

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.02.016

地震波入射角对地震动特性的影响研究

华 凯¹, 范留明^{1,2}, 车军鹏¹

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 在场地地震反应研究中,通常假定来自基岩的地震波是垂直向上传播的。但是这一假定与实际情况不符,越来越多的证据表明地震波是以某一角度倾斜向上传播,而且地震波入射角是影响场地地震反应的一个重要因素。为了揭示地震波入射角与地震动特性之间的关系,本文以均匀场地为例,假定地面与基岩面为无限大水平面,根据地震波的传播原理,确定从入射波到达地面同一点处的各条地震波路径,计算每条路径上地震波的到达时间及其振动幅值,然后按照到达时间对这些振动幅值进行叠加运算,计算得到的地震动时程就是场地反应的理论解;结合文献实例分别计算得到倾斜入射P波与S波作用下的位移时程,通过对比分析,验证该理论解法的正确性;应用此方法研究了地震动的幅值大小、持续时间、运动轨迹与地震波入射角的关系。研究表明,随着入射角的增大,P波作用引起的水平位移与S波作用引起的垂直位移通常会增大,地震动轨迹构成的轮廓面积也会随之增大,而地震动的持续时间总体减小。

关键词: 地震波; 入射角; 场地反应; 地震动特性

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2019)02-0248-08

Characteristics of earthquake ground motion influenced by seismic incident angle

HUA Kai¹, FAN Liuming^{1,2}, CHE Junpeng¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: It is generally assumed that seismic waves from bedrock propagate vertically upwards when site seismic response is calculated. However, it is the fact that the seismic waves propagate obliquely upward at a certain angle and that the characteristics of earthquake ground motion are influenced by seismic incident angle, which is proved by more and more evidence. The site model of single layer site is taken as an example in order to discuss the relationship between incident angles of seismic wave and characteristics of earthquake ground motion, ground surface and bedrock interface of which are assumed to be infinite horizontal planes. According to the principle of seismic wave propagation, the seismic rays reaching the same point of the ground surface can be determined, seismic waves of which can be also calculated. Making use of superposition principle, the ground motion time history can be obtained. The method is used to calculate the theoretical solution of displacement time history of site seismic response under P wave and the S wave of oblique incidence. The correctness of the theoretical solution is verified by a comparative analysis. The magnitude, duration, trajectory characteristics of the ground motion and its relationship with the incident angle of the seismic wave are studied by applying the method. The horizontal displacement caused by incident P wave and the vertical displacement caused by incident S wave and the contour area are formed by the ground motion trajectory generally increase with the increase of the incident angle. Conversely, the duration of the ground motion decreases.

收稿日期: 2018-09-11

基金项目: 陕西省重点实验室计划资助项目(17JS090)

作者简介: 华凯,男,硕士生,研究方向为地震行波效应。E-mail:1754289309@qq.com

通讯作者: 范留明,男,博士,教授,研究方向为地震行波效应。E-mail:liuming_fan@163.com

Key words: seismic wave; incident angle; site seismic response; characteristics of earthquake ground motion

在场地地震反应研究中,通常假定场地地层是水平无限大成层介质,将入射地震波简化为从基岩垂直向上传播的体波。事实上,越来越多的研究表明,地震波并非以垂直方式透过基岩入射至近地表,而是以斜入射的方式透过基岩入射至自由表面。特别是对于浅源地震,将地震波入射视为垂直入射与实际不符^[1]。按照所研究对象的不同,大致可将地震波斜入射作用下的动力反应问题分为两大类^[2],一类是工程场地或复杂地形的地震反应问题^[3-6],另一类是大型建(构)筑物的地震响应问题^[7-10]。无论哪一类问题,地震波的入射角都成为了研究场地地震反应一个不得不考虑的问题。这个问题本质上是一个二维空间问题,地震波垂直入射实际上是地震波斜入射入射角等于 0° 的一个特殊情况。二维场地反应分析方法主要分为频域和时域两种方法。其中传递矩阵法和刚度矩阵法是频域分析法中典型的两种方法。如果考虑土体本构关系的非线性行为时,就需要使用时域数值分析方法。非线性方法虽然更接近实际,但因其参数选择较为困难,工程应用并不是十分广泛。本文基于以上两种方法存在的问题,提出射线传播理论的场地反应分析方法,该方法原理清晰、计算简捷、适用性强。从研究现状看^[11-17],其他学者采用不同的方法对斜入射地震波作用下的地表响应或地表建筑响应进行了相应研究,研究成果均表明地震波斜入射时地表响应比垂直入射地表响应有所增强。但对于地震动其他特性的研究相对较少。为此,本文以均匀场地为例,在推求得到场地反应理论解的基础上,详细地研究了地

震波入射角对地震动幅值大小、持续时间、运动轨迹的影响。

1 斜入射波作用下的场地响应

斜入射地震波作用下的场地振动与垂直入射情况有很大不同,从动力学角度而言,前者较后者复杂得多。为了能够找到一种精确计算场地反应的模型,下面以单层均匀场地为例,假定基岩面为无限大水平面,推求其在斜入射地震波作用下场地反应的理论解。在推导过程中,把场地地层看作为均匀弹性介质,与基岩共同构成双层弹性介质模型;把来自基岩的地震波看作为从无限远处发射的平面波,把沿着不同传播路径到达地面同一点处地震波按照到达时间先后进行叠加运算,形成地震时程,则此地震时程就是斜入射地震波作用下场地振动的理论解。为了解决这一问题,首先应该清楚地地震波是如何在场地中传播的。

1.1 地震波的传播路径

按照地震学原理,当地震波传播至弹性界面时,不仅发生反射现象,而且产生波型转换,各类体波的振幅关系由 Zoeppritz 方程确定。因此,无论是哪一种类型的入射波,场地中必然同时存在 P 波(纵波)和 S 波(横波)两种体波,其传播路径遵从 Snell 定律,据此可以得到 P 波倾斜入射情况下场地地震波的传播路径(见图 1),采用同样的方法,可以得到 S 波倾斜入射情况下场地地震波的传播路径。不过,应该特别强调的是,本文所指的 S 波是 SV 波,而不是 SH 波。

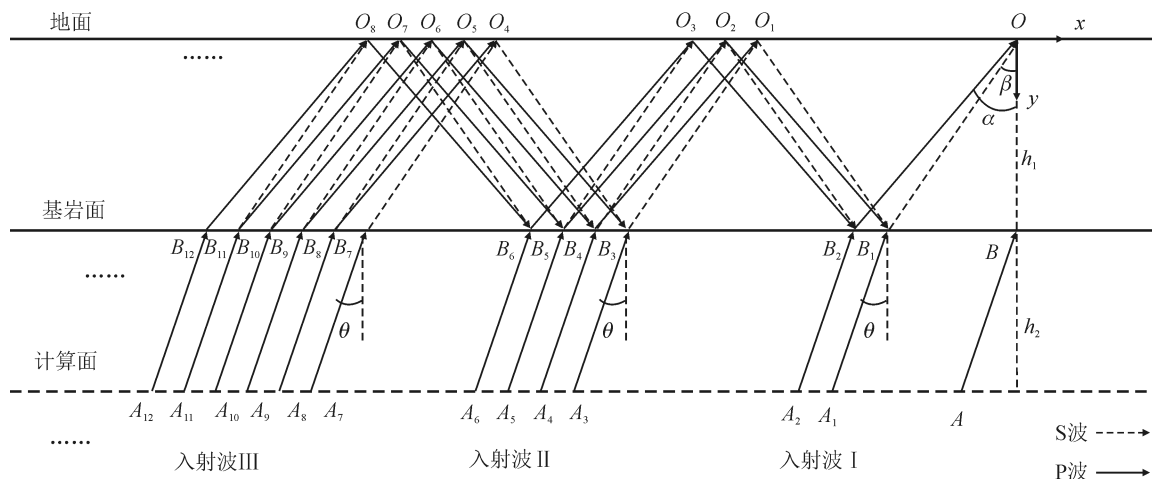


图 1 地震波在单层场地中的传播

Fig. 1 Seismic wave propagation in single layer

由图 1 可见,基岩面(场地地层与基岩的接触面)以及地面都是弹性波阻抗界面,地震波在此处将发生波型转换现象(因基岩中的转换波与计算无关,故未在图上表示出来)。图中,实线表示 P 波,点划线表示 S 波,箭头表示传播方向,地震学中称之为地震射线。为了叙述方便,将向上传播的地震波称为上行波,例如, $A_1B_1, A_2B_2, B_1O, B_2O, \dots$, 这些射线都是向地面方向传播的上行波; $O_1B_1, O_2B_1, O_2B_2, \dots$, 则是向基岩方向传播的下行波。研究发现,地震波在层中的传播具有如下特点。

1) 到达地面观测点 O 的地震波有两种传播路径。其一是入射波透过基岩面后直接到达地面,这些路径仅有 A_1B_1O 和 A_2B_2O 两条,其地震射线均是上行波。其二是入射波透过基岩面后,经过地面和基岩面反射之后到达地面,这种路径有无限多条,例如, $A_3B_3O_1B_1O, A_6B_6O_3B_2O, A_9B_9O_6B_5O_3B_2O$, 其地震射线既有上行波,又有下行波。

2) 到达地面观测点 O 的射线与地面或基岩面的交点数量分布有明显规律性,从右向左,地震射线与地面的交点数量依次分别为 3, 5, 7, \dots , 与基岩面的交点数量依次分别为 2, 4, 6, \dots 。

3) 在场地地层中,同类型的上(下)行波射线彼此平行。由于平面波只有一个入射方向,假定地面与基岩面水平,则按照 Snell 定律,无论 P 波或 S 波,上行波射线互相平行,下行波射线也互相平行。

4) 在场地地层中,同类型波射线长度相等。由 2) 可知,同类型的上行波或下行波射线与垂直界面方向夹角相等,而场地地层厚度不变,因此根据几何学原理可知,其射线长度必然相等。

1.2 地震波的到达时间

地震波的到达时间是指来自基岩的入射波到达地面某观测点的时间,由传播路径所决定,包括地震波在每条路径上的传播时间和地震波斜入射造成的延迟时间两部分。下面以 A_1B_1O 和 A_2B_2O 路径为例,说明其计算过程。

1) 传播时间

地震波沿 A_1B_1O 路径的传播时间 t_s^{11} 是指从点 A_1 到 O (见图 1)所需要的时间,计算式为:

$$t_s^{11} = \frac{h_1}{v_{s1} \cos \beta} + \frac{h_2}{vp_2 \cos \theta} \quad (1)$$

式中: h_1 是场地地层厚度, h_2 是假定计算面距离基岩面的距离, v_{s1} 是场地地层的横波速度, vp_2 是基岩的纵波速度, θ 是来自基岩的地震波的入射角, β 是场地地层中横波传播方向与垂线的夹角。

同样地,可得到地震波沿 A_2B_2O 路径的传播时

间 t_p^{11} :

$$t_p^{11} = \frac{h_1}{vp_1 \cos \alpha} + \frac{h_2}{vp_2 \cos \theta} \quad (2)$$

式中: vp_1 是场地地层的纵波速度, α 是场地地层中横波传播方向与垂线的夹角(见图 1)。

2) 延迟时间

正如斜射阳光以不同时间达到地面情况一样,倾斜入射地震波到达基岩面的时间也因其位置不同而不同,由此造成的时差称为延迟时间。由于假定震源位于无限远处,不能确定地震波到达基岩面的绝对时间,因此计算中采用相对延迟时间。

假定图 1 中地震波到达 A 点的时间为起算时间(零点时间),地震波到达 A_1 点的时间 t_s^{12} 以及到达 A_2 点的时间 t_p^{12} 分别为:

$$t_s^{12} = -\frac{h_1 \tan \beta \sin \theta}{vp_2} \quad (3)$$

$$t_p^{12} = -\frac{h_1 \tan \alpha \sin \theta}{vp_2} \quad (4)$$

式(3)~(4)表明,地震波到达 A_1 点、 A_2 点比到达 A 点分别提前 t_s^{12} 、 t_p^{12} , 其负号表示提前到达。

据 Snell 定律,有:

$$\frac{\sin \theta}{vp_2} = \frac{\sin \alpha}{vp_1} = \frac{\sin \beta}{vs_1} = p \quad (5)$$

式中: p 是射线参数。

将式(5)分别代入式(3)~(4),可得:

$$t_s^{12} = -\frac{h_1 \sin^2 \beta}{vs_1 \cos \beta} \quad (6)$$

$$t_p^{12} = -\frac{h_1 \sin^2 \alpha}{vp_1 \cos \alpha} \quad (7)$$

3) 到达时间

地震波到达地面 O 点的时间等于传播时间与延迟时间之和,据式(3)~(4)及式(6)~(7)可得:

$$t_s^1 = t_s^{11} + t_s^{12} = \frac{h_1 \cos \beta}{vs_1} + \frac{h_2}{vp_2 \cos \theta} \quad (8)$$

$$t_p^1 = t_p^{11} + t_p^{12} = \frac{h_1 \cos \alpha}{vp_1} + \frac{h_2}{vp_2 \cos \theta} \quad (9)$$

式中: t_s^1 、 t_p^1 分别是地震波沿 A_1B_1O 、 A_2B_2O 路径的到达时间。

为了方便表达,定义:

$$t_s = \frac{h_1 \cos \beta}{vs_1} \quad (10)$$

$$t_p = \frac{h_1 \cos \alpha}{vp_1} \quad (11)$$

$$t_0 = \frac{h_2}{vp_2 \cos \theta} \quad (12)$$

综合式(8)~(12),可得到地震波到达 O 点的时间表达式:

$$t_s^1 = t_0 + t_s \quad (13)$$

$$t_p^1 = t_0 + t_p \quad (14)$$

采用上述方法,以此类推可得到地震波沿各条路径的到达时间 $t_s^i, t_p^i (i=1,2,\dots,n)$ 。其中, t_s^i 是最终以 S 波到达 O 点的第 i 路径所对应的到达时间, t_p^i 则是最终以 P 波到达 O 点的第 i 路径所对应的到达时间。两者区别在于,前者的传播路径要经过 B_1O ,后者则需经过 B_2O (见图 1)。

表 1、表 2 列出了 $i = 1,2,\dots,10$ 情况下地震波的传播路径及其达到时间 t_s^i, t_p^i 。

表 1 传播路径及达到时间(S波)

Tab.1 Seismic ray and arrival time (S wave)

序号 i	传播路径	到达时间 t_s^i
1	A_1B_1O	$t_0 + t_s$
2	$A_3B_3O_1B_1O$	$t_0 + 3t_s$
3	$A_4B_4O_1B_1O$	$t_0 + 2t_s + t_p$
4	$A_4B_4O_2B_1O$	$t_0 + 2t_s + t_p$
5	$A_5B_5O_2B_1O$	$t_0 + t_s + 2t_p$
6	$A_7B_7O_4B_3O_1B_1O$	$t_0 + 5t_s$
7	$A_8B_8O_4B_3O_1B_1O$	$t_0 + 4t_s + t_p$
8	$A_8B_8O_5B_3O_1B_1O$	$t_0 + 4t_s + t_p$
9	$A_9B_9O_5B_3O_1B_1O$	$t_0 + 3t_s + 2t_p$
10	$A_8B_8O_5B_4O_1B_1O$	$t_0 + 4t_s + t_p$

表 2 传播路径及达到时间(P波)

Tab.2 Seismic ray and arrival time (P wave)

序号 i	传播路径	到达时间 t_p^i
1	A_2B_2O	$t_0 + t_p$
2	$A_4B_4O_2B_2O$	$t_0 + 2t_s + t_p$
3	$A_5B_5O_2B_2O$	$t_0 + t_s + 2t_p$
4	$A_5B_5O_3B_2O$	$t_0 + t_s + 2t_p$
5	$A_6B_6O_3B_2O$	$t_0 + 3t_p$
6	$A_8B_8O_5B_4O_2B_2O$	$t_0 + 4t_s + t_p$
7	$A_9B_9O_5B_4O_2B_2O$	$t_0 + 3t_s + 2t_p$
8	$A_9B_9O_6B_4O_2B_2O$	$t_0 + 3t_s + 2t_p$
9	$A_{10}B_{10}O_6B_4O_2B_2O$	$t_0 + 2t_s + 3t_p$
10	$A_9B_9O_6B_5O_2B_2O$	$t_0 + 3t_s + 2t_p$

1.3 地震场地响应的理论解

1) 传播路径的响应函数

见图 1,假定来自基岩的地震波函数为 $f(t)$,则按照某一路径到达地面 O 点的地震波函数称之为该传播路径的地震波响应函数(简称响应函数),其表达式为:

$$u_s^i(t) = A_s^i f(t - t_s^i) \quad (15)$$

$$u_p^i(t) = A_p^i f(t - t_p^i) \quad (16)$$

式中: u_s^i 是第 i 条传播路径的 S 波响应函数, A_s^i 是其振幅(简称响应振幅); u_p^i 是第 i 条传播路径的 P 波响应函数, A_p^i 是其振幅(简称响应振幅)。 t_s^i, t_p^i 是到达时间,其涵义与 1.2 部分内容相同。

A_s^i 与 A_p^i 由一个透射系数与若干个反射系数的乘积所决定,反射系数的个数等于地震波的反射次数(最后一次地面反射除外)。表 3~4 中分别列出了 $i = 1,2,\dots,10$ 情况下 A_s^i 与 A_p^i 的响应振幅。其中, T_{pp} 与 T_{ps} 分别是 P 波从基岩到场地地层的透射系数; $R_{pp1}, R_{ps1}, R_{sp1}, R_{ss1}$ 是地面对地震波的反射系数; $R_{pp2}, R_{ps2}, R_{sp2}, R_{ss2}$ 是基岩面对地震波的反射系数。这 2 个透射系数和 8 个反射系数的值均由 Zoeppritz 方程确定。因篇幅所限,不在此列出,详见文献[13]。

表 3 传播路径及响应振幅(S波)

Tab.3 Seismic ray and source response (S wave)

序号 i	传播路径	响应振幅 A_s^i
1	A_1B_1O	T_{ps}
2	$A_3B_3O_1B_1O$	$T_{ps}R_{ss1}R_{ss2}$
3	$A_4B_4O_1B_1O$	$T_{pp}R_{ps1}R_{ss2}$
4	$A_4B_4O_2B_1O$	$T_{ps}R_{sp1}R_{ps2}$
5	$A_5B_5O_2B_1O$	$T_{pp}R_{pp1}R_{ps2}$
6	$A_7B_7O_4B_3O_1B_1O$	$T_{ps}R_{ss1}R_{ss2}R_{ss1}R_{ss2}$
7	$A_8B_8O_4B_3O_1B_1O$	$T_{pp}R_{ps1}R_{ss2}R_{ss1}R_{ss2}$
8	$A_8B_8O_5B_3O_1B_1O$	$T_{ps}R_{sp1}R_{ps2}R_{ss1}R_{ss2}$
9	$A_9B_9O_5B_3O_1B_1O$	$T_{pp}R_{pp1}R_{ps2}R_{ss1}R_{ss2}$
10	$A_8B_8O_5B_4O_1B_1O$	$T_{ps}R_{ss1}R_{sp2}R_{ps1}R_{ss2}$

表 4 传播路径及响应振幅(P波)

Tab.4 Seismic ray source response (P wave)

序号 i	传播路径	响应振幅 A_p^i
1	A_2B_2O	T_{pp}
2	$A_4B_4O_2B_2O$	$T_{ps}R_{ss1}R_{sp2}$
3	$A_5B_5O_2B_2O$	$T_{pp}R_{ps1}R_{sp2}$
4	$A_5B_5O_3B_2O$	$T_{ps}R_{sp1}R_{pp2}$
5	$A_6B_6O_3B_2O$	$T_{pp}R_{pp1}R_{pp2}$
6	$A_8B_8O_5B_4O_2B_2O$	$T_{ps}R_{ss1}R_{ss2}R_{ss1}R_{sp2}$
7	$A_9B_9O_5B_4O_2B_2O$	$T_{pp}R_{ps1}R_{ss2}R_{ss1}R_{sp2}$
8	$A_9B_9O_6B_4O_2B_2O$	$T_{ps}R_{sp1}R_{ps2}R_{ss1}R_{sp2}$
9	$A_{10}B_{10}O_6B_4O_2B_2O$	$T_{pp}R_{pp1}R_{ps2}R_{ss1}R_{sp2}$
10	$A_9B_9O_6B_5O_2B_2O$	$T_{ps}R_{ss1}R_{sp2}R_{ps1}R_{sp2}$

在获取这些系数后,就可以计算各条传播路径响应函数的振幅。例如 $i = 3$ 时,S 波响应函数所对应的传播路径是 $A_4 B_4 O_1 B_1 O$,表明入射 P 波经过基岩面,形成同类型 P 波,透射系数为 T_{pp} ;经过地面反射,形成转换 S 波,反射系数为 R_{ps1} ;再经过基岩面反射,最终形成 S 波后抵达地面,反射系数为 R_{ss2} 。因此,响应振幅就等于于此三个系数的乘积 $T_{pp} R_{ps1} R_{ss2}$ 。以此类推,可以计算得到任意一条路径的响应振幅。

2) 场地响应的理论解

沿着传播路径到达地面的地震波有 S 波和 P 波两种。无论哪一类地震波,都存在不同路径相同到达时间问题,而且传播路径越长,同时到达的情况越多。如表 1 与表 2 中, $i = 3$ 与 $i = 4$ 的到达时间相同, t_s^i, t_p^i 分别为 $t_0 + 2t_s + t_p$ 与 $t_0 + t_s + 2t_p$ 。类似情况还有 $i = 7, 8, 10$ 的情况, t_s^i, t_p^i 分别为 $t_0 + 4t_s + t_p$ 与 $t_0 + 3t_s + 2t_p$ 。因此,需要对到达地面的地震波按照时间进行叠加处理,得到地面 S 波时程 u_s 和 P 波时程 u_p ,其表达式为:

$$u_s(t) = \sum_{i=1}^n u_s^i(t) = \sum_{i=1}^n A_s^i f(t - t_s^i) \quad (17)$$

$$u_p(t) = \sum_{i=1}^n u_p^i(t) = \sum_{i=1}^n A_p^i f(t - t_p^i) \quad (18)$$

按照矢量合成方法,可将 u_s, u_p 表示成为水平地震动时程 u_x 和垂直地震动时程 u_y :

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s \\ u_p \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中:

$$\begin{cases} R_{11} = (1 - R_{pp1}) \cos\alpha + R_{ps1} \sin\beta \\ R_{12} = -R_{sp1} \cos\alpha + (1 + R_{ss1}) R_{p1} \sin\beta \\ R_{21} = (1 + R_{pp1}) \sin\alpha + R_{ps1} \cos\beta \\ R_{22} = R_{sp1} \sin\alpha - (1 - R_{ss1}) R_{p1} \cos\beta \end{cases} \quad (20)$$

虽然上述推求计算场地响应的理论解的方法是针对倾斜入射 P 波提出来的,但是同样适用于倾斜入射 S 波。所不同的是,在应用上述方法计算倾斜入射 S 波时,为了保证入射 S 波转换的 P 波不发生折射现象,入射角 θ 须满足:

$$\sin\theta < \frac{v_{s2}}{v_{p1}} \quad (21)$$

2 模型算例

2.1 地震场地模型

为了验证上述斜入射场地响应理论解法是否正确,选取文献[16]模型进行验算,以便对比分析。此

模型场地土厚度 50 m,密度 $1\,000\text{ kg/m}^3$,P 波速度 346 m/s,S 波速度 200 m/s;下卧层为半无限空间基岩,密度 $1\,500\text{ kg/m}^3$,P 波速度 866 m/s,S 波速度 500 m/s。P 波入射角 60° ,S 波入射角 30° ,地震入射波的计算面位于地下 100 m。

2.2 计算结果

采用上述方法编写了计算机程序,并对模型进行了计算。震源波函数采用位移形式,位移时程见图 2。时间间隔取 0.001 s,地震路径 n 取 65 536 条,计算结果见图 3 和图 4,与文献[16]的理论解非常接近。而且通过对比特征点数值,发现两者误差不得超过 5%,表明此理论算法是正确可靠的。

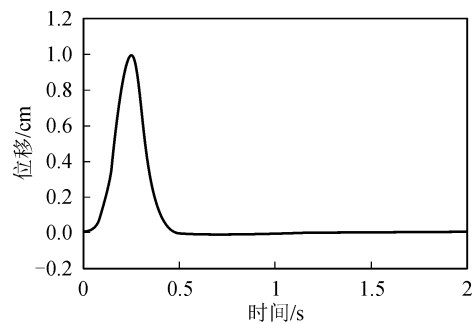
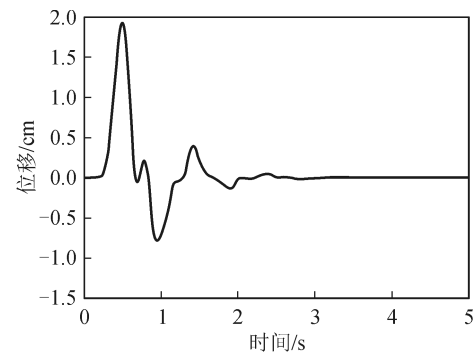
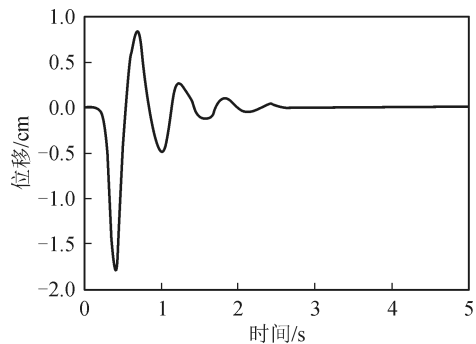


图 2 入射波位移时程

Fig. 2 Time history of displacement of incident wave



(a) 水平位移



(b) 垂直位移

图 3 P 波 60° 角入射时地面位移时程

Fig. 3 Time history of displacement on ground surface under P wave of 60° angle incidence

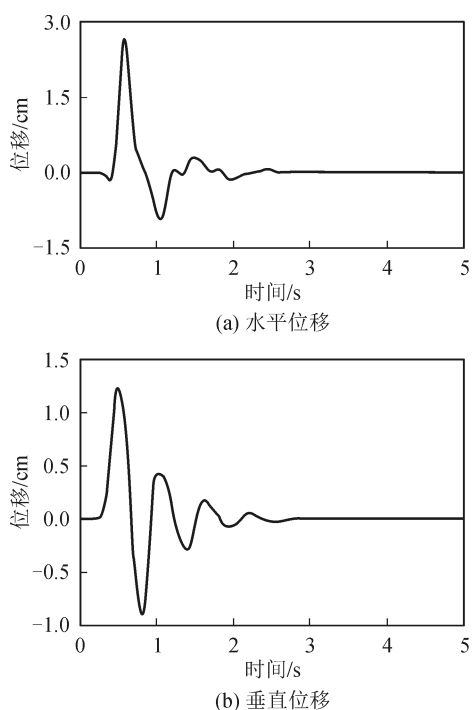


图4 S波30°角入射时地面位移时程
Fig. 4 Time history of displacement on ground surface under S wave of 30° angle incidence

3 地震动特性

3.1 地震动的幅值大小

当来自基岩的地震波进入场地地层后,在地面与基岩面之间多次往复传播,使地面振动持时较入射波持时长。由于地面与基岩面的反射系数的绝对值都不大于1,所以地面位移呈现随时间逐渐减少趋势。但是,与垂直入射情况不同的是,无论倾斜入射波是P波还是S波,都会同时形成水平方向和垂直方向的振动(见图3和图4),其大小与入射角有密切关系。

表5分别列出了P波与S波入射角与最大位移的关系。由于S波大于临界角(35.26°)时会出现折射波,所以入射角大于40°的最大位移值未在表中列出。

表5 最大位移(绝对值)与入射角的关系
Tab. 5 Maximum displacement and incident angle

入射角/ (°)	最大位移(入射P波)		最大位移(入射S波)	
	水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向
0	0	3.158	3.158	0
10	0.496	3.111	3.095	0.493
20	0.959	2.972	2.912	0.933
30	1.362	2.755	2.660	1.247
40	1.679	2.476		
50	1.881	2.155		
60	1.940	1.803		
70	1.778	1.414		

由表5可见,除70°入射角外,总体而言,最大水平位

移(绝对值)随P波入射角的增大而增大,随S波入射角的增大而减小;最大垂直位移(绝对值)则相反,随P波入射角的增大而减小,随S波入射角的增大而增大。

3.2 地震动的持续时间

位移随时间的变化不仅与地震波型有关,而且还与入射角有密切关系。为此,采用对比地震动持时(持续时间的简称,下同)的方法,研究位移随时间的变化特性。

地震动持时的定义种类较多,本文采用位移相对幅值定义持时^[15],其具体定义是位移绝对值第一次和最后一次达到或超过最大位移绝对值的1%所经历的时间,这一定义方式能够较好地反映位移随时间衰减的快慢程度。

表6分别列出了P波与S波入射角与地震动持时的关系,其中S波大于临界角的持时未在表中列出。表6中虽然存在个别异常情况,例如P波入射角等于20°时的水平及垂直方向的持时、50°时垂直方向的持时。但是,总体上地震动持时随入射角的增大而减小。出现个别异常情况,可能与相对幅值的定义方式有关,由于这种定义方式具有很大的主观性,不能完全涵盖地震动情况。

表6 地震动持时与入射角的关系

Tab. 6 Earthquake duration and incident angle

入射角/ (°)	持时(入射P波)		持时(入射S波)	
	水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向
0	3.875	2.320	3.925	3.730
10	3.865	2.305	3.820	3.225
20	3.280	2.370	3.225	2.295
30	3.820	2.365	2.235	2.395
40	3.675	2.345		
50	3.155	2.710		
60	2.625	2.315		
70	1.740	2.285		

3.3 地震动的运动状态

当地震波以倾斜方式入射至场地地层后,由于地层界面及地面对地震波类型转换作用,使场地内同时存在P波与S波两种不同类型的振动,S波所引起的地面振动状态与单一的体波振动有显著差异,下面借用相图分析法进行研究。

相图是相轨线图的简称,反映了系统状态变量随时间变化的动态特性。图5是S波分别以10°,20°和30°入射时引起的地面振动的相图,其中横坐标x为水平位移,纵坐标y为相同时刻的垂直位移,轨线上任一点表示在xoy平面上的运动状态,其箭头表示振动状态随时间变化的先后顺序。

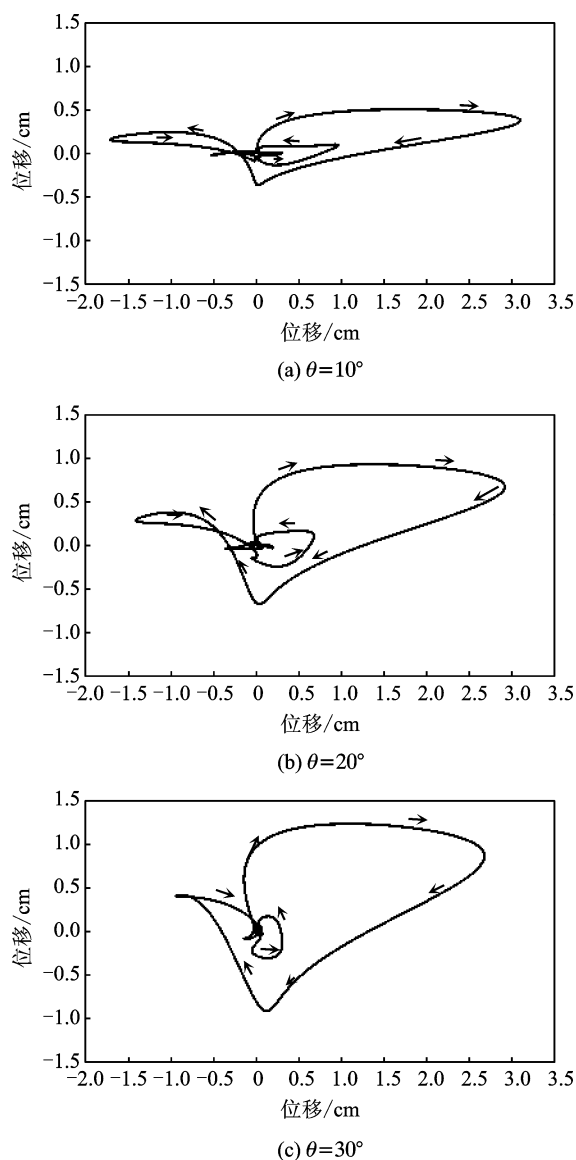


图5 S波入射时地面振动轨迹
Fig.5 Movement trajectory on ground surface under S wave of incidence

由图5可见,地面振动轨迹为复杂旋转曲线,与Rayleigh面波的某些特征有一定程度类似,总体上表现为水平正向位移($x > 0$)偏大的旋转运动,相轨线图的形状及其构成的轮廓受人射角影响显著。

1) 当 $\theta = 10^\circ$ 时,相轨线图呈扁平状,其中在 $x > 0$ 一侧的轨迹轮廓呈“辣椒形”,最大水平位移与最大垂直位移之比为6.3(见图5(a)),表明在小入射角情况下,转换P波能量很小,垂直方向振动很弱,地面振动以水平振动为主,旋转运动不明显。

2) 当 $\theta = 20^\circ$ 时,相轨线图在水平方向收缩变短,而在垂直方向拉长变宽。其中,在 $x > 0$ 一侧的轨迹轮廓接近“尖刀形”,最大水平位移与最大垂直位移之比为3.1(见图5(b)),表明随着入射角增大,转换P波能量增强,引起的垂直方向振动随

之增大。地面振动仍然以水平振动为主,但是旋转运动特征增强。

3) 当 $\theta = 30^\circ$ 时,转换P波能量继续增强,引起的垂直方向振动进一步增大,相轨线图的轮廓面积增大明显,最大水平位移与最大垂直位移之比为2.1(见图5(c))。表明当入射角接近临界角时,虽然地面振动表现为水平偏强、垂直偏弱的特征,但是旋转运动特征却非常显著。

4 结论

斜入射地震波作用下的场地响应与垂直入射情况不同,前者的动力学问题及动力特性较后者更为复杂。在斜入射地震波作用下,地震入射角与地震动特性关系密切,对地震动的幅值大小、持时、运动状态有显著影响,是有别于垂直入射作用下地震响应的一个重要参数。研究发现,随着入射角的增大,场地地震动特性有如下变化。

1) 入射P波引起的水平位移与入射S波引起的垂直位移通常会增大。

2) 地震动持时变短,尾振(接近于地震结束部分的振动,像小尾巴一样)减小。

3) 水平与垂直方向的振动幅值越来越接近,地震相轨线构成的轮廓面积增大,旋转运动特征愈加明显。

上述结论是入射角小于临界角情况下得到的。当入射角大于临界角时,将出现地震波沿场地地面或地层界面滑行现象。在这种情况下,场地的振动特性与入射角的关系更为复杂,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 王笃国, 赵成刚. 地震波斜入射时二维成层介质自由场求解的等效线性化方法[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3): 554-561.
WANG Duguo, ZHAO Chenggang. Two-dimensional equivalent linear seismic analysis of free field in layered half-space due to oblique incidence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(3): 554-561.
- [2] 范留明, 赵钦, 刘云贺. 倾斜入射地震波作用下成层场地动力反应的界面子波算法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 601-607.
FAN Liuming, ZHAO Qin, LIU Yunhe. Interfacial wavelet algorithm for dynamic response of horizontal layered site due to inclined seismic waves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(4): 601-607.
- [3] HEYMSFIELD E. Two-dimensional scattering of SH waves in a soil layer underlain with a sloping bedrock [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000,

- 19(7): 489-500.
- [4] 李山有, 王学良, 周正华. 地震波斜入射情形下水平成层半空间自由场的时域计算[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(3): 372-376.
LI Shanyou, WANG Xueliang, ZHOU Zhenghua. The time-step numerical simulation of free field motion of layered half-space for inclined seismic wave[J]. Journal of Jilin University (Earth Science), 2003, 33(3): 372-376.
- [5] 尤红兵, 赵凤新, 荣棉水. 地震波斜入射时水平层状场地的非线性地震反应[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 234-240.
YOU Hongbing, ZHAO Fengxin, RONG Mianshui. Nonlinear seismic response of horizontal layered site due to inclined wave[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 234-240.
- [6] 张建经, 朱传彬, 张明, 等. 地震波入射角对盆地地震反应影响的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊1): 2720-2727.
ZHANG Jianjing, ZHU Chuanbin, ZHANG Ming, et al. Numerical analysis for effect incident angle of seismic wave on seismic response of basin [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 2720-2727.
- [7] 焦红波, 王慧. 地震波入射角对输水隧洞地震响应的影响[J]. 人民黄河, 2012, 34(8): 144-146.
JIAO Hongbo, WANG Hui. Influence of seismic wave incident angle to the seismic response of water diversion tunnel[J]. Yellow River, 2012, 34(8): 144-146.
- [8] 宋波, 盛朝晖, 徐明磊, 等. 地震波输入角度对大型脱硫塔结构动力影响的实验研究[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(12): 1648-1654.
SONG Bo, SHENG Zhaohui, XU Minglei, et al. Experimental study on the dynamic effect of a desulfurization tower under different seismic wave input angles[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(12): 1648-1654.
- [9] 李晓蕾, 卢俊龙. 兴教寺玄奘塔频域地震响应分析[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(4): 422-427.
LI Xiaolei, LU Junlong. Response analysis of Xuanzang Pagodain in Xingjiao Temple affected by earthquake in frequency domain [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(4): 422-427.
- [10] 李晓娜, 王嘉威, 李同春, 等. 强震作用下高拱坝抗震安全分析[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(3): 332-337.
LI Xiaona, WANG Jiawei, LI Tongchun, et al. Seismic safety analysis of high arch dam under strong earthquake[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34(3): 332-337.
- [11] 廖河山, 陈清军, 徐植信. SH波倾斜入射时土层的非线性响应分析[J]. 同济大学学报, 1994, 22(4): 517-522.
LIAO Heshan, CHEN Qingjun, XU Zhixin. Nonlinear response of layered soils to obliquely incident SH waves[J]. Journal of Tongji University, 1994, 22(4): 517-522.
- [12] 危艳. 斜入射作用下地震场地动力反应分析[J]. 福建建筑, 2017, (8): 84-88.
WEI Yan. Dynamic response analysis of seismic site under oblique incidence [J]. Fujian Architecture & Construction, 2017, (8): 84-88.
- [13] 杜修力, 陈维, 李亮, 等. 斜入射条件下地下结构时域地震反应分析初探[J]. 震灾防御技术, 2007, 2(3): 290-296.
DU Xiuli, CHEN Wei, LI Liang, et al. Preliminary study of time-domain seismic response for underground structures to obliquely incident seismic waves [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2007, 2(3): 290-296.
- [14] 尤红兵, 赵凤新, 荣棉水. 地震波斜入射时水平层状场地的非线性地震反应[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 234-240.
YOU Hongbing, ZHAO Fengxin, RONG Mianshui. Nonlinear seismic response of horizontal layered site due to inclined wave[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 234-240.
- [15] 范留明, 李宁. 软弱夹层的透射模型及其隔震特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2456-2462.
FAN Liuming, LI Ning. Transmission model of weak intercalation and its vibration isolation properties[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2456-2462.
- [16] 赵密, 杜修力, 刘晶波, 等. P-SV波斜入射时成层半空间自由场的时域算法[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 84-90.
ZHAO Mi, DU Xiuli, LIU Jingbo, et al. Time-domain method for free field in layered half space under P-SV waves of oblique incidence[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 84-90.
- [17] 谢礼立, 张晓志. 地震动记录持时与工程持时[J]. 地震工程与工程振动, 1988, 8(1): 31-38.
XIE Lili, ZHANG Xiaozhi. Accelerogram-based duration and engineering duration of ground motion [J]. China Earthquake and Engineering Vibration, 1988, 8(1): 31-38.

(责任编辑 王绪迪)