

采用波动方法探测土石混合体结构特性的可行性研究

张亚南, 冯 春, 李世海

(中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

摘要: 将土石混合体概化为由土体和块石随机分布构成的宏观致密和等效均匀介质, 将深部爆源的爆炸效果用等效冲击载荷代替, 以基于连续介质力学的离散元方法(CDEM)的计算程序为平台, 以模型均匀随机技术为条件, 通过研究土石混合体内部结构特性对应力波传播过程的影响, 建立波动响应与内部结构特性(包括含石率、块石特征尺寸和土石分布规律)之间的对应关系。研究表明: 在一定载荷条件及材料性质下, 加速度波的最大振幅和主频受含石率和块石特征尺寸的影响有着规律性的变化; 均匀分布情况下, 不同分布规律对于波动响应的影响很小, 可以忽略; 分别给出随含石率和块石特征尺寸变化的波动响应规律(最大振幅、主频)拟合曲面, 且最大振幅和主频的值满足实际工程的可测性; 以给定波动响应情况为例, 通过已知最大振幅和主频易在拟合影响曲面上查出含石率和块石特征尺寸。从规律性、可测性和易操作性 3 个方面说明采用波动方法探测土石混合体结构特性的可行性。

关键词: 岩石力学; 土石混合体; 波动方法; 含石率; 块石特征尺寸; 土石分布

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2011)09 - 1855 - 09

FEASIBILITY STUDY OF WAVE METHOD FOR DETECTING STRUCTURAL PROPERTIES OF SOIL-ROCK MIXTURES

ZHANG Yanan, FENG Chun, LI Shihai

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: Soil-rock mixtures are seen as the macro-density and equivalent homogeneous medium constituted by soil and rock under random distribution; and the explosion effect of deep explosion source is replaced by equivalent impact load. The platform of continuum media mechanics of discrete element method(CDEM) is used; and the uniform random technique is adopted. By studying the impact of internal structural properties of soil-rock mixtures on stress wave propagation process, the relationships between internal structural properties(including percentage of rock, feature size of rock block and distribution of soil-rock) and wave responses are established. The study results show that in certain of the same loading and material properties, the maximum amplitude and dominant frequency of acceleration wave have regular changes under the effect of percentage of rock and feature size of rock block. Under the uniform distribution, the impact of different distributions of soil-rock on wave response is very small and can be neglected. The fitting surfaces of wave response(maximum amplitude and dominant frequency) with the variations of percentage of rock and feature size of rock block are given; and the maximum amplitude and dominant frequency both meet the testability of actual project. Taking an assigned wave

收稿日期: 2011 - 03 - 04; **修回日期:** 2011 - 05 - 20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB731506); 国家自然科学基金重点项目(10632100)

作者简介: 张亚南(1986 -), 女, 2008年毕业于北京科技大学土木工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事土石混合体波动响应的数值模拟等方面的研究工作。E-mail: yiyang_de@163.com

response for example, percentage of rock and feature size of rock block are given easily on the fitting impact surface by means of the assigned maximum amplitude and dominant frequency. The feasibility of wave method for detecting structural properties of soil-rock mixtures is illustrated from three aspects of regularity, testability and handleability.

Key words: rock mechanics; soil-rock mixtures; wave method; percentage of rock; feature size of rock block; distribution of soil-rock

1 引言

土石混合体是一种由具有一定特征尺寸的高弹性模量岩块及低弹性模量土体组成的多相体系^[1],是介于土体与岩体之间的一种特殊地质体。土石混合体多种组合成分之间的力学性质差异性较大且其成因复杂,因此总体上说土石混合体具有成分组合比例不确定、块石分布不规则和力学性质复杂等特性。土石混合体有着广泛分布,主要分布在三峡库区^[2]、攀西地区^[3-4]和金沙江流域^[5]等地区。

土石混合体滑坡是一类极为常见的滑坡灾害类型。工程上常需对土石混合体边坡的稳定性进行评价及其支护手段进行优化设计,土石混合体的复杂性导致在对其进行工程分析时,很难给出有效的解析解,因而随着计算机的发展,更多的是采用数值计算来实现^[6-10]。但是就目前数值模拟技术来说,其计算结果的可靠性均取决于土石混合体结构模型的正确性以及结构内部特性参数的选取。因此,准确掌握土石混合体的内部结构特性参数是关键。

目前对于内部结构的确定主要有 3 种方法:一是采用图像处理技术^[11],此方法应用较多;二是进行现场统计,之后通过相关力学原理模拟土石分布特征,如 X. Li 等^[12]基于野外调查对土石混合体结构特征的统计分析,并运用 Monte Carlo 原理模拟块石在土石混合体中的分布特征;三是采用激光扫描技术^[13]。上述 3 种方法均受天然露头 and 人工开挖面的限制,无法准确刻画工程尺度上土石混合体的内部结构特性。

与研究土石混合体的传统静力方法相比,本文将首次提出采用了动力方法研究土石混合体的内部结构特性。用波动方法探测岩体结构已有许多的研究,如用波速来描述岩体的完整性^[14],用瑞利波方法探测矿井煤层^[15]等,但用波动方法探测土石混合体的研究却未见报道。本文拟通过研究土石混合结构的内部特性对应力波传播过程的影响,建立波动响应(最大幅值、主频)与内部结构特征(含石率、块

石特征尺寸、土石分布规律)之间的对应关系,以说明采用波动法探测土石混合体的内部结构特性是否可行,若可行则提出一定的理论依据和可行性方法。

2 影响因素分析

为研究在应力波作用下土石混合体的波动响应规律,主要考虑到以下 3 个方面的影响因素:

(1) 土石混合体的结构特性影响土石混合体力学特性的因素很多,综合前人的研究成果,就碎石而言,影响土石混合体力学性质的因素主要集中在含石量、石块排列和石块尺寸 3 个方面^[16]。探测结构特性是为研究土石混合体力学特性提供基础,因此,土石混合体的结构特性对其力学特性的影响因素也主要考虑这 3 项,即含石率 $W(\%)$,块石特征尺寸 $L(m)$ 和土石分布规律,其中,土石块体的分布规律分为宏观均匀分布和极其非均匀分布,对于土石分布极其非均匀的土石混合体,它的探测方法应如同探测煤层、油层等,在波动曲线中会出现较大波动转折处等现象,由于土石分布的极其非均匀情况较为复杂,这里对于非均匀情况先不作讨论,因此以下研究均假设土石的分布为宏观均匀分布。

(2) 土石混合体中土和石的材料性质包括土体的弹性模量 $E_s(Pa)$ 和密度 $\rho_s(kg/m^3)$ 以及岩石块体的弹性模量 $E_r(Pa)$ 和密度 $\rho_r(kg/m^3)$ 。

(3) 外界条件影响。本研究拟在土石混合体材料中某一深处加一个爆源,用爆炸冲击波作为输入应力波,因此影响因素还包括冲击波的峰值 $\sigma_{max}(Pa)$,冲击波上升波持续时间 $t_1(s)$,下降波持续时间 $t_2(s)$ 和爆源距地表垂直距离 $H(m)$ 。

图 1 为土石混合体各影响因素的示意图。图 1(a)给出的是土体和块石的物理量,在土石混合体中深 H 处埋设爆源;图 1(b)给出的是爆炸冲击波各物理量。

研究选用的输出波为加速度波,选取加速度波的最大振幅 A_m 和主频 f_m 作为因变量,以 t_1, H, E_s 为基本量,得到量纲一的关系式:

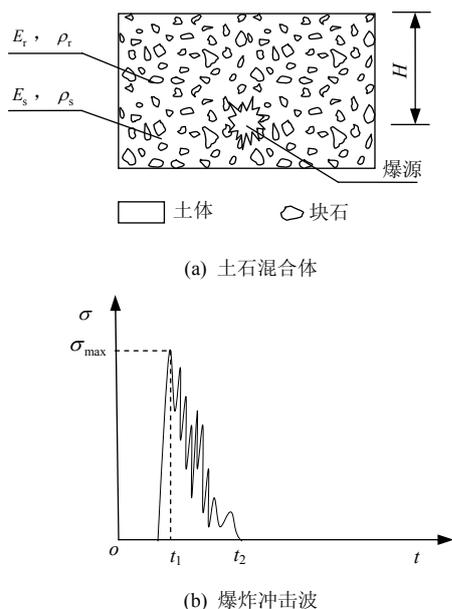


图 1 土石混合体各影响因素示意图

Fig 1 Sketch of impact factors of soil-rock mixtures

$$\frac{A_m}{H/t_1^2} = f\left(W, \frac{L}{H}, \frac{\rho_s}{E_s H/t_1}, \frac{\rho_r}{E_s H/t_1}, \frac{E_r}{E_s}, \frac{\sigma_{max}}{E_s}, \frac{t_2}{t_1}\right) \quad (1)$$

$$\frac{f_m}{1/t_1} = f\left(W, \frac{L}{H}, \frac{\rho_s}{E_s H/t_1}, \frac{\rho_r}{E_s H/t_1}, \frac{E_r}{E_s}, \frac{\sigma_{max}}{E_s}, \frac{t_2}{t_1}\right) \quad (2)$$

关于材料性质的敏感性研究发现土和石的材料性质在各自的范围内变化时波动响应的变化很小, 因此文中直接给定它们的值; 而载荷条件是通过控制达到要求的, 因此也将给定载荷条件, 式(1), (2)分别变为

$$\frac{A_m}{H/t_1^2} = f\left(W, \frac{L}{H}\right) \quad (3)$$

$$\frac{f_m}{1/t_1} = f\left(W, \frac{L}{H}\right) \quad (4)$$

均匀分布情况下的土石分布规律这一影响因素不是量化参数, 因此对其无法用量纲分析。本文设置岩石块体的位置是均匀随机布置, 即每次计算时土石分布位置都不同, 因此对土石分布规律的研究可在其他结构特性影响因素研究中同时进行。

3 结构特性对波动响应影响的研究

为研究土石混合体的结构特性对波动响应的影响, 本文作以下基本假设:

- (1) 作为单一介质的岩石块体和充填土块的力学性质是已知的;
- (2) 材料为理想弹塑性体;
- (3) 同一条件下, 岩石块体尺寸相同。

3.1 土石混合体模型的实现

本研究采用基于连续介质力学的离散元方法 (CDEM) 进行计算, CDEM 中土石混合体模型的程序实现方法为:

(1) 对土石分布规律的处理。在每次计算过程中, 模型每个块体单元都被赋予随机分布的 0.0~1.0 范围内的数据, 当随机数据在 0.0~(1-W) 范围内, 就为该块体单元赋土块材料组号; 当随机数据在 (1-W)~1.0 范围时, 就为该块体单元赋石块材料组号, 其中, 1-W 为土块在总体积中所占比率。

(2) 对块石大小的控制。当给定块石尺寸数值, 据该尺寸控制每个块体组所包含的块体数 N, 将每 N 个块体单元为一组重新编号, 最后循环各块体组, 给同一块体组中的单元赋予相同的随机材料组号, 由此实现指定块石尺寸的随机分布。

模型设置: 模型尺寸为 50 m×30 m, 爆炸冲击波作用在深 20 m 处, 模型的左、右侧面和底面均固定约束, 并均为无反射边界条件, 上表面为自由表面。在上表面分别布置 3 个测点, 从左到右(测点 1~3)距爆源在地面上的垂直投影点的距离分别为 24, 14 和 4 m。其计算模型如图 2 所示。

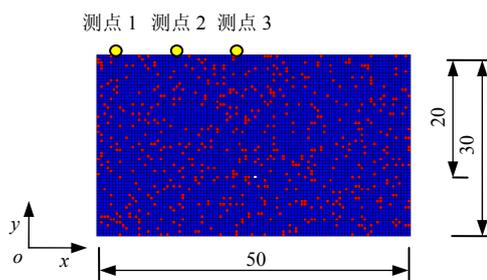


图 2 土石混合体计算模型示意图(单位: m)

Fig.2 Sketch of numerical model of soil-rock mixture (unit: m)

3.2 材料和荷载参数选取

给土体和石块分别赋予相应的材料参数, 相关土石材料参数选取如表 1 所示。对于冲击载荷的选取, 李顺波等^[17]曾对爆炸冲击波在不同介质中传播衰减规律进行了模拟研究, 文中分别对水、土和混凝土不同介质进行计算, 得到它们的冲击波压力时

程曲线。本文参考土和混凝土的冲击波峰值和持续时间并考虑实际情况，对爆炸冲击波进行了简化，选取冲击载荷峰值为 50 MPa，持续时间为 400 μs(上升波持续时间 $t_1 = 100 \mu s$ ，下降波持续时间 $t_2 = 300 \mu s$)，冲击载荷简化如图 3 所示。

表 1 土石材料参数

Table 1 Material parameters of soil and rock

材料名称	密度 /($kg \cdot m^{-3}$)	杨氏模量 /Pa	泊松比	黏聚力 /Pa	内摩擦角 /($^\circ$)
土块	1 800	3.8×10^8	0.30	4×10^4	25
石块	2 500	3.0×10^{10}	0.25	4×10^6	40

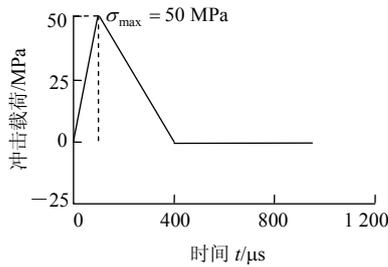


图 3 冲击载荷简化图

Fig.3 Simplified diagram of impact load

3.3 含石率影响的计算与分析

为观察应力波在土石混合物中的传播过程，图 4 分别给出纯土、土石混合体和纯石 3 种情况的位移云图。取同一时刻 5.5 ms 时的位移云图，可以看到土石混合体的传播过程受土石不同材料的影响，出现非均匀传播现象，它们的传播速度依次为纯土<土石混合体<纯石，这是因为石块的传播速度大于土块的传播速度，土石混合体作为二者的复合产物，其传播速度介于纯土和纯石二者之间。

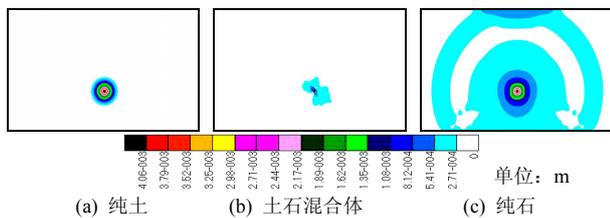


图 4 纯土、土石混合体和纯石 3 种情况的位移云图

Fig.4 Nephograms of displacements in soil, soil-rock mixture and rock

这里的含石率 W 是指石块占土石混合物总体积的百分率。在单独研究含石率时，固定块石特征尺寸 $L = 0.5 \text{ m}$ ，含石率变化范围为 0%~100%，不同含石率情况如图 5 所示。

含石率改变情况下，加速度波持续时间变化的对比情况如图 6 所示。以测点 1 的 y 方向的典型振

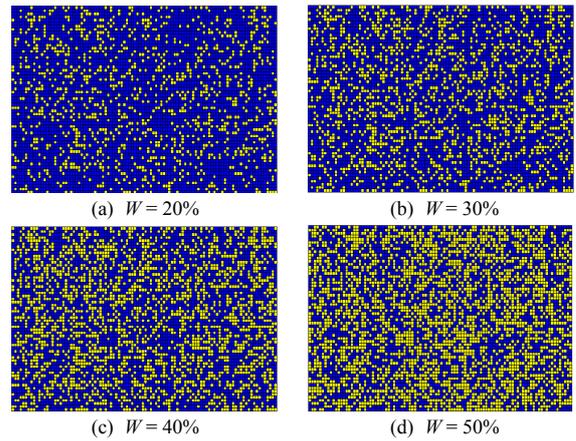
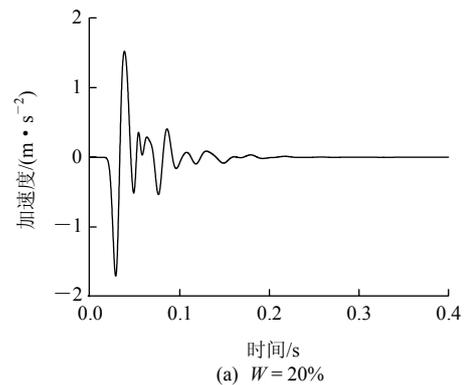


图 5 不同含石率变化示意图

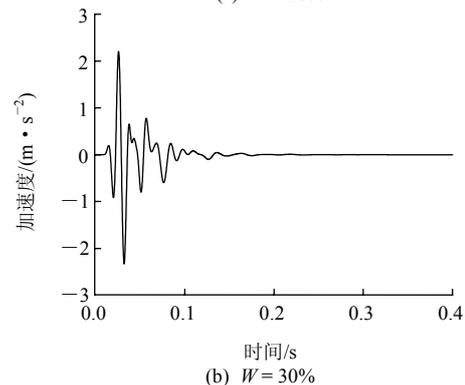
Fig.5 Sketches of variation of different percentages of rock

动曲线为例，可见随着含石率的增加，土石混合体的加速度波持续时间逐渐缩短。取同一时间段 0.4 s 内的波动曲线，波动的持续时间从 0.22 s 变化到 0.12 s 左右。

图 7 为含石率对加速度波最大振幅影响曲线，3 条曲线分别为 3 个测点的情况，并且每条曲线都进行了多次计算，目的是在含石率不变情况下实现土石分布规律的改变，每条曲线均是多次计算的平均值，并且每条曲线上的数据点都给出误差范围。在一定材料性质和荷载条件下，由图 7 可以看出：(1) 均匀分布情况下的不同土石分布规律体现在每个数据点的误差范围上，该误差范围远小于含石率变化时的数据点间距离，表明不同土石分布规律对加速度波的最大振幅影响不大，相对于含石率的影响而



(a) $W = 20\%$



(b) $W = 30\%$

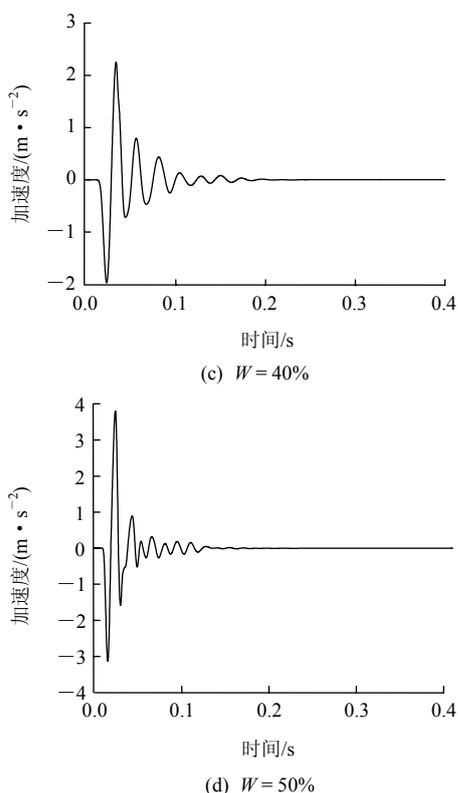


图 6 不同含石率下土石混合体的典型振动曲线对比图
Fig.6 Comparison diagrams of typical vibration curves of soil-rock mixtures under different percentages of rock

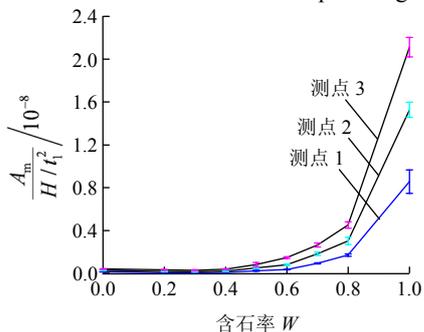


图 7 含石率对加速度波最大振幅影响曲线
Fig.7 Impact curves of percentage of rock on maximum amplitude of acceleration wave

言, 可以忽略; (2) 测点位置对最大振幅的影响较为明显, 测点距爆源在地面上的垂直投影点越近, 最大振幅越大; (3) 随着含石率的增加, 加速度波的最大振幅值增加, 当 $W < 60\%$ 时, 上升趋势平缓, 当 $W \geq 60\%$ 时, 最大振幅迅速增加。

图 8 给出含石率对加速度波主频的影响, 同样 3 条曲线分别对应于测点 1, 2, 3 三个测点的情况, 并且每条曲线给出了多次计算的误差范围。由图 8 可以看出: (1) 均匀分布情况下的不同土石分布规律对加速度波的主频影响不大, 相对于含石率的影响而言, 可以忽略; (2) 测点位置变化时, 主频变化不大; (3) 随着含石率的增加, 加速度波的主频

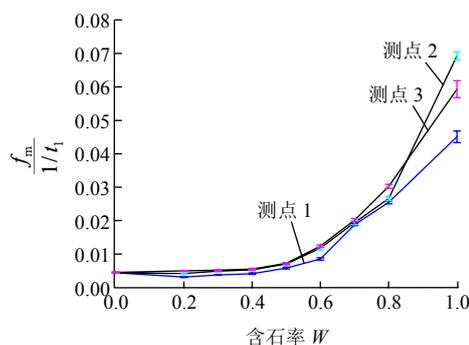


图 8 含石率对加速度波主频影响曲线
Fig.8 Impact curves of percentage of rock on dominant frequency of acceleration wave

增加, 当 $W < 60\%$ 时, 上升趋势平缓, 基本在 15 Hz 左右, 当 $W \geq 60\%$ 时, 最大振幅迅速增加, 达到 700 Hz。

3.4 块石特征尺寸影响的计算与分析

固定含石率情况下, 控制块石特征尺寸变化范围为 0.5~3.0 m。之所以称为块石特征尺寸是由于假设块石单元为长方体单元, 此处忽略了块石表面的凹凸不平和形状的不规则性, 忽略的原因是选取的尺寸较大, 表面凹凸变化尺寸较单一块石尺寸小得多。不同块石特征尺寸变化示意如图 9 ($W=20\%$) 所示。

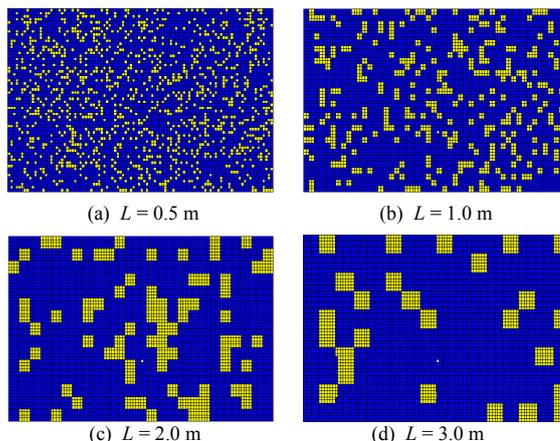


图 9 不同块石特征尺寸变化示意图 ($W=20\%$)
Fig.9 Sketches of variation of different feature sizes of rock block ($W=20\%$)

块石特征尺寸改变情况下, 选取测点 1 的 y 方向的典型振动曲线, 加速度波持续时间的变化对比情况如图 10 ($W = 20\%$) 所示。当块石特征尺寸由 0.5 m 变到 3.0 m 时, 加速度持续时间由 0.12 s 变化到 0.21 s, 即随着块石特征尺寸的增加, 加速度持续时间逐渐增加。

固定含石率 $W=50\%$, 图 11 分别给出块石特征尺寸对加速度波最大振幅和主频的影响, 3 条曲线仍选取测点 1, 2, 3 三个测点的情况, 并且给出它们由于土石分布规律不同所导致的误差范围。

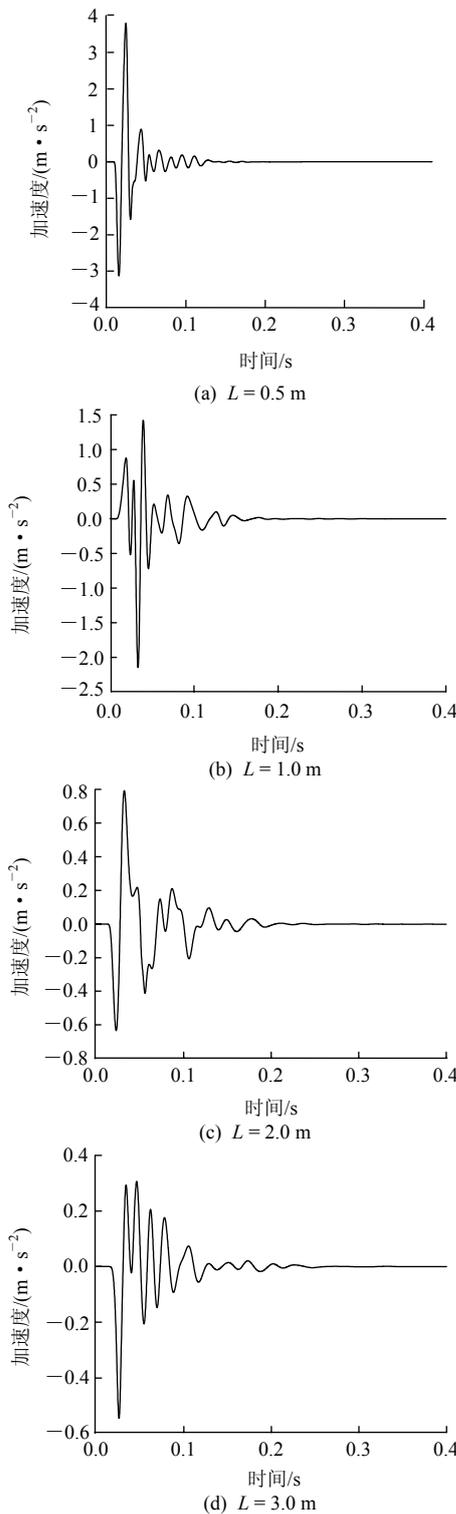


图 10 不同块石特征尺寸下的典型振动曲线对比图($W=20\%$)
 Fig.10 Comparison diagrams of typical vibration curves under different feature sizes of rock block($W=20\%$)

由图 11(a)可以看出,在一定材料性质和荷载条件下,有:(1)当其他条件相同时,均匀分布情况下的不同土石分布规律对于加速度波最大振幅的影响相对于块石特征尺寸而言,影响较小,可以忽略;(2)地表测点选取对于最大振幅有明显影响,随着测点距冲击载荷在地面上的垂直投影点的距离越

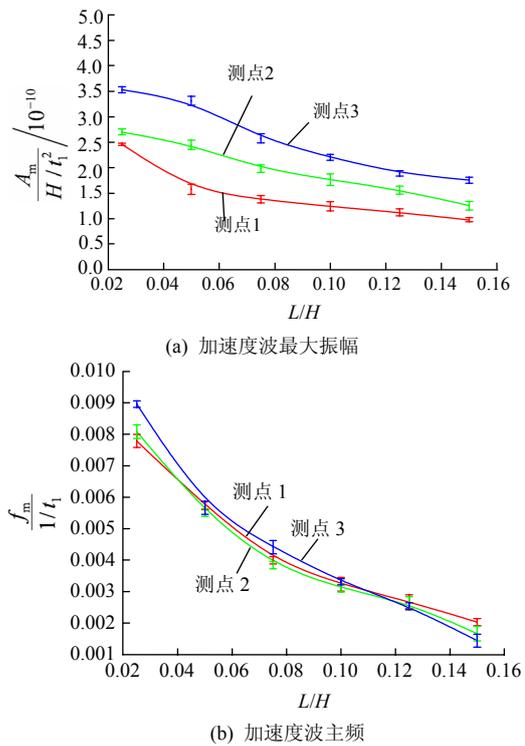


图 11 块石特征尺寸对加速度波最大振幅和主频的影响曲线
 Fig.11 Impact curves of feature size of rock block on maximum amplitude and dominant frequency of acceleration wave

近,最大振幅值越大,此影响与块石特征尺寸影响相当;(3)随着块石特征尺寸的增加,加速度波的最大振幅值减小,但相对于含石率的影响其变化范围不大。

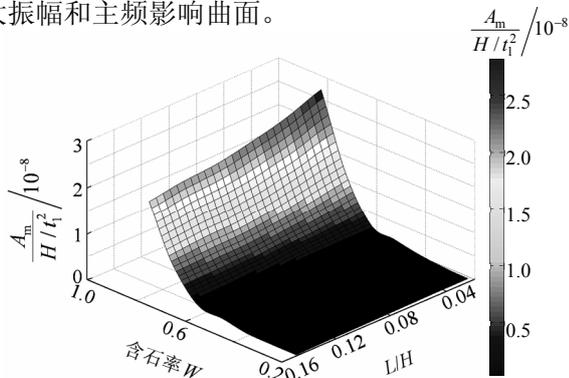
从图 11(b)可以明显看出,在一定材料性质和荷载条件下,有:(1)随着块石特征尺寸的增加,加速度波的主频在减小,且变化趋势较为均匀;(2)相对于块石特征尺寸对加速度波主频的影响,测点位置影响不大;(3)均匀分布下的不同土石分布规律对于主频影响很小。

这里需要指出,研究采用加速度波的最大振幅 A_m 和主频 f_m 作为因变量,而没有采用加速度持续时间或波速(可以通过起跳时间来体现),是因为由加速度波振动曲线可以看出,最大振幅和主频较波动持续时间和波速(起跳时间)而言,变化明显、易测得且取值误差较小。

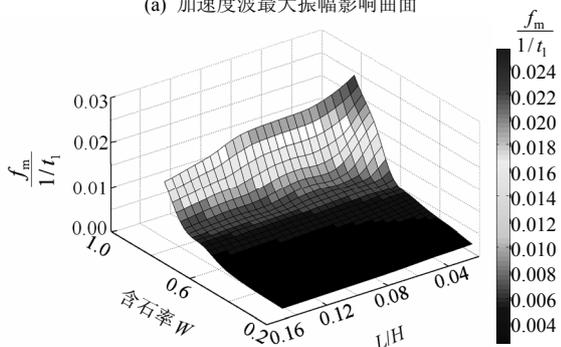
4 多种结构因素作用下的波动响应

在实际情况下,土石混合体的波动响应受内部结构特性的多种因素共同作用。节 3.3 和 3.4 分别分析了含石率和块石特征尺寸对波动响应规律的影响,给出了单独作用时加速度波的波动响应变化规律,并且由节 3.3 和 3.4 的计算结果表明,均匀分布情况下的不同分布规律对于加速度波的影响很小,

可以忽略。因此，多种因素共同作用主要指含石率和块石大小的综合影响，分别控制二者的变化范围，含石率 $W=20\% \sim 80\%$ ，块石特征尺寸 $L=0.5 \sim 3.0$ m。由此，建立多条最大振幅曲线与主频曲线，最终可以给出这 2 个结构特性对波动响应规律的影响曲面，图 12 为土石混合体结构特性对加速度波最大振幅和主频影响曲面。



(a) 加速度波最大振幅影响曲面



(b) 加速度波主频影响曲面

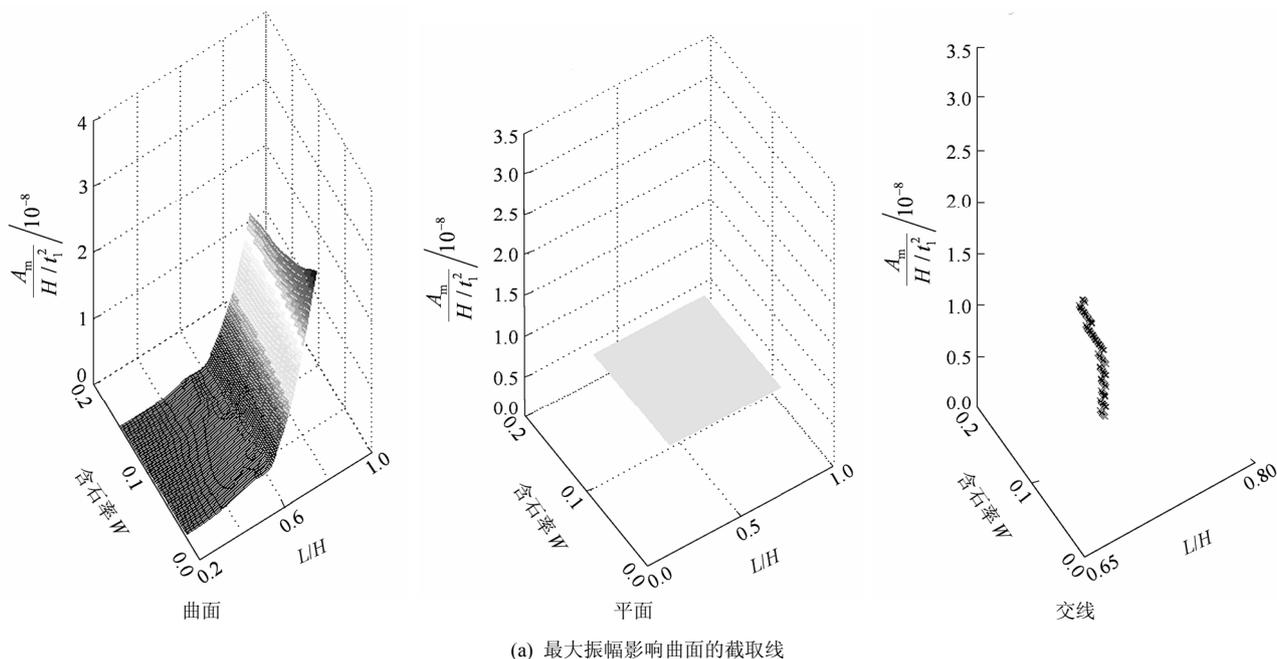
图 12 土石混合体结构特性对加速度波最大振幅和主频影响曲面

Fig.12 Impact surfaces of structural properties of soil-rock mixtures on maximum amplitude and dominant frequency of acceleration wave

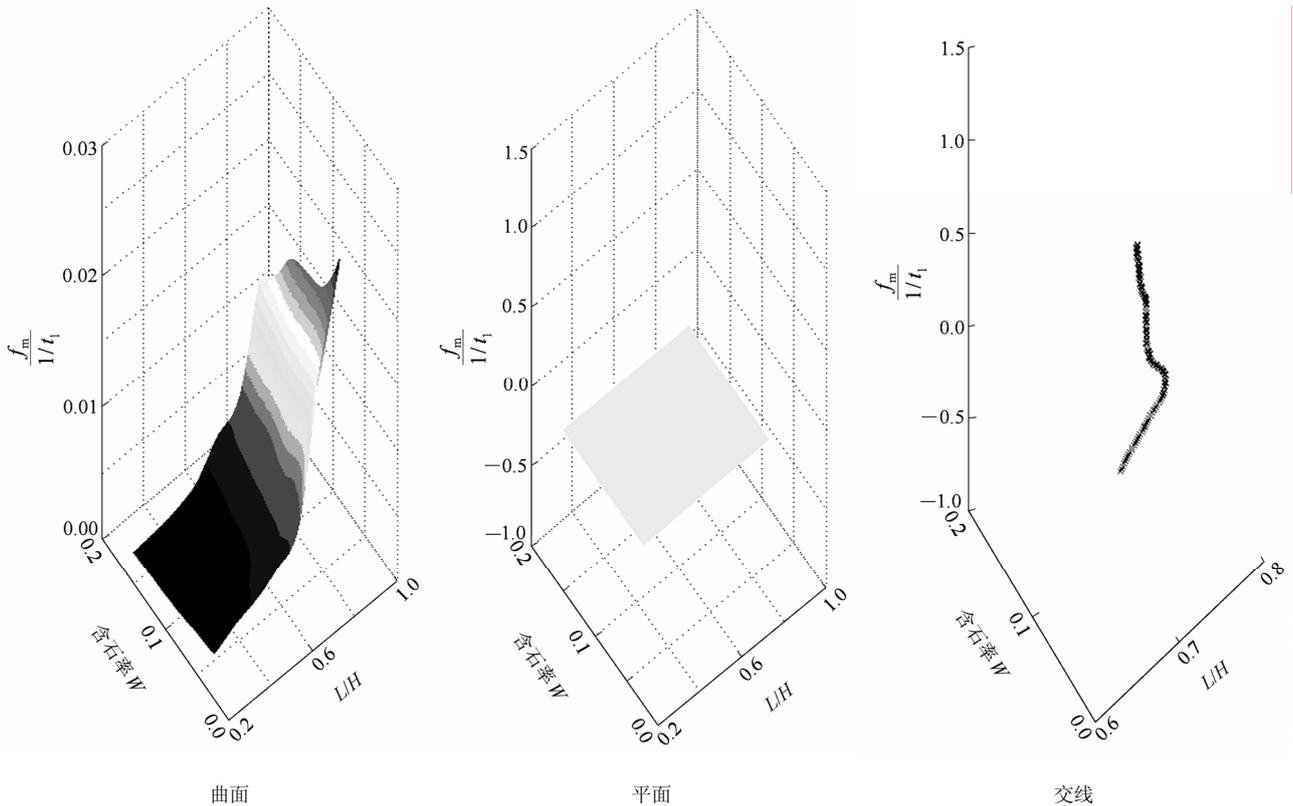
由图 12 可以看出，当含石率 $W=80\%$ 和特征尺寸 $L=0.5$ m 时，最大振幅和主频均为最大值；当含石率 $W=20\%$ 和块石特征尺寸 $L=3.0$ m 时，最大振幅和主频均为最小值。在含石率 $W>60\%$ 时，曲面变化趋势沿含石率较沿特征尺寸变化明显，可以说，此段内含石率的影响较为重要；在含石率 $W<60\%$ 时，沿含石率和沿块石特征尺寸曲面趋势变化相当，此段内二者同样重要。

给出的影响曲面中最大振幅的变化范围为 $1 \sim 60 \text{ m/s}^2$ ，主频的变化范围为 $20 \sim 250 \text{ Hz}$ ，均在实际工程可测的范围内，因为一般加速度传感器可以满足从 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ 的加速度测量范围和频率从 $0.1 \sim 20.0 \text{ kHz}$ 范围内的振动冲击测试的使用要求，因此文中给出的影响曲面满足波动方法探测土石混合体的可测性条件。

实际工程中，在给定土石混合体的材料性质和荷载条件情况下，采用波动探测方法，在现场用加速度传感器监测传到地表的加速度波形，记录加速度波的最大振幅值和主频值，用以上 2 个影响拟合曲面进行插值可以查出土石混合体的含石率和块石特征尺寸。例如，若在同样的材料和荷载条件下，测得加速度波的最大振幅为 20 m/s^2 ，主频为 120 Hz ，化成量纲一的量分别为 1.0×10^{-8} 和 0.012 ，用 2 个数值平面截取 2 个影响曲面分别得到 2 条曲线，如图 13 所示，交点 O 的坐标值即为其含石率 W 和 L/H (这里 $H=20$ m)值，如图 14 所示，由此得到含石率 $W=68.5\%$ 和块石特征尺寸 $L=0.72$ m。



(a) 最大振幅影响曲面的截取线



(b) 主频影响曲面的截取线

图 13 影响曲面的平面截取线

Fig.13 Intersecting line of impact surface intercepted by plane

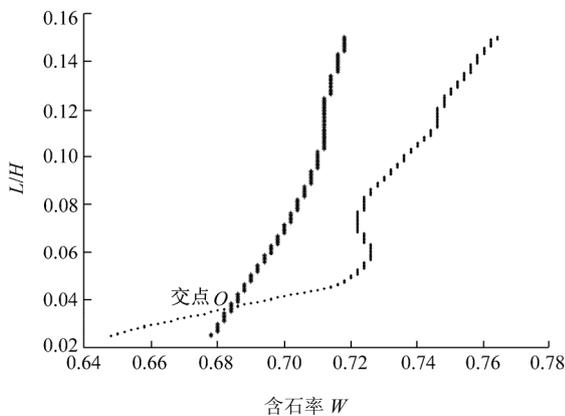


图 14 两曲线相交点

Fig.14 Intersecting point of two curves

5 结论

本文将土石混合物看成宏观致密和等效均匀介质，将深部爆源的爆炸效果用等效冲击载荷代替，且在一定材料性质和荷载条件下，通过研究土石混合物内部结构特性对应力波传播过程的影响，建立了地表响应加速度最大振幅值、主频与内部含石率、块石特征尺寸之间的对应关系，并讨论了结构特性

对波动响应影响的规律性、波动响应的可测性及波动方法探测土石混合物结构特性的可行性，得到如下结论：

- (1) 计算结果表明，在含石率和块石特征尺寸不变的情况下，均匀分布下的不同土石分布规律对加速度波的影响很小，可以忽略。
- (2) 单独研究含石率影响并控制其变化范围为 0%~100% 时，加速度波的最大振幅和主频随着含石率的增加而增加；单独研究块石特征尺寸影响并控制其变化范围为 0.5~3.0 m 时，加速度波的最大振幅和主频随着块石特征尺寸的增加而减小。
- (3) 综合含石率和块石特征尺寸 2 个结构特性因素的影响，给出了加速度波的最大振幅和主频的影响曲面，且最大振幅和主频值均满足实际工程的可测性；以给定波动响应情况为例，证明了波动方法探测土石混合物内部结构特性是可行的。

研究中将土石混合物概化为宏观致密、等效均匀介质，是为了不考虑土石混合物中孔隙和土石分布极其非均匀的影响，因此文中结论只适用于致密的、宏观均匀的土石混合物，对于极其非均匀的土

石混合体有必要作进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦, 等. 土石混合体微观结构及力学特性数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 300 - 311.(XU Wenjie, HU Ruilin, YUE Zhongqi, et al. Mesosstructural character and numerical simulation of mechanical properties of soil-rock mixtures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 300 - 311.(in Chinese))
- [2] 殷跃平, 张加桂, 陈宝荪, 等. 三峡库区巫山移民新城址松散堆积体成因机制研究[J]. 工程地质学报, 2000, 8(3): 265 - 271.(YIN Yueping, ZHANG Jiagui, CHEN Baosun, et al. Formation mechanism of large-scale loose sediment at the relocation sites of Wushan County in the Three Gorges reservoir area[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(3): 265 - 271.(in Chinese))
- [3] 徐文杰, 胡瑞林, 谭儒蛟, 等. 虎跳峡龙蟠右岸土石混合体野外试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1 270 - 1 277.(XU Wenjie, HU Ruilin, TAN Rujiao, et al. Study on field test of rock-soil aggregate on right bank of Longpan in Tiger-leaping Gorge area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1 270 - 1 277.(in Chinese))
- [4] 赫建明. 三峡库区土石混合体的变形与破坏机制研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国矿业大学, 2004.(HE Jianming. Study on deformation and failure mechanisms of rock-soil aggregate in the Three Gorges reservoir area[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2004.(in Chinese))
- [5] 国家电力公司中南勘测设计研究院. 金沙江虎跳峡河段梯级开发方式设计报告[R]. 长沙: 国家电力公司中南勘测设计研究院, 1999.(Zhongnan Investigation Design and Research Institute, State Power Corporation of China. Design and research report of the way of stepping exploitation of the Tiger-leaping Gorge on the Jinsha River[R]. Changsha: Zhongnan Investigation Design and Research Institute, State Power Corporation of China, 1999.(in Chinese))
- [6] WANG Y, HUTTER K. Granular material theories revisited[M]// Edited by BALMFORTH N J, PROVENZALE A. Geomorphological Fluid Mechanics. Berlin: Springer-Verlag, 2001: 79 - 107.
- [7] LIU S H, SUN D A, WANG Y S. Numerical study of soil collapse behavior by discrete element modeling[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(5): 399 - 408.
- [8] XU W J, YUE Z Q, HU R L. Study on the mesostructure and mesomechanical characteristics of the soil-rock mixture using digital image processing based finite element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5): 749 - 762.
- [9] LI S H, ZHAO M H, WANG Y N. A new numerical method for DEM block and particle model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3): 436 - 440.
- [10] 油新华. 土石混合体的随机结构模型及其应用研究[博士学位论文][D]. 北京: 北方交通大学, 2001.(YOU Xinhua. Stochastic structural model of the soil-rock aggregate and its application[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Northern Jiaotong University, 2001.(in Chinese))
- [11] YUE Z Q, CHEN S. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(5): 375 - 397.
- [12] LI X, LIAO Q L, HE J M. In-situ tests and a stochastic structural model of rock and soil aggregate in the Three Gorges reservoir area[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3): 494 - 499.
- [13] LANARO F, TOLPPANEN P. 3D characterization of coarse aggregates[J]. Engineering Geology, 2002, 65(1): 17 - 30.
- [14] 李晓杰, 曲艳东, 闫鸿浩, 等. 岩体爆破效应的声波探测[J]. 爆破器材, 2005, 34(4): 1 - 6.(LI Xiaojie, QU Yandong, YAN Honghao, et al. Acoustic detection of blasting effect in rock mass[J]. Explosive Materials, 2005, 34(4): 1 - 6.(in Chinese))
- [15] 丁宝国, 沈跃加. 瑞利波探测技术用于矿井地质超前探测[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(4): 61 - 63.(DING Baoguo, SHEN Yuejia. Rayleigh wave detection technology used in in-advance geological detection[J]. Coal Geology and Exploration, 2009, 37(4): 61 - 63.(in Chinese))
- [16] 欧阳振华, 李世海, 戴志胜. 块石对土石混合体力学性能的影响研究[J]. 实验力学, 2010, 25(1): 61 - 67.(OUYANG Zhenhua, LI Shihai, DAI Zhisheng. Study of the influence factors of mechanical properties for soil-rock mixture[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(1): 61 - 67.(in Chinese))
- [17] 李顺波, 东兆兴, 齐燕军, 等. 爆炸冲击波在不同介质中传播衰减规律的数值模拟[J]. 振动与冲击, 2009, 28(7): 115 - 117.(LI Shunbo, DONG Zhaoxing, QI Yanjun, et al. Numerical simulation on decay spread of blasting shock wave in different media[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(7): 115 - 117.(in Chinese))