

文章编号:1007-2993(2013)01-0013-04

# CFG 桩复合地基的数值模拟分析

范崇民<sup>1</sup> 王浩<sup>1</sup> 邴宇峰<sup>2</sup>

(1. 中兵勘察设计研究院,北京 100053; 2. 北京方恒置业股份有限公司,北京 100005)

**【摘要】** 运用 FLAC<sup>3D</sup> 软件,分析了 CFG 桩复合地基的沉降变形和应力变化特征,验证了 FLAC<sup>3D</sup> 软件在 CFG 桩复合地基的数值分析中的可靠性,并对今后 CFG 桩地基处理工程的设计和施工提出了建议。

**【关键词】** 数值分析;CFG 桩;复合地基;沉降

**【中图分类号】** TU 431.1

**【文献标识码】** A doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2013.01.004

## Numerical Simulation Analysis of CFG Pile Composite Foundation

Fan Congmin<sup>1</sup> Wang Hao<sup>1</sup> Bing Yufeng<sup>2</sup>

(1. China Ordnance Industry Survey & Geotechnical Institute, Beijing 100053, China;

2. Beijing Fangheng land Co., Ltd, Beijing 100005, China)

**【Abstract】** It's analyzed that the characters of settlement and stress about CFG pile composite foundation using FLAC<sup>3D</sup> program. And it's proved that the FLAC<sup>3D</sup> program's dependability in the numerical simulation analysis of CFG pile composite foundation. Advices is offered to the designs and constructions.

**【Key words】** numerical simulation; CFG pile; composite foundation; settlement

### 0 引言

进入 21 世纪,越来越多的大型建筑物拔地而起,这些建筑物具有层数多、荷载大和基础埋置深的特点。这对地基的要求越来越高,传统的天然地基已不能满足需要,复合地基技术得到快速发展。CFG 桩复合地基具有地基承载力提高幅度大、应用范围广、沉降小稳定快、施工简便和造价相对低廉等特点,在全国地区应用广泛<sup>[1]</sup>。但是,目前运用数值分析法研究 CFG 桩复合地基的变形、受力特征还不够完善。因此,本文利用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 对 CFG 桩复合地基进行模拟,分析了其沉降变形和应力变化特征及原因,以对今后的地基处理工程提供参考。

### 1 工程概况

本工程位于北京市朝阳区三元东桥北侧,为高级写字楼,地上 26 层,地下 4 层,高度约为 85.5~99.9 m,±0.00 标高为 39.10 m,结构形式为框筒结构。

### 2 建立模型

#### 2.1 地基模型

根据勘察报告可知,地基土体共分为 13 层,涉及地基处理的有⑤—⑩层,见表 1。在模拟过程中,地基深度选择为 40 m,并且除去开挖部分后模型相关的土体为⑥—⑩层,共五层(见图 1)。

表 1 地基处理土层

成因类别	地层编号	岩性	各大大层顶标高/m	压缩性
第四纪 沉积层	⑤	粉质粘土、重粉质粘土	23.84~26.82	中高—低压缩性
	⑤ <sub>1</sub>	粘质粉土、砂质粉土		低压缩性
	⑤ <sub>2</sub>	粘土		中—中低压缩性
	⑤ <sub>3</sub>	细砂		低压缩性
	⑥	细砂、中砂	15.74~19.10	低压缩性
	⑥ <sub>1</sub>	圆砾、卵石		低压缩性
	⑥ <sub>2</sub>	粘质粉土、砂质粉土		低压缩性
	⑥ <sub>3</sub>	粉质粘土		中低压缩性
	⑥ <sub>4</sub>	粉质粘土		中低压缩性

作者简介:范崇民,1962 年生,男,汉族,北京人,助理工程师,主要从事土工试验工作。E-mail:fchm2924@sina.com

续表

成因类别	地层编号	岩性	各大层层顶标高/m	压缩性
第四纪沉积层	⑦	细砂、中砂		低压缩性
	⑦ <sub>1</sub>	砂质粉土、粘质粉土	8.34~15.10	低压缩性
	⑦ <sub>2</sub>	粉质粘土		低—中低压缩性
	⑦ <sub>3</sub>	粘土、重粉质粘土		低—中低压缩性
	⑧	粉质粘土、重粉质粘土		低—中低压缩性
	⑧ <sub>1</sub>	粘质粉土、砂质粉土	5.10~6.90	低压缩性
	⑧ <sub>2</sub>	粘土		中低—低压缩性
	⑨	粉质粘土、重粉质粘土		中—低压缩性
	⑨ <sub>1</sub>	细砂、粉砂	-3.95~-1.48	低压缩性
	⑨ <sub>2</sub>	粘质粉土、砂质粉土		低压缩性
	⑨ <sub>3</sub>	粘土		低—中低压缩性
⑩	中砂、细砂		低压缩性	
⑩ <sub>1</sub>	粘质粉土、粉质粘土	-9.45~-6.90	低压缩性	

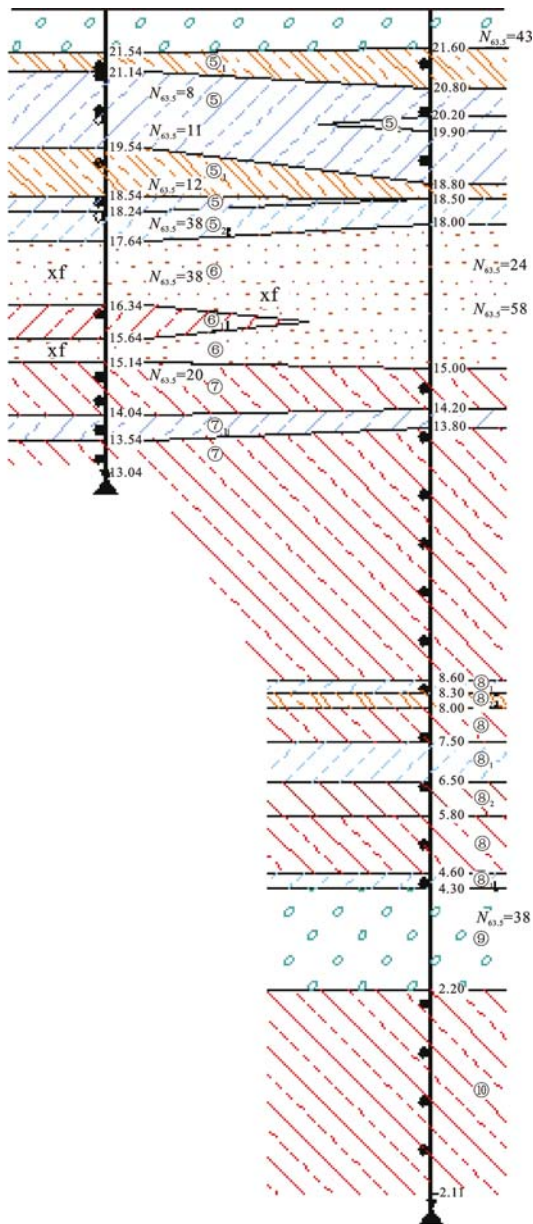


图1 工程场地代表地质剖面图

CFG桩复合地基场地面积为44.8 m×21.6 m,考虑到复合地基的影响,将场地面积扩展为原来的2倍,深度方向为桩长的2倍,根据对称原则选取场地的1/4建立模型,因此模型的最终大小为50 m×25 m×40 m。

土体本构模型选取中,⑥、⑩的细中砂层选用Mohr-Coulomb模型,其余四层选用弹性模型,土体参数选取遵循求加权平均值的原则,具体参数见表2。

表2 土体参数

土层编号	地层编号	厚度/m	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
S1	⑥	7.8	2 000	62.3	0	25.0
S2	⑦	4.7	1 970	15.8	10	20.0
S3	⑧	7.3	2 030	18.7	20	15.0
S4	⑨	6.2	1 890	18.7	15	12.0
S5	⑩	5.6	2 100	70.0	0	30.0
S6	⑪	8.4	1 860	21.2	18	32.5

土层编号	地层编号	泊松比 $\nu$	变形模量 $E/\text{MPa}$	体积模量 $K/\text{MPa}$	剪切模量 $G/\text{MPa}$
S1	⑥	0.33	42.05	41.18	15.81
S2	⑦	0.30	11.74	9.77	4.51
S3	⑧	0.31	13.49	11.82	5.15
S4	⑨	0.30	13.89	11.56	5.34
S5	⑩	0.34	45.48	47.33	16.97
S6	⑪	0.30	15.75	13.11	6.06

设置一定厚度的褥垫层能够保证桩、土共同承担荷载,充分发挥桩间土的作用,提高复合地基承载力<sup>[2]</sup>。根据规范要求 and 实际工程经验,垫层的最佳厚度应为100~300 mm,垫层压缩模量取值范围应为20~100 MPa。结合实际场地情况,褥垫层采用150 mm厚粒径为5~10 mm的砂石或碎石,参数见表3。

表 3 褥垫层参数

粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	泊松比 $\nu$	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	体积模量 $K/\text{MPa}$	剪切模量 $G/\text{MPa}$
0	30	0.25	2 300	33.30	16.70

## 2.2 桩模型

复合地基增强体采用钻孔灌注桩形式,按正方

形布置,1/4 场地共设置 96 根桩,桩长 17.5 m,有效桩长 17.0 m,保护桩长 0.5 m,桩间距 1.3 m,桩径 400 mm,桩身采用 C25 混凝土。桩模型依然采用 FLAC-3D 中的 pile 单元,桩身材料采用理想的各向同性线弹性材料(见表 4)。模型结点和单元数量见表 5。桩位布置图见图 2,土层概化模型见图 3。

表 4 桩单元(pile)参数

密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 $\nu$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	周长 $P/\text{m}$	横截面积 $A/\text{m}^2$	$J/\text{m}^4$	$I_y/\text{m}^4$	$I_z/\text{m}^4$
2 500	0.30	25	1.26	0.126	0.002 52	0.001 26	0.001 26

土层编号	地层编号	切向弹簧			法向弹簧		
		$K_s/\text{MPa}$	$C_s/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$\varphi_s/(\text{°})$	$K_n/\text{MPa}$	$C_n/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$\varphi_n/(\text{°})$
S1	⑥	81.09	0	0	81.09	0	0
S2	⑦	32.92	13	10.0	32.92	12.6	10.0
S3	⑧	32.5	25	20.0	32.5	25.2	20.0

表 5 模型单元参数

实体单元		结构单元	
单元数 (zone)	结点数 (grid-point)	桩单元数 (pile)	结点数 (node)
15 625	17 576	1 632	1 728

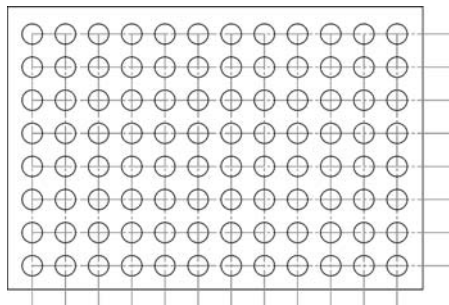


图 2 CFG 桩分布图(1/4 场地)

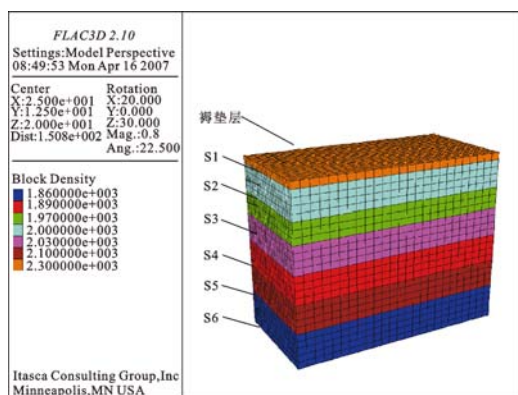


图 3 土层概化模型图

## 2.3 边界条件

施加恰当的边界条件有利于分析模型计算过程

的收敛性和保证计算结果的合理性。本次模拟采用约束模型边界位移的边界条件,就是在模型的四周边界面以在面的法向上用零位移进行约束。同理,基坑底部也作同样的边界处理。在消除边界效应的原则下,充分考虑拟建场地的具体形态特征和实际的工程水文地质条件。

## 3 模拟结果分析

在实际施工中,基坑开挖完成后又经基底回弹稳定后才进行地基处理施工,且回弹位移较小,因此在模拟过程中没有实际的基坑开挖过程,而是通过设置初始地应力来模拟开挖后的地基土应力场。

## 3.1 复合地基沉降分析

复合地基处理的思路就是在满足地基承载力的同时,严格控制建筑物总沉降和差异沉降。

在模拟前,通过沉降理论可以计算出建筑物的总沉降。根据龚晓南<sup>[3]</sup>的复合地基沉降计算方法,将复合地基分为加固区和下卧层两部分,分别采用复合模量法和 Geddes 法计算相应的沉降变形量,再加成得到复合地基的总沉降。依据这一思路并结合自制软件计算得出的复合地基沉降量为 49.0 mm。(见图 4)

模拟结果复合地基最大沉降值为 41.7 mm,出现在中心位置,最小值为 20.2 mm,出现在角点位置。复合地基沉降呈中间大,四周小的近椭圆盆形分布,这与一般现场实测结果相符<sup>[4-5]</sup>,见图 5。

处理后的基础差异沉降是由框架结构相邻柱间的差异沉降来表示(见图 6)。根据模拟结果计算得到的相邻柱间最大差异沉降为 0.00145。

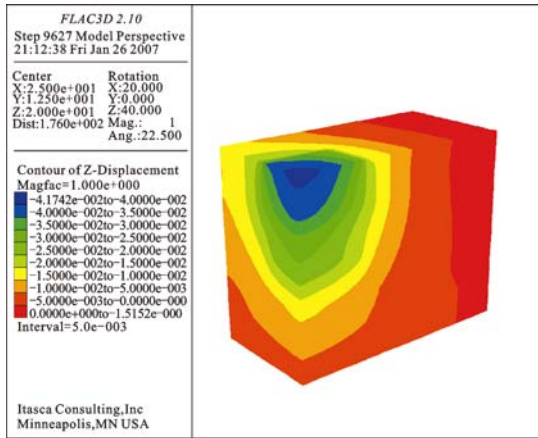


图4 复合地基 Z 向位移图

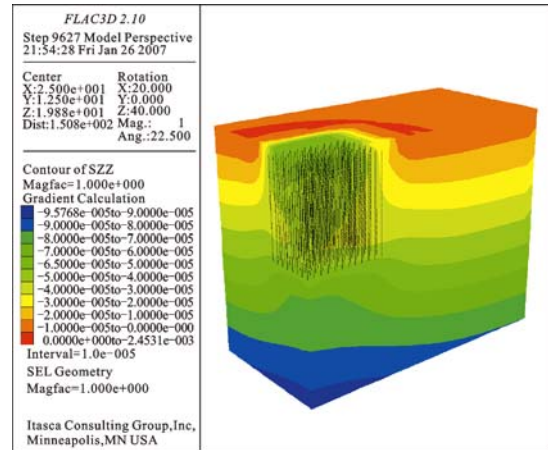


图7 复合地基应力云图

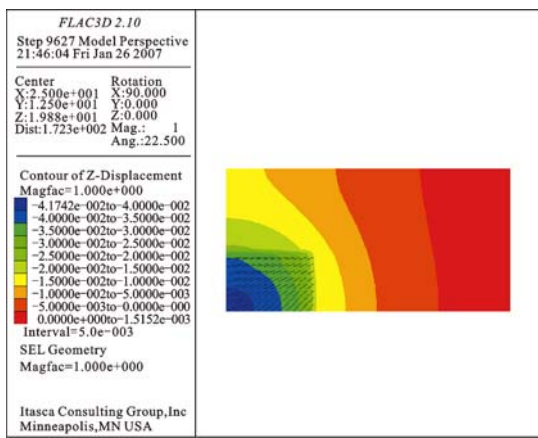


图5 复合地基位移俯视图

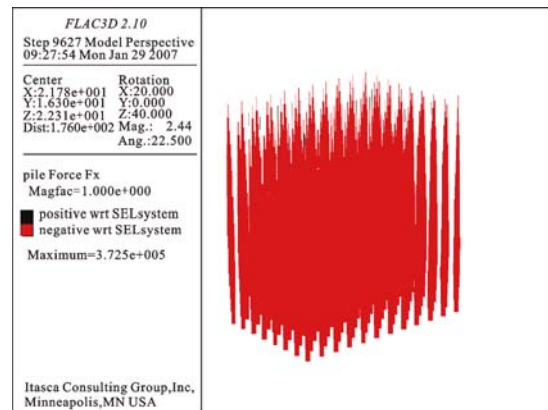


图8 桩身轴力图

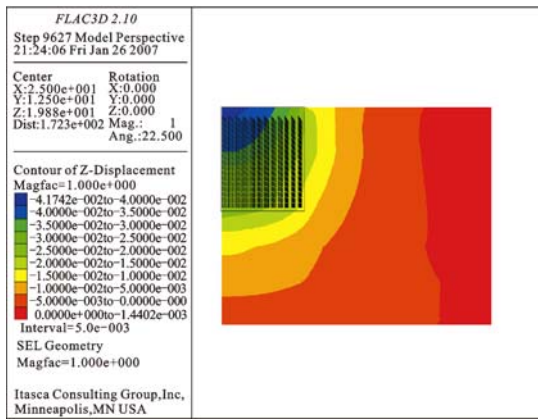


图6 复合地基横向位移图

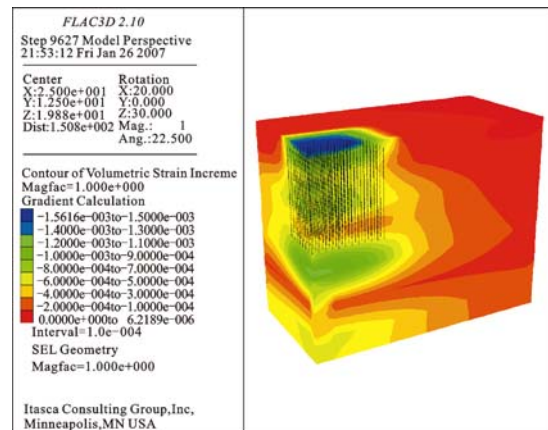


图9 复合地基体积应变增量云图

### 3.2 复合地基应力分析

复合地基 Z 向应力云图见图 7。从中可以发现，加固区外的各层土体应力分布均匀，完全按照各土层相应的重度产生应力梯度<sup>[6-7]</sup>。而加固区的应力变化明显小于其外侧土体，这是因为复合地基承担荷载的主要是桩体，其置换作用将土体的重度效应减小，而桩与桩之间、桩与土之间的相互作用，使得复合地基成为一个有机的整体来发挥其承载能力，表现沉降变形<sup>[8-9]</sup>。

从桩身轴力可以看到，桩身最大轴力为 372.5 kN，出现在桩身的中下部(见图 8)。而该工程 CFG 桩的极限承载力为 745 kN，符合安全系数为 2 的设计要求。复合地基体积应变变化见图 9，等效荷载作用面延至桩身的中下部，与桩身最大轴力和摩阻力中性点处一致<sup>[10]</sup>。而复合地基下卧层的体积应变变化不大，表明下卧层附加应力分布均匀。



和计算模型均不能准确地、定性地涵盖这些影响因素。如果把现有分析边坡岩土体稳定性分析方法有机地结合在一起,以边坡岩土体的力学响应为基础,结合实际坡体结构和性质及环境因素的复杂性,从坡体的极限平衡状态、应力应变状态、屈服时的破坏状态、坡体的安全系数、工程危害等角度分析坡体实际受力状态来研究边坡稳定性,更加贴切实际工程应用。

#### 参 考 文 献

- [1] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3-13.
- [2] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学出版社, 1997.
- [3] 张咸恭, 王思敬, 张倬元, 等. 中国工程地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

- [4] 吴俊杰, 王成华, 李广新. 非饱和土基质吸力对边坡稳定的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 732-744.
- [5] 郭 璇, 赵成刚, 于威威. 非饱和土边坡稳定的安全分析及进展[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(1): 8-14.
- [6] 李玉銮. 边坡变形及其失稳影响因素分析[J]. 福建建筑, 2009, 99(3): 67-69.
- [7] Duncan, J. M. State of the art: Limit equilibrium and finite element analysis of slopes. Journal of Geotechnical Engineering. 1996, 122(7): 577-596.
- [8] 李克钢. 岩质边坡稳定性分析及变形预测研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [9] 张强勇, 刘大文, 蔡德文. Sarrna 法在加锚岩质高边坡安全稳定评价分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3368-3372.
- [10] 刘 军, 李仲奎. 非连续变形分析(DDA)方法研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 25(5): 839-845.

收稿日期: 1012-09-12

(上接第 16 页)

### 3.3 模拟结论可靠性分析

将模拟结果与理论计算值、建筑物使用中的沉降实测值相比较发现, 模拟值要小于计算值(见表 6)。这是因为地基土体的⑥层即复合地基加固区的 S1 层实际分布不均匀, 而在土层概化模拟的过程中, 将各层都设置为均匀土体, 造成一定的误差; 另外, 该层土体的参数特别是切、法向弹簧参数的设置偏保守, 造成模拟沉降值偏小。但总的来说, 模拟结果与计算结果、实测结论能够较好地符合, 这也验证了 FLAC 软件对于复合地基模拟计算的可靠性。

表 6 模拟值、计算值与设计要求的比较

指标	模拟值	实测值	计算最大值	设计要求	结论
建筑物中心最终总沉降量/mm	41.7	47.5	49.0	50.0	满足要求
柱间差异沉降	0.00145	0.00174	0.00188	0.002	满足要求

## 4 结 论

通过对该工程的 CFG 桩复合地基的数值模拟分析, 得出以下结论:

复合地基沉降分布呈中间大, 四周小的椭圆盆形, 最大位移出现在中心。

复合地基加固区的应力变化小于外侧土体, 这是由桩体的置换效应引起的。

综合比较建筑物总沉降和差异沉降的模拟值、理论计算值以及实测值等, 发现两者相差不大, 符合实际要求, 验证了 FLAC<sup>3D</sup> 软件的可靠性。

#### 参 考 文 献

- [1] 张在明. 北京地区高层和大型公用建筑的地基基础问题[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 11-23.
- [2] 孙 钧. 城市地下工程施工安全的智能预测与控制及其三维仿真模拟系统研究[J]. 海峡两岸隧道与地下工程专集(1). 岩石力学与工程学报, 1999, 18(增刊): 753-762.
- [3] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [4] 阎明礼, 张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [5] 化建新, 董长和. CFG 桩垫层效应研究[J]. 岩土工程技术, 1999(1): 48-50.
- [6] 张小敏, 郑俊杰. 刚性桩复合地基应力及沉降计算[J]. 岩土工程技术, 2002(5): 265-268.
- [7] 郑 刚, 刘双菊, 伍止超, 等. 刚性桩复合地基在水平荷载作用下工作性状的模型试验[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 865-868.
- [8] FLAC-3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Version 2.1, User's manual [M]. Itasca Consulting Group, Inc. USA.
- [9] 董必昌, 郑俊杰. CFG 桩复合地基沉降计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(97): 1084-1086.
- [10] 黄绍铭, 等. 减少沉降量桩基的设计与初步实践[C]. 第六届土力学及基础工程学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 1991.

收稿日期: 2012-09-26