

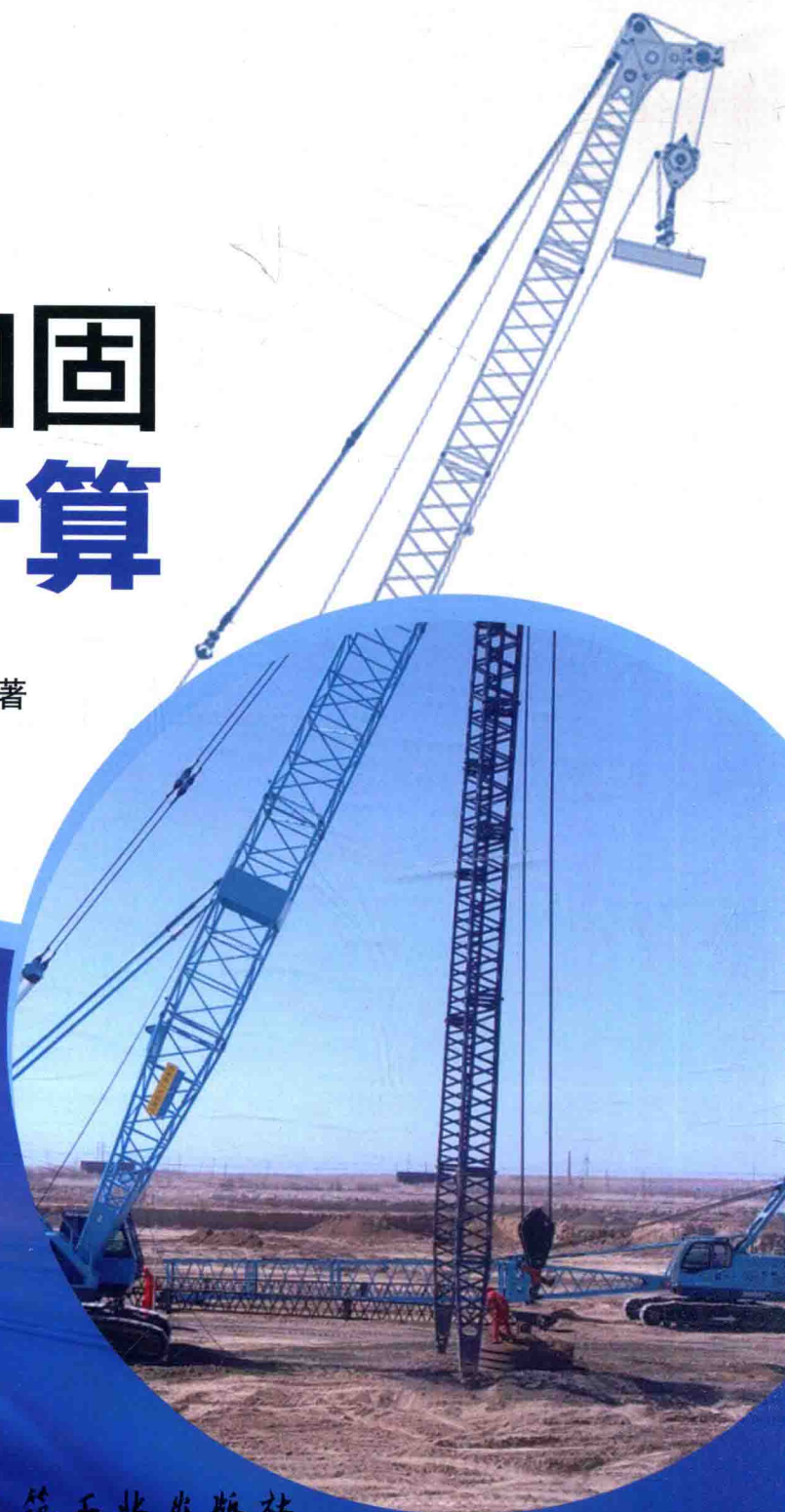
本学术著作获江西理工大学优秀学术著作出版基金资助

Simplified
Calculation
of Dynamic
Compaction

强夯加固 简化计算

■ 罗嗣海 石亮 邓通发 著

中国建筑工业出版社



本学术著作获江西理工大学优秀学术著作出版基金资助

强夯加固简化计算

罗嗣海 石 亮 邓通发 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

强夯加固简化计算/罗嗣海等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 12

ISBN 978-7-112-17492-8

I. ①强… II. ①罗… III. ①夯实加固 IV. ①TU472.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 269798 号

本书是作者从事相关课题研究的成果总结。全书共 9 章, 主要介绍从工程需求与实用角度出发, 采用室内试验、模型试验、统计分析、简化理论分析和数值模拟等方法, 对冲击作用及冲击作用后土的性状、强夯冲击动应力、强夯地面夯沉量、强夯加固效果简化计算方法、地面夯沉量在加固效果估算中的应用、置换式强夯的置换深度等方面进行的研究及取得的实用成果。本书既可供岩土工程相关专业人员学习, 也可作为大中专学校和科研院所相关人员参考。

责任编辑: 刘江 范业庶

责任设计: 王国羽

责任校对: 陈晶晶 姜小莲

强夯加固简化计算

罗嗣海 石亮 邓通发 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 12 $\frac{3}{4}$ 字数: 307 千字

2015 年 9 月第一版 2015 年 9 月第一次印刷

定价: 40.00 元

ISBN 978-7-112-17492-8

(26264)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

强夯法，即强力夯实法，也称动力固结或动力压密法（英文常称 Heavy Tamping，Dynamic Compaction, Dynamic Consolidation 等），其应用始于 1969 年法国工程师 L. Menard 对法国 Cannes 附近 Napoule 地区废弃石料的地基处理。由于具有经济易行、效果显著、设备简单、施工便捷、质量容易控制、适用范围广泛、节省材料、施工周期短等突出优点，强夯法在工程中得到广泛而成功的应用。四十余年来的发展，强夯应用的工程类别不断拓展，工艺不断改进，能量不断加大，适用的地质条件不断突破，产生了良好的经济与社会效益。

与工程实践的成功和广泛应用形成鲜明对比的是，强夯的研究尚处于肤浅、零星和不成熟的初级阶段。主要表现在：对冲击作用和冲击后土的性状研究不够，强夯机理和强夯适用土质条件仍没有共识，强夯尚无较全面和公认的设计计算理论和方法，施工前难以对施工中产生的地面变形、特别是施工后地基的性状进行估算，强夯应用仍处于高度经验阶段。

强夯是一个多孔多相松散介质中的瞬时动力大变形课题，问题十分复杂，精确的理论求解十分困难、也难于在工程中应用。本书作者的研究不过于追求理论精准和严密，主要从工程需求与实用角度出发，采用室内试验、模型试验、统计分析、简化理论分析和数值模拟等方法，对冲击作用及冲击作用后土的性状、强夯冲击动应力、强夯地面夯沉量、强夯加固效果简化计算方法、地面夯沉量在加固效果估算中的应用、置换式强夯的置换深度等方面进行了研究，取得了一些实用成果。

全书共分 9 章：

第 1 章介绍了土的室内冲击试验研究成果。在简要综述前人研究成果的基础上，分别介绍了饱和土冲击动力响应、土冲击本构关系、冲击后土性状及动静压密后土性状的对比研究等方面的研究成果。

第 2 章介绍了强夯冲击动应力研究成果。系统总结了锤-土接触面应力峰值和作用时间的计算公式，推导了新的接触面拟静力公式和锤-土接触时间公式，用工程实测数据计算分析了应力峰值和接触时间的一般规律，比较了不同公式计算结果的差异。拟合了地基内部动应力峰值实测结果及数值计算结果，与理论公式进行了比较，探讨了地基内部的动应力分布及其实用计算公式。

第 3、4 章介绍了强夯地面变形规律的研究成果。分别采用工程实例统计和模型试验，建立了典型土类中强夯时夯坑深度和场地平均夯沉量的计算方法。

第 5、6 章分别介绍了作者提出的强夯加固效果估算方法的统计估算法和简化理论分析法，可依据夯前土质参数和强夯工艺参数估算夯后地基性状。

第 7、8 章分别介绍了地面变形参量在强夯加固效果估算及施工控制中的应用研究成果。内容包括应用夯坑深度和场地平均夯沉量进行夯后地基内部土工程性状指标估算、特

定荷载下夯后地基的沉降估算及其应用于地基性状估算和施工控制。

第9章介绍了置换式强夯的置换深度估算方法,包括经验统计法、拟静力法和一维波动方程法。

本书内容是作者在浙江大学攻读博士学位期间及随后在东华理工大学和江西理工大学工作期间取得的成果。研究工作得到了国家自然科学基金“基于地面变形的强夯加固计算方法研究”(50869002)、江西省自然科学基金“饱和土强夯加固机理与加固效果的理论与试验研究”(2008GZC0031)、江西省教育厅科技项目“强夯的地面变形规律及其在加固效果评价中的应用”及东华理工大学博士启动基金的资助。本书的出版得到江西理工大学优秀学术著作出版基金的资助。

作者感谢博士研究生导师龚晓南院士的指导,感谢国家自然科学基金委员会、江西省自然科学基金委员会、江西省教育厅、江西理工大学和东华理工大学的经费支持。作者课题组成员王观石、杨建永、赵康参与了多次讨论,东华理工大学杨泽平副教授和作者的研究生巩田捷、张海、胡微、傅军健、王洋、吕爽、吴周明、王琨、李辉参与了部分研究工作。作者的研究还多处引用了前人的研究成果或工程实例数据。对他们的劳动、支持和帮助,作者一并表示感谢!

强夯研究是一个困难而复杂的课题,作者的研究着重于从实用角度出发;但统计分析的样本数量偏少、模型试验的尺寸偏小和简化理论分析的假设条件偏多等仍需在进一步研究时更好解决。限于作者水平和认识,书中肯定存在不足乃至错误之处,敬请同行专家和读者批评指正。

目 录

第 1 章 土冲击性状的室内试验研究	1
1.1 概述	1
1.2 土的冲击动力响应	2
1.2.1 单次冲击响应的一般规律	2
1.2.2 多次冲击的动力响应	3
1.3 土的冲击本构关系	9
1.3.1 钱家欢等的冲击本构关系	9
1.3.2 韩文喜等的冲击本构关系	10
1.4 冲击后土的压缩与强度性状	11
1.4.1 侧限条件下冲击后土的性状	12
1.4.2 三轴条件下冲击后土的性状	18
1.5 静力压密与冲击压密后土的压缩性状对比	20
1.5.1 试验方案	20
1.5.2 试验成果及分析	21
第 2 章 强夯冲击应力的简化计算	26
2.1 锤-土接触面应力峰值估算	26
2.1.1 锤-土接触面应力峰值计算公式	27
2.1.2 接触面“等效拟静力”基本计算公式	30
2.1.3 锤-土接触面应力的一般规律	34
2.2 锤-土间接触持时估算	37
2.2.1 现有锤-土接触持时计算公式	37
2.2.2 基于球体碰撞的接触时间计算公式	37
2.2.3 接触持时的规律	39
2.3 地基内部动应力估算	40
2.3.1 地基冲击应力的估算方法	40
2.3.2 比较分析	43
第 3 章 强夯地面夯沉量估算的经验统计法	45
3.1 直接经验统计法	45

3.1.1	夯击地面变形的一般特征	45
3.1.2	夯坑深度估算的经验统计法	45
3.1.3	场地的平均夯沉量估算的经验统计法	49
3.2	基于量纲分析的经验统计法 (一)	51
3.2.1	夯坑深度估算的经验公式	51
3.2.2	场地平均夯沉量估算的经验公式	54
3.3	基于量纲分析的经验统计法 (二)	58
3.3.1	夯坑深度估算的经验公式	58
3.3.2	场地平均夯沉量估算的经验公式	60
第4章	强夯地面夯沉量估算的模型试验法	62
4.1	砂土地基夯沉量估算的全模试验法	62
4.1.1	量纲方程的建立	62
4.1.2	试验装置	63
4.1.3	试验方案	64
4.1.4	试验成果及分析	65
4.1.5	夯坑深度估算的拟合方程	66
4.2	砂土地基夯沉量估算的半模试验法	67
4.2.1	量纲方程的建立	68
4.2.2	试验装置	68
4.2.3	试验方案	68
4.2.4	试验成果及分析	69
4.2.5	夯坑深度和有效加固深度估算的拟合方程	71
4.3	黏性土地基夯沉量估算的全模试验法	73
4.3.1	量纲方程的建立	73
4.3.2	试验方案	73
4.3.3	试验成果及分析	74
4.3.4	不同锤径、不同能量时的能量效率	76
4.3.5	夯坑深度估算的拟合方程	76
4.4	黏性土地基夯沉量估算的半模试验法	78
4.4.1	量纲方程的建立	78
4.4.2	试验方案	78
4.4.3	试验成果及分析	79
4.4.4	不同锤径、不同能量时的夯坑深度与能量效率	84
4.4.5	夯坑深度和有效加固深度估算的拟合方程	85
第5章	强夯夯后土性指标估算的经验统计法	87
5.1	直接经验统计法	87

5.1.1	加固程度与单位面积夯击能的关系	87
5.1.2	最大加固程度及对应的单位体积夯击能	88
5.1.3	平均加固程度与土质、单击夯击能的经验关系	88
5.2	基于量纲分析的经验统计法 (一)	89
5.2.1	量纲方程	89
5.2.2	样本选择	89
5.2.3	拟合方程	92
5.2.4	拟合方程的精度	93
5.2.5	拟合方程应用于预测	94
5.3	基于量纲分析的经验统计法 (二)	95
5.3.1	量纲方程	96
5.3.2	样本选择	96
5.3.3	拟合方程	96
5.3.4	拟合方程的精度	96
5.3.5	拟合方程应用于预测	97
5.4	基于模型试验结果的砂土地基夯后性状简化估算法	97
5.4.1	模型试验成果简介	97
5.4.2	单点夯击时夯点下的夯实效果估算	99
5.4.3	侧向加固范围及侧向加固程度研究	101
5.4.4	群点夯时加固效果的近似估算	102
5.4.5	工程实例研究	106
5.5	强夯效果深度效应的统计规律	108
5.5.1	相对加固程度的概念与相对加固深度的概念	108
5.5.2	黄土干容重加固效果深度效应的统计规律	109
5.5.3	黄土孔隙比加固效果深度效应的统计规律	110
5.5.4	方程的验证	111
第 6 章 强夯夯后土性指标估算的简化理论法		113
6.1	无黏性土夯坑深度与夯后土性指标估算的拟静力法	113
6.1.1	用土质参数表达的无黏性土“等效拟静力”计算公式	113
6.1.2	无黏性土强夯效果“拟静力分析法”的有关公式	115
6.1.3	计算参数的初步研究	118
6.1.4	工程实例研究	120
6.2	基于有限元计算结果的无黏性土夯后土性指标估算方法	126
6.2.1	有限元模型及验证	126
6.2.2	参数研究	127
6.2.3	加固效果的估算方法	133

6.2.4	工程实例	134
6.3	基于有限元计算结果的黏性土夯后土性指标估算方法	135
6.3.1	有限元模型及参数	135
6.3.2	计算结果拟合	137
6.3.3	工程实例	139
第7章	夯坑深度在夯后土性指标与地基沉降估算中的应用	142
7.1	强夯夯击时夯点下竖向位移与竖向应变分布	142
7.1.1	数据收集	142
7.1.2	竖向位移分布公式	142
7.1.3	竖向应变分布公式	146
7.2	夯坑深度在夯后土性指标估算中的应用	148
7.2.1	夯后夯坑中心点下孔隙比的估算	148
7.2.2	夯后相对密度的估算	149
7.2.3	夯后前期固结压力沿深度变化	149
7.2.4	工程实例	149
7.3	基于夯坑深度的夯后地基沉降估算及应用	152
7.3.1	基于夯坑深度的夯后地基沉降估算方法	152
7.3.2	夯坑深度在夯后地基参数与施工控制中的应用	157
7.3.3	工程实例	158
第8章	场地平均夯沉量在夯后土性指标与地基沉降估算中的应用	162
8.1	强夯夯击竖向应变与位移分布模式	162
8.1.1	强夯夯击产生的竖向应变	162
8.1.2	夯击竖向位移分布	164
8.2	场地平均夯沉量在夯后土性指标估算中的应用	165
8.3	场地平均夯沉量在夯后地基沉降估算中的应用	166
8.3.1	基于场地平均夯沉量的夯后地基沉降估算的方法	166
8.3.2	基于场地平均夯沉量的夯后地基沉降估算方法的应用	170
8.3.3	工程实例	171
第9章	置换式强夯的置换深度估算	175
9.1	概述	175
9.1.1	强夯置换地基加固效果的控制因素	175
9.1.2	置换深度的研究现状	176

9.2 置换深度的统计分析	177
9.2.1 工程实例	177
9.2.2 置换深度与单击夯击能的相关分析	177
9.2.3 置换深度与单击夯击能、锤径及土层性质的相关分析	178
9.3 确定置换深度的拟静力法	179
9.3.1 拟静力法确定置换深度的基本思路	179
9.3.2 计算模型	179
9.3.3 计算参数拟合	181
9.4 一维波动方程在置换深度研究中的应用	181
9.4.1 一维波动方程在岩土工程中的应用概况	181
9.4.2 模拟置换体形成过程的一维波动方程法	182
9.4.3 置换体形成的若干规律	184
参考文献	188

第1章 土冲击性状的室内试验研究

1.1 概 述

强夯加固地基是一个多孔多相松散介质受短时冲击荷载作用的十分复杂的过程。因此,室内试验是强夯研究中的重要手段。

从过程上看,强夯加固高饱和度的地基土,首先产生瞬时冲击响应,冲击停止后地基土在冲击产生的超静孔隙水压力作用下产生再固结。因而,强夯后的地基土经历了特殊应力历史(多次冲击及冲击后的再固结),其性状也有其特殊性。

模拟强夯的室内试验应研究的问题包括:冲击作用时土的反应、冲击作用土压密的成因和发生时间(冲击瞬间还是冲击后再固结)、土的冲击本构关系、冲击后土工程性状及其与冲击作用的关系、冲击压密与静力压密后的土静力性状的对比。

相对于静力荷载和循环荷载作用下土的性状研究,土在冲击荷载作用下的性状研究是很不充分的。

国外较国内更早开展了强夯相关的室内试验研究,但侧重于对加固机理的定性探讨和用于确定现场施工参数。如法国梅纳公司最先设计制造了一种模拟现场强夯作用的动力固结仪,用于在室内研究夯击的最佳夯击能量和土的动力性状。Godecke、Jessberger等(1980, 1981)进行了干砂和饱和粉土的室内动力固结试验,探讨了冲击荷载下的应力变化特点及夯后土的渗透规律。

相对而言,国内对土的冲击性状研究更为深入和定量。研究设备包括一维和三轴动力固结仪,研究对象涉及饱和与非饱和粗粒土和细粒土,在过程上包括对冲击瞬间的反应与冲击后再固结。钱家欢等(1986)利用一维动力固结仪研究了细砂和软黏土在冲击荷载下的应力、位移、孔隙水压力及应力-应变特征。白冰等(1997)在改装的三轴仪上,研究了冲击荷载作用下饱和和软黏土的变形、孔隙水压力的增长和消散、再固结体应变的发生和强度增长等有关问题。韩文喜(1999)利用土动三轴仪对饱和土(黏土和砂土两类土)强夯加固地基的全过程进行高精度、高灵敏模拟,观测试样在冲击荷载作用下的动应力、动位移、孔隙水压力的变化规律及强夯的应力-应变关系特征,总结出了动应力-应变本构关系。孟庆山(2003)在白冰等的基础上对SJ-IA型应变控制三轴剪力仪进行改装,研究了动力排水固结机理和在各向等压固结和偏压固结下夯击时饱和和软土的动态响应及冲击能量、最佳冲击数、合理的冲击遍数以及两遍夯击的间隔时间,对能量施加的大小顺序也进行了试验研究。

近年来,作者的研究团队对土的冲击动力响应、冲击后再固结、冲击再固结后土的性状、动力与静力压密后土性状的对比等进行了较系统深入的研究,进一步深化了对冲击阶段的应变、孔隙水压力累积、冲击及冲击再固结阶段的体变、冲击形成的超固结及冲击后

土的压缩特征的认识。

1.2 土的冲击动力响应

1.2.1 单次冲击响应的一般规律

土受冲击作用产生的动力响应包括：在锤-土接触面产生冲击应力，在土中产生应变、位移和压缩，在高饱和度土中产生孔隙水压力，冲击停止后孔隙水压力发生消散，即再固结。

不同研究者采用了有所不同的仪器进行研究，典型仪器如图 1-1 和图 1-3 所示。

图 1-1 为钱家欢使用的一维动力固结仪，仪器由底座、试样室、加静压装置、活塞、导杆、沙盘、重锤等组成。另有动应力、动位移和动孔隙水压力传感器。同时用光线记录仪拍摄试验过程中的动应力、动位移和动孔隙水压力变化。试样是圆筒形的，直径和高度均为 10cm，加静压装置可模拟土在现场受到的自重应力。沙盘的作用是防止金属与金属直接冲击，得到单脉冲荷载波形。测得的某一击时的动应力、动位移和动孔隙水压力如图 1-2 所示。

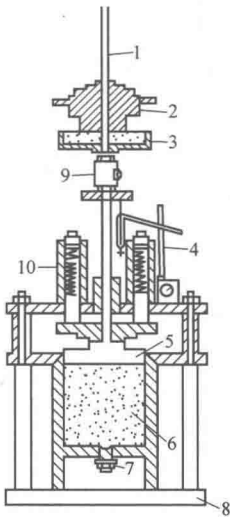


图 1-1 钱家欢动力固结仪

- 1—导杆；2—重锤；3—沙盘；4—位移传感器；
- 5—活塞；6—试样室；7—孔隙水压力传感器；
- 8—底座；9—动压力传感器；10—加压装置

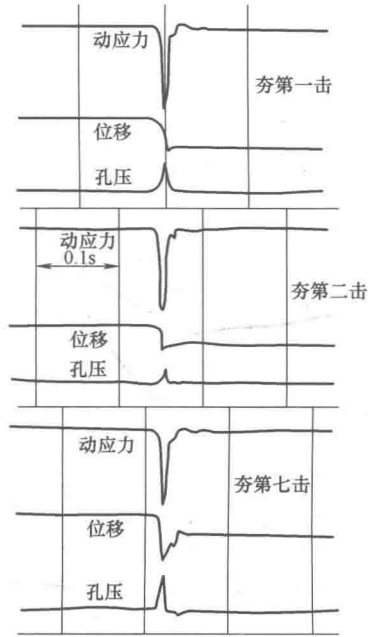


图 1-2 一维动力固结仪冲击时土样中的动应力、位移和孔隙水压力的关系（据钱家欢等）

图 1-3 所示为韩文喜对 MTS810Teststar 程控伺服土动三轴试验机进行改装的三轴冲击试验装置，可对现场夯锤的半径、落距、能量等参数进行缩放，可采用不同的围压来模拟土在地下各种深度处的应力状态，可观测试样在冲击荷载作用下的动应力、动位移、孔

隙水压力的变化规律及强夯的应力-应变关系特征。测得的动应力、动位移和动孔隙水压力如图 1-4 所示。

从图 1-2 和图 1-4 所示可见，在夯击作用下，动应力为单一的尖波峰，第二波峰不明显（或与第一峰值数值相差太大，可以忽略不计）；动应力作用时间极短，一般为 1~2ms（按缩放比计算，实际作用时间为 35~70ms）；动应力的大小随夯击次数的增加而递增。两次夯击之间的间隔时间相对于动应力作用时间而言较长，两击之间不能简化为震动形式，说明强夯的荷载形式是间歇性的冲击荷载，而不同于加载方式为波动形式的地震或机器振动的循环荷载形式。

图 1-4 所示表征了动应力、动位移、动孔隙水压力三个参数的作用的时间先后顺序。在动应力开始作用的同时，试样即开始产生竖向压缩和侧向膨胀。但竖向压缩和侧向膨胀在冲击应力作用已完成后仍继续发展，位移主要在动应力停止后才完成，竖向位移峰值达到的时间约滞后于动应力峰值 20~60ms。位移达到峰值后有少量回弹，然后到达相对稳定状态。孔隙水压力在动应力作用的同时开始上升，但达到峰值的时间不仅滞后于动应力峰值，而还滞后于位移峰值，滞后动应力约 50~150ms，滞后位移约 20~60ms。达到峰值后，孔隙水压力又下降到某一个稳定值，砂性土这个稳定值为夯击前的孔隙水压力值或低于夯前的孔隙水压力值；黏性土这个稳定值比夯击前略高。

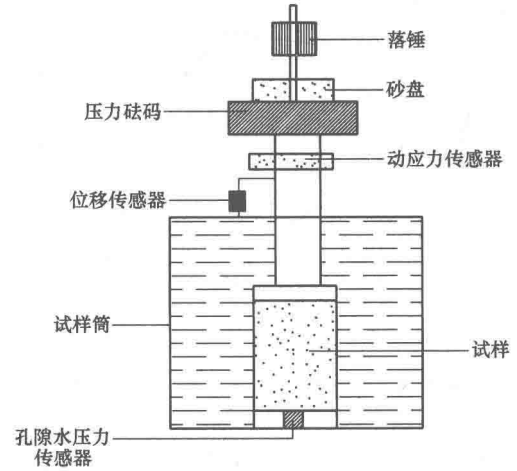


图 1-3 韩文喜三轴冲击试验装置（据韩文喜等）

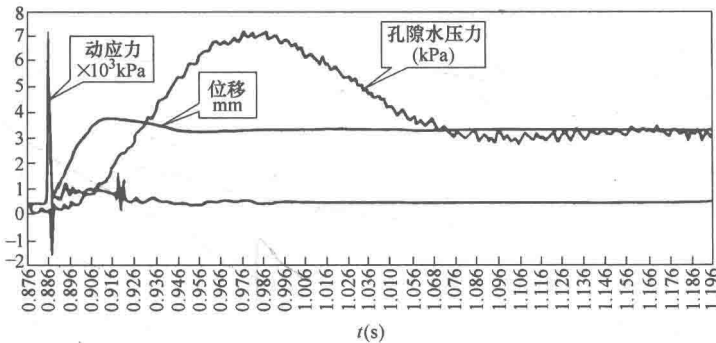


图 1-4 动应力、动位移、动孔隙水压力历时曲线（据韩文喜等）

1.2.2 多次冲击的动力响应

为研究多次冲击时不同土类、不同排水条件下的动力响应，作者曾进行了相关研究。试验采用 STSZ-ZD 型全自动应变控制三轴仪并加装冲击装置。冲击装置包括落锤、承载板、落锤导杆和位移测量部件四部分。落锤为重量 5N 的空心锤，落距依冲击能的不同分别采用 10、15、20cm；承载板承受落锤的冲击，并将冲击能量传递给试样。承载板垫上

一块橡胶垫，保证冲击作用无“反弹”，使冲击力的形式为单脉冲形式。

对饱和砂土和黏土进行了试验。试验所用砂土为中砂，粒径大于 0.3 mm 的颗粒占 86%，渗透系数为 2.2×10^{-3} cm/s。试样采用湿捣法制备，试样的饱和分三步：CO₂ 饱和、水头饱和和反压力饱和，让试样的饱和度 S_r 达到 99%，初始孔隙比 e 为 0.83。试验用的黏土天然含水率 26.9%，塑限 $w_p=25.3\%$ 、液限 $w_L=48.4\%$ 、塑性指数 $I_p=23.3$ 。取回实验室后再次风干，人工碾碎，用粒径 0.075 mm 的分析筛进行筛分，采用抽气饱和和反压饱和和联合法进行饱和，让其饱和度大于 95%，初始孔隙比 e 为 0.95。

对制备好的试样，先施加 50kPa 围压让其初始固结，固结完毕后分别在排水和不排水两种情形下施加 3 种不同的能量进行冲击，测量冲击时的轴向变形、孔隙水压力、试样体变和排水量；冲击后测量孔隙水压力的消散和伴随的再固结体变和排水量。试验方案见表 1-1。

试验方案

表 1-1

试样编号		围压	冲击次数	锤重	落距	冲击能量		冲击时 排水条件
砂土	黏土	σ_3 (kPa)	N (次数)	W (N)	H (cm)	E (N·cm)		
A1	C1	50	24	5	10	5×10	50	关排水阀 (不排水冲击)
A2	C2				15	5×15	75	
A3	C3				20	5×20	100	
B1	D1	50	24	5	10	5×10	50	开排水阀 (排水冲击)
B2	D2				15	5×15	75	
B3	D3				20	5×20	100	

(1) 冲击阶段的孔隙水压力

图 1-5 所示为冲击能量 $5 \times 10 \text{ N} \cdot \text{cm}$ 、不同排水条件下饱和砂土和黏土冲击阶段的孔隙水压力与冲击击数关系。由图 1-5 可知，冲击孔隙水压力与排水条件、土类、冲击击数关系密切，砂土在排水条件下冲击不产生孔隙水压力的累积，不排水条件下冲击随冲击击数增加不断累积孔隙水压力直至趋于稳定；黏土排水与不排水时均产生孔隙水压力，不排水条件下随击数增大不断累积至稳定值且其值高于排水时的数值；排水条件下先达到峰值然后有所下降；排水与不排水冲击的孔隙水压力差别黏土明显小于砂土的差别。

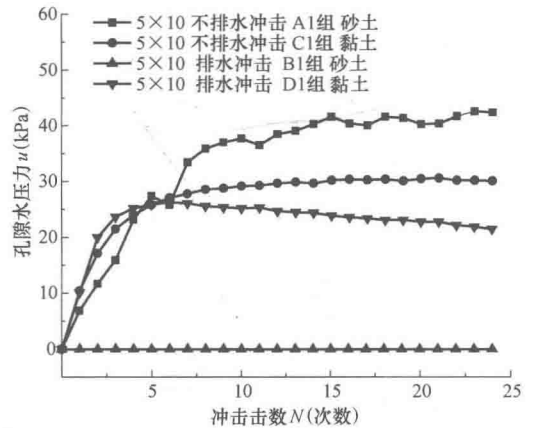


图 1-5 不同土类、不同排水条件冲击阶段的孔隙水压力与冲击击数关系

图 1-6 所示为不同排水条件、不同冲击能量饱和砂土和黏土冲击阶段孔隙水压力与冲击击数关系，表 1-2 为饱和砂土和黏土在不同排水条件下，冲击结束时的孔隙水压力。由图 1-6 和表 1-2 可见，冲击产生的孔隙水压力随冲击能量增加而增大，不排水时较排水时明显，不排水时砂土较黏土中明显。砂土在不排水条件下 $5 \times 20 \text{ N} \cdot \text{cm}$ 能量冲击的试样，孔隙水压力达到围压值，产生液化。

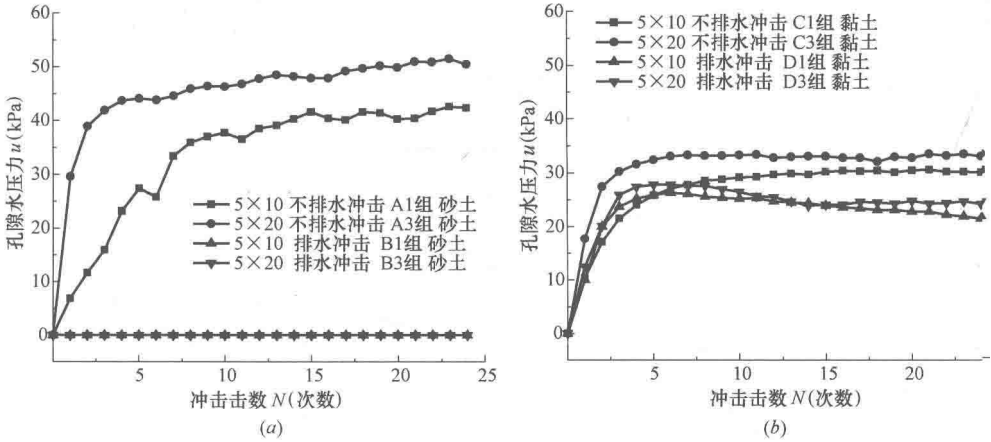


图 1-6 不同冲击能量、不同排水条件下冲击阶段的孔隙水压力与冲击击数关系
(a) 砂土；(b) 黏土

冲击结束时的孔隙水压力

表 1-2

能量 (N · cm)	孔隙水压力 u (kPa)			
	不排水冲击		排水冲击	
	A 组(砂土)	C 组(黏土)	B 组(砂土)	D 组(黏土)
5×10	42.6	31.5	0	21.5
5×15	44.7	33.5	0	24.5
5×20	50.0	35.2	0	24.2

(2) 冲击阶段的轴向变形

图 1-7 所示为冲击阶段轴向应变与冲击击数关系。由图 1-7 可见：①在试验条件下，饱和黏土冲击及砂土在排水冲击时的轴向应变-冲击击数关系近于双曲线，而砂土不排水冲击两者近于直线关系；②轴向应变随冲击能量增加而增加，砂土中冲击能量大到一定数

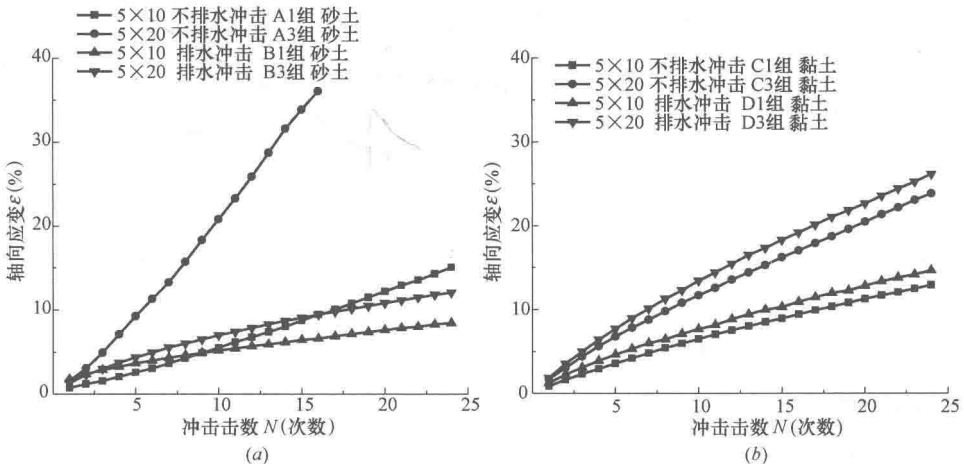


图 1-7 同一土类、不同能量、不同排水条件下冲击阶段的轴向应变与冲击击数关系
(a) 砂土；(b) 黏土

值时将因液化使轴向应变急剧增大；③砂土中不排水冲击轴向应变大于排水冲击的值，黏土中冲击轴向应变不排水时的值小于排水冲击值；④能量相同时，排水冲击轴向应变黏土大于砂土，而不排水冲击轴向应变砂土一般大于黏土。

图 1-8 所示为不同条件下冲击阶段的试样最大轴向压缩量与冲击能量的关系。由图可见，不同渗透性饱和土在不同排水条件下冲击，其最大轴向压缩量都随着能量的增大而增大，两者近于线性关系。但不同土类其表现不同：同能量下，饱和砂土不排水冲击的最大轴向压缩量比排水冲击的明显更大，这可解释为不排水冲击时孔隙水压力增大的同时土体的有效应力不断减小，土体趋向变软；饱和黏土则排水条件冲击时最大轴向应变比不排水条件的大，这是因为排水冲击时，孔隙水的流失加剧了土骨架的压缩程度。

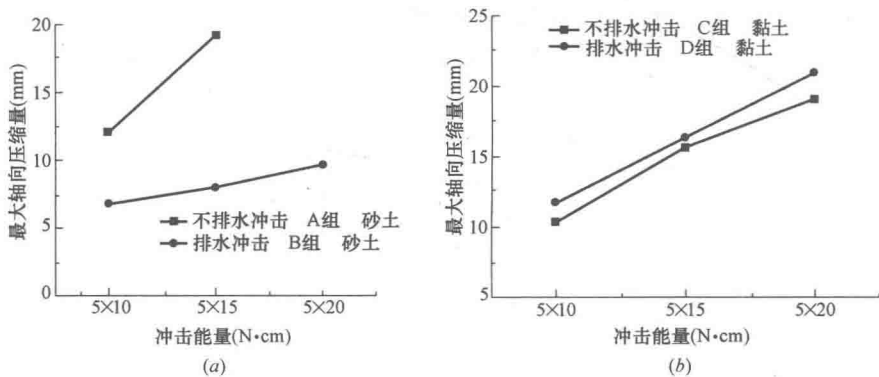


图 1-8 冲击阶段的最大轴向压缩量与冲击能量关系
(a) 砂土；(b) 黏土

(3) 冲击阶段的排水和体变

实测结果表明，饱和土试样不排水条件下冲击时无排水、无体变产生。排水条件下冲击阶段的排水和体变与冲击击数关系如图 1-9 所示，冲击结束时测得的排水量如表 1-3。由图 1-9 和表 1-3 可见，试验测得的体变与排水量非常接近，说明试验土处于近饱和状态。体变与排水量随冲击击数增加而增大，砂土中体变与排水量随能量增大而明显增大，

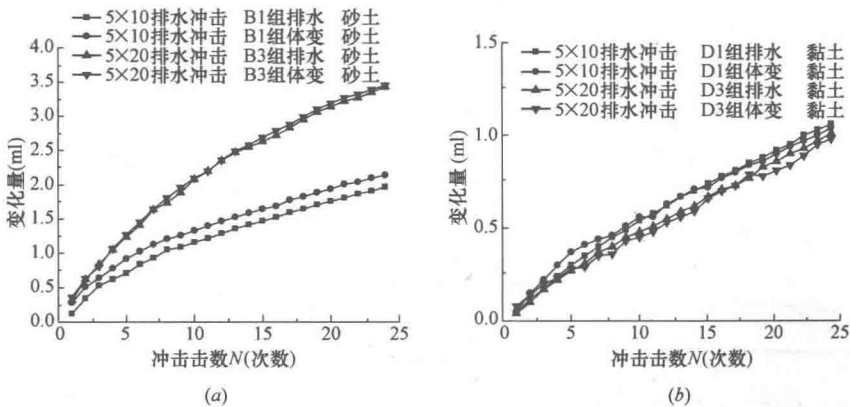


图 1-9 排水条件下冲击阶段的排水和体变与冲击击数关系
(a) 砂土；(b) 黏土

黏土中体变与排水量随能量增加变化不明显，砂土排水冲击阶段体变明显大于黏土。

排水条件下冲击阶段排水量

表 1-3

能量 (N·cm)	不同渗透性饱和土排水量(ml)	
	砂土	黏土
5×10	2.01	1.06
5×15	2.78	1.05
5×20	3.43	1.01

(4) 再固结阶段的孔隙水压力与体变

图 1-10 所示为冲击能量 $5 \times 10 \text{ N} \cdot \text{cm}$ 冲击后再固结阶段的孔隙水压力-体变-时间关系曲线。分析图 1-10 可知，不排水冲击后再固结时，砂土的孔隙水压力随着孔隙水的迅速流失在一分钟内迅速消散为零值，体变也迅速增大至一定值，之后随时间变化不大；而黏土的孔隙水压力则随着孔隙水的缓慢排出，随时间的增大而减小，最终在 20 min 时消散为零，体变随着时间缓慢增大。对比黏土排水冲击与不排水冲击后的再固结过程可见，不排水冲击后的再固结体变明显大于排水冲击后的再固结体变。

表 1-4 是不同情况下再固结稳定后的体变量。可见，其余条件相同，不排水冲击后再固结体变大于排水冲击后再固结体变，再固结体变与冲击能呈正相关关系。

再固结阶段体变量

表 1-4

能量 (N·cm)	不同渗透性饱和土的体变量(ml)			
	不排水冲击后再固结阶段		排水冲击后再固结阶段	
	砂土	黏土	砂土	黏土
5×10	1.65	1.74	0	1.11
5×15	1.94	1.80	0	1.29
5×20	液化	1.84	0	1.59

(5) 冲击总体变及其组成

冲击总体变包括冲击时与冲击后再固结两个阶段产生体变。不排水冲击试验，冲击过程无排水、无体变，排水和体变只发生在再固结阶段，总体变=再固结阶段的体变；排水冲击试验的总体变=冲击阶段的体变+再固结阶段的体变。

表 1-5 是各试样的总体变及冲击阶段、再固结阶段的体变与所占的比例，图 1-11 所示为总体变随冲击能量变化曲线。

从图 1-11 和表 1-5 可见：①从总体变的阶段组成看：不排水冲击饱和土（砂土和黏土）的体变均全部来自冲击后的再固结；排水冲击时，饱和砂土的体变全部体变发生于冲击阶段，而饱和黏土则来自冲击阶段体变与冲击后再固结体变之和，试验时冲击阶段产生的体变约占冲击引起总体变的 40%~50%，冲击后再固结阶段产生的体变则占 50%~60%；②从总体变的大小看：冲击产生的总体变受冲击能和冲击时的排水条件影响。从冲击能看，随冲击能量增加，总体变增大，尤其是排水冲击砂土更为明显，而饱和黏土则与冲击能相关性不明显，说明砂土中加大冲击能量效果明显，饱和黏土中则不一定有明显成效；从冲击时的排水条件看，排水冲击产生的总体变较不排