土木試驗所報告

第六十號

水理模型實驗の意義竝にその相似律と
相似限界に就いて……內務技師　佐藤　清…1

營口港模型試驗報告……內務技師　松尾春雄…35

鋪裝コンクリート版に及ぼす氣象作用
の影響(1)……內務技師　島田八郎…67

コンクリート支承面が局部的に荷重を
受ける場合コンクリートの許容支壓應
力度實驗竝びに其の適用限界に就いて…內務技師　一木保夫…89

昭和十六年三月

內務省土木試驗所

水理模型實驗の意義竝びにその相似律と相似限界に就て

内務技師 佐藤清一

要旨

水理模型實驗の意義を明らかにし，研究せんとする現象を運動狀況によりて分類し，其等の各々に就て適切なる相似律を求め尙ほ模型試驗の適性限界に言及したものである．

目次

I. 總論……（2）
〔1〕模型實驗の意義……（2）
〔2〕力學的相似……（2）
〔3〕流體運動の分類……（4）
〔4〕固定河床と移動河床……（6）
〔5〕模型を歪めること……（6）
〔6〕模型實驗の特質……（10）
II. 相似律……（11）
〔1〕重力の影響を考へる場合……（11）
1. 慣性力と粘性力とを共に考へ得る場合……（11）
2. 粘性力を無視し得る場合……（14）
3. 慣性力を無視し得る場合……（15）
〔2〕重力の影響を考へざる場合……（16）
1. 慣性力と粘性力とを共に考へ得る場合……（16）
2. 粘性力を無視し得る場合……（17）
3. 慣性力を無視し得る場合……（17）
〔3〕抵抗に關する技巧……（18）
1. 浸透水……（18）
2. 開水路の流れ……（19）
（1）不等流……（20）
A. 模型を歪めざる場合……（20）
B. 模型を歪めたる場合……（21）
（2）等流……（22）
A. 模型を歪めざる場合……（23）
B. 模型を歪めたる場合……（23）
（i）$r=h$ と見做し得る場合……（24）
（ii）$r=h$ と見做し得ない場合……（24）
（a）矩形單斷面の場合……（25）
（b）矩形複斷面の場合……（26）
（c）抛物線形斷面の場合……（28）
III. 移動河床模型實驗……（28）
IV. 相似限界……（30）
V. 結語……（33）

I. 總 論

[1] 模型實驗の意義

吾々が實際に起るべき現象を知らんとする場合，又は或るものを作り出さうとする場合その實物に於て起るべき現象を豫め知る必要のある場合，其の實物と同樣のものをその大さを變へて作りたる物に就て研究する事が出來，之によつて實物に於て起るべき現象を豫め知る事が出來れば極めて便利なる事が多い．此の樣にして研究する事が**模型實驗**である．從つて模型實驗は大さを變へた所謂模型に依つて之を實物とした時のものに起るべき現象を研究するのであるから，其の縮尺は倍數にも又分數にもなり得る．即ち或る場合には或實現象が小にして判明せぬ場合に之を擴大せる模型に依つて研究する必要の起る事もあり得ようし，又吾々が通常屢々相遭する如く，實物大のものに就て種々研究しようとすれば莫大な費用がかゝるか又は到底不可能なる場合に，之を縮少したものについて研究して實物の內容を豫知しようとする事の必要も起る．吾々が相遭するのは殆ど後者の場合であるから以下に於ては其の積りで種々なる所見を述べる事とする．

[2] 力學的相似

今玆に大さの異りたる 2 つの現象があるものとする．此の 2 つの現象の間に何等かの關係が成立して，其の爲めに片方の現象に基いて他の現象を推斷又は豫言する事が出來れば極めて便利である．此の樣な 2 つの類似の現象の間に成立し得る關係を**相似律**といふ．然らば此の關係は如何に見出されるか，之に就て以下順を追つて所見を述べて見たいと思ふ．而して此の相似律が確たるものであればある程模型實驗の價値は實に莫大なるものとなる．玆に相似律が確たるものであればと云つたのは，一般に或る現象といふものは色々な多くの作用力に依つて起るものであるが，實物と模型とに於て之等をどの程度に考慮して行くか，そして如何に適切に實物と模型との間の關係を見出すかに依りて實物に對する豫言の確實さが異るからである．

此の樣に實物に於て起るべき現象を豫言するのに其の模型を形に於て實物と全く相似に製作するのが原則ではあるが，模型として使用する材料の特殊性の爲めに或る特別なる害が起らぬ樣に，大を助け小を犧牲にして模型の形を適當な所に於て適當な丈變へる事も考へられる．此の意味に於て模型を實物に對し相似形に作らざるものを一般に**歪めた模型**といふ．之に就ては尙ほ別節に於て述べる事とする．

今は實物に對して全く相似形に作られたる模型に就て論じよう．

模型の形が實物に全く相似であれば，そこに起る力學的現象も形に於けると同一の縮尺に於て相似かと云ふに，之は決してさうはならない．本論文は水理模型實驗に就て述べんとするのであるから水理學的立場から論すれば，それは流體には流體特有の諸性質があるからであり，又多くの場合外界からの力が不變であるからである．

實物とその模型なる 2 つの現象を考へた場合に，之等の現象を表はす 2 つ運動の方程式が同一形で而も同一解を得る事が出來る樣に模型を作りたる場合に，此の兩者は互に**力學的に相似**であると云ひ得る．それには之等の兩現象に作用してゐる諸力の比が一定でなければならない．然るに模型に於ては多くの場合之に使用する流體は實物と同一のものであり，又之に作用する外界の力も同一である事が多いので玆に大きな問題が生れる．之を如何に處置すべきかが玆に研究せんとする事柄である．

力學的に相似なる模型を作りて實現象を知らうとする事は實物と模型とに於て同一運動の方程式が成立して其の解が同じ形にならなければならないのであるから，その運動の方程式を模型に依りて適當に解くには先づ其の境界條件が同一でなければならない．即ち模型は實物に幾何學的に相似形に作らなければならない．之が模型の形に對する原則である．即ち前に模型を實物に相似形に作るといつたのは，實物と模型との兩者に於て其の境界條件を同一にした，又は相似にしたといふに外ならないのである．從つて模形を歪めて作るといふ事は此の點から見て意味をなさないものである．併し之は，嚴格な意味に於ては意味をなさないものではあるが，模型には種々なる事情の爲めに縮小の限度が考へられる爲めに此の限度以下に於ける模型にとりては之を歪めた模型によりて近似的に實現象を再現するといふ事は考へられるものである．

此の樣に先づ境界條件が同一に作られた後には，如何なる割合に流體を流せば * よいかといふ問題が次に起る．之に關する縮尺を第 II 章以下に於て述べようとするのである．

次に現象に於ける主作用力と模型限界について一言しなければならない．

吾々の取扱ふ水理現象に於ては大體次の如き作用力が考へられる．即ち

1. 重力　2. 壓力　3. 慣性力　4. 粘性力　5. 彈性力　6. 表面張力　7. 見掛けの應力 **

等である．如何なる流體の運動にも常に之丈の力は全部働いてゐるのであるが，取扱はふとする問題の 1 つ 1 つに於て之等の諸力が常に同一大さの割合で働いてゐるものではなくその問題に依つて必ず之等の諸力の中の幾つかが優勢に現はれてゐる事が多いのである．從つて模型に於てもその優勢なる幾つかの力が優勢である樣に作るべきであつて，例へば實物に於て重力と慣性力との影響が大である時には模型に於ても重力と慣性力との影響が大である樣にしなければならない．少くとも流體運動の慣性力と粘性力との割合は考慮して行かねばならない．

模型を力學的に相似に働かしむるには，同一運動の方程式が成立する樣にしなければならない．從つて上の諸力の中の適當なる幾つかの力が作用し合つて，その樣にして出來た模型に於てその流況に對して實物と同一運動の方程式が成立する樣にしておかねばならない．例へば實物に於ては過流の狀態で流れてゐる場合に整流狀の模型で實驗を行つてはならない．此の樣にする時は流體の運動の方程式が，實物と模型とに於て省略する項が異り，從つて式そのものが全く異つて來るからである．

又實物が射流であるならば模型も射流で，實物に空洞現象があれば模型も空洞現象の起る所で，表面張力の影響の少ないものは模型に於ても表面張力の影響の少ない樣にして實驗を行ふべきである．殊に實物に於て表面の流れが問題となつてゐる樣な場合には，模型に於て表面張力が効いてくる樣であつてはならない．

從つて，模型を縮小して作る場合には次の樣な限界判定が必要となつて來る．例へば模型が小さくなつて來ると粘性の影響が優勢となり整流となつたり，又表面張力の影響が優勢となつて流れが阻害され又毛管現象が起つたりする恐れがあるのである．

最後に抵抗又は損失の問題であるが，元來流體が流れる場合には必ず抵抗又は損失が起る．その 1 つは境界面との摩擦に依るもので之を外部摩擦といひ，他の 1 つは流體內の微粒子相互の摩擦で之を內部摩擦と稱する．

* 吾々の關係する主として土木に關する問題には水の中を運動するものよりも水の方が運動をするものを取扱ふ事が多いので流すと云つた．

** H. Lamb : Hydrodynamics. p. 676.
G. Reynolds : Scientific papas. p. vol. II. p. 554.
之は又 Reynolds 應力とも云はれる．

後者は更に 2 つに分けて考へられる．その 1 つは整流に於て見られる如き流體層間の相對速度に基く粘性摩擦であり，他の 1 つは渦流に於て觀察される如き流體の微小素片がその平均の流れの方向に平行又は垂直に不規則な小運動 * をする爲めに恰も整流の場合の粘性抵抗にも相當する渦粘性抵抗が生ずるのである．その爲めに渦流に於ては單純なる粘性力ではなくして複雜なる所謂見掛けの應力の抵抗が存するのである．從つて G. I. Taylor も主張する如く ** 渦流に就てはこの見掛けの應力についての相似をも考へるべきであるが，現今の流體力學に於ては之に關する相似律所か（實物に於ける）渦流の現象の量的取扱ひそのものに就ても未だ確立されてゐない狀態であるから玆に於ては觸れない事を餘儀なくされるのである．從つて開水路の問題を取扱ふ際に問題となる流れの抵抗について，內部摩擦の分まで外部摩擦を加減するといつた不合理も生ずるのである．之が技巧に就ては後章に於て詳述したい(II.〔4〕).

［3］ 流體運動の分類

上述の如くに力學的相似を期する場合には先づ實現象に於ては如何なる作用力の影響が大となつてゐるかを知る必要があるから，吾々の屢〻相遭する流體運動を分類整理しておく必要がある．即ちこの樣に分類された運動の夫々に於て，その用ひる方程式が異つて來るからである．

筆者は流體運動を次の如くに分類してみた．

吾々の考へる流體運動に於ては多くの場合表面張力の影響が小であるから之を無視して考へる時は，流體の運動に關係する力としては次の如きものが考へられる．即ち 1. 重力，2. 壓力，3. 慣性力，4. 粘性力，5. 彈性力の 5 力が主たるものとなる．見掛の應力は，之等の 5 力によつて作られる運動の方程式がそのまゝで非常に小さい運動に適用する事が出來る故，之から誘導して出される力であるから玆には特に入れないでおく．併し尙ほ此の點に就て論議すべき餘地は充分にあるのであつて，之は渦亂現象の研究の完成と相俟つて明らかとされねばならない事である．

一般に壓縮性及び粘性を考慮に入れた流體運動の基本方程式は

$$\frac{\partial v}{\partial t}+(v\cdot\nabla)v=K-\frac{1}{\rho}\operatorname{grad}p+\tfrac{1}{3}\nu\operatorname{grad}\operatorname{div}v+\nu\Delta v \quad \cdots\cdots(1)$$

であつて，Navier-Stokes の運動の方程式と稱せられるものである．

然るに吾々が取扱ふ範圍の問題に於ては水の壓縮性を無視して考へて差支へない場合が多いから *** 以下水は非壓縮性流體として考へる事とする．然る時は

$$\operatorname{div}v=0$$

であるから運動の一般式は周知の如く

$$\frac{\partial v}{\partial t}+(v\cdot\nabla)v=K-\frac{1}{\rho}\operatorname{grad}p+\nu\Delta v \quad \cdots\cdots(2)$$

とする事が出來る．玆に

v＝或る點に於ける流質微小體のもつ速度

---

* 之を渦亂變動又は單に變動といふ．

** G. I. Taylor：“Statistical Theory of Turbulence” Proceedings of Royal Society of London. Series A. Vol. 151.

*** 但し水衝作用の如き場合には之を考慮に入れる必要がある．

K=質力
p=其の點に於ける壓力
ρ=流體密度
ν=動粘性係數

である.

これから論じようとする力學的相似論に於ては質力の影響の有無が問題となり，殊に吾々の取扱ふ現象に於ては質力は主として重力となるから，此の重力の作用の有無に依りて先づ大きく 2 つに分け，その各々に就て速い運動と遅い運動とに分て考へる．然る時は次の如くになる．

1. 重力の影響を考へる場合

（1）慣性力と粘性力とを共に考へ得る場合

此の場合は重力の影響も慣性の影響も粘性の影響も共に考慮する最も一般な場合であつて，嚴密に云ふと總ての流體運動が此の中に含まれる．之に對する運動の方程式は前述のものであつて

$$\frac{\partial v}{\partial t}+(v\cdot\nabla)v=K-\frac{1}{\rho}\mathrm{grad}\,p+\nu\Delta v \quad\cdots\cdots(2)$$

によつて表はされる．

（2）粘性力を無視し得る場合　之は運動が相當に速いので所謂慣性の項，質力の項はそのまゝに粘性の項のみを無視した場合で方程式は次の如くになる．

$$\frac{\partial v}{\partial t}+(v\cdot\nabla)v=K-\frac{1}{\rho}\mathrm{grad}\,p \quad\cdots\cdots(3)$$

即ち完全流體として考へる場合に相當し，之に對しては瀉流の問題，波動の問題等は先づ此の中に含めてよい．

（3）慣性力を無視し得る場合　運動が遅い場合には慣性の項は影響が小となり粘性が効いて來る．從つて方程式は

$$\frac{\partial v}{\partial t}=K-\frac{1}{\rho}\mathrm{grad}\,p+\nu\Delta v \quad\cdots\cdots(4)$$

となる．更に運動が定常的なる場合には

$$0=K-\frac{1}{\rho}\mathrm{grad}\,p+\nu\Delta v \quad\cdots\cdots(5)$$

となる．之に對しては土堰堤を浸透する水の運動等が考へられる．

2. 重力の影響を考へない場合

（1）慣性力と粘性力とを共に考へ得る場合　之は重力の影響は小にして殆ど無視して考へ得るが，又は重力の影響は考慮する必要がないが，慣性力と粘性力とは共に考へる必要のある場合である．從つて運動の方程式は

$$\frac{\partial v}{\partial t}+(v\cdot\nabla)v=-\frac{1}{\rho}\mathrm{grad}\,p+\nu\Delta v \quad\cdots\cdots(6)$$

となる．之に對しては流體の中に浸された物體の運動，例へば水中を球が相當に速く動く場合又管内の流れの如きものが考へられる．

（2）粘性力を無視し得る場合　運動が相當に速い爲めに粘性の項を無視しても差支へないと考へられる場合であつて，運動の方程式は

$$\frac{\partial v}{\partial t}+(v\cdot\nabla)v=-\frac{1}{\rho}\mathrm{grad}\,p \quad\cdots\cdots(7)$$

となる．

（3）慣性力を無視し得る場合　運動が比較的遅い爲めに慣性の項を無視して差支へないと考へられる場合であつて，運動の方程式は

$$\frac{\partial v}{\partial t}=-\frac{1}{\rho}\mathrm{grad}\,p+\nu\Delta v \quad \cdots\cdots(8)$$

となり，更に定常的な運動に對しては

$$0=-\frac{1}{\rho}\mathrm{grad}\,p+\nu\Delta v \quad \cdots\cdots(9)$$

となる．之は粘性運動の場合であつて，管内の比較的遲い流れ等は之に屬す．

[4] 固定河床と移動河床

管内の流れの問題，浸透水（土堰堤等）の問題，堰堤の溢流の問題，渦動の減衰の問題等を模型に依つて研究する場合には問題にはならないが，開水路の問題殊に河川，漂砂の問題を研究する場合には模型を固定性のもの，例へばセメントとか“たゝき”の如きもので其全部を製作するか，又自然河川の河床が砂礫性である様に模型に於ても河床として砂の如き移動性をもつものを以て構成せしめるかゞ重要なる問題となつて來る．本來自然の河川には，餘程の岩石質山岳地帶を流れるものの外は其の河床は固定質のものではないのであるから，之を固定河床性河川と見做して實驗する事は極めて不合理である．如何なる河川と雖も必ずその河床には泥質，砂質，又は礫質の移動物質が存在するに違ひない．而して之等の移動性物質あるが故に河床が低下又は上昇したり流身が變つたり，水位が變つたり，切角作りたる構造物の根が掘られて破壞したり，埋沒されたり，種々なる事故が起るのである．故に此の移動性の物質を無視して河川の研究をする事は，殊に之に加へて浮游物質の移動を見逃して研究する事は全く意味をなさないのである．併し，之は多くは工作物その他の局所的問題を取扱ふ場合に極めて重要となるものであつて，河川なら河川の大きな範圍に亙つて——例へば背水の問題等を研究せんとする様な場合には之を無視して研究しても，充分なる近似に於て所期の目的を達成する事の出來る場合もある．

從つて主として河川に關する問題を取扱ふ場合には，本來は移動河床性の模型を作りて研究するのが原則ではあるけれども，或る問題に於て局所的な河床の洗掘・堆積がその全般に大した影響を及ぼし得ないと見做し得る場合には之を固定河床の模型に依つて研究する事も出來るのである．

水制の流身に向つての出し方を研究したり，此の水制を設けたる爲めに河床の如何なる場所に洗掘が起り如何なる場所に堆積が生ずるかといつた問題，又落差工乃至は床止工の形狀・配置に依りて如何に河床が變化するかと云ふ問題，又放水路等の取入口乃至は分流點の形を如何にすべきかといつた問題，又水門下流の洗掘に關する問題等は總て砂質，礫質物質の移動狀態に依つて著しい影響を受けるので，之等は是非とも移動河床模型に於て研究しなければならない．

之等は主として局所的な問題であるが，時には河川の大きな範圍に亙つて堆積洗掘が問題となる事もある．例へば航路維持の問題，人工放水路の問題等が之である．此の様な問題の場合には河床物質の移動は勿論の事であるが，浮游物質の移動も問題となる．

此の様に研究せんとする問題そのものについて種々特色があるのであるから，今研究せんとする問題には河床の洗掘又は堆積による凹凸が充分なる影響を及ぼすものであるかどうかを良く判斷した上で，模型を固定河床に作るべきか移動河床に作るべきかを決斷しなければならない．

尙ほ移動河床の模型實驗に就ては特に項を改めて述べる事とする．

[5] 模型を歪めること

吾々の行ふ模型實驗的研究の對象は自然が相手である丈に非常に大きなものが多い．それ故に之を比較的處理

のしよい大いさに縮少した模型を作る時は多くの場合その平面形に於て 1/2000 とか 1/3000 とかいふ程度の極めて分母の大きい縮尺によつて縮少しなければならない事が屢々である．然る時は後述の如き理由から或る程度垂直方向の縮尺を擴大し，平面と垂直とに於て相異つた縮尺を以て模型を作らなければならないことが起るのである．此の樣に模型を實物に對して全く幾何學的に相似に製作しない事を模型を歪めると稱してゐる．

その模型を歪める事の 1 つとして上述の如くに平面と垂直方向に於てのみ縮尺を變へるといふ方法があるが，その實例として本試驗所に於て行はれたる例及び外國に於て行はれたる例＊の幾つかを擧げると次の如くである．

模型實驗	水平	垂直	歪度	模型實驗	水平	垂直	歪度
1. 浦戸港々口潮流	1/ 300	1/ 40	7.5	9. Model of the Cape Cod Canal (estvary)	1/ 600	1/ 60	10.0
2. 神崎川分流	1/ 600	1/ 100	6.0				
3. 江戸川水門	1/ 100	1/ 40	2.5	10. Movable bed model of the Missippi River near Fort Chartres	1/1000	1/ 125	8.0
4. 安東港（鴨綠江）	1/1667	1/ 150	11.1				
5. 營口港（遼河）	1/3000	1/ 150	20				
6. 多摩川	1/1250	1/ 100	12.5	11. Fixed bed model of the Mississippi River between Helena Ark. and Donaldsoniville, La.	1/2000	1/ 100	20.0
7. 多摩川	1/ 800	1/ 200	4.0				
8. Model of Columbia River Estuary.	1/3600	1/ 128	28.1				

然らば如何なる理由に依つて模型は歪められねばならないのか．之を列擧すれば大體次の如きものが考へられる．

（1） 實際の流れに於ては多くの場合其の流れの狀態は渦流の範圍に屬する．然るに此の模型を作る際，場所の關係，模型流量の關係，又取扱ひに便なる關係上相當に大きな縮尺で縮少する時は，模型の水深は極めて小なるものとなり，その爲めに水の粘性の影響が効いて來て模型に於ける流れは層流となる恐れが充分にある．實物が渦流であるのに模型を層流に於て實驗をしたのでは意味をなさないので，模型に於てはどうしても流れが渦流となる丈の最小の水深は必要である．それには縮尺を變へて更に大型の模型を作ればよいのであるが，上述の如き種々なる事情の爲めに之が出來ない場合がある．此の樣な場合に平面形丈は元の儘に止めて，水深の方丈を深くするといふ事が必要となるのである．

（2） 此の樣に充分なる水深を有せしめない時には，模型に於ては表面張力の影響が大きく効いて來て流況を阻害する事があり，

（3） 同時に又，例へば河岸に接觸した部分に於ては水分子が主流の部分に於けるよりも大きく上下し，その量が深さに比して相當に大きな値にもなり得る．

（4） 水深の測定を行ふ場合，測定器の精度が一定してゐるので水深の小となる程誤差が大となる．

（5） 斷面内に於ける流速の分布を測定する場合，例へば Pitot 管の太さが相當にあるので——少くとも 1 mm はあるので——模型の水深の小なる程測定は不確定となる．極めて水深の小となりたる場合には，之に挿入されたる測定器の爲めに流れが妨害されて全然測定が不可能となる事もある．

（6） 水が流れる時には——自由表面の存在する場合に——其の表面が必ず小さな不規則な運動をするので，

＊ O'Brien and Hickox : Applied Fluid Mechanics より．

此の量が大きく効いて來る．

（7）以上は主として水深を或程度以上に大としなければ，流れそのもの又測定に對して誤差が大となる爲に，模型を歪めて充分なる水深を得せしめようといふのであるが，其の外移動河床性の模型に於て河床の物質を移動せしめるのに勾配を急にして充分なる流速を出さしめる爲に模型を歪める事を必要とする事もある．

移動河床の模型に於ては，模型を縮少して行くと共に砂礫をも縮少して行けばよいのであるが，余り縮少し過ては却つて砂や礫が河床に於て移動する如き性質を具備しない樣になる．之では移動河床の實驗にはならないから，模型河床物質があくまでも砂や礫としての性質を備へてゐる如き範圍内に砂・礫の縮少を止めなければならない．從つて河床の移動物質の縮少には自ら限りがあるのである．從つて之を動かすのに或程度以上の水勢は必要であり，從つて模型を歪めて勾配を大となし相當の流速を出さしめる必要が起るのである．

此の樣にして上述の如き種々なる理由より模型を歪める必要が起るのであるが，然らば模型の歪め方には如何なる方法があるかといへば O'Brien と Hickox もその著書 * に於て述べてゐる如く次の如きものが考へられる．

（1）模型を移動河床とする爲めに模型用砂及び粗度を變へる．

（2）模型の全體又は 1 部を傾けて勾配を變へる．

（3）流量とか時間の如き加減の出來る水理學的量を歪める．

（4）水平と垂直とに於て模型縮尺を變へる．

（5）縱方向と横方向と垂直方向とに於て模型縮尺を異にする．

等である．此の中（4）が一番多く用ひられる．

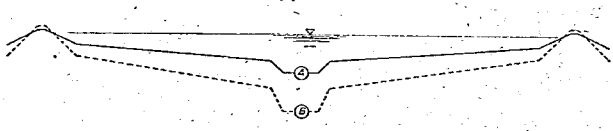
上述の如くに場合によつては模型を歪めなければ實物とは全く掛け離れたものとなる恐れがあるのであるが，果して此の樣にして歪めたものが實物を再現し得るものなのであらうか．誰しもが此の樣な疑問を懷く事であらうと思ふ．私は之に就て特に一番多く用ひられる（4）に就ては次の樣に考へる．即ち，

（1）流體は等方性のものであるから歪めた模型に於てはその歪めた通りの形の水路に特有な流れ方をするもので，決して歪めに應じた不均一的な流れ方をして異れるものではない．故に模型を歪めるといふ事は流體運動の相似性から云つて嚴密な物理的意義を全然失つたものであると私は思ふ．

（2）此の事から直ちに推測される如くに，例へば水平と垂直とに於て模型縮尺を變へた場合には斷面の兩邊の比が異つて來るから流速分布の狀態が全く異り，最大速度の位置も變つて來る．

（3）從つて此の樣に歪めた模型に於ては，此の歪めた模型を全く幾何學的に相似に引伸した實物，即ち歪んだ實物の現象を取扱つてゐる事になる．例へば圖—1 の A 斷面の如き河川の研究をするのに，之を B 斷面の如き實河川に置代へて實驗してゐる事に外ならないのである．之に依つて，平面的に見た流況の如きは模型の平面形さへ實物に相似であれば大した誤差は生じないものと思はれるが，上に述べた通りに斷面内の流速分布狀態は余程變つて來るに違ひない．而して平面的流況でさへも，模型を水平と垂直とに於て歪めたる場合には——垂直縮尺の分

圖 — 1



* O'Brien and Hikox : Applied Fluid Mechanico.

母を水平縮尺のそれより小にしたる場合には——模型勾配は實物の勾配よりも急となり，斷面も大となるので從つて流速が大となり流水のもつ運動の勢力は丁度歪めた度合丈大となり＊平面形に於ける水のあたり方が實物と模型とに於て必ず相異が出來て來る筈である．故に此の事から云つても出來得る限りに於て模型は歪めない方が良い．

もしどうしても模型を歪めて作らなければならない場合には，實河川を一度頭の中で歪めた實河川に置代へてみて，之等兩河川水の流動現象に大なる差異のない程度の歪んだ實河川を考へ，之を水平，垂直，同一縮尺に依りて全く幾何學的に縮少して模型とすべきである．

要するに問題は，實際の河川を，如何なる程度に歪んだ實河川によつて充分なる近似を以て代用し得るやといふ事に決着する．

（4）　上述の樣に模型を歪める事に依りて流れのもつ運動の勢力の割合が異つて來る．

實物に於ける諸量に suffix 1. をつけ，模型に於ける夫等に相當せる諸量に suffix 2. を附け，運動の勢力を K, 質量を M, 長さを L, 幅を B, 深さを H, 徑深を R, 勾配を I, 粗度係數を n を以て表はす．

而して之等の諸量の實物と模型とに於ける比を次の如くに置く．

$$k=\frac{K_1}{K_2},\quad m=\frac{M_1}{M_2},\quad l=\frac{L_1}{L_2}=\frac{B_1}{B_2},\quad h=\frac{H_1}{H_2},\quad r=\frac{R_1}{R_2},\quad i=\frac{I_1}{I_2},\quad n'=\frac{n_1}{n_2}.$$

然る時，運動の勢力の比 K' は如何に表はされるかを調べて見るに，流速の式として Manning 公式を使用すれば，

$$K=\frac{Mv^2}{2}=\frac{M}{2}\cdot\frac{1}{n^2}R^{\frac{4}{3}}I$$

であるから

$$k=m\cdot n'^2\cdot r^{\frac{4}{3}}\cdot i$$

となる．今模型に於ても水を用ひるものとすれば $m=1$. 又斷面形が相當に細長い場合には $r=h$ と見做してよい．而して $i=\frac{h}{l}$ となし得るから結局 k は

$$k=\frac{l^{\frac{4}{3}}}{n'^2}\cdot\frac{1}{d^{\frac{7}{3}}}\qquad\cdots\cdots(10)$$

但し d=歪度$=\frac{l}{h}$

となる．即ち之に依りて模型に於ける運動の勢力は歪度の 7/3 乘に比例して增加する事が解る（圖—2）．

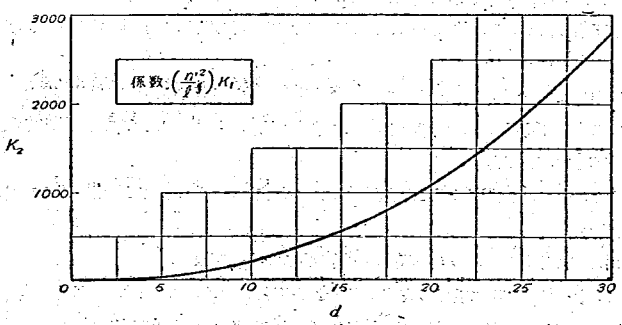
從つて，例へば河川が海に注いでゐる場合海には渦が出來るが，模型に於ては歪めた丈靜止せる海に注ぎ込む河川よりの動運の勢力が增加するのであるから，海に生ずる渦の中心の位置，その大さ，形狀，並びに强さは實際とは異つたものとなるであらう．

此の樣な意味からも模型を歪める事には賛成出來ない．殊に運動の勢力の歪み方は模型歪度の 7/3 乘に比例して增加するから此の點余程の注意を要する

（5）　河床の洗掘又は堆積を實驗しようとする時は前にも述べたる通り移動河床の模型とするを要し，之に用ひた砂を充分に動かす爲には模型の縮尺を歪める事が考へられた．

＊ (4) を參照．

図—2



之は一應は頷ける事ではあるが，良く考へて見ると此處にも不合理がある．

元來砂には砂特有の水中の安息角が存在するのであつて，之は模型を歪める，歪めないに關係せず常に一定の筈である．

從つて模型を歪めるも例へば河床の洗掘の形狀は歪められず，その歪められた模型の形に特有の掘れ方をするものであつて決して歪められざる實物に對する掘れ方を現はすものではなくなるのである．

此の點から云つても歪める事には賛成出來ない．併し場合に依つては模型を歪めなければどうしても河床を移動せしめる事が出來ない事もあり得るが，此の樣な場合には前述の如き運動の勢力の歪度の充分に小さいと思はれる範圍内で又渦の位置の余り變らない程度の歪度の範圍内で模型を歪めるべきである．

然し乍ら，本來の物理的意味の上からも模型を歪める事は不合理なのであるから矢張模型は歪めない事を原則とし，之に依つて生ずる流れに依つて充分に動き得る小さな模型用砂を使用すべきである．此の樣にして余りにも模型用砂の小となり過ぎる場合には，模型の方を大きくして實驗すべきである．

頼れるかどうか分らないが，費用がかゝるから小規模な模型でまあ試みて見ようといふ實驗を百回繰返すよりも，どうしても此の現象が如何になるかを知りたいとの決意が强固であるならば斷じて始めから大型のもので實驗すべきものと考へる．

（6）最後に一言したきは，模型を歪めるに當つては實物水路の勾配と模型の粗度並びに流れの抵抗に留意すべき事である．

模型に於て水平縮尺を垂直縮尺よりも小とする時は模型の勾配は必ず急となる．そこで模型そのものの粗度並びに流れの抗抵を充分に大となす事の出來ない樣な場合には——此の樣な場合が多いのであるが——模型の流れは射流となる恐れがある．從つて模型の歪度は流れが射流とならない樣な範圍内にて採るべきであるが，實物の勾配が急なる程歪めた模型は射流となり勝ちなる事に注意しなければならない．之に就ては尙ほ後章に於て述べる事とする．

[6] 模型實驗の特質

上述の如くに模型實驗には種々なる困難が伴ふものではあるが，之を打開して行く時は大體に於て次の如き特質利點が考へられよう．

（1）數學的解の得られないものを實際的に解き得ること．

運動の方程式が極めて複雜にして解析的取扱ひの困難なる又は不可能なる問題も模型によりて其の樣な實際の運動を行はしめ之を觀測又は測定する事に依りて解を得る事が出來る．實際の問題に於ては一般に複雜なるものが多いので，從つた數學的式の形に於ては到底出し得ぬものが多い．然るに模型に於ては斯るものの影響迄も見

る事が出來る.

（2） 模型に於ては如何に複雜な境界條件でも比較的容易に作り得る.

問題に依つては運動の一般式は立ち得るが境界條件が甚だしく面倒なる爲めに之を解く事が出來ないものが多い. 此の樣な場合模型に於ては形を作る事は比較的容易で自由であるから, 容易に境界條件を滿足させることが出來る.

（3） 數多き種々なる場合を容易に研究し得る.

吾々が實驗に直面する問題の多くは, 計畫を色々と變へて見て之が最も合理的經濟的なるものを見出さうとするものであるから, 此の樣な場合には容易に, 短時日に種々なる場合に就て試みる事が出來, 而も 1 つの實驗に依つて得られた結果から次々と缺點を修正して最も合理的な計畫へと達する事が出來る. 而も工法上の順序まで研究する事が出來る.

（4） 縮尺を或る程度に於て自由に撰擇する事が出來る.

實物は莫大に大きなものであつても, 後章に於て述べる如き限界內に於て——卽ちその模型が力學的相似性を具備し得る範圍內に於て自由に縮小した模型を作る事が出來る.

（5） 研究の時間が少くて濟み, 無駄がない.

若し模型に依らずに之を實際的に研究せんとする時は必ず失敗も伴ふものであるから從つて無駄も出來, 其の結果の出るのにも相當の時間がかゝる. 併し之を模型に依りて研究すれば種々考へる場合を自由に試みる事が出來實際上の損害もなく, 時間も極めて少くて濟む.

（6） 從つて研究の費用も僅少で濟み, 多くの場合工事費の無駄を省く事が出來る.

（7） 又研究の都合流體密度を變へる必要のある場合には, 之を變へて行ふ事も可能である.

（8） 流れによる洗掘及び堆積沈澱を研究する事が出來る.

從つて當を得たる模型實驗の研究によりては莫大な利益を得るものであり, 其れ丈に模型實驗の使命も重且つ大と云はねばならない. 唯, 其所に行ひたる模型實驗に依りて得られたる結果がどの程度の精度を有するものであるかをよく認識しなければならない. 一般に計算せられた結果を以て最も正しきものと過信し勝ちな者もないではないが, 之とて結局はその計算の基礎となりたる假定と, 之に基く精度の問題である. 其の點から云へば模型實驗による研究も同じことである.

中には, 模型等で水を流して見たつて何が出るか, 全く反對の事も出るかも知れないではないかと頭から否定してかゝる人もあれば, 又中には, 何でも模型に頼らなければならない, そして模型實驗において得られたる結果こそ最も正しきものなりと模型實驗を過信してゐる者もある樣であるが, 之は孰れも模型實驗の眞意を理解しないが故の誤解である. 物には全て精度といふものがあるのであるから之をよく確かめた上で判斷しなければならない.

II. 相　似　律

模型實驗とは運動の方程式を模型に依りて實用的に解くものなりといふ見解の下に第 I 章第〔3〕節に於て分類した運動の各々に就て, 模型實驗に依りて得られたる方程式の解は實物の解に對して如何なる關係に在るかを求めて見よう. 相似律とは此の樣にして得られたる實物と模型との間の關係に外ならないのである.

〔1〕 重力の影響を考へる場合

1. 慣性力と粘性力とを共に考へ得る場合.

實物の流體の運動を嚴密な意味に於て表示する上からも當然の事ではあるが，模型實驗を行ふ場合模型の水理學的量は實物とは異つて來る爲め嚴密な意味からは實物と模型とに於て運動の方程式は異つて來る筈である．從つて夫々の運動の特徴を捉へて簡單化した方程式に依らずに，先づ最も一般的な流體の運動の方程式から出發して考へて見よう．

實物には suffix 1 を附け，模型には suffix 2 を附けて表はし，記號を

u_1＝實物の流體の速度の x 成分

v_1＝〃　〃　〃　y　〃

w_1＝〃　〃　〃　z　〃

t_1＝〃　時間

p_1＝〃　壓力

X_1, Y_1, Z_1＝實物に於て作用する質力の各 x,y,z 成分

g_1＝實物の重力の加速度

ρ_1＝〃　流體密度

μ_1＝〃　流體の粘性係數

ν_1＝〃　〃　動粘性係數

とす．

而して質力として重力のみを考へ流體を非壓縮性と考へれば運動の一般式は，(2) を x,y,z の 3 成分に分けて次の如くになる．

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial u_1}{\partial t_1}+u_1\frac{\partial u_1}{\partial x_1}+v_1\frac{\partial u_1}{\partial y_1}+w_1\frac{\partial v_1}{\partial z_1}=-\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial x_1}+\nu_1\Delta u_1\\
&\frac{\partial v_1}{\partial t_1}+u_1\frac{\partial v_1}{\partial x_1}+v_1\frac{\partial v_1}{\partial y_1}+w_1\frac{\partial v_1}{\partial z_1}=-\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial y_1}+\nu_1\Delta v_1\\
&\frac{\partial w_1}{\partial t_1}+u_1\frac{\partial w_1}{\partial x_1}+v_1\frac{\partial w_1}{\partial y_1}+w_1\frac{\partial w_1}{\partial z_1}=g_1-\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial z_1}+\nu_1\Delta w_1
\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(11)$$

而して模型に於ても同樣に

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial u_2}{\partial t_2}+u_2\frac{\partial u_2}{\partial x_2}+v_2\frac{\partial u_2}{\partial y_2}+w_2\frac{\partial u_2}{\partial z_2}=-\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial x_2}+\nu_2\Delta u_2\\
&\frac{\partial v_2}{\partial t_2}+u_2\frac{\partial v_2}{\partial x_2}+v_2\frac{\partial v_2}{\partial y_2}+w_2\frac{\partial v_2}{\partial z_2}=-\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial y_2}+\nu_2\Delta v_2\\
&\frac{\partial w_2}{\partial t_2}+u_2\frac{\partial w_2}{\partial x_2}+v_2\frac{\partial w_2}{\partial y_2}+w_2\frac{\partial w_2}{\partial z_2}=g_2-\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial z_2}+\nu_2\Delta w_2
\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(12)$$

として表はされる．

そこで模型は水平，垂直共に同一に縮少するものとし諸量の縮尺を次の如くおく．

$$\left.\begin{aligned}
&l=\frac{l_1}{l_2}=\frac{x_1}{x_2}=\frac{y_1}{y_2}=\frac{z_1}{z_2},\qquad t=\frac{t_1}{t_2},\\
&v=\frac{u_1}{u_2}=\frac{v_1}{v_2}=\frac{w_1}{w_2},\qquad p=\frac{p_1}{p_2},\\
&\rho=\frac{\rho_1}{\rho_2},\qquad \mu=\frac{\mu_1}{\mu_2},\qquad g=\frac{g_1}{g_2},
\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(13)$$

從つて，

$$\nu=\frac{\nu_1}{\nu_2}=\frac{\mu}{\rho}$$

然る場合に實物を縮少して作りたる模型に於て (12) が成立する爲めには如何なる條件が必要であるかを求めよう．

(13) の關係を (11) に代入すれば $\frac{\partial u_1}{\partial t_1}=\frac{v}{t}\frac{\partial u_2}{\partial t_2}$; $u_1\frac{\partial u_1}{\partial x_1}=\frac{v^2}{l}u_2\frac{\partial u_2}{\partial x_2}$, ……;

$\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial x_1}=\frac{p}{\rho l}\cdot\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial x_2}$,……; $g=\frac{g_1}{g_2}$; $\nu_1\Delta u_1=\frac{\mu v}{\rho l^2}\nu_2\Delta u_2$, ……, となるから

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{v}{t}\left(\frac{\partial u_2}{\partial t_2}\right)+\frac{v^2}{l}\left(u_2\frac{\partial u_2}{\partial x_2}+v_2\frac{\partial u_2}{\partial y_2}+w_2\frac{\partial u_2}{\partial z_2}\right)=-\frac{p}{\rho l}\left(\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial x_2}\right)+\frac{\mu v}{\rho l^2}\left(\nu_2\Delta u_2\right)\\
&\frac{v}{t}\left(\frac{\partial v_2}{\partial t_2}\right)+\frac{v^2}{l}\left(u_2\frac{\partial v_2}{\partial x_2}+v_2\frac{\partial v_2}{\partial y_2}+w_2\frac{\partial v_2}{\partial z_2}\right)=-\frac{p}{\rho l}\left(\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial y_2}\right)+\frac{\mu v}{\rho l^2}\left(\nu_2\Delta v_2\right)\\
&\frac{v}{t}\left(\frac{\partial w_2}{\partial t_2}\right)+\frac{v^2}{l}\left(u_2\frac{\partial w_2}{\partial x_2}+v_2\frac{\partial w_2}{\partial y_2}+w_2\frac{\partial w_2}{\partial z_2}\right)=g\,g_2-\frac{p}{\rho l}\left(\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial z_2}\right)+\frac{\mu v}{\rho l^2}\left(\nu_2\Delta w_2\right)
\end{aligned}\right\}\quad(14)$$

之が (12) に匹敵する爲めには

$$\frac{v}{t}=\frac{v^2}{l}=g.=\frac{p}{\rho l}=\frac{\nu v}{l^2}\quad\cdots\cdots(15)$$

なるを必要とする．更に之を書き直せば

$$\frac{\rho v^2}{p}=\frac{vl}{\nu}=\frac{v^2}{gl}=1\quad\cdots\cdots(16)$$

となる．(16) に於て $\frac{vl}{\nu}$ 及び $\frac{v^2}{gl}$ は夫々實物と模型とに於ける Reynolds' number の比及び Froud' s number の比を表はすものであり，$\frac{\rho v^2}{p}$ は慣性力と壓力との比の，實物と模型とに於ける比を表はしてゐる，

故に最も一般的に實物と模型とを力學的に相似ならしめる爲めには兩者に於ける Reynolds 數と Froud 數の比が同一でなければならない事が解る．換言すれば最も一般的に力學的に相似に模型實驗を行ふには，模型の Reynolds 數と Froud 數とが共に同時に實物の夫等に等しい樣に模型を作りそして之を働かしめる事を要する．

而して此の場合の換算縮尺は，(16) 中には

$$\rho,\ v,\ p,\ l,\ \nu,\ g$$

なる 6 箇の量を含み，而して方程式の數は 3 箇であるから之等 6 箇の量中 3 箇を既知とする必要がある．之等の中先づ g は何か特別な裝置を以て * 變へない以上は 1 に等しいから之を含んで既知量を 3 つとる事になる．他の 2 つとして l, μ を撰べば他の縮尺は次の如くに定まる．

$$\left.\begin{aligned}
v&=l^{\frac{1}{2}}\\
p&=\mu l^{-\frac{1}{2}}\\
\rho&=\mu l^{-\frac{3}{2}}\\
t&=l^{\frac{1}{2}}
\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(17)$$

卽ち之は，模型を幾何學的に相似に $\frac{1}{l}$ に縮小して作り，之に使用する流體の粘性を μ とする時は，その模型用流體の密度を $\rho=\mu l^{-\frac{3}{2}}$ に依つて加減して作り得れば實物と模型とに於ける流速，壓力，時間の關係は (17) に依つて與へられる事を示す．

* 例へば磁力等を以て．

又 (16) を g, ρ, μ を既知量として解く時は他の諸量は次の如くになる,

$$\left.\begin{aligned} l&=\nu^{\frac{2}{3}}\\ v&=\nu^{\frac{1}{3}}\\ p&=\rho^{\frac{1}{3}}\mu^{\frac{2}{3}}\\ t&=\nu^{\frac{1}{3}}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(18)$$

即ち，模型用流體としてある密度，ある粘性を有する流體を使用する事に定めれば，模型の縮尺は自ら定まりて $l=\nu^{\frac{2}{3}}$ とすべく，此の様な模型を作りたる場合には他の縮尺 v, p, t, は (18) に依りて換算する事が出來る.

故に，始めから模型の縮尺を定めてかゝる時は粘性を與へて密度が思ふ様なる，又は密度を與へて粘性が思ふ様なる流體を作り出す事は至難の事であるから最も一般的に力學的に相似なる實驗は期し難い.

併し例へば空氣の如くに比較的容易に密度を變へ得る流體の場合には，――此の中に浸された物體の運動の如き場合には――密閉した廻流流路を作り之の內部の壓力を高めて流體の密度を大にして實驗する事も考へられる.

2. 粘性力を無視し得る場合

此の場合は比較的速い運動である．從つて運動の方程式は前揭の (3) であつて流體を完全流體又は理想流體として考へる場合である．即ち實物に於ても模型に於ても流體は完全流體として考へて差支へない様な運動の範圍にある事が必要である.

(3) を x, y, z の 3 成分に分けて書けば，實物に於ては

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial u_1}{\partial t_1}+u_1\frac{\partial u_1}{\partial x_1}+v_1\frac{\partial u_1}{\partial y_1}+w_1\frac{\partial u_1}{\partial z_1}=-\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial x_1}\\ &\frac{\partial v_1}{\partial t_1}+u_1\frac{\partial v_1}{\partial x_1}+v_1\frac{\partial v_1}{\partial y_1}+w_1\frac{\partial v_1}{\partial z_1}=-\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial y_1}\\ &\frac{\partial w_1}{\partial t_1}+u_1\frac{\partial w_1}{\partial x_1}+v_1\frac{\partial w_1}{\partial y_1}+w_1\frac{\partial w_1}{\partial z_1}=g_1-\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial z_1}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(19)$$

又模型に於ては

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial u_2}{\partial t_2}+u_2\frac{\partial u_2}{\partial x_2}+v_2\frac{\partial u_2}{\partial y_2}+w_2\frac{\partial u_2}{\partial z_2}=-\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial x_2}\\ &\frac{\partial v_2}{\partial t_2}+u_2\frac{\partial v_2}{\partial x_2}+v_2\frac{\partial v_2}{\partial y_2}+w_2\frac{\partial v_2}{\partial z_2}=-\frac{\partial 1}{\rho_2}\frac{p_2}{\partial y_2}\\ &\frac{\partial w_2}{\partial t_2}+u_2\frac{\partial w_2}{\partial x_2}+v_2\frac{\partial w_2}{\partial y_2}+w_2\frac{\partial w_2}{\partial x_2}=g_2-\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial z_2}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(20)$$

であるから (19) に (13) を代入し之が (20) となる條件を求むれば,

$$\frac{v}{t}=\frac{v^2}{l}=g=\frac{p}{\rho l}\quad\cdots\cdots(21)$$

然るに $v=\frac{l}{t}$ であるから之を書き直せば

$$\frac{v^2}{gl}=\frac{p}{\rho gl}=1\quad\cdots\cdots(22)$$

を得る.

玆に於て $g=1$ とし v, p を未知數とすれば之等は ρ, l に依つて次の如くに表はされる.

$$\left.\begin{aligned} v&=l^{\frac{1}{2}}\\ p&=\rho l\\ t&=l^{\frac{1}{2}}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(23)$$

實物が水である場合に模型に於ても水を使用せる場合には $\rho=1$ にして，從つて p は

$$p=l$$

となるものであるが，模型用流體として粘性は充分に小さいが密度の大なるものを使用せる場合には $\rho=\rho l$ に依つて計算しなければならない．*

而して $\frac{v^2}{\sqrt{gl}}$ は Froud 數と呼ばれるものであるから (22) は Froud 數が一定である様に——即ち實物と模型との Froud 數が等しい様にして實驗をすべきである事が分る．

波の運動は通常粘性變形を考へないし，又餘り變形せざる範圍に於て研究するならば (23) に依つて換算する事が出來る．

又溢流の問題を取扱ふにも流速が充分に大であるから粘性の項を省略するのが普通であり，堤體との摩擦の影響も通常無視して

$$\left.\begin{aligned} 0&=\cos\theta+\frac{1}{\gamma}\frac{dp}{dz}+\frac{v}{g}\frac{dv}{dz}\\ \frac{dp}{dz}&=-\gamma\cos\theta+\frac{\gamma}{g}\frac{v^2}{\rho_z}\end{aligned}\right\}$$

の如き方程式 ** に依つて解く．故に之に關する實驗も (23) に依つて換算して差支へない．

3. 慣性力を無視し得る場合

流體運動の遲い場合には粘性の影響が大となるから粘性項を考慮し，慣性項を無視して考へる．此の場合の運動の方程式は (4) に依つて表はされ，之を x,y,z の 3 成分に分けて書き表せば先づ實物に於ては，

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial t_1}&=-\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial x_1}+\nu_1\Delta u_1\\ \frac{\partial v_1}{\partial t_1}&=-\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial y_1}+\nu_1\Delta v_1\\ \frac{\partial w_1}{\partial t_1}&=g_1-\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial z_1}+\nu_1\Delta w_1\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(24)$$

又模型に於ては

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial u_2}{\partial t_2}&=-\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial x_2}+\nu_2\Delta u_2\\ \frac{\partial v_2}{\partial t_2}&=-\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial y_2}+\nu_2\Delta v_2\\ \frac{\partial w_2}{\partial t_2}&=g_2-\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial z_2}+\nu_2\Delta w_2\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(25)$$

となる．

(24) に (13) を代入し之が (25) に匹敵する條件を求めば，

$$\frac{v}{t}=g=\frac{p}{\rho l}=\frac{\nu v}{l^2}\quad\cdots\cdots(26)$$

となるが，t にて微分した項は極めて小さいので之を無視するか，又は定常的な運動を考ふれば (26) は

$$g=\frac{p}{\rho l}=\frac{\nu v}{l^2}$$

となる．更に $g=1$ として之を書表せば

$$\frac{vl}{\nu}=\frac{\rho v^2}{p}=\frac{v^2}{l}\quad\cdots\cdots(27)$$

となる．之より ν, l を與へられたるものとして v, p を求めば，

---

* 例へば海水を用ひて溢流又は波壓の模型實驗を行ひたる場合等が之に相當する．水の粘性は 15°C にて 0.0114 (C.G.S.)，鹽分 35 ‰ の海水の粘性は 15°C にて 0.0123 (C.G.S.) である．

** Charles Jaeger : " Erweiterung der Boussinesq'schen Theorie des Abflusses in offenen Gerinnen. ——Abflüsse über abgerundete Wehre. " Wasserkr. u.— wirtsch. H. 4. 1940. S. 83~86.

$$\left.\begin{aligned} v&=\frac{l^2}{\nu}\\ p&=\rho l\\ t&=\nu l^{-1}\end{aligned}\right\} \quad\cdots\cdots(28)$$

を得る.

模型に於ても實物と同一流體を用ひる場合は $\rho=1$, $\mu=1$, 從つて $\nu=1$ であるから

$$\left.\begin{aligned} v&=l^2\\ p&=l\\ t&=l^{-1}\end{aligned}\right\} \quad\cdots\cdots(29)$$

に依つて換算すればよい事となる.

例へば土堰堤の浸透の問題等は之に屬するもので, 此の樣にして實驗する時は土堰堤を構成する粒子の大さ並びに堰堤の形を縮少したと同一の縮尺で縮少すべきである.

然らずして, 模型に於ても實物に使用すると同一の土砂を用ひ, 又はその樣にせずとも少くとも模型縮尺と異りたる縮尺の土砂を用ひる場合には後揭 [3] に於けるが如くにして換算しなければならない.

[2] 重力の影響を考へざる場合

1. 慣性力と粘性力とを共に考へ得る場合

運動が重力には殆ど無關係と見られる場合の最も一般なる運動の方程式は (6) に依りて與へられ, 之を 3 成分に分けて書き表はせば, 先づ實物に於ては

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial u_1}{\partial t_1}+u_1\frac{\partial u_1}{\partial x_1}+v_1\frac{\partial u_1}{\partial y_1}+w_1\frac{\partial u_1}{\partial z_1}=-\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial x_1}+\nu_1\Delta u_1\\ &\frac{\partial v_1}{\partial t_1}+u_1\frac{\partial v_1}{\partial x_1}+v_1\frac{\partial v_1}{\partial y_1}+w_1\frac{\partial v_1}{\partial z_1}=-\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial y_1}+\nu_1\Delta v_1\\ &\frac{\partial w_1}{\partial t_1}+u_1\frac{\partial w_1}{\partial x_1}+v_1\frac{\partial w_1}{\partial y_1}+w_1\frac{\partial w_1}{\partial z_1}=-\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial z_1}+\nu_1\Delta w_1\end{aligned}\right\} \quad\cdots\cdots(30)$$

而して模型に於ては

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial u_2}{\partial t_2}+u_2\frac{\partial u_2}{\partial x_2}+v_2\frac{\partial u_2}{\partial y_2}+w_2\frac{\partial u_2}{\partial z_2}=-\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial x_2}+\nu_2\Delta u_2\\ &\frac{\partial v_2}{\partial t_2}+u_2\frac{\partial v_2}{\partial x_2}+v_2\frac{\partial v_2}{\partial y_2}+w_2\frac{\partial v_2}{\partial z_2}=-\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial y_2}+\nu_2\Delta v_2\\ &\frac{\partial w_2}{\partial t_2}+u_2\frac{\partial w_2}{\partial x_2}+v_2\frac{\partial w_2}{\partial y_2}+w_2\frac{\partial w_2}{\partial z_2}=-\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial z_2}+\nu_2\Delta w_2\end{aligned}\right\} \quad\cdots\cdots(31)$$

となる.

(30) に (13) を代入すれば前同樣にして

$$\frac{v}{t}=\frac{v^2}{l}=\frac{p}{\rho l}=\frac{\nu v}{l^2} \quad\cdots\cdots(32)$$

なる條件を得る. 之を書き直せば

$$\frac{vl}{\nu}=\frac{\rho v^2}{p}=1 \quad\cdots\cdots(33)$$

となり, **重力に無關係なる運動に對しては實物と模型とに於て Reynolds 數が同一である樣にして實驗すべき事を示してゐる.** 之に於て l, ρ, ν を與へられたものとして解けば v, p, t は次の如くになる. 即ち

$$\left.\begin{aligned} v&=\nu l^{-1}\\ p&=\frac{\mu^2}{\rho}l^{-2}\\ t&=\frac{l^2}{\nu}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(34)$$

而して模型に實物と同一流體を用ひる場合には勿論 $\mu=\rho=\nu=1$ としなければならない.

之は例へば，流體中に浸された物體の運動を取扱ふ場合の如きもので，水中の球の運動及び管の流れ等は之である.

2. 粘性力を無視し得る場合

運動が相當に速い場合に對しては粘性力を無視して差支へないから運動の方程式は (7) に依つて表はされる. 之を x, y, z の各成分に分けて書き表せば，

實物に於ては

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial u_1}{\partial t_1}+u_1\frac{\partial u_1}{\partial x_1}+v_1\frac{\partial u_1}{\partial y_1}+w_1\frac{\partial u_1}{\partial z}=-\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial x_1}\\ &\frac{\partial v_1}{\partial t_1}+u_1\frac{\partial v_1}{\partial x_1}+v_1\frac{\partial v_1}{\partial y_1}+w_1\frac{\partial v_1}{\partial z_1}=-\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial y_1}\\ &\frac{\partial w_1}{\partial t_1}+u_1\frac{\partial w_1}{\partial x_1}+v_1\frac{\partial w_1}{\partial y_1}+w_1\frac{\partial w_1}{\partial z_1}=-\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial z_1}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(35)$$

又模型に於ては

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial u_2}{\partial t_2}+u_2\frac{\partial u_2}{\partial x_2}+v_2\frac{\partial u_2}{\partial y_2}+w_2\frac{\partial u_2}{\partial z_2}=-\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial x_2}\\ &\frac{\partial v_2}{\partial t_2}+u_2\frac{\partial v_2}{\partial x_2}+v_2\frac{\partial v_2}{\partial y_2}+w_2\frac{\partial v_2}{\partial z_2}=-\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial y_2}\\ &\frac{\partial w_2}{\partial t_2}+u_2\frac{\partial w_2}{\partial x_2}+v_2\frac{\partial w_2}{\partial y_2}+w_2\frac{\partial w_2}{\partial z_2}=-\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial z_2}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(36)$$

である.

(35) に (13) を代入して (36) の成立する條件を求めば

$$\frac{v}{t}=\frac{v^2}{l}=\frac{p}{\rho l}\quad\cdots\cdots(37)$$

を得る. そこで $v=\dfrac{l}{t}$ として整理すれば

$$v^2=\frac{p}{\rho}\quad\cdots\cdots(38)$$

となる. 故に此の様な運動にては流速の縮尺は壓力の縮尺にのみ關係する事となる. 併し之は多くの場合近似的たるを免れない. 例へば比較的速い管の流れ等は之に屬して考へられるが，管の流れには本來相當の抵抗があり，此の抵抗は大體に於て流速の自乘に比例して增加するものであるから流速の小なる場合に對しては影響は少いが流速の大となるに及び大なる影響をもつて來るものであるから相當に速い管の流れに對しては上揭の如き (38) 式は不適當である.

3. 慣性力を無視し得る場合

更に運動の遲い場合には慣性の項を省略して差支へないから運動の方程式は (8) に依つて表はされ，之を 3 成分に分けて書く時は，實物に於ては

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial t_1}&=-\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial x_1}+\nu_1\Delta u_1\\ \frac{\partial v_1}{\partial t_1}&=-\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial y_1}+\nu_1\Delta v_1\\ \frac{\partial w_1}{\partial t_1}&=-\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial z_1}+\nu_1\Delta w_1\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(39)$$

又模型に於ては

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial u_2}{\partial t_2}&=-\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial x_2}+\nu_2\Delta u_2\\ \frac{\partial v_2}{\partial t_2}&=-\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial y_2}+\nu_2\Delta v_2\\ \frac{\partial w_2}{\partial t_2}&=-\frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial z_2}+\nu_2\Delta w_2\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(40)$$

である.

前同樣 (39) に (13) を適用して (40) が成立する條件を求めば

$$\frac{v}{l}=\frac{p}{\rho l}=\frac{\nu v}{l^2}\quad\cdots\cdots(41)$$

更に書き直せば (33) と同じものとなり

$$\frac{vl}{\nu}=\frac{\rho v^2}{p}=1\quad\cdots\cdots(42)$$

故に v, p, t は (34) と同樣に

$$\left.\begin{aligned}v&=\nu l^{-1}\\ p&=\frac{\mu^2}{\rho}l^{-2}\\ t&=\frac{l^2}{\nu}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(43)$$

となる.

定常運動の場合には (42) は

$$v=\frac{\rho l}{\mu}\quad\cdots\cdots(44)$$

となる.

例へば比較的遲い管の流れの實驗に於て兩端の壓力を或る一定比に縮尺して模型實驗を行ふ場合には之によつて換算する事になる.

而して [2] 3, の場合は所謂狹い意味に於ける粘性流體の運動を意味するものである.

[3] 抵抗に關する技巧

流體が流れる場合には外部抵抗並びに內部抵抗を受ける. 外部抵抗は境界面の粗度に依る抵抗で內部抵抗とは主として渦亂應力に基く抵抗である.

自由表面を有する流れ, 主として開水路の流れの如きは, 流質が重力の作用を受けてより低き位置につかふとする時上述の如き種類の抵抗を受けて, その爲めに自由水面に勾配が出來るのである.

從つて此の樣な流れは重力の影響と抵抗の影響とが同じ重さであると考へなければならない. 從つて此の樣な問題を模型に依りて實驗せんとする時は前節に述べて來た樣な [1] 2 又は 3 に於けるが如き相似論を以つてしては律する事が出來ない. 何となれば, [1] 2 は慣性の影響のみが大きい場合, [1] 3 は粘性の影響のみが大きい場合を取扱つてゐるからである.

併し流體の內部に於て渦亂の抵抗を考へずに極めて影響の小さい粘性の抵抗を考慮し, 又境界との間に生ずる粘性による大なる抵抗を考慮するならば [1] 1 を以て實驗を行ふ事が出來る筈である. 併し, 實物が水である場合に模型に於ても水を使用せんとし, 而も同じ重力の場に於て實驗せんとする時は非常な困難が伴ふ, 殆ど不可能と云つてよい困難が伴ふのであるから, 斯くの如き模型實驗に對しては適當な抵抗に依つて補正の爲し得る實驗法を考へねばならない. 之に就て考へてゐる 2, 3 の場合に就て論じよう.

1. 浸 透 水

[1] 3 に於て述べた樣にして實驗する事も可能ではあるが, 實際問題として模型には模型としての勝手な土砂

を使用するのが便利である．此の様にした場合には模型に於ては模型としての特有の抵抗であるから取りも直さず抵抗に對して技巧を加へた事になる．

例へば土堰堤とか井戸とか2次元として取扱へる場合が多いから2次元の問題に就て之を檢討して見れば次の如くである．

實物には Suffix 1 をつけ，模型には Suffix 2 をつけ，u_1, v_1, p_1, g_1, ρ_1, は總て [1] に於て定義せるものとし，k_1, k_2 を夫々實物の砂及び模型用の砂の透水度であるとせば Darcy に依りて唱へられてゐる如く浸透水の運動は次の如くに表はす事が出來る．即ち實物に於ては

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial\left(\frac{p_1}{\rho_1 g_1}+y_1\right)}{\partial x_1}&=-k_1 u_1\\ \frac{\partial\left(\frac{p_1}{\rho_1 g_1}+y_1\right)}{\partial y_1}&=-k_1 v_1\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(45)$$

又模型に於ては

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial\left(\frac{p_2}{\rho_2 g_2}+y_2\right)}{\partial x_2}&=-k_2 u_2\\ \frac{\partial\left(\frac{p_2}{\rho_2 g_2}+y_2\right)}{\partial y_2}&=-k_2 v_2\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(46)$$

に依つて表はされる．

今實物を $1/l$ に縮尺する事とし，水理學的諸量の縮尺は (13) に依りて定義されたるものとし，更に透水度に就ては

$$k=\frac{k_1}{k_2}\quad\cdots\cdots(47)$$

とする時，(45) が縮尺されて (46) が成立すべき條件を求めば

$$\frac{p}{\rho g l}=1=vk\quad\cdots\cdots(48)$$

を得る．

玆に於て $g=1$ とし l, ρ, k, なる縮尺を與へて實驗するものとせば流速と壓力の縮尺は次の如くに定まる．

$$\left.\begin{aligned}v&=k^{-1}\\ p&=\rho l\\ t&=kl\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(49)$$

k_1 又は k_2 は一般に空隙率從つて砂の粒子の大さと搗固め，流體の粘性の函數であるから k も空隙率，流體の粘性の函數となる．故に模型に於て粘性の異りたる流體を用ひる場合にはその粘性の影響は k_2 の中又は k の中に含まれる．故に模型用としての砂と流體を指定した場合には豫め k_2 の實驗値を求めて置く事が必要である．

又實物と同一流體を模型用として用ひる場合には云ふ迄もなく $\rho=1$ として換算すべく，實物と同一の砂を實物と同一の狀態で用ひて，即ち透水度が等しい様にして實驗する時は $k=1$ としなければならない．

2. 開水路の流れ

之は吾々の最も多く遭遇する問題ではあるが又最も困難なる問題である．

此の流れについての抵抗は前にも述べたる通りに2種類が考へられるが，此の各々が如何なる狀態で如何なる割合で影響して來るかは，未だ渦流の問題が解決されてゐないので此の2つを明らかに分けて相似論をたてる事

は今の所では極めて困難である.

従つて運動の方程式としては渦流抵抗の影響を實驗的に經深 R, 勾配 I の函數として加味したものから出發しなければならない.

即ち此の様な考へ方は, 開水路の流れそのものを一つの流管の如くに考へ, 此の大きな流管の全般に亘つて抵抗損失を考へるといふ方法でもある.

又開水路の實驗に於ては種々なる困難が生ずるので I [5] に於て述べた如くに模型を歪めて近似解を得る事が行はれる.

(1) **不等流** 周知の如く用水路の不等流は次式に依りて表はされる. 先づ實物に於ては

$$I_1=i_1-\frac{dH_1}{dl_1}=\frac{d}{dl_1}\left(\frac{v_1^2}{2g_1}\right)+\frac{v_1^2}{C_1R_1} \quad \cdots\cdots(50)$$

又模型に於ては

$$I_2=i_2-\frac{dH_2}{dl_2}=\frac{d}{dl_2}\left(\frac{v_2^2}{2g_2}\right)+\frac{v_2^2}{C_2^2R_2} \quad \cdots\cdots(51)$$

玆に I_1=實物の水面勾配

i_1= 〃 河床勾配

H_1= 〃 水深

l_1= 〃 水路の長さ

v_1= 〃 流速

g_1= 〃 重力の加速度

C_1= 〃 流速係數

R_1= 〃 水路の經深

而して諸量の縮尺は次の如くにおく.

$$i=\frac{I_1}{I_2}=\frac{i_1}{i_2},\quad h=\frac{H_1}{H_2},\quad l=\frac{l_1}{l_2},\quad v=\frac{v_1}{v_2},\quad g=\frac{g_1}{g_2},\quad c=\frac{C_1}{C_2},\quad r=\frac{R_1}{R_2},\quad i=\frac{h}{l} \quad \cdots\cdots(52)$$

(50) が (52) の如くに縮尺されて (51) が成立する爲めの條件を求めば

$$i=\frac{v^2}{gl}=\frac{v^2}{C^2r} \quad \cdots\cdots(53)$$

を得る.

A. 模型を歪めざる場合

模型縮尺を水平と垂直とに於て同一にとれば $h=l$ となり, 從つて $r=l$, $i=1$ となる. 又重力の影響を變へる事は困難であるから $g=1$ として流速, 時間, Chézy 係數の縮尺を求めば次の如くである.

$$\left.\begin{aligned} v&=l^{\frac{1}{2}}\\ t&=l^{\frac{1}{2}}\\ C&=1 \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(54)$$

即ち之は, $1/l$ の模型を作りたる場合, 模型に於ける流速係數が實物のそれに等しい様にして水を流せば流速は $v=l^{\frac{1}{2}}$ に依りて換算する事が出來る事を示す.

從つて此の實驗には抵抗の影響を加味した流速の法則が必要で, 而も此の法則は小なる水路より大なる水路に

至る相當に大きな範圍に於て良く成立するものでなければならない．Manning の流速の法則（又は Gaukler 公式，又は Strickler 公式）はLindquist も其の流速公式に關する調査報告書* に述べてゐる如く此の意味に於て適當なものと考へられるから，C として Manning 式の C を用ひる事にすれば模型の粗度は次の如くに定める事が出來る．

即ち Manning 式に於ては $C=\frac{R^{\frac{1}{6}}}{n}$（但し n≒Kutter の粗度係數）であるから

$$c=\frac{C_1}{C_2}=\left(\frac{R_1}{R_2}\right)^{\frac{1}{6}}\frac{n_2}{n_1}=l^{\frac{1}{6}}\frac{n_2}{n_1}=1$$

從つて

$$n=l^{\frac{1}{6}} \quad \cdots\cdots(55)$$

となる．但し

$$n=\frac{n_1}{n_2}$$

n_1＝實水路の Kutter の粗度係數．

n_2＝模型水路の Kutter の粗度係數．

即ち模型に於ては Kutter の粗度係數を實物の Kutter 粗度係數の $1/l^{\frac{1}{6}}$ に作る事を要する．之は Kutter の粗度係數の表によつて模型粗度を作つてもよいが，之は多くの場合困難であるから之を實驗的に定める事が考へられる．此の樣にして實驗的に模型粗度を作る事を檢照實驗と名付けよう．之は次の如くにして行へばよい．

先づ模型を $1/l$ に縮小して作り，之に流量，水位共に記錄のある流れを模型流量 $v=l^{\frac{1}{2}}$ に依つて換算して流し，此の場合模型の水位が各所に於て實際の水位に相當した高さにまで達する樣に模型の粗度又は抵抗を加減するのである．

併し此の樣にして行ふ實驗には一つの缺陷がある．それは，檢照實驗に依つて修正された模型をそのまゝ手を入れる事なく次の實驗を行ふ事の出來る場合は何の支障も來さないのであるが，實物の種々なる改修計畫を實驗せんとする場合その計畫に從つて模型も改造しなければならなくなる．此の樣にして模型を改造する時は今まで修正しておいた粗度及び抵抗は全く變つたものとなり，今度の新しいものについて (55) が滿足されるかどうか分らなくなるからである．故に此の樣な場合には新しい水路の部分について (55) を滿足せしめる樣な適當な粗度，抵抗を見積つてつけるか何か，其所に適當な處置を施さねばならない事となる．

B. 模型を歪めたる場合

水平の縮尺を $1/l$，垂直の縮尺を $1/h$ とする時，前述と同樣

$$d=\left(\frac{l}{h}\right) \quad \cdots\cdots(56)$$

とし之を歪度と名付ける．而して $i=\frac{h}{l}$ であるから

$$\frac{1}{i}=d \quad \cdots\cdots(57)$$

となり，模型を歪めると云ふ事は歪度に相當した丈模型の勾配を急にする事であり，歪めた模型に依る實驗とは此の樣に勾配を變られた 2 つの水路に於て——勾配を變へた水路に對しある條件を以て水を流し——水理學的量

* E. Lindquist : "On Velocity Formulas for Open Channels and Pipes" 1933.

を比較するである.

實物の水路に於ては河幅に對し水深が極めて小さいのが普通であるから歪度の小さい場合には模型に於ても水路幅に對し水深は相當に小さいものとする事が出來る. 從つて $r=h$ と見る事が出來るから (48) は

$$\frac{1}{d}=\frac{v^2}{gl}=\frac{v^2}{c^2h} \quad \cdots\cdots(58)$$

となる.

$g=1$ とし l と h とを與へて實驗する時は流速, Chézy 係數の縮尺は次の如くに與へられる.

$$\left.\begin{aligned} v&=h^{\frac{1}{2}} \\ c&=d^{\frac{1}{2}}=\left(\frac{l}{h}\right)^{\frac{1}{2}} \\ t&=l\cdot h^{-\frac{1}{2}} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(59)$$

即ち模型を d 丈歪めて作る時は模型に於て Chézy 係數が $1/d^{\frac{1}{2}}$ なる樣にして水を流さねばならない.

Manning 公式に依り $C_1=\dfrac{R_1^{\frac{1}{6}}}{n_1}$ と取る時は

$$c=h^{\frac{1}{6}}n^{-1}=d^{\frac{1}{2}}$$

或は

$$n=h^{\frac{2}{3}}l^{-\frac{1}{2}} \quad \cdots\cdots(60)$$

となる. 從つて模型の粗度を實物の粗度の $1/h^{\frac{2}{3}}l^{-\frac{1}{2}}$ にすればよい.

例へば Mississippi 河の模型實驗に於ては

$l=2000$ $h=100$

であるから歪度は 20 となり模型の粗度は

$$n_2=\frac{d^{\frac{1}{2}}}{h^{\frac{1}{6}}}n_1=\frac{4.47}{2.15}n_1=2.08\,n_1$$

となる.

即ち歪んで作られたる模型に於ては多くの場合模型粗度を大きくしなければならない.

此の樣に歪められた模型の場合に於ても模型粗度を上記の適當な縮尺によつて調制する事が必要となるが, 之は一般に檢照實驗に依つて定める方が便利である.

此の樣な實驗法を少しく modify して次の樣な方法も考へられる.

今の實驗法では先づ模型流量を $v=h^{\frac{1}{2}}$ によつて流しておき, 此の時の模型の水位が實際の水位に合ふ樣に n_2 を加減するのであるが, 今度は $v=h^{\frac{1}{2}}$ に近い流量を種々流してみて一應作りあげてある模型に於て最も實際の水位に近くなる如き流量を決定して (此の時の流量と實物の流量との比を以て流量の縮尺とする), 之を模型流量となし, 之に更に n_2 の修正を施して實際の水位に精確に一致せしめる方法である.

併し前記 (59) (60) の使用に當りては一般に歪度の小さい事が必要であり, 實物の $\dfrac{B_1}{H_1}$ が極めて大なる場合には相當の歪度まで許容出來る. 而して此の限度は大體に於て歪められた模型に於て $\dfrac{B_2}{H_2}\fallingdotseq 10$ 位であらう. (圖—11 參照)

(2) 等 流 流水は定常的なる場合には不等流となつてゐるのが普通であるが, 恰度流量を求める時に各斷

面に於て夫々の流速を等流の流速公式に依りて計算する如く，模型實驗に於ても夫々の斷面に於ける平均流速の關係を求めて換算縮尺を見出す事も出來る．流水が等流なる場合には勿論此の方法に依るべきものである．

等流に對する平均流速公式は周知の如く $v_1=C_1R_1^{\frac{1}{2}}I_1^{\frac{1}{2}}$ であるが，此の Chézy 係數として Manning の形 $\frac{1}{n_1}R_1^{\frac{1}{6}}$ を採用して進めて行く事とする．

A. 模型を歪めざる場合

實物に於ては $v_1=\frac{1}{n_1}R_1^{\frac{2}{3}}I_1^{\frac{1}{2}}$，模型に於ては $v_2=\frac{1}{n_2}R_2^{\frac{2}{3}}I_2^{\frac{1}{2}}$ であるから前式に (52) を適用して後式にて割れば

$$\left.\begin{array}{l} v=\dfrac{l^{\frac{2}{3}}}{n} \\ l=nl^{\frac{1}{3}} \end{array}\right\} \quad \cdots\cdots(61)$$

を得る．從つて

即ち模型の形狀の縮尺を與へ，模型粗度を與へたる場合には流速並びに時間の縮尺は (61) に依つて與へられる．

B. 模型を歪めたる場合

（i） $r=h$ **と見做し得る場合**　歪度が小なるか，又は歪められたる模型に於ける水路幅と水深との比が相當に大なる場合には $r=h$ として差支へない．從つて

$$v_1=C_1R_1^{\frac{2}{3}}I_1^{\frac{1}{2}}$$

$$=ch^{\frac{2}{3}}\frac{h^{\frac{1}{2}}}{l^{\frac{1}{2}}}v_2$$

$$\therefore \quad v=ch^{\frac{7}{6}}l^{-\frac{1}{2}} \quad \cdots\cdots(62)$$

を得る．而して流量の比を求めば次の如くである．

A_1=實水路の斷面積

A_2=模型水路の斷面積

$$a=\frac{A_1}{A_2}$$

$$q=\frac{Q_1}{Q_2}$$

Q=實水路の流量

Q_2=模型水路の流量

とする時は

$$a=hl, \quad q=av$$

にて表はされるから流量の縮尺 q は

$$q=ch^{\frac{13}{6}}l^{\frac{1}{2}} \quad \cdots\cdots(63)$$

に依りて與へられる．

（ii） $r=h$ と見做し得ない場合

（a） 矩形單斷面の場合　歪められた模型に於て

$\frac{B_2}{H_2}\fallingdotseq 10$ 以下になれば $r=h$ として考へる事が不適當となる.

図—3

$$s=\frac{S_1}{S_2}\qquad S_1=\text{實物の潤邊}$$

$$S_2=\text{模型の潤邊}$$

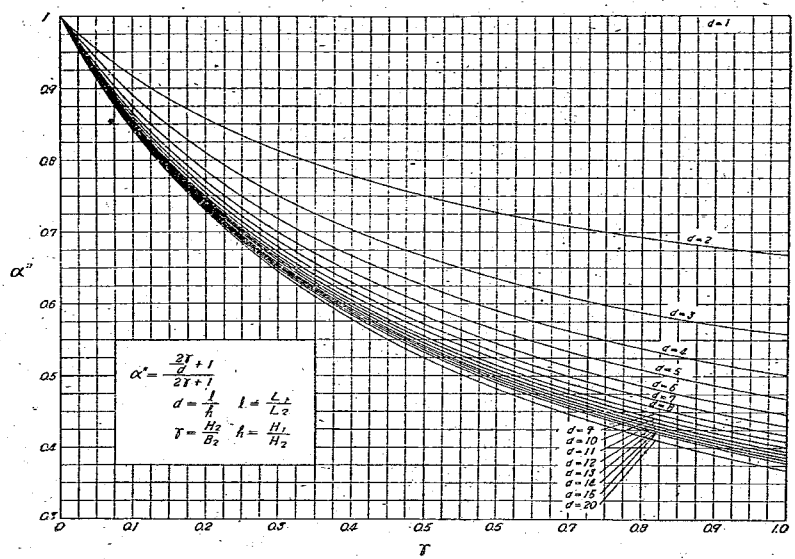
とする時最早や $s=l$ とは見做し得ない. 此の場合には l に係數 α^η を掛けて次の樣に表はす事が出來る.

$$s=\alpha^\eta l \qquad \cdots\cdots(64)$$

$$\alpha^\eta=\frac{\frac{2\gamma}{d}+1}{2\gamma+1}$$

$$\gamma=\frac{H_2}{B_2}$$

図 — 4



從つて $r=\frac{h}{\alpha^\eta}$ となり流速の縮尺 v は

$$\left.\begin{aligned} v&=\frac{1}{n}\alpha^{\eta-\frac{2}{3}}l^{-\frac{1}{2}}h^{\frac{2}{3}} \\ t&=\frac{n\alpha^{\eta\frac{2}{3}}l^{\frac{3}{2}}}{h^{\frac{2}{3}}} \end{aligned}\right\} \qquad \cdots\cdots(65)$$

而して流量縮尺 q は

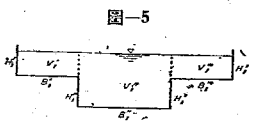
$$q=\frac{1}{n}\alpha^{r-\frac{2}{3}}l^{\frac{1}{2}}h^{\frac{13}{6}} \quad \cdots\cdots(66)$$

となる.

α^r は圖—4 の如く，例へば歪度が 10 で $\gamma=0.3$ なる模型を作りたる時は $r=1.54\,h$ にも達する.

（b） **矩形複斷面の場合**　此の場合には便宜上斷面を圖—5 の如く v_1' 區間，v_1'' 區間，v_1''' 區間の 3 區間に分けて考へる．水理學的諸量の記號は從前通りであるが此の 3 區間に就ての夫々を $'$，$''$，$'''$ を附して區別する．然る時は之等 3 區間の流速の縮尺 v'，v''，v''' は夫々次の如くに表はされる.

圖—5



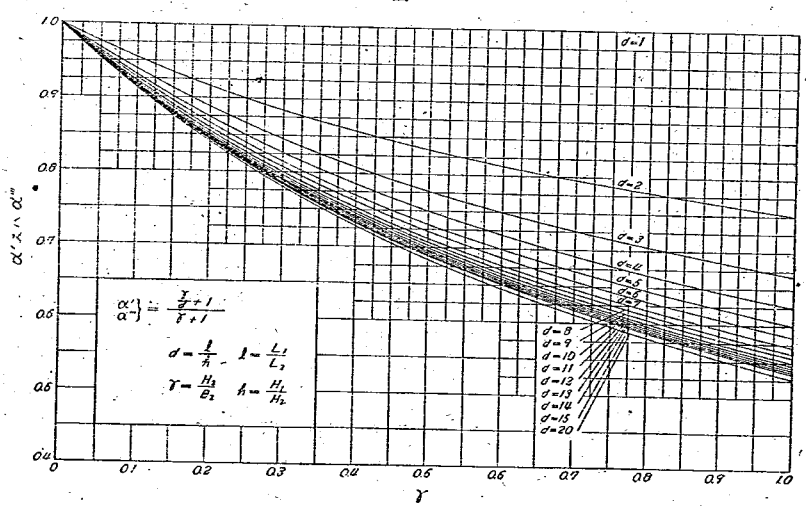
$$\left.\begin{aligned} v' &= \frac{1}{n'}\alpha^{r-\frac{2}{3}}l^{-\frac{1}{2}}h^{\frac{7}{6}} \\ v'' &= \frac{1}{n''}\alpha^{r-\frac{2}{3}}l^{-\frac{1}{2}}h^{\frac{7}{6}} \\ v''' &= \frac{1}{n'''}\alpha^{r-\frac{2}{3}}l^{-\frac{1}{2}}h^{\frac{7}{6}} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(67)$$

從つて流量の縮尺 q'，q''，q''' は次の如くになる.

$$\left.\begin{aligned} q' &= \frac{1}{n'}\alpha^{r-\frac{2}{3}}l^{\frac{1}{2}}h^{\frac{13}{6}} \\ q'' &= \frac{1}{n''}\alpha^{r-\frac{2}{3}}l^{\frac{1}{2}}h^{\frac{13}{6}} \\ q''' &= \frac{1}{n'''}\alpha^{r-\frac{2}{3}}l^{\frac{1}{2}}h^{\frac{13}{6}} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(68)$$

從つて全體の流量縮尺 q は $n'\fallingdotseq n''\fallingdotseq n'''=n$ とせば

圖 — 6



$$q=\frac{1}{n}l^{\frac{1}{2}}h^{\frac{1}{6}}\left[\frac{\alpha''^{-\frac{2}{3}}+\alpha'^{-\frac{2}{3}}\beta'+\alpha''^{-\frac{2}{3}}\beta''}{1+\beta'+\beta''}\right]\quad\cdots\cdots(69)$$

となる．

但し　$\beta'=\dfrac{Q_2'}{Q_2''}$

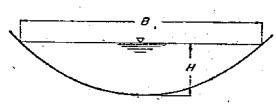
$\beta''=\dfrac{Q_2''}{Q_2''}$

而して α' 及び α'' は圖—6 に示す如く，α'' は圖—4 に依ればよい．

(69) から解る如く斷面中央部の流量が斷然大きく，兩側部の流量が之に比して小さい時は $\beta'\fallingdotseq\beta''\fallingdotseq0$ となり式 (69) は (66) に一致する．

此の様に模型の斷面兩側部の流量の中央部の流量に對する比を見積り得れば流量の換算は (69) を用ひて行ひ得るが，β'' を見積る事は，見積りに多少誤りがあつても大した誤差にはならないとは云へ，元來此の斷面を 3 部分に分つた所に近似性が存在するので (69) に依るよりは寧ろ (66) に依るか又は後述の如くに斷面形を抛物線と見做した方がよいと思ふ．

圖—7

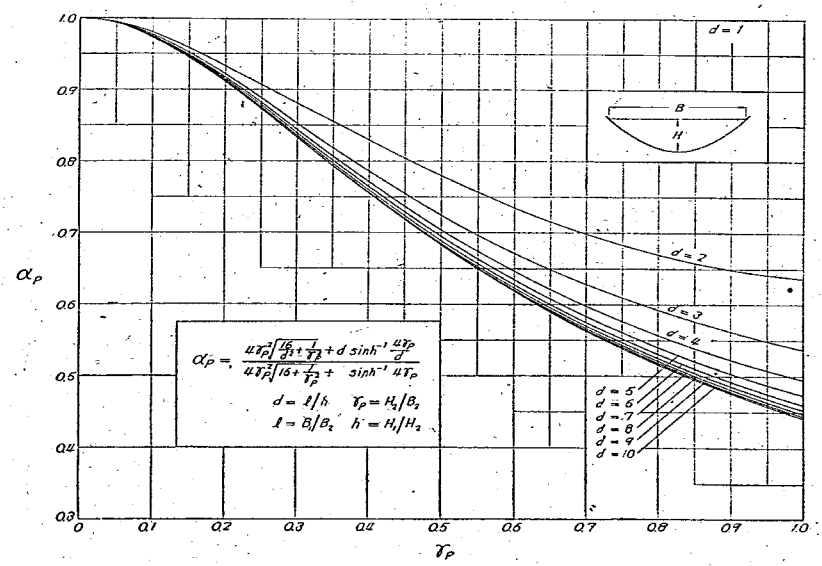


而して時間の縮尺は $t=\dfrac{l}{v}$ によつて計算すればよい．

(c)　**抛物線形斷面の場合**　此の場合の r は

$$r=\frac{h}{\alpha_p}$$

圖 — 8



$$\alpha_p=\frac{4\gamma_p^2\sqrt{\frac{16}{d^2}+\frac{1}{\gamma_p^2}}+d\sinh^{-1}\frac{4\gamma_p}{d}}{4\gamma_p^2\sqrt{16+\frac{1}{\gamma_p^2}}+\sinh^{-1}4\gamma_p}$$

として表はされるから流速縮尺 v 及び時間縮尺 t は

$$\left.\begin{aligned}v&=\frac{1}{n}\alpha_p^{\frac{2}{3}}l^{-\frac{1}{2}}h^{\frac{2}{3}}\\ t&=\frac{n\alpha_p^{-\frac{2}{3}}l^{\frac{2}{3}}}{h^{\frac{2}{3}}}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(70)$$

となり流量縮尺 q は

$$q=\frac{1}{n}\alpha_p^{-\frac{2}{3}}l^{\frac{1}{2}}h^{\frac{13}{6}}\quad\cdots\cdots(71)$$

となる．而して α_p は圖−8 に示す如くである．

此の樣な縮尺

$$q=\frac{1}{n}\alpha^{-\frac{2}{3}}l^{\frac{1}{2}}h^{\frac{13}{6}}\quad\cdots\cdots(72)$$

を用ひるといふ事をもう一度振返つて考へて見ると，之は次の事に外ならない．

即ち，實物と模型との相對應する斷面の各々に就て流量の比が q となる事が必要である．之は連續の條件を考慮する時は，模型に於て各斷面の粗度が妥當なものに作り得た時には當然斯くなるべきである．

併し模型の製作に當りては各斷面に於ける粗度を始めから其の樣に適當に作る事は困難であるから，一般には水位の合つた所と合はない所とが出來るであらう．それで此の實驗は次の樣に行へばよい．

上式に依つて流量を換算して流さうといふのであるが．此の式中 l，h は模型を如何に縮尺するかに依つて必然的に與へられたものとなる．又 α は模型の歪度及び模型の寸法に從つて與へられるから之も必然的に定つて來る．次に n であるが，此の n が與へられれば流量の縮尺は決定されるわけである．そこで此の n の値を求めるのにはどうすればよいかといふに，之は模型の n_2 が分れば求め得るのであるから，先づ n_2 を推定して求めるより致し方がない．併し此の樣に推定して求めた n_2 が正しいものであつた時には，之に依つて換算して流した流れによつて規定の水位に達し得る筈であるが，一般には之が規定の水位に達する事はむづかしい．それ故 n_2 も實驗的に決定しなければならない事となる．即ち，模型が一應出來上つたならば先づ推定して求められた n_2 に依り，此の前後の模型流量を色々に變へて流して見て模型の何れかの場所に於て既知の水位に達する最少の模型流量を求める．此の場合は，模型の他の場所に於ても規定の水位に達しておれば問題はなく，その時の粗度 n_2 は Q_1 と Q_2 とより逆に算出して求める事が出來るが，一般にはその樣にはなつてゐないから今度は規定の水位にまで達してゐない他の場所の粗度 n_2 を，其の規定の水位に迄達せしめる樣に適當に人工を加へてやるのである．此の樣にして水位を合はし得た時に始めて實物と模型との粗度の比が一樣に n であると云ふ事が出來るのである．即ち前にも述べた如く，此の場合の考へ方に於ても矢張り檢照實驗が必要となるのである．

さうして斯くして逆算して得られた n_2 を用ひて，今度研究せんとする流量 Q_1 を模型に換算して Q_2 を求め，而て此の Q_2 を模型に流して色々と研究したき問題を研究するといふ順序になるのである．

例へば多摩川の背水の實驗等は此の樣にして行つた．

III. 移動河床模型實驗

河川の流路又は之に施設せる種々なる工作物に關する洗掘，堆積，又河口に於ける洗掘堆積を實驗に依り研究せんとする時は河床又は海底を移動性物質にて作る事が必要となる．

此の洗掘及び堆積には固形物質の浮游といふ事も問題にはなるものであるが，直接に河床を攻撃する作用を主として考へる場合には水流の掃流力が一番の問題となる．依つて以下に於て掃流力に依る砂礫の運動を如何に考へて行くかといふ問題に就て論じてみたい．

本來流體がある境界に接して流れる時は必ず其の境界面に於て剪力を伴ふものである．嚴密なる粘性流體の意味に於ては固定境界面に於ては流速は零となるべきものであるが，今の場合には可動性境界であるから境界面に於て之動があるものとして差支へない．之が河床なる境界面に於て剪力を及ぼす由所である．此の剪力が即ち**掃流力**であり之に依つて河床の砂礫が移動せしめられるのであるから，少くとも河床砂礫の移動に關しては此の掃流力について相似を考へなければならない事となる．然るに河床の砂礫は一般に水流の剪力が或る値に達しない中は移動を開始しないものである．即ち河床砂礫の摩擦力が水流の掃流力に勝つてゐる間は河床砂礫は靜止のまゝに止つてゐる．而も此の摩擦抵抗は砂礫の大さ，比重，大小粒の混合の狀態に依つて異るものと考へられるが，之等の諸量と此の砂礫を動かし始める最小の掃流力即ち**限界掃流力**との間には次の如き關係が存在する事が實驗的に確かめられた*

$$F_0=k(\gamma-\gamma_0)\lambda d_m \quad \cdots\cdots(73)$$

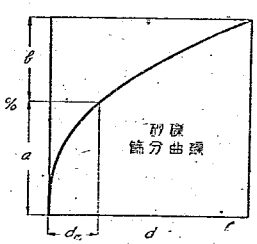
玆に，

F_0＝限界掃流力　　$\lambda=\frac{a}{b}$（圖—9）

γ＝砂礫の比重　　d_m＝平均粒徑

γ_0＝水の比重　　k＝常數

圖 — 9



此の樣に F_0 に依つて河床の砂礫を移動せしめるのであるが，模型を小にすると共に F_0 は小となり從つて模型用の砂も小さな粒徑のものとしなければならないのであるが，模型用砂は如何に小粒徑とするとも少くとも粉末性のものとならない範圍に止める事が必要である．何となれば粉末狀となりたる時は運動の性質が砂礫性とは異るからである．

此の樣に模型用砂が餘り小粒徑のものとはなし得ない事になれば之が打開策として2つの方法が考へられる．

その一つは模型用砂として動き易い爲に比重の輕いものを使用する事であり，他の一つは模型を歪める事に依つて掃流力を增大せしめる事である．

前者の場合には比重の輕い模型用砂として種々なる天然又は人工的材料が考へられる．

例へば石炭，輕石，琥珀，米粒の如きものである．

而して一般には之等2つの方法を適當に組合はせて使用する事が考へられる．即ち歪める事は理論的には近似に過ぎないから模型は歪めるとしてもなるべく歪度の小さいものとし，此の爲めの掃流力の不足分を比重の小な

* 安藝皎一・佐藤清一：“砂粒河床模型實驗の基本に關する實驗並びに限界掃流力に關する研究” 土木試驗所報告 43號．

る物質を使用する事に依りて補ふといふのである.

結局移動河床の模型實驗法として今の所, 次の3方法が考へられてよいと思ふ.

1. (59) 式に依る方法

移動河床の模型實驗に於ては水の運動そのものに於て相似が成立しなくてはならないと同時に又その剪力による河床の砂の運動も相似でなくてはならない. 從つて玆に非常な困難が伴ふ.

水流の運動を不等流であると見做す時は水の運動そのものについては(59)が成立しなくてはならないから, 模型には流量 $Q_2=Q_1/h^{\frac{5}{2}}$ 丈流しおき而もその時の模型粗度が $n_2=n_1/h^{\frac{2}{3}}l^{-\frac{1}{2}}$ である樣にして置かねばならない. 此の粗度といふものは移動河床模型實驗の場合には水流の剪力に依りて動かされつゝある砂粒又はその堆積・洗掘により生ずる粗度である. 然るに模型河床の砂としては, 之の移動といふ事からしては限界掃流力に依つて相似的に定められねばならない. 即ち實砂礫の平均粒徑 d_{1m} と模型用砂の平均粒徑 d_{2m} との比を e とすれば

$$e=\frac{h^2}{l}\cdot\frac{1}{k'\gamma'\lambda'} \qquad \cdots\cdots(74)$$

なる式に依つて與へられねばならない.*

但し,

$$\left.\begin{aligned} k' &= \frac{k_1}{k_2} \\ \gamma' &= \frac{\gamma_1-\gamma_0}{\gamma_2-\gamma_0} \\ \lambda' &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \\ e &= \frac{d_{1m}}{d_{2m}} \end{aligned}\right\} \qquad \cdots\cdots(75)$$

而して此の樣にして與へられた砂粒又は之が移動に依つて生ずる堆積洗掘による凹凸の粗度が前記の如くに $n_2=n_1/h^{\frac{2}{3}}l^{-\frac{1}{2}}$ に相當してゐなくてはならないのである.

此の樣な模型用砂を求めるといふ事は相當に困難であり, 一つに實驗に依つて求められねばならない事と思ふ.

而も更に困難なるは或る流量の流れの場合には河床は移動せずに靜止なるまゝに止まり, 又或る流量以上になると之が動き始める. それ故砂の動かない狀態の時の流水と, 動いてゐる時の流水の狀態とでは粗度が著しく異る事である. 故に實驗は如何なる狀態に於て行ふかを豫め決定しておいてその場合の其れに相當した粗度を見込まなければならない事である.

2. (66) 式又は (71) 式に依る場合

實物と模型の水路の各斷面に就て夫々 Manning 流速公式の比が一定となる樣に模型を働かせるといふ觀念の下に (66) 式又は (71) 式なる流量の換算縮尺を考へた. 即ち

$$q=\frac{1}{n}\alpha^{-\frac{2}{3}}l^{\frac{1}{2}}h^{\frac{13}{6}} \qquad \cdots\cdots(76)$$

なる縮尺を考へた.

此の縮尺に從つて模型流量を決定せんには l,h,α,n の値が與へられればよい. 此の中 l,h,α は模型の寸法を定めれば直ちに與へられるものであるが, n は簡單には定まらない. 之は次の如くにすべきであると思ふ.

---

* 前揭に同じ

模型の寸法が定められたら (74) に依つて模型用砂を決定し，他の豫備實驗に依つて模型に於て種々研究せんとする水位に就て此の模型用砂の移動の狀況竝びに n_2 の變化を調べておく．然る後，今度研究せんとする水位に就て n_2 は幾らになるかを今の豫備實驗から求め，上式に依りて模型の流量を換算すればよい．

3. 水位を合はせて流す方法

之は 2. の變形法とも考へられる． 2. の方法では其の様にして模型に水を流した場合に，之が檢照實驗である場合には，河川の各所に於て水位が實記錄に合致してゐる事を要する．

それで此の第3の方法は檢照實驗に依つて n_2 を定めようとするものである．

即ち，模型には初め (74) によりて求められた模型用砂をしいておき，之に流量，水位共に記錄のある實際の流れに對して模型を檢査する意味に於て，實記錄の水位に合はせて之が全く一致するまで模型流量を種々に變へて流して見る．而して或る模型流量 Q_2 に依つて水位が實際の記錄に合つたならば，此の Q_2 と之に相當せる實際に記錄のある流量 Q_1 とに依つて (76) より逆に n_2 を求め，之を以て此の流量附近の移動河床模型の粗度とする．次に研究の對照となる實流量 Q_1 を考へる場合には，此の n_2 に依つて (70) より Q_2 を計算して流せばよい．

尙ほ移動河床模型實驗に就ては次の點に就て注意を要する．

1. 砂漣が生じたる場合には，元來砂漣そのものには相似の關係は無いのであるから，之を全く無視しなくてはならない．併し模型水深の相當に大なる場合は砂漣は之を無視して之を均した狀態のものを考へてよいが，模型水深の比較的淺い場合には，此の水位に對する砂漣の比はかなり大きなものであり，從つて此の砂漣に依る流水への粗度は極めて大きく效く．故に此の様な場合には模型用砂の配合を變へて砂漣の生じにくいものとするか，又は模型を大きく作る事が必要である．

2. 次に河床の洗掘・堆積を實驗せんとする場合，殊に洗掘を見ようとする場合には水中に於ける砂の摩擦角には相似律が存在しない事を念頭に置かねばならない．

即ち洗掘の如きは，一般に時間が經てば經つ程洗掘穴は深くなつて行く事であらうが，その穴の大さは其の砂の水中の摩擦角により規定される大さに止まらざるを得ない．從つてその穴の大さを以てそのまゝ實物に引伸す事は出來ないのである．

故に此の點から云つても模型は歪めない事が望ましいのである．

要するに移動河床の模型實驗とは移動性の境界條件を以て流體の運動を模型に依つて解く事に外ならないと思ふ．

IV. 相似限界

第I章及び第II章に於て述べて來た様に模型に於ても實物に於けると同一形の運動の方程式の成立する事が必要であるから，從つて模型には種々なる限度が生じて來る．其の主なものを考れば次の如くである．

1. 實物が渦流であれば模型も渦流で，實物が層流なら模型も層流で實驗しなければならない．

流水が渦流なるか層流なるかは周知の如く Reynolds 數 $\frac{vl}{\nu}$ に依つて大凡の限界を定める事が出來るが，此の Reynolds 數を構成する ν は (模型にも實物と同一流體を使用するとして) 一定であり，模型の大さを小にするに伴ひ v, l は小となり從つて Reynolds 數が小となりて層流となる恐れがある．故に之に對して大體次の如き限界を考へたらよからうと思つてゐる．

管に於ては Reynolds 數が大凡 2000 位が限界となつてゐる樣であるから，管の直徑を徑深に直して $\frac{R}{4}$ となし，開水路に於ては限界速度，又は水深は

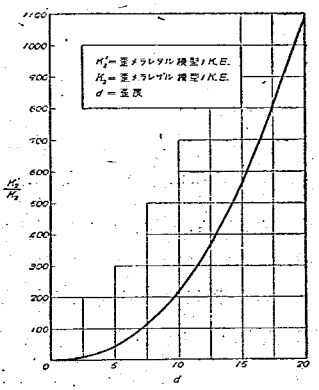
$$\frac{vR}{\nu}>500 \quad \cdots\cdots(77)$$

に依つて檢査してよいと考へる．

2. 歪度に對する限界

模型を歪める事は本來物理學的に見て近似に過ぎないのであるから，何の程度の近似に止めるかを考へる必要がある．

圖 — 10



又水平と垂直の縮尺を變へて歪めるといふ事は模型勾配を急にする事であるから，實物が常流である場合には模型の流水が射流にならない事を要する．

（1） 模型の近似の程度を調べる一手段として流水のもつ運動の勢力を考へてみた．

歪められた模型の流れのもつ運動の勢力が，之を歪めない場合のものに對して何の程度に增大するかを示せば圖—10. の如くである(I.(10)式參照)．

之に依れば例へば模型を 5 倍に歪めると運動の勢力は歪めない場合のものの約 42.75 倍に增大する．

（2） 射流にならぬこと．模型の縮尺を水平と垂直とに於て變へる事は模型の勾配を變へる事である．多くの場合模型勾配が急になる樣に歪められるから之に對して射流とならない樣な限界を考へて見る必要がある．之に對して次の樣に考へてみた．

模型に於て射流となる勾配 I_{2c} は

$$I_{2c}=\frac{g}{C_2^2}$$

に依つて與へられる．然るに $d=\frac{I_2}{I_1}$ であるから模型の歪度の限界としては

$$d<\frac{g}{I_1C_2^2} \quad \cdots\cdots(78)$$

g=重力の加速度

I_1=實物の勾配

C_2=模型の Chézy 係數

が考へられる．

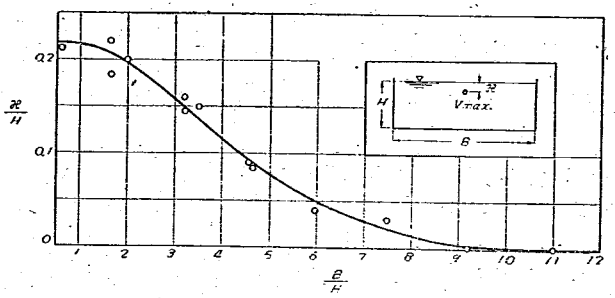
從つて，實物の勾配の急なる程歪め方は小さくしなければならない．

（3） 模型水路の斷面形は大凡 $\frac{B}{H}>10$ なるを要す（但し B=水面幅，H=水深）．

水路斷面內の流速の分布は斷面形の異るに從つて變り，一般に一定の水面幅に對して水深の大となる程最大流速の點が下る傾向がある．

此の問題を典型化して，矩形斷面のものについて諸實驗*の結果を調べて見るに，(幅：水深) の比の大となるに從つての最大流速の點 Vmax の上り方は圖—11 の如くである．

圖 — 11



之等の實驗に依れば，水路に於ける流量又は流速，水路側面の粗度に依つて多少の差はあるも大體に於て，Vmax なる點の位置は $\frac{B}{H}=1$ 位の所では水深の表面より 0.2 位の所に位置し，それより幅員の大となるに從ひ水表面に近づき，$\frac{B}{H}\fallingdotseq 9\sim 10$ より大となれば Vmax の位置は全く水表面に存在する．

而して斷面の全般に亘れる流速分布の狀況は Vmax なる點の位置を以て代表して考へて大差ないから，此の Vmax の位置を以て斷面內の流速分布狀態を示す指數とすれば，斷面形を歪めても之に大した變化を來さない限界を之等の實驗より求むれば，少くとも矩形斷面のものに就ては

$$\frac{B}{H}>10 \qquad \cdots\cdots(79)$$

である樣である．

然るに斷面內の流速の分布の仕方といふものはその斷面形に從つて異るものではあるが，圓形斷面又は抛物線形斷面のものに對する資料が乏しいので此の點を確かめる事が出來ないとはいへ，$\frac{B}{H}$ が相當に大となる時は抛物線形斷面でもあらましな矩形斷面に直して考へても大差はないからその樣な斷面形の場合にも (79) を使用しても大體の目安は着く事と思ふ．

卽ち模型を如何に歪めるとも $\frac{B}{H}=10$ 以下になる程に歪める事は望しくない．

3. 移動河床模型實驗に於ては以上の外に，砂漣の生じない事が必要である．

4. 更に又，洗掘の形狀をも研究せんとする時は砂の水中に於ける摩擦角は一定であるから歪める事それ自身が望ましくない．

5. 特に表面の流れを見ようとする場合には少くとも表面張力 (約 $\sigma=0.075$ gr/cm) に打勝つ丈の表面流速

* 1. 松尾春雄：“小型水路に於ける流速公式の實驗的研究” 土木試驗所報告第 48 號．
2. Nikuradse: “Untersuchung über die Geschwindigkeitsverteilung in turbulenten Strömungen” (1926).
3. Wien-Harms: Handbuch der Experimentalphysik. IV. 4. Teil. III §2.
4. O'Brien-Hickox: Applied Fluid Mechanics. Art. 118.
5. L. Prandtl: “Ueber die ausgebildete Turbulenz.” Verhandlungen des 2. internationalen Kongresses für technische Mechanik. S. 73.

が必要である.

V. 結　　語

以上を要約すれば次の如くである.

1. 水理模型實驗とは寸法の異りたる水理模型によりて實驗的に運動の方程式を解く事であり，特に移動河床の問題は可動境界を與へて解く事である.

2. 實驗するに當り，問題とする現象が如何なる種類の運動であるかを判斷して夫々適切な方法を取らねばならない(第Ⅱ章).

3. 殊に開水路の如き問題は重力と摩擦抵抗とが相匹敵する重みで關係して來るので摩擦抵抗に就て特別な人工的技巧を必要とする. その方法は第Ⅱ章〔3〕の如くである.

4. 模型を歪める事は近似解に過ぎないが，全く歪めずに小規模な模型を作る時は流體力學上全然別な範疇に屬するものとなる恐れがあるので，其の樣な場合には多少の歪も止むを得ない. その樣な場合には水理學的諸量の換算は第Ⅱ章〔3〕による.

5. 移動河床の模型實驗は第Ⅲ章に於て述べた如き概念に基いて行ふ事が出來ると考へる.

6. 流體の諸性質上模型實驗には種々なる限度が考へられる. それで，模型の設計に先立ち先づ第Ⅳ章に述べたる所により其の樣な模型を作つて良いかどうかを確かめる必要がある. (2600. 12. 21. 赤羽分所にて)

資料を引用せし並びに參考とせる文獻

1. 物部長穗：水理學
2. 友近晉：流體力學
3. 本間仁：低溢流堰堤の流量係數(I.II.)土木學會誌. 26 卷，6 號，9 號.
4. 大坪喜久太郎："模型實驗".
5. 大坪喜久太郎："鉛直線を軸とする渦の相似". 土木學會誌，23 卷，7 號.
6. 伊藤剛：水理學.
7. 松尾春雄："小型水路に於ける流速公式の實驗的研究". 土木試驗所報告 48 號.
8. 安藝皎一・佐藤清一："砂粒河床模型實驗の基本に關する實驗並びに限界掃流力に關する研究". 土木試驗所報告 48 號.
9. 荒川秀俊：氣象力學 (1940).
10. 小野正三：航空力學.
11. 山縣昌夫：船型試驗法.
12. "Vicksburg に於ける國立水理試驗所に於ける模型實驗". 土木試驗所彙報 7 號. 佐藤清一譯.
13. J. Nikuradse: "Untersuchungen über die Geschwindigkeitsverteilung in turbulenten Strömungen." (1926).
14. Wien-Harms: Handbuch der Experimentalphysik IV. 4. Teil, III. §2.
15. L. Prandtl: "Ueber die ausgebildete Turbulenz" Verhandlungen des 2. internationalen Kongresses für technische Mechanik.

16. O. Reynolds: Scientific Papers Vol. II. p. 554.

17. Th. von Kármán: "Mechanische Aehnlichkeit und Turbulenz." Verhandlungen des 3. internationalen Kongresses für technische Mechanik. Teil I.

18. E. Lindquist: "On Velocity Formulas for Open Channels and Pipes" (1930).

19. Charles Jaeger: "Erweiterung der Boussinesq'schen Theorie des Abflusses in offenen Gerinnen. Abflüsse über abgerundete Wehre." Wasserkr. u.-wirtsch. H. 4. 1940. S. 83~86.

20. H. Rouse: Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers.

21. H. Lamb: Hydrodynamics.

22. Dodge & Tompson: Flnid Mechanics.

23. O'Brien & Hickox: Applied Fluid Mechanics.

24. G. I. Taylor: "Statistical Thory of Turbulence." Proceedings of Royal Society of London, Vol. 151.

營口港改良計畫に關する模型試驗報告

內務技師　松　尾　春　雄

この試驗は滿洲國の依囑を受けて行つたものであつて，試驗の目的は營口港々內航路の水深維持に關して最も適切なる計畫を樹つる爲の資料を得る事にある．營口港上流鴨島附近の河岸維持は本港の水深維持と密接な關係があると思ふが，模型に於て之を嘗める事は困難と考へたので本報告は之には觸れてゐない．

試驗を行ふに際し蒐集した資料は 1920 年以降年々發行された遼河工程局年報 (Lower Liao River Conservancy; Report) 原口技正の「營口港に就て」(1937) の外に著者の依頼によつて營口治水工程處が調査したものである．此等は模型試驗結果を論ずる場合缺く可からざるものであるから本報告に詳細に記した．本試驗は當所青木楠男技師と著者とが滿洲國より依囑を受けて行つたものであつて，資料の蒐集滿洲國との交涉，試驗の方針等に就ては同氏を煩した事が多い．資料の整理は當所技手前澤郡治が主として之に當り試驗には外に囑託坂上種正助手向田忠靜の助力を得た．

模型試驗は昭和 14 年 5 月開始，昭和 15 年 4 月完了．試驗費約 4000 圓を要した．

目　次

I. 總　說……(2)
1. 營口港及遼河々口改修の沿革……(2)
2. 現在の狀況及び現場に於ける調査……(4)
a. 氣象狀況．b. 潮汐，潮流．c. 河の狀態．d. 河口の狀態．
II. 試驗設備及試驗事項……(15)
1. 試驗設備……(15)
2. 試驗事項……(17)
III. 定流による試驗結果……(18)
1. 下潮時中等潮位の場合……(20)
a. 現狀．　b. 西水道締切を一部撤去し水道の浚渫をした場合．
c. b の場合に於て締切上流の本川に水制を設置した場合．
d. 計畫導流堤を設けた場合．
e. 計畫導流堤を設け，西水道締切撤去，水制を設けた場合．
2. 下潮時低潮位の場合 (a, b, c, d, e)……(23)
3. 上潮時高潮位の場合 (a, c)……(25)
4. 上潮時中等潮位の場合(a, b, c, d, e)……(25)
5. 上潮時低潮位の場合 (a, b, c, d, e)……(28)
IV. 波による試驗結果……(29)
a. 現狀模型．　b. 計畫導流堤設置模型．
V. 結　論……(30)

I. 總　　說

[1] 營口港及遼河改修の沿革

營口港は，其源を興安嶺に發し渤海に注ぐ延長 1,300 km を有する遼河の左岸沿ひに發達した營口市街に面し，河口を遡ること約 30km の地點にある河港である．營口が盛んになり始めたのは西曆 1830 年頃よりの事であつて，1820年頃には貿易は上流牛莊城に於て最も盛んに行はれ，其頃の營口は一小漁村に過ぎなかつたのであるが，遼河の年々運び出す土砂は次第に河身を隆起せしめ，爲に民船の取引は田庄丘，營口と漸次下流に移り，1835 年頃には營口の商勢頓に加はり，牛莊，田莊臺の商務は悉く此地に移されるに至つた．然し乍ら河は自然の儘に放任して置かれた爲，營口も亦年と共に，河口附近に閂洲を增大し出入船舶の入航に支障を來した．更に之を惡化せしめたのは 1889 年に起つた大洪水である．その氾濫水を排除する目的で營口より上流約 130km の唐家窩堡と韓家窩堡間に水路が開鑿せられた．之は氾濫水を唐家窩堡附近から東沙河方面へ落す爲附近住民と密鹽業者との手によつて開鑿せられた．唐家窩堡から遼河本流に沿ひ渤海に至る距離は約 150km であるが，開鑿水路は僅か 70 餘 km で渤海に注ぐ爲，水面勾配に大なる差を生じて次第に新水路は河巾と水深を增大し，之が今日の双臺子河となつた．其爲唐家窩堡下流の遼河本流では水量が著しく減少し，水深維持に必要な流量がなくなつて唐家窩堡，三叉河間の舟運は不能に陷り，河口の狀態も亦惡化の一路を辿つた．

1906，7 年頃に至り遼河改修の必要が叫ばれ，一部民營で行はれ樣としたが，此頃丁度下流鴨島の問題と河口淺瀨の問題とが世論を喚起して居つて，之等を統一して解決する爲支那官憲の手に委ねられることゝなつた．

斯くて 1909 年東三省の總督であつた徐世昌は外人技師ヒューズの案に基いて改修計畫を樹て，官營で施工し樣としたが，工事費を輸出入貨物の附加稅に依つて賄はふとした爲之を徵收される側の外國人等に議論沸騰し，遂に關係各國に移管されて，1914 年 7 月國際協定成立迄放任しておかれた．然し其間唐家窩堡，三叉河間の舟運を打開する爲ヒューズ氏は遼河分流點より下流 1.9 km の冷家口に於て双臺子河を橫切る石堰堤を築造し以て水面を堰上げ，遼河の河水を本流に取戻さうと企てた．この工事は 1909 年に工を起し 1911 年 7 月完成に近づいたのであつたが，地方民の苦情の的となり竣功間際に不幸破壞の難を被つて遂に工事は斷念された．其爲唐家窩堡，三叉河間は浚渫作業によつて水深の維持が計られ新開河の開鑿竣功迄此の浚渫が行はれた．

之等の諸障碍を根本的に解決し樣といふ努力は，1914 年 7 月中華民國と北京外交團との間に遼河改修に關する國際協定が成立して以來眞劍に續けられた．此協定によつて遼河工程局が設けられ英人技師ヒューズ氏がこの改良工事に當つたのである．工事の範圍は河口の淺瀨，河口より營口港に至る水路の改良，西水道の締切，鴨島附近の護岸，及び上流改修工事であつたが 1918 年 1 月ヒューズ氏の客死により工事は一頓挫を來した．1919 年改修工事は上，下流に分けて施行することゝなつて，上流は日本人技師，下流は英人技師が各々分擔し，相關聯して改修に力を注ぎ 1933 年迄前後 20 年間繼續された．其間下流に於ては下潮を本川に導流して閂洲の洗掘に資する爲の西水道締切の完成，11.8 km に及ぶ本導流堤の築設，水路の浚渫，鴨島の護岸工事等が施工せられ，又上流部の改修に於ては二道橋，夾心子間の所謂新開河A線の開鑿がなされた．

然し乍ら 1931 年滿洲事變勃發以來貿易不振の爲，工費の調達に困難を來し河口の浚渫さへも出來ない狀態と

なつて，1932年末に河口淺瀨の水深は 3.6 km に維持されたものが 1933 年末には 2.85 m となつて關係方面に焦慮を與へるに至つた，其の結果 1933 年 12 月工程局總會に於て事業遷續の不可能なるを認め 1934 年1月 1 日附を以て一切を滿洲國交通部に引渡しを行つた．爾來營口航務局の努力が續けられ着々其實效を擧げつゝある．

(a) 埠　頭

埠頭設備は滿洲國の河川法制定前には從來の習慣によつて總て河川沿岸の私人，公人，法人等によつて施設經營せられて居り，國とか市町村で管理經營されて居るものは全然なく，其上之等經營者は河川の中までも所有權を有して居る爲，河川が私權の目的物になつたり，河川敷地内の工作物等が無秩序に造られたりして居つたが，滿洲國成立後河川法が制定せられて河川は國有となり，統制ある河川行政が行はれるに至つた．

現在一般汽船の碇泊は上港界附近の滿鐵牛家屯石炭棧橋より下流太古西埠頭に至る延長約 6,000m の間で之より西方西稅關迄の延長約 2,000m は民船の碇泊所と定められて居る．港内埠頭は大部分木橋護岸で又接岸不能箇所多く，其水深は河岸より 10～15m の處で 4～5 m である爲何れも河岸より 10～15m の場所に繫船し，ボンツーンを使用して居る．

岸壁は 27 ケ所を有しその總延長約 4393 m で内譯は次の通りである．

表 — 1

繫船能力	港内埠頭			港區外下流埠頭			港區外上流頭埠		
	隻數	水深	總延長	隻數	水深	總延長	隻數	水深	總延長
		m	m		m	m		m	m
5,000 t 級							1	10.7	121
4,000 〃	4	6.7	700	1	9.1	115	3	7.6	361
3,500 〃	2	6.1	152						
3,000 〃	2	5.5	245						
2,500 〃	6	5.2～5.8	654	1	6.7	210	4	6.1～6.7	729
2,000 〃	3	4.3～5.8	382						
1,500 〃	5	4.3～4.6	410	1	6.1	60	1	4.9	80
800 〃	2	4.0～4.6	144						
200 〃	2	4.9	30						
計			2,717			385			1,291

此外港區外下流埠頭に水深淺く繫船不能のもの一ケ所，延長 180 m あり．

(b) 貿　易

入港船舶の最大吃水は 1917 年には 18′～19′ (5.50～5.80 m) のもの，1929年には 22′～23′ (6.70～7.0 m)，更に 1933 年には 24′～25′ (7.30～7.60 m) のものが入港したが何れの年も 17′～18′ (5.20～5.50) の船が最も多い．大體に於て 16′～20′ (4.80～6.10 m) の範圍の船が大部分を占めてゐる．

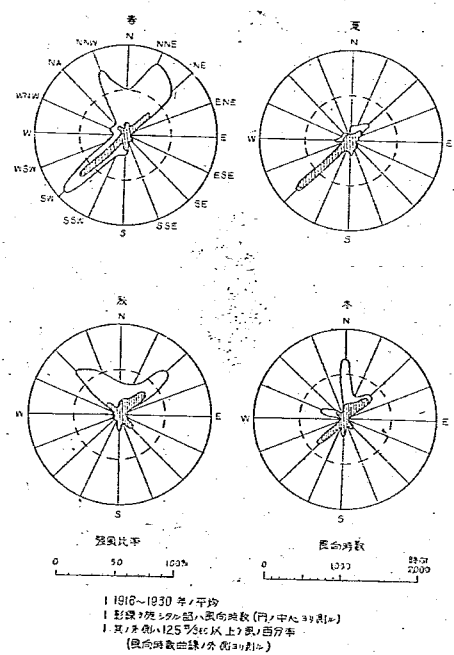
之等の出入船舶數は 1911 年 1,358 隻 1,427,652 t，　1931 年 2,814 隻 3,037,082 t，　1933 年 1,047 隻 1,001,462 t であつて 1931 年の輸出入貨物は 250 萬噸，金額約 2 億圓に及んだが其後は滿洲事變，支那事變の影響を蒙り急激に減じた，其の主要貨物は輸出は大豆其他の穀類，輸入は織物穀類，染料等の製品で其主なる取引先は，中華民國，日本，蘭領印度，北米合衆國，英領印度等であるが 1934 年に於ける之等諸國との貿易中，中華民國は全貿易額の 51 %，日本は 41 %で當港貿易の大部分が此の二國に占められて居た．こゝに注意を要することは貿易は結氷の爲1年の内約 28 %は閉鎖されてゐて，開港期間はあとの約 72 %であることである．

[2] 現在の狀態及び現場に於ける調査

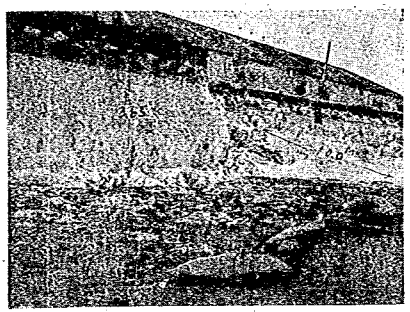
(a) 氣象狀況

(i) 雨　此地方に於る年雨量は西曆 1894～1933 年間に於て最大 948 mm, 最小 258 mm 平均 583 mm であつて此内 52 %は 7, 8 兩月で降つてゐる. 河川の土砂は大部分此の雨季に運び出される.

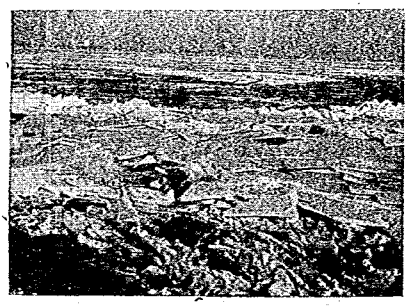
圖—1 風向時數及强風比率圖



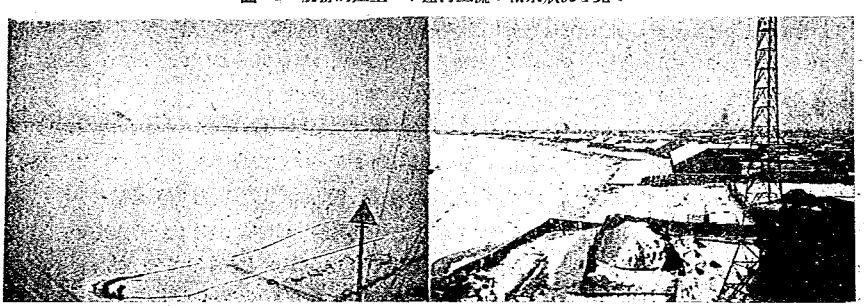
圖—3 航務局前護岸附近の低潮時に於ける結氷狀況



圖—4 航務局前下潮時流氷の動き



圖—2 航務局屋上ヨリ遡河上流の結氷狀況を見る



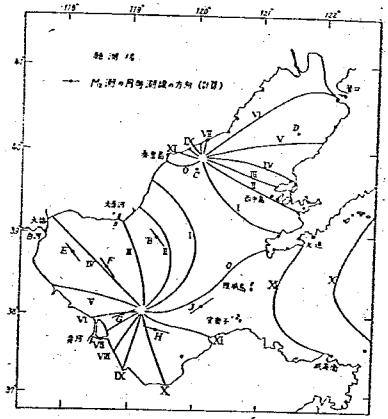
(ii) 風　最大風向は北東及南西で 6, 7 月に南西風多く, 12, 1 月には北東風が多い. 又 3 月開港期の最強風は南々西である. 今 1916～1930 年迄, 春夏秋冬各々の平均値を風向時數及び 45.1km/hr (12.5m/sec) 以上の風だけの百分率を圖示すれば圖—1 の如くである.

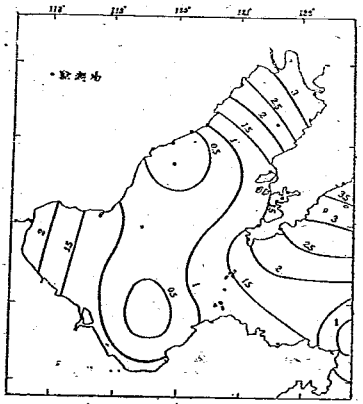
(iii) 結氷　營口港の結氷狀態は上流約 20 哩 (32km) の田庄臺附近では 12 月初旬凍結し, 鴨島附近では 12月中旬, 營口港內の滿鐵驛附近に於ては 12 月下旬より 1 月初旬結氷を見る. 更に下流の舊砲臺附近より河口迄は全多を通じて凍結する例は少い.

多期の結氷による港の閉鎖は大體 12 月上旬から翌年 3 月中旬迄の 3 ケ月餘で, 1 年の約 28 %に當る. 此期間全く港としての機能を失ふ爲, 貿易上多大の支障を與へる.

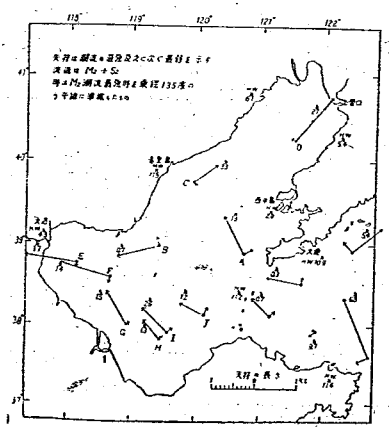
圖—5　渤海灣に於ける同時潮圖及潮流圖

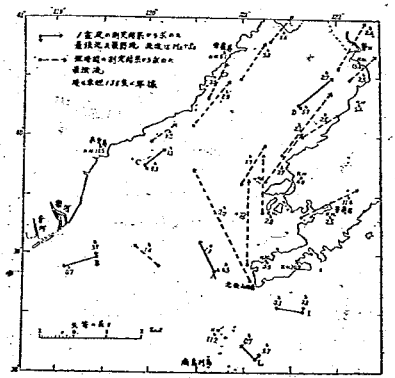
(a) M_2潮の同時潮圖(東徑 135 度子午線に準據)　(b) 半日週潮の等潮差圖 2 (H_m+H_s) 米





(c) 半日週潮流 (各層の平均)　(d) 半日週潮流 (海灣北半詳細)





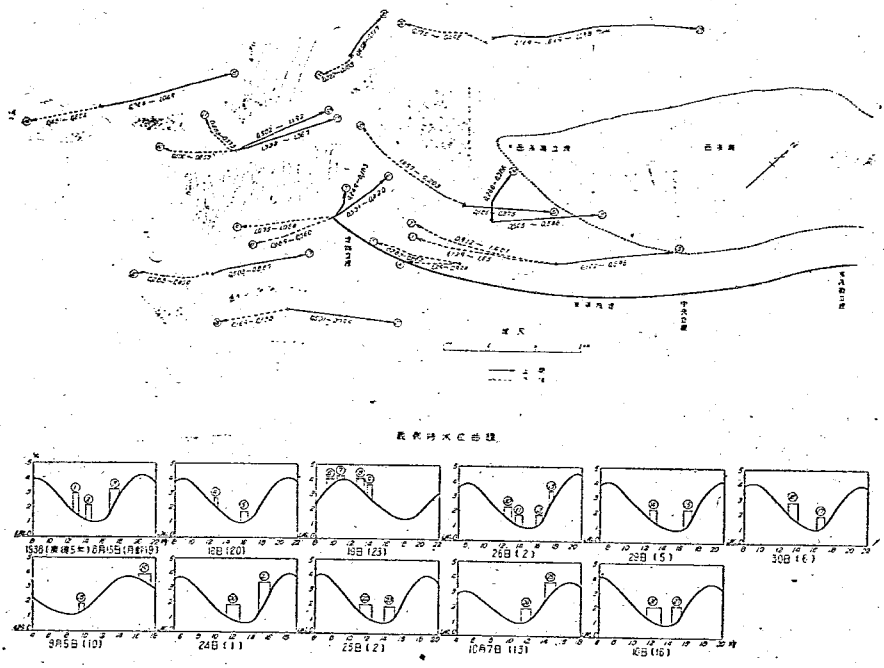
氷の厚さは毎年大體2月に最も厚く 1905～1929 年迄の最大氷厚は 25～98cm で各年の平均最大厚は約 45cm である.

(b) 潮汐. 潮流

昭和 7, 8 の兩年に亙り滿洲國の委託により海軍水路部に於て遼東灣方面の海岸測量を施行した際得られた實測資料を基にした遼東灣の潮汐及潮流の調査報告及渤海灣に於て昭和 8～9 年に一晝夜に亙る洋中 5 點の潮汐調査を行つた結果の報告[1]から渤海灣内の同時潮及潮流を知る事が出來る.

即ち圖—5 はその結果の一部であるが之によれば半日週潮流は灣口附近を除く外は潮流は北東及南西に流れ灣の北半 (秦皇島を通じ東西に引いた直線以北) に於ては灣首の略低潮時から略高潮時迄灣首に向ひ, 略高潮時から略低潮時迄は反對の方向に流れる. 日週潮流に就ては測點が少く且各測點に於ける値には相當に大きい誤差を含んで居るやうであるが一般に灣首に於ける日週潮の略低潮から略高潮時迄は日週潮流は灣首に向ひ, 略高潮時から略低潮時迄は反對の方向に流れる樣である.

圖—6 遼河々口潮流觀測圖



1) 水路要報第 13 年(昭和 9 年第 3, 4, 5 號)"再び遼東灣の潮汐及潮流に就て" 理論計算は第 11 年 (昭和 7 年) 第 7 號 "遼東灣の潮汐に就て"
水路要報第 15 年 (昭和 11 年) 第 4 號, 第 5 號 "渤海灣の潮汐及潮流に就て"

營口航務局に於て康德5年（1938年）8月～10月の3ヶ月に亘つて遼河々口の潮流觀測を行つた結果は圖—6に示す通りである．但し之は石油罐に小旗を立てたものを流してそれの流れを觀測したのであるから表面流と見做される．之によると上潮は大體北 35° 東の方向をとり下潮は南 20°～45° 西の方向である．之は導流堤の延長方向及位置を論ずる場合に大きな關係がある．

河口及び港内の水位は渤海の潮汐によつて複雜な昇降を示すが大潮時に於ける干滿差は約3.0 m で1904～1934年迄の信號所及び港内に於ける．各〻年平均の高潮位，低潮位，平均水面，平均潮位差等の變化を圖示すれば圖—7 の如くである．

又月による平均水面の變化は大體冬季に低く夏季に高い．其差は年により異るも約 55cm である．

導流堤築造によつて上潮の時間が增し，下潮の時間が減少した事が表—2 に見られる．

潮の傳播速度に就て調査した結果信號所，稅關間にては 9.0 m/sec, それから上流に行くに從ひ漸減し，感潮區の最上流部では 0.54 m/sec, 位となつてゐる．

圖—7 潮位年變化 信號所は圖—15に於ける四道溝の位置，稅關は航務局に相當する

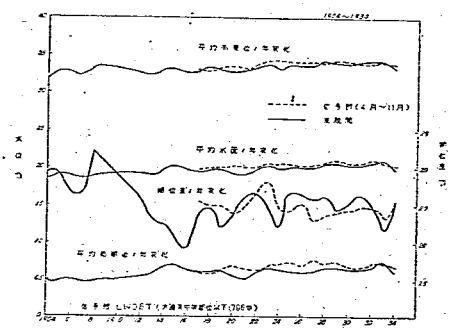


表 — 2

年	上潮時間	下潮時間	高潮間隙	低潮間隙
	時 分	時 分	時間	時間
1921	5—01	7—24	4.35	11.75
24	5—01	7—24	4.50	11.90
25	5—02	7—23	4.93	12.32
26	5—01	7—24	4.83	12.23
27	5—01	7—24	4.85	12.05
28	5—40	6—45	4.74	11.51
29	5—15	7—10	4.86	12.02
30	5—08	7—17	4.53	11.82
31	5—15	7—10	4.80	11.96
32	5—37	6—48	4.96	11.76
33	5—33	6—52	4.85	11.72
平 均	5—14	7—11	4.73	11.92

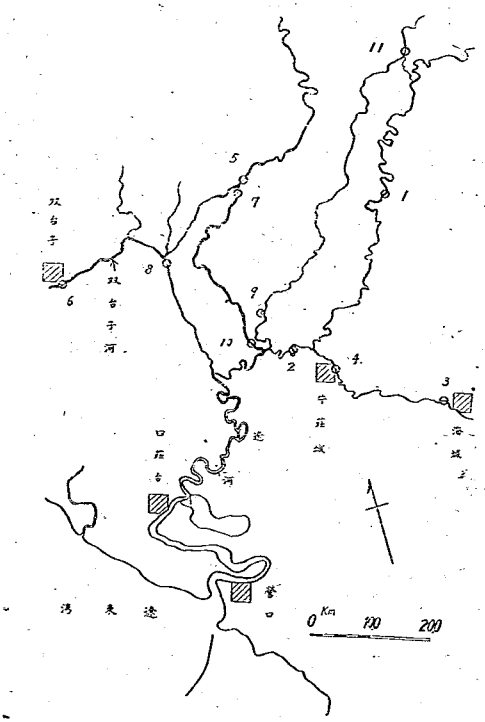
(c) 河の狀態

遼河は洪水時に泥土の流出が非常に多いことは，前にも述べたが其の最も甚だしいのは支流柳河からのものである．此の河は河口より上流約 320km の新民府に於て遼河に注ぐ支流であつて平時は全く枯渇して居るが，雨季には夥しい土砂を流出し，之が遼河下流に流下する土砂の大半を占めて居る．此の流出土砂を防止する爲1938

年以來柳河の砂防工事が行はれて居り．此の工事の完成には大きな期待がかけられてゐる．

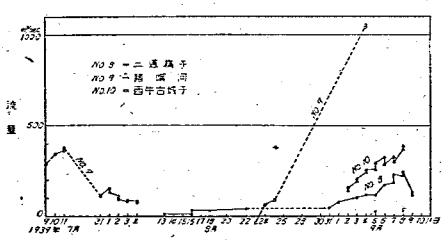
次に遼河と双臺子河が唐家窩堡に於て連絡されてから，遼河本流の流出水は其の半ば以上，双臺子河へ流出して了ふので，之を昔日の如く遼河本流に復歸させ營口を再び昔の繁榮に戻さうと云ふ目的で新開河が開鑿された，之は舊遼河工程局時代に上游遼河總工程司の岡崎文吉博士の計畫實施せられたもので，双臺子河筋の二道橋から遼河本流筋の夾心子に至る延長約 22.5 km の開鑿水路（底幅 183 m　平水に於ける水深 2.28m 堤防法勾配 2 割）である．開鑿と同時に二道橋に於て双臺子河全巾に，ストニー式水門 7 連と民船を通す爲の閘門を設けた，此工事は 1920 年立案され用地買收等に 3 ヶ年を費し，1924 年着工 1928 年に其掘鑿を 95 %で打切つて 7 月末開通した，然し開通以來 1930年迄に夏期 3 回に亙り大洪水があつた爲 1930 年 11 月には二道橋と二十里堡間約 8.5 km に夥しい泥土の沈澱を來した．其爲水門の調節による人工的掃流作用は著しく減退して了つたから，之を浚渫によつて淺瀬の除去を行ふと同時に急屈曲部の護岸工事を施工しなければ新開河本來の使命を果すことが出來ない狀態に立至つた．此の沈澱泥土は滿洲國に接收の年即ち 1934 年の 8 月には泥土高1.5 m に及んだので，之を取除く爲 1935 年吸揚式浚渫船一隻（能力 150 m^3/hr）を購入し，1935年 9 月より浚渫を開始し，翌 1936 年も作業を行つたが 1937 年 4 月の測量によると全く原河床に戻つて少しも浚渫の效果が現はれなかつた．之は夏期洪水時の夥しい流泥と

圖—8　遼河流量調査位置平均平面圖



冬期間結氷の爲作業を中止する爲效果が擧がらなかつたのである．其爲平水は（大連灣中等潮位上 3.00 m 以下の水位）全然水の疎通無く夏期洪水時のみ流通して居る現狀である．然るに 1937 年頃より舊河川たる遼河本流は新開河の惡化に反し河狀が著しく良好となり，遼河を上下する民船の大部分は遼河本流を經て運航して居る現狀である．

圖—9　實測流量圖



（i）上流の流出水　　今上流よりの流量

表 — 3

遼河流量調査表　(每月 15 日觀測), 康德 6 年(1939)

場所	月 / 種別	4	5	6	7	8	9	10	11	12
(1) 太子河唐馬寨	水位 m	3.76	3.84	5.69	4.53	4.07	5.30	4.62	4.00	3.83
	流水斷面積 m^2	144.8	126.7	291.0	193.8	165.3	1,038.4	214.1	141.0	109.8
	平均流速m/sec	0.458	0.509	0.672	0.338	0.317	0.793	0.389	0.224	0.179
	流量m^3/sec	66.26	64.52	195.81	65.47	52.33	839.48	83.19	31.58	19.64
(2) 太子河小馬溜	水位 m	1.32	1.22	1.78	2.90	1.10	5.79	1.90	0.85	0.73
	流水斷面積 m^2	224.0	241.9	305.0	464.0	313.8	852.5	400.2	325.5	251.3
	平均流速m/sec	0.446	0.482	0.806	0.888	0.378	0.905	1.124	0.756	0.764
	流量m^3/sec	99.87	116.66	245.75	411.86	118.50	771.57	449.69	246.02	191.88
(3) 海城河海城	水位 m	22.08	22.19	22.20	22.25	22.35	22.33	22.19	22.20	22.20
	流水斷面積 m^2	13.0	8.4	2.2	6.2	28.5	27.8	15.2	12.3	13.3
	平均流速m/sec	0.422	0.451	0.378	0.511	0.677	0.675	0.526	0.419	0.426
	流量m^3/sec	5.48	3.81	0.82	3.16	19.30	18.75	8.01	5.16	5.66
(4) 海城河牛莊	水位 m	4.08	4.21	4.11	4.28	4.24	5.72	4.56	4.40	4.42
	流水斷面積 m^2	10.6	8.6	4.0	11.3	7.8	60.3	16.5	11.0	12.5
	平均流速m/sec	0.344	0.406	0.360	0.400	0.390	0.262	0.490	0.469	0.453
	流量m^3/sec	3.65	3.49	1.44	4.18	3.06	15.80	8.49	5.15	5.66
(5) 双唐盞家宮河屋	水位 m	5.60	缺	4.73	6.87	5.81	7.40	5.83	5.14	流氷ノ爲メ缺測
	流水斷面積 m^2	226.8		132.4	414.9	238.1	302.5	205.5	129.4	
	平均流速m/sec	0.762		0.565	1.147	0.700	1.647	0.738	0.552	
	流量m^3/sec	172.75	測	74.76	475.79	166.84	504.44	155.36	71.43	
(6) 双盞子河盤山	水位 m	1.38	0.82	1.22	2.42	1.34	缺	1.68	3.08	
	流水斷面積 m^2	407.0	342.2	340.3	538.1	385.0		294.7	465.1	
	平均流速m/sec	0.464	0.439	0.537	0.492	0.581		0.482	0.3	
	流量m^3/sec	188.97	150.17	182.83	264.71	223.77	測	141.93	420.05	
(7) 外遼河六間房	水位 m	5.75	4.79	4.96	7.18	5.88	7.63	5.95	5.37	
	流水斷面積 m^2	80.1	36.0	43.0	166.5	79.3	209.4	79.6	50.6	
	平均流速m/sec	0.715	0.301	0.437	1.185	0.417	1.367	0.676	0.449	
	流量m^3/sec	57.35	11.51	18.78	197.35	33.07	291.38	56.71	22.68	
(11) 渾河筋北大溝	水位 m	7.92	7.70	9.00	9.23	7.70	11.65	8.22	7.98	7.82
	流水斷面積 m^2	78.2	60.0	160.0	178.3	60.5	412.0	68.8	50.2	35.9
	平均流速m/sec	0.82	0.705	1.091	1.115	0.704	1.800	0.833	0.732	0.438
	流量m^3/sec	65.20	42.75	169.00	196.52	42.81	773.50	57.29	36.77	15.71

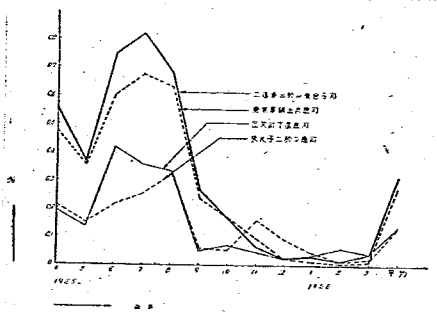
1. 水位標高は凡て大連灣中等潮位を零とする.
2. 實測は每月中旬行ひしものにして流速は浮子, 及び廣井式流速計により測定する.
3. 盤山は感潮部なる爲流量複雜である..

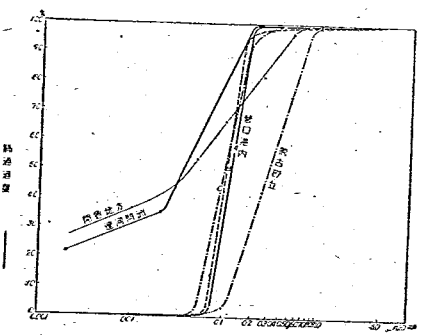
表—4

康德6年(1939)	4月	5月	6月	7月	8月	6月	10月	11月
(5) 双臺子河唐家窩堡	m^3/sec 172.75	—	47.76	475.79	166.84	504.44	155.36	71.43
(7) 外遼河六間房	57.35	11.51	18.78	197.35	33.07	291.38	56.71	22.68
遼河本流への流入比	33.2%	—	25.1	41.5	19.8	57.7	36.5	31.8

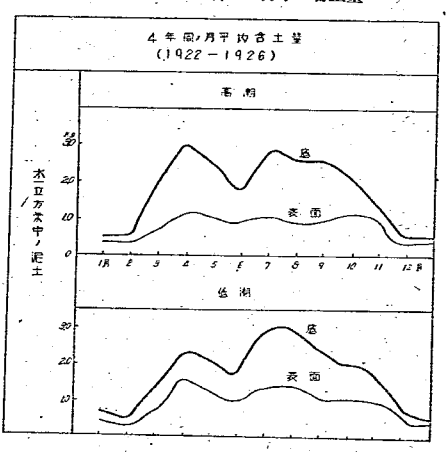
流入比平均 35.1 %

圖—10　遼河本支流に於ける含有土砂の月別百分率及土砂粒度曲線





圖—11　港内に於ける河水の含土量



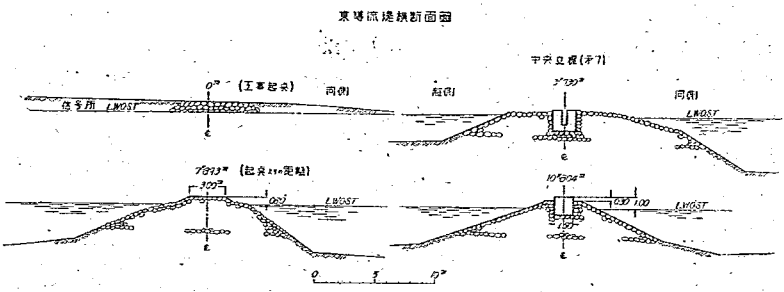
を康德6年(1939年)の實測に就て見ると圖—8 及び表—3 の如くである．此内 (1)～(7) 及び(11) は毎月 15 日に同時に觀測されたものであるが (8) (9) (10) は圖—9 に示す日に測定された値である．又 (2) (6) (9) (10) は感潮區域である爲複雜な流量を示してゐる．(5) は唐家窩堡に於て双臺子河と遼河に分流する前の流量で (7) は遼河へ流入する流量であるから此の流入量の比を計算すると表—4 の如くで大體平水時には 30 %，洪水時には 50 %，遼河本流へ流れて居る．

三叉河より下流は太子河及び渾河を合流する爲と潮汐の影響を受ける爲斷合水量は豐富である．此の實測結果より推定すると營口に達する平水は大凡 200m^3/sec，洪水は 2,300m^3/sec 位と思はれる．遼河本流の洪水量尚ほ大であるが，上流域で溢流散開する爲唐家窩堡に達する洪水量は僅か 1,700m^3/sec 程度に過ぎないと云はれてゐる．

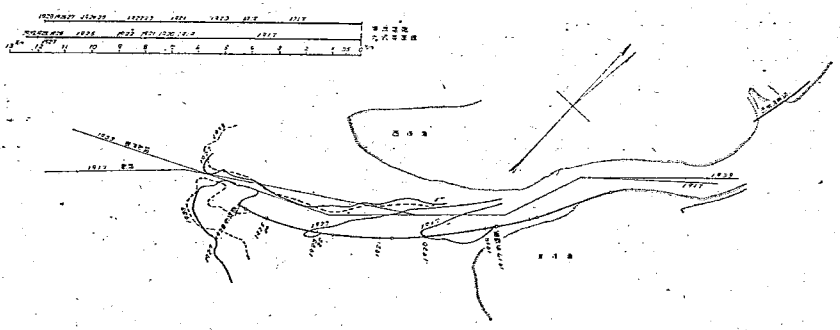
(ii) 漲泥　遼河の河岸は從來殆んど人工を加へられず自然の儘である爲，常に岸の缺潰を來し，之が上流からの流出泥土と共に河口へ運ばれて沈澱し厄介な閉洲を形成する．

遼河本流に於る含有土砂の月別百分率を示せば 圖—10 左の如くである．之は 1925 年 4 月から 1926 年 3 月迄每日河水中の懸垂土砂重量の水に對する比である．尙 圖—10 の右は蒙古砂丘の土砂，蒙古開墾地方の土砂，

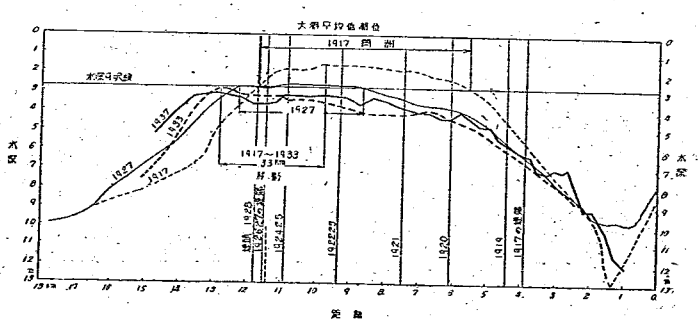
圖—12　東 導 流 堤 橫 斷 圖 面



圖—13　東導流堤各年施工延長と 9 呎等深線の移動關係圖



圖—14　導流堤の延張に伴ふ閉洲の移動縱斷圖



營口港內及び遼河々口門洲の土砂を篩分けた粒度曲線である.

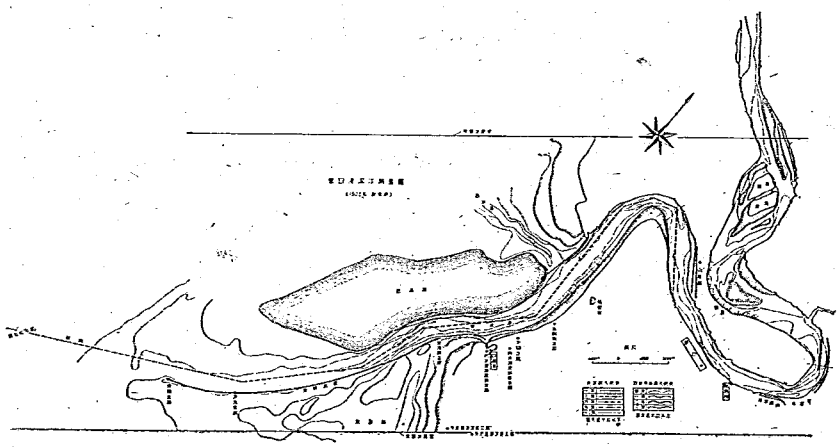
次に營口港內に於る 1922～1926 年間の月平均含土量を示せば 圖—11 の如くである. 之によると解氷時期と洪水時期に土砂が特に多い. 又水面と水底との含土量にも大きな差がある. 大體水の重量に對し夏期は 0.35%, 冬期には 0.05% 位の泥土を含有してゐる.

(d) 河口の狀態

(i) 導流堤　河口の門洲は當港にとつて最も大きな障碍である. 此門洲を流水の掃流力によつて洗掘せしめ, 河口の水深を維持する爲東導流堤の工事が施工せられた. 之は 1916 年工を起し 1928 年迄に 11.8km の延長に及んだのであるが, 工費不足の爲以後はたゞ維持工事だけが行はれた. 構造は 圖—12 の如く天端巾 3.0m 兩法 2 割の簡單な形の捨石工で天端高は上潮を餘り阻害しない事と流水による被害を考慮して最干潮位上 60cm に築造せられた. 使用石材は約 50 萬立方米で工費約 210 萬圓を要した.

門洲の深さの改修工事着手以來の變化を見るに 1916～1922 年迄は航路は大體 1.8m に維持され 1927 年頃迄は 2.1m 內外, 以後は 2.7～2.9 m に維持されてゐる. 此の水深維持と東導流堤工事の進捗とは密接な關係があるから各年の施工延長と 9 呎 (2.74m) コンターの移動平面圖を 圖—13 に, 又門洲の縱斷面圖を 圖—14 に, 示す. 之によつて見ると導流堤施工の結果門洲の頂は海に向つて 1 年に約 120 m 移動し, 1917 年以來 1928 年迄に約 1,800m 移動した. 1928年以後門洲は稍々平衡狀態に保たれてゐるが, 尙年々相當の浚渫を必要とするから右岸に並行導流堤を設け之等を現在の堤頭より尙 3600 m 程度延長し水深 L. W. L 以下 7m の場所に達せしめ年々の浚渫土量を輕減する工事が計畫されてゐる. (圖—20 a 參照) 尙康德 5 年 (1938年) 秋實測の遼河々口深淺測量圖を 圖—15 に示す.

圖—15 遼 河 々 口 深 淺 測 量 圖



(ii) 西水道締切　遠河本流の水が西水道から逆流するのを阻止して河水を河口に導流し，以て淺瀨を洗掘せしめる目的で 1916，17 年に締切られた．其後補修，補强が施され 1934 年以後は手を加へることなく現在に及んでゐる．構造は東導洗堤と同樣の捨石堤で平面圖（圖—15）に見る樣締切られ，一部二重に補强工事が施されてゐる．現在天端高は低い部分で L.W. 上約 60cm 高い處は 2m 位で上流根元附近では約 2.8m である．

導流堤の項で述べた並行導流堤の計畫では此の西水道締切附近は L.W.+4.0m で防波堤となり，現在は上潮，下潮が締切上を溢流して居るが計畫では全然遮斷される事となる．

現在の下潮時溢流狀況を 圖—16 に示す．上潮では此の樣な締切內外に於ける水位差は生じない．

圖—16　西水道締切の下潮時に於ける狀況

a—B點より北を望む　　b—A點より北を望む

(iii) 浚渫作業　1929年舊工程局は導流堤と共に浚渫によつて水路の維持を行ふ計畫を樹て，當時ジヤワにあつた浚渫船を購入して 3—4 ケ年で門洲上の水路を水深 12 呎（3.66 m）幅員 400 呎 122 m に浚渫し，更に之が成功の曉には水深 14 呎（4.27 m）幅員 200 呎（61 m）の水路を開鑿し樣としたのであつたが，之が成績は豫期した通りの效果を得られなかつた．此の浚渫工事は 1930 年～32 年に行はれたのであるが，多期の不就業期間を除くと每年大體 5 月～10月の 6 ケ月間作業し，浚渫作業前 9.5 呎（2.9m）であつたものを 10～12 呎（3.28～3.96m）に浚渫したが作業中も夏期の洪水で浚渫能力以上の泥土が沈澱し，結局作業の終りには 10 呎（3.28m）位で結氷期に入る，此期間に幾分の沈澱があつて翌年 5 月の浚渫開始期には，前年の浚渫開始の時と同じ 9.5 呎（2.9m）の水深に還る．

浚渫船は吸揚式のもので其の能率は 1 年の內 6 ケ月の作業で約 100,000 m^3 であつた．此の能率の擧がらぬ原因は土砂が非常に微粒で，泥艙中へ却々沈澱しない事，結氷の爲作業が 1 年の內 6 ケ月しか出來ない事等が擧げられてゐる．

河口門洲の土質を 1930 年ロンドン帝國商工協會で分析したものを 表—5 に示す．

浚渫能率が此樣な狀態であつたので 1933 年には工費の無いことを理由に一時作業を中止した。

表—5　105°C に乾燥せし土壤の百分率

區分	粒徑 mm	百分率
粗砂	2.0～0.2	0.38
細砂	0.2～0.02	64.40
沈泥	0.02～0.002	13.43
粘土	0.002以下	17.25
105°C に於る水分		3.73
水に溶解せる物質		0.97
灼熱減量		(3.10)
計		100.16

其結果同年 11 月には水深 8.5 呎 (2.8m) に減じたので浚渫の必要が認められ 1934 年滿洲國航政局に接收後は再び作業を開始した. そして 1937 年には新しく 600 t のバケツト式浚渫船 (浚渫能力約 200m³/時) 一隻を加へて水深の維持に當つてゐるので現今は水深 10 呎 (3.3m) に保たれてゐる.

(iv) 碎氷作業　前述の如く 1 年の內 28 %の期間氷の爲貿易が杜絕することは港として實に大きな打擊と云はなければならない. 由つて之を碎氷作業によつて打開し樣といふ議は 1919 年頃より營口官民の間に起つて, 爾來調査研究の結果, 1931 年 3 月 5 日より 20 日間餘, 營遼河工程局に於て試驗的に行つた. 之は天津工程局所屬碎氷船通陵 (總屯數 342 t, 700HP) 清陵 (總屯數 342 t, 900HP) の 2 隻を傭船して碎氷したのであるが, その結果は所期の目的を達し, 人爲的に不凍港となし得る事實を確めた. 其後久しく碎氷作業は行はれなかつたが 1936 年再び作業が行はれ, 次で 37 年 2 月にも碎氷作業を實施の結果何れも開港期を 1 ケ月～1 ケ月半早めることが出來た.

(e) 流　速

(i) 航務局前に於る流速

營口港內に於る潮の流速を 1923 年 6 月及び 1933 年 9 月に實測したものを表—6 に示す.

表 — 6

潮	1923 年 6 月	1933 年 9 月
大潮時の上潮最大流速	2.11m/sec	1.98m/sec
〃 下潮 〃	1.58	1.45
小潮時の上潮 〃	1.34	1.46
〃 下潮 〃	1.34	1.28

營口航務局前 (斷面 No.36) に於る 1937 年 9 月 6, 7 日 (月令 2, 3) 及び 1939 年 4 月～10 月の每月 15 日の實測を表—7 に又 5 月, 7 月, 9 月, 10 月の各斷面に於ける平均流速及び流量を圖—17 に示す.

表—7　實測流量表　(營口航務局前橫斷抗 No. 36),　康德 6 年(1939)

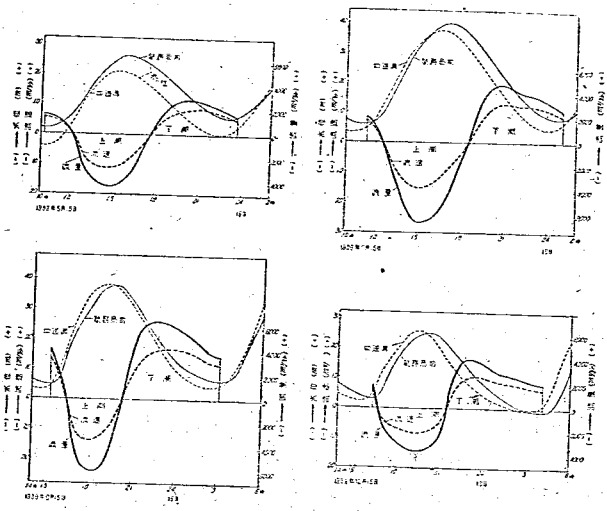
月日 (括弧內は月令)	一潮時の時間	下潮量 m³	上潮量 m³	下潮：上潮	河水量 m³	河水の下潮に對する割合 %	河水m³/sec
4. 15 (26) 16	時 分 13 0	63,188,472	58,963,284	0.517 : 0.483	4,225,188	6.7	90
5. 15 (26) 16	〃 〃	53,674,218	57,477,387	0.483 : 0.517	—	—	—
6. 15 (28) 16	13 30	100,387,548	90,425,844	0.526 : 0.474	9,961,704	9.9	205
7. 15 (29) 16	〃 〃	93,299,640	85,728,192	0.521 : 0.479	7,471,448	8.0	154
8. 15 (1) 16	12 35	116,611,500	116,107,200	0.501 : 0.499	504,300	0.4	11
9. 15 (3) 16	11 40	132,521,412	58,499,580	0.694 : 0.306	74,021,832	55.8	1,760
10. 15 (3) 16	11 35	72,688,368	44,319,528	0.621 : 0.379	28,368,840	39.0	680

(ii) 東西水道に於る流速

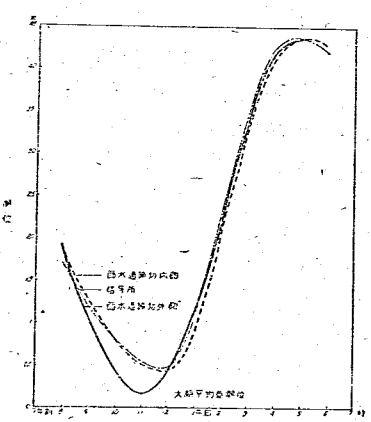
1923 年 6 月 29 日實測による西水道締切の內外水位と信號所水位との關係を 圖—18 に示す. 之によると締切內に於て最低潮位になる時間が締切外よりも約 1 時間早い.

又圖—19 は 1939 年 8 月 4, 5 日 (月令 19, 20) に東水道及び西水道に於ける分流量を實測せるものである.

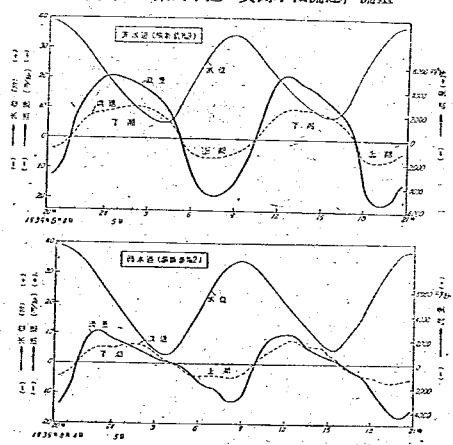
圖—17　航務局前に於ける實測の水位，平均流速，流量及び四道溝の水位（表—7 參照），（ ）内の數字は月令．5 月 15 日 (26)；7 月 15 日 (29)；9 月 15 日 (3)；10 月 15 日 (3)



圖—18　西水道締切内外の水位



圖—19　東西水道の實測水位流速，流量



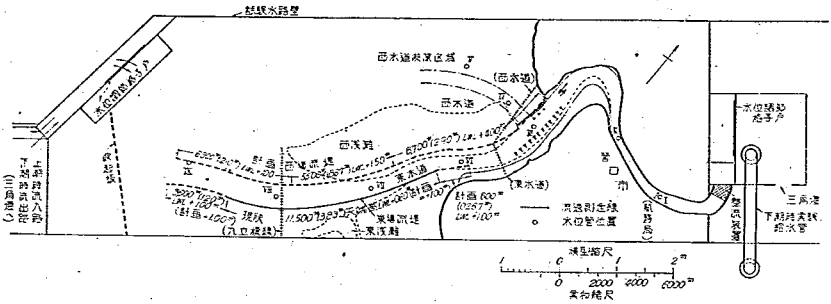
II.　試驗設備及試驗事項

[1] 試驗設備

本試驗は當所赤羽分所屋内 4 米工法試驗場内に於て行つた．模型の縮尺は試驗場の大さに依り制限を受け平面

縮尺は 1/3000 鉛直縮尺は 1/150 と定めた.

圖—20 a 模型平面圖

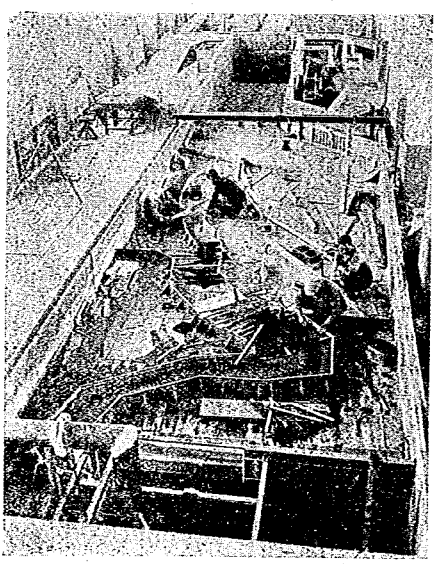


模型に取入れた範圍は 圖—20 に示す如く航務局前上流約 2.3 km から康德 6 年 (1939年) 現在の東導流堤端下流約 6.4 km 迄である.

康德 5 年 (1938年) 現地に於て實測した深淺測量平面圖 (縮尺 1/11,000) 及横斷測量圖 (縮尺横 1/3,000 鉛直 1/300) より又以上の圖面にない海の部分は海圖によつて, 約 100 箇所の横斷型板を作つた.

深淺測量平面圖に於ては四道溝を境として上流 (斷面 No. 3～41) は河の L.W.L (大連灣中等潮位—12.5 m) 下流 (斷面 No. 3 より下流) は海の L.W.L (大連灣中等潮位—1.79 m) によつて深淺が表はされてゐるが本試驗では基準面として常に海の L. W. L を採用した.

圖—20 b 模型製作中の寫眞



河の L.W.L は大連灣中等潮位以下 1.52 m であり海の L.W.L は之よりも更に 27cm 低い. 試驗通底上 40 糎に床板張をなしその上に模型を作つた. 模型表面はセメント 1, 荒川砂 (平均粒徑 0.25 粍) 3, 黒色着色劑混入のモルタルで仕上げた.

尚締切堤, 水制, 導流堤は鉋仕上せる厚さ 5 粍の板で作つた. 圖—20 b は模型製作作業を上流側から見たものである.

試驗の場所は潮汐の影響によつて正流及逆流を生ずる爲下潮上潮及び何れの場合にも試驗し得る樣に裝置し, 何れの場合も流量は模型の終端にある頂角 45° の三角銳緣堰によつて測定した.

模型の上流端及下流端に木製格子戸を設けて此の加減により水位の調節を行つた.

模型各所の水位の關係を見る爲めに圖—20 a の

Ⅰ乃至Ⅸの9ヶ所に內徑6mmの銅管を埋め込みゴム管により硝子製水位管に接續した.

水位はベンゾールを使用し水位差を約8倍に擴大して讀み取つた.

潮汐波の進行狀態を見る爲に別に 圖—20 a に示す位置に一端に蝶番を有する高さ 23cm 長さ 2.25 m の板を水中にて振動しこの波の進行狀態を見る裝置を設けた.

[2] 試驗事項

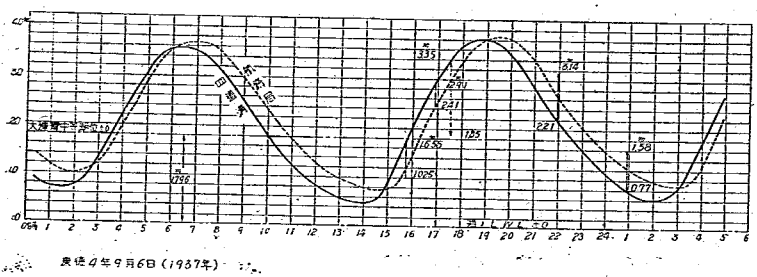
(i) 定流に依る試驗

當所に於ては未だ潮汐を發生せしめる裝置を有しない爲, 本試驗に於ては下潮時 (正流) 及び上潮時(逆流)に於ける定流狀態に於て行つた.

模型に收めた範圍內に於ける現場の水位觀測所は航務局前と四道溝の二ヶ所であつたから模型試驗に於てもこの二ヶ所で水位を合せた.

定流に依る試驗は下潮時と上潮時の 2 種類に就いて行つた. 各場合とも高潮位及び低潮位の二つに就て試驗した.

圖—21　航務局—四道溝水位曲線圖



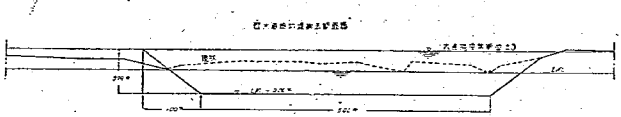
水位は康德4年 (1937年) 9月6日～7日の大潮時の水位曲線によつた. (圖—21 參照).

模型の形は

(a) 現狀　康德5年 (1938年) 2月調査の圖面による現在の地形の儘.

(b) 西水道締切一部撤去及水路浚渫.　西水道に底巾 500 米法面勾配約 1/250 の梯形水路を海の L.W. L.—2 米迄浚渫し締切工をその水路の斷面なりに撤去したもの. 圖—22 參照

圖—22　西水道締切堤撤去跡面圖



(c), (b) の模型で締切撤去の上流側へ水制を設けて下潮を東水道へ導く樣にした模型.

(d)　計畫の導流堤による場合.　西導流堤を新設し, 東導流堤を根元及び先端共に延長したもの. (圖—20a に太い破線にて示した導流堤)

(e) (d)の西水道部分の西導流堤を(b)の如く切り開き西水路を浚渫した場合.

であつてこれら各〻に就いて下潮時，上潮時に於ける東水道及び西水道斷面の流速，航務局前の流速，九立標線（東導流堤の九立標を通り試驗槽の長手の方向に略〻直角な線）に於ける流速を測定した.

上記斷面に於ける流速測定には細いピトー管を用ひ，間隔5糎毎に，深さ1~1.5糎毎に流速を測定した．各深さに於ける流向も同時に測り，表面に於ける流向及流速は約1糎平方の紙片を流して普通露出1~½秒を與へて寫眞撮影をした．又各斷面に於ける水位は水面測定針を用ひて測つた．模型全體に亘る流況は16粍撮影機に收めた.

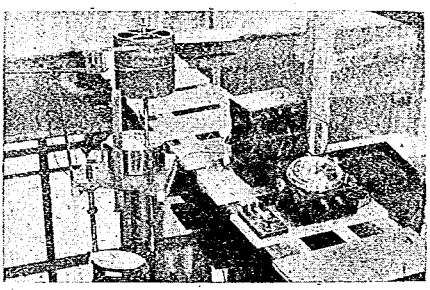
(ii) 波による試驗

本試驗は遼東海灣から押寄せる潮波が遼河々口及河中に如何なる狀態で進むかを見んが爲の試驗であつて海の方から波を送つて No. 0~No. 21 の 21 ケ所（圖—37 及38 參照）で廻轉式圓筒記錄器により記錄し波頂の進行の時間的遲れ即ち波の傳播時間を調査した．波は波起し板を海側の模型モルタル塗り終りの所に蝶番で垂直に取付け常に一定の波形週期のものを送る樣にした.

波は大部分は唯一回の運動による押し波で行ひ一部引波で行つたが引波は波頂不鮮明にて良結果を得られなかつたので押波による結果だけを報告することゝした.

波起し板の方向從つて波の進行方向は上述"遼東海灣の潮汐及潮流に就いて"中の半日週潮の潮流の方向を基とし營口航務局調査の潮流觀測の結果を參照し，又模型下流側流入（調節用）格子戶の位置による影響を考慮して波起し板の位置を大體 N 47° W 從つて波の進行方向を N 43° E とした.（圖—20a參照）

圖—23 波記錄裝置



波の記錄は No. 0 を基準點としてこゝを通つた第1番目の波が No. 1~No. 20 に到着する時間及びその形を記錄した，記錄器は2臺を用ひ1臺を常に基準點に置き他の一臺を順次記錄個所に移轉してそれらの個所の記錄を取つた.

記錄裝置は 圖—23 に示す樣に水中に立てた3本の鐵棒を脚にした臺上に廻轉式圓筒記錄器を載せ，水上に浮べた薄いブリキ板製の浮舟の波による昇降をペンにより圓筒上の油煙紙に記錄せしめ，同時に秒時計に連結せるペンで時間的記錄を取つた.

III. 定流に依る試驗結果

康德4年(1937年)9月6日及び7日の水位曲線（出水時）(圖—21 參照）より，營口航務局前量水標と四道溝量水標（圖—20a に於る水位管位置ⅠとⅡ間）との同時水位が，大體中等潮位附近及び低潮位附近で示す處の2つの相互水位を求め，之に基いて前述の (a), (b), (c), (d), (e) の5つの場合に就て試驗を行つた．試驗は主として東水道と西水道に於ける，下潮時の分流量及び上潮時の流入量を測定して比較を行つた．尙計畫西導流堤設置の場合と比較する爲，下潮時に於る實線の內 Y—2′, Y—5′, Y—8, Y—16, Y—21 は九立標に於て現在の東導流堤に略〻直角に測定線を設け，流速の測定を行つた．又現地に於る實測と比較する爲，Y—1, Y—2′,

Y—5′, Y—6, Y—8 の實驗では航務局前の斷面 No. 36 に於ても流速を計つた. 以上の外に潮位の高い狀態で, 東西兩水道に於る上潮量を (a) 及び (c) の模型で檢べた. 又低潮時の (d) 及び (e) の二つに對しては流量を現狀と同じに流した時の, 航務局～四道溝の水位差を測り, 更に航務局～四道溝の水位差を現狀と同じにした場合の全流量を測つた. 試驗の結果は表—8 に示す通りである. 又各試驗共表面流の狀態を見る爲に 1 cm 平方の紙フロートを流して寫眞寫眞を撮つた. 卽ち Y—1, Y—2′, Y—5′, Y—6～16, Y—21 は流速をピトー管で測定すると同時に, (但し 5′ は西水道の流速測定不能) 且フロート寫眞を撮つたが, Y—3′ はフロート寫眞のみによつて分流量の推定を行つた.

表—8 の試驗で同一模型で同一の水位差によつて試驗した場合に流量に著しく差があり又水位差と流量との關

表—8 替口港模型試驗の結果

狀態			實驗番號	水位差 mm	三角堰流量 l/sec	平均流速 cm/sec				流量 l/sec			東西水道分流比	備考
						航務局	東水道	西水道	九立標	航務局	東水道	西水道		
下潮時	中等潮位	a 現狀	Y—2′	6.2	2.75	37.00	25.00	6.26	8.73	3.12	2.26	0.56	0.80 : 0.20	
		b	Y—8	〃	〃	37.56	25.06	7.85	7.75	2.96	2.25	0.75	0.75 : 0.25	
		c	Y—10	〃	〃	—	25.58	6.68	—	—	2.25	0.61	0.79 : 0.21	
		d 計畫	Y—16	〃	2.37	—	26.69	—	10.76	—	2.40	—	1.00 : 0	
		e	Y—21	〃	2.60	—	26.90	6.00	11.16	—	2.47	0.56	0.82 : 0.18	
	低潮位	a 現狀	Y—5′	5.4	1.43	25.60	24.00	6.80	10.40	1.66	1.52	0.18	0.90 : 0.10	
		b	Y—9	〃	1.60 (1.43)	—	19.59	11.73	—	—	1.21	0.46	0.73 : 0.27	
		c	Y—11	〃	1.43	—	18.50	9.77	—	—	1.17	0.38	0.75 : 0.25	
		d 計畫	Y—17	〃	1.37									水位を合せ流量を讀び
		e	Y—20	〃	1.68									〃
		d 計畫	Y—18	5.9	1.43									流量〃水位〃
		e	Y—20′	3.6	〃									〃
上潮時	高潮	a 現狀	Y—15	10.0	2.48	—	7.40	8.52	—	—	1.004	1.845	0.35 : 0.65	
		c	Y—14	〃	2.52	—	7.59	8.59	—	—	1.028	1.860	0.36 : 0.64	
	中等潮位	a 現狀	Y—1	3.33	1.63	21.00	6.54	6.80	—	1.65	0.71	0.93	0.43 : 0.57	
		b	Y—6	〃	1.50 (1.62)	24.00	6.30	7.13	—	1.74	0.64	0.93	0.41 : 0.59	
		c	Y—12	〃	1.43	—	6.16	6.71	—	—	0.62	0.89	0.41 : 0.59	
		d 計畫	Y—25	〃	1.55	—	15.51	—	—	—	1.60	—	1.00 : 0	
		e	Y—22	〃	1.20	—	5.95	4.25	—	—	0.61	0.57	0.52 : 0.48	
	低潮位	a 現狀	Y—3′	4.2	1.18	—	12.70	5.25	—	—	0.95	0.28	0.77 : 0.23	
		b	Y—7	〃	〃	—	9.49	9.01	—	—	0.71	0.52	0.58 : 0.42	
		c	Y—13	〃	1.16	—	9.88	8.18	—	—	0.75	0.54	0.58 : 0.42	
		d 計畫	Y—26	〃	1.10									水位を合せ流量を讀び
		e	Y—23	〃	1.15									〃
		e	Y—24	5.0	1.18									流量〃水位〃
		d 計畫	Y—27	5.1	〃									〃

狀態欄中　a：現狀，b：西水道締切一部撤去，西水道浚渫，c：b の模型で水制設置.
　　d：計畫，e：d の模型で西水道締切一部撤去，西水道浚渫，水制設置.
水位差欄中の數字は航務局と四道溝との模型に於る水位差 (圖—20 (a) の Ⅰ と Ⅱ の水位差)

係が逆に出たものがあり又三角堰流量と，東西兩水道流量の和とが 10 %內外差のあるものがあるが，之は主に試驗中常に流れの狀態を一樣に保ち得なかつた事によるものと思ふ．模型の縮尺が小にすぎた事即ち使用流量が少なかつた事が主な原因であつて尙正確な結果は更に大なる模型を用ひなければ得られないと思ふ．本報告では實驗狀態が割合よく行はれたと考へられる處の表—8 のものに就て比較研究を行つた．

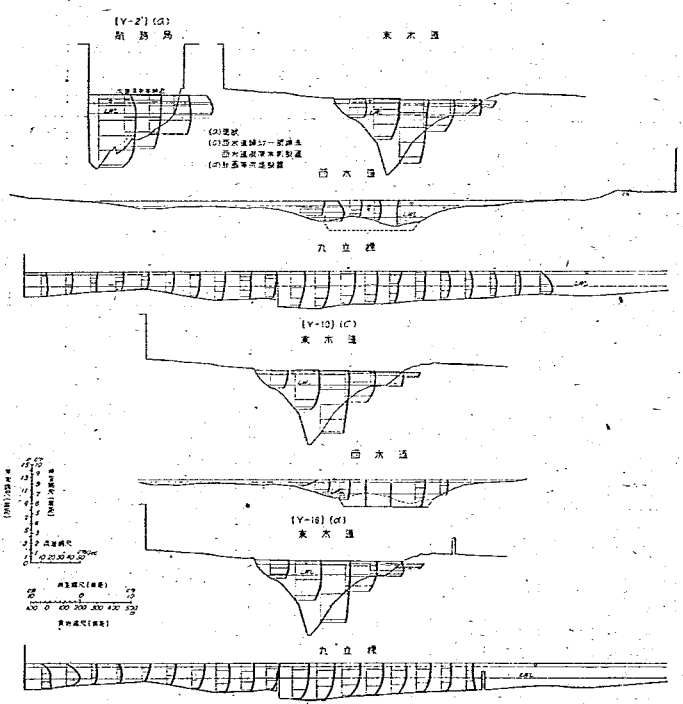
基準面は凡て信號所の L.W.L（大連灣中等潮位下 1.796 m）に據つた．

［1］ 下潮時中等潮位の場合

最初 圖—20 の水位曲線の示す航務局水位を +2.75 m（+18.33mm)[1] 四道溝を +2.21 m（+14.73 mm）水位差 0.54 m (3.6mm) にて行ふ豫定であつたが水位の調節が困難であつたので，航務局 +3.14 m（+20.93mm) 四道溝 +2.21 m（+14.73mm）水位差 0.93 m (6.2 mm) として試驗を行つた．之は分流點の水位が豫定水位の

圖—24　模型流速曲線．下潮時，中等潮位

Y—2′ は現狀．Y—10 は西水道締切一部撤去水制設置．Y—16 は計畫，



1)　弧內の數字は模型寸法に換算した値．以下同樣．

場合に近似する樣に，四道薄の水位を水位曲線に一致させたものである．

(a) 現狀の場合

現狀の場合に於る試驗結果は，表—8 のY—2′の如く，東水道と西水道との流量が各〻 2.26l/sec 及び 0.56l/sec で其比は 0.8：0.2 であつた．流速の分布は 圖—24 に示した．

又紙フロートを流した際の表面流の狀態を 圖—25 a 及bに示す．

(b) 西水道締切一部撤去し，西水道を浚渫した場合

表—8 のY—8 の如く東水道に於る流量は 2.25 l/sec，西水道は 0.75 l/sec，其比 0.75：0.25 で，現狀の 0.8：0.2 に比し，西水道からの流出比が稍〻增し東水道は減じてゐる．

(c) 西水道の締切を撤去した上流側へ 3 本の水制を設置せる場合

圖—20 a の如く水制によつて流心を左岸へ寄せる樣にして，西水道への落潮を抑制した．之に就て實驗の結果]は（Y—10），東西水道の分流量は殆ど (a) 即ち現狀の模型と同じであつた．其の値は，東水道 2.25 l/sec，西水道は 0.61 l/sec で比は 0.79：0.21 である．圖—24 流速分布及び 圖—26 參照．

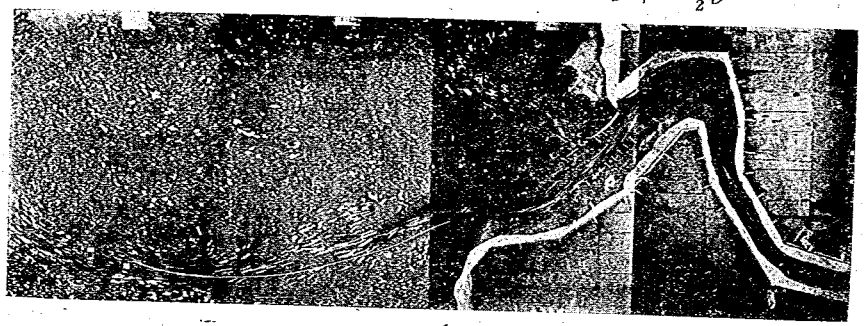
圖—25　a 流向寫眞，下潮時，中等潮位
試驗（Y—2′）現狀：寫眞撮影露出時間 t＝1 秒

圖—25　b 同上，東導流堤附近の表面流況　t＝5 秒
左圖は堤頭附近のみ．試驗中時に左圖の如く，時に右圖の如き狀態となる．

(d) 計畫導流堤を設けたる場合

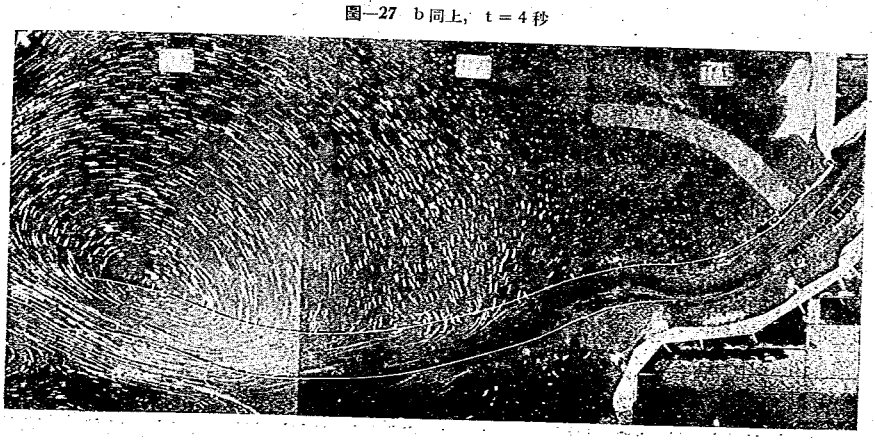
計畫導流堤は現在の東導流堤の根元及び先端を各〻延長し，此の西側へ之に略〻平行の導流堤を築造するものである(圖—20)．導流堤の先端は水深約 7 m に達する．東導流堤は總延長 15,900m で天端高は全部 L.W.L+

圖—26 下潮時，中等潮位，試驗（Y—10）
西水道締切一部撤去，西水道浚渫,水制設置 $t=1$ 秒←→ $t=\frac{1}{2}$ 秒



圖—27 a 下潮時，中等潮位，試驗（Y—16）計畫導流堤設置 $t=1$ 秒

圖—27 b 同上，$t=4$ 秒



1.00 m である．西導流堤は總延長 20,600 m で天端高は先端部 6,300 m が L.W. +1.00 m 次の 5,600 m は +1.50 m 殘りの 8,700 m は防波堤となす爲 +4.00 m である．之は左岸西砲臺より四道溝に亘つて岸壁にする計畫になつてゐるからである．計畫は此の平行導流堤と同時に航路を浚渫する事になつて居るが此の實驗では，左岸に岸壁を作ること，，航路の浚渫は行はず，河底は現狀のもので試驗を行つた，Y—16 の實驗が之である．

總流量は導流堤によつて河口が延長された爲稍〻減じたが，西水道が全然遮斷される爲，東水道の流量としては，反つて現狀（Y—2′）よりも稍〻增してゐる（表—8）．又東水道の平均流速は現狀（Y—2′）では 25.00cm/sec であつたのが計畫では 26.69cm/sec で約 7 %速くなつてゐる又九立標線で兩者を比べると，現狀 Y—2′ では 8.73 cm/sec であつたものが，計畫の Y—16 では 10.76 cm/sec と約 23 %流速が增した．圖—24 流速分布及び圖—27 參照．

(e) 計畫導流堤を設け更に西水道の締切を撤去しその上流へ 3 本の水制を設置せる場合

Y—21 の實驗が之で計畫（Y—16）のものに比べ東水道は略〻同じ流速流量を示してゐる．九立標線に於ける流速は現狀（Y—2′）の 8.73 cm/sec 計畫（Y—16）の 10.76 cm/sec に對し 11.16 cm/sec と增加した．東西水道の流量比は 0.82 : 0.18 である．

[2] 下潮時低潮位による試驗

低潮位の水位は 圖—21 の如く，航務局の水位を +1.58m (10.53mm) とし，其時の四道溝水位を + 0.77 m (+10.53 mm) とした．之は (i) の場合と同樣實驗の際水位差及び流量の少いものは容易に安定しないので水位差を大きく採つたものである．

(a) 現狀の場合

表—8の Y—5′ で航務局水位 +1.58m (+10.53mm) 四道溝 +0.77 m (+5.13 mm) 水位差 0.81 m (5.4 mm) にて實驗を行つた．其の分流量は東水道 1.48 l/sec. 西水道 0.18 l/sec で分流比は 0.9 : 0.1 である．但し西水道の流量は締切の低い部分から僅かに流出する程度で從つて流速も小さくピトー管による測定が不可能であつたからフロート寫眞より算定した値によつたものである．

此の Y—5′ と Y—2′ 即ち中等潮位の現狀とを比較するに，Y—5′ は西水道からの流出比が 10 %減じてゐる．之は西水道締切天端が 圖—22 の如き高さで締切られて居る爲である．

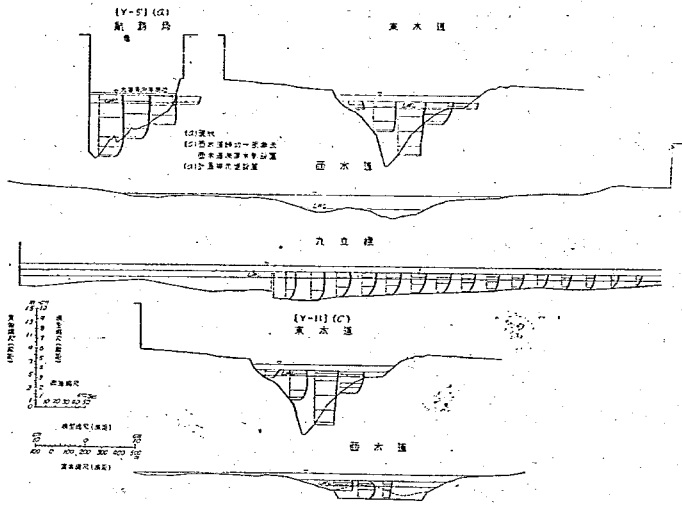
流速分布の狀態は 圖—28 に又表面流の狀態は 圖—29 に示した．

(b) 西水道締切一部撤去，西水道を浚渫の場合

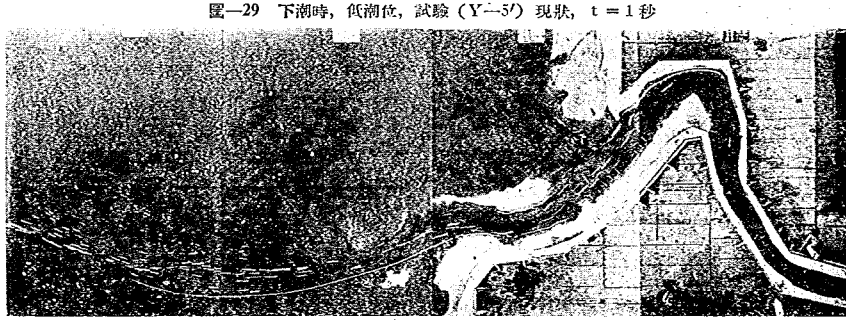
表—8, Y—9 の如く實驗水位は現狀の場合と同樣，航務局 +1.58m (+10.53mm) 四道溝 +0.77m (+5.13mm) 水位差 0.81m (5.4mm) にて流量は，東水道 1.21 l/sec, 西水道 0.46 l/sec, 其の比は 0.73 : 0.27 となり西水道からの流出が現狀のもの〻 0.9 : 0.1 に比しかなり多く，中等潮位の場合に於る現狀と浚渫との差より更に大きくなつた．

此の實驗で三角堰流量が現狀の 1.43 l/sec に對し 1.60 l/sec と測定された．中等潮位の場合は西締切撤去の場合も現狀と同流量であつたが低潮位では前記の樣に流量が增した，然し東水道としては反つて減少してゐる．實驗全體を通じ流水を安定せしめるのに非常に困難であつたが，特に低潮位の實驗で之が甚だしかつた．表—8 の三角堰流量欄で括弧內にある數字は再度同じ水位差で流したとき測定された値で，低潮位の實驗では此の程度の違ひは免れ得なかつた．

圖—28 模型流速曲線，下潮時低潮位
Y—5′ は現狀，Y—11 は西水道締切一部撤去，水制設置



圖—29 下潮時，低潮位，試驗（Y—5′）現狀，t＝1秒



(c) 西水道締切一部撤去，西水道浚渫，水制設置の場合（Y—11）

(a)，(b) のものより東水道への流量は減少する．又 (b) と同樣に西水道からの下潮量が現狀より多い．圖—28流速分布及び 圖—30 表面流況參照．

(d) 計畫導流堤を設けたる場合（Y—17）

全流量は (a) (b) (c) (e) のどれよりも少いが東水道を流れる量は (a) に次で大きい．此實驗は水位と全流量の關係のみを檢した．

(e)，(d) の西水道を (c) の模型と同樣にした場合（Y—20）

此の實驗も，水位と流量の關係のみ檢べたのであるが，航務局～四道溝が同一水位差の場合の (a) (b) (c)

圖—30　下潮時，低潮位．試驗（Y—11）
西水道締切一部撤去，西水道浚渫，水制設置 t = 1 秒

(d) の何れよりも全流量は多い．

［3］ 上潮時高潮位に依る試驗

水位の高い狀態で東西水道入潮比の關係を見る爲，

(a) 現　狀

(c) 西水道締切一部撤去，西水道浚渫，水制設置

の 2 つに就て試驗を行つた，實驗水位は康德 4 年（1937年）9 月 6 日の現地實測で上潮流速の最大の時に示された四道溝水位を基とし，四道溝 +3.35m (22.33mm)，航務局 +1.85m (12.33mm) 水位差 1.50 m (10.0 mm) として，東，西兩水道からの流入量を測定した．(Y—15, 14)

結果は水位差同一の場合の入潮量及東西兩水道の流量比何れも (a) と (c) では殆ど差がない卽ち西水道よりの量は東水道よりの量よりも著しく大である．

［4］ 上潮時中等潮位に依る試驗

圖—20の水位曲線から得た四道溝水位 +2.91m (+19.40mm) 航務局水位 +2.41m (+16.07mm) 其の差 0.50 m(3.33mm) で試驗を行つた．

(a) 現狀の場合

現狀に於る試驗の結果は表—8 の Y—1 の如く，東水道の流量 0.71 l/sec，西水道は 0.93 l/sec，で其の比は 0.43 : 0.57 となり，西水道からの流入量が東水道よりも 14 %多く測定された．流量分布は圖—31，表面流の狀態は 圖—32 に示した．

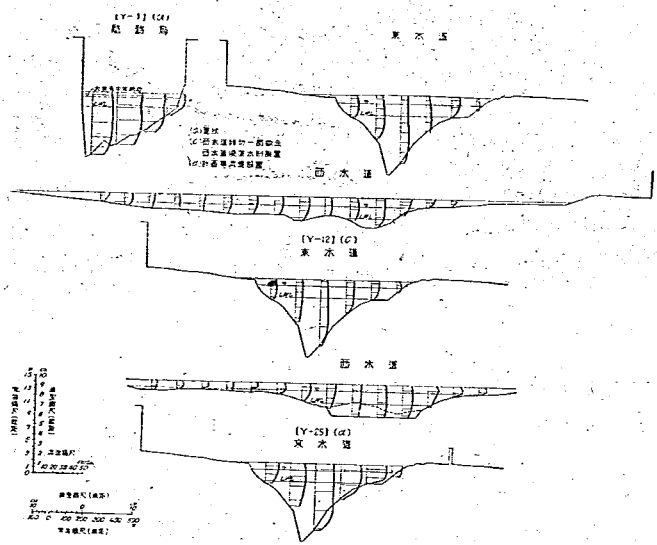
(b) 西水道締切一部撤去，西水道を浚渫の場合

實驗の結果表—8 Y—6 の如く，東水道 0.64 l/sec，西水道 0.93 l/sec，其の比は 0.41 : 0.59 で現狀の0.43 : 0.57 に比し，僅かに西水道からの入潮が增してゐる．

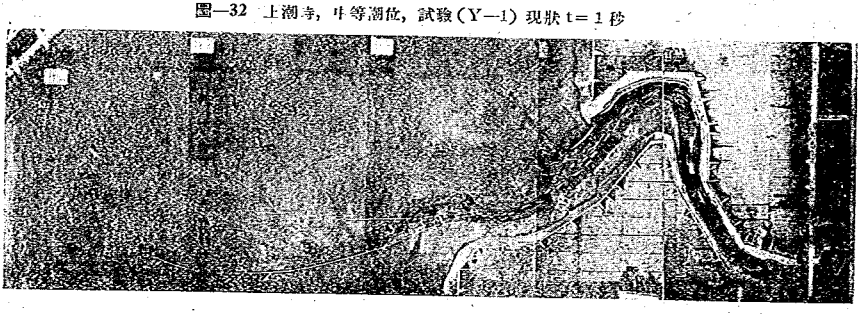
(c) 西水道締切を一部撤去，西水道浚渫，水制設置の場合 (Y—12)

東西分流比は (b) と同樣 0.41 : 0.59 であつた．全流量は 1.43 l/sec で (a) (b) よりも入潮量が少いのは水制による影響である．圖—31 の流速分布 圖—33 の表面流況參照．

圖—31 模型流速曲線，上潮時，中等潮位.
Y—1 は現狀，Y—12 は西水道締切一部撤去，水制設置，Y—25 は計畫.



圖—32 上潮時，中等潮位，試驗（Y—1）現狀 t＝1 秒



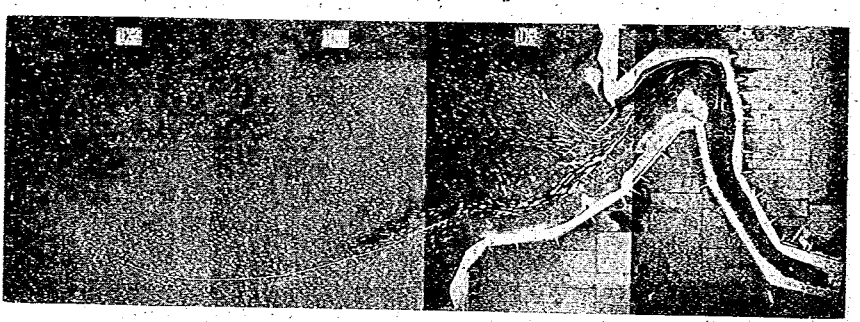
(d) 計畫導流堤を設けた場合（Y—25）

全流量は 1.55 l/sec で(a)の 1.63 l/sec より約 5 %少く (b) (c) よりも稍〻多い．此の場合は全流量が東水道を通る爲，平均流速は(b)及び(c)の約 2.5 倍となつた．卽ち (b) (c) に比べ東水道からの入潮量が增加した．之は東水道に對して，西水道からは之に直角に流入する爲，互の流勢を消耗して，入り惡くなつて居つたものを計畫では西導流堤によつて，西水道からの流水を遮斷したので，東水道を通る上潮が非常に入り易くなつたものと考へられる．

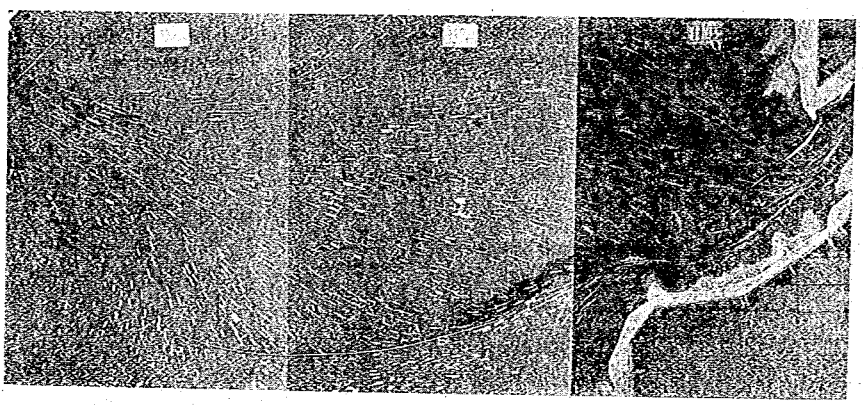
圖—31流速分布圖及び 圖—34 表面流況參照.

(e), (d) の模型で西水道を (c) の模型と同様にした場合（Y—22）

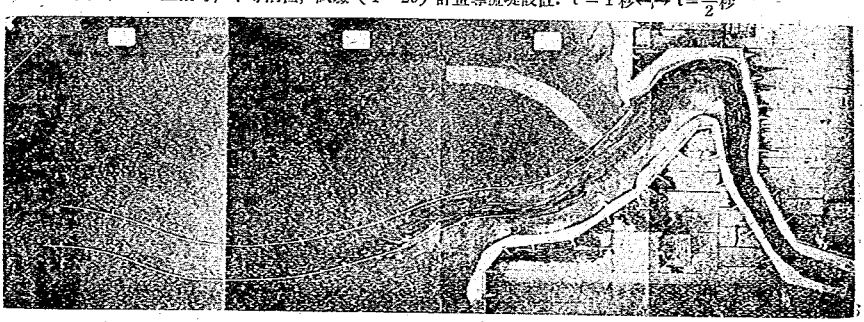
圖—33 a 上潮時，中等潮位，試驗（Y—12）西水道締切一部撤去
西水道浚渫，水制設置；t＝1秒



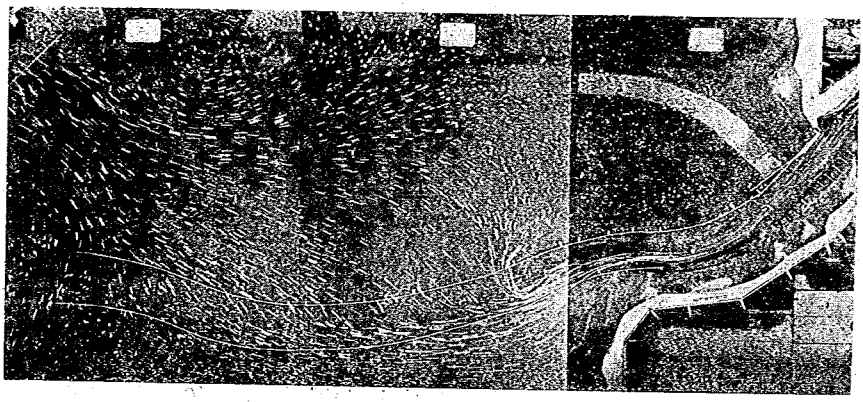
圖—33 b 同上. t＝4秒



圖—34 a 上潮時，中等潮位，試驗（Y—25）計畫導流堤設置. t＝1秒←|→ t＝$\frac{1}{2}$秒



圖—34 b 同上，t＝4秒



全流量は 1.20 l/sec で現狀の 1.63 l/sec に對して約 26 %，計畫のものより約23 %減少した．卽ち計畫導流堤で西水道を開いた場合は入潮を阻害すること顯著であつた．

［5］ 上潮時低潮位に依る試驗

低潮位の試驗は四道溝水位 +1.655m（+1.103mm）航務局水位 +1.025m（+6.83mm）水位差 0.63m（4.2mm）で行つた．この試驗も水位の調節が困難な爲，航務局水位が 圖—21 の水位曲線の水位差よりは大となつた．航務局水位を變へた事は下潮時の場合と同樣である．

試驗の結果は西水道よりの入潮量が中等潮位の場合に比し著しく減少した，之は締切堤を溢流する水深が減ずる爲であるから，此の西水道からの入潮量を低潮時にも相當流入せしめて，その下潮時の揚流力を東水道に於て利用するといふ見地から，西水道締切堤を一部撤去した模型で比較試驗を行つたのであるが，其の結果現狀のものより，入潮比に於て西水道は 19 %の增加を見た．

(a) 現狀の場合

此の試驗は流速をフロート寫眞による表面流速から算定した．試驗結果は東水道より 0.95 l/sec 西水道より 0.28 l/sec，となり從つて其の分流比は 0.77 : 0.23 となつた．之に對し中等潮位の場合には 0.43 : 0.57 である．

(b) 西水道締切一部撤去，西水道浚渫の場合

表—8 Y—7 の如く東水道 0.71 l/sec, 西水道 0.52 l/sec, で分流比は 0.58 : 0.42 と測定された．

現狀の實驗で中等潮位のときは 0.43 : 0.57 低潮位の場合は 0.77 : 0.23 と西水道からの入潮割合が著しく減じて居るが，締切一部撤去のものは中等潮位時 0.41 : 0.59 だつたのが低潮時も 0.58 : 0.42 となつてゐる程度である．之は西水道を撤去した爲に低潮時にも水が入る爲であつてこの關係は下潮の場合も同樣である．

(c) 西水道締切一部撤去，西水道浚渫，水制設置の場合 (Y—13)

全流量は (a) (b) より稍少く 1.16 l/sec であつて東，西水道の分流比は (b) と同樣であつた．

(d) 計畫導流堤を設けたる場合 (Y—26)

此實驗は水位を合せ全流量だけを測つた．全流量は 1.10 l/sec であつて，(b) (c) のものに比べ稍々減少した

然し全流量が東水道を通るのであるから，東水道としては流速流量共に增加してゐる．

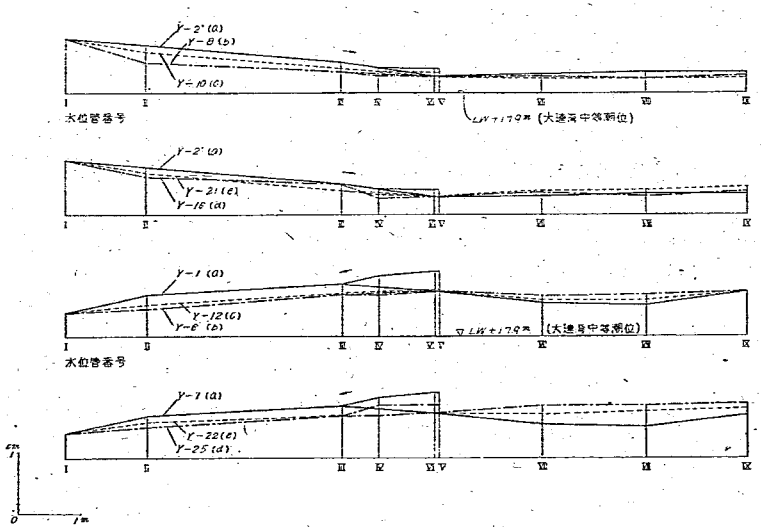
(e), (d) の模型で西水道を (c) の模型と同樣にした場合 (Y—23)

(d) と同樣に全流量だけを測つた．全流量は 1.15 l/sec で (d) と殆ど同じであつて，之は中等潮位の場合の (d) と (e) との關係と稍〻異る．

以上各種試驗に於て水面勾配を測定した結果を 圖—35 に揭げた．水路の底に設けた管を水位管に連結して讀

圖—35　各試驗に於ける水面勾配

4 圖中上 2 圖は下潮時，下 2 圖は上潮時，何れも中等潮位の合場



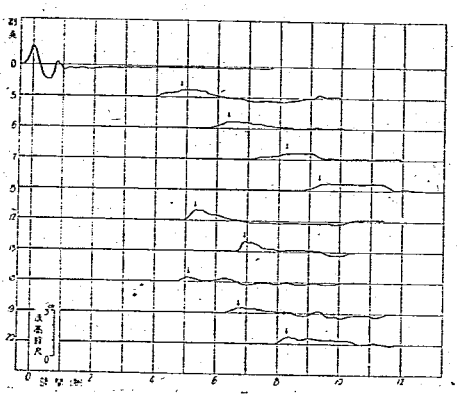
んだ結果である．圖の水位管ⅠⅡ等の位置は圖—20 に示した．

IV. 波による試驗結果

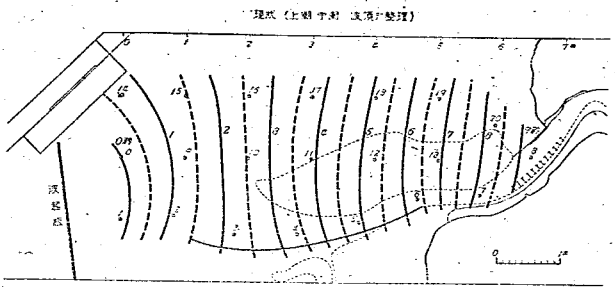
(a) 現狀の模型に就ての試驗

河口附近の潮汐波の進行狀態を明にする爲に行つたものであつて，その進行の速さは $\omega=\sqrt{gh}$ で定められる事は模型に於ても潮汐波と同樣に考へられるから，試驗結果から潮汐波進行の狀態を知る事が出來ると考へる．試驗は Y—1 に相當する中等潮位上潮時の現狀について行つた．基準點 No. 0 に於けるものと，これに對する西淺灘中央より上流

圖—36　押波ミ形圖

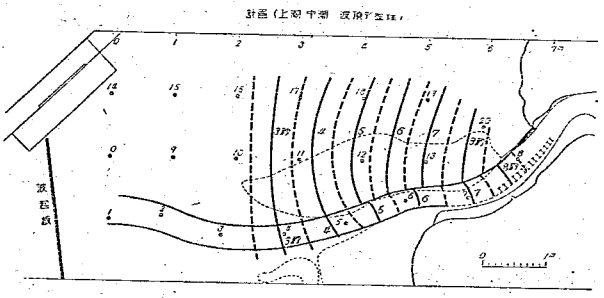


圖—37 押波の傳播狀況（現狀）



部の圖—37 に示した測點 No. 5, 6, 7, 8（東水道）12, 13（中央線）18, 19, 20（西水道）の押波による記錄を圖—36 に示した．各波に就て矢印に示した點を波の頂として之に就て波の傳播速度を算出した結果を圖—37 に示した．時間の數字は基準點 No. 0 からの傳播時間であつて 3 回の觀測値によつて計算したものである．之によれば波は進むに從つて形がのび波高は低くなつて，波形も極めて不規則になる．圖—37 によれば波の頂は西水道より入るものの方が東水道より入るものよりも稍〻早く到達するらしく見える．尙試驗の波は No. 0 附近に於て半波高 1.15 cm，周期 1.4 秒，波長 1.10 m といふ長い波であり傳播速度は No. 0 附近に於て約 0.79m/sec. である．圖—39 に東水道を傳はる波の速さを $\omega=\sqrt{gh}$ によつて計算した値と比較して示した．

圖—38 押波の傳播狀況（計畫）



(b) 計畫導流堤設置模型に就て

波の傳播狀態を 圖—38 に示す．之は基準點 No. 0 から各點に達する時間を 0.5 秒毎に波頂の位置を示したものである．之を現狀のものと比較すると，東水道を進行する潮波の速度が目立つて速く No. 8 に達する時間は計畫導流堤設置の場合之がない場合に比し約 1 秒早い．圖—39 參照．

V. 結　論

試驗の目標は現在の西水道を更に開鑿して上げ潮を入り易くして下げ潮の際に東水道を通過する量を多からしめる事が出來るか否か，又現在滿洲國に於て計畫されてゐる右岸導流堤竣功の曉に於ける流水の狀態を明にするにあつた．室內試驗設備を利用した爲模型の縮尺が小に過ぎ試驗の流量及水面勾配が過少となつた爲十分正確な

結果が得られなかつた事は遺憾であるが表—8に掲げた試驗結果から上記の各種狀態に就ての檢討を試みる.

模型はすべて固定の河底の場合であつて 1937 年現在の測量に基いて製作したものだけによつて行び改造後の河底の變化は取入れてない. 又潮汐による水面勾配の時間的變化を實驗には取入れてないが之等を考慮に入れて上記の定流による試驗結果を調べる事とする.

實際と模型との相似律は Manning 流速方式による相似律と Froude に依る相似律との間にある事が試驗結果と實測との比較によつて知られる. 卽ち Manning によれば

$$\frac{V}{v}=\frac{\frac{1}{N}R^{\frac{2}{3}}I^{\frac{1}{2}}}{\frac{1}{n}r^{\frac{2}{3}}i^{\frac{1}{2}}}=\frac{n}{N}\left(\frac{H}{h}\right)^{\frac{7}{6}}\left(\frac{I}{L}\right)^{\frac{1}{2}}=2.77$$

$$\frac{Q}{q}=\frac{AV}{av}=1{,}246{,}500$$

Froude によれば

$$\frac{V}{v}=\sqrt{\frac{H}{h}}=12.25$$

$$\frac{Q}{q}=6{,}750{,}000$$

玆に V 及 v は夫々實際及び模型の流速

N 及 n	〃	粗度係數（$N=0.025$　$n=0.0109$ にとる）
R 及 r	〃	徑深
I 及 i	〃	水面勾配
H 及 h	〃	水深
L 及 l	〃	平面の長さ

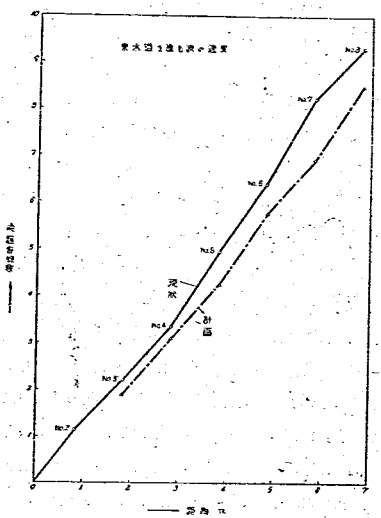
模型と實際との水位を一致せしめた時の平均流速の比は下潮中等潮位に於て $\frac{V}{v}=7.4$ 上潮中等潮位に於て $\frac{V}{v}=4.4$ となつてゐて兩者の比が一致しないでしかも上記の兩相似律による値の間にある. 之の上潮と下潮との比が一致しないのは主として時間の影響であつて實際では流速を測定した時の水面勾配になる以前の水面の狀態が著しく影響してゐる爲であらうと思ふ. よつて實際との數量的相似關係は廣い範圍内でしか論ずる事が出來ない.

波の試驗の場合その傳播速度 Q と ω 及び傳播に要する時間 T と t の比は

$$\frac{Q}{\omega}=\frac{\sqrt{gH}}{\sqrt{gh}}=12.25$$

$$\frac{T}{t}=\frac{\frac{L}{Q}}{\frac{l}{\omega}}=\frac{L}{l}\cdot\frac{\omega}{Q}=3000\times\frac{1}{12.25}=244.9$$

圖—39　東水道を進む波の速さ



即ち傳播速度は實際に於ては模型の 12.25 倍又甲地點から乙地點まで達するに要する時間は實際では模型の 244.9 倍である.

西水道外側は割合に水深が大であつて等深線は西淺灘外側の汀線に略〻平行して走つてゐるから潮汐波の進行方向は略〻この等深線に直角であつて上潮が西水道の本川と合流する點に到達する時間は西水道よりするものが本川よりするものより早い, この事は 圖—37 に示した試驗結果によつても首められる事である. 從つてこの潮を成可く多く本川に取入れ下潮時に航路の掃流に利用する事は常識的に考へられる事である. 然るに試驗の結果現在の狀態と西水道の締切を撤去した場合とでは同一水位差の下に於て上潮量は豫期に反し前の場合の方が稍〻大なる傾向が見える. 計畫導流堤を設けた西水道締切有無の二つを比較するに同じ傾向が認められる. 下潮時に於ける東水道の流速は西水道を開いた場合には稍〻小となる. 從つて西水道を開く利益は認められない, 却つて掃流力を弱める結果となる. 上潮時に於て流量が減少する結果となつたのは本川に對し西水道よりする流れが殆ど直角に入る爲に合流點附近に著しい渦流を生ずる爲である.

計畫右岸導流堤を設け且つ左岸導流堤を 7 m 等深線まで延長した場合には兩導流堤間の航路の水深維持は現在に比し著しく改善される事は試驗結果からも明に了解される. 此の場合土砂の沈澱は 圖—27 b に見る如く西淺灘の沖側への成長を助け且兩堤端沖の航路內に生じやがては又更に之の延長を必要とするであらう事は豫期される處である. しかし航路內では 7 m 等深線より深い部分に沈澱を生ずるから相當の年數航路に支障を生ずる樣な事は起らないと思ふ. 且又遼河の改修工事が進捗して上流柳河の洪水が遼河々口に來ない事となれば河口の沈澱土砂は現在よりも遙に減くなる事と思ふ.

計畫導流堤に於ても西水道は塞ぐべきである. 計畫に於ては堤端が平面に於て稍〻逆の方向に曲げられてゐる. 之は上潮を多く本川に取入る爲のやうであるが, 水深維持の上からは上流部の曲率半徑の儘延長するか, 寧ろ現在の左岸導流堤端に於て現在の曲線に切線を引いた方向に延長する方が適當と思ふ. 上潮を多く取入れる爲左岸堤頂の高さを右岸堤頂より低くしてある現在の計畫は良いと思ふ.

計畫導流堤竣功の曉は, 航務局附近に於て上潮時間は減少し下潮時間は增加する爲, 平水時潮汐により最高水位は低下し最低水位は上昇すると思ふ. その程度は在來の導流堤の築造に伴ふ潮汐變化と比較して考ふるに 15～30cm であらう. 洪水時に於ける水面の上昇は航務局附近では在來殆ど認められない, 1937年中の水位曲線の 6～10 月の間に於て稍〻水面が上昇してゐる事實は認められるが之は主として氣壓の關係と思はれ, その外に洪水時に一時的に水面が上昇してゐる形跡は認められなかつた. 兩導流堤竣工の曉には在來よりも最高水位が上昇する事は豫想される事であるが, 河口に近い爲潮汐の影響が大であつて在來の觀測結果より推定するに恐らく最高水位は航務局に於て洪水時に於ても現在の大潮高潮時の最高水位以上になる事はないと思ふ.

潮汐波の到達時間は計畫導流堤竣功の曉には航務局前に於て在來よりも僅に (約 4 分程度) 早くなる事が波の試驗から結論される. 即ち高潮間隙が在來よりも 4 分位少くなる.

入潮量が減少する爲冬季の氷結線は在來よりも稍〻下流に及ぶ事と思ふ.

鋪裝コンクリート版に及ぼす氣象作用の影響

(鋪裝版溫度に就て)

內務技師　島田八郎

目次

緒言……(1)
I. 鋪裝版の溫度變化に關する理論的考察……(2)
(1) 總說……(2)
(2) 基本式……(3)
(3) 版平均溫度及び版溫度日差……(6)
II. 鋪裝コンクリート試驗版に關する試驗結果並に試驗概要……(8)
(1) 試驗鋪裝版並に試驗概要に就て……(8)
(2) 試驗結果の概要並に鋪裝版內溫度變化のフーリエー級數展開……(9)
(3) 鋪裝日最大最小溫度月平均値並に同溫度日差實測値に就て……(13)
(4) 實驗値と氣象要素との關係特に Newton 冷却恒數並に蒸發輻射熱量の算定……(15)
(5) 異る鋪裝並に異る氣象條件地域に於ける應用……(17)
III. 結言……(19)

緒言

各種別の道路鋪裝が寒暑の度頗る異る氣候の地域に使用されつつある時表面溫度及び鋪裝內部の溫度分布を明確にする事の溫度傾度に據る內應力の分布を知る上に且又鋪裝の設計及び施行技術上頗る緊要なる事は玆に改めて說く必要無く藤井技師[1]の所論をみるも其の一端を窺ひ知り得る.

元來道路鋪裝は氣象狀況により影響を蒙る事多く隨つて各地に於て夫々四季期節により表面及び內部溫度分布に大なる差異を生ずるものと推測される. 內應力を論ずる目的の一として日週期による表面溫度並に內部溫度の測定が從來屢々行れてゐる. 藤井技師[2], H. M. Westergaard[3], Road Research Board の報告[4], K. Eberle[5]等の研究も其の一例にて, 主として溫度分布を或る特定の地域に於て實測せるものである, 氣象作用との關係の密接なる事を指摘し注意を促してゐる. 其の他本邦に於ても夏季に於ける路面種類[6]による表面溫度比較測定あるも資料乏しき狀態である. 瀝靑系鋪裝の表面溫度上昇は內應力問題以外材料の軟化現象とも關係を有す. 本文は主として鋪裝溫度と氣象作用との關係を從來より一層數量的に論究し單に氣象狀況並に鋪裝種別を知る場合鋪裝溫度に關する傾向を合理的に或程度推測し得る事を明かにせんと試みたものである,* 其の爲鋪裝の一例としてコンクリート鋪裝に於ける1年間の溫度の觀測値を基準とし二三主要氣象要素との相關關係を考察した.

* 本試驗は藤井技師之を計畫し船山元內務技手及び大山福之が測定を行ひ, その結果を集錄して調査研究したものである.
試驗資料に關し特に藤井技師の御高配に與る. 記して深く感謝の意を表す.

I. 鋪裝版の溫度變化に關する理論的考察

(1) 總　說

鋪裝版は外氣に直接曝露せるを以て氣象作用の影響を常に受けつゝ其の時の氣象狀況に應じ熱の傳達を受く．從て斯かる條件により版の溫度が決定される．表面に於て熱的平衡を保ち熱傳導度により內部に其の一部を擴散しつつ溫度分布を示す狀態は地面地中溫度と類似す．今實際上の適用性を考慮し氣象作用との關係を求めんに氣象作用の要素とし選擇すべきものに氣溫，濕度，風速，日射量等あるも，各々に就いて嚴密に定義を下す事は殆ど不可能である．藤原，高橋諸氏[7] Brunt[8] 等の研究を見るも是等相互間には密接な關係が存在し考慮の餘地の十分にあるを推論してゐる，日射量も特定地點に於ても雲形雲量等大氣の狀態により左右される．本報告に於ては總て巨視的に問題を取扱ひ全貌を窺ひ知らんと試みた．先づ氣溫は普通の意味の如き百葉箱中に於ける觀測値又は類似の條件の下にあるものとし，日射量は Robitzsch 式日射計による如き全天日射量をとる，濕度風速の如き地形の影響を蒙り易きものの試驗地に於ける資料を缺くを以て此等の相互關係を直接に論及する能はざるも Newton 冷却恆數 (h′) の判定に是等の關係を考慮す．日射量に就いては太陽より直接輻射による如く取扱へば水平單位面積に時間 Δt に投射される日射量は下記(9)式の如く示さる．

$$\left.\begin{aligned} \Delta S &= J'_0 \sin h \, \Delta t \\ \sin h &= \sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos t \end{aligned}\right\} \cdots\cdots (1)$$

但し　J'_0：太陽輻射常數 (solar constant) より地上に達する間に吸收されしものを減少せるもの

h：太陽高度 (altitude)

δ：赤　緯 (declination)

φ：緯　度 (latitude)　　t：時角 (hr. angle.)．

地表面上の値とし

J_0 の値の東京に於ける日最高月平均を氣象臺報告よりとる．表—1 の如し．

表—1　水平日射量月平均 (cal./cm². h.) 昭和 11—12 年

月	10	11	12	1	2	3	4	5
J_0	53	52	48	52	57	71	78	81

	6	7	8	9
	63	83	87	70

赤緯 (δ) 零卽春分秋分にては (1) 式は，下記 (2) 式となる．

$$\Delta S = J'_0 \cos\varphi \cos t = J_0 \cos t \cdots\cdots (2)$$

但し J_0 式は表—1 に示す値をとる．今 6 時を時間の原點とすれば單位時間に於ける日射量は (2)′ 式で與へられる．

$$\left.\begin{aligned} J_e &= J_0 \sin\left(\frac{\pi}{12} t\right), && 0 < t < \frac{T}{2} \\ &= 0, && \frac{T}{2} < t < T \end{aligned}\right\} \cdots\cdots (2)'$$

但し T は日週期 24 時間を表し，時の單位は時間とす．

鋪裝面に於ける熱の授傳は最も簡單に取扱ひ太陽より來る輻射の一部が吸收され，內部に傳導し表面溫度と氣溫の差に應じ Newton 冷却則に從ふ熱の授達があり，更に蒸發其の他版自身の輻射等による熱の發散を考慮す．斯かる條件の下に表面に於ける熱平衡を境の條件とし，熱傳導式を解く，但し鋪裝の熱常數は一定とし且つ半無限體の場合と假定す．

（2） 基 本 式

上述せる假定條件の下に熱傳徑分式を解く．（圖—1 參照）

今記號を下記の如く定め置く，

k^2 ；鋪裝版の溫度傳導率 $k^2=\dfrac{\lambda}{c\rho}$

（例へば cm.^{2} hr^{-1}. °C^{-1}）

λ ；同上 熱傳導度（例へば cal. cm^{-1}. hr^{-1}. °C^{-1}）

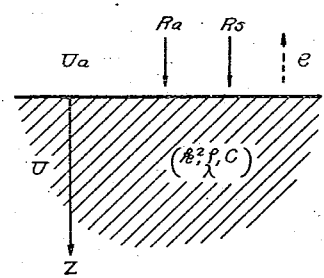
C,ρ ；同上 比熱，密度

α ；吸收率（表面） $\alpha'=\dfrac{\alpha}{h'}=\dfrac{\alpha}{h\lambda}$

h' ；Newton の輻射則恒數

（例へば cal. cm.^{2} hr.$^{-1}$ °C^{-1}）

$h=\dfrac{h'}{\lambda}$



圖—1

R_a+R_s；天空及び太陽よりの輻射のエネルギー中地上に達するものにて簡單に日射量 J_s とす．

e ； 蒸發及び鋪裝版よりの輻射其の他の原因による熱量の發散（+）

熱傳導方程式及び表面（境）の條件は下記の如し．但し

U_a ； 地面に近き空氣の溫度氣溫，U；鋪裝版溫度とし，表面に原點をとり鋪裝版厚みの方向に Z 軸をとり無限に擴るものとす．

$$\frac{\partial U}{\partial t}=k^2\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \qquad \cdots\cdots(3)$$

境の條件，$z=O$ に於て

$$\alpha(R_a+R_s)-h'(U_{z=0}-U_a)-e=-\lambda\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)_{z=0} \qquad \cdots\cdots(4)$$

（2） は書換へれば

$$\left.\begin{aligned}\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)_{z=0}-hU_{z=0}&=-hF(t)\\ F(t)&=U_a+\alpha'(R_a+R_s)-\frac{e}{h'}\end{aligned}\right\} \qquad \cdots\cdots(4)'$$

今 R_a+R_s を前節に述べし如く，日射量にて日變化をするとし，且事柄を簡單に取扱ひ春分（秋分）の場合の如く 6時より 18時まで12時間日射あるとし且つ時の原點を 6時にとり前節 (2)′ 式を援用すれば (4)′ 式の $F(t)$ は (5) の如くなる，

$$\left.\begin{aligned}F(t)&=U_a+\alpha' J_0\sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)-\frac{e}{h'}, && 0<t<\frac{T}{2},\\ &=U_a-\frac{e}{h'}, && \frac{T}{2}<t<T\end{aligned}\right\} \qquad \cdots\cdots(5)$$

但し T；周期にて 24 時間を示す，(5) を滿足する樣 (3) を解けばよい，最初の條件を $t=O$，$U=O$ とすれば解は一般に (6) 式の如くなる．

$$U=\frac{2h}{\sqrt{\pi}}\int_0^\infty e^{-h\lambda}d\lambda\int_{\frac{z+\lambda}{2k\sqrt{t}}}^\infty F\left(t-\frac{(z+\lambda)^2}{4k^2\beta^2}\right)e^{-\beta^2}d\beta \qquad \cdots\cdots(6)$$

玆では單に周期的變化を取扱つてゐる．即ち上式を計算し $t\to\infty$ の場合とし過渡部分の消失せるものを求む

$F(t)$ 函數が三角函數であれば (6) 式に代入し容易に解を求め得，即ち

$$F(t) = A_n \begin{cases} \cos(\omega nt - \varepsilon_n) \\ \sin(\omega nt - \varepsilon_n) \end{cases} \qquad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad \cdots\cdots (7)$$ と置けば

(6) 式 よ り

$$U = hA_n e^{-z\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}} \begin{matrix} \cos \\ \sin \end{matrix} \left(\omega nt - z\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}\varepsilon_n\right) \int_0^\infty \cos \sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}\lambda \, e^{-\left(h+\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}\right)\lambda} d\lambda$$

$$\pm h A_n e^{-z\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}} \begin{matrix} \sin \\ \cos \end{matrix} \left(\omega nt - z\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}} - \varepsilon_n\right) \int_0^\infty \sin \sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}\lambda \, e^{-\left(h+\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}\right)\lambda} d\lambda$$

$$= Ae^{-z\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}} \times \frac{h}{\sqrt{\left(h+\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}\right)^2}} \times \begin{matrix} \cos \\ \sin \end{matrix} \left(\omega nt - z\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}} - \varepsilon_n - \varepsilon'_n\right) \cdots (8)$$

但し， $\varepsilon'_n = \tan^{-1} \dfrac{\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}}{h+\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}}$

を得，(5) 式にて與へられてゐる $F(t)$ を Fourier の級數で展開するに下記 (9) 式の如くなる．

$$F(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\omega nt - \varepsilon_n) + \alpha' \frac{J_0}{\pi} + \frac{\alpha' J_0}{2} \sin \omega t$$

$$- \frac{J_0 \alpha'}{\pi} \left(\frac{2}{2^2-1} \cos 2\omega t + \frac{2}{4^2-1} \cos 4\omega t + \frac{2}{2^2-1} \cos 6\omega t \cdots\cdots\right) - \frac{e}{h'} \quad \cdots\cdots (9)$$

但し $U_a = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\omega nt - \varepsilon_n)$ とす．

(9) 式の各項を (8) 式に適用すれば，解は下記 (10) 式の如く求め得．

$$U = A_0 + \left(\frac{\alpha' J_0}{\pi} - \frac{e}{h'}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n h}{\sqrt{\left(h+\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}\right)^2 + \frac{\omega n}{2k^2}}} e^{-z\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}} \cos\left(\omega nt - z\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}} - \varepsilon_n - \varepsilon'_n\right)$$

$$+ \frac{\alpha' J_0}{2} \left\{ \frac{h \cdot e^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2k^2}}}}{\sqrt{\left(h+\sqrt{\frac{\omega}{2k^2}}\right)^2 + \frac{\omega}{2k^2}}} \sin\left(\omega t - z\sqrt{\frac{\omega}{2k^2}} - \varepsilon'_1\right) \right.$$

$$\left. - \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{2}{3} \frac{h}{\sqrt{\left(h+\sqrt{\frac{2\omega}{2k^2}}\right)^2 + \frac{2\omega}{2k^2}}} \cos\left(2\omega t - z\sqrt{\frac{2\omega}{2k^2}} - \varepsilon'_2\right) + \frac{2}{15} \times \cdots\cdots \right\} \right] \cdots\cdots (10)$$

但し， $+\varepsilon' n = \tan^{-1} \dfrac{\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}}{h+\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}}$

表面に於ける温度は上式に於て $z=O$ と置けばよい.

$$(U)_{z=0} = T_m + \sum_{h=1} A_n\, C(h,n)\cos(n\omega t - \varepsilon_n - \varepsilon'_n)$$
$$+ \alpha' J_0 \left\{ \frac{c(h,1)}{2}\sin(\omega t - \varepsilon'_1) - \frac{2}{3\pi} C(h,2)\cos(2\omega t - \varepsilon'_2) \right.$$
$$\left. - \frac{2}{15\pi} C(h,4)\cos(4\omega t - \varepsilon'_4) - \cdots\cdots\cdots\cdots \right\}$$
$$= Tm + \Psi(A,h,t) + \alpha' J_0 \Phi(h,t) \quad \cdots\cdots(11)$$

但し,　$T_m = A_0 + \left(\frac{\alpha' J_0}{\pi} - \frac{e}{h'}\right)$

$$C(h,t) = \frac{h}{\sqrt{\left(h+\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}\right)^2 + \frac{\omega n}{2k^2}}}$$

$$\psi(A,h,t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n\, C(h,n)\cos(n\omega t - \varepsilon_n - \varepsilon'_n)$$

$$\Phi(h,t) = \frac{C(h,1)}{2}\sin(\omega t - \varepsilon'_1) - \frac{2}{3\pi} C(h,2)\cos(2\omega t - \varepsilon'_2)$$
$$- \frac{2}{15\pi} C(h,4)\cos(4\omega t - \varepsilon'_4) - \quad \cdots\cdots(12)$$

$$\varepsilon'_n = \tan^{-1} \frac{\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}}{h + \sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}}$$

(10) 及び (11) 式にて鋪裝の内部及び表面の温度の分布從つて温度傾度が判る. 勿論實際には本算式の如き簡單な假定では不十分であるが一般的の傾向は之にて推定し得.

T_m は表面及び版中に於ける版平均温度と見做し得るもので一般に最高最低温度の平均温度とは異るものである. 日射量 J_0, 吸收率 α, 熱傳導度 λ, Newton 冷却恒數 h', 竝に蒸發其の他の熱の發散量 e に起因するもので從て四季節の影響が著しく顯れて來る.

$\psi(A,h,t) + \alpha' J_0 \Phi(h,t)$ は總て $T = 24$hrs 及び其の整數分の一を周期とする三角函數よりなる級數にて温度の日差を與ふ. 勿論種々の常數の値により異るものではある. T_m の値と共に知り得ば,鋪裝版の表面の温度が氣象作用の影響により如何なる程度の温度上昇を來すものなるやを知り得るは勿論底面に於けるものをも推定し得. 一般に版内部の温度傾向を求め得る. 然るにコンクリート鋪裝版に於ける各恒數 h', α, 竝に e に就きて研究されしもの無し.

先づ本試驗結果より晴天の日を撰び月平均の觀測値より h', e, の値を算定せんに J_0, λ, α, 氣温 U_a, 既知値を上式に代入する必要がある. 最も合理的なるは實驗結果の適當な組合せにより最も確らしき J_0, λ, α, e 等の値を決定すべきであるが, 資料の關係上玆では下記の如く別に數値を假定した.

J_0 ; 日射量は 表—1 に記載せる月平均値をとる,

λ ; 後節温度分布測定より温度傳導率 (k^2) を推定し得るも上層基層用コンクリートの値[10] として得しものの平均値 $\lambda = 18$ [cal. cm^{-1}. hr^{-1}. °C^{-1}] をとる.

k^2 ; 同樣 35 [cm^2 hr^{-1} °C^{-1}] をとる.

兩値は乾燥狀態に於けるもので, 實際の傳導度は上記のものより 15~20% も大となる.

α ; 吸收率に關しては熱線に就て大山博士(11)の試驗あるも特に鋪裝材料の實驗されしもの無く，假りに照明試驗の結果を(12)引用し．コンクリートに對し 0.70 をとる．元來は α は入射角即ち日射の場合には高度にて著しく異るもので Hans Ch. Brunner(13) の論文にも太陽高度 40°〜50° に對する地面の値が擧げてある，照明實驗結果より類推するに鋪裝の種類により特性は可成り異るものである．

α も Fourier 級數に展開する必要がある．

上記の如き假定をする時は要用なる結果を容易に求め得．

（3） 版平均温度及び版温度日差

$$\frac{\alpha'}{\pi} = 0.0124\frac{1}{h}$$

$$\left.\begin{aligned} T_m - A_0 = \Delta T_m &= \frac{\alpha' J_0}{\pi} - \frac{e}{h'} \\ &= \frac{1}{h}(0{,}0124\ J_0 - 0{,}0556\,e) \\ &= \frac{1}{h}(J - 0{,}0556\ e) \\ J = 0{,}0124\,J_0 & \end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

更に，日差を與ふ $\psi(C, h, t) + \alpha' J_0\, \Phi(h, t)$ の傾向の概要を述べん，

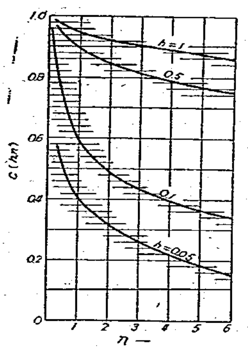
先づ $C(h, n)$, ε'_n…係數と h の關係を求めんに總て日變化の場合即ち基本周期 T の 24hr なる場合を取扱ふ，

$h = 0.05$; 0.1 ; 0.5 ; 10 ; 4.0 ;

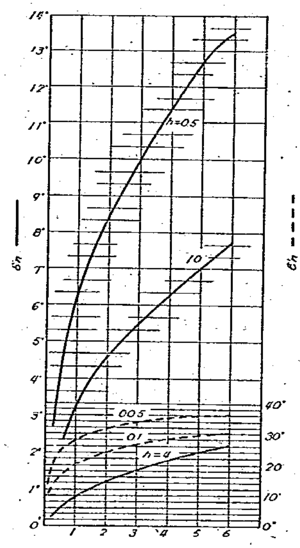
$n = 1 \cdots\cdots 6$

に對する $C(h, n)$, ε_n を圖—2〜a, b に示す．

圖—2—a



圖—2—b



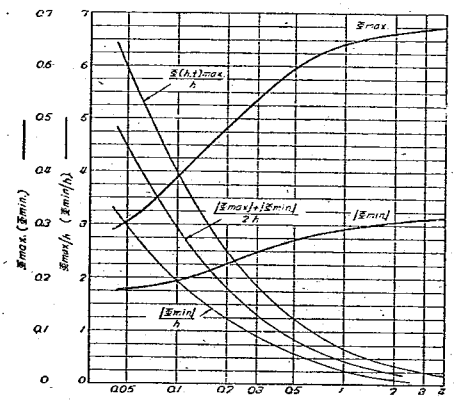
h の增加に伴ひ，$C(h, n)$ は1に近づき相差 ε'_n 著しく減少する事を示す此等を用ひて，……

$\psi(A, h, t)$ 及び $\alpha' J_0\, \Phi(h, t)$ 函數の變化の傾向並に極大値及び極小値を求むれば氣温並に日射量による影

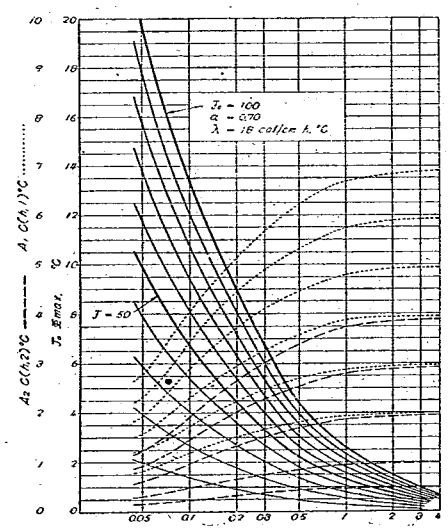
響を知り得る．實驗の範圍にては ψ, Φ の極大値を與ふ時刻は略ゝ相接近す．即ち h の 1.0 乃至 0.05 の範圍に於て時刻 $t = 6$〜7〜8 時（夜半に原點とれば 12 乃至 14 時）の相接近せる時刻に於て ψ, Φ 共に極大となる故今 ψ, Φ の傾向を吟味し兩者を加算する事により影響を推定す．

$\alpha' J_0 \Phi\ (h, t)$ の極大極小値，$\alpha' J_0 \Phi_{max}$, $\alpha' J_0 \Phi_{min}$ を述べんに，(13) 式を得し場合と同じ數値を與へ且つ J_0 に標準値 100 を與ふれば (14) 式を得．

圖—3；Φ_{max}, Φ_{min}, 竝に Φ_{max}/h, Φ_{min}/h と h との關係を示す



圖—4；$\alpha' J_0 \Phi_{max}$ と h との關係を示す



$$\left.\begin{aligned} \alpha' J_0 \Phi_{max}, &= 3{,}89 \frac{\Phi_{max}}{h} \\ \alpha' J_0 \Phi_{min}, &= 3{,}89 \frac{\Phi_{min}}{h} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots (14)$$

$$J_0 = 100$$

$\Phi \sim t$ の關係式より各々の h に對應する t に關する極大極小値 Φ_{max}, Φ_{min} を夫々求むれば容易に Φ_{max}/h Φ_{min}/h, を得．勿論 Φ_{min} は負符號を有するも絶對値をとる．日射量による影響を示す Φ_{max}/h, Φ_{min}/h, は共に h の減少即ち冷却恒數 h' の減少に伴ひ著しく增大するも極小値の斯かる傾向は前者より可成り僅かである，日差を考察するに $(\Phi_{max}+\Phi_{min})/2h$ にて與へられる．

比等の數値 Φ_{max}, Φ_{min}, Φ_{max}/h, Φ_{min}/h, $(\Phi_{max}+\Phi_{min})/2h$ と h との關係を 圖—3 に示す．

更に $J_0 = 100$, $\alpha = 0.7$ 即ち (14) 式に基準する，$\alpha' J_0 \Phi_{max}$ と h との關係は別に圖—4 に示す．同圖には $J_0 = 10, 20, \cdots 50, \cdots 90, 110$, に對應する同曲線竝に次に記述せんとする氣温による影響をも記載す．

$\Phi\ (A, h, t)$ は氣温による項である，一般に氣温は Fourier の級數

$$U_a = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\omega n t - \varepsilon_n)$$

にて與へられるが後節二三の實測値に示す如く通常主要なる項は零 1,2 次項にて $n = 3$ 以下は可成り小さく係數 A_1, A_2, A_3, は比率は

$$A_1 : A_2 : A_3 :: 5 : 2 : 0.65$$

の程度である．本實驗の精度にては A_3 以下を省略す，A_1, A_2 の符號は相反し，ε'_1, ε'_2 は負値にて 3〜4hrs. の値である，1 例として，昭

和 12—11月—12月の氣溫を示すに下記 (15) 式の如し.

$$U_a = 12.36 - 4.57\sin(x + 3.34) + 2.13\sin(2x + 3.38) - 0.74\sin(3x + 4.69) + 0.26\sin(4x + 4.26) - 0.31\sin(5x + 5.94) + 0.27\sin(6x + 6.0) \quad \cdots\cdots(15)$$

但, $x = \frac{\pi}{12}t$, ε_n の單位は時間, 原點は夜半とす. $-5\sin(x+3) + 2\sin(2x+3)$ の極大極小の日差を計算すれば略々 12 となる, 逆に氣溫の日差の振幅の與へられる時上記の比率に分配し, 然る後各項の影響を下記の如くを考察す.

$$\psi(A, h, t) = A_1 C(h, 1)\cos(\omega t - \varepsilon_1 - \varepsilon'_1) + A_2 C(h, 2)\cos(2\omega t - \varepsilon_2 - \varepsilon'_2)$$

通常地面に於ける實測例を(14)見るも, h は 0.1 前後より大なれば相差 $\varepsilon'_1, \varepsilon'_2$ は 30° 即ち 2時間より小である, 且つ今の場合 $-\varepsilon_1, -\varepsilon_2$ は正値なれば $-\varepsilon_1 - \varepsilon'_1$, $-\varepsilon_2 - \varepsilon'_2$ は正値にて最初の相差より小となる, 常に相差を考慮に入れ影響を算定すべきも單に傾向を明かにせん爲め簡略に $A_1 C(h, 1)$, $A_2 C(h, 2)$ を求み置き加算する事により $\psi(A, h, t)$ の値を推定する目安とする. 圖—4 には $A_1 = 7, 6, 5, 4, 3, 2,$; $A_2 = 4, 3, 2, 1, 0.5°C$ に對する $A_1 C(h, 1)$, $A_2 C(h, 2)$ の値をも圖示す.

兩者を加算し氣溫による影響を推定し得, 可成り嚴正を缺くも $n = 1$ の 1項をとり計算するよりは精度高く今の場合一次の目的を達し得. 斯くの如くして表面に於ける溫度の日差振幅を定める二つの主要要素……$\psi(h,t)$, 及び $\alpha' f_0 \Psi(h, t)$ の影響を明にす. 版の內部の溫度分布は (11) 式にて表される事勿論なれども通常係數 h 等不明の事多ければ下記 (16) の如く簡單に表す場合が多い.

$$U = T_m + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot e^{-z\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}} \operatorname{ocs}\left(\omega nt - z\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}} - p_n\right) \quad \cdots\cdots(16)$$

實際は更に一層簡單なる分布を假定し內應力を算定する事が多い(15).

II. 鋪裝コンクリート試驗版に關する試驗結果

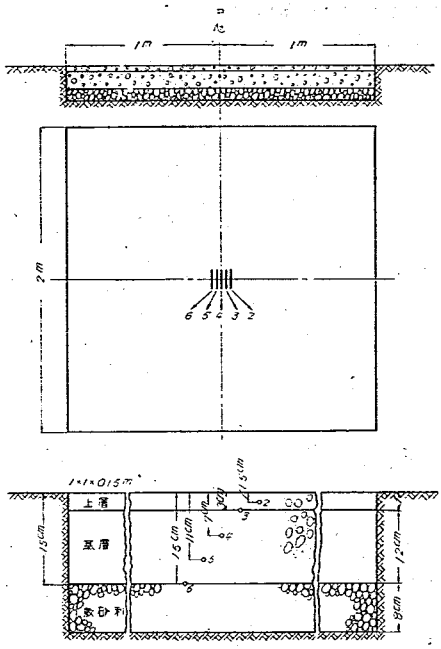
(1) 試驗鋪裝版並に試驗概要に就て

試驗コンクリート版: 圖—5 に示す如く大さ 2m 平方にて厚さ 12cm の基層コンクリート (配合 1 : 3 : 7, w/c 比 80%, スランプ 1cm) 及び厚さ 3cm の上層コンクリート (配合 1 : 1.5 : 3, w/c 比 41%, スランプ 2cm) より成り全コンクリート版厚さ 15cm とす.

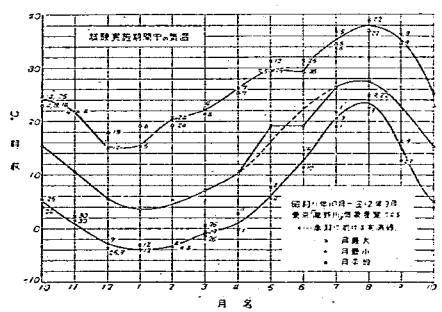
設置場所は赤羽分所構內の日射通風の一日中防げなき場所を撰び, 昭和 11年 10月 9日施工す, 地盤を堀り下げローム質路床上に砂利層厚 8cm. (50mm～5m) のものを敷均し, 其の上に二層に鋪裝し床版表面と地盤を一致せしむ, 表面仕上にはテンプレートを使用す, セメントは淺野普通セメント砂利及砂は鬼怒川產 (茨城縣關本村產) のものを使用す. 夫等の性質及び粒度並に强度試驗結果は普通の場合と異らざれば省略す. 尙版の養生方法は濡れたる筵にて覆ひ 8日間灌水養生を行つた.

試驗方法; 床版內部の溫度は電氣抵抗溫度計を用ひ圖—5 に示す如く版の中央部に表面より夫々 1.5cm; 3cm; 7cm; 11cm; 15cm; の深さに 5個の電氣抵抗溫度計を埋め込み, 夫等を上より順次 No.2, No.3, No.4, No.5, No. 6 と名付けた. 尙氣溫測定用として 1個の溫度計を別に設置し No. 1 とし之等各〻の溫度を自記記錄裝置

圖—5　コンクリート試驗鋪裝版



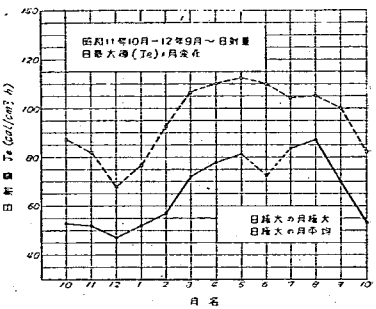
圖—7　試驗現場に於ける氣温日最大最小の月最大最小値圖



により自動的に記錄せしめた.

試驗期間（昭和11年10月～12年10月）に於ける氣象狀況の要素として日射量日最大の月平均値及月極大値を同年氣象要覽より引用し，參考の爲め圖—6 に圖示す. 氣温測定の爲め設

圖—6　日射量日最大の月平均 J_0 及月最大の年變化圖



置せる温度計位置稍〻不適當なりし爲め殊に夏季コングリートの照反しの影響を蒙り 2～3°C 高く測定されし傾向あり，其の程度を示しをく事を必要と認め圖—7 に同期間に於ける東京「灌野川」の觀測値を氣象要覽より引用し赤羽試驗に於ける結果と比較す，圖中觀測値の傍に記入せる數字は月最大，月最小の起りし日を示す. 後節試驗結果を論ずる場合是等の差異を考慮す.

（2.）試驗結果の概要竝に鋪裝版內温度變化のフーリエー級數展開

既に前節に述べし如く自記温度記錄圖に示された No.1, No.2 No.3, No.4, No.5, No.6, の温度より鋪裝版温度に就いて各種の關係を明かにせんと試みたものである，卽ち所謂着離期打込みセメント硬化作用の顯著なる期間のものに就ては，稻に松村技師により發表されしものあるも本報告は斯かる期間の經過せる後のものに就き考察せるものである. No.1, は氣温にて他は鋪裝版內温度にて No.2, は表面近く No.6, は最下部の温度を與ふものなる事は既に述べた，玆に昭和11年10月より同12年10月間の記錄に就き考察す，雨天及び曇天の日に於けるものは各温度變化複雜なるか又は變化顯著ならざるも晴天の場合四季

を通じ類似の日變化を爲し表面よりの深さと共に振幅漸次減少し温度の最高最低を示す時間も共に遲れてゐる，其の例を圖—8～a, b に示す．試驗結果を論ずるに當り今曇天，雨天の日を除き數日に亘り天候の定まり，晴天連續し且つ前後兩日の夜半温度比較的接近せる日を選擇す，其の他總て測定結果は圖—8 に示すものと類似の傾向

圖 — 8. a 鋪裝版內温度變化

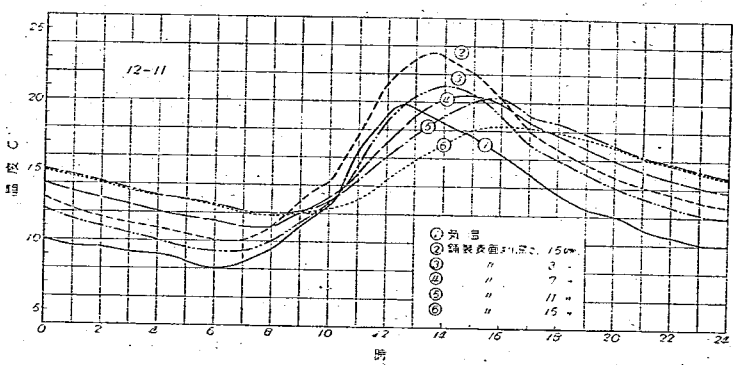
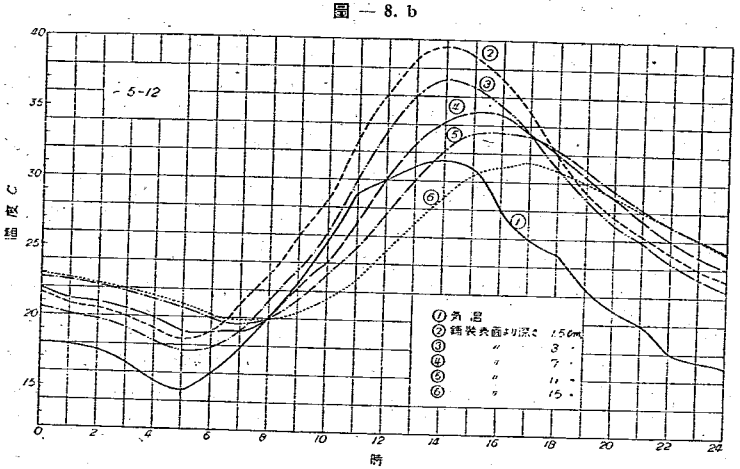


圖 — 8. b



をとる．氣温に就ては測定器の設置場所の關係上，前節に述べし點を考慮する必要がある．

氣温及び鋪裝版各位置に於ける温度は一般に Fourier の級數として表はし得．今圖—8～a, b に示せるものに就き Fourier 級數による展開結果を列擧す．數式中 $\omega=\frac{\pi}{12}$, sin 函數の相差の單位及び t の單位は時間とす．

Fourier 級數の展開式を見るに氣温 (y_1) の場合 $n=6$ 項まで振幅は十分の一度の程度であるが主要項は $n=2$ 項までゝある．鋪裝版內部では $n=4$ 項以下は急激に減少し百分の一度程度となるを以て $n=4$ 以下の項の記載をば省略す．

温度實測値の Fourier 級數展開

12月11日の試驗結果

$$y_1 = 12.36 - 4.57\sin(\omega t + 3.34) + 2.13\sin(2\omega t + 3.38) - 0.74\sin(3\omega t + 4.69) + 0.26\sin(4\omega t + 4.26) - 0.31\sin(5\omega t + 5.94) + 0.27\sin(6\omega t + 60)$$

$$y_2 = 15.0 - 5.42\sin(\omega t + 2.87) + 2.19\sin(2\omega t + 2.78) - 0.86\sin(3\omega t + 2.53)$$

$$y_3 = 13.9 - 4.91\sin(\omega t + 2.46) + 2.14\sin(2\omega t + 2.50) - 0.312\sin(3\omega t + 1.52)$$

$$y_4 = 15.0 - 4.03\sin(\omega t + 1.54) + 1.56\sin(2\omega t + 0.95) - 0.367\sin(3\omega t + 0.34)$$

$$y_5 = 15.5 - 3.36\sin(\omega t + 0.73) + 1.32\sin(2\omega t + 0.47) - 3.34\sin(3\omega t + 1.83)$$

$$y_6 = 14.5 - 2.80\sin(\omega t + 0.13) + 0.85\sin(2\omega t + 1.30) - 0.16\sin(3\omega t + 0.83)$$

5月12日の試驗結果

$$y_1 = 22.8 - 7.13\sin(\omega t + 3.68) + 2.18\sin(2\omega t + 4.16) + 0.29\sin(3\omega t - 1.1) + 0.29\sin(\omega t - 0.21) - 0.2\sin(5\omega t - 1.17)$$

$$y_2 = 28.5 - 9.43\sin(\omega t + 2.92) + 2.08\sin(2\omega t + 2.08) - 0.43\sin(3\omega t - 1.34) + 0.87\sin(4\omega t - 5.63)$$

$$y_3 = 26.05 - 8.76\sin(\omega t + 2.61) + 2.24\sin(2\omega t + 2.45) - 0.40\sin(3\omega t - 0.63)$$

$$y_4 = 26.15 - 7.50\sin(\omega t + 1.61) + 1.66\sin(2\omega t + 1.41) - 0.33\sin(3\omega t + 0.351)$$

$$y_5 = 26.09 - 6.42\sin(\omega t + 0.9) + 1.41\sin(2\omega t + 0.21) - 0.13\sin(3\omega t - 1.4)$$

$$y_6 = 25.17 - 5.43\sin(\omega t + 0.11) + 0.34\sin(2\omega t - 4.86) - 0.23\sin(3\omega t - 1.32)$$

是等の結果より鋪裝版全體の平均温度即ち y_2 乃至 y_6 の常數項を得，各項の温度振幅の減少竝に相位の遲れの關係より温度傳導率從つて減衰率 $e^{-z\sqrt{\frac{n\omega}{2k^2}}}$ を推定し得る．

今 $n=1$ の項即ち日變化に就き振幅減衰割合竝に相位の遲れより温度傳導率 (k^2) を求む，1章2節 (10) 式にて與へられる如く，温度振幅減衰竝に遲れと表面よりの深さ (z) との關係は容易に求め得る．同 (10) 式より $n=1$ の項は

$$A_1\,C(h,1)\,e^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2k^2}}}\cos\left(\omega t - z\sqrt{\frac{\omega}{2k^2}} - \varepsilon_1 - \varepsilon'_1\right)$$

$$+\frac{\alpha' J_0}{2}\,C(h,1)\,e^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2k^2}}}\sin\left(\omega t - z\sqrt{\frac{\omega}{2k^2}} - \varepsilon_1'\right)$$

にて與へられる，勿論上式の原點は午前6時にて本節に得たる Fourier 展開式の原點は夜半である，上式は下式 (17) 式の如く書換へ得る．

$$\alpha\,C(h,1)\,e^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2k^2}}}\cos\left(\omega t - z\sqrt{\frac{\omega}{2k^2}} - \varepsilon_1' - \beta\right) \quad \cdots\cdots (17)$$

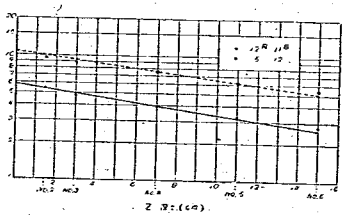
但し，$$\alpha = \sqrt{(A_1 \cos \varepsilon_1)^2 + \left(\frac{\alpha' J_0}{2} + A_1 \sin \varepsilon_1\right)^2}$$

$$\tan \beta = \frac{A_1 \sin \varepsilon_1 + \frac{\alpha' J_0}{2}}{A_1 \cos \varepsilon_1}$$

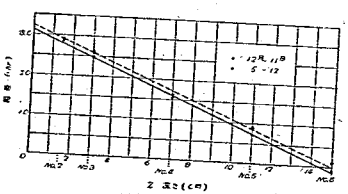
を表す．其の他の記號はII章2節で既に說明せるものに同じ，要するに溫度振幅は z に應じ $e^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2k^2}}}$ に從ひ漸次減少し相位の遲れも $z\sqrt{\frac{\omega}{2k^2}}$ の如く z に比例して變化す．

上述せる 12月—11日，5月—12日の記錄も略ゝ斯かる傾向をとる，圖—9～a, b は Fourier 級數展開 $n=1$ 項の $A_1\left(\text{振幅} \times \frac{1}{2}\right)$ の對數と深さ z 並に相差と深さ z との關係を圖示せるものである．實測點は完全には云ひ難きも可成りの程度に一直線上に分布せるを以て今平均値より溫度傳導率 k^2 を求む．

圖—9～a Fourier 級數展開式の A_1 常數と深さ z との關係圖



圖—9～b Fourier 級數展開式第一項相差と深さ z との關係圖



$n=1$ の場合，深さの差 z なる二點の溫度振幅及び相差を夫ゝ A_0, A_z (°C) 及び B_0, B_z (hr) とすれば此等の間の關係下記 (18) 式より容易に k^2_α, k^2_β を得．

$$\left.\begin{aligned} \frac{\log A_0 - \log A_z}{\log e} &= z\sqrt{\frac{\pi}{Tk_\alpha^2}} \\ (B_0 - B_z)\frac{\pi}{12} &= z\sqrt{\frac{\pi}{Tk_\beta^2}} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (18)$$

但し T は日周期 24 時を，k^2_α, k^2_β は溫度振幅及び相位遲れより得たる溫度傳導率を示す．

12月 11 日及び 5 月 12 日の記錄より得し圖—9～a, b の直線關係より下記の如く k_α^2, k_β^2 を得．

$k_\alpha^2 = 46\ (\text{cm}^2 \cdot h^{-1} \cdot °\text{C}^{-1})$ ……12月 11 日

$= 50\ (\text{cm}^2 \cdot h^{-1} \cdot °\text{C}^{-1})$ ……5月 12 日

$k_\beta^2 = 41\ (\text{cm}^2 \cdot h^{-1} \cdot °\text{C}^{-1})$ ……{12月 11 日 / 5月 12 日

$k_\alpha^2/k_\beta^2 \fallingdotseq 1$. にてコンクリートも一般土壤の如く Isotropismus (16) を滿足しないものである，上述せるは特定の 2 日の結果であるが溫度傳導率 (k^2) は一般に秋より冬期のものが春より夏期に至るものより小である．斯かる差異の生ずる原因は主として濕度の影響に依るものと推測さる．

k_α^2, k_β^2 の平均値を求めんに，12月 11 日の場合 43.5 ($\text{cm}^2\ h^{-1}\ \text{C}^{-1}$)，5月 12 日の場合，45.5 ($\text{cm}^2 h^{-1}\ \text{C}^{-1}$)，となり II. 章 2 節の數式算定に引用せる値に比較するに稍ゝ大なる程度にて濕氣を含む鋪裝コンクリートの溫度傳導率の一般の値を示す．

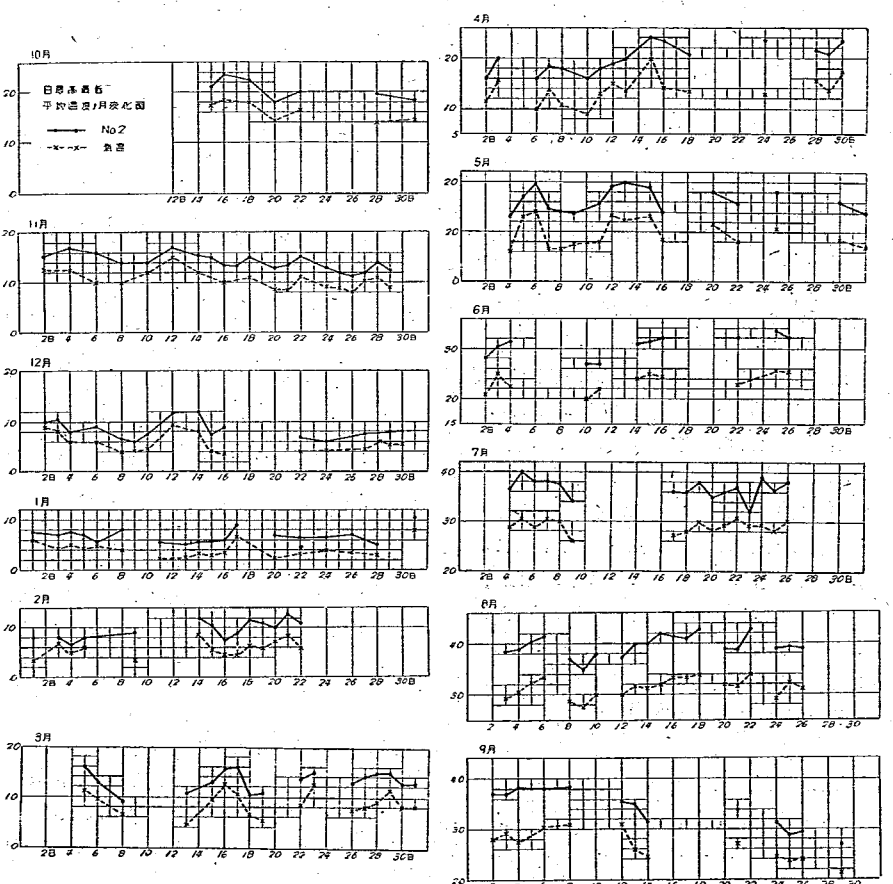
各記錄の Fourier 級數展開を求め路面に於ける熱の出入等を論ずる事は省略し，自記記錄より直接に溫度日差竝に日最大，日最小溫度の平均値，更に鋪裝版平均溫度をも求め其等の値に就き月平均を算定し I 章 2, 3 節に得たる數式の結果に代入し鋪裝版溫度上昇に關し氣象作用と密接な關係を有する二三の主要特性を論ぜんとす．

（3）鋪裝日最大最小溫度平均値竝に同溫度日差實測値に就て

表面部に近き部分の溫度の上昇値を知れば內部の溫度は數式によるも推測し得るを以て先づ表面部の値を明かにする事が頗る肝要である，溫度計 No. 2 は表面より 1.5cm の個所に塡裝されたものであるが今此の値を採り論ずる事とする．先づ日最大日最小の平均溫度を求む．

最大最小日平均溫度

圖—10　鋪裝コンクリート版表面溫度及氣溫の日平均溫度の月變化

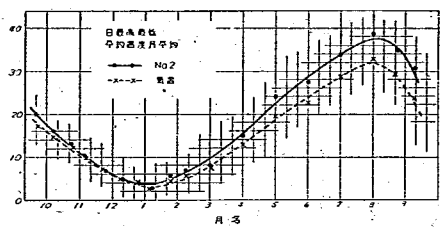


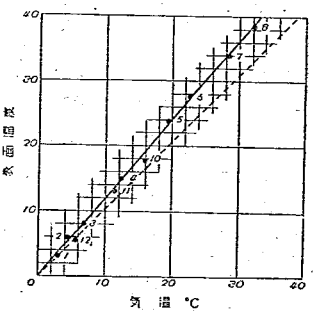
玆に云ふ最大最小日平均溫度とは No. 1, No. 2 溫度の一日中の變化に於ける最高最低の平均値を示すものである．雨天其の他溫度變化の不明確の日の結果を除き約一年間の値を自記記錄より求め圖—10 に示す．

No. 2 溫度を以下表面溫度と假稱す，圖中橫軸には日をとり今の論義に不適當なる如き日の記錄は省略した．表面溫度と氣溫との間には可成り密接な竝行關係が存在し然も溫度の變化範圍は月により著しき異る特長がある卽ち今月毎に更に月平均をとり，月平均値よりの偏倚を考察するに，

10月 11月 12月 1月 2月 ； 秋の中頃より冬に於て日平均は比較的一定に近く變動少きも 4月 5月 6月は變動最も著しき季節である，9月は夏より秋に亙る狀況を如實に示してゐる，特に顯著なる事は表面溫度と氣溫の差は月毎に略ゝ同一程度の値を示すものが多い．圖—10 に示す日平均値より月毎に月平均を求め圖—11—a, b, に示す．

圖—11—a, b　鋪裝表面溫度と氣溫の日最大最小溫度月平均



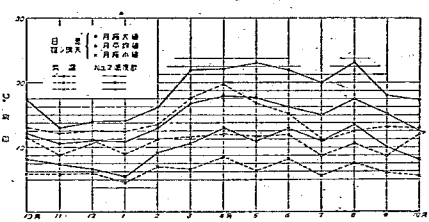


斯くして鋪裝版最大最小溫度平均が如何に變化するや其の傾向を知り得．

溫度日差（振幅）　更に表面溫度の振幅を各記錄よりとり月毎に其の平均を求む．卽ち表面溫度及び氣溫の一日中の極大極小値の差を日差とし圖—12 に示す．

圖—12 の橫軸には月をとり日差月極大．月極小 ×，月平均 O，を圖示せるものである．例へば月平均を鋪裝版表面溫度日差は氣溫日差と竝行關係に就き考察するに其の値著く異り 4月，8月に於て著く大に，10月，12月 1月に於ては兩者相接近せる値を示すものにて兩者間に直截的の關係の存在せざるは鋪裝版溫度は氣溫の外 Newton 冷却則の冷却恒數 (h')，吸收率 (α) 竝に日射量に密接な關係を有する事に依るものである．極大のものは兩者同一日のものに非らざる爲めか平均値間のものの關係の如き緊密な關係を示さず．

圖—12　表面溫度及氣溫の日差圖



更に同圖に示せる表面溫度の月極大，月平均日差と氣溫日差月平均の値を縱橫軸に表すと 圖—13 の●群及び○群の如く分布す，今平均値に就き（表面溫度日差月平均）—（氣溫月日差月平均）と（表—1）に示した日射量日最大 J_0 月平均との關係を圖に示した，同圖に明かなる如く兩者間に可成り複雜な關係を有するもので，日

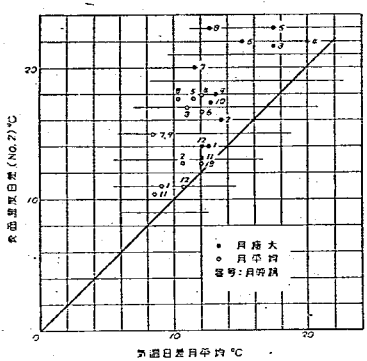
* No. 2, No. 3……No. 6, 記錄に約 ＋2.5°C の指示誤差あり修正の上圖示す．

射量以外に冷却恒數 (h') 及び版よりの熱發散 (e) 等の影響を著しく蒙る事を示す.

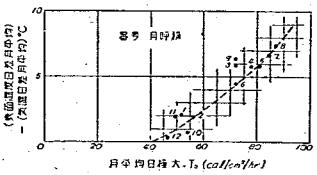
鋪裝版の溫度日差は四季を通じ東京地方にては月極大月平均共に略ゝ3階級に分類され可成りの溫度範圍を示す.

日差最大群	3, 4, 5, 6, 8 月	月平均 18°C
同上最小群	11, 12, 1 月	月平均 10°C
同上中間群	7, 9 月	最大群に近し
	2, 10 月	最小群に近し

圖—13　表面溫度日差と氣溫日差月平均との關係



圖—14.（表面溫度日差月平均）－（氣溫日差月平均）と日射量日極大月平均 (J_o) との關係



同圖よりh', eの係數を度外視し即ち期節によるも h', e 影響大差無きものと假定すれば日射量日最大月平均 J_o が 40 cal/cm². hr 程度以下なれば表面溫度の日差は略ゝ氣溫日差に等しく且つ日最大最小平均溫度も兩者相等しい. 斯くの如く日射量 J_o の增加に伴ふ表面溫度氣溫日差の增加傾向を知り得, 今鋪裝版種類異る時若し單に表面に於ける吸收率 (α) のみ考慮すれば容易に日差の値を推定し得. 日最大最小の平均溫度と氣溫との關係は既に圖示せるを以て兩者を組合せ表面溫度の上昇傾向を知り得, 蓋し最大最小平均溫度は版の輻射發散熱量 (e) の影響を蒙る事が著しい.

I章3節に得たる數理的考察により後節是等の關係を更に明かにせん.

表 — 2

月名	10	11	12	1	2	3	4	5	6
(最大最小平均値)－(版平均溫度)	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.~1.5	2.5	2.0

7	8	9
2.0	2.0	2.7

一般に鋪裝版の各點の溫度變化は極大部に於て急激にて時間範圍も少きも極小部に於ては變化緩慢にて時間範圍も大である隨つて版の平均溫度は極大極小（最大最小）平均より稍ゝ小き値をとる. 今兩者の差の月平均を求めんに左記表—2 の如し.

（4） 實驗値と氣象要素との關係特に Newton 冷却恒數 h' 竝に蒸發輻射熱量 e の算定

3 節に述べし試驗結果を考察するに鋪裝版の表面最大（最低）溫度は同平均溫度と同溫度日差の兩者より成立つと見做し得るも常に版平均溫度と密接な關係を有す. 是等二種の平均溫度竝に溫度日差は氣象條件と密接な關係にある事勿論にて該關係を明かにする方法に就て緒言に於て言及せる如く氣象要素の氣溫をも直接的な獨立變數とせず他の日射溫度風速等の氣象作用との關係を求めんとするものは理論上更に一般性を有するものであるが

本報告に於ては既に論ぜる如く氣温其のものも獨立せる變數と見做す方式をとり，Ⅰ章に記述せし如き數式を基準とし試驗結果と比較し主として下記の諸要素との關係を考察す．

氣象要素； 氣温，日射量 (J_o)，Newton 冷却則による恒數 h'，吸收率 α，蒸氣輻射發散量 e，

個々の日觀測値を撰び先づ氣象要素との關係を求め然る後其等の月平均をとるべきも資料の關係上實驗値は上述せし如きものにて晴天日の月平均値をとり該月平均値を基準とし諸種の關係を論ず．

氣象要素の中氣温 (U_a) 日射量 (J_o) 吸收率 (α) を既知なるものとし，Newton 冷却恒數 (h') と熱傳導度 λ との比率 $h=\frac{h'}{\lambda}$ 及び蒸發輻射發散量 e を求めんとす．即ち

氣温； 既にⅠ章3節に述べし如く，日差の月平均よりして Fourier 級數展開式に於ける $n=1,2$ に相當する振幅の $\frac{1}{2}$，即ち A_1, A_2, を推定す．

日射量； 日最大月平均 J_o 既にⅡ章1節に記述せるを以て省略し，$\frac{\alpha J_o}{\pi\lambda}$ の値のみ記入す．(表—3)

表 — 3

月名	10	11	12	1	2
$J(=0.0124\,J_o)$	0.66	0.645	0.592	0.642	0.705
	3	4	5	6	7
	0.88	0.97	1.00	1.02	1.03
	8	9	但し $\lambda=18$ (cal. cm^{-1} °C^{-1}. h_r^{-1}), $\alpha=0.70$ とす		
	1.08	0.87			

先づ鋪裝表面温度の版平均温度より最大温度（又は最小）に至る温度差を求む．此の温度差は前節に得し表面温度日差 $\times\frac{1}{2}$ に前節表—2 に記載せる温度差（最大最小平均温度—版平均温度）を加へる事により求め得．

月に應じて日射量を考慮に入れⅠ章2節圖—4 に示せる，$\alpha' J_o \Phi(h,l)_{\max}$. 曲線により日射 ($J_o$) と h の影響を考察し一方氣温による影響項 $\psi(A,h,l)$ を該節に説明せし如く一日及び半日週期の部分のみに依るとし取扱ひ，兩者と版平均温度より最大温度に至る温度差 (T_{m-max}) の關係を滿足する樣係數 h を定むる事同所論の如く爲す．

斯くの如くして $h=\frac{h'}{\lambda}$ の月平均的の値を得更にⅠ章3節 (13) 式より版平均温度 (T_m) と氣温平均温度 ($A°$) との差が與へられる，

$$T_m - A_o = \frac{1}{h}(J - 0.0556\,e),\ J = 0.0124\,J_o$$

該式に既に求めし h の係數値を代入し發散量 (e) を算定す．$T_m - A_o$ の T_m, A_o は共に温度變化の Fourier 級數展開の常數項に相當するものである，今兩者の差の値は夫々の温度の最大最小平均の差と等しきものと假定し上に述べし平均温度差の式を其の儘適用す．以上の如き方法により概略的に算定せる h, e を表—4 に示す．

表—4 h (Newton 冷却恒數 / 熱傳導度), e (蒸發及び輻射發散熱量) 月平均表

月名	$h\left(\frac{h'}{\lambda}\right)$	e (cal/cm^2/hr)
1	1～1.3	12.0
2	0.55	2.7
3	0.32	7.5
4	0.25	6.2
5	0.25	微少零に近し
6	0.2	3.6
7	0.24	0.5 微少
8	0.17	2.7
9	0.15	1.2
10	0.5	1.1
11	1～	2.6
12	1～1.3	11.0

h は風速温度に密接な關係を有するもので臺井氏[17] の地面に於ける調査の場合より本結果は四季を通じ大なる値なれども同程度のものである．多期に於て $h=1$ の程度の如き大なる値を示した，試驗地の特定の事情によるか疑實ならず，$h=0.5$ なれば $h'=9.0$ (cal/cm^2.h.°C) $=90$. (K. cal/m^2.h.°C) にて通常流動せる空氣中に於ては $h'=10$～500 (Kcal/m^2 hr. °C)[18] 靜止せる空氣中にては 3～30 (Kcal./m^2.hr.°C) と云れてゐる．

發散熱量 (e) は多期には著しく夜間氣溫低下し鋪裝版よりの輻射が著しく增大すると推測される．玆に得たる値は地面の場合より大なるものである．Newton 冷却恒數 h'. 熱量發散量 e に關しては更に機會を得て論究せんとす．

上述の如く得たる鋪裝版溫度に關する結果は月平均に就いての巨視的なもので可成りの假定と省略との下に論究せしものであるが，表面溫度上昇並に內部溫度分布に關し概括的な判定を下し得るものである．

（5） 異る鋪裝並に氣條件の異る地域に於ける應用

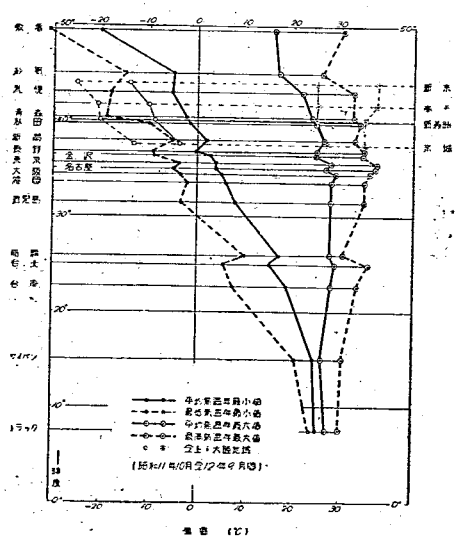
今鋪裝の異る場合を考察するに Newton 冷却恒數 h', 吸收率 α, 並に鋪裝面よりの蒸發 e 等總て異るものである．h', α に關しては未だ實測されしもの無く假りに h' は風速溫度の如き氣象要素一定なれば同程度の値をとると見做し α に關し照明試驗に於ける値が[19] 適用されるとすれば容易に表面溫度日差は I 章 3 節の $\psi(A, h, t) + \alpha' J_0 \Phi(h, t)$ 式又は圖—3, 4 より容易に推定し得．例へば瀝靑鋪裝の場合には吸收率 90% 前後なればコンクリート鋪裝の場合に比較し日射による部分 $\alpha' J_0 \Phi(h, t)$ の影響は約 90/70 ≒ 1.3 倍に增大するも氣溫による影響は大差無きものと見做せば冷却恒數 $h'\left(h = \frac{h'}{\lambda}\right)$ に應じて日差を求め得．

瀝靑鋪裝の熱傳導度は骨材含有容積にて著しく異り且つ，構造上鋪裝版全體厚さに對し一樣なる傳導度を示さない，若し骨材の含有しない場合には λ ≒ 3 cal. cm^{-1} °C^{-1}. hr^{-1}.[20] 以下なれども 30% 容積前後も含む場合には λ はコンクリートと略ゞ同程度である，從つて $\Phi(h, t)$ は一般にコンクリートの場合より增大し冷却恒數 $h'\left(\alpha' = \frac{\alpha}{h'} = \frac{\alpha}{\lambda h}\right)$ 其のものは大差無き場合にても增加比率は上述せる 1.3 より更に增加す．

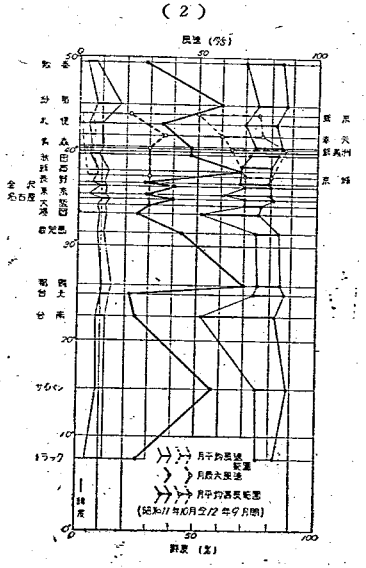
一方版の平均溫度 T_m の氣溫の平均よりの增加率は $\left(\frac{\alpha' J_0}{\pi} - \frac{e}{h'}\right)$ なれば日差の場合と全く同樣に論じ得．

圖 — 15

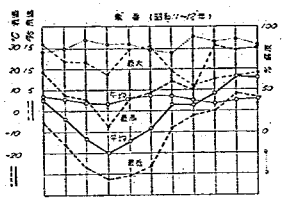
（1）



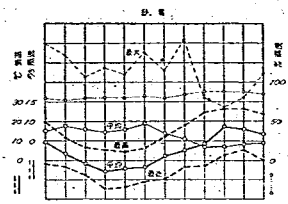
（2）



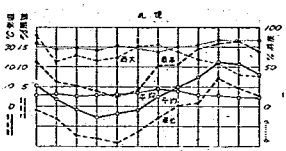
（3）



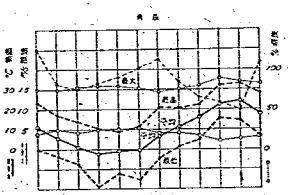
（4）



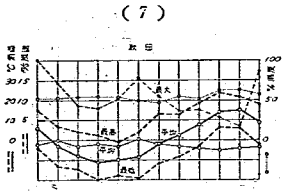
（5）



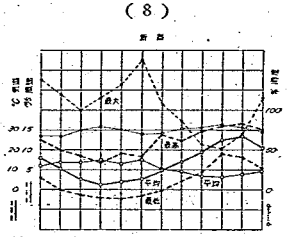
（6）



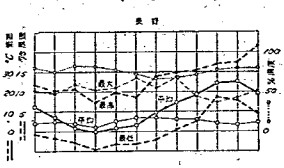
（7）



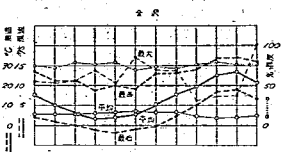
（8）



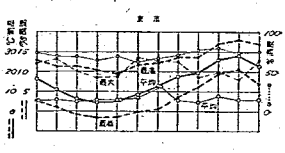
（9）



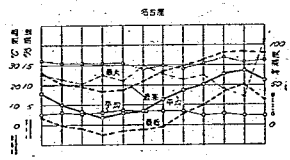
（10）



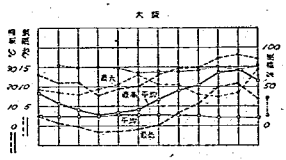
（11）



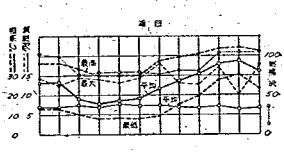
（12）



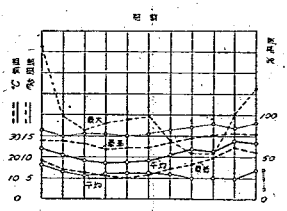
（13）



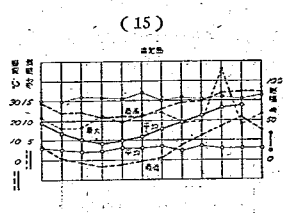
（14）



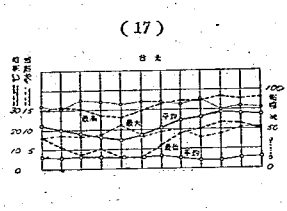
（16）



（15）

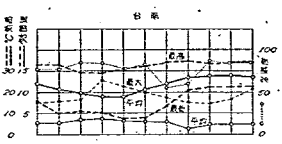


（17）

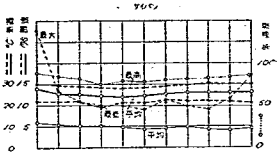


地域による氣象作用の影響も氣温 U_a 竝に日射量 (J_o) に考慮し上述せる所論を適用すれば各地に於ける舗裝の温度に關する傾向を推定し得．氣温日射量は共に緯度其の他特定の地勢により著しく異るも該地の氣温の最高最低の平均値及び平均氣温等より氣温による影響を定む，日射量 (J_o) は各地の緯度の影響のみならず地勢天空

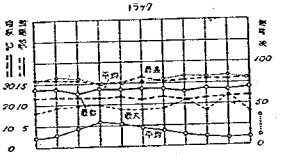
(18)



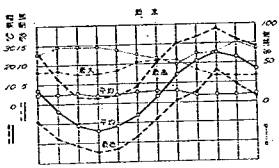
(19)



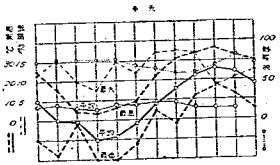
(20)



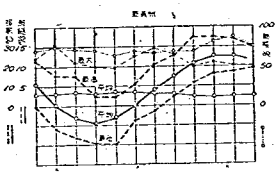
(21)



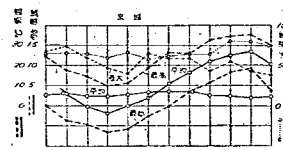
(22)



(23)



(24)



狀況の影響を蒙る事頗る大なれば，其都度常に測候所等の觀測値に據る事が必要である．本試驗期日中に於ける本邦主要各地の氣溫，竝に風速等を氣象要覽より引用し參考の爲め圖—15～(1～24) に示す．

結　　言

本文は鋪裝コンクリート試驗版により一年を通じて行はれた温度測定實驗結果より鋪裝表面温度上昇竝に版内部温度分布と氣象作用との關係を考察し其の主要要素との關係を二三明かにし鋪裝の種類の異る場合竝に氣象狀況の異る地域に於ける理論の應用を試みたものである．主なる結果を要約すれば下記の如し．

1)　鋪裝温度變化と關聯し考察すべき氣象要素の撰擇に就き述べる．

2)　全天空輻射による日射量を

$$J_e = J_0 \sin\left(\frac{\pi}{12}t\right), \quad 0 < t < \frac{T}{2}$$

$$= 0 \quad , \qquad \frac{T}{2} < t < T$$

と假定し $T = 24\,h$, t 時間單位とし J_0 に月平均値をとる．

表面に於ては Newton の輻射則に從ふ熱の傳達あるものとし，且蒸發及び版自身よりの輻射等による發熱減量 (e) を追加し版内への熱傳導をも考慮し境の條件とす．即ち下式の條件により一般の熱傳導式を解く．

$$\left.\begin{aligned} \left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)_{z=0} - hU_{z=0} &= -h\,F(t) \\ F(t) &= U_a + \alpha'(R_a + R_s) - \frac{e}{h'} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (4)'$$

$$h = \frac{h'}{\lambda}, \qquad \alpha' = \alpha / h' = \alpha / h\lambda,$$

但し　h'；Newton 冷却則恒數，　α；吸收率，　λ；熱傳導度，

U_a：氣温　$A_0+\sum_{n=1}^{\infty}A_n\cos(\omega nt-\varepsilon_n)$

$$\alpha'(R_a+R_s)=\alpha' J_0\sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right),\quad 0<t<\frac{T}{2}$$

$$=0,\qquad \frac{T}{2}<t<T$$

3) 舗裝版の表面より深き z の點に於ける温度を得.

$$U=A_0+\left(\frac{\alpha' J_0}{\pi}-\frac{e}{h'}\right)+\sum_{n=1}^{\infty}A_n C(h,n)\,e^{-z\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}}\cos\left(\omega nt-z\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}-\varepsilon_n-\varepsilon'_n\right)$$

$$+\frac{\alpha' J_0}{2}\left\{C(h,1)\,e^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2k^2}}}\sin\left(\omega t-z\sqrt{\frac{\omega}{2k^2}}-\varepsilon'_1\right)\right.$$

$$\left.-\frac{2}{\pi}\left(-\frac{2}{3}C(h,2)\cos(2\omega t-\varepsilon'_2)+\frac{2}{15}\times\cdots\cdots\right)\right\}$$

但し，　$C(h,n)=h\Big/\sqrt{\left(h+\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}\right)^2+\frac{\omega n}{2k^2}}$　，$\varepsilon'_n=\tan\dfrac{-1\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}}{h+\sqrt{\frac{\omega n}{2k^2}}}$　とす，

4) 舗裝版表面温度は（3）項の温度に，$z=0$ と置き容易に之を求め得.

今下記の如く示し，$(u)_{z=0}$ を與ふ T_m, $\psi(A,h,t)$, $\alpha' J_0\Phi(h,t)$ 函數の特性を論ず.

$$(U)_{z=0}=T_m+\psi(A,h,t)+\alpha' J_0\Phi(h,t)\cdots\cdots(11)$$

T_m ＝ 版平均温度 ＝ $A_0+\left(\dfrac{\alpha' J_0}{\pi}-\dfrac{e}{h'}\right)$

$\psi(A,h,t)$；氣温による温度振幅への影響

$\alpha' J_0\Phi(h,t)$；日射量による　〃

5) 係數 $h=0.05\sim4$, $n=1\cdots\cdots6$, の範圍に於ける $C(h,n)$, ε'_n, の値を求め圖示す.

6) 係數 $h=0.05\sim4$ の範圍に於ける，$\psi(A,h,t)$, $\alpha' J_0\Phi(h,t)$ の變化を論じ熱傳等度 $\lambda=18$ (cal/cm. h. °C.) $\alpha=0.70$ 程度の場合の 値を計算し圖示す. 特に $\alpha' J_0\Phi(h,t)$ に就いては極大極小値 $\alpha' J_0\Phi(h,t)_{max}$, $\alpha' J_0\Phi(h,t)_{min}$ を算出す.

7) 斯くして舗裝版温度に關する特性中特に主要なる版平均温度竝に版温度日差の氣温 U_a, 竝に日射量 J_0 により推定される事を理論的に明かに示す.

8) 上述の如く得たる理論的考察の結果とし試驗結果とを比較せん爲め赤羽分室に設置せる厚さ 15cm. 2 m. 平方の試驗コンクリート舗裝に就き一年を通じ表面より 1,5cm, 3,0cm……15cm と 6 ケ箇に設塡せる熱電對により温度變化を自記せしむ.

9) 自記温度の中 12月11日，5月12日の兩日の結果を Fourier 級數に展開す，常數項は熱電對位置深さに拘らず略ゝ一定値を示し，$n=4$ 次項以下は振幅 0.01/°C 程度となり省略す，振幅の減衰相位の遲れより，コンクリート版の温度傳導率 (k^2) を推定し得，Fourier 級數展開式の一日周期のもの振幅，相位より夫ゝ k_α^2, k_β^2 を求めんに版の深さの範圍に就き略ゝ一定値を下記の如く得.

$k_\alpha^2=46$ (cm^2 h^{-1}. °C^{-1}) 12月11日

50 ($cm^2\ h^{-1}\ °C^{-1}$) 5月12日

k_β^2 = 41 (〃) 12月11日, 5月12日

10) 試驗コンクリート版の溫度傳導率 (k^2) は四季期節により異るものの如く夏期の方多く且振幅減衰率相位遲れより求めしものは異る値を示す (Isotropismus ならず)

11) 版の日最大最小の平均溫度を月毎に調査し且晴天日に就き月平均値を求む, 1年を通じ正弦的に變り, 氣溫同溫度との關係を考察し圖示す (圖—11)

12) 表面溫度竝に氣溫の日差の月極大小と月平均を求め圖示し (圖—12) 兩者の關係を考察す. 例へば 10月12月1月に於ては兩者略ゝ同一値を示すも4月8月6月に於ては兩者に著しき差あり日射の影響の顯著なる事を示す.

13) 版表面溫度日差は 3, 4, 5, 6, 8月 月平均 約 18°C
11, 12, 1月 月平均 約 10°C
にて他は中間に屬す.

14) 月平均月射量 J_0 = 40cal/cm^2 h. 以下は (表面溫度日差月平均) — (氣溫日差月平均) = 0 にて 40 cal/cm^2 h. 以上拋物線曲線の如き傾向に增大す.

15) 版の日最大最小平均溫度—版平均溫度の月平均値を求む 10, 11, 12, 1, 2 月略ゝ 0 なれども夏季 2.0°C 前後九月最高 2.7°C を示す.

16) 實驗値の月平均値に理論的考察を適用し氣象要素とし氣溫 U_a 竝に日射量 J_0 を與へ, Newton 冷却恒數 h' と熱傳導度 λ との比 $h = h'/\lambda$ 竝に蒸發輻射熱量 e を算定す.

17) 斯くして求めたる h は 1.3~0.15, e は 12cal/cm^2 h.~0 の範圍に及び, h の大なる値は 11, 12, 1月に起り, e の大なるものは 12月1月に起る, h, e に關しては將來の研究に俟つべきである.

18) 試驗コンクリート版にて得たる溫度上昇に關する結果を異る鋪裝竝に氣象條件の異る地域に應用する場合考慮すべき諸點を列擧した.

以上各項に擧げたる如きものに就き鋪裝溫度の變化に關する特性を論じた, 本實驗に於ては風速, 溫度を測定せざりし爲め主として月平均に就き相關關係を論じた. 將來此等の諸性質を直接考慮に入れる事により一層其の進展を期待し得.

引用文献

(1) 藤井眞透: 鋪裝コンクリート版の溫度に及ぼす氣溫の影響, 同土木試驗所報告, 18號, 昭和5年10月, p. 57

(2) 藤井眞透: 前揭(1)

(3) H. M. Westergaard; Analysis of Stresses in concrete Roads caused by variations of temperature; Public Roads, Vol. 8,1927/1928 p. 55.

(4) Stresses due to curling from either temperature or moisture, Report of the Road Research Board, March. 1938. p. 115

(5) K. Eberle; Ueber Temperature und Spannung bei Balken und Fahrban deckenplatten aus Beton, Zement, 27 J. 1938. H. 5. 65; H. 6. 77, H. 7. 90; H. 8, 101; H. 10. 149; H. 11. 162.; H. 13. 190.; H. 14. 208; H. 16. 222.

（6） 夏季路上温度の測定

東京市土木試驗所報告 昭和2年 頁. 134.

（7） 藤原咲平，高橋諸一郎，關口領，東京に於ける大氣下層の熱の出入について，氣象集誌，2輯，15卷，7號，(1934, 255).

（8） D. Brunt. The Transfer of Heat by radiation and turbulence in the lower atmospere, Proc. of Royal Soc., Series Avol 124, 1929. P. 203.

（9） 例へば A. Nippoldt. J. Keränen, E, Schneidler; Einführiung in die Geophysik, II. 1929. S. 170.

（10） 島田八郎； コンクリートの熱的性質に關する試驗（第1報）土木試驗所報告第37號

（11） 大山松次郎； 布地及紙の輻射線に對する性質，電氣學會誌，昭和2年4月，465號，

（12） 島田八郎； 路面の光反射に關する試驗並に之に基く道路照明基準に就て，土木試驗所報告39號，昭和12年11月，

（13） Hans Christian Brunner; Küsteneinfluss auf Temp. und Feuchte bodennaher Luftschichten, Gerlands Beiträge Bd. 56. H. 2. 1940.

（14） 壺井伊八； 地面温度に關係した調査，海洋氣象臺彙報第82，昭和10年5月

（15） 前揭，(3) (4) (5)，

（16） A. Nippoldt, etc. Einführung in die Geophysik, II. S. 127.

（17） 壺井伊八； 前揭 (14)

（18） 大賀惠二； 傳熱諸論と其の適用，1940.

（19） 島田八郎； 前揭 (2)

（20） 同 上 鋪裝用アスファルトの温度傳導率に關する試驗，土木試驗所報告第43號，昭和13年11月，

コンクリート支承面が局部的に荷重を受ける場合のコンクリートの許容支壓應力度實驗式竝びに其の適用の限界に就いて

內務技師　一　木　保　夫

要　旨

コンクリート支承面が局部的に荷重を受ける場合のコンクリートの支壓力に關する試驗の結果に基づき，次の許容支壓應力度式を提案した．

支承面が帶荷重を受ける場合

$$\sigma_{ca}'=\sigma_{ca}\sqrt[2.2]{\frac{d}{d'}}$$

支承面が點荷重を受ける場合

$$\sigma_{ca}'=\sigma_{ca}\sqrt[1.8]{\frac{A}{A'}}$$

之等の式の適用限界に就いては $\frac{d}{d'}$ 又は $\frac{A}{A'}\fallingdotseq 30$ までと考へた．卽ち $\sigma_{28}=210\ \mathrm{kg/cm^2}$ とすれば帶荷重を受ける場合に於ては $\sigma_{ca}'\leqq 280\ \mathrm{kg/cm^2}$，點荷重を受ける場合に於ては $\sigma_{ca}'\leqq 400\ \mathrm{kg/cm^2}$ となる．

更に上記許容應力度式の簡易式として次の式を導いた．

帶荷重を受ける場合　$\sigma_{ca}'=0.9\,\sigma_{ca}\sqrt{\frac{d}{d'}}$

點荷重を受ける場合　$\sigma_{ca}'=1.1\,\sigma_{ca}\sqrt{\frac{A}{A'}}$

之等の簡易式は $\frac{d}{d'}$ 又は $\frac{A}{A'}=2\sim 10$ の範圍に於ては誤差は小さく實際的に適用し得る．

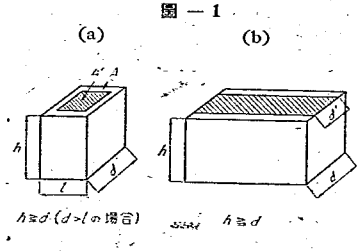
目　次

Ⅰ. 緒　言……（2）
Ⅱ. 既往の實驗……（2）
Ⅲ. 標準示方書に規定された許容支壓應力度式に對する批判……（3）
Ⅳ. 試驗方法……（4）
Ⅴ. 支壓力に關する試驗結果……（5）
Ⅵ. 試驗結果より實驗式の誘導……（10）
Ⅶ. 標準示方書規定の式と試驗結果より誘導せる式との比較……（13）
Ⅷ. 許容支壓應力度實驗式竝びに其の適用の限界に就いて……（14）
Ⅸ. 標準示方書規定に對する改正案の提案……（15）
Ⅹ. 簡易計算式……（15）
Ⅺ. 結　言……（16）

I. 緒　　言

柱又は壁の下に於ける基礎臺，鐵筋コンクリート鉸或はロツカーの接觸面等の如く，コンクリート支承面が局部的に荷重を受ける場合には，支承面全體に荷重を受ける場合よりもコンクリートの許容支壓應力度を大きく採ることが出來る．之は支壓材自身の强度の外に，支壓力を受ける面 A' と支承の表面積 A との關係に依るものであつて，土木學會鐵筋コンクリート標準示方書に於ては第 75 條 (2) に次の如く規定してゐる．

圖 — 1



支承の表面積 A が支壓力を受くる面積 A' より大なる場合には，其の許容支壓應力度 σ_{ca}' は次式に依ることを得（圖—1 參照）．

(a) の場合　　$\sigma_{ca}'=\sigma_{ca}\sqrt[3]{\frac{A}{A'}}$

(b) の場合　　$\sigma_{ca}'=\sigma_{ca}\sqrt[3]{\frac{d}{d'}}$

$\left(\sigma_{ca}=\frac{\sigma_{28}}{3.5}\right)$

但し σ_{ca}' は 120 kg/cm² を超過すべからず．

此の規定は Bauschinger 及び Bach の行つた砂岩に就いての試驗及び Graf の行つたコンクリートに就いての試驗結果を基として定められたもので，各國の標準示方書にも此の式が採用されてゐるが，我國に於ては未だ之に關する實驗はない．

σ_{ca}' の限度を 120 kg/cm² に止めたのは，上記 3 氏の實驗範圍から定めたのであるが，實際に於て例へば鐵筋コンクリートロツカーの設計の際に，接觸面附近の應力度を 120 kg/cm² 以內とすることは甚だ困難であり，然も筆者の曩に行へるロツカーの試驗から見ても σ_{ca}' の限度を更に高め得るであらうことは，容易に豫想出來たのである．且つ又，示方書規定の支壓應力度式そのものに就いても尙批判の餘地がある．

以上の理由より本研究に於ては，支壓面積を種々に變へて支壓力を試驗し，之より實驗式を誘導して，支承面が局部的に荷重を受ける場合の支壓應力度の許容し得る限度を明らかにし，更に之を示方書規定と比較して，示方書規定に對する改正案を提案せんとしたのである．

試驗は帶荷重を受ける場合卽ち示方書規定の (b) の場合と，點荷重を受ける場合卽ち示方書規定の (a) の場合との 2 つに分けて行ひ，その結果を別々に整理した．

本試驗に當つては，所員池田克己君の助力を得た．

II. 既 往 の 實 驗

支承面が局部的に荷重を受ける場合の支壓力に就いての既往の實驗としては，Bauschinger, Bach 及び graf 等の實驗があるが，この內前 2 者は砂岩に就いて試驗したものであり，コンクリートに就いて試驗したのは Graf のみである．

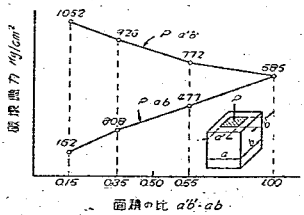
次に之等 3 氏の實驗結果を簡單に述べる. (Bach-Baumann, "Elastizität und Festigkeit," 9. Aufl., s. 213. und Emperger, "Handbuch für Eisenbetonbau," 3. Aufl., I. Bd., s. 350)

[1] Bauschinger 及び Bach の實驗 (1876 年)

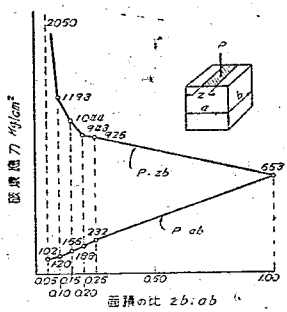
稜の長さ約 10 cm の 6 面體の砂岩を, 鐵片によつて支壓面積を種々に變へて加壓したのである.

圖—2 は Bauschinger の實驗結果であり, 圖—3 は Bach の實驗結果である.

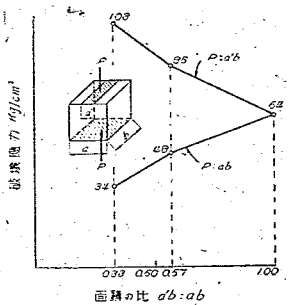
圖—2　砂岩に就いての Bauschinger の實驗結果



圖—3　砂岩に就いての Bach の實驗結果



圖—4　コンクリートに就いての Graf の實驗結果



[2] Graf の實驗 (1921 年)

Graf の行つたコンクリートに就いての實驗結果は圖—4 の如くである. 支承面全體に荷重を受けた場合の强度 64 kg/cm² と云ふ, 非常に强度の小さなコンクリートを使用してゐる. 又その試驗の範圍も非常に小範圍である.

尙 Graf は支壓材の高さ及び幅の影響, 兩面に局部荷重を受けた場合等に就いても試驗してゐる.

III. 標準示方書に規定された許容支壓應力度式に對する批判

緒言に於て述べた如く, 土木學會鐵筋コンクリート標準示方書に於ては, 許容支壓應力度式として線荷重の場合には $\sigma_{ca}'=\sigma_{ca}\sqrt[3]{\frac{d}{d'}}$, 點荷重の場合には $\sigma_{ca}'=\sigma_{ca}\sqrt[3]{\frac{A}{A'}}$ なる式を規定してゐる. 即ち支壓應力度式の一般形としては $K'=K\sqrt[n]{\frac{A}{A'}}$ $(n=3)$ であり, 獨逸の標準示方書に於ても同じく此の形式を採用してゐる. 此の式は前述の如く Bauschinger, Bach 及び Graf の實驗から導いたものであるが, 之等は砂岩に就いての實驗が主であり, 又實驗の範圍も小範圍であるから, $n=3$ とすることが正しいか否かは尙批判の餘地がある. 又線荷重の場合も點荷重の場合も同一の式で表はし得るや否やも疑問である. 又試驗結果より實驗式を誘導する場合に式の一般形としては, $A=A'$ 即ち支承面全體に荷重を受ける場合と局部的に荷重を受ける場合とを連續ならしめ, 且つ又 K' と σ_{23} との關係を明確ならしめるためには, $A=A'$ の場合に $K'=\beta K=\alpha\sigma_{23}$ となる如き式の形

を選び，然して β とか α なる係數は，式を誘導した後に於て更に批判を加へなければならない．

依つて筆者は一般的な式の形として

$$K'=\beta K\sqrt[n]{\frac{A}{A'}}=\alpha\sigma_{28}\sqrt[n]{\frac{A}{A'}}$$

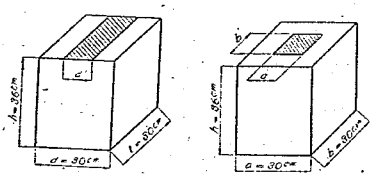
なる形を選び，之に就いて線荷重及び點荷重の各々の場合に對し實驗によつて n, β 及び α の値を決定せんとしたのである．但し上式に於て K' は支壓材が局部的に荷重を受ける場合の破壞應力度，K は支壓材が面全體に荷重を受ける場合の破壞應力度，β は試驗の結果を最小自乘法により對數方眼紙上に 1 つの直線を以て表はさんとするときにその直線の通過すべき點を決定する係數，α は支壓材の大さ寸法及び β によつて異なる係數である．

IV. 試　驗　方　法

[1] 供試體及び使用コンクリート

供試體の寸法は幅 d 又は $a=30$ cm，長さ l 又は $b=30$ cm，高さ h は彈性體の理論より，幅の 1.0～1.2 倍にて應力度の分布が實際的に見て一樣になることが證明されてゐるので，幅の 1.2 倍をとつて 36 cm と定めた（圖—5 參照）．

圖—5　供試體の寸法



セメントは淺野普通ポルトランドセメント，砂は多摩川產，砂利は荒川產（最大寸法 30 mm）の良質のものを使用した．

コンクリートは一般構造用コンクリートを標準として容積配合比 1：2：4（重量配合比 1：2.35：4.63）とし，流動性はスランプ 6～8 cm を標準とした．

帶荷重を受ける場合の試驗に使用したコンクリートの，標準供試體に就いての材齡 28 日の壓縮强度は表—1 の如くであり，平均 280 kg/cm² となつてゐる．この內 1～3 は支壓力試驗供試體 No. 1 製作の際に，又 4～6 は支壓力試驗供試體 No. 13 製作の際に夫々同じコンクリートから製作せるものである．

表—1　帶荷重試驗に使用せるコンクリートの壓縮强度

供試體番號	容積配合	水セメント比 %	スランプ cm	フロー	材齡 日	供試體寸法cm 徑	供試體寸法cm 高	重量 kg	單位重量 kg/m³	破壞荷重 ton	壓縮强度 kg/cm²
1	1:2:4	61	6.5	185	28	15	30	12.91	2435	47.0	266
2	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	12.85	2424	46.3	262
3	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	12.78	2411	48.0	272
4	〃	〃	8.5	190	〃	〃	〃	12.82	2418	51.5	291
5	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	12.81	2416	52.5	297
6	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	12.78	2411	51.0	289
平均									2419		280

點荷重を受ける場合の試驗に使用したコンクリートの強度は表—2 の如くで平均 156 kg/cm² である．前に比して強度が低いのは骨材は前と略々同じものであるが，セメントの強度の差異によるものである．

表—2　點荷重試驗に使用せるコンクリートの壓縮強度

供試體番號	容積配合	水セメント比 %	スランプ cm	フロー	材齡 日	供試體寸法 cm 徑	供試體寸法 cm 高	重量 kg	單位重量 kg/m³	破壞荷重 ton	壓縮強度 kg/cm²
1	1:2:4	62	6.5	195	28	15	30	12.74	2403	27.5	156
2	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	12.74	2403	26.2	148
3	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	12.72	2399	28.8	163
平均									2401		156

支壓力試驗供試體の製作は，木製型枠にコンクリートを 4 層に分つて填充し，突固めは土木學會の標準突固めに準じ直徑 32 mm，長 50 cm の突棒にて每層 40 回宛突いて締固めた．3 日後に脫型して標準養生水槽中（水温平均 20°C）に入れ，試驗日の前日まで水中養生を行つた．

供試體は加壓面積の異なるものに就き 3 箇宛製作した．

[2] 載荷方法

供試體は試驗日の前日，養生水槽中より取出し，上下面の不陸を金剛砥にて均し，材齡 28～30 日にて試驗した．

M. A. N. 1000 ton 壓縮試驗機又はアムスラー型 200 ton 壓縮試驗機を使用し，供試體の下面は試驗機の下部傳壓面に直接一樣に接着せしめ，供試體の上面と試驗機の上部傳壓面との間には厚約 16 mm の機械仕上げせる鋼鈑を置いて加壓面を種々に變へた．帶荷重試驗に對しては鋼鈑の長さは 30 cm，幅 d' を 30 cm, 25 cm, 20 cm, 15 cm, 10 cm, 5 cm, 2.5 cm 及び 1 cm の 8 種とし，點荷重試驗に對しては鋼鈑の大さ $a' \times b'$ を 30 cm ×30 cm, 25 cm×25cm, 18 cm×18cm, 9 cm×9 cm, 5 cm×5 cm 及び 2 cm×2 cm の 6 種とした．尙供試體は製作の際の上面を上面とし，供試體の中心と鋼鈑の中心とは正しく一致せしめて加壓した．

供試體の表面には石膏を塗り，龜裂狀態の觀察に便ならしめた．

V. 支壓力に關する試驗結果

[1] 支承面が帶荷重を受ける場合

加壓面幅 d' を 8 種に變へて行つた支壓力試驗の結果を一括して表—3 に示す．

各異なる加壓面幅に對する平均値をとれば表—4 の如くになる．但し $A=d\,l$, $A'=d'l$ である．

破壞の狀態は寫眞—1～8 に示す通りで，殆んど總ての場合に加壓面の下側に楔形の破壞を生じた．

表—4 より $\frac{A'}{A}=\frac{d'}{d}$ と $\frac{P}{A}$ 及び $\frac{P}{A'}$ との關係を求むれば，圖—6 の如くになる．

圖—6 の破壞に對する $\frac{P}{A'}=K'$ 曲線の形より見て，又 K' と $\frac{A}{A'}$ との關係を對數方眼紙上にとるときは略々直線に近き形をなすことより，K' と $\frac{A}{A'}$ との關係は一般に

表—3 支壓力試驗結果（帶荷重の場合）

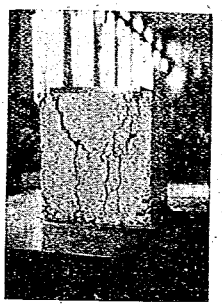
供試體番號	加壓面幅 d' cm	材齡 日	單位重量 kg/m³	荷重 P ton		P/dl kg/cm²		$P/d'l$ kg/cm²	
				龜裂	破壞	龜裂	破壞	龜裂	破壞
1	30	28	2441	315	338	350	376	350	376
2	〃	29	2451	303	372	337	413	337	413
3	〃	〃	2444	360	373	400	414	400	414
4	15	28	〃	187	224	208	249	415	493
5	〃	29	2441	—	225	—	250	—	500
6	〃	〃	2426	174	220	193	244	387	489
7	25	28	2441	295	330	328	367	393	440
8	〃	29	2429	290	297	322	330	387	396
9	〃	30	2426	242	302	269	336	323	403
10	10	28	〃	115	166	128	184	383	553
11	〃	29	〃	125	178	139	198	417	593
12	〃	〃	〃	103	181	114	201	343	603
13	20	28	2438	146	262	162	291	243	437
14	〃	29	2432	215	253	240	281	358	422
15	〃	30	2435	146	245	162	272	243	408
16	5	28	2426	84	119	93.3	132	560	790
17	〃	〃	2432	83	102	92.2	113	553	677
18	〃	〃	2420	194	126	104	140	627	841
19	2.5	〃	2423	75	75	83.3	83.3	1000	1000
20	〃	〃	2426	82	82	91.6	91.6	1099	1099
21	〃	〃	2398	70	70	77.6	77.6	931	931
22	1	〃	2407	60	60	66.7	66.7	2000	2000
23	〃	〃	2426	59	59	65.6	65.6	1967	1967
24	〃	〃	2423	55	61	61.1	68.0	1833	2040

表—4 各加壓面幅に對する平均値

加壓面幅 d' cm	$A'/A=d'/d$	$A/A'=d/d'$	P/A kg/cm²		P/A' kg/cm²	
			龜裂	破壞	龜裂	破壞
30	1.00	1.00	362	401	362	401
25	0.83	1.20	306	344	368	413
20	0.67	1.50	188	281	281	422
15	0.50	2.00	201	248	401	463
10	0.33	3.00	127	194	381	583
5	0.17	6.00	96.6	128	580	769
2.5	0.08	12.00	84.2	84.2	1010	1010
1	0.03	30.00	64.5	66.8	1933	2002

寫眞—1　$d'=30$ cm 卽ち全面加壓の場合

寫眞—2　$d'=25$ cm の場合



寫眞—3　$d'=20$ cm の場合

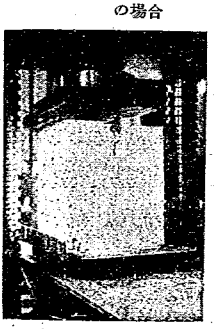
寫眞—4　$d'=15$ cmの場合

寫眞—5　$d'=10$ cmの場合

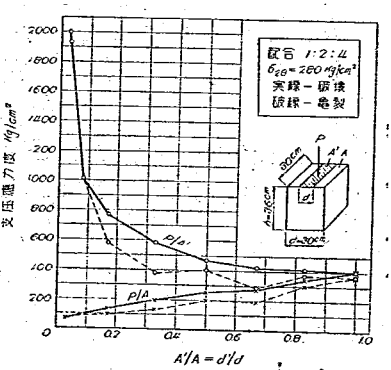
寫眞—6　$d'=5$ cm の場合

寫眞—7　$d'=2.5$ cm の場合

寫眞—8　$d'=1$ cm の場合



圖—6　$\frac{A'}{A}=\frac{d'}{d}$ と $\frac{P'}{A}$ 及び $\frac{P}{A'}$ との關係



$$K'=\gamma\sqrt[n]{\frac{A}{A'}}$$

なる形で表はし得ることがわかる.

[2] 支承面が點荷重を受ける場合

加壓面積 A' を 6 種に變へて行つた支壓力試驗の結果を一括して表—5 に示す. No. 20, 21 及び 22 は參考のため, 直徑 10.2 cm の圓形の鋼鈑にて加壓したものである.

表—5 支壓力試驗結果 (點荷重の場合)

供試體番號	加壓面積 cm² $a'\times b'=A'$	單位重量 kg/m³	荷重 P ton 龜裂	荷重 P ton 破壞	$P_1=\frac{P}{ab}$ kg/cm² 龜裂	$P_1=\frac{P}{ab}$ kg/cm² 破壞	$P_1=\frac{P}{a'b'}$ kg/cm² 龜裂	$P_1=\frac{P}{a'b'}$ kg/cm² 破壞
1	30×30=900	2392	170	268	189	298	189	298
2	〃	2426	193	235	214	261	214	261
3	〃	2398	113	197	126	219	126	219
4	9× 9= 81	2448	55.0	58.0	61.1	64.4	679	716
5	〃	2438	70.0	70.0	77.8	77.8	864	864
6	〃	2401	66.0	66.0	73.3	73.3	815	815
7	25×25=625	2448	—	168	—	187	—	269
8	〃	2414	—	185	—	206	—	296
9	30×30=900	2444	151	205	168	228	168	228
10	25×25=625	2414	94.0	159	104	177	150	254
11	5× 5= 25	2441	41.0	41.0	45.6	45.6	1640	1640
12	〃	2401	44.0	44.0	48.9	48.9	1760	1760
13	〃	2457	45.0	50.0	50.0	55.6	1800	2000
14	18×18=324	2407	82.0	97.0	91.1	108	253	299
15	〃	2438	85.0	114	94.4	127	262	352
16	〃	2414	90.0	115	100	128	278	355
17	2× 2= 4	2451	11.0	21.4	12.2	23.8	2750	5350
18	〃	2420	11.0	20.8	12.2	23.1	2750	5200
19	〃	2454	14.9	19.8	16.6	22.0	3725	4950
20	ϕ10.2=81.8	2417	45.0	46.5	50.0	51.7	550	568
21	〃	2420	63.0	63.0	70.0	70.0	770	770
22	〃	2401	58.5	58.5	65.0	65.0	715	715

(總て材齡 28 日にて試驗す)

各異なる加壓面積に對する平均値をとれば表—6 の如くになる. 但し $A=ab$, $A'=a'b'$ である.

破壞の狀態は寫眞—9～15 に示す通りで, 側面に縱の龜裂を生じて破壞したものが多い.

表—6 より $\frac{A'}{A}=\frac{a'b'}{ab}$ と $\frac{P}{A}$ 及び $\frac{P}{A'}$ との關係を求むれば, 圖—7 の如くになる.

此の場合にも帶荷重の場合と同樣に $\frac{P}{A'}=K'$ 曲線の形より, 又 K' と $\frac{A}{A'}$ との關係を對數方眼紙上にとるときは略々直線をなすことより, K' と $\frac{A}{A'}$ との關係は一般に

$$K'=\gamma\sqrt[n]{\frac{A}{A'}}$$

なる形で表はし得ることがわかる.

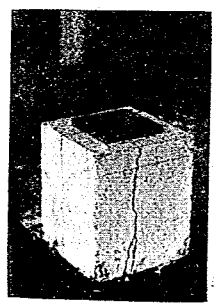
表—6　各加壓面積に對する平均値

加壓面積 cm^2 $a' \times b' = A'$	A'/A	A/A'	P/A kg/cm^2		P/A' kg/cm^2	
			龜裂	破壞	龜裂	破壞
30×30=900	1.000	1.000	174	252	174	252
25×25=625	0.694	1.440	104	190	150	273
18×18=324	0.360	2.778	95.2	121	264	335
9× 9= 81	0.090	11.111	70.7	71.8	786	798
5× 5= 25	0.028	36.000	48.2	50.3	1733	1800
2× 2= 4	0.004	225.000	13.7	23.0	3075	5167

寫眞—9　$A'=30\times30=900\ cm^2$ 卽ち全面加壓の場合

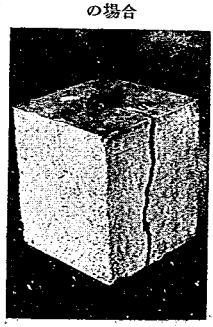
寫眞—10　$A'=25\times25=625\ cm^2$ の場合

寫眞—11　$A'=18\times18=324\ cm^2$ の場合

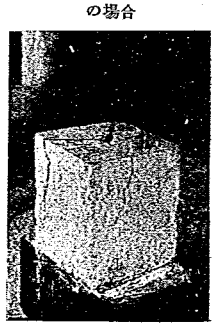


寫眞—12　$A'=9\times9=81\ cm^2$ の場合

寫眞—13　$A'=5\times5=25\ cm^2$ の場合

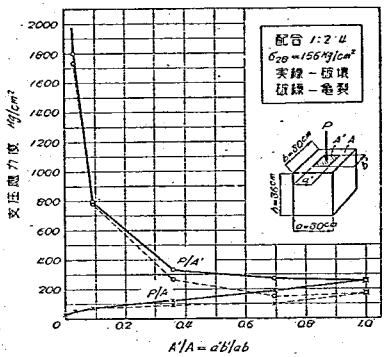


寫眞—14　$A'=2\times2=4\ cm^2$ の場合



寫眞—15 $A'=\phi 10.2=82\,cm^2$ の場合

圖—7 $\frac{A'}{A}=\frac{a'b'}{ab}$ と $\frac{P}{A}$ 及び $\frac{P}{A'}$ との關係



VI. 試驗結果より實驗式の誘導

K' と $\frac{A}{A'}=\frac{d}{d'}$ 又は $\frac{ab}{a'b'}$ との關係を一般に

$$K'=\beta K\sqrt[n]{\frac{A}{A'}}=\beta K\left(\frac{A}{A'}\right)^{m}=\alpha\,\sigma_{28}\sqrt[n]{\frac{A}{A'}}\qquad\left(m=\frac{1}{n}\right)\qquad\cdots\cdots(1)$$

なる形にて表はし，試驗の結果より係數 β, α 及び指數 m の値を決定する．

(1) 式の對數をとれば

$$\log K'=\log\beta+\log K+m\log\frac{A}{A'}$$

$$m\log\frac{A}{A'}+\log\beta=\log K'-\log K\qquad\cdots\cdots(2)$$

最小自乘法により

$$\begin{cases}\left[\left\{\log\frac{A}{A'}\right\}^2\right]m+\left[\log\frac{A}{A'}\right]\log\beta=\left[\log\frac{A}{A'}\cdot\left\{\log K'-\log K\right\}\right]\\ \left[\log\frac{A}{A'}\right]m+\left[1\right]\log\beta=\left[\log K'-\log K\right]\end{cases}$$

之より

$$m=\frac{\left[\log\frac{A}{A'}\cdot\left\{\log K'-\log K\right\}\right]\left[1\right]-\left[\log\frac{A}{A'}\right]\left[\log K'-\log K\right]}{\left[\left\{\log\frac{A}{A'}\right\}^2\right]\left[1\right]-\left[\log\frac{A}{A'}\right]^2}\qquad\cdots\cdots(3)$$

$$\log\beta=\frac{\left[\left\{\log\frac{A}{A'}\right\}^2\right]\left[\log K'-\log K\right]-\left[\log\frac{A}{A'}\right]\left[\log\frac{A}{A'}\cdot\left\{\log K'-\log K\right\}\right]}{\left[\left\{\log\frac{A}{A'}\right\}^2\right]\left[1\right]-\left[\log\frac{A}{A'}\right]^2}$$

次に支承面が帶荷重を受ける場合及び點荷重を受ける場合の各々の場合に就いて實驗式を誘導する.

[1] 支承面が帶荷重を受ける場合

表—4 より 8 つの觀測式 ((2) 式) を得る. 之より

$$\left[\log\frac{A}{A'}\right]=4.367,\quad \left[\left\{\log\frac{A}{A'}\right\}^2\right]=4.306401,\quad \left[\log K'-\log K\right]=1.6426,$$

$$\left[1\right]=8,\quad \left[\log\frac{A}{A'}\cdot\left\{\log K'-\log K\right\}\right]=1.785749$$

從つて之等の數値を (3) 式に入れゝば

$$m=\frac{1.785749\times8-4.367\times1.6426}{4.306401\times8-4.367^2}$$

$$=0.46$$

卽ち

$$n=\frac{1}{m}=\underline{2.16}$$

又

$$\log\beta=\frac{4.306401\times1.6426-4.367\times1.785749}{4.306401\times8-4.367^2}$$

$$=-0.047116$$

卽ち

$$\beta=\frac{1}{1.1146}=\underline{0.90}$$

故に(1)式は

$$\underline{K'=0.90K\sqrt[2.16]{\frac{A}{A'}}}\qquad\cdots\cdots(4)$$

となる.

次に

$$K'=\alpha\sigma_{28}\sqrt[n]{\frac{A}{A'}}\qquad\cdots\cdots(5)$$

と置き, K と標準供試體に就いての σ_{28} との關係より α の値を決定する.

卽ち $\beta K=\alpha\sigma_{28}$

$0.90\times401=\alpha\times280$

$\alpha=1.28$

故に σ_{28} を基準とすれば (4) 式は次の如くになる.

$$K'=1.28\,\sigma_{28}\sqrt[2.16]{\frac{A}{A'}} \qquad \cdots\cdots(6)$$

玆に係數 1.28 は支壓材の大さ，寸法等によつて異なる係數であつて，主として支壓材の高さの影響を受けるが，加壓面幅 d' が比較的狹く高さ h が幅 d の 1.0～1.2 倍以上の場合にあつては殆んど影響を受けないものと考へられる．

［2］ 支承面が點荷重を受ける場合

表—6 より 6 つの觀測式（(2) 式）を得る．之より

$$\left[\log\frac{A}{A'}\right]=5.556,\quad \left[\left\{\log\frac{A}{A'}\right\}^2\right]=9.269256,\quad \left[\log K'-\log K\right]=2.8247,$$

$$\left[1\right]=6,\quad \left[\log\frac{A}{A'}\cdot\left\{\log K'-\log K\right\}\right]=4.998026$$

從つて

$$m=\frac{4.998026\times6-5.556\times2.8247}{9.269256\times6-5.556^2}$$

$$=0.58$$

卽ち

$$n=\frac{1}{m}=\underline{1.73}$$

又

$$\log\beta=\frac{9.269256\times2.8247-5.556\times4.998026}{9.269256\times6-5.556^2}$$

$$=-0.064097$$

卽ち

$$\beta=\frac{1}{1.1590}=\underline{0.86}$$

故に (1) 式は

$$K'=0.86\sqrt[1.73]{\frac{A}{A'}} \qquad \cdots\cdots(7)$$

となる．

次に σ_{28} を基準にとるときは．

$$0.86\times252=\alpha\times156$$

より $\alpha=1.39$

となり (7) 式は次の如くになる．

$$K'=1.39\,\sigma_{28}\sqrt[1.73]{\frac{A}{A'}} \qquad \cdots\cdots(8)$$

係數 1.39 に就いては帶荷重を受ける場合と同樣に考へられる．

VII. 標準示方書規定の式と試驗結果より誘導せる式との比較

試驗の結果より

帶荷重を受ける場合に對し

$$K'=0.90\,\sqrt[2.16]{\frac{A}{A'}}=1.28\,\sigma_{28}\sqrt[2.16]{\frac{A}{A'}}$$

點荷重を受ける場合に對し

$$K'=0.86\,\sqrt[1.73]{\frac{A}{A'}}=1.39\,\sigma_{28}\sqrt[1.73]{\frac{A}{A'}}$$

なる關係式を得たが，今之等を土木學會鐵筋コンクリート標準示方書に規定されてゐる

$$K'=K\sqrt[3]{\frac{A}{A'}}=\sigma_{28}\sqrt[3]{\frac{A}{A'}}$$

なる式と比較してみる．

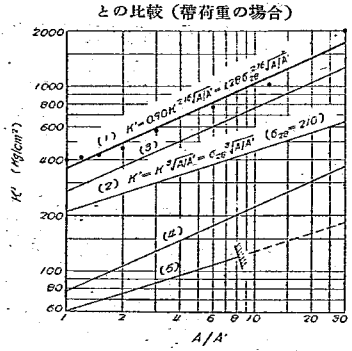
[1] 帶荷重の場合

圖—8 に於て，(1) は試驗結果を示す直線である．今 σ_{28} を標準示方書に於て取扱つてゐる最大値 210 kg/cm^2 とすれば，示方書規定の公式は (2) なる直線で示される．(3) は同じく $\sigma_{28}=210$ kg/cm^2 として，本試驗結果より得た關係式を適用した場合の直線である．

(2) と (3) とを比較するに (3) の方が (2) よりも K' の値が大で，この K' の差は $\frac{A}{A'}$ の大となるにつれて增加してゐる．卽ち直線の勾配が (2) に於ては 1：3 であるに對して (3) では 1：2.16 となつてゐる．たゞ $\frac{A}{A'}=1$～3 の範圍に於ては試驗結果は (2) に近い關係を示してゐる．

又示方書に於ては實驗範圍の狹小のため，規定の式は $\frac{A}{A'}$ が約 8 位までしか適用し得ないものとしてゐるが，本試驗より得た關係式は $\frac{A}{A'}=30$ まで適用し得ることが確かめられ，許容支壓應力度 σ_{ca}' の限度を現行の規定よりも更に高め得ることを示してゐる．

圖—8　示方書規定の公式と試驗結果との比較（帶荷重の場合）



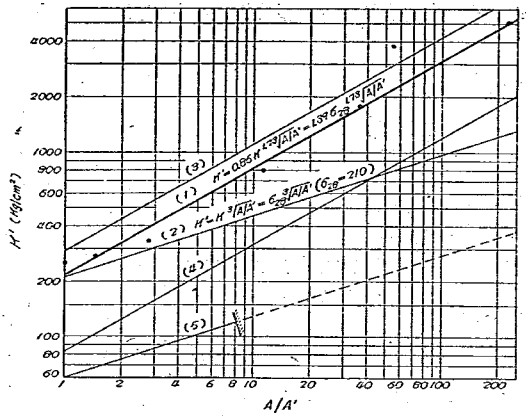
[2] 點荷重の場合

圖—9 に於て，(1) は試驗結果を示す直線である．前と同樣に $\sigma_{28}=210$ kg/cm^2 とすれば，示方書規定の公式は (2)，試驗結果より得た關係式は (3) なる直線で示される．

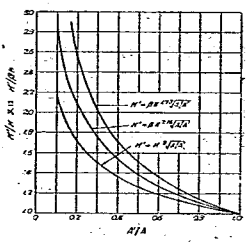
(2) と (3) とを比較するに，K' の差は $\frac{A}{A'}$ の大となるにつれて增加し，その增加は帶荷重の場合よりも大である．卽ち (3) の勾配は帶荷重の場合の 1：2.16 に對して 1：1.73 となつてゐる．この場合にも $\frac{A}{A'}=1$～3 の範圍では試驗結果は (2) に近い關係を示してゐる．

又式の適用範圍に就いてもこの場合は $\frac{A}{A'}=200$ まで適用し得る．

圖—9 示方書規定の公式と試驗結果との比較（點荷重の場合）



圖—10 $\frac{A'}{A}$ と $\frac{K'}{K}$ 又は $\frac{K'}{\beta K}$ との關係



圖—10 は示方書規定の式による場合と，本試驗より得た式による場合との，$\frac{A'}{A}$ と $\frac{K'}{K}$ 又は $\frac{K'}{\beta K}$ との關係を示したものであつて $\frac{A'}{A}$ の小となるにつれてその間の差が增加してゐることは圖—8 又は圖—9 に於けると同樣である．

VIII. 許容支壓應力度實驗式竝びに其の適用の限界に就いて

圖—8 又は圖—9 の (5) なる直線は，$\sigma_{28}=210\ \mathrm{kg/cm^2}$ とした場合の標準示方書規定の公式による (2) に對して 3.5 の安全率をとつた許容支壓應力度を示す．但しこの許容支壓應力度 σ_{ca}' は，規定によれば 120 kg/cm² を超過し得ないことになつてゐる．

之に對して直線 (4) は夫々試驗結果より誘導せる式に於て $\sigma_{28}=210\ \mathrm{kg/km^2}$ とした場合の (3) に對して，同じく安全率を 3.5 にとつた許容支壓應力度を示す．この (4) は帶荷重を受ける場合（圖—8）に於ては試驗範圍 $\frac{A}{A'}=1\sim30$ の全體に亙つて成立し，その最大値は $\sigma_{ca}'=367\ \mathrm{kg/cm^2}$ を示しており，點荷重を受ける場合（圖—9）に於ては試驗範圍 $\frac{A}{A'}=1\sim200$ の全體に亙つて成立しその最大値は $\sigma_{ca}'=1803\ \mathrm{kg/cm^2}$ を示しており，(5) の樣に途中でその値を限定する必要はないのである．

次に本試驗より求めた (6) 式又は (8) 式に於ける係數 1.28 又は 1.39 は支壓材の大さ，寸法等によつて異なり主として支壓材の高さの影響を受ける係數であるから，安全のため之等を 1 と考へるときは，許容支壓應力度式は帶荷重及び點荷重の夫々の場合に對して $\sigma_{ca}'=\sigma_{ca}\sqrt[2.16]{\frac{A}{A'}}$ 及び $\sigma_{ca}'=\sigma_{ca}\sqrt[1.73]{\frac{A}{A'}}$ となり，圖—11 に示す如き直線となる．この樣にしても，從來の規定によるよりも遙かに大きな支壓應力度を許し得ることがわかる．

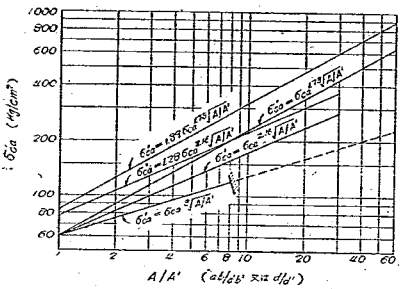
更に式を簡易化するために指數を安全側に變へて，筆者は許容支壓應力度式として次の式を提案する．

支承面が帶荷重を受ける場合 $\sigma_{ca}'=\sigma_{ca}\sqrt[2.2]{\frac{A}{A'}}$

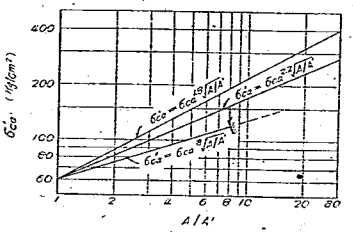
支承面が點荷重を受ける場合 $\sigma_{ca}'=\sigma_{ca}\sqrt[1.8]{\frac{A}{A'}}$

今之等の式を標準示方書規定の式と比較すれば圖—12 の如き關係にある．但し何れも $\sigma_{28}=210\ \mathrm{kg/cm^2}$ 即ち

圖—11　(6) 式又は (8) 式に於ける係數を 1 とした場合の許容支壓應力度



圖—12　筆者の提案せる式と現行規定の式との比較



$\sigma_{ca}=60$ kg/cm² としたときのものである.

然して $\frac{A}{A'}$ の範圍を何れの場合に對しても 30 までとすれば, 之等の式の適用の限界は, 帶荷重を受ける場合に對しては $\sigma_{ca}'\leqq 280$ kg/cm², 點荷重を受ける場合に對しては $\sigma_{ca}'\leqq 400$ kg/cm² となる.

之等の限界値は標準示方書に於て取扱はれてゐる 1：2：4 程度のコンクリートで, $\sigma_{28}=210$ kg/cm² なる强度を有するものに對する値であつて, 更に强度の大きなコンクリートに於ては責任技術者の判斷によつて, 限界値として更に大きな値をとることが出來る. この樣に大きな支壓應力度を許し得ることによつて, 鐵筋コンクリートロッカーの設計等に於て, 非常に樂に設計をなし得ることになる.

IX. 標準示方書規定に對する改正案の提案

$\frac{d}{d'}$ 又は $\frac{A}{A'}$ の範圍を擴張した本試驗の結果より筆者は土木學會標準示方書第 75 條 (2) の規定に對し, 次の改正案を提案する.

卽ち

支承の表面積 A が支壓力を受くる面積 A' より大なる場合には, 其の許容支壓應力度 σ_{ca}' は次式に依るべし (圖—1 參照).

(a) の場合　　$\sigma_{ca}'=\sigma_{ca}\sqrt[1.8]{\frac{A}{A'}}$

(b) の場合　　$\sigma_{ca}'=\sigma_{ca}\sqrt[2.2]{\frac{d}{d'}}$

$$\left(\sigma_{ca}=\frac{\sigma_{28}}{3.5}\right)$$

但し σ_{ca}' は (a) の場合に於ては 400 kg/cm², (b) の場合に於ては 280 kg/cm² を超過することを得ず.

試驗の結果より見て第 75 條 (2) の規定は $\frac{d}{d'}$ 又は $\frac{A}{A'}$ の小なる範圍に於てのみ成立するものである.

X. 簡易計算式

圖—1 の (a) の場合に對し $\sigma_{ca}'=\sigma_{ca}\sqrt[1.8]{\frac{A}{A'}}$, (b) の場合に對し $\sigma_{ca}'=\sigma_{ca}\sqrt[2.2]{\frac{d}{d'}}$ なる許容支壓應力度式を提

案したが，之等の式は圖—12 による時は計算を必要としないが，任意の σ_{ca} と $\frac{A}{A'}$ 又は $\frac{d}{d'}$ に對する σ_{ca}' を計算せんとする時は，指數が $\frac{1}{1.8}$ 又は $\frac{1}{2.2}$ と云ふ複雜な數字であるために對數表を使用しなければならず，計算が面倒である．それで計算尺によつて容易に計算し得る樣な，$\frac{1}{2}$ なる指數を有する簡易計算式を導かんと試みた．

一般に $\sigma_{ca}'=x\,\sigma_{ca}\sqrt[2]{\frac{A}{A'}}$ 又は $\frac{d}{d'}$ とおけば，(a) の場合に於ては $\frac{A}{A'}=1\sim30$ の範圍で $x=1\sim1.2$ 平均 1.1 となる．又 (b) の場合に於ては $\frac{d}{d'}=1\sim30$ の範圍で $x=1\sim0.86$ 平均 0.9 となる．

卽ち

(a) の場合　　$\sigma_{ca}'=1.1\,\sigma_{ca}\sqrt{\frac{A}{A'}}$

(b) の場合　　$\sigma_{ca}'=0.9\,\sigma_{ca}\sqrt{\frac{d}{d'}}$

上記の簡易式による時の誤差の範圍は次の如くである．

(a) の場合に於ては $\frac{A}{A'}=1\sim30$ にて誤差は $+10\sim-10\,\%$ であるが，$\frac{A}{A'}=2\sim10$ の範圍に適用すれば誤差は $+6\sim-3\,\%$ に過ぎない．

又 (b) の場合に於ては $\frac{d}{d'}=1\sim30$ にて誤差は $-10\sim+5\,\%$ であるが $\frac{d}{d'}=2\sim10$ の範圍に適用すれば誤差は $-7\sim-0\,\%$ に過ぎない．

この程度の誤差は實際的には許容し得るもので，上記簡易式によつて計算しても差支へない．

XI. 結　　言

1：2：4 コンクリート支壓材（幅 30 cm，長 30 cm，高 36 cm）が局部的に荷重を受ける場合の支壓力に關し試驗を行ひ，その結果より標準示方書規定に對する改正案を提案したが，之を要約すれば次の如くである．

1. 試驗は支承面が帶荷重を受ける場合と點荷重を受ける場合とに分けて行つたが，その結果は表—3，表—4，圖—6 及び表—5，表—6，圖—7 に一括して示した．

2. 試驗結果より支承の表面積 A と支壓力を受くる面積 A' との比と，破壞の際の支壓應力度 K' との間に次の關係式を得た．

支承面が帶荷重を受ける場合は

$$K'=0.90\,K\sqrt[2.16]{\frac{A}{A'}}=1.28\,\sigma_{28}\sqrt[2.16]{\frac{A}{A'}}$$

支承面が點荷重を受ける場合は

$$K'=0.86\,K\sqrt[1.73]{\frac{A}{A'}}=1.39\,\sigma_{28}\sqrt[1.73]{\frac{A}{A'}}$$

但し K は支壓材が面全體に荷重を受けた場合の破壞强度である．

3. 試驗結果より得た關係式を更に安全側に整理して之に安全率を考へ次の如き許容支壓應力度式を提案した．

帶荷重を受ける場合　$\sigma_{ca}'=\sqrt[2.2]{\frac{A}{A'}}$

點荷重を受ける場合 $\sigma_{ca}'=\sqrt[1.8]{\frac{A}{A'}}$

4. 土木學會鐵筋コンクリート標準示方書第 75 條 (2) に於ては，許容支壓應力度式として $\sigma_{ca}'=\sigma_{ca}\sqrt[3]{\frac{A}{A'}}$ $\left(\sigma_{ca}=\frac{\sigma_{28}}{3.5}\right)$ なる式を採用してゐるが，之と筆者の提案せる式とを $\sigma_{28}=210\ \mathrm{kg/cm^2}$ として比較すれば圖—12 の如くである．

5. 許容支壓應力度式の適用の範圍に就いては，標準示方書の規定では既往の試驗範圍の狹小のため $\frac{A}{A'}\fallingdotseq 8$ までを考へ，$\sigma_{28}=210\ \mathrm{kg/cm^2}$ とした場合の σ_{ca}' の限度を $120\ \mathrm{kg/cm^2}$ に止めてゐるが，筆者は試驗範圍 $\frac{A}{A'}\fallingdotseq 30$ までをとり，σ_{ca}' の限度を帶荷重を受ける場合に對しては $280\ \mathrm{kg/cm^2}$，點荷重を受ける場合に對しては $400\ \mathrm{kg/cm^2}$ まで高めることを提案する．

6. 以上より標準示方書第 75 條 (2) の規定に對し次の改正案を提案する．

支承の表面積 A が支壓力を受くる面積 A' より大なる場合には，其の許容支壓應力度 σ_{ca}' は次式に依るべし (圖—1 參照)．

(a) の場合　$\sigma_{ca}'=\sigma_{ca}\sqrt[1.8]{\frac{A}{A'}}$

(b) の場合　$\sigma_{ca}'=\sigma_{ca}\sqrt[2.2]{\frac{d}{d'}}$

$\left(\sigma_{ca}=\frac{\sigma_{28}}{3.5}\right)$

但し σ_{ca}'は (a) の場合に於ては $400\ \mathrm{kg/cm^2}$，(b) の場合に於ては $280\ \mathrm{kg/cm^2}$ を超過することを得ず．

試驗結果より見て現在の第 75 條 (2) の規定は $\frac{A}{A'}$ 又は $\frac{d}{d'}$ の小なる範圍に於てのみ成立するものである．

7. 計算を簡易ならしめるため次の簡易式を導いた．

(a) の場合　$\sigma_{ca}'=1.1\ \sigma_{ca}\sqrt{\frac{A}{A'}}$

(b) の場合　$\sigma_{ca}'=0.9\ \sigma_{ca}\sqrt{\frac{d}{d'}}$

之等の簡易計算式による誤差の範圍は $\frac{A}{A'}$ 又は $\frac{d}{d'}=2\sim10$ に於ては $+6\sim-3\%$ 又は $-7\sim-0\%$ に過ぎず，此の範圍では實際的に適用し得る．

昭和十六年三月 十 日印刷
昭和十六年三月十五日發行

內務省土木試驗所
東京市本鄉區駒込上富士前町二十六番地
電話大塚(86)自3101番至3103番
印刷者 井上源之丞
東京市板橋區志村町五番地
印刷所 凸版印刷株式會社
東京市板橋區志村町五番地