

土石流扇狀地之三維堆積地形

謝正倫¹ 蔡元芳²

關鍵詞： 土石流、土石流扇狀地、現場調查、實驗研究。

摘要

本研究利用一系列以各種不同實驗條件下所形成之 72 個土石流扇狀地及 5 處現場土石流扇狀地來探討土石流扇狀地之堆積特性。由實驗及現場調查結果發現，土石流扇狀地之無因次橫、縱斷面在平衡階段皆具有高斯分佈之幾何相似特性，且其橫、縱斷面分佈係數會隨著土石流中混合礫石均勻係數之變大及泥漿流體密度之增加而起加大之作用，至於無因次之平面形態則均具有圓弧分佈之幾何相似特性。且利用上述所得之三個無因次幾何相似形態函數可推導土石流扇狀地之三維堆積地形公式 $Z = f(X, Y, L_c, B_m, Z_0)$ 及體積公式 $V = \alpha L_c B_m Z_0$ 。文中更進一步利用 Takahashi 之研究推估土石流扇狀地之最大淤積長度 (L_c)；且藉由實驗資料所迴歸出之土石流扇狀地沿中心軸之平均淤積坡度公式可用以概估土石流扇狀地之扇頂淤積厚度 (Z_0)；而在土石流土砂流出量為已知或可估計之情況下，亦可利用前述之扇狀地體積公式計算土石流扇狀地之最大淤積寬度 (B_m)。如此在 L_c 、 B_m 及 Z_0 為已知之情況下，則整個土石流扇狀地之三維堆積地形即可確定。

THE 3-D DEPOSITION EVOLUTION OF DEBRIS-FLOW FANS

Chjeng-Lun Shieh Yuan-Fan Tsai

Department of Hydraulics and Ocean Engineering
National Cheng Kung University
Tainan, Taiwan 70101, R.O.C.

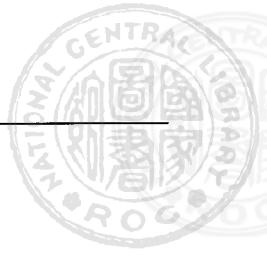
Key Words: debris flow, debris-flow fans, field investigations, experimental study.

ABSTRACT

Seventy two debris-flow fans of different experimental conditions and five debris-flow fans in the field were used to study the configurations of the debris-flow fan in this paper. The experimental results and field investigations showed that the non-dimensional longitudinal and cross sectional profiles of the debris-flow fan in the stable stage can be described by Gaussian functions, and the distributive coefficients of the longitudinal and cross sectional profiles will increase with the increase of the uniformity coefficients of the non-uniform particles and the density of the viscous fluid, while the non-dimensional plan form of the debris-flow fan can be described by a circular arc. By combining the three non-dimensional curves mentioned above, the volume function, $V = \alpha L_c B_m Z_0$, and the 3-D morphological function, $Z = f(X, Y, L_c, B_m, Z_0)$, of the debris-flow fan can be easily derived. The maximum length, L_c , of the debris-flow fan can be predicted using Takahashi's technique, and the thickness of the apex point, Z_0 ,

¹ 國立成功大學水利及海洋工程學系教授兼防災研究中心主任

² 國立成功大學水利及海洋工程學系博士班研究生



Z_0 , of the debris-flow fan by using the experimental function of the average deposition slope along the center line. Under the predictable value of debris-flow effluxes, the maximum width, B_m , of the debris-flow fan can be calculated by the volume function. Then the 3-D deposition evolution of the debris-flow fan can be determined given the parameters L_c , B_m and Z_0 .

一、前 言

台灣地區自民國 79 年 6 月 23 日歐菲莉颱風侵襲花蓮縣銅門村至民國 85 年 7 月 31 日賀伯颱風重創南投縣陳有蘭溪沿岸土石流災害共造成數百人之身亡，因此如何劃定土石流災害危險區遂成為政府重要之工作。而土石流災害危險區之劃定通常可藉由一計劃水文量所引致土石流扇狀地之淤積厚度高低將每條土石流潛在危險溪流區分為高危險區及次危險區。因此如何由各種不同地形、堆積物及水文量等因素找出土石流扇狀地淤積形態幾何相似特性及其三維堆積狀況遂成為土石流防治工程規劃及災害危險區劃定等措施之重要的前驅工作。然而往昔有關土石流扇狀地的研究，大都以土石流扇狀地淤積長度作為研究對象，如 Takahashi [1] 根據質量不減原理與動量平衡觀點誘導出土石流之停止淤積長度、Okuda [2] 以質點動力學之觀點估算土石流扇狀地長度、Cannon [3]、Okuda [4]、Ikeya [5] 及 Bathurst 等人 [6] 則以現場觀測之歷史資料，根據統計方法分析其規則性以預測土石流災害之氾濫長度。然而僅就土石流扇狀地長度進行研究雖可大致預測土石流危險範圍但對災害危險度之區分則完全無法提供參考。因此本文擬以各種不同地形、水文量及堆積物等特性作為實驗設計條件，以期找出在各種不同實驗條件下之土石流扇狀地三維淤積狀況，以供土石流防治工程規劃及災害危險區劃定之參考。以往有關類似的實驗研究有 Okuda [2]、Takahashi 和 Yoshida [7,8]、Hooke [9]、Major 和 Pierson [10]、游繁結和林成偉 [11,12] 及江永哲和林裕益 [13] 然而這些研究者對土石流扇狀地形狀幾何相似特性及三維淤積狀況則並未有進一步的定量分析，殊為可惜。至於謝正倫和蔡元芳 [14] 曾以單一粒徑 $d_{50} = 1.6\text{mm}$ 為實驗材料所作之 11 個實驗結果進行土石流扇狀地之橫、縱斷面及平面無因次幾何相似特性之初步分析，但並未探討各種不同粒徑大小、混合粒徑及黏土質細料對扇狀地幾何相似特性之影響，且於文中亦未針對土石流扇狀地之最大淤積長、寬、厚度及三維淤積狀況進行研究，更缺少現場地形資料提供驗證，由於只以 $d_{50} = 1.6\text{mm}$ 為實驗材料所得之土石流扇狀地幾何相似特性結果，與現場之混合礫石或可能含有黏土質細粒出入甚大，且只知土石流扇狀地之幾何相似特性，對土石流扇狀地之可能三維堆積地形並無貢獻且難以應用。本研究即基於以往研究之不完整處，進行更多之室內實驗及現場資料之搜集，以期更了解土石流扇狀地之堆積特性。其中室內實驗共計 72 例，分別以各種不同粒徑之均勻礫石、不同均勻係數之混合礫石及不同密度之泥漿流體進行實驗，使能符合各種不同地文條件之現場，結果發現土石流扇狀地之無因次橫、縱斷面雖亦具有高斯分佈之幾何相似特性，但其橫、縱斷面分佈係數會隨著土

石流中混合礫石均勻係數之變大及泥漿流體密度之增加而起加大之作用。文中更進一步以 72 個實驗結果探討土石流扇狀地之最大淤積長、寬及厚度並配合前述之土石流扇狀地幾何相似特性函數，求得土石流扇狀地之三維堆積地形公式，最後更以現場調查之 5 處扇狀地形作為驗證。

二、土石流扇狀地實驗

2.1 實驗之建立

本研究之實驗設備如圖 1 所示，係由一直線渠道接續一平台所構成。渠道長 8.0m、寬 0.2m、高 0.5m，而平台之長為 3.0m、寬為 2.2m、高為 0.5m。渠道及平台之坡度皆可電動調整，其調整範圍分別為 $0^\circ \sim 30^\circ$ 及 $0^\circ \sim 20^\circ$ 。此外，另有供砂系統及供水系統，可分別將粗骨材、清水或泥漿流體送至渠道之上游端充分混合後形成土石流流下，並配合以各種不同之流量、坡度及加砂濃度以探討這些變數對土石流扇狀地堆積特性之影響。而本研究所用之粗骨材共計 7 種，其中 3 種屬均勻礫石，其中值粒徑 d_{50} 分別為 1.6、4.5 及 7.0mm；另 4 種為混合礫石其中值粒徑均為 4.5mm 而均勻係數 $C_u (= d_{84} / d_{16})$ 則分別為 2.5、3.9、7.6 及 13.0，粗骨材之比重 $\sigma = 2.65\text{g/cm}^3$ ，內摩擦角 ϕ 約為 37° 。

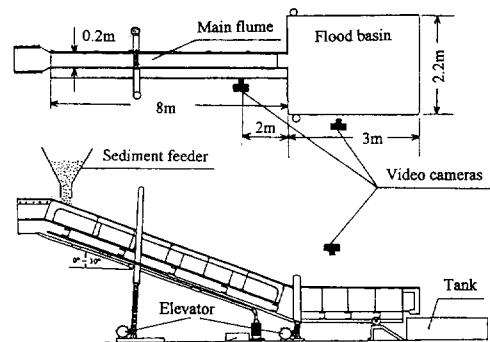


圖 1 實驗設備圖

至於本研究所使用之流體有清水及 3 種不同密度之泥漿流體，密度分別有 1.083 、 1.216 及 1.365g/cm^3 ，而此 3 種不同密度之泥漿流體係因加入不同體積濃度（分別為 5%、13% 及 22%）之黏土質細料於清水在攪拌器內充分混合後所形成，而所加入之黏土質細料，其中值粒徑約為 0.016mm 、比重為 2.66g/cm^3 、液性限度 $LL = 26.19$ 、塑性限度 $PL = 8.06$ 、塑性指數 $PI = 18.13$ ，依統一土壤分類屬 CL (黏土)，經國立成功大學土壤力學試驗室將試體經快剪

試驗得知，凝聚力 $c = 0.13\text{kgf/cm}^2$ ，內摩擦角 $\phi = 26.9^\circ$ ，並將其歸類為 lean clay。至於為何本文會使用 3 種不同密度之泥漿流體，主要係為了解泥流型與礫石型土石流扇狀地之差異，綜觀近年來發生於台灣之土石流災害，大致可分為礫石型土石流及泥流型土石流，而礫石型之土石流如民國 79 年花蓮縣銅門村土石流災害、民國 74、75 及 85 年之南投縣豐丘村土石流災害等，至於泥流型土石流災害之最典型為民國 83 年花蓮縣豐濱鄉東興部落之土石流災害。廣義而言礫石型土石流為清水與粗顆粒之混合流體，而泥流型土石流於其組成成份中則較礫石型土石流富含微細之黏土顆粒，此種微細之黏土顆粒會融於清水形成泥漿流體（黏性流體），致使泥流型土石流於運動過程中表現出高黏性、低流速、低衝擊力及水與泥難以分離之低脫水性，不同於礫石型土石流之低黏性、高流速、高衝擊力及水與礫石極易分離之高脫水性。而本文之所以會採用 3 種不同體積濃度之泥漿流體，係為探討清水中含黏土質細粒多寡對土石流扇狀地地形之影響。

本研究之實驗方法係採用定量自渠道上游端供應流體及粗骨材的方式來進行一系列之室內定床實驗，但實驗渠道及平台之底床則均黏有粒徑約為 1.6mm 之均勻顆粒以作為底床粗糙度之用。本研究共計 72 個實驗例，其實驗條件及實驗結果如表 1 所示。其中 θ_1 為上游渠道坡度； θ_2 為下游平台坡度； ρ 為土石流中流體之密度，泥漿流體密度 ρ 值係由加入於攪拌器中之清水重及黏土質細料重，假設攪拌均勻之情況下換算而得； Q_d 為土石流流量係由沈水馬達置於攪拌器內所抽送之流體流量 Q_f （可於實驗中計算總供流體積除以供流時間計算而得）與輸砂器所供應之粗骨材流量 Q_s （可於實驗中計算總供砂重量及供砂時間換算求出）相加所得；至於土石流中粗骨材所佔之體積濃度 C_d 則可由 Q_s 及 Q_f 換算而得。由於本文採定量供流供砂方式，因此 Q_d 、 C_d 、 ρ 等上游入流邊界條件可假設為定值，並不隨時間而改變。 h 為渠道內接近出口處各實驗例所量測之土石流動深，由實驗觀察發現此流動深並不隨時間而變化約為定值； L_c 為實驗後各扇狀地之中心軸淤積長度； B_m 為實驗後各扇狀地之最大淤積寬度； Z_0 為實驗後各扇狀地之扇頂淤積厚度； V 為實驗後各扇狀地所量測之淤積體積。由表 1 可看出實驗例 Run 1 ~ Run 30 屬均勻礫石之清水實驗例，實驗例 Run 31 ~ Run 57 屬混合礫石之清水實驗例，實驗例 Run 58 ~ Run 72 屬均勻與混合礫石之泥漿流體實驗例，實驗例 Run T1 ~ Run T3 為 Takahashi 等 [7,8] 之 3 個均勻礫石清水實驗例。

2.2 土石流扇狀地之形成過程

土石流扇狀地之形成過程可由實驗例 Run 53 之混合礫石清水實驗例之六張照片如圖 2 所示，此圖乃由平台正上方所拍攝，照片中之紅黑相間隔網其長、寬度均為 10cm；圖中之實驗時間（由土石流沖入平台起算）分別為 2 秒、4 秒、6 秒、16 秒、22 秒及最終時刻 27 秒。由圖顯示土石流由渠道進入下游平台之初期時，扇狀地之發展主要係以縱斷方向（X-dir）為主，6 秒內扇狀地向下游之

表 1 土石流扇狀地實驗條件及結果一覽表

Run No.	d_{50} (mm)	C_u	θ_1 (deg.)	θ_2 (deg.)	Q_d (cm^3/sec)	C_d (%)	ρ (g/cm^3)	h (cm)	L_c (cm)	B_m (cm)	Z_0 (cm)	V (cm^3)
1	1.6	1.0	15	2	2570	35.8	1.0	0.9	90	72	9.7	17101
2	1.6	1.0	15	2	4340	42.4	1.0	1.4	101	95	10.2	20787
3	1.6	1.0	15	5	2750	35.6	1.0	1.1	108	110	12.5	31769
4	1.6	1.0	15	5	4030	38.0	1.0	1.3	121	102	13.1	36539
5	1.6	1.0	17	2	2430	30.0	1.0	0.9	125	101	11.1	35198
6	1.6	1.0	17	5	2300	30.4	1.0	1.0	86	94	12.3	24687
7	1.6	1.0	17	5	3460	48.0	1.0	1.6	90	142	14.6	41875
8	1.6	1.0	19	2	3340	43.1	1.0	1.5	78	116	16.8	33467
9	1.6	1.0	19	5	2580	50.4	1.0	1.3	68	102	15.6	22098
10	1.6	1.0	21	2	1470	30.6	1.0	0.7	110	110	10.5	30770
11	1.6	1.0	21	5	2380	51.7	1.0	1.2	67	92	17.3	26967
12	7.0	1.0	17	2	4980	32.1	1.0	1.9	79	109	17.2	34082
13	7.0	1.0	17	5	5030	34.8	1.0	1.7	79	89	17.9	27930
14	7.0	1.0	19	2	4860	41.2	1.0	2.0	70	113	17.7	29665
15	7.0	1.0	19	5	4890	35.2	1.0	1.8	69	88	17.5	25595
16	7.0	1.0	21	2	4410	35.6	1.0	2.0	52	88	18.8	20190
17	7.0	1.0	21	5	5150	33.8	1.0	1.8	78	91	24.3	39825
18	4.5	1.0	17	2	2740	45.3	1.0	1.8	38	70	11.8	8325
19	4.5	1.0	17	2	4220	40.8	1.0	1.9	58	89	17.8	20960
20	4.5	1.0	17	5	2610	42.5	1.0	1.6	38	55	10.4	6174
21	4.5	1.0	17	5	4630	35.2	1.0	1.7	91	110	18.0	41706
22	4.5	1.0	17	5	5040	40.5	1.0	1.9	68	80	18.4	21324
23	4.5	1.0	19	2	2690	44.2	1.0	1.6	48	73	16.3	13009
24	4.5	1.0	19	2	4220	40.8	1.0	1.9	58	93	18.7	23177
25	4.5	1.0	19	2	4370	40.5	1.0	1.8	66	93	21.9	29360
26	4.5	1.0	19	5	2620	42.7	1.0	1.5	50	64	14.0	10918
27	4.5	1.0	21	2	2810	46.6	1.0	1.4	37	62	13.6	7655
28	4.5	1.0	21	2	4880	38.5	1.0	1.7	80	100	22.7	34944
29	4.5	1.0	21	5	2590	42.1	1.0	1.5	50	73	14.8	14515
30	4.5	1.0	21	5	4090	38.9	1.0	1.4	85	95	19.5	33440
31	4.5	2.5	17	2	2750	45.5	1.0	1.6	34	61	12.4	7855
32	4.5	2.5	17	2	5210	42.4	1.0	1.9	64	87	18.6	22642
33	4.5	2.5	17	5	2820	46.7	1.0	1.5	29	49	7.1	3636
34	4.5	2.5	17	5	4810	37.6	1.0	1.8	85	97	21.1	40721
35	4.5	2.5	19	2	2720	44.9	1.0	1.6	32	60	11.6	7225
36	4.5	2.5	19	2	5030	40.4	1.0	1.8	80	102	21.1	41923
37	4.5	2.5	19	5	2820	46.8	1.0	1.5	44	61	13.2	9566
38	4.5	2.5	19	5	4350	37.9	1.0	1.6	73	90	21.7	27811
39	4.5	2.5	21	2	4860	38.3	1.0	1.7	80	105	25.1	51308
40	4.5	2.5	21	5	2600	42.3	1.0	1.4	46	63	13.7	10471
41	4.5	3.9	17	2	2640	43.2	1.0	1.3	56	82	17.6	19122
42	4.5	3.9	17	2	4530	44.8	1.0	1.9	50	87	16.2	18338
43	4.5	3.9	17	5	2710	44.6	1.0	1.6	33	49	8.1	5135
44	4.5	3.9	17	5	4700	46.7	1.0	1.7	45	58	11.2	7980
45	4.5	3.9	19	2	2670	43.8	1.0	1.3	38	60	13.5	9233
46	4.5	3.9	19	2	4500	44.4	1.0	1.8	58	95	18.5	23590
47	4.5	3.9	19	5	2840	47.2	1.0	1.5	46	65	12.6	10860
48	4.5	3.9	19	5	4760	47.5	1.0	1.7	69	81	16.3	22522
49	4.5	3.9	21	2	4500	44.4	1.0	1.5	80	91	18.7	32516
50	4.5	3.9	21	5	2620	42.7	1.0	1.3	56	69	14.4	13194
51	4.5	7.6	17	2	2660	43.6	1.0	1.3	52	77	14.1	17069
52	4.5	7.6	17	5	2940	49.0	1.0	1.3	45	67	10.2	9271
53	4.5	7.6	19	2	2890	48.1	1.0	1.5	64	90	17.0	22082
54	4.5	7.6	19	5	2720	44.9	1.0	1.3	80	84	15.1	21603
55	4.5	7.6	21	2	2370	36.7	1.0	1.1	85	88	14.8	24896
56	4.5	13.0	19	5	2790	46.2	1.0	1.4	85	119	14.1	32965
57	4.5	13.0	21	2	2730	45.1	1.0	1.2	75	93	13.3	26171
58	4.5	1.0	17	2	2500	40.0	1.083	1.2	40	64	9.1	7222
59	4.5	2.5	17	2	2500	40.0	1.083	1.2	44	65	8.9	7291
60	4.5	3.9	17	2	2500	40.0	1.083	1.2	39	60	7.7	5314
61	4.5	7.6	17	2	2500	40.0	1.083	1.1	47	73	10.7	11037
62	4.5	13.0	17	2	2500	40.0	1.083	1.3	41	76	12.5	11160
63	4.5	1.0	17	2	2500	40.0	1.216	1.3	85	133	14.1	41627
64	4.5	2.5	17	2	2500	40.0	1.216	1.3	59	93	15.6	22177
65	4.5	3.9	17	2	2340	35.9	1.216	1.2	50	85	13.3	14856
66	4.5	7.6	17	2	2460	39.0	1.216	1.2	89	113	13.2	39257
67	4.5	13.0	17	2	2570	33.9	1.216	1.1	77	119	13.9	33963
68	4.5	1.0	17	2	2500	40.0	1.365	1.2	65	93	12.1	22695
69	4.5	2.5	17	2	2700	37.0	1.365	1.2	62	104	12.4	23569
70	4.5	3.9	17	2	2900	34.5	1.365	1.3	67	100	11.6	23066
71	4.5	7.6	17	2	2900	34.5	1.365	1.2	90	136	10.7	39750
72	4.5	13.0	17	2	2900	34.5	1.365	1.2	77	118	11.8	34077
T1	5.05	1.0	17	2	1200	50.0	1.0	N/A	81	79	9.7	13279
T2	4.0	1.0	18	4	2200	45.5	1.0	N/A	67	124	10.5	21847
T3	4.0	1.0	18	4	2200	36.4	1.0	A/A	75	142	13.0	32996

發展長度已達平衡而不再向前發展，而橫斷方向 (Y -dir) 之最大淤積寬度發展則由其扇狀體之中央慢慢向渠道出口處移進，至 22 秒時其最大淤積寬度之發生位置已移至谷口，而從 22 秒以後至實驗結束其扇狀體之形狀則改變甚微，係因其上游來砂大多溯源淤積於渠道內，僅小部份之來砂會繼續向扇狀地之橫斷方向慢速流動淤積，此段時間即稱之為土石流扇狀地之“平衡階段”。另一方面，若低濃度之土石流或清水跟隨土石流後面而來，則土石流扇狀地將被侵蝕。而本文對土石流扇狀地形特性之探討均針對其平衡階段而論，對於平衡階段後之土石流扇狀地變化，在本文則尚未探討。至於其它之實驗例亦有相同之情形，如圖 3 分別為 Run 10 之均勻礫石清水實驗例及 Run 68 之均勻礫石泥漿流體實驗例之扇狀地最終淤積情形照片圖。而有關本研究於土石流扇狀地幾何相似特性分析所用參數之定義分別如圖 4 所示，此圖由上而下分別為實驗例 Run 10 扇狀地之最終時刻平面、縱斷面及橫斷面之淤積狀況圖。圖中 X 軸為縱斷面之位置， $X = 0$ 代表渠道與平台之交接點亦即扇狀地之頂點， X 軸之正向代表自交接點往下游方向；圖中 Y 軸為橫斷面位置， $Y = 0$ 代表橫斷面之中心點， Y 軸正向代表中心點之右側位置（由下游向上游看）， Y 軸負向則代表左側位置； Z 軸則為淤積厚度； Z_0 則代表扇頂處之淤積厚度，通常此淤積厚度為扇狀體之最大淤積厚度； Z_c 則代表橫斷面中心點之淤積厚度，即中心軸縱斷面之淤積厚度； L_c 代表中心軸上自扇頂起算之淤積長度，通常此長度即為扇狀體之最大淤積長度； B_m 代表橫斷面之最大寬度值，通常其發生位置在谷口該橫斷面； B 則代表任意橫斷面之寬度； γ 為扇狀地沿中心軸之平均淤積坡度。

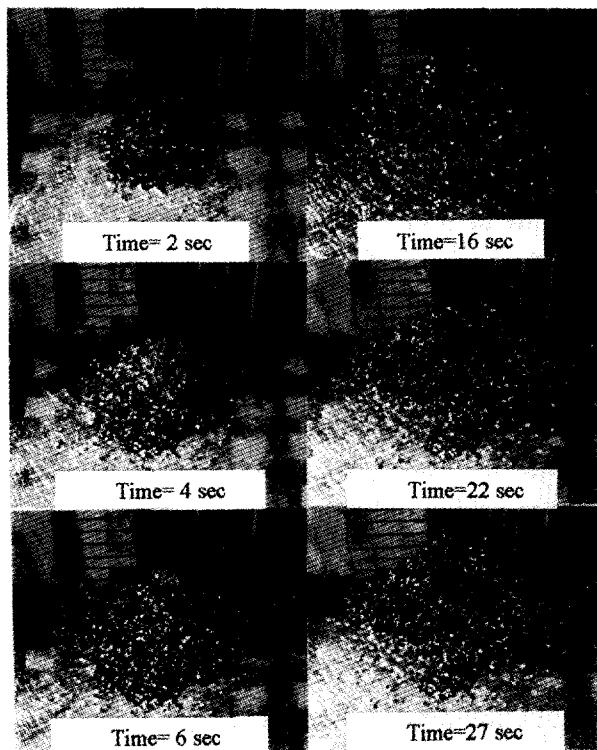
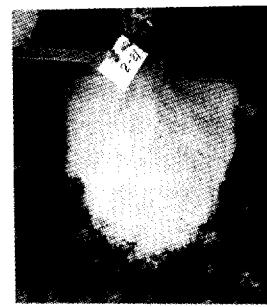


圖 2 實驗例 Run 53 土石流扇狀地之形成過程照片圖



(a) 實驗例 Run 10



(b) 實驗例 Run 68

圖 3 實驗例 Run 10 及 Run 68 之扇狀地最終時刻淤積情形照片圖

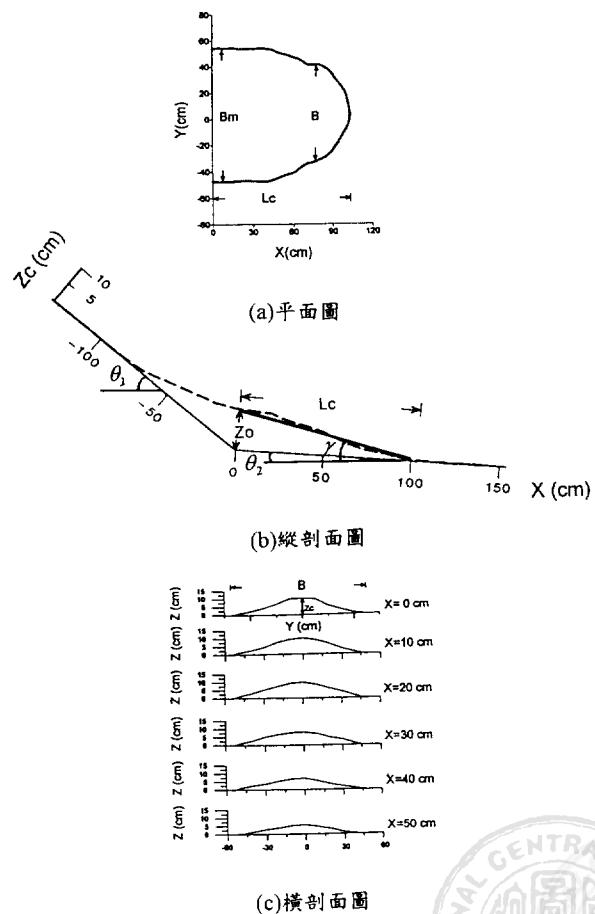


圖 4 實驗例 Run 10 之扇狀地最終平面、縱斷面及橫斷面淤積狀況圖



三、土石流扇狀地之現場調查與水文分析

本研究之土石流扇狀地現場調查共計 5 處，分別為南投縣信義鄉之 3 處土石流扇狀地及苗栗縣三義鄉之 2 處土石流扇狀地，其現場照片分別如圖 5 所示。而南投縣之 3 處扇狀地經當地居民證實均為民國 85 年 7 月 31 日在賀伯颱風豪雨作用下所形成，其地點分別為 Fan 1 在信義之愛國橋側、Fan 2 在豐丘之對岸、Fan 3 在久美之農富坪橋側。至於苗栗縣之 2 處扇狀地 (Fan 4 及 Fan 5) 則為多次土石流堆積所形成，而最近一次發生土石流之時間為民國 86 年 7 月 9 日豪雨所造成，其位置在國道中山高速公路 155km 旁之火炎山。由圖 5 可看出此 5 處地點所形成之土石流扇狀地應已達其平衡階段，至於在平衡階段以後扇狀地之變化情形，則不在本文之探討範圍內，如圖 6 為 Fan 3 在賀伯風災後 8 個月所拍攝，由圖可看出扇狀地在沿中心軸方向被上游所流下之清水侵蝕出一條深而長之渠溝，且扇狀地之右前緣亦遭陳有蘭溪洪水切割過，而此種遭破壞後之扇狀地地形所分析出之結果會與本文由實驗所得之結果

有較大之出入，但本文於 5 處土石流扇狀地所進行之地形測量，均在扇狀地形成後不久遭破壞以前所為，其經測量後之淤積厚度等高線圖如圖 7 所示。至於本文為何會選擇此 5 處土石流扇狀地，而不選擇其他土石流扇狀地如豐丘扇狀地之原因如下：豐丘於民國 85 年賀伯颱風侵襲下又發生土石流，圖 8 即為災後所拍攝之照片圖，由圖可看出豐丘扇狀地有明顯向右傾斜之趨勢，並不如本文中所提及之 5 處扇狀地來的左右對稱，造成其向右傾斜之原因，可能因為其右方地勢較低或由於人為開路、種植、建民房及水工結構物之阻擋亦會迫使豐丘土石流扇狀地在形成過程中產生若干程度之變形，且在扇狀地形成後又因造成人命傷亡及交通受阻迫使須對此扇狀地進行清除以利救災，以致無法取得其完整之扇狀地地形。因此若以豐丘扇狀地形作為實驗結果之驗證，可能會有較大之誤差。故本文所舉之 5 處土石流扇狀地大多為人煙罕至，地形變化單純類似實驗設備者，即上游路渠道坡度變化不大、谷口張開角度近似 180° 、下游淤積平台左右較對稱者。

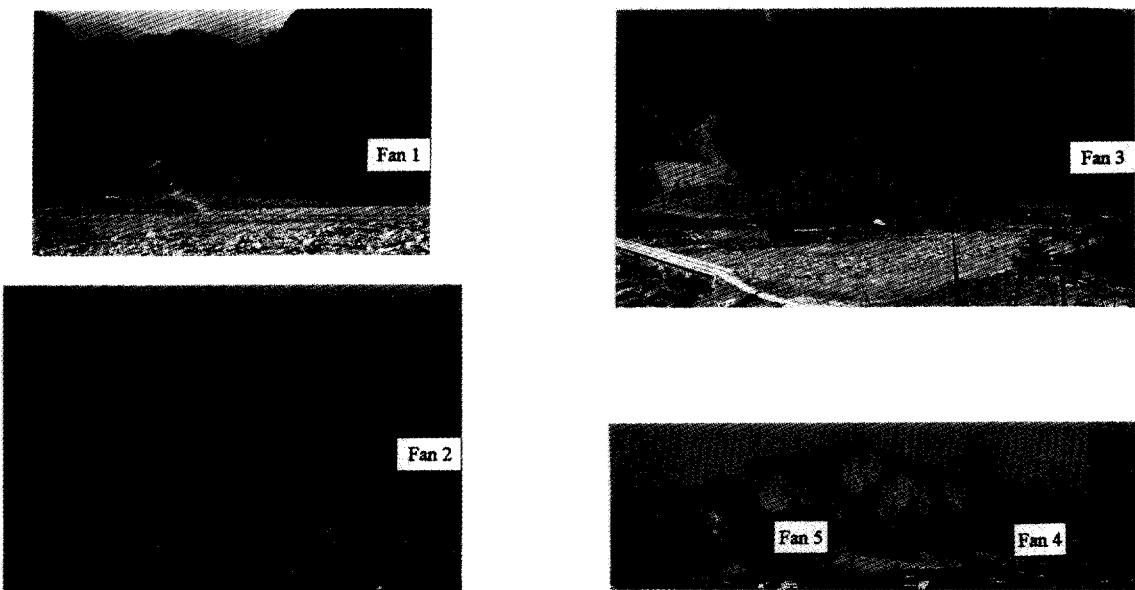


圖 5 現場土石流扇狀地 (Fan 1~Fan 5) 照片圖



圖 6 現場土石流扇狀地 (Fan 3) 經清水流破壞後之照片圖



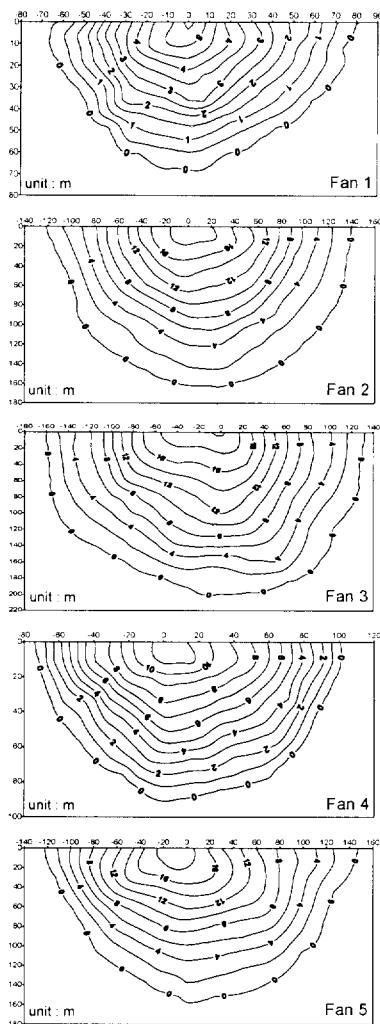


圖 7 現場土石流扇狀地 (Fan 1~Fan 5) 之淤積厚度等高線圖



圖 8 豐丘扇狀地之照片圖 (林銘郎攝)

為能了解現場扇狀地堆積土石材料之特性以利分析，本研究於該 5 處現場扇狀地進行明坑採樣粒徑分析，其方法係以各扇狀地沿中心軸之中心點附近，以 $1m^3$ 左右之明坑進行人工挖掘，所挖掘之土樣全部予以秤重後，將粒徑大於 $1.0cm$ 之土樣進行現地篩分析。現地篩分析係以 $1.0cm$ 、 $1.5cm$ 、 $2.5cm$ 、 $4.0cm$ 及 $5.0cm$ 之方眼篩輔以夾具進行，至於粒徑大於 $5.0cm$ 之顆粒則以直尺進行判識每增加 $2.0cm$ 再細分一組，而附著於粗顆粒上之細顆粒則以鋼刷刷除，篩選完畢後，分別秤重記錄，並將粒徑小於 $1.0cm$ 之土樣取四分之一攜回，於實驗室進一步分析其粒徑分佈，如此即可得出各現場扇狀地之明坑採樣粒徑分佈圖則如圖 9 所示。至於此 5 處扇狀地之其他基本地文資料經調查整理後如表 2 所示。

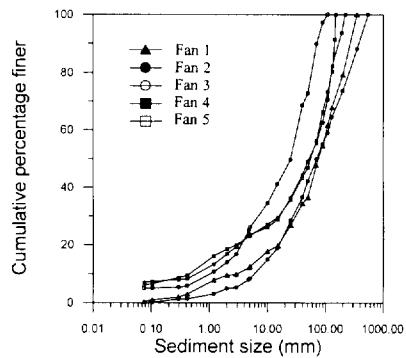


圖 9 現場土石流扇狀地之明坑採樣粒徑分佈圖

表 2 現場土石流扇狀地之基本資料

扇狀地 編號	L (m)	A (ha)	θ_1 (deg.)	θ_2 (deg.)	B_u (m)	d_{50} (mm)	C_u	L_c (m)	B_m (m)	Z_0 (m)	V (m^3)
Fan 1	1510	113.6	14.7	2.5	6.0	72	29.3	68	142	5.7	15171
Fan 2	1980	207.4	18.2	4.4	7.5	70	25.5	163	258	19.3	224912
Fan 3	1550	105.5	21.5	3.7	5.5	26	21.6	201	291	20.5	360962
Fan 4	590	18.1	21.2	6.8	3.5	51	61.2	91	174	11.6	57939
Fan 5	980	27.3	22.8	7.2	3.5	53	85.8	158	269	18.6	216692

其中 L 為溪流長度； A 為溪流之集水面積； θ_1 為河道上游路之平均坡度； θ_2 為河道下游路之平均坡度 (L 、 A 、 θ_1 及 θ_2 均由災害前之地形圖量測所得)； B_u 為河道上游路之平均寬度 (係由現場調查概估所得)； d_{50} 為溪床上堆積物之中值粒徑； C_u ($= d_{84} / d_{16}$) 為溪床上堆積物之均勻係數； L_c 為各扇狀地之中心軸淤積長度； B_m 為各扇狀地之最大淤積寬度； Z_0 為各扇狀地之扇頂淤積厚度； V 為各扇狀體經量測後所計算出之淤積體積，一般而言土石流可能流出之土砂體積 (V) 與其土砂儲存量、降雨量、溪床坡度及集水面積有關，日本建設省 [15] 曾就其國內 550 處土石流災害現場調查，得到集水面積 (A) 與土砂流出量 (V) 之關係，並以最小二乘法推求不同機率下之迴歸方程式如表 3。今將本研究之 5 處現場扇狀地代入表 3 計算後發現，其扇狀地體積均比日本全國平均標準 (V_{50}) 為高，由此顯示本省單位流域面積之土石流土砂流出量可能較日本平均標準嚴重，且除 Fan 1 約與其平均標準近似外，其餘之扇狀地 (Fan 2 ~ Fan 5) 則均在 95% 以上之高標準，分析

其原因可能由於 Fan 2 ~ Fan 5 其地質較脆弱且溪床坡度非常陡峭之故。

表 3 日本土石流土砂流出量之迴歸公式表 [15]

土砂流出量 機率百分比	迴歸方程式 (A : km ² , V : m ³)
50%	$V_{50} = 13600 A^{0.61}$
70%	$V_{70} = 27064 A^{0.61}$
80%	$V_{80} = 40800 A^{0.61}$
90%	$V_{90} = 70992 A^{0.61}$
95%	$V_{95} = 113968 A^{0.61}$
99%	$V_{99} = 274720 A^{0.61}$

為能更了解現場土石流扇狀地淤積形狀與水文量間之關係，本研究乃利用各種理論及經驗公式將災害當時之水文量推估如下：

3.1 上游路土石流濃度 C_d (假設等於土石流平衡濃度)

依據 Takahashi [16] 所推導之土石流平衡濃度公式如式(1)。

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta_1}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta_1)} \quad \text{若 } C_d \geq 0.9C, \text{ 則 } C_d = 0.9C. \quad (1)$$

其中顆粒之密度 (σ) 一般可採用 2.65 g/cm^3 ，流體之密度 (ρ) 於 Fan 1 及 Fan 2 採用 1.0 g/cm^3 ，至於 Fan 3、Fan 4 及 Fan 5 由於現場明坑採樣發現有類似沈泥及黏土質之細料存在，即通過 200 號篩約佔 5 ~ 10% (如圖 9 所示)，由於無法得知其真實流動中流體之密度 (ρ)，故採預測值 1.2 g/cm^3 ，內摩擦角 (ϕ) 一般可採用 37° ，而在堆積狀態時之體積濃度 (C_s) 一般可採用 0.67。

3.2 土石流尖峰流量 Q_d (cms)

依據謝正倫和陳禮仁 [17] 之研究，現場土石流之尖峰流量與降雨強度之關係如式(2)所示。

$$Q_d = \frac{C_s}{C_s - C_d} \frac{CI A}{360} \quad (2)$$

其中 C 為逕流係數 (假設為 0.8)； I 為降雨強度 (mm/hr)，南投縣之 3 處扇狀地 Fan 1、Fan 2 及 Fan 3 採用賀伯颱風於當地之最大降雨強度約為 112.5 mm/hr ，至於苗栗縣火炎山之 2 處扇狀地 Fan 4 及 Fan 5 因為多次土石流堆積所形成，擬採用該地區降雨頻率為 25 年一次之降雨強度約為 158.7 mm/hr ； A 為集水面積 (ha)。

3.3 上游路土石流平均流速 u (m/sec)

依據 Bagnold [18] 之本構關係可推導得土石流之平均流速公式如式(3)所示 [19]。

$$u = \frac{2}{5d} \left\{ \frac{g \sin \theta_1}{a_i \sin \phi_k} \left[C_d + (1 - C_d) \frac{\rho}{\sigma} \right] \right\}^{1/2} \left[\left(\frac{C_s}{C_d} \right)^{1/3} - 1 \right] h^{3/2} \quad (3)$$

其中 d 採用表 2 之中值粒徑 d_{50} ； $a_i = 0.042$ 為摩擦係數 (Bagnold [18])； ϕ_k 為顆粒之動摩擦角一般可採用 31° ； g 為重力加速度。

3.4 上游路土石流流動深 h (m)

依流體力學質量守恆觀念， Q_d 可以式(4)表示。

$$Q_d = B_0 h u \quad (4)$$

將式(2)及式(3)代入式(4)，則 $Q_d = f(h)$ 即可推求上游路土石流流動深 h 。茲將所計算出各扇狀地於災害時上游路之預測水文量列如表 4 所示。

表 4 各現場土石流扇狀地於災害時上游路水文量之預測值

扇狀地編號	C_d (%)	Q_d (cms)	h (m)	u (m/sec)
Fan 1	32.4	55.0	0.88	10.4
Fan 2	46.9	172.9	1.64	14.0
Fan 3	60.3	263.7	2.24	21.4
Fan 4	60.3	63.8	2.00	9.1
Fan 5	60.3	96.2	2.36	11.6

四、土石流扇狀地幾何相似特性之研究

4.1 土石流扇狀地橫斷面幾何相似特性之無因次分析

本研究中有關土石流扇狀地橫斷面幾何相似的無因次分析方法係以 Z/Z_c 及 Y/B 兩無因次參數，先將本研究之 3 組 ($d_{50} = 1.6, 4.5$ 及 7.0 mm) 不同粒徑之均勻礫石清水實驗例 (Run 1 ~ Run 30) 共計 30 個實驗結果及 Takahashi [7,8] 之 2 組 ($d_{50} = 4.0$ 及 5.05 mm) 不同粒徑之均勻礫石清水實驗例 (Run T1 ~ Run T3) 的 3 個實驗結果，將其所有橫斷面資料進行上述之無因次之分析。經點繪如圖 10 所示，由圖可知其分佈形狀具有高斯函數式(5)的形狀特性。

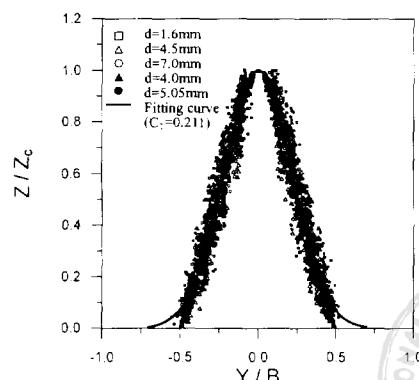
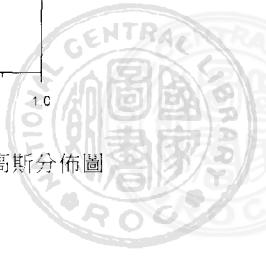


圖 10 土石流扇狀地橫斷面實驗資料之高斯分佈圖



$$\frac{Z}{Z_c} = \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{1}{C_T^2} \left(\frac{Y}{B} \right)^2 \right] \quad (5)$$

其中 C_T 為高斯分佈係數， C_T 之大小可影響高斯曲線之形狀，本研究利用圖 10 中共計 33 個實驗結果各實驗觀測點與高斯形狀曲線間之距離為最小，來求得最佳之高斯分佈係數 $C_T = 0.211$ ，而相關係數則高達 83%。若將此 33 個均勻礫石實驗結果，個別以相同方法加以分析，則其 C_T 值約在 0.204 ~ 0.225 間，且由分析結果發現高斯分佈係數 C_T 值並不隨均勻礫石清水實驗例中之各種不同流量、地形、均勻粒徑大小及加砂濃度而有所規則且劇烈之變化。至於本研究另 27 個混合礫石之清水實驗例 (Run 31 ~ Run 57) 及 15 個均勻與混合礫石之泥漿流體實驗例 (Run 58 ~ Run 72)，總計有 42 個實驗例所得之扇狀地橫斷面實驗結果依上述之相同方法分析，結果發現其橫斷面雖亦具有高斯分佈之特性，但其分佈係數 C_T 值則會隨混合礫石均勻係數 C_u 之變大及流體密度 ρ 之增加而逐漸加大。今將實驗所得之 C_T 值與 C_u 值及 ρ 值之關係繪如圖 11，而圖中之近似曲線乃由實驗資料經迴歸後所得之迴歸公式如式(6)。

$$C_T \approx 0.22 + \frac{1}{18\pi} \tan^{-1} [1.2(C_u - 1)] + 0.11(\rho - 1)^{1.23} \quad (6)$$

至於 5 處土石流現場扇狀地 (Fan 1 ~ Fan 5)，經分析後發現其橫斷面仍具高斯分佈之形狀特性如圖 12，其 C_T

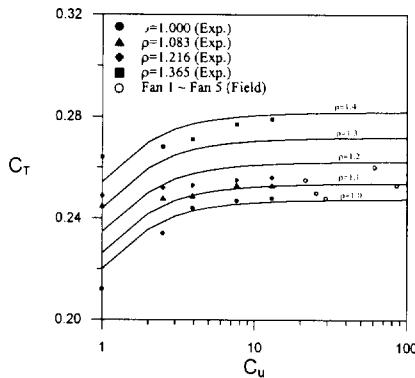


圖 11 橫斷面高斯分佈係數 (C_T) 值與均勻係數 (C_u) 值及流體密度 (ρ) 值之關係圖

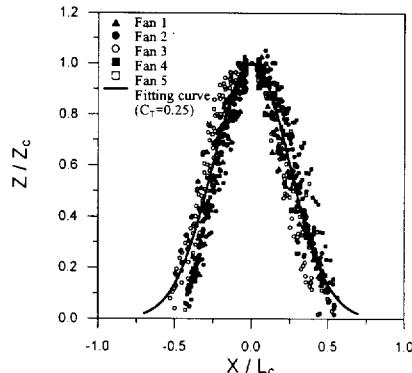


圖 12 土石流扇狀地橫斷面現場資料之高斯分佈圖

值分別為 0.248、0.250、0.255、0.260 及 0.253。將此些值點繪於圖 11，由圖可發現 Fan 1 及 Fan 2 之 C_T 值與實驗資料所迴歸出之式(6)中 $\rho = 1.0$ 曲線較吻合，至於 Fan 3 ~ Fan 5 之 C_T 值較大約與實驗資料所迴歸出之式(6)中 $\rho = 1.1$ ~ 1.2 曲線較吻合，分析其原因可能由於 Fan 3 ~ Fan 5 現場合類似沈泥及黏土質細料使土石流中之流體密度加大之緣故。

4.2 土石流扇狀地縱斷面幾何相似特性之無因次分析

有關土石流扇狀地縱斷面形狀的無因次分析方法則係以扇狀地之中心軸縱斷面資料為對象進行分析。今以 Z/Z_0 及 X/L_c 兩無因次參數，先將本研究及 Takahashi [7,8] 之均勻礫石清水實驗例共計 33 個中心軸縱斷面資料進行上述之無因次分析，經點繪如圖 13，由圖可知其無因次縱斷面形狀具有半高斯之形狀分佈特性如式(7)。

$$\frac{Z_c}{Z_0} = \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{1}{C_L^2} \left(\frac{X}{L_c} \right)^2 \right] \quad (7)$$

其中 C_L 為高斯分佈係數，而 C_L 值可類比於 C_T 之方法求得其最佳之高斯分佈係數 $C_L = 0.389$ ，而相關係數則高達 86%。若將此 33 個均勻礫石清水實驗例之實驗結果，個別以相同方法加以分析，則其 C_L 值約在 0.373 ~ 0.401 間，且由分析結果發現高斯分佈係數 C_L 值亦並不隨均勻礫石清水實驗例中之各種不同流量、地形、均勻粒徑大小及加砂濃度而有所規則且劇烈之變化。至於本研究另 27 個混合礫石之清水實驗例 (Run 31 ~ Run 57) 及 15 個均勻與混合礫石之泥漿流體實驗例 (Run 58 ~ Run 72)，總計有 42 個實驗例所得之扇狀地縱斷面實驗結果依上述之相同方法分析，結果發現其縱斷面雖亦具有高斯分佈之特性，但其分佈係數 C_L 則會隨混合礫石均勻係數 C_u 之變大及流體密度 ρ 之增加而逐漸加大。今將實驗所得之 C_L 值與 C_u 值及 ρ 值之關係繪如圖 14，而圖中之近似曲線乃由實驗資料經迴歸後所得之迴歸公式如式(8)。

$$C_L \approx 0.385 + \frac{1}{17\pi} \tan^{-1} [0.3(C_u - 1)] + 0.12(\rho - 1)^{1.07} \quad (8)$$

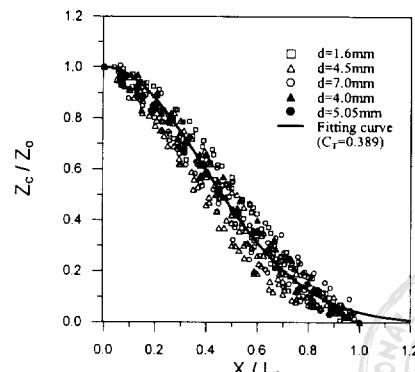


圖 13 土石流扇狀地縱斷面實驗資料之半高斯分佈圖

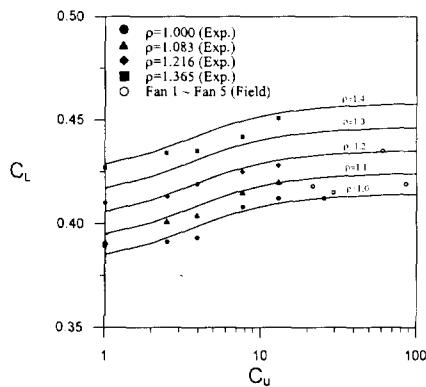


圖 14 縱斷面高斯分佈係數 (C_L) 值與均勻係數 (C_u) 值及流體密度 (ρ) 值之關係圖

至於 5 處土石流現場扇狀地 (Fan 1 ~ Fan 5)，經分析後發現其橫斷面仍具半高斯分佈之形狀特性如圖 15，其 C_L 值分別為 0.415、0.412、0.418、0.435 及 0.419。將此些值點繪於圖 14，由圖可發現 Fan 1 及 Fan 2 之 C_L 值與實驗資料所迴歸出之式(8)中 $\rho = 1.0$ 曲線較吻合，至於 Fan 3 ~ Fan 5 之 C_L 值較大約與實驗資料所迴歸出之式(8)中 $\rho = 1.1 \sim 1.2$ 曲線較吻合，分析其原因可能由於 Fan 3 ~ Fan 5 現場含類似沈泥及黏土質細料使土石流中之流體密度加大之緣故。

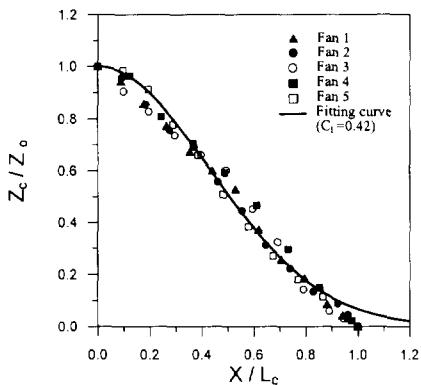


圖 15 土石流扇狀地縱斷面現場資料之半高斯分佈圖

4.3 土石流扇狀地平面幾何相似特性之無因次分析

最後有關土石流扇狀地平面形狀之無因次分析方法，係以 B / B_m 及 X / L_c 兩無因次參數，對本研究所有實驗例包括 30 個均勻礫石清水實驗例、27 個混合礫石清水實驗例、15 個均勻與混合礫石泥漿流體實驗例及 Takahashi [7,8] 的 3 個均勻礫石清水實驗例共計 75 個平面形狀資料實驗結果進行無因次分析，並將結果點繪於圖 16，由圖可知其分佈均近似於二次曲線中之圓弧。故以圓弧方程式式(9)來模擬其分佈形狀，而其相關係數則高達 83%。

$$\left(\frac{B}{B_m}\right)^2 + \left(\frac{X}{L_c}\right)^2 = 1 \quad (9)$$

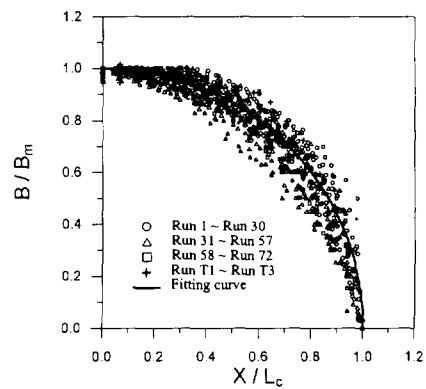


圖 16 土石流扇狀地平面實驗資料之圓弧分佈圖

至於 5 處土石流現場扇狀地 (Fan 1 ~ Fan 5)，經分析後發現其平面形態仍具有圓弧分佈之形狀特性如圖 17 所示。

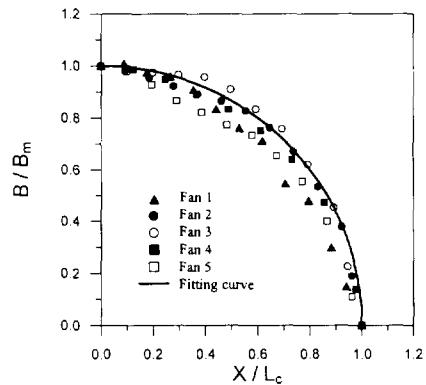


圖 17 土石流扇狀地平面現場資料之圓弧分佈圖

五、土石流扇狀地三維地形公式及體積公式

由上述之土石流橫、縱斷面及平面之幾何相似特性曲線函數式(5)、式(7)及式(9)，三式聯立可得土石流之三維地形公式如式(10)。

$$Z = Z_0 \exp \left[-\frac{X^2}{2 C_L^2 L_c^2} - \frac{Y^2 L_c^2}{2 C_r^2 B_m^2 (L_c^2 - X^2)} \right] \quad (10)$$

由上式可知 $Z = f(X, Y, L_c, B_m, Z_0)$ ，亦即在土石流扇狀地之最大淤積長度 (L_c)、最大淤積寬度 (B_m) 及最大淤積厚度 (Z_0) 為已知時則土石流整個三維形態即可確定。且根據此三維地形公式，式(10)先後對 X 及 Y 積分即可求出土石流扇狀地之體積公式如式(11)。

$$V = \alpha L_c B_m Z_0 \quad (11)$$

其中

$$\alpha = 2 C_L C_r \sqrt{\pi} \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2\sqrt{2} C_r} \right)$$



$$\left[\frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(1 - \frac{3}{2} C_L^4 \right) \operatorname{erf} \left(\frac{1}{\sqrt{2} C_L} \right) + \frac{C_L}{2\sqrt{2}} (1 + 3 C_L^2) e^{-\frac{1}{2} C_L^2} \right] \quad (12)$$

今將各種不同實驗材料所求得之最佳高斯分佈係數 C_T 、 C_L 代入式(12)後即可求得各扇狀體之最佳體積公式係數 α 值。結果發現 α 值在均勻礫石之清水實驗例 (Run 1 ~ Run 30 及 Run T1 ~ Run T3) 時其平均值約為 0.232, 而 α 值在混合礫石之清水實驗例 (Run 31 ~ Run 57) 時其值約在 0.253 至 0.275 之間, 至於 α 值在均勻與混合礫石之泥漿流體實驗例 (Run 58 ~ Run 72) 時其值約在 0.263 至 0.321 之間。今將實驗所得之 α 值與混合礫石均勻係數 C_u 值及流體密度 ρ 值之關係繪如圖 18, 由圖可發現體積係數 α 值亦會隨 C_u 值之變大及流體密度 ρ 值之增加而逐漸加大, 且藉由實驗資料經迴歸後可得其近似曲線公式如式(13)。

$$\alpha \approx 0.235 + \frac{1}{12\pi} \tan^{-1} [0.7(C_u - 1)] + 0.14(\rho - 1)^{1.1} \quad (13)$$

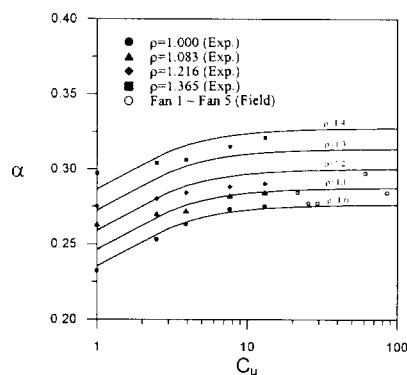


圖 18 土石流扇狀地體積係數 (α) 值與均勻係數 (C_u) 值及流體密度 (ρ) 值之關係圖

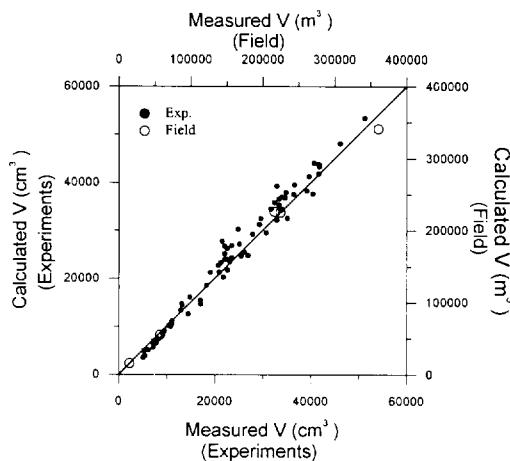


圖 19 土石流扇狀體總淤砂體積 (V) 之估算值與實測值比較圖

至於本研究之 5 處現場扇狀地 (Fan 1 ~ Fan 5) 其 α 值經代入式(12)計算後分別為 0.277、0.277、0.284、0.297 及 0.284, 此結果與 Takahashi [20] 之預測土石流扇狀地體積約略等於 1/3 倍土石流最大淤積長、寬及厚度之乘積較為小些。再將 5 處現場扇狀地之 α 值點繪於圖 18, 由圖可發現 Fan 1 及 Fan 2 之 α 值與實驗資料所迴歸出之式(13)中 $\rho = 1.0$ 曲線較為吻合, 至於 Fan 3 ~ Fan 5 之 α 值較大, 約與實驗資料所迴歸出之式(13)中 $\rho = 1.1 \sim 1.2$ 曲線較吻合, 分析其原因可能由於 Fan 3 ~ Fan 5 現場含類似泥泥及黏土質細料使土石流中之流體密度加大之緣故。最後將式(11)所推導之淤砂體積公式估算值與本研究之 72 個實驗例、Takahashi [7,8] 之 3 個實驗例及 5 處現場土石流扇狀地所量測之實際淤砂體積做一比較如圖 19, 由圖可知兩者甚為吻合。

六、土石流扇狀地最大淤積長、寬及厚度之研究

6.1 土石流扇狀地最大淤積長度 (L_c) 之研究

有關土石流扇狀地最大淤積長度之推估, 本研究係採用 Takahashi [1] 利用質量及動量守恆之觀點所推導出之土石流扇狀地最大淤積長度公式(14)式來進行估算, 經將實驗與現場資料 (如表 1 及表 4) 代入(14)、(15)及(16)式計算後發現 Takahashi [1] 之土石流扇狀地最大淤積長度估算值與現場及實驗量測結果尚稱吻合, 唯實驗之計算值有較實測值為大之趨勢, 其比較圖如圖 20 所示。

$$L_c = \frac{U^2}{G} \quad (14)$$

其中

$$U = u \cos(\theta_1 - \theta_2) \left\{ 1 + \frac{[(\sigma - \rho) C_d K_a + \rho] \cos \theta_1 g h}{2[(\sigma - \rho) C_d + \rho] u^2} \right\} \quad (15)$$

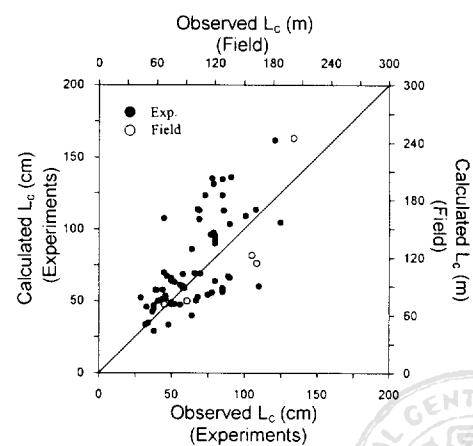
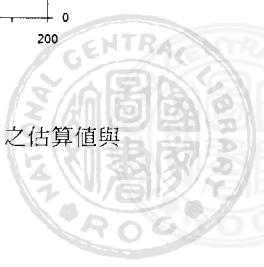


圖 20 土石流扇狀地最大淤積長度 (L_c) 之估算值與實測值比較圖



$$G = \frac{(\sigma - \rho) g C_d \cos \theta_2 \tan \phi_k}{(\sigma - \rho) C_d + \rho} - g \sin \theta_2 \quad (16)$$

K_a 為主動土壓力係數， $K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$ 。

6.2 土石流扇狀地最大淤積厚度 (Z_0) 之研究

由圖 7(b) 可知，土石流扇狀地之最大淤積厚度（即扇頂淤積厚度）與扇狀地沿中心軸之平均淤積坡度 (γ) 及最大淤積長度之關係約可近似如式(17)。

$$Z_0 \approx \tan(\gamma - \theta_2) L_c \quad (17)$$

亦即在扇狀地最大淤積長度及沿中心軸之平均淤積坡度為已知之情況下， Z_0 即可由式(17)推估得出。而土石流扇狀地之淤積坡度，依 Takahashi [1] 根據土石流堆積層下方剪力與抗力之關係，推論當移動層厚度為一倍粒徑時，則土石流扇狀地有其臨界淤積坡度如式(18)。

$$\tan \gamma = \frac{C_s (\sigma - \rho) \tan \phi}{C_s (\sigma - \rho) + \rho (1 + H_0/d)} \quad (18)$$

其中 H_0 為堆積層上方之流動深， d 為堆積層之粒徑。

因式(18)中之 H_0/d 很難由實驗及現場觀察而得出，經本研究將表 1 中之 72 個實驗例之 L_c 、 Z_0 及 θ_2 代入式(17)所求得各扇狀地沿中心軸之平均淤積坡度 ($\tan \gamma$) 資料分析後發現 $\tan \gamma$ 跟上游路單位寬度之土石流流量 (q)、土砂濃度 (C_d) 及中值粒徑 (d_{50}) 之關係最為密切，經與式(18)比較整理後可得出較實用之土石流扇狀地沿中心軸之平均淤積坡度概估式如式(19)。

$$\tan \gamma = \frac{C_s (\sigma - \rho) \tan \phi}{C_s (\sigma - \rho) + \rho \left[1 + 4.5 \times 10^{-4} C_d^{-6} \left(\frac{q^2}{g d_{50}^3} \right)^{1/3} \right]} \quad (19)$$

圖 21 即為扇狀地沿中心軸之平均淤積坡度實際值與估算值之比較圖，經將 5 處現場扇狀地資料點繪於圖 21，由圖可看出式(19)之估算值與實際值尚稱吻合。

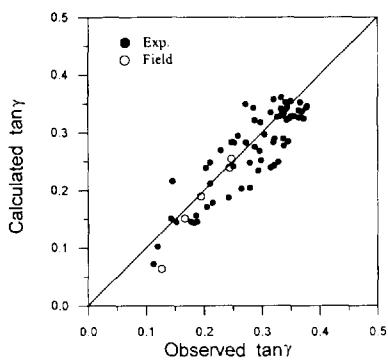


圖 21 土石流扇狀地沿中心軸之平均淤積坡度 ($\tan \gamma$) 估算值與實際值比較圖

6.3 土石流扇狀地最大淤積寬度 (B_m) 之研究

土石流扇狀地之最大淤積寬度在最大淤積長及厚度為可估算之情況下，其與扇狀地體積 (V) 之關係，可由式(13)代入式(11)概估如式(20)所示。

$$B_m \approx \frac{1}{0.235 + \frac{1}{12\pi} \tan^{-1}[0.7(C_u - 1)] + 0.14(\rho - 1)^{1/3}} \frac{V}{L_c Z_0} \quad (20)$$

其中土石流扇狀地體積 (V) 可以表 3 之日本全國土石流土砂流出量之迴歸公式表概估，唯本省土砂產量較日本豐富，建議在地質較脆弱且溪床坡度甚陡峭之地點宜至少採用表 3 之高標準 V_{90} 較保險，不過土石流可能流出土砂量最佳之估算方法即現場調查其溪流上游可能崩塌量及溪床上可能移動之堆積層厚度，並配合以一計畫水文量來推估，可能較為準確。

七、結論

本研究以各種不同流量（由 $1470 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 至 $5210 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ）、流體（包括清水及 3 種不同密度之泥漿流體）、地形（渠道坡度由 15° 至 21° ，平台坡度為 2° 及 5° ）、粗骨材（包括 3 種均勻礫石及 4 種混合礫石）及加砂濃度（由 30% 到 51.7%）來進行 72 個土石流扇狀地實驗並將 Takahashi [7,8] 之 3 個土石流扇狀地實驗結果一併分析，由實驗結果發現土石流扇狀地之無因次橫、縱斷面在平衡階段皆具有高斯分佈之幾何相似特性，且其橫、縱斷面之高斯分佈係數 C_t 及 C_b 值並不隨 75 個實驗例中之各種不同流量、地形、粒徑大小及加砂濃度而有所規則且劇烈之變化，但會隨著土石流中混合礫石均勻係數之變大及泥漿流體密度之增加而起加大之作用，至於無因次之平面形態則均具有圓弧分佈之幾何相似特性。而 5 處現場土石流扇狀地經分析後發現與實驗結果具有相同之分佈情況，且若現場場合類似泥漿及黏土質細料時其橫、縱斷面之高斯分佈係數 C_t 及 C_b 值亦會較大些。經利用無因次化後之土石流扇狀地橫斷面、縱斷面及平面形態函數，可推導出土石流扇狀地之三維地形公式 $Z = f(X, Y, L_c, B_m, Z_0)$ 及體積公式 $V = \alpha L_c B_m Z_0$ ，而利用此體積公式所得之計算結果與實驗及現場扇狀地之量測結果比較後發現非常相近。文中更進一步利用 Takahashi [1] 之研究推估土石流扇狀地之最大淤積長度 (L_c)；且藉由實驗資料所迴歸出之土石流扇狀地沿中心軸之平均淤積坡度公式可用以概估土石流扇狀地之扇頂淤積厚度 (Z_0)；而在土石流土砂流出量為已知或可估計之情況下，亦可利用前述之扇狀地體積公式計算土石流扇狀地之最大淤積寬度 (B_m)。如此在 L_c 、 B_m 及 Z_0 為已知之情況下，則整個土石流扇狀地之三維堆積地形即可確定。唯本研究之結果僅適用於概估現場地形變化單純類似實驗設備者，即上游路渠道坡度變化不大、谷口張開角度近似 180° 及下游淤積平台左右較對稱者如文中之 5 處土石流現場扇狀地，至於要將本研究結果應用於推估地形變

化較複雜、氾濫平台左右不對稱或遭人為嚴重開墾過之現場如豐丘扇狀地等，可能需再經研究修正，或以數值模式進行模擬，否則會有較大之誤差，不過一般土石流危險溪流其地形大約與實驗設備相近。

參考文獻

1. Takahashi, T., *Debris Flows*, International Association for Hydraulic Research, published by A. Balkema, Rotterdam, and Brookfield, Netherlands, pp. 221–223 (1991).
2. Okuda, S., "Fields investigation of debris flow," *Annals of Disaster Prevention Research Institute*, Kyoto University, Kyoto, Japan, No. 16A, pp. 53–69 (1973) (in Japanese).
3. Cannon, S.H., "An empirical model for the volume-change behavior of debris flows," *Proceeding of 1993 Conference of Hydraulic Engineering*, ASCE, San Francisco, California, U.S.A., pp. 1768–1773 (1993).
4. Okuda, S., "Features of debris deposits of large slope failures investigated from historical records," *Annals of Disaster Prevention Research Institute*, Kyoto University, Kyoto, Japan, No. 27B-1, pp. 353–368 (1984) (in Japanese).
5. Ikeya, H., "A method of designation for area in danger of debris flow," *Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steplands, Proceedings of Institute Associate Hydrology Science Symposium*, IAHS Publication No. 132, Wallingford, U.K., pp. 576–588 (1981).
6. Bathurst, J.C., Burton, A., and Ward, T.J., "Debris flow run-out and landslide sediment delivery model tests," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 5, pp. 410–417 (1997).
7. Takahashi, T., and Yoshida, H., "Study on the deposition of debris flow (1): deposition due to abrupt change of bed slope," *Annals of Disaster Prevention Research Institute*, Kyoto University, Kyoto, Japan, No. 22B-2, pp. 315–328 (1979) (in Japanese).
8. Takahashi, T., "Study on the deposition of debris flow (2): process of formation of debris fan," *Annals of Disaster Prevention Research Institute*, Kyoto University, Kyoto, Japan, No. 23B-2, pp. 443–456 (1980) (in Japanese).
9. Hooke, R.L., "Processes on arid-region alluvial fans," *Journal of Geology*, Vol. 75, pp. 405–460 (1967).
10. Major, J.J., and Pierson, T.C., "Debris flow rheology: experimental analysis of fine-grained slurries," *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 3, pp. 841–857 (1992).
11. 游繁結、林成偉，「土石流堆積特性之初步探討」，中華水土保持學報，第二十二卷，第二期，第 1–20 頁 (1991)。
12. 游繁結，「土石流堆積特性之探討 (2) 土石流之堆積形態」，中華水土保持學報，第二十三卷，第一期，第 1–16 頁 (1992)。
13. 江永哲、林裕益，「土石流堆積形狀之初步探討」，中華水土保持學報，第十八卷，第二期，第 15–27 頁 (1987)。
14. 謝正倫、蔡元芳，「突擴斷面土石流淤積形態幾何相似特性之研究」，中華民國力學學會期刊，第十三卷，第一期，第 11–20 頁 (1997)。
15. 日本建設省河川局砂防部砂防課，土石流危險溪流および土石流危險區域調查要領，日本，第 78–81 頁 (1989)。
16. Takahashi, T., "A mechanism of occurrence of mud-debris flows and their characteristics in motion," *Annals of Disaster Prevention Research Institute*, Kyoto University, Kyoto, Japan, No. 20B-2, pp. 405–435 (1977) (in Japanese).
17. 謝正倫、陳禮仁，「土石流潛在溪流之危險度的評估方法」，中華水土保持學報，第二十四卷，第一期，第 13–19 頁 (1993)。
18. Bagnold, R.A., "Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear," *Proceeding of Royal Society, London, Series A*, 225, pp. 49–63 (1954).
19. 蔡元芳，「土石流沖淤模式之研究」，碩士論文，國立成功大學水利及海洋工程研究所，台南，第 22–26 頁 (1994)。
20. Takahashi, T., "Debris flow: its mechanics and hazard mitigation," *Proceeding of the ROC-JAPAN Joint Seminar on Multiple Hazards Mitigation*, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, R.O.C., pp. 1079–1092 (1985).

85 年 11 月 24 日	收稿
86 年 3 月 8 日	修改
86 年 3 月 12 日	接受

