

# 1 绪论

## 1.1 研究背景及意义

中国幅员辽阔，丘陵和山地广泛分布，在斜坡地基上修筑路堤等土石方工程是工程建设中尤其是交通土建工程中经常遇到的工程活动之一<sup>[1]</sup>。根据斜坡地基的岩土条件，斜坡路堤可划分为普通斜坡地基路堤和斜坡软弱地基路堤<sup>[1]</sup>两类，其典型的工程地质力学模型如图 1-1 所示。

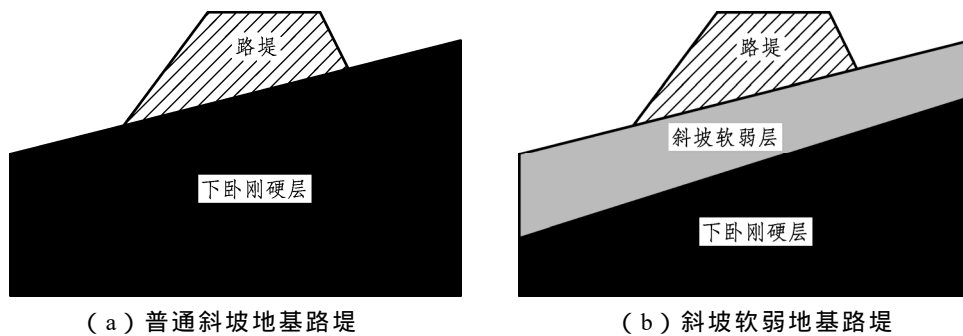


图 1-1 斜坡地基路堤工程地质力学模型示意

普通斜坡地基路堤，其地基土体的强度较高，在路堤自重荷载作用下地基变形较小，填方工程的安全性除了确保路堤边坡自身的稳定外，尚需重点关注路堤沿斜坡地面的滑动稳定性。

斜坡软弱地基路堤则是相对于水平软弱地基路堤而言的一类填方工程。从几何构造上讲，其地基存在地面横坡，导致了路堤横断面对称性丧失；从材料上看，其地基表层为软弱土层，虽然其成因特殊、物质组成独特，但宏观上地基软弱土体仍表现为低强度和高压缩性，在路堤自重荷载作用下仍然会产生过量的压密沉降和侧向变形<sup>[1-5]</sup>。

斜坡软弱地基路堤这一科学概念的提出具有重要的现实意义和理论意义，主要体现在如下三个方面：

- (1) 斜坡软弱地基广泛分布于我国西南山区，铁路、公路等公共交通基础设施建设

频遇。

铁路方面, 诸如渝怀铁路<sup>[1, 2]</sup> (重庆至怀化铁路) 全长 583.301 km, 沿线分别穿越丘陵区、低山区和中山区, 地形地势起伏较大, 线路所经过部分地段丘(山)间谷地分布软弱岩土, 主要为全新统冲(坡)洪积流塑—软塑状淤泥、淤泥质黏土、软黏性土等, 局部地段为坡残积具有弱膨胀性的黏土。全线填方工程软弱地基共计 130 处, 累计线路长度 12.03 km, 其中斜坡软弱地基共约 80 处, 累计线路长度接近 10 km, 占全线填方工程软弱地基的 80%以上, 路堤中心填土高度大于 10 m 的路堤 39 处/4 242 延米, 路堤中心填土高度大于 15 m 的路堤 17 处/2 061 延米。

遂渝铁路<sup>[1, 2]</sup> (遂宁至重庆铁路) 全长 144.737 km, 线路途经川中丘陵、川东南低山两个地貌单元, 地势起伏, 高差大, 丘(山)间槽谷、水田浅层和表层、堰塘多分布有软弱岩土, 主要为全新统冲(坡)洪积流塑—软塑状淤泥、淤泥质黏土、软黏性土等。全线斜坡软弱地基共计 14 处, 累计线路长度 3.8 km, 其中典型的斜坡软弱地基填方工程共 14 处/900 延米, 路堤中心填高大于 10 m 地段共 13 处/809 延米, 路堤中心填高大于 15 m 地段共 2 处/69 延米。

六盘水枢纽株六引入线及六盘水南编组站工程<sup>[6, 7]</sup>在约 20 km 线路范围内, 有 4 段累计长度共约 8 km 的斜坡软弱地基, 其中最长的一段连续分布长达 3.3 km; 内昆铁路老钢厂—李子沟段<sup>[7, 8]</sup>在长约 14 km 线路范围内, 有累计长度共约 9.6 km 的斜坡软弱地基, 最长的一段长达 1.32 km; 此外, 株六、沾昆、水柏、黔桂等新建、改建铁路都不同程度地分布有斜坡软弱地基<sup>[9]</sup>。

公路建设方面, 粤赣高速公路全长 135.632 km, 其粤境北段沿线部分丘间槽谷分布有软土、松软土。全线填方工程共有 20 处软弱地基, 其中斜坡软弱地基 5 处, 路堤中心最大填高大于 18 m 的斜坡软弱地基路堤共 2 处 (K38+175~K38+235 段, 路堤边坡最大填高 38 m, 中心最大填高 20.5 m; K38+840~K38+882 段, 路堤边坡最大填高 24 m, 中心最大填高 18 m)<sup>[1]</sup>。

(2) 斜坡软弱地基路堤潜在风险严重, 处理不当易造成滑塌失稳、侧向变形过大等重大工程事故, 严重威胁行车安全。

在勘探设计初期, 工程地质技术人员未充分认识到“斜坡软弱地基”的特殊性, 未将其归纳入“软土”的范畴, 从而导致施工初期防护措施力度不够, 出现了一系列工程问题<sup>[10]</sup>。

在贵州六盘水铁路枢纽工程建设过程中, 线路所经斜坡软弱地基地段滑坡灾害非常严重, 一度造成工程施工不能进行。据统计, 施工期间共计发生滑坡 22 处, 其中 21 处

为斜坡软弱地基，占滑坡总数的 95%以上<sup>[11, 12]</sup>，仅六盘水枢纽株六引入线及南编组站共约 8 km 的一段线路就由于在斜坡地基上填筑路堤、开挖路堑、弃渣等施工行为累计引发滑坡 15 处，工程整治费用超过 2 000 万元<sup>[7]</sup>。内昆线老钢厂—李子沟段共约 10 km 斜坡软弱地基，施工过程中也发生过严重的地质灾害和工程病害，主要为路堤、路堑滑坡，基坑边坡溜坍，桥涵地基承载力不足，隧道进出口处边仰坡滑坍、围岩软弱等，工程整治费用近 8 000 万元<sup>[7]</sup>。内昆铁路大关车站位于巨型岩堆上，施工后，出现斜坡岩堆路堤病害，比较典型的是 K279 + 670 ~ K279 + 760 段路堤加筋土挡墙外移产生拉裂病害，K279 + 987 ~ K280 + 107 站台地段填方土体开裂<sup>[1]</sup>。

斜坡软弱地基路堤容易出现的病害主要有以下几类：

- ① 地基产生过大的侧向变形。
- ② 地基连同路堤朝下坡脚一侧发生失稳破坏。
- ③ 路基差异沉降显著，对于公路，路表易出现纵向长大裂缝；对于铁路，则会对轨道结构产生危害，影响行车安全性、舒适性等。

图 1-2 给出了斜坡软弱地基路堤部分典型病害的照片。



(a) 失稳破坏<sup>[1, 13]</sup>

(b) 路表纵向长大裂缝<sup>[1, 13]</sup>

图 1-2 斜坡软弱地基路堤典型病害

(3) 斜坡软弱地基路堤这一科学概念的提出具有重要的理论研究意义和工程应用价值。

在斜坡软弱地基上填筑路堤，路堤水平分层填筑、压实的动态施工力学行为改变了天然斜坡软弱地基的初始应力状态，容易产生地基连同路堤过量的变形甚至失稳破坏，即斜坡软弱地基在填方荷载作用下将产生压密沉降和横向剪切变形，并随着填方荷载的增加逐渐增大，直至发生剪切破坏，丧失稳定性。同水平软弱地基相比，在相同的路堤

自重荷载作用下，斜坡软弱地基的变形将会加剧，尤其是发生在下坡脚一侧的侧向变形表现得更为明显，这极易引起路表开裂、沉降不均匀、差异沉降显著等影响正常行驶病害，严重时更会产生结构性破坏。对于高等级铁路、公路，由于设计车速的不断提高，当前人们对线路及路基结构的变形问题十分重视，其设计原则已经由传统的“强度控制”逐步转变成“变形控制”，对路基的变形提出了极其严格的要求，认为路基结构在发生强度破坏前，已经产生了不能忍受的过大变形，严重地影响了其路用性能。开展此类软弱土体的工程特性以及地基处理等方面的相关研究就成为寻找斜坡软弱地基处治方法的根本途径，具有重要理论研究意义和工程应用价值。

## 1.2 斜坡软弱地基的分类

斜坡软弱地基主要分为以下四类：丘间槽谷坡洪积软弱土地基、非沉积型斜坡软弱土地基、湖泊相软土边缘地基、斜坡上松散堆积体地基<sup>[1, 4]</sup>。

(1) 丘间槽谷坡洪积软弱土地基：西南山区丘间槽谷多存在一定的坡度，槽谷的覆盖土层多由坡（洪）积砂黏土、淤泥质黏土、黏土组成，具备构成斜坡软弱地基的条件。当线路斜穿槽谷或沿着丘坡脚行进时，部分填方地段位于软土边缘，进而造成填方地段地基由软弱土体构成，且软弱土体底部存在较大的横坡<sup>[1, 4]</sup>。图 1-3 所示为典型的山区丘间槽谷软弱土地基。



图 1-3 典型的山区丘间槽谷软弱土地基<sup>[1]</sup>

(2) 非沉积型斜坡软弱土地基：此类地基多表现为软弱土体呈不连续状分布在斜坡凸起的山梁、台地之上或局部洼地、沟谷之下，且与海（湖）相沉积软土相比，其成因、工程特性等均存在一定程度的差异，为非沉积型斜坡软土，最初被命名为“坡残积型、坡洪积型、溶蚀洼地型软土”<sup>[1, 4]</sup>。

(3) 湖泊相软土边缘地基：该地基的软弱土体由湖泊相软土构成，且软土地基基底存在大小不等的斜坡<sup>[1, 4]</sup>。

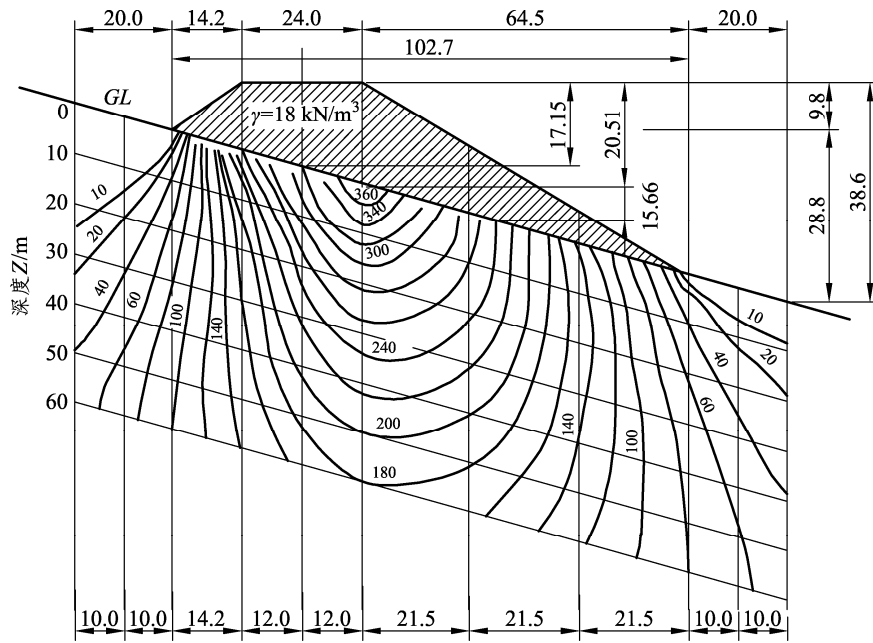
(4) 斜坡上松散堆积体地基：这类地基主要是指岩堆。作为一种普遍存在的不良地质现象，它是岩石经物理风化作用后形成的碎块，在重力作用下或通过降水搬运迁移至山坡或坡脚的疏松堆积物，其形成原因主要为坡残积或崩坡积。斜坡上的岩堆一般都具备物质成分不均匀、密实程度较差等特点<sup>[1, 4]</sup>。

### 1.3 斜坡软弱地基路堤工程特性研究现状及评述

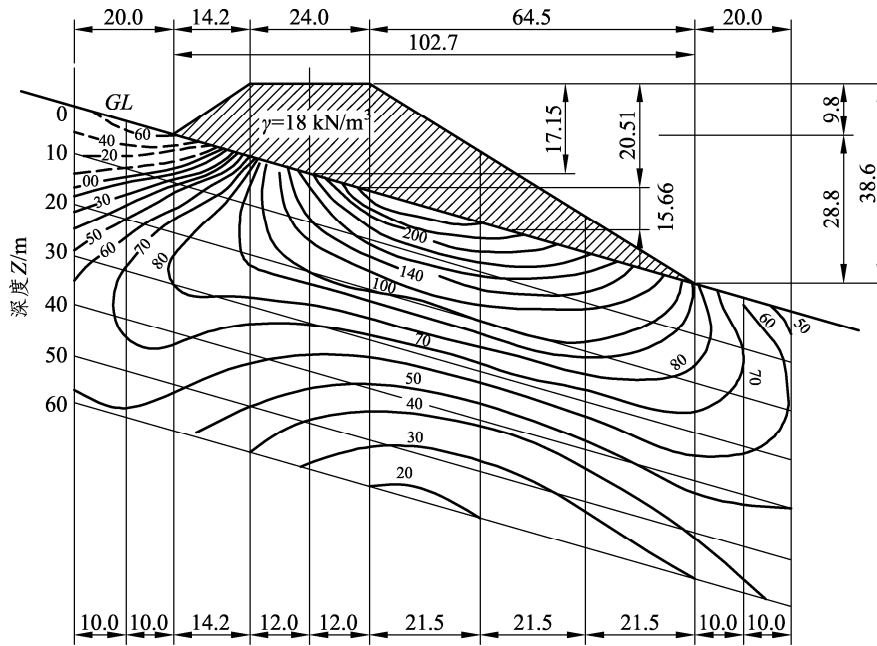
目前，针对斜坡软弱地基路堤，国外研究甚少，主要是因为西方发达国家在山区修筑填方工程时，多从保护自然生态环境或削减占有耕地的角度出发，环保意识强烈，普遍采用高架桥、隧道等方案通过斜坡地段。但我国目前限于现有的技术条件和经济原因，在山区斜坡地段修筑填方工程时主要还是通过填筑路堤来实现<sup>[14]</sup>。斜坡软弱地基路堤由两部分组成，分别是自然状况的斜坡软弱地基和人工修筑的路堤。既有的理论分析均以稳定性、变形、土体强度等为研究对象，研究手段主要有理论推导、数值模拟、室内试验、现场测试等。有代表性的研究及评述如下。

#### 1.3.1 斜坡软弱地基路堤理论研究

赵牡珍<sup>[15]</sup>（1985）在其译文中较为翔实地介绍了斜坡填土等三种工况下地基应力的计算表达式以及地基应力的分布情况等。图 1-4 所示为其给出的斜坡填土竖向、水平方向地基应力等应力线图，但未考虑柔性路堤荷载的特点以及斜坡软弱层（视地基土体均匀，未考虑分层）。



(a) 竖向地基应力



(b) 水平方向地基应力

图 1-4 斜坡填土竖向、水平方向等应力线图 (尺寸单位: m; 等值线单位: kPa; 自文献[15]修改而得)

魏永幸<sup>[3]</sup> (2001) 给出了松软水平地基和松软倾斜地基的应力分布和塑性变化趋势图, 如图 1-5 所示, 并从软弱地基变形机理出发, 初步论证了斜坡软弱地基路堤的安全性评价与地基加固的理念。

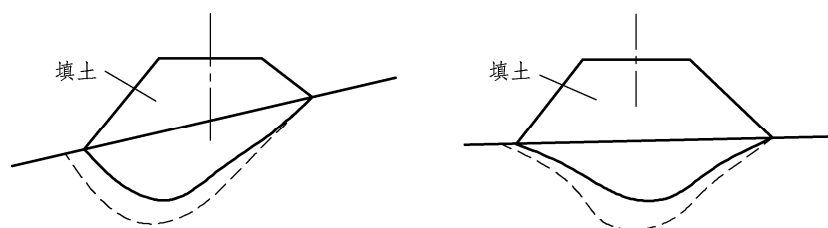


图 1-5 地基的应力分布及塑性变化趋势<sup>[3]</sup>

尤昌龙等<sup>[16]</sup> (2003) 指出, 在斜坡软弱地基上修筑路堤引起的附加应力在下坡脚一侧集中, 水平软弱地基的附加应力则集中在地基的中部。同水平地基相比, 在相同的路堤自重荷载作用下, 斜坡地基的应力值较大, 因而在路堤自重荷载作用下, 斜坡地基更易发生失稳破坏。

漆宝瑞<sup>[10]</sup> (2003) 针对发生剪切破坏的潜在滑移面可能不是规则的几何形状这一情况, 提出应根据工程的实际情况, 先选出几组较危险的潜在滑移面, 随后采用传递系数法分别验算剪出口的推力, 从中选定最危险的潜在滑移面。

魏永幸等<sup>[5]</sup> (2006) 为了保障斜坡软弱地基与水平软弱地基具有相当的稳定程度, 在通过稳定安全系数对斜坡软弱地基进行稳定安全性评价的基础上, 适度地提高了路堤滑动稳定性判定标准, 并定义修正后的稳定安全系数为当量安全系数, 提出了稳定当量安全系数的建议值。该建议值的提出是基于变形控制的理念, 充分地考虑了斜坡软弱地基变形特性的影响, 同时该设计理念已被收录在《铁路工程地基处理技术规程》(TB 10106—2010、J 1078—2010) 中<sup>[17]</sup>。

### 1.3.2 斜坡软弱地基路堤数值模拟研究

蒋鑫等<sup>[18]</sup> (2002) 基于 GEO-SLOPE 软件平台, 获得了斜坡软弱地基在路堤自重荷载作用下路堤和地基的应力与变形, 探讨了不同地层坡度、路堤填筑高度以及软弱土层厚度多个影响因素下的应力与变形响应, 特别关注了下坡脚处等关键部位的响应。

蒋鑫等<sup>[19]</sup> (2003) 基于极限平衡法, 分别采用 Bishop 法、Janbu 法、Ordinary 法等, 探讨了斜坡软弱地基路堤的稳定性受其断面几何参数 (地层坡度、路堤高度、软弱土层

厚度)影响的变化趋势。

蒋鑫等<sup>[20]</sup> (2004) 运用弹塑性有限元法, 分析了软弱夹层在地基中的相对位置对斜坡软弱地基填方工程关键部位的位移响应, 运用极限平衡法探讨了软弱夹层在地基中的相对位置、软弱夹层厚度的不均匀性对斜坡软弱地基填方工程稳定性的影响。

蒋鑫等<sup>[21]</sup> (2007) 基于强度折减有限元法, 研究了在路堤分步建造过程中斜坡软弱地基路堤的变形与稳定性变化, 探讨了设置反压护道和放缓路堤边坡对填方工程力学特性的影响, 分析了复式滑面出现的可能性, 认为复式滑面是否出现这一现象与斜坡软弱土层的厚度密切相关。

QIU 等 (2007)<sup>[22]</sup> 利用有限元法, 分析了斜坡软弱地基公路路堤的变形行为及对沥青路面结构的影响。

刘金龙等<sup>[23]</sup> (2007) 同样采用有限元强度折减法, 探讨了斜坡软弱地基的变形特征及稳定性变化, 通过计算, 给出了地基内塑性区的分布规律。

邱延峻等<sup>[24]</sup> (2009) 基于 ABAQUS 软件平台, 建立了斜坡路基沥青路面动力计算有限元模型, 针对车辆荷载、行车速度等多因素研究了斜坡路基动应力、基层层底拉应力、路表弯沉等动力响应变化规律。

陈义军等<sup>[25]</sup> (2009) 通过室内大型三轴试验, 获得填料的力学参数, 并借此建立了相应的本构关系, 对山区公路斜坡填筑路堤的应力应变特征、影响因素进行了数值模拟分析研究。

刘金龙等<sup>[26]</sup> (2010) 采用有限元方法, 研究了倾斜软弱地基上在路堤分步建造过程中侧向变形、竖向沉降以及稳定性的变化规律, 对抗滑桩处治倾斜软弱地基的加固效果作了评价。

李荣华<sup>[27]</sup> (2010) 采用强度折减有限元法和正交试验设计, 对斜坡湿软地基路堤的稳定性进行了数值计算, 并对稳定安全系数进行了回归分析, 提出了山区斜坡湿软地基路堤稳定安全系数和湿软土层厚度、斜坡坡度等多因素之间的回归关系式, 认为路堤高度、路基填土的  $c$ 、 $\varphi$  值和湿软土层的  $c$ 、 $\varphi$  值是影响稳定性系数的主要因素。

刘晋南等<sup>[28]</sup> (2010) 基于 GEO-SLOPE 软件平台中的 SLOPE/W 模块和 QUAKE/W 模块, 探讨了在水平地震荷载作用下斜坡路基结构的动力稳定性。

### 1.3.3 斜坡软弱地基路堤试验研究

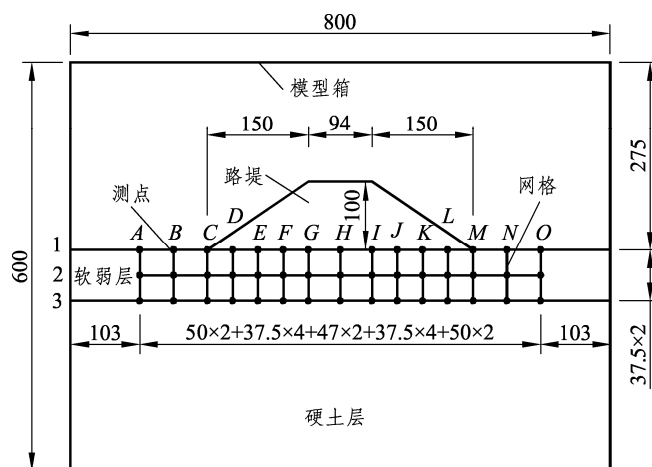
针对斜坡软弱地基路堤开展的试验研究主要有以下三种: 土工离心模型试验、室内常规模型试验和现场试验。



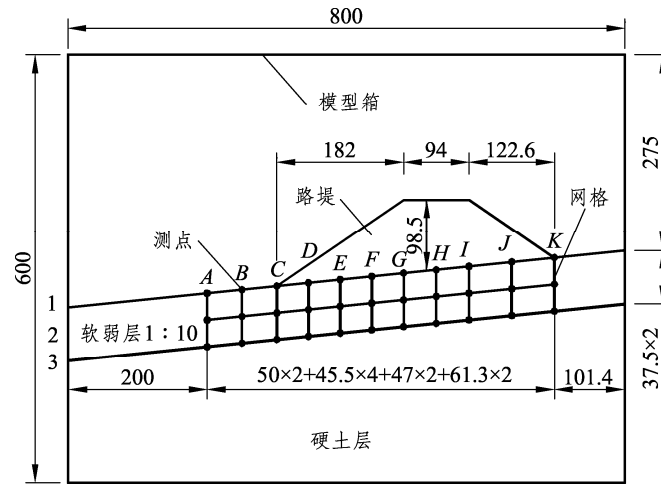
### 1. 土工离心模型试验方面

李碧雄等<sup>[29]</sup> (1996) 结合山区公路建设的实际情况, 基于土工离心模型试验和平面固结有限单元法研究了斜坡高填方路堤的工程特性, 探讨了地面横坡、路堤填筑密度等因素对斜坡高填方路堤工程特性的影响。

张良等<sup>[30, 31]</sup> (2004) 依托西南交通大学 TLJ-2 型土工离心机, 进行了多组基于变形特征为评价指标的离心模型试验的对比研究, 研究对象依次为水平软弱地基路堤、地面横坡为 1:10 的斜坡软弱地基路堤、抗滑桩加固的 1:10 斜坡软弱地基路堤以及打入桩加固的 1:10 斜坡软弱地基路堤, 模型尺寸及测点布置如图 1-6 所示。试验成果表明: 斜坡软弱地基较水平软弱地基而言变形更为集中, 变形幅值更大, 更易发生失稳破坏, 同时变形幅值随软弱层深度的增加, 递减幅度增大; 加固效果方面, 抗滑桩与打入桩均可有效约束地基变形的发展, 提高地基路堤的整体稳定性, 但打入桩限制变形的效果较优。



(a) 水平地基



(b) 斜坡地基

图 1-6 模型尺寸及测点布置 (单位: mm) [30, 31]

徐光明等<sup>[32]</sup> (2004) 通过离心模型试验, 针对倾斜基岩上的边坡, 探讨了其破坏模式以及稳定性。试验成果表明: 此类边坡失稳时边坡整体沿基岩面向下滑动, 表现为典型的平移滑动破坏模式, 紧贴岩面的软弱夹层称为滑动破坏面。

胡勇刚、罗强等<sup>[33, 34]</sup> (2010) 设计了 5 组水泥土搅拌法加固斜坡软弱地基路堤的室内土工离心模型试验方案, 研究了斜坡软弱地基在路堤荷载作用下的变形特性, 水泥土搅拌法不同的布桩方式对斜坡软弱地基的加固效果、对桩土荷载分担以及加筋垫层筋带拉力的影响规律。

刘望坤<sup>[35]</sup> (2013) 针对山区斜坡软土路基开展了 3 组离心模型试验 (水平软弱地基路堤、1:10 斜坡软弱地基路堤、1:15 斜坡软弱地基路堤), 探讨了 3 种工况水平变形、竖向变形的变形特性。

## 2. 室内常规模型试验方面

林育梁等<sup>[36]</sup> (2002) 通过 1:100 室内的模型试验研究了倾角为 8.63° 的斜坡软土层在路堤荷载作用下的变形特征, 试验结果表明在荷载作用下均质软土地基的最大侧向变形多发生在软土层厚度的 0.2~0.3 倍深度附近。

冯文凯等<sup>[37]</sup> (2006) 采用底摩擦试验方法对基岩斜坡路堤的不均匀沉降开展了研究, 结果表明坡脚是最容易发生破坏的薄弱部位, 随着基岩坡度的增加, 路堤下滑趋势、变形破坏和应力集中的程度都显著增强。图 1-7 所示为相关试验照片。

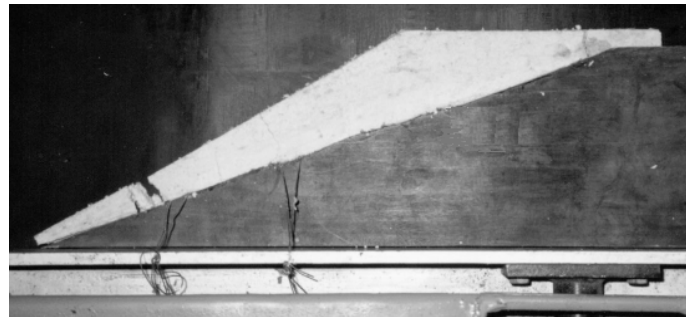


图 1-7 基岩倾角为  $20^\circ$  时的最终破坏现象<sup>[37]</sup>

王志斌等<sup>[38]</sup> (2006) 采用大型室内模型试验, 对山区斜坡地基路堤的工作性状进行了研究, 观测和分析了路堤内部应力、坡面位移、滑移面的位置及形态的变化规律。在路堤顶部均布荷载的作用下, 路堤的破坏模式表现为折线型破坏。

王志斌等<sup>[39]</sup> (2008) 依托大型室内模型试验, 如图 1-8 所示, 通过测试填方路堤不同位置处的水平位移和垂直位移、路堤内部应力以及路堤破坏面的形态, 研究了采用土工格栅加固和未采取加固处治措施的斜坡地基路堤的变形及破坏规律。结果表明, 土工格栅可有效提高斜坡地基路堤的稳定性和承载能力, 并能够大幅削减填方路堤的水平位移。



图 1-8 室内模型试验槽<sup>[39]</sup>

### 3. 现场试验方面

魏永幸<sup>[40]</sup> (2001) 采用碎石桩加固内昆铁路李子沟段斜坡软土地基路堤, 并进行了复合地基平板载荷试验。结果表明, 碎石桩复合地基可显著改善地基变形, 提高载荷能力。

尤昌龙等<sup>[41]</sup> (2002) 以内昆铁路老锅厂—李子沟段高原斜坡软土地基路基为研究对

象，开展了相关施工试验研究工作，提出了“强基固本，治软抗滑”的技术措施，以确保斜坡路基的稳定。

钟岱辉等<sup>[42]</sup>（2004）针对高压旋喷桩加固处理斜坡软弱地基开展了研究，结合原位试验探讨了旋喷桩、复合地基沉降和承载力的分析计算方法。

刘宏文<sup>[43]</sup>（2004）依托内昆铁路老锅厂—李子沟段路基施工开展了试验研究，现场测试包括斜坡软土地基振动挤密碎石桩处理试验研究、斜坡软土地基高压旋喷桩处理试验研究、路基底渗水盲沟设置与否的试验比较等，提出并实施了“排水—治软—抗滑”的指导原则与处治措施。

#### 1.3.4 斜坡软弱地基路堤工程特性研究现状评述

通过文献调研可见当前的研究试图描述的力学响应主要集中在侧向变形、竖向沉降、稳定安全系数、潜在滑移面形态、塑性点分布、破坏模式以及稳定性评价等方面。上述研究存在以下几个特点：

（1）数值模拟多以平面应变全结构为研究对象，完全满足了斜坡软弱地基路堤荷载呈长带状、对称性丧失等特点；采用有限单元法进行研究时，多考虑了地基的初始应力、路堤分层分步填筑等技术细节，刘金龙等<sup>[26]</sup>（2010）引入了时间的概念，从软弱层土体固结的角度出发，考虑了路堤的填筑期和施工间歇期。

（2）稳定性研究方面，研究人员尝试采用有限元、有限差分剪切强度折减法研究路堤边坡稳定性，突破了传统刚体极限平衡法的局限。相对于传统的极限平衡法，剪切强度折减法无须对土体条间力的大小、方向等相关要素进行假设，也无须事先设定试算滑移面（包括试算滑移面的形状、位置等），允许任意形式的滑动方式发生，成功地解决了当软弱层厚度偏薄时是否会出现复式滑移面等一系列技术难题。同时，剪切强度折减法也可同步获得路堤填筑过程中各个阶段的稳定安全系数，改善了刚体极限平衡法通常只可获得路堤填筑完成后的稳定安全系数的缺陷，但当前业内针对斜坡软土地基路堤的稳定性评价基本上是通过极限平衡法计算获得稳定安全系数来实现的。研究人员也已开始初步尝试将可靠度的理念引入到斜坡软弱地基稳定性分析中。

（3）因采用工程加固措施的数值模拟涉及土和结构的相互作用等精细描述，目前还不多见，且现有分析略显粗糙，如蒋鑫等<sup>[44]</sup>（2006）虽初步基于三维有限元计算获得采用抗滑桩加固后地基及路堤的侧向变形示意图（选自跨中截面），但并未详细交代计算分析过程。刘金龙等<sup>[26]</sup>（2010）同样进行了抗滑桩的加固处治效果分析，但仍基于平面有限元分析，且未深入考虑抗滑桩的空间布置（未明确描述抗滑桩空间问题的平面化

的实施过程)、土和结构的相互作用,未给出抗滑桩的内力分布。可见,当前既有的研究多集中于在未采用工程加固措施的情况下,针对斜坡软弱地基路堤的工程力学特性、破坏模式等方面开展探讨。当采用了工程处治加固措施以后,斜坡软弱地基路堤的工程力学特性等方面较之未采取相应加固措施会产生何种程度的改变,有待更进一步的深入研究。

(4) 因斜坡软弱地基路堤构造断面几何形态对称性的丧失,故而会产生区别于水平软弱地基路堤呈对称状锅底状的沉降变形,既有的数值模拟大多数未考虑轨道结构或路面结构。邱延峻等<sup>[24]</sup>采用了有限单元法,以路基-沥青路面综合设计为理念,探讨了公路斜坡路基动应力、基层层底拉应力、路表弯沉等动力响应变化规律,将研究领域拓展到了沥青路面结构。西南山区多发地震,针对斜坡软弱地基路堤在地震荷载作用下的动力学特性开展的研究目前仍较少。

(5) 模型试验因造价昂贵,故而在斜坡软弱地基路堤的研究中开展得不多。研究虽可通过预先设定的网格来观察特殊点位的位移变化,具体如图 1-6 所示,借此宏观推测滑移面的形态及稳定性,但无法获得准确的稳定安全系数,研究上存在一定局限性。同时,因模型试验费用高昂,设计方案有限,因此基于模型试验对斜坡软弱地基路堤开展的研究目前相对较少。

## 1.4 斜坡软弱地基路堤设计方法研究现状及评述

斜坡软弱地基具有一定的地面横坡,且地基土体和软土有一定的相似性,具有较低的强度和高压缩性,故本节简要回顾斜(陡)坡地基路堤和软土地基路堤目前在国内设计中所采用的方法。

### 1.4.1 斜(陡)坡地基路堤设计方法

《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016、J447—2016)<sup>[45]</sup>和《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)<sup>[46]</sup>针对斜(陡)坡地基分别指出应根据不同的地面横坡,采用如表 1-1 所示处治措施。

表 1-1 不同地面横坡下斜坡地基处治措施<sup>[45, 46]</sup>

地面横坡	《铁路路基设计规范》处治措施	《公路路基设计规范》处治措施
缓于 1:5	清除地表植被	清除地表草皮、腐殖土

1:5~1:2.5	原地表挖台阶，台阶宽度不应小于2 m。当基岩面上的覆盖层较薄时，宜先清除覆盖层后再挖台阶；覆盖层较厚且稳定时，可直接在原地面挖台阶	原地面挖台阶，台阶宽度不应小于2 m。当基岩面上的覆盖层较薄时，宜先清除覆盖层再挖台阶；当覆盖层较厚且稳定时，可予保留
陡于1:2.5	基底及基底下软弱层滑动稳定安全系数不应小于1.25。当符合要求时，应在原地面设计台阶；否则应采取改善基底条件或设置支挡结构等抗滑措施。陡坡路堤靠山侧应设排水设施，并采取防参加固措施	必须检算路堤整体沿基底及基底下软弱层滑动的稳定性，抗滑稳定系数不得小于表1-2的规定值；否则应采取改善基底条件或设置支挡结构等防滑措施

表 1-2 高路堤与陡坡路堤稳定安全系数（公路路基设计规范）<sup>[46]</sup>

分析内容	地基强度指标	分析工况	稳定安全系数	
			二级及二级以上公路	三、四级公路
路堤的堤身稳定性、路堤和地基的整体稳定性	采用直剪的固结快剪或三轴固结不排水剪指标	正常工况	1.45	1.35
		非正常工况 I	1.35	1.25
	采用快剪指标	正常工况	1.35	1.30
		非正常工况 I	1.25	1.15
路堤沿斜坡地基或软弱层滑动的稳定性	—	正常工况	1.30	1.25
		非正常工况 I	1.20	1.15

注：区域内唯一通道的三、四级公路重要路段，高路堤与陡坡路堤稳定安全系数可采用二级公路的标准。

《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)<sup>[46]</sup>指出：针对陡坡路堤，应在掌握场地水文地质条件、填料来源及其性质的基础上，进行地基处理、结构形式、排水设施、边坡防护等综合设计。施工过程中应根据实际情况变化，及时调整设计，保证路基稳定。应加强沉降控制，进行施工监测，监测设计应明确监测路段、监测项目、监测点的数量及位置、监测要求等，监测应持续至公路建成营运后不少于一年。

铁路及公路路基设计规范同时指出陡坡路堤应设排水措施，并采取防参加固措施。

对比铁路和公路行业路基设计规范可见，当前对斜（陡）坡地基的设计主要从控制稳定性入手，在设计中均未强调对侧向变形的控制，也无须计算填筑完成后侧向变形的大小，仅须在施工时进行动态监测。

### 1.4.2 软土地基路堤设计方法

《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016、J447—2016) [45]要求, 软土及其他类型厚层松软地基上路堤的稳定性、工后沉降不满足要求时, 应进行地基处理并与基底处理相协调。路基边坡稳定分析计算时, 最小稳定安全系数应符合下列规定: 永久边坡, 一般工况边坡最小稳定安全系数应为 1.15~1.25, 地震工况边坡最小稳定安全系数应为 1.10~1.15; 临时边坡, 边坡稳定安全系数应为 1.05~1.10。路基工后沉降控制限值见表 1-3。

表 1-3 铁路路基设计规范路基工后沉降控制限值<sup>[45]</sup>

铁路类别		一般地段工后沉降 /mm	桥台台尾过渡段工后沉降 (差异沉降)/mm	沉降速率 /(mm·a <sup>-1</sup> )		
有砟 轨道	客货共线 铁路	200 km/h	150	80	40	
		200 km/h 以下	级	200	100	50
			级	300	150	60
	高速铁路	300 km/h、 350 km/h	50	30	20	
		250 km/h	100	50	30	
	城际铁路	200 km/h	150	80	40	
		160 km/h、 120 km/h	200	100	50	
重载铁路		200	100	50		
无砟轨道		15	5	—		

注: 无砟轨道铁路不仅应满足差异沉降要求, 还应满足不均匀沉降造成的折角不应大于 1/1 000 的规定。无砟轨道路基沉降比较均匀且调整轨面高程后的竖曲线半径大于  $0.4v^2$  时 ( $v$  为设计速度), 工后沉降控制限值为 30 mm。

《公路路基设计规范》(JTG D30—2015) [46]指出, 软土地基上路堤稳定系数应符合表 1-4 的要求, 当计算的稳定系数小于表 1-4 所列的规定值时, 应针对稳定性进行地基处理设计。路基工后沉降应符合表 1-5 的要求, 当不满足表 1-5 的要求时, 应针对沉降进行处治设计。

表 1-4 公路路基设计规范软土地基上路堤稳定安全系数容许值<sup>[46]</sup>