

三危山断层近场地震动对敦煌莫高窟的影响研究

卢育霞^{1,2}, 石玉成^{1,2}

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:三危山断层距敦煌莫高窟仅约3 km。本文建立横向均匀成层的地震断层模型,利用随机有限断层方法,预测三危山断层发生5.5级、6.0级、6.5级地震时震动对莫高窟的影响。研究表明逆断层使三危山断层辐射的地震动分布形态呈现出明显的上下盘效应。同时,将计算PGA值与已有的根据其它地区地震记录推出的PGA衰减关系进行了对比分析,认为该结果可供莫高窟抗震防护加固设计时参考。

关键词:莫高窟;三危山断层;近场地震动;随机有限断层法

中图分类号:P315·9 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0844(2004)03-0260-06

0 前言

举世闻名的莫高窟历经千年,承受各种自然力的作用,现今潜藏着坍塌和被损坏的危险性,其中未来地震可能是造成其破坏的重要原因。受重力和构造运动的影响,莫高窟石壁中已存在近东西向、南北向和近水平裂隙,在未来地震的作用下,会使裂隙增多,原有裂隙加大,并可能引起岩体壁面坍塌和剥落。为了提高莫高窟及其附属建筑物的综合抗震能力,减轻地震可能造成的灾害,须对莫高窟保护区的抗震设防标准进行科学评价,并尽快采取有效防护措施。三危山断层是一条第四纪活动断层,距莫高窟最近距离约3 km,发震时的近场强地面运动对洞窟会产生重大影响,因此有必要深入研究该断层近场地震动空间分布特征。

目前研究强地面运动特征主要通过两种途径进行:一是经验统计方法,对现有大量实际强震记录进行统计分析,找出规律;另一种是通过地震学的理论数理计算来反映震源破裂过程,再与实际地震记录相结合对比分析。前者对于缺乏强震记录的地区适用的可靠程度难以确定,而后者因近几年强震记录积累迅速,近场强地震动衰减研究的理论方法越来越得到重视,尤其研究强地震动预测的随机法取得了很大进展。考虑莫高窟及其附近地区无强震记录,为了给洞窟加固抗震设防提出相应的设计地震动参数,本文确定采用随机有限断层方法预测地震动。我们建立横向均匀成层的地震断层模型,以Boore^[1], Schneider-Langer等^[2]提出并改进的点源模型为基础,运用随机有限断层地震动叠加合成方法,预测发生5.5级、6.0级、6.5级地震时三危山断层产生的地震动对莫高窟的影响;同时,将计算PGA值与已有的根据其它地区地震记录推出的PGA衰减关系进行对比分析,以验证结果。

1 合成地震动的随机有限断层法

随机有限断层模型主要适用于拟合近场强地震动,很多研究已证明该方法是可行的(Schneider等, 1993; Atkinson和Beresnev, 1997)。另外,一些研究者多次模拟了有丰富强震资料的1994年北岭6.7级地震,与实际近场强震记录对比合成效果较好(Beresnev等, 1997; 陶夏新, 2003);陶夏新等还论证了这种随

收稿日期:2004-05-20

基金项目:科技部社会公益研究专项资金项目(2002DIB20062);中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC20040050

作者简介:卢育霞(1978-),女(汉族),甘肃玉门人,硕士,主要从事岩土工程与工程地震研究工作。

机方法在合成的时程中表达破裂的方向性效应和上盘效应是有效的^[5]。笔者曾使用随机有限断层法模拟有近场记录的1988年肃南5.7级地震,合成结果进一步验证了这一方法的有效性。

已知地震是由断层活动破裂产生的,点源模型是当震中距远远大于发震断层空间尺度时,可将断层理想化为一个发生地震的“点”;然而当强震发生在近区域处(即近场的大尺度发震断层破裂)时就必须考虑有限断层长度的影响。Beresnev 和 Atkinson^[3](1997,1998)提出模拟地震动的有限断层方法:假定地震破裂与一个有限的断层平面有关,该断层平面被划分为若干个矩形次断层(子源),根据断层的错动性质可确定破裂起始点(震源);由震源点开始,当破裂传播到每个次断层的中心位置时,子源开始破裂,设定破裂的模式和破裂传播的速度,可得出子源破裂的时间顺序;把每个次断层看作一个点源,根据子源与场址的几何关系,可以计算每个子源对场址的影响;考虑每个子源的破裂传播到达的延时,分别叠加各子源的加速度时程,可得出有限断层破裂在场点处引起的地震动(图1)。

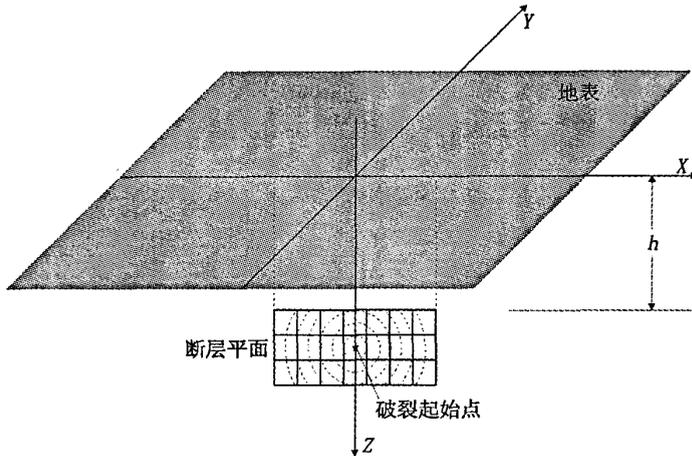


图1 断层近场地震动计算模型示意图(中心破裂模式)

Fig.1 Sketch of computation model of near-field ground motions of fault.

根据这一基本思想,可将本文合成地震动的有限断层法分析确定地震断层模型基本步骤归纳如下:

(1) 根据震级(或设定震级)确定发震断层的规模^[4]:

$$\log L = -2.44 + 0.59M \quad (1)$$

$$\log A = -3.49 + 0.9M \quad (2)$$

式中 L (km) 和 A (km^2) 分别为断层的长度和面积, M 为震级。

(2) 将发震断层简化为一矩形断层平面,整个断层平面被分成许多子源。确定子源的尺寸有多种方式,如在大震震级(M)和破裂长度(L)已知的情况下,与选定的子震震级(M_s)相应的子源平均破裂长度 ΔL 可以表示为

$$\log \Delta L = \log(L) - 0.5(M - M_s) \quad (3)$$

因此,选择能使子源基本可视为点源子震震级,然后可根据公式(3)确定子源几何尺度的大小。目前,一般均认为 M_s 的上限以5~5.5级左右为宜^[5]。

本文中根据 Beresnev 等^[3]的研究,4~8级地震时均有一特定的子源几何尺度可以使拟合结果最为理想,给出的子源长度 ΔL 与震级的关系为

$$\log(\Delta L) = 0.4M - 2 \quad (4)$$

(3) 控制子源能量之和等于地震总能量,即所有发生子震地震矩之和应与大震地震矩一致。求得大震地震矩和子震地震矩,即可得到整个断层面发生子震的个数。由于破裂不均匀,计算可能使一个子源中分配到多个子震。

(4) 每个子源都可作为一个点源处理:结合 Brune 的 ω^2 震源谱,将各子源地震动过程作为有限持时、有限带宽的白噪声直接合成地震加速度时程;设定断层的破裂方式和传播速度后就可计算出全部子源破裂的时间顺序,根据场地和每个子源的空间关系,计算各子源对场址的影响,并考虑每个子源的破裂传播到达的延时,分别叠加各子源的加速度时程,就得到有限断层在场点处引起的地震动:

$$a(t) = \sum_{i=1}^{NX} \sum_{j=1}^K a_{ij}(t - t_{ij}) \quad (5)$$

式中 $a(t)$ 为合成地震动时程; $a_{ij}(t)$ 为第 i 个子源的第 j 次地震加速度时程; NX 为断层划分子源总个数; K 为第 i 个子源的发震次数。合成中考虑了子震发震时间的滞后 t_{ij} , 其中既包括子源破裂传播引起的时间滞后和子震至场地间由于传播距离的不同而引起的时间滞后,也包括当一个子源发生多次子震时的位错时间引起的时间滞后。

2 三危山断层设定地震的震源模型

2.1 断层概况

敦煌莫高窟位于青藏高原西北缘,紧邻新构造活动强烈的阿尔金山和祁连山区。区域内发育了十多条较大规模的活动断裂,地震活动频繁。历史上记载敦煌莫高窟受到远距离几次大地震的波及,如 1927 年古浪 8 级地震和 1932 年昌马 7.6 级地震,造成最大烈度为 VI 度的破坏;近场最大震级为 5 级,影响烈度 VI 度;仪器记录最大震级 3.7 级。

三危山断层是距离敦煌莫高窟文物保护单位最近的一条活动断层,运动特征以粘滑为主兼有少量蠕滑,前第四纪以左旋平移运动为主,第四纪早、中期以倾滑逆冲运动为主,中更新世以中段逆冲活动最强烈,晚更新世以来断层基本停止了活动。主要表现为强烈的间歇性抬升,构造抬升速率总体上表现为西段强,东段次之,中段弱的趋势。现有资料表明该断层现代弱震活动水平不高,沿三危山断层及其附近没有强震发生,历史上最大地震记录为 5 $\frac{1}{4}$ 级(1933 年 7 月 11 日,小宛堡附近),但不能排除未来该断层发生对莫高窟构成较大影响的近震。

三危山断层全长 150 km,总体产状 N50~70°E/SE \angle 50~70°,根据其地表展布形态可分为三段:西水沟断层段,长 35 km;芦草沟断层段,长 55 km;双塔断层段,长 60 km^[7]。相比之下,我们更关心离莫高窟最近距离只有 3 km 左右的西水沟断层段发生的地震。文献[8]中地震危险性分析表明莫高窟位于三危山 6.5 级的潜在震源区之内,因此我们以西水沟断层段发生 5.5 级、6.0 级、6.5 级地震为例计算,模拟三危山断层发震对莫高窟地区地震动分布的影响。

2.2 介质地层模型参数

莫高窟地区以三危山断层为界划分为三危山隆起带和敦煌盆地两个构造单元,莫高窟位于隆起带与盆地的交界处。地层模型采用横向均匀成层介质,在纵深方向上分为 3 层,即第四纪沉积层、前寒武纪基岩层、和上地壳结晶岩层。模型中不考虑局部盆地边缘效应。地层结构参数见表 1^[9-11]。

表 1 地层模型及参数

介质类型	层厚/m	剪切波速	密度	Q 值
		$V_s/[m \cdot s^{-1}]$	$\rho/[kg \cdot m^{-3}]$	
第四纪沉积岩	200~1 000	500~1 500	700~2 700	30~200
前寒武基岩	4 627	3 500~3 800	2 500~2 900	200~300
结晶岩	5 000	2 300~3 800	2 500~2 900	300~400

2.3 发震断层模型参数

发震断层的规模要依据地震震级大小来定。设定发震震级,根据公式(1)、(2)、(4)可得到发震断层的规模和最理想子源尺度。将断层平面划分为若干子断层,根据所有子源地震矩之和与总地震矩一致的原则,

确定断层面上共要发生子震个数。发生 5.5 级、6.0 级、6.5 级地震时,三危山断层震源参数见表 2。

表2 地震震源参数

震级/M	5.5	6.0	6.5
断层走向/倾向	N65°E/SE∠50~70°		
断层尺度(长×宽)/m	6 400×4 800	12 500×7 500	24 000×12 000
断层深度/m	8 000~12 000	6 500~13 500	4 500~15 500
地震矩/N·m	2.24×10 ¹⁷	1.26×10 ¹⁸	7.08×10 ¹⁸
应力降/Pa	4.0×10 ⁶	5.0×10 ⁶	5.0×10 ⁶
子源尺度/m	1 600	2 500	4 000
剪切波速/[m·s ⁻¹]	3 460		
破裂速度/[m·s ⁻¹]	0.8×3 460		

3 模拟结果与分析

模拟三危山断裂为一逆冲断层,倾向SE∠50~70°,这种非垂直断层向外辐射地震波产生的地震动使自由表面的对称性遭到了破坏。地震动分布形态呈现出明显的上下盘效应。莫高窟位于断层下盘,南北长约1.6 km,距三危山断层3~3.5 km。当发生5.5级、6级、6.5级地震时,计算石窟区水平峰值加速度分别可达到180 gal、280 gal、550 gal左右。

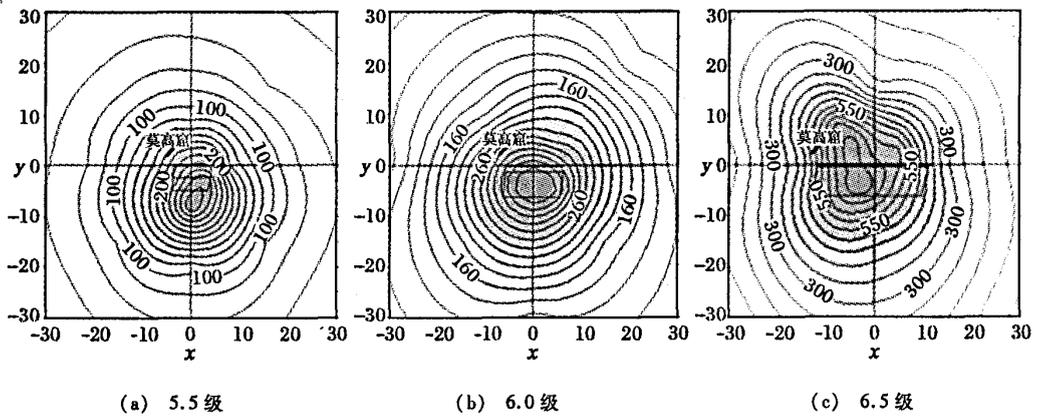


图2 三危山断层近场水平峰值加速度分布图
(图中四边形为倾斜断层平面在地表的投影)

Fig.2 Distribution of peak horizontal acceleration near the Sanwei Mt. fault.

一般近场地震动的研究方法和成效必须靠强震观测记录验证。由于敦煌莫高窟地区几乎没有烈度资料和近场强震记录,我们将计算结果与不同方法或不同地区统计得到的近场地震动衰减规律进行了对比研究(图3)。

(1) Compbell(全球,基岩,D为震中距,1981):

$$\ln a = -4.1414 + 0.868M - 1.09 \ln(D + R_0(M)), \sigma_{\ln a} = 0.37 \quad R_0(M) = 0.0606e^{0.7M}; \quad (4)$$

(2) Boore 和 Joyner(美国西部,D为断层距,1981):

$$\lg a_{\max} = -1.02 + 0.249M \lg \sqrt{(D^2 + 7.3^2)} - 0.0025 \sqrt{D^2 + 7.3^2}, \sigma = 0.26; \quad (5)$$

(3) 王国新、陶夏新(美国西部,D为断层距,2001):

$$\lg a_{\max} = 4.053 - (2.797 - 0.251M) \lg(R + 8.84), \sigma = 0.257 \quad (6)$$

(4) 石玉成(敦煌地区,2000)^[5]

$$\text{长轴: } \ln a = 9.6829 + 0.5389 - 2.2059 \ln(\Delta + 20), \sigma_{\ln a} = 0.65 \quad (7)$$

$$\text{短轴: } \ln a = 5.8620 + 0.5309M - 1.63162 \ln(\Delta + 5), \sigma_{\ln a} = 0.69; \quad (8)$$

由于地震动参数具有较大的不确定性,地震动衰减规律是有区域适用性的。从图3中可以看到5.5级、6.0级、6.5级地震的各点模拟值分布于其它衰减曲线之间,大体上与各衰减曲线的走势一致。在三种震级条件下,分别选取地表断层线八个不同方向上断层距相同的点进行计算,所得PGA值有明显差异,可

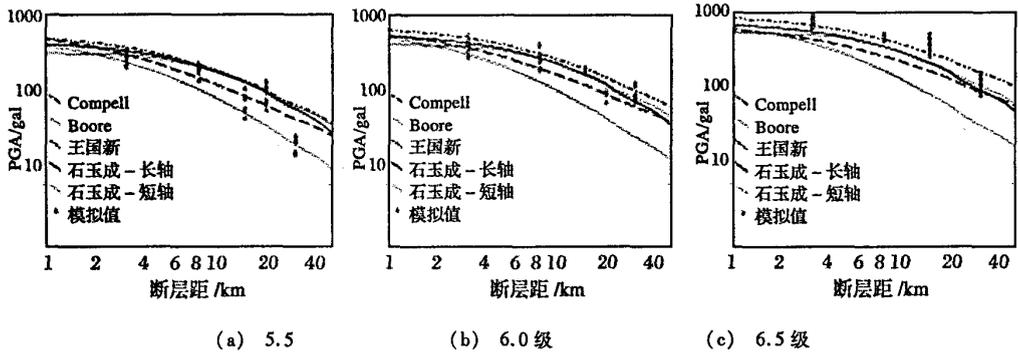


图3 几种近场地震动衰减曲线对比

Fig. 3 Comparison of some attenuating curves of near-fault ground motion.

见我国目前采用的地震动衰减关系不考虑断层类型因子以及上下盘效应等因素,与本文得到近断层地震动的分布情况还有一定差异,近断层地震动衰减规律还值得深入研究。另外值得注意的是,本文模型计算数据随震级增大呈现出逐渐高于其他统计规律的趋势,这与设定地震的断层活动方式为逆冲有关。随着强震记录的增加,人们发现张性地区与压性地区的地震动衰减特征有差异,逆冲断层型地震的近场加速度峰值一般较高^[12]。本文的断层模型考虑了实际的断层与介质条件,所得结果应优于其他平均意义上的衰减规律,所以总体上看,本文模型数值模拟的PGA值是有效的,对莫高窟文物保护的抗震设计具有参考价值。

4 结语

(1) 本文采用随机有限断层方法模拟莫高窟区地震动分布特征是可行的,此模型也验证了地震的震源机制对近场地震动分布特征是有影响的,今后研究地震动衰减关系模型应当考虑这种影响。

(2) 三危山断层未来不能排除发生中强地震的可能,研究表明目前西段抬升活动最强,假定地震发生在距莫高窟最近距离约3 km的西水沟断层段,模拟该断层发生5.5级、6.0级、6.5级地震时窟区地震动峰值加速度分别可以达到180 gal、280 gal、550 gal左右。综合考虑本地区的地震地质和地震活动特征,并基于莫高窟的重要性和工程设计施工中的可操作性,莫高窟抗震防护加固设计地震动参数参考280 gal较为可行。

[参考文献]

- [1] Boore D M. Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra[J]. BSSA, 1983, 73(6):1865-1983.
- [2] Kunze T, Langer H, Scherbaum F, Schneider G. Site dependent strong motion simulation, Seminar Berlin, 1986.
- [3] Beresnev I A, G Atkinson. Modeling finite-fault radiation from the ω^n spectrum[J]. BSSA, 1997, 87(1):67-84.
- [4] Wells D, K Coppersmith. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement [J]. BSSA, 1994, 84: 974-1002.
- [5] 陶夏新,王国新. 近场强地震动模拟中对破裂的方向性效应和上盘效应的表达[J]. 地震学报,2003, 25(2):191-198
- [6] 袁道阳,石玉成,王旭东. 敦煌莫高窟地区断裂新活动特征及其对石窟的影响[J]. 敦煌研究,2000, 63(1):56-64.
- [7] 张裕明,柳卓. 敦煌三危山断层——一条无强震的第四纪活动断层[J]. 中国地震,1989, 5(3):37-48.
- [8] 石玉成,徐晖平,王旭东. 敦煌莫高窟地震安全性评价[J]. 敦煌研究,2000, 63(1):49-55.
- [9] 张诚,杜志俊,付印发. 甘肃东部地区Q值的分布(一)[J]. 西北地震学报,1990, 12(2):16-21.
- [10] 王周元. 甘肃地区分层地壳结构[J]. 西北地震学报,1984, 18(3):84-91.
- [11] 付印发,葛延山,李纲. 甘肃东部及邻近地区地壳QP值分布特征[J]. 西北地震学报,1992, 14(1):45-54.
- [12] 俞言祥,高孟潭. 台湾集集地震近场地震动的上盘效应[J]. 地震学报,2001, 23(6):615-621.

INFLUENCE OF NEAR-FIELD GROUND MOTIONS OF SANWEI MT. FAULT ON MOGAO GROTTOS IN DUNHUANG

LU Yu-xia^{1,2}, SHI Yu-cheng^{1,2}

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Gansu Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Gansu Lanzhou 730000, China)

Abstract: Sanwei Mt. active fault is only 3 km from Mogao Grottoes in Dunhuang city, Gansu province. In this paper, based on the horizontal layered & homogeneous seismogenic fault model, the influence of ground motions generated from Sanwei Mt. fault on Mogao Grottoes under scenario earthquakes respectively with magnitude of 5.5, 6.0 and 6.5 is simulated using the stochastic finite-fault method. It indicates that the distribution of ground motions near Sanwei Mt. fault presents the hanging wall effect of reverse fault. The calculated values of *PGA* are compared with those deduced from other attenuation formulas based on the data of other areas to validate the calculation result. This study has some reference to aseismatic and reinforced design in Mogao grottoes.

Key words: Mogao grottoes; Sanwei Mt. fault; Near-fault ground motion; Stochastic finite-fault method



《西北地震学报》第五届编辑委员会会议在兰召开

《西北地震学报》第五届编辑委员会会议于2004年9月16日在兰州召开。参加会议的有来自全国地震系统的部分编委、主办单位有关领导、特邀嘉宾及编辑部工作人员20余人。中国地震局兰州地震研究所副所长张新基同志主持会议并致辞欢迎各位编委。

会议首先听取了学报专职副主编、编辑部负责人吕太乙同志关于《西北地震学报》第五届编委会成立以来的编辑部工作汇报,内容包括近几年的办刊状况、取得的工作成绩、存在的困难和问题、采取的改革措施以及对学报的定位、特色和发展目标的考虑等。

与会编委们就如何提高《西北地震学报》的办刊质量和学术地位进行了热烈讨论。大家充分肯定了《西北地震学报》创刊二十多年来取得的成绩,客观分析了当前在发展中面临的困难和存在的问题,讨论了期刊生存发展的新思路,提出了很多好的建议和具体措施。编委们的发言可归纳为三个方面(共28条):(1)抓住机遇,迎接挑战,稳步发展,把《西北地震学报》做大做强;(2)要坚持走特色化的发展道路,充分发挥中国西部强震多、地震构造表现清楚、资料丰富等得天独厚的优越条件,创办具有自己鲜明特点和优势的期刊;(3)坚持高质量、高水平办刊的理念,转变观念,拓宽思路,在办刊机制和编辑部管理机制上要不断改革,与时俱进。

会议还特别邀请中国地震局工程力学研究所杂志社张明宇社长和钟南萍副主编介绍了先进经验。名誉主编、中国地震学会理事长张国民研究员出席会议并做了重要发言,提出了建立主编、副主编约稿制度和编委任期责任制度的建议。最后,学报主编、中国地震局兰州地震研究所所长王兰民研究员做了总结发言。

(本刊编辑部)