

饱和砂土动力液化到渗流液化过程探讨

邓荣贵¹, 张倬元², 刘 宏²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 成都理工学院, 四川 成都 610059)

摘 要: 根据饱和砂土地震液化现象及饱和砂土动力学试验所观察到的现象, 本文从砂粒~孔隙水两相介质相互作用的角度出发, 研究饱和砂土在振动荷载作用下的液化过程和机制。研究结果表明, 饱和砂土受振, 砂粒相对滑动并重新排列, 孔隙率降低, 孔隙水受压产生超静孔水压力并不断增大, 部分孔隙水挤出渗流, 隙水渗流对砂粒产生渗流压力。渗流压力与超静孔隙水压力迭加, 形成的上托力等于或大于砂粒水中重力时, 砂粒在隙水中处于悬浮状态。此时, 饱和砂土宏观上表现为液态。为此, 根据下沉砂粒与向上渗流孔隙水之间相对运动过程中的动力作用特征, 建立了描述饱和砂土液化过程的模型和液化判据。

关键词: 砂土; 液化; 砂土地震液化; 砂土液化模型; 饱和砂土液化。

中图分类号: TU43

文献标识码: A

1 前言

饱和砂土地震液化是地震灾害的主要形式之一。例如, 1964 年美国阿拉斯加地震造成 10 000 多平方公里的砂土地层液化, 日本新泻地震引起了大面积砂土液化, 1976 年中国唐山大地震造成 24 000 多平方公里的砂土地层液化。砂土地层液化, 使河道和水渠淤塞, 农田淹没, 道路破坏, 地面下沉, 房屋开裂, 坝体失稳等严重灾害。1999-09-21 台湾省 7.2 级大地震造成楼房下了陷两层也与地基砂土液化有关。F. L. Men(1986), A. Revil(1999), B. V. Degregorio (1990), S. Pietruszek (1987), G. Bouckovalas(1987), M. Yoshikawa(1986)和 F. Oka(1992)等学者就砂土地震液化的物理机制, 渗透压力与泥砂运移, 松砂膨胀、密实及静态液化模型, 砂土地震液化特征, 循环荷载作用下饱和砂土液化计算模型, 不同的饱和砂土地震液化模型特征和砂土动力强化本构模型等进行了研究, 提出了有关砂土地震液化机理和建立了相应的地震液化模型。过去的研究在一定程度上反映了饱和砂土地震液化的基本现象^[1~7]。Y. Lou(1985), K. Zen(1985), F. Guan(1988), X. Hong(1991), D. V. Ramsamooj(1990)和杨春林(1997)等学者对饱和砂土地震液化有效应力

分析方法, 砂土饱和度与上覆压力对砂土液化的影响, 土体动力响应预测模型, 饱和砂土液化可能性的灰色预测方法和初始剪应力作用下砂土动力特性预测模型等进行了研究, 总结和提出了砂土地震液化预测预报方法和相应的模型^[8~14]。过去的研究在理论、方法和应用等方面都取得了较大进展, 但是, 因饱和砂土地震液化现象的复杂性和环境条件的多变性, 对饱和砂土地震液化现象的形成机理、形成条件、形成过程及预测预报等问题还有待于进一步探讨。为此, 本文从饱和砂土固相颗粒与液相流体在地震惯性力作用下, 固相颗粒相对滑移, 液相流体转移渗流过程中, 砂粒与孔隙水相互作用角度, 分析饱和砂土地层的地震液化问题, 将饱和砂土地震液化过程, 视为由接触式随机堆积而成在宏观上呈现为孔隙性固态的整体结构, 在地震力作用下变为散粒状悬浮于孔隙水中, 使饱和砂土宏观上呈现为液态即液化。孔隙水排出后再变为重新排列的更密实的, 宏观上呈现为孔隙性固态整体结构的动力过程。通过悬浮颗粒与孔隙水相互作用的分析, 建立饱和砂土地震液化模型和液化判断准则。

2 饱和砂土地震液化模型建立

饱和砂土地震液化实际上是在不排水或排水不

收稿日期: 2001-05-05。

基金项目: 建设部人立项和“地质灾害与地质环境保”国家专业实验室资助(编号: 96004)。

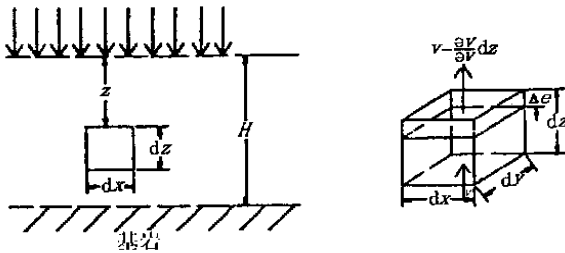
作者简介: 邓荣贵(1960-), 男, 四川自贡市人, 博士, 副教授, 现从事岩土体力学与工程和地质灾害与防治方面的教学和研究工作。

及时条件下, 砂粒间相对滑移形成新的排列结构, 孔隙率降低孔隙水排出, 颗粒在上覆荷载、颗粒自重、孔隙水渗流阻力和地震惯性力作用下, 土体宏观上从固体到液体, 再由液体变为固体的传变过程中, 暂时呈现为液态的现象。砂土孔隙比降低势必排出孔隙中多余的水(非饱和土也有气体), 砂粒相对下沉。因孔隙水渗流方向与砂粒下沉运动方向相反, 砂粒必将受到孔隙水的阻碍。当孔隙水的阻碍作用占优势时, 砂粒在隙水中呈悬浮状态, 土体宏观上呈液态即液化。土体宏观上呈液态维持的时间与土体级配、砂粒矿物成份、形态、砂土孔隙比、地震特征、孔隙水特征及排水条件、上覆压力等因素有关。

对于大面积沉积的砂层, 其分布常常比较稳定, 范围大而厚度相对较小, 地表的排水条件接近。因此, 饱和砂土地层地震液化可以简化为一维问题, 如图 1 所示。设地震前 z 处土体的有效应力 σ_0 为

$$\sigma_0 = p + \gamma_f z \quad (1)$$

式中 p 为地面附加荷载 (kPa), γ_f 为砂土浮重度 (KN/m^3)。



(A)几何模型 (B)液化砂土单元体

图 1 饱和砂土地震液化模型

Fig. 1 Liquefaction model of saturated sand

因饱和砂土地层对地震波具有明显的衰减作用, 设地震波传至砂层底面时 ($z = H$) 加速度峰值为 A_0 , 传至地面时加速度峰值为 α_0 ($z = 0$), 各点的加速度峰值均随时间 t 变化。地震加速度峰值 α 的变化与砂土层对地震波的衰减强弱等多种因素有关, 但总的趋势是随 z 的减小而变小, 随 t 的增加而减小并趋于零, 于是其变化规律可以通过构造分析确定。由地球物理学可知, 地震波的衰减多为遵守指数变化规律

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\beta_1 t} e^{\frac{z}{H} \ln(\frac{A_0}{\alpha_0})} \quad (2)$$

式中 β_1 为待定系数, 由砂土层对地震波的衰减特征确定 (s^{-1}); H 为砂层厚度 (m); α 为任意时刻砂土层中任意点的地震加速度峰值 ($m \cdot s^{-2}$)。

某一烈度的地震作用下, 砂土地层可降低的孔隙比 Δe 应随砂土层的埋深增加而减小(埋深越大, 沉积时间越长, 上覆荷载越大, 砂土层就越密实, 反之就越疏松), 随时间增加而变小且趋于零。根据砂土动力学试验结果其变化亦遵守指数变化规律, 通过构造分析得到的下式具有上述变化特征

$$\Delta e = \Delta e_0 \cdot e^{-\beta_2 t} e^{\frac{z}{H} \ln(\frac{\Delta e_0}{\Delta e_H})} \quad (3)$$

式中 Δe_0 为砂层顶面可降低的最大孔隙比, Δe_H 为砂土层底面可降低的最大孔隙比, Δe 为任意时刻任意点砂土层可降低的孔隙比, β_2 为待定系数, 由砂土层的结构特征确定 (s^{-1})。

单位时间内任意点 z 处产生的体积应变应与砂土层可降低的孔隙比、地震惯性力(地震加速度乘净质量)随 z 的变化率和地震力作用时间成正比

$$\epsilon_v = A_a t e^{-\beta_0 t} e^{\beta_3 z} \quad (4)$$

式(4)中

$$A_a = A_1 \Delta e_0 \alpha_0 \ln \left[\frac{A_0 \gamma_s - \gamma_w}{\alpha_0 H g} \right] \quad (5)$$

$$\beta_0 = \beta_1 + \beta_2 \quad (6)$$

$$\beta_3 = \ln \left[\frac{A_0 \Delta e_H}{\alpha_0 \Delta e_0} \right] / H \quad (7)$$

式中 A_1 为比例系数, γ_s 为砂粒重度 ($\text{KN} \cdot \text{m}^{-3}$), γ_w 为水的重度 ($\text{KN} \cdot \text{m}^{-3}$), g 为重力加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。在砂层任意深度 z 处取一单元体(见图 1)进行分析, 令固体体积为单位体积, 单位时间内此单元体内排出的隙水量为 Δq , Δq 应等于单元体内孔隙体积的震缩量 ΔV_i , 即

$$\Delta q = \Delta V_i \quad (8)$$

设单元体底面孔隙水排进的渗流速度为 V , 顶面排出流速应为 $v - (\partial v / \partial z) dz$, 则有

$$\Delta q = \left(\left(v - \frac{\partial v}{\partial z} dz \right) - v \right) dx dy dz = - \frac{\partial v}{\partial z} dx dy dz \quad (9)$$

单位时间单元体内砂土的体积震缩量 ΔV_i 应为

$$\Delta V_i = \epsilon_v dx dy dz dt = A_a t e^{-\beta_0 t} e^{\beta_3 z} dx dy dz dt \quad (10)$$

将(9)式和(10)式代入(8)式得

$$\frac{\partial v}{\partial z} = - A_a t e^{-\beta_0 t} e^{\beta_3 z} \quad (11)$$

由流体动力学原理有

$$h_e = h + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} \quad (12)$$

式中 h 为孔隙水压力静水头 (m), u 为超静孔隙水压力 (kPa), γ_w 为孔隙水重度 ($\text{kPa} \cdot \text{m}^{-3}$), h_e 为孔隙水总水头 (m), 其余参数同上。

若以 $z=H$ 处的砂土层底部为参考点, 则有

$$z=0 \text{ 时, } h=H, u=0, v \geq 0$$

$$z=H \text{ 时, } h=0, u \geq 0, v=0 \quad (13)$$

由此可以得到以 $z=H$ 为参考点饱和砂土液化方程式及相应的边界条件, 即饱和砂土液化模型

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -A_0 t e^{\beta_0 t} e^{\beta_3 t} \quad (14)$$

$$h=H-z \quad (15)$$

$$h_e = h + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} \quad (16)$$

$$u = \gamma_w \left[h_e - \frac{v^2}{2g} \right] \quad (17)$$

$$\text{当 } z=H, v=0, h=0, u=\gamma_w h_e \quad (18)$$

$$\text{当 } z=0, v=v_0, h=H, u=0 \quad (19)$$

$$\text{当 } t=0, v=0, h=H-z, u=\gamma_w h_e \quad (20)$$

$$\text{当 } t \rightarrow \infty, v \rightarrow 0, h \rightarrow H-z, u \rightarrow 0 \quad (21)$$

若以分析点 z 为参考点, 不考虑孔隙水静水头, 则(15)式至(22)式变为

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -A_0 t e^{\beta_0 t} e^{\beta_3 t} \quad (22)$$

$$h=0 \quad (23)$$

$$h_e = \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} \quad (24)$$

$$u = \gamma_w \left[h_e - \frac{v^2}{2g} \right] \quad (25)$$

$$\text{当 } z=H, v=0, h=0, v + \frac{\partial v}{\partial z} = \gamma_w h_e \quad (26)$$

$$\text{当 } z=0, v=v_0, h=0, u=0 \quad (27)$$

$$\text{当 } t=0, v=0, h=0, u=0 \quad (28)$$

$$\text{当 } t \rightarrow \infty, v \rightarrow 0, h \rightarrow 0, u \rightarrow 0 \quad (29)$$

对(23)式积分, 并利用(27)的边界条件得

$$v = -\frac{A_0}{\beta_3} t e^{-\beta_0 t} (e^{\beta_3 H} - e^{\beta_3 z}) \quad (30)$$

由(31)式、(25)式和(28)式得

$$v_0 = \frac{A_0}{\beta_3} t e^{-\beta_0 t} (e^{\beta_3 H} - 1) \quad (31)$$

$$h_e = \frac{v_0^2}{2g} \quad (32)$$

$$u = \frac{\gamma_w}{2g} (v_0 - v^2) \quad (33)$$

(30)式和(33)式为饱和砂土液化过程中, 孔隙水渗流速度和超静孔隙水压力变化特征。

3 饱和砂土地层液化判断准则

根据流体动力学原理, 饱和砂土液化孔隙水排

出砂粒下沉时, 砂粒受到孔隙水的阻力 R 为:

对于斯托克斯理论

$$R = 3\pi\mu_1 d_s v k_s^{1/2} \alpha_1 \quad (34)$$

对于阿连理论

$$R = 1.25\pi\alpha_1 k_s^{3/4} v^{3/2} \sqrt{\mu_1 \gamma_w d_s^3 / g} \quad (35)$$

对于牛顿理论

$$R = 0.055\pi\gamma_w d_s^2 v^2 k_s \alpha_1 \quad (36)$$





式中 π 为圆周率; μ_1 为孔隙水的动力粘滞系数 ($\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$), 据表 1 确定; d_s 为砂粒当量直径 (m , 可取砂粒的平均粒径), 由砂土级配确定; k_s 为砂粒形状修正系数(无量纲系数), 据砂土颗粒形状统计资料查表 2 确定; α_1 为砂土颗粒间的相互作用系数(无量纲系数), 由试验确定(常取 0.2~1.0)。

表 1 水的动力粘滞系数

Table 1 Dynamic viscous coefficient of water						
温度 $T(^{\circ}\text{C})$	0	10	20	40	60	80
$\mu_1 (10^{-6} \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2})$	1.79	1.31	1.00	0.66	0.47	0.36

表 2 典型物体形状修正系数

Table 2 Modified coefficient of typical body

序号	1	2	3	4
物体名称	球体	棱形体	不规则球体	不规则块体
物体形状				
形状系数	1.0	1.76	1.17	2.27

任意点 z 处, 饱和砂土颗粒在浮自重、上覆砂层有效应力和隙水阻力作用下, 三者的合力为零时处于悬浮状态, 即初始液化状态; 当孔隙水阻力大于砂粒浮自重与上覆砂层有效应力之和时, 砂层处于液化过程中; 当地震作用消失, 隙水不断排出, 渗流速度降低并趋于零时, 砂粒达到新的排列结构, 饱和砂土宏观上又呈现为固体状态, 而砂层孔隙比降低且更加密实了。因此, 饱和砂土地震液化判据为

$$R \geq (2\pi\gamma_f d_s^3 + 3\pi d_s^2 \sigma_0) / 12 \quad (37)$$

上式取等号, 则变为

$$R = (2\pi\gamma_f d_s^3 + 3\pi d_s^2 \sigma_0) / 12 \quad (38)$$

将式(1)和(35)至(37)代入式(38)可求得砂土层不同深度 z 处砂土层液化时孔隙水渗流的临界速度 v_c :

对于斯托克斯理论

$$v_c = \frac{2\gamma_f d_s^2 + 3d_s(p + \gamma_z)}{36\mu_1 \alpha_1 k_s^{1/2}} \quad (39)$$

对于阿连理论

$$v_c = \left[\frac{2\gamma_f d_s^3 + 3d_s^2(p + \gamma_f z)}{15.0 k_s^{3/4} a_1 \sqrt{\mu_1 \gamma_w d_s^3 / g}} \right]^{2/3} \quad (40)$$

对于牛顿理论

$$v_c = \left[\frac{2\gamma_f d_s + 3(p + \gamma_f z)}{0.66 \alpha_1 k_s \gamma_f / g} \right]^{1/2} \quad (41)$$

相应的超静孔隙水压力临界值

$$u_c = 0.5g(v_0^2 - v_c^2) \quad (42)$$

v_c 是饱和砂土本身特征(包括固相和液相特征)所决定的,其值越大则抗液化的能力就越强。显然,饱和砂土地震液化准则为

- 当 $v < v_c$ 时,处于非液化状态;
- 当 $v = v_c$ 时,处于初始液化状态;
- 当 $v > v_c$ 时,处于液化状态过程中。

4 饱和砂土地震液化模型分析

4.1 模型特征分析

根据(30)式~(33)式,模型具有如下基本特征:

1. 孔隙水渗流速度 v 随浮重度增加而增大, u 随浮重度增加而减小,表明固相砂粒重度愈大液相流体重度愈小,非饱和砂土或干砂受震时不易液化,砂粒重度与液相流体重度相等时,不存在液化问题,两相介质混合物始终保持为液态;
2. 地震波入层峰值加速度 A_0 与地表峰值加速度 α_0 的差愈大, v 就愈小 u 就愈大,饱和砂土就愈容易发生地震液化。作为一种极端情况,当 $A_0 = \alpha_0$ 时, v 和 u 均为零,其物理意义是砂土层对地震波没有衰减作用,地震时砂粒与隙水一起运动,砂土不存在体积震缩问题;
3. 地表砂土因地震可能降低的最大孔隙比 Δe_0 愈大, v 和 u 愈大,饱和砂土愈容易液化,这与饱和松砂地层容易液化的现象一致,反映砂土层不均匀时 $\Delta e_H / \Delta e_0$ 对 v 和 u 的影响,即反映砂层不同部位的地震液化程度不同;

4. v 随分析点的埋深增加而减小但 u 增加,按传统理论说明饱 u 增加和砂土层容易液化,而本文提出的模型表明地表容易液化,其原因在于传统理论是从静力学的角度研究饱和砂土液化,主要反映饱和和砂土产生初始液化过程,即孔隙水尚未运动。本模型从动力学角度考虑,认为饱和和砂土液化不仅与超静孔隙水压力有关,而且与孔隙水排出渗流形成的动水压力有关,即主要反映的是砂土液化过程;

5. v 和 u 都随地震作用时间不断增加,当砂土逐渐密实或孔隙水逐渐排出或地震作用停止后, v 和 u 都逐渐减小且趋于零。当砂层厚 20 m 时, v 和 u 的变化规律如图 2, 3 所示。

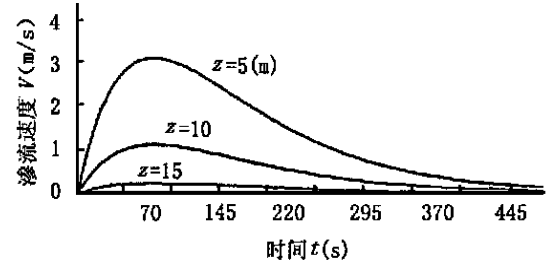


图 2 v 与时间 t 的变化关系
Fig. 2 The change of v with t

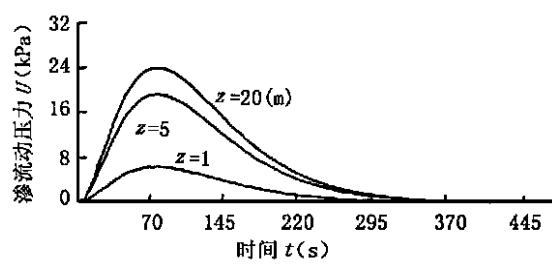


图 3 u 与时间 t 的变化关系
Fig. 3 The change of u with t

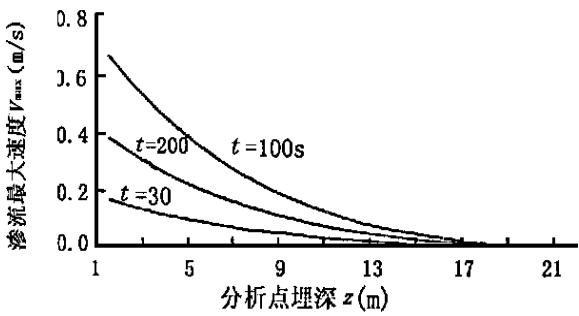


图 4 v_{max} 与埋深 z 的变化关系
Fig. 4 The change of v with z

4.2 饱和砂土地震液化准则分析

4.2.1 砂土颗粒及孔隙水特征对液化的影响

根据(40)至(42)式,总体上讲,砂土颗粒及孔隙水特征对砂土液化的影响特征如下:

1. d_s 、分析点的上覆有效压应力 σ_0 和砂粒浮重度 γ_f 越大, v_c 就愈大,其物理概念是砂粒越粗、上覆有效压应力、砂粒浮重度 γ_f 越大,砂粒相对滑移启动困难,即使启动了下沉较快即饱和和砂土就不易液化;
2. 砂粒形状愈不规则,砂粒表面物质附着特性

强、孔隙水动力粘滞系数大,砂粒间容易相对滑动,砂粒下沉时阻力就愈大,因此 v_c 就愈小,饱和砂土容易液化。

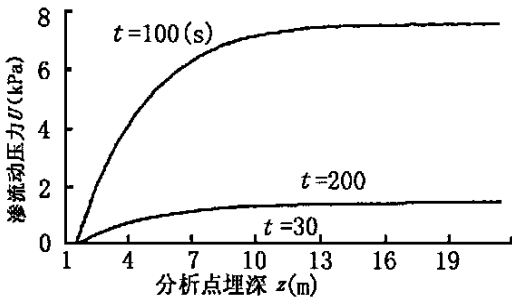


图 5 u 与埋深 z 的变化关系

Fig. 5 The change of u with t

4.2.2 砂土液化模型与传统液化理论比较

传统液化理论从静力平衡角度分析,认为在地震惯性力作用下饱和砂土中的超静孔隙水压力 U 等于或大于有效应力时砂土就会液化,砂土初始液化时有

$$u = u_c \quad (44)$$

由本文提出的准则为

$$v = v_c \quad (45)$$

如果忽略研究点单个砂粒自重, (38)式变为

$$R = \pi d_s^2 \sigma_0 / 4 \quad (46)$$

由(46)式和(34)~(36)式有

对于斯托克斯理论:

$$R = \frac{4}{\pi d_s^2} 3\pi \mu_1 d_s v_c^{1/2} \alpha_1 \quad (47)$$

对于阿连理论:

$$R = 1.25\pi \alpha_1 k_s^{3/4} v_c^{2/3} \sqrt{\mu_1 \gamma_w d_s^3 / g} \quad (48)$$

对于牛顿理论:

$$R = \frac{4}{\pi d_s^2} 0.055\pi \gamma_w d_s^2 v_c^{3/4} \alpha_1 \quad (49)$$

比较(42)式与(47)至(49)式可知, (42)式中的 v_c 与(49)式中的 v_c 在因次上是一致的,表明传统的砂土液化理论判据相当于本文所述的用牛顿理论导出的判据。牛顿理论所述的阻力实际是以压差阻力为主,显然传统的液化判据没有考虑孔隙水的运动,假定了饱和砂土为一个封闭系统,这对于初始液化前是符合实际的。根据饱和砂土地震液化现象和实验观测结果表明,砂土地震液化过程中,初始液化前孔隙水几乎无运动,此时孔隙水对砂粒的作用符合牛顿理论理论,但时间非常短暂。饱和砂土初始液化后砂粒受到的粘滞阻力和压差阻力具有相同数

量级即阿连理论^[17],因此建议用(40)式作为计算砂土液化时孔隙水临界渗流速度 v_c , (43)式作为砂土液化判据。

4.3 模型应用范围推广讨论

上述讨论可知,无论是饱和砂土还是非饱和砂土甚至干燥的砂土,只要有足够的地震惯性力作用,使各参数的组合满足(44)式,砂土均会液化。对于非饱和土,各式中的孔隙水重度和动力粘滞系数取饱和部分隙水重度和非饱和部分空气重度对两者体积比例的加权平均值。从原理上讲,饱和砂土在地震惯性力作用下可能液化,另一方面,即使砂土饱和度相对较小甚至为零,只要地震惯性力随 z 的变化率和砂土可能降低的孔隙比足够大,仍然有液化的可能。

(30)式和(39)式至(41)式也可以描述不同粒径散粒状孔隙介质的液化问题,即不仅砂土会产生地震液化,干燥的粒状黄土、粘土和粉尘仍有液化的可能。西北黄土边坡地震时高速长距离滑动、常见的粘土和粉尘堆积体在振动力作用下发生滑塌(溜滑)或“冒气冒烟”的现象应是液化的表现。另外,中、粗砂甚至卵石地层,只要地震惯性力随 z 的变化率足够大,仍有液化的可能,过去难以见到中、粗砂地层发生地震液化现象,只是地震烈度太小的缘故。另一方面,若砂卵石地层孔隙中不是清水或空气而是重度和动力粘滞系数较大的泥浆,也有液化的可能,常见的泥石流现象就是一个佐证,只不过泥石流中的泥浆是水平运动,地震液化时孔隙中的泥浆是垂直运动。总之,从理论上讲本文提出的模型适用于许多固相粒状介质和液相流体组合而成的两相混合介质的地震液化现象分析。

5 结 论

上述分析可以得出以下认识:

1. 砂土液化现象实质是砂土震缩,孔隙水挤出,砂粒相对下沉过程中因受渗流孔隙水阻力作用暂时处于悬浮状态,砂土宏观上呈现为液态,即液化;

2. 砂土地震液化实际上为散粒堆积状固相体介质与填隙状液相介质相互作用的结果。地震惯性力作用时,液相流体中堆积而成的散状砂粒相对滑移下沉,实现重新排列,其结果是孔隙比降低,砂粒更加密实,填隙状流体排出,两者相互运动和相互作用,就整个液化过程而言,此作用应是一个动力学过程;

3. 地震液化不仅是饱和砂土的特性,从广义上讲任何粒状介质与填隙状流体介质组成的两相介

质, 只要其特征(内部条件)和地震惯性力(外部条件)的组合达到某种程度, 均有液化的可能;

4. 本模型不仅可以用于饱和砂土的液化分析, 也可用于非饱和砂土、干燥砂土、干燥粒状粘土或尘埃和砂卵石的广义液化现象分析, 以及地震液化预测分析。

参考文献:

- [1] F. L. Men, On the physical mechanism of sand liquefaction, Proceeding of the 8th European conference on earthquake, engineering, Vol. 2, P5. 3/1—5.3/8 1986.
- [2] A. Pevil, pervasive pressure-solution transfer, - a hole-viscoplastic model *Geophysical Research Letter*, No. 2, Vol. 26, P255—258, 1999.
- [3] B. V. Degregorio, A model of dilatation, densification, and static liquefaction of loose sand, *Mathematical Geology*, No. 1, Vol. 22, P1—13, 1990.
- [4] S. Pietruszczak, Modeling of sand behavior under earthquake excitation, *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, No. 3, Vol. 11, P221—240, 1987.
- [5] G. Bouckovalas, Computational model for saturated sand subjected to cyclic loading *Soils and Foundation*, No. 4, Vol. 27, P34—44, 1987.
- [6] M. Yoshikawa, Dynamic behavior of a model saturated sand during liquefaction, *Soil Mechanics And Foundation Engineering*, No. 12, Vol. 34, P45—51, 1986.

- [7] F. Oka, A constitutive model for sand based on the non-linear kinematic hardening rule and its application, proceedings.
- [8] Y. Lou, A method for two-dimensional effective stress analysis of sand liquefaction *Journal of Hydraulic Engineering*, P56—59, No. 2, 1985.
- [9] K. Zen, Evaluation of drainage effect in sand liquefaction, Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering P1931—1934, 1985.
- [10] F. Guan, Study on the methods for analysis of sand liquefaction during earthquakes *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, P54—66, No. 4, Vol. 8, 1998.
- [11] X. Hong, effects of saturation and back pressure on sand liquefaction, *Journal of Geo-technical Engineering*, P1347—1462, No. 9, Vol. 117, 1991.
- [12] D. V. Ramsamooj, Model prediction of cyclic response of soils, *Journal of Geo-technical Engineering*, P1053—1072, No. 7, Vol. 116, 1990.
- [13] X. M. Chen, Indeterminate gray prediction method of possibility of sand liquefaction during earthquake *Journal of Gulin Institute of Technology*, P106—109, No. 2 Vol. 17, 1997.
- [14] 顾晓鲁. 地基与基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993
- [15] 成都科学技术大学. 河床动力学(第一版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.
- [16] 河海大学. 土工原理与计算(第二版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [17] 李诗久. 工程流体力学(第一版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980.

On the Procedure From Dynamic liquefaction to Seepage Liquefaction of Saturated Sand Soil

DENG Rong-gui¹, ZHANG Zhuo-yuan² and LIU Hong²

(1. Civil College of Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031 China;

2. Chengdu University of Technology, 610059 China)

Abstract: Based on the liquefaction phenomena observed of saturated sand soil under seismic action and in dynamic test, and from the interaction between water and sand grain, the liquefaction mechanism and procedure of saturated sand under vibrational load were analyzed in this paper. The results from the study show that when saturated sand soil was librated, sand grain will slide and rearrange each other, pore ratio reduce, excess hydrostatic pressure produce and continually increase. At that time, some pore water will be extruded and seepage out. The seepage of the pore water produces seepage pressure on the sinking sand grain. When the sum of the seepage pressure and excess hydrostatic pressure is equal to gravity of sinking sand grain, the sand grain suspends in pore water and the saturated sand soil shows liquid state in macrocosm. The model described the procedure from dynamic liquefaction to seepage liquefaction and liquefaction criterion of saturated sand soil were established.

Key words: sand soil; liquefaction; seismic liquefaction; liquefaction model of sand soil; liquefaction of saturated sand soil