

## 垂直向地震作用对节理岩体失稳破坏的影响

梁庆国<sup>1</sup>, 韩文峰<sup>2</sup>, 赵士耀<sup>3</sup>

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 天津城市建设学院土木工程系, 天津 300381; 3. 甘肃路桥第二公路工程有限责任公司, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**基于线弹性断裂力学理论分析了垂直向地震作用对节理岩体地震动力破坏的影响。在仅考虑峰值时,最不利的单向地震动加速度方向是水平倾向坡外,双向则依据破裂机制是拉剪或压剪,加速度分别是水平倾向坡外与向下或向上的组合。地震动的幅值、作用方向及双向地震动的组合都可使岩体的破坏机制发生转化,并且是突变的、不可逆的。较低峰值的双向地震动产生的应力强度因子可能大于较高峰值的单向地震动所产生的应力强度因子。在岩体节理分布特征和静态应力场一定的初始条件下,第一个导致岩体中产生破裂的地震动加速度幅值及其方向的组合唯一地决定了岩体不可逆破坏发展的方向、机制及最终的破坏特征,其复杂性远大于静力作用时的情况。对岩体地震动力破坏问题的认识应充分考虑垂直向地震动的重要影响。

**关键词:**岩体力学; 节理岩体; 地震动力破坏; 垂直向地震作用; 复杂性

**中图分类号:** TU457; P315.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2007)04-0307-07

## Influence of Vertical Seismic Action on Seismic Dynamic Failure of Jointed Rock Mass

LIANG Qing-guo<sup>1</sup>, HAN Wen-feng<sup>2</sup>, ZHAO Shi-yao<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Department of Civil Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China;

The 2nd Highway Engineering Co. Ltd of Gansu Highway &amp; Bridge, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Based on the theory of linear-elastic fracture mechanics, the influence of vertical seismic action on seismic dynamic failure of jointed rock mass is discussed. When a single peak acceleration loads on rock mass, the severest accelerated direction is horizontal slip-outward, and for acceleration with two directions, the severest ground motions are the combination of horizontal slip-outward with upward or downward according to that its failure mechanism is tensile-shear or compressive-shear crack. The amplitude, direction and combination of horizontal and vertical accelerations can change the failure mechanism of rock mass and the changing is catastrophic and irreversible. The dynamic stress factor from two lower accelerations of horizontal and vertical might cause more serious failure than that from higher single acceleration. For given jointed rock mass and static stress field, the amplitude and direction combination of first ground motion accelerations causing failure in rock mass will determine the unique development direction, mechanism and final characteristics of rock mass failure, therefore, the seismic dynamic failure of rock mass is much more complex than static failure. The influence of vertical seismic action on seismic dynamic failure of jointed rock mass should be considered comprehensively.

**Key words:** Rock mass mechanics; Jointed rock mass; Seismic dynamic failure; Vertical seismic action; Complexity

收稿日期: 2007-05-17

基金项目: 科技部社会公益研究专项(2002DIB20062)资助

作者简介: 梁庆国(1976-), 男, 甘肃临洮人, 博士, 副教授。主要从事工程地质和岩土工程方面的研究。

# 0 引言

地震以地震波形式传播的能量会造成岩土体的变形和破坏,从而导致严重的工程震害和地质灾害。地震动力作用是岩体变形破坏的重要原因之一,然而普遍存在但却研究较少的问题。文献[1]提出了一个很好的节理岩体破坏的断裂力学模型,对于理解具有未贯通节理岩体的地震动力破坏有很好的借鉴价值,但文中只讨论了水平向地震动加速度的作用,并且只考虑其中的单个峰值。文献[2]和[3]的资料表明强震区或极震区的垂直向地震动峰值很高,对于某一点的地震动其实际运动轨迹是非常复杂的;此外长历时、高峰值的大地震和短历时、高峰值的小地震在极震区产生的破坏效果甚至不相上下<sup>[4-6]</sup>。基于此,本文将在文献[1]模型的基础上,考虑强震区垂直向地震动的影响,进一步探讨岩体地震动力破坏的相关问题。

# 1 模型的建立

如图 1,参考文献[1]的模型,假设为两平行节理所割裂的块体  $M$  受到水平向地震动加速度  $a_h$  和垂直向地震动加速度  $a_v$  的惯性力作用,块体  $M$  的惯性力和重力的合力可分解为垂直裂隙方向及平行裂隙方向的两个分力,其等效受力图和裂隙应力图如图 2、3<sup>[1]</sup>。

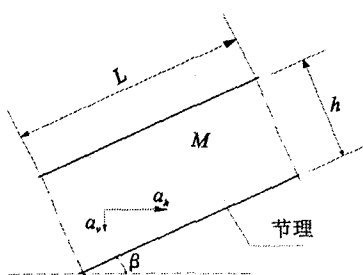


图 1 分析模型及加速度分布

Fig. 1 Analysis model and accelerated directions.

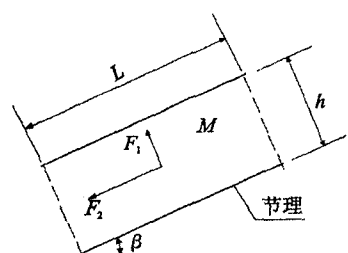


图 2 块体等效受力示意图

Fig. 2 Equivalent forces applied on rock block.

依据达朗贝尔原理,则有

$$F_1 = \gamma h l g A, F_2 = \gamma h l g B \quad (1)$$

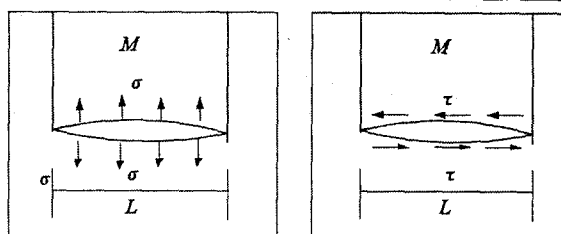


图 3 等效后的裂隙面受力图

Fig. 3 Equivalent stress applied on joint surfaces.

作用在节理两边的等效应力为

$$\sigma = \gamma g h A, \tau = \gamma g h B \quad (2)$$

其中  $A$ 、 $B$  分别定义为地震动作用下法向应力和切向应力系数,如表 1。岩体所受的地震动方向组合有 8 种,对应力方向和符号的规定为:对法向应力  $\sigma$ ,垂直于节理面拉为正,压为负;对剪应力  $\tau$ ,平行节理面向下为正(逆时针),平行节理面向上为负(顺时针),其中,  $K_h$  为水平地震系数,  $K_v$  垂直向地震系数。由法向应力与切向应力在裂隙端部产生的附加应力强度因子为

$$K_{ld} = \gamma g h A_1 \sqrt{0.5 \pi L} \quad (3)$$

$$K_{hd} = \gamma g h B \sqrt{0.5 \pi L}$$

若暂不考虑地应力场的影响,则

$$\begin{aligned} K_d &= K_{ld} + K_{hd} \\ &= \gamma g h B \sqrt{0.5 \pi L} (A_1 + |B|) \\ &= \gamma g h \sqrt{0.5 \pi L} C \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{其中} \quad C = A_1 + |B| \quad (4a)$$

$$A_1 = \begin{cases} |A|, & A > 0 \\ 0, & A \leq 0 \end{cases} \quad (4b)$$

式(4a)和(4b)中,  $A > 0$  时说明节理受法向拉应力作用且对节理端部的应力强度因子有贡献,节理处于拉剪应力状态;若  $A < 0$ ,则节理呈闭合状态,仅切向应力对节理端部应力强度因子有贡献。对  $B$  取绝对值是由于无论剪应力是顺时针方向还是逆时针方向,都是剪切状态,对破坏的贡献仅取决于其量值的大小。

表 1 双向地震动时参数  $A$ 、 $B$  之值

|        |     | $A$ |                                                 | $B$                                             |  |
|--------|-----|-----|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--|
| 单<br>向 | 水平  | 向左  | $-K_h \sin \beta - \cos \beta$                  | $-K_h \cos \beta + \sin \beta$                  |  |
|        |     | 向右  | $K_h \sin \beta - \cos \beta$                   | $K_h \cos \beta + \sin \beta$                   |  |
|        | 垂直  | 向上  | $-K_v \cos \beta - \cos \beta$                  | $K_v \sin \beta + \sin \beta$                   |  |
|        |     | 向下  | $K_v \cos \beta - \cos \beta$                   | $-K_v \sin \beta + \sin \beta$                  |  |
| 双<br>向 | 左+下 |     | $-K_h \sin \beta + K_v \cos \beta - \cos \beta$ | $-K_h \cos \beta - K_v \sin \beta + \sin \beta$ |  |
|        | 左+上 |     | $-K_h \sin \beta - K_v \cos \beta - \cos \beta$ | $-K_h \cos \beta + K_v \sin \beta + \sin \beta$ |  |
|        | 右+下 |     | $K_h \sin \beta + K_v \cos \beta - \cos \beta$  | $K_h \cos \beta - K_v \sin \beta + \sin \beta$  |  |
|        | 右+上 |     | $K_h \sin \beta - K_v \cos \beta - \cos \beta$  | $K_h \cos \beta + K_v \sin \beta + \sin \beta$  |  |

其中  $K_h$  为水平地震系数;  $K_v$  垂直向地震系数。

在静态应力场作用下,节理两端应力强度因子为<sup>[1]</sup>

$$K_{II}^s = \sin 2\beta \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sqrt{0.5\pi L} \quad (5)$$

按照工程断裂准则,在地震作用下岩体产生破坏的条件是

$$K_I^d + K_{II}^d + 2K_{II}^s = K_I^c \quad (6a)$$

$$K_d + 2K_{II}^s = \gamma g h \sqrt{0.5\pi L C} + \sin 2\beta (\sigma_1 - \sigma_2) \sqrt{0.5\pi L} \quad (6b)$$

由式(4)、(6)可以看出,在岩体厚度  $h$  和裂隙长度  $L$  一定的情况下,其破裂机理和破坏可能性大小则主要取决于三个参数,即裂隙倾角  $\beta$ ,水平地震系数  $K_h$  和垂直向地震系数  $K_v$ 。

## 2 分析与讨论

### 2.1 单向地震动

#### 2.1.1 水平向左与水平向右

对于  $A$ :  $A_{右}$  恒大于  $A_{左}$ , 且始终有  $A_{左} < 0$ , 即向左震动始终是压应力作用,不会使岩体承受拉应力,这种情况下岩体为压剪状态。

对于  $B$ :  $K_h \sin \beta - \cos \beta < 0$ , 即  $\tan \beta < \frac{1}{K_h}$  时  $B_{右}$

恒大于  $B_{左}$ ;  $K_h \sin \beta - \cos \beta > 0$ , 即  $\tan \beta > \frac{1}{K_h}$  时,有  $C_{右左} = |B_{右}| + A_{右} - |B_{左}| = K_h \sin \beta - \cos \beta + 2K_h \cos \beta$  恒大于 0, 故  $B_{右}$  恒大于  $B_{左}$ ,  $K_{d右} > K_{d左}$ 。所以仅仅考虑水平单时,水平向右是最不利地震动方向。

水平向左震动时其应力强度因子则完全取决于  $B$  的绝对值。若  $-K_h \cos \beta + \sin \beta > 0$ , 即  $\tan \beta > \frac{1}{K_h}$  时,  $C = \sin \beta - K_h \cos \beta$ , 则  $\beta$  越大  $C$  越大; 若  $-K_h \cos \beta + \sin \beta < 0$ , 即  $\tan \beta < \frac{1}{K_h}$  时,  $C = K_h \cos \beta - \sin \beta$ , 则  $\beta$  越小  $C$  越大; 在实际地震动峰值加速度的可能范围内,向左震动时  $C$  的分布如图 4(a), 可见  $B$  值由大变小再由小变大的倾角突变值随峰值加速度的增大而增大。

水平向右震动时,水平地震系数  $K_h$  越大,则产生拉应力所需的结构面倾角就越小,岩体从压剪破坏转化为拉剪破坏的临界角度也就越小。换言之,当结构面倾角一定时,  $K_h$  的增大至一定大小时则使岩体破裂的机制产生突变(如图 4(b)), 且总的应力强度因子也发生在某一倾角时产生了突变(如图 4(c))。

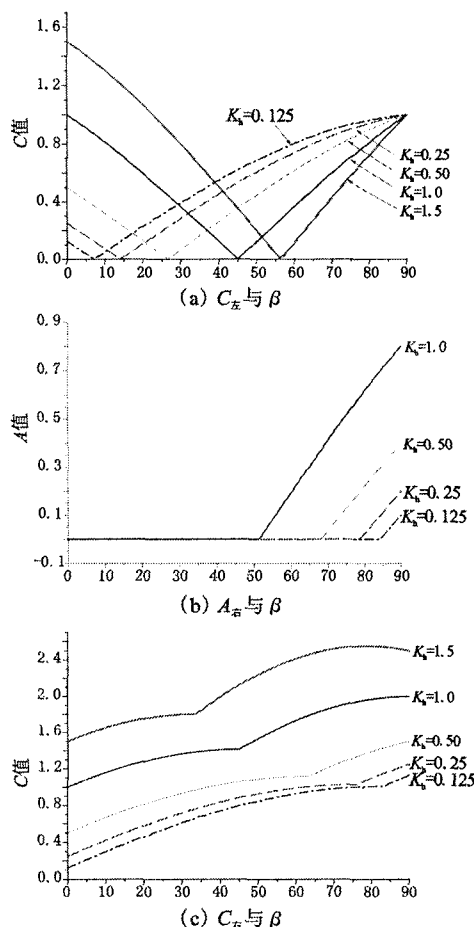


图4 不同加速度时  $\beta$  与  $A$ 、 $C$  的关系

Fig. 4 Relationship between  $\beta$  and  $C$  or  $A$ .

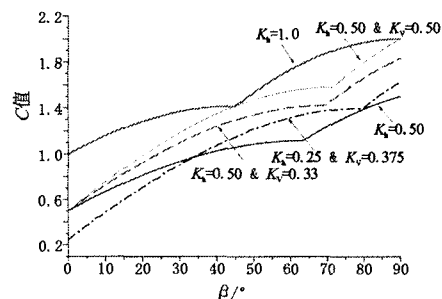


图5 不同  $K_h$  和  $\lambda$  条件下  $C_{右+上}$  随结构面倾角的变化关系

Fig. 5  $C_{右+上}$  change with  $\beta$  in different  $K_h$  and  $\lambda$ .

#### 2.1.2 对于垂直向上与垂直向下

对于  $A$ :  $A_{下}$  恒大于  $A_{上}$ 。对于  $B$ : 由于  $K_v \leq 1$ , 即  $A_{上} = A_{下} = 0$ , 则  $B_{上}$  恒大于  $B_{下}$ 。故仅考虑垂直向地震动时,垂直向上是最不利的方向,且倾角越大,垂直地震系数越大,则越利于垂直向地震动破坏。

现考虑另一种特殊情况,即  $K_v > 1$ , 若  $C_{下} - C_{上} = (K_v - 1) \cos \beta - 2 \sin \beta > 0$ , 即当  $\tan \beta < \frac{K_v - 1}{2}$ , 向

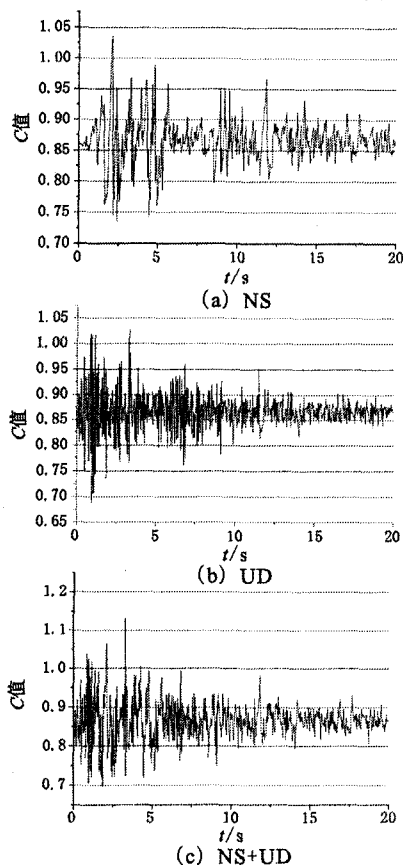


图6 不同地震动方向组合的C值曲线( $\beta=60^\circ$ )

Fig. 6 The C value curves in different combination of ground motion direction( $\beta=60^\circ$ ).

下运动为最不利运动方向,且岩体破坏机制为拉剪破坏;反之,若 $\tan \beta > \frac{K_v - 1}{2}$ ,则向上运动是最不利运动方向,且岩体破坏机制为压剪破坏。因此就垂直向地震动而言,仅当垂直地震系数大于1时垂直向下的地震动才是最不利方向,岩体破坏机制从压剪破坏转化为拉剪破坏,并且倾角越小,产生拉应力所需的垂直向地震动也就越小。而垂直地震系数越大,则从拉剪破坏向压剪破坏突变的节理倾角也越大。

综合上述关于单向运动的情况,对于垂直向地震,仅当 $K_v > 1$ 时岩体才有可能产生拉剪破坏,且结构面倾角越小,垂直地震系数越大,就越易发生破坏;其他情况下仅考虑单向地震运动时,结构面倾角越大越易破坏,地震系数越大也越易发生破坏。

## 2.2 双向地震动的考虑

对于A:恒有 $A_{右+下} \geq A_{左+下}$ ,及 $A_{右+下} \geq A_{右+上}$ ,而 $A_{左+上} < 0$ ,即左上运动的组合始终是处于压剪状态,而右下组合出现拉剪状态的可能性最大,即出现拉剪破坏的最不利地震动组合为右下。

对于B: $B_{右+上}$ 始终最大,而右下、左下、左上之间的大小关系取决于 $K_h$ 、 $K_v$ 及结构面倾角 $\beta$ 的组合关系,较为复杂。由于最终决定岩体是否破坏的是C值的大小,实际破坏的判断应对所有可能的组合进行计算后确定。

考虑到水平单向时,向右运动为最不利方向,故主要探讨 $C_{右+下}$ 、 $C_{右+上}$ 之间的关系。在任何情况下都有 $A_{右+下} \geq A_{右+上}$ , $B_{右+上} \geq B_{右+下}$ ;若 $\tan \beta < \frac{1}{K_h} - \lambda$ 时, $A_{右+下} = A_{右+上} = 0$ ,而 $|B_{右+上}|$ 始终都大于 $|B_{右+下}|$ ,此时,右下运动与右上运动均为压剪状态, $C_{右+上}$ 为最大,是最不利地震动组合。

若 $\frac{1}{K_h} - \lambda < \tan \beta < \frac{1}{K_h} + \lambda$ ,则 $A_{右+下} = K_h \sin \beta + K_v \cos \beta - \cos \beta$ ,而 $A_{右+上} = 0$ ,即右下为拉剪状态,而右上为压剪状态;此时 $C_{右+下} = K_h \sin \beta + K_v \cos \beta - \cos \beta + K_h \cos \beta - K_v \sin \beta + \sin \beta$ ,而 $C_{右+上} = K_h \cos \beta + K_v \sin \beta + \sin \beta$ ,要使 $C_{右+上} > C_{右+下}$ 则必须满足: $\tan \beta > \frac{\lambda K_h - 1}{(2\lambda - 1)K_h}$ ( $\lambda \neq 0.5$ ;若 $\lambda = 0.5$ , $C_{右+上} - C_{右+下} = (1 - K_v) \cos \beta \geq 0$ ,此时右上组合为最不利地震动);反之则 $C_{右+上} < C_{右+下}$ 。

若 $\tan \beta < \frac{1}{K_h} + \lambda$ 时, $A_{右+下}$ 和 $A_{右+上}$ 均大于0,右下和右上地震动时均为拉剪状态,此时若要使 $C_{右+上} > C_{右+下}$ ,必须满足: $C_{右+上} > C_{右+下} = K_v (\sin \beta - \cos \beta) > 0$ ,即当 $\beta > 45^\circ$ 时右上运动组合为最不利地震动;反之则右下组合为最不利运动。

一般水平向加速度达到峰值时,垂直向地震动则较小且出现几率较低,反之亦然;而中等强度的水平向加速度和垂直向加速度幅值接近且同时出现的几率则较多。通过对 $K_h$ 分别等于0.125、0.25、0.5、1.0(对应于中国地震烈度表中的Ⅶ度、Ⅷ度、Ⅸ度和Ⅹ度)时在 $\lambda$ 在多种情况下任意倾角的计算,发现 $C_{右+上}$ 均大于相应的 $C_{右+下}$ 、 $C_{左+上}$ 、 $C_{左+下}$ ,因此一般情况下,最不利双向地震动是右上。

岩体在受到水平和垂直地震动作用时的破裂机制和应力强度因子,在结构面倾角一定时取决于 $K_h$ 和 $K_v$ 的组合,在一定的条件下,较低峰值的双向地震动产生的应力强度因子可能大于较高峰值的单向地震动所产生的应力强度因子,如图5。因此仅考虑单向峰值或超过一定强度的单向地震动对岩体动力破坏影响的做法是值得商榷的。

## 2.3 考虑实测地震动加速度时程曲线的分析

假定水平地震动平行于结构面倾向,此时属于

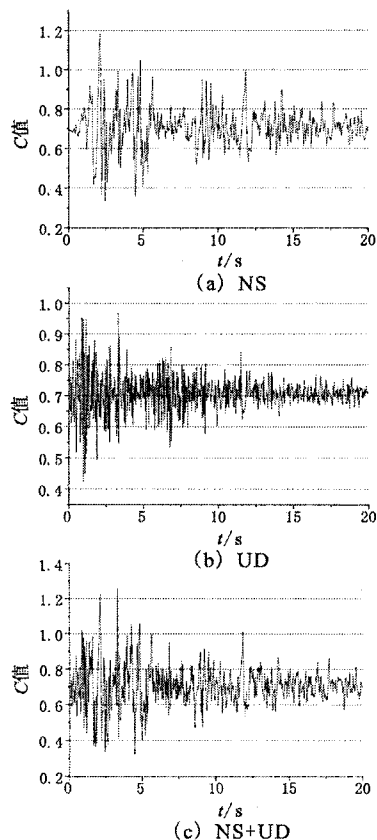


图 7 不同地震动方向组合的  $C$  值曲线( $\beta=45^\circ$ )

Fig. 7 The  $C$  value curves in different combination of ground motion direction( $\beta=45^\circ$ ).

I、II 型破裂,若水平地震动垂直于结构面倾向则属于 I、III 型破裂机制,而实际的三维地震动则可能使岩体处于 I、II、III 复合破裂状态。为简便起见,本文主要讨论水平地震动平行于结构面倾向的情况。计算采用 El Centro 加速度记录的 NS(南北)和 UD(上下)分量的前 20 s。

由于地震波记录的同一时刻的水平向与垂直向的加速度共同代表了该点地震动的特征,计算时必须同时考虑时程曲线上加速度的方向组合。假定右为南为正,下为正,则北为左为负,上为负,此时双向地震动的右上、右下、左上、左下就分别可用两条加速度时程曲线在同一时刻点的组合来表示,即加速度时程曲线上不同时刻的(+,+),(+,-),(-,+)(-,-)组合就分别代表(右+下)、(右+上)、(左+下)、(左+上)。故可统一用右下组合的公式计算不同时刻的  $C$  值:

$$\begin{aligned} A &= K_h \sin \beta + K_v \cos \beta - \cos \beta \\ B &= K_h \cos \beta - K_v \sin \beta + \sin \beta \end{aligned} \quad (7)$$

在 NS 向时程曲线上,正值(N)代表向右,  $K_h > 0$ , 负值(S)代表向左;在 UD 向时程曲线上,负值

(D)代表向上,正值(U)代表向下,故在计算前先将 UD 向时程反向再进行计算。图 6、7 是计算的结果,其中对  $\beta=60^\circ$  的计算因 10 s 后的  $C$  值较小,而略去,对  $\beta=45^\circ$  的计算时将加速度的幅值共同放大 2 倍,但不改变其频率特征。

从图中可以看出,计入垂直向加速度分量后,  $C$  值超过一定阈值(如 1.0)的次数明显增多。例如,对于  $\beta=60^\circ$  的结构面,仅 NS 向分量时有 1 个  $C > 1$  的峰值,仅 UD 向分量时  $C > 1$  的峰值有 4 个,而 NS + UD 后则为 6 个;对于  $\beta=45^\circ$  的结构面,将其水平和垂直向都等比放大 2 倍,其水平和垂直分量的峰值分别增加至 0.68 g 和 0.36 g 后,仅 NS 向分量时  $C > 1$  的峰值仅 1 个,仅 UD 向分量时未出现  $C > 1$  的峰值,而计入垂直向分量后有 7 个;并且大多出现在水平和垂直向加速度的峰值附近。相比于水平单向震动,地震动初期出现了更多  $C > 1$  的峰值,即垂直向运动较强烈的时段和垂直向地震动由强变弱、水平向地震动逐渐增强的时段。对 El Centro EW 分量和 UD 分量的组合及其在不同倾角  $\beta$  时计算的  $C$  也具有类似规律。

由于地震动的频率效应,特别是垂直分量一般频率较高,岩体又是对加载率较敏感的介质,仅  $C > C_{cr}$  还不一定立即破裂并形成增长的裂纹,而需要足够次数的  $C > C_{cr}$  的震动达到才能使结构面延长或贯通,显然,  $C > C_{cr}$  的震动出现次数越多,则岩体破裂进一步发展的可能性越大,这种疲劳破坏最终会导致岩体损伤的增大到新的稳定状态为止。这说明垂直向地震动对岩体的地震动力破坏具有重要影响。由于在强震区地震动的垂直分量是客观存在且强度很高,因此考虑垂直向地震分量与否对于认识和分析岩体地震动力破坏机理和特征至关重要。

### 3 讨论

#### 3.1 地震动力作用下岩体断裂机制分析

地震动的传播是以应力波的方式进行的,震动的传播至岩体中节理处时,节理两端的剪切或张拉强度就是地震动能量继续传递的唯一保证。但实质上其根本前提就是:地震动应力不要超过其极限强度。论文模型中讨论的实际上是临界情况,即地震动应力大于等于极限强度,此时节理进一步破坏、发展。按照前述的分析模型,若结构面尖端的应力强度应子满足:  $K_I^d + K_{II}^d + 2K_{III}^d = K_{Ic}$  的条件岩体就将发生破裂。原本在静态应力场作用下难以破坏的结构面,则可能由于在地震动产生的附加动应

力强度因子作用下破坏,此时只有附加应力强度因子超过一定的阈值后即  $C > C_{cr}$  (临界值)才能破坏。由于岩体存在一定的场位特征<sup>[6]</sup>,无论其处于卸荷区、集中区还是正常应力区,在较长时期内保持相对恒定的静态应力场  $\sigma_1, \sigma_2$  作用只能使裂纹发展到一定的距离,之后便停留在一个稳定的  $\beta$  和有效长度为  $L \cos \beta + l$  状态下<sup>[7-8]</sup>。因此岩体的地震动力破坏是以  $L, \beta$  的调整、变化至稳定状态的过程,该过程中断裂机制的突变性使  $\beta$  降低或增大,从而使节理的有效长度减小,附加应力强度因子变小。地震动附加应力强度因子是导致岩体破裂的触发因素或主导因素。

### 3.2 岩体地震动力破坏的特点

前述采用实际地震动记录的断裂分析,实际上是存在不足的。一方面,岩体的 I 型应力强度因子约为 II 型应力强度因子的 1/15,即  $K_{II}^c = 15K_I^c$ <sup>[9]</sup>,因此最易破坏的方式是拉剪断裂。当地震惯性力作用于岩体节理系统时,将可能优先从岩体最先达到强度极限的薄弱节理处拉裂,而并非一定沿最大应力值处破坏。另一方面,对于一定长度和倾角的节理,在地震动强度因子作用下,如果在整个地震动过程中都未发生破裂,那么上述的分析是正确的;但一旦破裂有所发展,则根据静态应力场的情况节理将发生有效长度和倾角上的变化,即  $L$  和  $\beta$  都发生了变化,那么自破裂发生后的地震动荷载将作用于新的节理系统。因此,在地震动作用期间只要岩体中有新的破裂产生,就意味着岩体的参数也发生了变化,这种改变是节理倾角、长度和厚度、静态应力场特征、加速度的组合关系等四方面的因素导致的;并且由于不同方向的地震动加速度幅值及组合出现的次序不同,其方向又具有不确定性,任意一处岩体的破坏将改变岩体中最薄弱节理的分布特征、岩体的破坏机制和地震动参数的特征,这使得岩体的动力破坏表现出高度的非线性和不确定性,与荷载大小和作用方向相对稳定的静力破坏具有本质上的不同。据此在岩体节理分布特征和静态应力场一定的初始条件下,第一个足以导致岩体中产生破裂的地震动加速度幅值及其方向的组合唯一地决定了岩体不可逆破坏发展的方向、机制及结果。所以岩体动力破坏是一系列具灾变性的节理系统演化 and 发展的过程和结果,其复杂性和不均匀性远大于静力作用时的情况。

### 3.3 关于地震动的考虑

一般认为垂直向的地震动是最先到达的 P 波

引起,水平向运动是 P 波之后的 S 波及其次生的面波引起。因此地震发生后最早是垂直向地震动较水平运动强烈,而后由于 S 波到达而逐渐变为水平向运动强烈,此时垂直向运动相对较弱。而在 P 波行将结束而 S 波即将或已经到来时,则两者幅值较低且接近。显然,超过一定阈值的强烈的水平向地震动和垂直向地震动的时差取决于震源深度、震中距离及地震波在地层传播过程中的衰减。距离震中越近,两者的时差越小,共同出现较高加速度的几率也越高,产生的破坏也就越强烈,这也许可以解释极震区地震岩土灾害更为严重的原因。

目前虽然对于地震动的研究,无论水平向还是直向地震动的峰值、频率等特征都积累了较多资料。就本文探讨的问题,水平向或垂直向峰值加速度固然重要,但这些峰值或超过一定强度的水平向加速度所对应的垂直向加速度及其方向也是不可忽视的因素。此外上述的讨论是基于线弹性断裂力学的应用条件,且考虑的主要是二维问题,而实际岩体的破坏为三维问题,还需考虑其复杂的地质因素、地下水压力等因素。因此进一步积累岩体地震动力破坏和地震动的资料,采用系统复杂性的思想方法,积累和综合研究基岩场地上双向或三向地震动的特征,选择典型的震例进行解剖分析,理论联系实际,才可能更好地认识岩体地震动力破坏的特征,为抗震减灾提供科学依据。

## 4 结论

(1) 仅仅考虑水平向地震动时,水平向右是最不利地震动方向。水平向右震动时,水平地震系数  $K_h$  越大,则产生拉应力所需的结构面倾角就越小,岩体从压剪破坏转化为拉剪破坏的临界角度也就越小。当结构面倾角一定时,  $K_h$  的增大至一定大小时则使岩体破裂的机制产生突变。

(2) 对于垂直向地震动,仅当垂直向地震系数  $K_v > 1$  时,岩体才有可能产生拉剪破坏,且结构面倾角越小,垂直地震系数越大,就越易发生破坏。

(3) 考虑双向地震动作用时,一般情况下最不利的双向地震动是右上。在一定的结构面倾角时,较低峰值的双向地震动产生的应力强度因子可能大于较高峰值的单向地震动所产生的应力强度因子。考虑垂直向地震动与否对节理岩体的失稳破坏机制和程度具有重要影响。

(4) 地震动附加应力强度因子是导致岩体破裂的触发因素或主导因素。在岩体节理分布特征和静

态应力场一定的初始条件下,第一个足以导致岩体中产生破裂的地震动加速度幅值及其方向的组合唯一地决定了岩体不可逆破坏发展的方向、机制及结果。所以岩体动力破坏是一系列具灾变性的节理系统演化和发展过程和结果,其复杂性和不均匀性远大于静力作用时的情况。

#### [参考文献]

- [1] 张振南,葛修润.地震载荷作用下的节理岩体破裂模型[J].岩石力学与工程学报,2005,24(10):1645-1648.
- [2] 梁庆国,韩文峰,李雪峰,等.强震极震区竖向地震力与重大工程安全问题[A]//全国岩土与工程学术大会论文集(下)[C].北京:人民交通出版社,2003:1348-1355
- [3] 韩文峰,宋畅,梁庆国.极震区的地震动与潜在震源区内重大工程安全[J].工程地质学报,2004,12(4):346-353.
- [4] D E Hudson. Earthquake damage mechanisms-limits and countermeasures[A]//Symposium on Earthquake Disaster Mitigation[C]. [S. l.]: University of Roorkee,1981,1:79-98.
- [5] Julian J Bommer, Geoge Georgallides, Iain J Tromans. Is there a near-field for small-moderate magnitude earthquakes? [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2001,5(3):395-423.
- [6] 聂德新.岩体的场位特征及其工程应用[J].工程地质学报,2000,8,(1):68-72.
- [7] 陶振宇主编.岩石力学的理论与实践[M].北京:水利出版社,1981.
- [8] Lane R Johnson, Charles G Sammis. Effects of rock damage on seismic waves generated by explosion[J]. Pure applied geophysics, 2001,158:1869-1908.
- [9] Lockner D A, J D Madden. A multiple crack model of brittle fracture—1, non-time-dependent simulations [J]. Journal of Geophysics Research, 1991, 96:9623-9642.