

## 突合せ溶接継手の許容応力について

正員 工学博士 小 西 一 郎\*  
准員 西 村 昭\*\*

## ON THE ALLOWABLE STRESS OF BUTT WELDED JOINTS

(JSCE Feb. 1952)

Dr. Eng., Ichirō Konishi, C. E. Member, Akira Nishimura, C.E. Assoc. Member

**Synopsis** In the design of welded steel bridges, the fatigue resistances of welded joints must be considered first of all. But, in our country, there is no design specifications for welded steel bridges in which the fatigue strengths are taken into consideration.

For the purpose to contribute to the design of welded steel bridges, the authors have performed the fatigue tests on specimens of X and V butt welded joints. This paper is a report on the test results, including (1) the authors' empirical formulas for the endurance limits of the joints; (2) the allowable endurance limits for the same joints suitable for our present welding technique, considering differences between shop and field welding, and highway and railway bridges; and (3) the comparison between (2) above and the allowable endurance limits specified in other countries, for example U. S. A. and Germany.

**要旨** 本文は、これまで著者が行つてきた突合せ溶接継手の疲労試験結果に基づいて、わが国の現状に則した許容時間強度線を提案したもので、現場溶接と工場溶接との相違、道路橋と鉄道橋との別等を考慮した。最後に著者の提案をドイツ、アメリカ等の現行示方書の規定と比較したものである。

## 1. 緒 言

溶接橋梁の設計に当つてまづ第1に考慮すべきことは、溶接継手の繰返し荷重に対する耐久性の問題である。従来わが国においても溶接継手の疲労試験は行われてきたが、溶接橋梁設計に必要な許容応力を定めるためには実験資料が少く、また、それらの間に系統的な一貫性を見出すことができない。諸外国において全溶接橋梁が多数建設されているにもかかわらず、わが国においては繰返し及び衝撃荷重に対する信頼性の欠如から、全溶接橋梁の建設に躊躇している現状にある。これはもちろんわが国の溶接技術の信頼性の問題にもよるが、また一方には現在の溶接技術を基礎とした溶接橋梁設計示方書が存在しないことにも起因している。溶接技術の進歩は全溶接橋梁建設の機運に益々拍車をかけることは明らかで、早晚わが国においてもアメリカ、ドイツに比肩する溶接橋梁設計示方書の決定がなされることを信ずる。

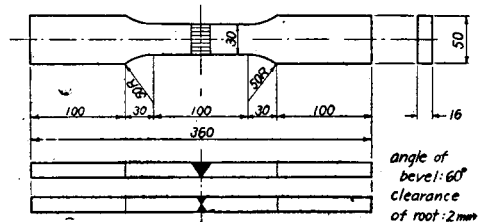
著者はかかる現状に鑑みて、基本継手について疲労試験を行つているが、そのうち上限応力が引張の場合の突合せ溶接継手について、一応の纏まりを得たので、ここに発表する次第である。

## 2. 疲労試験

a) **使用試験機** 疲労試験は京大工学研究所に設置してある Losenhausen Fatigue Testing Machine (UHS型)によつて行つた。引張圧縮荷重の繰返し速度は毎分400, 600, 800, 1200回の4段可変であるが、今回の試験ではこのうち800回を用いた。

b) **試験片** 図-1の形状を有するX及びV継手で、静引張試験に用いた母材試験片も同一形状寸法である。材質は鋼板SS41、厚さ16mmである。溶接には神戸製鋼B-2電極棒を用い、直流電弧溶接で、ビードはX型では片面より4mmφ棒1層、5mmφ棒2層、他面より5mmφ棒3層、V型では4mmφ棒1層、5mmφ棒5層である。なおV型では裏溶接

図-1 試験片



\* 京都大学教授, 工学部土木工学教室

\*\* 京都大学文部教官, 工学部土木工学教室

は施していない。両型とも補強盛はグラインダー仕上げを行つたが、母材厚まで削られていないので、繰返し応力に対する効果は削らないものと同等と見なされる。

c) 試験方法 突合せ継手の疲労試験は次の4種類の繰返し直応力について行い、応力繰返し数  $n=2 \times 10^6$  に対する時間強度を求めた。

繰返し応力: (1)  $-\sigma_{max} \sim +\sigma_{max}$ , (2)  $-6\text{kg/mm}^2 \sim +\sigma_{max}$ , (3)  $0 \sim +\sigma_{max}$ , (4)  $+6\text{kg/mm}^2 \sim +\sigma_{max}$

本実験は比較的大型の試験片を用いて、引張、圧縮応力により上述の4種の繰返し応力状態(1)~(4)によつて疲労試験を行つたのが特長と言えるだろう。

d) 試験結果及びその考察 繰返し応力の種類別に

各試験について得られた上限応力  $\sigma_{max}$  と破断に至る応力繰返し数  $N$  をそれぞれ両対数グラフの縦、横軸にとり、いわゆる  $S-N$  曲線を描くと、図-2のごとく共通の傾斜  $K=0.106$  の直線が得られる。

いま

$$\sigma_D = \sigma_{max} (N/n)^K \dots\dots\dots (1)$$

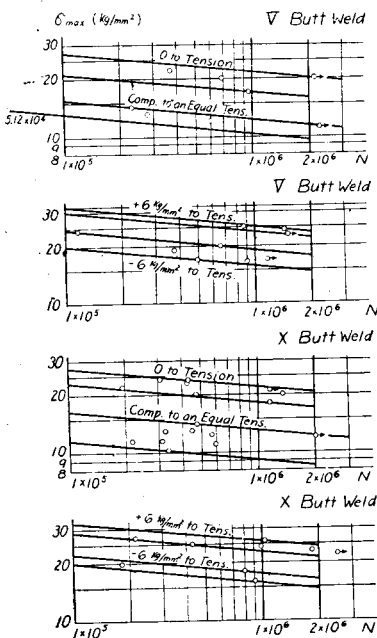
ここに、 $n$ : 指定繰返し数、 $\sigma_D$ :  $n$  に対する時間強度

を用いて  $n=2 \times 10^6$  に対する時間強度を求め、これを4種の繰返し応力(1)~(4)ごとにX, Vを含めて上限応力の総平均値を求めると表-1の  $\sigma_{max}$  に示した

表-1 時間強度 ( $n=2 \times 10^6$ )

応力	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$r$
(1)	-10.4	10.4	-1
(2)	-6	16.0	-0.375
(3)	0	18.4	0
(4)	+6	22.7	+0.264

図-2 V及びX継手のS-N曲線



値となる(以下応力の単位はすべて  $\text{kg/mm}^2$  とする)。また静引張試験結果は表-2の通りである。

表-2 静引張試験結果

試験片	$\sigma_S$	$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\epsilon$ (%)	破断箇所
母材	24.3	44.7	77.4	46.6	ほぼ平行部分中央
V型	24.8	42.4	84.5	-	すべて平行部分 素材部
X型	24.5	42.8	77.7	26.4	

註:  $\sigma_S$ : 降伏点応力,  $\sigma_B$ : 引張強さ,  $\sigma_T$ : 真破断応力,  $\epsilon$ : 伸率 (G.L.=5cm)

比較のため諸外国の試験結果を表-3に掲げる。ただし表中の  $\sigma_u$  は基本強度,  $\sigma_w$  は反復強度である。

表-3 諸外国の実験結果

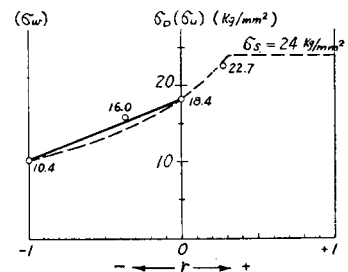
実験者	開先	母材厚 (mm)	母材		$\sigma_u$	$\sigma_w$
			$\sigma_S$	$\sigma_B$		
Wilson 他	1)	V	19.05	21.7	38.3	16
	2)	U	22.23	25.4	44.6	15.8
	3)	X	"	21.6	41.4	14.8
"	3)	U	"	20.7	43.8	15.1
"	3)	X	"	22	42.3	14.9
"	3)	X	"	"	"	16.2
Haigh	4)	V	14.3~15.9	"	"	17.5
Roš	5)	V, X	24	"	"	14.0 (7.5)
Kommerell	6)	V	"	40	"	18.0
	6)	V	"	40	"	13

註: 補強盛はそのまま、引張圧縮繰返し応力による  $n=2 \times 10^6$  の時間強度を示す。

著者の実験結果ではX型とV型との間に判然たる優劣をつけ難く、両型に対する実験値の相違は本質的なものというよりは偶発的なものを見ることができ

る。図-2に見るように溶接試験片ごとに相当のばらつきがある。同一繰返し応力状態で破断に至る繰返し数  $N$  の小なるものは、その破断面に必ず溶接上

図-3  $\sigma_D$  と  $r$  との関係



の欠陥が見出される。この点、溶接の良否は繰返し応力に極めて鋭敏である。なお破断状況を眺めると、底部、変質部、補強盛端のいずれかより破断を生じ、溶接部内部に気泡、スラグ、溶込み不良等がある場合は底部より、溶接部良好で、補強盛端に急激な断面変化がある場合には切欠き効果を生じて補強盛端より、ま

た表面仕上げ, 溶接共に良好な場合は変質部にて破断を生じた。

3. 時間強度線

$r = \sigma_{min}/\sigma_{max}$  とすれば繰返し応力 (1)~(4) に対する  $r$  は表-1 に示すごとくである。いま  $r$  を横軸,  $\sigma_D (= \sigma_{max})$  を縦軸にとつて 表-1 の値を記入すると 図-3 が得られる。両振領域すなわち  $0 \leq r \leq 1$  ではこの曲線はほとんど  $\sigma_u$  と  $\sigma_w$  を結ぶ直線(図中実線)に一致する。

また縦軸に  $\sigma_D (= \sigma_{max})$ , 横軸にそれに対応する  $\sigma_{min}$  をとると, 図-4 のごとき時間強度線が得られる。この線を表わすために直線式, 曲線式等多数の研究者の提案式があるが, 図中表-1 の値を示した○印の著者の実験結果から判るごとく, 直線式は少くとも両振領域ではあてはまらない。しかし片振領域では  $\sigma_w, \sigma_u$  を結ぶ直線が実験結果によく一致する。

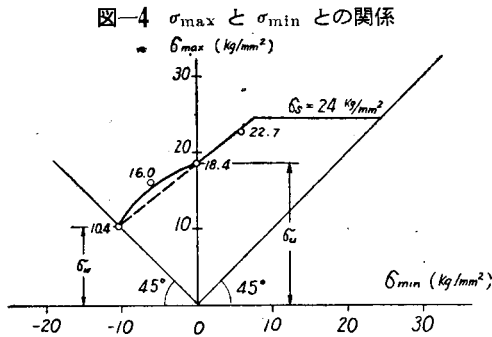


図-4  $\sigma_{max}$  と  $\sigma_{min}$  との関係  
 $\sigma_{max}$  (kg/mm<sup>2</sup>)

すなわち  $n = 2 \times 10^6$  の時間強度線は  
 両振領域:  $\sigma_D = \sigma_u + (\sigma_u - \sigma_w)r, 0 \leq r \leq 1$  .....(2)  
 片振領域:  $\sigma_D = \sigma_u + (\sigma_u - \sigma_w)(\sigma_{min}/\sigma_w) \leq \sigma_s$  .....(3)

で表わすのが適当と考える。式 (2) は Weyrauch の式に外ならない。

式 (3) を書きなおすと

$$\sigma_D = \sigma_u \left( 1 - \frac{\sigma_u - \sigma_w}{\sigma_w} r \right) \leq \sigma_s, 0 \leq r \dots\dots(3')$$

式 (3') を 図-3 上に画けば点線の如くなる。

式 (3) または (3') で  $\sigma_D \leq \sigma_s$  としたのは, 静力学的に生ずる変形に対する制限条件である。

4. 許容時間強度

実際設計計算に用いる許容時間強度線としては, まづ簡単なことが必要条件である。また一方許容強度線はいかなる  $r$  に対しても同一の安全率を有していることが好ましく, このことは構造物の安全率をあらゆる部材について等しく設計するためにも必要なことである。許容時間強度の決定に当つて考慮すべき安全率の

問題については, ここではとりあえず在来の安全率の考え方によることとし, 超過確率を導入した統計的考察については別の機会にゆずることとする。

ここに採用する安全率  $\nu$  としては, 静荷重を受ける鋼橋の設計において, 許容応力  $\sigma_z$  が降伏点  $\sigma_s$  に対して有する安全率を用いるものとする。すなわち道路橋, 鉄道橋に対してそれぞれ  $\nu = 24/13 = 1.845, \nu = 24/12 = 2$  とする。従つて許容応力は,

$$\sigma_{D,Z} = \frac{1}{\nu} \sigma_D \leq \sigma_Z \dots\dots(4)$$

溶接の許容時間強度は (1) 構造物の性質によつて作用する繰返し荷重の回数によつても異なり, また (2) 工場溶接, 現場溶接によつても異なる。これ等の点を考慮して許容応力を求めると次の通りである。

(1) 鉄道橋においては, 床組構造上その死荷重は割合小さく, これに反し活荷重は大きく, 設計荷重に近い列車荷重によつて繰返し荷重が作用する。これに反し道路橋においては, 死荷重が割合大で活荷重による応力は死荷重に比し小さく, また設計荷重に等しいか, またはこれに近い大きさの荷重の通過の頻度は, 鉄道橋に比し小である。これ等の諸点を考慮して, 橋種によつて指定繰返し数  $n$  に違つた値を用いている。いまここにはアメリカ溶接橋梁示方書で採用せられている値を用い, 鉄道橋では  $2 \times 10^6$  道路橋では  $6 \times 10^6$  を用いるものとする。

さて 図-2 より  $S-N$  曲線の傾斜を与える  $K$  の値は同種類の溶接継手については  $r$  の値に拘らず一定と見なされる。従つて指定繰返し数  $n, n'$  に対する時間強度をそれぞれ  $\sigma_D, \sigma'_D$  とすれば, 式 (1) より

$$\sigma'_D = \sigma_D (n/n')^K = \alpha_1 \sigma_D \dots\dots(5)$$

上式において  $\sigma_D$  は  $n = 2 \times 10^6$  に対する時間強度とすれば, 本実験結果より突合せ溶接継手については  $K = 0.106$  であるから, 指定繰返し数  $n'$  に対する時間強度  $\sigma'_D$  は

$$\sigma'_D = (2 \times 10^6/n')^{0.106} \cdot \sigma_D, \alpha_1 = (2 \times 10^6/n')^{0.106} \dots\dots(5')$$

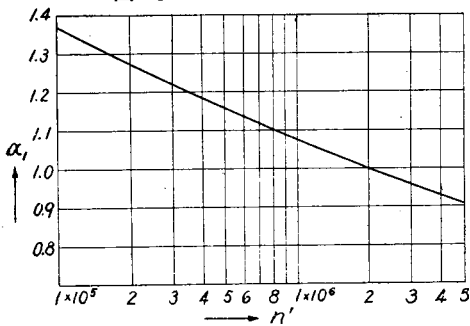
によつて求めることができる。 $n'$  と  $\alpha_1$  との関係は 図-5 の通りである。

(2) 次に現場溶接は工場溶接より各種条件が悪くなるため疲労強度も低下することが考えられる。いま現場溶接の時間強度と工場溶接の比を  $\alpha_2$  とすれば, 現場溶接の突合せ継手の許容応力は, 指定繰返し数を  $n'$  とするとき

$$\sigma_{D,Z} = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\nu} \sigma_D \leq \sigma_Z \dots\dots(6)$$

ここに  $\alpha_2$  の値は現場溶接施工の状態によつて異な

図-5  $n'$  と  $\alpha_1$  との関係



るものであるが、ここには  $\alpha_2=0.85$  を採用することにする。この値は昭和 15 年 4 月制定のわが国の電弧溶接鋼道路橋設計及び製作示方書案において引張を受ける突合せ継手の現場及び工場溶接の許容応力比  $0.6/0.7=0.856$  にはほぼ一致する。また著者の実験において、各種の  $r$  に対する  $n=2 \times 10^6$  の時間強度の最小値、平均値、及びその比を示すと表-4 の通りである。最小値と平均値の比は表に示した通りほぼ  $0.85 \sim 0.95$  となるが、 $\alpha_2=0.85$  は本実験においては、工場溶接の時間強度の最小値と平均値の比の最低値に一致したことになる。

表-4 (単位: 応力  $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

応力	$r$	最小値	平均値	比
(1)	-1	9.1	10.4	0.875
(2)	-0.375	14.7	16.0	0.918
(3)	0	15.7	18.4	0.853
(4)	+0.264	21.2	22.7	0.934

式 (6) の  $\sigma_D$  として式 (2) 及び式 (3) を用いることは、実験値に忠実ではあるが、このため両振領域と片振領域と異なる式を用いなければならない煩雑さが生じて来る。図-4 に示した通り式 (3') を両振領域まで延長して用いると、 $r=-1$  及び  $r=0$  で実験値に一致し、その中間においてこの誤差はいずれも安全側となる。従つて計算上からも式 (2)、(3') の両式を用いるよりは式 (3') のみを用いる方が好ましいと考えられる。

式 (6) に式 (3') を代入すると、突合せ溶接継手の許容応力は

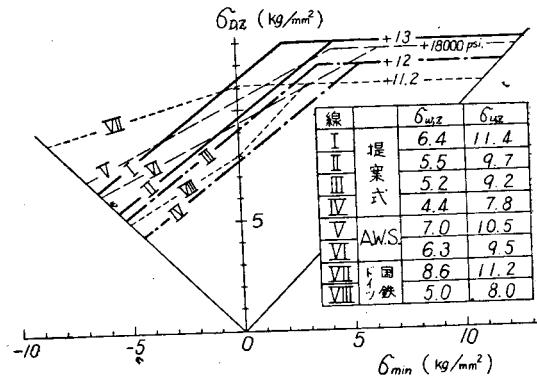
$$\sigma_{D,Z} = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\nu} \frac{\sigma_u}{1 - \frac{\sigma_u - \sigma_w}{\sigma_w} r} \leq \sigma_Z, \quad -1 \leq r \leq 1 \quad \dots\dots\dots(7)$$

本実験で得られた  $\sigma_u=18.4 \text{ kg}/\text{mm}^2$ ,  $\sigma_w=10.4 \text{ kg}/\text{mm}^2$  (これらは  $\alpha_1=\alpha_2=1$  の場合の値である) を代入すれば

$$\sigma_{D,Z} = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\nu} \frac{18.4}{1 - 0.77 r} \leq \sigma_Z, \quad -1 \leq r \leq 1 \quad \dots\dots\dots(8)$$

式 (8) によつて、鉄道橋、道路橋の指定繰返し数  $n$  をそれぞれ  $2 \times 10^6$ ,  $6 \times 10^5$  と仮定した場合の許容時間強度線を求めると図-6 の鎖線 II, IV 及び実線 I, III に示す通りである。同種類の線のうち上方のもの III, I がそれぞれ工場溶接に対するもの、他が現場溶接に対するものである。なお図-6 の線 VII, VIII はドイツ国鉄で使用されているもので、VII は裏溶接及び溶接部の機械仕上げを施した突合せ継手の許容時間強度線を、VIII は裏溶接不可能の場合のものを示す。また A.W.S. で規定した  $6 \times 10^6$  回,  $2 \times 10^6$  回に対する突合せ継手の許容時間強度線をそれぞれ V 及び VI で示した。

図-6 許容時間強度線図



5. 突合せ継手断面積の算定

部材軸方向力が  $S_{max}(+)$  と  $S_{min}$  の間を変動する場合の突合せ継手所要面積  $F_D$  は、式 (8) を用いて次式で与えられる。

$$F_D = \frac{S_{max}}{\sigma_{D,Z}} = \frac{1}{\frac{\alpha_1 \alpha_2}{\nu}} \frac{S_{max} - 0.77 S_{min}}{18.4} \geq \frac{S_{max}}{\sigma_Z} \quad \dots\dots\dots(9)$$

但し単位は、 $F_D: \text{mm}^2$ ,  $S: \text{kg}$

従つて

(a) 鉄道橋 ( $n=2 \times 10^6$ )

工場溶接  $F_D = \frac{S_{max} - 0.77 S_{min}}{9.2} \geq \frac{S_{max}}{12}$

現場溶接  $F_D = \frac{S_{max} - 0.77 S_{min}}{7.8} \geq \frac{S_{max}}{12}$

(b) 道路橋 ( $n=6 \times 10^5$ )

工場溶接  $F_D = \frac{S_{max} - 0.77 S_{min}}{11.4} \geq \frac{S_{max}}{13}$

現場溶接  $F_D = \frac{S_{max} - 0.77 S_{min}}{9.7} \geq \frac{S_{max}}{13}$

上式において継手に作用する軸方向力  $S_{max}(+)$ ,  $S_{min}$  (引張: +, 圧縮: -) を代入すれば、直ちに所

要断面積が算定される。

## 6. 結 言

一般構造用圧延鋼材鋼板 SS41 の突合せ溶接継手の引張圧縮疲労試験を行つて次の結果を得た。

(1) 図-2 に見るごとく  $S-N$  曲線は両対数座標上では直線となり、この傾斜は、応力変動の位置に拘らず一定となる。

(2) 従つて式(1)を用いて、実験値を指定繰返し数  $n=2 \times 10^6$  における時間強度に整理することができる。

(3) 両振領域では式(2)に示す Weyrauch 式が、片振領域では式(3)に示す直線式が実験結果によく一致する。

(4) 式(2), (3)に求めた時間強度より許容応力を求めるに当り、安全率  $\nu$  は道路橋、鉄道橋につきそれぞれ 1.845, 2 を用いた。

(5) 指定繰返し数  $n$  の変化による許容時間強度の変化は係数  $\alpha_1$  (図-5) を用い、また現場溶接の許容時間強度は工場溶接の値に係数  $\alpha_2$  を乗じて求めるとし、 $\alpha_2=0.85$  を採用した。

(6) 許容応力  $\sigma_{D,Z}$  は計算の簡便をはかるため、安全側の値を与える直線式(3')を用いることにした。従つて許容応力は式(8)で与えられる。これを図-6に示した。

(7) 従つて突合せ継手の所要断面積は式(9)で与えられる。

本実験に当つてはすべて板厚  $t=16\text{mm}$  の試験片を

用いたが、板厚が異なる場合に対しても突合せ継手に対しては以上の結果は適用できるものとする。

また図-6に見るごとくアメリカ、ドイツの規定では、両振領域における許容応力  $\sigma_{D,Z}$  を直線と与えているが、その傾斜  $(\sigma_u - \sigma_w) / \sigma_w = (\sigma_u / \sigma_w) - 1$  は著者の提案直線より緩である。この傾斜は  $\sigma_u / \sigma_w$  の値に係数するが、表-3に示した諸外国の実験値より見ても、アメリカ及びドイツの規定の傾斜は緩にすぎるものと思う。

本研究は文部省科学研究費による総合研究「溶接及び鉄接構造物の繰返し荷重に対する安全度向上に関する研究」の成果の一部である。

## 参 考 文 献

- 1) W. M. Wilson and A. B. Wilder, Univ. Illinois Bull., No. 310, Jan. 20, 1939.
- 2) W. M. Wilson and co-workers, Univ. Illinois Bull., No. 327, Feb. 25, 1941.
- 3) W. M. Wilson and co-workers, Univ. Illinois Bull., No. 344, Oct. 12, 1943.
- 4) B. P. Haigh, Fatigue Strength of Butt Welds, The Iron and Steel Institute: Symposium on the Welding of Iron and Steel, Vol. II, pp. 795-802, 1935.
- 5) M. Roš and A. Eichinger, The Strength of Welded Connections, 4), pp. 843-866.
- 6) Preliminary Publication of Second Congress, Intl. Assn. Bridge & Structural Engineering, p. 341, 1936.

(昭.26.10.18)

UDC 532.51:627.131

# 巾の拡がる水路に関する実験

准 員 嶋 祐 之\*

## EXPERIMENT ON THE CHANNEL EXPANSION

(JSCE Feb. 1952)

Sukeyuki Shima, C. E. Assoc. Member

**Synopsis** In this experiment the author studied the gradual expansion of the channel, in which the following types of flow were measured by adjusting the bed slope, flux and downstream water level. The first flow is such as to continually change from subcritical to supercritical, the second is supercritical only, and the last is such as to abruptly change from supercritical to subcritical along the longitudinal distance of the channel. Then he compared these results with the theoretical ones.

**要旨** 水路巾の漸次拡がる水路に関し、勾配、流量或いは下流端の水位等を調節する事に依り各種の流れ即ち水路の途中で常流から射流に連続的に遷移する流れ、最初から射流のみの流れる流れ及び射流から常流に断続的に遷移する流れを作り、それ等の流れの特性

を調べ併せて理論との比較を行つたものである。

## 1. 緒 言

巾の変化する水路の流れでは水理的な条件例えば勾配、流量、下流端の水位、巾の拡がり方、粗度係数等の値により上述の如き種々なる流れを得るのであるが、一旦射流が現われれば水路壁より生ずる攪乱の影

\* 東京大学講師、工学部土木教室