

文章编号 1000-5013(2004)02-0156-05

地震液化诱发地面大位移的计算分析

林建华 黄群贤

(华侨大学土木工程系, 福建 泉州 362011)

摘要 根据地面大位移产生的特点, 采用一些合理的假设, 提出一种计算地震液化诱发地面大位移的方法. 同时, 对影响地面大位移的可能因素进行初步的研究. 计算结果表明, 该方法在计算地震动期间产生的地面侧移中, 能够较真实的反映液化诱发地面大位移的物理机制, 揭示地面大位移产生的规律. 计算结果与宏观震害现象相吻合.

关键词 地震, 液化, 地面大位移, 侧向扩展

中图分类号 TU 435

文献标识码 A

地震过程中, 由于饱和砂土液化诱发的小坡度地面侧向永久位移对结构的破坏, 是液化区公路、铁路、桥梁、码头、堤坝、房屋、地下结构与生命线工程震害的主要形式之一^[1~3]. 这种地面永久侧移值在地震现场可以看到几厘米到几米, 它对地面及地下结构可造成极大的破坏, 国内外均有不少这方面的震害实例. 因此, 此课题的研究在世界岩土地震工程领域日益引起重视. 地震液化诱发地面大位移的计算方法, 有经验法、简化法和数值法. Hamada, Bartlett 和 Youd 等人^[2]对地震液化引起地面大位移作了大量地调查, 应用数理统计方法, 回归得到估算地面大位移的经验方法; Yasuda 用震前的土性参数, 通过有限元方法, 最终求出地震时产生的地面位移. Dobry, 景立平^[4]等采用 Newmark 滑块法, 计算地面大位移. 本文根据地面大位移产生的特点, 利用一些合理的假设, 提出了计算砂土液化诱发地面大位移的一种新方法. 通过对土体进行非线性地震反应分析, 引入地震过程中饱和砂层中孔隙水压力生成的经验公式. 然后, 根据 Newmark 刚性滑块的基本原理, 计算地震过程中由液化产生的地面侧移值, 并对影响地面大位移的可能因素进行详细的研究.

1 计算模型的建立^[5]

1.1 基本假定

在研究小坡度地形的地震过程中地面侧移, 计算中采用 5 个基本假定. (1) 基岩是水平的, 在半空间内无限延伸. (2) 地震动期间, 不考虑孔隙水压力的消散. (3) 土体只沿着滑移层方向向下滑移. (4) 地震反应由竖向传播的剪切波引起的. (5) 液化层上边界或液化层底层边界的最大倾角为 2~6(°).

1.2 土的动力本构模型

土体动力本构关系的研究, 是土动力学研究的基础和难点之一. 本文在地震反应分析中假定土体为粘弹性体, 粘弹性模型中的两个参数是动剪模量和阻尼比. 由于液化前后土的性状完全不一样, 因此在进行计算分析中, 对液化前后土的应力-应变应采用不同的本构模型.

1.2.1 液化前的应力应变关系 本文采用常用的 Hardin Drnevich 双曲线本构关系, 其关系表达式为

$$G = G_{\max} / (1 + \gamma_h), \quad (1)$$

其中 $G_{\max} = 3271 \times \frac{(2.973 - e)^2}{(1 + e)} (\text{OCR})^a (\sigma'_0)^{1/2}$, $\gamma_h = (\gamma / \gamma_r) [1 + a e^{-b(\gamma / \gamma_r)}]$, $\gamma_r = \tau_{\max} / G_{\max}$ 称为参考剪应

收稿日期 2003-11-20

作者简介 林建华(1955-), 男, 教授, 主要从事工程抗震方面的研究. E-mail: linjianhua@hqu.edu.cn

基金项目 福建省自然科学基金资助项目(D020014)

变, τ_{\max} 为最大剪应力, G_{\max} 为最大剪切模量($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$); a, b 为土的常数, 其值可通过试验求得. 利用式(1), 可以确定不同应变水准下土的剪切模量.

1.2.2 液化后土的应力应变关系^[4] 石兆吉等^[6] 根据室内外试验资料确定两个临界值, 一是刚达到液化状态时的剪应变为 2%, 二是相应的剪切模量值 G_{li} , 即 $G_{\text{li}} = 0.0125 G_{\max}$ (砂土) 或 $G_{\text{li}} = 0.0281 G_{\max}$ (粉土). 本文在计算地面加速度过程中, 当某一砂层液化后, 选用上式作为土层剪切模量值.

1.2.3 阻尼比的计算 1972 年, Hardin 和 Drnevich 提出了阻尼比和剪切模量之间的关系, 即

$$D/D_{\max} = \gamma_h / (1 + \gamma_h), \tag{2}$$

在式(2)中, $\gamma_h = (\gamma/\gamma_r) / [1 + a_1 e^{-b_1(\gamma/\gamma_r)}]$, D_{\max} 为最大阻尼比, a_1, b_1 为土的常数, 其值可通过试验求得. 利用式(2), 可以得到不同应变水准下土的阻尼比.

1.2.4 孔隙水压力发展模型 Seed 等根据饱和砂土试样在各向等压力固结后, 在不排水条件下进行周期加荷的三轴试验结果. 文中提出循环剪切作用下, 孔隙水压力的表达式为 $u_g/\sigma'_0 = 2\arcsin(N/N_1)^{1/20}/\pi$. 其增量的形式为

$$\Delta u_g = \sigma'_0 (N/N_1)^{\frac{1}{20}-1} \Delta N / [\pi \cdot \theta \cdot N_1 \sqrt{1 - (N/N_1)^{\frac{1}{\theta}}}], \tag{3}$$

式中 Δu_g 为 Δt 时间内由于地震震动而产生的孔隙水压力, θ 是决定土的类型和试验条件的经验公式. Seed 认为, $\theta = 0.7$ 的值可以代表许多的土, ΔN 为 Δt 时间内的震动周数, N 为累计震动周数.

2 液化诱发地面大位移的计算

2.1 屈服加速度的确定

屈服加速度采用的计算模型, 如图 1 所示. 设土壤的抗剪强度 S_u , 根据 Newmark 刚性滑块模型很容易得到屈服加速度 a_y , 即

$$a_y/g = (\sigma'_v/\sigma_v)(S_u/\sigma'_v - \sin \alpha), \tag{4}$$

上式中, σ'_v, σ_v 分别为有效上覆压力和总上覆压力, g 为重力加速度, α 为滑移层倾角(取液化层上边界与液化层底层边界倾角的最大值).

2.2 土层抗剪强度的确定

1992 年, Baziar^[7] 等在估计砂土液化诱发地面侧移时, 根据 Newmark 刚性滑块的应力-应变关系为刚塑性的假定, 在整个地震时程内用砂土完全液化后的残余强度来计算地面侧移. 然而, 在砂土液化的过程中, 随着孔隙水压力的增大, 砂土的抗剪强度不断减小, 直至完全液化后的残余强度. 因此, Baziar 选用砂土完全液化后的残余强度计算地面侧移, 显然不尽合理. 本文考虑到液化过程中, 孔隙水压力对砂土抗剪强度的影响, 假设在土层液化前每一个循环时段内, 土的抗剪强度为常数. 则应力状态以有效应力表示土的抗剪强度, 即

$$S_u = c' + \sigma'_v \tan \phi', \tag{5}$$

上式中, σ'_v 为剪切破坏面上的法向有效应力, c' 为有效粘聚力, ϕ' 为有效内摩擦角. 在每个时间段内, 有效应力随孔隙水压力的增长而减少, 因而抗剪强度也随着降低. 液化后, Vaid^[7] 等研究认为, 液化后土的残余抗剪强度 S 为 $(0.05 \sim 0.15) \sigma'_v$.

2.3 动力方程的建立及求解

经过有限单元法离散, 土体的动力方程式可写为

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = -M\ddot{u}_g, \tag{6}$$

在式(6)中, M 为质量矩阵, K 为刚度矩阵, C 为阻尼矩阵, $\delta, \dot{\delta}, \ddot{\delta}$ 分别为结点对于基岩的位移、速度、加速度, \ddot{u}_g 为地震加速度. 由于考虑到土体的非线性动力特性, 在动力分析中, 动剪模量 G 与阻尼比 λ 随动剪应变 γ 的变化而变化. 因此, 在每时步的动力计算中, 先对所有单元分别假定适当的 G 和 λ 值(初始 G 和 λ 由静力计算得到). 然后, 采用 Wilson- θ 方法求解动力平衡方程. 根据计算各单元的动剪应变 γ , 得出各单元相应的 G 和 λ . 若 G 和 λ 的计算值与最初的假设值相差较大, 则以 G 和 λ 的计算值作为下一次迭代的初始值, 再按前述步骤进行迭代, 直至收敛为止. 一般迭代精度为 5% ~ 10%. 在实际计算中, 采用了“跨大步”的方法, 即将若干个 Δt 作为一大步($50\Delta t$). 在这个大步中, G, λ 及 ω 保持不变.

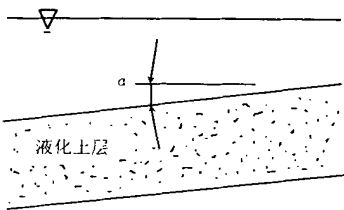


图 1 屈服加速度计算模型

直至算得最后一步时, 再进行迭代. 现分别将叙述 3 个主要步骤. (1) 分段计算剪应变随时间的过程线, 求出计算时段的平均剪应变 γ_m . (2) 计算该时刻的平均动剪应力 $\tau_{av} = 0.65\tau_{max}$ (τ_{max} 为最大动剪应力). (3) 计算该时段每一单元的应力比 τ_{av}/σ_0 . 根据常规液化试验曲线或者经验公式, 确定液化周数 N_l 为

$$N_l = 10^{(b-\tau_{av}/\sigma_0)/a},$$

(7)

式(7)中, σ_0 为初始法向应力, a 和 b 是试验中确定的常数, 与砂土的抗液化性质有关. (4) 计算这一时段的等效周数 ΔN . 可根据 1979 年 Martin 等的研究, 对于不同的地震震级和强震历时, 从表 1 中可查出地震波的等效振动周数 N_{eq} 及平均每秒的等效周数 ΔN . 本文在计算中根据震级和历时, 由表 1 确定出震动全过程的等效周数. 然后, 通过计算时间间隔内的地震波能量与整个持续时间内的地震波能量之比, 可得 $SA(\Delta T_i) = \int_{0}^{\Delta T_i} a^2(t) dt / \int_{0}^{T_d} a^2(t) dt$, 再计算 ΔN . 即 $\Delta N = N_{eq} \cdot SA(\Delta T_i)$. 此式的物理含义是, 以时段 ΔT_i 内地震波能量的相对大小为权系数, 将总的等效震动次数 N_{eq} 按权系数的大小分配到各时段. (5) 计算每一时段的孔隙水压力、屈服加速度和地面加速度时程. 对于下一时段, 可以重复步骤(1)~(5), 直至地震结束.

2.4 地面侧移的计算

当地面加速反应时程 $a(t)$ 和地面屈服加速时程 $a_y(t)$ 确定以后, 利用 Newmark 刚性滑块模型可以计算地震期间液化诱发的地面永久侧移值. 当地面加速反应时程 $a(t)$ 大于地面屈服加速时程 $a_y(t)$ 时, 土体将产生滑移. 即当 $a(t) \leq a_y(t)$ 时, 土体不沿滑移层产生滑移; 而当 $a(t) > a_y(t)$ 时, 土体沿滑移层产生滑移. 在第 i 时段内滑移的位移 Δ_i , 可按 $\Delta_i = \iint [a(t) - a_y(t)] dt dt$ 计算, 则地面永久侧移值为每一时段滑动位移的累积, 即 $\Delta = \sum_{i=1}^n \Delta_i$. 式中, Δ 为地面永久侧移值, n 为地震动期间的时段数.

3 算例及结果分析

3.1 计算模型

根据前面所提出的方法, 本文编制了相应的程序, 以一缓坡为例进行了大量的数值计算, 并对多种影响因素进行研究. 本文截取某高度(h) 为 15 m, 宽度(L) 为 45 m 的土体进行分析, 其断面与单元分割如图 2 所示. 输入 EL Centro 地震记录, 地震曲线如图 3 所示. 地震持续时间(t) 为 30 s, 且假定等效振动

表 1 N_{eq} 和 ΔN 与 T_d 的经验取值

震级	N_{eq}	T_d/s	ΔN
5.5~6.0	5	8	0.6
6.5	8	14	0.6
7.0	12	20	0.6
7.5	20	40	0.5
8.0	30	60	0.5

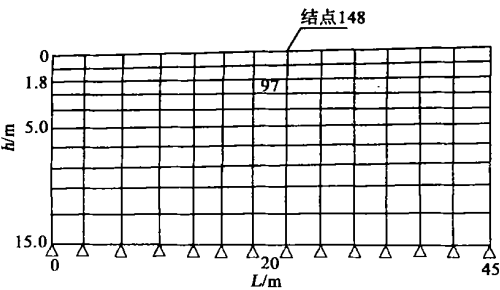


图 2 断面有限元计算网格

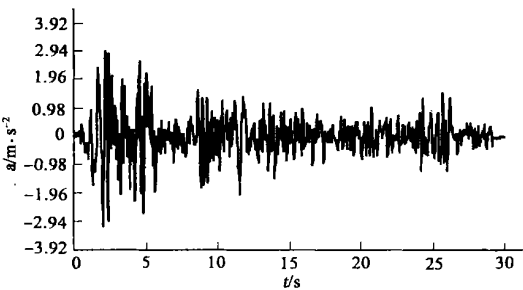


图 3 EL Centro 地震波

次数为 $N_{eq} = 15$, 时间步长为 0.02 s. 水平面在地下 1.8 m 处, 水平面以上土层容重 $\rho = 12.73 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 水平面以下土层的容重 $\rho = 17.61 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 土的强度参数 $c' = 0$, $\phi = 36^\circ$, 泊松比 $\mu = 0.3$, 孔隙比 $e = 0.6$; 震动液化次数参数 $a = 0.48$, $b = 0.2$; 阻尼比参数: 干砂 $D_{max} = 0.33$, 饱和砂 $D_{max} = 0.28$; 孔隙水压力参数 $\theta = 0.70$, 模量系数 $K = 256$, 模量指数 $n = 0.45$, 破坏比 $R_f = 0.8$. 因地基处于 K_0 固结状态, 取侧向压力系数 $K_0 = 0.412$; Wilson- θ 积分常数 $\theta = 1.40$. 为研究地震液化引起缓坡地区发生地面水平位移的影响因素, 本文根据不同的地震烈度调整地震加速度的峰值. 对于地震烈度为 9, 最大峰值加速度 (a_{max}) 调整为 $3.92 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; 对于地震烈度为 8, a_{max} 调整为 $1.96 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $2.94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; 对于地震烈度为 7, a_{max} 调整为 $1.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. 液化区体的残余强度分别取 $0.05\sigma_v$, $0.07\sigma_v$, $0.10\sigma_v$, $0.12\sigma_v$, $0.15\sigma_v$ (σ_v 为上覆有效应力). 当滑移层倾

角($^{\circ}$)分别为 2, 3, 4, 5 和 6, 地面大位移的数值计算结果, 如表 2 所示. 图 4 给出了计算得到的中间结点, 在 $a_{\max}=1.96\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 时的地面加速度反应时程. 图 5 给出了中间单元的孔隙水压力发展时程曲线, 图中曲线 1 ~ 4 的最大峰值加速度($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) 分别为 0.98, 1.96, 2.94 和 3.92.

表 2 地面大位移值(m)

$a_{\max}/$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	$h/$ m	$\alpha_1/(^{\circ})$					$\alpha_2/(^{\circ})$					$\alpha_3/(^{\circ})$				
		2	3	4	5	6	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
3.92	8	1.42	2.39	4.23	7.84	19.13	0.82	1.39	2.76	4.17	11.47	0.47	0.65	1.02	1.80	3.21
2.94	7	1.15	1.96	4.96	6.75	18.07	0.62	1.13	2.24	4.82	9.59	0.32	0.48	0.85	1.48	3.10
1.96	5	0.86	1.78	3.92	6.32	17.23	0.44	0.85	1.61	4.39	9.14	0.21	0.32	0.61	1.17	2.76
1.47	4	0.57	1.57	3.44	5.91	16.54	0.25	0.56	1.43	3.91	8.02	0.11	0.21	0.35	0.87	2.43

$a_{\max}/$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	$h/$ m	$\alpha_4/(^{\circ})$					$\alpha_5/(^{\circ})$					$h/$ m	$\alpha_0/(^{\circ})$				
		2	3	4	5	6	2	3	4	5	6		2	3	4	5	6
3.92	8	0.33	0.47	0.65	1.01	1.82	0.18	0.25	0.39	0.56	0.81	8	3.20	3.66	4.03	4.34	4.60
2.94	7	0.21	0.31	0.49	0.82	1.49	0.12	0.17	0.25	0.38	0.62	7	3.01	3.44	3.78	4.08	4.33
1.96	5	0.12	0.20	0.32	0.60	1.18	0.07	0.10	0.17	0.26	0.43	6	2.78	3.18	3.51	3.77	4.01
1.47	4	0.06	0.09	0.17	0.34	0.88	0.03	0.05	0.08	0.12	0.25	5	2.54	2.91	3.20	3.45	3.66
												4	2.27	2.60	2.86	3.08	3.28

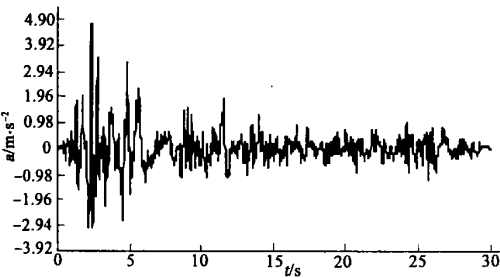


图 4 地面加速度反应时程

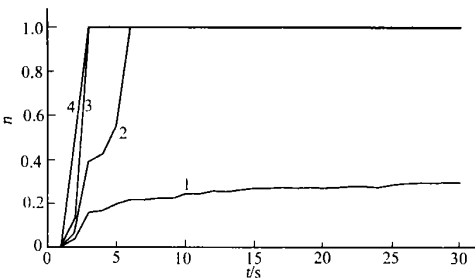


图 5 震动孔隙水压力比时程

3.2 计算结果分析

(1) 从表 2 可看出, 随着地震波加速度调整系数的增大, 地震波的能量也增大, 液化层厚度(h)明显变厚, 地面水平位移愈呈现增大的趋势. 在表 2 中, α_1 , α_2 , α_3 , α_4 和 α_5 的残余强度 S 取值分别为 $0.05\dot{\sigma}_v$, $0.07\dot{\sigma}_v$, $0.12\dot{\sigma}_v$ 和 $0.15\dot{\sigma}_v$, 而 α_0 可以从图 6 中看出, 地面水平位移(d)的发展是随时间缓慢发展的. 即地震动时间越长, 地面位移也越大. 在图 6 中, 曲线 1~4 的最大峰值加速度($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) 分别为 1.47, 1.96, 2.94 和 3.92, 残余强度取 $0.07\dot{\sigma}_v$, 倾角 α 为 4° . (2) 液化后, 砂土可动用的残余强度对地面滑移有着重要的影响. 当液化后砂土的可动用的残余强度较大时, 如表 6 残余强度取 $0.15\dot{\sigma}_v$, 地震波加速度峰值为 $1.47\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 时, 地面水平位移只达到几个 cm 的量级, 属于小位移范畴. 当液化后砂土可动用的残余强度较小时, 如表 2 残余强度 S 取 $0.05\dot{\sigma}_v$ 时, 地面位移一般可达到 m 的量级, 属于大位移范畴, 应引起足够的重视. (3) 对于滑移层倾角较大时, 如液化土的残余强度(S_d) 为 $0.05\dot{\sigma}_v$, 滑移层倾角 α 为 6° 时, 从计算结果上看地面侧移值可达到十几米. 这主要是由于液化土的残余强度很小, 导致砂土层的屈服加速度也变小. 它在地震加速度及自身重力的双重作用下, 产生大范围滑移. 在该种情况下, 在地震结束后由于孔隙水压力的消散缓慢, 导致砂土的强度得不到快速恢复, 土体在自身重力的作用下将继续滑动. 这与实际震害观察的结果吻合. 因此, 当液化砂土的残余强度较小时, 应当按两部分来计算地面位移. 一部分为地震动期间产生的位移; 另一部分为地震结束后, 砂土的强度得不到恢复时在自重作用下产生的位移. (4) 从表 2 可以看出, 地面侧移值随着滑移层倾角变大而增大. 这是由于倾角越大, 重力的作用愈加明显, 向下滑移的屈服加速度越小, 因此, 滑移位移明显增大.

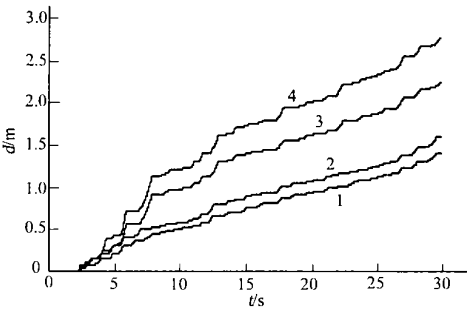


图 6 地面侧移时程

当滑移层角度很小或接近水平时,重力在沿滑移层方向上的分量接近为零.此时,土体的屈服加速度将达到或接近最大值,滑移体很难产生滑移,且滑移体可沿滑移层双向滑移,因此其侧移总和将趋于零.

(5) 表2给出了由传统的经验方法计算的地面大位移值.传统的经验方法主要是通过对地震资料进行回归,得到预测地面大位移的经验公式.这些公式只能粗劣地给出一个位移值,不能全面地揭示地面位移产生的机理,而且能否准确预测或在给定信度内进行预估尚无实例验证.本文所计算的结果与 Hamada 的经验公式计算出来的结果不太一样,主要有两个原因.(1) Hamada 等的统计回归公式,没有考虑到地震动强度、地震持续时间及砂土液化后残余强度等重要因素的影响.他的计算方法只要厚度一样,倾角一样,计算的结果完全一样.这显然与实际不符合.出现这种情况,是由于他所用的统计回归资料决定的.(2) 本计算方法只考虑到地震动期间产生的地面侧移值,没有考虑到地震结束后产生的地面侧移值.因此,计算值可能会偏小于经验公式计算的结果.

4 结论

本文根据地面大位移产生的特点,提出了新的计算地面大位移的方法,同时对影响地面大位移的各种可能因素进行了研究.通过这些工作,主要得到4点结论.(1) 研究砂土液化诱发地面大位移,必须全面考虑地震和场地条件.只考虑地震因素(如 Youd 方法)或只考虑场地条件(如 Hamada 方法),都是不全面的.计算结果表明,地震动强度越大,持续时间越长,滑移层倾角越大,产生的地面侧移也越大.(2) 当液化后砂土的残余强度较大时,如残余强度取 $0.15 \sigma_v'$ 时,地面水平位移只达到几个 cm 的量级,属于小位移范畴.当液化后砂土的残余强度较小时,如残余强度为 $0.05 \sigma_v'$ 时,地面水平位移可达到数 m 的量级,这属于大位移范畴.特别是当滑移层倾角大于 5° 时,土体有可能产生更大滑移,应引起足够的重视.(3) 当液化后砂土的残余强度较小,且孔隙水压力消散缓慢的情况下,在计算地面大位移时应分两部分来考虑.一部分为地震动期间产生的位移;另一部分为地震结束后,砂土的残余强度得不到恢复时在自重作用下产生的位移.关于如何计算地震结束后产生的地面侧移,有待于进一步的研究.(4) 数值计算结果表明,与经验方法相比较,本文提出的计算地面大位移的方法在物理机制上更加合理,能够较真实地揭示地面大位移产生的规律.它的计算结果与宏观震害现象吻合,具有较强的工程适用性.

参 考 文 献

- 1 刘惠珊,徐凤萍,李鹏程等.液化引起地面大位移对工程的影响及研究现状[J].特种结构,1997,14(2):47~50
- 2 高玉峰,刘汉龙,朱伟.地震液化引起地面大位移研究进展[J].岩土力学,2000,21(1):294~298
- 3 刘惠珊,张在明.地震区的场地与地基基础[M].北京:中国建筑工业出版社,1994.146~158
- 4 景立平,李玉亭,王绍博.砂土液化诱发地面侧移分析[J].东北地震研究,1996,12(4):40~49
- 5 Braja M D 著.土动力学原理[M].吴世明译.浙江:浙江大学出版社,1984.158~164
- 6 石兆吉.判别水平土层液化势的剪切波速法[J].水文地质与工程地质,1986,(4):9~13
- 7 Vaid Y P, Thomas J. Post liquefaction behavior of sand [J]. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(2): 163~173

Calculation and Analysis of Large Ground Displacement Induced by Seismic Liquefaction

Lin Jianhua Huang Qunxian

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou, China)

Abstract Based on the characteristic of the emergence of large ground displacement and some reasonable hypothesis, the authors pose a method for calculation large ground displacement induced by seismic liquefaction and make an initial study on its possible influencing factors. In calculation lateral ground displacement emerging during earthquake, this method is able to reflect fairly truthfully its physical mechanism and to reveal the regular pattern of its emergence, as shown by the reckoning which coincides with macroscopic phenomenon of seismic damage.

Keywords earthquake, liquefaction, large ground displacement, lateral spread