

防波堤開口部の潮流にともなう海底摩擦 および垂直渦動粘性係数について

中 村 重 久*

1. 緒 論

伊勢湾台風によって多大の被害をこうむった名古屋港に高潮防波堤が計画され、昭和 39 年 2 月には約 90% 完成した。ここでは防波堤開口部で昭和 39 年 1 月から 2 月にわたる期間、運輸省第 5 港湾建設局によって得られた潮流の資料をもとに、海底摩擦力および開口部断面内の垂直渦動粘性係数を求めた。資料は下げ潮時および上げ潮時の毎時観測によって得られた潮流流速である。したがって上記の海底摩擦力および垂直渦動粘性係数の潮流による変化をも知ることができる。これによって、これまで名古屋港の潮流に関する模型実験によって得られた結果に加えて^{1), 2)}、防波堤開口部における潮流について新しい知見が得られる。

名古屋港付近のみにかぎらず一般に海岸付近の潮流と相互関係の深い海底摩擦力および垂直渦動粘性係数につ

いて、これまで十分知られているとはいえない。したがって、ここでは資料解析の結果を参照して海底摩擦力と垂直渦動粘性係数とについて考察する。

2. 潮流の観測資料について

潮流に関する資料は、運輸省第 5 港湾建設局の観測によって得られたものであるが、ここに、観測に関連した諸事項ならびに参考になることを記す。

潮流の観測を行なったのは名古屋港の高潮防波堤にある 2 つの開口部である。この開口部は地理的に 図-1 の記号 M および S に位置する。ここに M は主開口部、S は副開口部をあらわす。全般的にみて両開口部周辺は平滑であると思われるが、両開口部断面は 図-2 にみるような形状である。観測点は主開口部については A, B, C, D, E, F および G の 7 点、副開口部については H, I, J, K および L の 5 点をえらび、それぞれの測点について観測時の海面下 1, 2, 3, 4, 5, 7 m および海底上 1 m で CM-2 型流速計を用いて潮流観測が行なわれた。ただし副開口部では水深の関係で水面下 7 m での観測は各測点とも行なわれていない (図-2 参照)。

観測はできるだけ潮位差の大きい朔または望の前後の時期をえらんだ。潮流観測を行なったときの潮位変化は名古屋港気象観測塔の記録から 図-3 のようになる。昭和 39 年 1 月 27, 30, 31 日および 2 月 11 日 (月令は

図-1 名古屋港高潮防波堤付近の地形

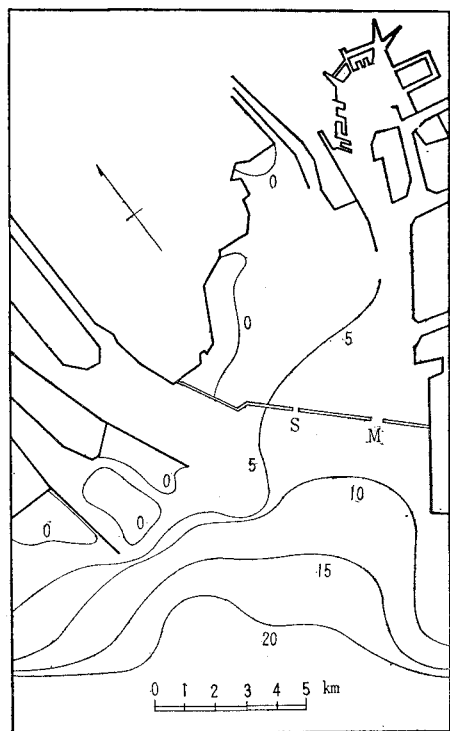


図-2 (a) 主開口部 M の断面

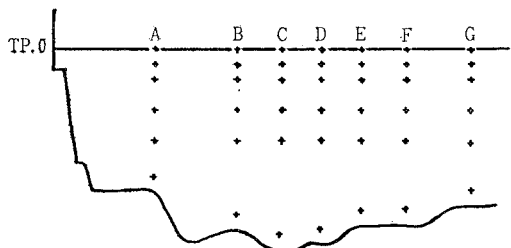
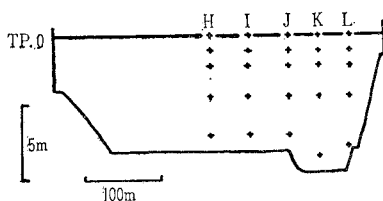


図-2 (b) 副開口部 S の断面



* 正会員 理修 京都大学助手 防災研究所

図-3 名古屋港気象観測塔における潮位記録

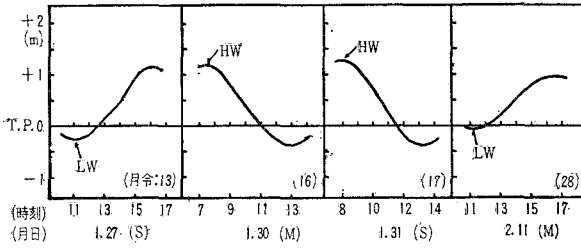
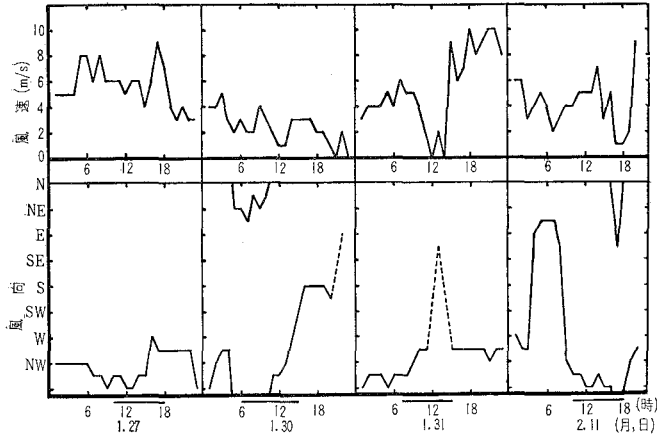


図-4 名古屋港気象観測塔における風向、風速



それぞれ 13, 16, 17 および 28) の低潮時からそれにつづく高潮時まで、あるいは高潮時からそれにつづく低潮時までの間について 1 時間ごとに潮流観測結果が得られている。この資料を解析した結果について考察したい。

なお観測時期における風向、風速を参考資料として示したものが図-4 である。これも潮位観測記録と同じく名古屋港気象観測塔で得られた記録による。潮流観測時は一般に風速は小さく、風向はだいたい北西であるが、潮流観測資料からみて風の影響はごく表面に限られ、潮流のみの問題と考えることは海面をはなれたところでは可能であろう。それで以下において観測によって得られた流速は潮流のみからなるとして解析をすすめる。

3. 海底摩擦

潮汐波のエネルギーはいろいろの原因によって消費される。そのおもな原因の一つに海底摩擦が考えられる。この問題に関する研究は G.I. Taylor (1920)³⁾ に始まり、その後 S.F. Grace^{4), 5), 6)}, H. Charnock⁷⁾, K.F. Bowden and M.R. Howe⁸⁾ および 樋口・中村⁹⁾ によって研究されている。また他の原因として、海水内部の乱れの状態によって生ずる渦動粘性も考えられる。一般に海岸付近の海水の運動を考えると、運動方程式は

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u = -g \nabla h + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

で与えられる。ここに u は流速、 h は水深、 η は垂直

渦動粘性係数、また水平成分の微分演算子を ∇ であらわす。ところで上式右辺第 2 項を内部摩擦応力 τ を使ってあらわすこともできる。このとき、

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{\partial \tau}{\partial z}$$

ところで海面では τ は風応力による摩擦応力となり、海底では海底摩擦応力となる。ここでは海面における摩擦応力については考えない。また海底摩擦応力については測得流速の方向の値を求める。計算の便宜上、海底より上向きに z をとり、海底を水平であると仮定する。

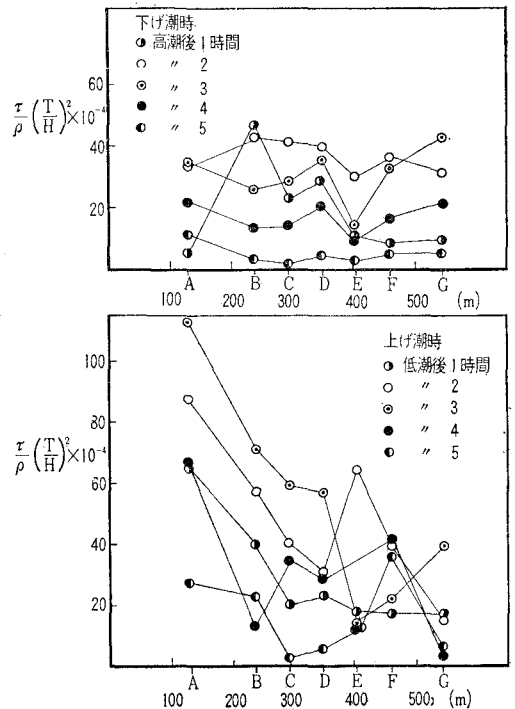
流速分布および速度勾配について詳細な吟味をすべきではあるが、図-2 に示すように観測点の網目は海底付近の流速垂直分布の詳細を知ろうとするにはあらく、適当ではない。ここでは流速は海底付近で流速は対数分布則にしたがうとして、海底上 1 m の流速の観測値から摩擦速度を求める。ただし防波堤開口部付近では底質が粘土およびシルトからなると考えられるから、海底を滑面と仮定し von Kármán の式を用いる。すなわち、

$$\frac{u}{u_*} = 5.5 + \frac{1}{\kappa} \log_e \frac{u_* z}{\nu}$$

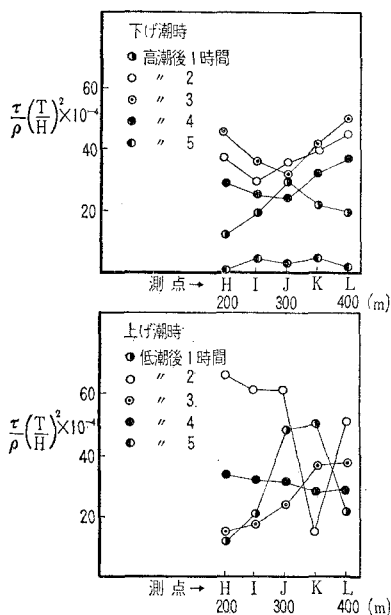
ここに u は海底上 z の高さにおける流速、

u_* は摩擦速度で $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$ で定義される。 ρ は海水の密度、 τ は海底摩擦力、 κ は von Kármán の定数、ま

図-5 主開口部における海底摩擦力



図—6 副開口部における海底摩擦力



たゞは海水の動粘性係数である。

主開口部および副開口部の海底摩擦応力の場所的分布を図—5および図—6に示す。海底摩擦応力は時間によって変化する。全体的傾向として海底上 1 m における流速が大きいほど海底摩擦応力も大きい。また図

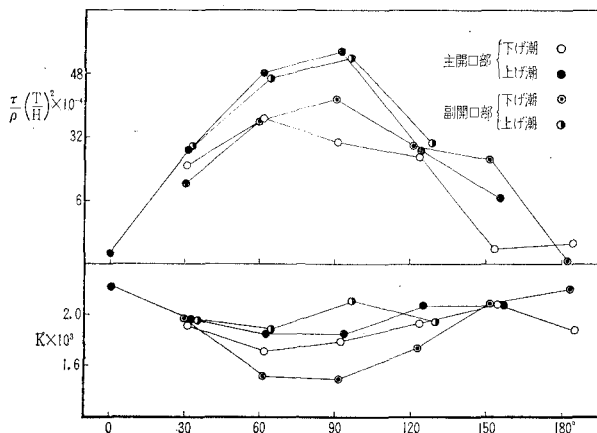
—2 の開口部

断面と図—5および図—6とを対比すると海底摩擦応力は水深の小さいところで大きい値となる傾向がある。平均海底摩擦力 $\bar{\tau}$ を求めて、これを無次元化したものを図—7 に示す。すなわち観測期間に相当する低潮時からそれにつづく高潮時まで、あるいは高潮時からそれにつづく低潮時までの時間を $T/2$ 、その時間における潮位差を $H(=2a, a: \text{振幅})$ とし、潮位変化を正弦曲線で近似した。ここに上記の量を用いて、縦軸に $\bar{\tau}/\rho(T/H)^2$ をとり、横軸には $T/2$ が 180° になるようにとって、4 つの曲線を相互に比較できるようにした。ここに $T/2$ はそれぞれについてだいたい 6 時間である。

流速の時間変化が $u=u_0 \sin(\omega t + \epsilon)$ で与えられるとすれば、海底摩擦応力は

$$\tau = -k \rho u |u|$$

図—7 海底摩擦力と海底摩擦係数の時間的変化



であり (k は海底摩擦係数), それに相当する結果が図—7 にみとめられる。さらに詳細にみれば主開口部, 副開口部いずれも下げ潮の時期には上げ潮の時期よりも, $\bar{\tau}/\rho(T/H)^2$ の振幅がだいたい 20% 小さい。 $\bar{\tau}$ の値は最大 6 dyne/cm², 潮流の極大のとき平均として 4.2 dyne/cm² である。従来の研究による τ の値は R. Agnew (1960)¹⁰⁾ によって要約されているがそれによれば, Irish Sea の潮流について Bowden および Fairbairn (1956) は最大 4 dyne/cm², また Bowden (1959) は最大 8 dyne/cm² を与えている。さらに California 海岸沖で Lesser (1951)¹¹⁾ は海底を粗面または滑面として計算して, それぞれ 5 または 0.2 dyne/cm², また Kennebec の感潮河川について W.H.I. (1952) は 10~30 dyne/cm² を与えている。ちなみに, Bowden ら (1956)¹²⁾ の場合, 用いた資料は水深 15~20 m, 潮位差約 6 m の水域におけるもので, これから $\bar{\tau}$ の値について水深約 10 m, 潮位差約 1.5 m の防波堤開口部における値として潮流極大のときの平均値が 4.2 dyne/cm² 程度の値であることは, ほぼ妥当であるように思われる。

図—7 には同時に海底摩擦係数の時間変化も与えてある。もともと定数とみなされている摩擦係数も時間とともに, したがって流速の変化にともなってその値が変化することがわかる。

4. 垂直渦動粘性係数

ある時刻における海面勾配, いろいろの深さでの水の運動の加速度がわかっていれば問題とする水域で前節の運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u = -g \nabla h + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

から海底摩擦力とともにあらゆる深さにおける内部摩擦力の成分がわかるはずである。ところで, ここに与えられている防波堤開口部の資料から正確な水面勾配を知ることはできない。したがって水の運動にともなう内部摩擦力の考察には, さらに別の概念を援用しなくてはならない。たとえば Prandtl の混合距離の理論を用いるとか^{13, 14)}, 乱流理論の結果を援用するなどである^{14, 15)}。

ここでは別の立場から考察してみたい。いま流れの方向に x 軸, 海底から上向きに z 軸をとる。垂直方向に δz だけ距った 2 点での流速の差 δu は δz の間の海水に働く内部摩擦力の一部を構成すると考えられる。流速として, ある時間に対する平均流速 $\bar{u}$ を考える。このとき流速差 δu に対するエネルギー $(1/2)\rho(\delta u)^2$ が内部摩擦力の原因となっていると考えることによって

$$\frac{1}{2} \rho (\delta u)^2 = \eta \frac{\partial a}{\partial z}$$

図-8 垂直渦動粘性係数の時間的変化

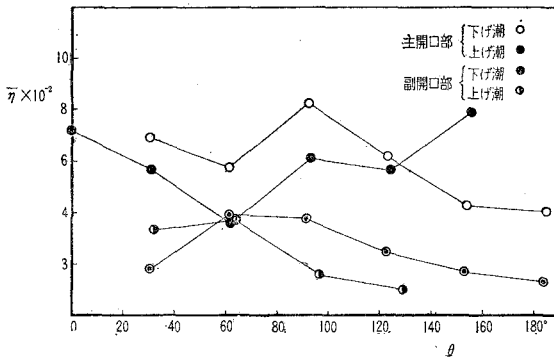
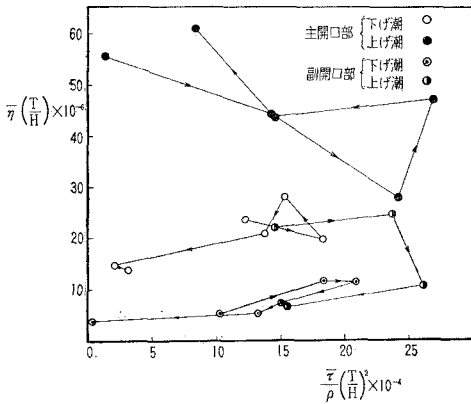


図-9 海底摩擦力と垂直渦動粘性係数との対比



を考えることができる。ところで実際には $\bar{u}$ のほかに乱流成分 u' の効果もあるはずであるが、この u' は $\bar{u}$ に対してある範囲内の値をとると考えられる。しかし、与えられた資料から u' を知ることはできないから、ここでは上式から垂直渦動粘性係数に相当する量 η を求める。ただし計算上 η が負になることがあるが、これは速度勾配の符号に原因するもので、内部摩擦応力が作用する向きを示すものと考えられる。このような考察のもとに上式で $\partial \bar{u} / \partial z$ のかわりに $|\partial \bar{u} / \partial z|$ をとって計算する。垂直方向にとりあった網目の点について上式を用いて η を求め、これから毎時の主開口部および副開口部における断面内の η の分布図をつくる。これから断面積 A に対する η の断面平均が得られる。すなわち

$$\bar{\eta} = \int_A \eta \, ds / \int_A ds$$

図-7 におけると同様に、時間を θ であらわし、 $\bar{\eta}$ と θ の関係を示したのが図-8である。これでは $\bar{\eta}$ が時間的変化として簡単な変化をしていないことがわかる。 $\bar{\eta}$ は高々 800 C.G.S. の値をとる。概略的にみて $\bar{\eta}$ は時間的に変化しないと考えると十分であろう。ところが、図-9のように $\bar{\eta}$ と τ との関係を見ると、 τ に対応して $\bar{\eta}$ も時間的に変化しているようにみえる。

5. 結 論

名古屋港高潮防波堤開口部における潮流の観測資料からつぎのようなことがわかった。

海底を滑面と仮定して解析すると、海底摩擦応力は場所によって異なった値をとる。これは水深および流速に関係が深い。海底摩擦応力の最大値はだいたい 4.2 dyne/cm² である。また海底摩擦係数も流速によって変化する。

垂直渦動粘性係数の時間的変化は明瞭ではない。その最大値は 800 C.G.S. である。しかし垂直渦動粘性係数の各断面平均と平均海底摩擦力とを対比してみると時間的変化があるようにみえる。

終りにこの研究を遂行するにあたり終始適切なお指導をいただいた京大防災研究所 樋口明生助教授に心から感謝の意をあらわす。また図面作成に助力いただいた北川吉男氏にも記して謝意をあらわす。さらに名古屋港高潮防波堤開口部における潮流観測資料を提供していただいた運輸省第5港湾建設局名古屋港工事事務所、風向および風速の観測資料を提供していただいた名古屋地方気象台に厚く感謝の意をあらわす。

参 考 文 献

- 1) 樋口明生・吉田幸三：名古屋港の潮流に関する水理模型実験Ⅱ，京大防災研究所年報，No. 6, pp. 346-364, 1963.
- 2) 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄・大西英夫：伊勢湾の水理模型実験についてⅡ，第10回海岸工学講演会講演集，pp. 80-85, 1963.
- 3) Taylor, G.I.: Tidal friction in the Irish Sea, Phil. Trans. Roy. Soc., A, 220, London, 1918.
- 4) Grace, S.F.: Friction in the tidal currents of the Bristol Channel, Proc. Roy. Soc., A, 220, pp. 388-395, 1920.
- 5) Grace, S.F.: Internal friction in certain tidal currents, Proc. Roy. Soc., 124, pp. 150-163, 1929.
- 6) Grace, S.F.: Friction in the tidal currents of the English Channel, Month. Not. Roy. Astro. Soc., Geophys. Suppl., Vol. 4, No. 2, pp. 133-142, 1937.
- 7) Charnock, H.: Tidal friction from currents near the sea bed, Geophys. J. Roy. Astro. Soc., 2, pp. 215-221, 1959.
- 8) Bowden, K.F. and M.R. Howe: Observations of turbulence in a tidal current, Jour. Fluid Mech., Vol. 17, Pt. 2, pp. 271-284, 1963.
- 9) 樋口明生・中村重久：名古屋港の潮流観測について，京大防災研究所年報，No. 7, pp. 410-419, 1964.
- 10) Agnew, R.: Estuarine currents and tidal streams, Proc. 7th Conf. Coastal Eng., Vol. 2, pp. 510-535, 1960.
- 11) Lesser, R.M.: Some observations of the velocity profile near the sea floor, Trans. A.G.U., Vol. 32, No. 2, pp. 207-211, 1951.
- 12) Bowden, K.F. and L.A. Fairbairn: Measurements of turbulent fluctuations and Reynolds stresses in a tidal current, Proc. Roy. Soc., A, pp. 422-438, 1956.
- 13) Kent, R.E. and D.W. Pritchard: A test of mixing length theories in a coastal plain estuary, Jour. Mar. Res., Vol. 18, No. 1, pp. 62-72, 1962.
- 14) 野満隆治・瀬野錦蔵：新河川学，pp. 86-92, 1959.
- 15) 速水頌一郎：Hydrological studies on the Yangtze River, China, IV, Jour. Shanghai Sci. Inst., Section I, Vol. 1, 1939.