

纤维布加固混凝土连续梁弯矩重分布特征分析

镇斌¹, 施鹏飞¹, 欧阳利军¹, 丁斌²

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 温州职业技术学院, 温州 325035)

摘要: 通过延性系数指标来研究纤维布加固矩形截面混凝土连续梁的弯矩重分布能力, 采用数值分析方法模拟纤维布加固矩形截面混凝土连续梁的弯矩重分布系数。研究发现, 能量法计算的能比可考虑纤维布加固 T 形截面混凝土连续梁的实际弯矩重分布能力, 可利用弯曲刚度法分析纤维布加固 T 形截面混凝土连续梁截面弯矩重分布系数的演变过程。

关键词: 纤维布; 混凝土; 连续梁; 弯矩重分布

中图分类号: TU 375.1 **文献标志码:** A

Analysis on the Moment Redistribution of Continuous Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber Reinforced Polymer

ZHEN Bin¹, SHI Pengfei¹, OUYANG Lijun¹, DING Bin²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Wenzhou Vocational & Technical College, Wenzhou 325035, China)

Abstract: As for continuous concrete beams strengthened with fiber reinforced polymer (FRP), the ductility coefficient index was used to study its moment redistribution ability and meanwhile a numerical analysis method was adopted to fit the moment redistribution coefficient. It is found that the energy ratio calculated by using the energy method is considered with the actual moment redistribution capacity of continuous concrete beams strengthened with FRP and the flexural rigidity model can be used to analyze the evolution process of the moment redistribution coefficient of T-section continuous concrete beams strengthened with FRP.

Keywords: fiber reinforced polymer; concrete; continuous beam; moment redistribution

纤维布具有轻质高强、耐腐蚀、施工方便、不增加空间及适用性强等优点, 在实际加固工程中, 采用纤维布粘贴加固钢筋混凝土连续梁能够较大幅度地提高混凝土连续梁的抗弯承载力, 改

变混凝土连续梁的破坏模式, 影响混凝土连续梁的弯矩重分布。弯矩重分布的实现取决于混凝土梁控制截面塑性铰的发展, 可充分发挥结构构件的承载潜力^[1-14]。

收稿日期: 2018-08-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11472160, 11672185, 51708349); 温职院面向温州 510 产业新技术应用项目(WZY510005)

第一作者: 镇斌(1980-), 男, 副教授. 研究方向: 工程结构非线性分析. E-mail: zhenbinshea@usst.edu.cn

通信作者: 欧阳利军(1982-), 男, 讲师. 研究方向: 工程结构检测、评定与加固理论研究. E-mail: ouyang@usst.edu.cn

目前国内外学者主要考虑普通钢筋混凝土连续梁、纤维布加固矩形截面混凝土连续梁、纤维布加固T形截面混凝土连续梁3种工况,研究不同工况下的连续梁弯矩重分布过程、机理以及影响因素,考虑常规延性指标、能量法及变形法这3种方法研究混凝土连续梁的弯矩重分布能力,采用受压区高度法、塑性铰法、数值分析模型、新刚度变化及弯曲刚度法来模拟纤维布加固矩形截面混凝土连续梁的弯矩重分布系数。但是,目前对纤维布加固T形截面混凝土连续梁的弯矩重分布性能方面的研究鲜见报道。本文基于目前的研究成果,对纤维布加固混凝土连续梁弯矩重分布系数的计算方法进行了一些分析,指出当前研究存在的不足和未来需进一步改进的方向。

1 普通混凝土连续梁的弯矩重分布

弯矩重分布是框架结构连续梁设计中影响内力分布的重要因素,直接影响结构的承载能力和延性,目前在普通钢筋混凝土连续梁的弯矩重分布方面主要研究弯矩重分布机理、弯矩重分布影响因素和重分布系数。邓宗才^[15]分析了混凝土梁截面受压区高度、钢筋类型对混凝土连续梁的弯矩重分布系数的影响,研究表明:试验梁中支座形成塑性铰后,跨中弯矩继续增大,连续梁的弯矩重分布现象十分明显;随着荷载增加,跨中处形成塑性铰后将弯矩传递给支座,连续梁的弯矩重分布程度非常显著;同等工况下(表1),得到的Ⅲ级钢筋(HRB400)混凝土连续梁的最大弯矩重分布系数为30%,能够充分发挥混凝土连续梁的延性,且屈服强度高,具有良好的经济性。 β_0 为未加固的弯矩重分布系数, k_u 为混凝土受压极限状态时相对受压区高度。

表1 弯矩重分布系数 β_0 与相对受压区高度 k_u ^[15]

Tab.1 Moment redistribution coefficient β_0 and relative compression area height k_u ^[15]

| 梁号 | k_u | $\beta_0/\%$ |
|----|-------|--------------|
| B1 | 0.27 | 20 |
| B2 | 0.14 | 30 |
| C1 | 0.11 | 10 |
| C2 | 0.17 | 20 |
| C3 | 0.14 | 25 |
| C4 | 0.12 | 30 |

注: B1, B2 为Ⅲ级钢筋,其余为Ⅱ级钢筋。

梁的弯矩重分布系数的影响,研究表明,同级钢下相对受压区高度越小,连续梁的弯矩重分布程度越显著,极限状态下梁截面的弯矩试验值均大于抗弯承载力计算值,重分布系数最大值接近30%,如表2所示。 M_1, M_2 分别为跨中弯矩、支座弯矩, M_a, M_c 为抗弯承载力计算值, M_b, M_d 为弯矩试验值。

表2 极限状态下弯矩重分布情况^[16]

Tab.2 Moment redistribution under limit state

| 梁号 | $M_1/(\text{kN}\cdot\text{m})$ | | $M_2/(\text{kN}\cdot\text{m})$ | | $\beta_0/\%$ |
|------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|--------------|
| | M_a | M_b | M_c | M_d | |
| CB-1 | 84.1 | 105.9 | 84.1 | 98.3 | 15.7 |
| CB-2 | 76.3 | 92.5 | 76.3 | 84.6 | 28.2 |
| CB-3 | 66.7 | 78.0 | 66.7 | 70.3 | 28.9 |
| CB-4 | 53.2 | 75.8 | 53.2 | 66.3 | 30.4 |

文献[15-16]的研究表明,钢筋的型号、受压区高度是影响普通钢筋混凝土连续梁弯矩重分布的重要因素,同时,连续梁都表现出从中支座向跨中处的弯矩重分布过程。文献[15-18]分析了普通混凝土连续梁弯矩重分布的过程,大致可分为3个阶段:a.混凝土连续梁截面未开裂,构件表现为弹性阶段;b.中支座受拉区混凝土开裂后,跨中受拉区混凝土开裂,其弯矩重分布情况主要由截面刚度变化控制,构件表现为弹塑性阶段;c.支座处受拉区钢筋屈服后,跨中受拉区钢筋屈服,其弯矩重分布情况改变了原来的计算简图,构件表现为塑性阶段。

常莹莹等^[19-20]基于钢筋混凝土受弯构件延性系数和塑性转动能力,给出了混凝土极限压应变 ε_{cu} 所对应的 k_y 和 k_u 的计算公式为

$$k_y = \frac{x_c}{h_0}, k_u = \frac{x_n}{h_0}$$

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{k_u h_0} \text{ 或 } \varphi_u = \frac{\varepsilon_{su}}{(1-k_u)h_0}, \varphi_y = \frac{\varepsilon_{sy}}{(1-k_y)h_0} \quad (1)$$

式中: φ_u, φ_y 分别为截面极限曲率和屈服曲率; x_n, x_c 分别为极限状态和钢筋屈服时混凝土的受压区高度; k_y 为钢筋屈服时相对受压区高度; h_0 为混凝土截面有效高度; ε_{cu} 为受压区混凝土极限压应变; $\varepsilon_{su}, \varepsilon_{sy}$ 分别为受拉钢筋极限拉应变和屈服拉应变。

通过截面分析得到弯矩重分布系数 β_0 与曲率延性系数 φ_u/φ_y 的计算方法(式(2)),拟合出不同钢筋等级的 k_y-k_u 之间的关系,由式(1)可以确定 φ_u/φ_y 与 k_u 的关系,再由式(2)计算得到了弯矩重分布系数 β_0 与 k_u 的近似线性关系。研究表明,弯

李美云等^[16]研究了受压区高度对混凝土连续

矩重分布系数与钢筋配筋率和材料规格有关, 中国规范^[21]确定的弯矩重分布系数不超过 30%, 当采用最大配筋率时, 弯矩重分布现象最显著。

$$\beta_0 = 1 - \frac{\varphi_u/\varphi_y - 1}{15 + (\varphi_u/\varphi_y - 1)} \quad (2)$$

文献[19-20]将通过中国规范确定的弯矩重分布系数与各国规范公式计算结果进行比较, 当相对受压区高度最大时, 中国规范处于极限状态, 计算的弯矩重分布系数达到最大值, 而美国和欧洲规范还有一定的延性储备, 弯矩重分布系数处于稳定值, 弯矩重分布能力没有得到最大发挥。同时, 在中国规范的分析过程中考虑了受压钢筋屈服状态、混凝土极限受压状态及受拉钢筋的极限状态时的应变情况, 推导出相应的关于相对受压区高度 k_y 和 k_u 的计算公式, 通过牛顿迭代法得到相应的 k_y 和 k_u 。在各种不同状态下考虑影响弯矩重分布的因素, 作者认为这一过程相对受压区高度的分类及计算显得比较繁杂。纤维布材料加固位置及加固量的引入增加了加固连续梁截面的相对受压区高度的分类, 塑性铰的转动情况不再依据钢筋屈服状态, 故该计算公式是否适用纤维布加固混凝土连续梁有待进一步研究。

2 加固矩形截面连续梁弯矩重分布

目前纤维布材料加固混凝土连续梁的研究引起国内外学者的关注, 曹国辉等^[22]对不同类型纤维布加固的钢筋混凝土连续梁进行研究, 试验结果表明, 两根普通钢筋混凝土梁弯矩重分布系数最大, 分别为 0.260 和 0.269, 其次是弯矩重分布系数在 0.174~0.236 范围内的玻璃纤维布(GFRP)加固梁, 弯矩重分布系数最小的是在 0.078~0.112 范围内的碳纤维布(CFRP)加固梁。粘贴纤维布后的混凝土连续梁的延性有一定程度的降低, 但在同等工况下, 相对于碳纤维布加固的钢筋混凝土连续梁, 玻璃纤维布加固的混凝土连续梁的延性更好, 且有利于连续梁弯矩重分布的发生。周光辉等^[23]采用 CFRP 布和 GFRP 布加固混凝土连续梁中支座受拉区, 试验结果表明: 极限状态下 CFRP 布粘贴受拉区时支座截面弯矩重分布系数为 4.1%; GFRP 布粘贴受拉区时支座截面弯矩重分布系数为 5.1%; 且静力条件下计算的支座截面极限弯矩理论值均小于试验值, 截面材料强度得到了充分的发挥, 混凝土连续梁弯矩重分布比较充分。

在考虑弯矩重分布影响因素方面, 郝永超^[24]

作了进一步研究, 影响纤维布加固混凝土连续梁的弯矩重分布的还有加固位置、加载条件等因素, 纤维布加固混凝土连续梁在屈服荷载下的弯矩重分布系数如表 3 所示。C1 为跨中和支座处各自内嵌一根玄武岩筋; C2 为跨中和支座处各自内嵌一根碳纤维筋; C3 为支座、跨中处分别内嵌一根玄武岩筋和碳纤维筋; C4 与 C3 属相同工况, 在加固前增加初始荷载; β_1 为加固后的弯矩重分布系数。

表 3 屈服状态下弯矩重分布结果^[24]

Tab.3 Moment redistribution under yield state

| 编号 | $M_1/(\text{kN}\cdot\text{m})$ | | $\beta_1/\%$ | $M_2/(\text{kN}\cdot\text{m})$ | | $\beta_1/\%$ |
|----|--------------------------------|-------|--------------|--------------------------------|-------|--------------|
| | M_a | M_b | | M_c | M_d | |
| C1 | 24.0 | 25.4 | -5.8 | 24.0 | 22.3 | 7.1 |
| C2 | 28.0 | 27.9 | 0.4 | 28.0 | 24.5 | 12.5 |
| C3 | 23.9 | 23.1 | 3.3 | 28.2 | 27.3 | 3.2 |
| C4 | 23.5 | 22.1 | 6.0 | 27.6 | 25.8 | 6.5 |

从表 3 的数据可知, 所有加固梁的弯矩重分布系数均在 -25%~+25% 之间, 大部分在 -10%~+10% 之间, 在规范规定的范围之内。

何海等^[25]考虑了在混凝土框架结构中无法对混凝土柱处连续梁梁顶进行加固的情况, 研究碳纤维布加固梁的跨中情况, 通过控制截面的抗弯刚度 EI 来实现混凝土连续梁的弯矩重分布。梁支座处由塑性铰转角 θ 控制, 当发生弯矩重分布时, θ 的计算公式为

$$\theta = \frac{2l}{3EI} \left(\frac{ql^2}{8} - M_2 \right) \quad (3)$$

式中: l 为梁跨度; q 为塑性阶段后极限均布荷载。

张涛涛^[26]利用延性系数指标分析 6 根粘贴碳纤维布的混凝土连续梁和 2 根对比梁的弯矩重分布能力, 研究表明, 影响加固梁的弯矩重分布的因素为连续梁截面的几何尺寸、加载条件和加固材料的力学性能。通过常规延性指标和能量法指标分析表明, 当支座处粘贴相同层数的纤维布时, 纤维布加固量的增加有利于提高连续梁的抗弯承载力, 有利于实现混凝土连续梁的弯矩重分布, 但计算得出的延性系数无法反映每个阶段的实际弯矩重分布系数情况。

a. 常规延性指标 α ^[27]。

$$\alpha = \Delta_u/\Delta_y \quad (4)$$

式中, Δ_u , Δ_y 分别为极限荷载和屈服荷载时相对应的曲率(挠度)(取两跨中的较大值)。

b. 能量法指标 γ 。

$$\gamma = A_p/A_a \quad (5)$$

式中, A_p , A_a 分别为荷载-挠度曲线下所包围的塑性变形面积和总面积。

Kara 等^[28-29]分析了碳纤维布加固混凝土连续梁的截面几何尺寸、加载方式和加固位置, 通过中性轴深度法分析得到纤维布加固混凝土连续梁截面的弯矩-曲率关系, 利用截面分析的弯矩-曲率关系和抗弯承载力来反映试验梁的抗弯性能。试验过程中大部分纤维布加固混凝土连续梁和对比梁发生脆性破坏, 但少数纤维布加固混凝土连续梁破坏时表现出较好的延性。同时基于梁的延性水平提出 3 种工况: 完全延展性梁、脆性梁、半延性梁。在完全延展性和半延性梁这 2 种情况下, 每跨的承载力 P_u 满足如下公式:

$$P_u = \frac{2}{l}(M_c + 2M_a) \quad (6)$$

考虑加载增量情况, 荷载增量 $\Delta P=0$, $\Delta M_c = -2\Delta M_a$, ΔM_c , ΔM_a 分别为支座、跨中处的弯矩增量。支座和跨中的再弯矩可分别为 $\Delta M_c/0.188Pl$ 和 $\Delta M_a/0.156Pl$, P 为施加荷载, 因此, 支座与跨中的再分配比率 λ 定义为

$$\lambda = \frac{\Delta M_c}{0.188Pl} / \frac{\Delta M_a}{0.156Pl} = \frac{0.156(-2\Delta M_a)}{0.188(\Delta M_a)} = -1.66 \quad (7)$$

研究发现, 延性水平分析得出理论上的支座处弯矩重分布程度总比跨中截面处大 66% 左右, 但截面分析得到的弯矩-曲率关系只能反映构件材料截面的弯矩情况, 无法反映混凝土连续梁的实际弯矩分布情况。为了解决实际工程中连续梁的弯矩重分布问题, Oehlers 等^[30-31]在采用数值分析模型得到截面的弯矩-曲率关系的基础上, 采用弯曲刚度法来实现混凝土连续梁的弯矩重分布, 提出了如图 1 所示的理想梁模型。通过截面分析的弯矩-曲率得到截面刚度 $EI=M/\varphi$, M 为弯矩, φ 为曲率。通过跨中和端部的 EI 的差异来反映弯矩分布过程, 采用力法和共轭梁理论得出的式(8)来迭代得出端部弯矩。同时在试验过程中, 当钢筋屈服时, φ_u/φ_y 的值在 50%~150% 范围内计算出的弯矩重分布系数与理论公式得到的弯矩重分布系数很接近。

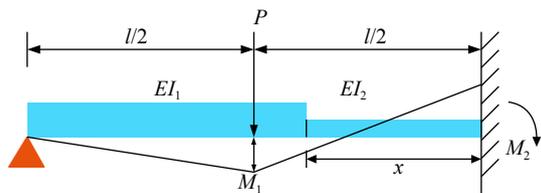


图 1 理想梁的模型

Fig.1 Model of the ideal beam

$$x = \frac{2M_2l}{Pl + 2M_2}$$

$$P = \frac{16M_2}{l} \frac{[EI_2l^3 - (EI_1 - EI_2)(3x^2l - 3xl^2 - x^3)]}{3EI_2l^3 - (EI_1 - EI_2)(8x^3 - 12x^2l)} \quad (8)$$

式中: EI_2 , EI_1 分别是端部处、跨中处的抗弯刚度; x 为梁截面的拐点位置。

采用 440 ACI 规范^[32]建议的式(9)得到纤维布加固下混凝土梁平衡配筋率 ρ_{fb} , 当配筋率 $\rho_f > \rho_{fb}$ 时, 采用式(10)和式(11)得到加固梁极限弯矩 M_{fu} ; 当 $\rho_f < \rho_{fb}$ 时, 采用式(12)和式(13)得到的加固梁极限弯矩 M_{fu} 。

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (9)$$

$$M_{fu} = \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c}\right) b d^2 \quad (10)$$

$$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85\beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu}} \leq f_{fu} \quad (11)$$

$$M_{fu} = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2}\right) \quad (12)$$

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}}\right) d \quad (13)$$

式中: f_{fu} 为纤维布的极限强度; b 为混凝土截面宽度; d 为混凝土截面高度; ρ_f 为纤维布的配筋率; f_f 为纤维布的实际强度; A_f 为纤维布的实际面积; ε_{fu} 为纤维布的极限拉应变; f'_c 为混凝土单轴抗拉强度; E_f 为纤维布的弹性模量。

同时, 将 ACI 440 规范^[32]建议的纤维布加固混凝土连续梁计算公式与文献^[28-29]的数值分析结果进行了比较。由图 2 和图 3 分析可知, 数值分析得到的弯矩值 M_{nu} 与试验弯矩值 M_{ex} 之间比值的平均值和标准差分别为 1.01 和 15%, 而 ACI 440 规范建议公式得到的弯矩值 M_{ACI} 和试验弯矩值 M_{ex} 之间比值的平均值和标准差分别为 0.91 和 17%。数值分析得到的极限弯矩值较 ACI 440 规范建议的计算公式得到的极限弯矩值要更接近于试验值。

文献^[33-34]同样以数值分析模型作为基础, 将模型截面分成 n 个条带, 假定同一个条带 i 上各点的应变和应力均等于该条带中心点处的应力和应变, 根据平截面假定, i 条带混凝土的应变

$$\varepsilon_i = \bar{\varepsilon} - Z_i \varphi \quad (14)$$

式中: $\bar{\varepsilon}$ 为截面中心线处应变; Z_i 为截面的中性轴深度。

如图 4 所示, 根据力的平衡条件,

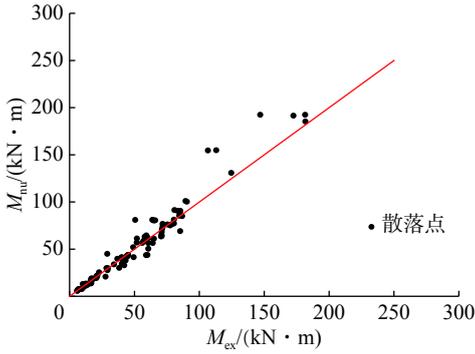


图2 数值分析结果与试验弯矩值对比^[29]

Fig. 2 Numerical analysis results and test moment values

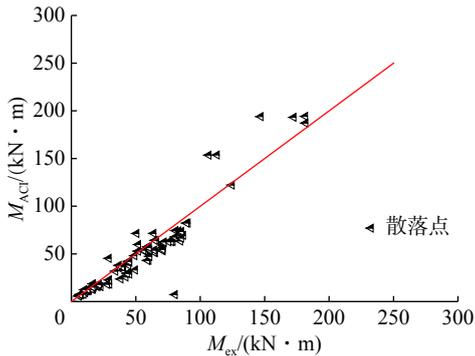


图3 ACI 建议公式计算值与试验弯矩值对比^[29]

Fig. 3 ACI analysis results and test moment values

$$\sum x = 0, \quad \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \Delta A_i + \sigma'_s A'_s + \sigma_s A_s + \sigma_f A_f = 0 \quad (15)$$

式中: σ_{ci} 为截面受压区混凝土等效应力; ΔA_i 为第 i 条带混凝土的面积; σ_s 为受拉钢筋的应力, σ'_s 为受压钢筋的应力; σ_f 为受拉纤维布的应力; A'_s 为受压钢筋的面积; A_s 为受拉钢筋的面积。

图4中, ε_s 为受拉区钢筋的应力; ε_f 为纤维布的应力; ε_{ci} 为第 i 条带受压区混凝土的应力; ε'_s 为受压区钢筋的应力; F_c 为受压区混凝土压力; C_s 为受压区钢筋压力; T_s 为受拉区钢筋拉力; T_f 为受拉区纤维布拉力; A_f 为受拉纤维布的面积。

利用 Matlab 软件进行混凝土梁截面的计算机仿真, 拟合连续梁跨中梁底粘贴 0~5 层纤维布的弯矩-曲率曲线, 通过确定截面尺寸和材料本构的模型, 对于任何曲率估计 Z_i , 并计算该截面构成材料中的应变。使用材料模型找到相应的应力, 使截面的拉压应力平衡, 计算该曲率并获取相应使用材料的弯矩, 叠加得到截面弯矩 M 。增加横截面上的曲率, 重复上述过程得到该截面的 $M-\varphi$ 关系(图5), 直到达到混凝土极限压应变和纤维布极限拉应变, 程序终止。

由上述分析模型模拟得到的截面的弯矩-曲率

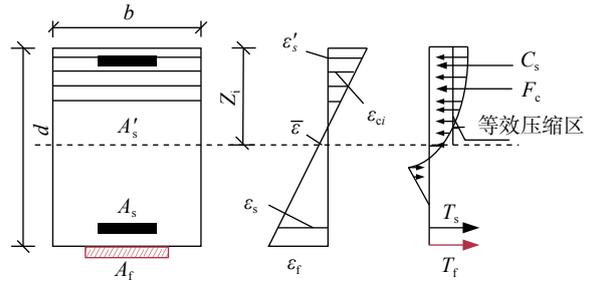


图4 截面的分析模型

Fig. 4 Analysis model of the section

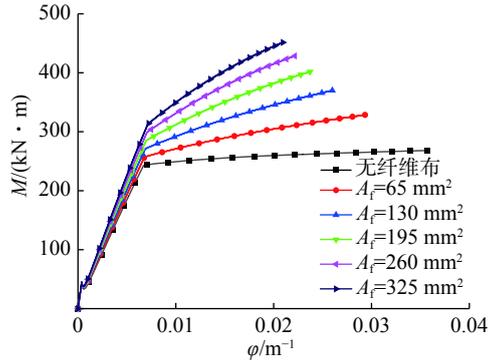


图5 拟合的 $M-\varphi$ 关系

Fig. 5 $M-\varphi$ relation by fitting

关系可知, 加固后的混凝土连续梁的开裂弯矩提高幅度不大。但极限弯矩随着加固量的增加而增大, 当在跨中加固 5 层纤维布时, 相应的极限弯矩比未加固的极限弯矩提高了 65% 以上, 而相应的极限曲率降低了 40%, 连续梁截面的延性水平大大降低。得到的 $M-\varphi$ 关系与文献[33-34]模拟的基本一致, 并通过 $M-\varphi$ 关系获得该截面抗弯刚度 ($EI=M/\varphi$)。依靠纤维布加固混凝土连续梁的抗弯刚度变化来实现梁每个阶段的弯矩分布, 使用虚功原理和支座反力重新计算整个梁新的刚度变化, 通过新的刚度变化实现混凝土连续梁的实际弯矩重分布。研究表明, 用分析模型理论验证 Ashour 等^[35]、Oehlers 等^[30-31]和 Aiello 等^[36]的试验结果, 得到的弯矩重分布系数与试验弯矩重分布系数基本一致, 能较好地反映试验连续梁的弯矩重分布全过程。但文献[33-34]中获取新刚度变化的具体方式目前还不明确, 无法证实数值分析的结果。

分析文献[22-34]中的研究结果表明, 跨中和支座受拉区的加固层数会改变连续梁的抗弯承载力。从塑性转动能力和曲率延性^[26]这两个角度来研究弯矩重分布, 这一问题已经引起国内外学者的关注。但曲率延性系数的计算公式还不完善, 分析的弯矩重分布系数与实际的不一致。塑性铰

转动能力^[25]方面,通过塑性转角来实现混凝土连续梁的弯矩重分布,但文献[29]的研究表明,混凝土极限压应变远小于0.0035,无法形成塑性铰,故塑性铰法不适用超静定梁板结构。

利用 Matalab 软件进行连续梁截面的非线性分析,得到的纤维布加固连续梁截面的弯矩-曲率关系并不能反映混凝土连续梁的弯矩变化情况。同时,对比分析 ACI 440 规范^[32]得到的纤维布加固下的平衡配筋率计算公式忽略了受压区的钢筋应力,计算得到的弯矩值偏小,精确度比数值分析得到的连续梁弯矩分布情况低。为了研究纤维布加固混凝土连续梁的弯矩重分布系数,采用弯曲刚度法迭代荷载来获得梁各部分的弯矩分布情况,迭代过程相对比较繁琐。新刚度变化也能反映混凝土连续梁的实际弯矩重分布,计算过程相对没有弯矩刚度法繁杂,但计算方法的适应性需要进一步证实,故上述方法可作为研究纤维布加固 T 形截面混凝土连续梁的弯矩重分布系数计算的参考方案。

3 加固 T 形截面连续梁弯矩重分布

连续梁的截面尺寸同样也是影响弯矩重分布的重要因素,陈永秀等^[17-18]采用的塑性铰法分析弯矩重分布的影响因素还包括高跨比、截面延性、截面刚度。通过受压区高度法得到受压区高度的弯矩重分布系数建议公式。纤维布加固混凝土连续梁支座处的弯矩重分布系数建议公式为

$$\beta_1 = \frac{1}{3} \left(\frac{4x_{u0}}{x_{u1}} - 1 \right) \beta_0 = 0.0833 \left(\frac{4x_{u0}}{x_{u1}} - 1 \right) \quad (16)$$

式中, x_{u0} , x_{u1} 为未加固和加固截面极限破坏时的混凝土受压区高度。

研究表明,式(16)计算得到的弯矩重分布系数总小于试验的弯矩重分布系数,并按规范要求控制纤维布加固 T 形截面混凝土连续梁的弯矩重分布系数在 15% 范围内。

欧阳利军等^[37-38]对 7 根纤维布加固连续梁和 1 根对比梁进行了试验研究,试验结果表明,在跨中底部粘贴 1~3 层的玄武岩纤维布,钢筋屈服后加固梁发生了明显的弯矩重分布。

Rahman 等^[39]通过延性系数指标分析纤维布加固连续梁的弯矩重分布能力,采用 Jaeger 等^[40]提出的变形法的 J 因子来分析 FRP 加固混凝土连续梁的延性行为(式(17))。

$$J = f\Delta, f = M_u/M_3, \Delta = \Delta_u/\Delta_1 \quad (17)$$

式中: f 为强度因子; Δ 为变形因子; M_u , M_3 分别为极限弯矩和混凝土压应变为 0.001 时相对应的弯矩; Δ_u , Δ_1 分别为极限曲率和混凝土压应变为 0.001 时相对应的曲率(挠度)。

文献[37-39]分析了纤维布加固 T 形截面连续梁弯矩重分布过程,大致可分为 3 个阶段: a. T 形截面混凝土连续梁没有开裂,构件表现为弹性阶段。b. 首先跨中处受拉区混凝土形成裂缝,导致跨中抗弯刚度降低,弯矩传递到支座处;随着荷载的增加,支座处受拉区混凝土开裂,支座弯矩传递到跨中处,其弯矩重分布情况主要由梁截面刚度变化控制,构件表现为弹塑性阶段。c. 跨中处受拉区钢筋屈服后,支座处受拉区钢筋屈服,受拉区应力由纤维布承担,其弯矩重分布情况主要由纤维布控制,构件表现为塑性阶段。

利用 Grace 等^[41]提出的能量法研究连续梁的延性行为,延性定义为非弹性能量与总能量比率,如图 6 所示。

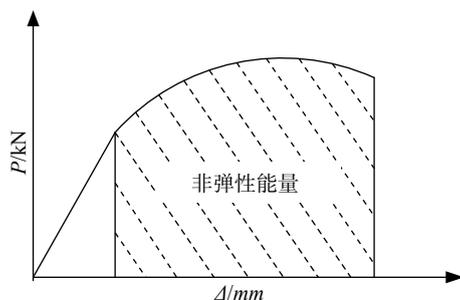


图 6 荷载-挠度曲线图

Fig.6 Load-deflection curve diagram

文献[39-41]研究发现,所有试验梁都表现出弯矩分布从支座区域到跨中区域的传递过程,根据变形法和能量法计算出延性系数,分析得出箍筋间距和截面翼缘处纵向钢筋的间距会提高纤维布加固混凝土连续梁的弯矩重分布能力。

文献[42]主要改变加固方案和锚固方式,研究发现,加固 T 形连续梁弯矩重分布的影响因素主要由纤维布的刚度和粘贴层数、加固位置、锚固方式及结构的几何尺寸和加载方式等控制。通过分析模型得到 T 形截面和倒 T 形截面混凝土连续梁的弯矩-曲率关系,利用虚功原理和支座反力计算得到梁的新刚度变化并进行弯矩重分配,分析了这两组连续梁的试验结果,得到的实际的弯矩重分布系数值与试验的弯矩重分布系数值比较吻合。另外,试验结果还得出倒 T 形截面连续梁的弯矩重分布情况比 T 形截面的更明显,这主要是由于跨中受拉区的截面刚度得到增强。

通过以上的研究分析, 作者认为影响纤维布加固 T 形截面连续梁弯矩重分布的因素主要有: a. 构件的整体规格及材料规格; b. 加固位置及加固量; c. 外在加载方式。T 形截面连续梁弯矩重分布的影响因素多且复杂。采用塑性铰法计算得到的支座处修正弯矩重分布系数总小于试验结果, 在工程设计方面并不安全, 需要按照规范要求控制弯矩重分布系数情况。利用变形法和能量法得到的同一工况下的延性系数表现出连续梁不同的弯矩重分布能力, 应该建立统一可靠的计算公式来衡量纤维布加固 T 形截面混凝土连续梁的弯矩重分布能力。数值分析模型方面的研究, 参照矩形截面梁的材料规格建立起截面弯矩-曲率关系, 但实际结构中外部结构的锚固方式及内部箍筋的锚固增强了结构的强度及刚度。因此, 分析模型只利用截面钢筋、混凝土及纤维布的合力削弱了截面的抗弯承载力情况, 依靠 Matlab 软件建立起混凝土 T 形截面连续梁的截面分析模型并不可靠, 在这方面需要进一步研究。同时, 在此基础上新的刚度变化, 依据虚功原理和支座反力获取新刚度变化的方式过于简单, 需要获取具体公式来分析 T 形截面连续梁的弯矩重分布情况, 因此, 这方面还需要探究。

4 结束语

纤维布加固混凝土连续梁弯矩重分布规律是连续梁加固设计的重要依据。在实际工程中, 混凝土框架梁需考虑板对参与抗弯, 而纤维布加固 T 形截面混凝土连续梁弯矩重分布规律尚不明确, 需进行以下几方面的深入研究:

a. 采用延性系数指标来研究连续梁的弯矩重分布情况, 需考虑连续梁的竖向变形、混凝土的压应变和塑性变形能力等因素, 建立统一可靠的延性系数计算公式, 为进一步分析纤维布加固 T 形截面连续梁的弯矩重分布系数提供理论依据。

b. 研究发现, 塑性铰法得到纤维布加固 T 形截面混凝土连续梁支座处的弯矩重分布系数与实际中的弯矩重分布系数基本吻合, 但有学者认为, 在实际工程中, 试验梁在加载过程中无法形成塑性铰, 因此, 从塑性转动能力方面得到的纤维布加固 T 形截面连续梁支座处的弯矩重分布系数计算公式可靠与否, 学者们还存在一定的分歧。

c. 利用受压区高度法研究相对受压区高度与连

续梁弯矩重分布的关系, 相对受压区高度分类的多样性以及纤维布加固混凝土连续梁后曲率计算的不确定性, 得到的相应的纤维布加固 T 形截面混凝土连续梁的弯矩重分布系数计算方法有待深入研究。

d. 现有的分析模型只是考虑截面的钢筋、混凝土及纤维布材料的规格, 而实际中由于锚固方式的加强, 其截面的实际受力状态相对复杂, 数值分析模型需要进一步研究; 研究发现, 在分析模型的基础上, 可利用弯曲刚度法实现纤维布加固矩形截面混凝土整个连续梁的加载过程中的弯矩分布, 计算弯矩分布方法的适用性可在纤维布加固 T 形截面混凝土连续梁中进一步探究; 同时, 新刚度变化同样也是在分析模型的基础上, 但虚功原理和支座反力获取新刚度变化的方式未具体化, 需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 吕志涛. 高性能材料 FRP 应用与结构工程创新[J]. *建筑科学与工程学报*, 2005, 21(1): 1-5.
- [2] ALSAYED S H. Flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars[J]. *Cement and Concrete Composites*, 1998, 20(1): 1-11.
- [3] TIGHIOUART B, BENMOKRANE B, GAO D. Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars[J]. *Construction and Building Materials*, 1998, 12(8): 453-462.
- [4] TASTANI S P, PANTAZOPOULOU S J. Bond of GFRP bars in concrete: experimental study and analytical interpretation[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2006, 10(5): 381-391.
- [5] 都凡, 欧阳利军, 陆洲导, 等. 高温(火灾)下 FRP 钢筋混凝土构件力学性能研究进展[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2016(7): 79-85.
- [6] BENMOKRANE B, EI-SALAKAWY E, CHERRAK Z, et al. Fibre reinforced polymer composite bars for the structural concrete slabs of a public works and government services Canada parking garage[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2004, 31(5): 732-748.
- [7] 朱虹, 董志强, 吴刚, 等. FRP 筋混凝土梁的刚度试验研究和理论计算[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(11): 44-52.
- [8] 贾莹, 程东辉. 碳纤维布加固钢筋混凝土连续梁试验与分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- [9] 叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(3): 24-36.
- [10] 盛光祖. 碳纤维布加固混凝土连续梁抗弯性能的试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- [11] 胡明龙. IFRP 加固混凝土连续梁抗弯性能的试验研究及

- 数值分析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [12] 文明才. 纤维布加固钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [13] 欧阳利军, 丁斌, 陆洲导. 玄武岩纤维及其在建筑结构加固中的应用研究进展[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2010(3): 84–88.
- [14] 沈蒲生. 混凝土结构设计[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [15] 邓宗才. 钢筋混凝土连续梁弯矩重分布法的研究[J]. *建筑结构*, 1997(8): 30–32.
- [16] 李美云, 管品武, 刘立新, 等. HRB400级钢筋混凝土连续梁的试验分析[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2003, 24(1): 89–92.
- [17] 陈永秀, 陆洲导, 范骅. 碳纤维加固混凝土连续梁弯矩重分布设计方法[J]. *四川建筑科学研究*, 2009, 35(2): 97–99.
- [18] 陈永秀. 碳纤维加固混凝土梁试验与理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [19] 常莹莹, 贡金鑫. 钢筋混凝土受弯构件的延性及弯矩重分布[J]. *建筑科学与工程学报*, 2010, 27(2): 38–44.
- [20] 常莹莹. 钢筋混凝土受弯构件的延性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [21] 刘南科, 周基岳, 王春瑞, 等. 钢筋混凝土连续梁和框架考虑内力重分布设计规程[S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 1993.
- [22] 曹国辉, 方志, 吴继峰. FRP片材加固混凝土连续梁试验研究[J]. *建筑结构*, 2005, 35(10): 63–66.
- [23] 周光辉, 马卫群. FRP片材加固钢筋混凝土连续梁试验研究[J]. *湖南城市学院学报(自然科学版)*, 2004, 13(3): 4–6.
- [24] 郝永超. 内嵌FRP筋材加固混凝土连续梁抗弯性能研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2010.
- [25] 何海, 陆洲导, 姜安庆. 碳纤维加固对钢筋混凝土连续梁受力影响的初探[J]. *四川建筑科学研究*, 2004, 30(1): 57–58.
- [26] 张涛涛. 粘贴CFRP加固混凝土连续梁的试验研究和理论分析[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- [27] MEIER U, DEURING M, MEIER H, et al. Strengthening of structures with CFRP laminates: research and applications in Switzerland[M]//NEALE K W, LABOSSIERE P. *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*. Montreal, Canada: Canadian Society for Civil Engineering, 1992: 243–251.
- [28] KARA I F, ASHOUR A F. Moment redistribution in continuous FRP reinforced concrete beams[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 49: 939–948.
- [29] KARA I F, ASHOUR A F. Flexural performance of FRP reinforced concrete beams[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(5): 1616–1625.
- [30] OEHLERS D J, JU G, LIU I S T, et al. Moment redistribution in continuous plated RC flexural members. Part 1: neutral axis depth approach and tests[J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(14): 2197–2207.
- [31] OEHLERS D J, LIU I S T, JU G, et al. Moment redistribution in continuous plated RC flexural members. Part 2: flexural rigidity approach[J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(14): 2009–2218.
- [32] ACI Committee 440. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP Bars[S]. Draft, Detroit, MI: American Concrete Institute, 2000.
- [33] TAJADDINI A. Investigation of moment redistribution in FRP-strengthened continuous RC beams and slabs[D]. Bath: University of Bath, 2015.
- [34] TAJADDINI A, IBELL T, DARBY A, et al. Quantifying moment redistribution in FRP-strengthened RC beams[C]// *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*. 2016: 853–862.
- [35] ASHOUR A F, EL-REFAIE S A, GARRITY S W. Flexural strengthening of RC continuous beams using CFRP laminates[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2004, 26(7): 765–775.
- [36] AIELLO M A, OMBRES L. Moment redistribution in continuous fiber-reinforced polymer-strengthened reinforced concrete beams[J]. *ACI Structural Journal*, 2011, 108(2): 158–166.
- [37] 欧阳利军, 陆洲导, 丁斌. 玄武岩纤维布加固混凝土连续梁抗弯试验研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2013(2): 3–7.
- [38] 欧阳利军, 丁斌, 陆洲导, 等. 玄武岩纤维与碳纤维加固连续梁抗弯试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(9): 1341–1346.
- [39] RAHMAN S M H, MAHMOUD K, EL-SALAKAWY E. Behavior of glass fiber-reinforced polymer reinforced concrete continuous T-Beams[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2017, 21(2): 04016085.
- [40] JAEGER L G, TADROS G, MUFTI A A. Balanced section, ductility and deformability in concrete with FRP reinforcement[D]. Halifax, Canada: Technical University of Nova Scotia, 1995.
- [41] GRACE N F, SOLIMAN A K, ABDEL-SAYED G, et al. Behavior and ductility of simple and continuous FRP reinforced beams[J]. *Journal of Composites for Construction*, 1998, 2(4): 186–194.
- [42] TAJADDINI A, IBELL T, DARBY A, et al. Prediction of capacity for moment redistribution in FRP-strengthened continuous RC T-beams[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2017, 21(1): 04016066.