

合流部の段波に関する研究

荒木正夫* 富所五郎** 高木茂知***

(昭和54年10月30日受理)

Study of Hydraulic Bores in Confluence

Masao ARAKI, Goro TOMIDOKORO, and Shigenori TAKAKI

In order to understand the characteristics of hydraulic bores in the open channel confluence, model experiments and numerical experiments using the finite element method have been performed. The relative wave-heights (the ratio of the wave-height of bores to the total water depth), the confluent angles and the main channel velocities have been adopted as the affecting parameters on the hydraulic bores in the confluence. The following results are obtained.

Becoming larger the relative wave-heights, for the bores going upstream direction the wave-height ratios (the ratio of the wave-height to the wave-height of bores in the sub channel) and the wave-velocity ratios (the ratio of the wave-velocity to the wave-velocity of bores in the sub channel) become smaller, but for the bores going downstream direction the wave-height ratios become larger and the wave-velocity ratios smaller to some extent of relative wave-heights, and exceeding this limit, the tendency is reversed. Becoming larger the main channel velocities, the wave-height ratios become larger for the bores going upstream direction and smaller for the bores going downstream direction, but the wave-velocity ratios don't change. And becoming larger the confluent angles, the hydraulic bores spread more easily to upstream direction than to downstream direction for the reason that the separation of flow in the confluence differs respectively.

1 序 論

河川合流部は、防災工学上最も重要な箇所の一つであり、そこでの流れの機構を究明することは重要な課題である。本研究では、不定流でも特に急激な流れである段波について扱い、有限要素法を用いた解析方法により精度良く解析を行なうことができたので¹⁾、模型実験と数値実験の両方から合流部における段波特性について考察した。模型実験では、水路形状を簡単に変えることができないので合流部に浸入する段波の相対波高と主水路流

* 土木工学教室 教授

** 土木工学教室 講師

*** 大学院修士課程修了 (現在バンフィックコンサルタンツ㈱)

速の影響を調べ、数値実験では、模型実験で得られたことの裏付けと合流角の影響を調べた。

2 実験水路と測定地点²⁾

川幅 50m, 河床公配 1/1000, 流速 2.0m/s の時, 水深 3.0m の矩形断面を有する河川を想定し, 水平縮尺 1/100, 鉛直縮尺 1/30 とし, 合流角 30° の模型実験水路を造った (Fig. 1). 粗度は棧 (溝型) 粗度³⁾ を水路底面に敷いて人工的につけ検定した結果, マニングの粗度係数 $n = 0.025$ であった. また支水路上流の貯水池面積は約 5.8m^2 である.

実験は, 貯水池に水を貯め水門を急開することにより段波を発生させ Fig. 2 に示される地点の時間的な波高変化を波高計により測定した. またモータドライブを用いて写真の連続撮影も行ない段波の平面的な拡がりを観測した. 実験条件は, 支水路流速を 0 とし, 主水路流速 v , 初期水深 (段波を起こす前の定常状態時の水深を指し M. P. 1 の水深 h_1 で代表させる), 合流部に侵入する段波の波高 (M. P. 4 の波高 ΔH_4 で代表させる) をそれぞれ変えて行なった. 水路床勾配を変えることができないので v が同じ場合でも h_1 を変えると主水面勾配も変わってしまうが, 合流部付近の解析に対しては影響は少ないと見て無視した.

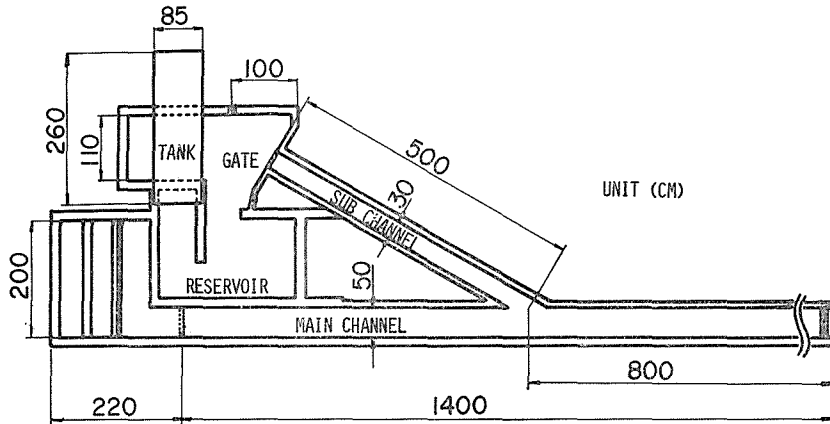


Fig. 1 Experimental channel

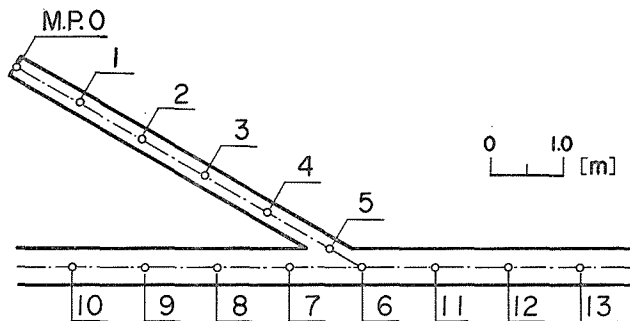


Fig. 2 Measuring points of water-level

3 結果と考察

3.1 実験結果

Table 1 Experimental results

v (cm/s)	h_1 (cm)	ΔH_4 (cm)	$\frac{\Delta H_4}{h_4 + \Delta H_4}$	ΔH_7 (cm)	ΔH_{11} (cm)	$\overline{\omega_I}$ (cm/s)	ω_{II} (cm/s)	$\overline{\omega_{II}}$ (cm/s)	ω_{III} (cm/s)	$\overline{\omega_{III}}$ (cm/s)	q_I (l/s)	q_{II} (l/s)	q_{III} (l/s)
5	3.1	3.0	0.45	1.0	1.7	102.5	64.8	70.6	93.8	88.2	9.2	3.2	8.0
	3.0	4.9	0.58	1.3	3.2	130.4	67.5	73.3	102.4	96.8	19.2	4.4	16.4
	3.0	6.6	0.65	1.7	4.1	151.6	68.7	74.5	112.4	106.8	30.0	5.8	23.0
	2.9	10.0	0.74	2.2	5.6	168.6	74.3	79.8	132.9	127.7	50.6	8.2	37.2
	6.0	3.0	0.31	1.1	1.5	107.9	84.8	89.7	104.7	100.0	9.7	4.7	7.9
	6.1	5.0	0.43	1.5	3.0	124.0	90.1	94.9	118.4	113.7	18.6	6.8	17.8
	6.1	6.8	0.50	2.1	4.4	148.2	89.5	94.7	121.5	116.4	30.2	9.4	26.7
	9.1	3.0	0.24	1.1	1.4	121.0	100.1	104.7	118.4	113.7	10.9	5.5	8.3
	9.1	5.4	0.36	1.8	3.0	141.6	104.4	109.0	128.8	124.1	22.9	9.4	19.3
9.1	6.9	0.41	2.4	4.2	152.3	103.5	108.1	133.6	128.9	31.5	12.4	28.1	
20	3.1	3.1	0.46	1.1	1.5	102.5	59.3	78.0	100.9	81.1	9.5	3.3	7.6
	3.2	5.0	0.57	1.7	2.8	130.4	63.0	81.9	113.4	93.4	19.6	5.4	15.9
	3.1	6.8	0.65	2.2	3.5	151.6	63.4	83.7	125.0	104.2	30.9	7.0	21.9
	3.0	9.8	0.73	2.7	5.0	158.3	68.5	87.7	137.4	117.7	46.5	9.2	34.4
	6.1	2.8	0.30	1.1	1.1	107.9	75.0	94.7	113.3	93.6	9.1	4.1	6.2
	6.1	4.7	0.41	1.8	2.4	124.0	77.1	86.8	126.9	107.2	17.5	6.9	15.2
	6.0	6.8	0.51	2.4	3.7	148.2	76.6	97.1	126.6	106.1	30.2	9.2	23.4
	9.1	3.0	0.24	1.2	1.2	121.0	85.5	104.5	128.8	110.0	10.9	5.1	7.7
	9.1	5.2	0.35	2.0	2.5	141.6	90.6	109.6	140.3	121.5	22.1	9.1	17.5
9.1	6.8	0.41	2.6	3.5	152.3	93.6	112.6	144.2	125.4	31.1	12.2	25.2	
40	9.3	2.9	0.23	1.6	0.5	121.0	66.7	105.1	154.7	114.4	10.5	5.3	3.9
	9.1	5.4	0.36	2.8	1.8	141.6	75.6	114.2	160.9	120.5	22.9	10.6	14.5
	9.2	7.0	0.42	3.5	2.8	152.3	77.8	116.2	164.6	124.9	32.0	13.6	23.0
	9.0	9.2	0.49	4.0	3.9	161.0	80.8	120.3	169.0	128.6	44.4	16.2	33.0

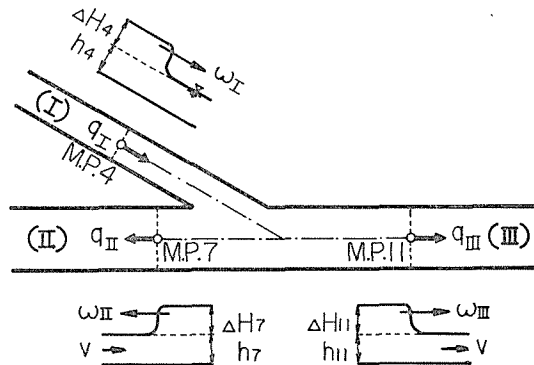


Fig. 3 Explanation of the symbols

Table. 1 に実験結果を示すが、それには Fig. 3 に示される記号が用いられており、支水路を (I) の水路、主水路の合流部より上流側を (II) の水路、下流側を (III) の水路としている。また段波の伝播速度のところでは $\bar{\omega}$ の付いているのが相対波速、付いてないのが絶対波速を示している。 q_I, q_{II}, q_{III} はそれぞれ合流部を出入する段波の流量を示しているがそれについては後程述べることにする。

3・2 上・下流への段波伝播の違い

主水路にインクを流しておき、段波が合流部に到達してからの様子を写真撮影をした結果、上、下流へ伝わる段波の性質の異なるのが認められた。すなわち、上流側へ伝わる段波は、水位が急上昇するため流れの上をはって行く段波であり、下流側へ伝わる段波は、定常状態時の流れを巻き込みながら進行していく流れである。しかし、これらの現象は複雑で段波の伝播の仕方、侵入段波の性質、水路形状、段波侵入前の水理条件など多くの変数が互いに作用し合っている。次に個々の影響を1つずつ考察してみた。

3・3 侵入段波の相対波高による影響

侵入段波の性質として、ここでは相対波高 $\Delta H_4/(h_4 + \Delta H_4)$ で代表させた。すなわち相対波高は全体の水深に対して段波の波高の占める割合を示しており、段波到達以前の流れと比べてどの程度強い流れであるかを示していると考えてもよく侵入段波の性質としては適当であると思われる。

Fig. 4, 5, 6 には、侵入段波に対する上、下流へ伝播する段波の波高比と波速比が相対波高によりどのように変化するかを示されている。ここに波高比はその点の段波の波高と

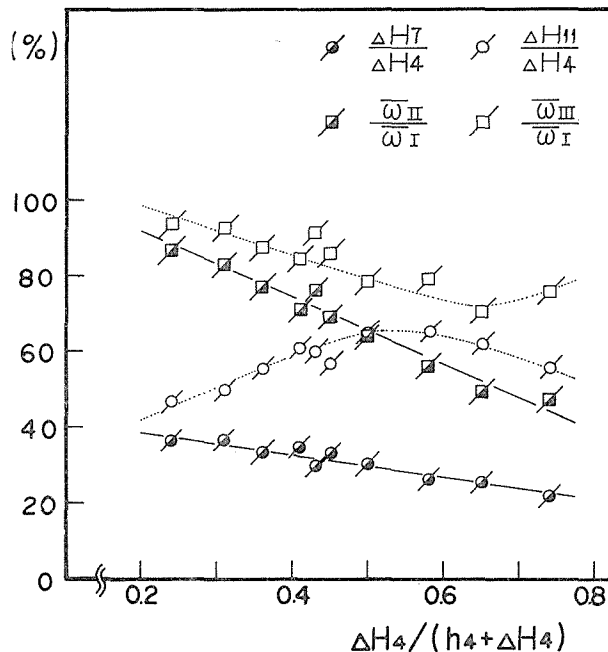


Fig. 4 Influence of relative wave-height ($v = 5\text{cm/sec}$)

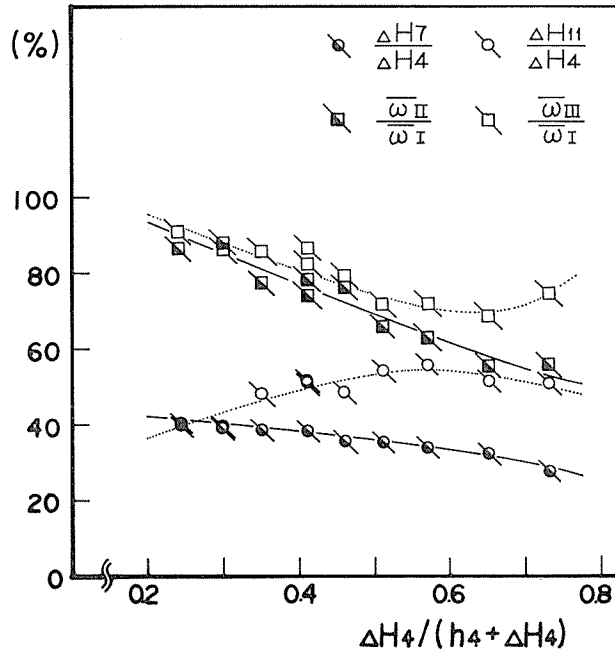


Fig. 5 Influence of relative wave-height ($v = 20\text{cm/sec}$)

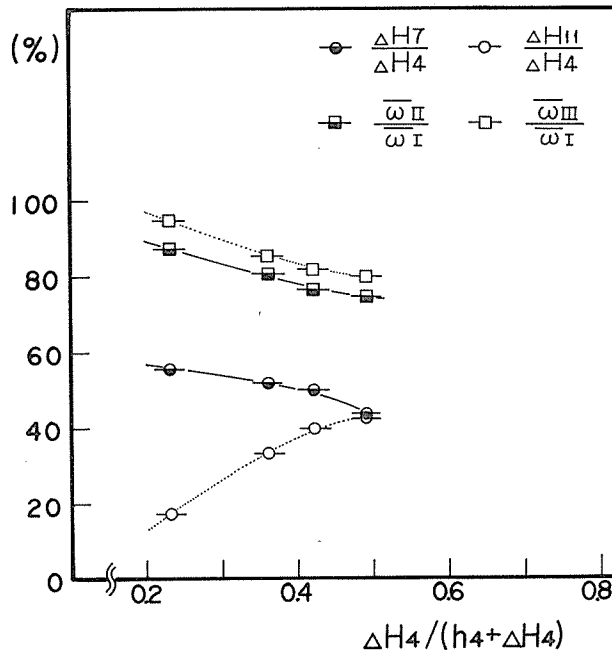


Fig. 6 Influence of relative wave-height ($v = 40\text{cm/sec}$)

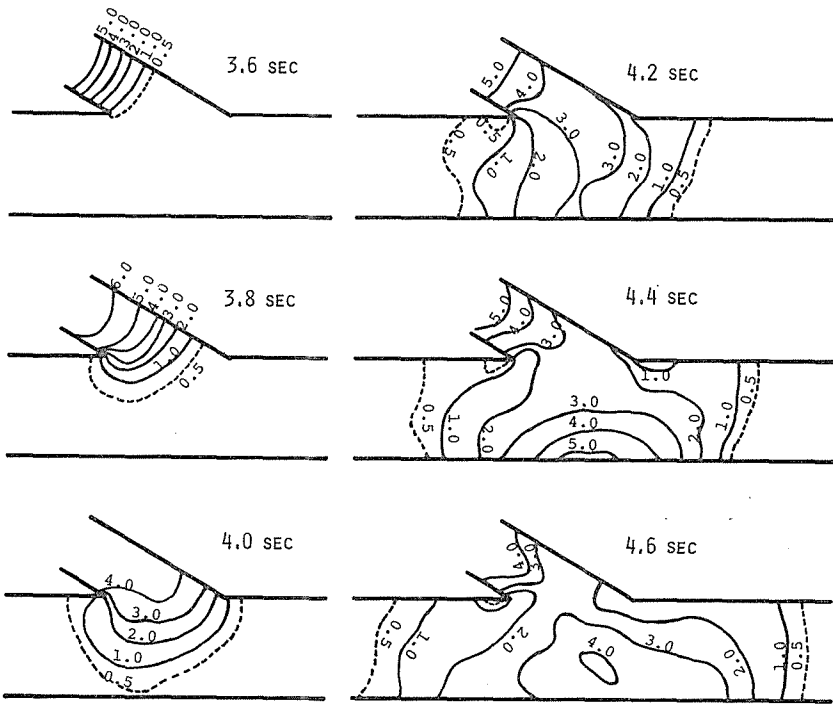


Fig. 7 Expansion of hydraulic bores in the confluence ($h_1 = 9\text{cm}$, $v = 5\text{cm/sec}$)

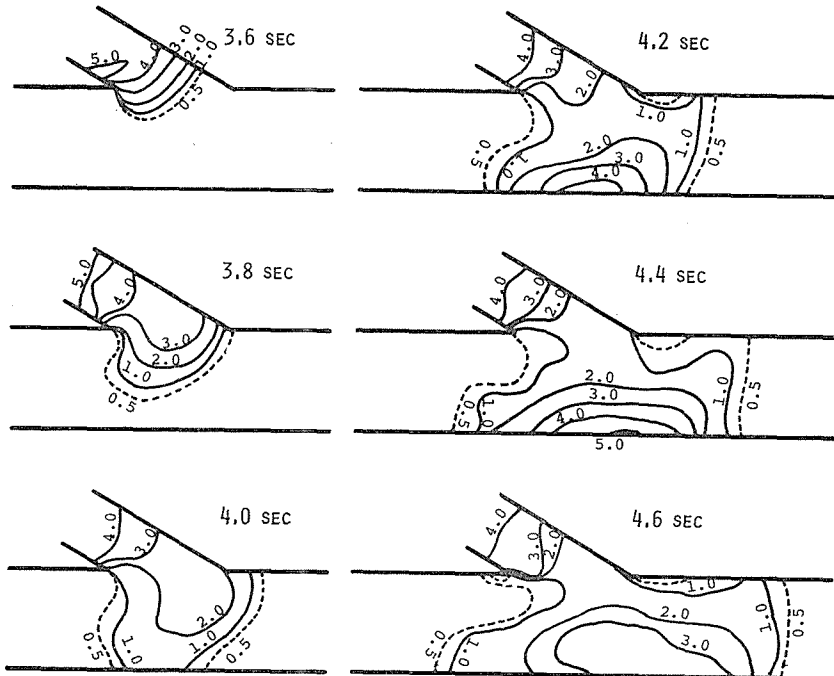


Fig. 8 Expansion of hydraulic bores in the confluence ($h_1 = 3\text{cm}$, $v = 5\text{cm/sec}$)

進入段波の波高との比で波速比は波速のそれらの比を示す。それによると次のようである。

① 上流側へ伝わる段波

i) 相対波高が大きくなると波高比，波速比ともほぼ直線的に減少していく。

② 下流側へ伝わる段波

i) 相対波高が大きくなると波高比は増し波速比は減少する。

ii) 相対波高がある程度大きくなると全く逆の傾向を示す屈曲点がある。

相対波高が変わると合流部での段波の拡がり方がどのように違うか数値実験により調べてみた。水理条件は $v=5\text{cm/s}$ で Fig. 7 は $h_1=9\text{cm}$, $\Delta H_4=5\text{cm}$, Fig. 8 は $h_1=3\text{cm}$, $\Delta H_4=5\text{cm}$ であり，それぞれ等波高線が描かれている。これによると相対波高が大きいと合流部に侵入してきてもあまり拡がらず，合流点開口部（主水路と支水路の接続するところ）の隅角点から流れのはく離領域ができ，特に上流側には合流角が 30° という形状のため段波があまり拡がっていかない。また下流側へもはく離領域のため段波が伝わりにくくなるが流れる幅が狭くなるので波高比は大きくなる。しかし，相対波高が $0.5\sim 0.6$ にまで大きくなると主水路右岸の壁に当たった段波が左岸の方まで反射して影響を及ぼしはく離領域を小さくするので全く逆の傾向を示すものと考えられる。またその時の主水路右岸の壁に沿う波高の分布変化を Fig. 9 に示す。横軸の 0 点は合流点開口部の中心位置であり，(+)，(-) はそれぞれ下流方向，上流方向への距離である。また波高分布曲線の縦線

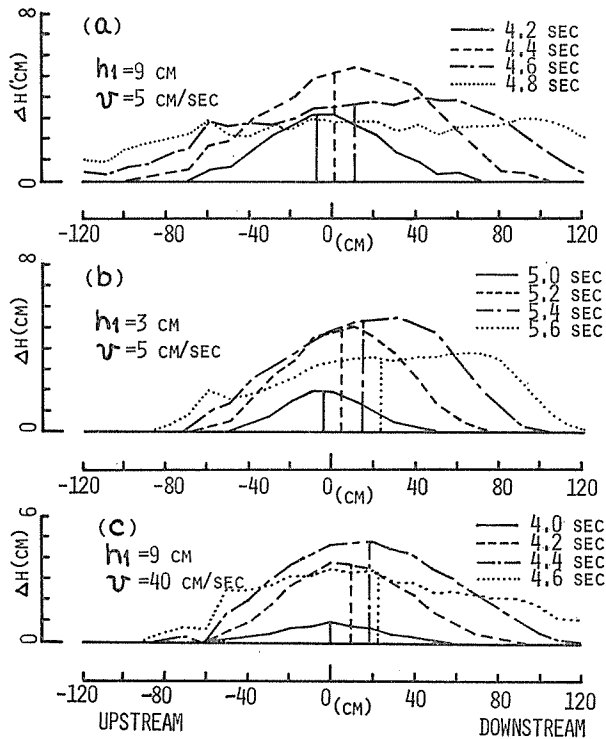


Fig. 9 Wave-height distribution of hydraulic bores along the right bank of the main channel ($\Delta H_4=5\text{cm}$)

はその曲線の中心位置である。それを見ても相対波高が大きいほど段波が右岸のより下流側に当り、その波高分布形状もこんもりとした形となっていて段波到達以前の流れと比べて強い流れであるといえる。

3・4 主水路流速の影響

Fig. 4, 5, 6 を比較し主水路流速が変わると段波の伝わり方にどのような違いがあるかを考察した。

- i) 流速が変化しても曲線の形状(勾配)はあまり変わらない。
- ii) 波高比は主水路流速が大きくなれば、上流側へ伝わる段波は大きく、下流側へ伝わる段波は小さくなる。
- iii) 波速比は主水路流速によりあまり変わらない。

i) のことより相対波高が合流部段波解析をする上で1つの大きなパラメータとなることがより一層はっきりする。また Fig. 10 より主水路流速が速ければ上流側へは流れに逆らうので伝わりにくく下流側へは流れに乗って伝わりやすくなることがわかる。そのため波高比は侵入段波の相対波高が同じでも ii) のような結果となるが波速比は相対波速を用いればほぼ一定となる。また Fig. 9 の主水路右岸の壁に沿う波高変化を調べても主水路流速が速ければ上流側は急な勾配であり時間と共に進んでおらず、下流側へはその逆であることがわかる。

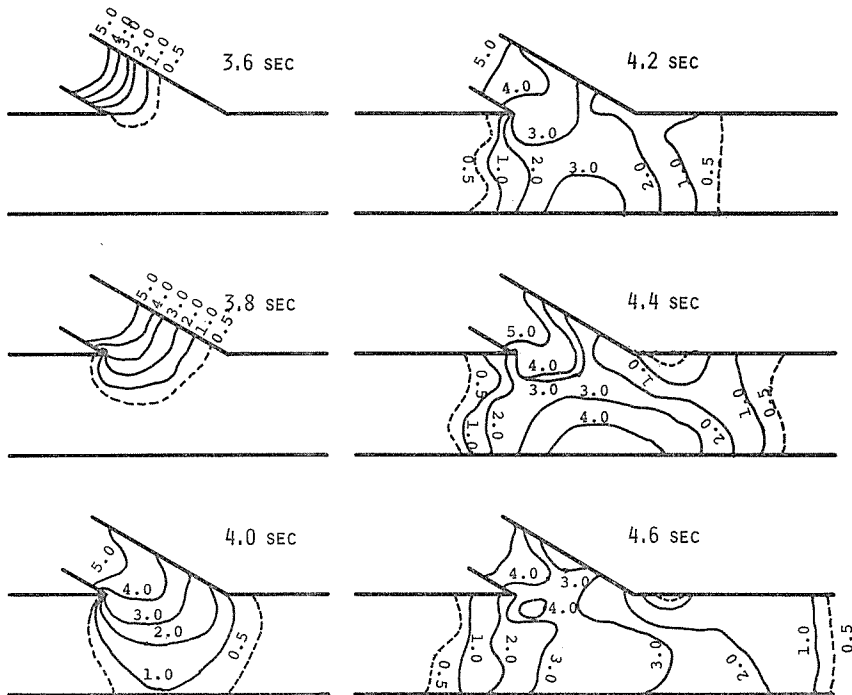


Fig. 10 Expansion of hydraulic bores in the confluence
($h_1 = 9\text{cm}$, $v = 40\text{cm/sec}$)

3・5 段波の流量特性

段波が合流部に入ってきたとき流量的にはどうであるか考察した。支水路から合流部に入ってくる段波の流量 q_I ，上・下流へ伝播される段波の流量 q_{II} ， q_{III} はそれぞれの波高と絶対波速と水路幅を乗じた値を用いた。Fig. 11 に q_{II} と q_{III} の q_I との比をとって比較してあるが次のような傾向がある。

① 上流側へ伝わる段波 (q_{II}/q_I)

i) 主水路流速にはほとんど関係なく相対波高が大きくなると減少する。

② 下流側へ伝わる段波 (q_{III}/q_I)

i) 相対波高が 0.4～0.5 をピークに上に凸の曲線になる。

ii) 主水路流速が速ければ割合は小さくなる。また、 $(q_{II} + q_{III})/q_I$ の値もとってみると支水路から出ていく流量の方が多い場合もある。すなわち、これは合流部が拡幅部の性質をもっていて段波が合流部に到達後、支水路に負の段波が伝わっていることが予想される。M. P. 4 の地点の波高変化を調べてみると主水路流速や相対波高により支路上流へ伝わる負の段波の大きさがかなり異なっていることが認められた。そこで反射係数、すなわち入力段波の波高に対する負の段波の波高の割合をとると Fig. 11 の $(q_{II} + q_{III})/q_I$ の曲線によく似た曲線が得られた。しかし負の段波を測定したのが合流部のすぐ手前でなく

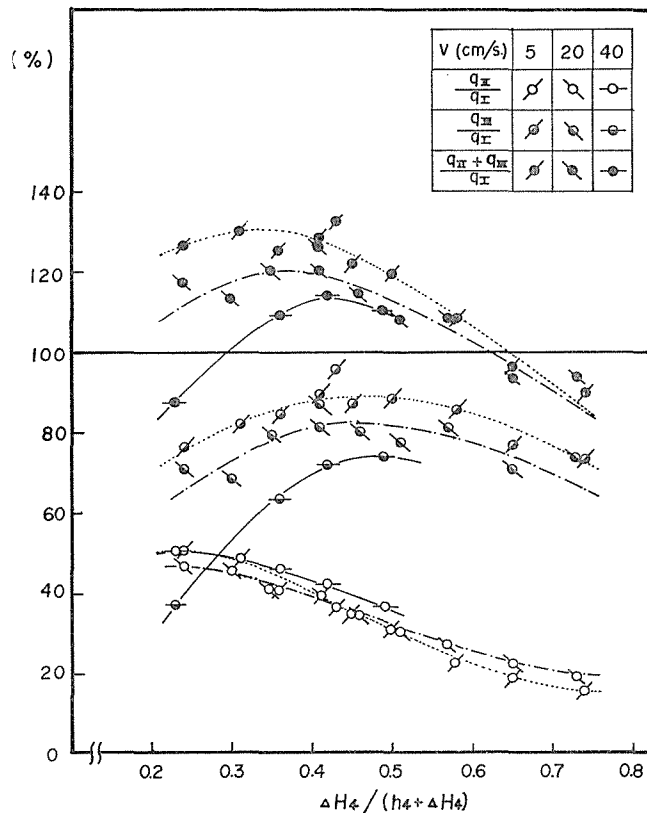


Fig. 11 Influence of the main channel velocities (30°)

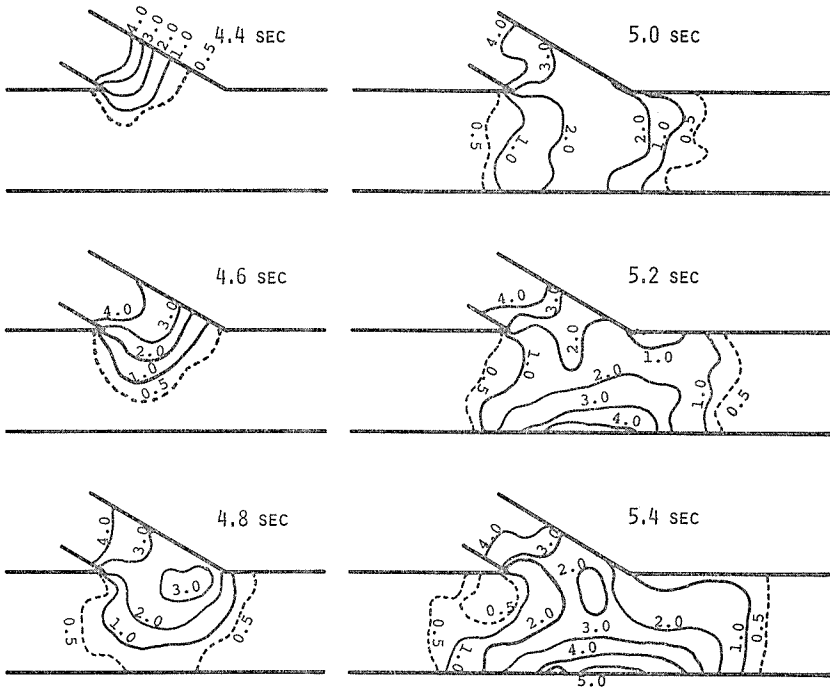


Fig. 12 Expansion of hydraulic bores in the confluence (30°)

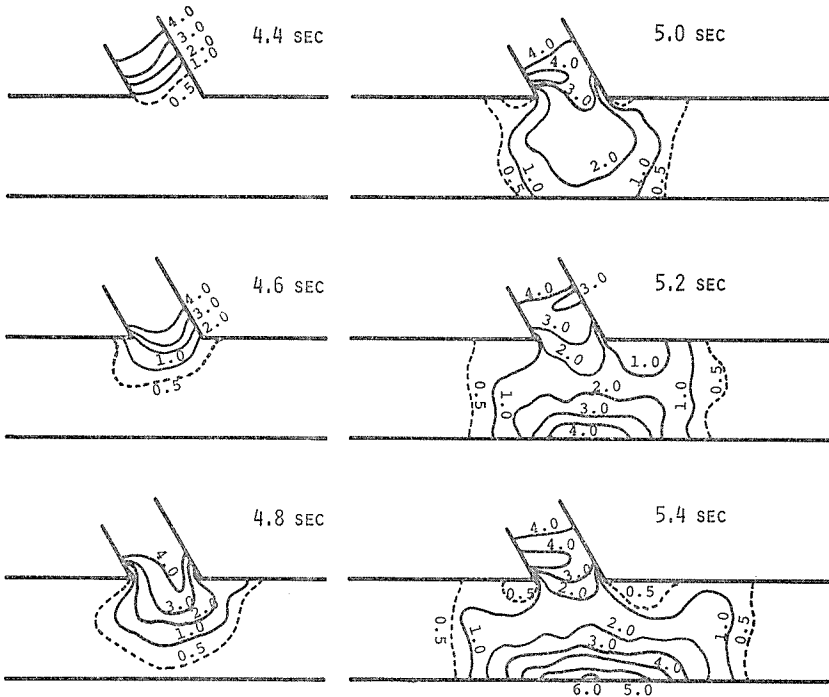


Fig. 13 Expansion of hydraulic bores in the confluence (60°)

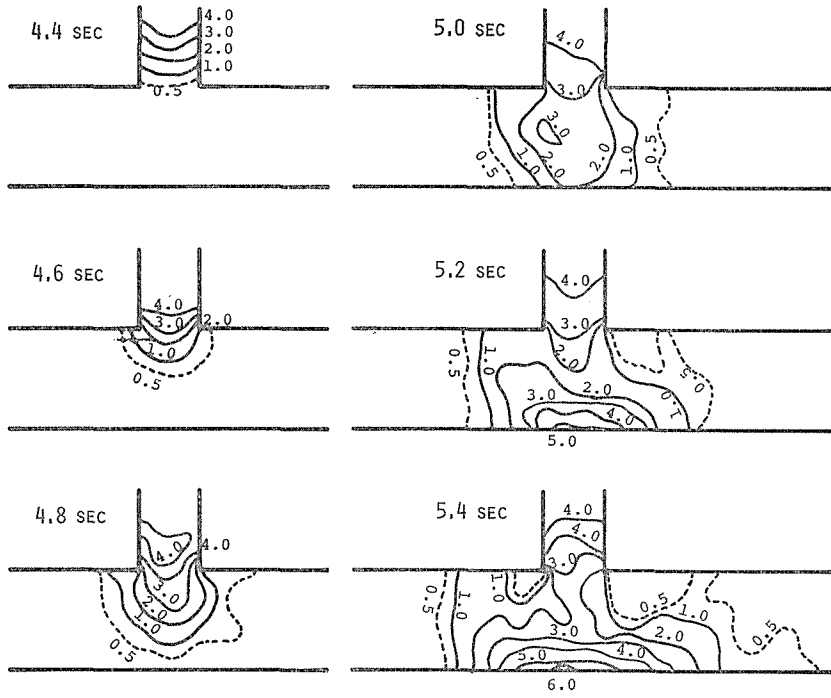


Fig. 14 Expansion of hydraulic bores in the confluence (90°)

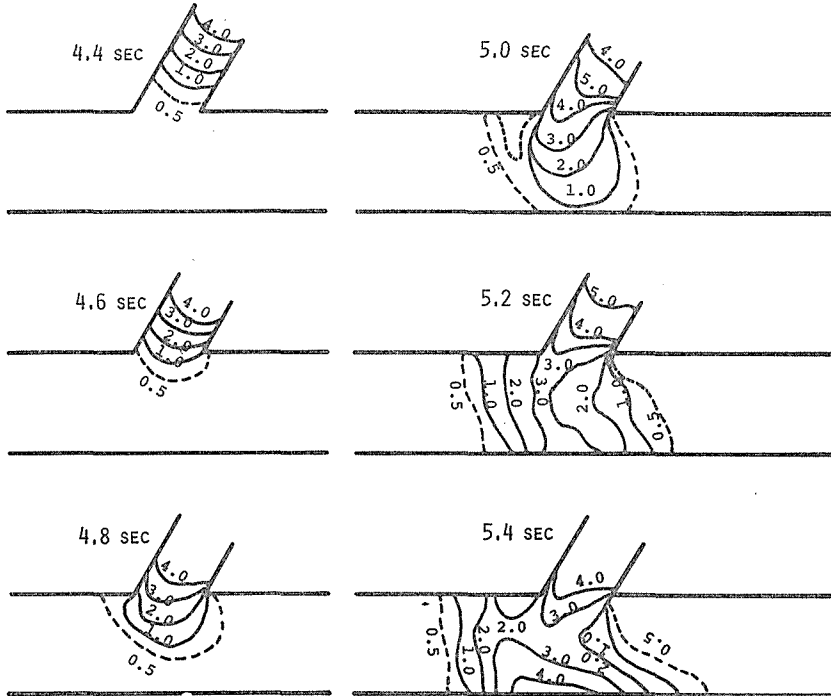


Fig. 15 Expansion of hydraulic bores in the confluence (120°)

M. P. 4 なのでもいえないのが相対波高, 主水路流速により段波の拡がり方がかなり異なっていることを示しているといえる.

3・6 合流角による影響

今迄に解析を行ってきたのは, 合流角が 30° の場合であり, しかも支水路には流れがない状態のときだけである. そこで, もっと一般的な場合を考え, 主水路, 支水路共上流端で 20cm/s の流速をもつ流れについて合流角を変え, それについて考察した. 合流角は $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ とし境界条件は支路上流端でどの場合も同じ波高変化を与えた. Fig. 12, 13, 14, 15 にそれぞれ $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ のときの等波高線を示す. これらから, 合流部の形状により段波の伝わり方が異なるのがよくわかる. 特に, 段波侵入後の流れのはく離の様子がかなり異なるということである. すなわち, 合流角を増すに従っ

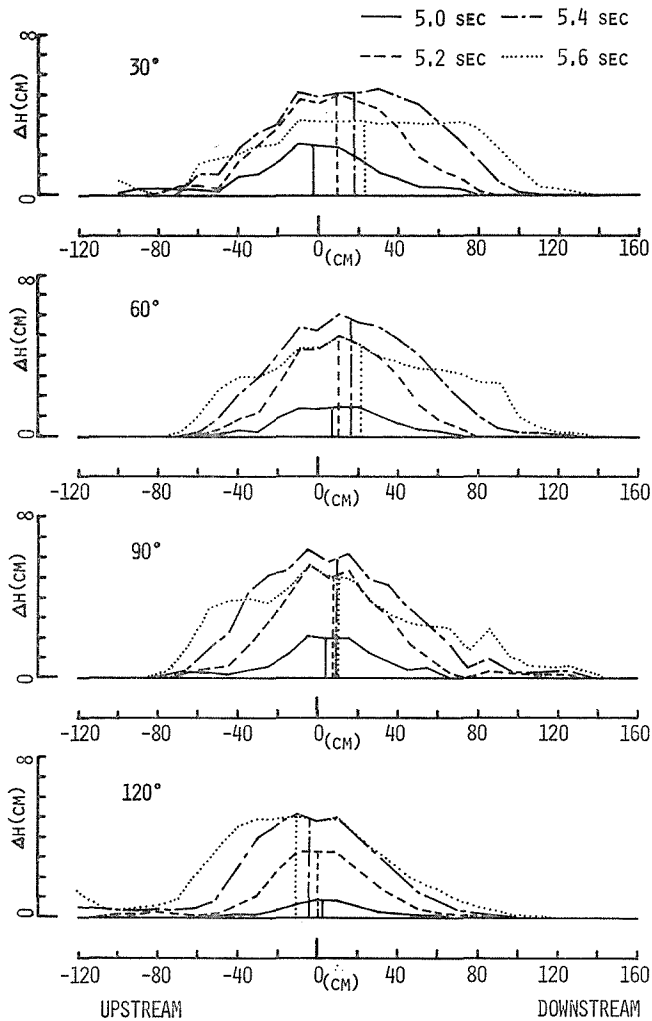


Fig. 16 Wave-height distribution of hydraulic bores along the right bank of the main channel

て上流側には、はく離しにくくなり下流側にはよりはく離しやすくなる。また、上・下流への段波の伝播は、はく離領域を廻り込んでなされることから合流角により段波の伝播速度などがかなり異なり、合流角を増すに従い、上流側へ伝わる段波の波速は速くなり、下流側へ伝わる段波の波速はおそくなる。また Fig. 16 にそれぞれの合流角の場合の主水路右岸の壁の波高変化を示した。これによると合流角により波高分布形状及び波高分布曲線の中心位置が異なってくるのがわかる。それは段波が主水路に侵入してくる方向と合流点開口部の形状に起因している。合流角が小さいうちは下流側にふくらんだ曲線形状になるが、合流角が 120° になると全く逆の曲線形状になってくる。これは合流角が増すに従い、上流側へは伝わりやすく、下流側へは伝わりにくくなっていることを表わしている。また、波高曲線の中心位置は合流角が小さいときは時間と共に下流方向へ移動し 30° と 60° の場合を比較するとその移動速度は 30° の場合の方が速い。また 90° の場合は、ほとんどある一定のところに止まっており、 120° になると時間と共に上流方向へ移動している。また 30° の場合は開口部中心線より下流方向へ移動しているのに対し、 120° の場合は、下流側より上流方向へ移動している。これは合流点開口部の形状により 30° の場合は上流側から拡がり始め、 120° の場合は下流側から拡がり始めているからである。

4 結 論

本論文では、有限要素法を用いた数値実験と模型実験により合流部における段波伝播の機構について考察した。次に各項目別に分けて結論をのべ、さらに今後の課題についても述べる。

i) 上・下流への段波伝播の違い

上流へ伝播する段波は、流れの上をはって行く段波であり、下流へ伝播する段波は、定常状態時の流れを巻き込みながら進行していく段波である。

ii) 侵入段波の相対波高による影響

相対波高は、段波到達以前の流れと比べてどの程度強い流れであるかを示していると考えられ、それにより合流部での拡がり方、はく離の大きさなどが異なり合流部段波解析においては重要なパラメータとなる。そして、上流側へ伝わる段波は、相対波高が大きくなると波高比、波速比とも減少していく。また下流部へ伝わる段波は相対波高の増加に伴ない波高比は増し波速比は減少するが相対波高がある程度大きくなると全く逆の傾向を示す屈曲点がある。

iii) 主水路流速の影響

波高の割合は、主水路流速が大きくなれば上流側へ伝わる段波は大きく、下流側へ伝わる段波は小さくなるが、波高比は主水路流速によりあまり変わらない。

iv) 段波の流量特性

上流側へ伝わる段波は、主水路流速にはほとんど関係なく相対波高により決定され、下流側へ伝わる段波は侵入段波の流量との比をとると、相対波高が $0.4 \sim 0.5$ のときピークを示し、同じ相対波高の時でも主水路流速が速ければ小さくなる。また、これらのことより合流部が拡幅部の性質をもっていて段波が合流部到達後、支水路に負の段波が伝わっていることがわかった。

v) 合流角による影響

合流角が異なると、段波の侵入方向、合流点開口部の形状が異なるため段波の伝わり方、特に段波侵入後の流れのはく離の様子がかなり違う。そのため合流角を増すに従い、上流側には伝わりやすく、下流側には伝わりにくくなる。また、合流点開口部の形状のため合流角が 90° より小さい場合は上流側から、 90° より大きい場合には下流側から拡がり始め、段波が主水路右岸に当たる位置が異なる。

vi) 今後の課題

合流部の段波特性を知るにはまだまだ実験ケースが少なくまだ十分解明できているとはいえない。特に水路幅の比を変えたり、合流点開口部の形状を変えたり、主・支水路の比を変えたり、まだやるべきことは多くある。しかし、実験条件を大幅に変化させることは模型実験ではなかなか容易なことではないので、今後は数値実験を中心にしてもっと広い条件のもとでの実験を行ない合流部段波特性を明らかにすることが必要である。また合流部ではなくその前の段階として水路幅の異なる水路を伝播する段波についての研究も行なっていく必要がある。

なお、本文の計算は信州大学リモートバッチステーションを経由した東京大学大型計算機センターの HITAC8800/8700 を利用して行なわれた。

参 考 文 献

- 1) 荒木・富所・高木；FEMによる合流部の段波の数値実験法，信州大学工学部紀要，第46号，(1979)
- 2) 高木；合流部の段波に関する研究，信州大学修士論文，(1979)
- 3) 足立；人工粗度の実験的研究，土木学会論文報告集，第104号，(1964)