

接着結合における G_{IC} と引張りせん断接着強さの相互関係

本多 琢 己

The Relationship between G_{IC} and Adhesive Tensile Strength of Wood-Adhesive Joints.

Takumi HONDA

Summary : The correlation of fracture toughness of mode I (G_{IC}) and adhesion strength (S) in wood-adhesive joints using various API adhesive was examined. The fracture of wood-adhesive joints showed the which of viscoelastic behavior or quasi-elasticity behavior on the amount of the crosslinking agent. Therefore, the amount of the crosslinking agent which shows maximum value or minimum value is different in G_{IC} and S.

Next, the relationship between S and G_{IC} was examined on the case in which it was made to deteriorate under various environmental conditions. In the continual dipping test in cold water and hot water, there was the high correlation between G_{IC} and S. In the meantime, both correlation was not clear in water resistant test and accelerated degradation test. The difference seems to occur in internal stress and degradation condition of the adhesive, because area and circumference length of the bonded zone of test specimen effect on the water diffusion condition into the wood and adhesive.

要旨 : 種々の API 接着剤を用いた接着系におけるモード I の破壊靱性 G_{IC} と引張りせん断接着強さ S の相互関係を調べた。接着系の破壊は架橋剤の添加量に関して粘弾性的挙動あるいは準弾性的挙動のどちらかを示した。そのため、最大値または最小値を示す添加量が G_{IC} と S では異なっていた。次に、様々な環境条件下で劣化させた場合について G_{IC} と S の関係を検討した。冷水や温水中での連続浸漬試験では、 G_{IC} と S の間に高い相関が認められた。一方、耐水試験及び促進劣化試験においては両者の相関は明確ではなかった。試験体の接着部の面積や外周長さが木材中や接着剤中への水分の拡散状態に影響することから、接着剤の内部応力や劣化程度に差が生じると考えられる。

1 はじめに

接着系の破壊は破壊条件や破壊形態に依存するため一般に複雑な現象である。また、試験方法によっても試験体の先端部分での応力集中や変形過程が異なることから、材料力学的評価方法に加えて破壊力学的パラメーター (G_C) を用いて接着特性を評価することが多い。引張りせん断接着強さと引張りモードの破壊靱性値 (G_{IC}) との相互関係を明らかにすることは、接着系の破壊に関するデータの蓄積を図り、接着特性を多角的に評価する上で意義深い。材料力学的評価方法として通常行われる引張

りせん断接着強さの測定においては、切り欠きのコーナー付近に応力が集中しモード I の破壊に似た機構を含むと考えられるので、 G_{IC} との相関が期待される。

これまで、レゾルシノール系樹脂接着剤 (PRF) に比べて接着系の破壊に関するデータが少ない水性高分子-イソシアネート系樹脂 (API) 接着剤を種々使い、接着系の破壊に及ぼす架橋剤の添加量の影響¹⁾ や接着耐水性²⁾、接着耐久性³⁾ についてモード I の G_{IC} で評価してきた。本報告では、新たに API-木材接着結合における引張りせん断接着強さを測定し、既報¹⁾²⁾³⁾ の G_{IC} との相互関係を追求した。

Table 1. Test conditions

Tests	Test procedures
I Normal test	58%RH 3 weeks
II Cold water soaking/dry test	58%RH 3 weeks→20°C cold water 6 hrs→40°C 8 hrs dry→air dry
III Cold water soaking/dry test	58%RH 3 weeks→20°C cold water 24 hrs→60°C 24 hrs dry→air dry
IV Hot water soaking/dry test	58%RH 3 weeks→60°C hot water 3 hrs→60°C 3 hrs dry→air dry
V Boil and dry test	58%RH 3 weeks→boiling water 5 hrs→20°C cold water 1 hr 60°C 20 hrs dry→air dry
VI Boil and dry cycle test	58%RH 3 weeks→boiling water 4 hrs→60°C 20 hrs dry→boiling water 4 hrs→60°C 2 hrs dry→air dry

2 実 験

2.1. 材料および方法

集成材用の API 接着剤を 4 種類 (以下 API・a、API・b、API・c、API・d と記す)、比較用にフェノール・レゾルシノール供給樹脂 (以下 PRF と記す) 接着剤も用いた。架橋剤の添加割合はメーカーの指示に従いそれぞれ 15 部を標準とした。架橋剤の添加部数の影響を調べる実験では、 G_{IC} の場合¹⁾と同様に 5、10、15、20、25 部の 5 段階に変化させた。なお、API・a、API・b、API・c は構造用、API・d は造作用であり、API・a と API・d には同じ架橋剤を用いた。

厚さ 6 mm のカラマツ柾目板から、JIS K 6851 に規定された 2 PL 試験体を作製した。接着剤塗布量を 250 g/m²、柾目面接着とし、圧縮圧 0.98 Mpa、室温で 24 hr

硬化させた。26 mm×13 mm の部分が負荷時に破断するように加工した。20°C、65%RH で 3 週間以上養生し測定に供試した。引張りせん断接着強さ (S) の測定はクロスヘッドスピード 5 mm/min で行った。

耐水性試験の処理条件²⁾を Table.1 に示す。

耐久性試験³⁾として以下の 3 試験を行った。

連続冷水浸漬試験 (Cold water test) : 20°C の冷水中に浸漬し 24 hr、72 hr、168 hr 後に取り出し湿潤状態で供試。

連続温水浸漬試験 (Hot water test) : 60°C の温水中に浸漬し 24 hr、72 hr、168 hr 後に取り出し湿潤状態で供試。

煮沸繰返し試験 (Cycle test) : 4 hr 煮沸→60°C、20 hr 乾燥を 1 サイクルとする処理を 10 サイクル繰返し、1、3、5、10 サイクル後に供試。

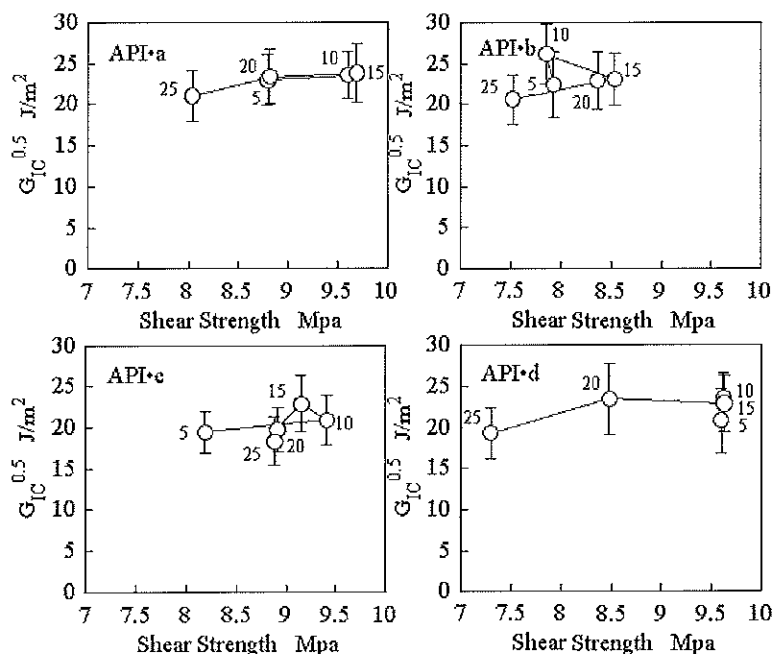


Fig. 1 G_{IC} vs shear strength of samples bonded with API adhesive including various amounts of crosslinking-agent (isocyanate).

3 結果及び考察

3.1. 架橋剤の部数に対する G_{IC}、S の変化

各接着剤について架橋剤の添加部数を変化させたときの G_{IC}^{0.5} と S を対応させ Fig.1 に示した。接着剤ごとの特徴を列挙すると、API・a、API・d では G_{IC}^{0.5} が保持されたまま S が減少し、一方、API・b では右回りに G_{IC}^{0.5} や S が減少する。これらに比べて API・c では G_{IC}^{0.5} や S の変動が少ない。

いま、G_{IC}^{0.5} の最大値を G_{IC,max}、最小値を G_{IC,min} とし、それに対する S の値をそれぞれ S'、S'' とする。また、S の最大値を S.max、最小値を S.min とし、それに対する G_{IC}^{0.5} の値をそれぞれ G'_{IC}、G''_{IC} とする。RG = (G'_{IC} - G''_{IC}) / (G_{IC,max} - G_{IC,min})、RS = (S' - S'') / (S.max - S.min) とおくと、RG または RS が 1 に近いほど G_{IC} と S の大小関係が一致してくると考えられる。

RG は API・a、API・b、API・c、API・d でそれぞれ

1.0、0.46、0.32、0.84 であった。また、RS は API・a、API・b、API・c、API・d でそれぞれ 1.0、0.33、0.22、1.0 であった。API・a と API・d では比較的大小関係が一致することから、G_{IC} と S の間に相関関係があると考えられる。

API 接着剤では架橋剤の添加量を増減するとベースポリマー間の架橋密度が変化する。架橋密度の低いところでは接着層が柔軟性に富み接着系は粘弾性破壊挙動を示した。一方、架橋密度が高くなると接着層の可塑性が著しくなり準弾性破壊挙動を示した。RG や RS の値が 1 からずれたのは、接着系の破壊が不連続な破壊挙動を示す、すなわち粘弾性的挙動から準弾性的挙動に変化するような領域では、G_{IC} と S の相互関係が低いことによると考えられる。接着系の破壊を粘弾性的挙動あるいは準弾性的挙動を示す領域ごとに分けて G_{IC} と S の相互関係を詳細に検討すれば良い相関関係が得られるかも知れない。

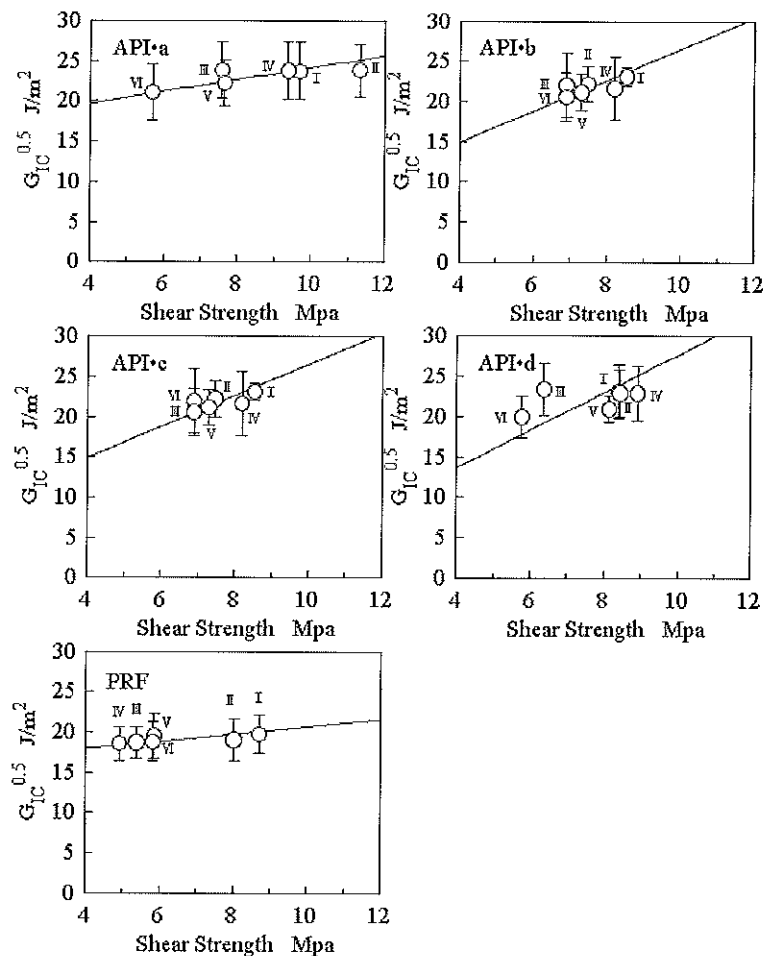


Fig.2 G_{IC} vs shear strength of samples bonded with API adhesive with various test conditions.

3.2. 耐水性試験における G_{IC} 、 S の変化

Fig.2 に各接着剤について耐水性試験における $G_{IC}^{0.5}$ と S を対応させた。前項の RG 、 RS を接着剤ごとに算出すると、 RG は API・a、API・b、API・c、API・d、PRF でそれぞれ 0.98、0.40、1.0、0.86、1.26 であった。また、 RS は API・a、API・b、API・c、API・d、PEF でそれぞれ 0.34、0.96、1.0、0.19、0.76 であった。大小関係が一致しないものもあるが、 G_{IC} と S の相関 Ry^2 を求めると API・a、API・b、API・c、API・d、PRF でそれぞれ $Ry^2=0.62$ 、0.44、0.44、0.22、0.46 であった。

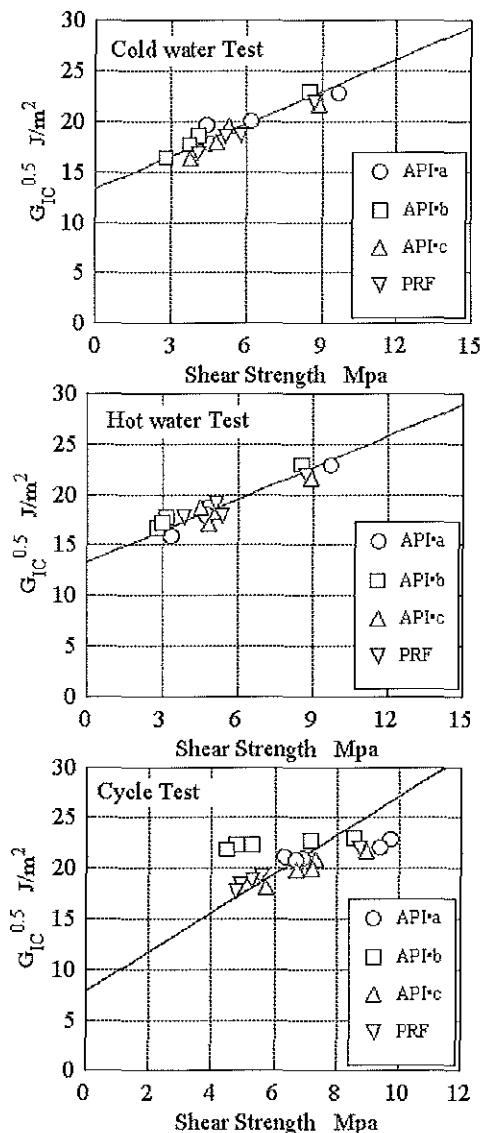


Fig.3 G_{IC} vs shear strength of samples bonded with API adhesive with various accelerated-aging test.

3.3. 耐久性試験における $G_{IC}^{0.5}$ と S の相互関係

Fig.3 に各接着剤について耐久性試験における $G_{IC}^{0.5}$ と S を対応させた。API を 1 グループにまとめ G_{IC} と S の相関を求めると Cold water Test で $Ry^2=0.88$ 、Hot water Test で $Ry^2=0.90$ 、Cycle Test で $Ry^2=0.29$ であった。

被着材や接着剤の種類、暴露条件が同じ場合でも、接着部の形状・寸法の違いが耐水性、耐久性に影響を与える。すなわち、木材中や接着剤中への水分の拡散状態は接着部の面積や外周長さに影響されるため、同時間水中に浸漬した場合でも接着層に発生する内部応力や接着層の劣化の程度が異なってくる。この影響は Cold water Test、Hot water Test に比べて水中浸漬時間の短い Cycle Test の Ry^2 に端的に現れていると考えられる。

また、DCB では板目面の繊維方向が荷重に対して converging になっているために破壊が木材の中で生じては繊維に沿って接着界面に移動し、また木材中に移動することをくり返した。これに対して 2 PLY 試験片では板目面の繊維方向がランダムのため、破壊が木材中で生じるとそのまま木材中を進行した。破壊開始時の応力集中や破壊の進展経路の差異が G_{IC} と S の相互関係に影響したものと考えられる。

4 ま と め

今回の結果、 G_{IC} と S の相互関係についてはなおも不明朗な部分が残った。今後検討すべき課題として以下のことが挙げられる。 G_{IC} と S のそれぞれについて木破率の相関式を求め同木破率に対する補正值に変換し、 G_{IC} と S の相互関係を検討する。また、 S に変え、引張りせん断試験の荷重-変形曲線下の積分値を算出し、 G_{IC} との相互関係を検討する。

引用文献

- 1) 本多琢己：森研情報，22，1-6 (1995)
- 2) 本多琢己：山梨県森林総合研究所研究報告，21，17-22 (2000)
- 3) 本多琢己：第 44 回日本木材学会大会研究発表要旨集，474 (1994)