文章编号：1000－7598－(2008) 08－2226－05

地震液化条件下地面的大变形三维数值分析

童立元[1]，王 斌[1]，刘义怀[2]，张 波[3]

（1. 东南大学 交通学院，南京 210096；2. 江苏省高速公路建设指挥部，南京 210004；3. 中国科学院武汉岩土力学研究所，武汉 430071）

摘 要：地基液化条件下地面大变形是造成工程结构破坏的主要原因之一。考虑地形、地震、土层、地下水等影响因素，针对典型的岸坡场地 3 层土地基模型，利用有限差分法 FLAC^{3D}，对可液化场地在地震作用下发生地面大变形的过程进行了数值模拟。结果表明，临空面坡比愈大、地表坡度越陡，地基液化地表侧向位移值愈大；变坡度的场地在地震作用下发生的侧移要比单一倾斜率的场地大；地震最大加速度越大、地震持续时间越长，地基液化侧向位移、地表沉陷和隆起现象越严重；液化层的埋深、厚度以及地下水位都对地面大变形的产生有着不同程度的影响，应选择合理的地基处理方案进行处理。

关 键 词：地震液化；地面大变形；数值模拟

中图分类号：TU 435 **文献标识码**：A

3D numerical simulation of large ground displacement caused by seismic liquefaction

TONG Li-yuan[1], WANG Bin[1], LIU Yi-huai[2], ZHANG Bo[3]

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Expressway Construction Headquarters, Nanjing 210004, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The large ground displacement caused by seismic liquefaction is one of the main reasons which induce the failure of engineering structures. According to the typical three-layer foundation at sloping field, the process of the ground displacement due to liquefaction is analyzed by using FLAC 3D. The numerical simulation considers the main effecting factors, including the earthquake, topography, soil and groundwater characteristics. The results indicate that lateral displacements become larger when the gradients of the free face and ground surface increase. The lateral displacement of the site with variational gradients is larger than that of the site with single gradient. The surface lateral displacement, subsidence and upheaval become more serious when the ground maximal acceleration and earthquake time increase. The burying depth, thickness of the liquefaction layer and the ground water level affect the large ground displacement also. So, the reasonable ground improvement scheme should be considered according to the actual conditions.

Key words: seismic liquefaction; large ground displacement; numerical simulation

1 引 言

大量的震害调查结果表明，地震液化引起的地面大变形是造成工程结构破坏的主要原因之一[1, 2]。在过去的几十年中，对地震液化问题的研究主要集中在液化影响因素、产生机理与条件、抗液化强度以及液化势评价方面，而对地基液化大变形方面的研究则相对较少，因此液化大变形规律的研究可以为强震区抗震设计与施工提供科学依据和指导，对于防灾减灾具有重大的现实意义。

液化大变形主要受控于地震、地质地形及土质三方面因素的影响。国外基于震害调查、离心模型与动三轴试验等，提出了一些经验法、简化法来预测大变形，但由于液化大变形为复杂的动力问题，预测结果往往不尽人意[3−5]。而有限差分等数值模拟手段可以准确地模拟材料的屈服、塑性流动、软化直至大变形，尤其在大变形分析和模拟施工过程等领域有其明显的优势。

本文采用 FLAC^{3D} 手段，考虑地形、地震、土质、地下水等因素，设计不同的工况，探讨液化大变形的有关规律，为工程选址、设计提供参考。

2 FLAC^{3D} 基本计算原理[6]

液化大变形的模拟涉及到 FLAC^{3D} 的动力模块。多层土体场地条件下地震波的传播多应用等价线性方法，而 FLAC^{3D} 采用完全非线性分析方法考

收稿日期：2007-03-29

作者简介：童立元，男，1975 年生，博士，副教授，主要从事岩土工程的教学与科研工作。E-mail: atmu@seu.edu.cn

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

虑材料的动力非线性，模型中的每个单元在给定的边界条件下遵循指定的非线性本构关系，可以模拟非线性材料在不同频率振动条件下发生相互干涉和融合的现象。

动力载荷的输入：加速度时程、速度时程和应力（或压力）时程或变力时程。动载既可以加载于模型的边界上（如模拟地震载荷），也可以加载于模型内部的节点上（如模拟地铁振动）。

边界条件：采用“静态”边界条件，将计算区域取得很大，并在模型边界的法向和切向上使用阻尼器来达到耗能目的，使得反射弹性波对计算的影响较小；或采用自由场地边界条件，在边界的法线方向和水平方向上分别设置独立的黏壶，从而达到吸收入射波的效果。

土体的非线性本构模型：采用了弹塑性物理模型和复合的考虑拉应力分离 Mohr-Coulomb 准则。

动力与地下水的耦合计算：采用 Finn 模型来模拟土体在动力作用下的孔隙水压力的产生和变化、砂土发生液化的情况。

3　计算方法有效性的验证

为验证 FLAC^{3D} 计算液化大变形的有效性，选择了 1995 年日本阪神地震中神户港沉箱式码头岸壁地震液化引发地面大变形的案例进行试算。选用 Kobe 地震波，地震持续时间为 24 s，地表最大加速度约为 0.35 g，模型的几何参数和土性参数可参考文献[7]。模拟分成 3 步：（1）静力分析，以重力作为体力加载到该模型上形成初始应力场；（2）指定场地的地下水位，进行模型考虑地下水情况的分析；（3）动力分析，将地震波分别加载于模型的垂直和水平方向，分析结果表明沉箱顶部发生的侧向位移在 4.0～4.5 m 之间。而根据历史地震调查，实际沉箱顶部水平位移为 3.8 m[7]，二者非常吻合，证实了 FLAC^{3D} 计算的合理性。

4　典型岸坡场地地震液化大变形的模拟分析

设计典型的临空面倾斜率为 1:2 的岸坡场地模型，以揭示具有临空面的场地发生地面大变形的过程与基本规律。输入地震波选用美国 El Centro 地震波[7]（图 1）。计算中为了分析不同的地震地表最大加速度对于大变形的影响，将地表加速度峰值调整为 0.2 g 和 0.4 g。

计算模型及尺寸如图 2 所示。模型共包括 3 层土体，中间为可液化土层。各土层的计算参数见表 1。将地表最大加速度为 0.4 g 的 El Centro 地震波施加于模型底部，地震持续为 10 s。

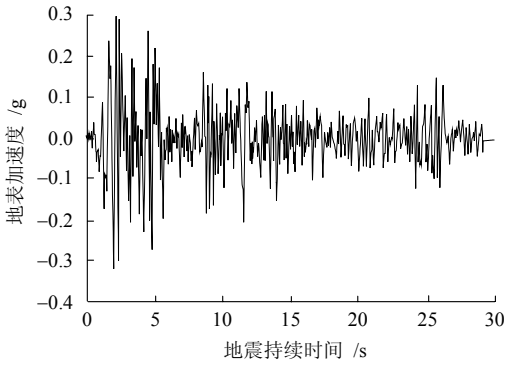


图 1　El Centro 地震波加速度时程曲线（a_{max}=0.3 g）
Fig.1　Ground surface acceleration curve of El Centro seismic wave

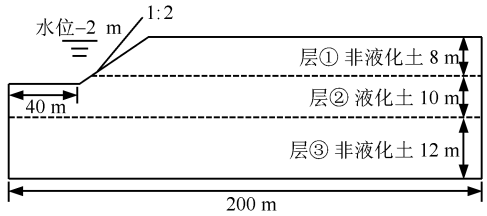


图 2　地质模型剖面图
Fig.2　Section sketch of the simulation model

表 1　计算模型土体物理力学参数
Table 1　Soil parameters of the geological model

土层号	土层种类	体积模量 K /MPa	剪切模量 G /MPa	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /（°）	密度 ρ /g·cm^{-3}	层厚 /m
①	非液化土	26.7	16.0	15	24.0	2.0	8
②	可液化土	16.7	10.0		30.0	1.8	10
③	非液化土	26.7	16.0	15	24.0	2.0	12

（1）位移分析

图 3 为计算侧向位移云及位移矢量图。计算表明，在临空面与地下水位相交的地带范围将会发生最大的侧向位移（约为 3.59 m）；在临空面范围发生类似于边坡失稳的圆弧滑动现象；在临空面顶部附近，地表发生沉陷（最大约 0.93 m），而在临空面底部附近的地表会有隆起（最大约 0.83 m）。

选择临空面底部附近、表面和顶部附近的 3 组节点分析侧向位移随地震加载时间变化的结果。

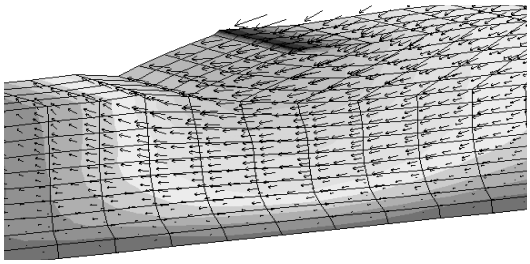


图 3　侧向位移云图及位移矢量图（局部放大）
Fig.3　Lateral displacement results and its vector diagram (locally magnified)

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

计算表明，自临空面与地下水相交的地带，随着距离的增加，侧向位移有减小的趋势；临空面顶部的节点并不是从地震开始震动时就会产生同其他几个节点相比较大的侧向位移，而是在震动约 1 s 后才会产生最大的侧移，且侧移的增幅也是最大的；临空面表面的节点有随着高度增加，而侧向位移增大的趋势和规律。

（2）孔隙水压力

图 4 为不同深度孔隙水压力随地震加载时间的变化曲线。孔压的增长模式相似，但增长曲线的起点不一样；出现最大地表加速度的时刻孔压的增长幅度明显加大；随着地表加速度的降低，孔压增长幅度减小回落，孔压达到稳定水平，初始液化发生（3 s 左右），之后有效应力始终维持在较小水平，强度很低，而孔压变化的趋势呈现振荡型、缓慢微弱增长。

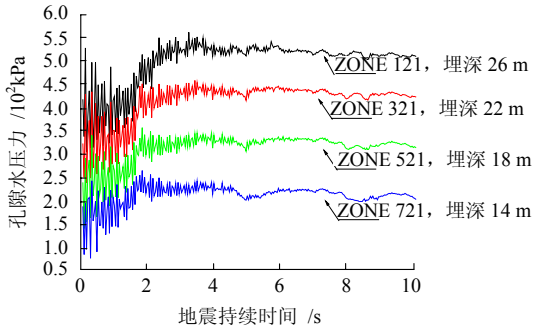


图 4 孔隙水压力随地震加载时间的变化曲线
Fig.4 Curves of pore water pressure vs. earthquake time duration

5 地震液化大变形影响因素模拟分析

5.1 地形条件

在土性参数、地震条件（持续时间 10 s，地表最大加速度 a_{max} = 0.4 g）不变的情况下，设计不同临空面坡角（坡比 1:2，1:5 和 1:8）、变坡模型（同一临空面坡比从坡顶至坡底按 1:2→1:5→1:8 变化）、不同地表坡度（0～2°），以探讨地形条件的影响。

（1）不同临空面坡角

计算表明（图 5），在临空面与地下水位相交的地域范围分别产生了约 2.12 m 和 1.61 m 的侧向位移。随着临空面坡角的降低，最大侧向位移随着临空面倾斜率的降低发生的范围有所扩大，孔隙水压力增长模式与临空面坡比 1:2 的情况相似。震动结束之后，临空面的坡比愈大则产生的地表侧向位移值愈大，增加幅度也愈大，地震将产生更加严重的地表沉陷和隆起。当倾斜率减小时，随着离临空面距离的增加，临空面后的地表侧向位移呈对数衰减的现象愈加明显。

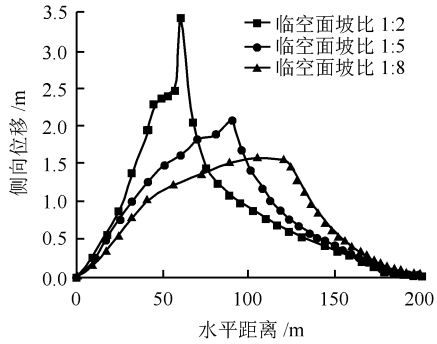


图 5 不同临空面坡角时地表侧向位移变化情况
Fig.5 Surface lateral displacements at different gradients of the free face

（2）变坡情况下的计算

实际工程中，临空面倾斜率多是变化的（图 6）。计算表明（图 7），坡角愈陡的地方位移变化的幅度就愈大，说明了不同的临空面坡角对产生侧向位移的影响，变坡度的场地在地震作用下发生的侧向位移要比单一坡角的场地大，更为危险。

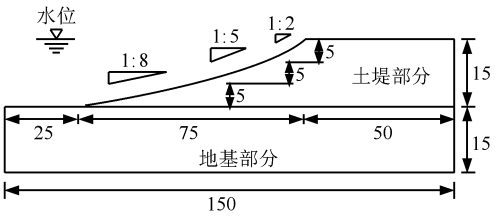


图 6 变坡度模型示意图（单位：m）
Fig.6 A model with variational gradients (unit: m)

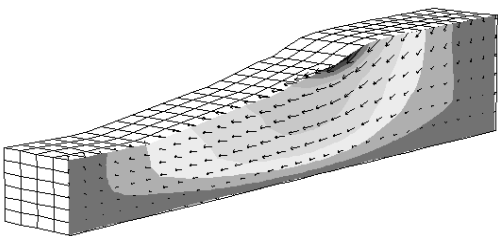


图 7 变坡度模型侧向位移云图及位移矢量图
Fig.7 Lateral displacement and its vector graph of the model with variational gradients

（3）不同地表坡度的影响

计算表明（图 8），随着地表坡度的增加，侧向位移的增长模式发生了明显的变化；当地表坡度为 2°时，在模型的堤岸附近产生了背离临空面的位移，虽然坡度的增加幅度不大，但在地震的作用下所表现出的侧向位移增长幅度很大，说明在地震多发地区，地表坡度较陡的场地极易遭受地震作用而破坏，工程建设应避开此类场地，这是在工程选址工作中必须考虑的重要安全因素之一。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

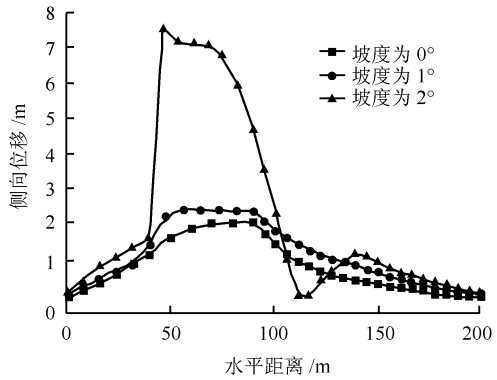


图 8　不同地表坡度时地表侧向位移分布情况
Fig.8　Lateral displacement at different ground surface gradients

5.2　地震条件

在模型参数、网格划分和土性参数不变的前提下，利用临空面坡比为 1:5 的模型，设计不同的地震最大加速度（分别为 0.2，0.3，0.4 g，持续 10 s）、不同的地震持续时间（a_{max} = 0.4 g，持续 10 s 和 30 s）。计算结果表明（图 9 和表 2），在相同的时间内地震时地表最大加速度值愈大，则地震释放的能量愈多，就会产生更大的侧向位移、地表沉陷和隆起现象；地震持续时间的长短对于地表产生侧向位移、地表沉陷及隆起的作用也是明显的，因此震动持续时间长、且释放能量高的地震对场地以及场地中的工程设施的破坏无疑是致命的。

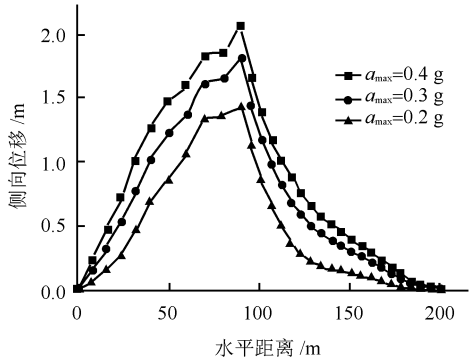


图 9　不同地表加速度条件下侧向位移分布情况
Fig.9　Lateral displacement at different ground accelerations

表 2　不同地震持续时间时地表位移对比表
Table 2　Displacements at different earthquake time durations

位移	不同地震持时（s）位移 /m	
	30	10
最大地表侧向位移	3.24	2.12
最大地表沉陷	1.04	0.63
最大地表隆起	1.17	0.50

5.3　土层条件

在地震条件、土性参数和其他影响因素不变的前提下，利用临空面坡比为 1:5 的模型，地震持续时间为 10 s，地表最大加速度 a_{max} = 0.4 g，设计不同液化层厚度（液化层埋深为 8 m 不变，厚度分别为 6，8，10 m）、不同的液化层埋深（厚度为 10 m 不变，埋深 8，10，12 m）、不同的地下水位（2，4，6 m）。计算结果表明（表 3、图 10 和图 11），液化层的埋深、厚度以及地下水位都对地面大变形的产生有着不同程度的影响，应选择合理的地基处理方案进行处理；随着水位的变化，最大侧向位移发生的位置有了改变，往往发生在水位与临空面的交汇地带。

表 3　不同液化层厚度时地表位移对比表
Table 3　Displacements at different thicknesses of liquefaction layer

侧向位移与竖向位移	不同液化层厚度（m）时位移 /m		
	6	8	10
最大地表侧向位移	1.990	1.998	2.12
最大地表沉陷	0.59	0.62	0.63
最大地表隆起	0.493	0.476	0.50

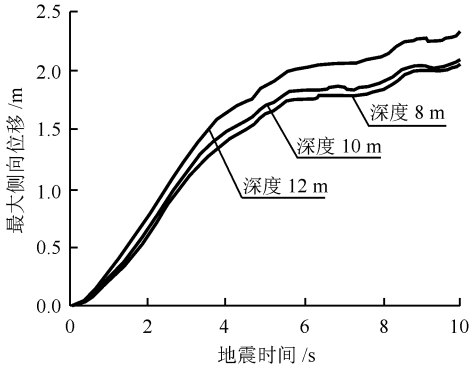


图 10　不同液化层埋深条件下侧向位移随地震时间的变化
Fig.10　Lateral displacements at different depths of liquefaction layer

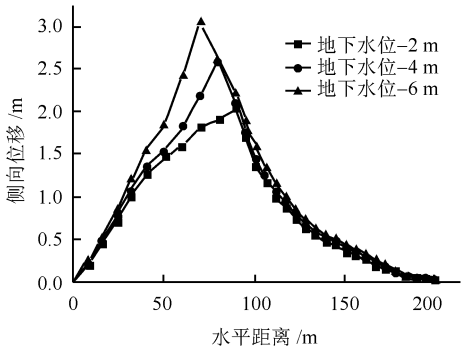


图 11　不同地下水埋深条件下侧向位移变化情况
Fig.11　Lateral displacements at different depths of groundwater

6　结　语

我国滨海、滨河（湖）、古河道、三角洲等区域分布有大面积的可液化土，地震诱发液化大变形对工程结构的危害评价工作有重要实际意义。本文研究表明，地震液化引发的地面大变形主要受控于

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

地震、场地和土质三方面因素的影响，只考虑地震因素或只考虑场地条件的计算预测方法都是不全面的，合理的预测计算模型应综合地反映 3 个因素对地面大变形的影响。

参 考 文 献

[1] 刘惠珊，翁鹿年，王承春. 近年地震中的液化侧向扩展与岸坡滑塌[J]. 工程勘察，1991（3）：16－20.
LIU Hui-shan, WENG Lu-nian, WANG Cheng-chun. Lateral spreading and slope falling caused by seismic liquefaction recently[J]. **Engineering Exploration**, 1991, (3): 16－20.

[2] 高玉峰，刘汉龙，朱伟. 地震液化引起的地面大位移研究进展[J]. 岩土力学，2000，21（3）：294－298.
GAO Yu-feng, LIU Han-long, ZHU Wei. Advances in large ground displacement induced by seismic liquefaction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(3): 294－298.

[3] Guang-wen ZHANG. Estimation of liquefaction induced ground deformations by CPT&SPT-based approaches[D]. Canada: University of Alberta, 2001.

[4] 张建民. 地震液化后地基大变形的实用预测方法[C]// 第八界土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京：万国学术出版社，1999：573－576.
ZHANG Jian-min. Feasible predicting method for large ground deformation caused by seismic liquefaction[C]// The Eighth Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Beijing: Wanguo Science Press, 1999: 573－576.

[5] 周云东，刘汉龙，高玉峰，等. 砂土地震液化后大位移室内试验研究探讨[J]. 地震工程与工程振动，2002，22（1）：152－156.
ZHOU Yun-dong, LIU Han-long, GAO Yu-feng, et al. Study on laboratory of large ground displacement induced by seismic liquefaction[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2002, 22(1): 152－156.

[6] FLAC3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions[M]. USA: ITASCA Consulting Group. 2003.

[7] 王斌. 地震液化大变形预测及其对高速公路工程影响研究[D]. 南京：东南大学交通学院，2005.

上接第 2192 页

[4] LEE K M, MANJUNATH V R. Experimental and numerical studies of geosynthetic-reinforced sand slopes loaded with a footing[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2000, 37(4): 828－842.

[5] JAMES A BLATZ, RICHARD J Bathurst. Limit equilibrium analysis of large-scale reinforced and unreinforced embankments loaded by a strip footing[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2003, 40: 1 084－1 090.

[6] RICHARD J Bathurst，陶连金. 加筋边坡在坡顶荷载作用下的极限承载能力[J]. 岩土工程学报，2004，26（2）：194－197.
RICHARD J Bathurst, TAO Lian-jin. Study on ultimate bearing capacity of reinforced slopes with full-scale model test[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(2): 194－197.

[7] 陶连金，RICHARD J Bathurst. 土工格栅加筋边坡坡顶条基极限荷载的预测[J]. 土木工程学报，2005，28（7）：107－111.
TAO Lian-jin, RICHARD J Bathurst. Footing load prediction of geogrid reinforced slope by numerical method[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2005, 28(7): 107－111.

[8] 杨锡武，易志坚. 基于离心模型试验和断裂理论的加筋边坡合理布筋方式研究[J]. 木工程学报，2002，35（4）：59－64.
YANG Xi-wu, YI Zhi-jian. Study on reasonable distribution of reinforcement for reinforced slope[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2002, 35(4): 59－64.

[9] 万剑平. 土工格室加筋边坡大模型试验研究[J]. 中南公路工程，2004，29（3）：7－10.
WAN Jian-ping. Large model test of geocell reinforced slope[J]. **Central South Highway Engineering**, 2004, 29(3): 7－10.

[10] 朱万红，黄晓明，韩明. 土工格室加筋效果的室内试验[J]. 河南科技大学学报（自然科学版），2005，26（4）：64－67.
ZHU Wan-hong, HUANG Xiao-ming, HAN Ming. In-lab study of reinforcement effect of geocell[J]. **Journal of Henan University of Science Technology** (Natural Science), 2005, 26(4): 64－67.

[11] 苗英豪，胡长顺. 土工格栅加筋陡边坡路堤位移特性的试验研究[J]. 中国公路学报，2006，19（1）：47－52.
MIAO Yin-hao, HU Chang-shun. Research on displacement characteristics of geogrid reinforced embankment with steep slope[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2006, 19(1): 47－52.

[12] 王岚，邢永明，崔亚楠. 粉煤灰加筋土挡墙工作机理的离心模型试验研究[J]. 公路交通科技，2006，26（1）：44－47.
WANG Lan, XIONG Yong-ming, CUI Ya-nan. Research on centrifuge modeling test to the working mechanism of geogrid reinforced flyash retaining wall[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2006, 26(1): 44－47.

[13] KOERNER R M. Designing with Geosynthetics[M]. New-Jersy: Prentice-Hall Inc., 1990.

[14] 魏丽敏，张军乐，何群. 差异沉降下加筋土挡土墙筋带变形特性试验研究[J]. 湖南科技大学学报（自然科学版），2005，20（1）：45－48.
WEI Li-min, ZHANG Jun-le, HE Qun. Test study on deformation behavior of reinforcements induce by differential settlement for reinforced retaining wall[J]. **Journal of Hunan University of Science & Technology** (Natural Science Edition), 2005, 20(1): 45－48.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net