

随机地震荷载下黏性土残余应变的半经验计算公式

袁晓铭¹, 孟上九^{2,1}, 孙锐¹

(1. 中国地震局 工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 提出一个新的简化半经验计算公式, 用于随机地震荷载作用下黏性土残余应变的计算。新公式放弃了目前将不规则地震荷载转换成一定次数等幅正弦波的方式, 而采用直接对不规则动应力波进行逐波累计的计算方法, 这样可以得到任意随机地震荷载作用下土残余应变的实际发展过程。新公式首先略去地震波频率特性的影响, 将一随机地震应力时程保留其有效幅值, 筛选成一系列不同幅值的往返荷载; 然后, 以增量方法逐波累计计算残余应变。对每一动应力循环, 以已有等幅荷载经验计算公式对循环次数的偏导构造残余应变的增量模型, 并考虑了动压应力对残余应变增长的控制作用。经计算, 对于等幅动荷载作用, 新公式与现有公式之间误差很小。对于地震荷载输入, 采用动三轴试验与新公式进行对比。对比结果表明, 提出的公式可以有效地描述不规则地震荷载下黏性土残余变形的增长过程和最终结果, 可反映不同类型地震波作用下、CM和EM试验下以及不同波序下土残余应变的发展和差异。

关键词: 不规则地震荷载; 残余应变; 半经验公式; 动三轴试验

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A

1 问题的提出

强度理论以往一直是土工抗震研究的主体, 但随着工程设计要求的提高以及性能抗震设计思想的出现和发展, 土(水)工结构及地基以变形(位移)为主要控制参数的分析方法和技术越来越被广泛需求和应用。

地震波是一种具有明显不规则和不对称性的随机动荷载, 由于问题的复杂性和仪器设备功能的限制, 以往用于工程实际的残余应变增长模型是基于等幅荷载试验得到的。但是, 已有的研究结果^[1~4]表明, 地震荷载的不规则性和不对称性在不少情况下对土的动力特性有不可忽视的影响, 特别是对具有强非线性的软弱土的大变形动力响应问题。同时, 在将实际地震力应用于土体动力分析时, 一般采用Seed^[5]提出的转换方法, 即将实际地震应力峰值的0.65倍作为等幅循环应力幅值, 等幅荷载的循环次数则依震级大小而定。但这种转换方法不适用于大脉冲强地震动下土体残余变形的分析, 不能反映地震作用下由地震动本身不规则性和不对称性、土层横向分布不均匀以及结构非对称带来的土体永久位移和地基震陷的差异, 不适应土体时程分析的要求。之后有研究人员利用分时段转换方法, 改进了Seed的转换方法, 但在时段的划分上还是存在任意性, 也缺乏试验验证, 且上面问题仍然存在。另外, 由于循环次数只与震级有近似关系, 而现在土体地震反应分析一般是以烈度或加速度峰值为基本输入, 由于地震烈度与震级之间非单值对应且关系复杂, 使转换次数的确定可操作性很差, 对于实际地震荷载下土体的变形问题, 要找到确切对应的等幅荷载作用次数则难度更大, 实际确定循环次数时带有很多的人为因素。因此, 发展能直接用于实际地震荷载的残余变形计算模型是解决上述问题一个合适的途径。

收稿日期: 2003-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59978049); 国家科技部和地震学联合基金资助项目(199128)

作者简介: 袁晓铭(1963-), 男, 研究员, 主要从事土动力学和岩土工程研究。

2 理论模型

对于等幅正弦荷载作用，由动三轴试验回归出的土残余应变计算公式^[6]为

$$\bar{\varepsilon}_p = 10 \left[\frac{1}{c_5} \frac{\bar{\sigma}_d}{\sigma_3} \right]^{s_5} \left(\frac{N}{10} \right)^{-\frac{s_1}{s_5}} \quad (1)$$

式中： $\bar{\varepsilon}_p$ 为土单元残余应变； σ_3 为围压； N 为等幅荷载作用次数； $\bar{\sigma}_d$ 为等幅荷载幅值； k_c 为固结比； S_1 、 C_5 、 C_6 、 C_7 、 S_7 、 S_5 为与土性有关的参数， $C_5=C_6+S_6(k_c-1)$ ， $S_5=C_7+S_7(k_c-1)$ 。

对于实际地震波作用，首先将动应力荷载分解成如图1所示的一系列不同幅值往返荷载。

将一随机地震应力波筛选成一系列不同幅值往返荷载，依据目的不同，有多种方法，如全峰值记数法、简单峰值记数法、跨均值峰值记数法和变程记数法等^[7]。地震应力荷载下残余变形的试验结果表明^[1,4,8]，一个往返大循环中那些较小幅值涟波的作用基本上是可以略去的。为使问题简单化，本文采取以跨均值峰值记数法。以一个应力循环为例，原波见图2(a)。筛选中规定随机信号每穿越两次零线则循环次数记一次，并依次向后叠加，这样一次应力循环中包括了一对正向和负向荷载。将两个正负荷载的极值分别筛选并保留，同时记下对应时刻 t_{n+} 和 t_{n-} 以及循环次数 n ，图2(b)为筛选后的波形。从图2可以看出，筛选后原有波形的主要特征和有效幅值得以保留，与有效幅值相应的循环次数和对应时刻也同时获得。以此类推可将整个地震应力时程筛选成一系列不同幅值往返荷载。

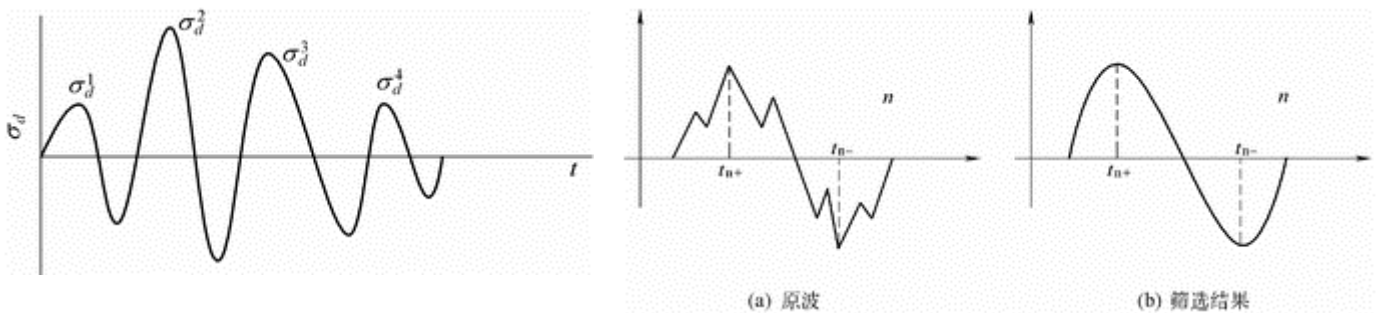


图1 地震应力荷载的分解

图2 地震应力波的筛选

完成随机地震应力波筛选后，在形成实际地震荷载的残余变形计算模型中，本文关键点之一是采用如下逐波累计的增量方法

$$\varepsilon_p^i = \varepsilon_p^{i-1} + \Delta \varepsilon_p^i \quad i=1, 2, \dots, M \quad (2)$$

式中： ε_p^i 为第 i 个动应力作用下土单元累计残余应变； ε_p^{i-1} 为第 $i-1$ 个动应力作用下土单元累计残余应变，并且 $\varepsilon_p^0 = 0$ ； M 为往返荷载总的作用次数； $\Delta \varepsilon_p^i$ 为第 i 个动应力引起的土单元残余应变增量。

本文的另一关键是构造土单元残余应变增量 $\Delta \varepsilon_p^i$ 。当动荷载循环从 $i-1$ 变到 i ，幅值从 σ_d^{i-1} 变到 σ_d^i ，由式(1)已知的 ε_p - σ_d 和 ε_p - σ_d^{i-1} 关系，以 $\sigma_d^{i-1} < \sigma_d^i$ 为例，示于图3。由 σ_d^i 引起的残余应变增量 $\Delta \varepsilon_p^i$ ，可以按如下取法：当 σ_d 由 σ_d^{i-1} 变到 σ_d^i 时，残余应变增量 $\Delta \varepsilon_p^i$ 的发展轨迹会脱离原 σ_d^{i-1} 下的轨迹，力学上推测，发展轨迹是改向由 σ_d^i 下轨迹的切向运动，数学上可由式(1)对 N 求一阶偏导给出，即图3上残余应变从A移动到B，则 $\Delta \varepsilon_p^i$ 为

$$\Delta \varepsilon_p^i = \left(\frac{\sigma_d^i}{\sigma_3 c_5} \right)^{\frac{1}{s_5}} \left(-\frac{s_1}{s_5} \right) \left(\frac{i-1}{10} \right)^{\left(\frac{-s_1-1}{s_5} \right)} \quad (3)$$

且第1次残余应变的增量 $\Delta \varepsilon_p^1$ 为

$$\Delta \varepsilon_p^1 = 10 \left[\frac{1}{c_5} \frac{\sigma_d^1}{\sigma_3} \right]^{\frac{1}{s_5}} \left(\frac{1}{10} \right)^{\frac{-s_1}{s_5}} \quad (4)$$

在式(1)和式(2)中,动应力频率的影响略去,因为很多研究表明,在常见的地震波频段范围内,频率的影响不大。在实际地震应力荷载中,每一动荷载循环轴两侧的动荷载幅值一般是不对称的,考虑到试验中动压应力对残余变形的增长基本上起控制作用^[1,4,8],而动拉应力对残余变形的增长贡献很小。因此,式(3)中的动应力幅值 σ_d^i 取为动压应力幅值,而动拉应力的作用则仅当动拉应力大于动压应力时按Martin等^[9]的回弹方法做简略处理。

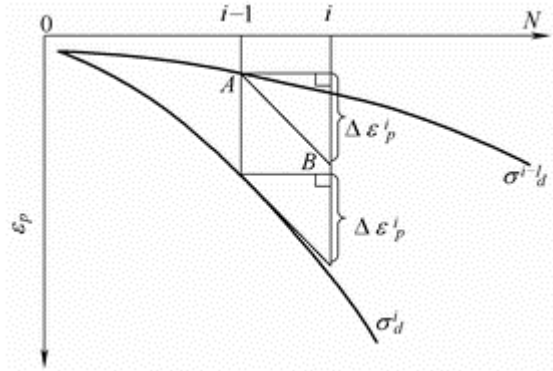


图3 由 σ_d^i 引起的残余应变增量 $\Delta \varepsilon_p^i$

3 新公式的验证

3.1 等幅荷载下公式的验证 当等幅正弦荷载作用时,由式(2)计算出的土残余应变与式(1)进行比较,结果如表1所示,其中计算参数取为: $s_1=-0.128$, $s_4=0.186$, $c_5=0.714$, $k_c=1.5$, $\sigma_3=200\text{kPa}$ 。

表1 等幅正弦荷载下式(2)与式(1)计算结果比较

循环次数N	动应力幅值/kPa	10	20	30	40	90	110
5	式(1)残余应变(%)	3.84e-6	1.60e-4	1.41e-3	6.63e-3	0.52	1.53
	式(2)残余应变(%)	4.03e-6	1.68e-4	1.48e-3	6.96e-3	0.54	1.60
	误差(%)	4.95	5.00	4.96	4.98	3.85	4.58
10	式(1)残余应变(%)	6.19e-6	2.57e-4	2.27e-3	1.07e-2	0.84	2.46
	式(2)残余应变(%)	6.44e-6	2.67e-4	2.36e-3	1.11e-2	0.87	2.56
	误差(%)	4.04	3.89	3.96	3.74	3.57	4.07
50	式(1)残余应变(%)	1.87e-5	7.88e-4	6.89e-3	3.23e-2	2.53	7.44
	式(2)残余应变(%)	1.91e-5	7.92e-4	7.01e-3	2.29e-2	2.57	7.57
	误差(%)	2.14	0.51	1.74	1.86	1.58	1.75
100	式(1)残余应变(%)	3.02e-5	1.25e-3	1.11e-2	5.20e-2	4.08	11.90
	式(2)残余应变(%)	3.06e-5	1.27e-3	1.12e-2	5.27e-2	4.12	12.10
	误差(%)	1.32	1.60	0.90	1.35	0.98	1.17

表1的比较结果表明,由式(2)计算出的土残余应变与式(1)之间的误差很小,最大不超过5%,说明在等幅荷载作用时新公式是成立的,更多的比较结果也说明了这一点^[7]。

3.2 实际地震荷载下公式的试验验证 对于真实地震荷载作用,采用地震波输入动三轴试验验证式(2)的可靠性。试验是在中国地震局工程力学研究所和哈尔滨工业大学新研制出的全自动地震波输入动三轴装置上进行的,该装置能很好的实现力、位移控制下地震波试验功能^[10]。试验所用土样为原状黏性土,

取自我国杭州湾地区和天津地区。试验采用应力控制，工况如表2，含有不同的固结比、围压、动应力峰值以及不同的地震波和类型。

表2 试验工况

土类	淤泥			淤泥质黏土		淤泥质亚黏土		淤泥质黏土		淤泥质黏土		黏土	
	天津波			EL-Centro		迁安波		宁河波		唐山波		EL-Centro	
输入波形													
输入波类型	EM	CM	RM	EM	CM	EM	CM	EM	CM	EM	CM	EM	CM
工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
固结比	1.73	1.73	1.73	1.50	1.50	2.30	2.30	1.30	1.30	1.50	1.50	1.50	1.50
围压/kPa	200	200	200	200	200	100	100	200	200	130	130	50	50
动应力峰值/kPa	150	150	150	150	150	100	100	100	100	50	50	60	60

试验采用5条地震加速度记录作为轴向应力时程输入，分别为国内常用的天津波、EL-Centro波、迁安波、宁河波以及唐山大地震中北京饭店得到的南北向水平加速度记录(简称唐山波，下同)，其中唐山波为振动型，其余均为冲击型。实验中，施加动荷载峰值时活塞处于最低位置称为CM试验，活塞处于最高位置称为EM试验，RM则为将原地震应力时程时间上颠倒，自后向前输入。每组CM和EM试验是对同样的土样进行，RM也如此。土样的物理性质和由此确定的计算参数如表3所示。

表3 土样物理性质和计算参数

工况	含水量(%)	密度/(g/cm ³)	-S ₁	C ₆	S ₆	C ₇	S ₇
1、2、3	46.6	1.80	0.17	0.48	0.25	0.15	0.0
4、5	39.5	1.82	0.16	0.60	0.21	0.17	0.0
6、7	30.7	1.96	0.15	0.65	0.20	0.18	0.0
8、9	39.5	1.82	0.16	0.58	0.21	0.16	0.0
10、11	40.8	1.82	0.16	0.59	0.23	0.16	0.0
12、13	24.7	1.85	0.13	0.80	0.30	0.18	0.0

由式(2)计算出的和试验得到的最终残余应变比较如表4所示。由表4可见，13个工况，二者之间的误差为4%~40%，平均为15%。

为检验式(2)在描述土残余变形发展过程特征方面的有效性，将工况1、5、7和11计算出的和试验得到的残余应变时程绘于图4。由图4可见，对于不同的固结比、围压、动应力峰值及不同的地震波和类型，式(2)计算出的应变时程和试验结果基本吻合。

为进一步检验式(2)在描述波序对土残余变形发展影响方面的可行性，用源于一个地震波的3种类型动应力荷载(CM波、EM波和RM波)分别作用于3个同样的土样，即工况1、2和3的情况，计算和试验残余应变时程比较绘于图5。图5的试验结果表明，不规则波的波序对土残余变形发展和最终结果都有显著影响。从本质上来说，强地震下土表现为一种强非线性反应，它的残余变形发展与受力历史有关，是过程的函数。并且，一般来说，幅值一样的荷载，作用在前面时影响更大。在残余变形发展上，如试验结果那样，大波出现在前，则其影响较强，大波出现在后则反之。式(2)能够模拟这种影响，并且计算结果同实验结果很相似。同时，从图5也可看出，式(2)能够模拟出CM波、EM波造成的残余应变差异，式(2)计算出的这种差异为46%，实验结果为56%，二者接近。

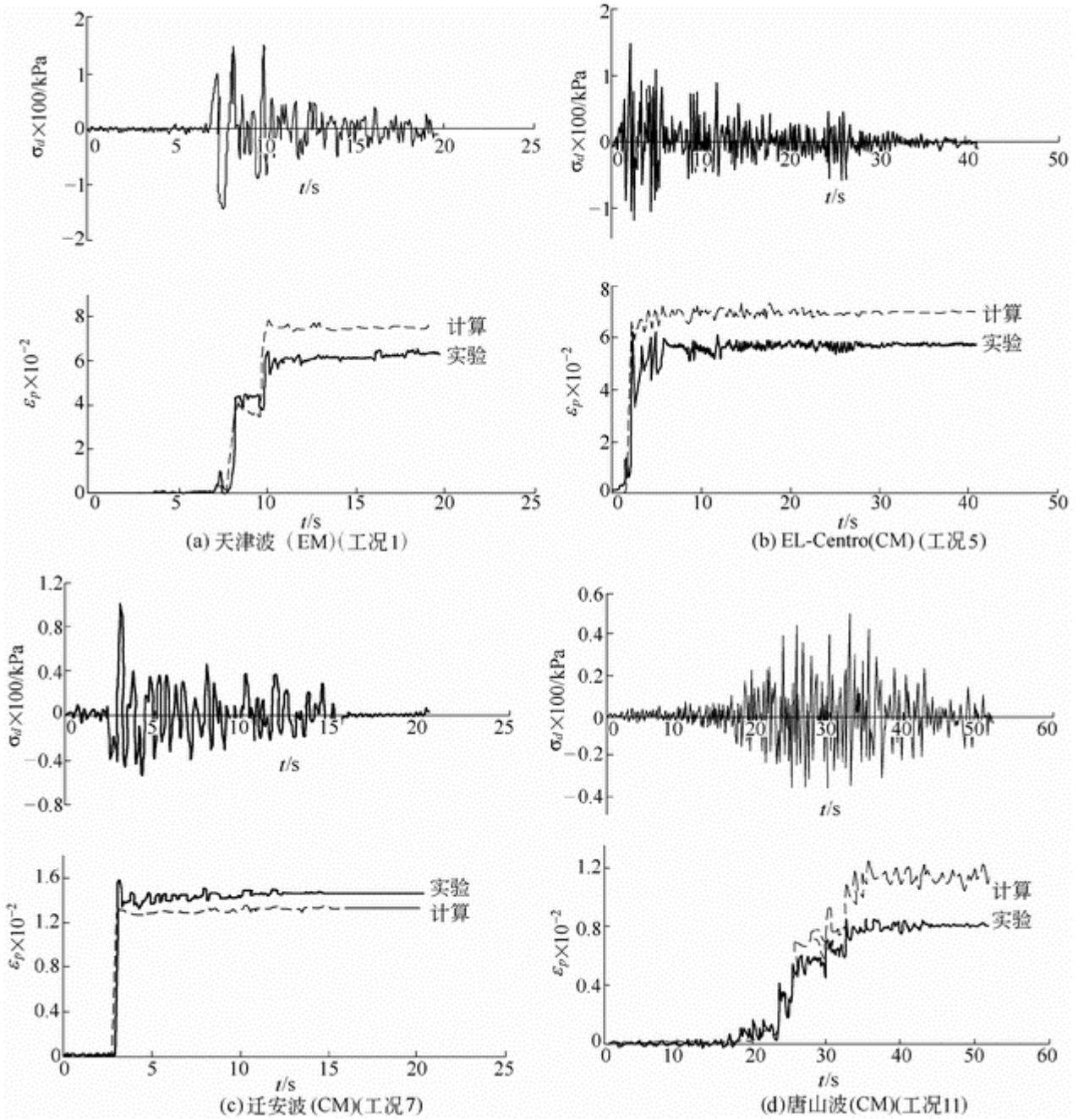


图4 计算和实验的残余应变时程比较

对于更多工况下波形造成的这种残余应变的差别的比较,见表4,由表4进一步可以看出式(2)的模拟也是较为成功的。

虽然式(2)本身的建立并不是在非常严格的理论基础之上,但是逐波累计增量的思想在很大程度上已得到认可^[3],只是成果不多。本文是这种思想的实践,这也是式(2)谓之半经验的缘由。从本文的试验结果看到,这种思想是可以接受的,并且可操作性较好。

表 4 计算和试验的残余应变比较

土类	淤泥			淤泥质黏土		淤泥质亚黏土		淤泥质黏土		淤泥质黏土		黏土	
输入波形	天津波			EL-Centro		迁安波		宁河波		唐山波		EL-Centro	
输入波类型	EM	CM	RM	EM	CM	EM	CM	EM	CM	EM	CM	EM	CM
工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
实验残余应变(%)	6.20	3.95	3.18	2.13	5.78	0.93	1.45	1.55	3.25	0.32	0.83	0.98	1.54
计算残余应变(%)	7.43	5.10	3.06	2.35	6.94	0.77	1.32	1.93	3.74	0.37	1.15	0.87	1.35
误差 (%)	19.8	29.1	3.8	10.3	20.1	17.2	9.0	24.5	15.1	15.6	38.6	11.2	12.3

4 结论

文中提出了一个增量公式，适用于不规则地震荷载作用下黏性土残余应变的直接计算。对于等幅动荷载，本文公式与现有公式的计算结果基本一致。对于不规则荷载输入，采用动三轴试验检验了本文公式的可靠性，对比结果表明，本文公式可以有效地描述实际地震下黏性土残余变形发展的基本特征和时间历程，且较为切实可行，也可反映不同类型地震波作用下、CM和EM试验下和不同波序下土残余变形的发展和差异。

地基和土工结构物在地震作用下的变形和震陷分析技术越来越被广泛应用。与以往不同的是，由于放弃了Seed的转换方法，本文的公式能更合理方便地计算出均匀变形和震陷，更进一步，本文公式还能合理计算出地震作用下由惯性力不均匀、土层横向分布不均匀和结构非对称等导致的地基和土工建筑物中的不均匀变形和不均匀震陷，而以往的模型在这方面则受到很大限制。

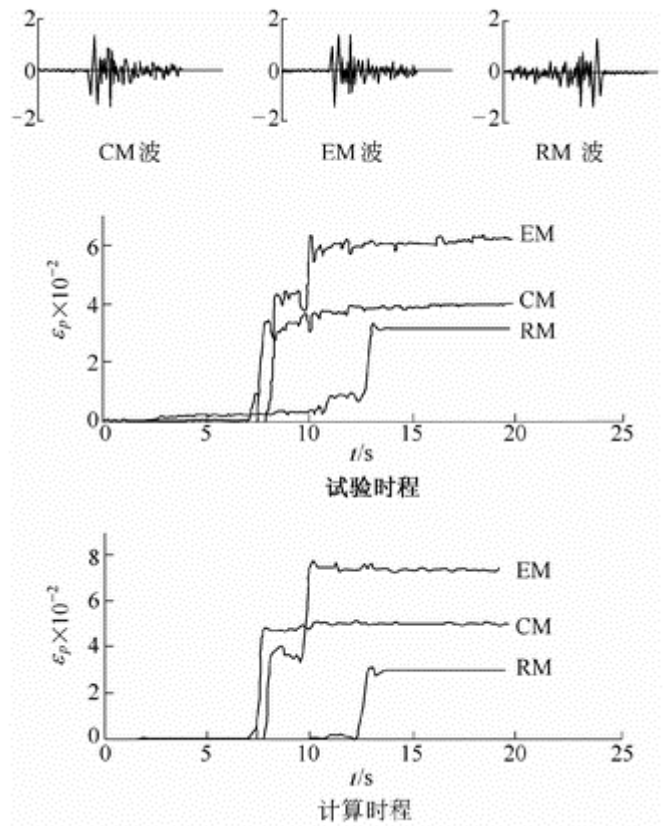


图5 3种加荷次序下计算和试验的残余应变时程对比

参考文献：

[1] Zshihara K, Royamachi N, Kasuda K. Strength of a cohesive soil in irregular loading[C]. Proc. 8th WCEE, 1984. 7-14.
 [2] Nagase H, Ishihara K. Effects of load irregularity on the cyclic behavior of sand [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1987, 6(4): 239-248.
 [3] 谢定义. 土动力学[M]. 西安：西安交通大学出版社，1988.
 [4] Yuan X M, Sun R, Meng S J. Effect of asymmetry and irregularity of seismic waves on earthquake-induced

differential settlement of buildings on natural subsoil [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(2): 107-114.

[5] Seed H B, Idriss I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential [J]. Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1981, (SM9): 1249-1273.

[6] 郁寿松, 石兆吉. 土壤震陷试验研究[J]. 岩土工程学报, 1989, (4): 35-44.

[7] 孟上九. 不规则动荷载下土的残余变形及建筑物不均匀震陷研究[D]. 哈尔滨: 中国地震工程力学研究所, 2002.

[8] 孟上九, 袁晓铭, 孙锐. 建筑物不均匀震陷机理的振动台实验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, (6): 747-751.

[9] Martin G R, Finn W D L, Seed H B. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1975, 101(GT5): 423-438.

[10] 孙锐, 袁晓铭, 韩俊伟, 赵惠, 张尚盈. 全自动地震波输入动三轴装置指标和功能测试[J]. 地震工程与工程振动, 2002, (3): 100-105.

Semi-empirical formula for evaluating the residual strain of cohesive soils under irregular earthquake loading

YUAN Xiao-ming¹, MENG Shang-jiu^{1,2}, SUN Rui¹

(1. Institute of Engineering Mechanics, Harbin 150080, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A new semi-empirical formula for evaluating the residual strain of cohesive soils under random earthquake loading is derived by using incremental method and establishing the incremental model. Instead of transforming the irregular seismic loads into the uniform sinusoidal loads with the certain cyclic number, the new formula can attain the real process of the residual strain of soils by directly calculating the irregular dynamic stress. First, the frequency characteristics of the input seismic waves are neglected and the input waves are filtered to form a series of cyclic load with different amplitude. Then, the residual strain is calculated by using the incremental method of the cycle-by-cycle accumulation. For each cyclic dynamic stress, the incremental strain is obtained in terms of the first partial derivative of the known formula for the uniform load with respects to the cyclic number. Also, the dominant effect of the compression stress on the increasing of the residual strain is considered in the formulation of the model. The validity of the formula is verified by the model tests.

Key words: irregular earthquake loading; residual strain in soil; semi-empirical formula; dynamic triaxial test