

# 抗震设防与工程地震的关系及若干 原则、方法问题

彭承光 王业新

李子权 李运贵

(广东省地震局)

**提要** 本文回顾了我国东南沿海滨海地带几例历史大地震造成的巨大灾害;讨论了由定数法所确定的地震烈度折算成抗震设计参数的关系,以及由频率法取得的地震动参数直接作为抗震设防依据的重要性;简述了地震小区划方法,指出开展沿岸地带港口城市、开发区和重大工程场地的地震小区划工作对减轻地震灾害的深远意义。

**关键词** 工程地震 抗震设防 地震危险性分析 地震小区划 原则与方法

## 一、滨海地带几例地震灾害

我国东南沿海地区,历史地震活动频繁,尤其是滨海近岸地带,强烈地震时有发生,给人民带来巨大的灾难和痛苦。例如:

### (1) 1604年12月28日泉州海外8级地震

泉州地震灾害:楼阁、雉堞倾圮殆尽,城内外庐舍倾圮,山石海水皆动,复舟甚多,地裂数处。莆田地震灾害:城崩数处,城中大厦几倾,乡间房屋倾圮无数,有伤人者,田地裂出黑沙,池水因地裂而涸。

### (2) 1605年7月13日琼山、文昌7级地震

琼山地震灾害:公署民房崩倒殆尽,城中压死数千,地裂水沙涌出,南湖水深三尺,田地陷没者不可胜记,调塘等都田沉成海,计若干顷。演顺都沉陷数十村。文昌地震灾害:官署民舍尽毁,压伤人畜,平地突陷成海。地震造成骇人听闻的惨象,被载于当地村民的族谱与家谱,至今还传诵于民间。

### (3) 1918年2月13日南澳海外7级地震

南澎地震灾害:灯塔站所有混凝土结构建筑物,如洋员宿舍,华员宿舍,院落围墙、火药库、贮油室等,皆倾圮、倒塌;水池之水悉为荡空,基岩地裂,涌出泉水。南澳地震灾害:全县屋宇夷为平地,人民死伤十之八,尸压败垣,无人收葬。汕头地震灾害:楼房、戏院、商店、衙署等房屋塌坏甚多,倒塌房屋百余家,死伤约千人,崎嶇对岸石山峰峦倾落山下,海水腾涌。诏安地震灾害:民房倒塌三千余间,死伤居民很多。粤东、闽西父老对此次

地震灾难仍记忆犹新。

在我国其它地区，现今地震造成的灾害，也令人触目惊心，例如，1976年7月28日，唐山发生7.8级地震，是日凌晨，突然，地光闪射，地声轰鸣，房屋倒塌，地裂山崩。数秒之内，百年城市建设夷为墟土，24万城乡居民死于瓦砾，16万人顿成伤残，7千多家庭断门绝烟。此难波及京津，全国震惊，这是世界地震史上的一场空前的大浩劫！

## 二、地震预报与工程地震

### 1. 地震预报

地震历来是人类共同抗御的对象，减轻地震灾害已成为人类面临的一项紧迫任务。大力开展地震预报与工程抗震工作，乃是做好应付地震灾害预案工作的重要一环。

地震预报的目的，是力图正确地指出今后可能发生破坏性地震的地点、时间、大小，使政府和人民得以采取相应措施，减轻地震灾害给国家和人民带来的损失。

地震预报划分为长期预报、中期预报、短期预报和临震预报。其中，中、短、临预报是为发出地震警报以减轻震灾服务的；从广义来说，长期预报主要是为工程抗震设防服务的。

### 2. 工程地震

工程地震是为解决工程建设抗震设防而迅速发展起来的一门新学科。它主要研究与建筑场地有关的潜在震源区划分、潜在震源区地震活动性规律、地震动参数选择以及这些参数的估计；研究与地震有关的地基与基础条件、强震运动及局部土质条件、土动力性质和性状，土与结构相互作用，地震危险性评定，地震区划和地震小区划。

对于长期地震预报，工程地震工作者主要通过场地地震危险性评定与场地地震小区划工作所取得的地震动参数，以及地基震害分布为工程结构抗震设计提供重要的依据。

## 三、地震烈度与抗震设计

### 1. 地震烈度

地震烈度是指某一个地区的地面和各类建筑物遭受某一次地震影响的强弱程度。

一次地震对不同地点的波及影响是不一样的，随着距离震中的远近而出现强弱不同的烈度。一般来说，距离震中愈近，烈度就愈高，距离震中愈远，烈度就愈低。我国地震工作者习惯把地震烈度理解为震害强弱程度，或通过震害强弱程度反映的地震动的大小。

地震烈度表是表示地震影响的一把尺度。我国地震烈度表是按宏观震害现象为标准来评定的，评定时并不考虑地震动加速度的大小。目前，国际上普遍采用按12度划分的烈度表，但日本采用按8度划分的烈度表，欧洲却沿用10度划分的烈度表。我国地震烈度表沿用国际通用12度分级标准，1980年修订的中国地震烈度表，虽然附加了地震动加速度、速度，但在烈度评定中是不使用的。

### 2. 地震基本烈度

地震基本烈度是预测某一个地区在未来一定时期内，在一般场地条件下可能遭遇的最大地震烈度。例如《中国地震烈度区划图》（1976）所反映的基本烈度是在未来100年内，在标准土为二类土的场地条件下，各地可能普遍遭受到的最大地震烈度。

### 3. 抗震设防烈度

抗震设防烈度是工程抗震设计所采用的地震烈度。一般情况下，设防烈度可采用基本烈度。在一定条件下，可采用地震小区划提供的地震动参数（如地面运动加速度峰值、反应谱值或地震影响系数）。

我国TJ11—78规范规定，建筑物设计烈度，一般按基本烈度采用，对特殊重要的建筑物，如必须提高一度设防时，应按国家规定的批准权限报请批准后，其设计烈度可比基本烈度提高一度采用；次要的建筑物，如一般仓库、人员较少的辅助建筑物等，其设计烈度可比基本烈度降低一度采用，但基本烈度为7度时不应降低。

新颁发的GBJ11—89规范规定，甲类建筑应按专门研究的地震动参数计算；乙类建筑可按本地区设防烈度提高一度采取抗震措施，但设防烈度为9度时可适当提高；丙类建筑按本地区设防烈度采取抗震措施；丁类建筑可按本地区设防烈度降低一度采取抗震措施，但设防烈度为6度时可不降低。

### 4. 设防烈度与设计地震动参数的折算

建筑物在进行结构的抗震强度验算时，通常只考虑水平方向的地震作用，并分别采用由设防烈度折算而来的水平地震系数和水平地震影响系数。

水平地震系数K，是地面运动水平最大加速度与重力加速度的比值，即

$$K = \frac{PGA}{g}$$

例如，在一次地震某处地面运动加速度记录中以重力加速度为单位的最大值，就是这次地震在该处的地震系数。一般认为，地面运动加速度愈大，地震的响影就愈强烈，地震烈度也愈高。地震系数和地震烈度同是表示地震强烈程度的参数，所以，两者之间存在着大致相对应的关系。烈度每增高一度，K值大致增长一倍。TJ11—78规范和中国地震烈度表（1980）所采用的K—I值列于表1。

表1 地震烈度与地震系数对应关系表

Table 1 Correspondence between seismic intensity and seismic coefficient

地震烈度I (度)		7	8	9
地震系数	TJ11—78规范	0.1	0.2	0.4
K	中国地震烈度表 (1980)	0.125	0.25	0.5

动力放大系数 $\beta$ ，是单质点弹性结构体系在地震作用下，最大绝对加速度与地面运动最大加速度的比值，即

$$\beta = \frac{SA}{PGA}$$

也就是单质点最大加速度反应比地面最大加速度增大的倍数，当地面运动加速度和阻尼比给

定时, 针对不同自振周期, 计算出各个相应的动力放大系数, 从而得到一条 $\beta$ - $T$ 曲线, 即 $\beta$ 谱曲线, 一般称之为动力系数反应谱。TJ11—78规范取 $\beta_{\max}$ 为2.25。

水平地震影响系数 $\alpha$ : 是单质点弹性结构体系在地震作用下, 最大绝对加速度与重力加速度的比值, 即

$$\alpha = \frac{SA}{g}$$

地震影响系数实质上是地震系数和动力放大系数的乘积:

$$\begin{aligned}\alpha &= K \cdot \beta \\ &= \frac{PGA}{g} \times \frac{SA}{PGA} \\ &= \frac{SA}{g}\end{aligned}$$

根据 $\beta_{\max}$ 值和前述所列 $K$ 值, 便可得到TJ11—78规范规定的相应烈度的 $\alpha_{\max}$ 值, 即当设计烈度为7度、8度、9度时, 地震影响系数最大值 $\alpha_{\max}$ 分别取0.23、0.45、0.90。地震影响系数曲线一般称为 $\alpha$ 谱曲线。

### 5. 设防烈度与场地选择

我国抗震规范中, 地震作用的大小决定于基本烈度, 建筑物抗震设计的地震动参数一般均按烈度来取值。作为设防标准的基本烈度, 主要是依据《中国地震烈度区划图》。该图主要反映在区域地震活动和地震地质构造特征等地震环境因素的影响下, 且在一般场地条件下, 烈度的最普遍分布情况。事实上, 由于场地环境条件的不同, 建筑物的破坏形式和性质也不同。对于主要是不稳定工程地质现象引起地震地基失效造成建筑物的破坏, 单纯采用提高设防烈度, 提高结构的抗震措施, 显然是不合理的, 也是无济于事。笼统地按同一烈度设计不同场地上的工程建筑, 在抗震上就有可能或偏于保守、或偏于不安全, 结果将造成国家经济损失或危及人民生命财产的安全。由于地震烈度是反映地震时某一个地区定性的、宏观的震害程度或地面震动破坏力的综合评价, 采用任何一个地震动参数来表征其与地震烈度的关系, 必然具有很大的离散性。随着科学技术的发展和人们的不断认识, 采用现行的地震烈度区划图作为重大工程抗震设计的依据, 显然是不能令人满意的。因此, 不少建筑设计师现已直接选用工程场地地震动最大加速度和反应谱作为抗震设防的基础。

### 6. 设计反应谱

我国现行有关规范的设计反应谱, 有采用 $\alpha$ 谱曲线或 $\beta$ 谱曲线。在影响反应谱形状的诸因素中, 场地条件和震级、震中距是主要的因素。从理论分析和实测记录表明,  $\beta$ 谱曲线随不同场地条件和震级大小的影响而有较显著的变化。比如, 当场地土层愈厚且软、震级愈大且远震中距时, 反应谱中长周期的频谱成分愈显著, 其主峰的位置愈向右移, 峰点就愈扁平。所以, 必须根据不同场地类别和震级、震中距来确定其反应谱曲线。

$\beta$ 谱曲线实质上也是加速度反应谱。其谱曲线的形状与 $\alpha$ 谱(也即 $SA$ )的形状相比, 两者仅相差一个比例常数 $K$ (即水平地震系数)。因为 $\alpha$ 谱曲线的形状与 $\beta$ 谱曲线的形状相似,

所以，为简化起见，GBJ11—89规范将不同场地的几条 $\alpha$ 谱曲线合并为一条水平线和一条下降线（图1），并给出不同情况下的拐点周期（表2）。新规范中设计反应谱既反映不同场

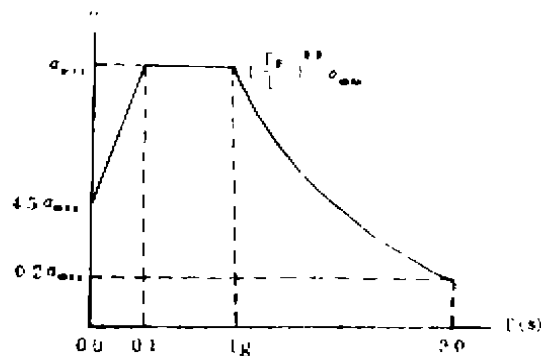


图1 地震影响系数 $\alpha$

Fig. 1 Seismic influence factor ( $\alpha$ )

$\alpha$ —地震影响系数；  $\alpha_{max}$ —地震影响系数最大值；  
 $T$ —结构自振周期；  $T_g$ —特征周期，根据场地类别和近震、远震按表2采用

地类别的影响，也考虑了近震和远震的影响，并适应0—3秒的范围。对周期大于3.0秒的建筑物，其反应谱取值宜做专门研究。

开展建筑场地工程地震勘测工作，可以提供适合具体工程场地的地面运动加速度和标准设计反应谱。

表2 特征周期 (S)  
Table 2 Characteristic period (S)

数值 震型 \ 场地	场 地 类 别			
	I	II	III	IV
近 震	0.20	0.30	0.40	0.65
远 震	0.25	0.40	0.55	0.85

四、新规范抗震设防准则

1. 小震不坏、设防烈度可修、大震不倒的设防准则

按GBJ11—89规范设计的建筑，当遭受低于本地区设防烈度的多遇地震（即小震）影响时，一般不受损坏或不需修理仍可继续使用，当遭受本地区设防烈度的地震影响时，可能损坏，经一般修理或不需修理仍可继续使用，当遭受高于本地区设防烈度的预估的罕遇地震

(即大震)影响时,不致倒塌或发生危及生命的严重破坏。

## 2. 三个水准设防要求

新抗震设计规范在地震危险性概率分析的基础上,提出三个水准的抗震设防要求:第一水准烈度,以50年为基准期,超越概率为0.632的地震烈度为众值烈度,计算结构的弹性地震作用,进行强度验算,使建筑物处于正常使用状态;第二水准烈度,以50年内超越概率为0.1的基本烈度,作为结构的弹塑性变形验算,使非弹性变形或结构体系的损坏控制在可修复的范围,与TJ11—78规范相当;第三水准烈度,以50年内超越概率为0.02的罕遇地震的烈度作为延性设计,使结构在强烈地震作用下有较大的非弹性变形,但应控制在规定的范围内,以免倒塌。

## 3. 两阶段设计的地震影响系数

新抗震设计规范采用二阶段设计来实现前述三个水准的设防要求。第一阶段设计取第一水准的地震影响系数(表3)进行构件的截面承载力验算,这样,第一阶段设计既满足了在第一水准下具有必要的强度可靠度,又满足第二水准的设防要求。因此,对于一般结构,无需进行基本烈度下的抗震验算。第二阶段设计取第三水准的地震影响系数(表3)进行弹塑性变形验算,以便采取相应的构造措施实现第三水准的设防要求。

表3 两阶段设计的地震影响系数最大值  $\alpha_{\max}$

Table 3  $\alpha_{\max}$  of seismic influence factor in the two-period design

抗震设 计阶段	6度	7度	8度	9度
第一阶段	0.04	0.08	0.16	0.32
第二阶段		0.50	0.90	1.40

# 五、工程场地地震危险性评定

地震危险性评定是指评价某一个工程场地未来可能遭受最大地震的破坏影响。其目的是为建筑物提供抗震设计依据。

工程场地地震危险性评定主要采用定数法和概率法两种。

## 1. 定数法

地震危险性评定的定数法也叫确定性法。它是对工程场地未来一定期限内遭受最大地震的危险性作出唯一的预测。

确定性地震危险性评价大致做法是:综合区域地震活动性和地震构造环境的分析结果,确定研究地点周围的地震危险区的分布范围及最大震级;利用该区的地震烈度衰减规律,估计各危险区在研究地点的最大地震影响烈度,取其最大者为基本烈度。

定数法的关键在于对地震发生的时间、地点、大小的判别都作为确定性事件,其最终结果给出场地地震危险性唯一的、确定性的评价。迄今为止,大多数地震危险性的评价,主要

还是采用定数法。我国第二代地震烈度区划图就是按定数法结果勾划出来的。

但是，就目前科学技术水平，人们对地震的认识还不能达到准确预报程度，对地震发生的时间、地点、大小的判别都带有很大的不确定性，因此，还不能作为确定性事件来处理。显然，确定性定数法所得结果，无法满足重大工程按一定危险水平进行抗震设防的要求。

## 2. 概率法

地震危险性评定的概率法，一般称为地震危险性分析。它是以概率方式来评价某一个工程场地在一定期限内遭受不同程度地震作用的可能性。

地震危险性分析方法的基本步骤是：判定潜在震源模型；确定各潜在震源区的地震活动性参数；选取适合工程场地的地震动衰减规律；按一定概率模型分析场地的地震危险性。

概率法把地震发生的时间、空间和强度都当作随机事件，用概率模型来表示其不确定性。概率法分析结果给出该工程场地震动参数超过某一给定值的概率。

应用地震危险性分析，可以按照不同设防水准，提出相应概率水平的地震动参数，这样，就有可能通过最佳决策求得最大抗震效果，达到既安全又经济的目的。由此可见，采用概率法分析结果作为抗震设计参数，其重要性是不言而喻的。

# 六、地震小区划

地震小区划即地震小区域划分的简称。地震小区划是研究一个小地区，如一座城市、县镇，以及一个矿山或一个工业基地在对工程抗震有重要影响的不同场地工程地质条件下，在其周围潜在震源的影响下，可能出现的场地地震效应，并详细划分和评估可能遭受到地震破坏作用结果的分布。它不仅为重大工程项目抗震设计、抗震加固提供依据，也是为制定城市建设规划与改造规划、土地利用规划、震害预测与制定减轻地震灾害计划提供重要的基础资料。地震小区划主要内容与工作流程框图如下（图2）。

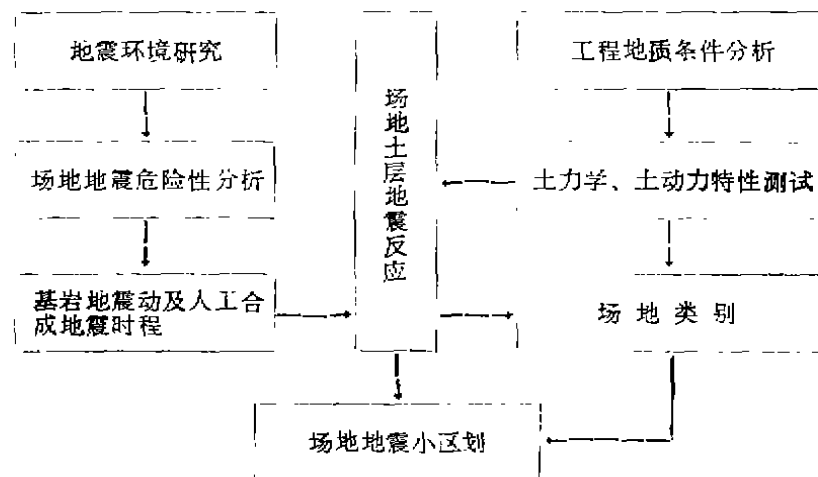


图2 地震小区划主要内容与工作流程框图

Fig. 2 The main contents and the working process of macrozonation

地震小区划种类很多,但大致分为两类。第一类是场地破坏效应小区划,它是根据场地工程地质条件(或地震工程地质条件)和场地、地基对地震的敏感程度和地震效应来进行小区域划分的。目前,由于如何鉴定和评价场地不同地质单元的地震稳定性的研究,还没有统一模式。只能由工程地质工程师根据现场调查和测试资料进行综合分析、作出判断和评估。

第二类是场地地震动和反应谱小区划,它是根据场地地面卓越周期、地震动的峰值加速度、峰值速度和反应谱来进行小区域划分的。此外,还有根据多指标综合成果来进行小区划。

(1) 场地烈度 $I_s$ 小区划: 在地震烈度区划的基础上,按一定场地工程地质条件对地震区划结果进行小区内烈度的调整。也有根据按烈度的分析计算结果划分小区。

(2) 地震工程地质小区划: 根据场地工程地质条件、岩土体结构和力学指标、土体抗震性能进行地震影响小区划。

(3) 场地类别小区划: 根据场地土层波速 $V_s$ 、厚度 $H$ 、承载力 $f_k$ 来进行场地类别小区划。

(4) 地基液化小区划: 可根据相对土层密度 $D_r$ 或标准贯入 $N_{63.5}$ 、以及液化应力比 $\tau_d/\sigma_0'$ 来判别砂土液化,并根据液化等级编制地基液化小区划。

(5) 地基震陷、滑移小区划: 主要根据发生震陷和滑移的机理或原因,对工程场地内潜在危险地段作出估计。也有采用地面震陷敏感性指数 $\zeta$ 分析结果来划分小区。等等。

以上均属于第一类小区划。

(6) 地面脉动卓越周期 $T_g$ 小区划: 利用场地地面常时脉动具有频率特性的稳定性,采取对某一场地多次重复测量所得的大致相同的自振特性的结果,使用最大周期与平均周期来进行小区划。

(7) 地面运动最大峰值加速度PGA小区划: 根据场地内各参考点地震反应分析计算的最大峰值加速度PGA进行场地小区域划分。

(8) 地面运动最大峰值速度PGV小区划: 根据场地内各参考点地震反应分析计算的最大峰值速度PGV来划分地震影响小区。

(9) 场地 $\beta$ 谱分类小区划: 根据一定场地的合成人工地震波作为输入波,输入到参考点处的基岩上,利用该处的测井(钻孔)资料和物理状态参数,求得各参考点处以地面峰值加速度与动力放大系数乘积所表示的地面最大绝对加速度反应谱,即

$$S_A(T) = PGA \cdot \beta(T)$$

并采用PGA和PGV双参数来标定 $\beta(T)$ 模型。于是,可以根据 $\beta$ 谱曲线形态进行场地土类别小区划: 按标准反应谱峰值点 $\beta_{max}$ 周期 $T$ 编制小区划; 利用 $\beta$ 谱特征点作地震小区域划分。

以上均属于第二类小区划。

多指标综合地震小区划,则是采用以地震动参数和反应谱作为主要目标,以场地工程地质条件和场地土类别为基础,结合多项指标成果综合而成的地震影响小区划。

目前,愈来愈多的工程地震与建筑抗震设计师认为,为满足工程抗震设防的要求,对于一个地区,需要采用指标各不相同的一组地震小区划图件,而不是一张单一指标的小区划图。我国《地震小区划工作大纲》(试行稿,1988、1),除了规定给出设计地震动小区划



图外，还要求根据城市和工程场地内工程地质条件的详细调研结果，编制不同类型的地面破坏小区划图件。

## 七、防御滨海地带未来的地震影响

大凡从事工程抗震的工程师，对中国东南沿海地区分布着如下几条有名的地震带：汕头——泉州地震带、河源——邵武地震带、阳江——广州地震带、雷州——琼北地震带，都比较熟知。然而，由于近十几年来，地震科技事业的迅速发展和南海北部大陆架的深入调查，地震工作者对滨海地区地震大形势的研究取得了新的进展，认为位于南海北部大陆边缘存在着一条鲜为人知的名曰滨海地震带。对这条地震带，一般抗震设计工程师并不熟知。这条地震带，一旦发生强烈地震，势必使处于对外经济开放前缘地带的一些沿海城市、港口、重大工程建设产生不同程度的地震影响。

我国城市规划法有关规定指出，在可能发生强烈地震的地区，在编制城市规划中必须采取相应的抗震措施。显然，着手沿海地区对外经济开放前缘地带的地震烈度复核和地震小区划工作，对减轻地震灾害有着深远的意义。可以说，这项工作的开展已经势在必行，刻不容缓，否则，将给蓬勃发展的港口城市、工业基地和开发区留下难以估量的隐患。

随着我国四化建设的飞速发展，近些年来，工程地震工作已愈来愈受到全社会的广泛关注。已经有一些沿海城市、港口和工业基地、开发区正在陆续开展地震小区划工作。但令人担忧的是，由于种种原因，沿海地带一些建设项目的抗震设防问题，尚未被引起足够的重视。但是，地震灾害的严酷事实和惨痛现象告诫人们，建筑必须抗震设防。这是关系人民生命财产安全的头等大事。地震灾害调查已再次表明，凡是采取相应抗震措施的建筑物，就可以抗御地震的突然袭击，大大减轻震灾造成的损失。不然，一遇突而其来的强烈地震，多年的劳动建设成果就会毁于一旦，后果是不堪设想的。

## 参 考 文 献

- 〔1〕中国地震目录（第一、二册合订），科学出版社，1971。
- 〔2〕《华北地震科学》编委会编辑出版，唐山抗震救灾图集，1988。
- 〔3〕北京建筑工程学院等，建筑结构抗震设计，地震出版社，1981。
- 〔4〕胡世贤，地震工程，地震出版社，1988。
- 〔5〕冯小旺等，抗震设防标准及各类建筑物抗震设计中“小震”与“大震”的取值，《地震工程与工程振动》，9卷，1期，1989。
- 〔6〕戴国宝，建筑抗震设计的基本原则和概念，《工程抗震》，第1期，1989。
- 〔7〕周锡元等，场地·地基·设计地震，地震出版社，1990。

# THE RELATIONS BETWEEN ANTISEISMIC DESIGN AND ENGINEERING SEISMICS, SOME PRINCIPLES AND METHODS

Peng Chengguang, Wang Yexin, Li Ziquan, Li Yungui

( Seismological Bureau of Guangdong Province )

[Abstract] This paper reviews a several great disasters caused by a few historical macroseisms in the coastal region of south east China. After discussed the parameter of antiseismic design converted by seismic intensity, which determined by determinism, the importance of taking parameter of ground shock as the basis of antiseismic design and stated briefly the method of microzonation, it points out that carrying out the task of microzonation in the city of coastal region, developing area and the important engineering sites has profound significance in reducing earthquake catastrophes.

[Key words] Engineering earthquake, Antiseismic design, Analysis of seismic risk, Microzonation, Principle and method