硬ぜい材料の超仕上げに関する研究 (第1報)**

——グラニットの超仕上げ——

松 井 正 己*

Studies on Superfinishing of Hard and Brittle Materials (Part 1)

——On Superfinishing of Granite——

Seiki MATSUI

At first, the scratching test of granite was performed to observe the cutting process by a single grain. Next, the grinding test of granite was performed to study the pre-machining process of superfinishing. Finally, the process of granite superfinishing by vitrified bond wheels and resinoid bond wheels was investigated experimentally. In this experiment, the stock removal, the superfinishing resistance, the surface roughness were measured.

The main results of experiments are as follows.

- 1) Under light load the shape of scratched traces on granite was similar to that on metal.
- 2) Silicon carbide wheels were more suitable for grinding process of granite than aluminum oxide wheels.
- 3) The superfinishing resistance of granite was expressed as the sum of two terms, ploughing and frictional. This ploughing force was proportional to the stock removal. Under the conditions used, the apparent coefficient of friction between wheel and work, μ , was about 0.11 and the experimental constant C' equivalent to the coefficient of piling-up in metal superfinishing about 1.
- 4) The value of surface roughness of granite ground by silicon carbide wheels was about $3 \mu H_{\max}$.
- 5) The value of surface roughness of granite roughly superfinished was about $1 \mu H_{\max}$ and the value finely superfinished under about $1 \mu H_{\max}$.
- 6) Superfinishing process of granite was performed successfully in place of lapping process.

1. 緒 言

一般金属の超仕上げに関する研究, 資料は比較的多く発表されているが, 非金属材料についてはほとんど公表されたものがない。そこで筆者は, 非金属材料のなかでまずいわゆる硬ぜい材料と言われているもの2, 3を選び, これらについて工作物振動方式平面超仕上げ¹⁾を行ない, その際の超仕上げ量, 超仕上げ抵抗, 超仕上げ面あらさなどを実測し種々の考察を試みた。

本報告はその第1報として, グラニットの超仕上げ実験結果について述べる。

2. グラニット (Granite) について

本実験で試料として用いたものは, 山口県産の Black Granite に属する斑れい岩で, 実用的には, 定盤, 直定規などに鑄鉄の代わりとして用いられつつあるものである。

さてこのグラニットの顕微鏡組織は斎藤により詳細に調べられているが²⁾, それによると, 大部分は斜長石で一部輝石から造岩されている。

次に表1はグラニットの物理的, 機械的性質を鑄鉄と比較して示したものである³⁾。これからグラニットは, 鑄鉄に比べて比重, 線膨張係数, 熱伝導率が小さく, シュア⁴⁾かたさが大きいなどの特長を持っていることがわかる。

なお図1は, 筆者が明石製作所製の微少硬度計を使って, 荷重を 25, 50, 100, 200, 500, 1000 g と変えてか

* 昭和38年10月16日 精機学会秋季大会学術講演会において発表

**正会員 東北大学工学部

表1 グラニットの物理的、機械的性質

性質	材質 グラニット* (山口県産)	鋳鉄**
比重 (g/cm^3)	2.92	7.2~7.6
シヨアかたさ	93	38
ヤング係数 (kg/cm^2)	$(9.6\sim9.7)\times 10^5$	$(8.5\sim 10)\times 10^5$
吸水率 (%)	0.04~0.076***	0.0016
比熱 ($\text{cal/g}^\circ\text{C}$)	0.17	0.10
熱伝導率 ($\text{Kcal/mh}^\circ\text{C}$)	1.05	45
温度伝導率 (m^2/h)	2.1×10^{-8}	62×10^{-8}
線膨張係数 ($1/^\circ\text{C}$)	7.7×10^{-6}	10×10^{-6}

*斎藤の実測値。 **機械設計便覧(丸善)より。

***試料を24h煮沸した後の値

図1 グラニットの微少硬度(斜長石の部分)

たさを測定した結果の1例である。これらの測定から次のことがわかった。

- 1) 造岩している各組織によってかたさが異なる。
- 2) 荷重が100g以上になると割れを生じて測定が困難になる。
- 3) 荷重25g, 50gによるかたさの平均値は、斜長石の部分で約680, 輝石の部分で約500である。

3. 実験装置, 実験方法, 実験条件

3.1 ダイヤモンド圧子による引っかかり試験

単一砥粒によるグラニットの切削状態を見る目的で, マルテンズの引っかかり硬度計を使い, ダイヤモンド4角錐を圧子として, 低荷重, 低速引っかかり試験を行ない, 顕微鏡でその引っかかり溝を観察した。

3.2 乾式平面研削加工実験

超仕上げの前加工として, 岡本工作機械製作所製P.S.G-1形卓上精密平面研削盤を使い乾式平面研削を行なった。そして研削抵抗は抵抗線ひずみ計式研削動力計で, また仕上げ面あらさは小坂式仕上げ面検査機で測定した。さらに実際の半径切込量 d をダイヤルゲージで実測し, 研削盤目盛によるみかけの半径切込量 d' と比較し

切り残し量を求めた。

3.3 超仕上げ実験

超仕上げ実験装置はこれまでの実験⁴⁾と同じ故に省略する。

実験方法もこれまでと同様で, 工作物に振動を与え, カップ状砥石を回転させ, 作業条件をいろいろ変えて超仕上げを行ない, 超仕上げ抵抗(平行ばねと空気マイクロメータ使用), 超仕上げ量(化学天びん使用), 超仕上げ面あらさ(小坂式仕上げ面検査機)などを測定し, 必要に応じて超仕上げ面の顕微鏡写真を撮影した。

実験条件の詳細は次のとおりである。

1) 試料 T社製グラニット(山口県産)

Hv $\approx$ 680 寸法は10mm $\times$ 10mm $\times$ 15mm

2) 砥石

WA, #700, R_H72, VおよびC, #700, R_H81, V
A, #500, R_H94, B(通称PE砥石)

3) 作業条件

運動条件…平均切削速度 $\bar{v}=13\sim 30\text{m/min}$ 最大
傾斜角 $\theta=7^\circ\sim 16^\circ$, 切削長 $L=30\sim 60\text{m}$

砥石圧力… $N=1.3\sim 3.3\text{kg/cm}^2$

工作液…軽油(約1l/min)

4. 実験結果および考察

4.1 ダイヤモンド圧子による引っかかり試験

図2は, 前述の要領で, 荷重を3, 5, 10, 25, 35gと

図2 ダイヤモンド圧子による引っかかり溝の形状

変え、0.71mm/minの低速で引っかいた時の引っかき溝の形状を示す。

これから次のことがわかった。

- 1) 荷重3gでは、引っかき溝の周辺に、一様なこまかいひげ状のクラック(たて割れ)が認められるとはいえ、全体としては金属面の引っかきの場合と同様な両縁の比較的はっきりした引っかき溝が認められる。

荷重5gでは、そのひげ状のクラックがやや大きくなるが、やはり全体としては両縁のはっきりした溝が認められる。

- 2) 荷重が10gになると溝の両縁の割れが多少生じてきて、引っかき溝の途中に貝がら状の大きい割れを起こす部分が出てくる。しかしまだ全体としては、金属面引っかきの場合と同様な引っかき溝が認められる。

荷重が25gになると、貝がら状割れが多くなるが、まだ両縁のはっきりした溝の部分も相当ある。

- 3) 荷重が35gになると溝の大部分に大きな割れが生じてくる。

なおこの引っかき試験は、錐面を前方にしていゆる面切削を行なったので、この時の荷重は主に4角錐の前方の1錐面で支えられる。したがって静的な押し込み試

図3 研削抵抗と半径切込み量の関係

図4 垂直研削抵抗と切り残し量の関係
(○WA ●GC)

験の場合にあてはめると4倍の荷重がかかった場合に相当する。すなわち引っかき試験で、荷重10gまでは比較的是っきりした引っかき溝がえられるのは、前述の微小硬度試験で、荷重50gまで塑性変形的な圧痕が見られることと大体対応している。

さてグラニットの超仕上げの場合、1個の砥粒にかかる荷重は数gのオーダーと考えられるので、この引っかき試験からもわかるように、金属面超仕上げの場合と同様な引っかき溝が生ずる場合も多いことが推察される。

4.2 乾式平面研削加工実験

図3は、WA, #80, HmVとGC, #80, HmVの砥石で、グラニットを乾式平面研削したときの研削抵抗と半径切込み量 Δ の関係を示す。また図4は切り残し量の実験結果である。

これらの実験結果から、グラニットの研削加工におい

図5(a) 超仕上げ抵抗の時間による変化の1例

図5(b) 超仕上げ抵抗の時間による変化の1例

図6 超仕上げ量と超仕上げ抵抗の関係

図7 超仕上げ量と超仕上げ抵抗の関係

ではC系砥石が適していること、また接線研削抵抗が鋼などに比べると非常に小さいことがわかる。

したがって以下述べる超仕上げ実験の前加工としてはC系砥石によって平面研削することにした。

4.3 超仕上げ実験

4.3.1 超仕上げ抵抗の時間による変化

超仕上げ抵抗の時間による変化の1例を図5に示す。

前に超仕上げ作用には、脱落形、脱落目つぶれ形、目つぶれ形があり、理想的な場合は脱落目つぶれ形を示すことを明らかにした⁵⁾。

さてグラニットの超仕上げの場合は、図からもわかるように、いずれの砥石でも脱落目つぶれ形を示しており理想的な超仕上げが可能である。特にB砥石の場合はV砥石に比べ超仕上げ抵抗がずっと小さく、十分な仕上げ作用を行なうことができる。

なおこれらの実験結果から次のことがわかった。

1) いずれの場合も、切削後1分位(切削長で約13m)

図8 超仕上げ面の顕微鏡写真 (倍率 ×55)

までは抵抗が漸減し、この時期では切削作用がはげしい。

1分をすぎると、抵抗はほとんど変わらず、切削作用は少なくなり仕上げ作用に入るものと思われる。

2) V砥石の場合、WAとGCでは、超仕上げ抵抗値、超仕上げ抵抗の時間による変化の様子などに大差が認められなかった。

4.3.2 超仕上げ量について

図6、図7は、超仕上げ量—超仕上げ抵抗の実験結果を示す。

さて前報で述べたように、超仕上げ抵抗 T_c は掘り起こし項 T_c' と摩擦項 T_c'' の和と考えられる⁶⁾。ここで T_c' は加工断面積に比例し、 T_c'' は垂直抵抗 N に比例すると考えると次式が成立する。

$$T_c = T_c' + T_c'' = C' \times p \times \frac{M}{\rho L} + \mu N \quad (1)$$

なお T_c は切削方向の単位面積当りの水平抵抗で、実測する接線抵抗を T とすると $T_c = T \times \frac{\pi}{2 \cos \theta \cdot E'(\theta)}$ で表わされる。

ここで $E'(\theta)$: $\sin \theta$ を母数とする第1種完全楕円積分、 M : 単位面積当りの超仕上げ量、 ρ : 工作物比重、 L : 切削長、 p : 比研削抵抗、 C' : 実験常数、 μ : 砥石と工作物間のみかけの摩擦係数である。

いま図6、図7の関係直線を延長し、超仕上げ量 $M \rightarrow 0$ の時の超仕上げ抵抗 T_c から、(1)式を参照してみかけの摩擦係数 μ を求めると、いずれの場合も $\mu \approx 0.11$ となる。

次にこの μ を使って、超仕上げ抵抗を掘り起こし項と

摩擦項に分離すると、この掘り起こし項が超仕上げ量に比例することになる。

さてグラニットでも前述の引っかかり試験から金属面引っかかりと同様な引っかかり溝が生ずることがわかったし、また実際の超仕上げ面を顕微鏡で観察すると図8のようにかなりはっきりした引っかかり溝が認められる。

そこでグラニットの場合も金属の場合と同様に考え、比研削抵抗 P としてマイヤ硬度(ビッカース硬度の1.08倍)をとり、図6、図7の関係直線の勾配から C' を求めてみると、V砥石の場合もB砥石の場合も $C' \approx 1$ となる。なおこの場合 $\rho = 2.9 \text{ g/cm}^3$, $H_V = 680 \text{ kg/mm}^2$ とした。

この C' は金属の超仕上げの場合は盛り上がり係数と名

付けたもので、ゲージ鋼で2~3、黄銅で3~4、軟鋼で4~5、アルミニウムで10~11程度であった。

グラニットの場合の C' は、盛り上がりの効果(C' を大きくすると)、割れの効果(C' を小さくする)の総合されたものであり、金属の場合に比べると小さく、被研削性がよいことを示している。

以上の実験結果ならびに考察から次のことがいえる。

- 1) 荒超仕上げの場合は、V砥石で荷重を大にし、割れを多く起こさせて加工すればよい。この場合A系砥粒とC系砥粒であまり差が認められなかった。
- 2) 仕上げ加工の場合は、弾性砥石(たとえばPE砥石)で荷重を小にし、割れの少ない塑性変形的な加工をすればよい。

4.3.3 超仕上げ面あらさについて

図9は超仕上げ面あらさ曲線の1例を示す。また前加工面(研削面)あらさも付記してある。

これから次のことがわかる。

- 1) 前加工面(研削面)は $H_{\max} = 3 \mu$ 程度であるが、V砥石による荒超仕上げによって 1μ 内外の面が、またPE砥石による仕上げ加工によって 1μ 以下のあらさの面が容易にえられる。
- 2) あらさ曲線のところどころに見られる深い溝は、割れの存在している部分と考えられる。前加工面ではそれが著しいが、荒超仕上げ面では大分少なくなり、仕上げ超仕上げ面ではさらに減少している。
- 3) 文献によると、石材定盤、石材直定規の加工は、荒研削、仕上げ研削後、#220程度のC砥粒で荒ラッピングし、最後は#600程度のC砥粒で仕上げラッピングすると言われている。そしてその際えられる面のあらさとしては、斎藤の実測例があり、Windley Bros. Ltd.の輝緑岩定盤の場合 $H_{\max} \approx 1.1 \mu$ 、Do All Co.の斑れい岩直定規の場合 $H_{\max} \approx 2.6 \mu$ 程度とのことである⁷⁾。

図9 超仕上げ面あらさ曲線の1例

図10 超仕上げ面あらさの実験結果

図11 超仕上げ面あらさの実験結果

したがって筆者の超仕上げ法は、あらさ、仕上げ能率の点から従来のラッピングに代わって十分実用になりうるものと考えられる。

次に金属面の超仕上げの場合と同じように、超仕上げ工程中の平均掘り起こし力 Tc' を $N^{1/2}$ でわったものが超仕上げ面の平均的なあらさに関係すると考える⁸⁾。

図10、図11はその関係を示す実験結果である。

なお掘り起こし力 Tc' は超仕上げ量 M に比例するからここでは $Tc'/N^{1/2}$ の代わりに $M/N^{1/2}$ をとってある。また平均的なあらさとしては、図9のようなあらさ曲線から深い溝(割れの部分)を除いて最大高さあらさを求めその1/2をとった。

単位面積当りの砥粒切れ刃数が砥粒切れ刃角や垂直抵抗などによって変わると考えると、平均的なあらさは、 $(Tc'/N^{1/2})^{2/3}$ に比例すると思われるが⁹⁾、実験結果も大体そのような傾向を示している。

5. 結 言

筆者は硬ぜい材料としてまずグラニットを選び、これについて工作物振動方式平面超仕上げを行ない、その際の超仕上げ量、超仕上げ抵抗、超仕上げ面あらさなどを実測し種々の考察を試みた。なお単一砥粒によるグラニットの切削状態を見る目的で引っかかり試験を、また超仕上げの前加工としての研削実験をあわせ行なった。得られた結果は次のとおりである。

- 1) 微小硬度計によるグラニットのかたさ(荷重25 g, 50 g)は、斜長石の部分で約680、輝石の部分で約500である。
- 2) マルテンスの引っかかり硬度計によるグラニットの引っかかり溝は、荷重10 g程度までは、両縁が比較的是っきりしており金属面の場合によく似ている。
- 3) グラニットの研削加工においては、研削抵抗、切り残し量、仕上げ面あらさなどの点からC系砥石が適している。
- 4) グラニットの超仕上げ抵抗の時間による変化は、筆者の実験条件ではいずれの場合も脱落目つぶれ形を示しており、理想的な超仕上げが可能である。

5) グラニットの超仕上げ抵抗を掘り起こし項と摩擦項に分離した。この掘り起こし項が超仕上げ量に比例する。なおこの場合、筆者の実験条件では、砥石と工作物のみかけの摩擦係数 $\mu \approx 0.11$ 、実験常数 C' (金属の場合の盛り上がり係数に相当するもの) ≈ 1 であった。

6) グラニットの仕上げ面は、研削面で $H_{max} \approx 3\mu$ 程度であるが、V砥石による荒超仕上げで 1μ 内外の面が、またPE砥石による仕上げ加工で 1μ 以下のあらさの面が容易にえられる。

7) グラニットの超仕上げは、仕上げ能率、仕上げ面あらさの点から従来のラッピングに代わって十分実用になりうる。

最後に筆者の研究に対したえず御指導をたまわった東北大学教授佐藤健児博士ならびにグラニット試料について御配慮をたまわった東洋工業株式会社田中重芳博士に深甚な謝意を表する。

また実験の補助で協力をえた佐々木健君ならびに砥石について援助を受けた株式会社呉製砥所、大阪金剛製砥株式会社に対し感謝の意を表わすものである。

(1965, 12月11日受付)

文 献

- 1) 松井正己：平面の超仕上に関する研究(第1報), 精密機械, 22巻7号(1956) 309.
- 2) 斎藤勲男：石材定盤の顕微鏡的組織, 機械の研究, 13巻11号(1961) 1402.
- 3) 斎藤勲男：石材定盤, 日刊工業新聞社, (1963) 154.
- 4) 松井正己：平面の超仕上に関する研究(第3報), 精密機械, 22巻11号(1956) 477.
- 5) 松井正己, 中里昭三：超仕上作業とその原理, 養賢堂, (1965) 89.
- 6) 4) に同じ
- 7) 切削加工技術便覧編集委員会編：切削加工技術便覧, 日刊工業新聞社, (1962) 1223.
- 8) 松井正己, 中里昭三：超仕上作業とその原理, 養賢堂, (1965) 162.
- 9) 8) に同じ.