

第十四篇

水工模型試驗

目 錄

頁

第一章 概 說

A 水工模型試驗之重要	14— 1
B 水工學術之發展	14— 2

第二章 水工試驗室之主要設備及佈置

A 設 備	14— 6
2.1 給水系統	14— 6
2.2 空間	14— 6
2.3 試驗水槽	14— 7
2.4 度量儀器	14— 7
2.5 人員	14— 9
B 佈置	14— 9
2.6 教學研究用之水工試驗室	14— 10
2.7 水工模型試驗室	14— 10

第三章 水工模型相似性原理

A 概 說	14— 15
3.1 幾何性相似	14— 16
3.2 運動性相似	14— 16
3.3 動力性相似	14— 17
B 水工模型之相似定律	14— 18
3.4 福祿定律	14— 18
3.5 雷諾定律	14— 19
3.6 魏泊定律	14— 19
3.7 馬赫定律	14— 20

C	相似律之意義與應用	14— 20
3•8	福祿定律之意義	14— 24
3•9	雷諾定律之意義	14— 30
3•10	魏泊定律之意義	14— 32
3•11	馬赫定律之意義	14— 36
3•12	尤拉數之意義	14— 39
3•13	穴蝕數	14— 41
D	不等比模型及卡曼數	14— 43
3•14	不等比模型卡曼數	14— 43
3•15	卡曼數	14— 45

第四章 水工模型之設計建造及運用

A	概說	14— 47
B	模型之設計及建造	14— 48
C	模型之運用	14— 50
D	明渠水流模型	14— 51
4•1	滾流溢水道	14— 51
4•2	隧道溢水道	14— 53
4•3	靜水池	14— 53
4•4	出水工	14— 56
4•5	渠道建築物	14— 57
4•6	河渠模型	14— 57
E	暗渠水流模型	14— 59
4•7	模型研究之主要問題	14— 60
F	野外實地研究	14— 61
4•8	各項記錄之測定	14— 61

第五章 水工模型之實際應用問題

A	橋墩荷力之問題	14— 63
5•1	示例一	14— 63
B	空氣阻力問題	14— 64
5•2	示例二	14— 64
C	閘門流量研究	14— 66

5.3 示例三	14— 66
D 平板移動時所受阻力問題	14— 68
5.4 示例四	14— 68
E 黏滯力與引力問題	14— 70
5.5 示例五	14— 70
F 次大氣壓力研究	14— 74
5.6 示例六	14— 74
G 推動船體功率研究	14— 74
5.7 示例七	14— 74
H 重力對於加速度變化之研究	14— 77
5.8 示例八	14— 77

第六章 模型試驗實例

A 美國俄亥俄河之活動河床試驗	14— 78
6.1 濬挖試驗結果	14— 81
B 美國密西西比河聖安桑尼瀑布之航運問題	14— 81
C 美國賓州賓斯唐市防洪工程	14— 83
D 美國大苦力壩之溢洪道、出水口及靜水池試驗	14— 84
E 美國大苦力壩河川出口	14— 94
F 美國大苦力壩之除水系統試驗	14—100
G 美國大苦力壩模型製造	14—100
H 美國田納西河皮克蘭汀船閘	14—106
6.2 試驗獲得之結論	14—107
I 尖山埠水庫模型試驗	14—108
6.3 試驗之項目	14—108
J 谷關電廠平壓塔模型試驗	14—110
6.4 平壓塔模型設計	14—110
6.5 預備試驗	14—112
K 石門水庫溢洪道模型試驗	14—114
6.6 引言	14—114
6.7 試驗步驟	14—115

第七章 元次分析

A 概說	14—118
------	--------

B	質量與力量.....	14—118
7.1	質量、長度、時間制度.....	14—119
7.2	力、長度、時間制度.....	14—119
7.3	π 定理.....	14—119
C	雷來方法.....	14—122
7.4	雷來方法示例.....	14—123

第八章 水工模型試驗應用附表

第十四篇

水工模型試驗

編撰人：毛 壽 彭

審查人：鄧 先 仁

第一章 概 說

A 水工模型試驗之重要

現代工程設計，以科學的突飛猛進，理論與計算更為精確，但理論的確定成立，必由於長期實地觀察或模型試驗 (model test)，根據觀察所得的經驗，及模型試驗的結果，則可歸納而為經驗公式或學說，然後才可應用在工程設計上。唯水流性質變化莫定，河川情形因地而異，即同一河流而上中下各段河性亦不盡相同，所以水利工程措施，宜於此者未必宜於彼，適於昔者未必適於今。更因實地觀察，對水利工程之各種現象不能作分析之研究，對實物之控制，更不能操縱自如，所以研究水利工程者，均以模型試驗為主，十九世紀末歐美各國已有水工試驗，舉凡學理之探討，工程之設計，無不先經試驗，以期成果安全並解決疑難問題。

水工試驗 (hydraulic model test) 對於水利工程上的問題，間有並不能達到預期之目的者，然學術上之試驗均由於累次之失敗，長期之研究，而後才得良果，多一次之失敗，即多一次之經驗，由此經驗，或反足以獲得科學上之進步。以往雖有因試驗而無結果，以致在工程方面不免少有損失，但在學術上仍有相當價值，所以水工模型試驗之性質，非僅對水利工程上可以解決疑難而同時在學術上亦有研究價值，倘試驗無良好之結果，應由次列各點推敲之：

- a. 由於研究之問題未能十分了解。
- b. 試驗之手續與設備未能周到。
- c. 模型比例過小，不能得到精確之觀察。
- d. 試驗者缺乏相當之學理與經驗，未能下精確之評判。

模型乃有系統之構造物，用以代表同樣相似系統的另一構造物，前者稱為模型體 (model)，後者稱為原型體 (prototype)，利用此模型體試驗所產生之現象與結果，即可以推測原型體之特性，惟一般模型並不一定小於原型，有時為觀察清楚起見模型還可大於原型，不過水工模型試驗均因試驗場地之限制，及便於設備操縱管理計，均用小於原型的模型。

水工模型試驗，對於流水性質，每次試驗只應研究一種問題，對附帶次要問題可略而不計。倘有數種問題需要解答時，應分別設計模型，分別加以試驗以求解答。

B. 水工學術之發展

利用儀器測定水流現象，早在十七世紀已有意大利物理學家托瑞司里 (E. Torricelli) 開始，當時托瑞司里氏曾研究孔口之射流試驗及大氣壓力與真空等現象。茲將自十七世紀以來，各水工學者在學術上之發展，略為介紹如次：

帕斯喀 (Blais Pascal, 1623~1662) 法國科學家帕斯喀於 1653 年宣佈帕斯喀定理，為後來水力機械開一新的啓示。

牛頓 (Isaac Newton, 1642~1727) 英國物理學家牛頓曾於 1686 年宣佈三個自然定律，刊載於「自然科學之數學原理」一書中，奠定力學研究之基礎。

畢托 (Henri Pitot, 1695~1771) 法國水工學家，畢托於 1732 年首先利用 90° 彎管測量水流速，稱之為畢托管 (Pitot tube)，其型式雖有改變，但至今仍為測水流速度之最佳儀器。

伯努利 (Daniel Bernoulli, 1700~1780) 伯努利於 1738 年首先發表液體之動能、位能、壓能三者之和曰總能 (total energy)，而為常數，其液體重率之總能曰能頭 (energy head, total head)，伯努利氏對水動力學 (Hydrodynamics) 之研究貢獻良多，該式：

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} + Z = \text{常數} \quad (1.1)$$

尤拉 (Leonhard Euler, 1707~1783) 尤拉於 1750 年首先發表理想流體之運動方程式及水流試驗之貫性相似律。

蔡滋 (A. Chezy, 1718~1798) 蔡滋氏於 1775 年在法國測驗土渠而創立明渠亂流公式，至今仍為計算流速最簡便之公式

$$V = C \sqrt{RS} \quad (1.2)$$

包爾達 (J. C. Borda, 1733~1799) 包爾達曾做管中水流試驗，並發表其

管徑突增之經驗公式：

$$h_e = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} \quad (1.3)$$

杜布特 (Colonel C. D. Du Buat) 杜布特於 1779 年曾研究堰口流量而得堰口流量公式：

$$Q = CLH^{\frac{3}{2}} \quad (1.4)$$

文托瑞 (G. B. Venturi) 文托瑞於 1784 年曾發明一種流量計後經赫雪爾 (Herschel) 於 1831 年應用此流量計以測水管內之流量，其理論係根據文托瑞對漸粗管之實驗，故稱文托瑞流量計 (Venturi meter)。

布來吉 (J. B. Bel'lyer) 布來吉於 1828 年曾發表水躍公式，而同時比頓 (Giororgio Bidone, 1781~1839) 亦試驗水躍 (Hydraulic jump) 現象，並創立經驗公式。

包愛賽里 (J. L. Poiseuille, 1799~1369) 包愛賽里於 1842 年提出管流試驗後建立包愛賽里定律。

斯托克 (G. G. Stokes) 斯托克於 1849 年試驗大小不同之顆粒，在流體及靜止液體中降落速度，因此乃創立斯托克定律。

達爾西 (H. Darcy) 達爾西於 1857 年更發表：水頭損失與管長 L 及管內液體之平均流速 V 之平方成正比，與管之直徑 D 成反比，即 $h_f \propto \frac{LV^2}{D}$ ，後來維斯巴曲 (J. Weibach) 亦發表孔口流速係數及水頭損失與管長及管內流速之公式，後稱為達爾西或維斯巴曲管流損失公式：

$$h_f = f \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (1.5)$$

貝塞 (H. E. Bazin) 十八世紀後半世紀 1888 年貝塞提出堰流公式，並於 1897 年發表明渠水流公式。

卡特 (W. R. Kutter, 1818~1888) 及甘蓋來 (E. Ganguillet) 二氏研究明渠水流後，發表明渠水流之經驗公式，後人為紀念其貢獻以其姓氏而命名公氏。

福特勒 (Alphonse Fteley) 及斯蒂爾 (F. P. Stears) 二氏亦於 1878 年發表清堰公式。

韓福瑞 (Andrew Atkinson Humhreys) 及愛賓德 (H. L. Abbot) 二氏於 1876 年發表「密西西比河之物理及水力」，對水利有極大貢獻。

滿寧 (R. Manning, 1816~1897) 滿寧於 1889 發表水流之經驗公式，

對於管流及明渠均可適用，即滿寧公式：

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (1.6)$$

福祿 (W. Froude 1810~1879) 福祿於 1870 左右發表福祿數，對每流試驗之重力相似律奠定基礎：

$$F = \frac{V^2}{Lg} \quad (1.7)$$

雷諾 (O. Reynolds 1812~1912) 雷諾於 1883 年曾以有色指示劑注入流水中之試驗而建立雷諾定律為水工試驗之滯性相似律

$$R_e = \frac{\rho LV}{\mu} \quad (1.8)$$

傅瑞曼 (J. R. Freeman) 傅瑞曼自 1888，1932 年在水利工程方面非常活躍，對於水工試驗有很多貢獻，他的「水工試驗室技術」(Hydraulic Laboratory Practice)，內容極為豐富，為水工試驗必讀之參考書。美國標準局之水工試驗室即係富氏所建立者。

水利工程上之許多經驗公式，自白金漢 (Edger Buckingham) 於 1915 年發表元次分析 (dimensional analysis) 以後，更得到有理性分析之工具，因之水利工程師對於經驗公式之係數均能得到滿意之解答，最近更因航空學之發展，而水工學與空學在原理方面有很多接近之處，且為包括之範圍廣泛起見，流體力學乃應運產生，於是普來杜 (Ludwig Prandtl)：泰勒 (G.I. Jaylor) 及卡滿 (Theodore Von Karman) 諸氏乃有亂流 (Turbulen flow) 及邊界層 (boundary layer) 之研究。

德國專斯頓大學 (Technical University of Dreaden) 教授恩格斯 (H Engels 1854~1945) 於 1893 年創設河工實驗室，從事天然河流之試驗。其後阮百克教授 (T. Rehbock, 1864~1960) 亦於 1901 年在德國克斯盧大學 (Polytechnic Institute of Karlsruhe) 設立水工實驗室，德國農商部 1903 年於柏林設立水工試驗室，試驗水工結構及船體模型等。

美國第一座現代化之水工試驗室於 1841 年設於麻省勞衛祿 (Lewell) 後來法朗西士 (J. B. Francis) 在該室曾研究堰流公式及水輪機。利海大學 (University of Lehigh) 及握賽斯特學院 (Worcester Polytechnic Institute) 各於 1887 年及 1894 年設立水工試驗室，除供教學之用外，並辦理水工結構及量水設備試驗。康乃爾大學 (University of Cornell) 於 1899 年亦設立水力試驗室，斯秀德教授 (E. W. Schoder) 曾在該室研究管流試驗，1908 年美國地質調查局 (U. S. G. S.) 曾在加州大學設立泥沙水工試驗室，1918 年愛我華

大學 (University of Iowa) 亦設一所水工試驗室，美國當時軍部 (U. S. War Department) 於魏克斯堡 (Vicksburg) 亦設立一大規模之水工試驗室，主要作河道模型及波浪之試驗，美國墾務局 (Bureau of Reclamation) 亦在柯州丹福 (Denver, Colorado) 設立大型水工試驗室，主要作水工結構方面之試驗，田納西流域管理局亦在諾瑞斯 (Norris) 設立水工試驗室主要研究該局之水工結構物試驗，美國標準局 (Bureau of Standard) 在華盛頓所設之水工試驗室，規模相當大。水土保持局 (Soil Conservation Service) 在各分區設立之水工試驗站很多，目前全美各大學工學院及公私研究機構共有水工試驗室約在一百所以上。

日本現有水工試驗所十多所，印度亦有十多所水工試驗室。我國舉辦水工試驗，始於民國十七年之天津第一水工試驗所，繼於民國廿四年南京有水工試驗所之成立，但該所設備尚未完成，七七事變，政府遷移後方，中央水利實驗處於抗戰期間，曾先後與中央大學合辦沙坪壩工試驗室；與西南聯大合辦昆明水工試驗室；與北農學院合辦武功水工試驗室；及與四川水利局合辦灌縣水工試驗室。抗戰勝利後，中央水利實驗處除繼續仍與前述中央大學等合辦水工試驗室外，並於三十四年勝利還都後，完成南京清涼山水工試驗所，該試驗所規模甚大，為亞洲第一水工試驗室，但不幸大陸於三十八年淪陷，政府遷臺，各機構一再緊縮，而中央水利實驗處與臺灣大學合設臺北水工試驗所，與臺南工學院（後改為成功大學）合設，臺南水工試驗室，分別研究試驗臺灣水利之實際問題。後各大專院校為教學需要亦多建立水工試驗室，水資源統一規劃委員會亦設立水工試驗室一所。

晚近更因土壤力學理論之進步，以前水工設計工程師所感最困難之泥沙問題，亦可從事河工之動床試驗，而求得定性之研究。

水工試驗之設備儀器近廿年來亦由人為測讀進步到自動測讀之電子儀器。所以水工模型試驗之重要性，不惟未因電子計算機而減低，反而因儀器工具之精密，而更為工程界所重視。

第二章 水工試驗室之主要設備及佈置

A 設 備

水工試驗室有不可缺少之設備。此類不可缺少之設備，包括充足之給水，足夠之場地，及適合之量度儀器，與素質優良之工作人員。

2.1 給水系統

給水量因試驗工作及可靠之水源而定，例如比尺較大之溢洪道模型，比較河道模型每需較大水量，一般比尺之普通河流模型，所需要之流量 3 秒立方呎或 4 秒立方呎即足夠用，但是溢洪道模型如取三個閘門為 40 呎長，40 呎寬，而模型比尺為 1:25，則所需流量為 40 秒立方呎。水工試驗室之水源如能以重力式取之於蓄水池、天然河流或灌溉渠道則較為適宜，以此種方式取水，有充足之水源可用。惟多數之水工試驗室係用蓄水池貯存自來水，採取循環式，不過蓄水池要有充足之容量，以可供最大抽水量，連續抽 10 分鐘為原則。總之一切之模型試驗，必須有充分水量可以供給。

如以抽水機直接供應模型試驗，流量及水壓常因電壓忽高忽低，及蓄水池水位降落而有變化，所以供給模型用水，以用重力式為優，為達到此項目的，可用抽水機送水到高平水櫃，高平水櫃須有一足夠長度之溢水道，堰口之長度以每 1 秒立方呎 (cfs) 需要 20 呎為度。此長度將可自動控制其精確性，水櫃必須有不同之送水口以便同時分別送水到不同之模型。由於此項要求之忽略，在許多試驗室內，均會發生相當困難。在一供水線上如有兩個模型同時操作，則彼此不能單獨獨立，因為供水線之摩擦損失同時影響二個模型。

假如總給水量很大，則可用一組小抽水機供給，因為此種抽水系統之總容量通常只需要使用時間之一小部份。很多例子，抽水機如此平連安裝可送最大之流量到供水櫃，或者為了特別目的在經常高壓下用串連而送少量之水到供水櫃。抽水機之大小，架數及連接方法在設計水工試驗室時，不可忽視。

2.2 空 間

水工試驗室須有足夠之空間，以便佈置模型，試驗場地須平整而且有頂蓋，除非氣候溫和的地方，可以不要頂蓋，風、雨及過冷過熱均妨礙試驗工作之進行。固定設備不受影響之較大地面，可用管流系統自高平水櫃引水者，為最適合於水力試驗之處，固定之蓋頂，可有可無，但在經濟範圍以內，可保護之房蓋極為

需要。水流經過模型試驗以後，必須仍能流回蓄水池以便循環使用。

在設計新水工試驗室時，不妨參考美國及歐洲已有水工試驗之佈置，美國機械工程學會所出版之水工試驗室技術 (Hydraulic Laboratory Practice) 美國標準局所出版之「美國之水工試驗室」 (Hydraulic Laboratory in the United States)，胡丕氏 (L. J. Hooper) 之「美國及加拿大之代表性水工試驗室」 (Representative Hydraulic Laboratory in the United State and Canada) 提供很多參考資料。

2.3 試驗水槽

模型試驗在固定水槽中舉行，有很多便利之處，水槽之入口處，可裝設堰口或其他量水設備以觀測流量，尾水控制閘門設於水槽之出口處，試驗水槽一般用來試驗水工建築模型，其斷面多採用四方形狀，亦有採用深大於寬者，其尺寸可用 1 呎×1 呎到 10 呎×10 呎，普通之尺寸為 3 呎×3 呎，試驗水槽須有足夠之長度，以便安裝靜水橋於水流入口處，使水流穩定，行近水槽即接近模型段，須順直無阻礙，其長度至少要相當於六倍或八倍之水深，愈長愈好。模型之下游亦要有足夠之長度，以便觀察冲刷情形，及準備模擬水流之形態，試驗水槽或須設計一沉砂池，以便截取模型下游冲刷下來之泥砂，水槽可用鋼鐵，混凝土，木板或金屬片製造，其支架可用木架或鋼架。鋼鐵為最好之材料，因其堅強可適合一切情形，木材則忽乾忽濕，壽命不長。鋼鐵之形狀比值不易變更，鋼鐵亦較混凝土有彈性。為觀察方便計，玻璃框架必須準備，有些水槽之製造全部長度能以活動，此種形式之水槽之建造費頗高，但活動式之水槽均是為某種試驗之目的而設，例如推移質運行之設驗，及全部模型傾斜對於不等此之影響。河道模型亦可在試驗水槽內舉行，但此種水槽之寬遠大於深。適合於河道模型典型之水槽，可以採用 1 呎深 20 呎寬，長度由 80 呎到 100 呎。水槽之簡單建造法可用磚混凝土塊在光滑之地面上築牆，而將要試驗之模型放在槽內即可試驗。假如模型之邊界須經常變換則用預立混凝土塊中插以螺針，用作臨時牆以支持模型測深之鐵軌。

2.4 量度儀器

自水工模型試驗所得之結果均不會比量度儀器之精確性為好。流量、流速、長度、高程及間時均須實際測定，所以適合施測設備者，必須妥為準備。

a. 流量 率定流量可用標準堰口，文秋瑞流量計 (Venturi meter) 或隔板式之孔口。但文秋瑞流量計及隔板式之孔口不能用以測定大流量。使用之流量計，最好大小流量均能實測，小流量時所顯示之水頭差很小，亦可用於測大流

量。如此則此種式樣之流量計需加旁支管(by pass)以測小流量。孔口則有許多不良之處，損失水頭頗大，當抽水入高平水櫃，及由高平水櫃放出時，均不希望有水頭損失，三角堰放在堰頂之下端，在許多試驗室中均能適合應用。試驗室除此種小型的可活動量水設備外，均須配裝一個標準量水池(volumetric tank)或一標準重衡設備(gravimetric measuring standard)。一新建立的水工試驗室很容易建造一個量水池，小流量之測定可用標準平臺秤或用金屬板製造之水櫃，小型活動之量度設備必須用標準容器率定，其他測流管嘴(flow nozzle)、彎管流量計(elbow)、巴歇耳氏槽均可應用。

b. 流速 很多樣儀器設備專測水工模型之流速，畢托管可用於高流速之測定，明渠流速之測定，如在1秒呎之等級，則用小型流速計附有1吋之推進器，或用本造(Bentzel)流速管均可得到滿意結果。本造流速管如圖2.1所示。測定流速範圍在秒0.4到3.5呎之間。

表面流速或用照相測定，在水面噴洒塑膠碎紙(confetti)同時在其垂直上空用快門1/2到2秒攝取照片，碎紙花在照片上顯示出色線，色線與表面流速成正比，此種方法需要高度精確之照相機，此種測法如圖2.2及2.3所示。

c. 高程(elevations) 水面坡度必須時時精確測定，工程師所用水

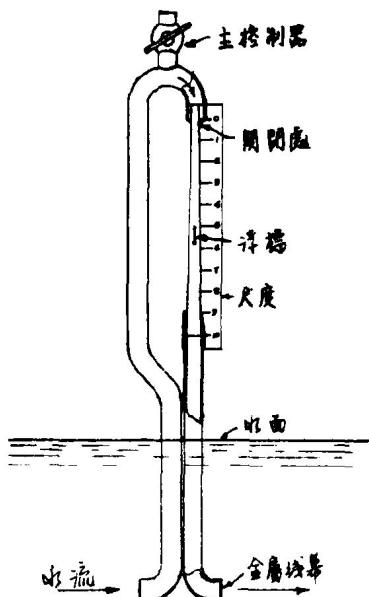


圖 2.1 本造 (Bentzel) 流速測定管

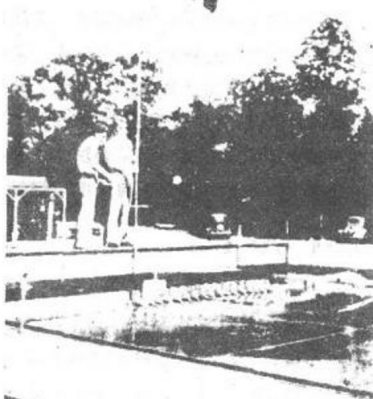


圖 2.2 攝影測水流表面流速之方法

準儀，與可讀到 0.001 呎之標準為尺合用，即可得到滿意結果，在特別情形下高程讀數，有些尺子可以讀到 0.0001 呎，但沒有商業上之水準儀可以讀到如此精確數值，此等尺子主要用於測定相對高程，參考一個水位即可得到個別水位，或由其共同水位讀起。如圖 2.4 所示。

d. 壓力 測定壓力所用之壓力計，有單腿液體測壓管，U 形測壓管，或盆式壓力計 (potttype) 及畢托管計，流體壓力計如保耳壺式指示計可以測到 300 psi 的壓力。

e. 時間 測定時間所用止錶 (stop watch) 精確度可到 1/15 秒。另有電子衡量計 (electronic counter)，可自動計時。

2.5 人 員

水工人員素質為水工試驗室成功之要素，負責水工試驗之工程師，必須徹底的了解模型之相似律及其應用性與其所受之限制。該工程師必須對工程科學徹底認識，對建築技術有充分之知識，並了解其困難所在，其他協助人員亦應俱備同樣條件。

水工試驗室必須有一小型工廠、木工及金工應用工具俱全，而且要有熟練之木工及機械工。我們不能過於強調模型試驗之成功，完全依靠模型之製造、實驗之行政及試驗結果之編譯。實際上水工試驗必需要有技巧之工作人員、適合之設備、及一位專家和有訓練之工程師。

B 佈 置

水工試驗室之佈置，因其用途及性質而定。如水工試驗室之設立，純為教學



圖 2.3 測定表面流速之照片

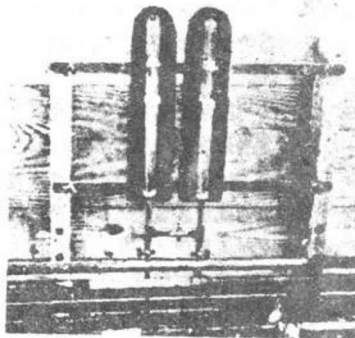


圖 2.4 水面測微尺，用於測定水面坡度

研究及學生實習，則水工試驗室之佈置比較簡單，試驗場地亦不要太大，但如水工試驗室之目的為模型試驗包括河工模型及泥沙試驗，則水工試驗室必須有較大面積，茲舉例分別說明如後：

2.6 教學研究用之水工試驗室

主要試驗場至少應有 $40\text{呎} \times 60\text{呎}$ ，在此主要試驗場內應有一條迴水渠道，其斷面大約 $2\text{呎} \times 2\text{呎}$ ，該渠圍繞室內，離開牆壁約 10呎 ，此迴水渠道應有木蓋或混凝土蓋，亦可用鐵爐格蓋，但學生及參觀者每每投入渠道中香煙頭，且或利用爐格來刮鞋底之泥土，容易污濁此渠道之水流入蓄水池。蓄水池之大小以 $12\text{呎} \times 8\text{呎} \times 10\text{呎}$ 為度，蓄水池上可以安裝一架 6吋 及一架 4吋 之抽水機，此兩架抽水機可並聯送水到 8吋 之水管內，此 8吋 之水管在試驗室內為主要供水管。

在試驗室之二樓兩旁可設陽臺 (balcony) 約 14呎 寬，許多重大之東西如抽水機、渡槽、堰口試驗箱、重衡箱等可以設在主要試驗場地。而計算室、辦公室、儀器室及水工教室均可設在二樓之一旁平臺上，另外一旁平臺之空間可以放置輕便設備。 8吋 之管流系統可以送水到水工試驗室內任一角落。如此佈置在第一層之一切試驗設備水源均由上面供給，第二層樓兩旁平臺之一切試驗設備水源均由下面供給。

8吋 之水管可固定於二樓平臺之底下，如此第一層之試驗單位可自 8吋 水管直接引水，二樓平臺之試驗單位亦可自 8吋 水管引水。管流統中當然要裝設接頭，T 字形之三通，十字形交播接頭，及水表等，二樓平臺試驗單位之廢水可讓其流至一樓而以水櫃或水表量之。倘有壓縮空氣可用，則可裝設小空氣管路， 2吋 之給水管可沿 8吋 管架設， 220伏特 3相 及 110伏特 單相之電源在試驗室內均須裝設，高平水櫃可設在試驗室一端，下接 8吋 之送水管。

此種佈置之主要利益為有充分空間可供教學及研究試驗用，第一層樓中間之上空試驗場 (open space) 因有充分之上空可用以裝置大型之試驗水槽設備等，上空試驗場上面不要加蓋，則可與二樓互相呼應，且便於起重機及吊車之活動，二樓之儀器設備亦可由起重機搬運以資節省勞力，水工試驗室因須備有起重機及吊車，所以除正門之外，應備有側門，側門之寬度應以中型車輛必要時能來往出入為度。

2.7 水工模型試驗室

模型試驗室之大小並無一定標準，一般水工結構之模型應在室內做，而河道模型則可放在露天試驗場做，美國水工試驗室室內面積較大，設備優良的學校很

多，計有柯州大學 (Colorado State University)、愛我華大學 (University of Iowa)、明尼蘇達 (University of Minnesota)、加州大學 (University of California)，及麻省工學院 (M. I. T.) 等，作者於 1966 年曾得國家科學委員會之助前往美國考察水工試驗，更得柯州大學之聘為客座教授，因之能有機會考察美國著名之水工試驗室。以上所列各水工試驗室，已不是完全為教學用，即除教學外尚對外服務，協助水利機關代為研究水工問題，舉辦模型試驗。柯州大學之水工試驗室，距校總區約五哩，該室長約 300 呎，寬為 120 呎之實驗室一棟及三層樓之辦公室一棟，內有教室、會議室及特別試驗室等，該試驗室之露天試驗場及室內試驗之水源均取之於馬牙水庫 (Horsetooth Reservoir)，最大流量為 150 秒立方呎 (cfs)，最大有效水頭為 175 呎，該水工試驗室有一長 200 呎寬 8 呎深 4 呎之玻璃水槽，可以變化坡度，最大流量可達 100 秒立方呎，為全美最大之玻璃水槽。

美國墾務總局之水工試驗室規模相當大，茲將該室之佈置及水工試驗室之設備介紹如次：

a. 固定設備 該水工試驗室面積，除去辦公室、工廠及貯藏室不計外，約計 53,000 平方呎。該室之固定設備在室中央有一長水溝寬 $9\frac{1}{2}$ 呎，深自 3 至 8 呎不等，作為室內之貯水池，三架 12 吋之水平式抽水機分別裝在貯水池之兩端，每架抽水機動力為一百匹馬力電動馬達。在北端之抽水機處有水力控制閘門及管路，使抽水機可順聯並可平聯，小水溝圍繞著試驗室主要部份的周圍，即為流水溝。在此系統內包括永久量水設備，給水管路閘門等。試驗室的地面有很緩的坡度傾斜迴水溝以便排水。主要水道及管流水溝用鐵網格子蓋著，以便刷洗地面，永久量水設備包括四組文秋瑞 (Venturi) 表，喉徑自 4 吋到 14 吋不等，每組供給四分之一的試驗室之用，迴水溝之管流系統均係 12 吋的標準管，並每隔十五呎有一個三通接頭垂直升起，連管流系統接到模型去時，臨時自三通接水管引水。

水流在永久的管流系統內，用水流控制閘門調節，除幾個秋瑞水流的閘門外，其他均固定在地面以下。為減少體積及重量，此種水閘之控制圓筒均係特別設計⁶，並係在該試驗室工廠內製造，此種圓筒之操縱水壓每平方吋約七十磅，並由四方向的嚮導閘控制，可以向左右移動或放在中間位置，如此則可以開關文秋瑞表路上的主要閘、或放在任何中間位置。而從自計板的指標上即可以觀察出文秋瑞表路上閘門的位置。

水在主要循環系統內，另受單獨操作四向閘的控制作用，此種閘亦係接連水手操縱閘的圓筒上。

另有特別設計之壓力計，係測量文秋瑞表水頭差之用，凡與水銀接觸之部份均係不銹鋼及玻璃製成。玻璃管的內徑為 $1/2$ 吋，以免毛細管作用的影響，精確程度可讀到千分之一呎。

b. 活動設備 活動設備中主要的小型抽水機計有七個 8 吋垂直渦輪式抽水機，及六個 6 吋抽水機，8 吋抽水機的容量為每秒 5 立方呎，6 吋每架流量每秒 2 立方呎。每一架抽水機裝置後均配水銀壓力計。

c. 流量檢定設備 試驗室內所有流量計在安裝時，及一定期間內，均要經過檢定。流量計之設備為體積櫃 (volumetric tank) 設在室之中央，主要之體積櫃容量約有 700 立方呎，其中包括一小型之體積櫃約有容量 60 立方呎，凡流量小於每秒 2 立方呎，小體積櫃即可應用，大流量則兩個體積櫃均可合用。檢定工作進行之記時，係用電磁自記式，可精確至百分之一秒。

d. 特別檢定設備

1. 玻璃水槽 鋼架玻璃水槽，為試驗溢水道護坦及水扉等有用設備，亦可試驗各種堰堤所受水浪力量。尤其對水流經過各種閘門上下之現象，溢水道頂形狀之研究，各種水工建築物所引起沖刷問題、及水流挾砂問題之研究，利用玻璃水槽尤為相宜。玻璃水槽 80 呎長，每一格 10 呎長，8 呎高。玻璃水槽首端之平水箱 (head box) 高 10 呎，較玻璃水槽高 2 呎，水槽內之水位可用不同之尾水門調整。槽之最高流量達 30 秒立呎。

2. 空氣試驗設備 此項設備有二架離心送風機，每架容量在 2 p. s. i. 時約有 3,000 立方呎，利用空氣代替水流可以很快解決密閉水道的問題，如閘門、閘門及管路等，利用空氣所做模型試驗結果，可以水工模型試驗校正之。送風機在一定速率下，空氣之總流量可用銳緣入口或流量孔口測定。

3. 流體磁鏡 (polarscope) 此器包括兩個 12 吋的磁極透鏡及同樣大小兩個四分之一的浪波板，此板即安裝在支架上，自前向後為磁極透鏡，四分之一的浪波板，擬試驗模型，四分之一之浪波板，磁極透鏡，彩色透明擴散鏡，及光源。所以試驗之模型僅能為二元尺度，且須透明，大約半吋寬，連以容器。此容器包括入口及出口與極小的變速抽水機及水箱串連，水箱中為蒸餾水 1.5 % 鋁鎂 (magnesium bentonite) 及 0.01 % 磷酸鈉 (sodium parophosphate) 的混合液。此種水工模型試驗最好作為水流情形有疑問時之初步試驗。一個模型的建造及試驗亦不過數小時，既省時間又省金錢，不過此種模型設計必須利用空氣或水工模型作進一步的研究。

4. 加砂器 活動河床模型型之均勻加砂器，其上部為一金屬漏斗，底下為加砂器之擺動盤，加砂器之長槽放在有伸性之彈簧轡上，其下為支架每秒擺