

# 建筑结构粘钢补强 加固技术研究

山东工业大学

# 粘钢补强加固技术研究\*

## 阶段报告之一: 砼抗折试件粘钢补强的静载试验

罗建群 孙纪正 赵治广 荣济平

山东工业大学

**摘要:** 砼抗折试件粘钢补强的静载试验研究表明, 粘贴的补强钢板能与原试件共同工作, 产生协调变形, 可显著提高原构件的承载力和刚度。通过对补强试件破坏形式和影响补强效果因素的分析研究, 探讨了粘钢补强的合理方法, 为粘钢补强加固技术提供了依据。

### 一、引言

粘钢补强加固方法不仅可用于砼或钢筋砼结构裂缝及其他病害的修补, 还可用以设计承载能力不足的改扩建工程。

众所周知, 砼裂缝是砼及钢筋砼结构工程老化病害中最为突出、最为普遍的问题。宏观裂缝不仅会降低结构的承载能力或刚度, 同时, 还将降低结构的防水性、气密性、引起砼内钢筋锈蚀或诱发其他工程病害, 从而降低了工程耐久性, 并可能造成工程事故。所以, 对于严重的砼构件裂缝, 必须及时地采用合理可靠的修补措施进行补强加固, 以防止或抑制其裂缝的开展, 恢复或提高其承载能力和结构刚度, 延长工程使用寿命。另外, 对某些因设计或施工有误, 而造成配筋不足的结构以及需提高设计荷载

---

\* 国家自然科学基金和山东省自然科学基金联合资助

的改扩建工程，也常需对某些结构构件进行补强加固。

粘钢补强加固方法，是依靠具有良好粘结性能高强建筑胶粘剂，把钢板与砼牢固地粘结在一起形成整体，使有效地传递应力，共同工作。从而恢复或提高结构的承载能力和结构刚度，同时也可恢复因裂缝而降低了的各種功能。

本阶段试验是选择部分去年本子课题为研究不同裂缝修补材料、切口型式、界面处理方法等预留裂缝的已经破坏之砼抗折试件，先采用环氧砂浆修补裂口后，再用粘结剂在底部受拉区粘贴钢板。通过静载试验，研究采用不同粘结剂，对不同标号的砼试件和不同厚度钢板的补强加固效果和影响因素；加载过程中的钢板实际受力状况；以及破坏形式和破坏机理等。以寻求经济合理的补强加固技术。

## 二、试 验

### (一) 砼试件

#### 1、原试件情况

原抗折试件采用 $150 \times 150 \times 550\text{mm}$ 的小梁为标准试件，砼的设计强度分别为 $C_{20}$ 、 $C_{30}$ 。其中又分加筋和不加筋两种。所配钢筋为2根 $\phi 3$ (即8#铁丝)，经测试，抗拉强度为 $R_t = 500\text{MPa}$ 。其保护层厚为 $20\text{mm}$ ，水泥采用425#普通硅酸盐水泥，骨料最大粒径为 $d_m = 40\text{mm}$ ，砂为中砂，其细度模数 $M_x = 2.70$ ，级配良好。砼拌和材料及配比见表1。坍落度为 $3 \sim 5\text{cm}$ ，采用人工拌和，振捣台振捣的方法成型，24小时后拆模，然后放入砼标准养护室内养护28天。

表1 砼拌和配比表(重量比)

| 材料<br>强度<br>等级 | 水泥 | 水    | 砂   | 石子   |
|----------------|----|------|-----|------|
| C20            | 1  | 0.59 | 2.1 | 3.57 |
| C30            | 1  | 0.45 | 2.1 | 3.14 |

原试件都曾预留过各种角度与深度的切口，作为预留裂缝。然后在试件切口内充填有机高分子材料，聚合物水泥基材料及无机修补材料等进行修补，再进行破坏性试验。各个原试件的具体情况 & 试验结果详见“砼裂缝修补技术研究(砼抗折试验法)”一文。

## 2、砼试件的修复

原砼抗折试件在做完抗折试验后，都已出现裂缝，有的在新断面上。在粘贴钢板之前，应对原试件进行修复。本次试验全部用环氧砂浆修补。修复之前，首先对原试件进行基体处理。先把原切口处充填材料除去，然后用钢丝刷把切口及裂缝中松散浮渣刷去，再用毛刷刷去灰尘，最后用高压水冲洗干净，晾干备用。修复时，先按配比配制树脂基液，在干燥的切口面及裂缝处涂刷一遍基液，待半固化后，再配环氧砂浆，填入切口及裂缝内，填平压实。固化24h后即可使用。

## (二) 粘贴补强钢板

### 1、钢板

粘贴钢板全部采用A<sub>3</sub>钢。其厚度分别为1.5mm、3.0mm和4.5mm，钢板尺寸为 $b \times L = 150 \times 400\text{mm}$ 。

## 2、粘结剂

粘钢补强的粘结剂采用了环氧粘结剂及Jc—1动力结构胶粘剂。

环氧粘结剂配比及其性能如表2和表3。

表2 环氧粘结剂配合比(重量比)

| 材料<br>种类 | E44 | 增韧剂 | 固化剂  | 稀释剂  | 425#水泥 | 石英粉 |
|----------|-----|-----|------|------|--------|-----|
| 环氧<br>基液 | 100 | 15  | 8~10 | 5~10 |        |     |
| 环氧<br>腻子 | 100 | 15  | 8~10 | 5~10 | 100    | 200 |

表3 环氧砂浆性能表

| 项目 | 极限强度(MPa) |      | 弹性模量(GPa) |      |
|----|-----------|------|-----------|------|
|    | 抗 拉       | 抗 弯  | 抗 拉       | 抗 弯  |
| 指标 | 5.5       | 26.1 | 17.9      | 14.9 |

JC—1型强力动荷结构胶粘剂是以高分子物为主体的触变性双组分胶料，A组分为固化剂，B组分为膏状物胶料，A：B=1：4（重量比）

主要技术性能：(根据厂方提供数据)

### 1) 物理性能

胶粘剂固化时间：初固：20℃为24小时。

(固化90%以上)

固化完全：20℃时为48小时。

## 2) 机械性能

钢板—砼粘结: 平均剪切强度 $>6\text{MPa}$ , 砼破坏; 抗拉强度大于  
砼抗拉强度, 砼破坏;

钢—钢粘结, 抗剪强度 $16\sim 18\text{MPa}$ ; 抗拉强度 $30\sim 35\text{MPa}$ ;

抗压强度平均 $70.6\text{MPa}$ ;

均匀扯离强度 $18\text{MPa}$ ;

线膨胀系数 $2.6\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$

## 3、粘贴方法

(1) 砼基层处理: 用砂轮打磨砼粘贴表面, 去掉 $1\sim 2\text{mm}$ 厚表层,  
用高压水冲洗干净, 待干燥后脱脂棉沾丙酮擦试表面即可。

(2) 钢板表面处理: 首先, 用砂轮打磨钢板粘贴面, 直至出现  
金属光泽, 打磨纹路应与钢板受力方向垂直。其后用脱脂棉沾丙  
酮擦试干净。

(3) 粘结: 粘结剂配制好后, 用抹刀同时涂抹在已处理好的砼  
表面和钢板面上, 厚度 $1\sim 3\text{mm}$ , 中间厚边缘薄, 然后将钢板贴于  
预定位置。粘好钢板后, 用手锤沿粘贴面轻轻敲击钢板, 如无空  
洞声, 表示已粘贴密实, 否则应剥下钢板补胶, 重新粘贴。

(4) 加压: 钢板粘贴好后, 应立即固定加压。固定加压压力约  
为 $0.1\text{MPa}$ , 使胶粘剂从钢件周边挤出时为止。

(5) 固化: 保持 $20^{\circ}\text{C}$ 以上,  $24\text{h}$ 后即可撤去荷载,  $3\text{d}$ 后可受力  
使用。

## (三) 试验装置

1、支承条件将芯梁简支在试验机的圆柱支座上, 支座间距 $4$

50mm, 如图1。

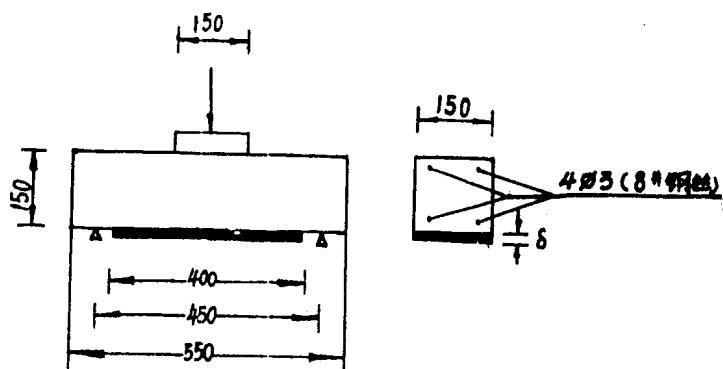


图1 试验装置图

## 2、荷载测定

采用英国产的RSA250电子万能试验机加载, 并自动记录破坏荷载, 其加载速度为50KN/min。

## 3、应变测量

通过该试验机所附引伸仪测求钢板应变。测量时, 在钢板中部粘贴刀口固定块, 刀口间距10mm, 把引伸仪卡在刀口中, 从X—Y记录仪上直接记录在不同荷载下钢板两测点间的相对变形值, 从而可求出跨中底部钢板的应变值  $\varepsilon$ 。

## 4、裂缝观测

用读数显微镜对破坏试件的裂缝进行测读描述。

### (四) 试验方法

试验机压头通过加力桥以纯弯曲的方式加载, 两对称着力点各距支座150mm。各梁均先在破坏荷载的 $1/3 \sim 1/2$  (30KN左右)

范围内进行2~5次逐级加载和卸载的测试后, 再进行破坏性试验。另外, 我们还做了10根不同类型的粘钢补强砼抗折试件, 在不同动载等级下, 先经20万次左右的疲劳试验(疲劳试验报告另附), 其中, 有8根经疲劳试验后, 无异常现象的试件, 仍在IN JTRON8302型疲劳试验机上进行静载破坏性试验。

### 三、试验结果及分析

#### (一) 原材料试验结果

##### 1、砼强度测试

在制作芯梁同时, 按同样浇注、振捣及养护条件下制取砼标准试件(150×150×150mm)在WE-2000试验机上进行试验, 其加载速度为0.3~0.5MPa/S, 直至试件破坏, 记录其破坏荷载, 每组试件为三块, 其测试结果及强度评定见表4。

表4 抗压强度测试结果

| 强 度<br>等 级 | 极限荷载(KN) |       |       | 抗压强度(MPa) |      |      | 评定值   |
|------------|----------|-------|-------|-----------|------|------|-------|
|            | 1        | 2     | 3     | 1         | 2    | 3    |       |
| C20        | 670.5    | 616.5 | 605.2 | 29.8      | 27.4 | 26.9 | 28.03 |
| C30        | 816.8    | 834.8 | 817.0 | 36.3      | 37.1 | 36.3 | 36.60 |

实测结果表明, 砼强度同设计强度基本相近。

##### 2、钢板拉伸强度测试

用同样A<sub>3</sub>制作1.5mm, 3.0mm, 4.5mm厚钢板拉伸试验件各3根, 进行拉伸性能测试, 同时记录其荷载—应变曲线。图2为其典型的荷载—应变曲线, 各试验件测试结果见表5。

表5 钢板拉伸性能表

| 编 号 | 试件<br>编 号 | 试件厚度(mm) |      | 试件宽度(mm) |      | 面 积<br>(mm <sup>2</sup> ) | 屈 服<br>荷 载<br>(KN) | 破 坏<br>荷 载<br>(KN) | 屈 服<br>应 力<br>(MPa) | 破 坏<br>应 力<br>(MPa) | 弹性模量(MPa) |          |
|-----|-----------|----------|------|----------|------|---------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-----------|----------|
|     |           | 实 测      | 平 均  | 实 测      | 平 均  |                           |                    |                    |                     |                     | 实 测       | 平 均      |
| A   | A-1       | 1.45     |      | 21.4     |      |                           | 6.80               | 8.200              | 219.1               | 264.2               | 1.826×10  |          |
|     | A-2       | 1.50     |      | 21.6     |      |                           | 6.90               | 8.540              | 213.0               | 263.6               | 2.060×10  | 1.805×10 |
|     | A-3       | 1.50     | 1.48 | 21.8     | 21.6 | 31.97                     | 7.40               | 9.420              | 226.3               | 288.2               | 1.529×10  |          |
| B   | B-1       | 2.50     |      | 20.3     |      |                           | 14.80              | 17.310             | 291.6               | 341.2               | 1.810×10  |          |
|     | B-2       | 2.55     | 2.55 | 19.6     | 19.2 | 49.05                     | 14.60              | 17.980             | 292.1               | 359.8               | 1.688×10  |          |
|     | B-3       | 2.60     |      | 17.8     |      |                           | 14.40              | 15.820             | 311.1               | 341.8               | 2.222×10  |          |
| C   | C-1       | 4.19     |      | 19.8     |      |                           | 21.20              | 30.230             | 255.5               | 364.3               | 1.808×10  |          |
|     | C-2       | 4.15     | 4.11 | 18.4     | 20   | 82.27                     | 22.80              | 29.250             | 298.6               | 383.1               | 2.183×10  | 1.967×10 |
|     | C-3       | 4.00     |      | 21.8     |      |                           | 24.40              | 32.000             | 279.8               | 367.0               | 1.911×10  |          |

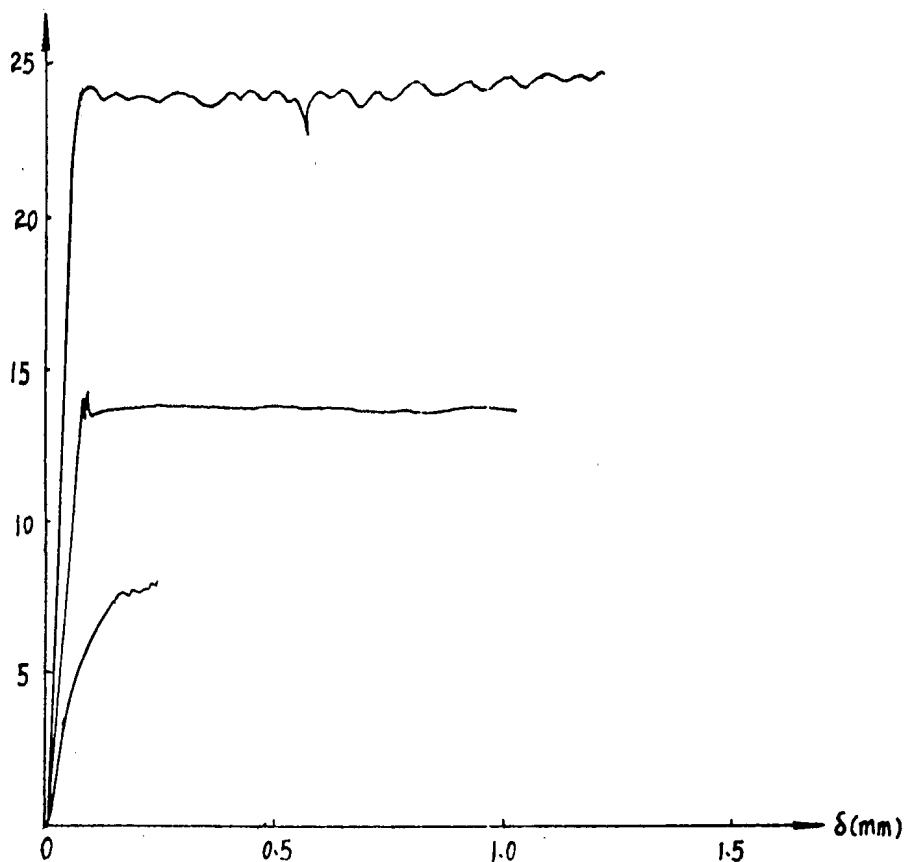


图2 钢板荷载—应变曲线

### 3、粘结剂性能测试

本次试验中，在进行抗折试件等幅动载疲劳试验的同时，做了七块 $100 \times 100 \times 100$ mm粘钢砼试件的剪切实验，其中，三块环氧胶粘钢剪切试件，按钢板面积 $(40 \times 40)$ mm<sup>2</sup>计算，各试件抗剪强度平均为13.58MPa，按实际砼面积计算，各试件抗剪强度平均为7.95mm<sup>2</sup>，四块JC—1结构胶粘钢剪切试件，各试件抗剪强度平均为9.80MPa，按实际砼面积计算，各试件抗剪强度平均为4.28MPa。

#### (二)粘钢补强试件静载试验结果

粘钢补强砼抗折试件静载试验主要成果如表6；同类试件经动载下20万次左右疲劳试验后无异常现象的试件，再进行静载破坏性试验的主要结果如表7。图3为静载试验中补强钢板跨中的荷

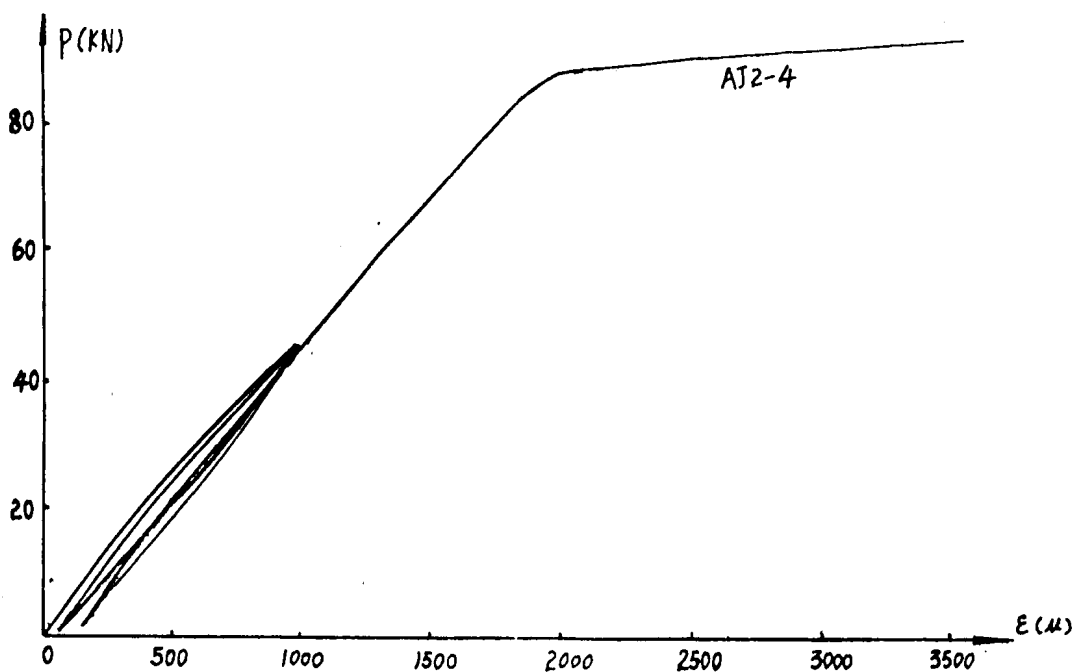


图3 试件跨中钢板荷载—应变曲线

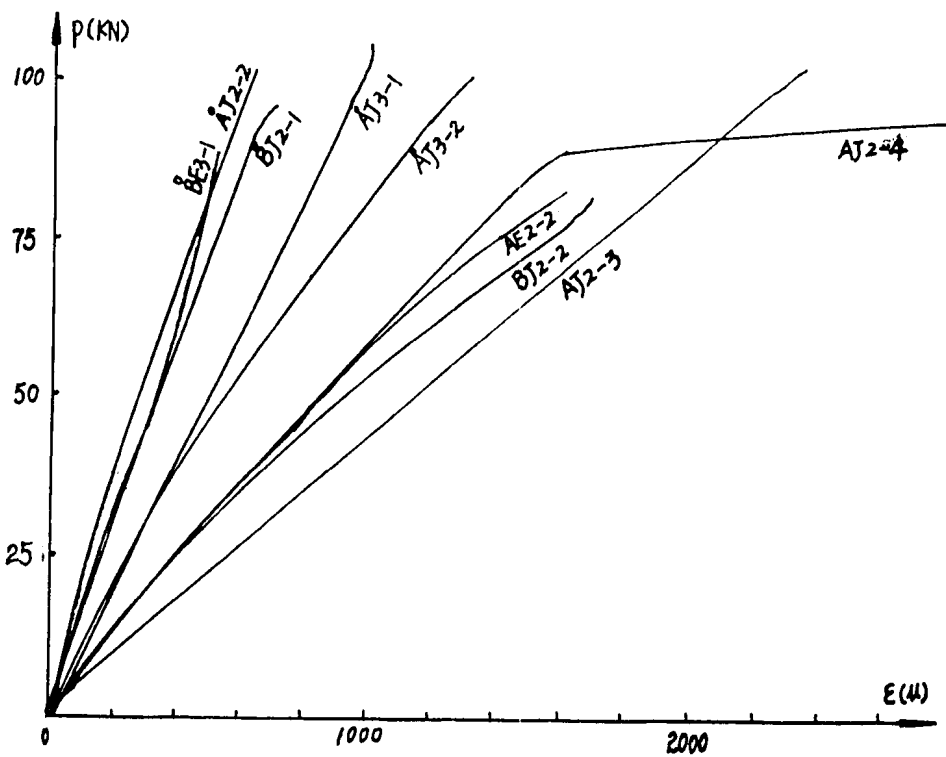


图4 试件破坏对比曲线

表6 粘钢补强经折试件的静载试验成果表

| 序<br>号 | 试<br>件<br>编<br>号 | 原试件情况    |                                    |                          |                           |        |              | 粘贴钢板的补强试件 |        | 静 载 试 验             |                |                     |                     |                           |                |                     | 破坏后检查结果         |                  |                            | 说<br>明   |                         |                                                                             |
|--------|------------------|----------|------------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------|--------------|-----------|--------|---------------------|----------------|---------------------|---------------------|---------------------------|----------------|---------------------|-----------------|------------------|----------------------------|----------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
|        |                  | 设计<br>标号 | 实<br>测<br>强<br>度<br>$R_b$<br>(MPa) | 破<br>坏<br>荷<br>载<br>(KN) | 抗<br>压<br>强<br>度<br>(MPa) | 折<br>度 | 试件破<br>坏情况   | 粘<br>材    | 贴<br>料 | 阴<br>板<br>厚<br>(mm) | 荷<br>载<br>(KN) | 变<br>形<br>量<br>(mm) | 应<br>变<br>( $\mu$ ) | 钢<br>板<br>应<br>力<br>(MPa) | 荷<br>载<br>(KN) | 应<br>变<br>( $\mu$ ) | 应<br>力<br>(MPa) | 破<br>坏<br>类<br>型 | 粘<br>结<br>固<br>化<br>情<br>况 |          | 粘<br>结<br>面<br>积<br>(%) |                                                                             |
| 1      | AE2-2            | C20      | 28.03                              |                          |                           |        |              | 环氧        | 环氧     | 1.5                 | 31.6           | 0.00684             | 684                 |                           | 123.462        | 80.70               | 1800            | 324.9            | a                          | 固化<br>良好 | 80~90                   |                                                                             |
| 2      | BE2-2            | C20      | 28.03                              | 28.1                     | 3.75                      |        | 通缝           | 环氧        | 环氧     | 3.0                 | 40.8           | 0.0060              | 600                 |                           | 114.42         | 69.05               | 1100            | 209.77           | a                          | 固化<br>良好 | 80~90                   |                                                                             |
| 3      | BE3-1            | C30      | 36.60                              | 47.0                     | 6.27                      |        | 通缝           | 环氧        | 环氧     | 3.0                 | 40.0           | 0.0072              | 720                 |                           | 137.30         | 72.55               | 1450            | 276.52           | a                          | 固化<br>良好 | 80                      |                                                                             |
| 4      | BE3-3            | C30      | 36.60                              | 31.5                     | 4.20                      |        | 修补外新<br>断面开裂 | 环氧        | 环氧     | 3.0                 |                |                     |                     |                           |                | 73.4                |                 |                  | b                          | 固化<br>良好 | 60~70                   |                                                                             |
| 5      | AJ2-3            | C20      | 28.03                              | 35.0                     | 4.67                      |        | 新断面<br>开裂    | JC-1      | JC-1   | 1.5                 | 66.0           | 0.0200              | 2000                |                           | 361.0          | 94.4                | 3000            | 541.50           | d                          | 固化<br>良好 | 90~100                  |                                                                             |
| 6      | AJ2-4            | C20      | 28.03                              | 28.0                     | 3.73                      |        | 切口一侧<br>开裂   | JC-1      | JC-1   | 1.5                 | 41.6           | 0.0087              | 870                 |                           | 157.04         | 95.3                | 3400            |                  | c                          | 固化<br>良好 | 90~100                  | 破坏时, 钢板已接近<br>或达到流限 $\varepsilon=1900$<br>时, 已达 $\sigma_t=342.95\text{MPa}$ |
| 7      | AJ3-2            | C30      | 36.60                              | 35.5                     | 4.73                      |        | 新断面开裂        | JC-1      | JC-1   | 1.5                 | 29.6           | 0.0039              | 390                 |                           | 70.40          | 105.7               | 1500            | 270.75           | d                          | 固化<br>良好 | 90~100                  |                                                                             |
| 8      | BJ2-2            | C20      | 28.03                              |                          |                           |        |              | JC-1      | JC-1   | 3.0                 | 49.2           | 0.0101              | 1010                |                           | 192.61         | 81.05               | 1700            | 324.19           | a                          | 固化<br>良好 | 90~100                  |                                                                             |

破坏时, 钢板已接近  
或达到极限  $\varepsilon = 1900$   
时, 已达  $\sigma = 342.95 \text{ MPa}$

表7 粘钢补强抗折试件经动载等幅疲劳试验后的静载破坏试验成果表

| 序<br>号 | 试<br>件<br>编<br>号 | 原试件情况    |                          |                          |                      |            |             | 粘贴钢板的补强试件   |            | 经疲劳试验后的静载试验破坏结果 |                   |            |                 |                           |                  | 破坏后检查结果                    |                         |                                                                           | 说<br>明 |
|--------|------------------|----------|--------------------------|--------------------------|----------------------|------------|-------------|-------------|------------|-----------------|-------------------|------------|-----------------|---------------------------|------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------|
|        |                  | 设计<br>标号 | 实测抗<br>强度 $R_b$<br>(MPa) | 破<br>坏<br>荷<br>载<br>(kN) | 抗<br>强<br>度<br>(MPa) | 试件破<br>坏情况 | 粘<br>材<br>料 | 粘板厚<br>(mm) | 荷载<br>(kN) | 应变<br>( $\mu$ ) | 钢板<br>应力<br>(MPa) | 荷载<br>(kN) | 应变<br>( $\mu$ ) | 应<br>力<br>应<br>变<br>(MPa) | 破<br>坏<br>类<br>型 | 粘<br>结<br>固<br>化<br>情<br>况 | 粘<br>结<br>面<br>积<br>(%) |                                                                           |        |
| 1      | AE3-1            | C30      | 36.60                    | 35.5                     | 4.73                 | 新断面上<br>开裂 | 环氧          | 1.5         | 30         | 390             | 70.40             | 100.5      | 2300            | 415.15                    | a                | 固化<br>较好                   | 10                      | 破坏后检查发现, 环<br>氧胶粘结试件是在,<br>钢板上粘结胶的面积积<br>较小, 但其环氧砂浆浆<br>过渡层均与原试件<br>牢固粘结。 |        |
| 2      | AE2-1            | C20      | 28.03                    | 33.5                     | 4.47                 | 切口侧开裂      | 环氧          | 1.5         |            |                 |                   | 86.35      |                 |                           |                  | 固化<br>较好                   | 40~50                   |                                                                           |        |
| 3      | BE3-1            | C30      | 36.60                    | 34.6                     | 4.61                 | 切口一侧<br>开裂 | 环氧          | 3.0         | 35         | 220             | 41.95             | 102.4      | 650             | 123.96                    | a                | 固化<br>较好                   | 20~30                   |                                                                           |        |
| 4      | AI2-1            | C20      | 28.03                    | 24.9                     | 3.32                 | 切口一侧<br>开裂 | JC-1        | 1.5         | 35         | 360             | 64.98             | 108.2      |                 |                           | a                | 固化<br>较好                   | 100                     |                                                                           |        |
| 5      | AI2-2            | C20      | 28.03                    |                          |                      |            | JC-1        | 1.5         | 50         | 170             | 30.69             | 96.81      | 720             | 129.96                    | a                | 固化<br>较好                   | 100                     |                                                                           |        |
| 6      | AI3-1            | C30      | 36.60                    | 31.6                     | 4.21                 | 切口一侧<br>开裂 | JC-1        | 1.5         | 30         | 310             | 55.96             | 104.7      | 1040            | 187.72                    | a                | 固化<br>较好                   | 95                      | 距支点10cm左右有<br>-70°斜裂缝                                                     |        |
| 7      | BI2-1            | C20      | 28.03                    | 25.5                     | 3.40                 | 切口一侧<br>开裂 | JC-1        | 3.0         | 30         | 280             | 53.40             | 88.37      | 680             | 129.68                    | a                | 固化<br>较好                   | 95                      |                                                                           |        |
| 8      | BI3-1            | C30      | 36.60                    | 33.1                     | 4.41                 | 新断面<br>上开裂 | JC-1        | 3.0         |            |                 |                   | 118.7      |                 |                           | a                | 固化<br>较好                   | 95~100                  |                                                                           |        |

载—应变的典型过程曲线；图4为各试件静载破坏时的对比曲线。

试验结果表明，各粘钢补强的抗折试件实测的极限荷载 $P_u$ 为69.06~118.7kN，平均破坏荷载为92.39kN，由于试验条件不完全相同，其离散程度较大，其 $C_u=0.1543$ ； $C_s=0.0501$ ；相应的破坏弯矩值 $M_u$ 为 $(0.518\sim0.890)\times 10^3\text{N}\cdot\text{m}$ ，平均为 $0.693\times 10^3\text{N}\cdot\text{m}$ 。而未粘钢板的同类抗折试件实测的极限荷载平均值为34.9kN，破坏弯矩平均值为 $0.262\times 10^3\text{N}\cdot\text{m}$ 。可见，经粘贴补强后，其极限承载能力约为原试件的2~3.4倍，平均为2.65倍。说明粘钢补强后均可大幅度地提高其承载能力。当然，由于钢板厚度、粘结剂种类、砼强度、粘结工艺及试验方式的不同，各试件的破坏形式及承载能力提高的程度也是不尽相同的。

### (三) 粘钢补强试件的破坏形式及现象分析

无论直接的静载试验或先经动载下等幅疲劳试验后的静载破坏试验的粘钢补强砼抗折试件的最终正常破坏形式有如下四种类型：(图5)

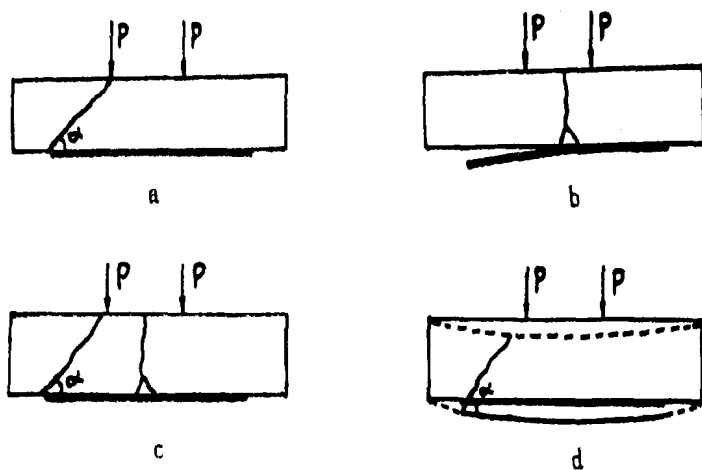


图5 试件破坏型式

1、钢板粘结良好，破坏是沿一侧支点，因砼的抗剪强度不足而呈 $45^{\circ}$ 左右的砼开裂破坏(a型)。其破坏状况如图5，a所示。这是大多数试件最常见的破坏形式。

试验后检查结果表明，钢板与底部砼粘结面积均在80—90%以上，结合牢靠，钢板已通过粘结剂与原构件共同受力。在试件底部受弯段内，由于补强钢板的作用，在纯弯段内，已经满足乃至超过了该段正截面弯曲受拉强度的要求；在其余有钢板粘结部分，也能承受该段内的弯矩及剪力的共同作用。但由于试件砼的抗拉及抗剪强度较低，随着荷载增大，支座附近的主应力也增大，当在补强钢板外缘的支座附近的砼的强度不足以抵抗该点主拉应力时，必将出现由底部支座开始垂直于主拉应力迹线的斜裂缝，并迅速地向受压区边缘发展而导致试件破坏。显然，这类破坏是由于在支座附近斜截面强度不足，又未予加固的结果。即使底部钢板未能充分发挥作用，但也已有效地提高了抗折试件的承载能力，一般为原试件承载力的2倍以上。

2、钢板粘结良好，破坏是由原裂缝修补处开裂，其后沿补强钢板一端粘结裂开(b型)。其破坏形式如图5、b所示。

破坏后检查结果表明，钢板与砼粘结面积在60%~70%，结合尚好。尽管钢板与原砼抗折试件已共同工作，变形协调。但由于原破损的试件，裂缝已较深或接近折断，而补钢板前的裂缝修补不可能十分完善。因此，当跨中纯弯段受力最大的原裂缝附近砼已达到极限抗抗应变时，原裂缝处就有可能首先出现微裂缝，

受拉区砼退出工作，其抗力将全部转移到补强钢板及梁内钢丝上。当荷载继续增大，钢板与砼表面产生的剪应力达到使钢板粘结破坏的极限剪切强度时，产生沿钢板一侧的粘结开裂破坏。在这一类破坏形式中，钢板并未很好地发挥补强加固作用。这种破坏形式下，承载能力为原试件的2倍左右。

3、钢板粘结良好，破坏首先由原裂缝修补处出现微裂缝，最后沿钢板一端砼内剪切破坏(C型)。其破坏形式如图5，C所示。

破坏后检查结果表明，钢板与砼粘结面积在80%以上，结合良好。补强钢板与原砼抗折试件已共同工作，变形协调。当跨中纯弯段受力最大的原裂缝附近砼已达到极限抗拉应变时，原裂缝处就有可能首先出现微裂缝，但由于钢板粘结较好，与原构件协调变形，较好地发挥了作用，限制了修补处裂缝的继续开展。随着荷载的继续增大，当砼内斜截面产生的剪应力大于原试件的抗剪强度时，便会出现类似第一类的破坏形式。显然，在这类破坏形式中，补强钢板已较充分地发挥了补强加固作用，限制了跨中裂缝的开展。这种破坏形式下，其承载能力为原试件的2.5倍以上。

4、钢板粘结良好，钢板与原试件协调变形，补强钢板已明显弯曲。当荷载继续增大时，最终因砼斜截面上强度不足而沿补强钢板的一侧产生砼剪切破坏(d型)。其破坏形式如图5，d所示。

当补强钢板配置恰当，且粘结剂材料及工艺合理，粘结效果良好的试件，受载时，补强钢板将通过粘结剂与原试件形成整体，使有效地传递应力而共同工作，粘结面上变形一致。当荷载接近极限荷载时，在纯弯段明显可见补强钢板与原试件的共同弯曲现

象,而又不脱壳,补强试件仍保持协调变形,跨中挠度可达4~5mm,相对挠度达1%以上,补强钢板应力接近屈服强度,说明已充分发挥其补强加固作用。最终的破坏也多因支座附近斜截面强度不足而形成第一种类型的破坏型式。承载能力一般为原试件的3倍左右。是一种补强合理的破坏方式。

另外,在实验中也曾发生过个别非正常破坏情况。均系当荷载较小时,补强钢板未见受力,而当荷载接近原试件破坏荷载时,钢板以一侧脱壳,试件本身破坏。经检查分析,多系使用了过期粘结剂;或粘结时未加压;或是钢板粘结面除锈不好或有油渍等,属粘结不良的情况。所以,受载时,当粘结面上不能或很少传递应力,补强钢板不能起到应有作用或退出工作而未能达到提高承载力的目的。从剥离的钢板来看,粘结面上所粘砼有效面积仅达20~30%左右。

#### (四)粘钢补强的影响因素

粘钢补强能够大幅度提高砼抗折试件的承载能力和刚度是无庸置疑的。但补强加固的效果却与粘结剂种类、粘结工艺、补强钢板厚度、砼试件的强度及补强加固方法等因素密切相关。从静载试验结果来看,以上各因素分别有不同的影响。

##### 1、粘结剂的影响

对比同为C<sub>30</sub>和补强钢板厚度1.5mm的试件(AE2-2, AJ2-3和AJ2-4)来看(表8),JC-1结构胶较环氧胶约提高17.5%。从7个采用环氧胶的试件,平均极限荷载为83.56KN,而JC-1胶为99.25KN。JC-1结构胶较环氧胶也约提高18.8%。