

文章编号: 1000-7598-(2007) 增刊-0703-07

材料模型参数对自由场地震响应的影响

苏 栋¹, 李相崧², 明海燕¹

(1. 深圳大学 土木工程学院深圳市土木工程耐久性重点实验室, 深圳 518060; 2. 香港科技大学 土木工程系, 香港)

摘 要: 水平自由场地震响应分析是岩土工程近几十年的研究热点之一。利用完全耦合有限元程序 SUMDES 2006 和临界状态砂土本构模型, 分析了 15 m 深的饱和砂土自由场在地震作用下的响应, 包括加速度的传播、孔隙水压力的发展、侧向变形以及地面沉降。通过增大和减小 10 % 参数值, 分析了材料本构模型中 12 个参数值的变化对土层地震响应的影响。分析结果表明, 在这些参数中, 临界状态应力比 M 和 $e-p^\xi$ 平面中临界状态线在 e 轴上的截距 e_r 的影响比较显著, 因而利用室内试验数据率定模型参数时, 需保证其有足够的精度。分析结果也说明, 用于自由场地震响应分析时, 临界状态砂土本构模型仍然有进一步简化以减少参数个数的空间。

关 键 词: 自由场; 地震响应; 完全耦合; 本构模型; 模型参数

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Effects of material model parameters on seismic free ground response

SU Dong¹, LI Xiang-song², MING Hai-yan¹

(1. Shenzhen Key Laboratory for Durability of Civil Engineering, College of Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
2. Civil Engineering Department, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

Abstract: Analysis of response of level ground subjected to earthquake is one of the most active research areas in geotechnical earthquake engineering. In this paper, seismic response including propagation of acceleration, development of pore pressure, lateral displacement and settlement, of a level ground consisting of 15 m saturated sand is analyzed, by using the finite element procedure SUMDES 2006, incorporating a critical state constitutive model for sand. Effects of model parameters on seismic ground response are studied by adjusting the values of parameter by $\pm 10\%$. The analytical results show that, among these parameters, the critical state stress ratio M and e_r , the intercept of the critical state line on the e axis in the $e-p^\xi$ plane, impose stronger effect. Therefore, the accuracy of the two parameters should be secured when the parameters are calibrated against the experimental data. The results also imply that the number of parameter in the model may be reduced when it is applied to the analysis of seismic response of level ground.

Key words: free ground; seismic response; fully coupled; constitutive model; model parameters

1 前 言

水平自由场地震响应分析一直是岩土工程近几十年的研究热点之一, 也是地震工程实践的重要内容。一般而言, 分析应包括场地液化评估, 沉降、变形分析以及场地表面运动的计算。对土体材料的性质而言, 水平场地地震响应分析方法可划分为线性方法和非线性方法。线性方法中, 任意位置的响应可以用传递函数和输入地震波的参数直接表

达; 非线性方法中, 任意位置的响应只能在时域中通过数值积分得到。目前广泛使用的 Shake 程序^[1]是用等效线性的方法考虑土的非线性。

从土骨架和孔隙水的相互作用角度而言, 水平场地地震响应分析方法可以归为两类: 非耦合法和完全耦合法。在非耦合法中, 饱和砂土场地的液化, 土体加速度、速度和位移响应是用不同的程序分别计算得到。完全耦合法考虑孔隙水与土骨架的相互作用, 用一个综合的程序同时计算出地震作用下的

收稿日期: 2007-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50608051); 广东省自然科学基金资助项目 (No. 06301363); 深圳市科技计划项目 (No. 200523)

作者简介: 苏栋, 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 主要从事砂土液化、桩-土相互作用、岩土工程数值分析等方面的研究。E-mail: sudong@szu.edu.cn

孔隙水变化、土体的加速度、速度和位移响应。完全耦合法要求所使用的本构模型能够很好地模拟土在各种加载条件下的应力-应变、应变-强度、剪胀和剪缩等特性。

本文利用完全耦合的有限元分析程序 SUMDES 2006, 并结合临界状态砂土本构模型, 分析了 15 m 深的饱和砂土自由场在地震作用下的响应。通过增大和减小 10 % 参数值, 分析了模型的 3 组共 12 个参数值的变化对土层地震响应的影响。

2 SUMDES 2006

SUMDES^[2] 是李相崧于 1992 年开发的一维多方向水平场地地震响应分析程序, 该程序假设场地水平, 并且在水平面无限延伸, 地震波从底面垂直上传播, 场地表面各种应力为 0, 场地底面不透水, 地下水位以下的土完全饱和。虽然程序假设变量在水平方向是不变的, 但它能描述介质在空间各方向的运动, 因而是个一维多方向的水平场地地震响应分析程序。SUMDES 是按照 Biot^[3, 4] 和 Zienkiewicz^[5, 6] 所描述的分析框架, 基于动量守恒和质量守恒两个物理定律, 以及分别描述土骨架、孔隙水和水土相互作用等 3 个本构关系建立起来的, 因而是一个完全耦合的分析程序。它能模拟压缩波和剪切波同时传播的情况, 并计算地震引起的土层水平运动和垂向沉降以及孔隙水压力的累积和消散以及振动引起的侧向土压力变化、土的压缩和膨胀等。

SUMDES 2006 是笔者在 SUMDES 的基础上开发的 windows 应用程序。程序以 SUMDES 原程序为内核, 提供用户友好型的图形输入输出界面。SUMDES 2006 包含两个运行程序: SUMDES Edit 和 SUMDES Plot, 其中 SUMDES Edit 用于问题的定义和求解, SUMDES Plot 用于分析结果的图形显示和数据导出。



图 1 SUMDES Edit 中的用户工具栏

Fig.1 User toolbar in SUMDES Edit

如图 1 所示, SUMDES Edit 中, 单击用户工具栏中的按钮, 可以通过弹出的对话框定义本构模型、土体材料参数、土层参数及单元划分和土层底部输入的地震波; 还可以对已定义的问题进行检查; 问题定义成功后, 通过单击运行或停止按钮可以随时开始或中止运算; 运算结束后, 结果保存为 *.out 文件。

通过 SUMDES Plot, 用户可以打开 SUMDES Edit 所产生的 *.out 文件。使用程序的 Plot 菜单可以直接绘制任意节点的加速度、速度、位移时程曲线, 以及这些物理量的富氏谱和响应谱; 可以绘制任意单元的正应力、剪应力、孔隙水压力和超静孔隙水压力时程曲线; 可以绘制加速度、应力、孔隙水压力等各种物理量沿深度的轮廓图 (任意时刻轮廓图或峰值轮廓图)。如图 2 所示, 使用程序中的 Animation 菜单, 还可以动态地显示一些物理量的变化过程。

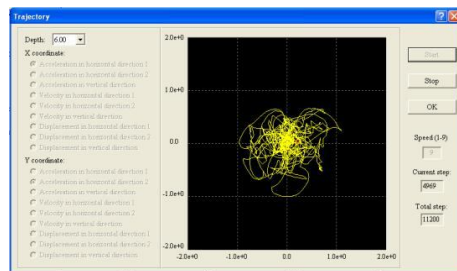


图 2 SUMDES Plot 中动画显示运算结果

Fig.2 Animation view of results in SUMDES Plot

目前, SUMDES 2006 已经嵌入了多种本构模型, 包括线弹性模型、与平均正应力相关的线弹性模型、降次边界面模型以及考虑与状态相关的剪胀性的临界状态砂土模型^[7]。本文使用考虑与状态相关的剪胀性的临界状态砂土模型, 下节将简单介绍模型的主要框架及模型参数。

3 临界状态砂土模型

临界状态砂土模型^[7]是以与状态相关的剪胀性理论和临界状态理论为基础, 以塑性双边界面为平台的本构模型。模型只用一组参量模拟砂土在各种密度和应力水平下的行为, 包括剪胀性、应力-应变行为和应变-强度行为。

土的剪胀性的定义是塑性体积应变比增量与塑性偏应变增量之比:

$$D = \frac{d\varepsilon_{kk}^p}{\sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p}} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_{kk}^p = \varepsilon_v^p$ 为塑性体应变; $e_{ij}^p = \varepsilon_{ij}^p - \varepsilon_{kk}^p \delta_{ij} / 3$ 为

塑性偏应变张量。Li 和 Dafalias^[8]提出的剪胀性的一般形式为

$$D = D(R, \theta, e, Q, C) \quad (2)$$

式中: R 为剪应力比; θ 为罗德角; e 为孔隙比; Q 代表除 e 之外所有会影响 D 的内部状态变量。根据定义, $D > 0$ 和 $D < 0$ 分别代表剪缩和剪胀, $D = 0$ 代表临界状态或相变状态。在此模型中, D 采用与状态参量:

$$\psi = e - e_c = e - [e_r - \lambda_c (p/p_r)^\xi] \quad (3)$$

相关的表达式。式 (3) 中, e_r 、 λ_c 和 ξ 为 $e-p^\xi$ 平面中临界状态线参数。

模型包含两个边界面, 其中与偏应力系数 $r_{ij} = \sigma_{ij}/p - \delta_{ij} = s_{ij}/p$ 相关的边界面为一锥面 F_1 ; 与平均法向应力 $p = \sigma_{kk}/3$ 相关的边界面为一平面 F_2 。

模型的第 1 作用机制与偏应力系数相关。由锥面 F_1 的一致性条件 $dF_1 = 0$ 可得:

$$p \bar{n}_{ij} dr_{ij} - K_{p1} dL_1 = 0 \quad (4)$$

式中: $\bar{n}_{ij}$ 为 r_{ij} 在锥面 F_1 上的投影 $\bar{r}_{ij}$ 处的法向张量 ($\bar{n}_{ij} \bar{n}_{ij} = 1$); K_{p1} 和 dL_1 分别为与 F_1 相关的塑性模量和加载指数。

模型的第 2 作用机制与平均法向应力相关。由边界面 F_2 的一致性条件 $dF_2 = 0$ 可得:

$$dp - K_{p2} dL_2 = 0 \quad (5)$$

式中: K_{p2} 和 dL_2 分别为与 F_2 相关的塑性模量和加载指数。

如表 1 所列, 模型共包含 5 组 18 个参数, 各参数的具体含义参见文[7]。分析中涉及到的重要参数将在适当位置介绍。

表 1 Toyoura 砂的主要模型参数
Table 1 Main model parameters for Toyoura sand

弹性参数	临界状态参数	与 dr 相关的参数	与 dp 相关的参数	默认参数
$G_0 = 125$	$M = 1.25$	$d_1 = 0.41$	$d_2 = 1$	$a = 1$
$\nu = 0.25$	$c = 0.75$	$m = 3.5$	$h_4 = 3.5$	$b_1 = 0.005$
	$e_r = 0.934$	$h_1 = 3.15$		$b_2 = 2$
	$\lambda_c = 0.019$	$h_2 = 3.05$		$b_3 = 0.01$
	$\xi = 0.7$	$n = 1.1$		

注: c 为拉伸临界状态百分比与压缩临界状态应力比。

4 基准算例及分析结果

本文使用的基准算例如图 3 所示, 土层为 15 m 厚的完全饱和砂土, 均匀划分为 15 个单元。砂土的

颗粒比重为 2.65, 孔隙比为 0.787, 渗透系数为 0.02 cm/s, 土层的初始侧向压力系数为 0.6。分析中土的本构模型采用上节介绍的临界状态砂土模型, 基准算例中本构模型参数采用文[7]所率定的 Toyoura 砂参数, 参数值见表 1。

分析中土层输入的剪切波为经过 Hanning 窗口修正的正弦波, 可表示为

$$A(t) = \frac{A_p}{2} [1 - \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} \right)] \sin(2\pi f t) \quad (6)$$

式中: A_p 为加速度峰值; f 为振动频率; T 为振动时长。分析中峰值 $A_p = 0.1 \text{ g}$, 频率 $f = 1.0 \text{ Hz}$, 地震波时长 $T = 20 \text{ s}$, 而分析的时间步长为 0.001 s, 分析总时长为 30 s。

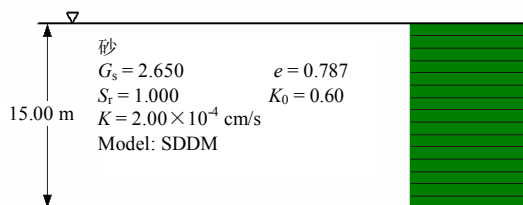


图 3 基准分析模型

Fig.3 Model for the benchmark analysis

下面简要介绍基准算例的分析结果。图 4 比较了深度为 15, 10, 5 m 和 0 m 处所计算的加速度时程曲线。可以看出, 10 m 处加速的波形仍然较为完整, 但在 8 s 后幅值开始变小, 早于输入波幅值变小的时刻。0 m 和 5 m 处加速度幅值的变化与 10 m 处相似, 但它们在 10 s 后幅值减小幅度很大, 在 16 s 后幅值已接近于 0, 在离心机振动试验中也曾观测到类似现象, 该现象与砂土液化有关, 因为剪切波不能在完全液化的土中传播^[9]。

图 5 为加速度峰值轮廓图。底部输入的加速度峰值为 0.1 g, 随着剪切波沿着土层向上传播, 加速度被不断放大, 尤其在较浅的土层中。经过放大后, 土层表面的加速度峰值为 0.195 g, 剪切波被该土层放大了 1.95 倍。

图 6 比较了 2.5, 7.5 m 和 12.5 m 深度处的超静孔隙水压力时程曲线。所有深度处的超静孔隙水压力在 2.5 s 才开始出现, 滞后于振动信号。深度越深, 水压力增长的速度越快, 峰值越大, 在 12 s 左右水压力已经接近峰值。这几个点的超静孔隙水压力的峰值分别为 18.2, 62.9, 111.1 kPa。从图 6 还可以看出, 在振动信号结束时, 这几处的孔隙水压力并没有出现明显的下降, 这种现象主要是由于土层较厚, 而渗透系数相对较小造成的, 该现象也与

实际地震现场观测到的现象相吻合。

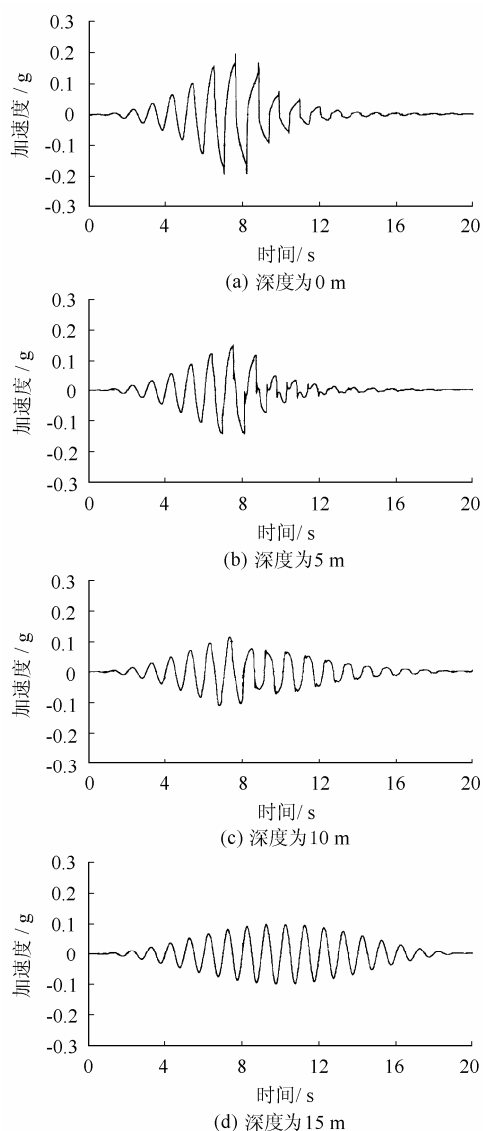


图 4 加速度时程

Fig.4 Time histories of acceleration

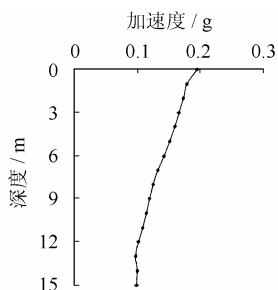


图 5 加速度峰值轮廓图

Fig.5 Profile of peak acceleration

图 7 为深度 15, 10, 5 m 和 0 m 处的侧向位移时程曲线。可以看出, 8 s 以前位移随着加速度幅值的增加逐步增加, 位移正峰值和负峰值基本相等, 即振动关于 0 点对称, 表明这段时间的变形基本上属于弹性变形, 但在 8 s 以后, 深度 10, 5 m 和

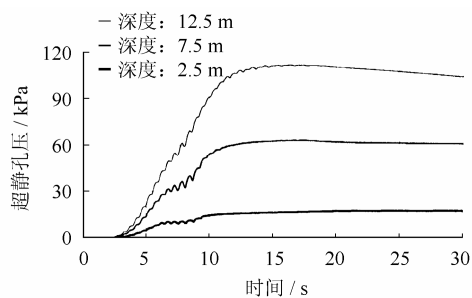


图 6 超静孔压时程

Fig.6 Time histories of excess pore pressure

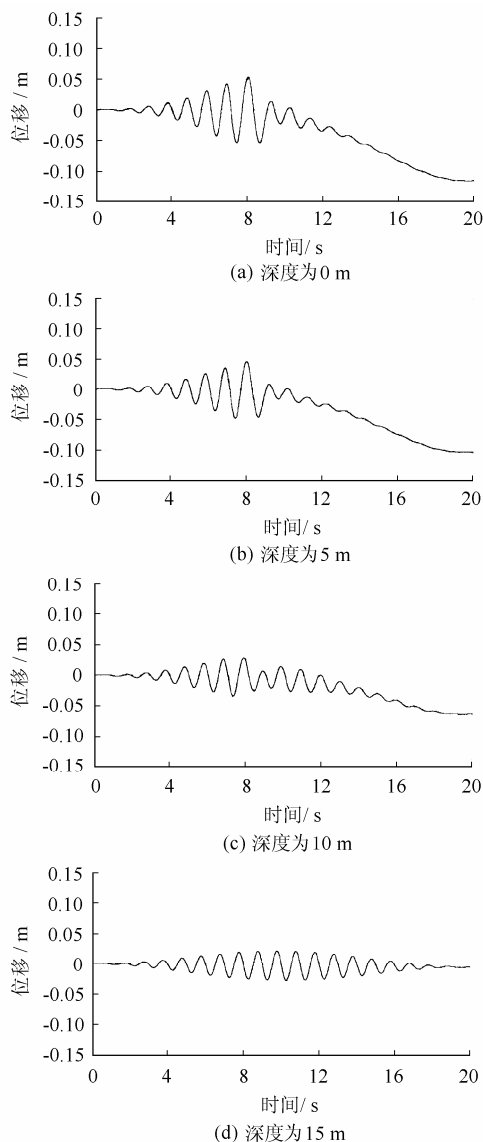


图 7 侧向位移时程

Fig.7 Time histories of lateral displacement

0 m 处的位移幅值明显减小, 而且位移往负值方向发展。通过和孔隙水压力时程曲线比较表明: 砂土的变形和砂土层中的超静孔隙水压力的发展密切相关, 随着超静孔隙水压力的增长, 土体不断产生和积累塑性变形; 在接近液化时, 土体出现了流动式的破坏。

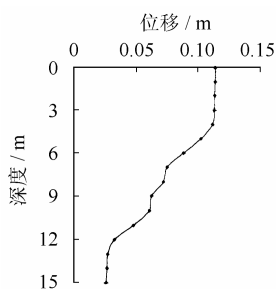


图 8 侧向位移峰值轮廓图

Fig.8 Profile of peak lateral displacement

图 8 为侧向位移峰值轮廓图。该图表明, 侧向位移从底部到表面逐渐增大, 地表的最大位移为 0.11 m。但位移相对深度的梯度, 即剪应变在中部最大, 在深层和浅层处较小, 这与水平自由场的边界条件吻合。

图 9 为土层表面的竖向沉降时程曲线。土层在 2.5 s 开始沉降, 这与超静孔隙水压力出现的时刻相一致, 说明土体的沉降是和超静孔隙水压力的消散以及水从土表面的排出同时进行的。在 6 s 以后, 地面沉降随着时间基本线性增长; 根据达西定律可推断在这时段内孔隙水压力的梯度基本维持不变。在 30 s 时沉降为 0.31 cm, 但沉降还没有结束。

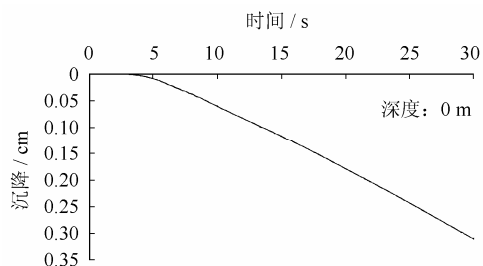


图 9 土层表面沉降时程

Fig.9 Time history of settlement at the ground surface

5 材料模型参数的影响

本文对表 1 所列参数中的 3 组(临界状态参数、与 dr 相关的参数和与 dp 相关的参数)共 12 个参数进行敏感性分析, 以考查临界状态本构模型的主要参数变化时对水平自由场地震响应带来的影响。分析采取调整(增大或减少 10%)其中某个模型参数而保持其他模型参数和算例参数(包括土层厚度、输入的地震波等)与基准算例完全相同的方式进行, 并将每个分析的结果与基准算例的结果进行对比。

表 2 和表 3 分别列出将临界状态参数增大和减小 10%对地表加速度放大系数、地表侧向位移和地表沉降的影响, 表中影响百分比的定义为

$$\alpha = \frac{n - n_b}{n_b} \times 100 \% \quad (7)$$

式中: n_b 为基准算例的结果; n 为对比算例的结果。从表 2 可以看出, 与临界状态相关的 5 个参数中, 临界状态应力比 M 和 $e-p^\xi$ 平面中临界状态线在 e 轴上的截距 e_r 的影响较大。

当 M 增大 10%时, 对地表侧向位移和地表沉降的影响为 -14.11%; 当 M 减小 10%, 对地表侧向位移的影响为 18.65%, 模型中的塑性模量:

$$K_{pl} = \frac{Gh}{R} [Mg(\bar{\theta})e^{-n\psi} - \bar{R}] \quad (8)$$

即 K_{pl} 与 M 成正比。 M 增大, K_{pl} 增大, 在相同水平剪应力作用下的剪应变减小, 侧向位移也减小; 而 M 减小时则情况相反。

当 e_r 增大 10%, 对地表加速度放大系数、地表侧向位移和地表沉降的影响分别为 8.53%, -36.30%, -16.65%; 当 e_r 减小 10%, 对地表加速度放大系数、地表侧向位移和地表沉降的影响分别为 -14.32%, 58.22%, 20.90%。由式(3)可知, e_r 直接影响到状态参量 ψ , 其他参数不变时, 增大 e_r 导致 ψ 减小; 而根据式(8), 由于 $n > 0$, ψ 减小使得 K_{pl} 增大, 侧向位移也减小。另一方面, ψ 减小也就是土的剪缩性减弱, 因而土体的塑性体应变也减小, 导致地表沉降减小。

表 2 临界状态参数增大 10%的影响

Table 2 Effect of critical state parameter increased by 10%

参数值	地表加速度放大系数		地表侧向位移		地表沉降	
	数值	影响百分比/%	绝对值/m	影响百分比/%	数值/cm	影响百分比/%
基准参数	1.95	0.00	0.11	0.00	0.31	0.00
$M=1.375$	2.04	4.71	0.10	-14.11	0.32	1.95
$c=0.825$	1.98	1.68	0.13	12.75	0.32	2.65
$e_r=1.0274$	2.12	8.53	0.07	-36.30	0.26	-16.65
$\lambda_c=0.0209$	1.95	0.16	0.12	8.44	0.31	0.10
$\xi=0.77$	1.97	0.99	0.10	-9.23	0.31	-0.19

表 3 临界状态参数减小 10%的影响

Table 3 Effect of critical state parameter decreased by 10%

参数值	地表加速度放大系数		地表侧向位移		地表沉降	
	数值	影响百分比/%	绝对值/m	影响百分比/%	数值/cm	影响百分比/%
基准参数	1.95	0.00	0.11	0.00	0.31	0.00
$M=1.125$	1.89	-3.04	0.13	18.65	0.31	-0.99
$c=0.675$	1.96	0.63	0.12	9.76	0.31	-0.19
$e_r=0.8406$	1.68	-14.03	0.18	58.22	0.38	20.90
$\lambda_c=0.0171$	1.99	1.88	0.11	-0.35	0.31	-0.19
$\xi=0.63$	1.93	-1.05	0.12	7.48	0.31	0.06

表 4 和表 5 分别列出与 dr 相关的参数增大和减小 10 % 对地表加速度放大系数, 地表侧向位移和地表沉降的影响, 可以看出, 该组参数变化所带来的影响基本小于 10 %, 除了 d_1 增大 10 % 导致地表侧向位移增加 13.10 %, h_1 增大 10 % 导致地表侧向位移减小 11.96 %, h_1 减小 10 % 导致地表沉降增加 11.67 %。相比较而言, 与 dr 相关的参数对自由场地震响应的影响远小于与临界状态相关的参数。

表 4 与 dr 相关的参数增大 10 % 的影响

Table 4 Effect of parameters associated with dr increased by 10 %

参数值	地表加速度放大系数		地表侧向位移		地表沉降	
	数值	影响百分比 /%	绝对值 /m	影响百分比 /%	数值 /cm	影响百分比 /%
基准参数	1.95	0.00	0.11	0.00	0.31	0.00
$d_1 = 0.451$	1.91	-1.94	0.13	13.10	0.32	1.63
$m = 3.85$	1.99	1.88	0.12	6.60	0.31	-1.12
$h_1 = 3.465$	2.07	6.39	0.10	-11.96	0.30	-4.44
$h_2 = 3.355$	1.86	-4.45	0.12	8.36	0.33	6.62
$n = 1.21$	1.98	1.47	0.12	2.81	0.31	-0.74

表 5 与 dr 相关的参数减小 10 % 的影响

Table 5 Effect of parameters associated with dr decreased by 10 %

参数值	地表加速度放大系数		地表侧向位移		地表沉降	
	数值	影响百分比 /%	绝对值 /m	影响百分比 /%	数值 /cm	影响百分比 /%
基准参数	1.95	0.00	0.11	0.00	0.31	0.00
$d_1 = 0.369$	1.99	2.25	0.11	-6.77	0.31	-1.98
$m = 3.15$	1.96	0.73	0.11	-3.87	0.32	2.75
$h_1 = 2.835$	1.80	-7.59	0.12	4.57	0.35	11.67
$h_2 = 2.745$	2.03	3.93	0.10	-8.44	0.30	-4.44
$n = 0.99$	1.91	-1.88	0.10	-9.23	0.32	3.45

表 6 和表 7 分别列出与 dp 相关的参数增大和减小 10 % 对地表加速度放大系数, 地表侧向位移和地表沉降的影响。同样, 该组参数的影响也较小。这主要是由于在模型中, 第 2 作用机制只有在 p 位于边界面上, 而且 $dp > 0$ 时才被激活。而由于在地震过程中大部分时刻 p 都在减小, 所以该作用机制产生的影响有限。

6 结 语

利用完全耦合有限元程序 SUMDES 2006 和临界状态砂土本构模型, 分析了 15 m 的饱和砂土自由场在地震作用下的响应, 包括加速度的传播、

表 6 与 dp 相关的参数增大 10 % 的影响

Table 6 Effect of parameters associated with dp increased by 10 %

参数值	地表加速度放大系数		地表侧向位移		地表沉降	
	数值	影响百分比 /%	绝对值 /m	影响百分比 /%	数值 /cm	影响百分比 /%
基准参数	1.95	0.00	0.11	0.00	0.31	0.00
$d_2 = 1.1$	1.97	1.20	0.12	9.85	0.31	-0.35
$h_4 = 3.85$	1.95	0.16	0.12	8.00	0.31	0.45

表 7 与 dp 相关的参数减小 10 % 的影响

Table 7 Effect of parameters associated with dp decreased by 10 %

参数值	地表加速度放大系数		地表侧向位移		地表沉降	
	数值	影响百分比 /%	绝对值 /m	影响百分比 /%	数值 /cm	影响百分比 /%
基准参数	1.95	0.00	0.11	0.00	0.31	0.00
$d_2 = 0.9$	1.97	0.84	0.13	11.35	0.31	0.35
$h_4 = 3.15$	1.97	1.31	0.12	2.55	0.31	-0.54

孔隙水压力的发展、侧向变形以及地面沉降。通过增大和减小 10 % 参数值, 分析了 3 组 (临界状态参数、与 dr 相关的参数和与 dp 相关的参数) 共 12 个材料本构模型参数值的变化对土层地震响应的影响。分析结果表明, 临界状态应力比 M 和 $e-p^{\xi}$ 平面中临界状态线在 e 轴上的截距 e_c 变化时产生的影响较大。因而使用室内试验数据率定模型参数时, 需要有足够数量的高精度数据点去确定这两个参数, 以保证分析结果的可靠性。分析结果也说明, 对于自由场地震响应分析, 临界状态砂土本构模型仍然有进一步简化以减少模型参数个数的空间。

参 考 文 献

- [1] Idriss I M, Sun J I. SHAKE91: a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits.[Z]. User's Guide, University of California, Davis, 1992.
- [2] Li X S, Wang Z L, Shen C K. SUMDES - a nonlinear procedure for response analysis of horizontally-layered sites subjected to multi-directional earthquake loading[Z]. Report to the Department of Civil Engineering, University of California, California: Davis, 1992.
- [3] Biot MA. General theory of three dimensional consolidation[J]. *Journal of Applied Physics*, 1941, 12: 155-164.
- [4] Biot MA. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid[J]. *Journal of Applied Physics*,