

文章编号:1000-582X(2003)06-0142-04

多层粘钢加固砼梁的有限元仿真*

鲍安红^{1,2}, 殷学钢¹, 吴永³

(1. 重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400044; 2. 西南农业大学, 重庆 400716; 3. 重庆工学院数理学院, 重庆 400081)

摘要:根据粘钢加固钢筋混凝土梁各种组成材料的布置特点, 选用分离式模型, 建立了粘钢加固梁的有限元模型。利用建立的模型对同一钢筋混凝土梁在粘贴钢板量相同的情况下, 采用不同层数粘贴的加固梁进行了分析。通过有限元分析发现, 在相同荷载作用下, 粘贴1层钢板梁的挠度及钢筋和混凝土的应力最大, 粘3层次之, 粘2层最小。这表明多层加固的效果优于单层加固, 但加固层数不宜太多, 这些结果与理论分析结果相吻合, 这说明该模型对未开裂粘钢加固钢筋混凝土梁是适用的。

关键词:粘钢加固; 有限元模型; 多层加固; 加固效果

中图分类号: TU375

文献标识码: A

粘钢法是用粘结剂把钢板粘贴在钢筋混凝土结构表面的一种静力加固方法, 在钢筋混凝土梁受弯段的底面粘贴钢板可提高梁的抗弯承载力。加固规范 CECS 25:90 规定梁底粘钢截面积按下式计算^[1]:

$$A_a = \frac{f_{cm} b X - f_y A_s}{f_{ay}}$$

式中 f_{cm} 为混凝土弯曲抗压强度, b 为梁的宽度, X 为混凝土抗压区高度, A_s 为钢筋截面积, f_y 为钢筋抗拉强度, f_{ay} 为钢板抗拉强度。对计算出的粘钢截面积 A_a , 规范没有规定按几层进行粘贴。不同的设计或施工人员在考虑钢板层数时, 他们的观点也不一致, 有的认为单层加固效果好, 有的认为多层加固效果好。对此问题国内也有一些高校和科研机构进行了实体模型试验, 但由于钢筋混凝土梁本身的特点, 试验结果离散性大, 而且在实体模型试验中, 粘贴钢板的应力, 尤其是内层钢板应力不好测定, 故现在对此问题还无定论。

为排除外界环境的干扰, 真实地反映粘钢加固梁在受到荷载作用后的各种材料的应力, 考虑用有限元分析有众多优点, 针对粘钢加固钢筋混凝土梁的特点, 建立了未开裂粘钢加固梁的有限元模型, 并利用此模型对粘钢总截面积相同, 但采用不同的层数进行钢板粘贴的梁进行了受力分析, 以此研究不同粘钢层数对加固效果的影响。

1 粘钢加固钢筋混凝土梁的有限元模型

用有限元法分析粘钢加固钢筋混凝土梁的力学性能, 与一般固体力学的有限元分析相比, 在基本原理和方法上是相同的^[2], 但在具体的分析中又有自己的特点。由于粘钢加固梁的材料组成复杂, 在未加固前梁由两种不同力学性质的材料——混凝土和钢筋组成, 加固后增加了钢板和粘胶剂。考虑粘钢加固梁各种材料的布置特点, 在建立有限元模型时, 选用分离式模型^[3], 将钢筋、钢板、混凝土及粘结层, 各自按其力学性能和布置特点选择不同的单元形式进行划分。

1.1 基本假定

- 1) 构件各种材料变形满足平截面假定^[4];
- 2) 混凝土假定为各向同性材料, 在受到各方向的拉力和压力时各向同性;
- 3) 简支的边界条件简化为对应简支边上所有结点的简支;
- 4) 上表面相应的载荷作用在相应尺寸的结点上;
- 5) 钢筋和混凝土完全固结, 不会产生相对滑移, 钢筋和混凝土变形协调一致;
- 6) 在考虑粘结层厚度的时候, 照国际惯例按钢板厚度的 $1/3 - 1/2$ 考虑;
- 7) 粘结层单元和混凝土单元或钢板单元在粘结处变形协调且不会产生相对滑动。

* 收稿日期: 2003-01-14

作者简介: 鲍安红(1969-), 女, 重庆潼南人, 重庆大学博士研究生, 西南农业大学讲师, 从事建筑结构加固方面的研究。

1.2 材料本构关系

1) 钢筋和钢板的本构关系

钢筋和钢板的应力—应变关系如图1所示,在静力加载情况下,认为受压钢筋或钢板的力学性能完全等于受拉钢筋或钢板^[5],括号内的符号为钢板的力学特征值。图中 E_s 和 E_b 分别为钢筋和钢板弹性阶段的弹性模量, E_{sh} 和 E_{bh} 分别为钢筋和钢板强化阶段的弹性模量, ε_{sh} 和 ε_{bh} 分别为钢筋和钢板的极限应变。 E_{sh} 和 ε_{sh} 分别取为 $E_s/60$ 和3%, E_{bh} 和 ε_{bh} 也分别取为 $E_b/60$ 和3%。

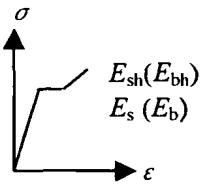


图1 钢筋和钢板的应力—应变图

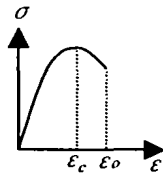


图2 受压区混凝土的应力—应变图

2) 混凝土的本构关系

受压区混凝土的应力—应变关系如图2所示。其关系式为^[5]:

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (\varepsilon_c < \varepsilon_0)$$

$$\sigma_c = f_c \left(1 - 0.15 \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{\varepsilon_u - \varepsilon_0} \right) \quad (\varepsilon_0 < \varepsilon_c < \varepsilon_u)$$

式中, $\varepsilon_0 = 2 \times 10^{-3}$, $\varepsilon_u = 3.8 \times 10^{-3}$

受拉区混凝土的应力—应变关系如图3所示。其关系式为^[5]:

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c \quad (0 < \varepsilon_c < \varepsilon_{t0})$$

式中, $\varepsilon_{t0} = 1.0 \times 10^{-4}$

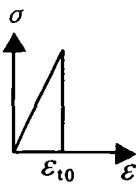


图3 受拉区混凝土的应力—应变图

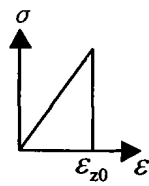


图4 粘结层应力—应变图

3) 粘结层的本构关系

由于粘结层材料本身是各向异性的非弹性材料,对它的本构关系,目前尚无比较成熟完整的研究。在有限元模型建立时,对粘结层假定为各向同性的线弹性材料,其应力—应变关系取为:

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s \quad (0 < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s0})$$

式中, $\varepsilon_{s0} = 2.9 \times 10^{-3}$ 。这样把粘结层的应力限制在表面脱落剪应力 $18 \text{ N/mm}^{[1]}$ 范围内,保证不会表面脱落。

1.3 单元划分

1) 钢筋的单元划分

由于钢筋内埋于混凝土之中,其截面积相对混凝土截面积较小,故在单元划分时忽略钢筋截面积的影响,钢筋采用了无截面的线单元^[6]。沿钢筋长度方向,把钢筋分为若干个单元。钢筋的截面积在有限元模型建立时,采用常量来定义,以便计算钢筋单元的刚度矩阵。

2) 混凝土单元划分

混凝土采用六面体八结点单元^[6]。在单元划分时,沿其X轴、Y轴和Z轴分别划为有限个单元网格,让所有的钢筋处于网格线上。为保证单元尺寸一致,对钢筋的混凝土保护层厚度需做适当的调整。

3) 粘结层单元划分

粘结层采用六面体八结点单元,因粘结层厚度较小,沿其厚度方向按3个单元进行划分。在进行粘结层单元划分时,粘结层和混凝土的结合面上的单元节点应重合。

4) 钢板单元划分

钢板也采用六面体八结点单元^[6]。因钢板厚度较小,沿其厚度方向也按3个单元进行划分。在进行粘结层单元划分时,钢板和粘结层的结合面上的单元节点应重合。

1.4 粘钢加固钢筋混凝土梁的有限元模型

在进行粘钢加固钢筋混凝土梁的有限元模型建立时,实际就是按顺序对粘钢加固钢筋混凝土梁的不同组成部分的有限元模型的建立。其步骤如下:

1) 混凝土单元模型的建立

首先选定单元类型为六面体八结点混凝土单元,输入混凝土单元常量和材料性质,按梁的截面尺寸和跨度建立混凝土模型,分别沿X轴、Y轴和Z轴按所需单元尺寸划分网格,形成混凝土单元。

2) 钢筋单元模型的建立

在混凝土单元划分完的基础上,选定钢筋单元类型,输入钢筋截面积和材料性质,在预定的混凝土单元网格线上加入钢筋单元,这样钢筋单元与相邻混凝土单元共结点。

3) 粘结层单元和钢板单元模型的建立

粘结层单元模型的建立同混凝土单元,首先选定单元类型,输入材料性质,按粘结钢板的宽度、长度及粘结层的厚度,定位在混凝土梁的表面建立模型,分别

沿 X 轴、Y 轴和 Z 轴按所需单元尺寸划分网格,与混凝土的结合面上两种材料的单元节点应重合。

在一种材料的模型建立之后,建另一种材料模型之前,需要进行单元限定,以确定网格划分对象。粘结层单元模型建立后,进行钢板单元模型的建立,它与粘结层单元模型的建立过程相同。如果粘结钢板不止一层,则需重复建立粘结层和钢板的单元模型。在所有材料单元模型建立之后,加上约束条件和外荷载就可进行有限元分析。

2 不同粘钢层数对粘钢加固的有限元分析

2.1 计算构件基本条件

计算构件见图 5,构件截面尺寸 $b \times h = 200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,梁长 $L = 2700 \text{ mm}$,混凝土弹性模量 $E_c = 3.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 。纵向受拉钢筋为 2 ϕ 14,钢筋抗拉强度 $f_y = 210 \text{ N/mm}^2$,弹性模量 $E_s = 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,泊松比为 $\mu_s = 0.3$ 。粘贴钢板抗拉强度 $f_b = 210 \text{ N/mm}^2$,弹性模量 $E_b = 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,泊松比为 $\mu_b = 0.3$,钢板宽度和长度均相同,宽度同梁宽,长度 $L_1 = 2500 \text{ mm}$ 。粘结层弹性模量 $E_z = 2.31 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$,宽度和长度同钢板,泊松比为 $\mu_z = 0.3$ 。粘贴钢板分 3 种情况:①粘贴 1 层钢板,钢板厚度 $t = 6 \text{ mm}$,粘结层也为 1 层,粘结层厚 $t = 2 \text{ mm}$;②粘贴 2 层钢板,每层钢板厚度 $t = 3 \text{ mm}$,粘结层也为 2 层,每层粘结层厚 $t = 1.5 \text{ mm}$;③粘贴 3 层钢板,每层钢板厚度 $t = 2 \text{ mm}$,粘结层也为 3 层,每层粘结层厚 $t = 1 \text{ mm}$ 。在分析过程中按剪跨比 $\lambda > 2$ 加载,则可忽略剪切变形影响。由于是研究钢筋混凝土梁正截面加固,在分析过程中还可忽略箍筋和受压区架立钢筋的影响。

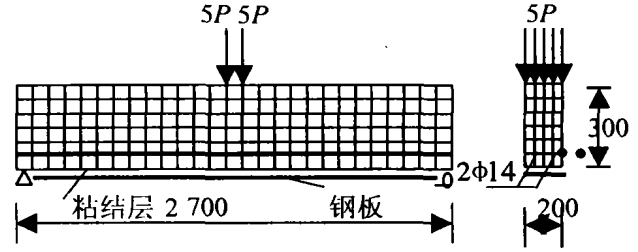


图 5 构件尺寸图

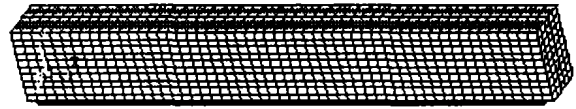


图 6 模型单元网格立体图

2.2 数值计算结果

对于所建立的 3 种粘贴钢板的有限元模型,加上相同的两端简支约束和相同的外荷载,假定粘贴钢板时梁所受外荷载为零,即钢板不存在应力滞后现象。用有限元计算 3 个模型受到 40 kN 的外力作用时(即在梁顶跨中的 8 个结点上,每个结点作用荷载 $P = 5 \text{ kN}$),各种材料的应力及梁的挠度,计算结果见表 1。

从表 1 的分析结果可以看出,在同一梁上粘贴相同量的钢板,粘贴层数不同,梁的挠度和各种材料的应力也各不相同。从变形看,粘贴 2 层钢板的挠度最小,粘贴 1 层钢板的挠度最大。从材料的应力看,粘贴 2 层钢板的混凝土拉压应力及钢筋应力都是最小,粘贴 1 层钢板的混凝土拉压应力及钢筋应力都是最大。而从钢板最大应力看,粘贴两层钢板最小,粘贴 1 层钢板最大。通过以上分析可以看出,粘两层钢板的加固效果最佳,粘一层钢板的加固效果最次。因此可以推断,粘钢加固时多层加固优于单层加固,但粘贴层数不宜太多。

表 1 粘贴不同钢板层的有限元分析结果

粘贴钢板	层数	1 层	2 层	3 层
	每层厚度	6 mm	3 mm	2 mm
粘贴层	层数	1 层	2 层	3 层
	每层厚度	2 mm	1.5 mm	1 mm
混凝土应力(MPa)	最大拉应力	2.471 3	2.451 4	2.453 41
	最大压应力	-3.605 8	-3.594 7	-3.596 6
各层粘结层应力(MPa)	第 1 层	上 2.029 5 下 2.012 8	上 2.001 1 下 1.996 5	上 2.009 2 下 1.997 4
	第 2 层	—	上 2.014 8 下 2.028 4	上 2.006 1 下 2.010 3
	第 3 层	—	—	上 2.029 8 下 2.041 3
各层钢板应力(MPa)	第 1 层	上 18.111 下 18.793	上 17.935 下 18.260	上 17.925 下 18.134
	第 2 层	—	上 18.409 下 18.767	上 18.199 下 18.430
	第 3 层	—	—	上 18.546 下 18.787
钢筋最大应力(MPa)		10.548	10.446	10.453
最大挠度(mm)		0.4419	0.4397	0.4400

3 结 论

通过利用所建立的有限元模型,对不同钢板粘贴层数、相同粘钢量的加固钢筋混凝土梁在未开裂情况下进行了受力分析,通过分析发现:在梁所受外荷载一致的情况下,粘贴钢板层数对梁的加固效果有影响,多层加固优于单层加固,但加固层数不宜太多。

由于有限元分析结果与理论研究是一致的,这说明所建立的有限元模型对未开裂粘钢加固钢筋混凝土梁的有限元分析是适用的。在有限元模型建立时,没有考虑混凝土的开裂,因此该模型只适用于未开裂加固的情况,对于加固后的加载过程,只要混凝土未开裂,对梁的分析也可采用该模型。如果混凝土有开裂现象,则需在该模

型的基础上建立裂缝模型,才能适用。

参考文献:

- [1] 混凝土结构加固技术规范(CECS 25:90). 北京:中国建筑工业出版社,1990.
- [2] 詹先仪. 非线性有限元分析[M]. 重庆:重庆大学出版社,1987.
- [3] 吕西林,金国芳,吴晓涵. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M]. 上海:同济大学出版社,1997.
- [4] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,1988.
- [5] 滕智明. 钢筋混凝土基本构件[M]. 北京:清华大学出版社,1988.
- [6] 鲍安红,殷学纲. 粘钢加固对非加固段的抗剪承载力影响[J]. 固体力学学报,2002, 23: 211-215.

Effect of Reinforcement Beam Sticking Different Layers Steel

BAO An-hong^{1,2}, YIN Xue-gang¹, WU Yong³

(1. Environment Mechanics Department, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Southwest Agriculture University, Chongqing 400716, China;

3. College of Math and Physics, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400081, China)

Abstract: This paper constituted the FEM (finite element method) model of sticky steel reinforcement beam and the model was used to analyze the reinforcement effect of the beam sticking different layers' steel plate. The result shows two layers of steel is better than others, which agrees with theoretic analysis. It illuminate that the FEM model is in point for sticky steel reinforcement beam without crack.

Key words: sticky steel reinforcement; the FEM model; steel plate; the reinforcement effect

(编辑 刘道芬)