

泥沙運移學

主編者：吳健民

審查者：顏清連

中國土木工程學會

前 言

本篇擇要討論泥沙在流體中，起動、搬運及沉積之規律，將各種泥沙之運動，作有系統之重點介紹，敘述現象之物理本質，描敘不同形式運動所遵循之統一規律。由於泥沙之運動環境錯綜複雜，影響運動之因素不易控制，且泥沙運動理論尚在萌芽中，手冊中除將主要理論作介紹外，尚着重各方面之實驗成果，對經驗或半經驗公式與計算法，亦作某一程度之綜合、對比與歸納，至於詳細之理論推導與各家理論之應用等則因格於手冊編寫格式之限制，有待專書之另行補充。

泥沙之移動為地殼風化與水文循環中，自然消長之過程，其移動屬二相流之範疇，泥沙在水流之作用下發生運動，惟其運動復影響水流，兩者相互制衡，相互影響，其程度隨泥沙特性而異，例如水流中含有大量小於0.01毫米之顆粒時，泥沙表面之物化特性將發生重要作用，水流呈非牛頓流，屬流變學研究之範疇。一般泥沙之運動屬於動床水流之範疇，組成邊界之材料為可動之泥沙顆粒；邊界在水流作用下發生變形，結果河床之形狀又反過來影響水流，形成一回饋系統，其涉及之水理特性，當較一般河床固定之明渠水力學所討論之對象複雜，無論水流之結構、泥沙運動之強度及分佈，均與床面形態息息相關，加以泥沙移動之實測困難，致近數十年來不乏國內外專家致力於此界之研究，但諸多關鍵性問題猶未突破，而停留於定性認識階段。

根據泥沙學之發展情況，該學門主要內容可能為：

- (a) 泥沙之形成及性質：研究泥沙之形成，即風化及風化產物、泥沙之顆粒及群體特性等。
- (b) 泥沙搬運學：研究泥沙在沖淤過程中之規律。
- (c) 泥沙之取樣及測驗：研究泥沙之量測及統計取樣，泥沙特性之室內分析與表達及模型試驗等。
- (d) 應用泥沙學：研究上述三部門之應用。

截至目前止，尚無一完整之泥沙學專著包羅上述四大部門。1971年沈學汶⁽²⁸⁴⁾主編三卷“River Mechanics”，其中有甚多關於泥沙運動之內容，惟以定床水力學為探討之重點。W. Graf⁽²⁸⁵⁾編寫之“Hydraulics of Sediment Transport”，比較有系統介紹泥沙搬運之各項環節。M. S. Yalin⁽⁶²⁾撰寫之“

Mechanics of Sediment Transport”(1972年初版, 1977年再版), 以維度分析法為主, 闡述泥沙搬運機制之不同觀點, 有獨特之見解。50年代美國土木工程師學會着手主編一本“Sedimentation Engineering”, 由泥沙界專家執筆, 先在學會會報上討論, 廣泛徵求各界意見後, 經修改於1979年匯編成冊, 由V. A. Vanoni⁽²³⁶⁾主編出版, 可謂集泥沙學之大成, 雖含上述四大部門, 惜承受篇幅所限, 尚有遺珠之憾, 例如泥沙搬運方面以懸移質為主, 却缺推移質之完整敘述。J. Bogardi⁽²³⁷⁾編寫之“Sediment ; Transport in Alluvial Stream”(1955年以匈牙利文出版, 1974年改寫英文)介紹歐洲國家在泥沙方面之研究成果與實測資料。1977年D. B. Simons及F. Sentürk⁽⁹¹⁾編寫“Sediment Transport Technology”一書, 搜集甚多例題, 有助初學者對於泥沙運動力學之了解。1982年李日明等(Simons, Li & Associates)⁽²³⁸⁾主編“Engineering Analysis of Fluvial Systems”一書, 則以泥沙學之應用為重點。除上述有關泥沙搬運學及泥沙學之一般著作外, 近年來對於管路及海岸之泥沙移動等亦有甚多成冊專著出版。

泥沙科學尤以泥沙搬運學為正在萌芽中之新科學, 由於泥沙移動性質之錯綜複雜及觀測之困難, 各項運動規律之研究, 在基本觀念上存在之爭論尚多, 故除上述專著外, 在有關學術及工程期刊及論文集集中發表之論文特多; 又對同一問題之處理方式亦可能形形色色, 所得經驗公式之成果差異可能甚大, 亟待使用者作深入詳細之比較分析, 以期對於泥沙運動之內在機制有所澄清, 去粗求精, 選擇理論上及實驗上具有可靠基礎而符合實際情況之計算公式, 供工程上之應用, 基於此本手冊儘量收集不同範疇之泥沙理論, 作嘗試性之系統介紹, 內容矛盾及不成熟處在所難免, 敬請讀者批評指教, 以便日後再版時修正改進。

第十七篇

泥沙運移學

目 錄

前 言

第一章 流動泥沙之特性

A 概 說	17- 1
1.1 泥沙之性質	17- 1
B 泥沙之混合特性	17- 2
1.2 粒 徑	17- 2
1.3 泥沙顆粒之形狀	17- 2
1.4 粒徑分佈	17- 4
1.5 泥沙之比重	17- 7
1.6 安息角與靜止摩擦角	17- 7
C 泥沙之容積特性	17- 9
1.7 乾密度	17- 9
1.8 懸浮泥沙濁水之單位重量	17-10
1.9 中央粒徑與空隙率之關係	17-11
D 泥沙之沉降速度	17-11
1.10 球形顆粒之沉降速度	17-11
1.11 自然磨損泥沙之沉降速度	17-15
1.12 泥沙形狀對於沉降速度之影響	17-17
1.13 邊界面對於沉降速度之影響	17-20
1.14 群體顆粒沉降時粒子間相互作用之影響	17-22
1.15 泥沙濃度對於沉降速率之影響	17-22
1.16 懸浮液中沉降速度之測定	17-23
1.17 溫度對於自然泥沙之沉降速度及沉降直徑之影響	17-25
1.18 混合泥沙之沉降速度	17-27
1.19 顆粒表面糙率與沉降速度之關係	17-27

E 懸浮液之黏性指數	17-28
1.20 懸浮液之膠質溶液與膠化溶液	17-28
1.21 延散系之黏性係數	17-29
1.22 球形顆粒之黏性係數	17-29
1.23 不安定懸浮液之黏性係數	17-31
1.24 凝 聚	17-31

第二章 臨界推移力

A 概 說	17-33
2.1 定 義	17-33
2.2 臨界推移力之理論	17-34
B 均勻粒徑之臨界推移力	17-34
2.3 均勻粒徑臨界推移力之理論公式	17-34
2.4 均勻粒徑臨界推移力之經驗公式	17-40
C 混合泥沙之臨界推移力	17-42
2.5 混合泥沙之臨界推移力經驗公式	17-42
D 河床質之粗粒化現象	17-43
2.6 河床甲護層之作用	17-43
E 河岸斜面上之臨界推移力	17-46
2.7 推移力比公式	17-47
F 黏性泥沙之臨界推移力	17-47
2.8 黏性泥沙之臨界推移力	17-47

第三章 動床河床之形態

A 概 說	17-54
3.1 河床形態之影響	17-54
B 河床形態之定義與分類	17-54
3.2 河床形態之定義	17-54
C 小規模河床形態之理論分析	17-60
3.3 小規模河床形態之解析解	17-60
D 中規模河床形態之發生機制	17-75
3.4 中規模河床形態機制之理想理論	17-75
3.5 中規模河床形態之剪力流模式	17-79

E 河床形態之領域區分	17- 83
3.6 河床形態之無因次表示	17- 83
3.7 河床形態之經驗圖解 ^{(129)(130)~(140)}	17- 84

第四章 動床水流之阻力

A 概 說	17- 89
4.1 河床型態與水流阻力	17- 89
B 河床波之構造與形狀特性	17- 89
4.2 河床波構造之波譜函數表示法	17- 89
4.3 河床波之形狀特性	17- 93
C 動床水流之阻力及其預測法	17- 97
4.4 動床水流之多元性	17- 97
4.5 定床及無輸沙平坦河床之阻力法則——平坦定床及平坦動床（無輸沙之平坦動床河床）之情況	17- 99
4.6 具有河床型態變化時動床水流阻力之分析	17-106
D 動床阻力側壁效應之修正法	17-124
4.7 河床阻力之側壁效應	17-124

第五章 輸沙量

A 概 說	17-130
5.1 名 詞	17-130
B 推移量	17-131
5.2 推移質移動之模式化	17-131
5.3 推移量之推移力模式	17-131
5.4 推移量之昇舉力模式	17-136
5.5 推移量維度分析模式	17-137
5.6 推移量能量保存律模式	17-139
5.7 雀躍模式	17-140
5.8 河床形態模式	17-142
5.9 序率過程模式	17-143
C 懸移量	17-151
5.10 懸移質之基本特性	17-151
5.11 懸移質之濃度分佈式	17-153

5.12	懸移質濃度與 Kármán 常數之變化	17-162
5.13	懸移量之計算式	17-165
5.14	基準點濃度	17-174
D	總輸沙量	17-176
5.15	總輸沙量之計算公式	17-176
5.16	總輸沙量計算	17-177
5.17	總輸沙量公式之選擇	17-184

第六章 河床沖淤變化

A	概 說	17-186
6.1	河床之沖淤變化	17-186
B	大規模河床之沖淤	17-187
6.2	河床沖淤之控制方程式	17-187
6.3	河床變動特性之分析	17-190
6.4	河床沖淤變動之計算法	17-194
6.5	沖淤模式之解析解	17-196
6.6	懸移質影響沖淤時之河床變動	17-203
C	河道之平面形狀與河床變動	17-205
6.7	中、小規模之河床變動	17-206
6.8	流路變動	17-211
D	橋墩之局部沖淤	17-215
6.9	局部沖刷現象之特性	17-215
6.10	橋墩最大平衡沖刷深	17-216
6.11	橋墩沖刷進行過程	17-220

第六章附錄 沖積河川模擬模式

A	概 說	17-223
6'.1	沖積河川模式之分類	17-223
B	主要沖積河川模式之簡介	17-224
6'.2	擬似定量流類沖積河川模式	17-224
6'.3	變量流類沖積河川模式	17-238

第七章 泥沙資料之整理與水庫壽命

A 概 說	17-256
7.1 含沙量資料之工程用途	17-256
7.2 水庫之泥沙問題	17-256
B 含沙量實測資料之整理分析	17-257
7.3 懸移質取樣資料之整理	17-257
7.4 推移質資料之整理	17-259
7.5 輸沙量計算輔助資料之整理	17-260
7.6 懸移質之分析	17-261
7.7 推移質之分析	17-264
C 水庫淤積與壽命	17-267
7.8 入庫輸沙量之決定	17-267
7.9 水庫壽命之估計	17-271
7.10 水庫下游河道之冲刷	17-288

第八章 泥石流

A 概 說	17-296
8.1 泥石流之發生	17-296
8.2 泥石流之分類	17-297
B 泥石流之流動機制	17-298
8.3 泥石流之產生條件	17-298
8.4 水石流之形成過程	17-303
8.5 水石流之流動機制	17-308
8.6 水石流之堆積機制	17-314
C 土砂流之流動機制	17-320
8.7 土砂流之流量及阻力	17-320

第九章 風沙運動

A 概 說	17-322
9.1 風沙運動之基本形式	17-322
9.2 水流與空氣中泥沙運動之差異	17-324
B 風沙之運動機制	17-325

9.3	風沙之起動	17-325
9.4	風沙之垂直分佈	17-327
9.5	風沙輸沙量公式	17-329
9.6	風沙現象之特性	17-332
C	風沙對風速分佈之影響	17-335
9.7	風速之垂線分佈	17-335

參考文獻

第十七篇

泥沙運移學

主編人：吳建民

審查人：顏清連

第一章 流動泥沙之特性

A 概 說

1.1 泥沙之性質

構成河床之泥沙與河川之水流間具有極複雜之相互作用，其所引起之力學變化與流況固然與水流之特性有密切之關係，亦受泥沙本身物理特性之影響。一般構成河床之泥沙，在河口部分大小粒徑較均一，而在上游河川則粒徑大小不一；前者稱為均勻泥沙（Uniform Sediment），而後者則稱之為混合砂礫（Sediment Mixture）。又河流上游之混合砂礫，一般可視之為非黏性河床材料（Noncohesive Material）；但含有黏土或膠質成份之河床材料，則粒子間顯示相當高度之黏着性，此種材料稱之為黏性材料（Cohesive Material）。由黏性泥沙所構成之河床材料，如一經冲刷而剝離粒團時，在泥沙水理學上則視之為非黏性材料。黏性材料之特性受化學及物理作用而發生變化，致黏性材料之流水阻力特性變化多端，至今尚無完整之研究成果，本文之內容僅以非黏性泥沙為主。

一般表示泥沙混合度之方式為泥沙粒徑組成曲線，即表示粒徑大小組成頻率分佈之粒徑分佈曲線。其特徵值一般有中央粒徑、平均粒徑及表示分散度之標準偏差等，此等特徵值中反映泥沙之混合度者為標準偏差。粒徑組成曲線之標準偏差與河床砂礫之分級現象（Sorting）及表面粗粒化現象（Armoring）有密切之關係，在河床為細砂以上之粗粒徑組成者，其標準偏差愈小，表面粗化現象發生之可能性愈難；但如其組成為泥土或黏土時，因黏性材料之作用，河床表面形成一層堅化黏土層（Armored Clay Layer），而達成與表面粗粒化現象類似之效果。

泥沙顆粒集聚時所產生之容積特性（Bulk Properties）中，影響泥沙水理學最重要參數之一為乾密度與空隙率。一般輸沙量均以泥沙之重量或容積推算，

因此在計算河床、水庫或海岸之沖淤量時，需事先知道沖淤物之乾密度與空隙率。此乾密度與空隙率受粒徑分佈、粒徑大小、比重、壓密度等複雜因素之影響，河床物質之包含膠質至卵石、塊石等廣大粒徑變化時，其詳細分析研究將更趨重要，尤其在水庫壽命之推定時，容積特性之正確判斷將為水庫可興建與否之關鍵因素。

另一參數為在水流中呈懸浮狀態細小砂粒之沉降速度 (Falling Velocity)。一般慣用之河床質材料沉降速度均假定砂礫為球形，並針對其直徑表示沉降速度之變化。

B 泥沙之混合特性

1.2 粒 徑

泥沙之混合特性中，最重要之徵值為粒徑，根據粒徑之大小，泥沙可分為礫石、卵石、砂礫、壤土及黏土等。其分類法甚多，表 1.1 表示其典型之分類規範⁽¹⁾。美國地球物理聯合會 (AGU) 之分類標準 (Grade Scale) 係將 Wentworth 之標準擴大細分⁽²⁾，表中亦列有 Krumbein 氏提案之 ϕ 尺 (Phi Scale) 分類方式⁽³⁾。 ϕ 為泥沙粒徑之二進位對數表示方式；即

$$\phi = -\log_2 d \quad (1.1)$$

式中 d 為泥沙之粒徑，以公厘 (mm) 計。

1.3 泥沙顆粒之形狀

表示泥沙顆粒之徵值有：球狀率 (Sphericity)、圓形率 (Circularity) 及圓滑率 (Roundness) 等，其定義分別為⁽⁴⁾

$$\text{球狀率} \quad S_{ps} = A_0 / A \quad (1.2)$$

$$\text{圓形率} \quad C_{\phi} = R_0 / R \quad (1.3)$$

$$\text{圓滑率} \quad R_{ou} = r_0 / r \quad (1.4)$$

式中 A ：顆粒之表面積

A_0 ：與顆粒同體積球體之表面積

R ：泥沙投影面積之周邊長

R_0 ：與泥沙投影面積等面積之周邊長

r ：內接於泥沙顆粒最大投影面積圓之半徑

r_0 ：泥沙顆粒各角或緣之平均曲率半徑

另 McNown 氏⁽⁵⁾⁽⁶⁾建議採用形狀係數 (Shape Factor)，即

表 1.1 粒徑分類基準

名		稱	AGU 之分類		粒 徑 範 圍 (mm)	φ 尺 度
巨 礫 石	巨 礫 石	巨 礫 石	boulders	very large boulders large boulders medium boulders small boulders	4096~2048 2048~1024 1024~512 512~256	- 11 - 10 - 9 - 8
	鵝 卵 石	大 礫 石	cobbles	large cobbles small cobbles	256~128 128~64	- 7 - 6
砂	中 礫 石 (pebbles)	中 礫 石	gravel	very coarse gravel coarse gravel medium gravel fine gravel very fine gravel	64~32 32~16 16~8 8~4 4~22	- 5 - 4 - 4 - 3 - 2
	細 礫 石	細 礫 石		very coarse sand coarse sand medium sand fine sand very fine sand	2~1 1~0.5 0.5~0.25 0.25~0.125 0.125~0.062	0 1 2 3 4
砂	極 粗 砂	粗 砂	sand	coarse silt medium silt fine silt very fine silt	1/16~1/32 1/32~1/64 1/64~1/128 1/128~1/256	5 6 7 8
	中 粗 砂	中 粗 砂		coarse clay medium clay fine clay very fine clay	1/256~1/512 1/512~1/1024 1/1024~1/2048 1/2048~1/4096	9 10 11 11
填 土	粗 粒 填 土	粗 粒 填 土	silt			
	中 粒 填 土	中 粒 填 土				
粘 土	細 粒 粘 土	細 粒 粘 土	clay			
	微 細 粒 粘 土	微 細 粒 粘 土				

美國統一土壤分類法則詳下表：

分 類 法	細 粒 土 壤 (粉 土 或 粘 土)				中 砂	粗 砂	細 礫	粗 礫	卵 石
標準編號	0.001	0.002	0.005	0.053	0.074	0.105	0.250	0.420	76.2
粒徑 (公厘)	0.001	0.002	0.005	0.053	0.074	0.105	0.250	0.420	76.2

$$SF = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (1.5)$$

式中 a 、 b 及 c 分別為直交三軸之長軸、中軸及短軸。此形狀係數為最影響泥沙顆粒沉降速度之因素，亦為實用上最有意義之形狀徵值。一般河流中泥沙之形狀係數約為 $0.3 \sim 1.0$ ，而以 0.7 者居多⁽⁷⁾。

天然泥沙具有不規則之形狀，因此表示粒徑之大小尺寸時，需選擇某種代表直徑。一般粒徑之表示方式有三種⁽⁸⁾：

(a) 篩孔直徑 (Seive Diameter)：簡稱篩徑，為通過正方形篩孔 (Seive Opening) 球體之直徑（主要用於砂及礫）。

(b) 沉降直徑 (Sedimentation Diameter)：又稱沉泥直徑或等價直徑，為同一比重、同一沉降速度球體之直徑（主要用於黏土、沉泥及細砂）。

(c) 公稱直徑 (Nominal Diameter)：又稱帳面直徑或名目直徑，為同體積球體之直徑（主要用於無法篩分之大礫石以上之材料）。

1.4 粒徑分佈

淤積於河道中之泥沙或在河流中懸浮或推移之泥沙，係由大小、形狀及比重不一之顆粒所組成。實用上，由於構成的床質之材料以石英居多，其比重為 2.65 ，故均不計及泥沙比重之組成頻率，而簡單以 2.65 為代表。形狀之組成頻率亦略而不計，除在沉降速度之研究上，利用形狀係數 (S.F.) 外，亦不採用其他較複雜之徵值。至於粒徑之組成則影響泥沙之沖淤及輸沙之多寡，因此需進一步採用粒徑組成之各種代表徵值。

泥沙粒徑之組成一般採取標準篩分析法，將標準篩網目之大小間隔為粒徑之區分間隔，分別計算各粒徑區分間之樣品重量，以總重量之百分數表示其組成。細顆粒之分析則利用 Stokes 律以等價直徑大小換算之。以前細粒之分析曾用淘汰法、底抽法等，惟目前世界各國均盛行比重計測定法，將比重計放入懸濁液之量筒內，測定比重與時間之變化，換算為粒徑。一般粒徑之大於 74μ 者採用篩分析法，小於 74μ 者採用比重計粒徑測定法。粒徑之無法以標準篩篩分者，則採用中軸測定法，將其重量計量或換算之，並針對中軸長之區分範圍，計算重量百分率。

山地、陡坡、河川之由粗粒河床質組成者，其粒徑分析一般採用現場面積格子法 (Grid Method)、線格子法 (Line Grid Method) 或百步法 (Hundred-Step Method)；採取各格子點下或百步點下粒徑之大小，測定其中軸長度，依中軸徑區分內之顆粒個數與總樣本顆粒個數計算個數百分率。又採用格子法時，格子點之間隔以最大粒徑為準，百步法則以取樣者正常之步法為準，並以母脚指

下之沙粒為樣品。

粒徑之組成一般以粒徑累加曲線 (Cumulative Curve) 表示之。其座標有用半對數或對數概率紙者。圖 1.1 及 1.2 為其例。又粒徑一般均採用 mm 為單位，其統計徵值有代表粒徑及組成徵值等：

(a) 代表粒徑：代表粒徑有中央、平均及有效粒徑等

1 中央粒徑， d_{50} (Median Diameter)：對應於累加百分率 $p = 50\%$ 之粒徑。一般對應於累加百分率為 $p\%$ 之粒徑均以 d_p 表之。

2 平均粒徑， d_m (Mean Diameter)

$$d_m = \frac{\sum_{p=0}^{100} d \Delta p}{\sum_{p=0}^{100} \Delta p} \quad (1.6)$$

式中 Δp 表示粒徑為 d 之粒徑所佔百分率。

3 有效粒徑， d_{10} (Effective Diameter)：對應於 $p = 10\%$ 之粒徑。

(b) 組成徵值

表示組成曲線之特性徵值則有均等比、均等係數、篩分係數、曲率係數及標準偏差等。

1 均等比， M (Uniformity Modulus)

$$M = \frac{\sum_{p=50}^{100} d \Delta p}{\sum_{p=0}^{50} d \Delta p} \quad (1.7)$$

2 均等係數， C_u (Uniformity Coefficient)

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1.8)$$

3 篩分係數， S_0 (Sorting Coefficient)

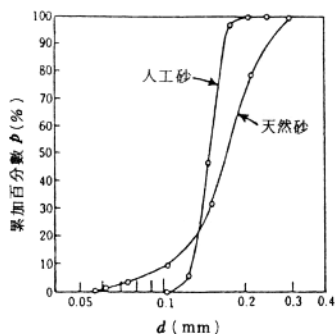
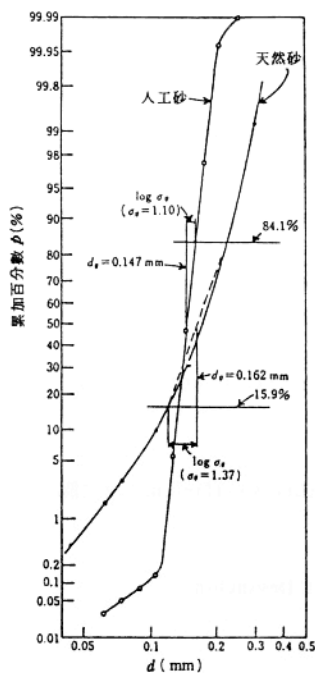
$$S_0 = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{15}}} \quad (1.9)$$

4 曲率係數， C_g (Curvature Coefficient)，又稱粒度係數

$$C_g = \frac{(d_{30})^2}{(d_{60})(d_{10})} \quad (1.10)$$

5 標準偏差 σ_ϕ (Standard Deviation)

$$\sigma_\phi = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \quad (1.11)$$

圖 1.1 人工砂與天然砂粒徑分佈之一例⁽¹⁸⁾圖 1.2 人工砂與天然砂對數概率粒徑組成曲線之一例⁽¹⁸⁾

如採用對數概率組成曲線時，Otto 氏⁽⁹⁾等提議用幾何平均粒徑、 d_g (Geometric Mean Size)、幾何標準偏差、 σ_g (Geometric Standard Deviation) 等。 d_g 可由圖 1.2 中之 15.9% 及 84.1% 連續直線，求 50% 之交點。粒徑之組成如遵從對數常態分佈時， $d_g = d_{50}$ 。幾何標準偏差 σ_g 可利用 σ_g 與 $d_{84.13}$ 及 $d_{15.87}$ 與 d_g 等距之特性得

$$\sigma_g = \left(\frac{d_{84.1}}{d_{15.9}} \right)^{1/2} \quad (1.12)$$

及

$$\sigma_g = \frac{d_{84.1}}{d_g} = \frac{d_g}{d_{15.9}} \quad (1.13)$$

(c) ϕ 尺分類法微值

如採用 ϕ 尺分類法⁽¹⁰⁾ 時，中央粒徑、平均粒徑及標準偏差等特徵值之表示方式如下，又對應於累加百分率為 $p\%$ 之 ϕ 值用 ϕ_p 表之。

$$1 \quad \text{中央粒徑} \quad M_{d\phi} = \phi_{50} \quad (1.14)$$

$$2 \quad \text{平均粒徑} \quad M_\phi = \frac{(\phi_{84} + \phi_{16})}{2} \quad (1.15)$$

$$3 \quad \text{標準偏差} \quad \frac{\sigma_\phi (\phi_{84} - \phi_{16})}{2} \quad (1.16)$$

$$4 \quad \text{偏 度} \quad d_\phi = \frac{(M_\phi - M_{d\phi})}{\sigma_\phi} \quad (1.17)$$

$$5 \quad \text{峯 度} \quad \beta_\phi = \frac{\{(\phi_{95} - \phi_5) - \sigma_\phi\}}{\sigma_\phi} \quad (1.18)$$

上述各種代表粒徑中，以代表粒徑大小之中央粒徑、平均粒徑及代表粒徑組成分散度之標準偏差及篩分係數較為重要。

1.5 泥沙之比重

水流所輸送泥沙之比重受母岩或土壤構成礦物質之左右，表 1.2 表示構成土壤母質成份之比重。實際河川中河床質之組成以石英居多，約達 50% 以上，其比重為 2.65，故一般均將河床質之比重以 2.65 計算之。

1.6 安息角與靜止摩擦角

表 1.2 主要土壤成份之比重

成 份	比 重	成 份	比 重
石 膏	2.32	白 雲 石	2.87
正 長 石	2.56	霽 石	2.94
高 嶺 土	2.60	輝 石	3.20 ~ 3.40
伊 黎 土	2.60*	角 閃 石	3.25 ~ 3.50
綠 泥 岩	2.60 ~ 3.00	褐 鐵 礦	3.80
石 英	2.66	赤鐵礦(含氫)	4.31
滑 石	2.70	磁 鐵 礦	5.17
方 解 石	2.72	赤 鐵 礦	5.20
白 雲 母	2.80 ~ 2.90		

安息角一般指將泥沙自漏斗落下所形成圓錐堆積物之自然坡度，圖 1.3 表示 Gibson 氏及久寶氏實驗之成果⁽¹²⁾。Gibson 曾建立一經驗公式如下

$$\tan \phi = K_1 d_m^{0.125} s^{0.19} r_1^{0.25} \quad (1.19)$$

式中 ϕ = 水中安息角(度)

d_m = 平均粒徑(mm)

s = 泥沙在水中之比重；($s = \sigma / \rho - 1$)

σ = 泥沙之密度

ρ = 水之密度

r_1 = 泥沙之最長徑與最短徑之比

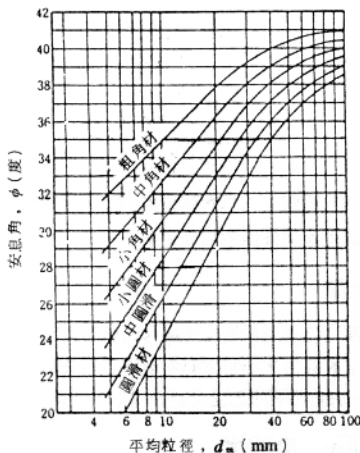


圖 1.3 安息角與平均粒徑之關係(美國墾務局)⁽¹²⁾