

土壤结构相互作用概论

〔美〕J. R. 奥尔古德 著

89002部队情报资料研究室 译

（内部发行）

中国人民解放军工程兵司令部

一九八一年十月

土壤结构相互作用概论
中国人民解放军工程兵司令部

*

中国人民解放军战士出版社出版发行
中国人民解放军第一二〇二工厂印刷

•

开本: 787×1092 毫米 1/16 • 印张 $6\frac{4}{16}$ • 字数 156,000

1981 年 10 月第一版 (北京)

1981 年 10 月第一次印刷

说 明

本文译自美国一九七二年七月AD报告(AD-748581)。

文章综述了防核武器效应设施的土壤结构相互作用的现有知识,较详细地分析土壤结构相互作用的各个侧面,提供诸如地运动、应力波断裂作用和体系最优化必要资料,并通过实例介绍了水平埋置圆筒结构的设计方法,其他如拱、穹顶、球壳、框架、箱形结构也作了相应的介绍。

本文由中国人民解放军89002部队情报资料研究室翻译。为保持原文的完整性和连贯性,除个别地方作了删节外,其余未作变动。

本文可供地下工程结构设计和科研人员参考。

提 要

本书综述防核武器效应设施的土壤结构相互作用现有知识。充分详细地讨论了本课题的各主要分题，以便对本课题有个全面了解并提出了主要参考书目。

用水平埋置的圆筒为例介绍了所推荐的设计方法。对于其它形状的埋置结构建议了类似的设计方法。并对所得的设计用有限单元法进行分析。给出了用该方法对二维和三维问题的分析实例。

为了使读者对土壤结构相互作用问题有个全貌的了解，书中提供了诸如地运动、应力波断裂作用和体系最优化之类外围课题最低限度的必要资料。

特别强调了将埋置结构荷载转嫁给土壤的方法，从而使设计很经济，抗力大大增加。

本书反映了过去十年中在美国核防护署（原先是国防原子支援署）主持下所做的工作。

目 录

1.0 引言	(1)
1.1 目的	(1)
1.2 问题的分析	(1)
1.3 背景	(1)
1.4 范围和方法	(1)
1.5 参考文献	(2)
2.0 介质	(3)
2.1 引言	(3)
2.2 背景	(3)
2.3 土壤性质	(3)
2.3.1 自然性质	(4)
2.3.2 填置性质	(5)
2.3.3 内在性质	(7)
2.3.4 荷载性质	(7)
2.3.5 压缩模量	(9)
2.3.6 卸载与重复加载特性	(10)
2.3.7 剪切强度	(10)
2.3.8 剪切模量和体模量	(11)
2.4 动力效应	(11)
2.5 本构关系	(12)
2.6 参考文献	(13)
3.0 荷载和土壤结构体系性状的主要方面	(15)
3.1 荷载	(15)
3.2 波的传播	(17)
3.2.1 一般特性	(17)
3.2.2 波动理论基础	(18)
3.2.3 反射与折射	(19)
3.2.4 地运动的近似关系	(19)
3.3 相互作用	(20)
3.3.1 相对位移	(20)
3.3.2 界面压力	(23)
3.3.3 界面反射	(23)
3.3.4 应力集中系数和动载系数	(23)
3.3.5 应力波断裂	(24)

3.3.6	降低界面压力——拱作用	(26)
3.3.7	等沉降面	(27)
3.3.8	粘性土中的拱作用	(28)
3.3.9	衬填	(28)
3.4	土壤液化	(29)
3.5	参考文献	(29)
4.0	土壤结构相互作用的基础	(32)
4.1	引言	(32)
4.2	量纲分析	(32)
4.3	不被复坑道	(33)
4.4	水平圆筒	(34)
4.4.1	理论	(35)
4.4.2	设计方法	(43)
4.4.3	有限单元分析	(47)
4.5	参考文献	(63)
5.0	其它形式的结构	(65)
5.1	电缆与管道	(65)
5.2	底脚与基础	(68)
5.3	竖立圆筒	(72)
5.3.1	竖立囊和一维应力盒	(72)
5.3.2	竖井	(74)
5.4	拱	(75)
5.5	穹顶、球体和三维应力传感器	(78)
5.6	箱形结构、框架和其它掩蔽部	(81)
5.7	参考文献	(82)
6.0	最优化	(85)
6.1	问题的一般提法	(85)
6.2	最优化步骤	(85)
6.2.1	结构分析的方法论	(85)
6.2.2	子程序	(87)
6.2.3	结构造价分析	(90)
6.2.4	计算与输出	(90)
6.3	参考文献	(90)
7.0	概述	(91)
附录	——实验室试验得到的本构关系和物理性能	(92)

1.0 引言

1.1 目的

约从1962年一直到1968年进行了广泛的研究,以探明土壤和结构相互作用现象学。大部分工作是在美国核防护署(DNA)资助下进行的。随后,压缩了一下工作继续进行,对所获得的知识进行综合,却花了更多的力量。本书概述了核防护署计划安排下获得的土壤结构相互作用研究的主要成果。

1.2 问题的分析

土壤结构相互作用知识是对抵抗大的静荷载或冲击波荷载的埋设结构进行恰当的设计所必需的。在过去,并不需要精确的设计方法或专门步骤,因为碰到的主要是低的公路填方下的涵管,或荷载不大的类似场合。事实表明,实际上所有涵管的毁坏是由于填土作业质量缺乏控制或由于意外原因,例如,由于水的渗入或渗出造成的损坏^[1.1]。

今天的公路和铁路的高路堤、抗冲击波荷载的防护设施的需求以及地下城市发展迅速增长的需要,都要求改进设计步骤,要求采用比过去惯用的好得多的施工质量控制。

1.3 背景

核防护署资助的土壤和结构相互作用研究工作,目的在于提供防冲击波荷载的防护系统的设计、分析方法并了解系统的性状。为了解决对冲击波的响应问题,首先需对静力问题有较好的了解。

静力问题的大量研究工作(主要针对涵管)是在核防护署资助的研究之前完成的。涵管研究中突出的是马斯顿(Marston)^[1.2]和斯潘格勒(Spangler)^[1.3]的研究,其中还发展了在假设的荷载分布基础上建立的性状理论。也有人提出过建立在接缝强度、限制环向压缩和最小柔度基础上的设计方法。所有这些方法本身都不足以取得有效的的设计,主要因为它们没有适当地考虑拱作用,也没有考虑所有可能的破坏形式。

截至1970年的涵管技术研究状况见参考文献1.1,其中引入了广泛的文献目录。

不幸,迄今进行的土壤结构相互作用试验很少对土壤性质和土壤性状进行过充分的量测。部分原因是,只是近些年来才有良好的土壤应变和应力仪可供使用。此外,迄今为止还找不到恰当的理论来指导试验人员进行良好的试验设计。

自马斯顿理论以来,第一个主要理论进展是弹性理论解^[1.4,1.5]。随后是一系列不断改进的有限单元计算程序^[1.6],这些程序能解二维体系(平面应力或平面应变)的静态或动态、线性或非线性问题。三维线性体系的程序也有^[1.7]。尽管不完善,这些分析工具却大大地改进了对土壤结构相互作用的理解和分析能力。

为了认识静力和冲击荷载作用下土壤结构体系,已进行了广泛的试验。文献1.8到1.12提供了恰当的书目资料。近期研究的主要参考资料将在本书有关章节中提到。

1.4 范围和方法

本书打算介绍土壤性质、荷载和地运动的一般知识,然后较详细地分析土壤结构相互作用的各个侧面。再给出特定形式结构的大致设计方法,最后对土壤结构体系的分析进行讨论。

*1.5 参考文献

- 1.1 Highway Research Board. National Cooperative Highway Research Program Report 116, Structural analysis and design of pipe culverts, by R.J. Krizek, et al., Washington, D.C., 1971.
- 1.2 A. Marston. "The theory of external loads on closed conduits in the light of the latest experiments," Highway Research Board, Proceedings, vol. 9, 1929, pp. 138-170.
- 1.3 Iowa State College. Engineering Experiment Station. Bulletin No. 153. The structural design of flexible-pipe culverts, by M.G. Spangler. Ames, Iowa, Dec. 1941.
- 1.4 J.O. Burns. An analysis of circular cylindrical shells embedded in elastic media, Ph.D. thesis, University of Arizona, Tucson, Ariz., 1965.
- 1.5 Air Force Weapons Laboratory. Technical Report No. AFWL-TR-65-98, Pressure distribution on underground structural cylinders, by K. Höeg. Kirtland Air Force Base, N.M., Apr. 1966. (Contract AF 29(601)-6368) (AD 631671)
- 1.6 Naval Civil Engineering Laboratory. Contract Report CR 69.019, Dynamic response analysis of two-dimensional structures with initial stresses and non-homogeneous damping, by I. Farhoomand, E. Rukos, and E.L. Wilson. Berkeley, Calif., University of California, Jan. 1970. (Contract N62399-69-C-0016) (AD 874628L)
- 1.7 University of California. Structural Engineering Laboratory. Report No. SESM 70-20, SAP, a general structural analysis program, by E.L. Wilson. Berkeley, Calif., Sept. 1970. (Contract DACW 68-67-C-004)
- 1.8 Iowa State University. Engineering Experiment Station. Final Report on Contract, DA-49-148-ZX-085, A study of loads on underground structures, pt. 1. An annotated bibliography, by D.A. Van Horn. Ames, Iowa, Jan. 1963. (DASA 1406)
- 1.9 Defence Research Board. Report DR-170, Bibliography of soil dynamics and soil-structure interaction during dynamic or similar loadings, compiled by G.T. Hughes, et al. Ottawa, Canada, Mar 1965.
- 1.10 Air Force Weapons Laboratory. Technical Report No. AFWL-TR-67-145, An annotated bibliography of protective structures research, by M.J.C. Garcia. Kirtland Air Force Base, N. M., Feb. 1968. (See also AFWL-TR-69-179, Feb. 1970)
- 1.11 Highway Research Board. Subcommittee 6GF-B5C1, Stress and displacement bulletin, Solutions to boundary value problems in stresses and displacements of earth masses and layered systems by D. Hampton, B.B. Schimming, and E.L. Skok. Washington, D.C., Jan. 1966.
- 1.12 University of Southampton, Department of Civil Engineering. Report no. 1, The dynamic response of a cylinder shell embedded in an elastic half-space using the finite element method of analysis, by C.S. Duns. Southampton, England, Feb. 1966. (Research Contract no. A/70/GEN/9658)

2.0 介 质

2.1 引言

本章提供了土壤结构体系设计必需的材料性能背景资料,只限于为了使读者了解埋置结构的设计和分析所必需的土壤性质、试验和关系的最低限度的内容。为了那些希望深入了解这些课题的读者,列出了详细的背景资料的来源。

除非另有说明,下面的讨论基本上针对粒状土,因为粘土一般不适合于必须承受高荷载的土壤结构体系。也有例外,如用粘土层来衰减应力脉冲或形成隔水层。无论如何,粒状土壤较高的模量和剪切强度及相对地不易产生塑性流,比之粘土的相应特性优越。适宜于防护工程的是很细的,有足够细颗粒和湿度,因而具有一定粘结强度的粒状土。

利用土壤一个或更多的主要参数时常可以进行近似的设计。例如,受均匀地表荷载的均匀半无限粒状土的最大垂直位移,可用相应于外加压力的土壤侧限压缩割线模量的弹性理论获得相当好的近似,假定实验室试验中确定模量时,土壤的初始密度和其它有影响的因素与野外试验相同。

一般都知道,在静力设计中,相应于初次加载的土壤应力—应变曲线通常有重大意义。对于冲击波荷载,加载—卸载—再加载的全部特性都是重要的,相对于土壤—结构体系的固有周期而言,荷载作用时间短的场合尤其如此。全部特性,包括土壤场区地质,在确定晚期运动中是绝对必要的。其中原因之一是当荷载是动载时,场区一部分可能是卸载的而另一部分可能是再加载的。这样,为了充分地确定性状,需要确定受载的任何可能阶段的土壤状态关系式。这种关系式称作本构方程,在下面章节中将进一步介绍。土壤本构方程包含了土壤工程师所熟悉的土壤性质,其中主要的性质将在下面几节中加以评述。

2.2 背景

惠特曼(Whitman)概述和评价了土壤的动载反应研究,并给出了所需土壤性质的试验方法^[2.1]。标准土壤试验的弹性关系在附录中给出。杰克逊(Jackson)讨论了推导土壤本构关系的实验室数据分析方法^[2.2]。已制定出多种状态方程以用于各种计算机程序,其中有迭麦其欧(DiMaggio)^[2.3]、伊森伯格和李(Isenberg and Lee)^[2.4]及纳尔逊(Nelson)^[2.5],^[2.6]的。进一步的研究和提高是需要的,以增进对岩土材料性状的了解,并求得完善的解析表述;然而,现有的表述已经不差,已能算出近地面运动^[2.7—2.16]。

本书是以下列假设为基础的,即对于设计目的而言,用一种近似方法或一种主要代码,能够充分好地算出近地面运动,而所得的数据将利用下几章的方法作为土壤结构分析的输入。这样,我们的主要兴趣在于近地表埋置结构附近的土壤的本构性质。大多数情况下对范围的这种限制使问题得到了简化,因为排除了考虑热力学性质的必要性。

2.3 土壤性质

土壤一般表现为各向异性介质,静水应力作用并不在所有方向上产生相等应变。但是,对大多数应用来说,假设土壤在纯压缩下是各向同性的就足够了。很自然,土壤性质对边界

条件以及对沉积性质和加载方式非常敏感。在确定土壤性质和将实验室测量与相应野外条件的测量相比较时必须牢记这个事实。

粒状材料的常用性质在表2中给了细目并进行了分类。有些参数按理放在其它类中较为合宜,但是表中的分类,讨论时方便。

表2.1 土 壤 性 质^a

符 号	参 数	指 标 或 方 程
自 然 性 质		
-	棱 角	-
-	粒径分配	$e_{\max} - e_{\min}$
ρ	质量密度	-
e_w	含水率	$e_w = 100W_w/W_s$
e	孔隙比	$\bar{e} = V_v/(V - V_v)$
填 置 性 质		
d_r	相对密度	$d_r = (e_{\max} - \bar{e})/(e_{\max} - e_{\min})$
K_o	静止侧向土压力系数	$K_o \approx 0.95 - \sin \phi$
K_p	被动侧向土压系数	$K_p = \tan^2(45^\circ + \phi/2)$
K_a	主动侧向土压系数	$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$
ν	泊松比	$\nu = (M_s - 2G)/2(M_s - G) = K_o/(1 + K_o)$
K	体模量	$K = 3\Delta V/\sigma_{KK}$
内 在 性 质		
$\bar{c}$	粘聚力	-
ϕ	摩擦角	-
u	孔隙水压	$u = u_i + \Delta u_{cw} + \Delta u_{dis}$
静 载 性 质		
M_s	从 $\sigma_{11} - \varepsilon_{11}$ 曲线得来的侧限压缩模量	-
M_u	卸载模量	-
S	剪切强度	-
G	剪切模量	-
动 载 性 质		
C_d	膨胀波速度	-
C_s	剪力波速度	-
ζ	阻 尼	-

a. 注: 名词的定义见符号表。

2.3.1 自然性质

土体的自然性质包括: 颗粒棱角, 粒径分配, 质量密度, 含水率和孔隙比。这些性质对设计中使用的其它性质有影响, 但在另外方面仅有间接意义。幸亏, 设计者有可能改变土的

自然性质，甚至在埋置结构附近填入外来的土壤。结果，回填土壤及填土方法便得以控制。

2.3.2 填置性质

“填置”性质指埋置结构附近最易受到回填方式影响的土壤性质。它们包括相对密度（或密度的某一其它度量），静止侧向土压系数、泊松比和体模量。相对密度对于大多数应用来说无疑是这些性质中最重要的，因为它是刚度和剪切强度的决定性主要因素之一。

对许多野外设施，特别是那些具有自由排水性质的非粘性土壤中的设施、密度或密度的某一指标是控制压实程度时使用的唯一参数。密度主要取决于土壤种类、填土作业时的压实作用力和含水率。土壤种类和相对密度对摩擦角的影响见图 2.1(2.17)。初始孔隙比同样影响摩擦角。

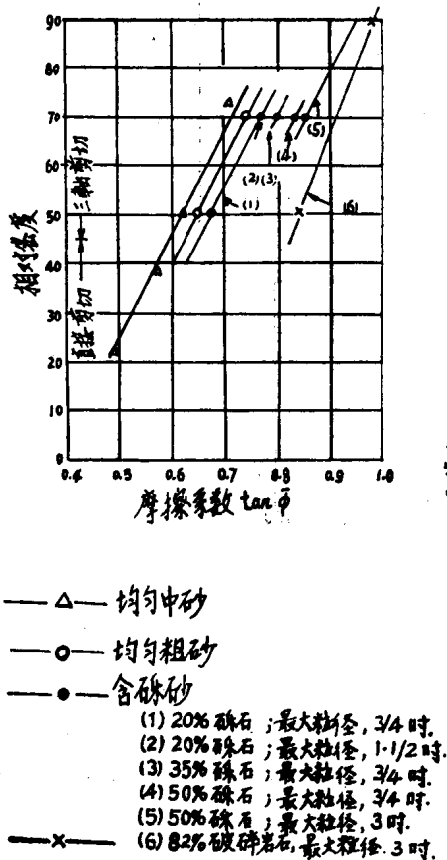


图 2.1 粗粒土壤相对密度对摩擦系数的影响（取自参考资料 2.17）

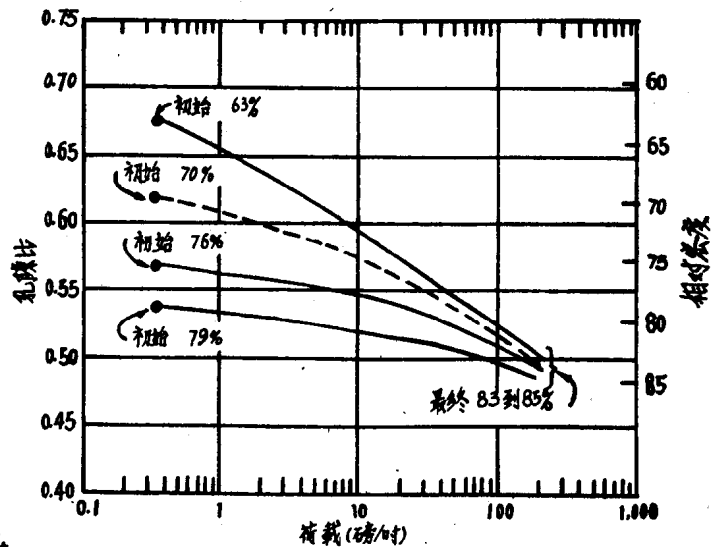


图 2.2 一种均匀细砂的压缩特性与填置相对密度的关系（取自参考资料 2.17）

土壤在受载时从一给定的初始密度按图 2.2 中所示的方式压实。压实程度可用孔隙比或相对密度方便地表达，如表 2.1 所示。图 2.2 中两个预期得到的特性是明显的：一，高初始密度土壤的相对密度随荷载的变化不大；二，所有不同初始密度的曲线在压力大于 100 磅/英寸²时汇集到一共同值。

对于粒状土壤和粘性土壤，在给定的压实作用力下，密度随含水率的变化曲线在图 2.3 中作了比较。许多基本上是粒状的土壤因含有细颗粒和水份而使土壤有一定粘聚力，其压实

曲线将位于图2.3中所示曲线之间〔2.18〕。当然，压实作用是填置密度的主要因素。在参考文献2.1和2.19到2.27中对密度和确定密度的方法作了详细讨论。参考文献2.19中概述了美国各州公路工作者协会和其它部门的实验细则。密度对土壤模量和其它参数的影响将在以后的章节中讨论。

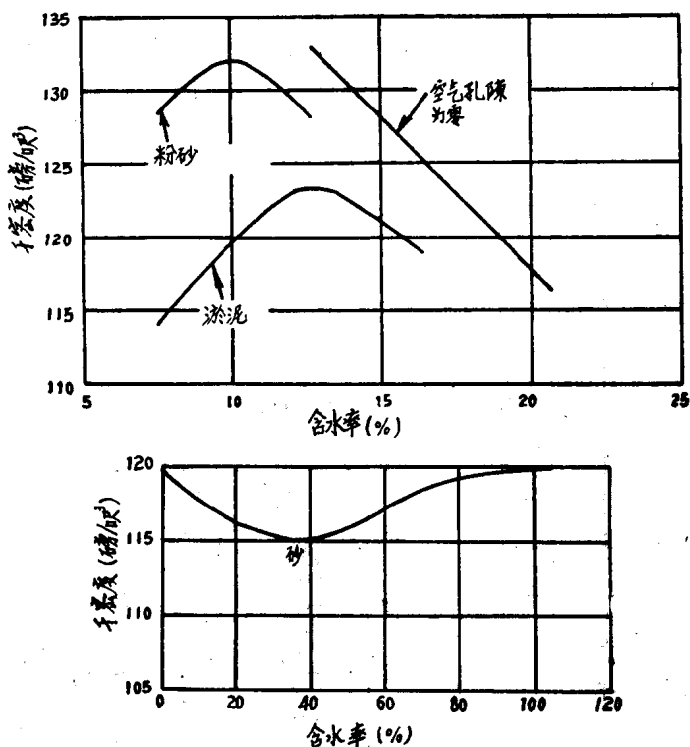


图 2.3 修正的美国各州公路工作者协会压实曲线

亨德伦(Hendron)(2.28)和其他研究者指出：大约在10磅/英寸²以上，静止侧向土压系数 K_0 。(水平与垂直应力之比)在加载时变化不大。但从图2.4看出，在卸载过程中该系数逐渐增加到加载时的两倍以上。试验表明，静止侧向土压系数对于同样填置的次尖棱和次圆干砂没有很大的差别〔2.29〕。显然， K_0 主要取决于土壤的填置或沉积过程。

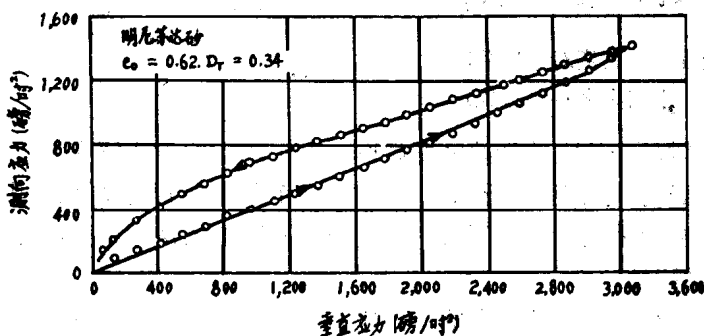


图 2.4 一维压缩时的侧向应力 (取自参考资料2.28)

根据泰沙基(Terzaghi)的著作〔2.30〕, K_0 值的变化范围从松散砂的0.3到密实砂的0.5。地下水位以下, K_0 接近于1.0。分层夯实, 可使土壤的 K_0 值增至0.8; 反之, 对于有可能发生侧向膨胀的堆筑工程或路堤, K_0 的有效值可为0.2或更少。在使用落砂法的地方, 通常 K_0 大约是0.45。在受到均匀地表荷载的均匀土壤场区, K_0 的大小可根据下式估算〔2.31〕,

$$\left. \begin{aligned} K_0 &= 1 - \sin \bar{\phi} && \text{(砂)} \\ K_0 &= 0.95 - \sin \bar{\phi} && \text{(粘土)} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

式中 $\bar{\phi}$ = 排水条件下(或无排水条件下考虑有效应力的)的内摩擦角。倘若考虑有效应力, 则方程2.1既适用于无粘性土也适用于粘性土。方程的精确度约在 ± 0.15 以内。

泊松比(水平应变与垂直应变之比)的情况与 K_0 相对应。严格地讲, 泊松比 ν 在不同坐标方向的值不同, 并随荷载变化; 但是, 若用与一给定作用应力相应的割线模量来确定它, 设计中可用一个单一的值。表2.1的右栏中给出了有关的关系式。(表2.1也给出了用静止侧向土压系数 K_0 表示的 ν 的关系式。参考文献 2.32 中概述了一些不同研究者确定的各类土壤的泊松比值。)与 K_0 一样, 泊松比受到填土方法的影响。

填土方法也影响体模量 K , 后者定义为平均主应力与体应变之比。它常被选来作为本构关系中的自变量〔2.2〕, 因此它是比较重要的土壤参数之一。 K 的变化范围大约相同于侧限压缩模量, 后者将在评述土壤内在性质后讨论。

2.3.3 内在性质

土壤内在性质(如惠特曼定义的那样〔2.1〕)系指与土体整体尺寸或土体边界条件无关的土壤性质。内在性质控制了土壤的剪切强度。如表 2.1 所示, 土壤内在参数是粘聚力, 摩擦角和恒含水率下受剪时形成的过量孔隙水压。对于大多数粒状土壤, 粘聚力小于25磅/英寸², 摩擦角的变化范围约从30度到45度, 随颗粒的棱角而定。

甚至在密实干砂中孔隙水压也会发生变化, 但是, 这样的变化在地表下几英尺和地下水位之上是不显著的, 除了最小主应力比最大主应力小很多的不寻常情况〔2.1〕。

2.3.4 荷载性质

剩下的主要设计参数是荷载性质——那些通常在某些实验室或野外试验中荷载作用下显示出来的抗力特性。这些特性包括侧限压缩模量 M_s , 卸载模量 M_u , 剪切模量 G 和剪切强度。在土壤结构相互作用设计中, 我们要注意的问题是防止土壤和结构这两者的破坏。通常影响抗力的主要土壤参数是土壤模量和剪切强度。

土壤结构相互作用理论中常用的压缩模量包括:

E_s = 杨氏弹性模量

M_s = 割线侧限压缩模量

M_t = 切线模量

M_1 = 加载模量, 通常为 M_s 或 M_t 。

M_u = 卸载模量

M_r = 重复加载模量

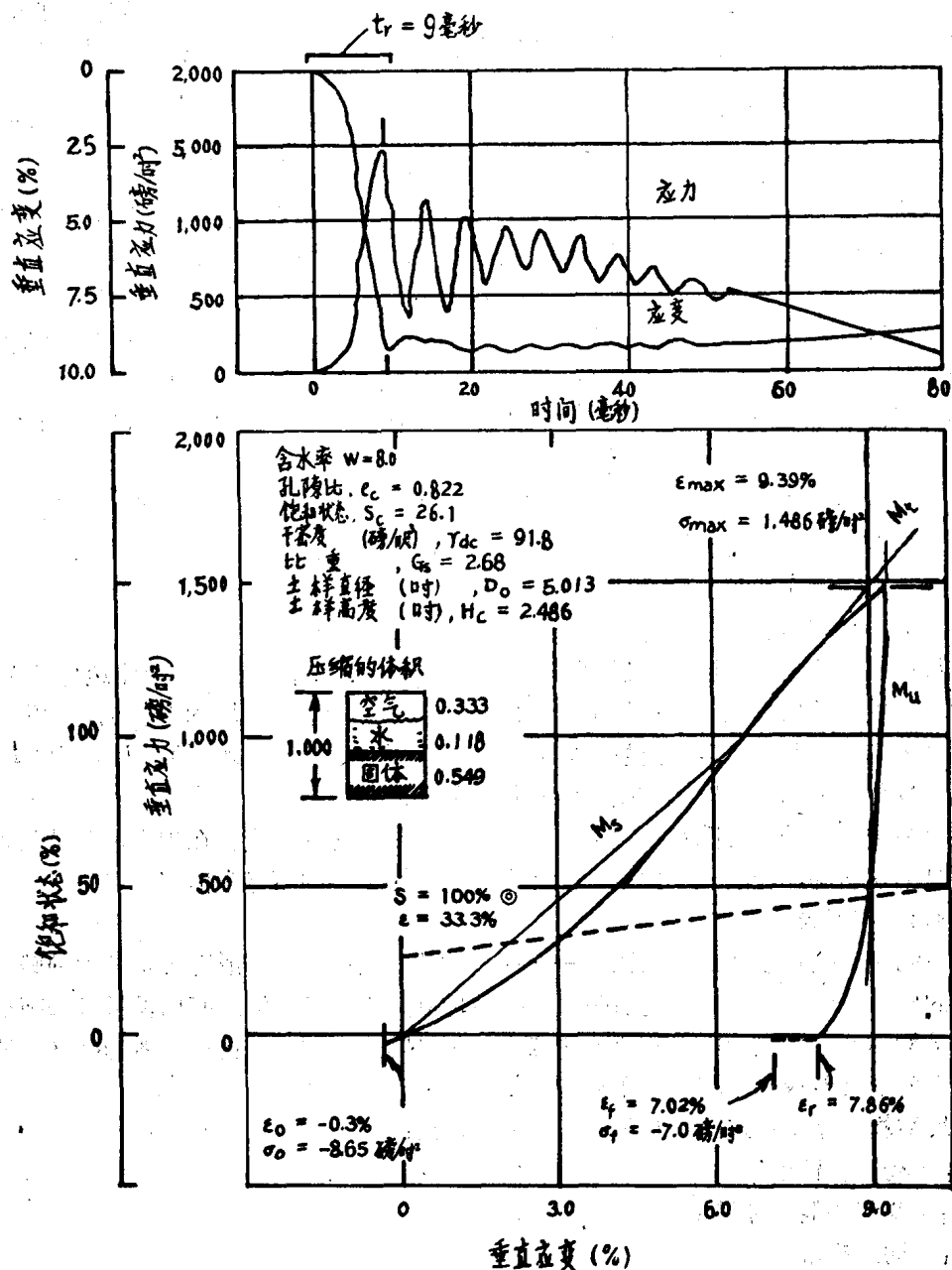
G = 剪切模量

K = 体模量

这些模量通常由侧限压缩、零(null)、三轴或比例加载试验确定。图2.5是一页典型的实验数

据记录。选了与作用压力相对应的几个模量(如图2.5所示),而有些则作为变模量。

除以上列出的模量外,还有一些与特殊的土壤结构配置形式有关,如底脚的地基



分类: 灰色含泥砂的粘质砂 (SM-SC)

附注 $LL = 21$, $PL = 14$, $PI = 7$,

$e_c = 0.828$, $S_o = 25.9\%$

计划: "延迟平瓦" 事件 6

试验场地: 加舒大 DRES, 观察

钻孔号: NCEL 1 土样号: 3

深度: 6.2 日期: 10-9-67

EI: 2,157.8

图 2.5 单轴应变试验结果——动力试验 NCEL 1.3.2. (取自参考资料 2.33)

模量和埋置圆筒的弹性支撑模量。这些模量将在第4章和第5章中讨论特殊几何外形结构时定义。上述的其它模量在下节中定义和讨论。

2.3.5 压缩模量

这里所谓的压缩模量包括 M_s 、 E 和 M_t 。侧限压缩模量是侧限压缩试验中与作用应力相对应的应力——应变曲线的割线模量。非线性系统的近似解常用弹性理论获得，所用的杨氏模量得自下式，

$$E = \frac{(1 + \nu_s)(1 - 2\nu_s)}{1 - \nu_s} M_s = \eta M_s \quad (2.2)$$

式中 M_s 是与作用压力相对应的侧限压缩模量， ν_s 是泊松比。

顾名思义，切线模量是应力——应变曲线的正切——通常指给定的荷载区间平均应力处的正切。图2.5的实验室数据记录中给出了割线和切线模量。

粒状材料单轴应变实验的初次加载期间($0 < \sigma \leq 100$ 磅/英寸²)，应力——应变曲线的初始阶段常常是向下凹的。当荷载增加时，孔隙闭合，第二阶段开始，结果产生应力——应变曲线向上凹的部分。只有当颗粒开始破碎时，应力——应变曲线才能改变曲率，变成又向下凹。

在给定砂和初始密度的条件下， M_s 的变化见图2.6a。图中表示了海军土木工程实验室砂实测应力——应变变化范围。用落砂法将砂装填在直径5英尺，厚1/2英寸的钢环组成的土箱内。试验中的静止侧向土压系数为0.45。可以看出，对给定型式的试验，数据的离散还是相当大的，即使在这些试验中，条件控制得很好。

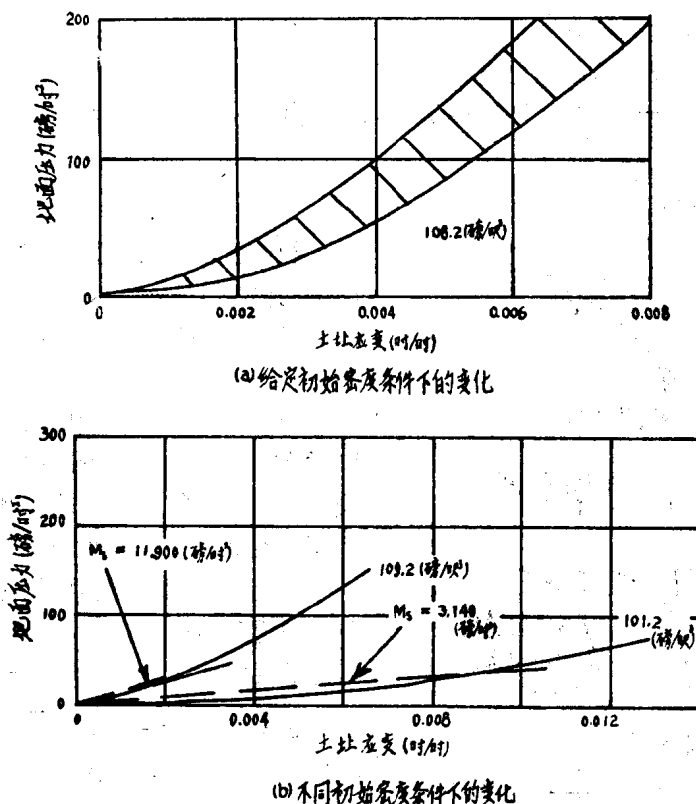


图 2.6 土壤应力和应变性质的变化(海军土木工程实验室土箱内的侧限压缩试验)

从上述实验可以看出, M_s 随初始密度变化, 见图2.6b〔2.29〕。图中两条曲线相当于用落砂法所能达到的最大和最小密度。从图2.6b中可以看到的最主要之点是, 低压下 M_s 有效有很大差别(25磅/英寸²时相差2倍), 这种差别随压力增加而加大, 直到一最大差值, 此最大差值从该图所示的试验结果尚不能确定。

给定初始密度下 M_s 的变化尚无充分的资料。在一组试验中, 发现在良好的控制条件下这种变化是 $\pm 20\%$ 〔2.34〕, 在野外条件下。变化要大于此范围。

通过固结仪试验确定 M_s 时须谨慎小心。来自固结仪试验的结果难得是可靠的, 除非荷载是通过一柔性膜用气压或液压施加的。如果不容易取得使用这样加载手段的试验结果, 则对于非饱和的、中砂压实到95%美国各州公路工作者协会 T99—49密度时, M_s 可从下列关系式估算,

$$M_s \approx 1,000 p_a^{0.8} \quad (2.3)$$

式中 p_a 是欲求的 M_s 所相应的应力。当大于约200毫米的细粒的百分比增加时, M_s 值比之方程2.3算出的就很快减少。方程2.3是卢歇(Luscher)提出的〔2.35〕。

在分段线性分析中, 常用切线模量而不是割线模量。自然, 以上关于割线模量的讨论同样适用于切线模量。卸载模量通常也取切线模量。

2.3.6 卸载和重复加载特性

对于受冲击波荷载的场区, 卸载模量 M_u 甚至可能比 M_s 重要, 因为大部分时间属于运动的卸载阶段。一种粉砂的卸载特性见图2.5。卸载——重复加载性能的主要特征是:

1. 卸载——重复加载曲线比初始加载要陡得多。
2. 卸载后保持永久残余变形。
3. 出现伴随能量损失的滞回现象。

砂通过初次加载——卸载循环的能量损失是50%左右。在以后的加载中, 每一循环的能量损失下降〔2.1〕

2.3.7 剪切强度

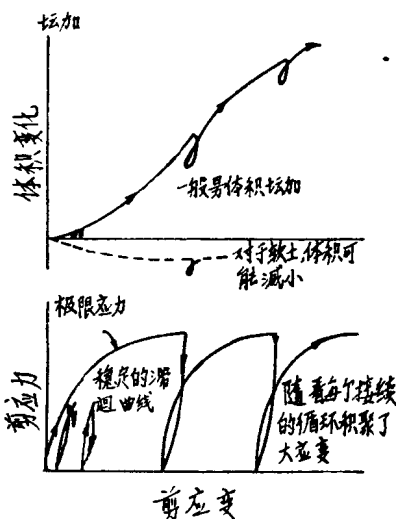


图 2.7 剪切时典型的应力——应变和体积变化曲线(取自参考资料2.1)

剪切强度 S 是指发生剪切破坏时的应力。典型的剪应力——应变和体积变化曲线见图2.7。可以注意到这些曲线是下凹的, 而持续的加载——卸载循环产生类似的曲线。对于幅度小于极限应力约一半的剪应力, 在多次荷载循环后产生相对稳定的滞回曲线。除了很软的土壤外, 常常随剪力荷载的增加体积也增加, 因为颗粒脱离从而相互间企图滑动。

利用三轴剪切试验可很快确定剪切强度, 但在缺乏这样的数据时, 可用经泰沙基改进而考虑了孔隙水压效应的摩尔——库伦假设:

$$S = \bar{C} + (\sigma - u) \tan \bar{\phi}, \quad (2.4)$$

式中 S = 剪切强度

$\bar{C}$ = 粘聚力

σ = 平面上的法向总应力

$u = u_i + \Delta u_{cw} - \Delta u_{dis}$

u_i = 初始孔隙水压

Δu_{cw} = 不变含水率条件下剪切期间产生的过量孔隙水压

Δu_{dis} = 在加载期间由于固结而被抵销的过量孔隙水压

$\bar{\phi}$ = 摩擦角

摩尔——库伦方程诚然是土壤实际强度性状过于简单的表述，但是，它为许多种应用提供了足够精确的近似，并提出了强度涉及的主要参数。对强度更完善的表述见第2.5节。

虽然方程2.4不包括外形参数，但剪切强度与形状、质量及加载方式有关。这些因素影响 σ 和 u 。

2.3.8 剪切模量和体模量

剪切模量 G 是现有应变状态下剪应力——剪应变包络线的斜率。剪切破坏包络线与体系几何形状有关，因而与体系的应力不变量有关。这无疑是说初始剪切模量能够从三轴剪切试验中确定，但剪切模量函数却不能用它来确定。

对剪切模量提出过许多解析表达式，其中包括法胡曼德(Farhoomand)(2.36)和纳尔逊(Nelson)(2.5, 2.6)的。这些表达式表明剪切模量与几何形状及介质中的应力状态密切相关。剪切模量或体模量在本构模型中没有必要表示成显函数。

体模量是平均应力与体应变之比(2.37)。根据定义，它是应力不变量的函数。剪切模量和体模量以及剪切强度对惯性和应变速率效应的依赖性尚不完全清楚。第4章中给出了土壤各个模量之间的解析关系。

2.4 动力效应

动力效应可认为是与应力波阵面上和阵面附近现象有关的效应，也是质量作用特有的效应。除压力和密度间断外，与波阵面有关的现象还包括反射、折射、应变速率效应和能量衰减。固体中的波传播是本书讨论范围以外的一个广泛的研究领域，在后面一节中介绍本报告所需的最低限度的有关内容。

应变速率对干的粒状材料压缩性的影响一般可以忽略。但是， $\bar{\phi}$ 值可能有10%到15%的变化，这能导致承载能力很大的变化。摩擦角究竟怎样和为什么受应变速率的影响还不知道。

对于湿砂，由于固结产生的过量孔隙水压(因而，剪切强度)受应变速率的影响，尽管如此，极限剪切强度对应变速率的依赖性很小。由于高应变速率引起的过量孔隙水压的差别，饱和砂物理参数值可以是静力值的两倍或更多倍数。粘性土中的应变速率也几乎只受过量孔隙水压 Δu_{cw} 的变化影响。

质量作用现象大致类似于单自由度弹簧——质量体系的特点，即：

1. 如果荷载持续时间与基本固有周期之比约大于6，荷载持续时间将不影响最大挠度。

2. 如果荷载持续时间对基本固有周期之比约大于6，土壤质量将不影响最大挠度。

3. 如果上升时间与基本固有周期之比约大于6，荷载实际上将是静态的。

基本压缩振型频率(垂直于均匀土场的表面)可用下式近似值，