

上海某小区高层住宅地基隔振问题实例浅析

陈龙珠

(上海交通大学船建学院土木系, 上海 200240)

摘要: 抑制环境振动的影响, 是一种特殊的地基处理范畴。本文较为系统地介绍了上海深厚软土地某小区高层住宅发生环境振动问题的起因、地基隔振试验设计方案及其效果实测数据, 初步分析了地基隔振试验方案未达到预期效果的主要原因, 并对这类问题的工程设计论证方法提出了建议。

关键词: 高层住宅; 环境振动; 地基隔振; 实例分析

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)04-0351-06

Case study on ground vibration isolation for residential buildings in Shanghai

CHEN Long-zhu

(Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To reduce the influence of environmental ground vibration is a special ground treatment technology. The cause of the environmental vibration problem of high-rise residential buildings in a residential area on the deep soft soil site in Shanghai, the design scheme of the ground vibration isolation test and the measured results of the vibration reduction effect are introduced in this article. The main reasons for the failure of the ground vibration isolation test scheme to achieve the expected vibration reduction of the high-rise residential buildings are briefly analyzed, and the design demonstration method for such problems is proposed at the end.

Key words: high rise residential buildings; environmental vibration; ground vibration isolation; case study

0 引言

地基处理, 大多是指采用一定的技术方法, 提高地基的变形模量和抗剪强度, 以降低地基的沉降或侧向位移和提高地基的承载力。随着环境工程的兴起和发展, 地基处理的范畴已处于不断的扩展之中, 如地基振动抑制、化学污染土修复等。为拦截和降低振动的影响范围和影响程度, 对传播环境振动的地基进行适当处置, 如开挖空沟、设置刚性或柔性隔振排桩等, 是与传统地基处理截然不同的领域, 未系统学习并实践过相关理论与方法的工程科技人员, 从事这方面的设计会容易出现事与愿违的问题。处理环境振动问题, 不同于抗震设计, 后者已形成较为成熟的技术标准和设计软件, 而且工程科技人员设计建造的建筑, 很快经受设防地震实际

考验的概率也较低, 设计中存在的问题不会马上暴露出来; 对环境振动的处置, 一旦设计方案付诸实施完成之后, 便将接受实际减振效果的检验, 因而更应引起那些有能力获得这类工程合同却对此领域不够熟悉的工程科技人员的重视。本文根据手头积累的上海某小区高层住宅地基隔振实例资料^[1-3], 尝试着谈谈这方面的问题, 以抛砖引玉。

1 高层住宅的环境振动问题

如图1所示, 上海青浦区某住宅小区北邻华志路, 其他3侧由河道所围, 小区的东、北部区域建有8幢14层的高层住宅, 其余为3层别墅。该小区工程场地属滨海平原地貌, 岩土勘探孔地面标高在3.72~4.32 m之间, 建成后小区室外地坪高程为

4.3 m。土层分布及其常用物理力学指标如表 1，为深厚饱和软土地基。



图1 上海青浦区某住宅小区平面示意图(部分)

Fig. 1 Part Plan of a residential area in Qingpu of Shanghai

该小区住宅建筑抗震设防分类为丙类，设防烈度为 7 度。为有助于满足抗扭设计验算要求，8 幢高层住宅建筑，被结构分缝而成东、西 2 个相对独立的单元，每个单元为两梯三户或四户两类布置。根据设计资料，房屋建筑平面近似为矩形，对 1 号和 2 号楼等两梯四户布置的高层住宅(图 2)，东西向长 62.00 m、南北向宽 12.90 m；对 8 号楼等两梯三户布置的，东西向长 52.75 m、南北向宽 14.65 m。房屋总高约 41.50 m，室内外高差 0.90 m；地下 1 层层高 2.8 m，为自行车停车库；地上 14 层住宅，层

高 2.9 m。该住宅楼为现浇钢筋混凝土剪力墙结构，混凝土强度等级 C30，钢筋主要采用 HRB 400。采用桩筏基础，筏板厚 400 mm，混凝土强度 C30， $\Phi 400$ PHC 预应力高强混凝土预制管桩有效桩长 34 m，桩端持力层为 $\textcircled{2}_{2-1}$ 层。

高层住宅上的住户入住后，纷纷反映室内吊灯、洗衣机滚筒、容器中的水会持续晃动，集体向政府投诉担心住宅建筑安全。为查明振源和确定减振方法，该小区开发单位委托上海市建科院到现场进行地基和住宅建筑振动测试与分析。经多次测试和对该小区周围的振源进行调查比较分析，确认小区西北面、西南面距离 1.5~3.5 km 范围内各有众多的石材加工厂，其中有砂拉锯和圆盘锯等大型通用石材加工机械，其基础并未经过减振专业设计。现场调查和测试表明，大型石材加工机械的工作转速多为 87 rpm，即 1.45 Hz。

根据上海市建筑抗震设计规范，对 7 度的设防烈度，III类、IV类场地，其设计特征周期分别取为 0.65 s、0.90 s。场地特征周期与自振周期关系密切。在环境振动条件下，场地土承受的剪应变一般会比设防烈度地震下的要低，使得地基自振周期变短。因未查阅到该小区岩土勘察报告，无具体波速剖面资料来核定其场地类别，只好凭经验将地基自振周期取为 0.65~0.90 s，即地基自振频率处 1.11~1.54 Hz(平均值为 1.33 Hz)，与大型石材加工机械工作频率比较接近。这会使得深厚软土地基容易出现类共振现象，使得石材加工厂产生的地基振动向周围进行广泛的传播。

表 1 土层分布及主要物理力学性质一览表

Tab. 1 List of soil layer distribution and main physical and mechanical properties

层序	土层名称	层底深度/m	直剪固块(峰值)		平均比贯入阻力 p_s /MPa
			黏聚力 c /(kPa)	内摩擦角/ $^\circ$	
$\textcircled{1}_1$	填土	1.0~1.6	—	—	—
$\textcircled{2}$	黏土	2.5~3.0	22	16.5	0.55
$\textcircled{3}$	淤泥质粉质黏土	14.2~15.5	13	19.5	0.50
$\textcircled{6}$	黏土	16.8~17.4	45	17.0	2.59
$\textcircled{7}$	砂质粉土	21.3~23.0	5	31.0	4.89
$\textcircled{8}_{1-1}$	粉质黏土	24.5~25.0	12	22.0	1.48
$\textcircled{8}_{1-2}$	砂质粉土	>30.0	7	29.5	3.40
$\textcircled{8}_{1-3}$	粉质黏土	—	9	28.0	1.97
$\textcircled{8}_{2-1}$	砂质粉土	—	8	28.0	3.75
$\textcircled{8}_{2-2}$	砂质粉土	—	5	31.0	—

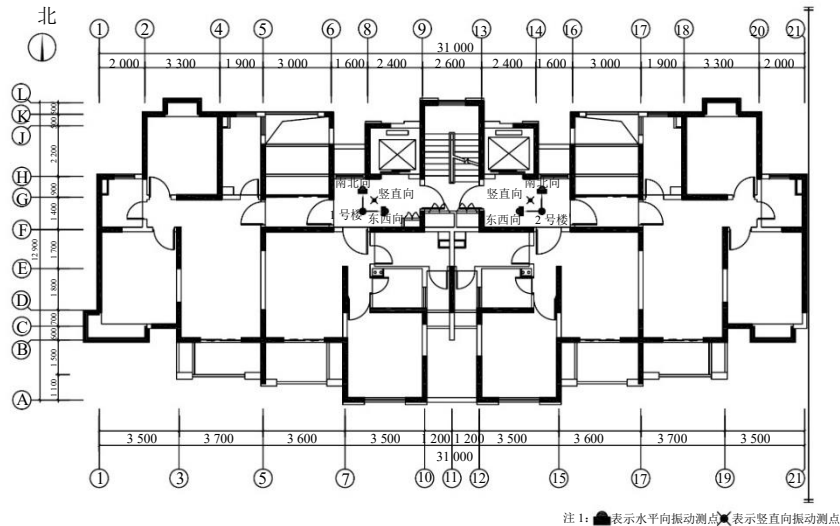


图2 1号、2号楼西单元楼层平面及振动测点布置示意图(单位: mm)

Fig. 2 Floor plan and vibration measuring points at West unit of Building 1 and 2 (Unit: mm)

对14层钢筋混凝土剪力墙结构的住宅建筑,取高度 $H=41.5\text{ m}$,宽度 $B=12.9\text{ m}$ 和 14.65 m ,根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011),其南北向水平自振周期由 $T_1=0.04+0.038H/\sqrt{B}$ 估算分别约为 0.712 s 和 0.685 s ,对应自振频率为 1.405 Hz 和 1.460 Hz ,与上述大型石材加工机械工作频率非常接近。因此,从附近石材加工厂传来的地基振动,容易使得这个小区的高层住宅建筑发生共振现象,而沿高度方向的结构振动放大效应,将进一步加大位于高楼层住户的振感程度。

现场测试表明,该小区高层住宅建筑振动主频约为 1.5 Hz ,其水平振动远大于竖向的,且沿高度方向的放大效应显著。以8号楼为例,室外地坪东西、南北向加速度峰值分别为 4.28 mm/s^2 、 5.02 mm/s^2 ,而其7层和14层楼板的对应值分别变为 10.65 mm/s^2 、 6.42 mm/s^2 和 16.54 mm/s^2 、 12.31 mm/s^2 ,该住宅振动是东西向强于南北向;对同时测试的2号楼,7层和14层楼板的对应值分别为 4.34 mm/s^2 、 6.48 mm/s^2 和 5.41 mm/s^2 、 12.02 mm/s^2 ,南北向比东西向具有更强的振动。根据以往经验,当楼板水平加速度峰值达到 10 mm/s^2 (约 1 gal)或振级达到 69 dB 时,夜间室内绝大多数人将会有振感而形成干扰。可见,该小区地面和楼层较低的住户,并未体验到需要投诉的振感程度。

2 高层住宅地基隔振方案及其论证试验

降低高层住宅高楼层住户的环境振级,可从振

源、振动传播路径和受振住宅等3个主要方面来考虑,但相关单位因故未能对振源基础和住宅结构进行减振改造,小区开发商选择了与有关岩土勘察设计单位合作,尝试采用地基隔振的途径来解决问题。

如图1和图3所示,地基隔振试验段设于住宅小区的西北角,即1号楼北侧和2号楼的西侧,平面上呈 Γ 形而未封闭。设计方案拟布设2~3排柔性隔振桩(简称隔振桩),成孔直径 300 mm ,成孔深度 45 m (深于住宅工程桩底),排与排之间交错布置,前后排中心距 200 mm ,同排相邻孔中心间距 600 mm ;桩孔成孔完毕后,在孔内沉入外径 200 mm 的S2型OD200PVC-U双壁波纹管,管内充满膨润土泥浆。每施工好1排柔性隔振桩,进行1次隔振效果测试,并由此决定是否施工第3排隔振桩。

在第1、2排隔振桩施工完成后,对隔振桩内外侧的地基及1号、2号和6号高层住宅进行了环境振动测试,这里仅梳理第2排隔振桩完成后的主要测试结果。在进行隔振桩内外侧地面的振动测试时,未干涉附近的石材加工设备运作状况;而在测试高层住宅振动时,设置了4种工况:工况1为住宅小区西北、西南方向2个石材加工厂的砂拉锯全部关闭;工况2是仅西北面一家厂的3台南北向砂拉锯运作;工况3是仅西北面另一家厂的4台东西向砂拉锯运作;工况4则是对各厂家的砂拉锯运作不加干预。室外隔振桩两侧场地测点和各楼层测点的振动信号频谱第一主频均仍处于 1.5 Hz 左右,地基和高层住宅受石材加工厂内砂拉锯运作等引发的类共振现象仍然存在。由测试报告所列数据,

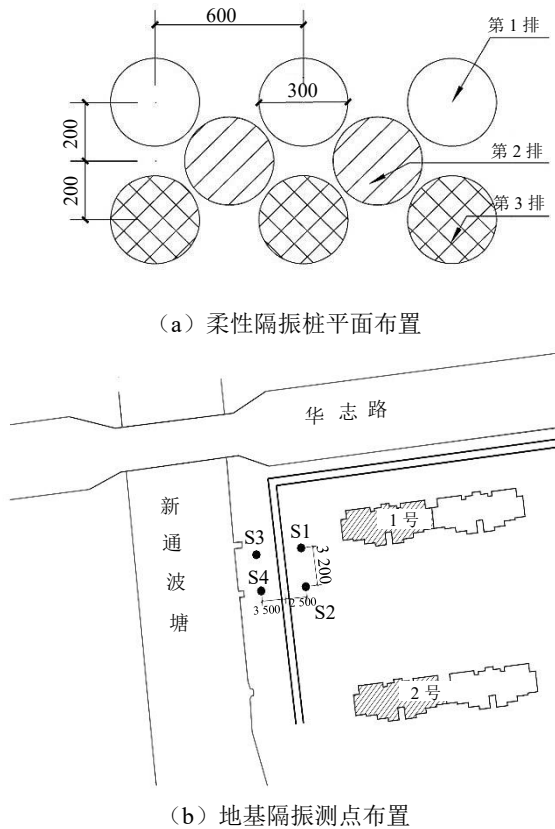


图3 地基隔振桩布置及振动测试平面布置示意图
(单位: mm)

Fig. 3 Layout of ground vibration isolation piles and vibration test points (Unit: mm)

计算隔振桩内、外对应测点(图3)的振动加速度有效值之比: S1与S3组的竖向、东西向和南北向依次为1.143、0.953和0.600; S2与S4组的竖向、东西向和南北向依次为1.133、0.805和0.649。可见, 西侧2排隔振桩对其附近地面南北向水平振动分量的隔振效果相对最好, 东西向水平振动分量的次之, 而对竖向振动分量没有隔振效果(有所放大)。

表2列出了2号和1号楼顶层楼板的水平振动加速度测试数据, 可见它们在地基设置2排隔振桩后, 仍然还是南北向比东西向的振动更为强烈。将地基设置隔振桩后的振动加速度有效值与未隔振时的数据之比定义为振动衰减系数, 由表可见, 在3种工况下, 2号楼顶层楼板东西向水平振动衰减系数处于0.891~1.064(平均值为0.975), 地基隔振桩对其减振效果很低; 对南北向水平振动来说, 其衰减系数处于1.202~1.874(平均值为1.521), 地基隔振桩不但没有减振效果, 而且还增强了振动程度。

由表2所列振动加速度峰值数据及上文所述判据可以推论, 地基设置2排隔振桩后, 这2幢楼的顶层住户将仍处于有感振动的状态之中。鉴于2排隔振桩试验段对高层住宅未达到预期的减振效果, 这个方案便终止进一步的实施了。经过测试结果的比较, 从行政管理上要求各石材加工厂夜间停开砂拉锯等大型动力设备, 是解决夜间环境振动干扰该小区高层住宅高楼层住户休息问题的一种良好对策。

这个地基隔振方案在实施前, 曾由市住建委科技委组织了专家技术论证, 之后该小区开发商又组织了一次专家研讨会, 笔者均对其隔振的实际有效性提出了异议。上述地基隔振试验段的实测数据, 也验证了笔者当时的判断。

3 地基隔振试验效果欠佳原因浅析

根据波动理论, 弹性土体受扰动产生的应变, 可分解为体变和形变, 它们向外扩散便产生纵波和横波, 在地震学中分别称为P波和S波, 前者比后

表2 高层住宅水平振动加速度

Tab. 2 Horizontal vibration accelerations of high rise buildings

测点	工况	东西向				南北向			
		未隔振 有效值/ (mm/s ²)	2排隔振桩			未隔振 有效值/ (mm/s ²)	2排隔振桩		
			有效值/ (mm/s ²)	衰减系数	峰值/ (mm/s ²)		有效值/ (mm/s ²)	衰减系数	峰值/ (mm/s ²)
2号楼 14层	2	1.03	1.00	0.971	3.86	1.95	2.90	1.487	9.16
	3	0.92	0.82	0.891	3.33	1.68	2.02	1.202	7.15
	4	1.56	1.66	1.064	7.00	2.54	4.76	1.874	17.98
1号楼 14层	2	—	1.29	—	5.09	—	1.73	—	6.32
	3	—	1.02	—	4.12	—	1.55	—	5.96
	4	—	1.89	—	7.90	—	3.80	—	13.34

者具有更快的传播速度,但后者波及之处引起土体质点的振动会比前者更强。被统称为体波的P波和S波,既可在地基内部传播,也能沿地表传播,其中P波引起土体质点的振动方向与波的传播方向一致,而S波引起土体质点的振动方向与波的传播方向相垂直。为满足地表的自由边界条件,在地表层传播的P波和S波将耦合形成一种表面波,叫瑞利波即R波,波速比S波的略低。R波使得一定深度内的地基土质点进入振动状态,竖向和水平分量的相对大小会随时间而变,其轨迹呈椭圆的形状。对地表竖向振源来说,其产生的波在沿地表传播的过程中,P波和S波引起质点的振幅与距离的平方成反比,R波则是距离的平方根成反比,可见R波衰减比P波和S波要慢得多,而且振源大部分的能量是由R波携带的。因此,离地表振源一定距离以外,地基振动基本上是由R波控制的。

对地表竖向振源产生的地基振动,离开振源多远才能当成主要由R波控制了?对泊松比为0.25的均质弹性地基表面上的竖向简谐振源,能够找到地面振动的精确解(记 W 为振幅、 φ 为相位角)和R波近似解(记 W_R 为振幅、 φ_R 为相位角),计算曲线如图4所示^[4],其中横坐标 $a_r=2\pi r/v_s$, f 为振动频率, r 为与振源的距离, v_s 为地基土的S波速。

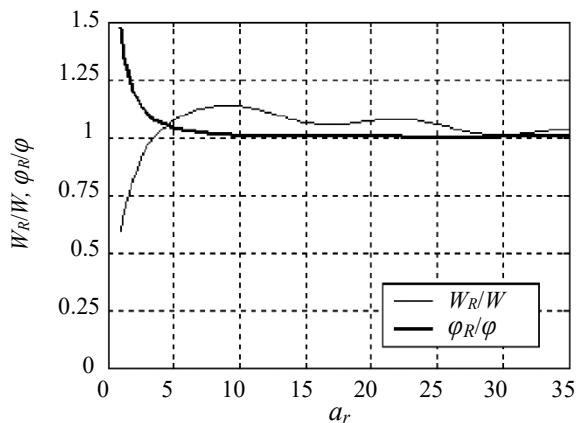


图4 竖向简谐振源下均质地基(泊松比0.25)表面振幅和相位

Fig. 4 Amplitude and phase of ground surface (Poisson's ratio 0.25) under vertical harmonic excitation

在地基隔振中,人们主要关注振幅变化;而在表面波法测试地基波速时,则更加关注相位角。由图4可见,离振源越近,R波对地表振幅的影响越小;当 $a_r > 1.55$ 或 $r_1 > 0.247 v_s/f$ 时,有 $W_R/W > 0.75$,意味着R波影响已成为精确解的主要部分。考虑到实际土体具有黏滞阻尼效应而消耗振动能量,这里将 $a_{r2}=15$,即 $r_2=2.387 v_s/f$,作为不计P波和S波影

响的临界位置。对本文涉及的小区,作为估算,取地基土平均S波速度取145 m/s,振源频率约为1.45 Hz,对应的 r_1 、 r_2 分别为24.7 m、239 m。因此,按地基隔振分类思想,当隔振屏障(空沟、排桩或充填沟等)布置在离振源24.7 m以内时,可认为属于主动隔振;当隔振屏障布置在离振源239 m以外时,则属于被动隔振。对饱和地基,土体泊松比接近于0.49左右, r_1 、 r_2 数值均会有所增大。上述地基隔振桩设置在1号、2号高层住宅的西北侧,与西北面和西南面的石材加工厂振源的距离处于1.5~3.5 km,显然属于被动隔振的范畴。

R波虽然叫表面波,但它可以引起一倍多波长深度内的地基土质点进入振动状态。美国早就报道过空沟隔振和柔性排桩的试验结果^[5],要想获得同样程度的振动衰减系数,被动隔振比主动隔振的沟深或桩长要大一倍左右,且被动隔振沟的沟深应大于一个R波的波长,而被动隔振桩的桩长则更大。当然,振动衰减系数要求若有所放松,隔振沟深度或隔振桩长度与R波波长之比,可有所减小。按上述取定的地基平均S波波速的0.95倍作为R波波速,则R波的波长为 $v_R/f=95$ m。该小区地基隔振桩长度为45 m,不到R波波长的一半,桩底以下土层的环境振动,仍可向小区内的地基且向高层住宅的基础乃至上部结构传播,加上地基-结构的共振性状并未改变,高层住宅中高楼层的振感仍处于超限状态。

另外,定性来说,空沟、混凝土连墙的波阻抗(质量密度与波速的乘积),分别从两个极端与地基土的波阻抗形成悬殊的差别,均有益于提高地基隔振的效果。本小区隔振桩,虽然管材和充填泥浆的波阻抗整体较低,但桩与桩之间仍存在相连的地基土,仍是外来振动向小区地基传播的途径。这或许也是两排柔性隔振桩内侧地面各个方向的振动,并未整体明显降低的一个原因。

4 结 语

本文主要定性分析了上海某小区高层住宅地基隔振未能达到预期目标的原因。为提高地基隔振设计的成功率,除此初步分析之外,尚应利用现有计算机能够开展大型复杂计算的条件,对三维尽可能大范围的地基-基础-上部结构进行整体建模和振动模拟计算,以实现减振方案的可行性论证和比选优化。在此基础上,再进行现场隔振试验,会有助于提高地基和建筑结构减振的成功率。

参考文献

- [1] 朱斌, 陈龙珠, 龚治国, 等. 上海某小区高层住宅环境振动影响测试评估[J]. 工程抗震与加固改造, 2013, 35(4): 115-123.
ZHU Bin, CHEN Long-zhu, GONG Zhi-guo, et al. Evaluation of industrial vibration impact to tall residential building in Shanghai[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2013, 35(4): 115-123.
- [2] 上海市建筑科学研究院房屋质量检测站. 青浦某小区房屋振动第一阶段测试报告[R]. 上海: 2011.
- [3] 上海市建筑科学研究院房屋质量检测站. 青浦某小区房屋振动第四阶段(隔振段第二排施工完成后)测试报告[R]. 上海: 2012.
- [4] CHEN L Z, ZHU J Y, YAN X S, et al. On arrangement of source and receivers in SASW testing[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24(5): 389-396.
- [5] DAS B M. Fundamentals of Soil Dynamics[M]. New York: Elsevier, 1984: 214-221.

【简 讯】

《土力学及基础工程实用名词词典》第二版简介

《土力学及基础工程实用名词词典》(浙江大学出版社, 1993)出版 20 多年来得到了广大读者的欢迎。20 多年来我国土木工程建设快速发展, 对外交流日益增多, 不少设计、施工技术人员承担域外工程。近年来, 不少读者希望词典能够再版。为了适应需要, 在第一版的基础上组织编写了第二版。第二版对第一版收编的词条进行了修订、补充、完善, 收编的汉语词条从 723 条扩展到 1 106 条。

《土力学及基础工程实用名词词典》(第二版)收录了土力学及基础工程领域的常用词条和相应的英文词条。词条释文力求正确、简明、全面, 并尽可能包括设计、施工所需资料。词条索引共有 3 种: (1) 词条分类检字索引; (2) 词条拼音检字索引; (3) 词条英文检字索引。查阅方便。

《土力学及基础工程实用名词词典》(第二版)内容分 30 个部分, 分别为: (1) 综合类; (2) 工程地质及勘察; (3) 岩土分类; (4) 室内试验; (5) 原位测试; (6) 土的物理性质; (7) 渗透性和渗流; (8) 应力; (9) 位移和变形; (10) 固结; (11) 抗剪强度; (12) 本构模型; (13) 岩

土动力性质; (14) 地基承载力; (15) 地基处理; (16) 浅基础; (17) 复合地基; (18) 桩基础; (19) 特种基础; (20) 土坡稳定; (21) 挡土结构和喷锚结构; (22) 堤与坝; (23) 土压力; (24) 基坑工程与降水; (25) 地下工程; (26) 动力机器基础; (27) 地基基础抗震; (28) 土工合成材料; (29) 环境岩土工程; (30) 其他。

《土力学及基础工程实用名词词典》(第二版)主编龚晓南, 副主编谢康和。罗勇博士、连峰博士、李璞博士、王志达博士、沈阳博士、郭彪博士、吕文志博士、张杰博士、陈东霞博士、史海莹博士、张磊博士、张雪婵博士、黄大中博士等在浙江大学学习期间参与了本词典词条的遴选、编写和校对工作。本词典在编写过程中还得到了浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心同事们的大力支持, 陆水琴和王笑笑等同志为本词典的排版、校对等做了许多工作, 在此表示感谢。

由于编者水平有限, 本词典中难免有错误和不当之处, 敬请读者批评指正。

龚晓南