筋并锚固于梁腹。</p>
	锚固于梁顶		<p>同样采用钢丝绳或钢绞线作为预应力索，用千斤顶张拉并锚固于梁顶部。</p>
	锚固于梁腹		<p>斜杆采用刚度大的槽钢并与楔形块构成一体，水平筋采用粗钢筋、钢丝绳或高强钢丝等，用</p>
对策及适用范围		简图	说明

悬臂 钢筋 混凝土 梁加固	锚固 于梁 腹		以钢绞线作为预应力筋置于梁底部，锚固设于腋梁上。张拉时可端同时进行。张拉锚固成后将钢绞线套入无缝钢管再压浆防护。
箱梁 体外 预应力 加固	锚固 于箱 上下 顶		针对于箱梁腹板受剪力、提升力和割裂力的不足，以沿主梁和梁腹板布置的竖向预应力钢丝束对其追加预应力。

二、加固原理

对于需要加固的钢筋混凝土梁式桥，常在梁底或梁侧下部增设预应力加劲钢丝索或预应力粗钢筋补强，并分别锚固在梁的两端，通过设置一定的联结构件使预应力拉杆（钢丝索或粗钢筋）与梁体构成一个衍架体系，成为一次超静定结构，从而抵消部分恒载应力，起到卸载作用，从而较大幅度地提高桥梁的承载能力。

通过在梁体外布设钢材的拉杆或撑杆，并与被加固的梁体锚固联结，然后施加预应力，强迫后加的拉杆或撑杆受力，从而改变原结构的内力分布，并降低原结构应力水平，使结构总承载力显著提高，且可减少结构的变形、裂缝宽度缩小甚至完全闭合。这就是体外预应力加固梁式桥梁，并能提高其承载能力的机理。

体外预应力下撑式拉杆加固补强方法是最常用的一种，它可视为改简支梁为上承式桁架梁。桁架的上弦即为原结构主梁，下弦是新增设的水平拉杆，腹杆是新增的斜拉杆，把与梁体接触的垫块视为竖杆，单垫块为单柱式，双垫块为双柱式。斜杆的上端锚固位置有两种：一种锚于梁端的顶部；另一种锚于靠近端横梁处的梁肋顶部。斜杆的下端与滑块联结，滑块依赖拉杆收紧后产生的上托力和滑移时的摩擦力与上弦联结。对斜杆的张拉不是直接施加，而是随着水平拉杆张拉力增加，下端滑块产生相应的移动，使它的长度增大。当水平拉杆张拉力达到设计量后，将它的两端锚固，加固工作即告完成。在斜杆顶端和梁底垫块上作用力的水平分力共同对梁体施加偏心轴向压力。上述作用力的竖向分力所形成的力偶对梁端施加负弯矩及竖向负剪力。这些预加力可以抵消或超过恒载作用力。在车

辆通过时，这些体外拉杆是上部结构的组成部分并与原有梁体共同受力，形成超静定体系，各拉杆的张拉力将自动增加，进一步起到梁体加强作用。

三、力学要点

加固后预应力拉杆与桥梁的钢筋混凝土梁或板等构件将组成一个整体并共同受力工作。因此，补强拉杆与被补强的梁板组成了一个新复合体系，改变了结构原来的静力图形，并提高了其承载能力。

当采用预应力拉杆加固钢筋混凝土梁式桥时，加固结构的性能和受力特征，与后张法无粘结部分预应力结构相似。张拉预应力如同外力一样作用在原梁上，原梁仍承受着恒载内力；张拉预应力筋在原梁上产生的预应力内力，基本上与恒载内力相反，所以，体外预应力实际起到卸荷作用。

体外预应力筋张拉结束后，和原梁体的联结方式与程度对设计和计算梁体的承载力是很重要的。如果预应力筋仅仅在锚固点及支撑点与原梁相接触，其余均裸露在梁外工作，当梁随外载的作用增加而发生挠曲时，梁中原有钢筋亦随着原梁曲率的增加而伸长。但由于预应力筋在体外，它中间部位是与梁体脱开的，故没有发生弯曲，仍然是直的，自然其应变及应力的增加远不及梁中原钢筋快。破坏时，预应力筋的应力可能达不到屈服强度。应力可能在张拉控制应力和屈服强度之间。一般考虑，梁体破坏时，预应力拉杆的应力取为张拉控制应力。

如果在预应力筋张拉结束后，若将其用错喷混凝土和梁体浇筑在一起，形成了整体梁，则由于预应力筋处处被粘结在原梁上，可与之共同变形。所以，当随着作用在加固梁上的外荷载增加，预应力筋和梁中原钢筋以及受压区混凝土的应力都在原有的基础上增大。若预应力筋和原配筋总和在适筋范围内时，尽管预应力筋与原梁中钢筋不同时刻到达屈服点，但破坏时，两者都可达到屈服，因而其正截面强度计算方法与一般预应力混凝土梁相似。

一般来说，需加固的梁中受拉钢筋的应力已较高，梁的挠度也较大，裂缝也较宽，因而对加固拉杆施加的预应力值越高，越能改善被加固梁的受力状态，故加固拉杆张拉控制应力宜定得高些。但也不能定得过高，否则有可能在超张拉过程中，个别钢筋达到或超过其实际屈服强度，以致发生危险。

预应力加固与一般预应力混凝土梁一样，也存在预应力损失，但两者是有区别的，加固设计时要充分考虑到。同时，必须考虑预留构造措施，以便在使用过程中及时调整加固件的工作应力数值。

由于加固施工一般均在现场进行，又是高空作业，按控制应力值对拉杆张拉多为不便，且不准确。故多采用拉杆的张拉伸长量来控制张拉应力。所以，要求张拉伸长量计算要准确。

四、计算要点

采用体外预应力拉杆补强加固对策，应事先进行必要的设计与计算：

1) 计算求出被补强构件提高荷载等级前所受荷载及其引起的内力，包括恒载和活载内力。方法与通常桥梁设计时内力计算相同。

2) 计算提高荷载标准后的活载内力, 并由恒载与活载的组合来验算加固的必要性。

3) 由上面两项之差得出内力的提高值(即需补强加固的抵抗力矩及剪力等), 估算出补强拉杆应有的横截面面积。

4) 计算和确定拉杆所必需的张拉力与伸长量。由于张拉预应力拉杆达到一定应力后, 外荷载有所增大, 在由拉杆和被加固梁组成的超静定结构体系中, 拉杆产生的作用效应增量, 可按结构力学的方法进行分析, 几种荷载的综合效应等于各种荷载分别作用时的效应迭加。

5) 承载力验算。按设计规范验算被加固梁在跨中和支座截面的偏心受压承载力, 以及支座至拉杆弯折处或支座附近的斜截面承载力。验算中将拉杆的作用效应作为外力, 并与全部荷载作用下作偏心受压分析。若验算结果不能满足规范要求时, 可加大拉杆截面或改用其它加固方案。

6) 计算确定施工中控制张拉时需要的控制量。

体外预应力加固对策与梁底粘贴钢板的加固对策相比, 不需清凿混凝土保护层, 且损伤梁体程度小, 加固时不影响或少影响交通, 能恢复或提高桥梁的荷载等级, 经济效果较明显。但对于梁体外的预应力筋和有关构件应采取切实有效的防护措施, 否则在温度, 腐蚀等外界条件作用下, 容易造成预应力筋断裂而使加固工作失败。该对策适用于中小跨径梁式桥梁, 对于较大跨径的桥梁, 采用本对策加固时, 宜同时配合其它方法进行综合加固, 以达到较好的加固效果。

第八节 改变结构体系加固法

不同的结构体系受力特点不同(如简支梁的跨中弯矩比同跨径的连续梁、拱式或刚式体系要大得多)。利用这一特点, 可通过改变原桥上部结构体系来改善结构受力、提高承载能力, 从而达到加固补强的目的。

一、加固方法

就梁式桥梁而言, 改变结构体系加固对策主要有以下三种:

1) 在梁下增设钢桁架等加劲梁或叠合梁;

2) 在简支梁下增设支架或桥墩(改变了简支梁结构体系, 支点处将产生负弯矩必须认真的进行受力计算, 必要时还必须采取相应的措施如在支点处进行加固);

3) 简支变连续(即将简支梁与简支梁加以连接, 改变为连续梁结构);

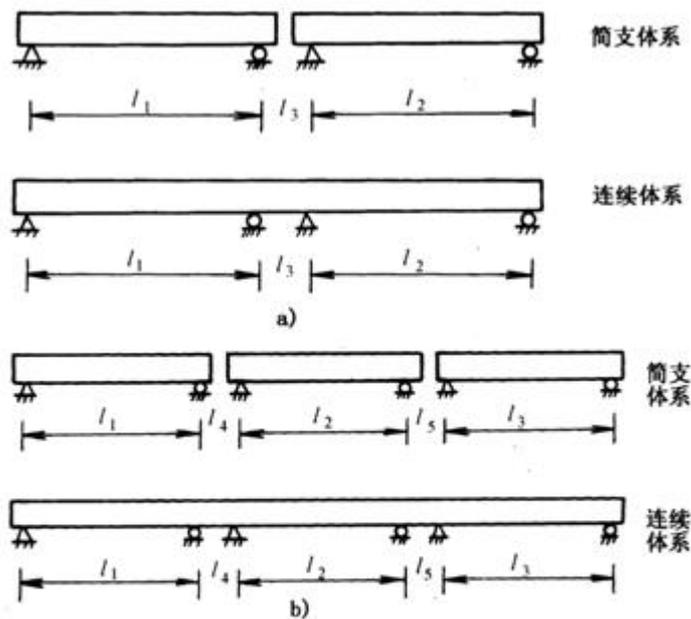
改变结构体系加固的各种方法均需在桥下操作、设置永久设施, 从而影响了桥下净空, 故制定加固方案时均须考虑对通航及排洪能力的影响。因简支变连续法最为常见, 故在此只介绍这一方法。

恒载及体系转换前的荷载（包括新浇筑的桥面混凝土铺装）由简支梁体系承担。

体系转换后的荷载（如人行道、栏杆等恒载）及活载由连续梁体系承担，显然这些荷载在各跨跨内产生的正弯矩比简支梁时要小，从而提高了承载能力。

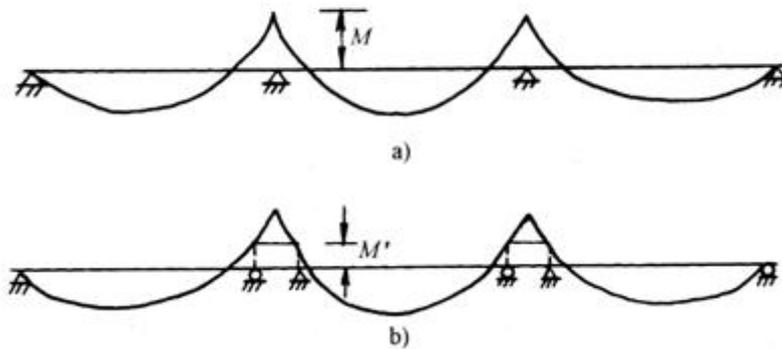
因简支梁支承点未动，故转换为连续梁时实际上是长短跨相间的。所谓短跨即是相邻梁端支承点之间的梁段，如原为二跨简支梁，可转换为二个长跨和一个短跨的连续梁（见图 7-17a）。如原为三跨简支梁，转换后成连续结构即为三个长跨和二个短跨结构组成（见图 7-17b）。这类中间支承为双支承的连续梁比单支承有利。因其长跨跨度不扩大，可减小各跨跨内正截面弯矩，同时可减小中间支承上的负弯矩，即相对于单支点具有削减负弯矩部分峰值的作用（见图 7-18）。

因桥面铺装混凝土参与结构作用，截面高度增加，提高了抗弯能力和抗弯刚度。同时，对于截面而言，为二阶段受力，即体系转换前的恒载（简支梁自重，新浇筑桥面铺装混凝土自重）均由桥面铺装混凝土不参与结构作用的简支裸梁承担，体系转换后增加的恒载（人行道、栏杆等恒载）及活载均由新浇桥面铺装与裸梁的组合截面并转换成连续梁体系承担。此时如采用容许应力法（或应力限值法）确定承载能力和计算挠度及裂缝宽度时，应按上述体系转换及截面组成程序进行应力叠加计算。如采用极限状态法确定承载能力时，按体系转换程度计算外荷载产生的内力，并乘以相应荷载系数后的内力按代数和叠加，由组合截面的抗力抵抗之。



a)两跨简支变连续 b)三跨简支变连续

图 7-17 简支变连续简图



二、施工要点

简支变连续的施工要点如下：

- 1) 凿除原桥梁端上缘混凝土及桥面铺装，布置新增的负弯矩钢筋。
- 2) 把相邻梁端伸缩缝间隙中用膨胀混凝土填塞密实，以备支点负弯矩区段下缘受压。
- 3) 按连续梁计算布置新铺桥面钢筋，特别是墩顶上桥面负弯矩配筋。
- 4) 浇筑整体桥面混凝土并养生至设计强度。
- 5) 为了保证桥面铺装混凝土与原梁体共同参与结构作用，可采用三点措施：
梁顶凿毛；梁顶设置抗剪栓钉；桥面铺装混凝土采用补偿混凝土，可减少或不产生桥面混凝土收缩，从而减小或不产生新老混凝土之间的收缩差内力。

以空心板简支梁为例，简支变连续时新增抗负弯矩钢筋及混凝土浇筑结构如图 7-19 所示。

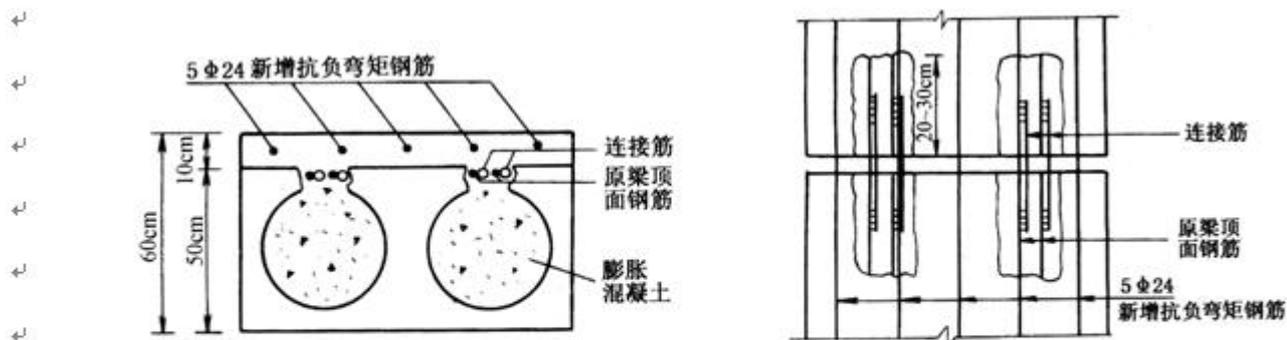


图 7-19 空心板梁桥简支变连续体系结构

第九节 增设辅助构件加固法

当桥梁承载能力不能满足要求，但梁体结构基本完好时，为了提高荷载等级，可以考虑采用增加辅助构件对策。

增设辅助构件加固一般采用增设主梁和横梁的方法，如图 7-20 所示。增设主梁一般也有两种方式，其一是增设主梁的同时，对桥面进行拓宽，其二是不拓宽桥面增设主梁。增设主梁对桥面进行拓宽时，新增设的主梁在横桥向的布置方

式将直接影响施工的难易，改变新旧主梁的受力状态（主要是荷载横向分布），具体情况可参考文献^[11]。



图 7-20 增设辅助构件加固

不拓宽桥面增设主梁时，新增主梁一般设置在原有中梁两侧，在新增主梁位置上将原桥面凿开，切断原横隔梁，利用原结构设置悬挂模板，现场浇筑新增主梁混凝土。对于预应力混凝土桥梁，应考虑到在桥上无法进行预应力张拉，新增预应力梁必须先预制场张拉后再安装就位。新增主梁加固方法对于过去常见的少主梁或双主梁整体现浇式桥梁的技术改造尤为有利，这种上部结构不仅主梁的间距大。新增的主梁容易布置与浇筑，增加主梁后的上部结构承载能力可以明显得到提高，而且增加主梁后也改善了原有桥面板的受力状况。为了使新旧结构联成整体共同受力，可将原主梁的横隔梁内钢筋与新梁横隔梁的钢筋焊接起来，或通过预埋钢板将新旧横隔梁联结。有时还在横隔梁下部增设贯通全桥宽的联结钢筋，并加大横隔梁下缘混凝土截面，将此钢筋包裹在混凝土内。与此同时，整体浇筑桥面铺装混凝土，并常常在其中设置钢筋网，以进一步加强整体性。

增设横梁的方法常用于因横向整体性差而降低承载能力的桥梁上部结构，以增加其各主梁之间的横向联结。在新增横隔梁部位的主梁梁肋上钻孔，设置贯通全桥宽的横向联结钢筋，此钢筋的两端用螺帽锚固在两侧主梁梁肋外侧。浇筑新增横隔梁混凝土之前应将主梁结合处的混凝土表面先凿毛洗净，再悬挂模板浇筑横隔梁混凝土。