

地震强度对 Upper San Fernando 土坝流动变形的影响

邹离湘,明海燕

(深圳大学土木工程系,广东 深圳 518060)

摘要 对 Upper San Fernando 土坝进行一组抗震性能分析,采用基于与状态相关的剪胀性理论的临界状态砂土模型,描述土在所有可能加载条件下的响应.除了给出土坝的总体位移及变形状况外,还提供了土在局部位置的应力路径和应力应变关系.堤坝变形的计算值与现场观测的结果非常接近.

关键词 流动变形;完全耦合分析;液化;残余强度;Upper San Fernando 土坝

中图分类号 TV641.2;P315.9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2003)03-0285-06

在 1971 年 San Fernando 地震中,Lower San Fernando 土坝的上游边坡发生了严重的滑坡破坏,而临近的 Upper San Fernando 土坝只发生了有限度的指向下游方向的流动变形.30 年来,这两个土坝的地震响应一直吸引着世界各地工程界及学术界对它的关注^[1~6].本文采用新开发的完全耦合分析程序 SUMDES2D 和临界状态砂土模型^[7]对 Upper San Fernando 土坝进行抗震性能分析.除了分析土坝在 1971 年地震作用下的变形情况,还分析了地震强度对该坝流动变形的影响.

1 数值分析程序和本构模型

SUMDES2D 是基于动量守恒和质量守恒两个物理定律,以及土骨架、孔隙水和土水相互作用等三个本构关系的完全耦合动力分析程序,其基本控制方程为

$$\sigma_{ij,j} - \rho b_i = -\rho \ddot{u}_i \tag{1}$$

$$n(v_{i,i} + \epsilon_{vwc}) + \dot{u}_{i,i} = 0 \tag{2}$$

式中: σ_{ij} ——总应力; ρ ——土的密度; b_i ——体积力的加速度; u_i ——土骨架的位移; v ——水的渗流速度; ϵ_{vwc} ——孔隙水因受压而产生的体积应变; n ——土的孔隙率.

分析所采用的临界状态砂土模型的特别之处是它揉合与状态相关的剪胀性概念^[8],即土的剪胀性不仅取决于应力比而且还取决于材料的内部状态.在三轴压缩空间该模型的剪胀性

$$d = \frac{d\epsilon_v^p}{d\epsilon_q^p} = d_1 \left(e^{m\psi} - \frac{\eta}{M_c} \right) \tag{3}$$

$$\eta = q/p'$$

式中: ϵ_v^p 、 ϵ_q^p ——土骨架的塑性体积应变和塑性偏应变; d_1 、 m ——材料常数; η ——应力比; q 、 p' ——偏应力和平均有效正应力; M_c ——应力比在临界破坏时的值; $\psi = e - e_c$ 是状态参数^[8], e ——孔隙比; e_c ——临界孔隙比.对于松粒状土,在到达临界状态之前剪胀性总为正.这意味着模型对于松砂在临界破坏之前的响应总是剪切收缩,这也就是松砂的流动液化.对于紧粒状土,存在有相态转换应力比 $\eta_{pt} = M_c e^{m\psi} < M_c$,在该状态剪胀性为零,模型的响应从剪缩切换到剪胀.这一特点勾画出中紧砂和紧砂的反复流动响应.以上描述表明该模型能够以一种统一的方式模拟粒状土在不同密度和应力状态的各种响应.在这种统一的框架之下,对一种砂土材料只需要一组材料参数,不同的材料响应则取决于材料的初始状态,如密度和应力状态等.

2 Upper San Fernando 坝的有限元模型

图 1(a)是 Upper San Fernando 坝的有限元网格图.图 1(b)是所采用的输入地震波,即 Pacoima 加速度谱,峰值加速度为 $0.6g$.该地震波被认为可以代表 1971 年地震在 Upper San Fernando 坝所在场地的运动.此前有关该坝的分析均采用此地震波.本文所述的分析中,采用了 3 种强度的输入地震,即峰值加速度分别为 $0.36g$ 、 $0.6g$ 和 $0.9g$.

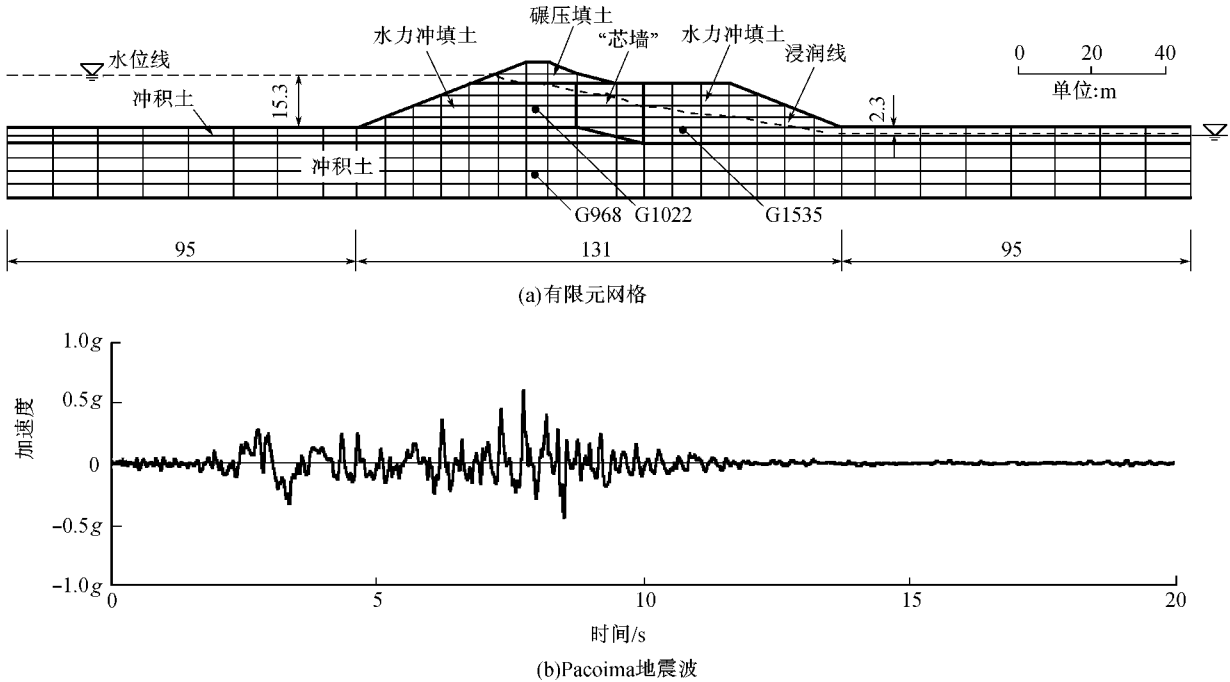


图 1 有限元网格及输入地震波

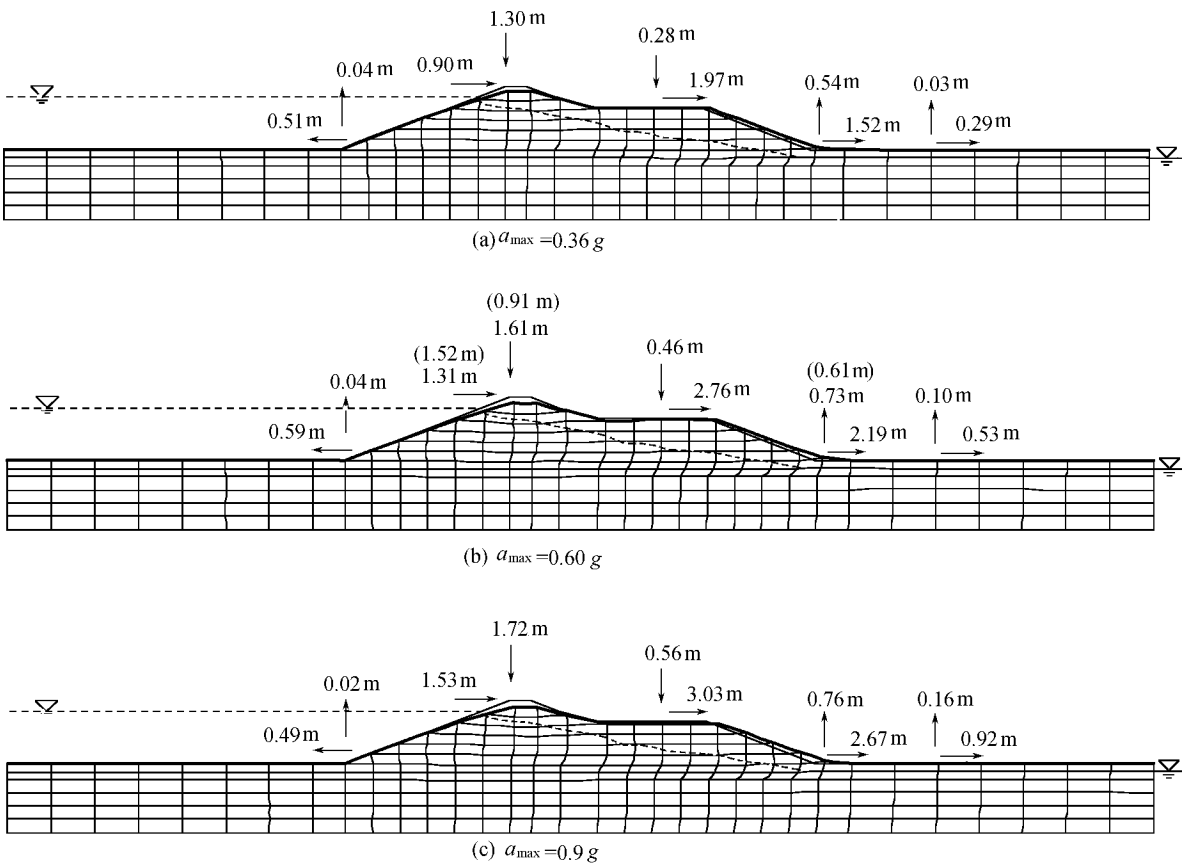
Fig.1 Finite element mesh and inputed seismic wave

在 1985~1987 年间针对 Lower San Fernando 土坝进行了一次大规模的研究,内容包括现场试验、采样及实验室试验^[9].Upper San Fernando 坝不在这次研究之列,因此缺乏有关该坝中土的详细资料.然而,这两个坝相距只有 3 km,而且两个坝都是用水力冲填的方法直接建造在天然冲积土上,使用的材料也类似.1973 年现场钻探、采样和勘察的结果显示两个坝中的土在类型和品质等方面没有重大的差别,所以,分析借用了有关 Lower San Fernando 坝的数据.按照土的分类,土坝有限元网格可以分成下列几个区域,即位于坝顶的碾压填土层,两个水力冲填土区(包括粘土芯墙)和上下两层冲积土基础,它们的初始孔隙比 e_0 分别是 0.5、0.66 和 0.567.其中水力冲填土的残余强度为 15 kPa.

3 地震强度对土坝流动变形的影响

图 2 所示的是 Upper San Fernando 土坝在三种不同强度地震作用下 40 s 时的变形状况.图 2(a)是在 1971 年地震作用下土坝的实际变形情况,图中还给出了现场观测的位移.可以看出数值分析结果与实际观测的结果非常吻合.在相对较强烈的地震($a_{max} = 0.9g$)作用下,土坝的变形(图 2(b))有所加大,但增幅并不显著.

分析结果表明输入地震的峰值加速度越大,地震所引发的变形就越大.但是当输入地震的强度超过一定程度后,它对土坝变形程度的影响变得较不敏感.这说明地震的作用主要是激发土体液化,一旦液化,土流动变形的程度主要取决于土的残余强度和土所受的初始驱动力之间的关系.也即初始驱动力超过残余强度越多,流动变形就越严重.从 Upper San Fernando 土坝下游反压平台水平位移的时程曲线(图 3)可以清楚地看出不同强度地震对土坝流动变形的这种影响趋势.对应于 $a_{max} = 0.6g$ 和 $0.9g$ 的曲线较为接近,而对应于 $a_{max} = 0.36g$ 的曲线则明显低于前两者.值得注意的是,在强震时段(0~12 s)之后反压平台水平位移的速率在 3 种情况下几乎相同.位移幅度的差别主要产生于地震的前 12 s 内,这是因为在强震时段,超孔隙水压力升高的速率及惯性力的大小在输入不同加速度条件下有较大差别.



注 1. 括号内为观测位移 2. 括号外为计算位移 3. 箭头代表位移方向

图 2 地震强度对土坝流动变形的影响

Fig.2 Impact of seismic intensity on flow deformation of the dam

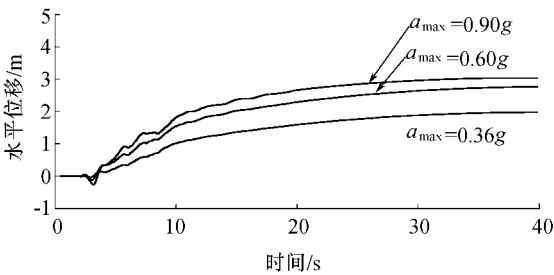


图 3 反压平台顶面中央水平位移的时程曲线

Fig.3 Time history of horizontal displacement at the center of the berm

土坝流动变形的这一机理清楚地反映在 G1022 高斯点的应力路径和应力应变关系上(点 G1022 ,G1535 和点 G968 的位置参见图 1(a)).图 4(c)(f)(i)所示的 $p' \sim q$ 应力路径表明,在所有 3 种情况下土均发生液化. $a_{\max} = 0.36g$ 时,有效平均正应力 p' 随着孔隙水压力的增长而降低, $t = 12s$ 时剪应变仅为 -2.2% . $a_{\max} = 0.6g$ 时,有效平均正应力降低的速率明显加大, $t = 12s$ 时剪应变相应较大,为 -5.6% . $a_{\max} = 0.9g$ 时,有效平均正应力的降低更为迅速, $t = 12s$ 时剪应变也更大,为 -7.9% .然而,在 3 种情况下, $t = 12 \sim 40s$ 之间产生的剪应变却相差无几(分别是 -4.4% , -5.5% 和 -4.6% ,见图 4(b)(e)(h)).类似的现象也发生在 G1535 点.

G968 点位于堤坝基础内,土的密度较大,土的响应表现出典型的中密至密砂的特性,在 3 种条件下均没有产生流动型的变形.在较弱地震作用下(图 5(a)~(c)),生成的超孔隙水压力很小,应力应变关系近似为弹性响应,地震结束后永久变形很小(约 -0.2%).随着输入地震峰值加速度的提高,超孔隙水压力生成的速率也提高,土表现出反复流动的特征.地震结束后永久变形加大约 -2% ,见图 5(d)~(i).

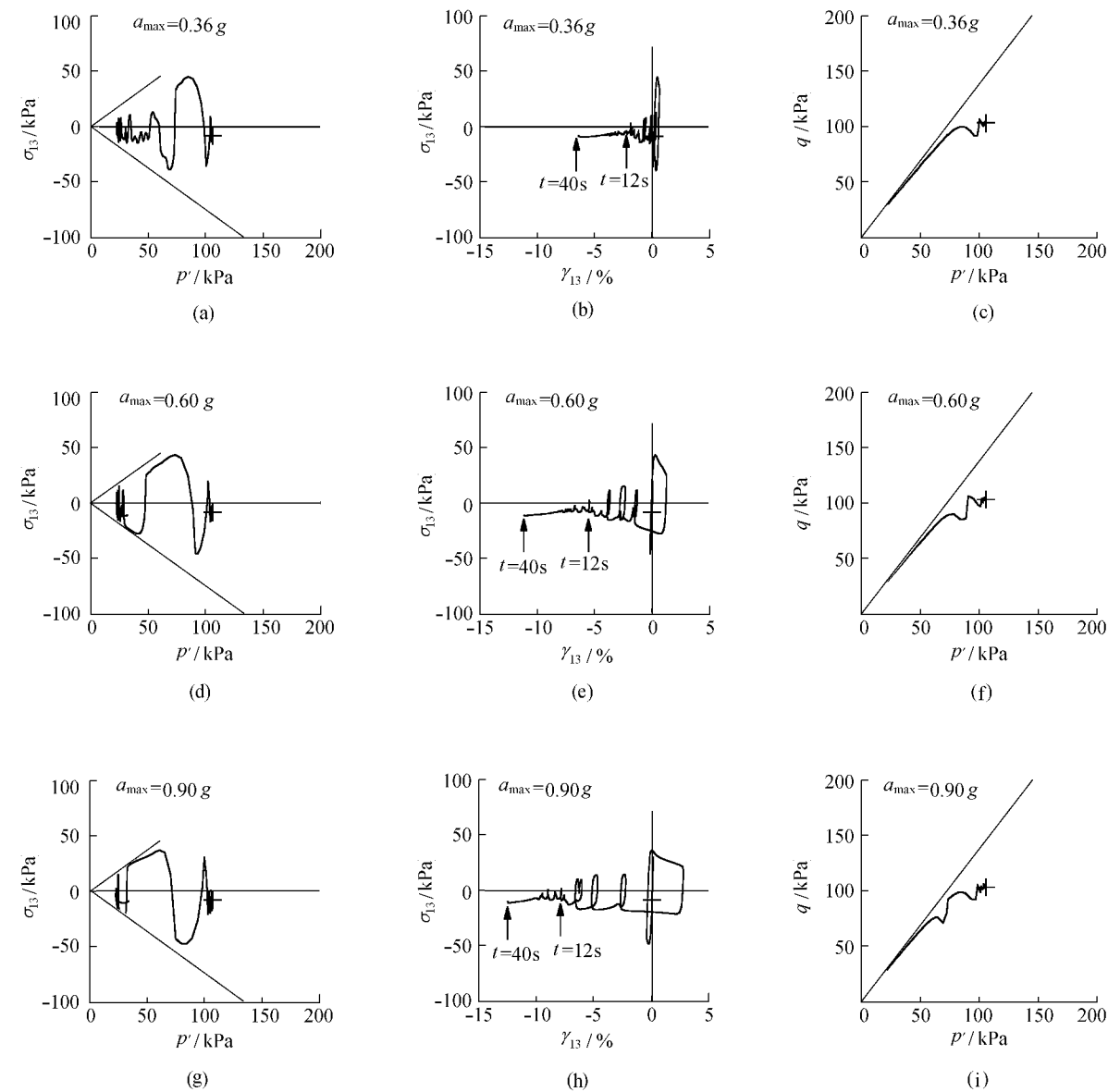


图 4 G1022 点应力路径和应力应变关系
Fig.4 Stress paths and stress-strain relationships for location G1022

4 结 语

对 Upper San Fernando 土坝进行了一组抗震性能分析 ,计算的变形结果与实测震害资料符合 .还研究了地震强度对土坝流动变形的影响 ,讨论地震强度对土坝总体变形 ,以及局部土应力路径和应力应变关系的影响趋势及程度 .结果表明输入地震的峰值加速度越大 ,地震所引发的变形就越大 .但是当输入地震的强度超过一定程度后 ,它对土坝变形程度的影响则变得较不敏感 .这说明地震的作用主要是激发土体液化 ,一旦液化 ,土流动变形的程度则主要取决于土的残余强度和土所受的初始驱动力之间的关系 .也即初始驱动力超过残余强度越多 ,流动变形就越严重 .通过模拟包括液化后流动变形在内的整个液化发展过程 ,提出了地震强度影响土坝流动变形可能的内在机理 .

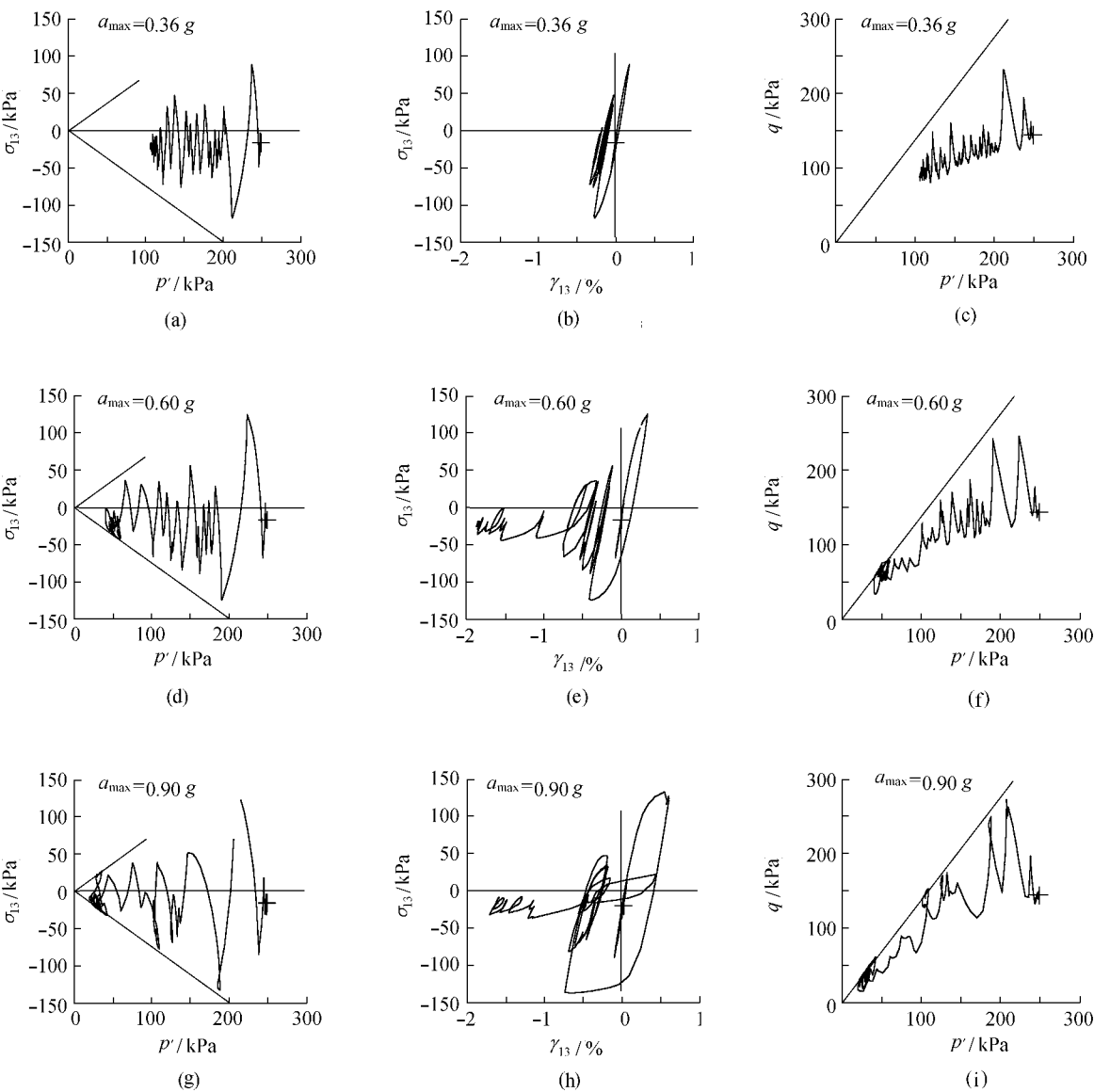


图 5 G968 点应力路径和应力应变关系

Fig.5 Stress paths and stree-strain relationships for location G968

参考文献：

[1] ZIENKIEWICZ O C ,LEUNG K H ,HINTON E ,et al. Earth dam analysis for earthquakes :numerical solution and constitutive relations for non-linear(damage) analysis[A].Proc Int Conf on Dams and Earthquake[C]. London :United Kingdom ,1981. 179—194.

[2] ZIENKIEWICZ O C ,PASTOR M ,CHAN A H C ,et al. Computational approaches to the dynamics and statics of saturated and unsaturated soil[A]. In :BANERJEE P K ,BUTTERFIELD R ,eds. Advanced Geotechnical Analyses[C]. London and New York :Elsevier Applied Science ,1991. 1—46.

[3] BYRNE P M ,JITNO H ,SALGADO F. Earthquake induced displacements of soil-structure system[A].Proc 10th World Conf on Earthquake Engrg[C]. Madrid Spain :AA Balkema ,Rotterdam/Brookfield ,1992. 1407—1412.

[4] MORIWAKI Y ,BEIKAE M ,IDRISS I M. Nonlinear seismic analysis of the Upper San Fernando Dam under the 1971 San Fernando earthquake[A].Proc 9th World Conf on Earthquake Engrg[C]. Tokyo and Kyoto :Japan Association for Earthquake Disaster Prevention , 1989. 237—241.

[5] MORIWAKI Y ,TAN P ,JI F. Seismic deformation analysis of the Upper San Fernando Dam under the 1971 San Fernando earthquake[A]. In :DAKOULAS P ,YEGIAN M ,HOLTZ R D ,eds. Geotech Earthquake Engrg and Soil Dynamics III(GSP 75 ,ASCE) [C]. Washington :

University of Washington ,1998. 854—865.

- [6] WU G. Earthquake-induced deformation analyses of the Upper San Fernando Dam under the 1971 San Fernando earthquake[J]. Can Geotech J 2001 28 :1—15.
- [7] LI X S ,DAFALIAS Y F. Dilatance for cohesionless soils[J]. Géotechnique 2000 50(4) 449—460.
- [8] BEEN K ,JEFFERIES M G. A state parameter for sands[J]. Géotechnique ,1985 35(2) 99—112.
- [9] CASTRO G ,SEED R B ,KELLER T O et al. Steady-state strength analysis of Lower San Fernando Dam slid[J]. Journal of Geotechnical Engineering ,ASCE ,1992 ,118(3) 406—427.

Impact of earthquake intensity on flow deformation of the Upper San Fernando Dam

ZOU Li-xiang , MING Hai-yan

(Department of Civil Engineering , Shenzhen Univ. , Shenzhen 518060 , China)

Abstract : The anti-seismic performance of an earth dam is determined not only by its geometry and composition , but also by the intensity of an earthquake to which the dam is subjected. A series of fully coupled finite element analyses of the response of the Upper San Fernando Dam to earthquakes of different intensities are presented for the study of the impact of the earthquake intensity on flow deformation of the earth dam. A critical state sand model cooperating with the concept of state-dependent dilatancy is employed to describe the soil behavior under all of the loading conditions. The analyses provide not only the global displacement and deformation of the dam , but also elemental soil responses at representative locations. The calculated deformation of the dam is in good agreement with the observed data.

Key words : flow deformation ; fully coupled analysis ; liquefaction , residual strength , Upper San Fernando Dam