

第 1 章 绪 论

1.1 研究意义

堆积体系指的是第四纪堆积作用形成的地质体,是基岩、古垮塌体、古崩滑体、现代崩滑体和第四系沉积体等几种或全部的组合体,属于斜坡变形破坏后的产物。在我国西南河谷地区广泛发育和分布第四纪松散堆积物,它们是典型的内外动力耦合作用的产物。这类松散堆积物的构成介于土、岩之间,是一套成因多样、组分复杂、结构无序、土石混杂堆积的特殊地质体,其衍生地质灾害具有随机性、复发性和多发性的特点,受到了工程地质学、土力学、岩石力学等学科的广泛关注,已成为新的、特殊的重要研究对象。

大型堆积体成因复杂,主要包括残坡积物、崩滑堆积体、冲洪积物、泥石流堆积物、冰碛物和冰水沉积物等两种或多种组合混杂堆积。堆积体在中国的分布十分广泛,对重大工程的建设及人民生命财产安全具有重要的影响,特别是西南山区深切河谷地带,各种类型的浅表生时效变形现象发育,最终导致了边坡大规模崩塌,滑坡屡屡发生,形成了大量的堆积体。随着我国西部大开发及西电东送战略的实施,工程建设不可避免地会遇到越来越多这类堆积体。在长江(三峡水电站)、岷江、金沙江(如溪落渡、向家坝、虎跳峡、梨园、阿海、金安桥等水电站)、澜沧江(如小湾、大朝山、黄登、大华桥等水电站)、怒江、大渡河、雅砻江等水电站的勘测设计及建设中,均涉及这类问题(表 1.1),对坝址选择、枢纽布置及库岸稳定和移民安置带来重大影响,成为高山峡谷区修建水电工程必须面对的主要工程地质问题之一。如位于金沙江中游虎跳峡两家人松散堆积体,总体积达 4 亿 m^3 ,由于规模巨大,其稳定性对坝址的选择有极大的影响;澜沧江小湾水电站左岸坝前饮水沟堆积体紧邻坝基分布,坝肩开挖时其下侧局部被挖除,其稳定状态如何直接关系其支护设计、施工安全及电站的运营;金沙江梨园水电站坝前念生垦堆积体,由于变形范围广、对工程影响大而造成巨大的工程投资;大华桥水电站库区分布有多个规模巨大的堆积体,稳定性差,并涉及大量的移民搬迁问题;古水电站坝后右岸争岗堆积体,规模巨大,并于 2008 年持续暴雨后产生变形,对古水电站整个枢纽布置格局方案产生重大影响。显然,堆积体进一步发生滑坡灾害不仅给国家及人民生命财产带来重大损失,同时也为西南水电开发及重大工程建设带来极大的制约和潜在安全隐患。据统计,三峡库区发生的崩滑地质灾害中,第四系松散堆积体滑坡占总数的 42.85%,滑坡总体积占堆积体总体积的 17.73%。

对于规模较大的堆积体,无论从堆积体分类、堆积体工程勘察手段与方法、堆积体物理力学性质试验与参数选择、堆积体成因机制、稳定性分析与预测、变形破坏特征、地质灾害预防与治理、监测技术及地质环境保护等方面都有值得研究的问题。



表 1.1 西南地区部分河流梯级水电站工程区分布的堆积体统计表

河流名称	工程名称	滑坡堆积体/万 m ³			崩塌堆积体/万 m ³		混合堆积体/万 m ³	
		<100	100~1000	≥1000	<100	100~1000	100~1000	≥1000
金沙江	奔子栏水电站	2	2	1	1			2
	其宗水电站	14	17		8	5		6
	虎跳峡河段	19	7		25	16		2
	梨园水电站	6	3		9	1	1	9
	阿海水电站	6	9		7	3	3	3
	金安桥水电站	3	5	2	16	14		7
	龙开口水电站	8			5	2		3
	观音岩水电站	6	6		5			1
	乌东德水电站	7	13	12	6	8		1
	溪落渡水电站			23		3		1
	向家坝水电站	10	32	5	4	30		8
长江	三峡水电站	3398	382	41	508	41		10
澜沧江	如美水电站	1	4	4	1		9	10
	古水水电站	2	14	1	10	9	2	5
	黄登水电站	19	10		3	3	2	2
	大华桥水电站		1			14		5
	小湾水电站	12	14	2	27	2		
	大朝山水电站	22	4	1	4			
	漫湾水电站	7	6		6			
	糯扎渡水电站	15	38		3	4		
	景洪水电站	6	9		2			

随着西部大开发战略的逐步实施，在复杂地质环境和大规模工程活动、水库蓄水及暴雨等复杂条件下，可能会有大量的松散堆积斜坡发生变形甚至失稳破坏，对工程建设造成极大危害。工程实践表明：对于大规模堆积体，无论从防护治理的策略还是施工技术上都有较大的难度，工程上大多是采取避让的原则。查明堆积体规模、形态特征及成因机制，正确认识堆积体的物质组成、结构特征及物理力学性质，客观评价堆积体的变形特征及其稳定状态，采取有针对性的预防治理措施，是西南河谷地区工程建设中大型堆积体地质灾害防治的关键。

为探索、解决上述复杂环境下的松散堆积体主要工程地质问题、变形破坏特征及其防治处理措施，作者结合大量西南山区河谷水电工程建设有关大型堆积体工程勘察实践与专题研究成果，对 20 几个典型的大型堆积体进行总结与分析，结合西南地质环境



特征及堆积体成因机制分析,以堆积体系统分类、工程地质特征及工程勘察与试验技术手段研究为基础,对西南山区河谷复杂地质环境下的各类大型松散堆积体的变形失稳特性、稳定性分析评价及堆积体地质灾害特点等进行系统的研究,并探讨不同治理措施对堆积体变形的控制作用及其适宜性。通过研究,以期获得紧密结合工程实际,具有一定理论创新,并能指导大型堆积体工程勘察与试验、变形稳定性分析及有效工程处理措施的经验方法和成果。

西南地区地质环境条件复杂,大型堆积体分布广泛,河谷型堆积体由于成分混杂,结构无序,一般无胶结或弱胶结,厚度从几十米到上百米,易成灾,环境效应影响较大,工程效应影响最为突出。随着社会经济发展,人类工程活动(包括水利水电资源开发、矿山开采、交通建设等)越来越强烈,其强度已超过国内外其他地区,而且此环境下的堆积体成因、规模、工程地质特性、致灾能力超越已有研究事例,因而对西南山区河谷大型堆积体工程地质特性及其稳定性进行分析研究,并提出地质灾害防治措施,理论上具有一定的开创性和探索性,实践上具有重要的现实意义。

1.2 国内外研究现状

对于滑坡、崩塌及泥石流等单一成因堆积体,其成因机制与稳定性研究已有上百年的历史。目前对于山区河谷堆积体的研究主要包括堆积体成因与分类、工程地质勘察、物理力学特性、变形失稳模式、稳定性分析及堆积体地质灾害防治等方面,分述如下。

1.2.1 堆积体成因与分类

目前,在堆积体地质成因方面已进行了大量的研究。如金沙江金坪子堆积体的成因分析、西南地区河谷深厚覆盖层基本特征及成因机理研究、三峡主库区“复合堆积体”的研究、三峡库区滑坡堆积体的研究、西南地区河谷深厚覆盖层成因机理的新认识、鲁布革水电站耐滑斜坡的成因机制研究、峡谷区高边坡复合堆积体的成因分析、虎跳峡两家人松散堆积体的成因探讨,以及梨园水电站下咱日堆积体成因机制分析、万州安乐寺滑坡前缘松散堆积体、万州西溪铺松散堆积体、三峡库区万州和平广场滑坡等堆积体的成因分析。这些均揭示了堆积体的形成与河谷发育演化、新构造运动、物理地质作用和气候变化等密切相关,是内外动力耦合作用的结果。

金沙江流域是西南山区深切河谷的典型代表,内外动力地质作用强烈,尤其是金沙江中游河段,各种成因的大型堆积体广泛分布,相应的研究成果也较为丰富,从地貌类型与环境效应、区域地壳稳定、河谷演化与断裂活动性、河谷岸坡变形、主要工程地质问题、地震滑坡、深厚覆盖层成因及其工程效应等方面进行了较为全面的研究,充分显示了大型堆积成因的多样性与机理的复杂性。

堆积体目前尚无统一的分类,现有的分类多为单因素分类,如按成因类型划分为滑坡堆积体、崩塌堆积体、泥石流堆积体等;按形成条件和性状,可分为河谷型(分布于河谷斜坡地带)、盆地型(分布于盆地周边山麓地带)及原面型(分布于高原面上);按动力成因分为自然堆积体和人工堆积体等。张永双等在《中国西南山区第四纪冰川堆积物工程地质分类探讨》中,提出冰水堆积体的工程地质分类应遵循的科学性、简单有效、兼顾传统



及普适性原则,指出了综合考虑堆积体物质组成与结构特征的分类思路。

1.2.2 堆积体综合勘察技术

堆积体工程勘察是堆积体稳定分析与治理设计的基础。综合勘察技术手段包括工程遥感、地质测绘、工程勘探(包括钻探、洞探、井探、坑槽探等)、工程物探及试验研究等。大型堆积体尤其是滑坡堆积体、河床深厚覆盖层及泥石流堆积体由于分布广泛,地质勘察方面的文献资料与工程实例较多,多采用综合勘察与实验手段,如天花板水电站库区左岸边坡变形区工程地质勘察。除常规的钻探外,综合物探技术被广泛应用。河谷深厚覆盖层的存在,不仅严重制约了工程坝址的选择,影响相关流域水电资源的开发利用,也给坝工设计带来巨大的困难。因此,对河谷深厚覆盖层先后开展了较为系统深入的勘察、科研及试验研究工作,如雅砻江大渡河流域、岷江上游、金沙江虎跳峡上游其宗河段、雅鲁藏布江中下游河段等。相比之下对大型崩塌堆积体、冰水堆积体、坡残积堆积体及混合堆积体等进行系统勘察研究的相对较少。

对于大型堆积体,传统的钻探、坑槽探等技术难以操作,而使用物探技术则事半功倍。早期使用物探对堆积体进行研究常使用单一的方法,如将浅层地震反射法用于西藏满拉水电站左岸塌滑体勘探、使用高频大地电磁测深对堆积体进行探测、使用电测深法对三峡库区和康定白土坎滑坡堆积体进行勘察及运用高密度直流电法对武隆县梓桐滑坡覆盖层及滑移面的探测等。目前采用综合物探技术对堆积体进行勘察,如三峡库区移民新址松散堆积体的研究,便采取了综合物探手段。

随着研究技术手段的现代化发展,遥感(RS)、地理信息系统(GIS)及全球定位系统(GPS)(统称3S技术)技术已被广泛应用于大范围的区域地质调查、水库地质灾害分析及大型堆积体变形动态监测等研究。如三峡库区及小湾水电站库区均建立了遥感监测系统,对水库塌岸及大型堆积体进行动态监测研究。

1.2.3 堆积体物理力学特性研究

对于堆积体岩土力学特性的研究,国内外不少文献资料均有涉及。L. E. Vallejo 和 Y. Zhou 在 20 世纪 90 年代初对土石混合体的力学特征进行过研究,围绕这种特殊地质材料的特殊物理力学性质,国内也先后开展了相关的研究工作,包括基于数字图像处理技术的堆积物粒度分析、土石混合体粒度分形特性及其与含石量和强度的关系及块石含量对其力学参数及渗透性影响的试验研究等。随着土石混合体(具有一定工程尺度、强度较高的块石、细粒土体及孔隙构成且具有一定含石量的极端不均匀松散岩土介质系统)概念的提出,对堆积体(土石混合体)物理力学特性的研究从实验方法到分析手段均获得了较快发展,如循环载荷试验、常规三轴试验、土石混合体重塑试验、原位大型水平推剪与直剪试验、土石混合体渗透特性试验研究、力学模型建立及其变形破坏的数值模拟研究、细观结构及力学特性数值模拟研究、堆积体滑面强度参数反演分析等。对于大型堆积体,其物理力学参数取值的准确性,对计算结果具有重要的影响,需要开展室内外综合试验研究。

西南山区深切河谷地带广泛分布综合成因的深厚覆盖层,其厚度一般可达数十米至数百米,而修建于这些深厚覆盖层上的水电站运行期间在高水头压力之下的渗透稳定问题是



工程上尤为重要。目前国内外众多学者对于堆积体形成演化及对各类土体渗透性进行了大量研究,取得了丰硕成果,但对大型堆积体渗透特性的研究仍较少。

1.2.4 堆积体变形失稳模式

堆积体变形失稳及其运动是变形从量变演化发展到质变的一个复杂动力学过程,量变是小变形过程,而质变发生后的破坏、运动则是大变形过程。近年来,陈红旗、黄润秋等通过对堆积体空间效应的研究来分析堆积体变形失稳的空间特征及控制措施,运用地质工程分析、数值模拟和物理试验等多种手段,通过对大型堆积体工程边坡的实例对比研究,剖析了堆积体的形态、结构、环境、演化等空间要素;提出惯性聚集,剩余下滑力扩散等空间效应机制及堆积体变形失稳的空间特征及控制途径。

大型堆积体的变形和失稳破坏具有层次性特征。日本地质学家申润植等研究表明,滑动面在堆积层内或在堆积层与基岩接触面上约占50%以上。贺可强等提出了堆积体失稳破坏的多层转移模式。许强等结合近年来数十起重大滑坡灾害监测预警和应急抢险的实践经验和教训,总结并提出斜坡变形时间演化的三阶段规律和斜坡裂缝空间演化的分期配套特性。丁秀美等通过大量的数值模拟和调查研究,提出了堆积体变形破坏的层次性。

1.2.5 堆积体稳定性分析

堆积体稳定性分析是堆积体研究中的一项重要内容。稳定性计算和分析方法较多,目前采用的方法以条分法为主,包括 Fellenius 法、Bishop 法、Janbu 法、Sarma 法、K 法和分块极限平衡法以及不平衡推力传递系数法等。近年来,随着计算机技术和信息网络技术的进步和发展,在堆积体稳定性的分析研究中,新技术和新方法层出不穷,包括遗传算法、模拟退火算法及神经网络等非线性理论方法;刚体极限平衡法和有限元法;三维软件 3D-Sigma 和 3D-Flac;改进的剩余推力法与 Sarma 法;三维弹塑性有限元迭代解法;三维极限平衡分析法;平面离散元法(UDEC)及有限元法;土工离心模型试验法等。随着 3S 技术的迅猛发展,基于 GIS 的稳定性评价也被广泛应用于堆积体的稳定性分析与评价。

对于蓄水条件下松散堆积体的稳定性研究,大多借鉴暴雨入渗诱发滑坡的研究成果。大型堆积体稳定性通常采用综合方法进行分析评价。

1.2.6 堆积体地质灾害防治研究

堆积体的灾害效应已引起地质工程界的广泛关注,大量文献资料表明,国内外以往的研究,主要集中于斜坡堆积体形成过程及现状的评价,以及堆积体斜坡变形破坏主要控制因素及失稳模式的研究,对大型堆积体地质灾害危险性分析与评价及灾害预警方面的研究相对较少。目前,对单个大型堆积体地质灾害进行过分析和论证文章较多,对每一方面堆积体地质灾害(如边坡、库岸、地基等地质灾害)进行全面分析论述的较少;研究堆积体地质灾害处治技术与方法的较多,研究预防措施尤其是对处理措施进行适宜性评价的较少。

1.3 研究技术路线

研究技术路线见图 1.1。

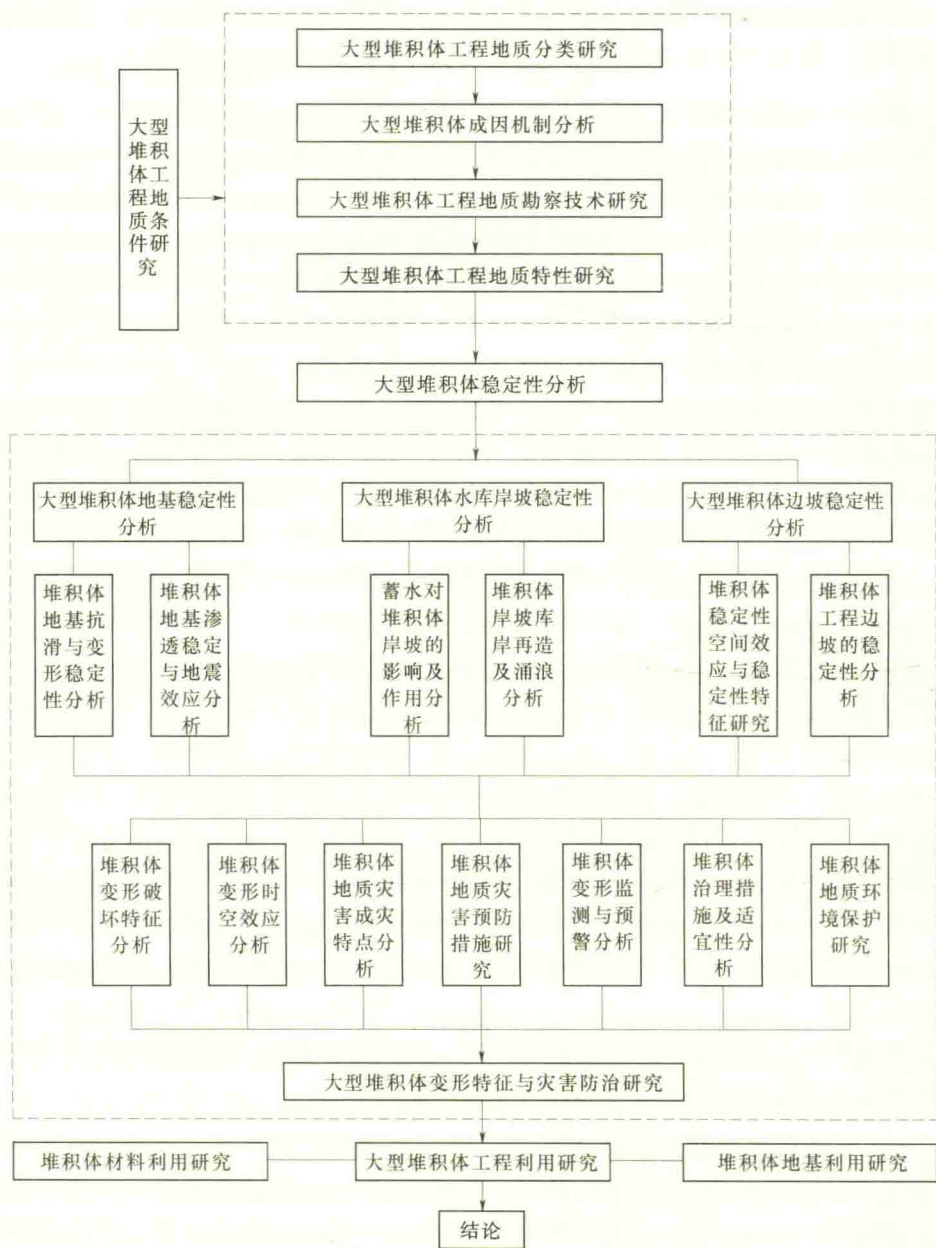


图 1.1 大型堆积体工程地质研究技术路线

1.4 研究成果概述

西南地区地处青藏高原东部边缘地带，区域构造背景复杂，断裂构造发育，地震活动强烈，高山峡谷地貌特征突出，山区河谷地带广泛发育和分布第四纪大型复杂松散堆积体，工程地质问题突出，对工程建设及人民生命财产安全具有重要的影响，研究意义重大。通过系统研究，取得以下几方面的成果。



(1) 大型堆积体可在按堆积体要素进行分类的基础上,按粒度组成、结构特征及空间形态特征等进行工程地质分类。依据堆积体底界面几何形态特征,可将堆积体分为平面型、曲面型、槽谷型和阶梯型4种;根据堆积体空间形态特征可将堆积体分为扁豆型、扇面型及条带型3类。以影响堆积体稳定的主要因素作为分类依据进行组合,可将堆积体分为4个大类、8个亚类。天然状态下大部分堆积体为稳定性较差或潜在不稳定堆积体,部分为基本稳定堆积体,少量为稳定或不稳定堆积体。

(2) 西南地区地质环境条件复杂,深切河谷大型堆积体具有灾变成因、多期成因、混合成因等形成机理及相应的时空演化特征。大型堆积体属于典型的内外动力耦合作用产生的成因复杂、土石混合且与地质灾害密切相关的复合地质体,河谷地带(包括河床及河谷斜坡地带)、活动断裂带及特殊岩性组合地带是堆积体集中发育分布地带。

(3) 大型堆积体工程地质勘察应考虑不同工程设计阶段、不同成因类型及不同分布地点的技术要求,采取“以3S技术为指导,地质测绘为基础,工程物探为辅助,工程勘探为重点,试验研究为支撑、各种手段相互验证”的综合勘察技术方法,对工程选址及建筑物安全有重大影响的大型堆积体应进行专题研究。前期应重视工程区及影响区(包括工程及其外围区、近坝库区、居民点区、临建或附属工程区)分布的大型堆积体地质勘察;施工期应加强施工地质工作,动态跟踪堆积体开挖、处理、变形或破坏情况,及时采取应对措施;工程运行期应开展堆积体的系统监测,确保堆积体的稳定与安全。

(4) 大型堆积体具有物质成分多样性、结构特征不均一性、力学性质差异性及材料介质非连续性等土石混合堆积物特点,具有独特的强度特征及动力学特征。堆积体物理力学参数的选取应采用综合比较分析方法确定。堆积体与基岩明确分离,界面清晰,堆积体底界面即是堆积体的物理边界,也是堆积体稳定性的重要控制性界面。河谷大型混合堆积体物质组成与结构特征极其复杂,总体上具有土石混合介质特性、不均匀性及成层性。

(5) 大型堆积体变形失稳基本诱发模式可分为“开挖牵引型、加载推移型、库水作用型、暴雨渗透型、地震促发型、洪水冲刷型及综合诱导型”等7种,且变形特征具有明显的时空效应。大型堆积体失稳模式主要表现为沿堆积体底界面产生整体(或局部)平面型滑动失稳模式、沿堆积体内部已有滑移面产生滑动失稳模式及受最大剪应力面控制的局部牵引式圆弧形滑移失稳模式。

(6) 大型堆积体具有天然稳定性、潜在不稳定性、动态稳定性及空间稳定性特征,堆积体工程边坡应根据堆积体所属枢纽工程等级、建筑物级别、边坡所处位置、边坡重要性和失事后的危险程度,划分边坡类别和安全级别,采用不同安全控制标准。影响堆积体稳定性的诸多因素归纳起来可分为主控因素(内因)和诱发因素(外因),其中主控因素为地质环境因素,而诱发因素则包括动力环境因素和人类工程经济活动因素等。虽然大型堆积体天然状态下多处于整体稳定状态,但稳定程度相对较低,不少处于临界稳定状态,在工程场址选择、方案布置原则上应尽量避让,若避让不开,对工程有影响的要进行综合勘察、设计与治理。

(7) 除少量古堆积体稳定性较好外,大部分堆积体天然状态下稳定程度较低,是潜在的不稳定体,是产生滑坡的主要载体,是工程建设的危险源。在强降雨、地震、水库蓄水及人类工程活动影响下,极易产生新的地质灾害。堆积体地质灾害防治,应坚持“预防为



主,避让与治理相结合”的原则。根据堆积体变形特征与成灾特点,宜采取综合预防措施,能避让的要尽量避让,不能避让的要进行有效的防治,对引起地质灾害的人为因素要加以有效控制,防患于未然。为增强处理措施的适宜性与针对性,大型堆积体的处理应采取分级布置、分区治理、分期实施的综合处理措施。对于潜在不稳定及不稳定堆积体,均应视为地质灾害加以重视,并作为地质灾害易发区加以治理和保护。

(8) 对涉及工程开挖的大型堆积体,对开挖料应研究加以利用,既节约工程投资,又有利于环境保护。一般以土为主的大型堆积体是良好的防渗料,而以石为主的大型堆积体则是良好的堆石料,大型河床堆积体(深厚覆盖层)则是应用广泛的天然砂砾料。工程实践证明,坝基部位分布的大型堆积体可研究保留或部分加以利用。深厚覆盖层具有成因复杂、结构松散,层次不连续、力学性质不均匀的特点,利用其作为坝基,稳定问题突出,但只要做好地基勘察与处理,深厚覆盖层建高堆石坝不仅技术上可行,而且经济效益明显,具有广泛的发展前景。

(9) 河谷地带古老的大型堆积体,经长期改造,处于整体稳定状态,由于地貌上常形成缓坡平台,加之土层较厚,不少大型堆积体成为了人类赖以生存和发展的土地资源和生存家园,部分堆积体还成为工程建设场地加以利用。鉴于西南地区河谷深切,自然地质灾害发育,地质环境脆弱。由于人类工程活动会进一步诱发或加剧堆积体地质灾害,因此,应坚持开发与治理相结合,同时加强堆积体发育区地质环境保护。

面对复杂的大型堆积体,尽管国内外不少学者进行过多方面的研究,但在现有基础上,仍有值得进一步研究或探讨的课题。

(1) 堆积体还没有规范的试验方法及标准来研究其抗剪强度性质,寻求从堆积体堆积时间效应(成因机制与演化过程等)与空间上的结构特征(细观结构特征、堆积模式及胶结程度等)对堆积体抗剪强度的响应度确定合理的试验方法,并结合实际工程需要,研究适用于确定土石混合体力学参数的方法。

(2) 由于堆积体造成的危害具有发育频率高,分布广,危害大等特点,准确评价堆积体灾害发生的理论与方法仍是当前工程地质学研究的关键问题之一。目前,堆积体致灾预报仍然是一大难题。探究堆积体三维宏观与微观结构特征与强度的相关性,掌握堆积体堆积过程响应的破坏力学机制,并从边坡的内在物质结构出发,建立科学合理的堆积体失稳破坏预测模型,将具有重要的科学意义。

(3) 鉴于大型堆积体的复杂性和前期地勘工作的局限性,依据传统分析方法确定的工程措施往往在适应性方面存在缺陷,而目前的边坡工程尚缺乏适应现场综合条件的信息化动态优化,往往造成治理措施与实际情况脱节,部分边坡部位的实际安全指标不足、部分又超标过多的缺乏针对性情况,一方面带来工程投资的浪费,另一方面也隐伏下边坡安全隐患。因此应加强堆积体的三维数字化模拟、动态化设计、信息化施工及远程自动监测的集成系统研究,综合考虑处理措施的适应性、可靠性、经济性及合理性。

(4) 大型堆积体的变形失稳与岩、土、水的相互作用有关,与工程建设活动更是密切相关。对岩、土、水自身特性与相互作用机理的研究,目前已有深厚的理论基础,而人类活动对岩、土、水自然特性及相互作用的影响的研究相对不足,加强岩、土、水与人类活动相互作用的研究,将成为大型堆积体研究的发展方向。

第2章 大型堆积体工程地质分类

堆积体是地球表层各种成因类型的第四纪沉积物或堆积物形成的地质体。西南地区由于区域地质环境复杂,动力地质过程活跃,河谷地带常分布各种成因的大量堆积体,后经长期表生改造并不断发展演化,常形成大型混合堆积体,不仅规模巨大,成因复杂,类型多样,而且工程地质问题突出,是值得引起广泛关注的特殊岩土体。目前对单个堆积体(如崩塌、滑坡、泥石流等)的分类已有较为深入的研究,形成了相对独立的分类体系,而对大型综合成因堆积体(主要指厚度超过30m、体积超过100万 m^3 的堆积体),除了单因数或要素(如规模、成因等)分类以外,尚缺乏系统的工程地质分类。如何在既有众多分类中,提出适合于西南地区河谷大型堆积体科学合理的分类方案是值得探讨的课题。本章在总结现有分类基础上,探讨以堆积体工程地质特性(包括物质组成、结构特征、地球物理特性、空间形态特征等)及稳定性为主要因数的综合工程地质分类方案,为堆积体工程地质特性深入研究及工程地质问题分析评价打下基础。

2.1 堆积体要素分类

2.1.1 按规模大小分类

堆积体按规模大小(包括堆积体体积和厚度)可分为以下5类:

- (1) 小型堆积体。体积小于10万 m^3 ,堆积体厚度一般小于10m。
- (2) 中型堆积体。体积10万~100万 m^3 ,堆积体厚度一般10~30m。
- (3) 大型堆积体。体积100万~1000万 m^3 ,堆积体厚度一般30~60m。
- (4) 特大型堆积体。体积1000万~1亿 m^3 ,堆积体厚度一般60~100m。
- (5) 巨型堆积体。体积大于1亿 m^3 ,厚度一般大于100m。

中、小型堆积体常为单一成因堆积体,而大型堆积体则多为综合成因堆积体,如虎跳峡两家人混合成因堆积体,体积达4亿 m^3 ,最大厚度192m。

2.1.2 按形成时间分类

堆积体按形成时间可分为以下3类:

- (1) 古堆积体。第四纪以来形成的古滑坡、古地震等形成的堆积体,固结或弱固结,整体稳定性好。
- (2) 老堆积体。全新世以来形成的堆积体,尚未固结或弱固结,现今整体稳定性较好。
- (3) 新堆积体。又称现代堆积体,现今(近100年来)形成的堆积体,结构松散,未胶结,整体稳定性较差。



2.1.3 按成因类型分类

堆积体按成因类型可分为：滑坡堆积体、崩塌堆积体、泥石流堆积体、冰水堆积体、冲积堆积体、洪积堆积体、坐落（或错落）堆积体、坠覆堆积体、堰塞堆积体及混合堆积体等（表 2.1）。以下对其中后三类堆积体加以说明。

（1）坠覆堆积体。这是指坠溃作用及其堆积物，是一种新的斜坡失稳形式，裂隙发育的硬质岩高陡边坡，由于受卸荷松动和风化作用的综合影响，产生“坠覆”。如三峡库区黄蜡石坠覆堆积体总方量达 1800 万 m^3 。

（2）堰塞堆积体。由于河谷岸坡在动力地质作用下迅速产生崩塌、滑坡、泥石流以及冰川、融雪活动所产生的堆积物或火山喷发物等形成的自然堤坝横向阻塞山谷、河谷或河床，导致上游段壅水而形成的具备一定挡水能力的堵塞河道的堆积体称之为堰塞堆积体。堰塞堆积体属重力与流水作用形成的混合堆积体，一般结构松散，孔隙率大，抗渗能力及稳定性较差。汶川地震形成堰塞堆积体 34 处，其中规模最大的唐家山堰塞堆积体最大厚度 124.4m，体积约 2000 万 m^3 。

（3）混合堆积体。这是指由两种及两种以上成因形成的复合堆积体，如冲洪积堆积体、坡残积堆积体、坡崩积堆积体、崩滑堆积体、冰川泥石流堆积体等。

2.1.4 按结构特征分类

结构特征（包括充填状态、密实程度和粗粒骨架作用等）是堆积体的重要特征，堆积体按结构特征可分为松散型堆积体、密实型堆积体及胶结型堆积体。

（1）松散型堆积体。结构松散，无胶结，如新近形成的崩塌堆积体及滑坡堆积体、稀性（水石型）泥石流堆积体、碎屑流堆积体、冰水堆积体、冲洪积堆积体、坡崩积堆积体、堰塞堆积体等。

（2）密实型堆积体。结构密实，弱胶结（一般为泥质胶结），如古堆积体、深层堆积体、黏性泥石流堆积体、冰水泥石流堆积体、残积堆积体等。

（3）胶结型堆积体。有胶结（一般指钙质或铁质胶结）的堆积体，如有胶结的冰水堆积体、钙华堆积体等。

2.1.5 按物质组成分类

堆积体按物质组成可分为以下 3 类：

（1）泥土堆积体。含石率小于 15%，一般为粗粒类土或细粒类土。如可溶岩或软岩地区分布的坡残积堆积体、湖相淤积堆积体、风积堆积体等。

（2）块石堆积体。含石率大于 75%，一般为巨粒土。块石堆积体较为明显的有碎屑流堆积体、流石滩堆积体、冰水堆积体及岩质崩滑堆积体。

（3）土石混合堆积体。含石率区间值为 15%~75%，一般为混合巨粒土或巨粒混合土或碎石土。组成颗粒物理力学性质差异很大，即岩石和土的差异；结构上既有土颗粒之间的细观结构，又有岩石与土颗粒之间的宏观结构；土力学的常规试验方法和本构模型均很难适用于这种特殊介质。大型堆积体多为土石混合堆积体。



据不完全统计,三峡库区泥土滑坡堆积体 1968 处,岩质滑坡堆积体 608 处,岩土混合滑坡堆积体 1254 处;云南省土质滑坡堆积体 7961 处,岩质滑坡堆积体 944 处,岩土混合滑坡堆积体 2791 处。

2.1.6 按稳定状态分类

堆积体按稳定状态可分为稳定堆积体、潜在不稳定堆积体及不稳定堆积体。

(1) 稳定堆积体。此为已停止发展,一般情况下不可能重新活动的堆积体,如形成年代久远的古堆积体、结构紧密或有胶结且底界面平缓未发生过变形或滑动的堆积体,坡体上植被较盛,常有老建筑。

(2) 潜在不稳定堆积体。此为近现代堆积形成的结构较为松散的堆积体或曾经变形滑动过,并保存有滑移面后经改造暂时处于稳定状态的堆积体或表部已发生局部变形和坍塌的堆积体,天然状态下绝大部分堆积体为潜在不稳定堆积体。

(3) 不稳定堆积体。这是指位置、形态和体积仍在活动或变化的堆积体。如活动性泥石流堆积体、河流冲洪积堆积体和整体发生变形或滑移的堆积体(堆积体位置、形态和体积处在不断变化之中)。

2.1.7 按堆积地点分类

堆积体按堆积地点可分为斜坡(山麓)堆积体、沟谷堆积体及河流堆积体。

(1) 斜坡(山麓)堆积体。堆积于斜坡(山麓)之上的堆积体,如崩塌堆积体、滑坡堆积体、坡残积堆积体及坡面泥石流堆积体等。

(2) 沟谷堆积体。堆积于冲沟或谷地之上的堆积体,如冰川泥石流堆积体、坠覆堆积体及崩滑泥石流混合堆积体等。

(3) 河流堆积体。堆积于河流阶地、古河道和河床内的堆积体,如冲洪积堆积体(包括阶地堆积体)、堰塞堆积体、冲积堆积体、湖积堆积体、冰川泥石流堆积体等。

2.1.8 按动力成因分类

按动力成因类型可分为自然堆积体和人工堆积体两大类。

(1) 自然堆积体。这是指由地震、大气降雨、侵蚀、崩塌积加载等自然因素引发形成的堆积体,可细分为滑坡堆积体、崩塌堆积体、泥石流堆积体、冰水堆积体、冲积堆积体、坠覆堆积体、混合堆积体等。

(2) 人工堆积体。这是由爆破、工程渗漏、挖(填)方和人为水位变化等人为因素形成的堆积体。如填方、弃渣、存料、尾矿库、堆石坝、爆破松动等人为作用形成的堆积体。大型堆(弃)渣场也为人工堆积体,高填方地基、堆石坝等为特殊的人工堆积体。

2.1.9 按外动力地质作用类型分类

按外动力地质作用将河谷第四纪堆积体划分为风化残积、重力堆积、地表水堆积及冰川堆积四个大类,可再按主导地质作用进行细分(表 2.1)。

堆积体按要素分类主要特征见表 2.2。



表 2.1 河谷第四纪堆积体成因类型

成因	成因类型	代号	主导地质作用
风化残积	残积	Q^{el}	物理、化学风化作用
重力堆积	坠积 崩塌堆积 滑坡堆积 土溜	Q^{col} Q^{del}	较长期的重力作用 短促间发生的重力破坏作用 大型斜坡块体重力破坏作用 小型斜坡块体表面的重力破坏作用
地表水堆积	坡积 洪积 冲积 泥石流堆积	Q^{dl} Q^{pl} Q^{al} Q^{sef}	斜坡上雨水、雪水间由重力的长期搬运、堆积作用 短期内大量地表水流搬运、堆积作用 长期的地表水流沿河谷搬运、堆积作用 短期内大量地表水石流搬运、堆积作用
冰川堆积	冰碛堆积 冰水堆积 冰缘堆积	Q^{gl} Q^{igl} Q^{prgl}	固体状态冰川的搬运、堆积作用 冰川中冰下水的搬运、堆积作用 冰川边缘冻融作用

表 2.2 堆积体按要素分类及主要特征表

要素	名称类别	主要特征说明
结构特征	松散型堆积体	结构松散的堆积体，如崩塌、冰积、冲洪积及坡残积堆积体等
	密实型堆积体	结构密实的堆积体，如古堆积体、深层堆积体、泥石流堆积体等
	胶结型堆积体	有胶结的堆积体，如有胶结的冰水堆积体
物质组成	泥土堆积体	含石率小于 15%，包括粗粒类土或细粒类土
	块石堆积体	含石率大于 75%，巨粒土
	土石混合堆积体	含石率区间值为 15%~75%，混合巨粒土或巨粒混合土或碎石土
形成原因	坡积堆积体	坡积成因为主形成的堆积体
	滑坡堆积体	滑坡成因为主形成的堆积体
	崩塌堆积体	崩塌成因为主形成的堆积体
	泥石流堆积体	泥石流成因为主形成的堆积体
	冰水堆积体、	冰水冲刷或冰碛成因为主形成的堆积体
	洪积堆积体	洪积成因为主形成的堆积体
	冲积堆积体	冲积成因为主形成的堆积体
	坠覆堆积体	坠溃作用及其堆积物
	堰塞堆积体	堰塞成因为主形成的堆积体，主要指堵塞河道的堆积体
稳定状态	混合堆积体	由两种及两种以上成因形成的复合堆积体
	稳定堆积体	指已停止发展，一般情况下不可能重新活动的堆积体
	潜在不稳定堆积体	稳定程度较低或表部已发生局部变形和坍塌的堆积体
	不稳定堆积体	指位置、形态和体积仍在活动或变化的堆积体

续表

要素	名称类别	主 要 特 征 说 明
形成时间	新堆积体	现今（近 100 年来）形成的堆积体，结构松散，未胶结
	老堆积体	全新世以来形成，现今整体稳定的堆积体。堆积体尚未固结或弱固结
	古堆积体	第四纪以来形成的古滑坡、古地震等形成的堆积体。固结或弱固结
堆积地点	斜坡（山麓）堆积体	堆积于斜坡之上的堆积体
	沟谷堆积体	堆积于冲沟或谷地之上的堆积体
	河流堆积体	堆积于河流阶地、古河道及河床内的堆积体
堆积体规模	小型堆积体	体积<10 万 m ³ ，厚度在 10m 以内
	中型堆积体	体积 10 万~100 万 m ³ ，厚度 10~30m 之间
	大型堆积体	体积 100 万~1000 万 m ³ ，厚度 30~60m 之间
	特大型堆积体	体积 1000 万~1 亿 m ³ ，厚度 60~100m 之间
	巨型堆积体	体积>1 亿 m ³ ，厚度超过 100m
按动力成因	自然堆积体	由地震、大气降雨、侵蚀、崩塌加载等自然因数形成
	人工堆积体	由爆破、工程渗漏、挖（填）方和人为水位变化等人为因素形成
按动力地质作用类型	风化残积	主要为残积，以物理、化学风化作用为主
	重力堆积	包括坠积、崩塌堆积、滑坡堆积、土溜等，以重力破坏作用为主
	地表水堆积	包括坡积、洪冲积、泥石流堆积等，以地表水流搬运、堆积作用为主
	冰川堆积	包括冰碛堆积、冰水堆积、冰缘堆积等，以冰川、冰水的搬运、堆积作用为主，部分为冰川边缘冻融作用形成

2.2 工程地质分类

已有工程实践表明，堆积物的物质成分和组构特征与其工程性质具有密切的关系，是堆积物工程地质分类的基础。堆积物的物质成分和组构特征主要表现为：颗粒组成的不均一性和多元性、组构单元的双元性（土石混合性）、结构的无序性和胶结性等。根据堆积物的地质特征和以往工程分类经验，堆积体的工程地质分类应遵循以下原则（张永双等，2009）。

- (1) 科学性原则。必须抓住控制和影响堆积体工程性质的关键或主要的地质因素，如胶结作用和胶结强度、细观结构和粒度组成等。
- (2) 简单有效原则。分类方法和分类指标必须简单明了，即便于记忆和操作、便于推广应用、便于工程评价。
- (3) 兼顾传统原则。为了推广应用，对以往传统分类方案中有价值的方法、名称和指标应尽量采用。
- (4) 普适性原则。分类应尽量适用于不同成因类型（如崩积、滑塌堆积、泥石流堆积、冰碛冰水堆积、坡残积堆积等）巨粒土、碎石土堆积体的工程分类。



根据上述原则, 提出以下初步的工程地质分类。

2.2.1 按粒度组成分类

颗粒组成是决定堆积体工程特性的主要因素, 是不同堆积体的共性。堆积体为土石混合物, 是第四纪以来形成的, 由具有一定工程尺度、强度较高的块石、细粒土体及孔隙构成且具有一定含石量的极端不均匀松散岩土介质系统, 其中可视粒径、土/石阈值、“土”与“石”的强度特征及含石量 4 个参数是土石混合物概念中的关键问题。堆积体 (或土石混合物) 目前尚缺乏系统的理论研究成果。由于颗粒组成是决定堆积体工程特性的主要因素, 以颗粒大小及粒组含量为分类依据, 一般仍然沿用土的分类。根据《水电水利工程土工试验规程》(DL/T 5355—2006), 粒组划分与名称见表 2.3。巨粒类土的分类和定名见表 2.4。

表 2.3 粒组划分与名称

粒 组 划 分 与 名 称			粒径 d 的范围/mm
巨粒	漂石 (块石)		$d > 200$
	卵石 (碎石)		$200 \geq d > 60$
粗粒	砾 (圆砾、角砾)	粗砾	$60 \geq d > 20$
		中砾	$20 \geq d > 5$
		细砾	$5 \geq d > 2$
	砂	粗砂	$2 \geq d > 0.5$
		中砂	$0.5 \geq d > 0.25$
		细砂	$0.25 \geq d > 0.075$
细粒	粉粒		$0.075 \geq d > 0.005$
	黏粒		$0.005 \geq d$

表 2.4 巨粒类土的分类和定名

分类	粒 组 含 量		名 称	代 号
巨粒土	巨粒含量 $> 75\%$	漂石 (块石) 含量 $>$ 卵石 (碎石) 含量	漂石 (块石)	B (B_a)
		漂石 (块石) 含量 $\leq$ 卵石 (碎石) 含量	卵石 (碎石)	Cb (Cb_a)
混合巨粒土	巨粒含量 $> 50\%$ 且 $\leq 75\%$	漂石 (块石) 含量 $>$ 卵石 (碎石) 含量	混合土漂石 (块石)	B (B_a) SI
		漂石 (块石) 含量 $\leq$ 卵石 (碎石) 含量	混合土卵石 (碎石)	Cb (Cb_a) SI
巨粒混合土	巨粒含量 $> 15\%$ 且 $\leq 50\%$	漂石 (块石) 含量 $>$ 卵石 (碎石) 含量	漂石 (块石) 混合土	SIB (B_a)
		漂石 (块石) 含量 $\leq$ 卵石 (碎石) 含量	卵石 (碎石) 混合土	SICb (Cb_a)

对表 2.3, 试样中巨粒组含量小于或等于 15% 时, 可剔除巨粒组后, 按粗粒类土或细粒类土的规定进行分类和定名; 当细粒土含量对巨粒类土的性质产生影响时, 巨粒类土应做进一步细分。细粒组含量等于或大于 5%、小于 15% 时称为含细粒巨粒类土, 在其代号后加 F; 细粒组含量等于或大于 15%、小于 50% 时称为细粒质巨粒类土, 在其代号后加细粒组的基本代号 C 或 M。



根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001), 粒径 $d > 2\text{mm}$ 颗粒含量超过全重 50% 的土称碎石土, 根据粒径的大小和形状可细分为漂石、块石、卵石、碎石、圆砾、角砾 6 种; 由细粒土和粗粒土混杂且缺乏中间颗粒的土为混合土, 当碎石土中粒径小于 0.075mm 细粒土质量超过总质量的 25% 时, 定名为粗粒混合土; 当粉土或黏土中粒径大于 2mm 的粗粒土质量超过总质量的 25% 时, 定名为细粒混合土。

堆积体多为土石混合体, 除坡残积颗粒较细, 为细粒土外, 一般多属粗粒类土、巨粒类土、碎石土或混合土。具体应用中应根据堆积物特征细化分类。

2.2.2 按结构特征分类

结构特征(包括充填状态、密实程度和粗粒骨架作用等)是堆积体的重要特征, 它对堆积体咬合力和内摩擦角的充分发挥影响很大。除了少量钙质胶结冰碛、冰水砾岩外, 大多数堆积体都属于弱胶结的土状堆积物, 它们在干燥失水后, 在水中具有显著的崩解特性。对于弱胶结的堆积体来说, 由于其颗粒组成对于工程特性有重要的影响和控制作用, 因此其工程分类的理论基础便是粒度组成与工程性质的相关关系, 尤其是黏粒含量的影响。总体上堆积体的结构特征可分为松散型、中密(稍密)型、密实型和胶结型四大类, 分类特征详见表 2.5。

表 2.5 堆积体按结构类型特征分类

结构类型	胶结程度	骨架颗粒含量和排列	天然陡坎与坑壁情况	可挖性	可钻性
松散型	无胶结	骨架颗粒含量小于总量的 60%, 排列混乱, 大部分不接触, 颗粒被充填物包裹。充填砂时, 取出大颗粒即坍塌, 充填软塑的黏性土	不能形成陡坎, 自然坡角接近颗粒的休止角, 坑壁不稳定, 易发生坍塌	镐可以挖掘, 并壁易坍塌, 取出大颗粒后, 立即坍塌	钻进较易, 钻杆稍有跳动, 孔壁易坍塌
中密(稍密)型	局部弱胶结	骨架颗粒含量大于总量的 60% ~ 70%, 呈交错排列, 大部分接触, 骨架颗粒疏密不均, 孔隙未填满。充填砂土时, 掏取大颗粒后充填物难形成凹形, 充填硬塑黏性土	天然陡坎不易直立, 自然坡角大于颗粒的休止角, 坎下堆积物较多, 坑壁容易发生掉块	镐可以挖掘, 并壁有掉块现象, 从并壁取出大颗粒后, 能保持原面形状	钻进较困难, 钻杆稍有跳动, 孔壁易发生坍塌现象
密实型	整体弱胶结	骨架颗粒含量大于总量的 70%, 呈交错排列, 连续接触, 孔隙填满, 密实坚硬, 取出大颗粒后充填物大部分能形成凹形, 不易塌落	天然陡坎较稳定, 较陡立, 坎下堆积物较少, 坑壁稳定, 无掉块现象	镐掘费劲, 个别需用锚杆或放炮, 取大颗粒困难	钻进困难, 钻杆跳动剧烈, 孔壁较稳定
胶结型	钙质强胶结	骨架颗粒含量大于总量的 70%, 呈交错排列, 连续接触, 孔隙填满, 密实坚硬, 取出大颗粒后充填物能形成凹形, 不会塌落	天然陡坎较稳定, 近直立, 坎下无堆积物, 坑壁稳定, 无掉块现象	镐掘费劲, 整体需用锚杆或放炮, 较难取出大颗粒, 洞壁稳定	钻进困难, 钻杆跳动剧烈, 孔壁稳定

一般堆积体结构特征可按密实程度分类; 泥石流堆积体结构特征与性质有关, 黏性泥石流具有一定胶结(泥质), 堆积体结构较为紧密, 而稀性泥石流胶结较弱或无胶结, 结



构较为松散；冰水堆积体可按胶结程度进行分类：①中强胶结，冰碛、冰水巨砾岩或角砾岩，其单轴抗压强度不小于 0.5MPa，且干燥后在水中不具崩解现象；②弱胶结，富含黏土的漂（块）石、碎石混合土；③无胶结，漂（块）石、碎石土。

大型混合堆积体空间结构特征不均匀，常具有一种或多种结构特征。典型堆积体结构特征见图 2.1～图 2.4。



图 2.1 松散结构堆积体

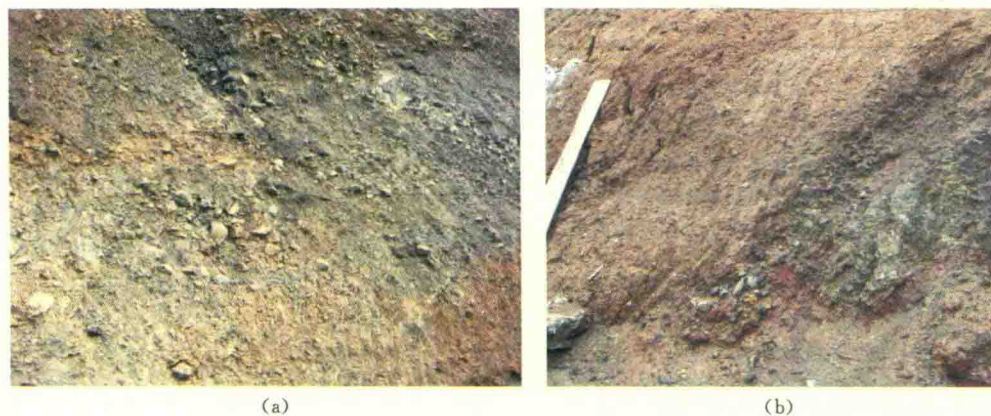


图 2.2 中密型结构堆积体



图 2.3 密实型结构堆积体



图 2.4 胶结型结构堆积体

2.2.3 按空间形态特征分类

堆积体的空间形态特征不仅与堆积体堆积环境、成因机制有关，还与堆积体的稳定性密切相关，因此探索堆积体的空间形态特征分类具有重要意义。

2.2.3.1 按平面几何形态特征分类

根据陈红旗、黄润秋等对大型堆积体边坡的空间工程效应研究成果，依据堆积体平面几何形状，可将堆积体分为敞口型堆积体、锁口型堆积体、条带型堆积体和哑铃型堆积体等 4 种，见图 2.5。

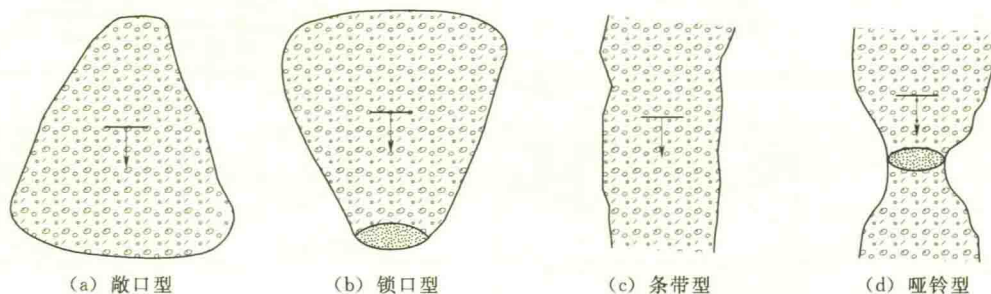


图 2.5 堆积体空间形态

(1) 敞口型。堆积体前缘较后缘有更为宽敞的空间，多分布于岸坡阶地平台底部。在堆积过程中，堆积物向前扩散，前缘横向分离度相对要高。若堆积物块度较大，则容易在前缘隆起。该类型堆积体边坡自然工况下，一般较为稳定；在遭受横向整体切脚开挖或前缘浸入水中时，容易引起变形失稳，往往以蠕动变形为主。

(2) 锁口型。堆积体后缘较前缘更为宽敞，多分布于沟口部位，物源区面积较大。在堆积过程中，堆积物向沟口堵塞，后续堆积物向收缩部位汇聚，使得前缘遭受挤压，变得密实，并在堵塞部位形成支撑拱效应。该类型堆积体边坡的稳定主要受前缘控制，当前缘锁口部位遭受破坏，将变形失稳，为此，对前缘的保护尤为重要。

(3) 条带型。堆积物沿坡上冲沟或条带形洼地运移，堆积物主要受堆积体边界挟持和提供抗滑力。由于堆积路径前方没有显著的抗滑体，因此这类堆积体边坡往往处于次稳定