

# 台湾土石流研究之回顾

曾森煌<sup>\*</sup>

游繁结<sup>\*\*</sup>

(建国工商专科学校土木工程科·台湾)

(中兴大学水土保持学系)

**摘要** 30年来台湾人口剧增,经济发展迅速,对山坡地之开发积极而迫切。然而本岛地势陡峻,岩层破碎,气候上位处冷、热气流锋面区,且台风豪雨频仍,又不当开发利用山坡地,致灾害经常发生。尤以土石流对于生命财产造成很大的威胁,损害大者如1982年西仕台风过境造成北部地区严重的土石流灾害,1990年欧非莉台风过境花莲铜门村十二、十三邻惨遭土石流吞埋,造成人死村灭的惨剧等等。

台湾的土石流研究最近10年才受到重视,本文仅就44篇文献分灾害报告、灾害防治对策、流动性质、发生机制、堆积机制、力学特性、危险程度预警及冲淤模式研究等做个回顾。其中大都已获相当成果,尤以发生之临界公式,堆积长度及范围,及预警系统方面有较好应用效果。然而堆积物粒径分离与内部应力对土石流的发生及推移应有很大的相关性,尚须深入探讨。

**关键词** 台湾 土石流 发生 堆积 预警

## A Review of Debris Flow Studies in Taiwan

Sen-Huang Tseng

Fan-Chieh Yu

(Department of Civil Engineering Chien-Kuo Junior College of Technology and Commerce, Taiwan)

(Department of Soil and Water Conservation College of Agriculture, Chung Hsing University)

**Abstract** Natural disasters such as flood, landslide, and debris flow occur frequently in Taiwan due to steep topography, young geological formations and heavy rainfalls. The need for studies on debris flows have received a great attention since several serious disasters in Taiwan caused by debris flows in 1982. This paper reviews research works on debris flow from 1985 to 1994, according to eight categories: investigation of disasters, mitigating works, flowing property, occurrence mechanism, deposition mechanism, dynamic property, forecasts, and simulation models.

This review reveals that significant results have been obtained in occurrence mechanism, deposition, and forecasting of debris flows. However, many aspects related to the mechanisms of flowing are still unknown. More efforts should be concentrated on building a complete theory for debris flow.

**Key words** Taiwan debris flow occurrence deposition forecasting

① 收稿日期 1995-05-10 \*建国工商专科学校土木工程科讲师。\*\*中兴大学水土保持学系教授。

# 1 前言

二三十年来台湾人口剧增,经济发展迅速,土地利用的需求大量增加,在平地已达饱和利用后,对占全岛2/3面积的山坡地之开发趋于积极而迫切;然而本岛地质上正位于欧亚板块与太平洋板块冲撞之缝合区,造山运动绵绵不息,致地势陡峻,岩层破碎,且台风暴雨频仍,故自然环境相当恶劣;又加上人为不当开发利用山坡地以致于造成山崩地滑之灾害经常发生,尤以土石流对于生命财产造成很大的威胁。

台湾最早作土石流的研究,应该推中兴大学水土保持学系江永哲博士,在1983年起首先就土石流的学理探讨,及发生在台湾地区的土石流灾区调查研究,并试着去找出发生土石流的相关因素以及寻求防治的对策。本文仅就自1985年起陆续发表在中兴大学农林学报及水土保持学报、中华水土保持学报、中兴大学、成功大学、台湾大学等博硕士论文或水利工程研讨会论文44篇有关土石流研究的文章,分类整理各家的成果以供进一步研究及应用之参考。

本文参考黄宏斌(1993)对日本之土石流研究回顾之分类方式,将50几篇文献分类如下:

- (1)土石流灾情报告摘要;
- (2)土石流灾害防治对策工事研究;
- (3)土石流之流动性质研究;
- (4)土石流之发生机制研究;
- (5)土石流之堆积机制研究;
- (6)土石流之力学特性研究;
- (7)土石流之危险程度预警之研究;
- (8)土石流之冲淤模式研究。

## 2 各类研究提要

### 2.1 土石流灾情报告摘要

从文献上记载得知自1989年至1991年三年间,仅台湾东部地区就发生过四起大规模的土石流灾害,房屋冲毁,村落被淹埋等合计死亡的人数超过70人以上,政府机构对于造成灾害的原因,及防灾的对策探讨给与重视,除了提供研究经费给学术研究机构从事学理、对策及预警系统研究外,对灾害基本资料的调查和灾区整治也不遗余力。

如前所述台湾的地形陡峭、雨量充沛,雨强又大,河短流急,加以岩质破碎,风化侵蚀严重,山崩容易发生,其崩塌堆积物遇有豪雨来临,迳流汇集供应水量,堆积物就容易发生土石集体流动。表1为自1981年以后所发生较大的土石流灾害统计表(尹承远等,1994)。有关个案调查研究,如表中资料来源所列,江永哲、吴正雄(1985)对1981年莫瑞台风过境时的新竹县芎林和1982年西仕台风过境时的台北县林口两地土石流灾害之研究;游繁结、陈重光(1987)对1985年尼尔森和1986年韦恩台风过境时所引起的南投县丰丘与十八重溪两地的土石流灾害研究;江永哲、林启源(1991)对1989年彰化县二水及南投县溪头两地因豪雨造成之土石流灾害研究和中兴大学水土保持学系(1990)及时对当时欧菲莉台风来袭引起的土石流造成花莲县铜门村十二、十三邻屋毁人亡的惨剧都有详细而有条理的记载。谢正伦(1992)根据水土保持局的调查资料整理花东地区1989年至1991年土石流灾害情形(见表2)。其中除铜门村者如前述外,1991年9月耐特台风过境台东,南回公路泷桥附近之土石流造成十几部车辆遭土石流冲入太平洋的惨剧。除政府单位对灾害调查外,

学术研究单位对灾害情形的叙述及原因探讨有十数篇之多。

表1 台湾历年土石流灾害资料统计表

发生地点	发生时间	发生雨量 (mm)	降雨型态	集水区面积 (km <sup>2</sup> )	地质状况	地形或坡度	灾害情形	资料来源
新竹县 寿林	70.7.19 23:00	506	莫瑞台风	—	砾石层	—	不详	(江永哲, 吴正雄, 1985)
新竹县 湖口	70.3.22 06:00—07:00	347.1	连续降雨	—	红土砾石层	20% (11.3°)	湖口新增间交通中 断	(张三郎, 1986)
台北县 林口	71.8.11 3:40	371	西仕台风	—	砾石层	11~45°	道路损毁、交通中断	(江永哲, 吴正雄, 1985)
南投县 丰丘	74.8.23 19:00 75.8.22 8:50	159 234.5	尼尔森台风 韦恩台风	1.68	变质板岩与片岩,节 理发达。附近有断层 通过,地表为破碎砂 台岩块堆积而成,胶 结不良孔隙发达。	53.17% (28°) 80.97%	土石堆积在工路上, 泥浆冲入民宅达1m 高,广大葡萄园遭掩 埋。	(游繁结, 陈重光, 1987)
南投县 十八 重溪	74.8.22 75.8.22	308 193	尼尔森台风 韦恩台风	2.1	砂岩、黑色板岩,邻 近有断层通过,岩质 破碎,表层多松散且 胶结不良之土砂砾。	31% (17°)	横跨十八重溪之桥 梁右岸桥墩几被掩 没,幸其结构未遭 破坏。	(游繁结, 陈重光, 1988)
阳明山 马槽	75.11.28	977.1	持续降雨	0.94	热液换质之火成岩 溪床上覆厚层崩积 物,下伏青黑色黏土 层。	29% (16°)	席卷路过轿车一辆, 造成3人死亡,损毁 马槽桥北侧之民房, 冲毁下游之翠林桥。	(张石角, 1987)
彰化县 二水	78.7.27 9:00	371	豪雨	0.11	砾石层	22% (12.4°)	土石堆积公路上, 交通中断;道路下方 民宅损毁。	(江永哲, 林启源, 1991)
南投县 溪头	78.9.12 14:00	376.5	豪雨	0.33	桂竹林层易崩塌	60% (27°)	不详	(江永哲, 林启源, 1991)
花莲县 铜门	79.6.23 14:40	430.6	欧菲莉台风	0.49	先第三纪变质岩,地 层构造破碎、裂隙发 达,堆积物结构疏 松。	36.4% (20°)	房舍全毁24间半毁 11间,死亡29人,失 踪6人,受伤7人,无 家可归者68人。	(中兴大 学水保系 1990)

## 2.2 土石流灾害防治对策工事研究

江永哲、林裕益(1988)、李明晃(1989)、吴道煦(1990)、黄怡仁(1991)等人自1987年起陆续发表他们利用室内渠槽试验结果,在坡度15°~24°之间,采用最大粒径14.4、21.0、32.2mm等三种材料。对重力式坝、梳子坝、立体格子坝、A型梳子坝和透水栅在防治土石流流动成灾的功效上加以探讨。发现重力式防砂坝全部拦阻砂石,迅速淤满导致下游被冲刷,乃建议研究设置开放式之防砂坝,且一致认为开放式防砂坝在开口间距与最大粒径之比小于2时有显著之分离土石流颗粒之功能。更能有效减低土石流的尖峰流量,促进土石流停积,降低灾害程度。

## 2.3 土石流之流动性质研究

土石流之流动时,其物理性质不同于一般含砂水流,有段波的形成,先端部较高且浓度较大,在流速分布上,上层明显加快且有粗粒化的现象,流动性质的了解对于土砂产出量和冲淤推估有很大的帮助。台湾的学者在流动特性之研究,主要有中兴大学江永哲等,对防砂坝与下游河床特

性对流动的影响和流速分布曲线的探讨。成功大学谢正伦及研究生对二维土石流运动方程式在考虑高桥平衡浓度方程式,及一般扩散方程式做不同的数值模拟土石流。台湾大学刘格非及其研究生以 Savage 和 Hutter's 之土石流运动方程式研究斜坡上土石流之定形波及利用特征线法探讨土石流受挡土墙之影响。以上诸项研究获致之成果整理列出于表3。

表2 近年花东地区土石流灾害之雨量资料

地点	雨量站	台风	时间	总雨量(mm)	最大时雨量(mm/hr)
砂婆岫溪	北埔	莎拉	78. 9.	522	50
		欧菲莉	79. 6.	483	76
		黛特	79. 9.	855	68
法华山 (庆丰村)	北埔	欧菲莉	79. 6.	483	76
		黛特	79. 9.	855	68
		欧菲莉	79. 6.	453	71
铜门 榕树	铜门	黛特	79. 9.	902	74
	西林	莎拉	78. 9.	866	68
凤林溪	马太鞍	欧菲莉	79. 6.	744	48
		黛特	79. 9.	1074	58
		莎拉	78. 9.	832	68
大兴溪	马太鞍	欧菲莉	79. 6.	754	52
		黛特	79. 9.	1135	60
		莎拉	78. 9.	902	90
寿丰溪	西林	欧菲莉	79. 6.	744	70
		黛特	79. 9.	860	59
		莎拉	78. 9.	846	100
清水溪 拔子溪	大坪	欧菲莉	79. 6.	557	43
		黛特	79. 9.	866	82
		莎拉	78. 9.	745	112
瑞穗 红叶溪	立山 大坪	欧菲莉	79. 6.	462	27
		黛特	79. 9.	846	65
富兴溪	大坪 滨 卓麓	欧菲莉	79. 6.	443	30
		黛特	79. 9.	876	50
		莎拉	78. 9.	631	89
玉里	苗圃 哇拉鼻	欧菲莉	79. 6.	400	30
		黛特	79. 9.	771	46
		莎拉	78. 9.	675	113
清水溪	卓麓	欧菲莉	79. 6.	363	30
		黛特	79. 9.	640	50
		莎拉	78. 9.	509	95
竹田 (九岸溪)	明里	欧菲莉	79. 6.	431	44
		黛特	79. 9.	656	52
南回公路 (浚桥)	绍家	耐特	80. 9.	619	73

## 2.4 土石流之发生机制研究

台湾有关土石流发生之研究论著收集了七篇,详细状况列出表4,重要的成果为获得发生土石流之临界坡度公式有郑瑞昌、江永哲(1986)所提的

$$\tan\theta = \frac{C * (\rho g - \rho)}{C * (\rho g - \rho) + \rho(1 + h/H)} \times \tan\phi \quad (1)$$

(游繁结·1987)所得。

$$\tan\theta \geq \frac{\tan\phi}{1 + \left\{ \frac{\gamma_w h}{(\gamma_{sat} H - n\gamma_w h)} \right\}} \quad (2)$$

(游繁结·赖建信·1994)修正(2)式为

$$\tan\theta \geq \frac{0.8 \tan\phi}{1 + \left\{ \frac{\gamma_w h}{(\gamma_{sat} H - n\gamma_w h)} \right\}} \quad (3)$$

(林炳森等·1993)的修正游繁结(2)式如下

### 1. 有地表径流时

$$\tan\theta > \frac{(\gamma_{sat} - \gamma_w)H}{\gamma_{sat} H + \gamma_w(H - h)} \times \tan\phi$$

## 2. 水位低于地表时

$$\tan\theta > \frac{\tan\Phi}{1 + \frac{\gamma_w}{\gamma_{sat} - \gamma_w} * \frac{h}{H}}$$

以及(黄宏斌·1993)的(5)式

## 1. 当水位与堆积面齐平时及有地表径流时

$$\tan\theta = \frac{G_s - 1}{G_s + e} \times \tan\Phi$$

## 2. 当水位位于堆积面之下时

$$\tan\theta = \frac{(G_s - 1) + (1 + wG_s)a/H}{(G_s + e) + (wG_s - e)a/H} \times \tan\Phi$$

以上式中:  $\theta$  为发生坡度;  $n$  为糙率;  $\Phi$  为土体内摩擦角;  $e$  为堆积层孔隙比;  $C^*$  为堆积层砂砾容积浓度;  $a$  为非饱和层高度;  $\rho_g$  为砂砾密度;  $\gamma_w$  为水单位重;  $\rho$  为水之密度;  $\gamma_{sat}$  为砂砾单位重;  $H$  为堆积层厚度;  $G_s$  为砂砾真比重  $\gamma_{sat}/\gamma_w$ ;  $h$  为水位高。

表3 台湾土石流流动特性之研究一览表

研究者	研究方法	研究成果	备注
中兴大学 江永哲及 研究生等	以渠槽试验探讨防砂土 具与下游河床特性对土石流流动之影响	土石流溢坝后由于颗粒间及河床底撞击可使产生停积并得堆积高度,长度与河床坡度,场高之关系式	试槽 450×28×60cm 上游坡度 10.6°,下游坡 度为三种资料 来源:江永哲等 4人(1992)
连惠邦	以土石流最小泥砂体积浓度及维持运动之 基本动力条件,分别建立土石流流体运动模 式研究,基于颗粒间离散应力和摩擦阻力与 水流剪应力达平衡之观念导出膨胀流体模 式模把土石流剖面流速分布,及引进最大信 息摘原理,并比对渠槽试验结果。	认定引用最大信息摘原理之机率模式不但 公式形态较物理模式简易,获得之剖面流速 和泥砂体积浓度之分布与渠槽试验结果更 相吻合,且可模把各种流况颇具潜能。	试槽 600 × 10 × 30cm 4种坡度12 ~ 20°, 5种粒 径,资料来源: 连惠邦(1994)
苏重光 连惠邦 江永哲	以混合流层模式模拟稳定均匀流动条件下 之土石流流速分布,并比对松村/水山式之 试验结果	得依土石流垂直剖面可分为两层(粘性层及 惯性层)分别建立分布式与实验结果资料 很接近,且推知粘性层高度随泥砂体积浓 度增高而降低	资料来源:苏重 光等三人 (1993)
成大许睿心	采高桥之平衡浓度公式,以 leap-frog - frog 解二维之土石流方程式,用 stag- gered grid 处理流速,浓度及流动深度数值 模拟,土石流并与渠槽试验结果比对	无论在 Bagnold 或 CHENG 之 G. V. F. 本构 条件下 得相当的准确	资料来源:许 睿心(1992)
曹家文	先建立平面二维之土石运动方程式,利用 stag-gered grid 与 leap-frog method 数值 方法模拟土石流并验证渠槽试验及现场调 查结果	得一冲淤模式模拟土石流发生到停积,比 对动床试验结果,同时与铜门村现场调查结 果验证令人满意	试槽800×20× 50cm,坡度7°与 15°两种资料 来源:曹家文 (1993)
蔡元芳	采扩散方程式取代平衡浓度方程式,与前项 相同处理模拟土石流之冲淤,验证渠槽之试 验结果	显示以扩散方程式取代平衡浓度方程式,所 模拟结果均优于许、曹两研究	资料来源:蔡元 芳(1994)
台大刘格非	以 Savage 和 Hutbers 之土石流运动方程式 来研究斜坡上,石流之定形坡	发现石流停止时其深度与距离为线性关系, 同时也找到10种可能定形波并探讨其间可 能之水跃现象	资料来源:刘格 非(1992)
刘格非 等三人	以特征线法,震波之数值方法模拟挡土墙之 影响缓坡上石流之运动	发现当石流总质量大,土压系数大或坡度陡 时,石流较易运动后速度较大,停止后波高 小,最后传递距离较远	资料来源:刘格 非等(1993)

表4 台湾有关土石流发生之研究一览表

研究者	研究方法	研究成果	备注
兴大 呈正雄 罗绍麟 江永哲	利用空照图探讨冬山溪、林口台地及新竹芎林地区土石流地形及植被因素与土石流发生之关系。	得知:1.崩塌率随集水区坡度及起伏量之增而增。2.迎风坡向之崩塌个数及面积最多。3.植生覆盖只防止浅层崩塌。4.崩塌率随谷密度增加而增。5.最大崩塌率落在坡度为34°到46°间。	资料来源:吴正雄、罗绍麟、(1985)。吴正雄、汪水哲(1985)。江永哲、吴正雄(1986)
郑瑞昌 江永哲	取五股区土石流灾区土石为材料,测定物性,并以室内渠槽试验研究土石流发生时之性状	发现:1.坡度15°以上便可能发生土石流。2.临界坡度 $\theta$ 由下式(1)可求: $\tan\theta = \frac{C(\rho g - \rho)}{C(\rho g - \rho) + \rho(1 + h/H)} \tan\phi$	1.资料来源:郑瑞昌、江永哲(1986)。2.试槽200×30×30cm 坡度15°~36°
游繁结	以自然土砂砾、均匀砾石及粗砂等三种材料模拟拟土石流之发生验证所推遵之理论公式。	发现斜面上堆积土砂砾之组成与土石流发生有关。其发生之临界坡度 $\theta$ 可由(2)式求。	1.资料来源:游繁结(1987)2.试槽200×22×24cm
游繁结 赖建信	以三义火火山土石流迹地土砂材料配成7种级配试料,以7种坡度、11种流量组合渠槽试验模拟土石流之发生。	1.土体内 $d < 2\text{mm}$ 之含量若少于20%时,容易发生土石流。2.修正(2)式(游繁结,1987)其临界坡度修正系数为0.8得(3)式。	1.资料来源:游繁结、赖建信(1994)。2.试槽300×10×25cm
林炳森 冯赐阳 李俊明	以无限长边坡稳定分析法忽略流速考虑渗流力推导土石流发生之临界条件,以水槽试验结果验证并比对森口砾石层土石流发生之适用性	修正(2)式(游繁结,1987)为(4)式。	资料来源:林炳森等3人(1993)
台大 黄宏斌	探讨林口台地非饱和堆积层土石流发生之临界角与含水量之关系。又依据土壤力学之理论基础推导出土石流之发生模式,并讨论高桥、Sidle、江永哲、游繁结及林炳森等发生模式	得土石流土体倾斜角 $\theta$ 与土壤含水量 $w$ 之关系如(5)式并比较出游(1987)式所得较高桥为高,而林炳森(1993)式于 $\theta < a/H < 1$ 时有不合理现象(临界角随 $a/H$ ,增加而减少)	资料来源:黄宏斌(1993)
江永哲 林启源	就台湾土石流发生雨量特性探讨美、日、加等国既有研究成果进行分析验证出适合台湾土石流发生降雨之理论。以求台湾本身土石流发生降雨特性。	1. Caine(1980)发表之 $I = 14.28 \cdot t^{-0.39}$ 适用。2.但在延时小于30h时 Cannon Ellen(1985)所得之 $(I - 6.86)D = 38.1$ 更吻合台湾土石流起动之降雨状况。3.台湾土石流发生延时 $> 12\text{h}$ 雨量 $< 150\text{mm}$ 。	资料来源:江永哲、林启源(1991)

## 2.5 土石流堆积机制研究

土石流之流动性常因段波冲出谷口后,出口处的两岸限制减少或坡度减缓,因而流速降低,流体逐渐脱水而停积,谷口扇状地带被开发利用作为田园或部落聚集之场所。土石流堆积长度与面积都影响田园及部落安全性。大部份土石流的灾害常在这个堆积扇区造成。有关土石流之堆积特性研究不多,列如表5。主要的是中兴大学游繁结、林成伟(1991)以质量不灭与动量平衡的观点,修正高桥保与吉田(1979)所推导之堆积长度理论公式。并采四种渠槽坡度、两种堆积平台坡度、四种不同粒径、三种水流量、三种供砂量的组合,室内渠槽试验结果验证得堆积长度修正公式

(6)如下：

$$L = V^2/G \tag{6}$$

$$G = (\rho_s - \rho)g * Cdu \cos \theta \tan / (\rho_s - \rho)Cdu + \rho - g \sin \theta$$

$$V = A_o * u * \cos(\theta_u - \theta)$$

式中：Cdu 为上游流路土石流之体积浓度； $\theta_u$  为上游流路之坡度；u 为土石流趋近下游流路之流速； $A_o$  为土石流体力之修正系数，即  $A_o = 1 + e^{8.85u - 2.19}$ 。

由于土石流有重复发生性，游繁结(1993)继续从事重复堆积的实验，其结果及江永哲等4人(1992)探讨防砂坝下游河床对土石流停止和堆积的影响之结果，表5。

表5 台湾有关土石流堆积特性之研究 一览表

研究者	研究方法	研究成果	备注
兴大游繁结	以室内渠槽试验探讨土石流段波出谷后之减速，扩张，停止，堆积特性导出土石流堆积长度之理论推估式	修正高桥保，吉田等理论公式得(6)式	资料来源：游繁结(1991)，试槽为200×22×24cm
游繁结	以室内渠槽试验测定土石流堆积长度，宽度，面积，溪谷宽度及粒径之各项相关性	1. 扩张度与堆积长度直线正相关 2. 可由堆积长宽，面积，及溪谷平均坡度推估段波高度 3. 粗颗粒堆积平面近圆形，细颗粒近椭圆形，4. 出石后堆积颗粒筛选极为明显，先端有较大之砾石集中	资料来源：游繁结(1992)渠槽试验要素同前
游繁结	藉渠槽试验连续堆积情况验证理论公式	发现相同规模之土石流其重复堆积长度，不超过初次堆积面积有稍扩大，由(6)式用来推估重复堆积则稍嫌高估	资料来源：游繁结(1993)渠槽试验要为两倍到三倍
江永哲等四人	利用渠槽试验探讨防砂坝下游对土石流停止，并堆积之影响	发现溢坝后之土石流与河床撞击与河床糙度摩擦力可使停积	资料来源：江永哲等四人(1992)

### 2.6 土石流之力学特性研究

使土石流流动除了推移力外尚有分散应力的作用。土石流之分散应力的产生主要来自粗颗粒之间的碰撞，自床面以上 y 处之颗粒间分散力大约等于高程自 y 处起到达水面之泥沙颗粒的有效重量。由于粗颗粒质量很大，其跃动碰撞运动 Bagnold 认为高浓度粒子流动时，粒子间发生冲突而产生整体流动现象，结果颗粒间产生剪切力  $T_{xy}$  及粒子间之分散力  $P_y$ ，当粒子运动之惯性力为主时，产生

$$P_y = a_i b \lambda f(\lambda) d^2 (du/dy)^2 \cos \alpha$$

之分散力其作用方向与流动方向成至直角，剪切力  $T_{xy}$  又为

$$T_{xy} = P_y \tan \alpha$$

式中  $a_i$  = 定数， $\lambda$  = 线性浓度。

由式中可知分散力之大小与粒径的平方成正比，故颗粒愈粗所承受之分散力越大。因此分散力与剪切力之剪切运动，垂直分选作用故使粗粒渐上升至水面，而水面流速最大，使得颗粒愈粗愈赶到前面，聚集在垄头形成逆级配现象，高桥实验证明，大于平均粒径之颗粒将升至水面，而小的则下降至床面。

表6 台湾有关土石流力学特之研究一览表

研究者	研究方法	研究成果	备注
兴大宋 义达	以三种不同粒径之试验进行土石流冲击力之模拟试验。	发现土石流密度随坡度增而增,但当坡度大于24°时则反之。	资料来源: 宋义达 (1980)
兴大 林炳森 方世杰 冯赐阳	以无限长边坡稳定分析法为依据,忽略水流流速考虑渗流,推导土石流发生之临界条件以水槽试验验证之,并比对林口台地现场资料。	其有地表迳流之临界公式可解释土体因坡面推移力大于土体抗剪强度而破坏,惟须加入冲刷作用方可确切表示砾石层受地表迳流作用而发生土石流之特性。	资料来源: 炳森等3人 (1990)
成大詹钱登	以玻璃珠均匀大小之混合体,以环状剪力式土石流实验机模拟土石流之流动研究其动内摩擦角。	发现安息角随粒径增加而减,而平均剪应变率及垂直应力间没有显著关系。	资料来源: 詹钱登 (1993)
台大黄宏斌	以渠槽试验探讨非饱和堆积层土石流发生之临界角度与含水量之关系。	发现凝聚力与摩擦角会随含水量增加而减少,且土石流土体倾角 $\theta$ 与土壤含水量 $w$ 之关系为 $\theta = 123.73 - 35.49 \ln w$	资料来源: 黄宏斌 (1992)
台大陈荣河 林美聆 陈宏宇	藉铜门土石流材料粒径调整进行大型直剪试验,探讨级配材料特性之影响。	认为等重量替代法调整粒径分布合理可行,并推出改良式等重量替代法。	资料来源: 陈荣河等3人 (1993)

有关土石流之力学特性方面研究文献有五篇,最早为宋义达(1980)以三种不同粒径度试料进行土石流冲击力的模拟试验,林炳森等(1990)以无限长坡稳定分析法为依据,忽略流速但考虑渗流力推导土石流发生之临界条件,解释土石流之发生为各试体因坡面推移力大于土体抗剪强度而破坏之力学条件,詹钱登(1993)以均匀粒径玻璃珠在环状剪力试验机中模拟土石流的流动,探讨动内摩擦角,虽然得到一个安息角随粒径增加而减小的结论,但对土石流流体内部应力所知还是太少。颗粒的轨迹、分散力与颗粒特性之关系尚待进一步了解。

## 2.7 土石流危险程度及预警系统之研究

依据日本的调查,土石流发生后其流动速度可快到每秒一二十米的速度前进,其汹涌之势有如千军万马,一旦发生实在走避不及。因此要避免遭受土石流的灾害冲击,应事先了解那些地方是可能发生土石流的区域,其灾害的程度为何?如能预知这些事则生活区域的选择就能趋吉避凶。已存在的生活区的危险也可减到最少。有关这方面的研究,首先是张石角(1987)分析各类山崩之地形、地质条件来评估山坡地开发之影响;游繁结(1992)以GIS处理地形、地质图层资料来预测土石流潜在发生区。谢正伦等以溪床坡度及集水面积为判断危险溪流之地文因子,由花东地区土石流发生例分析比对结果得出一个有效的判断指标,即有土石流危险溪流为溪床坡度介于 $10^\circ \sim 30^\circ$ 间,集水区面积在 $10 \sim 300 \text{hm}^2$ 之间。初步已可运用到山坡地开发位置的选择。在此方面的研究尚有詹钱登(1994)及尹承远等人(1994)其成果均列于表7。

## 2.8 土石流之冲淤模式

由理论分析,土石流由发生、流动到停积的过程均遵循一些物理运动方程式在进行,近来电脑的容量愈来愈大,运算的速度愈来愈快,也愈精确,故要在短时间内用数值计算的方式来模拟土石流由发生而停积的整个过程极为可行。成大许睿心(1992)分别在Bagnold及CHENG之G. V. F.本构条件下,采高桥的平衡浓度公式建立二维的土石流方程式,以Staggered grid和leap-frog方法求解并比较对渠槽试验结果得相当的准确性。其后曹家文(1993)采用动床渠槽

试验及铜门现场资料比对也令人满意,蔡元芳(1994)再以扩散方程式取代平衡浓度方程式,效果更佳。参见表3。因此可知模拟模式之建立,如能从2.6节所提流体内部应力的进一步了解将是一个值得努力的方向。

表7 台湾有关土石流危险程度及预警之研究一览表

研究者	研究方法	研究成果	备注
台大 张石角	分析各类型山崩之地形和地质条件,并综合之为工程环境地质调查参数,讨论研究成果应用山坡地开发之环境影响评估。	归纳土石流之发生地形和地质特征为 a. 坑谷面,部份为阶地面 b. 崩积物,卵石和沙土混合 c. 溪沟 d. 台地砾石层	资料来源: 张石角 (1987)
兴大 游繁结	以德基水库集水区为地形单元利用已建土石流发生模式(游繁结,1987)配合相关地形图及地质图等资料,以GIS处理来预测土石流潜在发生区,进而探讨地形特性与土石流发生之关系。	1. GIS可省人力、物力,且展示容易。2. 土石流潜在发生区,集水区 $a < 1 \text{ km}^2$ 溪谷坡度 $15^\circ < s < 30^\circ$ 机率最多,残土率多在0.4至0.6之间属地形平衡状态期,溪流长度多介于0.2~2km之间。集水区平均坡度 $7^\circ \sim 42^\circ$ 之间。 3. 地质破碎之溪谷,有较高之潜在发生率。	资料来源: 游繁结 (1992)
成大 谢正伦	现场调查花东295条溪曾发生土石流状况分析归纳其发生之各项要素。	1. 发生土石流之溪流坡度 $s$ 多在 $10^\circ \sim 25^\circ$ 间,集水面积在 $10 \sim 120 \text{ hm}^2$ 公顷间溪流长度多在0.5~2km间,最大暴雨在 $27 \sim 65 \text{ mm/h}$ 间。2. 流动时侵蚀河床厚度在0.5~3.5m间。3. 危险溪流大都为1,2次谷。	资料来源: 谢正伦 (1992)
谢正伦 江志浩	以溪床坡度及集水区面积之地质因子作为危险溪流判断指标,判断花莲县190条土石流危险溪流,据调查确有148条于近数年内发生土石流。	认为判定有土石流危险溪流之指标,溪床坡度 $S$ 介于 $10^\circ \sim 30^\circ$ 间,集水面积 $a$ 介于 $10 \sim 30 \text{ hm}^2$ 之间为可行。	资料来源: 谢正伦, 江志浩 (1992)
谢正伦 陈礼仁	提出有效集水面积为危险溪流之判定指标,并以流出土砂量作为危险度之评估标准,最后以东部历年土石流区,取150作为计算条件,针对危险溪流(A=高危险,B=中危险,C=低危险)计算有效集水面积。	结果显示C级之有效集水面积在 $1 \sim 8 \text{ hm}^2$ 间。曾发生土石流区之有效集水面积 $A15$ 均大于 $6 \text{ hm}^2$ ,与日本建设省 $5 \text{ hm}^2$ 近似。	资料来源: 谢正伦, 陈礼仁(1993)
詹饒登	运用坡度集水面积两个土石流发生之地质特性,过滤可能发生土石流之区域,来节省现场调查工作,进一步分析地质特性及水文特性,业判断土石流危险度及预测。	认定坡度 $> 10^\circ$ ,集水面积 $> 5 \text{ hm}^2$ 为可行之过滤标准	资料来源: 詹饒登(1994)
伊承远	探讨过中、日六种土石流发生模式,最后以游繁结(1987)修正渗流理论土石流发生模式应用于预测	建立土石流调查作业方法可作土石流潜在危险筛选,作为野外现场精查之依据。	资料来源: 伊承远等4人 (1994)

### 3 结 语

综合上面所述,近10年来台湾在土石流灾害的探讨已受相当重视。有关灾害防治对策工事和流动性研究上也获得相当成果;在发生机制、堆积机制研究方面也有令人满意的结果;危险区域、危险程度的划定及预警系统建立的研究成果也初步可运用。至于有关力学特性的研究,宏观

的来说国内外研究的成果是丰收的,在微观的方面,内部应力的了解尚需深入去探讨,方能配合电脑科技,在模式的建立上更上一层楼。

### 参考文献

- 1 尹承远,吴仁明,翁勋政,欧阳湘.土流危险地质、地形、水文特征与预警模式建立.能资所06—83—0282报告.工业技术研究院能源与资源研究所,新竹,1994
- 2 江永哲,连惠邦,林裕益,李明晃,吴道煦.开放式防砂坝对土流防治功效之探讨.中华水土保持学报,1993,24(1):37~43
- 3 江永哲,王德镛,连惠邦,黄志彰.防砂坝与下游河床特性对土石流流动影响之研究.中华水土保持学报,1992,23(2):135~143
- 4 江永哲,黄怡仁.透水栅防治土石流功效之实验.兴大水土保持学报,1992,24(1):51~65
- 5 江永哲,林启源.土石流之发生雨量特性分析.中华水土保持学报,1991,22(2):21~37
- 6 江永哲,吴道煦.A型梳子坝防治土石流功效之试验.中华水土保持学报,1990,21(2):29~43
- 7 江永哲,林裕益.动式防砂坝防治土石流灾害之解析.兴大水土保持学报,1988,10:69~87
- 8 江永哲,吴正雄.芎林地区之地形植生因素与土石流发生之关系研究.农林学报,1986,34(2):35(1):183~194
- 9 李俊明.板儿崩积层土石流发生机制之初步研究.中兴大学土木工程研究所硕士论文,1993
- 10 吴道煦.A型梳子坝开口间隔与防治土石流功效之试验.中兴大学水土保持学研究所硕士论文,1990
- 11 李明晃.立体格子型坝防治土石流功效之试验.中兴大学水土保持学研究所硕士论文,1990
- 12 吴正雄,江永哲.林口台地林地之地形因素与土石流发生之关系研究.中华水土保持学报,1992,16(2):18~58
- 13 吴正雄,罗绍麟.冬山溪集水区地形植被因素与土石流发生之关系研究.中华林学季刊,1985,18(3):53~64
- 14 宋义达.土石流冲击力之探讨.中兴大学水土保持研究所硕士论文,1980
- 15 林炳森,冯赐阳,李俊明.砾石层土石流发生特性之研究.中华水土保持学报,1993,24(21):55~64
- 16 林成伟.流路坡度变化对土石流堆积特性之探讨.中兴大学水土保持研究所硕士论文,1991
- 17 林炳森,方世杰,冯赐阳.土石流流力学特性之试验研究.土壤冲蚀及河训川冲淤研讨会论文集,台北市,1990
- 18 林裕益,江永哲.梳子坝调节土石流功效之试验.中华水土保持学报,1988,19(1):40~57
- 19 连惠邦.砾石型土石流流体性质与运动特性之相关研究.中兴大学水土保持研究所博士论文,1994
- 20 黄宏斌.非饱和堆积层土石流发生之临界角度与含水量之关系研究.中华水土保持学报,1993,24(1):21~27
- 21 黄宏斌.日本之土石流研究回顾.中华水土保持学报,1993,24(1):83~90
- 22 陈荣河,林美聆,陈宏宇.铜门村土石流材料特性之初步研究.中华水土保持学报,1993,24(1):65~73
- 23 曹家文.土石流冲淤模式之开发与应用.成功大学水利及海洋工程研究所硕士论文,1993
- 24 许睿心.土石流流动与淤积之数值模拟.成功大学水利及海洋工程研究所硕士论文,1992
- 25 陈重光,游繁结.十八重溪土石流灾害之探讨.兴大农林学报,1988,37(1):1~18
- 26 游繁结,赖建信.不同粒径组成与土石流发生之关系探讨.中华水土保持学报,1988,25(1):25~31
- 27 游繁结.土石流堆积特性之探讨(Ⅱ)土石流流动复堆积之特性.中华水土保持学报,1993,24(1):45~53
- 28 游繁结.土石流之堆积形态.中华水土保持学报,1992,23(1):1~16
- 29 游繁结.土石流堆积特性之初步探讨.中华水土保持学报,1991,22(2):1~20
- 30 游繁结.利用地理资讯系统建立山坡地之土石流数值地理模式,1992,81农建—9·1—林—26(5—7)
- 31 游繁结.跃石流之基础研究(1)土石流发生机制之研究.中华水土保持学报,1987,18(2):28~40
- 32 游繁结,陈重光.丰丘土石流灾害之探讨.中华水土保持学报,1987,18(1):76~92

- 33 张石角. 山坡地潜在危险之预测及其在环境影响评估之应用. 中华水土保持学报, 1987, 18(2): 41~62
- 34 冯赐阳. 砾石层土石流发生特性之初步研究. 中兴大学土木工程研究所硕士论文, 1992
- 35 詹钱登. 土石流危险度之评估与预测. 中华水土保持学报, 1994, 25(2): 95~102
- 36 詹钱登. 理想化土石流之动内摩擦角. 中华水土保持学报, 1993, 24(1): 29~36
- 37 刘格非, 郭哲昆, 吴昌修. 缓坡土石流运动之研究. 中华水土保持学报, 1993, 24(1): 1~11
- 38 刘格非. 斜坡上土石流定形坡之研究. 台湾大学工程学刊, 1992, 54(97)~112
- 39 郑瑞昌, 江永哲. 土石流发生特性之初步研究. 中华水土保持学报, 1987, 17(2): 50~69
- 40 蔡元芳. 土石流冲淤模式之研究. 成功大学水利及海洋工程研究所硕士论文, 1994
- 41 谢正伦, 陈礼仁. 土石流潜在溪流之危险度的评估方法. 中华水土保持学报, 1993, 24(2): 13~19
- 42 谢正伦, 江志浩. 土石流危险溪流之判定方法. 交通大学, 第六届水利工程研讨会论文集, 1993, P262~273
- 43 谢正伦. 土石流预警系统之研究, 1992, 81农建—71—林—79报告
- 44 苏重光, 连惠邦, 江永哲. 混合流层模式、土石流流连分布. 中华水土保持学报, 1993, 24(1): 75~82