

# 接着結合における破壊靱性と接着耐久性

本多 琢 己

Fracture Toughness and Gluing Durability of Wood-Adhesive Joints.

Takumi HONDA

**Summary :** Concerning the API adhesive, continual cold water dipping and continual hot water dipping and boiling cycle test was done, gluing durability was pursued from change of fracture toughness  $G_{IC}$ . The correlation of  $G_{IC}$  survival rate and treat time (cycle) was calculated. Gluing durability was evaluated with the half destruction period in initial value ratio 50%. In case of the API adhesive, the half destruction period of the hot water test was shorter a little than it of the PRF adhesive. However, it seems to have the Gluing durability which is equivalent to the PRF adhesive, when it is synthetically judged including other test result. In addition, in not only API adhesive but also PRF adhesive, it was confirmed that the  $G_{IC}$  recovered by the re-drying after the treatment. The relationship between fracture load and wood failure of the adhesion system was pursued, because it seemed to be  $G_{IC}$  in the mixed fracture system of resin and wood.

**要旨 :** API 接着剤について、連続冷水浸漬、連続温水浸漬および煮沸繰返試験を行い、破壊靱性の变化から接着耐久性を追求した。処理時間（サイクル）に対する破壊靱性残存率の回帰式を算出し、初期値比 50% における半減期によって評価した。API 接着剤では温水浸漬試験の半減期が PRF 接着剤に比べて多少下回ったが、その他の試験結果も含めて考察してみれば、PRF 接着剤とほぼ同等の接着耐久性を有していると判断される。浸漬試験終了後に試片を乾燥させて測定すると再び破壊靱性が回復した。これは API 接着剤のみならず熱硬化性の PRF 接着剤についても確認された。API 接着剤の場合、木破率がやや高いため木材と接着剤の混合破壊系における破壊靱性を与えている。

## 1 はじめに

接着した木材製品は使用環境に応じて接着層が劣化し、接着強さは時間と共に低下をきたす。接着耐久性は自然暴露試験や促進劣化試験で調べることができる。最も正確に接着製品の寿命を知る方法は実際に使用して調べることである。しかしこの方法では、環境条件が様々で再現性に欠ける、試験期間が長い、暴露場を必要とするなどの欠点があるため、材料、接着剤の開発テンポについていけない。そのため促進劣化試験の結果から接着耐久性を予測する方法が種々提案されてきた<sup>1)</sup>。そこでは主に接着耐久性をせん断接着強度の残存率で評価する方法が採用されているため、接着系の破壊が材料力学的評価法により扱われており、破壊力学的評価法による検討はなされていない。

前報<sup>2)</sup>では種々の水性高分子-イソシアネート系樹脂 (API) 接着剤を用い、耐水処理による接着系のモード I 破壊靱性 ( $G_{IC}$ ) 値の変動から接着耐水性について考察した。本報告では、更に厳しい処理条件、すなわち連続冷水浸漬処理、連続温水浸漬処理および煮沸-乾燥繰返し処理などの促進劣化処理した場合の接着系の  $G_{IC}$  の変動から API 接着剤の接着耐久性について考察した。

## 2 実 験

### 2.1. 実験材料

ベースポリマーの異なる構造用 API 接着剤を 3 種類 (以下 API・aAPI・bAPI・c と記す) 用いた。架橋剤の添加割合はメーカーの指示に従った。比較用にフェノール・レゾルシノール共縮合樹脂 (以下 PRF と記す) 接着剤も用いた。前報<sup>2)</sup>と同様の手順で  $G_{IC}$  測定用の DCB を

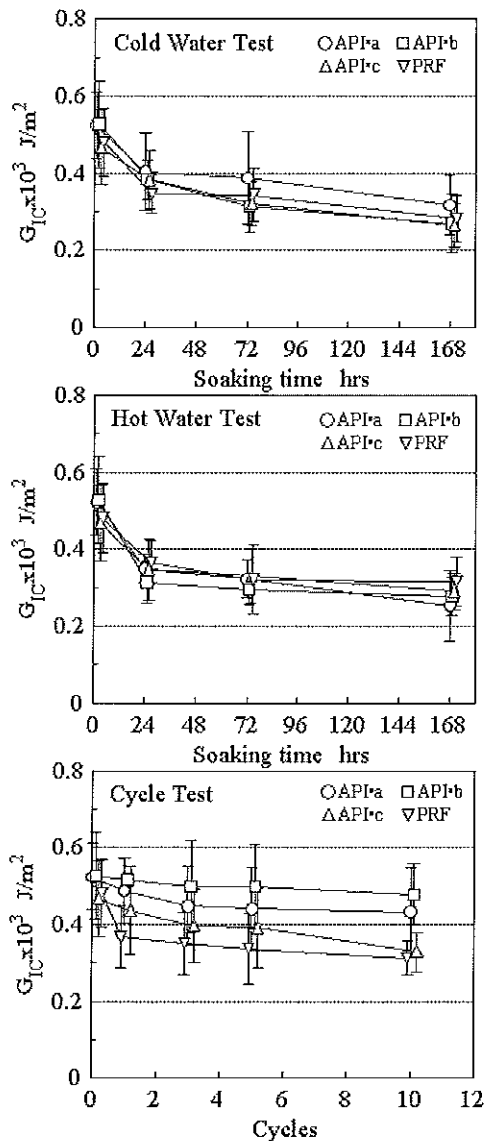


Fig.1 Changes of fracture toughness  $G_{IC}$  during accelerated-aging test.

作製した。 $G_{IC}$ の測定はクロスヘッドスピード1 mm/minで行った。 $G_{IC}$ の算出方法は高谷ら<sup>3)</sup>の方法を参考にした。

## 2.2. 促進劣化試験

促進劣化処理として以下の3試験を行った。

連続冷水浸漬試験 (Cold water test、以下 Test 1 と記す) : 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 (wett) で供試した。

連続温水浸漬試験 (Hot water test、以下 Test 2 記す) : 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 (wett) で供試した。

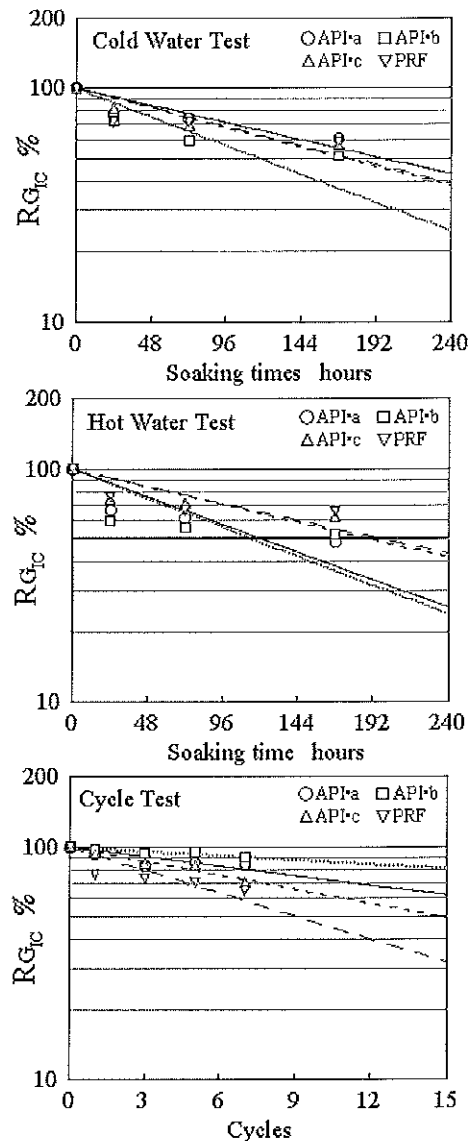


Fig.2 Changes of  $RG_{IC}$  during accelerated-aging test.

Note:  $RG_{IC}$ : Ratio of the  $G_{IC}$  on accelerated aging specimens to the  $G_{IC}$  on control specimens.

煮沸繰返し試験 (Cycle test、以下 Test 3 と記す) : 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サイクル後に供試した。

なお、Test 1、Test 2 については 168 hr の処理終了後に 60°C、20 hr 乾燥した状態 (Dry) でも試験した。

## 3 結果及び考察

### 3.1. 促進劣化処理による $G_{IC}$ の変化

Fig.1 に促進劣化処理過程における  $G_{IC}$  の変化を促進劣化処理ごとに示した。

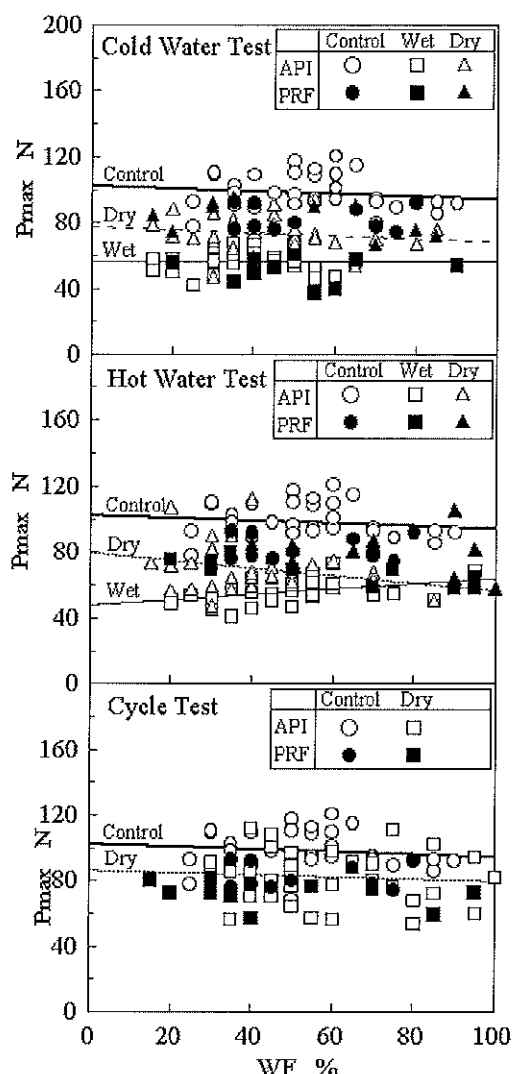


Fig. 3 Relationships between Pmax and wood failure on accelerated-aging test.

ここで、破壊靱性残存率  $RG_{IC}$  を

$$RG_{IC} = 100 * G_{IC,treat} / G_{IC,cont}$$

( $G_{IC,cont}$ : 常態の破壊靱性、 $G_{IC,treat}$ : 処理後の破壊靱性) と定義し、 $\log RG_{IC} = aT + 100$  ( $T$ : 処理時間または処理回数) の回帰式から、初期破壊靱性値が半減 ( $RG_{IC} = 50$ ) する  $T$  ( $=T_{50}$ ) を算出して比較した。

Test 1 における  $T_{50}$  は API・a、API・b、API・c、PRF でそれぞれ 196 hr、118 hr、172 hr、177 hr であった。Test 2 における  $T_{50}$  は API・a、API・b、API・c、PRF でそれぞれ 122 hr、116 hr、190 hr、199 hr であった。Test 3 における  $T_{50}$  は API・a、API・b、API・c、PRF でそれぞれ 22 cycle、50 cycle、15 cycle、9 cycle であった。 $T_{50}$  を接着剤間で比較してみると Test 1 では API = PRF、Test 2 では API < PRF、Test 3 では API > PRF

となる。これらの大小関係には、Test 2 に関しては API 樹脂のベースポリマーが吸水性に富むため接着層が軟化したこと、また Test 3 に関しては API 樹脂のベースポリマーが柔軟性に富むため被着体の膨潤・収縮に追従できなかったことが影響していると考えられる。

### 3. 2. 木破率と破壊荷重の関係

API 樹脂では高い浸透性のためカラマツのように比重の低い軟質な針葉樹を被着体に用いると複雑な破壊形態が現れ木部破断の割合が高くなる。したがって、API 樹脂とカラマツの混合破壊系における  $G_{IC}$  と考えられる。この接着系の破壊現象を更に詳細に考察するため木破率と破壊荷重の関係を調べた。木破率と破壊荷重の関係を促進劣化試験ごとに Fig.3 に示した。API 樹脂の銘柄の違いを考慮せずに 3 種類を 1 グループと見なした。ここで、DCB の破壊荷重を  $P_c$ 、被着体の破壊荷重を  $P_w$ 、接着層の破壊荷重を  $P_g$ 、また木部破断の割合を  $A_w$ 、凝集破壊の割合を  $A_g$  とすると、

$$P_c = P_w A_w + P_g A_g \quad \dots\dots (1)$$

$$A_w + A_g = 1 \quad \dots\dots (2)$$

となり、(1)、(2)式から

$$P_c = (P_w - P_g) A_w + P_g \quad \dots\dots (3)$$

が求まる。

今回の実験では、接着系の破壊後の破面に凹凸の形成が確認されたことから、破壊が 3 次元的に進行したと考えられる。ところが  $A_w$  の測定においては破壊を平面的に取扱うため破壊の深度が考慮されていない。そのため(3)式の相関の程度は低かった。(3)式から Control、wett および dry のそれぞれについて  $P_g$ 、 $P_w$  を算出した。Control の場合、 $P_g = 102.1$  N、 $P_w = 94.0$  N であった。Test 1 においては、wett で  $P_g = 56.7$  N、 $P_w = 56.6$  N、dry で  $P_g = 77.6$  N、 $P_w = 68.2$  N であった。Test 2 においては、wett で  $P_g = 47.9$  N、 $P_w = 64.0$  N、dry で  $P_g = 79.7$  N、 $P_w = 56.5$  N であった。また、Test 3 においては、10 サイクル終了時に  $P_g = 86.1$  N、 $P_w = 79.5$  N であった。このように Test 1、Test 2 の wett 条件では接着系全体が湿潤状態にあるため  $P_g$  や  $P_w$  は Control に比べて低下するが、乾燥することで再び回復することが分かった。

### 3. 3. 促進劣化過程における含水率と膨潤率

Test 1、Test 2 の処理では吸水による接着層の軟化や木材の膨潤に伴って接着層に生じる応力が、また Test

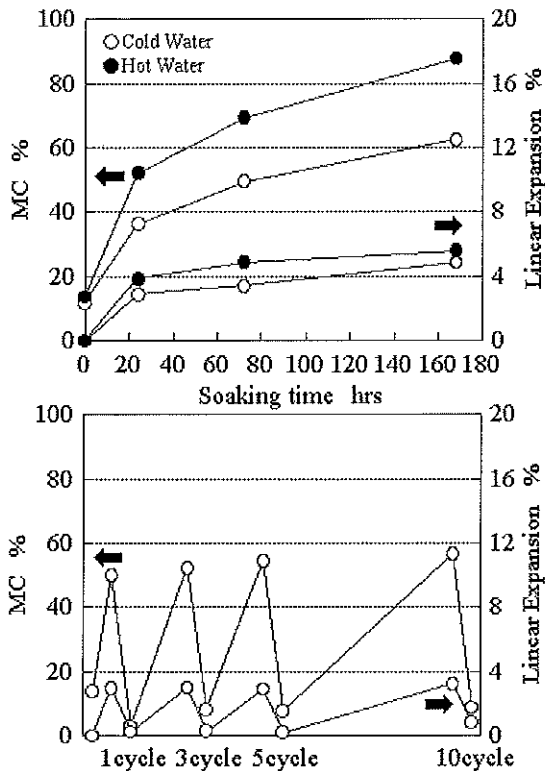


Fig. 4 Changes of moisture content and linear expansion during accelerated-aging test.

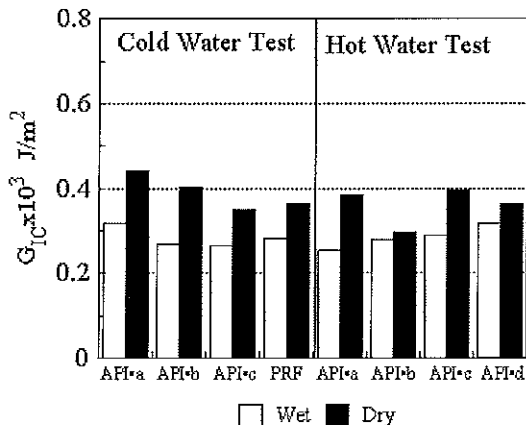


Fig. 5  $G_{Ic}$  in an air-dry state and in a wet state after cold water test and hot water test.

3の処理ではこれらに加え高温への暴露が接着性能低下の主因と考えられる。そこで、処理中の試験片の含水率と横方向(R方向)膨潤率の変化を調べた(Fig.4)。連続浸漬処理では、含水率、膨潤率共に処理時間の経過に伴い増加するが、温水処理したTest2の方が高めに推移することが分かった。一方、Test3では含水率は処理の繰返しに伴って増加するが、膨潤率は4%とほぼ一定であった。

### 3.4. 乾燥による $G_{Ic}$ の回復

168 hrの連続浸漬処理終了後の試片を乾燥し  $G_{Ic}$  を測定した(Fig.5)。Test2のAPI・bのように乾燥後も  $G_{Ic}$  がほとんど変化しない場合もあるが、その他のAPI接着剤ではおおむね75%程度まで回復した。これは、Fig.3に示したように接着層や木材が吸水によって軟化し一時的に凝集力が低下していたのが、乾燥することで再び回復したためと考えられる。ここで、注目すべきはPRF接着剤においても  $G_{Ic}$  の回復が認められたことである。PRF接着剤は分子構造が3次元編目状に発達しているため吸水による軟化は考えにくい。したがってPRF接着剤の場合はAPI接着剤とは回復機構が異なっており、木材の凝集力が回復したことや接着層の内部応力が解放されたことに基づくものと考えられる。

## 4 ま と め

促進劣化試験を行い、DCBのモードI破壊靱性を測定した。その結果、API接着剤の接着耐久性はPRF接着剤とほぼ同等と認められた。

API接着剤のみならずPRF接着剤についても処理後の再乾燥によって破壊靱性が回復することを確認した。

API樹脂では高い浸透性のため一般に破壊形態は複雑であった。これらを破壊荷重と木部破断との関係で整理した。

## 文 献

- 1) 中戸莞二編著：新編木材工学，株式会社養賢堂，315-317(1985)
- 2) 本多琢己：山梨県森林総合研究所研究報告，21，17-22 (2000)
- 3) 高谷政広，浜田良三，佐々木光：木材学会誌，30，124-138(1984)