

文章编号:1005-0523(2001)03-0011-05

一种被动的杂交混凝土墩柱分析模型

朱 弓, 弓俊青

(北方交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 在轴力作用下杂交混凝土墩柱横向膨胀系数和界面约束应力随纵向应变变化的条件下, 考虑了混凝土材料的非弹性和各向异性的性质, 建立了约束混凝土的三维应力—应变增量方程; 提出了在杂交墩柱分析中纵向应力由微分增量和变分增量组成的计算方法, 对杂交墩柱的承载力和界面约束应力进行了分析研究; 分析了 FRP 的厚度和间距等对承载力与界面约束应力的影响。

关键词: 杂交混凝土墩柱; 被动约束模型; 纤维增强复合材料(FRP); 承载力

中图分类号: TU522.3

文献标识码: A

0 引言

在罕遇地震时, 钢筋混凝土桥梁结构的非线性变形大都集中在墩柱, 其抗震性能与墩柱的延性变形和耗能能力相关, 混凝土桥墩的延性是靠塑性铰区截面的非线性转动能力(延性)获得的[1]。当混凝土墩柱在塑性铰区受到有效的横向约束时, 混凝土处于三向应力状态, 与单向受力状态相比, 混凝土的极限压应变和承载力提高, 从而使墩柱的承载力和延性增加[13]。用纤维增强复合材料的卷材对墩柱缠绕形成的杂交混凝土墩柱结构(如图1所示)是近年来出现的一种新型结构, 具有强度高、延性大和耗能能力强等优点, 其非线性变形性能的研究日益受到人们的关注和重视[13]。

杂交结构的非线性力学性能与约束混凝土的应力—应变关系有关, 也与所缠绕的复合材料强度和

刚度有关, 复合材料对墩柱施加的横向约束力随横向膨胀应变大小变化[13]。界面的约束应力随轴向变形被动地变化, 若用约束应力为常量的主动式方法会高估混凝土的极限承载力与极限变形能力[13]。本文考虑了混凝土的横向膨胀系数随纵向变形的变化, 用三维本构方程描述受轴压时混凝土的应力—应变关系, 按照界面应变连续的变形协调条件, 考虑了混凝土在非线形变形时的各向异性性质, 提出了用纵向应力的变分增量和微分增量概念, 用增量法研究了在轴压状态下杂交混凝土墩柱的承载力, 其结果与试验结果符合较好, 并为进一步在偏心受压状态下墩柱的非线性性能的研究准备了一个基础[13]。

1 基本分析理论

1.1 材料的应力—应变关系

1) 纤维增强复合材料的应力—应变关系

复合材料增强带的厚度较薄, 在杂交结构中只受拉应力[13]。根据常用的纤维增强材料(碳纤维和玻璃纤维)性质与试验结果, 纤维材料的拉伸变形基本为弹性变形, 由以上两种纤维材料和树脂加工成的纤维增强复合材料, 其应力—应变关系仍表现为线弹性的行为, 故在本文的研究中按弹性材料考虑[13]。

2) 混凝土的应力—应变关系

混凝土在受横向约束作用下的应力—应变关系

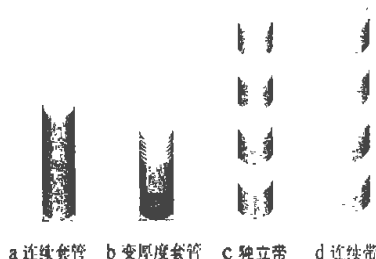


图1 复合材料带的缠绕方式

收稿日期:2001-04-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59978001)

作者简介:朱弓(1937-),男,教授。
中国知网 <https://www.cnki.net>

与单轴受压时不同,应力—应变关系中的参数随横向约束应力变化,本文采用 Mander[3]等人提出约束混凝土应力—应变关系

$$f_c = f'_{cc} x r / (r - 1 + x) \quad (1)$$

式中, f'_{cc} 为约束混凝土的峰值抗压强度^[13]混凝土的应变比 x 为

$$x = \epsilon / \epsilon_c \quad (2)$$

其中, ϵ 是与 f_c 对应的纵向混凝土压应变; ϵ_c 为与 f'_{cc} 对应的纵向混凝土压应变; 参数 r 为

$$r = E_c / (E_c - E_{sec}) \quad (3)$$

这里, E_c 是混凝土的初始弹性模量, E_{sec} 为峰值点的割线模量, 即

$$E_{sec} = f'_{cc} / \epsilon_c \quad (4)$$

与约束混凝土峰值应力 f'_{cc} 对应的应变值 ϵ_c 可由下式确定

$$\epsilon_c = \epsilon_0 \{1 + R(f'_{cc} / f'_d - 1)\} \quad (5)$$

式中, f'_d 为无约束混凝土的抗压强度; ϵ_0 是对应 f'_d 的压应变; R 为一经验数据, 可参考文献[3]取值^[13]

f'_{cc} 与横向约束的形式和大小有关, 这里采用 Mander[3]等人给出的表达式

$$K = f'_{cc} / f'_d = 1 + k_1 x \quad (6)$$

其中, K 称为横向约束系数, Richart 等给出了 k_1 的表达式如下[4],

$$k_1 = 6.7(x)^{-0.17} \quad (7)$$

$$x = f'_i / f'_d \quad (8)$$

假设复合材料增强带沿混凝土柱截面周向的应力 f_s 相同, 则对圆形截面, 复合材料增强带对墩柱的横向约束应力可表示为

$$f_i = 1/2 \rho f_s \quad (9)$$

这里, ρ 为圆形截面墩柱复合材料带的体积含量^[13]

s 为复合材料带的间距, 考虑到复合材料增强带有时是不连续缠绕的, 增强带对墩柱的约束作用力沿纵向是非均匀的, 其有效约束与混凝土的“压力拱”有关, 复合材料增强带对墩柱的有效约束应力定义为(2)

$$f'_i = k_e f_i \quad (10)$$

其中 $k_e = A_e / A_c$, 为有效约束系数, A_c 为

$$A_c = A_c (1 - \rho_c) \quad (11)$$

这里, ρ_c 纵向钢筋配筋率, A_c 是复合材料增强带所包裹的截面面积^[13]

1.2 基本分析理论

由于混凝土是非弹性和各向异性的, 弹性模量和横

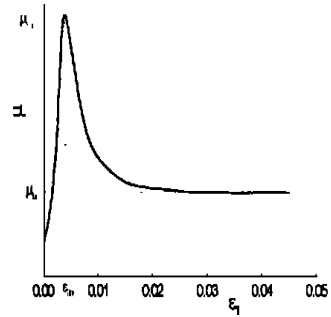


图2 横向膨胀系数曲线

向膨胀系数 μ 等都随受力状态而变化^[13]当混凝土的变形在弹性阶段时, 横向膨胀系数仍为泊松比 ν_0 ; 当时入非线性变形阶段, 随着微裂纹的扩展, 横向膨胀系数 μ 逐渐增加, 对于无约束混凝土墩柱, 随变形的进一步发展, 变形会不稳定, 而对于受 FRP 带(或箍筋)约束的混凝土墩柱, 由于横向变形受到约束, 其横向膨胀系数的变化就比较复杂, Mirmiran[4]通过对用复合材料管约束的圆形截面混凝土墩柱进行试验, 得到了在单轴情况下横向膨胀系数 μ 的拟合曲线(如图2所示), 图中 ϵ_0 的值基本为 0.0038, μ_{max} 和 μ_b 的试验回归值为

$$\mu_{max} = -0.7611 \ln(2E_s t / f'_d D) + 4.0167 \quad (12)$$

$$\mu_b = -0.1375 \ln(2E_s t / f'_d D) + 0.8646 \quad (13)$$

这里, E_s 为复合材料管的弹性模量; t 为复合材料管的厚度; D 为墩柱截面的直径; f'_d 则为无约束混凝土的强度^[13]本文在分析中利用了图2的拟合关系^[13]

对于圆形截面, 若墩柱的轴线为 z 轴, 其纵向应变用 ϵ 表示, 纵向应力为 $f_c = \sigma$, 相应的横向的约束应力为, $\sigma = \sigma = f'_i$, $\epsilon = \epsilon = \epsilon$, 对于均匀各向同性材料, 在弹性状态下, 应力应变关系为

$$\epsilon = 1/E(f_c - 2\nu f'_i) \quad (14)$$

$$\epsilon = 1/E[(1-\nu)f'_i - \nu f_c] \quad (15)$$

从(14)和(15)中消去纵向应力 f_c , 得到

$$\epsilon = (1-\nu-2\nu^2)f'_i - E\epsilon/\nu E \quad (16)$$

由于混凝土在非线性变形情况下, 变形具有各向异性的特点, 考虑到横向约束应力远比纵向应力小, 本文假设横向约束应力与应变的关系为线性的, 且横向应变引起的膨胀效应与弹性时相同, 即取 Poisson 系数为 ν_0 ; 设混凝土的初始弹性模量为 E_0 , 可得到与(16)式对应的增量形式为

$$d\epsilon = (1-\nu_0-2\nu_0^2)df'_i - E_0 d\epsilon/\nu E_0 \quad (17)$$

采用增量方式, 将以上理论应用到受轴压情况, 对第 i 步, 根据复合材料带的弹性质, 可得到 $\Delta f'_i$ 与 $\Delta\epsilon$ 的关系

$$\Delta f'_{li}=1/2k_eE_sR\Delta \epsilon \tag{18}$$

这里, E_s 复合材料带的弹性模量, R 为复合材料带的体积含量

横向应变参照(17)式解出

$$\Delta \epsilon_i=1-v_0-2v_0v/E_{\phi}\Delta f'_{li}-v\Delta \epsilon \tag{19}$$

将(18)式代入上式中,可得到 $\Delta \epsilon_i$ 与 $\Delta \epsilon$ 的关系

$$\Delta \epsilon_i=\beta \Delta \epsilon \tag{20}$$

$$\beta=-vE_{\phi}/E_{\phi}-0.5E_{s}k_eR(1-v_0-2v_0v) \tag{21}$$

式中, β 为横向应变与纵向应变的关系,与墩柱混凝土和复合材料带的刚度,也与混凝土所处的受力状态及几何尺寸等因素有关(13)约束应力增量可由式(18)确定(13)计算中采用迭代的方法,即将新得到的 $f'_{li+1}=f'_{li}+\Delta f'_{li}$ 作为约束应力,重新计算 β 值,直到最后两次计算的 β 值之间的差别满足所要求的精度(13)

由(9)及(10)可得到复合材料带的应力增量为

$$\Delta f'_{si}=2\Delta f'_{li}/k_eR \tag{22}$$

在本文的分析计算中,以纵向应变作为增量,纵向应力增量是应变增量导出的,由于约束应力变化时,对应的应力-应变关系参数将发生变化,从而导致应力-应变关系函数产生变分增量,所以,应力增量的计算除应考虑由于纵向应变增量引起的微分增量外,还应考虑由于约束应力改变所引起纵向应力

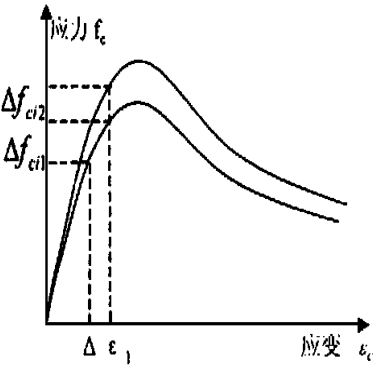


图 3 纵向应力的微分增量和变分增量

的变分增量,如图 3 所示(13) $\Delta f'_{c1}$ 是由纵向应变引起的纵向应力微分增量, $\Delta f'_{c2}$ 则是由于横向约束力的变化而引起的纵向应力变分增量(13)其中,微分增量的计算可由(15)式导出增量形式

$$\Delta f_{c1}=E_c\Delta \epsilon+2v_0E_c/E_{\phi}\Delta f'_{li} \tag{23}$$

这里, E_c 为对应应力状态的混凝土切线模量(13)引起应力变分增量的主要参数是 f'_i 的变化,应用式(2)和(7)并对 f'_i 取变分,并应用到第 i 步的增量方程中,可以得到由 $\Delta f'_i$ 产生的应力变分增量为

$$\Delta f_{c2}=(5.56xrf_{li}^{-0.17}/r-1+x'+27.8(1-r)(1-$$

$$x')f'_{cix}rf_{li}^{-0.17}/(r-1+x')^2\epsilon\cdot \epsilon/f_{f0})\Delta f'_{li} \tag{24}$$

则第 i 步的纵向应力增量为

$$\Delta f_{ci}=\Delta f_{c1}+\Delta f_{c2} \tag{25}$$

在求解过程中给定纵向应变增量 Δf_{ϵ} ,通过以上方法计算它增量(13)

2 算例与分析

2.1 与试验结果的比较

Mirmiran[4]曾进行了圆形截面在玻璃纤维约束下的轴压试验,所用数据为:混凝土圆柱截面直径 152.5 mm;无约束混凝土的轴压强度 32 MPa;增强带为 ± 15 铺设、厚度 1.3 mm 的玻璃纤维增强复合材料,间距 $s'=0.0$,强度 524 MPa,弹性模量 37.233 GPa;利用本文的分析理论,计算了试件在横向约束下的应力-应变关系,曲线见图 4。由图可见,本文所得到的应力-应变曲线与试验值符合较好,说明所用的分析理论和方法是有效的 19.

2.2 计算分析结果

1) 考虑界面应力变化的应力-应变关系

在复合材料增强带的约束下,混凝土受到的约束应力随纵向应变变化,混凝土的纵向应力-应变关系与约束应力为常量时不同 19.图 5 是圆形截面在 FPR 增强带约束下的应力-应变关系比较图,其中 FPR 增强带的应力-应变按线弹性考虑, Mander 解是由 FPR 增强带应力取极限强度时对应的约束应力(常量)得到,以 FPR 增强带达到极限强度为受

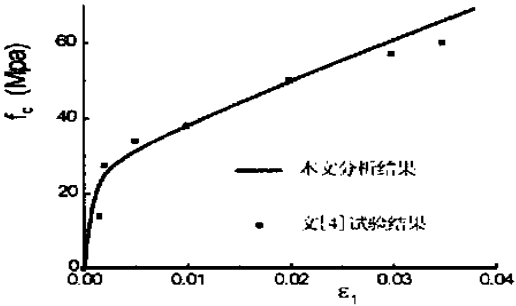


图 4 约束混凝土的应力应变关系比较

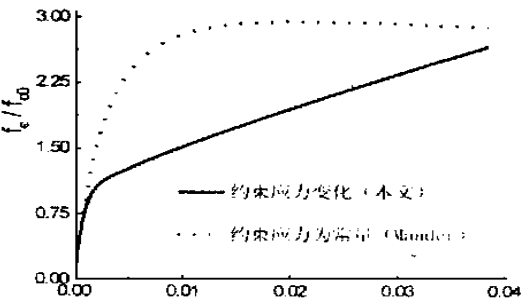


图 5 混凝土在不同约束条件下的应力-应变关系

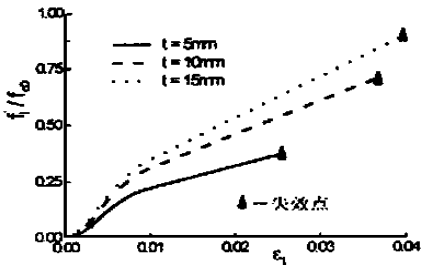


图 6 纵向应变与约束应力的关系

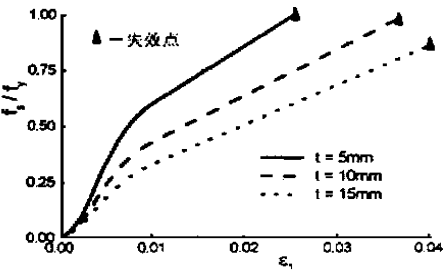


图 7 纵向应变与 FRP 带应力之间的关系

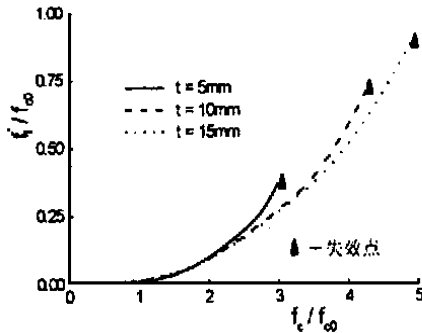


图 8 约束应力随纵向应力的变化

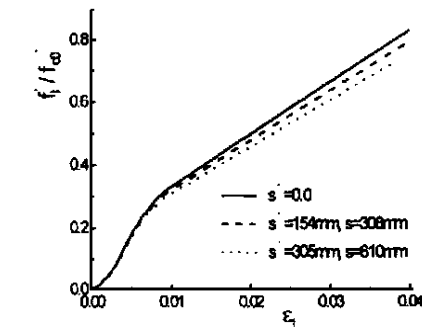


图 9 间距对约束应力的影响

压的极限状态;若称本文解为曲线 1, Mander 解为曲线 2, 初始阶段, 由于 FRP 增强带为线弹性的, 随纵向应变的增加, 曲线 1 的约束应力逐渐增加, 在应变较大的情况下, 横向膨胀系数随纵向应变的增加加快, 相应应力随应变的增加也逐渐加快, 后期的应力-应变关系基本上为直线, 且与曲线 2 逐渐接近¹⁹. 以上的分析可以看到, 以约束应力为常量(以最大应力为约束应力)的应力-应变关系高估了混凝土的

极限强度, 说明实际应用时应当考虑其约束应力随纵向应变的变化¹⁹.

2) 界面约束应力与纵向应变的关系

按照本文所给出的分析方法, 对界面约束应力随纵向应变的变化情况进行分析研究, 结果见图 6 与图 7⁽¹³⁾所用数据为: 截面直径 $d_s = 1.524 \text{ m}$, 混凝土单轴抗压强度 $f_c' = 20.67 \text{ MPa}$, $\epsilon_c = 0.002$, 碳纤维复合材料增强带的极限强度 $f_y = 2862.0 \text{ MPa}$, 材料弹性模量 $E_s = 168.35 \text{ GPa}$, 体积含量 $\rho = 1.55\%$, 增强带净间距 $s = 152.4 \text{ mm}$ ⁽¹³⁾

界面约束应力与混凝土和 FRP 的刚度比、间距, 以及体积含量有关¹⁹. 对于受 FRP 增强带约束的墩柱, 复合材料是弹性的, 约束应力与侧向应变成正比, 受横向膨胀系数的影响, 约束应力随纵向应变增加, 初始阶段的增加速度比后期的大¹⁹. 由图可以看到, 当 FRP 的体积含量增大(厚度增强)时, 在同一应变时对应的横向约束应力增加, 从而增加了墩柱的承载力; 同一应变时复合材料带中的应力减小, 复合材料达到极限强度时对应的纵向应变就增加, 说明增加复合材料带的含量, 可以有效地增加对混凝土的横向约束, 从而提高墩柱的极限变形能力(即提高其墩柱的延性变形能力)¹⁹.

3) FRP 界面的约束应力与纵向应力的关系

图 8 表示了 FRP 约束下, 横向界面约束应力随纵向应力的变化情况, 由图可见, 在纵向应力较小时, 混凝土的横向膨胀系数较小, 混凝土变形受横向约束应力的影响较小, 因而界面约束应力很小; 随着纵向应变的增加, 混凝土的横向膨胀系数灵敏和非线性变形增大, 横向应变加大, 界面约束应力相应增加很快¹⁹. 其规律同前面所讨论的界面约束应力与纵向应变的关系相同¹⁹. 从不同厚度对应的曲线比较看到, 随着复合材料增强带厚度的增加, 所能施加的横向约束应力和墩柱的承载能力明显提高; 图 7 曲线表现出的另一个规律是, 在相同的纵向应力情况下, 增强带厚度小, 对应的约束应力却大; 其原因是, 当纵向应力值相同时, 实际上对应的纵向应变值是不同的; 对于增强带厚度较小的情况, 其横向约束刚度相对较小, 相同纵向应力对应的纵向应变大, 且由于混凝土材料在纵向应变较大时其横向膨胀系数也大, 因而在相同的纵向应力作用下, 横向应变相对较大, 相应的约束应力也较大¹⁹. 之后随混凝土非线性变形的进一步发展, 约束应力迅速增大¹⁹.

4) FRP 带的间距对界面约束应力的影响

图 9 至图 10 是表示在相同的厚度情况下, 复合

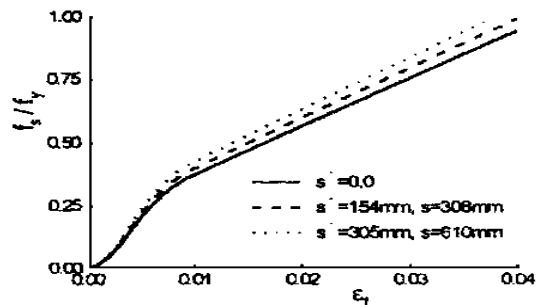


图 10 间距对 FRP 带应力的影响

材料带间距不同时对应的约束应力随纵向应变的变化情况¹⁹当减小复合材料带的间距时,一方面增加了体积含量,另一方面也提高了有效约束系数,所以,其承载力与延性随之提高;当间距减小时,则相对承载力与延性减小¹⁹.

3 结束语

用本文提出的被动杂交混凝土墩柱分析模型对承载力和约束应力的分析研究,得到如下四点认识:

1) 采用被动式的约束模型能较好地反映杂交混凝土墩柱的非线性行为,是进行承载力和延性分

析计算有效方法¹⁹.

2) 对杂交混凝土墩柱的承载力和延性进行分析时,应考虑混凝土的各向异性性质和由于约束应力变化而引起的纵向应力的变分增量¹⁹由于 FRP 的约束应力较大,其变分增量的影响显著¹⁹.

3) 以约束应力为常量(以最大应力为约束应力)的计算方法高估了约束混凝土墩柱的极限强度,分析中应考虑约束应力随纵向应变的被动变化¹⁹杂交混凝土墩柱的承载力受 FRP 带的应力控制¹⁹.

4) 随 FRP 体积含量的增加,杂交混凝土墩柱的承载力和延性明显提高¹⁹.

参考文献:

[1] N J M·谱瑞斯特雷,F·塞勃勒,G M·卡尔雄·桥梁抗震设计与加固[M]·北京:人民交通出版社,1997,10.
[2] H Saadatmanesh, M R Ehsani, M W Li·Strength and Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced with Fiber Composite Straps[J]·ACI Structural Journal, July-August 1994, 434~447.

A Passive Confinement Model for Analysis of Concrete Columns Confined by FRP

ZHU Xi, GONG Jun-qin

(College of Civil Engineering and Architecture ,Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: It is recognized that transverse confinement on the concrete columns with high-strength fiber reinforced polymers(FRP) tube(or straps) can significantly enhance its strength and ductility during several earthquake. When the concrete column is subjected to axial compression, the degrees of strains in lateral direction and the confinement pressures develop owing to poisson's effect. In this paper, the 3D increment constitutive relationships of confinement concrete take into account of inelastic and anisotropic properties are derived. A passive confinement model is proposed in this paper and is applied to calculate the transverse confinement pressure. The effects on the strength of the columns with confinement stresses are studied when the thickness and the spacing of FRP straps are changed.

Key words: hybrid concrete columns; passive confinement model; fiber-reinforced polymers(FRP) ; strength.