

文章编号: 1000-7598-(2008)11-3104-05

邻近地铁车站基坑开挖位移传递规律数值模拟

李志高¹, 曾远², 刘国彬³

(1. 福建工程学院 土木工程系, 福州 350007; 2. 中交第三航务工程勘察设计院, 上海 200032; 3. 同济大学 地下建筑工程系, 上海 200092)

摘要: 上海地铁8号线人民广场站是个平行换乘车站, 车站基坑紧邻地铁1号线人民广场站开挖。监测数据说明, 随着基坑开挖, 地铁车站背向基坑倾斜。通过有限差分法数值模拟, 得到了邻近大刚度地铁车站的基坑开挖位移场的位移传递规律, 并对其规律进行了分析, 结果表明, 大刚度地铁车站的存在对基坑开挖的位移场具有很大的影响: (1) 对基坑变形的遮拦作用, 从而减小了支护结构的变形; (2) 隔断了坑周土层的位移传递路径, 使得土体位移场发生变化, 促使地下建筑物背向基坑方向倾斜。

关键词: 地铁车站; 深基坑; 背向倾斜

中图分类号: U 25

文献标识码: A

Numerical simulation of displacement transfer law of excavation adjacent metro station

LI Zhi-gao¹, ZENG Yuan², LIU Guo-bin³

(1. Department of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350007, China; 2. The Third Harbor Engineering Investigation & Design Institute, Shanghai 200032, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: People Square Station of Shanghai Metro No.8 is a parallel transfer station, of which excavation is adjacent to People Square Station of Metro No.1. Monitoring data indicate that the constructed station inclines reversely during adjacent excavation. Through FDM numerical simulation, displacement transfer behavior of excavation is analyzed; and displacement transfer law of excavation adjacent large stiffness underground building, is analyzed. The results show that a large stiffness underground building makes a great difference of displacement that: (1) block effect, which results to minish the displacement of retaining structure; (2) cutting off the path of soil displacement transfer, which changes soil's displacement and brings on building's inclination reverse to pit.

Key words: metro station; deep excavation; reverse inclination

1 引言

基坑开挖引起周围地层移动^[1-3]是由于开挖卸荷引起坑底土体产生以向上为主的位移, 即坑底土体隆起, 同时也引起围护墙在两侧水土压力差的作用而产生水平向位移和墙外侧土体的位移。随着开挖深度增加, 基坑内外的土面高差不断增大, 当开挖到一定深度时基坑内外土面高差所形成的加载和地面各种超载的作用, 会使地墙外侧土体产生向基坑内移动, 并引起比较明显的地面沉降, 尤其基坑邻近建筑物开挖时, 如果变形较大, 会导致建筑物向基坑倾斜, 危及建筑物的安全。基坑开挖引起的

周围地层变形, 从基坑周边开始逐渐往外传递, 存在一个位移传递路径以及需要一个过程^[4-5], 但当基坑邻近大刚度地下构筑物(如地铁车站)时, 由于这类建筑物刚度大、埋深大, 基坑开挖引起的坑周土层变形的位移场传递也表现出与一般基坑位移场不同之处。上海轨道交通8号线人民广场站就遇到这样问题。在车站基坑施工期间, 监测数据显示, 邻近的已建地铁1号线车站随着基坑开挖的进行, 车站显示背向基坑方向倾斜, 而且随着挖深的增大, 这种背向倾斜越来越显著, 这与已有的认识不同。基于此, 本文先从实测数据出发得到一些规律, 然后再通过有限元数值计算, 通过模拟有、没

收稿日期: 2007-01-19

基金项目: 福建省青年人才基金项目(No.2007F3008)。

作者简介: 李志高, 男, 1977年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程、地下结构等方面的研究。E-mail: hellolzg@yahoo.com.cn

有地下构筑物时基坑周围位移场的差异, 研究其位移场传递机制。

2 工程概况

上海轨道交通 8 号线人民广场车站为地下 2 层 3 柱 4 跨岛式车站, 外围长度为 329.5 m, 标准段内净宽 26.48 m, 端头井深 15 m, 标准段深 13.2 m。车站主体西侧紧贴已建运营 1 号线人民广场站布置, 与地铁 1 号线之间采取同站厅平行换乘。图 1 为车站与基坑的平面布置示意图, 图 2 为 8 号线人民广场站与 1 号线人民广场站基坑的立面相对位置图。

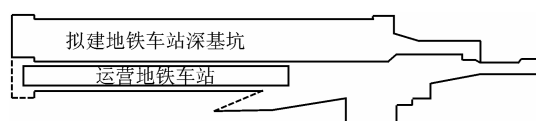


图 1 基坑与已建运营车站平面布置示意图

Fig.1 Plane of pit and constructed running station

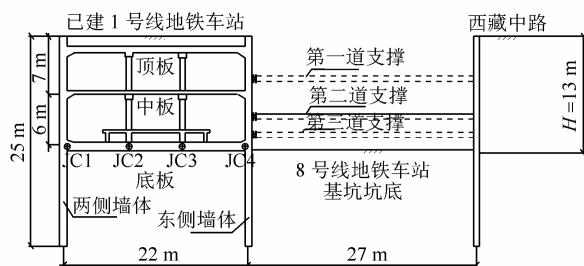


图 2 人民广场站新老车站立面相对位置图

Fig.2 Section plane of new & old station

3 已建车站底板变形实测分析

为了减小基坑开挖对周围环境的影响, 本工程采用“逆作法”施工, 即基坑开挖→顶板浇筑→中板挖土支撑→中板浇筑→底板挖土支撑→底板浇筑。

本文以 8 号基坑 21~22 轴施工为例, 分析各施工阶段已建地铁 1 号线人民广场站车站结构底板变形状况见图 3。2003 年 5 月 3 日顶板浇筑, 7 月 1~8 日挖②, ③层土, 7 月 9~14 日支撑层①; 7 月 22 日中板浇筑。9 月 2~6 日挖④层土, 9 月 15 日支撑层②, 9 月 20 日挖⑤层土, 9 月 22 日支撑层③, 10 月 8 日底板浇筑。JC1—JC4 分别从东到西: 上行隧道, 靠上行隧道立柱, 靠下行隧道立柱、下行隧道监测点假定初始状态底板位置为 0.00 m。由图 3 可知, (1) 顶板施工期间 1 号车站结构整体抬升, 至 2003 年 5 月 3 日顶板浇筑, 1 号上行隧道抬升了 1.3 mm, 下行隧道抬升了 0.4 mm, 开始呈

现背向基坑倾斜的趋势; (2) 顶板浇筑后的放置阶段, 1 号车站结构表现为整体下降, 与 5 月 3 日数据比较, 至 2003 年 7 月 1 日, 1 号车站结构平均下降 0.8 mm; (3) 中板挖土施工期间, 1 号车站东侧结构表现为抬升, 西侧结构表现为下降。至中板浇筑, 1 号上行隧道抬升了 1.6 mm, 下行隧道下降了 -2.3 mm。沉降差异为 3.9 mm; 背向基坑倾斜趋势更为明显; (4) 底板挖土施工期间, 施工对 1 号车站结构变形影响更大。与中板浇筑后变形比较, 底板施工期间, 1 号上行隧道抬升了 2.6 mm, 下行隧道下降了 -1.2 mm。背向基坑倾斜趋势加大; (5) 至底板浇筑, 1 号车站上行隧道累计抬升了 4.2 mm, 下行隧道累计下降了 -3.3 mm。

从以上的实测数据分析可知, 邻近运营地铁车站的基坑开挖过程中地铁车站呈整体背向基坑倾斜, 为什么会出现这种情况? 下面采用弹塑性有限差分数值计算方法分析计算基坑开挖对周围环境产生的影响。

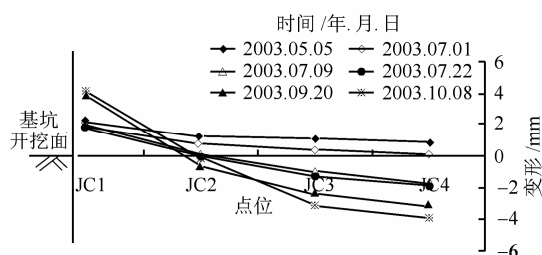


图 3 已建车站底板变形横剖面图

Fig.3 Soleplate displacement of constructed station

4 数值模拟分析

以下主要讨论有邻近大刚度地下构筑物的存在时基坑开挖过程中周边土体应力场、位移场变化, 并与没有地下构筑物时的位移场、应力场做比较, 通过数值计算分析来揭示基坑变形的机制和作用, 从中寻找邻近大刚度地下构筑物基坑施工的位移场分布特性。对于开挖及支护过程, 采用施工荷载步的方法分步开挖、分步支护进行分步加卸载。为真实模拟实际基坑开挖的影响, 在地铁车站、基坑围护结构与周围土体之间设置了接触面单元。

4.1 计算模型

本节采用二维有限差分程序 FLAC^{2D}[6-7], 计算开挖及支护以及地下建筑物与基坑之间不同距离对基坑周围位移场的影响(图 4)。对于地铁车站及地下连续墙采用二维梁单元, 支撑结构采用一维杆单元, 土体采用 4 节点平面单元。地下连续墙与地铁车站周围设置接触单元。采用分步开挖、分步支护

来模拟基坑开挖施工的加卸载过程；对于边界约束采用左右两侧水平方向约束，下部边界设竖向约束，上部边界为自由边界。FLAC 网格图见图 5，计算范围内基坑周围土层分为 6 层，各层土的特性参数见表 1。对于地铁车站结构和地下连续墙材料，由于其弹性模量较土体大得多，因此可按弹性受力状况来考虑，在有限差分数值计算中对结构材料采用弹性梁单元模拟，对土体采用 Mohr-Coulomb 非线性弹塑性模型模拟，不考虑时间的影响。支撑参数的选取可按以下参数取值：弹性模量 $E=2.0\times10^5$ MPa，截面积 $A=218.7\times10^{-4}$ m²，截面惯性矩 $I=6.60\times10^{-4}$ m⁴，预应力 $P=200$ kN。地下连续墙参数：弹性模量 $E=3.0\times10^4$ MPa，厚度 $D=800$ mm。接触面的参数由经验选取。计算中取剪切刚度 $K_s=100$ kPa/m， $K_n=100$ kPa/m，接触面单元最大容许嵌入量 $\mu=0.02$ mm。

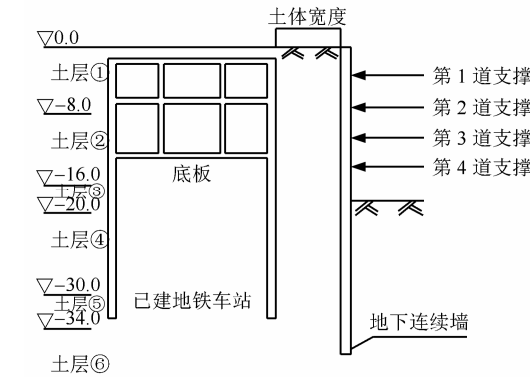


图 4 地下建筑物与基坑开挖示意图 (单位: m)
Fig.4 Plane of pit and subway station (unit: m)

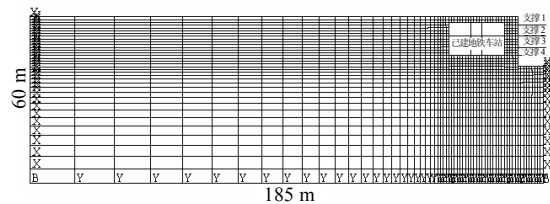


图 5 FLAC 网格图
Fig.5 Mesh of FLAC

表 1 物理力学参数表

Table 1 Physico-mechanical parameters of model

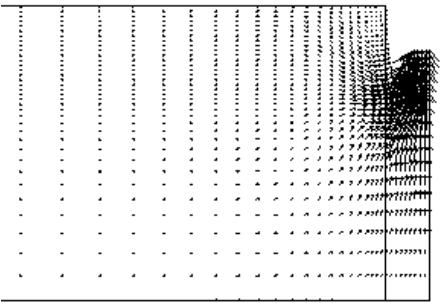
土层	重度 /(kg·m ⁻³)	体积模量 /MPa	剪切模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
①	18.80	16.67	10.17	15	30
②	19.80	30.30	25.60	16	32
③	19.10	33.33	20.25	20	30
④	19.70	41.67	32.50	18	34
⑤	19.80	77.78	47.25	19	32
⑥	17.00	78.43	53.20	21	38

整个过程分为开挖和支护两个过程。长条形基坑平行地铁车站，可看作平面应变问题。土体破坏准则采用弹塑性摩尔-库仑破坏准则。在开挖前假设土体内部仅存在由重力产生的初始地应力，且土体初始变形已经完成，在开挖之前初始位移场全置为 0，这样开挖后土体位移场完全是由于开挖作用引起的变形。

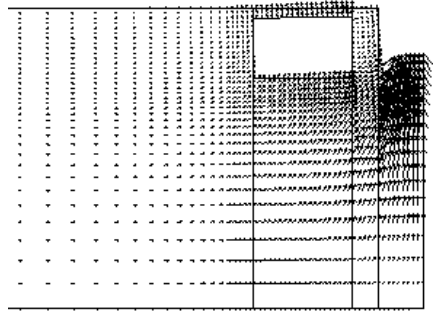
4.2 计算结果分析

4.2.1 地下构筑物的存在对基坑周围位移场的影响机制分析

通过 FLAC 数值模拟的位移场 (图 6) 可以看出，有、无地下构筑物情况下坑周土体的位移场出现很大的不同，从图 6 (a) 可知，无地下构筑物存在时坑周地面下沉，而有地下构筑物时构筑物与基坑之间的地面，有少许上抬，而且地下构筑物也背向基坑倾斜。由于图 6 的计算模型，所有参数都一样，工况也一致，唯一不同的地方就是图 6 (b) 有地下构筑物，而图 6 (a) 没有地下构筑物，所以出现这种情况，完全可以认为是由于地下构筑物的存在造成的。基坑开挖时，土体卸荷，打破原来的力的平衡，土体进行内力调整，围护结构发生侧移，基坑底部隆起，从而产生土体位移。支护结构变形产生的空间由墙后的土体补充。位移是逐渐传递有一个过程，从坑周开始，逐次向坑外传递，存在位移产生、发展、传递的过程。当土体位移传递



(a) 无地下结构物时



(b) 有地下结构物时

图 6 基坑位移场

Fig.6 Displacement field of excavation

到地下构筑物时,由于构筑物刚度较大、宽度较宽,土体位移的连续传递就被中断了,但构筑物下部的土体位移传递仍然继续进行。土体在位移传递的过程中,由于力的作用,必然对地下结构物产生影响,而地下结构物也同时对邻近的土体产生同样的影响,这种影响相互作用随着基坑开挖深度的加大累积起来,累积的结果是地下结构物背向基坑倾斜,而基坑开挖卸荷导致的坑底土体回弹变形又促进了这种倾斜,所以距离基坑近的地方产生向上的位移。而由于地下建筑物与周边土体的剪切力作用,也带动了旁边的土体向上位移。

另外,还有一个因素不容忽视,即由于地下建筑物的遮拦作用,围护结构变形减小,围护结构后面空出的空间就小,需要土补充的量也就小,这样,也有利于土体的向上变形。总之,地下构筑物与围护结构之间土体的向上变形,这是一个由于基坑开挖导致土体位移传递、地下构筑物的存在中断这种传递以及构筑物的遮拦效应减小围护结构变形,这些因素综合作用而导致的结果。

4.2.2 地下构筑物对基坑围护结构变形的影响

图 7 为支护结构在不同工况、不同土体宽度下的变形图(图中曲线的 6 m 等分别表示地下构筑物与基坑的距离为 6 m 等, wu 表示无地下建筑物时情况,其他类似)。从图中可以看出,由于地下建筑物的存在,对基坑围护结构水平变形影响很大。尤其是对支护结构的最大变形值影响很大,且支护结构出现最大变形值的位置下移大约 1 m 左右。地下建筑物与基坑支护结构距离越小,地下建筑物的遮拦效应越明显,围护结构产生的水平位移越小。

4.2.3 不同土体宽度对地铁车站底板的影响

从图 8 (a) 可以看出,基坑离车站越近,车站受基坑开挖影响越大,车站底板基本上整体抬升,靠近基坑的大,远离基坑的小。之所以会出现整体抬升,是由于受基坑开挖影响,土体变形从基坑向外扩展,进行土体的位移传递,位移传递的结果,导致车站背向基坑倾斜。由于车站地连墙与车站成一体,连接刚度较大,形成以远离基坑那边的地连墙底部为转动支点,因此,呈现出车站整体上抬的现象。而且,随着基坑开挖深度的增加,这种上抬效果越来越明显(图 8 (b)),但在理论上,这里应该存在一个临界深度。在基坑开挖到临界深度之前地下构筑物背向基坑倾斜,超过临界深度后构筑物向基坑倾斜。

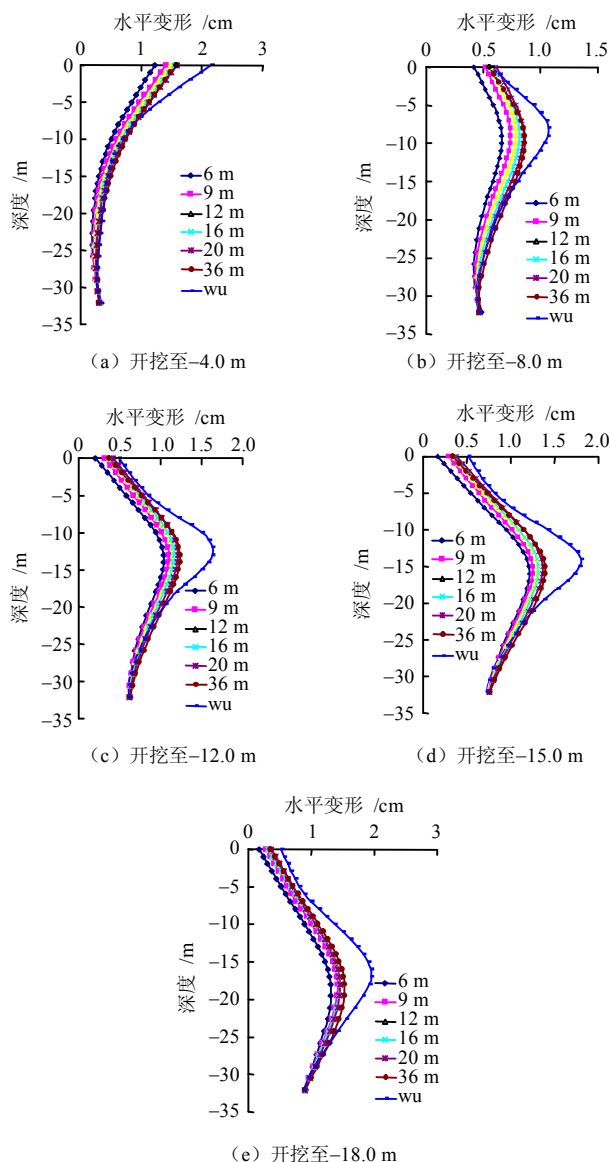


图 7 支护结构变形图

Fig.7 Horizontal displacements of retaining structure

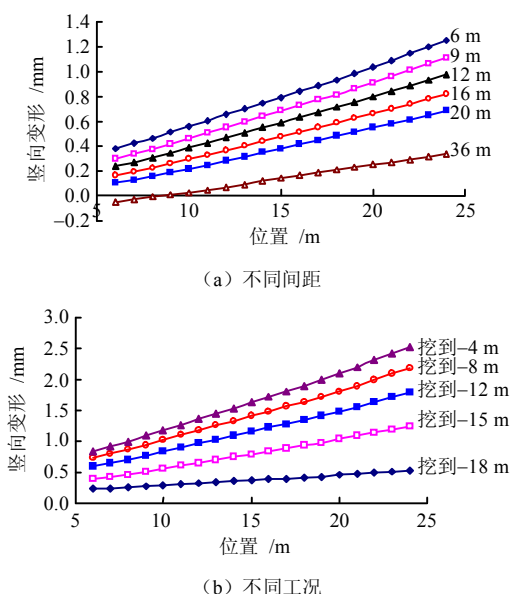


图 8 车站底板变形图

Fig.8 Vertical displacements of station's soleplate

5 结 论

监测数据说明,随着基坑开挖,地铁车站背向基坑倾斜。数值模拟说明,由于地下构筑物的存在,隔断了土体位移的传递路径,使得土体位移场发生变化,促使地下建筑物背向基坑方向倾斜。而地下建筑物的背向倾斜,导致车站底板上抬。

有、无地下建筑物存在对基坑开挖的位移场具有很大的影响,当基坑邻近地下构筑物开挖时,在相同的情况下基坑支护结构的水平变形明显减小,而地下建筑物后面的土体的水平变形和竖直变形也明显减小,说明地下构筑物的存在对基坑变形有明显的遮拦作用,而且这种遮拦作用不仅对建筑物后面土体位移场效果明显,对建筑物与基坑支护之间的土体位移场也有显著的作用。

参 考 文 献

- [1] 刘建航,侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [2] 刘熙媛,闫澍旺,窦远明,等. 模拟基坑开挖过程的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 97—100.
LIU Xi-yuan, YAN Shu-wang, DOU Yuan-ming, et al. Experimental studies of simulated excavation process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(1): 97—100.
- [3] 何世秀,韩高升,庄心善,等. 基坑开挖卸荷土体变形的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 17—20.
HE Shi-xiu, HAN Gao-sheng, ZHUANG Xin-shan, et al. Experimental researches on unloading deformation of clay in excavation of foundation pit[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(1): 17—20.
- [4] 刘继国,曾亚武. FLAC3D 在深基坑开挖与支护数值模拟中的应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 505—508.
LIU Ji-guo, ZENG Ya-wu. Application of FLAC3D to simulation of foundation excavation and support[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(3): 505—508.
- [5] 曾远,李志高,王毅斌. 基坑开挖对邻近地铁车站影响因素研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 642—645.
ZENG Yuan, LI Zhi-gao, WANG Yi-bin. Research on influence factors of deep excavation adjacent to subway station[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2005, 1(4): 642—645.
- [6] Itasca Consulting Group. FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) User Manuals, Version 5.0[Z]. Minneapolis, Minnesota: [s. n.], 2005.
- [7] 刘波,韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

欢迎订阅 2009 年《岩土力学》

《岩土力学》是全国中文核心期刊、美国《工程索引》(EI) 收录期刊,同时也是中国科学引文数据库、中国科技论文统计源期刊,且为《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》、《万方数据库》、重庆维普全文收录,欢迎读者通过各期刊网查阅本刊内容。本刊主要报道岩土力学与工程研究和工程获得的新理论、新成果、新方法,主要内容有:岩土力学与岩土工程研究、典型工程实录、测试技术与测试方法、学术讨论、学术与工程动态、学术讲座等。

本刊为月刊,大 16 开本,每期页码为 280 页,每月 10 日出版,国内、外公开发行人。每期定价 28 元,全年定价 336 元。本刊的邮发代号: 38-383,同时自办发行,国外订户可通过中国国际图书贸易总公司订阅。编辑部电话: 027-87198484。

直接在本编辑部订阅,付款方式有两种:

(1) 邮局汇款: 430071 湖北武汉市小洪山中国科学院武汉岩土力学研究所,收款人:《岩土力学》编辑部,附言: 2008 年《岩土力学》刊款。并将订阅回执(或复印件)发 E-mail 至 ytlx@whrsm.ac.cn,或邮寄到编辑部。

(2) 银行汇款: 帐户名称: 中国科学院武汉岩土力学研究所,开户行: 中国建设银行武汉市科学院支行,银行账号: 4200 1237 0530 5000 0260,注明: 2009 年《岩土力学》刊款。

收到刊款后,编辑部将根据订户提供的通讯地址及时寄给发票,并按时寄刊。请订户务必写清邮政编码、详细的通讯地址,联系电话及 E-mail 地址。