

構造用合板の面内せん断疲労における破壊基準と寿命の評価

愛知県産業技術研究所 杉本 貴紀

1. はじめに

地球温暖化や廃棄物の累積などの環境問題を背景として、木造住宅に関しては平均使用年数の長寿命化が求められております。住宅に用いられる木質系材料は、地震や台風によって繰り返し負荷を受け、使用年数とともに必然的に受ける負荷回数も増加します。従って安全な長寿命木造住宅を実現するためには、木質系材料の強度性能に及ぼす繰り返し負荷の影響を検討し、材料の疲労特性を表す負荷の大きさ（応力レベル）と疲労寿命との関係（ $S-N$ 線）等を把握する必要があります。また、金属など他の工業材料と異なり木質系材料は粘弾性的性質を有するため、繰り返し負荷に対する力学的挙動は取り扱いが複雑です。

そこで私たちは、木造住宅の耐力壁などに用いられ、耐力要素として不可欠な構造用合板について、地震や風圧による繰り返し面内せん断力に対する力学挙動を実証するとともに、様々な負荷条件下における疲労挙動を検討しました。

2. ひずみエネルギーを用いた疲労挙動の解析

まず、図1に示すように、市販の構造用合板を用いてサイン波・周波数0.5Hzの負荷条件下の面内せん断疲労試験を行い、その時の応力-ひずみヒステリシスループより得られる負荷1回毎に散逸するエネルギー、すなわちエネルギーロスに着目して疲労寿命との関係を調べました。木材の疲労に関する既往の研究において、エネルギーロスを解析することによって木材の疲労限度を推定できることが示されております^{1), 2)}。

本実験において、負荷1回毎の平均エネルギーロスは、疲労寿命が長くなるにつれて減少し、ある値に漸近する傾向を示しました（図2）。漸近値以下では疲労寿命は無限であり、その漸近値は疲労限度に相当すると考えられました。非線形回帰分析を用いてこの漸近値を評価し、これに対応する応力レベルを算出することによって、構造用

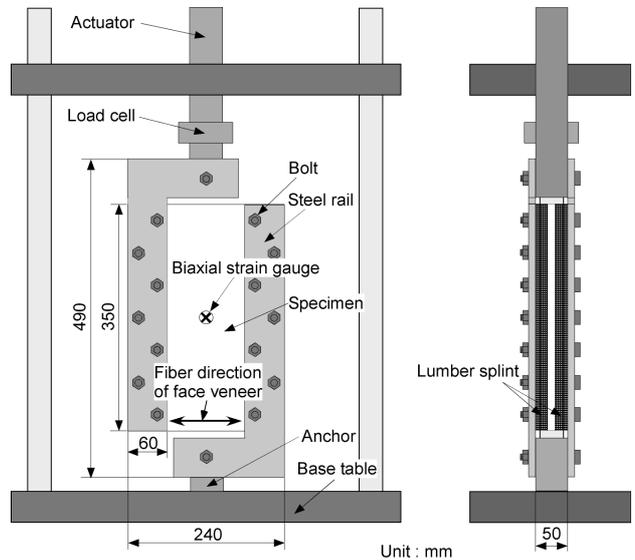


図1 構造用合板の面内せん断疲労試験

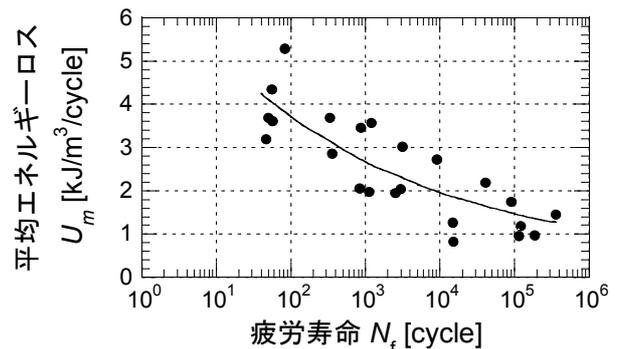


図2 平均エネルギーロスと疲労寿命の関係

合板の面内せん断疲労限度を推定することができました。

次に、種々の負荷条件下における疲労挙動を総合的に明らかにするために、負荷波形を矩形波・三角波、負荷周波数を0.5Hz・5.0Hzに設定して、構造用合板の面内せん断疲労試験を行いました。その結果、負荷波形、周波数といった負荷条件が構造用合板の疲労寿命に顕著な影響を及ぼし、負荷条件によって $S-N$ 線が異なることが明らかとなりました（図3）。これは、合板が面内せん断負荷に対して粘弾性を示し、同じ応力でも負荷条件によって変形量が異なるためである（図4）と考えられます。そこで、1回毎の負荷の大きさだけでなくその変形量も加味したパラメータとして、

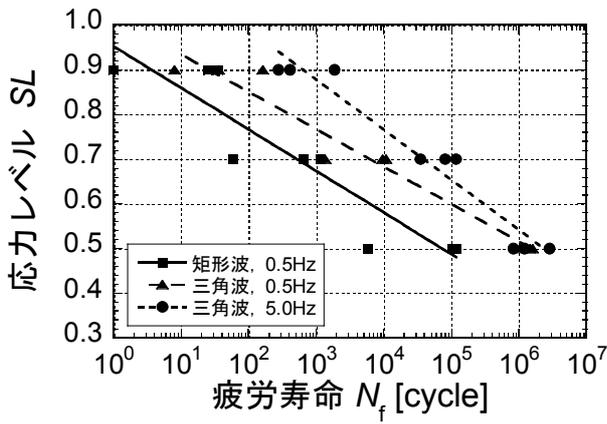


図3 S-N線

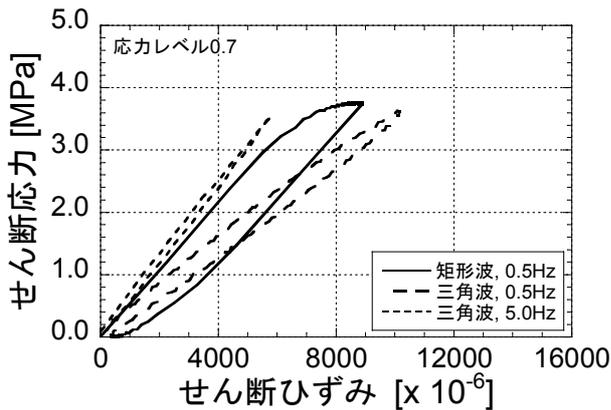


図4 負荷1回目の応力-ひずみヒステリシスループ

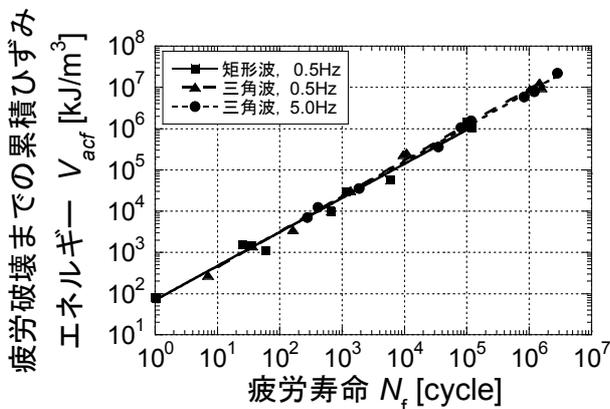


図5 疲労破壊までの累積ひずみエネルギーと疲労寿命の関係

ひずみエネルギーに着目して解析を行いました。疲労破壊までの累積ひずみエネルギーと疲労寿命との関係を調べると(図5)、種々の負荷条件に共通のただ一つの関係が得られました。すなわち、この関係は負荷条件という外的要因に依存しない材料固有の疲労破壊基準であり、負荷条件の影響を受けるS-N線に代わって合板の疲労特性を普遍的な形で定式化することができました。また、

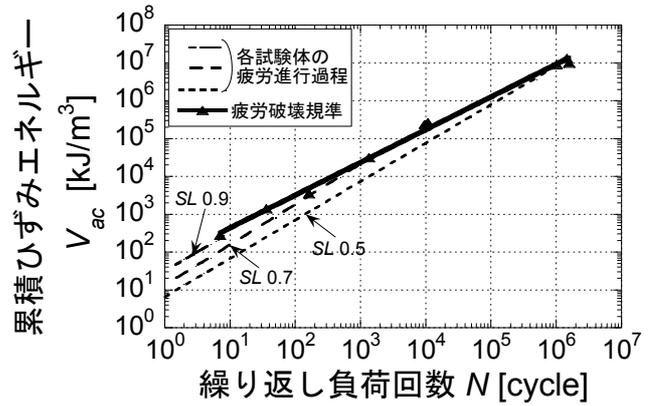


図6 疲労進行過程の例と疲労破壊基準

表1 疲労進行過程と疲労破壊基準の実験式

負荷条件 (波形・周波数)	疲労進行過程 ($V_{ac} = V_{1st} N^b$)	疲労破壊基準 ($V_{acf} = c N_f^d$)
Sq, 0.5 Hz	$V_{ac} = V_{1st} N^{1.05}$	$V_{acf} = 69.764 N_f^{0.826}$
Tr, 0.5 Hz	$V_{ac} = V_{1st} N^{1.03}$	$V_{acf} = 59.285 N_f^{0.866}$
Tr, 5.0 Hz	$V_{ac} = V_{1st} N^{1.03}$	$V_{acf} = 64.902 N_f^{0.847}$

V_{ac} : N回までの累積ひずみエネルギー; V_{1st} : 負荷1回目のひずみエネルギー;

V_{acf} : 疲労寿命 (N_f)までの累積ひずみエネルギー

三角波・0.5Hzでの負荷条件を例として、疲労破壊に至るまでに、繰り返し負荷回数とともにひずみエネルギーが累積されていく過程を調べると、図6に示すように、ひずみエネルギーは両対数グラフ上で負荷回数とともに線形に累積され、疲労破壊基準と交わる時点で破壊することが分かります。その傾きはいずれの試験体でも同じであり、負荷に応じて、1回目のひずみエネルギー、すなわち疲労進行過程のスタート地点のみが異なります。すなわち、疲労進行過程を表す、ある負荷回数までのひずみエネルギーの累積値とその回数関係も、負荷条件に依らず一つの式で表され、ひずみエネルギーを用いて疲労進行過程を表現できることが分かりました。このようにして定式化したひずみエネルギーに基づく疲労進行過程と疲労破壊基準を負荷条件毎に表1に示します。この表からも、ひずみエネルギーに基づく疲労進行過程と疲労破壊基準が負荷条件に依らず共通であることが分かります。

このようなひずみエネルギー解析を基に、種々の負荷条件における構造用合板の疲労寿命を負荷1回のみ力学試験から簡便に推定できる方法

を考案しました。具体的には、まず、ある1負荷条件において一連の疲労試験を行って疲労進行過程と疲労破壊基準の実験式をマスターラインとして取得します。そうすれば、ある負荷波形・周波数・応力レベルにおける疲労寿命は、当該条件にて負荷1回のみ試験を行ってひずみエネルギー (V_{1st}) を算出すれば、マスターラインとして取得した疲労進行過程にその値を代入し、同じくマスターラインである疲労破壊基準との交点となる負荷回数として推定できます。

そこで、表1に示した三角波・0.5Hzにおける疲労進行過程と疲労破壊基準をマスターラインとして、矩形波・0.5Hzと三角波・5.0Hzの疲労寿命の推定を試み、実際に実験から得られた疲労寿命と比較しました。寿命推定の際には、実際の疲労試験で得られた各試験体の負荷1回目のひずみエネルギーを V_{1st} として用いました。図7に示すように、矩形波・0.5Hz、三角波・5.0Hzのどちらの条件においても、疲労寿命の推定値は概ね実験値と一致し、推定値を用いてほぼ実験結果と同じとみなせる $S-N$ 線を得ることができました。本推

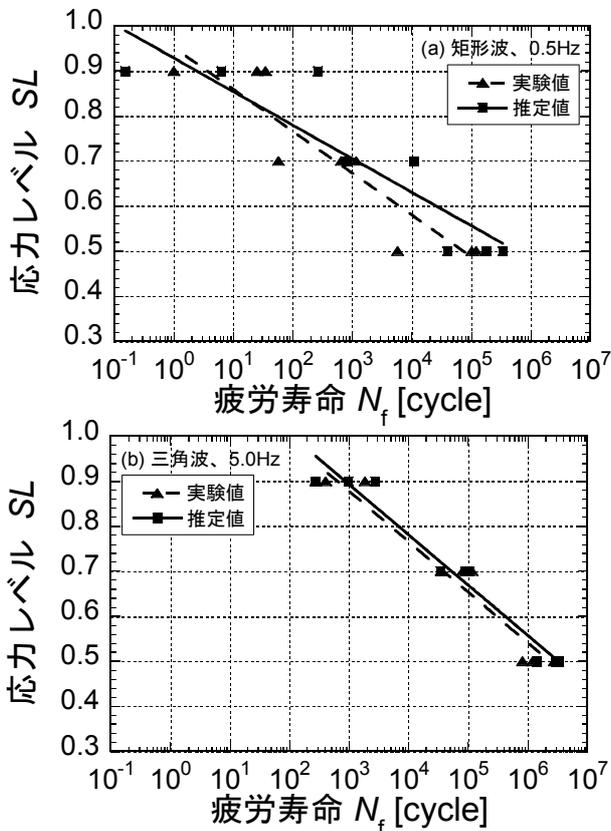


図7 疲労寿命の推定値と実験値の比較

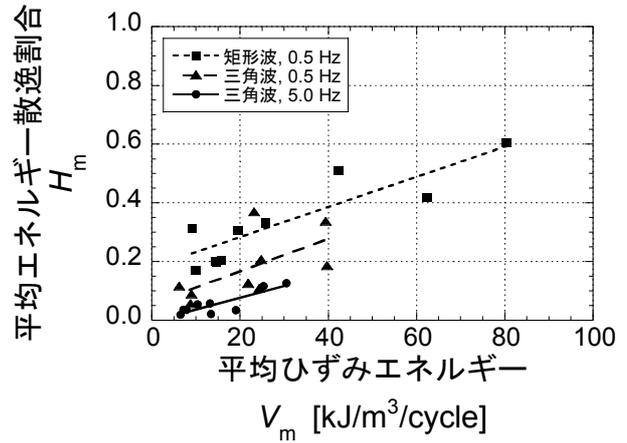


図8 平均エネルギー散逸割合

定法は、膨大な試験時間を要する疲労試験の代替として有望な手法であるといえます。

また、繰り返し負荷下において、材料に与えられたひずみエネルギーと材料が散逸するエネルギーに着目して、木質材料の特性の一つとしてエネルギー散逸性能を評価することを試みました。疲労試験中に合板に与えられた負荷1回当たりの平均ひずみエネルギーに対する負荷1回あたりの平均エネルギーロスの割合 (=平均エネルギー散逸割合) をエネルギー散逸性能の指標とし、平均ひずみエネルギーに対してプロットしました (図8)。材料に与えられる平均ひずみエネルギーが同じでも、負荷条件によって散逸割合が異なり、合板にとってシビアな負荷条件ほど高いエネルギー散逸性能を示すことを明らかにしました。このような合板の面内せん断疲労におけるエネルギー散逸性能を木質構造において効果的に発揮させることができれば、高エネルギー散逸構造体を実現できるのではないかと考えております。

3. 変動荷重下における新たな累積被害則の提案

地震や風圧などに起因して木造住宅に作用する外力は常に変動するため、これまで示した様々な負荷条件を考慮することに加えて、変動荷重下での挙動を検討することが重要となります。変動荷重下における疲労寿命を算出する累積被害則として一般的なマイナー則³⁾に関して、木質材料に適用した例はほとんど無く、他の材料においてもこの法則の不具合が指摘されております。そこ

で、構造用合板の面内せん断疲労において、表2、3に示すように、試験途中に応力レベルや負荷条件を一度変更する実験を実施しました。その結果得られた構造用合板の疲労寿命は、マイナー則には従いませんでした(図9)。そこで、マイナー則を基として、負荷回数の対数値を用いた新たな累積被害則を次式のように考案しました。

$$\log(n_1)/\log(N_{f1}) + \{\log(n_1 + n_2) - \log(n_1)\}/\log(N_{f2}) = 1$$

図10に示すように、変動荷重下での構造用合板の疲労寿命は、新たな法則にほぼ従うことが分かりました。新たに考案した累積被害則は、他の木材・木質材料の変動荷重下での疲労寿命の推定にも適用できるのではないかと考えております。

表2 変動荷重試験条件 I

	第1ステージ		第2ステージ	
	S_1 [MPa]	n_1 [cycle]	S_2 [MPa]	n_2 [cycle]
<i>High-Low loading</i>				
HL1	3.86	500	3.38	
HL2	4.34	50	2.89	
HL3	4.34	1	3.38	
HL4	4.34	10	3.85	
<i>Low-High loading</i>				
LH1	2.89	50000	4.34	疲労破壊まで
LH2	3.38	5000	3.86	
LH3	3.38	5	4.34	
LH4	3.86	10	4.34	

表3 変動荷重試験条件 I I

	第1ステージ				第2ステージ			
	波形	周波数 [Hz]	S_1 [MPa]	n_1 [cycle]	波形	周波数 [Hz]	S_2 [MPa]	n_2 [cycle]
<i>High-Low loading</i>								
HLa	矩形	0.5	3.86	30	三角	0.5	3.38	
HLb	三角	0.5	4.34	3	三角	5.0	3.38	
<i>Low-High loading</i>								
LHa	三角	0.5	3.38	10	矩形	0.5	3.86	疲労破壊まで
LHb	三角	5.0	3.38	10000	三角	0.5	4.34	

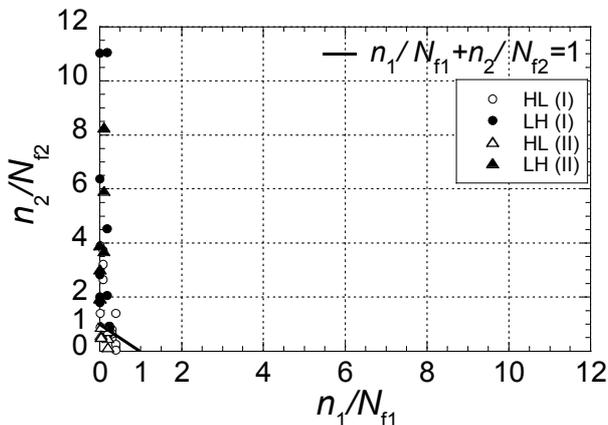


図9 マイナー則の適用

4. おわりに

本研究では、構造用合板の面内せん断疲労挙動の詳細な解析をもとに、ひずみエネルギーに基づいた疲労進行過程・疲労破壊基準の定式化、これらを用いた疲労寿命推定法の提案、そして変動荷重下における累積被害則の修正案など、木材・木質材料の力学分野のみならず、材料科学など関連する研究領域においても興味深い知見を示しました。本研究で確立した一連のひずみエネルギー解析は、他の木材・木質材料の曲げ疲労・引張疲労等にも用いることができると推察され、体系的に木材・木質材料の疲労挙動を捉え、記述することができる一手法になり得ると考えております。また、これら材料の疲労挙動に関する知見をもとに、今後は木質構造の接合部や構造体そのものの疲労挙動を解明する研究に取り組みたいと考えております。

参考文献

1. Marsoem SN, Bordonné PA, Okuyama T: Mokuzai Gakkaishi 33(5): 354-360 (1987).
2. Sasaki Y, Yamasaki M, Sugimoto T: Wood Fib Sci 37(2): 232-241 (2005).
3. Miner, M A: J App Mech 67: A159-A164 (1945).

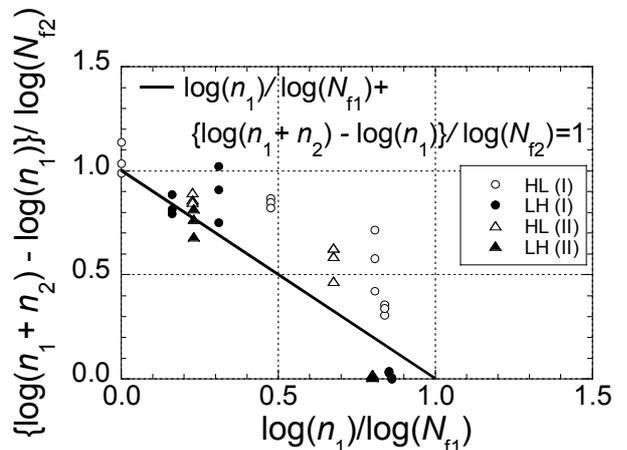


図10 新たな累積被害則の適用