

# 包括震后固结沉降在内的多层结构物基础抗震性分析<sup>①</sup>

包小华<sup>1</sup>, 付艳斌<sup>1</sup>, 叶斌<sup>2</sup>, 叶冠林<sup>3</sup>, 张锋<sup>4</sup>

(1.深圳大学土木工程学院,广东深圳 518060; 2.岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学),上海 200092;

3.上海交通大学,上海 200240; 4.名古屋工业大学,日本 名古屋 466-8555)

**摘要:**以一多层次框架结构停车场的地基基础为研究对象,分析其在将来可能发生大地震中的动力特性。除地基可能出现的液化,还包括地震中的瞬时沉降及地震后地基长期固结沉降,尤其是不均匀沉降。采用水土耦合2维有限元分析法,对研究领域的地基基础及上部结构进行整体建模。计算中采用的地震波为一三连动人造地震波,最大加速度为182 gal,主震持续150 s。为比较不同的基础形式对地基液化和沉降的影响,对采用长桩和密集型短柱两种基础形式做分析比较。有限元计算中,采用能反映其地层土交变移动特性的弹塑性本构模型来描述土的动力学特性,桩基础和上部框架结构采用梁单元模型,密集型短柱基础采用弹性单元模型。结果表明,除地震中地基的液化,震后随着超孔隙水压的消散,地基基础长期不均匀沉降也是不可忽略的重要问题。

**关键词:**地震; 液化; 沉降; 数值分析; 本构模型

中图分类号: TU43

文献标志码:A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0439-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0439

## Seismic Performance of Foundations of Multi-story Buildings Considering Post-earthquake Consolidation Settlement

BAO Xiao-hua<sup>1</sup>, FU Yan-bin<sup>1</sup>, YE Bin<sup>2</sup>, YE Guan-lin<sup>3</sup>, ZHANG Feng<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 4. Nagoya Institute of Technology, Nagoya 466-8555, Japan)

**Abstract:** In evaluating the damage caused by earthquakes, attention has been paid in the past to ground liquefaction and displacement during or immediately after the earthquakes. For this reason, only the analysis of liquefaction in sandy ground during earthquakes is performed in most dynamic analyses. However, the damage to complex ground that contains sand, silt, or clay layers and long-term settlement over several weeks or years after the earthquake cannot be ignored mainly because of the long time required for the dissipation of excess pore water pressure (EPWP) and the recovery of the ground rigidity. In this study, a multi-story car park with a steel frame is designed and constructed according to Japanese Architectural Building Standards. This study will investigate the seismic performance of the building during and after a great earthquake that is predicted to hit the central part of Japan in the near future. Special attention is paid to the differential settlement caused by liquefaction and long-term settlement after the earthquake. The analysis is performed using a 2D soil-water coupled dynamic/static finite element analysis program DB-LEAVES, considering ground-foundation-superstructure as one whole system. The program can

① 收稿日期:2014-08-20

基金项目:国家自然科学基金(51308346, 51108270); 广东省自然科学基金(S2013040012443, 2014A030313551); 深圳大学青年教师科研启动项目(201420)

作者简介:包小华(1983—),女,讲师,硕士生导师,主要从事岩土工程方面的教学和科研.E-mail:bxh@szu.edu.cn

analyze not only the static and dynamic behavior of natural complex ground but also solve soil-structure interaction problems. The applicability and accuracy of the program have been verified by many investigations. A rotational kinematic hardening elasto-plastic model called the cyclic mobility (CM) model is adopted in this analysis to describe the nonlinear behavior of cohesionless soils under both dynamic and static loadings, particularly the cyclic mobility of sand during liquefaction. With the CM model and an effective-stress-based FEM code, the mechanical behavior of soil, change of EPWP, and consolidation can be defined. The input earthquake wave is an approximation of three synchronized seismic waves whose main shock lasts about 150 s with a maximum acceleration of 182 gal. Before the dynamic analysis, a static analysis considering the ground-structure as one whole system is performed to determine the initial effective stress of the ground. In the dynamic analysis, an equal displacement boundary condition, sometimes called a periodic boundary condition, is used for two side boundaries to manage the energy-loss problem. In this study, a comparison of long-pile and short-pile foundations is presented. As mentioned above, the ground behavior is described by the CM model; in addition, the long piles and super structure are modeled as beam elements, and the short piles are modeled as elastic solid elements. The analysis shows that liquefaction occurred mainly in loose and medium dense sand layers. The long-pile foundation has a better capacity for resisting differential settlement, whereas the short-pile foundation (improved ground) has a better capacity for resisting ground liquefaction. In all cases, most of the differential settlement occurs during earthquake motion, while the post-liquefaction settlement is relatively uniform despite its large amplitude. Therefore, serious consideration should be given not only to the liquefaction behavior of the ground during earthquake motion but also to the long-term settlement after the earthquake.

**Key words:** earthquake; liquefaction; settlement; numerical analysis; constitutive model

## 0 引言

在进行地震造成的地基灾害的评估中,地基液化和沉降是两个重要因素。因而关于单一砂土地基上地震造成液化现象的动力分析方面的研究层出不穷,但是对于由砂土、黏性土或粉性土组成的复杂天然地基的液化分析仍然欠缺。根据近年观察到的地震后地基的液化和破坏现象发现<sup>[1-5]</sup>,地基将在震后很长一段时间里持续沉降,其震后不均匀沉降是基础和上部结构物产生破坏的主要原因。因此,随着超孔隙水压的消散产生的地基不均匀沉降是一个不可忽略的问题。而复杂地基沉降机理在地震中及震后比单一的砂土地基更加复杂。

对于地基的液化和长期沉降的研究较集中于理论方面、实验方面和数值计算方面。黄雨等<sup>[1]</sup>对汶川地震中地基土的动力液化和沉降现象进行了现场观测和分析。袁晓铭等<sup>[6]</sup>从理论上分析了软弱地基上地震后导致结构物产生不均匀沉降的原因主要为地震波类型、土层类型和结构物类型;并指出目前常用的分析方法难以计算出结构物的不均匀沉降,无

法给出与实际震害现象和实验一致的结果。中国地震局工程力学研究所<sup>[7]</sup>进行了 5 m×5 m 振动台试验,研究表明土体和结构产生不均匀沉降的原因是地震波本身的不对称和不规则性。Shideh Dashti 等<sup>[8]</sup>采用离心机实验分析了液化地层上浅基础的沉降动力特性,指出沉降量与液化层厚度无关,取决于地层的透水性,并且大部分不均匀沉降发生在地震荷载作用。Mojtaba Mirjalili 等<sup>[9]</sup>用数值模拟的方法分析了建立在软土地基上的大型堤岸的长期固结沉降,计算中土体采用了弹-黏塑性本构模型,较好地评估了地基长期的不均匀沉降。其他一些案例可参见文献[10-12]。

总的来说,以上研究有各自的优点和缺点。首先,这些研究大多集中于单一的砂土地层或者黏土地层,由砂性、粉性土或黏性土组成的复杂地层条件下地基液化和震后长期固结沉降现象的研究还未被重视。其次,分析中所使用的土的本构模型也不能很好地反应地震荷载中土体的交变移动性及固结排水过程中超孔隙水压的消散过程与土体强度恢复的

关系。再者,遇到桩基础地基时没有很好地考虑地基基础及上部结构的相互作用问题。

因此,本研究采用水土耦合2维有限单元分析法对一6层停车场地基基础进行包括地震作用下的动力和震后地基长期固结沉降的静力在内的数值分析。研究所采用的有限元程序 DBLEAVES<sup>[13]</sup>能有效地解决2维/3维水土耦合数值计算的各种动力和静力问题。此程序的准确性已经被多次证实<sup>[14-16]</sup>。为探讨不同的基础形式对地基液化和沉降的影响,研究中对采用长桩和密集型短柱两种基础形式做比较分析。土体采用移动硬化弹塑性本构模型 Cyclic Mobility Model (CM Model)<sup>[17-21]</sup>来描述,桩基础和上部框架结构采用梁单元模型,密集型短柱基础采用弹性实体单元模型。

## 1 有限元分析领域及地层土参数

### 1.1 分析平面图及土层分布状况

根据地层和上部结构的对称性,包括地基、基础和上部结构在内的整体系统的2维断面图如图1所示,  $A_{s1-8}$  为砂土层,  $A_{silt,1-5}$  为粉土层。各层厚度分别为  $A_{s1}=2 \text{ m}$ 、 $A_{s2}=2 \text{ m}$ 、 $A_{s3}=2 \text{ m}$ 、 $A_{s4}=2 \text{ m}$ 、 $A_{silt,1}=5 \text{ m}$ 、 $A_{silt,2}=2 \text{ m}$ 、 $A_{s5}=1 \text{ m}$ 、 $A_{silt,3}=3 \text{ m}$ 、 $A_{s6}=6 \text{ m}$ 、 $A_{s7}=2 \text{ m}$ 、 $A_{silt,4}=2 \text{ m}$ 、 $A_{s8}=2 \text{ m}$  及  $A_{silt,5}=2 \text{ m}$ 。地下水位在地表面以下2m深处(GL-2.0m)。地层分布数据来源于现场钻孔实验。选取结构物基础地表左侧的A点和右侧的B点为研究对象,分析不均匀沉降情况。以离结构物16m远处地下4m深处砂土层的1号单元(GL-4.0m)、地下10m深处粉土层的2号单元(GL-10.0m)、地下22m深处底层砂土层的3号单元(GL-22.0m)和地下29m深处底层黏土层的4号单元(GL-29.0m)为研究对象,分析地基的液化情况。

### 1.2 两种类型基础

计算分析两种不同类型的基础:

#### (1) 类型-1:长桩基础

众所周知,桩基础可以有效控制总沉降和不均匀沉降(图1)。该类桩桩长31m,直径1.2m。从左到右桩间距分别为12.65m、10.85m、10.5m、10.5m、10.5m和12.65m。桩筏宽为75.65m,厚2m。筏板和桩头的连接设为固结,计算时桩模型化为弹性梁单元。采用长桩基础为结构物基础初始设计方案。

#### (2) 类型-2:密集型短柱基础

更改之后的设计方案为大量长5m的短柱基

础,这也是现实结构物的基础状况。由于短柱非常密集,为减少计算量,分析时将整个基础区模型化为改良的弹性地基,宽75.65m、深5m。其弹性模量由短柱和柱间土体根据其体积比得到的加权平均值为计算依据。

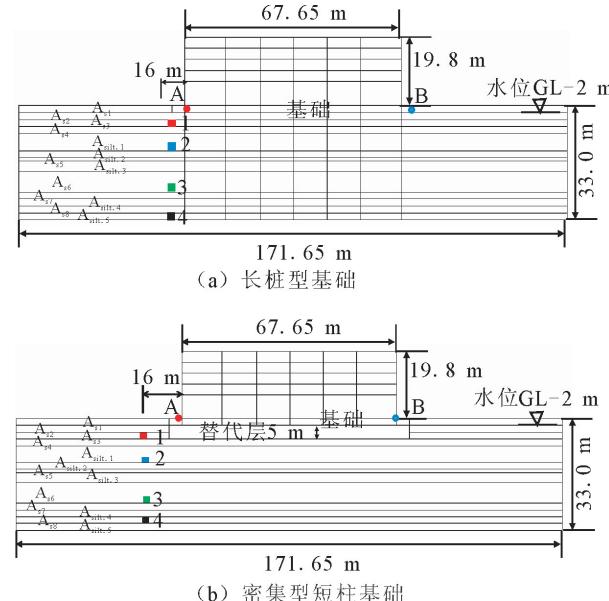


图1 分析领域及地层分布

Fig.1 Analyzed ground and layer distribution

### 1.3 本构模型及计算用各参数

对于地层的有限单元法动力分析,砂土和粉土用CM模型(移动硬化弹塑性本构模型)来描述土体的动态和静态特性,用统一的方法考虑土体的应力诱导各向异性、密度和结构。模型中共有8个参数,其中M、N、λ、κ与ν这5个参数与剑桥模型相同。另外三个参数,即a:结构破坏速度控制参数;m:超固结消失速度控制参数或者土体密度改变参数;b:应力诱导各向异性发展参数,有明确的物理意义,且由不排水三轴交变荷载试验和排水三轴压缩试验得出。关于本模型的详细描述可见文献[17-21]。计算中所用各层土的材料参数列于表1。模型中所用状态变量的初始值列于表2。 $A_{s2}$ 层松砂的液化强度曲线如图2所示( $A_{s2}$ 层为典型的松砂,非常容易液化)。

### 1.4 地震波和有限单元法模拟

计算所用地震波为假设断层位于日本东海、东南海和南海的人造3连动地震波。图3显示了地震波的时间加速度变化规律。整个震动持续200s,主震持续时间为150s,最大加速度为182 gal。根据日本的抗震划分标准,此人造波的地震强度小于5。

表 1 各土层材料参数

Table 1 Material parameters of each layer in test

土层	$\lambda$	$\kappa$	$\nu$	$R_f$	$e_0$	$a$	$b_r$	$m$
A <sub>s1</sub> A <sub>s4</sub>	0.05	0.01	0.30	4.6	0.80	2.2	1.5	0.1
A <sub>s2,3</sub> A <sub>s5,6</sub>	0.03	0.006	0.30	4.6	0.78	2.2	1.5	0.1
A <sub>s7</sub> A <sub>s8</sub>	0.024	0.005	0.30	4.6	0.75	2.2	1.5	0.1
A <sub>silt,1-3</sub>	0.207	0.041	0.35	3.5	1.1	0.1	0.1	3.8
A <sub>silt,4-5</sub>	0.207	0.035	0.35	3.5	1.1	0.1	0.1	3.8
改良材料				$E=105$ kPa;				$\nu=0.25$

表 2 各土层物理状态变量

Table 2 Physical state variables of each layer

土层	OCR	$D_r/\%$	$R_\phi^*$	$\zeta$	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	$k/(m \cdot s^{-1})$
A <sub>s1</sub> A <sub>s4</sub>	4.0	53	0.80	0	1.0E-4	17.6
A <sub>s2,3</sub> A <sub>s5,6</sub>	5.0	58	0.80	0	1.0E-4	17.6
A <sub>s7</sub> A <sub>s8</sub>	6.0	78	0.80	0	1.0E-4	17.6
A <sub>silt,1-3</sub>	2.5	-	0.60	0	1.0E-6	16.7
A <sub>silt,4-5</sub>	2.5	-	0.60	0	1.0E-6	17.6
改良材料				-		

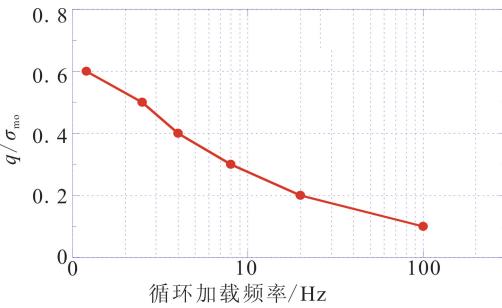
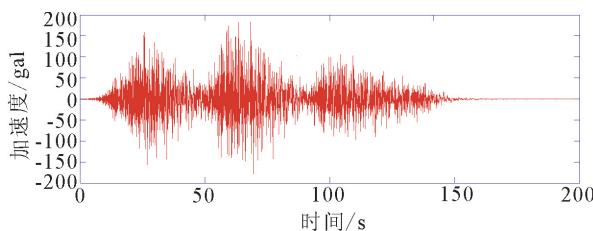
图 2 砂土层 A<sub>s2</sub> 液化强度曲线Fig.2 Liquefaction strength curve of sand layer A<sub>s2</sub>

图 3 三连动地震波加速度时程

Fig.3 Acceleration time-history of the seismic wave

图 4 显示了地基和上部结构的有限单元网格化分情况。动力计算中左右两边的边界使用等位移边界条件来考虑能量逸散问题, 底部边界设为水平方向和竖直方向固定, 排水边界按照实际水位情况设在地下 2 m 深的界面上。积分中用了 Newmark- $\beta$  法, 积分时间间隔为 0.002 s。根据材料初始刚度比的雷氏衰减法, 在整个系统的动力分析中, 土体、基础和上部结构的第一和第二振型衰减率分别为 2% 和 10%。

在动力分析前, 进行地基基础和上部结构在内的静力计算获取地层的初始应力状态。考虑结构自重的地层初始平均有效应力分布见图 4。由于从第二层到第六层停车活荷载的分布不均匀, 所以分析中按照最不利情况即停车满载集中在二层到六层的左半部分来考虑。地震荷载的动力分析后继续了时间为 3.5 年的静力分析来考虑震后随着超孔隙水压的消散地基的固结沉降情况。

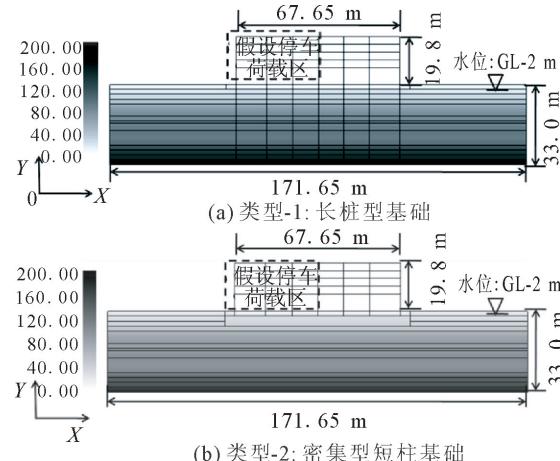


图 4 考虑结构自重的地层初始平均有效应力

Fig.4 Initial average effective stress distribution on the ground considering self-weight

## 2 结果与讨论

### 2.1 超孔隙水压与有效应力

图 5 为地震结束时地层的超孔隙水压比 (EPWPR) 分布。由结果可知, 不管是长桩基础还是短柱基础, 基础范围以外两边的地层, 在地下 4.0~6.0 m 和 19.0~25.0 m 深处发生了液化 ( $EPWPR \approx 1.0$ )。对于基础下面的地层, 在地下 2.0~6.0 m 深处, 长桩基础的地层发生了严重的液化, 而短柱基础的地层没有液化。换而言之, 采用短桩基础的地层可以更好地抵抗液化。图 6 为地震结束时地层的超孔隙水压 (EPWP) 分布情况。图 7 为所选各层土层单元 (离基础 16 m 远处的自由场地) 的超孔隙水压比和平均有效应力在地震中的时间变化规律。由于地层中部 (GL-8.0~-19.0 m) 粉性土的低透水性, 地层底部的砂土层 (GL-19.0~-25.0 m) 超孔隙水压发展非常迅速。地震结束时最大超孔隙水压达到 165 kPa, 对于两种基础类型的地基, 震后超孔隙水压的消散大概都需要 3.5 年的时间。并且两种基础类型的地层除在基础下面的地层外, 都显示出相似的超孔隙水压分布情况。

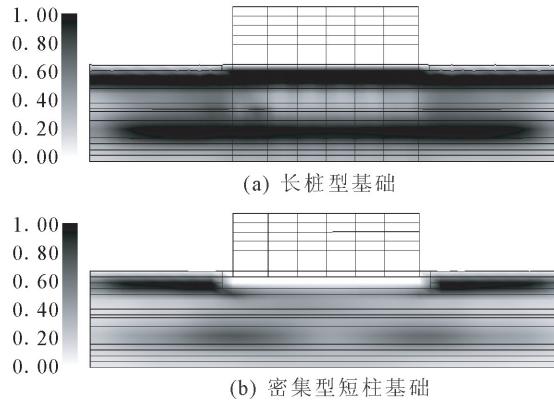


图 5 地震结束时地层超孔隙水压分布

Fig.5 Distribution of EPWPR immediately after earthquake

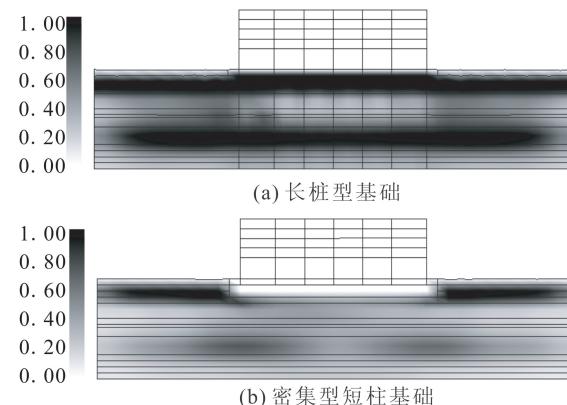


图 6 地震结束时地层超孔隙水压分布

Fig.6 Distribution of EPWP immediately after earthquake

## 2.2 位移

图 8 为地震结束时地基和上部结构的位移矢量分布情况。很明显,对于上部结构和基础,采用短柱型基础比采用长桩基础能产生更大的水平位移。但对于基础两边自由场地基,两种基础形式都产生很大的水平位移,且地震中产生的位移主要为水平方向。图 9 为地震结束后 3.5 年时地基和上部结构的位移矢量分布情况。随着地基固结和强度回复,地震中产生的部分水平位移会减小甚至消失,竖向位移由于地基的固结沉降增加很多。两种基础情况下两边自由场的位移基本相同,但是对于基础下地层和上部结构,采用短柱基础的地基和上部结构的位移明显大于采用长桩基础的情况。

基础地表面两端 A 点和 B 点在地震中的瞬时沉降情况如图 10 所示。很明显,地震中结构物两端基础产生了不均匀沉降,并且采用短柱基础的不均匀沉降量明显大于长桩基础。震后 72 小时内的不均匀沉降时间关系如图 11 所示。很明显,地基基础的总沉降量包括地震中的瞬时沉降和震后的长期固

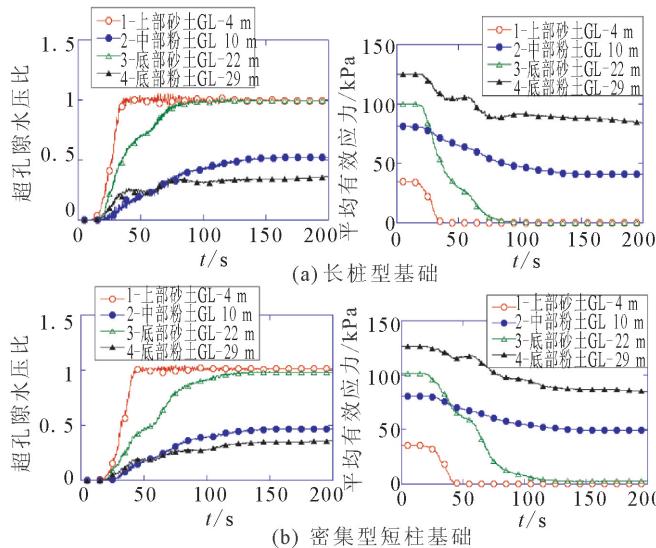


图 7 震中土层单元的超孔隙水压比和平均有效应力变化曲线

Fig.7 Time-history curvers of EPWPR and mean effective stress of the selected soil layers during earthquake

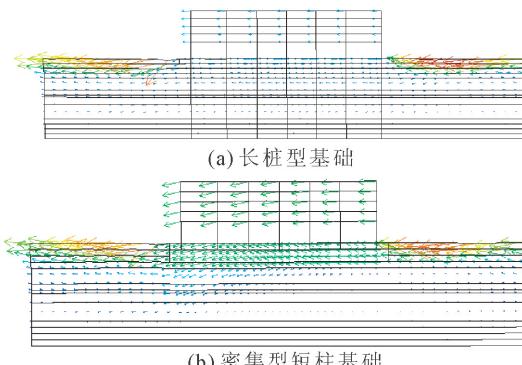


图 8 地震结束时地基基础及结构位移矢量

Fig.8 Displacement vector of the foundation and structure immediately after earthquake

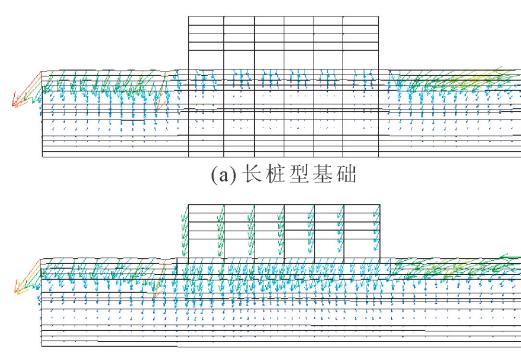


图 9 地震结束后 3.5 年地基基础及结构位移矢量

Fig.9 Displacement vector of the foundation and structure in 3.5 years after earthquake

结沉降。尽管震后长期固结沉降总量相当大,但是大部分的不均匀沉降发生在地震中,即为瞬时沉降。

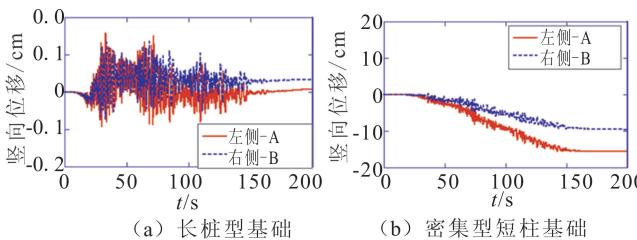


图 10 地震中基础两端地表的沉降变化曲线

Fig.10 Load-displacement curves for static loading tests

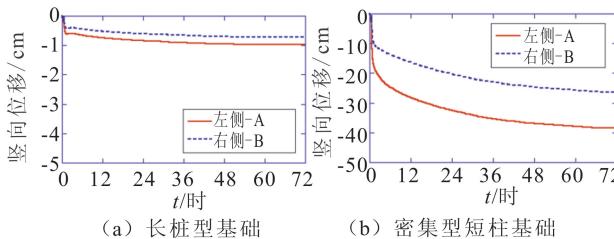


图 11 地震后 72 小时内基础两端地表的沉降变化曲线

Fig.11 Settlement curves of two sides of the surface in 72 hours after earthquake

图 12 为两种基础类型的震后瞬时沉降和长期固结沉降的比较。对于采用长桩基础的地基,结构物基础两端的不均匀沉降量在地震结束时为 0.16 cm,震后 3.5 年为 0.24 cm。对于采用短柱基础的地基,结构物基础两端的不均匀沉降量在地震结束时为 6.70 cm,震后 3.5 年为 12.10 cm。这意味着大概 60% 的不均匀沉降发生在地震中。根据长期不均匀沉降量计算出采用短桩基础的结构物的倾斜度为 1.8‰。显示出现有的设计规范低估了采用短柱型基础结构物在地震作用下产生的不均匀沉降。

### 3 结论

本研究利用水土耦合弹塑性有限单元分析法(DBLEAVES),计算分析复杂砂性和粉性土地层中地基基础及上部结构物在内的地震荷载作用下,地基基础的液化和震后长期固结沉降。分析计算了采用长桩基础和密集型短柱的两种基础形式以便进行对比分析。本研究可得到以下结论:

(1) 液化主要发生在地层中的松砂层和中密度砂土层。对于基础下面地基,采用长桩基础比采用短柱型基础地基液化严重。而对于基础范围以外两边自由场地基,不管采用哪种基础类型,地基液化情况相似。



图 12 地震结束时瞬时沉降与震后长期固结沉降

Fig.12 Instant settlement immediately after earthquake and long-term consolidation settlement after earthquake

(2) 采用短柱型基础时,地震中液化和震后固结沉降造成的基础最大不均匀沉降量为 12.10 cm,而采用长桩基础时不均匀沉降量很小。换而言之,长桩基础比短柱基础具有更强的抵抗地基沉降的能力,短柱型基础则比长桩基础具有更强的抵抗地基液化的能力。不管采用哪种基础类型,虽然震后地基的长期固结总沉降量不容忽视,但不均匀沉降主要发生在地震中。

(3) 本研究所用的有限元法尽管没有评估结构物的破坏,但是可以很好地评估结构物基础的抗震稳定性。地震中除了地基基础的液化,值得注意的是震后地基的长期固结沉降。在某些情况下,根据建筑设计规范结构物的抗震性能符合要求,但是从震中不均匀沉降和长期固结沉降角度来看,结构物仍可能存在很大的风险。

### 参考文献(References)

- [1] Huang Y, Jiang X. Field-observed Phenomena of Seismic Liquefaction and Subsidence During the 2008 Wenchuan Earthquake in China [J]. Nat Hazards, 2010, 54(3): 839-850.
- [2] Boulanger R W. Liquefaction in the 2011 Great East Japan Earthquake: lessons for U S Practice [C]//Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake. Tokyo, Japan: [s. n.], 2012: 655-664.
- [3] Ishihara K. Liquefaction in Tokyo Bay and Kanto Regions in the 2011 Great East Japan Earthquake [C]//Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake. Tokyo, Japan: [s. n.], 2012: 63-81.
- [4] Sekiguchi T, Nakai S. Effects of Local Site Conditions on Lique-

- faction Damage in Mihamra Ward of Chiba City [C]//Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, Tokyo, Japan, 2012; 865-870.
- [5] Yasuda S, Ishikawa K. Several Features of Liquefaction-induced Damage to Houses and Buried Lifelines During the 2011 Great East Japan Earthquake [C]//Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake. Tokyo, Japan: [s.n.], 2012; 825-836.
- [6] 袁晓铭,孙锐,孟上九.软弱地基土上建筑物不均匀震陷机理研究 [J].土木工程学报,2004,37(2):67-72.  
YUAN Xiao-ming, SUN Rui, MENG Shang-jiu. Research on Mechanism for Earthquake-induced Differential Settlement of Buildings on Soft Subsoil [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(2): 67-72. (in Chinese)
- [7] 孟上九.不规则荷载下土的残余变形和建筑物不均匀震陷研究 [D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2002.  
MENG Shang-jiu. Research on Mechanism for Irregular Load-induced Residual Stain of Soil and Differential Settlement of Buildings [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2002. (in Chinese)
- [8] Shideh Dashti, Jonathan D Bray, Juan M Pestana, et al. Mechanisms of Seismically Induced Settlement of Buildings with Shallow Foundations on Liquefiable Soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2010, 136, 151-164.
- [9] Mojtaba Mirjalili, Sayuri Kimoto, Fusun Oka, et al. Long-term Consolidation Analysis of a Large-scale Embankment Construction on Soft Clay Deposits Using an Elasto-viscoplastic Model [J]. Soils and Foundations, 2012, 52 (1): 18-37. (in Chinese)
- [10] Zhou Y G, Chen Y M, Shamoto Y, et al. Centrifuge Model Test on Earthquake-induced Differential Settlement of Foundation on Cohesive Ground [J]. Science in China: Series E, 2009, 52(7): 2138-2146.
- [11] D K Karamitros, G D Bouckovalas, Y K Chaloulos. Insight into the Seismic Liquefaction Performance of Shallow Foundations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2013, 139: 599-607.
- [12] Noda T. Co-seismic and Post-seismic Behavior of an Alternately Layered Sand-clay Ground and Embankment System Accompanied by Soil Disturbance [J]. Soils and Foundations, 2009, 49(5): 739-756.
- [13] Ye G L. Dbleaves; User's Manual [Z]. Version 1.6, Shanghai: Shanghai Jiaotong University, China, 2011. (in Japanese and Chinese).
- [14] Bao X, Ye G L, Ye B. Explanation of Liquefaction in the 2011 Great East Japan Earthquake Using Numerical Analysis [J]. Natural Hazard, 2014. (Accepted)
- [15] Bao X, Ye B, Ye G, et al. Seismic Performance of SSPQ Retaining Wall-centrifuge Model Tests and Numerical Evaluation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 61-62: 63-68.
- [16] Bao X, Morikawa Y, Kondo Y, et al. Shaking Table Test on Reinforcement Effect of Partial Ground Improvement for Group-pile Foundation and Its Numerical Simulation [J]. Soils and Foundations, 2012, 52(6): 1043-1061.
- [17] 张锋,叶冠林.计算土力学 [M].北京:人民交通出版社,2007.  
ZHANG Feng, YE Guan-lin. Computational Soil Mechanics [M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)
- [18] Zhang F, Ye B, Noda T, et al. Explanation of Cyclic Mobility of Soils: Approach by Stress-Induced Anisotropy [J]. Soils and Foundations, 2007, 47(4): 635-648.
- [19] Zhang F, Jin Y, Ye B. A Try to Give a Unified Description of Toyoura Sand [J]. Soils and Foundations, 2010, 50(3): 679-693.
- [20] Zhang F, Ye B, Ye G L. Unified Description of Sand Behavior [J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2011, 5(2): 121-150.
- [21] Ye B, Ye G L, Zhang F. Numerical Modeling of Changes in Anisotropy During Liquefaction Using a Generalized Constitutive Model [J]. Computers and Geotechnics, 2012, 42: 62-72.