

抄 録

第 28 卷 第 5 號 昭和 17 年 6 月

水 理

(39) 技術者の流體力學的考察の導入 510

材 料

(40) ボルトランドセメント水和熱發生に及ぼす各種混和剤の影響 514

堰 堤

(41) Madden 堰堤溢流部の模型試験と原型試験 518

橋梁及構造物

(42) 老舊吊橋の補強 520

鐵 道

(43) 電化區間に於ける軌條波狀磨耗に就いて 522

水 理

(39) 技術者の流體力學的考察の導入

(Arthur Ellwood; "An Engineer's Approach to Fluid Mechanics". E. N. R., Oct. 9, 1941, p. 87-91. 竹内俊雄 抄)

梗概：實際の水理學の問題を解く爲に數學的な解析を發達せしめ應用する事が非常に盛んになつた。以下の議論は斯様な新らしい考へ方を評論し現代の流體力學の種々な公式の意味を明示した。説明的な例で之等の式を實驗の技術的な問題に應用する事を示した。

現代の水理學には歴史的な背景が有り、これは明に 3 つの時期に分けられる。其の第 1 期は 19 世紀の後半に始まつたのである。當時は 2 つの考へ方が活潑に行はれた、其の 1 つは“流體力學”に關するものであり、他の 1 つは“實驗水理學”とよべよべるものであつた。

流體力學は抽象的な數學的研究であり、其の式は技術者が日常の問題を解くのに用ひる事が出来ない様なものであつた。其の爲に管の中や種々な形をし材料で出来て居る水路の中の水の流れを決める事の出来る様な實際役に立つ式を求める研究がどうしても必要であつた。Chezy の式に述べられて居る様な基礎的な關係は既にわかつて居つた。然し塗布してある物との摩擦とか他の要素による常數は缺けて居つた。斯様にして經驗を主とする時期となり技術者は續々と多くの常數

を入れ込んだ。給水工事、排水路其の他の水理構造物を設計する際に之等の式及常數を我々は今尙用ひて居る。

發達の第 2 期 水理學の發達の第 2 期は Osborne Reynolds (1883) の研究が發表され理解されてからである。種々な流れの状態にある違つた形の管のどれにも當嵌る様な一般的な常數を見出す事が出来れば總ての實驗及常數を相關せしめる事が出来るといふ希望が有つた。

管の中の流れの一般式は

$$S = \frac{f}{4R} \cdot \frac{U^2}{2g} \dots\dots\dots(1)$$

此處に f は摩擦係數で dimension の採り方で違ふ。水理研究者は管について變數の値を關係づけ、對數目盛りに f と Reynolds 數 R との關係を描いた。

此處に

$$R = \frac{UD}{\nu} \dots\dots\dots(2)$$

U : 平均流速

D : 直径

ν : 動粘性係數 $= \frac{\mu}{\rho}$

Blasius と Nikuradze の研究によつてある限界内の Reynolds 數に對して一定値の f を得た。かくして層流に對しては (即ち R が約 2000 までは)

$$f = \frac{64}{R} \dots\dots\dots(3)$$

R が約 2000 から約 100000 までの滑かな管の中

渦亂流に對して Blasius は 1912 年次の様に決めた。

$$f = \frac{0.3164}{Re^{1/4}} \dots \dots \dots (4)$$

1932 年 Nikuradze は Re の値が約 100 000 から約 10 000 000 までの滑かな管に對して次式を示した。

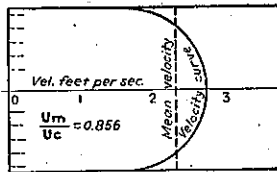
$$f = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.57}} \dots \dots \dots (5)$$

水理学研究の第 3 期即ち我々の時代には“流體の渦亂”なる考が新たに加へられた。流體の流れの内部機構が質的にも量的にも研究され、此の結果一般の流速分布曲線及境界の抵抗式を發達せしめた。

次に述べる議論では先づ Prandtl-von Kármán 派によつて發達させられた新しい考へ方を参照して取扱ふ事にする。参考書を見れば書いてあるから之等の式の數學的誘導は示してない。主なる目的は現代の“流體力学”の種々な公式の物理學な意味を述べよとする事である。此の文中に現れる多くの區及記號は B. A. Bakhmeteff 教授が彼の書物で用ひて居るものと同じものを用ひた。

流速分布曲線 管を充滿して流れる液體の流速は何處でも一定ではなく、壁面のところの最小な値から中心のところの最大の値にまで變化するものであるといふ事は數百年前から技術者及水理學者にはわかつて居つた。New York 市設の 48 吋管について得た流速分布曲線を圖-1 に示す。

圖-1. New York 市 Convent Ave. と 127 St. の 48 吋管の流速分布曲線



$U = \frac{Q}{A}$ から得た流速は“平均流速”に過ぎず、最大流速よりも 10 乃至 20% 小さい。それ故 Bernoulli の式で流速水頭 $\frac{U^2}{2g}$ を用ふのは正しくなく、正しくする爲には或る係數 α 或は β を修正の爲に用ひねばならない。任意断面を通過する運動エネルギーを考へる際には次の様に書く。

$$\alpha = \frac{\int_0^A U^2 dA}{U_m^2 A} \therefore h_v = \alpha \frac{U_m^2}{2g} \dots \dots \dots (6)$$

任意断面を通過する運動量を考へる際には次の様に書く。

$$\beta = \frac{\int_0^A U^2 \cdot dA}{U_m^2 A} \therefore h_v = \beta \frac{U_m^2}{2g} \dots \dots \dots (7)$$

現代の水理學者の目的の一つは管の中の流體の數學的な流速分布の式を求める事である。此の問題は後でわかる様に Th. von Kármán によつて巧に解かれた。

層流 層流中の剪斷應力に關する法則と式とを Issac Newton が初めて Principia (1687) に發表した。或る液層が y なる距離の他の層に對して U なる速度で運動して居るとすると流速分布は三角形になり、運動して居る液體中の剪斷應力は次の様になる事を Newton が示した。

$$\tau = \mu \frac{dU}{dy} \dots \dots \dots (8)$$

此處に μ は“絶対粘性係數”である。

Hagen 及 Poiseuille は Newton の假設を用ひて粘性流に對する有名な式を導いて居る。

$$U_{avor} = -\frac{dp}{dx} \frac{d_0^2}{32\mu} \dots \dots \dots (9)$$

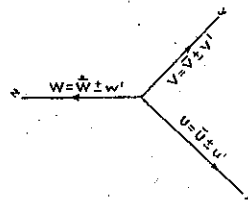
此處に d_0 は直径、 μ は絶対粘性係數、 $\frac{dp}{dx}$ は壓力勾配即ち單位長さ當りの壓力損失である。

此の事は層流中では損失水頭は流速の 1 乗に比例する事を示す。Poiseuille の式は粘性流では最大流速は平均流速の 2 倍である事も示して居る。

渦亂流 渦亂流は何等一定した形式に従ふものではない。即ち各水分子は時間に關しては全く豫想出来ない。一定にして不規則な變動を受ける。斯様なわけで渦亂流は“渦”とは違ふのである。といふのは渦は一定の型式に従ふからである。(勿論渦亂流は渦の結果生ずる場合も有る)。渦亂は大小の渦の中にあられ、これは運動量を或る層から他の層に傳へる事が出来又エネルギーの散逸を生ずることも出来る。

數學的には渦亂流の水の各粒子は圖-2 に示す様に 3 軸方向に對し 3 つの瞬間的な速度ベクトル U, V, W を有する。

圖-2. 渦亂流の各粒子に對する速度ベクトル U, V, W .



各速度は時間には関係せず勝手に變動する。各流速は平均流速 \bar{U} , \bar{V} 及 \bar{W} と各方向の速度變動 w' , v' 及 w' との和より出来て居る。流れが X 軸の方向ならば平均流速 \bar{U} は一定で他の平均流速 $\bar{V}=0$ $\bar{W}=0$ である。

渦亂の動きは見たところ全く不規則であるが、渦亂の統計的分布は正常誤差法則及度數分布曲線に従ふことがわかるのである。渦亂の研究を統計的方法による様になつたのは此の爲である。此の方面の事は大部分 von Kármán, G. I. Taylor 及 A. A. Kalinske によつて爲された。數學的な論文を此處には取扱はず Bakhmeteff 教授が“非常にむづかしい神秘的な水の運動”と稱して居る問題に對して現代の水理學者の大部分の人が解答を求めようとして居る方面に關してのみ述べる事とする。

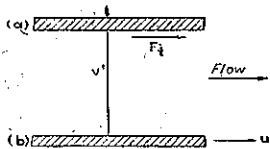
運動量交換は渦亂流では重要な要素でこれを考慮せねばならない。例へば圖-4 で filament (b) は filament (a) に對して w' の速度で動き更に横斷方向の流れ v' が有るとすると、單位時間に質量の交換が有り、折襟にして (b) から (a) に運動量の交換が有るのである。此の結果剪斷力 R が生じ剪斷應力 τ が生ず。此の事は次の様に書ける。

$$\tau = \rho \cdot v' \cdot w' \dots\dots\dots(10)$$

此處に ρ は密度である。

混合距離は渦亂の理論の別の考へ方である。例へば圖-4 に流速分布曲線を示してあるが v' は時計廻り方向の速度ベクトルを示して居る。Prandtl は

圖-3. 渦亂の運動量交換の爲に剪斷應力を生ずる



流れの如何なる流域にも縦斷方向の距離に對する或る parameter を考へ、此處を小さい水分子が渦亂の混合作用によつて運ばれる。

(ガスの運動論の平均自由行程と類似して居る)。これは“混合距離”と云はれる。圖-4 から軸方向成分は次の様になる事がわかる。

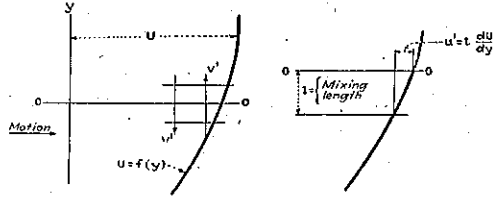
$$w' = l \frac{dU}{dy} \dots\dots\dots(11)$$

此處に dU/dy は此の場所の速度勾配である。

平均して成分 w' 及 v' は同じ order であり、それ故双方共に $l \frac{dU}{dy}$ に比例すると假定すると

$$\tau = \rho \cdot w' \cdot v' = \rho l^2 \left(\frac{dU}{dy} \right)^2 \dots\dots\dots(12)$$

圖-4. 渦亂流の“混合距離”を決定する方法を示した圖



即ち

$$\tau = \left(\rho l^2 \frac{dU}{dy} \right) \frac{dU}{dy} = \epsilon \frac{dU}{dy} \dots\dots\dots(13)$$

此の Prandtl の式は粘性抵抗に對する (8) 式 ($\tau = \mu dU/dy$) と類似して居る。係數 ϵ は時々“渦亂による機械的粘性係數”と呼ばれる。

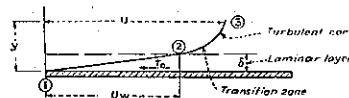
渦亂の形式は時間と長さの縮尺が違ふ丈であるといふ事が任意の管の大部分の斷面について行つた渦亂の相似な實驗から明かである。或る假定をなし流體力學の或る原理を用ひて von Kármán は混合距離に對して“一般常數” κ の項を用ひて次の關係式を導いた。

$$l = \kappa \frac{dU}{dy} \dots\dots\dots(14)$$

此處に κ は von Kármán の“一般常數”でありこれは壁面の性質には無關係である。Nikuradze の實驗によつて認められて居る κ の値は 0.40 である。(κ は實際 0.32 から 0.40 まで變化する)。

層流膜 實際の流體の流れでは剪斷力は渦亂と粘性の双方の影響を受ける (圖-5)。

圖-5. 水管中の流速分布に對する現在の考へ方



全體の應力は層流に對する (8) 式と渦亂流に對する (12) 式とを組合せたものである。

$$\tau = \mu \frac{dU}{dy} + \rho l^2 \left(\frac{dU}{dy} \right)^2 \dots\dots\dots(15)$$

混合作用が自由に起り得る水路の中心部分には粘性は剪斷力に殆んど影響を及ぼさない。大きい Reynolds 數のところでは流れは全く渦亂であると考へる事が出来 (15) 式の粘性の影響を省略し、又速度の自乗に比例する應力も省く。小さい Reynolds 數のところでは粘性の影響は極めて重要で剪斷力は速度の自乗より小さい指数で變化する。

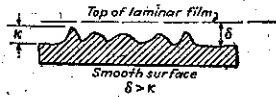
壁面では固體の境界が有る様に運動量交換による横

断方向の流れが起り得ないから、混合距離は零でなければならぬ。此の爲 (15) 式の右邊第 2 項は消へて粘性の項丈残る。其の爲壁面では層流層が無ければならぬ。

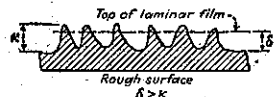
管内の流れに関する現代の考へ方は次の様である。即ち境界には“層流膜”が有る。流速分布曲線は此の部分では直線を爲す(圖-5 の 1 から 2 まで)。此の層流膜の内側に遷移部が有り更に内側に渦亂核が有る。

層流膜の考へ方によつて所謂“粗”及“滑”な面の間の相違を物理的に示してくれる。

圖-6. 層流膜に対する滑と粗の面



若し $\delta > \kappa$ ならば表面は“滑”である。 $\delta < \kappa$ で突起が渦亂の中に突出して居ると表面は“粗”である。



von Kármán は δ に對して次の實驗から求めた値を示して居る。

$$\delta = 11.5 \frac{\nu}{\sqrt{\tau_0/\rho}} = 11.5 \frac{\nu}{U^*} \dots\dots (16)$$

$\sqrt{\tau_0/\rho}$ なる記號は彼の式に屢々出て來るので Prandtl はこれを“摩擦速度”と名づけた。此の摩擦速度は速度の dimension を持つ。

此處に $\tau_0 = \gamma RS$

$$\rho = \frac{\gamma}{g}$$

$$\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = U^* = \sqrt{RSg} \dots\dots (17)$$

此處に S は動水勾配, R は徑深, g は重力による加速度, γ は液體の比重である。

一般速度分布 上に述べた假定と式を基にして von Kármán は彼の有名な對數的な“速度分布曲線”を導いた。次式は Prandtl が示して居る様に Kármán の式をもつて容易にした形を用ひて導いたのである。

滑な管

$$\frac{U}{U^*} = a_s + \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{yU^*}{\nu} \right)$$

或は

$$\frac{U}{U^*} = a_s + \frac{2.30}{\kappa} \log \left(\frac{yU^*}{\nu} \right) \dots\dots (18)$$

此處に a_s “は壁面特性常數”である。

此の式は Nikuradze によつて實驗から確められ、後は滑な管 ($\kappa = 0.40$) に對して次式を與へて居る。

$$\frac{U}{U^*} = 5.5 + 5.75 \log \left(\frac{yU^*}{\nu} \right) \dots\dots (19)$$

滑な管に對する平均流速は ($\kappa = 0.36$ を用ひて)

$$\frac{\bar{U}}{U^*} = 1.43 + 5.75 \log \left(\frac{r_0 U^*}{\nu} \right) \dots\dots (20)$$

或は ($\kappa = 0.40$ を用ふと)

$$\frac{\bar{U}}{U^*} = 3.5 + 5.75 \log \left(\frac{R \bar{U}^*}{\nu} \right) \dots\dots (20a)$$

粗なる管に對しては

$$\frac{\bar{U}}{U^*} = a_r + 5.75 \log \left(\frac{y \bar{U}^*}{\nu} \right) \dots\dots (21)$$

Nikuradze の實驗によると(砂を塗つた管を用ひて) $k_s U^*/\nu < 3.3$ ならば a_r は 5.5 の値を有し、これは滑な管の a_s の値と同じであり、 $k_s U^*/\nu > 67$ ならば a_r は次式

$$a_r = 8.5 - 5.75 \log \left(\frac{k_s U^*}{\nu} \right) \dots\dots (22)$$

で表はされる事を示した。

常數に對して此等の實驗値を用ふると粗なる管に對して次式を得る。

$$\frac{U}{U^*} = 8.5 + 5.75 \log \left(\frac{y}{k_s} \right) \dots\dots (23)$$

粗なる管に對する平均流速は

$$\frac{\bar{U}}{U^*} = 6.5 + 5.75 \log \left(\frac{R}{k_s} \right) \dots\dots (24)$$

渦亂のエネルギー 結論として渦亂によるエネルギーの散逸について少し述べよう。初歩の水理學の教科書に書いてある $(W/g) \cdot (U^2/2)$ なる項は平均流速の運動エネルギーを示して居る。渦亂によるエネルギーは

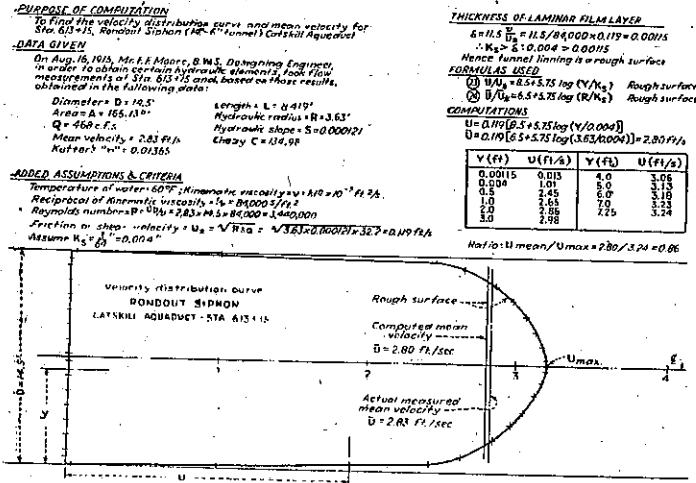
$$E_t = \frac{W}{g} \left(\frac{u'^2 + v'^2 + w'^2}{2} \right) \dots\dots (25)$$

此處に W は液體の重量, u', v' 及 w' は x, y 及 z 軸の平均流速の變動である。彎曲部, 瓣及水路擴大部等の様に場所から場所へで渦亂のエネルギーの變化する所では渦亂のエネルギーを計算から省略する事は間違である。

渦亂流ではポテンシアルエネルギーの大部分は先づ渦亂のエネルギーに變換され、それから粘性によつて熱に變換される。粘性が無ければ實際エネルギー損失は起らずエネルギー即ち渦亂は永久に續く。A. A. Kalinske 教授の示した渦亂の統計的理論によると流體の單位體積當りのエネルギーの平均散逸率は

$$K = \frac{15 \mu \bar{v}^2}{\lambda^2} \dots\dots (26)$$

圖-7. 流速分布に對する Kórmán の式から求めた結果と Oatskill Aqueduct の Rondout siphon で實際に測定した流速とを比較した應用水理學の問題



此處にはエネルギーの散逸の際の渦亂の特性を示す長さである。

(26) 式は渦が小さければ小さい程 (λ が小さい) エネルギー散逸の平均の割合は大きい事を示して居る。それ故 “堰堤下部に於ける高流速の流れの運動エネルギーを殺滅する爲には強い小さい渦を生ずる事が望ましい” (Kalinske)。

上に述べた事によつて水理技術者は渦亂の考へをもつと知らなければならない事がわかるのである。かういつた考へは多くの神秘的なエネルギー散逸について見透しを與へるばかりでなく種々な水理構造物を計算し設計する際の新しい方法への先觸れとなるであらう。

材 料

(40) ポルトランドセメント水和熱發生に及ぼす各種混和劑の影響

(L. R. Forbrich; "The Effect of Various Reagents on the Heat Liberation Characteristics of Portland Cement". Journ. of A. C. I. Nov. 1940 pp. 161-181. 宍安隆和抄)

セメント水和熱による影響を軽減する爲に低熱セメントを用ひて非常な好結果をもたらされた事により、この低熱セメントの硬化機構を知らんとする研究が盛んになつて來た。其の水和熱について、先づ最初に問題となつたのは全發熱量を減ずる事であり、次に發熱速度を

緩慢にして人工的に冷却して得るものを作る事に重要性があると考へられて來た。然し最近では型枠に接する部分の發熱の状態が構造物内部のそれよりも一層重要であると考へられて來た。即ち表面のコンクリートは急速な温度變化を受け、この爲に龜裂の起る事が充分あり得るのであるが、内部では温度變化は極緩慢であつて、この爲に起る温度應力は塑性變形を起して充分消滅せしめる事が出來て、比較的大きい温度降下に對しても、龜裂を防ぎ得るのである。低熱セメントを用ひた時水和熱の作用が非常に緩和されると言ふのは、總發熱量に對しては勿論重要であるが、發熱速度が緩慢な事が最も重要な事である事が分つた。この初期發

熱速度が重要である事に關して初めて提案をしたのか Carlson で種々の發熱の特性を發表した。この發熱特性を支配するものは種々あるが其の中で重要なものは、細率、化學成分、セメント塊の冷却速度、混合劑及或る種の化學成分である。初期の發熱速度は凝結時間及初期強度に關係があると同時にコンクリート中の温度上昇にも重要な關係のある事は明で、Carlson の實驗から推論し又二、三の實驗から、初期の發熱量の調節にその組成を變へるよりも、何か混入劑を用ひればもつとよい方法を得る事が出來るであらうと言ふ事を知つたのである。

此の方便を知る爲にセメントと其の中の2種の化學成分について、コンクリートに對しては其の物理的性質のよく分つてゐる試薬を加へて、その影響を知らんとしたのである。この試薬としては擴散劑、無機質の促進劑、有機質の觸媒劑を用ひた。

擴散劑とは、セメント水和作用に有效な表面積即ち粒子の数を増加して、一定の workability を得るに必要な水量を減じ強度を増し耐久性を増し、浸出しの減少等の如き結果をもたらしめる役割をもつもので、こゝではカルシウムリグニン硫酸化物 (Calcium lignic sulphonate) を用ひた。

次に或る種の無機化合物はセメントの凝結及硬化作用に對して促進劑として或ひは抑制劑として作用せしめ得る。硬化を促進する化合物は發熱の速度を高める事は明かである。然し更にこの點を確める爲に二、三の

実験を CaCl_2 について行つたのである。

更に多くの有機物はセメントの凝結作用を著しく阻害し又あるものは全然凝結作用を停止させるものである。然しある種の有機物を少量用ひれば、強度を非常に増し、而も用ひる分量からセメント中の成分と直接化合するとは思はれないので有機觸媒剤とも考へられるものがある。此の有機物は置換されたベンゾイックアシッドと呼ばれるもので、3~7日の材齢に於て強度の増加速度が甚だ大きくなるが初期に於てはさして影響が見られない。かゝる強度の變化から發熱量も3~7日目に發熱速度が増大するであらうと言ふ事が推論され、上記有機物質の代表的なサルチル酸を用ひて実験したのである。

本実験に用ひた試薬の分量は發熱量以外の性質から決定した。即ち擴散剤はセメントの0.32% (重量) まで促進剤は CaCl_2 を用ひて1.0% まで、有機觸媒は0.05% 及0.080% を用ひたが、之が強度の増加には最も有效である。

本研究の目的は先づ第一にセメント及セメント成分の影響を決定する事で、種々の試薬によつて欲する發熱量を生ぜしめる様に或ひは少くともある制限内に調節し得る事が可能なる事を確めたのであり、附録として之等の試薬を種々の割合に混合して其の水和熱及コンクリートの他の性質に及ぼす影響を研究したものである。

試験方法

發熱試験 早期發熱速度—セメントの早期發熱速度は水セメント比0.35のセメント糊につき Conduction Calorimeter を用ひて測定した。この方法は供試體の中に挿入した銅片の一端を、他の一端は略一定の温度 (75°F) に保つた Conducting metal tube に接続し兩者の温度差を測定するのである。温度差は抵抗寒暖計及特殊の抵抗試験装置によつて 0.02°C まで測定し得る。發生した熱は發生と略同時に供試體から出て行くから殆んど一定の温度で、發熱速度を決定する事が出来る。

水和熱—Solution Calorimeter の簡単なものを用ひて測定を行つた。セメント糊は栓をもつて封じた硝子壺中におき、試験までは 75°F に貯へて置く。水セメント比を變化させる以外はセメント糊中の含水量には變化なく0.40で保つたのである。

試験結果—初期發熱速度

セメント中の2主成分に対する試験:—セメントの水和作用の初期に於ける發熱作用に非常に重大な影響を

及ぼす2つの主成分 Tricalcium Alminate (Ca_3A) Tricalcium Silicate (Ca_3S) について試験した。 Ca_3A は單位重量當りの發生熱量は他の成分に比して大で、之れは24時間以内に現はれるものである。 Ca_3S は最初24時間の發熱は緩慢であるが、全發生熱量は非常に多量である。使用した試薬は重量比にしてセメントに對して擴散剤0.32%、有機觸媒0.08%、 CaCl_2 は1.0% である。

礬土酸三石灰 Tricalcium Alminate:—

圖-8に示す如くで、之に對する影響は發熱速度に對しても總發熱量に對してもさして大ではない。

Tricalcium Silicate (珪酸三石灰)

同じく圖-8に示す如くである。擴散剤の發熱量の減少が目立つてゐる。 CaCl_2 は非常な促進作用を與へ最大發熱速度は約5倍に増加し、總熱量も増加してゐる。

圖-8. 珪酸三石灰、及礬土酸三石灰に及ぼす各種試薬の影響

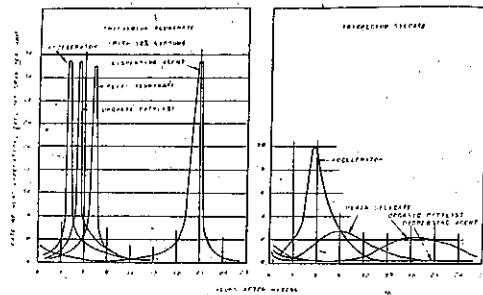
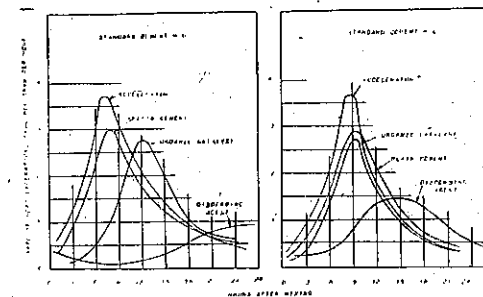


圖-9. 2種のポルトランドセメントの發熱作用に對する各種混和劑及其の組合せの影響



ポルトランドセメントに對する試験

2種のポルトランドセメントについて実験した結果は圖-9に示す如くである。重要な特徴としては CaCl_2 は非常な促進作用をなす事及双方のセメントに對する擴散剤の影響は顯著で低熱セメントを用ひたと同じ如くである。

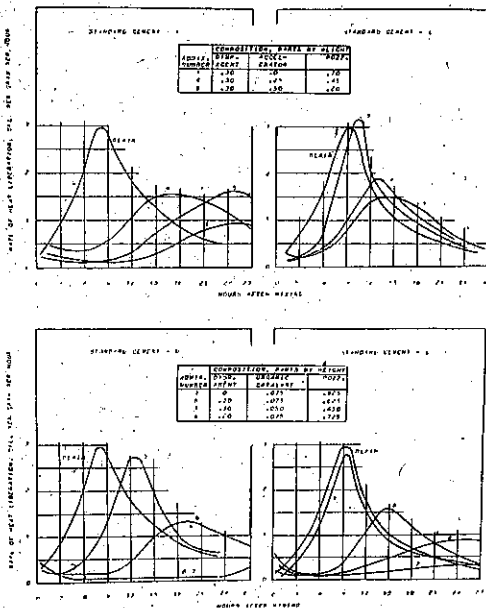
試薬の組合せ

各種の試薬としての混和剤は夫々のセメントに對して一定の影響のある事は確かめられた。此等の結果から試薬の量を種々に變化せしめてセメント發熱量に欲する如き特性を與へる事が出來ると考へられ、8種の組合せを作り各種セメントについて其の特性を調べて見た。

擴散剤と促進剤：—圖-10 は擴散剤と其れの促進剤との組合せに對するセメント 2 種類に及ぼした影響を示した。

擴散剤と有機觸媒：—有機觸媒は兩種のセメントに擴散剤の作用を促進する。

圖-10. 2種のポルトランドセメントの發熱量に對する各試薬及びその各種の組合せの影響



擴散剤、有機觸媒及促進剤：—圖-11 は此等3種の混和剤の影響を示したものである。セメント U については擴散剤及有機觸媒による抑制作用は非常に大で、CaCl₂の量を種々變化させるも其の影響は著しくなかつた。セメント L に對しては 0.50 の促進剤によつて最大速度が擴散剤及有機觸媒の抑制作用にも拘らず大で促進剤を少量加へる事によつて任意に發熱作用を調節する事の出來る事を知つた。

HR-0 HR-10 HR-20

上述の如き混和剤の各種組合せに對する影響を更にコンクリートに用ひられるものにつき 3 種を選んで研究した。3種の組合せ HR-0 HR-10 HR-20 の組

圖-11. 二種のポルトランドセメントに對する各種試薬及びその組合せの發熱作用に及ぼす影響

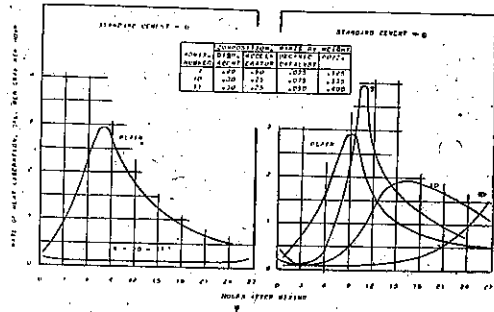
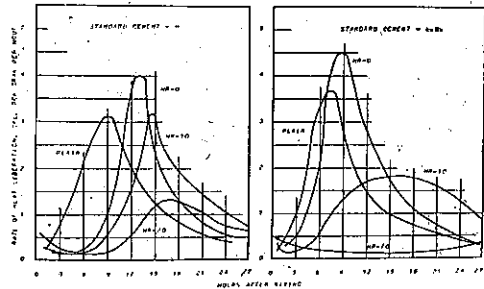


圖-12. 8種の試薬の組合せによるセメント發熱作用に對する影響



成は表-1 通りである。

表-1.

名稱	組成 (重量比)			
	擴散剤	促進剤	有機觸媒	其の他
HR-0	0.30	0.50	0	0.20
HR-10	0.30	0.50	0.075	0.125
HR-20	0.30	0	0.075	0.625

HR-0:—これは普通の構造物に使用されるもので發熱量はさして重大ではないが、コンクリートの他の性質に擴散剤の影響が必要であり、更に標準の硬化速度を要するもの。

HR-10:—擴散剤の影響が重大であると共に、材齡の比較的經つたものに大なる強度を必要とする場合、有機觸媒の影響を同じ配合のものについて求めた。

HR-20:—特に初期發熱が重大なる影響を有するものについて設計した。

HR-0 について 7 種のセメントの試験を行つたが、實用的に言へば HR-0 は熱發生の特性及セメントの最後の硬化の特性には著しい影響を與へなかつた。

HR-10 に對して 5 種のセメントの試験を行ひ、その影響は大體 HR-0 と同じであるが、ほんの少し抑

制作用が表はれる。

HR-20 については數種のセメントについて試験したが、最大發熱量に到る時間が遅れ、最初 24 時間の間に發生した熱量及最大速度が一樣に減少する。

以上の實驗からある制限内では欲する發熱曲線を得る様に 3 種の混和剤を組合せ得るが、セメントの種類によつてその割合が變化する。セメント成分中 C_3A の少なく C_2S の大なるものは擴散剤及有機觸媒による抑制作用が顯著の様である。

コンクリート試験

壓縮強度：表-2 が HR-0 HR-10 HR-20 を加へた時のコンクリートの壓縮強度及其の配合に及ぼす影響を示したもので一般に此等の混和剤を加へると壓縮強度は増加するが、之は混和剤の爲に w/c が減じた爲に起るものと見てよい。w/c の減少は平均 13% であ

表-2 の 1. コンクリートの物理的性質

Table with columns for concrete type (A, B, C, D), admixture (HR-0, HR-10, HR-20), and physical properties like compressive strength and w/c ratio.

壓縮強度は 12 30 x 127 の円柱体を用いて 2 回 1 回 1 回の 3 回の平均値をとり、その平均値を 1.0 として算出する。

表-2 の 2.

Table showing the relationship between admixture content, w/c ratio, and compressive strength for various concrete types.

つたが、混合の種類、骨材の粒度、配合の設計等によつて變化する。

表-2 の 3. コンクリートの物理的性質

Table showing physical properties of concrete with different admixtures, including compressive strength and heat of hydration.

Table showing physical properties of concrete with different admixtures, including compressive strength and heat of hydration.

強度-熱量比：— 壓縮強度と水和熱との比として示した強度熱量比はマスコンクリート構造物に於けるセメントの有効率を測定する場合に用ひる事が出来る。強度-熱量比は w/c を減ずる事により又セメントの細度を増す事により、更に C_3A の含有量を減じ C_2S の含有量を增加する等の種々な要素によつて増加せしめられる事は明であるが、本研究により更にある混和剤の組合せによりて増加せしめ得る事が分つた。HR-20 のものに對して得た結果は表-3 の通りである。

表-3.

Table showing the ratio of strength to heat of hydration for different admixtures, comparing HR-20 and other types.

HR-0 HR-10 HR-20 を用ひる事によつて w/c が減じ、その爲に發熱量も減ずるから、強度が實際に増加すると同時に水和熱の減少が起り、此等の混和剤を用ひてある強度に對して發熱量を減少せしめる事が出来る。従つて此の事は比率の減少と共に總發熱量の減少ともなり得るのである。

結論

1. 擴散剤はセメントの初期發熱速度を抑制し、24 時間までに發生する總熱量を減少せしめる。 C_3A に對しては急激な發熱を防ぎ C_2S の發熱量も大いに抑制する。

2. 有機觸媒はセメント及 C_2S の初期發熱量に多少抑制作用を與へる。 C_3A に對しては多少の促進作用がある。

3. 緊急結劑 $CaCl_2$ は最初 24 時間の間は發熱の最大

速度及總熱量を増加する。Ca₃A に対しては殆んど影響はない。然し Ca₂S に対しては總發熱量及發熱速度を増大する。

4. 擴散剤と促進剤を組合せたもの HR-0 は一般に高速度の發熱時期を遅らせ、7 日までは總熱量は増加するが 28 日では殆んど其の影響はない。コンクリートに之を用ひると一定のウオカビリティーに對する w/c を減少するからそれに應じて強度が増加し、耐久性も改善される。

5. 擴散剤、促進剤及び有機觸媒を混合したもの。一般構造物用として設計した HR-10 は 3 日間には發熱量を減少するが其の後は殆んど影響はない。コンクリート中では HR-0 と同じ影響を持つが、たゞ材齡がたつにつれ強度が大いに増大する。

6. 擴散剤と有機觸媒の混合物の影響は發熱量が重大な問題となる。工事用として設計した HR-20 については、初期の發熱速度は大いに減ずるが 28 日 110 日の總發熱量は増大する。コンクリートでは各材齡に於て HR-20 を加へた爲に強度の減少を示す事なく、材齡のたつたものでは w/c の減じた爲に却つて強度の増加が起る。

以上の如く此等の混和剤を用ひて任意の發熱特性を

有するコンクリートの出来る事が明となつたのである

堰 堤

(41) Madden 堰堤溢流部の模型試験と原型試験

(P. S. O'Shaughnessy; "Conformity Between Model and Prototype Tests—Madden Dam Spillway." Civil Eng., Aug. 1941, p. 491~493. 野田和郎 抄)

Panama 運河の Madden 堰堤溢流量に關する報告が Richard R. Randolph, Jr. によつて 1938 年の Transactions に發表されてゐるが、其の中に論ぜられてゐる實地試験は模型試験に於けるよりも溢流水深が小である爲め残念ながら原型と模型との直接の比較が出来ないのである。併し其の後模型試験の溢流水深と大體接近した 2 つの水深に對して原型試験が行はれたので本文では兩者の比較をなし得るのである。

Madden 堰堤の模型は縮尺 1/72 で溢流部断面は長さ 100 呎の 4 つのドラムゲートに相應する様に作った。堤頂は標高 232 m で長さ 440 呎である。模型試験は Colorado の Fort Collins の Colorado 農科大學水理實驗室で行はれた。

實驗された中の最低水深 11.31 呎、17.30 呎の 2 つは後に行はれた原型試験の水深の範囲内にある。

原型の平面、立面及び横断面圖は圖-13、圖-14 に示す如くである。

Chagres 河が運河に流入する地點の Gamboa に於ける流量が 50 000 呎³/秒を超過すると亦航に悪影響を及ぼすので溢流試験中に於て 4 門のゲートを下る事は出来なかつた。

溢流試験は 20 回行はれたが、此の中 3 つは水深が 17.58 呎と 17.85 呎との間にあり、3 つは 12.75 呎と 12.95 呎との間にある。此の 6 つの水深は模型

圖-13. Madden 堰堤平面圖

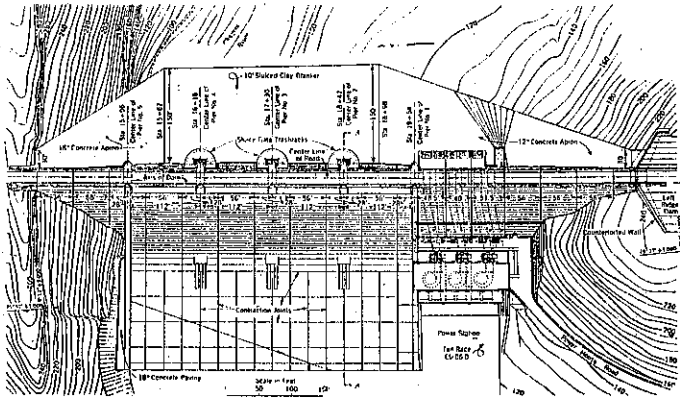


圖-14. Madden 堰堤立面及横断面圖

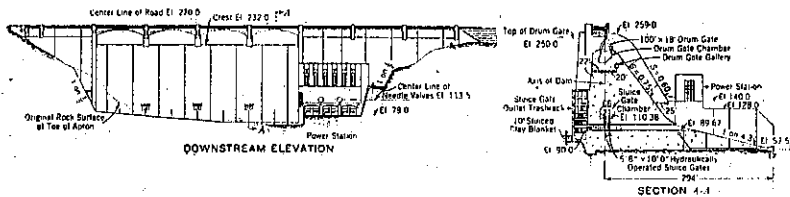


表-4. Madden 堰堤溢流部の試験結果

Run No.	Reservoir Ht.	Head Over Crest, Ft.	Drum Gate Discharge, Cfs	No. of Drum Gates Lowered
1	240.85	17.85	24,680	1
2	249.73	17.73	23,070	1
3	240.58	17.68	24,350	1
4*	248.00	6.00	24,090	4
5	244.05	12.05	16,080	4
6	244.85	12.85	16,090	1
7	244.75	12.75	15,400	1
8	233.10	1.10	1,540	4
9	234.52	2.52	4,870	4
10	233.01	1.01	730	1
11	238.63	6.63	22,910	4
12	239.04	7.04	21,730	4
13	238.54	6.54	21,930	4
14	238.46	6.46	21,480	4
15	238.02	6.02	18,820	4
16	237.06	5.06	16,600	4
17	236.88	4.88	13,640	4
18	236.82	4.82	13,530	4
19	236.60	4.60	13,350	4
20	236.60	4.60	13,020	4

* During Run 4 the top of the drum gates was at El. 243.0. For all the other runs the drum gates were lowered to the crest, El. 232.0.

圖-15. 各種水頭に対するナツプ

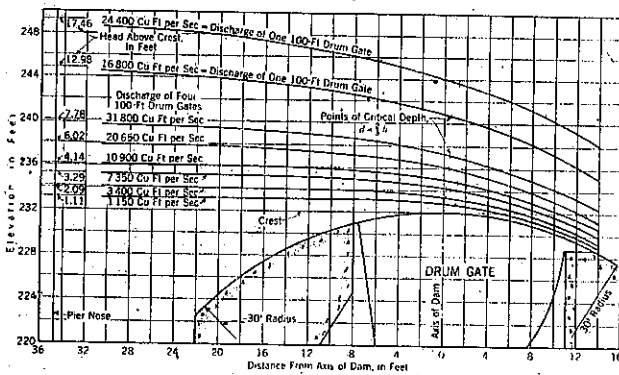
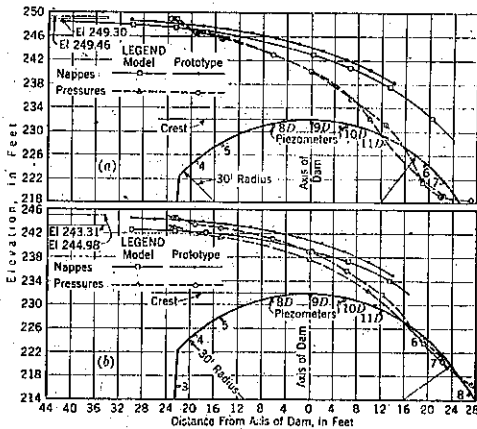


圖-16. ナツプと水壓との比較

- (a) 水頭 17.80 呎 (模型) 17.46 呎 (原型)
- (b) 水頭 11.31 呎 (模型) 12.98 呎 (原型)



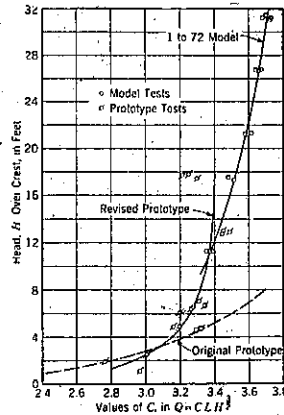
* 4 番目の試験ではドラムゲート上端は標高 242 にある。他の試験では門扉は標高 232 (堤頂) 迄下げてある。

試験の最低水深より高いので両者の比較をなし得るのである。此の結果は表-4 に示す如くである。

ナツプの形状はスチール・テープに浮子を付けて測定した。此の測定には 2 人が従事し 2 呎間隔の読みを測定した。1 つの測定には約 11 分を要し、此の間に於ける貯水池水面の低下は平均 0.025 呎、最大 0.040 呎であつた。ナツプ及び堰頂水壓の測定は水深が 12.98 呎及び 17.46 呎の時に行はれた。

堰頂水壓の測定方法は始めの原型試験と同一であり、其の結果は始めの原型試験及び模型試験とよく一致した。測定水壓は上流面では静水壓より大きく、頂部に於

圖-17. 堰頂流量係數



ては小となる。

静水壓と水頭傾斜線の差は水深と共に増大し、下流側の真空も水深と共に増大する。

測定の結果は圖-15 及び圖-16 に示される。水壓はピエゾメーターで測定し、ナツプの形状は模型ではポイント、ゲージ、原型では浮子で測定した。

圖-17 は溢流係數と溢流水深との關係を示すもので、圖中 "original prototype" なる曲線は初期の原型試験を示し水深は 8 呎以下である。此の資料は其の時には結論を得る爲に不十分なものと考へられてゐた。又 "revised prototype" なる曲線は後の原型試験の結果を示す。

原型の寫眞に依つて中央部の溢流状態 (溢流水深 17.70 呎) と端に於ける溢流状態 (溢流水深 8 呎) とを比較すると水深の大きい時には中央部よりも端に於て水流の攪亂が大となる。模型試験では 4 門が同時に開放されてゐるに拘らず原型試験に於ては端の 1 門のみが開放されてゐる譯で、従つて模型の溢流係數は 4 門の平均値であるに對し原型の溢流係數は模型の場合に比

し溢流量の小なる1門のみの流量を基礎として得られたものである。圖-17 に於て水深18呎に於ける流量係数は模型とよく一致するが18呎の流量係数は小である。

1 門扉のみの操作に於てはエプロンの全幅に互つて跳水が起らないから、エプロンに於ける流速及び水壓に關し模型と原型との比較を論ずることは出来ないが、表-5 の模型試験の結果は4門を全部開放した方が望ましいと言ふ結論を與へるのである。

表-5 門扉1門及4門開放の場合のエプロン部流速

No. of DAM GATES OPENED	HEAD, Ft	DISCHARGE, Cu Ft PER SEC	MAXIMUM VELOCITY BEFORE JUMP, Ft PER SEC	BOTTOM VELOCITY AT END OF APRON, Ft PER SEC
1	17.40	23,840	81.7	29.0
1	12.80	18,080	70.2	23.1
4	7.78	31,800	77.0	0.0
4	6.02	20,650	71.5	0.0

圖-18 一門扉開放の状態、流量 16100 呎³/秒水頭 12.9 呎

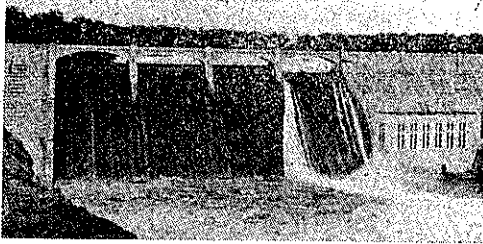


圖-18 は1門開放の場合を示すもので、跳水がエプロンの全幅に起らず流速が大なる爲め相當の渦流を生じてゐるが、全門扉が同時に操作された時斯かる現象は起らないのである。以上を要約すれば次の結論を得る。

1. エネルギー消失の最好條件としてはエプロン全幅に互る跳水を必要とし、此の爲めには全門扉の同時開閉及び溢流量の均等が必要である。此の結論は原型試験から得られたものである。
2. 堤頂水壓及びナツプの形状は模型試験と一致する。
3. 流量は模型試験と略々一致し、其の差異は極く僅少で観測誤差の範囲内にある。

橋梁及構造物

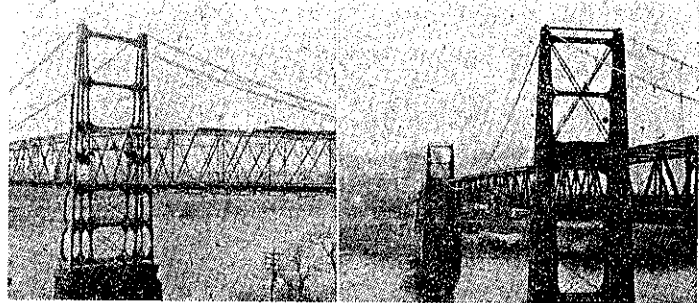
(42) 老舊吊橋の補強

(D. B. Steinman and J. London; "Ailing Suspension Bridge Restored." E.N.R., Sept. 11, 1941. p. 85. 瀬尾五一抄)

概要 Ohio 州の Steubenville で Ohio 川を横断してゐる吊橋は1904年架設以來35年を閲し、近時の重交通に堪えざる程度に時代遅れとなりたるを以て、廣範圍に補綴補強せられ、其の結果本來の設計荷重 H-15 より大なる H-20 (米國公道橋設計仕方書の最大荷重) に堪え得る近代橋梁として若返つた譯である。補強された著しき部分は、鎮礎部のケーブルの錆蝕せる部分が切り取られ、新しく取り換へられて、補強された鎮礎に鈎着された事、新しい補剛構が作られ、新しい床が補強された床組の上に置かれた事、ケーブルの吊材が吊鉤に置き換へられた事、塔が補強された事等である。

舊橋 圖-20 に示されてゐる様に鋼構造部分の總延長は $496+324+700+276=1796$ 呎である。West Virginia 側では補剛構はコンクリートの鎮礎の上で支承され、ケーブルはコンクリートに埋め込まれたアイバーチエンにピン連結されてゐる。Ohio 側では鋼のロッカーカーベントの上に支承され、ケーブルはコンクリートブロック内に縦着されたアイバーチエンの控背に連結されてゐる。川の中の石造橋脚上に鋼塔が建造されてをり、ケーブルの徑は7.5吋で No. 8 の bright steel wire 1498 本から成つてゐる。ケーブルの間隔は塔の上では33呎、鈎着部と中央支間の中央では25呎である。本來の補剛構は部材がスレンダーで1924年に補強されてゐる。車道は20呎、歩道が6呎で何れも木造である(鋼縦桁と木材の梁を使用)。南北兩側のケーブル

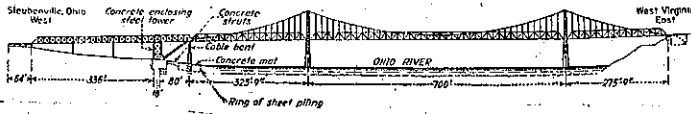
圖-19 舊橋と補強後の橋梁との對照



は共に子繩の端(コンクリートと鎮礎の部分)は取り換へなければならぬ程腐蝕してゐたのであるが、此の部分の取換へは非常に困難な問題であつて、此の施工を交通の支障なしに又最初の見積り工費を超過する事なしに遂行し得たのは請負人の創意と手腕に依るものである。

鎮礎と塔 Ohio 側の鎮礎は重量がどちらかと謂へば軽く、安定は前面の砂の受働土壓に依る事が大で、近代

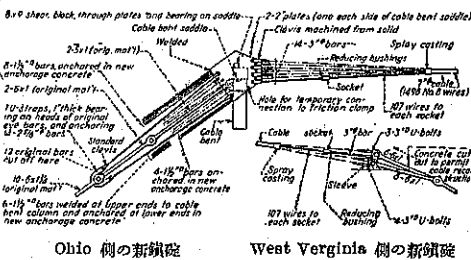
圖-20. 補強されし吊橋の一般圖



的な H-20 橋梁としては充分ではないのと云ふ事が調査の結果明かになつたので、鋼製の塔（鎮礎の上に建造された鋼塔で、取付陸橋の橋脚）をコンクリート（400 m³）で埋め込み、鎮礎と一體とした結果、鎮礎の重量が増加し、滑動に対する抵抗が増加した譯である。Ohio 側の元のアイバーの控背は過應力を受けてゐるので 1.5 平方吋の鋼棒 18 本を補足した。此の鋼棒の下端は、新しいコンクリートに埋め込まれたガーダーに連結されてゐる（圖-21 参照）。

石造の cable bent の脚柱は木材の杭打ち基礎の上にある。此の基礎杭は H. W. L. と L. W. L. との間

圖-21. 腐蝕せるケーブルの端の部分を除き修理された新鎮礎。修理作業は荷重を受けながらされた



Ohio 側の新鎮礎

West Virginia 側の新鎮礎

圖-22. 摩擦結着の圖、腐蝕せる端部が切斷され、修理されるまでケーブルをしつかりと締付ける作用をなす

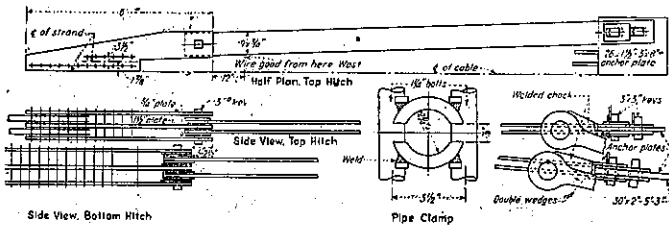


圖-23. West Virginia 側鎮礎附近の摩擦結着



にあり、腐蝕の恐れがあるので、孔を掘つて杭の状態を調査したのであるが、杭は完全なものであつたので、脚柱の基礎の洗掘防止の爲め、長さ 20 呎の鋼矢板を 52x59 呎の楕圓形

状に打ち込み、表面は厚さ 2 呎のコンクリート張りとなし、鎮礎と鋼矢板との間には 2 本の 5x7 呎のコンクリートのストラットを配置して Ohio 側の鎮礎の安定増大に利用した。cable bent は本來の部材に飯を銲接して補強され、pin bearing は支壓軽減のために底部を増大した。

中央部の鋼製の塔は 圖-19 の左圖の様に A 型結構から成つてゐるのであるが、3/8 吋の鋼板や山形鋼等に依り圖-19 の右圖の様に補強された。

ケーブルの巧妙な修理 West Virginia 側の鎮礎のコンクリートに埋込まれたるケーブルの部分は相當腐蝕が進行してゐた。鎮礎に於けるアイバーは先づ完全と云つてよかつた。ケーブルの腐蝕はコンクリートに直接に接觸してゐる部分であつた。

腐蝕せる子繩 (strands) は切斷され、子繩の半分に鍛鋼製のソケットを取付け、このソケットは當初からある鈎着のためのアイバーに取付ける。ソケットは子繩を通すためにテーバーし、且つ銲解せる亜鉛を入れるための穴を備へてゐる。ソケットを通つた子繩を締付ける Reducing bushing がソケット中に扭ち込まれ、ソケットと 3 吋のニッケル鋼の棒鋼とが連結される。子繩を

切斷し新しくケーブル連結をなすために巧妙な一時的摩擦結着 (friction hitch) が考案された。此の摩擦結着を施工することに依り、第一に子繩の作業を容易ならしめ、第二に子繩の切斷の際にも橋梁は安全であり、第三に子繩の切斷に依る應力の減少を防ぐのである。

摩擦結着の構造は 圖-22, 23 に示されてゐる。

ケーブルベントの修理 ケーブルは rocker bent saddle の部分數呎と、控背のアイバーチェンとの連結部分が腐蝕してゐた。之の修理には 2 つのケーブルベント鞍の各側に 2 吋飯を取り付け、此の 2 吋飯には孔が明けてあり、控背のアイバーと新しいケーブルに連結する様になつてゐる。

新しい吊材 前述の如く本来の棒鋼の吊材が鋼索に依り置き代へられた。此の作業中、主要なケーブル帯が取り除かれ、ケーブルの被覆を取り去り、ケーブルにブロンズの楔を打ち込み検査した處、腐蝕と弛緩せるワイヤーが認められたが、之はワイヤーの外側2層に限られてゐたので容易に修理する事が出来た。2つのバンドプレートより成つてゐる本来のケーブル帯はそのままとし、ケーブルの掴みは一對の鑄鋼板を取付けて補強した。修理されたケーブルは塗料をぬられ、No. 9の亜鉛引きワイヤーで巻き、ケーブル帯は樹脂に依り水密性にされた。

新しい補剛樑 本来の補剛樑は全溶接のワーレン樑に置き換へられた。又本来の木製の床組と鋼縦桁が取り去られ、sheetpileより成る Neeld-typeの床組に置き換へられた。

鐵 道

(43) 電化區間に於ける軌條波狀磨耗に就いて

(A. H. Morgan; "Rail Corrugation."
A. R. E. A. 1941, B. 平川朋之抄)

波狀磨耗は運轉區間の軌條踏面に時に見られる現象である。普通そのピッチは數種あり、その初期に於ては軌條頭部に等間隔の小さな輝いた斑點が現れる。

此の間隔は普通 60~100 mm であるが 40 mm より小さいものも或は 250 mm 以上のもある、その斑點の谷の深さは多くの場合 0.25~0.43 mm である。

此の波狀磨耗の起きた軌條は列車運轉の際騒音が烈しく従つて乗心地がよくない。然しながらもつと重要な事は軌條自身の磨耗であり、又振動により起る軌道上部構造の破壊及弛みである。従つて軌道構造に危険を齎すものである。

同様に車輛に起る振動は必然的に車輛保守の方からも問題が起きて来る。

波狀磨耗の問題を考ふるに當つては20年來アメリカの電氣鐵道技術者に依つてなされた廣大な研究を認めざるを得ない。

此の研究は波狀磨耗を或る程度減ずる方法と波狀磨耗の本原因を發見してゐるが、全然それを無くする方法は未だ發見されて居ない。

蒸氣鐵道に於ても電氣鐵道と殆ど同じ様に久しく此問題に悩んで居るが、根本原因を起す多くの條件は電氣

鐵道の場合に於ける程著しくないので波狀磨耗の問題はそれ程重大な事ではない。

波狀磨耗の最も主な形は軌條數本に亘つて連続して一様に現はれた場合である。

波狀磨耗の發達は列車運轉の初期に起り、尋で隨時起るものであるらしい、此の波狀磨耗の特別の型の原因には色々あるがこれは第二次的なものであるので後には色々あるがこれは根本原因について説明を試みよう。

波狀磨耗の根本原因は車輛と軌條との同期振動でありその接觸面への影響である。

勿論車輛の振動は車輛走行部分の性質即ち其設計、スプリング、重量分布状態、車輛問題及運轉速度によるものである。

一方軌條の振動は軌道構造の性質、即ちバラスト、枕木、タイプレート及軌條断面によるものである、勿論軌條にかゝる荷重の量、荷重のかゝり方にも影響がある。

以上の事は既に證明されて居る様に理論ではなく事實である。

磨耗のない軌條面を走るとどんな車輛もある定まつた振動數或は振動の周期を持つてゐる、そしてその振動數はある速度で 38 mm から 254 mm の範圍内にある事が分つてゐる、又軌條自身の振動の周期は長さの方向にやはり 38 mm~254 mm である事が分つた。そこで或る速度で車輛の性質と軌條の性質とが同じ振動數を與ふる時車輛と軌條との間に壓力の非常な増大を來す様な振動となるのである。

普通の運轉状態に於てすら車輛と軌條の接觸面に於ける壓力強度は非常に大きい事が知られてゐる。そしてその部分が堅くなる事は事實である。其れは降伏點を超えて應力を受けてゐる證據である。

Illinois大學及鐵道軌條製造協會の研究で壓力強度は非常に大きい事が證明されてゐる。

それ故に壓力強度が軌條の變形の原因となるだらうと言ふ事が言はれる、然しながら波狀磨耗が起るのは同期振動の下に車輛が反覆運轉される場合のものである。

又最初波狀磨耗が同期振動の下に最初の車輛通過で起きても若し次の車輛の通過が軌條振動と一致しないならば最初の波狀磨耗の効果は消滅するだらう。

上述の事から實際一様に起る波狀磨耗の型には二つの要素がある事が明かである。

即ち第一の要素は同期振動でありそれは少くとも波狀磨耗の發達の間は引續いて繰返してゐるに違ひない。

第二は接觸面の軌條鋼の降伏點を多少超過する様な

振動より起る壓力の増加である。

波狀磨耗を起す同期振動の修正を考ふるに運轉狀態は止める譯にはいかぬと言ふ事を考へて置く必要がある。そこで波狀磨耗の發達する様な區間の修正にはその初期に於て車輛の速度を變ふるか或は運轉の方向を變ふるかする事によつて波狀磨耗を止める事が出来る、さうすれば同期振動と言ふ條件は永續的なものとはならないだらう。言ひかへれば波狀磨耗が現はれるや否や之を打消すやうな結果をもたらす事になるのである。

車輪と軌條の接觸面に於ける壓力強度に關してこの壓力によつて起る變形に對する抵抗を増大する方法と波狀磨耗の發達を防ぎ或はその度合を減ずる方法と二通りある。その一つは軌條鋼の降伏點應力を増加する事である。他の一つは車輪と軌條の接觸面を増大する事である。前者の目的には高炭素鋼軌條を使用して大いに効果が上つてゐる。

AREA 示方書によれば蒸氣區間では出来るだけ降伏點の高い炭素鋼軌條を使用してゐる合金鋼の使用はより高い降伏點を得る事が出来るが、中滿俺鋼のやうな半合金鋼では充分でない。全合金鋼が現今考へられてゐるが經濟的に成立たない、又壓延レールを熱處理する試みもあるが之は實際には困難である。

軌條端を熱處理する事によつて材料の降伏點を増加すれば繼目に於ける車輛の衝擊に對する抵抗を増大する事が出来る、従つて繼目落を減ずる事が出来ると言ふ事は既に廣く行はれてゐる事である。

車輪と軌條の接觸面を増大する方法には色々な方法がある。Pitts burgh 鐵道では軌間を擴大する事によつて波狀磨耗は殆ど除かれてゐる。著しい波狀磨耗が軌間を 1/4 in だけ擴大する事に依つて特別な場合を除き殆んど消滅した。

蓋し車輪と軌條との接點がレール頭部の端に近いときは接觸面積が小さいから軌條の流れに對する抵抗が小さい。そこで軌間を擴大すれば接點が軌條頭部の中

央に移るから軌條の流れは減小し接觸面積は増大する、それで同期振動の衝擊は殆ど波狀磨耗を始めるに不充分となる、Cleneland では軌條を傾けて接觸面積を増大してゐる、Brooklyn ではタイヤの輪廓と一致する様に軌條頭部を工夫してゐる。更に在來の圓錐形の車輪踏面より圓錐形のもの考へてゐる傾向もある。

次に波狀磨耗に似た狀態が壓延の時に織り込まれる場合が稀にある、Detroit United Railway では1組の 100lb RA-A 軌條で敷設後間もなく同期振動に依つて起る波狀磨耗と見掛けは少しも違はぬ波狀磨耗を起した例がある。それで Cleneland Trunk Western の汽車線から持つて來た軌條と取かへたる所この組のものは他のものゝやうには波狀磨耗は生じなかつた。

更にこの状態で波狀磨耗を全部 grinding して取除いたる所最初の軌條も汽車線からもつて來た軌條も其の後は波狀磨耗が起らなかつた。

Erie Rail-road では軌條を敷設して間もなく波狀磨耗が發達した例があつた、此の軌條が壓延された條件を詳細に追求せる所壓延ロールが不良なりしたため壓延軌條の頭部に充分なる壓力が加はらず頭部が餘りに強度が弱いと言ふ事が分つた。

軌條表面の窪みは自然車輛のスプリングに反動を與へそれは更に第二の窪みを發生する作用を與ふる事になる。普通此等の波狀磨耗は窪みで最も著しくそれから次第に小さくなる、同じ理由から軌叉にて波狀磨耗は最も著しい。

次に堅い軌條端は抵抗力が大きいため波狀磨耗を生じ易い、又繼目落も波狀磨耗を生ずる結果となる、曲線の所では外軌にてはスリップ、内軌にてはドラッグ或はその合成されたる状態となるため波狀磨耗の原因となる。

曲線で規則正しく波狀磨耗を示してゐる所では出来るだけ磨耗を減ずるやうにすれば修正出来る。之には軌條及輪縁に塗油する事がなされてゐる。