

文章编号 1000-5013(2002)03-0260-03

# CFRP 或钢条带加固砼双向板的承载力分析

方 德 平

(华侨大学土木工程系, 泉州 362011)

**摘要** 采用塑性铰线理论, 分析外贴碳纤维布(CFRP)或钢条带加固的正方形板的承载力. 改进张继文的塑性铰线模式, 得出更为精确的理论解, 同时修补了该理论解的一个缺陷, 即随着条带宽度的增加, 承载力上升至无穷大. 与实验值相比较, 由于拱的效应, 本文的理论解偏于保守.

**关键词** 承载力加固, 碳纤维, 钢筋砼, 双向板, 塑性铰线

中图分类号 TU 378.02

文献标识码 A

在已有的许多加固技术中, 外贴板加固法近年来因其施工方便、快捷, 加固后对结构的自重、外观尺寸增加最小的优点而倍受关注. 依据需加固结构的具体情况, 可相应采用钢板或碳纤维布(CFRP)进行补强加固. 其中, 外贴钢板已被广泛用于加固钢筋砼的梁和板等构件. 尽管对采用外贴技术加固的砼梁和单向板已有很多研究, 但对采用该技术加固的砼双向板的研究甚少<sup>[1]</sup>, 特别是对更为实用的外贴条带加固双向板则更少<sup>[2]</sup>. 文献 [2, 3]采用塑性铰线理论, 推导出承载力的计算公式, 但在塑性铰线模式的假定方面, 尚有待改进. 在更为一般的塑性铰线模式的基础上, 本文分析了加固的砼双向板承载力, 得出了简明实用的计算公式.

## 1 双向板的塑性铰线模式

如图 1 所示, 文献 [2]的试验板为正方形四边简支板, 板边长  $a = 1.7 \text{ m}$ , 厚  $70 \text{ mm}$ . 局部荷载作用面边长  $d = 150 \text{ mm}$ .  $\text{SB}_1$  板未加固,  $\text{SB}_2$  板用厚  $0.11 \text{ mm}$ 、宽  $500 \text{ mm}$  的 CFRP 布条十字形粘贴于板底;  $\text{SB}_3$  板用厚  $1 \text{ mm}$ 、宽  $150 \text{ mm}$  的钢条带井字形粘贴于板底, 同方向两条带净间距  $200 \text{ mm}$ . 砼立方体抗压强度为  $26.4 \text{ MPa}$ , 钢筋是  $\varnothing 6.5 @ 150$ , 双向, 屈服应力为  $340 \text{ MPa}$ , 极限应力为  $431 \text{ MPa}$ , 平均保护层厚度  $16.5 \text{ mm}$ . 钢条带的屈服应力为  $250 \text{ MPa}$ , 极限应力为  $324 \text{ Pa}$ . 钢的弹性模量为  $200 \text{ GPa}$ ; CFRP 条带的弹性模量为  $235 \text{ GPa}$ , 极限应力为  $3550 \text{ MPa}$ . 板角处的负筋与板底配

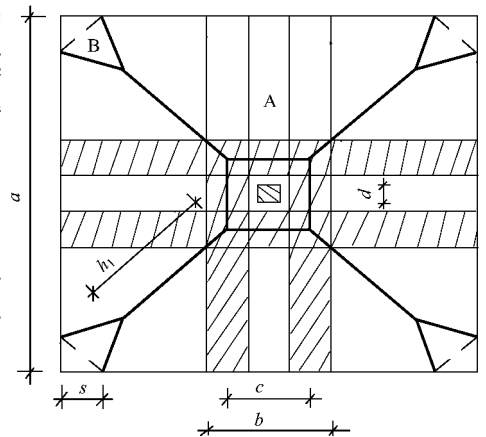


图 1 塑性铰线模式

筋相同, 为模拟简支的边界条件, 板角处施加向下压力。

本文的塑性铰线模式与文献 [2] 的不同之处在于, 铰线并不固定在条带的搭接边上. 即  $c$  值是一个变量 ( $c < d$ ), 不一定等于  $b$ . 我们认为, CFRP 或钢条带只能在纵向承受拉力. 因此, 条带叠合区的单位长度板的塑性弯矩等于未叠合区的塑性弯矩, 有可能在条带叠合区形成塑性铰线。

## 2 用虚功原理计算加固板的承载力

### 2.1 加固板的总虚内功

设中间刚性板块产生向下的单位虚位移, 由几何变形协调条件可得刚性板块 A、B (图 2). 它们绕各自转动轴一简支边和负塑性铰线的转动角为  $\theta_A, \theta_B$ , 可表达为

$$\theta_A = \frac{2}{a(1-t_1)}, \quad \theta_B = \frac{2(1-t_1-\frac{2}{2}t_3)}{a(1-t_1)(1-t_1-t_2-\frac{2}{2}t_3)}, \quad (1)$$

式中的变量  $t_1, t_2, t_3$  分别为  $c/a, s/a, h_1/a$  的几何含义, 如图 1 所示. 刚性板块 A 上的塑性铰线在转角  $\theta_A$  上所作的虚内功  $W_{iA}$ , 刚性板块 B 上的正负弯矩塑性铰线在转角  $\theta_B$  上所作的虚内功为  $W_{iB}$ , 它们分别表示为

$$W_{iA} = \theta_A m_p a (1-t_0-2t_2) + \theta_A M_{pb}, \quad W_{iB} = 2 \frac{2}{2} t_2 a m_p \theta_B, \quad (2)$$

式中  $t_0 = b/a$ , 试验板的板角顶面和板底面的配筋相同. 非加固区的单位长度正负屈服弯矩同为  $m_p$ , 加固区的屈服总弯矩为  $M_{pb}$ . 加固板的总虚内功  $W_i$  表示为

$$W_i = 4W_{iA} + 4W_{iB}. \quad (3)$$

### 2.2 加固板的局部荷载承载力

荷载的虚外功  $W_e = P_u$ ,  $P_u$  为作用在板中心处, 边长为  $d$  的小正方形的局部荷载. 根据虚功原理,  $W_e = W_i$ . 可得与式 (3) 相同的  $P_u$  表达式. 按照塑性理论, 应求出  $P_u$  的极小值. 由  $\frac{dP_u}{dt_3} = 0$ , 可得  $t_2 = 0$  时,  $P_u$  和  $W_i$  为极小值. 即忽略了负弯矩塑性铰线的影响, 塑性铰线延伸至板角, 则  $P_u = \frac{8m_p}{1-t_1} (1-t_0 + \frac{M_{pb}}{m_p a})$ . 显而易见,  $t_1$  为最小值  $\frac{d}{a}$ , 即板中心区的塑性铰线位于局部荷载的周边,  $P_u$  为最小值, 即

$$P_u = \frac{8am_p}{a-d} (1-t_0 + \frac{M_{pb}}{m_p a}). \quad (4)$$

### 2.3 加固板的均布荷载承载力

图 1 所示的加固板受均布荷载  $q_u$  作用, 其虚内功  $W_i$  与局部荷载作用时相同, 而虚外功  $W_e = q_u V$ . 其中  $V$  为板虚位移所构成的体积.

$$W_e = \frac{q_u a^2}{3} \left[ (1+t_1+t_1^2) - 2t_2^2 \frac{1-t_1-\frac{2}{2}t_3}{1-t_1} \right]. \quad (5)$$

根据虚功原理,  $W_e = W_i$ , 可得  $q_u = \frac{W_i}{V}$ . 当  $t_2 = 0$  时,  $W_i$  为极小值,  $V$  为最大值, 整理得  $q_u =$

$$\frac{24m_p}{a^2(1-t_1)} (1-t_0 + \frac{M_{pb}}{m_p a}). \quad \text{当 } t_2 = 0, \text{ 即对角线的屈服铰线模式, } q_u \text{ 为最小值. 即}$$

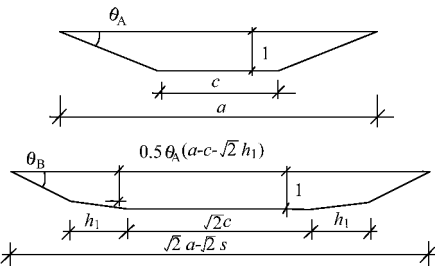


图 2  $\theta_A$  和  $\theta_B$  的计算简图

$$q_u = \frac{24m_p}{a^2} \left( 1 - t_0 + \frac{M_{pb}}{m_p a} \right).$$

(6)

表 1 中,  $P_e$  为文 [2] 的试验值,  $P_u$  和  $q_u$  为本文的计算值, 括号内的数值为文 [2] 中式(8), (14) 的计算值. 对于未加固的 SB<sub>1</sub> 板, 式(4)中  $t_0 = d/a$ ,  $M_{pb} = m_p d$ , 式(6)中  $t_0 = 0$ ,  $M_{pb} = 0$ .

表 1 试验板承载力的实验值和计算值

试件	$t_0$	$m_p / (\text{kN} \cdot \text{m}) \cdot \text{m}^{-1}$	$M_{pb} / \text{kN} \cdot \text{m}$	$P_e / 8m_p$	$P_u / 8m_p$	$q_u a^2 / 24m_p$
SB <sub>1</sub>	—	4.22	—	1.629	1.097(1.097)	1.000(1.121)
SB <sub>2</sub>	0.294	4.22	7.355	3.110	1.899(2.452)	1.730(1.862)
SB <sub>3</sub>	0.294	4.22	7.040	2.814	1.851(2.39.)	1.687(1.816)

3 结束语

(1) 加固板承载力的实验值和本文的计算值之间差值  $(P_e - P_u) / P_e$ , 约为 35%, 偏于保守. 本文认为, 板周边的水平推力产生的拱效应是一个主要因素. (2) 与文献 [2] 的承载力公式相比较, 本文的塑性铰线并不固定在条带的搭接边上, 计算值更小, 因而是更为精确的理论解. 此外, 在文献 [2] 的承载力公式中, 随着条带宽度  $b$  的增加, 承载力急剧上升. 当  $b = a$ , 全板底加固, 承载力为无穷大. 其原因在于, 把塑性铰线固定在条带的搭接边上. 本文克服了这一缺陷. 随着条带宽度  $b$  的增加, 承载力线性增加, 较为合理.

参 考 文 献

1 Zhang Jiwen, Teng Jingguang, Huang Yulong. Behavior of two-way RC slabs externally bonded with steel plate[J]. Journal of Structure Engineering ASCE, 2001, 127(4): 390~397  
2 张继文, 吕志涛, 腾锦光等. 外贴 CFRP 或钢条带加固混凝土双向板的受力性能及承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(4): 42~48  
3 张继文, 腾锦光, 吕志涛等. 粘钢板加固集中荷载下简支混凝土双向板的性能研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(2): 20~25

Analysing the Bearing Capacity of Two-Way Concrete  
Slabs Reinforced with CFRP or Steel Strips

Fang Deping

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract** By adoption of yield line theory, the author analyses the bearing capacity of square slabs reinforced with carbon fibre reinforced plastic (CFRP) or steel strips and improves Zhang Jiwen’s yield line pattern. A more accurate theoretical solution is obtained; and moreover, a defect in this theoretical solution, namely, the bearing capacity rises up to infinite with the increase of strip width, is made up. As compared with experimental value, the author’s theoretical solution is on the conservative side due to arching effect.

**Keywords** reinforcement, carbon fibre, steel reinforced concrete, two-way slab, yield line