

沈阳地区地震工程地质问题的初步研究

孔庆瑞 左建
(沈阳农业大学)

摘要

本文通过对沈阳地区地震工程地质条件的分析,应用地面运动反应分析理论和方法,确定了该区基本参数和场地动力特性的分布规律。最后对沈阳地区地震工程地质特征作出了评价。

关键词 地震地质条件;地面运动;地震地质背景;地震活动性

一、前言

沈阳地区位于中国东部郯城—海城强震带北部,地质构造复杂,地震活动较为频繁。为合理规划城市布局,提高场地选择的科学性,从评定地震危险区入手,以工程地质条件为基础,分析强震作用下该区地面运动的基本规律和特点,进而作出地震工程地质评价。在此基础上,对沈阳地区未来可能发生的地震灾害影响做出预测。

二、沈阳地区地震地质背景

(一) 地震地质背景

根据对沈阳地区地质构造的研究,将该区地震地质条件归纳为以下几点:

1. 该区处于中国东部郯—庐断裂带北延部分的营口—开原断裂带(沈阳—开原断裂带及大民屯断裂)和浑河断裂带通过地段,此外还有沈阳—牛心台断裂、大潘断裂、新民—大兴沟断裂、大柳屯—于洪断裂和北陵—姚千户断裂(图1)。它们分别隶属新华夏系、华夏系、纬向构造体系及河西系构造体系。晚近期受新华夏系控制,营口—开原断裂带继承性活动显著,沈阳以东以山地为主,西侧为平原,沈阳市区处于山前倾斜平原的浑河冲—洪积扇部位。松软覆盖层之下埋设的潜山隆起,上覆第四系厚约20—50m。其南、西、北三个方向外围地区第四系厚度明显增加。

2. 从地震活动特点来看,在研究区内东经 $122^{\circ}30'$ — $123^{\circ}50'$,北纬 $41^{\circ}30'$ — $42^{\circ}50'$,15世纪前仅有地震记载31次,15世纪后地震记载明显增多,我们将其作为主要研究对象绘于图2,这样可以明显看出其平静期与活动期的交替。

第一平静期——1476年。

第一活跃期1476—1765年,历时约300年。

第二平静期1765—1888年,历时约200年。

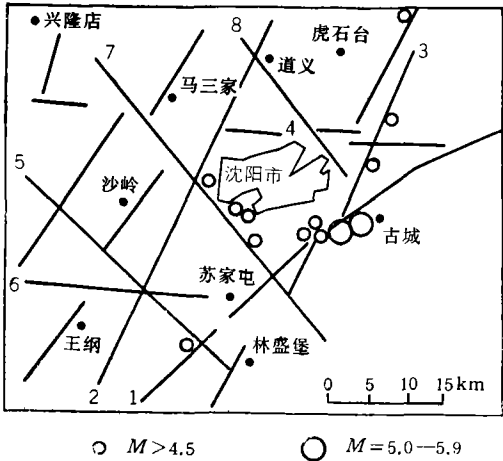


图 1 沈阳地区地震地质图

1.浑河断裂； 2.大民屯断裂； 3.沈阳-开原断裂；
4.沈阳-中心台断裂； 5.大潘断裂； 6.新民-大兴
沟断裂； 7.大柳屯-于洪断裂； 8.北陵-姚千户断裂

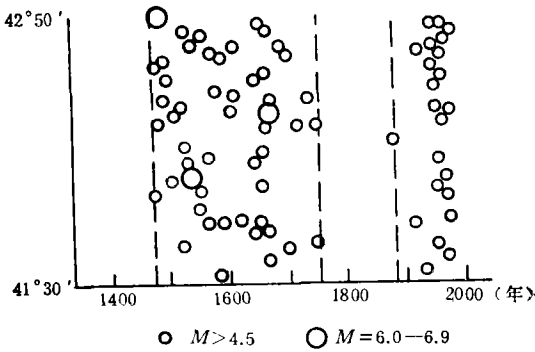


图 2 沈阳地区地震活动分期图

第二活跃期 1888 年至今,历时约 100 年。

因此,沈阳地区近期仍可能处在活跃期内。此外,第一活跃期经历了近 300 年,曾发生过 6.9 级地震一次,金县—沈阳—开原间共发生过有感地震 100 余次。然而在浑河断裂带上,仅有零星小震活动,地震活动与北北东向断裂关系最密切,而地震又绝大多数发生在几条断裂交汇部位^[1]。

3. 从该区地球物理场及地壳结构分析,西部平原区地壳厚度为 30—40km,东部山区为 30—35km,其间过渡陡坡与营口—开原断裂相当。其重力梯级带与过渡陡坡方位一致。反映本区地壳深部结构东西两侧的不均一性。

4. 沈阳地区最新构造应力场对该区地震活动直接具有控制作用,根据辽、吉地区近年部分地应力测量资料(表 1)及邻区大范围震源机制证实,区域最新构造应力场主压应力方向为北东南西向。

表 1 辽吉地区近年地应力测量成果表

测量时间	地 点	初始应力值 kg/cm ²		σ_{\max} 方向	测量单位
		σ_{\max}	σ_{\min}		
1980 年 2 月	抚顺矿山	144.51	42.32	NE65°	抚顺矿务局
1976 年 4 月	白山电场	104.81	56.84	NE34°	东北水电勘测设计院
1978 年 9 月	白山电场	167.40	101.31	NE32.7°	东北水电勘测设计院
1975 年 8—10 月	海城镁矿	58±5	104±8	NE84±7°	地震大队

(二) 危险区的预测

前人的研究已证明,绝大多数破坏性地震都发生在活动断裂上,目前普遍认为形成地

震原因是地壳岩石在某些应力较高的部位发生破坏,或者是已有断裂受构造应力作用而重新发生突然运动时,以地震波的形式释放能量而形成地震。

本文研究的目的是利用沈阳地区断裂活动的资料反演构造应力场,从而对近期沈阳地区地震危险趋势作出估计。由于断裂带介质的力学性质接近于弹塑性行为,因而采用弹塑性增量有限单元法模拟地下 15 km 深处应力分布状态,并联系历史上的地震活动划出潜在危险区^[2],能较好地接近实际情况。

弹塑性有限单元分析主要由线性化、方程求解及状态决定三个步骤组成。线性化是指对于每一个增量步由给定的状态量求得结构的切线刚度矩阵或割线刚度矩阵;方程求解是指求解增量运动方程以得到增量位移;再从增量位移求得新的变形状态、应变、应力等,构成了状态决定步骤的主要内容。

为了使计算结果精确,在非线性分析的每个增量步中,还要进行平衡迭代,每次迭代以后,都要进行状态决定,以此作为下一个增量步或下次迭代求解的出发点。在状态决定的计算中,从增量位移计算增量应变仅涉及几何关系,而从增量应变计算增量应力则涉及材料的本构关系。在弹性增量理论中应力和应变的关系为微分关系。

$$d\{\sigma\} = ([D] - [D]_p)d\{\varepsilon\} = D_{ep} \cdot d\{\varepsilon\} \quad (1)$$

其中本构关系张量 $[D]_{ep}$ 一般情况下是应力 $\{\sigma\}$ 、塑性应变 $\{\varepsilon\}_p$ 和材料硬化参数 Ep 等状态量的函数。在平面应变问题中,其弹塑性矩阵 $[D]_{ep}$ 为:

$$[D]_{ep} = \frac{E}{1+\gamma} \begin{bmatrix} \frac{1-\gamma}{1-2\gamma} - BS_x^2 & \frac{\gamma}{1-2\gamma} - BS_xS_y - BS_xS_y & \\ \text{对} & \frac{1-\gamma}{1-2\gamma} - BS_y^2 - BS_yS_x & \\ \text{称} & & \frac{1}{2} - BS_{xy}^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

上式中 $B = 9G/[2\sigma^2(Ep + 3G)]$, S 为应力偏量 (S_x 系在 x 方向上的应力偏量),本计算式需给定的参数有四个,即弹性模量 E ,材料的屈服极限 σ ,硬化模量 Ep ,泊松比 γ 。

本文计算是根据王绳祖和张流对周口店花岗闪长岩做的高温高压三轴实验的变形破坏过程图,从比例极限点(82%—87% 峰值差应力)为起点,直到曲线斜率近于零点,此段是以晶内塑性及晶内破裂为特征计算的应力。应变关系正是这个范围之内,故以上四个参数 E, γ, σ 及 Ep 之间的匹配关系是参考周口店花岗闪长岩的应力、应变曲线,并考虑到沈阳地区地壳结构及地壳内物理条件,特别是与实测资料对应的区域应力场之间的匹配关系而定。

单元网格化采用四边形等参单元。网格化的原则是从提高精度和降低机时出发。整个结构共分割为 368 个单元。其中线性单元 34 个,非线性单元 334 个,结点 344 个(图 3)。至此,对与地震活动关系密切的沈阳-开原断裂,大民屯断裂,浑河断裂进行了数值分析。结果表明:沈阳-开原断裂上新城子以东,大民屯断裂上的于洪一带,浑河断裂上的苏家屯—古城子等部位均具剪破发震危险(表 2)。

对于发震的危险趋势及强度,主要有以下几个特点:

第一,自 1975 年海城 7.3 级地震以后,该区小震活动有所增强。海城地震系列总体

表 2 沈阳地区地震危险区预测

危 险 区		构造部位	新构造活动性	数学模拟数值				活动断裂带危险区长度 (km)	震级
				应力集中区应力值 (Pa)		断裂带应力状态 (Pa)			
				σ_{max}	τ_{max}	σ_n	τ_1		
$M_s \geq 5$	于洪区	EW,NNE,NW 深部重力异常带	北北东断陷与东部山区交接处	8.5×10^8	3×10^8	大民屯断裂 3×10^7	1.5×10^8	6.5	5.0
$M_s \geq 5$	苏家屯	NNE,NE,EW,NW, 沈阳上地幔局部隆起斜坡部位	新生带断陷盆地边缘	8×10^8	2.5×10^8	开原沈阳断裂 2.5×10^8	1.2×10^8	8.0	5.1
$M_s \leq 5$	新城子区	NNE,EW 深部重力异常区	新生代断陷盆地东侧	8×10^8	2.28×10^8	开原沈阳断裂 3.7×10^8	1.8×10^8	2.0	5.8
$M_s < 5$	东陵区	NNE,EW,及NW 交汇处	近年小震增多 $M_s = 2.5$	7.5×10^8	3.1×10^8	3.5×10^8	1.1×10^8		<5.0

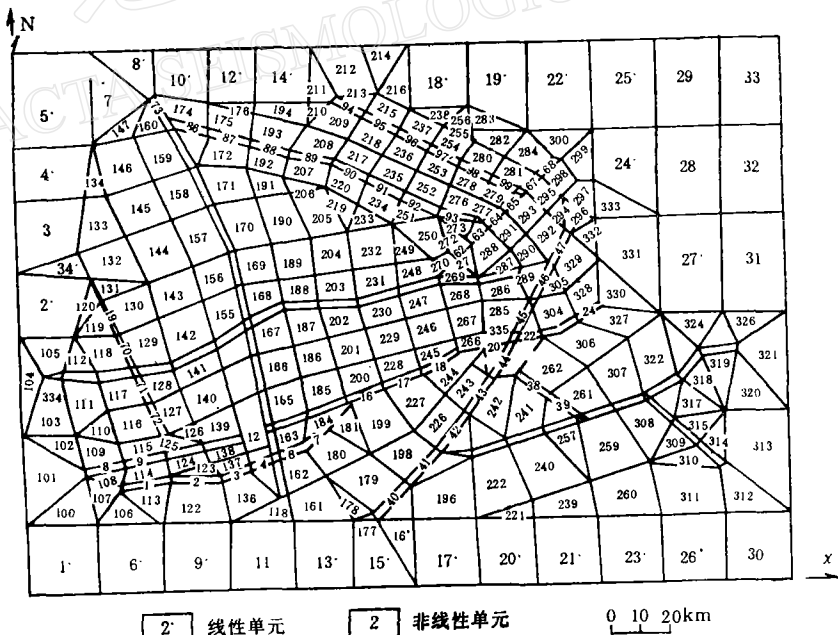


图 3 沈阳地区构造与有限单元网格图

能量释放,加速了本区的能量积累与释放。

根据近年来该区震级-频度关系计算 b 值如图 4, 预测该区最大可能发生 5—6 级地震。

第二,按断裂长度计算震级经验公式 $M = 3.3 + 2.1 \lg L$ 同样得出今后 100 年内地

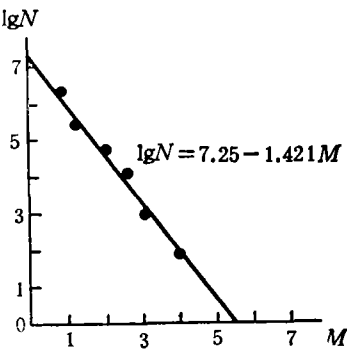


图 4 沈阳地区地震 b 值线

震趋势存在发生 5—6 级地震的危险。

三、场地强震效应工程地质研究

(一) 沈阳地区场地地质特征

1. 岩相分布特点。全区自东而西存在着基岩、山前冲、洪积层、平原冲积层,以及浑河河谷冲积层。松散沉积物由于所处地貌单元不同,岩相在水平和垂直方向上均有显著变化(表 3)。

表 3 沈阳地区场地地质特征

分 区 代 号		岩 相 分 区		岩性结构
I	基岩区	I ₁ , I ₂	浑南, 北区	变质结晶岩系
II	洪积冲积 浑河古扇	II ₁	洪 积 区	亚粘土 0—20m, 砂 20m
		II ₂	浑河古扇区	中粗砂 20—30m
III	浑河冲积区	III ₁	河谷平原	亚粘土 1—4m
		III ₂	冲积平原	亚粘土 1—4m
IV	辽河、浑河 冲积平原	IV ₁	蒲河谷盆地区	砂砾石, 粘土 50—100m
		IV ₂	辽河冲积平原	砂砾石 50—100m

东部山地广泛出露结晶变质岩系, 仅浑河河谷堆积厚度 10—25m 的冲积砂砾石层、中粗砂、粘土, 局部上覆人工土; 该区中部为山前冲、洪积扇区; 西部以冰碛、冰水沉积砾石、粗细夹粘土透镜体为特点, 总厚度为 25—50m。沈阳市区即处于该冲、洪积扇上。其南部发育浑河现代河谷, 由砂卵石及中细砂层组成; 西部为冲、洪积扇前缘与辽河平原交替过渡地带, 岩相以冲积层为主, 深埋藏冰碛、冰水沉积层。总厚度达 100—150m。

地表显示东高西低, 沈阳一带地面高差不过 10—25m。覆盖层下部埋藏着潜山隆起, 其主体与东部山地相连。

2. 沈阳地区地下水埋藏深, 自东向西变浅。市区多低于地面以下 15—20m, 个别开采下降漏斗区大于 30m, 而浑河河谷平原地带地下水深仅 3—5m。

(二) 场地地基土的波速及弹性剪切模量

场地土体类型、颗粒级配、土层相对密度,以及成因时代等因素,直接决定波速和剪切模量。

1. 该区地基土的波速值。根据本区实测数据,并结合下辽河平原冲、洪积扇的实测资料,提出了该区横波波速与场地土大体相应数值(表 4)。

表 4 沈阳地区场地岩性与横波速度特征

地质时代		岩 性	厚度 (m)	分 布		横波速度 v_s (m/s)
				范 围	深度 (m)	
全新世	Q_4	3 人工土		市区一级阶地	0	0—150
		2 亚砂土	1—5		3	150
		1 砂,卵石	10—15		15	300
晚更新世	Q_3	3 亚砂土	8—20	一级阶地 及平原区	5	200
		2 中砂	5—10		3	300
		1 砂,砾石	8—60		20	400
中更新世	Q_2	2 冲积	20—50	东陵山前地带	0—50	300—500
		1 冰水堆积	10—40			
早更新世	Q_1	砂,砾石	10—30	自山前延入 平原下部	10—100	600
第 三 纪	R	红层				

表 5 各类土层横波速度和密度表

土石类型	时 代	横波速度 v_s (m/s)	密度 ρ (T/m^3)
人 工 土	Q_4	120	0.17
淤 泥	Q_4	120	0.17
粘 土	Q_3	140	0.19
硬 粘 土	Q_2	300	0.19
亚 粘 土	Q_4	250	0.18
粉 砂	Q_3	120	0.18
中 粗 砂	Q_{2-3}	320	0.19
砾 石	Q_{1-2}	350	0.19
风 化 岩	Q	400	0.21
新鲜岩石	A_{n2}	500	0.24

2. 场地土剪切模量(G_0)值特征。场地平均剪切模量值反映了场地土质条件对震害的影响。它是土层的刚度、厚度、滤波、放大作用的综合体现将该区划分为 4 个大区, 10

个小区,以区别土质条件对震害影响的差异。市区 G_0 值变化特点是,自东向西 G_0 值逐渐减小,由东部 $24 \times 10^3 \text{T/m}^2$ 到西部的 $21 \times 10^3 \text{T/m}^2$,市区南部现代河谷冲积区 G_0 值显著减小,本文所采用各土层横波波速及质量密度如表 5。

(三) 沈阳地区强震地面运动参数预测

对本区岩石地面运动参数的预测是在对本区地震地质研究及危险区预测的基础上,根据国内外有关资料,参照邻区海城地震观测成果及震害分析进行的。

地面地震反映分析,在对该区岩石地面运动参数预测的基础上,利用地质结构比拟,与邻区海城地震所测得地面最大加速度相对照,确定各岩相分区的土层放大系数。最后根据各区土层放大系数求出最大加速度值。

四、沈阳地区地震工程地质问题及评价

(一) 主要地震工程地质问题

以该区地震工程地质条件为内容,编制了该区地震工程地质略图(图 5);同时对可能产生的震害地段作简要评价。

1. 区内断裂构造的地震效应由于断裂特点不同,决定了地震工程地质性质的差异。

(1) 国内外震例表明:一般震级小于 6 级者,地震很少产生地震断层并直接导致地基失效现象。依据最大加速度-烈度相应关系、震级与烈度关系,本区存在三个可能的 VII—VIII 度椭圆状危险烈度场,其长轴 5—10km,短轴 3—6km。

(2) 大量的土工实践证明,活动断层在工程建设中做为灾害性工程地质问题,随着工程规模的日益扩大,已日趋突出了。地震活动都与活断层有生成联系或与之有依附关系^[3],于洪、新城子北,苏家屯等三个 5—6 级地震危险区,都处在活动断层活动范围之内。其它地区出现地震活动,也难于产生地面破坏效应。

(3) 沈阳-开原断裂带,浑河断裂带均切割地壳数十公里,规模巨大。它们具有对危险地震震波自西向东面抚顺方向传播的阻尼作用^[4]。所以,它们的存在对抚顺地区降低了烈度影响。而沈阳-开原断裂和大民屯断裂二者间的城乡场地将直接受到三个危险区影响。因此,它们不具阻尼减震作用。

2. 埋设潜山地形的地震效应。尽管沈阳市处于新华夏系地震活动带附近,深部与上地幔局部隆起相对应,且地面运动最大加速度 $a_{\max} > 200 \text{cm/s}^2$,但因具有与东部山地相连的覆盖层较薄的埋设潜山隆起,对地震波的放大作用将显著降低,使震害减轻。可能出现 VII—VIII 烈度区中的 VI 度异常场。

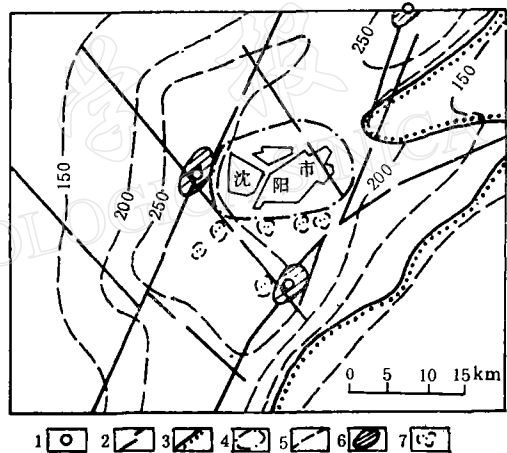


图 5 沈阳地区地震工程地质图

1. 预测危险地震震中; 2. 活动性主干断裂; 3. 松散层与基岩分界线; 4. 隐伏潜山分布区; 5. 最大水平加速度值线 (m/s^2); 6. 预测危险地震烈度震害区; 7. 可能出现砂土液化地段

3. 场地砂土液化:

(1) 该区西部有相当一些地段地下水埋藏浅,粉、细砂巨厚,属于粘粒含量小于 3% 的饱和砂土,是地震时常见的发生液化的土类。

(2) 砂土的相对密度 $D_r = 0.64$,小于饱和砂土发生 VIII 度地震时可能发生液化的 $D_r = 0.75$,故可能发生液化。

(二) 沈阳地区地震工程地质评价

沈阳市区直接受控于新华夏系活动地震带,南、北、西三侧存在大于 5 级地震危险区,但市区并未直接座落于具有发震危险区部位。从图 4 看出,市区岩石地面运动参数为 $d_{\max} > 100\text{cm/s}^2$,主振相周期 $T = 0.25\text{s}$,强震持续时间 $t = 10-15\text{s}$ 。而地面 d_{\max} 达到 200cm/s^2 局部达到 250cm/s^2 ,相当于基本烈度值的 VII—VIII 度。由于市区基岩埋藏较浅,地下水埋藏较深,是以砂、砾石为主的岩相结构,所以具有较好的抗震性能。可按我国制定的 TJ-78 抗震规范,基本烈度按 VII 度执行。除对重大及高层建筑或局部较弱地基提高烈度及地基处理外,一般不宜再提高防、抗震标准。

本文是在确定该区地震危险程度的基础上,以地震地质的观点,对地面运动的反应特征进行了分析,进而对该区工程地质稳定性作出了评价,这种在较大范围内通过定性分析与定量预测相结合的综合评价方法,还有待于充实完善,其中有些问题尚有待深入研究。

参 考 文 献

- [1] 彭一民、郝宪生,1985. 北京地区地震地质条件及地震地面运动反应分析. 地球科学,10,1,151—153.
- [2] 刘玉海、杜东菊,1985. 沈阳-抚顺地区地震工程地质评价. 西安地质学院学报,7,1,87—89.
- [3] 刘玉海,1987. 活动断层的工程地质分类. 西安地质学院学报,9,4,43—44.
- [4] 刘国昌,1979. 地质力学及水文地质在工程地质方面的应用,11—13. 地质出版社.

PRELIMINARY RESEARCH ON THE GEOLOGICAL PROBLEMS OF EARTHQUAKE ENGINEERING IN SHENYANG REGION

KONG QINGRUI and ZUO JIAN

(Shenyang Agriculture University)

Abstract

This paper examines the problem of active faults in relation to geological engineering studies. In addition to the problem of faults, a discussion, classification, and evaluation of the various types of active faults and a discussion of concrete methods of evaluating active fault systems is also given. Each of these is of great significance to geological engineering in the selection of choice sites for important major construction projects such as location of a nuclear station, location of a high-energy accelerator, location of a key large-scale hydro-electric power station, and the location of thermal power plants, also included in this study are engineering studies for planning, construction and arrangement of new cities.