序

本书的出版是我国工程地质界值得庆祝的一件大事，它标志着我国在黄土滑坡的预测预报和减灾对策研究方面取得了重要进展。

滑坡是一种分布广泛、经常发生的地质灾害。在我国各种地质灾害中，其危害程度仅次于地震。也像地震预报一样，滑坡的预测预报是减轻和防止滑坡对人类生命财产造成损失的重要环节，是滑坡研究中的关键问题。近年来，随着人们对滑坡危害的日益重视和“国际减灾十年”活动的开展，国内外对滑坡预测预报研究十分活跃，本书即是其中的代表性成果之一。

我国黄土分布广泛，黄土性质特殊，斜坡常有滑动。尤其是黄土高原地区，沟谷深切，高陡的黄土坡易于发生滑动，往往一夜之间整个村庄就被黄土滑坡埋盖，给人民造成莫大的危害或威胁，迫切需要开展黄土滑坡预测预报及减灾对策研究。同时，黄土滑坡研究在国内外滑坡研究中也占有重要的地位。

本书在深入研究黄土地区滑坡发育特征、分布规律和危害状况的基础上，选择了滑坡发育最多、危害最重的崩滑性黄土-红层接触面滑坡作为研究对象，以滑坡分布密集、灾害不断发生的甘肃省天水市为研究区，以滑坡发育特征明显的孟家山滑坡、锻压机床厂滑坡为研究点，是完全正确的，可谓抓住了黄土滑坡的典型代表。经过作者等集中力量深入研究，时间不长就取得了重要进展。在对滑坡特征全面总结后，提出了“坡体蠕动-后缘拉裂-滑带由中部向两侧发展-剪出口形成-坡体突滑”的斜坡变形破坏发展过程的地质模式。这种模式的正确性已为物理模拟实验、弹塑性有限元数值模拟所证实，并在锻压机床厂滑坡的反演分析中得以验证。这一模式的提出，把黄土滑坡发育规律的认识提高到了一个新的高度，为滑坡预测预报奠定了可靠的理论基础。

在黄土滑坡预测预报方面，本书对滑坡的滑动时间、活动强度、滑坡危害三个方面的预测提出了一套行之有效的研究途径和技术方法，将预测与反演相结合，以滑坡地质模式及变形监测研究、物理模拟实验、滑坡动态演化过程的数值模拟研究为途径，并把三方面研究有机地结合起来，进行了系统深入的分析。尤其以基于岩土体本构特征的蠕变（流变）理论为基础，研究滑坡的演化过程，预测斜坡变形破坏的趋势，更是抓住了滑坡预测预报的本质和突破口。本书的研究结果虽然尚需进一步在实践中检验，但其研究思路和途径具有较高的学术价值和理论意义。

书中还依据研究结果提出了减灾防灾对策的制定原则和具体的措施建议，对天水市滑坡灾害的防治具有重要的应用价值和社会经济意义，也对类似的滑坡地区有参考应用价值。

本书是一本学术水平高、实用性强的优秀专著。它将在国内外滑坡研究中发挥巨大的作用，并受到广大读者的欢迎。

张咸恭

1996 年 5 月

前　言

作为一种自然地质现象，滑坡研究由来已久。作为一种地质灾害，对其研究则始自本世纪初。随着人类在山区的开发性工程经济活动强度的增大和频度的增高，滑坡灾害日趋频繁，一次造成数百人甚至上千人死亡、数亿元直接经济损失的大型灾难性事件经常发生，滑坡灾害研究随之逐渐系统、深入。虽然滑坡灾害不像地震、洪水、火山、龙卷风等自然灾害那样引人注目或使人类付出巨大代价，但因其分布广泛、发生频繁，对人类造成总的经济损失却相当惊人，有时甚至不小于其它单一的一类自然灾害。如1995年我国大陆6级以上地震7次，灾害死亡人数85人，直接经济损失11.6355亿人民币；而同年发生灾害性滑坡（广义上的，包括崩塌、泥石流）超过3000次，至少造成776人死亡，直接经济损失大于23.513亿人民币。据统计，美国由于各类滑坡活动，年均死亡人数超过25人，大于地震灾害死亡人数；日本死于斜坡破坏的人数与死于其它所有自然灾害（包括地震）的人数间的比率为26%—54%。为提高全人类的减灾、防灾意识，有效减少自然灾害的损失，1987年12月2日负责联合国经济和财政支出的第二委员会一致通过支持“国际减轻自然灾害十年计划”（IDNDR）的决议，并将地震、火山、龙卷风、洪水、滑坡等灾害定为重点减灾对象。“减灾十年”活动的开展，极大地推动了自然灾害的研究。进入90年代以来，滑坡灾害研究异常活跃。作者等从1986年起，对黄土滑坡的形成机理、预测预报等方面进行了深入的研究。1990年以来，承担国家“八五”科技攻关课题“黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究”，本书是在该项研究成果的基础上编写而成的。

全书分六章。第一章为全书的导论，系统总结、分析了黄土地区典型滑坡预测及减灾对策研究的意义，滑坡在黄土地区的分布、发育规律，国内外滑坡预测预报研究的现状与发展趋势等，引入了黄土地区滑坡预测预报研究的思路和技术路线。第二章全面介绍了天水市区黄土滑坡的分布、发育规律及其在黄土地区的典型性与代表性。第三章为滑坡机理研究部分，从滑坡地质结构、变形特征分析、相似材料模拟实验及弹塑性有限元数值模拟三方面，深入、系统地研究了滑坡的变形破坏机理，分析、建立了滑坡变形破坏的地质模式，为滑坡预测预报研究奠定了正确的地质概念模型。第四、第五章为滑坡预测预报研究部分，在对滑坡变形监测、相似材料物理模拟实验分析研究的基础上，以基于岩土体蠕变（流变）理论的滑坡变形动态过程分析为突破口，通过滑坡的位移、应力及塑性变形分析，预测了不同条件滑坡的灾变时段及相应的灾变表现，估测了滑坡的临滑时段和活动强度，总结了滑坡变形的数字统计规律。第六章为减灾对策研究部分，以滑坡灾害预测为基础，以研究结果为依据，从工程与非工程两方面，提出了天水市区黄土地区减灾、防灾对策的制定原则和具体的措施、建议。书中第一章，第三章第一、第三节，第四章第一、第三、第四节，第五章，第六章，前言及结论由文宝萍编写；第二章由李媛、文宝萍、王兴林编写；第三章第二节、第四章第三节由李媛、文宝萍编写。

参加课题研究的主要人员有地矿部环境地质研究所文宝萍、钟立勋、李媛；甘肃省地

矿局第一水文地质工程地质队王兴林、崔旭东、田志荣、陈汉、赵治江、王世宇、王景辉；中国科学院地质研究所吴玉庚、刘竹华；铁道部科学研究院西北分院徐峻岭、廖小平。此外，地矿部环境地质研究所刘传正、施韬、张颖曾在前期参加了部分工作。插图清绘工作由李京森、胡素娥完成。

本书的编写得到了张咸恭、段永侯、夏其发、哈承佑等诸多教授、专家的鼓励、支持和关怀。张咸恭教授还在百忙之中为本书作序。中国水文地质工程地质勘查院黎青宁高级工程师、清华大学王恩志副教授、天水市建委杜毅高级工程师在课题的研究中给与了极大的支持和帮助，在此一并表示由衷的感谢。

滑坡预测预报是滑坡研究中的前沿课题，也是减轻滑坡灾害的关键。“黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究”是作者等在黄土滑坡研究中的一次探索和尝试，其研究结果尚需在实践中检验，研究内容亦需进一步补充、丰富、完善、深入，甚至更新和再发现。但其研究思路、研究途径和预测预报模式若能为同行参考，对同行们的类似研究起到抛砖引玉的作用，便是本书作者的初衷所在。目前，这项研究仍在继续，作者诚恳欢迎来自各方的批评、建议，并希望在今后的研究中得到同行专家、学者和减灾工作者们的关注和指正。

作　者

1996 年 6 月于北京

目　录

序
前　言
第一章　黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究的意义与内容 …… (1)
　第一节　黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究的意义 …… (1)
　第二节　黄土地区滑坡的分布发育规律 …… (2)
　第三节　国内外滑坡预测预报研究现状与发展趋势 …… (5)
　第四节　黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究的内容与技术路线 …… (10)
第二章　天水市区黄土滑坡发育的典型性 …… (12)
　第一节　天水市区黄土滑坡的成灾历史与危害现状 …… (12)
　第二节　天水市区黄土滑坡发育的环境背景概况 …… (13)
　第三节　天水市区黄土滑坡的分布规律 …… (19)
　第四节　天水市区黄土滑坡的主要类型 …… (21)
第三章　滑坡变形破坏机理研究 …… (23)
　第一节　滑坡的发育特征与变形破坏的地质模式 …… (23)
　第二节　滑坡变形破坏机理的相似材料模型实验研究 …… (30)
　第三节　滑坡变形破坏机理的有限元数值模拟研究 …… (36)
第四章　滑坡动态演变过程及趋势预测研究 …… (48)
　第一节　滑坡动态的实际表现及趋势分析 …… (48)
　第二节　相似材料模型上滑坡动态全过程的预演 …… (55)
　第三节　滑坡演变的动态过程与趋势预测的数值模拟研究 …… (57)
　第四节　滑坡失稳后活动强度的估测 …… (75)
第五章　滑坡灾变判据及灾变预测的数学模型研究 …… (79)
　第一节　滑坡的灾变判据 …… (79)
　第二节　滑坡灾变预测的数学模型研究 …… (80)
第六章　滑坡减灾对策研究 …… (84)
　第一节　滑坡灾害损失预评估 …… (84)
　第二节　基于天水市区典型滑坡的减灾对策研究 …… (85)
　第三节　黄土地区滑坡的减灾对策研究 …… (86)
结　论 …… (88)
主要参考文献 …… (91)
英文摘要 …… (93)
滑坡照片 …… (95)

第一章　黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究的意义与内容

第一节　黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究的意义

一、社会经济意义

我国黄土面积为 63.53 万 km^2，约占全国陆地总面积的 6.63%。其中，由青海东部，甘肃东部、中部，宁夏南部，陕西北部、中部，山西、河南西部等地组成的黄土高原地区，黄土连续分布面积为 44 万 km^2，其余零星分布于新疆、东北、太行山以东及山东、江苏等地（张宗祜，1989）（图 1-1）。中国黄土分布面积广、厚度大、地层层序完整，举世闻名。尤其黄土高原地区，更以黄土沉积连续，发育厚度大，地形、地貌及岩性组构特征典型而著称于世。通常意义上讲的黄土地区即指黄土高原地区。本书亦沿用这一习惯概念。

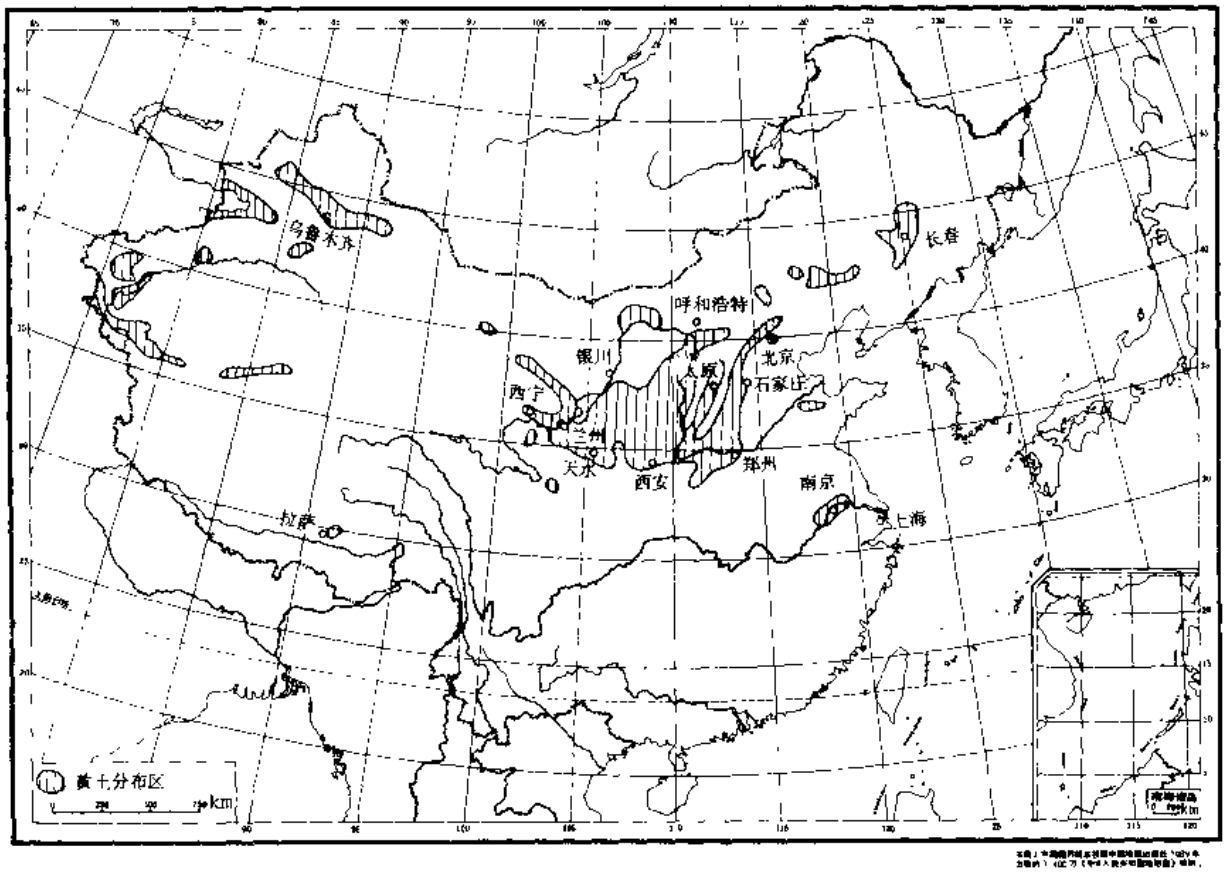


图 1-1　中国黄土分布图

（据张宗祜，1989）

黄土地区的矿产资源、水电资源、土地资源及光热资源丰富，开发潜力大，具有建立能源、重化工基地、牧业、林果业基地的优越条件。然而，由于黄土岩性疏松，大孔隙、垂直节理发育，含大量碳酸盐物质，遇水极不稳定，抗侵蚀性弱，且因黄土高原地壳长期上

升，沟谷切割强烈，地形破碎，沟壑纵横，地面坡度陡等，因此，黄土地区地质环境十分脆弱。黄土地区地处干旱、半干旱气候过渡区，年内降水集中，强度大。在这种自然地理地质环境下，以水土流失、滑坡、崩塌、泥石流灾害为主的多种自然灾害发生频繁。近年来，黄土地区人口快速增长，至1985年，人口已达8149.24万，占全国人口104532万的7.8%，比1980年年均增长16.7‰，高于全国12.8‰的人口增长速度。随着人口的快速增长和工程经济建设的发展，开挖坡脚、坡上填方、过度耕种等各种不合理人类活动剧增，从而更加剧了自然灾害的发生频度和强度。与全国其它地区相比，黄土地区工业发展缓慢，农业生产水平低下，人民生活长期处于比较贫困状态。1985年，全区工农业总产值为809.04亿元（按1980年不变价格计算），占全国同年工农业总产值的6%，与1980年相比，平均增长10%，低于全国12%的增长速度。频发的自然灾害是阻碍黄土地区社会经济发展的主要因素之一。

滑坡是黄土地区的主要灾害之一。据统计，全国约有1/3的滑坡灾害发生于黄土地区。1949—1990年，仅在陕、甘、青3省部分地区，至少有1025人直接死于滑坡灾害。1955年8月18日，陇海线西宝段卧龙寺黄土滑坡，毁坏路基230m，中断行车数日。1983年3月7日，甘肃东乡县洒勒山黄土滑坡，瞬间压埋村庄3座，致死237人，伤22人，毁房500余间，死牲畜433头，毁埋公路1000m、农田20余公顷、水库两座。1990年8月11日，天水锻压机床厂黄土滑坡，瞬时摧毁车间6座，致死7人，使一个正在蓬勃发展的企业陷于瘫痪。白鹿塬滑坡、蒋刘滑坡、黄茨村滑坡等许多著名大型灾害性滑坡均发生于黄土地区。因此，以减轻滑坡灾害为目的，开展“黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究”，具有十分重要的社会经济意义。

二、理论意义

黄土是我国滑坡发育的易滑地层之一。黄土覆盖面广，发育厚度大。黄土滑坡在我国，乃至世界上都占有特殊的地位。受黄土地区地形地貌，黄土地层岩性、组构、构造及其与下伏基岩接触特征的控制，以及受特殊的自然地理、气候条件、人类活动方式的影响，发生于黄土地区的各类滑坡，与其它地区的滑坡相比，发育、活动性质独特。如滑面多沿下伏基岩面，或产生于下伏第三纪软弱泥岩，或顺沿黄土古土壤层；滑坡前部易崩塌，滑动速度大，多具崩滑性等。因此，在黄土地区内，选取典型滑坡点，进行解剖研究，查明滑坡的形成发育机理，预测其动态变化趋势，在滑坡研究中具有明显的理论意义。

第二节　黄土地区滑坡的分布发育规律

受区域地质构造、地层岩性、地形、地貌条件控制和气候、人类活动条件的影响，黄土地区的滑坡具有明显的分布发育规律。

一、黄土地区滑坡的分布规律

黄土地区内的滑坡分布呈现其特有的时空规律性。

1. 空间分布规律

区内滑坡沿塬、梁、卯边及河谷两岸成带状分布，围绕新生代、中生代构造盆地边缘成群集中，在地震活动带内成片密集。此外，明显受降雨影响，年降雨量大于400mm的地区，滑坡发育；小于400mm的地区，滑坡稀少（图1-2）。

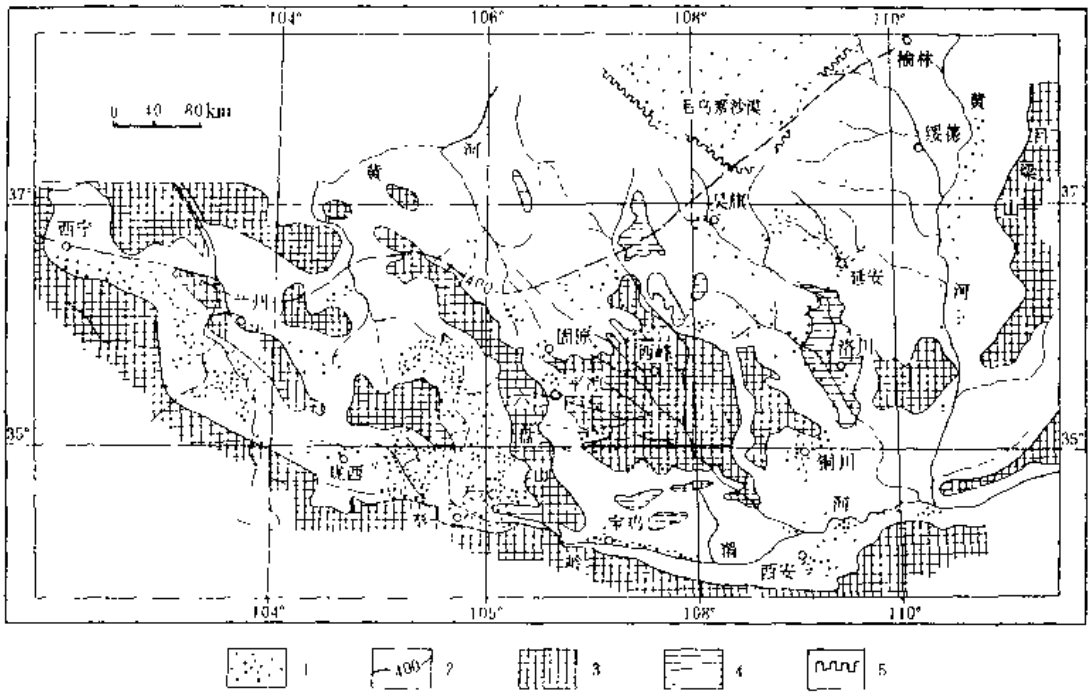


图 1-2 黄土高原滑坡分布图

（据靳泽先等，1989）

1. 滑坡点；2. 降水等值线；3. 基岩山区；4. 黄土塬；5 长城

因地形有利，中生代、新生代盆地周边滑坡极其发育，自盆地周边向中心方向，滑坡分布由密到疏。尤其新生代红层盆地，第三纪泥岩（粘土岩）发育，遇水易软化，上覆黄土与基座红层构成的特殊二元结构特别利于滑坡发育。故黄土地区的新生代红色盆地，如湟水-临夏盆地、陇中盆地、陇东盆地、西吉盆地、关中盆地及陕北盆地等盆地．周边滑坡高度密集。据统计，在这些地区，宽度大于 500m 的滑坡每 100km^2 大于 10 个。

黄土塬、梁、卯及河谷两岸，地形切割条件好，故滑坡发育。董志塬、洛川塬、白鹿塬及其周围的梁、卯边、小塬边，渭河、巴谢河、泾河等及其支流河谷两岸，滑坡发育。据查，每 100km^2，宽度大于 500m 的滑坡个数超过 5 个。在这些地带内，基座为第三纪粘土岩的地段，滑坡发育密度更大。

在黄土高原内，发育有三大地震带：银川—天水—武都一线的六盘山南北地震带、兰州—天水一线的祁吕系前弧西翼北西向地震带、渭南—西安—宝鸡—线的祁吕系前弧东翼北东向地震带，均为我国的活跃地震带。著名的 8.5 级海原地震、8 级华县地震、7.5 级通渭地震及 7.5 级天水地震等均发生于这些地震带内。受地震影响，在地震带内滑坡密集发育。如海原地震 8 度区内，滑坡高度密集。据查，黄土地区 6 级以上地震便诱发出大量滑坡。

黄土地区北部，年降水量小于 400mm，滑坡稀少，其它地区年降水量大于 400mm，滑坡发育。

上述地震带交汇处，则是滑坡密集发育带。从图 1-2 清楚可见，凡滑坡密集区，均为易发滑坡段的交汇区，如天水地区、西宁—临夏一线、宝鸡渭河沿线、西安周边地区、兰州周边地区及延安周边地区等，均为滑坡成片（带）密集发育区，其中以天水地区滑坡分布

密度最大，滑坡集中区面积最广。

天水地区位于陇中第三纪红色盆地东缘，银川--天水--武都地震带和兰州--天水地震带交汇部位的渭河中游地段。该区新构造运动、河流下切作用强烈，地形破碎，黄土-红层二元结构地层发育，年降水量580mm，降水集中，多暴雨。因此，滑坡异常发育（图1-2），该区滑坡的发育集中了黄土地区滑坡群区密集带的所有特点，滑坡分布密度、发育特征、活动形式之典型，在黄土地区首屈一指。区内规模大于10万m^3的滑坡分布密度每100km^3超过20个（据吴纬江，1992）。

2. 时间分布规律

黄土地区滑坡发育的时间性明显受降雨、地震的动态特征影响。

据粗略统计，区内约有90%的滑坡与降雨、地震有关。受降雨的年内动态特征影响，与降雨有关的滑坡多发生在7、8、9三个月的雨季期间。地震活跃期，对应着滑坡多发期。每次6级以上地震，均触发大量滑坡。1654年天水7.5级地震、1718年通渭7.5级地震及1920年海原8.5级地震等均诱发了大量滑坡。

此外，每年3—5月的冬春冰雪消融期亦相对多发滑坡。著名的洒勒山滑坡、洒勒山新滑坡、卧龙寺滑坡就发生于这一时期。

二、黄土地区滑坡的发育规律

区内滑坡的发育规律受制于控滑因素的发育特征。

1. 控制滑坡发育的主要因素

黄土地区特有的塬、梁、卯地貌单元周边及构造盆地地形，为滑坡发育创造了优越的地形条件；黄土地层质地松散，大孔隙、垂直节理发育，多层古土壤存在，为滑坡发育提供了良好的物质基础；黄土地层与下伏基岩幔覆式堆积接触特征，为滑面形成提供了有利条件。此外，黄土地层下广泛分布岩性软弱的第三纪泥岩地层，亦是该区滑坡发育的另一主要因素。除第三纪泥岩外，其它类型基岩，除其与黄土接触面外，很少直接参与滑坡的发育过程。

2. 黄土滑坡的主要类型

黄土地区发育多类黄土滑坡。已有的多年研究成果表明，在多类黄土滑坡中，从滑体物质、滑面发育位置、滑坡运动机制三方面看，表1-1中的几类黄土滑坡在区内广泛发育。

表1-1 黄土滑坡的主要类型

分类指标	滑坡类型	典型滑坡
滑体物质	黄土滑坡	兰州白塔寺滑坡、天水锻压机床厂滑坡
	黄土-红层滑坡	洒勒山滑坡、兰州常湾滑坡
滑面发育位置	黄土滑坡	兰州白塔寺滑坡、天水戒烟所滑坡
	黄土-红层接触面滑坡	天水锻压机床厂滑坡、长安古刘滑坡
	黄土-红层顺层滑坡	巴谢河巴峰山滑坡、兰州大水沟滑坡
	黄土-红层切层滑坡	洒勒山滑坡、卧龙寺滑坡
	黄土-非红层接触面滑坡	天水黄龙西村滑坡、葡萄园滑坡
滑坡滑移特征	（缓慢）蠕滑性滑坡	铜川川口滑坡、天水椒树湾滑坡
	（快速）崩滑性滑坡	洒勒山滑坡、天水锻压机床厂滑坡

从滑体物质角度看，黄土滑坡，滑体由黄土组成；黄土-红层滑坡，滑体由黄土及第三系泥岩两类物质组成。据查，区内黄土滑坡约占70%以上，黄土-红层滑坡不足30%，且后者多为规模大于1000万m^3的巨型滑坡。

就滑面发育位置而言，黄土滑坡的滑面发育于黄土地层中，多为规模小于10万m^3的小型滑坡。黄土-红层接触面滑坡指主滑面顺沿黄土与第三纪泥岩接触面发育；黄土-非红层接触面滑坡指主滑面顺沿黄土与非红层类基岩接触面发育。此二类滑坡规模多在10万m^3以上。黄土-红层顺层滑坡指主滑面沿红层层面发育；黄土-红层切层滑坡为主滑面斜切红层层面发育。此二类滑坡多为规模大于百万m^3以上的大型，甚至巨型滑坡，尤其后者中多为巨型滑坡。据粗略统计，黄土地区内各类滑坡的分布发育状况大致为：黄土滑坡占40%左右，黄土-红层接触面滑坡约为30%，黄土-非红层接触面滑坡小于5%，黄土-红层顺层滑坡为20%，黄土-红层切层滑坡小于10%。

滑坡运动机制分类，不同研究者以不同目的，提出过多种分类方案。已经发生的众多黄土滑坡的滑移特征显示，滑坡的移动主要表现为两种形式：一类滑坡移动速度缓慢，在滑移过程中自前至后逐渐解体，或缓慢地整体滑动，此类多为复活后的各种老滑坡，少数为滑面极缓的黄土滑坡或黄土-红层接触面滑坡，在此称具这类滑移特征的滑坡为(缓慢)蠕滑性滑坡。另一类滑坡在移动过程中，速度快，且既滑亦崩，以滑为主，多为前崩后滑，故称此类为（快速）崩滑性滑坡。这类滑坡在黄土地区分布极广，其滑移特征代表着多数新黄土滑坡的滑移模式。洒勒山滑坡、蒋刘滑坡及天水锻压机床厂滑坡等均属于此。由于此类滑坡滑移速度快，且呈崩滑性，所以成灾性极大。在黄土地区，几乎所有的造成人员伤亡、重大财产损失的灾害性滑坡都为崩滑性滑坡。因而，从灾害角度看，研究这类滑坡意义最大。

基于上述认识，本书以具崩滑性滑移特征的黄土-红层接触面滑坡(以后称崩滑性黄土-红层接触面滑坡）为对象，研究其形成活动机理，预测其动态演化趋势，继而提出相应的减灾对策建议。

第三节　国内外滑坡预测预报研究现状与发展趋势

对于具体滑坡而言，滑坡预测预报有滑坡滑动时间预报、滑坡活动强度预报及滑坡危害预测。滑坡预测预报研究在国内外由来已久，近十多年来十分活跃。

一、滑坡滑动时间预测预报研究的现状与趋势

滑坡滑动时间的预测预报是世界公认的尖端课题。由于滑坡地质过程、形成条件、诱发因素的复杂性、多样性及其变化的随机性、非稳定性，从而导致滑坡动态信息极难捕捉，加之滑坡动态监测技术的不成熟和滑坡研究理论的不完善，滑坡滑动时间的预测预报一直被认为是一项十分困难的前沿课题。此外，滑坡监测费用高、周期长，也是制约滑坡滑动时间预测预报进展的因素之一。尽管如此，近几十年来，国内外许多研究者都将其作为攻克目标，潜心研究，取得了初步的成果。

1. 研究现状

滑坡形成与变形过程是滑坡岩土体蠕动变形的过程。因此，数十年来，在粘弹塑性力

学基础上发展起来的、揭示岩土体变形时间效应的岩土体蠕动变形（流变）理论一直是滑坡滑动时间预测预报研究的基础。岩土体蠕变（流变）理论中的应变（位移）-时间曲线的三阶段过程被视为是滑坡预测预报的基本标准（图 1-3）。第Ⅰ蠕变阶段，又称减速蠕变阶段（AB 段），岩土体变形以减速发展，蠕变曲线斜率逐渐减小。第Ⅱ蠕变阶段（BC），又称稳定蠕变阶段，岩土体变形大致以等速发展，蠕变曲线近似一倾斜直线，应变速率大体不变。第Ⅲ蠕变阶段（CE），又称为加速蠕变阶段，岩土体变形速率由 C 点开始迅速增加，到达 E 点，岩土体破坏。其中，在 CD 段，变形迅速增大，但岩土体尚未破坏，DE 段，岩土体变形速率剧增，岩土体很快破坏。据此，滑坡的变形破坏过程亦被分为与之对应的几个阶段，并把对各阶段起始时刻的预报相应归之为长期预报，中期预报，短期预报和临滑预报。所有的滑坡滑动时间预测预报都围绕滑坡变形破坏阶段，以不同时间尺度进行预报。日本学者斋藤迪孝在室内实验和仪器监测的基础上，于 1965 年提出以第Ⅱ蠕变阶段或第Ⅲ蠕变阶段的应变速率为基本参数的预测预报经验公式（1-1）、（1-2）及相应的预测预报理论，当属国内外系统研究滑坡预测预报理论之始端。尤其是用此理论成功地预报了 1970 年 1 月 22 日发生的日本饭山线高场山滑坡后，引起了各国研究者的兴趣。滑坡预测预报研究渐趋活跃。特别是对一些大型滑坡的成功预报，更增加了研究者的信心。如智利研究者对 Chuiquicamata 露天矿滑坡（1969.2.18），加拿大研究者对 Hogarth 滑坡（1975.6.23），我国研究者对金川露天矿采石场滑坡（1983.7.9）、宝鸡卧龙寺新滑坡（1977.5.5）及湖北新滩滑坡（1985.6.12）等的成功预报。

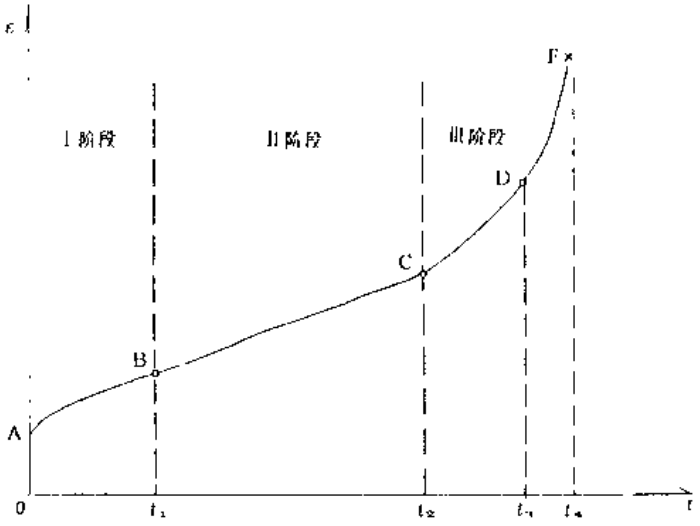


图 1-3　岩土体蠕变曲线

$$\lg t_r = 2.33 - 0.916 \times \lg \dot{\varepsilon} \pm 0.59 \qquad \text{（第Ⅱ阶段）} \qquad (1\text{-}1)$$

$$t_r - t_1 = \frac{\frac{1}{2}(t_2 - t_1)}{(t_2 - t_1) - \frac{1}{2}(t_3 - t_1)} \qquad \text{（第Ⅲ阶段）} \qquad (1\text{-}2)$$

上二式中：t_r 为达到最终破坏（滑动）所经历的时间；$\dot{\varepsilon}$ 蠕变速率（$10^{-4}/min$）；t_1、t_2、t_3 为位移时间曲线上任意的相对位移量相等的相邻三点所对应的时间。

从预测预报方法上看，目前国内外研究主要集中于以下几方面。

（1）滑坡变形前兆的现象预报法

与地震、火山等其它自然灾害相似，滑坡失稳前也表现出多种宏观先兆：前缘频繁崩塌，地下水位突然变化，地热、地声异常，动物表现失常等。由于这些现象在临滑前表现直观，所以用于临滑预报十分有效。但这种方法的有效性依赖于正确的地质分析和经验判

断。用这种方法，我国曾成功地预报了宝成线须家河滑坡（1963.9.13）。

（2）位移-时间曲线变化趋势判断法

基于岩土体变形的蠕变（流变）理论，在滑坡变形的不同阶段，位移-时间曲线形态不同，临滑阶段的位移-时间曲线呈现急剧上升趋势。在系统监测资料的基础上，判断位移变化的加速阶段，按变化趋势在曲线上找出滑坡失稳时刻，作出预报。这是近几十年来，滑坡滑动时间预测预报中最常用的方法。预报效果和精度取决于系统的位移监测和监测的时间尺度，并依赖于正确的地质分析和经验判断。智利 Chuquikamata 滑坡、加拿大 Hogarth 滑坡、我国的卧龙寺新滑坡（1977.5.5）及新滩滑坡（1985.6.12）等都是用此方法作出了成功的预报。其特点亦是对临滑预报较为有效。

（3）斋滕法和改进的斋滕法

由于斋滕法以土体蠕变理论为基础，以应变速率为基本参数，所以在一定程度上反映了滑坡变形的本质。因而，自“斋滕法”出现后，较多研究者用其进行滑坡预报，取得了一定的效果。另一方面，“斋滕法”只适用于前缘不受阻的土质滑坡，所以在应用上有一定的局限性。一些学者（秦四清等，1993）尝试研究了改进的“斋滕法”，用来预报滑坡滑动时间。

（4）统计数学模型法

近年来，随着各种统计数理理论在地学中的广泛应用，许多研究者尝试以位移为参数、以统计数理理论为基础，建立滑坡位移-时间关系的数学模型，以期用数学模型描述滑坡变形的规律，预报滑坡发生时间。这是目前滑坡预测预报研究中最活跃之处，在我国尤为活跃。目前，最常见的统计数学模型有回归模型（晏同珍，1988）、灰色理论模型（陈明东，1988）、泊松旋回模型（晏同珍，1987）、生物生长模型（晏同珍，1988）、悌度正弦模型（崔政权，1989）及突变理论模型（秦四清，1993）。所有的模型预报法都只用于临滑预报，并都是对已发生的滑坡作反演拟合预报，事后验证效果良好。但无一用于未发生滑坡的超前预报，故各种模型的真正效果如何，尚有待实践检验。

（5）黄金分割法

黄润秋教授、张倬元教授等人以自然界事物演变的普遍规律——“黄金分割律”为依据，通过对国内外十余个具有完整系统状态历时曲线的滑坡实例的分析研究，于 1988 年提出以“黄金分割法”预测滑坡发生时间，指出，滑坡位移历时曲线的线性段的历时与线性、非线性段历时之和之比等于黄金分割数 0.618，就其反演拟合结果看，效果较好。尤其对滑坡中、短期预报可靠性较高。

（6）非线性动力学模型预报法

1993 年，秦四清博士以非线性动力学理论为基础，提出滑坡孕育过程的非线性动力学模型，进而预报滑坡发生时间。非线性动力学观点和方法将滑坡发生时间的预报研究从目前的经验预报和统计预报引入物理预报，从理论上看，这是认识上的一个飞跃。但是，由于滑坡演变的复杂性及外界环境的多变性，要建立滑坡孕育过程的非线性动力学方程决非易事。但无论如何，这种观念上的更新，对今后进一步的研究将产生很大的影响。

（7）降雨量参数预报法

降雨在滑坡演变过程中起着重要的诱发作用。雨季或雨季后，滑坡发生频繁。降雨对滑坡的诱发作用与累计雨量和雨强有关。一定的雨量和雨强可缩短滑坡的演变历程，使尚

在演变之中的滑坡提前滑动。因此，以降雨量为参数，预报滑坡起动的临界降雨量和降雨强度，亦是滑坡发生时间预报的内容之一。薛果夫于1988年对新滩滑坡变形演变与降雨量的关系及其对降雨的敏感度等进行了深入的反演分析研究，其反演拟合结果较好。日本学者通过在滑坡模型上的降雨模拟实验，对以降雨量为参数的滑坡预报研究了多年，但至今公开的结果不多。

(8) 声发射参数预报法

以滑坡变形过程中岩土体声发射参数为指标预测滑坡动态，是目前国内外滑坡滑动时间预报研究中的另一热点。于济民等人通过对宝成线观音山车站山体变形的声发射监测，提出了山体变形趋势预测。结果表明，这种方法用于滑坡预报是可行的。

(9) 多参数预报法

选取多种参数，综合预测滑坡发生时间，也是国内外滑坡滑动时间研究中的热点之一。美国学者B. Voight于1989年提出多参数预报的经验公式：

$$t_f - t_x = (\Omega_x^{1-\alpha} - \Omega_i^{1-\alpha}) / A(\alpha - 1)$$

式中：Ω为任意参数，位移、剪应力、地面倾角等；Ω_x为初始值；Ω_i为预报值；α、A为经验常数。

由于经验常数A、α不易确定，所以上式在应用上还有较大限制。

从上述讨论可以看出，近几十年来，国内外滑坡滑动时间预测预报研究颇为活跃，成果甚多。但纵观近几十年的研究，自1965年“斋滕法”后，研究进展较为缓慢。从方法有效性上看，仅前(1)、(2)、(3)种方法对滑坡做出过成功的滑前预报。(4)、(5)、(6)三种方法均为事后验证，所以真正效果如何，尚难以定论。其它几种方法正在探索之中。由此可见，以地质分析、经验判断为主的滑坡发生时间的定性或半定量、准定量预报及基于监测资料的趋势定量预报，在当前研究中占主导地位。就各国研究状况而言，或许由于中、日两国滑坡灾害较重，所以这种方法研究开展较多。欧美国家则相对较少，多侧重于滑坡发生空间的区域性预测预报研究；即使对滑坡动态系统监测，也只是侧重于回答滑坡是否稳定和滑坡防治措施的效果如何这两个问题。这可能与欧美国家注重滑坡防治有关。

2. 滑坡滑动时间预测预报研究的趋势

尽管国内外滑坡滑动时间预测预报研究已有数十年历史，取得了较大进展。但至今尚有许多关键问题没有解决，滑坡滑动时间预测预报理论和方法还不成熟。根据已有研究中存在的问题，可以预测在今后一段时间内滑坡滑动时间预测预报研究将集中于以下几方面：

(1) 基于岩土体蠕变（流变）理论的滑坡变形演变过程及动态趋势预测预报研究

无论学科如何发展，依据于粘弹塑性力学的岩土体蠕变（流变）理论是滑坡滑动时间预报的基础。根据岩土体蠕变理论，滑坡的变形破坏是其内部应力和岩土体强度随时间不断变化的结果，位移、应变及其它是这种变化的直接和间接反映。因此，岩土体蠕变理论揭示了滑坡变形破坏的本质，描述了滑坡应力、强度、应变位移随时间变化的内在规律。因而，以岩土体蠕变理论为基础，研究滑坡变形过程中应力、强度、应变、位移、应变（位移）速率等随时间的变化规律，进而预测滑坡滑动时间，应是滑坡滑动时间预测预报研究的突破口之一。

(2) 多因子综合预测预报研究

滑坡形成过程中，滑体在宏观和微观上有多种表现，如应力、应变、位移、应变速率、

岩土体强度、弹性波波速、电阻率、声发射参数等。所有这些参数虽都可作为滑坡预报的因子，但如何选取能够反映滑坡动态过程的最佳因子，是滑坡预报的关键。

(3) 基于一定数理统计理论的滑坡滑动时间预测预报模型研究

尽管已有多种数学模型用于滑坡滑动时间预报，但尚无一成熟模型。所有模型均需要在实践中改进、完善。

(4) 基于非线性动力学的滑坡滑动时间预测预报研究

非线性动力学思想的提出，无疑会在今后的研究中掀起热潮。

(5) 水在滑坡演变过程中的作用和定量评价研究

水（地表水、地下水）在滑坡变形破坏过程中作用极大，然而其在滑坡变形破坏中的作用机理及其定量表现，一直是滑坡预报研究中的难点。在今后研究中，它仍将是重点课题之一。

(6) 人类活动在滑坡演变过程中的作用和定量评价研究

随着人类活动的广泛和加强，因不合理的人类活动诱发的滑坡愈来愈多，所以人类活动在滑坡演变过程中的作用机理及其定量表现，亦将是滑坡滑动时间预报研究的重要方向之一。

(7) 滑坡变形破坏过程中岩土体强度的变化规律研究

随滑坡变形的发展，滑坡岩土体强度不断变化。但各类岩土体强度的变化规律如何，尚不完全清楚，故仍需进一步研究。

二、滑坡活动强度预测预报研究现状与趋势

滑坡活动强度包括滑动速度和滑移距离两方面。滑坡活动强度预测是滑坡运动特征的预测。因而研究物体运动特征的运动物理学和能量转换与守恒定律被视为是滑坡运动学研究的基础。近几十年来，国内外对滑坡运动特征的预测预报研究，主要集中于以下几方面。

1. 质点运动学预测方法

将滑坡运动看作是质量集中于重心的质点运动，从而利用质点运动学和相应的能量转换与守恒定律研究滑坡的运动过程。我国潘家铮、美国土木工程学会等据此分别提出过滑速预测公式。经多年实践检验，这种方法在滑坡运动特征预测中具有一定的普遍性。但已有研究中对滑动边界的假设过于简单，所以如何确定更合理的滑动边界，是今后研究的重点。

2. 滑坡运动机理研究与质量运动学相结合的预测方法

基于不同的滑坡运动机理假设，国内外已有多种预测方法。具有代表性的方法有：

(1) 奥地利学者 A. E. Scheidegger 在调查了世界上 33 个大型滑坡的运动特征后，提出架空坡斜率 f_e，又称等价摩擦系数的概念，并发现：

$$\lg f_e = a \lg V + b$$

式中：V 为体积；$a=-0.15666$、$b=0.62219$。据 V 求出 f_e 后，按下式计算滑速：

$$V_s=\sqrt{2g\ (H-f_eL)}$$

此公式为反推公式，在实际应用上有一定局限性。

(2) H. J. Körnei 则将大型滑坡视为流体，提出按流体力学方法计算滑速，在一定假设基础上，提出滑速：

$$V^2=\frac{1}{e^{2s/k}}\left[V_k^2\left(e^{2s/k}-1\right)+V_0\right]$$

式中：$k=\frac{D_F\cdot\zeta}{g}$；$V_k=\sqrt{D_F\cdot\zeta\left(\sin\alpha-f\cos\alpha\right)}$；$V_0$ 为初速度；D_F 为流体密度；ζ 为流体紊流系数。

上式的某些参数难于确定，故应用上还不成熟。

（3）日本学者佐佐木恭二在室内环剪实验的基础上，利用测定的表观摩擦角对日本数个碎屑流滑坡的滑速、滑程进行反演拟合研究，并提出了相应的公式。

（4）王思敬教授、王效宁博士，在对我国数个大型滑坡运动机理研究基础上，通过滑坡运动全过程能量分析，提出滑速及最大滑距预测公式：

$$V=\sqrt{\frac{2}{M}U+2g\left(H-Lf\right)},\quad L_{max}=\frac{1}{gf}\cdot\frac{U}{M}+\frac{H}{f}$$

式中：M 为滑体质量；U 为滑体变形能；H 为重心落差；L 为水平滑距；f 为动摩擦系数。其反演结果与实际接近。但实际上，在滑体变形能量计算中，假设太多，故此类研究仍不成熟。

纵观已有研究成果可见，与滑坡滑动时间的预测预报研究一样，滑坡活动强度的预测预报研究亦不够成熟，有待进一步研究。如何将质点运动物理学理论和能量转换与守恒定律更合理地用于滑坡运动特征研究，是今后的主要研究趋势。

三、滑坡危害预测预报研究现状与趋势

对滑坡从单纯的地质现象研究到从地质灾害角度研究是近几十年来滑坡研究观念上的一个飞跃。尤其“减灾十年”活动的开展，进一步推动了这方面的研究。目前对具体滑坡危害的预测研究多是在运动特征研究的基础上，找出滑坡可能的危害范围，根据直观经验判断对可能受灾范围内的灾害损失和社会经济影响作出评估。如何作出更准确的、定量的滑坡危害预测是今后这方面研究的主要趋势。

第四节　黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究的内容与技术路线

一、黄土地区滑坡研究的基础及存在的问题

自 1958 年 8 月陇海线西宝段卧龙寺滑坡发生后，黄土地区的滑坡研究受到了政府及生产、教学、科研部门的广泛重视。近几十年来，许多生产、科研及教学单位对黄土地区各类滑坡进行了大量的调查、研究，如“渭河干流黄土塬边渠道边坡稳定性研究”，从而对黄土地区各类滑坡形成机理、分布、发育特征有了初步的认识。1983 年 3 月 7 日洒勒山滑坡的发生，将黄土地区的滑坡研究推上了一个新的高潮阶段。通过“洒勒山滑坡形成机制及巴谢河流域滑坡研究”，“西南、西北山地崩、滑灾害研究”，“黄河中游不稳定斜坡破坏机制研究”，“黄河中游区域工程地质研究”，“黄土高原地区综合治理开发考察系列研究”等多项国家和部门“六五”、“七五”重点科研项目的开展，对黄土滑坡的形成机理有了更进

一步的认识，基本查明了黄土地区滑坡的分布发育规律，为今后进一步研究奠定了坚实的基础。但是，以往研究多为黄土滑坡空间发育规律的研究，以及围绕洒勒山滑坡的形成机理研究，对黄土滑坡滑动时间、活动强度及灾害危险性的预测预报则尚未涉及。因此，在以往研究基础上，以已有研究结果为依据，在黄土滑坡发育的典型地区选择典型点，进行勘查、监测、开展典型类型滑坡的预测预报及减灾对策研究，对进一步发展黄土滑坡的研究理论和黄土地区减灾防灾有着重要的理论意义和明显的实际意义。

二、研究区和研究点的选取

基于对黄土地区滑坡分布规律的认识，在已有研究基础上，从滑坡分布密集性、滑坡发育典型性、滑坡危害严重性及社会经济地位重要性四方面综合分析，确定天水市区为本专题研究的研究区。

如前所述，黄土地区发育多种类型的黄土滑坡，滑面沿黄土与第三纪红层接触面发育的黄土-红层接触面滑坡是其中最为发育的滑坡类型之一，约占各类滑坡总数的30%，且规模多在10万m^3以上。就滑坡危害性而言，以滑速高的崩滑性黄土滑坡危害最大。限于经费制约，本专题仅选取黄土滑坡中最主要类型之一的崩滑性黄土-红层接触面滑坡为研究对象。对于具体研究点的选取，以滑坡活动特征、诱发因素典型，灾害社会经济影响严重为基本原则。通过对天水市区滑坡分布发育特征的调查，兼顾具体研究经费等诸多实际情况，选取孟家山滑坡和锻压机床厂滑坡为解剖点。前者正在活动变形，威胁天水-社棠高压输电线的安全，影响即将修建的天水--宝鸡310国道；后者已经滑动，并造成了严重的直接危害和社会经济影响。在本课题研究中，前者为预测点，后者为反演拟合验证点。如此反演与预测相结合，以期探求一条有效的滑坡预测预报途径。

三、课题研究的主要内容、技术路线及研究思路

1. 研究的主要内容与技术路线

鉴于前述对国内外滑坡预测预报现状及发展趋势的认识，结合本专题的研究目的和研究点的实际情况，以滑坡变形破坏机理研究、滑坡预测预报研究及减灾对策研究为主要研究内容，以野外地质勘查、滑坡动态仪器监测、室内物理模拟实验、数值模拟为主要技术路线，并将地质分析研究、实验模拟研究及数值模拟研究相互对比、印证、补充。

2. 研究思路

从滑坡形成的地质条件分析、外部环境分析、结构特征分析、变形破坏特征分析、物理模拟实验研究、数值模拟研究等诸多方面研究滑坡变形破坏机理。滑坡滑动时间预测以预测滑坡等速蠕变与加速蠕变转折时段的短期预报为主要目标，以滑坡宏观变形监测、相似材料物理模拟实验结果为基础，以基于岩土体蠕变（流变）理论的滑坡变形演变过程及动态趋势预测预报研究为突破口，同时考虑降水、人类活动对滑坡动态的影响，通过滑坡变形演变过程的研究，力求掌握滑坡变形在宏观上的几何规律，微观上的物理规律，及其变化量值的数字统计规律，进而预测滑坡在各种条件下的灾变时段及相应灾变表现，估测滑坡的临滑时段；以能量转换与守恒定律为基础，预测滑坡活动强度；根据滑坡区的人文经济环境状况，预测滑坡危害，进而以研究结果为依据提出减灾防灾对策的制定原则和具体的减灾、防灾措施建议，并以此进一步扩展至黄土地区同类滑坡灾害的减灾、防灾对策建议之中。

第二章　天水市区黄土滑坡发育的典型性

天水市区，由于其特殊的自然地理地质环境，黄土滑坡分布、发育及其对该区社会经济的危害在黄土地区之典型，屈指可数。

第一节　天水市区黄土滑坡的成灾历史与危害现状

一、成灾历史

天水，古称秦州，自古以来，便深受滑坡之害，近2000年以来的历史记载中，大规模滑坡灾害达300多次，伤亡千、万人的大事件屡有发生。

1654年7月21日天水7.5级地震，天水县8个乡发生地震滑坡，面积达1000km^2，宽度大于500m的滑坡59处。当时极震区面积158km^2，滑坡面积竟有40km^2，占极震区面积的25%。史料记有“秦州大震（X度），年余不止，山皆倒置，水上高原，死一万多人”。其中罗家堡滑坡最大，“罗家堡七十峪，两山拽成一处，壅河成潭，木里山崩水涌，压埋村落近十里，村落聚为海，名曰海子”。该滑坡体长达4.5km，宽2km，地震时东山向西滑移，堵塞稠泥河形成堰塞湖。

1920年海原地震，使渭河谷地发生“山崩地裂，黑水横溢，马跑泉摇出大川，水能行舟”之巨变。

1965年7月7日，罗玉沟因暴雨诱发三处大滑坡，面积共0.4km^2，推下土量达560万m^3，继而形成泥石流，淹没市区北关、东关企事业单位20多个，直接经济损失139.5万元。

1984年秋，因降水较多，天水及其周围地区暴发大量黄土滑坡。据不完全统计，天水市区至少有80多处，80多个村庄安全受滑坡直接威胁。

1990年8月特大暴雨，天水市区藉河、渭河两岸发生20余处滑坡、泥石流，死亡22人，工厂被毁，农田被埋，道路遭破坏，直接经济损失达5000万元之巨。给城市建设和工农业生产造成严重危害，同时社会经济影响极大。其中，天水锻压机床厂遭到毁灭性打击，200多万m^{3}土体的滑动，摧毁了6个主体生产车间（照片18），压埋成品库、钢材库、300m铁路专用线、50吨龙门吊、800门自动电话交换机等重要生产设备和库房。据厂方计算，滑坡造成固定资产和流动资金直接经济损失2067万元。同时滑坡造成7人死亡，4人受伤。侥幸的是，因全区停电，厂里组织职工离开车间排洪抢险，才避免了大量人员伤亡。此外，滑坡还摧毁天水—清水盘山公路700余米，中断公路交通。1990年8月后位于市区中心的椒树湾、秦山庙老滑坡复活，造成滑体上居民房屋和道路普遍开裂、位错，危及14个单位，6个居民委员会，1974户居民共7780人的生命财产安全。对于这两处滑坡，市政府不得不花费357万元用于滑坡治理（照片22），投入200多万元用于滑体上的居民搬迁。长控厂、海珠厂、电工仪器厂也受到不同程度的灾害波及。严重的滑坡灾害极大地影响了市区工农业生产的发展和人民群众的正常生活。

1992 年 4 月 22 日晚 8 时，秦城区戒烟所后部滑坡，毁房数十间，由于人员及时提前撤离，才未造成任何伤亡。

频繁发生的滑坡灾害严重地阻碍了天水市区社会经济的发展。

二、危害现状

经初步调查，目前天水市区仍有多处正在活动的滑坡危胁着正常的居民生活和工农业生产。

位于天水北道区东泉镇卫生院后山坡上的胡家崖滑坡（照片 19），1990 年 8 月暴雨后，老滑坡呈复活迹象，地表开裂，房屋变形（照片 20）。目前地表裂缝已延伸 200m。估计滑坡近百万 m^3，直接危胁着坡下密集的居民生活区。

天水市塑料厂滑坡，位于秦城区天水市塑料厂厂区后山坡上。1990 年 8 月暴雨后，老滑坡开始复活，山坡后部坡体开裂，房屋变形（照片 21），公路从中间裂开，上下错开 2 3cm，滑坡方量约为 20 万 m^3。坡下有水渗流，对厂区及家属区构成直接危胁。

位于天水市北道区东部潘集寨的孟家山滑坡，近来活动强烈，目前山体已有四条裂缝，而且 T_2、T_1 裂缝已基本贯通，监测结果显示，滑坡裂缝仍在不断扩大，一旦滑坡失稳，从坡上穿过的天水一社棠 11 万伏高压输电线路将会立即中断，坡下即将施工的天水—宝鸡 310 国道亦将直接受害。

总之，天水市区多处地段，仍处在滑坡的直接威胁之中，因此在天水市区进行滑坡研究不仅十分必要，而且意义重大。

第二节　天水市区黄土滑坡发育的环境背景概况

一、天水市区在黄土地区中的地位

1. 地理位置及所处地貌单元

天水市位于甘肃省东南部，东邻陕西省宝鸡市，南连陇南山区，西接定西地区，北壤平凉地区。该区公路、铁路交通便利，陇海铁路、甘陕公路穿绕市区（图 2-1），担负着连接西北内陆的重要作用。我国四大石窟之一的麦积山石窟坐落于市区东南郊。渭河及其支流藉河、散渡河、葫芦河、牛头河、颖川河、东柯河等穿流市区，汇入渭河。

天水地处黄土高原中部偏南，属陇西黄土地区南部亚区（据张宗祜，1989），为典型的黄土丘陵沟壑区。直接覆盖于第三系基底之上的黄土堆积十分发育，特征典型。

2. 社会经济地位

天水，古称秦州，历史悠久，是中华民族的发祥地之一。大地湾古遗址的发掘证明，早在 7000 多年前，我们的祖先就在这里生息繁衍。据司马光《资治通鉴》记载，传说中的伏羲、女娲、轩辕均出生在此。唐朝时期，这里是古丝绸之路从长安通往西域的要道。如今，天水仍是甘肃省东部的政治、经济、文化及交通中心。至 1992 年，全市人口 3 004 092 人，为甘肃省第二大城市。目前又成为全国城市综合体制改革和中等城市机构改革试点城市之一。

天水市区水利资源丰富，工、农业生产总值连年递增，土特产琳琅满目，其中“花牛”苹果多次在全国荣摘桂冠，饮誉海内外，是全国十大苹果基地之一。1992 年，全市国民生产总值 266.954 万元，人均国民生产总值 895 元，在甘肃省排名仅次于兰州。

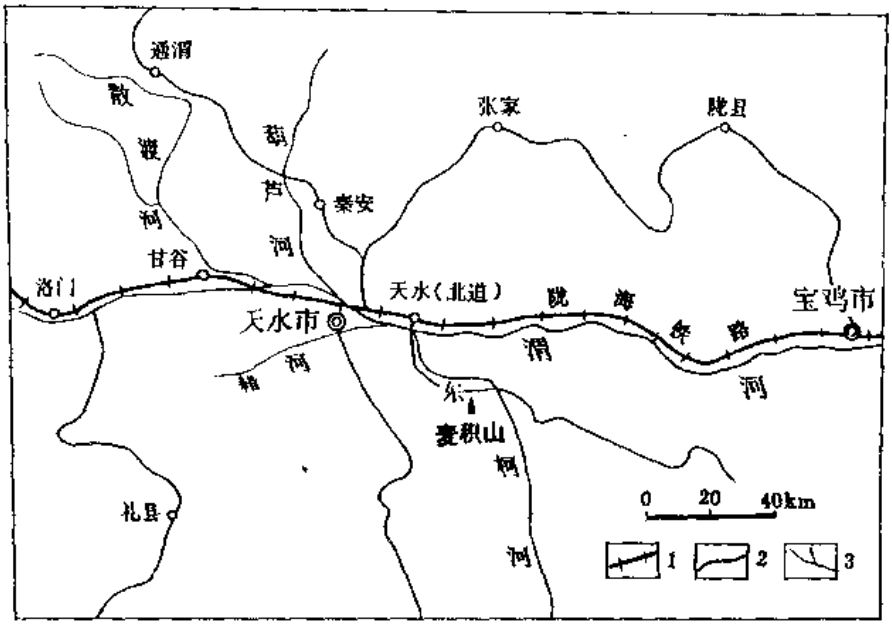


图 2-1 天水市区交通位置图

1. 铁路；2. 公路；3. 水系

从上述可见，在天水市区进行滑坡灾害研究，社会经济意义十分明显。

二、地质背景概况

1. 地质构造

研究区位于秦岭北缘深大断裂带内，新第三纪北西向舒缓向斜轴部。北侧为凤凰山断裂，南邻甘泉断裂，中央为耤河、渭河断陷谷地（图 2-2、2-3）。

褶曲轴中心位于天水市区的中心地带，其轴线沿耤河及渭河河谷延伸，所以河谷两岸第三系多向河谷倾斜，为第三系层面上的堆积物顺层滑动创造了有利条件，也是构成天水地区滑坡形成与发展的地质构造基础。

市区内，断裂构造不甚发育，所以具体滑坡发育与断裂构造的直接关系不明显。但滑坡的总体分布、发育规律则受构造控制。

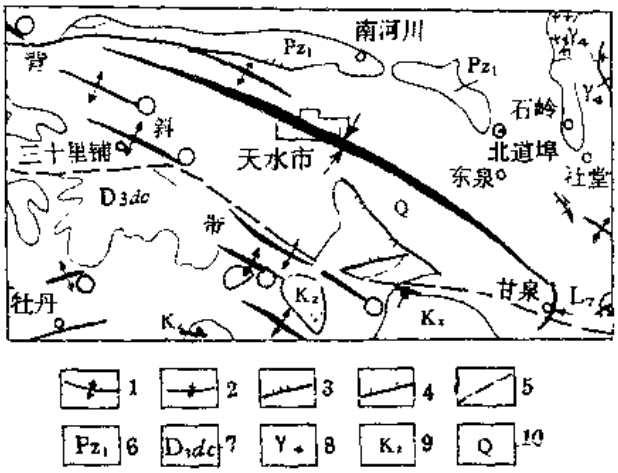


图 2-2 天水市区构造图（1：50 万）

1. 背斜；2. 向斜；3. 压性冲断；4. 正断层；5. 推测断层；6. 下古生界；7. 泥盆系；8. 花岗闪长岩；9. 新生界；10. 第四系

2. 地层岩性

在天水市区出露的地层主要有：下古生代牛头河群变质岩、老第三纪砂砾岩、新第三纪泥岩及第四纪松散堆积物。

下古生代牛头河群变质岩系（Pz_1nt）：由灰白色、灰绿色大理岩、石英岩、白云岩及片

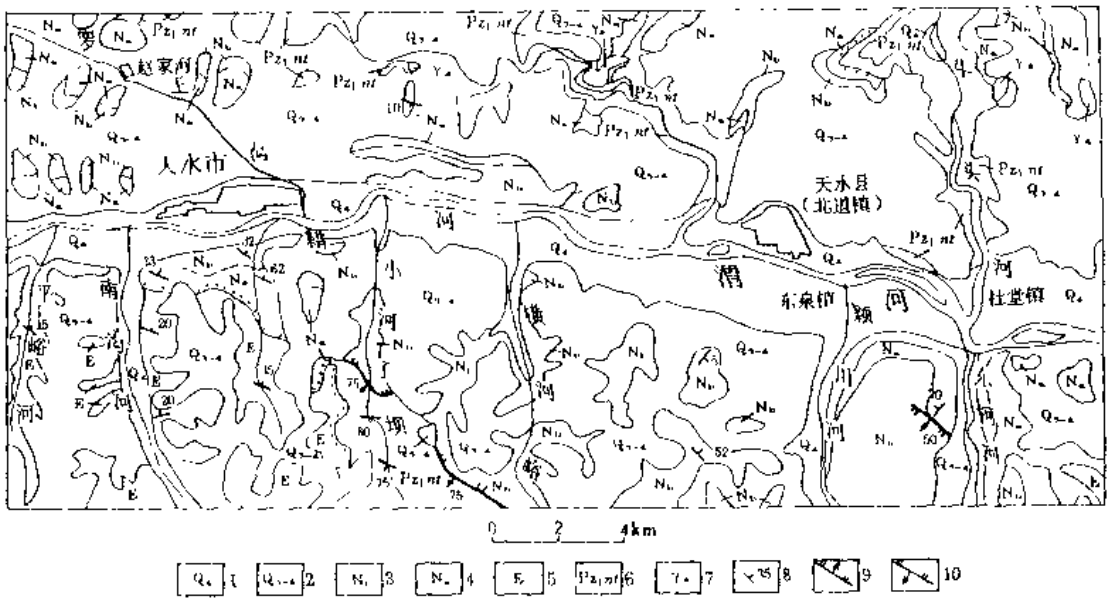


图 2-3 天水市区域地质图

1. 第四系全新统；2. 第四系更新统－全新统；3. 新第三系上段；4. 新第三系下段；5. 老第三系；6. 下古生界牛头河群；7. 花岗闪长岩；8. 地层走向倾向及倾角；9. 正断层走向及倾向倾角；10. 逆断层走向倾向及倾角

岩、片麻岩组成。表层风化严重，岩体破碎。在研究区东南部零星出露。产状：NE30°/SE∠60°－62°。上覆地层多为新第三系，部分段为老第三系。该岩层与上覆地层以角度不整合接触。

老第三纪砂砾岩（E）：红－紫红色，钙泥质胶结。仅出露于南沟河以西、以南地段。上覆新第三纪泥岩，二者呈角度不整合接触。

新第三纪泥岩（N）：红褐色、灰绿色互层泥岩（粘土岩），致密，较坚硬，颗粒分析表明，泥岩中粘土矿物含量＞53%，隔水性极好。岩层产状平缓，倾角小于10°，走向NW300°左右，在河谷两侧微倾向山外。干燥状态下，该层泥岩致密、坚硬，强度较高，遇水后，极易软化，强度迅速下降。其物理力学性质指标如表2-1所示。该层在研究区中部分布广泛，厚度较大，属断陷湖盆沉积，向四周厚度逐渐减小，部分地段仅存一薄层强风化壳，如孟家山滑坡地段。其顶部普遍有一层厚1m左右的风化壳，多呈土状，红褐、灰绿色。遇水软化后强度极低，故多成为上覆黄土滑动的滑带物质。上覆第四系，二者呈不整合接触。

第四纪松散堆积物以黄土为主。黄土在天水广泛分布，北部黄土厚度20－40m，南部厚度较小，多在5－10m。黄土沉积类型以风积为主，坡积、冲积及混合堆积黄土的分布也相当广泛。按黄土堆积时代，天水市区黄土以中更新世黄土及晚更新世黄土为主，缺失早更新世黄土。晚更新世马兰黄土（Q_3），厚度5－15m左右，分布广泛，浅黄－褐黄色，亚砂土，质地均一，松散具大孔性、垂直节理和湿陷性，土层中含钙质菌丝。在研究区内，该层黄土中未见古土壤层发育。中更新世离石黄土（Q_2），厚度10－30m，呈灰黄－黄褐色，亚粘土，质地较紧密。垂直节理发育，东研究区内可见2－3层古土壤，其中含钙质结核透镜体。经调查，本区黄土中发育两组垂直节理，即NE45°/SE∠70°和EW/S∠67°，节理张开，一般无充填。黄土地层，遇水易崩解，垂直渗透性良好，但储水性极差，勘查结果证实，黄土地层中地下水贫乏。除黄土外，由砂土、亚粘土及砂、卵砾石组成的第四系冲洪

积物广泛分布于河谷及沟中。各层黄土及其它第四系堆积物物理力学性质指标如表 2-1 所示。

表 2-1　天水市区主要地层物理力学性质指标

岩土名称	天然容重 γ (g/cm³)	天然含水量 W (%)	颗粒密度 G_s(g/cm³)	孔隙比 e	塑限 W_p (%)	液限 W_L (%)	塑性指数 I_p (%)	天然状态下 变形模量 E_0 (kPa)	天然状态下 泊松比 (μ)	饱和状态下 变形模量 E_0 (kPa)	饱和状态下 泊松比 μ	原状土直剪 C (kPa)	原状土直剪 φ (度)	饱和土直剪 C (kPa)	饱和土直剪 φ (度)	渗透系数 K (cm/d)
Q_3 黄土	1.45～1.56	15.3～20.9	2.72	1.11～1.16	18.9～22.6	29.2～32.6	10.3	11912～12268.26	0.29	10100.29	0.31	21	31.3	<15	28	2.972～5.530
Q_2 黄土顶部古土壤层	1.77～1.75	24.0～24.9	2.69～2.72	0.910～0.919	21.8～31.2	20.8～34.2	10.4～12.4	18213.54～18377.27	0.33	1370～7.69	0.35	64	30.5	<10	25.5	
Q_2 黄土（上）	1.76	20.7		0.88	18.32	29.11	9.79	26000	0.3	18692.31	0.35	35	31.6	<25	27.8	
Q_2 黄土中部古土壤层	1.94	23.7	2.67	0.7	18.0	28.0	10.0	34369.23	0.31	31153.85	0.35	71～76	31		<26	
Q_2 黄土（下）	1.86～1.88	20.7～22.8		0.765～0.78	17.76～23.6	29.01～34.8	11.25	40000	0.31	28000	0.35	49	33.4	30	26.1	0.215
已滑松散堆积体	1.54	18.3	10.1	0.840	17.6	27.7		<10000	0.3～0.35	<7500	0.35	0	<20.5			
河漫滩堆积物	1.40～1.69	20.0～28.1	2.7	>1.15	16.8～19.0	26.4～32.0	8～11	<10000	0.3～0.35	<7500	0.35	18	20.5～29	<5	<20	
第三纪（N）紫红色泥岩	2.11	23.5	2.75	0.61	21.5	38.5	17.0	11472.09	0.35	5875.86	0.42	96.9～200	23.2～34	19.3	3.7	

注：岩土样取自孟家山滑坡及锻压机床厂滑坡地段。

3. 地形地貌

天水市区南北两山夹峙，中间谷地平坦。梁、卯、残塬状黄土丘陵与河谷、沟壑相间构成天水市区地貌景观的总体格局。

（1）黄土堆积丘陵地形

主要分布于渭河两岸，呈剥蚀残留的黄土梁、卯、残塬地形。相对高差在 150--300m。基底为第三系“红层”，上覆 10—35m 黄土，其上沟谷发育，多呈“V”形谷，与河流垂直。沟谷下切与向源侵蚀作用强烈，山梁呈条带状，倾向河流、沟谷下游，顶面平缓，两侧坡度 15－20 度，且沟梁相间。冲沟多呈树枝状排列，在区内入耤、渭干流，冲沟两侧多有崩

滑地形分布。黄土丘陵地形为区内最高分水岭山地，以秦城区为中心，西部中梁山为耤河与罗玉沟分水岭，海拔1520m，相对高差300m；以东为北山二爷墩，为耤河与渭河分水岭，海拔1553.8m，相对高差440m。南侧属秦岭北坡山前梁状丘陵地，自南向北延伸，海拔1540－1630m，相对高差300m。山地丘陵、梁、梁之间多为河谷穿插。

(2) 侵蚀堆积河谷地形

分布在渭河及其支流耤河、葫芦河、榜沙河、散渡河、颖川河、牛头河、东柯河等区内较大河流两侧丘陵坡地前沿，由古河流侵蚀发育而成。基岩为第三纪红、绿色泥岩，上部为第四纪黄土覆盖。河谷区阶地异常发育，自下而上可分为Ⅵ级。河漫滩和Ⅰ、Ⅱ级阶地组成河谷平原地形，其中以Ⅰ级阶地最为发育，阶面开阔平坦，沿两岸均有分布，Ⅱ级阶地仅局限于河谷盆地之中，沿盆地两侧呈带状或小面积的零星分布。Ⅰ、Ⅱ级阶地多为近代洪积、冲积成因，为堆积阶地，是区内工矿企业及民宅建筑的主要基地。Ⅲ、Ⅳ级阶地由于冲积扇和侵蚀掩盖，保留多不完整。Ⅴ、Ⅵ级阶地仅见于渭河李家渠以东地段。Ⅲ级以上高阶地均为侵蚀基座阶地，一般高出河漫滩50m以上，高阶地以峡谷地区最为发育，有些高阶地由于为厚层黄土披盖，外表形态极似黄土丘陵，加之被深切的沟谷分割，多失去统一阶面，呈现梁状或台状地形。

各阶地的形成时代，以上覆黄土地层的不同相对划分，Ⅰ、Ⅱ级阶地为全新世前后的产物，而Ⅲ级以上为晚更新世早期形成，Ⅳ、Ⅴ级为中更新世早期形成，Ⅵ级以上为中更新世早期或早更新世形成。

(3) 冲洪积扇地形

冲洪积扇地形，在河谷两岸及其支沟沟口均有分布。区内较大支沟有：南沟河、水家沟、罗玉沟、吕二沟等。以冲洪积扇的生成时代可分为古、老、新洪积扇，其中以新、老洪积扇较为普遍，主要见于渭河、耤河两岸及其各大支沟沟口，有时表现为单个扇状形态，也有相互连接形成洪积扇裙。渭、耤河两岸冲洪积扇的发育，加剧了河道水流的摆动，造成河曲塌岸侵蚀，促使沿河两岸山地坡面的滑坡发育。

(4) 滑坡地形

研究区滑坡地形相当普遍，几乎在河谷岸边及所有冲沟中均有分布。依其发生时代，可分为古、老、新滑坡，新滑坡一般规模小，多发生在冲沟两侧，为近期生成，其滑坡形态保存尚好，但极不稳定。老滑坡分布最多，规模较大，且多连接成群，其生成时代与二级阶地相当，老滑坡较新滑坡稳定，在一般地区仅有小型崩塌产生，但受河流侵蚀地段，则易产生新滑坡。古滑坡分布较少，仅在马跑泉、市区中心一带有所分布，面积不大，古滑坡多在更新世早期生成，滑坡体均为黄土覆盖，因而滑坡形态不明显，并有数条冲沟发育。

4. 新构造运动与地震

天水地处我国六盘山南北地震带中段银川--天水－武都带和秦岭北缘东西地震带中部天水--兰州带的交汇复合部位，地震背景复杂，活动频繁。据有关资料，有史以来天水共发生4.5级以上地震57次，历史最大地震8级。按国家地震局烈度区划，天水地区地震烈度为Ⅶ度强。

天水地区新构造运动强烈，近期以间歇性的地表整体抬升为主，平均抬升速率0.6－0.8mm/a（据李玉龙等，1982）。

5. 水文地质特征

总体上天水市区地下水资源丰富，主要类型有：

(1) 松散岩类孔隙潜水

赋存于河谷及较大沟谷内的砂砾石及亚砂土层中，补给源主要为地表水和大气降水。向下游方向径流、运移。地下水埋深Ⅰ级阶地为1—5m，Ⅱ级阶地为10—20m，含水层厚度7—12m，但富水性不均。该潜水水质较好。

(2) 基岩裂隙潜水

赋存于研究区东西两端的老第三系碎屑岩和部分花岗岩的裂隙之中，为大气降水及地表水补给。该类潜水分布极不均匀，受地貌条件控制，多以泉的形式排泄。

古老滑坡地带，因地形平缓，有一定量地下水出露。发育于谷坡及塬、梁、卯边缘地带的新滑坡区内，地下水贫乏。故而，在天水市区，地下水对新滑坡发育无直接影响。

水对该区黄土滑坡发育的作用主要表现为大气降水通过黄土垂直节理及黄土孔隙渗入坡体，增大坡体容重，软化坡体物质，降低黄土及其古土壤层、黄土与第三纪泥岩接触带的抗剪强度，从而导致滑坡沿黄土或黄土中古土壤层或黄土与第三纪泥岩接触带发生。

三、气候特征与人类活动

1. 自然气候

研究区地处陇中黄土高原与陇南山地之间，地形复杂，大陆性气候特征明显，处于暖温带半湿润、半干旱气候的过渡带。

天水市区年平均气温10℃，降水主要为由西南季风与东南季风带来的水汽形成的夏季雨和地形雨，多暴雨。年平均降水量580mm、蒸发量1294mm，降水多集中在6—9月，占全年降水的70%。近40年来的气象资料表明，7—8月份日最大和小时最大降水量出现的比率最高，占全年的65%。9月份多阴雨天气，但降雨强度较小（图2-4，2-5）。降水年际分配有大约7—8年的周期，丰水年降水量可达600—800mm，平水年500—600mm、枯水年300—500mm。

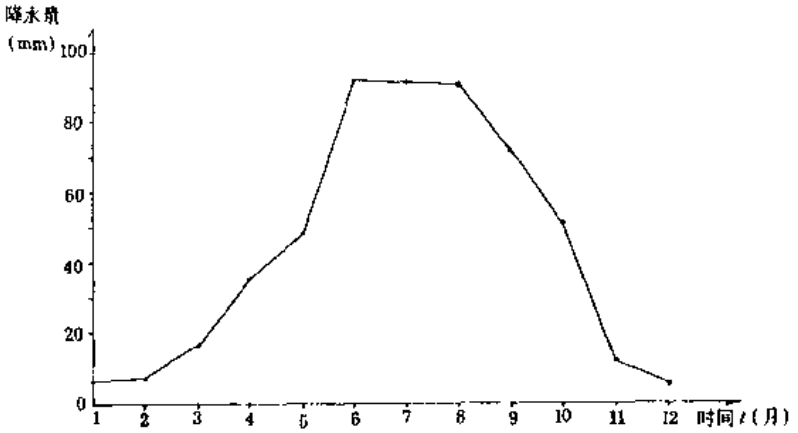


图2-4 天水市区月均降水量变化曲线

2. 人类活动

随着城市的发展，天水市区的人类活动无论在范围上、规模上及频度上都越来越强。不合理的人类活动非常活跃，因其诱发的滑坡灾害比比皆是。因此，控制不合理人类活动，保护市区地质环境的自然平衡，迫在眉睫。据初步调查，天水市区不合理的人类活动类型主要有：坡脚开挖、坡上填方、不合理人工排水、堵塞地下水排泄口等。



图 2-5　天水市区年降水量变化曲线

北道区城隍沟，由于不合理开挖取土，1985 年发生滑坡，毁坏民房二座。星灯厂通往福利区的公路北侧，由于当地农民大量取土，黄土坡脚已遭毁坏，处于上部的高压线杆茂茂可危。秦城区戒烟所后部，人为建房开挖坡脚，坡上排水沟渗漏，局部段暗沟淤塞，最终造成滑坡活动。

泰山庙滑坡，近几十年来，人们为修建房屋，在老滑坡体上大量开挖、填筑平台，堵塞原地下水出口，尤其是在滑体前部抗滑段的开挖切割，造成滑体抗滑力减弱，加速了滑坡的复活变形。此外，椒树湾滑坡、锻压机床厂滑坡等的活动变形均在不同程度上与不合理的人类活动有关。

第三节　天水市区黄土滑坡的分布规律

一、空间分布特征

1. 滑坡沿河谷两岸集中成带分布

据初步调查，流经天水市区的河流，渭河、耤河、南沟河、颖川河和东柯河、牛头河等河谷两岸滑坡成群出现（图 2-6）。表明天水市区内的滑坡有以流域为单元集中成带分布的特点。渭河在天水市区 280km² 面积内，发育滑坡 200 余处。

然而，受地形、地貌、岩性、构造等条件的控制，滑坡在河流两岸分布的数量和类型呈现不对称之特点。

秦城区：沿耤河两岸滑坡皆有分布。南岸集中分布在南沟河以东，滑坡类型以黄土滑坡为主，仅在个别冲沟内，有黄土-红层滑坡出现。南沟河以西及南沟河两侧，仅有零星的小型黄土滑坡分布。北岸集中分布在罗峪沟以东广大地区，滑坡类型以大型黄土-红层接触面滑坡为主，如椒树湾滑坡，泰山庙滑坡。而在罗峪沟以西，仅局部发育中小型黄土滑坡。

北道区：渭河南岸较为发育，而且以颖川河两岸尤为密集，在滑坡类型上，颖川河东岸主要为黄土-红层接触面滑坡，如胡家崖滑坡。而西岸则黄土滑坡和黄土-红层滑坡均有。渭河北岸只有零星的中小型黄土滑坡分布。

纵观全区，在大大小小的冲沟中，也密集分布着大量滑坡，而且以冲沟沟源部位和两侧为多。这是由于冲沟沟源比降小，汇水面积大，冲沟下切使第三纪泥岩在沟中出露，黄

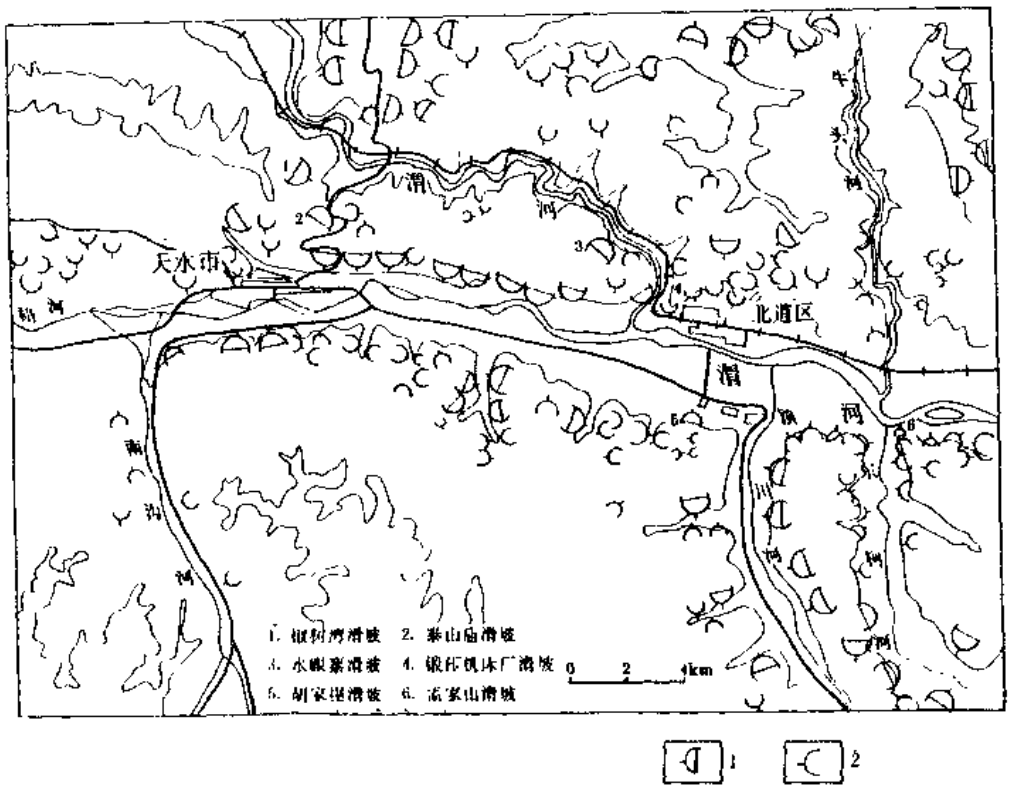


图 2-6 天水市区滑坡分布图

1. 黄土-红层滑坡；2. 黄土滑坡

土与粘土岩接触部常有悬挂泉水出露，使沟源容易产生滑坡，如簸箕洼南山、董沟等处滑坡。而老滑坡前舌节理发育，在长期地下水作用下，粘土岩呈饱和状态，发生塑性流动并局部复活，产生新的滑坡，如下曲弯古滑坡。冲沟两侧地段，沟坡出露第三纪泥岩，由于洪水掏冲坡脚，使两侧黄土及部分泥岩失稳而形成滑坡，如师家崖沟两侧的滑坡。

2. 滑坡沿构造线及强震区集中分布

经调查发现，天水市区大型滑坡群集中分布在活动断裂带附近。渭河谷地及其北部的葫芦河、牛头河流域，是近期活动断裂分布区，地形破碎，沟谷发育，具备了滑坡发育的空间条件，因此滑坡在此地成片出现。

在区内的强震区，同样也有规模较大的滑坡集中分布，而且滑坡规模和分布密度由震中向外围依次减小。如 1654 年天水县西南部地震，在长 40km，宽 25km 的范围内，诱发轴线长度大于 500m 的滑坡达 50 余处。

3. 滑坡沿具备一定条件的边坡集中分布

市区范围内，耤河、渭河两侧山体一般高达百米以上，边坡组成岩性不同，坡度各段不一，滑坡发育程度也不尽相同。

大面积厚层黄土分布地段，是黄土滑坡发育地带。这一地段黄土垂直节理发育，常形成十几米至几十米的悬崖，由于基岩埋藏较深，滑动面没有切穿至第三系，因此滑坡多产生在黄土内部，同时这些滑坡兼有崩塌性质，如城隍沟—石咀湾以北诸滑坡。

陡坡地段，黄土厚度小，第三系泥岩埋藏浅的边坡，是黄土-红层滑坡发育地带。由于黄土节理发育和大孔隙、湿陷等特性，使土体松散，强度降低，因此往往沿黄土与粘土界面上形成顺层滑坡，如耤河南岸吕二沟、龙王沟诸滑坡。

4. 滑坡在一定地层中集中分布

区内老第三纪砂砾岩及牛头河群变质岩系分布地段，很少有滑坡分布。滑坡多集中分布在新第三纪地层（红层）或第四纪黄土层中。

第三系红、灰绿色泥岩，又称“天水白土”，是一种结构致密胶粘性较高的粘土岩，具有较高的隔水性，故地表渗水常为粘土所隔并促使岩石软化而形成滑动面。区内大部分滑坡滑动面都产生在粘土层上，特别是当层面与山坡坡面一致时更是如此。

第四系黄土以其特殊的多孔性和湿陷性，在丰水期内因自重湿陷或崩解而产生裂缝并导致滑坡。

二、时间分布规律

天水市区的滑坡大多由降水和地震引起，据粗略统计占 90%左右，降水、地震一般涉及范围较广，因此，可以在同一时间及较大范围内诱发大量滑坡。如 1990 年 8 月 11 日天水市区一次特大降雨，造成天水市区耤河、渭河两岸大量滑坡活动，其中包括天水锻压机床厂滑坡、椒树湾滑坡、胡家崖滑坡和塑料厂滑坡等。

地震滑坡也是如此，1654 年天水 7.5 级地震，1718 年通渭 7.5 级地震和 1879 年武都 7.5 级地震，均造成了大范围的大量滑坡。

第四节　天水市区黄土滑坡的主要类型

如前所述，天水市区滑坡分布密集，各类黄土滑坡均有发育，但不同类型的滑坡其发育程度不同，因而造成的危害大小亦不尽一致。据初步调查，按滑面发育位置，在天水市区危害严重，发育广泛的黄土滑坡主要有以下二类。其它类型黄土滑坡则极少发育。

一、黄土滑坡

滑坡沿黄土中的某一层面滑动，滑坡物质为黄土。此类滑坡规模一般较小，多在 10 万 m^3 以下，但分布较广泛，约占市区黄土滑坡发育数量的 50%左右。多发育于陡坡前缘。就其滑移机制看，多为快速崩滑性黄土滑坡。因规模小，故造成的危害一般不大，以毁房为主。如簸箕洼南山滑坡和风动厂公路东侧滑坡及秦城区戒烟所滑坡等。

二、黄土-红层接触面滑坡

约占全区滑坡发育总数的 47%。该类滑坡多分布于河谷及大的沟谷两侧，规模大，多在 10 万 m^3 以上。故而，此类滑坡对天水市区危害最重。凡造成人员伤亡或重大经济损失或构成潜在重大威胁者几乎均是此类滑坡。椒树湾滑坡、泰山庙滑坡、塑料厂滑坡、胡家崖滑坡、锻压机床厂滑坡、孟家山滑坡、吕二沟滑坡、罗玉沟滑坡等皆属此类。就其滑移机制分析，因老滑坡滑面平缓，滑带塑性高、强度低、滑体重心低，能量小等，如椒树湾滑坡、泰山庙滑坡，胡家崖滑坡（图 2-7），故而再度复活呈缓慢蠕滑性。新滑坡则因滑体高势能、高重心，及滑面相对较高强度等，活动多表现为快速崩滑性，如锻压机床厂滑坡。在天水市区，后者造成的危害及影响远大于前者，如锻压机床厂滑坡造成 7 人死亡，6 个车间被毁，而椒树湾、泰山庙滑坡却以造成房屋开裂、公路变形等为主要危害。因此，在天水市区研究崩滑性黄土-红层接触面滑坡社会经济意义更大。

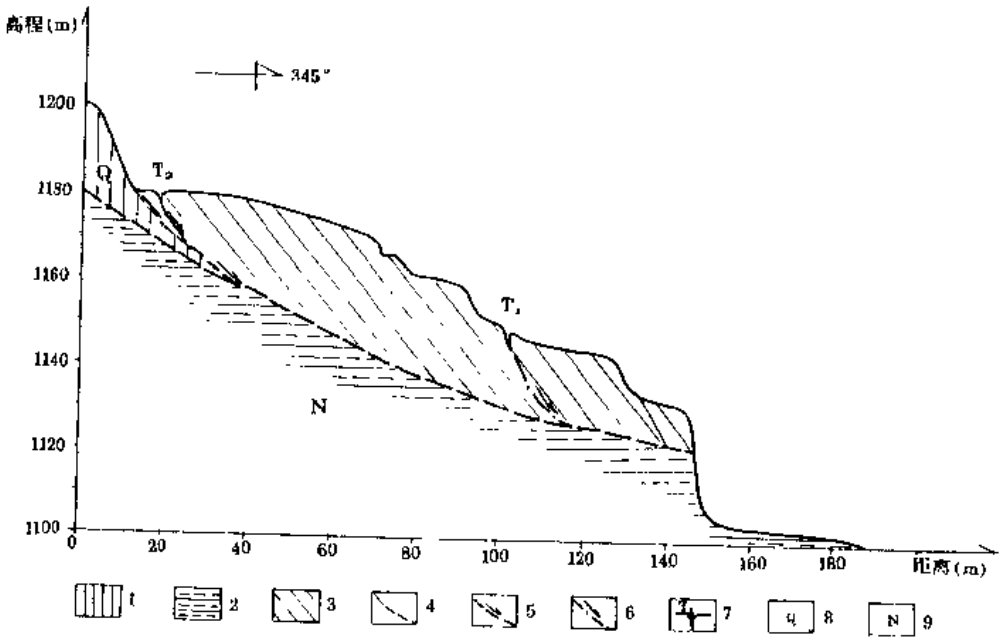


图 2-7　胡家崖滑坡剖面图

1. 黄土；2. 泥岩；3. 滑坡堆积物；4. 推测地层界线；5. 推测老滑动面；
6. 推测新滑动面；7. 裂缝；8. 第四纪；9. 新第三纪

第三章　滑坡变形破坏机理研究

滑坡的变形破坏是具有一定特殊组构的斜坡岩土体在内外因素长期作用下，岩土体内应力和强度不断变化，相对消长的结果。弄清滑坡的变形破坏机理是正确预测滑坡发展趋势的前提。为了能对崩滑性黄土-红层接触面滑坡的变形破坏机理有一深入的认识，以天水市孟家山滑坡和锻压机床厂滑坡为解剖点，从地质分析、相似材料模型模拟实验、弹塑性有限元数值模拟三方面对此进行了系统的综合研究。

第一节　滑坡的发育特征与变形破坏的地质模式

一、滑坡的发育特征

滑坡的发育特征决定于构成滑坡的滑体与滑带（面）的发育状况、滑坡的形态及滑坡边界条件等，正是这些方面的特殊组合才构成了各类具有不同性质的滑坡。

1. 滑体

研究区内崩滑性黄土-红层接触面滑坡滑体均由黄土组成，厚 15—40m（图 3-1，3-2），

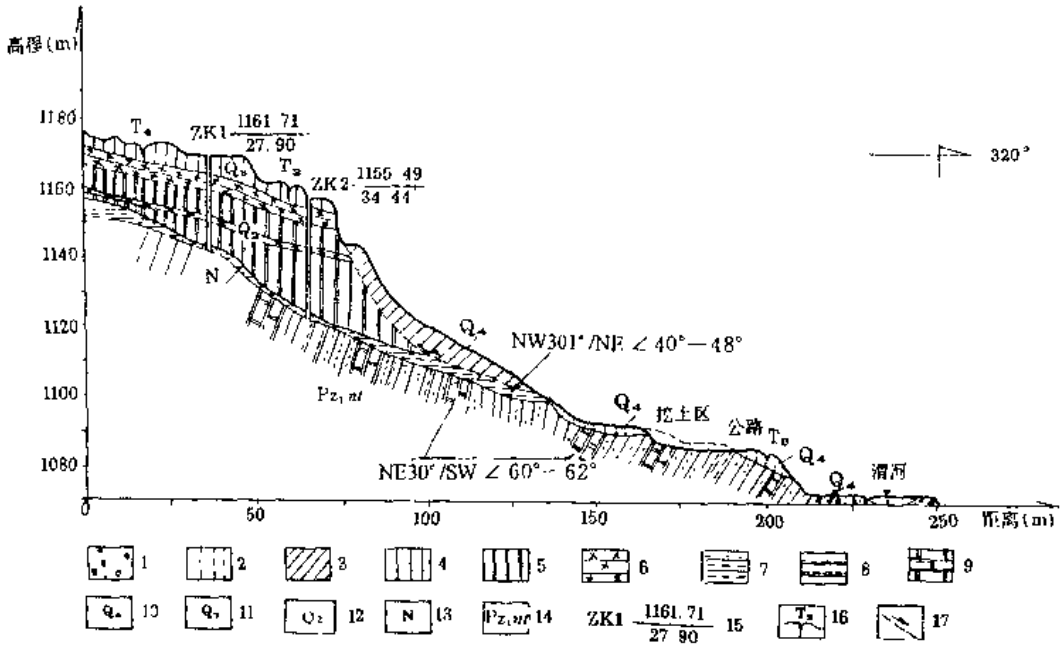


图 3-1　孟家山滑坡纵剖面图

1. 砂卵砾石；2. 崩、坡积土；3. 滑坡堆积物；4. 马兰黄土；5. 离石黄土；6. 古土壤层；7. 泥岩；8. 片麻岩；9. 石英岩＋大理岩；10. 第四纪全新世；11. 第四纪晚更新世；12. 第四纪中更新世；13. 新第三纪；14. 下古生代牛头河群；15. 钻孔及其编号 $\frac{\text{标高}}{\text{孔深}}$；16. 裂缝及其编号；17. 推测滑面

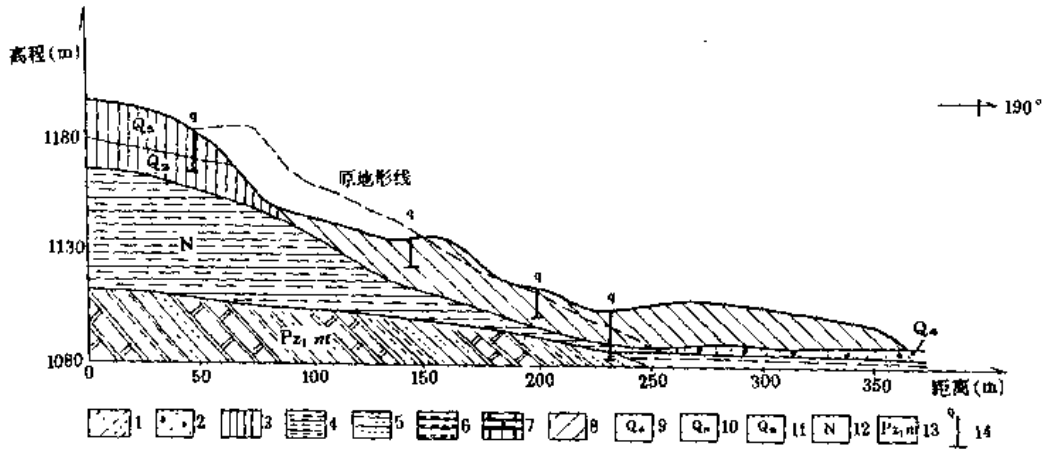


图 3-2　锻压机床厂滑坡纵剖面图

1. 亚粘土；2. 砂卵砾石；3. 马兰黄土；4. 离石黄土；5. 泥岩；6. 片麻岩；7. 大理岩＋石英岩；8. 滑坡堆积物；9. 第四纪全新世；10. 第四纪晚更新世；11. 第四纪中更新世；12. 新第三纪；13. 下古生代牛头河群；14. 探井

其结构与物理力学性质完全受控于原状黄土。总体特征与原状黄土相同，结构疏松大孔隙和垂直节理发育，并由上、下两部分组成，下部中更新世黄土，厚 10—30m，含 2－3 层古土壤，上部晚更新世黄土，厚 5—10m。野外调查结果证实，滑坡后缘裂缝均顺沿黄土垂直节理发育。由于各滑坡的微地貌形态和周围小环境不同，因而滑体物质的容重、湿度等略有差异。如，由于锻压机床厂滑坡上部山坡有农灌作用，故滑体容重、含水量大于孟家山滑坡。滑动后，滑体前部碎裂、松散，后部相对完整，表明此类滑坡滑动速度快，滑动过程中既滑亦崩，并显示滑坡能量释放口在前部，即滑面在剪出口处最后贯通。

2. 滑带（面）

野外调查及钻孔勘探资料均清楚表明，崩滑性黄土-红层接触面滑坡的滑带（面）具有比较明显的三段式结构：即后缘段、主滑段和前缘段。后缘段，倾角陡，50°—80°，追踪黄土中的垂直节理发育，性质受控于黄土的性质。主滑段，即滑带（面）的中段，顺沿黄土与第三纪泥岩接触带（面）发育，其产状取决于滑坡发育处接触带（面）的产状。但与其它类型滑坡滑带（面）倾角相比，该类滑坡滑带（面）总体倾角较陡，显示滑坡重心位置较高。如在锻压机床厂滑坡处，接触面产状NW300°/SW∠25°—10°，在孟家山滑坡处其产状为：NW301°/NE∠40°—48°，前缘处倾角 22°。设于孟家山滑坡内的钻孔倾斜仪监测结果显示（图 3-3，3-4，3-5），孟家山滑坡正沿黄土与第三纪泥岩接触带向坡下蠕动变形，最大滑动影响带最厚 2m 左右。滑带（面）前缘段倾角平缓，沿坡脚最小阻力部位斜穿黄土层发育（锻压机床厂滑坡），或仍顺沿土、岩接触面发育（孟家山滑坡）。由于主滑带的发育特征对滑坡的变形活动性质起着主导控制作用，故在此对其发育特征作一重点论述。

（1）物质成分

钻孔岩芯及野外出露情况显示，黄土-第三纪泥岩接触带物质主要由松散的泥岩强风化物组成，夹少量黄土团块。颗粒分析结果表明，此带物质中粘粒（<0.005mm）含量 52%，粉粒（0.05—0.005mm）含量 41.2%，砂粒（>0.05mm）含量 6.8%，为重粘土类土。正是这种粘土质软弱带的发育，对滑坡滑带（面）的性质及滑坡的变形活动特征产生了巨大

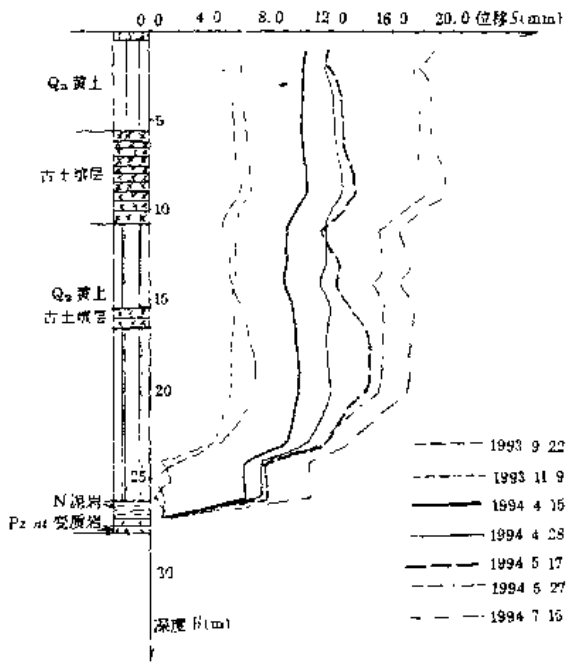


图 3-3 孟家山滑坡 ZK_1 钻孔监测曲线

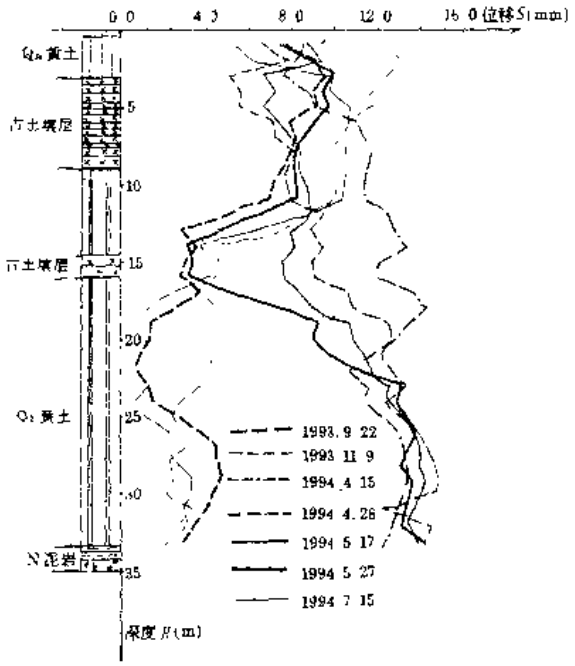


图 3-4 孟家山滑坡 ZK_2 钻孔监测曲线

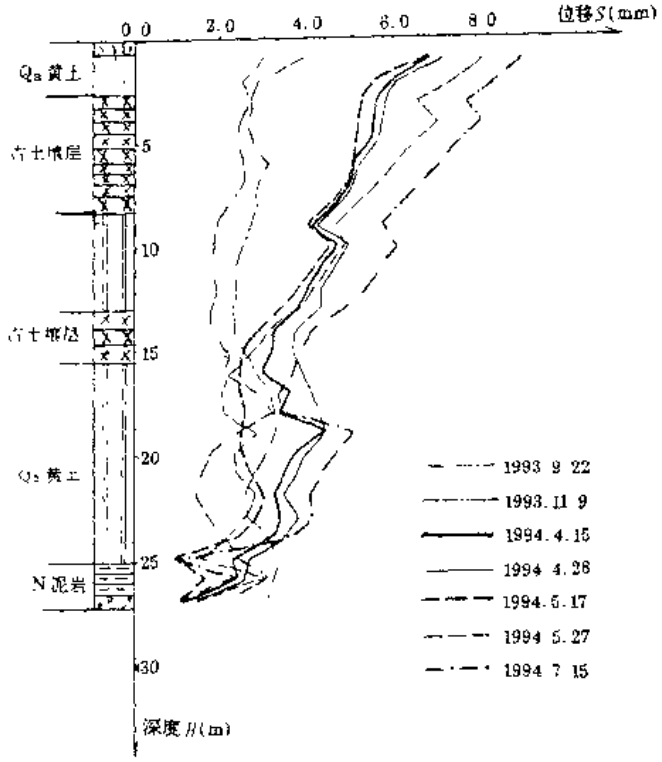


图 3-5 孟家山滑坡 ZK_3 钻孔监测曲线

的影响。

(2) 物理力学性质

据勘查和岩土性质测试结果，上部黄土含水量很低，土-岩接触带物质隔水性极好，故

在此接触带附近，土体含水量增大，甚至达可塑软塑状（锻压机床厂滑坡），静力触探贯入阻力比 P_s 值由黄土地层中的 4000kPa 突降至 2000kPa 左右（据汤兰亭，1992），表明黄土-第三纪泥岩接触带先天软弱，为滑坡滑带（面）的发育提供了极好的物质条件。

孟家山滑坡主要物理力学性质指标如表 3-1 所示。由表中可见，滑带土塑性指数 I_P=17，为典型高塑性土。力学强度较低，在天然状态下，抗剪强度指标 C、φ 值的峰残差值较大，表明在新滑坡孕育过程中将有一定的能量积蓄。值得指出的是，此带土体对湿度变化甚为敏感（图 3-6，3-7），随含水量增加，C、φ 值降低，当含水量大于塑限时，C、φ 值以较小幅度缓慢降低，否则，迅速增大。

表 3-1　孟家山滑坡黄土-泥岩接触带主要物理力学性质指标

天然容重 r (g/cm³)	天然含水量 W (%)	颗粒密度 Gs (g/cm³)	孔隙比 e	塑限 W_P (%)	液限 W_L (%)	塑性指数 I_P (%)	原状峰值抗剪强度指标		原状残余抗剪强度指标		原状		饱和峰值抗剪强度指标		饱和残余抗剪强度指标		饱和	
							C (kPa)	φ (度)	C' (kPa)	φ (度)	变形模量 E_0 (kPa)	泊松比 μ	C (kPa)	φ (度)	C (kPa)	φ (度)	变形模量 E_0 (kPa)	泊松比 μ
2.11	20.5	2.75	0.61	21.5	38.5	17	96.9	23.2	53	7.9	11472.1	0.35	19.3	3.7	16.1	1.8	5875.9	0.42

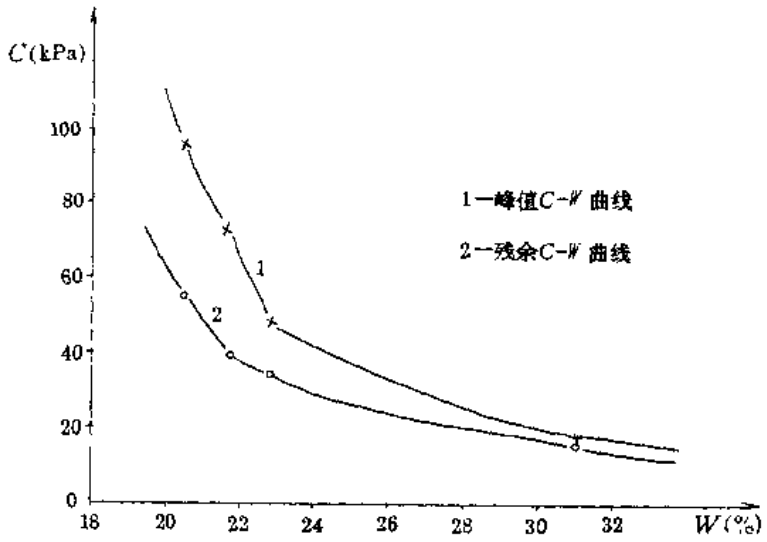


图 3-6　孟家山滑坡滑带土内聚力与含水量关系曲线

3. 滑坡的形态与边界条件

滑坡总体坡度较陡，具有较好的势能储备，是崩滑性黄土-红层接触面滑坡的另一特性。孟家山滑坡呈后缓前陡地形（图 3-8、照片 1、2、3），滑坡后部，呈台阶状，平均坡度 20°；由于前缘已产生崩塌，故呈陡坡状，最大坡度达 80°左右。锻压机床厂滑坡为近连续斜坡地形，平均坡度 35°（图 3-9，照片 17），后缘呈陡坡。局部呈陡崖，高 20—40m，坡角 40°—68°。滑坡后缘均顺沿黄土垂直节理发育，两侧多以冲沟为界，或由后缘裂缝弧形发育而成，孟家山滑坡即是如此。

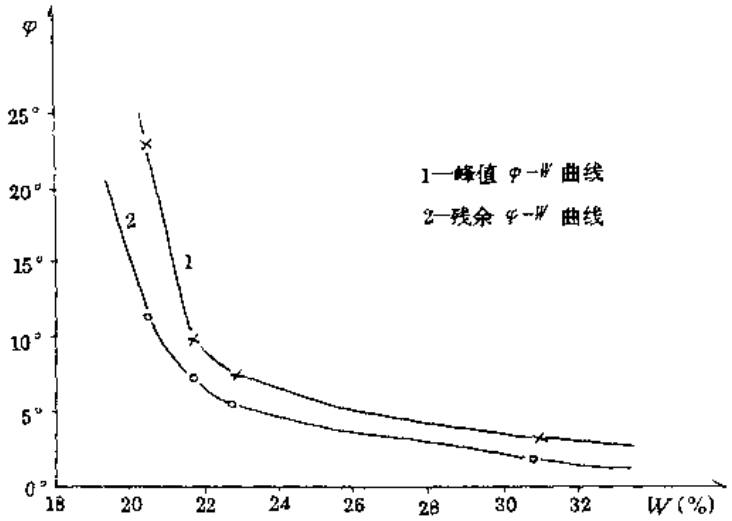


图 3-7　孟家山滑坡滑带土内摩擦角与含水量关系曲线

二、滑坡的变形破坏特征

经野外调查及访问发现，崩滑性黄土-红层接触面滑坡变形的宏观表现以后缘拉裂缝成弧形不断扩展，前缘或后缘时有断续崩塌为主要特征。与其它类型堆积层滑坡相比，在临滑阶段之前，拉裂缝扩展速率极小，坡体剪出口无任何反映。进入临滑阶段后，拉裂缝扩展速率远大于它类堆积层滑坡，滑坡剪出口似在起滑时才最后贯通。现结合孟家山滑坡和锻压机床厂滑坡的变形破坏过程，对此类滑坡的宏观变形特征加以详述。

1. 孟家山滑坡

该滑坡位于东柯河与渭河交汇处的渭河右岸，发育于黄土梁边斜坡之上，斜坡最大高差 117m，平均坡度 45°，坡体前缘 50°— 80°（图 3-8，照片 1、2、3）。坡上前部为荒地，后部为果园，天水—社棠 11 万伏高压输电线路从坡上穿过（照片 12），坡下 1100m 高程处，强风化第三纪泥岩、下古生代牛头河群变质岩出露（图 3-8），坡脚为人工采土、石场，天水—伯阳简易公路从坡脚通过，即将动工的天水－宝鸡 310 国道亦正从坡脚通过。在人为开挖活动和降雨影响下，坡体前缘时常发生小型滑塌，使公路交通受阻。据访问，1975 年夏，前缘滑塌，从坡上推下 4 人，后救起 3 人，死 1 人；1990 年 10 月，又一次小滑塌，阻断公路；1992 年 6 月 24 日晚，前缘再一次滑塌万余 m^3 土体，堵断天--伯公路，且部分土体滑入渭河。此次滑塌后，使坡体前缘坡度加大至 80°左右（照片 2、3）。同时，在坡上发现规模不等的 4 条弧形拉张裂缝（照片 11、图 3-8）。显示坡体正处于蠕动变形之中，其中以 T_2、T_4 裂缝规模最大。当时，T_2裂缝宽 20—40cm，落距 30—40cm，裂缝中部最宽（40cm），落距最大（40cm），裂缝成弧形延伸长约 120m，向两端裂缝宽度、落距逐渐减小，可见深度大于 5m（照片 5、6、7）；T_4 裂缝宽 2—30cm，落距 5—20cm，裂缝中部宽 18—30cm，落距 10—20cm，裂缝延伸与 T_2 平行，向两侧宽度、落距亦逐渐缩小（照片 8、9），沿 T_4 裂缝，已形成两处落水洞，洞径 1--1.2m，深度大于 1m（照片 10）。T_1 裂缝发育于坡体前缘西侧，走向 NW290°，宽 26--50cm，落距 30cm，与 T_2 裂缝相交（图 3-8），将前缘坡体切割成危险块体（照片 4），1993 年 10 月 22 日，T_1 裂缝前部土体发生少量崩滑。T_3

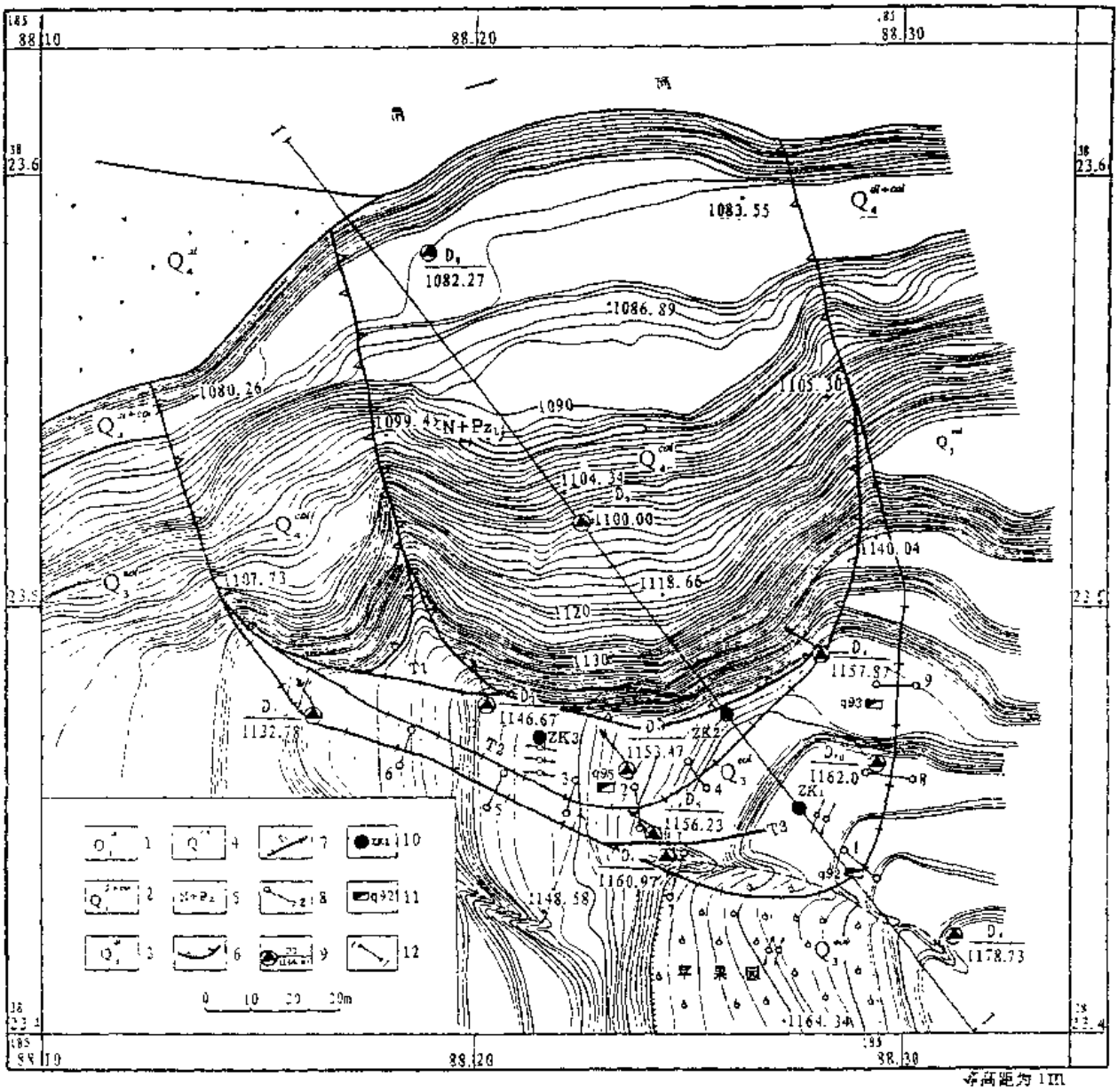


图 3-8 孟家山滑坡平面地质图

1. 第四纪全新世滑坡堆积物；2. 第四纪全新世崩坡积物；3. 第四纪全新世冲积物；4. 第四纪中更新世风积黄土；5. 新第三系＋下古生界；6. 滑坡周界；7. 拉裂缝及其编号；8. 裂缝观测桩及其编号；9. 地形变测量点及其编号和位移矢量；10. 钻孔倾斜仪观测点及其编号；11. 探井及其编号；12. 剖面线

裂缝产状 NE5°/SE∠78°，呈闭合状延伸交于 T_4 裂缝。据实地勘查，目前变形坡体平均厚度约 25m，最大厚度 34m，最小厚度 20m，纵长 60m，平均宽度 100m，变形坡体方量约 20 万立方米。连续 3 年的野外调查、监测结果表明，孟家山滑坡正处于蠕动变形之中，但目前变形速率不大，T_2、T_4 裂缝尚未与坡缘贯通，滑坡前缘坡脚无变形迹象。

2. 锻压机床厂滑坡

位于天水锻压机床厂北侧山体上，地处渭河左岸黄土塬边斜坡地带。滑坡高差 95m，宽 300 余米，长 145—200m，面积 $5.15\times10^4m^2$（照片 17）。坡缘上为农田，长年靠引水渠道灌溉、耕植。坡脚下为天水锻压机床厂生产区，天水—清水公路通过厂区西北部盘坡而上，

路边配置断续衬砌的排水渠道。天水锻压机床厂为60年代修建的“三线”工厂，建厂时为平整厂区、修建厂房及铁路专用线，将原坡脚向内开挖数十米，修建天-清公路时，又在坡体上清土削坡，使公路上方形成陡坡，甚至陡崖，从而使坡体的原始形态大为改变，坡体内原已平衡的应力状态亦随之变异。加之坡上农田灌溉、排水沟渗、漏水，使滑体、滑带（面）增重、软化，坡体逐渐开始变形。1987年发现坡体后缘拉裂变形，铁道部第一勘测设计院曾多次建议实施治理措施，但因种种原因一直未能成行。以后，裂缝被耕地覆盖，在降雨冲刷下，演变成大小不等的串珠状落水洞。天—清公路边排水沟亦与同期发现多处落水洞，滑坡后缘公路上方陡坡时常出现局部滑塌、断路现象。1990年雨季，路边排水沟的落水洞连成串珠状，厂方曾用石料填埋落水洞，但效果甚微。直至1990年8月11日，在2时30分的113mm百年一遇特大暴雨诱发下，于上午11时50分，坡体从坡脚部位剪出，

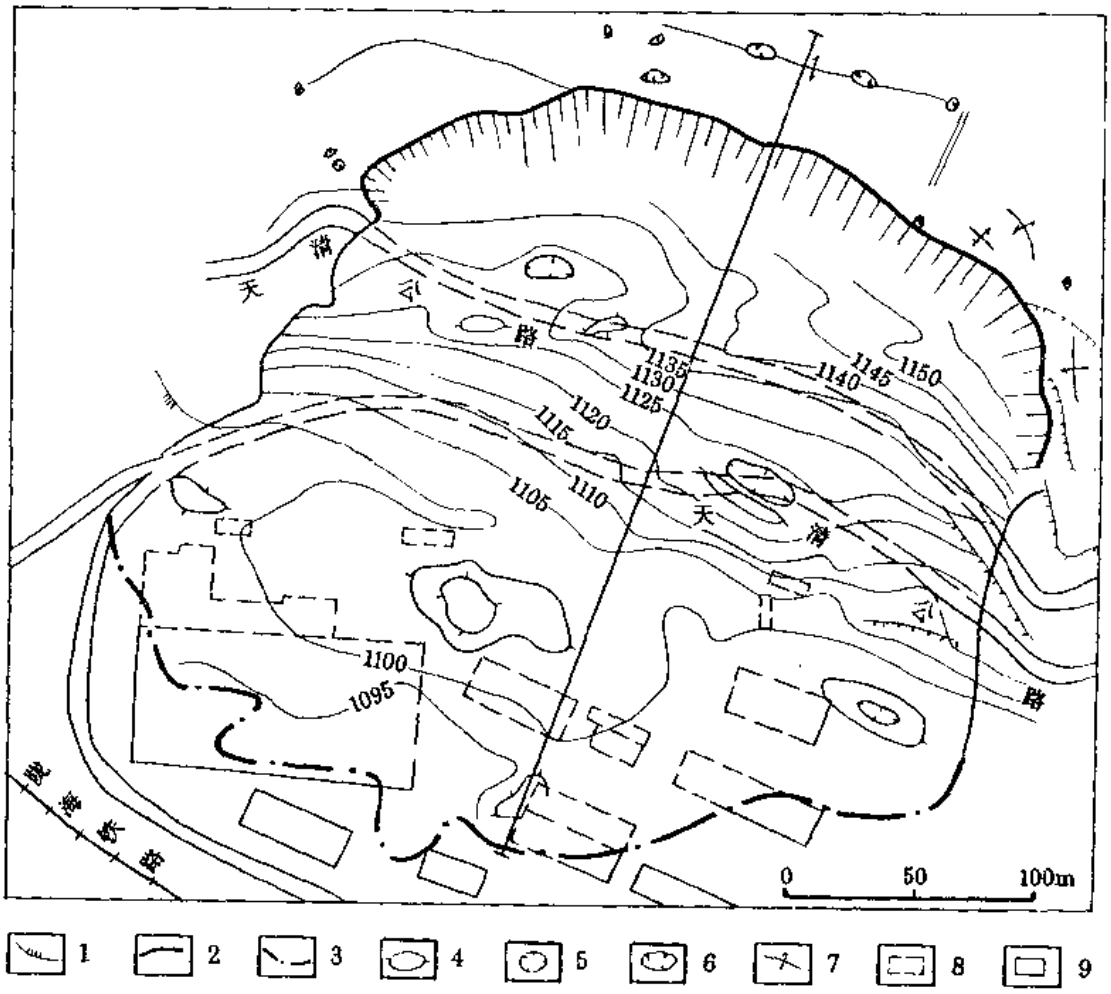


图3-9 锻压机床厂滑坡平面图

1. 四级阶地；2. 滑坡后壁；3. 滑坡前缘；4. 滑坡鼓丘；5. 滑坡洼地；6. 落水洞；7. 滑坡裂缝；8. 被破坏的厂房；9. 未破坏的厂房

约200万立方米土体突然向厂区滑动，最大滑距118m，滑动过程在瞬间迅速完成。滑动后，坡体前部物质碎裂松散，滑体中轴部位受建筑物阻挡形成隆丘状堆积，后部滑体及滑坡形态则相对完整（照片17）。锻压机床厂滑坡的滑动，直接造成7人死亡，摧毁6个生产车间

及其生产、生活设施多处，使正处兴旺发展之中的锻压机床厂陷入瘫痪状态，社会经济影响极大。国家不得不拨款4000万元，将厂区迁址。坡体滑动后，又牵引后部未动坡体变形，顺滑坡后缘形成二条弧形拉张裂缝，新变形坡体于1990年11月滑塌，压死农妇1人。

三、滑坡变形破坏的地质模式

从上述的滑坡变形破坏特征可见，崩滑性黄土-红层接触面滑坡的变形破坏经历以下几个发展过程：

1. 坡体蠕动---后缘拉裂

由于陡峻坡形或因前缘人为开挖坡脚，导致坡体应力状态改变，坡体向临空方向蠕动，以适应新的应力状态。随着坡体蠕动，黄土中既存的、具有优势方位的垂直节理被拉开，在宏观上呈现后缘拉张裂缝。

2. 坡体蠕动---滑带自中部向两侧发展

坡体向临空方向蠕动，自表及里发展，致使下层土体受压，应力增大。因黄土-红层接触带在坡体中强度最低，故滑带沿此逐渐发育。因滑体中部重心部位，受压最大，因此，滑带最早在重心断面处的黄上-红层接触带上发育成熟，应力由此处向两侧释放传递，滑带由中部向两侧逐渐发展。由于滑带物质软弱，所以坡体蠕变过程缓慢而不明显。在坡体蠕变过程中，受降雨影响或因坡体强度衰减，陡坡部位（前缘或后缘）时常发生小型崩滑，因而滑坡后缘拉裂及坡面变形在缓变增长的同时，呈现不规则突跃变化。

3. 剪出口形成-坡体突滑

滑带不断发展，最终在剪出口全面贯通。滑坡变形过程中积蓄的能量在此突然释放，坡度陡、重心位置高的斜坡体以崩滑方式快速下滑。能量在坡体前部的突然释放，导致滑体前部破碎，后部结构、形态则相对较完整。

第二节　滑坡变形破坏机理的相似材料模型实验研究

为了直观表现崩滑性黄土-红层接触面滑坡的变形破坏过程，外界因素对滑坡的效应，验证宏观调查中对滑坡变形破坏模式的认识，本项研究中，在地质调查的基础上，采用相似材料模型对滑坡变形破坏过程和机理进行了物理实验模拟研究。

一、原型选取

根据地质调查结果，选取滑坡特征明显，目前仍在变形活动之中的孟家山滑坡为模拟实验原型。该滑坡的基本地质特征上节已述，不再重复。确定1993年7月滑坡勘查时的状态为建模依据。

二、模型设计

1. 模型比例尺与模型尺寸

限于研究经费和实验条件，实验模型取二维平面模型。确定模型的几何比例尺为1：100。据此，孟家山滑坡的模拟范围为：长260m，宽18m，高110m，实验模型尺寸为：长2.6m，宽0.18m，高1.10m。

2. 相似系数、相似指标、相似关系

根据相似原理，实验模型中各相似系数有如下关系：

$$C_E=C_\sigma=C_T=C_S=C_r\cdot C_l \tag{3-1}$$

$$C_f=1 \tag{3-2}$$

$$C_\varepsilon=1 \tag{3-3}$$

诸式中：
$$C_E=\frac{E_p}{E_m},\ C_\sigma=\frac{\sigma_p}{\sigma_m},\ C_T=\frac{T_p}{T_m},\ C_r=\frac{r_p}{r_m},$$

$$C_l=\frac{l_p}{l_m},\ C_f=\frac{f_p}{f_m},\ C_\varepsilon=\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_m} \tag{3-4}$$

其中：C 为相似系数，E、σ、T、S、r、l、f、ε 分别为变模、应力、强度、位移、容重、几何尺寸、摩擦系数及应变。

P 代表原型，M 代表模型。

前述模型设计中，已确定几何相似系数 $C_l=100$，为便于配比材料，此次实验中确定容重相似系数 $C_r=1$，则由式 (3-1)，其它相似系数随之而定，该次模拟实验的相似条件为：

$$C_E=C_\sigma=C_T=C_S=C_r\cdot C_l=100 \tag{3-5}$$

表 3-2　孟家山滑坡模型材料及各层土体物理力学性质指标

岩土体名称	原型		模型		实际应用		模型材料配比
	γ (g/cm³)	E (kPa)	γ (g/cm³)	E (kPa)	γ (g/cm³)	E (kPa)	
Q_3 黄土	1.56	11912 ～ 12268	1.56	119 ～ 123	1.63	128.21 ～ 140.03	重晶石粉 60% 粘性土 30% 水 20%
Q_2 顶部古土壤	1.75～1.77	18213.54 ～ 18377.27	1.75～1.77	182 ～ 184	1.80	181.80	重粉 65% 滑粉 20% 水 10% 机油 5%
Q_2 黄(上)	1.76	26000	1.76	260	1.75～1.80	227.27 ～ 230.89	重粉 60% 粘性土 20% 机油 7.5% 水 7.5%
Q_2 中部古土壤	1.94	34269.23	1.94	343	1.91～2.01	232 ～ 256	
Q_2 下部	1.86	40000	1.86	400	1.89～2.03	375 ～ 400	重粉 70% 粘性土 10% 云母粉 10% 水 10%
已滑松散堆积体	1.54	<10000	1.54	<100	1.4	200	重粉 20% 粘性土 60% 机油 5% 水 15%
河漫滩堆积体	1.46～1.6	<10000	1.46～1.6	<100	225.90		
新第三纪(N)紫色泥岩	2.11	11492.09	2.11	115	1.91～2.15	184 ～ 204	重粉 50% 粘性土 30% 机油 10% 水 10%

3. 模型材料

对于坡体中的黄土材料及第三纪泥岩，采用重晶石粉、粘性土、滑石粉、云母粉及机油、水等按不同配比，以 $C_r=1$ 假设进行配制，模型材料的配比及相应的力学指标如表 3-2 所示。从表中可见，模拟材料基本满足 $C_r=1$ 的相似材料假设。第三系泥岩与黄土接触带（面）强度低，为滑坡滑带（面）发育部位，为模拟其指标，在泥岩与黄土接触面部位垫放一层米格纸和电光纸，其摩擦系数为 0.38－0.42，较好地模拟了滑坡滑面的力学条件或抗剪摩擦系数。泥岩下伏的下古生代牛头河群变质岩因不参与滑坡发育过程，故视为坚硬基底，对其不按相似比例设计。

4. 模型制作

坚硬基底以上相似材料模型部分，采用夯实方法逐层进行。滑体上部的 T_2、T_4 拉张裂缝，据其实际发育情况，模型逐层夯实成型后，在相应部位用钢锯锯出上大下小之裂缝。制作完成后的实验模型如照片 13 所示。

三、实验量测系统

为观测模型的变形破坏过程，在模型中布点，以一定量测方法量测其位移变化过程。

1. 量测方法

根据试验目的及滑坡和实验的具体条件，本次实验采用了以下几种观测方法：

（1）千分表

用于测量滑坡各点的垂直位移，共设置了 5 个测点。

（2）电阻式电测位移计

用于量测滑坡各点的水平位移，共布设了 14 个测点。并在位移计上配以 UCAM-8C 型自动检测仪（照片 14），自动巡回检测和自动处理所测数据，打印检测结果。

（3）白光散斑测试

主要用于量测滑坡初始位移矢量场的特征。受测试方法及实验条件的制约，测试范围仅局限在 T_2 和 T_4 裂缝之间（图 3-10）。

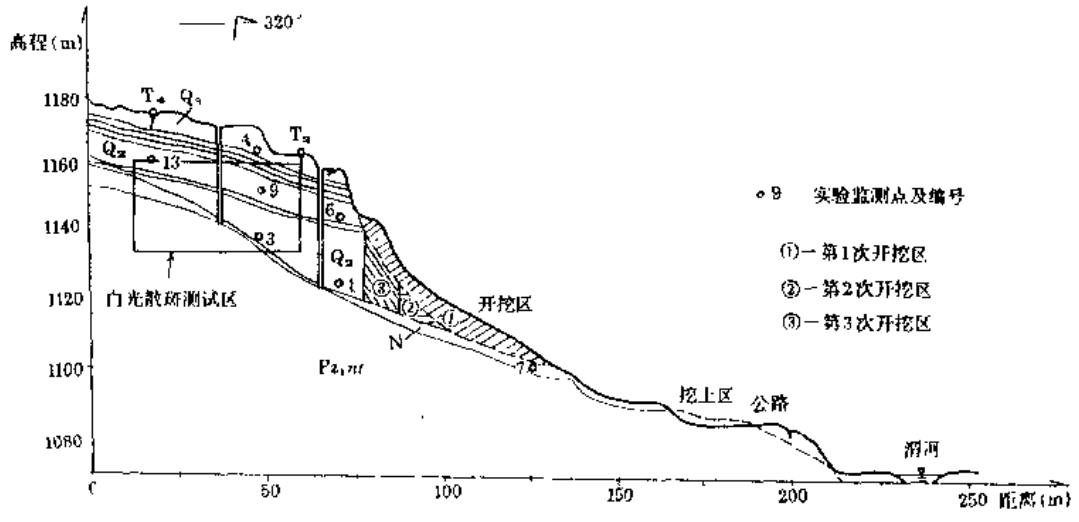


图 3-10 孟家山滑坡模型试验设计图

（4）坐标网格

为了宏观上了解滑坡变形，在模型上划分 5cm×5cm 网格直接观察滑坡的变形。

(5) 摄影

对于滑坡的破坏及运动过程，以摄影方法直观反映其变化状况。

2. 量测点的布置

为全面了解滑坡各层及各部位的变形特征及变形破坏过程，以从上到下、从前至后为原则，沿滑坡各层面部位布设量测点，如图 3-10 所示。

四、实验过程

模型制作完毕，测量装置安装就绪后，正式试验于 1994 年 4 月 14 日开始。为模拟滑坡在原始状态、降雨及人类活动影响下的变形特征与过程，整个试验分三个阶段。

1. 原始状态下滑坡变形模拟实验阶段

此阶段自 1994 年 4 月 14 日至 18 日。以白光散斑、千分表、电测位移计量测，无任何外界因素作用时，滑坡的变形状况及其动态趋势。

2. 降水对滑坡变形影响的实验阶段

此阶段自 1994 年 4 月 18 日至 5 月 10 日。用量具喷洒水方法模拟降水。其间降水分两期：4 月 18 日 -27 日为第一期，4 月 28 日 - 5 月 4 日停止降水，5 月 5 日至 5 月 10 日为第二期降水。模拟降水后，涂于滑坡表面的银粉被破坏，故在此实验阶段主要以千分表和电测位移计量测滑坡的位移变化。

3. 人类活动对滑坡变形影响的实验阶段

针对孟家山滑坡特征，逐渐开挖坡脚，模拟人工开挖坡脚对滑坡变形的影响。开挖方式如图 3-10。开挖过程分三次进行，第一次于 5 月 11 日，清除坡面已滑的松散堆积物，第二次和第三次开挖均先后于 6 月 2 日进行，开挖后滑坡迅速滑下，整个实验即告结束。

五、原状条件下滑坡的变形特征

1. 滑坡位移矢量场的特征

由图 3-11 清楚可见，滑体范围内位移矢量均朝向坡下，各点位移矢量方向的倾角均在 20°—40°之间，此倾角恰与各点所对应的黄土与第三纪泥岩接触面倾角一致，表明滑坡正沿黄土与第三纪泥岩接触面蠕动变形，此与实际调查、勘探及监测结果完全吻合，进一步证明了野外实际判断的正确性。

2. 滑坡变形的发育分布规律

图 3-12、3-13、3-14 显示，无任何外界因素影响时，滑坡各处位移量极小。比较各处位移量值可以看出，T_2 裂缝位移量大于 T_4 裂缝，位于滑坡前缘的 6# 点位移量大于其它部位，其它部位测点几乎不动。6# 点垂直位移量大于水平位移量。这种变形特征表明，滑坡前缘表部具有崩塌之势。滑坡前部位移量大于后部，显示滑坡变形具有以 T_2 裂缝为界的解体崩塌趋势。此与滑坡实际表现完全一致。在滑坡深部滑面处，3# 点位移大于 1# 点位移，表明滑面变形逐渐向前发展。据白光散斑测试结果（图 3-11），T_2 与 T_4 裂缝之间坡体，位移量值上表现为从 T_4 裂缝至 T_2 裂缝，位移量逐渐减小，即后部位移量大于前部位移量，随深度增加，位移量减小，表明滑坡变形自表层向深部逐渐发展。模型实验揭露的滑坡变形规律与实际对滑坡变形破坏地质模式的分析完全一致，从而证明前述分析的正确性。

六、外界因素对滑坡变形破坏的影响

1. 降水对滑坡变形的影响

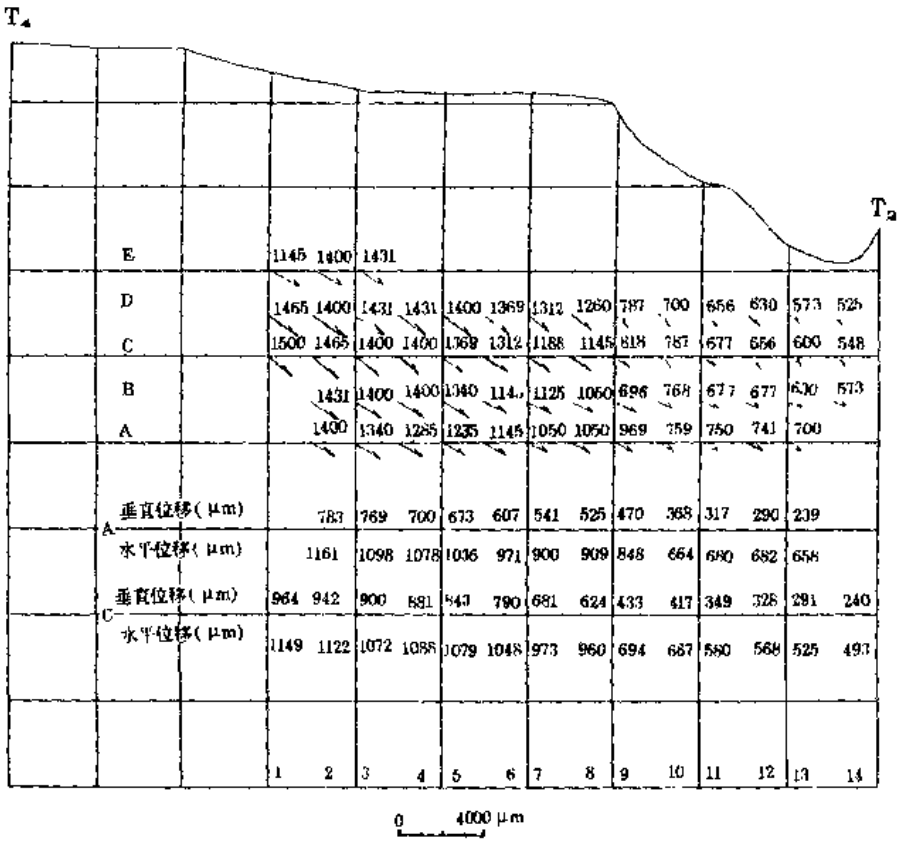


图 3-11　滑坡位移矢量图

(1) 降水与滑坡变形的关系

由图 3-12，3-13，3-14 及 3-15 清楚可见，模拟降水后，滑坡各处位移均明显增大，且位移变化规律与实验降水规律基本一致，表现为随降水量增加，各处位移量加大，降水停止，位移趋于平稳。说明降水对滑坡变形有重要影响。此外，位移峰值及位移降缓时间滞后于降水停止时间 2—3 天。第一期降水停止后，5 月 3 日，T_2 裂缝向深部发展到第一层古上壤层处，同时坡体前缘处沿古土壤层向前剪出 0.5mm，继之，T_4 裂缝也向下延伸。显示降水在滑坡变形中滞后作用特点。从各部位的敏感程度上看，T_2 裂缝及其前部坡体变形与降水相关性明显，其后部坡体包括 T_4 裂缝则不如前者。

由于实验时间与滑坡实际变形时间尚无量值对应关系可循，所以，尽管实验降水量值大小可测，但其与实际降雨量之间的对应关系，还不能确定。故降水对滑坡变形的影响，在实验中，只能从定性方面分析评价。

(2) 降水后滑坡变形的发育分布规律

随着降水对滑坡的作用，滑坡各处位移量逐渐增大，滑坡变形的发育分布规律随之表现得更加明显。

总体变形规律与原状条件下一致，滑坡裂缝位移量最大，T_2 裂缝位移大于 T_4 裂缝，T_2 裂缝前坡体位移大于 T_2 裂缝后坡体位移，近滑坡前缘（6# 点），垂直位移大于水平位移。坡体表层位移大于深部位移。即坡体变形仍保持前部解体崩滑，牵引后部，表层坡体变形向深部发展之趋势。坡体近滑面处深部位移显示，位于坡体中部滑面处的 3# 点位移最大，其前部 1# 点、7# 点位移逐渐减小，近坡脚处 7# 点位移量最小，表明滑面自中部向前逐渐发育，

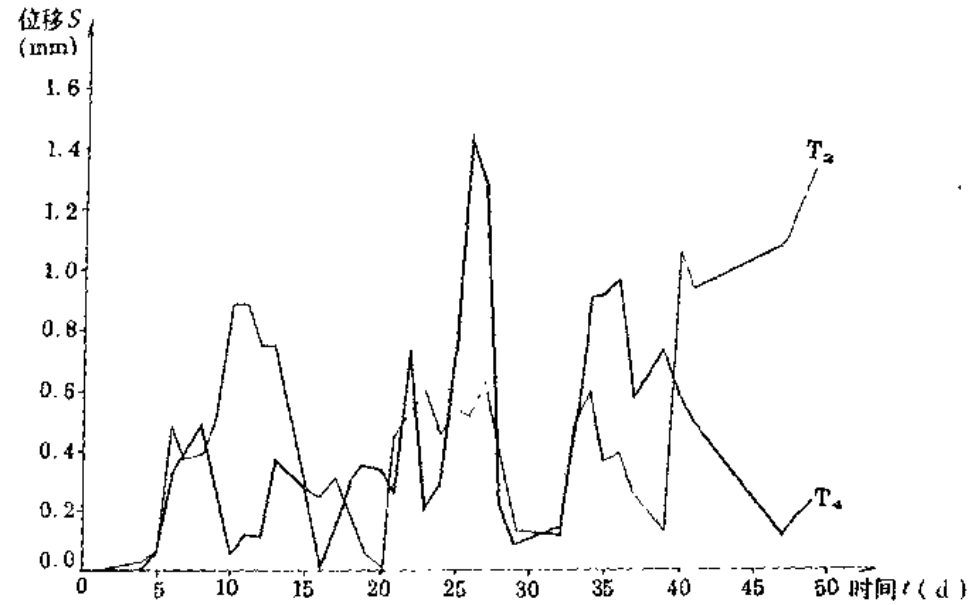


图 3-12　孟家山滑坡实验模型裂缝宽度变化曲线

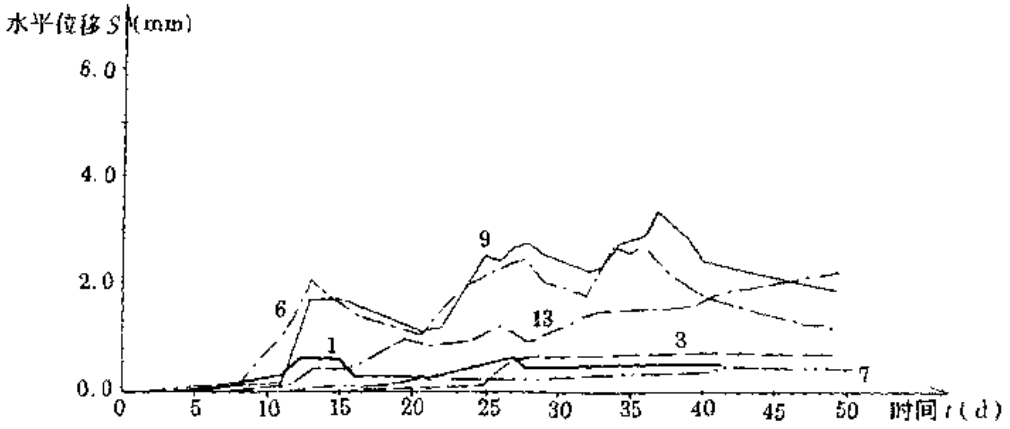


图 3-13　孟家山滑坡实验模型水平位移变化曲线

最后在坡脚处贯通。

2. 人类活动对滑坡变形的影响

（1）人类活动与滑坡变形的关系

5 月 11 日挖除坡面堆积物后，滑坡各处垂直位移显著增大，T_2、T_4 裂缝于 5 月 11 日先后贯通至泥岩面处。由于垂直位移增长幅度大，故此时撤去测点上的千分表。仅留电测位移计测量水平位移的变化。至 6 月 2 日第二次开挖前，撤去各处电测位移计。所以第二次开挖后至滑坡破坏的滑坡变形过程无定量量测数据。由图 3-12，3-13，3-14 可见，尽管水平位移增长幅度不及垂直位移，但滑坡各处水平位移也呈现增长趋势，第二次开挖后，瞬时间滑坡变形无明显反映，继之，第三次开挖刚一结束，坡体变形急剧增大，并迅速滑动。可见，人类活动对滑坡变形有明显影响。

（2）人类活动作用后滑坡变形的发育分布规律

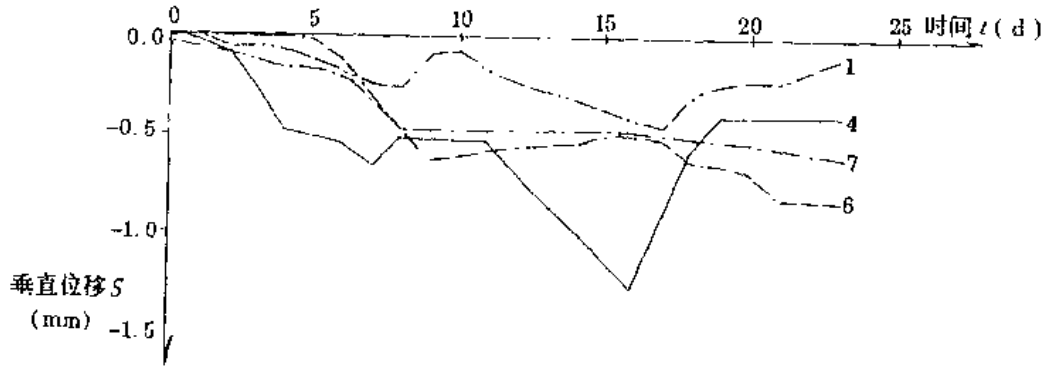


图 3-14　孟家山滑坡实验模型垂直位移变化曲线

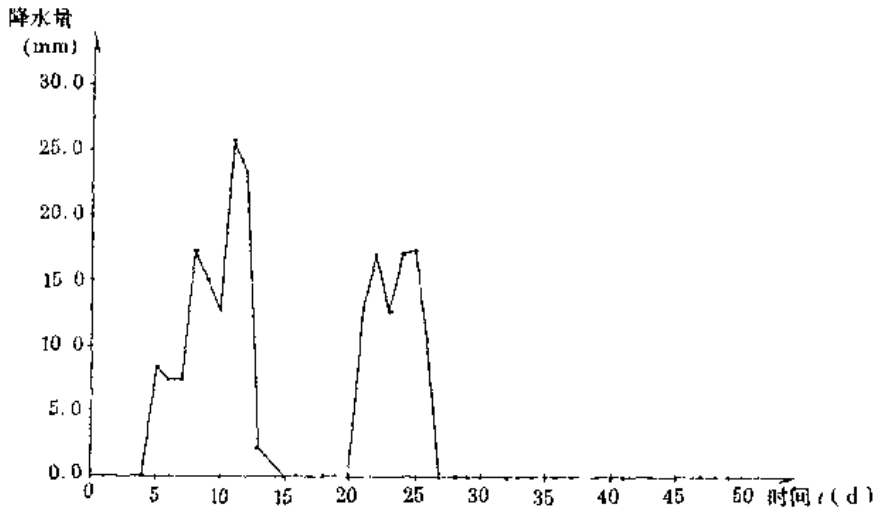


图 3-15　模拟降水量变化曲线

图 3-12，3-13，3-14 显示，在清除坡积物后初期，T_4 裂缝位移大于 T_2 裂缝，后期，T_2 裂缝位移迅速增大。表明，后期以 T_2 裂缝为界滑坡开始解体变形。坡面其它部位，初期，水平位移在中部大于其它部位，后期后部水平位移大于它处，显示后部以深部变形为主。坡体深部滑面处，各处位移变化规律与天然及降雨条件下完全一致，表明滑带（面）仍逐渐向前发育。

第三节　滑坡变形破坏机理的有限元数值模拟研究

通过滑坡变形破坏现象的地质分析及相似材料模型模拟实验研究，对滑坡变形破坏机理有了一定的认识。为了更深入地了解滑坡变形破坏机理，验证前述的基本认识，把现象认识提高到理性认识，采用弹塑性有限元方法对孟家山滑坡、锻压机床厂滑坡的变形破坏机理进行了数值模拟研究。

一．地质模型、计算模型、计算方案及计算参数的确定

1．地质模型

根据野外勘查资料及滑坡的基本特征，选取孟家山滑坡纵剖面、锻压机床厂滑坡纵剖面为计算剖面。按滑坡的结构特征及勘查资料的精度，将孟家山滑坡计算剖面上岩土材料概化为10类（图3-16），将锻压机床厂滑坡计算剖面上岩土材料概化为6类（图3-17）。这种概化既反映了滑坡的实际地质结构，又便于计算。

2. 计算模型

根据计算剖面的实际受力状况，对两个滑坡分别确定图3-16、3-17所示计算模型。模型左侧边界为荷载边界，受三角形分布的自重侧压力作用，在边界任一点上其值为$\frac{\mu}{1-\mu}rh$；底边受垂直位移约束，右侧边界受水平位移约束；坡面为自由边界，从而构成了滑坡的荷载、位移边界条件，以保持整个受力体系的平衡。

鉴于岩土体的特殊性质，选取莫尔—库仑准则为塑性屈服准则。

网格剖面分析考虑滑坡的复杂性及远场效应，采用四边形等单元、三角形单元及无界域单元三种计算单元。据此，孟家山滑坡计算剖面被离散化为227个单元，253个节点（图3-16），锻压机床厂滑坡计算剖面被离散化为132个单元，156个节点（图3-17）。

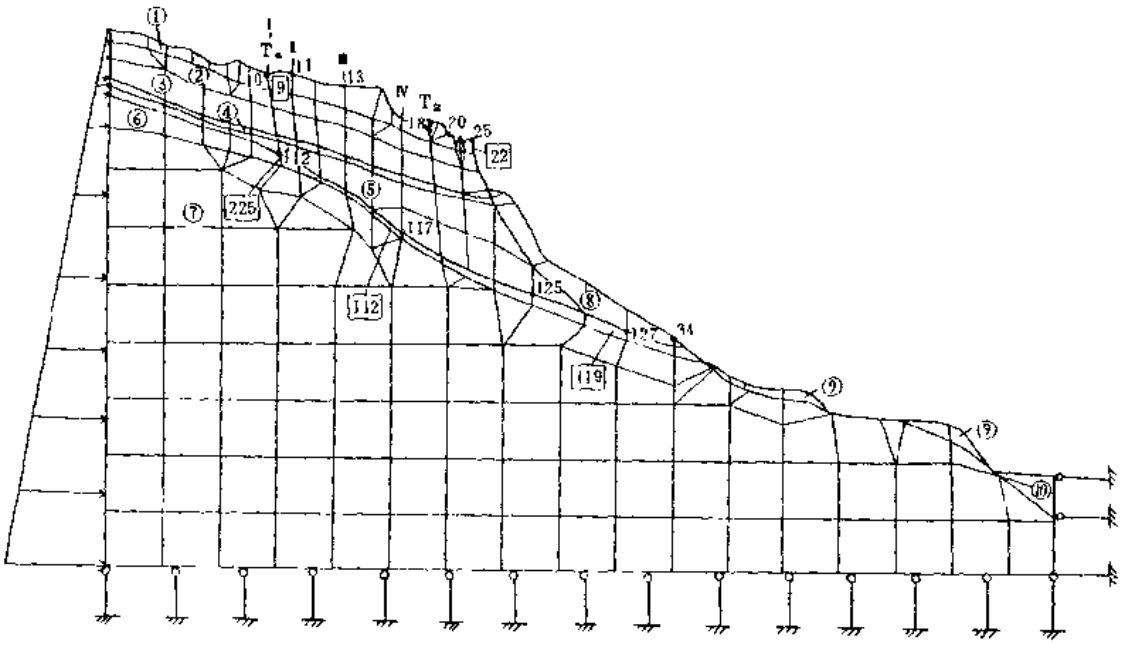


图3-16　孟家山滑坡地质概化模型、计算模型及计算监测网点布置图

①Q_3黄土；②Q_2黄土第一层古土壤；③Q_1黄土上部；④Q_2黄土第二层古土壤；⑤Q_2黄土下部；⑥N泥岩；⑦Pz_1nt变质岩；⑧Q_4滑坡堆积物；⑨Q_4崩、坡积物；⑩Q_4冲积物

·112监测点；[225]监测单元；监测断面

3. 计算方案

为了解滑坡在各种条件下的变形破坏特征，对孟家山滑坡设计了四种计算方案，即：

原状条件：视1993年7月滑坡勘查、取样时的状态为原始状态。

降雨条件：按雨量又设计了15mm、25mm、50mm、75mm四种降雨条件。同时降雨的介入按瞬时条件考虑，此时段小于24小时。此外，由于降雨入渗至滑带处的量值及滑带强度的相应降低量值，目前还无法确定，所以降雨对滑坡的作用仅考虑增加滑体容重和后缘

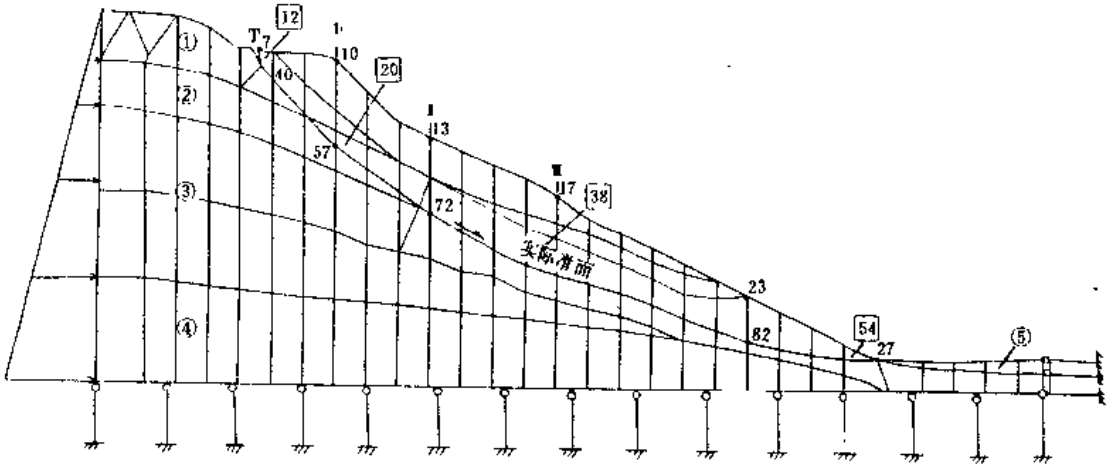


图 3-17　锻压机床厂滑坡地质概化模型、计算模型及计算监测网点布置图

①Q_3 黄土；②Q_2 黄土；③N 泥岩上部；④N 泥岩下部；⑤Pz_1nt 变质岩；⑥Q_4 冲积物

·57 监测点；[38]监测单元；监测断面

裂缝处的动水压力两方面。

人为开挖坡脚条件：与模拟实验完全相同，分三步开挖：第一步清除坡面堆积物；第二步顺泥岩面向坡内开挖 14m，单宽方量 $45m^3$；第三步继续向坡内开挖 10m，单宽方量 $145m^3$。

降雨＋人为开挖坡脚条件：将不同降雨量与不同开挖步聚叠加，以研究滑坡在极端条件下的变形特征。

对锻压机床厂滑坡视 1987 年 10 月该段坡体勘查时的状态为原始状态。由于滑坡已经滑动，所以只取原始状态一种计算方案。

4. 计算参数

根据试验资料，部分参照工程地质经验类比数据，确定滑坡各类材料的计算参数如表 3-3 所列。

表 3-3　滑坡计算参数

滑坡	计算参数 / 材料类型	容重 r (kg/cm^3)	弹模(变模) E_1 (kg/cm^2)	泊松比 μ	内聚力 C (kg/cm^2)	内摩擦角 φ (°)	粘弹性模量 E_2 (kg/cm^2)	粘弹性系数 η_1 [$kg/(cm^2 \cdot d)$]	粘塑性系数 η_2 [$kg/(cm^2 \cdot d)$]
孟家山滑坡	Q_3 黄土	1.56×10^{-3}	119	0.29	0.21	31	119	40000	4×10^6
	Q_2 黄土古土壤(1)	1.77×10^{-3}	183	0.32	0.64	30.5	183	60000	5×10^6
	Q_2 黄土(上)	1.76×10^{-3}	260	0.30	0.35	31.6	260	62000	6.2×10^6
	Q_2 黄土古土壤(2)	1.94×10^{-3}	342	0.31	0.71	31	342	70000	7×10^6
	Q_2 黄土(下)	1.86×10^{-3}	400	0.31	0.49	33.4	400	90000	9×10^6
	N 泥岩	2.11×10^{-3}	114.7	0.35	0.96	23	114.7	20000	2×10^6
	Pz_1nt 变质岩	2.7×10^{-3}	90000	0.16	30	50	90000	8.5×10^9	7.6×10^9
	Q_4 滑坡堆积物	1.54×10^{-3}	100	0.3	0	20.5	100	25000	2.5×10^6
	Q_4 崩坡积物	1.54×10^{-3}	100	0.3	0	20.5	100	25000	2.5×10^6
	Q_4 冲积物	1.45×10^{-3}	100	0.3	0.1	28	100	25000	2.5×10^6

续表

滑坡	材料类型 \ 计算参数	容重 r (kg/cm³)	弹模(变模) E_1 (kg/cm²)	泊松比 μ	内聚力 C (kg/cm²)	内摩擦角 φ (°)	粘弹性模量 E_2 (kg/cm²)	粘弹性系数 η_1 [kg/(cm²·d)]	粘塑性系数 η_2 [kg/(cm²·d)]
锻压机床厂滑坡	Q_3 黄土	1.6×10^{-3}	100	0.30	0.2	30	100	30000	3×10^{6}
	Q_2 黄土	1.88×10^{-3}	200	0.32	0.6	31	200	60000	6×10^{5}
	N 泥岩上部	2.15×10^{-3}	90	0.42	0.48	14	90	18000	1.8×10^{6}
	N 泥岩下部	2×10^{-3}	50000	0.25	20	34	50000	4.5×10^{9}	4.5×10^{9}
	Pz_1mt 变质岩	2.7×10^{-3}	90000	0.16	30	50	90000	8.5×10^{9}	7.6×10^{9}
	Q_4 冲积物	1.45×10^{-3}	100	0.30	0.1	28	100	25000	2.5×10^{6}

二、滑坡变形破坏的基本特征

弹塑性有限元计算结果，清楚地显示了滑坡体内各向应力的分布规律及滑坡位移趋势、剪切破坏区的展布特征，从更深层次上揭示了滑坡变形破坏的状态和本质。

1. 孟家山滑坡

原状条件下滑坡应力分布特征显示（图 3-18，3-19，3-20），最大主应力 σ_1 方向自坡内向坡面由垂直逐渐转至与坡面平行。在坡体表层，由于应力重分布结果，最大主应力 σ_1 由压应力转为拉应力，形成表层拉应力区，此区范围恰与坡体表层拉张裂缝的扩展范围基本一致。随深度增加，σ_1 的压应力量值逐渐增加，在坡体下部中前段，围绕第三纪泥岩与黄土接触带形成 σ_1 应力集中带，此带发展至近坡脚部位，但尚未与坡脚贯通；坡内最大剪应力 τ_{max} 随深度增加，不断增大，与 σ_1 集中带对应部位，最大剪应力等值线展布出现突异变化，显示应力集中特征，在坡体前缘部位，最大剪应力等值线均平行坡面向下伸展，无一线与坡面相交。滑坡的这种应力分布状态表明，因坡体表层土体疏松，无抗拉能力，故在拉应力作用下，形成数条拉张裂缝；坡体下部中前段，围绕薄层第三纪泥岩 σ_1 集中成带，τ_{max} 等值线在土 岩面上的突异，意味此处滑带正在发育，但尚未与坡面贯通。由图 3-21 清楚可见，坡体前缘裂缝部位及坡体中后部已经发生塑性屈服破坏，后缘 T_4 裂缝段的拉剪破坏区尚未到达潜在滑带部位，后端及中前部滑带尚未形成。此后，随坡内应力的逐渐调整及滑体、滑带物质强度的衰减，滑体及滑带中的塑性破坏区将均由中后部向两端发展，直至与坡面贯通，滑坡整体失稳。滑坡位移矢量分布显示（图 3-22），黄土-第三系接触面之上坡体各点位移明显大于该面以下坡体各点之位移，各点位移矢量显示，垂直位移分量大于水平位移分量，显示土-岩接触面以上坡体的崩滑位移趋势；因坡体表层松动，故位移量由表入深逐渐减小，自后缘至前缘，位移量逐渐增大，前缘处位移量最大；T_2 裂缝前部坡体位移量明显大于其后部坡体位移量，显示前部块体的解体滑移趋势。弹塑性有限元计算结果显示的坡体变形破坏特征与滑坡变形的实际表现和相似材料模拟实验结果几乎完全一致。由此证明前述地质分析的正确性。

2. 锻压机床厂滑坡

由图 3-23，3-24，3-25 可见，滑坡应力分布的总体特征与孟家山滑坡基本相似：自坡内向坡面，最大主应力 σ_1 方向由垂直逐渐转至与坡面近于平行；随深度增加，σ_1 的压应力量值逐渐增加，在坡体下部中前段，围绕第三纪泥岩与黄土接触带形成 σ_1 集中带，但此带未与坡脚贯通；坡内最大剪应力 τ_{max} 随深度增加，不断增大，与 σ_1 集中带对应部位，最大剪

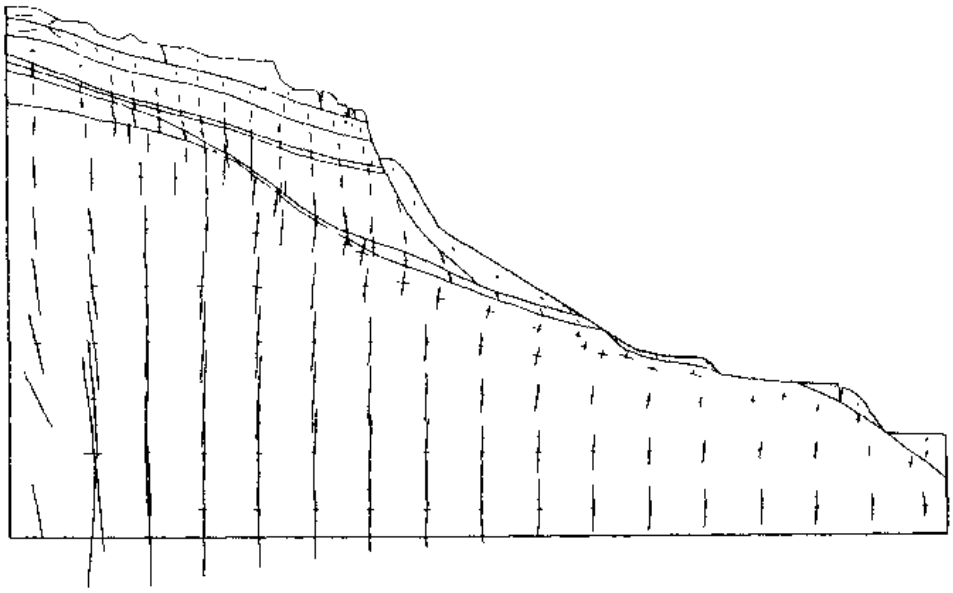


图 3-18　原状条件下孟家山滑坡主应力矢量图

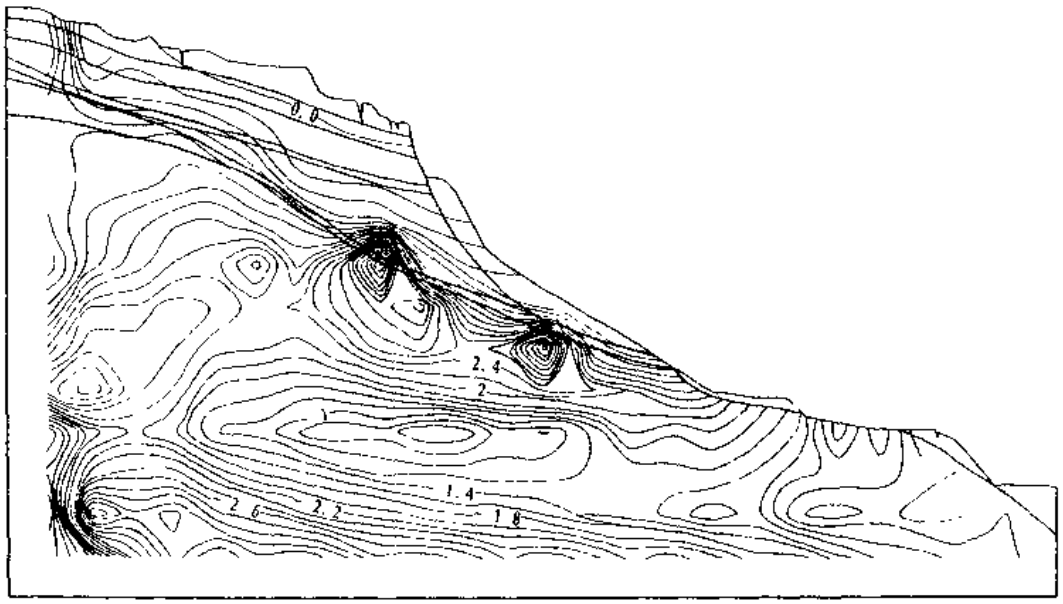


图 3-19　原状条件下孟家山滑坡最大主应力 σ_1 等值线图

应力等值线展布微有突异，在坡体前缘部位，最大剪应力等值线亦平行坡面向下延伸，未与坡面相交。但由于坡形及地层展布与孟家山滑坡有所不同，因而，应力分布亦稍有差别：拉应力集中区仅出现于坡体后缘与坡眉之间。此部位正是滑坡后缘拉裂缝的形成部位。上述应力分布特征表明，随着坡体拉裂缝在后缘拉应力区的形成，应力释放向下传递，滑带逐渐发育，至 1987 年勘查时，中前段滑带正在发育。由图 3-26 可以看出，滑坡中后部已经发生塑性破坏。由于中后部已破坏土体向临空方向的蠕动，滑体及滑带塑性破坏区将由后向前逐渐发展，直至与坡面贯通。滑坡位移矢量显示（图 3-27），黄土-第三纪泥岩接触面

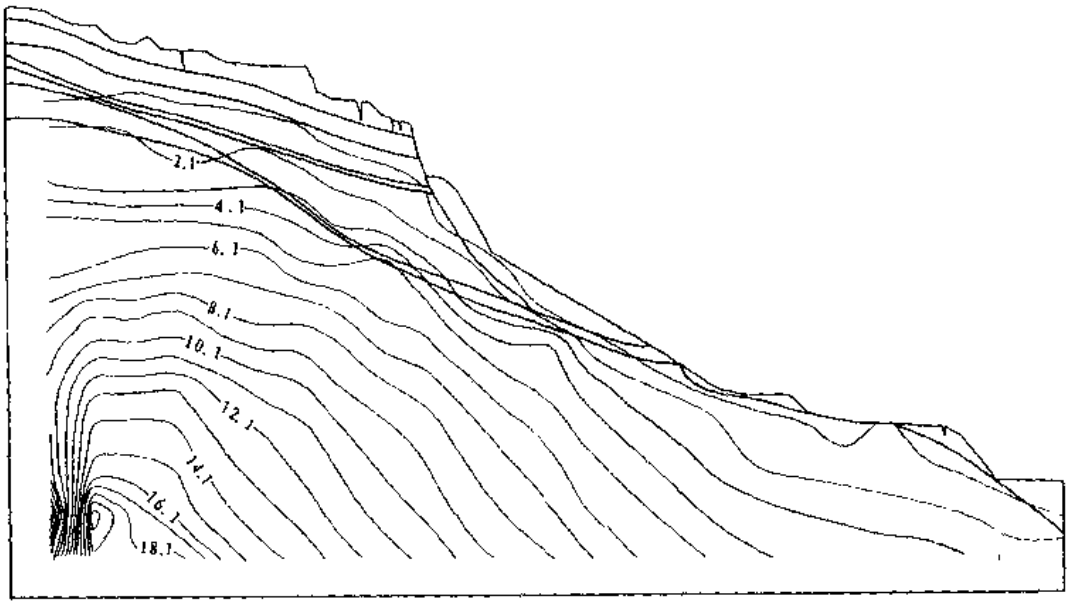


图 3-20　原状条件下孟家山滑坡最大剪应力 τ_{max} 等值线图

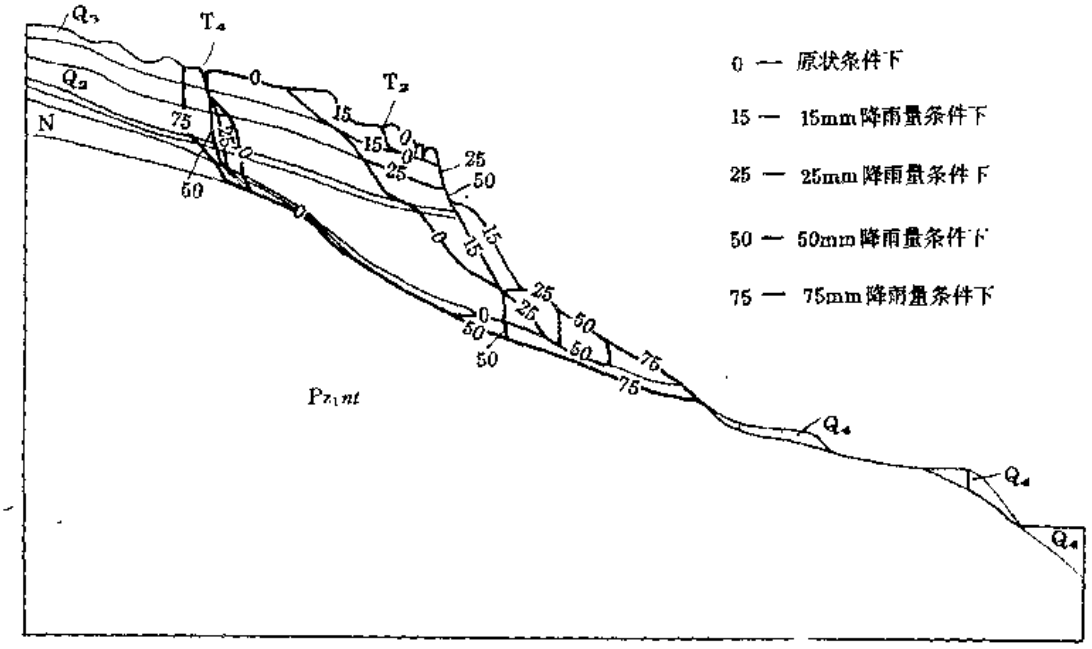


图 3-21　原状及不同降雨量条件下孟家山滑坡塑性区扩展图

以下坡体位移量极小，基本未动，此面以上坡体位移量由前至后逐渐增大，此进一步说明坡体沿土-岩接触面自后向前逐渐变形。坡体各点位移矢量显示，垂直位移分量略大于水平位移分量，表明坡体变形亦具崩滑之势。坡体后缘拉裂缝部位，位移量最大，且垂直位移远大于水平位移，显示整个坡体沿拉裂缝的错落、并兼有坡体后缘的塌滑的变形特征。这种变形特征与 1987 年勘查时地表宏观表现完全一致。

三、外界因素对滑坡变形破坏的影响

1. 降雨对滑坡变形破坏的影响

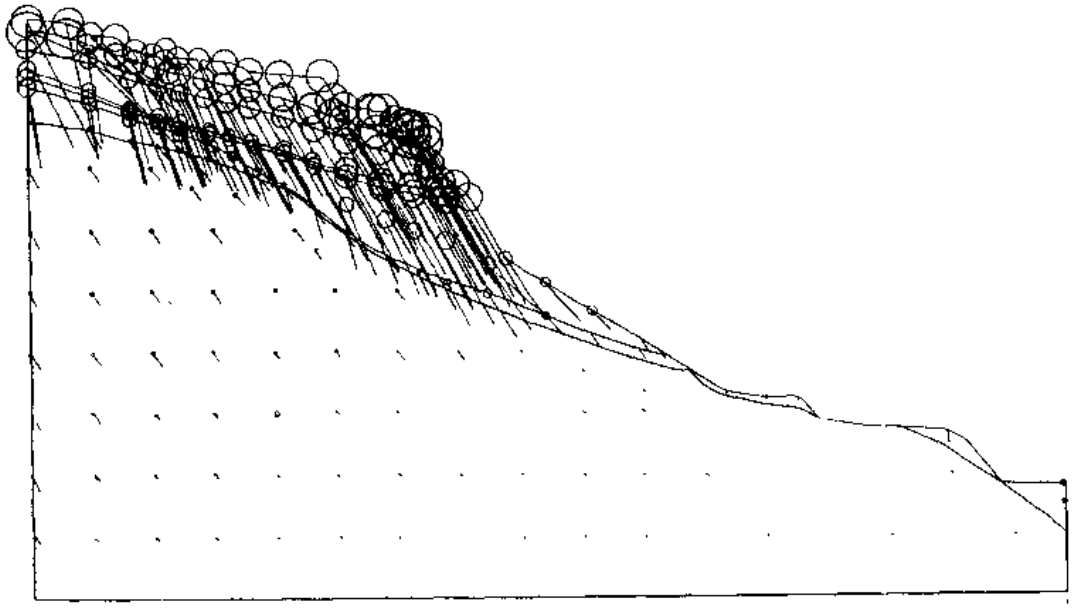


图 3-22　原状条件下孟家山滑坡位移矢量图

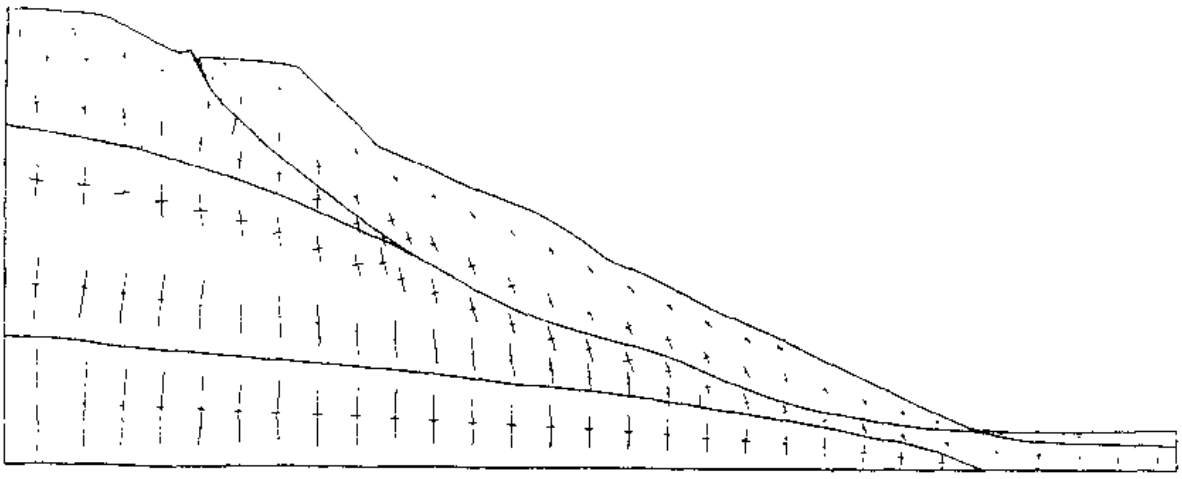


图 3-23　原状条件下锻压机床厂滑坡主应力矢量图

计算结果表明，降雨作用下坡体内应力分布的总体特征未变，但随着降雨量的增大，坡体中拉应力区显著扩大，意味坡面拉裂缝不断加宽、加深；最大主应力集中带中应力量值逐渐提高，应力集中区向前缓慢扩展；最大剪应力量值也逐渐增大，在 σ_1 集中带部位，τ_{max} 展布变异程度加大，显示滑带向坡脚扩展发育（图 3-28，3-29）；同时，坡体内各点的位移量值亦不断增大。坡体的塑性破坏区由中后部向两侧（端）逐渐扩展（图 3-21）。当降雨量为 75mm 时，最大主应力 σ_1 集中带扩展至坡脚处，同时，在坡脚部位，两条剪应力等值线穿出坡面，坡体上塑性区全部贯通（图 3-21），显示滑坡已开始破坏。同时，紧邻 T_4 裂缝后部的坡体也发生塑性破坏，说明滑坡顺 T_4 裂缝滑动后，在滑坡后缘将有拉裂缝出现。锻压机床厂滑坡滑动后即出现这种情形，从而证明这种计算结果的正确性。

由上述分析可以看出，降雨对滑坡变形破坏的影响是明显的。随降雨量增大，滑坡变

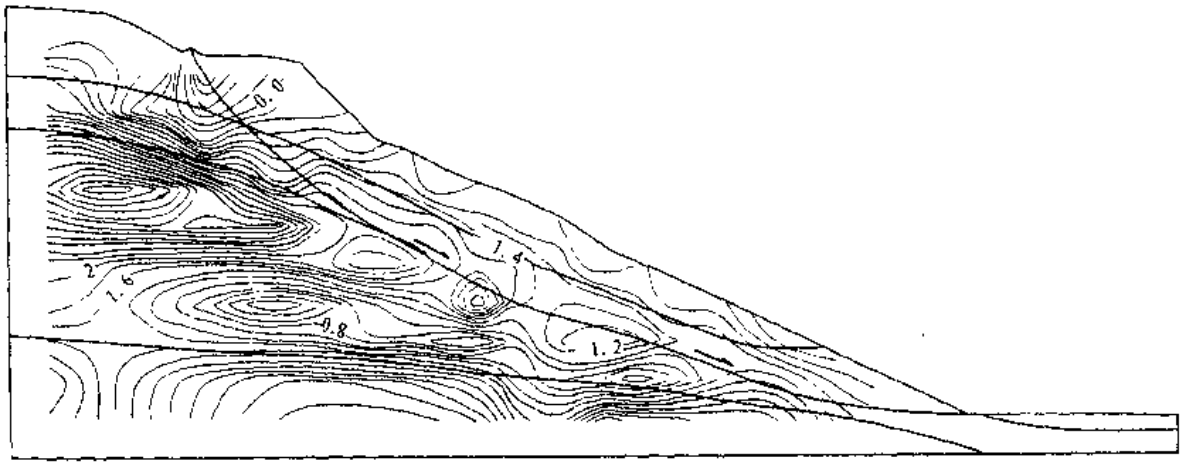


图 3-24　原状条件下锻压机床厂滑坡最大主应力 σ_1 等值线图

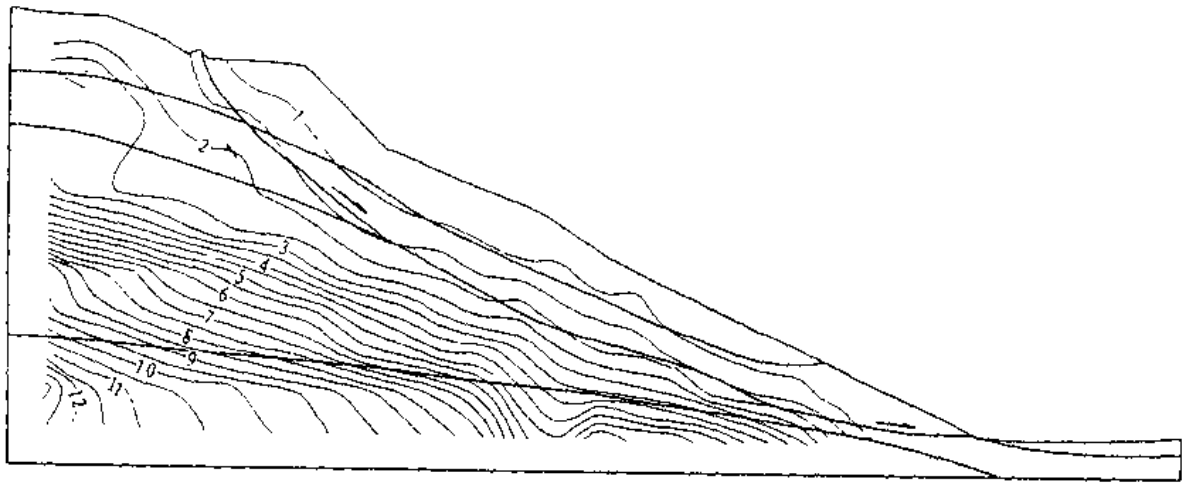


图 3-25　原状条件下锻压机床厂滑坡最大剪应力 τ_{max} 等值线图

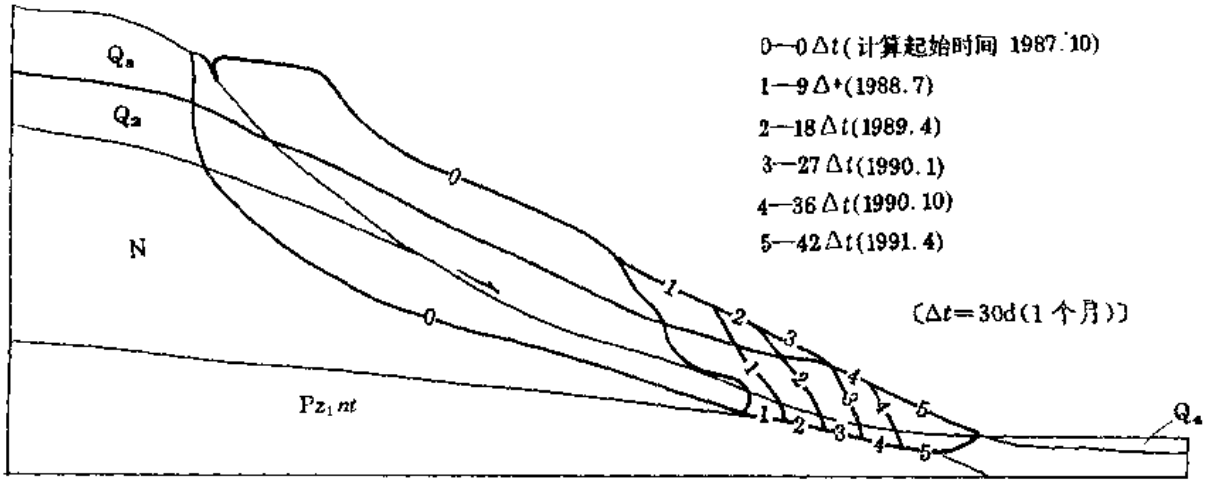


图 3-26　锻压机床厂滑坡塑性区扩展图

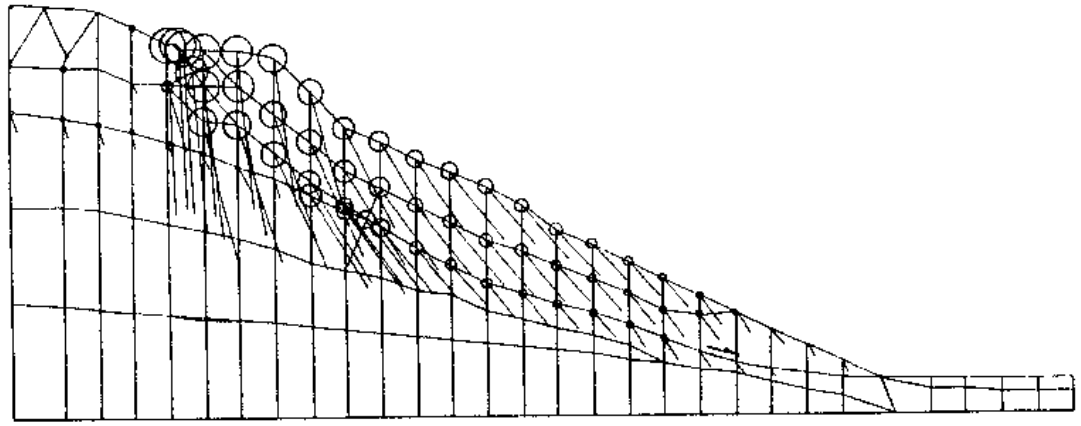


图 3-27　原状条件下锻压机床厂滑坡位移矢量图

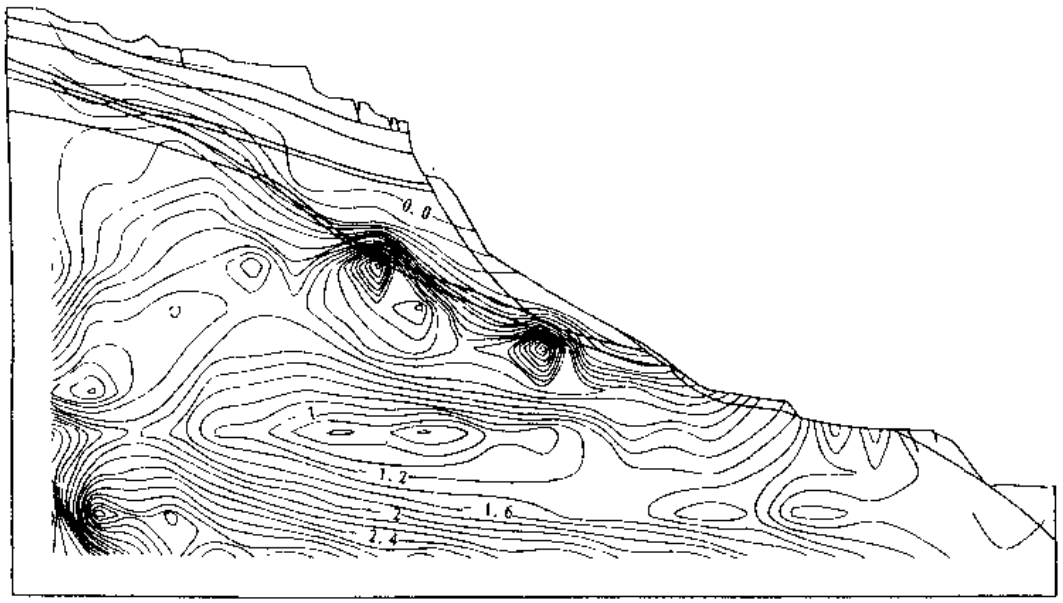


图 3-28　降雨 75mm 时孟家山滑坡最大主应力 σ_1 等值线图

形破坏加强。从计算结果看，降雨对滑坡变形的主要影响表现为：入渗加大坡体容重后，造成表层松动范围，即拉应力区扩大，坡体下部中前段的最大主应力集中量值和区域扩大，最大剪应力变异展布范围和应力量值亦缓慢扩大，直到 75mm 降雨量时等值线切出坡面；滑坡塑性区向两侧扩大，至 75mm 雨量时，在坡内全部贯通，最终滑坡破坏。由于未考虑降雨对滑体、滑带强度的影响，所以，计算结果所反映的滑坡活动强度可能小于滑坡的实际状况，而降雨强度可能大于实际状况。

2. 人类活动对滑坡变形破坏的影响

模拟计算结果显示（图 3-30，3-31），当坡脚被逐渐开挖后，坡体内应力分量的矢量特征及总体趋势保持不变，但随着开挖的继续，坡体上部拉应力区及坡体下部中前段的最大主压应力集中带显著扩大，最大剪应力在 σ_1 应力集中带上的变异程度及范围明显增大，最大剪应力等值线逐渐切穿坡面。坡体的塑性破坏区向两侧逐渐扩大（图 3-32）。各点位移量

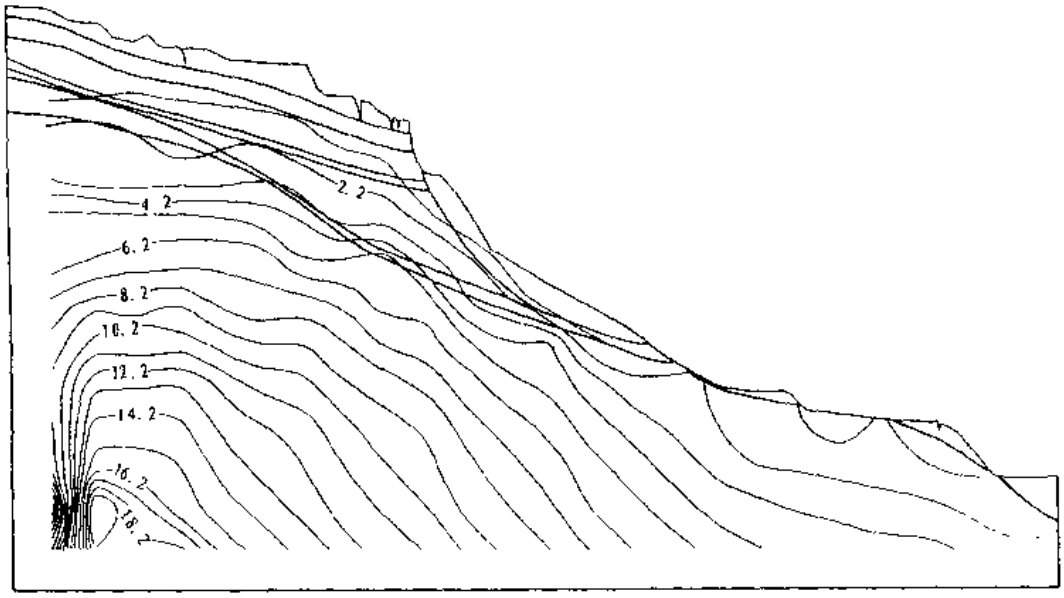


图 3-29　降雨 75mm 时孟家山滑坡最大剪应力 τ_{max} 等值线图

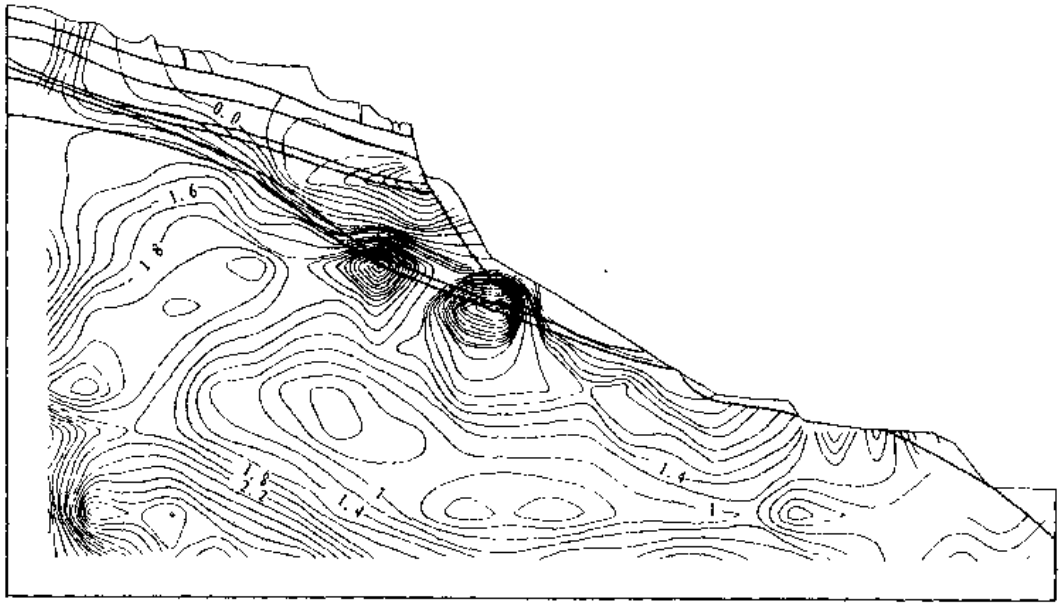


图 3-30　第三次开挖时孟家山滑坡最大主应力 σ_1 等值线图

逐渐增大。与降雨影响的区别是：降雨时拉应力区由坡体表层向下扩展，而开挖时，拉应力区由坡缘向坡后迅速扩大，在坡缘处形成明显的拉应力集中区，显示坡体前缘崩塌作用强烈；坡体下部中前段的主压应力 σ_1 集中带和最大剪应力 τ_{max} 变异带的集中和变异程度、扩展速度均大于降雨影响，但应力量值上没有明显提高。由图 3-32 清楚可见，第二次开挖后，坡体内塑性破坏区已基本贯通，表明此时坡体已处于极限平衡状态。此即为何在模拟实验中，第二次开挖后，第三次开挖刚一实施，坡体便迅速滑动的根本原因。即第三次开挖是已经处于极限平衡状态坡体破坏的触发因素。

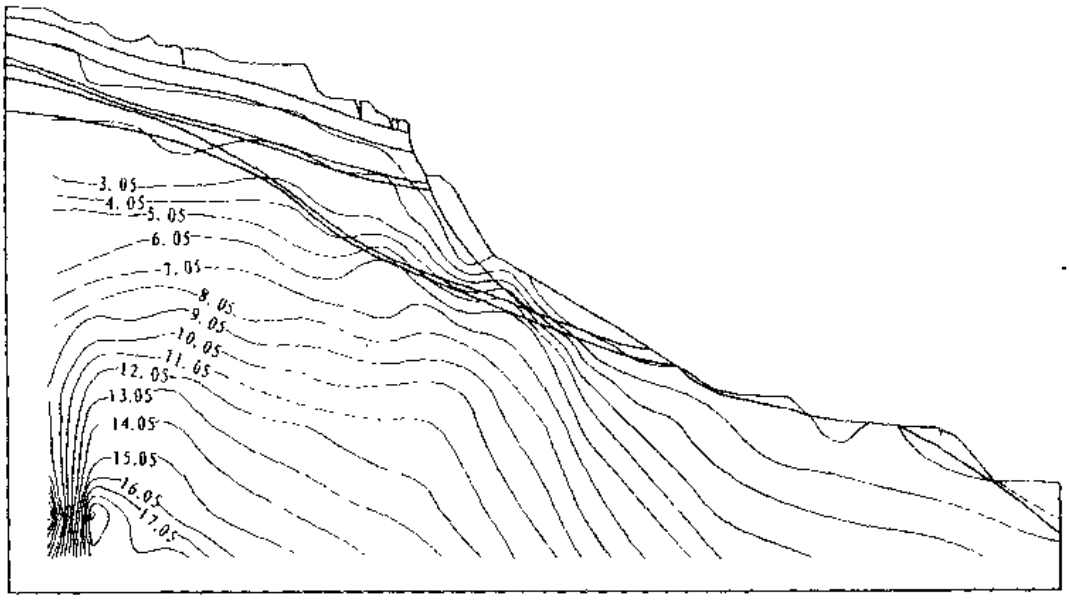


图 3-31　第三次开挖时孟家山滑坡最大剪应力 τ_{max} 等值线图

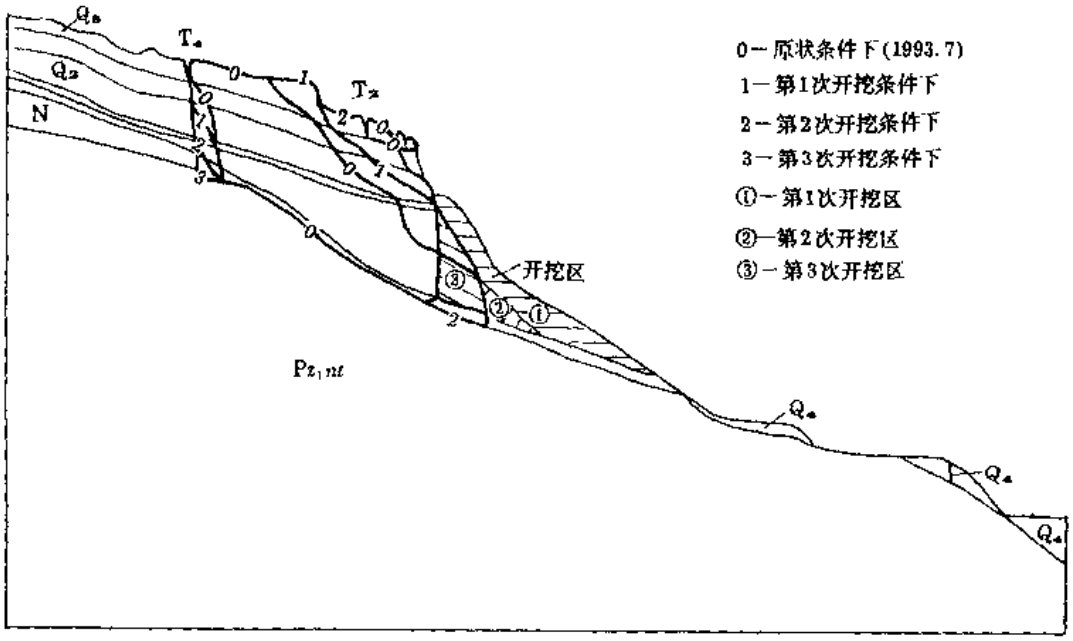


图 3-32　不同开挖条件下孟家山滑坡塑性区扩展图

综上所述可见，人为开挖坡脚活动对滑坡变形破坏的影响也是极其明显的。人为开挖坡脚后，坡体内应力变异程度加强，塑性区扩大，从而导致坡体迅速的崩滑破坏。

3. 降雨和人为开挖坡脚条件下滑坡的变形破坏状况

计算结果表明，降雨与人为开挖坡脚活动叠加作用于滑坡时，坡内的应力分布状态是二者单独作用时的综合表现，故不再赘述。在此，仅就坡体塑性区的扩展特征，加以简述。由图 3-33、3-34 可见，降雨与人为开挖坡脚活动叠加后，坡体内塑性区迅速扩大，当第二

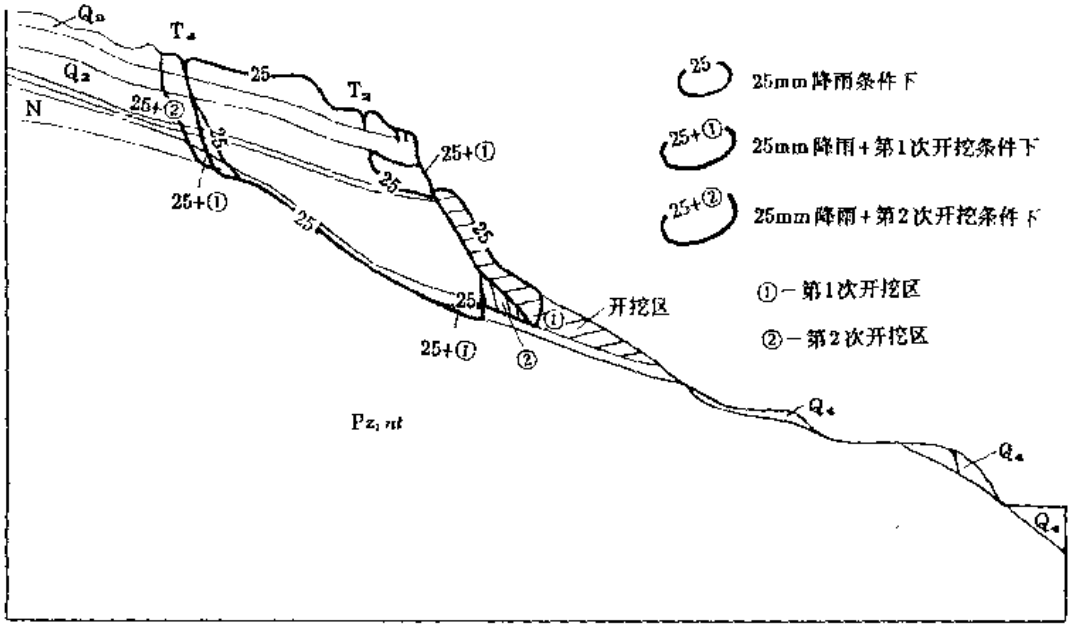


图 3-33　25mm 降雨和人为开挖坡脚条件下孟家山滑坡塑性区扩展图

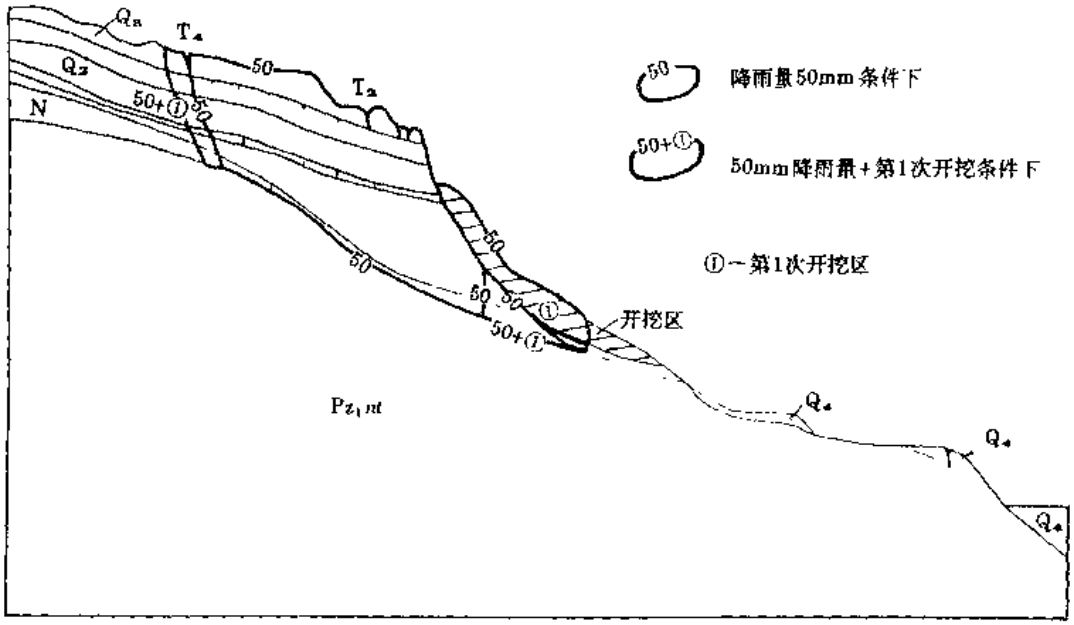


图 3-34　50mm 降雨和人为开挖坡脚条件下孟家山滑坡塑性区扩展图

次开挖时叠加 25mm 降雨量，坡体中的塑性破坏区便全面贯通；第一次开挖时，叠加 50mm 降雨量，坡体中塑性破坏区贯通。显然，降雨与人为开挖坡脚作用的叠加，将加速滑坡变形破坏进程，加大滑坡的活动强度。与单独降雨作用时相同，若考虑降雨对滑体、滑带强度的影响，则滑坡活动强度可能更大，实际降雨强度可能减小。

第四章　滑坡动态演变过程及趋势预测研究

滑坡预测预报本质在于寻找滑坡变形破坏的演化规律，这种规律既有宏观上的几何变化规律，又有微观上的物理甚至化学变化规律，以及基于上述各种变化的量值上的数学统计规律。只有研究滑坡变形破坏的全过程，才可能认识和获得滑坡变形破坏的演化规律，正确预测滑坡变形破坏的发展趋势。为了全面了解滑坡动态的演变过程，本项研究试图以孟家山滑坡为预测对象，以锻压机床厂滑坡为反演对象，从滑坡变形的宏观监测、相似材料模型模拟实验及数值模拟三方面，探求崩滑性黄土-红层接触面滑坡的变形破坏演化规律。通过宏观变形监测，掌握滑坡动态的基本特征；通过模型模拟实验，预演滑坡变形破坏的全过程；以岩土体蠕变（流变）理论为基础，采用数值分析方法，模拟、预测滑坡应力、位移的变化过程，以能量理论为基础，模拟、预测滑坡的活动强度。三方面研究互相补充、对比、印证，进而预测滑坡变形破坏的趋势和活动强度，对滑坡加速活动时段作出短期预报，对临滑时段提出中期估测。

第一节　滑坡动态的实际表现及趋势分析

为了解滑坡动态的实际表现，从1992年7月起，对孟家山滑坡布点进行了较为系统的监测，从而对滑坡的动态特征有了直观的认识。

一、滑坡位移监测系统

1. 监测内容

合理的监测内容的确定是掌握滑坡变形破坏动态特征的前提。随着滑坡变形的发展，滑体、滑带在宏观和微观上有多种反映，如位移、湿度、温度、应力、应变、地下水位、水化学场、孔隙水压力等。位移是滑坡变形最直接的表现，也是最易捕捉的滑坡动态信息，目前，滑坡位移监测技术正趋于成熟。滑坡在其它方面的变化信息，其反映均不及位移直接，且监测技术尚不完善，需要较大的经济投入。基于此，在本项研究中，以位移为参数，监测其动态变化，据此预测滑坡变形发展趋势。由于滑坡活动的特殊性，位移特征在不同部位表现不同。为了解滑坡变形在三维空间的变化特征，对孟家山滑坡位移的监测主要集中于以下几方面：

（1）滑坡后缘拉裂缝宽度；

（2）滑坡地表位移；

（3）滑坡深部位移。

2. 监测手段

针对课题的经济能力，具体滑坡的变形状况及滑坡区环境特征，确定监测手段，力求其简易可行、经济合理。故而、在孟家山滑坡上采用了以下三种监测手段。

（1）简易裂缝监测桩

在滑坡后缘裂缝两侧埋设水泥桩，用钢尺量测裂缝两侧桩距的变化，以监测滑坡裂缝宽度的变化状况。

(2) 地形变监测

用 Theool0 经纬仪以前方交汇法按国家 5 级小三角精度量测点的平面变化，按国家 5 级三角高程精度联测各点的高程变化。地形变量测为确定滑坡表面位移量及位移速率变化，掌握滑坡活动的基本动态特征提供了定量依据。

(3) 滑坡深部位移的钻孔倾斜仪监测

为观测滑坡深部变形状况，自 1993 年 7 月起，在滑坡上 3 个钻孔中埋设测管，1993 年 9 月正式开始用 Sinco 50325 钻孔倾斜仪量测滑坡深部水平位移，钻孔倾斜仪监测精度高，效果好，是目前滑坡监测中最受推崇的监测手段之一。由于经费及人为因素等，1994 年 7 月钻孔倾斜仪监测停止。10 个月的监测结果反映出滑坡位移明显，为确定滑坡深部位移特征、滑带（面）发育位置等提供了可靠的定量依据。

3. 监测系统的布置

滑坡监测系统的布置以能控制滑坡在三维空间上的变化规律为基本原则。监测系统由监测点、线、面组成。点、线、面布设考虑地形变化，兼顾经济、人力及技术等因素（图 3-8）。

滑坡裂缝监测点顺沿裂缝走向布设，成弧线状分布。在孟家山滑坡 T_2、T_4 裂缝两侧，共布设裂缝监测桩九对，其中 1#、7#、5#、6#、8#、9# 桩位于 T_4 裂缝两侧，2#、3#、4# 桩位于 T_2 裂缝两侧，由于人为破坏，现仅剩 1#、6#、7#、5# 四对桩。地形变监测点力求成网状分布。由于滑坡后方有突出山包，前方有开阔河滩，滑体本身范围不大，故为了便于通视，减少观测中的搬镜次数，节省人力，并兼顾滑体上的地形条件，将地形变监测点布设成不规则网状，中心线与滑坡主剖面线平行，固定点设于滑体外山包上和山坡坡脚下。地形变监测点于 1992 年 11 月开始布设，先后共布点 10 个，由于人为破坏，现有 7 个点仍在使用中。滑坡深部位移监测点与滑坡上 3 个钻孔同位。

二、滑坡变形的动态特征及趋势分析

1. 滑坡后缘裂缝的变形特征及其趋势分析

表 4-1 孟家山滑坡裂缝宽度增长特征

裂缝 \ 裂缝宽度变化 监测桩号		宽度增长量 (mm)	平均增长速率 (mm/m)	监测时段
T_2	2#	5.5	3.67	1992.8—1993.10
T_4	1#	119	3.5	1992.8—1995.5
	5#	51	2.55	1993.8—1995.5
	6#	94	2.76	1992.8—1995.5
	7#	64	1.88	1992.8—1995.5

近 3 年的监测结果显示（图 4 1），滑坡裂缝宽度随月成不规则的缓慢增长，且不同部位，滑坡裂缝宽度的增长程度不同。裂缝宽度的增长与降雨量变化（图 4-2）大致成 1--3 个

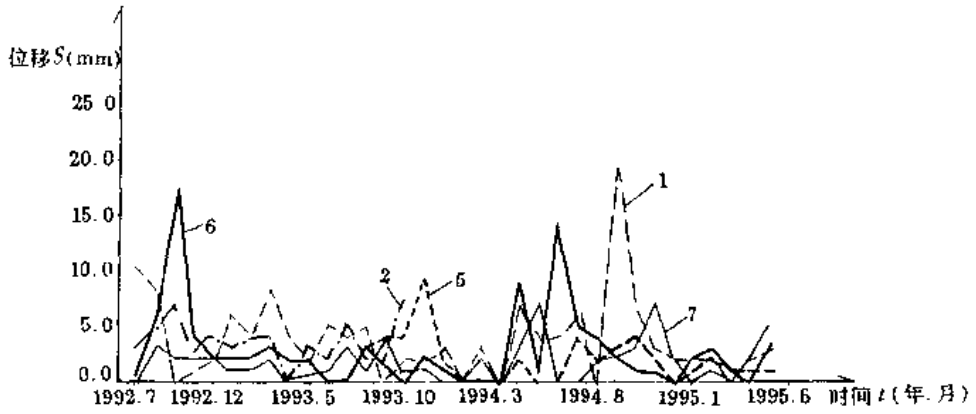


图 4-1　孟家山滑坡裂缝宽度变化曲线

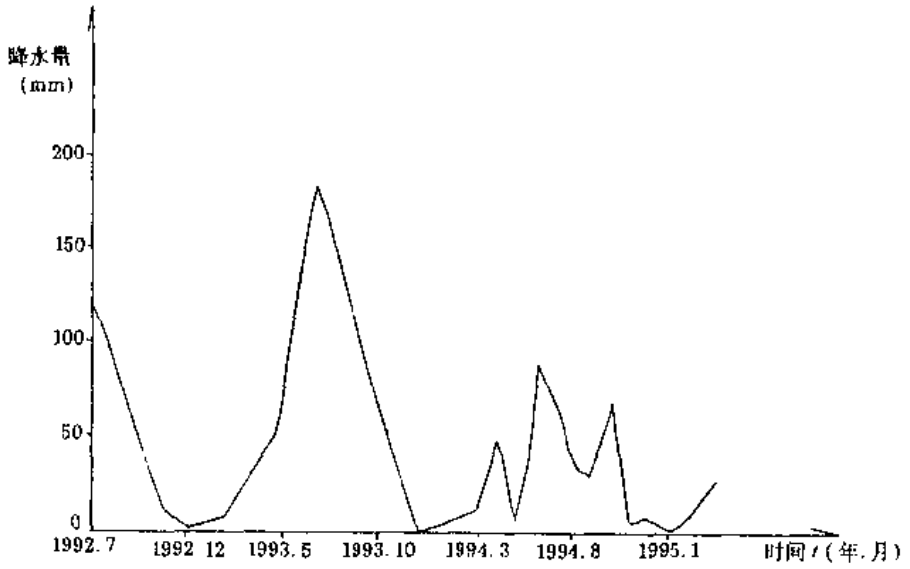


图 4-2　天水市区降雨量变化曲线

月的滞后关系。从表 4-1 可见，滑坡裂缝的绝对增长量以近滑坡中轴处 1# 测桩的 T_4 裂缝宽度增长最大，近 3 年滑坡裂缝宽度增长 119mm。裂缝宽度增长速率以 T_2 裂缝最大（2# 桩），平均月增长速率 3.67mm，T_4 裂缝在近滑坡中轴部位（1# 桩）的增长速率次之，月增长速率 3.5mm，裂缝两侧宽度增长速率较小，增长速率 1.88—2.76mm/月。滑坡裂缝宽度的增长特征表明：滑坡变形呈现以 T_2 裂缝为界的解体滑坡之势，裂缝自中轴部位开始向两侧发展。

由图 4-3 可见，裂缝宽度扩展呈现台阶式的上升趋势，台阶变化多出现在 3—5 月和 7—9 月两期，正好与春季消冻、夏季降雨期大致对应，可见滑坡变形的发展与季节变化有关。裂缝扩展的总体趋势表现为：自变形开始至 1994 年 3 月，增长速率逐渐减小，1994 年 4 月以后位移速率增加，且大致以均匀速率缓慢发展。

2. 滑坡地表变形特征及趋势分析

实际监测结果表明，滑坡表面各部位均处于不同程度的蠕动变形之中（表 4-2，图 3-8、图 4-4）。坡面各点位移均朝向坡下。但各部位变形特征极不一致。滑坡前缘（D_2 点）及裂缝附近（D_1、D_6、D_7），垂直位移大于水平位移，显示这些部位坡体以崩滑或错落变形为主；

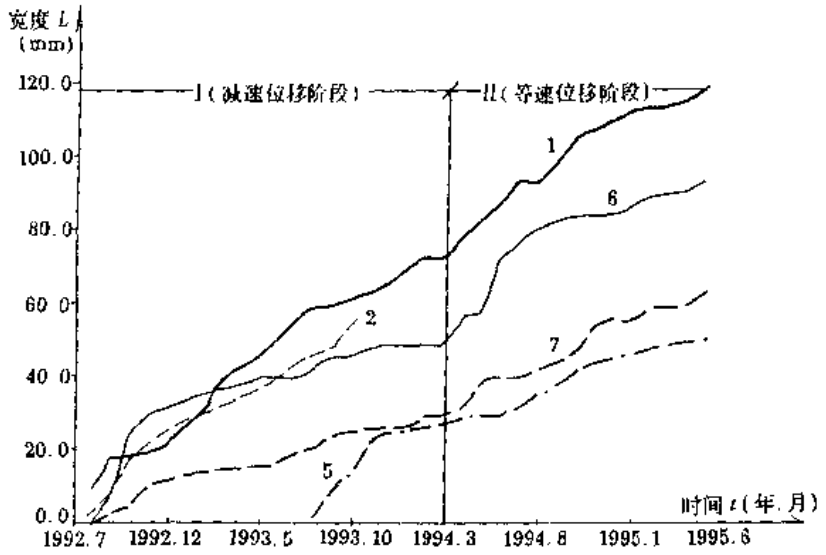


图 4-3　孟家山滑坡裂缝宽度扩展曲线

被裂缝切割的块体中部（D_3、D_4）水平位移大于垂直位移，表明此段坡体以滑动变形为主。T_2 裂缝前坡体（D_2、D_3）位移速率大于其后坡体（D_1、D_4、D_6、D_7）的位移速率，近滑坡前缘处 D_2 点的位移速率最大，达 1.05cm/月。滑坡近中轴部位（D_3、D_6、D_7）的位移速率大于两侧（D_1、D_4）位移速率。由此变形规律可以看出，滑坡变形呈现以 T_2 裂缝为界的解体式崩滑之势，滑坡整体变形由中轴部位开始向两侧发展。坡面变形的总体特征与滑坡裂缝的变形表现基本一致。

表 4-2　孟家山滑坡地表变形特征

监测点号	平面位移			垂直位移		合位移			监测时段
	位移量 (cm)	平均位移速率 (cm/m)	位移方向	位移量 (cm)	平均位移速率 (cm/m)	位移量 (cm)	平均位移速率 (cm/m)	位移方向	
D_1	16.5	0.55	330.5°	17.0	0.57	23.7	0.79	45.9°	1992.11--1995.5
D_2	20.8	0.69	340.3°	23.8	0.79	31.6	1.05	48.8°	1992.11--1995.5
D_3	20.5	0.68	323°	13.9	0.54	21.8	1.03	34.1°	1993.7－1995.5
D_4	20.3	0.68	317°	11.4	0.38	23.3	0.78	26.1°	1992.11--1995.5
D_6	16.1	0.54	319°	19.4	0.65	25.2	0.84	50.3°	1992.11－1995.5
D_7	21.6	0.72	322°	21.9	0.73	30.7	1.02	45.4°	1992.11—1995.5

与裂缝变形趋势相似，滑坡地表变形亦呈台阶式的上升趋势。在位移速率的变形趋势上表现为：近滑坡前缘部位（D_2）和 T_4 裂缝东侧（D_1），自变形开始至 1994 年 3 月，位移

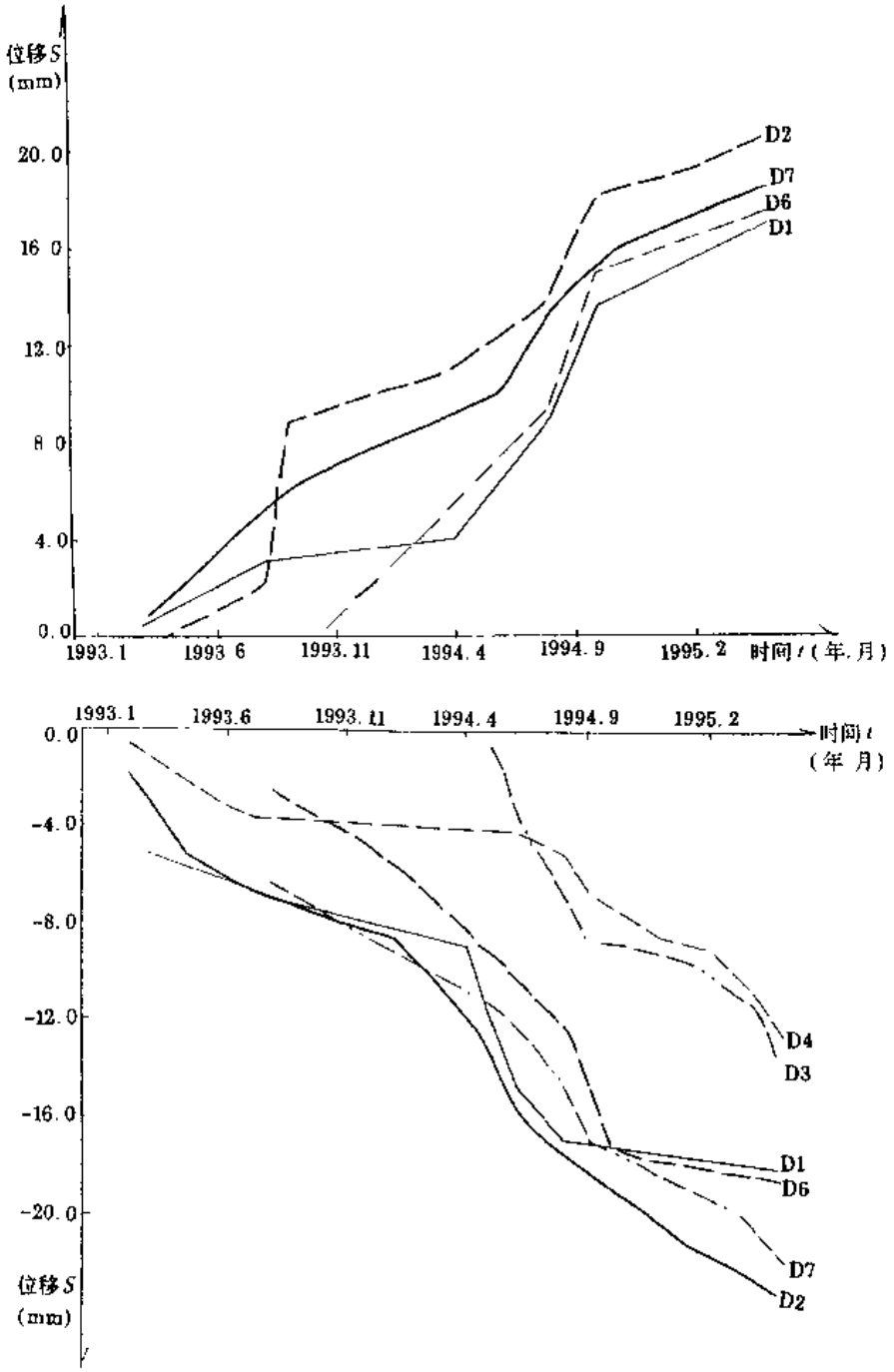


图 4-4　孟家山滑坡地形变测点位移曲线

速率缓慢减小，自 1994 年 4 月起位移速率增大，且大致以匀速发展；坡体其它部位的位移速率则自 1994 年 6 月起开始增大，并以近等速的趋势发展。与裂缝监测结果比较，滑坡变形的趋势特征基本一致。

3. 滑坡深部位移特征及趋势分析

监测结果（图 3-3，3-4，3-5，4-5）反映，ZK_1 钻孔部位，滑带以上滑体基本呈整体变形，至滑带附近，位移量减小，滑面下位移减至零。显示，滑坡变形自上向下发展，随滑

体蠕动，该处滑带逐渐发育。从位移特征分析，滑动影响带厚约 2m。同时，在古土壤层发育部位，滑坡位移量稍大于它处，意味古土壤层为滑坡次滑带的发育部位。ZK_2 钻孔部位，滑坡深部变形规律与 ZK_1 孔稍有不同，1993 年 9 月 22 日，1993 年 11 月 22 日及 1994 年 7 月 15 日三次监测结果显示，随深度增加，滑坡位移量逐渐减小，滑带以下减至零；1994 年 4 月 15 日，1994 年 4 月 18 日，1994 年 5 月 15 日及 1994 年 5 月 27 日四次监测结果则反映，随深度增加，滑坡位移总体呈现逐渐增加之势，至滑带（面）处位移量最大。将这种变形规律与降水量变化规律相比较可以看出，在雨季及雨季稍后，滑坡表层位移大于深部，雨季前，滑坡深部位移却大于表层，表明，雨季及雨季稍后，坡体表层受降雨直接影响，故位移量大于深部；随着雨水向深部运移、渗透，则在雨季前，滑坡深部位移大于表层位移。说明 ZK_2 钻孔周围坡体对降雨变化敏感，由此亦可见，ZK_2 孔周围坡体比 ZK_1 孔周围坡体松动强烈。故在进一步的变形中，易与后部解体而最先破坏。位于滑坡东侧的 ZK_3 孔的监测结果显示，随深度增加，滑坡位移逐渐减小，至黄土与第三纪接触带处，减至最小值，表明随坡体蠕动，此处滑坡正逐渐发育。与 ZK_1 孔相似，在 ZK_2 孔和 ZK_3 孔的黄土古土壤层发育部位，滑坡位移量稍有起伏，意味着滑坡次滑带在这些部位也逐渐发育。

在位移量值上（表 4-3），ZK_1 孔处坡体表层位移量最大，为 80.87mm，ZK_3 孔处表层位移量最小，为 44.17mm；ZK_2 孔处滑面位移量最大，为 61.01mm，ZK_3 孔处滑面位移量最小为 16.85mm。综合比较三孔附近坡体的变形特征可以看出，滑带（面）在滑坡轴线上中前部发育程度最好，中后部次之，在滑坡两侧发育程度较差。T_2 裂缝前的 ZK_2 孔部位，坡体松动强烈，对降雨变化敏感，从整体位移上显示解体滑移之势；T_2 裂缝后的 ZK_1 孔部位坡体变形在表层较强，深部滑带（面）处变形较弱，且滑带（面）以上呈整体变形；滑坡侧部 ZK_3 孔部位坡体变形程度最弱，正处于由表层向深部蠕动发展之中。

表 4-3　孟家山滑坡深部位移特征

钻孔 / 位移特征 / 位置	ZK_1		ZK_2		ZK_3	
	位移量（mm）	平均位移速率（mm/m）	位移量（mm）	平均位移速率（mm/m）	位移量（mm）	平均位移速率（mm/m）
表层（1m）	80.87	8.087	65.78	6.578	44.17	4.417
滑面	40.92	4.092	61.01	6.101	16.85	1.685

根据监测结果，滑坡表层平均月位移速率 4.42--8.87mm/月，滑带（面）平均月位移速率 1.69—6.36mm/月。表层位移速率与地形变量测结果（平面位移）相近，因而，地形变监测和钻孔倾斜仪监测较好地反映了滑坡的变形特征，滑坡裂缝监测桩量测结果可能存在较大误差，只能作参考分析。

与表面变形趋势相似，滑坡深部位移同样表现为台阶式上升趋势（图 4-6）。自变形开始至 1994 年 4 月下旬，位移速率以减速发展，此后，位移速率明显增加，且位移速率大致相等。表明 1994 年 4 月下旬前，滑坡变形处第一阶段，即减速蠕变阶段，此后，滑坡变形进入第二阶段，即近等速发展阶段。

三、滑坡变形破坏的阶段

由滑坡动态的实际监测结果可以看出，尽管滑坡各处不同部位位移量、位移速率不同，

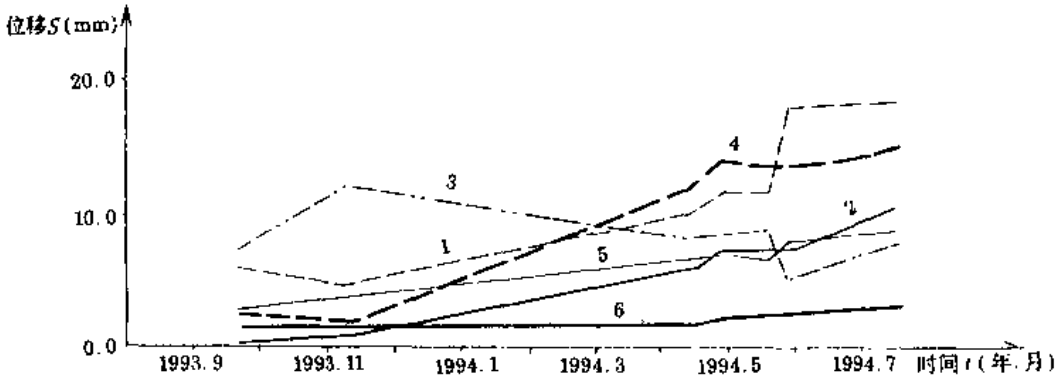


图 4-5　不同深度处滑坡位移变化曲线

1—ZK_1 孔深度 1m 处；2—ZK_1 孔深度 26m 处；3 -ZK_2 孔深度 1m 处；4—ZK_2 孔深度 33m 处；5—ZK_3 孔深度 1m 处；6—ZK_3 孔深度 26m 处

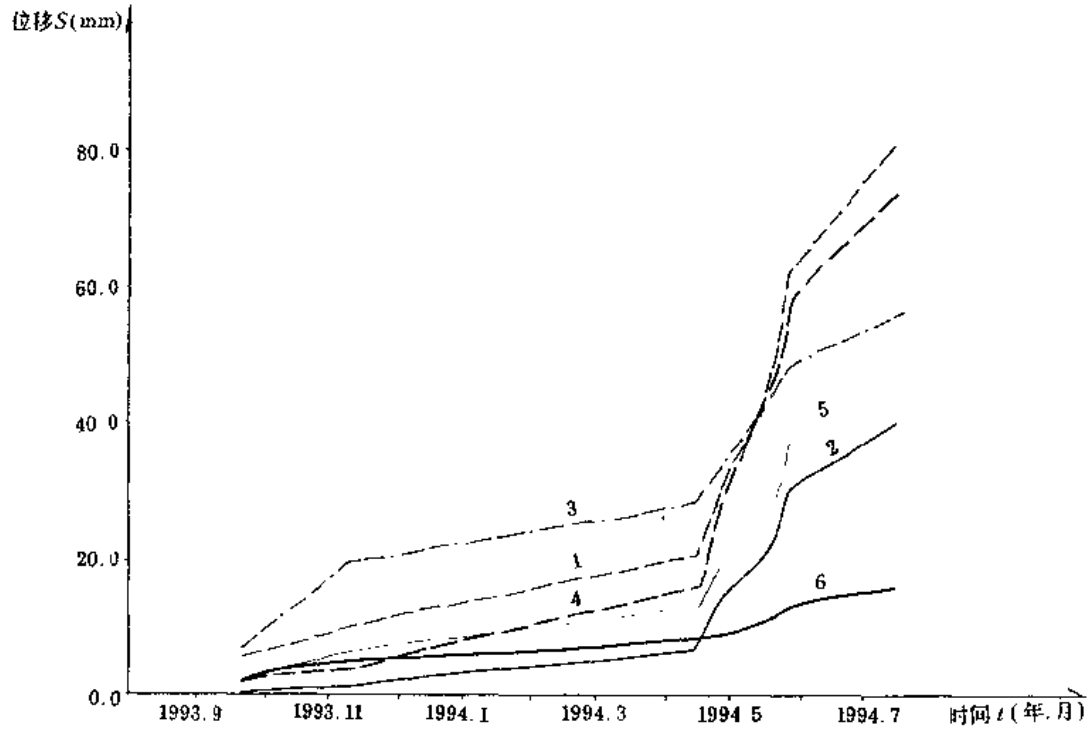


图 4-6　不同深度处滑坡位移曲线

（曲线说明同图 4-5）

但总体演变趋势表现为受季节变化，尤其是降雨影响，呈台阶状上升趋势。各种监测结果反映出的位移速率在 1994 年 4 月或 6 月前逐渐减小，显示 1994 年 4 月或 6 月前为滑坡变形的第一阶段，即减速阶段，此后至今（1995 年 5 月），位移速率增加，且位移以近等速发展。表明自 1994 年 4 月后，滑坡各部位变形先后进入第二阶段，即等速发展阶段。至目前，孟家山滑坡各处变形仍处于近等速发展阶段。

第二节　相似材料模型上滑坡动态全过程的预演

相似材料物理模拟实验，不仅揭示了滑坡变形的发育分布规律及其对降水、人类活动的反应，而且预演了滑坡变形至破坏的全过程，研究此过程的演化规律，对于认识滑坡实际的变形破坏过程，预测其动态演化规律极有意义。

一、滑坡变形的动态演变过程

由图 4-7、4-8、4-9 可见，在实验初期，滑坡裂缝宽度，各部位水平、垂直位移速率极低，显示滑坡变形处于第Ⅰ阶段。模拟降水过程开始后，滑坡各部位各向位移速率加快，呈

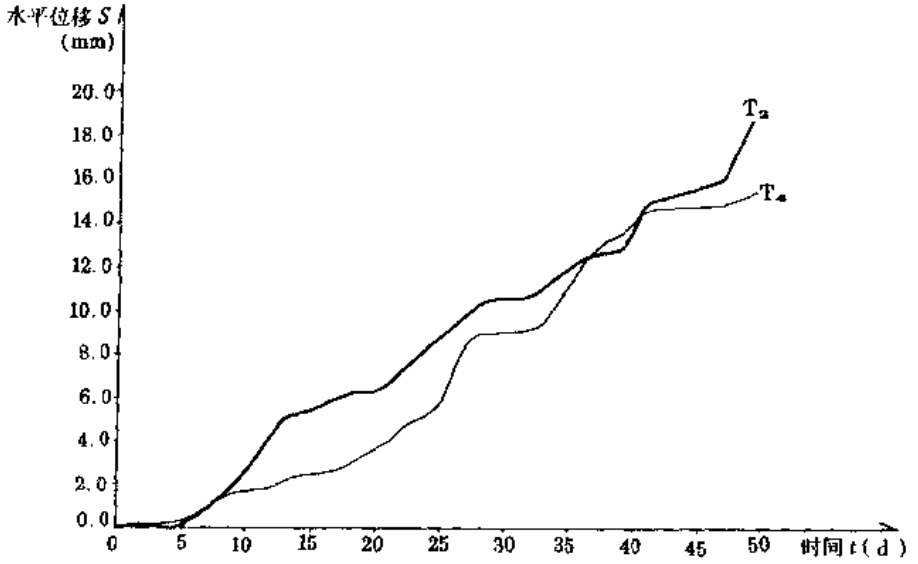


图 4-7　孟家山滑坡实验模型裂缝扩展曲线

现近似线性增长规律。表明降水作用后，滑坡各部位变形进入大致等速发展的第Ⅱ阶段。滑坡裂缝宽度随降雨时段变化呈台阶状线性增长规律，其它部位水平位移、垂直位移则持续增长。滑坡各处位移速率量值的变化规律与位移量值大小规律完全一致：T_2裂缝位移速率最大，T_4 裂缝次之，近坡体前缘处 6# 点再次，滑面近坡脚处位移速率最小。清除坡面堆积物后，初期滑坡各处位移速率反而减缓，后期，各处位移速率则呈现加速增长之势，其中以 T_2 裂缝的加速发展最为剧烈，显示清除坡面堆积物一段时间后，滑坡变形进入加速变形的第Ⅲ阶段，并将以 T_2 裂缝为界解体崩滑。于实验过程第 50 天相继实施的第二、第三次开挖，使滑坡位移速率进一步加速，故而，在极短时间内便开始了 T_2 裂缝前部块体迅速崩滑，并牵引后部块体滑动的滑坡破坏过程。

由于滑坡实验持续时间与实际变形时间尚无对应关系，加之几个过程介入时间及方式完全理想化，故滑坡在各变形阶段的表现还不能用相似关系逆推到原型上。此外，在位移量值上，模型上各处位移量可能比原型的实际表现偏大，这可能与模型材料配比与实际相似比有出入，及二维模型与三维实体不同有关。

二、滑坡破坏过程

第三次开挖刚一实施，滑坡立即表现出滑动之势、T_2 裂缝前坡体沿黄土与第三纪泥岩

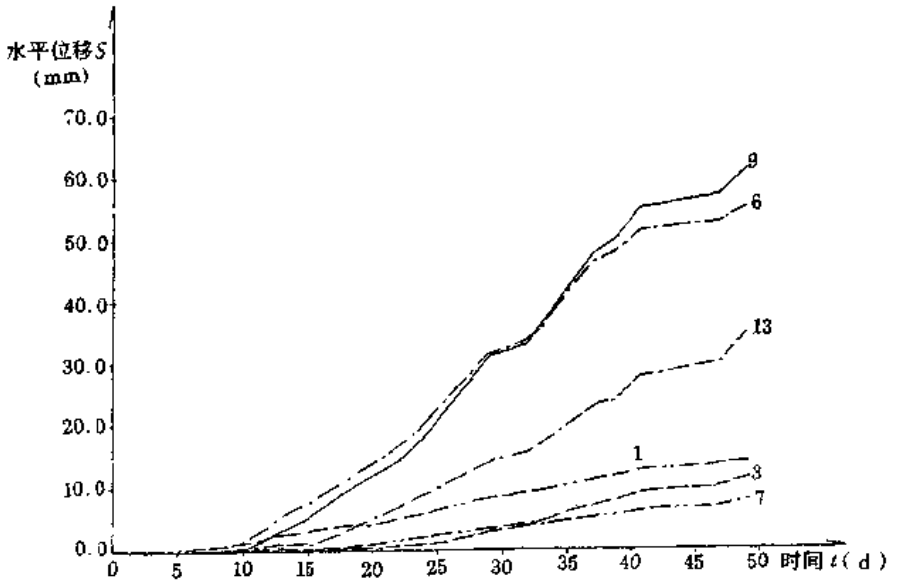


图 4-8　孟家山滑坡实验模型水平位移曲线

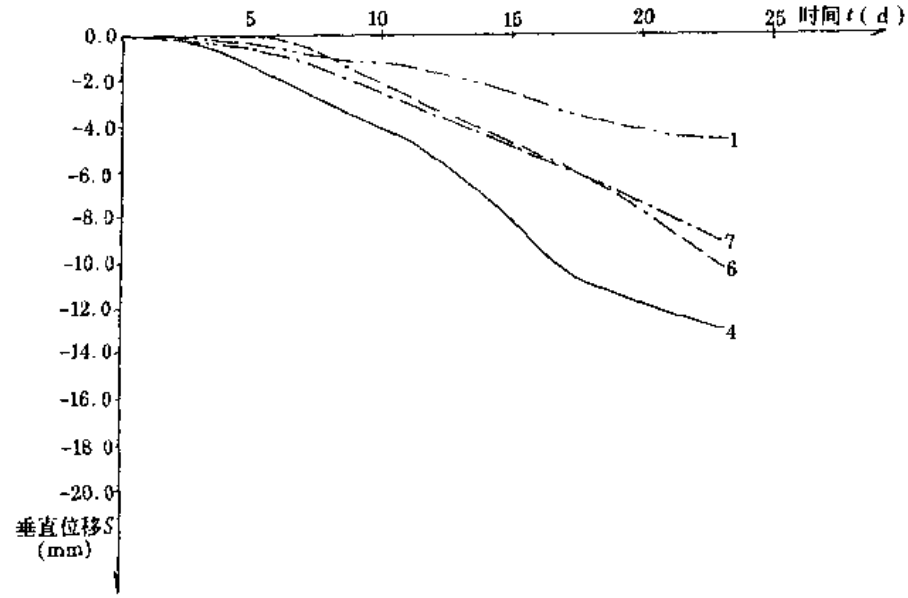


图 4-9　孟家山滑坡实验模型垂直位移曲线

接触面迅速滑移，T_4 裂缝前块体随之沿滑面快速移动（照片 14）。之后在数秒间，T_2 裂缝前坡体急剧冲向渭河，T_4 裂缝前块体则沿滑面向前移动 5cm 后停止（照片 15）。T_4 裂缝前坡体为何最终停止于坡面，可能与模型材料容重稍大于原型，及滑面材料强度为恒值，无峰、残和长期强度变化有关。若考虑滑面强度的衰变特点，则 T_4 裂缝前块体亦应顺滑面滑下，而不至于滑移一段后停止。

第三节　滑坡演变的动态过程与趋势预测的数值模拟研究

岩土体是具有弹性、塑性、粘性的综合性流变体。滑坡变形随时间不断发展，就是组成滑坡的岩土体具有明显蠕变（流变）性质的反映。滑坡中应力、应变状态随时间不断变化是造成滑坡变形不断发展的本质所在。所以，用基于粘弹塑性流变力学的岩土体蠕变理论研究滑坡中的应力、应变及位移变化规律，模拟、预演滑坡动态演变过程，是掌握滑坡变形本质，进行滑坡预测预报的一条有效途径。近年来，随着材料状态本构模型研究的深入和以计算机为工具的数值计算理论水平的提高，粘弹塑性有限元逐渐兴起，为研究岩土体的复杂蠕变过程提供了有利的条件。基于上述认识，在本项研究中，采用粘弹塑性有限元法模拟研究滑坡的动态演变过程，并与实际监测、相似材料模型模拟实验相互比较、验证，据此，预测滑坡的演变趋势。

为了与滑坡变形破坏机理的弹塑性有限元模拟研究相对应，滑坡动态演变过程数值模拟研究在前者基础上展开，故而地质模型、计算模型与前者完全一致。根据实际监测结果，孟家山滑坡目前正处于第Ⅰ（等速）蠕变阶段，所以，通过滑坡动态演变过程研究，预测滑坡第Ⅱ（等速）蠕变阶段与第Ⅲ（加速）蠕变阶段的转折时段，即进行滑坡短期预报，是本项研究的主要目标，对滑坡临滑时段仅作估测分析。

一、力学模型与数学模型的确定

确定适宜的力学模型与数学模型是进行滑坡动态演变过程粘弹塑性有限元数值模拟的前提。

1. 力学模型

选取西源模型（西源正夫模型）（图 4-10a）描述滑坡岩土的粘、弹、塑性状。与 Bigham 模型、Kelvin 模型、Burgers 模型等其它粘弹塑性模型相比，西源模型能够较好地反映岩土体的蠕变（流变）性能，描述岩土体蠕变全过程，是目前公认的比较完善的粘弹塑性力学模型。当 $\sigma>\sigma_s$ 时，其本构方程为：

$$\frac{\eta_1\eta_2}{E_2}\dot{\sigma}+\eta_1\dot{\varepsilon}=\frac{E_1+E_2}{E_1E_2}\dot{\sigma}+\left(\frac{\eta_1}{E_1}+\frac{\eta_2}{E_2}+\frac{\eta_1}{E_2}\right)\sigma+(\sigma-\sigma_s) \tag{4-1}$$

式中：E_1——弹性模量，E_2——粘弹性模量，η_1——弹性粘滞系数，η_2——塑性粘滞系数，σ——应力，ε——应变，σ_s——屈服强度（长期强度）

其蠕变曲线如图 4-10b。蠕变方程为：

$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma}{E_1}+\frac{\sigma}{E_2}\left(1-e^{-\frac{E_2}{\eta_1}t}\right)+\frac{(\sigma-\sigma_s)}{\eta_2}t \tag{4-2}$$

上式中各附号意义同前。

与前述弹塑性分析一致，采用莫尔--库仑准则为塑性屈服准则。

2. 数学模型

依据有限元法的基本思想，对力学模型的本构方程进行变换，可得以下非线性形式的有限元总体平衡方程：

$$[K(\{\delta\})]\{\delta\}=\{R\} \tag{4-3}$$

上式中：$\{\delta\}$——节点位移列阵，$\{R\}$——节点荷载列阵，$[K(\{\delta\})]$ 表示刚度是位移的函数

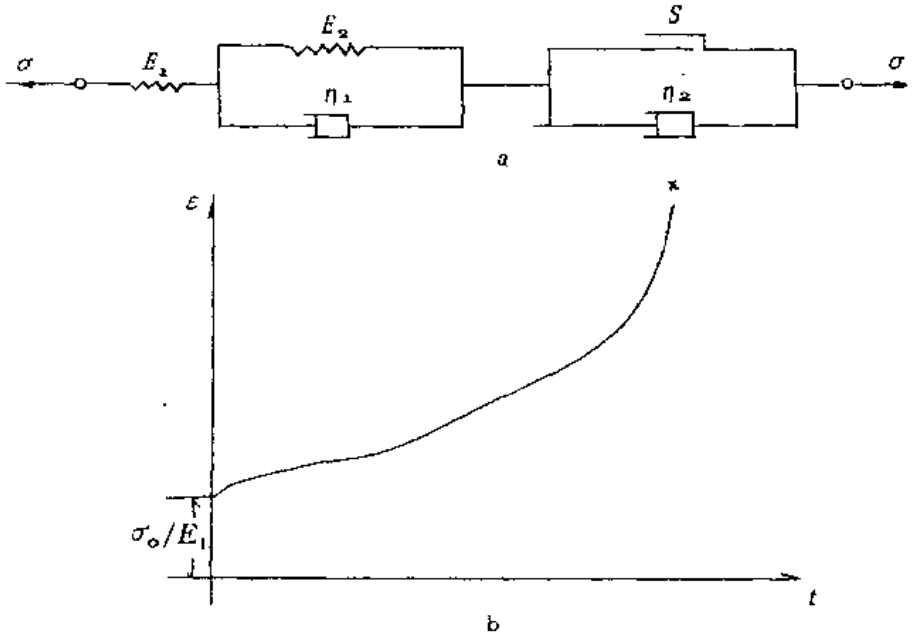


图 4-10　西源模型

采用常刚度初应变法求解，则（4-3）式可写成：

$$[K]\{\delta\} = \{R\} + \{R_c\} \tag{4-4}$$

上式中：$[K]$——弹性总刚度，$\{R_c\}$ 为由“初应变”——粘弹性或粘塑性应变引起的非线性荷载修正项，为时间的函数。

计算过程中，将考察时段 t 分为许多小时段 Δt_i（时步），假定在每个微小时段 Δt_i 内，应力状态保持不变，求得 Δt_i 时刻的蠕应变值，根据岩土蠕变特征和相应的应力状态，找出微小时段内的应变增量，再采用应力转移法进行调整，这样可得 Δti 时段末的新的应力状态和变形状态。逐个对每一时段进行计算，最终可求出整个时段内应力、应变的变化结果。

在滑坡变形过程中，位移量、位移速率不断增大，位移量可由几毫米发展到 1m 以上，甚至 2m，变形由小变形逐渐发展到大变形。而粘弹塑性力学仅限于描述小变形，所以，粘弹塑性有限元法不能求解滑坡变形的全过程，这是此种方法的主要缺陷。为满足粘弹塑性有限元计算中小变形的要求，针对滑坡变形的实际特征，确定位移量 100cm 为允许的最大位移值，即计算的滑坡位移量不超过 100cm，否则，计算自动终止。根据已有滑坡的变形过程，位移量 100cm 大致相当于加速位移阶段前后的滑坡位移量。基于此，滑坡动态演变过程研究的主要目的是分析滑坡从变形开始到加速位移阶段的变形特征，据此预测滑坡加速蠕变阶段出现的时段，达到对滑坡趋势进行短期预报的目的。

针对所研究滑坡的变形特征，便于与实际监测结果对比分析，取等间距计算时步，Δt=30 天即 1 月。

二、计算参数与计算方案

1. 计算参数

综合已有岩土物质力学性质测试结果及工程地质经验数据，确定计算参数，如表 3-1。

岩土蠕变（流变）参数主要依据经验数据类比确定。由于岩土强度在变形过程中的衰

减特性，所以计算中岩土强度值取长期强度。据前人测试结果，黄土地层及其它第四系长期强度取其峰值强度的65%，第三纪泥岩长期强度等于其残余强度，下古生代变质岩长期强度取其峰值强度的50%。

尽管来自经验类比的计算参数与实际情况相比会有一定出入，但其总体关系是能够符合实际情况的，因而可以期望计算结果所反映的总体规律能与实际情况一致，不会影响滑坡变形破坏的发展规律。

2. 计算方案

(1) 孟家山滑坡

依据已有的弹塑性计算结果，对孟家山滑坡取二个计算方案：

第一，原状条件下，与弹塑性分析相同，计算起始时间取1993年7月（滑坡勘查时间）。

第二，开挖条件下。由于第三次开挖滑坡已经破坏，所以粘弹塑性计算，只考虑前二步开挖。

降雨对滑坡的影响随时间呈动态变化，目前在粘弹塑性有限元计算中，还无法叠加外界因素的动态作用，所以，计算中暂未考虑降雨的影响。

(2) 锻压机床厂滑坡

与弹塑性分析相同，仅选原始状态进行计算。取1987年10月勘查时间为计算起始时间。

三、原状条件下滑坡动态演变过程及趋势预测

1. 孟家山滑坡的动态演变过程及趋势预测

在原状条件下，经过33个时步的迭代求解后，T_2裂缝点位移量达98cm，第34个时步迭代时，计算终止。表明第34个时步时，滑坡最大位移量已超过100cm允许值。现从位移、应力、塑性区扩展三方面分析滑坡的动态演变过程。

(1) 滑坡位移特征与趋势预测

a. 滑坡位移特征及其与实际监测、模拟实验结果的比较

由计算结果可见（图4-11），在滑坡表面，裂缝段（10#点，18#点）位移大于非裂缝段位移，前部T_2裂缝（18#点）位移量大于T_4裂缝（10#点）位移量。非裂缝段前部点位移量大于后部，坡体前缘（25#点）位移量最大。T_2裂缝前（20#点、25#点）坡面位移大于T_2裂缝后（11#点、13#点）坡面位移。显示滑坡呈现以T_2裂缝为界的解体变形特征。T_2裂缝前及裂缝部位（包括T_4）垂直位移大于水平位移，T_2裂缝后坡面水平位移大于垂直位移，意味T_2裂缝前坡体具有崩滑之势，沿裂缝坡体呈错落变形，T_2裂缝后坡体则以滑动变形为主。从而滑坡最终呈现崩滑性滑动过程。由计算结果反映出的滑坡表面位移特征与实际监测、模拟实验结果基本一致，由此说明计算结果的可信程度。

纵深断面上滑坡深部位移特征显示（图4-12，4-13，4-14，4-15），滑坡各处坡面位移大于深部位移，随深度增加，滑坡位移逐渐减小，至黄土与第三纪泥岩接触面以下，滑坡位移为零。显示滑面沿黄土与第三纪泥岩接触面发育，此与实际勘查、监测及模拟实验结果完全一致。与ZK_1孔位置相同的监测断面Ⅲ的滑坡深部位移图像与实际表现十分相似，比较相同时间1994年4月的位移量（累计水平位移量），计算结果在坡体表层（深1m处）和滑面两处的位移量为：2.475cm和0.75cm，实际监测结果为2.104cm和0.795cm，二种

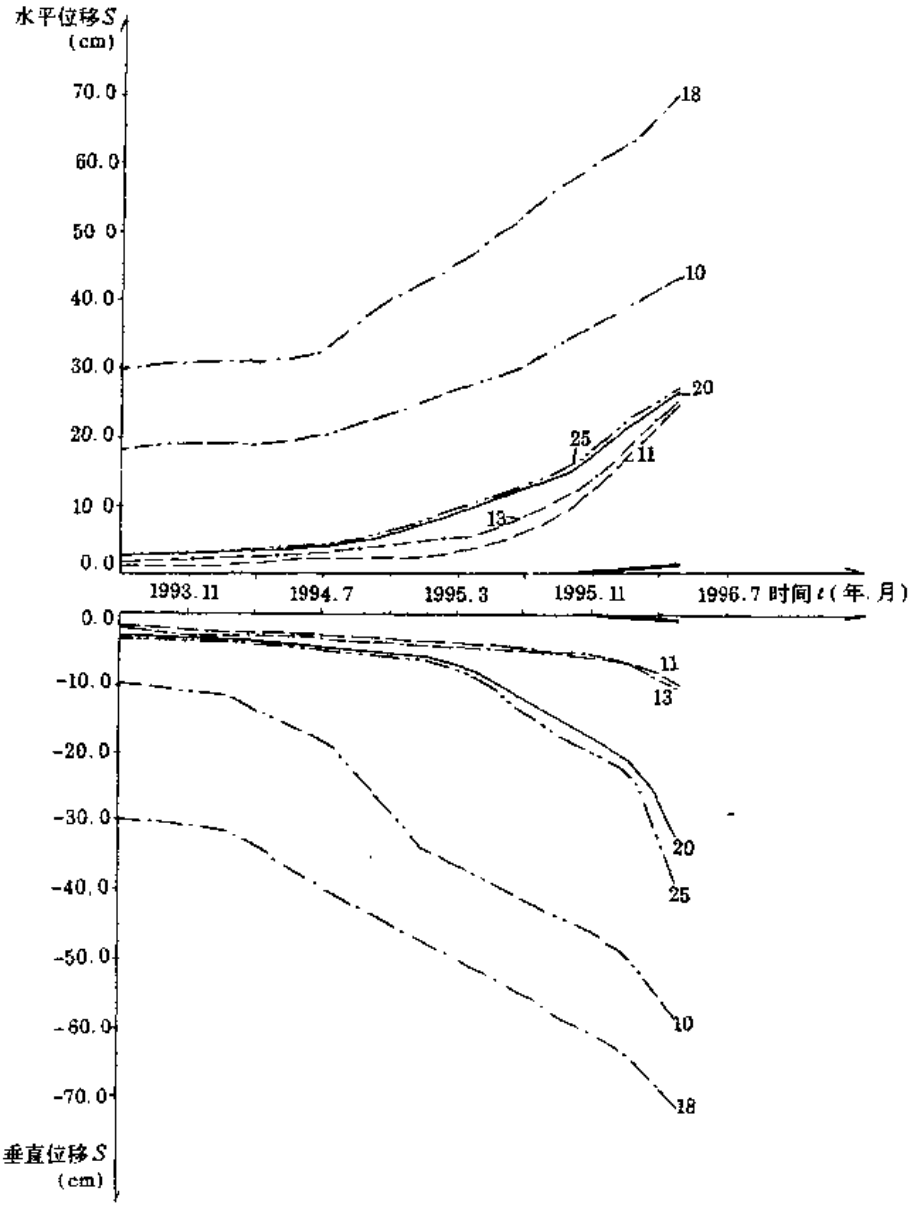


图 4-11　孟家山滑坡坡面位移计算曲线

结果十分接近，在其它各处，计算结果略小于实际监测结果。这可能与计算中未考虑降雨等外界因素有关。从图 4-12，4-13，4-14，4-15 可以看出，在断面上滑坡位移均在黄土古土壤层处略有起伏，从而也显示出滑坡次滑带在这些部位逐渐发育。

滑坡深部位移特征显示（图 4-16），在滑坡变形的后期阶段以前，滑面中段（117#点，125#点）位移量最大，后段（112#点）次之，前段（127#点）最小，在滑坡变形阶段后期，滑面后段位移量迅速增加，滑面前段位移量亦不断增加，但其量值仍小于滑面中段位移量。这种变形规律表明，滑面发育自中段开始，随后向侧逐渐发展，滑坡剪出口在最后形成。此结果与滑坡深部位移实际监测及模拟实验结果完全一致。从而进一步说明了计算结果的可靠性，也更进一步证实了对滑坡变形破坏地质模式分析的正确性。此外，滑面各部位水平

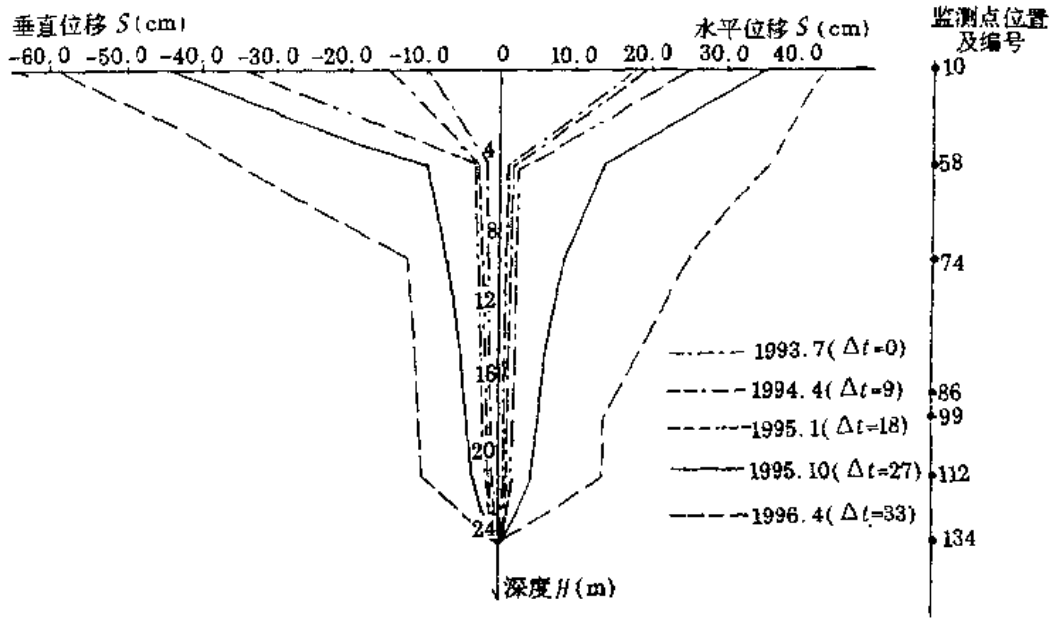


图 4-12　孟家山滑坡监测断面Ⅰ滑坡位移计算曲线

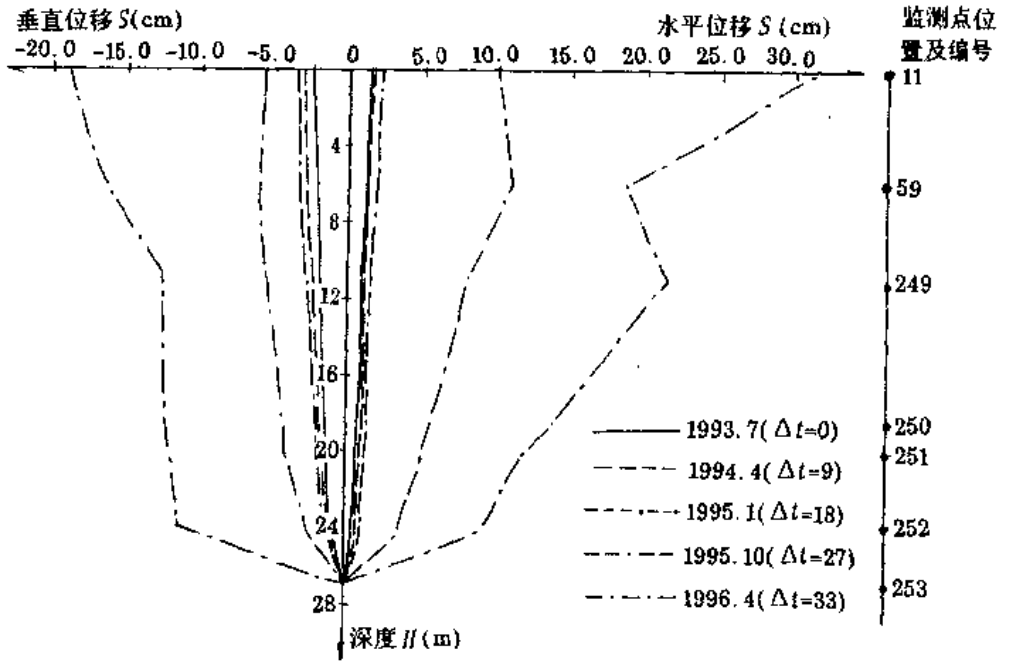


图 4-13　孟家山滑坡监测断面Ⅱ滑坡位移计算曲线

位移与垂直位移的比率关系恰与该部位滑面（黄土-第三系接触面）的倾角变化一致，显示了滑面产状对滑坡位移特征的控制作用，这种规律也与模拟实验的结果完全一致。

综上所述，尽管对计算条件作了理想化处理，但计算结果与实际监测、模拟实验所反

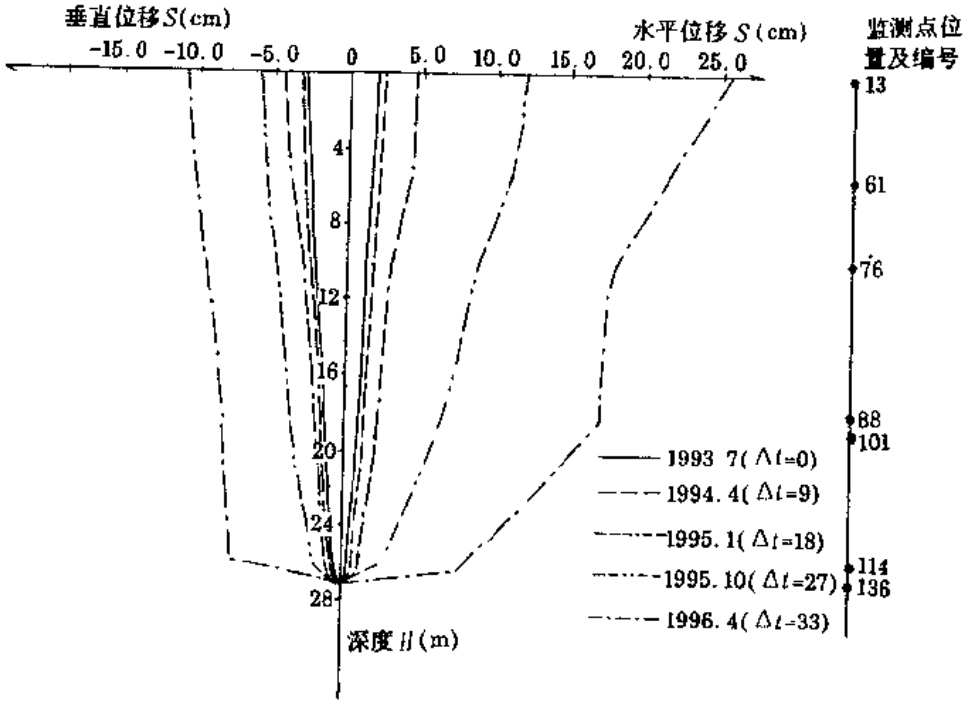


图 4-14　孟家山滑坡监测断面Ⅱ滑坡位移计算曲线

映的滑坡变形规律几乎完全一致，计算结果与实际监测结果在量值上也基本相近，前者仅略小于后者。所以，有充分理由相信计算结果的可靠。由计算结果所表现的滑坡变形规律完全可以用来超前预测滑坡演变趋势。

b. 滑坡变形演化过程及趋势分析

由计算曲线（图 4-11，4-16）清楚可见，在计算时段内，滑坡蠕动变形的减速—等速—加速过程均已表现，只是最终加速阶段尚未完成。由于滑坡变形的复杂性和特殊性，滑坡各部位变形速率不均，水平位移速率和垂直位移速率不等。

从坡面位移曲线（图 4-11）上可以看出，滑坡动态演变有如下趋势规律：滑坡前部（20#点、25#点），从变形开始至 1994 年 7 月，水平位移速率极其缓慢，且从 0.5cm/月减至 0.25cm/月，垂直位移速率，从变形开始至 1995 年 1 月，也由 0.5cm/月减为 0.25cm/月；直至 1996 年 1 月，水平、垂直位移均成等速增长，其中水平位移速率约为 1.5cm/月，垂直位移速率大约 2.5cm/月；1996 年 1 月后，滑坡变形进入加速阶段，位移速率剧增，尤其垂直位移增长速度极快，在坡体前缘（25#点）表现尤为强烈，意味着滑坡前部将逐渐开始崩塌，且崩塌自前缘开始逐渐向后发展。T_2 裂缝段（18#点），水平位移速率从变形开始至 1994 年 6 月，由 1cm/月减至零，垂直位移速率，1994 年 1 月前，由 1cm/月减为 0.25cm/月；以后至 1996 年 1 月，水平、垂直位移均以大致 2.5cm/月的速度等速增长；与前部变形相同，1996 年 1 月后，位移速率剧增，位移速率大于 5cm/月，显示，变形进入加速阶段，但此时位移速率略小于坡体前缘。T_4 裂缝段（10#点）的变形动态规律与 T_2 裂缝几乎完全同步，只是位移量小于 T_2 裂缝，加速变形阶段位移速率稍低于 T_2 裂缝。T_2 裂缝后坡体（11#点、13#点）变形显示，自变形开始至 1995 年 3 月，位移速率缓慢衰减，此后位移呈等速增长，直至 1996 年 1 月；与坡体其它部位相同，1996 年 1 月后，位移速率迅速增大，高达 4cm/月，

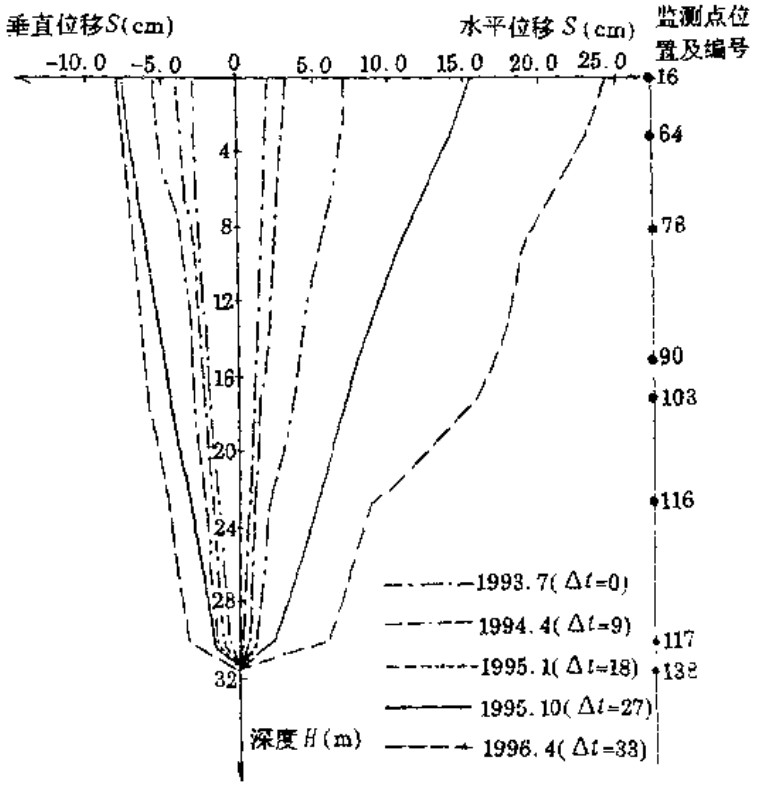


图 4-15　盂家山滑坡监测断面 N 滑坡位移计算曲线

意味后部坡体的变形亦从 1996 年 1 月后进入加速发展阶段，此外，在后部坡体的变形进程中，水平位移速率大于垂直位移速率，显示滑坡后部变形以滑动为主。滑坡坡脚部位（34# 点）于 1996 年 4 月开始变形，位移量 0.2cm，剖面位移矢量（倾角）方向 23.5°，表明，从 1996 年 4 月开始滑坡剪出口形成，滑坡整体加速变形开始。

滑坡深部变形过程显示（图 4-16），滑面后段（112# 点），自坡体变形开始至 1995 年 1 月，一直处于缓慢的微小变形之中，（水平、垂直）位移速率由 0.1cm/月减至零；以后位移以 1cm/月的速度等速发展，直至 1995 年 7 月；1995 年 7 月后，位移开始加速发展，表明 1995 年 7 月后，后缘 T_4 裂缝逐渐与黄土-第三系接触带（面）贯通。滑带（面）中前段（117# 点、125# 点），在 1994 年 7 月前，（水平、垂直）位移速率均呈等速增长，此后，位移速率剧增，且前段（125# 点）的位移速率远大于中段（117# 点），显示滑坡具有解体滑移之势，这与坡面位移的表现特征完全一致。滑带（面）前缘段（127#）则到 1995 年 10 月后位移才呈现加速趋势，此前位移增长速度极其缓慢，表明 1995 年 10 月后，近前缘部位的滑带（面）才开始发育成熟。

滑坡变形的上述演化过程显示，不同部位变形的非同时性和非整体性，在同一时期，滑坡不同部位处于不同的变形阶段，同一变形阶段，不同部位位移量不等。因此，以位移及位移速率为滑坡趋势预测参数，关键在于选取适当的变形部位，并结合滑坡活动特征进行预测预报。作为趋势预测控制点的选取，以变形信息易于观察捕捉，所在部位能客观反映滑坡变形的特征为基本原则，同时，在预测控制点的选取时，同时兼顾最短安全期原则。即

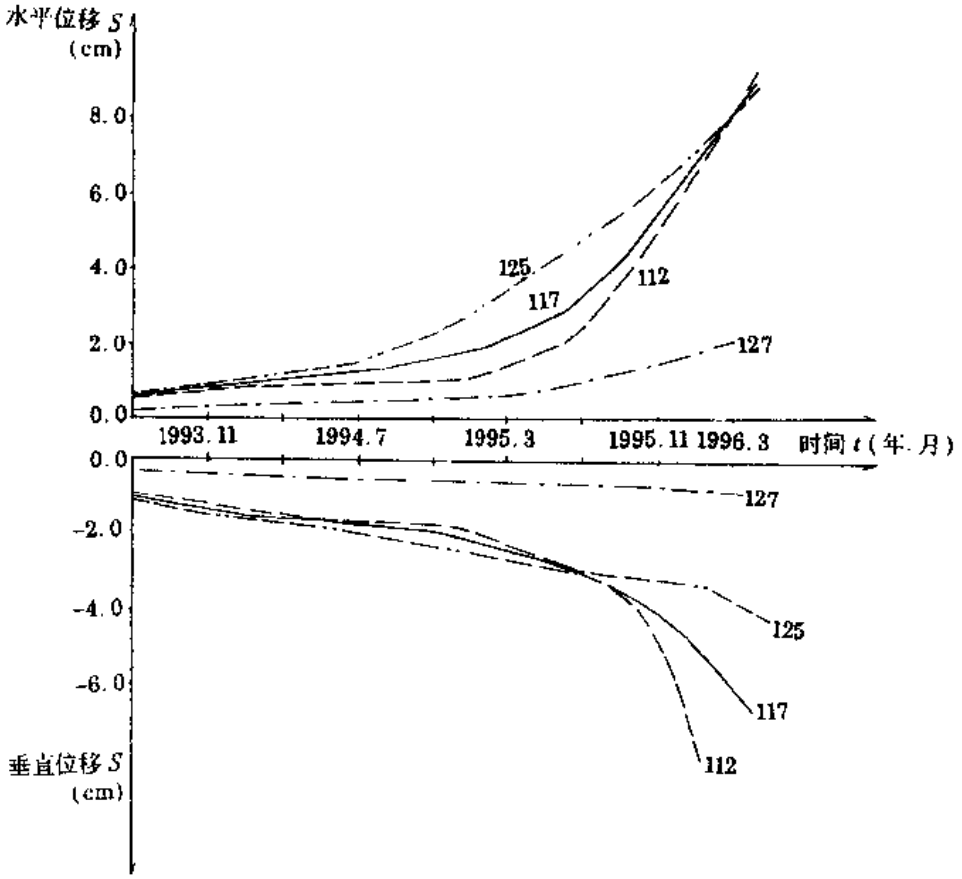


图 4-16　孟家山滑坡深部（滑面）位移计算曲线

以最早进入加速蠕变阶段为变形点的预测控制点。根据上述原则，在前述分析基础上，对孟家山滑坡选取前缘点（25#点）、T_2 裂缝点（18#点）、T_4 裂缝点（10#点）为滑坡趋势预测控制点。

从前述分析可以看出，尽管坡面各处变形开始时间不同，第一、第二变形阶段历时不等，但在 1996 年 1 月后，位移速率急剧增大，表明宏观上坡体变形在 1996 年 1 月后进入加速发展阶段，坡体变形快速增大，直至滑坡破坏。尤其坡体前缘（25#点）急剧变形，逐渐开始崩塌破坏，将是滑坡变形进入加速发展阶段最直观的标志。故 1996 年 1 月为滑坡预测警戒时段。

c. 基于滑坡蠕变特征的滑动时间估测

加速变形时间并不是滑坡的滑动时间。岩土体蠕变（流变）理论、室内实验研究及已发生的滑坡实际变形过程均清楚表明，滑坡岩土体变形进入加速发展阶段后，尚需经过一段时间的变形过程，方才开始滑动。加速变形阶段历时的长短与滑坡规模、类型及滑体结构、滑带（面）发育特征有关。据对国内外典型滑坡加速变形阶段历时调查结果（据张倬元、黄润秋）（表 4-4），总体规律是：滑坡规模越大，加速变形阶段历时越长；滑坡岩土体越松软，此段历时越长，土质滑坡加速变形阶段历时较岩质滑坡长；滑带（面）强度越低，滑坡加速变形阶段历时越长；滑带（面）倾角越缓，历时也越长；滑坡坡面越缓，此段历时越长；等等。已有研究结果证实，若滑坡线性等速阶段历时为 t_1，非线性加速变形阶段历时为 t_2，则有：

$$t_1/(t_1+t_2)=0.618 \tag{4-5}$$

即滑坡变形符合自然界事物演化的普遍规律---黄金分割律。所以，孟家山滑坡也不应例外。若以滑坡变形演化过程的数值模拟结果为依据，选取滑坡前缘点（25#点）、T_2裂缝点（18#点）和T_4裂缝点（10#点）为预报控制点，根据黄金分割律，这三点所在部位坡体加速变形阶段的历时及相应的坡体破坏时间如表4-5所示。

表4-4 国内外典型滑坡加速变形阶段历时

滑坡名称	滑坡类型	规模（万m^3）	发生地点	发生时间	加速变形阶段历时（月）
洒勒山滑坡	黄土滑坡	3100	中国	1983.3.7	25
新滩滑坡	堆积层滑坡	3000	中国	1985.6.12	34
锡别山矿边坡	岩质滑坡	2	中国		2
黄荆坪矿边坡	岩质滑坡	0.2	中国	1980.9	25（h）
洒勒山新滑坡	黄土滑坡	300	中国	1986.3.25	14
龙西滑坡	半固结土质滑坡	200	中国	1986.1.26	24.8
金川露天矿边坡 YI-4	岩质边坡		中国		8
金川露天矿边坡 YI 2	岩质边坡		中国		7
金川露天矿边坡 YI 2	岩质边坡		中国		9
Vajont 滑坡	岩质滑坡	25000	意大利	1963.10.9	17
Chuquikamata 露天矿边坡	岩质边坡		智利	1959.2.18	3.1
Kencotta 露天矿边坡	岩质边坡				16（d）
敬家村滑坡①	黄土滑坡	100	中国	1978.5.11	30

①据韩恒悦，1984。

（据张倬元、黄润秋，1988）

表4-5 孟家山滑坡代表性点加速变形阶段历时及坡体破坏时间

点　位	加速变形阶段历时（月）	坡体破坏时段
滑坡前缘（25#点）	7.4	1996年8月（中）
T_2裂缝点（18#点）	11.1	1996年12月（初）
T_4裂缝点（10#点）	11.1	1996年12月（初）

从上述分析可以看出，若不考虑任何外界因素的影响，孟家山滑坡前缘将从1996年8月开始频繁崩塌，以后牵引T_2裂缝前坡体于1996年12月崩滑，继之，T_4裂缝前坡体产生

整体滑动。此即本项研究对孟家山滑坡滑动时间的粗略估测。

实际上，在滑坡漫长的变形过程中，不仅受降雨、冻融等自然因素随季节变化的不断影响，而且可能受人为活动的影响，正如第三章的分析结果，这些外界因素的作用，大大加剧滑坡的变形程度，缩短滑坡的变形历程，从而使滑坡活动时间提前。至于提前的幅度，则取决于外界因素的作用强度和作用时间。如何在滑坡变形过程的数值模拟研究中考虑外界因素的动态变化及其作用的定量评价，是今后需深入研究的难点之一。

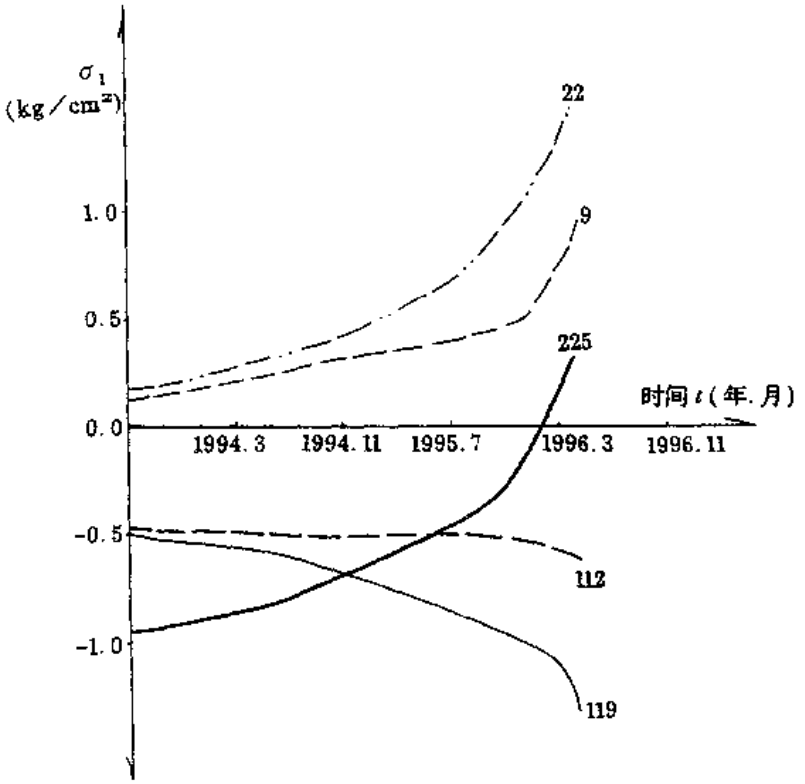


图 4-17　孟家山滑坡代表性点最大主应力 σ_1 历时计算曲线

(2) 滑坡内应力分布与演化规律

滑坡不同部位代表性单元最大主应力 σ_1 和最大剪应力 τ_{max} 历时计算曲线如图 4-17、4-18 所示。由图中清楚可见，坡面前、后缘部位（22#单元、9#单元）拉应力、剪应力随时间不断积累，从而导致这两处不断产生拉剪破坏，拉裂缝逐渐扩大，坡体变形以崩塌、错落为主。滑坡深部滑带部位，后部（225#单元）最大主应力随时间增长，逐渐由压应力转为拉应力，最大剪应力不断增大，显示此处的拉剪破坏性质；滑带中部（112#单元），最大主应力以压应力状态缓慢增加，最大剪应力随时间增长逐渐衰减；近坡脚部位（119#单元）最大主压应力不断增加，最大剪应力不断积累，表明此处的压剪破坏特征。滑带部位最大剪应力在中部衰减，两端积累，表明滑带在坡体中段首先产生剪切破坏，随后，应力向两端传递，致使两端滑带最大剪应力不断积累，在坡体滑带两端分别产生拉剪、压剪破坏，最终滑带（面）贯通，滑坡整体滑动。

应力状态的历时过程显示，各代表性单元的应力增、减变化时段与相应节点部位的位

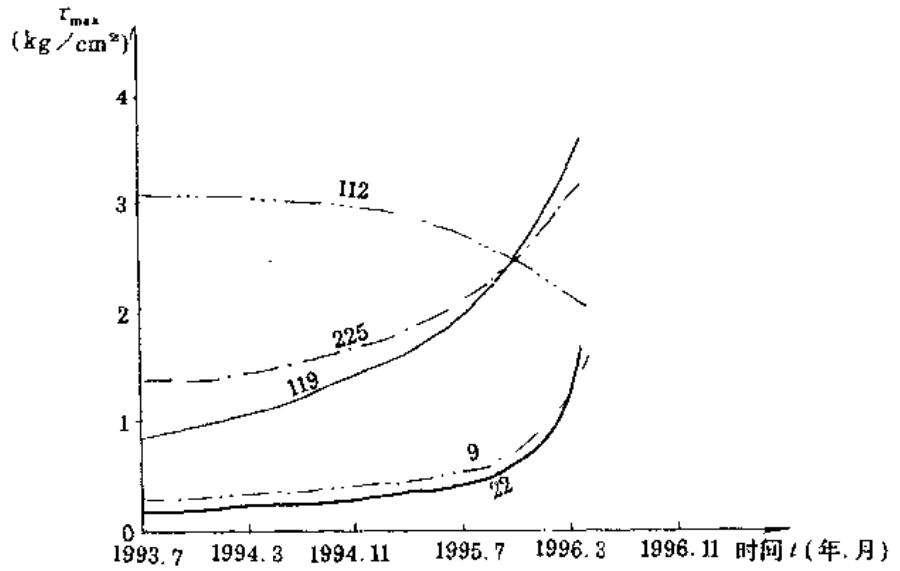


图 4-18　孟家山滑坡代表性点最大剪应力 τ_{max} 历时计算曲线

移变化时段同步，从而证实了应力状态的改变，是导致坡体变形，并不断加剧，直至破坏的本质所在。在滑坡前（22#单元）、后缘（9#单元），拉应力、剪应力逐渐增加，造成坡体拉裂，裂缝宽度不断加大，并逐渐下错，尤其坡体前缘部位的拉应力增长速率大于剪应力增长速率，因而坡体垂直位移大于水平位移，最终产生崩滑。滑坡内拉应力增长幅度以坡面前缘（22#单元）处最强，后缘（9#单元）次之，滑带后部（225#单元）最小。显示滑坡内拉应力自前向后，由表及里减小的规律，表明滑体在前缘部位松动最强烈，表层坡体松动比深部坡体强烈；主压应力在滑带处由后向前增大，滑带前部（119#单元）最大剪应力增大幅度最大，量值最高，显示滑带前部为滑带发育中的锁固段。最大剪应力增长幅度滑带大于坡面，最大主拉应力变化幅度坡面大于滑带，表明滑带以压剪变形为主，坡体表层则以松动的拉剪破坏为主。

（3）滑坡塑性区扩展趋势

不同时步滑坡塑性区扩展图像（图 4-19）显示，在初始状态时，滑体中后部及前缘表层已经产生塑性屈服破坏，滑坡前部、T_2、T_4 裂缝深部及滑带前段尚未屈服。随着时间的增长，塑性区逐渐由中后部向两侧扩展，故而在剪应力变化上表现为滑体尤其滑带中段应力逐渐衰减、滑带两端应力不断集中之变化规律。滑坡内塑性区扩展速度极慢，直到第 27 个时步后，即 1995 年 10 月后，扩展速度加快，至第 33 时步即 1996 年 4 月滑体、滑带全部发生塑性屈服破坏，滑带与坡脚贯通，而且 T_4 裂缝后坡体也发生塑性屈服破坏，显示，坡体的强烈变形将牵引 T_4 裂缝后坡体也产生拉裂破坏。从计算结果看，塑性区的扩展进程与位移、应力变化基本同步，滑带（面）贯通时间与坡脚开始变形时间完全一致，表明位移、应力、塑性区扩展三者之间互为因果的相互关系，从而进一步揭示了滑坡变形的本质。随着滑带的贯通，滑体整体变形加速发展，直至破坏。

2. 锻压机床厂滑坡变形过程的反演分析

在无任何外界因素影响下，经过 42 个时步的迭代求解后，滑坡后缘裂缝点位移量

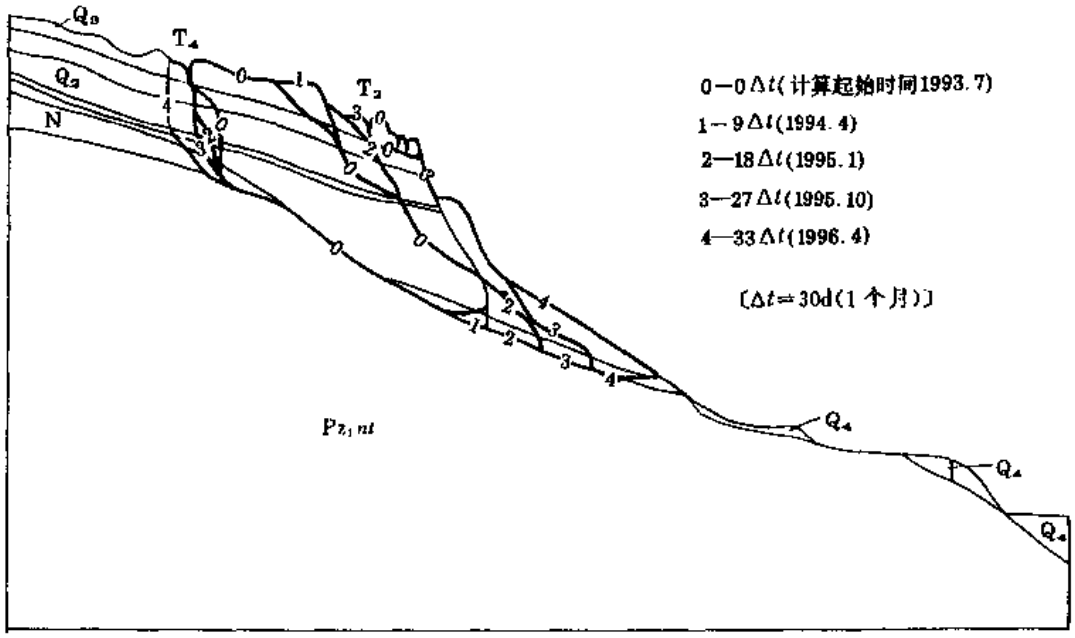


图 4-19　孟家山滑坡塑性区扩展图

77.2cm，到第 43 时步迭代时，计算自动终止，表明至第 43 个时步时，滑坡后缘裂缝位移量超过计算终止值 100cm。现从位移、应力、塑性区扩展三方面反演分析锻压机床厂滑坡的变形过程。

（1）滑坡位移特征及演变趋势

a. 位移特征

计算结果（图 4-20）显示，坡面上以后缘裂缝点（7#点）的位移量最大，且垂直位移大于水平位移，剖面位移矢量方向（倾角）56.3°，此角度与实际滑面的倾角基本一致，显示后缘坡体变形以顺沿裂缝的错落变形为主。自后向前，滑坡位移量逐渐减小，表明坡体变形从后缘开始。除滑坡裂缝部位外，其它各处水平位移大于垂直位移，显示坡体变形以滑动为主。

纵深断面滑坡位移特征显示（图 4-21、4-22、4-23），坡面位移大于深部位移，随深度增加，位移量减小，黄土与第三系接触面以下，位移量减为零，由此清楚可见，滑面顺沿黄土-第三系接触面发育。与实际滑面发育位置比较，在滑坡中、前部，计算滑面与实际滑面完全吻合，坡体后部，由于受后缘拉裂缝发育特性的控制，所以实际滑面倾角 56°，斜穿黄土地层发育，这种发育特征与前述后缘拉裂缝扩展的位移矢量方向完全一致。所以，若考虑后缘拉裂缝的发育特征，则计算滑面位置与实际滑面发育位置几乎完全一致，由此可见，计算结果是可信的，因而反演分析滑坡的变形过程是有意义的。与孟家山滑坡不同的是，在黄土层内部次滑带的发育迹象不甚明显。

滑坡深部滑带（面）位移特征显示（图 4-24），自后向前，滑带（面）位移量逐渐减小，表明滑带（面）从后向前逐渐发育，直至最后贯通。因后部滑面倾角陡，向前滑面逐渐变缓，所以，滑带（面）后部（40#点）垂直位移大于水平位移，前部则与之相反。

b. 滑坡变形过程及演化趋势

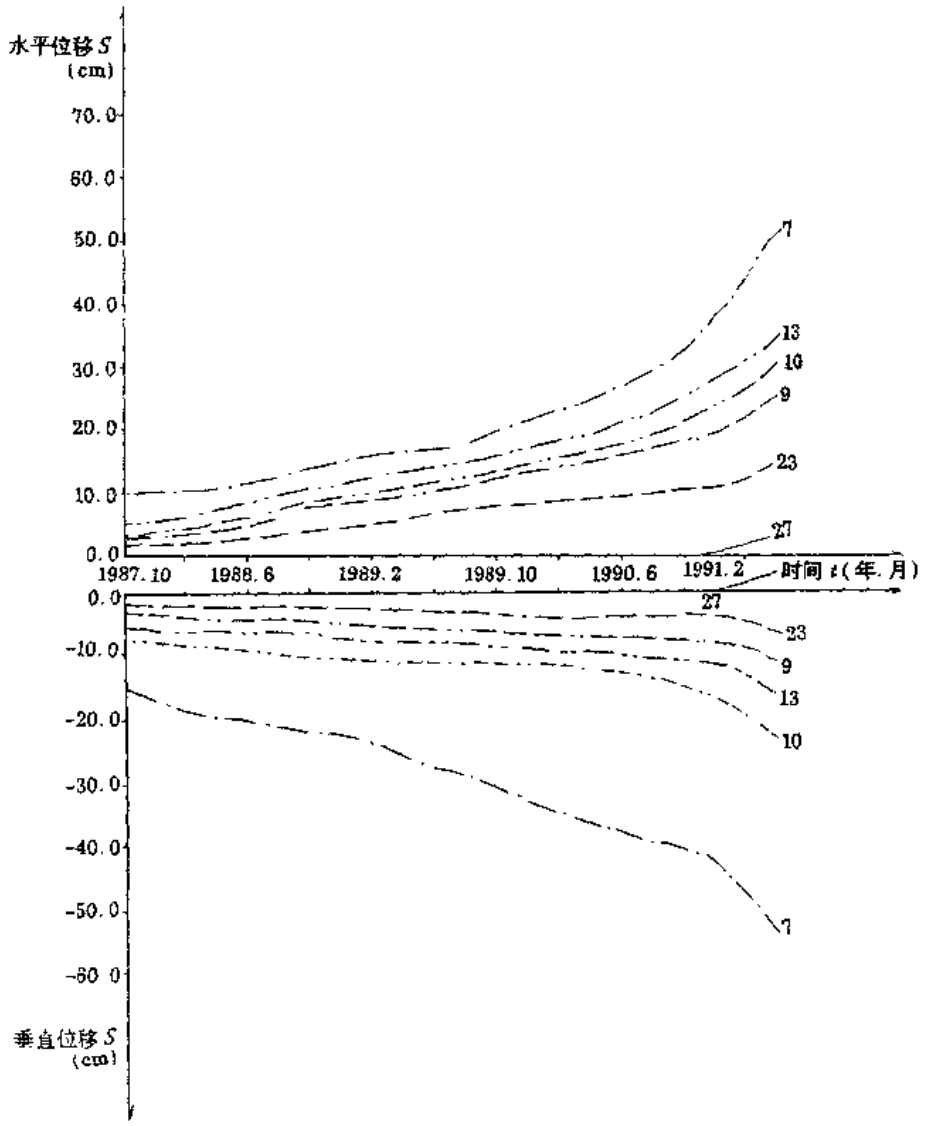


图 4-20　锻压机床厂滑坡坡面位移计算曲线

滑坡位移历时过程反映（图 4-20、4-24），在计算时段内，滑坡变形的各个阶段均有不同程度的表现，与孟家山滑坡相比，锻压机床厂滑坡变形的第一阶段，即减速蠕变阶段表现不甚明显，且位移增长速率低，所以锻压机床厂滑坡变形历程较之孟家山滑坡更为漫长，这可能与锻压机床厂滑坡坡面及滑面倾角均缓于孟家山滑坡，滑体、滑带（面）强度比后者更低有关。

坡体后缘部位（7#点），水平位移，在 1989 年 7 月前，位移速率从 0.25cm/月减至零，1989 年 7 月至 1990 年 9 月，大致以 1.25cm/月的速率呈线性增长；垂直位移，在 1989 年 3 月前，位移速率由 1cm/月减为 0.5cm/月，1989 年 3 月至 1990 年 9 月，以 1.5cm/月的速率呈线性增长；1990 年 9 月后，该处水平、垂直位移均呈现加速发展趋势。坡面其它部位，从变形开始至 1990 年 11 月，水平、垂直均为缓慢等速发展，1990 年 11 月后，位移加速增长，在计算时段内，未见减速变形阶段。坡脚部位（27#点）于 1991 年 4 月突然开始变形，

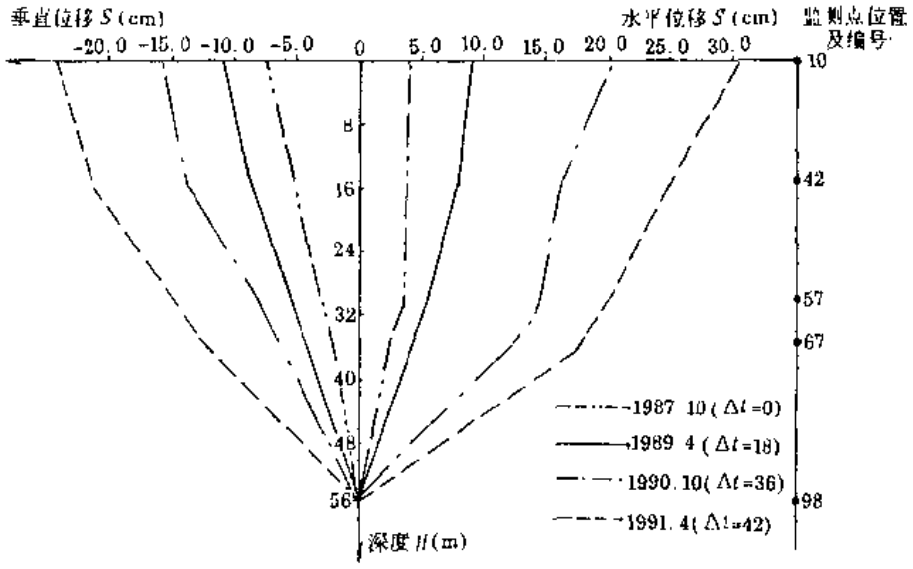


图 4-21 锻压机床厂滑坡监测断面Ⅰ滑坡位移计算曲线

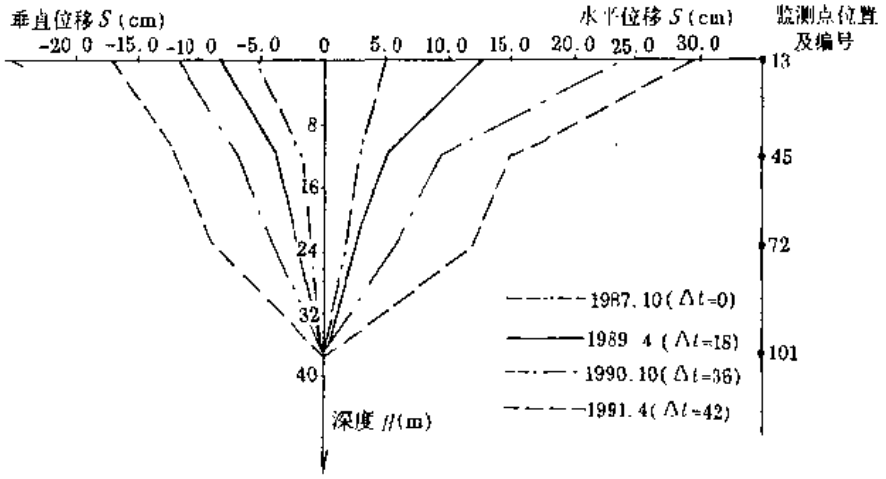


图 4-22 锻压机床厂滑坡监测断面Ⅱ滑坡位移计算曲线

且呈鼓胀变形，位移量 4.6cm，位移矢量方向向上与水平方向夹角 40.6°，显示此时滑面贯通，从坡脚切出，滑坡整体变形开始加速发展。滑面从坡脚斜切的发育特征与滑坡的实际表现完全一致。在滑坡深部滑带（面）的变形历程中，除近坡脚部位外，其它部位在 1989 年 9 月前，位移呈减速增长，此后直到 1990 年 12 月，滑带（面）位移大致以等速发展，1990 年 12 月后，滑带（面）位移开始加速发展；近坡脚部位，从变形开始至 1990 年 12 月，位移一直缓慢呈线性增长，1990 年 12 月后，也开始呈现加速变形的趋势。

从上述分析可以看出，与孟家山滑坡相似，锻压机床厂滑坡不同部位变形演变过程的历时长短不一。滑坡变形发展过程显示，从 1990 年 9 月起，坡体变形自后缘坡面开始从表及里，由前向后逐渐进入加速变形阶段，直到 1991 年 4 月，滑面在坡脚贯通，剪出口部位开始变形，预示着滑坡整体加速变形阶段的开始。

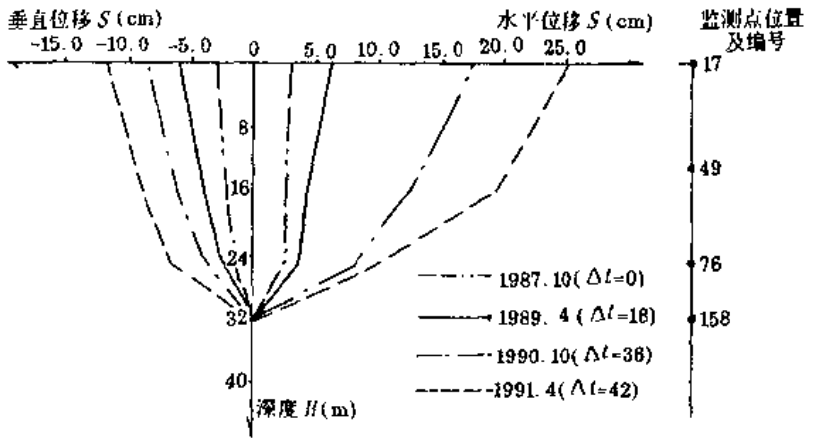


图 4-23　锻压机床厂滑坡监测断面Ⅲ滑坡位移计算曲线

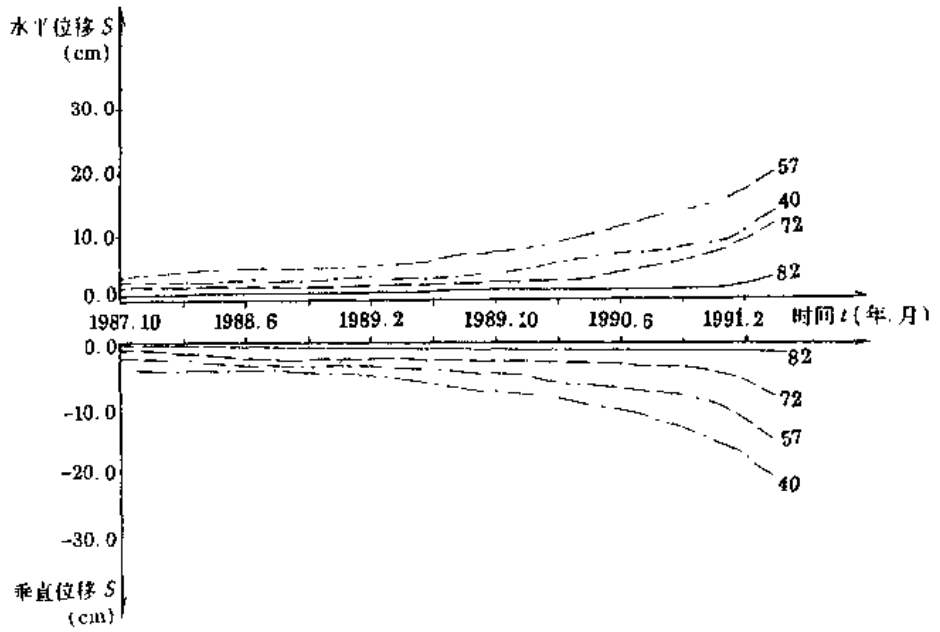


图 4-24　锻压机床厂滑坡深部位移计算曲线

按前述原则，以最短安全期考虑，选滑坡后缘（7#点）为预测控制点，用“黄金分割律”推算，锻压机床厂滑坡加速变形阶段历时 8.6 个月，则滑坡滑动时间大致在 1991 年 5 月。实际上锻压机床厂滑坡于 1990 年 8 月 11 日在百年一遇的 2 时 30 分钟 113mm 大暴雨诱发下滑动。显然，降雨作用使滑坡滑动时间提前，充分说明了降雨在滑坡变形过程中的作用。

(2) 滑坡内应力分布及演变特征

滑坡代表性单元最大主应力和最大剪应力历时过程显示（图 4-25，4-26），坡体后缘部

位（12#单元）拉应力、剪应力不断增长，从而导致该处滑坡拉裂缝不断扩张，坡体沿之错

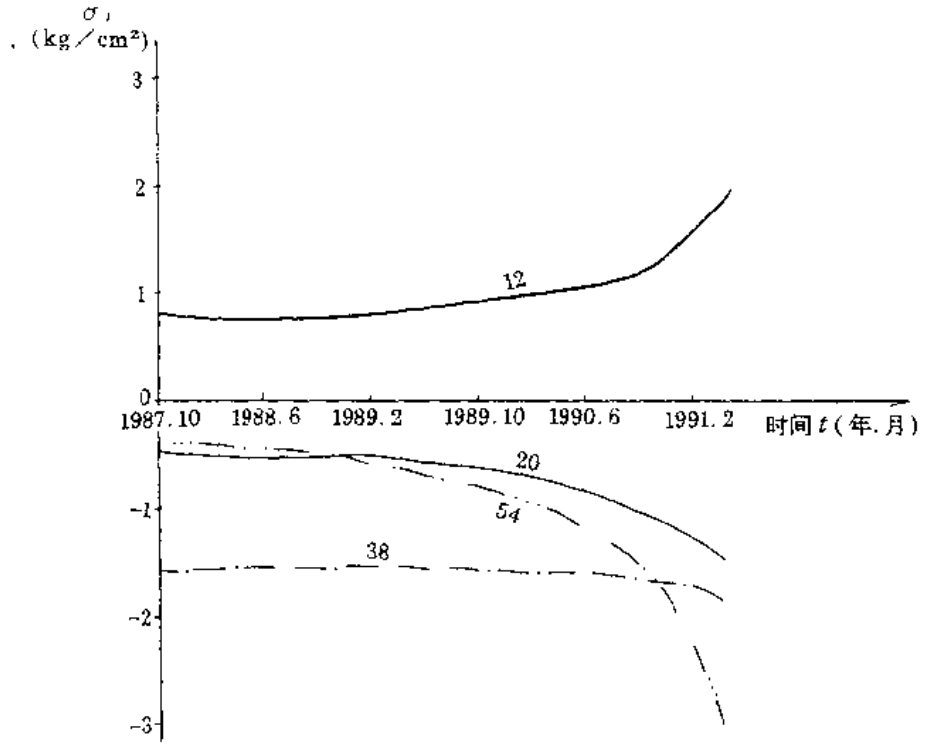


图 4-25　锻压机床厂滑坡代表性单元最大主应力 σ_1 历时计算曲线

落，产生拉剪破坏。滑带（面）中后部（20#单元，38#单元）主压应力缓慢增长，最大剪应力持续衰减，坡脚部位（54#单元）主压应力、最大剪应力均以较大幅度不断积累。如此规律表明，滑坡中后部滑带（面）剪切变形发展，使应力不断释放，向前部传递，从而在近坡脚部位应力集中，最终滑带（面）在坡脚贯通，滑坡整体滑动。

与孟家山滑坡相似，坡体各部位应力增、减变化时段与相应部位位移变化过程基本同步，同样揭示了应力状态变化导致滑坡变形的本质规律。

（3）滑坡塑性区的扩展特征

由图 3-26 清楚可见，初始状态时，滑坡中、后部已经发生塑性屈服破坏。随着时间的发展，塑性区由后向前缓慢扩展，第 36 个时步后、即 1990 年 10 月后，塑性区开始迅速扩展，直到第 42 个时步后，即 1991 年 4 月后，塑性区扩展到滑坡坡脚，滑带（面）从坡脚切出，故此时在坡脚处开始向上鼓胀变形，坡体开始全面的加速变形进程，直至整体滑动。滑坡塑性区的扩展进程与位移、应力变化过程同步，表明三者之间互为因果的密切关系。

四、人工开挖坡脚条件下孟家山滑坡变形的演化趋势

为考察孟家山滑坡在人为开挖坡脚作用的影响下，滑坡变形破坏过程的演化特点，计算中又模拟了第一次开挖条件下和第二次开挖条件下滑坡变形破坏的发展过程。由于人工开挖时间不易确定，为计算方便，假设开挖在坡体初始条件下实施。下面仅着重就人工开挖条件下，滑坡变形进程的改变和塑性区的扩展特征加以分析。

1. 第一次开挖条件下，滑坡的变形破坏过程

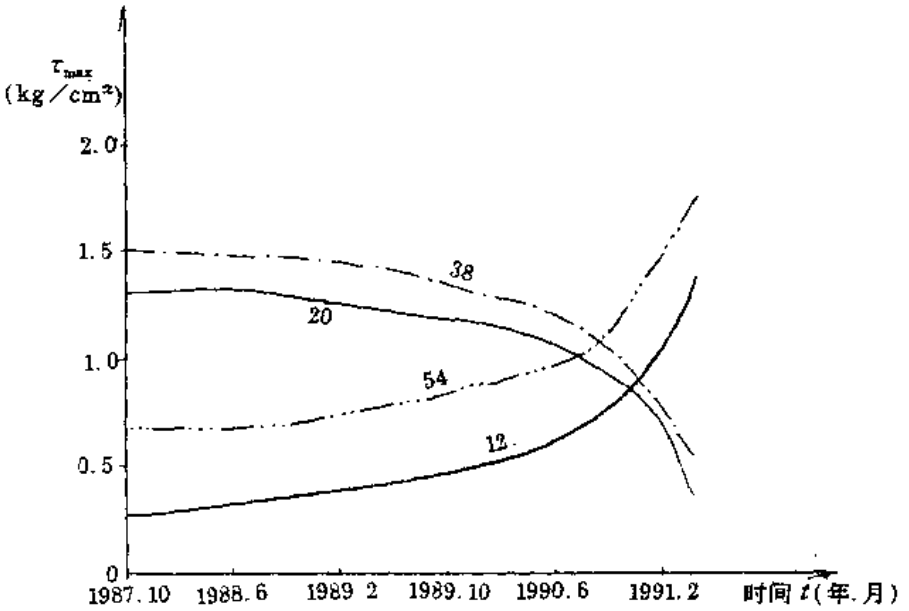


图 4-26　锻压机床厂滑坡代表性单元最大主应力 τ_{max} 历时计算曲线

(1) 滑坡变形进程的改变

清除坡面松散的已滑堆积物后，经过 9 个时步的迭代计算，T_2 裂缝（18#点）处位移量达 85cm，至第 10 个时步迭代时，计算终止，说明 T_2 裂缝位移量已超过 100cm。由此可见，由于坡面堆积物的清除，滑坡变形速率大大加快，变形进程缩短。由计算结果分析，在第 2 个时步前，坡体位移增长不明显，此后，坡体各处位移速率增大，并呈线性增长，其中以坡体前缘（25#点）和 T_2 裂缝（18#点）的位移速率最大，在第 8 个时步迭代后，前缘和 T_2 裂缝部位位移急剧增大，变形进入加速发展阶段，坡体其它部位变形在第 9 个时步迭代后，也呈现加速发展趋势。按最小安全期原则，据“黄金分割律”大致推算，清除坡面堆积物后，滑坡加速变形阶段历时约 4.3 月，由此粗略估计，在不考虑降雨影响下，清除坡面堆积物 1 年后，坡体开始滑动。无疑若有降雨影响，则滑坡活动时间提前。

(2) 滑坡塑性区的扩展

由图 4-27 可见，清除坡面堆积物，并经过 6 个时段后，坡体前缘上部及后缘拉裂缝段拉剪型塑性区迅速扩展，滑带（面）向坡脚方向缓慢扩展，表明清除坡积物后，使滑坡前缘段的崩塌变形加速，历程缩短。9 个时段后，滑带（面）塑性区与坡脚贯通。自此，滑坡整体开始加速变形，直至破坏。同时，T_4 裂缝后坡体也产生拉剪屈服破坏，显示坡体向临空方向的迅速蠕动，牵引后部坡体产生拉裂变形。

2. 第二次开挖条件下，滑坡的变形破坏过程

(1) 滑坡变形进程的改变

清除坡面堆积物，并进一步开挖坡脚后，经过 3 个时步的迭代，T_2 裂缝位移量 98cm，至第 4 个时步求解时，计算终止，说明 T_2 裂缝位移量已大于 100cm。计算结果反映，由于坡脚的进一步开挖，坡体各处位移速率较之上一步开挖大大加快，变形中几乎未出现第一阶段，第 2 时步后，T_2 裂缝点（18#点）和坡体前缘点（25#点）位移加速增大，其它部位

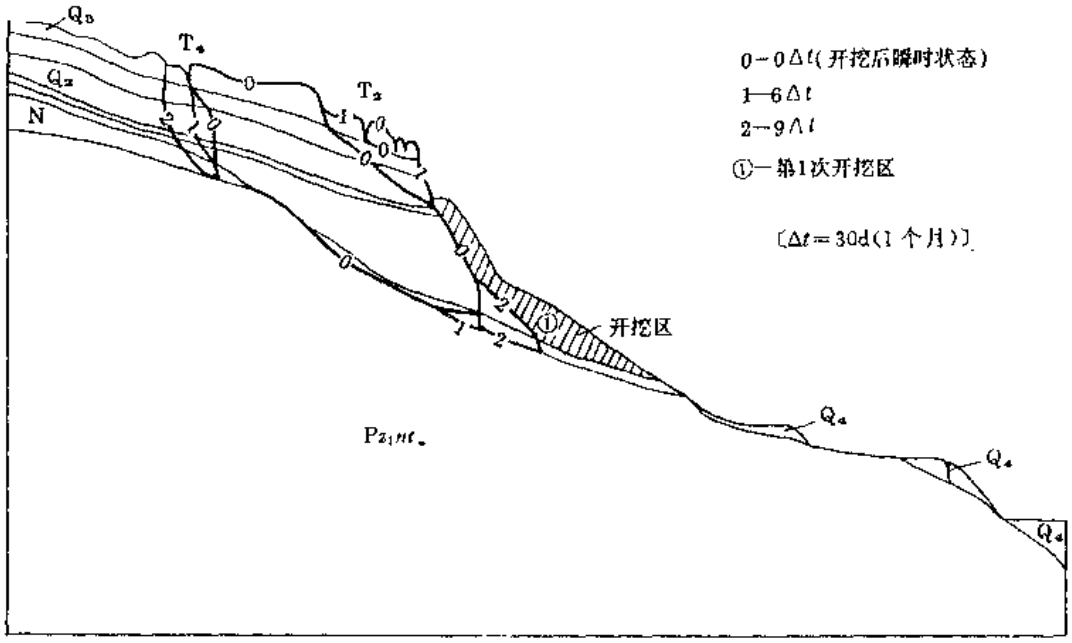


图 4-27　孟家山滑坡第一次开挖后塑性区扩展图

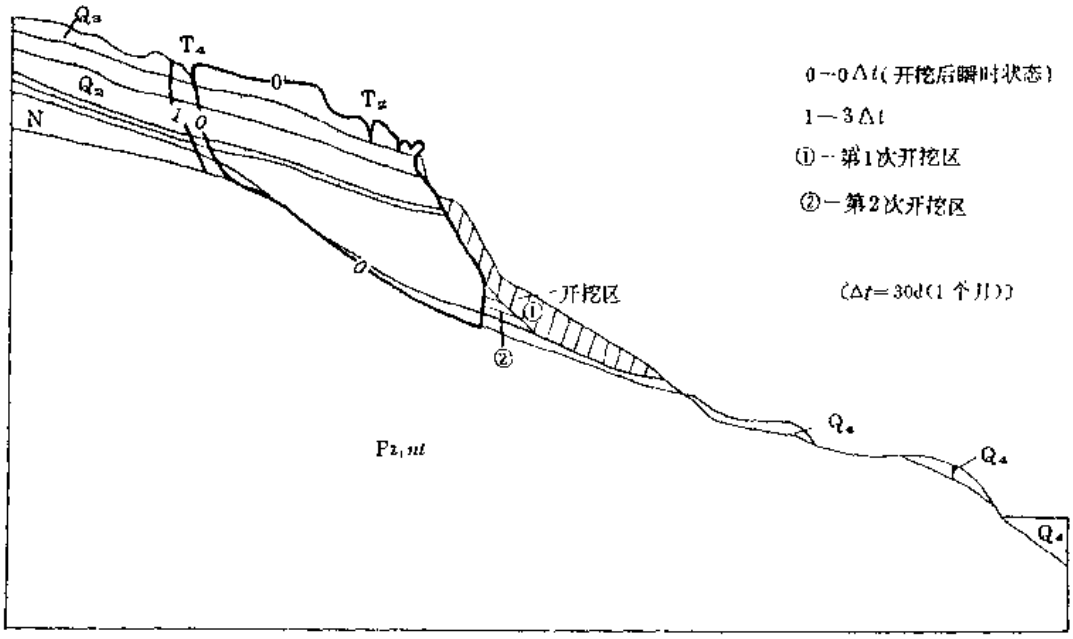


图 4-28　孟家山滑坡第二次开挖后塑性区扩展图

从第 4 个时步后，位移速率亦迅速增大，表明自第 2 个时步后，坡体各处相继开始加速变形。可见，坡体变形历程比第一次开挖后进一步缩短。据“黄金分割律”粗略估测，滑坡加速变形阶段历时约 1.2 个月。即在无降雨影响下，第二次开挖后 4 个月，滑坡开始整体

滑动。

(2) 滑坡塑性区的扩展特征

第二次开挖后，滑带（面）已与坡脚贯通（图 4-28），仅后缘 T_4 裂缝尚未与滑带（面）贯通，显示坡体已处于极限平衡状态，在第 3 个时步迭代后，不仅 T_4 裂缝与滑带（面）贯通，且 T_4 裂缝后坡体也产生拉剪破坏。滑坡整体变形加速发展，在短时间内便会快速崩滑。

第四节　滑坡失稳后活动强度的估测

滑坡一旦失稳，便进入运动状态。以滑动速度、扩展范围为标志的滑坡活动强度直接控制着滑坡致灾程度的大小。因此，进行滑坡活动强度预测，意义重大。滑动速度、扩展范围是滑坡运动特征的直接表现。滑坡运动过程是能量相互转换的过程，滑面发育成熟后，滑体所具有的势能在克服了滑面摩擦阻力后，转化成动能，滑体以一定速度顺滑道运动，运动过程中滑体的动能因不断克服滑道上摩擦阻力而逐渐耗尽，最终滑体运动停止。所以，运动学中功能转换与守恒定律是研究滑坡运动特征的基础。据此，在本项研究中试图对滑坡滑移速度及扩展范围作粗略估测。

一、滑移速度

1. 公式推导

尽管滑坡运动并不是理想的质点运动，但其总体运动规律符合质点运动规律。所以，粗估滑速时，可将其简化为一个位于滑坡重心处的质点，以重心处质点的运动规律近似替代滑坡运动的总体规律。为便于计算，针对所研究的孟家山滑坡、锻压机床厂滑坡的特征，在求解滑坡滑移速度时，作如下几点假设（图 4-29）：

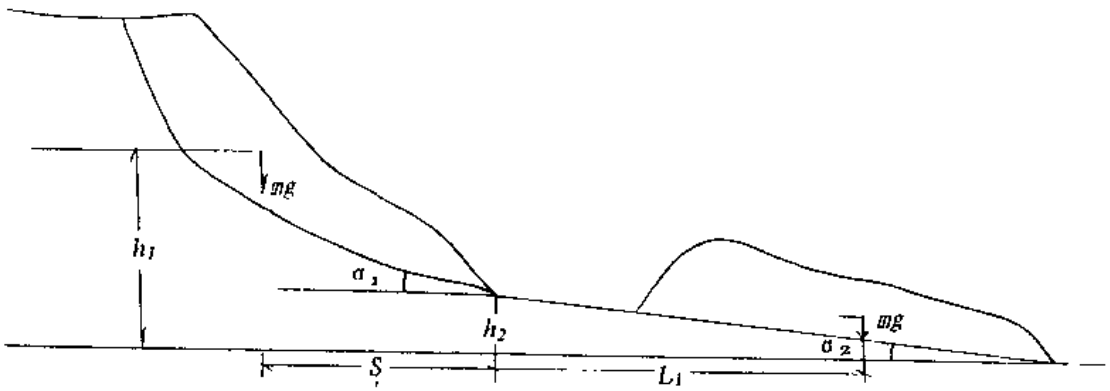


图 4-29　滑坡滑速、滑程计算示意图

①滑坡重心高度零点取坡下稳定地面处，滑坡重心落差为 h_1；

②滑坡剪出口与稳定地面高差为 h_2；

③滑坡启动后，滑带（面）内聚力 $C=0$，内摩擦角降为残余内摩擦角 φr_1，则滑坡滑面上动摩擦系数 $fk_1=\mathrm{tg}\varphi r_1$；

④滑面平均倾角为 α_1；

⑤滑坡重心至滑坡剪出口的距离为 S；

⑥滑坡运动过程中，只克服滑道上的摩擦阻力；

⑦滑坡未动时，仅具有势能；

⑧不考虑滑坡前缘崩塌的影响，认为滑坡作整体滑动，且不解体。

由前述分析可知，滑坡运动过程是能量不断衰减的过程，滑坡运动是一种减速运动。显然，滑速最大值在滑坡启动的瞬间。设滑坡启动速度为 V_0，据能量转换与守恒定律有：

$$mgh_1=\frac{1}{2}mV_0^2 \tag{4-6}$$

则：

$$V_0=V_{max}=\sqrt{2gh_1} \tag{4-7}$$

当滑坡重心到达滑坡剪出口时，由能量转换与守恒定律，可有以下关系：

$$mgh_1-mg\cos\alpha_1\cdot \mathrm{tg}\varphi_{r_1}\cdot S/\cos\alpha_1=\frac{1}{2}mV_1^2+mgh_2 \tag{4-8}$$

则此时滑速

$$V_1=\sqrt{2g\ (h_1-h_2)\ -2g\cdot S\cdot \mathrm{tg}\varphi_{r_1}} \tag{4-9}$$

2. 实际验算与预测

根据滑坡特征及勘查资料，锻压机床厂滑坡及孟家山滑坡的运动参数值如表 4-6 所示。

据式 4-7、4-9，锻压机床厂滑坡和孟家山滑坡在各种条件下的滑速估测值如表 4-6 所列。

由计算结果可以看出，两个滑坡的最大滑速及重心落至剪出口时的滑速均大于 25m/s，按通常滑速等级分类方案，锻压机床厂滑坡和孟家山滑坡均属高速滑坡。根据已有研究结果，以这种速度滑动的滑坡极可能转化为碎屑流。实际上，锻压机床厂滑坡滑动后，前部堆积物破碎，有些近似碎屑流特征。可见，计算结果与实际状况接近。

由表 4-6 清楚可见，滑带（面）的饱和状况对滑速影响极大，滑坡饱和后，滑速提高。滑坡前缘开挖坡脚后，随着坡脚的开挖，滑体重心提高，故最大滑速提高，但由于剪出口高程也随之提高，因而重心落至剪出口时的滑速则逐渐降低。

应该指出，滑坡在孕育过程中，内部积蓄一定的应变能，滑坡一旦滑动，应变能释放，故而滑坡的初始滑速，即最大滑速提高。据研究，有时应变能释放增加的滑速甚至超过滑坡势能转化的滑速（如岩质滑坡）。所以，以传统能量法估测的最大滑速可能低于实际值。另一方面，滑坡运动系统并不是一个完全的能量守恒系统，滑坡能量不仅以摩擦功的形式消耗，而且岩土体破裂变形、滑坡声响等都不断地消耗滑坡的能量。所以，计算的滑坡重心落至剪出口时的滑速可能大于实际值。

表 4-6　滑坡运动参数及活动强度

滑坡及计算条件 / 滑坡运动参数及活动强度	锻压机床厂滑坡	孟家山滑坡					备注
		原状条件下	滑面饱和条件下	第一次开挖条件下	第二次开挖条件下	第三次开挖条件下	
重心落差 h_1 (m)	37	78	78	81	84	86	1. 根据滑坡特征，锻压机床厂滑坡滑面残余内摩擦角取饱和残余值，孟家山滑坡按原状、饱和两种条件分别计算。 2. 滑体与滑道的残余内摩擦角取黄土残余内摩擦角。锻压机床厂滑坡取其饱和值，孟家山滑坡按饱和与未饱和分别计算
剪出口落差 h_2 (m)	0	32.5	32.5	42.5	47.5	50.5	
滑面残余内摩擦角 φr_1 (°)	1.8	7.9	1.8	7.9/1.8	7.9/1.8	7.9/1.8	
滑面平均倾角 α_1 (°)	25	40	40	40	40	40	
重心至剪出口距离 S (m)	101	75	75	51.5	42.5	32.5	
最大滑速 V_{max} (m/s)	26.93	39.1	39.1	39.84	40.58	41.56	
重心落至剪出口时滑速 V_1 (m/s)	25.75	26.23	29.08	24.79/26.89	24.49/26.25	24.65/26	
滑体与滑道残余内摩擦角 φr_2 (°)	23	28	23	28/23	28/23	28/23	
滑道平均倾角 α_2 (°)	0	18	18	18	18	18	
最大滑程 L_{max} (m)	180.69	244.69	508.33	203.1/421.95	190.48/395.67	182.4/378.84	

二、滑坡扩展范围

滑坡扩展范围即滑程。滑程的大小直接控制着滑坡的致灾范围。此处，仅就滑坡纵轴方向上的最大可能滑程作粗略估测。

1. 公式推导

基本假设

①滑坡剪出口至滑坡重心停积处距离为 L_1；

②滑体与滑道间的残余内摩擦角为 φr_2，则滑体与滑道间的动摩擦系数为 $f k_2 = \mathrm{tg}\varphi r_2$；

③滑道与水平面的夹角为 α_2；

④滑道平坦，无障碍物；

⑤滑坡作整体滑动，不解体。

根据能量转换与守恒定律，当位于滑坡重心处的质点停止滑动时，有如下关系：

$$mgh_1 - mg\cos\alpha_1 \cdot \mathrm{tg}\varphi r_1 \cdot S/\cos\alpha_1 = mg\cos\alpha_2 \cdot \mathrm{tg}\varphi r_2 \cdot L_1/\cos\alpha_2 + mg\ (h_2 - L_1 \cdot \mathrm{tg}\alpha_2) \qquad (4\text{-}10)$$

则 $$L_1=\frac{h_1-h_2-S\cdot \mathrm{tg}\varphi_1}{tg\varphi\ r_2-\mathrm{tg}\alpha_2} \tag{4-11}$$

滑坡最大滑程，即滑坡前缘剪出口的滑动距离为：

$$L_{max}=L_1+S=\frac{h_1-h_2-S\cdot \mathrm{tg}\varphi_1}{\mathrm{tg}\varphi_2-\mathrm{tg}\alpha_2}+S \tag{4-12}$$

2. 实际验算与预测

根据滑坡特征，估测的锻压机床厂滑坡及孟家山滑坡的最大滑程如表 4-6 所示。

经实地调查，锻压机床厂滑坡由于坡前厂房的阻挡，实际最大滑距为 118m，比计算值 180.69m 低。所以，若无厂房阻挡，滑坡实际滑距可能大于 118m，接近计算值。可见，计算结果具有相当的实际意义。计算结果显示，若遇降雨，使滑体、滑面饱和，则滑程迅速增大至未饱和时的 1 倍以上。足见，降雨在滑坡运动中的作用。坡脚开挖后，由于剪出口高程的提高和滑坡重心至剪出口距离的缩短，因而滑程减小。

与前述对滑速的分析相同，若考虑滑体破裂、声响等其它形式的能量消耗，那么滑坡的实际滑程可能低于计算值。

第五章　滑坡灾变判据及灾变预测的数学模型研究

尽管各个滑坡结构不同，类型不一，滑坡变形的历程长短不等，变形速率大小各异，但在滑坡变形过程中按变形速率变化，存在三个阶段过程，则是滑坡变形发展的普遍规律。前二个阶段，滑坡变形发展缓慢，滑面尚未贯通，坡体自身尚有一定的抗滑能力，从整体而言，滑动力小于抗滑力。因此，在这一阶段实施滑坡治理工程不仅可行，而且时间上有裕度，这时是积极防灾的最佳时机。滑坡变形进入加速阶段后，滑面迅速贯通，坡体抗滑力急剧降低，坡体失稳已势在必行。从灾害角度看，进入第Ⅲ变形阶段的滑坡致灾已指日可待。这一时期，实施滑坡防治工程已为期较晚，人类的一切活动只能是尽可能减少灾害损失，所以减灾活动应在这一时段尽快着手。因而，从防灾减灾角度审视，在滑坡变形中期预报滑坡进入第Ⅲ变形阶段的时间及相应的变形表现和使滑坡变形进入第Ⅲ阶段的外界因素强度等，较之预报滑坡滑动的准确时间及其临滑表现将更有实际意义。基于上述认识，称滑坡变形第Ⅱ阶段到第Ⅲ阶段的临界点为灾变点。从前述数值模拟结果可以看出，滑坡滑带（面）贯通之时，对应着坡体变形全面进入加速阶段之期。所以，滑带（面）贯通时刻，亦为滑坡变形的灾变点。依据上述思路，结合本项研究的具体情况，以孟家山滑坡为对象，以滑坡变形的实际监测数据、数据模拟研究结果为根据，预测孟家山滑坡进入第Ⅲ变形阶段时的表现、使其变形进入第Ⅲ阶段的外界因素的作用强度及进入第Ⅲ变形阶段的大致时段，以期为防灾、减灾决策提供依据。

需要指出的是，所有预测结果应是趋势性的短、中期预测。有待于在今后的实践中检验、完善。随着监测资料的不断积累和今后进一步研究的深入，预报结果和预报模型将不断得到补充、完善，甚至更新，从而预测结果和预测模型将会更加逼近实际。

第一节　滑坡的灾变判据

滑坡变形进入第Ⅲ阶段时的位移、位移速率和使滑坡变形进入第Ⅲ阶段的外界因素作用强度的量值大小，统称为滑坡的灾变判据。

一、位移与位移速率

依据前述原则，选取滑坡前缘点、T_2裂缝点、T_4裂缝点为预测控制点。

根据数值模拟计算结果，孟家山滑坡变形进入第Ⅲ阶段时，各控制点的位移量及位移速率如表 5-1 所示。

表 5-1 滑坡灾变位移及位移速率判据

预测控制点	水平位移（cm）	垂直位移（cm）	位移速率（cm/m）
滑坡前缘	21	24	7
T_2 裂缝	63	64	5
T_4 裂缝	42	45	4.75

二、降雨强度

从前述降雨对滑坡影响的定量作用研究中可以得到，当降雨量达 75mm 时，滑坡滑带（面）完全贯通（图 3-21）。由此，75mm 降雨量可视为诱发滑坡的临界降雨量。由于计算中仅考虑瞬时条件下，降雨加大坡体容重、在后缘裂缝中产生动水压力两方面，限于目前研究深度，未顾及降雨作用下，滑带（面）强度的降低及降雨随滑坡蠕变过程的动态作用。所以，75mm 降雨量是最高的瞬时临界降雨量，此处，瞬时可视为小于 24 小时降雨量。

三、人类活动强度

定量计算结果表明，当第三次开挖后，坡体滑带（面）完全贯通（图 3-32），故三次自坡脚向坡内开挖 52.5m 的深度值应为开挖坡脚条件下人类活动诱发滑动的临界强度。同样，若考虑滑坡蠕变的累进性发展与人类活动强度的连续作用过程，则实际的诱滑临界强度可能小于预测值。

四、降雨与人类活动叠加作用后，诱滑因素临界强度的变化

根据数值模拟结果，当完成两次坡脚开挖活动后，叠加 25mm 瞬时（小于 24 小时）降雨量，则滑面贯通，所以，25mm 降雨量及二次开挖深度 42.5m 为此种条件下的外界因素诱滑最高临界强度。当完成一次开挖后，降雨 50mm 时，滑带（面）贯通，因此 50mm 瞬时降雨量（小于 24 小时）及清除坡面堆积物为相应条件下外因诱滑的最大临界强度。

第二节 滑坡灾变预测的数学模型研究

滑坡变形是时间的函数。无疑，基于统计原理的时间序列分析方法是研究滑坡变形与时间关系数学模型的有效方法之一。滑坡变形的不同阶段，变形与时间的关系不同，第一阶段，二者呈负指数关系；第二阶段，二者近似线性关系；第三阶段，二者表现为正指数关系。试图用一种数学模型描述滑坡变形全过程中的变形与时间关系，不仅不现实，而且不可能。根据滑坡的变形表现，对各个阶段分别建立变形-时间关系的数学模型，才可能正确反映滑坡的变形规律。孟家山滑坡变形的实际监测及数值模拟结果均表明，滑坡变形正处于第二阶段，即近等速发展阶段。依据前述思路，为预测孟家山滑坡进入第三变形阶段的时段，利用实际监测数据，建立基于宏观监测数据的滑坡位移-时间关系的数学模型，以前述位移灾变判据为阀值，预测滑坡位移达到灾变值的时段，并将此结果与数值模拟结果得出的灾变时段互相对比，分析二者间的关系与可信度。

一、预测控制点的选取与模型的建立

1. 预测控制点的选取

由于滑坡变形监测系统尚不完善，监测手段落后，因此，目前还不能选取与数值模拟研究中完全一致的理想控制点。根据前述对滑坡实际监测资料的分析，选取监测时段相对完整、位移表现特征明显的，靠近滑坡前缘的2#地形变监测点和靠近T_4裂缝的7#地形变监测点为预测控制点。以2#点描述滑坡前缘附近的变形状态，用7#点描述T_4裂缝的变形状态，并对7#点的位移量加上在该处量测的T_4裂缝的初始宽度18cm和落距量10cm(1992年10月)，以完整表现T_4裂缝的状况。

2. 模型的建立

如前述分析，2#点和7#点变形分别自1994年4月和1994年6月进入第三变形阶段。故对此两点分别截取1994年4月和1994年6月以来（至1995年5月）的监测数据为建模的原始数值（图5-1，5-2）。

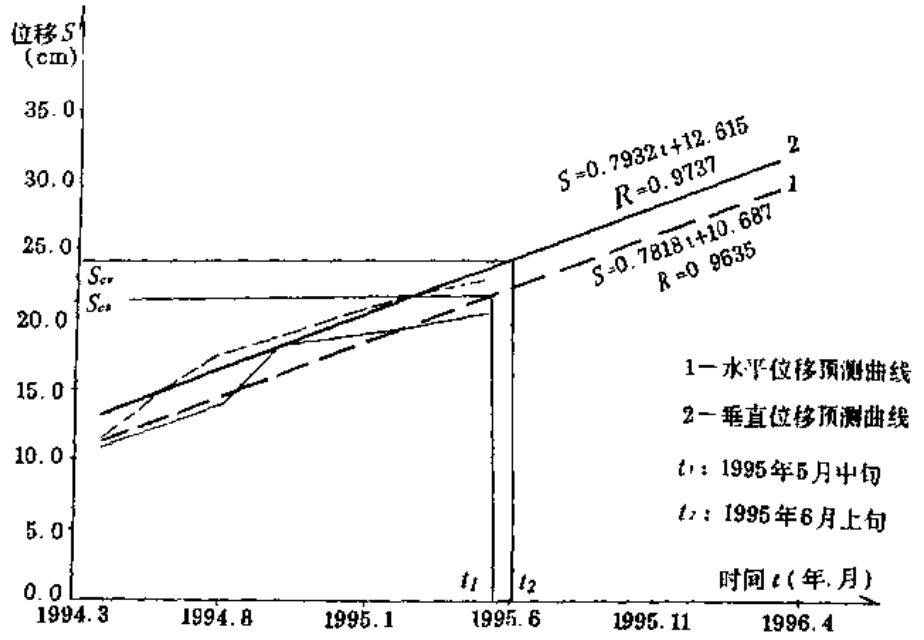


图5-1 地形变测点2#（滑坡前缘）位移-时间关系曲线

设滑坡位移S与时间t的关系为：

$$S = at + b \tag{5-1}$$

式中：a、b为待定系数。

利用图5-1、5-2所示原始数据，根据统计原理，得到2#点和7#点的水平、垂直位移与时间关系模型为：

(1) 2#点（滑坡前缘）

水平位移：$S_h = 0.7818t + 10.687$

相关系数：$R = 0.9635$

方差：$\sigma = 0.93$

垂直位移：$S_v = 0.7932t + 12.615$

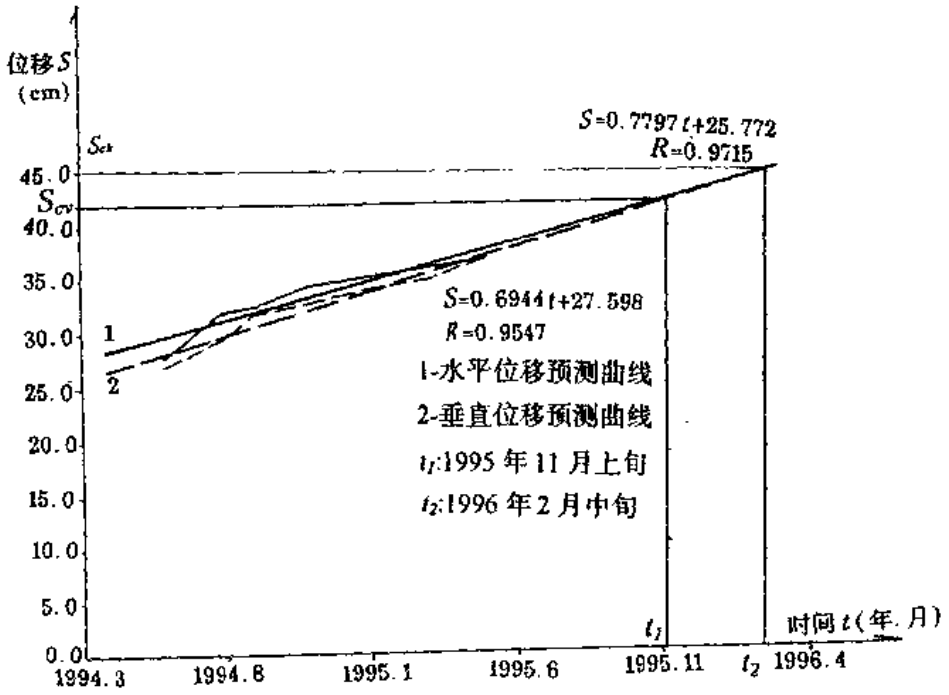


图 5-2　地形变测点 7*（T_4 裂缝）位移-时间关系曲线

相关系数：$R=0.9737$

方差：$\sigma=0.79$

(2) 7# 点（T_4 裂缝）：

水平位移：$S_h=0.6944t+27.598$

相关系数：$R=0.9547$

方差：$\sigma=1.58$

垂直位移：$S_v=0.7797t+25.772$

相关系数：$R=0.9715$

方差：$\sigma=1.68$

从相关系数 R 值看，四个模型均在 0.95 以上，从而在一定程度上说明，滑坡位移 S 与时间 t 明显线性相关。

二、模型的显著性检验

假设位移 S 服从 t 分布，取检验水平 $\alpha=0.05$，即模型的置信度为 99.5%。检验模型关系是否显著。在假设下，有统计量：

$$\frac{\hat{a}}{\sigma}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(t_i-\bar{t})^2}\sim t_{\alpha/2}(n-2)$$ （n 为样本数）即服从 t 分布。

下面对 2# 点和 7# 点分别检验：

1. 2# 点（近滑坡前缘）

水平位移：统计量$\frac{\hat{a}}{\sigma}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(t_i-\bar{t})^2}=12.86$

$t_{\alpha/2}(n-2)=t_{0.025}(12)=2.1788<12.86$

所以，水平位移模型线性关系显著。

垂直位移：统计量$\frac{\hat{a}}{\sigma}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(t_i-\bar{t})^2}=14.93$

$t_{\alpha/2}(n-2)=t_{0.025}(12)=2.1788<14.93$

则：垂直位移模型线性关系显著。

2.7#点（T_4裂缝）

水平位移：统计量$\frac{\hat{a}}{\sigma}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(t_i-\bar{t})^2}=5.19$

$t_{\alpha/2}(n-2)=t_{0.025}(10)=2.2281<5.19$

则水平位移模型线性关系显著。

垂直位移：统计量$\frac{\hat{a}}{\sigma}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(t_i-\bar{t})^2}=5.48$

$t_{\alpha/2}(n-2)=t_{0.025}(10)=2.2281<5.48$

故垂直位移模型线性关系显著。

三、滑坡灾变时段的估测

利用已确定的位移与时间关系模型，根据前节确定的位移灾变判据，预测控制点的灾变时段分别为：

2#点：水平位移：1995年5月中旬前后；

垂直位移：1995年6月上旬前后；

7#点：水平位移：1995年11月上旬前后；

垂直位移：1996年2月中旬前后。

从估测结果看，前缘2#点的变形超前数值模拟结果（1996年元月）和目前的实际表现，比目前实际状况超前，可能与测量误差有关；比数值模拟结果超前，则与降雨作用有关。综合分析几种结果，若在1995年雨季中，无短时间大暴雨出现，则滑坡前缘部位可能在1995年6月后、1996年元月前进入灾变时期，即加速变形阶段。7#点即T_4裂缝段的估测灾变时间与数值模拟结果（1996年元月）基本接近，综合两种结果，可以认为1995年底至1996年初，T_4裂缝部位的坡体变形将进入加速发展阶段。比较2#点与7#的估测结果，2#点所代表的前缘部位变形较7#点代表的T_4裂缝部位坡体更早进入加速发展阶段，进一步显示了前部坡体变形具有解体发展之势的特征，同时，与数值模拟结果比较，进一步反映出前部坡体松动强于后部、对降雨作用敏感的基本规律。

然而，预测必竟是预测，必须经过实践检验，方能显示其正确性。上述预测结果尚有待于在实践中经受检验，并在实践中不断地完善，甚至更新。

第六章　滑坡减灾对策研究

滑坡变形破坏机理及预测预报研究的目的在于根据研究结果，提出防灾减灾建议，为政府制定防灾减灾决策提供科学依据。为保护地质环境，减少和防止地质灾害，地学研究者以其研究成果参与政府决策，在决策制定者和实施者之间充当桥梁作用，正成为当代包括滑坡灾害研究在内的环境地质学的主要发展方向之一。在此，依据前述研究结果，对天水市区典型滑坡——孟家山滑坡，及以其为代表的天水市区乃至黄土地区该类滑坡的减灾、防灾对策提出建议，以期为政府制定减灾防灾对策提供依据。

第一节　滑坡灾害损失预评估

根据滑坡的活动特征及所处的人文环境，孟家山滑坡一旦滑动，将可能在以下几方面造成危害，进而产生严重的社会经济影响。

一、人员伤亡

孟家山滑坡脚下，当地农民频繁取土，滑坡一旦高速滑动，若恰有农民在坡脚取土，造成人员伤亡将不可避免。在孟家山滑坡历史上，这种情况曾有发生。若滑坡滑动时，正值坡下修建 310 国道，则人员伤亡更大。

二、中断天水—社棠高压输电线路

天水—社棠 11 万伏高压输电线路从孟家山滑体上穿过，一旦滑坡滑动，则高压电线杆倒塌，必将中断输电线路，造成社棠段断电，社棠段数十家国有、集体厂矿、企事业单位及居民正常用电将会因此中止，间接损失及社会、经济影响巨大。

三、中断 310 国道的正常修建

即将正式动工的天水—宝鸡 310 国道从孟家山滑坡脚下穿过。若孟家山滑坡在国道修建期间滑动，必将中断 310 国道的正常施工，延长工期。

四、毁损坡上果园

孟家山滑坡后部为农民承包的苹果园，滑坡滑动，可能毁损部分果园，给农民造成直接经济损失。

五、淤塞河道，淹没农田

据前述滑坡活动强度研究结果，尽管孟家山滑坡规模不大，但滑速高、滑程远。其一旦滑动，将以高速冲进渭河，淤塞河道。若滑动正逢洪水季节，则可能造成一定范围的河道回水。滑坡所在地段渭河上游多为滩地农田，滑坡淤塞河道，造成回水后，可能淹没少量滩地农田。

第二节　基于天水市区典型滑坡的减灾对策研究

孟家山滑坡、锻压机床厂滑坡是天水市区崩滑性黄土-红层接触面滑坡的典型代表，同类滑坡在天水市区分布广泛，危害严重。所以，对此类滑坡减灾防灾对策提出建议，十分必要。

一、孟家山滑坡的防灾、减灾对策建议

1. 减灾防灾对策的制定原则

孟家山滑坡正在活动变形之中。天水—社棠11万伏高压输电线路从坡上穿过，即将动工的天水—宝鸡310国道从坡下通过。所以，确保天水—社棠高压输电线路的稳定，310国道的正常施工、安全运营，不发生任何人员伤亡为制定减灾防灾对策的最基本原则。此外，适时、经济、有效为制定减灾防灾对策的另一基本原则。基于此，对孟家山滑坡应以滑前防灾为主，具体防灾措施应以工程措施为主，其它措施为辅。据前述研究结果，孟家山滑坡正处于第二变形阶段，所以，正当实施防治工程的有利时机。

2. 防滑工程措施

根据前述研究结果，除黄土及黄土-红层接触带（面）的特殊性质外，滑体重心高、坡面陡、滑带（面）倾角大是孟家山滑坡滑动呈现崩滑性的主要原因。所以，防治工程措施以降低滑体重心、加大坡体抗滑力、降低滑带（面）强度为目的。所以，从经济、有效角度考虑，减、压、填、挡、排、护应是防治孟家山滑坡的五项主要工程措施。

（1）减

减即削减孟家山滑坡自 T_4 裂缝至滑坡头部，尤其 T_2 裂缝前裂隙发育、易发崩滑部位的滑坡土体方量。减缓坡面坡度、减小滑坡下滑力。据已有成功经验，对天水市区的黄土地层，刷方后坡度1∶0.7即可保持坡面基本稳定。

（2）压

压即在滑坡剪出口附近填方压脚，增大滑坡抗滑段的抗滑能力。前述研究结果已清楚显示，滑带（面）剪出口最后形成，所以坡脚处抗滑能力增大，对剪出口的形成不利。模拟实验及定量计算结果均显示，坡脚处土方量减少（开挖坡脚），滑坡稳定性降低。从而进一步表明，压脚对加固孟家山滑坡的作用。

（3）填

填即夯填滑坡裂缝、落水洞，防止雨水沿裂缝、落水洞向坡内下灌。

（4）挡

挡即支挡工程。在坡体下部，设置挡土墙，增大坡体抗滑能力，提高滑坡的整体稳定性。根据已往成功经验，以下两类挡土墙在坡面较陡的黄土滑坡防治中颇为有效。一类为重力式挡土墙联合加筋土挡墙。在坡体剪出口上下最大滑动力部位设置重力式挡墙，重力式挡墙墙顶加置加筋土挡墙，在墙面板后埋设十排左右聚丙烯拉筋带，利用加筋与土的共同作用来支撑坡体及填土的侧向压力。另一类为土锚杆挡墙，利用打入土层中的钢筋锚杆与墙身肋柱及挡板的共同作用组成一个强有力的支挡结构，以维持坡体力的平衡及安全稳定。此类挡墙在锻压机床厂北侧厂坡整治工程中实施，效果良好。两类挡墙相比，前者施工工艺简单，但工程造价高，后者与前者相比，可节约工程造价70%左右（据汤兰亭等，

1992)，经济效益明显，但施工工艺较复杂。

(5) 排

排即排除滑体上的地表水。在滑坡后缘及坡面修筑地表排水沟，阻止大气降水进入滑坡体内。

(6) 护

护即坡面加固防护处理，防止地表水（雨水）渗入坡体。实践证明，对于黄土滑坡，以下两种形式的坡面加固护理措施较为有效。一为混凝土方格骨架护坡，方格内铺种草皮。另一种为浆砌片石护墙，墙面坡度维持 1：0.75 即可稳定。

以上仅是一些原则性的工程防治措施，若要投入实施，还需作详细、深入的可行性论证及工程设计。

3. 其它措施

在对滑坡实施工程治理措施的同时，还应从另一角度，采取以下两种措施，以分别配合工程措施和防止滑坡稳定性的进一步恶化。

(1) 完善滑坡监测系统，继续监测滑坡动态

为确保天水—社棠 11 万伏高压输电线路的稳定及 310 国道的正常施工和安全运营，完善现有的滑坡监测系统，提高监测精度，对滑坡动态作出更准确的跟踪预报，以便在紧急状态下，提前采取应急措施，减少滑坡灾害。

(2) 严禁在坡下开挖取土

人为开挖坡脚对滑坡稳定性及动态演化进程影响甚大，所以，应立即禁止当地农民在坡下继续开挖取土。

二、天水市区崩滑性黄土-红层接触面滑坡的防灾、减灾对策建议

孟家山滑坡是天水市区崩滑性黄土-红层接触面滑坡的典型代表，所以，对孟家山滑坡提出的各种减灾防灾措施对天水市区此类滑坡具有广泛的适用性。但各种措施的具体实施应针对各个滑坡的特点及其对周围环境的社会经济影响程度等分别对待。从总体上看，天水市区社会、经济地位重要，人类工程经济活动频繁，人口密集，适宜的生产、生活空间有限，所以，滑坡灾害的社会经济影响较大。因此，避免人员伤亡，确保正常的工程建设和城市发展，兼顾适时、经济、有效性是制定天水市区减、防滑坡灾害对策的基本原则。故而，在天水市区，对滑坡灾害应以防为主，以减为辅。即若工程及其它治理措施可行，经济合理，则尽可能的积极防治滑坡。否则，再采取消极、被动的避让、搬迁等减灾措施。就一般而言，对中小型滑坡以治理为主，千万立方米以上的大型滑坡以避、迁为主。

第三节　黄土地区滑坡的减灾对策研究

研究以天水市区孟家山滑坡、锻压机床厂滑坡为典型代表的崩滑性黄土-红层接触面滑坡的主要目的在于探求以其为代表的黄土地区此类滑坡的变形破坏机理、活动特征、变形演化规律，进而提出在黄土地区减、防此类滑坡灾害的对策建议，减轻灾害损失。

一、减灾、防灾对策的制定原则及其基本内容

从天水市区黄土滑坡分布发育的典型性看，对其提出的各种减灾、防灾措施同样对黄土地区此类滑坡具有普遍的适用性。但是，黄土地区此类滑坡分布广泛，规模不一，周围

环境各异，所以减、防灾对策应区别情况，分别对待。从社会经济角度，在黄土地区中，对崩滑性黄土-红层接触面滑坡的防灾、减灾对策的制定应遵循以下几条基本原则：

1. 城镇区滑坡，在工程、经济可行的条件下，以工程防治的主动措施为主，躲、搬、让等被动措施为辅。对规模大于千万立方米的大型滑坡，应在灾害评估和社会经济影响程度分析的基础上，进行各种方案综合论证后，慎重采取相应对策。一般的中小型滑坡，其减、防灾措施内容与孟家山滑坡相同。

2. 对农村地区此类滑坡，以躲、迁等被动措施为主，工程措施以小规模、简单措施为主，如减、压、填措施为主，以减缓滑坡活动强度，延长滑坡变形进程。一般不宜采取大型的支挡类工程措施。

3. 交通沿线上，大型滑坡以避、绕为主，中小型滑坡以防治为主。

二、提高民众减灾、防灾意识，普及科普知识，是减少黄土地区滑坡灾害的有效对策之一

黄土地区民众文化素质、减灾、防灾意识在全国范围内处于较低水平，盲目开挖、过度开荒、不合理填方、毁坏监测标志等不合理人为活动极其频繁，所以，提高黄土地区民众文化素质，增强减灾、防灾意识，减少各种不合理人类活动，将大大减轻滑坡灾害。此外，在民众中，普及有关滑坡知识，使群众能自辩、自防滑坡，积极向有关部门报告险情，鼓励群众灾后自救，也能有效地减轻滑坡灾害。

三、充分发挥保险在减灾中的作用

随着社会的发展，保险在减灾中的作用已越来越明显。所以，鼓励易发滑坡段群众和厂矿企业、事业单位积极加入保险（同样适合于天水市区），也将是减少灾害损失和社会经济影响的有效措施之一。

结　　论

通过本项研究，可以得出以下几点基本结论：

1. 由于特殊的地质地理环境，黄土地区是我国滑坡多发区之一。黄土滑坡危害严重，极大地阻碍了黄土地区的社会经济发展。黄土滑坡以其特殊的结构特点，活动特征，在各类滑坡中占有特殊重要的地位。所以，在黄土地区开展“典型滑坡预测预报及减灾对策研究”不仅具有重要的社会经济意义，而且有着明显的理论意义。在各类黄土滑坡中，崩滑性黄土-红层接触面滑坡不仅分布广泛，而且危害最重，所以，从减轻灾害角度，选取崩滑性黄土-红层接触面滑坡进行研究，具有特殊重要的意义。

2. 天水市区是黄土滑坡分布发育最密集区之一。该区的滑坡分布规律、发育特征、危害程度之典型在黄土地区屈指可数。自古以来，天水市区便深受滑坡之害，在众多的滑坡中，以崩滑性黄土-红层接触面滑坡造成的危害最重，社会经济影响最大。孟家山滑坡、锻压机床厂滑坡是天水市区崩滑性黄土-红层接触面滑坡的典型代表，前者正在活动变形，后者已经滑动，造成严重危害。以此两个滑坡作为研究解剖点，预测与反演相结合，开展本项研究，是一条十分有效的研究途径。

3. 黄土地层质地疏松、垂直节理发育、物理力学性质特殊；黄土与第三纪泥岩接触带（面）力学强度低、性质独特；滑坡坡面较陡，滑体重心高，潜能大；滑面倾角陡．是崩滑性黄土-红层滑坡发育的基本特征。该类滑坡的本构特性决定了其变形活动的地质模式为“坡体蠕动-后缘拉裂-滑带自中部向两侧发展-剪出口形成-坡体突滑”。滑坡的实际变形破坏过程和相似材料模型物理模拟实验研究和弹塑性有限元数值模拟研究，从宏观现象、微观特征及物理力学机理上进一步证实了滑坡变形破坏的地质模式，并揭示出拉应力集中区位于坡体后缘、前缘，压、剪应力从中部集中发展，向两侧释放传递是滑坡活动呈现崩滑式的力学本质之所在。降水、人类活动对滑坡稳定性状影响极大。

4. 对孟家山滑坡动态的各种监测结果表明：孟家山滑坡目前正处于近等速发展的第Ⅱ变形阶段。但坡体各部位变形量、变形速率不同，目前以滑坡前缘及 T_2 裂缝的变形量、变形速率最大，显示滑坡的解体崩滑之势，滑带（面）部位，以中段变形最大，两端较小。相似材料模型物理模拟实验对滑坡变形破坏过程的预演结果显示出滑坡变形特征及趋势与实际表现近乎吻合。基于岩土体蠕变（流变）理论的滑坡动态演变过程的数值模拟结果，反映的滑坡变形特征及变形趋势与实际监测、模拟实验基本一致。所以，在此基础上预测滑坡变形破坏趋势不仅有意义，而且可信。由此对孟家山滑坡变形趋势得出的预测结果为：无任何外界因素影响时，滑坡变形将于 1996 年 1 月后进入加速发展阶段，按“黄金分割律”估测滑坡临滑时间为前缘点可能于 1996 年 8 月开始崩塌，进而牵引后部坡体于 1996 年 12 月开始整体下滑。若人为将坡面松散堆积物清除，则大约一年后，坡体开始滑动。若清除坡面堆积物后进一步向坡内开挖坡脚 42.5m，则开挖后约 4 个月，滑坡便开始整体滑动。所以，不合理人类活动将大大加快滑坡的变形破坏进程。若考虑降雨影响，各种条件下滑坡的滑动时间都将提前。锻压机床厂滑坡反演分析结果所显示的滑坡变形特征与滑坡实际变

形特征十分接近，进一步说明研究途径的有效性。反演结果显示，若无外界因素作用，滑坡变形于1990年9月进入加速发展阶段，滑动时间大致在1991年5月。实际上滑坡在百年一遇大暴雨诱发下于1990年8月11日滑坡，充分显示了降雨在滑坡变形破坏过程中作用。

5. 基于能量理论的滑坡活动强度估测结果显示：在原状条件下孟家山滑坡最大滑速为39.1m/s，重心落至剪出口时，滑速为26.23m/s，滑坡最大滑程为244.69m，在外界因素影响下滑坡的滑速、滑程将明显增大。锻压机床厂滑坡的反算结果为：最大滑速26.93m/s，重心落至剪出口时，滑速为25.75m/s。最大滑程180.69m。若考虑滑道上厂房的阻挡作用，则计算滑程可能减小，从而与实际的118m接近，由此表明估测结果具有一定的实际意义。

6. 基于数值模拟结果，孟家山滑坡位移的灾变判据为：前缘：31.89cm，T_2裂缝：89.8cm，T_4裂缝：61.55cm。75mm降雨量为孟家山滑坡的最高的临界诱滑强度，向坡开挖52.5m为最大的人类活动诱滑强度。若考虑降雨、人类活动的叠加作用，则诱滑强度大大降低。基于滑坡动态实际监测数据，以时间序列分析方法建立的滑坡灾变预测数学模型，显著检验表明，模型可信度较高，据此与数值模拟结果综合分析对比，预测滑坡进入第Ⅲ变形阶段的灾变时段大致为：前缘坡体1995年6月后至1996年元月底前；T_4裂缝段大致在1995年底至1996年初。

7. 目前所有的预测应是一种趋势性的短、中期预测。有待于在今后的实践中经受检验和进一步完善。随着监测资料的不断积累和今后的研究的深入，预测结果和预报模型将不断得到补充、完善，甚至可能更新。从而预测结果和预测模型将会更加逼近实际。

8. 孟家山滑坡一旦滑动，将造成较大危害和社会经济影响，所以对孟家山滑坡的减灾、防灾应以工程防治为主，其它措施为辅。从经济、有效性考虑，减、压、填、挡、排、护是适用于孟家山滑坡的五项基本工程措施，对坡度较大的孟家山滑坡而言，重力式挡墙联合加筋土挡墙及土锚杆挡墙较为适宜。同时，完善现有监测系统，提高监测精度，禁止继续开挖坡脚也应是有效的减灾措施。用于孟家山滑坡的各种减灾、防灾措施对天水市区同类滑坡具有广泛的适用性。但对具体滑坡，还应分别情况，具体对待。

9. 适用于天水市区的崩滑性黄土-红层滑坡的减灾、防灾对策对黄土地区同类滑坡具有广泛的普遍意义。但是黄土地区范围广大，各部滑坡规模不一，周围环境各异，所以减、防灾对策应从社会经济角度综合评估，城镇区、农村地区、交通干线等分别实施以防为主、或以减为主、或以避为主的相应对策。此外，提高民众文化素质、减灾意识，增强保险作用等也都是有效的减灾对策。

10. 尽管预测结果可能与实际有所出入，甚至相差很大。但是滑坡变形的地质分析及变形监测研究、相似材料物理模拟实验研究、滑坡变形及其动态演化过程的数值模拟研究是进行滑坡预测预报的三个基本途径，将三方面研究相结合，互相补充、验证，是进行滑坡预测预报研究的一种有效模式，这种模式不仅适用于黄土地区的同类滑坡研究，而且对该区的其它类型滑坡及其它地区的滑坡研究也有普遍意义。尤其是以基于岩土体蠕变（流变）理论的滑坡演变过程研究预测滑坡变形趋势，将是发展滑坡预测预报理论的突破口。

11. 本项研究中尚存在多处不足之处：

（1）滑坡监测系统不完善，监测时间欠短；

(2) 滑坡蠕变计算参数取自经验类比数据，从而预测结果可能在一定程度上与实际有所出入；

(3) 数值模拟分析未考虑外界因素（降雨、人类活动）在滑坡变形演化过程中的连续动态作用，所以预测结果均为最高（或最长）值。

上述问题，有待于今后更进一步的深入研究。

主要参考文献

1. 张宗祜，张之一等，中国黄土，地质出版社，1989。
2. 孙广忠，西北黄土的工程地质力学特性及地质工程地质问题研究，兰州大学出版社，1989。
3. 国家科委全国重大自然灾害综合研究组，中国重大自然灾害及减灾对策（分论），科学出版社，1993。
4. 文宝萍，浅谈山地灾害对我国社会经济的主要影响及相应的承灾能力，中国地质灾害与防治学报，第5卷，第1期，1994。
5. 中国科学院黄土高原综合科学考察队，黄土高原地区重点县综合治理与经济发展战略规划问题研究，科学出版社，1992。
6. 中国科学院黄土高原综合科学考察队水资源地下水研究小组，黄土高原地区地下水资源合理利用，学苑出版社，1990。
7. 孙建中，赵景波等，黄土高原第四纪，科学出版社，1991。
8. 陕西省地矿局第二水文地质工程地质队，黄河中游区域工程地质，地质出版社，1986。
9. 胡海涛，项式均等，关中西部滑坡的结构、构造特征及稳定性分析，地质学报，第45卷，第4期，1965。
10. 王永焱、林在贯等，中国黄土的结构特征及物理力学性质，科学出版社，1990。
11. 靳泽先，韩庆宪，黄土高原滑坡分布的“群体性”，滑坡论文集（1987），四川科技出版社，1989。
12. 郎煜华，甘肃历代滑坡浅析，滑坡论文集，四川科技出版社，1989。
13. 吴伟江，王兴林等，甘肃东部滑坡发育规律初探，兰州大学学报，第28卷，1992增刊。
14. 左鸣放，邓冠荣，甘肃近40年滑坡特征，兰州大学学报，第28卷，1992增刊。
15. 李坤，黄土滑坡的形成及分布规律，兰州滑坡会议论文选集，中国铁道出版社，1988。
16. 李鸿琏，邓养鑫，甘肃滑坡概要，兰州滑坡会议论文选集，中国铁道出版社，1988。
17. 刘德基，天水市区滑坡的岩层构造特征，兰州大学学报，第28卷，1992增刊。
18. 徐邦栋，滑坡概况总报告，兰州滑坡会议论文选集，中国铁道出版社，1988。
19. 王恭先，中国滑坡防治研究综述，兰州滑坡会议论文选集，中国铁道出版社，1988。
20. 张倬元，国际滑坡研究趋向与进展——第六届国际滑坡学术讨论会述评，中国地质灾害与防治学报，第4卷，第3期，1993。
21. 王恭先，李天池，我国滑坡研究回顾与展望，滑坡论文集，四川科技出版社，1989。
22. 王思敬等，工程地质学新进展——第六届国际工程地质大会论评，北京科学技术出版社，1991。
23. 王恭先，滑坡防治研究的新进展，兰州大学学报，第28卷，1992增刊。
24. 于济民，滑坡预测预报技术综述，兰州大学学报，第28卷，1992增刊。
25. 于济民，侯殿英，滑坡监测技术现状，兰州滑坡会议论文选集，中国铁道出版社，1988。
26. 刘光代，滑坡破坏发生时间预报的探索，兰州滑坡会议论文选集，中国铁道出版社，1988。
27. 夏其发，滑坡研究综述，中国地质灾害防治学报，第5卷，第2期，1994。
28. 于济民，滑坡预报参数的选择和预报标准化的确定方法，中国地质灾害与防治学报，第3卷，第2期，1992。
29. 晏同珍，滑坡动态规律及预测应用，全国第三次工程地质大会论文选集（下），成都科技大学出版社，1988。
30. 陈明东、王兰生，边坡变形破坏的灰色预报方法，全国第三次工程地质大会论文选集（下），成都科技大学出版社，1988。
31. 张倬元、黄润秋，岩体失稳前系统的线性和非线性状态及破坏时间预报的“黄金分割数”法，全国第三次工程地质大会论文选集（下），成都科技大学出版社，1988。
32. 秦四清，张倬元等，滑坡非线性时间预报理论，工程地质研究进展，1993。
33. 黄润秋，崩滑灾害的全过程数值模拟——以四川溪口滑坡为例，工程地质研究进展，1993。
34. 蔡耀军，范中原等，滑坡时间预报，环境地质工程地质论文集，中国地质大学出版社，1994。
35. 周创兵，黄明，论新滩滑坡的动态规律，水电工程地质，1991年1期。
36. 阳吉宝，滑坡位移观测资料的应用，中国地质灾害防治学报，第5卷，第2期，1994。
37. 廖小平，高速远程滑坡的动力分析与运动模拟，中国地质灾害与防治学报，第4卷，第2期，1993。
38. 王思敬，王效宁，大型高速滑坡的能量分析及其灾害预测，滑坡论文集，四川科技出版社，1989。

39. 李鸿琏，天水地区的黄土滑坡，兰州滑坡会议论文选集，中国铁道出版社，1988。
40. 查小刚，天水市区滑坡分布及原因分析，兰州大学学报，第28卷，1992增刊。
41. 杜毅等，天水市区的滑坡泥石流，兰州大学学报，第28卷，1992增刊。
42. 戴祥礼，天水市两区滑坡区域特征，兰州大学学报，第28卷，1992增刊。
43. 洪嘉祥，冯学术，甘肃省滑坡史料分析，兰州大学学报，第28卷，1992增刊。
44. 汤兰亭、李毓林，天水锻压机床厂黄土山坡变形的治理，兰州大学学报，第28卷，1992增刊。
45. 冯学才，天水锻压机床厂滑坡成因与特征及灾害对策，兰州大学学报，第28卷，1992增刊。
46. 王家鼎，王念秦等，天水市椒树湾、泰山庙滑坡变形监测与分析，兰州大学学报，第28卷，1992增刊。
47. 薛振勇，侯书云，人类活动诱发的地质灾害——天水锻压机床厂滑坡，中国地质灾害与防治学报，第2卷，第4期，1991。
48. 李玉龙等，陕甘宁青四省（区）新构造的基本特征，兰州大学学报，第18卷，1992年第3期。
49. 文宝萍，铜川大型黄土滑坡活动机理分析，第三届全国青年工程地质学术讨论会论文集，成都科技大学出版社，1993。
50. 胡广韬等，滑坡动力学，地质出版社，1995。
51. Saito, M, Forecasting the time of occurrence of a slope failure, Proceedings of 6th International Conference, 1965.
52. Scheideger. A. E, On the Prediction of the Research and velocity of Catastrophic Landslides, Rock Mechanics, Vol. 5, P231 −236.
53. G. S. Zolotarev, Large landslides and mudflows Problems of Prediction and Protection, Proceedings of 4th Internatconal symposium on landslides, P189—197.
54. Chowdhury R. N, Recent Developments in Landslide studies, Prceeedings of 5th International symposium on landslides, P209—228.
55. Bhandart. R. K, Simple and economical instormentation and warning systems for landslides and other mass movements. Proceedings of 5th Inteinatconal symposium on landslides, P251—274.
56. Pilot G, Instrumentation and warning systems for research and complex slope stability problems, Proceedings of 5th International symposium on Landslides, P275—306.
57. Sassa, K, Geotechnical model for the motion of Landslide, Proceedings of 5th Int. Symp. on landslides, Vol. 1, P37—55, 1988.
58. Wen Baoping, The features of Landslides, rockfall and debris flow disasters in China, Proceedings of the International Congress of IAEG, 1994, P1459—1464.
59. 山田刚二，渡正亮等著，铁道部西北研究所译，滑坡和斜坡崩坍及其防治，铁道出版社，1976。
60. 韩恒悦，宋立胜，兰田敬家村滑坡的滑动过程，滑坡文集（4），中国铁道出版社，1984。
61. 李曰国、尚岳全等，黄腊石滑坡深部断裂带的形成、工程地质研究进展，1993。
62. 冯康等，数值分析方法，国防工业出版社，1978。
63. 黄运飞、冯静，计算工程地质学，兵器工业出版社，1992。
64. 潘别桐、黄润秋，工程地质数值法，地质出版社，1994。
65. 于学馥、郑颖人等，地下工程围岩稳定性分析，煤炭工业出版社，1983。
66. 范广勤，岩土工程流变力学，煤炭工业出版社，1993。
67. C. C. 维来洛夫，土力学的流变原理，科学出版社，1988。
68. 林韵梅，实验岩石力学模拟研究，煤炭工业出版社，1984。

TYPICAL LOESS LANDSLIDES FORECAST AND COUNTERMEASURES

Abstract

"Typical landslide forecast and countermeasures" are contributed not only to society and IDNDR activity, but to landslide research. According to a sysmatical analysis of the related research at home and abroad and distribution and development of landslide in loess area, the focus and approach of the study was introduced. Tianshui city was selected as a pilot area of the study due to the its typical loess landslides and the severe landslide disasters in loess area. Those loess landslides which sliding surface were between loess and Negecene red mudstone and their elevate difference high were determined as case study spots, because of their higher risk than other type of loess landslides. Mengjiashan landslide, Hujiaya one, and Duanyajichuangchang one were the representatives of this type of the landslides in Tianshui.

Based on a detail field investigation and exploration, since 1992, several in-site methods, such as, a theodolite, deep inclinometer and fissure measuring have been used to monitor the Mengjiashan landslide, Hujiaya landslide, etc. of Tianshui city. The monitoring result shows that the landslides have been under creep deformation, among them Mengjiashan landslide was the most typical one.

The mechanism of the landslides was studied by such the methods as an analysis of geological structure of landslides and their deformation feature, a physical modeling and an elastic and plastic finite element numerical simulation, etc. The study result presents that the geological process of the landslide form is slope creeping - cracking at the back of the slope-sliding zone forming-appearance of the sliding zone's exit-slope sliding. Such kind of geological process of the landslide is restricted by the feature of stress distribution in the slope and under the control of geological structure of the slope, the effect of rainfall and human's activity too.

According to the monitoring result, Mengjiashan landslide is at the second creep stage with about a uniform creep speed at each spot of the landslide. However, different spot has different creep speed on the landslide, the maximum is at the front of the landslide, which show that landslide will breakup and fall down one by one with a high speed. The prediction was proved by the physical modeling. In order to predict the sliding time of the landslide, based on the result of the monitoring and the model experiment, as well as the

creep theory of soil and rock, a viscio-elastic-plastic finite element simulation was conducted. The numerical simulation presents that the deformation of the landslide would last about two years, if there is no any external influence. Rainfall and human activity would make the process of the landslide deformation shortened. And besides, the sliding speed and maximum displacement was also forecasted by the theory of energy. The result was that the landslide would slide as a high speed and large displacement under any conditions, which may result in a disaster around the landslide in Tianshui city and also effect the local industry and agriculture. Afterwards, catastrophic criteria of the landslides, for example, width of landslide fissures and maximum deformation value of the landslides under any external conditions, and related mathematical model were considered .

Finally, some engineering and non-engineering countermeasures against the landslides were suggested, while the risk assessment in Tianshui and the loess area was carried out.

滑 坡 照 片

1 孟家山滑坡远景
2 孟家山滑坡前缘陡坡
3 孟家山滑坡西侧缘
4 孟家山滑坡 T_1 裂缝
5 孟家山滑坡 T_2 裂缝中部（1）
6 孟家山滑坡 T_2 裂缝中部（2）
7 孟家山滑坡 T_2 裂缝中部（3）
8 孟家山滑坡 T_4 裂缝中部
9 孟家山滑坡 T_4 裂缝西侧
10 孟家山滑坡 T_4 裂缝中部及落水洞
11 孟家山滑坡 T_2、T_4 裂缝侧观
12 孟家山滑坡体上天水一社棠高压输电线路
13 孟家山滑坡实验模型
14 电阻式位移计与 UCAM-8C 型自动测试系统
15 孟家山滑坡模型沿泥岩层面滑移状态
16 孟家山滑坡模型最终破坏状态
17 锻压机床厂滑坡全景
18 锻压机床厂滑坡压埋车间
19 胡家崖滑坡全景
20 胡家崖滑坡体上民房开裂
21 塑料厂滑坡体上民房开裂
22 正在治理中的泰山庙滑坡前部