

FRP 歯車における設計システムの開発 —積層材料を用いた歯車における曲げ疲労強度の算定—

同志社大工

青山栄一

同志社大工 片山傳生

同志社大工

廣垣俊樹

(株)イシダ 杉村和哉

同志社大[院]

○矢倉吉典

1. 緒言

軽量化, 低騒音化のために FRP 歯車が金属歯車に代わり自動車用エンジンや梱包機などで採用されている。FRP 歯車に関する研究は非常に少ないため, 明確な設計基準がなく, 試行錯誤的に歯車設計を行っているのが現状である。本研究では FRP 積層材料を用いた歯車の持つ破壊特性や繊維配向が歯元の強度に及ぼす影響を調査する。実験より明らかとなった特性を考慮し疲労強度を算出する設計手法を構築することが本研究の目的である。

2. 実験装置および方法

2-1. 供試歯車 FRP 歯車に使用した布基材フェノール樹脂は直交異方性を持つ材料である。本実験で用いた歯車は表 1 に示す 7 種類の平歯車である。

Table 1 Dimension of gears

Laminate configuration	FRP gear [0/90] ²				N gear [0/-30/-30] ²	Plastic gear
Module	3	4	5	5	4	
Standard Pressure Angle [deg]	20					
JIS class	4					
Face width [mm]	25					
Teeth depth [mm]	6.75	8	11.25	11.25	9	
Number of Teeth	49	65	49	39	49	49
Diameter of Standard Pitch Circle [mm]	147	195	198	195	245	146
Reference diameter [mm]	133	201	204	202	232	204

2-2. 実験方法

2-2-1. 引張試験 本研究で用いた歯車材料の基本的な特性を知るために引張強さを測定した。

2-2-2. 引張破壊挙動の観察 FRP 積層材料の引張破壊を観察することにより基本的な破壊特性と繊維配向による影響を明らかにする必要がある。そこで 2-2-1 の引張試験後の試験片を観察した。

2-2-3. 単純曲げ試験 材料の許容曲げ応力を求めるために曲げ試験を行った。荷重方向に関しては、層に対して垂直に負荷した。

試験方法は、JIS K 7055 で規定されている試験片形状、試験速度で、三点曲げ試験によって行った。

2-2-4. 曲げ破壊試験 歯車を固定し、加圧棒で歯先に線荷重をかけ破損時までの最大負荷を測定した。繊維配向が 0° となる歯を基準とし、各歯を Fig. 2-1 のように決定した。

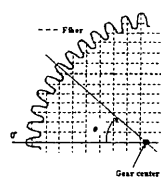


Fig.2-1 Fiber angle

2-2-5. 曲げ変形・破壊挙動の観察 曲げ破壊試験時の歯の変形・破壊挙動を観察するために接写撮影を行った。

FRP 歯車の 0° ~ 90° において各歯の破壊挙動を観察し、歯車材料の違いによる影響、等方性材料と直交異方性材料を歯車に用いた場合の破壊挙動の違いを観察する。

2-2-6. 繰り返し疲労試験 本研究で使用した歯車の 45° 付近を評価角度とし、この評価角度において負荷を変化させて歯車の疲労限界を求めるため、疲労試験を行った。なお、測定は最大 10⁷ 回まで行った。

3. FRP 歯車材料の特性

3-1. 使用材料の特性 本研究で歯車に布基材フェノール樹脂の積層材料を用いた利点として、フェノール樹脂のプリプレグは成形作業環境がよく成形能率が上がる、繊維量のコントロールが容易などの点が挙げられる。また強化繊維に綿布を使用した理由としては材料としての機械強度が高い、機械加工性、耐衝撃性が良いなどの点が挙げられる。

3-2. 引張強さ 引張試験結果を Fig.3-1 に示す。FRP の 0° とプラスチックがほぼ同じ強さであり、FRP は 0° から 45° までほぼ直線的に引張強度が低下している。これは強化繊維の方向以外の引張で、その強化効果が低下するためと考えられる。

3-3. 引張破壊挙動の観察 0~30° では、明らかな亀裂開口型となり、45° 方向に対しては、繊維に沿わずに引張方向に対して垂直な亀裂開口型の破壊であった。これは繊維の強度が低いために繊維と樹脂の剥離の前に繊維が切れたことが原因であると考えられる。

3-4. 材料許容曲げ応力について 単純曲げ試験により布基材フェノール樹脂の許容曲げ応力を求めた。その結果は図 3-2 に示すように、引張破壊応力と同様、繊維配向角が 0~45° の範囲ではほぼ直線的な許容曲げ応力の低下が見られた。

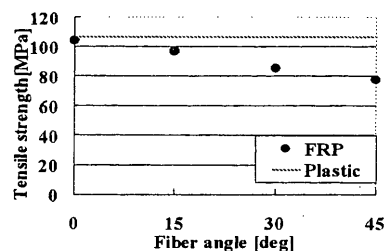


Fig.3-1 Results of tensile test

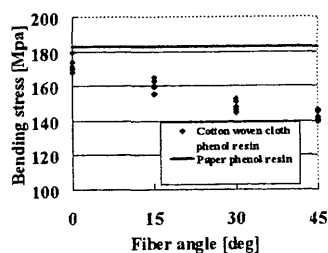


Fig. 3-2 Allowable bending stress

4. FRP 歯車の特性

4-1. 曲げ破壊強さ 曲げ破壊試験結果を Fig.4-1 に示す。結果より、どの歯車もほぼ同様の傾向を示したがモジュールごとに分かれた。これでは設計を行う際に手間がかかるので、モジュールに関係なく表す必要がある。またプラスチック歯車は、FRP 歯車よりも強度が低くなった。強度が低下した原因についてはプラスチックのへき開強さが影響していると考えられ、へき開強度が弱いので破壊が助長されたものと考えられる。

この材料を用いた場合、最低値は45° が最も低いという引張、単純曲げ試験結果と同様の傾向を示した。

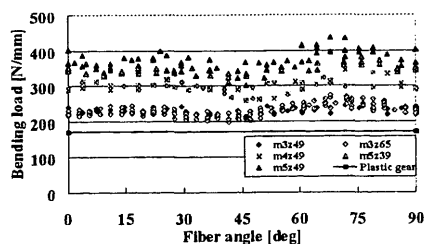


Fig. 4-1 Results of bending fracture test

4-2. 曲げ変形・破壊挙動 歯車の亀裂進展を観察すると、FRP 歯車は歯元すみ肉部より少し歯先側の位置で破壊している。このことがFRP 歯車を用いた場合の特徴となる。

また、FRP 歯車における破壊形態は、繊維に沿った破壊と、繊維に沿わない破壊に分けられる。

4-3. 疲労強度の特性 各歯車において運転寿命を測定した。FRP 歯車は曲げ破壊試験結果と同様、モジュールごとに分かれたので疲労試験結果においてもモジュールに関係なく表す必要がある。また、FRP 歯車はプラスチック歯車より疲労限界負荷が高くなった。本実験ではFRP、プラスチック歯車共に疲労曲線はほぼ直線となり、 10^7 回までで明確な疲労限が現れなかったもので、 10^7 回以上の領域に関しては近似直線を延長して考えるのが妥当である。

5. FRP 歯車の曲げ強さ設計について

5-1. 危険断面の位置について 歯たけの 8~9 割のところに集中しており、求めた破断開始位置の平均の角度は約 15° 付近であった。よってFRP 歯車における危険断面位置決定法としては、15° 接線法が適切であると考えられる。

5-1. 歯元応力の評価 FRP 歯車はたわみのため厳密な

かみ合いを期待できないので、歯先荷重とする。危険断面に関しては、15° 接線法で決定する。破損に関与する応力として、曲げ応力・せん断応力・圧縮応力を考慮し、15° 接線法で決定された危険断面の位置での繊維配向方向の相当応力を組み合わせ応力の考え方をを用いて求める。その結果と解析結果を用いて15° 接線法で算出した歯元応力を実応力に変換して曲げ破壊試験結果をまとめた図を Fig. 5-1 に示す。

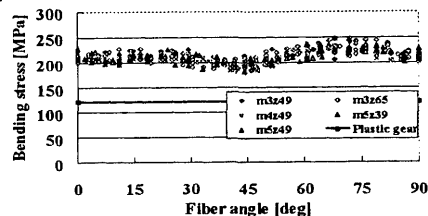


Fig. 5-1 Bending fracture stress

5-2. 曲げ疲労強度の算定 疲労試験結果においても同様の歯元応力の式を用い実応力に変換した。その結果を Fig. 5-2 に示す。曲げ破壊試験同様モジュール・歯数によらず、ほぼ同じ値を示したため、FRP 歯車としてまとめて近似直線を引き、この近似直線をFRP 歯車の曲げ疲労強度とする。

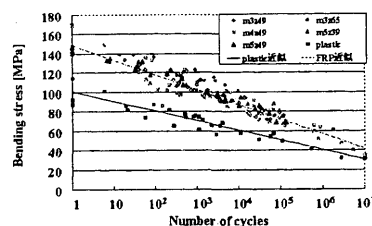


Fig. 5-2 Bending fatigue strength

6. 結言

- (1) 布基材フェノール樹脂積層材料を用いて製作した歯車は、破断開始位置が歯元すみ肉部よりも高く、繊維配向の影響により変曲点下部となる。
- (2) 積層材料を歯車に用いると、亀裂の進展に影響を及ぼし、亀裂伝播方向と繊維配向角度が異なると亀裂の進展を妨げ、強度に影響する。
- (3) FRP 歯車の危険断面の位置を決定する方法は15° 接線法が適切である。
- (4) 積層材料を歯車にした場合、歯車の歯元強度はへき強さに依存する。
- (5) FRP 積層材料で歯車の歯の歯元強度設計をするに当たり必要となる試験としては、引張試験、曲げ試験、せん断試験である。

謝辞

本研究の実験材料の提供をして頂きました(株)インダの関係者の方々に厚く御礼申し上げます。

(文献省略)