

Research in the Seismic Microzonation for Large Factories and Mines—Taking Yizheng Chemical Fiber Factory as an Example

Xiaosan Tao, Weilin Yang, Zhibing Gao, Hongmei Qu

Institute of Earthquake Engineering for Jiangsu Province, Nanjing
Email: txs3880@163.com

Received: Jan. 10th, 2014; revised: Feb. 10th, 2014; accepted: Feb. 20th, 2014

Copyright © 2014 Xiaosan Tao et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Xiaosan Tao et al. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: Taking Sinopec Yizheng Chemical co., LTD. factory (hereinafter referred to as Yizheng Chemical Fiber Factory) as an example, the characteristics of seismic microzonation for Large Factories and Mines are studied. The research demonstrated the seismic environment, borehole layout, engineering geological zoning, acceleration time history synthesis, analysis of seismic effect, seismic microzonation, etc. According to the results of the site geological conditions and a lot of seismic effects of Yizheng Chemical Fiber Factory, the factory is divided into three districts; the parameters of aseismic design for each district are also given, at the same time, and the seismic microzonation map and seismic geological disaster zoning map are formulated. By comparing the seismic microzonation results with some related seismic codes, this article points out some shortcomings in the related seismic codes. The seismic microzonation of large factories and mines, and even town, district or city urban, which is conducive to the planning and construction, improves the ability of society of earthquake prevention and disaster reduction.

Keywords: Large Factories and Mines; Engineering Geological Zoning; Analysis of Seismic Effects; Seismic Microzonation

大型厂矿企业地震小区划研究 ——以仪征化纤厂区为例

陶小三, 杨伟林, 高志兵, 瞿红梅

江苏省地震工程研究院, 南京
Email: txs3880@163.com

收稿日期: 2014年1月10日; 修回日期: 2014年2月10日; 录用日期: 2014年2月20日

摘要: 以中国石化仪征化纤股份有限公司厂区(以下简称仪征化纤厂区)为例, 研究大型厂矿企业地震小区划特征, 论证了工作区地震环境、钻孔布设、工程地质分区、加速度时程合成、地震动效应分析、地震小区划分区等。根据仪征化纤厂区的场地地质条件和大量的地震效应计算结果, 将厂区分为三个小区, 给出各小区的设计地震动参数, 同时编制了地震动小区划图和地震地质灾害小区划图。将地震动小区划结果与相关规范作了一些比较, 指出相关规范中一些不足之处。提出应对大型厂矿企业, 甚至城镇、新区或城市市区开展地震小区划工作, 这有利于规划建设, 提高社会防震减灾能力。

关键词: 大型厂矿企业; 工程地质分区; 地震效应分析; 地震小区划

1. 引言

强烈地震常常以猝不及防的突发性和巨大的破坏力给社会经济发展、人类生存安全和社会稳定、社会功能带来严重的危害。近几年发生的强震，都以血的代价换来惨痛教训。历次震害表明，场地条件与震害密切相关。

《中国地震动参数区划图》^[1]给出了用于一般工业与民用建筑的工程结构抗震设计的地震动参数，其比例尺为 1:400 万，给出的是大范围内地震危险度的平均估计(平均值)，它不能作为重大工程和可能引起严重次生灾害工程的建设抗震设防依据。地震震害经验表明，地震破坏作用在几百米、甚至几十米以内均有显著差异。地震小区划针对具体场地做更加深入细致的工作，针对性更强、考虑的因素更多、精度要求更高，为具体规划区的抗震设防提供参数，从而受到行政管理部门、工程界的高度重视并获得迅速发展。

地震小区划是社会、经济建设中的重要基础工作，各级政府对此都很重视。近几十年，我国已有不少城市开展了城市地震小区划工作，如南京市、广州市、兰州市、上海市等。大型厂矿企业开展地震小区划工作的尚不多，但此类企业占地范围广、仪器设备多、次生灾害源多，同时人员密集、财产集中，一旦遭遇地震破坏，会造成极其严重的人员和经济损失。地震小区划工作有利于企业实施科学规划、抗震设计、震害预测、抗震鉴定加固等，尤其是对引进重大项目或特殊项目的抗震设计；有利于企业提高防震减灾能力，在地震灾害预防、地震应急救援中，做到有的放矢、有序高效，最终达到把地震灾害、经济损失、人员伤亡减少到最低。

本文以仪征化纤厂区为例，研究这类地震小区划的特征，并将地震小区划结果与相关规范作比较，指出相关规范中的不足，进而建议大型厂矿企业尽早开展地震小区划工作，以提高企业的防震减灾综合能力。

2. 工作区概况

仪征化纤为大型石化企业，位于江苏省仪征市，南邻长江，北靠宁通高速公路，交通便捷。地震小区划范围为其厂区，面积约 6 km²。

2.1. 地震环境

近场区为仪征化纤厂区边界外延 25 km 范围。根

据近场区构造地貌特征，可将近场区划分为 6 个主要次级构造单元，即六合 - 全椒凹陷、高邮凹陷、江都隆起、仪征凹陷、宁镇断块隆起及句容凹陷等，仪征化纤位于仪征凹陷区内，长江从其南部通过。近场区断裂构造较为发育，共有 8 条主要断裂，这些断裂在第四纪早、中更新世都曾有过较明显的活动。幕府山 - 焦山断裂距仪征化纤最近，具有规模大、活动年代新的特征，有发生中强破坏性地震的危险性，年代为第四纪中更新世，长度约 100 余公里，但该断裂距场地的直线距离有 12 km，已不会对场地的稳定性产生直接影响。其余断裂距场地较远，对场地稳定性的影响较小。

近场区位于华北地震区长江下游 - 黄海地震带内，其震灾主要由近场区破坏性地震和中、远场强震活动所引起。近场区地震活动是比较活跃的，其强度在江苏陆地也是最高的，近场区历史上发生过 5 次破坏性地震，分别为 1624 年扬州 6 级地震、1676 年扬州 4.75 级地震、1712 年仪征 4.75 级地震、1872 年镇江 4.75 级地震、1930 年镇江 5.5 级地震，其对本场地的最大影响烈度为 VI 度。对场地影响最大的中、远场强震是 1668 年山东郯城 8.5 级地震，影响烈度可达 VII 度。1970 年 1 月至 2011 年 12 月近场区共记录到 $M_L \geq 1.0$ 级地震 116 次，最大震级为 $M_L 3.6$ 级地震。

2.2. 工程场地条件

仪征化纤厂区地貌上为长江下游低山丘陵地区，基岩埋深较浅且起伏较小，经过几十年的开发建设，现厂区地表较平整开阔。

为全面了解和探测厂区工程地质条件，正确划分工程地质单元，本项目收集厂区范围内现有 200 多个钻孔资料，同时新布置 15 个钻孔。根据勘探结果、土层特征、物理力学性质等，仪征化纤厂区地下 42 m 深度范围内岩土体自上而下可划分为 5 大工程地质层，若干亚层(表 1)。

3. 研究方法

在充分收集、调查、分析厂区地震地质、工程地质和水文地质资料的基础上，吸收最新科研成果，依据《工程场地地震安全性评价》^[2]要求，划分工程地质单元，开展钻孔勘探、土动力性能测试等，结合场地条件，建立模型进行地震危险性分析和场地地震动

Table 1. Distribution of strata in Yizheng chemical fiber factory
表 1. 仪征化纤厂区地层分布

层号	岩土层
①	杂色杂填土、素填土等
②	灰黄色粉质粘土、粉土、灰色粉砂等, 划分 6 个亚层
③	灰黄色粉质粘土为主, 划分 2 个亚层
④	细砂、粘质粉土混卵石、卵石混粗砂为主
⑤	棕红色强风化泥岩、棕红色中风化泥岩

效应研究, 最终给出地震小区划图和使用说明。

4. 钻孔布设

合理布设钻孔, 是地震小区划工作中的一项重要内容。钻孔布设的合理与否, 直接影响到工作量、经费投入、工作质量。

在充分收集、整理、分析仪征化纤厂区内的工程地质、水文地质、地形地貌资料的基础上, 在各工程地质单元内均布置了控制性钻孔, 共 15 个控制性钻孔, 并注意适当均匀分布。同时为提高工作质量, 在收集、整理的钻孔资料中, 选择 29 个钻孔作为非控制性钻孔以加密土层地震反应计算点。控制性钻孔均钻入中风化基岩; 非控制性钻孔均钻入卵石层, 部分钻入中风化基岩。

5. 工程地质分区

工程地质分区是一项重要的基础工作, 直接影响地震小区划成果质量。工程地质分区是基于不同地质时代形成的地质地貌单元、岩土体成因类型、岩土体结构类型等地质标志进行的工程地质分区的划分。

大型厂矿企业基础资料相对较多, 应充分收集、分析相关资料。首先根据已有资料进行工程地质单元的初步划分, 然后在不同的工程地质单元内进行场地勘察, 校正初分的工程地质单元的界线。采用“区内相似, 区际相异”的原则, 将仪征化纤厂区划分为 3 个工程地质分区, 即 I 级阶地区、河漫滩区及坳沟区。

6. 地震动效应分析

6.1. 基岩地震动时程合成

依据区域及近场区地震地质和地震活动性的最新研究成果, 对影响仪征化纤厂区地震安全性的潜在

震源区进行划分(图 1), 这与《中国地震动参数区划图》^[1]中的潜在震源区划分有差别, 并确定地震活动性参数, 选取合适的基岩地震动衰减关系, 对地震小区划范围边界拐点和控制计算点进行地震危险性分析计算。

根据地震危险性分析结果, 将目标反应谱转换成相应的功率谱, 用三角级数叠加法, 生成零均值的平稳高斯过程, 并乘以非平稳强度包络函数。在合成过程中采用逐步逼近目标函数的方法, 使合成的加速度时程 $a(t)$ 精确满足于基岩地震动峰值加速度, 近似满足基岩加速度目标谱, 并使相对误差小于允许误差。

鉴于大型厂矿企业占地范围较大, 需要根据地震地质和地震活动性的研究成果、地震危险性分析计算结果等, 确定是否需要将地震小区划范围分几个小区, 分别进行基岩地震动时程的合成。由仪征化纤厂区 23 个计算点(8 个边界拐点和 15 个控制计算点)基岩地震动水平向峰值加速度结果可知, 各计算点 50 年超越概率 63%、10%、2% 的基岩地震动水平向峰值加速度值相差不大, 结合地震地质和地震活动性研究成果, 仪征化纤厂区作为一个区域开展基岩地震动时程合成。

50 年超越概率 63%、10% 基岩地震动水平向加速度时程各合成一组, 加速度峰值统一取最大值(表 2)。各计算点 50 年超越概率 2% 的基岩地震动水平向峰值加速度值相差稍大(0.006 g), 也可以合成一组基岩地震动加速度时程; 本项目为提高工作质量, 合成两组 50 年超越概率 2% 基岩地震动加速度时程, 其峰值见表 2。不同设防水准下典型的基岩地震动加速度时程见图 2。

6.2. 土层地震反应分析

土层地震反应分析是在已知的土层剖面、土层波速和基岩地震动入射波条件下, 研究地表的地震动特征, 所需场地土的静、动力性能参数有: 土层波速、土的密度、动剪切模量及阻尼比与剪应变关系曲线等。根据钻孔资料(15 个控制性钻孔和 29 个非控制性钻

Table 2. The maximum value of bedrock horizontal acceleration
表 2. 基岩地震动水平向加速度时程峰值

50 年超越概率水准	63%	10%	2%
地震动水平向峰值加速度/g	0.032	0.106	0.201 (0.204)

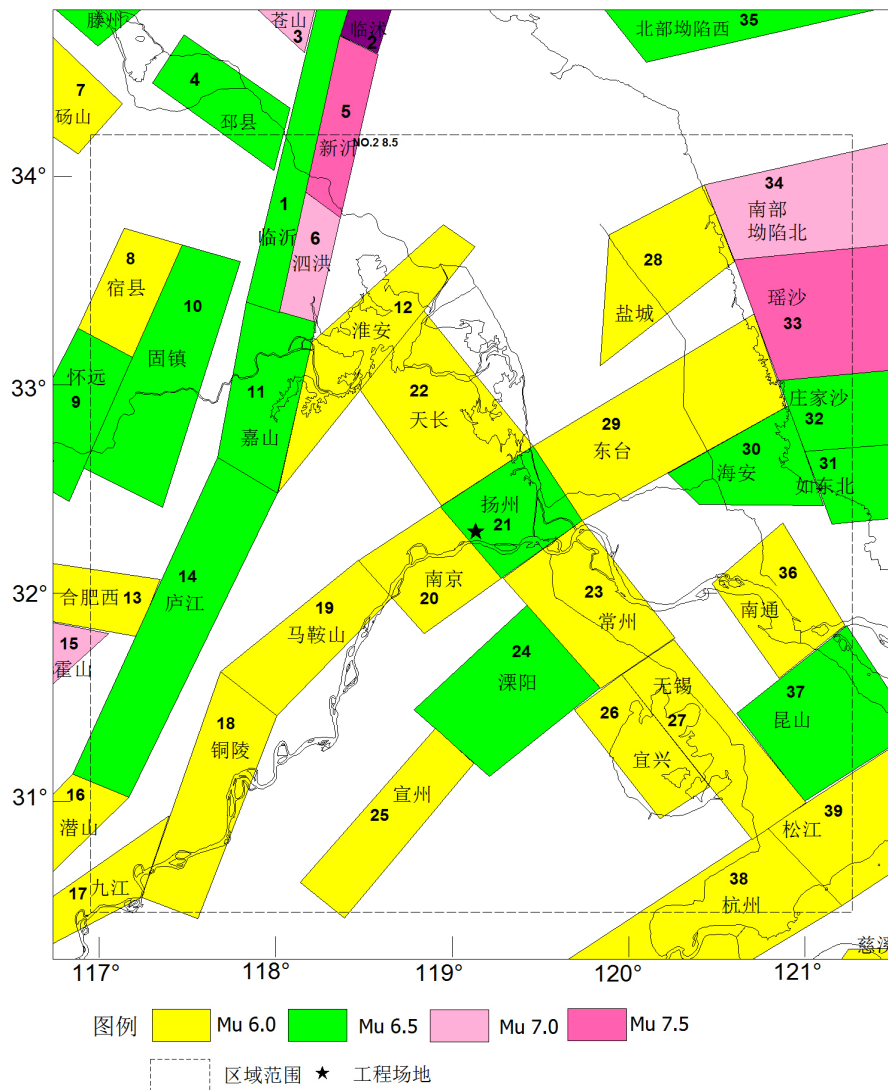


Figure 1. Regional delineation of potential seismic zone map
图 1. 区域潜在震源区划分图

孔), 仪征化纤厂区共建立 44 个土层地震反应分析模型, 采用等效线性化方法考虑土体的非线性特性, 利用一维波动模型进行土层地震反应计算。

6.2.1. 土层地震反应分析模型

控制性钻孔的土层波速采用现场原位测试结果; 非控制性钻孔的土层波速缺少, 将控制性钻孔的土层波速按土类别分别进行统计回归, 得到各类土土层剪切波速 V_s 随土层深度 D 变化的统计关系式, 其回归公式见表 3。部分土层由于土层波速资料较少, 不能进行统计回归, 可根据相近钻孔同类同深度土层的平均剪切波速值补充。未钻入中风化基岩的非控制性钻孔根据周边深孔资料进行了推测补充, 从而使非控制

Table 3. The V_s - D regression analysis results of all kinds of soil
表 3. 各类土的 V_s - D 回归分析成果

岩土类型	物理状态	经验回归方程
②-5	粉质粘土, 灰、灰黄色	$V_s = 98.29D^{0.226}$
③-1	粉质粘土, 黄褐色	$V_s = 139.93D^{0.164}$
③-2	粉质粘土, 灰黄、褐黄色	$V_s = 128.95D^{0.223}$
④-3	卵石混粗砂, 黄褐色	$V_s = -504.44 + 92.55D - 3.31D^2 + 0.04D^3$

性钻孔均进入中风化基岩, 再根据统计关系, 推测出非控制性钻孔的土层波速。土层动剪切模量、阻尼比与动剪应变关系曲线由室内动三轴试验确定, 土层剖面资料由岩土勘察单位提供。

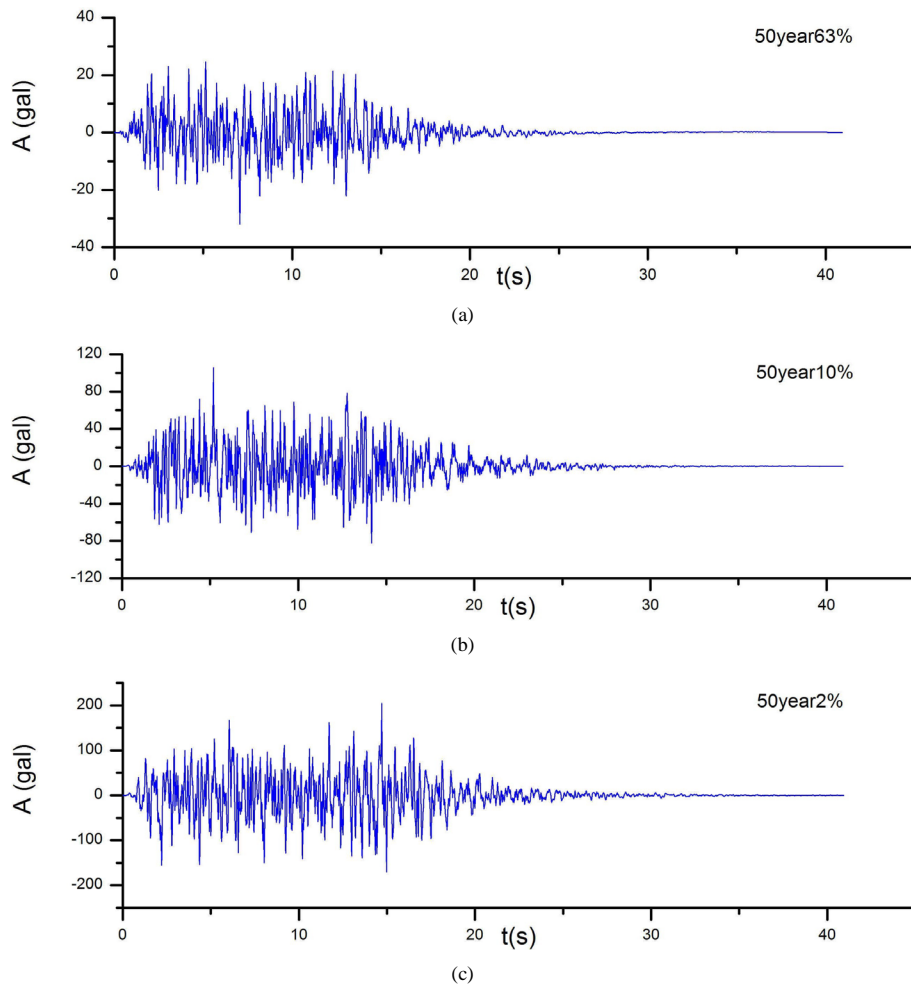


Figure 2. Accelerate time recording of the bedrock
图2. 基岩地震动加速度时程曲线

6.2.2. 地震反应计算

在确定土层的物理性质参数之后,再利用合成的基岩地震动加速度时程进行地震反应分析。考虑到不同样本地震动时程输入结果的离散性,每一概率水准输入3条基岩地震动时程进行计算。综合分析土层力学模型地表的地震动加速度峰值和反应谱并作归准化处理,最终得到44个计算点加速度反应谱及规准谱。

7. 地震小区划

地震小区划包括地震动小区划和地震地质灾害小区划。地震动小区划将编制仪征化纤厂区50年超越概率63%、10%、2%地表地震动峰值和反应谱小区划各一套图表,以及地震动小区划图说明;地震地质灾害小区划将结合场地条件对某种或某几种类型(如

砂土液化、软土震陷等)作重点分析,编制仪征化纤厂区50年超越概率10%、2%地震作用下的地震地质灾害小区划图和说明。

7.1. 地震动小区划

7.1.1. 地面峰值加速度PGA小区划

任一超越概率水准下,各计算点的PGA都有一定的差异,这主要来自于地震小区划范围内工程地质条件的差异。三概率水准下,仪征化纤厂区各计算点地表PGA的差别均远低于20%,可以不用进行PGA分区,但PGA的差异将在设计反应谱小区划各分区中体现。

7.1.2. 设计反应谱小区划

因各计算点岩土特性是不同的,故土层地震反应

计算得到的地面加速度反应谱就会有差异，它反应出不同场地条件对加速度反应谱的影响。根据控制性计算点地表加速度反应谱的差异，并参考非控制性计算点地表加速度反应谱的差异，地表加速度反应谱的差异主要依据计算点绝对反应谱平台、反应谱曲线下降的缓陡和特征周期，再结合场地工程地质单元分区资料，可将仪征化纤厂区分成三个小区，分别用 S-1、S-2、S-3 表示，分区的地表设计地震动参数见表 4，并给出设计地震动参数小区划图和使用说明。

S-1 为 I 级阶地区，S-2、S-3 为坳沟区和河漫滩区，这也充分说明场地条件对地震动参数影响显著，二者有着密切的依存关系。

7.2. 与相关规范比较

7.2.1. 地震峰值加速度

仪征化纤厂区基本为 II 类建筑场地，中软土；仅少部分河漫滩区为 III 类建筑场地，软弱土。厂区位于中国地震动峰值加速度区划图^[1]0.10 g 区，即峰值加速度在 0.090 g~0.139 g 范围内。仪征化纤主要为建筑

Table 4. The parameters of aseismic design for each district ($\lambda = 0.05$)

表 4. 分区地表设计地震动参数表(阻尼比 0.05)

分区	参数	不同概率水准的反应谱参数值		
		50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%
S-1	$A_{max}(g)$	0.049	0.144	0.257
	α_{max}	0.127	0.374	0.668
	$T_g(s)$	0.45	0.50	0.60
	β_{max}	2.60	2.60	2.60
	γ	0.90	0.90	0.90
S-2	$A_{max}(g)$	0.052	0.156	0.276
	α_{max}	0.130	0.390	0.690
	$T_g(s)$	0.45	0.50	0.60
	β_{max}	2.50	2.50	2.50
	γ	0.90	0.90	0.90
S-3	$A_{max}(g)$	0.051	0.145	0.254
	α_{max}	0.128	0.363	0.635
	$T_g(s)$	0.50	0.60	0.70
	β_{max}	2.50	2.50	2.50
	γ	0.90	0.90	0.90

物和构筑物，鉴于《建筑抗震设计规范》^[3]和《构筑物抗震设计规范》^[4]的地震影响系数标准形式基本类似，故本文用《建筑抗震设计规范》^[3]进行比较，仪征化纤厂区建筑抗震设计地震动参数见表 5。44 个计算点 50 年超越概率 63% 的 PGA 范围在 0.048 g~0.053 g，50 年超越概率 10% 的 PGA 范围在 0.142 g~0.156 g，50 年超越概率 2% 的 PGA 范围在 0.252 g~0.278 g。

对比表 4 和表 5 可知，仪征化纤厂区峰值加速度 A_{max} 明显高于建筑抗震规范取值，提高 40.0%~48.6%；参照中国地震动峰值加速度区划图^[1]归档原则，仪征化纤厂区由 0.10 g 区提高到 0.15 g 区，抗震设防要求已然提高一档。

7.2.2. 地震影响系数

由表 4 可知，S-1 区设计地震动参数最小，本文以 S-1 区地震影响系数曲线与建筑规范相比较(图 3)，可以看到，三概率水准下，S-1 区地震影响系数曲线外包建筑规范地震影响系数曲线。

比较表 4 和表 5 可知，三概率水准下，S-1 区地震影响系数最大值 α_{max} 明显大于规范值，而且高出很多。特征周期 T_g 方面，S-1 区特征周期大于规范值，且不同概率水准下，特征周期是不同的。下降指数 γ 二者一致。

S-1 区和 S-2 区均为 II 类建筑场地，其地震影响系数最大值和特征周期是不同的；S-3 区包括 II 类建筑场地和 III 类建筑场地。由此可见，同一类别建筑场地的地震动特性也会有较大差别，所以规范中给出的地震动参数只是场地特征参数的平均值。如果具体到某一工程，计算结果可能与规范取值有较大的出入。

各类规范均充分利用当时的科研成果，代表了当

Table 5. The parameters of seismic design criterion for Yizheng chemical Fiber factory ($\lambda = 0.05$)

表 5. 仪征化纤厂区建筑抗震设计规范地震动参数值(阻尼比 0.05)

特征参数	超越概率		
	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%
$A_{max}(g)$	0.035	0.100	0.220
α_{max}	0.080	0.230	0.500
$T_g(s)$	0.35(II)	0.35(II)	0.40(II)
	0.45(III)	0.45(III)	0.50(III)
γ	0.9	0.9	0.9

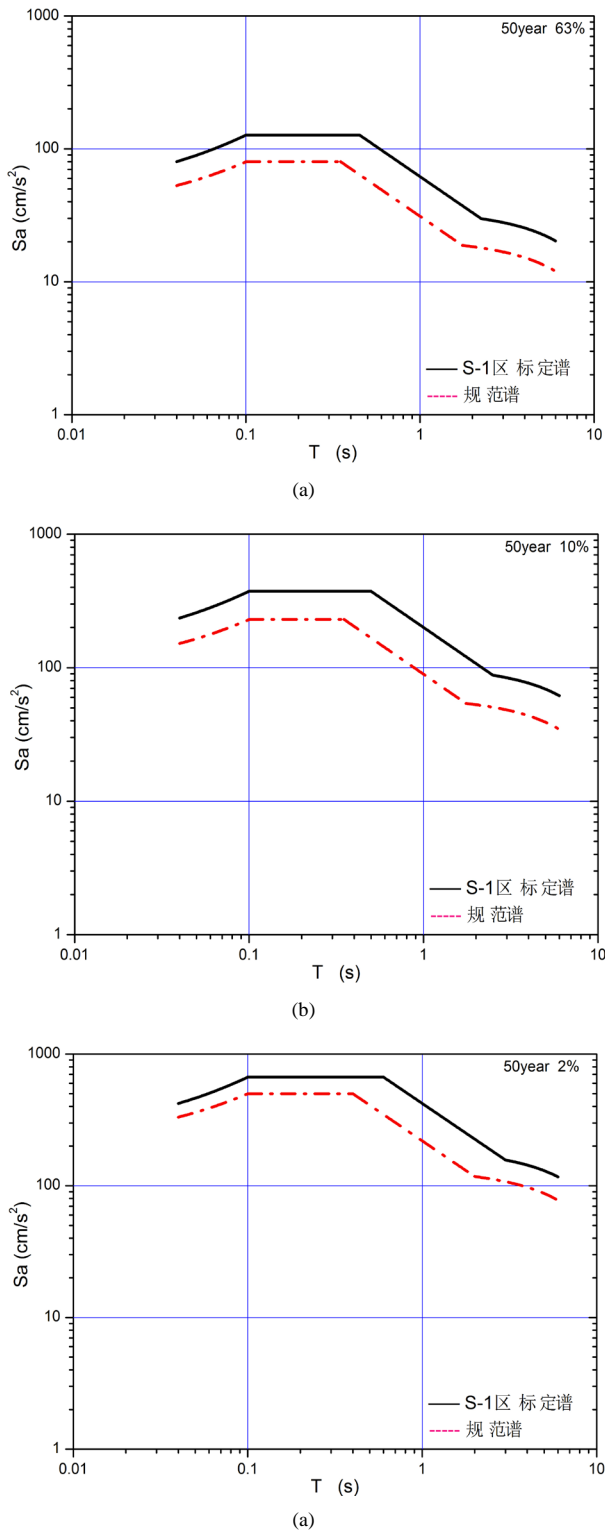


Figure 3. The horizontal seismic influence coefficient curve
图 3. 水平向地震影响系数曲线

时的科技认知，有其时效性和局限性。几年后，随着资料的积累，案例的增多，以及相关科学研究的深入，

规范也需要修订完善。《中国地震动参数区划图》^[1]是 2001 年颁布实施，《建筑抗震设计规范》^[3]是 2010 年颁布实施，近年来，世界各地发生了多次大地震，获得很多地震资料，同时相关学科也取得新成果，目前新一代《中国地震动参数区划图》正在制定中。

仪征化纤各项一般建设按表 5 开展抗震设计，这符合国家规定，但实际上造成建构筑物的抗震能力不足，一旦遭遇破坏性地震，必然不能最大程度地减轻地震灾害。地震小区划工作采用当前资料，运用最新科研成果，故仪征化纤厂区抗震设防要求已由 0.10 g 区提高到 0.15 g 区，相应的建构筑物设计地震动参数也提高，这有利于仪征化纤规划建设，提高抗震能力。

7.3. 地震地质灾害小区划

地震地质灾害是指在地震作用下，地质体变形或破坏所引起的灾害，包括地基土液化、软土震陷、崩塌、滑坡、地裂缝和泥石流等地震地质灾害。对于人口密集，经济发达地区而言，一旦遭遇破坏性地震的袭击，严重的地震地质灾害以及由此引发的其他次生灾害将导致巨大的人员伤亡和财产损失。

仪征化纤厂区抗震设防烈度为 VII 度，因该工程为大型石化企业，一旦发生地震地质灾害，损失极其严重，故对仪征化纤厂区按地震影响烈度为 VII 度和 VIII 度分别进行地震地质灾害评价，判别不同工程地质单元内地震地质灾害类型及其分布，勾画出严重、中等、轻微和无四种不同等级灾害的分区界限。并编写地震地质灾害小区划图说明，说明各分区内潜在地震地质灾害类型、程度及空间分布，介绍地震地质灾害小区划结果的使用范围以及使用过程中要注意的事项等。

8. 小结

从仪征化纤厂区地震小区划中，我们得到：

1) 大型厂矿企业占在范围大，可能涉及多个工程地质单元，场地特性、各项地震动参数受场地条件影响明显。大型厂矿企业建构筑物较多，必然开展过多次岩土工程勘察工作，应尽量收集相关资料，仔细分析，确保工程地质分区更细致、更合理、更准确。同时应当补充一些钻孔，钻孔布设需要考虑地形地貌特点、资料收集情况，以及建构筑物分布、重要工程或重点

工程场点(含规划)、可能发生次生灾害工程场点、需持续生产工程场点、工程地质分区、土质条件变化大小、某区域资料多寡、钻孔密度等等,力争获取更多、更有用的岩土信息,努力提高地震小区划质量。

2) 地震动效应分析时,应充分利用大型厂矿企业钻孔资料多的优势,多建立土层地震反应计算模型,以提高地震动小区划成果精度。大型厂矿企业地震小区划采用与工程地质分区相结合的方法更适合,尽量用地震动分区图法。为提高地震动小区划结果使用便捷性,地震动小区划分区不宜过细,细微的差别不宜过分强调,即地震动小区划分区数量尽量整合减少,各分区用不同颜色标示,地震动小区划图附上分区设计地震动参数表。

3) 在地震地质灾害评价中,大型厂矿企业场地问题多样化,引起地基失效的因素较多,如滑坡、崩塌、泥石流、砂土液化等。确定这些因素需要掌握大量水文地质、工程地质资料,技术人员也要具备一定的经验。同时应当按基本烈度、以及基本烈度提高一度,开展地震地质灾害小区划分析,这样才更全面、更有效。

4) 各类规范均充分利用当时的科研成果,代表了当时的科技认知,有其时效性和局限性。地震小区划工作能及时利用当前资料和科研成果,如潜在震源区、地震活动性参数、地震动衰减关系、土层力学参数等等,且充分考虑场地条件,从而使结果更符合实际。地震小区划成果有利于土地规划、工程抗震设计。

综上所述,规范取值为统计平均值,并结合国情作了调整,与场地条件结合不太紧密,是最低的抗震设防要求。地震小区划针对具体场地做更加深入细致的工作,针对性更强、考虑的因素更多、精度要求更高。因此建议其他大型厂矿企业、城市尽早开展地震小区划工作,以提高防震减灾综合能力。

参考文献 (References)

- [1] 全国地震标准化技术委员会 (2012) 中国地震动参数区划图. GB18306-2001.
- [2] 中国地震局 (2012) 工程场地地震安全性评价. GB17741-2005.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局 (2010) 建筑抗震设计规范. GB50011-2010.
- [4] 国家技术监督局 (2012) 构筑物抗震设计规范. GB50191-2012.