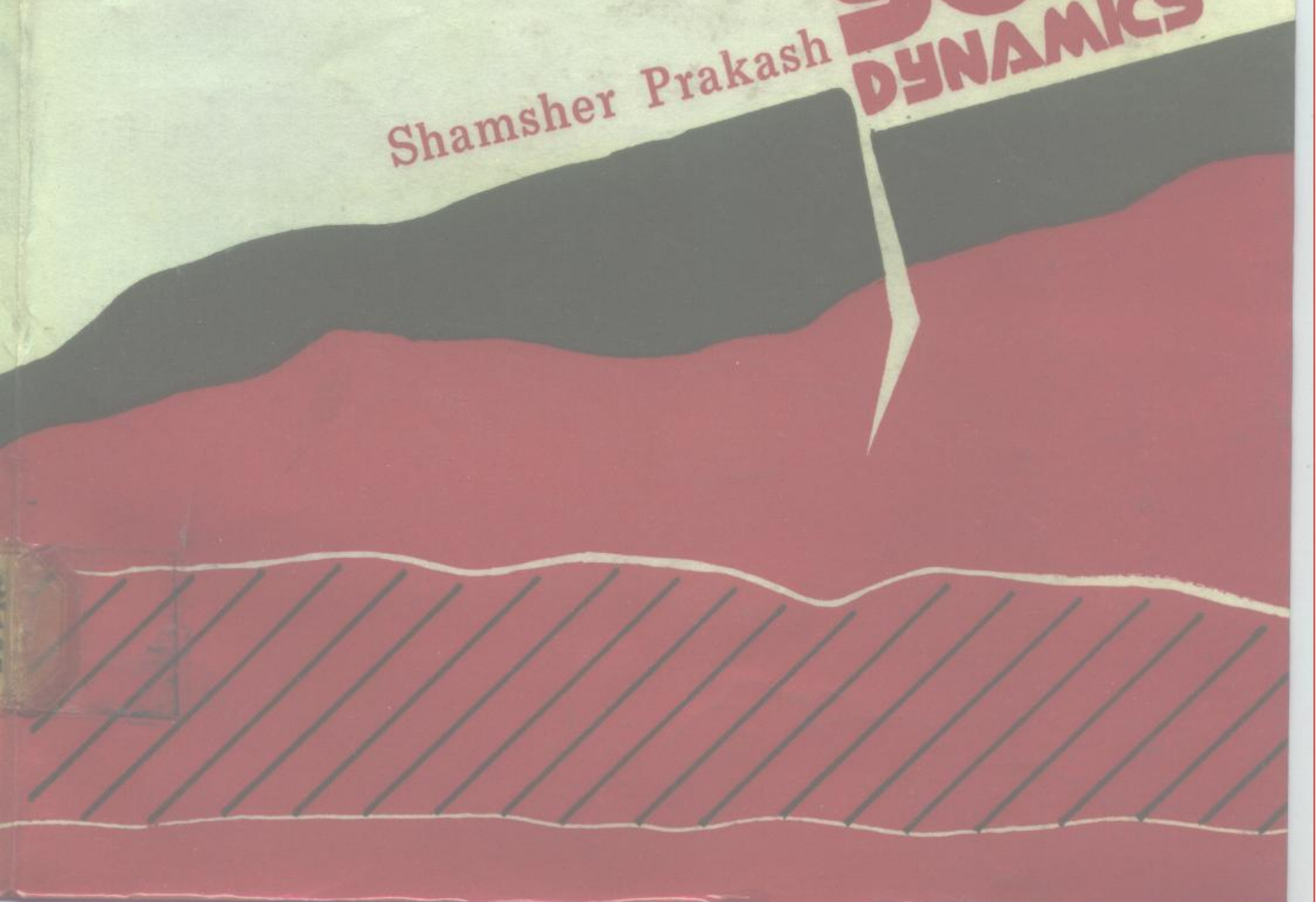


# 土动力学

[印度] S. 普拉卡什著 徐攸在 王志良 王余庆 刘惠珊译 汪闻韶校

Shamsher Prakash

**SOIL  
DYNAMICS**



# 土 动 力 学

〔印度〕S.普拉卡什 著

徐攸在 王志良 王余庆 刘惠珊译 汪闻韶校



水利电力出版社

## 提 要

本书是1981年美国出版的一本内容较全面的土动力学教材。全书共分九章，除系统地介绍了振动理论和波的传播原理外，主要讲授：土在动力条件下的应力应变关系和强度特性及其参数的室内、外测定方法；动土压力及挡土墙的计算；地基的动承载力及浅基础的动力计算；桩的动力分析；土的液化；机器基础和隔振问题等。书中还介绍了国外设计规范中有关的规定，并附有计算实例和习题。

本书可供土建、水利、地震工程和其它土工专业方面的设计、科研、勘察试验人员以及大学有关专业师生参考。

Shamsher Prakash  
SOIL DYNAMICS  
McGraw-Hill Book Company 1981

## 土 动 力 学

[印度] S. 普拉卡什 著

徐攸在 王志良 王余庆 刘惠珊 译

汪闻韶 校

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 19印张 430千字

1984年12月第一版 1984年12月北京第一次印刷

印数0001—6510册 定价3.80元

书号 15143·5496

## 序

太沙基 (Terzaghi) 1951 年在马莱特 (Mallet) 和帕匡特 (Pacquant) 关于土坝一书的序中指出, 土木工程各方面的发展都要经历三个阶段: 经验阶段, 在此阶段中工程实例起着主要作用; 科学阶段, 在这阶段中取得了很大进展, 然而, 过分相信科学力量有时也会导致失败; 成熟阶段, 即工程经验与科学分析相结合而形成一种判断力, 从而使工程师能够充分履行其职责。

土动力学的现状不能按太沙基的三阶段来区分, 相反它是一种奇特的混合, 其中各部分的发展显著地不平衡。一部分是由经典的弹性介质动力学和经典的有阻尼振动理论组成, 它们已经很先进, 只要结合地基土的实际问题的几何条件即可。土的有关性质可用静力的或最简单的动力试验来确定; 另一方面, 在研究土的液化问题中, 土的独特动力性质是主要的, 经典理论只起次要作用。

土动力学的发展不平衡, 还由于另外两个情况造成: 所研究的荷载的来源各不相同, 以及对各种实际问题要求解决的迫切程度不同。

由土支承的结构, 可能受到来自土体以外的动力作用。其中有些力较容易计算, 如旋转式或往复式机器的运转, 火箭点火或重物下落等产生的力; 而其它的力最好用概率方法估计, 如风或波浪产生的力。工程师在任何情况下都要估计土承受外荷载的能力, 并推断出土的瞬时位移和永久位移。如土的应力很小, 位移基本上为弹性的, 则其解是简单明确的, 不必多考虑土的性质。如土的位移是非弹性的或重复荷载导致位移积累, 则其解就不再是那样简明了。

如果运动不是由作用在结构物上的外力而是由土本身引起的, 问题就更难处理。运动传到结构上, 然后根据结构和土本身的特性产生反应。土的运动可由附近的扰动引起, 如压缩机的运转或打桩等; 也可以由远处的地震引起。如为后者, 则地面运动本身不能以确定的形式预先给出。故用概率方法或谱的概念来假定之。在某些情况下, 地面运动甚至引起土的液化, 因此, 由土支承的结构不管其特性如何, 都将遭到破坏。

土动力学各方面的发展取决于需要, 往往首先是从军事上觉察到, 可举三个例子来说明。

在确定基础和筏基的极限承载力方面取得了很大进展。研究这个领域的动力, 很大程度上是来自设计抵抗高能空中爆炸的防护结构的需要。对于非军事工程, 极限承载力不如位移重要, 特别当地基为无粘性土和荷载如锻锤或落锤那样为重复荷载时。虽然也常计算这类设备基础的承载力, 但与累积沉陷值的计算相比, 则是次要的, 土动力学在这方面仍处于经验阶段。

设计探测远距离快速运动目标的跟踪雷达装置的需要, 是精确了解土在低应力水平下弹性性质的巨大动力。设备振动产生的惯性力是主要的。共振柱试验的改进, 首先在防护

结构的设计中得到应用，也是由于要满足这类问题的特殊需要。

随着地震学的发展，抗震设计成为比土动力学更广泛的课题，但它仍需要土动力学在某些专门领域内发展。地震问题对经济和社会的重要性使人们花费了许多时间和才能。可以说土动力学在这方面已接近于成熟阶段，虽然设计方法的验证还需要等待可能发生的破坏性地震，但肯定在理论上和实验上已获得科学的进展。

还可举出一些例子。如果本书表明了土动力学远非是一门发展均衡的学问，尚有重大的空白和需要研究的领域，有些重要的实际问题还很少论及，而另一些应用不广的问题却研究得很深，那么，作者就算成功地反映了现有的发展水平。作者意识到有这些空白并予以指出。这样，作者就向读者介绍了目前所知道的东西，提供一个很好的有关权威性著作的参考文献一览表，并指出在哪些地方迫切地需要更多的知识。

R.B.派克 (Ralph B. Peck)

伊利诺斯大学 (University of Illinois)

欧巴那-查姆培恩 (Urbana-Champaign)

## 前 言

自有地球以来就存在土与基础的动力荷载问题。地震引起土体破裂并摇晃所支承的每一物体。

土与基础动力性质的研究落后于结构动力性质的研究，是由于错误地认为弱土上的上部结构只需要比好土上的多加强些而造成的。然而，1964年新潟地震中很坚固的房屋大量倾斜，引起了同行们对土动力学的关注。

这些问题的开拓工作早已在日本和印度开始进行；作者有理由引以自豪的是1963年在罗基（Rooke）大学首先给研究生正式开出“土动力学”课程。它至今仍为主修土力学的学生们的一门必修课。从此，全世界几乎所有第一流大学都讲授土动力学。

早在1960年，罗基大学就开始从各方面研究土的动力性质。并已在土的液化、动土压力、土动力参数的确定、机器基础的分析与设计、基础的抗震设计、地震荷载下的桩以及土与结构的动力相互作用等领域中取得很大进展。对机器基础的性能监测方面也取得了进展。

讲授土的各种动力性质，至今尚靠分散在大量技术刊物中的研究资料。因此，很需要将资料汇编成一本土动力学的基础教材，作为认真研究这一课题的起点。这就是计划编写本书时的目的。本书介绍了本学科到最后定稿时的发展水平，并能使初次接触土动力学的读者对该学科有个基本了解。

本书首先向读者介绍了土动力学中的问题（第一章），接着讲机械振动理论（第二章）。第三章是讨论弹性介质中波的传播。第四章则应用其原理来确定土的模量，该章还包括实验室和现场测定这些常数的方法及其典型数据。后几章专门研究挡土墙的稳定（第五章）、动承载力（第六章）、桩基（第七章）、土的液化（第八章）和机器基础（第九章）。

本书的内容安排合乎逻辑，使读者能够比较容易地按照主题的展开顺序来学习。作者尽量使本书自成体系，这对第一本这类教科书来说是很必要的。书中每章附有大量参考文献目录，感兴趣的读者可查阅有关著作的详细内容。

土动力学正在迅速发展，某些分析和设计方法在近期内可能就要改变。这已在本书适当的地方提请读者注意，并指出了在这些问题上目前知识水平的局限性。

在编写中，得到我的一些同事和学生的各种帮助。J.克里什那（Jai Krishna），石原研而（Kenji Ishihara），R.W.斯蒂芬逊（R.W. Stephenson），福马（Masami Fukuoba），S.萨兰（Swami Saran），W.D.L.芬恩（W.D. Liam Finn）和V.K.布里（ViJay K. Puri）等提出了有益的意见。有些问题的解是V.K.布里，J.坎多克（Jal Khandoker）和L.多列克（Leo Turek）得出的。V.K.布里还帮助校对了全书。

编写本书时，经常引用已出版的书刊中的资料。感谢美国土木工程师协会允许利用其刊

物上的资料。第五章第九节的一部分、表6-4、表6-5和第九章第十八节是经印度标准学会许可，分别转载印度规范IS No.1893-1975第三版和IS No.2974-1969（第一部分）第一版中的资料，详细内容可参阅规范原文。新德里印度标准学会备有这些规范。

对其它有版权的资料，则在文中和图中的适当处表示感谢。

M.莱维丝夫人（Mrs. Marqot Lewis）耐心仔细地打印了手稿，对她的辛勤努力表示谢意。B.哈里斯夫人（Mrs. Barbara Harris）在编辑工作中给予了协助。

十分感激我的母校罗基大学，她提供了极好的机会让我在这一新的领域中进行实验并改进试验和分析的方法，同时也感谢密苏里-罗拉大学给我机会来汇集整理在罗基大学所收集到的资料。

S.普拉卡什

# 目 录

序

前 言

<b>第一章 引论</b> .....	1
第一节 土力学与土动力学 .....	1
第二节 动荷载的性质 .....	1
第三节 土单元在地震荷载下的应力条件 .....	5
第四节 动荷载下土和土构筑物的问题 .....	6
参考文献 .....	7
<b>第二章 振动理论</b> .....	8
第一节 概述 .....	8
第二节 定义 .....	8
第三节 简谐运动的性质 .....	9
第四节 弹簧-质量系统的自由振动 .....	11
第五节 有粘滞阻尼的自由振动 .....	14
第六节 有粘滞阻尼的强迫振动 .....	16
第七节 与频率有关的激振力 .....	18
第八节 瞬态力作用下的系统 .....	20
第九节 瑞利 (Rayleigh) 法 .....	22
第十节 对数衰减率 .....	23
第十一节 粘滞阻尼的确定 .....	24
第十二节 力传递系数 .....	25
第十三节 振动量测仪器的原理 .....	26
第十四节 双自由度系统 (减振器) .....	28
第十五节 谱反应 .....	29
习题 .....	31
<b>第三章 弹性介质中波的传播</b> .....	33
第一节 引言 .....	33
第二节 弹性杆中波的传播 .....	33
第三节 弹性无限介质中波的传播 .....	40
第四节 半无限弹性半空间中波的传播 .....	43
第五节 地表基础产生的波 .....	47
第六节 结语 .....	48
参考文献 .....	49



<b>第四章 土的动应力、变形和强度特性</b> .....	50
第一节 引言 .....	50
第二节 静荷载下土的常规试验 .....	50
第三节 剪切试验中的排水问题 .....	50
第四节 直剪试验 .....	51
第五节 三轴压缩试验 .....	53
第六节 对动力试验仪器的某些特殊要求 .....	54
第七节 摆式加荷设备 .....	55
第八节 瞬态荷载下饱和砂土的性质 .....	59
第九节 静应力的大小和脉冲次数对粘性土强度的影响 .....	60
第十节 脉冲荷载下影响粘性土的应力-变形与强度特性的因素 .....	66
第十一节 振动单剪试验 .....	66
第十二节 共振柱仪 .....	71
第十三节 野外试验 .....	71
第十四节 土常数的典型数值 .....	78
第十五节 结语 .....	85
习题 .....	86
参考文献 .....	88
<b>第五章 动土压力和挡土墙</b> .....	91
第一节 侧向土压力问题 .....	91
第二节 地震时挡土墙的性质 .....	96
第三节 库伦理论的修改 .....	97
第四节 修改的库尔曼图解法 .....	98
第五节 用于 $c-\phi$ 土的解析解 .....	99
第六节 作用点 .....	105
第七节 在小尺寸墙上进行的试验研究 .....	105
第八节 位移分析 .....	109
第九节 印度标准实用规范 .....	112
第十节 例题 .....	113
第十一节 结语 .....	120
习题 .....	121
参考文献 .....	122
<b>第六章 动承载力</b> .....	124
第一节 概述 .....	124
第二节 浅埋连续基础下的破坏区域和极限承载力 .....	124
第三节 基础的安全准则 .....	125
第四节 基础的地震荷载 .....	126
第五节 水平荷载和力矩的影响 .....	128
第六节 有关标准中的规定 .....	137
第七节 垂直荷载下的动力分析 .....	140

第八节	水平荷载下的动力分析	143
第九节	试验工作	152
第十节	结语	155
	参考文献	157
<b>第七章</b>	<b>桩基础</b>	159
第一节	概述	159
第二节	打桩机	159
第三节	桩的容许荷载	162
第四节	振动对桩的影响	165
第五节	水平荷载下桩的常规分析方法	166
第六节	水平荷载作用下垂直桩的反应	169
第七节	桩在无粘性土中的解	172
第八节	粘土中的桩	180
第九节	动力分析	181
第十节	土的模量	191
第十一节	群桩效应	191
第十二节	规范规定	191
第十三节	结语	192
	习题	192
	参考文献	194
<b>第八章</b>	<b>土的液化</b>	197
第一节	引言	197
第二节	理论	197
第三节	液化的准则	199
第四节	影响液化特性的因素	201
第五节	液化的室内研究	203
第六节	三轴剪切中的液化研究	203
第七节	用振动单剪研究液化	207
第八节	液化势的估计	210
第九节	振动台研究	215
第十节	密砂的液化特性	226
第十一节	现场试验	229
第十二节	根据标准贯入数据进行液化分析	235
第十三节	结语	237
	习题	239
	参考文献	240
<b>第九章</b>	<b>机器基础</b>	243
第一节	引言	243
第二节	机器基础的设计标准	244
第三节	分析方法	245

第四节	块体基础的自由度 .....	245
第五节	土的弹簧刚度的确定 .....	246
第六节	块体基础的垂直振动 .....	248
第七节	块体基础的水平振动 .....	249
第八节	块体基础的摇摆振动 .....	249
第九节	块体基础的扭转振动 .....	251
第十节	块体基础同时受摇摆振动、水平振动和垂直振动 .....	252
第十一节	印度规范对往复式机器基础设计和施工的规定 .....	256
第十二节	块体基础的设计步骤 .....	258
第十三节	按弹性半空间理论计算垂直振动 .....	260
第十四节	按弹性半空间理论计算水平振动 .....	263
第十五节	按弹性半空间理论计算摇摆振动 .....	264
第十六节	按弹性半空间理论计算扭转振动 .....	266
第十七节	冲击式机器的基础 .....	266
第十八节	印度规范对冲击式机器基础设计和施工的规定 .....	271
第十九节	冲击式机器基础的设计步骤 .....	272
第二十节	例题 .....	274
第二十一节	隔振和波的屏蔽 .....	287
第二十二节	结语 .....	290
参考文献	.....	293

# 第一章 引论

## 第一节 土力学与土动力学

“土力学”这一术语是“土力学创始人”太沙基(Karl Terzaghi)博士铸定的。土力学是研究土在应力作用下的工程性质与行为的学科。把土作为建筑材料的系统性研究是由太沙基在本世纪初开创的,在他的第一部用德文写作的土力学于1925年出版以后的短短二十年内,全世界都受到这一新学科的冲击。

土动力学是土力学的一个分支,它是研究土在动应力作用下的工程性质与行为的学科。虽然“应力”一词在土力学的原来定义中同时包括静的和动的应力,但是通常“应力”一词只意味着静应力。这就是为什么几乎所有土力学教科书对土在动应力作用下的行为只是仓卒一提而过的原因。

## 第二节 动荷载的性质

作用在地基和土构筑物上的动荷载可能是地震、炸弹爆炸、往复式或旋转式机器或重锤的运行、施工操作(如打桩)、采石、高速交通工具(包括飞机着陆)、风、或者波浪作用。每一种荷载的性质和其他荷载的性质是相当不同的。

地震<sup>①</sup>是结构和地基动荷载的最重要的来源之一。每次地震都伴随由震源释放出来的一定量能量,可以给定一个以数字表达的地震震级(M)[里奇特(Richter),1958]。

表1-1给出了各特定地震震级所伴随的能量的概念。

表 1-1 地震震级(M)和释放的能量(E)

M	5.0	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.6
E(10 <sup>20</sup> 尔格)	0.08	2.5	14.1	80	446	2500	20000

注 1.6.33级地震释放的能量量级是 $8 \times 10^{20}$ 尔格。

2.此表经印度密鲁特[Meerut(UP)]的沙利塔·普拉卡山(Sarita Prakashan)许可,引自J·克里什那(Jai Krishna)和A.R.强德拉塞卡朗(A.R.Chandrasekaran)合著的“地震工程原理”(Elements of Earthquake Engineering, 1976)。

- 以地球体内的扰动为源产生的波所引起的地球表面的振动称为地震。地震可能起源于火山爆发或是由于地球体内应变积累过程引起。在后一种情况中,当地球体内变形所积累的应变能超过材料的储能极限时,就会释放出来。在此阶段地层内将发生滑动。

在地球体内开始发生滑动或破裂的点称为震源,位于震源正上方在地表上相应的点称为震中。

一次地震释放的能量的量度是它的震级。正如里奇特(1958)所建议的,地震震级等于离震中100公里处标准仪器上记录的、地面运动最大振幅毫米读数的以10为底的对数值。

由于地震时的地面运动，基础可能下沉，房屋可能倾斜，土可能液化并丧失支承建筑物的能力，轻型建筑物可能上浮。图1-1是新潟地震（1964）时房屋的倾斜情况。图1-2和图1-3分别为一辆汽车陷入土中和一个污水处理箱浮出地面以上的情况。斯坦布鲁格（Steinbrugge, 1970）曾给出过一张描述美国地震震害和建筑物表现的图解说明。其中也包括一个有选择的美国地震年表。克里什那和强德拉塞卡朗（1976）指出，每年在世界上发生7级或7级以上的地震平均有12次。

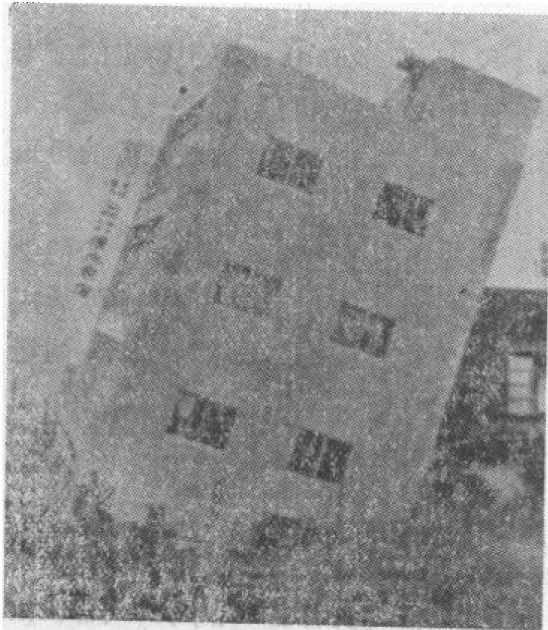


图 1-1 1964年新潟地震中建筑物的倾斜  
[西特(Seed)和依德利斯(Idriss), 1967]

图 1-2 1964年新潟地震中汽车下陷

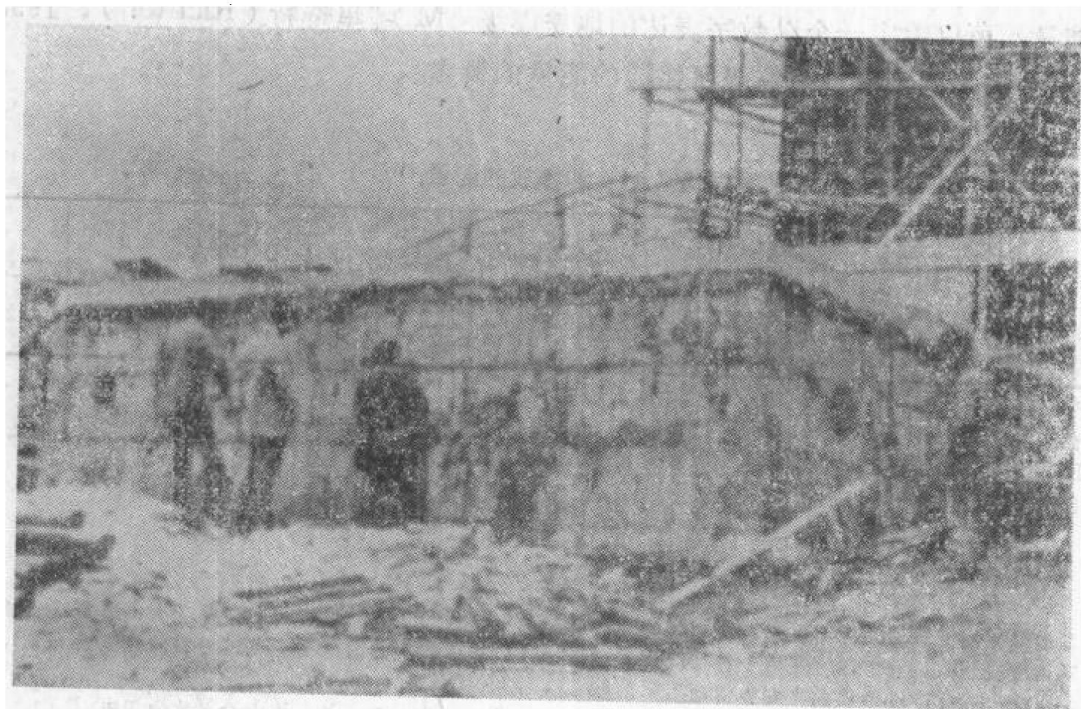


图 1-3 新潟地震中污水处理箱浮上地面  
(西特和依德利斯, 1967)

比较一下地震能量与核爆炸能量是很有趣的。广岛 (Hiroshima) 上空爆炸的那类原子弹释放出来的能量是  $8 \times 10^{20}$  尔格, 相当于一次 6.33 级地震。因此, 以释放能量来衡量的话, 1950 年 8 月 15 日的阿萨姆 (Assam) 地震 ( $M=8.6$ ) 相当于 2500 个这样的原子弹同时一起爆炸。表 1-2 列出了在印度发生过的一些地震和它们的震级等资料。

表 1-2 在印度发生过的一些地震\*

年 份	地 区	日 期	北 纬 (度)	东 经 (度)	震 级 (M)
1819	库奇(Kutch)	6月16日			8.0
1833	比哈(Bihar)	8月26日	27.5	86.5	7.7
1897	阿萨姆[Assam(Shillong Plateau)]	6月12日	26.0	91.0	8.7
1900	包加特[Palghat (Kerala)]	2月8日	10.7	76.7	6.0
1905	坎各拉(Kangra)	4月4日	32.5	76.5	8.0
1930	都伯里(Dhubri)	7月3日	25.8	90.2	7.1
1934	比 哈	1月15日	26.6	86.8	8.3
1941	安达曼斯(Andamans)	6月26日	12.4	92.5	8.0
1943	阿萨姆(东北)	10月23日	26.8	94.0	7.2
1950	阿萨姆(东北)	8月15日	28.7	96.6	8.6
1956	安加(Anjar)	7月21日	23.3	70.0	7.0
1956	布兰德舍[Bulandsher(UP)]	10月10日	28.1	77.7	6.7
1958	卡波考特[Kapkote(UP)]	12月28日	30.0	80.0	6.3
1960	德里(Delhi)	8月27日	28.3	77.4	6.0
1963	巴德嘎姆[Badgam(Kashmir)]	9月2日	33.9	74.7	5.5
1966	西尼泊尔(W.Nepal)	6月27日	29.5	81.0	6.3
1966	摩拉达巴德[Moradabad(UP)]	8月15日	28.0	79.0	5.3
1967	尼考巴(Nicobar)	7月2日	9.0	93.4	6.2
1967	柯依纳(Koyna)	12月11日	17.4	73.7	6.5
1970	布罗奇(Broach)	3月23日	21.7	72.9	5.7
1970	巴德拉查拉姆[Bhadrachalam(AP)]	4月13日	17.6	80.6	6.5
1975	希马查尔普拉德什(Himachalpradesh)	1月19日	32.5	78.4	6.5

\* 经印度密鲁特的沙利塔·普拉卡山许可, 引自健·克里什那和埃·尔·强德拉塞卡朗合著的“地震工程原理”(1976)。

众所周知, 地震会引起在各个方向上的随机运动。图 1-4(a) 是 1940 年 5 月 18 日爱尔森特罗 (EL Centro) 7.1 级地震南北向上的加速度分量。图 1-4(b) 是 1967 年 12 月 11 日考依纳地震的加速度图。另一方面, 往复式和旋转式机器产生的动荷载基本上类似正弦型, 锤的冲击将构成作用在基础上的瞬时荷载。典型的动荷载图形可表示为 稳态运动 [图 1-5(a)、(b)], 瞬态运动 (图 1-6) 和打桩运动 (图 1-7)。

上述图形仅是实际荷载情况的简化表示。现场的实际荷载同这些简化荷载相比常在以下几方面有差别:

1. 实质上荷载并不是真正周期性的, 即荷载的循环并不是按相等的时间间隔重复出现;
2. 任意两个循环的峰值可能不同;
3. 在自然界中不存在纯粹的动荷载。荷载总是动、静荷载的组合。静荷载是由上部结

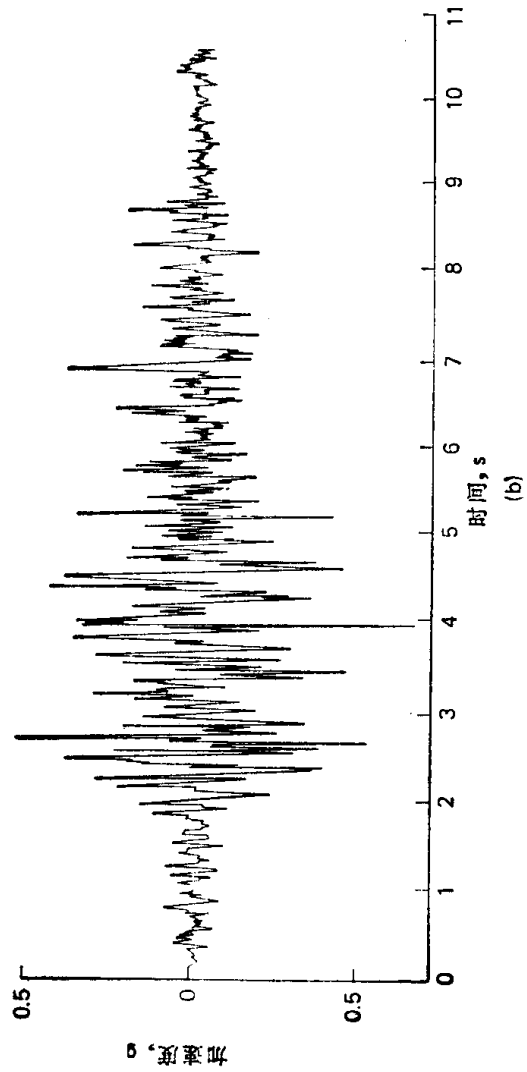
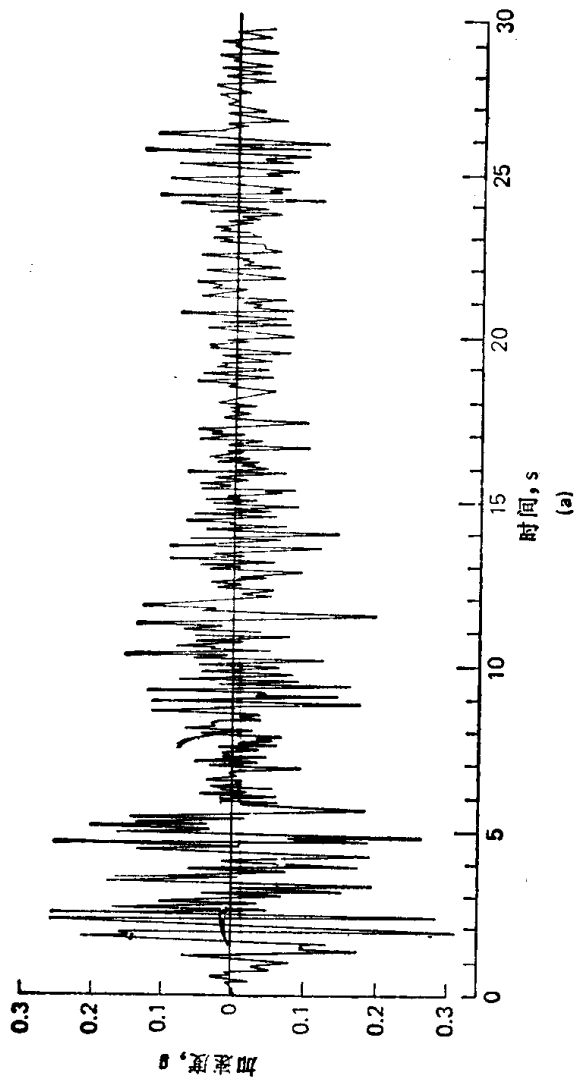


图 1-4

(a) 1940年5月18日爱尔兰特罗地震的加速度图的南北分量, (b) 1967年12月11日柯依纳地震的加速度图沿柯依纳坝轴线方向的水平分量

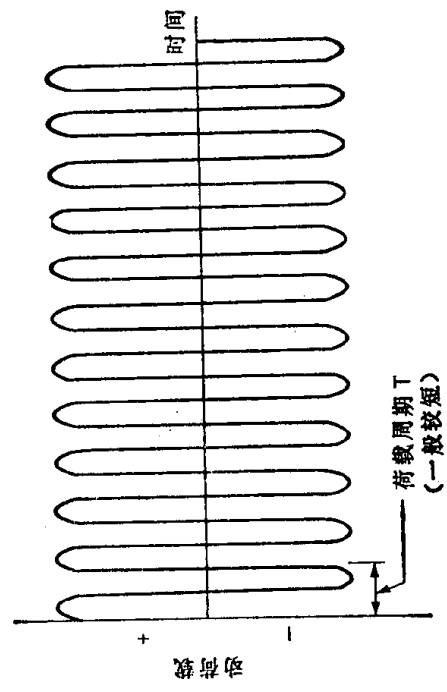
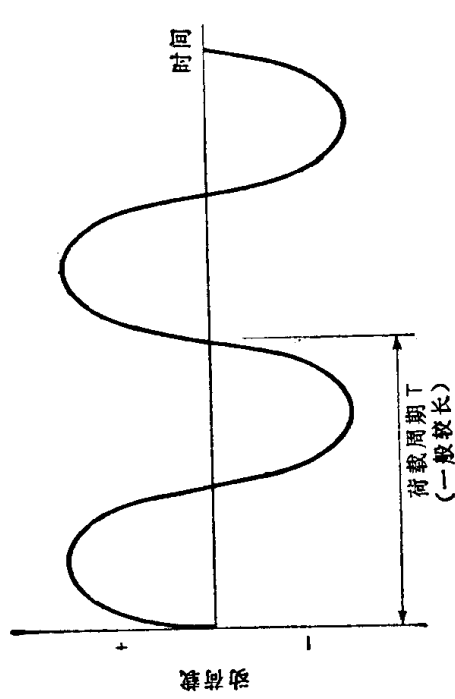


图 1-5 稳态振动的动荷载

(a) 长周期的慢振动荷载, (b) 短周期的快振动荷载

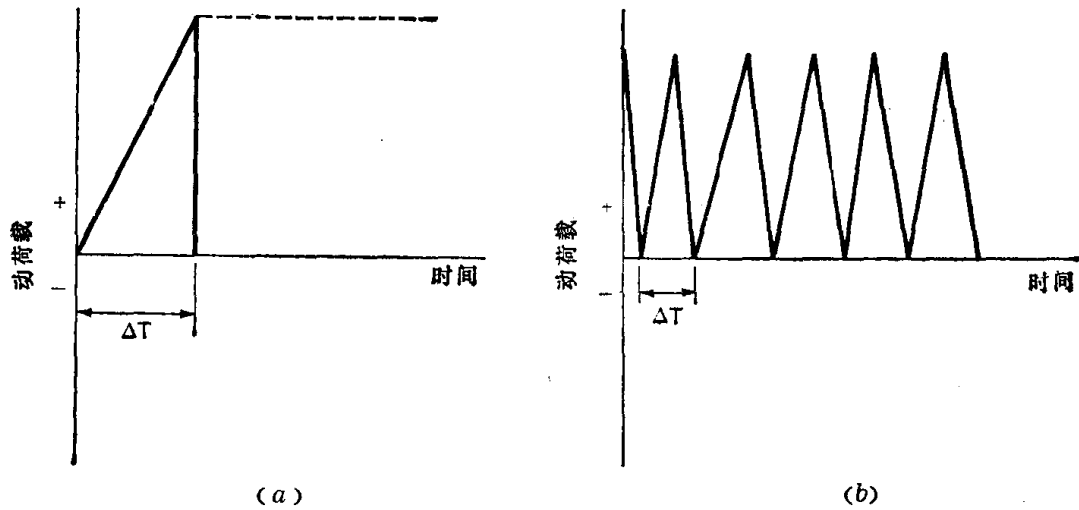


图 1-6 瞬时动荷载  
(a)单脉冲加载; (b)多脉冲加载

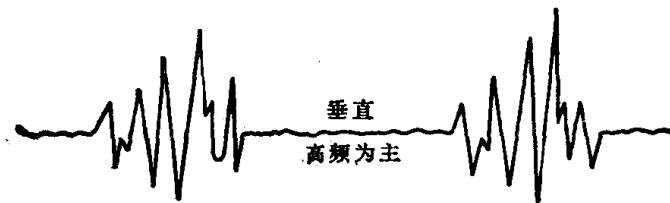


图 1-7 打桩引起的地表垂直加速度轨迹

构和下部结构的自重产生的，而动荷载可能是由上述振源引起的。在下文中，所有与自重不同的荷载，除了另有声明外，都以动荷载考虑。

### 第三节 土单元在地震荷载下的应力条件

荷载伴随着静的和动的应力组合而存在。如果初始静应力较大而地震引起的附加应力较小，则其合成效果与图1-8 (a) 中所示类似。在此图中，一系列对称的脉动应力迭加

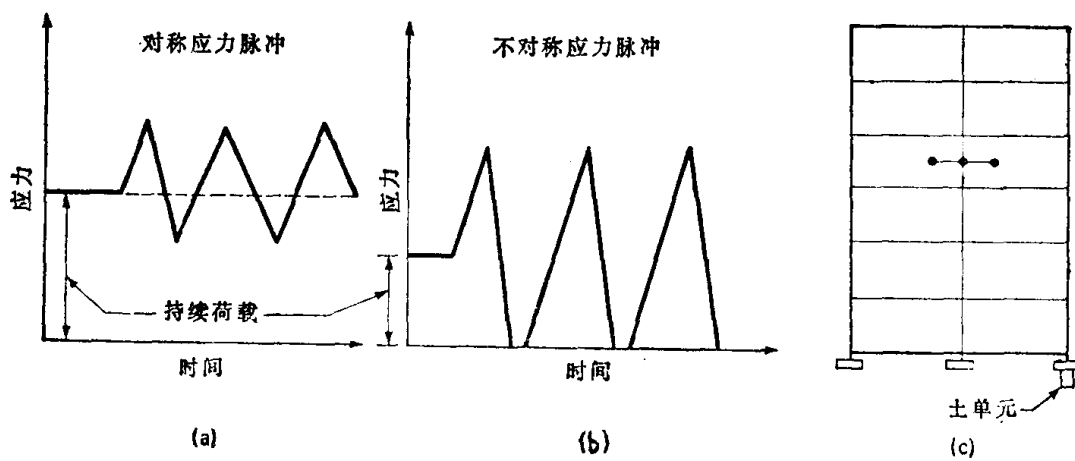


图 1-8 地震时土单元一维加载的情况  
[西特和张(Chan), 1966]



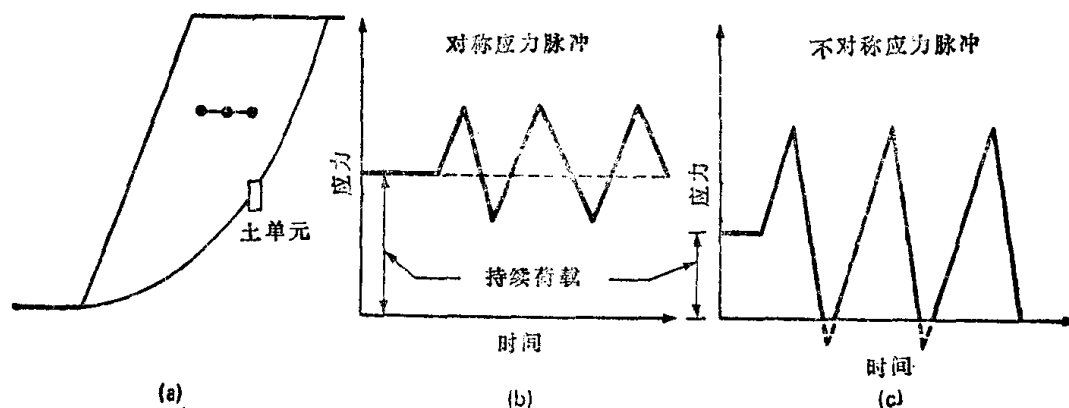


图 1-9 地震时土单元二维加载的情况  
(西特和张, 1966)

到初始的持续应力上面。然而，如果初始的持续应力较小，而脉动应力较大，则组合效果将如图1-8(b)所示。当基础位于土上时，基础下不能有拉应力[图1-8(c)]。这时，基础下的土中应力只作用于一个方向。

在堤坝中，典型的土单元[图1-9(a)]在地震前承受有初始持续应力，由地震引起的脉动应力将迭加在此应力上面。因为土单元可以承受任一方向的剪应力，综合后的应力图形如图1-9(b)和(c)所示。

#### 第四节 动荷载下土和土构筑物的问题

以下几章将详细讨论的土和土构筑物的动荷载问题如下：

1. 土在动应力下的变形和强度特性；
2. 土压力问题和挡土墙；
3. 动承载力和浅基础的设计；
4. 动荷载下的桩基；
5. 土的液化；
6. 机器基础。

进行土的应力应变和强度特性的研究有几个方面的困难，最重要的是为模拟现场和加载条件而设计合用的仪器。同时，世界上的任何地区，目前都还没有致力于此项研究工作的试验标准化。对于确定动荷载下土的其它性质的现状也是如此。

在许多稳定性问题中，常用等效的静力来代替动力并求得解答。这样做有时会导致危险的结果。因此，对于这种情况，动力分析是绝对重要的，而在其它情况中，需要估计结构的自振周期<sup>①</sup>以确保不发生共振现象<sup>②</sup>。

①、②见第二章定义。