論 說 報 告

第22卷第1號 昭和11年1月

道路縱斷勾配の路面排水に及ぼす效果に就て

會員 工学士 工 藤 久 夫*

On the Effect of the Longitudinal Grade upon Surface Drainage of the Road

By Hisao Kudô, C. E., Member.

要 旨

路面上任意の一點に降つた雨水の流下方向及其が路端に到達する時間より，雨水が路面上に滯留する時間を推定し，主として表面排水上より見たる縱斷勾配の必要度を吟味したものである。

目 次

1. 緒 言

道路の縱斷面を決定する際に，一般に最小縱斷勾配上より制限が行はれて居る。

地形が平地で制限より緩な場合には，この最小縱斷勾配に從つて上り下りの坂道をを作る。その爲に道路敷地は蛇腹型となり，天然地形に順応した縱斷勾配を付する場合に比し，工事費及び用地費は幾分嵩上する。

坂道の少きは交通上最も好ましき事であるにも拘らず平地に起伏を付するのは，路面排水上よりの習慣と解さるゝが，本篇は排水に必要な横斷勾配のある道路に更に縱斷勾配をつけた場合に路面排水が如何樣の變化を受くるかに就て其の程度を考究せんとするものである。

2. 導 式 上 の 假 定

路面排水の如く流水深が極めて薄いものは，常水路の Chézy 型を其の儘利用されずに，L. Girard は實驗上最急勾配方向に於ける流速は

$$v=ch\sqrt{p} \quad \cdots\cdots(1)^{1)}$$

c: 流速係數，　h: 流水深，　p: 最急勾配

を以て表はして居る。

J_x: 路面の横斷勾配（路頂を原點とす），　J_z: 路面の縱斷勾配

とすれば，横斷勾配のみの場合は (1) 式により

$$v=ch\sqrt{J_x}$$

流向單位幅に對する流量は $q=ch^2\sqrt{J_x}$ となる。

---

* 内務技師　内務省大阪土木出張所勤務

1) 藤井博士，土木工學　第 2 卷　第 5 號

J_z の爲に J_x より勾配が急になり其の合成最急勾配を $p=\alpha J_x$ とすれば

$$v'=ch'\sqrt{\alpha J_x},\qquad q'=ch'^2\sqrt{\alpha J_x}$$

路面が滲透性の場合は，降雨の初期には雨水が道路面に滲み込み，路頂に降つた雨水は路端卽ち流末に近づく程流水深は小となり，從て (1) 式より流速は小となる。此の關係は極めて複雜であるから，假りに滲透なき場合若くは路面が飽和した時を考ふれば，雨量の一定の場合には

$$q=q'\qquad\therefore\ h'=\frac{h}{\sqrt[4]{\alpha}},\qquad \text{流水深比}=\frac{h'}{h}=\frac{1}{\sqrt[4]{\alpha}},\quad \text{i.e. } v'=ch\sqrt[4]{\alpha}\sqrt{J_x},\qquad \text{流速比}=\frac{v'}{v}=\sqrt[4]{\alpha}$$

縦断勾配があれば横断勾配のみの場合より最急勾配は大となるので一般に $\alpha>1$ である。$\alpha=1\sim2$ の範圍で流速比及水深比を図示すれば 図-1 の如く，p の變化に比し流水深從て流速の変化は尠い。

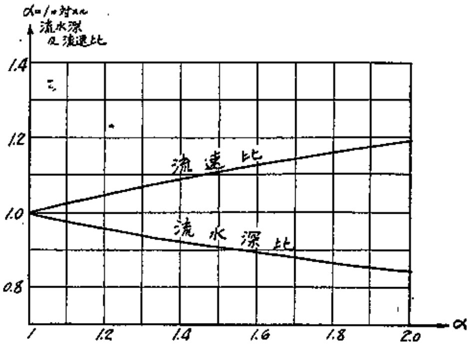
路面上の任意の１點上の降水量が一定の場合には h は恒數であるから上式は

$$v'=K\frac{\sqrt{\alpha J_x}}{\sqrt[4]{\alpha}},\quad K=ch\cdots\cdots\cdots\cdots(1)'$$

雨水が側溝迄到達する實際の速度及時間を計上するには K を決定する爲に多くの實驗を必要とするが，縦横兩勾配の割合によつて雨水が路面上を流下する相對的の關係を知る丈には $K\equiv1$ として運算すれば便利である。

斯く考へた v' を假りに速度係數と名付ける。

図 1.　最急勾配增加による流速並に流水深比



3.　合成流の方向並に性質

J_x, J_z の共存する路面上任意の 1 點に降つた雨水はベクトクの加法によつて求めた最急勾配 p の方向に流れる。道路正横断水平軸なる x 軸と p がなす角を θ とすれば

$$\tan\theta=\frac{J_x}{J_z},\qquad\therefore\ dz=\frac{J_z}{J_x}dx$$

水平流下流は

$$ds_h=\sqrt{dx^2+dz^2}=dx\sqrt{1+\lambda^2}=\alpha dx$$

玆に　$\frac{J_z}{J_x}=\lambda,\ \sqrt{1+\lambda^2}=\alpha$

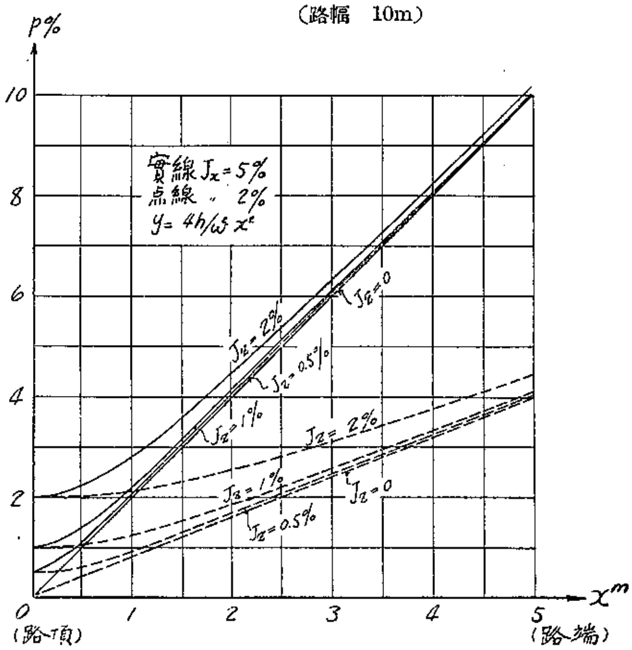
ds_h の先端の落差$=J_x dx+J_z dz=J_x(1+\lambda^2)dx$

$$\therefore\ p=\sqrt{J_x^2+J_z^2}\equiv J_x\sqrt{1+\lambda^2}\equiv\alpha J_x\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

この最急勾配 p の増加程度に關し數値的概念を得る爲に實用の路面横断勾配の兩極端 2％ 及 5％ に對し $J_z=2\%, 1\%, 0.5\%$ の範圍で (2) 式を用ひ，道幅 10 m の場合に，拋物線横断曲線たる

$y=\frac{4h}{w^2}x^2$　h：路頂高，w：路幅，

図 2.　ox 線上に降つた雨水の流下勾配
（路幅　10m）



x: 路頂から測つた水平距離

に就て算出すれば 図-2 の如く, 縦断勾配が 1% 以下の様に小なる時の最急勾配の増加度は實用上極めて小いものである。

この流下實距離は

$$J_z=0 \text{ にて } \quad ds=\sqrt{1+J_z^2}\,dx, \qquad J_z>0 \text{ にて } \quad ds=\sqrt{1+\lambda^2+J_x^2(1+\lambda^2)^2}\,dx$$

を以て表はされる。

砂利道の横斷勾配は平均 1/20 で, これが水平道路の場合には路面の最急傾斜は 3° 以下となり, 道路構造令による國道の最急勾配は平坦部にて 1/30 以下と定められてあるから, 砂利道にこの最急勾配を付けた場合でも (2) 式による p は 6% で最急勾配方向の傾斜角は 4° に滿たない。

水理學の取扱では普通に水面の傾斜が

$$\theta'>10^\circ \text{ の場合は } \quad J=\sin\theta', \qquad \theta'\leqq 10^\circ \text{ では } \quad J=\sin\theta' \fallingdotseq \tan\theta'$$

を以て表はして居るので道路の如く最急勾配方向の傾斜角 θ' が特別の場合でも 10° を出づる事が無い場合には水面勾配は前掲の如く $J=dy/dx$ の取扱で充分であり, 從て實際問題として $dx \fallingdotseq ds$ と近似的に置かれる。

そこで流下速度係數は $(1)'$ に $K=1$ と置けば

$$J_z=0 \text{ にて } \alpha=1 \quad \therefore \quad v'=\sqrt{J_x}, \qquad \text{流下時間係數 } dt \fallingdotseq \frac{dx}{\sqrt{J_x}} \qquad \therefore \quad t=\int_0^{\frac{w}{2}} \frac{1}{\sqrt{J_x}}\,dx \quad \cdots\cdots(3)$$

J_z のみ存し横斷勾配のない場合は

$$\alpha=\infty \qquad \therefore \quad t=\infty$$

即ち雨水は路面を河身として流下するが故に坂下になる程流水深が大となり路面維持上最も悪い狀態となる。

J_x, J_z の共存する時は

$$v'=\frac{\sqrt{\alpha J_x}}{\sqrt[4]{\alpha}}=\frac{\sqrt[4]{J_x^2+J_z^2}}{\sqrt[4]{\alpha}}$$

$$dt \fallingdotseq \frac{ds_h}{v'}=\frac{\alpha\,dx\,\sqrt[4]{\alpha}}{\sqrt{\alpha J_x}}=\frac{\sqrt[4]{\alpha^3}}{\sqrt{J_x}}dx=\frac{\sqrt{1+\left(\frac{J_z}{J_x}\right)^2}\sqrt[4]{\alpha}}{\sqrt[4]{J_x^2+J_z^2}}dx$$

故に路頂に降つた雨水が側溝に達するに要する時間を示す所の時間係數は

$$t'=\int_0^{\frac{w}{2}} \frac{\sqrt[4]{\alpha}}{J_x}\sqrt[4]{J_x^2+J_z^2}\,dx=\int_0^{\frac{w}{2}} \frac{1}{J_x^{\frac{5}{4}}}(J_x^2+J_z^2)^{\frac{3}{8}}dx \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3)'$$

上式の積分は一般には困難であるから總時間係數 t は Σ の形によつて求め得べく, 或る特殊の形については實用上 $\sqrt[4]{\alpha} \fallingdotseq 1$ と見做して解けば比較的簡單な取扱をする事が出來る。但し縦斷勾配の存在によつて最急勾配は横斷勾配のみの場合より大となるが故に $\sqrt[4]{\alpha}>1$ で, 從て v' は斯く假定すれば λ の大になる程精密値より大となり, 流速比は大となるが, 次に述べる實例から見ても $\sqrt[4]{\ }\fallingdotseq 1$ として計算した結果は縦斷勾配の路面排水上の效果の性質を定める手段としては大なる支障はない。

$(3)'$ 式の積分困難の時は雨水の流線平面投影は Δx を區切つて其の點の最急勾配方向はベクトルの加法によつて求めて, Δy を算出すれば良い。前例により $J_x=5$ 及 2% に對する雨水の流線平面投影は

$$z=\int \frac{J_z}{J_x}dx, \quad \frac{dy}{dx}=\frac{8h}{w^2}x \text{ より } \qquad z=\frac{w^2}{8h}J_z \log x \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

流下狀況を判斷する爲に, 雨水の流線平面投影を (4) 式により $J_z=2$, 1 及 0.5% に對し図示すれば 図-3_a, 3_b と

図 3_a. ox 線上に降つた雨水の流線平面投影

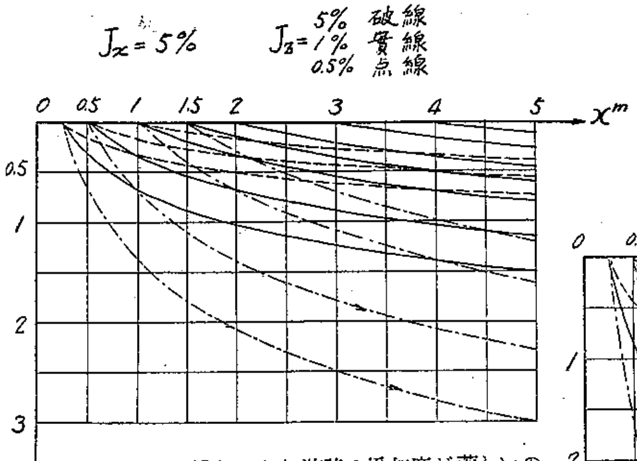
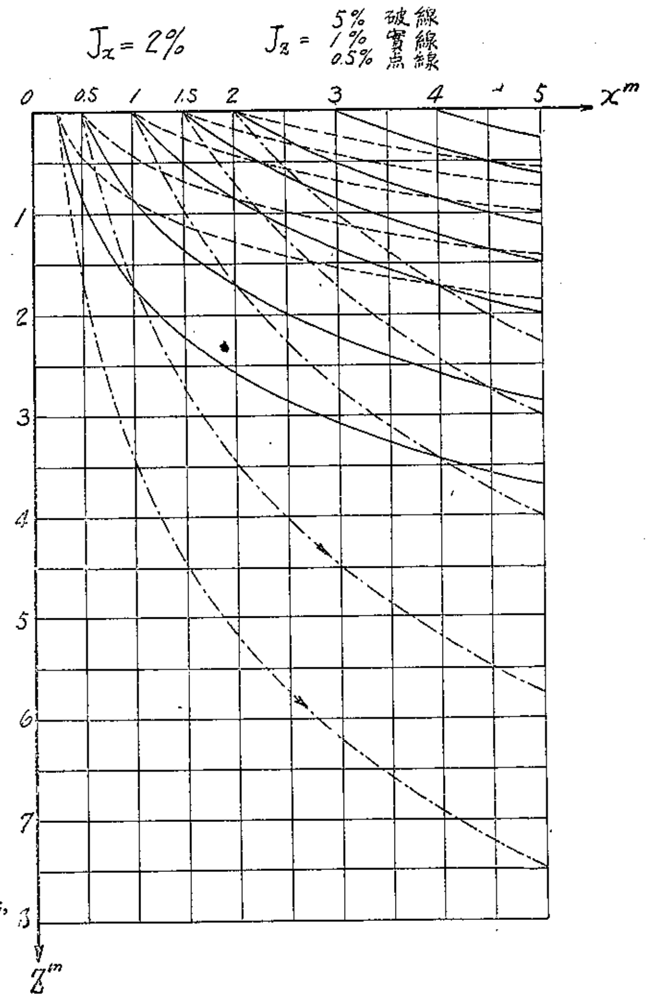


図 3_b. ox 線上に降つた雨水の流線平面投影



なり λ の増加により流路の増加度が著しいのを知られる。

雨水が路面に滯留する時間を檢する爲に別個に速度係數式を算出すれば **図-4** となる。

一般に路面の横斷曲線は久野博士[2]により

$$y=h\left(\frac{x}{l}\right)^n, \qquad n=1\sim 2, \qquad l=\frac{w}{2}\cdots\cdots(5)$$

を以て表はされて居るが故に上式の $n=1, 1.5, 2$ の場合，及 Girard が排水理論より求めた横斷曲線式に對して(3)′式を使用し，縱斷勾配の存在による流速の増加と，流路の延長による流下時間の増減等を吟味し，之が路面排水上の效果に就て檢討すれば次の如くである。

i) 横斷勾配が路頂に於て交叉する 2 直線よりなる時は (5) 式は

$$n=1 \qquad \text{i.e.} \quad y=h\frac{x}{l}=\kappa x, \qquad J_x=\frac{dy}{dx}=\text{恒數}=\kappa,$$

$J_z=0$ にては
$$t=\int_0^{\frac{w}{2}}\frac{1}{\sqrt{\kappa}}dx=\frac{1}{\sqrt{\kappa}}\,\frac{w}{2}$$

$J_z>0$ にては
$$t'=\int_0^{\frac{w}{2}}\frac{\sqrt[4]{1+\lambda^2}}{\kappa}\sqrt[4]{1+\lambda^2}\sqrt{\kappa}\,dx=\frac{\sqrt{1+\lambda^2}}{\sqrt{\kappa}}\,\frac{w}{2}\cdots\cdots\cdots\cdots(3)''$$

$\sqrt[4]{\alpha}\doteqdot 1$ の近似値は

$$t''=\sqrt{\frac{\sqrt{1+\lambda^2}}{\kappa}\,\frac{w}{2}} \qquad \text{茲に } J_z=\lambda\kappa\cdots\cdots\cdots\cdots(3)'''$$

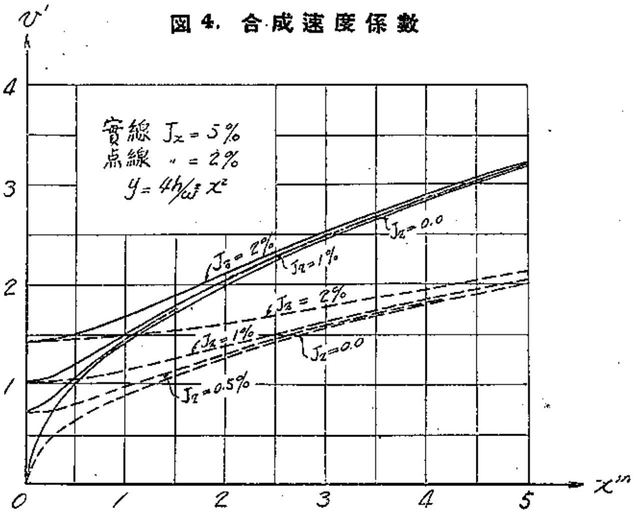
$$\frac{t'}{t}=\sqrt[2]{1+\lambda^2}, \qquad \frac{t''}{t}=\sqrt[4]{1+\lambda^2}$$

---

2) 久野博士，土木学會誌第 19 卷第 8 號，“鋪裝路面の横斷曲線に關する理論”

$\lambda>0$ では $\frac{t'}{t}$ 及 $\frac{t''}{t}>1$ で $\lambda=0\sim1$ の範圍內にて數値計算をなし t' を實線，t'' を點線にて表し $\frac{t'}{t}$ 及 $\frac{t''}{t}$ をも併せて同樣線別にて図示すれば図-5 となり，縱斷勾配 J_z の爲に流下距離の增加度が大になる割合に速度が增加せぬ爲に $\sqrt{1+\lambda^2}$ 丈雨水は路面上に停滯することになり排水上不都合である。例へば $\lambda=1$ にては t は 41 % も大となるし，p が必要以上に大になることは土砂，砂利道の如き田舍道では結合土の流失多く，其の方面からも良い結果を來さぬことになり，縱斷勾配の效果に對する性質が決定した。更に図-5 の精密値と近似解との比較により後掲の高次横斷曲線で取扱ふ近似解の性質をも了解する事が出來る。

図 4. 合成速度係數



ii) $n=1.5$ の場合

$$y=h\frac{x}{l}^{1.5},\quad \frac{dy}{dx}=J_x=1.5h\sqrt{\frac{x}{l}}$$

$J_z=0$ では (3) 式より

$$t=\int_0^{\frac{w}{2}=l}\frac{1}{\sqrt{J_x}}dx$$

$$=\frac{1}{\sqrt{1.5h}}\int_0^l\frac{1}{\sqrt[4]{\frac{x}{l}}}dx=\frac{4}{3}\frac{l}{\sqrt{1.5h}}$$

J_z の存在する時は (3)' 式より

$$t'=\sum_0^l\frac{1}{J^{\frac{5}{4}}}(J_x^2+J_z^2)^{\frac{3}{8}}\Delta x$$

$$=\frac{l^{\frac{5}{8}}}{1.66h^{\frac{5}{4}}}\sum_0^l\frac{1}{x^{\frac{5}{8}}}$$

$$\times\left(\frac{2.25h^2}{l}x+J_z^2\right)^{\frac{3}{8}}\Delta x$$

となり一般には積分が困難であるから Σ の形で近似數値を求めることが出來る。

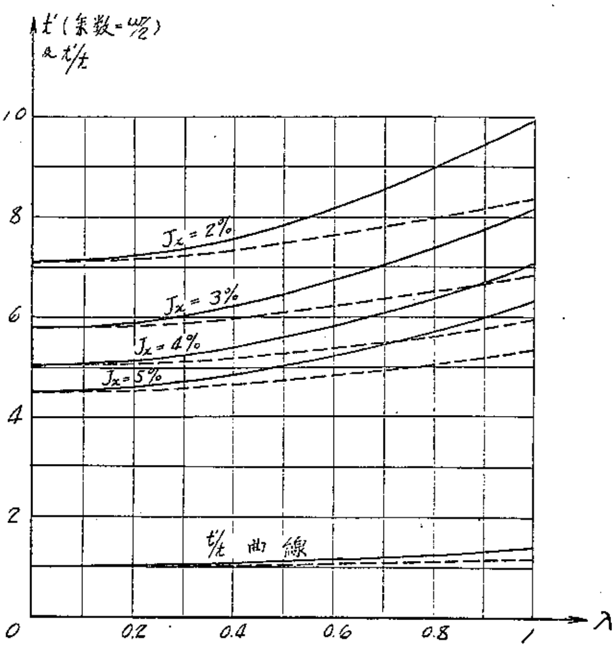
iii) 二次拋物線の場合

$$n=2\qquad \text{i.e.}\quad y=\frac{4h}{w^2}x^2$$

(3) 式より $J_z=0$ では

$$t=\int_0^{\frac{w}{2}}\frac{1}{\sqrt{\frac{8h}{w^2}x}}dx=\sqrt{2}\sqrt{\frac{w^3}{8h}}$$

図 5. 直線横斷勾配にて路頂より路端に流水の到達する時間係數



$J_z>0$ にて $\sqrt[4]{\alpha}\doteqdot 1$ として近似解を求むれば

$$t''=\int_0^{\frac{w}{2}}\frac{1}{\frac{8h}{w^2}x}\sqrt[4]{\frac{64h^2}{w^4}x^2+J_z^2}\,dx=\left|\frac{w^2}{8h}\left[2\sqrt{\frac{64h^2}{w^4}x^2+J_z^2}+\log\left\{\frac{\sqrt[4]{\frac{64h^2}{w^4}x^2+J_z^2}-\sqrt{J_z}}{\sqrt{\frac{64h^2}{w^4}x^2+J_z^2}+\sqrt{J_z}}\right\}^{\frac{\sqrt{Jz}}{2}}\right.\right.$$

$$\left.\left.-\sqrt{J_z}\tan^{-1}\sqrt{\frac{\frac{64h^2}{w^4}x^2+J_z^2}{J_z^2}}\right]\right|_{\frac{w}{1000}}^{\frac{w}{2}}\cdots\cdots(3_4)$$

道幅 10 m に對し上掲の t に對する t'' の增加率を求むるに $J_z=1\%$ にては（計算尺使用）下表となる。

横断勾配 / 降水位置	$J_x=5\%$	$J_x=2\%$
$x=0.25$ (m)	$+17.5\%$	$+7.3\%$
〃 1.00	+ 5.0	+1.5
〃 2.00	+ 2.7	+0.5
〃 3.00	+ 1.8	+0.1

二次拋物線形は路頂より路端に到るに從ひ横断勾配が大となり，J_z の一定値に對し λ は次第に減ずる爲 J_z の影響は路端になる程小となるが之の形を用ひても縦断勾配により路面滯水時間の增大は免れない。

iii) 三次拋物線の場合

L. Gilard は流水深を一定に保つ横断曲線は排水理論上

$$y=\left(\frac{q}{ch^2}\right)^2\frac{x^3}{3}\cdots\cdots(6)^{3)}$$

q: 單位幅に對する流量，其他の記號は (1) 式に同じ

の三次拋物線形で表はして居る。之の流下時間係數を求むるには α の小なる間は近似値として $\sqrt[4]{x}\doteqdot 1$ とし

$$\frac{dy}{dx}=J_x=\left(\frac{q}{ch^2}\right)^2x^2\equiv a^2x^2 \qquad \text{と置けば}$$

(3) 式より $J_z=0$ にて $\quad t=\int_0^{\frac{w}{2}}\frac{1}{ax}dx=\frac{1}{a}\left|\log x\right|_{\frac{w}{1000}}^{\frac{w}{2}}$

$J_z>0$ の場合には

$$t''=\int_0^{\frac{w}{2}}\frac{1}{a^2x^2}\sqrt[4]{a^4x^4+J_z^2}\,dx$$

$$=-\frac{1}{4a}\left[\frac{4\sqrt[4]{a^4x^4+J_z^2}}{ax}+\log\frac{\sqrt[4]{a^4x^4+J_z^2}-ax}{\sqrt{a^4x^4+J_z^2}+ax}-2\tan^{-1}\frac{\sqrt{a^4x^4+J_z^2}}{ax}\right|_{\frac{w}{1000}}^{\frac{w}{2}}\cdots\cdots(3_5)$$

4. 雨水流線の實驗

路面上の雨水が流下する速度及流下時間係數を定めるには多くの實驗を必要とするが，玆には最も簡單な流線形の實驗を行ひ流路の相似性を見た。

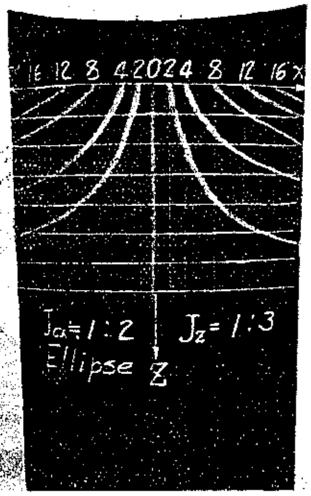
厚 4.5 mm 鋼板長 120 cm のものをローラーにかけて半徑 45.7 cm に巻き拱矢を 10.2 cm とした材料を利用し次の實驗を行つた。之を $J_z=1:3$ になる樣に据付くれば試驗片は垂直断面 x, y によつて楕円となり，平均勾配は約 1:2 となる。

今 $dx=4$ cm（路頂のみは 2 cm）に區切り萬年筆用スポイトを以て白色液を z の等しき xy 面上に滴下して自然流下をなさしめ，石筆にて x, y 軸を描き，寫眞機の都合上眞上から寫すと同結果になる樣，壁に立て掛け撮寫せるものを示せば次の如く前掲數値計算の図表と比較するに 図-3 は拋物線，寫眞は楕円であり從つて J_x, J_z の

3) 藤井博士，土木工學 第 2 卷 第 5 號

比も異つては居るが流線形の性質は良く類似して居るのを見られるであらう。

図 6. 雨水流線の實驗



5. 結　論

J_z 即縦断勾配による路面上の雨水の流速變化と其の流路及之が路端に到達する時間の影響度より考へて，路面の維持が充分な場合には下の結論を生ずる。

i) 縦断勾配は既に知られたる交通の安易の點よりするも又上記の排水理論より見ても地形の許す丈小にするのが良い。然し側溝排水の要ある場合には其によつて自らの限度がある。

ii) 平坦な地形で兩側が水田の如く側溝を設けなくても自然排水の出來る様な特別の場合には，排水の爲には特に縦断勾配を附する要はなく横断勾配のみで充分である。

iii) 側溝を要する街路の如き場所では其の經濟工法より見て必要限度の最小縦断勾配を付すれば良い。

iv) 縦断勾配の大なる坂道では横断勾配があつても，雨水は図-3の如く縦断方向にも牽かれて水流が道路に集まる傾向があるから適當の位置に横断溝を作つて排水を計るが良い。交通上の見地から坂路に於ける横断勾配を平地よりも緩にする實驗式を採用する際は之が爲に雨水の路面滯留時間を増加することは忘れてはならぬ。

v) 河川の堤防を道路に兼用する場合には築堤縦断勾配に從へば路面排水上充分であるが，堤防の高く路幅の大にして然も之に鋪装をなす場合の如きは法面保護上特別の注意を必要とする。

vi) 本邦の道路構造に關する細則第 4 條には 0.5％ を以て最小縦断勾配の標準として居る。この制限の出た根據は筆者には不明であるが，雨水を路面上横にも縦にも早く流して排水を良好ならしめ，土砂又は砂利道の如く一時的にでも轍跡が路面に付いた場合には雨水を縦断方向に導いて道路外に排出する主旨によつて生じたものとすれば，路面が良好に維持されて居る道路に於ては理論上之の制限を緩和せらるべきである。この事は豪雨の後に砂利道の如き磨損し易い路面に生じた水溜りの修繕をする際に修路工夫が一時的の横断方向の小溝を作つて排水し，縦断方向には水道を付けると云ふ實際上の慣行から見ても判断し得られよう。但し轍跡が路面に深く刻まるゝ迄自然に放置して置かるゝが如き原始的の道路に就いては問題は又自ら別となる。