高分子コンクリートの動特性と工作機械構造への 応用に関する基礎的研究（第1報）*

—高分子コンクリートの配合設計—

森脇俊道** 上野 滋** 高野真一*** 岩田一明**

Basic Study on Dynamic Characteristics of Polymer Concrete and its Application to
Machine Tool Structure (1st Report)
—Composition Design of Polymer Concrete—

Toshimichi MORIWAKI, Shigeru UENO, Shinichi TAKANO and Kazuaki IWATA

In order to apply polymer concrete as a new structural material to machine tool structures, basic studies are carried out to obtain optimum design strategy of concrete. The relations are experimentally obtained between the weight percentage of the fine aggregate within the aggregates and the volume percentage of the total aggregates filled in limited volumes. Cylindrical specimens made of epoxy resin concretes with various compositions are tested to compare static and dynamic rigidities and tensile strength. Major results obtained are as follows: (1) There exists an optimum weight percentage of the fine aggregate taking into account of the sizes of the aggregates and the volume to be filled. (2) When the content of the resin in the concrete is increased, the damping of the concrete specimen is increased, while the rigidity is decreased. The effect of the resin content is much critical to the change of the rigidity than to that of the damping. (3) The tensile fracture of the concrete is mainly attributable to the fracture of the coarse aggregate. Thus the tensile strength of the concrete specimen is higher for that with larger weight percentage of the fine aggregate.

Key words: machine tool structure, polymer concrete, aggregate, modulus of elasticity, damping ratio, tensile strength

1. 緒 言

工業製品の高度化に伴い、加工技術の進歩と工作機械の高速・高能率化および高精度・超精密化に対する要求はどどまることを知らない。このため工作機械の本体を構成する構造材料に関しても、従来用いられてきた鋳鉄や鋼板溶接構造では満たされないすぐれた特性を求めて、新しい材料を使用する試みが続けられている。たとえば超精密工作機械や測定器には天然の花崗岩が使用され、また最近では各種のセラミックやコンクリートが工作機械に利用されつつある^{1)~3)}。

一般に工作機械構造用材料に要求される性能の項目としては、静・動剛性、熱剛性、寸法安定性、軽量、耐衝撃性、耐水・耐油性、加工性（被削性）、他材料との接合性、成形性、コスト、入手の容易さなどがあげ

られる。近年特に注目を浴びつつある高分子コンクリートは、内部減衰が大きく、成形性に優れ、また低コストであるといった特徴を有している。しかしその反面粒子分散型複合材料である高分子コンクリートは、その配合設計の自由度が大きいいため、工作機械構造用材料としての基本特性、最適な設計方針が明らかにされておらず、また長期寸法安定性についても検討の余地が残されている。

本研究の目的は、高分子コンクリートの特性を主として静・動剛性の観点から明らかにし、工作機械への応用に関して検討することにある。ここではまず、種々の組成を変えた高分子コンクリートの丸棒試料を製作し、その静的、動的特性、ならびに強度を実験的に明らかにするとともに、最適な配合設計について検討する。

2. 実験材料

2.1 骨材と実積率

高分子コンクリートは、母材中に異種の物質を分散

* 原稿受付 昭和58年6月24日、昭和58年度精機学会春季大会学術講演会（昭和58年3月28日）にて発表

** 正 会 員 神戸大学工学部（神戸市灘区六甲台町）

*** 学生会員 神戸大学工学部

Fig. 1 Experimentally obtained relation between inner diameter of cylindrical vessel to be filled and volume percentage of aggregates filled

させた複合材料であり、基本的には骨材とそれらを結合する結合材（樹脂）から成り立つ。高分子コンクリートに使用される骨材の配合設計は、基本的にはセメントコンクリートの配合設計に準拠し、Fullerの実験式⁴⁾やDIN規格⁵⁾などが用いられている。しかしながら、配合設計において基礎となる実積率は必ずしも明らかにされておらず、また高分子コンクリートの特性、特に振動特性に重要な役割を果たすと考えられる組成の影響についての研究は見当たらない。そこでまず、実験によって骨材の実積率を求め、以後の配合設計への手がかりを得るものとする。

ここでは骨材をその寸法によって粗骨材（砂利）と細骨材（砂）の2種類に分ける。すなわちここでは後述するコンクリート試料の寸法を考慮して、10 mm 間隔のふるいを通り、7 mm 間隔のふるいを通らない骨材を粗骨材、2 mm 間隔のふるいを通った骨材を細骨材とする。

内径が種々異なる円筒容器に粗骨材と細骨材をそれぞれ充てんし、その実積率を測定した結果を図1に示す。ここで実積率は、充てんされた骨材の重量を測定し、骨材の比重をもとに換算して求めている。細骨材の実積率は円筒容器内径の大きさにかかわらずほぼ61%の値を保っている。他方、粗骨材の実積率は容器内径が骨材直径の8~10倍以上の場合に細骨材と同じく約61%となるが、容器内径が小さくなるに従い、寸法効果を受けて低下する傾向が見られる。ここで参考のために、直径7 mm および2.38 mm の2種類の鋼球を用いて求めた実積率を同じく図1に示す。単一直径の鋼球の場合は、粒径が分布している骨材に比較して容器内径の変化が実積率に及ぼす影響が顕著である。たとえば直径2.38 mm の鋼球では、実積率は容器内径が粒径の50倍において球の体心立方構造における実積率68%に近づいている。

粗骨材と細骨材の混合物を配合比を変えて内径51 mm の円筒容器に充てんし、粗骨材、細骨材および混

Fig. 2 Experimentally obtained relation between weight percentage of fine aggregate and volume percentage of aggregates filled in cylindrical vessel

Fig. 3 Experimentally obtained relation between weight percentage of small steel ball and volume percentage of steel balls filled in cylindrical vessel

合物の実積率を測定した。図2は得られた砂率（全体の骨材に占める細骨材の割合）と実積率の関係を示している。図より粗骨材と細骨材を混合すると、単独の場合よりも実積率は大きくなり、本実験の場合では砂率37%において最大の実積率72.5%になることがわかる。図には参考のため容器内径が80 mm および25 mm の場合について同様に求めた実積率も示している。粗骨材直径に比較して容器内径が小さい場合には実積率は全般に小さくなるが、それ以外の場合では砂率と実積率の関係はほぼ同じ傾向を示すことがわかる。

内径51 mm の容器に直径7 mm と2.38 mm の鋼球を充てんし、実積率を求めた結果を図3に示す。図2の結果と比較すると、直径が一定の鋼球を充てんして得られる最大の実積率は、粒度分布を有する骨材の場合

表1 樹脂および骨材の基本的な特性

樹脂	粘度 (25°C)	180 mPas
	比 重	1.08
	引張破断強度	54 MPa
	樹脂・硬化材混合比	10:3
骨材	細骨材(ふるいの大きさ)	2 mm 以下
	粗骨材(同上)	7~10 mm
	比 重	2.85

よりも小さく、また最大の実積率を示す細骨材率も異なることがわかる。以上の結果により、本研究では図2の結果に基づいて、高分子コンクリートの配合設計を行うものとする。

2.2 コンクリート試料の組成

骨材と樹脂の組成を種々変化させたコンクリートの丸棒試料を製作し、各種の特性を測定した。丸棒試料の直径は 50 mm、長さは 300 mm である。使用した樹脂はチバガイギー社製のエポキシ樹脂(商品名アラライト)で表1に樹脂および骨材の基本的な特性を示す。

コンクリートの組成に関して、図2の結果から実積率が最大となる砂率 37% を採用し、理論上骨材の空隙を樹脂で完全に充てんするように骨材・樹脂重量比を 7.5:1 としたものを標準試料とする。

ここでは比較のため、樹脂量を標準試料に対して $\pm 20\%$ 変化させたもの、砂率を 0% と 100% としたもの、すなわち粗骨材のみのコンクリートとモルタル、さらに同一の実積率 66.5% で砂率を 16% と 80% に変えたものを製作した。実積率が標準試料と異なるものは、いずれも理論上骨材の空隙を樹脂で完全に充てんし得る骨材・樹脂重量比となるようにしている。またこのほか、増量のために直径 $3\mu\text{m}$ 以下の炭酸カルシウム微粉末を配合した試料も製作した。この場合の骨材、樹脂、増量材の重量比は 8:1:1, 10:1:1, 12:1:1 の 3 種類である。実験に供したコンクリート試料の番号と組成をまとめて表2に示す。

3. 実験方法と実験装置

試作した高分子コンクリート試料の弾性係数、減衰比を以下に示す手順に従って測定した。すなわち両端自由状態における試料の二次曲げ振動のノード点に糸をかけてつるし、試料中央部をハンマで加振することによって生ずる自由減衰振動波形を試料中央部に固定した加速度ピックアップを用いて測定する。ここで加振によって高次の振動モードを励起しないように、ハンマの質量、パッドの剛性を調整しておく⁶⁾。得られた加速度信号は一旦データレコーダに記録し、記録時の

表2 コンクリート試料の成分

番号	砂率	骨材・樹脂・増量材重量比
1	37	7.50 : 1 : 0
2	37	9.38 : 1 : 0
3	37	6.25 : 1 : 0
4	0	4.10 : 1 : 0
5	16	5.67 : 1 : 0
6	80	5.67 : 1 : 0
7	100	4.46 : 1 : 0
8	37	8 : 1 : 1
9	37	10 : 1 : 1
10	37	12 : 1 : 1

Fig. 4 Schematic illustration of experimental setup and data processing equipment

1/16 の速度で再生して A-D 変換器によって数値化(サンプリング間隔 0.1 ms)してミニコンピュータに取り込む。

ミニコンピュータ内では減衰波 1 サイクルごとの極値と隣接する極値間の時間間隔を求め、得られた極値の包絡線を指数関数 $Ae^{-\xi\omega_0 t}$ に最小自乗近似することによって減衰比 ξ を推定する。ここで A は定数、 ω_0 は固有角振動数、 t は時間である。また共振周波数 f から、連続はりの曲げ振動方程式を用いて等価弾性係数 E を次式により求める。すなわち、

$$E = \frac{(2\pi f)^2 l^4 m}{2.267^2 \pi^4 I} \quad (1)$$

ここで、 l は試料の長さ、 I は試料の断面 2 次モーメント、 m は試料の単位長さ当たりの質量である。なお、弾性係数をより精度よく求めるために、いわゆるティモシェンコはりとして取り扱うことも考えられるが、ここでは組成変化によるコンクリートの弾性係数の相違を知ることの主たる目的とし、またポアソン比を求めていることから式(1)による方法を採用している。実験に用いた測定・解析システムの概要を図4に示す。

材料の減衰特性は、加えられる加振力や振動振幅の大きさ、あるいは試料の寸法、形状などの影響を受けることが考えられる。そこで、ここでは加振力一定に

Fig. 5 Weight composition of concrete specimens

相当する加速度振幅レベルにおいて減衰特性を同定することとした。すなわち両端自由の場合における動的なたわみを静的な式に近似し、中央を加振力 F で加振すると、加速度 a は、

$$a = \frac{(2\pi f)^2}{9.8} \frac{Fl^2}{48EI} \quad (2)$$

によって与えられる。ここでは加振力 $F=88\text{ N}$ に相当する加速度レベルから、一定の振動周期の間に減衰比を測定した。

製作したコンクリート試料の引張破断強度を求めるため、万能引張試験機を用いてコンクリート試料に引張荷重を与え、破断に至るまでの荷重と試料の伸びの関係を測定した。

4. 実験結果と考察

4.1 コンクリート試料の重量

同一の配合設計による高分子コンクリート組成のばらつきを調べるため、標準コンクリート試料1について10本の試料を製作した。試料の実積率を求めた結果、骨材の平均比重を2.85とすると実積率の平均値は70.0%、標準偏差は0.64%であった。その他の試料については、3~5本ずつ製作したが、組成のばらつきはほぼ同程度であり、十分小さいと判断できる。

製作したコンクリート試料の平均的な重量と、その配合比から算出した骨材、樹脂、増量材の重量構成をまとめて図5に示す。増量材を添加することにより標準試料1に対して樹脂量が15~36%、骨材の量が2~9%減少しているが、全重量は若干増加する傾向にある。

4.2 等価剛性と減衰比

標準コンクリート試料1をハンマで打撃加振し、得られた自由減衰加速度信号から、各振動周期ごとの振幅の極値と振幅極値間の周期を求め、振動周期に対し

Fig. 6 Example of measured peak amplitude and period of decaying acceleration signal of No.1 concrete specimen subjected to impulsive loading

Fig. 7 Relation of peak to peak amplitudes in adjacent cycles of decaying acceleration signal of No.1 concrete specimen

て図示した例を図6に示す。図より加速度信号はほぼ指数関数的に減衰しており、また振動周期は一定であることがわかる。振動1周期ごとの両振幅と、隣接する振動周期における両振幅の関係を図7に示す。減衰が粘性減衰である場合にはこの両者の関係は原点を通る直線で表し得ること、および図6の結果からコンクリート試料の減衰はほぼ粘性減衰であると考えられる。これよりコンクリートの減衰能を粘性減衰比で評価するのは妥当であると判断される。

10種類のコンクリート試料について測定した減衰比と等価弾性係数をまとめて図8に示す。ここで図の横軸にはコンクリート中に占める樹脂の重量割合を取り、縦軸には実験より求めた減衰比および等価弾性係

Fig. 8 Experimentally obtained modulus of elasticity and damping ratio of concrete specimens as influenced by weight percentage of resin (Numbers in figure denote specimen numbers)

数の平均値と実験データの範囲を示している。全般的に樹脂量が多いほど弾性係数が低下し、逆に減衰比が増加する傾向が認められるが、弾性係数の低下割合は、減衰比の増加割合に比べてはるかに大きい。

炭酸カルシウム微粉末を添加しない試料（試料1～7）のうち、試料2は樹脂量が最も少なく、骨材の空隙が樹脂によって完全に充てんされないため試料中に気孔が存在し、そのため弾性係数は標準試料1よりも小さくなっている。他方試料3は、逆に樹脂量が多すぎてかえって弾性係数が低下している。砂率を大幅に変えても実積率が同じとなるようにした試料5と6については、弾性係数、減衰比ともに近い値が得られていることがわかる。炭酸カルシウム微粉末を添加した試料のうち、試料10は試料2と同じく樹脂量が不足して試料中に気孔が生じていた。

製作した全部の試料について、実験より求めた減衰比と等価弾性係数の関係をまとめて図9に示す。図中大きな記号は、別途製作した直径80mmの試料に対する実験結果を示している。この結果からも材料の剛性と減衰比はほぼ相反する傾向にあることがわかる。

4.3 強度と総合特性

引張試験によってコンクリート試料の引張荷重と伸びの関係を求めた例を図10に示す。図より、引張りにおけるコンクリート材料には弾性変形領域はあまり認められず、材料が破断に至るまでの荷重とひずみの関係は、ひずみの増加に伴って見かけ上材料が硬化する特性を示している。

製作した10種類のコンクリート試料について、実験より求めた固有振動数、等価弾性係数、減衰比、引張破断強度の平均値をまとめて図11に示す。図には比較のため、同一形状の炭素鋼（S45C）棒の実験値もあ

Fig. 9 Summary of relations between modulus of elasticity and damping ratio of concrete specimens (Symbols in larger sizes indicate experimental data for concrete specimens of 80 mm in diameter)

Fig. 10 Experimentally obtained relation between force and elongation of No.1 concrete specimen in tensile test

わせ示している。図より、実験を行った範囲内ではコンクリートの減衰比はほぼ0.008程度（鋼の80～100倍）、弾性係数は13～28 GPa（同0.06～0.14倍）であることがわかる。

試料の引張破断強度に関しては、炭酸カルシウム微粉末を添加しない試料のうち、試料6および試料7の強度が高い。すなわち砂率100%試料7（モルタル）が最も引張強度が高く、また同一の実積率でも試料5より砂率の大きい試料6の強度が高い。これは製作した高分子コンクリートにおいては、いずれも破断は粗骨材（砂利）で発生しており、強度の低い粗骨材の割合が少ない試料ほど全体としての引張強度が高いことによる。引張破断した試料の破断面の例を図12に示す。

炭酸カルシウム微粉末を添加した試料8および9と、それらにほぼ対応する標準試料1を比較すると、炭酸カルシウム微粉末を添加することによって試料の引張破断強度はほとんど変わらないか、あるいは若干増加する傾向が見られる。

以上をまとめると、全般に骨材に関しては最密実積状態を実現し、空隙など欠陥が生じないように必要最小

Fig. 11 Comparisons of physical properties of concrete specimens tested

限の樹脂量を添加すればよいといえる。炭酸カルシウムなどの微粉末を増量材として配合することは、実積率の増加、剛性の向上、高価な樹脂の使用量低減などの観点から有効と思われる。また実験を行った範囲においては、炭酸カルシウム微粉末を添加した試料8,9は作業性も良く、総合的に判断して試作したコンクリート試料のうちでは最も良いものと判断される。

5. 結 言

高分子コンクリートを工作機械に使用することを目的として、種々組成を変えたエポキシコンクリートの丸棒試料を製作し、剛性、減衰能及び強度の観点からそれらの特性を明らかにした。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 骨材の実積率は砂率と充てん空間の大きさに対する骨材寸法によって影響を受け、最適な砂率が存在する。
- (2) 高分子コンクリートの組成に占める樹脂の割合が大きいくほど、減衰比は増大するが剛性は低下する。しかしながら減衰比の増大よりも剛性低下の割合はるかに大きい。
- (3) 高分子コンクリートの引張破断は主として粗骨材の破壊によって発生し、砂率の高いものほど

(a) Concrete 1

(b) Concrete 4

(c) Concrete 8

Fig. 12 Examples of fractured surfaces of concrete specimens after tensile test

破断強度が高い。

以上の研究成果をもとに、高分子コンクリートの最適配合設計の指針を得ることができた。

なお本研究は文部省科学研究費補助金（課題番号56550095）の援助を受けて行ったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) P. A. McKeown & G. H. Morgan: Epoxy Granite; A Structural Material for Precision Machines, Precision Engg., 1, (1979) 227.
- 2) W. J. Wills-More et al.: Some Aspects of the Design and Development of a Large High Precision CNC Diamond Turning Machine, Ann. CIRP, 31, 1, (1982) 409.
- 3) H. Schulz u. R. G. Nicklau: Konstruktives Gestalten von Werkzeugmaschinen aus Polymerbeton, Werkstatt u. Betrieb, 115, 5, (1982) 311.
- 4) 清水茂夫：実用レジンコンクリート，山海堂（1979）。
- 5) DIN 1045: Bestimmungen des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton.
- 6) 森脇俊道，芦田和孝，岩田一明：インパルス応答法による工作機械動剛性の測定（第1報）——ハンマの最適設計，精密機械，44, 6 (1978) 724.