

文章编号: 1000-7598 (2009) 05-1504-05

水平谐振荷载作用下桥梁基桩的动力反应

蔡可键

(宁波工程学院 建工学院, 宁波 315016)

摘 要: 针对桥梁基桩在施工和运营过程中不可避免承受动力作用的问题, 在考虑桩顶承受轴向和横向静力荷载共同作用的基础上, 将激振荷载简化为水平谐振荷载作用, 并基于动力 Winkler 地基梁模型, 将桩周土由一系列分布的彼此独立的弹簧和阻尼器所代替, 建立桥梁基桩在瞬态荷载激励下的横向振动方程, 求解基桩横向非线性动力学响应。在考虑桩-土接触和透射边界的基础上, 引入有限单元方法建立基桩的二维非线性动力有限元模型, 分析了基桩各项设计参数。计算结果表明: 基桩桩顶位移大致随荷载频率的变化呈驼峰形, 其位移量随着荷载振幅的增大而增加; 基桩的自振频率随着长径比的增加而增大, 且随着桩-土模量比的增加, 自振频率有减小的趋势; 增大桩径会增大基桩的受力, 其对应的变形也将有所减小, 且基桩的稳定性增加。

关 键 词: 桩基础; 桩-土共同作用; 有限单元法; 动力 Winkler 地基梁模型; 动力响应

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Dynamic response of pile foundation under horizontal resonant vibratory loads

CAI Ke-jian

(School of Civil Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315016, China)

Abstract: According to the inescapability dynamic functions of bridge pile foundation in the construction and operation processes, and based on considering axial forces and horizontal forces co-operation in pile top, the horizontal vibratory loads can be simplified as resonant vibratory loads. Based on the dynamic Winkler found model and through simplifying soils as independent springs and dampers, the horizontal vibration equation can be established and the horizontal nonlinear dynamic response of pile foundation can be solved. Considering the pile-soil interaction and transmitting boundary, the finite element method was introduced to establish two dimensional nonlinear dynamic models. The design parameters are analyzed; and the calculation results show that the displacement variation in pile top is hump shape with load frequency change and the values increase with the amplitude enlargement. The natural frequency of pile foundation increases with the increase of pile length-diameter ratio and decreases with increase of pile-soil modulus ratio. The enlargement of pile diameter can increase pile stress and the stability of pile foundation is strengthened with deformation reduction.

Key words: pile foundation; pile-soil interaction; finite element method; dynamic Winkler foundation model; dynamic response

1 引 言

桩作为一种重要的基础形式, 在房屋建筑、桥梁及近海工程中得到广泛应用^[1-2], 而桥梁基桩在承受上部荷载的同时, 在施工和运营过程中不可避免地会受到动力荷载的作用, 主要包括地震作用、汽车制动力、轮船及河流漂浮物的撞击力等, 而基桩的动力行为由桩基础与地基土介质的相互作用所控制, 这种动力相互作用一般可分为两类, 即惯性

相互作用和运动相互作用, 前者描述了作用于基桩的惯性荷载而导致的桩-土相互作用, 后者则表征了基桩对于基岩及土体传播来的地震荷载的响应。

关于动力荷载作用下桥梁基桩力学性状, Novak 等^[3-4]将 Baranov 薄层法推广应用到单桩的振动分析中, 对单桩的动力阻抗作了总结, 对影响参数进行了研究。Nogami 等^[5]应用时域 Winkler 地基梁法分析了单桩在竖向荷载和横向荷载作用下的动力反应, 并将该模型应用于群桩的非线性竖向振

收稿日期: 2007-07-27

作者简介: 蔡可键, 男, 1962 年生, 硕士, 副教授, 主要从事市政工程领域的教学与研究工作。E-mail: nbsckj@sina.com

动。此后, Makris 和 Gazetas 等^[6-7]采用线弹性的集总参数模型来分析桩-土体系的动力相互作用, 并给出了桩的解析解。随着计算技术的发展, 数值计算也应用于基桩的动力分析中。Kuhlemeyer^[8]基于 Novak 近似解, 通过梁弯曲理论的有限元法, 求出了横向受荷摩擦桩的静态与动态刚度的多项式表达式。

有限元法能比较合乎实际地模拟桩-土体系的工作状态, 并能同时考虑桩和土的非线性特征, 但计算量大, 存在无穷远地基的人为截断处理。为此, 本文拟对层状地基中轴、横向荷载下桥梁基桩的水平动力反应进行分析, 在考虑桩土接触和透射边界的基础上, 建立基桩二维非线性动力有限元模型, 以揭示动力荷载下桥梁基桩的受力特性。

2 基本分析模型

在桩与土的水平向相互作用静力分析中, 常根据桩侧土体水平抗力系数的假定不同, 可用张有龄法、 K 法、 m 法和 C 值法等几种。而对于轴、横向荷载同时作用于基桩的问题, 在工程中往往采用简化的计算方法, 即将桩顶竖向分力和水平向分力分开计算, 再按小变形迭加原理计算桩身内力和位移^[9-10]。而对于水平动力荷载作用下, 多采用桩基-结构物共同作用的集总参数简化法, 其需要得到桩顶处的土-桩系统的动刚度和阻尼系数的显式表达^[11-12]。

除满足 Novak 薄层理论限定之外, 还假定等截面圆柱沿桩侧的竖向土层阻抗仍按常规法计算, 由此得到各层段交界面上的轴力 N_i , 桩头轴力为常值或轴力按竖向同频振动结果取值 (但不计竖向位移及其存在所产生的附加水平运动)。用于桩-土相互作用分析推导的桩段作竖向、水平振动时的基本模型如图 1 所示, 图中 f_{ui}^l 和 f_{ui}^R 分别表示阻尼器的水平抗力和转动抗力。由于桩底土的阻抗作用与弹性半空间上圆盘解近似, 对于较深土层可采用弹性半空间解, 但由于桥梁基桩的长细比一般均较大, 超出了近似圆盘阻抗公式应用范围 ($L/D \leq 2$), 故对于桩端距基岩不深的情况, 可采用与桩的截面形式一致, 但不同材料属性的延伸土柱法^[13], 该法由 Nogami 在推导两桩动水平阻抗中提出。本文为分析方便, 假定桩尖恰好位于底层土 (单层土) 的起始层面上, 推导过程中令 s 代表底层土参量 (如 m_s 、 V_s 、 ρ_s 、 h_s 以及 ξ_s), 土柱特征标量与桩具有同种形式。

图 1 为层状土中的桩, 在桩头受到水平方向简

谐力 $Q(0)e^{i\omega t}$, 竖向荷载 P 和力偶 $M(0)e^{i\omega t}$ 作用。假定桩是等直截面的、竖直的、弹性的, 且桩顶自由。当桩顶受到瞬态轴向荷载和瞬态弯矩同时激励时, 桩除受这两种动载荷作用外, 还受到自身的动惯性力、地基的横向抗力和黏滞阻尼的作用, 则桩的惯性矩为 I_p , 弹性模量为 E_p , 桩单位长度的质量为 m_p 。桩周土模拟为动力文克尔地基, 土的动反力用连续分布的弹簧和阻尼器模拟。

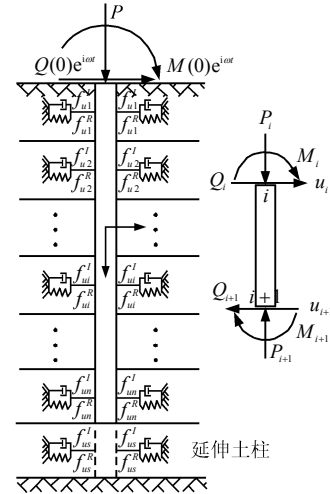


图 1 层状地基中基桩水平振动计算模型

Fig.1 Horizontal vibratory calculation model of pile foundation in layered foundation

基桩桩头位移记为 $u(0)e^{i\omega t}$, 桩头转角记为 $\varphi(0)e^{i\omega t}$ 。当桩头受到承台的刚度约束时, 可认为桩头转角为 0。将桩离散为梁单元, 单元长度一般就为各层土的厚度。图 2 为梁单元计算简图, 则在简谐激励作用下, 桩的运动方程为

$$E_p I_p \frac{d^4 u_i(z)}{dz^4} + (f_{ui}^R - m_p \omega^2 + i\omega f_{ui}^l) u_i(z) + P_i \frac{d^2 u_i(z)}{dz^2} = 0 \quad (1)$$

式中: ω 为简谐荷载频率; P_i 为第 i 层土中桩受到的竖向荷载。

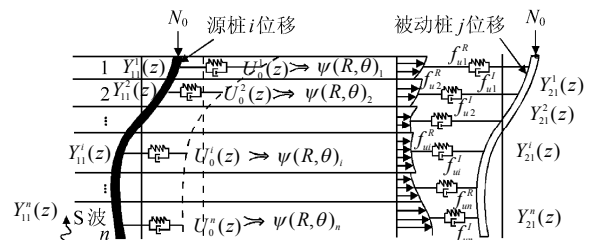


图 2 基桩水平振动受力模型

Fig.2 Horizontal vibratory stress model of pile foundation

其指数形式的通解为

$$u_i(z) = C_{u,1}^i e^{\lambda_{1,2}^i z} + C_{u,2}^i e^{-\lambda_{1,2}^i z} + C_{u,3}^i e^{\lambda_{1,2}^i z} + C_{u,4}^i e^{-\lambda_{1,2}^i z} \quad (2)$$

式中: 桩-土特征标量 $\lambda_{1,2}^i = \sqrt{-2\delta_i \mp 2\sqrt{\delta_i^2 - 4\Lambda_{u,i}}}/2$; $\delta_i = N_i/E_p I_p$, 每层段 N_i 值可由竖向振动方程得出, $\Lambda_{u,i} = (f_{ui}^R + i\omega f_{ui}^I - m_p \omega^2)/E_p I_p$ 。

3 基桩动力响应有限元模型

谐振荷载作用下桩-土相互作用可简化为二维平面应变模型, 基桩采用理想的弹性梁单元模拟, 桩周土则采用 15 节点的三角形单元, 并符合 Mohr-Coulomb 准则, 桩与桩周土之间的接触为动力接触, 而对于边界条件采用 Lysmer 透射边界单元以消除边界上的反射误差。

3.1 本构模型

采用弹塑性有限元法基桩动力响应进行计算分析, 其基桩采用线弹性模型, 而对于桩周土则采用能够较好地反映其非线性特性的理想弹塑性本构模型和摩尔-库仑破坏准则来模拟^[14], 如图 3 所示。该模型屈服面 F 的表达式为

$$F = \frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_1) + \frac{1}{2}(\sigma_3 + \sigma_1)\sin\varphi - \cos\varphi \quad (3)$$

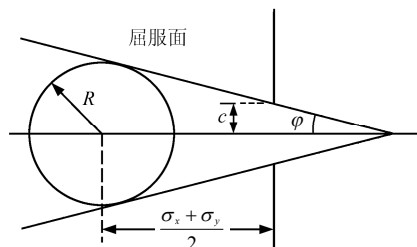


图 3 Mohr-Coulomb 本构模型
Fig.3 Mohr-Coulomb constitutive models

3.2 接触分析

在桩顶竖向荷载和横向动力荷载作用下, 桩-土界面可能存在两种接触状态, 即完全黏结状态和相对滑移状态。当轴向荷载超过桩-土界面的黏结强度时, 桩和土就会发生相对滑动, 从而在桩-土界面处产生变形和应力的非连续现象。此外, 在考虑桩土界面的相对滑移效应后, 单桩竖向动刚度和阻尼均有所减小。因此, 在计算单桩竖向动力阻抗时必须考虑桩与土的相对滑移效应。

桩-土摩擦系数 μ 是影响桩与桩侧土之间受力变形的一个重要参数, 它与桩土材料性质有关。桩-土界面上切向应力 τ 和法向应力 σ_x 存在如下关系:

$$\tau = \mu\sigma_x = \mu K_0 \sigma_y = \beta\sigma_y \quad (4)$$

式中: σ_y 为土的竖向有效应力; K_0 为静止土压力系数; β 为根据经验得出桩土间的摩阻力参数。由式 (4) 可得

$$\mu = \beta / K_0 \quad (5)$$

K_0 由各土层的 c 、 φ 值计算得到, β 可按表 1 取值。

表 1 摩阻力参数 β
Table 1 Values of friction parameters β

参数	饱和软土	黏性土、粉土	砂土
β	0.15~0.25	0.25~0.40	0.35~0.50

3.3 边界条件

以有限元模拟半无限土体时, 引入侧边界和底部边界, 侧边界水平方向约束, 底部边界则竖直和水平方向都约束。对于普通边界约束条件, 简谐波在边界上会发生反射, 对分析结果的精度往往产生不利影响, 为消除该误差, 采用 Lysmer 透射边界单元^[15], 即由相互平行的弹簧和阻尼器组成的 2 节点 Kelvin 单元, 传递到边界上的法向应力和剪切应力为

$$\sigma_n = -C_1 \rho V_p \dot{u}_x \quad (6)$$

$$\tau = -C_2 \rho V_s \dot{u}_y \quad (7)$$

式中: ρ 为桩周土的密度; V_p 和 V_s 均为波速; C_1 和 C_2 均为边界松弛系数。

4 计算实例

4.1 谐振荷载下基桩计算模型

在分析过程中, 对于桩-土体系采用以下几何和物理参数加以描述, 基桩桩径为 1~2 m, 桩长为 40 m, 嵌入下部坚硬土层 (10 m)。桩周土体分为上下两层: 上层是软黏土 (30 m), 下层是较为坚硬的砂土层 (20 m), 桩-土具体物理参数见表 2, 具体尺寸及网格图如图 4 所示。

表 2 材料计算参数
Table 2 Parameters of materials

材料名称	弹性模量 E_p / kPa	泊松比 μ	剪切波速 V_s / (m/s)	黏聚力 c / kPa	φ / (°)	重度 / (kN/m ³)
桩身混凝土	2.0×10^7	0.23				23.0
软黏土层	2.0×10^4	0.37	60	1 400	16.5	12.8
砂土层	7.8×10^5	0.20	80	6 700	28.0	27.0

4.2 基桩动态响应

首先, 选择基桩长径比为 $l/d = 20$, 即基桩桩径为 2 m 的模型, 通过改变振动荷载的频率以及振

幅来进行计算,并将计算结果与理论结果进行对比,图5给出了改变振动荷载频率以及振幅对基桩桩顶位移的影响,其中实线部分为有限元计算结果,数据点为解析解计算结果。从图中可以看出,有限元计算结果与解析解计算结果相近,基桩桩顶位移大致呈驼峰形。当荷载振动频率与基桩的自振频率相等时,其位移达到最大值,且位移随着荷载振幅的增大而增加。

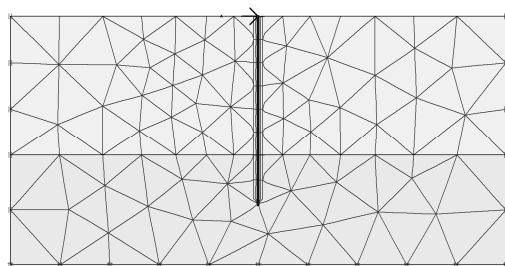


图4 有限元模型的网格划分
Fig.4 Finite Element Grid Model

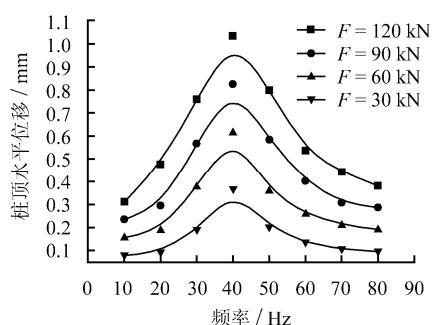


图5 桩顶位移随谐波荷载振幅和频率的变化
Fig.5 Variation of displacement at pile top with amplitude and frequency of vibratory loads

基于以上算例条件,采用本文方法分析桩基、地基有关参数及激振频率对桩基水平振动阻抗函数的影响。图6给出了振动荷载振幅 $F = 120$ kN、保持桩长不变、改变桩径以改变长径比时,基桩自振频率随桩-土模量比的变化。从图6可以看出,基桩的自振频率随着长径比的增加而增大,且随着桩-土模量比的增加,自振频率有减小的趋势。

图7给出了振动荷载自振频率为40 Hz、振幅 $F = 120$ kN、保持桩长不变、改变桩径以改变长径比时,通过改变桩顶最大位移随桩-土模量比的变化。从图7可以看出,在振动荷载的作用下,桩-土模量比和基桩的长径比对基桩的变形都有较大的影响,桩顶最大位移随着桩-土模量比的增加而增大,并随着长径比的增加而增大。

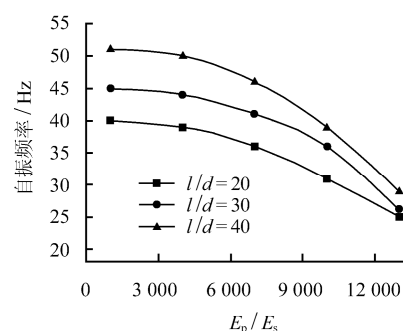


图6 自振频率随桩土模量比的变化
Fig.6 Variation of pile natural frequency with pile-soil modulus ratio

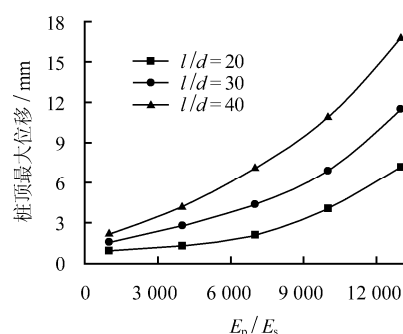


图7 桩顶位移随桩土模量比的变化
Fig.7 Variation of displacement at pile top with pile-soil modulus ratio

为了解振动荷载振幅变化对桩身受力的影响,将基于以上给定算例条件,采用本文方法,保持振动荷载激振频率为40 Hz,并保持桩长不变,改变桩径以改变长径比时,计算得到基桩桩身弯矩随振动荷载振幅的变化情况。从图8可以看出,在保持基桩长径比不变的情况下,振幅的增加会导致桩身弯矩显著增加,而在保持基桩长径比的同时,增大桩径会增大基桩的受力,但其对应的变形也将有所减小,基桩的稳定性增加。

5 结论

本文综合考虑了水平简谐激振荷载作用下基桩的变形和受力机制,建立基桩的运动方程,并引入有限单元方法建立基桩的二维非线性动力有限元模型,在考虑桩-土接触和透射边界的基础上,通过改变激振荷载频率、振幅、长径比等因素,以研究基桩的变形和受力情况,得出以下主要结论:

(1) 基桩桩顶位移大致随荷载频率的变化呈驼峰形。当荷载振动频率与基桩的自振频率相等时,其位移达到最大值,且位移量随着荷载振幅的增大而增加。

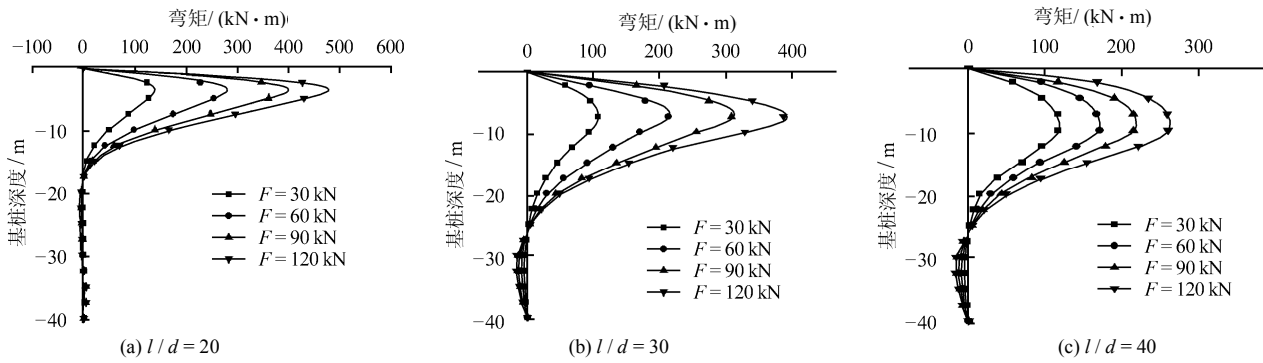


图8 桩身弯矩随桩基长径比和振幅的变化

Fig.8 Variation of pile shaft moment with pile length diameter ratio and amplitude

(2) 在保持桩基桩长不变的情况下, 通过改变桩基的长径比可知, 桩基的自振频率随着长径比的增加而增大, 且随着桩-土模量比的增加, 自振频率有减小的趋势。

(3) 激振荷载的振幅的增加会导致桩身弯矩的显著增加, 而在保持桩基长径比的同时, 增大桩径会增大桩基的受力, 对应其变形也将有所减小, 且桩基的稳定性增加。

参考文献

- [1] 赵明华, 李微哲, 杨明辉, 等. 成层地基中倾斜偏心荷载下单桩计算分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 670—674.
ZHAO Ming-hua, LI Wei-zhe, YANG Ming-hui, et al. Analysis of single piles under eccentric and inclined loads in layered soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(4): 670—674.
- [2] 赵明华, 刘建华, 段少华. 考虑桩基差异性及桩土共同工作的桩基承台梁内力分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2149—2153.
ZHAO Ming-hua, LIU Jian-hua, DUAN Shao-hua. Inner force analysis of pile capping beam considering stiffness variance of pile and pile-soil interaction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(12): 2149—2153.
- [3] NOVAK M. Dynamic stiffness and damp of piles[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1974(11): 574—598.
- [4] NOVAK M, EI SHARMOUBY B. Stiffness constants of single piles[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1983, 109(7): 961—974.
- [5] NOGAMI T, OTANI J, KONAGAI K, et al. Nonlinear soil-pile interaction model for dynamic lateral motion[J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1992, (118): 89—106.
- [6] GAZETAS G, KE F, AMIR KAYNIA, et al. Dynamic interaction factors for floating pile groups[J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1991, (117): 1531—1548.
- [7] MAKRI N, GAZETAS G. Dynamic pile-soil-pile interaction, part II: lateral and seismic response[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1992, 21(1): 145—162.
- [8] KUHLEMEYER R L. Static and dynamic laterally loaded floating piles[J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 1979(105): 289—304.
- [9] 赵明华, 吴鸣, 郭玉荣. 轴、横向荷载下桥梁桩基的受力分析及试验研究[J]. 中国公路学报, 2002, 15(1): 50—54.
ZHAO Ming-hua, WU Ming, GUO Yu-rong. Study of the behavior analysis and model test of bridge piles under simultaneous axial and lateral loading[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2002, 15(1): 50—54.
- [10] 胡安峰, 谢康和, 肖志荣. 水平荷载下单桩动力反应分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2003, 37(4): 420—425.
HU An-feng, XIE Kang-he, XIAO Zhi-rong. Dynamic-response analysis for a single pile subjected to lateral loading[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2003, 37(4): 420—425.
- [11] MYLONAKIS G, GAZETAS G. Kinematic pile response to vertical P-wave seismic excitation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2002, 128(10): 860—867.
- [12] WU G, FINN W D L. Dynamic nonlinear analysis of pile foundations using finite element method in the time domain[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997(34): 44—52.
- [13] NOGAMI T, NOVAK M. Resistance of soil to a horizontally vibrating pile[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1977, 6(3): 247—261.
- [14] 李云安, 葛修润, 糜崇蓉, 等. 岩-土-混凝土破坏准则及其强度参数估算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 9—12.
LI Yun-an, GE Xiu-run, MI Chong-rong. Failure criteria of rock-soil-concrete and estimation of their strength parameters[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(5): 9—12.
- [15] LYSMER J, KUHLEMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 1969, 95(4): 859—877.