

最適しゅんせつ船団計画

資 料

竹内益雄*・植山幸雄**・河田和己***

1. はしがき

わが国の近年における高度成長経済にともない、産業伸長の基盤である工業用地はいちじるしい臨海性向を示し、これに付帯して航路の整備や泊地のしゅんせつ工事等の港湾整備の必要性が強まってきている。しかし最近の傾向として、造成される臨海工業地帯の周辺には適切な土取場が得られないため、埋立用土砂、特に良質土砂が不足し、そのため遠隔地の土取場から良質土砂を大量にしかも低廉に入手することが必要となってきた。また掘込港湾等で大量のしゅんせつ土砂の土捨場が近くになく、遠距離に輸送することも多くなってきた。この方式には、掘削機能と運搬機能を区分したしゅんせつ船ならびに土砂運搬船団をもって施工することが有利とされており、わが国では八郎潟の干拓工事の築堤用砂の採取運搬に始めて使用された。その後伊勢湾の高潮防波堤にも利用され、現在では瀬戸内海の航路のしゅんせつ工事等に使用して、本工法の特色を十分発揮しており、今後も本工法は掘込港湾のしゅんせつ工事とか、干拓堤防の築堤工事に広く応用されることと思われる。

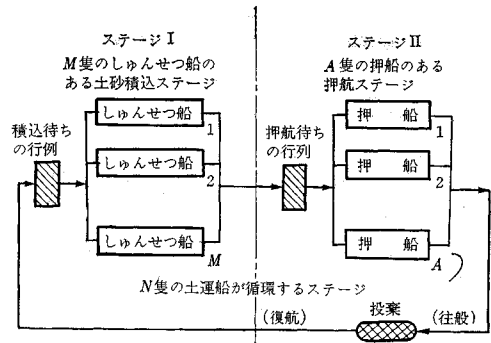
この工法の重要な要素は、各作業船の性能を高めることと併行して、作業船団の組み合わせ方がその経済性を大きく支配する。本研究では特にこの問題を究明すべく、備讃瀬戸航路しゅんせつ工事を例にとりて、土砂の採取ならびに長距離土砂輸送計画における最適船団計画の策定、およびその時の稼働率、施工量の算出を科学的に行なったものである。なお最適船団とは、単位時間においてしゅんせつ土量 1m^3 あたりの各作業船の遊休による損失費用を最小にするしゅんせつ船団の構成をもって定義する。またここにいる遊休時間とは、サイクルキューによって必然的に発生する待ち時間を意味し、休止

時間とは、故障天候等によって偶発的に発生する待ち時間を意味するものとする。

2. 船団の動態について

いま一般的に考えて、それぞれ能力の等しいしゅんせつ船が M 隻、押船が A 隻、土運船が N 隻あるものとし、船団の作業内容をしゅんせつ船の積み込み作業と押船の押航作業からなる2段階のサービス施設のある閉鎖環状システムとしてとらえることとする。このときのしゅんせつ船団の動態を図式化すると図-1 のようになる。備讃瀬戸航路しゅんせつ工事におけるしゅんせつ船団の

図-1 しゅんせつ船団の動態モデル



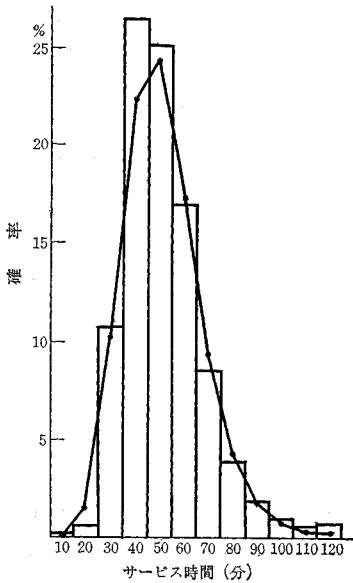
動態分析を行なった結果図-2 のようになったので、しゅんせつ船のサービス時間は平均値 $1/\mu_1$ 、相 k_1 のアーラン分布に、押船のサービス時間は平均値 $1/\mu_2$ 、相 k_2 のアーラン分布にしたがうと仮定した。なお、モデルのくわしい理論解析については「サイクルキューモデルによるしゅんせつ船団計画に関する研究」と題して、竹内が土木学会論文集に投稿中であるので、ここではその結果のみを記すにとどめた。すなわち、 H_i をステージ i ($i=I, II$) においてサービスを受けている(サービスをしている)船の隻数とし、 n_1 をステージ I の土運船の隻数とすると

*正会員 KK臨海土木工業所常務取締役技術部長

**正会員 KK臨海土木工業所企画課長

***正会員 KK臨海土木工業所企画課

図2 しゅんせつ船のサービス時間の確率分布およびアーラン分布
 平均値 $1/\mu_1=0.86$ 時間
 相 $k_1=11$



$$H_I = \sum_{n_1=0}^{M-1} n_1 P(n_1, N-n_1) + M \sum_{n_1=M}^{N-A} P(n_1, N-n_1) + \sum_{n_1=N-A+1}^N (N-n_1) P(n_1, N-n_1) \dots (1)$$

$$H_{II} = A \sum_{n_1=0}^{M-1} P(n_1, N-n_1) + A \sum_{n_1=M}^{N-A} P(n_1, N-n_1) + \sum_{n_1=N-A+1}^N (N-n_1) P(n_1, N-n_1) \dots (2)$$

となる。一般に定常状態においては、サービスを受けている土運船がアーラン分布の各仮想窓口にいる状態確率は等しいので、式(1)、(2)は $M, A, N, 1/\mu_1, 1/\mu_2$ の関数として表わすことができる。また、しゅんせつ船・押船・土運船の稼働率をそれぞれ U_M, U_A, U_N とすれば

$$\left. \begin{aligned} U_M &= H_I / M \\ U_A &= H_{II} / A \\ U_N &= (H_I + H_{II}) / N \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

と表わされる。したがって、このときの遊休率をそれぞれ T_M, T_A, T_N とすれば

$$\left. \begin{aligned} T_M &= 1 - U_M = 1 - H_I / M \\ T_A &= 1 - U_A = 1 - H_{II} / A \\ T_N &= 1 - U_N = 1 - (H_I + H_{II}) / N \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

となる。また、最適船団の定義にもとづいて、目的関数を定めるとつぎようになる。

$$C = \frac{C_M(1-U_M)M + C_A(1-U_A)A + C_N(1-U_N)N}{Q} \dots (5)$$

$$Q = 24 \cdot r \cdot R \cdot H_I \cdot \mu_1 \dots (6)$$

ここに、 C を1日あたり総損失費用、 C_M, C_A, C_N をしゅんせつ船・押船・土運船の1日あたり損失費用、 Q を1日あたり施工量、 r をしゅんせつ時間と運転時間の比、 R を1回あたりの土運船への積込量とする。すなわち最適船団を求めるためには、式(5)の C の値を最小にする船団構成を求めればよいことになる。

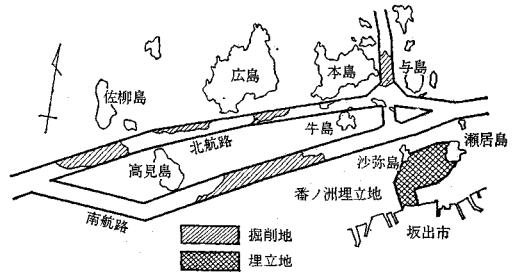
しゅんせつ船・押船・土運船の1日あたり損失費用、 Q を1日あたり施工量、 r をしゅんせつ時間と運転時間の比、 R を1回あたりの土運船への積込量とする。すなわち最適船団を求めるためには、式(5)の C の値を最小にする船団構成を求めればよいことになる。

3. モデルの実証例

前節においては最適船団構成を求めるためのモデルを策定したが、つぎに現実の施工状況に適するかいなかを検討することが重要である。その方法として実際に施工されている、ある工事現場の条件を数学モデルに与え、休止時間を考慮したうえでその時の稼働率から遊休率を求める。この実績による遊休率と前節のモデル計算による遊休率との比較差が小さいほど、理論式の実作業への適応度が高いことになる。

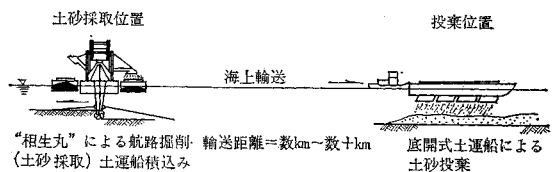
いま実在の工事現場として、瀬戸内海備讃瀬戸航路しゅんせつ工事を例として採用した。この工事を施工するに当たって、臨海土木工業所はカッター付ポンプ式バジローディングしゅんせつ船相生丸1隻のほかに、押船3隻、土運船4隻によって構成された船団を使用している。図-3に施工位置を示す。

図-3 備讃瀬戸航路しゅんせつ工事位置図



本工法はカッター式バジローディングポンプしゅんせつ船により海底の土砂をしゅんせつし、これを船側に接船した大型土運船に積込み、この土運船は押船により押航され、いわゆるバジラインを構成することによって数10km程度までの中距離輸送を経済的に行なおうとするものである。図-4にその工法を示す。

図-4 工法の概要図



相生丸はこの工事の施工目的のために新たに設計、建造されたしゅんせつ船で、従来のポンプ船のように吸入

土砂を長い排送管をとおして輸送せず、両舷の撒管により土運船に直接積込む方式をとっている。このため本船に装備してあるサンドポンプは、低揚程で馬力あたりの揚水量が大きく、含泥率も従来のポンプ船の約2倍(20~25%)にあげることができ、駆動出力は1000 P.S.であるが、6000 P.S.級の普通ポンプ船のそれに匹敵する揚土能力を有しており、しゅんせつ費の経済化を計っている。

土砂輸送にあたるバージラインは、従来の曳船方式にくらべ、離接船、旋回性、航速等の作業性にすぐれており、埋立地における投棄作業も正確に指定された地点に行なうことができる。押船は総出力1240 P.S. 双らせんコルトラダー付で、底開式 850 m³ 積土運船を約7.5ノットの速力で押航し、ピストン輸送に当たっている。

工事着手以来、日々の工事日報にその作業状況を記録し、それをもとにつぎのような資料を収集した。

ステージ I に関する資料

- しゅんせつ船の積み込み時間
- しゅんせつ船の土運船待ちによる遊休時間
- しゅんせつ船の土運船接船待ちによる遊休時間
- 土運船のしゅんせつ船による遊休時間
- 故障、異物混入、測量、錨打替、天候による休止時間

ステージ II に関する資料

- 押船の押航時間、投棄時間、復航時間、シフト時間
- 押船の遊休時間
- 土運船の遊休時間
- 押船—土運船の遊休および休止時間
- 故障、天候による休止時間

以上の資料により、解析された数学モデルが、現実の施工状況と適合するかどうかを検討するため、両者の遊休率をもって比較した。

(1) 条件

$$M=1 \text{ 隻} \quad A=3 \text{ 隻} \quad N=4 \text{ 隻}$$

$$1/\mu_1=0.86 \text{ 時間}$$

$$1/\mu_2 = \begin{cases} 3.80 \text{ 時間 (押航距離 22 km)} \\ 4.04 \text{ 時間 (押航距離 23 km)} \\ 4.07 \text{ 時間 (押航距離 24 km)} \end{cases}$$

(2) 計算

式(3)、(4)を用い、上の条件を与えて計算した。

(3) 結果

表一より明らかなように、このモデルの計算値と施工実績との誤差はきわめて小さく、現実の施工現場によく適合していることがわかる。したがって、将来この種の工事計画に適用できることが推論される。

表一 モデルの計算結果と遊休率の比較誤差

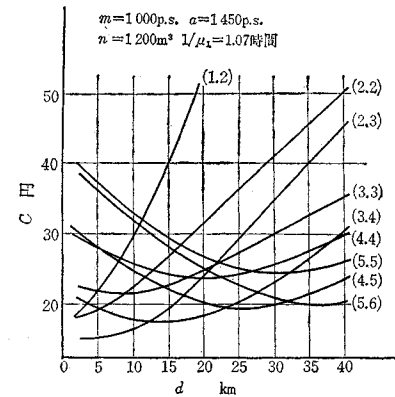
		22 km	23 km	24 km	
モデルによる計算値	$1/\mu_1$ (時間)	0.86	0.86	0.86	
	$1/\mu_2$ (時間)	3.80	4.04	4.07	
	H_I (隻)	0.583	0.558	0.558	
	H_{II} (隻)	2.575	2.614	2.620	
	稼働率	U_M	0.583	0.558	0.558
		U_A	0.858	0.872	0.873
		U_N	0.789	0.793	0.797
	遊休率	T_M	0.299	0.323	0.326
		T_A	0.117	0.104	0.102
		T_N	0.192	0.188	0.187
施工実績	遊休率	T_M	0.320	0.320	0.320
		T_A	0.090	0.090	0.090
		T_N	0.138	0.138	0.138
誤差	しゅんせつ船	0.021	0.003	0.006	
	押船	0.027	0.014	0.012	
	土運船	0.054	0.050	0.049	

サフィックスはそれぞれしゅんせつ船、押船、土運船をあらわす。

4. 計算結果の図表化

通常、工事計画のための理論モデルが策定されているならば、随時、設計条件を与えて計算することにより科

図一5 1日当り損失費用 c と距離 d との関係



図一6 しゅんせつ船の稼働率 U_M と距離 d の関係

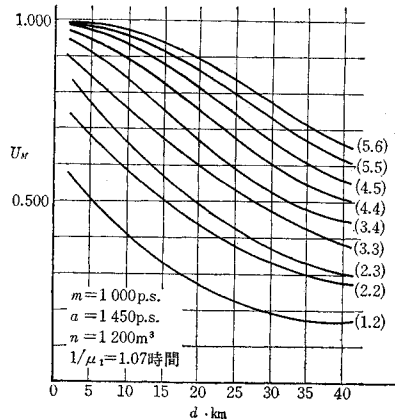


図-7 押船の稼働率 U_A と距離 d との関係

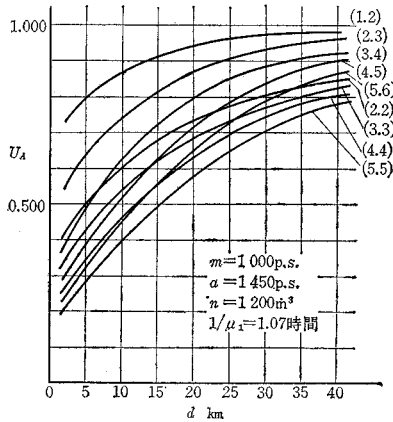


図-8 土運船の稼働率 U_N と距離 d との関係

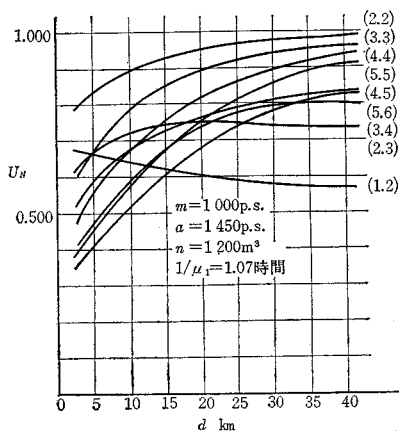
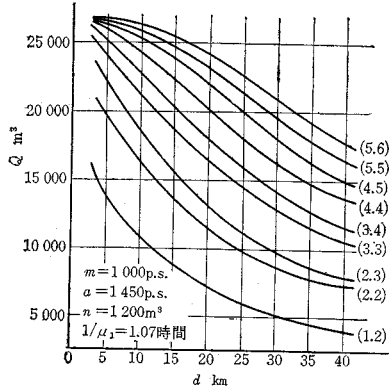


図-9 施工土量 Q と距離 d との関係



学的な工事計画の策定が可能となる。しかしこのための計算には時間を要し、またそのつど電子計算機を使用すれば費用も高くなる。したがって、適応頻度の高い範囲を定めてあらかじめ計算しておけば、そのような手数を省くことができ、しかも他の場合との比較も容易に行な

えるので、諸種の条件を与えて計算を行ない、計画図表の作成を行なった。ここにその例として $m=1\ 000\text{ S.P.}$, $a=1\ 450\text{ S.P.}$, $n=1\ 200\text{ m}^3$ の場合の距離と、1日あたりの損失費用との関係、距離と稼働率との関係、距離と施工量との関係を船団数ごとに図-5~9に表示した。ただし、図の中で (A, N) は押船、土運船の隻数を表わす。また m, a, n はしゅんせつ船、押船、土運船の各船種の規格を表わす。

5. む す び

本モデルでは、待ち時間は遊休のみによるものとして解析したが、実際の施工現場では必ず休止による待ち時間が生じる。しかし、これを一般的に計算式に組み入れて表示することは非常に困難である。すなわち新船、中古船による故障の発生率、地域差による天候の相違などその要素は一様でないからである。したがって、計算結果によっては休止時間を全く無視して求めているので、将来の工事計画に際してはこの点を注意して運用する必要がある。

以上で最適しゅんせつ船団計画の策定が容易にできることになるが、これはしゅんせつ船団計画への一つのアプローチを科学的・定量的に一つのモデルとして取扱かったものである。したがって、実際のしゅんせつ船団の動態をかなり大たんにモデル化しているので、このモデルを解いて得られた数値をもとにして、ただちにデジジョンメーカーを行なうことはきわめて危険である。本研究はデジジョンメーカーを行なう際の一つの科学的な判断の材料を提供するものであり、われわれはこの最適船団計画のモデルの計算結果を基礎とし、これに長年の施工経験を加味するならば、さらに高度なデジジョンメーカーが可能になると確信している。最後に本研究に当って終始ご指導を賜った京都大学工学部教授 石原藤次郎博士、同 長尾義三博士、助教授 吉川和広博士に心から感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 本莊秀一：最近の臨海土地造成工法に関する研究
- 2) 米谷栄二・河上省吾：土木学会論文集第125号 p. 1
- 3) Koenigsberg, E.: Finite Queues and Cyclic Queues, Operations Research, Vol. 8, p. 246, 1960
- 4) 竹内益雄：サイクルキューモデルによるしゅんせつ船団計画に関する研究, 土木学会論文集(投稿中)
- 5) 竹内益雄・村上幹弥：バージローディングポンプしゅんせつ船「相生丸」とバージラインによるしゅんせつ工事について, 作業船, 第42号, p. 19
- 6) 臨海土木工業所：しゅんせつ船の最適船団計画に関する研究 (1966.4.4・受付)