



粗巨粒土填筑地基

谢春庆 邱延峻 著

西南交通大学出版社

粗巨粒土填筑地基

谢春庆 邱延峻 著

西南交通大学出版基金资助出版

西南交通大学出版社

·成都·

内 容 提 要

随着经济的发展,国家加快山区重点建设的步伐。这些建设场地的地形、地貌、地质条件复杂,常牵涉到深挖高填。填料一般为开山而来的块碎石等粗巨粒土,且土方工程量大,对填筑地基性状和变形要求高。本书结合三明、龙洞堡和铜仁等机场的场道地基工程,对山区机场高填方块碎石等粗巨粒土夯实地基的性状和变形进行了系统研究,提出了该类地基处理方法系统,揭示了复杂高填方粗巨粒土夯实地基体系的沉降变形规律以及影响变形的主要因素,为今后此类地基的处理和优化设计提供了科学依据。

本书图文并茂,内容丰富,条理清晰。具有较高理论和实用价值,可供机场、公路、铁路、土木、水电、矿山等部门有关专业技术人员参考,也可作为有关专业教学、科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

粗巨粒土填筑地基 / 谢春庆, 邱延峻著. —成都: 西南交通大学出版社, 2003.6
ISBN 7-81057-715-8

I. 粗... II. ①谢...②邱... III. 山区—飞机跑道—地基变形—研究 IV. V351.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第020285号

粗 巨 粒 土 填 筑 地 基

谢春庆 邱延峻 著

*

责任编辑 刘莉东

封面设计 肖 勤

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段111号 邮政编码: 610031 发行部电话: 87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 8.75

字数: 201千字

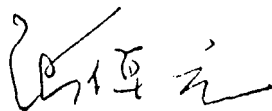
2003年6月第1版 2003年6月第1次印刷

ISBN 7-81057-715-8/V·012

定价: 18.00元

序

随着社会和国民经济持续快速发展,山区基础设施建设发展十分迅速。山区场地的突出特点是地形起伏大,不可避免地要深挖高填,同时山区石料又非常丰富。建设和施工单位基于经济和环境保护等方面的考虑,一般采用块碎石作为地基填料。所以,以块碎石等粗巨粒土为填料的高填方地基的填筑方法、性状、变形和稳定性问题是山区基础设施建设中最主要的岩土工程问题之一。目前,国外对此问题关注很少,国内也缺乏系统研究。作者抓住这个薄弱环节,结合三明、龙洞堡、大理和铜仁等机场的场道地基工程,对粗巨粒土地基的性状和变形进行了系统研究。首先,采用室内试验和原位测试相结合的方法,分析研究了原地面地基的天然性状和变形特征,确定其处理方法;其次,通过现场大型试验,分析和确定了粗巨粒土填料的一般要求和填筑方式,并对其处理的方法、步骤、参数及处理后地基检测方法、检测项目进行了研究;再次,分析和总结了粗巨粒土填筑地基变形监测的现状、方法、项目,确定了监测数据处理的方法和途径;最后,根据现场试验和监测数据,运用公式法、二维和三维数值模拟,分析了高填方粗巨粒土填筑体变形的一般特征。总之,通过潜心研究,分析了粗巨粒土高填方地基的一般变形特征、过程和机理,同时还建立了山区粗巨粒土填筑地基处理的方法系统,撰写了以上述系统研究成果为主要内容的我国首部“粗巨粒土填筑地基”的专著。相信本专著的出版,不仅对粗巨粒土性状和变形的理论研究有所促进,而且一定能对各种山区工程,如机场、公路、铁路、民用建筑等的粗巨粒土填筑地基的工程实践有所裨益,特为之作序。



2002年3月18日

目 录

1 绪言	
1.1 研究的意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 高填方夯实地基性状研究现状	3
1.2.2 高填方夯实地基变形研究现状	6
1.3 研究的内容及技术路线	9
1.3.1 研究内容	9
1.3.2 技术路线	9
2 原地地面地基处理试验研究	
2.1 三明机场原地地面地基处理试验研究	11
2.1.1 工程地质概况	11
2.1.2 试验场地的位置及分区	13
2.1.3 未处理原地地面地基变形分析	14
2.1.4 强夯试验设计及施工概况	15
2.1.5 处理后原地地面地基性状改善程度分析	23
2.1.6 强夯施工参数	29
2.2 龙洞堡机场原地地面地基处理试验研究	29
2.2.1 工程地质概况	29
2.2.2 未处理原地地面地基变形分析	31
2.2.3 强夯试验设计及施工概况	33
2.2.4 处理后原地地面地基性状改善程度分析	36
2.3 小 结	38
3 高填方块碎石填筑地基的夯实试验研究	
3.1 挖填界面的处理	40
3.1.1 一般建筑地基的作法	40
3.1.2 填挖交界面设计	40
3.1.3 变形分析	41
3.2 填筑材料及处理	42
3.2.1 三明机场填料的研究	43
3.2.2 龙洞堡机场填料分析	44
3.3 填筑机械	46
3.4 填筑方法	46

3.4.1	碾压、强夯对比试验及经济技术分析	47
3.4.2	抛填与堆填对比试验	51
3.5	强夯试验	53
3.5.1	单点夯击试验	53
3.5.2	地基加固深度	55
3.5.3	满夯试验	57
3.5.4	填筑层顶层的压实试验	57
3.6	夯实地基性状分析	57
3.6.1	参数测试	57
3.6.2	加固效果评价	58
3.7	强风化白云岩的夯实试验	60
3.7.1	试验场地概况	60
3.7.2	单点夯击试验	60
3.7.3	强夯处理效果检测	61
3.7.4	密度试验	62
3.7.5	垂直静载荷试验	62
3.7.6	现场回弹模量试验	63
3.8	关于干密度能否作为地基检测唯一标准的讨论	64
3.9	高填方夯实地基处理方法系统	67
3.10	小 结	70
4	高填方块碎石夯实地基变形的监测研究	
4.1	监测仪器及埋设	71
4.1.1	国内外填筑地基的沉降观测仪器现状	71
4.1.2	高填方夯实地基变形监测	72
4.2	变形发展的规律分析	72
4.2.1	三明机场施工期变形监测成果分析	72
4.2.2	龙洞堡机场施工期变形监测成果分析	75
4.2.3	工后沉降规律分析	77
4.3	问题讨论	83
4.3.1	夯实的高填方地基工后反沉降是一客观物理现象	83
4.3.2	反沉降原因讨论	84
4.4	小 结	86
5	高填方块碎石夯实地基变形计算	
5.1	建筑规范法	87
5.1.1	《建筑地基基础设计规范》法	87
5.1.2	《工程地质手册》法	89
5.1.3	填筑体自身分层沉降计算	90
5.2	图解法	92

5.3	水电工程法	92
5.3.1	劳顿和列斯特公式	92
5.3.2	顾慰慈公式	93
5.3.3	戈戈别里德捷公式	95
5.3.4	《碾压土石坝设计规范》(SD218-84)方法	95
5.3.5	前苏联建筑法规 II-53-73 法	95
5.3.6	改进的水电大坝沉降计算公式	96
5.4	铁路工程法	96
5.5	实用估算方法	98
5.5.1	计算数据	98
5.5.2	统计分析	99
5.5.3	经验公式	100
5.6	小 结	102
6	高填方块碎石夯实地基变形二维有限元分析	
6.1	有限元位移法的基本原理	103
6.1.1	位移模式建立	103
6.1.2	单位应变量	104
6.1.3	单元刚度矩阵	105
6.1.4	体积力计算	105
6.2	填筑体二维变形有限元分析	106
6.2.1	地基地质模型	106
6.2.2	数值模型	106
6.2.3	物理模型	107
6.2.4	变形计算	107
6.3	填筑体工后沉降分析	108
6.4	小 结	108
7	高填方块碎石夯实地基变形三维数值分析	
7.1	FLAC 的基本原理	109
7.2	计算模型	113
7.3	地基及填筑体的变形特征及稳定性状况评价	114
7.3.1	地基及填筑体的变形特征	114
7.3.2	地基及填筑体的稳定性特征和潜在滑面的分析	116
7.4	小 结	119
8	高填方块碎石夯实地基变形影响因素、变形过程和机理分析	
8.1	高填方夯实地基变形影响因素分析	120
8.2	填筑地基的应力分析	121
8.2.1	非饱和细粒土应力分析	121
8.2.2	非饱和块碎石填筑体应力分析	122

8.3 高填方夯实地基变形过程及机理分析	123
8.4 小 结	124
9 结 论	125
附 录	127
参考文献	130

1 绪 言

1.1 研究的意义

机场作为航空事业的载体，正随着国民经济的迅速发展和社会的全面进步而迅猛发展。建设机场的重大意义主要体现在两个方面：一是国防，二是对地方经济起巨大的拉动作用。目前，我国在西南山区在建和拟建的机场就有数十个，其中贵州省有 10 个，西藏自治区 5 个，四川省有 5 个。这些机场共同的特点是级别高、要求高、建设时间短、计划内投资少。这些机场建设为了节省大量的耕地和满足净空要求，多建设在荒山荒坡区。山区地形地貌复杂，机场建设中，势必牵涉到土方的深挖高填，如万州机场、铜仁机场、兴义机场、龙洞堡机场、广元机场、攀枝花机场、九黄机场等，填方高度一般在 30 米以上，最大达 100 余米。土方量多在 600 万方以上，最大达 5 000 余万方。下表是我国一些山区高填方机场的基本情况。各机场地质条件不一样，填料不一样，怎样采取合适的填筑方法、填筑材料、观测方法等，是各个机场必须解决的问题。即如何处理好机场建设中大面积、高填方、疏松且不均匀的堆填场地，使之满足机场建设地基稳定、变形、强度的要求，这是山区机场“开山填谷”场地地基处理中迫切需要解决的一项课题。

我国一些高填方机场概况

机场名	最大填方高度 (m)	填料性质	主要压实方式	填方量 (m ³)	建设情况
三明机场	28	砂、泥岩块碎石 (70%)	强 夯	775.5 万	在建
龙洞堡机场	54	石灰岩大块碎石	强 夯	约 1 200 万	已建
广元机场	38	砂、泥岩块碎石	强夯、碾压	600 万	已建
大理机场	30	白云岩石渣	强 夯	750 万	已建
铜仁机场	24	白云岩大块碎石	强 夯	218 万	已建
绵阳机场	28	卵砾土	碾压、强夯	约 250 万	已建
攀枝花机场	65	砂、泥岩块碎石	强 夯	约 2 400 万	在建
万州机场	32	砂、泥岩块碎石	强 夯	约 750 万	已建
兴义机场	42	白云岩大块碎石	强 夯	1 199 万	在建

续 表

机场名	最大填方高度 (m)	填料性质	主要压实方式	填方量 (m ³)	建设情况
九黄机场	102	含泥砂砾石	碾压、强夯	2 763 万	在建
荔波机场	46	砂、泥岩块碎石	强 夯	约 1 200 万	在建
黎平机场	30	石灰岩块碎石、红粘土	强 夯		在建

机场建设证明,山区机场土方工程是山区机场建设的经济、技术核心问题。一个山区机场建设的好坏、快慢主要决定于土方工程。现有机场建设中待解决的问题及建成后出现的问题,一般是土方工程中高填方夯实地基的变形问题。机场场道(图 1.1)是机场建设的主体,在我国由于受技术和材料的制约,其道面一般采用混凝土刚性道面,场道工程主要是变形设计,在地基有关物理力学性能满足要求的前提下,还必须满足残余沉降和差异沉降均小于 5 cm 的要求,这是山区机场建设非常关键的一环。目前国外一般采用沥青柔性道面,对变形要求不高,故对地基变形性状的研究很少。国内虽然每个机场都进行了现场试验,但研究的目的是论证和检验所采用方法的有效性和施工工艺的可靠性,为施工和质量检查提供数据和编制技术要求。由于目前机场建设的数量、行业等关系,很少有人对山区机场高填方夯实地基,尤其是块碎石地基,做较系统的深入研究,设计人员得不到反馈信息,无法对设计进一步优化,可能造成浪费和留下隐患。

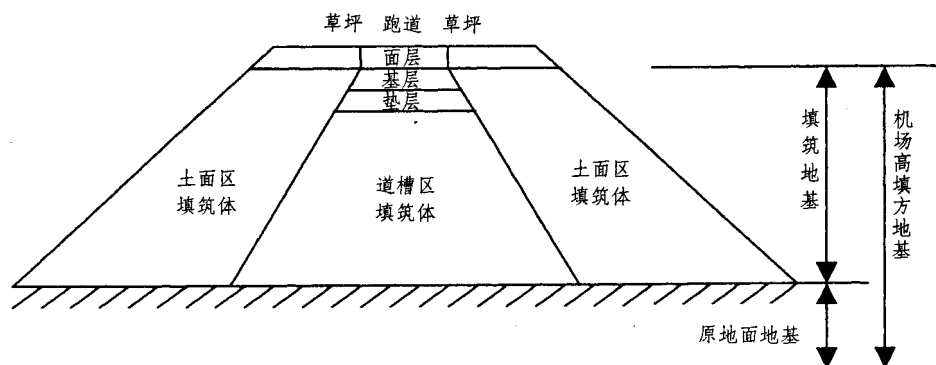


图 1.1 高填方机场场道横断面结构示意图

要研究地基的变形,必须研究地基的性状。因此,本书结合三明、龙洞堡和铜仁等机场的场道地基工程,对山区机场高填方块碎石夯实地基的性状和变形进行了系统研究。首先,采用了室内试验和原位测试相结合的方法,分析研究了场道原地地面地基的天然性状和变形特征,确定其处理方法;其次,通过现场大型的试验,分析和确定了填料的一般要求和填筑的方式。对比分析强夯压实块碎石填筑体的优越性,并对其处理的方法、步骤、参数及处理后地基检测的方法、检测的项目进行了研究。再次,分析和总结高填方夯实地基变形监测的现状、方法、项目,确定了监测数据处理的方法和途径。最后,根据现场试验、监测的数据,运用公式法、二维和三维的数值模型,分析了高填方块碎填筑体变形的一般特征、过程和机理。对今后此类地基的优化设计和施工具有重要的指导意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 高填方夯实地基性状研究现状

1.2.1.1 强夯技术的发展概况及趋势

强夯法处理地基是 20 世纪 60 年代末由法国 Menard 技术公司首先创用的。该项技术已在世界上广泛应用。我国于 1978 年开始介绍和引进强夯技术,并于 1978 底开始在工程中试用。由于强夯技术经济易行、效果显著、设备简单、施工方便、质量容易控制、适用范围广泛、节省材料、施工周期短,在我国迅速推广,并广泛运用于港口堆场、仓储码头、道路路基、新建厂矿场地的平整等。据不完全统计,“八五”期间,全国重大工程项目强夯处理地基在 300 万平方米以上。处理的地基土涉及杂填土、素填土、粉土、粘性土、砂土、碎石土、湿陷性黄土。我国强夯处理地基的工程主要有北京乙烯工程(消除液化)、惠州油罐区工程(加固抛石填海地基)、燕化 200 万吨催化装置(处理山区非均匀抛石填海地基)、大连西太平洋石油罐区工程(处理山区非均匀块石回填地基)、大庆石化厂贮罐地基工程(消除液化)等。强夯法唯一显著的缺点就是夯击过程中可能对周边建筑物产生震动影响,从而要求强夯法施工应保持一定的安全距离,故强夯法特别适合开阔场地的地基处理工程,也就特别适合机场地基的处理。20 世纪 90 年代以来,我国在沿海机场软土地基中广泛采用了强夯法,张倬元(1995)、陈上明(1996)等对福建长乐机场、浦东机场强夯处理地基性状进行了较为系统的研究。认为强夯在提高软土地基承载力,消除砂土液化,减小地基不均匀沉降方面作用明显。甘厚义、周虎鑫(1995~1996)等在大理机场、龙洞堡机场、三明机场高填方地基处理中根据地质条件、山区具有丰富的块碎石填料的性质,在道槽部分采用强夯法,土面区部分采用强夯法或碾压法,分别对铺填的块碎石料或碎石料与土的混合料(三明机场)、力学性质较好的土料进行处理,效果良好。由此看出,强夯对大块碎石加固技术和对沿江沿海饱和软土的处理技术,将成为我国在该领域的重点内容,应用前景广阔。

国外强夯机械日趋大型化,施工所用履带式吊车通常在 1 000 kN 以上,还制作了专用的三脚架和轮胎式强夯机,加固后的夯坑直径在 7.0 m 以上。由于客观原因所限,国内普遍采用的是 250~500 kN 的履带式吊车,提升高度在 20.0 m 以下,重锤约 140~200 kN,锤径 2.0~2.5 m,即低中能量的强夯。山区机场多采用 2 000~3 000 kN·m 强夯,沿海软土机场采用 1 500 kN·m 以下,一般为 1 000 kN·m 的低能量强夯。目前国内采用的强夯加固最大能量级为 8 000 kN·m(三门峡火电厂处理湿陷性黄土地基,1992)。大能量的强夯主要机具是 50 t 履带吊,辅以龙门桁架,起吊高度 20 m,重锤约 430 kN,锤径 3.2 m,静压强约 53.5 kPa。一般以 3 000 kN·m 强夯为限,当能量小于 3 000 kN·m 时,施工机械相对简单,50 t 履带吊不必辅以龙门桁架,施工便捷,定位快,工效高、移动迅速;当强夯能量大于 3 000 kN·m 时,50 t 履带吊必须辅以龙门桁架才足以保证施工安全,因而机具移动、定位相对较慢,工效相对低。当强夯能量大于 8 000 kN·m 时,目前施工单位常用的 50 t 履带吊难以承受,因此国内施工机具的制约是过高能量强夯技术发展的关键。目前国内也在加强这方面的研究。以 75 t 履带吊,辅以龙门桁架进行 1 000 kN·m 以上能量的强夯,已成为机具的经济可行性研究,在不久的将来很快会得到开发与运用(王铁宏,1998)。

强夯影响深度指强夯后地表下土体发生物理力学变化的某一深度。Menard 强夯影响深度公式为

$$h = \sqrt{MH}$$

式中 M ——夯锤质量

H ——夯锤吊高

该式考虑的因素很少, 计算简单, 但偏差较大。为了工程的实际运用, Gambin 等提出改进的 Menard 强夯影响深度公式为

$$h = a \cdot \sqrt{MH/10}$$

式中, a 为系数, 其值 $0.5 \sim 1.0$ 。Fang、Leoards、Eillis、汪文善、范维垣等通过大量的统计工作, 得出 $a \in (0.3, 0.8)$, 基本值 0.5 。强夯有效加固深度指地基强夯后能满足特定工程要求的深度, 它位于影响深度的某一范围内, 具有更重要的工程意义。为了得出较为准确的强夯有效加固深度, 太原工业大学、蒋鹏 (1999)、坂口旭 (1979)、王成华 (1991)、张永军 (1992)、徐志飞、杨志强 (1993) 等分别从能量守恒、夯击次数对有效加固深度的叠加效应、振动波的传播特性及土体对波能的吸收效应等角度, 采用回归分析、神经网络、有限元等方法, 得出了不同的计算公式, 近似地反映了强夯有效加固深度。我国强夯地基有效加固深度一般 $6 \sim 10$ m, 最大 21 m, 分层填筑的高填方地基处理最大深度 54 m; 国外已见资料报道, 地基处理最大深度 17 m。

关于强夯法加固地基的机理, 目前国内外还没有形成统一的看法, Menard、Gambin、Fang、Leoards、Eillis、Mitchell、坂口旭、太原工业大学、张永军、钱学德等从不同的角度对强夯机理进行了研究, 并提出了自己的看法。Mitchell 的看法具有代表性, 他认为, 当强夯法用于非饱和土时, 压密过程基本上与实验室中的普氏击实法相同, 在饱和和无粘性土的情况下, 可能会产生液化, 压密过程和振动压密的过程相似, 对饱和细粒土的加固效果还不明确。他指出, 对饱和细粒土, 需要破坏土的结构, 产生超孔隙水压力以及通过裂隙形成的排水通道, 孔隙水消散, 土体才会压密。在我国, 对非饱和土加固机理的认识是, 一般将地基视为弹性半空间体, 在重锤自由下落, 夯击地面的瞬间, 由势能转化的动能一部分以声波的形式向四周传播, 一部分由于摩擦产生热能, 其余大部分则使土体振动, 并以压缩波、剪切波、瑞利波的形式在地基内传播。地基一般不均匀, 成层状, 土体中的孔隙为空气、水或其他液体所充填。在夯击地面的瞬间, 波在成层状地基中从一个弹性介质传到另一介质, 同时, 波能的一部分返回第一个介质。传到另一个介质的波能起强夯加固的作用, 返回的波能则使表层土体变松。这是强夯中地表局部隆起的原因。强夯加固多孔隙、粗颗粒含量高、非饱和地基是基于动力压密理论, 冲击型动力荷载在瞬间使土体中的孔隙体积缩小, 土体密实, 承载力提高。非饱和土的夯实变形主要是由于土颗粒的相对位移重新排列而引起, 也是土中孔隙空气被排出的过程, 经强夯处理后, 土体达到密实状态。蒋鹏 (1999) 对强夯机理进行了较为系统的研究后认为, 强夯荷载应属中高速冲击荷载, 强夯激发的应力波具有明显的强间断特征, 夯击坑过程是一个作用时间很短的冲击侵砌过程, 夯坑周边地基土的变形具有高应变率的特征, 从而提出了从冲击波理论和可压缩流体理论出发解释强夯加固机理的观点。

目前,强夯处理地基的形式主要有直接强夯、换填强夯、置换强夯。直接强夯是在原地面无不铺加任何材料的前提下,夯锤直接置于原地面的夯实方式;换填强夯是挖除部分或全部原地面土层后,回填物理力学性质良好的材料,然后对剩余的原地面土层及填筑材料进行夯实的方式;置换强夯是在不挖原地面土层的前提下,在原地面填物理力学性质良好的材料,然后对原地面土层及填筑材料进行夯实的方式。

1.2.1.2 原地地面地基处理现状

高填方原地地面地基处理与房屋、公路、铁路、大坝类似。处理的主要方法有清除、换填、碾压、强夯。建筑部门对房屋、工厂等重大工程地基的处理在全国范围内多采用强夯法,尤其是非均质回填地基和液化地基、抛石地基。公路、铁路、水电部门对公路、铁路、大坝地基则多采用清除、换填、碾压法,少见强夯处理的报道,这可能与施工单位设备、处理后地基性状要求有关。高填方机场道槽部位一般用清除、换填、置换、强夯法,个别采用碾压法,如绵阳机场。清除方法用于除去地表草皮、树根、耕植土、土方量较少的淤泥和软土。换填、置换一般辅以强夯的方法,即换填强夯法、置换强夯法。90年代中期,中国建筑科学院地基研究所甘厚义、空军工程设计研究局周虎鑫等对贵州龙洞堡机场、福建三明机场、云南大理机场厚度小于4m的淤泥和软土进行了换填强夯法、置换强夯法处理试验研究,采用载荷试验测得处理后地基的回弹模量、变形模量大于15MPa,承载力大于300kPa,满足了地基强度的要求。对道槽下填料用中风化、微风化具有良好级配(不均匀系数 $C_u > 5$,曲率系数 $C_c > 1$)的坚硬岩石。换填强夯法最大粒径80cm,置换强夯最大粒径40cm。20世纪90年代末,用同样的方法对铜仁机场、万州机场原地面进行处理,也获得了成功。由于机场对沉降变形有严格的要求,到目前为止,高填方原地地面强夯处理的深度还未超过4.5m。现在兴义机场42m的高填方原地地面松散层(红粘土)厚度大于10m,其下有小溶洞群,有关单位正进行换填强夯与置换强夯相结合的方法处理该类地基的研究与实践。据了解,九黄机场填方高度100余米,原地面处理拟采用强夯、碾压和碎石桩相结合方式。

1.2.1.3 填筑体研究现状

均匀、稳定、密实是对填筑地基的基本要求。由于建筑物的不同,对填筑体基本要求的差异很大。目前,机场对填筑体要求最高,除一般要求的均匀、稳定、密实外,还必须满足差异沉降、工后沉降 $< 5\text{ cm}$ 的要求。因而对填料、填筑方法、填筑体检测项目、标准有严格的要求。

1) 填料

公路部门规定填方路基宜优先选用级配较好的粗粒土作填料。细粒土作填料时,当土的含水量超过最佳含水量两个百分点以上时,应晾晒或掺入固化材料等技术措施处理。高速公路高路堤填料的粒径最大粒径15cm,CBR最小值上路堤为8%,下路堤为3%。当用石料填筑时,最大颗粒不宜超过层厚的 $2/3$,即30cm。高速铁路高路堤填料在国内外皆未有明确的规定,只是建议在可能的前提下优先选用级配较好的A、B组作填料,实际中为了降低成本也采用了块石、C组料、改良后的D组料。抛填堆石坝由坝址侧的山体岩石爆破抛填堆积而成,对粒径没有严格的要求;碾压堆石坝石料选用范围宽,包括坚硬岩石、风化岩石、甚

至松散的页岩、片岩。堆石料的粒径一般在 0.6 ~ 610 mm。民航部门规定道槽区宜选用透水性强的土壤,大于 10 cm 的土块必须打碎。土面区除泥炭、淤泥、腐植土外均可作为填土。显然各部门除泥炭、淤泥、腐植土外对填料的种类、粒径、级配都没有严格的限制,一般是就地取材。到目前为止,由于压实、经济等原因,各种填方工程多采用细粒土、粗粒土,在我国除个别抛石填海、开山填谷工程外,少有用巨粒土。但从目前各种建筑物对地基要求日益提高、节约耕地及节约成本方面来看,山区填筑地基大规模地采用沟谷中卵砾石料、开山的大块碎石料作填料为必然。如何用好这些物理力学性质良好,但又难以压实的石料,是目前及以后一个非常有意义的研究课题。

2) 填筑方法

从压实的机具来看,高填方填筑的方法可分为碾压法和强夯法。无论何种方法,皆为分层填筑,分层填筑的厚度因机具、填料的性质、建筑物对地基的要求不同而有较大的差异。公路、铁路、大坝的路堤和坝体多采用细粒土和粗粒土,压实机具为各式碾压机,分层填筑厚度一般不大于 0.5 m。机场填料采用细粒土时,填筑方法和填筑厚度与公路、铁路、大坝类似。当采用大块碎石填筑时,道槽区分层填筑厚度一般为 4 m,土面区最多可达 8 m,采用强夯击实。

3) 填筑体检测项目、方法

细粒土填筑体的检测项目、方法已有成熟的经验,有关部门出台了相应的规范、标准。检测的项目主要有压实度、干密度、承载力等。现场测定干密度的方法主要有环刀法、灌砂(水)法、核子密度计法等。室内测定最大干密度的方法,规范规定标准重型击实法。土夹石填筑体的检测项目与细粒土类似。但在检测方法上困难较大。由于土夹石含有大颗粒的石块(最大可达 0.8 m),室内的标准击实试验难以测得其最大干密度,即使增大试筒的直径,也因大颗粒对击实功的损耗,得不到真正的干密度,其值偏小。在填土未真正达到密实时,施工中检测结果,会出现“超密”现象。为此,林秀贤、鲁爱民,GBJ7-89 规范等提出了相对密度修正法、最大紧密度修正法、体积修正法、规范修正法等。实践表明,上述方法修正后的室内最大干密度值偏大,相对之下,最大紧密度修正法的所得的最大干密度值较接近实际。重要建筑物为了控制变形,常增加模量的测定,方法为载荷试验,但费工费时。开山获取的大块碎石填筑体,室内无法测定其最大紧密度,室外常用大型的灌水法测得其实际密度,也就不能计算出压实度,施工中常说的压实度“98 区”、“90 区”,对大块碎石填筑体只是习惯用法。机场大块碎石填筑的道槽区对变形要求严格,模量为必测项目,方法为大型载荷试验,极费工费时。但在工程中我们发现,土夹石、大块碎石填筑体现场检测的干密度达到一定值后,模量满足要求。能否采用检测方法相对简单的干密度,作为土夹石、大块碎石填筑体惟一的检测标准,同样是一个非常有实际意义的研究课题。

1.2.2 高填方夯实地基变形研究现状

1.2.2.1 监测的设备与方法

地基的用途不一样,变形监测的目的、精度和监测设备就有所差异。交通部门在填筑体稳定的前提下,关心的是垂向变形问题。高速公路、一级公路容许的工后沉降:桥台与路堤相邻处 < 10 cm,涵洞或箱型通道处 < 20 cm,一般路段 < 30 cm。铁路容许的工后沉降与公路

相似, 路桥过渡段的地基(路堤 $H < 7\text{ m}$) 工后沉降小于 5 cm 。机场道槽区工后沉降和差异沉降无论填高多少皆应小于 5 cm , 实际工程中以 4 cm 控制。水电部门对大坝的变形观测主要为侧向变形, 监测的主要为侧向位移。高速公路、一级公路、铁路一般进行二等或二等以下的水准观测, 设备主要为水准仪、经纬仪(沉降桩法)、分层沉降仪、电磁式分层沉降仪、垂直变位仪、垂直相对变位仪。碾压土石坝垂向观测设备与公路、铁路相似。机场进行二等或二等以上的水准观测, 设备主要为水准仪、铟钢尺。上述方法及设备适用于碾压填方的变形观测, 对强夯, 尤其是大块碎石强夯很不适合, 特别是分层沉降观测。观测设备埋入土层中后, 在强夯强大的冲击作用下, 设备被破坏, 如龙洞堡机场埋入填筑层中的多种设备几乎全被损坏。解决山区机场夯实地基沉降观测的方法和设备是一个迫切问题。

1.2.2.2 变形计算

土的压缩变形随时间增长的过程称为固结。1925 年, 太沙基在假定地基是一个均匀的、等向的半无限空间弹性体, 土中应力与应变成直线关系, 土体变形是无限小, 土颗粒和孔隙水均不可压缩, 孔隙水渗流服从达西定律, 渗透系数为常数的条件下, 建立了单向固结的基本微分方程, 并获得了一定条件下的初始条件和边界条件下的解析解, 这一方程迄今还广泛应用。根据一维方程进一步推导出二、三维固结微分方程。1941 年, 比奥从比较严格的固结理论出发, 推导了反映孔隙水压力消散与土颗粒骨架变形相互关系的三维固结理论, 把饱和粘土受力及土体的应力、应变、位移和超静孔隙水压力消散相互制约关系及其时间效应完全结合起来, 建立了水土耦合作用模型。两种理论的假定基本一致, 不同之处, 太沙基固结理论假定在固结过程中总法向应力不随时间改变。固结理论用于解决任意时刻的变形, 而最终沉降量可用分层总和法简单求得。分层总和法同样是以均质半无限弹性空间理论推算的。以均质弹性半空间的应力来计算非均质地基, 在理论上不尽合理, 但经过经验系数修正, 具有广泛的应用性。无论是固结理论计算地基任意时的沉降还是用分层总和法计算地基最终沉降量, 运用的对象为细粒土, 是否可运用来计算粗粒土和巨粒土沉降, 目前还未见到。

目前, 压实地基变形计算总的方法为分层总和法。即原地面地基、填筑体变形和荷载作用下原地面地基、填筑体变形之和。对单一对象的沉降计算, 方法较多, 大致可分为规范法、数值法和经验法。规范法即《建筑地基基础设计规范》(GBJ7-89) 推荐的分层总和法, 也是工程中最常用的方法。它用于计算地基最终沉降, 较接近实际, 但经验常数范围窄, 并且没有砂土、土夹石、块碎石的沉降修正系数。对填筑体的沉降计算, 翁兴中、沈永福、李雷、郑志等提出了根据填方地基分层填筑、分期固结的特点, 提出了改进的分层总和法, 这些方法基本原理类似, 推导方法相近, 其假设条件与规范法一致, 基本公式来自土体压缩(固结)理论, 即① 高填土自身压缩按分层总和法计算, 在计算填土某一层对下面土层的作用时, 该层填土层作为附加荷载, 以下填土按自重应力考虑; ② 填土内部自重应力按线性分布, 按应力公式 $\sigma = \gamma h$ 计算。土体中的附加应力符合半无限体上条形荷载作用下的应力分布; ③ 随应力水平的提高, 填土逐渐被压密, 压缩模量逐渐提高, 其应力、应变符合 $e-p$ 曲线或 $E-P$ 曲线。它们的基本原理可用公式来说明。分层碾压的坝体(或填筑体)在施工期各土层的固结是随坝体升高而逐渐发生的, 施工期各土层的沉降不受在此前发生的各土层的影响, 而运行期各土层是在相对稳定的受力条件下产生固结, 其沉降是在坝体填筑完成后才发生的, 所以各土层运行期的沉降在坝顶沉降中发生累积效应。基于此, 将坝体自上而下地按年度分为几层, 采用分层总和法计算沉降(见图 1.2)。第 i 层在施工期的沉降量为上覆荷

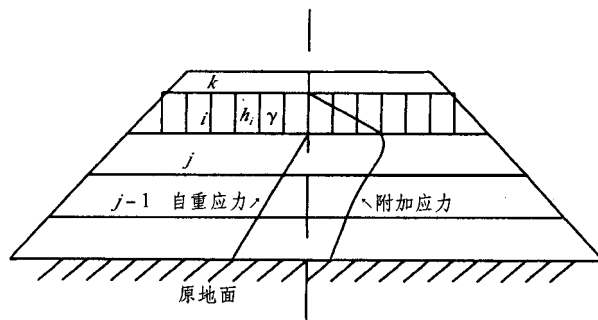


图 1.2 坝体变形计算结构示意图

重及本层荷重作用下，本层和下卧土层在其后续施工期内的固结压缩量之和，即第 i 层在施工期的第 t 年度的沉降量为：

$$S_{it} = S_i U_{it} + \sum_{j=i+1}^n S_j U_{jt}$$

$$S_i = \frac{p_i - \gamma_i h_i / 2}{E_{si}} h_i \quad (\text{按压缩模量计算})$$

$$S_i = \frac{e_i - e_{it}}{1 + e_i} h_i \quad (\text{按压缩曲线计算})$$

$$S_j = \frac{p_j}{E_{sj}} h_j \quad (\text{按压缩模量计算})$$

$$S_j = \frac{e_j - e_{jt}}{1 + e_j} h_j \quad (\text{按压缩曲线计算})$$

其中

$$p_i = \sum_{k=1}^i (\gamma_k h_k + u_k)$$

式中 S_i, S_j ——第 i, j 层在第 i 层施工期的上覆荷重和本层荷重作用下的压缩量；

e_i ——第 i 层的起始孔隙比；

e_{it} —— $(p_i - \gamma_i h_i / 2)$ 作用下第 i 层的孔隙比；

e_j —— $\left(\sum_{k=i}^j \gamma_k h_k - \gamma_j h_j / 2 - u_j \right)$ 作用下第 j 层的孔隙比；

e_{jt} —— $\left(\sum_{k=i}^j \gamma_k h_k - \gamma_j h_j - u_j \right)$ 作用下第 j 层的孔隙比；

u ——孔隙水压力；

γ, h ——土层的容重和厚度；

i, j, k ——土层编号；

U_{it}, U_{jt} ——第 i, j 层在 t 年度的固结度。

第 i 层在运行期的最终沉降为

$$S_{jt} = \sum_{j=i}^n S_j (1 - U_{jt})$$

式中, t_c 为坝体竣工工期 (年)。

文中作者假设的前提是细粒土, 能否适宜粗粒土和巨粒土沉降计算, 未作探讨。陈国荣等则根据细粒土填方施工实测的沉降数据, 建立三元件粘弹性模型, 反分析沉降计算参数, 然后计算路面铺筑工后沉降, 在沪宁高速公路中取得了满意结果。周虎鑫对大理机场石渣填筑体用八节点有限元计算工后沉降值与实际观测值相近。美国学者 Kuanga-Hah Chu 根据列车与线路系统相互作用的特性, 提出了 FEM 模型, 其特点是考虑了列车荷载通过钢轨、轨枕、道床到路基的传递过程, 计算路基的变形与实际较吻合, 但文中给出的例子填方高度小于 10 m, 地基条件是细粒土。世界各国在填方实践中积累了一些经验, 建立了一些经验公式, 具有代表性的是德国和日本的工后沉降估算公式, 即

$$S = h^2 / 3000$$

式中 S ——路堤工后沉降量 (m);

h ——路堤高度 (m)。

但公式中填筑体沉降量仅与填筑高度有关, 而与变形密切相关的模量无关, 显然太粗略。如填土的变形模量为 10 MPa 和 100 MPa, 其工后沉降有巨大的差异, 而公式中没有体现。大块碎石填筑体工后沉降计算方法还未见报道。

1.3 研究的内容及技术路线

1.3.1 研究内容

- ① 原地地面地基处理试验研究。
- ② 高填方块碎石填筑地基处理试验研究。
- ③ 高填方块碎石夯实地基参数的检测及取值。
- ④ 高填方块碎石夯实地基沉降的监测。
- ⑤ 高填方块碎石夯实地基变形研究。
- ⑥ 高填方块碎石夯实地基沉降变形影响因素、过程及机理分析。

1.3.2 技术路线

通过国内外大量文献查阅, 在了解国内外高填方地基性状和变形特性的基础上, 紧密结合研究区的岩土工程特性, 按如下的思路进行研究:

- ① 大量查阅国内外文献, 了解国内外高填方地基性状和变形特性研究的现状、水平和存在的不足, 使本书的研究建立在最新动态、最新进展的基础上。
- ② 通过现场调研, 掌握研究区地层的结构、地基土的物理力学性质, 获得地基原状土的基本性状特征。
- ③ 现场的试验研究, 对比分析原地地面地基处理的方法, 分析强夯处理后的原地地面地基的性状特征及改善情况, 判断其物理力学性质、变形是否满足设计要求, 获得场区原地地面处理的一般方法。