

文章编号: 1000-7598-(2006) 05-0711-06

桩端压浆对超长直径桩侧阻力的影响研究

黄生根¹, 龚维明²

(1.中国地质大学 工程学院, 武汉 430074; 2.东南大学 土木工程学院, 南京 210096)

摘 要: 桩端压浆可大幅提高超长直径桩侧阻力, 且桩侧阻力的提高成为桩承载力提高的主要原因。桩土间存在一个软弱层(泥皮层), 浆液在压力作用下总是沿着软弱面向上运动, 并对桩侧土产生挤压, 在使桩径扩大的同时, 亦对桩周土体进行加固, 从而使桩侧摩阻力提高。根据超长直径桩工程实例的静载荷试验、标贯试验及 CT 检测结果证明, 压浆后在桩端以上一定范围内桩周土强度提高, 桩侧阻力提高 12.39%~52.87%, 侧阻力增量占总增量比例达 56%~88%。

关 键 词: 桩端压浆; 超长直径桩; 侧阻力; 自平衡静载荷试验

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Study on effect of base grouting on shaft friction of overlength large diameter pile

HUANG Sheng-gen¹, GONG Wei-ming²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The shaft friction can be improved greatly by base grouting, and the increment is the major part of ultimate bearing capacity increment of the overlength large diameter pile. There is a weak layer between a pile and the soil around it, so the grout always flows upward along the weak layer, squeezing the soil to a larger diameter and improving the shaft friction. According to the results of the self-balanced static load testing method, the SPT test and the CT scanning test of a project with overlength large diameter piles, the strength of soils in a large range above pile-bases was improved and the shaft friction was increased 12.39%-52.87%, the ratios of shaft friction in the increment of ultimate bearing capacities was 56%-88%.

Key words: base grouting; overlength large diameter pile; shaft friction; the self-balanced static load testing method

1 引 言

随着国民经济的不断发展, 钻孔灌注桩作为高层建筑、桥梁等结构的基础形式得到广泛应用。随着高层建筑荷载及桥梁跨度的不断发展, 对钻孔灌注桩承载力的要求越来越高, 桩径和桩长不断增大, 长度超过 50 m, 直径大于 1.5 m 的超长直径钻孔灌注桩已越来越多。目前, 我国桥梁工程中最大桩长已达 125 m, 桩径 3.0 m, 单桩承载力最高达 120 000 kN。

桩长、桩径越大, 面临的问题越多, 超长直径灌注桩存在的问题主要表现在施工难度大, 且质量难以保证。桩长、桩径越大, 对施工设备、施工工艺的要求越高, 施工工艺本身存在的缺陷表现越

明显, 影响施工质量的因素更多, 可靠性更差。为解决上述问题, 在一些工程的超长直径桩中开始应用后压浆技术。但目前, 超长直径桩应用桩端后压浆技术的理论研究远远落后于工程实践, 还缺乏全面深入地认识和必要的理论。

一般以为, 桩端压浆主要对桩端进行加固, 而根据一些超长桩的实测结果, 桩端压浆后侧阻力得到大幅提高, 并成为承载力提高的主要原因。本文结合苏一通大桥的试验资料, 对后压浆技术的作用机理以及后压浆对超长钻孔灌注桩侧阻力的影响进行研究。

2 桩端压浆机理分析

桩端压浆的浆液一部分作用于桩端土体; 另一

部分作用于桩端以上一定范围内的桩侧土体^[1~3]。本文主要讨论桩端压浆对桩侧土体的影响。

由于桩土间存在一个软弱层(泥皮层),其强度比桩周土要低,故浆液在压力作用下对桩侧土进行挤压,在使桩径扩大的同时,浆液总有沿着软弱面向上运动的趋势。软弱面有 2 个,即桩-泥皮接触面和泥皮-桩周土接触面。浆液在压力作用下首先克服任一软弱面的阻力,象楔子一样沿桩身向上运动,并对泥皮层和桩侧土体进行挤密,甚至破坏泥皮结构。浆液充填于挤密后产生的空隙里,固结后形成强度高水泥结石,相当于增大了桩的直径。浆液上升的高度与软弱层的厚度、强度、土的可灌性、注浆压力、流量等因素有关。在可灌性较好的土层中,浆液在土层中容易扩散,浆液压力较小,则沿桩土界面上升的高度较小;在可灌性较差的土层中,浆液不易扩散,浆液压力较大,上升高度也大;软弱层的厚度越大,浆液流动所受到的阻力就越小,上升高度相应也大。图 1~3 为某工程压浆后进行基坑开挖得到的不同深度桩截面的变化情况,桩长 24 m。离地面 12 m 处(离注浆点 9.5 m),桩的半径普遍增大大约 5 cm,少部分达 10 cm;离地面 9 m 处, (离注浆点 12.5 m) 桩的半径普遍增大大约 2~3 cm;离地面 6 m 处(离注浆点 15.5 m) 桩的半径增大大约 0.5 cm。



图 1 地面下-6 m 桩截面图
Fig. 1 Cross-section in a pile at -6 m



图 2 地面下-9 m 桩截面图
Fig. 2 Cross-section in a pile at -9 m



图 3 地面下-12 m 桩截面图
Fig. 3 Cross-section in a pile at -12 m

土体受到压力作用后,孔隙水压力增大,压浆完成后,随着孔隙水压力的消散,桩周土体因压密而强度提高。泥皮在浆液的强烈挤压甚至破坏作用下,产生强制固结,强度大幅提高,形成一个薄硬层,由于软弱面有 2 个,薄硬层既可能存在于外侧,也可能存在于内侧,形成一个夹层,见图 4 和图 5。



图 4 薄硬层(在外侧)
Fig. 4 The thin hard layer (outside)



图 5 薄硬层(在内侧)
Fig. 5 The thin hard layer (inside)

P. A. Thompson^[4] 所介绍的 8 根试验桩在载荷试验后,进行了开挖测量。对于采用相同钻进工艺的 1~4 号桩,桩端压浆后(1 号桩),桩径比未压浆桩增大 1.7%;桩端桩侧压浆后,(3 号桩,4 号桩和 6 号桩桩径比未压浆桩分别增大 2.3%~2.6% 和 4.1%。

当注浆压力较高,浆液在对土体产生挤压的同时,还会克服土体阻力,产生劈裂效应,浆液在土中形成网状结石,对土体起到加筋作用。图6为某大厦压浆后的桩土界面形状,从中可观察到由劈裂产生的浆脉,但数量不多,且很零散。



(a)



(b)

图6 劈裂产生的浆脉图

Fig. 6 Diffusion area of grout

浆液在软弱层中的运动可归纳为:软弱面劈裂—浆液上升—挤压—再劈裂—再上升—再挤压的过程。孔壁在扩张过程中,会引起桩周土超孔隙水压力的上升。注浆施工结束后,超孔隙水压力随时间而逐渐消散,桩周土体中的有效水平应力增长,土的抗剪强度增大。压浆会破坏泥皮,改变桩土间的接触条件,使桩土间的摩擦角增大。

桩侧摩阻力用有效应力法可表示为

$$q_{su} = \sigma'_v k_0 \tan \delta = \sigma'_h \tan \delta \quad (1)$$

式中 σ'_v 为平均竖向有效应力; δ 为桩土间外摩擦角,可取 φ' ; k_0 为静止土压力系数; σ'_h 为平均侧向有效应力。

假定压浆一段时间后,超孔隙水压力已经消散,桩周土完成固结,则桩侧摩阻力增量可表示为

$$\Delta q_{su} = \Delta \sigma'_h \tan \delta \quad (2)$$

式中 $\Delta \sigma'_h$ 为桩侧平均侧向有效应力增量。

由式(2),侧向有效应力和桩土间外摩擦角的

增大可引起桩侧摩阻力的提高。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

苏一通大桥为取得桩的可靠的工艺参数和设计参数^[5,6],进行了4期共计14根试桩自平衡静载试验。试验方案有三类,即:(1)先测试,后压浆,再测试;(2)先压浆,后测试;(3)直接测试。详见表1。

地层概况:自上而下分别为:②层亚黏土;③层淤泥质亚黏土;④层亚黏土;上部④-1层亚黏土,软塑;下部④-2层亚黏土夹粉砂或与粉砂互层;④-3粉砂层;⑤-2-1层亚黏土;⑤-2层粉细砂;⑦层粉细砂;⑧-1层中砂;⑧-2层细砂。

表1 静载荷试验试桩参数汇总表
Table 1 Parameters of load test piles

类型	编号	直径/m	桩长/m	测试方法
1期	S1	1.5	84	先测试,后压浆,再测试
	S2	1.5	69	先压浆,后测试
	S3	1.5	69	先测试,后压浆,再测试
	N3	1.8	76	先测试,后压浆,再测试
2期	SZ2	2.5	125	先压浆,后测试
	SZ3	2.5	106	先压浆,后测试
	SZ4	2.5	125	先测试,后压浆,再测试
3期	Z2	2.5	114	先压浆,后测试
	Z6	2.5	126	先压浆,后测试
	Z7	2.5	117	先压浆,后测试
4期	NII-1	1.2	58.9	直接测试
	NII-2	1.2	58.9	先压浆,后测试
	NII-3	1.5	63.6	先压浆,后测试
	NII-4	1.5	63.6	直接测试

3.2 试验装置与试验结果及分析

3.2.1 自平衡静载荷试验原理

静载试验采用自平衡试桩法。该法是利用预埋桩身的荷载箱进行静载荷试验。试验时,通过地面高压油管对荷载箱内腔施加压力,箱顶与箱底被推开,分别产生向上与向下的位移,从而调动桩周土的侧阻力与端阻力,直至破坏,其测试原理见图7。将桩侧土摩阻力与桩端土阻力以一定方式迭加而得到单桩抗压极限承载力。由于利用所测桩自身的反力来平衡加载力,省去了传统静压试验方法中庞大笨重的加载装置,显著提高了测试技术的效率和精度^[7,8]。

加载采用慢速维持法,按土层界面在各试桩的桩身布置钢筋应力计,每个截面对称布置3~4个钢筋应力计。

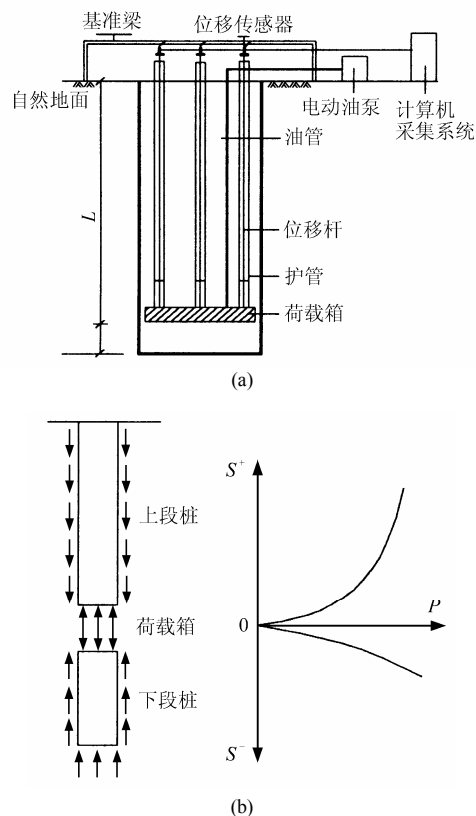


图 7 静载试验测试原理图

Fig. 7 Mechanism figures of self-balanced load test

3.2.2 压浆前后摩阻力对比

自平衡测试中,荷载箱对上段桩施加一向上的荷载,使上段桩产生向上的位移,而桩周土产生向下的侧阻力(负摩阻力);荷载箱对下段桩施加一向下的荷载,使下段桩受力后产生向下的位移,使下段桩的桩周土产生向上的侧阻力,桩端产生向上的端阻力,见图 7。为比较压浆前后桩的承载特性,对上段桩,取平均摩阻力与平均桩土位移的关系进行分析;对下段桩,结合桩身埋设的钢筋计的测试结果,得出桩侧摩阻力与平均位移关系。各试桩的摩阻力与桩土位移的关系见图 8~11。

压浆前,侧阻力占总极限荷载的 85.77 %~93.04 %,压浆后侧阻力比例有所下降,为 77.86 %~65.33 %,但仍属端承摩擦型桩。由于侧阻力的变化对桩承载力的影响更明显。表 2 列出了 9 根桩压浆前后平均摩阻力对比及侧阻力增量对桩极限承载力的贡献,其中 S1 桩侧阻力增量比例最小,占 56 %;SZ4 桩最大,占 88 %。

3.2.3 检测结果

为对压浆情况进行试验,特进行了标贯和 CT 扫描检测。压浆后,桩周土的强度、变形模量及桩土间的接触条件均发生了较大变化,导致侧阻力的提高。图 12 为苏一通大桥 S2 桩压浆前后桩周土标

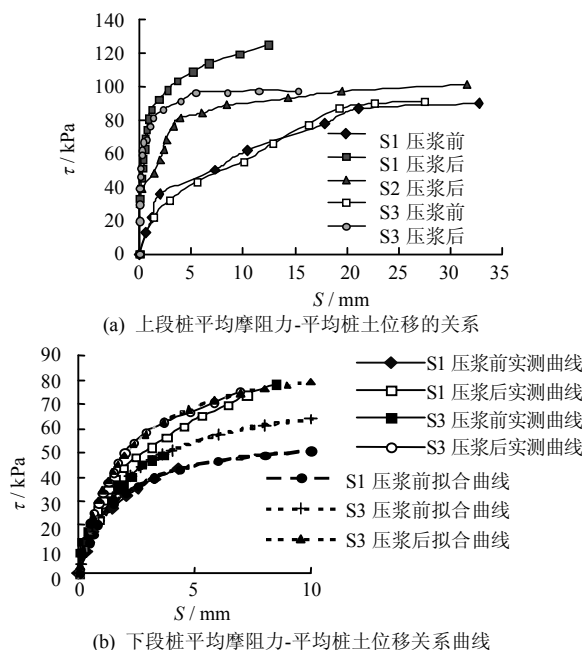


图 8 S1~S3 平均摩阻力与平均桩土位移的关系

Fig. 8 The relationship between average friction and relative displacement of pile S1—S3

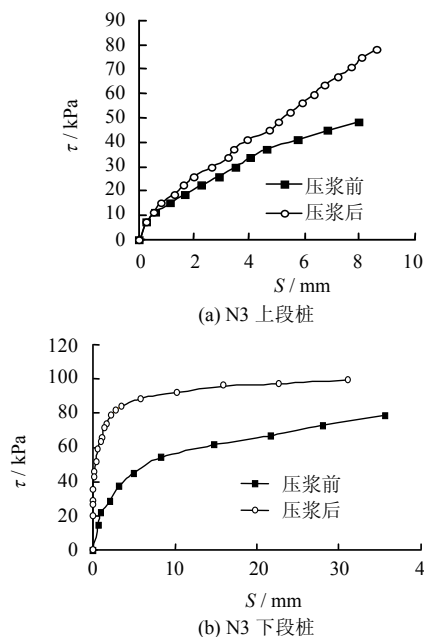


图 9 N3 桩平均摩阻力-平均桩土位移关系曲线

Fig. 9 The relationship between average friction and relative displacement of pile N3

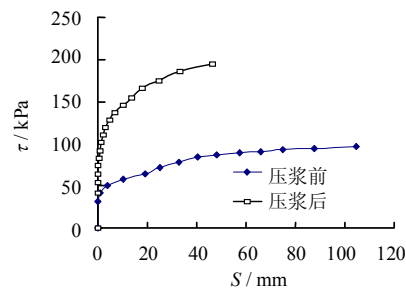
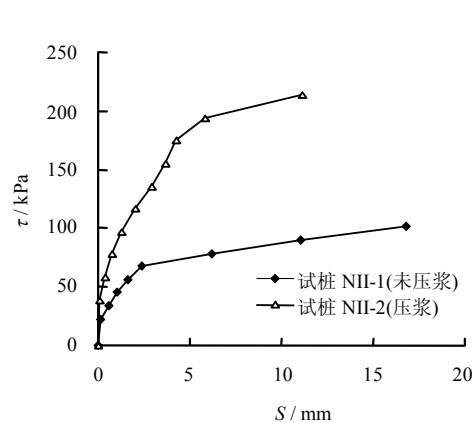
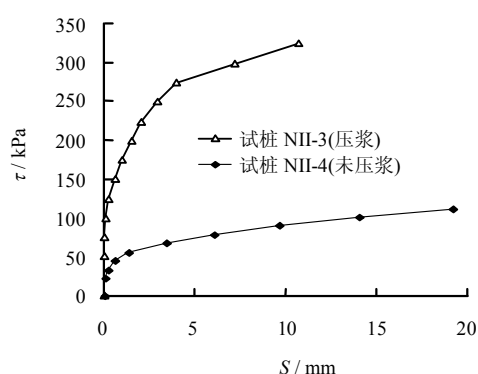


图 10 SZ4 试桩压浆前后下段桩摩阻力-桩土位移关系曲线

Fig. 10 The relationship between average friction and relative displacement of pile SZ4



(a) NII-1, NII-2



(b) NII-3, NII-4

图 11 NII4 根试桩压浆前后摩擦力与桩土位移关系曲线

Fig. 11 The relationship between average friction and relative displacement of pile NII4

表 2 侧阻力增量对承载力的影响
Table 2 The influence of friction increment on the bearing capacities

桩号	极限承载力 提高幅度/%	总侧阻 提高幅度/%	侧阻力增量占 总增量比例/%
S1	56	12.39	56
S2	75	38.9	71
S3	100	52.87	76
N3	68	41.25	81
SZ4	69	33.98	88
NII-1(NII-2)	48	29.56	60
NII-4(NII-3)	61	36.76	69

贯值变化图, 在做标贯试验的 12 m 范围内, 标贯值最大提高幅度为 67 %, 最小提高幅度为 18 %。苏一通 SZ2, SZ3 桩的 CT 扫描结果也显示桩周土在一定范围内得到加固, 在图 13 中, 桩的外围存在一个土的性质得到改善的加固区, 分布范围较大。说明压浆过程中, 浆液具有一定的上升高度, 并对桩周土进行加固。

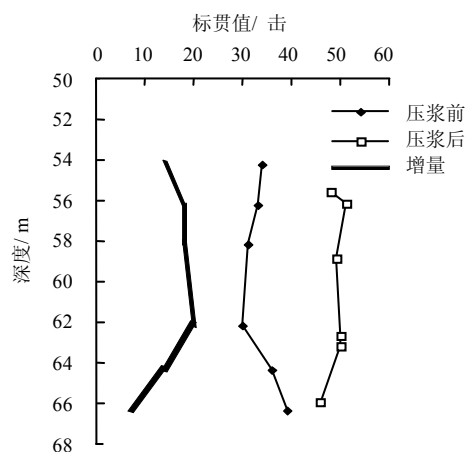
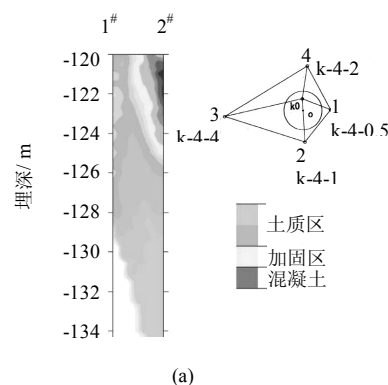
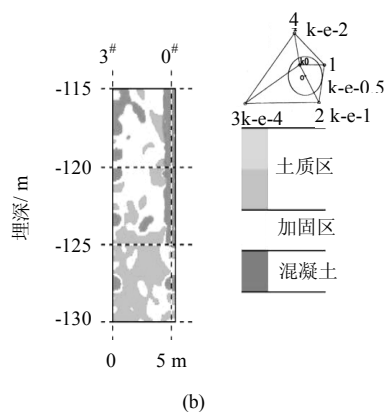


图 12 S2 桩压浆前后桩周土标贯值变化图

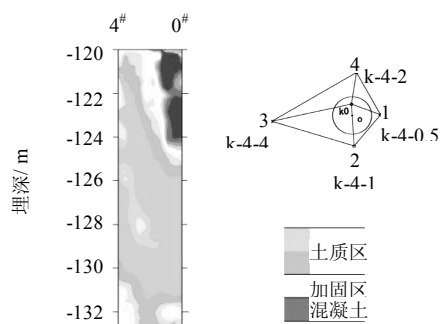
Fig. 12 Contrast figure of SPT values of soils before and after grouting



(a)



(b)



(c)

图 13 CT 扫描图

Fig. 13 The scanning figures of CT

4 结 论

(1) 桩端压浆可大幅提高超长大直径桩侧阻力, 且桩侧阻力的提高成为桩承载力提高的主要原因。

(2) 根据一超长大直径桩工程实例的静载荷试验、标贯试验及 CT 检测结果, 压浆后, 在桩端以上一定范围内浆液沿桩身上返, 桩周土强度提高, 桩侧阻力提高 12.39%~52.87%, 侧阻力增量占总增量比例为 56%~88%。

(3) 压浆使桩周土体中的有效水平应力增长, 桩土间的接触条件改变, 从而使桩侧摩阻力提高。

参 考 文 献

- [1] Bruce D A. Enhancing the performance of large diameter piles by grouting[J]. **Grouting Engineering**, 1985, (4): 9—15.
- [2] Bruce D A. Enhancing the performance of large diameter piles by grouting[J]. **Grouting Engineering**, 1985, (5): 11—19.
- [3] Fleming W G K. The Improvement of Pile Performance by Base Grouting[A]. **Proc. Instn. Civ. Engrs**[C]. [s.l.]: [s.n.], 1993, (8): 88—93.
- [4] Stocker M F. The influence of post grouting on the load bearing capacity of bored piles[A]. **Proc. 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**[C]. [s.l.]: [s.n.], 1983.
- [5] 黄生根, 龚维明. 苏通大桥一期超长大直径试桩承载特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, (19): 3 370—3 375.
HUANG Sheng-gen, GONG Wei-ming. Analysis of bearing behavior of 1-stage super long-large diameter testing piles in Sutong bridge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, (19): 3 370—3 375.
- [6] 黄生根, 张晓炜, 曹辉. 后压浆钻孔灌注桩的荷载传递机理研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 251—254.
HUANG Sheng-gen, ZHANG Xiao-wei, CAO Hui. Mechanism study on bored cast-in-place piles with post-grouting technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(2): 251—254.
- [7] 龚维明, 戴国亮, 蒋永生, 等. 桩自平衡测试理论与实践[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(1): 82—88.
GONG Wei-ming, DAI Guo-liang, JIANG Yong-sheng, et al. The theory and practice of self-balanced test[J]. **The Journal of Architecture Structure**, 2002, 23(1): 82—88.
- [8] 黄生根, 王辉, 张晓炜. 超长大直径桥桩的压浆效果研究[J]. 公路交通科技, 2004, (5): 70—73.
HUANG Sheng-gen, WANG Hui, ZHANG Xiao-wei. Study on the grouting effects of super long large diameter bridge piles[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2004, 21(5): 70—73.

首届国际地下工程服务寿命专题讨论会通知 (第 1 号)

由于经济发展和城市化进程的加快, 许多发展中国家对大规模、高质量地下工程的需求日益增多, 因此在满足地下结构安全性和适用性的条件下, 如何有效提高结构的耐久性和可维护性已成为当前的研究热点。在结构工程设计准则中, 耐久性和可维护性在结构全寿命设计理念的发展过程中占有重要的地位, 国际上对此已进行了大量的研究, 欧洲根据这一设计原则已经建成了相当数量的工程。

本会议由同济大学和代尔福特理工大学发起, 将邀请国内外知名学者和专家就相关议题作专题报告, 介绍和讨论地下工程全寿命过程相关的设计理论和最新技术, 分享卓有成效的工程经验。

本次会议特别面向大学、规划设计部门、研究所、建设和施工企业、咨询机构、政府管理职能部门的人员, 以及关心地下工程和混凝土工程全寿命和使用性能的所有人员。

主要议题: 地下工程的全寿命预测规模、地下结构的耐久性能研究、地下结构的检测技术与监控方法、地下结构的维护理论及方法、地下结构的安全性、适用性和耐久性设计、全寿命设计和成本控制、高性能材料及其工程应用。

会议时间: 2006 年 10 月 19~20 日

会议地点: 上海同济大学

会议语言: 英语

会议注册和论文征集情况见 <http://geo-structure.tongji.edu.cn/>。

秘书处及联系方式: 联系人 柳献或刘涛

地址: 同济大学地下建筑与工程系, 上海市四平路 1239 号 123 信箱

邮编: 200092

电话: +86-21-65980234

传真: +86-21-65984573

E-mail: xian.liu@tongji.edu.cn, liutao.tongji@gmail.com