DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.018

预应力混凝土空心板桥梁加固方法对比分析

杨雪峰

（云南省石林公路分局，云南 昆明 652200）

摘要：为了研究对预应力混凝土空心板桥加固后，结构刚度、延性及抗裂性能的变化，对比分析不同加固方法对结构力学性能的影响，利用Ansys软件，分析采用不同方法加固后的结构响应。结果表明：粘贴钢板对空心板承载能力提高最大，碳纤维加固法对结构延性提高最为明显，增大截面加固法对抑制结构裂缝最为有效。

关键词：加固方法；空心板；粘贴钢板；粘贴碳纤维；增大截面

近年来，交通运输行业作为国家的基础产业，发展迅速。根据2018年交通运输行业发展统计公报，全国公路桥梁已达85.15万座，里程约5 568.59万m，发展迅速。桥梁经过长期运营，承载力出现不同程度的下降，特别对于混凝土桥梁，受到混凝土老化的影响，桥梁出现不同程度的开裂。目前，桥梁加固技术多集中于单种加固方法的承载力计算分析上，对桥梁加固方法的对比研究较少。黄侨、方世成等分析了预应力碳纤维加固过程中关键参数设计指标，并以RC简支梁为例，计算了预应力碳纤维加固过程中参数的取值；李隆、任更锋等考虑RC梁式桥承载能力衰减的特点，提出了基于损伤退化模型的加固方法，并采用增大截面的方法对某一实桥进行加固，计算了加固后的桥梁结构承载能力；张树仁、宋建永等对采用粘贴钢板加固的RC梁桥进行加固后桥梁承载能力计算及试验研究，给出了粘贴钢板加固法的RC梁斜截面设计计算方法；孙林、檀永刚对一五跨连续拱桥进行技术状况评定后，综合采用增大截面法、粘贴钢板法进行加固分析，并对加固后结构采用有限元计算，结果表明加固方案合理。也有学者对采用粘贴碳纤维布、增大截面等加固方法后力学性能进行分析，采用不同加固方法后结构承载力均有不同程度的提高。然而，随着基础设施逐步完善，桥梁加固研究仍是一个值得关注的问题，对受损桥梁进行各加固方法对比分析，从而针对病害，选择最佳加固方法，可以节省资源，创造效益。

该文依托某20 m空心板桥，基于有限元软件，对结构分别建立采用不同加固方式加固后的有限元模型，在相同外部荷载作用下，对比分析不同加固方式对PC空心板力学性能的贡献值，进而得出相关结论。

1 桥梁结构加固方法

1.1 粘贴碳纤维加固法

碳纤维利用了其很高的抗拉强度，并通过环氧树脂浸涂而形成增强结构复合材料。在垂直于裂缝或受力方向粘贴于受损结构，环氧树脂作为黏结剂，成为剪力连接媒介，使原有钢筋和增强贴片形成新的复合结构同时受力，进而增大结构抗拉及抗剪能力，一定程度上提高了结构的延性、刚度、强度和抗裂性，有效地控制了裂缝及挠度的进一步发展。碳纤维材料具备强度高重量轻、耐腐蚀、施工便捷、抗疲劳性能好等诸多优点，普遍适用于加固抗剪、抗压（偏心受压）、抗弯和抗震等各种形式。该方法普遍适用于混凝土梁桥、板桥的结构抗弯和抗剪加固。其加固效果尤其对于结构配筋率很低或钢筋锈蚀严重的老桥十分显著；同时也适用于桥梁墩柱抗剪切能力的提高、加强抗压能力和增强抗地震的延性。

1.2 增大截面法

增加截面法即对不能满足正常运营需要的桥梁结构采取措施，使桥梁截面积增大，进而提高结构承载能力的一种方法。目前，在PC空心板加固工程中，运用较为广泛的增大截面法是在结构表层进行加固，凿除既有桥面后，对空心板表层进行拉毛处理，通过布置纵横向钢筋、剪力钉等，使新建桥面铺装与原PC空心板

收稿日期：2019－02－26

基金项目：国家自然科学基金资助项目（编号：51308056）

作者简介：杨雪峰，男，高级工程师，E－mail：649555320@qq.com

形成整体，进而起到增加截面面积的目的。另一种是加大主梁肋的高度和宽度，即通过增加梁肋截面刚度，提高主梁抗弯刚度，从而提高结构承载能力。

1.3 粘贴钢板加固法

粘贴钢板是当交通量增加造成主梁承载力不足，结构出现受力裂缝，甚至结构钢筋因开裂而出现锈蚀时，在结构受力部位，使用黏结剂或锚栓在梁或板（底、顶或肋）等主要部位，把钢板牢固地黏结、锚固在需要补强结构的受压、受剪及受拉的部位，使钢板和原结构牢固地形成一个整体，同时受力。此加固法一般用机械固定（螺栓固定），结合化学粘贴（建筑结构胶或者环氧树脂），在原钢筋混凝土结构构件的病害缺陷和受力薄弱部位用抗拉强度高、受力性能很好的钢板、型钢等高强度材料进行粘贴，使原结构与所用的粘贴材料形成一个整体，使原混凝土与钢板共同受力，进而起到增加补强钢筋的作用，有效地提高结构构件的抗弯及抗剪能力，也起到了控制构件裂缝继续扩展的作用。

2 有限元模型

2.1 依托工程

以河北省某 20 mPC 空心板桥为依托工程，空心板高 0.95 m，单片空心板宽 1.59 m。空心板横断面及立面布置如图 1、2 所示。

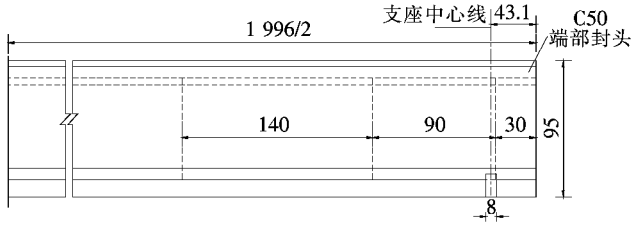

图 1　20 mPC 空心板立面布置图（单位：cm）

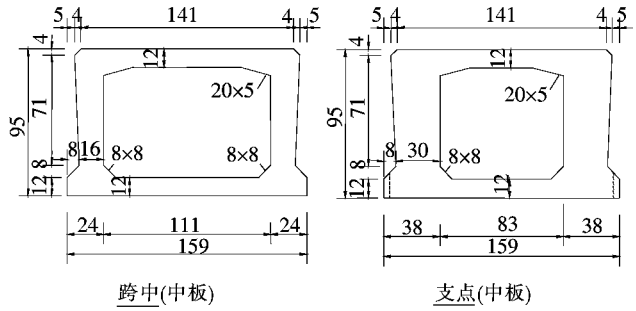

图 2　PC 空心板横断面构造图（单位：cm）

2.2 有限元模型

利用 Ansys 软件对空心板进行模拟分析。为对比不同加固方法作用下结构力学性能的变化，分别建立正常运营状态下 PC 空心板模型 O－model、粘贴钢板加固空心板模型、增大截面加固后空心板模型 I－model 及碳纤维加固后空心板模型。其中，混凝土、碳纤维及钢结构分别采用实体单元 Solid65、壳单元 Shell41 及实体单元 Solid45 模拟。为了定性分析碳纤维加固法及粘贴钢板加固方法施工材料的增加对结构的影响，同时分别建立采用 0.15、0.30、0.45 mm 厚碳纤维加固空心板下缘形式的有限元模型 C－model1、C－model2、C－model3，分别建立采用 0.4、0.6、0.8 cm 厚钢板加固空心板下缘形式的有限元模型 S－model1、S－model2、S－model3。采用增加截面面积的方法对 PC 空心板表层进行加固（I－model）。

为得出不同加固形式下 PC 空心板正常使用状态下空心板抗裂性能以及结构极限承载力，需对有限元模型荷载进行逐步增加，该文设置结构荷载步如表 1 所示。

表 1　加载步数

荷载步	加载	荷载步	加载
1	结构自重及预应力荷载	5	卸载二恒
2	二恒	6	激活加固单元及荷载
3	整体车道荷载	7	整体车道荷载
4	车道荷载卸载	8	二恒

3 加固方案对比

3.1 极限承载能力对比分析

定性分析碳纤维加固法及粘贴钢板加固方法加固后结构承载能力的响应，读取 O－model、C－model1、C－model2、C－model3、S－model1、S－model2、S－model3、I－model 计算结果，PC 空心板加固后极限承载力如图 3 所示。

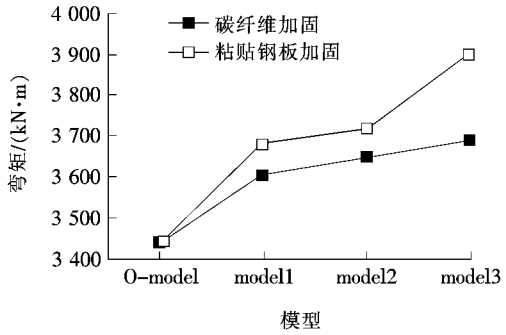

图 3　极限弯矩对比

对比 I－model 与 O－model 计算结果可知：对空心板采用增加截面法加固法，极限承载力由3 441.50增加至3 499.66 kN·m，强度相对提高1.69%。由图3可知：在结构承载能力提高方面，粘贴钢板法较碳纤维加固法更为明显，并随着钢板厚度的增加，结构承载能力有较大提高，粘贴钢板法加固效率较高。随着碳纤维厚度的增加，结构承载力有一定的提高，但效率较低，根据计算结果，0.45 mm 碳纤维比0.15 mm 碳纤维在承载能力方面贡献率仅提高1.08%。

3.2 挠度对比分析

依据前文定义加载步数，对 PC 空心板进行逐步加载，求得加固后空心板结构极限弯矩，分别计算极限弯矩作用下结构跨中挠度，各模型对应的跨中挠度示意图见图 4。

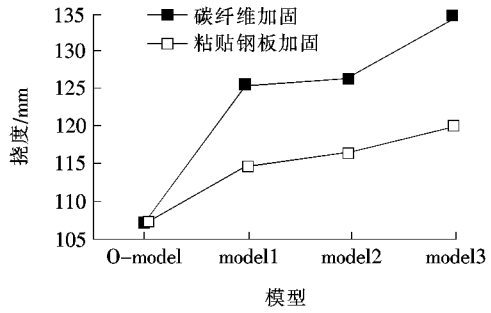

图 4 加固后跨中挠度对比

对比 I－model 与 O－model 计算结果可知：对空心板采用增加截面法加固，极限荷载作用下，结构跨中挠度为68.68 mm，说明 PC 空心板加固后结构刚度明显增大，延性减弱。由图 4 可知：空心板承受极限荷载作用下，结构挠度指标方面，碳纤维加固法较粘贴钢板法更为明显，并随着碳纤维厚度的增加，结构延性有较大提高，粘贴碳纤维法加固效率较高。随着钢板厚度的增加，结构延性有一定的提高，但效率较低，根据计算结果，0.8 cm 钢板比0.4 cm 钢板在结构延性方面贡献率仅提高4.52%。

3.3 抗裂性能对比分析

PC 空心板正常使用状态下经不同方式加固后，裂缝宽度见表 2。

表 2 正常使用状态下裂缝宽度

计算模型	裂缝宽度/mm	计算模型	裂缝宽度/mm
O－model	0.143 1	S－model1	0.085 4
C－model1	0.120 6	S－model2	0.072 1
C－model2	0.117 9	S－model3	0.066 4
C－model3	0.105 6	I－model	0.106 9

由表 2 可知：随着碳纤维厚度的增大，裂缝宽度减小，但幅度较小，根据有限元计算结果，PC 空心板纵、横向裂缝扩展区域相应变小，但效果不明显；粘贴钢板较碳纤维在结构抗裂性能上效果较好，钢板厚度增加，PC 空心板纵横向裂缝扩展区域减小较为明显；作用同等大小外部荷载，增加空心板表层截面积后，跨中裂缝扩展区域明显减小，同时裂缝宽度降低，增大截面加固法效果较为显著。

4 结论

（1）粘贴钢板法对空心板桥承载能力影响最为显著，粘贴碳纤维以及增大截面法对承载力贡献次之。

（2）当外界荷载达到结构极限荷载时，粘贴碳纤维可大大增加结构延性，粘贴钢板法及增大截面法对结构延性提升较小。

（3）对结构进行加固后，裂缝在一定程度上均被抑制，但增大截面加固空心板后，效果最为明显。

参考文献：

[1] 张延年，李玉兵，柳成林，等.混凝土梁式桥裂缝调查分析与防治[J].沈阳大学学报：自然科学版，2015(2).
[2] 黄侨，万世成，侯旭.桥梁预应力碳纤维板加固中的参数取值及损失计算方法研究[J].公路交通科技，2016(49).
[3] 李隆，任更锋，魏炜，等.基于损伤退化模型的钢筋混凝土梁式桥加固计算方法研究[J].公路交通科技，2006(4).
[4] 张树仁，宋建永，张颂娟.桥梁加固钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算方法及试验研究[J].中国公路学报，2003(3).
[5] 孙林，檀永刚.基于有限元的桥梁计算分析与加固方案设计[J].沈阳大学学报：自然科学版，2014(5).
[6] 李青松，田安国.预应力 CFRP 技术在桥梁加固中的应用[J].世界桥梁，2008(3).
[7] 刘小燕，欧阳剑，王良波.碳纤维布加固桥梁正截面强度的计算[J].桥梁建设，2004(1).
[8] 朱利明，朱超，阳春龙.碳纤维加固预应力受弯构件的计算方法探讨[J].世界桥梁，2011(6).
[9] 杨斌，安关峰，单成林.增大截面加固受弯构件的正截面承载力计算方法[J].科学通报，2016(5).
[10] 周乐，张建鹏，白云皓.CFRP 布加固受弯钢梁试验研究与理论分析[J].沈阳大学学报：自然科学版，2014(5).
[11] 龚赛群.从期刊论文分析我国公路桥梁加固技术研究之发展：2002 年—2011 年[J].公路工程，2012(4).
[12] 林晓东.基于 ANSYS 的结构粘钢加固分析[J].河北北方学院学报：自然科学版，2008(6).
[13] 吴怀义.粘贴碳纤维加固混凝土板桥 ANSYS 仿真计算分析[J].公路交通科技：应用技术版，2010(10).