

约束混凝土柱的升降温全过程轴力分析

吴波, 乔长江

(华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

摘要:利用 SAFIR 程序, 开展了约束混凝土柱的升降温全过程轴力分析。考察了轴向/转动约束刚度比、截面边长、荷载比、荷载偏心率、配筋率、升温时间等参数对 ISO834 标准升降温过程作用下约束混凝土柱的轴力的影响规律, 并与单调升温时的相应规律进行了比较。通过对 2880 种工况的计算分析, 建议给出了该类构件轴力变化系数的实用计算方法。研究表明: 对于轴向/转动约束混凝土柱, 无论单调升温还是先升温后降温, 轴力变化系数总体都呈现出先逐渐增大而后有所减小或基本保持稳定, 最后以较大速率持续降低的趋势, 主要区别在于后期单调升温对应的降低速率一般比先升温后降温时更大; 对于先升温后降温的轴向/转动约束混凝土柱, 转动约束刚度比、柱长和混凝土保护层厚度对轴力变化系数影响较小, 而轴向约束刚度比、荷载偏心率和配筋率越大或荷载比和截面边长越小, 轴力变化系数的峰值就越大。

关键词:钢筋混凝土; 约束柱; 轴力; 升温段; 降温段

中图分类号: TU375 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2010)02-0053-07

Axial Force in Restrained RC Columns during Heating and Cooling Phases

WU Bo, QIAO Chang-jian

(State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract: Using the computer program of SAFIR, the influences of some parameters (i. e., axial/rotational restraint ratio, sectional dimension, load ratio, load eccentricity ratio, reinforcement ratio, and heating time, etc.) were analyzed on axial forces in restrained concrete columns exposed to ISO834 standard fire with cooling phase, compared with those in the standard fire without cooling phase. Based on the simulation results of 2880 cases, a practical calculation method for axial force in column was proposed. It was shown that: (a) for axially-and-rotationally restrained columns in fire with or without cooling phase, the enhancement coefficient of axial force increased gradually first, and then reduced gently or kept constant, and finally decreased quickly. However, in the late stage, the enhancement coefficient corresponding to fire without cooling phase dropped more significant than that with cooling phase; and (b) the influences of the rotational restraint ratio, column length and thickness of concrete cover on the enhancement coefficient of axial force in axially-and-rotationally restrained columns were limited subjected to fire with cooling phase, while the peak value of the enhancement coefficient increased with the increase of the axial restraint ratio, load eccentricity ratio and reinforcement ratio or with the decrease of the load ratio and sectional dimension.

Key words: reinforced concrete; restrained column; axial force; heating phase; cooling phase

收稿日期: 2009-12-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50738005); 国家科技支撑计划子课题(2006BAJ03A03-12); 亚热带建筑科学国家重点实验室重点研究项目(2008ZA10)

作者简介: 吴波(1968-), 男, 博士, 研究员, 主要从事结构抗灾研究, (E-mail) bowu@scut.edu.cn。

乔长江(联系人), 男, 博士, 主要从事结构抗火研究, (E-mail) qiaocivil@gmail.com。

以往人们评估结构的抗火性能大多都只是针对单独构件进行,忽略了结构的连续性以及相邻构件之间的相互约束作用。实际火灾调查与明火试验表明,结构中构件的火灾行为与单独构件相比存在较明显的差别。为此,不少研究人员通过从原结构中取出一个子结构或者对构件端部施加约束的方法近似考虑火灾中相邻构件之间的相互约束效应。例如,Ali 和 O'Connor 对 10 根高 1.8 m 的钢柱进行了耐火试验^[1],结果表明转动约束增加对附加轴力影响相对较小,而荷载比对附加轴力影响较大。Valente 和 Neves 考察了轴向和转动约束对钢柱临界温度的影响^[2],分析表明轴向约束降低了钢柱的临界温度,转动约束却提高了钢柱的临界温度。Huang 等进行了 4 根具有不同轴向约束刚度比的型钢混凝土柱的耐火试验^[3],发现轴向约束的存在显著降低了试件的耐火性能。Ali 等开展了 93 根缩尺高强/普通混凝土约束柱的耐火试验,考察了轴向约束刚度比、荷载比和升温速率对柱耐火性能的影响^[4],并基于有限差分法提出了高温下约束混凝土柱的轴向力计算方法^[5],但该方法没有涉及降温阶段,同时忽略了钢筋的作用。

值得指出的是,目前有关约束构件的研究大多只是针对升温阶段开展的,而实际火灾却只在有限时间内升温,随后就会由于可燃物消耗殆尽而降温。随着研究的深入,积极探索升降温全过程约束构件的火灾行为与耐火性能无疑更为合理。

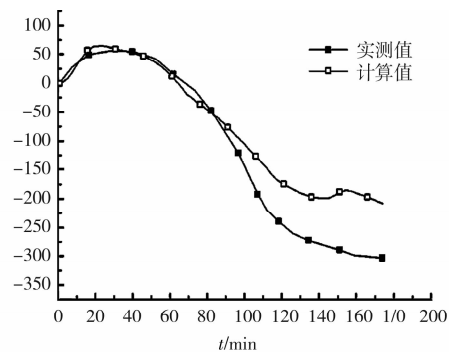
Bailey 等和 El-Rimawi 等对钢材降温阶段的应变恢复进行了理论研究^[6-7],考察了简支钢梁和端部固定钢梁在降温阶段的力学响应。李国强和郭士雄对约束钢梁的降温段行为进行了理论研究和参数分析^[8-9],并进行了 2 根约束钢梁的火灾升降温试验^[10]。Ellingwood 和 Lin 对混凝土外伸梁进行了升降温全过程的耐火试验^[11],Cai 等和 Bratina 等则分别采用广义梁柱单元和基于应变的平面梁单元对文献^[11]所提试验进行了数值分析^[12-13]。Iu 等考察了 Cardington 八层组合钢框架升降温全过程的结构性能^[14]。Bailey 等和 Liew 等考察了各跨同时升降温和火灾水平蔓延(注:蔓延时结构不同部位可能分别出现升温 and 降温)对平面多层多跨钢框架的影响^[6, 15]。吴波等针对具有轴向约束的 12 根钢筋混凝土异形柱、4 根普通混凝土方形柱、4 根高强混凝土方形柱,进行了升降温全过程明火试验^[16-18],研究表明具有不同轴压比和不同轴向约束刚度比的同类试件,在降温阶段虽然变形和轴力存在差别,但却呈现出相似的变化趋势。Garlock 和 Quiel 考察了

火灾竖向蔓延对高层钢框架外围柱的影响^[19]。

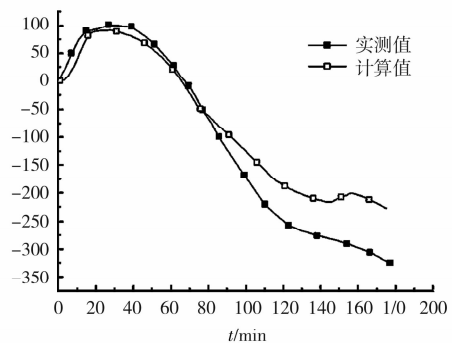
从上述分析可以看出,虽然国内外学者对结构升降温全过程的火灾行为已开展了少量研究,但主要针对钢框架、组合钢框架和约束钢构件,有关混凝土框架和约束混凝土构件的全过程抗火研究很少。有鉴于此,该文以约束混凝土方形柱作为研究对象,着重探讨该类构件升降温全过程的轴力变化情况以及主要参数的影响规律,建议给出轴力变化系数的实用计算方法。

1 程序验证

该文采用比利时 Liege 大学开发的抗火分析软件 SAFIR 进行数值计算。考虑文献^[17]的轴向约束混凝土柱 RCN21 和 RCN22,明火试验时柱四面受火,并对其施加定常轴向约束。升温过程中炉内温度遵循 ISO834 标准升温曲线,升温过程持续约 110 min,随后自然降温。图 1 所示为两试件附加轴力计算结果与实测结果的比较。从图 1 可以看出,计算曲线与实测曲线总体吻合较好。



(a) 试件 RCN21



(b) 试件 RCN22

图 1 附加轴力计算结果与实测结果的比较

2 参数分析

2.1 计算模型

图 2 所示为约束混凝土柱的计算模型。图中 N

为柱和轴向约束弹簧共同承受的常温轴力, M 为柱端和转动约束弹簧共同承受的常温弯矩, H 为柱长, k_l 为柱顶的轴向约束刚度, k_R 为柱顶和柱底绕 z 轴的转动约束刚度。一般来说, 硅质骨料混凝土的抗火性能比钙质骨料混凝土更弱, 加之前者的应用也较为普遍, 因此以硅质骨料混凝土为研究对象。作为初步探讨, 仅考虑四面受火方形柱, 计算过程中环境温度遵循 ISO834 标准升降温曲线。

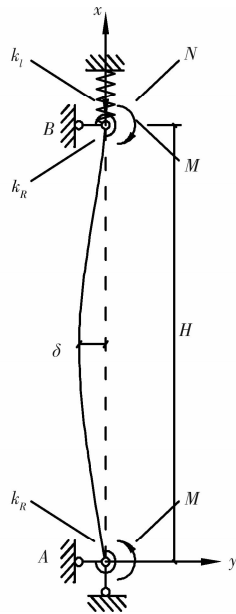


图2 约束柱的计算模型

2.2 影响规律

分析过程中的主要参数包括: 轴向约束刚度比 β_l ($\beta_l = k_l / (E_c^{20} A_c / H)$, E_c^{20} 为混凝土的常温弹性模量, A_c 为柱横截面积)、转动约束刚度比 β_R ($\beta_R = k_R / (4E_c^{20} I_c / H)$, I_c 为柱截面惯性矩)、截面边长 b 、柱长 H 、荷载比 μ ($\mu = N_0 / N_u$, N_0 为柱实际承受的常温轴力)、荷载偏心率 e ($e/e_0/b$, 偏心距 $e_0 = M_0 / N_0$, N_0 为柱端实际承受的常温弯矩)、升温时间 t_h 、全截面配筋率 ρ 、混凝土保护层厚度 c 。其中 N_u 为偏心距 e_0 对应的柱常温竖向极限承载力。

下面通过典型算例, 考察上述参数对高温下约束混凝土柱的轴力的影响规律。为后文叙述方便, 称 $N(t)/N_0$ 为轴力变化系数, 其中 N_0 和 $N(t)$ 分别为升温前和升温后 t 时刻柱的轴力。通过分析发现, 实际结构中轴向约束刚度比主要在 0.005 ~ 0.15 之间变化, 转动约束刚度比主要在 2.0 附近变化。据此, 算例的基本条件取为: $\beta_l = 0.05$ 、 $\beta_R = 2.0$ 、 $b = 0.4$ m、 $H = 3.0$ m、 $\mu = 0.45$ 、 $e = 0.25$ 、 $t_h = 30$ min 和 $t_h = 120$ min (分别对应于无转动约束柱和转动约束柱)、 $\rho = 2.0\%$ 、 $c = 30$ mm。常温下混凝土的轴心抗压强度和纵筋屈服强度分别取为 30 MPa 和 375

MPa, 混凝土含水率取 0.02。当考察某参数对轴力变化系数的影响时, 该参数再补充考虑其他取值情况。图 3—图 11 所示为柱轴力变化系数随各参数的变化情况。从图中可以看出:

1) 对于单调升温的无转动约束柱, 随着升温时间的增加, 轴力变化系数总体呈现出先逐渐增大而后渐趋平缓或略有降低的趋势, 直至最终破坏; 而先升温后降温的无转动约束柱的轴力变化系数则呈现出先不断增大而后明显减小, 且减小速率渐趋稳定的趋势, 其最大值对应时刻滞后于降温开始时刻约 30 min。这是因为升温初期柱的竖向热膨胀导致轴向约束向下“压”构件, 使得柱轴力逐渐增大; 单调升温时, 随着升温的持续一方面材料劣化导致柱轴向刚度降低, 另一方面高温及增大后轴力共同作用下的混凝土瞬态热应变加大, 两方面都使柱存在缩短的趋势, 这与竖向热膨胀引发的柱伸长效应共同作用, 使得柱轴力的增长逐渐平缓或略有降低; 对于先升温后降温的情况, 降温初期虽然柱截面外围温度不断降低, 但内部温度却继续升高, 柱竖向热膨胀导致轴力继续增大; 降温一段时间之后, 柱截面外围温度已降低较多且内部温度开始下降, 柱的竖向降温收缩导致轴力不断减小。

2) 对于先升温后降温的无转动约束柱, 降温开始之前的升温时间越长, 轴力变化系数的最大值越大且出现的时刻越晚。随着升温时间不断增长, 柱可能在升温阶段即发生破坏, 使得轴力变化系数表现出与单调升温相同的变化趋势。

3) 对于无转动约束柱, 截面边长、柱长、全截面配筋率和混凝土保护层厚度对柱轴力变化系数影响很小; 而轴向约束刚度比、荷载比和荷载偏心率对该系数影响较大。各参数的具体影响: (1) 随着轴向约束刚度比增加, 轴力变化系数峰值逐渐增大; 对于先升温后降温的无转动约束柱, 该系数重新回归 1.0 所对应的时间与轴向约束刚度比几乎无关, 此后轴向约束刚度比越大, 轴力变化系数下降相对越快。这是因为轴向约束刚度比越大, 柱轴力随柱伸长(或收缩)而增长(或降低)的速率就越快, 从而导致轴力变化系数不仅峰值越大, 而且峰值点之后的回落速率更快, 最终使得不同轴向约束刚度比情况下该系数回归 1.0 所对应的时间几乎一致。(2) 随着荷载比增加, 轴力变化系数的峰值减小。这主要是因为荷载比越大, 高温下混凝土的瞬态热应变就越显著, 一定程度上抵消了自由热膨胀引发的柱伸长效应, 从而使轴向约束作用下柱轴力的上升空间减小。(3) 荷载偏心率越大, 轴力变化系数就越大。这主要是因为荷载偏心率越大, 相应的柱常温竖向极限承

载力就越小,导致相同荷载比情况下实际施加的竖向荷载变小,高温下自由热膨胀引发的柱伸长效应

更能得到充分发展,从而使得柱轴力的增长更为显著。

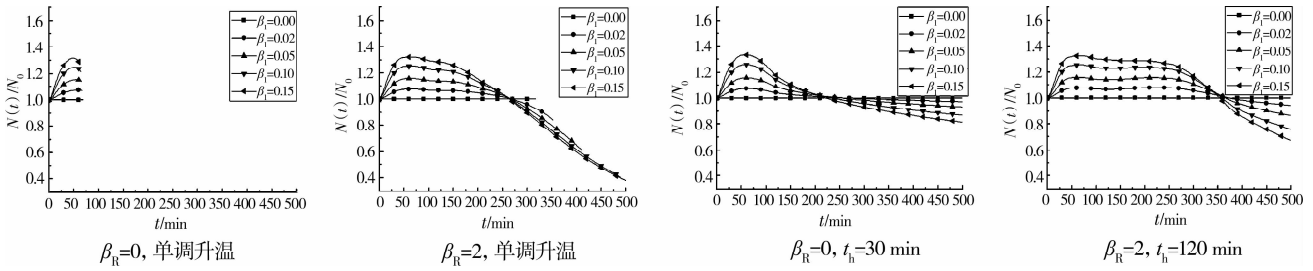


图 3 柱轴力随轴向约束刚度比的变化情况

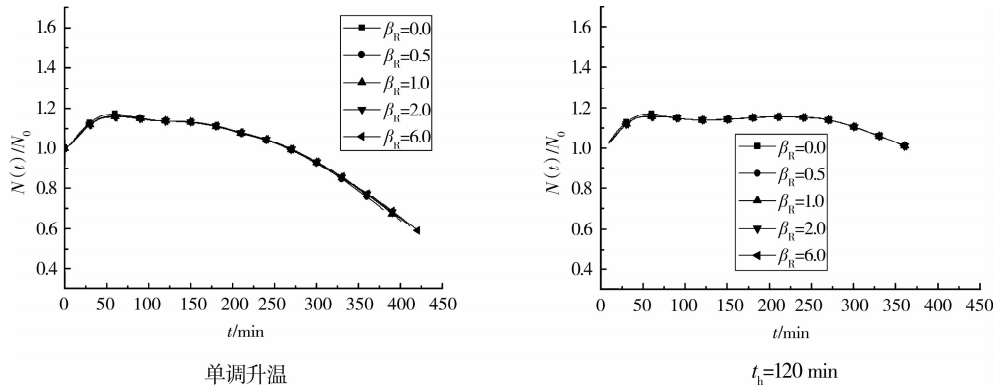


图 4 柱轴力随转动约束刚度比的变化情况

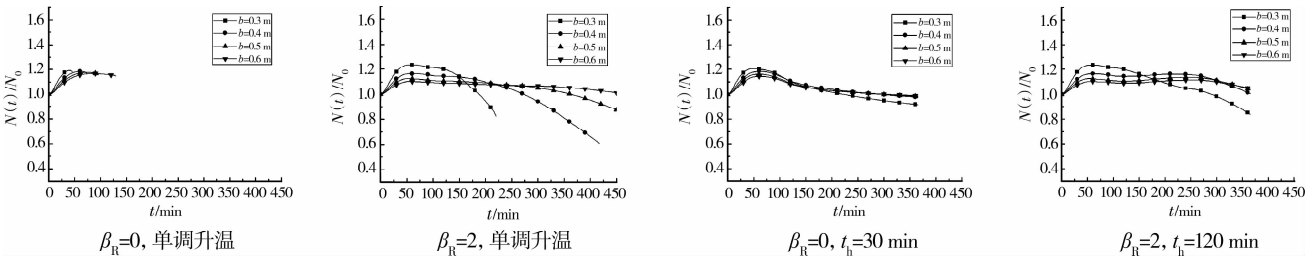


图 5 柱轴力随截面边长的变化情况

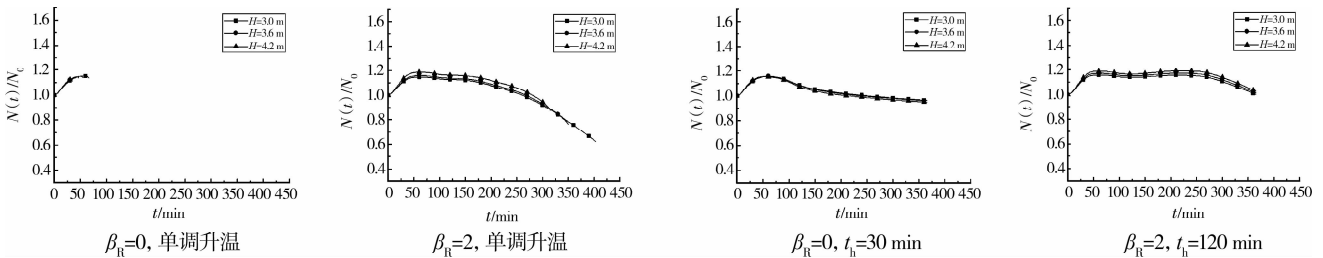


图 6 柱轴力随柱长的变化情况

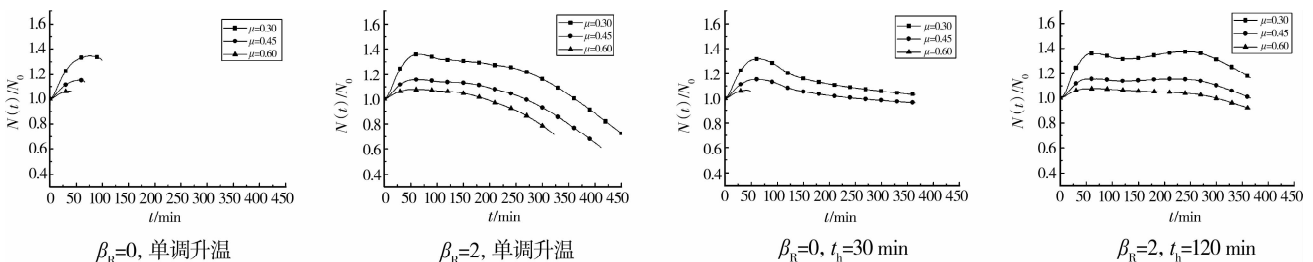


图 7 柱轴力随荷载比的变化情况

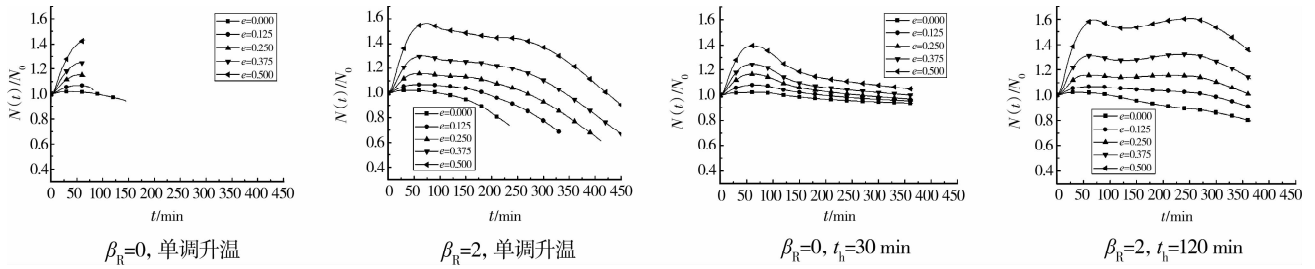


图 8 柱轴力随荷载偏心率的变化情况

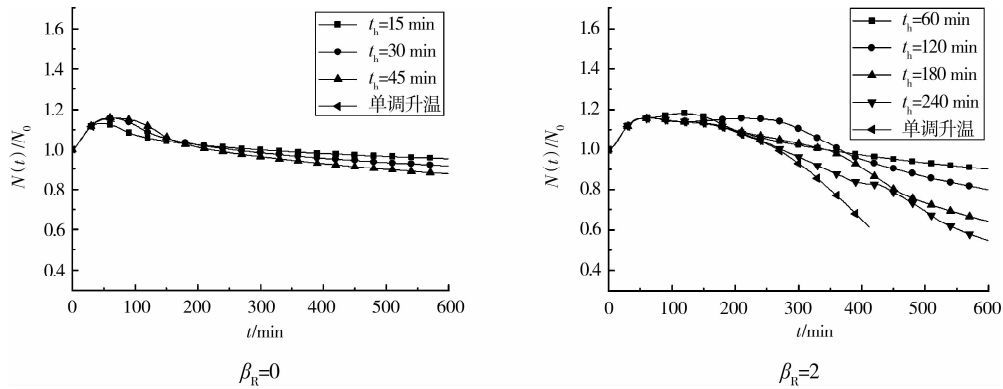


图 9 柱轴力随升温时间的变化情况

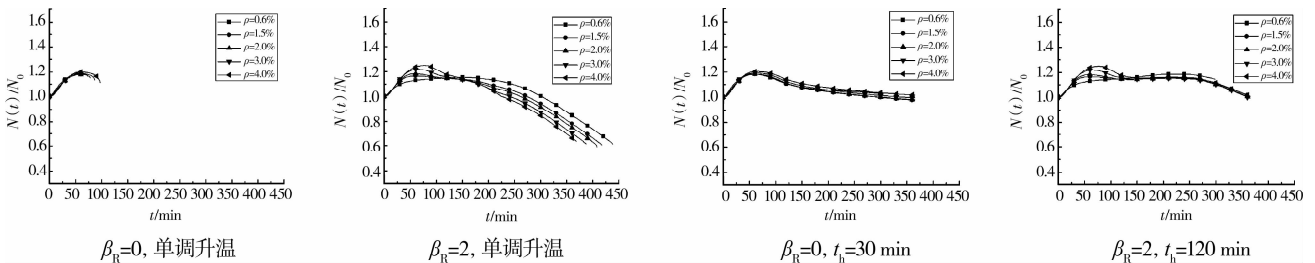


图 10 柱轴力随配筋率的变化情况

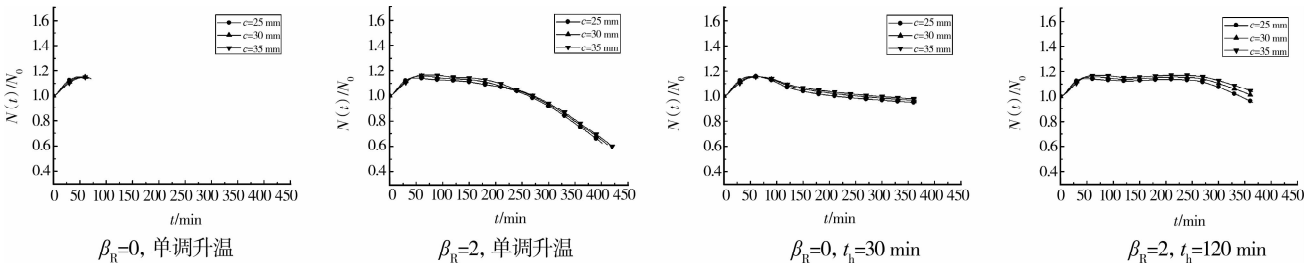


图 11 柱轴力随混凝土保护层厚度的变化情况

4)对于转动约束柱,无论是单调升温还是先升温后降温,轴力变化系数总体都呈现出先逐渐增大而后有所减小或基本保持稳定,最后以较大速率持续降低的趋势,主要区别在于后期单调升温对应的降低速率一般比先升温后降温时更大。这是因为后期轴力变化系数的降低机理不同所致,单调升温后期该系数不断降低主要源于材料劣化引发的柱轴向刚度持续减弱,先升温后降温后期该系数不断降低则主要源于柱的竖向降温回缩。

5)对于单调升温情况,转动约束柱与无转动约束柱的不同之处在于,前者最终破坏时轴力变化系

数一般明显小于 1.0 且事前经历了 1 个长时间的降低过程。这是因为转动约束在柱上、下两端产生的柱端弯矩与柱半高处因轴力和侧向挠度引发的二阶弯矩正好相反,显著减小了柱半高处的弯矩,使得柱最终破坏时刻大幅度延后,而在此之前材料劣化导致柱轴向刚度不断降低,使得柱上、下两端之间的竖向距离不断缩短,升温前由柱承担的常温轴力不断转移给轴向约束,致使轴力变化系数以较大速率持续降低并最终明显小于 1.0。

6)对于先升温后降温的转动约束柱,降温开始之前的升温时间越长,降温后期轴力变化系数的降

低速率越快。

7) 对于先升温后降温的转动约束柱, 转动约束刚度比、柱长和混凝土保护层厚度对轴力变化系数影响较小; 全截面配筋率仅对轴力变化系数的峰值点附近有一定影响, 在此之外则影响有限; 轴向约束刚度比、截面边长、荷载比和荷载偏心率对轴力变化系数影响较大。各参数的具体影响如: (1) 随着轴向约束刚度比增加, 轴力变化系数峰值逐渐增大, 但该系数重新回归 1.0 所对应的时间与轴向约束刚度比几乎无关, 此后轴向约束刚度比越大, 轴力变化系数下降相对越快。(2) 截面边长越大, 轴力变化系数的峰值越小, 且降温后期该系数下降越缓, 但截面边长大于 400 mm 之后其影响不再明显。这是因为截面边长越大, 截面高温区域占全截面的比例就越小, 使得前期柱的竖向热膨胀和后期柱的降温回缩均相对较小, 进而导致轴力变化系数的峰值随之变小且降温后期该系数下降缓慢; 随着截面边长不断增加, 截面高温区域占全截面的比例的变化幅度越来越小, 致使上述现象不再明显。(3) 荷载比越大或荷载偏心率越小, 轴力变化系数的峰值就越小。(4) 全截面配筋率越大, 轴力变化系数的峰值也就越大。这是因为全截面配筋率越大, 纵筋对柱竖向热膨胀的影响就相对越大, 而钢筋的热膨胀系数又大于混凝土, 使得柱的竖向热膨胀有所增加, 进而导致轴力变化系数的峰值加大。

3 实用计算方法

针对 4 种轴向约束刚度比 (0.00、0.05、0.10、0.15)、4 种截面边长 (0.3 m、0.4 m、0.5 m、0.6 m)、3 种荷载比 (0.3、0.45、0.6)、5 种荷载偏心率 (0.0、

0.125、0.25、0.375、0.5)、3 种配筋率 (0.6%、2.0%、4.0%)、4 种持续升温时间 (60 min、120 min、180 min、240 min) 共 2880 种工况, 进行了约束混凝土柱轴力变化系数的升降温全过程分析。计算过程中其它参数分别取为: 转动约束刚度比 2.0、柱长 3.0 m、混凝土轴心抗压强度 30 MPa、纵筋屈服强度 375 MPa、混凝土保护层厚度 30 mm、混凝土含水率 0.02。

通过对大量计算结果的整理和分析, 建议给出柱轴力变化系数的实用计算公式如下:

$$N(t)/N_0 = 1 + \varphi_1 t^{0.6606} + \varphi_2 t^{0.6708} \quad (1)$$

式中: $\varphi_1 = (-0.1697t_h^2 + 82.5t_h + 31402)(-0.2690\mu^2 + 0.3660\mu - 0.1609)(-15.77\rho + 1.33)(1.501b^2 - 1.853b + 0.6630)(-1.28e^2 - 0.03736e - 0.07617)(-1.014\beta_i^2 + 0.3012\beta_i)$; $\varphi_2 = (-0.3281t_h^2 + 160.3t_h + 59724)(0.9058\mu^2 - 1.233\mu + 0.5433)(1.212\rho - 0.1033)(1.317b^2 - 1.624b + 0.5796)(7.186e^2 + 0.2080e + 0.4459)(-0.3759\beta_i^2 + 0.1118\beta_i)$ 。其中 t 和 t_h 的单位均为 min; b 的单位为 m。公式适用范围: $\beta_i = 0 \sim 0.15$, $\beta_R \geq 0.0$, $b = 0.3 \sim 0.6$ m, $H = 3.0 \sim 4.2$ m, $\mu = 0.3 \sim 0.6$, $e = 0 \sim 0.5$, $t_h = 60 \sim 240$ min, $\rho = 0.6\% \sim 4.0\%$, $f_c = 20 \sim 40$ MPa, $f_y = 350 \sim 450$ MPa, $c = 25 \sim 35$ mm。空气温度降至 20℃ 时, 计算结束。

图 12 所示为柱轴力变化系数的程序计算结果与实用公式计算结果的对比情况。二者的相关系数为 0.9682, 后者与前者之比的均值为 1.009, 均方差为 0.075。从图中可以看出, 式(1)具有较好的计算精度。

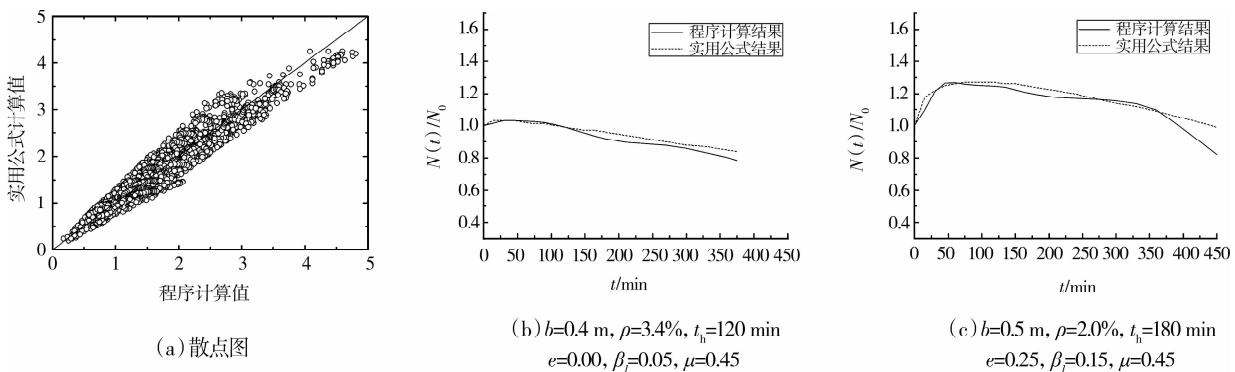


图 12 程序计算结果与实用公式计算结果的对比

4 小结

通过该文的研究, 可以得到如下初步结论:

1) 随着升温时间的增加, 单调升温无转动约束柱的轴力变化系数总体呈现出先逐渐增大而后渐趋平缓或略有降低的趋势, 直至最终破坏; 而先升温后

降温无转动约束柱的轴力变化系数则呈现出先不断增大而后明显减小, 且减小速率渐趋稳定的趋势, 其最大值对应时刻滞后于降温开始时刻约 30 min。

2) 对于无转动约束柱, 截面边长、柱长、全截面配筋率和混凝土保护层厚度对柱轴力变化系数影响很小; 荷载比越大或荷载偏心率越小, 轴力变化系数

就越小;轴力变化系数峰值随轴向约束刚度比的增加而逐渐增大,对于先升温后降温的无转动约束柱,该系数重新回归1.0所对应的时间与轴向约束刚度比几乎无关。

3)对于转动约束柱,无论是单调升温还是先升温后降温,轴力变化系数总体都呈现出先逐渐增大而后有所减小或基本保持稳定,最后以较大速率持续降低的趋势,主要区别在于后期单调升温对应的降低速率一般比先升温后降温时更大。

4)对于先升温后降温的转动约束柱,转动约束刚度比、柱长和混凝土保护层厚度对轴力变化系数影响较小;轴向约束刚度比和荷载偏心率越大或荷载比越小,轴力变化系数的峰值就越大;截面边长越大,轴力变化系数峰值越小,但截面边长大于400mm之后其影响不再明显;全截面配筋率仅对轴力变化系数峰值点附近有一定影响,在此之外则影响有限,轴力变化系数峰值随全截面配筋率的增加而增大。

参考文献:

- [1] ALI F A, O'CONNOR D. Structural performance of rotationally restrained steel columns in fire [J]. Fire Safety Journal, 2001, 36(7): 679-691.
- [2] VALENTE J C, NEVES I C. Fire resistance of steel columns with elastically restrained axial elongation and bending [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1999, 52(3): 319-331.
- [3] HUANG Z F, TAN K H, PHNG G H. Axial restraint effects on the fire resistance of composite columns encasing I-section steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(4): 437-447.
- [4] ALI F A, NADJAI A, SILCOCK G, et al. Outcomes of a major research on fire resistance of concrete columns [J]. Fire Safety Journal, 2004, 39(6): 433-445.
- [5] ALI F A, NADJAI A, SILCOCK G, et al. Calculation of forces generated in restrained concrete columns subjected to fire [J]. Journal of Applied Fire Science, 2003-2004, 12(2): 125-135.
- [6] BAILEY C G, BURGESS I W, PLANK R J. Analyses of the effects of cooling and fire spread on steel-framed buildings [J]. Fire Safety Journal, 1996, 26(4): 273-293.
- [7] EI-RIMAWI J A, BURGESS I W, PIANK R J. The treatment of strain reversal in structural members during the cooling phase of a fire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1996, 37(2): 115-135.
- [8] 李国强,郭士雄. 受火约束钢梁在升温段和降温段行为的理论分析(I) [J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(3): 241-250.
- LI GUO-QIANG, GUO SHI-XIONG. Analysis of restrained steel beams subjected to temperature increasing and descending, Part 1: Theory [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006, 26(3): 241-250.
- [9] 郭士雄,李国强. 受火约束钢梁在升温段和降温段行为的理论分析(II) [J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(4): 359-368.
- GUO SHI-XIONG, LI GUO-QIANG. Analysis of restrained steel beams subjected to temperature increasing and descending, Part 2: Validation and parametrical analyses [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006, 26(4): 359-368.
- [10] LI G Q, GUO S X. Experiment on restrained steel beams subjected to heating and cooling [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(3): 268-274.
- [11] ELLINGWOOD B, LIN T D. Flexural and shear behavior of concrete beams during fires [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(2): 440-458.
- [12] CAI J, BURGESS I, PIANK R. A generalized steel reinforced concrete beam-column element model for fire conditions [J]. Engineering Structures, 2003, 25(6): 817-833.
- [13] BRATINA S, SAJE M, PIANINC I. The effects of different strain contributions on the response of RC beams in fire [J]. Engineering Structures, 2007, 29(3): 418-430.
- [14] IU C K, CHAN S L, ZHA X X. Nonlinear pre-fire and post-fire analysis of steel frames [J]. Engineering Structures, 2005, 27(11): 1689-1702.
- [15] LIEW J Y R, TANG L K, HOLMAAS T, CHOO Y S. Advanced analysis for the assessment of steel frames in fire [J]. Journal of Construction Steel Research, 1998, 47(1-2): 19-45.
- [16] WU B, LI Y H. Experimental research on fire performance of axially restrained RC columns with L-shaped cross section [C]//Tan K H, et al. Proceedings of the Fifth International Conference Structures in Fire. Singapore: Research Publishing Services, 2008: 451-462.
- [17] WU B, LI Y H. Experimental study on fire performance of axially-restrained normal- and high-strength concrete columns [J]. Submitted to Structural Engineering and Mechanics, 2009, 32(5): 635-648.
- [18] WU B, LI Y H, CHAN S L. Effect of heating and cooling on axially restrained RC columns with special-shaped cross section [J]. Fire Technology, 2010, 46(1): 231-249.
- [19] GARLOCK M E M, QUIELI S E. The behavior of steel perimeter columns in a fire [C]//Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium, New York, 2005: 1-13.

(编辑 胡玲)