

1995年日本神户地震建筑物倒塌与S波和盆地边缘次生面波干涉的研究

赵志新^① 徐纪人^① 久保田隆二^② 脇坂安彦^③ 梶川昌三^③

(^①中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; ^②川崎地质公司(株), 东京 108-8337, 日本; ^③建筑省土木研究所, 筑波 305-8516, 日本. E-mail: zhaozhixin@ccsd.org.cn)

摘要 用地震波在不均匀介质传播中的波动方程的数值模拟方法, 分析了二维剖面SH以及P-SV地震波传播过程中波的叠加干涉与1995年日本神户地震中建筑物倒塌率分布之间的关系. 模拟中使用了错格实数 Fourier 变换的快速、高精度的微分算子. 利用地震波在不均匀地下介质传播的瞬间分布图分析了地震波在空间叠加干涉的过程. 结果表明, 模拟所得加速度波形的峰值很可能是由基岩表面传入沉积层的次生面波和沉积层中体波在地面表层中的干涉所致. 模拟所得地面加速度振幅的分布与建筑物倒塌率的分布极为一致. 远离地震断层的建筑物峰值倒塌率也和加速度的峰值吻合. 干涉过程的分析表示了建筑物倒塌率的分布与地质构造和地震波速度结构密切相关. 地震体波与盆地边缘次生面波的干涉很可能是形成倒塌极大值的原因. 由此可见用数值模拟方法研究地震波动传播过程以及其干涉过程对于地震灾害研究是十分必要的.

关键词 数值模拟 建筑物倒塌率 波的干涉 地震波加速度 速度结构

大地震发生时地震断层附近强烈的震动对其周围的建筑物造成极大的破坏. 地震引起的地面运动加速度和速度分布一般是随着距地震断层的距离增加而渐渐衰减, 因而由地震引起的灾害也逐渐减轻^[1~3]. 但有时也常有例外的情形. 大地震后地震烈度异常的报道也常有所闻, 地震灾害并不是单一的随震中距的增大而减轻. 例如中国唐山1978年M7.8大地震后, 河北玉田县地区地震烈度比周围邻区要小, 形成所谓的低烈度异常现象区. 对于这一问题不少学者用场地效应来解释河北玉田地区的地震烈度异常成因, 表明复杂的烈度分布可能与地下结构有关^[4,5]. 特别是1995年日本神户地震(135.03°E, 34.58°N, M7.2), 一个引人注目的狭长重灾区带发生在远离余震区而靠近大阪湾^[6]一侧. 六甲山位于神户大震余震区的西北, 有基岩出露, 大阪群沉积层位于神户市东南侧并且在近大阪湾处渐渐增厚. 带状的余震区沿北东方向的六甲山根延伸, 与活断层区分布一致. 然而地震灾害重灾区与余震区(或者说与地震断层)的分布不一致(图1), 相差1~2 km. 这两者的差异已引起广泛的讨论^[9,10]. 神户地区地震观测台网密集, 震中定位误差很小, 远小于重灾区(宏观震中)与微观震中的分布的差别, 这种差别与震中定位误差无关. 地震后为了查明严重灾区的原因, 对地震区进行了大量的地质和地球物理调查研究, 结果在重灾区带的下

面尚未发现活断层或隐伏断层^[7]. 它的形成很可能与其他地质因素有关^[11~13].

本文从研究地震波在岩石和沉积层所组成的不均匀介质的波动传播过程出发, 用错格实数 Fourier 变换微分法的拟谱分析数值模拟方法^[14], 研究神户不均匀介质的重灾区地面加速度复杂分布成因问题. 详细研究地震动振幅在介质传播过程中不同时间和空间领域的分布特征, 探索地震动在地表的分布机制和沉积层结构对地震波传播过程影响的关系. 特别用波的传播数值模拟方法阐明高烈度区(6度以上)地震时地震灾害与地面运动的关系(日本气象厅是7度烈度标准; 中国地震烈度是12度烈度标准). 研究不均匀介质中地震波传播中波的叠加干涉对地震动幅度在地表分布的影响和对建筑物破坏的作用, 探讨倒塌率的复杂分布特征成因. 这对于城市抗震防震工作有着极为重要的现实意义.

1 房屋倒塌率调查

神户地震重灾区展现在地震断层的东南侧, 如图1所示靠向大阪湾海岸. 地震烈度6度以上的地区(日本气象厅标准)呈现为大约20 km长、2 km宽的区域. 图1影线所示的烈度7度(木结构建筑物的倒塌率大于30%)区不均匀地分布在地震灾区.

图2给出了FF'(图1)线附近的建筑物倒塌率精

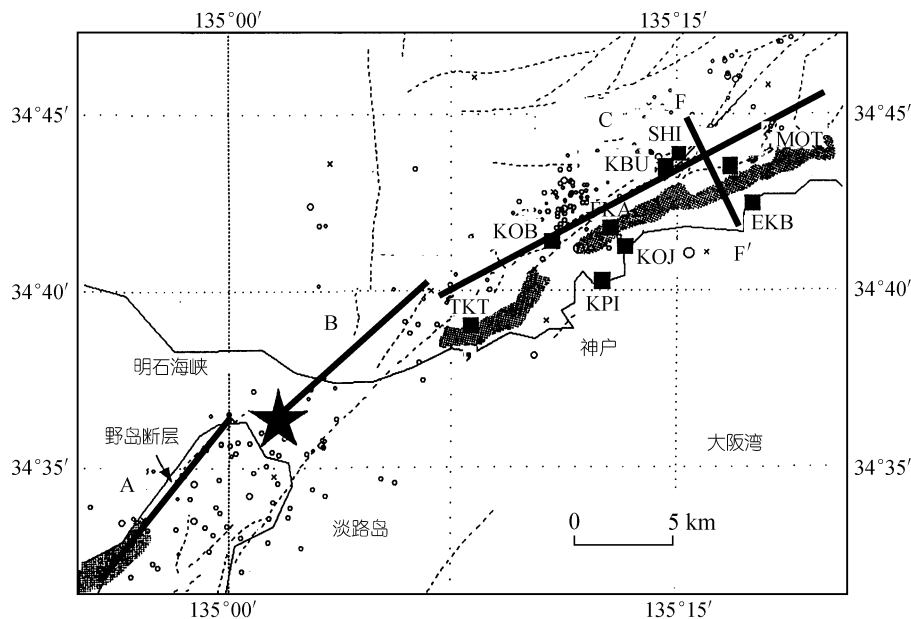


图 1 1995 年神户地震(135.03° E, 34.58° N, M7.2)的余震区及重灾区(据文献[7]修改)

影区: 日本气象厅标准地震烈度 7 度区; 黑方块: 地震台站; 五角星: 1995 年日本神户地震主震震源; 小圈: 余震. 图中 3 条黑线段 A, B 和 C 代表多重震源破裂过程神户主震的 3 次破裂断层(据文献[8]). 线段 FF' 表示图 3 速度结构调查线及其附近的地面震动数值模拟剖面

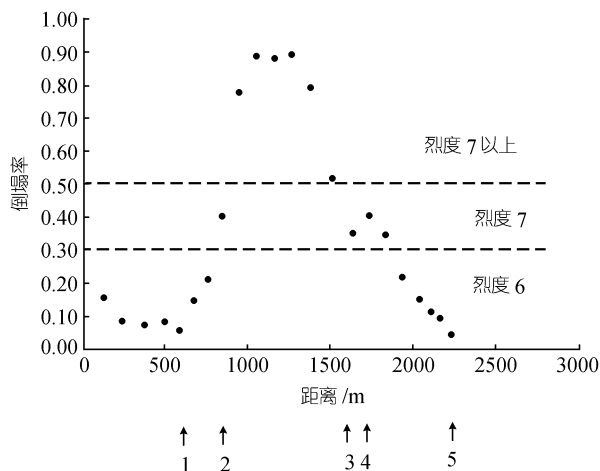


图 2 沿调查线的建筑物倒塌率的分布(据文献[15])

坐标原点是地震断层. ↑1: 阪急神户铁路; ↑2: JR 神户铁路; ↑3: 阪神铁路; ↑4: 国道 34 号公路; ↑5: 海岸线. 烈度 6 以上都是重灾区

查结果^[15]. 倒塌率是根据木结构和钢筋混凝土结构建筑物的破坏情况而定的. 倒塌率调查线在图 1 中的 KOB 的东北处, 平行于 FF' 速度结构调查线, 邻近 FF' 线的东北侧. 调查是沿着地震断层(图 2 坐标原点)到大阪湾海岸的沉积层上进行的, 几乎和余震带垂直. 测线大约长 3.5 km 且与重灾带直交. 由图 2 可见, 倒塌率并不单调地随离地震断层距离增加而减小, 而是沿调查线地震烈度在 6 度到超 7 度之间变化. 沿

调查线的倒塌率有一个峰值, 在 JR 神户线(↑2 处)与阪神铁路(↑3)之间的超 7 度区高达 90%. 地震烈度最大的是超 7 度区. 在阪急神户铁路(↑1)和 JR 神户铁路(↑2)的西北地区的房屋倒塌率小于 30%. 在 JR 神户铁路(↑2)东南一侧倒塌率骤然升高, 迅速增加到 90%. 在跨过国道 34 号公路(↑4)后房屋的倒塌率又降低为 50% 左右, 烈度也变成 7 度. 从国道 34 号公路(↑4)到海岸线(↑5)倒塌率渐渐减少.

为了阐明图 2 所示建筑物倒塌率分布的成因, 日本建设省土木研究所在神户市运用微动探查方法沿与重灾带垂直的方向沿图 1 所示的 FF' 测线进行了地震波速度结构调查. 图 3 示出了其二维的高精度 S 波速度结构的结果. 速度结构调查线在倒塌率调查线的附近, 都与地震断层走向直交. 图 3 中, 在离左端大约 5 km 处甲南大学(128 格处)附近, 由北西西南东东的逆冲断层是根据反射勘探资料所得. 甲南大学的左边是花岗岩露头区(Ⅳ)(图 3), 其右边是大阪群, 由上(Ⅰ)、中(Ⅱ)、下(Ⅲ)3 层沉积层组成, 它的下面是类花岗岩层^[16]. 大阪群层的Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ层及类花岗岩Ⅳ的 P 波速度分别为 1900, 2000, 2400, 4500 m/s, S 波速度分别为 500, 700, 1100 和 2200 m/s, 密度分别为 2.0, 2.0, 2.1, 2.5 g/cm³. 在图 3 中, 倒塌率峰值处下面也没有断层.

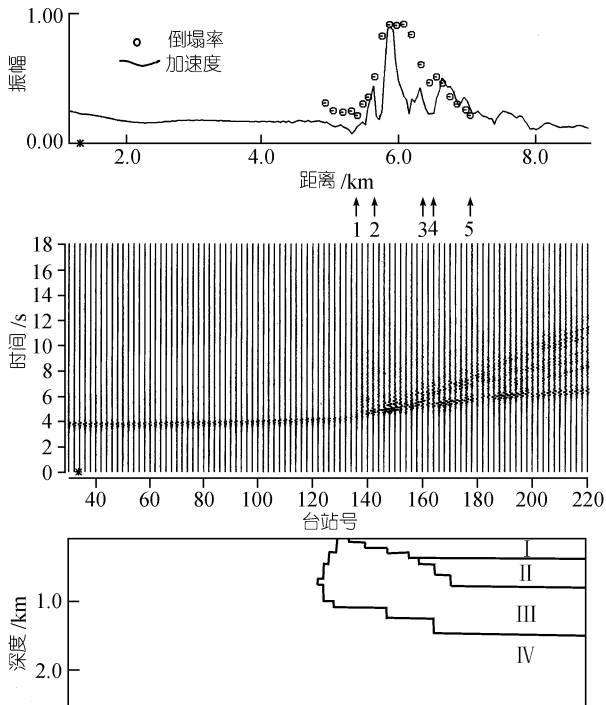


图3 地下构造, SH波情形下模拟所得地震波最大加速度振幅和建筑物倒塌率的比较

为了便于不同量纲物理量的比较, 上图使用了标准化振幅, 下图剖面为地面微动探查法测得的速度结构. I, II和III层是大阪群层的上、中、下3层. VI层是类花岗岩. 中图是模拟得到的地表面地震波形; *: 震源. 上图是倒塌率(圆圈)和地面加速度运动最大振幅(实线)的比较. ↑1到↑5具有图2中同样的含义

2 不均匀介质中地震波传播数值模拟

本文用地震波在不均匀介质中传播的拟 Fourier 谱数值模拟方法, 探讨图3中不均匀速度结构中波的传播与图2的建筑物倒塌率的关系. 由于该方法具有高速和占内存小的优点, 被广泛地运用于地震波传播模拟研究中^[17,18]. 具有高精度和高稳定性的错格实数 Fourier 变换微分算子被用于数值模拟计算中^[19]. 1995年神户大地震是具有多重震源破裂过程的地震^[8]. 地面运动的数值模拟是沿着速度结构调查线 FF'附近的建筑物倒塌线进行的, 它垂直横跨多重破裂断层中 A, B, C 三个子断层中的 C 断层, 换言之, 震源断层穿过了模拟分析对象剖面. 这里先尝试近似地用二维 SH 问题的数值模拟计算图3所示的不均匀结构上的地面运动. Zhao 等人^[20]曾使用在类似以上二维结构条件下模拟所得到的地震形波作为 Green 函数, 并用文献[8]的震源过程模拟了部分神户地震记录的理论地震图, 效果尚佳. 说明本文选用二维模拟及速度结构计算所得地面运动和实际记录结果相关性甚佳.

在离散模拟运算中, 图3中的速度结构以 40 m 边长的正方形在水平(x)和垂直(z)两方向上划分为 256×256 格. 因此, 问题处理的极限频率可达 6.25 Hz. 计算时间间隔步长取为 0.008 秒. 垂直作用于剖面的线震源置于地下 8 km 处. 模拟进行了 2250 个时间步长, 得到了 18 秒的计算地震波形. 计算空间的底面和两侧被处理为吸收边条件^[21]. 自由表面条件是通过在表面上方加上 N 点零速度来进行垂向应力微分实现的. 对称微分法^[22]用于垂向位移微分以提高计算的稳定性. 震源函数由准 Gauss 空间分布函数和一个峰值频率为 3 Hz 的 Ricker 波列时间函数组成. 在选用震源函数的频率时参考了文献中建筑物的固有周期结果^[23], 木造建筑物和 50 m 以下钢筋水泥建筑物的固有周期大约在 0.1 和 1.0 秒之间. 3.0 秒频率比较适合于本文的建筑物倒塌率的数值模拟分析. 文献[24]中在中国上海市实验测定结果表明, 民用工程建筑以及单元住宅楼的基本周期也差不多分布在 0.2 和 0.4 秒之间.

图3给出了速度结构(下图)、模拟地震波形(中图)、振幅和倒塌率(上图)的比较, 3个图的横坐标是相同的. 下图中近甲南大学的逆断层的节面(节线)大约位于 128 格的地方. 中图甲南大学左侧基岩上的地震波形形状简单而且振幅也基本相同, 这是因为从震源发出的地震波仅通过单一的类型花岗岩介质 IV 区. 然而甲南大学右侧的大阪群层的波形差别很大, 面波、来自层间界面折射和自由表面的反射波等后续震相相继出现, 使得波动的持续时间增长, 波形也变得复杂. 这可能与其复杂的多层介质结构及增幅率的不同有关. 长时间的持续震动可能有利于解释在大阪群层出现的倒塌率高于类花岗岩一侧的原因. 断层节线处初始震相振幅比其两侧的也小. 图3的上图给出了标准化后和中图中相应的波形振幅(实线)和倒塌率(圆圈)的比较. 甲南大学(大约 128 格处)左侧基岩波形振幅变化光滑平缓. 其右侧的大阪群层沉积层上的波形振幅变化激烈, 峰谷迭起, 峰值在沉积层的近 ↑2 处. 然而就整体而言, 包括它们的峰谷变化在内, 加速度波形振幅变化与倒塌率吻合得相当好. 图3中沿断层节线两侧波形振幅的差异看上去似乎与地震波通过的地质结构有关.

本文又尝试了上述情形下 P-SV 地面运动的模拟计算, 图4给出了 P-SV 波数值模拟的结果, 模拟条件和方法、图示方法都和上面 SH 的情形相似. 图中也是标准化后波形振幅(实线)和倒塌率(圆圈)的比较.

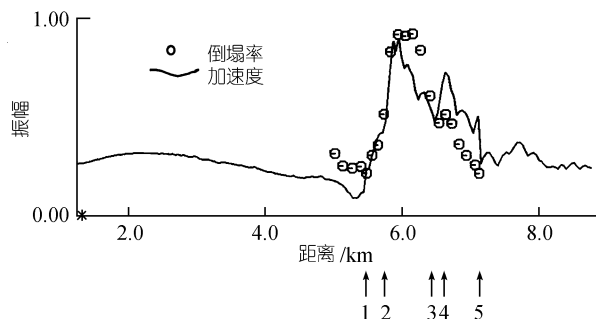


图 4 P-SV 波情形下模拟所得地面地震波最大加速度振幅和建筑物倒塌率的比较

总的来讲两者吻合尚好. 和图 3 结果相比, 两图地面运动加速度波形振幅极大值沿地面变化, 虽有许多不同, 但大略的变化趋势却还相似. $\uparrow 1$ 左侧基岩波形振幅变化光滑平缓. 其右侧的大阪群层沉积层上的波形振幅变化激烈. 地面运动加速度波形振幅变化峰值在沉积层的近 $\uparrow 2$ 右侧处与倒塌率吻合. 图 3 和图 4 这一相似结果可能表明波动场与地质结构的密切关系.

3 地震波干涉及加速度峰值成因

本文讨论了建筑物复杂的倒塌率分布与地面运动的关系. 沿调查测线的倒塌率和数值模拟加速度的最大振幅分布都吻合得非常好, 它们的峰谷变化几乎是重合在一起. 如此一致的变化规律表明精确的地质构造和地震波速度结构有利于充分认识复杂的倒塌率的分布成因^[7], 表明建筑物倒塌率的高低与地面运动加速度振幅的大小密切相关. 强震地面运动的特征一般可以通过它的三要素来描述: 即振幅、频谱和持时^[25]. 依文献[23,24]所示建筑物的固有周期, 数值计算中所用 3 Hz 的震源峰值频率与 50 m 以下的建筑物的固有频率相近, 图 3 和图 4 的模拟结果基本可以用于说明神户地震地面运动加速度波形的最大振幅和建筑物的高倒塌率的相关关系. 图 3 显示出右侧的大阪群沉积层的波形震相复杂, 面波、体波、来自层间界面折射和自由表面的反射波等后续震相相继出现使得波动的持续时间增长, 长时间的持续震动可能是高倒塌率都出现在大阪群沉积层一侧的原因之一. 这 3 点都与文献[25]的结论一致.

即使在重灾区中模拟结果的地面运动幅度在地表的分布也是不均匀的. 图 3 的地质构造是盆地构造. 图 5 用地震波动数值模拟方法演示了这种与结构有关的波的空间传播过程, 尝试说明波的干涉过程可能与地面运动的峰值相关. 所使用的数值模拟方法

与上节相同. 为了看起来清楚, 将图 3 下图中的 3 层大阪群沉积层合为一层(I), 演示波的干涉叠加过程. 为了说明盆地构造干涉现象的一般性原理, 本文在图 5, 6 中分别给出具有一定角度的逆冲断层和垂直错动断层两种不同断层面倾角情形下波的传播过程及干涉现象. 图 5 中, 在 2.0 秒瞬间地震波传播的空间波动分布的快拍中, 体波在单一高速花岗岩区(II区)以球面波前传播. 在 3.0 秒快拍中, 高速花岗岩 II 区左侧表面地震波一方面在自由界面反射, 另一方面有波沿表面向右传播透过断层面进入 I 区, 我们称这种沿表面传播的波为次生表面波. 同时可见, 在花岗岩区(II区)传播的地震波穿过沉积层底部而进入 I 区向上前方传播. 在 4.0 和 5.0 秒的快拍中可见到, II 区中的球面波前经 I 区底部折射入 I 区形成平面波前, 以 I 区视速度向上前方传播, 平面波前与地面夹角为小的锐角. 另一方面在 4.0 和 5.0 秒的快拍中可见, 次生面波继续沿地表向前传播. 面波波前几乎垂直于地面, 成直角以介质 I 中的速度向前传播. 从图中可见, 面波周期比体波的周期大. 这种次生面波与 I 区中上行的体波相遇, 分别在地下和地面发生叠加干涉. 如此的地质结构和构造下的干涉现象形成图 3 中地面运动加速度的峰值, 导致图 2 中高倒塌率破坏峰值. 从图 5 可见, 干涉叠加的地面运动峰值远离断层面, 所以倒塌率峰值也远离断层面, 其距离大小取决于 I, II 两层的速度差. 5.0 秒以后波的传播快拍显示出更多的震相, 可能引起地面的多次复杂的长时间震动, 造成更多的破坏. 7.0 秒后, 由于两种波的波速不同, 随时间的增加两者渐渐分离. 这种复杂的变化随时间离震源而去. 图 6 是垂直断层面半盆地边缘的情形, 数值模拟的震源函数峰值频率为 5 Hz, 从其中 3.6 与 4.5 秒的两张快拍中都可以看到体波与面波在沉积层中类似的叠加干涉现象, 仍然是面波的波前几乎垂直于地面, 以介质 I 的速度向前传播. 原介质 II 中的球面波经盆地底部折射后成为平面波前进入 I 中的体波与地面成小的锐角, 以介质 I 中的视速度向上前方传播, 两者在介质 I 相遇, 叠加干涉. 同时可见, 如图 5 那样, 面波的周期要比体波的大, 这与通常的观测结果一致^[26].

4 讨论和结论

本文讨论了神户市地震波动在不均匀介质传播中形成的干涉现象对极震区不均匀建筑物倒塌率的复杂分布的影响关系. 结果表明: (1) 在神户盆地地质

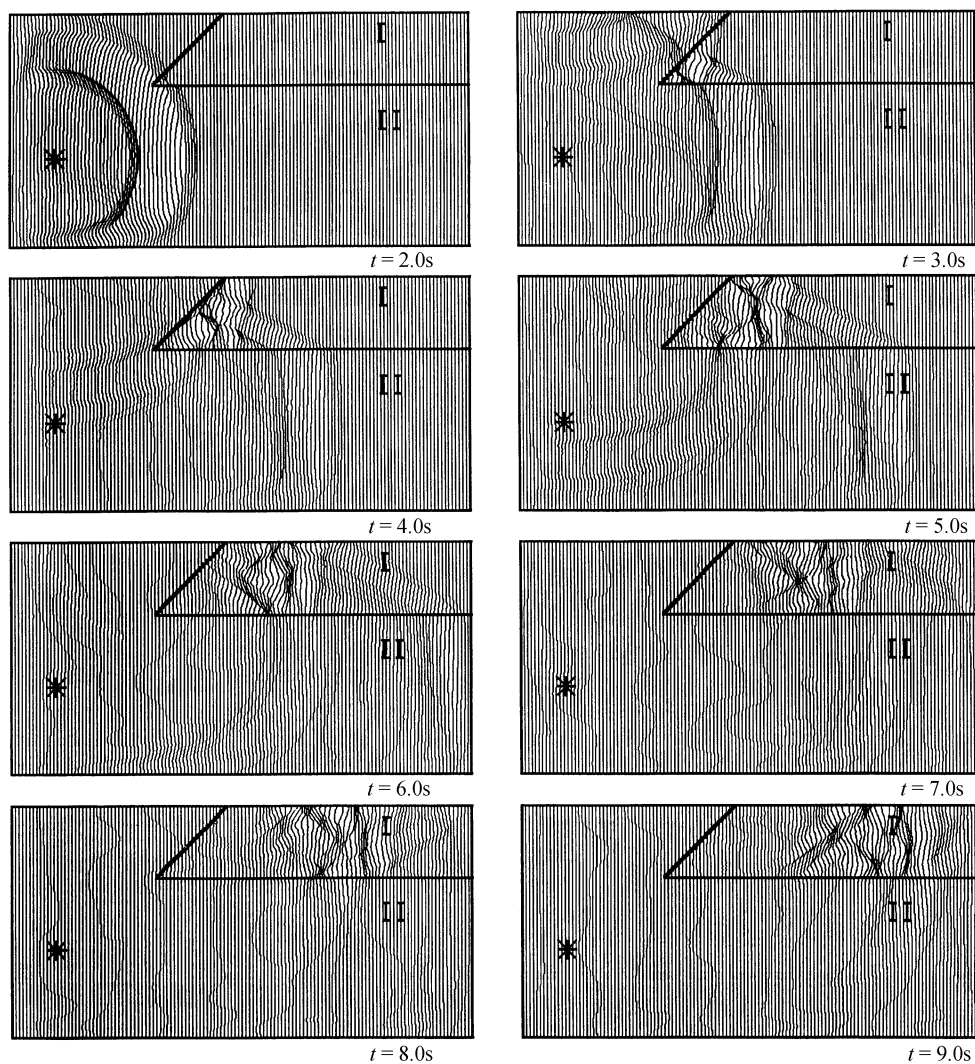


图5 不均匀介质地震波传播的空间瞬间快拍

具有一定角度逆冲断层情形下波的传播过程及干涉现象. 沉积层 I 区厚 2 km. 逆冲断层面位于距左端约 5 km, 相当于图 3 的第 128 格处.

I 区和花岗岩 II 区的速度和密度值分别为 1000 m/s, 2.1 g/cm³ 和 2000 m/s, 2.5 g/cm³.

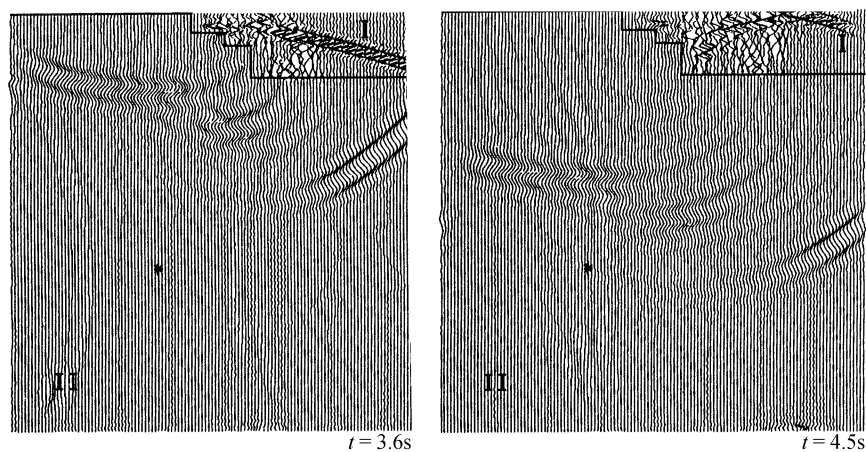


图6 垂直错动断层情形下波的传播过程及干涉现象的快拍

构造条件下形成的地震波动的叠加干涉形成了地面运动峰值,导致了建筑物的破坏倒塌率的极大值;(2)数值模拟结果表明神戸市区地面运动的最大振幅和建筑物倒塌率的分布极为吻合,这说明倒塌率的复杂分布原因与地下构造关系密切;(3)地震波传播数值模拟方法用于地面运动和抗震减灾研究是一种有效方法。

本文用于说明建筑物倒塌率分布的地面运动数值模拟结果是在二维的情形下得出的,用于数值模拟的速度结构是专门用微动探查求得的高精度的新结果。这样的结果可以说明许多问题。今后寻求高精度的三维速度结构,在三维速度结构下进行三维数值模拟可能会更加有助于深刻认识地质结构与地面运动以及地面运动与建筑物破坏之间的关系。

致谢 衷心感谢两位审稿者对文章的改进建议。感谢许志琴和杨文采教授对本工作的支持。本工作受中国国家重点基础研究发展规划项目(2003CB716505)、中国大陆科学钻工程年度(2002)科学研究项目(课题号 2002207)和中国国土资源部 20001010203 课题资助。

参 考 文 献

- Frankel A. Mapping seismic hazard in the central and eastern United states. *Seism Res Let*, 1995, 66: 8~21
- Somerville P G, Smith N F, Graves R W, et al. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letters*, 1997, 68: 199~222
- Fukushima Y, Tanaka T. A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan. *Bull Seism Soc Am*, 1990, 80: 757~783
- Kawase H. The cause of the damage belt in Kobe: "The basin-edge effect," Constructive interference of the direct S-wave with the basin-induced diffracted/ Rayleigh waves. *Seismological Research Letters*, 1996, 67: 25~34
- Hao X, Seo K, Samano T. Low damage anomaly of the 1976 Tangshan earthquake: An analysis based on the explosion ground motions. *Bull Seism Soc Am*, 1994, 84: 1081~1027
- 吉川澄夫, 伊藤秀美. 1995、1995 年兵庫県南部地震の概要. 月刊地球、号外, 1995, 13: 30~38
- 入倉孝次郎. 兵庫県南部地震の震源断層、強震動と被害特徴. 物理探査, 1995, 48: 463~489
- Sekiguchi H, Irikura K, Iwata T, et al. Minute locating of faulting beneath Kobe and the waveform inversion of the source process during the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan, earthquake using strong ground motion records. *J Phys Earth*, 1996, 44: 473~387
- Graves R W. Three dimensional finite difference modeling of the San Andreas fault: Source parameterization and ground motion levels. *Bull Seism Soc Am*, 1998, 88: 881~897
- Furumura T, Koketsu K. Specific distribution of ground motion during the 1995 Kobe earthquake and its generation mechanism. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25: 785~788
- Fujiwara H, Takenaka H. Calculation of surface waves for a thin basin structure using a direct boundary element method with normal modes *Geophys. J Int*, 1994, 117: 69~91
- Pitraka A, Irikura K, Iwata T, et al. Three-dimensional simulation of the near-fault ground motion for the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan, earthquake. *Bull Seism Soc Am*, 1998, 88: 428~440
- 川瀬博, 松島信一, Graves R W, 等. 1998 'エッジ効果' に着目した単純二次元盆地構造の三次元波動場解析—兵庫県南部地震の際の震災帯の成因—. 地震, 1998, 50(2): 1~449
- Kosloff R, Baysal E. Forward modeling by a Fourier method. *Geophysics*, 1982, 42: 1402~1412
- 石川浩次, 溝口昭二, 大鹿明文. 兵庫県南部地震の神戸の地盤と被害状況調査. 応用地質, 1995, 36(1): 62~80
- 赵志新, 徐纪人, 堀内茂木. 错格实数 Fourier 微分算子及其在非均匀介质波动传播研究中的应用. 地球物理学报, 2003, 46: 234~240
- Wang Y, Takenaka H, Furumura T. Modelling seismic wave propagation in a 2-D cylindrical whole earth model using the pseudospectral method. *Geophys J Int*, 2001, 145: 689~708
- Zhao Z X, Xu J R, Horiuchi S. Staggered grid real value FFT differentiation operator and its application for wave propagation simulation in heterogeneous medium. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46: 324~333
- Zhao Z X, Xu J R, Horiuchi H. Differentiation operation in the wave equation for the pseudospectral method with a staggered mesh. *Earth Planets Space*, 2001, 53: 327~332
- Zhao Z X, Kubota R. The empirical Green's function method by using simulated waveforms. In: Irikura K, Kudo K, Okada H, et al, eds. *The Effect of Surface Geology on Seismic Motion—Recent Progress and New Horizon on ESG Study—Special Volume on Simultaneous Simulation for Kobe Earthquake*. Balkema Rotterdam Brookfield, The Netherlands, 1998. 127~134
- Cerjan C, Kosloff D, Kosloff R, et al. A nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equations. *Geophysics*, 1985, 50: 705~708
- 古村孝志, 竹中博士. 端に不連続を持つデータののための Fourier 微分法——対称法. 物理探査, 1992, 45: 303~309
- 小林啓美, 翠川三郎, 丹沢広行, 等. 建築物の振動性状の簡便な測定方法の開発. 日本建築学会構造系論文報告集, 1987, 378: 48~56
- Kubo T. Earthquake-resisting technologies for building structures, Evaluation of seismic resisting capacity of existing buildings — Brick-wall buildings in Shanghai, China. In: WG-1 Earthquake-resisting Technologies for Building Structures, 3rd EQTAP Workshop, Nov 28-30, 2000. Organization Committee for the 3rd EQTAP Workshop. Manila, Philippines, 2000. 67~74
- 胡聿贤. 地震工程学. 北京: 地震出版社, 1988. 150~173
- Zhao Z X, Xu J R, Yang W C, et al. Simulations of Reflection Seismic Profile of Borehole Area of Chinese Continental Scientific Drilling. *Acta Petrologica Sinica*, 2003 (in press)

(2003-07-01 收稿, 2003-11-07 收修改稿)