

潮流を含む水理模型実験における防波堤開口部の 相 似 性 に つ い て

樋 口 明 生

ON THE SIMILITUDE AT THE OPENING OF BREAKWATER IN HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT INVOLVING TIDAL CURRENT by Haruo HIGUCHI

Synopsis

The discharge coefficient plays an important role when the maximum current velocity at the opening of the breakwater in prototype is estimated from the result of hydraulic model experiment involving tidal current.

The discharge coefficients of three kinds of models, of which the horizontal scale is same each other, 1/700, and the vertical scales are 1/500, 1/250 and 1/125, are obtained for two kinds of widths of the opening.

After the comparison between the coefficients of three models considering the effects of Froude number and model distortion, a kind of the scale effect is found, that is, the larger model has the larger coefficient.

1. ま え が き

伊勢湾を横切る防波堤が完成した場合に、主として港口で潮流がどの程度の大きさになるかを知るために以前に数年間水理模型実験をおこなった^{1) 2)}。その際、実験で得られた港口流速から原型の値を推定するのに、たんに流速の縮尺を乗じて換算しないで、原型と模型の流量係数の差を考慮して原型の値を求めた。というのは、潮流の流速は港口断面内で一様ではなく、ある分布をもつが、流速が最大になる時刻には断面内の最大流速と平均流速の間には、その比が流量係数の逆数で表わされるという関係があるとして推定した。模型については、表面流速は港口の中央部で最大になることが確かめられており、また水深方向にも表面で最大になると考えられるので、中央部の表面流速を最大流速とみなせば、上に述べた関係が成り立つことは実験の結果明らかにされている。原型についても同様な関係が成立つものとすれば、最大流速を推定するためには原型の流量係数を知らなければならないが、類似の場合の実測例がなかったので、潮流の実験に使用した唯一つの模型の流量係数から大胆な外挿により原型の値を推定しておいた。

これまでも流量係数を調べたことがある^{3) 4)}が、もう少し系統的に種々の縮尺の模型港口の流量係数を求めて模型の歪の影響とともに縮尺効果を調べ、より正確に原型の値を推定しようと試みた。しかしながらいままでに実験が全部終わっておらず、原型の値を推定するに至らなかったことをあらかじめ、お断りしておく。

2. 流量係数について

底が水平で幅 B の直線水路に、幅 b の収縮部が存在するとき、摩擦損失がなければ流れは Fig. 1 のよ

うになる⁵⁾。ここに h は水深を表わす。この場合流量 Q は近似的につぎのように表わされる。

$$Q = CA\sqrt{2g\Delta h} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに C は流量係数, A は流水断面積, g は重力加速度である。

一般に流量係数は多くの要素の関数であるが, いま考えているような場合はつぎのように表わされる⁶⁾。

$$C = C' K_F K_y K_e \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに C' は流量係数の標準値であり, K_F は Froude 数, K_y は側方水深, K_e は法面こう配の影響をあらわす数である。これらの係数は U. S. Geological Survey により, 4 種の異なった基本的な収縮部の型に対して実験的に求められているが, いま対象とするような型, すなわち **Fig. 2** に示すような型についてはもちろん求められていない。

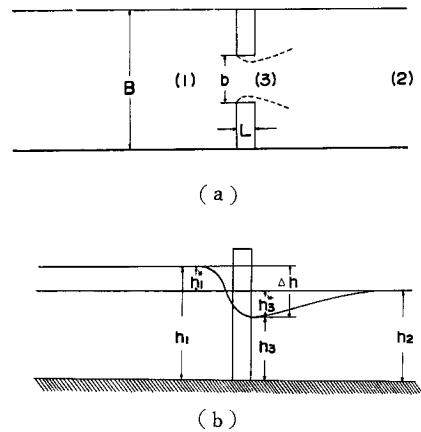


Fig. 1 Sketch of flow through constriction.
(a) plan, (b) elevation.

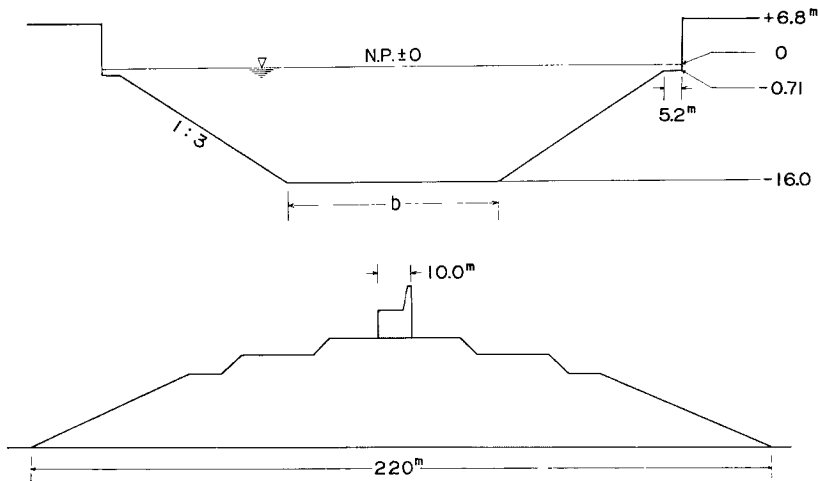


Fig. 2 Sections of opening and breakwater.

Tracy および Carter⁷⁾ の実験によれば, 水路幅 B に対して収縮部の幅 b が小さい場合には, 背水比 $h_1^*/\Delta h$ がほとんど 1 に近いことが示されている。実際 Δh を測定することは, **Fig. 1** の断面 (3) の位置が一定しないなどの理由により困難である。これらの理由により, ここでは断面 (1) および (2) で水位を測定しその差をもって Δh とみなした。したがって式 (1) はつぎようになる。

$$Q = CA\sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad \dots\dots\dots(3)$$

3. 実験設備と経過

実験は **Photo. 1** および **Fig. 3** に示すような 5×11 m のコンクリート製の水槽を用い, 定常流についておこなった。中央に木製の防波堤模型を据え (写真の中央部), この開口部を通して 5.5 kw のポンプで水を循環させた。流量は三角堰で測定した。水位の測定のために上流側と下流側とで水槽の底から水槽外にパイプ

で水をひき、別の小さな2つの水槽に導いて連通管とし、その中の水位をフックゲージで測定し、水面が乱れるために生ずる測定誤差をなくした。Photo. 1 の下部に見える2つの水槽がそれである。

一連の実験をおこなう間、下流側の水位を一定に保つように水槽内の水量を調節した。

この研究のために Table 1 に示す8種類の模型をラワン材で製作したが、ここで使用したのは、No. 3, 4, および5の3種類である。断面形は Fig. 2 に示す原型の値にそれぞれの縮尺を乗じたものである。名古屋港の平均潮位は図のN. P. ± 0 より1.4m高く、実験はこの値を基準にしておこなった。実験ケースは、Table 2 に示すようである。すなわち、3種類の模型について、2種類の港口幅、4種類の水深、Froude 数が0.03から0.85、Reynolds 数は560から40 000の間である。水深については、原型では浚渫により水深を変えるわけであるから、模型の高さを変えて水深を変化させるべきであるが、ここでは便宜的に水位だけを変えて水深を変化させている。したがって Table 2 に書かれている水深は、水位が上からN. P. -2.6 , -0.6 , $+1.4$, $+3.4$ m の場合に相当する。また、原型では港口幅を表現するのに N. P. -16 m における幅 b でなく、N. P. -12 m における幅で表わしているから、表に示した模型の港口幅 b_m は通称500mと350mとに相当する。

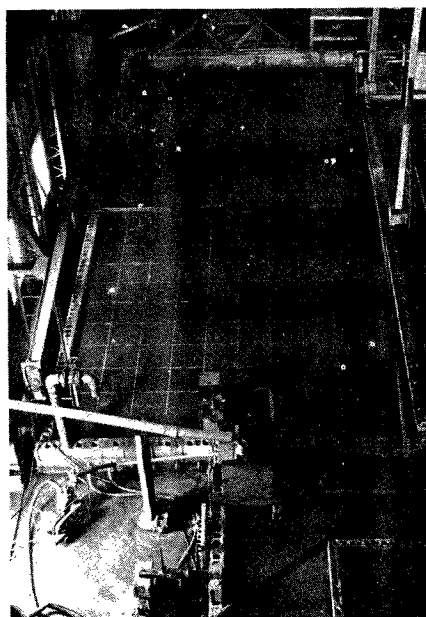


Photo. 1 Experimental facilities.

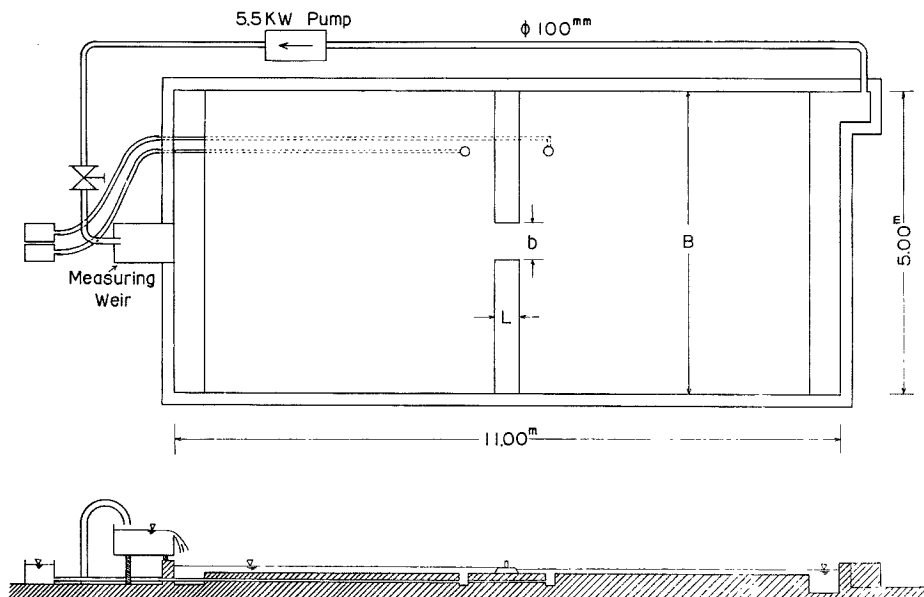


Fig. 3 Experimental facilities.

Table 1 Scale of model.

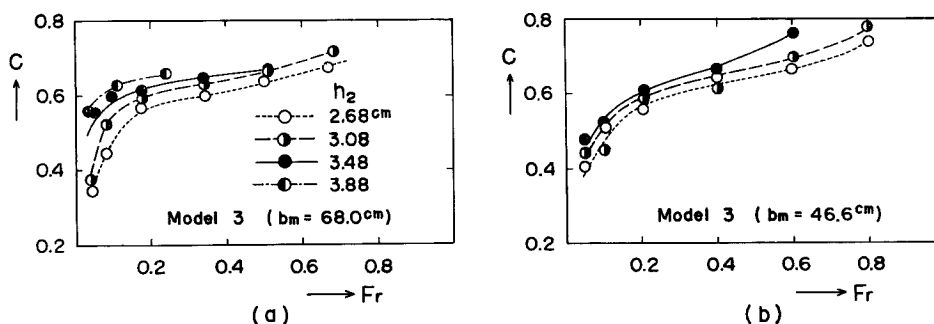
Model No.	Scale ratio (prototype/model)			
	Horizontal	Vertical	Velocity	Discharge
1	2 000	2 000	44.7	$1\,790 \times 10^5$
2	2 000	667	25.8	344
3	700	500	22.4	92.7
4	700	250	15.8	27.6
5	700	125	11.2	9.80
6	500	500	22.4	56.0
7	250	250	15.8	9.92
8	125	125	11.2	1.75

Table 2 Treated range.

Model No.	b_m (cm)	h_p (m)	h_2 (cm) ($h_p=17.4$ m)	F_r	R_e $\times 10^3$
3	68.0	13.4	3.48	0.03~0.85	0.56~15.0
4		15.4	6.96	0.05~0.80	1.95~38.5
5	46.6	17.4	13.92	0.05~0.25	5.50~40.0

4. 実験結果と考察

実験により求めた流量係数は Fig. 4 ~ 6 のようである。これらの図は横軸に Froude 数 F_r 、縦軸に流量係数 C をとり、下流側の水深 h_2 をパラメーターとして示したもので、Fig. 4 は Model 3、Fig. 5 は Model 4、Fig. 6 は Model 5 に関するものである。図の番号の後の a 、 b はそれぞれ港口幅が 500 m、350 m の場合を示している。

Fig. 4 Discharge coefficient of Model 3. ($1/700 \times 1/500$)

これらの図によると Froude 数の増加にともない流量係数も増加するが、この傾向は Froude 数が 0.2 以下でとくにいちじるしい。U. S. Geological Survey の実験では、Froude 数に関して Fig. 7 のような結果を得ている⁸⁾。取り扱った範囲が必ずしも一致しないので、比較しにくいだが、Froude 数が 0.2~0.8 の間に

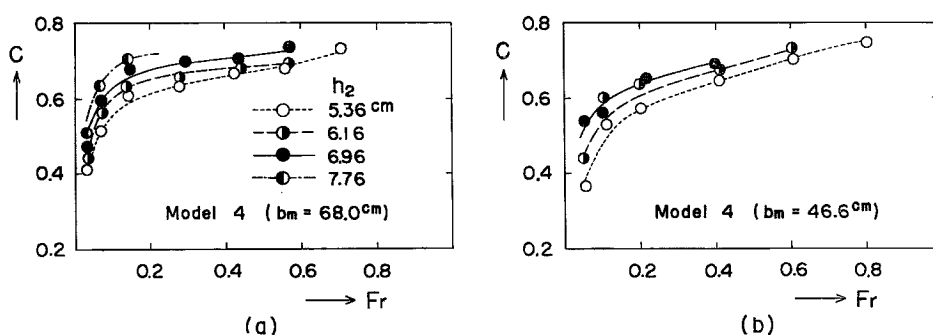


Fig. 5 Discharge coefficient of Model 4. (1/700×1/250)

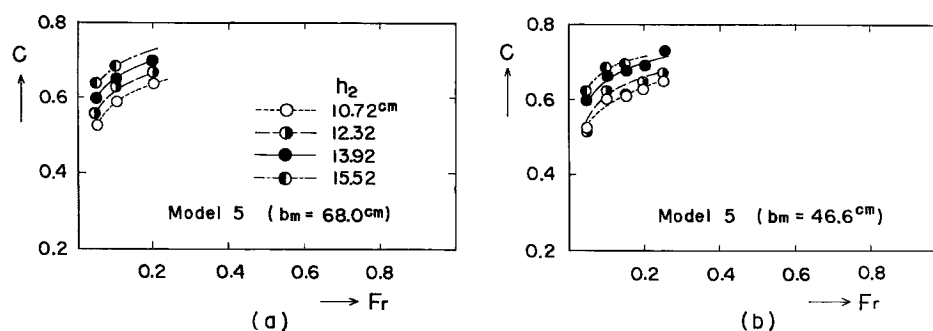


Fig. 6 Discharge coefficient of Model 5. (1/700×1/125)

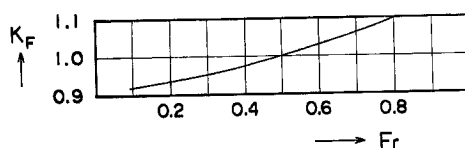


Fig. 7 Variation of discharge coefficient with Froude number. (after Ven Te Chow)

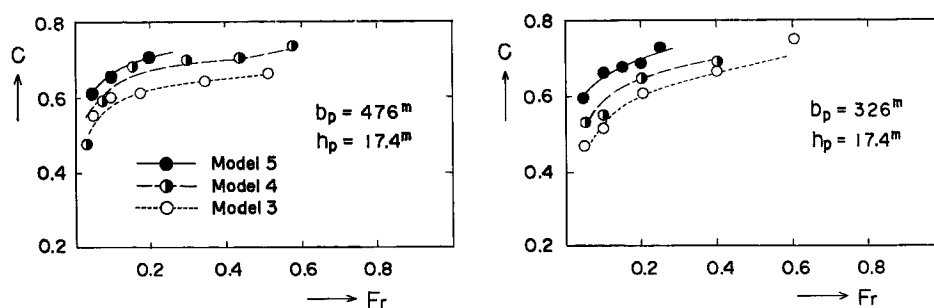


Fig. 8 Difference of discharge coefficient between model scales. (1)

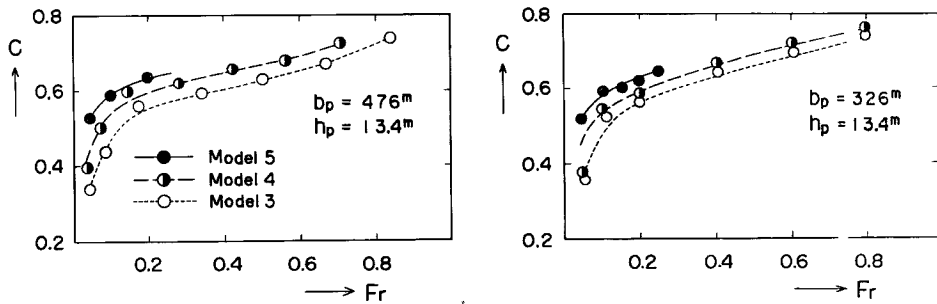


Fig. 9 Difference of discharge coefficient between model scales. (2)

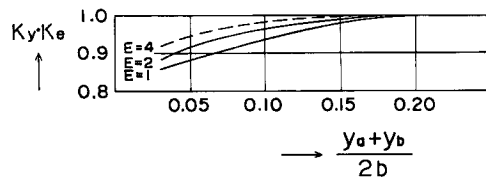
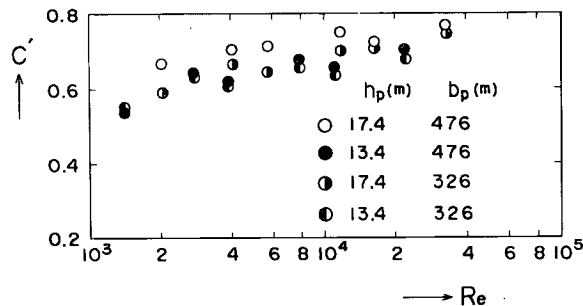
Fig. 10 Variation of discharge coefficient with $(y_a + y_b)/2b$ and E .

Fig. 11 Variation of discharge coefficient with Reynolds number.

限ってみても、われわれの結果の方がこう配がきつくなっている。

これらの図から、原型における水深が同一の場合だけを取り出すと **Fig. 8** および **Fig. 9** のようになる。**Fig. 8** は $h_p = 17.4\text{m}$ に関するものであり、**Fig. 9** は $h_p = 13.4\text{m}$ に関するものである。これらの図は、原型における同一水深については、同一 Froude 数に対して Model 3, Model 4, Model 5 の順に流量係数は大きくなることを示している。これらの模型は水平縮尺が一定で鉛直縮尺だけが2倍、4倍になったものであるから、主として模型の歪みの効果を示しているともいえよう。

これまでに示した結果は、いわば生の値であり、(3)式によって得られた流量係数そのものである。この中には再三述べたように模型の歪の効果が含まれているが、この効果は実際には鉛直縮尺の違いによる堤防および開口部の法面こう配の変化、および同一の原型水深に対する模型水深の変化として影響を与えているはずである。そこで、得られた結果からこれらの影響を取り除いてみよう。

U. S. Geological Survey の実験によれば、法面こう配による影響についてはあらわには表わされていないが、開口部の幅と水深の影響については、台形の断面をもつ堤防が直立壁の開口部をもつ場合の補正係数 K_y について、2種類の法面こう配に関する結果が得られている⁹⁾。これによると、開口部断面内の平均水

深 $(y_a+y_b)/2$ と開口幅 b との比が0.2よりも小さいと、 K_y は1より小さくなり、その値は $1-b/B$ が0.7より大きければ一定値となることを示している。われわれの場合は $1-b/B$ が0.865および0.906であり十分一定値となる範囲内に入っている。これらの図⁹⁾から読みとった値を法面こう配をパラメーターにしてプロットするとFig. 10のようになる。図の横軸は $(y_a+y_b)/2b$ であり、縦軸は $K_y \cdot K_e$ である。図中の E は堤防の法面こう配（水平距離/鉛直距離）を表わし、 $E=1$ 、および2（実線）はU.S. Geological Surveyの結果であり、 $E=4$ （破線）は外挿で得た推定値である。このように、この図はこう配の影響を含んだものを示しているから、縦軸を $K_y \cdot K_e$ と考えてよいであろう。実際には堤防のこう配だけでなく、開口部のこう配の影響をも考慮しなければならないと思われるが、資料がないのでここでは考えない。

Table 3 Estimated maximum velocity in prototype.

Run	Width of opening		Water depth		Estimated maximum velocity (cm/sec)	Froude Number	Reynolds Number
	Main(m)	Sub(m)	Main(m)	Sub(m)			
TDA	350	50	17.4	8.9	130~175	0.100~0.134	$\times 10^7$ 2.28~3.05
TDB	400	200	"	"			
TDC	500	300	"	"	90~120	0.069~0.109	1.57~2.09
TCA	350	50	13.4	8.9	215~290	0.187~0.252	2.88~3.89
TCB	400	200	"	"	170~225	0.148~0.195	2.28~3.02
TCC	500	300	"	"	135~185	0.118~0.161	1.81~2.48

Fig. 7にはFroude数 F_r が0.1より大きい場合の K_F だけが示されているので、代表的に $F_r=0.1$ および0.2の場合を取り上げ、Fig. 7から K_F を、Fig. 10から $K_y \cdot F_e$ を求め、 $F_r=0.1$ および0.2の場合の実験値 C をこの $K_F \cdot K_y \cdot K_e$ で除し、(2)式の C' を求めるとFig. 11のようになる。図の横軸はReynolds数である。丸印の相違は図に示されたように水深および開口幅の相違を示している。この図は水深が大きい方が、また開口幅の広い方が流量係数が大きいことを表わしている。この図はすでにFroude数、水深変化、および法面こう配の影響を一応取り除いた結果と考えられるが、それでもなおこのような規則正しい配置が見られるのは、まだ完全にその影響が取り除かれていないためかも知れない。

しかしながら、いずれにせよこのような流量係数 C' がReynolds数とともに大きくなる傾向は認めてよいであろう。これはいわば模型の歪の影響を除いた、いわゆる縮尺効果というようなものと考えられる。

この図から、直接原型の値を外挿することは、断面形のひずみの影響がまだ残っているかも知れないし、また取り扱ったReynolds数の範囲が狭ますぎることなどの点から危険をとまなうので、ここでは一応の見当をつける程度にとどめる。

実験²⁾の結果から推定される原型における最大流速、およびこれらの値が実現した場合のFroude数およびReynolds数をTable 3に示す。表中、実験記号TDAなどの2番目の字は港内水面積の、3番目の字は港口幅の違いをそれぞれ表わしている²⁾。

最大流速の推定値に幅があるのは、これの推定の際に使用した原型の流量係数の値に幅をもたせたためであり、小さい方はその値が0.8、大きい方は0.6の場合に相当する。この表に見られるように、最大流速時でもFroude数はたかだか0.25の程度である。Fig. 10は $F_r=0.1$ および0.2における実験値から得られた結果であるが、これからもわかるようにReynolds数の増加にともない C' も増加しているから、このままのこう配で大きくならないとしても原型のReynolds数(10^7)付近ではかなり大きくなると考えられる。

5. あ と が き

以上、水平縮尺が1/700、鉛直縮尺が1/500、1/250、および1/125の3種類の防波堤模型を使って、2種類

の港口幅について流量係数を求めた。その結果、この3種の模型に関しては、Froude 数および模型の歪みの影響を除いても Reynolds 数によって変化し、大きい模型の方が流量係数は大きくなり、一種の縮尺効果がみられた。

しかしながら、これらの模型は断面形が相似でなく、一応歪みの影響は取り除かれているはずではあるが、この縮尺効果の中にはまだひずみによるものも含まれているかも知れない。これを確かめるためには、断面形の相似な、ひずまない模型により同様な実験をおこなう必要があり、現在この実験をすすめている。

最後に、この研究を進めるにあたって、終始適切な御指導を賜った岩垣教授、ならびに実験に協力していただいた平賀太郎、片山信二、川井健蔵の諸氏に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 樋口明生, 吉田幸三: 名古屋港付近の潮流に関する水理模型実験について (1), 京大防災研究所年報, 第5号A, 昭37.3, pp.323—331.
- 2) 樋口明生, 吉田幸三: 名古屋港付近の潮流に関する水理模型実験について (2), 京大防災研究所年報, 第6号, 昭38.7, pp.346—364.
- 3) 樋口明生, 吉田幸三: 模型実験における防波堤開口部の流量係数について, 第7回水理講演会講演集, pp.昭37.10, 7—12.
- 4) 樋口明生: 模型防波堤開口部の流量係数に関する実験的研究, 第19回土木学会年次学術講演会講演概要, 昭39.5, pp.52—1—2.
- 5) Chow, Ven Te: Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill, 1959, p.477.
- 6) Ditto, p.482.
- 7) Tracy, H. J. and Carter, R. W.: Backwater effects of open-channel constriction, Trans. ASCE, Vol. 120, 1955, pp.993—1006.
- 8) 3) p.480.
- 9) 3) pp.483—484.