

不规则动荷脉冲波对砂土 液化特性的影响

谢定义 巫志辉

(陕西机械学院水利水电学院, 西安)

提 要

本文介绍了在气动式振动三轴仪上进行的不规则动荷脉冲波试验成果, 探讨了不规则波下饱和砂土变形和孔压的发展特点, 分析了不同波幅脉冲所具有的波序效应, 并对锡德和石原等的简化处理方法进行了检验和述评。

一、概 论

在土工抗震设计中, 我们所遇到的地震荷载是一种随机的、不规则作用的动荷脉冲波。正确考虑土在这类波作用下的动力特性是一个急待解决的问题。国外已有不少人进行了广泛的研究^[1-8]。但是, 在国内还很少有这方面的研究成果。本文拟介绍笔者利用气动式三轴仪对标准砂土在不规则动荷脉冲波作用下所进行的试验研究工作, 进一步揭示不规则波下砂土变形和孔压发展的特点, 并对国外现有的一些处理方法进行检验和述评。

目前, 对不规则波研究的中心问题是寻求一种表达不规则波随机性的有效方法, 并在这个基础上确定动强度(在一定振次下产生一定破坏应变所需的剪应力)的变化规律, 为土工抗震设计提供正确的土性指标。从这个目的出发, 现有方法之一是将不规则波概化为一种等效谐波, 使这种波在相应幅值及循环次数作用下能够对土产生等效于不规则波的影响。显然, 这样的等效谐波可以在应力幅值和循环次数的不同组合下得到。应力幅值愈小, 需要的振次愈多。西特(Seed)和伊德里斯(Idriss)根据对强震记录的分析得出, 地震剪应力波的平均剪应力 τ_{av} 约为最大剪应力 τ_{max} 的65%。当取等效谐波的幅值为 $\tau_e = 0.65\tau_{max}$ 时, 相应的等效循环次数, 对于7, 7.5和8级地震分别为10次、20次和30次。安拉卡依(Annakai)和李(Lee)以破坏意义上的等效(即达到相同的破坏应变)为基础(图1), 得出了不规则波等效于谐波幅 τ_e 时的循环数 \bar{N}_f 为

$$\bar{N}_f = N_{ef} \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_{if}} \quad (1)$$

式中 N_{ef} ——等效谐波在 τ_e 时的破坏循环次数;
 N_{if} ——以不规则波某脉冲幅 τ_i 为等幅谐波时的破坏循环次数;
 N_i ——不规则波中等于 τ_i 的脉冲次数。

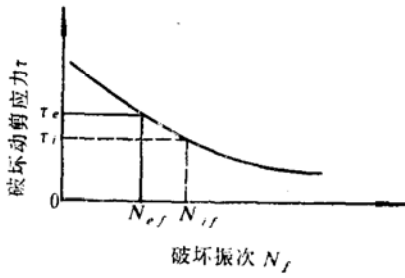


图1 破坏动剪应力 τ 与破坏振次的关系

现有方法之二是将等幅谐波下某一破坏振次 N_f (一般为20次)的抗液化剪应力比 R_l (等于 τ_d/σ_0) 乘上某一个修正系数 C_2 , 以等效于不规则波下发生相应破坏的动应力比(等效强度) R_{max} , 即

$$R_{max} = C_2 R_l \quad (2)$$

对此, 石原(Ishihara)和叶田(Yasuda)进行了系统的工作。初期(1972)他们考虑到随机波的不同变化, 把不规则波区分为冲击型波和振动型波, 并在动三轴仪上,

利用电液伺服系统, 将1965年日本十胜冲地震时记录的十二种波型分别施加到砂样上, 测定出不同波型作用下的最大动剪应力与孔隙水压力。研究指出, 如以等幅动应力 σ_{dp} 的谐波作用20周破坏为基础, 则不规则波作用时破坏动应力的比值 $\sigma_{dp}/\sigma_{dmax}$, 对冲击型波为0.47~0.61, 平均为0.53, 即 $C_2 = \frac{1}{0.53}$, 对振动型波为0.56~0.65, 平均为0.61, 即 $C_2 = \frac{1}{0.61}$ 。

因谐波作用测得的破坏应力比为0.165, 故冲击型波作用时的破坏应力比为0.165/0.53, 振动型波作用时为0.165/0.61, 两种波型均显示出较等效谐波为高的抗液化强度。后来, 石原和叶田对1964年新泻地震的记录也进行了类似的实验, 综合得出: 冲击型波和振动型波对应的强度修正系数 C_2 分别为1/0.55和1/0.70。到了1975年石原和叶田发表了他们在三轴仪及扭剪仪上进行的试验结果, 指出, 强度修正系数 C_2 对于同一种土和起始应力条件, 取决于荷载的随机性, 对于不同土还取决于该土在等幅谐波条件下动强度曲线的特性(用 $\log R_l - \log N_f$ 曲线的斜率 b 表示)。同样, 当以 N_f 等于20次为基础时, 可以得出:

$$C_2 = \left[\frac{1}{20} \sum_{i=1}^n \left(\frac{L_i}{L_{max}} \right)^{-\frac{1}{b}} \right]^b \quad (3)$$

式中 L_i ——不规则波中某一应力值;

L_{max} ——不规则波中最大应力值(图2)。

为简化计, 可将不规则应力按 L_i/L_{max} 为1.0~0.9, 0.9~0.8, 0.8~0.7, …… , 0.2~0.1和<0.1的序列分为10级, 计出各级内的荷载脉冲数 n_1, n_2, \dots, n_{10} , 则式(3)可以写为:

$$C_2 = \left[\frac{1}{20} \left\{ (1.0)^{-1/b} + n_1(0.95)^{-1/b} + n_2(0.85)^{-1/b} + \dots + n_9(0.15)^{-1/b} + n_{10}(0.05)^{-1/b} \right\} \right]^b \quad (4)$$

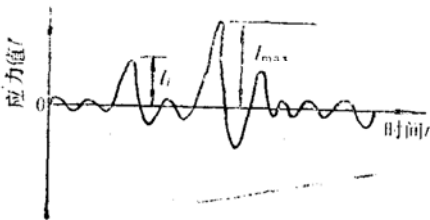


图2 不规则动荷载脉冲波的应力值随时间的变化

对于不同地震应力波按式(4)计算的结果表明, C_2 均大于1, 变化范围为1.41~2.20。

可以看出, 上述两类方法均以累积破损概念为基础, 即认为材料所受的破损效应只取决于应力脉冲的大小, 而与应力脉冲的作用顺序(或应力路径)无关。但是, 美国沈智刚及哈德尔(L.F. Harder), 里莫特(J. L. Vrymoed), 贝内特(W.J. Bennett)等人的实验表明^[8], 不规则荷载模式中应力

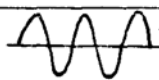
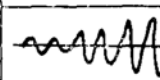
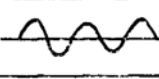
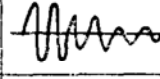
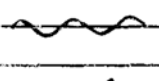
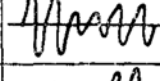
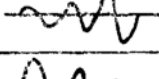
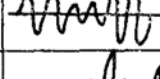
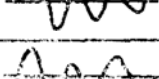
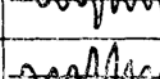
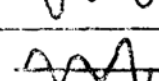
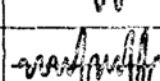


脉冲的位置和顺序对砂土的液化势是有影响的。较大的应力脉冲, 不管它的位置如何, 都产生较大的孔压增加。应力路径的这种影响, 对低密度砂很小, 密度愈高愈为显著(中密砂可达34~54%, 密实砂可达36~72%)。而较小的应力脉冲, 当其在大的应力脉冲之后出现时, 会引起与应力脉冲大小不成比例的破坏作用, 当其在大的应力脉冲之前出现时, 将有增大抗液化强度的作用。

为了进一步探讨不规则动荷脉冲波的影响, 下面将对笔者的实验成果予以介绍和讨论。

二、实验方案

实验采用福建标准砂($d_{60} = 0.4\text{mm}$, $C_u = 1.59$, $\gamma_{\text{max}} = 17.05\text{kN/m}^3$, $\gamma_{\text{min}} = 14.29\text{kN/m}^3$), 试样容重控制在 $\gamma_d = 15.6\text{kN/m}^3$ (相应的 D_r 为0.53)。试验时先在气动式三轴仪上施加限制压力 σ 。进行均压固结, 再按预定的动荷波型施加动应力, 在饱和和不排水条件下, 测定试样应变和孔压的变化过程。根据试验研究的需要, 动荷选用两组模式, 一组研究波序的影响, 另一组研究不规则波综合作用的影响。为此在第一组动荷试验中, 先选定46, 29和20kPa三种动应力幅, 分别组成谐波*a*, *b*和*c*三种动荷波型, 依次以A-1, A-2, A-3表示。再按不同动应力幅单脉冲和双脉冲的不同组合, 分别组成B-1, B-2, B-3, B-4以及C-1, C-2, C-3, C-4共两类八种波型。第二组试验选择冲击型、振动型和混合型三种波型, 分别表示为D-1, D-2及D-3。这样, 可以通过对以上14种波型(表1)作用下不同试验成果的对比如分析来探讨不规则波的作用特点。不规则荷载脉冲波可按其频幅要求, 用手控制荷载定值器的开度使压力表达达到预定峰值的方法循环施加。如以后看到的记录波型所示, 这种方法简便易行, 而且能够满足试验要求。

表1

编号	荷载波型	特点	编号	荷载波型	特点
A-1		<i>a</i> 谐波	C-1		<i>cba</i> 组循环波
A-2		<i>b</i> 谐波	C-2		<i>abc</i> 组循环波
A-3		<i>c</i> 谐波	C-3		<i>acb</i> 组循环波
B-1		<i>cba</i> 谐波	C-4		<i>bca</i> 组循环波
B-2		<i>abc</i> 谐波	D-1		冲击型波
B-3		<i>acb</i> 谐波	D-2		振动型波
B-4		<i>bca</i> 谐波	D-3		冲击、振动混合型波

三、试验成果

(一)不规则应力脉冲波作用的波序效应

图3到图6示出了几类波型下典型的试验记录成果。由图3可以看出,小幅谐波(A-1型)在振次220以内对试样并不引起附加应变,在试样内发展的孔压比为0.44,可以被认为是一个基本上无影响的动力荷载;中幅谐波(A-2型)有较明显的作用,大幅谐波(A-3型)在振次为4时已使孔压比接近1.0,应变达到4.0%,反映出液化破坏的特性。等效谐波作用下土的动强度曲线如图7所示,双对数作图时的直线斜率 b 等于-0.22。

如果根据B型各类荷载波型的记录(如图4)将 a, b, c 不同组合出现一次称为组波作用一次,即 $(N)=1$,按组波的循环次数 (N) 作出应变与孔压的反应过程线(如图8),则当 $(N)=1$ 时,应变和孔压的反应值如表2所示。这些反应值和A型各波 $N=1$ 时相应的反应组合值的对比表明:对于应变,其峰值的大小主要决定于大应力脉冲的作用;对于中小应力脉冲,当其在应力脉冲之前时,中脉冲愈早,反应愈大,小脉冲愈早,反应愈小;当中小脉冲

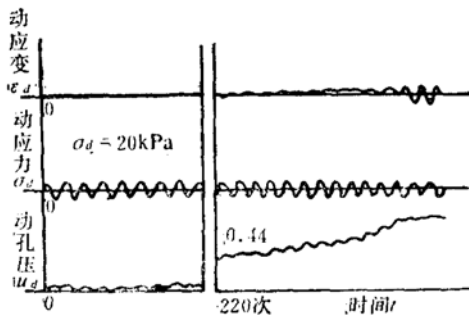


图3 A-1型波下动应变,动应力与动孔压的过程线

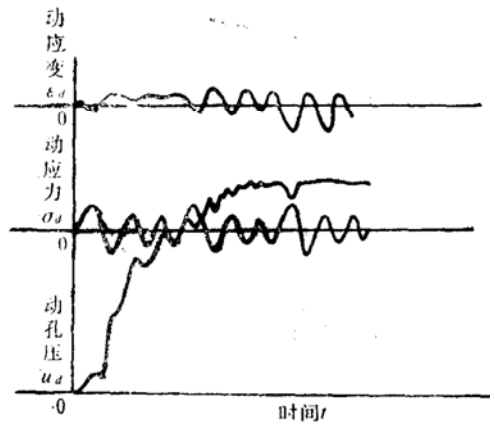


图4 B-2型波下动应变,动应力与动孔压的过程曲线

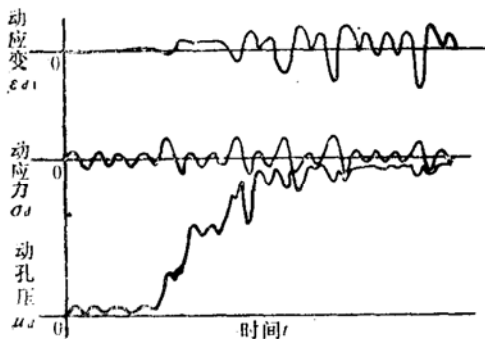


图5 C-3型波下动应变,动应力与动孔压的过程曲线

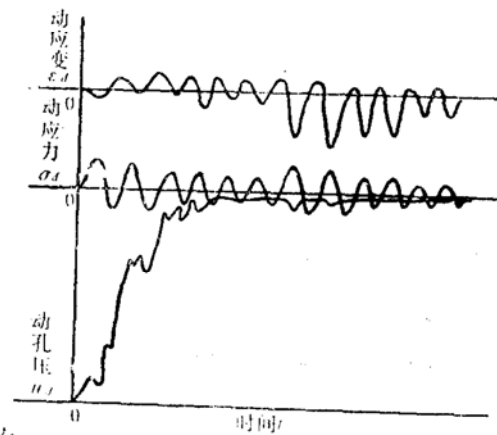


图6 D-3型波下动应变,动应力与动孔压的过程曲线

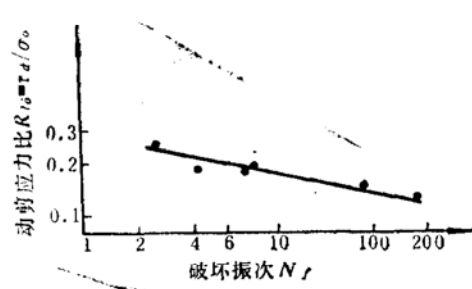


图7 动剪应力比与破坏振次的关系

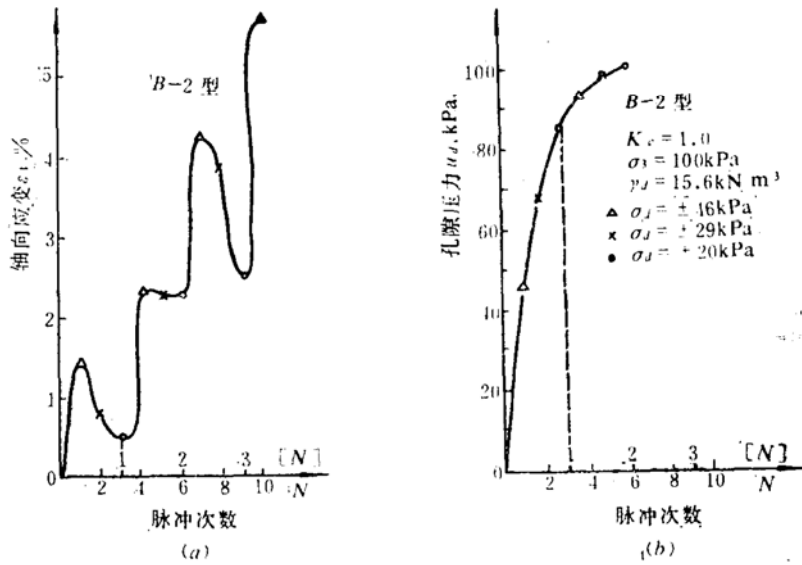


图8 a) B-3型波下轴向应变与脉冲次数的关系
b) B-2型波下动孔压与脉冲次数的关系

表2 (N) = 1 的 反 应 值

荷 载 类 型	应 变 (%)			孔 压 比	
	峰 值	谷 值	终 值	峰 值	终 值
B-1	0.9	0.05	0.9	0.20	0.20
B-2	1.4	0.50	0.5	0.85	0.85
B-3	1.3	0.25	1.1	0.80	0.30
B-4	1.0	0.06	1.0	0.30	0.30
组合a+b+c	1.2 + 0 + 0 = 1.2			0.20 + 0 + 0.05 = 0.25	

在大脉冲之后时，中脉冲愈近反应愈大，小脉冲愈近，反应愈小；对于一个脉冲组作用完毕后最终的应变反应值，当大脉冲在前时，如末脉冲愈小，则终值愈小，当大脉冲在后时，如首脉冲愈小，则终值愈小；对于孔压，每个脉冲都使孔压产生相应的累积增长。因此终值等于峰值，且其大小十分明显地取决于脉冲的波序，其规律是：大脉冲愈早，孔压愈高，大脉冲居于首末两处的孔压分别为0.80~0.85和0.2~0.3。如大脉冲前有中小脉冲，则较大者愈

前, 反应愈大。如大脉冲后有中小脉冲, 则较大者愈近, 反应愈大。

如果再对继续作用的组波循环次数, 即(N)等于 2, 3, 4 的情况加以考察, 则表 3 和表 4 表明, 在 B 型各脉冲荷载波之间仍然反应出与表 2 相同的规律, 仅在孔压比约等于 1 时, 出现反常现象, 即 $B-3$ 的应变峰值反而大于 $B-2$ 的应变峰值, 反映出孔压上升到较大值时小脉冲作用有更为剧烈的影响。

综上所述, 可以将不规则应力脉冲波作用的波序效应概括如下:

- 1) 大波效应: 应变和孔压的反应主要取决于大应力脉冲的作用;
- 2) 首波效应: 在大应力脉冲前, 中应力脉冲出现愈早, 反应愈大;
- 3) 连波效应: 在大应力脉冲后, 中应力脉冲相连愈早, 反应愈大;
- 4) 缓冲效应: 大应力脉冲在前时, 后连的应力脉冲愈小, 反应的终值愈小;
- 5) 强化效应: 大应力脉冲在后时, 前行的应力脉冲愈小, 反应的终值愈小;
- 6) 加速效应: 孔压发展较高时, 小应力脉冲的作用会较显著地加速变形破坏的进程。

表 3 (N) = 2 时的反应值

荷载类型	应变 (%)				孔压比		
	始值	峰值	谷值	终值	始值	峰值	终值
$B-1$	0.9	0.7	0.05	0.70	0.20	0.45	0.45
$B-2$	0.5	2.3	2.20	2.20	0.85	1.00	1.00
$B-3$	1.1	2.6	2.15	3.20	0.80	0.97	0.97
$B-4$	1.0	1.3	0.25	1.30	0.30	0.54	0.54

表 4 (N) = 3、(N) = 4 的反应值

荷载类型		应变 (%)			孔压比		
		始值	峰值	终值	始值	峰值	终值
$B-1$	(N) = 3	0.8	2.0	2.0	0.65	0.95	0.95
	(N) = 4	0.7	0.8	0.8	0.45	0.65	0.65
$B-2$	(N) = 3	2.5	5.6	/	1.00	1.00	1.00
	(N) = 4	2.2	2.4	2.5	1.00	1.00	1.00
$B-3$	(N) = 3	3.8	5.7	2.5	1.00	1.00	1.00
	(N) = 4	3.2	4.8	3.9	0.97	1.00	1.00
$B-4$	(N) = 3	3.0	4.8	2.4	0.97	1.00	1.00
	(N) = 4	1.3	3.0	0.7	0.54	0.97	0.97

由图 9、10 中各类荷载脉冲波的发展和对比, 可以明显地看出以上各种效应的实际效果。同样, 对于 C 类动荷载波型下的应变和孔压成果 (图 11 和图 12), 如以 (N) = 1 的反应为例 (表 5), 则亦可更明显地看出波序效应的作用。

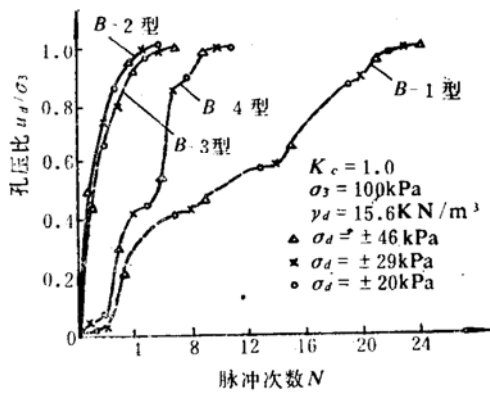


图9 不同B型波下孔压比与脉冲次数的关系

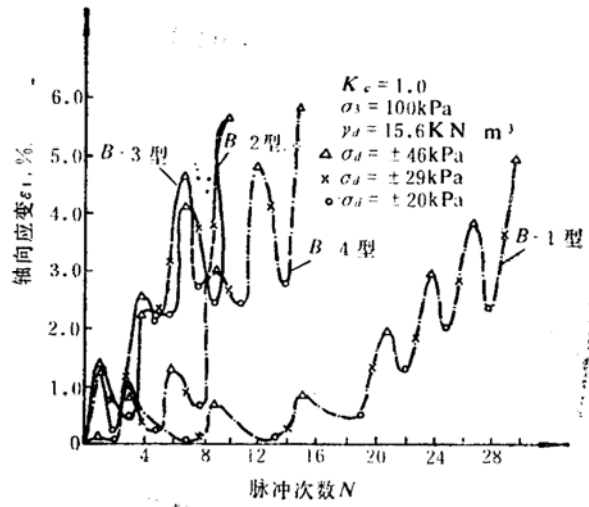


图10 不同B型波下轴向应变与脉冲次数的关系

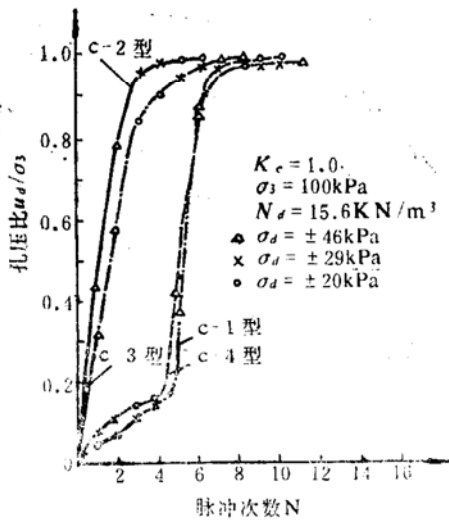


图11 不同C型波下孔压比与脉冲次数的关系

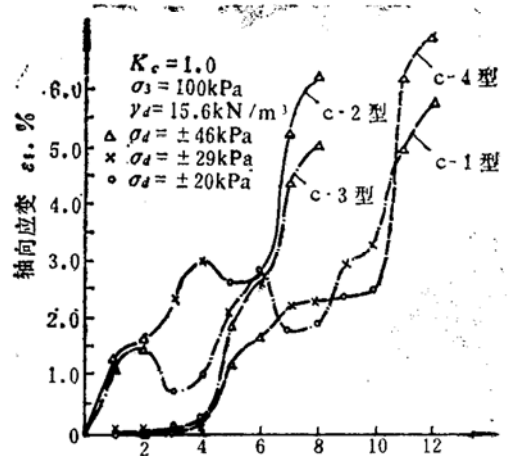


图21 不同C型波下轴向应变与脉冲次数的关系

表5

(N)=1 时的反应值

荷载类型	应变 (%)	孔压比
C-1	0.05-0.2-2.8	0.07-0.14-0.85
C-2	1.6-3.0-2.7	0.78-0.98-1.0
C-3	1.4-1.0-2.7	0.59-0.90-0.975
C-4	0.08-0.22-1.7	0.11-0.15-0.87

(二)不规则应力脉冲波的基本类型

从不规则应力脉冲波的波序效应分析，当大应力脉冲的幅值大小和其它应力脉冲相差很

大时，大波效应起控制作用，前后的中小应力脉冲所引起的强化效应、缓冲效应和在孔压发展较高时的加速效应都反映出相对较弱的影响。大应力脉冲的幅值和邻级应力脉冲的幅值相差不大时，连波效应显著，首波效应次之，连波综合的结果反映出类似大波效应的影响，小应力脉冲的缓冲效应，加速效应穿插发挥各自的影响。由此可见，对不规则应力脉冲的类型较粗略地划分为冲击型波和振动型波进行研究，能够在相当程度上反映波序主要特征的作用。文献资料中对这两种波型均得到较等幅谐波为高的动力稳定性也是容易理解的。当冲击型波连续多次作用时，短期的冲击型波构成了整体上的振动型波。在图13所示的脉冲波中，

如果只考虑前七个脉冲波，就可以看作是冲击型波，但就全部波型来看，又可以看作振动型波。由此可见，区分上述两种波型，除一般的对比外，在机理分析上并没有实质性的差别。它们的基本影响都是各种波序效应的组合交替。以图13为例，脉冲A、B、C、D所对应的变形和孔压的迅速上升都反应了大波效应，其中脉冲A的变形较小，反应了它前面四个小脉冲的强化效应，而B、C、D几个脉冲引起的变形连续增大，反映了连波效应，它们中间小脉冲变形反映了加速效应。从孔压上升的变化可以看出，当任一脉冲的升荷和降荷分别和试样所处的受压和受拉相对应时，孔压的增幅较大，反之，则较小，而当出现破坏后，不但不增，反而下降。不规则脉冲波的不同效应，还可以由图14,15,16及17的不同成果分析看出。

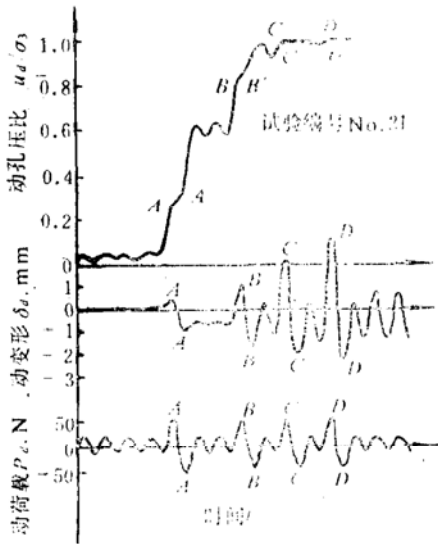


图13 给定动荷载波型下动孔压比与动变形的过程曲线

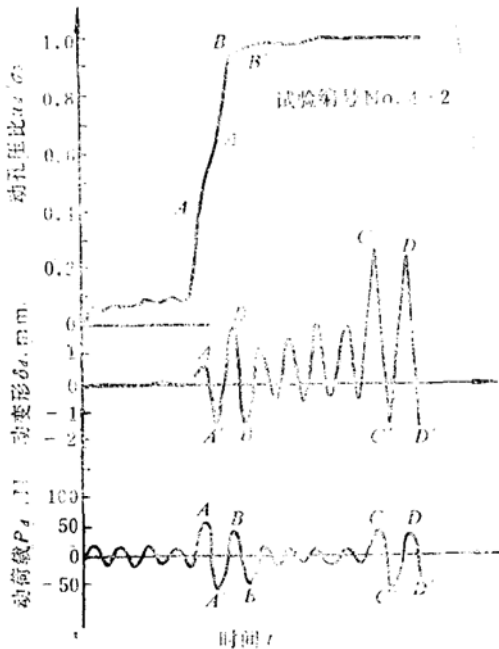


图14 给定动荷载波型下动孔压比与动变形的过程曲线

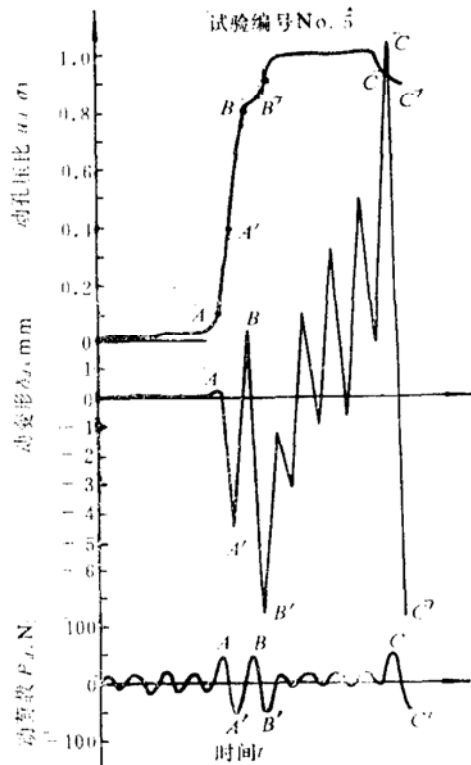


图15 给定动荷载波型下动孔压比与动变形的过程曲线

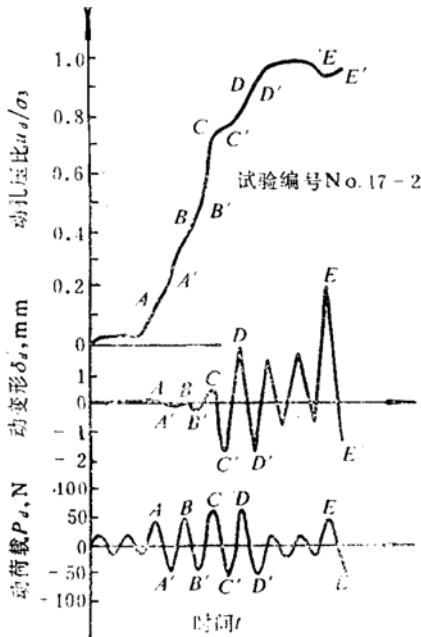


图16 给定动荷载波型下动孔压比与动变形的过程曲线

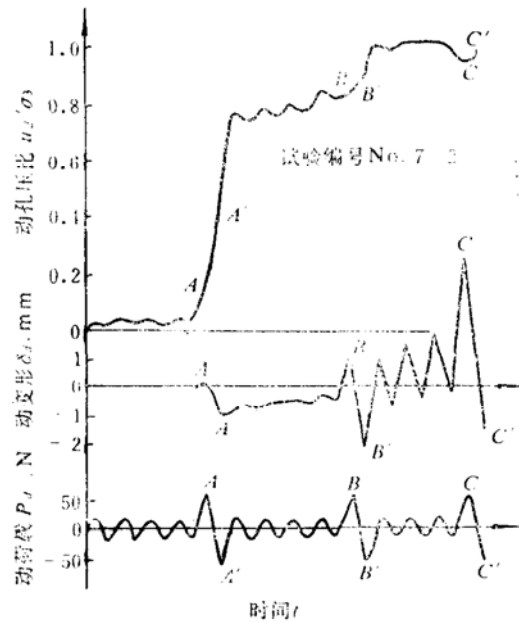


图17 给定动荷载波型下动孔压比与动变形的过程曲线

四、实用问题

现在已经明确，不规则应力脉冲波的作用与应力脉冲波的构成有很大的关系。再加上起始密度及固结应力状态的变化，就成了一个十分复杂的问题。因此，目前在解决实用问题时所用的等效谐波法和等效强度法都只能视为一种简化处理的途径。关键问题在于“等效”两字。在确定等效循环数或等效修正系数时必须考虑由不规则应力脉冲波的不同构成所引起的特性效应。为了了解现有方法的实用程度和适用范围，下面拟就实验的基本成果，进行相应的检验。

对于等效谐波法，可首先对不同的荷载类型按一定的破坏标准(如 $2e_1 = 5\%$ 或 $u_d = \sigma_3$)求出实验所得的破坏循环次数 N_f ，然后将这个破坏循环次数内的不规则脉冲波按 $\tau_e = 0.65\tau_{dmax}$ 转换为等幅谐波，并求出与之相应的等效循环次数 \bar{N}_f 。最后，利用 $\tau_{df} - N_f$ 曲线或按 \bar{N}_f 查取相应的 τ_{df} ，从而求出 τ_{df}/τ_e ，或按 τ_e 查取相应的 N_{ef} ，从而求出 \bar{N}_f/N_{ef} 。显然，如 $\tau_{df}/\tau_e = 1$ ，或 $\bar{N}_f/N_{ef} = 1$ ，则表明等效谐波法与试验结果具有一致性。表6示出了这种计算的结果。可以看出 τ_{df}/τ_e 一般在1.00附近，平均值为1.030，但是 \bar{N}_f/N_{ef} 值却与1相差较远，变化也较大，平均值为0.945。造成这种矛盾情况的主要原因是试样的 τ_{ef} 曲线相当平缓，此时，相当大的振次差别在 τ_{df} 上反应甚微，或者说， τ_{df} 对有效循环次数的变化并不敏感，即平缓形的动强度曲线掩盖了应力波的构成特点。由此可见，等效谐波法较适用

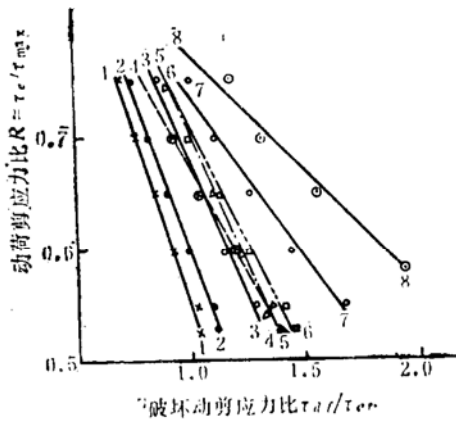
表 6

试验 编号	荷 载 类 型	实验的破 坏次数 N_f	等效剪应力 $\tau_e = 0.65$ $\times \tau_{max}$	相应于谐波 的破坏振次 N_{ef}	不规则波的 等效循环次 数 N_f	τ_{df}	τ_{df}/τ_e	\bar{N}_f/N_{ef}
(1)	B-1	30	0.150	23	73.9	0.117	0.780	3.210*
(3)	B-2	9.3	0.150	23	23.9	0.149	0.993	1.039
(4)	B-3	9.4	0.150	23	24.5	0.148	0.987	1.065
(5)	B-4	14.9	0.150	23	29.0	0.143	0.953	1.261
(8)	D-1	12	0.150	23	29.5	0.142	0.947	1.233
(9)	C-2	6.8	0.150	23	19.4	0.155	1.033	0.843
(10)	C-3	8.0	0.150	23	19.7	0.153	1.026	0.857
(12)	C-4	11.5	0.150	23	26.3	0.146	0.973	1.143
8	D-1	11	0.166	23	18.1	0.157	0.946	0.787
7-2	D-1	11	0.178	10	5.41	0.149	1.113	0.541
5	D-2	7.0	0.166	14	4.75	0.202	1.217	0.339*
16-2	C-4	7.0	0.189	6.6	5.9	0.196	1.037	0.894
17-2	C-1	7.0	0.186	7.6	4.9	0.208	1.118	0.645
13	B-1	13	0.169	12	15.5	0.162	0.959	1.292
19-2	B-2	5.0	0.186	7.6	4.3	0.210	1.129	0.632
4-2	D-2	7.0	0.193	6	2.04	0.245	1.270	0.340
						平均	1.032	0.945

注: *因过高或过低, 在求取平均值时剔除。

于动强度曲线平缓的土性条件。已有的实验表明, 动强度曲线($\log \tau_{df}/\sigma_0 - \log N_f$ 曲线)的斜率与试样的起始密度和起始固结应力有关。相对密度 D_r 愈大, 固结应力比 K_0 愈高, 曲线的斜率愈大。因此, 在这种情况下等效谐波法的适用性较差。

对不同波型的各次试验设不同 R 值, 用式 $\tau_e = R\tau_{max}$ 计算对应的 τ_{df}/τ_e , 则可得出图18的成果。可以看出, R 愈大, 对应的 τ_{df}/τ_e 愈小, 不同波型对应于 $\tau_{df}/\tau_e = 1$ 的 R 值并非都是0.65。如果把各种波型作用于试样破坏以前的各应力脉冲的幅值求取其平均值 $\bar{\sigma}_d$, 并求出它对第一个应力脉冲 σ_{d1} 之比 $\lambda = \sigma_{d1}/\bar{\sigma}_d$, 则这个比值可以在一定程度上反映各应力脉冲组首波变化的情况。此时, 由图19中 $\tau_{df}/\tau_e = 1$ 时的 $R - \lambda$ 关系可知, R 接近0.65几个试验点所对应的 λ 都较小。这就说明, 西特的方法比较接近于小应力脉冲在前的情况。因此, 对于地震作用的波型, 等效谐波转换的方法还是比较接近实验结论的。



线号	试验号	荷载 变形
1	4-2	D-2
2	7-2	D-1
3	8	D-1
4	18	B-1
5	5	D-2
6	17-2	C-1
7	16-2	C-3
8	19-2	B-2

图18 不同动荷波型下动荷剪应力比与破坏动剪应力比的关系

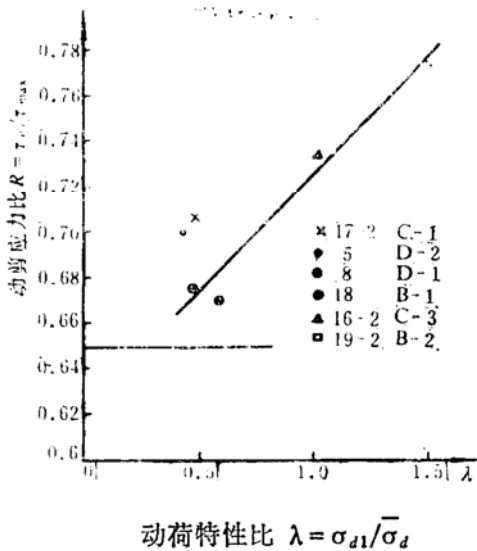


图19 不同动荷波型下动荷剪应力比与动荷特性比的关系

对于等效强度法，核心问题是确定应力等效修正系数 C_2 。石原等人在一系列试验基础上指出， C_2 的变化范围为1.41~2.00，为了进行检验，我们首先由图7求出了 $\log R$ （即 τ_f / σ_0 ）- $\log N_f$ 曲线的斜率 b 为-0.22以及 R_{120} 为0.185。然后，对不同荷载波型，不同密度条件下的9个试验成果进行了计算（表7）。所得的 C_2 值为1.42~1.70，全部处在石原的数据范围内，说明修正系数具有比较稳定而窄狭的变化范围。

如果再按等效强度法计算出 $R_{max,2}$ 值（等于 $C_2 \cdot R_{120}$ ）并将其和等效谐波法求得的 $R_{max,1}$ （等于 $0.65\tau_c / \sigma_0$ ）对比（表7），则可发现，后者大于前者4~31.1%，较大的差别发生在大脉冲较早及非冲击型波情况（B-2，C-3，C-1等），较小的差别发生在相反的情况（B-1，D-1，D-2）。

表7

试验编号	8	18	19-2	17-2	16-2	7-2	5	29	21
荷载类型	D-1	B-1	B-2	C-1	C-3	D-1	D-2		D-1
修正系数 C_2	1.485	1.418	1.645	1.571	1.503	1.688	1.720	1.689	1.560
$R_{max,2}$	0.230	0.220	0.255	0.244	0.234	0.262	0.267	0.262	0.242
等效谐波计算的 $R_{max,1}$	0.241	0.249	0.323	0.320	0.301	0.306	0.311	/	/
比值 $\frac{R_{max,1}}{R_{max,2}}$	1.048	1.109	1.267	1.311	1.286	1.168	1.165	/	/

五、结 论

1. 不规则动荷脉冲波下饱和砂土的液化特性与等幅谐波下有显著不同。目前在解决不规则动荷脉冲波作用条件下砂土液化问题所用的方法均建立在累积破损概念基础上, 未考虑不规则各荷载脉冲波波序的影响, 使它们仅能作为一种经验方法, 在应用上受到一定的局限性。

2. 现有的实验研究表明, 不规则动荷脉冲波中不同波幅作用的顺序对土应变和孔压的发展都显示出复杂的影响, 其中大脉冲具有大波效应, 中脉冲具有首波效应和连波效应, 小脉冲具有强化效应、缓冲效应和加速效应, 视脉冲的构成特性和土的起始强度(决定于土的粒度密度和固结应力状态)而出现不同的综合效应。

3. 目前在研究不规则波影响时经常粗略地把它分为两种基本波型: 冲击型和振动型。这种划分能够在相当程度上反映波序主要特征的作用。

4. 在解决实际问题时, 等效谐波法(H·B·锡德)一般可较好地适用于土的动强度曲线比较平缓(土的密度较小, 固结应力比接近于1)而不规则荷载脉冲由小到大具有冲击类型的情况。由石原和叶田提出的等效强度法一般得出了与等效谐波法相近的结果。但对于大脉冲较早或振动型波, 宜用石原的方法。

参加本实验研究工作的还有周建华和苟俭勤同志

参 考 文 献

- [1] 地震波的不规则性和初期约束压对液化的影响, 地基的地震效应和砂土液化译文选译, 译自《土与基础》, 1975, No. 6.
- [2] 文土立坂·进叶田, 十四夫岩前, 健一井时, 在循环荷载和任意荷载下砂的归一化不排水动强度, 安徽水科所译自《Soil and Foundations》Vol. 20, 1980. 9, No. 3.
- [3] 沈智刚, Harder, L. F., Vrymod, J. L. and Bennett, W. J., 随机荷载下砂的动力反应, 国外地震工程, 1981. 3. 中国科学院工程力学研究所译。

Effect of Irregular Dynamic Impulse History on Liquefaction Characteristics of Saturated Sand

Xie Dingyi and Wu Zhihui

(Shanxi Institute of Mechanical Engineering, Xian)

Abstract

In this paper the experimental results of saturated sand under irregular dynamic impulse history are presented. Experiments are conducted on the pneumato-dynamic apparatus. On the basis of testing data developing characteristics of deformation and pore water pressure and six kinds of order effects of different impulse are analysed. Finally, the simplified methods suggested by B. H. Seed and Ishihara are checked and discussed.