

基于物态本构模型的土体动力反应分析方法

李宏儒, 胡再强, 陈存礼, 谢定义

(西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 通过对现有土体动力反应分析方法的分析, 提出了新的有效应力物态地震反应分析方法。首先, 建立了能够全面反应饱和土体的应力应变非线性、硬化性、剪切胀缩性和压密回胀性、应力路径相关性以及球应力和偏应力与变形的耦合性等主要特征的有效应力物态动本构关系。其次, 以动力固结理论和瞬态动力学理论为基础, 将该本构关系引入到以动力反应与动力固结相耦合、静应力和动应力变化相耦合, 孔压产生、扩散和消散相耦合、能够较全面反映动力作用下土体应力应变反应的真实过程为特点的三维瞬态动力方程组, 形成了饱和砂土体有效应力物态地震反应分析的完整理论体系。最后, 开发了新的动力固结三维有限元分析程序, 通过对一个饱和路基的计算和分析, 不仅得到了合理的土体动力性状, 而且验证了该分析方法与程序的正确性。

关键词: 有效应力物态动本构关系; 瞬态动力学; 地震反应分析; 耦合分析; 有限单元法

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2008)04-0503-08

作者简介: 李宏儒(1974-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程试验及分析计算工作。E-mail: Lhrbj2008@126.com。

Approach of soil dynamic response analysis based on physical state constitutive relationship

LI Hong-ru, HU Zai-qiang, CHEN Cun-li, XIE Ding-yi

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: A new approach based on the effective stress and physical states for analyzing the seismic response of soil was emphasized as the center of this paper on the wide basis of discussing current analytic methods. The first one was the effective stress-physical state dynamic constitutive relationships established on the revealed dynamic stress-strain characteristics. It could be used to consider the soil properties of non-linearity, hardening, shear dilatation-contraction, compression-swelling, as well as the soil properties of stress path dependence and coupling of spherical stress to deviator stress. The second achievement of this research was the fundamentals of a 3-D dynamic consolidation with governing equations established on the basis of the transient dynamic theory, characterized by combining the effective stress and physical states dynamic constitutive relationships and coupling the dynamic response and dynamic consolidation, static stress and dynamic stress, generation, diffusion and dissipation of pore water pressure so as to simulate the actual process of stress-strain response of soil mass and form a complete theoretical framework system of the seismic response analysis approach based on the effective stress and physical states of soil mass. Finally, a new 3-D dynamic consolidation FEM calculation program was developed, and inspected through seismic analysis of a saturated road foundation, not only the reasonable soil properties were obtained, but also the validity of the proposed method and program were proved.

Key words: effective stress and physical state dynamic constitutive relationship; transient dynamics; seismic response analysis; coupling analysis; finite element method

0 引言

一般地, 在动力作用前, 土体在各种力作用下的固结过程已经完成, 土体的应力状态为固结静应力状态。当它受到动力的作用时, 动力作用与土体的静应力状态相结合, 将在土体内产生一定的附加动应力, 引起土骨架的振动和与该振动相应的变形(压缩、回

胀、剪缩、剪胀或弹性变形), 甚至局部的破坏。

如果土体处于饱和状态, 在上述过程中, 伴随着土体的变形, 将发生孔隙水压力的增长与消散, 甚至局部的液化^[1]。这些变形、破坏、孔压长消以及液化

不断地改变着土的基本性质,也使土体中的静应力状态不断地进行调整或重分布,不断地改变着每一个后续时刻土体发生变形的初始应力状态和初始土性特征,使变形、破坏、孔压以及液化不断地在变化中积累。当这些积累在某一时刻达到足以导致土体发生整体破坏的塑性区、液化区时,土体即失去自身的稳定性,发生土体的动力失稳^[2]。

显然,在土体动力反应过程分析中要全面地反映上述复杂的真实过程不是一件容易的事。人们为了认识土体在地震作用下发生的性态变化,其分析方法先后经历了总应力分析法、无孔压消散的有效应力分析方法、孔压先长后消的有效应力分析方法和孔压长消耦合的有效应力分析方法。

总应力法^[3]是在全时程内按平均动剪应变(各时步最大值的65%)下对应的模量和阻尼比进行迭代,至每次迭代采用的初始值和计算值间满足容许的相对误差时,得到地震全程引起的平均动剪应变和平均动剪应力场,无法计算出孔压和有效应力,简化性非常明显。

无孔压消散的有效应力分析方法^[4]按时段的等效震次和平均动剪应变场,或平均动剪应力场计算出时段末的孔隙水压力(用孔压模型)和有效应力,用此有效应力修正迭代完成时的模量作为下一个时段内计算的初始值。此方法针对地震过程是一个十分短暂,土体无渗流的情况提出,一般偏于保守。

孔压先长后消的有效应力分析方法^[5]是用孔压模型得到时段末的孔隙水压力和有效应力后,用此孔隙水压力作为本时段的初始孔压,用土体静力固结的理论计算孔压的消散,得到时段末的孔隙水压力,并将其作为下一个时段计算时的初始孔压,它与下一个时段计算的新增孔压一起参与静力固结消散,如此计算到地震结束,则可以得到一个将孔压长消过程简化为先增长(动力下)后消散(静力下)的有效应力分析方法。由此可见此方法是动力反应和静力固结交替进行,没有考虑动力固结,存在理论上的缺陷。

孔压长消耦合的有效应力分析方法^[6]是将孔压直接引入动力固结理论的动力平衡方程,将其和含有孔压的渗流连续方程一起求解,即可得到任意点的动应力、动应变和动孔压的变化过程,或得到任意时刻的动应力场、动应变场和动孔压场的场分布。在这种方程建立和求解时,应力孔压的消散与扩散,都必须先借助某种动孔隙水压力增长模式计算出动力作用下孔隙水压力的增长值,再将其转化成等效节点荷载迭加

到静力或动力固结模型中进行消散。所以固结方程不是一个独立的方程组,都离不开动孔隙水压力增长模式,因此还不能算是真正意义上的动孔压与动力反应的耦合分析。

同时,如果动本构与动孔压增长模式搭配不当的话,这种方法还可能导致不合理的计算结果,也就是说,引进增长孔压模型的这种方法在理论上还存在一定的缺陷^[7-9]。

由上述的分析可见,当在动力固结法的动力平衡方程中引入孔压这个基本未知量,并考虑阻尼项的影响时,采用瞬态型的、跟踪滞回曲线的有效应力物态本构模型,不仅在概念上可以得到协调,具有理论上的一致性,而且,由于它摆脱了一个十分难于准确确定的孔压模型,也具有应用上的简易性。它不仅使孔压的长与消相耦合,使动力渗透与动力固结相耦合,而且使动力固结与动力反应相耦合,应该被视为当前一种最有前景的方法。

1 砂土物态本构模型^[10]

1.1 建立物态本构的基本思路

本文所提出饱和砂土物态有效应力应变关系的基本思路如下。

(1) 土的物态系指在动荷作用过程中土处于压缩、回胀、剪缩、剪胀和剪切等不同物理状态时的性态。

(2) 动荷作用下的应力均指静动应力耦合的有效应力,且不考虑速率效应的影响。

(3) 一点的应力状态用平均球应力 p (广义正应力)、广义剪应力 q 和洛德参数 θ_σ 来表示,本文把平均球应力 p 和广义剪应力 q 简称为球应力和偏应力。

(4) 建立本构关系时,采取跟踪实际应力变化曲线,对应力变化过程中应力处于不同特性域,即土对应所处的不同物态(压缩、回胀、剪缩、剪胀、剪切等)分别建立球体应变关系,即球应力 p 与球体应变 ε_{vp} 之间的关系,建立偏体应变关系,即偏应力 q 与偏体应变 ε_{vq} 之间关系,以及偏应变关系,即偏应力 q 与剪应变 ε_s 间关系(见图1)。这样,可跟踪应力的变化判定土的物态,根据不同时段的不同物态利用相应的应力应变关系计算出各时段的应变,求出应力变化过程下的应变过程。这样,在分析物态变化时,可以有剪缩(C_1, C_2, C_3)、剪胀(P_1, P_2)、剪弹(E^+, E^-)和剪切(R^+, R^-)等4类9种物态,考虑到 $E^+ \approx E^- = E$ (数值很小), $R^+ \approx R^- = R$ (影响不大),故可简化为4类7种物态,但主要的只有剪缩与剪胀,

它们是影响土性变化的重要特性。

(5) 一点的应变状态用体应变 ε_v 和广义剪应变 ε_s 来表示, 而且体应变可以分解为球体应变及偏体应变。前者为球应力 p 增减产生的体应变 ε_{vp} , 后者为剪应力变化产生的体应变 (即通常所说的剪缩剪胀体应变), 表示为 ε_{vq} , 对不同的物态可表示为 $\varepsilon_{vq,n}$ ($n=C_1, C_2, C_3, P$)。即有 $\varepsilon_v = \varepsilon_{vp} + \varepsilon_{vq}$, 同样偏应变可以分解为球偏应变及偏偏应变。前者为球应力增减产生的偏应变; 后者为剪应力变化产生的偏应变 (即通常所指的偏应变), 用 ε_{sq} 表示。当不考虑球应力 p 变化所产生的球偏应变时, 广义剪应变 ε_s 等于偏应变 ε_{sq} 。

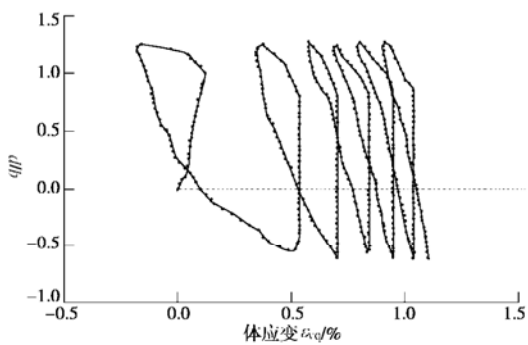


图 1 $\varepsilon_{vp} - q/p$ 关系

Fig. 1 Relationship between ε_{vp} and q/p

1.2 砂土的物态动有效应力应变关系的建立

(1) 球应力 p 与压缩、回胀体应变 ε_{vp} 的关系 (球体应变关系)

在不同固结应力状态 (σ_{3c}, k_c) 下, 保持剪应力 q 不变, 施加往返变化的球应力 p 时, 所进行的大量试验结果表明, 在往返加荷和卸荷过程中, 饱和砂土的球体应变随球应力的增 (减) 而增 (减), 即存在压缩 C 、回胀 S 物态。压缩物态段的体应变 $\varepsilon_{vp,c}$ 与回胀物态段的体应变 $\varepsilon_{vp,s}$ 与作用球应力比 (P/P_a) 的对数值之间均存在良好的线性关系, 用压缩体积模量 K_{pc} 和回弹体积模量 K_{ps} 分别表示为

$$K_{pc} = \frac{dp}{d\varepsilon_{vp,c}} = \frac{p}{\lambda_{ck}}, \quad (1)$$

$$K_{ps} = \frac{dp}{d\varepsilon_{vp,s}} = \frac{p}{\lambda_{sk}}, \quad (2)$$

这些关系中的参数 ($\lambda_{ck}, \lambda_{sk}$) 视具体情况与固结应力状态 (p_c, q_c 或 σ_{3c}, k_c) 和土性状态 (ρ_d) 以及 p 的往返作用次数 (N) 有关。

(2) 偏应力 q 与体应变 ε_{vq} 的关系 (偏体应变关系)

当保持球应力 p 不变, 施加往返变化的偏应力

q 时, 其所产生的体积变形是由剪切变形的发展引起的, 这种纯剪条件下的体积变化反映了饱和砂土的剪缩或剪胀物态变化特性。在此加荷应力条件下, 本文对不同密度的饱和砂土, 在不同固结应力状态 (σ_{3c}, k_c) 下进行了大量的试验研究, 结果表明, 在往返加荷和卸荷过程中, 饱和砂土的偏体应变随偏应力的增大 (减小), 可能呈现 3 种类型的剪缩 (C_1, C_2, C_3)、剪胀 P 和剪切 R 五种物态。在不同类型的剪缩 (C_1 型剪缩、 C_2 型剪缩和 C_3 型剪缩) 和剪胀 P 物态下有效偏应力比 q/p 与偏体应变 ε_{vq} 之间的关系均可近似地用直线拟合, 其表达式为

$$\varepsilon_{vq,n} = \varepsilon_{vnk} - A_{nk} \cdot q/p_c, \quad (3)$$

或用剪切体积模量 K_{qn} 表示为

$$K_{qn} = \frac{dq}{d\varepsilon_{vq,n}} = \frac{p_c}{A_{nk}}, \quad (4)$$

式中, p_c 为固结球应力, 参数 $A_{nk}, \varepsilon_{vnk}$ ($n=C_1, C_2, C_3, P$) 分别为不同类型的剪缩和剪胀物态时, 不同试验条件 k 下直线的斜率、截距。其中参数 A_{nk} 的值, 对 C_1 型剪缩为负值, 其余均为正值。两个参数的值不仅与物态有关, 而且均随不同试验条件 k (不同的密度、固结应力、往返次数等) 而变化。 K_{qn} 为不同应力空间特性域的剪切模量。

(3) 偏应力 q 与偏应变 ε_s 的关系 (偏偏应关系)

动荷载作用下, 可直接跟踪实际的应力应变关系曲线, 来建立饱和砂土的偏应力 q 与偏应变 ε_s ($\varepsilon_s = \varepsilon_{sq}$) 关系。试验研究证明, 动荷载作用下, 加载、卸载、再加载过程的动偏应力 - 动偏应变关系均服从双曲线关系, 它们在随动坐标系 ($q_r - \varepsilon_{s,r}$) 中可以写为

$$q_r = \frac{\varepsilon_{s,r}}{a_r + b_r \varepsilon_{s,r}} = \frac{\varepsilon_{s,r}}{\frac{1}{G_{0r}} + \frac{R_{fr}}{q_{fr}} \varepsilon_{s,r}}, \quad (5)$$

式中, a_r, b_r 为土性参数, 它们可对加载、卸载、再加载所对应的应力空间特性域分别确定。

G_{0r} 为荷载反向点 m (随动坐标系的原点) 的初始剪切模量, 即 $G_{0r} (=1/a_r)$ 为 $q_r \sim \varepsilon_{s,r}$ 关系曲线的初始切线斜率, 对加载、卸载、再加载过程分别根据其对应的物态和荷载反向点 m 的应力状态 (σ_{3c}, k_c) 和相应的物态确定。

R_{fr} 表示随动坐标内的破坏应力比, $R_{fr} = q_{fr}/q_{ult}$, b_r 的倒数为曲线的渐进值 q_{ult} ; q_{fr} 为荷载反向点 m 处的剩余强度。

至此, 本文得到了当考虑球应力与偏应力之间的互相交叉影响时, 描述动应力 - 动应变关系的三

类基本的应力应变关系。

1.3 有效应力物态本构关系参数的确定

本文所建立的物态有效应力本构关系共有如下 10 个土性参数：①压缩指数 λ_{ck} 和回胀指数 λ_{sk} ；②剪缩剪胀参数 A_{nk} ($n=C_1, C_2, C_3, P$)；③相态转换角 φ'_{d0} 和有效内摩擦角 φ'_d ；④起始剪切模量 G_{0r} 和破坏比 R_{fr} 。其中相态转换角 φ'_{d0} 和有效内摩擦角 φ'_d 可由常规静三轴试验来确定外，其它的参数通过动三轴试验确定。

1.4 物态本构模型的应用

根据物态本构模型，建立增量形式的物态本构关系可表示为

$$\left. \begin{aligned} d e_{ij} &= \frac{d S_{ij}}{2 G_r} , \\ d \varepsilon_v &= d \varepsilon_{vp} + d \varepsilon_{vq} , \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

可改写为

$$d \varepsilon_v = \frac{\partial f}{\partial p} dp + \frac{\partial f}{\partial q} dq = \frac{dp}{K_{pm}} + \frac{dq}{K_{qn}} \quad , \quad (7)$$

$$d \varepsilon_{ij} = \frac{d S_{ij}}{2 G_r} + \delta_{ij} \frac{dp}{3K} \quad , \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \frac{1}{K} &= \frac{1}{K_{pm}} + \frac{1}{K_{qn}} \frac{dq}{dp} , \\ G_r &= \frac{dq_r}{d \varepsilon_{sr}} = G_{0r} (1 - R_{fr} S_r)^2 . \end{aligned}$$

式中 $m=C, S$ ，即 K_{pm} 对压缩 C 和回胀 S 两种物态分别确定； $n=C_1, C_2, C_3, P$ ，即 K_{qn} 对不同物态分别确定； $n=R$ 时， $K_{qn}=\infty, K=K_{pm}$ ；增量应力-应变关系的矩阵形式

$$\{d\sigma\} = [D] \{d\varepsilon\} \quad . \quad (9)$$

当把上述物理方程用有效应力物态本构关系表示时，有

$$\left\{ \begin{array}{l} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\sigma_z \\ d\tau_{xy} \\ d\tau_{yz} \\ d\tau_{zx} \end{array} \right\} = \left[\begin{array}{cccccc} K + \frac{4}{3} G_r & K - \frac{2}{3} G_r & K - \frac{2}{3} G_r & 0 & 0 & 0 \\ K - \frac{2}{3} G_r & K + \frac{4}{3} G_r & K - \frac{2}{3} G_r & 0 & 0 & 0 \\ K - \frac{2}{3} G_r & K - \frac{2}{3} G_r & K + \frac{4}{3} G_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_r \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_y \\ d\varepsilon_z \\ d\gamma_{xy} \\ d\gamma_{yz} \\ d\gamma_{zx} \end{array} \right\} \quad (10)$$

2 饱和砂土体有效应力物态地震反应分析方法

首先从 D'Alembert 原理出发，根据有效应

力原理和渗流连续性条件，建立起动力反应分析与渗流的耦合方程，即动力固结方程组为

$$\left. \begin{aligned} (E_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_3 \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + E_3 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) + (E_2 + E_3) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \\ (E_2 + E_3) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} - \frac{\partial p}{\partial x} - C_x + X = \rho (\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + g_x) , \\ (E_2 + E_3) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + (E_1 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + E_3 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_3 \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}) + \\ (E_2 + E_3) \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z} - \frac{\partial p}{\partial y} - C_y + Y = \rho (\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + g_y) , \\ (E_2 + E_3) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + (E_2 + E_3) \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial z} + (E_3 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \\ E_3 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + E_3 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}) - \frac{\partial p}{\partial z} - C_z + Z = \rho (\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + g_z) , \\ \bar{k}_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \bar{k}_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \bar{k}_z \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{\partial}{\partial t} (\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}) . \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中 $E_1 = K + \frac{4}{3} G$ ， $E_2 = K - \frac{2}{3} G_r$ ， $E_3 = G_r$ ， $\bar{k}_x = k_x / \gamma_w$ ， $\bar{k}_y = k_y / \gamma_w$ ， $\bar{k}_z = k_z / \gamma_w$ ，而 k_x, k_y, k_z 为 x, y, z 方向的渗透系数； u, v, w, X, Y, Z 分别为 x, y, z 方向的位移分量和体积力； C_x, C_y 和 C_z 为与阻尼有关的项。

利用伽辽金加权残数法对动力固结方程进行空间域的离散，建立等参数单元有限元的基本关系式。再利用分部积分法将其中的被积函数微分指数降阶，将基函数代入，并考虑到形函数的性质，可得求解耦合方程的有限元列式。最后利用 Wilson- θ 逐步积分法对平衡方程进行时间域离散，连续方程选用 t 到 $t + \Delta t$ 的差分法求解，动力固结方程可写为

$$[\bar{K}]^e \{\delta\}_{t+\Delta t}^e = [\bar{F}]_{t+\Delta t}^e \quad , \quad (12)$$

式中， $[\bar{K}]^e$ 及 $[\bar{F}]^e$ 分别为动力等效刚度矩阵与等效动力荷载矩阵。

$$[\bar{K}]^e = [K]^e + a_1 [C]^e + a_0 [M]^e \quad , \quad (13)$$

式中 $[K]^e, [C]^e$ 和 $[M]^e$ 分别为单元的刚度矩阵、阻尼矩阵和质量矩阵； a_1 和 a_0 为逐步积分系数。

动荷载作用下，在土体中有一个随时间而变化的动应力场和动应变场，它既反映了应力和空间位置的不同，也反映了由于孔压的长消变化引起土体的衰化或强化以及由于动应力的变化所引起静应力状态的重新调整。震动期间动力反应分析时，必须确定瞬时的动应力场和动应变场及动孔压场。为此，计算时采用增量法，按时步进行迭代计算。

具体计算步骤如下^[11]：

(1) 开始计算时, 根据震前静力计算所得到的初始应力场, 计算出各单元的球应力 p 和偏应力 q 。对此应力状态按应力特性域准则分别对偏应力 q 和球应力 p 判定各单元在应力空间中的应力域, 再计算出初始时步的初始剪切模量 G_0 和体积模量 K_0 。

(2) 根据土性参数计算动力固结的刚度矩阵 $[K]$ 、质量矩阵 $[M]$ 和阻尼矩阵 $[C]$, 形成等效动力刚度矩阵 $[\bar{K}]$ 。

(3) 由输入的地震加速度时程曲线所确定各时步的地震加速度, 计算由地震引起的地震荷载增量。将上一时刻末的孔压所引起的孔压荷载, 地震荷载增量以及由质量、阻尼所引起的荷载增量叠加在一起形成本时步的等效动力固结荷载增量矩阵 $\{\Delta\bar{F}\}$ 。

(4) 根据等效动力刚度矩阵 $[\bar{K}]$ 和等效动力固结荷载矩阵 $\{\Delta\bar{F}\}$, 用 Wilson- θ 法求解动力固结增量方程组, 得到该时刻各单元节点的位移增量和孔压增量 $\{\Delta\delta_i^{t+\Delta t}\} = \{\Delta u_i^{t+\Delta t} \quad \Delta v_i^{t+\Delta t} \quad \Delta w_i^{t+\Delta t} \quad \Delta p_i^{t+\Delta t}\}^T$ 。

(5) 根据该时刻的位移场, 求出各单元的应变和应力, 再计算出相应的球应力 p 和偏应力 q 。由此应力状态先按加卸荷准则分别判定 p 和 q 的加载或卸载状态, 再对偏应力 q 和球应力 p 分别按应力特性域准则来判定各单元在应力空间中的应力域。

(6) 根据液化判定准则 ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0$), 判定各单元是否液化。若某单元出现液化, 则取该单元的剪切模量 $G=50$ kPa。

(7) 由莫尔-库仑强度破坏准则, 判定各单元的应力是否超过状态边界, 如果超过, 则进行应力修正计算。

(8) 判断各单元的主应力是否超过土的抗拉强度, 如果超过, 则进行对其应力修正进行抗拉裂计算。

(9) 根据孔压场, 计算出该时刻的静有效主应力 $\sigma_{is} = \sigma_{ic} - u$ ($i=1, 2, 3$, σ_{ic} 为初始主应力) 及静有效球应力 p_s 、有效偏应力 q_s 。

(10) 当各单元在应力空间中的应力域没有发生变化时, 则取与上一个时步相同的土性参数确定模量 K, G_r ; 如已经发生变化, 则先计算出此物态开始时的累积体应变值, 再对新的应力域确定模量 K, G_r , 作为下一时段第一次计算用的模量, 同时计算出新的系统基频。

(11) 对所有时步重复第 (2) ~ (10) 步, 直到地震结束为止。

按照上述步骤, 逐时步进行计算, 直至地震结

束, 得到地震期的位移场、应力场和孔压场。

3 砂土路基的动力反应分析

3.1 有限元模型建立及计算参数的选取

以理想中的砂土路基作为数值分析对象, 模型中的地基砂土层沿 Z 方向厚度为 43 m, X 方向宽度为 60 m, Y 方向长度为 80 m, 路基高度为 5 m。地下水埋深为地面下 3 m。用六面体单元划分的有限元模型如图 2 所示。

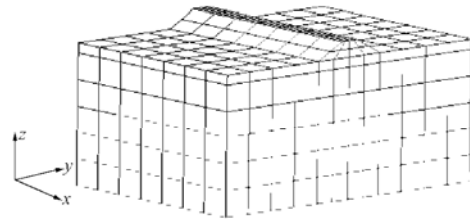


图 2 实体模型

Fig. 2 Finite element model

静力计算采用 E-B 模型, 计算参数见表 1, 动力计算为物态本构模型, 计算参数见表 2。

3.2 输入的地震加速度

输入非规则地震加速度 (沿 Y 向水平输入), 见图 3。

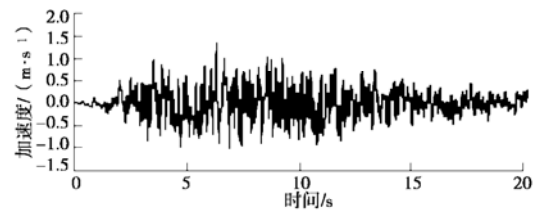


图 3 地震加速度

Fig. 3 Earthquake acceleration

3.3 计算结果及分析

为了直观的分析路基内部孔压场、应力场、变形场的变化, 用 YZ 平面在路基中间切割出一个面。

(1) 地基内瞬态孔压、残余孔压和孔压水平分布特性

在地震作用下, 不同时刻瞬态孔压的大小和分布随输入加速度的变化而在不断发生变化, 由于受物态变化的影响, 瞬态孔压变幅比较大, 时而大于残余孔压, 时而又小于残余孔压, 波动变化, 瞬态孔压和残余孔压总趋势是随着地震加速度的增大和地震历时而逐步上升, 真实的反映了土体内部孔压的实际变化性态。决定地基是否发生液化的关键是残余孔压发展的程度, 但从计算看出, 由于附加应力对土体动力稳定性的有利作用, 路基基础范围内残余孔压增长比较小, 这与上覆附加荷载提高地基抗液化能力的理论是相符

表 1 E-B 模型的计算参数

Table 1 Calculation parameters of E-B constitutive model

渗透系数 $/(10^{-4} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	天然密度 $/(10^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	破坏比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	K /kPa	K_{ur} /kPa	n	K_b	m	孔隙率 n	饱和度 $S_r / \%$
4.62	1.75	0.85	10	26	214	657	0.65	107	0.18	0.47	50.4

表 2 物态本构模型计算参数

Table 2 Calculation parameter of physical state constitutive model

A_{pk}	A_{c_1k}	A_{c_2k}	A_{c_3k}	相态转角 φ'_{00} $/(^\circ)$	有效内摩擦角 $\varphi'_d / (^\circ)$	压缩指数 λ_{ck}	回胀指数 λ_{sk}	剪切模量 G_{0r} / kPa	破坏比 R_{fr}
0.0020	0.0009	0.00185	0.0040	26	12	0.249	0.215	187	0.85

合的。孔压水平的分布图与残余孔压分布图具有相同的规律，附加荷载下路基的孔压水平比较低。孔压发展最高的区域并不在地基表面附近，而在地面下一定深度处，由它向周围形成一定的水力剃度，其中向地 4 面的剃度较大，反映出较高的排渗势，地震结束后，随着时间的推移，残余孔压进一步扩散和消散，孔压场发生了重新分布，继续向两边透水边界排渗，这一点符合本模型的计算具体条件，见图 4~10。

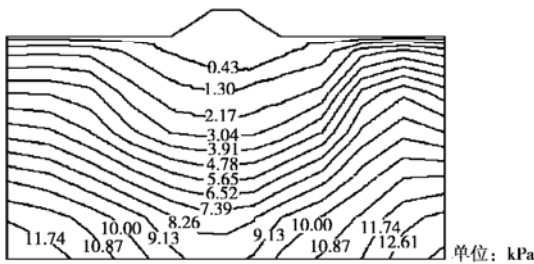


图 4 8 s 时残余孔压

Fig. 4 Contour of the residual pore water pressure after 8 s

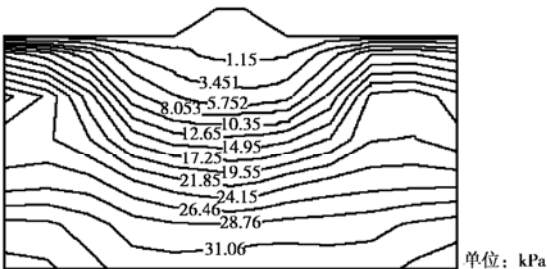


图 5 20 s 时残余孔压

Fig. 5 Contour of the residual pore water pressure after 20 s

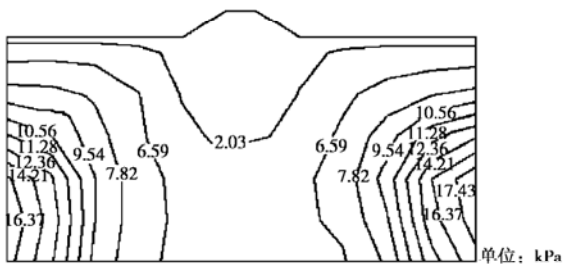


图 6 地震结束 0.5 h 时残余孔压

Fig. 6 Contour of the residual pore water pressure after earthquake completion of 0.5 h

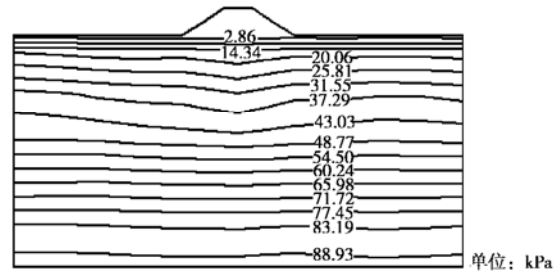


图 7 8 s 时瞬时孔压

Fig. 7 Contour of the transient pore water pressure after 8 s

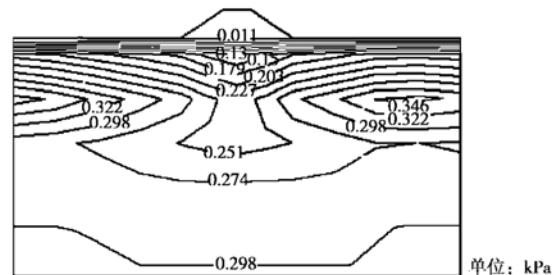


图 8 8 s 时孔压水平

Fig. 8 Contour of the pore water pressure after 8 s

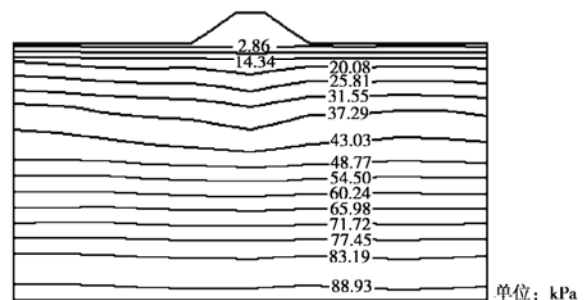


图 9 9 s 时瞬时孔压

Fig. 9 Contour of the transient pore water pressure after 9 s

(2) 残余变形的分布特性

基于物态本构模型的瞬态动力反应分析，跟随了土体在地震作用下的实际变形形态，可计算出土体在每个时步的实际残余变形。参看图 11~12，地震结束时的振陷变形量为-0.24 m。地震结束以后，随着孔压的消散，土体进一步的进行固结，竖向变形进一步的增加，当孔压消散完毕，固结结束后，竖向变形为-0.29

m, 变形场分布符合规律, 真实的反映了土地地震振陷的特性, 不再引进体变模型来计算残余变形, 这是其它计算方法无法完成的。

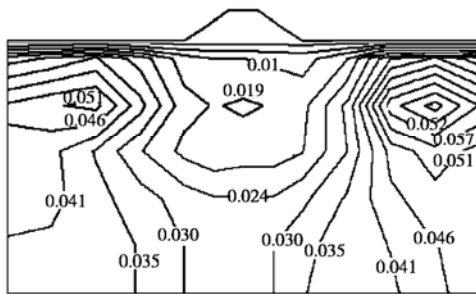


图 10 9 s 时孔压水平

Fig. 10 Contour of the pore water pressure after 9 s

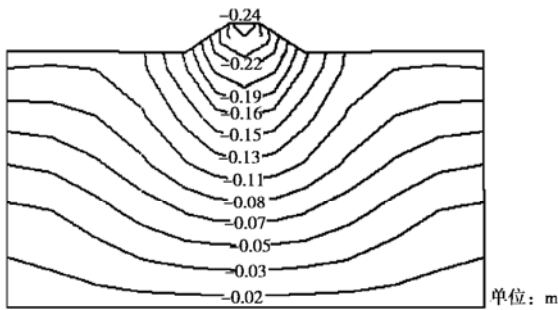


图 11 地震 20 s 时竖向位移

Fig. 11 Contour of the vertical displacement after 20 s

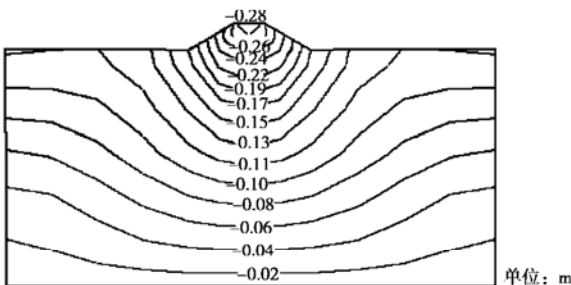


图 12 固结结束时竖向位移

Fig. 12 Contour of the vertical displacement at end of consolidation

(3) 渗透系数对孔压的影响

为了反应渗透系数对孔压的影响, 在模型的一侧底部取一单元的孔隙水压力变化时程曲线来说明, 参看图 13~14。基于物态本构模型的动力反应分析方法, 在固结方程中不再引进由孔压模型计算得到的增长孔压, 将孔压的增长与消散进行耦合, 孔压直接由方程求解, 瞬态孔压表现出强烈的波动性。土体的渗透系数 $2.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 的瞬态孔压比渗透系数 $2.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 瞬态孔压增长的速度明显增大且单调增长, 残余孔压 (平均量的累积) 值随渗透系数的减小而显著增大,

这与孔压理论是一致的, 所以土体的渗透系数对孔压的影响非常明显。

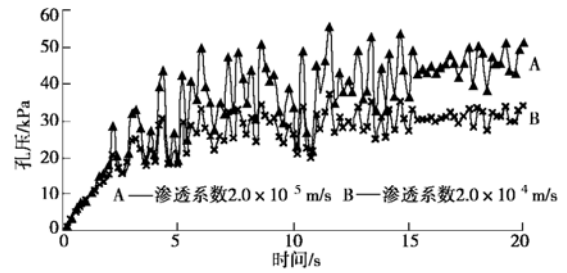


图 13 单元瞬态孔压变化时程曲线

Fig. 13 Transient pore water pressure of element during earthquake

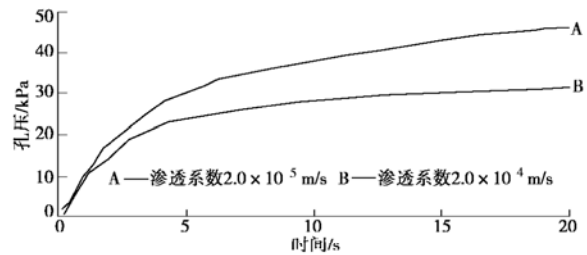


图 14 单元残余孔压变化时程曲线

Fig. 14 Residual pore water pressure of element during earthquake

4 结 语

(1) 瞬态理论的物态本构模型发展到瞬态模量场与瞬态动孔压水平相分离时, 它在继承饱和和砂土瞬态动力学理论的基础上, 完善有效应力空间内物态特性域, 引入应力历史边界, 考虑球应力、偏应力的交叉影响, 拓展采用适合往返荷载和物态差异的有效应力应变三类基本关系, 提出了饱和砂土的有效应力物态本构模型, 走出了更加有广阔前景的方向。

(2) 基于有效应力和足立于物态本构模型土体动力反应分析方法, 它不仅能够反映往返荷载下砂土的非线性、剪缩剪胀特性, 而且可以通过计算得到不同排水条件下砂土的塑性体应变和动孔隙水压力的变化, 不需要专门的孔压模型, 具有更加广泛的适用性。不仅使静、动有效应力相耦合以及孔压的涨消相耦合, 而且使动力渗流和动力固结相耦合以及动力反应和动力固结相耦合, 揭示了土体动孔压长消统一反应的过程、有效应力场和实际变形场的变化过程, 能够较全面地反映动力作用下土体应力应变反应真实过程, 为以变形为基础判定土体的动力稳定性提供了理论基础和途径。

(3) 所编制的土体动力反应分析有限元计算程序前后处理接口于商业软件 ANSYS, 使的数值模拟

过程图形可视化, 结果形象直观清楚。动力分析算例结果表明, 此方法真实的反映了土体在地震作用下的实际变形形态, 可以同时求得土体的变形(残余变形)、孔隙水压力(包括残余孔隙水压力的累积上升和消散及瞬态孔压的波动变化过程)变化过程、振后孔隙水压力的消散和固结变形过程, 实现了基于物态本构模型的瞬态理论在动力反应分析中的应用。

参考文献:

- [1] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004. (XI Ding-yi. Soil dynamics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004. (in Chinese))
- [2] ZIENKIEWICZ O C, CHAN A H C, PASTOR M, SCHREFLER B A, SHIOMI T. Computational geomechanics with special reference to earthquake engineering[M]. ENGLAND: John Wiley & Sons Ltd, 1999.
- [3] SEED H B, LEE K L, IDRIS I M. Dynamic analysis of slide in the Lower San Fernando dam during the earthquake of Feb. 9, 1971[J]. JGED, 1975, **101**(9): 889 - 912.
- [4] MEJIA L H, SEED H B. Three-dimensional dynamic response analysis of earth dams[R]. Report EERC-81-15, 1987: 34 - 46.
- [5] DANG F N, XIE D Y, LI N. A new method of dynamic consolidation analysis for saturated[M]. ICAPV2000, 2000: 715 - 168.
- [6] 盛 虞, 卢盛松, 姜 朴. 土工建筑物动力固结的耦合振动分析[J]. 水利学报, 1989, **12**: 31 - 42. (SHENG Yu, LU Sheng-song, JIANG Pu. A coupling analysis method of earth structures considering dynamic consolidation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, **12**: 31 - 42. (in Chinese))
- [7] 关 飞, 韩国城. 有效应力动力分析方法的探讨[J]. 地震工程与工程振动, 1988(12): 54 - 65. (GUAN Fei, HAN Guo-cheng. On the effective stress method of dynamic analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1988(12): 54 - 65. (in Chinese))
- [8] 徐志英, 周 健. 土坝地震孔隙水压力产生、扩散和消散的三维动力分析[J]. 地震工程与工程振动, 1985(4): 57 - 72. (XU Zhi-ying, ZHOU Jian. Generation, diffusion and dissipation of seismic pore water pressure in earth dam by 3-d dynamic analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1985(4): 57 - 72. (in Chinese))
- [9] 陈飞雄, 李 宁, 谢定义. 黑河土石坝的地震响应和液化分析[J]. 水利学报, 2000, **2**: 22 - 26. (CHEN Fei-xiong, LI Ning, XIE Ding-yi. Dynamic response of earthquake and liquefaction analysis of the Heihe Dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, **2**: 22 - 26. (in Chinese))
- [10] 陈存礼, 饱和砂土体有效应力物态地震反应分析方法的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005. (CHEN Cun-li. Research on seismic response analysis approach on effective stress and physical state in saturated sand mass[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005. (in Chinese))
- [11] 李宏儒. 土体动力反应分析方法的分析与改进[D]. 西安: 西安理工大学, 2005. (LI Hong-ru. Analysis and improvement of the methods for the soil dynamic response analysis[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005. (in Chinese))