Ⅳ－112　港口に於ける閘門の最適規模決定に関する研究

京都大学工学部　正員　長尾義三
京都大学工学部　正員　○木俣　昇
近畿日本鉄道　正員　岩部玖尚

〈まえがき〉

港湾の位置の決定は、原則として国土計画的にみて経済を基盤とした技術的諸条件を具備していることが必要である。従来わが国においては、閘門を有する閉口港は問題にされなかった。地盤沈下にともなう臨海工業地帯の工業立地条件が劣悪化したため、閘門を有する防潮堤の建造による高潮防災の必要性が急激に増大してきた。またわが国の地形上の特質として潮流のはげしい海峡部が多数存在するが、船舶航行の安全上の見地からこれら海峡部に閘門を有する締切堤を建設することの必要性が急速に高まってきた。かくして、港口に閘門を設置する閉口港の検討の必要性が新たな時代的要求として生じてきた。閘門を設置することによって港の内外水位差・潮流の影響を減じ、港湾機能を一面的には向上せしめることが可能になるが、その反面輸送活動チェーンにおいて閘門があい路となり、その結果が輸送経済におよぼす影響は非常に大きい。従ってこのような観点に立ち、閘門の適正規模を算定する研究が重要になってきた。

〈最適規模決定モデル〉

上述したように、このような計画においては、自然的制約条件を満足し、かつ経済的なものでなければならない。経済性の測定は、直接・間接効果を含んだものでなければならないが、間接効果の測定は非常に困難なため、本研究では、輸送経済に対する直接効果のみに限定して費用関数を設定し、それを最小にする閘門規模をもって最適規模と定義した。すなわち、C_A：船舶関係の単位時間当りの費用（円/日）、C_B：施設関係の単位時間当りの費用（円/日）とすれば、費用関数C_iは

$$C_i = C_A + C_B = B_1\lambda\{t_{\bar{w}(S)} + R/\mu\} + C(S) \qquad (1)$$

ただし、B_1：一船当り単位時間当りの費用（円/日隻）、$C(S)$：最大収容隻数をSとしたときの施設関係の単位時間単りの費用（円/日）、λ：単位時間当りの到着隻数（隻/日）、$t_{\bar{w}(S)}$：最大収容隻数をSとしたときの平均待ち時間（日）、R/μ：平均サービス時間（日）、i：自然的制約条件を満足する範囲内で考察した入閘船舶の船型の分割の組合せを示す番号。(1)式で与えられる費用関数を計算し、最小値を与える規模S_iをS_i^*で表示すれば、最適閘門規模は目的関数

$$C = \min_{\{i\}}\{C(S_i^*)\} \qquad (2)$$

を満足する組合せ番号i_0の$S_{i_0}^*$で決定される閘門規模であると定義される。

〈平均待ち時間算定モデル〉

閘門での船舶のふくそう現象は次のごとくモデル的にとらえられる。入港船舶は港の内外水位差のため閘門に入り水位調節を受けねばならない。船舶の安全のため閘門は一方通航とし、入閘扉前に到着した船舶は待ち行列をつくる。入閘扉が開放されると待ち行列の先頭より入閘可能最大隻数S，待ち行列がS隻以下の場合は全隻一度に入閘する。入閘扉が閉鎖され、内外の水位差を調節し、出閘扉を解放し、入閘中の船舶は出閘する。次に出閘扉を閉鎖し、入閘扉を開放して一閘門操作を完了する。この操作が繰返して行なわれる。一方、内外水位差・流速が小さい場合には、閘門の入・出閘扉はともに開放されていて入港船舶は閘室を通過するだけである。入港船舶の到着分布は一般にポアソン分

布に従うといわれている。尼崎閘門での到着分布の調査結果によれば図1のようになりポアソン分布と仮定できる。閘門のサービス時間は一閘門操作時間と考えられるが、解析上サービス時間は閘門サービス開始間隔で定義することとする。尼崎閘門において調査した結果，サービス時間は図2に示すように低次のアーラン分布をなしていると考えられる。一方，大型船舶用の閘門がわが国に存在しないため、そのサービス時間は平均値的にみて成立する次式(3)により推定せざるを得ない。

$k/\mu=\{(a+b)+2(d+e)+f\}/(1-2\lambda c)$ (3) ただし、λ：平均到着率，a：入閘より停止までの時間，b：始動より出閘までの時間，c：船舶安全間隔時間，d e：入，出扉開閉時間，f：水位調整時間。本研究では，上述した自然条件を満足する範囲内の一組合の場合，すなわち以下のような場合についてモデル計算を行なうこととする。(i) 1000^{GT}以下の閘門2基，(ii) $1000^{GT}\sim6000^{GT}$の閘門1基，(iii) 6000^{GT}以上の閘門1基を入，出 用に設置する場合である。サービス時間分布は上述したようにアーラン分布をなしているが，解析が容易であるという理由とその次数が低次であるということより小型船用閘門のサービス時間分布を安全側である指数分布と仮定した。従って上述の条件を満足するシステムは数学的には(i)に対応しては，(A) *Two-Server Bulk Service Queues*, (ii)(iii)に対応しては，(B) *χ^2-Bulk Service Queues*，さらに開放時のシステムは，(c) M/M/S，として記述できる。以下(A)，(B)のモデルについて略述する。(A)：$E(t)$：時刻tで両閘門が空で待ち行列のない確率，$Q(t)$：時刻tで第1の閘門がサービス中で第2閘門が空である確率，$R(t)$：時刻tで第一の閘門が空で第2閘門がサービス中である確率，$P_n(t)$：時刻tで両閘門がサービス中で$n\ (\geq 0)$隻が待っている確率とする。$P_n(t)$の母関数$F(x,t)$は，$F(x,t)=\sum_{n=0}^{\infty}P_n(t)x^n$ (3) と定義される。状態方程式は次のようにあらわされる。

$$\left.\begin{aligned}
&dE(t)/dt=-\lambda E(t)+\mu Q(t)+\mu R(t), \qquad dQ(t)/dt=-(\lambda+\mu)Q(t)+\lambda E(t)+\mu P_0(t)\\
&dR(t)/dt=-(\lambda+\mu)R(t)+\mu P_0(t) \qquad dP_0(t)/dt=-(\lambda+2\mu)P_0(t)+2\mu\sum_{m=1}^{S}P_m(t)+\lambda[Q(t)+R(t)]\\
&dP_n(t)/dt=-(\lambda+2\mu)P_n(t)+\lambda P_{n-1}(t)+2\mu P_{n+s}(t)
\end{aligned}\right\} \quad (4)$$

(3)，(4)の *Laplace* 変換を用いることにより解析された特性方程式 $\lambda x^{S+1}-(\alpha+\lambda+2\mu)x^S+2\mu=0$ (5) の単位円外の根$x_0(\alpha)$を用いて平均待ち行列L_g，待ち時間W_gは次式のように求められる。すなわち，

$L_g=\sum_{n=0}^{\infty}n\{\overline{P}_n(\alpha)\alpha\}|_{\alpha=0}=2\rho^2y_0/(y_0-1)[2\rho^2y_0+(1+2\rho)(y_0-1)]$ (6)，$W_g=L_g/\lambda$ (7)

ただし，$y_0=x_0(\alpha)|_{\alpha=0}$ $\rho=\lambda/2\mu$。(B)：結果のみを記せば，特性方程式

$y^S/[\mu/(\mu+\lambda-\lambda y)]^k-1=0$ (8) の単位円外の根 y_i，$S\leq i\leq S+k-1$ を用いて平均待ち行列L_gは $L_g=\sum_{i=S}^{S+k-1}(y_i-1)^{-1}$，(9) 平均待ち時間 は $W_g=\sum_{i=S}^{S+k-1}(y_i-1)^{-1}-(k-1)/2\mu$ (10) と求まる。

〈最適規模算定例〉

Sを独立変数として(10)で与えられる平均待ち時間を図示すれば図3が得られる。従って費用関係は図4のようになり最小値を与えるSが求まる。

図1 到着分布

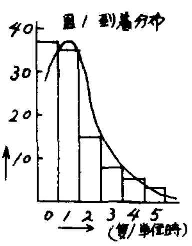

図2 サービス時間分布

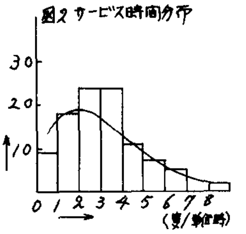

図3 平均待ち時間

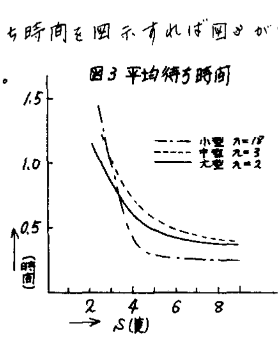

図4 費用関数