

土壤动力特性· 液化势及危害性评价

石兆吉 王兰民 著



地震出版社

地震科学联合基金 (No. 910001, 930026, 91155, 94093)

国家自然科学基金 (No. 59679014)

资助课题

地震科学联合基金资助出版 (No. 597028)

土壤动力特性·液化势及 危害性评价

石兆吉 王兰民 著

地震出版社

1999

内 容 简 介

本书分两篇。上篇为黄土,研究随机地震波荷载下黄土的本构关系、震陷、强度等动力特性,以及黄土液化机理和液化势评价。下篇为砂土,研究液化判别可靠性及其综合评价,以及考虑液化土层双重作用的液化危害性评价原理和方法。

本书可供从事地震工程的设计、科研、勘察、施工、管理等工程技术人员及有关大专院校师生参考。

土壤动力特性·液化势及危害性评价

石兆吉 王兰民 著

责任编辑:姚家榴

责任校对:张晓梅

*

地震出版社出版

北京民族学院南路9号

北京地大彩印厂印刷

*

787×1092 1/16 7.875印张 202千字

1999年11月第一版 1999年11月第一次印刷

印数 001—600

ISBN 7-5028-1688-7/P·1014

(2181) 定价:13.00元

前 言

地震工程、岩土工程、黄土动力学等学科至今已有长足的进步,为发展我国国民经济发挥了重要作用,作者有幸参与了部分工作,又得到地震科学联合基金会的鼓励和支持,故有机会对以下几个主要问题进行讨论。

1. 黄土动力特性。20年来,我国对黄土的动力特性作过大量的研究,取得颇有价值的成果,但是,多是在等幅循环荷载作用条件下进行的,与地震波荷载作用相差颇大。因此,有必要建立随机地震波荷载下黄土动力特性的新理论,解决我国原状黄土的动本构模型、动模量阻尼比、动应变和动强度中的破坏应变标准等问题,为工程抗震和震害预测预防提供更加合理、准确的黄土动力参数。

2. 液化势。我国对砂土液化的原理、判别方法等已作过大量研究,目前已存在40个以上的液化判别式或方法,如何看待这一情况?其可靠性如何确定?有无必要再建立类似的判别式?对这些问题,应有一个合理的考虑和提出一些可行的方法。

因土结构的特殊性,黄土液化与砂土液化可能有差别,其液化机理、液化特点、判别标准等似乎也是一个值得深入考虑的问题。作者得出的结果希望有益于大家的思考。

3. 液化危害性评价。相对讲,危害性评价的研究比较落后,目前实用上只局限于震害指数方法,存在着明显的不合理。液化影响的双重性,虽早已被人公认,但因其问题的复杂性,至今尚未提出一种定量的方法,作者对此作了一点探索,取得一些结果。

很明显,通过对已有宏观资料和室内试验结果的再整理和分析,专门的试验、计算、分析等手段对上述几个问题进行了研究,所得结果对今后的研究可能有些帮助,抛砖引玉吧。这些工作主要是在地震科学联合基金会和国家自然科学基金会的资助下完成的,在此一并表示感谢。

本书的上、下篇分别由王兰民、石兆吉负责完成。还应感谢各题目组成员:张振中、王峻、李兰、段汝文、郁寿松、孙锐、袁晓铭、张荣祥等。

作者

1999年6月

目 录

上 篇 黄 土

第一章 地震波作用下黄土的动力特性	(1)
第一节 试验设备、地震波荷载和试样.....	(2)
第二节 地震波作用下的黄土动力试验方法.....	(4)
第三节 黄土的弹塑动本构模型.....	(12)
第四节 黄土的震陷.....	(17)
第五节 不同地震波荷载对黄土动力特性的影响.....	(27)
第六节 动强度参数在黄土斜坡地震稳定性分析中的应用.....	(30)
第二章 黄土液化	(36)
第一节 试验用荷载时程、试样和试验方法.....	(37)
第二节 黄土液化机理与标准.....	(39)
第三节 黄土液化的产生条件和影响因素.....	(43)
第四节 孔压和应变增长模型.....	(47)
第五节 黄土液化的预测方法.....	(49)

下 篇 砂 土

第三章 砂土液化势	(58)
第一节 液化判别可靠性.....	(58)
第二节 砂土液化判别.....	(65)
第四章 砂土液化影响的双重性	(70)
第一节 宏观经验分析.....	(70)
第二节 大型振动台试验.....	(79)
第三节 计算分析方法和条件.....	(86)
第四节 计算结果分析.....	(93)
第五节 实例计算.....	(107)
第五章 液化危害性评价	(109)
第一节 考虑计算震陷值和宏观经验的液化危害性评价.....	(109)
第二节 考虑液化双重性的液化危害性评价.....	(114)

上篇 黄 土

第一章 地震波作用下黄土的动力特性

黄土是一种多孔隙、弱胶结的第四纪沉积物，它广泛分布于亚洲、欧洲、北美和南美等 10 多个国家。在我国，黄土主要分布于黄河中、下游的甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和河北诸省，在东北和新疆也有少量黄土分布，覆盖面积达 64 万平方公里，约占我国领土面积的 6.6%、世界黄土覆盖面积的 49%。特别是我国西北地区，黄土分布广，厚度大，地层完整，地貌类型多而复杂，为世界上黄土最为发育的地区。

由于黄土微结构所具有的独特动力性质，使其表现出很高的地震易损性。在中国中西部黄土地区，历次强震($M_s \geq 8$: 6 次, $M_s \geq 7$: 22 次, $M_s \geq 6$: 52 次)都曾引起过严重的地震滑坡、震陷和液化等黄土地震灾害,人口伤亡达百万人以上。甚至一些小的地震也在震中区和丘陵地带引起许多房屋和黄土窑洞变形或倒塌(例如 1986 年运城 3.1~3.7 级地震群)。在前苏联, 1989 年塔吉克 5.5 级地震曾引起饱和黄土层广泛液化, 导致大规模泥流, 掩埋村庄, 造成 220 人死亡。在美国中东部黄土地区, 1811~1812 年新马德里 8 级地震曾引起大面积液化, 地面沉降, 密西西比河水灌入, 形成大湖。这些震害实例均表明, 地震滑坡、液化和震陷是黄土地区三大地震岩土灾害, 而且, 在中强地震作用下即可触发成灾。因此, 在 20 世纪, 特别是 20 世纪的 80 年代和 90 年代, 国内外对黄土的动力特性及其震害进行了较多的研究。其中, 室内土动力学试验是研究的主要方法和技术手段。但在这些试验研究中, 大多沿用了模拟机器振动的等幅循环荷载, 而并非真实的地震波荷载。

我国在 1966 年邢台地震后, 特别是 70 年代海城、唐山地震后, 为研究地震作用下土壤的液化特性, 开发研制了大量的模拟地震作用的室内土动力学试验仪器设备。如振动三轴仪、振动单剪仪、共振柱试验仪和动力扭剪仪, 其中振动三轴仪试验是室内试验中最常见的一种方法。张振中^{[1~3]①}、段汝文^[4,5]、谢定义^②、巫志辉^{[6]③} 等人(1982~1990)在振动三轴仪上, 对黄土在等幅正弦循环荷载作用下的应力-应变关系、强度和震陷问题作过大量的研究, 都取

① 张振中、段汝文, 西安、兰州、天水、宝鸡等城市的黄土动力特性的试验研究, 兰州地震研究所工程地震研究报告集, 1982~1989。

② 谢定义、余雄飞, 原状黄土动力特性研究中的一些问题的讨论, 见: 全国土工建筑物及地基抗震学术讨论会论文汇编, 西安, pp. 398~401, 1986。

③ 巫志辉、谢定义, 原状黄土动力特性的进一步探讨, 见: 全国土工建筑物及地基抗震学术讨论会论文汇编, 西安, pp. 219~224, 1986。

得了颇有价值的成果。但是，地震波荷载是一种振幅和频率均不规则变化的随机动荷载，用等幅正弦循环荷载等效地震波荷载作用进行土的动力试验，仅仅是一种近似的做法，在某些情况下，由此引起土动力学参数的差异不容忽略。1988年，郑恒利、张振中^[7]利用人工爆破波激励下的动三轴试验，探讨了黄土震陷问题。

为了建立随机地震波荷载下黄土动力特性的新理论，为工程抗震和震害预测预防提供更为合理精确的黄土动力参数，我们利用可对试样施加任意波轴向荷载的动三轴试验系统，试验研究了随机地震波荷载作用下，西北原状黄土的动本构模型、动模量、阻尼比、动应变和动强度中的破坏应变标准问题。根据试验结果和土动力学理论，建立了双曲线型的弹塑本构模型，并初步得到了模型参数与所施加的随机地震荷载的卓越周期之间的定量关系。通过试验和计算，证实了曼辛(Mansing)不规则加卸荷准则对黄土的适用性；采用强震加速度记录和人造地震波的参数调整技术，研究了荷载时程类型（冲击型或往返型）、幅值、卓越周期和往返次数对黄土动应变的定量影响关系，得出了黄土残余应变的经验计算公式；在动强度的试验研究中发现，笔者以前提出的5%的黄土破坏应变标准偏大，经过进一步研究将其改为屈服应变或3%应变。

在试验中，我们还对正弦循环荷载和地震波荷载两种荷载作用下黄土的弹性模量、阻尼比、本构模型参数和残余应变进行了对比研究，结果发现，两种试验结果存在的偏差不容忽视。

第一节 试验设备、地震波荷载和试样

一、振动三轴仪试验系统

本研究采用图1-1所示的DSD-160型电磁式振动三轴剪力仪试验系统。这一试验系统可将任意波形的轴向荷载通过加荷活塞的上下运动直接施加到试样上。在试验前，我们将选用的一条地震波加速度时程的数据文件在微机上进行数模转换，转换得到的模拟电信号被磁带记录器记录在磁带上。在试验时，将磁带上记录的模拟电信号重放出来，通过输出幅度控制器可对磁带机输出信号进行幅度调整，一定幅度的模拟电信号波经过功放仪的功率放大，就直接输入到动三轴仪上的电磁线圈，电信号就会被转变为变化的磁场力，推动加荷活塞的上下受控运动，从而将地震波直接施加到了试样上。

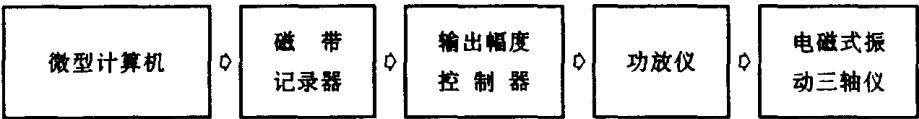


图 1-1 DSD-160 型电磁式振动三轴剪力仪试验系统

由表1-1给出的主要技术指标可看出，试验所用的电磁式动三轴仪的频率范围较宽，可覆盖地震加速度波的频谱范围。轴向动压力可模拟破坏性地震在土层中引起的动应力范围。因此，这一试验系统可以将地震波荷载不失真地施加到试样上。

表 1-1 DSD-160 型电磁式振动三轴剪力仪主要技术指标

振 动 方 向	双向或单向
频率范围(轴向)	0.1~100 Hz
最大轴向静压力	1.2 MPa
最大侧向静压力	0.6 MPa
最大轴向动压力	0.8 MPa
轴 向 总 行 程	±15 mm
轴向最大动位移	±10 mm
试 件 尺 寸	φ50 mm×100 mm

二、地震波荷载时程

本项研究中根据不同的研究目的,选用了 3 条地震加速度记录时程,5 条人造地震波反应时程,以及笔者制做的一条随机样板波,共计 9 条随机荷载时程,它们的波形如图 1-2 所示,其主要参数和场地类型见表 1-2。这些地震波荷载时程的卓越周期为 0.1~1.0 s,持时为 4.8~

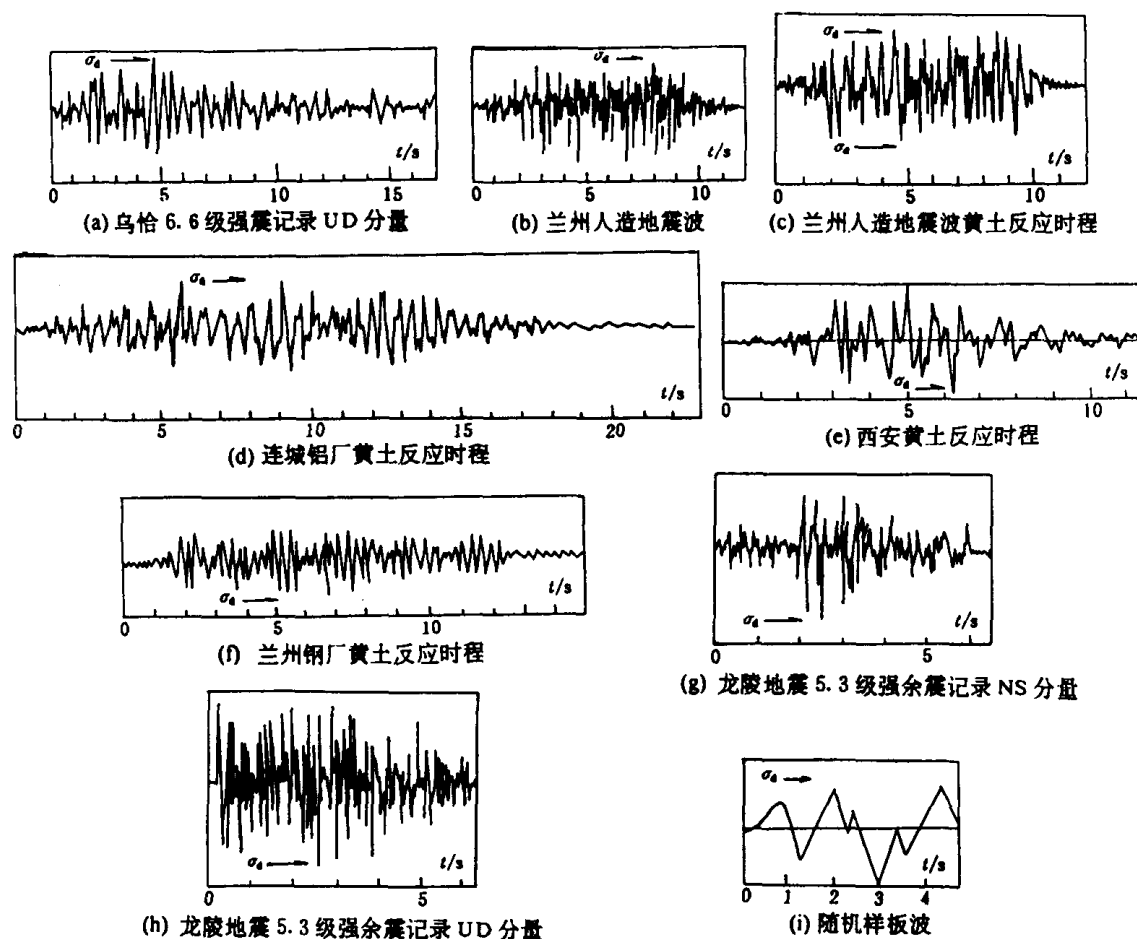


图 1-2 试验中使用的随机地震荷载时程

25.0 s, 包括了冲击型和往返型荷载, 模拟的地震动强度为 5~8 度。其中, 乌恰 6.6 级强余震 UD 分量是 1985 年新疆乌恰地震时在 4 m 厚黄土状土地表面记录到的。兰州人造地震波是兰州地震危险性分析和地震小区划中人工合成的基岩输入波。兰州、连城、西安和兰州钢厂的 4 条地震反应时程是马兰黄土层(Q_3)地震反应分析计算得到的地面加速度时程。龙陵地震 5.3 级强余震 NS 和 UD 分量是用来研究地震荷载卓越周期对黄土动力参数影响的两条时程。而随机样板波则是考虑曼辛准则的三种加御载规则情况(沿曼辛曲线、上骨架线、上大圈)专门制做的。

表 1-2 地震波荷载时程的主要参数和场地类型

随机荷载名称	卓越周期/ s	持时/ s	荷载 类型	模拟烈 度/度	超越概率	场 地
乌恰 6.6 级强余震 UD 分量	0.42	18.5	冲击型	7	50 年 10%	黄土状土
兰州人造地震波	0.17	11.0	往返型	8		基 岩
兰州黄土地震反应时程	0.26	11.0	往返型	8		黄 土
连城黄土地震反应时程	0.50	25.0	往返型	8		黄 土
西安黄土地震反应时程	0.36	11.0	往返型	8		黄 土
兰州钢厂反应时程	0.30	15.0	往返型	8		黄 土
龙陵地震 5.3 级强余震 NS 分量	0.14	6.4	冲击型	5		二类土
龙陵地震 5.3 级强余震 UD 分量	0.1	6.4	往返型	6		二类土
随机样板波	1.0	4.8	往返型			

三、试 样

在试验研究中, 主要选用了兰州市彭家坪典型的马兰黄土原状土样, 在动变形试验中, 还选用了甘肃连城铝厂、兰州钢厂等场地的黄土试样, 除此之外, 应用了陕西的渭南、西安和甘肃省的静宁、通渭、华家岭、榆中、会宁和景泉以及青海西宁等地的黄土动力试验资料。取样深度范围为 5~20 m, 这些试样的物性指标和各类试验所用试样情况如表 1-3 所示。

表 1-3 试样的物性指标

取 样 地 点	物 性 指 标			所用试样个数
	含水量 $w/\%$	容重 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	空隙比 e	
兰州市彭家坪	7.92~9.00	13.7~14.9	0.865~1.069	110
连城铝厂	10.45~12.86	14.7~15.29	0.934~1.010	12
兰州钢厂	18.45	15.68	0.992	6
甘肃和陕西等地	5.475~25.4	12.8~17.9	0.867~1.345	100

第二节 地震波作用下的黄土动力试验方法

在等幅循环荷载作用下的土动力学试验中, 用循环振次来等效地震动作用的强度, 直接采用地震波荷载进行试验时, 无需等效振次, 而直接用地震波的要三要素(幅值、卓越周期和持时)来表达地震作用。因此, 地震波作用的黄土动力试验不能完全沿用传统的试验方法, 需要建立相应的新方法。

一、弹性模量和阻尼比的试验方法

剪切模量和阻尼比是土层地震反应计算所必需的两个土动力参数，它们随着剪应变的不同而不同。因此，实际计算中所需要的是剪切模量和阻尼比随剪应变的变化曲线。然而，由于直接获得剪切模量曲线和阻尼比曲线的试验设备和方法(扭剪试验)较为复杂，所以通常采用振动三轴仪试验先获得弹性模量和阻尼比随轴向应变的变化曲线，然后再用泊松比将其换算为剪切模量和阻尼比随剪应变的变化曲线。

在进行模量和阻尼比试验时，首先在动三轴仪上使试样在原有上覆土层压力下固结，固结比(K_c)由下式确定：

$$\begin{cases} K_c = \frac{\sigma_{1c}}{\sigma_{3c}} = \frac{1}{K_0} \\ K_0 = 1 - \sin \varphi \end{cases} \quad (1-1)$$

式中： σ_{1c} 和 σ_{3c} 分别为轴向固结应力和侧向固结应力， K_0 为侧压力系数， φ 为土的内摩擦角。

对西北黄土，一般 φ 在 24° 左右，故通常取 $K_c=1.69$ 。待固结变形稳定后，逐级向试样施加随机地震荷载时程，荷载时程的幅值逐级增大，每级荷载的幅度以试样不产生残余应变或残余应变极小为宜，使试样在试验过程中始终处在小应变状态，同时记录随机动应力和动应变的时程曲线和滞回曲线。每一级荷载作用下的弹性模量 E_{di} 和阻尼比 λ_i ，可按式获得：

$$\begin{cases} E_{di} = \frac{\sigma_{dmaxi}}{\epsilon_{di}} \\ \lambda_i = \frac{\Delta W_i}{2\pi W_i} \end{cases} \quad (1-2)$$

式中： σ_{dmaxi} 为第 i 级荷载压缩方向动应力的最大幅值， ϵ_{di} 为对应于 σ_{dmaxi} 的动应变值(图 1-3)， W_i 为第 i 级荷载作用的最大滞回圈上 $\triangle AOB$ 两倍的面积， ΔW_i 为第 i 级荷载作用的最大滞回圈所围成的面积(图 1-4)。

在弹塑本构模型的试验中，也采用上述方法，只是试验一直要进行到试样产生较大的塑性变形(应变达 10^{-2} 数量级)，以覆盖地震应力使土体产生应变的范围。

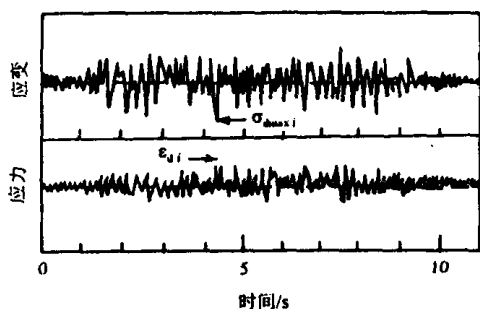


图 1-3 第 i 级试验记录的动应力和动应变时程曲线

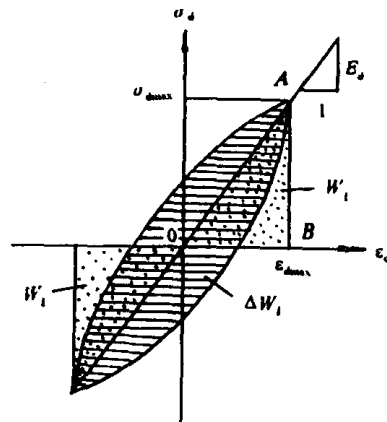


图 1-4 第 i 级试验记录的滞回圈

二、动变形试验方法

1. 残余应变(震陷)的定义

震陷是指在地震作用下,土体中产生的突然性附加沉降,它可造成建筑物地基的不均匀沉降,从而引起其上建筑物的开裂、倾斜和倒塌。

土的震陷性在土动力学中是用残余应变表示的。在本项研究中,它被笔者定义为随机地震荷载时程作用结束后,土体中的残余应变值。在震陷的动三轴试验中,残余应变(ϵ_p)被取为随机地震荷载时程作用前后试样的高度差($H_2 - H_1$)与荷载作用前试样的高度 H_1 之比,即:

$$\epsilon_p = \frac{H_2 - H_1}{H_1} \quad (1-3)$$

按此定义,残余应变可以从试验中记录到的轴向应力和应变时程上确定(图 1-5)。

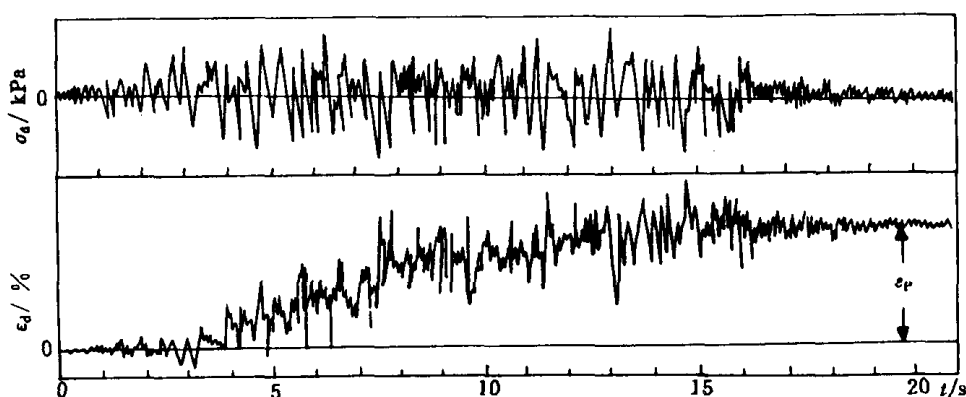


图 1-5 残余应变的定义

2. 残余应变试验

从将要预测震陷的场地,挖取几组不同深度处的未扰动土样,并在动三轴仪上固结。轴向固结应力被取为土层的自重应力与建筑物在地基土中引起的附加应力之和。固结比(K_c)由公式(1-1)确定。

固结变形稳定后,一条随机地震应力时程通过轴向加荷活塞的受控上下运动被施加到一个试样上。同时,记录动应力和应变的时程曲线。然后,一组中的其它试样被分别进行上述试验。在一组每一试样的试验中,随机地震应力时程的幅值都被适当地设置到不同的值。这样,用同一组的 5~7 个试样进行该时程的不同幅值下的震陷试验(图 1-6)。将试样中产生的残余应变(ϵ_p)与对应的动应力时程的峰值(σ_d)点在图 1-7 中,并用一条光滑曲线连接起来。这条光滑曲线就是所谓的震陷曲线。笔者将试样刚开始产生残余应变所需的动应力称为震陷的起始动应力,用 σ_{d0} 表示;将残余应变开始急剧增大时所对应的动应力称为震陷破坏的临界动应力,用 σ_{dr} 表示。

三、动强度试验方法

由于地震波荷载下土的动强度无法沿用常规的定义和试验方法,因此,我们参考国外有关文献^[8],提出了这种随机荷载下黄土的动强度定义和试验方法^[9]。现较为详细地阐述如下。

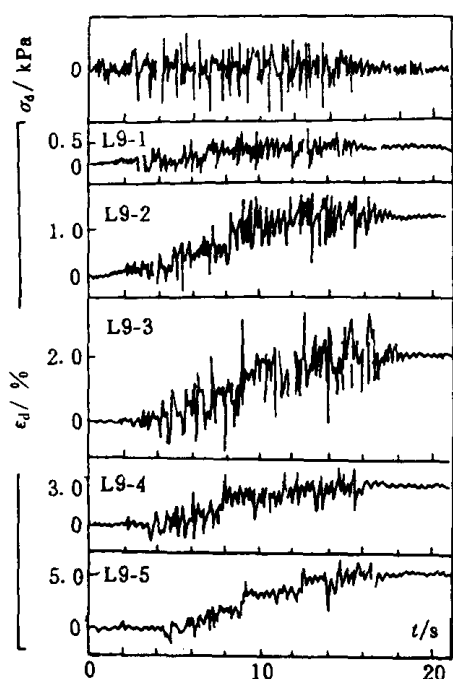


图 1-6 残余应变试验记录时程

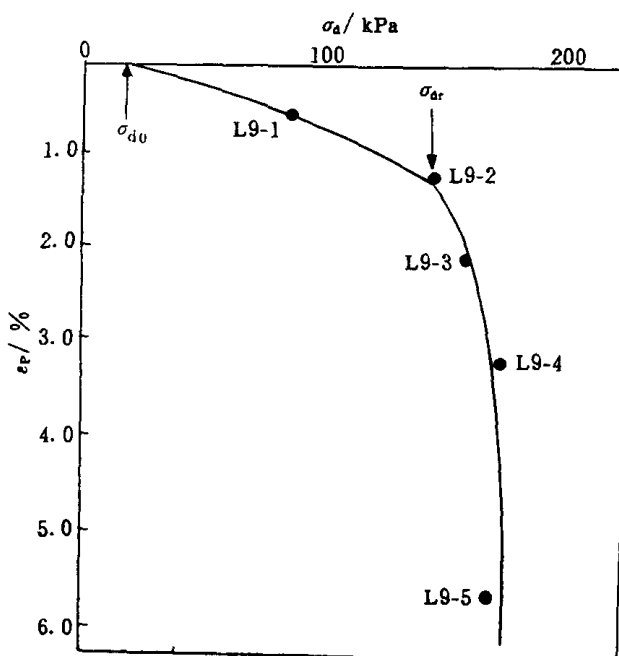


图 1-7 震陷曲线

1. 动加荷方案

试验中所采用的加荷方案如图 1-8 所示。首先将试样在一个轴向固结应力下排水固结,其固结比按公式(1-1)取值。待固结变形稳定后,对试样施加一个幅值相对较小的随机地震荷载序列,在这一阶段加荷过程中,试样由变形到产生一定幅值的残余应变,如图 1-8 中 B' 点。再把同一时程幅度变大的荷载加到同一试样上。试样进一步变形到图 1-8 中 B'' 点所指的残余应变。依次下去,同一随机动荷载的几个序列被施加到同一试样上,而每一序列荷载的幅值都逐渐增大。如果把轴向应力和残余应变的峰值点连接起来,就获得一条如图 1-8 中 C' 、 C'' 和 C''' 所示的虚曲线。这条曲线代表了在一套给定固结应力和随机地震荷载条件下土的动应力-残余应变关系。

在这种加荷方案中,逐渐增大幅值的地震波荷载被加到一个试样上。因此,该试样对一个地震波荷载序列的响应就可能受到前面其它较大幅度序列的影响。因为前几级加荷序列的实施朝增加应变的方向进行,前几级荷载对这级应力-应变关系的影响就可能出现,这就好像该试样与没有经受任何荷载作用前的原始试样相比更软一些一样,即硬度减小。然而,对天然非饱和原状黄土来说,前几级荷载的施加增大了土的密度,从而会导致土的硬度增加一定的量值。图 1-9 所示的不同加荷试验结果表明,对同一荷载时程,黄土的积累残余应变只与所受荷载的幅值有关,而与幅值出现的先后次序基本无关。因此,对幅值逐级增大的加荷方案来说,前期荷载序列的影响可忽略不计。因而上述加荷方案对做出一条动应力与残余应变的关系曲线是合适的。而且,这种加荷方案有一个优点,即只使用一个试样就能获得一条动应力与残余应变的关系曲线。

在黄土斜坡的地震稳定性分析及其震害预测中,合理地选用一条或几条该场地未来可能遭受到的地震动时程,作为其动强度的试验荷载,将具有重要的工程实用意义。

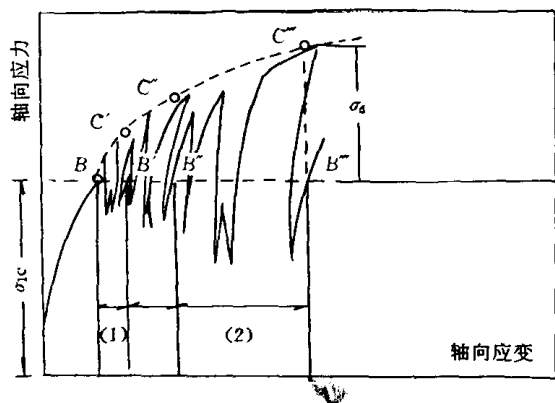


图 1-8 试验中使用的加荷方案

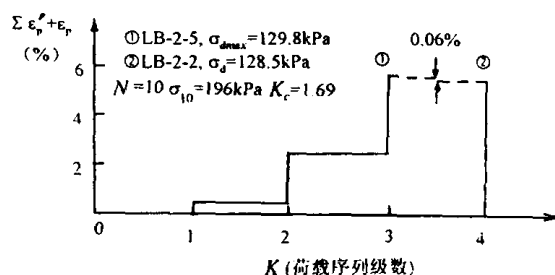


图 1-9 前期小幅值荷载序列对
累积残余应变的影响

2. 试验步骤

在动三轴仪上，将试样固结后，开始对其施加随机地震波荷载时程，同时记录动应力和应变时程。在一个动应力时程中有一个最大的峰值应力，使三轴加荷活塞到达最低点时实施这一最大动应力的试验称为 CM-试验；使三轴加荷活塞到达最高点时实施这一最大动应力的试验称为 EM-试验^[8]。在试验中，对每一条随机动荷载均采用上述两种方式试验，以模拟土体在地震时可能遭受到的地震应力的复杂情况。

这样，每组试验需用 6 个试样，对这些试样分别在 σ_{ic} 为 98.1, 196.2 和 294.3 kPa 三个轴向固结应力下各做两次试验。图 1-10、图 1-11 和图 1-12 分别给出了在三条随机地震波荷载作用下每一种固结应力的两种试验结果。以图 1-10 为例，图 1-10(a) 给出了乌恰 6.6 级强余震加速度 UD 分量时程被转换成动三轴仪上的轴向应力时程。图 1-10(b) 表明了一个试验过程中，峰值轴向应力在三轴压缩方向上为 $\sigma_d = 168.2$ kPa，由动荷序列作用使试样产生的轴向残余应变为 $\epsilon_p = 1.935\%$ ，在施加这一动荷序列之前，试样在其前几个序列里已经受到了一次 $\epsilon_p' = 3.588\%$ 的残余应变。图 1-10(c) 表明了后面一个试验过程中，随机动荷的幅度增加到 $\sigma_d = 183.5$ kPa，在前几级加荷序列的试验中已经受到了 $\epsilon_p' = 5.523\%$ 轴向残余应

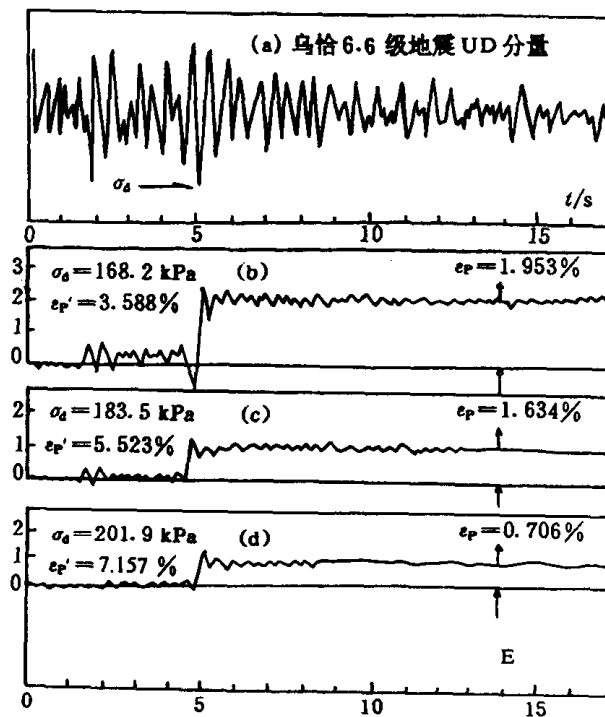


图 1-10 地震荷载作用下黄土动强度试验中
残余应变的增长情况

重塑黄土 L14-4, CM-试验: $\sigma_{ic} = 196.2$ kPa, $w = 7.92\%$

变的试样在该级加荷序列的试验过程中又经受了一次 $\epsilon_p = 1.634\%$ 的附加残余应变。在最后一级加荷序列的试验过程中，试样的轴向残余应变积累到 $\epsilon'_p + \epsilon_p = 7.863\%$ ，如图 1-10 所示。图 1-11 和图 1-12 分别表示了在人造地震波和其反应时程作用下的两个试验过程，它们都与图 1-10 相类似。值得指出的是，在三个图中所指示的峰值应力的幅值是指三轴压缩边的最大峰值。在上述三轴试验过程中，轴向固结应力朝三轴压缩边施加，因此，残余应变和试样破坏的关键现象总是产生在三轴压缩这一边。据此，在三轴压缩边所记录到的峰值应力就有理由被作为是直接影响残余应变发展和试样破坏的一个关键因素。

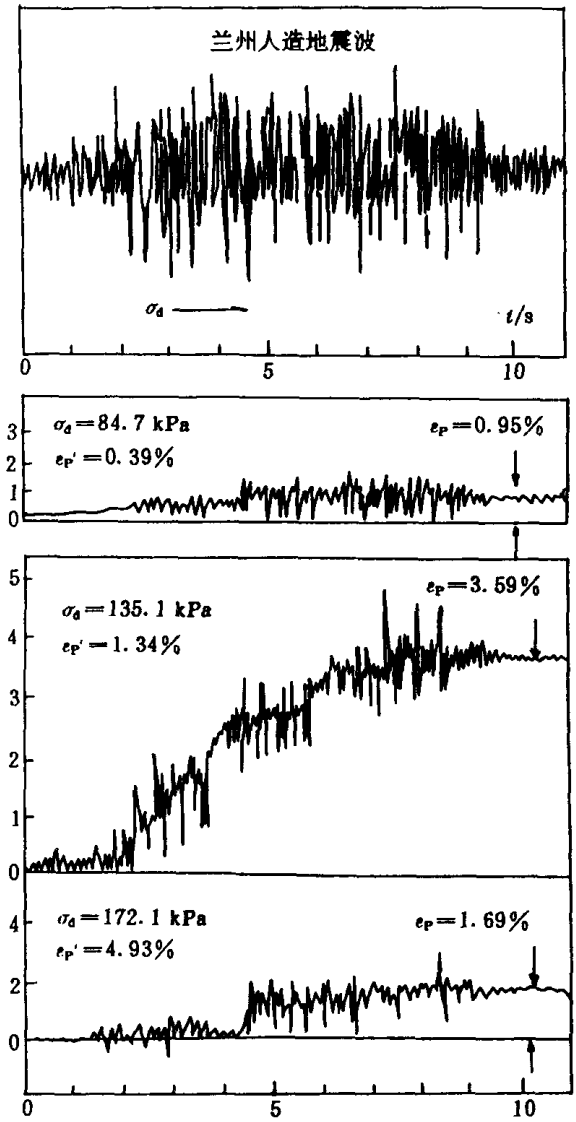


图 1-11 人造地震荷载作用下黄土动强度试验中残余应变的增长情况
重塑黄土 G88-7-21, CM-试验
 $\sigma_{1C} = 196.2 \text{ kPa}$, $w = 9.17\%$

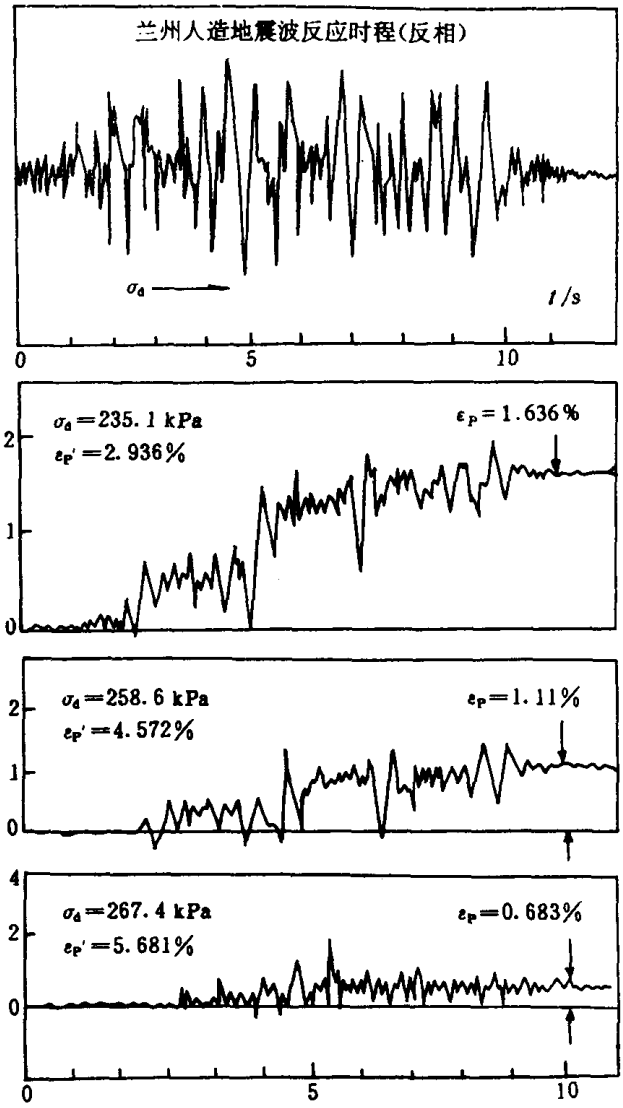


图 1-12 人造地震波反应荷载作用下黄土动强度试验中残余应变的增长情况
重塑黄土 G88-7-17, CM-试验
 $\sigma_{1C} = 294.3 \text{ kPa}$, $w = 9.7\%$

四、动强度的定义及其确定方法

等幅循环荷载作用下,土的动强度被定义为在一定振次作用下,产生某一指定应变所需的动应力。本章将随机地震波荷载作用下土的动强度定义为在一条特定的随机地震波荷载时程作用下,产生某一指定应变所需的动应力。笔者早先的试验结果表明^[9],对于天然非饱和原状黄土,这一指定应变取为5%较为合适。但其后的研究结果表明^[10],这一指定应变分别取为屈服应变和3%应变更更为合理。

根据这一定义,确定随机地震荷载下黄土的动强度参数 C_d 和 φ_d 值可按如下方法进行:

(1) 从诸如图 1-10 至图 1-12 的试验记录上读出对每一级随机地震波荷载序列所积累的总残余应变值 $\epsilon_p' + \epsilon_p$, 以 $\epsilon_p' + \epsilon_p$ 为横坐标, 压缩边动应力峰值 σ_d 为纵坐标, 将这些坐标点 $(\epsilon_p' + \epsilon_p, \sigma_d)$ 点在坐标图中, 并用光滑曲线连接起来, 就得到了一条动应力与残余应变的关系曲线(图 1-13)。

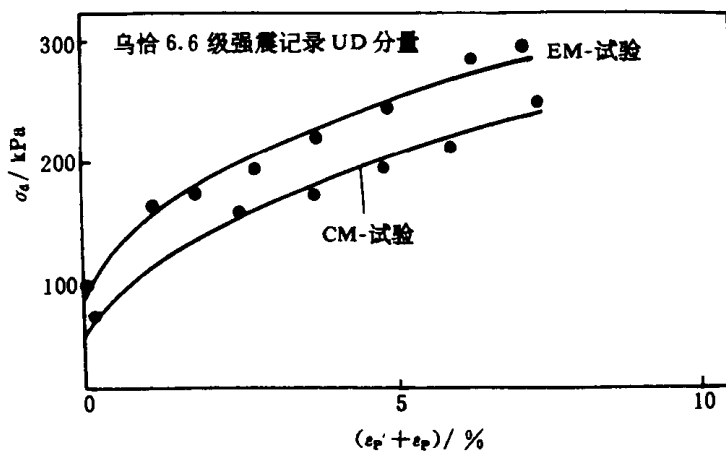


图 1-13 轴向残余应变

原状黄土 G88-7, $\sigma_{1C} = 294 \text{ kPa}$, $w = 7.74\%$, $\gamma = 14.62 \text{ kN/m}^3$

(2) 分别做每一固结应力下 CM 和 EM 两种试验所得到的两条 $\sigma_d - (\epsilon_p' + \epsilon_p)$ 曲线的平均曲线(图 1-14), 并由图中的三条平均曲线读出对应于 $\epsilon_p' + \epsilon_p = 5\%$ 的动应力值, 将其分别作为相应于三个固结应力下的轴向破坏动应力。

(3) 在 $\tau - \sigma$ 坐标中, 以 $(\sigma_{osd}, 0)$ 为圆心, τ_{osd} 为半径做动静合成摩尔应力圆(图 1-15), 由三个固结应力下的三个摩尔圆画出动强度包线, 然后量出动抗剪强度参数 C_d 和 φ_d 。其中, σ_{osd} 和 τ_{osd} 可通过下面两式确定:

$$\sigma_{osd} = (\sigma_{1C} + \sigma_{d1} + \sigma_{3C})/2 \quad (1-4)$$

$$\tau_{osd} = (\sigma_{1C} + \sigma_{d1} - \sigma_{3C})/2 \quad (1-5)$$

图 1-16 就是按此方法做出的对应于图 1-12 的一组试样的动强度。

值得注意的是, 图 1-14 表明, 当固结压力较小时, 在固结过程中, 土的原状结构没有被破坏, 做出的应力-积累残余应变曲线上的屈服点一般都很明显, 过屈服点后, 残余应变急剧增大, 动应力增加无几, 试样已经破坏。而屈服应变很小, 在 1%~2% 之间。因此, 在这种

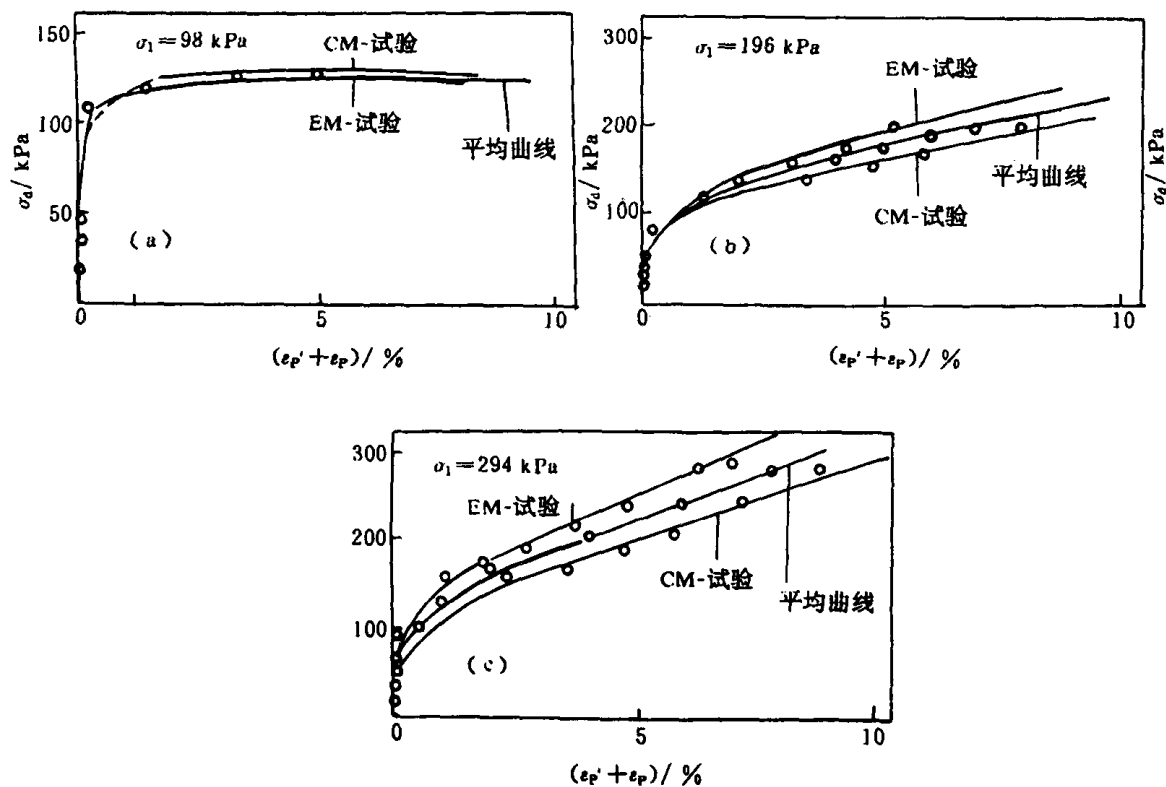


图 1-14 动应力与残余应变的关系

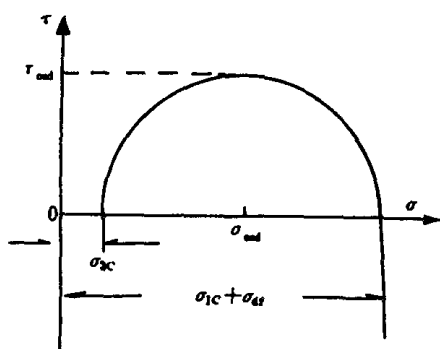


图 1-15 随机地震荷载下的
动摩尔应力图

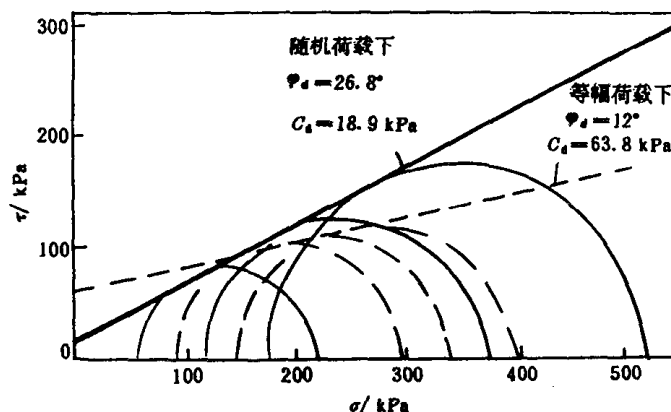


图 1-16 随机地震荷载下黄土的动强度
与常规动强度试验结果对比

原状黄土 G88-7, $w=7.27\%$, $\gamma=14.4 \text{ kN/m}^3$

情况下, 试样的破坏应变应取屈服应变; 当固结压力较大时, 在固结过程中, 土的原有结构已经破坏, 在固结应力作用下, 又达到新的稳定状态, 部分孔隙被土颗粒充填, 做出的

应力-积累残余应变曲线上的屈服点一般都不太明显。但对受动荷载作用中的试样,应力-应变时程曲线研究结果表明,一般当积累残余应变达到 3% 左右时,应力波形有畸变现象(图 1-17),说明试样已经发生破坏,故在这种情况下,将破坏应变确定为 3%。这样,虽然表面上看提供的动强度参数比 5% 保守一些,但它更为合理、安全。

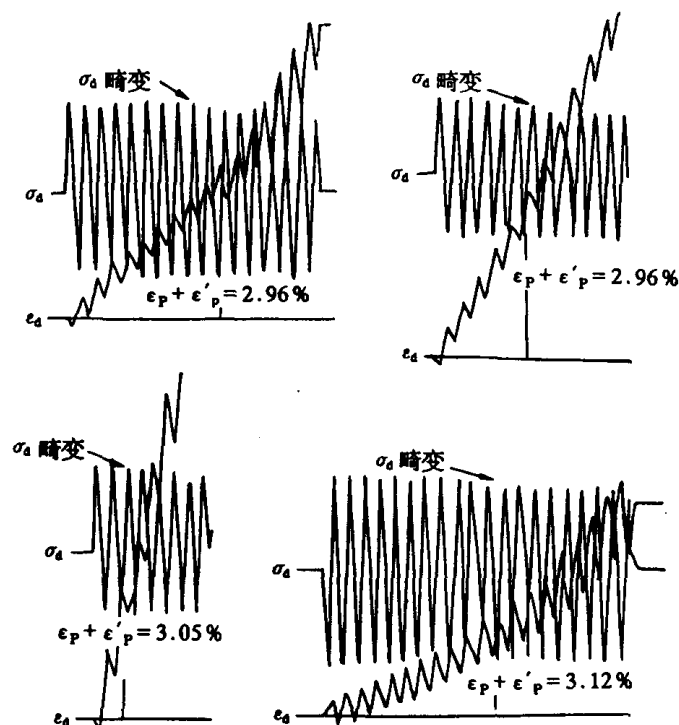


图 1-17 应力波畸变现象

第三节 黄土的弹塑动本构模型

一、双曲线模型

按照第二节模量的试验方法,笔者^[11]进行了不同地震波荷载作用下黄土的模量试验,得到图 1-18 所示的 4 条地震波荷载时程的试验曲线,从该图上可以看出,在地震波荷载作用下,黄土轴向动应变和轴向动应力的比值(ϵ_d/σ_d)与轴向动应变(ϵ_d)的关系基本上是直线关系,其直线方程为:

$$\frac{\epsilon_d}{\sigma_d} = a + b \cdot \epsilon_d \quad (1-6)$$

或改写为:

$$\sigma_d = \frac{\epsilon_d}{a + b \cdot \epsilon_d} \quad (1-7)$$

公式(1-7)即为双曲线模型, a 为公式(1-6)表示的直线在 ϵ_d/σ_d 轴上的截距, b 为直线的斜率。它们的物理意义为: