

DOI: 10.11779/CJGE2024S10009

间歇循环荷载和循环围压共同作用下软黏土变形特性 试验研究

黄珏皓^{1,2}, 邱岳峰³, 吴佳明⁴, 李轶楠^{*5}, 陈 健^{1,2}, 付晓东^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014; 4. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 5. 四川大学四川大学学报(工程科学版)

编辑部, 四川 成都 610065)

摘要: 对软黏土开展两类循环三轴试验, 即连续循环加载和间歇循环加载三轴试验, 研究了间歇循环荷载和循环围压共同作用下软黏土变形特性, 分析了循环围压和间歇停振阶段对软黏土累积轴向应变的影响。试验结果表明, 与连续循环加载条件对比, 间歇停振阶段的存在对软黏土变形特性影响显著, 间歇停振阶段因超孔隙水压力的消散而引起的变形不容忽视。另一方面, 随着循环围压的增大, 对应的累积轴向应变增量减小。不同循环围压条件下累积轴向应变增量的差异在第一加载阶段循环荷载作用期间较为显著, 而在随后循环加载阶段中可以忽略不计。基于上述试验结果, 提出了一个间歇循环荷载作用下考虑循环围压影响的软黏土累积轴向应变计算模型, 预测结果与实测数据较为吻合。上述研究成果可加深对间歇性循环荷载作用下软黏土变形规律的认识。

关键词: 间歇循环荷载; 软黏土; 累积轴向应变; 循环围压

中图分类号: TU442 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0048-05

作者简介: 黄珏皓(1991—), 男, 副研究员, 主要从事软土动力特性及本构模型方面的研究。E-mail: jhhuang@whrsm.ac.cn。

Experimental study on coupling effects of cyclic confining pressure and intermittent cyclic loading on deformation behavior of saturated soft clay

HUANG Juehao^{1,2}, QIU Yuefeng³, WU Jiaming⁴, LI Yinan⁵, CHEN Jian^{1,2}, FU Xiaodong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Power China Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China; 4. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China; 5. Editorial Department of Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The deformation characteristics of soft clay under intermittent cyclic loading and cyclic confining pressure are studied by conducting two types of cyclic triaxial tests, i.e., continuous cyclic loading and intermittent cyclic loading triaxial tests, and the influences of cyclic confining pressure and intermittent period on the accumulated axial strain of soft clay are analysed. The test results show that compared with the continuous cyclic loading conditions, the existence of intermittent period has a significant effect on the deformation characteristics of soft clay, and the deformation caused by the dissipation of the excess pore water pressure during the intermittent period cannot be ignored. On the other hand, with the increase of the cyclic confining pressure, the corresponding accumulated axial strain increment is small. The difference of the increment of accumulated axial strain under different cyclic confining pressures is significant during the cyclic loading period at the first loading stage, and can be ignored at the subsequent cyclic loading stage. Based on the above test results, a model for the accumulated axial strain of soft clay under intermittent cyclic loading considering the effects of cyclic confining pressure is proposed, and the predicted results are in good agreement with the measured data. The above research results can deepen the understanding of the deformation behavior of soft clay under intermittent cyclic loading.

Key words: intermittent cyclic loading; soft clay; accumulated

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目(52079135); 中国科学院青年创新促进会资助项目(2021325)

收稿日期: 2024-04-29

*通信作者 (Email: liyinan614@scu.edu.cn)

axial strain; cyclic confining pressure

0 引言

中国东南沿海地区广泛分布着软黏土, 其常受循环荷载作用^[1]。由于缺乏对循环荷载作用下软黏土力学性质的充分认识, 致使工程事故频发。例如, 温州机场跑道在运营 20 年后出现了高达 550 mm 的累积沉降^[2]。因此, 有必要对循环荷载作用下软黏土的力学性质开展研究, 以保障交通结构设施的安全运行。

针对交通荷载作用下软黏土的变形特性, 以往主要是通过室内动三轴试验开展研究^[3-4]。例如, Qian 等^[5]发现累积轴向应变随 OCR 的增加而减少。然而, 作用在土单元上的循环荷载不仅有循环变化的轴向应力, 还有循环变化的水平应力^[6]。因此, 部分学者通过开展变围压循环三轴试验来研究土体动力特性。Huang 等^[7]研究了动阻尼比随循环围压的变化规律, 发现动阻尼比随循环围压增加而降低。

值得注意的是, 以往研究中无论是恒围压, 还是变围压循环三轴试验, 均是采用连续循环加载模式来模拟交通荷载, 这与实际情况并不相符。实际上, 相邻列车运行时存在循环荷载停振期, 意味着软黏土实际上受到间歇循环荷载作用, 此作用过程由循环加载和间歇停振两阶段组成^[8]。当前, 许多学者在动三轴试验中采用间歇循环荷载模式, 模拟相邻列车运行存在的间歇停振期。Yildirim 等^[9]分析了间歇循环荷载作用下每个加载阶段内土体超孔隙水压和累积轴向应变的发展。

从上述研究成果来看, 间歇循环荷载对软黏土变形特性的影响不能忽视。同时, 以往研究中在循环荷载阶段未考虑循环偏应力和循环围压对软黏土变形的耦合作用。因此, 本文通过软黏土两种类型的循环三轴试验, 即连续循环加载和间歇循环加载试验, 分析循环围压和间歇停振阶段对软黏土累积轴向应变的影响, 并在此基础上建立间歇循环荷载作用下考虑循环围压影响的软黏土累积轴向应变计算模型。该研究有助于加深对间歇循环荷载作用下软黏土变形特性的认识。

1 试验土样及方案

1.1 试验土样

试验土样取自珠海地区, 埋深约为 12.0~14.0 m,

表 1 试验软黏土基本物理力学性质

Table 1 Physico-mechanical indexes of test clay

重度 $\gamma/(kN\cdot m^3)$	含水率 $w/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性 指数 I_P	渗透系数 $K/(10^7 cm\cdot s^{-1})$	孔隙比 e	压缩系数 a/MPa^{-1}	颗粒组成/%	
								0.075~0.005 mm	<0.005 mm
17.6	48.6	51.9	19.8	32.1	2.26	1.30	1.18	64.9	35.1

土样呈深灰色。其基本物理力学性质见表 1 所示。

1.2 试验方案

按照《土工试验规程》(GB/T 50123—2019) 制备直径 38 mm, 高 76 mm 的圆柱原状试样, 并对所有试样进行反压饱和。当试样 B 值达到 0.95 时, 认为试样饱和完成, 此时施加在试样上的有效围压为 20 kPa。然后, 对所有试样进行等向固结, 当试样排水量小于 100 mm^3/h 时, 固结过程完成, 此时作用在试样上的有效固结围压为 100 kPa。随后, 采用 GDS 变围压动三轴试验系统开展应力控制的循环三轴试验, 为了研究间歇停振阶段对循环荷载下软黏土力学性质的影响, 开展两类试验: ①间歇加载循环三轴试验; ②连续加载循环三轴试验。图 1 为两类试验的示意图。对于第一类试验而言(图 1 (a)), 整个多阶段间歇循环加载过程包含了四个阶段, 每个加载阶段由循环加载阶段和间歇停振阶段组成。在循环加载阶段, 通过对固结完成后的试样同时施加加载波形为半正弦波且相位差为 0 的循环偏应力和循环围压, 以模拟交通荷载。结合已有研究成果, 采用应力路径斜率 η 和循环应力比 CSR^[7] 分别表征循环围压幅值和循环偏应力幅值, 其表达式分别如下:

$$\text{CSR} = q^{\text{ampl}} / 2p'_o = q^{\text{ampl}} / 2\sigma'_3, \quad (1)$$

$$\eta = p^{\text{ampl}} / q^{\text{ampl}} = 1/3 + \sigma'_3 / q^{\text{ampl}}. \quad (2)$$

式中: p^{ampl} 、 q^{ampl} 、 σ'_3 分别表征循环平均主应力幅值、循环偏应力幅值及侧向应力幅值; σ'_3 、 p'_o 分别表示固结完成之后的有效固结围压、平均有效正应力。

结合已有研究成果, 拟定循环应力比 CSR 为 0.20, 应力路径斜率 η 分别为 0.33, 1.00, 2.00。其中 $\eta=0.33$ 代表恒定围压试验条件, 其余 η 取值则表示变围压试验条件。

另一方面, 受限于试验设备性能, 施加在试样上的荷载加载频率最大为 5 Hz。对于低渗透性土体而言, 较大的加载频率导致试样内孔隙水压分布不均匀且测试不够准确。因此, 本试验中采用的加载频率为 0.1 Hz。本试验中每个循环加载阶段设定的振动次数为 1000 次。列车运行时, 由于软黏土渗透系数较低, 循环荷载作用下产生的超孔隙水压力在加载阶段无法完全消散, 因此在循环加载阶段关闭排水阀门, 此时

试样处于不排水状态；列车通过后，循环荷载产生的超孔隙水压力会随着部分孔隙水的排出逐渐减小，因此在间歇停振阶段打开排水阀门，试样处于部分排水条件，间歇停振阶段停振时长为 3600 s。

对于第二类试验而言（图 1 (b)），循环围压和循环偏应力同时施加在固结完成后的试样上，整个试验过程试样分别处于不排水和部分排水状态。循环加载次数为 4000 次。表 2 为每个试样的加载条件。

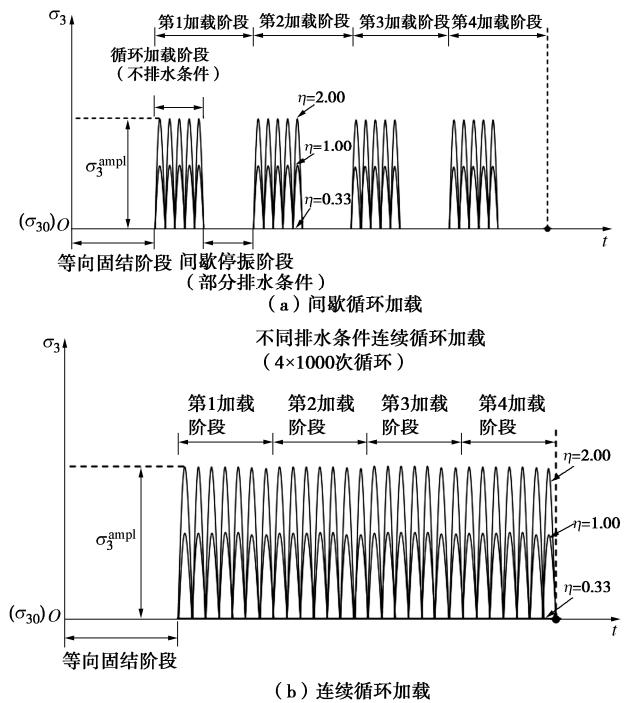


图 1 两种循环三轴试验示意图

Fig. 1 Schematic illustration of two types of cyclic triaxial tests

表 2 循环三轴试验方案

Table 2 Cyclic triaxial test programs

试验类型	编号	η	加载次数	停振时长/ s	排水条件
间歇加载					循环加载阶段: 不排水;
循环三轴试验	I1~I3	0.33, 1.0, 2.0	1000×4	3600	间歇停振阶段: 部分排水
连续加载	C1~C3				不排水
循环三轴试验	C4~C6		4000	—	部分排水

2 试验结果与分析

2.1 连续循环荷载软黏土累积轴向应变

不同试验条件下试样的累积轴向应变发展曲线形态类似。在部分排水条件下，累积轴向应变随循环围压的增加而增加，而在不排水条件下则减小。例如，在部分排水条件下， $\eta=0.33, 1.00, 2.00$ 的试样的累

积轴向应变分别为 1.80%，2.20%，3.19%，而在不排水条件下相应的累积轴向应变分别为 1.46%，1.29%，1.20%。上述试验结果表明，部分排水条件下，变围压试验条件下产生的累积轴向应变显著大于常围压试验条件，而在不排水条件下，循环围压的存在则限制了试样累积轴向应变的发展。因此，循环围压对软黏土变形特性的影响与排水条件有关。

2.2 间歇循环荷载软黏土累积轴向应变

间歇循环荷载作用下每个加载阶段产生的累积轴向应变 ($\Delta\epsilon_{pi, \eta}$) 由两部分组成，分别为循环加载期间产生的应变 ($\Delta\epsilon_{pi, \eta(\text{循环加载})}$) 和间歇停振期间因超孔隙水压消散产生的变形 ($\Delta\epsilon_{pi, \eta(\text{间歇停振})}$)。因此，每个加载阶段产生的累积轴向应变和一定数量加载阶段所产生的总累积轴向应变可分别表达如下：

$$\Delta\epsilon_{pi, \eta} = \Delta\epsilon_{pi, \eta(\text{循环加载})} + \Delta\epsilon_{pi, \eta(\text{间歇停振})} , \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{pn, \eta} &= \sum_{i=1}^n \Delta\epsilon_{pi, \eta} \\ &= \sum_{i=1}^n (\Delta\epsilon_{pi, \eta(\text{循环加载})} + \Delta\epsilon_{pi, \eta(\text{间歇停振})}) \end{aligned} \quad (4)$$

考虑到在连续循环加载模式下没有间歇停振阶段，故将该模式下的每 1000 次循环列作为一个加载阶段。图 2 为连续循环加载和间歇循环加载模式下不同加载阶段产生的累积轴向应变增量。如图 2 所示，对于连续循环加载和间歇循环加载模式，累积轴向应变增量在第一加载阶段较大，随后逐渐减小。同时，间歇循环荷载作用下产生的累积轴向应变增量大于不排水条件连续循环荷载作用下产生的应变增量，表明间歇停振阶段因超孔隙水压消散产生的应变累积不应忽视；而间歇循环荷载作用下产生的累积轴向应变增量在第一加载阶段小于部分排水条件连续循环荷载作用下产生的应变增量，而在其他加载阶段则较大。这是因为对于部分排水条件连续循环荷载作用下的试样而言，其应变主要由孔隙水的排出和循环荷载作用产生的变形组成。在第一个加载阶段中，随着孔隙水的排出，发生了较大的累积轴向应变增量，而在后续加载阶段中，由于试样的低渗透性，只有少量孔隙水被排出，导致因孔隙水排出产生的累积轴向应变增量减少。对于间歇停振循环荷载作用下的试样而言，试样的变形在循环加载期间由土壤颗粒之间的位移引起，而在停振期间则源于孔隙水的排出。循环加载期间产生的超孔隙水压力在间歇停振期间逐渐消散，导致除第一加载阶段外的其他加载阶段的累积轴向应变增量大于部分排水条件下连续循环加载产生的累积轴向应变增量。

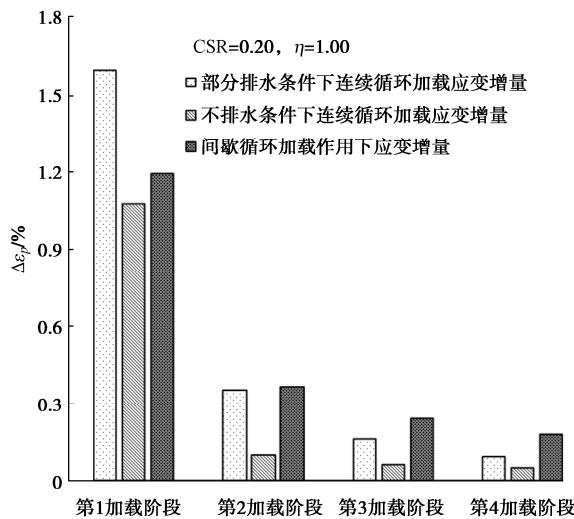


图 2 不同加载模式下各阶段累积轴向应变增量

Fig. 2 Strain increments of each loading stage under different loading modes

2.3 循环围压对累积轴向应变的影响

图 3 为各加载阶段累积轴向应变增量随应力路径斜率 η 值的变化曲线。从图 3 可以看出, 有、无循环围压试验条件下 (即 $\eta=0.33, 1.00$ 和 2.00), 累积轴向应变增量随加载阶段的增加逐渐减小, 但不同循环围压条件下对应累积轴向应变增量随加载阶段的衰减程度不同。例如, 当试验结束时 (即从第 1 加载阶段至第 4 加载阶段), $\eta=0.33$ 试验条件对应的累积轴向应变增量从 1.573% 下降到 0.150% , 衰减幅度为 90.46% , 而 $\eta=2.00$ 试验条件下相应的累积轴向应变增量从 0.789% 降至 0.126% , 衰减幅度则为 84.03% 。上述试验现象表明, 循环围压对累积轴向应变增量的影响主要体现在第 1 加载阶段, 而在后续加载阶段中, 有、无循环围压试验条件下对应累积轴向应变增量的差异较小。

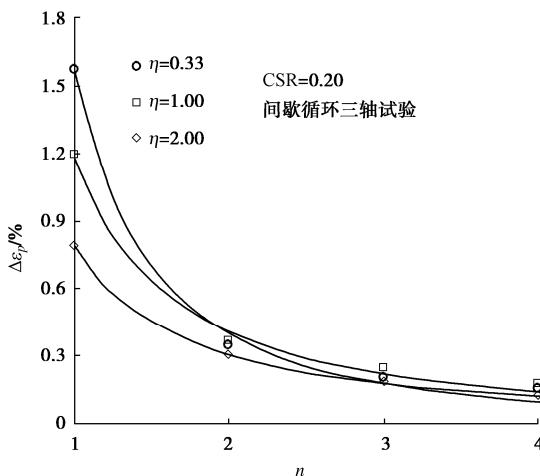


图 3 累积轴向应变增量随加载阶段的变化曲线

Fig. 3 Variation of strain increment versus loading stage

2.4 间歇循环加载累积轴向应变计算模型

基于上述试验结果, 间歇循环荷载作用下软黏土变形特性受间歇停振阶段和循环围压影响显著。结合图 3, 累积轴向应变增量随加载阶段数的关系曲线可用幂函数描述, 如下所示:

$$\Delta\epsilon_{pi, \eta} = \Delta\epsilon_{p1, \eta} \cdot n^a \quad . \quad (5)$$

式中, a 为拟合参数, $\Delta\epsilon_{pi, \eta}$, $\Delta\epsilon_{p1, \eta}$ 分别为第 i 阶段和第 1 加载阶段对应的累积轴向应变增量。采用回归分析, 当应力路径斜率 $\eta=0.33, 1.00$ 和 2.00 时, 对应拟合参数 a 分别为 $-1.987, -1.539$ 和 -1.346 。在此基础上可以得到参数 a 随应力路径斜率 η 的关系曲线, 参数 a 随 η 的增大呈线性增长趋势, 可由下式描述:

$$a = \alpha\eta + \beta \quad , \quad (6)$$

式中, α , β 为两个拟合参数, 其取值分别为 0.369 和 -2.034 。

另一方面, 第 1 加载阶段有、无循环围压条件下累积轴向应变增量比 $\Delta\epsilon_{p1, \eta} / \Delta\epsilon_{p1, \eta=1/3}$ 随应力路径斜率 η 的增大呈线性减小趋势。其中 $\Delta\epsilon_{p1, \eta}$ 、 $\Delta\epsilon_{p1, \eta=1/3}$ 分别代表变围压和恒围压条件下对应的累积轴向应变增量。累积轴向应变增量比可表达为:

$$\Delta\epsilon_{p1, \eta} / \Delta\epsilon_{p1, \eta=1/3} = b(\eta - 1/3) + 1 \quad . \quad (7)$$

式中, b 为拟合参数, 表示应变增量比随应力路径斜率的变化梯度。通过回归分析, 参数 $b=-0.307$ 。

随后, 将式 (6), (7) 代入式 (5) 中, 即可得到每个加载阶段对应的软黏土累积轴向应变增量计算表达式, 即:

$$\Delta\epsilon_{pi, \eta} = [b(\eta - 1/3) + 1] \cdot n^{\alpha\eta + \beta} \cdot \Delta\epsilon_{p1, \eta=1/3} \quad . \quad (8)$$

最后, 将式 (8) 代入式 (4) 中即可得到间歇循环荷载作用下软黏土累积轴向应变, 即:

$$\begin{aligned} \epsilon_{pn, \eta} &= \sum_{i=1}^n \Delta\epsilon_{pi, \eta} \\ &= \sum_{i=1}^n [b(\eta - 1/3) + 1] \cdot n^{\alpha\eta + \beta} \cdot \Delta\epsilon_{p1, \eta=1/3} \quad . \quad (9) \end{aligned}$$

为进一步验证式 (9) 的合理性, 表 3 为不同试验条件下总累积轴向应变计算值和试验值对比结果。从表 3 中可以看出, 计算值与试验值较为接近, 表明式 (9) 可以较好地预测间歇循环荷载作用下软黏土累积轴向应变。

表 3 间歇循环荷载作用下不同试样累积轴向应变

Table 3 Accumulated axial strains of each specimen under intermittent cyclic loading

编号	η	试验值/%	计算值/%
I1	0.33	2.281	2.295
I2	1.00	1.980	1.968
I3	2.00	1.403	1.391

3 结 论

(1) 循环荷载作用下软黏土变形特性受间歇停振影响显著。相较于不排水状态连续循环加载试验条件而言, 间歇停振循环加载条件下因停振阶段超孔隙水压消散所产生的总累积轴向应变较大; 而相较于部分排水状态连续循环加载而言, 间歇停振阶段的存在增强了试样刚度, 减少了下一加载阶段产生的累积轴向应变。

(2) 循环围压对累积轴向应变的发展影响显著。循环围压对第一个加载阶段累积轴向应变增量的影响较大, 但在后续加载阶段中的影响可以忽略。随着循环围压的增大, 第一个加载阶段循环荷载作用产生的累积轴向应变增量减小, 而在后续循环加载阶段中不同循环围压条件对应累积轴向应变增量差异性不甚明显。

(3) 提出了一个间歇停振循环荷载作用下考虑循环围压影响的软黏土累积轴向应变计算模型, 计算结果与实测数据较为符合。

参考文献:

- [1] GUO L, JIN H X, WANG J, et al. Undrained monotonic shear behavior of marine soft clay after long-term cyclic loading[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2019, **38**(7): 854-866.
- [2] FENG D, ZHU X X, WANG J, et al. The effects of cyclic loading on the reconsolidation behaviours of marine sedimentary clays under intermittent drainage conditions[J]. *Soil Dynam Earthq Eng*, 2019, **141**: 106510.
- [3] TSAI C. Generalized simple model for predicting the modulus degradation and strain accumulation of clay subject to long-term undrained cyclic loading[J]. *Ocean Eng*, 2022, **254**: 111412.
- [4] QIAN J G, DU Z B, YIN Z Y. Cyclic degradation and non-coaxiality of soft clay subjected to pure rotation of principal stress directions[J]. *Acta Geotechnica*, 2018, **13**(4): 943-59.
- [5] QIAN J G, LI S Y, ZHANG J L, et al. Effects of OCR on monotonic and cyclic behavior of reconstituted Shanghai silty clay[J]. *Soil Dynam Earthq Eng*, 2019, **118**: 111-119.
- [6] WICHTMANN T, NIEMUNIS A, TRIANTAFYLLOIDIS T H. On the influence of the polarization and the shape of the strain loop on strain accumulation in sand under high-cyclic loading[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2007, **27**(1):14-28.
- [7] HUANG J H, CHEN J, KE W H, et al. Damping ratio evolution of saturated Ningbo clays under cyclic confining pressure[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2021, **143**: 106581.
- [8] NIE R S, MEI H H, LENG W M, et al. Characterization of permanent deformation of fine-grained subgrade soil under intermittent loading[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2020, **139**: 106395.
- [9] YILDIRIM H, ERSAN H. Settlements under consecutive series of cyclic loading. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2007, **27**(6): 577-585.

(编校: 明经平)