

# 木材接着結合における破壊靱性と耐水性

本多 琢己

Fracture Toughness and Water Resistivity of Double-Cantilever Beams.

Takumi HONDA

**Summary** : Double-cantilever beams (DCB) were used to estimate the fracture toughness of wood adhesive joints. Various adhesives were used for bonding the DCB specimens, and also the effects of a wet treatment on the fracture toughness  $G_{IC}$  were investigated. No serious change of  $G_{IC}$  was observed to aqueous polymer isocyanate (API) adhesives, phenol-resorcinol formaldehyde (PRF) adhesives, which showed good water resistivity.  $G_{IC}$  of PRF adhesive bonds were smaller than those with API adhesives, polyvinyl alcohol/isocyanate (PVA/I) adhesive, and polyvinyl acetate/isocyanate (PVA<sub>c</sub>/I) adhesive.  $G_{IC}$  of PRF adhesive bonds increased when adding a small amount of PVA.

**要旨** : 2重片持ち梁の試験片を用いて各種接着剤の Mode I の破壊靱性 ( $G_{IC}$ ) を測定し、 $G_{IC}$  の挙動から接着層の耐水性を検討した。水性高分子-イソシアネート系樹脂 (API) 接着剤は、各処理において  $G_{IC}$  の変化が見られず良好な耐水性を示した。ポリビニールアルコール (PVA) や酢酸ビニール樹脂 (PVA<sub>o</sub>) をイソシアネートで強化した接着剤も  $G_{IC}$  の変化が少なかった。一方、フェノール・レゾルシノール共縮合樹脂 (PRF) 接着剤は耐水性に優れるものの、これらの熱可塑性樹脂接着剤などに比べて  $G_{IC}$  が低めであった。少量の PVA の充填によって PRF に補強効果が現われ、効率的な改良が可能であった。しかし、PVA の充填量をさらに増していくと耐水性に影響を及ぼす。

## 1 緒 言

一般的に、接着結合された部分の強さの判定は、破壊を生ぜしめる力を測定する方法で行われている。一方、集成材の端部のように乾燥などによる亀裂が予め存在する場合、接着層の開口を伴う破壊が多い。このような場合は接着層を亀裂が進展するときのエネルギー（破壊靱性  $G_{IC}$ ）を測定したほうがより実用的である。

$G_{IC}$  による木材接着の評価は、佐々木<sup>1)</sup>、高谷<sup>2)</sup>、鈴木<sup>3)</sup>らによってなされてきたが、いずれも常態試験における報告である。接着製品には用途によって耐水性や長期間の使用に耐えることのできる耐久性が要求されるので、耐水性試験や耐久性試験の際にも  $G_{IC}$  の測定を導入する必要がある。岩崎<sup>4)</sup>らは単板による2重片持ち梁 (DCB) の  $G_{IC}$  を測定し、耐水性との関係を報告している。この手法を集成材の接着耐水性の評価に適用<sup>5)</sup>するとすれば、被着体の膨潤・収縮により接着層に生ずる内部応力や被着体の剛性の大きさが接着系の  $G_{IC}$  に影響すると考えられるので、ラミナ程度の厚さの被着体で測定

する必要がある。

本報告は、耐水性試験における DCB のモード I 破壊挙動を明らかにすることで接着耐水性の新しい評価を試み、集成材の接着耐水性に関する新知見を得ようとするものである。

## 2 実験方法

### 2-1 試験片の作製

被着体としてカラマツ材を用いた。気乾比重 0.56～0.63、平均年輪幅 1.6mm、晩材率 30%程度であった。試験体の形状は Fig.1 のごとくで、板目面の繊維方向が荷重に対して converging になるように組み合わせ、柁目接着とした。接着層は荷重点から 50mm～140mm の間で、塗布量は 250g/m<sup>2</sup> とした。被着体の両端にテフロンシートを挿入し一定の接着層厚さを得た。圧縮圧 0.98Mpa、室温で 24hr 硬化させた。

### 2-2 接着剤

以下に使用した接着剤を示す。

API : 市販の水性高分子-イソシアネート系接着剤 5 種をそのまま用いた。銘柄ごとに API・a、API・b、API・

Table. 1 Test conditions

Tests	Test procedures
1 Normal test	58% RH 3weeks
2 Cold water soaking/dry test	58% RH 3weeks→20°C cold water 6hrs→40°C 18hrs dry→air dry
3 Cold water soaking/dry test	58% RH 3weeks→20°C cold water 24hrs→60°C 24hrs dry→air dry
4 Hot water soaking/dry test	58% RH 3weeks→60°C hot water 3hrs→60°C 3hrs dry→air dry
5 Boil and dry test	58% RH 3weeks→boiling water 5hrs→20°C cold water 1hr→60°C 20hrs dry →air dry
6 Boil and dry cycle test	58% RH 3weeks→boiling water 4hrs→60°C 20hrs dry→boiling water 4hrs →60°C 2hrs dry→air dry

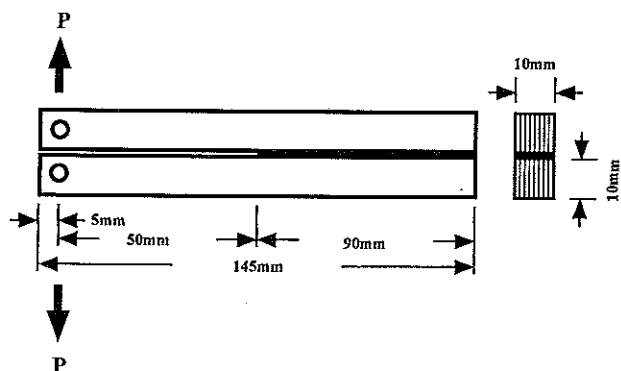


Fig. 1. Sample geometry of double cantilever beam.

c、API・d、API・eのように記す。

*PVA/I*: 15%PVA水溶液100部、CaCO<sub>3</sub>10部、SBR10部を混合したものを主剤とし、架橋剤としてイソシアネート溶液（75%トルエン溶液）を主剤に対して15部添加した。

*PVAm/I*: 前記のPVAを変性タイプとし、SBRを20部とした。

*PVAc/I*: 市販の酢酸ビニール樹脂接着剤にイソシアネート溶液を20部添加した。

*PRF*: 市販のフェノール・レゾルシノール共縮合樹脂接着剤をそのまま用いた。

*PRF・PVA*: PRFにPVA水溶液を添加した。たとえばPRFに対してPVA水溶液を7.5部添加したものをPRF・PVA7.5のように記す。

### 2-3 接着試験

DCBを一条件につき10個作製し、引張速度5mm/minで荷重-開口変位曲線を記録した。G<sub>IC</sub>は佐々木<sup>1)</sup>らの考案した式を用いて算出した。定数は高谷<sup>2)</sup>らの報告を参考にした。各耐水性試験の条件をTable.1に示す。

## 3 結果および考察

### 3-1 API接着剤

Fig.2からFig.6に市販のAPI接着剤の各処理に対するG<sub>IC</sub>の変動と木破率との関係を示す。API・a、API・b、API・c、API・dの各接着剤は構造用の場合で、いずれの接着剤においても処理1のG<sub>IC</sub>に対して有意な差を生じたものが存在せず、各処理に対してもG<sub>IC</sub>が安定し、良好な耐水性を示した。主剤のベースポリマーはAPI・aが変性PVA樹脂、API・bがEVA樹脂、API・cがアクリル樹脂、API・dがEVA樹脂と推察される。

また、API・eは造作用の場合であるが、処理1のG<sub>IC</sub>に対して5%有意水準で差が認められるのは処理6で、破壊荷重が103Nから85Nへ低下した。API・eの主剤のベースポリマーはおそらくPVA樹脂であろう。

### 3-2 PVA/I、PVAm/I接着剤

Fig.7にPVA樹脂をイソシアネートで強化した接着剤の各処理に対するG<sub>IC</sub>の変動と木破率との関係を示す。PVA/Iの主剤の組成はAPI・eに類似していると思われる。処理1のG<sub>IC</sub>に対して5%有意水準で差が認められるのは処理3、6である。処理3では木破率に変化はないが、破壊荷重が121Nから97Nへ低下している。また、処理6では破壊荷重が121Nから100Nへ低下し、さらに木破率も82%から58%へ急減している。

Fig.8はFig.7のPVAを変性PVAとした場合であるが、処理1のG<sub>IC</sub>に対して5%有意水準で差が認められるのは処理6で、破壊荷重が99Nから80Nへ低下し、さらに木破率も70%から42%へ急減している。PVA/Iの結果と較べてG<sub>IC</sub>の値は小さくなっているものの、処理3に対しての改良が認められる。変性PVAはイソシアネー

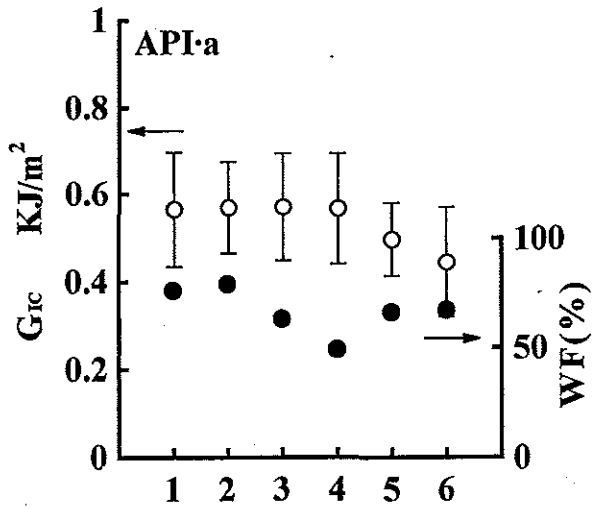


Fig. 2. Fracture toughness ( $G_{Ic}$ ) and wood failure (WF) of DCB bonded with API·a adhesive.

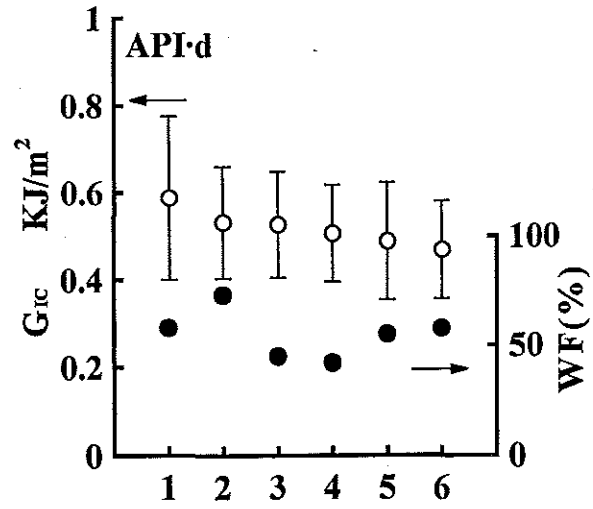


Fig. 5. Fracture toughness ( $G_{Ic}$ ) and wood failure (WF) of DCB bonded with API·d adhesive.

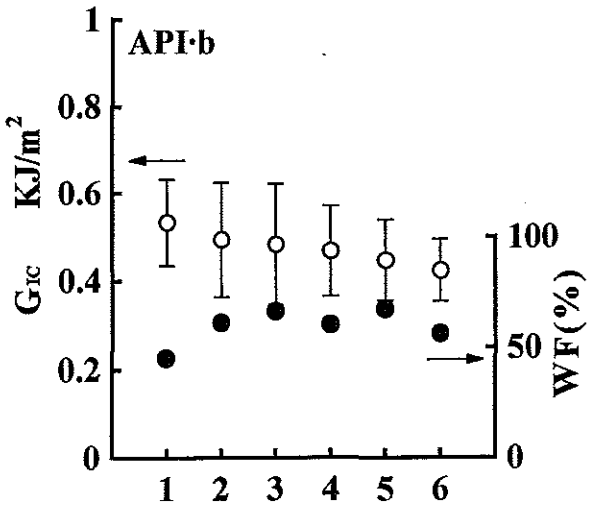


Fig. 3. Fracture toughness ( $G_{Ic}$ ) and wood failure (WF) of DCB bonded with API·b adhesive.

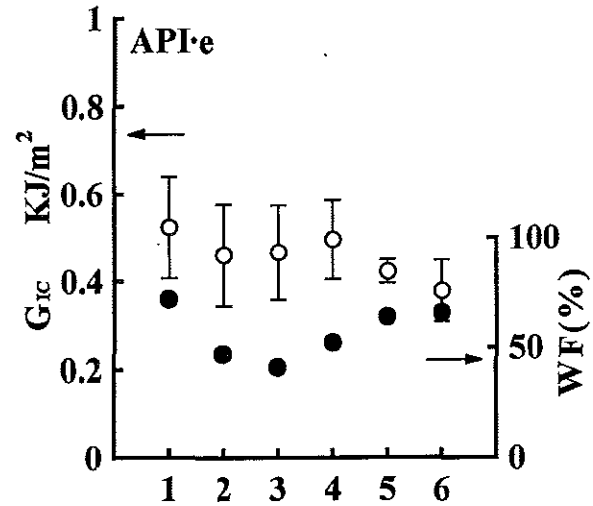


Fig. 6. Fracture toughness ( $G_{Ic}$ ) and wood failure (WF) of DCB bonded with API·e adhesive.

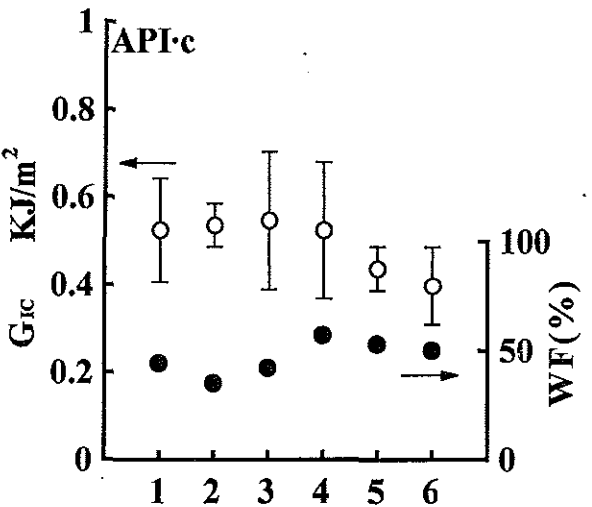


Fig. 4. Fracture toughness ( $G_{Ic}$ ) and wood failure (WF) of DCB bonded with API·c adhesive.

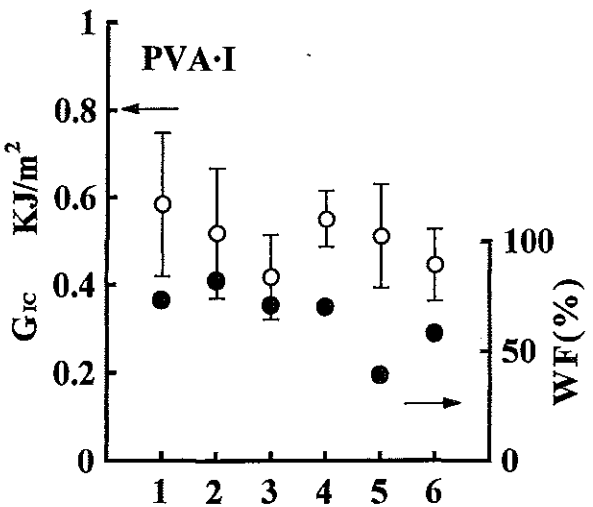


Fig. 7. Fracture toughness ( $G_{Ic}$ ) and wood failure (WF) of DCB bonded with polyvinyl alcohol/isocyanate adhesive.

トとの反応性により富むため、耐水性が向上したためと考えられる。

3-3 PVAc/I接着剤

Fig.9 に市販の酢酸ビニール樹脂をイソシアネートで強化した接着剤の各処理に対する  $G_{IC}$  の変動と木破率との関係を示す。処理1の  $G_{IC}$  に対して5%有意水準で差が認められるのは処理5、6である。処理5では破壊荷重が107Nから99Nへ、木破率が60%から47%へ低下している。また、処理6では破壊荷重が107Nから81Nへ低下し、特に木破率は60%から30%へ半減している。しかし、その他の処理に対しては  $G_{IC}$  が安定していることから、本来耐水性に乏しいPVAcが、イソシアネートによって強化されたのは明らかである。

3-4 PRF接着剤

Fig.10 に市販のPRF接着剤の各処理に対する  $G_{IC}$  の変動

と木破率との関係を示す。処理1の  $G_{IC}$  に対して有意な差を生じたものが存在せず各処理に対して  $G_{IC}$  が安定し、良好な耐水性を示した。

PRFのせん断接着力は構造用APIとほぼ同等の値を示すことが知られている。ところが  $G_{IC}$  の値を見るとPRFが  $0.35 \text{ KJ/m}^2$  であり、先のAPIの  $0.53 \sim 0.59 \text{ KJ/m}^2$  に比較して相当低い。この大小関係は鈴木らの結果<sup>3)</sup>と一致している。さらに荷重曲線を概説すると、PRFは破壊荷重に達すると急激な荷重の降下が起こり、鋸歯状であるのに対し、APIでは破壊点以降の荷重降下が抑止されており、プラトーの部分が多い。これらのことは接着層の厚さや接着層と被着体の弾性率の差なども原因するが、APIの分子が比較的流動性に富み変形に追従できるためと想像される。

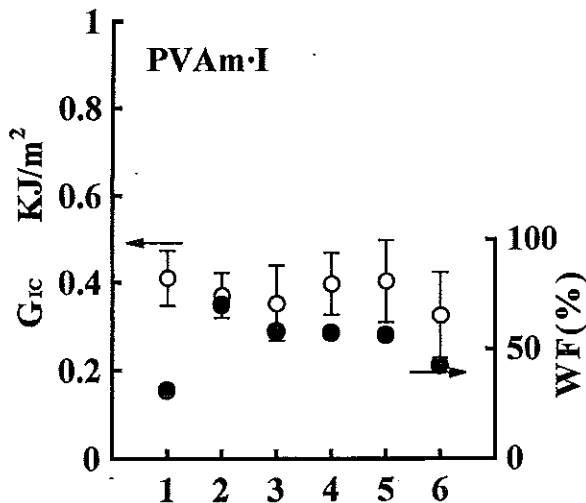


Fig. 8. Fracture toughness ( $G_{IC}$ ) and wood failure (WF) of DCB bonded with polyvinyl alcohol/isocyanate adhesive.

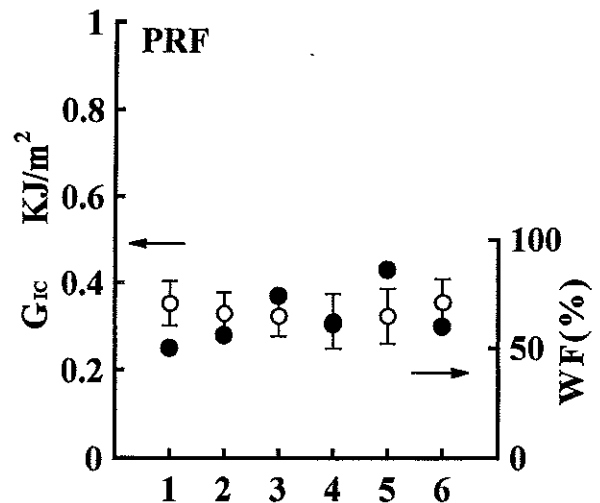


Fig.10. Fracture toughness ( $G_{IC}$ ) and wood failure (WF) of DCB bonded with phenol-resorcinol formaldehyde resin adhesive.

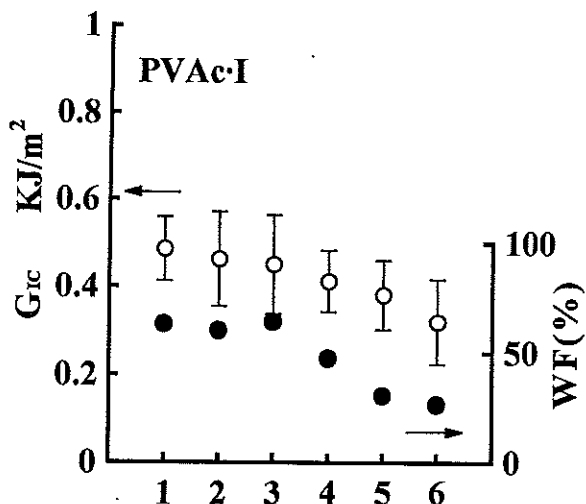


Fig. 9. Fracture toughness ( $G_{IC}$ ) and wood failure (WF) of DCB bonded with polyvinyl acetate/isocyanate adhesive.

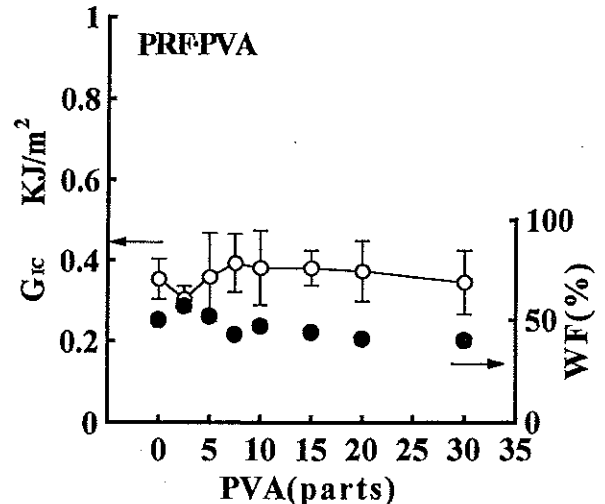


Fig.11. Effect of amount added PVA on Fracture toughness ( $G_{IC}$ ) and wood failure (WF) of phenol-resorcinol formaldehyde resin adhesive bonds.

## 3-5 PRF・PVA接着剤

Fig.11 は PRF に PVA を添加して、ブレンドによる  $G_{Ic}$  の変化を調べたものである。 $G_{Ic}$  は PVA7.5 部で最大値に達し、さらに PVA の量を増すと  $G_{Ic}$  は緩やかに低下する。次に PRF・PVA の耐水性と PVA の添加量の関係を各処理に対する  $G_{Ic}$  の変化から検討した。一例として PVA7.5 部及び 15 部の結果をそれぞれ Fig.12 および Fig.13 に示す。PVA が 10 部までは各処理に対して  $G_{Ic}$  が安定しているものの、それ以上 PVA の量を増すと処理 5、6 などにおいて  $G_{Ic}$  が大きく減少し、処理 1 に対して 5% 有意水準で差が生じてくる。PVA の軟化の影響が顕著になり耐水性の低下をきたすものと考えられる。

## 4 結 言

以上、各接着剤の耐水性試験における  $G_{Ic}$  の特徴について述べた。これらの結果は接着耐水性に関する重要な情報を提供しうるものである。

破壊は主として晩材同士が重なる部分を除いた早材部の表層近傍で生じており、一般に木部破断の現われ方が複雑であった。接着剤の浸透性の良否が破壊形態の差異に関係していると考えられるので、今後はこの点からも検討する必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) 佐々木光, P. F. Walsh: 材料, 26, 453-459 (1977)
- 2) 高谷政広, 浜田良三, 佐々木光: 木材学会誌, 30, 124-138 (1984)
- 3) 鈴木正治, A. P. Schniewind: 同上, 30, 60-67 (1984)
- 4) 岩崎徹, 鈴木正治: 同上, 35, 696-702 (1989)
- 5) 本多琢己: 第 43 回日本木材学会大会研究発表要旨集, p287 (1993)

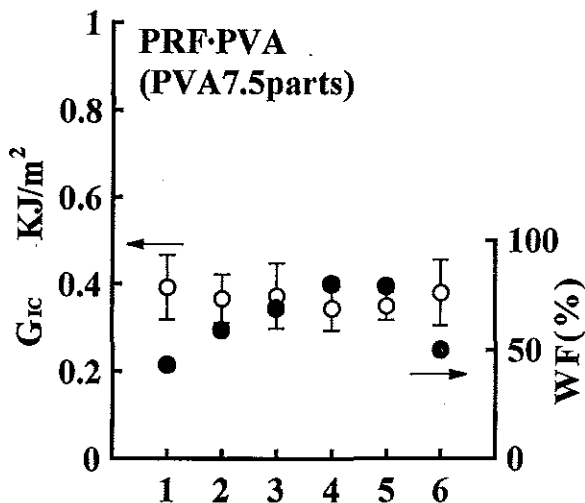


Fig.12. Fracture toughness ( $G_{Ic}$ ) and wood failure (WF) of DCB bonded with phenol-resorcinol formaldehyde/PVA (7.5 parts).

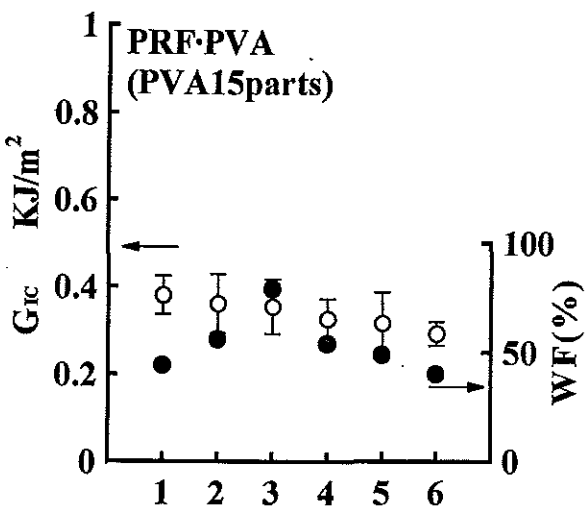


Fig.13. Fracture toughness ( $G_{Ic}$ ) and wood failure (WF) of DCB bonded with phenol-resorcinol formaldehyde/PVA (15 parts).