

强震近场地面旋转运动的讨论^{*}

郭 安 宁

(国家地震局兰州地震研究所)

一、前 言

在我国历史上某些大地震的记载中,曾记载到大震时的地面旋转现象。如1668年山东郯城8.5级大震时“民房有南北易向者”。1920年甘、宁海原8.5大震时,董福祥神道碑显著旋转。另外1976年唐山7.8级和7.1级地震时震中区也皆有旋转现象的报导。这个问题的研究不仅对今后的抗震建设具有实际意义,而且对地震学问题也有一定的理论意义。本文旨在用地震波振动合成观点去探讨大地震的旋转运动的产生机理及其存在范围。

二、研究史概述

在强震地面运动中,除了水平运动及垂直运动分量外,还有旋转运动的分量。从原则上讲,要完全确定结构物支承点的运动必须有三个转动分量,因此总共需要6个分量,即沿三个相互垂直轴的移动分量和三个相互垂直轴的转动分量。关于在地震时地面运动的旋转问题,前人研究过一些,如1972年日本学者柴田碧曾观察过一些震例的旋转分量并进行了理论分析,他发现旋转角速度与地面运动的水平加速度的平方呈正比关系,他对该问题的解释是当地震波前进时,由于介质的不均对地震波振动产生振幅差异所造成的,这个旋转是局部旋转场^[1]。1981年顾浩鼎等人从弹性力学角度讨论了断层周围的旋转场,但这个场是大半径的旋转的场,不是局部地面旋转运动,因之对局部地面建筑物影响不大^[2]。

三、地震波振动叠加及旋转

对于简谐周期性振动的研究中,最令人感兴趣的是振动的一维过程变化为二维的过程,这就是两个简谐振动的垂直叠加,由此也可推到三维体系中去,那就是二维平面的振动与空间的另一向振动的叠加。在本文的研究中,得到的是另外一种的运动形式。设在一直角坐标平面上,X坐标系的振动表达为:

$$X = A_1 \cos(\omega t + \phi_1) \quad (1)$$

^{*} 本文为1988年地震合同制课题项目

y坐标系上的振动表达为:

$$y = A_2 \cos(\omega t + \phi_2) \quad (2)$$

设它们的频率相同, 若将这两个振动合成即把上两式中的 t 消去就得到合振动的轨迹方程:

$$\frac{X^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2Xy}{A_1 A_2} \cos(\phi_2 - \phi_1) = \sin^2(\phi_2 - \phi_1) \quad (3)$$

(3)式是一个椭圆方程, 即在一般情况下, 由合振动所决定的运动轨迹为一椭圆, 椭圆的形状由两个振动的相位差 $\phi_2 - \phi_1$ 的值决定。公式(3)表明了一个有趣的结果: 两个周期性的谐振动在垂直合成后即变化为一个沿闭合曲线的旋转运动(当然不是垂直合成也会引起闭合曲线运动, 但旋转程度相对小), 这就是我们在今后研究地震近场旋转运动的基本起点。前面所述的都是周期性的谐振动的垂直合成问题。对于随机的振动垂直合成后是否也是质点沿封闭线运动呢? 现在我们来研究这个问题。对于一切振动的合成问题可以引入旋转矢量的概念用几何图形来表示, 如图1所示, 设一随机振动为:

$$y_1 = f_1(t) \quad (4)$$

设另一随机振动为:

$$y_2 = f_2(t) \quad (5)$$

y_1 的随机振动的最大振幅不超过 A_1 , y_2 的随机振动的最大振幅不超过 A_2 , 其合成方式就如图1所示的那样。若在某一给定的时间 t 时, y_1 随机振动的质点在 p_1 点, y_2 随机振动的质点在 p_2 点, 其合成就是互相平移后相交的点 p , 该点也就是合成后质点所在的位置。当时间 t 再进行时, 质点 p 就产生了位移, 但无论怎样从物理与数学上不难证明该 p 点是被约束在以 A_1 , A_2 为边长的矩形内。尽管振动是随机振动, 垂直合成的轨迹不会重复, 但是在该矩形内做复杂的封闭曲线运动, 即可以认为是复杂的旋转运动。对于地震引起的振动, 只要是垂直叠加合成, 即就会产生显著的地面旋转运动, 这就是我们所探讨的强震地面旋转运动产生的理论依据。

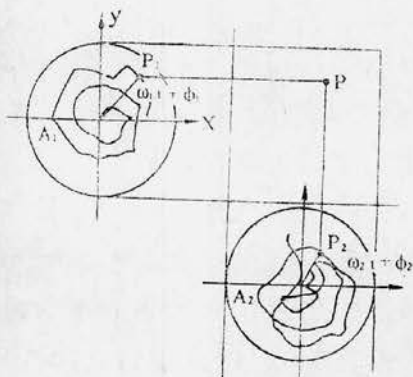


图 1

四、构造地震近场强震地面旋转运动的产生

目前认为地震的发生大都是以构造成因的, 即就是断层错动发震的。我们先来考虑一平面的情况。设有一发震断层, 其长度为 $A-B$, 並任设 C 点为始破裂点, 如图2所示。在近场中, 这是一线源发震。对于近场中的 p 点来说, 在地震时它接受到的地震波应是线源 AB 上每一点发射来的地震波, 这样, 每一点来到的地震波就会叠加。为了便于讨论, 我们在断层上取 CC_1 段为直径作一大圆, 且此圆的圆周通过 P 点, 如图2所示。根据几何学可知, 图中角 CPC_1 为直角, 这就是说对于 P 点来讲, 断层上 C 点发射来的地震波与 C_1 点发射来的地震波以直角相遇的, 相应地它们的振动方向也是以垂直相遇的, 只是有相位差。按照上述理论, 两振动垂直叠加后就会引起旋转运动, 那么对由 C 和由 C_1 点发射来的地震波在 P

点引起的合成运动就会变为旋转运动。根据以上道理，我们进而可推知在该圆周上任一点对C和C₁两点发射来的地震波其振动合成都会产生旋转运动。同时我们也可在线源断层AB上以任意直径画出很多圆，对于圆周上的任一点，由直径的两端点发射来的地震波在此点合成都会产生旋转运动。以上情况对于纵波和横波皆成立。

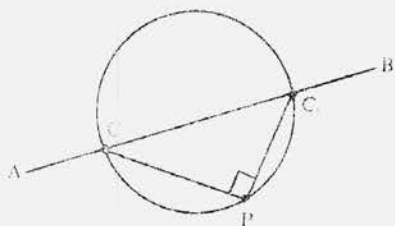


图 2

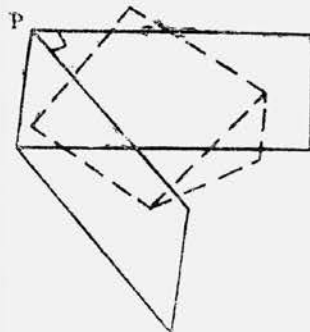


图 3 任意产状断层面情况下，振动垂直合成的条件图

在真实的情况下，发震断层的发展情况是在三维立体空间中进行的。如图3所示。在此情况，在地面上任一点P上接收射来两条射线，其水平投影相正交的条件，可以按以下的原则来选择。先通过P点作两条直交线，并沿其每一条线铅直切下得两个铅直面（图3中实线），这两个铅直面与震源断层面（图3中虚线）相交出两条直线（图3中未画出来，但可想而知），此两条直线上各取任何一点作波源，这两个波源到P点的射线其水平投影必正交，因之只要相位差合适，则合成后为旋转运动。但实际情况有时并不是这样。这是因为由两点发射来的地震波到P点时，因到时差太大，当后一个点发射地震波到P点时先一点发射的地震波已经过去，即赶不上趟，因此也就叠加不成了，故也没有产生旋转运动。这种情况在非常长的震源断层时可能出现。若设断层面上F₁点发射地震波来的持续时间为t_s，断层传播的速度为V₀，地震波速为V，则由F₁点发射的地震波到达P点的时间为：

$$t_L = \frac{PF_1}{V} \quad (6)$$

断层破裂从F₁点传播到F₂点的时间为：

$$t_s = \frac{F_1 F_2}{V_0} \quad (7)$$

当断层破裂传播到F₂之后，在F₂点发射地震波其到P点的时间为：

$$t_e = \frac{PF_2}{V} \quad (8)$$

因之F₂点发射地震波到P点之后与F₁点发射地震波的时间差值应为：

$$T = (t_s + t_e) - t_L \quad (9)$$

若该时间差小于F₁点地震波束的振动持续时间则能叠加得上，若大于则叠加不上，即T < t_s时能叠加，当T > t_s就不能叠加。

五、旋转分量的一些性质

1. 旋转场的范围

对于由振动叠加引起的旋转,因其垂直叠加时旋转最显著,故我们仅限制在直角条件的情况,如图4所示。图中HB为断层长度,P为地面上一点。如按发震断层总长度为直径做出一大圆,则最显著旋转都限制在该圆内,在圆外则显著不存在了。因为在这时,就不可能出现直交射线了,非常远时射线近于平行了。按震级—断层长度的公式可得:

$$L = 10^{\frac{M}{2.1} - 3.3} \quad (10)$$

式中L为断层长度,M为震级。则对任一震级的地震其最大旋转场是以L为半径所得到的圆,

$$\gamma = \frac{1}{2} \left(10^{\frac{M}{2.1} - 3.3} \right) \quad (11)$$

其面积为:

$$S = \pi \left(\frac{1}{2} 10^{\frac{M}{2.1} - 3.3} \right)^2 = \frac{\pi}{4} \left(10^{\frac{M}{2.1} - 3.3} \right)^2 \quad (12)$$

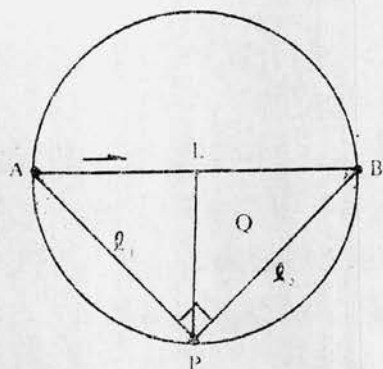


图 4

(11)和(12)式是针对直立断层来说的,对于倾斜断层来说还应考虑断层面在地表的投影范围,即 $\Delta r = R \cos \delta$ 式中R为断层面插入地下的尺度, δ 为断层面倾角。

另一个限制旋转场展布范围的因素就是断层发震时振动的持时问题,持时越长,叠加的时间也越长,叠加场的展布范围也越大,反之则越小,现就该问题做一讨论。在前面图中,我们在大圆内做一直角等腰三角形,

断层破裂由A点向B点传播。当A点开始破裂时,地震波就开始往外传播。由式(9)可得出A点振动传播到P点与B点振动传播到P点的时间差为:

$$T = \left(\frac{L}{V_0} + \frac{l_1}{V} \right) - \left(\frac{l_2}{V} \right) \quad (13)$$

若为等腰三角形,则 $l_1 = l_2$,得

$$T = \frac{L_0}{V} \quad (14)$$

式中 V_0 为断层传播速度,L为断层长度。若该时间差小于振动持续时间则叠加得上,若大于则叠加不上,由此可得叠加得上的断层上两点的距离L的极限值为:

$$L < \frac{t_s}{V_0} \quad (15)$$

按图4可得P点到断层的距离为:

$$Q = \frac{2}{1} L \quad (16)$$

式中L是发震断层的长度,这就是由振动持续时间定的旋转场的展布范围。

2. 地面质点的振动方式

因对于地面上的一质点来讲它接受到的地震动是一个三维向振动,故它的旋转振动方式也是三维向的。在水平面内正交的地震波的振动其叠加是在地表面内的旋转运动,但也可能是来自铅直轴的振动与水平面内振动之垂直合成,这就是一立体叠加问题。通俗地讲,在水

平面内振动的叠加就是地面上南北向振动与东西向振动的叠加，其直观表现为地面的旋转。在水平面内的振动与铅直轴方向振动的叠加其直观上表现为波浪状的起伏运动。

3. 旋转分量的旋转幅度特征

在前面图 2 所示的叠加其轨迹都被限制在一个矩形的方框内，而此矩形方框的大小由两振动的振幅所确定，故其旋转幅度也是永远被限制在两振动的振幅所规定的范围之内。

4. 当两振动相交并非直角正交时，它也会形成旋转，但旋转分量可能弱一点，有时并不是一个完全过程的旋转，由此而估计的旋转场的范围可能就要大得多。且地震波在传播途径中是很复杂的，地面某一质点除了接受发震断层上来的直达波外，还要接受来自地壳界面及各个界面的一次或多次反射波，经多次反射后又形成更多复杂的波，故这时的叠加更复杂，因其不是重要分量，我们在此不做讨论了。

参 考 文 献

- [1] 胡聿贤，地震工程学，地震出版社，1988.
- [2] 顾浩鼎，东北地震研究，No. 1, 1987.

DISCUSSION ON NEAR-FIELD GROUND ROTATING MOTION DURING STRONG EARTHQUAKE

Guo Anning

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Gansu, China*)