

近场地震动格林函数的解析法与数值法对比研究

张冬丽^{1,2,3}, 陶夏新^{1,4}, 周正华^{1,5}

- (1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150083;
2. 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;
3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;
4. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150083;
5. 中国科学院力学研究所, 北京 100036)

摘要:分析了在均匀弹性介质中, 分别用解析方法和三维波动有限元数值方法计算无限全空间近场地震动的格林函数的理论与方法。将震源处理分为: (1) 计算单位错点源单位脉冲引起的格林函数; (2) 用有限断层模型将断面划分为若干子源并有时间延迟, 叠加所有子源的格林函数。本文以1994年美国北岭地震为例, 用解析法和数值方法分别计算了LV3、PCD、MCN三个场地的格林函数, 并进行了对比分析。

关键词:近场地震动; 格林函数; 有限断层; 子源

中图分类号: P315.9; P315.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2004)03-0199-07

0 前言

断层附近的强地震动(近断裂强地面运动)研究一直是地震工程和地震学领域的一个重要研究课题。近几年发生的几次大地震, 如1994年美国Northridge地震, 1995年日本Kobe地震, 1999年台湾集集地震等均在近场造成了严重破坏, 使得断层附近强地面运动的研究更加受到重视。而格林函数的计算是近断裂强地面运动预测和模拟研究的基础和核心内容之一。

格林函数的计算是很复杂的一个问题。目前, 在国内外用来进行近断裂强地面运动的预测和模拟的主要方法包括: 经验统计方法、格林函数法(经验格林函数法和随机法)及宽频带格林函数法(包含有限元或有限差分数值模拟方法)。1978年Hartzell提出用主震的前震或余震记录作为经验格林函数合成主震这一思想以来^[1], 许多地震学家对此进行了研究, 逐渐形成了一套估计强地震动的半经验方法(Irikura, 1983, 1986; Boat Wight, 1988; Dan, 1988; Kanamorr, 1988; 金星, 1992, 2002; 罗奇峰, 1989)^[2-6, 11-13]。Bouchon和Aki(1977, 1979, 1981)也利用离散波数法推导并计算了三维空间弹性成层介质的格林函数^[7]。迄今为止的研究证明, 解析法只能用来计算横向成层介质的格林函数, 在考虑计算时间及计算方法的稳定性方面计算的层数是有限的, 对较复杂的局部场地条件则无能为力。而基于离散介质的数值模拟方法将是未来近断裂强地面运动模拟的主要分析方法。以局部人工透射边界技术结合三维波动有限元近断裂强地面运动时步数值模拟解耦方法是对数值模拟, 可消除地震波在传播过程中的边界反射及地震反应计算的低频零飘和高频失稳问题; 同时它在时空上是显式的、解耦的, 大大减小了计算的工作量和时间。本文的波动有限元数值计算就是以这种方法为基础的。

收稿日期: 2004-06-29

基金项目: 国家社会公益研究专项(2002DIB30076)资助; 中国地震局地震预测研究所兰州基地论著编号: LC20040063。

作者简介: 张冬丽(1974-), 女(汉族), 河南叶县人, 博士研究生, 助理研究员, 从事黄土动力学研究、地震工程与工程抗震研究。

1 格林函数的解析表达

在时间域中,用弹性动力学表示理论计算的地震动时间过程可表达为断裂面上滑动时间函数与格林函数在适当深度和距离范围内的卷积在整个断裂面上的积分。在缺少或者没有地震记录数据的地区,格林函数可以依据已知的地壳结构模型计算得出。预测强地震动所用的宽频带格林函数法是比较严格的一种方法,它有严格的理论和计算地震学基础。波的传播用格林函数表达,其中包括了断裂和上覆盖层速度结构的影响;格林函数中包括体波和面波;震源表达为在一个延伸的断裂面上的剪切位错双力偶点源,可以准确地表示出它的辐射模式和大于0.5 s的长周期段降低、平缓的趋势。

不考虑体力和应力的间断性,在断层面内一个分界面 Σ 两侧的位移间断所引起的弹性位移如下 (Aki and Richards, 1980; 陈运泰, 顾浩鼎, 1999)

$$u_i(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau \iint_{\Sigma} [u_j(\zeta, \tau)] c_{jkpq} v_k G_{ip,q}(x, t; \zeta, \tau) d\Sigma(\zeta) \quad (1)$$

式中 c_{jkpq} 是断层介质的弹性模量; v_k 为断层面法向的方向余弦; $G_{ip}(x, t; \zeta, \tau)$ 为断层面上 ζ 点与观测点 x 之间的路径效应, 即格林函数; $G_{ip,q}(x, t; \zeta, \tau)$ 是 G_{ip} 对 ζ_q 的导数。

实际震源模型引进的位移是由最简单的震源所产生的位移综合而成的, 这个震源就是集中在一定的空间和时间上的单一方向单位脉冲。这种简单源引进的位移场是弹性动力学的格林函数。在一个均匀、各项同性、无限介质内, 取点体力为单位脉冲, 即 $X_0 = \delta$, 得出格林函数的解析表达式

$$G_{ip}(x, t; \zeta, \tau) = \frac{1}{4\pi\rho} (3\gamma_i\gamma_p - \delta_{ip}) \frac{1}{r^3} \int_{r/a}^{r/\beta} \tau' \delta(t - \tau - \tau') d\tau' + \frac{1}{4\pi\rho a^2} \gamma_i\gamma_p \frac{1}{r} \delta(t - \tau - \frac{r}{a}) - \frac{1}{4\pi\rho\beta^2} (\gamma_i\gamma_p - \delta_{ip}) \frac{1}{r} \delta(t - \tau - \frac{r}{\beta}) \quad (2)$$

其中, γ 是从震源 ζ 点到接收点 x 的单位矢量 $\gamma_i = x_i/r = \partial r/\partial x_i$; $r = |x - \zeta|$ 为两点间的距离。式中的第二项是远场 P 波的运动引起的; 第三项是远场 S 波的运动引起的; 第一项才是近场项, 它有来自 P 波势的梯度和 S 波势的旋度两方面的贡献, 是由 P 波和 S 波两种运动组成的。

在地震学中, 由于作用力不一定是沿着特定的坐标方向的, 所以双力偶可模拟具有特定走向和倾向的断层面上沿特定方向的滑动。对于双力偶源, 以三阶段张量场 $G_{wp,q}$ 研究格林函数比较合适。对于一个无穷小面元的等效面力, 可以表示为九个力偶的组合, 为了得到九个力偶的总效果, 可引入地震矩张量分量 M_{pq} 。在有限断层模型中, 任一子源上应力引起的等效矩张量, 等于施加于有限单元网格结点上的等效体力 (Olsen, 1955; Pitarka, 1999)。相应于任意取向的剪切位错的矩张量 M_{pq} 的笛卡尔分量可用走向 ϕ_s , 倾角 δ 和滑动角 λ 来表示 (Aki and Richards, 1980):

$$\begin{aligned} m_{\text{sub}xx} &= -m_{\text{sub}} (\sin \delta \cos \lambda \sin 2\phi_s - \sin 2\delta \sin \lambda \sin^2 \phi_s) \\ m_{\text{sub}yy} &= m_{\text{sub}} (\sin \delta \cos \lambda \sin 2\phi_s - \sin 2\delta \sin \lambda \cos^2 \phi_s) \\ m_{\text{sub}zz} &= m_{\text{sub}} \sin \delta \sin \lambda \\ m_{\text{sub}xz} &= -m_{\text{sub}} (\cos \delta \cos \lambda \cos \phi_s + \cos 2\delta \sin \lambda \sin \phi_s) = m_{\text{sub}zx} \\ m_{\text{sub}xy} &= m_{\text{sub}} (\sin \delta \cos \lambda \cos 2\phi_s + \frac{1}{2} \sin 2\delta \sin \lambda \sin 2\phi_s) = m_{\text{sub}yx} \\ m_{\text{sub}yz} &= -m_{\text{sub}} (\cos \delta \cos \lambda \sin \phi_s - \cos 2\delta \sin \lambda \cos \phi_s) = m_{\text{sub}zy} \end{aligned} \quad (3)$$

m_{sub} 是一个子源 (双力偶点源) 的地震矩标量。若取断层的走向与 Y 轴正方向时, 则 $\phi_s = 90^\circ$ 且 $\lambda = 90^\circ$ 时的情况代表倾滑断层; $\phi_s = 90^\circ$, 且 $\lambda = 0^\circ$ 时, 为走滑断层; $\phi_s = 90^\circ$, $\lambda \neq 0^\circ$ 且 $\lambda \neq 90^\circ$ 时代表斜滑断层。

2 震源时间函数

震源体通常可简化为点源和体源两种类型。在近场区, 体源产生的地震波效果较点源更为理想。在

体源模型中,认为震源区的断层面上发生了不连续的错动,因而采用位错理论。对于一个给定的有限断层,我们可以将其划分为若干块,每一块近似地处理为一个位错源,并等价于一双力偶点源。通过给每一子源加上适当时间延迟,模拟震源的破裂过程。给出破裂开始的子源(i_0, j_0),则其它子源开始破裂的时间延迟由下式计算:

$$del(i,j) = \frac{\sqrt{(dl \times (i - i_0))^2 + (dw \times (j - j_0))^2}}{V_R}$$

(4)

式中 $del(i,j)$ 为第 (i,j) 个子源开始破裂的时间延迟; dl, dw 为断层面上子源的尺寸; V_R 为破裂速度,一般取剪切波速的 80% ~ 85% (Somerville et al., 1999)。在格林函数的计算中,作用力时间函数 $P(t)$ 为一近似 δ -脉冲。

3 单一位错点源引起的格林函数

本文以 1994 年 1 月 17 日在美国洛杉矶的圣费尔南多谷的北岭地区发生的 $M_w 6.7$ 地震为例,对比研究在单一位错点源和有限断层模型两种情况下,用波动有限元法和解析法求解的格林函数的结果。

北岭地震震中位置位于加州圣费尔南多西南 30 km 处 ($34^{\circ}13'N, 118^{\circ}33'W$)。地震与深约 5 ~ 20.4 km 处的一条未破裂到地表的盲断层——Frew 断层有关,发震断层的走向为 122° ,倾角为 40° ,断层滑动角为 101° ,平均滑动量为 1.3 m,最大滑动可达到 3 m^[9]。根据以上资料,本研究中所模拟的地震断层可定义为宽 15 km,长 18 km 的逆断层。在断层附近选了三个基岩台站(LV3、PCD、MCN)作为计算点(表 1)。

表 1 北岭地震中三个基岩台站的位置

台站	纬度	经度	震中距/km
LEONA VALLEY #3 (LV3)	34.596	-118.243	50.4
Malibu Canyon (MCN)	34.078	-118.693	20.7
PACOIMA DAM (PCD)	34.334	-118.396	18.7

当把震源看作是单一位错点源时,震源位于断层面中心,这种情况无法考虑断层产状对格林函数的影响,只能假定破裂沿走向方向单侧传播。利用解析法和三维波动有限元法可计算出三个位于基岩场地上的台站的格林函数。图 1 为在断层顶面到地

面 4 km 范围内 PCD 台站的格林函数(Y 向)(解析解与数值解)随深度的发展规律。图 2 为三个基岩台站的地面格林函数三分量的解析解与数值解的结果对比。

对于同一基岩场地,用解析方法得到的格林函数与用数值方法得出的符合较好(图 1)。剪切位错源在不同深度上引起的格林函数呈衰减趋势,同时 P 波和 S 波的到时也随深度的减小向后延迟,这与地震波在各向同性介质中的传播特性是一致的。

对于同一深度的不同观测点,如图 2 中地表面的三个基岩台站,格林函数随震中距的增大而减小。LV3 台的震中距为 50.4 km,它比 PCD 台(震中距为 20.7 km)和 MCN 台(震中距为 18.7 km)要远 2 倍以上,因此其格林函数的值不仅比这两个台站的要小,而且 P 波和 S 波的到时也要晚 1 ~ 2 s。对于位于断层两侧距离相当的两个台站而言,位于上盘的 PCD 台要比位于下盘的 MCN 台的格林函数大,地震波的到时总体上也较早。这与破裂传播的上盘效应吻合。

4 格林函数计算的有限断层模型

事实上,北岭地震的发震断层为一典型的逆冲断层,倾角为 42° ,滑动角为 101° 。在断层面上,破裂的起始位置位于断层的右下方^[14]。破裂在断层面上的传播是从破裂起始点向整个断层面扩散,断层面上不同位置的滑动也呈不均匀分布。有限断层模型^[15]可较好地模拟这种破裂传播与滑动分布的不均匀性;沿走向和倾向将断层面划分为若干个子源,指定破裂的起始位置,从而确定破裂传播到每一个子源的时间延迟;震源时间函数(滑动时间函数或滑动时程)是用于描述在断层破裂过程中断层面上—给定点的滑动过程(Aki and Richards, 1980)。这个参数直接影响着高频地震动的幅值:上升时间越短,地震动越大。震源时间函数可用破裂传播的方向、破裂速度、破裂上升时间及破裂到达各个子源的时间延迟来表达。断层顶

面的位移反应就是所有子源的格林函数与震源时间函数的卷积在时间域内的叠加。

确定子源尺度是有限断层模拟方法中的一个重要工作。最佳的子源尺寸与震级是密切相关的。它们之间的关系可用下式表达:

$$\log(\Delta l) = -2.0 + 0.1M, (4 \leq M \leq 8) \quad (5)$$

Δl 是断层子源的长和宽(km)。这个关系是与地区相对独立的。可以用此经验公式来确定任一地区任一地震事件的子源尺寸。

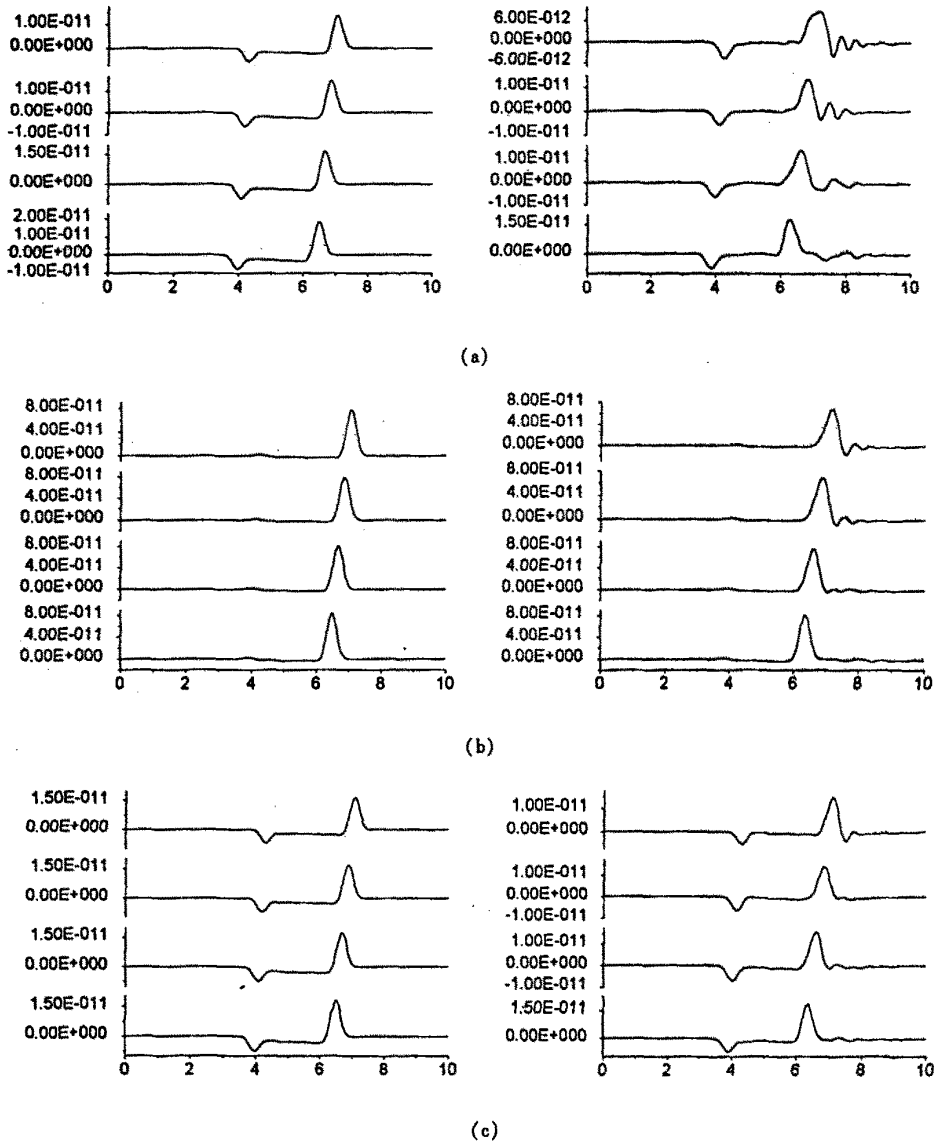


图1 PCD台的点源格林函数解析解(左)和数值解(右)随深度变化的规律
(横轴为时间/s;纵轴为格林函数/m;自下而上的深度间隔为1 000 m)

Fig.1 Analysis Green's function (left) and numerical Green's function (right) at PCD rock station in different depth due to point source.

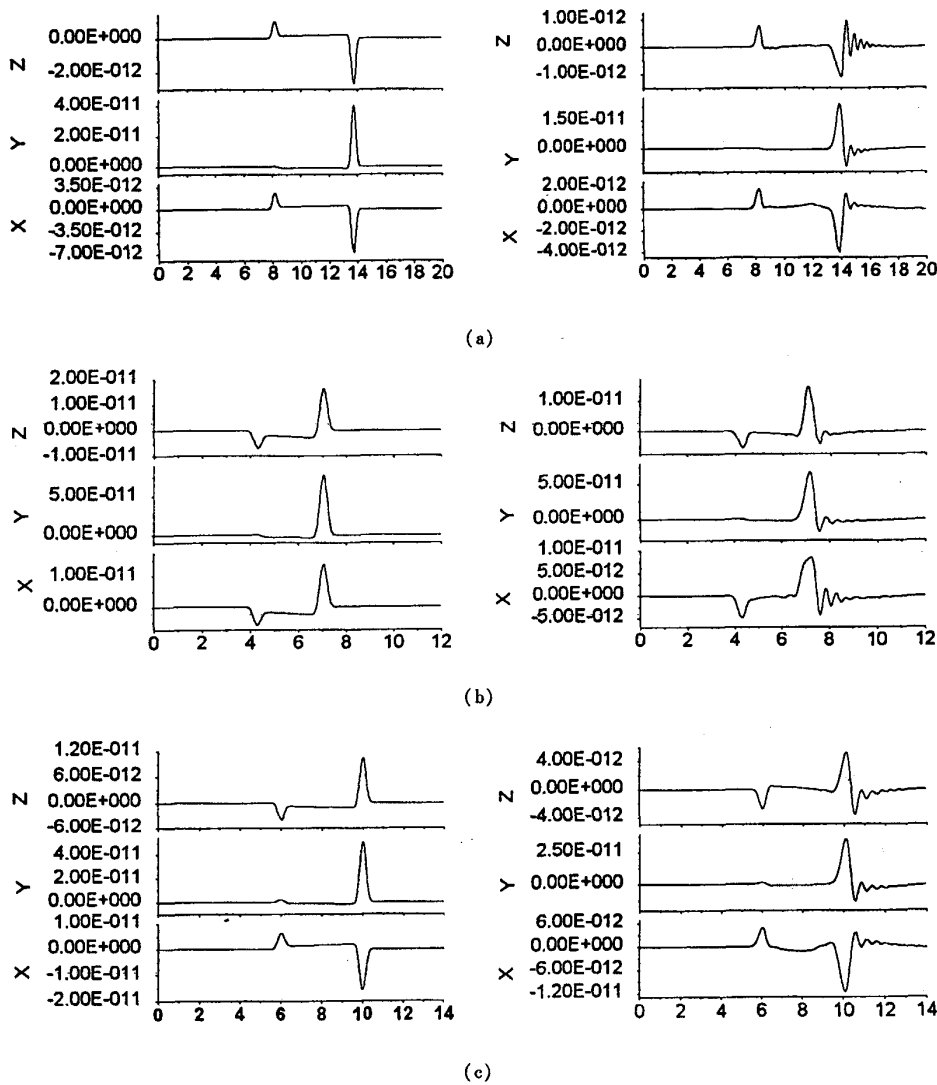


图2 点源引起的格林函数的解析解(左)与数值解(右)

Fig.2 Analysis Green's functions (left) and numerical Green's functions (right) due to point source.

在本文中,对于宽 15 km,长 18 km 的地震断层,假定子震震级 5 级,每个子源的尺度为 3 km×3 km,共划分了 30 个子源^[9,14]。利用有限断层模型,研究中用解析法和有限元法分别计算了三个基岩场地的地面格林函数,二者结果符合较好。最大幅值的差异性是由于在解析法中不能考虑介质中阻尼比对地震波传播的影响,而有限元法中考虑了这一点,但二者在量级上基本是一致的,并不影响计算结果的有效性。图 3 给出了两个基岩台站的(PCD 台和 MCN 台)对比结果。

5 结论

- (1) 无论是单一点源或是有限断层模型,利用解析法和有限差分法所得出的结果是一致的,二者均可以反映出震源、波的传播途径和场地特性(断裂和上覆盖层速度结构)。
- (2) 解析法用于横向成层介质的格林函数较为简便,对于地形及速度结构较为复杂的局部场地条件的格林函数,用数值模拟的方法更为合适,故两种计算方法的结合可为计算较深震源及较大的计算区域打

下基础。

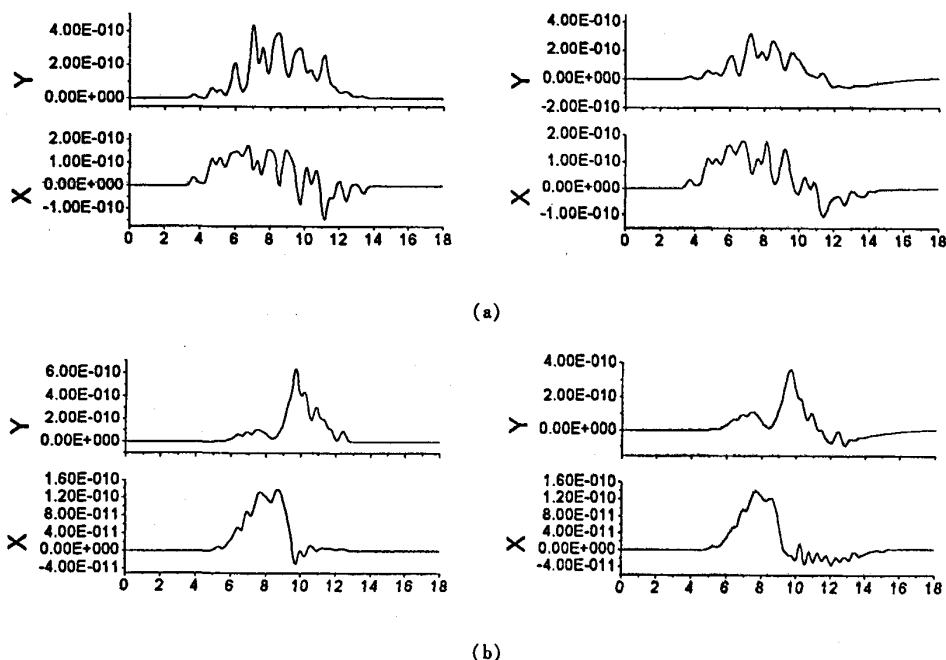


图3 基于有限断层模型的解析解(左)与数值解(右)

Fig.3 Analysis Green's function (left) and numerical Green's function (right) based on finite fault model.

(3) 基于射线理论和波动有限元数值模拟,采用双力偶点源模型计算断层在断层顶面引起的地震影响场(解析法),并将其作为断层上覆盖层的波动有限元数值模拟的入射场,计算(数值法)得到的格林函数是合理的。它可以兼顾波的传播途径与场地波速层与地形的复杂性,同时大大减小了计算量,提高了计算速度,也可保证模拟的稳定性和精度,为进一步计算断层运动在局部场地引起的土层地震反应提供了必不可少的条件。

[参考文献]

- [1] S H Hazell. Earthquake aftershocks as Green's function [J]. Geo. res. letters, 1978, 5: 1-4.
- [2] K Irikura. Semi-empirical estimation of strong ground motion during large earthquakes [J]. Bull. Disas. Prev. Inst., 1983, 33: 63-104.
- [3] K Irikura. Prediction of strong ground acceleration motions using empirical Green's function [A]. in: Proc. 7th Japan earthquake engineering [C]. 1986. 151-156.
- [4] J Boatwright. The seismic radiation from composite models of faulting [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1988, 78: 489-508.
- [5] K Dan, T Watanabe, T Tanaka. A Semi-empirical method to synthesize earthquake ground motions based on approximate source spectrum for far-field shear wave [A]. in: 9WCEE [C]. 1988.
- [6] H Kanamori, D C Jennings, D Helmberger. Estimation of strong ground motion in Mexico city [A]. in: 9WCEE [C]. 1988.
- [7] Bouchon M, Aki. Discrete wave number representation of seismic source wave fields [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1977, 67: 259-277.
- [8] Somerville P G. Characterizing earthquake slip models for the prediction of strong ground motion [A]. in: WCEE [C], 2002.
- [9] David J Wald, Thomas H Heaton, K W Hudnut. The slip history of the 1994 Northridge, California, Earthquake determined from strong-motion. Teleseismic, GPS, and leveling data [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1996, 86(1B): S49-S70.
- [10] [美]安艺敬一, P G 理查兹著. 定量地震学理论和方法 [M]. 北京: 地震出版社, 1987.
- [11] 周正华, 廖振鹏. 消除多次透射公式漂移失稳的措施. 力学学报, 2001, 33(4): 550-554.
- [12] 金星, 刘启方. 断层附近强地震动半经验合成方法的研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(4): 22-27.

- [13] 罗奇峰. 近场加速度的半经验合成[D]. 博士学位论文. 1989.
- [14] 王国新. 强地震动衰减研究[D]. 博士学位论文. 2001.
- [15] 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.

COMPARISON OF GREEN'S FUNCTION OF NEAR-FIELD GROUND MOTION DUE TO ANALYTICAL METHOD AND NUMERICAL METHOD

ZHANG Dong-li^{1,2,3}, TAO Xia-xin^{1,4}, ZHOU Zheng-hua^{1,5}

(1. *Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150083, China;*

2. *Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China;*

3. *Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;*

4. *Harbin Institute of Technology, Harbin 150083, China;*

5. *China Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100036, China)*

Abstract: The theory and method of Green's function of near-field ground motion is calculating in all-around infinite space in terms of single media by analytical method and 3-D finite element difference numerical method are analysed. For the same earthquake, the source can be considered as a single point source or finite several seismic sub-sources on a finite fault plane. Green's function is caused by plus of a point source or by pluses of all sub-sources with reliable time delay. Take the Northridge earthquake in 1994, U. S. A, as an example, Green's function at three rock seismic stations (LV3, PCD, MCN) are computed and analyzed due to both methods. The results show better coherence.

Key words: Near-field ground motion; Green's function; Finite fault; Seismic sub-sources