粘滞阻尼器在连体高层结构中的抗风减振效果

陈学伟^{a,b},韩小雷^{a,b},毛贵牛^a,季 静^{a,b}

(华南理工大学 a. 高层建筑结构研究所,广州 510640; b. 亚热带建筑科学国家重点实验室,广州 510640)

摘要:主要研究设置粘滞阻尼器的连体高层结构风振响应及风动力荷载作用下粘滞阻尼器对结构内力、变形、加速度及能量耗散的控制效果。根据连体高层结构刚性模型的风洞试验,得到风压系数时程数据。通过编制基于风洞试验的风荷载时程处理程序WINDHIST V2.0,可将风洞试验数据进行处理并导入有限元程序进行风振时程分析。对连体高层结构进行多工况风振时程分析,结果显示:设置粘滞阻尼器能减小连体结构内力及变形,内力的控制效果优于变形的控制效果。连体结构顶部加速度是由脉动风的动力效应引起,粘滞阻尼器能有效地控制结构顶部楼层加速度。 关键词:结构;动力荷载;风工程;时程分析;粘滞阻尼器;高层结构;风洞试验;风致响应 中图分类号:TU973.14;TU973.32 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2009)05-0074-07

Wind induced Response Analysis on a Connected Tall Building Structure with Viscous Damper

CHEN Xue-wei^{a,b}, HAN Xiao-lei^{a,b}, MAO Gui-niu^a, JIJing^{a,b}

(a. Tall Building Structure Research Institute; b. State Key Laboratory of Subtropical Architecture Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China)

Abstract : The control effects of a connected tall building structure with viscous damper in several respects were studied, such as internal force, deformation, acceleration and energy under dynamic wind load. Firstly, wind pressure time-history data were obtained from the wind-tunnel test of the structure model, and then a wind load processing program WINDHIST V2.0 based on wind tunnel test was developed, by which wind pressure data processed and inputted into Finite Element Method(FEM) program. Thus wind-induced vibration time-history could be analysed under various working conditions. It was shown that both the internal force and deformation of the connected structure with viscous damper can be decreased, while the effect of the former was more obvious than the latter. The acceleration at the top of the connected structure caused by dynamic response of fluctuating wind can be controlled effectively by viscous damper. **Key words:** structures; dynamic loads; wind engineering; time-domain analysis; viscous damper; tall building; wind tunnel test; wind-induced response

风荷载是高层建筑结构设计的主要控制因素之 一,一般的风荷载计算方法是根据中国荷载规范^[1], 采用等效风静力荷载,该静力风荷载通过风振系数 。考虑风的动力放大,规则体型结构的风振系数 通过荷载规范计算得到,复杂体型结构一般采用基 于风洞试验数据的频域法计算得到。由于粘滞阻尼 器在高层结构中越来越多的得到应用,风振分析的 频域法对于此类结构不再适用,而时域法^[2]是对此 类结构进行风振分析的有效手段。

收稿日期:2009-04-15

基金项目:亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究课题基金(C708086z) 作者简介:陈学伟(1983-),男,博士生,主要从事高层建筑结构抗震及抗风分析,(E-mail)dinochen1983@yahoo.com.cn。

1 风振时域法

1.1 基本原理

风振分析主要分为 2 种方法^[3]:频域法与时域 法。频域法物理概念清晰,计算效率较高而应用广 泛。时域法可以考虑结构几何与材料非线性的影 响,直观描述一定时程内结构的风振响应过程,而且 不存在频域法中模态截断的影响^[4]。

李杰^[5]等对单层球面风振分析的时域法与频域 法进行了比较,表明时域法和频域 CQC 法的计算结 果比较一致。笔者基于 AR 法^[6]模拟生成风压时 程,并对不同场地^[7]、不同结构形式、不同高度、不同 刚度的高层结构进行风振时程分析^[8],计算结果与 按简化^[910]公式计算结果进行对比,表明时域方法具 有一定的精度,能合理评估结构在风荷载下的响应。

风振时域法的求解方法与地震时域法相同,建立 集中参数多自由度体系的运动方程,如式(1)所示。 该文主要研究带粘滞阻尼器的结构体系,运动方程增 加了非线性阻尼器一项 *Cu*,如式(2)所示。由于结 构附加粘滞阻尼器,频域法不能计算结构风振响应。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P(t)$$
(1)
$$M\ddot{u} + C\dot{u} + C_{v}\dot{u} + Ku = P(t)$$
(2)

其中 K为刚度矩阵;C为阻尼矩阵;M 为对角质量 矩阵;u,u,u分别为结构的位移、速度、加速度向量。 P(t)为所施加的荷载。

为求解附加粘滞阻尼器的结构风振响应的控制 方程,采用由 E.L. Wilson^[11]开发的快速非线性分 析法(FNA)^[12],此方法主要针对线弹性结构使用而 设计,但结构中可以具有有限数量预定义的非线性 单元,如粘滞阻尼器单元。

1.2 基本步骤

风振时域法的基本步骤如下:

1) 通过有限元软件建立结构弹性分析模型。根 据具体情况,选取合理的结构计算模型。材料性能 为线弹性,结构几何变形为小变形。结构设置了粘 滞阻尼器,需要定义粘滞阻尼器的非线性性能。

2) 确定风荷载时程数据。风振时程分析首先需确定风荷载时程,目前常用的方法是: 进行风荷载 的时程模拟,将风速时程转换为风荷载时程; 直接 通过风洞试验测得结构表面各测点的风压系数时程 数据,再转换为风荷载时程,将风荷载数据导入有限 元分析软件中。

3)确定时程分析参数。选取时程分析方法:逐步 积分法或快速非线性分析,时间步长及分析总时间等。

4)进行时程分析并统计结果。根据结构层间位 移,层间剪力,耗能情况及楼层加速度评估结构风振 响应。

2 工程实例

2.1 工程概况

某连体高层建筑结构^[13]总高度 86.5 m,主要由 相距 120 m 的左右两个塔楼、高空连廊及低空连廊 4 部分组成;塔楼采用现浇钢筋混凝土框架剪力墙 结构,高空连廊及低空连廊采用钢桁架结构。结构 三维布置图如图 1 所示。为了改善结构抗震性能, 提高高空连廊的舒适度,左右塔楼与高空连廊上弦 平面及下弦平面设置粘滞阻尼器,顶层结构布置如 图 2 所示。其中,高空连廊上弦平面、下弦平面分别 布置有 12 只粘滞阻尼器,阻尼器参数为:阻尼系数 C=2500 kN/(m/s),阻尼指数 = 0.4;左右塔楼 分别布置了 22 只粘滞阻尼器,阻尼器参数为:阻尼 系数 C=2000 kN/(m/s),阻尼指数 = 0.3。经模 态分析得到结构前 4 阶振型的周期分别为: 2.465 s,1.877 s,1.672 s,0.855 s。



图 1 连体高层结构三维示意图



图 2 连廊顶面阻尼器布置图

2.2 风洞试验

风洞试验^[14]中,试验模型为刚体模型,包括此 连体结构及其前期工程(设缝分隔),如图 3 所示。 模型的几何缩尺比为 1/200。模型表面布置了 332 个测压点。试验风向角间隔取 10°,即试验中模拟了 36 个风向的作用。样本点数为 20 480,采样频率为 313 Hz。根据风洞试验的几何缩尺、风速缩尺和风 压测量的时间步长可以确定实际模型的风压时程的 时间步长为 0.275 8 s。模型区边界层流场模拟为 B 类地貌场地,地貌粗糙度系数为 0.16,基本风压设 定为 0.60 kPa。



图 3 风洞试验模型图

脉动风的主要特性包括湍流强度、湍流积分尺 度等。国际风荷载标准 ISO 指出:离地 30 m 处的大 气湍流强度近似与地面粗糙度系数相等。风洞试验 中为了满足《荷载规范》⁽¹⁾中规定的地貌粗糙度系数 及湍流读沿高度分布风要求,在试验前进行了测试 和校验。采用的风压系数时程数据来源于风洞试 验,试验中采用的脉动风的湍流强度经过换算后基 本满足规范的要求。湍流积分尺度与湍流互谱密度 函数的物理关系密切,即与脉动风的空间相关性关 系密切。这主要影响到脉动风在频域内的湍流特 性,和频域分析是直接相关的。该文采用风洞试验 风压系数时程数据进行时域分析,且各测点同步进 行测压的风压时程数据能够体现脉动风的空间相关 性,即对湍流积分尺度这一脉动风特性有所考虑。

3 程序编制

在风洞中选一个不受建筑模型影响、且离风洞 洞壁边界层足够远的位置作为试验参考点,在该处 设置了一根毕托管测量参考点风压,用于计算各测 点与参考点高度有关但与试验风速无关的无量纲风 压系数。试验参考点选在高度为 0.8 m 处,该高度 在缩尺比为 1/200 的情况下对应于实际高度160 m。 在空气动力学中,物体表面的压力通常用无量纲压力系数 *C*[#]表示如下:

$$C_{pi} = \frac{P_i - P}{P_0 - P} \tag{3}$$

其中 C_{pi} 为测点 *i* 处的风压系数, P_i 为作用点在测点 *i* 处的压力, P_0 和 P 分别为试验参考高度处的总 压和静压。各测点的风压力计算公式如式 (4) 所示。 $F_i = w_i A_i = C_{pi} w_r = C_{pi} \times w_0 \times 1.00 \times \left[\frac{160}{10} \right]^{0.32}$ (4)

其中 *F_i* 为测点 *i* 处的风压力,*w_i* 为测点 *i* 处的风压,*w_r* 为参考高度处的风压,*A_i* 为从属面积,*w₀* 为基本风压。

结构刚度足够且不存在大变形边界,因此不采 用气动弹性模型,不考虑流体与结构的相互作用。 连体高层结构的高空连廊与低空连廊不满足刚性隔 板假定,有限元模型中风压荷载采用点荷载输入,点 荷载时程按式(4)进行计算。左右塔楼由于楼板的 作用,满足刚性隔板假定,风荷载时程按楼层合力输 入,楼层合力的计算示意图及计算公式如下所示。



图 4 楼层合力计算示意图

 $F_x = -w_r H \cos C_p ds \qquad (5)$

$$F_y = -w_r H \sin C_p ds \qquad (6)$$

$$M_z = -w_r H_r (x \sin - y \cos) C_p ds \qquad (7)$$

其中, *F_x、F_y、M_z*分别为楼层 *x*方向作用力, *y*方向 作用力及绕 *z* 轴扭矩, *H*为楼层从属高度。

根据上述理论,采用面向对象语言 Delphi^[15]编制了基于风洞试验数据的风振时程荷载处理程序 WINDHIST V2.0。程序流程图如图 5 所示,程序 读取风洞试验模型测点空间坐标信息,刚性隔板信 息及模型表面法向量,然后自动按格式提取风洞试 验风压数据,转化成有限元模型的点荷载及楼层荷 载时程数据,并自动向有限元模型添加荷载时程及 风振分析工况。程序界面如图 6 所示。



图 6 程序界面图

4 风振响应分析

4.1 风振时程分析

时域法采用美国 CSI 公司开发的 ETABS 进行 分析。数值计算采用快速非线性分析 (FNA) 法。 积分前进行模态计算,振型取前 40 阶,参与质量达 到 93.28%。承载力验算时,结构阻尼比取为 0.035,风振加速度计算时,结构阻尼比取为 0.01。 由于结构平面不规则,每隔 30 风向角进行风振时程 分析,风向角的规定及 x,y方向规定如图 7 所示。



图 7 风向角示意图

4.2 分析结果

风动力荷载分为平均风与脉动风 2 部分^[16]。 风动力效应是由脉动风引起的,而平均风是一种静 力效应。粘滞阻尼器对风振的控制主要是减小脉动 风的风振效应。该文对连体结构进行 3 种工况的分 析:平均风静力荷载工况、设置阻尼器的风动力分析 和未设置阻尼器的风动力分析。粘滞阻尼器控制风 振响应的计算公式如式(8)所示。

$$=\frac{R_{\rm uc} - R_{\rm ave}}{R_{\rm c} - R_{\rm ave}} \times 100\%$$
(8)

式中, 为减振效果系数, Ruc 为未设置阻尼器控制 下结构的响应值, Rave 为平均风作用下结构的响应 值, Rc 为设置阻尼器控制下结构的响应值。

经分析可得,左塔楼刚度比右塔楼较小,左塔楼 层间位移角均大于右塔楼层间位移角,所以对左塔 楼的最大楼层层间位移角在不同风向角风荷载作用 进行对比,如图 8 所示。最大层间位移角出现在 120 风向角工况,即 y 负方向;由于粘滞阻尼器的减 振作用,结构层间位移角有所降低,y 方向结构变形 的减振效果 约为 32.8%,x 方向结构变形的减振 效果系数 约为 24.6%。



(1) x方向



(2) y方向

图 8 不同风向角风荷载作用下最大层间位移角对比

结构最大楼层层间剪力在不同风向角风荷载作 用进行对比如图 9 所示。最大层间剪力出现在 330° 风向角工况,即 y 正方向;由于粘滞阻尼器的减振作 用,结构层间剪力有所降低,y方向结构变形的减振 效果系数 约为 19.3%,x方向结构变形的减振效 果系数 约为 15.5%。左塔楼层间位移角与结构 层间剪力的减振效果系数 如表1所示。





(2) y方向

图 9 不同风向角风荷载作用下最大层间剪力对比

表1 减振效果系数								
风向角/。	左塔 <i>x</i> 方向 层间位移角	左塔	x 方向 楼层剪力	y 方向 楼层剪力				
0	25.90 %	23.70 %	25.00 %	0.00 %				
30	26.80 %	31.90 %	17.10%	17.30 %				
60	29.30 %	28.80 %	3.70 %	24.50 %				
90	17.10 %	34.70 %	3.80 %	22.20 %				
120	19.00 %	28.80 %	29.40 %	15.30 %				
150	41.50 %	18.20 %	26.00 %	14.70 %				
180	18.20 %	28.80 %	37.90 %	4.90 %				
210	39.30 %	43.80 %	31.40 %	- 6.10%				
240	10.60 %	66.80 %	17.20 %	33.00 %				
270	16.20 %	18.50 %	7.90%	3.70 %				
300	17.30 %	52.20 %	15.80 %	30.10%				
330	33.70 %	17.40 %	16.20 %	26.20 %				
平均值	24.60 %	32.80%	19.30 %	15.50%				

2

结构耗能情况在不同风向角风荷载作用进行对 比,如表2所示。结构阻尼器耗散能量与总输入能 量的比约为70%。阻尼器的能量耗散随着脉动风 引起结构振动而平缓增加,如图10所示。由于脉动 风动力荷载是平稳的随机荷载,阻尼器的耗能曲线 接近一条斜直线。因为结构模态阻尼比较小,而且 结构采用阻尼指数较高的粘滞阻尼器,所以阻尼器 耗散能量比模态阻尼要多。

表 2	不同风向角风荷载能量耗散情况对比表
-----	-------------------

风向角/ 。	输入能量/ kN·m	阻尼器 耗能/kN·m	模态耗能/ kN·m	势能/ kN m	动能∕ kN ∙m	阻尼器 耗能比
0	179.41	115.70	16.31	47.38	0.02	64.5%
30	101.84	70.80	9.53	21.48	0.03	69.5%
60	85.85	67.45	8.54	9.85	0.02	78.6%
90	149.83	115.53	15.93	18.35	0.02	77.1%
120	201.43	121.15	16.44	63.76	0.07	60.1%
150	189.69	135.53	21.49	32.52	0.15	71.4%
180	208.95	155.38	31.43	21.93	0.21	74.4%
210	92.00	73.50	16.52	1.97	0.01	79.9%
240	23.35	17.92	3.57	1.79	0.07	76.8%
270	73.43	54.96	10.97	7.50	0.01	74.8%
300	141.42	81.83	12.03	47.44	0.13	57.9%
330	128.16	75.68	62.01	63.55	2.59	59.1%



图 10 0 风荷载作用下能量耗散曲线图

为提高高空连廊的风振舒适度,在高空连廊的 上下弦平面设置了粘滞阻尼器。高空连廊出现最大 加速度的部位在连廊的跨中。跨中水平方向加速度 远大于竖向加速度。跨中水平方向加速度在不同风 向角风荷载作用下的对比如图 11 所示。从图 11 中 可见,粘滞阻尼器主要设置在结构的 y方向,粘滞阻 尼器很好地控制 y 方向的加速度,其值降低约 90%,而 x 方向加速度降低约 50%。



(2) y方向

图 11 0 风向角风荷载作用下顶层高空连廊跨中加速度对比

综上所述,连体结构设置粘滞阻尼器,能有效地 控制结构风振加速度。由于风荷载按频率成分可以 分为平均风与脉动风,平均风类似一种静力荷载,而 脉动风是一种平稳的动力荷载。粘滞阻尼器只能对 脉动风引起的动力响应进行控制,通过 y 方向最大 楼层剪力的对比可知,y 方向脉动风压占总风压的 比例约为 30%,设置粘滞阻尼器后,脉动风引起楼 层剪力的控制效果约为 15.5%,总剪力的控制效果 约为 5%。设置阻尼器对结构宏观的内力及变形有 控制效果,但是并不明显。设置阻尼器增加结构总 体阻尼,粘滞阻尼器的耗能大于结构模态耗能。结 构顶点加速度主要是脉动风的动力效应引起,设置 阻尼器能减小风振加速度,效果十分明显。

5 结 论

该文论述了风振时域法的主要原理与分析步骤。时域法进行高层结构风振分析比较耗时,但是 时域法能够考虑几何或材料非线性的因素。当结构 设置了非线性阻尼器,时域法是结构风振分析的有 效方法。对设置了粘滞阻尼器的连体高层结构,通 过时域法进行风振分析。经分析表明,设置粘滞阻 尼器能较大的提高整体结构的总阻尼,对脉动风引 起的结构振动起到良好的控制作用,有效地控制结 构顶部楼层加速度。由于结构抗侧刚度足够,周期 约为 2.465 s,因此脉动风压占总风压的比例不大, 所以粘滞阻尼器对内力及变形的控制效果不是十分 明显。对于刚度较小的超高层建筑结构,脉动风比 例较大,粘滞阻尼器的内力及变形的控制效果应相 应增大。

参考文献:

- [1] GB 50009 2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建 筑工业出版社,2002.
- [2] 王修琼,张相庭.混合回归模型及其在高层建筑风响应 时域分析中的应用[J].振动与冲击,2000,19(1):5-7. WANGXIU-QIONG, ZHANGXIANGTING. Hybrid regressive model and its application in time-domain analysis of tall building 's response to wind action[J]. Journal of Vibration and Shock,2000,19(1):5-7.
- [3] 刘锡良,周颖.风荷载的几种模拟方法[J].工业建筑, 2005,35(5):81-84. LIU XFLIANG, ZHOU YING, Numerical simulation

methods of wind load [J]. Industrial Construction, 2005,35(5):81-84.

- [4] MACRIO DI PAOLA. Digital simulation of wind field velocity[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998 (74/75/76): 91-109.
- [5]李杰,倪振华,谢壮宁.单层球面网壳风振分析的时域法
 与频域法比较[J].建筑科学与工程学报,2008,25(2):
 63-68.

LI JIE, NI ZHEN-HUA, XIE ZHUANG-NING. Comparison of wind-induced vibration analysis of singlelayer spherical latticed shells between time domain method and frequency domain method [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25 (2): 63-68.

- [6] DEODATIS G, SHINOZUKA M. Auto-regressive model for nonstationary stochastic process[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASEC, 1998, 114 (11): 1995-2012.
- [7] 王修琼,崔剑锋. Davenport 谱中系数 K的计算公式及 其工程应用[J]. 同济大学学报,2006,30(7): 849-852. WANG XIU-QIONG, CUI JIAN-FENG. Formula of coefficient K in expression of davenport spectrum and its engineering application [J]. Journal of Tongji University, 2006,30(7): 849-852.
- [8]陈学伟,韩小雷,郑宜,等.高层建筑结构风振时程分析 软件的技术研究[J].华中科技大学学报:城市科学版, 2008,25(3):136-141.

CHEN XUE-WEI, HAN XIAO-LEI, JACK C, et al. Computer program for wind time-history load simulation of tall building structure under wind-induced vibration [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2008, 25(3):136-141.

[9] 黄本才. 高层建筑风振系数简化方法和实用计算表格 [J]. 建筑结构学报, 2000,21(3):46-51. HUANG BEN-CAI. The simplified method and computing tables for MOE [J]. Journal of Building Structures, 2000,21(3):46-51.

- [10] 黄本才.高层民用建筑钢结构人体舒适度验算[J].建 筑结构,1998(6):34-37.
 HUANGBEN-CAI. Checking computations on human comfort of high-rise occupancy types steel building[J]. Building Structure,1998(6): 34-37.
- [11] WILSON E L. Three dimensional dynamic analysis for structures with emphasis on earthquake engineering
 [M]. Computers and Structures, Inc., Berkeley, Calif. 1997.
- [12] WILSON E L, FARHOOMAND I, K J. Nonlinear dynamic analysis of complex structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1973(1): 241-252.
- [13] 韩小雷,何伟球,陈学伟,等.中洲中心二期观光门架基 于性能的建筑结构抗震超限设计可行性报告[R]. 广 州:华南理工大学高层建筑结构研究所,2009.
 HAN XIAO-LEI, HE WEFQIU, CHEN XUE WEI, et al. Performance-based design on the HUB. II

(上接第 68 页)

 [5]朱伟,秦建设,卢廷浩.砂土中盾构开挖面变形与破坏数值模拟研究[J].岩土工程学报,2005,27(8): 897-902.
 ZHU WEI, QIN JIAN-SHE, LU TINGHAO.

Numerical study on face movement and collapse around shield tunnels in sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8):897-902.

[6]朱伟,陈仁俊. 盾构隧道施工技术现状及展望(第2)
讲):盾构隧道技术和施工管理[J]. 岩土工程界, 2001,4(12):14-16,20.

ZHU WEI, CHEN REN-JUN. Present state and perspectives of shield construction techniques (2): shield techniques and construction management [J]. Geotechnical Engineering World ,2001, 4(12):14-16,20.

- [7] KUWAHARA H, YAMAZAKI T, KUSAKABE O. Ground deformation mechanism of shield tunneling due to tail void formation in soft clay[C]// Proc, 14th Int. Conf. on Soil Mech. and Found Engrg, Kalkema, Rotterdam, The Netherlands, 1997:1457-1460.
- [8] ZHOU XIAO-WEN, PU JIA-JU, BAO CHENG GANG. Effect of shield tail void closure on lining earth pressure [C]// Proceedings of 15th Int. Cont. on soil Mech. and Geotech. Engrg, San Francisco, 2001:1441-1444.
- [9] 刘元雪, 施建勇, 许江, 等. 盾构法隧道施工数值模拟

sightseeing gate [R]. Tall Building Structure Research Institute, South China University of Technology, Guangzhou, 2009.

- [14] 谢壮宁,石碧青.广州中洲观光门风荷载特征风洞试验 数据图表[R]. 汕头:汕头大学大气边界层风洞实验 室,2008.
 XIE ZHUANGNING, SHIBFQING. Data and figures of wind tunnel test on the HUB. II sight seeing gate[R]. Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, Shantou
- [15] 何光渝,雷群. Delphi 常用数值算法集[M]. 北京:科学 出版社,2001.

University, Shantou, 2008.

[16] 黄本材,黄国砚,林颖儒,等.体育场屋盖结构静动力风 荷载实用分析方法[J].空间结构,2006,6(3):33-39.
HUANG BEN-CAI, HUANG GUO-YAN, LIN YINGRU, et al. Analytical methods of static and dynamic wind loading on cantilever roof structures for stadium[J]. Spatial Structures, 2000,6(3):33-39.

(编辑 王秀玲)

[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2):239-243.

LIU YUAN-XUE, SHI JIAN-YONG, XU JIANG, et al. Numerical simulation of excavation of shield tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2):239-243.

- [10] KASPER THOMAS, MESCHKE GUNTHER. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(2):160-171.
- [11] KASPER THOMAS, MESCHKE GUNTHER. A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling [J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33(4-5):234-247.
- [12] SWOBODA G, ABU- KRISHA A. Three-dimensional numerical modelling for TBM tunnelling in consolidated clay [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, 14(3):327-333.
- [13] KOMIYA K, SOGA K, AKAGI H, et al. Soil consolidation associated with grouting during shield tunnelling in soft clayey ground [J]. Geotechnique, 2001, 51(10):835-846.
- [14]梁精华. 盾构隧道壁后注浆材料配比优化及浆体变形 特性研究[D]. 南京:河海大学,2006.

(编辑 胡英奎)