セメント系押出成形部材のプロセス制御システムの開発

A DEVELOPMENT ON PROCESS CONTROL SYSTEMS FOR EXTRUSION MOULDING
OF CEMENTITIOUS COMPONENTS馬場明生^{*1}, 守明子^{*2}, 堀口昌利^{*3}

Akio BABA, Akiko MORI and Masatoshi HORIGUCHI

Process control for the extrusion moulding of cementitious components is more difficult than that of cast moulding because the rheological factors for the moulding are more complicated. This paper deals with a development of total process control systems including material and machinery technologies. Firstly, the process control flow of one way was proposed. Secondly, the equations which show the laws at each step of flow were checked based on experimental data with various materials, mix proportions, die opening geometries and barrel diameters. According to the good coordination between calculated values and experimental ones, the random accessible total system was developed.

Keywords: process control, cementitious components, extrusion moulding, extruding pressure, extruding velocity, process control system

プロセス制御, セメント系部材, 押出成形, 押出成形圧力, 押出成形速度, プロセス制御システム

1. はじめに

押出成形により製造されたセメント系部材は、少ない水量で、しかも、機械力を用いて材料中の空気を排除しながら製造されるので、材料組織が緻密化され、それ故に型枠成形、抄造成形、遠心成形などにより製造される部材と比較すると、高い曲げ比強度と耐久性とにおいて他の追随を許さない。また、押出成形機先端に設置するダイ（口金）を選択することにより、用途に応じた空洞構造をも含む適切な各種断面形状の部材が容易に得られ、しかも、その製造は連続的である。したがって、セメント系押出成形部材は、建築生産における省人化・情報化に対応しうる部材として、その生産量は増加の一途をたどっている。

しかしながら、著者らの最近の研究により、用途に適合した断面形状と安定した品質の部材を製造するための材料技術の観点からの基礎的な法則は明確になったものの、セメント系押出成形部材の製造工場ではシステム化した機械、すなわち機械系の使用を前提としているので、材料技術と機械技術との観点からの総合的なプロセス制御システムの確立が急務である。

著者らは、材料条件を種々変化させた実験を実施し、その

結果に基づいて、セメント系材料を押出成形するときの成形圧力および速度を予測する方法に関する基本的な法則を明確にした。さらに、ダイ開口形状およびバレル径という機械条件を変化させた実験を実施し、成形圧力は材料の塑性加工の度合いにより決定されること、ならびに材料条件と機械条件を変化させたときの成形速度の予測方法等を明らかにした。

ここでは、これらの成果をふまえて、機械条件と材料条件とを任意に変化させた場合における総合的なプロセス制御システム、ならびに押出成形機稼働時において操作点の変更を可能とするオンライン修正技術のための基本的な要素技術を提案する。

本論文で用いた記号

W*	water content ratio (-)
S/C	sand cement ratio(-)
σ	normal stress of fresh mixtures in tapered barrels (MPa)
τ	shear stress of fresh mixtures in tapered barrels (MPa)
Q	conveying rate per revolution (cm^3/r)
V	extruding velocity (cm/min)
P	extruding pressure (MPa)
P_{max}	extruding pressure when closed die openings (MPa)
t_e	effective thickness of die openings (cm)

*1 山口大学 工学部 感性デザイン工学科 教授・工博

*2 通商産業省 工業技術院 九州工業技術研究所
主任研究官・博士(工学)

*3 昭和電工株式会社 総合研究所 川崎研究室 主務

Prof., Dept. of KANSEI Design Engineering, Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Dr. Eng.
Senior Research Scientist, Kyushu National Industrial Research Institute, AIST, MITI, Dr. Eng.
Researcher, SHOWA DENKO K.K.

t_{eo}	effective thickness of barrel openings (cm)
A	sectional area of die openings (cm^2)
A_o	sectional area of barrel openings (cm^2)
n	rotational frequency of screws (rpm)
ζ	die barrel opening ratio (A/A_o)
r	inner radius of barrels (cm)
t	thickness of die openings (cm)
w	width of die openings (cm)
β	sectional hollow ratio of products (-)

2. 既往の研究

セメント系材料をある機械条件において押出成形するときの成形圧力および速度を予測する方法に関連して、著者らは以下の法則を明らかにした。

フレッシュな材料の塑性加工進行中において、ダイとバレルとの間に存在するテーバードバレル内の垂直応力 (σ) と剪断強度 (τ) との関係は、物質の種類および調合という材料条件にかかわりなく次式の関係となる [1]。

$$\tau = a \cdot \sigma^b \quad \text{.....(1)}$$

ここで、 a および b は機械条件に依存する定数である。Equation(1) は、押出成形に用いる材料が、これまで押出成形が適用されているプラスチックや粘土様材料 (Clay-like materials) 等とは異なり、剪断強度とその垂直応力依存性との組合せが優先する粒子分散型複合材料であることを示しており、「塑性加工則」と言うこととする。また、押出成形を実施する前に成形の可否および難易度を予測するために、粘着力および内部摩擦係数を 2 変数インディケータとして提案し、それらを求めるための簡易型一面剪断試験方法を提案した [2]。

つぎに、スクリー 1 回転当たりの材料の搬送量 (Q) は、材料条件にかかわらず押出成形圧力 (P) と次式の関係となる [1]。

$$Q = c \cdot P^{-d} \quad \text{.....(2)}$$

ここで、 c および d も機械条件に依存する定数である。

Equation(2) は生産性に直結した押出成形速度を求めるための基本的な式であり、「生産効率則」と言うこととする。

一方、機械条件としてダイ開口形状およびバレル径を変化させたときの成形圧力および速度について一連の実験を行い、機械条件の押出成形性に及ぼす影響に関して以下に述べる基礎的な知見を得た [3-5]。

機械条件を変化させた場合、成形圧力はバレル部からダイ部における材料の塑性加工の度合い (有効厚さ; t_{eo}) との関係は次式で表すことができる。

$$\frac{P}{P_{\max}} + \frac{t_{eo}}{t_{eo}} = 1 \quad \text{.....(3)}$$

Equation(3) はダイ開口形状とバレル径との関係において成形圧力を求める式であり、「有効厚さ則」と言うこととする。

さらに、機械条件を変化させた場合、成形速度 (V) とバレル断面積に対するダイ開口断面積の割合 (ダイバレル開口

率; $\zeta (A/A_o)$) との関係は次式で表すことができる。

$$V = n \cdot Q / (\zeta \cdot A_o) \quad \text{.....(4)}$$

Equation(4) はダイ開口形状とバレル径との関係において成形速度を求める式であり、「成形速度則」と言うこととする。

ここで、 Q は押出成形機が一定の場合、材料条件のうち水量比*1 (W^*) によって決定され、その関係は次式のようになる。

$$Q = e \cdot W^* + f \quad \text{.....(5)}$$

ここで、 e および f は使用するバレル径および物質によって決まる定数である。

本論文では、物質・調合という多様な材料条件と、バレルならびに部材断面形状を決定するダイ開口形状という機械条件とに関して、以下のような総合的なプロセス制御システムを提案する。

- 1) 材料条件および機械条件を与えることにより、操作点である押出成形圧力と速度との関係を決定することができる。
- 2) 任意の要素システムからランダムにアクセスすることができる。
- 3) オンライン状態で所望の操作点へと修正することができる。

*1 水量比とは、使用材料のうちセメント・細骨材・水の総質量に対する水の質量比とする。コンクリートの場合、通常、材料の調合は単位容積あたりの質量で表すが、ここでは部材の製造管理の立場から質量による表現を採る。

3. 要素技術の提案

3.1 提案の概要

既往の研究成果を基に総合的なプロセス制御システムの単一方向のフローを描くと Figure 1 のようになる。このフローは、フレッシュな材料の剪断特性から始まり操作点の決定に至るまでの基本的な流れを示している。現実の工場操作においてはフローの任意の位置にアクセスできることが求められるので、各ステップの要素を明確化にし、一方向の流れではなく包括的な相互関係について明確にする必要がある。すなわち、各ステップ毎の要素の関連要因および成立する法則を明確にすると同時に、要素間の定量的関連を視覚的にも明らかにする必要がある。そのためには、各要素における法則に加えてその適用範囲が明確でなければならない。そこで、関連要因、法則および適用範囲について取りまとめると Table 1 のようになる。しかし、各ステップにおける法則は、同表に示すように一部既往の研究で明確とはなっているが、以下の事項については明確になっていない。

- 1) 多様な材料および機械条件に対する包括的に成立する押出成形圧力と速度との定量的な関係
- 2) 包括的に成立する定量的な圧力と水量比との関係
- 3) 包括的に成立する定量的な速度と水量比との関係
 - 1) は操作点を定量的に表現するための関係であり、実際に行う製造における操作点はこの関係上にある。
 - 2) および
 - 3) は生産実行中に水量調節・スクリー回転数の調節等に

よって機械の操作条件を変えるための基本情報であり、これから求められる値により 1) の関係上の位置を確定できると同時に、単位水量等の変化に対する操作条件の変化を瞬時に予測することができる。

3.2 要素技術の提案

ここでは、プロセス制御フローの要素技術のうち明確とはなっていない上記 1) ～ 3) の項について明らかにする。

まず 1) に関しては、Equations(2),(3) および (4) より、操作点である押出成形圧力 (P) と速度 (V) との関係は、次式のように表現される。

$$V = \frac{(t_{e0} - t_e)^d}{(t_{e0} - 1)^d} \cdot \frac{n \cdot c}{A} \cdot P^{-d} \quad \text{.....(6)}$$

この式は 6 つの独立した操作点および機械条件の要因相互の関係式であり、機械条件による定数 c と d とを得ることで、操作点は決定される。

次に、2) に関しては、Equations(2),(3),(4) および (5) より、 V および Q を消去すると、成形圧力 (P) と水量比 (W^*) との関係は次式のように表現される。

$$P = \frac{t_{e0} - t_e}{t_{e0} - 1} \cdot c^{1/d} \cdot (e \cdot W^* + f)^{-1/d} \quad \text{.....(7)}$$

この式は、押出成形圧力と水量比との関係をバレルおよびダイという機械条件に関するパラメータを媒介として与えるもので、この式の活用によりオンライン中に水量調整によって成形圧力を変えることができる。

以上により求められた関係と既往の関係を合わせて実験結果にあてはめると、Table 2 のようになった。ここでは、適用範囲および主要定数についても記している。

Table 2 Equations of relationships between extruding pressure and water content ratio

Barrel diameter, 2r (cm)	Effective thickness of barrel, t_{e0} (cm)	Kind of fibers	Constant of equation			
			c	d	e	f
5.0	2.50	Chrysotile	14.08	0.166	69.0	2.2 ($0 < t_e \leq 2.50$)
5.0	2.50	Hydrophilic polypropylene	14.08	0.166	232.9	-17.0 ($0 < t_e \leq 2.50$)
7.5	3.75	Chrysotile	18.22	0.220	194.1	-12.4 ($0 < t_e \leq 3.75$)
7.5	3.75	Hydrophilic polypropylene	18.22	0.220	372.0	-35.2 ($0 < t_e \leq 3.75$)

Table 1 Various laws for presenting operating points of extrusion moulding

Name of law [reference]	Equation	Main variable	Main parameter: factor	Object
Plastic processing law [1, 2]	$\tau = a \sigma^b$	$\tau, \sigma (P)$	a, b : substances, die openings and barrels	stress conditions in tapered barrels
Productive law [1]	$Q = c P^{-d}$	$Q, P (\sigma)$	c, d : substances and barrels	production efficiency and extruding pressure
Effective thickness law [3, 4, 5]	$\frac{P}{P_{max}} + \frac{t_e}{t_{e0}} = 1$	P, t_e	P_{max} : substances and mix proportions t_{e0} : geometries of barrels t_e : geometries of die openings	degree of plastic processing in extruder
Extruding velocity law [3]	$V = n \cdot Q / (\zeta \cdot A_0)$ ($V / Q = n / A$)	V, Q	n : rotational frequency ζ : A/A_0 , die barrel opening ratio A_0 : sectional area of barrels A : sectional area of die openings	extruding velocity and production efficiency
Production efficiency law [4]	$Q = e W^* + f$	Q, W^*	e, f : substances and barrels	production efficiency and mix proportions

Materials and mix proportions

↓ ← Single shear test

Shear characteristics (cohesion and internal friction coefficient)

↓ ← Plastic processing law for standard extruder and standard die

Extruding pressure under standard extruder ($t_{e0} = 2.5$) and standard die ($t_e = t_{e1}$)

↓ ← Effective thickness law under standard extruder (t_{e0}) and standard die (t_{e1})

Maximum extruding pressure (P_{max1})

↓ ← Another extruder (effective thickness of barrel; t_{e0}')

New relationship between effective thickness (t_e) and extruding pressure (P) under another extruder

↓ ← Effective thickness of another die (effective thickness; t_{e2})

Extruding pressure (P_2) under another extruder and another die

↓ ← Relationship between effective thickness and die barrel opening ratio

Die barrel opening ratio under another extruder and another die

↓ ← Productivity law under another extruder and another die

Conveying rate per revolution

↓ ← Die barrel opening ratio under another extruder and another die

Extruding velocity (V) under another extruder and another die

Figure 1 Flow for predicting operating points (one way)

3.3 断面形状パラメータ則の提案

部材の断面形状の各種パラメータのうち、押出成形圧力に関連する有効厚さ (t_e) と押出成形速度に関連するダイバレル開口率 (ζ) とは互いに独立するものであり、現実には工場では押出成形を実施する場合は与条件として予め与えられる。しかし、プロセス制御システムを作動させるためには、採用する部材断面形状に関してこの2つのパラメータ (t_e と ζ) を与えておく必要がある。そこで、バレル径を部材幅 (w) 一定で部材厚 (t) を変化させた場合、部材厚一定で部材幅を変化させた場合、ならびに部材断面形状 $6.0 \times 2.5\text{cm}$ で3つの正方形空洞部をもつシェル厚 (空洞率: β) の異なる場合を例として示すと、部材断面に関する有効厚さとダイバレル開口率との関係を表す式は Table 3 のようになる。

4. 要素技術の検証

著者らがこれまでに実施した一連のセメント系材料の押出成形に関する実験によって得られたデータを用いて、Equations(1) ~ (5) ならびに前項「3. 要素技術の提案」で提案した Equations(6) および (7) で表される要素技術を検証した。

4.1 要素技術の検証のためのデータ

4.1.1 機械条件

押出成形機は、Table 4 に示すように、著者らが標準的な機械として用いてきたバレル径 5.0cm[1-7] と、部材断面積のスケールアップに伴うバレル径拡大を考慮したバレル径 7.5cm との2種類である。それぞれの押出成形機は、パグミル部とバレル部の間に真空脱気槽を備えている。

ダイ開口形状の諸元を Table 5 に示す。ダイ開口形状は、部材幅を一定として部材厚を変化させた場合、部材厚を一定として部材幅を変化させた場合、外部形状を一定として空洞率を3方向に変化させた場合とした。

4.1.2 材料条件

セメント系押出成形部材の製造に用いる物質は、セメント、細骨材、水、繊維質添加材および増粘剤からなる。セメントとして普通ポルトランドセメント (M 社製) (JIS R 5201) を、細骨材として豊浦標準砂を、増粘剤としてメチルセルローズ (S 社製 90SH-4000) を、繊維質添加材としてクリソタイル 6D (JIS M 8602) をそれぞれ用いた。また、セメント系押出成形部材の高靱性化の付与が予備実験により確認された繊維表面を金属酸化物で被覆した親水性化ポリプロピレン繊維 (SD 社製 以下、親水性化 PP と記す。) も繊維質添加材として用いた。セメントの物性を Table 6 に、細骨材の物性を Table 7 に、クリソタイルおよび親水性化 PP の物性を Table 8 にそれぞれ示す。

Table 9 に調合とダイ開口形状との組み合わせを示す。セメントに対する細骨材の割合 (砂セメント比; 以下 S/C と記す。) を質量比で 1.00 一定とし、水量比は繊維質添加材がクリソタイルの場合は 0.13 ~ 0.25、親水性化 PP の場合は 0.13 ~

Table 3 Equations of relationships between die barrel opening ratio and effective thickness

Die opening geometry (cm)	Equation
$6.0 \times t$ (t : thickness)	$\zeta = 36 t_e / \pi r^2 (6.0 - t_e)$
$w \times 2.5$ (w : width)	$\zeta = 6.25 t_e / \pi r^2 (2.5 - t_e)$
6.0×2.5 (β : hollow ratio)	$\zeta = t_e (8.5 + 5\sqrt{5\beta}) / \pi r^2$

Table 4 Specifications of extruders

Maker	Model	Installed mortar (kw)	Conveying capacity (l/h)	Vacuum pump (l/min)	Barrel diameter (cm)
Honda*	DE-50	0.75	12-25	60	5.0
Honda	DE-75D	0.75	15-40	60	7.5

(Note) * This extruder has been used as the standard extruding machine in the authors' (A. MORI and A. BABA) previous studies.

Table 5 Die opening geometries

Geometry of die (cm)	Hollow ratio (%)	Barrel diameter, 2r (cm)	Area of die opening, A (cm^2)	Die opening ratio, ζ (A/A_0) (%)	Effective thickness, t_e (cm)
6.0×1.2	0	5.0	7.20	36.7	1.00
6.0×1.5	0	5.0	9.00	45.8	1.20
6.0×2.5	0	5.0	15.00	76.4	1.76
10.0×1.2	0	5.0	12.00	61.1	1.07
6.0×2.5	33.8	5.0	9.93	50.6	0.66
6.0×2.5	45.0	5.0	8.25	42.0	0.52
10.0×2.5	0	7.5	25.00	56.6	2.00
10.0×2.5	33.8	7.5	16.55	37.5	0.68
10.0×2.5	45.0	7.5	13.75	31.1	0.53

Table 6 Chemical compositions and properties of Portland cement

Kind	Specific		Setting time			Stability
	Density (g/cm^3)	surface area (cm^2/g)	Water content (%)	Initial (h-m)	Final (h-m)	
Ordinary Portland cement	3.16	3190	28.3	2-36	3-45	Good
Compressive strength (MPa)			MgO (%)	SO ₃ (%)	Ignition loss (%)	
	3 d	7 d	28 d			
14.7	24.6	41.6	1.9	2.1	0.7	

Table 7 Properties of aggregate

Kind	Density (g/cm^3)	Bulk density (g/cm^3)	Ratio of solid phase (-)	Angle of repose (degree)	Water absorption (%)
Standard sand	2.66	1.56	0.59	37	0.6

Table 8 Properties of fiber additives

Kind	Density (g/cm^3)	Diameter	Aspect ratio (-)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation (%)
Chrysotile (6D)	2.74	0.7nm	-	1863	70 - 140	-
Hydrophilic polypropylene	0.91	17-19 μm	158-176	588	6.37	35-45

Table 9 Experimental combinations of materials and die opening geometries

Kind of fibers	Water content ratio (-)	6.0x1.2 (cm)	6.0x1.5 (cm)	6.0x2.5 (cm)	10.0x1.2 (cm)	10.0x2.5 (cm)	6.0x2.5 (cm)	10.0x2.5 (cm)	10.0x2.5 (cm)	10.0x2.5 (cm)
		Solid	Solid	Solid	Solid	Hollow (33.8%)	Hollow (45.0%)	Solid	Hollow (33.8%)	Hollow (45.0%)
Chrysotile	0.13	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	0.15	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	0.20	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	0.25	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Hydrophilic polypropylene	0.13	○	○	○	-	-	-	○	○	○
	0.15	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	0.175	○	○	○	-	-	-	○	○	○

0.175とした。水セメント比で表すとそれぞれ0.299～0.667, 0.299～0.424である。この水量比の範囲は、滑らかな表面の部材が得られる水量比であり、この範囲よりも水量比が大きくなると部材表面には波打ち (Wave) が観察され、逆に小さくなると犬歯状のひび割れ (Dog's tooth) が観察される範囲である。増粘剤の添加量は水量比や繊維質添加材の種類によらずモルタル総質量の1質量%とした。繊維質添加材のうちクリソタイルの添加量は、水量比によらずモルタル総質量の5質量%とし、親水性化PPについてはクリソタイルと同体積の添加量となるようにした。

4.2 押出成形圧力と調合との関係

前項「3. 要素技術の提案」で提案した Equation(7) に基づいて、押出成形圧力と調合との関係を検証した。その結果を Figure 2 に示す。Figure 2-a はバレル径が5.0cmの場合を、Figure 2-b はバレル径7.5cmの場合を示す。図中各プロットは実験値を示し、実線は Equation(7) による計算値を示す。何れの機械条件および材料条件においても実験値と予測式による計算値とは極めて高い整合性を示している。すなわち、調合およびダイ開口形状を変化させても、Equation(7) によって調合と成形圧力との関係を予測することができることになる。

すなわち、部材製造中に水量比を変化させることによる押出成形圧力の調整は可能であることになる。また、Table 2 に示すように、各調合における水量比に対する押出成形圧力

a. barrel diameter 5.0cm

b. barrel diameter 7.5cm

Figure 2 Coordination between calculated values and experimental ones (water content ratio vs. extruding pressure)

の定数 (e, f) が明らかとなっているので、Equation(7) は部材製造中における成形圧力の微調整に有効となる。

4.3 押出成形速度と調合との関係

前項「3. 要素技術の提案」で提案した Equation(5) に基づいて、押出成形速度と調合との関係を検証した。その結果を Figure 3 に示す。Figure 3-a はバレル径が5.0cmの場合を、Figure 3-b はバレル径7.5cmの場合を示す。図中各プロットは実験値を示し、実線は Equation(5) による計算値を示す。何れの機械条件および材料条件においても実験値と予測式による計算値とは極めて高い整合性を示している。すなわち、調合およびダイ開口形状を変化させても、Equation(5) によって調合と成形速度との関係を予測することができることになる。

したがって、部材製造中に水量比を変化させることによる押出成形速度の調整は可能であることになる。また、Table 2 に示すように、各調合における水量比に対する押出成形速度の定数 (e, f) が明らかとなっているので、Equation (5) は部材製造中における成形圧力の微調整に有効となる。

4.4 押出成形圧力と速度との関係

前項「3. 要素技術の提案」で提案した Equation(6) に基づいて、押出成形圧力と速度との関係を検証した。その結果を Figure 4 に示す。Figure 4-a はバレル径が5.0cmの場合を、Figure 4-b はバレル径7.5cmの場合を示す。図中各プロット

a. barrel diameter 5.0cm

b. barrel diameter 7.5cm

Figure 3 Coordination between calculated values and experimental ones (water content ratio vs. extruding velocity)

は実験値を示し、実線は Equation(6) による計算値を示す。何れの機械条件および材料条件においても実験値と予測式による計算値とは極めて高い整合性を示している。すなわち、調合およびダイ開口形状を変化させても、Equation(6) によって成形圧力と速度との関係、すなわち、操作点を予測することができることになる。

5. ランダムアクセスプロセス制御システム

前項「4. 要素技術の検証」により検証された要素技術を用いて、多様な材料条件および機械条件に対して、独立した多変数間に包括的に成立する定量的な関係の全体像を表現し、しかも、材料条件・機械条件の各要素よりランダムにアクセスできる制御システムとして Figure 5 を提案する。

Figure 5 は、各要素技術の間に成立する関係を相関図を用いて視覚的に表現したものである。この相関図を用いることにより、任意の要素システムからアクセスし操作点を予測することが可能である。操作点を予測する手順を図に従って述べると以下ようになる。

Figure 5.1 は、「塑性加工則」を示している。用いる押出成形機によって決定される機械条件下で塑性加工則を求めておくことにより、一面剪断試験の実施のみで成形圧力を予測することができる。ここでは、標準的なダイ ($6.0 \times 1.2\text{cm}$) およびバレル (直径 5.0cm) における塑性加工則を示している。図中の式は著者のこれまでの実験により蓄積されたデータ [1, 2, 6 および 7] を活用したものであり、それらの豊富なデータを活用することにより、一面剪断試験さえも実施せずして成形圧力を予測することも可能である。

Figure 5.2 は、「有効厚さ則」を示している。Figure 5.1 より予測した標準的なダイ ($t_e = 1.0\text{cm}$) における成形圧力①と標準的なバレルの有効厚さ ($t_{e0} = 2.5\text{cm}$) より標準的なダイとバレルにおける有効厚さ則②を導き、材料定数である P_{max} ③を求める。求めた P_{max} と実際の製造に用いるバレルの有効厚さ (t_{e0}') とを結んで新たな機械条件における有効厚さ則④を求める。実際の部材製造に用いるダイの有効厚さ (t_e') と有効厚さ則④との交点が新しい機械条件下での成形圧力⑤となる。

Figure 5.3 は、操作点にそれぞれ関係する2つの機械条件である「有効厚さとダイバレル開口率との関係」を示している。「有効厚さとダイバレル開口率との関係」に用いるダイの有効厚さ (t_e) を置くとダイバレル開口率⑥が求められる。求めた値⑥を用いることにより、成形速度予測へと展開する。様々な製品断面形状の系に対応したダイ開口形状についての有効厚さとダイバレル開口率との関係は、Table 3 に既に示した。

Figure 5.4 は、「生産効率則」を示している。予め求めておいた押出成形機についての生産効率則に予測した成形圧力⑤を置くと、単位輸送量⑦が求められる。

Figure 5.5 において、Figure 5.3 で予測したダイバレル開口率⑥と、Figure 5.4 で予測した単位輸送量⑦との交点⑧を求め、この値⑧と原点とを結ぶ。得られた直線の傾きの逆数

は $1/Q$ であるが、この直線は図中の矢印で示すように、単位輸送量 (Q) とダイバレル開口率 (ζ) とによって、原点を中心に变化する。実際の押出成形においては直線の傾きの逆数は小さいので図上での作業を判りやすくするためにこの傾きの逆数を10倍したものを $Q=10$ との交点⑨として求め、成形速度則へとつなげる。

Figure 5.6 は「成形速度則」を示している。図中の式は Equation(4) を変形したものであり、この式は成形速度 (V) と Figure 5.5 で求められた $10\zeta/Q$ との積は、スクリー回転数 (n) およびバレル断面積 (A_0) より算出される $10n/A_0$ と等しいことを示している。ここで横軸は、Figure 5.5 で求められた ζ/Q を10倍としたものとする。Figure 5.5 で求められた交点⑨に対応する $10\zeta/Q$ の値を Figure 5.5 の横軸に置く。この時の同図中に示す実線との交点⑩として、その時の成形速度が得られる。

以上のような手順により、操作点は Figure 5.7 に示すように Figure 5.4 における成形圧力⑦と Figure 5.6 における成形速度⑩との交点⑪となる。

この相関図は、それぞれの要素の何れの部分からもアクセスできるものであり、製造現場におけるオンライン修正技術の基礎となるものである。

6. 結論

セメント系押出成形部材の製造において、機械条件と材料

a. barrel diameter 5.0cm

b. barrel diameter 7.5cm

Figure 4 Coordination between calculated values and experimental ones (Operating points)

条件とを任意に変化させた場合における総合的なプロセス制御システムの開発を目的に、プロセス制御フローの各ステップにおける要素技術を提案した。提案した要素技術をセメント系材料の押出成形に関する一連の実験データに基づいて検証したところ、計算値と実験値とはよく一致した。この結果から、何れの要素技術からもランダムにアクセス可能な、セメント系押出成形部材のプロセス制御システムを開発した。

謝辞

本研究の遂行にあたり、建設省建築研究所 眞方山美穂氏、(株)日本製鋼所 時久昌吉氏および林 政枝氏、昭和電工(株) 松永豊治氏および黒住忠利氏に協力頂いた。記して謝意を表す。

[参考文献]

- [1] 守 明子・馬場明生；セメント系建築材料の押出成形における製造プロセス制御方法の開発，日本建築学会構造系論文集，No.456，pp.1-10，1994年2月
- [2] 守 明子・馬場明生；一面剪断試験によるセメント系建築材料の押出成形性の評価方法，日本建築学会構造系論文集，No.461，pp.1-10，1994年7月
- [3] 守 明子・馬場明生・眞方山美穂・堀口昌利・時久昌吉；セメント系押出成形部材の製造特性および曲げ特性に及ぼすダイ開口形状の影響に関する研究（その1）～（その5），日本建築学会九州支部研究報告，第36号，pp.165-184，1997年3月
- [4] 守 明子・馬場明生・眞方山美穂・堀口昌利・時久昌吉；セメント系材料の押出成形における製造プロセス制御方法の開発（その3）～（その7），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.805-814，1997年9月
- [5] 馬場明生・守 明子；セメント系材料の押出成形における成形圧力を予測するためのダイ開口形状の幾何学的評価方法の提案，日本建築学会構造系論文集，No.501，pp.1-6，1997年11月

Figure 5 Random access system for predicting operating points

- [6] 守 明子・馬場明生；新素材繊維を混入したセメント系材料の押出成形性，日本建築学会構造系論文集，No.484，pp.1-6，1996年6月
- [7] 守 明子・馬場明生；セメント系材料の押出成形におよぼす骨材最大寸法の影響，日本建築学会構造系論文集，No.491，pp.1-6，1997年1月

(1997年12月10日原稿受理，1998年5月8日採用決定)