

国産木質パネルの利用促進に向けた接着耐久性評価技術の開発

岩手大学農学部教授 関野 登

共同研究者： 足立幸司(秋田木工研)

高麗秀昭(森林総研)

小島陽一(静岡大学)

1. はじめに

構造用途の合板、OSB、パーティクルボード(PB)、MDFなどの木質パネルには、確かな接着耐久性が求められており、国産木質パネルの利用促進には接着耐久性に対する不安の払拭が欠かせない。本研究は日本木材学会木質パネル研究会が2004年に開始した「木質パネル第二次耐久性評価プロジェクト」の取りまとめの一環として実施したものであり、木質パネルの使用環境に応じた寿命推定を可能とする評価技術を検討するものである。上記プロジェクトでは、①全国8地域での最長7年にわたる屋外暴露試験による接着耐久性の評価、②水分レベルの異なる各種屋内使用環境での最長10年にわたる性能劣化調査、③品質管理として各国で実施されている各種促進劣化試験と①および②との対応、という3本柱で研究が実施されている。今回の研究助成では、主として②の結果解析が行われた。様々な屋内環境に最長10年間暴露された木質パネルについて強度劣化の有無が調査され、強度劣化が認められたケースについては含水率履歴をベースとする劣化外力の算出方法が検討され、その結果を用いて、特定の使用環境における30年後および60年後の性能を推定した。

表1 供試パネルの仕様と各種物性の初期値

供試パネル	原料(樹種等)	接着剤	規格	密度(g/cm ³)	MOR(MPa)	MOE(GPa)	IB(MPa)	LNR(kN)	NHPT(kN)
合板	北洋材	PF	JAS 特類	0.64	68.6	7.25	1.15	2.37	2.19
OSB(A)	アスペン	PF	JAS 3級	0.64	39.2	5.26	0.56	2.09	1.65
OSB(P)	パイン	PF	JAS 3級	0.67	36.8	4.97	0.64	2.00	1.90
PB (PF)	解体材	PF	JIS 18P	0.76	20.3	3.60	0.83	1.74	1.68
PB (MDI)	解体材	MDI	JIS 18P	0.80	28.8	4.12	2.19	2.76	2.73
MDF	南洋材	MUF	JIS 30M	0.76	28.8	4.23	0.62	2.38	2.18

(注) 公称厚さ：OSB(P)のみ11.5mm、他は全て12mm。MDFのみF☆☆☆、他はF☆☆☆☆。LNR(縁距離：12mm)、

NHPTはN50釘を使用。初期値：30体の平均値。合板、OSB：曲げ性能は表層繊維方向の値、LNRは直交方向の値。

2. 実験方法

供試パネルの種類、仕様および初期性能を表1に示す。測定対象とした強度性能は、MOR、MOE、剥離強度(IB)、釘側面抵抗(LNR)、釘頭貫通抵抗(NHPT)であり、曲げ性能とIBはJIS A5908に準じて、釘接合性能はASTM D1037に準じて測定した。供試パネルは、OSB以外は国産製品(2003年製造)で、各パネルとも同一ロットの3×6尺原板、約30枚が準備された。原板は実験住宅の野地板や軒天・鼻隠しに使用する3枚以外は尺角サイズに切断され、尺角12枚を1セットとして、約30セットがパネル毎に準備された。尺角試験体の振り分けに際しては、各セットの平均密度がほぼ

同一となるよう留意した。表 1 の初期性能は尺角 3 セットを用いて得られた値である。

設定した暴露環境を表 2 に示す。パネル含水率が低く、かつ含水率変化の少ない環境を水分レベル I とし、レベル V までの 5 段階としたが、レベル III (実験住宅への施工) では小屋裏空間に面する野地板と外気に面する軒天・鼻隠しの 2 水準(IIIa, IIIb)となるため、計 6 段階の設定となった。実験住宅への施工以外は、各パネルとも上記の尺角 1 セットが供試された。なお、表 2 の最右欄には暴露中のパネル周囲の温湿度データと吸着等温線より推定した含水率変化の例(合板)を示した。

表 2 暴露環境の種類と暴露期間および推定された含水率の変化(合板の例)

水分レベル	暴露環境と暴露期間	想定される実際使用部位	含水率 (%)
I	原則 20℃60%RH 室内、6 年、10 年	2 階床下地	10.1~11.5
II	モデル住宅(つくば市)の床下、5 年	1 階床下地	9.1~13.0
III	IIIa 実験住宅(盛岡郊外)の野地板、9.5 年	健全な野地板	6.1~11.3
	IIIb 実験住宅(盛岡郊外)の軒天(9.5 年)、鼻隠し(6 年)		10.7~17.3
IV	乾湿繰り返し(20℃:45%RH 3 ヶ月 ⇄ 90%RH3 ヶ月)、最長 5 年	間欠的な水分トラブル	8.8~16.2
V	高湿度下連続暴露(20℃・90%RH)、最長 5 年	連続的な水分トラブル	16.2

表 3 暴露試験結果の一例 (IB 残存率 ; %, 試験体数 ; 10~13/条件)

レベル	I		II	IIIa		IIIb		IV						V				
	6	10	5	9.5	6	9.5	0.5	1	1.5	2	3	5	0.25	0.5	1	2	3	5
合板	93	98	100	77	83	100	90	100	84	89	74	79	94	100	100	76	100	
OSB(A)	61	71	64	86	61	76	62	56	63	55	70	33	68	66	64	70	70	63
OSB(P)	83	90	92	88	88	89	100	80	77	75	86	72	88	94	83	94	67	81
PB(PF)	87	78	90	75	79	80	88	75	79	79	62	69	84	92	83	78	52	83
PB(MDI)	89	86	93	84	77	88	100	100	99	89	79	87	100	95	89	89	85	84
MDF	100	100	100	88	100	100	100	100	95	85	100	100	100	100	77	100	100	97

表 4 暴露前後の平均値の低下割合 (%)

	MOR	MOE	IB	LNR	NHPT
合板	13**	8**			
OSB(A)	16**	22**	31**		
OSB(P)	6*	10**	14*		
PB(PF)	8**	10**	22**		8**
PB(MDI)		3*	11**		6**
MDF	5**	6**			4*

空欄 : 有意差なし、*、** : 有意水準 5%、1%

3. 種々の屋内温湿度環境下に最長 10 年間暴露された木質パネルの強度性能

結果の一例として IB 残存率を表 3 に示す。高い残存率を保持したパネルは合板と MDF で、暴露条件全体を通じての IB 残存率は 74~100%の範囲にあった。一方、OSB(A) や PB(PF)では 5 割程度またはそれ以下の IB 残存率が散見され、合板や MDF と比べて劣化進行が早かった。また、ほとんどのパネルでレベル IV、V における暴露期間の進行に対する IB 残存率の明瞭な減少傾向は認められず、レベル I でも残存率が暴露 6 年<暴露 10 年となる場合が散見された。この傾向は IB 残存率のみならず他の 4 物性にも認められた。その要因には、回収される試験体(尺角パネル 2 枚)の元々の物性のバラつきが考えられる。そこで本報告では、表 3 に示す暴露 18 条件を一括して扱う。

すなわち、各々の水分レベル・暴露期間で受けるパネルの水分履歴は異なるものの、最長 10 年間、様々な水分履歴を受けた結果として、強度や弾性率の分布が暴露前と比べてどのように異なるか、また、それらの分布の平均値に暴露前後で有意差があるか否かを検討した。

検討結果の例として、合板の MOR 分布を図 1 に、PB(PF)の IB 分布を図 2 に示す（合板では表層繊維方向と直交方向のデータを用いるため暴露前の各平均値に対する相対値で階級を設定）。暴露前後で平均値の有意差検定を行った結果、表 4 に示す空欄部 12 条件では有意差が認められなかった。住宅の耐震性に関与する LNR はいずれのパネルでも劣化しなかったと言え、木質パネルの耐久性を論じる際の安心材料と成り得る。一方、OSB や PB では IB が 1~3 割、曲げ性能が最大 2 割程度劣化することが明らかとなった。

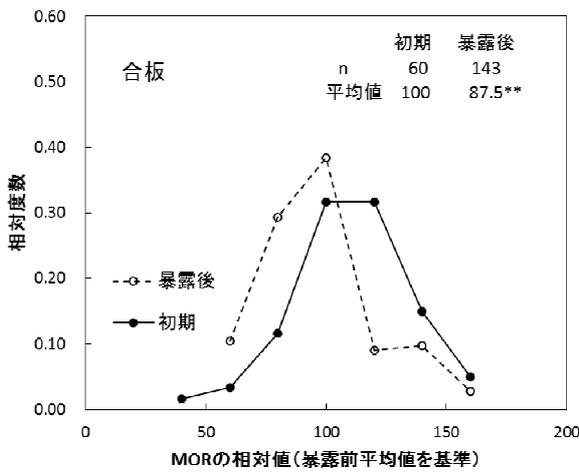


図 1 合板の MOR 分布の暴露前後の比較

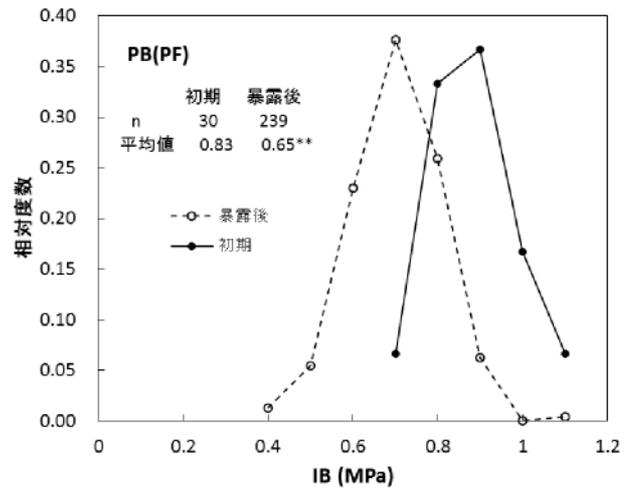


図 2 PB (PF) の IB 分布の暴露前後の比較

4. 屋内使用における劣化外力の導入と劣化外力算出方法の最適化

前項で行った暴露前後での強度分布の比較において、平均強度が統計的に有意に低下した木質パネルとその機械的物性を対象に、暴露期間中に受けた水分履歴をベースとする劣化外力を検討し、物性劣化との相関性が最も高くなる劣化外力の算出方法を決定した。また、決定された劣化外力と物性劣化の関係式を用いて、使用 30 年後あるいは 60 年後の残存性能を推定した。

なお、対象とする木質パネルと物性の組み合わせは以下のとおりで、計 18 条件である。OSB(A) ; MOR、MOE、IB、OSB(P) ; MOR、MOE、IB、PB(PF) ; MOR、MOE、IB、NHPT、PB(MDI) ; MOE、IB、NHPT、MDF ; MOR、MOE、NHPT、合板 ; MOR、MOE。

(1) 劣化外力の算出方法

一般に、木質パネルの機械的物性劣化の要因（生物劣化を除く）は、含水率変化に伴う木質エレメントの膨潤・収縮応力が接着層や接着点に作用して接着剤の凝集力が低下すること、加水分解によって接着部の凝集力の低下を起こすことが挙げられる。ここで、膨潤・収縮応力の大きさは含水率の変化幅に依存し、かつ、応力緩和を伴うため含水率の変化速度にも依存するという複雑な問題である。さらに木質ボードでは様々な接着点の存在形態があるため、その現象理解を一層複雑にしている。そこで本研究では、劣化外力を考える際に膨潤・収縮応力の大小を考慮せず、加水分解のみに着目し、以下の 2 点をベースに劣化外力 α の算出方法を検討した。

i) 含水率が高いほど加水分解は促進される

ii) 時間が経過するほど加水分解は進む

$$\alpha = \Sigma (k \times t)$$

ここに、 k は含水率に対応する劣化係数であり、 t はその劣化係数が持続した時間（年）である。

表 5 は試験パネルが暴露された環境での含水率の変動範囲（供試材料と同等の材料の吸着等温線および暴露環境の温湿度変化より算出）を示す。劣化外力 α をこのデータを用いて算出される、最適な算出方法を模索するために、以下の 2 点をパラメータとした。

iii) $k=0$ となる含水率の下限を、4%、8%、12%の 3 種類に設定

iv) 含水率と k の関係を、直線、指数、対数の 3 種類に設定

すなわち、(下限含水率 3 種類) × (k 重み付け 3 種類) = 9 種類の計算方法で算出された α のうち、物性劣化との関係に最も相関性の高いものを選定した。図 3 は含水率変動と設定した劣化係数 k の関係を示しており、表 6 は α 算出に用いた劣化係数 k の一覧である。

表 5 暴露条件別パネル含水率の変動範囲（%、下段は変動幅）

分類	I		II		III				IV		V					
					野地板		軒天・鼻隠し									
OSB (A)	6.7	⇔	11.2	7.7	⇔	12.1	5.3	⇔	11.2	9.1	⇔	17.6	7.5	⇔	16.2	16.2
	4.5		4.4		5.9		8.5		8.7							
OSB (P)	6.7	⇔	11.2	7.7	⇔	12.1	5.3	⇔	11.2	9.1	⇔	17.6	7.5	⇔	16.2	16.2
	4.5		4.4		5.9		8.5		8.7							
PB (PF)	8.5	⇔	12.3	8.8	⇔	15.5	7.3	⇔	12.3	10.9	⇔	17.2	9.0	⇔	15.2	15.2
	3.8		6.7		5.0		6.3		6.2							
PB (MDI)	7.7	⇔	11.1	7.9	⇔	14.0	6.6	⇔	11.1	9.8	⇔	15.5	8.1	⇔	13.7	13.7
	3.4		6.1		4.5		5.7		5.6							
MDF	7.6	⇔	10.0	8.5	⇔	10.9	6.1	⇔	10.1	9.6	⇔	13.7	8.2	⇔	13.3	13.3
	2.4		2.4		4.0		4.1		5.1							
合板	10.1	⇔	11.5	9.1	⇔	13.0	6.1	⇔	12.0	10.7	⇔	17.3	8.8	⇔	16.2	16.2
	1.4		3.9		5.9		6.6		7.4							
平均	7.9	⇔	11.2	8.3	⇔	12.9	6.1	⇔	11.3	9.9	⇔	16.5	8.2	⇔	15.1	15.1
	3.3		4.7		5.2		6.6		7.0							

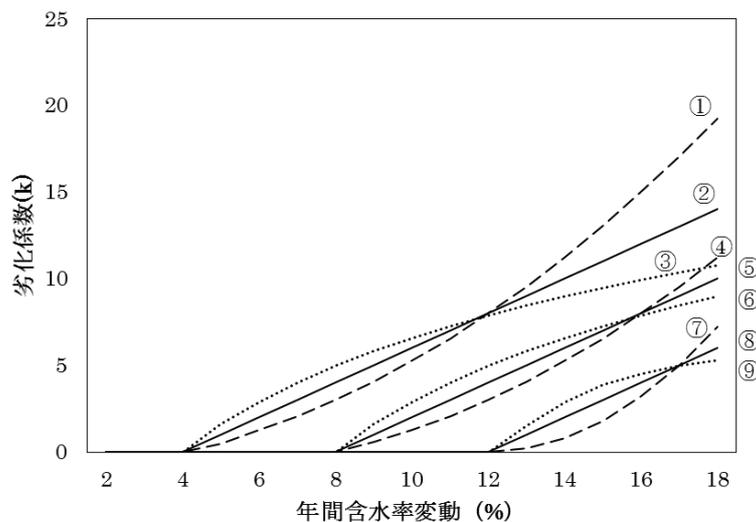


図 3 含水率変動と劣化係数 k の関係（9 種類の設定）

表 6 劣化外力算出に用いた劣化係数の一覧

			年間含水率変動範囲(%)						
			4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18
①	4%	指数	0.5	2.1	4.1	6.6	9.6	13.1	17.1
②	4%	直線	1.0	3.0	5.0	7.0	9.0	11.0	13.0
③	4%	対数	1.6	4.0	5.8	7.2	8.4	9.5	10.4
④	8%	指数	0.0	0.0	0.6	2.1	4.1	6.6	9.6
⑤	8%	直線	0.0	0.0	1.0	3.0	5.0	7.0	9.0
⑥	8%	対数	0.0	0.0	1.6	4.0	5.8	7.2	8.4
⑦	12%	指数	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	1.8	5.0
⑧	12%	直線	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	3.0	5.0
⑨	12%	対数	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	3.9	5.0

表 7 α と物性値の相関係数 (r 値) の一覧

		劣化係数 k の設定条件								
		下限含水率 : 4%			下限含水率 : 8%			下限含水率 : 12%		
		直線	指数	対数	直線	指数	対数	直線	指数	対数
MOR	合板	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.13	0.07
	OSB(A)	0.00	0.00	0.00	0.06	0.24	0.04	0.35	0.41	0.34
	OSB(P)	0.00	0.00	0.00	0.03	0.06	0.03	0.09	0.07	0.10
	PB(PF)	0.17	0.06	0.22	0.03	0.11	0.04	0.27	0.25	0.31
	MDF	0.21	0.02	0.27	0.14	0.29	0.17	0.50	0.50	0.50
MOE	合板	0.00	0.02	0.00	0.07	0.17	0.06	0.23	0.23	0.22
	OSB(A)	0.00	0.09	0.00	0.17	0.34	0.14	0.44	0.49	0.44
	OSB(P)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	0.26	0.20	0.29
	PB(PF)	0.00	0.00	0.00	0.12	0.06	0.00	0.28	0.25	0.33
	PB(MDI)	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00
	MDF	0.18	0.04	0.00	0.22	0.39	0.26	0.60	0.60	0.60
IB	OSB(A)	0.16	0.07	0.19	0.05	0.03	0.05	0.09	0.14	0.09
	OSB(P)	0.07	0.06	0.07	0.06	0.04	0.06	0.02	0.04	0.01
	PB(PF)	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.07
	PB(MDI)	0.31	0.29	0.32	0.27	0.23	0.26	0.18	0.17	0.18
NHPT	PB(PF)	0.10	0.07	0.12	0.05	0.02	0.06	0.02	0.01	0.02
	PB(MDI)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	MDF	0.00	0.10	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

網掛け部 : 5%または 1%で有意な相関、太字 : r 値が最大

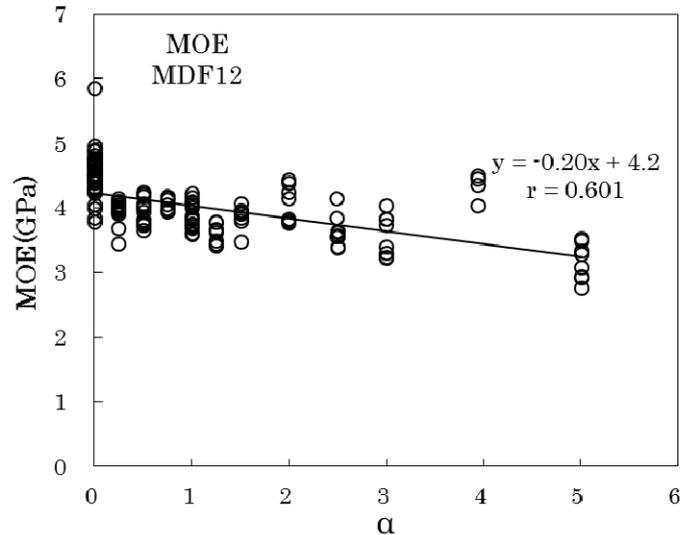


図4 劣化係数 α とMOE低下の関係 (MDF、条件⑧)

(2) 物性劣化との相関性

9種類の方法による劣化係数(図3)を用いて計算した劣化外力と物性劣化との相関係数を一覧表にしたのが表7である。また、相関関係の一例を図4に示した。有意な相関(表7:網掛け部)はMORでは5パネル中の3パネル、MOEでは6パネル中の5パネルで得られ、曲げ性能は本研究の劣化外力である程度は推定可能という結果となった。しかし、IBの場合、有意な相関が認められたのは4パネル中の1パネル(OSB(A)も一部なので正確には2パネル)で、NHPTの場合は、いずれのパネルおよび α 算出方法でも有意な相関は得られなかった。

以上のように、パネルおよび物性の種類に応じて相関の有無は異なるが、有意な相関が得られた条件内で相関係数の大きさを判断基準に α 算出方法の優劣を比較すると、

- 1) 劣化係数を $k=0$ とする含水率の下限値は12%が最適
 - 2) k の含水率による重み付け(直線、指数、対数)の適否に規則性は見られない
- という傾向が認められた。

(3) 相関性の向上にむけた座標軸の変換

前節では劣化外力の座標軸として α そのものを用いたが、ここでは、 $\log \alpha$ および $\sqrt{\alpha}$ の2種類を用いて、相関係数が向上するかどうかを検討した。結果を表8と表9に示す。表7で得られた最適条件の相関係数と比べると、X軸を $\log \alpha$ および $\sqrt{\alpha}$ にした場合で得られた相関係数の方がすべての場合で大きくなった。この傾向は屋外暴露における劣化外力と物性劣化の関係にも認められたことであるが、木質パネルの劣化速度は、劣化外力の増加とともにしだいに緩やかになっていくことが示唆される。なお、NHPTに関しては、座標軸を \log や $\sqrt{\quad}$ に変換しても有意な相関は得られなかった。

5. 強度劣化の推定

前項までに相関性の検討結果をもとに r 値が 0.3 以上の場合を対象として、最も高い相関係数が得られた X 軸および X 座標の算出方法で得られた回帰式を用いて、特定の使用環境における強度残存率を推定した。想定した使用環境は、住宅の構造用下地材のうち内部結露や事故的水掛かり等の水分トラブルが生じない場合と定期的に生じる場合の 2 条件とした。水分トラブルが生じない場合として、表 5 に示す水分レベルⅢ（野地板）の含水率変動データを用い、30 年後と 60 年後の強度残存率を推定した。また、水分トラブルが定期的に生じる条件として、表 5 に示す水分レベルⅣの含水率変動データを用い、30 年後の強度残存率を推定した。具体的には、それぞれの含水率変動から前述の方法に従って α を算出して x 座標を決定し、回帰式から y 座標を求めた。得られた値を初期値に対する残存率として示したのが表 10 である。

結果を概観すると、水分トラブルが無い場合の 30 年および 60 年後の性能は、PB(MDI)の IB で 20%~25%程度の低下が生じるものの、曲げ性能の劣化は最大で 1 割程度という結果となった。一方、水分トラブルがある場合、いくつかのパネルと強度の組み合わせで強度が半減するという推定結果となった。これより内部結露や事故的水掛かりなどの水分トラブルを定期的に点検し、補修・修繕することの必要性が示唆される。

表 10 最適な劣化外力指標より推定した使用 30 年および 60 年後の強度劣化

	パネル	水分トラブルなし			水分トラブルあり	
		含水率の変化範囲 (%)	残存率 (%)		含水率の変化範囲 (%)	残存率 (%)
			30 年後	60 年後		
MOR	OSB (A)	5.3~11.2	100	100	7.5~16.2	36
	PB(PF)	7.3~12.3	96	93	9.0~15.2	79
	MDF	6.1~10.1	100	100	8.2~13.3	32
MOE	合板	6.1~12.0	100	100	8.8~16.2	68
	OSB (A)	5.3~11.2	100	100	7.5~16.2	29
	OSB (P)	5.3~11.2	100	100	7.5~16.2	66
	PB(PF)	7.3~12.3	89	86	9.0~15.2	71
	MDF	6.1~10.1	100	100	8.2~13.3	62
IB	PB(MDI)	6.6~11.1	79	76	8.1~13.7	77

6. おわりに

本研究では、日本木材学会木質パネル研究会「木質パネル第二次耐久性評価プロジェクト」の取りまとめの一環として、水分レベルの異なる各種屋内使用環境での最長 10 年にわたる性能劣化の調査結果、含水履歴をベースとした劣化外力の算出方法の検討、その結果を用いた特定の使用環境における 30 年後および 60 年後の推定性能について示した。今後は、使用環境に応じた耐用年数を推定するための促進劣化試験方法の確立に向けて、促進劣化試験と実際使用における性能劣化の対応が詳細に検討される予定である。