金型材料用メタルレジンコンクリートの開発*

(第1報, プラスチックの射出成形金型の場合)

田 辺 郁 男^{*1}, 山 田 泰 弘^{*2}, 水 谷 淳 之 介^{*3}

Development of Metal Resin Concrete for Metallic Mold

(1st Report, Injection Molding for Plastics)

Ikuko TANABE, Yasuhiro YAMADA and Jyunnosuke MIZUTANI

It has been pointed out that it is difficult to manufacture hollow molds, free curved surfaces and large molds. Therefore, much time and high cost are involved in the production of injection molds for such plastics. In this paper, a new material, for metal resin concrete, has been developed as a material for the injection mold. This material consists of heat-proof epoxy resin and a steel aggregate. It is concluded from the results that metal resin concrete has sufficient stiffness, high compressive strength, excellent copying characteristics and heat shock resistance to be used as material for the injection mold.

Key Words: Metal Resin Concrete, New Material, Injection Molding, Plastics

1. 結 言

最近, 製品の軽量化のために, 構造材料にプラスチックの使用が増加している。また, 工業製品の多様化と頻繁なモデルチェンジによって, このプラスチック製品製作用の射出成形金型の製造頻度も激増している。

しかし, 射出成形金型の製造は, 凹型や自由曲面の機械加工が難しいこと, 型内に冷却管やノックピンなどの補助加工が必要であること, バリを少なくするために高精度な加工が要求されることなどから, 金型を製作するために多大の費用と日数がかかり, 新製品開発のための大きなネックとなっている。

そこで本研究では, これらの欠点を解消するために, プラスチックの射出成形金型用の型材料を開発・評価したものである。具体的には, 鋳造における造型法と同様の方法で, 製品と同形状の高精度模型を用意し, その模型をインサート材の中に埋設後に離型し, その空間部を射出成形用利用する方法において, そのイ

ンサート材としてメタルレジンコンクリートを開発し, その諸特性を明らかにして, 射出成形金型の型材料としての評価を行った。

2. メタルレジンコンクリートの諸特性

2・1 製作方法 メタルレジンコンクリートは, 金属(メタル)を骨材, 樹脂(レジン)を結合材としたコンクリートタイプの新素材であり, McGEARY⁽¹⁾の「骨材の最充てん方法」を利用して, 著者ら⁽²⁾が開発した「セラミックスレジンコンクリート」の中で初めて構築した考え方を基礎にして開発した新素材である。本実験の試料製作において, 骨材粒径比, 樹脂含浸条件などの製作条件は, これらの報告⁽¹⁾⁽²⁾を参考にして

いる。

図1に具体的なメタルレジンコンクリートの製作方法を示す。容器の中に粗骨材として直径 $\phi 11$ mmの鋼球を加振充てん(加振周波数57.5 Hz)すると, 鋼球は斜方晶充てんされ, 体積充てん率で60%充てんされる。次に, この鋼球の空げき部(40%)に, 中骨材として $\phi 2$ mmのプラスト粒を加振充てんすると, プラスト粒は鋼球の空げき部の6割に当たる24%に充てんされ, 粗骨材および中骨材の体積充てん率の合計は84%に上がる。さらに, 中骨材の空げき部(16%)に, 細骨材

* 原稿受付 平成4年3月10日。

^{*1} 正員, 富山工業高等専門学校 (〒939 富山市本郷町13)。

^{*2} 正員, 福井工業高等専門学校 (〒916 鯖江市下司町)。

^{*3} 正員, 富山商船高等専門学校 (〒933-02 新湊市海老江鎌合1-2)。

として $\phi 0.4$ mm のプラスト粒を加振充てんすると、中骨材の空げき部(16%)の6割に当たる10%に充てんされ、合計骨材充てん率は94%となる。次に、高充てん化した鋼骨材の上から耐熱エポキシ樹脂を結合材として滴下し、ふたをして型内を密封した後、骨材の下から真空引き(1.3 Pa)、また、滴下した結合材の上から加圧(5.9×10^5 Pa)をそれぞれ行い、結合材を迅速かつ満遍なく骨材の空げき部に含浸させる。その後、結合材を硬化させるために、プリキュアとして80°Cで3時間、ポストキュアとして250°Cで4時間保持した後完成する。

特に結合材は、圧縮・曲げ強度が大きいこと、ヤング率が大きいこと、硬化収縮率が小さいこと、耐候性・耐薬品性が大きいこと、分子間で架橋して構造材料に向くことなどの理由から、エポキシ樹脂を選択した。また、硝子遷移温度(TG)が250°Cの耐熱エポキシ樹脂を用い、さらに射出成形金型が急冷されることによって受けるヒートショック対策としてシリコン(ポリマ状)を重量比で15%添加したものを使用した。そのため動粘性係数は、 $0.115 \text{ m}^2/\text{s}$ (25°Cのデータ)と極めて粘性の高い材料となった。

2.2 熱的・機械的特性 メタルレジンコンクリートを射出成形金型用の型材料として使用する場合、いかに適材であるかを判定するために、ここではメタルレジンコンクリートの熱的・機械的特性の測定を行った。測定したのは、密度、熱伝導率、線膨張率、比熱、ヤング率、圧縮強度の5種類で、エポキシレジンコンクリートの測定と同様の方法⁽³⁾で行った。

図1 メタルレジンコンクリートの製作方法

表1に測定結果として、各6個の試料の平均値を示す。射出成形金型の型材料としてメタルレジンコンクリートに要求されることの一つは、生産性を上げるために、高温・流動性プラスチックを早く冷却・固化させることが必要であり、そのために熱伝導率が大きいことが挙げられる。メタルレジンコンクリートは、鋼単体に比べて熱伝導率が6割程度であり、冷却効率は多少悪くなると思われる(後述)。そのため、冷却管を製品の近傍周囲に配置することにより冷却効率を良くすることや、骨材に銅やアルミニウムを用いて、鋼よりも熱伝導率を良くすることなどが考えられる。

次に、精度良く製品を製作するためには、金型の剛性が要求されるわけであるが、メタルレジンコンクリートのヤング率は182 GPaであり、十分な剛性を持っていると言える。また、圧縮強度は250 MPaであり、現在の射出成形圧力の最高とされている120 MPaに比べて、十分な圧縮強度であると言える。結合材として使用した耐熱エポキシ樹脂の接着強度が、硝子遷移温度の250°Cまではほとんど一定であることから、この圧縮強度の値も250°Cまではほぼ一定であると思われる。

2.3 表面付近の微視的観察 メタルレジンコンクリートの表面は、直接製品と接することになる。ここでは、どのような形態でメタルレジンコンクリートが構成されているかを知るために表面付近の微視的な観察を行った。

図2に走査形電子顕微鏡による観察結果を示す。メタルレジンコンクリートの表面は、全面が耐熱エポキシ樹脂で覆われており、その樹脂厚さは薄いところで5~8 μm であった。これは、3種類の試料について観察した結果、いずれも同程度の厚さであった。このメタルレジンコンクリートで射出成形金型を製作した場合、模型と接する部分は耐熱エポキシ樹脂のみで構成されるため、極めて良い転写性が期待される。

図3に工具顕微鏡による観察結果を示す。表面の耐熱エポキシ樹脂の次に $\phi 0.4$ mmのプラスト粒、 $\phi 2$

表1 メタルレジンコンクリートとその構成材料の熱的・機械的特性

Material Characteristics	Metal Resin Concrete	Steel	Epoxy Resin
Density kg/m^3	7360	7830	1500
Thermal Conductivity $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$	29.4	53.5	1.0
Specific Heat $\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$	0.47	0.46	1.6
Coefficient of Linear Expansion $\times 10^{-6} \text{ 1/K}$	14	12	96.5
Young's Modulus GPa	182	205	2.6
Compressive Strength MPa	250	530	—

mm のプラスト粒, $\phi 11$ mm の鋼球の順に構成されており, 各骨材とも個々に連続相に近い状態になっていて, 射出成形圧力に対して耐熱エポキシ樹脂を十分にバックアップできるため, 成形圧力による局部的な変形や破壊は起こりにくいと思われる。

2・4 型の転写性 前節では, メタルレジンコンクリート表面は, 全面が耐熱エポキシ樹脂で覆われていることが明らかになった。そのため, 模型の転写性が極めて良いと思われる。そこで, ここでは, メタルレジンコンクリートの型への転写性を定量的に評価する。評価の方法は, 比較用表面粗さ標準片をマスタとして埋設し, 離型後のメタルレジンコンクリートとこのマスタの表面粗さを比較することによって転写性を調べた。なお, このとき離型剤は使用していない。

図4にメタルレジンコンクリートの転写性の評価結果を示す。図中の○印は, ほぼ対称な位置での比較用表面粗さ標準片の表面粗さ(中心線平均粗さ Ra)を X 座標, メタルレジンコンクリートの表面粗さ(中心線平均粗さ Ra)を Y 座標としてプロットしたものである。この結果から, メタルレジンコンクリートの転写性は, 極めて良いことがわかる。そのため, 高精度模型を用意すれば, 模型の離型後, 機械加工は不要である。

2・5 ヒートショックに対する寿命特性 プラスチック射出成形金型は, 250°C 程度の流動性プラスチック

ックが型内に注入され, それが 30~40°C に急冷却されてから離型される。すなわち, 射出成形金型には大きなヒートショックが予測される。そこで, ここでは, メタルレジンコンクリートのヒートショックに対する寿命特性を検討する。検討方法は, 実際の射出成形の作業時間を考慮して, 250°C の油槽に 5 分間浸けた直後に, 30°C の油槽に 5 分間浸ける。これを繰り返して, メタルレジンコンクリート表面の崩壊の程度を調べる。試料は, 前節で製作した比較用表面粗さ標準片を転写したメタルレジンコンクリートブロック片を使用し, その表面粗さがどのように変化したかで表面劣化の程度を調べた。

図5にヒートショックに対する寿命特性を示す。この結果, 10 000 回程度のヒートショックでは, 表面粗さに変化はなく, 目視でも実験前と全く変化がなかった。これによりシリコンを混入した耐熱エポキシ樹脂はヒートショックに強いことを確認した。

2・6 加工特性 2・4 節から高精度の模型さえあれば機械加工が不要であることがわかった。しかし, ちょっとした型の補正のために機械加工の必要性が出てくることもある。そのため, ここでは, 機械加工特性の検討を行った。

図2 表面付近の樹脂の厚さ

図3 表面付近の骨材の構成状態

図4 メタルレジンコンクリートの転写性

図5 ヒートショックに対する寿命特性

機械加工は、正面フライス加工と平面研削加工の2種類を行った。表2(a)(b)にその加工条件を示す。これらの加工条件は、現在の軟鋼に対する加工条件⁽⁴⁾を参考にした。また、その加工条件よりも、切込み量の少ない加工条件についても行った。

表3に平面研削の結果を示す。切込み量が8 μm のときは、研削面全面にわたって正常な研削面が得られているが、切込み量が20 μm になると骨材に対する研削力が大きくなり、局部的に一番細かい $\phi 0.4 \text{ mm}$ のプラスト粒が粒界破壊を起こして欠落している。また、それは縦送り速度が低い場合に顕著に現れている。なお、フライス加工の場合、切削力によって骨材が粒界で破壊・欠落して、表2の加工条件の範囲では加工が困難であった。

2.7 製作できるプラスチックの種類 表4に射出成形用プラスチックの成形温度を示す⁽⁵⁾。結合材として使用した耐熱エポキシ樹脂の硝子遷移温度が250°Cであるため、メタルレジンコンクリート製射出成形金型で製作できるプラスチックは、表中の6割程度である。しかし、ポリエチレン、ABS、アクリルなどの構造材によく使用されるプラスチックは製作可能である。

表2 機械加工条件

(a) フライス加工の場合

Machining	Milling
Tool	Face Cutter, Diameter $\phi 80 \text{ mm}$, Four Edges, Carbide M20
Cutting Fluid	Water - Soluble
Cutting Speed m/min.	63, 126
Feed per Stroke mm/Edge	0.03, 0.06, 0.12, 0.22
Depth of Cut mm	0.1, 0.3, 0.5

(b) 平面研削の場合

Machining	Surface Grinding
Tool	Grinding Stone, Material WA Diameter $\phi 80 \text{ mm}$, Width 32 mm
Cutting Fluid	Water - Soluble
Number of Revolution r.p.m.	1790
Depth of Cut μm	8, 20
Speed of Longitudinal Feed m/min	4.9, 12, 20
Cross Feed mm/rev.	20

表3 平面研削後の表面粗さ

Speed of Longitudinal Feed m/min.	4.9		12		20	
Depth of Cut μm	8	20	8	20	8	20
Ratio of Normal Grinding Surface%	90	50	100	70	100	85
Surface Roughness R_a	0.12 - 0.25	0.17 - 0.29	0.13 - 0.26	0.18 - 0.28	0.15 - 0.30	0.18 - 0.42

3. メタルレジンコンクリートを用いた射出成形金型の製作とその冷却特性の検討

3.1 射出成形金型の製作 図6にメタルレジンコンクリートを用いた射出成形金型の製作方法を示す。密封可能な容器を加振台の上に固定し、その容器の底面に模型を搭載・固定する。その上に、インサート材として2.1節で説明したようにメタルレジンコンクリートを構成し、模型を離型後射出成形金型が完成する。

図7に、実験のために製作した射出成形金型の概略を示す。図7(a)は、 $\phi 50 \text{ mm} \times$ 長さ40 mmの中実円筒の製品を製作するためのメタルレジンコンクリート製射出成形金型である。上下型とも150 mm $\times$ 150 mm $\times$ 80 mmで、下型は $\phi 50 \text{ mm} \times$ 長さ40 mmの円筒模型を用いて製作し、その円筒の近接周囲に外径 $\phi 10 \text{ mm}$ (内径 $\phi 9 \text{ mm}$) $\times$ 900 mmの銅管を冷却用としてらせん状に埋設した。上型には、実験の際に下型の円筒空間部に加熱したスピンドルオイルを注入するためのライナとして内径 $\phi 10 \text{ mm}$ のアルミニウム管を埋設した。上下型とも4隅に $\phi 10 \text{ mm}$ のアルミニウム管が埋設されており、それを使用してM8のボルトで上型下型を固定できるようになっている。また、図7(b)は、比較のために製作した鋼製(SS41材)の射出成形金型である。冷却用の穴は $\phi 15 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 4$ 本(ストレート)で、冷却の面積がメタルレジンコンクリ

表4 射出成形用プラスチックの成形温度

Plastics	Temp. °C	Plastics	Temp. °C	Plastics	Temp. °C
Polystyrene	220	Polyamide 6	250	Polycarbonate	300
AS	250	Cellulose-butylete	220	GF-Polycarbonate	300
ABS	250	Acryl	240	Polyamide 6-6	300
Polyethylene	200	GF-Polyamid	250	Fluorine	320
Polypropylene	240	GF-AS	250	Polymethyl-pertene	280
Polyacetal	200	GF-ABS	250	Polysulfone	360
PVC	190	GF-Polyacetal	200	Polyacrylate	350

図6 メタルレジンコンクリートを用いた射出成形金型の製作

ートの型と同じにしてある。

今回のメタルレジンコンクリート製射出成形金型は、上型下型とも 13 kgf 程度であったが、メタルレジンコンクリート製作時に必要な設備である加振テーブルには 10 tonf 程度のものがあり、大きな金型を容易に製作できる。そのため、大きな射出成形金型を加工するための大型工作機械が不足している現在、メタルレジンコンクリートの適用は、一つの解決策になると思われる。

また、凸型よりも凹型の機械加工が困難であることから、凸型模型を製作し、それをメタルレジンコンクリートに転写して凹型射出成形金型としたほうが加工時間を短縮できる。その際、補助加工であるライナ・スプール・ノックピンなどの部分についても、これらの部品をあらかじめメタルレジンコンクリート内に埋設することにより機械加工が省略でき、加工時間を短縮できる。加工費用についても同様のことが言える。

3・2 冷却特性の検討 ここでは、射出成形金型の生産性を評価するために、3・1 節で製作した射出成

形金型について、「射出成形されたプラスチックがいかに迅速に冷却されるか」また、「射出成形金型自身の温度がいかに上昇しないか」の2点に着目し、簡単な実験を行った。

図8に冷却効果測定用のセットアップを示す。各射出成形金型の型3点、金型内の空間部3点、室温1点、油温1点の計8点の温度測定を熱電対を用いて行った。室温は、25°C一定と15°C一定の2種類とした。各射出成形金型を冷却するクーラント温度は20°C一定とした。また、実験を繰返し行うためと型内の熱電対保護のために、型内に注入する物質は、射出成形用プラスチックの代わりに、(比熱×密度)の値がそれと似ているスピンドルオイルを使用し、これを200°Cに加熱した後、各射出成形金型に注入し、各温度の経時的な変化を測定した。

図9に注入したスピンドルオイルの経時的な温度変化を示す。温度は3点の測定値の平均値である。メタルレジンコンクリートの熱伝導率が鋼の6割程度であるため、その断熱効果によって油温の冷却速度が多少遅くなっている。例えば、製品温度が40°Cで離型するとすれば、鋼の場合は注入後3.5分かかるのに対して、メタルレジンコンクリートの場合は4.0分が必要であり、この0.5分は、生産性に大きく影響を与える。そのため、射出されたプラスチックと埋設する冷却管の間のメタルレジンコンクリートをできるだけ少なくするような効果的な冷却パイプの配置を考慮する必要がある。

(a) メタルレジンコンクリート製の場合

(b) 比較のための鋼製の場合

図7 製作した射出成形金型の概要

図8 冷却効果測定実験のセットアップ

図9 注入したスピンドルオイルの経時的な変化 (室温 25°C一定の場合)

(a) 室温 25°C一定の場合

(b) 室温 15°C一定の場合

図 10 金型の冷却速度

ある。なお、図9は室温 25°Cの場合の結果であるが、室温 15°Cの場合は、両金型とも各時間の油温が 2 K 程度低かった。

図 10 に各射出成形金型の冷却速度を示す。(a)は室温が 25°Cの場合、(b)は室温が 15°Cの場合である。一般に、プラスチックを注入後、射出成形品の温度が 30~40°C程度になったときに離型し、次の射出成形を行うことになる。図 9 からその間の時間は 5 分程度である。そのため、ここでも注入後の 5 分間について検討する。図 10(a)の型温の変化から、鋼の型の場合は注入後 5.0 分で型全体が 5.0 K 温度上昇したのに対して、メタルレジンコンクリートの場合は冷却パイプを配していない底部(No.1)は、5.0 K 温度上昇したものの、それ以外の部分(No.2 と No.3)は、1 K 以下の温度上昇をただけであった。これは、冷却パイプを円筒部周辺に螺旋状に埋設することにより、効率良く型の冷却ができたことを示している。しかし、図

10(b)のように室温がクーラント温度より低い場合は、熱伝導率の良い鋼の金型のほうが、室温による冷却の影響を大きく受けており、その結果各射出成形金型の冷却速度に大きな違いがないことを示している。

4. 結 言

プラスチックの射出成形金型の製作における欠点を解消するために、インサート材としてメタルレジンコンクリートを開発し、その諸特性を明らかにして、射出成形金型の型材料としての評価を行った。その結果をまとめると以下のとおりである。

(1) メタルレジンコンクリートは、鋼単体に比べて熱伝導率が 6 割程度であり、同一形状の射出成形金型では冷却効率が多少悪くなる。また、剛性・強度は十分であった。

(2) メタルレジンコンクリート表面は、全面が耐熱エポキシ樹脂で覆われており、その樹脂厚さは薄いところで 5~8 μm であった。模型の転写性は、極めて良かった。

(3) シリコン(ポリマ状)を混入した耐熱エポキシ樹脂はヒートショックに強いことを確認した。

(4) 研削加工において、切込み量が 8 μm 以下では、正常な研削面が得られた。

(5) メタルレジンコンクリートを用いて、中実円筒のプラスチック製品($\phi 50 \text{ mm} \times$ 長さ 40 mm)をつくるための射出成形金型が、容易に製作可能であった。

(6) 冷却用の銅管(外径 $\phi 10 \text{ mm} \times$ 長さ 900 mm, ら旋状)を永久埋設することで、冷却用の穴加工を省略できた。

(7) メタルレジンコンクリートの熱伝導率が鋼の 6 割程度であるため、その断熱効果によって油温(製品温度)の冷却速度が多少遅くなっている。そのため、効果的な冷却パイプの配置を考慮する必要がある。

(8) メタルレジンコンクリートの型の温度については、冷却パイプを配していない底部の温度上昇は高いものの、それ以外の部分の温度上昇は低く、効率良く型の冷却ができたことを示している。

文 献

- (1) McGEARY, R. K., *J. of the American Ceramic Society*, 44-10(1961), 513.
- (2) 田辺・川崎, 機論, 57-543, C(1991), 3720.
- (3) 田辺・高田, 機論, 56-525, C(1990), 1314.
- (4) 例えば, データ活用研究会, データ活用ハンドブック(工作編), (1978)91, 163, 技術評論社.
- (5) 青葉, 射出成形・金型マニュアル, (1989), 182, 工業調査会.