

文章编号: 1671 - 6833(2009)03 - 0018 - 04

铆粘钢板加固钢筋混凝土梁的抗剪性能试验研究

谢丽丽¹, 余术刚¹, 刘立新², 彭长领², 王明智²

(1. 郑州大学 综合设计研究院, 河南 郑州 450002; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 通过 6 根采用铆粘 U 形钢板加固的钢筋混凝土梁和 2 根未加固对照梁的受剪性能对比试验, 与对照梁进行对比, 分析了铆粘钢板加固梁斜截面的受力特点以及承载能力、裂缝开展、刚度变化和加固效果, 提出了铆粘钢板加固钢筋混凝土梁的受剪承载力计算方法. 试验研究结果表明, 该公式具有较好的适用性.

关键词: 铆粘钢板; 抗剪加固; 计算公式
中图分类号: TU 375.1 文献标识码: A

0 引言

铆粘钢板加固方法是将事先打磨、钻好孔的钢板涂上胶在需加固的构件表面就位, 用电锤对准钢板孔并垂直构件表面在混凝土中打孔, 清除孔内灰尘并向孔内注胶, 随后用手锤逐个打入特制的异形铆钉或者丝杆将钢板铆粘在构件上. 与粘贴钢板相比铆粘钢板加固混凝土梁具有加固效果好, 加固质量容易保证等优点, 是一种新的有广泛应用前景的加固技术^[1]. 笔者通过 6 根采用铆粘 U 形钢板箍加固的钢筋混凝土梁, 2 根对照梁的受剪性能试验, 通过观察加固构件的破坏特征, 测试钢板应变的变化, 分析了在不同加固形式的构件中钢板与构件之间粘接性能变化及其锚固效果, 并与不加 U 形钢板箍的对照梁进行对比. 在试验分析的基础上, 提出了铆贴 U 形钢板箍加固钢筋混凝土梁的受剪承载力计算方法建议公式.

1 试验概况

为了便于比较, 各梁设计尺寸和配筋均相同 (如图 1 所示), 试验梁参数如表 1 所示 (实测值). 由 BDS1 可知试验梁抗弯承载力不足, 于是采用 CJ-1 型建筑结构胶粘贴 100 mm, 宽 6 mm 厚的 Q235 钢板, 其尺寸为 2 700 mm × 100 mm × 6 mm, 对称布置在梁底. 加固的 U 形钢板箍均采用 Q235 级, 宽 40 mm、厚 3 mm; 铆钉采用特制的异形铆钉或直径为 10 mm 丝杆, 加固胶分别采用建筑结构胶或水泥基胶.

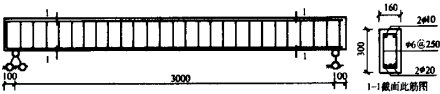


图 1 试验梁尺寸和配筋
Fig. 1 The size and reinforcement of beam

表 1 试验梁参数
Tab. 1 Parameters of test beams

试验梁 编号	h_0 /mm	f_{cu} /MPa	f_c /MPa	f_t /MPa	A_s /mm ²	f_y /MPa
BDS1	275	44.4	33.7	3.18	896.4	401.6
BDS2	276	42.8	32.6	3.12	896.4	401.6
BDS3	274	42.4	32.2	3.10	896.4	401.6
BDS4	276	43.0	32.6	3.12	896.4	401.6
BDS5	278	41.8	31.7	3.08	896.4	401.6
BDS6	278	38.8	29.5	2.95	896.4	401.6
BDS7	279	44.1	33.6	3.17	896.4	401.6
BDS8	277	49.6	37.0	3.33	896.4	401.6

试验梁分为 2 种类型, BDS1 和 BDS8 为未加固对照梁, BDS2 ~ BDS7 为铆粘 U 形钢板箍加固的梁, 试验梁的尺寸和配筋以及 U 形钢板箍的间距均相同, 主要变化参数为剪跨比, 铆钉形式和粘接胶形式. 铆粘 U 形钢板箍加固梁以及加载方式如图 2 所示, 试验梁加固信息如表 2 所示. 试验采用类似三分点加载方案, 通过同步液压千斤顶及反力梁施加荷载, 利用压力传感器配合 YD-88 应变仪控制加载, 试验数据除百分表外均采用

收稿日期: 2009 - 02 - 22; 修订日期: 2009 - 03 - 28
作者简介: 谢丽丽 (1954 -), 女, 郑州大学教授级高级工程师, 主要从事混凝土结构、砌体结构基本理论及应用研究.

CM-2B 静态应变测量仪自动采集. 施工是按照规范^[3]要求进行的, 在钢板表面粘贴应变片, 以测试钢板应力变化, 分析钢板的锚固性能和强度利用程度等异形铆钉形状如图 3 所示.

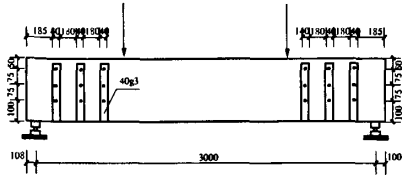


图 2 铆粘钢板 BDS2 ~ BDS7
Fig. 2 The beam of BDS2 ~ BDS7

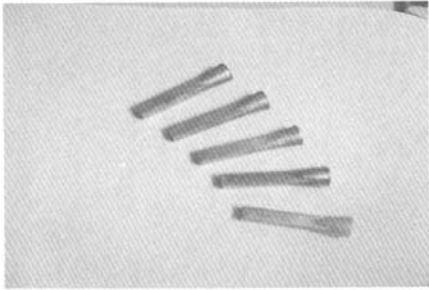


图 3 异形铆钉
Fig. 3 The picture of rivets

表 2 试验梁加固方式及加固参数

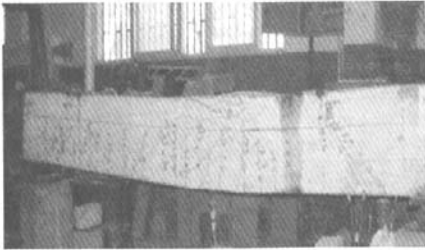
Tab. 2 Reinforcement methods and parameters of test beam

试验梁 编号	剪跨比 a/h_0	A_{sp} /mm ²	f_p /MPa	f_{yv} /MPa	A_{svl} /mm ²	f_{yv} /MPa	加固方式
BDS1	2	—	—	401.6	31.95	401.6	对照梁(梁底不粘贴钢板)
BDS2	1.5	87.6	327.6	401.6	31.95	401.6	直接加固, 结构胶, 异形铆钉
BDS3	2	87.6	327.6	401.6	31.95	401.6	直接加固, 结构胶, 异形铆钉
BDS4	2	87.6	327.6	401.6	31.95	401.6	直接加固, 结构胶, 丝杆
BDS5	1.5	87.6	327.6	401.6	31.95	401.6	直接加固, 水泥基胶, 异形铆钉
BDS6	2	87.6	327.6	401.6	31.95	401.6	直接加固, 水泥基胶, 异形铆钉
BDS7	2	87.6	327.6	401.6	31.95	401.6	直接加固, 水泥基胶, 丝杆
BDS8	2.5	—	—	401.6	31.95	401.6	对照梁(梁底粘贴钢板)

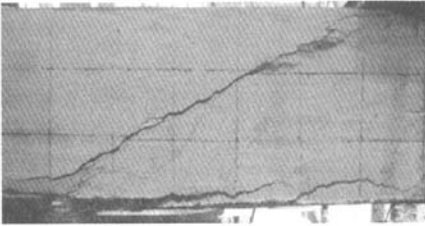
2 试验现象及分析

实验结果如图 4、图 5、图 6、图 7 所示. 试验表明, 对照梁 BDS1 的破坏属于比较典型的弯剪破坏, 构件开裂后, 随着荷载的增大, 在剪压区一条腹剪裂缝发展成为一条弯剪斜裂缝, 最后斜裂缝发展至加载点附近. 破坏时斜裂缝宽度发展到 1.3 mm, 跨中梁顶混凝土被挤碎, 梁底钢筋屈服 (图 4(a)). 受拉钢筋屈服到受压区混凝土压坏荷载范围内, 塑性铰可以转动, 塑性铰出现后, 简支梁形成三铰在一直线上的破坏机构, 试验梁进入破坏阶段.

BDS8 为梁底粘贴钢板但未加 U 形箍的对照梁. 随着荷载的增加, 一条斜裂缝在弯剪段贯通, 并随着荷载增加斜裂缝宽度增大, 当荷载达到 121.97kN 时, 跨中裂缝及斜裂缝快速发展. 破坏前, 外贴钢板与混凝土之间具有较好的粘结性能, 保证钢板与构件间的共同工作, 保证钢板达到屈服强度. 但是进入破坏阶段后, 钢板与混凝土构件之间发生局部剥离, 沿板与混凝土交接面, 出现较长的顺筋裂缝, 混凝土被撕裂, 因此导致构件破坏, 此时其正截面已进入适筋截面第三阶段, 但并



(a) 对照梁 BDS1 发生弯剪破坏



(b) 对照梁 BDS8 发生斜拉破坏, 钢板剥离

图 4 对照梁破坏形态

Fig. 4 The destruction shape of construct beams

未达到第三阶段末, 延性较差. 梁表现为明显脆性破坏特征, 为斜拉破坏^[4] (图 4(b)). 试验表明,

剪跨比反映了截面上正应力和剪应力的相对关系,因而也就决定了该截面上任一点主应力的方向和大小,影响着梁的破坏形态和承载力;粘钢加固容易发生钢板剥离破坏,属于脆性破坏。

加固梁 BDS2、BDS3 和 BDS4 为结构胶粘贴,由于跨中钢板约束作用,破坏时跨中裂缝宽度均小于对照梁,斜裂缝穿过铆钉孔,有明显的脆性破坏特征。BDS2 和 BDS3 剪跨比不同,其它加固方式相同,破坏时梁顶加载点附近混凝土都被压碎。开裂荷载 BDS2 比 BDS3 高,相同荷载作用下 BDS2 挠度小于 BDS3 (图 7(a)),U 形箍应变 BDS2 明显小于 BDS3,这是由于剪跨比较小,正应力不大而剪应力很高,这时梁的传力模型可以看成是一个斜向放置的短柱,箍板应力很小,最后短柱范围内混凝土被压酥,破坏时 BDS3 架立筋屈服,梁顶铆钉被拔出。在破坏形态上 BDS2 为斜压破坏如图 5 所示,BDS3 为剪压破坏。BDS3 和 BDS4 的铆钉形式不同,在开裂之前荷载-挠度曲线重合,箍板应变在梁破坏之前应变很小,临近破坏时箍板应变很大。BDS4 的承载力仅为 BDS3 的 63.7%,主要原因是在斜裂缝出现以后,斜裂缝间的混凝土在剪应力和压应力的作用下处于拉压应力状态,混凝土梁打孔时混凝土抗拉强度 f_t 减小,从而抗剪承载力降低。

采用丝杆加固时,钻孔深度过大,有的甚至穿透整个混凝土梁,截面削弱程度大于异形铆钉。

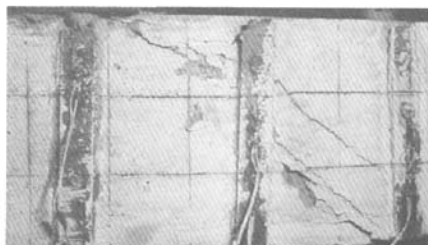
加固梁 BDS5、BDS6 和 BDS7 为水泥基胶粘贴。同结构胶加固结果相同,破坏时跨中裂缝宽度

均小于对照梁,斜裂缝穿过铆钉孔,有明显的脆性破坏特征。BDS5 和 BDS6 剪跨比不同,开裂荷载 BDS5 比 BDS6 高,相同荷载作用下 BDS5 挠度小于 BDS6 (图 7(a)),由于剪跨比不同,U 形箍应变 BDS5 明显小于 BDS6。破坏时 BDS5 剪压区形成相互平行的腹剪斜裂缝,向支座和集中荷载作用处发展,最后混凝土斜向压酥而破坏,BDS6 临近斜裂缝贯通梁顶,剪压区混凝土在剪应力和压应力共同作用下达到复合应力状态的极限强度而破坏。在破坏形态上 BDS5 为斜压破坏,BDS6 为剪压破坏。BDS6 和 BDS7 的铆钉形式不同,在开裂之前荷载-挠度曲线重合,垂直开裂荷载大体相同,斜裂缝荷载 BDS6 小于 BDS7。试验表明铆钉形式对加固梁的加固效果影响不大(图 6)。

试验表明:对于铆粘钢板加固钢筋混凝土梁,构件的破坏与普通钢筋混凝土梁受剪梁不同,斜裂缝一般贯通铆钉孔并迅速贯通梁顶,随着荷载的增加,裂缝不断增大,当剪跨比较大时钢板应力在构件即将破坏时迅速增大,当剪跨比较小时,钢板应力得不到充分发挥,最后构件产生破坏。在构件受力后期,明显可以观察到锚固端局部损伤,但由于铆钉的锚固作用,钢板不会发生剥离。图 7(b)示出了部分受剪构件外贴钢板中间处应变随荷载变化的结果,由于受裂缝位置和数量变化以及剪跨比的影响,钢板应变的发展具有一定的随机性,从钢板的最大应变可以发现,随着荷载的增大,钢板的应力逐渐增大,但最后由于混凝土梁的剪压破坏,钢板的应力出现下降甚至退出工作,构件破坏时,多数构件的外贴钢板没有达到屈服强度。



(a)BDS2为斜压破坏



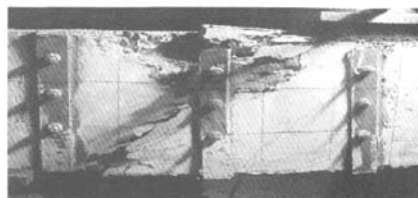
(b)BDS3为剪压破坏

图 5 BDS2 和 BDS3 破坏形态

Fig.5 The destruction shape of BDS2 and BDS3



(a)BDS6为剪压破坏



(b)BDS7为剪压破坏

图 6 铆钉对破坏形态的影响

Fig.6 The rivets and screw have not so much impact on the destruction shape

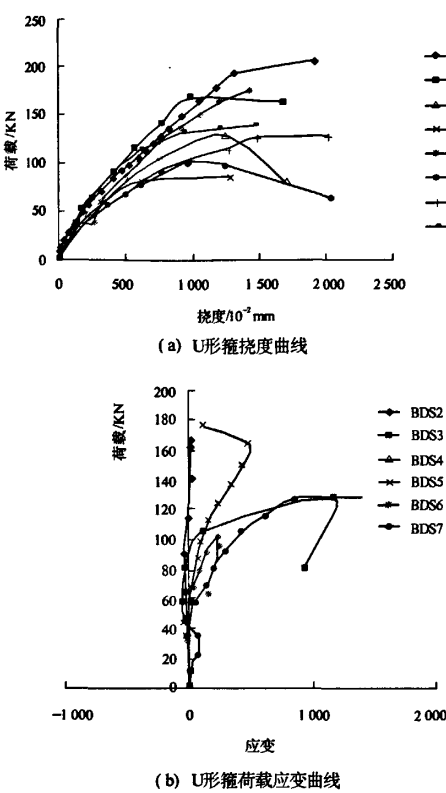


图 7 荷载挠度曲线和荷载应变曲线

Fig.7 The comparison of load - deflection curve and load compared strain curve of each beam

表 3 铆粘钢板加固梁受剪试验结果

Tab.3 The result of test beam

试验梁 编号	垂直开裂 剪力/kN	斜裂剪 力/kN	极限剪 力/kN	破坏 特征
BDS1	20.60	85.00	206.80	弯剪破坏
BDS2	64.30	90.00	167.20	斜压破坏
BDS3	46.80	58.60	128.80	剪压破坏
BDS4	46.80	58.60	82.00	剪压破坏
BDS5	50.28	50.28	163.40	斜压破坏
BDS6	33.75	45.00	101.25	剪压破坏
BDS7	34.86	58.10	127.82	剪压破坏
BDS8	57.61	74.07	139.91	斜拉破坏

3 铆粘 U 形钢板箍加固梁的受剪承载力计算

根据试验结果回归分析,采用铆粘 U 形钢板箍加固钢筋混凝土梁的受剪承载力可按如下公式计算^[5]:

$$V \leqslant 0.8V_c + V_{sv} + V_{sb} + 0.6 \frac{A_{sp}f_{sp}}{S_{sp}}h_o \quad (1)$$

式中各值所代表的含义参照混凝土结构加固技术

规范^[3].根据文献[5]0.8 为考虑打孔对混凝土的损伤折减系数,0.6 为考虑临近破坏时铆粘钢板有可能未达到屈服强度的折减系数.试验值与按(1)式计算值的比较列于表 4,除 BDS4 外试验结果与计算结果符合较好.BDS2 和 BDS5 的剪跨比较小,梁的传力模型可以认为是一个斜向放置的短柱,当短柱被压碎时,梁破坏,随着变形的加大,裂缝间的骨料咬合作用不断破坏,抗力不断下降,最后短柱范围内的混凝土被压酥,铆粘 U 形箍板的应力不能充分发挥,按照现行混凝土结构设计规范理论计算有一定的误差,因此未列入表 4 中.

表 4 试验值和计算值比较

Tab.4 The comparison of experimental and predicted value

试验梁 编号	试验值 V_u /kN	计算 V_c /kN	V_u/V_c
BDS3	128.80	91.9	1.40
BDS4	82.00	92.2	0.89
BDS6	101.30	89.0	1.14
BDS7	127.82	92.1	1.39

4 结论

- 1) 粘接胶的形式和铆钉形式对铆粘钢板斜截面加固效果影响不大,剪跨比较小时混凝土梁发生斜压破坏,剪跨比较大时发生剪压破坏;
- 2) 梁底粘贴钢板使梁的刚度增加,在荷载作用下,不存在塑性铰区,加固梁抗度较小.
- 3) 铆粘钢板箍可以有效防止梁底粘贴钢板的剥离,保证梁底加固钢板的应力充分发挥.
- 4) 铆粘 U 形钢板箍加固梁的受剪承载力可按(1)式计算.

参考文献:

[1] 桑大勇,王仁义,刘立新. 锚贴钢板加固钢筋混凝土梁受剪性能的试验研究[J]. 建筑结构,2007,(7): 410-413.

[2] 曹双寅,孙永新,朱海峰,等. 粘钢加固梁粘接锚固性能的试验研究及建议[J]. 工业建筑,2000,(2):4-7.

[3] GB 50367-2006《混凝土结构加固设计规范》[S]. 北京:中国建筑工业出版社. 2006.

[4] GB 50010-2002《混凝土结构设计规范》[S]. 北京:中国建筑工业出版社. 2002.

[5] 甘元初. 锚贴钢板加固钢筋混凝土梁受剪性能的试验研究[D]. 郑州:郑州大学土木工程学院硕士学位论文,2006.

(下转第 47 页)

合计算,计算结果表明:考虑耦合作用将对应力和位移产生较大影响,对土石坝的稳定不利。

参考文献:

- [1] 陈晓平,茜平一.非均质土坝稳定性的渗流场和应力场耦合分析[J].岩土力学,2004,54(05):860 - 864.
- [2] 毛昶熙.渗流计算分析与控制[M].北京:水利电力出版社,1991.306 - 330.
- [3] 王金昌,陈页开.ABAQUS在土木工程中的应用[M].杭州:浙江大学出版社,2006:60 - 109.
- [4] 柴军瑞,仵彦卿.均质土坝渗流场与应力场耦合分析的数学模型[J].陕西水力发电,1997,(10):4 - 7.
- [5] 殷宗泽.土工原理[M].北京:中国水利水电出版社,2007:312 - 366.

Stability Analysis of Earth - rockfill Dam Based on Fluid - solid Coupling

LI Zong - kun, WANG Peng - fei, ZHAO Feng - yao

(School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on the seepage characteristics of porous media and nonlinear constitutive relation, the coupling effect of seepage field and stress field is studied. And based on the principle of elasticity and seepage, the fluid - solid coupling mathematic model and finite element format are constructed. According to the earth - rockfill dam of Yanshan reservoir, a mathematical model of nonlinear coupling analysis is established, and the fluid - solid coupling model is analyzed by using general purpose finite element software ABAQUS. The results show that the interaction of seepage and stress in dam can not be ignored. The security of earth - rockfill dam stability will be reduced considering the coupling interaction.

Key words: fluid - solid coupling; ABAQUS; earth - rockfill dam; nonlinear; Yanshan reservoir

(上接第21页)

Experimental Study on Shear Properties of R. C. Beams Strengthened with externally bonded Steel Plate Anchored by Rivets or Screw

XIE Li-li¹, YU Shu-gang², LIU Li-xin², PENG Chang-ling², WANG Ming-zhi²

(1. Multifunctional Design and Research Academy Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Six R. C. beams strengthened with this method and two un-strengthened R. C. beams are tested and analyzed. The shear properties, bearing capacity, development of cracks, rigidity and the strengthened effect of the beams anchored by rivets or screw are discussed and compared with the un-strengthened beam. A design formula is given about R. C. beam which is strengthened with externally bonded steel plate anchored by rivets or screw in this paper, and the results indicate that the formula provides good reliability.

Key words: externally bonded steel plate anchored by rivets or screw; shear strength; suggest formula caculated for mular