

钢管混凝土哑铃型轴压构件极限承载力有限元分析

盛 叶, 陈宝春, 韦建刚

(福州大学土木建筑工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 提出了钢管混凝土哑铃型轴压构件极限承载力的有限元计算方法. 有限元建模中, 钢管与腹板采用壳单元, 混凝土采用实体单元. 对试验构件的分析表明, 有限元计算值与试验值吻合良好, 腹腔内的混凝土受钢管紧箍力作用的影响很小, 其应力 - 应变关系可按普通混凝土考虑. 应用有限元计算方法, 对哑铃型钢管混凝土构件的极限承载力进行了参数分析. 结果表明, 腹板间距的增加对极限承载力的提高呈非线性增长, 腹板高度的增加与极限承载力的提高基本上呈线性关系. 相比较而言, 腹板间距增加对构件极限承载力的提高的影响要大于腹板高度的增大对其的影响. 在参数分析的基础上, 对其简化计算方法的比较表明, 简单迭加法比等效单圆管法与试验值和有限元计算结果更为吻合、也更安全.

关键词: 桥梁; 极限承载力; 有限元; 钢管混凝土; 哑铃型; 轴压

中图分类号: TU398

文献标识码: A

Finite element methods on ultimate load - carrying capacity of CFST dumbbell shaped short columns under axial loads

SHENG Ye, CHEN Bao - chun, WEI Jian - gang

(College of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: A finite element method to calculate ultimate load - carrying capacity of CFST dumbbell shaped short columns under axial loads is presented. In the finite element model, shell element is used for steel tube and web; solid element is used for core concrete. The analysis of specimens shows that the predicted ultimate loads by the FE method coincide with tested results. The confining force have little effect on concrete inner the webs, so its stress - strain relation can be considered as that of concrete without confining force, the parameters study shows that the increase of the space between webs will make the ultimate load - carrying capacity increase nonlinearly, and the height of the web result it increase almost linearly. By comparison, the influence of the space between webs to the ultimate load - carrying capacity is more remarkable than that of the height of the web. Based on the parametric study, it is found from the comparison of the two simplified methods, the superposition simplified method coincide with tested ultimate load better and safer and simpler than the equivalent single - tube method to predict the ultimate load - carrying capacity of CFST dumbbell shaped short columns.

Key words: bridge; ultimate load - carrying capacity; finite element; concrete - filled steel tube; dumbbell; axial load

钢管混凝土单管构件(含圆截面和矩形截面)已进行了大量的试验与理论研究^[1]. 然而, 对于在钢管混凝土拱肋中大量应用的哑铃型构件, 研究才刚刚开始. 文献[2]、[3]进行了 10 根钢管混凝土哑铃型轴压短柱的试验, 分析了构件的破坏机理、极限承载力等, 并提出了极限承载力的简化计算方法. 然而, 由于受试件数量的限制, 构件的参数变化范围是有限的. 本文拟提出钢管混凝土哑铃型轴压构件非线性有限元计算方法, 应用通过试验验证的计算方法, 对钢管混凝土哑铃型轴压构件的极限承载力进行

收稿日期: 2004 - 12 - 29

作者简介: 盛 叶(1978 -), 女, 博士研究生.

基金项目: 福建省重大科技资助项目(2003F007); 福建省教育厅科研资助项目(JA03016)

较试验构件范围更大的参数分析,对文献[2]、[3]提出的简化算法进行进一步的验证。

1 计算方法

计算程序采用大型的有限元通用软件——ANSYS,建模中最主要的问题是单元选取和钢管混凝土组合材料的本构关系的选定。

1.1 单元选取

对于钢管混凝土拱桥的空间稳定性分析^[4]、施工工况和动力性能分析^[5],通常用 BEAM 单元分别模拟钢单元和混凝土单元,建模和计算均较简单,提取出来的结果只是其横截面上的平均应力、应变,钢管和内部混凝土的局部应力、应变无法求出。对于钢管混凝土节点的非线性有限元分析,常用 SOLID45 模拟钢单元,用 SOLID65 模拟混凝土单元^[6,7]。由于采用实体单元,所占计算内存较大,一般这种单元仅限于节点分析,钢管混凝土构件和结构中较少采用。

本研究在单元选取时与通常在钢管混凝土构件极限承载力分析^[8]中的做法相同,用 SHELL181 模拟钢单元,用 SOLID65 模拟混凝土单元。

对于钢管与混凝土之间的单元接触,模型中使用了节点耦合而非接触单元方法,因为接触单元过于复杂,面面之间的接触摩擦系数难以确定,模拟精度不高。本文不考虑钢管与混凝土的粘结滑移,对钢管和混凝土材料的接触面上所有坐标相同的节点的 x 、 y 、 z 3 个方向的平动自由度进行了耦合,确保它们在轴压作用下,在相同的自由度方向保持共同运动。

1.2 材料本构关系

钢的本构关系的选取最常见的是二折线和四折线本构关系。由于本文是研究极限承载力,所以采用了四折线本构关系,以反映钢与混凝土共同作用后的强化段的曲线^[9]。混凝土的本构关系选取是钢管混凝土构件非线性有限元分析的关键。根据试验结果^[2],哑铃型构件中的上下 2 个圆钢管混凝土的受力性能与单圆管钢管混凝土的受力性能基本相同,所以上下圆管内混凝土的应力-应变关系采用文献[1]提出的考虑套箍作用的单圆管钢管混凝土构件核心混凝土的应力-应变关系。腹腔内混凝土的受力比较复杂,为了比较,同时采用了文献[1]提出的考虑套箍作用的矩形钢管混凝土构件核心混凝土应力-应变关系和文献[10]中不考虑套箍作用的普通混凝土本构关系。

上述的钢管和混凝土应力-应变关系是用一维形式表达的,而混凝土的有限元模型是实体单元、钢管单元的有限元模型为壳单元,因此根据“等效单向应变”的概念,使三向应力对材料内部的作用可以用主应力轴的等效应力应变曲线来表达,这种方法已广泛应用于各种实际的有限元问题中^[11]。本文对混凝土材料选用多线性等向强化模型(MISO)定义材料各点的应力-应变关系,符合 Von Mises 屈服准则,本构关系曲线上各个点用文献[1]的公式编程算出。钢材材料选用多线性随动强化模型(MKN)定义材料各点的应力-应变关系,符合 Von Mises 屈服准则,并包含鲍兴格效应,特征点直接由文献[9]的公式算出。

2 算例分析

2.1 试件简介

文献[2]进行的哑铃型钢管混凝土轴压试验的构件分为 5 组,每组 2 个,共计 10 个构件。构件的设计参数有腹板高度 h_2 、腹板间距 b_1 以及腹板是否有拉杆加劲等。参数设置详见表 1。具体试验内容和试验结果详见文献[2]。

2.2 计算模型

用 SOLID65 模拟混凝土单元,用 SHELL181 模拟钢单元,对于有拉杆的单元用 LINK8 模拟(腹板处加强螺栓,位置设在沿腹板纵向四分点处),实常数设置中壳单元厚度设置为钢管壁厚 4 mm,杆单元面积设置为螺栓的横截面面积 28.26 mm²。初始应变设置为 0,材性定义中混凝土的抗压强度 $f_{ck} = 33.9$ MPa,泊松比取为 0.2,不考虑套箍时混凝土弹性模量 $E_c = 3.3 \times 10^4$ MPa(试验实测),考虑套箍时

混凝土弹性模量 $E_c = 3.48 \times 10^4$ MPa(文献[1]公式导出值). 钢材屈服强度 $f_y = 310.9$ MPa, 泊松比取为 0.286, 钢弹性模量 $E_s = 2.01 \times 10^5$ MPa.

5 组试验构件分别建立了 5 个有限元模型, 截面网格尺寸取为 0.027 m, 建立模型时先将构件截面网格化. 高度方向上网格数取为 12, 定义完构件截面的节点坐标, 运用 APDL 语言中的 DO 循环语句对截面节点坐标进行 12 次循环生成整个构件的网格模型, 并对相邻的相关节点进行单元定义, 对上下圆管内混凝土、中间腹腔内混凝土、管壁钢材、拉杆分别赋予不同的单元属性.

图 1 给出了试验构件 A - 1、A - 3、A - 5 的有限元模型, 构件 A - 2、A - 4 与构件 A - 1、A - 3 相比只是在腹腔处多了 3 根拉杆作为横向联系. A - 1、A - 2 2 个模型中钢分为 338 个节点, 336 个单元, 混凝土分为 663 个节点, 432 个单元, A - 2 模型比 A - 1 模型增加了 3 个杆单元. A - 3、A - 4 2 个模型中钢分为 338 个节点, 336 个单元, 混凝土分为 741 个节点, 480 个单元, A - 4 模型比 A - 3 模型增加了 3 个杆单元. A - 5 模型中钢分为 390 个节点, 384 个单元, 混凝土分为 741 个节点, 480 个单元.

由于实验时通过整块加载板加压, 平面方向上不能左右移动. 模型的边界条件模拟为底部 x 、 y 、 z 3 个方向固结, 上部 x 、 y 方向固结. 在高度方向进行位移加载, 位移加载优于力加载之处在于能成功计算出下降段.

表 1 构件参数一览表

Tab. 1 Parameter information of specimens

序号	构件编号	h_2 /mm	b_1 /mm	拉杆	f_y /MPa	f_{cu} /MPa
1	A - 1	148	50	无	310.9	50.6
2	A - 2	148	50	有	310.9	50.6
3	A - 3	148	100	无	310.9	50.6
4	A - 4	148	100	有	310.9	50.6
5	A - 5	178	50	无	310.9	50.6

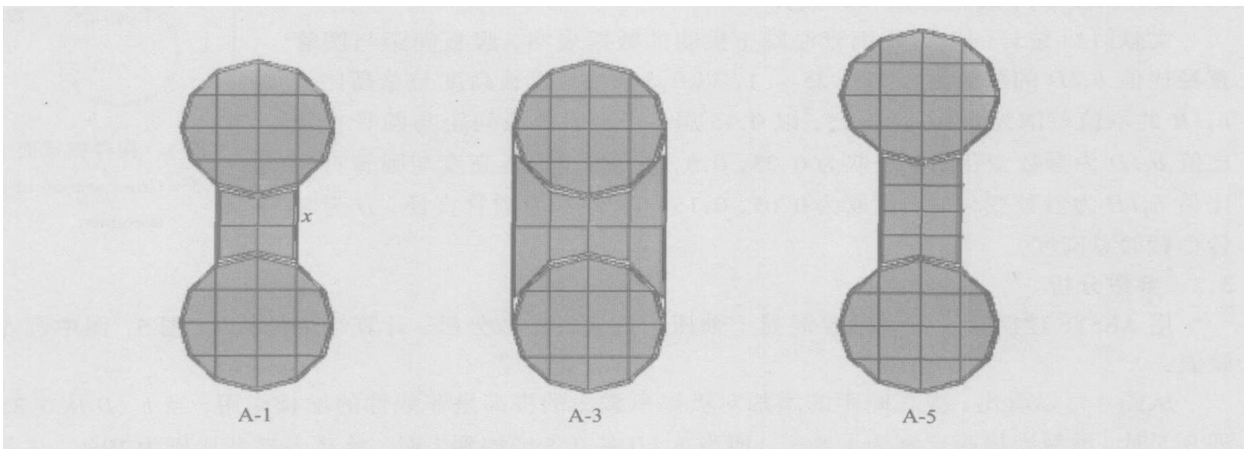


图 1 试验构件的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of specimens

2.3 计算结果

表 2 是构件极限承载力的有限元计算值和试验值的比较, 其中 N_e 为试验值, N_1 为考虑腹腔混凝土套箍作用时的有限元计算值, N_2 为不考虑腹腔混凝土套箍作用时的有限元计算值. 极限承载力试验值是以构件实测的荷载 - 挠度曲线达到第一个峰值点的位置对应的荷载作为极限承载力^[2], 有限元计算值是以计算出来的构件的荷载 - 挠度曲线的极值点的荷载作为极限承载力.

由表 2 和图 2 可以看出, 有限元计算结果与试验结果吻合良好, 该计算方法是可行的. 计算值 N_1

与 N_2 与试验值误差分别为 6% 和 2% 以内. 由于 N_1 考虑了腹腔内混凝土的套箍作用, 误差更大一些, 因此建议工程应用中采用 N_2 的计算方法, 即不要考虑腹腔内混凝土的套箍作用. 以下进行的参数分析中也都忽略了腹腔混凝土的套箍作用.

表 2 极限承载力试验值与计算值比较

Tab.2 Comparison of tested ultimate loads and the predicted values

试件编号	A - 1	A - 2	A - 3	A - 4	A - 5
N_e /kN	2 470	2 490	2 720	2 760	2 480
N_1 /kN	2 529	2 567	2 870	2 874	2 609
N_1/N_e	1.02	1.03	1.06	1.04	1.06
N_2 /kN	2 465	2 485	2 768	2 772	2 530
N_2/N_e	1.00	1.00	1.02	1.01	1.02

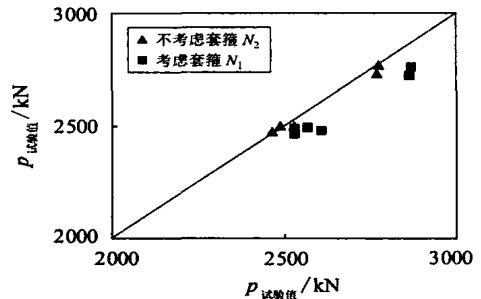


图 2 极限承载力有限元计算结果与试验结果比较

Fig.2 Comparison ultimate load - carrying capacity by test and by FE methods

3 参数分析

3.1 参数选取

哑铃型钢管混凝土截面主要由 2 个单圆管钢管混凝土截面和腹腔处的钢管混凝土截面组合而成, 构件横截面见图 3. 由于单圆管钢管混凝土构件在轴向压力作用下的受力性质研究的已经比较成熟, 所以参数分析的重点是腹腔处的变化, 而不是圆钢管混凝土. 分析的参数主要有腹板间距 b_1 、腹板高度 h_2 、腹板处是否加拉杆等.

文献[12] 统计的哑铃型钢管混凝土拱肋的数据表明, 腹板间距与圆管直径比值 b_1/D 的取值范围为 0.25 ~ 1, 以 0.5 居多. 腹板高度与总高比值 h_2/H 的取值范围为 0.05 ~ 0.25, 以 0.15 居多. 当以腹板间距与圆管直径比值 b_1/D 为参数变化时, 值取为 0.25, 0.5, 1. 当以腹板高度与圆管直径比值 h_2/H 为参数变化时, 值取为 0.05, 0.15, 0.25 (D 为圆管直径, H 为哑铃型截面总高度).

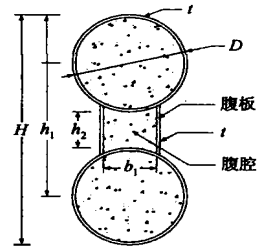


图 3 构件横截面

Fig.3 Gross section of the specimen

3.2 参数分析

用 ANSYS 建模对哑铃型钢管混凝土轴压构件进行参数分析. 计算结果见图 4、图 5. 图中圆点为试验值.

从图 4 可以看出, 腹板间距的增加对极限承载力的提高呈非线性的增长作用, 当 b_1/D 从 0.25 增加到 0.5 时, 承载力提高比例为 1.8%. 而当 b_1/D 从 0.5 增加到 1 时, 承载力提高比例为 19%. 这是因为随着两腹板的间距的线性增加, 腹腔混凝土的面积和惯性矩成非线性增加的趋势. 而从图 5 可知, 腹板高度的增加与极限承载力的提高基本上呈线性关系, h_2/H 从 0.05 变化到 0.15 时, 提高比例为 3%, h_2/H 从 0.15 变化到 0.25 时, 提高比例为 7%. 显然, 相比较而言, 腹板间距 b_1 增加对构件极限承载力的提高的影响要大于腹板高度 h_2 的增大对其的影响. 然而, 在灌腹腔内混凝土时, 拱肋截面越大, 腹板高度越高, 截面受力越不利, 爆管事故发生的可能性也越大^[13]. 因此, 哑铃型截面腹板间距 b_1 与腹板高度 h_2 的选取, 除考虑极限承载力外, 还应考虑结构构造与施工问题. 综合考虑, 认为腹板间距与圆管直径比值 b_1/D 取值在 0.5 附近、腹板高度与总高比值 h_2/H 的取值在 0.15 附近较为合适.

以腹板处是否有加拉杆为参数进行变化时, 极限承载力提高比例只有 0.3% ~ 0.8%。在腹板处设置拉杆, 主要是防止腹板向外局部屈曲并提高腹板对其腔内混凝土的约束, 防止腹板和圆管处焊缝过早被拉裂出现爆管事件^[2]。虽然设置拉杆对构件极限承载力的提高作用不大, 但从施工与构造角度出发, 对腹腔内填充有混凝土的哑铃型拱肋, 还是设置拉杆为好。

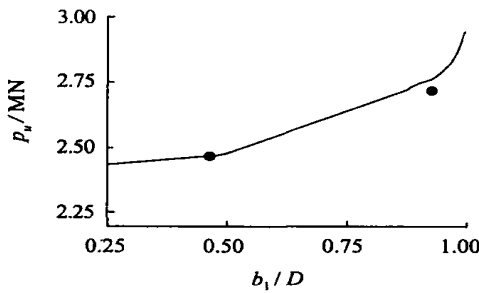


图 4 极限荷载与 b_1/D 关系曲线

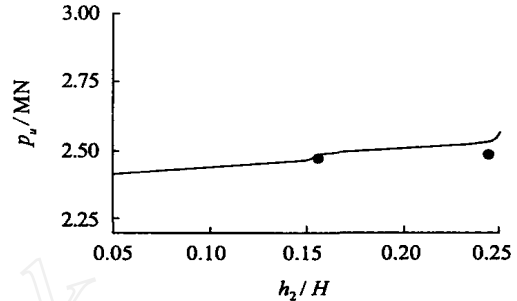


图 5 极限荷载与 h_2/H 关系曲线

Fig. 4 Relation curves of ultimate loads and parameters b_1/D

Fig. 5 Relation curves of ultimate loads and parameters h_2/H

3.3 简化计算方法比较

根据钢管混凝土哑铃型轴压构件试验结果, 文献[2]提出了极限承载力计算的简单迭加简化方法, 即考虑上下两钢管混凝土圆管、钢腹板和腹腔内(普通)混凝土的承载能力的简单迭加, 但不考虑腹腔内混凝土受紧箍力作用承载力提高的部分; 文献[3]则提出了等效单圆管法, 即考虑腹腔内混凝土受紧箍力作用承载力提高的部分, 将哑铃型整个截面等效成单根圆钢管混凝土轴压构件进行计算。

图 6 给出了按这 2 种简化计算方法计算的极限承载力与按本文提出的有限元计算方法计算结果的比较, 其中 N_4 是文献[2]简化公式计算值, N_5 是文献[3]简化公式计算值。从图 6 的比较可见, 2 种计算方法计算结果相差不是很大。其中, 文献[2]简化公式中没有考虑腹腔内混凝土套箍作用, 与本文提出的有限元计算方法的基本假定是一致的, 因此 N_4 与有限元计算值吻合程度比按等效单圆管法计算的 N_5 更好, 也更安全。此外, 文献[2]提出的简单迭加简化方法也更简单。所以, 建议工程应用时采用。

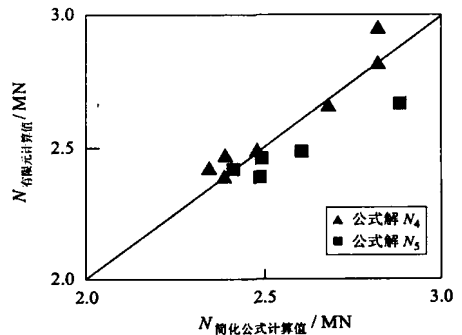


图 6 简化公式^[2,3]与有限元计算值比较

Fig. 6 Comparison of predicted values calculated by simplify formula and finite element method

4 结语

1) 采用本文的有限元计算方法计算出的钢管混凝土哑铃型轴压构件极限承载力与试验值吻合良好, 说明用该方法进行此类计算是可行的。哑铃型钢管混凝土所受的轴向压力主要由上下 2 个圆管承担, 中间腹腔内的混凝土与钢管之间紧箍力作用很小, 计算时可以忽略, 腹腔内混凝土可按普通混凝土的本构关系考虑。

2) 腹板间距的增加对极限承载力的提高呈非线性的增长作用, 腹板高度的增加与极限承载力的提高基本上呈线性关系。相比较而言, 腹板间距 b_1 增加对构件极限承载力的提高的影响要大于腹板高度 h_2 的增大。然而, 哑铃型截面腹板间距 b_1 与腹板高度 h_2 的选取, 除考虑极限承载力外, 还应考虑结构构造与施工问题。综合考虑, 认为腹板间距与圆管直径比值 b_1/D 取值在 0.5 附近、腹板高度与总高比值 h_2/H 的取值在 0.15 附近较为合适。

3) 钢管混凝土哑铃型轴压构件极限承载力的简化计算方法, 相比较而言, 简单迭加简化方法比等效单圆管法与试验值和有限元计算结果更为吻合、也更安全, 同时计算方法也更简单。

参考文献:

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构 - 理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] 陈宝春, 黄福云, 盛叶. 钢管混凝土哑铃型短柱轴压试验研究[J]. 工程力学, 2004, 22(1): 187 - 194.
- [3] 陈宝春, 黄福云, 肖泽荣. 钢管混凝土哑铃型短柱极限承载力的等效单圆管算法[J]. 公路交通科技, 2004(6): 50 - 54.
- [4] 张圣强, 王峰君, 赵长军. 浙江三门健跳钢管混凝土拱桥空间稳定性分析[J]. 公路交通技术, 2001(2): 29 - 31.
- [5] 彭桂瀚, 陈宝春. 东莞大汾北水道钢管混凝土拱桥受力分析[J]. 福建建筑, 2003(4): 25 - 38.
- [6] 梅力彪, 周云, 阴毅. 穿心暗牛腿钢管混凝土柱单梁节点空间非线性有限元分析[J]. 工业建筑, 2004(9): 81 - 83.
- [7] 汤文峰, 王毅红, 史耀华. 新型钢管混凝土节点的非线性有限元分析[J]. 长安大学学报, 2004(5): 60 - 64.
- [8] 宁平华, 李新平, 肖敏. 钢管混凝土轴压构件承载力试验研究[J]. 公路, 2004(9): 53 - 56.
- [9] 陈宝春, 秦泽豹, 彦版熙, 等. 钢管混凝土拱(单圆管)面内受力双重非线性有限元研究[J]. 铁道学报, 2003(4): 80 - 84.
- [10] 毛裕青. 钢管混凝土拱桥的极限承载力研究[D]. 上海: 同济大学土木建筑工程学院, 2000.
- [11] 林杰. 矩形钢管混凝土组合梁节点抗震性能试验研究[D]. 福州: 福州大学土木建筑工程学院, 2003.
- [12] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [13] 陈宝春, 肖泽荣. 钢管混凝土哑铃形拱肋灌注管内混凝土时的截面应力分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 73 - 76.

(接第 642 页) 间断频率判据, 可以有效避免模态混叠情况的出现, 分解的 IMF 相当于结构的某一阶模态响应, 可以减少其它阶结构模态频率分量的影响, 也可以有效降低虚假频率和一些噪声的影响, 对模态参数识别有很大帮助。

但是该方法也有一定的不足, EMD 方法本质上是一种经验式的信号分解技术, 没有精确的公式推导与定义, 所分解出来的基本模式分量不能用数学计算式表示, 因此给该方法的基本理论分析造成了一定的困难, EMD 的适用性和解决具体工程问题的能力还需进一步的研究。间断频率是筛分过程的一个附加条件, 也许会对分解结果造成未知的偏差。

参考文献:

- [1] 程军圣, 于德介, 杨宇, 等. 基于 EMD 的滤波方法研究及应用[A]. 第八届全国振动理论及应用学术会议论文集[C]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
- [2] Huang N E, Shen Z, Long S R, *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. Proc R Soc Lond A, 1998, 454: 903 - 995.
- [3] 陈隽, 徐幼麟. HHT 方法在结构模态参数识别中的应用[J]. 振动工程学报, 2003, 16(3): 383 - 388.
- [4] Yang J N, Lei Y. Identification of natural frequencies and dampings of in situ tall buildings using ambient wind vibration data[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2004, 130(5): 570 - 577.
- [5] Yang J N, Lei Y. Hilbert - Huang based approach for structural damage detection[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2004, 130(1): 85 - 95.
- [6] Xu Y L, Chen J. Structural damage detection using empirical mode decomposition: experimental investigation[J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 2004, 130(11): 1 279 - 1 288.
- [7] Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. Annu Rev Fluid Mech, 1999, 31: 417 - 457.