

地震液化区分布范围对地面大位移的影响

刘汉龙, 高玉峰, 朱 伟

(河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要 应用稳态强度理论和动力有效应力分析方法, 对液化后地面大位移进行数值计算, 以研究液化区分布范围对地面大位移的影响. 结果表明: 当液化区可动用的残余强度较大时, 液化区范围变化对地面位移影响不大, 亦即此时一般不发生地面大位移破坏. 当液化区可动用的残余强度较小时, 随液化区范围增大, 地面位移增大呈现三个阶段: 初始阶段(小位移阶段), 随液化区厚度增加位移缓慢地增加, 在几个 cm 量级内变化; 过渡阶段, 随液化区厚度增加位移急剧增加, 从几个 cm 量级快速增至 m 量级; 稳定阶段(大位移阶段), 随液化区厚度增加位移缓慢增加. 当土体发生局部液化时, 也能产生地面大位移破坏, 但当局部液化区处于地下土层一定埋深时, 基本不产生地面大位移的破坏.

关键词 地震 液化区 分布范围 大位移

中图分类号 :TU435

文献标识码 :A

文章编号 :1000-1980(2001)05-0001-06

在国内外震害调查报告中, 有大量关于液化现象的报道. 许多专家学者对此非常重视, 并致力于液化的影响因素、产生机理和条件、液化评判预测以及抗液化措施的研究. 液化引起的地面大位移对结构的破坏, 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等震害的最主要形式. 近十几年来, 人们越来越重视这种新的地震液化破坏形式的研究. 液化后地面大位移的计算方法总的来讲有经验法、简化法和数值法. 经验法和简化法一般用于近似地估计液化后地面大位移的量级. 以往的数值计算方法, 由于本构模型简单以及没有很好地处理液化后砂土流动特征等方面的原因, 计算结果不尽合理. 因此, 目前缺少液化区分布范围对地面大位移影响的深入研究. 多重剪切机构塑性模型将土的复杂机理分解为体积变化机理和一系列简单的剪切机理, 具有模拟剪应变快速地从微小增加到百分之一到百分之几十过程的能力^[1]. 本文采用该模型, 并考虑到液化后土体处于流动状态, 强度值降为残余强度, 进行液化后地面大位移的数值计算, 并根据计算结果, 研究液化区分布范围对液化后地面大位移的影响.

1 动力有效应力分析方法简介

动力有效应力分析方法是建立在 Zienkiewicz 两相耦合理论基础上的^[2], 它在平衡方程、物理方程、本构关系和连续方程以及边界条件和初始条件的基础上, 形成动力固结方程, 超静孔隙水压力直接由动力固结平衡方程求解.

为了考虑流体的共同作用, 将海水模拟为不可压缩流体, 根据固体与流体接触面上的平衡和连续条件, 由固体加速度产生的流体惯性力应与孔隙水压力的导数保持一致:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho \frac{\partial^2 U_n}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中 U_n 为位移的法向分量. 根据水压力分布控制微分方程式(1), Zienkiewicz 推导了流体的质量矩阵^[3]. 因此, 有限元离散后的控制方程组可表示为

$$(M + \Delta M) \ddot{U} + C \dot{U} + \int_V B^T \sigma dv = -M \ddot{U}_g + T_F \quad (2)$$

式中: U ——构造节点位移向量; M, C ——质量矩阵和阻尼矩阵; $\ddot{U}_g$ ——基岩地震加速度向量; $\int_V B^T \sigma dv$ 是非线性材料单元的节点力向量; ΔM ——流体质量矩阵, $\Delta M = -S_F^T H S_F$, 其中 H 为反映流体压力分布的函数矩阵, S_F 为动水压力增量矩阵; T_F ——表面力荷载向量。

土体的本构关系采用定义在应变空间中的多重剪切机构塑性模型, 其平面应变条件下表示周期活动性的有效应力和应变张量为

$$\sigma'^T = \{\sigma'_x, \sigma'_y, \tau_{xy}\} \quad (3)$$

$$\varepsilon^T = \{\varepsilon'_x, \varepsilon'_y, \gamma_{xy}\} \quad (4)$$

本构关系的基本形式可表示为

$$d\sigma' = D(d\varepsilon - d\varepsilon_p) \quad (5)$$

式中

$$D = Kn^{(0)}n^{(0)T} + \sum_{i=1}^n R_{L/U}^{(i)} n^{(i)}n^{(i)T} \quad (6)$$

式(5)中 $d\varepsilon_p$ 代表考虑剪胀特性的附加应变增量, 可由剪胀引起的体积应变增量表示:

$$d\varepsilon_p^T = \{\varepsilon_p/2, d\varepsilon_p/2, 0\} \quad (7)$$

式(6)第一项反映体积变化的机理, 由回弹模量 K 和方向向量 n 表示:

$$n^{(0)T} = \{1, 1, 0\} \quad (8)$$

第二项反映多重剪切变化的机理, 每一个机理 $i = 1, 2, \dots, N$ 代表一个虚拟的与水平轴成 $45^\circ + (\theta_i/2)$ 角度的简单剪切机理。多重剪切机理方向向量可表示为

$$n^{(i)T} = \{\cos\theta_i, -\cos\theta_i, \sin\theta_i\} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

式中

$$\theta_i = (i-1)\Delta\theta \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

$$\Delta\theta = \pi/N \quad (11)$$

加载和卸载准则定义在常规塑性理论应变空间^[4], 根据 $n^{(i)T}$, $d\varepsilon$ 的符号分别由每个虚拟简单剪切机理确定。由于多重剪切机构的特性, 该模型能够模拟考虑各向异性固结周期性状的主应力轴方向偏转的影响。模型中共有 10 个参数, 其中反映土的弹性特性的有剪切体积模量 G_0 和 K_0 , 反映土的塑性剪切特性的有摩擦角、相变位角和衰减系数 φ'_f 、 φ'_p 和 H_m , 其余 s_1, w_1, p_1, p_2 和 c_1 , 则反映土的剪胀特性。

液化后大位移计算实质采用的是静力有限元分析计算方法。具体计算时分两个阶段:(a)进行动力有效应力的计算, 确定液化区的分布范围;(b)在动力有限元分析的基础上应用稳态强度理论进行静力计算, 得到液化后的变形值。稳态变形是指土体在常体积、常法向有效应力、常剪应力和常应变速率下的持续变形状态。只有在所有颗粒定向达到统计的稳定条件及所有颗粒骨架完全破碎之后, 土体才能达到稳定变形。从这种意义上讲, 地震液化后的土体即处于稳态变形状态。稳态强度是指土体在稳态变形下可动用的强度, 它决定了土体在地震液化后的稳定性和残余变形。液化区土体的剪应力为^[5]

$$\partial\tau = \frac{\partial f}{\partial \sigma'_m} d\sigma'_m + \frac{\partial f}{\partial \gamma} d\gamma \quad (12)$$

Vaid 等^[6]认为, 液化后的残余强度为 $0.05 \sim 0.15\sigma'_{vo}$ (σ'_{vo} 为上覆有效应力)。

2 液化区分布范围对地面大位移的影响

2.1 算例

2.1.1 工程地质概况

福建省潘龙莱州段晋江江堤是泉州市的重点防汛工程之一。根据地质钻探资料, 本场地地层主要由海积与冲洪积沉积所构成, 一般为粘性土-砂土(软土)-软土(砂土)的结构形式。其主要地层分述如下(图1):(a)粉质粘土 主要分布在堤线的表层。(b)粘土 该层只在堤线局部段出露。层厚 $0 \sim 3.0$ m。(c)淤泥或淤泥质粉质粘土 此层多见于堤线中上部, 局部呈透镜体状。(d)淤泥夹砂 分布在堤线的中、上部, 局部呈透镜状分布。(e)(粉)细砂 该层呈断续分布, 局部呈透镜状分布。(f)(细)中砂 该层分布在堤线的中部。(g)中粗砂或粗中

砂 主要分布在堤基的中上部,贯穿整段堤线。(h)粗砂、含砾粗砂:多分布在地基的中下部。(i)砂砾卵石:分布在 整个堤线的下部。

2.1.2 单元划分及计算参数

图 2 是断面的有限元计算网格,计有 575 个结点和 506 个单元。单元类型共有 5 种:即线性单元、非线性单元、流体单元、流体固体连接单元和接触面单元。其中线性单元模拟混凝土防洪墙和上部结构,非线性单元模拟土体,流体单元模拟江水,接触面单元模拟土与结构的相互作用,流体固体连接单元模拟流体与固体相互作用。

根据现场钻探、标准贯入试验及室内物理力学性质试验确定的所需计算参数见表 1。

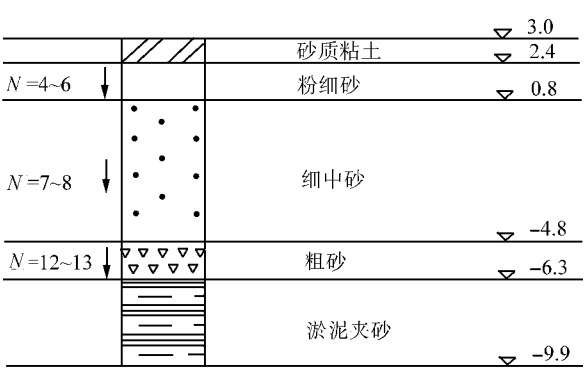


图 1 晋江防洪堤典型地质剖面
Fig.1 Geologic profile of Jinjiang Dike

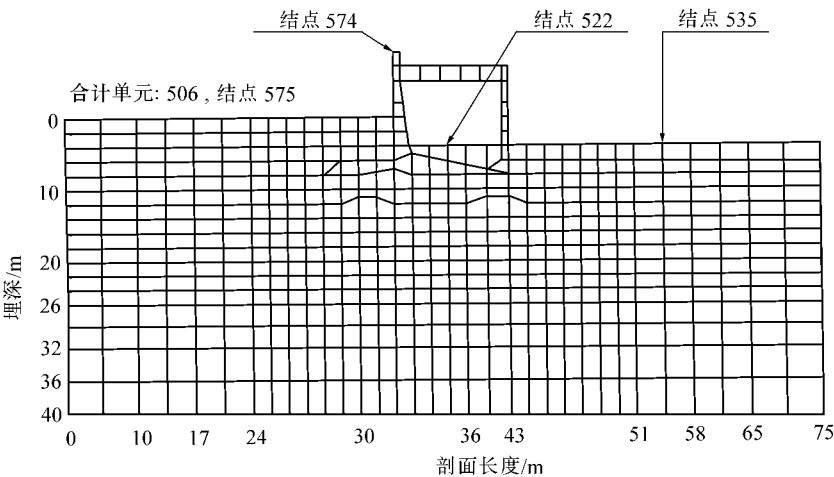


图 2 断面有限元计算网格
Fig.2 Calculation meshes

表 1 计算参数

土 层	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	G_0 /MPa	K_a /MPa	$-\sigma_m$ /kPa	φ_f' /($^\circ$)	φ_p' /($^\circ$)	剪胀参数				
							s_1	w_1	p_1	p_2	c_1
粘 土	18.0	74.97	195.50	143.0	30.0						
粉 细 砂	18.0	56.10	146.17	106.0	37.0	28.0	0.005	1.05	0.5	1.18	1.5
细 中 砂	18.0	56.10	146.17	106.0	37.0	28.0	0.005	1.15	0.5	1.12	1.5
粗 砂	18.5	84.90	221.04	98.00	38.0	28.0	0.005	5.50	0.5	1.02	1.6
墙前块石	20.0	180.00	469.00	98.00	40.0						
回 填 土	18.0	79.38	207.00	106.00	37.0						

在计算域两侧边界上,考虑半无限水平地层自由场的地震响应,通过粘性边界近似地入射到和反射出有 限元计算域。图 3 是在 1995 年 1 月 17 日日本阪神大地震发生时,在神户市港岛地下 32 m 深度处记录到的地 震加速度。阪神地震是浅源地震,类似于 1999 年 9 月 21 日在台湾发生的浅源地震,具有较大的破坏性。本 文选择其作为防波堤动力分析的输入地震波形。对于地震烈度为 8°,最大峰值加速度调整为 0.2g,地震烈度 为 7°,最大峰值加速度调整为 0.1g,地震历时 20 s。

2.2 大面积整体液化情况

针对防洪堤基底下卧土层发生大面积整体液化的情况,液化层厚度分别取 1 m,2 m,3 m,4 m,5 m,6 m,7 m, 8 m,9.5 m,11 m,液化区土体残余强度分别取 $0.15\sigma_{vo}'$, $0.05\sigma_{vo}'$ (σ_{vo}' 为上覆有效应力),进行液化后地面大位 移数值计算。计算剖面地表面中心点(节点编号为 522)、计算剖面右半侧中心点(节点编号为 535) 两个典型 节点的水平向、坚直向地面大位移列于表 2、表 3(空白表示位移小于 0.01 m,下同)。

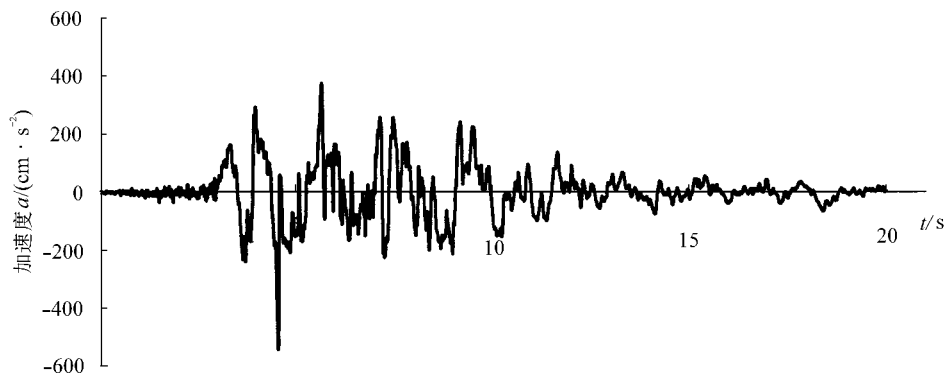


图3 输入地震加速度时程曲线

Fig.3 Input curve of seismic acceleration

表2 大面积整体液化时地面大位移

(液化层埋深 2.4 m,残余强度取 $0.15 \sigma_{vo}'$)

Table 2 Large ground displacement
(Residual strength $0.15 \sigma_{vo}'$)

厚度 /m	节点 522		节点 535	
	水平/m	竖直/m	水平/m	竖直/m
1		-0.02		-0.02
2		-0.02		-0.02
3		-0.02		-0.02
4		-0.02		-0.02
5		-0.03		-0.02
6	-0.01	-0.03		-0.02
7	-0.01	-0.03		-0.02
8	-0.02	-0.03		-0.02
9.5	-0.02	-0.04		-0.02
11	-0.02	-0.04		-0.02

表3 大面积整体液化时地面大位移

(液化层埋深 2.4 m,残余强度取 $0.05 \sigma_{vo}'$)

Table 3 Large ground displacement
(Residual strength $0.05 \sigma_{vo}'$)

厚度 /m	节点 522		节点 535	
	水平/m	竖直/m	水平/m	竖直/m
1		-0.02		-0.02
2		-0.02		-0.02
3	-0.03	-0.02	-0.01	-0.03
4	-0.10	-0.04	-0.04	-0.05
5	-0.49	-0.13	-0.18	-0.15
6	-1.01	-0.33	-0.40	-0.32
7	-1.44	-0.58	-0.64	-0.47
8	-1.90	-0.90	-0.92	-0.64
9.5	-2.02	-1.02	-1.02	-0.69
11	-2.17	-1.20	-1.14	-0.76

从计算结果可以看出：

a. 当液化区可动用的残余强度较大时,液化区范围变化对地面位移影响不大,亦即此时一般不发生地面大位移破坏.如残余强度取 $0.15 \sigma_{vo}'$ (表2),两个典型节点无论是水平向位移还是竖直向位移,只达到几个 cm 量级(小于 5 cm),这属于小位移范畴.

b. 当液化区可动用的残余强度较小时,液化区范围变化对地面位移影响显著,亦即此时一般发生地面大位移破坏,具体表现为液化区范围越大(大面积整体液化区厚度增加),地面水平位移和竖直位移增大呈现 3 个阶段:(a) 初始阶段(小位移阶段),随液化区厚度增加位移缓慢稳定增加,在几个 cm 量级变化;(b) 过渡阶段,随液化区厚度增加位移急剧增加,从几个 cm 量级快速增至 m 量级;(c) 稳定阶段(大位移阶段),随液化区厚度增加位移缓慢增加.如残余强度取 $0.05 \sigma_{vo}'$ (表3、图4),对于 522 节点,液化区厚度由 1 m 增至 3 m,水平位移和竖直位移均 2 cm 左右.液化区厚度由 3 m 增至 8 m,水平位移快速增至 1.9 m、竖直位移快速增至 0.9 m.液化区厚度由 8 m 增至 11 m,水平位移最大达 2.17 m、竖直位移最大达 1.2 m.对于 535 节点,液化区厚度由 1 m 增至 3 m,水平位移和竖直位移均 2 cm 左右.液化区厚度由 3 m 增至 8 m,水平位移快速增至 0.92 m、竖直位移快速增至 0.64 m.液化区厚度由 8 m 增至 11 m,水平位移最大达 1.1 m、竖直位移最大达 0.76 m.

2.3 局部液化情况

为研究局部液化区分布对地面大位移的影响,对不同液化区范围、分布状况进行组合,然后针对不同情况分别进行计算.考虑到上述结论,下面给出液化区厚度 5 m,长度分别取 10 m,20 m,30 m,41 m,位于防洪堤基底或其下 3 m 处,各种组合工况的计算结果.工况 1 液化区范围 $5 \text{ m} \times 10 \text{ m} (S_0)$,位于防洪堤基底;工况 2:液化区范围 $5 \text{ m} \times 20 \text{ m} (2S_0)$,位于防洪堤基底;工况 3 液化区范围 $5 \text{ m} \times 30 \text{ m} (3S_0)$,位于防洪堤基底;工况 4:液化区范围整个 5 m 厚土层($4.1 S_0$),位于防洪堤基底;工况 5 液化区范围 $5 \text{ m} \times 10 \text{ m} (S_0)$,位于防洪堤基底下 3 m;工况 6 液化区范围 $5 \text{ m} \times 20 \text{ m} (2S_0)$,位于防洪堤基底下 3 m;工况 7 液化区范围 $5 \text{ m} \times 30 \text{ m} (3S_0)$,位于防

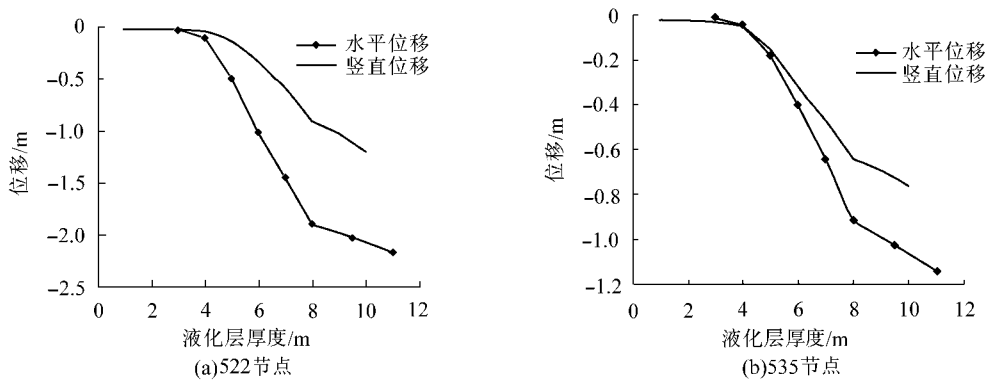


图 4 地面大位移随液化区厚度变化曲线(残余强度取 $0.05\sigma_{v0}'$)

Fig.4 Large ground displacement vs. thickness of liquefied area

洪堤基底下 3 m 工况 8 液化区范围整个 5 m 厚土层 ($4.1S_0$), 位于防洪堤基底下 3 m. 取液化区土体残余强度 $0.05\sigma_{v0}'$, 进行液化后地面大位移数值计算, 522, 535 两个典型节点的水平向、竖直向地面大位移列于表 4.

表 4 局部液化时地面大位移(残余强度取 $0.05\sigma_{v0}'$)

Table 4 Large ground displacement at partial liquefaction

工况	节点 522		节点 535	
	水平/m	竖直/m	水平/m	竖直/m
1		-0.02		-0.02
2	-0.04	-0.04		-0.02
3	-0.18	-0.07	-0.05	-0.07
4	-0.49	-0.13	-0.18	-0.15
5		-0.03		-0.02
6		-0.03		-0.02
7		-0.03		-0.02
8		-0.04		-0.02

- 从计算结果可以看出：
- a. 当土体发生局部液化时,也能产生地面大位移破坏. 如对于工况 4, 522 节点水平位移达 0.49 m. 但和 大面积整体液化产生的地面大位移相比,位移量明显减少.
 - b. 局部液化区范围越大,地面水平位移和竖直位移越大(图 5). 局部液化区位于防洪堤基底,随着液化 区水平向扩展(工况 1~4). 其节点 522 水平位移增至 0.49 m, 竖直位移增至 0.13 m; 节点 535 水平位移增至 0.18 m, 竖直位移增至 0.15 m.

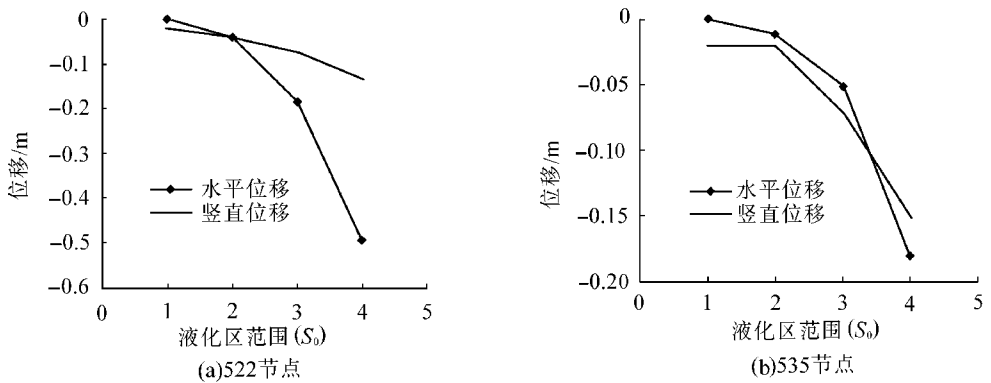


图 5 地面大位移随局部液化区面积变化曲线(残余强度取 $0.05\sigma_{v0}'$, 工况 1~4)

Fig.5 Large ground displacement vs. area of partial liquefaction

- c. 当局部液化区处于地下土层一定埋深时,基本不产生地面大位移的破坏. 表 4 给出了液化区位于防洪 堤基底下 3 m(工况 5~8) 两个典型节点 522, 535 的地面竖直位移值, 均只有几个 cm 的量级.

3 结 论

a. 当液化区可动用的残余强度较大时, 液化区范围变化对地面位移影响不大, 亦即此时一般不发生地面大位移破坏.

b. 当液化区可动用的残余强度较小时, 液化区范围变化对地面位移影响显著, 亦即此时一般发生地面大位移破坏. 具体表现为: 液化区范围越大(大面积整体液化区厚度增加), 地面水平位移和竖直位移越大, 且呈现 3 个阶段: (a) 初始阶段(小位移阶段), 随液化区厚度增加位移缓慢稳定增加, 在几个 cm 量级变化; (b) 过渡阶段, 随液化区厚度增加位移急剧增加, 从几个 cm 量级快速增至 m 量级; (c) 稳定阶段(大位移阶段), 随液化区厚度增加位移缓慢增加.

c. 当土体发生局部液化时, 也能产生地面大位移破坏, 但和大面积整体液化产生的地面大位移相比, 位移明显减少. 局部液化区范围越大, 地面水平位移和竖直位移越大. 当局部液化区处于地下土层一定埋深时, 基本不产生地面大位移的破坏.

参考文献:

- [1] Iai S, Matsunaga Y, Kameoka T. Strain space plasticity model for cyclic mobility[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(2): 1~15.
- [2] Zienkiewicz O C, Bettess P. Soils and other saturated media under transient, dynamic load conditions, soil mechanics-transient and cyclic loads[M]. New York: John Wiley and Sons, 1982. 1~16.
- [3] Zienkiewicz O C. The finite element method[M]. 3rd edition. New York: McGraw-Hill Book Co, 1977. 1~20.
- [4] Inagaki H, Iai S, Takahiro S, et al. Performance of caisson type quay walls at Kobe Port[J]. Soils and Foundations, 1996, 1(Special Issue): 119~136.
- [5] Finn W D L. Seismic response analysis of port structures with liquefaction potential[A]. Proc Int Workshop Remedial Treatment of Liquefiable Soils[C]. Tsukuba: Public Works Research Institute, 1994. 70~87.
- [6] Vaid Y P, Thomas J. Post-liquefaction behaviour of sand[J]. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(2): 163~173.

Influences of Liquefied Area on Large Ground Displacement

LIU Han-long, GAO Yu-feng, ZHU Wei

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: For the research of the influence of liquefied area on large ground displacement, the large ground displacement induced by seismic liquefaction is calculated by use of the theory of steady state strength and the analysis of dynamic FEM. When the available residual strength is large, there is no influence of liquefied area on ground displacement; when the available residual strength is small enough, there are three stages about the influence of liquefied area on large ground displacement: the first stage is of a small displacement of several centimeters; the second stage is the gradual stage with a rapid ground displacement increase from several centimeters to meters; the third stage is the steady increase stage of large ground displacement. When the foundation is partly liquefied, there is no influence of liquefied area on large ground displacement when the liquefied area is at a certain depth.

Key words: earthquake; liquefied area; distribution range; large ground displacement