

动荷载下边坡滑动的试验研究

(12)
80-86

张 平 吴德伦
(重庆建筑大学建筑工程学院 630045)

TU457
TU458.3

摘 要 为了较为真实地反映边坡在地震作用下的真实行为, 本文对岩石边坡问题作了简化模型的振动台动力试验。对于模型的夹层效应, 空间作用, 荷载的频幅特性与历时特性等都作了较为全面的试验研究。提出了边坡动力残余位移的累积计算公式。将试验结果与本文提出的本构预测相比较, 表明二者是一致的。

关键词 振动台动力试验, 残余位移, 边坡动力特性, 动荷载

中图法分类号 TU 457 岩体, 边坡, 位移, 节理

实际的节理岩体边坡(不论有无填充物)在地震或爆破作用下, 由于地面运动的加速度、速度和位移在时间和空间上都是不断变化的, 使得滑动块体不断产生累积位移, 从而节理边坡动力特性表现出明显的循环剪切特征。为了研究岩石节理的这种循环剪切性质, Newmark 于 1965 年首先提出了一个两块体模型来研究地震作用下岩石节理的单向剪切效应。该模型假定节理面为光滑的平直表面, 输入波形为方波, 并假定块体为刚性体, 接触面之间的阻力为摩擦阻力, 分析方法如图 1 所示。从图 1 可以看出, 在下部块体输入加速度为 A_m , 持续时间为 t_0 下, 上部块体响应的加速度为 A_r ($< A_m$), 持续时间为 t_m 。在时间 t_m 时, 上下两块体的相对运动停止。在时间 t 和 t_m 之间的相对剪切位移等于速度时间曲线图上的阴影部分的面积。

按 Newmark 模型计算的结果通常大于实际情况下块体的相对位移, 这是因为该模型没有考虑反向加速度脉冲的作用。为了克服 Newmark 模型的缺点, 本文通过振动台的动力试验, 研究了各种因素对砂夹层节理动力特性的影响, 分析了输入加速度与输出加速度之间的传递函数关系, 采用全波分析方法获得了块体相对位移的表达式。

1 动荷载下边坡滑动的试验研究

1.1 试验装置及试验参数

振动试验是在武汉水利电力大学 EVH-50-60-10 振动台上进行的。用水泥砂浆预制斜面倾角 β 分别为

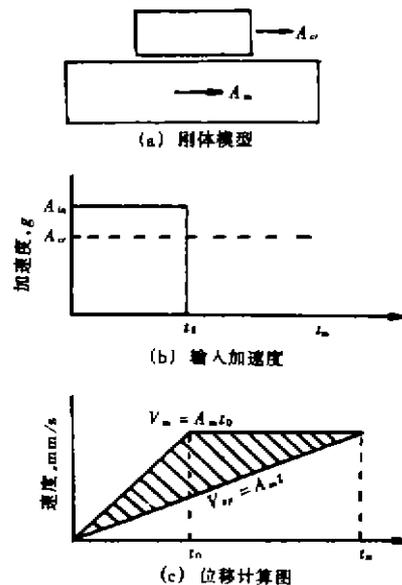


图 1 Newmark 模型

收稿日期: 1997-01-20

张 平, 男, 1958 年生, 讲师

4°、7°、10°、13°、15°和 19°的下块体以及长×宽×高=400 mm×200 mm×200 mm 的上块体。待强度达到要求后,将下部块体用石膏粘结在钢槽内。每个试验中,保持倾角 β 不变,改变下部块体与输入加速度的夹角 θ 来分析加速度方向对块体滑动的影响,如图 2 所示。试验时上下块体上粘贴的各测点数据以及激励加速度等均通过振动台数据采集系统自动记录,试验结果经数据分析仪的处理后可绘图输出,振动台的各项参数指标以及试验中设置的参数见附表。

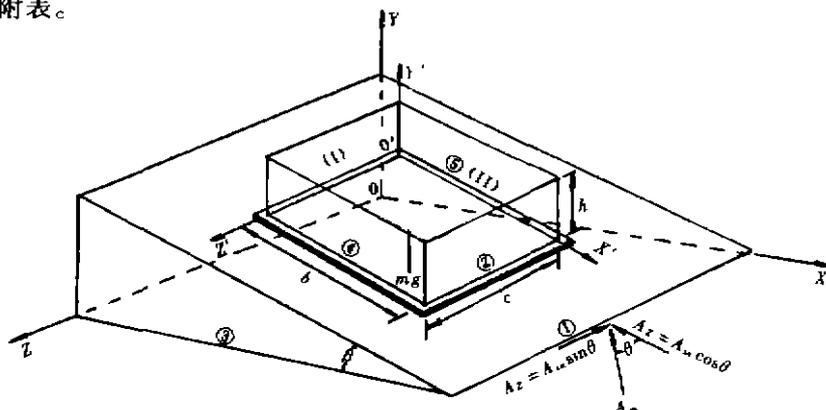


图 2 平面自由度试验

图中①、②、③、④、⑤为加速度计,(I)、(II)为位移计

试验中只研究了上部块体的滑动效应,而没有考虑块体的倾倒效应。上下块体之间夹层材料为特细砂,夹层最大厚度为 10 mm。法向应力通过对上部块体施以配重来获得。

1.2 各种因素对砂夹层节理动力特性的影响

图 3、4、5、6 分别表征了砂夹层厚度,法向应力,块体倾角,振动频率等因素对节理边坡动力特性的影响(图中 N 为循环剪切次数)。

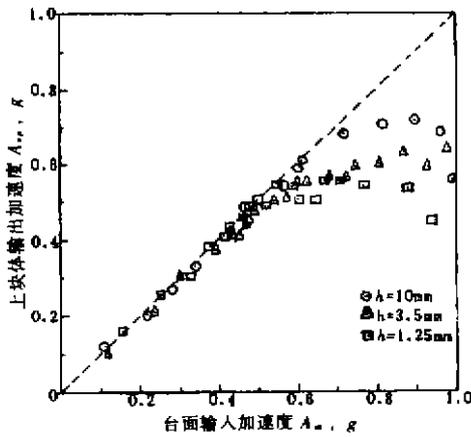
从以上各图可以看出,输出加速度 A_{sp} 与输入加速度 A_{in} 之间具有如下的趋势:在 $A_{in} < A_{cr}$ 时(A_{cr} 为上块体滑动时的极限加速度), A_{sp} 几乎和 A_{in} 相等,试验测点值基本上位于图中对角线上,无相对位移;当 $A_{in} > A_{cr}$,但 A_{cr}/A_{in} 值不大时,测点偏离对角线,使得 A_{sp} 变得比

稍小,对应的相对位移较小,并随频率的增大进一步地减小;而当 $A_{in} > A_{sp}$,且 A_{cr}/A_{in} 值较大时,测点的相对位移较大(高频情况例外)。另外,由试验还发现频率对 A_{cr} 值有较大的

附表 振动台装置参数和试验设置参数 A_{in}

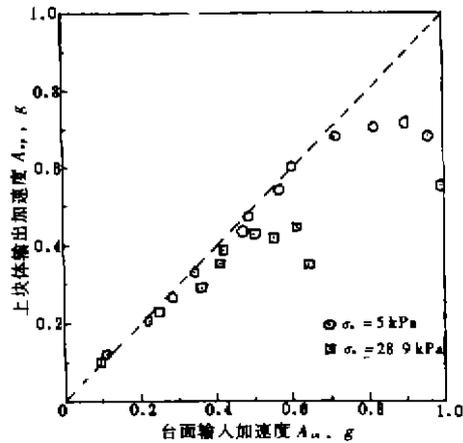
参数名	振动台装置参数	试验设置参数
上块体尺寸(mm)		400×200×200
下块体尺寸(mm)		1 000×500
夹层厚度(mm)		1.25, 3.5, 10
夹角 $\theta(^{\circ})$		24, 38, 62
倾角 $\beta(^{\circ})$		4, 7, 10, 13, 15
台面尺寸(mm)	2 000×2 000	
最大荷重(kN)	30	
最大水平驱动力(kN)	50	
最大位移(mm)	±100	
最大加速度(g)	2.5	
频率范围(Hz)	0-100	2.5, 10, 30, 50
振动波形	任意给定	正弦波
加速度测点(个)		5
位移测点(个)		2
最大法向应力(kPa)		28.97

影响,而倾角对 A_{ur} 值的影响也较大,其他因素的影响可忽略。



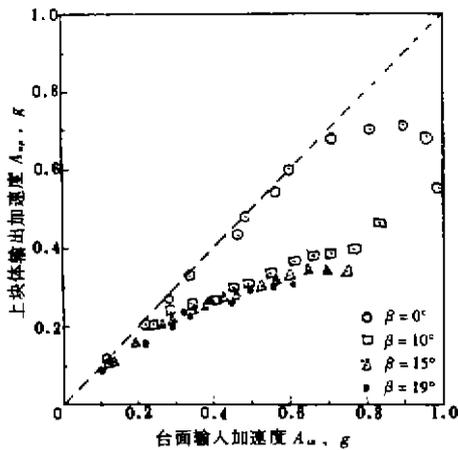
$\sigma_n = 5 \text{ kPa}, f = 2 \text{ Hz}, \lambda = 3, \beta = 0$ h 变化

图 3 夹层厚度对输出加速度与输入加速度的影响



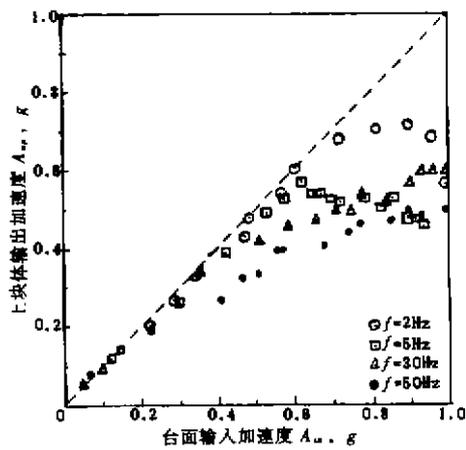
$h = 10 \text{ mm}, f = 2 \text{ Hz}, \lambda = 3, \rho = 0, \sigma_n$ 可变

图 4 法向应力对输出加速度与输入加速度的影响



$h = 10 \text{ mm}, \sigma_n = 5 \text{ MPa}, f = 2 \text{ Hz}, \lambda = 3, \beta$ 可变

图 5 倾角对输出加速度与输入加速度的影响



$h = 10 \text{ mm}, \sigma_n = 5 \text{ KPa}, N = 3, \beta = 0, f$ 可变

图 6 频率对输出加速度与输入加速度的影响

2 边坡滑动相对位移

2.1 相对位移的表达式

在 Newmark 模型中(图 1),块体滑动产生的相对位移值可按式计算:

$$d_1 = \frac{v^2}{2A_{cr}} \left(1 - \frac{A_{cr}}{A_{in}}\right) \quad (1)$$

式中 $v = A_{in} t_0$, 为下块体的最大运动速度。该式自 Newmark 于 1965 年提出以来,由于计算简单并满足一定的精度,而得到了广泛的应用。如前所述,由式(1)计算的结果将比实际的剪切位移要大,主要原因除了未考虑荷载的反向作用外,另外一个重要原因就是忽略了上块体的响应加速度 A_{ur} 随输入加速度 A_{in} 的增大而变化的情况。从图 3、4、5、6 可以看出,在

$A_{in} > A_{cr}$ 状态下, 对于不同的输入加速度有不同的输出加速度, 一般说来输出的加速度要比极限加速度大。因此, 在相对位移的计算中, 首先应将输入的波形考虑成一个完整的荷载, 其次应将输出的加速度取成 A_{up} 而不是恒定的 A_{cr} 值。

对于实际的地震动荷载可简化为简谐波的迭加, 如用正弦波则计算较为复杂。为了简化起见, 本文用一个方波和一个三角波去逼近一个正弦波, 这样可使计算大为简化, 如图 7 所示。现在, 我们假定输入荷载的周期为 T 、峰值加速度为 $A_{in} (> A_{cr})$; 输出荷载的加速度为 A_{up} , 对应于三角波的 A_{up} 的持续时间为 t_1 , 而对应于方波的 A_{up} 的持续时为 t_2 。在时间 $t = 0$ 时, 块体开始滑动。对于三角波, 在 $t = t_1$ 时滑动停止, 此时, 上下块体运动相同, 速度相等, 由图 7(b) 有

$$\frac{V_1}{V_{up1}} = \frac{3T}{T - t_1}$$

$$\frac{3T}{4(T - t_1)} = \frac{A_{in}T}{4A_{up}t_1}$$

而 $V_1 = A_{in}T/4$; $V_{up1} = A_{up}t_1$, 代入上式, 有

$$t_1 = \frac{A_{in}T}{3A_{up} + A_{in}} \tag{2}$$

在一个三角波循环荷载下, 块体的相对位移为图 7(b) 中的 oab 阴影面积, 即

$$d_1 = \frac{1}{2}TV_1 - \frac{1}{2}TV_{up1}$$

$$= \frac{A_{in}^2T^2}{2A_{up}} \left(\frac{A_{up}}{4A_{in}} - \frac{A_{up}^2}{A_{in}(3A_{up} + A_{in})} \right) \tag{3}$$

对于一个方波, 在 $t = t_2$ 时, 块体滑动停止, 类似地有

$$t_2 = \frac{A_{in}T}{A_{up} + A_{in}} \tag{4}$$

因此, 块体的相对位移如图 7(b) 中的 olm 阴影面积, 即

$$d_1 = \frac{A_{in}^2T^2}{2A_{up}} \left(\frac{-A_{up}}{2A_{in}} + \frac{A_{up}}{A_{up} + A_{in}} \right) \tag{5}$$

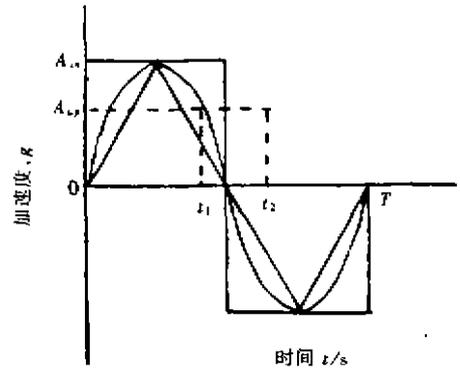
将式(4)和式(5)写成同一表达式有

$$d_1 = \frac{A_{in}^2T^2}{2A_{up}} f_1 \left(\frac{A_{up}}{A_{in}} \right) \tag{6}$$

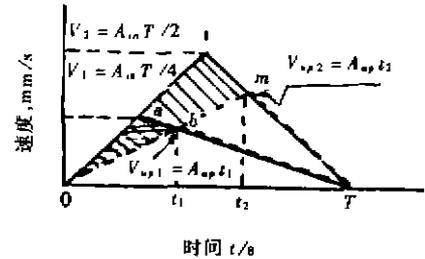
对于三角波

$$f_1 \left(\frac{A_{up}}{A_{in}} \right) = \left(\frac{A_{up}}{4A_{in}} - \frac{A_{up}^2}{A_{in}(3A_{up} + A_{in})} \right) \tag{7}$$

对于方波



(a) 输出和输入加速度波形



(b) 速度时间曲线

图 7 两块体模型

$$f_1\left(\frac{A_{up}}{A_{in}}\right) = \left(\frac{-A_{up}}{2A_{in}} + \frac{A_{up}}{A_{up} + A_{in}}\right) \quad (8)$$

式(6)说明,相对位移与输入波形无关,仅仅是 f_1 的函数,对于不同的波形 f_1 取不同的值。三角波和方波的 f_1 值分别为式(7)和式(8)。对于正弦波,其 f_1 值介于二者之间。 f_1 与 A_{up}/A_{in} 之间有如下性质:当 A_{up}/A_{in} 趋于 1 时, f_1 趋于零;当 A_{up}/A_{in} 趋于零时, f_1 仍趋于零,以保证相对位移为零。对于三角波和方波的 f_1 与 A_{up}/A_{in} 的关系有图 8 所示的关系。

如果改用频率 f 来表示相对位移,则有

$$d_1 = \frac{A_{in}^2}{2A_{up}f^2} f_1\left(\frac{A_{up}}{A_{in}}\right) \quad (9)$$

或

$$d_1 \propto \frac{1}{f^2} \quad (10)$$

此式说明,相对位移随频率的增大而减小。

对于 N 个循环荷载,累积相对位移为

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{A_{in}^2}{2A_{up}f^2} f_1\left(\frac{A_{up}}{A_{in}}\right) \quad (11)$$

2.2 输入加速度与输出加速度之间的传递函数

砂夹层节理输出加速度 A_{up} 与输入加速度 A_{in} 之间的传递函数关系可以用下面的式子来表示:

$$A_{up} = A_{in} \quad A_{in} < A_{cr} \quad (12)$$

$$A_{up} = A_{cr} f_2\left(\frac{A_{cr}}{A_{in}}\right) \quad A_{in} \geq A_{cr} \quad (13)$$

式中的 A_{cr} 为极限加速度, $f_2(A_{cr}/A_{in})$ 是与夹层厚度 h , 法向应力 σ_n , 台面运动频率 f , 静态安全系数 F_s 等因素有关的一个函数,且 $f_2(A_{cr}/A_{in})$ 应具有如下性质,当 A_{cr}/A_{in} 趋于 1 时, $f_2(A_{cr}/A_{in})$ 趋于 1; 当 A_{cr}/A_{in} 趋于零时, $f_2(A_{cr}/A_{in})$ 也应趋于 1, 以保证块体产生相对运动。综合考虑以上各种因素, $f_2(A_{cr}/A_{in})$ 可取为

$$f_2(A_{cr}/A_{in}) = 1 + K f_1(A_{cr}/A_{in}) \quad (14)$$

式中 $f_2(A_{cr}/A_{in})$ 是将式 $f_1(A_{cr}/A_{in})$ 或式(8)中的 A_{up} 用 A_{cr} 替换得到。这里选取

$$f_2\left(\frac{A_{cr}}{A_{in}}\right) = \frac{A_{cr}}{4A_{in}} - \frac{A_{cr}^2}{A_{in}(3A_{cr} + A_{in})} \quad (15)$$

通过试验结果拟合选取

$$K = 25.5 \left(\frac{h}{h_0}\right) \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_n}\right) \left(\frac{f_0}{f}\right)^{1.25} \quad (\beta = 0) \quad (16)$$

$$K = 12.4 F_s \left(\frac{h}{h_0}\right) \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_n}\right) \left(\frac{f_0}{f}\right)^{1.25} \quad (\beta \neq 0) \quad (17)$$

式中 h_0 , σ_0 和 f_0 为本次试验参考值,且 $h_0 = 10 \text{ mm}$, $\sigma_0 = 5 \text{ kPa}$, $f_0 = 2 \text{ Hz}$ 。 h 为夹层厚度 (mm), σ_n 为法向应力 (kPa), f 为台面荷载频率 (Hz), $F_s = \text{tg}\Phi / \text{tg}\beta$ (Φ 为静摩擦角, β 为

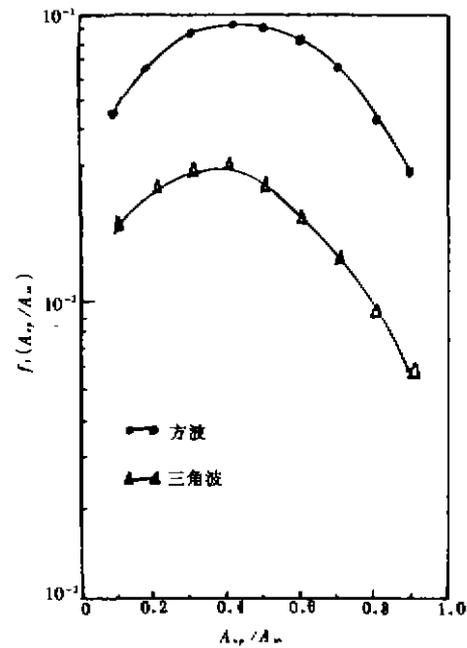


图 8 不同波形的 $f_1(A_{up}/A_{in}) - A_{up}/A_{in}$

倾角)。

类似地,对于无夹层的节理,有

$$K = 12.9 \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_n} \right) \left(\frac{f_0}{f} \right)^{1.25} \quad (\beta = 0) \quad (18)$$

和

$$K = 1.5F, \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_n} \right) \left(\frac{f_0}{f} \right)^{1.25} \quad (\beta \neq 0) \quad (19)$$

式中的极限加速度 A_{cr} 由试验确定,一旦 A_{cr} 值确定之后就可以用公式(14)确定出 $f_2(A_{cr}/A_m)$,再由公式(13)计算得到输出加速度 A_{up} 值,最后按公式(11)便可获得块体的相对位移 D 值。

2.3 计算值与试验结果的比较

图9为计算结果与本次试验结果的比较情况,节理间夹松散的干砂,夹层厚度 $h = 10 \text{ mm}$,法

向应力 $\sigma_n = 5 \text{ kPa}$, $\Phi = 25^\circ$, $N = 3$ 。由于 β 分别为 10° 、 15° 和 19° ,所以 F 分别为 1.35、1.74 和 2.6,运动速度 $v = 250 \text{ mm/s}$ 。频率 $f = 2, 5, 10, 30$ 和 50 Hz 。试验结果如图9中实线所示。计算选取的 K 为公式(17),位移由公式(3)计算,计算结果如图9所示。从图9看出,按计算公式得到的相对位移和试验实测的结果非常一致。

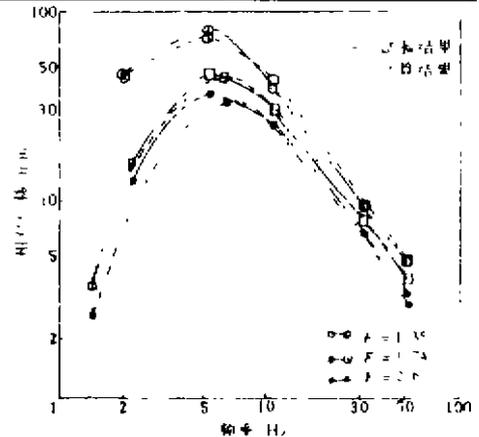


图9 计算结果与本次试验结果的比较
 $h = 10 \text{ mm}$, $N = 3$, $\sigma_n = 3 \text{ kPa}$, β 可变
 $v = 250 \text{ mm/s}$, $\phi = 25^\circ$

3 结 束 语

本次振动试验说明了滑动块体产生的累积位移,不仅与台面输入加速度大小、荷载频率和持续时间有关,而且还与法向应力和坡面倾角有关。其中坡面倾角和荷载频率影响最大。在试验结果的基础上,获得了输入加速度与输出加速度之间的传递函数关系式,通过输入加速度和输出加速度作用时间关系求得了块体累积位移的表达式。计算表明块体剪切位移随着荷载频率和静态安全系数的增加而减小。

参 考 文 献

- 1 Dowding C H, Belytschko T B, Yen H J. Dynamic computational analysis of openings in jointed rock, J. Geotech. Div. ASCE, 1983: 1551 - 1566
- 2 Newmark N M. Effect of earthquakes on dams and embankments. Geotechnique, 1966, 15
- 3 邵生俊, 谢定义. 饱和砂土的动强度及破坏准则. 岩土工程学报, 1991

A Shaking - Table Test Research on Rock Slope

Zhang Ping Wu Delun

(The Research Institute of Rock Engineering, Chongqing Jianzhu University, 630045)

Abstract A study of a two block, rock slope is conducted with a shaking - table test to quantify the effects of both joint properties and accelerations, frequency and duration of exciting load. It is observed that there exists a critical shear stress, hence a critical acceleration for initiation of the relative shear displacement along the joint interface. At constant velocity or acceleration, increasing dominant excitation frequency or static safety factor significantly decreases shear displacement.

Key Words a shaking - table, shear displacement, kynamic behaviour of rock slope

(编辑:陈 蓉)

科研成果

财务微机多用户实时处理与控制系统

内容简介及技术水平:

该系统是一种适应于事业行政单位,科研单位的新型通用会计电算化软件,它采用实时处理与控制的方式对会计业务和资金管理同时进行核算。

性能特点及主要技术指标:

该系统将终端机安排在每人会计审核人员的办公桌上,会计业务发生一笔,审核人员立即处理一笔,并同时送入终端机,马上产生机制凭单。系统数据、报表、图形实时反映,实时生成。