

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.006

地震作用下含软弱夹层的顺倾岩质边坡 加速度放大效应探究

王学伍, 张彦君, 万 驰, 年廷凯

(大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 基于 FLAC^{3D} 数值软件, 建立含软弱夹层的顺倾岩质边坡模型, 合理考虑地震波输入方式、模型边界条件、网格尺寸和力学阻尼, 探究地震作用下含软弱夹层的顺倾岩质边坡加速度放大效应和软弱夹层区域加速度放大系数的变化规律, 探究和分析软弱夹层的负效应。研究表明: 在软弱夹层区域, 加速度放大系数增加的速度更快; 软弱夹层厚度越厚, 软弱夹层位置越低, 放大效应越明显; 当软弱夹层倾角相差不大时, 软弱夹层位置变化不大, 此时软弱夹层倾角变化对加速度放大效应的影响较软弱夹层位置变化更为显著, 即软弱夹层倾角越大, 放大效应越明显; 当软弱夹层倾角相差较大时, 软弱夹层位置变化也较大, 此时软弱夹层位置变化的影响更为显著, 即软弱夹层位置越低, 放大效应越明显。

关键词: 软弱夹层; 顺倾岩质边坡; 地震; 加速度放大效应

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)03-0037-05

Acceleration Amplification Effects of Bedding Rock Slope with Weak Interlayer Under Earthquake

WANG Xuewu, ZHANG Yanjun, WAN Chi, NIAN Tingkai

(School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: Based on the reasonable selection of seismic input, boundary conditions of model, mesh size and mechanic damping, a FLAC^{3D} numerical model was established to investigate the acceleration amplification effect of the bedding rock slope with weak interlayer. The negative effect of weak interlayer was analyzed through the law of variation of acceleration amplification coefficient in the weak interlayer region. The results show that: In the weak interlayer region, the acceleration amplification coefficient increases faster; The thicker the weak interlayer is, the lower the position of the weak interlayer is, the more significant the seismic amplification effect is; When the dip angle difference of the weak interlayer is not particularly large, the position of the weak interlayer does not change much. In this situation, the influence of the dip angle change of the weak interlayer on the acceleration amplification effect is more significant than the position change of the weak interlayer, that is, the larger the dip angle of the weak interlayer is, the more obvious the seismic amplification effect is; When the dip angle difference of the weak interlayer is large, the position of the weak interlayer changes greatly. In this condition, the influence of the position change of the weak interlayer is more significant, which means the lower the position of the weak interlayer is, the more obvious the seismic amplification effect is.

Keywords: weak interlayer; bedding rock slope; earthquake; acceleration amplification effect

地震作用下岩质边坡的失稳破坏通常会严重威胁人民的生命财产安全以及工农业的生产发展, 为此, 国内外学者广泛开展地震边坡动力响应规律和变形破坏机制, 以及滑坡所诱发的次生地质灾害等

方面的研究^[1-11]。其中, 含软弱夹层岩质边坡作为常见地质体, 岩体介质中软弱夹层的弹性模量较小且强度相对较低^[12], 此类边坡在突发性的地震荷载作用下容易失稳破坏并形成大规模的滑坡。因此,

地震作用下含软弱夹层岩质边坡的动力响应规律、动力稳定性及其变形破坏机制在学术界和工程界广受关注。

刘立平等^[13]和李慧等^[14]采用数值模拟方法探究地震作用下含软弱夹层岩质边坡的动力特性,通过分析应力、位移和加速度等参数的计算结果,认为在边坡动力稳定性分析和边坡支护设计的过程中应当考虑软弱夹层的影响。周飞等^[15]基于振动台试验,以两个含不同厚度水平软弱夹层的岩质斜坡为研究对象,探究了含软弱夹层斜坡的加速度动力响应特征及其影响因素,指出坡面的动力响应强于坡内,并且高程、坡体位置和软弱夹层厚度是影响边坡动力响应的最主要因素。范留明等^[12]则基于应力波传播理论的解析方法研究了薄弹性软弱夹层的动力响应特性,指出应力波由高弹性模量介质传播至低弹性模量介质时会引起较为显著的动变形。杜晓丽等^[16]通过研究地震作用下不同结构软弱夹层对边坡稳定性的影响,认为含软弱夹层岩质边坡在地震荷载作用下的变形部位主要集中在软弱夹层和坡面处,并建议采用结构面倾角作为边坡稳定性的判断依据。范刚等^[17]和马洪生等^[18]则基于大型振动台试验分别探究地震作用下含软弱夹层顺倾和反倾岩质边坡的破坏模式,概化顺倾岩质边坡的破坏模式为拉裂—滑移—崩落式,反倾岩质边坡的破坏模式为中部岩层挤压滑出型,并且基于 HHT 边际谱理论提出利用能量判识方法来识别边坡的破坏模式。

软弱夹层的存在导致边坡的动力响应规律和变形破坏机制更为复杂,而已有的学术成果多是从整体角度探究含软弱夹层岩质边坡的动力相关问题,缺少对软弱夹层区域地震加速度放大系数变化规律的关注和研究。此外,探究软弱夹层区域的动力响应特性对于认识和理解软弱夹层对岩质边坡动力响应规律的影响具有重要的理论意义。因此,本文采用数值方法研究地震作用下含软弱夹层的顺层岩质边坡加速度放大效应,并探讨软弱夹层对边坡动力响应的影响。

1 数值模型

1.1 模型与参数

数值计算模型如图 1 所示,边坡高度 $H = 80$ m, $H_1 = 30$ m, $L = 160$ m, $L_1 = 30$ m, 坡角 $\alpha = 45^\circ$, β 为软弱夹层倾角, D_w 为软弱夹层上下边界之间的距离, M 为坡面上软弱夹层最底端的点距离坡脚的垂直距离。本文监测点的布置原则如下:(1) 探究软弱

夹层厚度对加速度放大效应的影响时,在软弱夹层两侧布置监测点,以便更有效地监测软弱夹层对加速度放大效应的影响(见图 1);(2) 探究其他问题时,监测点按照高程的增加均匀分布。岩质边坡的力学参数如表 1 所示^[19]。

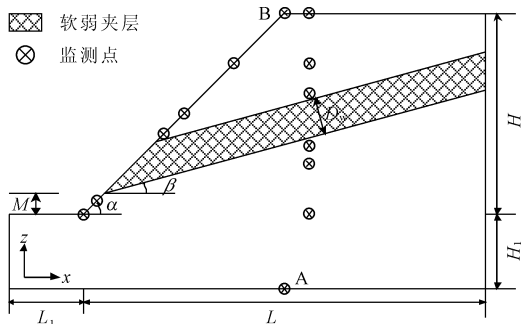


图 1 边坡模型

表 1 模型材料力学参数

介质	密度 /($g \cdot cm^{-3}$)	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /($^\circ$)	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	抗拉强度 /MPa
岩体	2.70	1.65	47.7	9.62	6.05	3.0
软弱夹层	2.65	0.30	21.0	3.75	0.98	0.1

1.2 动荷载及边界条件

本文动荷载的输入方式为加速度时程输入,模型底部不施加黏性边界,模型两侧采用自由场边界条件^[20]。鉴于本文主要探究软弱夹层对地震边坡动力响应规律的影响,并未考虑双向耦合地震作用时边坡的动力响应,且刘红帅等^[21]指出剪切波对岩质边坡动力响应的影响更为显著,因此,本文采用二维的平面应变模型分析边坡的动力响应规律,且只在边坡模型的 x 方向施加地震波;此外,董金玉等^[22]研究发现,输入地震波为正弦波和真实地震波时,岩质边坡加速度放大系数的整体规律相似,因此,本文为提高数值计算效率,考虑采用正弦波作为输入地震动,其幅值为 $0.1g$,频率为 1 Hz,持时选择则在后文具体分析。

1.3 网格尺寸以及力学阻尼

进行动力分析时,利用 FLAC^{3D}建立的边坡模型的网格尺寸受输入地震波的最短波长控制^[23]。

$$\Delta l \leq \left(\frac{1}{8} \sim \frac{1}{10} \right) \lambda \quad (1)$$

式中: Δl 为网格的尺寸; λ 为输入地震波的最短波长。

本文建立的边坡模型单元尺寸满足上述要求。

动力问题的数值分析中通常可以采用以下三种阻尼形式:瑞利阻尼、局部阻尼和滞后阻尼。鉴于力

学阻尼问题十分复杂,本文在此处对于阻尼形式的选取不做深入分析和探究,而是采用普遍方法,在FLAC^{3D}动力分析中选用局部阻尼形式,临界阻尼比取5%,局部阻尼系数可据下式计算为0.157。

$$\alpha_1 = \pi D \quad (2)$$

式中: α_1 为局部阻尼系数; D 为临界阻尼比。

1.4 地震持时确定

为节约计算时间,提高计算效率,本文在进行FLAC^{3D}动力分析时选取地震动持续时间为4 s。以探究软弱夹层厚度对加速度放大效应的影响为例,可以通过坡肩监测点B的加速度时程曲线说明计算持时取4 s的合理性。如图2所示,由于地震波从边坡底部传到边坡顶部需要一定的时间,所以在0.1 s之前,坡肩的监测点B所测得的加速度为零。在第一个周期,监测点B加速度变化规律与其他三个周期相比差别较大。在1 s之后即一个周期后,监测点B的加速度在不同周期变化规律基本一致。因此,计算持时取4个周期是合理的。另外,从图中也可以看出,监测点B的峰值加速度约为1.7 m/s²,而底部监测点A的峰值加速度为1 m/s²,二者相差约70%,这正体现了边坡加速度的放大效应。

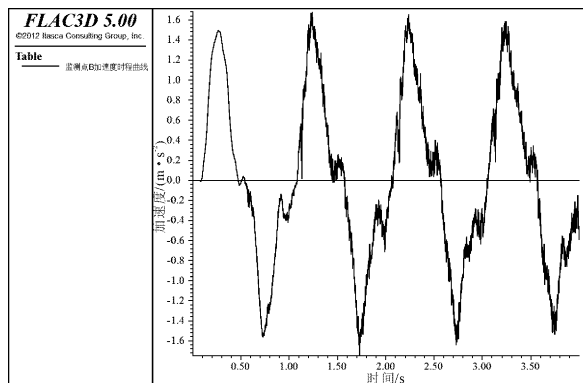


图2 监测点B加速度时程曲线

2 软弱夹层对加速度放大效应的影响

本文主要探究软弱夹层对加速度放大效应的影响,即在软弱夹层厚度(D_w/H)、软弱夹层位置(M/H)以及软弱夹层倾角(β)不同的工况下,对比分析含软弱夹层顺倾岩质边坡坡面和坡体内部竖直方向的加速度放大效应规律。本文所指的加速度放大系数均为监测点的水平向加速度放大系数(以下采用 P_{haa} 表示),定义为各监测点的水平向峰值加速度与模型底部监测点A处的水平向峰值加速度的比值。

2.1 软弱夹层厚度对加速度放大效应的影响

图3为软弱夹层厚度对边坡各监测点处的加速

度放大效应的影响图。总体上看,在坡面方向和坡体内部竖直方向上,随着高程的不断增加,加速度放大系数不断增大,放大效应趋于明显;且在边坡坡顶处,加速度放大系数达到最大值,放大效应最为显著。坡面方向上,个别监测点除外,其地震加速度放大系数基本上满足以下关系: $D_w/H = 0.20$ 边坡(下文简称厚夹层边坡)大于 $D_w/H = 0.04$ 边坡(下文简称薄夹层边坡)大于 $D_w/H = 0.00$ 边坡(下文简称无夹层边坡);此外,相对于其他区域,软弱夹层区域的加速度放大系数的增加速度更快。沿坡体内部竖直方向,软弱夹层下部监测点的地震加速度放大系数,无夹层边坡大于薄夹层边坡,但小于厚夹层边坡;软弱夹层区域监测点处的加速度放大系数的增加速度明显快于其他部位;软弱夹层上部监测点处的地震加速度放大系数,满足厚夹层边坡大于薄夹层边坡大于无夹层边坡。对比坡面加速度放大系数,在相对高程为0.4的位置,即软弱夹层出露处,厚夹层边坡达到1.514,无夹层边坡为1.25,二者相差约为21%;在坡肩位置,两者相差约为22%。对比坡体内部竖直方向的加速度放大系数,在相对高程为0.6的位置,即软弱夹层出露处,厚夹层边坡达到1.565,无夹层边坡为1.324,二者相差约为18%;在坡顶位置,两者相差约为17%。

综上分析可得,含软弱夹层的顺倾岩质边坡相较于无夹层边坡对地震加速度的放大效应更为明显,且软弱夹层厚度对放大效应有显著的影响,软弱夹层厚度越厚,加速度放大系数越大,放大效应越明显。而且,加速度放大系数在软弱夹层区域增加的速度更快,说明软弱夹层对地震波的反射与折射增强了边坡的动力响应。

2.2 软弱夹层位置对加速度放大效应的影响

图4为软弱夹层位置对边坡各监测点处的加速度放大效应的影响。从图4中可以看出,边坡坡面方向和坡体内部竖直方向上的加速度放大系数均满足以下关系: $M/H = 0.10$ 边坡(下文简称低位夹层边坡)大于 $M/H = 0.15$ 边坡大于 $M/H = 0.20$ 边坡(下文简称高位夹层边坡)。对于坡面加速度放大系数,在坡肩位置处,低位夹层边坡达到1.745,而高位夹层边坡为1.507,二者相差约16%。对于坡体内部竖直方向上的加速度放大系数,在坡顶位置处,低位夹层边坡达到1.662,而高位夹层边坡为1.460,二者相差约14%。

综上分析可得,软弱夹层位置对放大效应有显著的影响,软弱夹层位置越低,加速度放大系数越

大,放大效应越明显。

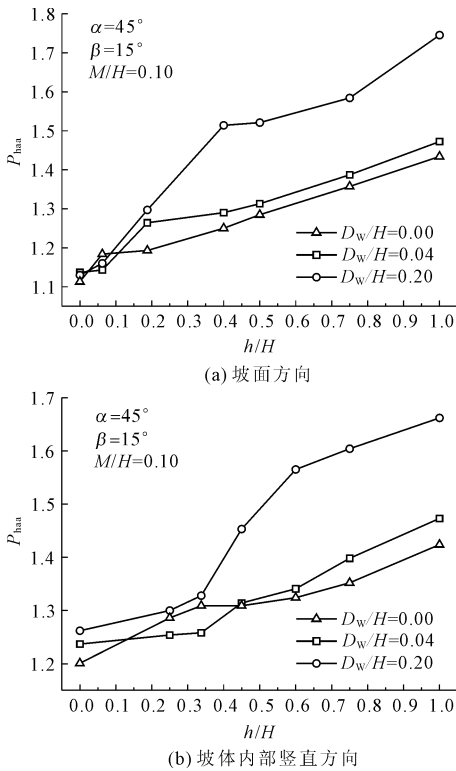


图 3 不同软弱夹层厚度边坡的加速度放大系数

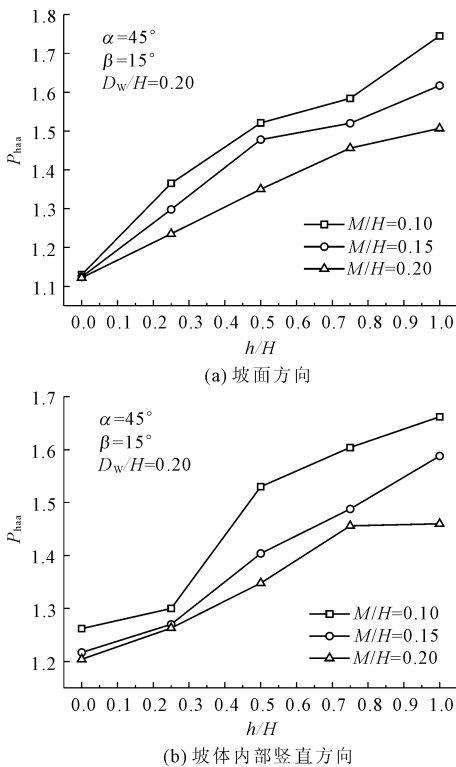


图 4 不同软弱夹层位置边坡的加速度放大系数

2.3 软弱夹层倾角对加速度放大效应的影响

图 5 为软弱夹层倾角对边坡各监测点处的加速度放大效应的影响。从图 5 中可以看出,坡面加速

度放大系数总体上满足以下关系:软弱夹层倾角 10° 边坡大于软弱夹层倾角 5° 边坡大于软弱夹层倾角 20° 边坡。对于坡体内部竖直方向上的加速度放大系数,在软弱夹层下部,软弱夹层倾角 5° 边坡大于软弱夹层倾角 10° 边坡大于软弱夹层倾角 20° 边坡;而在软弱夹层上部,软弱夹层倾角 10° 边坡大于软弱夹层倾角 5° 边坡大于软弱夹层倾角 20° 边坡。在坡肩位置处,软弱夹层倾角 10° 边坡的放大系数数值达到 1.793,而软弱夹层倾角 20° 边坡为 1.471,二者相差约 22%。在坡顶位置处,软弱夹层倾角 10° 边坡放大系数数值达到 1.768,而软弱夹层倾角 20° 边坡为 1.469,二者相差约 20%。

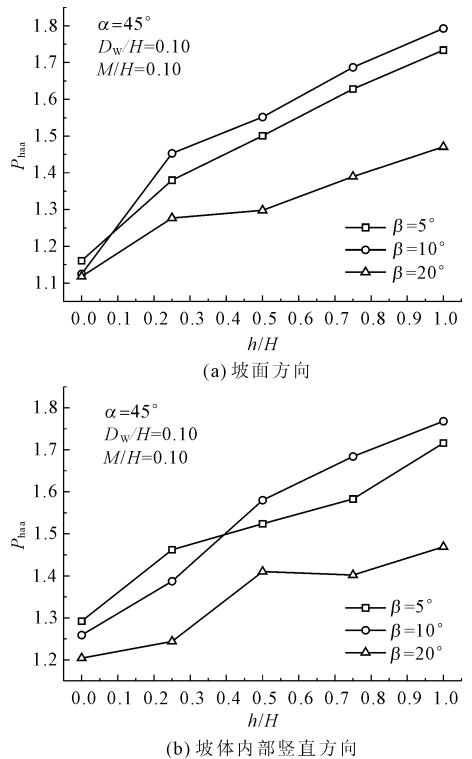


图 5 不同软弱夹层倾角边坡的加速度放大系数

综上分析可得:当软弱夹层倾角相差不大时,软弱夹层位置变化也不大,此时软弱夹层倾角变化对加速度放大系数的影响较软弱夹层位置变化对加速度放大系数的影响更为显著,即软弱夹层倾角越大,加速度放大系数越大,放大效应越明显;当软弱夹层倾角相差较大时,软弱夹层位置变化也较大,相比较而言,此时软弱夹层位置变化对加速度放大系数的影响更为显著,即软弱夹层位置越低,加速度放大系数越大,放大效应越明显。

3 机 理

软弱夹层的存在导致地震波在顺倾岩质边坡内部的传播过程非常复杂,地震波由高弹性模量的岩

体介质传播至低弹性模量的软弱夹层介质时出现波场分离现象,不同类型的应力波,如边坡表面的反射波,坡体内部的反射波以及折射波,相互叠加使得边坡的动力响应显著增强,导致坡体各处的地震加速度系数显著放大,且放大程度显著高于无软弱夹层岩质边坡;此外,软弱夹层出露处的加速度放大系数差异明显。软弱夹层的不同结构特征(厚度、位置、倾角),导致地震波在软弱夹层局部区域的反射和折射等传播过程不同,宏观表现为含软弱夹层岩质边坡动力响应的“强弱”不同。

4 结 论

本文采用数值方法研究含软弱夹层的顺倾岩质边坡加速度放大效应,进而分析软弱夹层结构对地震动力响应的的作用,得出以下几点结论:

(1) 含软弱夹层的顺倾岩质边坡加速度放大系数随着高程的增加而增大,放大效应亦更加明显;坡顶处,加速度放大系数达到最大,放大效应最显著。

(2) 软弱夹层的存在对边坡加速度放大效应具有显著影响。在软弱夹层区域,加速度放大系数的增加速度更快。软弱夹层越厚,位置越低,加速度放大系数越大,放大效应越明显。

(3) 当软弱夹层倾角相差不大时,软弱夹层位置变化也不大,此时软弱夹层倾角变化对加速度放大效应的影响更为显著,即软弱夹层倾角越大,加速度放大系数越大,放大效应越明显。

(4) 当软弱夹层倾角相差较大时,软弱夹层位置变化也较大,相对而言,此时软弱夹层位置变化的影响更为显著,即软弱夹层位置则越低,加速度放大系数越大,放大效应越明显。

参考文献:

[1] 卞康,刘建,胡训健,等.含顺层断续节理岩质边坡地震作用下的破坏模式与动力响应研究[J].岩土力学,2018,39(8):3029-3037.

[2] 祁生文,伍法权,孙进忠.边坡动力响应规律研究[J].中国科学E辑(技术科学),2003,33(S1):28-40.

[3] 宋丹青,陈志荣,陈俊栋.岩质边坡地震动力响应研究进展[J].水利与建筑工程学报,2018,16(6):1-7.

[4] 刘丽萍,王思长.地震作用下高边坡稳定性验算及监测分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(1):60-64.

[5] Ling H I, Leshchinsky D, Mohri Y. Soil slopes under combined horizontal and vertical seismic accelerations[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997, 26(12): 1231-1241.

[6] Ling H I, Cheng A H D. Rock sliding induced by seismic force[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1997, 34(6): 1021-1029.

[7] Siad L. Seismic stability analysis of fractured rock slopes by yield design theory[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(3): 21-30.

[8] Zhang C H, Pekau O A, Jin F, et al. Application of distinct element method in dynamic analysis of high rock slopes and blocky structures[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1997, 16(6): 385-394.

[9] Zhang Y, Nian T, Zheng D, et al. Analytical solution of seismic stability against overturning for a rock slope with water-filled tension crack[J]. Geomechanics and Engineering, 2016, 11(4): 457-469.

[10] 张彦君,年廷凯,郑路,等.地震与水压力耦合作用下岩质边坡倾覆解析方法[J].地震工程学报,2015,37(2):428-433,438.

[11] 年廷凯,吴昊,陈光齐,等.堰塞坝稳定性评价方法及灾害链效应研究进展[J].岩石力学与工程学报,2018,37(8):1796-1812.

[12] 范留明,闫娜,李宁.薄弹性软弱夹层的动力响应模型[J].岩石力学与工程学报,2006,25(1):88-92.

[13] 刘立平,杨实君,李英民.软夹层参数对边坡动力特性的影响分析[J].重庆大学学报(自然科学版),2007,30(5):31-34.

[14] 李慧,石乃鑫,杜永峰.含软弱夹层边坡的地震时程响应分析[J].低温建筑技术,2010,32(8):54-56.

[15] 周飞,许强,刘汉香,等.地震作用下含水平软弱夹层斜坡动力响应特性研究[J].岩土力学,2016,37(1):133-139.

[16] 杜晓丽,宋宏伟,魏京胜.地震对软弱夹层边坡稳定性影响数值模拟研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2010,32(1):39-42.

[17] 范刚,张建经,付晓,等.含软弱夹层顺层岩质边坡动力破坏模式的能量判识方法研究[J].岩土工程学报,2016,38(5):959-966.

[18] 马洪生,庄卫林,刘阳,等.反倾边坡地震破坏模式及能量判识方法研究[J].地震工程与工程振动,2016,36(4):112-120.

[19] 冯志仁,刘红帅,于龙.地震作用下含软弱夹层顺层岩质边坡表面放大效应研究[J].防灾减灾工程学报,2014,34(1):96-100.

[20] 陈育民,徐鼎平.FLAC/FLAC3D基础与工程实例[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2013:225-226.

[21] 刘红帅,齐文浩,郑桐.强震动作用下顺倾和反倾岩质边坡动力响应与破坏机理[M].北京:地震出版社,2016:17.

[22] 董金玉,杨继红,伍法权,等.顺层岩质边坡加速度响应规律和滑动堵江机制大型振动台试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(S2):3861-3867.

[23] Kuhlemeyer R L, Lysmer J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 99(5): 421-427.