

# FRP筋预应力混凝土梁抗弯性能研究进展

邓宗才, 王作虎, 杜修力, 刘景园

(北京工业大学建筑工程学院, 北京 100022)

**[摘要]** FRP筋预应力混凝土结构已成为国内外工程领域研究的重点, 文章分别介绍了国内外体内有粘结、体内无粘结和体外无粘结FRP筋预应力混凝土梁抗弯性能研究的主要成果, 并对今后拟开展的研究工作提出了建议。

**[关键词]** FRP筋; 预应力混凝土梁; 抗弯性能

**[中图分类号]** TU528 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)08-0086-06

## 1 前言

通常情况下, 钢筋混凝土结构具有承载力大、受力性能良好、造价低廉等优点。但当应用于桥梁、路面、水工结构、港口结构以及其他具有侵蚀性或暴露性的环境时, 由于钢筋的锈蚀而导致结构破坏的后果将是非常严重的; 特别是钢筋腐蚀后, 对预应力结构造成的危害更大。资料表明, 现在美国近50万座桥梁中, 有1/4因钢筋锈蚀而严重损坏, 进行修补至少需要400亿美元; 欧洲每年因钢筋锈蚀而引起的经济损失达15亿美元左右。为解决上述问题, 自20世纪80年代中期以来, 欧美及日本等国开始采用纤维塑料筋(FRP)代替钢筋。

FRP材料的主要特点有: 抗拉强度高, 与高强度钢丝不相上下; 抗腐蚀性能和抗疲劳性能优良; 容重小, 仅为钢材的25%左右; FRP筋的热膨胀系数与混凝土相近; 弹性模量小, 约为普通钢筋的25%~70%。FRP逐渐应用于桥梁、各类民用建筑、海洋和近海、地下工程等结构中。在非预应力FRP混凝土梁中, 由于FRP筋弹性模量较低, 在正常使用荷载下梁的挠度和裂缝宽度过大, FRP的高强度优势不能充分发挥出来; 另外FRP筋是线

弹性材料, 结构的延性较差, 影响了结构的抗震性能。一种有效的解决办法是将FRP筋用作预应力筋, 这样既能增加结构的受压区高度, 改善结构延性, 又能利用FRP高强的特点。国外对FRP筋预应力混凝土结构的研究较早, 应用实例增多, 但仍未形成统一的设计规范; 我国的研究刚起步。为了加快推广FRP在预应力混凝土结构中的应用, 为设计提供参考, 对FRP筋预应力混凝土梁的抗弯性能进行深入研究, 是一项十分重要的工作。本文综述了FRP预应力混凝土结构的最新研究成果, 对国内开展研究和工程应用具有一定的参考价值。

## 2 FRP筋预应力混凝土梁的抗弯性能

FRP材料的抗拉强度高, 但抗剪强度较低, 故FRP筋一般作为梁的受拉纵筋。混凝土梁的抗弯性能主要包括梁的荷载-挠度曲线, 抗弯极限承载力, 最大裂缝宽度、挠度和延性等。目前关于FRP筋预应力混凝土梁的抗弯性能的研究, 既有理论分析又有试验研究, 下面分别从体内有粘结、体内无粘结和体外无粘结预应力混凝土结构介绍国内外的主要研究成果。

### 2.1 体内有粘结FRP筋预应力混凝土梁抗弯性能

**[收稿日期]** 2005-07-25; **[修回日期]** 2005-09-26

**[基金项目]** 北京市自然科学基金重点项目(8051001); 北京市教委项目(KM200610005007)

**[作者简介]** 邓宗才(1961-), 男, 陕西扶风县人, 博士, 北京工业大学建筑工程学院结构学科部教授

国内外学者对体内有粘结 FRP 筋预应力混凝土梁的抗弯性能进行了大量的研究工作。韩小雷等对 AFRP 筋预应力高强混凝土梁的弯曲特性进行了试验研究<sup>[1]</sup>, 试验变化参数有预应力筋的种类、混凝土强度和加载历史, 得到的主要结论有 AFRP 筋预应力混凝土梁的荷载-挠度曲线在开裂前呈线性关系, 开裂后呈双线性关系, 但梁刚度要降低; 高强混凝土使预应力梁的开裂弯矩有所增大, 但对极限抗弯强度影响甚微; AFRP 筋预应力梁破坏时的挠度比相应钢筋混凝土梁要小, 且极限状态下的挠度随混凝土强度的提高而减小; AFRP 预应力混凝土梁的延性指标应同时考虑强度和能量等因素。

薛伟辰和张雷忠分别对新型 FRP 筋和 CFRP 筋预应力混凝土梁的受弯性能进行了研究<sup>[2,3]</sup>, 通过改变预应力筋的数量和受拉区非预应力筋的种类来对预应力梁的破坏过程进行研究。试验结果表明: 体内有粘结 FRP 筋预应力混凝土梁的有效预应力、正截面抗裂度和极限承载力的试验值与按现行有粘结钢筋预应力混凝土规范计算值吻合较好, 可以按现行设计规范计算, 但需研究截面界限受压区高度  $\xi_b$  的正确取值问题。

国外, 1992 年 Luc R 等开始探讨 GFRP 筋用于预应力混凝土结构的可行性<sup>[4]</sup>, 并对 3 根 2 m 的 GFRP 筋预应力混凝土梁和 1 根足尺寸的 20 m 预应力梁进行了试验研究, 试验证明 GFRP 筋用于预应力混凝土结构是可行的, 且与预测的性能吻合较好。1995 年加拿大首次将 FRP 筋用于预应力混凝土结构, Abdelrahman 等对 FRP 预应力混凝土桥梁进行了研究<sup>[5]</sup>, 试验共设计了 4 根 CFRP 筋预应力混凝土梁, 变化参数是 CFRP 筋的种类和加载方式, 结论有 CFRP 筋预应力混凝土梁在破坏前表现出双线弹性, 卸载后残余变形较小; 预应力梁在破坏前有明显的破坏征兆, 裂缝条数较多, 裂缝扩展和挠度较大。Frederic 等通过改变混凝土强度和预应力水平来对 CFRP 筋预应力混凝土梁进行了试验研究<sup>[6]</sup>, 结果表明最终的破坏是由 CFRP 预应力筋的断裂引起; 预应力梁破坏前均有明显的预兆, 表现出良好的延性, 试验结果与预先估计十分接近。

Patrick 对 FRP 筋预应力混凝土梁的抗弯变形能力进行了较为深入的研究<sup>[7]</sup>, 并分析和比较了各种延性指标用于 FRP 预应力混凝土结构的准确性。试验共对 23 根预应力混凝土梁进行了研究, 试验的主要变化参数有: 混凝土强度、预应力水平、预

应力筋种类以及加载过程。试验结果表明: 传统的钢筋混凝土结构的延性指标不再适合于 FRP 混凝土结构; AFRP, CFRP 预应力梁破坏前最大的挠度可达到跨度的 1/60, 裂缝间距、高度和最大裂缝宽度均较大, 破坏前有明显征兆; FRP 筋预应力混凝土梁破坏前主要是弹性变形, 约占 60% 以上, 塑性变形较小, 若用能量延性指标  $\mu = 0.5 (E_{el}/E_{ela} + 1)$  来衡量延性, 那么在不同的变形时期, 延性指标也不会变化; 通过试验结果的分析比较, 该文提出的延性指标  $Z = (\Delta_u M_u) / (\Delta_{cr} M_{cr})$  能全面地反映预应力梁的延性, 既适合于钢筋预应力梁又适合于 FRP 筋预应力梁。式中  $E_{el}$  指预应力梁消耗的总能量,  $E_{ela}$  指消耗的弹性能量,  $\Delta_u$  和  $\Delta_{cr}$  分别指极限状态下和开裂荷载下梁跨中的挠度,  $M_u$  和  $M_{cr}$  分别指梁的极限弯矩和开裂弯矩。

Chad 等对 FRP 筋预应力梁的承载力进行了理论分析和试验研究<sup>[8]</sup>, 首先从截面的应变关系和受平衡角度出发, 提出了 FRP 平衡配筋率  $\rho_b$  的概念, 并推导出了不同配筋率预应力梁的承载力设计值  $M_n$ , 计算式分别如下:

平衡配筋率:

$$\rho_b = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{tu}} \frac{\epsilon_{cu}}{f_{tu}\epsilon_{cu} + \epsilon_{pi} - \epsilon_{pi}} \quad (1)$$

FRP 筋预应力混凝土梁的承载力设计值  $M_n$ :

若梁的 FRP 筋配筋率  $\rho$  小于平衡配筋率  $\rho_b$ ,

当  $\rho < 0.5\rho_b$  时:

$$M_n = \rho b d^2 f_{tu} (1 - k/3) \quad (\text{少筋梁}) \quad (2)$$

其中  $k = \sqrt{(\rho n)^2 + 2\rho n - \rho n}$ ;

当  $0.5\rho_b < \rho < \rho_b$  时:

$$M_n = \rho b d f_{tu} (d - a/2) \quad (\text{适筋梁}) \quad (3)$$

若梁的 FRP 筋配筋率  $\rho$  大于平衡配筋率  $\rho_b$ :

$$M_n = 0.85 f'_c b \beta_1 k_u d^2 \cdot \left(1 - \frac{\beta_1 k_u}{2}\right) \quad (\text{超筋梁}) \quad (4)$$

其中  $k_u = \sqrt{\rho \lambda + \left[\frac{\rho \lambda}{2} \left(1 - \frac{\epsilon_{pi}}{\epsilon_{cu}}\right)\right]^2} - \frac{\rho \lambda}{2} \left(1 - \frac{\epsilon_{pi}}{\epsilon_{cu}}\right)$ ,  $\lambda = \frac{E_f \epsilon_{cu}}{0.85 f'_c \beta_1}$

式 (1) ~ 式 (4) 中:  $\beta_1$ —将截面受压区混凝土转化为等效矩形的高度系数,  $f'_c$ —混凝土抗压强度,  $f_{tu}$ —FRP 筋极限抗拉强度,  $\epsilon_{cu}$ —混凝土极限受压应变,  $\epsilon_{tu}$ —FRP 筋的极限抗拉应变,  $\epsilon_{pi}$ —

预应力筋的初始张拉应变,  $b$ —受压区宽度,  $d$ —预应力筋中心到受压区边缘的距离,  $n$ —FRP 弹性模量与混凝土弹性模量的比值,  $a$ —截面受压区混凝土等效矩形截面的高度。Chad 等还通过 5 根 FRP 筋预应力梁的试验和其他 8 位研究者的试验结果对以上计算公式进行了检验, 结果吻合较好; 建议使用 FRP 筋的设计强度作为预应力梁的设计依据, CFRP 和 AFRP 预应力混凝土结构的设计强度降低系数分别取 0.85 和 0.70。

## 2.2 体内无粘结 FRP 筋预应力混凝土梁抗弯性能

FRP 筋与普通钢筋有很大区别, FRP 筋是线弹性材料, 无塑性屈服过程, 若 FRP 筋与混凝土之间是完全粘结的, 则 FRP 筋会在最大弯矩截面处发生滑移或者断裂, 梁的变形能力较差。为了解决此问题, 研究人员对无粘结或者部分粘接 FRP 筋预应力混凝土结构进行了大量的研究。

薛伟辰通过改变受拉区非预应力筋的种类研究了体内无粘结 FRP 筋预应力混凝土梁的受力过程<sup>[2]</sup>, 结果表明无粘结预应力 FRP 筋的有效预应力以及无粘结预应力 FRP 筋混凝土梁的正截面抗裂度可按现行设计规范计算, 但正截面承载力按现行规范计算有一定的误差。张鹏和戴绍斌等人对体内无粘结预应力 CFRP 筋混凝土梁的预应力损失和受力过程进行了研究<sup>[9,10]</sup>, 研究表明: 在无粘结预应力 CFRP 筋混凝土梁的受拉区加入少量非预应力钢筋, 可以提高梁的承载力和延性, 更充分地利用碳纤维筋的高强度; 按照现行后张无粘结预应力混凝土梁的设计规范来设计后张无粘结预应力碳纤维筋混凝土梁是可行的。以上两文献关于 FRP 筋预应力混凝土梁的承载力是否可套用现行规范有不同的看法, 可能是由于所选的 FRP 筋材的性能不同所致, 其机理有待进一步研究。

Mohamed 等通过改变预应力筋的粘结方式分别研究了有粘结、无粘结和部分粘结预应力梁的抗弯性能<sup>[11,12]</sup>。研究表明: 无粘结 AFRP 筋预应力混凝土梁的极限抗弯承载力比相同条件下的有粘结预应力梁低 10% ~ 20%, 但极限变形能力能提高约 150%; 有粘结 AFRP 筋预应力混凝土梁脆性破坏的缺点可以通过无粘结预应力、部分粘结预应力或者无粘结预应力和有粘结非预应力相结合的方式弥补, 其中后两种方式能显著增加梁的延性, 减少弯曲裂缝的条数。

Janet 和 Chris 对部分粘接 FRP 筋预应力混凝土

梁进行了试验研究和理论分析<sup>[13,14]</sup>, 通过改变 AFRP 筋的种类和预应力筋的粘结方式(有粘结、无粘结和部分粘接)对 15 根预应力梁进行了试验。试验结果为: 通常粘结的预应力梁有相对较大的极限承载力, 破坏是由于 AFRP 筋的断裂引起, 破坏前梁的截面转动能力较小; 无粘结预应力梁相对有较大的转动能力, 破坏是由混凝土压碎所引起, 极限承载力大约是有粘结预应力梁的 25%; 部分粘接预应力梁表现出较高的承载力和较好的截面转动能力。除了试验研究, Janet 等还通过受力平衡和变形协调对部分粘接预应力梁的开裂过程和变形特点进行了理论分析, 与试验结果吻合较好, 可用于估计 FRP 筋部分预应力混凝土梁的开裂位置、极限荷载和转角。

Tim 等从理论方面分析了 FRP 筋预应力混凝土梁的受力过程<sup>[15]</sup>, 根据非预应力梁、体内有粘结预应力梁和无粘结预应力梁的受力特点, 采取了不同的变形协调条件和假设, 据平衡条件编制了电算程序, 比较了电算结果、美国 ACI-318 规范计算值和试验实测数据, 结果表明电算结果与实测值更为接近, 这为 FRP 筋预应力混凝土梁提供了一种电算方法。

Zhi Fang 等对 FRP 筋部分预应力混凝土梁提供了两种分析方法<sup>[16]</sup>: 一般的分析方法是将梁沿轴向分成  $n$  个截面, 每个截面再分成  $m$  层, 通过混凝土与无粘结 FRP 筋在整个无粘结区的变形协调来计算 FRP 筋的应力增量, 通过计算机计算得出整个受力过程的荷载-挠度曲线; 简化方法是假定 FRP 筋预应力梁的弯矩-曲率曲线呈三折线, 简化计算得出预应力筋的应力增量  $\Delta\epsilon_f$ , 预应力梁开裂时的跨中挠度  $D_c$ , 拉区非预应力钢筋屈服时的跨中挠度  $D_s$  和极限状态的跨中挠度  $D_u$ 。与试验结果进行比较, 两种分析方法的结果均吻合较好, 而简化方法更为简单、有效。

## 2.3 体外无粘结 FRP 筋预应力混凝土梁抗弯性能

目前我国还没有体外无粘结预应力钢筋混凝土的规范, 国内外大多数体外预应力混凝土受弯构件的设计均按照体内无粘结预应力混凝土的设计方法进行<sup>[17]</sup>, 但由于二次弯矩影响的存在, 使得这种设计方法的计算结果与实际情况偏差较大。体外预应力被认为是最有效的加固结构的方法之一, 且由于 FRP 材料轻质、高强、抗腐的特点, 国内外工程界越来越重视对体外无粘结 FRP 筋预应力混凝土

土的研究和开发。

东南大学的朱虹等对体外预应力 AFRP 筋梁的性能进行了试验研究<sup>[18]</sup>, 试验结果表明采用体外预应力 AFRP 筋对钢筋混凝土梁进行加固, 可明显提高结构的抗弯承载力, 减小挠度和裂缝宽度; 受拉钢筋配筋率对体外预应力钢筋混凝土梁的受力性能影响较大; 还对体外预应力 AFRP 筋混凝土梁提出了设计方法。

Robert 等研究了预应力 CFRP 筋加固连续梁的效果<sup>[19]</sup>, 试验共设计了 3 根 2 跨的连续梁, 变化参数是局部加固的位置不同。研究结果有: 在连续梁负弯矩处进行局部加固, 能显著改善梁极限状态下的受力性能, 预应力筋的加固效率比在正弯矩处加固和正、负弯矩都加固率要高; 连续梁体外 CFRP 筋预应力加固的受弯性能与体外钢筋预应力加固相似, 因此建议将体外预应力钢筋混凝土的设计方法用于 FRP 筋预应力梁。

A. Ghallab 等对体外 FRP 筋预应力加固预应力混凝土梁进行了研究<sup>[20]</sup>, 试验中 3 根梁加固的时期不同。试验结果表明: 采用 AFRP 筋预应力加固梁的极限承载力与加固的时期无关, 主要取决于混凝土强度、体内和体外预应力值的大小; 预应力加固后, 裂缝完全闭合, 可采用全截面进行挠度计算; 加固梁在外荷载下, 开裂荷载、挠度和极限承载力都能改善, 且不减弱梁的延性。

Raafat 等研究了各种因素对体外 CFRP 筋预应力加固效果的影响<sup>[21]</sup>, 试验研究的主要因素是跨高比  $S/d_p$  和体内有粘结预应力筋的预应力度 PPR, 通过对 3 组共 12 根梁的试验表明, 体外预应力 CFRP 加固梁是一种有效的加固方法, 抗弯承载力最大可提高 70%; 当体内有粘结预应力筋的预应力度 PPR 相同, 跨高比  $S/d_p$  越大, 加固后梁的承载力提高越大; 当跨高比  $S/d_p$  相同, 预应力度 PPR 越小, 加固效果越明显; 最后还根据变形关系, 推导出了体外预应力筋的应力增量计算式, 与试验结果吻合较好。

Kiang 等对体外预应力局部加固混凝土梁进行了研究<sup>[22]</sup>, 在理论分析基础上编程计算局部加固的长度, 并且根据粘结折减系数  $\Omega$  推导出了局部加固梁的承载力设计值, 用试验验证了理论分析的正确性和局部加固的可行性。试验的主要变化参数是体外预应力筋的种类、局部加固的长度和转向快的影响。研究结果表明: 如果实际加固长度满足需

要加固的长度, 则局部加固是一种有效的加固方法; 需加固的锚固点到支座的距离  $a$ 。主要受荷载形式和设计承载力的影响; 如果能保证局部有效加固长度, 相对于通长加固梁, 局部加固梁的极限荷载、最大挠度和最大裂缝宽度都能取得满意的结果, 并且优于通长加固梁; 理论计算与试验结果吻合较好, 误差不超过 6%。

A. Ghallab 等全面地分析了各种因素对体外预应力加固梁挠度的影响<sup>[23]</sup>, 试验参数有: 预应力水平、转向块的个数、体外预应力筋的高度、加固前梁的加载史、混凝土强度和梁的跨高比。试验结果表明: 体外预应力能有效控制裂缝扩展和使用荷载产生的挠度; 随着预应力水平的提高, 加固梁在使用荷载下的挠度减小, 但延性降低; 2 个转向块的加固效果比 1 个的好; 随着预应力筋偏心距的增加, 加固梁的挠度减小; 加固前的受荷历史和混凝土强度对加固后梁的受弯性能影响不大。除了试验研究外, 还比较分析了各种计算混凝土梁挠度的公式, 并根据试验结果对各种公式进行了延伸。

综上所述, 根据 FRP 筋在混凝土梁中的位置不同, 梁的受力机理和受力性能也有较大的区别。体内有粘结 FRP 筋预应力混凝土梁主要靠 FRP 筋与混凝土的粘结提供预应力, 它的抗弯力学分析, 可根据预应力钢筋混凝土梁的截面分析方法进行计算, 但  $\xi_b$  取值、最大挠度、最大裂缝宽度和延性指标等还需研究。体内无粘结 FRP 筋和体外 FRP 筋预应力混凝土梁, 都主要靠 FRP 筋两端的锚具来提供预应力, 锚具研发的质量对无粘结 FRP 筋预应力混凝土梁的受力性能有较大的影响。无粘结 FRP 筋与梁体混凝土可产生自由的相对运动, 与混凝土截面之间的变形不再协调, 因此预应力 FRP 筋混凝土梁的极限状态不能通过控制截面平面变形的分析方法计算, 预应力筋的应力增量 ( $\Delta f_{pe}$ ) 只能通过结构的总体变形求得。与体内无粘结 FRP 筋预应力相比, 体外预应力 FRP 筋混凝土梁会由于梁体受弯变形后产生的挠度会使 FRP 筋的有效偏心距减小, 降低体外筋的作用, 即产生二次影响。但体外预应力可以通过设置转向块来改善混凝土梁的受力性能, 而且便于施工、监测和更换, 是一种更有效的加固方法。转向块处 FRP 筋的转角不能太大, 防止被剪断, 而且理论方面的研究和分析有待于进一步完善。

### 3 结语

FRP筋在某些特殊的条件下能够取代钢筋用于预应力混凝土结构。为了更好地发挥FRP材料的特点和推广应用FRP,根据国内外的研究现状,拟对RRP预应力混凝土梁的抗弯性能进行深入研究。

1) 从理论上和机理上分析FRP筋预应力混凝土梁的受力过程、裂缝扩展和失效机制过程,形成统一的计算公式,供设计参考;

2) 对FRP筋预应力混凝土梁的动载性能进行研究;

3) 研究不同工况对FRP筋预应力损失的影响和FRP预应力混凝土结构的耐久性等。

#### 参考文献

- [1] X W Zou, 韩小雷, 季静等. 芳纶纤维预应力高强混凝土梁弯曲特性及延性探讨[J]. 建筑结构, 2002, 32(10): 53 ~ 55
- [2] 薛伟辰. 新型FRP筋预应力混凝土梁试验研究与有限元分析[J]. 铁道学报, 2003, 25(5): 103 ~ 108
- [3] 张雷忠, 钱锐, 茅卫兵. 预应力GFRP筋混凝土梁受弯性能研究[J]. 江苏建筑, 2003, 90(2): 24 ~ 27
- [4] Taerwe Luc R, Lambotte H, Hans-Joachim Miesseler. Loading tests on concrete beams prestressed with glass fiber tendons[J]. PCI Journal, 1992, 37(4): 84 ~ 97
- [5] Abdelrahman A A, Tadros G, Rizkalla S H. Test model for the first canadian smart highway bridge[J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(4): 451 ~ 458
- [6] Frederick S, Saliba J E, Casper L E. Experimental study of CFRP-prestressed high-strength concrete bridge beams[J]. Composite Structures, 2000, 49(2): 191 ~ 200
- [7] Patrick X. W. Zou. Flexural behavior and deformability of fiber reinforced polymer prestressed concrete beams[J]. Journal of Composites for Construction, 2003, 7(4): 275 ~ 284
- [8] Burke C R, Charles W. Dolan. Flexural design of prestressed concrete beams using frp tendons[J]. PCI Journal, 2001, 46(2): 76 ~ 87
- [9] 戴绍斌, 朱健. 预应力碳纤维筋混凝土梁张拉损失的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(3): 70 ~ 72
- [10] 张鹏, 邓宇, 等. 无粘结预应力碳纤维塑料筋混凝土梁的试验研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(8): 31 ~ 32
- [11] Mohamed Saafi, Houssam Toutanji. Flexural capacity of prestressed concrete beams reinforced with aramid fiber reinforced polymer (AFRP) rectangular tendons [J]. Construction and Building Materials, 1998, 12(5): 245 ~ 249
- [12] Houssam Toutanji, Mohamed Saafi. Performance of concrete beams prestressed with aramid fiber-reinforced polymer tendons[J]. Composite Structures, 1999, 44(1): 63 ~ 70
- [13] Janet M. Lees, Chris J. Burgoyne. Experimental study of influence of bond on flexural behavior of concrete beams prestressed with aramid fiber reinforced plastics [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(3): 377 ~ 385
- [14] Janet M. Lees, Chris J. Burgoyne. Analysis of concrete beams with partially bonded composite reinforcement [J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(2): 252 ~ 258
- [15] Tim J Ibell, Steven C C AU. Elasto-plastic behaviour of FRP-prestressed concrete [A]. Fifth International Conference on Fiber-Reinforced Plastics for Reinforced concrete[C]. 2001: 721 ~ 730
- [16] Zhi Fang, T Ivan Campbell. General and simplified models for the analysis of partially prestressed concrete beams containing frp tendons of arbitrary bonded condition [A]. FRP Composites in Civil Engineering[C]. 2001, 2: 1185 ~ 1192
- [17] 张仲先, 张耀庭. 体外预应力混凝土梁体外筋应力增量的试验与研究[J]. 铁道工程学报, 2003, 80(4): 75 ~ 80
- [18] 朱虹, 张继文, 吕志涛. 体外预应力AFRP筋RC梁的试验研究与设计方法[A]. 第二届全国公路科技创新高层论坛文集[C]. 2004. 261 ~ 268
- [19] Robert A Tjandra, Kiang Hwee Tan. Strengthening of RC continuous beams with external CFRP tendons [A]. Fifth International Conference on Fiber-Reinforced Plastics for Reinforced concrete[C]. 2001. 661 ~ 669
- [20] Ghallab A, Beeby A W. Behaviour of PSC beams strengthened by unbonded parafil ropes [A]. Fifth International Conference on Fiber-Reinforced Plastics for Reinforced Concrete[C]. 2001. 671 ~ 680
- [21] Raafat El-Hacha, Mamdouh Elbadry. Strengthening concrete beams with externally prestressed carbon fiber composite cables [A]. Fifth International Conference on Fiber-Reinforced Plastics for Reinforced Concrete [C]. 2001. 699 ~ 708
- [22] Kiang-Hwee Tan, M. Abdullah-Al Farooq, Chee-Khoo Ng. Behavior of simple-span reinforced concrete beams locally strengthened with external tendons [J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(2): 174 ~ 183
- [23] Ghallab A, Beeby A W. Deflection of prestressed concrete beams externally strengthened using Parafil ropes [J]. Magazine of Concrete Research, 2003, 55(1): 1 ~ 17

## Progress in Studies on Flexural Behaviors of Concrete Beams Prestressed with FRP Tendons

Deng Zongcai, Wang Zuohu, Du Xiuli, Liu Jingyuan  
(*Beijing University of Technology, Beijing 100022, China*)

[**Abstract**] Studies on concrete structures prestressed with FRP tendons have been emphasized in engineering structure field. This paper briefly introduces the main progress in the studies on flexural behaviors of internal bonded, internally unbonded and externally unbonded prestressed concrete beams with FRP tendons. Finally, advices for advanced research are proposed.

[**Key words**] FRP tendons; prestressed concrete beams; flexural behaviors

---

(cont. from p.80)

## The Real Time Optimization Research and Application for Transportation Scheduling System About Material Quarry of Cement With Genetic and Evolutionary Algorithm

Dai Jianyong<sup>1</sup>, Yang Shijiao<sup>1,2</sup>, Gu Desheng<sup>2</sup>

(1. *School of Architectural Engineering, Resource and Environment, Nanhua University, Hengyang, Hunan 421001, China*; 2. *School of Resources and Safety Engineering, The Central South University, Changsha 412006, China*)

[**Abstract**] According to complexity and non-linear character of transportation scheduling system in surface mine, the real time transportation scheduling system model is set up for the transportation scheduling system subject to many factors such as mining craft, yield, quality, etc., with all arithmetic operators of genetic algorithms such as selection, crossover, mutation, interpotation, and migration. The model has been adopted by production transportation scheduling system of raw material quarry in Shaofeng Cement Group, which not only reduced transportation cost, but also harmonized relations among mining craft, yield, quality, and got better effect. In the meantime, it will be of benefit to information construction of quarry enterprises and others materials circulation enterprises.

[**Key words**] genetic algorithms; transportation scheduling system; transportation cost