

卢肇钧院士科技论文选集

SELECTED WORKS ON SOIL MECHANICS
OF
ACADEMICIAN LU ZHAO-JUN

陈善缙 选编
Edited by Chen Shan-Wen



中国建筑工业出版社
China Architecture and Building Press

卢肇钧院士科技论文选集

SELECTED WORKS ON SOIL MECHANICS
OF
ACADEMICIAN LU ZHAO-JUN

陈 善 缙 选编
Edited by Chen Shan-Wen

中国建筑工业出版社
China Architecture and Building Press

(京)新登字 035 号

图书在版编目 (CIP) 数据

卢肇钧院士科技论文选集/卢肇钧著;陈善缙选编. —
北京:中国建筑工业出版社,1997
ISBN 7-112-03302-0

I. 卢… II. ①卢… ②陈… III. ①土力学-研究-文集
②地基-基础 (工程)-研究-文集 IV. TU4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 10964 号

卢肇钧是我国著名的土力学家与基础工程学家,中国科学院院士。我国铁路路基土工技术主要开拓者之一。他对我国铁路与工业民用建筑的地基与基础有精深的研究,特别是对盐渍土、软土等土性研究、土压力与边坡稳定、地基处理、锚定板挡土结构、锚杆技术的研究,近年来对膨胀土和非饱和土的研究均有论文发表在有关学报刊物上。本书收选了卢肇钧的代表性论文 19 篇,其中包括介绍他的导师——近代土力学创始人 K. Terzaghi 的《太沙基传》。

本书可供从事土力学与基础工程的科研人员、勘察、设计、施工技术人员以及大专院校有关专业的教师、研究生参考。

责任编辑:石振华

卢肇钧院士科技论文选集

SELECTED WORKS ON SOIL MECHANICS OF ACADEMICIAN LU ZHAO-JUN

陈善缙 选编

Edited by Chen Shan-Wen

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)
新华书店经销
中国建筑工业出版社印刷厂印刷 (北京阜外南礼士路)

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13³/₄ 字数: 333 千字
1997 年 10 月第一版 1997 年 10 月第一次印刷
印数: 1—1,200 册 定价: 18.00 元
ISBN 7-112-03302-0
TU·2544 (8447)

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)

编者的话

卢肇钧的人生，是埋头工作并走遍了祖国原野的一生，他对我和孩子们的影响也只是埋头工作。他从未想到自己在70岁以后被选为中国科学院院士，也未曾想到在他80岁时出版了论文选集。

用他自己的话说：“我年青时的学识、经验和能力都是很有限的，只是由于祖国大规模建设的需要，我才有机会在许多复杂困难的科研任务中锻炼成长，从而一点点、一滴滴地逐渐增长学识并做出一些成绩。但每一项科技成果的取得，都是与许多合作者的共同努力分不开的。因而今天国家和朋友们所给予我的荣誉，应该有一大半归功于多年来与我合作的同伴们。”他所说的多年合作的同伴们，是周镜院士、杨灿文教授、吴肖茗教授以及铁道部科学研究院土工研究室的许多同事们。

在龚晓南教授和石振华编审的倡议和支持下，中国建筑工业出版社为他出版这本论文选集。但各位老教授都还在辛勤从事学术研究，工作极为繁忙，为了减轻老教授们的负担，我自告奋勇代他们做了这本文集的选编工作，并代表卢肇钧向多年来关心和指教我们的老朋友们致以衷心的感谢。

陈善编 1997年5月

科学与技术的进步
应该使人类共同幸福；

中国的科学家和工程师
首先为祖国人民服务；
同时也就是
为世界人民服务。

—— 卢肇钧

卢肇钧简历

卢肇钧 男 汉族 1917 年 11 月 17 日生
原 籍： 福建，出生地郑州（河南省）
工作单位：铁道部科学研究院
职 称： 研究员，中国科学院院士

学 历： 1941 年清华大学土木工程系工学士
1948 年美国哈佛大学工程研究院科学硕士

工作简历：1941~1944 年 交通部桥梁设计处工务员
1944~1945 年 滇缅公路工程局工程师
1945~1947 年 清华大学土木系助教、教员
1948~1950 年 美国麻省理工学院助理研究员
1950~现 在 铁道部科学研究院：历任研究员、
土工研究室主任、博士研究生导师、院学术委员会名誉主任

学术兼职：中国土力学及基础工程学会第一届秘书长、第二
届副理事长，第三届理事长，第四届顾问
中国土木工程学会理事、常务理事、荣誉会员
中国自然科学基金委员会第二届委员

代 序*

卢肇钧，土力学家，铁路路基土工技术主要开拓者之一。长期从事土的基本性质及特殊土地地区筑路技术的研究。在他主持下，在我国最早阐明了硫酸盐渍土的松胀特性及其对路基稳定性的影响；提出了新型锚定板挡土结构及其相应的计算理论；首先获得了膨胀土强度变化的规律，并发现非饱和土的吸附强度与膨胀压力的相互关系。他长期领导中国土力学及基础工程学会，积极开展国内外学术交流，对推动土力学学科和岩土工程专业的发展做出了重要的贡献。



卢肇钧，1917年11月17日出生于河南省郑州市。祖籍福建省福州市。父亲卢学孟，曾留学法国，当时在郑州任陇海铁路局长。母亲陈复生，上海市人。卢肇钧6岁时随父母迁居北平，1930年入三基初级中学，1933年入汇文高级中学，1936年考入清华大学土木工程系。1937年芦沟桥事变后曾在北平辅仁大学和燕京大学物理系各借读半年。1938年赴昆明西南联合大学（清华、北大和南开三校联合）就学土木系，1941年毕业。

1941年至1945年卢肇钧在交通部桥梁设计处及滇缅公路工程局任助理工程师，先后在昆明、贵阳及重庆等地从事钢桥和悬索桥设计，在滇西云县、公郎、弥渡等地从事公路设计及施工。1945年回清华大学土木系任助教，讲授材料试验及结构设计，并协助清华大学迁回北平的复校建设工作。1947年考取公费留学生赴美留学。1947至1950年期间，卢肇钧在美国哈佛大学工程研究院取得科学硕士学位后，又在麻省理工学院的土力学研究室为博士研究生并兼任助理研究员，在近代土力学的创始人太沙基（K. Terzaghi）和泰勒（D. W. Taylor）教授的指导下从事土力学研究工作。当时哈佛大学和麻省理工学院的土力学研究曾被世界一致公认为近代土力学最高权威的学府，他在学习和工作的同时，还作为留美中国科学工作者协会波士顿分会的联络人，积极宣传、动员留美学生返回祖国贡献力量，参加建设。1950年秋因朝鲜战争爆发，卢肇钧提出辞职并准备返回祖国，泰勒教授再三挽留他在麻省理工学院共同工作，但怀有浓厚爱国感情的卢肇钧，婉言辞谢了教授的盛情，毅然返回北京。

自1950年10月起先后在铁道部科学研究院任副研究员、研究员、土工研究室主任、博士研究生导师，并曾兼任中国土力学及基础工程学会副理事长、理事长、中国土木工程学会理事、常务理事、荣誉会员。长期从事土的基本性质研究和特殊土地地区筑路技术研究。1991年当选为中国科学院学部委员，1994年改称为中国科学院院士。

* 引自《中国科学技术专家传略》，工程技术编 交通卷 中国科学技术协会编，北京：中国铁道出版社，一九九五年

我国铁路路基土工技术的开拓者

卢肇钧 1950 年回国后,利用在哈佛大学和麻省理工学院所获得的基础理论和训练,一直从事我国新建铁路沿线各种土的力学性质和特殊土地地区筑路技术的研究,是我国铁路路基土工技术的主要开拓者之一。几十年来,他不停地奔忙在中国铁路新线建设的土地上,为解决和研究铁路建设中的路基土工技术问题而努力。在铁道部科学研究院,他建立了中国铁路的第一个土工试验研究室,以此为基地组织培训了一支精干的试验研究队伍。在 50 年代初期,为各大区铁路勘测设计院和工程局培训了许多土工试验和岩土工程技术人员,并协助各铁路局普遍建立了土工试验室,从而提高了新建铁路路基的勘探、设计和施工的质量。

1953 年,当兰(州)新(疆)铁路新线勘测队初次进入甘肃省河西走廊地带时,我国西部干旱地区特有的盐渍土问题成为筑路工程中的难题。该地区每年春季有许多路面软化,夏秋松胀,使车辆难以通行,当地人称之为“橡皮地”。卢肇钧自 1954 年开始主持这项研究工作,亲自深入到河西走廊等盐渍土地地区,调查各种道路病害现象与当地的土质气象及水文地质的关系,提出了《兰新线张掖地区盐渍土路基的初步研究报告》。为了进一步深入研究盐渍土的松胀变形的机理,又与当时的助理研究员杨灿文合作,对多种不同成份盐渍土的物理力学性质进行了室内控制条件的系统试验研究,于 1956 年共同提出了《盐渍土路基工程性质的研究》报告,并制定了针对盐渍土路基的判别试验标准和设计原则,纳入铁路设计规范,从而基本解决了我国盐渍土地地区筑路技术问题。

我国沿海各省分布有大量的饱和软粘土地层。在这种地层上修筑的铁路路基和建筑物经常下沉甚至发生突然性地沉陷破坏。卢肇钧在 50 年代后期和 60 年代初期主持这项研究,在我国最早成功地采用排水砂井处理软土地基,研究制定了对软土地基的判别试验标准和设计原则。1959 年发表了《关于软土地基的抗剪强度指标和稳定分析》,并于 1962 年又发表了《软土内摩擦角和塑性指数的关系》。这两篇论文初步提出了他个人的学术见解,在国内同行中产生了一定的影响,并将他逐渐引向 80 年代对膨胀土和非饱和土抗剪强度特性的系统性研究。膨胀土和裂土是我国中南和西南许多省区大量存在的特殊土问题,而且也是世界许多国家存在的问题,引起许多路基塌滑和房屋开裂变形。在 80 年代后期卢肇钧开始进行这方面的研究工作,在裂土基本特性及其在路堤、路堑、边坡工程中应用技术条件的研究项目(该项目于 1990 年获得国家科技进步二等奖)中,负责非饱和土的基本性质的研究,指导研究生进行了一系列关于膨胀土的强度及其稳定性以及非饱和土强度特性等基础性的研究。这些研究项目于 1989 年列为我国自然科学基金资助项目,1990 年又被加拿大的“国际开发研究中心”(IDRC)列为中加交流合作的资助研究项目。现已取得有关膨胀土强度变化的规律性质及非饱和土凝聚力与其膨胀压力相互关系等新发现,并已发表了《土的变形破坏机理和土力学计算理论问题》(1989),《对粘性土内摩擦角的探讨》(1991)和《非饱和土的抗剪强度与膨胀压力》(1992)等论文,提出了全面重视自然现象的学术观点,并提倡对非饱和土的膨胀压力开展研究。

除上述对于土的基本性质和筑路技术等方面研究外,卢肇钧还在 70 年代铁道部的新型支挡结构的科研项目中,创造性地提出了一种锚定板挡土结构形式及其相应的计算理论。它具有结构轻、柔性大、能节约建筑材料并能适应承载力较低的地基等特点。经十多年的大

量研究和试用后，先行总结编写了《旱桥锚定板桥台设计原则》和《锚定板挡土墙设计原则》并已列入有关设计规范。其中提出的锚定板承载力的临界深度问题，引起了国内外同行的注意。这种结构型式已被许多部门采用，在国外发表时被称为中国特色的新结构。日本土质工学会曾作介绍并得到重视。

对我国土力学及基础工程学科发展作出了重要贡献

卢肇钧毕生致力于建立和领导铁道部科学研究院的土工研究室。在他的主持下土工研究室对新中国铁路建设中遇到的某些重大路基土工问题，如黄土路堑边坡的稳定性、路基翻浆、下沉、挡土墙土压力、软土路基的稳定和沉降、桩基承载力以及地基加固等课题，分别进行了研究。经过几十年的努力，取得了大量很有实用价值的科学研究成果和论文报告，培养出了一批高水平的科学研究人员和数十名硕士及博士。不但对我国铁路建设作出了重大贡献，同时在全国的岩土工程界也产生了一定的影响。铁道部科学研究院土工室已成为全国土力学学术活动的中心之一。也是国际交流中心之一。

我国土木工程学会于1957年开始组建全国土力学及基础工程学术委员会，于当年参加了国际土力学及基础工程学会组织并在国内开展学术活动。该委员会由茅以升任首届主任委员，卢肇钧任秘书长。挂靠在铁道部科学研究院土工室，积极推动土力学及基础工程学科的发展。1962年在天津召开了第一届全国土力学及基础工程学术会议，1966年在武昌召开了第二届学术会议后，由于“文化大革命”开始，学会工作中断。

1979年中国土木工程学会恢复活动后，成立全国土力学及基础工程学会并推选卢肇钧为常务副理事长（黄文熙先生为第一届理事长），1986年又选举卢肇钧为第二届理事长。他主持领导学会工作共十一年（1979—1990），在此期间对学术工作的主要贡献有：

1. 主持召开了我国第三届（1979年在杭州）、第四届（1983年在武昌）、第五届（1987年在厦门）全国土力学及基础工程学术会议，并组织出版了各届会议的论文选集。

2. 组织我国的学术论文和代表团出席了国际土力学及基础工程学会第十届（1981年在Stockholm）和第十一届（1985年在San Francisco）国际大会，并代表我国学会出席了国际土力学协会的执行委员会。

3. 1988年首次在我国北京召开了有30多个国家学者参加的“北京国际区域性土的工程问题学术讨论会”，并出版了会议论文集。

4. 为了推动我国建筑业地基加固技术的发展与提高，成立了《地基处理学术委员会》，组织学术讨论，出版地基处理学术刊物，并集中全国有关专家的主要研究成果与经验共同编写出版了《地基处理手册》。这个手册极受国内建筑界的欢迎，被评为1988年的优秀图书之一，并获第5届全国优秀科技图书奖，首届全国优秀建筑科技图书奖。

5. 主编《中国土木工程指南》的第三篇“土工与地基基础”，作为学会对我国工程师的指导手册，并在其中论述了“土的变形破坏机理和土力学计算理论问题”，阐明对复杂的土力学问题应从许多不同的角度全面考虑，并应进行“综合分析判断”。

坚持实事求是、联系实际的学术观点和学风

卢肇钧一贯注重实事求是、联系实际，在研究工作中坚持以探索自然规律为主，理论计算为辅。60年代以后，由于用电子计算机和数值分析法克服了求解复杂土力学问题的数

学困难，从而可以将土的应力-孔压-变形-强度-时间联系起来，综合分析地基或边坡的变形，承载力和稳定性以及与结构物的相互作用，使得计算土的弹塑性和粘弹塑性的本构关系成为可能。这是近代土力学的一大进步。由此国际学术界曾一度纷纷提出各种不同的本构关系建议，各国学者所建议土的本构模型已达数百种。然而电子计算机虽然能在数学方面取得十分精确的结果，它在物理方面是否正确则主要取决于所采用的本构模型是否符合实际以及模型的参数能否精确测定。由于土的力学性质极为复杂，现有的大量土力学模型尚未得到充分验证和推广应用。但有一些工程技术人员却过份迷信理论计算而轻视试验监测，因此，卢肇钧在《中国土木工程指南》中详细论述了土力学问题中的各种复杂因素，并指出：

1. 目前还没有任何一种土力学计算理论能在一次计算中概括土的全部复杂性质。每一种理论都是在某些简化假定的前提下建立的，而且，无论计算技术如何精确，实际计算结果不可能超过其参数测定的精确程度。

2. 因此，在运用任何一种计算理论去分析土力学问题的同时，还需要考虑这种理论所未曾计入的其他因素及其影响，并进行综合分析判断。这里所建议的“综合分析判断”，应包括从不同角度用不同理论所进行的分析并以大量工程实录和各种试验结果为参考所作出的判断。

3. 为了能进行比较全面的综合分析判断，土力学工作者不仅需要比较全面深入的理论知识，而且需要熟知大量的工程实录资料和已有的实践经验，包括前人的经验和自己的经验。

卢肇钧的这种理论联系实际的学术观点和实事求是的严谨学风对广大科技工作者产生了良好的影响。

（杨灿文）

院士自述*

卢肇钧 (Lu Zhaojun) 土力学及基础工程专家。1917 年 11 月 17 日生于河南郑州 (原籍福建福州)。1941 年毕业于清华大学土木工程系, 1948 年获美国哈佛大学科学硕士学位。铁道部科学研究院研究员。1991 年当选为中国科学院院士 (学部委员)。长期从事土的基本性质和特殊土地地区筑路技术研究。50 年代主持研究盐渍土和软土工程性质和筑路技术, 提出了硫酸盐渍土的松胀性对路基稳定性的影响; 在中国最早成功地采用排水砂井处理软土路基; 制定了软土的试验和设计标准。在主持新型支挡结构研究项目时, 提出了一种锚定板挡土结构形式及其相应的计算理论, 该形式在国内许多部门和日本被采用。在膨胀土和裂土的基本性质研究方面, 首先获得了膨胀土强度变化的规律, 并发现非饱和土的吸附强度与其膨胀压力的相互关系。

我 1941 年大学毕业后到交通部桥梁设计处工作, 在昆明、贵阳和重庆做了几年钢桥设计, 后又回到清华大学做结构力学和材料实验的助教。1946 年考取公费留美时原是一心想读结构力学的, 但是 1947 年到达纽约时遇见刘恢先, 他听说我将入哈佛大学的工程研究院学习, 便极力劝我改读土力学。因为当时世界公认的近代土力学创始人 K. Terzaghi 教授正在哈佛大学授课, 我于是改换专业, 开始学习土力学。这是我人生道路上的一个转折点。

第二个转折点发生在 1949 年春节时的一次聚餐会上, 当时我已从哈佛研究院毕业并被 Terzaghi 教授介绍到麻省理工学院土力学研究室的 D. W. Taylor 教授门下, 任研究助理兼攻博士学位。我在那里负责一项美国海军部委托的研究项目 (软粘土的三轴抗剪强度), 约定该研究成果即可作为我的博士学位论文。我的研究工作进展很顺利, 那里的师友们和房东老太太都对我很热情友好, 使我很满意并习惯于那里的舒适生活。但那时国内辽沈战役国民党失败的消息也开始传到国外, 我有时又不免想到国内饱受战乱和欺凌、灾难深重的父老姐妹们, 不知他们将来会过怎样的生活。1949 年春节时, 侨居波士顿的几十位清华校友在一起聚餐, 会上有些人慨叹说, “共产党即将统治中国, 我们今后只好流落异乡了。”另有人说, “列宁有赎买政策, 中国共产党一定会出高价聘技术人员回去的。”我当时说, “问题不在于是否出高价, 而在于共产党是否真的为中国人民谋幸福。若真的要振兴中国, 还是该回去的。”

在这次聚餐后, 一些关心祖国形势的留学生便开始联系聚会, 交流国内消息, 讨论中国问题。波士顿地区以侯祥麟、陈秀瑛、张钦楠等同学为核心, 成立了“中国问题座谈会”。在对祖国的真实情况有所了解后, 我下定了回祖国服务的决心, 并参加了动员同学回国的宣传工作。1950 年初, “留美中国科学工作者协会”发出动员回国的号召, 我被选为“留美科协波士顿区会”的联络人。在朝鲜战争爆发后, 我与第一批回国的 36 位留学生于

* 引自《中国科学院院士自述》Autobiographic Notes of Members of the Chinese Academy of Sciences 中国科学院学部联合办公室编, 上海: 上海教育出版社, 1996 年 5 月

1950年8月回到北京，后又陆续回来数百人。

我回来时正值全国解放后百废待兴，修复铁路和新建铁路的工作都面临大量的岩土工程技术难题。我一头扎进铁道科学研究所，便埋头工作了40多年，为解决铁路上的岩土工程技术问题而走遍了新中国各省的建设工程和山山水水。直到年纪老了后，才有机会坐下来稍微回忆往事，并偶而与老同学们聚会。

那些“留美科协”回来的昔日少年学子如今都已经是白头老翁了。他们中有许多人已经为祖国的科技发展和国防尖端工业立下了不朽的功勋。我只是归来的一个普通工程技术人员。也有少数回国的同学曾因被误解而一度遭遇坎坷，但每当这些不同遭遇的老同学们重新聚会时，没有人感觉自满，也没有人感觉委屈，我们都共享一种欢欣和安慰，因为我们都实现了自己选择的为祖国服务的志愿与道路。

1984年夏天，我代表中国土力学及基础工程学会在北京接待来访的国际土力学学会主席 V. F. B. DeMello 教授。DeMello 是我在 MIT 时的老同学，分别后几十年未通音信。那次重逢时畅谈往事，共同回忆过去在哈佛校园和 MIT 共事的生活，自然也回想起为人善良的 Taylor 教授和我那位老房东 Nowell 夫人。当年，他们在临别时都再三叮嘱，要求我一定要通信报告平安，我也答应了。但回来后因抗美援朝，中美关系紧张，国内的同事们极力劝阻我不要和美国人通信，以防引起误解，我因而未履行上述诺言。DeMello 说：“你走后他们曾多次谈到想念你，很担心你是否不幸入狱。直到最近我才听人说你在中国干得很好，但可惜 Taylor 教授和 Nowell 夫人都早已逝世了”。我对这段话没有做任何解释，但心中确实由于自己的失信而感到一种内疚。

我们还回忆 1948 年在哈佛参观那时新安装的电子计算机。那是装满了密密麻麻的真空电子管的整整一层楼，但如今只要一个手指大的半导体便与那一层楼的功能相同了。1947 年横渡太平洋须在海上航行 20 多天，一封家信往返需两个月。如今只要 10 多个小时便可飞抵世界上任何地方，只要拨通电话便可与远隔重洋的人互相交谈了。DeMello 说：“自然科学与技术发展得如此迅速，而且愈来愈加速。各国之间的距离愈来愈近，人类应该更幸福了，但许多人至今还在受战争苦难并互相残杀，社会科学家们何时才能找到使人类共同幸福的道路呢？”

那是一次美好的会晤，临别时他握着我的手说：“我们年纪都已经老了，但我们的思想仍和年轻时差不多。我们能做的事情虽很有限，但我们对未来的关心与希望是无穷的。”

目 录

编者的话 Ⅲ

卢肇钧简历 IV

代序 V

院士自述 IX

学术活动 XI

1 路堤高填土的密度（1954 年） 1

2 兰新线张掖地区盐渍土路基的研究报告（1954 年） 10

3 盐渍土路基工程性质的研究（1956 年） 21

4 关于软土地基的抗剪强度指标和稳定分析（1959 年） 44

5 软土内摩擦角和塑性指数的关系（1962 年） 54

6 锚定板挡土结构（1981 年） 65

7 原型锚定板抗拔力的试验与研究（1983 年） 73

8 锚杆技术及其应用（1985 年） 85

9 锚定板挡土结构的稳定性（1989 年） 103

10 锚定板挡土结构工程实录（1989 年） 118

11 土力学及基础工程在我国的发展（1988 年） 137

12 土的变形破坏机理和土力学计算理论问题（1989 年） 144

13 对粘性土内摩擦角的探讨（1991 年） 155

14 非饱和土的抗剪强度与膨胀压力（1992 年） 159

15 锚定式支护工程实践中几个问题的探讨（1994 年） 167

16 太沙基传（1995 年） 174

17 铁路土工技术研究的回顾与展望（1995 年） 179

18 膨胀力在非饱和土强度理论中的作用（1997 年） 183

19 关于土力学发展与展望的综合述评（1998 年将发表） 195

1. 路堤高填土的密度*

卢肇钧

(铁道部科学研究院)

【提 要】

路堤高填土应达到什么密度的问题最近在铁路工作中被提出来。在文献中，关于这个问题的系统分析不很多见。这篇报告从土壤的强度理论和土壤的压缩性质出发，解释路堤中一些现象的根源，提供合理地设计高填土密度的论据；并且针对现场的需要而介绍一部分有关的苏联先进资料。

一、路堤高填土工作中过去与现在的情况

在1951年以前，修筑铁路的高填土工作是不加人工压实的。那种过去修筑路堤方法只是任意地堆筑，一般要使堆筑的高度超过路堤的设计高度约10%，预计这样筑成的松路堤在经过一二个雨季之后，将会自然沉落至近似设计高度的情况，这种路堤须经过一年沉落之后始能铺设道碴枕木和钢轨。通车后路堤仍继续沉落，每次降雨后石碴陷入土中，轨道因而凹凸不平，须要随时抢修始能维护行车的安全，在通车的最初几年间行车速度很低而且时常发生出轨等事故。这样再经过许多年后，大部分路堤逐渐达到稳定状态，但有些地段仍经常发生翻浆沉落的现象，这种筑路方法只有在过去那种时代中才可勉强应用，因为那时的工程期限不急，车辆较轻，运行不繁而且行车较慢。

自从全国解放以后，随着工业的巨大发展，火车的载重量和速度都日益提高，铁路建设工作也要求更高的效率和质量。因而过去那种简单的不加人工压实的筑路方法在今天已不能适合要求。为了在路堤筑成后能立即铺轨通车，为了通车后能保证高度的运输效率与行车安全，必须采取填土打夯的筑路方法。同时，过去多年的经验已经告诉我们：那种不加人工压实的筑路方法其实是极不经济的。因为(1)疏松的高填土筑成后继续不断的沉落，以致路面不能保持原来设计的坡度。在这种情况下如要保证质量势须再进行测量补垫，耗

* 本文发表于土木工程学报第1卷第1期，1954年3月。

费人力物力。(2) 在路堤顶面上的道床石碴下沉到土壤中, 这种情况在通车后继续不断地发生, 因而养路工务段普遍地被迫采取加填石碴的救急措施, 经常进行垫补并调整钢轨。消耗大量的养路费并减短了枕木和钢轨的寿命。这种现象在一些地段继续至许多年, 最后在路堤中间造成一种土壤包围着石碴的“水囊”。又须采用更费钱的方法去补救它。

由于这些原因, 铁道当局自 1951 年开始在新建线路工程中全面地推行“填土打夯”工作法。在初步推行的工作中规定了路堤填土必须分层夯实。每层填 30cm, 夯实至 20cm。这个方法推行至今, 两年以来已经收到巨大而肯定的效果。但为了更进一步地做好路堤填土工作, 现行的简单规定还是很不够的。因为这个规定仅只是从经验出发, 缺乏科学的根据。实践证明了有些地区的土质原有结构十分紧密, 以致筑路时很难从 30cm 夯至 20cm。同时另一些地区的土壤十分松散, 即使照这个规定做了, 也仍不能确保路堤应有的质量, 因此现场上对于填土打夯的技术标准有更进一步研究改进的要求。

二、路堤高填土密度的理论

高填土路堤是一种用土壤作为建筑材料而造成的建筑物。它和任何其他的建筑物(如桥梁、房屋)一样, 承受着外来的荷重, 内部产生一定的应力, 而且受天然地基承载着。所以, 要科学地设计一个高填土路堤也应当和设计任何其他建筑物的程序一样, 先决定建筑物的基本要求, 其次要了解材料的种类和性质, 然后分析建筑物内部的应力, 最后根据材料的性质去设计安全断面, 或者根据已定的断面去计算所需材料的强度与等级。下面我们按照这个程序分别讨论。

(一) 高填土路堤的基本要求

高填土路堤的基本要求有三项:(1) 填土须要有足够的强度, 使路堤在各种季节变化及荷重作用之下均不致坍裂。(2) 填土的密度须保证在路堤筑成以后不再因其自身的重量而发生沉落。(3) 填土的上层须保证受列车活荷重应力多次重复作用后, 不发生永久性的变形和过大的弹性变形。

在过去的筑路经验中, 高填土沉落和路面变形的现象是普遍发生的。但填土坍裂的现象仅只在个别地基不良和边坡过陡的情况下才发生。因此, 高填土的密度主要是根据前述的第二和第三项基本要求而决定。本文的内容仅只针对着这个问题。

(二) 土壤作为筑路材料的主要性质

土壤作为筑路材料的主要性质表现为其密度, 含水量, 与压力之间的相互关系。为了解释这些现象, 需要先从土壤的强度谈起。

土壤的强度随着许多复杂的因素而变化, 但其中主要的三个因素是: 土壤的种类, 密度与含水量。如果选定一种土壤, 则其强度主要依据密度与含水量的数值而变化。对于一种土壤, 如果其密度增加, 则强度也增大, 但当含水量增加时, 则其强度减小。

含水量对于强度的影响可以用水膜理论来解释。根据水膜理论, 土壤的每一个矿物质颗粒的表面都包围着带电的水分子, 形成或厚或薄的水膜。这种水膜与土壤空隙中流动水的性质不同, 具有粘着力和抵抗变形的强度, 并且有一定的屈服点。水膜的强度因其厚薄而变化, 其厚度又随着含水量而变化。据苏联科学家杰氏(Б. В. Дерягин)的研究, 当水膜厚度为 $0.09\mu\text{m}$ 时, 剪变模量约为 $2\text{kg}/\text{mm}^2$, 当厚度大于 $0.15\mu\text{m}$ 时, 则强度等于零。又例

如某一土壤当含水量为 6.5%，密度为 1.76g/cm³ 时，其贯入阻力为 37kg/cm²；但当此土壤的含水量增至 13.0%，密度增至 1.90g/cm³ 时，其贯入阻力却降至 8kg/cm²。

假设用这个土壤在含水量为 6.5% 时填筑路堤，则填筑时因为内部颗粒间的抗剪强度较大的缘故，可以在很松的结构下与外力维持稳定。但这种稳定只能在含水量等于 6.5% 的条件下维持，若含水量增加便将发生变化。一般路堤到了雨季时被地下水或表面雨水浸入，在受水浸入的部分土壤颗粒之间的抗剪强度突然降低，同时上层的土浸湿后本身重量增大，因而发生局部不均匀的大量沉落，这是我们常见到的沉落原因。

可以更进一步用压缩曲线来研究这种现象。如果我们将上述的，含水量等于 6.5% 的疏松土壤放到压缩试验仪器中去作压缩试验，则我们将得到曲线 I（图 1），在这个曲线 I 上，压力增加时，空隙比减少得不很多。原因是内部颗粒之间的抗剪强度较大，因而能在较松的构造下与外力平衡。如果我们在上述试验开始时先将土样浸水使之达到饱和，则压缩量大为增加，结果将得到曲线 II（图 1）。这条曲线 II 代表土壤受压力后所达到的最小空隙比。（注：土壤的最小空隙比便代表最大密度、空隙比和密度可以互相换算。空隙比的减小又可代表土壤的沉降）。我们可以用压缩曲线来分析土壤在路堤中的各种情况：

(1) 假若考虑路堤中某一层填土，其所受的路堤自重总压力为 P_1 ，其在填筑时的含水量为 6.5%，填筑过程中未加人工夯实，那么填筑后的空隙比必是 ϵ_1 。图中的 A 点便代表这个情况。

(2) 假若上述的压力和含水量都不改变时，这一层土便在 A 点维持平衡。若假设含水量不变而压力逐渐增加，则平衡点将离开 A 点而沿着曲线 I 逐渐向右移动，因而密度增加，路堤下沉。这是因荷重增加而引起的沉落。

(3) 假若上述的压力 P_1 不变，而含水量增加，则平衡点将离开曲线 I 而沿着压力为 P_1 的垂直线向下移动。若含水量增至饱和程度，则平衡点落到曲线 II 上，B 点即代表这种情况。这是路堤因受水浸入而发生的沉落。

(4) 上述的土层在压缩曲线上的位置由 A 点降至 B 点时，其空隙比由 ϵ_1 降至 ϵ_2 。因而产生的实际下沉量可以用下列公式计算：

$$S = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{1 + \epsilon_1} \cdot H$$

S = 路堤由于这一层土壤浸水而发生的沉落量。

H = 土层的厚度。

(5) 假若土壤压力与密度的关系符合曲线 II，就可以保证路堤在任何水分变化时都不再发生沉落。所以曲线 II 代表最安全的情况。根据这条曲线，若设计中的土层将受压力 P_1 ，便应当在填土时预先将它用人工压实到空隙比等于 ϵ_2 的密度。

(6) 反过来看，如果我们要使土壤在静压力之下达到空隙比 ϵ_1 ，需要些什么条件呢？这

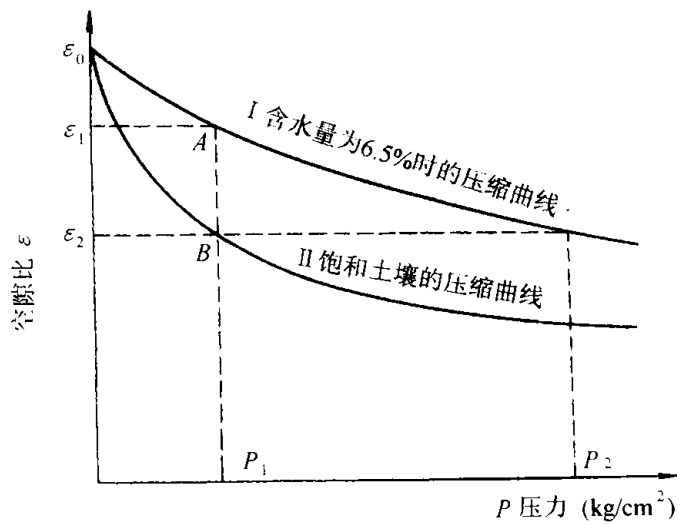


图 1 土壤的压缩曲线

有两个：一个条件是压力 P_1 ，另一个条件是饱和水分，在这两个条件中，如果含水量小于饱和水分，便必须加大压力至许多倍才能将土壤压缩至 ϵ_2 。例如从图 1 中可以看出，当含水量为 6.5% 时，必须有 P_2 那样大的压力才能得到 ϵ_2 。

(7) 如果压力小于 P_1 ，便根本不能压实到 ϵ_2 。

上面所讨论的是土壤在静压力下的性质。但从上述讨论的结果也可以更清楚地了解夯实试验以及最佳密度和最佳含水量的意义。一般夯实试验的作法是用某种重量的落锤，以规定的落高和落击次数夯实土壤。夯实后测定其密度。这样在各种不同的含水量之下作许多次试验，求得其最大的干容重。这个最大干容重便被称为最佳密度，其相当的含水量便是最佳含水量，夯实试验所得到的结果如图 2。

今试将图 2 和图 1 相比较。若图 2 中的横座标不代表静压力而代表夯实试验中的锤击功能，如果使 P_1 代表标准夯实试验所规定的锤击作用，那么在图 1 中的 B 点便近似于最佳含水量时的试验，而 ϵ_2 便近似于最佳密度时的空隙比。图 2 中夯实曲线上的各点均相当于图 1 中 ABP_1 直线上情形。因此得到结论：“最佳密度是土壤在某一种规定的夯实功能下所能达到的最大密度”。但它绝不是土壤在任何情况下的最大密度。因为 ϵ_2 在图 1 中只代表压缩曲线上的一点，若压力或夯实功能增加时，土壤的空隙比是仍要减小的。从上述的分析中可以看出，最佳密度 ϵ_2 不应普遍地在各种工程中运用，它只能作为填土设计工作中的一项指标，只有在设计压力为 P_1 时采用它才是合理的。若建筑物中的压力大于 P_1 ，它便成为不安全的；若压力小于 P_1 ，它又成为不经济的。在这里还应当说明，静压力与打夯作用对于压实土壤所起的作用虽然有基本相同的规律，但其中也还有许多值得研究的问题与不同之点。特别需要指出，在填土打夯时，最佳含水量并不是饱和的水分，它应当是小于饱和水量的。因此上述图 1 与图 2 的比较仅只是近似的。

在夯实工作中人们时常提出一个问题：“若不增加锤重，而增加落击次数，是否可以达到更高的密度？”这个问题可以用活荷重压缩曲线（图 3）来分析。在这个图中 $\epsilon_0 - \epsilon_1$ 代表土壤第一次受压力 P_1 作用时的变形。如将压力 P_1 除去，则土壤回弹至 ϵ_2 ，所以 $\epsilon_0 - \epsilon_2$ 是土壤受压力 P_1 作用一次以后所遗留的永久变形，如继续将压力 P_1 重复地施于土壤许多次，最初每次受压后均产生少量附加的永久变形，如 $\epsilon_2 - \epsilon_3$ ， $\epsilon_3 - \epsilon_4$ ，……等，这是因为土壤每次受压力时另有一些颗粒受影响而重新排列位置。但压力重复作用至许多次以后，附加的永久性变形不再发生；这时土壤每次受压力 P_1 作用时仅发生弹性变形 $\epsilon_M - \epsilon_N$ ；当压力除去后其空隙比为 ϵ_M 。于是： P_1 便成为土壤被压实以后的弹性限度， ϵ_M 便是用压力 P_1 所可能达到的最大密度。假若设计要求的密度大于 ϵ_M ，便必须采用比 P_1 更大的压力，仅靠增加重复作用的次数是不能解决这个问题。从这一段分析的结果可以认识到：填土的密度受夯实工具的限制，增加打夯次数只能在一定的限度以内收到效果，若要有效地提高填土密度，必须增加夯实工具的重量。

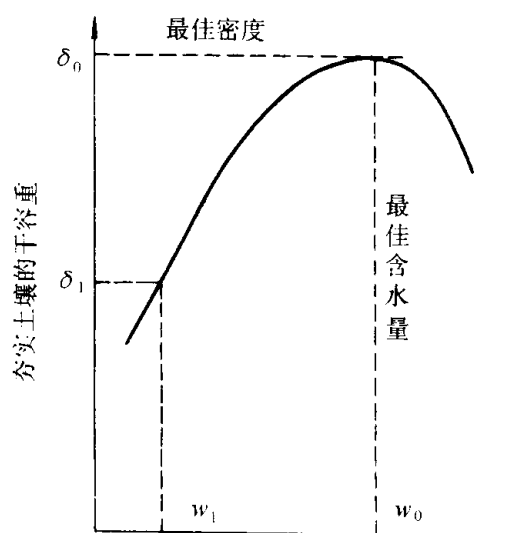


图 2 夯实曲线
打夯时土壤的含水量， $w\%$

