

刘 宏 张倬元 | 著



四川九寨黄龙机场 高填方地基变形与稳定性系统研究

Sichuan Jiuzhai Huanglong Jichang
Gaotianfang Diji Bianxing yu Wendingxing Xitong Yanjiu



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

TU47

22

2006

喀斯特环境与地质灾害防治教育部

重点实验室出版基金资助出版

四川九寨黄龙机场高填方 地基变形与稳定性系统研究

刘 宏 张倬元 著

西南交通大学出版社

• 成 都 •

图书在版编目 (C I P) 数据

四川九寨黄龙机场高填方地基变形与稳定性系统研究 /
刘宏, 张倬元著. — 成都: 西南交通大学出版社, 2006.7
ISBN 7-81104-326-2

I. 四... II. ①刘...②张... III. ①机场—地基变形—
研究—四川省②机场—地基—结构稳定性—研究—四川
省 IV. ①V351②TU47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 058035 号

四川九寨黄龙机场高填方地基变形与稳定性系统研究

刘 宏 张倬元 著

责 任 编 辑	刘莉东
责 任 校 对	李 梅
封 面 设 计	本格设计
出 版 发 行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮 编	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
电 子 邮 箱	cbsxx@swjtu.edu.cn
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成 品 尺 寸	170 mm × 230 mm
印 张	13.625
字 数	248 千字
版 次	2006 年 7 月第 1 版
印 次	2006 年 7 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-81104-326-2
定 价	25.00 元

图书如有印装问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

摘 要

【关键词】 九寨黄龙机场 高填方地基 变形 稳定 系统研究

随着我国西部大开发战略实施,多山的西南地区机场建设进入迅猛发展阶段。这些机场的特点是高填方、高地震烈度、场区地质条件复杂、常分布有软弱土层,且机场建设周期短。因而妥善解决机场高填方地基的稳定与变形(沉降与差异沉降)是该地区机场建设的核心问题和首要问题。但国内外对机场高填方地基变形与稳定性系统研究仍不多见,甚至连“高填方”的标准也无统一论。九寨黄龙机场场区基本地震烈度 8.1 度,海拔 3 442 m,最大填方高度 104 m,土石挖填方量超过 5 800 万 m^3 ,底部软弱土层厚达 10 余米。本文基于前人的初勘、详勘基础地质资料和环境工程地质评价,开展了高填方地基处理检测试验、砂砾石填料压缩蠕变试验、高填方地基变形与稳定性离心模型试验和数值模拟研究以及长达 2 年的高填方地基变形原位监测,形成了九寨黄龙机场高填方地基变形与稳定性系统研究体系,并获得了以下几点创造性成果。

(1) 以大量的试验和观测资料,丰富并完善了前人九寨黄龙机场高填方地基变形与稳定性系统研究设想,认为高填方地基工程研究、设计与施工必须紧密结合:第一,开展高填方地基基础地质条件研究和环境工程地质评价;第二,结合工程情况进行高填方地基变形与稳定性试验研究并提出软弱地基处理方法;第三,进行软弱地基处理试验和填料碾压夯实试验;第四,结合工程实践进行高填方地基变形与稳定性原位监测,并结合监测研究成果对前期试验研究进行反馈分析;第五,综合各阶段研究成果,对高填方地基将来的变形与稳定进行预测,并以此为依据进行下一阶段工程设计。

(2) 软弱土是原地基中相对软弱土层,其力学性质较一般土层差,却高于软土,不是真正意义上的软土。但它对高填方地基稳定性和地基沉降与不均匀沉降起着决定性作用,对其应根据实际情况进行强夯、碎石桩、换填和碾压处理。

(3) 初始压实度控制着砂砾石填料的压缩变形特性,初始压实度为 97.4% 的砂砾石填料在压缩变形过程中具对数函数特征,而初始压实度大于 99% 的砂砾石填料在压缩变形过程中则以线性函数特征为主。

(4) 高填方地基沉降包括底部原地基沉降和填筑体压缩沉降两部分。原地基(尤其是强夯地基)沉降是软弱土体较为缓慢的排水固结过程,填筑体沉降则是非饱和土体的快速自重压密过程,两者对荷载响应特性有较大区别。前者的

沉降曲线较为舒缓,沉降随荷载增加而逐渐发展,在停止加载后一段时期内,沉降速率才逐渐降低。后者加载期间沉降曲线陡而急,快速加载产生快速沉降,加载停止后,沉降速率迅速减小,导致加载期间沉降曲线与停止加载后沉降曲线之间存在明显拐点,并随工程间歇性施工加载沉降随加载呈阶坎状发展。

(5) 高填方地基工后沉降包括填筑过程中产生的部分瞬时沉降、加载结束后的主固结和次固结三部分,瞬时沉降速率最高可达 0.20 m/月 ,发展时间约为 $15\sim 40 \text{ d}$,主固结速率为 $0.003\sim 0.03 \text{ m/月}$,发展时间为 $8\sim 14$ 个月,次固结速率小于 0.003 m/月 ,发展时间为 $3\sim 5$ 年。

(6) 元山子沟高填方地基在发生 0.256 m 侧向位移,月平均位移速率高达 6.02 cm/月 条件下仍处于稳定状态,且深部并未出现沿某个层面滑移,有力指导了机场土石方工程顺利施工。土石方工程结束后,综合各阶段研究成果,以人工神经网络模型、回归参数模型和工程地质类比等方法对高填方地基工后沉降进行了预测,认为道槽区最大工后沉降量较小,元山子沟为 $0.57\sim 0.65 \text{ m}$,设计沟为 $0.27\sim 0.30 \text{ m}$,山巴沟为 $0.18\sim 0.26 \text{ m}$ 。为下一阶段场道工程设计与施工提供了坚实的理论依据,实现了九寨黄龙机场高填方地基变形与稳定性系统研究方法的生产实践意义。

Abstract

【Key Word】 Jiuzhai-huanglong airport high embankment deformation stability systematic research

With the great development of West China, the airport construction in the mountainous southwest of China is enters into a prosperous period. High embankment, intensive earthquake, complex geological conditions accompanied with soft soil, and short construction period are the main characteristics for these airports. Therefore, properly dealing with the stability and deformation (settlement and differential settlement) of the high embankment during the construction is the first and primary task in these regions. But little research has been carried out about the stability and deformation of the high embankment either domestic or abroad. So much as the standard of high embankment height is still violently disputed. The site of Jiuzhai-huanglong airport is located in the 8.1 degree of seismic intensity zone, and its elevation is 3 442 m. The maximum height of the embankment is 104 m. The total quantity of the excavated and filled earth-rock material is above 58 000 000 m³. The thickness of the weak soil under the embankment is above 10 m. In this dissertation, based on the predecessors' research for the basic geological conditions in the preliminary and detailed investigation, and the evaluations of the environmental engineering geology, ground treatment detection tests, coarse grain filling material compressional creep tests, centrifugal model tests and 2-year in-situ monitoring and numerical simulations for the stability and deformation of the high embankment of Jiuzhai-huanglong airport are carried out. Some creative conclusions are put out as follow.

(1) The research system of the deformation and stability of the high embankment of Jiuzhai-huanglong airport assumed by predecessors is improved and enriched by large numbers of tests and monitoring data. It's recommended strongly that research, design and construction are integrated tightly. First, study the basic geologic conditions of the high embankment and carry out its environmental geologic engineering assessment. Second, associating with the

engineering situation, carry out the deformation and stability of the high embankment tests and work out the reinforcement of the weak ground. Third, actualize the reinforcement tests of the weak ground and the rolling compaction tests of the filling material. Forth, implement the in situ monitoring during the whole construction period and feed the monitoring results back to the prophase tests study in time. Fifth, based on the comprehensive analysis of all research results, predict the coming deformation and stability of the high embankment, then to the next stage's design.

(2) The weak soil is a weak stratum comparing with others, not the regular soft soil. Its mechanical property is below regular soil, but above soft soil. The weak soil is crucial for the high embankment stability and settlement, especially the differential settlement, thus must be reinforced, according to the situation, by dynamic consolidation, gravel pile, cushion or rolling.

(3) The initial degree of compaction of grit filling controls its compressional characteristics. If the initial degree of compaction is 97.4%, the compaction process is logarithmic. If it is above 99%, the process is linear.

(4) The settlement of the high embankment is composed of the settlement of the ground and the compression of the embankment itself. The ground settlement (especially the settlement of the ground which reinforced by the dynamic consolidation) is a slowly draining consolidation of weak soil, and the embankment compression is a fast process of unsaturated soil compaction under its self-weight. The difference of their response to loading is remarkable. The former settlement curves are gentle and smooth, that's the settlement increases gradually with loading, and its velocity diminishes bit by bit after loading. The latter settlement curves during loading are steep, that's fast loading produces fast compression, and its velocity diminishes speedily after loading. Therefore, a remarkable knee point comes into being between them. With intermittently filling process, the settlement curves develop ladder-likely.

(5) The settlement that occurs after the embankment attained its scheduled level is composed of immediate settlement occurring during the filling process and primary consolidation and secondary consolidation occurring after the loading process. The maximum immediate settlement velocity is 0.20m/month, its life time is about 15~40 days. The primary consolidation velocity is 0.003~0.03m/month, its life time is about 8~14 months. The secondary consolidation velocity is below

0.003m/month, its life time is about 3~5 years.

(6) Though the lateral displacement of the high embankment located in Yuanshanzigou is above 0.256 m with a recorded velocity of 6.02 cm/month, it is still stable and deep slip surface is nonexistent. Based on the comprehensive analysis of all research results, the settlement that occurs after the embankment attained its scheduled level is predicted by the artificial neural net work and the regressive parameters models and the engineering geologic analogism. The results show that the maximum settlements of Yuanshanzigou is 0.57~0.65 m, and Shejigou is 0.27~0.30 m, Shanbagou is 0.18~0.26 m. All theoretically guide the filling process and provide a solid basis for the next stage's design and construction and actualize the creative and practical purpose of the research system of the deformation and stability of the high embankment of Jiuzhai-huanglong airport.

目 录

1 诸 论	1
1.1 选题依据和意义	1
1.2 国内外研究进展	3
1.3 主要研究工作及研究技术路线	12
2 研究区环境地质条件	15
2.1 地形地貌	15
2.2 地层岩性	15
2.3 区域地质构造与地震	17
2.4 气象条件	19
2.5 水文地质条件	19
2.6 土石力学性质	20
2.7 不良地质现象	22
3 高填方地基特性	24
3.1 软弱土	24
3.2 软弱地基加固处理	27
3.3 填料碾压夯实	34
3.4 高填方体填筑加载过程	38
3.5 小 结	40
4 高填方地基变形与稳定性计算	41
4.1 地基稳定安全系数法评价	41
4.2 砂砾石填料蠕变试验	48
4.3 高填方体压缩沉降计算	61
4.4 强夯地基土高压压缩试验	63
4.5 原地基沉降计算	64
4.6 小 结	65
5 高填方地基变形与稳定性离心模型试验	67
5.1 离心模型试验相似准则	67
5.2 高填方地基土工离心模拟试验技术	68
5.3 离心模型试验结果	74

5.4 小 结	89
6 高填方地基变形与稳定性原位监测	92
6.1 监测内容与监测方案设计	92
6.2 元山子沟监测结果	96
6.3 设计沟监测结果	118
6.4 山巴沟监测结果	125
6.5 小 结	127
7 高填方地基变形与稳定性数值模拟	129
7.1 FLAC ^{3d} 基本原理	129
7.2 前期模型	131
7.3 反馈模型	137
7.4 小 结	144
8 高填方地基工后沉降预测	145
8.1 人工神经网络模型	145
8.2 回归参数模型	165
8.3 已建高填方机场工后沉降观测类比	182
8.4 小 结	187
9 结论	189
参考文献	194
附录	199

1.1 选题依据和意义

随着我国西部大开发战略的实施,西南地区机场建设进入迅猛发展阶段。据不完全统计,目前西南地区在建和拟建的机场有攀枝花机场、九寨黄龙机场、南充高坪机场、万州五桥机场、黎平机场、兴义机场、康定机场、林芝机场、阿里机场、日喀则机场、荔波机场、龙洞堡机场、六盘水机场、新舟机场、毕节机场、昆明第二机场、红河机场、文山机场、黔江机场,扩建机场有达州河市机场、重庆江北机场、贡嘎机场、邦达机场等 30 多个,这些机场都具有下列共同特点。

(1) 高填方。这些机场多建于荒山坡地上以减少占用耕地,但为满足场地条件和净空条件,机场建设势必进行深挖高填,表 1-1 为西南地区一些高填方机场概况,在建的九寨黄龙机场最大填方高度 104 m,填方量 2 763 万 m^3 ,在全世界都是罕见的。

(2) 高地震烈度。西南地区处于环青藏高原高地地震带,机场场址地震基本烈度高,如九寨黄龙机场场区地震基本烈度为 8.1 度。

(3) 场区地质条件复杂,且高填方地基底部一般都分布有一定厚度的软弱土层。西南地区山高谷深,机场场区地形地貌复杂,地层岩性变化大,地基土性状极不均匀,并且在沟谷高填方地段,各种基岩强风化层、残坡积层、冲洪积层和风成黄土在地表水和地下水长期浸泡下往往形成软弱土层。由于软弱土层厚度和分布极不均匀,因此,对软弱土层如不进行特殊的工程处理,必将导致严重的地基沉降与不均匀沉降,甚至危及高填方体的整体稳定。如某机场高填方填筑施工过程中,由于对基岩表面风化残积软弱土层认识不足而导致高填方体滑坡,造成巨大损失。

(4) 气候条件差。受青藏高原和云贵高原影响,西南地区机场建设施工气候条件恶劣,部分机场季节性冻土较为严重,工程施工期短,而机场高填方工程浩大,工程进度与工程质量间的矛盾十分突出,高填方体压实度很难绝对保证,地基易产生不均匀沉降。

表 1-1 西南地区一些高填方机场概况^[1]

机场名称	最大填方高度(m)	填料性质	主要压实方式	填方量(万 m ³)	建设情况
铜仁机场	24	白云岩大块碎石	强夯	218	竣工
绵阳机场	28	含泥砂砾石	碾压、强夯	250	竣工
大理机场	30	白云岩石碴	强夯	750	竣工
广元机场	38	砂泥岩块碎石	强夯、碾压	600	竣工
龙洞堡机场	54	石灰岩大块碎石	强夯	1 200	竣工
黎平机场	30	石灰岩块碎石、红粘土	强夯	377	在建
万州机场	32	砂泥岩块碎石	强夯	750	在建
兴义机场	42	白云岩大块碎石	强夯	1 199	在建
荔波机场	46	砂泥岩块碎石	强夯	1 184	在建
攀枝花机场	65	砂泥岩块碎石	强夯	2 400	在建
九黄机场	104	含泥砂砾石	强夯、碾压	2 763	在建

(5) 随着我国经济迅速发展和社会全面进步,西南地区机场建设起点高,机场级别高、要求高(大理机场高填方地基最终剩余沉降量不大于 4 cm,不均匀沉降倾斜值不大于 1.5‰,土基回弹模量大于 50 MPa),建设时间短。因而机场高填方地基的稳定与变形(沉降与差异沉降)等工程地质问题是西南地区机场建设中存在的核心问题和必须解决的首要问题。

九寨黄龙机场位于四川省阿坝州松潘县漳腊盆地东部谷坡上,中心参考地理坐标:东经 103°40′59″,北纬 32°51′25″。航站区位于川主寺镇,南距成都市 355 km,北距九寨沟景区 88 km,东距黄龙寺景区 36 km,正处九寨黄龙旅游环线枢纽位置。机场等级为 4C,跑道轴线 NE16°或 SW196°,长 3 200 m,宽 45 m。机场场区地形条件复杂,处于高海拔(海拔 3 430 m)、高地震烈度(地震基本烈度为 8.1 度)地区,场道工程具有高土石方量(挖方 3 093 万 m³。填方 2 763 万 m³)、高填方(最大填方高度 104 m)和快速加载(主体工程加载期仅为 14 个月),且高填方体底部分布有较厚的软弱土层。因而,九寨黄龙机场是西南地区乃至全国机场建设史上最为复杂的和最具挑战性的机场。作者在导师张倬元教授指导下,选取“四川九寨黄龙机场高填方地基变形与稳定性系统研究”为博士论文。这其中的高填方地基是特指由下部包括软弱土层在内的原地基土体和上部人工填筑体两部分共同组成的特殊地质体(见图 1-1);高填方地基变形则是指由包

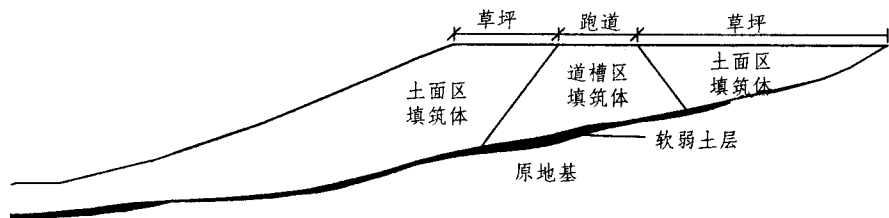


图 1-1 九寨黄龙机场高填方地基横断面结构示意图

括软弱土层在内原地基土体所发生的变形和由人工填筑体压缩引起的变形两部分构成；文中的施工期沉降是指土方工程填筑施工期间所发生的高填方地基沉降，工后沉降是指土方工程完工之后的高填方地基沉降。结合“四川九寨黄龙机场高填方地基变形有限元数值模拟研究”、“四川九寨黄龙机场高填方地基变形与稳定性离心模型试验研究”、“四川九寨黄龙机场高填方地基处理试验检测”、“四川九寨黄龙机场高填方地基变形监测研究”等研究课题，从九寨黄龙机场场区自然地质条件和高填方地基特性出发，以数值模拟、离心模型试验和原位监测为研究手段，对高填方地基变形与稳定性进行系统深入研究。

1.2 国内外研究进展

国内外对高填方地基系统研究较少，一般仅进行为数不多的几项研究，西南地区各机场建设中对各高填方地基都作了一定的现场试验，但都是以大面积施工提供施工参数和质量检验数据为目的而零星划分出试验段进行试验，缺乏系统深入的试验研究，甚至连“高填方”的标准也无统一论。在三峡机场工程中，设计单位曾提出填土厚度 ≥ 10 m 为高填方，这与九寨黄龙机场 104 m 的填方高度相差甚远。目前，对高填方地基的研究主要涉及高填方的软基加固处理、高填方地基变形与稳定性数值计算、离心模型试验、原位监测和监测结果的分析运用等，下面对这几个方面的研究状况进行具体阐述。

1.2.1 高填方软基处理

目前，西南地区机场高填方体软基处理主要方案为强夯、碾压、换填和碎石桩。

强夯法地基处理是 20 世纪 60 年代末由法国 Menard 技术公司首创，我国于 1978 年开始在工程中试用，90 年代以来，强夯法在机场软基处理中被广泛采

用。张倬元、陈上明、韩文喜等对福建长乐机场^[2]、上海浦东机场^[3]软基强夯处理作了系统研究,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。甘厚义和周虎鑫等在大理机场、龙洞堡机场把强夯用于软基加固处理外,还把强夯用于填筑料的夯实加密,并取得了显著的经济效益^[1]。强夯处理的地基土涉及杂填土、素填土、粉土、粘性土、砂土、碎石土和湿陷性黄土等,处理形式有直接强夯和置换强夯两种。直接强夯就是在原地面不铺加(或仅铺加薄层)材料进行强夯,置换强夯是在原地面铺加较厚垫层进行强夯。强夯荷载可以看作中高速冲击循环荷载^[4](蒋鹏,1999),对土体的加固除冲击压密作用外,还有在冲击波作用下产生的超静孔隙水压力在加载结束后消散,土体固结。置换强夯在夯击过程中还形成了复合地基,且垫层料的夯入使冲击波向深部传递,并为土体内孔隙水排出提供了良好通道,大大提高了地基的加固效果。

碾压法主要有三种:① 静压实;② 振动压实;③ 冲击压实。冲击压实起源于古代的人工打夯,但后来由于其效率低、劳动强度高而被静压实和振动压实所代替,20 世纪 50 年代初,Aubrey Berrange 首创能连续冲击压实的技术,即快速牵引(速度为 12~15 km/小时)三边、四边、五边或六边的压实轮,使之对地面产生持续不断的冲击力而压实土体。目前,冲击压实机械的冲击力可达 400 t,产生的冲击波具有地震波传播特性,大大提高了粗粒料和巨粒料的嵌锁紧密程度,加固深度可达 2.5 m。

碎石桩是指用振动或冲击荷载将底部装有活瓣式桩靴的桩管挤入地层,在软弱地基中成孔后,再将碎石从桩管投料口处投入桩管内,然后边击实,边上拔桩管,形成密实碎石桩,并与桩周土体一起形成复合地基^[5]。碎石桩处理的地基土主要有软土、人工填土和松散砂土,对地基土的加固除挤密作用外,还形成了复合地基,并为土体内孔隙水排出提供了良好通道,这对于高填方软基的排水加固是非常有利的。碎石桩特别适用于软基厚度较大的部位,如九寨黄龙机场针对软基厚度大于 10 m 的部位采用碎石桩处理。

换填主要用于机场高填方道槽区、高填方体坡脚等关键部位,并辅以强夯和分层碾压进行。如龙洞堡机场、三明机场、大理机场、铜仁机场、万州机场和兴义机场软基换填处理均大大降低了高填方地基的沉降变形^[6~9]。

1.2.2 变形与稳定性计算

高填方地基变形包括了下部饱和软弱土层的排水固结沉降和上部非饱和填土的自重压密沉降,下面分别进行阐述。

对于饱和土体,Terzaghi(1936)提出用有效应力($\sigma - \mu_w$)作为应力变量来描

述饱和土性状,用 Darcy 定律来计算固结过程中的流动速率,用体积变化系数 m_v 描述土体应力状态变化同土结构变形之间的关系,并建立了饱和土一维固结的经典理论。Biot 以有效应力($\sigma - \mu_w$)和孔隙水压力(μ_w)表达本构方程,考虑了骨架与孔隙水运动之间的相互作用,将应力与应变联系起来,于 1941 年建立了严格的饱和土体固结理论,使饱和土的研究与计算日趋成熟^[10~13]。

对于非饱和土体,即饱和度为 50%~90%的粘土或 30%~80%的砂土^[10],土体中需考虑三相体系,即气相、液相和固相。Coleman(1961)最早提出了描述非饱和土体应力状态的双变量理论^[14]。Fredlund 认为,在一般问题中,孔隙水和气压力对土颗粒的压缩可以忽略,采用了目前流行的净应力($\sigma - \mu_a$)和吸力($\mu_a - \mu_w$)的双变量理论。并在此基础上,Fredlund 和 Hasan(1979)建立了非饱和土体一维固结理论^[15]。20 世纪 80 年代后期有人开始研究非饱和土体的三维固结方程,杨代泉严格按双变量理论推导了非饱和土体的三维固结方程^[10,16],但由于公式复杂,参数众多,只能进行数值解,因而在工程实践中未被普遍采用^[17]。80 年代中期以来,由于计算技术的发展,数值模拟被广泛采用。尤其是有限单元法(finite element method 简称 FEM)、边界单元法(boundary element method 简称 BEM)、有限差分法(finite difference method 简称 FDM)、离散单元法(distinct element method 简称 DEM)和快速拉格朗日差分分析(Fast Lagrangian Analysis of Continua 简称 FLAC)等。对于土石坝和高填方地基,沈珠江(1994)根据鲁布革堆石坝的沉降观测资料和试验结果,建立了南水模型并对大坝沉降进行了反馈分析^[18],陈国荣建立了三元件粘弹性模型并用于沪宁高速公路填筑体工后沉降分析^[19],周虎鑫用 8 节点有限元对大理机场石渣填筑体工后沉降进行了分析^[20],谢春庆用 FLAC 对龙洞堡机场高填方地基变形进行分析^[1]。此外,国内外的研究者还发展了随机有限元进行沉降概率分析,如 Baecker 和 Ingra(1981)^[21]、Righetti 和 Williams(1988)^[22]、Phoo 和 Quack(1990)^[23]等人运用 Taylor 展开法随机有限元探讨了沉降的概率计算方法,Quek 和 Chow(1992)^[24]运用摄动随机有限元法对沉降进行了分析,Brakala 和 Pula(1996)^[25]将纽曼级数展开式与 Monte-Carlo 随机有限元法相结合进行了研究。

但目前国内外对于以砂砾石和块碎石为主的非饱和粗粒土和巨粒土变形研究较少,仅有少数的经验公式^[26],如德国和日本的工后沉降估算公式(1-1),罗斯和列斯特公式(1-2),顾慰兹公式(1-3),戈戈别里德捷公式(1-4)。

$$S = H^2/300 \quad (1-1)$$

$$S = 0.001H^{3/2} \quad (1-2)$$

式中, S 为路堤工后沉降量(m); H 为路堤高度(m)。

$$S_{\text{总}} = kH^n e^{-m/t} \quad (1-3)$$

式中, k, n, m 是经验系数, 按表 1-2 取值。

表 1-2 顾慰兹经验系数取值

经验系数	k	n	m
面板坝	0.004 331	1.204 5	1.746
斜墙坝	0.009 8	1.014 8	1.475 5
心墙坝	0.016	0.876	1.093 2

$$S_{\text{总}} = -0.453(1 - e^{0.08H})e^{0.693/t^{1.157}} \quad (1-4)$$

由于公式中仅考虑了填筑高度这一因素, 而未考虑填料的变形模量和工程加载速率等因素, 因而其结果是十分粗略甚至是危险的。如在龙洞堡机场和大理机场高填方地基沉降分析中, 上式的计算值与实测值最大差值可达 10 倍以上, 且差值随填筑体高度和变形模量增大而增大^[1]。谢春庆(2001)等对贵州龙洞堡机场和云南大理机场高填方地基沉降观测资料进行系统研究之后, 提出了高填方地基工后沉降估算公式^[1],

$$S = H^2 / \sqrt[3]{E^2} \quad (1-5)$$

式中, E 为地基土变形模量。

(1-5)式的适用性还有待于工程实践的进一步验证。因而, 对以砂砾石和块碎石为主的粗粒土和巨粒土非饱和土高填方的变形研究具重要的理论价值。

对于边坡稳定性的计算研究可追溯到一百多年前(Colmann, 1866), 到目前为止, 已提出了几十种方法。可大致分为三类: ① 传统的极限平衡分析法; ② 数值分析法; ③ 概率法。极限平衡法是一种定量方法, 也是工程中使用最多、最成熟的方法, 它的研究历史可追溯到 20 世纪 20 年代或更早, 近几十年来仍在不断发展。这种方法的理论基础即极限平衡理论的优点是在不给出应力作用下结构的变形图像的情况下, 仍能对结构的稳定性给出较精确的结论。更有意义的是, 分析失稳边坡反算的强度参数与室内试验结果吻合很好, 使分析结果更为可信。针对不同的条件, 工程界和学术界曾使用过以下几种方法: Taylor 法(1937, 1948)、Bishop 法(1955)、Bishop-Morgenstern 法(1960)、Morgenstern 法(1963)、Spencer 法(1967)、Hunter-Schuster 法(1968, 1971), 其他还有 L. Karafiath(1960)、Janbu(1954)和 Fellenius(1927)等提出的方法。这些方法有的仍在应用, 有的已逐渐被淘汰^[11]。传统的安全系数法是建立在确定性概念之上的, 虽然应用时间长, 范围广, 但由于没有考虑参数与模型的不确定性(包括

物理不确定、统计不确定和模型不确定)而无法进行稳定性的风险评价,无法给出边坡(包括破坏和未破坏的)破坏程度、风险水平,无法给防灾减灾提供可靠的依据,对于降雨、地震、人工活动所诱发的滑坡,不能提供滑坡的风险水平。斜坡概率稳定性评价法由于需要的信息量过大,在工程实践中往往因信息不足而得出错误的概率模型等。

1.2.3 离心模型试验

结构的荷载和应力主要由结构介质自身的重量产生,同时又支配着结构物的变形和破坏,这是岩土工程的一个显著特点。只有当现场结构的自重应力与室内模型相同时,模型才能呈现相似或相同的应力应变关系,获得与原型一致的结果。土工离心模型试验是将 $1/n$ 缩尺的模型置于特制的离心机中,在 ng 离心加速度的空间进行试验,由于惯性力与重力绝对等效,且高加速度不会改变工程材料的性质,从而使模型和原型的应力、应变相等,变形相似,破坏机理相同,能再现原型特征。黄文熙教授称之为“土工模型试验发展史上的里程碑”^[27]。目前离心模拟已广泛应用于各种工程领域中,并越来越受到工程界的重视。早在 1869 年,法国人 Phillips 就认识到弹塑性理论在解决复杂结构问题上的局限性,曾建议用离心机来增加模型的重力,以达到模型与原型之间具有相同性状的相似关系。但由于当时各种条件限制,直到 1932 年,苏联莫斯科水力设计院才建造了世界上第一台离心机,并开展了离心模型试验研究。从 20 世纪 40 年代到 60 年代苏联建造了不同容量的离心机二十余台。60 年代后期,英、美、日、法、德、丹麦、意大利、荷兰等国相继开展土工离心模型试验研究,使离心模型试验理论和技术得到了长足的发展。我国在 20 世纪 50 年代就注意到离心模型试验在模拟土工建筑物性状方面所具有的优点,并着手离心机建造方面的可行性研究。70 年代末才在长江科学院建成一台容量为 150 gt 的离心机,80 年代上海铁道学院、成都科技大学、南京水科院、河海大学相继建成了中小型离心机,开展了岩土理论及工程方面的研究,取得较好的研究成果。80 年代后期,离心模型试验机向大容量、高精度、自动控制和自动采集数据方向发展,以满足研究高土石坝、高应力等重型结构工程问题的需要。90 年代初中国水科院和南京水科院分别建成了 450 gt 和 400 gt 的大型离心机,使我国土工离心模型试验进入了世界先进水平(见表 1-3、表 1-4)^[28~30]。

岩土工程中离心模型的应用主要有以下三个方面:① 工程研究,即用离心模型试验解决生产中的实际工程问题。如黄河小浪底斜墙及斜心墙堆石坝(坝