

TI 层状场地中单桩对入射 SH 波的响应分析*

薛松涛^{1,2} 周 锋¹ 陈 镭¹ 王远功¹

(¹同济大学结构工程与防灾研究所 上海 200092) (²日本近畿大学理工学部 大阪)

摘要 采用横观各向同性(以下简称 TI)层状弹性体模型模拟半空间之上的层状场地,用梁单元模拟桩的运动。结合单桩的动力阻抗函数和 TI 自由场地在入射 SH 波下的响应,建立了 TI 层状场地中单桩对入射 SH 波响应的计算模型。研究了入射 SH 波作用下单桩沿桩身的剪力和弯矩分布,表明场地中单桩在地震作用下也可能破坏,应当引起重视。

关键词 土力学,横观各向同性,层状场地,桩,SH 波

分类号 TU 435

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2003)12-2067-04

RESPONSE OF SINGLE PILE EMBEDDED IN TRANSVERSELY ISOTROPIC STRATIFIED STRATA TO INCIDENT SH WAVES

Xue Songtao^{1,2}, Zhou Feng¹, Chen Rong¹, Wang Yuangong¹

(¹Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092 China)

(²School of Science and Engineering, Kinki University, Japan)

Abstract A model of transversely isotropic stratified strata is used to simulate the soil layers. At the bottom of the strata, dampers are used to absorb the vibration energy. A pile is embedded in this strata. The method for calculation of the dynamic impedance of single pile is developed. Combining the impedance and the response of the strata to incident SH waves, the response of single pile is obtained. The numerical examples indicate that the maximal moment of pile may cause the pile to fail, and more attention should be paid to the phenomena.

Key words soil mechanics, transversely isotropic, stratified strata, pile, SH waves

1 前 言

近些年来各国对桩的动力特性进行了广泛的研究,但大多数研究局限于桩顶受荷载作用的振动情况,关于在入射地震波作用下桩的动力特性研究比较少。文[1,2]分别采用有限元法和 Winkler 模型分析了刚性基岩条件下端承单桩对竖向入射剪切波的响应。1995 年文[3]基于层状土介质动力 Green

函数,研究了地震波作用下弹性半空间上单一均匀土层中群桩的动力响应。综观绝大多数这类文章,均将自由场假设成水平层状各向同性弹性体或粘弹性体,这与实际情形不符,而采用横观各向同性层状模型较接近实际情形。目前,只有陈镭等少数人研究横观各向同性层状场地的地震响应^[4-6],至于该场地中桩的地震响应,更是少有人研究。基于此,作者对这个问题进行了初步研究。本文只讨论在基岩入射 SH 波时其上卧横观各向同性层状场地中单

2002 年 4 月 8 日收到初稿,2002 年 6 月 6 日收到修改稿。

* 国家杰出青年基金(59925820)资助项目。

作者 薛松涛 简介:男,39 岁,博士,1985 年毕业于同济大学工程力学系,现任教授,主要从事地震工程、振动控制和结构健康监测等方面的研究工作。

桩的响应。

2 力学模型及运动方程

横观各向同性层状场地中单桩在基岩地震波入射作用时的力学模型见图1。桩的总长为L,其截面是半径为r₀的圆形截面,场地的总土层数为N(包括半空间),底面采用阻尼边界模型^[4]。设桩底面的土层界面数为m。将桩按土层分层方法同样分单元,即将桩分为m-1个单元,m个节点。

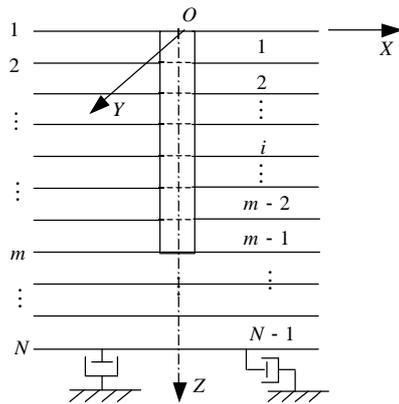


图1 力学模型
Fig.1 Mechanical model

在建立运动方程之前作如下假设：

- (1) 桩、土的变形均只限定在线弹性范围内；
- (2) 桩与土之间粘接良好,在变形时协调一致,不发生相对滑移及脱离；
- (3) 桩的断面保持不变,只考虑在X-Z平面内的平移及转动位移。计算中考虑桩的剪应力的影响；
- (4) 不考虑水平位移与竖向位移之间的耦合作用。

可以建立图2所示子结构频域内的运动方程：

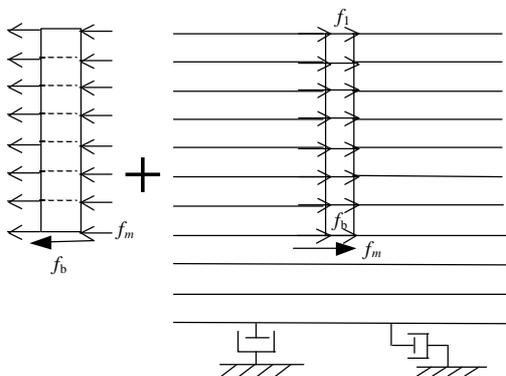


图2 子结构的划分
Fig.2 Substructure division

$$K_p^1 U_p^1 = P_p^1 - F_g^1 \tag{1}$$

式中：上标“1”表示单桩；K_p¹为桩在平面X-Z内的复刚度矩阵,该矩阵可以用引入剪切变形影响的经典平面梁单元复刚度矩阵组装而成；U_p¹为桩在平面X-Z内运动时的位移向量：

$$U_p^1 = [u_1 \quad q_{y1} \quad u_2 \quad q_{y2} \quad \dots \quad \dots \quad u_m \quad q_{ym}]^T \tag{2}$$

式中：u_i为桩第i节点沿X方向的位移；q_{yi}为桩在该节点处绕Y轴的转角。

桩上无外力作用,P_p¹=0。F_g¹为桩-土之间的相互作用力。因为仅在桩与自由场之间有相对位移时才产生相互作用力^[7],所以设自由场地的绝对位移为U_f¹,则桩与土之间的相互作用力可表示为

$$F_g^1 = K_g^1 (U_p^1 - U_f^1) \tag{3}$$

式中：K_g¹为开挖后场地在平面X-Z内的复刚度矩阵。故式(1)可改写为

$$(K_p^1 + K_g^1) U_p^1 = K_g^1 U_f^1 \tag{4}$$

解出U_p¹为

$$U_p^1 = (K_p^1 + K_g^1)^{-1} K_g^1 U_f^1 \tag{5}$$

最后可得

$$\bar{F}_p^1 = \bar{K}_p^1 U_p^1 \tag{6}$$

式中：F_p¹为桩所受外力,K_p¹为桩在平面X-Z内的刚度矩阵。

3 运动方程的求解

设_fK_g¹为自由场地的刚度矩阵,即在桩的轮廓线上受如图3的荷载作用时,自由场在该处的力-位移关系。这里的力不仅有环状水平力,还有作用在圆环上的力矩。在桩底部位置处,还有作用在圆盘上的如图4所示水平力及力矩。令_eK_g¹为开挖出的与桩同体积土桩的刚度矩阵,则开挖后场地的刚度矩阵为

$$K_g^1 = {}_f K_g^1 - {}_e K_g^1 \tag{7}$$

_fK_g¹可由环形荷载作用下的位移响应格林函数再加上底部圆盘荷载位移的影响得到,该影响可由盘状荷载作用下位移响应格林函数得到。

对于_fK_g¹的计算应当注意桩端的影响。第[2(m-1), 2(m-1)]以内的元素可以用环形荷载的公

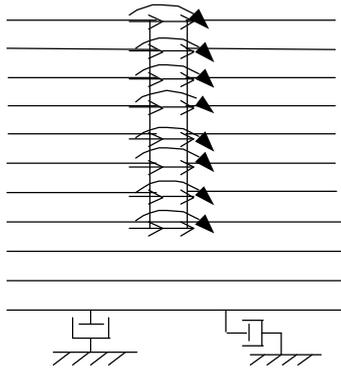


图 3 自由场中桩轮廓线上的荷载
Fig.3 Loads along pile profile in free field

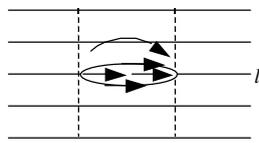


图 4 自由场中桩底圆盘上荷载
Fig.4 Loads on bottom of pile in free field

式计算，但第 $2(m-1), 2m$ 行及第 $2(m-1), 2m$ 列的元素还应加上圆盘荷载的影响。 ${}_f K_g^i$ 的详细计算参见文[5]。

桩在受入射 SH 波作用时的刚度矩阵可由平面梁单元刚度矩阵集总而成。这里的桩及置换的土桩的刚度矩阵均为复刚度矩阵，它们均包含着桩的质量矩阵，同时也包括阻尼力，只不过这里用的是滞变阻尼。

$$K_P^1 = \bar{K}_P^1(1 + 2x_p i) - \dot{u}^2 M_P^1 \quad (8a)$$

$${}_e K_g^1 = {}_e \bar{K}_g^1(1 + 2x_g i) - w^2 {}_e M_g^1 \quad (8b)$$

式中： x_p, x_g 分别为桩及场地的阻尼比； $\bar{K}_P^1, {}_e \bar{K}_g^1$ 为常规意义的刚度矩阵，对桩可用引入剪切变形影响的经典梁单元刚度矩阵：

$$\bar{K}_i^e = \frac{E_p J_y}{(1 + j_x) l_i^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l_i & -12 & 6l_i \\ 6l_i & (4 + j_x) l_i^2 & -6l_i & (2 - j_x) l_i^2 \\ -12 & -6l_i & 12 & -6l_i \\ 6l_i & (2 - j_x) l_i^2 & -6l_i & (4 + j_x) l_i^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中： E_p 为桩的弹性模量； J_y 为桩断面的关于 Y 轴的惯性矩； l_i 为单元长度； j_x 为考虑桩的剪切变形的系数，其表达式为

$$j_x = \frac{24(1 + m_i)}{A l_i^2} J_y k \quad (10)$$

式中： A 为桩的横截面积； m_i 为第 i 个桩单元的泊松比，对混凝土桩它为常数，但对土桩它随土层的不同而不同； k 为截面剪切校正因子，对圆形截面取 10/9。

${}_e K_g^1$ 为与桩同体积土桩的复刚度矩阵，其计算方法同桩，这里不再详细介绍。

$M_P^1, {}_e K_g^1$ 为桩及土桩的质量矩阵。

自由场地在 SH 波下的绝对位移 U_f^1 的求解可见文[6]，利用式(5)，(6)可分别求出桩在平面 X-Z 内运动时的位移向量 U_P^1 和桩在各层界面受到的力 F_P^1 。

4 算 例

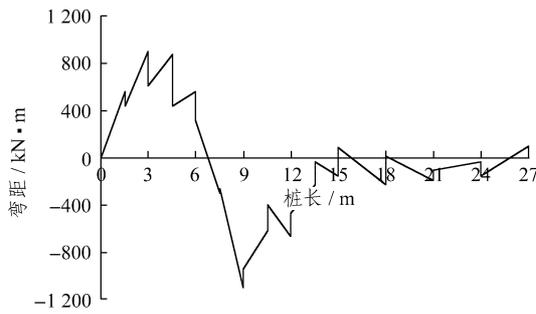
计算所选的地震记录为 ELCENTRO 波，以其作为基岩控制点的加速度，为了使该记录与上海地区的烈度相差不大，将其峰值调整为 35.0 gal。桩为常见钻孔灌注桩，直径为 0.6 m，桩长为 27 m，按照桩基的设计规程，其弹性模量取为 $0.8E_c$ ， $E_c = 3.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ，故 $E_p = 2.4 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ 。桩按土层分层共分为 14 个单元，15 个节点。前 10 层每层厚度为 1.50 m，后 4 层每层厚度取为 3.0 m。所选场地为弱横观各向同性层状场地，该场地类似于上海等地区的软土地基，其横向模量与竖向模量之比由上至下逐渐增大，最上层视为各向同性体，各参数的选取详见文[5]。在计算中未考虑场地的材料阻尼，现将计算结果介绍如下：

4.1 沿桩身弯矩分布

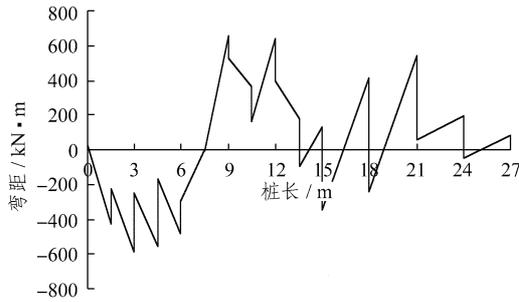
图 5(a)，5(b)，5(c)分别是在 1.2，1.5，6.3 s 时地震作用处于峰值时沿桩身弯矩分布。由于桩在每个界面上都受到弯矩作用，所以在图中桩在每个界面都有两个弯矩值。三个不同时刻的弯矩图都显示了共同的规律：最大弯矩出现在距桩头 9 m 处，即距桩头 1/3 桩长处，这些部位在地震作用下比较容易破坏；桩头弯矩为零，这是桩头自由无约束的缘故；桩底弯矩较小，这是因为桩底部相当于弹性约束，其受到周围土的弯矩，但土质较软，所以弯矩比较小。

该桩属弹性长桩，一般因弯曲破坏，所以可用以下公式计算正应力：

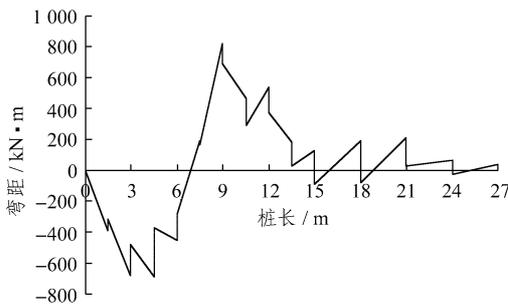
$$s_{\max} = \frac{M_{\max}}{I} \frac{R}{2} \quad (12)$$



(a) 1.2 s 时桩身变距分布



(b) 1.5 s 时桩身变距分布



(c) 6.3 s 时桩身变距分布

图 5 不同时刻沿桩身弯距分布

Fig.5 Moment along pile at different time

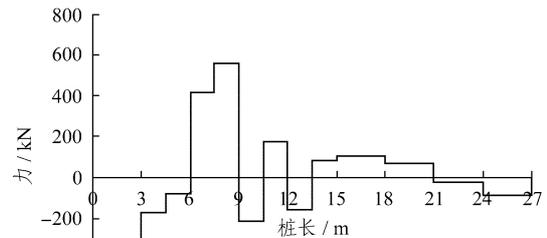
由图 5(a)所示,最大弯距发生在 1.3 s 时第 6 个节点处,即距桩头 9 m 处,最大弯距为 1 106.079 kN·m。桩的直径为 0.6 m, $I = \pi R^4/64$,代入式(12)可得最大正应力为 52.16 N/mm²。而一般桩采用的 C30 混凝土的弯曲抗压强度为 22 N/mm²,所以该处的混凝土会被压碎。

4.2 沿桩身剪力分布

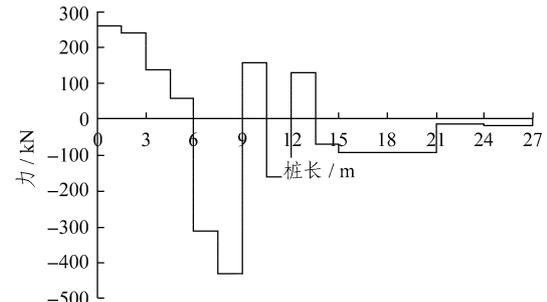
由图 6(a), 6(b)可见桩头的剪力不为零,这与桩头为自由端不符,实际上这是由数值计算的方法所导致的。由于本文所用的数值方法中土对桩的作用力是施加在节点上的,导致了桩头虽然自由但有剪力的现象。

5 结 论

TI 层状场地中单桩在入射 SH 波作用下,最大



(a) 1.3 s 时桩身剪力分布



(b) 6.3 s 时桩身剪力分布

图 6 不同时刻沿桩身剪力分布图

Fig.6 Shear along pile at different time

弯距将出现在距桩头 1/3 桩长左右处,计算表明地震作用时,该处的混凝土会发生破坏,这个现象是首次被发现。这说明即使是尚未建上部结构的桩基,受地震作用后仍有可能破坏,必须对其进行检测。可用动测诊断其有无破坏,再用静测判断其承载力是否下降。

参 考 文 献

- 1 Gazetas G. Seismic response of end-bearing single piles[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1984, 3(2): 82~93
- 2 Flores-Berrones R, Whitman R V. Seismic response of end-bearing piles[J]. Journal of Geotechnical Engineering Div., ASCE, 1982, 108(GT4): 555~569
- 3 陈清军. 层状半空间中单桩对任意入射地震波的响应[J]. 计算结构力学及应用, 1995, 12(4): 438~404
- 4 薛松涛, 陈 镨, 秦 岭等. 横观各向同性层状场地的动力边界条件[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 65~69
- 5 陈 镨. 横观各向同性层状场地的动力分析及应用[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 1999
- 6 陈 镨, 陈竹昌, 薛松涛等. 横观各向同性层状场地对入射 SH 波的响应分析[J]. 上海力学, 1998, 19(3): 213~220
- 7 Wolf John P. Dynamic Soil-Structure Interaction[M]. New York: Prentice-Hall, 1985