

くすること、回路の電圧を2Vから4Vにあげること、BridgeのA:B=10:100を10:10とすること等により相当感度を上げることが出来た。

Calibrationにおいても本文の曲げ引張りによる外単純引張りも行い好結果であった。

7. このように改良された実験装置、測定技術をもつて、近鉄奈良線において試験電車で実験し(昭.26.3.下旬)、特に $\sigma \sim V$ についての衝撃実験式を提案しうる見込である。

この測定法はなお研究の余地があるが、軌条の外枕木、継目板等にも適用される。本研究は文部省科学研究費による“軌条及び枕木に関する動力学的研究”の成果の一部であつて、直接有益な御助言を頂いた京大電気教室の大谷助教授、阪大構築教室の奥島助教授、

京大土木教室の教官各位、現地の実験で種々御便宜を賜つた京福電鉄会社、実験を手伝つて頂いた学生加納郁生君等関係各方面に深謝の意を表する次第である。

#### 参考文献その他

- 1) 第3回関西工学連合講演会(昭.25.10.15)で講演
- 2) 成岡昌夫氏紹介; “SR-4 歪計について” 土木学会誌35—9(昭.25.9) p.28~31.
- 3) “Safety of welded rails in the running roads” Bulletin of the Int. Railway Congress Association. Vol. 20 No. (May 1938) p.468~471.
- 4) 後藤尚男; “弾性基礎にある梁の揺み振動に関する基礎的研究” 土木学会誌, 35—4 (昭.25.4) p.29~p.31.
- 5) 遠床係数測定の一つの試みとして行つたもので現地は非常に軟弱な路盤上にあるためKの値が小となつた。弾性波法による測定は著者の1人が橋脚の基礎地盤反力係数の決定に用いた方法である。小西一郎、後藤尚男; “懸架橋脚の震害に関する動力学的研究(第1報)” 土木学会第5回年次懇話会(昭.24.5.22)で講演論文集第6号に近く登載の豫定。
- 6) たとえば小野諒兄; “鉄道線路の構造及び強度(II)” p.43~47. (昭.26.3.6)

UDC 624.166  
532.517

## 橋脚壁面における流れの剥離について\*

正員 杉 本 修 一\*\*  
准員 稲 田 裕\*\*\*

### ON THE SEPARATION OF FLOW FROM THE BRIDGE-PIER SURFACE.

(JSCE July 1951)

Syueichi Sugimoto, C. E. Member, Yutaka Inada, C. E. Assoc. Member.

**Synopsis** When the bridge-pier is not properly designed, the boundary layer separated from the pier surface develops a field of vertical vortex, and the back-water due to the pier increases. Therefore, it is desirable to restore the separated boundary layer to the pier surface as rapidly as possible and to make the field of vertical vortex small.

As a fundamental research to find out the condition that the separated boundary layer returns to the pier surface once again, we experimented with wooden models of triangular form set in our wooden smooth open channel with rectangular section. Results obtained are as follows;

The stability of the boundary layer separated from the model surface breaks down at the distance about 2.6 cm beyond the separation point (the summit) of the model, and then the disturbance develops from this point with a divergent angle 15°. The distance 2.6 cm above described is independent of the velocity and disturbance of the general stream, but the divergent angle 15° increases a little as the stream velocity increases. However, a certain limit exists in the phenomena above mentioned.

#### 1. 緒言

橋脚で水が壁面に沿うて流れるのは、前頭部附近のみであつて、壁面のある点に達すると流れが壁面から剥離し、そのまま後方に流れ去つてしまうこともあるし、また壁面に復帰することもある。剥離した流れと橋脚壁面との間には鉛直軸の渦を生ずるが、その渦の

範囲が大きいほど前面の堰上高を増すものと考えられ、橋脚軸が流れの方向に対して傾斜する場合特に重要な問題となつてくる。従つて流水が壁面より剥離しない様な橋脚形状を理想とするが、実際には困難なことであるから、剥離した流れはそのまま流れ去らしめずに、出来るだけ速かに壁面に復帰せしめることが望ましい。本文は堰上高を出来るだけ少くする様な橋脚形状を流体力学的に究明しようとする研究の一つとして、剥離した流れの復帰の条件を実験的に求めたものである。

\* 昭 25.5.28. 土木学会第 6 回年次学術講演会にて、“橋脚に関する流体力学的研究、第 2 報”として発表

\*\* 文部教官、京都大学工学部土木工学教室勤務

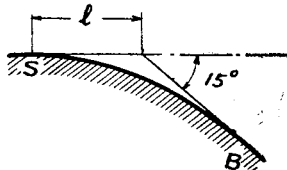
\*\*\* 建設技官、建設省近畿地方建設局勤務

2. 剥離流の復歸に関する諸説

(1) 谷一郎教授の考え方<sup>1)</sup> 剥離点における境界層外の速度を  $V$ , 運動量厚を  $\theta$ , 動粘性係数を  $\nu$  とする。層流剥離は粘性作用  $\rho\nu(V/\theta)$  に対し圧力上昇  $(dp/dx)\theta$  がある割合を越す時に起るのであるが, 更に同時に圧力上昇  $(dp/dx)\theta$  に対し前進駆動の運動量  $\rho V^2$  がある割合を越す時に表面復歸が行われるものとするれば, 結局, 局部的に剥離した層流境界層が層流のまま表面に復歸する条件として, 層流剥離点における Reynolds 数  $R_\theta = V\theta/\nu$  がある臨界値を越すことが必要となる。即ち  $R_\theta$  がある値になれば局部的に剥離した流れは復歸するであろうというだけで, どの点で復歸するかということには何等触れていない。

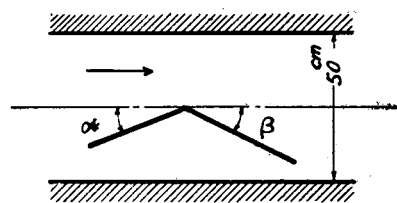
(2) Jacobs & Doenhoff の考え方<sup>2)</sup> これは谷氏の考え方に比べると遙かに幾何学的である。即ち図-1 で流れが層流として S 点で剥離し, そのまゝで距離  $l$  まで進むと, その点で層流は乱れ始め, 剥離点における物体表面の切線方向に対し  $15^\circ$  の角度で乱れは拡散し, その線が物体表面に接する点 B が剥離した流れの復歸点であると考え, 剥離点 S の流速を  $V_s$  とすると  $R_l = V_s l/\nu = \text{const.}$  であるというのである。そして空気の場合に対して  $R_l = 70,000$  を与えている。従つて復歸点以後は乱流境界層となるわけであるが, 谷氏の場合は復歸点以後も層流境界層であるという点で異なっている。

図-1 Jacobs and Doenhoff の考え方  
The idea of Jacobs and Doenhoff.



(3) 前川一渥美の実験<sup>3)</sup> 両氏は J-D\* の考え方

図-2 前川一渥美の実験  
Experiment by Maekawa-Atsumi



1) 谷一郎: "境界層の剥離に誘はれる遷移について", 航空学会誌 第7巻, 昭.15.3, 頁 229.  
2) E. N. Jacobs & A. E. von Doenhoff: "Transition as it occurs with and Following Laminar Separation," 5th. Int. Cong. Appl. Mech., 1938.  
3) 前川力, 渥美正一: "層流剥離に伴う遷移に関する研究", 応用力学学会誌, 昭.23.11, 頁 13~18.  
\* Jacobs & Doenhoff の略記, 以下同様。

を確かめるために, 図-2 の如く断面 50 cm 正方形の N.P.L. 型風洞を用い, その測定洞一杯に表-1 の如き模型をはめこみ, 風洞中心におかれた板の蝶番で折曲げて圧力上昇を生ぜしめて, この点に剥離点を固定し, 風洞中心線に対する前, 後半部の取付角  $\alpha, \beta$  を種々に変化させて復歸点を求め, 次の結果を得ている。

表-1 前川一渥美の実験模型 (単位 cm)  
Experiment-models used by  
Maekawa-Atsumi

	厚 さ	長 さ	幅
木 製 中 空 平 板	5	60	50
ジュラルミン製平板	0.7	70	50

いずれも後半 30 cm の部分が蝶番で前半部と接合されていて, この点を中心として折曲げることが出来る。

1. 層流剥離流の表面復歸の過渡的過程として J-D の様な考え方が成立するが, 定常的過程としては剥離流下流に逆流渦を生じ, これが剥離流を吸着けている。
2. 層流剥離流の安定の破れる Reynolds 数  $R_l$  は 25,000 で, 気流の乱れには関係がないが, 剥離点の境界層の Reynolds 数が 1200 程度以下では剥離流の安定は破れない。
3. 安定が破れて後の乱れの拡散角度は気流中の乱れが大きいほど大である。

(4) 噴流の擾乱による拡散<sup>4)</sup> 乱れの拡散角度については, Tollmien の解があるので, 参考のために結果だけを述べる。即ち静止流体の中へ同じ流体が噴出する場合, これを 2 次元的に考え, 噴流の内部及び外部の圧力は等しく, 噴流の擾乱による拡散は噴流方向に対し直線的であると仮定して計算した結果は次の様である。

1. 一様な流れが静止流体と隣合っている場合は, 噴流拡散角度は一様な流れの側へは  $4.7^\circ$ , 静止流体側へは  $9.8^\circ$  となる。
2. 静止流体内へ噴出する場合は, 両側へ夫々  $6.8^\circ$  である。

これらの値は J-D 及び前川一渥美の実験値よりかなり小さいが, 剥離した境界層の剥離点における流れの方向の圧力勾配を無視して計算したために生じた誤差であると考えられる。

3. 著者の実験

(1) 実験装置 この実験は京大工学研究所内の檜

(4) W. Tollmien: "Berechnung turbulenter Ausbreitungsvorgänge," Z.A.M.M., 1926, S. 468~478.

製水路(長さ 16 m, 有効水路幅 40 cm, 有効水深 18 cm)を用いて行つた。通水方法としてはポンプでヘッドタンクに揚水し, タンク内の水位を一定にして一定流量を流出管を通じて流出せしめた。勿論流出管の調節弁によつて, 通水流量を適当に調節することが出来, 水路下端の小型引上扉の操作と相俟つて, 水路内の水深と流速を調節した。

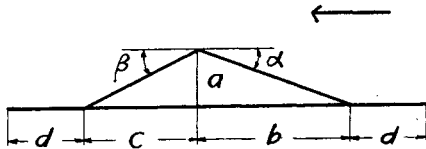
剝離を起させるために用いた模型は 図-3 の如きもので,  $\alpha=10^\circ$  を固定し,  $\beta$  を 表-2 の如く 7 種とした。模型の楔形の部分には高さ 12 cm の檜材を用い,

表-2 著者の模型寸法(単位 cm)

Dimensions of the models  
used by the authors

$\beta$	$8^\circ$	$9^\circ$	$10^\circ$	$11^\circ$	$12^\circ$	$13^\circ$	$14^\circ$
a	5.57	6.26	6.95	7.63	8.32	9.00	9.68
b	31.57	35.49	39.39	43.28	47.16	51.03	54.38
c	39.61	39.51	39.39	39.26	39.13	38.97	38.81
d	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00

図-3 著者の模型  
Models used by the authors

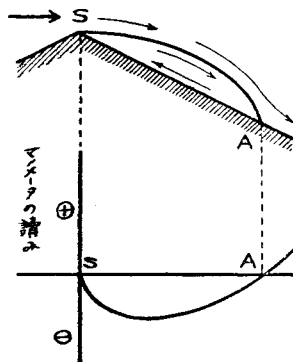


これに当てた裏板には厚さ 1 cm, 高さ 12 cm の杉板を用い, いずれも表面は鉋で平滑に仕上げた。模型頂点は特に尖鋭にし, 剝離点をこの点に固定させる様にした。

次に壁面流速の測定には, 直径 1 mm のピトー管を用い, 静圧管は同じ直径のものを動圧管の下方 1 cm のところに置いた。マノメーターは  $1/10$  の勾配をつけて設置し, 1 mm 目の尺度で測定する様にした。

(2) 実験方法  
空気の場合に対する前川一滯美の実験では, 層流剝離点より復帰点までの間に逆渦流を生ずることが認められる。

図-4 模型表面におけるマノメーターの読み  
Manometer-readings on the model surface



この事実が水の場合にも成立するとし, 模型表面でのマノメーターの読みを考えると 図-4 のようになる。即ち流れが剝離する S 点では, 上流よりの流れと下流から逆流して来た流れとが衝突して, マノメーターの読み(総圧と静圧の差)が零となり, その後は逆流するから負となる。復帰点 A では上流からの流れが上下流側へ分岐するので, 再び読みが零となる。従つてピトー管を模型表面に沿つて移動してゆき, マノメーターの読みが零となる点を求めて, 剝離流の復帰点とみなすことにした。

この場合ピトー管を移動させる深さは, 深さ方向における流速分布がなるべく均一で, 水面の少しくらいの変化があつても, それに影響されないことが望ましい。それで水路中央における深さ方向の流速分布を測定したが, 図-5 の様な結果を得たので, ピトー管を動かす位置を水底より 10 cm と決定した。

次に水深 11 cm の場合に深さ 10 cm の位置で水路に直角方向の流速分布を測定して 図-6 を得た。この図から流速が一様な部分から減少し始める点を 12.4 cm と認め, こゝに模型の頂点を置くことにした。

(3) 実験結果  
上述のようにして, 水路中央における表面流速が 24.1, 23.2,

図-5 水路中央における深さ方向の流速分布  
Velocity distribution along the vertical line in the centre of channel

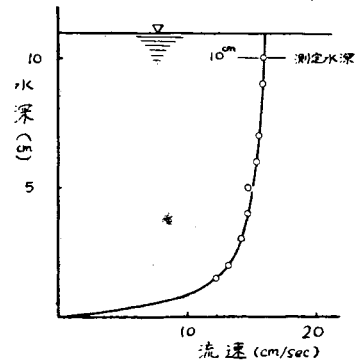


図-6 水路に直角方向の流速分布  
(水深: 11 cm, 測定位置: 水底より 10 cm)  
Velocity distribution along the horizontal line perpendicular to the channel.  
(Water depth: 11 cm, Measured position: 10 cm above the channel bed)

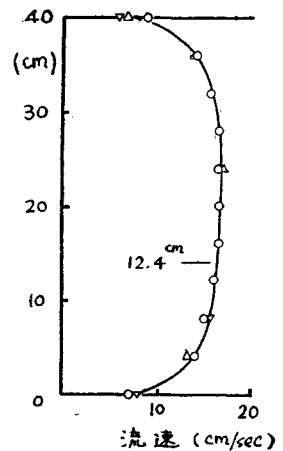
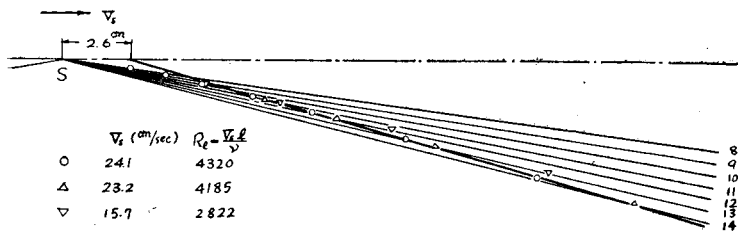


図-7 剥離流の復帰点の位置

Positions where the separated flow returns to the model surface



15.7 cm/sec の3つの場合について復帰点を求めた結果は、図-7 のようであつて、次の事実が認められる。

1. 剥離した流れが再び模型表面に復帰する点は、水路中央の表面流速  $V_s$  が遅くなるほど後方に移動する。

2. 各模型の復帰点を結ぶと、J-D 及び前川-渥美の実験の如く一直線とはならず、端が模型頂点即ち剥離点にくる様な曲線となる。しかし角度  $\beta$  の大きい場合だけを考へて復帰点を結べば略々一直線となり、この直線は流速を変えても、大体模型頂点より 2.6 cm の点に集まる。

3. J-D 及び前川-渥美の実験の如く、剥離点より層流のままで、 $l$  だけ進み、その点で層流の安定が破れ、乱れは角度  $\phi$  にて拡散するものとする、表-3 の様になる。従つて  $R_L$  は大体 3000~4000 に変化し、 $\phi$  は J-D が与へた拡散角度  $15^\circ$  とよく一致している。

表-3  $R_L$  及び  $\phi$  の値  
Values of  $R_L$  and  $\phi$

水路中央における表面流速 $V_s$	$R_L = \frac{V_s l}{\nu}$	$\phi$
24.1 cm/sec	4320	$15.75^\circ$
23.2	4185	$15.45^\circ$
15.2	2822	$14.6^\circ$

写真-1

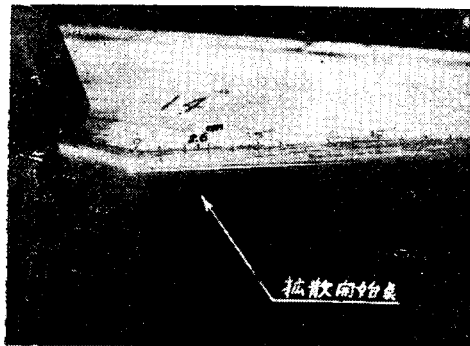


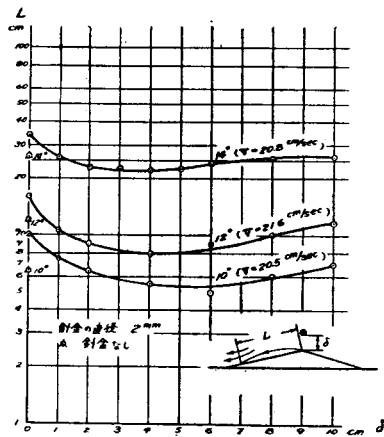
写真-1は  $\alpha=10^\circ, \beta=14^\circ$  の模型について、頂点附近より注射針の先端から赤インキを流し、赤インキの細線が乱れ始める位置を確かめたもので、明かに頂点より2.6cmの点で乱れ始めており、2.及び3.の事実を実証している。

4. J-D 型の現象は角度  $\beta$  が大きいとよく認められる

が、 $\beta$  が小さくなると認め難くなる。その限界は本実験では 図-7 より  $\beta=11^\circ$  と推定される。

5. 流れに攪乱がある場合を調べたのが 図-8, 9 である。攪乱を与えるために、模型頂点のところに金網を置いたが、水が堰きあげられて具合が悪いことを知つたので、結局頂点より距離  $\delta$  だけ離れた位置に針

図-8 剥離流の復帰点に対する攪乱の影響  
Effects of disturbance on the position where the separated flow returns to the model surface



金を置き、 $\delta$  の変化によつて攪乱の程度を変えるようにした。図-8 は  $\beta=10^\circ, 12^\circ, 14^\circ$  の場合について直径 1mm の針金を置く位置  $\delta$  を種々に変化し、復帰点を調べた結果であるが、攪乱の影響が大きくひどくのは大体  $\delta=5$  cm 以下であることがわかる。それで水路中央における表面直流速が 19.2 及び 20.2 cm/sec の場合について、夫々  $\delta=1, 3, 5$  cm 及び  $\delta=1, 2, 4$  cm として復帰点を調べた結果が 図-9 (a) 及び (b) である。かくして流れに攪乱を与えてもやはり J-D 型の現象が起ることを確かめ、表面流速及び  $\delta$  が異なつても、復帰点を結ぶ直線は模型頂点より 2.6 cm の 1 点に集まるといふ非常に興味ある結果を得た。この事実は前川-渥美の実験と定性的に一致す

図-9 攪乱を与えた場合の剥離流の復滞点の位置  
Positions where the separated flow returns to the model surface, when disturbance is given

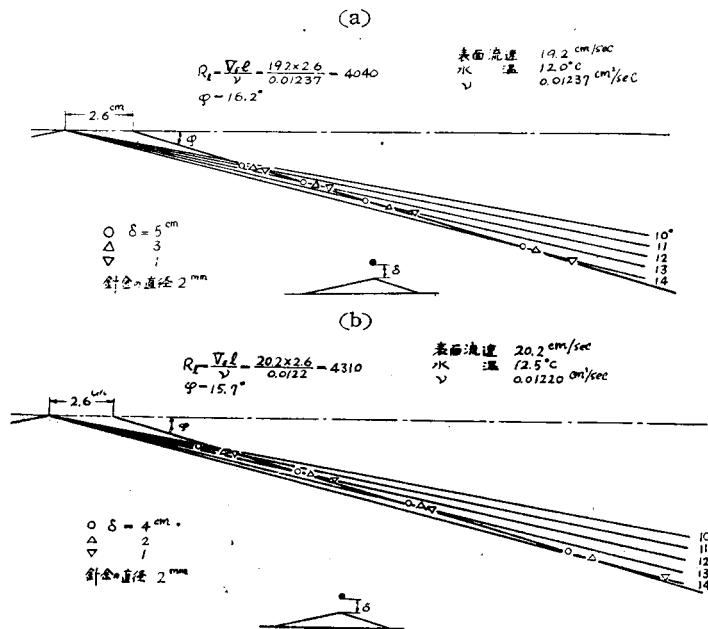


表-4 攪乱を与えた場合の  $R_i$  及び  $\phi$  の値  
Values of  $R_i$  and  $\phi$ , when disturbance is given

水路中央における表面流速 $V_s$	$R_i = \frac{V_s l}{\nu}$	$\phi$
19.2cm/sec	4040	16.2°
20.2 "	4310	15.7

るが、拡散角度は前川一瀧美の実験の如く変化せず、表-4 の如く略々一定となつた。

4. 実験結果と橋脚との関連

理想流体の無渦運動では、流線に沿つて Bernoulli の式  $p + \rho V^2/2 = \text{const.}$  が成立する。この式はエネルギー保存の法則であつて、流体の小部分に働く圧力差によつてなされる仕事が、その小部分の運動のエネルギーの変化に等しいことを示している。そこで対称物体の表面における流れの状態を考えてみると、前の激み点から最低圧力点まで圧力の降下に従つて加速され、最低圧力点から後の激み点までは圧力が上昇し減速される。理想流体の無渦運動では、前後の激み点における圧力は相等しいから、後の激み点に達した時には、前の激み点から最低圧力点までに得た運動エネルギーを失つてしまうことになる。実際上は、粘性によつて物体表面に接した境界層内でエネルギーが散逸される。それで上述の最低圧力点に達したときには、理

想流体の場合に比べて運動エネルギーがある程度減少しており、到底後の激み点まで達することが出来ずに途中で運動エネルギーが零となり、そこで流体は静止してしまう。すると圧力が上昇して流体は最低圧力点へ向つて逆流せざるを得ないことになり、上流から来る流れと衝突して流れは物体表面から剥離し後方へ流れ去ることになる。この様に考えると、剥離は最低圧力点後方の圧力上昇部分で起ることが理解され、最低圧力点が後方にあるほど、剥離点も後方に移ることが推察される。

我々は前報告<sup>5)</sup>において、橋脚前頭部における曲率変化が強いほど最低圧力点が前方に移ることを確かめたが、上述の考察によれば、剥離点もそれに従つて前方に移動することがわかる。しかも本実験によれば剥離流と物体表面とのなす角が剥離点

で11°以上であれば、J-D現象が予想され、その剥離点が極端に前方にあれば、乱れの拡散する線が物体表面に達しないこともあるはずである。換言すれば、物体表面より剥離した流れが表面に復帰しないで、そのまま後方に流れ去つてしまい、広い範囲に鉛直軸の渦を生ずることもあると考えられる。

5. 結語

本実験によつて、空気の場合に認められる J-D 型の剥離現象が水の場合にも認められたが、それにはある限度のあることがわかつた。この結果から、橋脚前頭部の形状と橋脚側面に出来る鉛直軸の渦の範囲などの関係、ひいては橋脚前面の堰上高の程度などを考察する際の有力な手掛りを得ることが出来た。

しかし本実験では物体表面が滑らかな場合のみを取扱つたので、表面の粗度が大きい場合どうなるかはよくわからない。それに本来は2次元流として実験すべきものであるが、種々の事情で開水路を用いたので、水路底面の影響がある程度加わつている。これらはいずれも将来の研究に俟ちたいと思つている。

本研究は文部省科学研究費による“水理構造物の防災工学的研究”の一部であつて、終始格別の御指導を賜つた石原藤次郎教授に深謝の意を表する次第である。  
(昭.26.2.7)

5) 杉本修一, 沼田裕: “橋脚に関する流体力学的研究(第1報)”, 土木学会誌, 昭.25.10, 頁9~12.