

# 循环荷载下饱和南京细砂的孔压增量模型

王炳辉, 陈国兴\*

(南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

**摘要:** 等幅循环荷载的不排水三轴试验的结果表明, 饱和南京细砂孔压比曲线的形状随循环周数比增大而发生规律性的变化。引入孔压增量比的概念, 并定义有效动剪应力比和有效应力对数衰减率, 发现孔压增量比的发展过程可分为下降段、平稳段和上升段; 在平稳段和上升段, 孔压增量比的累积量与有效动剪应力比的自然对数具有很好的线性关系, 并推导出第  $N$  周的孔压增量比与第  $N-1$  周的有效应力比的对数衰减率成正比, 而与动应力幅值无关。据此建立的饱和南京细砂孔压增量模型, 能够较好地描述等幅循环荷载作用引起的孔压比随循环周数的增大而增长的发展趋势。

**关键词:** 循环荷载; 南京细砂; 孔压增量模型; 孔压增量比; 有效动剪应力比; 有效应力对数衰减率

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)02-0188-07

**作者简介:** 王炳辉(1980-), 男, 浙江新昌人, 博士研究生, 从事土动力学研究。E-mail: [wbhchina@126.com](mailto:wbhchina@126.com)。

## Pore water pressure increment model for saturated Nanjing fine sand subjected to cyclic loading

WANG Bing-hui, CHEN Guo-xing

(Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** Undrained triaxial tests are carried out for saturated Nanjing fine sand subjected to uniform cyclic loading. The curve shapes of the excess pore water pressure (EPWP) ratio regularly change with the increase of the ratio of number of cycles. The concept of EPWP increment ratio is introduced. Two new concepts of the effective dynamic shear stress ratio and the log decrement of effective stress are defined. It is found that the development of the EPWP increment ratio can be divided into three stages: descending stage, stable stage and ascending stage. At the stable and ascending stages, a satisfactory linear relationship is obtained between the accumulative EPWP increment ratio and the natural logarithm of the effective dynamic shear stress ratio. Accordingly it is deduced that the EPWP increment ratio at the number of cycle  $N$  is in direct proportion to the log decrement of the effective stress at the number of cycle  $N-1$ , but is independent of the cyclic stress amplitude. Based on the above analysis, a new EPWP increment model is developed, and it fits the test results for better prediction of the curves of EPWP generation.

**Key words:** cyclic loading; Nanjing fine sand; pore water pressure model; pore water pressure increment ratio; effective dynamic shear stress ratio; log decrement of effective stress

## 0 引言

饱和砂土中振动孔隙水压力(以下简称孔压)的增长规律是研究砂土液化的核心内容之一, 是采用有效应力法分析结构物与饱和砂土场地动力相互作用的关键问题, 在土动力学研究中备受关注。自 Seed 等<sup>[1]</sup>在 20 世纪 70 年代提出反正弦函数孔压模型以来, 许多学者对孔压的增长模式作过深入的探讨, 提出了许多孔压模型。从孔压模型的形式而言, 可分成孔压全量模型和孔压增量模型两大类。孔压全量模型直接给出孔压与循环周数比、动剪应力比等参数之间的关系, 如运用较多的 Seed 孔压模型和张建民等<sup>[2]</sup>总结的孔压

经验模型等, 其中张建民基于试验得出的孔压模型可分成 A、B、C 3 类, 并随着动应力幅值的增大, 孔压比随循环周数比的增大而增长的模式从 C 型向 B 型再到 A 型过渡, 但未明确给出这 3 者之间的过渡条件。孔压全量模型的缺陷是需要根据设定地震震级大小预先给定液化循环周数, 因此无法给出动剪应力作用下饱和砂土的孔压增长过程, 无法采用有效应力法进行

**基金项目:** 国家自然科学基金重大项目(90715018); 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB714200); 国家公益性行业(地震)科研专项(200808022)

**收稿日期:** 2009-08-24

\*通讯作者

动力时程分析<sup>[3]</sup>。孔压增量模型是建立某一时段内孔压增量与动剪应力（或动剪应变）、土性参数等因素之间的关系，累加各个时段的孔压增量得到孔压。Finn 等<sup>[4]</sup>、郑颖人等<sup>[5]</sup>、Ivšić 等<sup>[6]</sup>等基于内时理论提出或改进的有效应变路径模型；Towhata 等<sup>[7]</sup>、Polito 等<sup>[8]</sup>基于剪切能提出的孔压增量模型；丰万玲等<sup>[9]</sup>、孙锐等<sup>[10-11]</sup>、Ishibashi 等<sup>[12-13]</sup>、Sherif 等<sup>[14]</sup>提出或改进的经验孔压增量模型。孔压增量模型不需要预先确定液化循环周数，至于何时达到初始液化由各个时段的孔压增量决定。因此，孔压增量模型在采用有效应力法进行动力时程分析中具有一定优势。

基于饱和南京细砂的动三轴试验结果，本文采用孔压增量比  $b_{\Delta m, N}$ 、有效动剪应力比  $a_{dE, N}$  和有效应力比  $x_{m, N-1}$  这 3 个参量，分析了 3 者之间的关系，建立了一个孔压增量模型。

### 1 饱和南京细砂的动三轴试验

动三轴试验在南京工业大学岩土工程研究所自行研制的 DSZ-1 型应力控制动三轴仪上完成，该仪器的性能见文献<sup>[15]</sup>。南京细砂的土粒密度为  $2.70 \text{ kg/m}^3$ ，最大孔隙比为 1.17，最小孔隙比为 0.62，其颗粒分试验结果如图 1 所示。重塑南京细砂试样采用饱和砂水沉法直接在动三轴仪的压力室内制备而成，每个试样的干砂重量为  $136.5 \text{ g}$ ，相对密度  $D_r=0.49$ 。测得反映饱和度的 Skempton 孔压  $B$  值均在 0.97 以上。试样在均幅值为  $s_d$  的等围压条件下完成固结后，关闭排水阀，然后施加正弦轴向应力，当试样达到初始液化时试验停止。表 1 给出了试验时的有效围压、施加的动应力幅值以及测得的初始液化循环周数  $N_c$ 。图 2 给出了饱和南京细砂的抗液化强度曲线。可以看出：有效围压对饱和南京细砂抗液化强度的影响，可以通过动剪应力比进行归一化；随着动剪应力比的减小，初始液化循环周数  $N_c$  逐渐增大。

表 1 动三轴试验方案及结果

Table 1 Test schemes and results of cyclic triaxial tests					
组号	试样编号	有效围压 $s'_c/\text{kPa}$	轴向动力幅值/kPa	动剪应力比 $t_d/s'_c$	初始液化循环周数 $N_c$
WA 组	WA1	40	13.2	0.165	84.2
	WA2	40	15.1	0.189	36.1
	WA3	40	18.1	0.223	13.1
WB 组	WB1	70	18.8	0.135	312.3
	WB2	70	23.1	0.165	49.1
	WB3	70	25.8	0.185	40.1
	WB4	70	32.2	0.230	7.0
WC 组	WC1	100	25.5	0.128	552.1
	WC2	100	31.9	0.155	109.1
	WC3	100	36.4	0.182	27.1
	WC4	100	40.7	0.204	16.2

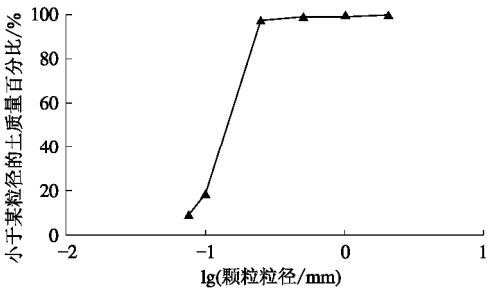


图 1 南京细砂颗粒分试验结果

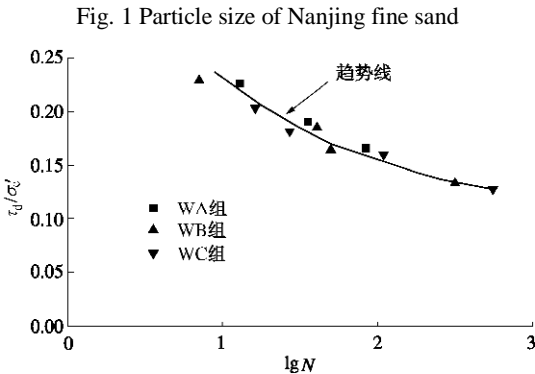


图 2 抗液化强度试验结果

Fig. 2 Test results of liquefaction resistance

将第  $N$  周循环荷载末（即  $t_d=0$ ，均等固结条件下的动三轴试验中  $t_d = s_d/2$ ）时刻对应的孔压记为  $m_N$ 。图 3 给出了 WC 组孔压比（孔压  $m_N$  与初始有效围压  $s'_c$  的比值）与循环周数比（循环周数  $N$  与初始液化循环周数  $N_c$  的比值）的关系，从曲线的总体形状看，随着动剪应力比  $t_d/s'_c$  的增大，孔压比曲线的形状从 S 型曲线向抛物线形发展，与张建民等<sup>[2]</sup>总结的孔压比曲线形状从 B 型向 A 型过渡的结论基本一致。其他两组试验结果也呈现类似规律。

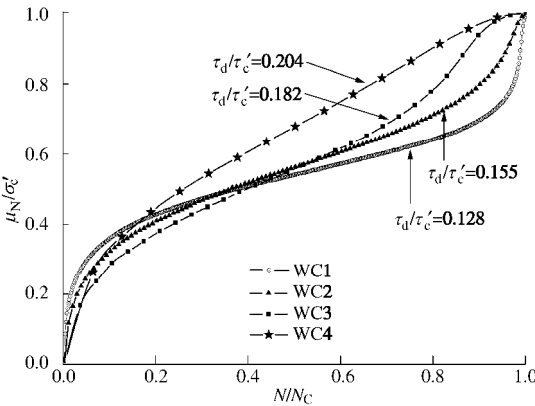


图 3 WC 组试验得到的孔压比增长曲线

Fig. 3 Curves of PWP ratio from test group WC

### 2 孔压增量比 $b_{\Delta m, N}$ 和有效动剪应力比 $a_{dE, N}$ 及其关系

为分析等幅循环荷载下孔压的增长规律，引入孔压增量比  $b_{\Delta m, N}$  的概念：第  $N$  周内的孔压增量  $\Delta m_N$  与

第  $N-1$  周末时刻饱和砂土有效应力  $s'_c - m_{N-1}$  的比值:

$$b_{\Delta m, N} = \frac{\Delta m_N}{s'_c - m_{N-1}} \quad (m_{N-1} < s'_c, 1 \leq N \leq N_c) \quad (1)$$

Ishibashi 等<sup>[12]</sup>称其为“修正孔压参量”(modified pore-pressure parameter), 张克绪等<sup>[16]</sup>将其定义为“孔压增量比”。 $b_{\Delta m, N}$  与惯用的孔压比的含义有明显差别: 孔压比是孔压  $m_N$  与初始有效围压  $s'_c$  的比值。

根据物理意义, 当  $N=1$  时, 由于施加循环荷载之前的孔压为  $m_0 = 0$ , 因此

$$b_{\Delta m, 1} = \frac{\Delta m_1}{s'_c} \quad (2)$$

即第 1 周的孔压增量比与孔压比相等。当  $N=N_c$  时,  $\Delta m_{N_c} = s'_c - m_{N_c}$ , 得到  $b_{\Delta m, N_c} = 1$ , 此时饱和砂土达到初始液化, 因此可以将  $b_{\Delta m, N} = 1$  作为等幅循环荷载下饱和砂土是否达到初始液化的依据; 当  $1 < N < N_c$  时,  $0 \leq b_{\Delta m, N} < 1$ 。因此, 孔压增量比的取值范围为  $0 \leq b_{\Delta m, N} \leq 1$ 。

$b_{\Delta m, N}$  具有可累加性, 从第 1 周循环到第  $N$  周循环的累积量为

$$\sum_{i=1}^N b_{\Delta m, i} = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta m_i}{s'_c - m_{i-1}} \quad (3)$$

孔压增量比  $b_{\Delta m, N}$  反映了饱和砂土受到动荷载时的孔压反应特性。

定义有效动剪应力比  $a_{dE, N}$ : 第  $N$  周动剪应力幅值  $t_d$  与第  $N-1$  周末时刻饱和砂土的有效应力  $s'_c - m_{N-1}$  的比值:

$$a_{dE, N} = \frac{t_d}{s'_c - m_{N-1}} \quad (m_{N-1} < s'_c, 1 \leq N \leq N_c) \quad (4)$$

Ishibashi 等<sup>[12]</sup>称其为“应力强度函数”(stress intensity function)。张克绪等<sup>[16]</sup>称其为“往返剪应力比”, 但它无法区分与惯用的动剪应力比的差异: 惯用的动剪应力比是动剪应力幅值  $t_d$  与初始有效围压  $s'_c$  的比值。

由于  $m_0 = 0$ , 则第 1 周有效动剪应力比为

$$a_{dE, 1} = \frac{t_d}{s'_c} \quad (5)$$

即第 1 周有效动剪应力比等于惯用的动剪应力比, 可理解为惯用的动剪应力比是有效动剪应力比的初值。

## 2.1 孔压增量比 $b_{\Delta m, N}$ 与循环周数 $N$ 的关系

采用  $b_{\Delta m, N}$  重新整理试验结果, 可得到  $b_{\Delta m, N}$  与  $N$  的关系, 图 4 给出了所有试验的整理结果。可以看出,  $b_{\Delta m, N}$  随  $N$  的增长可划分成下降段、平稳段和上升段 3 个阶段: 在下降段, 随着循环荷载作用周数的增加,  $b_{\Delta m, N}$  从某初始值开始明显减小, 该初始值的大小随动应力幅值的增大而增大。在平稳段,  $b_{\Delta m, N}$  几乎保持常

数, 该常数的大小也随动应力幅值的增大而增大。对循环荷载作用周数较多的情况, 平稳段这一特性显现的更加清晰。从局部放大图中可以看出: 平稳段和下降段之间的拐点约出现在  $N=3 \sim 5$  周(仅试样 WB4 出现在第 2 周)。在上升段:  $b_{\Delta m, N}$  随  $N$  的增长而迅速增大, 最终达到最大值  $b_{\Delta m, N_c} = 1$ 。分析试验结果发现:

当孔压增量比的累积量  $\sum_{i=1}^N b_{\Delta m, i} = 1$  时,  $b_{\Delta m, N}$  从平稳段开始进入上升段。将离散的孔压连续化, 则孔压增量比的累积量化为孔压增量比的积分, 由式 (3) 可知, 应有:

$$\int_0^{m_N} \frac{dm}{s'_c - m} = -\ln(s'_c - m) \Big|_0^{m_N} \quad (m_N < s'_c) \quad (6)$$

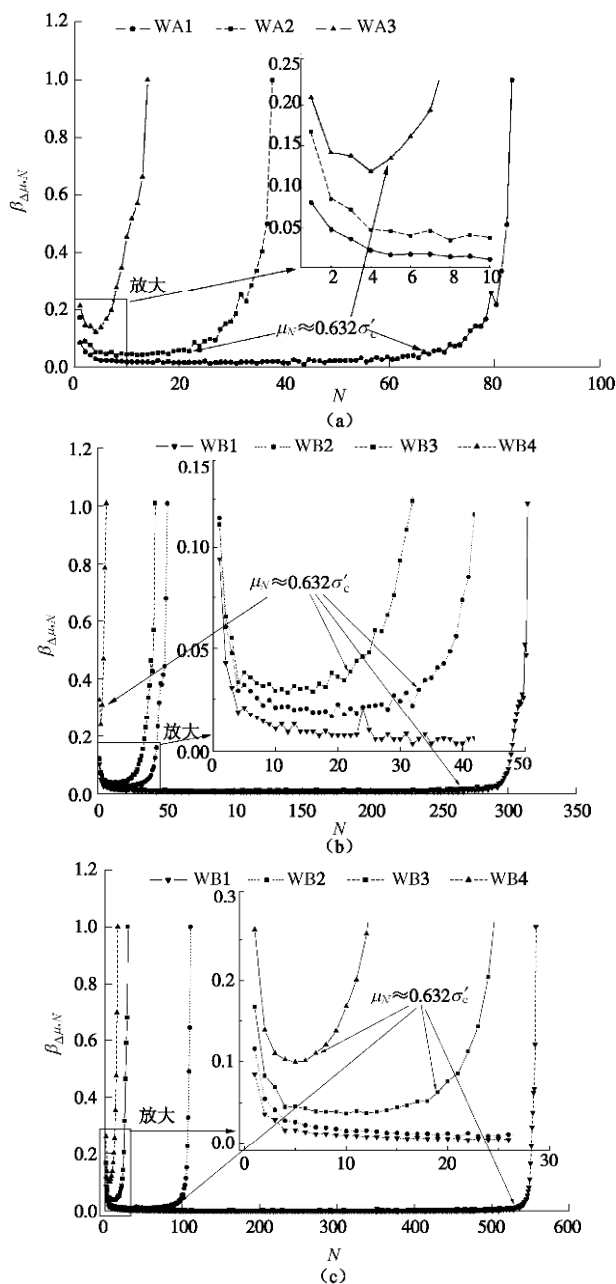


图 4  $b_{\Delta m, N}$  与  $N$  的关系

Fig. 4 Variation of  $b_{\Delta m, N}$  with  $N$

当  $\sum_{i=1}^N b_{\Delta m,i} = 1$  时, 应有  $\int_0^{m_N} \frac{dm}{s'_c - m} = 1$ , 由式 (6) 可得到此时的孔压  $m_N$  为

$$m_N = (1 - e^{-1}) s'_c \approx 0.632 s'_c \quad (7)$$

因此, 式 (7) 可以作为平稳段和上升段的阶段转换点, 如图 4 所示。

2.2 孔压增量比  $b_{\Delta m,N}$  及其累积量与有效动剪应力比  $a_{dE,N}$  之间的关系

图 5 给出了全部 11 组试验整理的  $\sum_{i=1}^N b_{\Delta m,i}$  与  $a_{dE,N}$  之间的关系。在半对数坐标系下,  $\sum_{i=1}^N b_{\Delta m,i}$  与  $a_{dE,N}$  之间总体上具有较好的线性关系。根据  $b_{\Delta m,N}$  发展的 3 个阶段, 详细分析  $\sum_{i=1}^N b_{\Delta m,i}$  与  $a_{dE,N}$  之间的关系。

从图 5 中的局部放大图可以看出: 在  $b_{\Delta m,N}$  下降段, 即施加动荷载的初始阶段,  $\sum_{i=1}^N b_{\Delta m,i}$  与  $a_{dE,N}$  之间的线性关系不佳。由于下降段出现在  $N=3\sim 5$  之前 (图 4 中局部放大图所示), 因此  $b_{\Delta m,N}$  与  $a_{dE,N}$  的关系采用前 4 周循环的试验数据 (试样 WB4 采用前 2 周循环) 进行分析。图 6 给出了所有试验结果中前 4 周循环 (试样 WB4 采用前 2 周循环) 的  $b_{\Delta m,N}$  与  $N$  的乘积与有效动剪应力比  $a_{dE,N}$  的关系, 可采用幂函数来拟合:

$$b_{\Delta m,N} = \frac{A}{N} (a_{dE,N})^C \quad (8)$$

得到拟合参数为  $A=4.01$ ,  $C=2.00$ 。

在  $b_{\Delta m,N}$  平稳段  $\sum_{i=1}^N b_{\Delta m,i}$  与  $a_{dE,N}$  的线性关系非常好; 而在  $b_{\Delta m,N}$  上升段  $\sum_{i=1}^N b_{\Delta m,i}$  与  $a_{dE,N}$  的关系有些波动, 但也可简化为线性关系来拟合, 并得到较好的结果。这两个阶段的线性关系可统一为

$$\sum_{i=1}^N b_{\Delta m,i} = b_N \ln a_{dE,N} + a \quad (9)$$

式中,  $a$  为直线在竖向轴上的截距,  $b_N$  为直线的斜率, 这两个阶段的参数拟合结果见表 2。

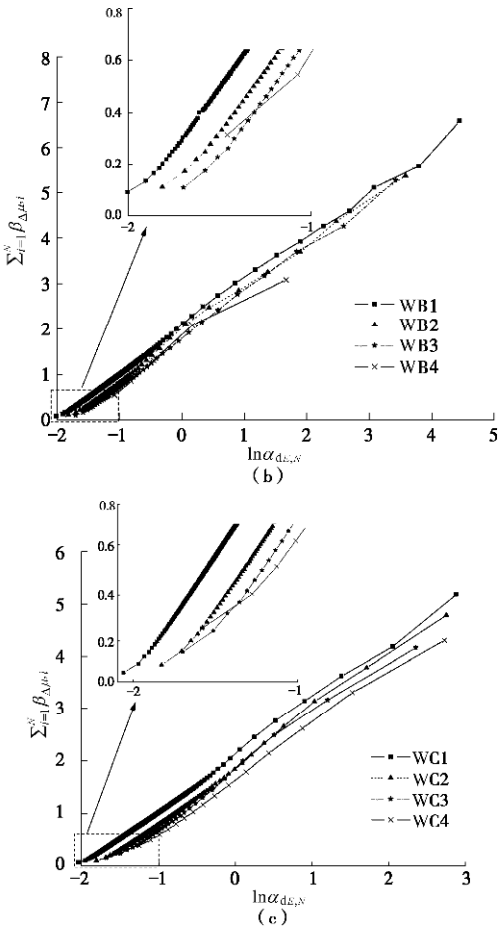
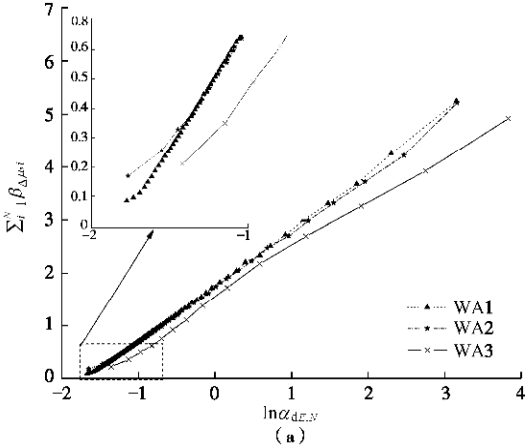


图 5  $\sum_{i=1}^N b_{\Delta m,i}$  与  $\ln a_{dE,N}$  的关系

Fig. 5 Variation of  $\sum_{i=1}^N b_{\Delta m,i}$  with  $\ln a_{dE,N}$

表 2  $\sum_{i=1}^N b_{\Delta m,i}$  与  $\ln a_{dE,N}$  线性关系的拟合参数及相关系数

Table 2 Values of fitting parameters and correlation coefficients of

linear relationship between  $\sum_{i=1}^N b_{\Delta m,i}$  and  $\ln a_{dE,N}$

试样 编号	平稳段			上升段		
	$a$	$b_N$	$R^2$	$a$	$b_N$	$R^2$
WA1	1.82	0.98	0.999	1.86	1.02	0.999
WA2	1.69	1.00	0.999	1.74	1.10	0.998
WA3	1.66	1.07	0.999	1.63	0.95	0.996
WB1	1.98	0.99	0.999	2.06	1.10	0.998
WB2	1.85	1.00	0.998	1.94	1.13	0.997
WB3	1.71	0.99	0.999	1.78	1.10	0.998
WB4				1.78	1.08	0.980
WC1	2.06	0.99	0.999	2.15	1.11	0.998
WC2	1.83	0.99	0.999	1.85	1.14	0.997
WC3	1.73	1.00	0.999	1.92	1.10	0.995
WC4	1.63	1.01	0.999	1.70	1.05	0.995
均值	1.82	1.00		1.86	1.08	
方差	0.02	<0.001		0.02	0.003	

注: 试样 WB4 的试验结果在平稳段的数据过少, 因此不参与计算参数。

由于孔压增量比  $b_{\Delta m, N}$  可以计算为

$$b_{\Delta m, N} = \sum_{i=1}^N b_{\Delta m, i} - \sum_{i=1}^{N-1} b_{\Delta m, i} \quad (10)$$

将式(4)、(9)代入式(10),并考虑到在  $b_{\Delta m, N}$  的平稳段及上升段内,式(9)中的  $b_N$  为定常数,则可推得

$$b_{\Delta m, N} = -b_N \ln \left( \frac{s'_c - m_{N-1}}{s'_c - m_{N-2}} \right) \quad (11)$$

第  $N-1$  周循环的有效应力对数衰减率定义为

$$x_{m, N-1} = \ln \left( \frac{s'_c - m_{N-1}}{s'_c - m_{N-2}} \right) \quad (N > 2) \quad (12)$$

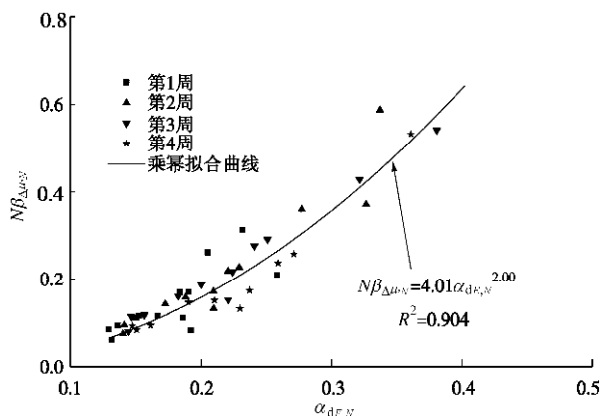


图6 前4周循环的  $b_{\Delta m, N}$  与  $a_{dE, N}$  的关系

Fig. 6 Relationship between  $b_{\Delta m, N}$  and  $a_{dE, N}$  for preceding 4 cycles

显然,  $x_{m, N-1}$  反映了饱和砂土中有效应力随孔压  $m_N$  的增长而逐渐衰减的特性。

将式(12)代入式(11)得

$$b_{\Delta m, N} = -b_N x_{m, N-1} \quad (N > 2) \quad (13)$$

从式(13)可知,第  $N$  周循环的  $b_{\Delta m, N}$  与第  $N-1$  周循环的有效应力对数衰减率  $x_{m, N-1}$  成正比。分析其物理意义,可得到有趣的结论:等幅循环荷载作用下,饱和砂土中孔压  $m_N$  的发展经过  $b_{\Delta m, N}$  的下降段后,  $b_{\Delta m, N}$  出现恒定的增长过程;在这个过程中,  $b_{\Delta m, N}$  与  $t_d$  无关,而与第  $N-1$  周循环的有效应力对数衰减率  $x_{m, N-1}$  成正比。式(13)中的负号可理解为  $b_{\Delta m, N}$  与  $x_{m, N-1}$  是相反的发展过程。因此,第  $N$  周循环产生的  $b_{\Delta m, N}$  可以通过第  $N-1$  周循环的有效应力对数衰减率  $x_{m, N-1}$  来计算。

必须指出:在加载初始阶段,有效应力对数衰减率  $x_{m, N-1}$  同样具有物理意义,并且有  $b_{\Delta m, N} < -x_{m, N-1}$ 。可理解为  $b_{\Delta m, N}$  需要循环动应力作用一定的周数之后才能达到  $-x_{m, N-1}$ , 之后  $b_{\Delta m, N}$  为恒定的增长过程。

### 3 孔压增量模型的建立

循环荷载下饱和砂土中的孔压增量  $\Delta m_N$  可以为

$$\Delta m_N = b_{\Delta m, N} (s'_c - m_{N-1}) \quad (14)$$

基于试验结果的分析可知,式(14)中的  $b_{\Delta m, N}$  可分为两个阶段来计算:①在加载初始阶段,根据自然成立的  $m_0 = 0$  及初始有效围压  $s'_c$  和动剪应力  $t_d$ ,代入式(8)可迭代计算得到  $b_{\Delta m, N}$ ;②恒定累积阶段,采用式(13)迭代计算得到  $b_{\Delta m, N}$ , 而其中的  $b_N$  根据孔压  $m_N$  是否大于等于  $0.632s'_c$  分别取值。这两阶段之间的转换条件为:当  $b_{\Delta m, N} < -x_{m, N-1}$  时,  $b_{\Delta m, N}$  处于初始加载阶段,采用式(8)迭代计算,否则  $b_{\Delta m, N}$  处于恒定累积阶段,采用式(13)迭代计算,当  $b_{\Delta m, N} = 1$  时孔压  $m_N$  达到有效围压,迭代计算结束。根据数值验证,式(8)与式(13)是连续的,能够反映孔压  $m_N$  累积增长的过程。

根据上述分析,将式(8)、(13)代入式(14),可建立孔压增量模型为

$$\Delta m_N = \begin{cases} \frac{A}{N} (a_{dE, N})^C (s'_c - m_{N-1}) & (b_{\Delta m, N} < -x_{m, N-1}) \\ -b_N x_{m, N-1} (s'_c - m_{N-1}) & (-x_{m, N-1} \leq b_{\Delta m, N} \leq 1) \end{cases} \quad (15)$$

本文试验得到的模型参数为  $A=4.01$ ,  $C=2.00$ ,

$$b_N = \begin{cases} 1.00 & (m_N < 0.632s'_c) \\ 1.08 & (m_N \geq 0.632s'_c) \end{cases}$$

### 4 孔压增量模型的验证及特征

为验证孔压增量模型,采用同样的试验方法,对同一级配的南京细砂制备相同相对密度的试样进行了一组验证试验。验证试验的加载方案及得到的初始液化循环周数  $N_c$  如表3所示。将验证试验、建模试验使用的有效围压  $s'_c$  和动剪应力  $t_d$  成对输入孔压增量模型式(15)得到如下结果:

(1) 孔压增量模型计算的抗液化强度与验证试验、建模试验的对比结果如图7所示。可以看出,孔压增量模型计算的抗液化强度点与建模试验结果点比较接近;且较好地预测了验证试验的抗液化强度点。

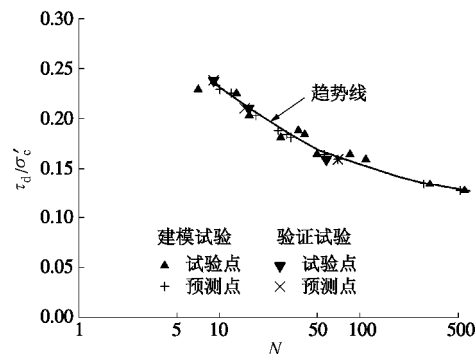


图7 模型计算的抗液化强度点与试验点的对比

Fig. 7 Comparison of liquefaction resistance between predicted and test results

表 3 验证试验方案及试验结果

Table 3 Schemes and results of validation tests					
组号	试样编号	有效围压 $s'_c$ /kPa	轴向动力幅值 /kPa	动剪应力比 $t_d/s'_c$	初始液化循环周数 $N_c$
YZ组	YZ1	80	38.2	0.239	9
	YZ2	80	33.8	0.211	16
	YZ3	80	25.5	0.160	57

(2)孔压增量模型计算的孔压比随循环周数增加而增长的曲线与验证试验结果、部分建模试验结果的比较如图 8 所示。可以看出：模型计算的孔压比曲线与建模试验结果基本吻合，如图 8 (a) 所示；且较好地预测了验证试验得到的孔压比曲线结果，如图 8(b) 所示。

(3)孔压增量模型计算的孔压比随循环周数比而增长的曲线与验证试验结果、部分建模试验结果的对比如图 9 所示，可以看出，模型计算的孔压比随循环周数比的变化趋势较好地反映了建模试验、验证试验结果，都随动剪应力幅值的增大，孔压比增长曲线形状由 S 型向抛物线型转变。

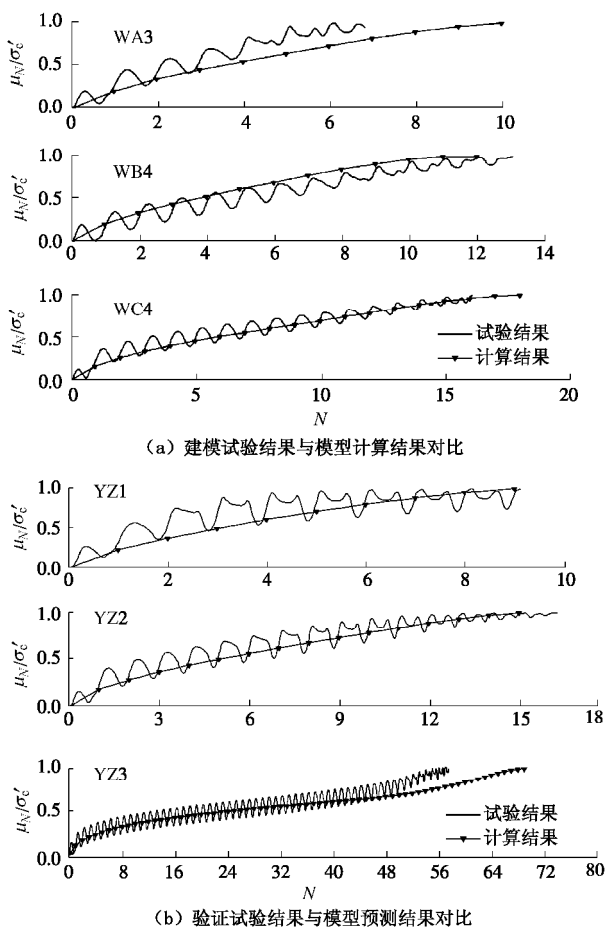


图 8 模型计算的孔压比增长曲线与验证试验结果对比

Fig. 8 Comparison of variation of EPWP ratio curves with  $N$  between test and predicted results

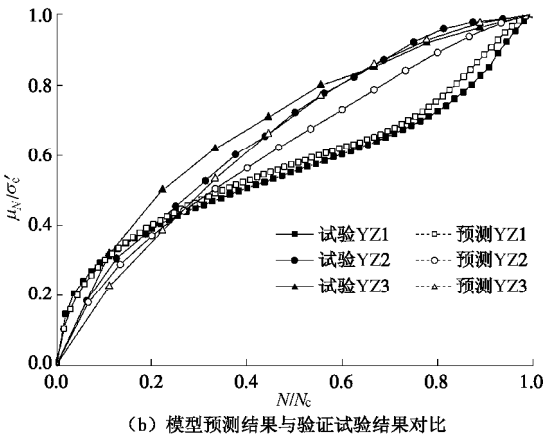
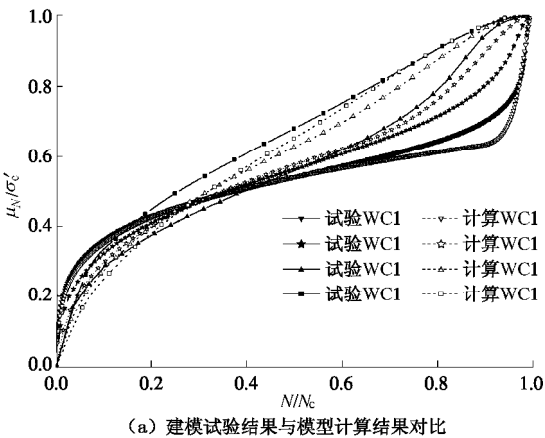


图 9 预测和验证性试验的孔压比曲线随循环周数比的变化  
Fig. 9 Comparison of variation of EPWP ratio curves with  $N/N_c$  between test and predicted results

5 结 语

孔压增量比  $b_{\Delta m,N}$  随着循环周数  $N$  的增大，可以分成下降段、平稳段和上升段 3 个阶段。在下降段， $b_{\Delta m,N}$  与有效动剪应力比  $a_{dE,N}$  的关系可用乘幂函数来拟合；在  $b_{\Delta m,N}$  平稳和上升段，孔压增量比的累积量  $\sum_{i=1}^N b_{E,i}$  与  $a_{dE,N}$  的自然对数具有很好的线性关系，从而得到第  $N$  周循环内的孔压增量比  $b_{\Delta m,N}$  与第  $N-1$  周循环的有效应力对数衰减率  $x_{m,N-1}$  成正比，两者发展的趋势则相反，且与动应力幅值无关。据此建立的孔压增量模型，能够较好地预测饱和南京细砂在等幅循环荷载下的初始液化循环周数，且能够较好地预测孔压比随循环周数比增大而增长的发展趋势。

参考文献:

[1] SEED H B, MARTIN P P, LYSMER J. Pore-water pressure changes during soil liquefaction[J]. American Society of Civil Engineers, Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1976, 102(4): 323 - 346.

- [2] 张建民, 谢定义. 饱和砂土振动孔隙水压力增长的实用算法[J]. 水利学报, 1991(8): 45 - 51. (ZHANG Jian-min, XIE Ding-yi. A practical method for calculation of seismic excess pore water pressure in saturated sand[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991(8): 45 - 51. (in Chinese))
- [3] 袁晓铭, 孙 锐, 孟上九. 土地地震大变形分析中 Seed 有效循环次数方法的局限性[J]. 岩土工程学报, 2004(2): 207 - 211. (YUAN Xiao-ming, SUN Rui, MENG Shang-jiu. Limitation of the seed's method of significant cyclic number in analyzing large deformation of soils during earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004(2): 207 - 211. (in Chinese))
- [4] FINN W D L, BHATIA S K. Predictions of seismic pore water pressure[C]. Stockholm, 1982.
- [5] 郑颖人, 徐干成, 谢定义. 一个新的内时参量动孔压模型及其适用性研究[J]. 水利学报, 1995(12): 39 - 53. (ZHENG Ying-ren, XU Gan-cheng, XIE Ding-yi. A pore-water pressure model with a new endochronic parameter and its applicability[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995(12): 39 - 53. (in Chinese))
- [6] IVSIC T. A model for presentation of seismic pore water pressures[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, **26**(2-4): 191 - 199.
- [7] TOWHATA I, ISHIHARA K. Shear work and pore water pressure in undrained shear[J]. Soils and Foundations, 1985, **25**(3): 73 - 84.
- [8] POLITO C P, GREEN R A, LEE J. Pore pressure generation models for sands and silty soils subjected to cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, **134**(10): 1490 - 1500.
- [9] 丰万玲, 石兆吉. 判别水平土层液化势的孔隙水压力分析方法[J]. 工程抗震与加固改造, 1988(4): 30 - 33. (FENG Wan-ling, SHI Zhao-ji. An analytical method using pore-water pressure for evaluation of liquefaction potential in level soil layer[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 1988(4): 30 - 33. (in Chinese))
- [10] 孙 锐, 袁晓铭. 非均等固结下饱和砂土孔压增量简化计算公式[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(9): 1021 - 1025. (SUN Rui, YUAN Xiao-ming. Simplified incremental formula for estimating pore water pressure of saturated sands under anisotropic consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(9): 1021 - 1025. (in Chinese))
- [11] 孙 锐, 袁晓铭. 地震荷载下饱和砂土孔压增长时程计算方法[J]. 地震工程与工程振动, 2006(3): 261 - 263. (SUN Rui, YUAN Xiao-ming. A method for calculating time-dependent pore water pressure rise of saturated sands under earthquake loading[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006(3): 261 - 263. (in Chinese))
- [12] ISHIBASHI I, SHERIF M A, TSUCHIYA C. Pore-pressure rise mechanism and soil liquefaction [J]. Soils and Foundation, 1977, **17**(2): 17 - 27.
- [13] ISHIBASHI I, SHERIF M A, CHENG Wenlon. The effects of soil parameters on pore-pressure-rise and liquefaction prediction[J]. Soils and Foundations, 1982, **22**(1): 39 - 48.
- [14] SHERIF M A, ISHIBASHI I, TSUCHIYA C. Pore-pressure prediction during earthquake loadings[J]. Soils and Foundations. 1978, **18**(4): 19 - 30.
- [15] 陈国兴, 朱定华, 何启智. DSZ-1 型动三轴试验机研制与性能试验[J]. 地震工程与工程振动. 2002, **22**(6): 71 - 74. (CHEN Guo-xing, ZHU Ding-hua, HE Qi-zhi. Development and test of DSZ-1 cyclic triaxial testing system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2002, **22**(6): 71 - 74. (in Chinese))
- [16] 张克绪, 谢君斐. 土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 1989. (ZHANG Ke-xu, XIE Jun-fei. Soil dynamics[M]. Beijing: Seismological Press, 1989. (in Chinese))