

钢筋混凝土面层加固石砌体轴心受压构件材料 强度利用系数和可靠度分析

孙潮, 陈宝春

(福州大学土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 钢筋混凝土面层加固石砌体形成的组合结构轴心受压构件属二次受力结构, 面层的混凝土和钢筋强度不能得到充分利用, 为此, 在极限承载力计算中, 引入小于 1.0 的材料利用系数来考虑这一影响, 然而现行规范中未给出该系数取值. 根据石砌体、混凝土和钢筋的本构关系研究的成果和变形协调条件, 分析了钢筋混凝土面层加固石砌体轴心受压构件混凝土和钢筋的材料强度利用系数. 根据分析结果并结合相关规范, 建议混凝土和钢筋的材料强度利用系数均取 0.8. 基于《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068-2001), 利用一次二阶矩法(JC法)进行了钢筋混凝土面层加固石砌体轴心受压构件可靠度分析, 分析结果表明满足现行规范要求.

关键词: 钢筋混凝土加固; 石砌体; 轴心受压; 强度利用系数; 可靠度

中图分类号: U448.223

文献标识码: A

Analysis of strength utilization factor of material and reliability for stone masonry member strengthening with reinforced concrete layer under centric compress load

SUN Chao, CHEN Bao - chun

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: Stone masonry member strengthening with reinforced concrete layer is initially loaded member and strength of concrete and reinforcement in the reinforced concrete layer can not be used fully that is considered by strength utilization factor of material which is smaller than one in calculation of the ultimate load - carrying capacity, but this factor is not provided in current code. Strength utilization factor of material for concrete and reinforcement is analyzed by the study results of constitutive relations of stone masonry, concrete and reinforcement and the deformation compatibility condition. The value 0.8 for this factor is proposed based on the results of analysis and the related codes. The second moment of first order method (JC method) recommended in Unified Standard for Reliability Design of Building Structures (GB 50068 - 2001) is applied to analyze the reliability of this member. The results meet with the requirement of current code.

Keywords: reinforced concrete; strengthening; stone masonry; centric compress load; strength utilization factor; reliability

1 概述

石砌体住宅和石拱桥具有材料来源丰富, 所需技术、设备简单, 造价低廉等优点, 因此 20 世纪五六十年代, 在我国贵州和闽南等石材丰富的山区农村和村镇, 建造有大量的石砌体住宅和石拱桥. 在农村多数的石结构住宅和石拱桥由村匠自行设计和施工, 在取材、构造以及施工工艺上往往存在缺陷. 此外由于服役时间较长, 材料的老化、腐蚀及结构不同程度的破损, 特别是 2008 年发生的 5·12 大地震的损坏, 造

成结构普遍存在隐患,影响其正常的使用功能和使用寿命,甚至造成人员财产严重损失的倒塌事件. 废除这些旧结构重建需耗巨资、花时间,而采用合理的加固技术,则具有节省投资、减少工期等优点,因此多数石结构需要鉴定和加固^[1-2].

钢筋混凝土面层加固石砌体的加固方法可用于加固房屋建筑中的石砌墙、石砌柱,加固石拱桥中的拱圈(即套拱加固法),加固圬工桥台等,在实际工程中应用广泛^[3-4]. 文献[5]报道了钢筋混凝土面层加固石砌体的小偏心受压构件的试验研究和理论分析,得到不同初应力水平下围套加固砌体受压构件的受力性能及破坏形式并采用条带法用 Fortran 语言编成计算程序进行了分析,但该文献未进行轴心受力构件的试验和理论研究,对小偏心受压构件也未进行材料强度利用系数的分析. 对钢筋混凝土面层加固砖砌体形成的组合砖柱的极限承载力和可靠度的研究表明,组合砖柱的变形和破坏特征等,都非常类似钢筋混凝土柱,因此其最大承载力可参照钢筋混凝土柱的有关公式进行计算^[6],其可靠度能够满足规范要求^[7]. 根据研究成果,现行规范《砌体结构加固设计规范(GB50702-2011)》^[8]给出了钢筋混凝土面层加固砌体轴心受压构件的计算公式:

$$N \leq \varphi_{\text{com}}(f_{m0}A_{m0} + \alpha_c f_c A_c + \alpha_s f'_y A'_s) \quad (1)$$

式中: φ_{com} 为轴心受压构件的稳定系数; α_c 为混凝土强度利用系数; α_s 为钢筋强度利用系数; N 为构件加固后的轴心压力设计值; f_{m0} 为原构件砌体抗压强度设计值; A_{m0} 为原构件截面面积; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; A_c 为新增混凝土面层的截面面积; f'_y 为新增竖向钢筋抗压强度设计值; A'_s 为新增受压区竖向钢筋截面面积.

式(1)是根据砖砌体和混凝土小型空心砌块砌体的试验得到的,规范只给出钢筋混凝土面层加固砖砌体或小型空心砌块砌体中的混凝土和钢筋的强度利用系数 α_c 和 α_s ,而未给出钢筋混凝土面层加固石砌体中的混凝土和钢筋的强度利用系数. 石砌体的受力性能与砖砌体或小型空心砌块砌体有所不同,其材料强度利用系数需另行研究. 此外,组合石砌体构件是由钢筋、混凝土和石砌体三种材料构成的,其可靠指标的计算较钢、木结构复杂. 因此,进行钢筋混凝土面层加固石砌体轴心受压构件的混凝土和钢筋的强度利用系数及可靠度研究具有理论和实际意义.

2 材料强度利用系数

基本假定: ① 新老结构变形一致,即加固后组合结构的变形符合平截面假定; ② 由于钢筋具有较长的屈服平台,因此假定组合砌体结构中的石砌体或混凝土达到其极限应变时,即认为组合砌体达到强度承载力.

根据对石砌体试验数据回归分析,认为二次抛物线应力—应变关系公式与试验结果符合较好,因此石砌体受压构件抗力计算采用二次抛物线及水平曲线的应力—应变曲线关系,见式(2)和式(3)^[9-10].

当 $\varepsilon \leq \varepsilon_{m0}$ 时,

$$\sigma = f_m \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{m0}} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{m0}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

当 $\varepsilon_{m0} < \varepsilon \leq \varepsilon_{mu}$ 时,

$$\sigma = f_m \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_{m0} = 0.002$, $\varepsilon_{mu} = 1.5\varepsilon_{m0}$

钢筋混凝土加固层中的混凝土一般不采用高强混凝土,混凝土本构关系采用式(4)和式(5)^[11-12].

当 $\varepsilon \leq \varepsilon_{c0}$ 时,

$$\sigma_c = f_c \left[2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

当 $\varepsilon_{c0} < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu}$ 时,

$$\sigma_c = f_c \quad (5)$$

式中: $\varepsilon_{c0} = 0.002$, $\varepsilon_{cu} = 0.0033$

钢筋混凝土加固层中的钢筋处于单轴受力状态,可采用理想弹塑性的构关系,见式(6)和式

(7)^[11-12].当 $\varepsilon_s \leq \varepsilon_{s0}$ 时,

$$\sigma_s = E_s \varepsilon \quad (6)$$

当 $\varepsilon_s > \varepsilon_{s0}$ 时,

$$\sigma_s = f_y \quad (7)$$

式中: $\varepsilon_{s0} = f_y/E_s$ 设石砌体在恒载下应力为 σ_1 , 相应的应变为 ε_1 , 令初始应力比 $\eta = \sigma_1/f_m$, 由式(2)可解得

$$\varepsilon_1 = (1 - \sqrt{1 - \eta}) \varepsilon_{m0} \quad (8)$$

根据采用的本构关系可知 $\varepsilon_{m0} = \varepsilon_{c0}$, 由假设可得后期组合结构能产生的最大应变差为:

$$\varepsilon = \varepsilon_{m0} - \varepsilon_1 = \varepsilon_{m0} \sqrt{1 - \eta} \quad (9)$$

将式(9)代入式(4), 同时注意到 $\varepsilon_{m0} = \varepsilon_{c0}$, 可以得到混凝土材料利用系数:

$$\alpha_c = \sigma_c/f_c = \beta + 2 \sqrt{1 - \eta} - 1 \quad (10)$$

将式(9)代入式(6), 可以得到钢筋应力从而得到钢筋材料利用系数:

$$\alpha_s = \sigma_s/f_y = E_s \varepsilon/f_y = E_s \varepsilon_{m0} \sqrt{1 - \eta}/f_y \quad (11)$$

根据式(10)和式(11)可得到图1和图2. 从图1可见, 当初始应力比 $\eta \leq 0.7$ 时, 随着初始应力比的增大, 混凝土材料利用系数下降缓慢, 当 $\eta = 0.7$ 时, $\alpha_c = 0.8$. 当初始应力比 $\eta > 0.7$ 时, 混凝土材料利用系数下降迅速. 从图2可见, 钢筋强度越高, 钢筋材料利用系数越低.

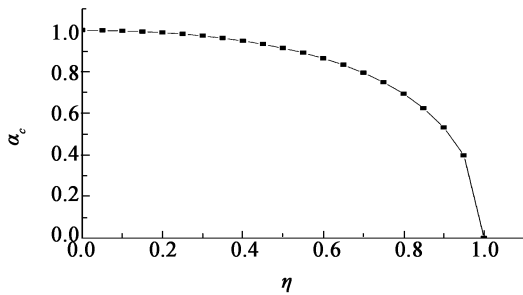
图1 初始应力比 η 对混凝土强度利用系数 α_c 的影响

Fig. 1 Influence of initial stress degree η on strength utilization factor of concrete α_c .

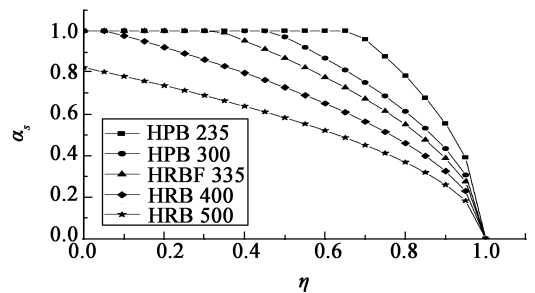
图2 初始应力比 η 对钢筋强度利用系数 α_s 的影响

Fig. 2 Influence of initial stress degree η on strength utilization factor of reinforcement α_s .

从材料本构可见, 石砌体的本构可以与混凝土取一样的形式, 因此可以认为钢筋混凝土面层加固石砌体的极限承载力与钢筋混凝土面层加固钢筋混凝土柱相似. 《混凝土结构加固设计规范(GB50367-2006)》^[13] 中钢筋混凝土面层加固钢筋混凝土柱轴心受压构件中综合考虑新增混凝土和钢筋强度利用程度的修正系数值为 0.8. 参考该规范和以上的数值分析, 建议钢筋混凝土面层加固石砌体轴心受压构件承载力计算公式(1)中混凝土和钢筋的强度利用系数 α_c 和 α_s 均取为 0.8.

3 可靠度分析

3.1 基本参数

计算中采用的各种荷载、材料和几何特征的统计参数及分布类型见表1-表3^[14]. 从表2可见, 砌体的材料性能指标统计参数与其强度无关, 但钢筋的材料性能指标统计参数与其强度有关, 混凝土强度越高, 材料性能指标统计参数越低. 表3中几何特征统计参数服从正态分布. 《建筑结构可靠度设计统一标准》对明确属于脆性破坏或延性破坏的结构构件提出了可靠指标要求^[15]. 常用的安全等级为二级的结构构件, 脆性破坏的可靠指标为 3.7, 延性破坏的可靠指标为 3.2. 配筋石砌体轴心受压属于脆性破坏, 因此目标可靠指标取 3.7. 在具体制订各本建筑设计规范时, 将抗力分项系数转化为材料强度分项系数, 在设计表达式中直接以设计强度表示^[16-17]. 混凝土材料强度分项系数为 1.4^[12], 砌体材料强度分项

系数为1.6(B级施工质量控制等级)和1.8(C级施工质量控制等级)^[18]. 抗力分项系数或材料强度分项系数越大,可靠指标也越大.

表1 荷载组合时的荷载统计参数

Tab.1 The statistic parameters of load combinations

| 荷载类别 | G | $L_{办}$ | $L_{住}$ | W |
|------------|-------|---------|---------|--------|
| μ_k | 1.06 | 0.700 | 0.859 | 0.999 |
| δ_k | 0.070 | 0.290 | 0.233 | 0.193 |
| 分布类型 | 正态 | 极值 I 型 | 极值 I 型 | 极值 I 型 |

注:恒载为 G ;办公室活载为 $L_{办}$;住宅活载为 $L_{住}$;风荷载为 W ; μ_k 为平均值; δ_k 为变异系数

表2 材料性能指标统计参数

Tab.2 The statistic parameters of material

| 参数 | 石砌体 | 钢筋 | | 混凝土 | | |
|----------------|------|--------|--------|------|------|------|
| | | HPB235 | HRB335 | C20 | C30 | C40 |
| μ_{kmc} | 1.15 | 1.02 | 1.14 | 1.66 | 1.41 | 1.35 |
| δ_{kmc} | 0.2 | 0.08 | 0.07 | 0.23 | 0.19 | 0.16 |
| 分布类型 | 正态分布 | 对数正态分布 | | 正态分布 | | |

注: μ_{kmc} 为平均值; δ_{kmc} 为变异系数

表3 几何特征统计参数

Tab.3 The statistic parameters of geometrical characteristics

| 结构构件种类 | 项目 | μ_{k_A} | V_{k_A} |
|---------|------------|-------------|-----------|
| 钢筋混凝土构件 | 截面高度宽度 | 1.00 | 0.02 |
| | 纵筋截面面积 | 1.00 | 0.03 |
| 砌体 | 单向尺寸(37cm) | 1.00 | 0.02 |

注: μ_{k_A} 为平均值; V_{k_A} 为变异系数

确定构件计算模式不定性需首先计算每个构件承载力实测值与计算值的比值,再按照概率统计的方法,计算平均值和变异系数,由此得出计算模式不定性的平均值和变异系数.根据文献[6]的试验结果,计算得轴心受压构件计算模式不定性的平均值为1.073,变异系数为0.0489.

3.2 混凝土和钢筋强度的影响

表4和表5列出了混凝土和钢筋强度的影响.从表4可见,随着混凝土强度的提高,抗力的统计参数平均值和变异系数减小,抗力分项系数和可靠指标变化不大.在可靠指标满足规范要求的情况下,抗力分项系数小于规范规定的混凝土和砌体的材料分项系数.从表5可见,钢筋强度的影响较小.

表4 混凝土强度的影响

Tab.4 Influence of strength of concrete

| 混凝土强度 | 抗力平均值 | 抗力变异系数 | 抗力分项系数 | 恒载+办公室活载可靠指标 β 平均值 | 恒载+住宅荷载可靠指标 β 平均值 | 恒载+风荷载可靠指标 β 平均值 |
|-------|-------|--------|--------|--------------------------|-------------------------|------------------------|
| C20 | 1.444 | 0.158 | 1.133 | 4.025 | 3.849 | 3.705 |
| C30 | 1.368 | 0.150 | 1.164 | 4.014 | 3.836 | 3.689 |
| C40 | 1.352 | 0.145 | 1.154 | 4.005 | 3.825 | 3.677 |

表 5 钢筋强度的影响

Tab.5 Influence of strength of reinforcement

| 钢筋强度 | 抗力的统计参数平均值 | 抗力的统计参数变异系数 | 抗力分项系数 | 恒载 + 办公室活载 可靠指标 β 平均值 | 恒载 + 住宅荷载 可靠指标 β 平均值 | 恒载 + 风荷载可靠指标 β 平均值 |
|--------|------------|-------------|--------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| HPB235 | 1.363 | 0.155 | 1.185 | 4.020 | 3.843 | 3.698 |
| HRB335 | 1.368 | 0.150 | 1.164 | 4.014 | 3.836 | 3.689 |

3.3 配筋率的影响

配筋率定义为 $A'_s/A \times 100$, A'_s 为新增受压区竖向钢筋截面面积, A 为加固后构件的截面面积. 配筋率的影响见图 3 和图 4. 抗力的统计参数平均值和变异系数、抗力分项系数和可靠指标 β 随配筋率的增加呈直线下降, 但变化不大. 在可靠指标满足规范要求的情况下, 抗力分项系数小于规范规定的混凝土和砌体的材料分项系数.

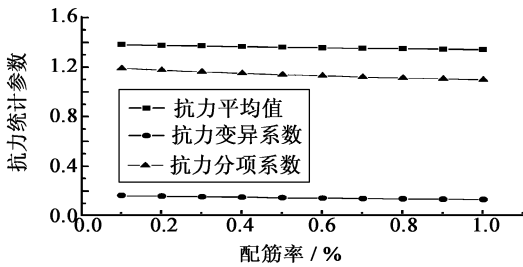


图 3 配筋率对构件抗力统计参数的影响

Fig.3 Influence of ratio of reinforcement on the resistance statistic parameters

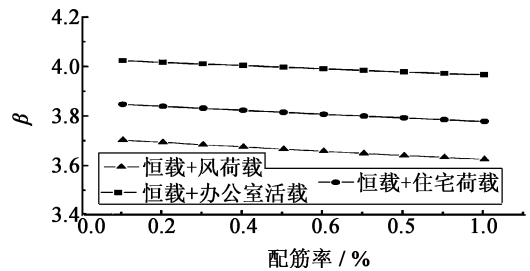


图 4 配筋率对可靠指标 β 的影响

Fig.4 Influence of ratio of reinforcement on reliability index β

3.4 含混凝土率的影响

含混凝土率定义为 $A_c/A \times 100$, 其中 A_c 为新增混凝土面层的截面面积, A 为加固后构件的截面面积. 随含混凝土率的增加, 抗力的统计参数平均值呈直线上升, 变异系数变化不大, 抗力分项系数呈曲线下降, 最大抗力分项系数为 1.39, 小于规范规定的混凝土和砌体的材料分项系数, 见图 5. 可靠指标 β 随含混凝土率的增加呈曲线变化, 但变化不大, 满足规范要求, 见图 6.

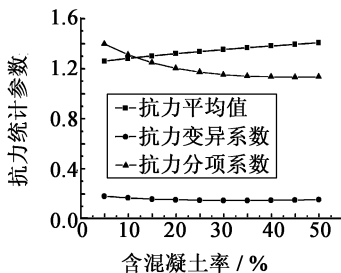


图 5 含混凝土率对构件抗力统计参数的影响

Fig.5 Influence of ratio of concrete on the resistance statistic parameters

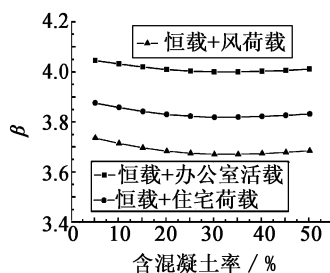


图 6 含混凝土率对可靠指标 β 的影响

Fig.6 Influence of ratio of concrete on reliability index β

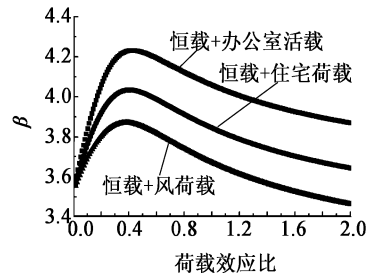


图 7 荷载效应比对可靠指标 β 的影响

Fig.7 Influence of different specific loads value on reliability index β

3.5 荷载效应比的影响

图 7 绘出了采用 C20 混凝土, HRB335 钢筋的组合石砌体轴压承载力可靠指标随荷载组合、荷载效应比的变化情况. 可靠指标因荷载组合不同而不同, 恒载加办公室活载情况下值最大, 恒载加风荷载情况下值最小. 可靠指标随荷载效应比的增加先升后降, 在荷载效应比为 0.44 左右达到峰值.

4 结论

1) 当初始应力比 $\eta \leq 0.7$ 时,随着初始应力比的加大,混凝土材料强度利用系数下降缓慢,当 $\eta = 0.7$ 时, $\alpha_c = 0.8$. 当初始应力比 $\eta > 0.7$ 时,混凝土材料强度利用系数迅速下降. 钢筋强度越高,钢筋材料强度利用系数越低. 建议钢筋混凝土面层加固石砌体的极限承载力计算公式(1)中混凝土和钢筋的材料强度利用系数 α_c 和 α_s 均取为 0.8.

2) 可靠指标因荷载组合不同而不同,恒载加办公室活载情况下值最大,恒载加风荷载情况下值最小. 可靠指标随荷载效应比的增加先升后降,在荷载效应比为 0.44 左右达到峰值. 材料强度和配筋率对抗力统计参数和可靠指标影响不大. 随含混凝土率的增加抗力分项系数呈曲线下降,可靠指标 β 呈曲线变化. 可靠指标均值在满足《建筑结构可靠度设计统一标准》脆性破坏目标可靠指标 3.7 的情况下,公式(1)抗力分项系数小于规范规定的混凝土和砌体的材料强度分项系数,说明混凝土和钢筋的强度利用系数均取 0.8 可靠度满足现行规范要求.

3) 论文主要从理论上进行了分析,有待后续开展相关试验研究以进一步完善.

参考文献:

- [1] 肖祖康,刘文彬. 闽南石结构住宅建筑通病及其防治[J]. 福建建筑高等专科学校学报, 2001, 3(3): 97-100.
- [2] 林晓峰,向中富,王旭军. 常用石拱桥加固技术综述[J]. 山西建筑, 2007, 33(9): 261-262.
- [3] Pinho F F S, Lúcio V J G, Baião M F C. Rubble stone masonry walls in Portugal strengthened with reinforced micro-concrete layers[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2012, 10(1): 161-180.
- [4] 廖仲权. 水口石拱大桥加固方案[J]. 广西交通科技, 2003, 28(5): 81-82.
- [5] 张晶,钱永久. 围套加固石砌体小偏心受压构件正截面承载力的计算[J]. 实验力学, 2010, 25(1): 106-112.
- [6] 柏傲冬,王世雄. 砂浆抹面纵配筋砖柱承载能力的试验及计算[J]. 建筑结构学报, 1982(1): 59-68.
- [7] 柏傲冬,颜茂兰. 组合砖砌体受压构件可靠度分析[J]. 四川建筑科学研究, 1985(2): 27-32.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50702-2011 砌体结构加固设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [9] 胡大琳. 大跨径石拱桥承载能力研究[D]. 西安:长安大学, 2007.
- [10] 黎宗勇. 钢筋混凝土套箍加固石拱桥承载力计算方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2009.
- [11] 姜慷康. 钢筋混凝土套箍加固石拱桥受力性能研究[D]. 成都:西南交通大学, 2009.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50367-2006 混凝土结构加固设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006.
- [14] 张新培. 建筑结构可靠度分析与设计[M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50068-2001 建筑结构可靠度设计统一标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.
- [16] Ellingwood B R. Reliability-based condition assessment and LRFD for existing structures [J]. Structural Safety, 1996, 18(2): 67-80.
- [17] 李继华,林忠民,李明顺,等. 建筑结构概率极限状态设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1990.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50003-2011 砌体结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.

(责任编辑:林晓)