

表面複合化材料の密着強度評価の提案

Proposal for valuation of adhesion strength in materials to be compounded on surface

九州工業大学工学部
物質工学科 教授
恵良 秀則
Hidenori Era



1. はじめに

近年、高機能化に向けた材料開発が進められており、その中でも鋼や鋳鉄のような安価な材料に異なる性質の材料を複合化して、表面機能を持たせる技術開発が盛んに行なわれている。メッキ、接合、溶射、鋳ぐるみなどは、代表的な複合化の技術である。

複合材料において、基材と表面異種材料の密着強度は、最も重要な特性の一つである。本編ではサーメット溶射皮膜を例にとり、密着強度評価のためのせん断試験方法を提案したので、紹介させて頂く。

2. 従来の密着性評価法

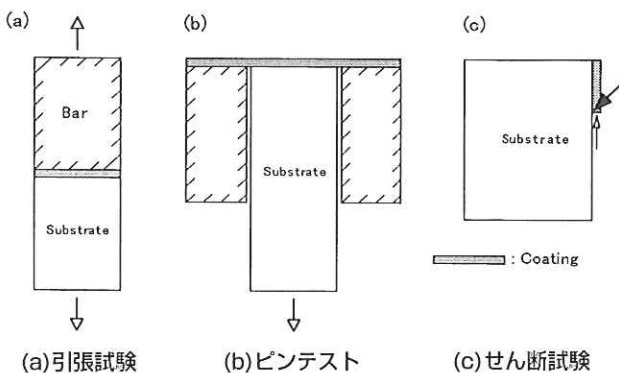


Fig.1 密着強度測定のための種々の方法

Fig. 1 は例えば、溶射皮膜の密着性評価のための試験方法の代表例である¹⁾。Fig. 1 (a)の引張試験は、最も一般的で、簡便な方法であるが、溶射皮膜に別の部材 (Bar) を接着剤で貼り付けて引張るので、この接着剤が基材/皮膜の密着強度より弱いと測定できないなどの欠点がある。Fig. 1 (b)はピンテスト²⁾を示している。ピンテストでは接着剤を使用しないが、ジグと基材を同時に溶射するとき、クリアランス領域に溶射材料が入り込む場合があり、精度の良い測定が困難である。さらに溶射した材料を熱処理したときの密着強度が測定できないなどの欠点がある。Fig. 1 (c)は通常のせん断試験である。試験片作製は、やや複雑であるが、接着剤は使用せず、また熱処理材にも適用できる。せん断試験で最も問題と

なるのが、矢印で示した部分の応力集中である³⁾。この応力集中が大きければ大きいほど、全体としては小さな力で破断し、正確な測定ができないことになる。そこで我々は、この応力集中を低減させるため、基材に半円状のノッチを導入することを提案した。

3. 新しいせん断試験法

Fig. 2 は半径 r のノッチを基材に導入したときの試験片を示している。軟鋼基材に (75Cr3C2+25NiCr) サーメットを溶射した複合材料である (Fig. 3)。溶射皮膜の厚さは $300\mu\text{m}$ である。この試験片をダイスにセットして、パンチでプレスするせん断試験法である (Fig. 4)。

まず、このノッチ導入が応力集中の低減に有効か否かを光弾性実験⁴⁾で確かめた結果が Fig. 5 である。この場合、光透過性の試料としてエポキシ樹脂を用いている。Fig. 5 (a)はノッチ無しで荷重ゼロの場合、Fig. 5 (b)はノッチ無しでプレスした場合で、基材と皮膜に相当する領域の境界と、ダイスの近くに間隔の狭い縞模様が観察される。Fig. 5 (c)に見られるように、半円状のノッチを導入した場合は、間隔の狭い縞模様が消えている。このことから半円状のノッチを導入すれば、応力集中が低減できる可能性のあることがわかる。ただしこの場合、基材および皮膜に相当する部分は、エポキシ樹脂を用いているので、両者の弾性率は同じである。

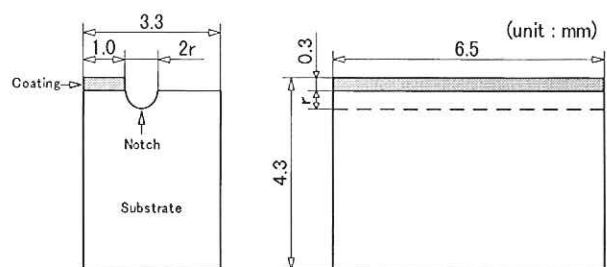


Fig.2 半円状ノッチを導入した試験片

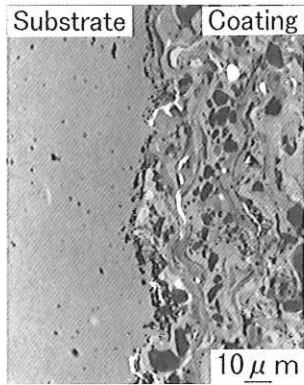


Fig.3 Cr₃G₂ サーメット皮膜と軟鋼基材の境界付近の反射電子像

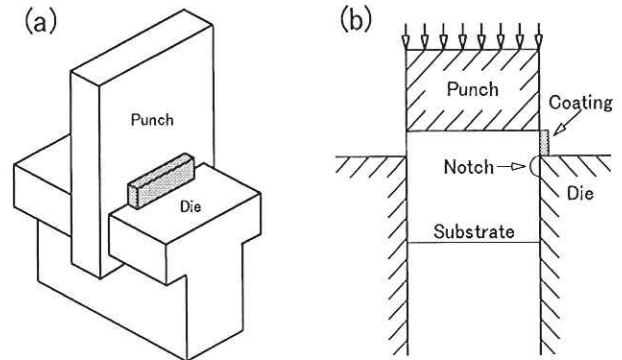
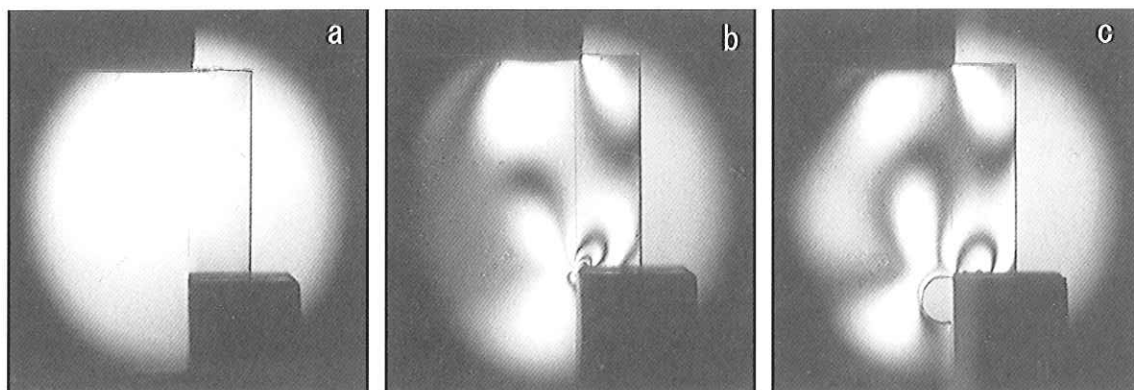


Fig.4 せん断試験のジグ、および方法模式図



(a) 荷重負荷前 (b) 荷重負荷状態 (ノッチ無し) (c) 荷重負荷状態

Fig.5 エポキシ樹脂板のせん断による光弾性像の変化

4. ノッチサイズと応力集中

適正なノッチ・サイズの検討を行うため、有限要素法を適用することにした。有限要素法では、まずメッシュ分割を行う必要がある。ここでは最小メッシュサイズとして $10 \times 20 \mu\text{m}$ を採用した。 $10 \mu\text{m}$ あるいは $20 \mu\text{m}$ というサイズは、応力集中の評価が十分にできることを別の計算によっても確認しており、また基材と溶射皮膜の境界付近は、 $20 \mu\text{m}$ 前後で凹凸があることから、妥当であると考えている。このような考察に基づき、メッシュ分割をFig.6のように行った。また有限要素法による計算結果をFig.7に示す。ノッチが無い場合、応力集中が3倍程度生じるが、ノッチがある場合 ($r=0.3\text{mm}$)、応力集中が低減していることがわかる。この結果は光弾性実験結果 (Fig.5) とも一致している。

応力集中を定量的に表わすため、相当応力を荷重応力で規格化した (σ / σ_0)。この値を基材/皮膜界面長手方向の距離L (Fig.6 参照) で整理した。結果をFig.8に示す。ノッチが無い場合、 $L=20 \mu\text{m}$ のところで $\sigma / \sigma_0=2.7$ であり、ノッチを導入すると、 σ / σ_0 は低下していくことがわかる。しかしノッチの半径rが0.3と0.4では、相当応力は同様な値を示し、これ以上ノッチサイズを大きくしても効果は無い。なおこの場合、基材と皮膜の弾性率は、同じとした ($E_c/E_s=1.0$)。

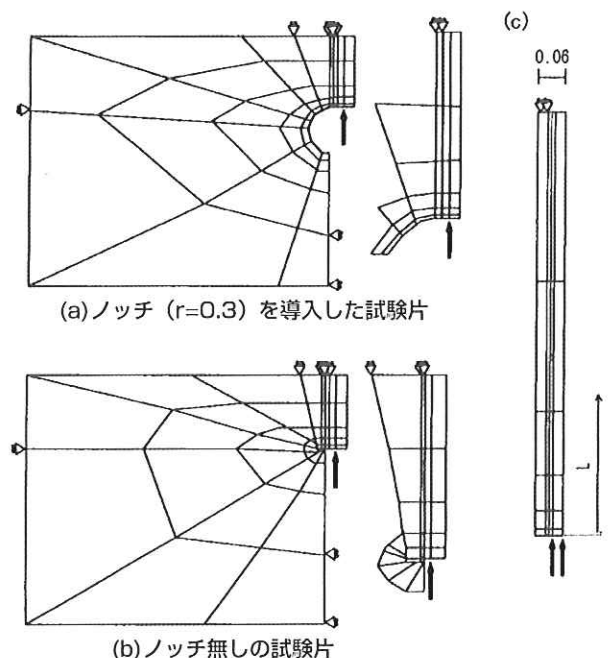


Fig.6 せん断試験片のメッシュ分割図

一般に耐摩耗性などが要求される被覆材料は、セラミックスやサーメットなどの硬質の材料が使用される。本稿で実験に使用した試料の基材は、軟鋼 (ヤング率、 $E_s=210\text{GPa}$) で、溶射皮膜はサーメット ($E_c=350\text{GPa}$ と見積った) であり、 $E_c/$

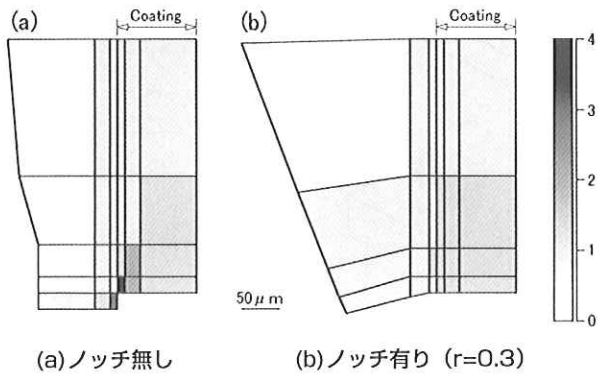


Fig.7 皮膜と基材のヤング率が同じ試験片 ($E_C/E_S=1.0$)の相当応力分布図

$E_S=1.67$ である。このときのL方向の σ/σ_0 の値がFig.9の上側の図(a)である。Fig.9の下側の図(b)は、せん断応力を表したものであり、基材と溶射皮膜のせん断力の平均値(τ_0)で規格化している、いずれにしろ $r=0.3\text{mm}$ 程度のノッチを導入することで、応力集中を著しく低減させることができる。すなわち精度の高い密着強度を測定できることが明らかとなった。

Fig.10に軟鋼/サーメット溶射皮膜をせん断試験としたときの密着強度の測定結果を示す。ノッチが無いとき($r=0$)応力集中が起こり、密着強度が低く測定されているが、ノッチを導入した場合、密着強度は高く測定され、 $r=0.3\text{mm}$ と $r=0.4\text{mm}$ ではほとんど変わらない密着強度となる。これは有限要素法の試算結果とも一致している(Fig.9参照)。

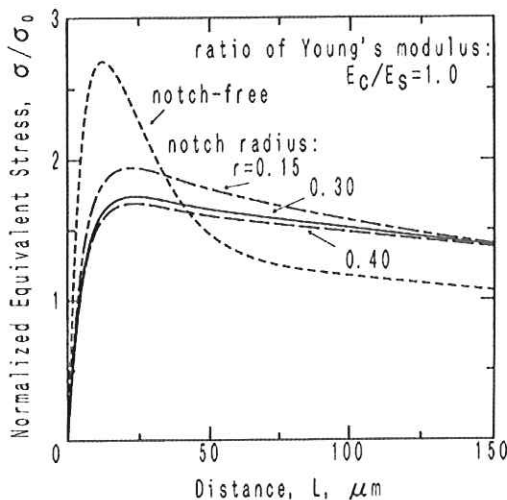
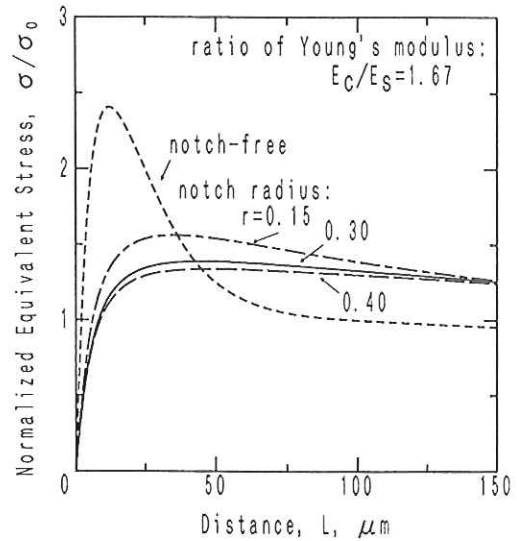


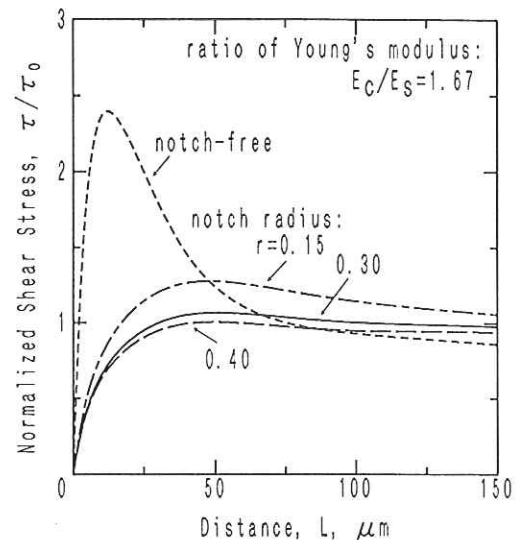
Fig.8 皮膜/基材界面に沿う相当応力の変化

5. 弾性率と応力集中

Fig.8とFig.9の結果から、基材あるいは皮膜の弾性率が異なると、応力集中の程度も違ってくるのではないかと推察される。そこで基材と皮膜のヤング率の比(E_C/E_S)を変化させて、有限要素法の計算により、検討を加えた。その結果をFig.11に示



(a)相当応力



(b)せん断応力

Fig.9 皮膜/基材界面に沿う相当応力の変化

す。縦軸の σ_{\max} は、基材/皮膜界面に沿う距離Lを変化させたときの、最も高い相当応力を示している。ノッチを導入すると、ヤング率の比に拘わらず応力集中は低減するが、その効果は E_C/E_S の値が大きいほど著しい。このことは例えば、基材に対して皮膜の弾性率が大きい方がノッチの導入による応力集中低減効果は、大きいことを示している。

6. おわりに

一般に性質の異なる材料(例えば金属とセラミックス)を複合化すると、それらの界面における密着性が問題となる場合が多い。そして、この密着性の評価も、本稿で述べた理由により精度よく測定することは、一般には難しい。本稿では溶射皮膜を例にとって、密着強度の評価方法を検討した結果、次のようにまとめることができる。

- (1) 光弾性実験および有限要素法による解析から、せん断試験片に半円状のノッチを導入するこ

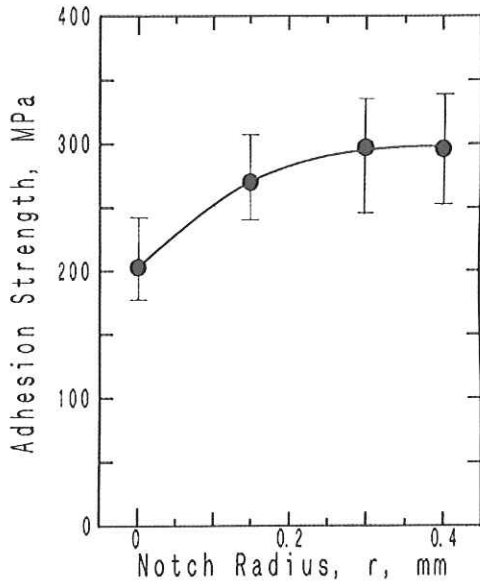


Fig.10 実際のせん断試験によって得られた Cr₃C₂サーメット皮膜の密着強度

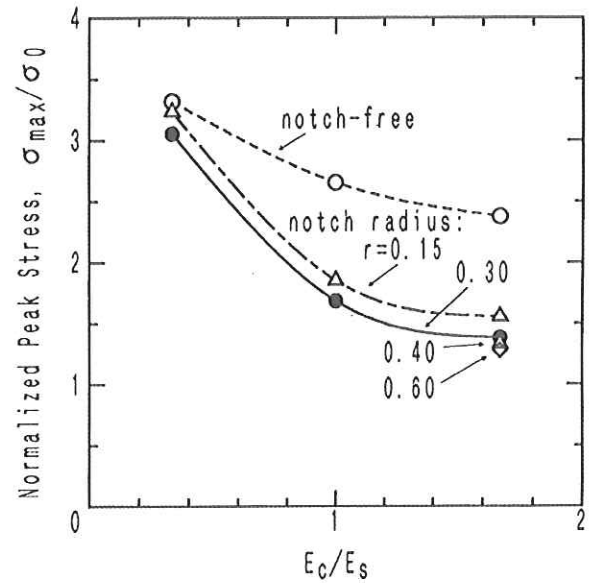


Fig.11 ピーク・ストレスに及ぼすノッチ・サイズとヤング率の比(E_c/E_s)の影響

とにより、試料片のコーナー部分の応力集中を低減させ得ることがわかった。

- (2) 溶射皮膜のヤング率が基材にほぼ等しいか大きいときに、ノッチ導入による応力集中低減効果が著しい。
- (3) 軟鋼基材にサーメットを溶射した試料片を用いて、実際にせん断試験を行った結果、ノッチ導入の有効性を確認できた。

参考文献

- 1) 日本工業規格、H8666、1980
- 2) 井上好章、小野登明、納富啓、出羽昭夫、豊田政男、塚本光夫、溶接学会論文集、9 (1991)、167
- 3) 福田重久、九州大学学位論文、1985、59
- 4) S.P.Timoshenko, J.N.Goodier, Theory of Elasticity, 3rd ed, McGraw-Hill, New York, 1970, 90