

混合结构变形曲线及动力特性研究*

沈蒲生, 孟焕陵

(湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要:借鉴框-剪结构分析方法,基于协同工作原理,考虑混凝土梁与核心筒间刚域、混凝土核心筒的剪切变形、钢框架轴向变形以及钢柱与混凝土梁的半刚性连接的影响,建立了含刚度特征值的混合结构变形曲线方程。再将混合结构视为连续弹性无限自由度结构,建立自由振动微分方程,推导了混合结构的自振周期公式。通过图表分析了与刚度特征值有关的自振周期系数中各参数的影响。结果表明,刚域的存在减小了结构自振周期,核心筒剪切变形、钢框架轴向变形及梁柱半刚性连接使自振周期增大。

关键词:混合结构;动力特性;剪切变形;轴向变形;半刚性连接;刚域

中图分类号:TU398+.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2006)06-0047-04

Research on Deformation Equation and Dynamic Properties of Hybrid Structure

SHEN Pu-sheng, MENG Huan-ling

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract:Based on the principle of interactive analysis, the deformation equation of hybrid structure which contains rigid character value is established using the analysis of the frame-shear wall structure for reference, considering the rigid zone between concrete beam and concrete-tube, the shear deformation of concrete-tube, axial deformation of steel frames and semi-rigid connection between steel columns and concrete beams. Assuming the hybrid structure to be a continuous elastic structure with infinite degree of freedom, a free vibration equation has been built and the formula for calculating free vibration period has been deduced. The influences of various parameters to the coefficient of free vibration period relating to rigid character value are discussed according to some diagrams. It is shown that the rigid zone can lessen the free vibration period but the shear deformation of concrete-tube, axial deformation of steel frames, and the semi-rigid connection between steel columns and concrete beams can enhance the free vibration period.

Keywords: hybrid structure; dynamic properties; shear deformation; axial deformation; semi-rigid connection; rigid zone

混合结构不但具有钢结构自重轻、强度高、延性好、施工速度快、建筑物内部净空大等特点,而且具有钢筋混凝土结构刚度大、防火性能好、造价低等优点。因此,它是最近十多年来迅速发展的一种结构体系,已被广泛应用于我国超高层建筑中。

在水平荷载作用下,由外钢框架-内混凝土核心筒组成的混合结构,是通过楼板迫使两类变形特点各异的抗侧力单元发生共同变形的,可采取类似于框-剪结构协同工作的连续化分析方法^[1]。但由于混合结构是由两种性能有较大差异的结构组合而成,相比混凝土框-剪结构,混合结构的分析中应着重体现出:(1)混凝土梁与核心筒之间存在刚域;(2)钢框架应考虑轴向变形的影响;(3)钢柱与混凝土梁为半刚性连接;(4)混凝土筒体应考虑剪切变形影响。在此基础

上可建立混合结构变形曲线方程,其中刚度特征值的改变将影响结构的自振周期(频率)等动力特性,而结构的自振周期(频率)是反应谱及时程分析的基础。

首先建立混合结构的变形曲线方程,再将其视为连续弹性无限自由度结构,建立自由振动微分方程,推导了混合结构自振周期公式。最后通过图表分析了混凝土梁与核心筒间刚域、混凝土核心筒的剪切变形、钢框架的轴向变形以及钢柱与混凝土梁的半刚性连接对自振周期系数的影响。

1 变形曲线的建立

1.1 考虑了混凝土梁与核心筒间刚域影响

借鉴框-剪结构协同工作的分析方法,沿着连梁切开,把各层连梁中的未知力化为未知函数,经整理后

* 收稿日期:2006-05-25

基金项目:国家自然科学基金项目(50378035)

作者简介:沈蒲生(1939-),男,江西新淦人,教授,主要从事混凝土结构基本理论及高层建筑分析与设计方法研究。

可得一般刚接结构体系的变形协调微分方程^[2]:

$$EI_w = \frac{d^4 y}{dx^4} - (C_f + C_b) \frac{d^2 y}{dx^2} = p \quad (1)$$

式中: y 为结构侧向位移; x 为结构计算截面距底部的距离; C_f 为结构中总框架的抗弯刚度; C_b 为结构总连梁的等效约束刚度; EI_w 为结构总剪力墙的抗弯刚度; p 为结构所承受的水平荷载。

引入边界条件解此微分方程, 可得三种常用荷载下的变形曲线:

$$y = \frac{qH^2}{C_f + C_b} \left[\left(1 + \frac{\lambda \operatorname{sh} \lambda}{2} - \frac{\operatorname{sh} \lambda}{\lambda} \right) \frac{\operatorname{ch} \lambda \xi - 1}{\lambda^2 \operatorname{ch} \lambda} + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\lambda^2} \right) \left(\xi - \frac{\operatorname{sh} \lambda \xi}{\lambda} \right) - \frac{\xi^3}{6} \right] \quad (\text{倒三角形荷载})$$

$$y = \frac{qH^2}{(C_f + C_b) \lambda^2} \left[\left(\frac{1 + \lambda \operatorname{sh} \lambda}{\operatorname{ch} \lambda} \right) (\operatorname{ch} \lambda \xi - 1) - \lambda \operatorname{sh} \lambda \xi + \lambda^2 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2} \right) \right] \quad (\text{均布荷载})$$

$$y = \frac{pH^3}{EI_w} \left[\frac{\operatorname{sh} \lambda}{\lambda^3 \operatorname{ch} \lambda} (\operatorname{ch} \lambda \xi - 1) - \frac{1}{\lambda^3} \operatorname{sh} \lambda \xi + \frac{1}{\lambda^2} \xi \right] \quad (\text{集中荷载}) \quad (2)$$

式中: λ 为结构刚度特征值, $\lambda = H \sqrt{(C_f + C_b)/EI_w}$; H 为结构高度; $\xi = x/H$ 。

式(2)即为考虑了混凝土梁与核心筒间刚域影响的结构变形曲线, 当考虑混凝土核心筒的剪切变形、钢框架的轴向变形、钢柱与混凝土梁的半刚性连接时, 结构变形曲线中的刚度特征值 λ 将做部分修正。

1.2 考虑混凝土核心筒的剪切变形^[3]

剪力墙的抗剪刚度 $C_w = \sum GA_i/\mu_i$, 其中 G 为混凝土剪切模量, 取 $G = 0.4E$; A_i 各墙肢的截面面积; μ_i 为各墙肢 T 形截面形状系数, 矩形截面取 $\mu_i = 1.2$ 。引入剪切变形系数 $\eta = C_f/C_w$, 可得考虑混凝土核心筒的剪切变形的刚度特征值:

$$\lambda = H \sqrt{\frac{C_f}{(1 - \eta)EI_w}} \quad (3)$$

1.3 考虑钢框架的轴向变形

混合结构是由两种性能有较大差异的结构组合而成, 一方面钢材与混凝土的弹性模量相差一个数量级, 在相同的应力水准下, 钢框架与内混凝土核心筒之间存在应变不一致性。另一方面, 混凝土筒体浇筑完后会产生收缩、徐变, 而钢材无此性能, 钢框架与混凝土核心筒间会产生附加应力。研究发现, 钢框架的轴向变形对混合结构受力性能的影响较大, 应该考虑轴向变形的不利影响^[4]。

此时, 钢框架的抗推刚度应予以修正:

$$C'_f = \delta C_f = \frac{\delta_M}{\delta_M + \delta_N} C_f \quad (4)$$

式中: δ 为钢框架轴向变形抗推刚度修正系数; δ_M 为仅考虑梁、柱弯曲变形时的框架顶点位移; δ_N 为考虑柱轴向变形时框架的顶点位移。 δ_M 与 δ_N 可参考文献 [1] 进行计算。

1.4 考虑钢柱与混凝土梁的半刚性连接

一般情况下, 钢柱与混凝土梁之间的连接即非完全刚接, 又非理想铰接, 在荷载作用下都会表现出一定程度的半刚性^[5]。此时可将梁端连接用有限刚度的转动弹簧代替^[6]。如果不考虑梁的轴向变形何剪切变形, 半刚性连接梁的单元刚度矩阵为:

$$K = \frac{2EI}{L(1 + 4\alpha + 3\alpha^2)} \begin{bmatrix} 3\alpha + 2 & 1 \\ 1 & 3\alpha + 2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

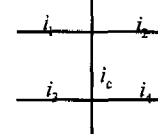
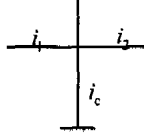
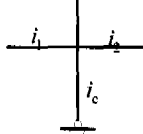
式中: EI 为梁的抗弯刚度; L 为梁的长度; α 为 2 倍梁的线刚度与梁端连接割线刚度的比值。

当梁端存在半刚性连接时, 梁的刚度折减系数为 $(1.5\alpha + 1)/(1 + 4\alpha + 3\alpha^2)$, 传递系数的折减系数为 $1/(3\alpha + 1)$ 。由于柱是连续的, 故柱的转动刚度和传递系数不变^[7]。

令 $\beta = \frac{1 + 1.5\alpha}{1 + 4\alpha + 3\alpha^2}$, 柱的抗侧刚度修正系数 α_c 按

表 1 计算。

表 1 柱抗侧刚度修正系数

	一般层	底层, 下端固定	底层, 下端铰支
柱的部位及固定情况			
i	$i = \frac{i_1 + i_2 + i_3 + i_4}{2i_c}$	$i = \frac{i_1 + i_2}{i_c}$	$i = \frac{i_1 + i_2}{i_c}$
α_c	$\alpha_c = \frac{\beta i}{2 + \beta i}$	$\alpha_c = \frac{0.5 + \beta i}{2 + \beta i}$	$\alpha_c = \frac{0.5 \beta i}{1 + 2 \beta i}$

于是总框架的抗弯刚度 $C'_f = \alpha_c C_f$, 考虑钢柱与混凝土梁的半刚性连接的结构刚度特征值为:

$$\lambda = H \sqrt{\frac{\alpha_c C_f}{EI_w}} \quad (6)$$

1.5 混合结构的变形曲线

综合公式(2)、(3)、(4)及(6)可得混合结构的变形曲线:

$$y = \frac{qH^2}{C_f + C_b} \left[\left(1 + \frac{\lambda \operatorname{sh} \lambda}{2} - \frac{\operatorname{sh} \lambda}{\lambda} \right) \frac{\operatorname{ch} \lambda \xi - 1}{\lambda^2 \operatorname{ch} \lambda} + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\lambda^2} \right) \left(\xi - \frac{\operatorname{sh} \lambda \xi}{\lambda} \right) - \frac{\xi^3}{6} \right] \quad (\text{倒三角形荷载})$$

$$y = \frac{qH^2}{(C_f + C_b) \lambda^2} \left[\left(\frac{1 + \lambda \operatorname{sh} \lambda}{\operatorname{ch} \lambda} \right) (\operatorname{ch} \lambda \xi - 1) - \lambda \operatorname{sh} \lambda \xi + \lambda^2 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2} \right) \right]$$

$$\lambda \operatorname{sh} \lambda \xi + \lambda^2 \xi \left(1 - \frac{\xi}{2} \right) \quad (\text{均布荷载})$$

$$y = \frac{PH^3}{EI_w} \left[\frac{\operatorname{sh} \lambda}{\lambda^3 \operatorname{ch} \lambda} (\operatorname{ch} \lambda \xi - 1) - \frac{1}{\lambda^3} \operatorname{sh} \lambda \xi + \frac{1}{\lambda^2} \xi \right] \quad (\text{集中荷载}) \quad (7)$$

$$\lambda = H \sqrt{\frac{(C_f + C_b)}{(1 - \eta) EI_w}} \delta \alpha_c \quad (8)$$

由式(8)可以看出,刚度特征值 λ 中的 C_b 、 η 、 δ_N 及 α_c 分别反映了混凝土梁与核心筒间刚域、混凝土核心筒的剪切变形、钢框架的轴向变形、钢柱与混凝土梁的半刚性连接的影响。

2 混合结构的自振周期

假定混合结构协同工作,其质量均匀分布,单位长度质量为 m 。将结构作为无限自由度的连续结构,混合结构自由振动的运动微分方程为^[8,9]:

$$EI_w \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} - (C_f + C_b) \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = -M \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (9)$$

设: $y = \phi(z)T(t)$, 利用分离变量法可得如下方程式。

$$\phi^{(IV)}(z)T(t) - 2a^2 \phi''(z) - b^4 \phi(z) = 0 \quad (10)$$

式中: $2a^2 = \frac{C_f + C_b}{EI_w} = \frac{\lambda^2}{H^2}$; $b^2 = \frac{m\omega^2}{EI_w}$ 。微分方程(10)的特征方程为:

$$r^4 - 2a^2 r^2 - b^4 = 0$$

其特征根为:

$$r_1 = -r_2 = \alpha, \quad \alpha = \sqrt{\sqrt{a^4 + b^4} + a^2}$$

$$r_3 = -r_4 = i\beta, \quad \beta = \sqrt{\sqrt{a^4 + b^4} - a^2}$$

故式(10)的解为:

$$\phi = A_1 \operatorname{ch} \alpha z + A_2 \operatorname{sh} \alpha z + A_3 \cos \beta z + A_4 \sin \beta z$$

引入四个边界条件: $z=0$ 时,侧移 $y=0$, 转角 $\theta=0$; $z=H$ 时,弯矩 $M=0$, 剪力 $V=V_w+V_f=0$ 。即: $\phi(0)=0$; $\phi'(H)=0$, $\phi''(H)=0$, $\phi'''(H) - \lambda^2 \phi'(H)/H^2=0$, 可得频率方程为:

$$2\lambda_1^2(\lambda_1^2 - \lambda^2) + [\lambda_1^4 + (\lambda_1^2 - \lambda^2)^2] \cdot$$

$$\operatorname{ch} \lambda_1 \cos \sqrt{\lambda_1^2 - \lambda^2} +$$

$$\lambda_1 \lambda^2 \sqrt{\lambda_1^2 - \lambda^2} \operatorname{sh} \lambda_1 \sin \sqrt{\lambda_1^2 - \lambda^2} = 0 \quad (11)$$

式中: $\lambda_1 = \alpha H$, $\lambda_2 = \beta H$, 可得:

$$\lambda_1^2 - \lambda_2^2 = \lambda^2 \quad (12)$$

通过迭代求解式(11), 可得一系列 λ_1 , 由式(12)可求得一系列的 λ_2 , 则可求得:

$$\omega_i = \frac{\lambda_{1i} \lambda_{2i}}{H^2} \sqrt{\frac{EI_w}{m}} \quad (13)$$

相应的周期为:

$$T_i = \varphi_i H^2 \sqrt{\frac{q}{gEI_w}} \quad (14)$$

式中: φ_i 为与刚度特征值有关的周期影响系数, $\varphi_i = 2\pi/(\lambda_{1i} \sqrt{\lambda_{1i}^2 - \lambda^2})$; q 为沿高度方向单位长度的结构重量; g 为重力加速度, $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。

3 参数分析

3.1 混凝土梁与核心筒间刚域影响

在不考虑混凝土梁与核心筒间刚域、混凝土核心筒的剪切变形、钢框架的轴向变形、钢柱与混凝土梁的半刚性连接的影响时,混合结构的基本周期如图1所示。

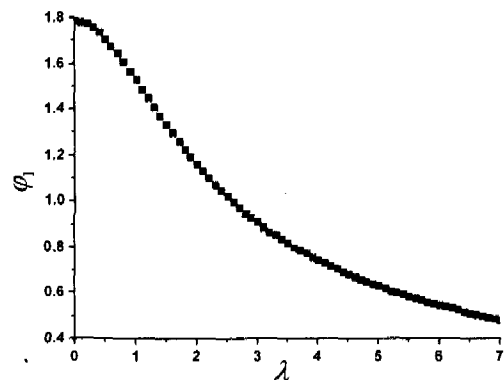


图1 结构基本周期图

变化结构总连梁等效约束刚度 C_b 大小来探讨其对结构自振周期的影响,以不考虑 C_b (即 $C_b=0$) 为比较基准,当 C_b 分别取 $0.1C_f$ 、 $0.2C_f$ 、 $0.3C_f$ 、 $0.4C_f$ 、 $0.5C_f$ 时,结构自振周期的变化趋势图2所示,图中纵坐标 φ_b = 考虑 C_b 时的 φ_i 值/不考虑 C_b 时的 φ_i 值。

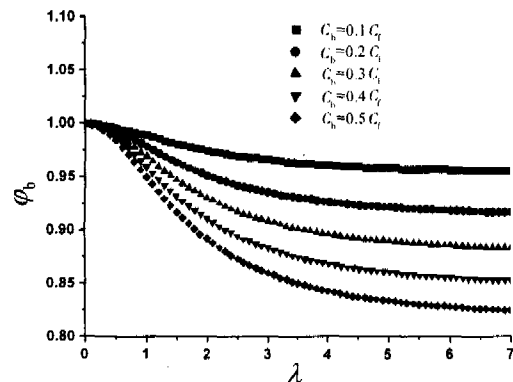


图2 考虑刚域时结构自振周期的变化趋势图

刚域的存在使得混合结构的刚度增大,自振周期减小,而且随着等效约束刚度 C_b 的增大也相应减小,但是减小趋势渐缓。随着 λ 的增加,刚框架所占比重增大, C_b 对自振周期影响的程度加大。

3.2 混凝土核心筒的剪切变形影响

变化混凝土核心筒的剪切变形系数大小来探讨其

对结构自振周期的影响,以不考虑 η (即 $\eta=0$)为比较基准,当 η 分别取0.01、0.02、0.03、0.05、0.1、0.2时,结构自振周期的变化趋势图3所示,图中纵坐标 φ_η 等于考虑 η 时的 φ_1 值/不考虑 η 时的 φ_1 值。

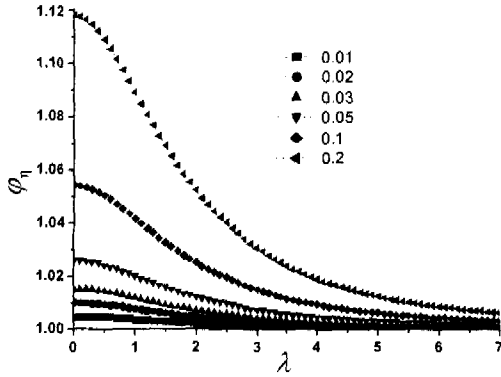


图3 考虑剪切变形时结构自振周期的变化趋势图

核心筒的剪切变形使得混合结构的刚度减小,自振周期增大,而且随着剪切变形的增大也相应增大,且增大趋势加剧。随着 λ 的增加,核心筒所占比重减小,剪切变形对自振周期影响的程度减小。

3.3 钢框架的轴向变形影响

变化钢框架轴向变形抗推刚度修正系数 δ 大小来探讨其对结构自振周期的影响,以不考虑 δ (即 $\delta=1$)为比较基准,当 δ 分别取0.95、0.90、0.85、0.80、0.75时,结构自振周期的变化趋势如图4所示,图中纵坐标 φ_δ 等于考虑 δ 时的 φ_1 值/不考虑 δ 时的 φ_1 值。

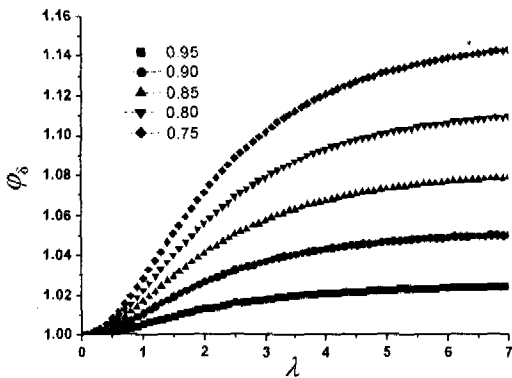


图4 考虑轴向变形时结构自振周期的变化趋势图

钢框架轴向变形使得混合结构的刚度减小,自振周期增大,而且随着轴向变形的增大也相应增大,但是增长趋势渐缓。随着 λ 的增加,刚框架所占比重增大,轴向变形对自振周期影响的程度加大。

3.4 钢柱与混凝土梁的半刚性连接影响

变化梁柱线刚度比 \bar{i} 、梁的线刚度与梁端连接的比值 α ,来探讨半刚性连接时抗推刚度修正系数 α_c 对结构自振周期的影响。限于篇幅,只给出一般层 $\bar{i}=0.5$ 和 $\bar{i}=5$ 两种情况下不同连接刚度($\alpha=0.5、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0$)下结构基本自振周期,再令 $\varphi_\alpha =$ 考

虑 α 时的 φ_1 值/不考虑 α 时的 φ_1 值,可得结构自振周期的变化趋势如图5所示。

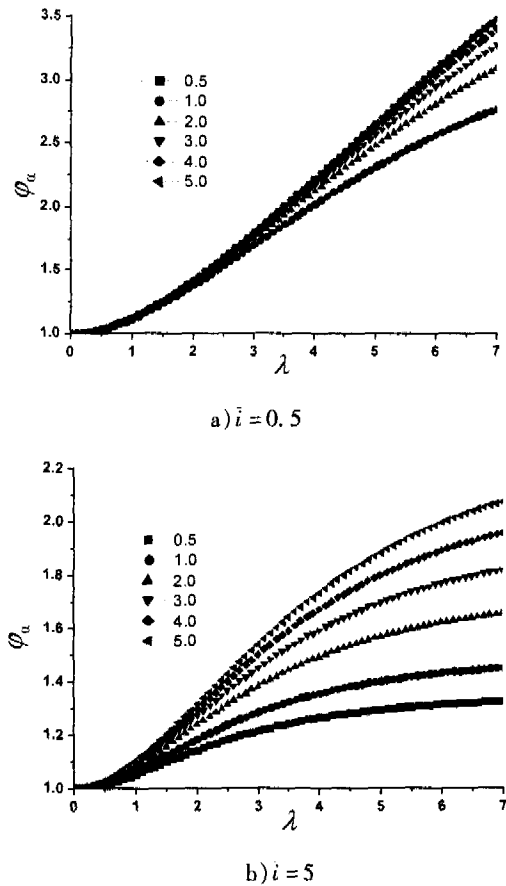


图5 考虑半刚性连接时结构自振周期的变化趋势图

半刚性连接使得混合结构的刚度减小,自振周期增大,而且随着连接刚度 α 的增大也相应增大,但是增长趋势渐缓。在相同的 α 情况下,随着 \bar{i} 的增加,结构的刚度减小,周期相应减小。随着 λ 的增加,刚框架与所占比重增大,半刚性连接节点增多,对自振周期影响的程度加大。半刚性对结构第2周期和第3周期的影响趋势相似,但幅度减小,说明半刚性连接对低阶振型自振周期的影响较显著,对高阶振型的自振周期的影响较小,可以忽略。

4 结论

1) 借鉴框-剪结构分析方法,基于协同工作原理,建立了混合结构的变形曲线方程,它考虑了混凝土梁与核心筒间刚域、混凝土核心筒的剪切变形、钢框架的轴向变形以及钢柱与混凝土梁的半刚性连接的影响,符合混合结构的实际受力特点。

2) 将混合结构视为连续弹性无限自由度结构,建立自由振动微分方程,推导了混合结构的自振周期公式,并制定了便于查用的各种系数图表,将它们的取值连乘后即可得混合结构的自振周期。

(下转第87页)

一定的政策扶持,如补贴、减免等。

表7 不同收入家庭付费意愿情况

收入 元/户·月	合计/户	为干净水付费/%		为污水处理付费/%	
		愿意	不愿意	愿意	不愿意
小于500	15	66.67	33.33	66.67	33.33
501~1000	63	84.13	15.87	85.72	14.28
1001~1500	80	92.50	7.50	87.50	12.50
1501~2000	77	89.60	10.40	88.31	11.69
2001~2500	44	95.46	4.54	95.45	4.54
2501~3000	45	93.33	6.67	88.89	11.11
3001~3500	19	89.47	10.53	89.47	10.53
3501~4000	14	78.57	21.43	78.57	21.43
4001~4500	7	100.00	0.00	100.00	0.00
4501~5000	8	87.50	12.50	100.00	0.00
5000以上	2	100.00	0.00	100.00	0.00
总户数	374	334	40	329	45

3 结论

1) 两城市居民人均生活日用水量随家庭收入的增加总体呈上升的趋势;户月均收入在1500元以上的家庭,其平均日人均生活用水量大致维持在规范所规定的平均日居民生活用水量定额范围(100~170 L/cap·d)内,户月均收入低于2000元的家庭平均日人均生活用水量则低于上述规范下限值。户月均收入在3500元以上的家庭,其人均最高日生活用水量大致维持在规范所规定的居民最高日生活用水量定额范围(140~230 L/cap·d)内,户月均收入在1501~3500元的家庭人均最高日用水量在上述规范下限制附近震荡,户月均收入低于1500元的家庭人均最高日用水量低于上述规范下限。

2) 居民对现有的自来水水质满意程度不一。认

为:不满意、一般的、满意的分别占26.21%、36.63%和35.29%;因此,74.60%的居民希望政府在提供清洁/卫生的供水方面进行改进。我们认为随着居民健康意识的加强,改善自来水水质的呼声将会更大。此外居民认为水质不好的原因依次为:水源受到污染、水处理技术落后、供水管网受到二次污染,分别占39.04%、26.74%、18.72%。针对以上原因,我们认为解决两城市水质问题的途径有:加强水源地的建设与保护、提高水处理技术水平、改造陈旧的城市供水管网。

3) 在被调查的居民中有56.68%的家庭将桶装水作为饮用水。桶装纯净水的使用率和消费量随家庭收入的增加总体呈上升趋势。这说明小城市生活用水存在两种水质共存的现象,而现有自来水水质不尽如意和桶装水使用方便是导致居民选择桶装水作为饮用水的主要原因。同时已有27.27%的居民表示希望政府能供应直饮水,这表明两城市居民对集中分质供水也有了明显的需求。

参考文献:

- [1] 中国科学院“21世纪中国可持续发展水资源战略研究”项目组. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告[R]. 中国工程科学,2000,(8):1-17.
- [2] 王阿华. 区域供水规划中用水量指标取值探讨[EB/OL]. <http://h2o2china.com>,2001.
- [3] 2003年重庆统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2003.
- [4] GB/T50331-2002,城市居民生活用水量标准[S].
- [5] 张智,梁健,曾晓岚,等. 重庆主城区居民生活用水状况研究[J]. 给水排水,2002,28(10):30-33.

(上接第50页)

3) 分析了与刚度特征值有关的自振周期系数中各参数的影响。结果表明,刚域的存在减小了结构的自振周期,核心筒的剪切变形、钢框架轴向变形及钢柱与混凝土梁为半刚性连接使得结构变柔,自振周期增大。随着梁的线刚度与梁端连接割线刚度的比值增大,半刚性连接对结构周期的影响渐缓,当大于2时影响已经很小,故此时可认为梁柱是铰接。

参考文献:

- [1] 方鄂华. 多层及高层建筑结构设计[M]. 北京:地震出版社,1992.
- [2] 孟焕陵,沈蒲生. 框-剪结构中连接形式对剪力墙合理数量的影响[J]. 华中科技大学学报(城市科学版). 2004,22(2):71-77.

- [3] 唐兴荣. 框架剪力墙结构考虑剪切变形时的内力和位移[J]. 苏州城建环保学院学报,1996,9(3):20-29.
- [4] 孟焕陵,沈蒲生. 轴向变形对混合结构受力性能的影响[J]. 工程抗震与加固改造,2005,27(5):16-19.
- [5] Liu E M. Dynamic analysis and response of semirigid frames[J]. Engineering Structure,1997,19(8):644-654.
- [6] 刘小强,吴惠弼. 半刚性连接钢框架位移和内力的计算[J]. 重庆建筑工程学院学报,1993,15(2):46-55.
- [7] 孙修礼,梁书亭,王群依,等. 半刚性连接钢管混凝土框架剪力墙结构的动力特性分析[J]. 地震工程与工程振动,2005,25(3):93-97.
- [8] 张相庭. 高层建筑抗风抗震设计计算[M]. 上海:同济大学出版社,1997.
- [9] 郭莹,裴煜,李正良. 高层建筑悬挂结构体系的地震反应分析[J]. 重庆建筑大学学报,2003,25(5):42-46,74.