

中央水利實驗處

研究試驗報告

甲種：水工模型試驗

第十五號

漢渝公路汽車渡船
模型試驗報告書

中華民國三十七年五月

中央水利實驗處
水工報告編纂委員會

總編纂	鄭肇經					
副總編纂	譚葆泰					
編輯	姚琢之	姜國幹				
	俞世煜	蔣彭年				
	嚴鏡海	李葆鑑				
副編輯	吳志成	毛昶熙				
	陳子霞	陳高林				
	張廢緒					
助理編輯	陳宏德	金泰來				
	焦文生	顏亢宗				
	陳文宗	治				

序

近世工程設計，因科學之演進，理論與核算益趨精確，成果日宏。惟水利工程之設計，則以河流水性各各不同，難以一成之定論，適應複雜之變化。故疏導宣洩之法，堤防障堰之功，合則安瀾順翕，化瘠土為沃區；不則巨浸稽天，淪平原於澤國。而凡所措施，宜於此者未必悉宜於彼；適於昔者未必仍適於今，因地制宜，各不相襲。是以水工之設計，關係繁複，其技術之進展，稍亦濡遲。蓋自來治水力學者，物理學家恆假設水流為無黏滯性之理想液體，因而計算其流動之定律，特水流固非絕對無黏滯性者，其為值雖微，而實具有決定性之因素，以故水工計劃實施以後，往往多所鑿枘。至工程師之從事水力研究者，頗思矯此闕失，遂舍理論而崇經驗，蒐集測驗資料，列為公式，參酌基本關係，而分別傳以係數，以斷符合實際情況。然當設計之時，選擇係數，仍苦無一定之據依，苟或毫釐之差，詎能免於千里之謬？迨西曆一八九八年，德國特萊司登水工教授恩格斯氏，始創水工模型試驗，應用相似性力學原理，倣製海港河渠堤堰閘壩之模型，參酌天然水性，調合水流，引注其中，用以觀測其變化現象，因微察著，以例證真，隨工程之目標，逐一改正其設施，以期於至當。於是驗諸一室而不訛，施諸實際乃有準，其成效之完滿，迥

非憑虛冥想，捫闔求步者所可比擬。然後水工技術，日臻孟晉，匪獨省工節帑，其成果之安全，於以有保障焉。

我國舉辦水工模型試驗，昉於民國二十四年，前全國經濟委員會既設置中央水利研究實驗機構，乃於南京清涼山麓，拓地庀材，籌建水工試驗大廈；復先假國立中央大學隙地，建立臨時水工試驗室，辦理模型試驗，以應當時各項水利工程之急需。繼而抗戰軍興，國府西遷，雖在時會艱虞器材廩竭之際，猶先後於重慶成都昆明武功等處，設立水工試驗機構，各依地區之需要，分別研究試驗，粗獲成果。三十五年國府還都，積極復員建設，尤致意於水利工程之興復。本處乃儘先修建原設中央大學之臨時水工試驗室，並趕築清涼山之水工試驗大廈，其昆明水工試驗室則遷移北平，改設北平水工試驗所。務期今後水工試驗技術，廣大發揚，庶幾裨益於全國水利之建設；且進而與世界各國互相聯繫，作技術上之交換，以資切磋。爰舉歷年辦理之各項水工試驗及研究報告六十餘種，擇尤彙編，附以英文摘要，用備中外學者之觀覽。第規模草創，精研有待，茲編之成，又復匆促，率陋粗疏之處，尚冀當世鴻碩有以繩正之！

中華民國三十七年五月 鄭肇經

中央水利實驗處研究試驗報告一覽

甲種 水工模型試驗

- 第一號 導淮入海水道楊莊活動壩模型試驗
- 第二號 導淮入江水道三河活動壩模型試驗
- 第三號 四川長壽龍溪水力發電廠攔河壩模型試驗
- 第四號 廣東北江蘆苞活動閘模型試驗
- 第五號 四川荊江船閘模型試驗
- 第六號 陝西黑惠渠模型試驗
- 第七號 陝西漢惠渠進水閘滾水壩及筏道模型試驗
- 第八號 甘肅隴惠渠進水閘及陡坡模型試驗
甘肅夏惠渠陡坡模型試驗
- 第九號 四川洪雅花溪渠幹渠跌水模型試驗
甘肅蘭豐渠崔家崖跌水模型試驗
- 第十號 四川荊江羊蹄峒蓋石峒滾水壩模型試驗
- 第十一號 陝西褒惠渠模型試驗
- 第十二號 雲南彌勒甸溪滾水壩模型試驗
陝西滂惠渠工程計劃之研究
貴州澗江攔河壩模型試驗
陝西渭惠渠攔河壩模型試驗
湖北金水流城洩洪堰模型試驗
- 第十三號 四川江北郭家沱虹吸溢道模型試驗
- 第十四號 四川荊江石溪口花石子滾水壩船閘模型試驗
- 第十五號 漢渝公路汽車渡船模型試驗
- 第十六號 四川長壽桃花溪水電廠暗渠及引水管水流情形之探討

第十七號 揚子江管箕背灘模型試驗

第十八號 揚子江小南海灘模型試驗

第十九號 安徽華陽河洩水閘模型試驗

乙種 水工研究

第一號 水槽兩壁對於臨界拖引力之影響

第二號 砂土場基滲水之探討

漢渝公路汽車渡船
模型試驗報告書

漢渝公路汽車渡船模型試驗報告書

目 錄

一 釋起	1
二 理論	1
甲 相似性與阻力係數	
乙 波浪阻力	
丙 摩擦阻力	
丁 漩渦阻力	
三 模型之設計與製造	10
甲 模型比例率之決定	
乙 設備概況	
丙 模型船	
丁 水流設備	
戊 流速管	
四 試驗之進行及其結果	13
甲 試驗之進行	
乙 計算之方法	
丙 試驗之結果	
五 模型與試驗之準確度	16
甲 模型之準確度	
乙 流速之準確度	
丙 阻力之準確度	
六 討論	17
七 附圖目次	19
1 汽船設計圖	
2 木船設計圖	
3-1 Kelvin 氏波浪圖	

- 3-2 水與船隻相對速率分佈圖
- 3-3 模型試驗設備筋圖
- 3-4 合併模型阻力筋圖
- 4 汽船模型試驗結果圖
- 5 木船模型試驗結果圖
- 6 木船汽船合併模型試驗結果圖
- 7 渡船速率與阻力關係曲線圖
- 8 渡船形狀阻力係數曲線圖
- 9 渡船模型水面波浪圖

符 號 一 覽

(1) 符號右下角有1字者代表原型，有2字者代表模型。例如 l_1 為原型長度， l_2 為相應之模型長度。

(2) 基本四次(Dimension)為質量(m)，長度(L)及時間(t)。

(3) 力之四次，如採用重力單位(Gravitational unit)，應為克或公斤。

符號	說明	四次	符號	說明	四次
l	長度	l	t	時間	t
A	面積	l^2	v	速率	l/t
W	體積	l^3	a	加速率	l/t^2
g	地心加速率	l/t^2	F_w	波浪阻力	$m l/t^2$
m	質量	m	F_r	摩擦阻力	$m l/t^2$
ρ	密度	m/l^3	F_v	漩渦阻力	$m l/t^2$
F	力	$m l/t^2$	F_i	形狀阻力($F_w + F_v$)	$m l/t^2$
μ	絕對粘度	$m/l t$	C_w	波浪阻力係數	零
z_w	浪幅	l	C_r	摩擦阻力係數	零
λ	l_1/l_2	零	C_v	漩渦阻力係數	零
τ	t_1/t_2	零	C_f	形狀阻力係數	零
K	F_1/F_2	零			

漢渝公路汽車渡船模型試驗報告書

一 緣 起

漢渝公路，北起漢中，南達重慶，車輛往返，須經重慶之嘉陵江。主管公路機關，以建造橋樑所費甚鉅，因有汽車渡船之計劃。渡船之設計，係以木船裝載車輛，木船之旁與汽船聯繫，藉以推動前進。關於船隻之各項規定列表如次：（參見附圖 1 及圖 2）

船 別	全長(公尺)	中寬(公尺)	吃水深度(公分)	排水量(公噸)
汽 船	12.19(40呎)	2.44(8呎)	60.96(2呎)	8.43
木 船	17.00	3.85	47.00	25.00

船隻行駛之最大速率為每秒 4.118 公尺（即每小時 8 哩），試驗之目的計分三項：

- 甲 測定汽船在各種速率時所受之阻力。
- 乙 測定木船在各種速率時所受之阻力。
- 丙 測定兩船聯合推進在各種速率時所受之阻力。

本試驗係本處於三十年八月接受交通部公路總管理處之委託，在重慶督溪木工試驗室舉行。因空襲關係，至十一月始製造模型，翌年三月着手試驗，歷時三月，至三十一年六月結束。

本試驗由技正鄭兆珍設計模型，並主持試驗，技正鄭兆珍助理研究員程學敏技佐吳志成監製模型並辦理試驗，技佐吳志成繪製圖表，技正鄭兆珍編製報告。

二 理 論

甲 相似性與阻力係數

凡工程上之複雜問題，於設計時不能以理論方法計算者，往往須以模型試驗解決之。試驗時原型與模型必須符合下列各項條件，其試驗之結果，始能應用於原型：

- 1 原型任何部分之長度，與模型相應部分之長度須成比例（其比例率以 λ 代表

之)，是謂幾何相似性。

2 原型中任何部分，在某時間內所移動之距離，與模型相應部分在相應時間內所移動之距離，須成比例，其移動距離之比例率與二者之幾何比例率相等（亦為 λ ）。同時原型與模型之相應時間，亦須成爲比例（其比例率以 τ 代表之），是謂運動相似性。

3 原型任何部分或全體所受之力，與模型相應部分或全體所受之力，須成比例（其比例率以 K 代表之），是謂動力相似性。

以上三比例率（ λ ， τ ， K ），爲原型與模型間之基本關係，乃從事模型試驗者所據以運算者也。

λ ， τ ， K 之值既定，則原型與模型間其他各種關係，亦因之確定，例如：

$$\frac{\text{原型面積}}{\text{相應模型面積}} \frac{A_1}{A_2} = \lambda^2$$

$$\frac{\text{原型體積}}{\text{相應模型體積}} \frac{W_1}{W_2} = \lambda^3$$

$$\frac{\text{原型速率}}{\text{相應模型速率}} \frac{v_1}{v_2} = \lambda$$

$$\frac{\text{原型加速率}}{\text{相應模型加速率}} \frac{a_1}{a_2} = \frac{\lambda}{\tau^2}$$

$$\frac{\text{原型質量}}{\text{相應模型質量}} \frac{m_1}{m_2} = \frac{\rho_1 W_1}{\rho_2 W_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \lambda^3$$

根據牛頓第二定律，力（ F ）=質量（ m ） \times 加速率（ a ）

$$\text{則} \quad \frac{\text{原型之力}}{\text{相應模型之力}} \frac{F_1}{F_2} = K = \frac{m_1 a_1}{m_2 a_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \lambda^3 \cdot \frac{\lambda}{\tau^2}$$

$$\text{或} \quad K = \frac{\rho_1 \lambda^4}{\rho_2 \tau^2} \dots \dots \dots ()$$

$$\text{上式可以變爲} \quad K = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{\lambda^4}{\tau^2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \lambda^2 \frac{\lambda^2}{\tau^2}$$

$$\text{但} \quad \lambda^2 = \frac{A_1}{A_2}, \quad \frac{\lambda^2}{\tau^2} = \left(\frac{\lambda}{\tau} \right)^2 = \frac{v_1^2}{v_2^2}$$

$$\text{故} \quad K = \frac{F_1}{F_2} = \frac{\rho_1 A_1 v_1^2}{\rho_2 A_2 v_2^2}$$

$$\text{或} \quad \left. \begin{aligned} F_1 &= C \frac{\rho_1 v_1^2}{2} A_1 \\ F_2 &= C \frac{\rho_2 v_2^2}{2} A_2 \end{aligned} \right\}$$

上兩式中之 F_1 及 F_2 ，係以絕對單位(Absolute unit)計算。如改為重力單位(Gravitytational unit)，則應變為

$$F_1 = C \rho_1 \frac{v_1^2}{2g} A_1 \dots \dots \dots (2a)$$

$$F_2 = C \rho_2 \frac{v_2^2}{2g} A_2 \dots \dots \dots (2b)$$

式中 C 為一常數(Constant)，稱為阻力係數(Drag coefficient)，第(2a)及(2b)式，稱為牛頓普通相似律(Newton's general law of similarity)。

綜觀上式，可知物體所受之阻力，因其進行之速率而不同，而阻力係數則始終不變。苟原型與模型具有相似性，則二者之阻力係數亦應相等。

第(2a)及(2b)式可合併為

$$F = C \rho \frac{v^2}{2g} A \dots \dots \dots (3)$$

式中除 F 及 v 為變數(Variable)外， A 代表原型及不同比例模型之相應面積，故亦為變數。如由模型試驗中測得其部分或全體在某種速率時所受之力，欲求原型相應部分或全體在任何速率時所受之力，即將模型中之 F, ρ, v, A 之值，代入第(3)式中，求得阻力係數 C 之值。再以原型之 A 值代入第(3)式，則原型阻力與速率之關係，即可確定矣。

第(3)式純粹由牛頓定律推演而來，並未受任何限制，是不啻假定原型與模型之運動，除受物質惰性及加速率之影響外，不受他種力之影響。譬如有一物體潛行深水中，其比重與水之比重相等，而水又毫無粘性，則此物體前進時所受之阻力，完全由於水之惰性及其速率之變化而產生。遇此等問題，可以採用上述方法，應用模型試驗以測定原型之阻力，實際上船行於水內，除受水之惰性阻力外，同時亦受波浪阻力，摩擦阻力，及漩渦阻力之影響，茲分述如次：

乙. 波浪阻力

船隻行駛時，水面發生波浪，波浪對於船隻所發生之阻力，稱為波浪阻力(Wave resistance)。原型與模型既具幾何相似性，則原型中波浪之各種長度(Linear dimensions)與模型中波浪之相應長度之比例率，亦須等於 λ 。惟原型與模型中之波浪，皆係因地心吸力發生，則原型中波浪所生之力與模型中相應波浪所生之力，亦有固定之比率，其比例率為

$$K = \frac{\rho_1 W_1 g_1}{\rho_2 W_2 g_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \lambda^3 \frac{g_1}{g_2} \dots\dots\dots(4)$$

式中 g_1 及 g_2 為原型與模型之地心加速率。

設原型與模型所受之力，除粘性力外，完全係波浪之阻力影響，則根據相似性之定義，二者阻力之比，亦須等於 K ，是即原型與模型二者力的關係須同時符合第(1)式及第(4)式

$$K = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{\lambda^4}{r^2} \left\{ \right.$$

$$K = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \lambda^3 \frac{g_1}{g_2} \left. \right\}$$

設 $\rho_1 = \rho_2$ 則

$$\frac{V_1}{\sqrt{g_1 l_1}} = \frac{V_2}{\sqrt{g_2 l_2}} \text{ 稱為霍特指數(Froude's number) } \dots\dots(5)$$

$$V_1 = \sqrt{\lambda} V_2 \dots\dots\dots(6)$$

$$F_1 = \lambda^3 F_2 \dots\dots\dots(7)$$

第(5)式表示原型與模型如具有相似性，則二者之霍特指數必須相等。更與第(2a)及(2b)式比較則得

$$F_{w1} = C_w \rho_1 \frac{V_1^2}{2g} A_1 = \phi \left(\frac{V_1}{\sqrt{g_1 l_1}} \right) \rho_1 \frac{V_1^2}{2g} A_1 \dots\dots(8a)$$

$$F_{w2} = C_w \rho_2 \frac{V_2^2}{2g} A_2 = \phi \left(\frac{V_2}{\sqrt{g_2 l_2}} \right) \rho_2 \frac{V_2^2}{2g} A_2 \dots\dots(8b)$$

即原型與模型，除粘性力外，同時受地心吸力之影響，則二者在相應速率時，其

阻力係數匪特相等，且同為霍特指數之函數；是謂霍特相似律 (Froude's law of similarity)。

第(8a)及(8b)式可合併為

$$F_w = \phi \left(\frac{v}{\sqrt{gl}} \right) \rho \frac{v^2}{2g} A \dots \dots \dots (9)$$

式中除波浪阻力 F_w 及速率 v 為變數外， A 代表原型及不同比例模型之相應面積，亦為變數；而阻力係數 C_w 隨霍特指數之值而變更，亦不復為常數矣。

第(6)式表示原型速率與模型相應速率之比率，為二者相應長度比率之平方根。

第(7)式表示原型阻力與模型阻力之關係。模型在某速率測得之阻力乘以 λ^3 ，即得原型在相應速率時之阻力。

船隻前進發生波浪，複雜萬端，實難以算學公式精確計算。茲將波浪之普通性質，演成近似之公式，以表明船隻波浪阻力變化之情形。其確定數值，須以試驗方法決定之。

設一物體以每秒 v 公尺之速率沿直線方向，在平靜之水面進行，則物體經過之處，必有波浪隨之發生，其形狀類似許多三角形，參見附圖 3-1。圖中之線表示浪峯 (Wave crest)。OA, OA' 及 OB, OB' 等稱為斜浪 (Diagonal wave)；AB, A'B' 等稱為橫浪 (Transverse wave)；兩橫浪浪峯間之距離 $cc', c'c''$ 等稱為浪幅 (Wave length)，英人 Kelvin 氏，曾假定物體為一幾何點（即假定物體之體積等於零），以理論方法，研究此種波浪之性質，得結論如下：

1 橫浪浪幅 λ_w ，可以下式表示之

$$\lambda_w = \frac{2\pi v^2}{g} \dots \dots \dots (10)$$

式中 v 為物體進行之速率。

2 浪峯之公式(即附圖 3 中「三角形」之公式)，可以下式表示之

$$(x^2 + y^2)^3 + a^2(8y^4 - 20x^2y^2 - x^4) + 16a^4y^2 = 0$$

座標零點，即為運動之物體。物體前進， a 值逐漸加大，「三角形」亦逐漸加大。行至一浪幅 λ_w 之距離時，又生一小「三角形」，如此連續產生不已，遂成附圖 3-1 之

形狀。

3 橫浪之高度(Wave height) H 與 a 值之平方根成反比，即

$$H = \frac{K}{\sqrt{a}} \dots \dots \dots (11)$$

式中 K 為常數。

船頭與船尾，可視為兩個上述之「物體」，所不同者，此兩「物體」各有其體積，不能以零值計算。其相去之距離亦不能以船身長 l 計算，此距離如以 βl 代表，則 β 之值必小於 1。

此兩「物體」在水中進行，各發生一組上述之波浪，相互影響。兩組波浪之高度雖各有不同，但根據第(10)式，其浪幅 λ_w 之值則無二致，因二「物體」進行之速率 v 相同也。又船頭「中心」所生之浪以浪峯 (Wave crest) 始，船尾「中心」所生之浪以浪谷

(Wave trough) 始，此兩組波浪之距離為 $(\beta l + \frac{\lambda_w}{2})$ ，其差度角 (Phase Angle) 為

$$\frac{2\pi(\beta l + \frac{\lambda_w}{2})}{\lambda_w}$$

。以上所述，均就橫浪而言，斜浪關係更為複雜，暫不計入。

設 H_1 為船頭波浪之高度， H_2 為船尾波浪之高度。船頭波浪行至船尾時，其 a 值加大， H_1 值降低 (根據第(11)式)，變為 ρH_1 (ρ 為常數，小於 1)。船隻所生之波浪為此兩組波浪之和，其高度 H 可以下式表示之：

$$H^2 = \rho^2 H_1^2 + H_2^2 + 2\rho H_1 H_2 \cos \frac{2\pi(\beta l + \frac{\lambda_w}{2})}{\lambda_w}$$

以第(10)式 $\lambda_w = \frac{2\pi v^2}{g}$ 代入上式

$$\text{則 } H^2 = \rho^2 H_1^2 + H_2^2 - 2\rho H_1 H_2 \cos \left(\frac{\beta}{\frac{v^2}{g} l} \right) \dots \dots \dots (12)$$

H_1 為船頭水面升起之高度， H_2 為船尾水面低落之高度，均與其速率水頭 (Velocity head) 成正比，故 H_1 及 H_2 之值可以下式表示之

$$H_1 = M \frac{v^2}{2g}, \quad H_2 = N \frac{v^2}{2g}$$

式中 v 為船隻進行之速率， M 及 N 為常數。第(12)式，可以變為

$$H^2 = \left\{ \rho^2 M^2 + N^2 - 2\rho MN \cos\left(\frac{\beta}{v^2}\right) \right\} \frac{v^4}{4g^2}$$

船隻發生之波浪，其所含能量在此處應為勢能 (Potential energy)，亦隨之向外傳播。根據能量不變原理，此能量必由船隻供給。假定波浪阻力為 F_w ，則船隻進行之浪幅 λ_w 所供給之能量為 $F_w \lambda_w$ 。波浪之能量，在深水波浪 (Deep water wave) 中，與浪高之平方 H^2 成正比，是即在每一浪幅 λ_w 中，其能量為 $K \lambda_w H^2$ ，式中 K 為常數。此處所討論者，雖非深水波浪，但為簡單起見，假定其能量與深水浪相同。如是則波浪之能量，應等於船隻供給之能量，即 $F_w \lambda_w = K \lambda_w H^2$

$$\text{或} \quad F_w \propto H^2 \propto \left\{ \rho^2 M^2 + N^2 - 2\rho MN \cos\left(\frac{\beta}{v^2}\right) \right\} \frac{v^4}{4g^2}$$

根據第(9)式，波浪阻力係數 $C_w = \frac{F_w}{\rho \frac{v^2}{2g} A}$ ，

$$\begin{aligned} \text{則} \quad C_w &\propto \frac{v^2}{g} \left\{ \rho^2 M^2 + N^2 - 2\rho MN \cos\left(\frac{\beta}{v^2}\right) \right\} \\ &= E \frac{v^2}{g} \left\{ \rho^2 M^2 + N^2 - 2\rho MN \cos\left(\frac{\beta}{v^2}\right) \right\} \dots\dots\dots(13) \end{aligned}$$

式中 E 為常數。

上式表示波浪阻力係數與速率之關係。惟推演公式時，未將斜浪之能量列入，並假定橫浪能量之性質，與深水波浪相同。故推演結果，僅為一近似公式而已。

由第(13)式可得以下之結論：

- a 式中之 $\frac{v}{\sqrt{gL}}$ 為雷特指數，原型與模型在相應之速率下，其 E, M, N, ρ 及 β

之值均應相等。如是則原型與模型之波浪阻力係數，純為霍特指數之函數，於此又得一證明。

b 此公式不過表示波浪阻力係數與霍特指數之變化，並不能算出波浪阻力確定之數值，因E, M, N, β 及 ρ 之值，均隨船隻之形狀而改變，同時 β 之數值因船隻之速率而變更，其中變化，異常複雜，迄今未有學理上之定論。故船隻波浪之阻力，必須以試驗方法求得之。而模型試驗乃為設計船隻時必經之步驟。

c 如以波浪阻力係數與相應之霍特指數繪成曲線，必有週期變化（參見附圖8），因式中含有 $\cos\left(\frac{\beta}{v^2}\right)$ 也。

丙 摩擦阻力

船隻在靜水中，其所受壓力，概與表面垂直。若船隻在水中運動，因水具有黏性，對於船隻表面發生切應力（Shearing force），阻止船隻之進行，是謂摩擦阻力（Frictional resistance）。

船隻運動時，貼於船隻表面之水，因其黏着力作用，與船隻同時前進，二者之相對速率等於零。由此向外，其相對速率逐漸增加，以達船隻運動速率之值為止。附圖3—2表示水與船隻相對速率之分佈情形。按牛頓定律，水對於物體每單位面積所生之摩擦阻力等於 $\mu \frac{dv}{dy}$ ，式中 μ 在一定之溫度時，其值不變，稱為水之絕對黏度（Coefficient of absolute viscosity）； v 為相對速率； y 為距物體表面之垂直距離。

設原型與模型所受之力，除惰性力外，完全為摩擦阻力，則二者力之比，應為

$$K = \frac{\mu_1 \frac{dv_1}{dy_1} A_1}{\mu_2 \frac{dv_2}{dy_2} A_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \cdot \frac{\lambda^2}{\tau}$$

更與第(1)式

$$K = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{\lambda^4}{\tau^2}$$

合併，則得

$$\frac{v_1 b_1}{\mu_1} = \frac{v_2 b_2}{\mu_2} \text{ 稱為雷那指數(Reynolds' number) } \dots\dots\dots(14)$$

上式表示原型與模型如其具有相似性，則二者之雷那指數必須相等。更與第(2a)及(2b)式比較，則得

$$F_{r1} = C_r \rho_1 \frac{v_1^2}{2g} A_1 = f \left(\frac{v_1 b_1}{\mu_1} \right) \rho_1 \frac{v_1^2}{2g} A_1 \dots\dots\dots(15a)$$

$$F_{r2} = C_r \rho_2 \frac{v_2^2}{2g} A_2 = f \left(\frac{v_2 b_2}{\mu_2} \right) \rho_2 \frac{v_2^2}{2g} A_2 \dots\dots\dots(15b)$$

即原型與模型，除惰性力外，同時受液體摩擦力之影響，則二者在相應速率時，其阻力係數匪特相等，且同為雷那指數之函數；是謂雷那相似律(Reynolds' law of similarity)。

第(15a)及(15b)可合併為

$$F_r = f \left(\frac{v b}{\mu} \right) \rho \frac{v^2}{2g} A \dots\dots\dots(16)$$

式中除摩擦阻力 F_r 及速率 v 為變數外， A 代表原型及不同比例模型之相應面積，亦為變數，而阻力係數 C_r 隨雷那指數之值而變更，亦不復為常數矣。

英人 Fröude 氏及德人 Blasius, Wieselsberger, Kempf, Gebers 諸氏均曾對平板(Flat Plate)之摩擦阻力，加以試驗。Gebers氏之結果為

$$f \left(\frac{v b}{\mu} \right) = 0.0206 \left(\frac{v b}{\mu} \right)^{-0.125}$$

式中 l 為平板沿流速方向之長度，代入第(16)式中，則得

$$F_r = 0.0103 \cdot l^{-0.125} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{0.125} \rho A v^{1.875} \dots\dots\dots(17)$$

式中之單位為秒，公尺，公斤。

船隻浸水部分，為一複曲面(Warped surface)，自與平板之性質不同，惟據前人試驗結果，其摩擦阻力與等面積等長度平板之摩擦阻力，相差甚微。按通例均應用

該項公式加以計算，不再另行試驗

丁 漩渦阻力

根據流體力學原理，船隻進行時，水對於船身之相對速率，在船邊者大，在船頭船尾者小；壓力則反是，其數值因船身形狀而不同。惟船身表面之水流因摩擦力作用消耗能量，則由船邊流至船尾時，不足抵抗船尾之壓力，於是船尾之水衝入，形成漩渦水流(Vortex)。此種漩渦，足以增加船尾之負壓，亦即增加船隻進行之阻力，是謂漩渦阻力(Vortex resistance)。

漩渦阻力，與船之形式，水之粘度，船行速率，以及波浪之形狀，均有密切之關係，根據理論方法計算，殊為困難。普通漩渦阻力，與波浪阻力及摩擦阻力相較，為值甚微。根據前人試驗結果，苟船隻形狀相似，則漩渦阻力係數 C_v 大致無所變更，即

$$F_v = C_v \rho \frac{v^2}{2g} A \dots \dots \dots (18)$$

式中 C_v 大致係為常數。其值因船隻之形狀而不同，須由試驗決定之。

以第(18)式與第(3)式相較，可知漩渦阻力，在通常情形下，符合牛頓普通相似律，不受霍特雷那相似律之限制。如以模型試驗之結果，與波浪阻力同時依照霍特雷那律推算於原型，自無不可，詳細計算方法下章再論及之。

波浪阻力及漩渦阻力，均與船隻形狀有密切之關係，二者之和，普通稱為形狀阻力(Form resistance)。

三 模型之設計與製造

甲 模型比例率之決定

此次試驗，係在本處鄂溪水上試驗室玻璃水槽中舉行。模型設計，係依照霍特雷那律，即長度比率如經選定，則速率之比，為長度比率之平方根，阻力之比為長度比率之立方。因密度玻璃水槽之寬度，給水量，及測定阻力之設備，決定模型長度比例率為 1:64。汽船模型長度為 19.05 公分，排水量為 32.16 克，吃水深度為 0.95 公分。木船模型長度為 26.56 公分，排水量為 95.37 克，吃水深度為 0.73 公分。

乙 設備概況

附圖 3-3 為模型設備簡圖。將模型船中線上 B_1 及 B_2 兩點，繫以絲線 f_1 及 f_2 ，經房架之滑輪 R_1 及 R_2 ，懸吊反重 W_1 。 B_1B_2 之距離與滑輪 R_1 及 R_2 之距離相等。絲線所受拉力，如不計及滑輪之阻力，應等於 W_1 。 DD 為座標板，固定於玻璃水槽。於船移動時，指針 a_1 及 a_2 可在座標板中間之空隙內移動。當靜水時，絲線 f_1 及 f_2 為垂直線，指針在座標板上有一定之位置，是為零點。水流動時，船受水力之推動，向右移動，絲線 f_1 及 f_2 遂與垂直線成一偏斜角 θ 。直至其所受拉力之水平分力與模型船之阻力相等，即成平衡狀態。阻力之大小，與偏斜角 θ 有一定之關係。 θ 之值，可以指針 a_1 移動之距離 d 及滑輪與座標板中間之距離 l 之比例（如 $\tan \theta$ ）計算之。如不計滑輪之摩擦力，則船隻阻力 F 應等於 $2W_1 \sin \theta$ 。實際上 θ 之值，恆受滑輪摩擦力之影響，故船隻阻力 F 與偏斜角 θ 之關係，須在靜水時用校正方法決定之。校正之法，係於指針 a_2 之底端繫絲線向外伸引，使與水面平行。絲線上另繫垂直絲線，下懸砝碼。將橫線末端向上偏斜，使成 45° 角，由是橫線上所受之力（相當船之阻力）與砝碼相同。由指針 a_1 移動之距離，可以計算偏斜角 θ 之值，因得阻力與 θ 之關係。然後更換砝碼重量，繼續測驗，根據成果，繪成曲線。水面流速，相當於船隻進行之速率，可以流速管 (Pitot tube) 測得之；如是則船隻阻力與速率之關係，乃可確定。

丙 模型船

船之模型係以臘製，其排水量在靜水時，如不計及滑輪之摩擦力，應等於模型重量 G 減去 $2W_1$ 。水流動時，應等於 $G - 2W_1 \cos \theta$ 。欲使船於停止時與進行時之排水量無顯著之差異，必須在不影響試驗精確度之範圍內，使 G 及 W_1 儘量加大， θ 之值儘量縮小。此次試驗，汽船模型之重量 G 為 84.2 克，反重 W_1 為 26.0 克，最大速率時之偏斜角 θ 為 $3^\circ 10'$ 。木船模型之重量 G 為 178.4 克，反重 W_1 為 41.5 克，最大偏斜角 θ 為 $3^\circ 30'$ ，均不致影響模型之吃水量。

在汽船試驗中，絲線 f_1 及 f_2 所受拉力之水平分力，等於汽船模型之阻力，亦即相當螺旋槳所生之力。故 B_1 與 B_2 兩點須儘量放低，使與原型螺旋槳之位置相當，如是，則船身進行時之傾斜情形，始能與原型相似。

船隻之浮力中心 (Metacenter) 須位於 B_1 與 B_2 距離之中心，則兩反重相等時

，船身在靜水中始不致傾斜。

汽船與木船模型合併時，先將木船模型挖空，使其重量等於其排水量，無需懸吊反重。然後使汽船與木船模型之浮力中心相對，將兩船之位置固定。在此試驗中，只吊汽船，不吊木船，因絲線 f_1 及 f_2 所受拉力之水平分力，相當於螺旋槳所生之力，而原型之行駛，其原動力全在汽船之螺旋槳，木船本身，並無原動力也。

汽船與木船之形狀不同，阻力亦異。合併行駛之時，因阻力之不同，發生力矩 (Turning moment)，使船身旋轉，必須將船舵偏斜，使船舵所生之反力矩與之平衡，則船始能沿直線前駛。試驗時之情形與此相同，須在汽船模型尾端裝一船舵，舵之偏斜角度，可以隨意變更，務使兩力矩互相抵銷，俾 a_1 及 a_2 能在座標板空隙中間自由移動而後已。惟經試驗觀察(參見附圖 3-4)，合併船隻之阻力方向，稍向 Y 方向偏斜，並不與船身(即 X 方向)平行。如以汽船浮力中心為 X 力矩中心 (Moment center)，則船舵所生之力矩 ($L_1 R_1$) 與阻力之力矩 ($L_2 R$) 平衡時，尚有沿 Y 方向之分力，無法消除，即水於流動時，船身除向 X 方向移動外，尚沿 Y 方向移動。如是則指針 a_1 及 a_2 緊貼座標板空隙之一邊，讀數不易精確。欲救此弊，須於指針 a_1 及 a_2 之底端，繫以絲線 f_3 及 f_4 ，使 f_3 及 f_4 之拉力，與船隻阻力沿 Y 方向之分力平衡，則指針 a_1 及 a_2 始能在空隙中自由移動。 f_3 及 f_4 之方向，務須與船身方向垂直，庶不致影響船隻沿 X 方向之阻力。

丁 水流設備

磐溪水工試驗室水流之設備，已詳本處編印之龍溪河閘河壩模型試驗報告書中。模型用水，源出磐溪，經磐溪石壩，引水渠，高壓水箱，進水管，量水堰而至玻璃水槽。試驗開始，先校正玻璃水槽之尾門，務使水面保持一定之高度，以測驗阻力與水深之影響。水面之高度，以測針測定之(參見附圖 3-3)。

戊 流速管

本處自製之流速管係依照 Prandtl 氏之設計。其要點為水經流速管發生之流線變化，並不影響速率水頭 (Velocity head) 之讀數，是即流速管係數等於 1.0，而流速管之位置，稍有不平，亦不致使讀數發生顯著之變化。並為精確起見，將閱讀速率水頭之玻璃管傾斜，使與垂直線成 $\cos^{-1} \frac{1}{5}$ 之角度，速率水頭可讀至 0.05 公厘。

四 試驗之進行及其結果

甲 試驗之進行

試驗開始，玻璃水槽內先放水至一固定之深度（此次試驗，深度定為12.28公分）。俟水平靜，再將模型放置水中，紀錄指針 a_1 在座標板上之位置，是為零點。然後將船吊起使離開水面，並徐徐開啓進水管之閘門，同時校正尾門，俟水深達12.28公分時，將船放置水中，紀錄指針 a_1 所移動之距離；然後再吊起模型，以流速管測量水面流速（船在水中時，不能同時測量水面流速，因船尾發生之漩渦常使讀數降低）。如是繼續多次測驗，得三組曲線，參見附圖4，圖5，圖6。圖中之直線，表示偏斜角 θ 與阻力之關係，乃依照第三章乙節所述之方法而校正者也。

乙 計算之方法

由試驗測得之阻力，為模型之總阻力，即形狀阻力（包括波浪阻力及漩渦阻力）與摩擦阻力之和。摩擦阻力，可由第(17)式推算。由總阻力中減去摩擦阻力，即得模型之形狀阻力，根據第二章丁節之討論，模型之形狀阻力，可以依照霍特定律引伸至原型，而原型之摩擦阻力，亦可由第(17)式計算。二者之和，即原型之總阻力。茲將試驗紀錄，列表於後，以見一斑。表中第1行及第2行，係由附圖4，圖5，圖6之曲線中求得；第3行係由第(17)式算出，式中之 $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)$ 值，須與試驗時水之溫度相當；第4行為第2行與第3行之差數；第1行乘以 $\sqrt{\lambda}(-8)$ 即得第5行；第4行乘以 $\lambda^3(-262144)$ 即得第6行；第7行仍係由第(17)式算出，原型河水之平均溫度假定為 10°C ，故 $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)$ 之值應為 1.31×10^{-6} 平方公尺/秒；第8行為第6行與第7行之和。

1 汽船模型試驗紀錄

比例	1:64	試驗時水之溫度	10°C
原型長度	12,048公尺，	模型長度	0.18825公尺
原型浸潤面積	30.81方公尺，	模型浸潤面積	0.007522方公尺

1	2	3	4	5	6	7	8
模型速率 (每秒公尺)	模型 總阻力 (克)	模型 摩擦阻力 (克)	模型 形狀阻力 (克)	原型速率 (每秒公尺)	原型 形狀阻力 (公斤)	原型 摩擦阻力 (公斤)	原型 總阻力 (公斤)
0.125	0.050	0.035	0.015	1.0	3.932	4.355	8.287
0.1875	0.119	0.075	0.044	1.5	11.534	9.315	20.849
0.2500	0.203	0.129	0.074	2.0	19.399	15.975	35.374
0.3125	0.316	0.197	0.119	2.5	31.195	24.275	55.470
0.3750	0.4825	0.2776	0.2059	3.0	53.975	34.168	88.143
0.4375	0.752	0.369	0.383	3.5	100.401	45.619	146.020
0.5000	1.200	0.474	0.726	4.0	190.317	58.598	248.915
0.51475	1.359	0.501	0.858	4.118 [*]	224.920	61.880	286.800
0.5625	2.185	0.592	1.593	4.5	417.595	73.079	490.674

*每秒4.118公尺=每時8.哩

2 木船模型試驗紀錄

比例 1:64 試驗時水之溫度 14°C
 原型長度 15.76公尺; 模型長度 0.24625公尺
 原型浸潤面積 70.4638方公尺; 模型浸潤面積 0.0172031方公尺

1	2	3	4	5	6	7	8
模型速率 (每秒公尺)	模型 總阻力 (克)	模型 摩擦阻力 (克)	模型 形狀阻力 (克)	原型速率 (每秒公尺)	原型 形狀阻力 (公斤)	原型 摩擦阻力 (公斤)	原型 總阻力 (公斤)
0.125	0.105	0.079	0.026	1.0	6.816	9.631	16.447
0.1875	0.225	0.169	0.056	1.5	14.680	20.601	35.281
0.2500	0.468	0.290	0.178	2.0	46.662	35.330	81.992
0.3125	0.815	0.441	0.374	2.5	98.042	53.684	151.726
0.3750	1.285	0.621	0.664	3.0	174.064	75.563	249.627
0.4375	1.940	0.829	1.111	3.5	291.742	100.888	392.130
0.5000	2.940	1.064	1.876	4.0	491.782	129.590	621.372
0.51475	3.260	1.124	2.136	4.118 [*]	559.940	136.850	696.790
0.5625	4.700	1.327	3.373	4.5	884.212	161.616	1045.828

*每秒4.118公尺=每時8.哩

3 合併模型試驗紀錄

比例 1:64

試驗時水之溫度 26°C

1	2	3	4	5	6	7	8
模型速率 (每秒公尺)	模型 總阻力 (克)	模型 摩擦阻力 (克)	模型 形狀阻力 (克)	原型速率 (每秒公尺)	原型 形狀阻力 (公斤)	原型 摩擦阻力 (公斤)	原型 總阻力 (公斤)
0.125	0.230	0.112	0.118	1.0	30.933	13.860	44.793
0.1875	0.528	0.241	0.287	1.5	75.235	29.643	104.878
0.2500	0.800	0.413	0.387	2.0	101.450	50.837	152.287
0.3125	1.148	0.627	0.521	2.5	136.577	77.248	213.825
0.3750	1.789	0.882	0.907	3.0	237.765	108.730	346.495
0.4375	2.732	1.178	1.554	3.5	407.372	145.170	552.542
0.5000	4.100	1.514	2.586	4.0	677.904	186.471	864.375
0.51475	4.340	1.598	2.742	4.118*	718.799	196.917	915.716
0.5625	5.488	1.888	3.600	4.5	943.718	232.553	1176.271

*每秒4.118公尺 = 每時8哩

丙 試驗之結果

1 根據模型試驗結果 (參見附圖4, 圖5, 圖6), 由上述計算方法, 繪成渡船速率與阻力曲線 (參見附圖7)。

2 汽船及木船形狀阻力係數與霍特指數 $\frac{v}{\sqrt{gl}}$ 之關係, 亦經計算, 繪成曲線 (參見附圖8)。在同一霍特指數時, 汽船形狀阻力係數, 遠較木船為低。

3 合併船隻阻力之變化, 極為複雜, 由歷次試驗觀察, 其變化之跡, 可得而尋者, 約有下列數端 (參見附圖9)。

a 汽船因受木船波浪之影響, 其船頭水面高度, 較單獨在同一速率進行時為

低。波浪之形狀亦有變化，均是使其波浪阻力降低。

b 汽船與木船接觸之處，水面抬高(參見圖9中之c點)，波浪形狀，亦與各船單獨進行時不同，足以使合併船隻之波浪阻力增高。

c 汽船與木船有一部分面積相接觸，故合併船隻之浸潤面積較兩船單獨浸潤面積之和為小。合併船隻之摩擦阻力，小於兩船單獨摩擦阻力之和者，經計算結果，為百分之 9.1。

當速率小時，上述 b 項影響較 a 項及 c 項影響之和為大，故合併船隻之阻力，較兩船單獨阻力之和為大。速率大時，則情形反是。此種現象，附圖 7 中甚為明顯。

五 模型與試驗之準確度

甲 模型之準確度

船之模型，以臘澆成之後，復以薄鐵片製成十二個斷面樣板，測量模型各斷面是否與原圖相符，如有不合，即加以修補。樣板尺寸，係以卡尺(Caliper)校正，差誤小於0.1公厘。故模型最大差誤為0.1公厘，合原型0.64公分，相當原型汽船長度萬分之5.2，寬度千分之2.6，原型木船長度萬分之3.8，寬度千分之1.7。

天平之差誤小於0.1克。汽船模型吃水線之斷面面積為33.5方公分，由兩反重0.1克之差誤所發生之吃水深度差誤為0.06公厘($=\frac{2}{335}$ 公分)，合原型0.38公分，相當原型吃水深度千分之6.2，木船模型吃水線之斷面面積為147方公分，相應吃水深度之差誤為0.014公厘，合原型0.09公分，相當原型吃水深度千分之1.9。

乙 流速之準確度

測定流速時，先以輪水及硫酸沖刷流速管之兩玻璃管，將管壁不潔之物洗淨滌盡，俾水在兩管內表面張力上昇之高度相等。然後使之傾斜並與垂直線成 $\cos^{-1} \frac{1}{5}$ 之角度，速率水頭可讀至0.05公厘。惟流速較大時，讀數時常擺動，速率水頭最大之差誤，估計為0.4公厘。當原型速率為每秒1.118公尺時(等於每時8哩)，最大之差誤為百分之1.4。

丙 阻力之準確度

各組試驗，反置之重量不同，阻力與偏斜角之關係亦異。而閱讀指針移動之距離時，指針擺動之程度亦不一致，估計偏斜角最大之差誤，汽船模型為 $2'38''$ （相當於座標板上2.5公厘），木船模型為 $2'36''$ （相當於座標板上2.5公厘），合併模型為 $1'03''$ （相當於座標板上1公厘）。由阻力與偏斜角之關係及速率之最大差誤，依照第四章乙節所述之計算方法，可以求得原型船隻阻力之最大差誤，計算結果，當原型速率為每秒4.118公尺時，汽船阻力最大之差誤為百分之4.2，木船為百分之3.1，兩船合併時為百分之2.2。

六 討 論

甲 普通船隻之阻力試驗，多在靜水中舉行。其主要設備為試驗車及試驗水槽。試驗槽內之水深不能小於模型船身之高度。試驗時，以模型裝於試驗車下，按照應有之吃水深度，投入水中。試驗車係以電機推動，其速率可以任意操縱。模型阻力，即在試驗車上測定之。如是則模型船各部分與水之相對速率，均等於試驗車進行之速率。此種情形，與實際船隻行駛情形相符合。此次因設備上之限制，在玻璃水槽內以流動之水舉行試驗，其弊為模型各部分與水相對之速率不能一致。蓋水槽內之水面流速以中心為最大，兩旁則遞減也。試驗時以流速管測得之速率，係水面之中心速率，與實際情形比較，失之較大。惟在亂流（Turbulent flow）中，水面中心部分流速之分佈，較為平均，其影響當不甚鉅也。

乙 根據前人試驗結果，如以船隻阻力與速率繪成曲線，當速率 $v = \sqrt{gd}$ （ d 為試驗槽內之水深）時，則曲線有突然上昇之現象。故試驗槽內之水深，不可太淺，須使試驗範圍內之速率，皆小於 \sqrt{gd} 。此次試驗，水深為12.23公分，最大速率為每秒59.4公分，實小於 \sqrt{gd} 之值，故試驗結果不受水深之影響。

丙 根據波浪之理論，當流速小於每秒23.3公分時，水面無波浪發生，故流速小於每秒23.3公分時，模型所受之力，未能與原型相似，如以模型測得之阻力推算於原

型，與實際情形亦不符合。故附圖 7 中之曲線，當速率小於每秒 $1.87 (=0.233 \times \sqrt{64})$ 公尺時，概以虛線表示之。模型速率大於每秒 23.3 公分時，因與原型之比例過小，水面之表面張力波浪(Surface tension wave)與重力波浪之比例，與原型亦不相同。而表面張力波浪發生於船身之前，重力波浪發生於船身之後，故模型船頭之波浪形狀亦未能與原型相似。至於船隻阻力受表面張力波浪之影響，為值甚微，模型測得之阻力，仍可以霍特定律推算於原型。

丁 船隻行駛之時，水流線為亂流式(Turbulent flow)。故模型中之水流，亦應為亂流式，始能與原型相似。此次試驗，當流速最小時(每秒 12.5 公分)，流線之形狀，經試驗觀察，亦呈亂流狀態，且雷那指數亦大於 580。故模型之水流情形與原型相似。

戊 汽船模型寬 3.81 公分，木船模型寬 6.02 公分，而玻璃水槽之寬度僅 25 公分，似嫌太狹。船隻所生之波浪，為水槽兩壁所反射，對於模型之阻力，不無影響，此乃設備上之限制。將來舉行相類之試驗，設備改良以後，再將水槽寬度與模型阻力之影響，重行加以測定，以補此次試驗之不足也。

己 在原型汽船中，船尾螺旋槳所生之水流，沖擊船舵，其力甚大。故船舵面積，無須太大，即可發生效力，此次試驗，模型船尾，無螺旋槳之設備，致船舵形狀未能與原型相似，其偏斜角度，與所生力之數值及方向，均與原型不盡相同。由試驗觀察，在各種速率時，合併模型之阻力與船身平均成 3° 之角度。在原型中，因船舵形狀未能相似，其阻力方向與船身所成之角度，當稍有不同。此次試驗測得之數值，為合併模型沿船身方向之阻力。因方向之差度甚微，與總阻力之數值相差無幾。

庚 在合併模型試驗中，汽船與木船之相對位置，對於阻力甚有影響。此次合併之位置，係兩船之浮力中心(Metacenter)相對。將來辦理相類之試驗，當再對於其他合併位置，加以試驗，以資比較。

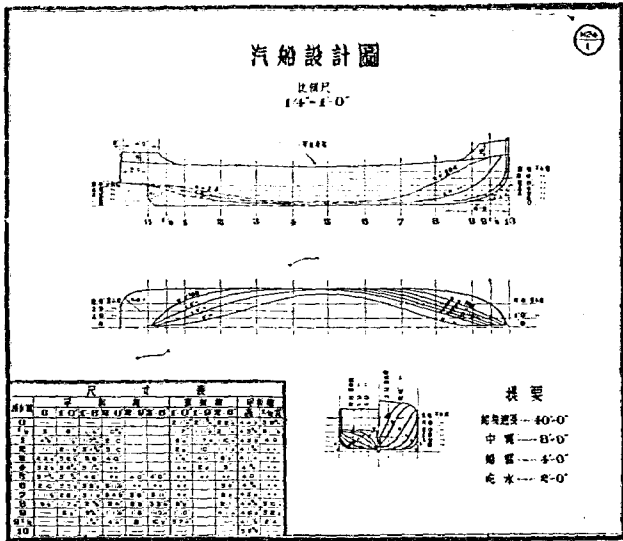


圖 1

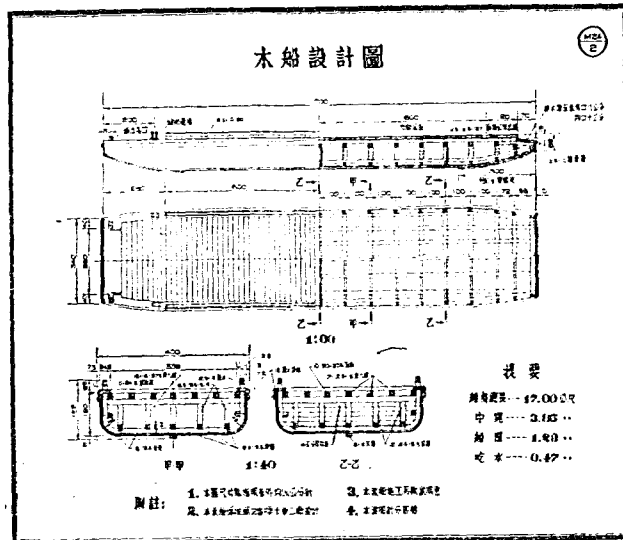


圖 2

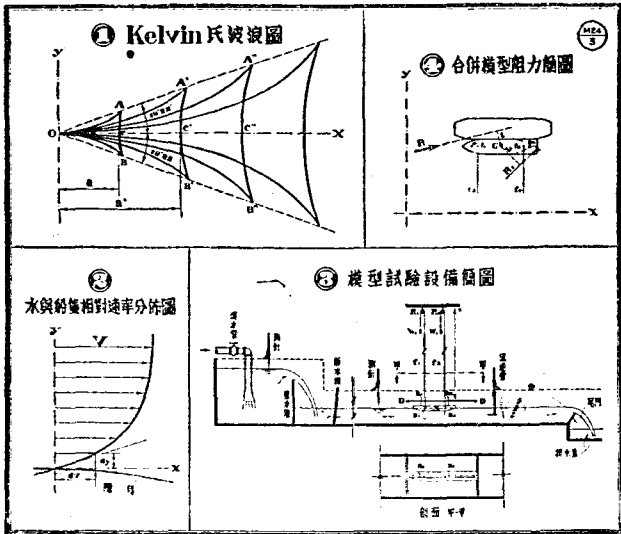


圖 3

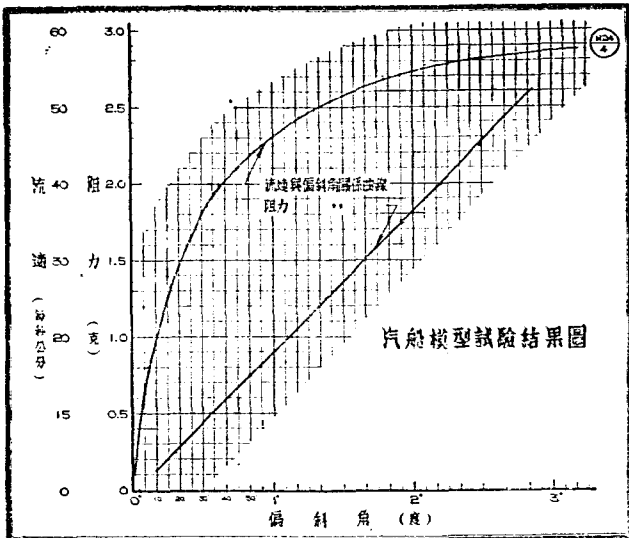
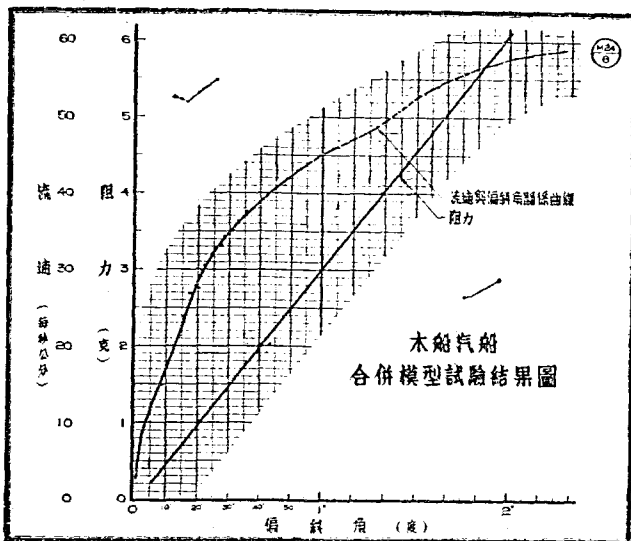
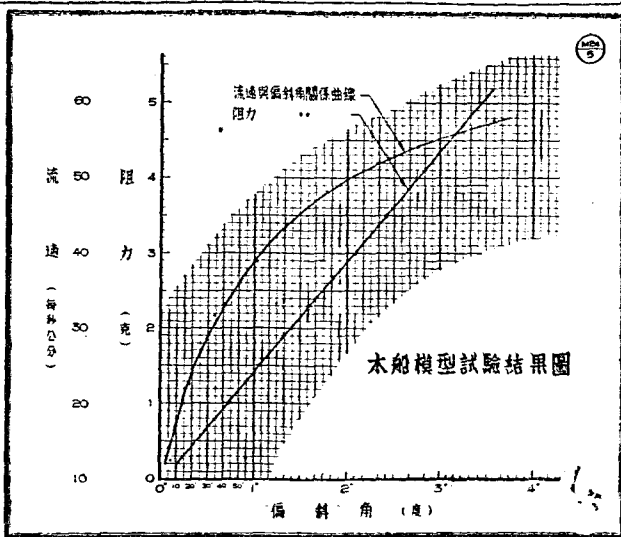


圖 4



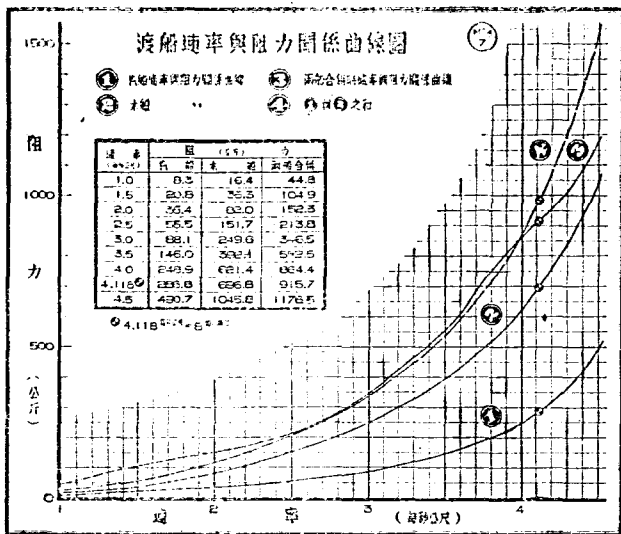


圖 7

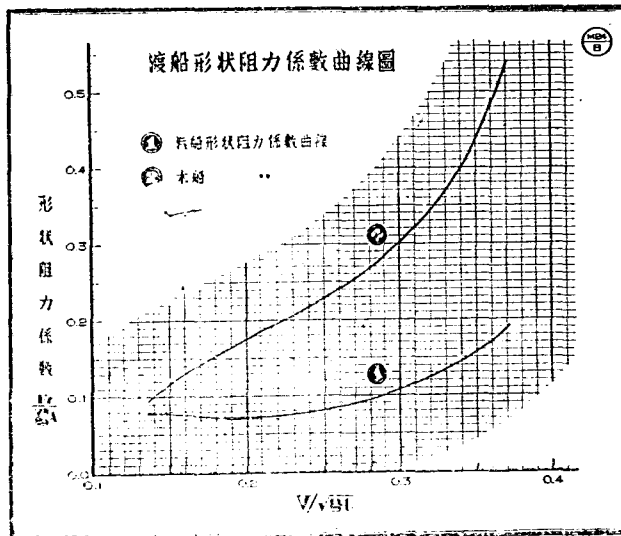


圖 8

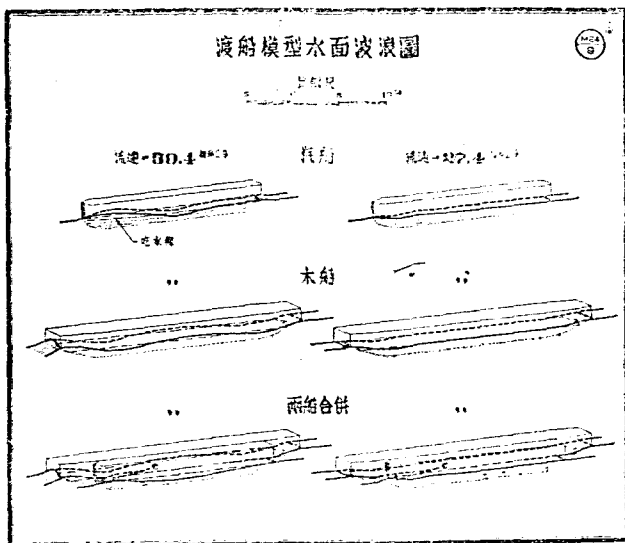


圖 9

Model Study on the Resistance of Ferry-Boat of the Han-Yu Highway

Abstract

- A. **Project conducted for:** The Highway Administration, Ministry of Communications.
- B. **Investigators:** Experiment conducted by H. M. Cheng, and C. C. Wu under the direction of C. C. Cheng.
- C. **Purpose:** To determine the individual and combined resistance of steam-tug and wooden ferry under different velocities.
- D. **Outline and result:**

Steam-tug towing a wooden ferry on its side to carry trucks across rivers is a common practice in highway transportation during war time in China. The standard dimensions of tug and ferry for Han-Yu Highway are given below (see figs. 1,2):

	Total length	width	draft	displacement
Steam tug	12,19 m.	2,44 m.	0,61 m.	8,43 metric tons
Wooden ferry	17,00	3,85	0,47	25,00

Max. relative velocity against current is 4,12 m/sec.

The model scale is chosen as 1:64 after consideration of wave resistance, vortex (form) resistance, and skin friction resistance. The models are made of paraffin with metallic weights to adjust for the correct position of metacenter. The boats, floating on water surface in a glass flume, are hung by two small silk threads f_1, f_2 with counterweights W_1, W_2 , around two pulleys R_1, R_2 attached on the ceiling of the laboratory (Fig. 3). Two needles a_1, a_2 are set on the model boat passing through a slotted scale D. After the counterweights are properly adjusted according to the exact weights of boats, a rating is made by the application of known horizontal force to determine the exact relation with the horizontal

reading of the needle on scale. The current velocity is measured by using Pitot tube thus the relation between velocity and ship resistance can be determined.

The experimental results for (1) steam-tug (2) wooden ferry and (3) steam-tug towing wooden ferry on side are shown on figs. 4, 5, and 6. The curves give the measured velocities as function of displacement of needle on the reading scale together with ratings for force, from which the resistance of boat for different velocities can be found. As the measured resistance is comprised of wave resistance, form (vortex) resistance and skin friction resistance and the latter does not follow the Froude's law of similitude, the skin friction resistance of model boat is calculated by Gebers' equation (p. 9) and subtracted from the measured value. The remaining value is multiplied by Froude's scale of force and again the skin friction for proto-boat is calculated by Gebers' equation. Thus adding together gives the total resistance of proto-boat. The calculations are shown on p. 14, 15 and the results are plotted on figs. 7, 8 which give the relation between total resistance and velocity (fig. 7) and the relation between coefficient of resistance and Froude's number.

It is interesting to note that the resistance of steam-tug towing a wooden ferry on side (line 3, fig. 7) does not equal to the algebraic sum of individual resistance of tug and ferry (line 4, fig. 7). This is due to the interference of surface wave when two boats are sailing together. The determination of most favourable relative position for tug towing a ferry on side to obtain minimum resistance may deserve further study.

NATIONAL HYDRAULIC RESEARCH INSTITUTE
RESEARCH BULLETIN
HYDRAULIC MODEL STUDIES
BOARD OF EDITORS

CHENG, CHAO-CHING	<i>Chief Editor</i>
TAN, PAO-TAI	<i>Assistant Chief Editor</i>
YAO, CHO-CHIH	<i>Editor</i>
JAUNG, GOA-GAN	<i>Editor</i>
YU, SHIH-YU	<i>Editor</i>
CHIANG, PENG-NIEN	<i>Editor</i>
YEN, CHING-HAI	<i>Editor</i>
LEE, PAO-CHIEN	<i>Editor</i>
WU, CHIH-CHENG	<i>Associate Editor</i>
MAO, CHANG-SHI	<i>Associate Editor</i>
CHEN, TZE-SHIA	<i>Associate Editor</i>
CHEN, KAO-LING	<i>Associate Editor</i>
CHANG, KENG-HSU	<i>Associate Editor</i>
CHEN, HUNG-TE	<i>Assistant Editor</i>
KING, TAI-LAI	<i>Assistant Editor</i>
CHIAO, WEN-SHENG	<i>Assistant Editor</i>
YEN, KANG-TSUNG	<i>Assistant Editor</i>
CHEN, TZONG-CHIH	<i>Assistant Editor</i>

NATIONAL HYDRAULIC RESEARCH INSTITUTE

RESEARCH BULLETIN

SERIES A : HYDRAULIC MODEL STUDIES

NO.15

MODEL STUDY
ON THE RESISTANCE
OF FERRY-BOAT
OF THE HAN-YU HIGHWAY

PUBLISHED BY

CHAO-CHING CHENG

COMMISSIONER

OF THE NATIONAL HYDRAULIC RESEARCH INSTITUTE

9

NANKING, CHINA

MAY 1948