

缅甸 Yangon 及其周边地区地震危险性评估

Yin Myo Min Htwe¹ 申文斌^{1,2} 孙 榕¹

(1 武汉大学测绘学院地球物理系,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:用概率统计方法对仰光(Yangon)及其周边地区的地震危险性进行了评估研究。根据常用的复现法和最大量级值的不同,将地震源区域划分为 9 个不同的区域。本研究区域为 13°37′N~20°2′N、93°35′E~99°5′E,并给出了 50 a 内地震发生可能性超过 2%和 10%的地震危险性分布图以及峰值加速度值。
关键词:地震危险性;评估;峰值加速度
中图法分类号:P223

缅甸处在由喜马拉雅山脉延伸至巽他海沟的一条很长的活动构造带上^[1],历史上发生过很多地震。仰光(Yangon)处在中央低地的南部,是缅甸三大地震构造活动省份之一。从 Taikkyi-Gyophyu 区的 Taungnio 山脉到仰光北,经话丹林山脉到仰光南形成了一系列孤立的山峰,这很可能源于上中新世岩石的剧烈变形,比较典型的一个断裂是位于大金塔以东 40 km 的实皆(Sagaing)断裂,它是一个南北走向的区域性右行走滑断层。本文的目的在于提供地震危险评估分布图,通过计算所研究区域 50 a 内地震发生概率超过 2%和 10%的峰值加速度(PGA)以及对站点的岩石类别进行划分来完成。峰值加速度值是基于 Boore(1997)的衰减关系^[2]给出的。

1 研究区域的地质构造情况

仰光的中部地区包含中新世加固的沉积岩和其上覆盖的第四纪沙、淤泥和粘土。一般认为,Mingalardon 山脉的最上部构造类似于上新世的伊洛瓦底江构造。然而,2003 年人们在公路延伸施工挖掘中发现 Shwegondaing 区域的岩石显示的薄风化页岩层;同年,人们在为 Yanshin 中心奠基时发现岩石为风化砂岩。上述两个例子说明其岩性特征类似于 Taikkyi Taungnio 区域的中新

世沉积物^[3]。
Htun^[4]认为,Thadugan 地区的砂岩和岩石的 Besapat 变异曾属于中新世的上勃固组,另外,Inyar 湖的左右桥墩处所暴露的部分岩石以及 Inyar 和 Damazete 路^[5]的交汇处所显示的岩石类型与 Thadugan 处的岩石类型尤为类似。
仰光郊区广泛分布着第四纪沉积岩,其主要成分为高塑性硬土,上面覆盖有沙和淤泥。Naring^[5]将第四纪沉积层分为河谷堆积层和冲积层。河谷堆积层包括比更新世更早的冲积层^[4],前者属于梯田沉积的一种,由松散的砂砾、沙和淤泥组成;而后者是较新的堆积物。考虑到勃固复背斜西部的巨大香肠状构造,独立山脉的中心比其周围区域更趋向于刚硬的岩石形态。根据 Taungnio、Phugyi 集水区、Thadugan 区域和 Shwedagon 山脉的山底构造情况,以及有可能的话丹林山脉的山底构造情况,Kyaukkok 或 Thadugan 砂岩就是那种类型的核心^[3,4]。
位于大金塔以东 40 km 的实皆断裂,是一个南北走向的区域性右行走滑断层。实皆断裂的向南延伸导致马尾结构的伸展分割与 Martarban 海的多个中心相互碰撞,其结果是沿东西走向的交叉断层(cross faults)和具有 NNW-SSE 趋势的反断层按照这种走滑框架发生走滑。

2 数 据

本文将以往已有的两个目录 DMH 目录(缅甸气象和水文局)和 PDE 目录(美国地质调查用的多种震中初步探测目录)合并成一个新的目录。两个目录中的记录有很大一部分是重复的,为此我们采用了自动的和手工的方法从联合目录里的重复记录中选出合适的记录,这其中还包括对地震源记录可靠性的评价以及数据优先度的评定。当同一个地震被广泛分布的地震仪测站所记录时,计算出参数的误差,比如初到时间、位置和量级。本文只考虑由位于缅甸的 10 个地震台站记录到的发生在缅甸区域的地震。联合目录覆盖区域为 93.35°E~99.5°E、13.37°N~20.2°N,它记录了 1975 年到 2006 年发生在缅甸的所有大于 5 级的地震。

9 个用于研究的地震区域处在以仰光为中心、半径大约 200 km 的区域内,如图 1 所示。地震源区的划分是基于所划分区内地震发生概率均匀分布的设想以及地表地质结构框架来进行的。9 个地震区域的 Gutenberg-Richter 参数参见表 1。

图 2 说明 Gutenberg-Richter 定律在实皆断层南部的地震应用,图 3 说明了回归年的地震量级。

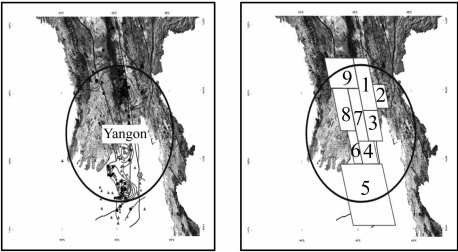


图 1 研究区域
Fig. 1 Area of Interest

表 1 Gutenberg-Richter 参数的输出

Tab. 1 The Output of Gutenberg-Richter Parameters

地震区域	A	B
1	0.759 67	0.357 59
2	0.544 07	0.434 22
3	0.672 1	0.434 22
4	0.598 27	0.473 69
5	0.710 78	0.443 45
6	0.776 08	0.379 9
7	0.596 71	0.473 69
8	0.631 44	0.434 22
9	0.499 76	0.434 22

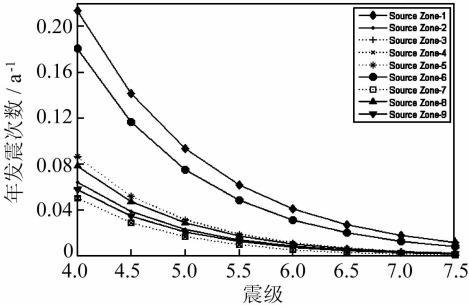


图 2 标准 Gutenberg-Richter 重现定律
Fig. 2 Standard Gutenberg-Richter Recurrence Law Period

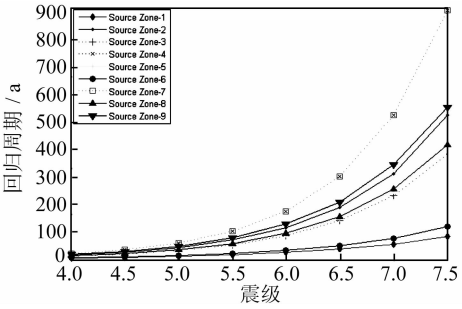


图 3 地震量级随回归时间的效果
Fig. 3 Effect of Earthquake Magnitude on Return Period

3 衰减关系

地表运动预测方程或衰减关系将地表运动(峰值加速度)与特定的量级、由地震中心到站点的距离、断层类型、泥土状况和构造环境等因素联系到了一起^[6]。将地表运动表述为走滑断层机制中的地震矩量级、距离以及站点状况的函数^[2]:

$$\ln Y = b_1 + b_2 (M_w - 6) + b_3 (M_w - 6)^2 + b_5 \ln r + b_v \ln (V_s / V_A) \tag{1}$$

$$r = \sqrt{r_{jb}^2 + h^2} \tag{2}$$

r_{jb}^2 是到破裂平面在地表投影的最短水平距离。

$$b_1 = \begin{cases} b_{1s}, \text{走滑地震} \\ b_{1RS}, \text{逆滑地震} \\ b_{1ALL}, \text{地震机制没有制定} \end{cases} \tag{3}$$

式中, b_{1s} 、 b_{1RS} 、 b_{1ALL} 是待确定的参数。表 2 列出了每个地震区域最短的水平距离。

对于 0~2 s 之间的周期,选择特定系数(输入)依照 Boore 的平滑系数来估计峰值水平加速度^[2]。然后,将峰值水平加速度代入式(1),由此估算出随机水平分量按 5% 衰减带来的伪加速度响应波谱(g)。Boore 等^[7]所做的工作是基于 Boore^[2]的,其中相关的方程式有改进^[8]。独立站

点类别的水平运动由地震震源记录获得,其时间间隔为 0 到 2 s,所产生的地震矩量级为 7。图 4 说明了 9 个地震区域的衰减结果。

表 2 每个地震区域最短的水平距离

Tab. 2 Closest Horizontal Distance of Every Seismic Source

地震区域	水平距离/km
1	136
2	86
3	54
4	71
5	171
6	121
7	64
8	96
9	179

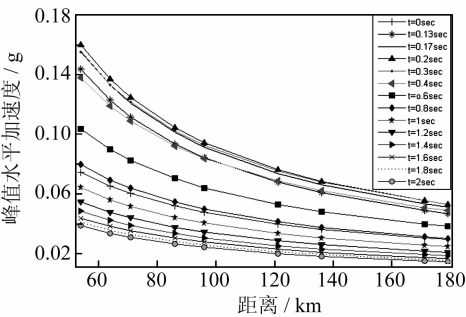


图 4 不同周期的峰值水平地面加速度的估计,分别九个地震区域基底岩石站点(620 m/s)的曲线,矩量级都为 7

Fig. 4 Estimates of Peak Horizontal Ground Acceleration of Different Periods for Rock Site (620 m/s) at the Base of Nine Source Zones with Moment Magnitude 7

4 危险性估计

不同回归周期的峰值加速度和概率水平是建筑结构分析和建筑设计中常用的参数,因此对它们的评估也是确定地震风险的常用方法。在本研究中,风险通过峰值加速度的估计来得到评估。评估结果以相对于峰值加速度的地震危险性概率的超标率分布图来刻画。研究区域共分为 9 个地震源区域。这些地震源都是通过多台地震仪联合记录来确定的。除了以构造的方式来定义构造区,这些区域同时对应于曾发生过 $M \geq 7$ 级地震的地方。对于仰光及其周边地区选定的站点,按照 Reiter 方程^[9]计算了与水平运动级别对应的年超标频率:

$$E(z) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \int_{m_0}^{m_u} f_i(m) \cdot$$
$$\left[\int f_i(r) P(Z > z | m, r) dr \right] dm \quad (4)$$

其中, $E(z)$ 是给定时间间隔 t 内、级别为 z 的水平

运动超标数的期望值, N 是地震源数, α_i 是第 i 个地震源区域内地震量级在 m_0 (地震量级下界) 和 m_u (地震量级上界) 之间的地震发生的平均次数, $f_i(m)$ 是第 i 个地震源区域量级(复发关系)的概率密度分布函数, $f_i(r)$ 是测站到地震源距离的概率密度分布函数, $P(Z > z | m, r)$ 是一个地震量级为 m 、震中距为 r 的地震所带来的水平运动会超过级别 z 的概率。

5 讨论与结论

对研究区域岩石站点 50 a 内地震发生概率超标为 2% 和 10% 的地震风险进行了计算。根据 Boore 给出的衰减关系^[2],对仰光及其周边地区计算了峰值加速度危险性曲线,也叫或然地震风险模型,结果如图 5 所示。利用格网上的峰值加速度来画等值线,从而得到或然地震风险图。或然地震风险分析图可以用在建筑法令的地震区划、地震保险以及关键设施的特种研究^[10]。

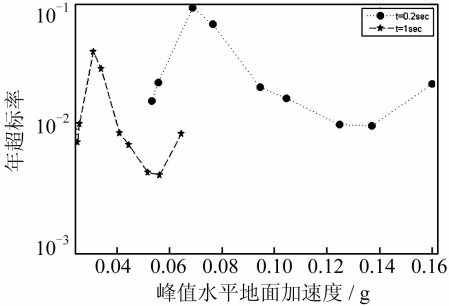


图 5 根据 Boore^[6] 所给出的衰减关系计算得到的所有地震源岩石站点处的风险曲线,波谱周期分别为 0.2 s 和 1 s

Fig. 5 Hazard Curve with 0.2 s and 1 s Spectral Periods Based on Boore et al.^[6] Attenuation Relationship at Rock Sites for All Sources

或然地震风险图显示了各个岩石站点 50 a 内地震发生概率超标 2% 和 10% 的峰值加速度等级,同时也表明 Boore^[2] 给出的衰减关系在不同的地震区域会有不同的峰值加速度值。

将回归周期近似为 2 475 a(50 a 内 2% 的超标)和 475 a(50 a 内 10% 的超标),根据 Boore^[2] 给出的经验关系,对级别为异峰-峰值加速度的岩石站点进行了或然地震危险分析,并给出了相应的等值线图,也即或然地震风险图(图 6),其中,计算采用了 MATLAB 工具,绘图采用了 ArcGIS-9.3 软件。

图 6 是针对仰光及其周边地区的地震风险图或叫异峰-峰值加速度图。它们是基于 Boore^[2] 给

出的衰减关系计算得到的,分别为 50 a 内概率超过 2%和 10% 的两种图。在建筑法规中,为了针对不同的建筑法规提供统一的危险响应波谱,通常会选用 0.2 s 的波谱加速度(0.2 SA)值来体现

响应波谱的短周期范围。总体来说,0.2 SA 代表波谱加速度中的上界。基于同样的理由,通常会选用 1 s 的波谱加速度(1.0 SA)值来体现响应波谱的长周期范围(1.0 SA)。

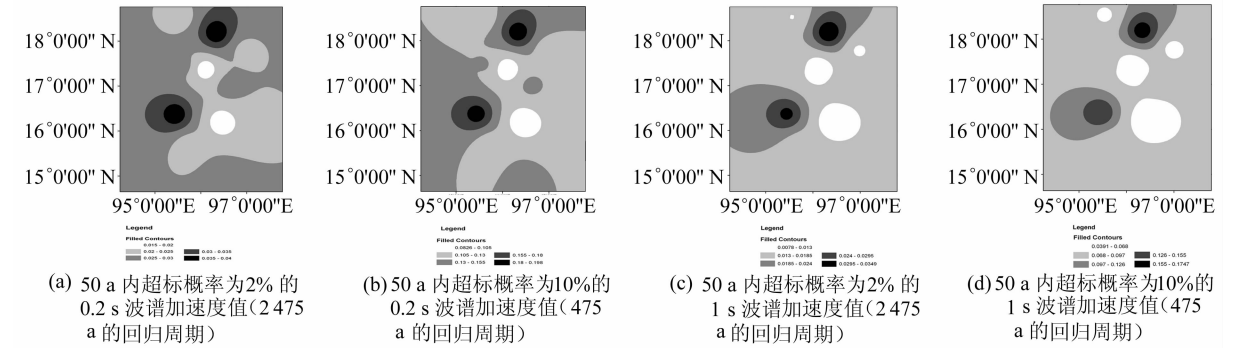


图 6 所有岩石站点的波谱加速度值
Fig. 6 Spectral Acceleration at Rock Sites for All Sources

由图 6 可以看出,最高的地震风险处在地震源区 1 (经度 96.33°, 纬度 18.18°) 和地震源区 6 (经度 95.45°, 纬度 16.37°);最低的地震风险区是地震源区 4 (经度 96.44°, 纬度 16.21°) 和地震源区 7 (经度 96.10°, 纬度 17.37°)。结合图 2 和图 3 可以发现,在本文研究的 9 个区域内,地震风险高的地区同时也是地震发生概率较大的区域,或地震回归年较短的区域。

GPS 在现代地壳构造运动中有着极大的应用^[11-12]。本文区域 1 所示的勃固地区,处在实皆断层的向南延伸地带。根据 Vigny^[1] 等人的计算,印度板块向东北插入欧亚大陆板块时,其相对运动大部分被实皆断层所吸收,实皆断层由此成为缅甸境内一大纵向构造带,其自然延伸可以达到勃固地区^[1],因此实皆断层的存在导致了区域 1 的地震活跃性。而区域 6 的地震活动不能简单地认为是实皆断层的向南延伸,一个可能的解释是安达曼海的转换断层的活动激发了区域 6 内的地震^[13]。值得注意的是,区域 4 和区域 7 作为地震低发区域,刚好介于区域 1 和区域 6 中间。这说明实皆断层和安达曼海的延伸至伊洛瓦底江下游海岸线的转换断层并不是连接在一起的。或者它们是连在一起的,但是现在已经处在地震平静期。这些结果对于仰光及其周边地区的建筑法规及长远使用具有十分重要的参考价值。

参 考 文 献

[1] Vigny C, Socquet A, Rangin C, et al. Present-Day Crustal Deformation Around Sagaing Fault, Myanmar[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(B11): 2 533-2 542

[2] Boore D M, Joyner W B, Fumal T E. Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work[J]. Seismological Research Letters, 1997, 68: 128-153

[3] Swe T L. Engineering Geology of Taikkyi-Taungnio Road Construction Project[R]. Feasibility Report, Directorate of Military Engineers, 2002

[4] Htun K. Sedimentology and Petrography of South-Western Part of Thadugan[D]. Yangon: Yangon University, 1996

[5] Swe T W. Water Well Drilling Report[R]. Ahlin Yaung Geotechnical and Engineering Services Co Ltd, Mymmar, 1998

[6] Petersen M D, Dewey J, Hartzell S, et al. Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Sumatra, Indonesia and Across the Southern Malaysian Peninsula [J]. Tectonophysics, 2004, 390: 141-158

[7] Boore D M, Atkinson G M. Boore-Atkinson Provisional NGA Empirical Ground-motion Model for the Average Horizontal Component of PGA, PGV and SA at Spectral Periods of 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 2, 3, 4, and 5 Seconds[R]. Report of Next Generation Attenuation (NGA) Models, Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2006

[8] Boore D M. Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work[J]. Seismological Research Letters, 2005, 76: 368-369

[9] Anderson J G, Brune J N, Anooshehpour R, et al. New Ground Motion Data and Concepts in Seismic