

文章编号: 1000-7598-(2007)09-1784-06

考虑热-水-力耦合效应多孔弹性地基的动力响应

刘干斌^{1,2}, 姚海林², 杨 洋², 卢 正²

(1. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 宁波 315211; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘 要: 通过对 Biot 波动方程的修正, 得到考虑热-水-力学耦合效应的多孔弹性介质动力响应的控制方程, 研究了简谐均布荷载作用下地基土体的热-水-力耦合动力响应问题。利用 Fourier 变换技术, 得到地基中的应力、位移和孔隙水压力积分形式的解答。利用 Fourier 逆变换得到数值结果, 分析了热-水-力学耦合条件下地基土体中温度增量、应力、位移和孔隙水压力响应的分布, 并讨论了热源输入的影响, 结果表明: 应力、位移和孔隙水压力随 ΔT 的增大而有一定的减小。

关 键 词: 多孔弹性; 热-水-力学耦合; 动力响应; Fourier 变换

中图分类号: TU 471.2

文献标识码: A

coupling thermo-hydro-mechanical dynamic response of a porous elastic medium

LIU Gan-bin^{1,2}, YAO Hai-lin², YANG Yang², LU Zheng²

(1. Faculty of Civil, Construction and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The dynamic response of porous elastic medium due to a harmonic load, is investigated theoretically by developing the coupling thermo-hydro-mechanical governing equations. The material of foundation, obeying Biot's dynamic poroelastic theory, is idealized as a uniform, fully saturated poroelastic half-space stratum. The analytical solutions of stress, displacement and pore pressure are derived using the Fourier transform and Fourier inverse transform. Numerical results are obtained and used to analyze the distribution of temperature increment, stress, displacement and pore pressure under the condition of thermo-hydro-mechanical coupling. Furthermore, the influence of heat source acted on the surface of foundation on dynamic response is discussed. The stress, displacement and pore pressure is slightly decreased with the increase of temperature increment ΔT .

Key words: porous elastic; coupling thermo-hydro-mechanical; dynamic response; Fourier transform

1 引 言

岩土工程实践中地下水的渗流作用不容忽视, 变温对工程稳定性的影响也开始得到重视。因此, 在研究岩土体热(温度场)、水(渗流场)、力(应力场和位移场)问题时, 必须考虑其相互影响进行热水力耦合研究。近年来, 热-流-固(T-H-M)耦合作用理论的研究已成为岩土力学及相关领域研究的热点问题之一。

Biot 早于 1955 年建立了热弹性和热动力理论^[1], 随后 Booker 和 Savvidou 研究了球形热源附近的固结

问题^[2]。长期以来, 热-水-力等多场耦合的研究多应用于垃圾、核废料处理等等。然而, 近年来许多学者注意到热-水-力场的耦合作用对土体力学特性的影响, 并开始致力于多领域的热-流-固耦合作用研究。何平等^[3]依据连续介质力学、热力学原理, 建立了饱和和正冻土中的水-热-力耦合模型。白冰^[4]分析了温度效应对黏性土介质若干基本力学特性的影响。Wu 等^[5]建立了非饱和土的热-水-力学耦合模型, 并利用数值方法进行了结果分析。Hosseini 等人^[6]利用边界元法分析了二维热弹性介质的动力响应问题。Lykotrafitis 等人^[7]研究了内置点源作用下的三维

收稿日期: 2006-01-19

修改稿收到日期: 2006-05-10

基金项目: 西部交通建设科技项目资助(No. 200531849305); 宁波大学人才基金资助(No. 011-011075)。

作者简介: 刘干斌, 男, 1976 年生, 博士, 主要从事软黏土力学及路基工程研究。E-mail: liugb@163.com

热弹性波动问题。目前，对多孔弹性介质T-H-M耦合动力响应问题的研究并不多见。

基于Biot多孔弹性介质的波动方程，本文通过对Biot波动方程进行修正得到饱和土体热-水-力学耦合动力响应的控制方程，研究了地基表面在简谐均布荷载作用下的热-水-力耦合动力响应问题，得到了简谐荷载作用下地基的应力、位移和孔隙水压力积分形式的解答，并进一步讨论了热源的输入对地基热-水-力学耦合动力响应的影响及地基土体中温度增量、应力、位移和孔隙水压力响应的分布。

2 T-H-M 耦合动力方程

对于一般土动力学问题，在频率不高的条件下可忽略流相的惯性，则运动方程可表示为^[1]

$$\sigma_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i \quad (1)$$

式中： σ_{ij} 为应力引量； ρ 为土体密度； \ddot{u}_i 为位移对时间的两阶导数。

考虑温度效应的多孔弹性地基耦合应力-应变关系为

$$\sigma_{ij} = \lambda e \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij} - \delta_{ij} p - \lambda' \theta \delta_{ij} \quad (2)$$

式中： p 为超孔隙水压力； θ 为温度增量， $\theta = T - T_0$ ， T 为绝对温度， T_0 为初始温度(°C)； e 为土体的应变， $e = u_{i,i}$ ； δ_{ij} 为 Kronecker 符号； λ ， G 均为反映多孔弹性介质的 Lamé 常数； λ' 为热模量， $\lambda' = (3\lambda + 2G)a_s$ ， a_s 为土骨架的热膨胀系数(°C⁻¹)。

孔隙水在土体中的渗流满足达西定律，即

$$-p_{,i} = b w_{,i} + \rho_f \ddot{u}_i \quad (3)$$

式中： $b = \rho_f g / k_d$ ； ρ_f 为流体密度(kg/m³)； k_d 为土体的动力渗透系数(m/s)。

考虑地基土体中温度场的影响，且由于固体介质的热膨胀比流体小得多，所以忽略固体的膨胀应变，则可以建立如下饱和土体的渗流方程：

$$u_{i,i} + w_{i,i} - a_w \theta = 0 \quad (4)$$

式中： a_w 为孔隙流体的热膨胀系数； $a_w \theta$ 为流体的热膨胀应变。

根据热力学定律，热传导方程可以表述为^[2]

$$h_i = -K \theta_{,i} \quad (5)$$

式中： h_i 为热流动矢量； K 为热传导系数(W·°C⁻¹·m⁻¹)。

忽略热流速度的影响，热平衡方程可由热传导

方程建立得到：

$$\int_0^t h_{i,i} dt + m \theta + \lambda' T_0 e = 0 \quad (6)$$

式中： $m = n \rho_f c_f + (1-n) \rho_s c_s$ ； c_f ， c_s 分别为孔隙流体和土骨架的比热(m²·s⁻²·°C⁻¹)， n 为孔隙率。

由式(1)和式(2)可以得到考虑热-水-力学耦合条件下多孔弹性介质的 Navier 方程：

$$G \nabla^2 u_i + (\lambda + G) \varepsilon_{i,i} - p_{,i} - \lambda' \theta_{,i} = \rho \ddot{u}_i \quad (7)$$

由式(3)和式(4)可以得到流体的平衡方程：

$$-\nabla^2 p = b(a_w \dot{\theta} - \dot{e}) + \rho_f \ddot{e} \quad (8)$$

由式(5)、式(6)可得

$$K \nabla^2 \theta = m \dot{\theta} + \lambda' T_0 \dot{e} \quad (9)$$

至此，建立了饱和土体热-水-力完全耦合动力响应的控制方程式(7)~(9)。

3 T-H-M 耦合动力响应的基本解

饱和多孔弹性地基热-水-力耦合动力响应问题的控制方程为式(7)~(9)，对于一般二维问题可在直角坐标系(x,z)中进行分析。考虑地基的半无限特性，且假设地基表面作用简谐荷载，则控制方程中各变量可以表示为 $\phi(x,z,t) = \phi(x,z)e^{i\omega t}$ 的形式。

考虑简谐荷载的作用，省略简谐因子，方程式(7)~(9)可以处理为

$$(\lambda + 2G) \nabla^2 e - \nabla^2 p - \lambda' \nabla^2 \theta + \rho \omega^2 e = 0 \quad (10)$$

$$-\nabla^2 p = b a_w i \omega \theta - (\rho_f \omega^2 + b i \omega) e \quad (11)$$

$$K \nabla^2 \theta = m i \omega \theta + \lambda' T_0 i \omega e \quad (12)$$

为求解方程式(10)~(12)，引入 Fourier 变换，并定义：

$$\bar{f}(\beta, z) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, z) e^{-i\beta x} dx \quad (13)$$

对式(10)~(12)进行 Fourier 变换，消去 \bar{p} ， \bar{e} 变量，得到仅含 $\bar{\theta}$ 的方程：

$$\left(\bar{\nabla}^2 - \gamma_1^2 \right) \left(\bar{\nabla}^2 - \gamma_2^2 \right) \bar{\theta} = 0 \quad (14)$$

式中： $\gamma_{1,2}^2 = \frac{-\zeta_1 \pm \sqrt{\zeta_1^2 - 4\zeta_0 \zeta_2}}{2\zeta_0}$ ； $\zeta_0 = (\lambda + 2G)K$ ；

$\zeta_1 = (\rho \omega^2 - \rho_f \omega^2 - b i \omega)K - (\lambda + 2G)m i \omega - \lambda'^2 T_0 i \omega$ ；

$\zeta_2 = -b a_w \lambda' T_0 \omega^2 - (\rho \omega^2 - \rho_f \omega^2 - b i \omega)m i \omega$ 。

考虑地基的半无限特性，求解式(14)：

$$\bar{\theta} = A_1 e^{-\nu_1 z} + A_2 e^{-\nu_2 z} \quad (15)$$

式中： $\nu_1^2 = \beta^2 + \gamma_1^2$ ； $\nu_2^2 = \beta^2 + \gamma_2^2$ 。

由式 (11)、式 (12) 和式(15)得到应变 e 和孔隙水压力的表达式:

$$\bar{e} = a_1 A_1 e^{-v_1 z} + a_2 A_2 e^{-v_2 z} \quad (16)$$

$$\bar{p} = b_1 A_1 e^{-v_1 z} + b_2 A_2 e^{-v_2 z} + A_3 e^{-\beta z} \quad (17)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{Kv_1^2 - (K\beta^2 + mi\omega)}{\lambda' T_0 i \omega} \\ a_2 &= \frac{Kv_2^2 - (K\beta^2 + mi\omega)}{\lambda' T_0 i \omega} \\ b_1 &= -\frac{ba_w i \omega - (bi\omega + \rho_f \omega^2) a_1}{v_1^2 - \beta^2} \\ b_2 &= -\frac{ba_w i \omega - (bi\omega + \rho_f \omega^2) a_2}{v_2^2 - \beta^2} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

由方程式 (2)、式 (7) 及式 (15) ~ (17) 及体应变表达式 $e = u_{i,i}$, 可以得到热-水-力耦合动力问题的位移和应力表达式:

$$\bar{u}_z = c_1 A_1 e^{-v_1 z} + c_2 A_2 e^{-v_2 z} + c_3 A_3 e^{-\beta z} + A_4 e^{-v_3 z} \quad (19)$$

$$i\beta \bar{u}_x = (a_1 + c_1 v_1) A_1 e^{-v_1 z} + (a_2 + c_2 v_2) A_2 e^{-v_2 z} + c_3 \beta A_3 e^{-\beta z} + v_3 A_4 e^{-v_3 z} \quad (20)$$

$$\bar{\sigma}_z = d_1 A_1 e^{-v_1 z} + d_2 A_2 e^{-v_2 z} + d_3 A_3 e^{-\beta z} + d_4 A_4 e^{-v_3 z} \quad (21)$$

$$i\beta \bar{\tau}_{xz} = e_1 A_1 e^{-v_1 z} + e_2 A_2 e^{-v_2 z} + e_3 A_3 e^{-\beta z} + e_4 A_4 e^{-v_3 z} \quad (22)$$

其中:

$$v_3^2 = \frac{G\beta^2 - \rho\omega^2}{G} \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{[(\lambda + G)a_1 - b_1 - \lambda'] v_1}{G(v_1^2 - v_3^2)} \\ c_2 &= \frac{[(\lambda + G)a_2 - b_2 - \lambda'] v_2}{G(v_2^2 - v_3^2)} \\ c_3 &= \frac{-\beta}{G(\beta^2 - v_3^2)} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= \lambda a_1 - 2Gc_1 v_1 - b_1 - \lambda' \\ d_2 &= \lambda a_2 - 2Gc_2 v_2 - b_2 - \lambda' \\ d_3 &= -2Gc_3 \beta - 1 \\ d_4 &= -2Gv_3 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= G[(a_1 + c_1 v_1) v_1 + c_1 \beta^2] \\ e_2 &= G[(a_2 + c_2 v_2) v_2 + c_2 \beta^2] \\ e_3 &= 2Gc_3 \beta^2; e_4 = G(\beta^2 + v_3^2) \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

4 边值问题

考虑半无限地基土体的二维情况, 假设地基表面作用条形均布简谐荷载, 荷载的宽度为 $2L$, 大小为 $q_0 e^{i\omega t}$, 地基表面透水, 同时考虑地表 ($z = 0$) 有条形均匀分布的热源输入, 其宽度和荷载相同, 热源的集度为 $\Delta T / 2L$ 。

荷载分布模型可表示为

$$q(t) = \begin{cases} q_0 e^{i\omega t} & (|x| < L) \\ 0 & (|x| > L) \end{cases} \quad (27)$$

考虑地表热源的输入, 且地表透水, 则可建立 T-H-M 耦合动力响应问题的边界条件如下:

$$\theta = \begin{cases} \frac{\Delta T e^{i\omega t}}{2L} & (|x| < L, z = 0) \\ 0 & (|x| > L, z = 0) \end{cases} \quad (28)$$

$$p = 0 \quad (z = 0) \quad (29)$$

$$\sigma_z = \begin{cases} \frac{q_0 e^{i\omega t}}{2L} & (|x| < L, z = 0) \\ 0 & (|x| > L, z = 0) \end{cases} \quad (30)$$

$$\tau_{xz} = 0 \quad (z = 0) \quad (31)$$

对式 (28) ~ (31) 进行 Fourier 变换, 将式 (15) ~ (22) 代入, 可以得到未知参数 A_1, A_2, A_3, A_4 如下:

$$A_2 = \Delta \bar{T}(\beta) - A_1 \quad (32)$$

$$A_3 = (b_2 - b_1) A_1 - b_2 \Delta \bar{T}(\beta) \quad (33)$$

$$A_4 = -\frac{[e_1 - e_2 + e_3(b_2 - b_1)] A_1 + (e_2 - e_3 b_2) \Delta \bar{T}(\beta)}{e_4} \quad (34)$$

$$A_1 = \frac{e_4 \bar{q}(\beta) + [d_4(e_2 - e_3 b_2) + (d_3 b_2 - d_2) e_4] \Delta \bar{T}(\beta)}{\chi} \quad (35)$$

$$\chi = e_4(d_1 - d_2) + (d_3 e_4 - d_4 e_3)(b_2 - b_1) - d_4(e_1 - e_2) \quad (36)$$

$$\bar{q}(\beta) = q_0 \frac{\sin(\beta L)}{\beta L} \quad (37)$$

$$\Delta \bar{T}(\beta) = \Delta T \frac{\sin(\beta L)}{\beta L} \quad (38)$$

在求得未知量 A_1, A_2, A_3, A_4 后, 对式 (15) ~ (22) 进行 Fourier 逆变换, 则可以得到应力、位移、孔隙水压力及地基中温度增量的积分形式的解答:

$$\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (A_1 e^{-v_1 z} + A_2 e^{-v_2 z}) e^{i\beta x} d\beta e^{i\omega t} \quad (39)$$

$$u_z = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (c_1 A_1 e^{-v_1 z} + c_2 A_2 e^{-v_2 z} + c_3 A_3 e^{-\beta z} + A_4 e^{-v_3 z}) e^{i\beta x} d\beta e^{i\omega t} \quad (40)$$

$$p = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (b_1 A_1 e^{-v_1 z} + b_2 A_2 e^{-v_2 z} + A_3 e^{-\beta z}) e^{i\beta x} d\beta e^{i\omega t} \quad (41)$$

$$\sigma_z = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (d_1 A_1 e^{-v_1 z} + d_2 A_2 e^{-v_2 z} + d_3 A_3 e^{-\beta z} + d_4 A_4 e^{-v_3 z}) e^{i\beta x} d\beta e^{i\omega t} \quad (42)$$

5 数值计算及分析

饱和多孔弹性地基表面作用简谐荷载条件下的热-水-力学耦合动力响应解答为式 (39) ~ (42)。要直接对其进行求逆Fourier变换较为困难，可以采用离散快速数值逆Fourier变换，截断积分范围，可令 $-16 < \beta < 16$ ，取 2 048 个积分点，可满足计算精度。本节同时考虑水-力耦合条件下地基的动力响应，并与热-水-力 (H-M) 学耦合动力响应问题结果进行比较。利用数值计算结果分析位移、应力、孔隙水压力以及温度场的分布，取外荷载 $q_0 = 1 \times 10^4 \text{ N}$ ，其他计算参数见表1，部分计算结果如图1~7所示。

表1 计算参数
Table 1 Computational parameters

参数名称	数值	参数名称	数值
弹性模量 E/MPa	200	孔隙率 n	0.4
泊松比 μ	0.4	流体密度 ρ_f	1 000
土骨架体积膨胀系数 a_s	0.002	土骨架密度 ρ_s	2 200
流体体积膨胀系数 a_w	0.004	渗透系数 $k_s / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1×10^{-8}
土骨架比热 c_s	2 000	绝对温度 $T_0 / (^\circ\text{C})$	30
流体比热 c_f	4 000	荷载频率 ω / Hz	10
热传导系数 K	4.0	宽度荷载 L / m	1.0

图 1 为不同地基深度范围内，温度增量场 θ 沿水平方向的分布曲线。由于考虑地表热源的输入，其温差为 $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ 。图中反映了温度增量场的分布，地表的温度增量场等于外部热源的输入。由于地基土体的热胀和热传导系数较小，地基土体沿深度 z 方向温度增量很小。

图 2 为不同地基深度范围内超孔隙水压力的分布曲线，图中没有考虑热源的输入。由于假定地表透水 ($z = 0$)，孔隙水压力在地表恒为 0。沿地基的深度 z 方向，孔隙水压力先增大，后减小。在 $z \rightarrow \infty$ 时，

孔隙水压力也将趋于 0。在荷载附近，孔隙水压力值较大，沿 x 轴方向孔隙水压力迅速衰减。图 3 为不同的热源输入对地基土体中孔隙水压力分布的影响，比较图 2 和图 3，在没有热源输入条件下，水-力耦合与热-水-力学耦合条件下的结果差别很小，可见在没有热源输入条件下，考虑温度场影响的意义不大。只有在考虑地表有热源输入时，分析热-水-力学耦合效应对地基动力响应的影响才有较大意义。且由图中可以看出，随着外部的热源输入 ΔT 的增大，孔隙水压力响应减小。

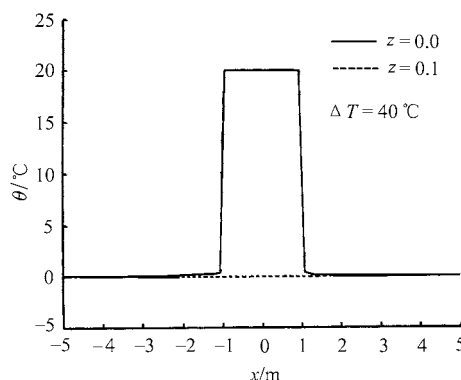


图 1 不同地基深度温度增量沿水平方向的分布
Fig.1 Distribution of temperature increment at different depths

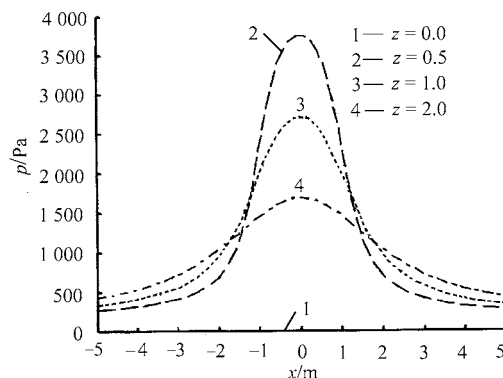


图 2 不同地基深度孔压沿水平方向的分布
Fig.2 Distribution of pore pressure at different depths

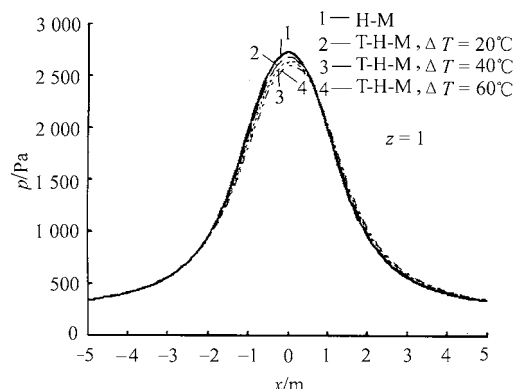


图 3 ΔT 对孔隙水压力的影响
Fig.3 Effect of temperature increment ΔT on pore pressure

图4为地基土体中的竖向位移响应随深度的分布规律,不考虑热源的输入,在荷载附近竖向位移随深度的增加而减小;荷载范围以外在地基较小深度范围内 $z < 2$,位移随深度增加而增大。图5为不同的热源输入对地基土体中竖向位移分布的影响,比较图4和图5可见:在没有热源输入条件下,水-力耦合与热-水-力学耦合条件下竖向位移响应的结果差别不大。当在地表有热源输入时考虑热-水-力学耦合对荷载附近地基竖向位移响应的有一定的影响,且由于土体遇热膨胀,在恒定外荷载作用下地基土体中竖向位移响应随外部输入热源 ΔT 的增大而减小。

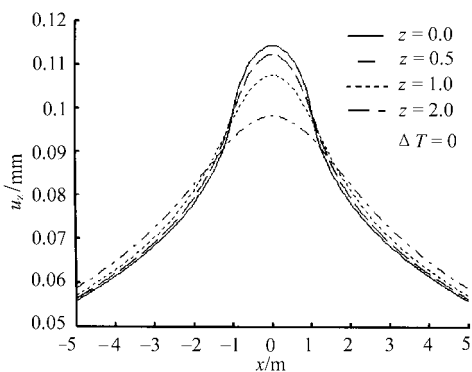


图4 不同地基深度竖向位移沿水平方向的分布
Fig.4 Distribution of vertical displacement at different depths of foundation

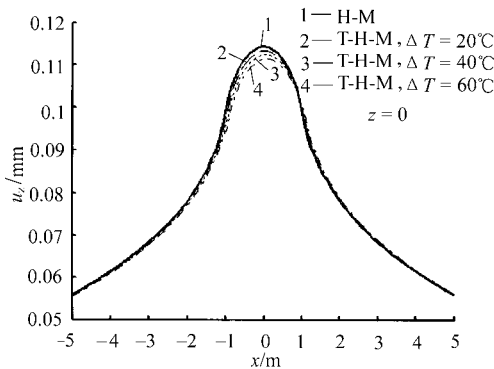


图5 不同热源输入对竖向位移的影响
Fig.5 Effect of heat source on vertical displacement

图6为地基土体中的竖向应力响应随深度的分布规律,不考虑热源的输入,地基表面竖向应力等于外荷载,沿地基深度方向荷载附近的竖向应力随深度增加而减小,应力沿 x 轴方向衰减较快。荷载范围以外应力随深度增加而增大。图7为不同的热源输入对地基土体中竖向应力分布的影响,在没有热源输入条件下,水-力耦合与热-水-力学耦合条件下的结果差别也不大。同样,在地表有热源输入时,由于土体遇热产生膨胀应力,在外荷载作用下土体中的竖向应力响应随热源 ΔT 的增大而减小。

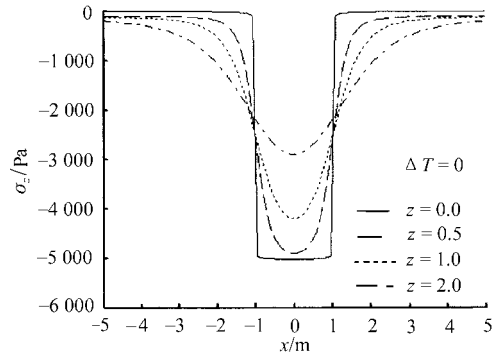


图6 不同地基深度竖向应力的分布
Fig.6 Distribution of vertical stress at different depths of foundation

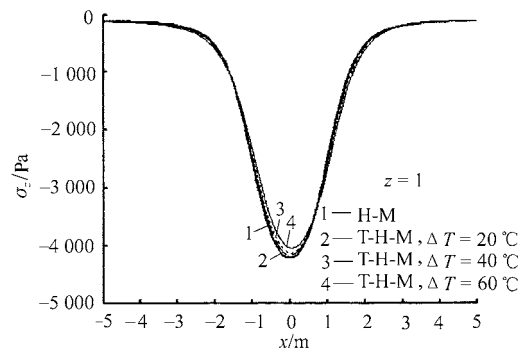


图7 ΔT 对竖向应力的影响
Fig.7 Effect of temperature increment ΔT on vertical stress

6 结论

通过对 Biot 波动方程的修正,获得了饱和和多孔弹性地基的热-水-力耦合动力响应的控制方程。引入 Fourier 变换,得到了简谐荷载作用下地基的热-水-力耦合动力响应问题的解答。利用离散 Fourier 逆变换得到了数值计算结果,分析了温度、孔隙水压力、位移和应力响应在地基土体中的分布规律。在没有考虑地表热源的输入时,T-H-M 耦合动力响应的结果和 H-M 耦合动力响应的结果差别不大。当地表有热源输入时,土体中产生膨胀应力和应变,考虑 T-H-M 耦合分析对应力、位移和孔隙水压力有一定的影响,且随输入热源 ΔT 的增大而减小。

参考文献

[1] Biot M A . Thermoelasticity and irreversible thermodynamics [J]. *Journal of Applied Physics*, 1955, 27(3): 240—253
[2] Carter J R, Savvidou C. Consolidation around a spherical heat source.[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1984, 20:1 079—1 090.

墙后填土的主动土压力(无论是砂性或黏性土)均较为有宜。

表 8 库仑法与朗肯法计算主动土压力系数 K_a 值的对比表 (墙背直立, $\delta = 0$)

Table 8 Comparisons of active earth pressure coefficient between Coulombs method and Rakine method

β (°)	α (°)	K_a 值		$\frac{K_{库} - K_{朗}}{K_{库}}$ /%
		库仑法	朗肯法	
20	0	0.45	0.5	-11.0
	15	0.61	0.60	2.0
	20	0.92	0.80	13.0
25	0	0.34	0.39	-14.7
	15	0.49	0.47	2.0
	25	0.87	0.79	9.2
30	0	0.29	0.33	-13.8
	20	0.42	0.42	0.0
	30	0.8	0.7	12.5
35	0	0.26	0.27	-3.8
	25	0.38	0.37	2.6
	35	0.74	0.68	8.1
40	0	0.21	0.21	0.0
	30	0.33	0.32	3.0
	40	0.68	0.65	4.4

7 结 语

库仑主动土压力系数 K_a 值的简易计算方法，

上接第 1788 页

[3] 何平, 程国栋, 俞祁浩, 等. 饱和正冻土中的水、热、力场耦合模型.[J]. 冰川冻土, 2000, 22(2): 135 - 138.
HE Ping, CHENG Guo-dong, YU Qi-hao, et al. A couple model of heat water and stress fields of saturated soil during freezing.[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2000, 22(2): 135 - 138.

[4] 白冰, 赵成刚. 温度对黏性土介质力学特性的影响[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 533 - 537.
BAI Bing, ZHAO Cheng-gang. Temperature effects on mechanical characteristics of clay soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(4): 533 - 537.

[5] Wenhua Wu, Xikui Li, R. Charlier, et al. A

是在原库仑数解法的基础上, 经过公式的简化与转换, 并结合土壤物理力学试验指标推得的一种较简易的计算方法, 与库仑法计算的 K_a 值比较, 误差很小。因而, 在工程实践中, 对于分析较大挖填土方边坡稳定性、拟定挡土建筑物的设计尺寸、估算工程量等, 都应具有立竿见影的效果。如: 当填土坡角为水平、墙背为直立、填土内摩擦角 $\phi = 30^\circ$ 时, 则 K_a 值即为 0.3; 并且 ϕ 每增加或减少 10° , K_a 值只需在 0.3 的基础上相应减少或增加 0.1。若填土坡度不为水平, 或墙背倾角不为直立, 则只需代入上述简易计算公式计算并予适当修正之。

参 考 文 献

[1] 武汉水电学院土力学教研组, 土力学地基与基础[M].北京:中国工业出版社, 1963.

[2] 顾晓鲁, 钱鸿晋. 地基与基础[M].北京:中国建筑工业出版社, 2005.

[3] 姚祖康. 道路路基和路面工程[M].上海: 同济大学出版社, 1994.

[4] 郭继武, 龚伟. 建筑结构[M].北京: 中国建筑工业出版社, 1991.

thermo-hydro-mechanical constitutive model and its numerical modelling for unsaturated soils [J]. **Computers and Geotechnics**, 2004, 31: 155-167.

[6] Hosseini-Tehrani P, Hosseini-Godarzi A R, Tavangar M. Boundary element analysis of stress intensity factor K_I in some two-dimensional dynamic thermoelastic problems.[J]. **Engineering Analysis with Boundary Element**, 2005, 29: 232-240.

[7] Lykotrafitis G, Georgiadis H G, Brock L M. Three-dimensional thermoelastic wave motions in a half-space under the action of a buried source.[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2001, 38: 4 857-4 878.