



|                     |                                                                                               |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title               | 実際の使用環境下における合板の性能劣化に関する研究                                                                     |
| Author(s)           | 古田, 直之                                                                                        |
| Degree Grantor      | 北海道大学                                                                                         |
| Degree Name         | 博士(農学)                                                                                        |
| Dissertation Number | 乙第6885号                                                                                       |
| Issue Date          | 2013-06-28                                                                                    |
| DOI                 | <a href="https://doi.org/10.14943/doctoral.r6885">https://doi.org/10.14943/doctoral.r6885</a> |
| Doc URL             | <a href="https://hdl.handle.net/2115/56451">https://hdl.handle.net/2115/56451</a>             |
| Type                | doctoral thesis                                                                               |
| File Information    | Naoyuki_Furuta.pdf                                                                            |



実際の使用環境下における  
合板の性能劣化に関する研究

北海道大学 大学院農学院

古田 直之

## 目 次

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| <b>第1章 緒論</b>                    | 1  |
| 1.1 研究の背景と目的                     | 1  |
| 1.2 既往の研究                        | 5  |
| 1.2.1 合板の接着性能に影響を及ぼす因子に関する研究     | 5  |
| 1.2.2 型枠用合板の性能に関する研究             | 7  |
| 1.2.3 構造用合板の性能に関する研究             | 8  |
| 1.2.4 合板の接着耐久性に関する研究             | 9  |
| 1.2.5 合板の強度耐久性に関する研究             | 11 |
| 1.3 研究の概要                        | 12 |
| <b>第2章 使用済み型枠用合板の各種性能調査</b>      | 14 |
| 2.1 はじめに                         | 14 |
| 2.2 試験方法                         | 15 |
| 2.2.1 供試材料                       | 15 |
| 2.2.2 含水率試験                      | 15 |
| 2.2.3 接着性能試験                     | 16 |
| 2.2.4 動的ヤング係数の測定                 | 17 |
| 2.2.5 曲げ試験                       | 17 |
| 2.3 試験結果                         | 17 |
| 2.3.1 含水率                        | 17 |
| 2.3.2 接着性能                       | 18 |
| 2.3.3 ヤング係数                      | 20 |
| 2.3.4 曲げ強さ                       | 24 |
| 2.4 使用済み合板の再利用に関する考察             | 25 |
| 2.5 結論                           | 25 |
| <b>第3章 使用済み型枠用合板を活用した再生合板の開発</b> | 27 |
| 3.1 はじめに                         | 27 |
| 3.2 試験方法                         | 27 |
| 3.2.1 再生合板の特徴                    | 27 |
| 3.2.2 製造工程                       | 28 |
| 3.2.3 試験体の製造                     | 29 |
| 3.2.4 曲げ試験                       | 33 |
| 3.3 試験結果                         | 34 |
| 3.3.1 表裏単板厚さと再生合板の曲げ性能           | 34 |
| 3.3.2 接合形状と再生合板の曲げ性能             | 36 |
| 3.3.3 実大再生合板の評価                  | 42 |
| 3.3.4 実用化に向けた課題                  | 43 |
| 3.4 結論                           | 44 |

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| <b>第4章 床下地材として長期使用された合板の接着性能劣化評価</b>       | 45  |
| 4.1 はじめに                                   | 45  |
| 4.2 試験方法                                   | 46  |
| 4.2.1 調査物件と採取合板の概要                         | 46  |
| 4.2.2 促進劣化処理                               | 47  |
| 4.2.3 引張りせん断試験                             | 50  |
| 4.3 試験結果                                   | 50  |
| 4.3.1 実用環境における合板の含水率                       | 50  |
| 4.3.2 実用環境における合板のせん断強さと木部破断率               | 51  |
| 4.3.3 促進劣化試験における接着性能低下                     | 53  |
| 4.3.4 実用環境での合板のせん断強さの劣化評価                  | 55  |
| 4.3.5 促進劣化試験と実使用環境下での性能劣化の関係               | 59  |
| 4.3.6 長期使用時の性能劣化予測                         | 62  |
| 4.4 結論                                     | 64  |
| <b>第5章 床下地材として長期使用された合板の曲げ・面内せん断性能劣化評価</b> | 65  |
| 5.1 はじめに                                   | 65  |
| 5.2 試験方法                                   | 65  |
| 5.2.1 調査物件と採取合板の概要                         | 65  |
| 5.2.2 促進劣化処理                               | 66  |
| 5.2.3 曲げ試験                                 | 66  |
| 5.2.4 面内せん断試験                              | 66  |
| 5.3 試験結果                                   | 69  |
| 5.3.1 促進劣化試験における曲げ性能低下                     | 69  |
| 5.3.2 実用環境における合板の曲げ性能                      | 74  |
| 5.3.3 促進劣化試験における合板の面内せん断性能低下               | 77  |
| 5.3.4 実用環境における合板の面内せん断性能                   | 79  |
| 5.3.5 実用環境下での性能劣化評価                        | 81  |
| 5.3.6 促進劣化試験と実用環境下での性能劣化の関係                | 84  |
| 5.4 結論                                     | 86  |
| <b>第6章 床下地材として長期使用された合板の釘接合性能劣化評価</b>      | 88  |
| 6.1 はじめに                                   | 88  |
| 6.2 試験方法                                   | 88  |
| 6.2.1 調査物件と採取合板の概要                         | 88  |
| 6.2.2 釘側面抵抗試験                              | 89  |
| 6.2.3 釘頭貫通試験                               | 90  |
| 6.2.4 釘一面せん断試験                             | 91  |
| 6.3 試験結果                                   | 92  |
| 6.3.1 釘側面抵抗性能                              | 92  |
| 6.3.2 釘頭貫通性能                               | 96  |
| 6.3.3 釘一面せん断試験                             | 98  |
| 6.3.4 床水平構面としての性能推定                        | 103 |

|             |     |
|-------------|-----|
| 6.4 結論..... | 110 |
| 第7章 総括..... | 111 |
| 謝辞.....     | 116 |
| 文献.....     | 118 |

## 第1章 緒 論

### 1.1 研究の背景と目的

合板（plywood）は、原木を薄く剥いた単板（veneer）を数枚積み重ね、接着剤で張り合わせて1枚の板としたものであり、単板の繊維方向を互いに直交させ、積層数は奇数枚にするのが一般的である。合板の特徴として代表的なものは以下の2点が挙げられる。1 つめは、一般的な製材では得ることのできない広い面積の板の製造が可能なことである。通常、原木の側面に刃物を当て、原木の両木口の中心部を支点として回転させる、いわゆる桂剥きの手法によって単板切削がなされ、この技術が大きな寸法の面材料の製造を可能にしている。2 つめは、木材素材と比較して寸法安定性が向上されている点である。木材の特徴として、繊維方向、放射方向、接線方向によって強度や収縮膨張の大きさが大きく異なる異方性を有する<sup>1)</sup>ことが挙げられ、このことが材料として木材を使用する場合の欠点となり得る。合板の場合は、木材の繊維方向を直交させて張り合わせているために、繊維方向と直交方向のバランスがとられており、反りや狂いに対する安定性が確保され、強度や収縮に対する異方性が改善されるといった大きな利点がある<sup>2,3)</sup>。

合板の製造方法は、単板切削、乾燥、接着の主要な3つの工程と、これらの作業を効率的に行うための副次的な工程からなっている。単板切削はベニヤレースを用いて原木を桂剥きするが、近年は非常に高精度かつ効率的な機械の開発<sup>4)</sup>により、単板の生産能力が飛躍的に向上している。単板乾燥は、接着性能の向上や製品の品質の安定化にとって非常に重要な工程である。乾燥は、仕上がり製品の収縮や割れを抑制するためには、合板に限らず木材製品にとって非常に重要な役割を果たしているが、製材や集成材ラミナ等の乾燥が数日間の日数を要するのに対して、単板乾燥では、単板が他の木材に比べて非常に薄いこと、高温かつ高速でドライヤ内を通過させることから、10～20分程度の時間で目標の含水率に到達させることが可能である。接着工程は、単板への接着剤塗布工程、熱圧前に単板同士が剥がれないようにするための仮圧締（冷圧）工程、そして熱硬化性樹脂接着剤を硬化させるための熱圧工程からなる。これらの接着工程においても、できるだけ人手をかけ

ずに高速で接着剤塗布や冷圧、熱圧を行う製造装置が充実してきている。このように合板は非常に複雑な工程を経て製品が完成しているものの、装置産業化が進んだことにより、他の木材製品に比べて生産性は非常に高い。また、原木からの製品歩留まりは集成材の約2倍の60%程度と高いこともあり、同材積で比較すると、合板は製材や集成材を下回る製品単価となっている。このように、合板は寸法安定性や強度等の性能面において、通常の木材には無い特徴を有するとともに、価格面においても他の木製品よりも優位性を持っている。

合板と並ぶ木質面材料として、パーティクルボードやMDF、OSBといった木質ボード類がある。これらのボード類は木材小片や木材繊維に接着剤を添加し熱圧して板状製品にしたものである。木質材料の中では装置産業化の程度が高く、価格競争力を持った材料であり、合板では得られない表面平滑性等を有している。木質ボード類は、近年着実に需要量を伸ばしている<sup>5)</sup>が、合板はこれらの材料よりも、強度や吸水時の寸法安定性等において優位性があり<sup>6,7)</sup>、国内における生産量は依然として合板が最も多い。

合板製造の歴史に目を向けてみると、我が国では1907年に名古屋の浅野氏によって初めてベニヤレースが開発され、合板が製造されたと記録されている<sup>8,9)</sup>。合板製造初期の頃は北海道内に豊富にあったナラ、カバ、タモ等の広葉樹天然林資源を原料としていた<sup>10)</sup>が、1920年代に入ると南洋材丸太が輸入されるようになった。南洋材は大径かつ通直であり材質も均質で合板原料として非常に優れたものであった<sup>11)</sup>ことから、以来2000年頃まで、南洋材が国内合板原料の主力として利用されてきた。その後は南洋材資源の枯渇や違法伐採等の問題が露呈し、外国産針葉樹や国産針葉樹材への転換が大幅に進んできた。接着剤については、合板製造初期はニカワやカゼイングルー、1930頃からは大豆グルー、1950年頃から2000年頃まではユリア樹脂やメラミン・ユリア樹脂が主体的に用いられてきた。近年は針葉樹合板の増加とともにフェノール樹脂の使用が増加している。一方、北米においては1905年にオレゴン州ポートランドに合板工場が開設されたのが初めとされている<sup>9)</sup>。北米における合板原料は、初期の頃は比較的大径のダグラスファー、1960年過ぎからは中小径のサザンパインを中心とした針葉樹材が用いられてきた。接着剤については、1930

年代からフェノール樹脂を用いた合板の開発が行われ、その後は外装用には同接着剤が使用されてきた。また、北欧においては、1870 年代に単板切削用のベニヤレースが使用されるようになり、1880 年代には合板製造が工業化されていた。当初は、フィンランド製のカバ合板等がその典型であった<sup>9)</sup>が、1960 年を過ぎた頃から資源が枯渇し、スプルース等の針葉樹材へと変遷していった。原材料の転換に伴い、その用途も高級家具材から建築用材へと換わっていき、接着剤も耐水性を持つフェノール樹脂が使用されるようになった。このように国内と海外では、合板原料および使用する接着剤に大きな違いが存在していた。

ここで、接着剤の耐久性（耐水性）について、現在使用されている合成樹脂接着剤について整理してみる。合板の日本農林規格（JAS）<sup>12)</sup>では、接着剤の耐久性を特類、1 類、2 類の 3 種に分類している。特類は、屋外または常時湿潤状態となる環境での使用を想定したもので、フェノール樹脂接着剤が使用されている。1 類は、断続的に湿潤状態となる環境での使用を想定したもので、主にメラミン・ユリア共縮合樹脂接着剤が使用されている。2 類は、時々湿潤状態となる環境での使用を想定したもので、通常ユリア樹脂接着剤が使用されている。合板の JAS では、特類は構造用合板のみ、2 類は普通合板と特殊合板のみと限定されているが、1 類は構造用合板、コンクリート型枠用合板、普通合板、特殊合板のすべてに適用されている。

国内における合板生産量は、1970 年代の 850 万  $\text{m}^3$  をピークに現在はその約 3 割の 250 万  $\text{m}^3$  程度に落ち込んでいる<sup>13)</sup>。輸入合板を含めた現在の国内総供給量で見ると、住宅着工戸数の減少や木質ボード類の攻勢等の影響からピーク時の約 6 割の 600 万  $\text{m}^3$  に減少しているものの、国内生産量に比べると落ち込みは少ない。すなわち、安価な東南アジア諸国や中国からの輸入合板が国内の合板産業を圧迫している。原材料は前述のように南洋材が大半を占めてきたが、1990 年代後半から大幅に減少し、2001 年には北洋材と使用量が逆転した。また、北洋材はその後、丸太輸出関税引き上げの影響から大きく減少するとともに、業界を挙げて原料の国産材化を推進したことで 2008 年にはスギやカラマツ等の針葉樹材が大勢を占め、着実に国産材利用が広がっている。これらの合板生産動向を用途別に見ると、全生産量に占める型枠用合板の割合は 1998 年の 27% から 2011 年には 1% に減少し、



構造用合板の割合は 1998 年の 23%から 2011 年には 75%へ大幅に増加している。すなわち、構造用合板は国産針葉樹材が適していたのに対し、型枠用合板は表面性能や強度性能、吸水時の寸法安定性等から針葉樹材が使用しにくく、その結果、東南アジアからの輸入材依存が強まっていると言える。型枠用合板は、製造から廃棄までの期間が建築構造材や家具部材等の他の木製品よりもはるかに短いことに加えて、南洋材自体が再生困難な資源であるため、地球環境保全の面でのリスクが非常に大きい。従って、型枠用合板については、転用回数の向上<sup>14)</sup>や再利用等による消費量の削減、国産材への移行<sup>15)</sup>等が強く求められている。

国内の木材産業に関する近年の動向については、2009 年の長期優良住宅普及促進法の施行により、適切な維持管理を施しながら数世代に渡って住宅を利用していくための取り組みが進められている。我が国では木造住宅が解体されるまでの年数は平均で 25～30 年程度であり、アメリカの 100 年、イギリスの 140 年に比べてはるかに短い<sup>16)</sup>。日本国内と欧米諸国では住宅構造や気候環境、あるいは生活様式の歴史的経緯等が異なるため、一概に比較はできないが、木材資源・環境問題の観点からは、住宅の耐用年数を延長し、より長く木材中に炭素を固定するための努力が必要となっている。また、2010 年に公共建築物等木材利用促進法が施行され、低層の公共建築物については原則木造化を図るなど、より大規模な木造建築の建設が推進されている。

超長期住宅や大規模木造建築物へ合板等の木質材料を使用していくにあたり、材料の信頼性がこれまで以上に重要度を増してきていると言える。建築物における信頼性の高い木質材料とは、「材料が建築物に使用されている期間、構造材として最低限要求された接着性能、強度性能等を保持できること」であると考えられる。構造材料としての木材についてみると、我が国には歴史的な木造建築物が数多く存在し、適切な管理の下では 1300 年を超える耐用年数がすでに証明されており、生物劣化が生じないよう適切な管理がなされた場合には一定の信頼性が得られていると言える。一方、構造材料としての合板についてみると、必ずしも十分な信頼性があるとは言えないように思われる。それは合板製造と接着剤の変遷の歴史が示すように、現在使用されている合板は、超長期住宅や大規模木造建築

物が想定する使用期間の性能を保証するだけの使用実績がないことによるものである。合板の JAS の制定は型枠用合板が 1967 年、構造用合板が 1969 年であり、合板の建築材料としての使用実績は 40 年程度しかない。また、国内においては、合板を建築構造材として使用した場合の性能劣化に関するデータは皆無である。合板等の木質材料の耐久性については、国内外において数多くの研究が進められてきた。これらの耐久性に関する研究は、一般的には、水分や熱を繰り返し作用させ、接着層に大きな負担をかける促進劣化試験と屋外で材料を風雨に曝す屋外暴露試験によって評価されてきた。これらの研究により、処理方法の違いによる劣化の程度、原材料や接着剤の種類による耐久性の優劣、あるいは気象因子による劣化の違い等が明らかにされている。しかしながら、これらの多くの試験結果を駆使しても、「合板は住宅構造材として何年持つのか」あるいは「100 年使用した場合に初期の何割程度の性能を保持できるのか」といった問いに対して具体的な数値を示して答えることは困難である。このような木質材料における接着耐久性に関する問題は、合板のみならず、集成材や LVL 等の積層接着材料、あるいはパーティクルボードや MDF といった木質ボード類にも通じる木質材料に課された大きな課題であるとも言える。

このような合板を取り巻く状況を踏まえ、本論文では、合板を型枠用や構造用等の建築材料として実際に使用した場合の性能劣化に関するデータを蓄積し、適切な使用方法を提案することを目的とした研究を行った。本章では、合板の基礎的性能や用途ごとの性能、あるいは接着耐久性、強度耐久性等に関する過去の研究を概説するとともに、本論文の概要について説明する。

## 1.2 既往の研究

### 1.2.1 合板の接着性能に影響を及ぼす因子に関する研究

合板は数枚の単板を接着剤で張り合わせたものであり、接着性能が不十分な場合は合板に要求される様々な性能に影響を与えるため、良質な合板を製造するためには接着性能の確保は最も重要な項目である。接着性能には様々な因子が複雑に影響するため、合板の接着性能に関しては、これまでに非常に多くの研究報告がある。合板の接着性能に関連する

因子としては、樹種や単板の性状等の材料特性によるものや乾燥温度や接着条件等の製造条件によるものがある。

樹種と接着性能の関係について、国内では浅野<sup>17)</sup>や柳下ら<sup>18,19)</sup>、高谷ら<sup>20)</sup>が単板密度や湿潤性と接着性能を関連させた研究を行っている。これらの報告では、様々な樹種の南洋材単板について、フェノール樹脂、メラミン・ユリア共縮合樹脂、ユリア樹脂の接着剤を用いて合板を製造し、接着性能は密度と概ね相関があること、単板の湿潤性と接着性能の関係は接着剤の種類によって異なること等が示されている。単板の湿潤性は、液適法<sup>21,22)</sup>や傾板法<sup>23,24)</sup>毛管上昇法<sup>25,26)</sup>等により測定されており、これらの手法の相互関係や接着性能との関連が検討され、接着性能との相関は毛管上昇法が比較的高いこと<sup>20,27)</sup>等が報告されている。また、密度に見合った接着強度を得るのが難しい樹種として、シナ<sup>28,29)</sup>やカポール<sup>30-32)</sup>、クルイン（アピトン）<sup>28,33)</sup>、メダン<sup>34)</sup>等が指摘されており、接着性能の改善策として、抽出成分の除去や浸透性の改善、接着剤塗布量の調整等が検討されている。針葉樹単板の接着については、国内では小倉ら<sup>35)</sup>が道産および北洋カラマツについて、田口ら<sup>36)</sup>がオウシュウアカマツについて、金田<sup>37)</sup>がスギおよびヒノキについて検討している。海外ではフェノール樹脂接着剤によるダグラスファー<sup>38)</sup>やサザンイエローパイン<sup>39)</sup>等の接着性能が検討されている。これらの針葉樹材の接着については、適切な接着操作がなされれば比較的良好な接着強度が得られている。

単板の含水率管理は、製造効率や仕上がり製品の精度の面から非常に重要であり、水分管理が不十分な場合には接着性能や製品の品質にも大きな影響を及ぼす。単板含水率と接着性能の関係について、南洋材については筒本ら<sup>40)</sup>が、シナ、カバ等の広葉樹材については野崎ら<sup>41)</sup>が報告しており、10%前後の含水率で接着した場合に接着強度が高くなることが明らかになっている。含水率の高い単板を接着できれば乾燥による消費エネルギーを削減できるが、含水率が高い場合、接着剤の単板への過浸透により接着層の形成が不十分となることに加えて接着層の温度上昇が遅れること<sup>42)</sup>から、特に高温での熱圧が必要なフェノール樹脂接着剤を使用する場合には熱圧時の接着不良（パンク）が生じやすい。単板の表面性状については、表面粗さや裏割れ率が大きい単板ほど接着性能が低下すること<sup>43)</sup>

が示されている。

単板乾燥条件と接着性能の関係については、主に北米において研究が進められ、過乾燥された単板の接着性能が低下する現象<sup>44-46)</sup>について、単板表面の不活性化 (inactivation) として取り上げられている。Northcott ら<sup>44)</sup>は高温で乾燥した場合、木材の吸湿性や濡れ性が低下することを報告した。また、不活性化された単板は、有機溶媒による抽出処理<sup>39)</sup>や表面の研削<sup>47,48)</sup>により接着性能が改善されることから、木材中の抽出成分や樹脂の表面の染み出し等が原因と推測されている。

### 1.2.2 型枠用合板の性能に関する研究

合板がコンクリート型枠として用いられ始めたのは 1952 年頃からとされているが、当時は型枠利用の本格的な研究が行われておらず、1962 年頃から施工業者、合板業者が型枠構工法の積極的な利用開発を研究し始めたとされている<sup>49)</sup>。コンクリート型枠用合板は国内においては 1967 年に初めて日本農林規格として定められ、それを契機に利用が拡大してきた。当初南洋材合板が国産合板の主流であったこと、南洋材は曲げ剛性やパネルの狂い等の型枠としての性能に優れたものであること等から、南洋材型枠用合板が大量に消費されるようになった。しかしながら、型枠用合板は数回の転用を経て比較的短期間で廃棄処分されることから、南洋材の大量消費が熱帯林資源の破壊や地球環境の悪化を招いているとの非難を浴び、その消費削減に関する取り組み<sup>14,50)</sup>が行われてきた。

型枠用合板に関する研究としては、柳下ら<sup>49)</sup>は南洋材から針葉樹に至るまでの様々な樹種を用いた合板について、耐アルカリ性や実施工時の着色、むしれ等の評価を行い、樹種ごとに型枠としての適正度合いを示した。南洋材の消費削減に関する取り組みには、型枠用合板を金属製や合成樹脂性等の木材以外への置き換え<sup>51,52)</sup>や南洋材を針葉樹材に転換する方法<sup>52,53)</sup>などが検討されてきた。針葉樹を用いた型枠用合板に関しては、高谷<sup>54)</sup>や堀<sup>55)</sup>等によりカラマツ、トドマツ、ラジアータパイン、ベイマツ、北洋カラマツ等を用いて製造した型枠用合板の各種性能が検討され、曲げ剛性については、JAS 基準を満足できるものの、南洋材よりも狂いが大きい傾向があること、カラマツやベイマツではむしれが生じ

やすいことなどの課題が指摘されてきた。また、南洋材、針葉樹材ともセメントの硬化不良が生じる<sup>56,57)</sup>ものがあることから、樹種によっては合板表面の塗装やその他の表面加工が不可欠となる。表面処理は、転用回数を向上させるための手段として一般的に行われており、通常は樹脂による塗装がなされているが、その他の手法として、ガラス繊維紙や不織布を利用する方法<sup>50)</sup>やポリプロピレンシートでオーバーレイする方法<sup>58)</sup>等が検討されてきた。

近年の動向として、南洋材原木の輸入の減少から国内での型枠用合板の生産量が激減し、国産針葉樹材を用いた型枠用合板としての利用が期待されている。河村ら<sup>59)</sup>は曲面施行に適した型枠用合板としてスギを用いた斜交型合板を提案している。渋谷<sup>15)</sup>は合板用として最近利用されている様々な針葉樹を用いた型枠用合板について、曲げ性能試験や実施工試験を行い、いずれの樹種においても、単板構成に配慮することで JAS 基準を満たす性能が得られることを報告している。

### 1.2.3 構造用合板の性能に関する研究

合板はベニヤレースにより切削された単板を複数枚積層したものであり、構成要素の性能が合板の強度性能に大きな影響を与える。合板の強度性能に関する研究については、国内において古くから高見<sup>60)</sup>、沢田<sup>61)</sup>、浅野<sup>62)</sup>、大熊<sup>63)</sup>、上田<sup>64)</sup>らによって、その理論が検討されている。これらの研究では、単板構成と合板の強度特性値の関係について詳細に検討され、合板を構成する単板の性能から任意の構成の合板の性能を推定できることが明らかにされてきた。構造用合板の JAS の制定は 1969 年であるが、当時の在来構法住宅では、構造耐力部材に面材料を使用する習慣はほとんどなく、その後 1971 年の建築基準法の改正で、合板を使用した耐力壁に壁倍率が与えられるなど、合板を構造用として利用する体制が整えられてきた。

吉田<sup>65)</sup>は南洋材を用いた構造用合板の実大および小試験体による曲げ試験を行い、これらの関連を求めた。大熊ら<sup>66,67)</sup>はラジアータパインを用いた合板について、強度性能に及ぼす欠点の影響や原木の枝打ちの影響等を明らかにした。平嶋ら<sup>68,69)</sup>はアメリカ産針葉樹

合板と国産ラワン合板の曲げ試験を行い、針葉樹合板の性能に及ぼす節や目切れ等の欠点の影響を指摘した。国内の合板企業では 1990 年頃から従来の南洋材から針葉樹材への樹種転換の取り組みを始め、その後針葉樹を用いた厚物合板の生産量が大幅な増加を見せるようになった<sup>70)</sup>。谷川<sup>71)</sup>らはラワン、ラーチ、ラジアータパインを用いた構造用合板について、湿度環境が曲げ性能に及ぼす影響について検討した。また、渋沢らは外国産材<sup>72)</sup>や国産材<sup>73)</sup>による 24mm 以上の厚物合板の強度性能評価を行った。

一方、北米では住宅構造形式の影響もあり、構造用合板の住宅への使用は日本よりも古く、1950 年代後半からとされている<sup>74)</sup>。日本では針葉樹合板が普及し始めたのは 2000 年を過ぎた頃からであるが、北米では当初からダグラスファーやサザンパインといった針葉樹材を原材料としており、針葉樹合板のデータ蓄積は多い。Biblis<sup>75,76)</sup>はサザンパイン合板について、様々なスパンで曲げ試験を行い、曲げ性能に及ぼすせん断たわみの影響について検討した。合板の含水率が強度性能に及ぼす影響については、Bohlen<sup>77)</sup>は圧縮強度について、Palka<sup>78)</sup>は層内せん断強度について検討し、いずれも含水率の増加とともに合板の強度は直線的に低下することを示した。McSween<sup>79)</sup>はサザンパイン単板にイエローポプラなどの広葉樹単板を複合させた構造用合板の接着性能について検討し、一部の樹種では接着に問題があることを指摘した。Shupe ら<sup>80,81)</sup>は、育林作業の異なる林分から得られた丸太より単板切削して合板を製造し、合板のせん断強度、曲げ性能に及ぼす育林作業の影響を調べた。

#### 1.2.4 合板の接着耐久性に関する研究

合板の接着耐久性についてはこれまでに数多くの研究がなされてきた。接着性能を劣化させる因子は水分、熱、紫外線、生物、外部応力等多岐にわたり、その材料の使用環境における劣化を定量的に評価するためには、いまだに多くの課題を残している。接着耐久性を最も正確に調べるには、その材料が実際に使用される環境での経年劣化を調べることであるが、住宅構造部材のように劣化が緩やかに進行する場合には、結果を得るには非常に長い年月を要するため現実的ではない。接着性能を劣化させる因子の内、水分と熱は非常

に重要であり、これらの因子は実験的にも制御しやすいため、これらを組み合わせた促進劣化手法が主に研究されてきた。

Northcott ら<sup>82)</sup>はいくつかの温度に暴露させた試験体の劣化を調べ、水蒸気に暴露させた接着層は煮沸よりも劣化しやすく、暴露温度が高くなるほど接着層は劣化しやすいことを明らかにした。Gillespie<sup>83)</sup>は様々な温度帯での促進劣化試験を行い、接着性能が初期の半分になる時間（ハーフライフ）について、各温度での性能劣化の関係を求めた。さらに、ユリア樹脂接着剤で接着した合板の劣化を解析し、含水率が性能劣化に影響していることを示した<sup>84)</sup>。山岸<sup>85)</sup>は様々な促進劣化手法による劣化の相関関係を調べるとともに、世界各国で合板規格に制定されている試験法に従って性能判定を行い、各試験法の問題点に言及した。後藤ら<sup>86)</sup>はフェノールおよびメラミン・ユリア共縮合樹脂接着剤による合板の煮沸乾燥繰り返し試験を行い、フェノール樹脂では被着材の劣化が、メラミン・ユリア共縮合樹脂では接着層の劣化が著しいことを明らかにした。

促進劣化処理は比較的短期間で耐久性の優劣を判定できるという大きな利点があるが、実際の使用環境においては水蒸気中や沸騰水中に暴露されることなどはあり得なく、実用上は劣化機構の差異という問題がある。屋外暴露試験は、材料が屋外で使用される場合には、試験結果から直接その材料の耐用年数を決定することができる。また、屋外暴露は自然環境での促進劣化処理と捉えて促進劣化処理の妥当性を主張するための比較試験としても数多くの研究がなされている。金田<sup>87)</sup>は南洋材による構造用合板を屋外に暴露し、接着性能の低下に及ぼす表面塗装の有無および接着剤の相違の影響を調べた。Northcott ら<sup>88)</sup>は煮沸繰り返し試験と屋外暴露試験の接着性能低下の関係を求め、新たな接着剤については単に煮沸繰り返し試験を実施するだけで接着耐久性の予測ができると結論づけた。Caster<sup>89)</sup>も同様に促進劣化処理と屋外暴露試験の劣化の関係を求め、様々な接着剤についてその耐久性を等級づけた。吉田<sup>90)</sup>は水性高分子・イソシアネート系接着剤とフェノール・メラミン樹脂接着剤により製造した合板について、促進劣化試験と屋外暴露試験を行い、熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂では促進劣化処理と屋外暴露の劣化が大幅に異なることを指摘した。井上<sup>91,92)</sup>は促進劣化試験の劣化と屋外暴露や高湿度環境での劣化を重ね合わせる

ことよって、促進劣化処理から実用環境の結果を予測する手法を提案した。

合板を耐力壁や床下時、屋根下地等に使用する場合、水分の作用の他に外部応力の作用が重要な劣化因子となる。床下地材を例に挙げれば、材料が長期間使用される間に歩行による荷重が繰り返し作用されることになり、これが材料の劣化に与える影響を考慮する必要がある。金田ら<sup>93,94)</sup>は合板に曲げ応力や引張り応力を加えた状態で、ウェザーメータや乾湿繰り返しによる促進劣化を行い、接着剤の種類と劣化の関係を明確にした。Kreibichら<sup>95)</sup>は、曲げ応力下では無負荷状態よりも屋外暴露による接着性能劣化が著しいことを報告した。

### 1.2.5 合板の強度耐久性に関する研究

合板を構造耐力部材として捉える場合、実用上材料に要求される性能は、曲げ、面内せん断、釘接合性能など多岐に渡っている。したがって、構造耐力部材としての合板の耐久性を考慮する場合は、長期使用時のこれらの性能の劣化の程度を明確にし、構造物として最低限要求される性能に対してどの程度の余力があるのかを明らかにする必要がある。

大熊<sup>96)</sup>らは合板および木質ボード類について、数種の促進劣化処理を行った後の曲げ性能や釘側面抵抗性能の低下を調べ、ボードの種類によって性能低下に大きな差がないことを報告した。吉田<sup>97)</sup>は南洋材や道産広葉樹材による合板について、屋外暴露および乾湿繰り返し処理を行い、樹種ごとに曲げ性能や面内せん断性能等の低下を明らかにした。高谷ら<sup>98)</sup>は合板および代表的な木質ボード類について、乾湿繰り返しや ASTM による促進劣化を行い、曲げや釘接合性能の劣化を検討した。池田ら<sup>99)</sup>は市販の合板および木質ボード類について、屋外暴露試験と減圧加圧を用いた促進劣化処理を行い、曲げ性能の低下に及ぼす接着剤の影響等を示した。関野ら<sup>99)</sup>は木質ボード類について、モデル化した床下環境に実際使用した場合の曲げ性能の変化を調べ、高含水率環境下では曲げ強さの低下が著しいことを示した。有馬ら<sup>100)</sup>は、壁の面内せん断耐力は釘側面抵抗性能との相関が高いことから、木質ボード類を屋外や湿潤環境等の様々な条件下に暴露した時の釘側面抵抗性能の低下率を求めた。青木ら<sup>101)</sup>は針葉樹合板の釘側面抵抗性能および釘頭貫通性能に及ぼす



水分作用処理の影響を調べた。

耐力壁等の構造性能の耐久性に目を向ける場合、合板単体としての劣化のみならず、接合部としての劣化を評価することが重要である。神谷ら<sup>102)</sup>は製材に合板を釘で打ち付けた接合部について、含水率が高い場合は乾燥を伴う時間経過でせん断耐力が大きく低下することを明らかにした。張ら<sup>103)</sup>は、構造用木質面材を用いた釘接合部について、煮沸による促進劣化処理手法を提案した。宮村ら<sup>104)</sup>は面材を釘打ちした製材を高湿度環境に暴露して釘接合性能試験を行い、せん断耐力は釘の錆や含水率変化の影響を受けることを示した。平井ら<sup>105)</sup>は合板および木質面材料について、JISによる促進劣化処理後の釘1面せん断試験を行い、それらの結果を基に面材を使用した耐力壁のせん断耐力の試算を行った。大畑ら<sup>106)</sup>は合板およびOSBについて、温水浸せきによる釘保持性能と実大耐力壁性能を調べ、合板は温水浸せきによる劣化が小さいことを報告した。

### 1.3 研究の概要

このように、合板については国内外において古くから使用材料や接着剤の種類を変えた場合の接着性能や強度性能の関係、促進劣化処理や屋外暴露試験による耐久性評価等、様々な研究が行われてきた。しかしながら、実際の使用環境における劣化の明確化と長期使用時の性能推定を行うためには、促進劣化試験や屋外暴露試験等の実験室レベルでの研究のみでは限度があり、建築材料としての実際の使用環境での劣化を直接評価することが不可欠である。現時点では実使用による評価は、実験室レベルでの評価に比べて大幅にデータが不足していると言わざるを得ない。とりわけ、木質材料のカスケード型の利用や超長期住宅、あるいは公共建築物等の大規模な木造建築物等が推進されている昨今においては、実用環境における劣化の数値化が極めて重要になっている。

以上の背景をもとに、本論文は、合板を型枠用や構造用等の建築材料として実際に使用した場合の性能劣化を明らかにすることを主な目的として実施した研究<sup>107-109)</sup>を取りまとめた。第2章では、型枠用として実際に使用され廃棄される合板を入手し、接着性能および曲げ性能の調査を行い、再利用の可能性を検証した。第3章では、第2章の結果をもと

に、使用済み合板を新たな合板の心板として再利用する手法を提案し、型枠用合板としての各種性能を評価した。第4章から第6章までは、住宅の床下地材として長期間使用された合板について、各種の残存性能の評価を行った。第4章では接着性能について、第5章では曲げ性能と面内せん断性能について、一般的な促進劣化試験における劣化と実用環境の劣化を比較分析することで長期使用時の劣化推定を試みた。第6章では合板の釘接合性能についての調査を行い、得られた特性値を基に床組の水平構面としての性能劣化の推定を行った。

## 第2章 使用済み型枠用合板の各種性能調査

### 2.1 はじめに

近年の環境問題に対する意識の高まりの中で、廃木材の再利用に対する社会的要請が強まっている。木材が本来持っている炭素固定機能を最大限に発揮するには、廃木材の再利用はカスケード型に進めるのが理想であり、再利用用途の拡大が望まれている。廃木材の中でも型枠工事で発生する使用済み型枠用合板（以下、使用済み合板）は適当な再利用用途が少なく、現状では大半が燃料用とされている。これは合板に異物が付着し、破碎してもチップの品質が悪いことや接着剤が含まれていること等が再利用の際の障害となっているためである。使用済み合板の再利用に関しては、パーティクルボード原料の一部としての利用<sup>110)</sup>やセメントボードへの利用<sup>111)</sup>、炭化物を利用した吸着剤としての利用<sup>112)</sup>などが検討されている。しかし、これらをチップ化することなく木質材料として再利用しようという試みは見られない。ところが、型枠用合板は製造してから廃棄されるまでの期間が短く、廃棄される合板においても面材料としての性能を十分保持している可能性がある。使用済み合板を面材料として再利用できれば、廃棄までの期間を延長でき、貴重な木質資源の有効活用が図れる。

一方、国内における合板用原木は熱帯産広葉樹（通称ラワン）から針葉樹への転換が進められてきたが、型枠用合板に関しては、表面の平滑性や硬化不良等の問題から原料の樹種転換が進まず、国内生産量が激減している<sup>113)</sup>。これに対し、金属製や合成樹脂製等の多種多様な型枠も開発されてきており、最近では木質系廃材や廃プラスチックを原料としたもの<sup>114)</sup>等の環境配慮型の型枠についても研究開発が進んできている。しかし、建設業界では価格や性能、加工の容易さなどから、依然として東南アジア諸国から輸入型枠用合板への依存も強く、安定供給の困難な南洋材の消費量を削減するための対策が必要と考えられる。

そこで本章では、使用済み合板を新たな合板の心板としての再利用の可能性を検証するため、使用済み合板の接着性能や動的ヤング係数、曲げ性能等を調査し、新品合板との比

較を行った。

## 2.2 試験方法

### 2.2.1 供試材料

試験に供した使用済み合板は建設業 4 社、廃棄物処理業 1 社から入手した 5 種類、新品合板は国産品 2 種類、輸入品 1 種類の計 3 種類とした (Table 1)。使用済み合板の一部を Fig.1 に示す。いずれの合板も厚さ 12mm、5 プライ構成であり、表面に塗装はされていない。入手したすべての合板について、合板表面の日本農林規格 (JAS) の表示を確認し、表示が確認できた一部の合板については Table 1 にその概要を示した。建設業者から入手した使用済み合板は、すべて建設現場で数回使用し、それ以上転用できなくなったため廃棄する予定のものである。転用回数は合板によって異なるが、聞き取りの結果からおおよそ 4~5 回が大半であると考えられる。入手した合板の寸法は様々であったが、長さの平均値は 779mm (最大 1728mm、最小 300mm)、幅の平均値は 653mm (最大 900mm、最小 335mm) であった。これらの合板表面にはコンクリート等の異物が付着したものが多く見られた。また、合板 B は一部に腐朽が見られた。入手した合板は直ちに無作為に 10 枚を抜き出し、後述する含水率試験に供した。さらに無作為に 5 枚を抜き出し、接着力試験、動的ヤング係数の測定および曲げ試験に供した。試験片は含水率試験を除き、20°C-65%R.H.の恒温恒湿器内で調湿し、重量が恒量に達した後に行った。なお、これらの試験に際し、表面のコンクリート等の付着物は手作業により除去した。

### 2.2.2 含水率試験

抜き出した合板から 75×75mm のサイズの試験片を採取し、次式に示す絶乾法により含水率を測定した。

$$MC = (W_u - W_0) / W_0 \times 100 \quad (1)$$

ここで、MC は含水率 (%)、 $W_u$  は入手時の試験片重量 (g)、 $W_0$  は 105°C、24 時間乾燥後の試験片重量 (g) である。試験片数は合板 1 枚あたり 3 片、合計 30 片とした。

Table 1. Outline of concrete form plywood.

| Sort of plywood | Mark of plywood | A company which obtained plywood | Sort of JAS                                                                                   |
|-----------------|-----------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Used plywood    | A               | Construction company             | A part were "Import, B-C", others were unknown                                                |
|                 | B               | Waste disposer                   | Unknown                                                                                       |
|                 | C               | Construction company             | A part were "Made in Japan, B-C, F <sup>★</sup> ", others were unknown                        |
|                 | D               | Construction company             | A part were "Made in Japan, B-C", others were unknown                                         |
|                 | E               | Construction company             | A part were "Made in Japan, B-C, F <sup>★</sup> ", and "Import, B-C", others were unknown     |
| New plywood     | F               | –                                | "Made in Japan, B-C, F <sup>★</sup> ", manufactured from Southeast Asian species              |
|                 | G               | –                                | "Made in Japan, B-C, F <sup>★</sup> ", manufactured from Southeast Asian species and conifers |
|                 | H               | –                                | "Import, B-C", manufactured from Southeast Asian species                                      |



Fig.1. Outline of used concrete form plywood.

### 2.2.3 接着性能試験

合板の JAS に準じ、 $80 \times 25\text{mm}$  の引張りせん断試験片を合板 1 枚あたり 40 片（順逆それぞれ 20 片）採取した。半数は常態接着力試験に、他の半数は煮沸繰り返し試験に供した。試験片は JAS の A 型試験片（切り込みの間隔  $25\text{mm}$ ）とし、引張りせん断試験により、せん断強さおよび木部破断率を算出した。なお、合板の JAS では、表板に対する心板の厚さの比が 1.5 以上 2.0 未満のものは 1.1 を、2.0 以上 2.5 未満のものは 1.2 を乗じて評価することとなっており、本研究においてもこの係数を乗じたせん断強さで評価した。

#### 2.2.4 動的ヤング係数の測定

幅 50mm、長さ 338mm の試験片を表板の繊維方向と試験片の長手方向が平行なもの（0 度方向）と直交するもの（90 度方向）を合板 1 枚あたりそれぞれ 4 片ずつ採取した。試験片中央部を指で軽く支持し、試験片端部をハンマで打撃した。他端部付近に設置したマイクで振動を検知し、FFT アナライザーを用いて固有振動数を測定し、次式により動的ヤング係数を算出した。

$$E_L = 4 \cdot l \cdot f^2 \rho \quad (2)$$

ここで、 $E_L$  は縦振動によるヤング係数、 $\rho$  は密度、 $l$  は長さ、 $f$  は 1 次固有振動数である。

#### 2.2.5 曲げ試験

合板の JAS においては、コンクリート型枠用合板では実大サイズ、構造用合板 1 級では小試験片による曲げ試験を規定している。本試験では、サイズの制約から構造用合板 1 級に準じて曲げ試験を行い、曲げヤング係数（ $E_B$ ）および曲げ強さ（ $\sigma$ ）を算出した。試験は動的ヤング係数の測定が終了した試験片を用いた。スパン 288mm の中央集中荷重方式の 3 点曲げ試験とし、平均荷重速度は毎分 14.7MPa 以下とした。曲げ試験終了後、試験片の端部を切り出し、絶乾法により含水率を測定した。

### 2.3 試験結果

#### 2.3.1 含水率

使用済み合板の入手時の含水率を Fig.2 に示す。含水率の平均値は最も高い A で 22.8%、最も低い C で 12.9%となり、各社間で大きく異なった。各社内での含水率のバラツキを示す変動係数は、A では 38.3%と非常に大きい値を示したが、C では 6.6%と小さかった。これらの合板はほとんどが屋外に放置されていたと考えられる。そのため、これらの含水率のバラツキは、合板の保管状況や入手時の天候等の違いによるものと思われる。

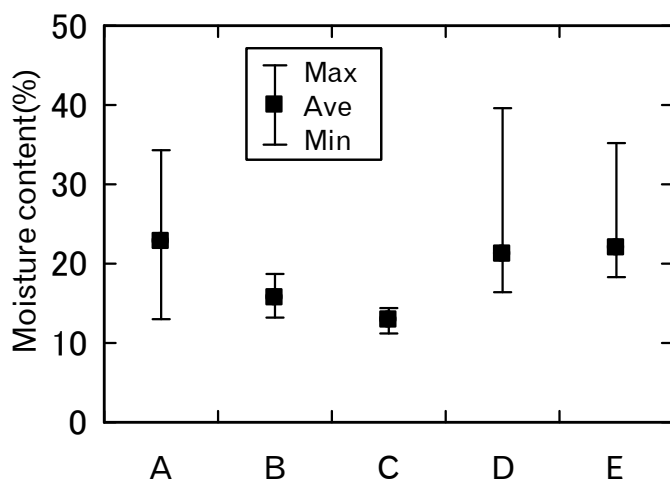


Fig.2. Moisture content of used plywood at sampling.

Note:

Ave: Average, Max: Maximum value, Min: Minimum value.

### 2.3.2 接着性能

一般的に木材の接着強度（せん断強さ）は密度との相関が高いので、異なる材料のせん断強さを単純比較することは難しい。そこで、合板の密度とせん断強さの関係について、常態時と煮沸繰り返し後の結果を合わせて Fig.3 に示す。新品合板の密度とせん断強さの相関係数は常態時で 0.96、煮沸繰り返し後で 0.75 といずれも高い正の相関が見られた。これに対し、使用済み合板における相関係数は常態時で 0.48、煮沸繰り返し後で 0.35 となり相関は低かった。また、使用済み合板では新品合板に比べ回帰直線が下に移動しており、屋外で合板を使用することで接着力の低下を引き起こしたことが窺える。使用済み合板の煮沸繰り返し後のせん断強さの平均値は、腐朽部を含む使用済み合板 B の 1 枚を除き JAS 基準の 0.7MPa を上回っていたが、個々の試験片では一部に JAS 基準に満たないものもあった。

Fig.4 はせん断強さと木部破断率について、常態時と煮沸繰り返し後を比較したものである。せん断強さは新品合板、使用済み合板とも常態時に比べ煮沸繰り返し後は 3～4 割程度低下しており、その傾向に大きな違いは見られなかった。木部破断率についても、いずれの合板も煮沸繰り返し処理により低下しているが、合板間のバラツキが非常に大きく、新

品合板と使用済み合板の間に傾向の違いは見られなかった。名波ら<sup>115)</sup>は築19年経過した枠組み壁工法住宅の耐力壁に使用されていた構造用合板の接着性能を調査した結果、常態時に比べ72時間連続煮沸後の木部破断率は新品合板では低下したが使用済み合板では腐朽部に近づくほど増加したと報告している。これは連続煮沸処理により接着層の劣化よりも木部の劣化が進んだことによるものである。本試験では、いずれの使用済み合板も木部破断率が低下したことから、木部の劣化よりも接着層の劣化が顕著であったことが窺える。このような傾向の違いは接着剤の種類、促進劣化処理、合板の使用期間の違い等が影響していると考えられる。構造用合板は特類の性能を満たすフェノール樹脂接着剤、型枠用合板は1類の性能を満たすメラミン樹脂系接着剤を主に使用している。構造用合板は型枠用合板よりも使用期間が長く、フェノール樹脂においては接着剤の耐久性に優れているため、構造用合板では接着層よりも木部の劣化が進み、型枠用合板では木部よりも接着層の劣化が進んだものと推測される。

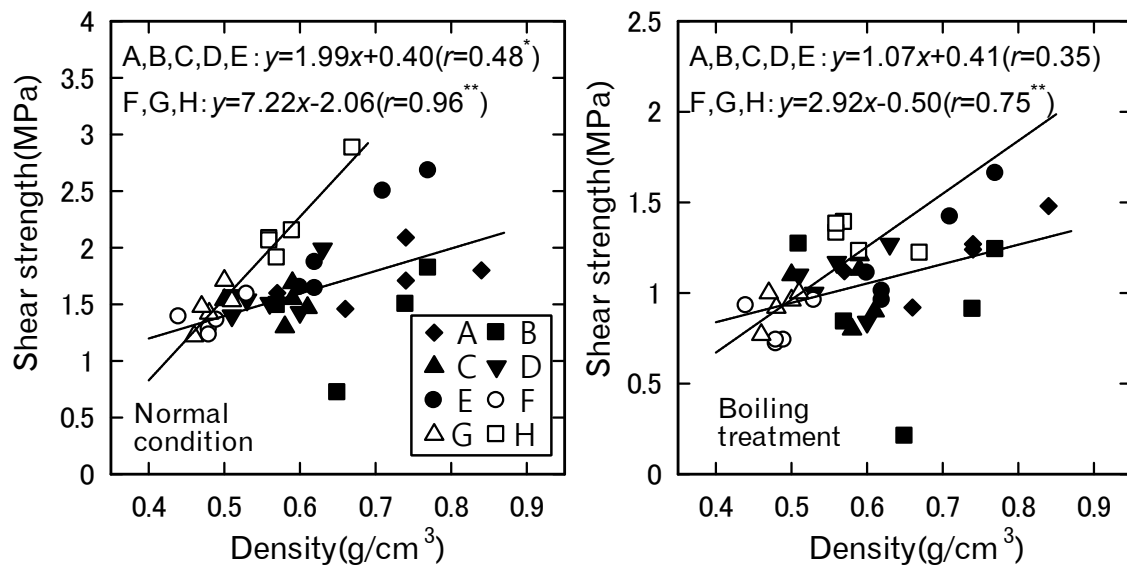


Fig.3. Relationship between density and shear strength of plywood.

Note:

\*\* : Significant at 1% level, \* : Significant at 5% level.



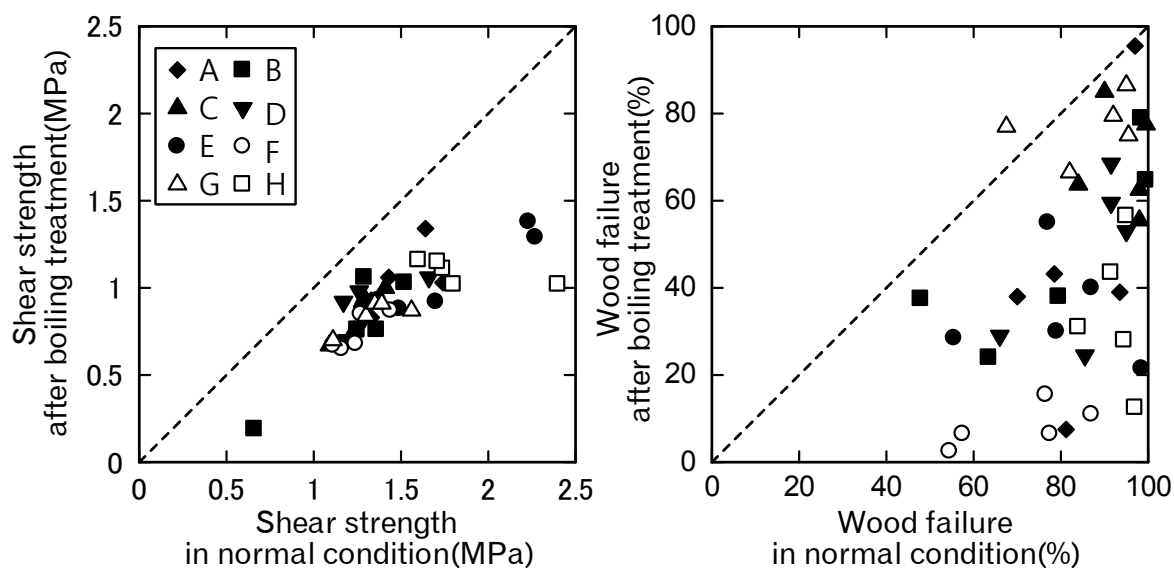


Fig.4. Relationship between normal condition and after boiling treatment in shear strength and wood failure.

### 2.3.3 ヤング係数

測定した使用済み合板と新品合板の密度、ヤング係数、曲げ強さ等を Table 2 にまとめて示す。合板のヤング係数は、樹種、単板構成、密度等の影響を受けるため、本来はこれらが同一なものについて比較する必要がある。今回入手した合板は表裏単板には南洋材を使用しているが、その種類は多岐にわたっており識別は困難であった。したがって、樹種の違いは密度の違いに置き換えて考察することとした。また、今回入手した合板はすべて 12mm 厚さの 5 プライ構成であるが、構成する単板厚さに違いがあるため、単板構成の影響を受けると考えられる。すなわち、0 度方向の有効断面 2 次モーメント比<sup>116)</sup>が大きい合板ほど 0 度方向のヤング係数が高くなる。そこで有効断面 2 次モーメント比と合板のヤング係数の関係について検討したところ、今回入手した合板の有効断面 2 次モーメント比の範囲では合板のヤング係数との間に明確な傾向は見られず、単板構成の影響は少ないものと考えられた。そこで、本試験では新品合板と使用済み合板の密度に対するヤング係数の関係について比較した。

合板の密度と  $E_B$ 、 $E_L$  の関係を Fig.5、Fig.6 に示す。新品合板では密度と 0 度方向のヤング係数 ( $E_{B0}$ ) の間に高い正の相関 ( $r=0.91$ ) が見られたが、使用済み合板では相関は低かつ

Table 2. Results of bending test of plywood.

| Mark | Direction | Moisture content |     | Density              |      | $E_L$ |      | $E_B$ |      | $\sigma$ |      |
|------|-----------|------------------|-----|----------------------|------|-------|------|-------|------|----------|------|
|      |           | Ave              | CV  | Ave                  | CV   | Ave   | CV   | Ave   | CV   | Ave      | CV   |
|      |           | (%)              | (%) | (g/cm <sup>3</sup> ) | (%)  | (GPa) | (%)  | (GPa) | (%)  | (MPa)    | (%)  |
| A    | 0°        | 13.6             | 2.8 | 0.70                 | 13.2 | 8.60  | 17.2 | 7.72  | 26.3 | 49.8     | 23.1 |
|      | 90°       | 13.6             | 2.2 | 0.71                 | 13.1 | 9.05  | 16.9 | 5.77  | 18.4 | 49.3     | 21.6 |
| B    | 0°        | 12.8             | 3.5 | 0.65                 | 16.5 | 6.04  | 14.3 | 5.92  | 23.6 | 30.9     | 39.5 |
|      | 90°       | 12.9             | 1.0 | 0.65                 | 15.4 | 10.10 | 27.0 | 4.91  | 25.8 | 48.3     | 20.6 |
| C    | 0°        | 12.9             | 3.7 | 0.58                 | 7.1  | 6.34  | 13.5 | 6.45  | 23.2 | 39.1     | 23.5 |
|      | 90°       | 13.1             | 2.9 | 0.57                 | 6.8  | 7.37  | 19.9 | 4.20  | 21.0 | 34.4     | 22.3 |
| D    | 0°        | 12.4             | 3.9 | 0.56                 | 8.8  | 6.15  | 14.9 | 7.39  | 18.4 | 44.8     | 16.7 |
|      | 90°       | 12.6             | 4.4 | 0.57                 | 7.8  | 8.61  | 13.4 | 4.73  | 11.9 | 40.6     | 15.5 |
| E    | 0°        | 11.7             | 5.2 | 0.67                 | 11.9 | 8.40  | 13.3 | 8.51  | 5.7  | 56.6     | 10.3 |
|      | 90°       | 11.9             | 5.3 | 0.66                 | 9.2  | 8.76  | 22.6 | 4.98  | 19.4 | 47.3     | 23.1 |
| F    | 0°        | 10.0             | 3.8 | 0.48                 | 7.0  | 5.73  | 4.7  | 6.28  | 4.6  | 39.2     | 10.0 |
|      | 90°       | 10.2             | 5.9 | 0.49                 | 5.5  | 6.25  | 14.3 | 3.15  | 14.4 | 30.4     | 18.7 |
| G    | 0°        | 10.1             | 2.9 | 0.49                 | 4.6  | 6.27  | 7.0  | 5.82  | 6.6  | 44.3     | 9.4  |
|      | 90°       | 9.7              | 3.2 | 0.48                 | 4.8  | 6.24  | 8.0  | 3.25  | 11.7 | 29.7     | 16.1 |
| H    | 0°        | 9.7              | 3.4 | 0.59                 | 9.0  | 6.99  | 11.0 | 8.45  | 13.1 | 54.7     | 15.6 |
|      | 90°       | 9.5              | 3.3 | 0.59                 | 7.1  | 8.47  | 8.1  | 4.66  | 8.8  | 40.9     | 24.4 |

Note:

Ave: Average, CV: Coefficient of variation,  $E_L$ : Modulus of elasticity measured by longitudinal vibration,  $E_B$ : Modulus of elasticity measured by bending test,  $\sigma$ : Modulus of rupture.

た ( $r=0.26$ )。使用済み合板は新品合板に比べ回帰直線が下に移動し、合板の繰り返し使用による劣化のため  $E_{B0}$  が低下したことがわかる。密度と 90 度方向のヤング係数 ( $E_{B90}$ ) の関係では、新品合板と使用済み合板の回帰直線の傾きは同程度であり、どちらも高い正の相関が見られた。使用済み合板の  $E_{L0}$  は新品合板よりも相関係数がやや低く、回帰直線が若干下に移動しているが、両者とも密度と正の相関が見られ、大きな違いは認められなかった。 $E_{L90}$  は使用済み合板の相関係数がやや低い両者に大きな違いは認められなかった。

ここで、これらの結果に対して単板の性能の面から考察した。5 プライ合板の  $E_B$  はそれを構成する単板のヤング係数を用いて次式で表すことができる。

$$E_{B0} = (E_{V1}I_1 + E_{V3}I_3 + E_{V5}I_5) / I_P \quad (3)$$

$$E_{B90} = (E_{V2}I_2 + E_{V4}I_4) / I_P \quad (4)$$

ここで、 $E_{B0}, E_{B90}$  は 0(90) 度方向の合板の  $E_B$ 、 $I_p$  は合板の断面 2 次モーメント、 $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$  は 1 層目 (表板)、2 層目 (添え心板)、3 層目 (心板)、4 層目 (添え心板)、5 層目 (裏板) の合板中立軸に対する断面 2 次モーメント (Fig.7 参照)、 $E_{V1}, E_{V2}, E_{V3}, E_{V4}, E_{V5}$  は各層における単板のヤング係数である。

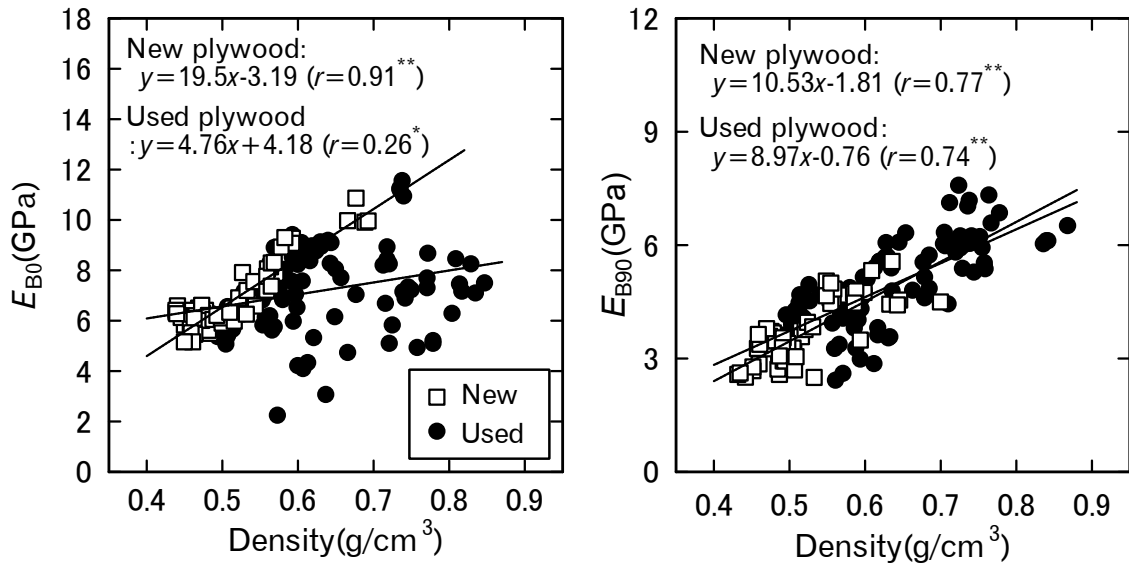


Fig.5. Relationship between density and  $E_B$ .

Note: \*\*, \*: Refer to Fig.3.

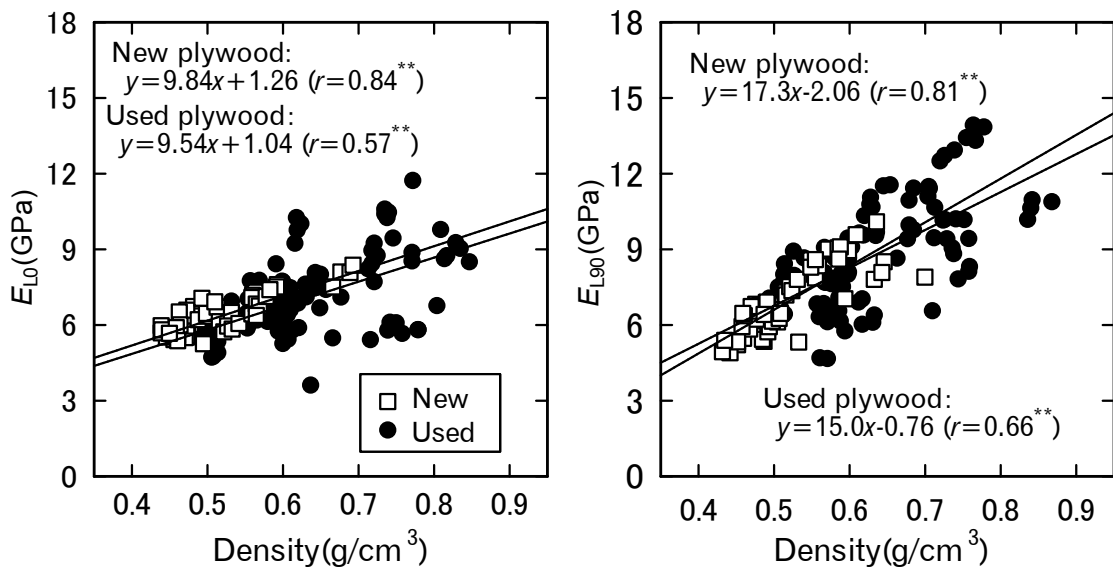


Fig.6. Relationship between density and  $E_L$ .

Note: \*\*, \*: Refer to Fig.3.

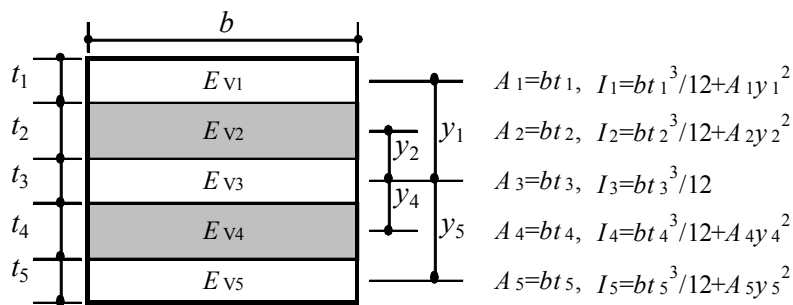


Fig.7. Veneer construction and moment of inertia of area.

また、ヤング係数の異なる層から構成された材料の縦振動によるヤング係数は構成部材の割合を考慮した平均的な値が得られることが確かめられており<sup>117)</sup>、5 プライ合板の  $E_L$  は単板のヤング係数を各々の断面積で重みをつけた平均値と仮定し、次式で表現できる。

$$E_{L0} = (E_{V1}A_1 + E_{V3}A_3 + E_{V5}A_5) / A_P \quad (5)$$

$$E_{L90} = (E_{V2}A_2 + E_{V4}A_4) / A_P \quad (6)$$

ここで、 $E_{L0}$ 、 $E_{L90}$  は 0(90)度方向の合板の  $E_L$ 、 $A_P$  は合板の断面積、 $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  は各層における単板の断面積である。

なお、(3)～(6)式では繊維方向が応力の方向と平行する単板のヤング係数に比べて直交する単板のヤング係数は極めて小さいため、直交方向の単板のヤング係数を無視している。新品合板と使用済み合板の  $E_{B90}$  が同程度であることから、(4)式において、使用済み合板の  $E_{V2}$  および  $E_{V4}$  は新品合板と同程度であることがわかる。すなわち、使用済み合板の添え心板にはヤング係数の低下は見られない。また、この結果から、添え心板よりも内部にある心板の  $E_{V3}$  が低下したとは考えにくく、(3)式における使用済み合板の  $E_{B0}$  の低下は、 $E_{V1}$  および  $E_{V5}$  の低下によるものと考えられる。

また、使用済み合板の  $E_{L0}$  が  $E_{B0}$  に比べて低下が少ないという結果は次のように推定できる。(3)式では  $I_P$  に占める  $I_1$  および  $I_5$  の比率が高いため、 $E_{V1}$  および  $E_{V5}$  の低下に伴う  $E_{B0}$  の低下は非常に大きい。一方、一般的な 5 プライ合板は表裏単板の厚さが添え心板よりも薄く、 $A_P$  に占める  $A_1$  および  $A_5$  の比率が比較的小さいことから、(5)式における使用済み合板の  $E_{L0}$  の低下の程度は(3)式における  $E_{B0}$  の低下に比べて少ないと考えられる。また、 $E_{L90}$

は  $E_{B90}$  と同様に  $E_{V2}$  および  $E_{V4}$  に低下が見られないことから同程度であったと考えられる。

### 2.3.4 曲げ強さ

合板の密度と曲げ強さの関係を Fig.8 に示す。密度と曲げヤング係数の関係と同様の傾向であり、新品合板では密度と 0 度方向の曲げ強さ ( $\sigma_0$ ) の間に高い正の相関が見られたのに対し、使用済み合板では回帰直線の傾きは小さく相関係数は低くなった。また、新品合板に対する使用済み合板の  $\sigma_0$  の低下の程度は、概ね Fig.5 における  $E_{B0}$  の低下よりも大きかった。特に、腐朽の見られた使用済み合板 B の一部の試験片では  $\sigma_0$  が 10MPa 未満と非常に低かった。一方、90 度方向の曲げ強さ ( $\sigma_{90}$ ) では使用済み合板と新品合板の回帰直線はほぼ重なっており、両者に差は見られなかった。したがって、使用済み合板の  $\sigma_0$  の低下は表裏単板の性能の劣化によるものであり、内層部の単板には性能劣化がほとんど見られないものと考えられる。使用済み合板の  $E_{B0}$  や  $\sigma_0$  が低下した原因については更なる検討が必要となるが、合板が屋外で吸水、乾燥を繰り返したことによる微細な割れの発生や、コンクリートの打込みや脱型を繰り返したことによる表裏単板のむしれの発生などが主要因として推測できる。

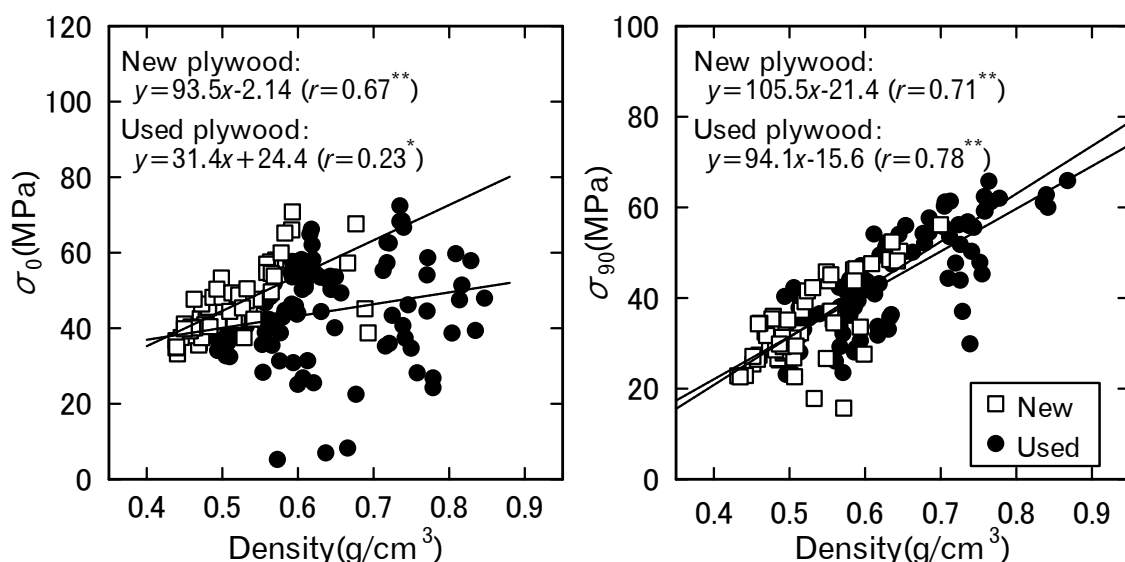


Fig.8. Relationship between density and  $\sigma$  of plywood.

Note: \*\*, \*: Refer to Fig.3.

## 2.4 使用済み合板の再利用に関する考察

今回測定した各種性能の観点から使用済み合板を新たな合板の心板として再利用する際の技術的な課題について考察した。使用済み合板は使用時に水分を多く含むとともに、屋外に放置されることから、含水率が非常に高い傾向が示された。含水率の高い合板をそのまま接着すると、接着不良や接着後の寸法変化などの問題が生じることが予想されるため、再利用に当たっては自然乾燥や人工乾燥など何らかの水分管理が必要になると考えられる。再利用を前提とするならば、使用済み合板を屋外に放置せずに屋根付き倉庫に保管するなどの対策を講じることも有効と考えられる。

使用済み合板の接着力はバラツキが非常に大きいため、すべての使用済み合板に JAS 型枠用合板と同じ 1 類の接着力を求めるのはおそらく困難であろう。使用済み合板を心板として再利用した場合、構成部材が単板のみではないため、JAS の型枠用合板には該当しない。しかし、JAS 型枠用合板と同等の接着力を付与するためには、何らかの選別手法が必要になると考えられる。また、前述のような合板の保管方法に関する対策がなされれば、接着力の低下を軽減できる可能性も考えられる。

曲げ試験結果から、合板の劣化は表層部の一部に限定され、内層部の単板は当初の性能を維持していることがわかった。心板として必要な曲げ性能の基準は存在しないが、使用済み合板の表裏面に単板を接着した場合、合板の曲げ性能は表裏単板の性能に大きく依存するため、心板として必要な曲げ性能はさほど高くないと考えられる。したがって、腐朽を含む合板を選別できれば、心板の曲げ性能という面からは再利用できる可能性が高い。

## 2.5 結論

使用済み合板を破砕せずに面材料の形状を保ったまま再利用する可能性を検討するため、使用済み合板の接着性能や曲げ性能等を調査し、新品合板の場合と比較した。その結果、以下の結論が得られた。

1) 入手した使用済み合板の含水率は平均値で 12.9~22.8%とバラツキが非常に大きく、合板の保管状況や入手時の天候等により大きく異なった。

2) 煮沸繰り返し試験における密度とせん断強さの関係は、新品合板では高い正の相関が認められたが ( $r=0.75$ )、使用済み合板では相関が低く ( $r=0.35$ ) 接着性能の低下が見られた。これは合板の繰り返し使用による接着層の劣化によるものと考えられた。

3) 使用済み合板の曲げヤング係数( $E_B$ )は 0 度方向では新品合板よりも低かったが、90 度方向では新品合板と同程度であった。

4) 使用済み合板の曲げ強さは  $E_B$  と同様に 0 度方向では低下したが 90 度方向ではほとんど低下していなかった。これらの結果から、使用済み合板は繰り返し使用による表裏単板の曲げ性能の劣化が見られたが、内層部の単板はほとんど性能劣化が見られないことがわかった。

本結果から、使用済み合板を再利用する際のいくつかの技術的課題が明確になり、これらの課題をクリアすることによって再利用の可能性が示された。

## 第3章 使用済み型枠用合板を活用した再生合板の開発

### 3.1 はじめに

第2章では、使用済み合板の接着性能や曲げ性能等を調査し、合板の再利用に関する考察を行った。その結果、曲げ性能の劣化は表層部の一部に限定され、内層部の単板は当初の性能を維持していることが確認され、再利用の可能性が示された。廃木材の再利用に関しては、建築解体木材を縦接合<sup>118)</sup>や集成化<sup>119)</sup>することにより、軸材料として再構成<sup>120)</sup>して利用しようとする研究事例があるが、合板等の面材料においてはこのような研究事例は報告されていない。使用済み型枠用合板は短期間の転用で使い捨てされていることから、これらを面材料として再度利用できれば、廃棄までの期間を延長でき、木質資源の有効活用が図れる。

そこで本章では、使用済み合板を心板として利用して表裏面に新たな単板を接着することで再生型枠用合板（以下、再生合板）を製造し、単板厚さや心板の接合形状が曲げ性能に及ぼす影響について検討した。また、実大再生合板を製造する場合の問題点の把握と性能評価を行った。

### 3.2 試験方法

#### 3.2.1 再生合板の特徴

再生合板とは Fig.9 に示すように使用済み合板を心板として利用し、その表裏面に単板を接着して新たな型枠用合板としたものである。本研究では、再生合板の長さを  $L$ 、幅を  $B$ 、心板1枚の  $L$  方向の長さを  $A$  とし、心板の表板繊維方向と単板の繊維方向が平行なものを平行型、直交するものを直交型と定義する。使用済み合板は寸法のバラツキが大きいため、一定寸法の再生合板として仕上げるには、心板に数カ所の接合部が必要になるが、本研究では合板の長手方向にのみ接合した再生合板について検討した。



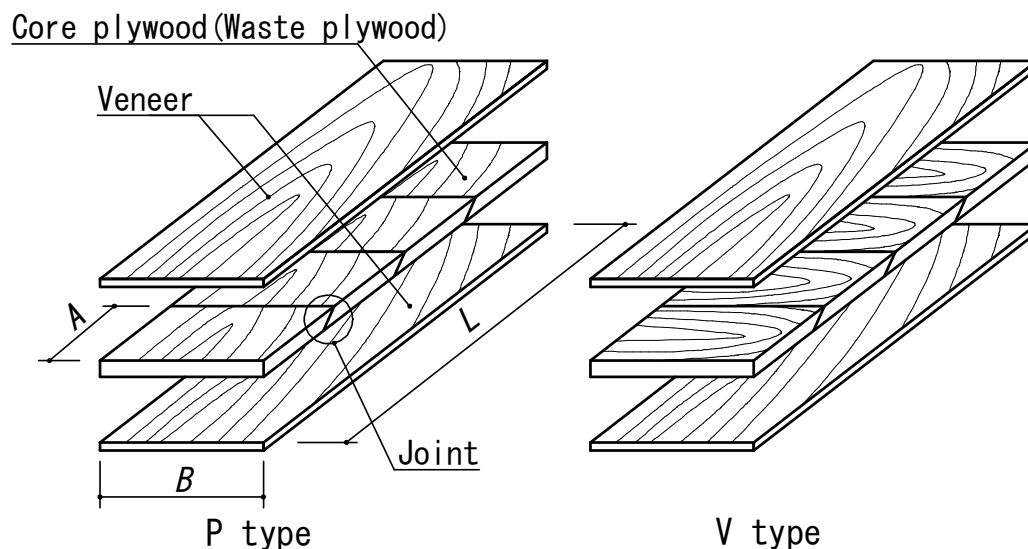


Fig.9. Configuration of reconstituted plywood.

### 3.2.2 製造工程

再生合板の製造工程を Fig.10 に示す。表裏にはレッドメランチ (*Shorea sp.*) 原木から切削したロータリー単板を使用した。心板は、旭川市内の建設業者から廃棄予定の型枠用合板を入手し、試験に供した。これらはすべて公称厚さ 12mm、5 プライ構成の無塗装型枠である。心板の含水率は合板の保管状況等により大きく異なっているため、実験室内において最低 1 年以上の自然乾燥を行った。また、心板に腐朽や単板のはく離、合板の破損等が含まれているものは目視により選別除去し、さらに表面に付着したコンクリート等の異物は人手によって除去した。型枠用合板は施工時に生じた貫通孔に詰め栓を埋め込んで転用するのが一般的であることから、孔の空いている心板には詰め栓（樹脂製市販品または木製試作品）の埋め込みを行った。また、心板の厚さを揃え、表面に付着したはく離剤<sup>121)</sup>等を除去するためにベルトサンダーを用いて 10.5mm～11.0mm になるまで研削した。

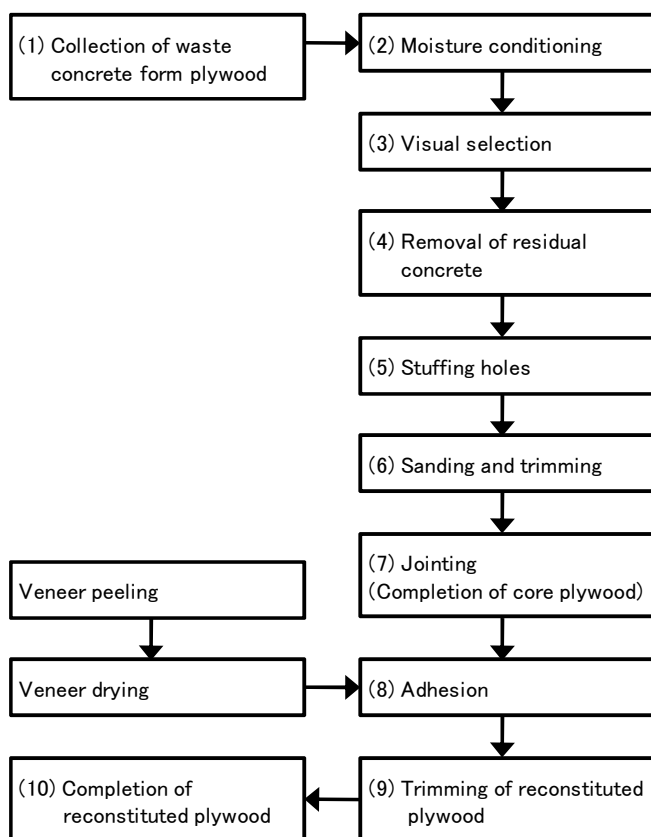


Fig.10. Manufacturing process of the reconstituted plywood.

### 3.2.3 試験体の製造

#### (1) 単板厚さの検討

単板厚さを 1.0mm と 2.5mm の 2 条件に設定し、Fig.10 に従って再生合板を製造した。製造条件を Table 3 に示す。表裏に使用した単板の気乾密度と含水率の平均は、それぞれ  $0.54\text{g/cm}^3$ 、6.6%であった。使用した心板の自然乾燥後の密度と含水率の平均は、それぞれ  $0.63\text{g/cm}^3$ 、11.9%であった。心板の接合は Fig.11 に示すバットジョイント (BJ) とし、フェノール樹脂接着剤 (DIC 北日本ポリマ㈱製、HD-2305) を用いて行った。接合は、Fig.12 に示すように合板側面から圧力を加えるための治具を用いてホットプレスにより熱圧して行った。製造条件は、熱圧温度  $130^\circ\text{C}$ 、圧縮圧力  $0.8\text{MPa}$ 、熱圧時間 10 分とした。側面圧力は Fig.12 の治具に配置した 5 本のボルトを締めることにより加え、この時の圧力はおよそ  $0.5\text{MPa}$  程度であった。心板と単板の接着には水性高分子ーイソシアネート系接着剤 (光

洋産業(株)製、主剤：KR-M42、架橋剤：AX-45)を使用した。塗布量はメーカーの指示に従い片面につき 222g/m<sup>2</sup>とし、コールドプレスにより圧縮圧力 1.2MPa で 60 分間圧縮した。再生合板の仕上がり厚さは、1.0mm 単板を使用したものがおよそ 12.5mm(以下、12mm 厚合板)、2.5mm 単板を使用したものがおよそ 15.5mm(以下、15mm 厚合板)である。

Table 3. Manufacturing conditions for reconstituted plywood in relation to the effect of veneer thickness on bending properties of plywood.

| Sort of plywood           | Reconstituted plywood |
|---------------------------|-----------------------|
| Type                      | P                     |
| Joints                    | BJ                    |
| <i>A</i> (mm)             | 78                    |
| <i>B</i> (mm)             | 470                   |
| <i>L</i> (mm)             | 468                   |
| Thickness of veneer(mm)   | 1.0, 2.5              |
| Thickness of core plywood | 10.5                  |
| Number of samples         | 8                     |

Note:

P: Refer to Fig.9, BJ: Refer to Fig.11.

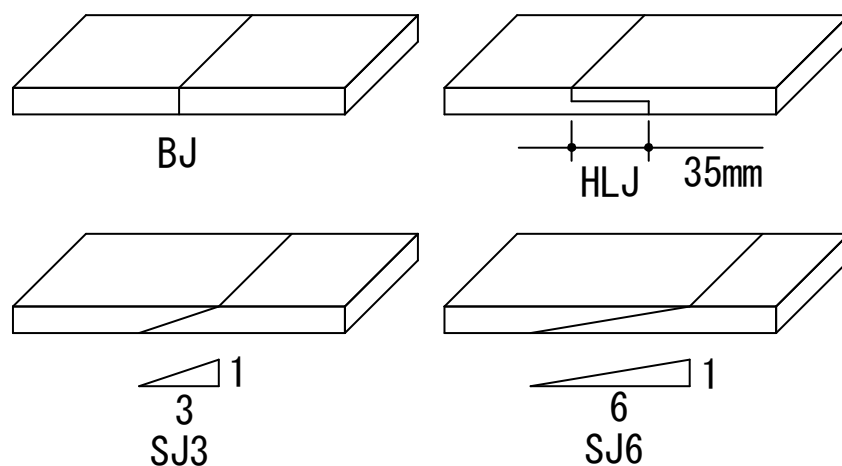


Fig.11. Joints of core plywood.

Note: BJ: Butt joint, HLJ: Half lap joint, SJ3: Scarf joint of 1/3 slope, SJ6: Scarf joint of 1/6 slope.

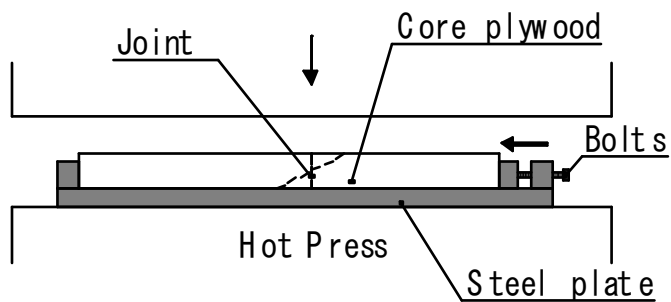


Fig.12. Jointing method of core plywood.

## (2) 接合形状の検討

心板の接合形状の検討は、心板のみの場合およびこの表裏面に単板を接着した再生合板の場合の2種類について行った。接合形状は Fig.11 に示す4条件とし、HLJは階段状に切り欠いた形状（ハーフラップジョイント）、SJ3とSJ6は傾斜がそれぞれ1/3および1/6のスカーフジョイントである。製造条件を Table 4 に示す。心板については、Fig.2の(1)～(7)の手順に従い製造した。使用した心板の自然乾燥後の密度と含水率の平均は、それぞれ  $0.58\text{g/cm}^3$ 、9.7%であった。再生合板については、単板厚さの検討結果（後述の3.3.1節参照）に基づき、表裏面に接着する単板厚さを1.0mmとし、前述と同様に心板を製造した後、単板を接着して再生合板とした。表裏に使用した単板の気乾密度と含水率の平均は、それぞれ  $0.43\text{g/cm}^3$ 、7.2%であった。表裏単板の接着条件は前述と同様であるが、スカーフジョイントの接合においては、接合部に1mm程度の段差が生じる位置で圧縮治具を固定した。

Table 4. Manufacturing conditions for reconstituted plywood in relation to the effect of joint shape on bending properties of plywood.

| Sort of plywood           | Core plywood      | Reconstituted plywood |
|---------------------------|-------------------|-----------------------|
| Type                      | P                 | P, V                  |
| Joints                    | BJ, HLJ, SJ3, SJ6 | BJ, HLJ, SJ3, SJ6     |
| <i>A</i> (mm)             | 225               | 225                   |
| <i>B</i> (mm)             | 450               | 450                   |
| <i>L</i> (mm)             | 450               | 450                   |
| Thickness of veneer(mm)   | -                 | 1                     |
| Thickness of core plywood | 11                | 11                    |
| Number of samples         | 2                 | 2                     |

Note:

P and V are shown in Fig.9, BJ,HLJ,SJ3 and SJ6 are shown in Fig.11.

### (3) 実大再生合板の製造

上記の検討結果を踏まえ、実用上の問題点の把握と実用性能の評価を目的として、実大再生合板の製造を行った。使用した心板の長さの平均値は 954mm（最大 1712mm、最小 549mm）、幅の平均値は 644mm（最大 900mm、最小 460mm）であった。これらの心板を用いて Fig.10 の手順に従い、600×1800mm の寸法の再生合板を製造した。接合形状は Fig.11 の BJ とし、Fig.9 の平行型および直交型を製造した。裁断寸法と合板使用枚数を Table 5 に示す。表裏に使用した単板の気乾密度と含水率の平均は、それぞれ 0.43 g/cm<sup>3</sup>、8.5%であった。再生合板を製造するに当たり、Fig.10 の工程(1)、(6)および(9)において材積を測定し、製造歩留まりを算出した。

心板自体の接着性能は第 2 章において検討しているため、ここでは、表裏単板と心板の間の接着性能について検討した。製造した実大再生合板について、平行型および直交型それぞれ 4 枚から 75×75mm の寸法の試験片を 4 片ずつ採取し、合板の JAS に従って 1 類浸せきはく離試験を行った。

Table 5 Trimmed dimensions of core plywood pieces and number of waste plywood pieces collected for this study.

| Symbol | Type | Joints | $A$ (mm) | $B$ (mm) | $T$ (mm) | $n$ |
|--------|------|--------|----------|----------|----------|-----|
| PBJ    | P    | BJ     | 465      | 640      | 10.5     | 27  |
|        | P    | BJ     | 930      | 640      | 10.5     | 14  |
| VBJ    | V    | BJ     | 465      | 640      | 10.5     | 59  |

Note:

$A$ : Dimensions of core plywood shown in Fig.9.

$B$ : Dimensions of core plywood shown in Fig.9.

$T$ : Thickness of core plywood

$n$ : Number of waste plywood pieces used for this tests.

P and V are shown in Fig.9., BJ is shown in Fig.11.

### 3.2.4 曲げ試験

製造した心板および再生合板は、合板の JAS（構造用合板 1 級）に従って 3 点曲げ試験を行い、曲げヤング係数 ( $E_b$ ) および曲げ強さ ( $\sigma_b$ ) を算出した。試験体の幅は 50mm、スパンは厚さの 24 倍とした。単板厚さの検討に用いた試験体は、表板の繊維方向に対するスパンの方向が 0 度方向と 90 度方向のものを合板 1 枚からそれぞれ 1 体ずつ採取し、合計でそれぞれ 8 体とした。曲げ試験時の荷重点に対する心板の接合部の位置は無作為に決定した。接合形状の検討に用いた試験体は、表板の繊維方向とスパンの方向は 0 度方向のみとし、合板 1 枚から 4 体採取し、1 条件当たり 8 体とした。曲げ試験時の荷重点は接合の中央部と一致させた。また、比較用として、接合部の無い心板および再生合板（以下、NJ）についても試験を行った。いずれの試験においても、試験体を 20°C-65%R.H.の恒温恒湿器内で調湿し、重量が恒量に達した後に試験を行った。試験終了後、試験体の端部を切り出し、絶乾法により含水率を測定した。

実大再生合板については、合板の JAS（コンクリート型枠用合板）に従って、スパン 1500mm の中央集中荷重方式の 3 点曲げ試験を行い、曲げヤング係数 ( $E_b$ ) を算出した。

### 3.3 試験結果

#### 3.3.1 表裏単板厚さと再生合板の曲げ性能

再生合板の曲げ試験結果を Table 6 に示す。12mm 厚合板の 0 度方向では、荷重点から離れた接合部で破壊が生じたため、接合部に生じる曲げモーメントを用いて  $\sigma_b$  を算出した。15mm 厚合板ではせん断破壊と荷重点における曲げ破壊の 2 種類が存在していたが、破壊時の最大荷重値から  $\sigma_b$  を求めた。したがって、15mm 厚合板では  $\sigma_b$  を過小評価している可能性がある。なお、せん断によって破壊した試験体は 0 度方向では 5 体、90 度方向では 1 体であった。15mm 厚合板におけるせん断破壊は、繊維方向がスパンに直交する単板（0 度方向では使用済み合板の 2 層目あるいは 4 層目、90 度方向では 3 層目）におけるローリングシアによるもので、いずれも裏割れが開くような形で破壊が進行した後、水平方向に割裂した。

密度と  $E_b$  の関係を新品合板の値<sup>107)</sup>と合わせて Fig.13 に示す。0 度方向の  $E_b$  は 12mm 厚合板では新品合板よりも低い値となったが、15mm 厚合板では新品合板と同程度かやや高い値を示した。90 度方向の  $E_b$  は逆に 15mm 厚合板で新品合板よりもやや低い値となったが、12mm 厚合板では新品合板と同程度であった。合板の曲げ性能は、繊維方向がスパン方向に対して平行な単板の厚みを増す程、0 度方向の合板の  $E_b$ 、 $\sigma_b$  が増加し、90 度方向の  $E_b$ 、 $\sigma_b$  が低下するのが普通であり<sup>122)</sup>、本試験の結果もこの傾向と一致した。再生合板の製造に当たっては、型枠用合板として必要な性能を満たすよう表裏単板厚さを決定する必要がある。合板の JAS では型枠用合板の  $E_b$  は実大サイズの曲げ試験によって評価し、0 度方向の基準値は 12mm 厚さで 7.0GPa、15mm 厚さで 6.5GPa 以上と定めている。また、型枠用合板の  $\sigma_b$  に関する規定はないが、構造用合板 1 級（板面品質 B-C）では、0 度方向の基準値は 12mm 厚さで 24MPa、15mm 厚さで 22MPa 以上と定めている。12mm 厚合板における 0 度方向の  $E_b$ 、 $\sigma_b$  は、すべてこれらの基準値を満たしていることから、表裏単板厚さは 1.0mm 程度あれば十分であると考えられた。

Table 6. Results of bending tests of reconstituted plywood.

| Type | Direction |       | Moisture<br>content (%) | Density<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $E_b$<br>(GPa) | $\sigma_b$<br>(MPa) |
|------|-----------|-------|-------------------------|---------------------------------|----------------|---------------------|
| R12  | 0°        | Ave   | 10.8                    | 0.64                            | 7.98           | 39.7                |
|      |           | CV(%) | 3.5                     | 10.5                            | 8.1            | 12.4                |
|      | 90°       | Ave   | 10.9                    | 0.62                            | 5.08           | 41                  |
|      |           | CV(%) | 2.7                     | 14.8                            | 29.2           | 33.4                |
| R15  | 0°        | Ave   | 10.4                    | 0.64                            | 10.79          | 62.5                |
|      |           | CV(%) | 2.2                     | 10.3                            | 8.7            | 11.4                |
|      | 90°       | Ave   | 10.7                    | 0.64                            | 3.01           | 30.4                |
|      |           | CV(%) | 3.2                     | 8.4                             | 32.6           | 36.3                |

Note:

R12: Reconstituted plywood of 12.5mm in thickness,

R15: Reconstituted plywood of 15.5mm in thickness,

Direction: Direction of bending stress to the grain of face veneer,

$E_b$ : Modulus of elasticity (MOE),  $\sigma_b$ : Modulus of rupture (MOR),

Ave, CV: Refer to Table 2.

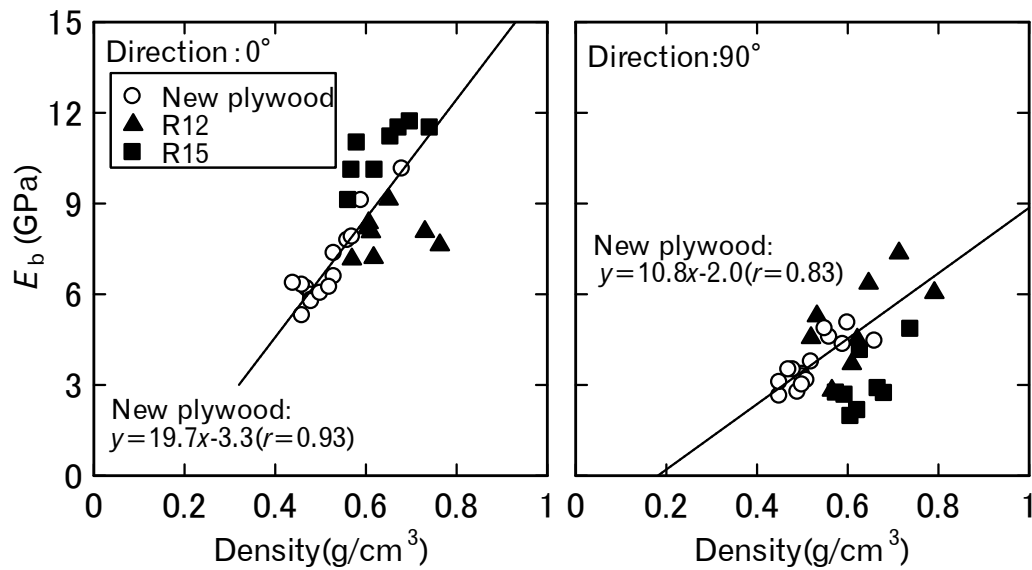


Fig.13. Correlation between density and  $E_b$ .

Note: R12, R15, Direction,  $E_b$ : Refer to Table 4.

New plywood: The data of new commercial concrete form plywood<sup>107)</sup>.



### 3.3.2 接合形状と再生合板の曲げ性能

#### (1) 荷重－変位曲線と破壊性状

曲げ試験結果を心板のみの場合と再生合板の場合をまとめて Table 7 に示す。心板のみの場合および再生合板の場合におけるそれぞれの接合形状の代表的な荷重－変位曲線を Fig.14 に示す。心板のみの場合では、BJ は比例限度内で急激に破壊したのに対し、その他は塑性域のある破壊を示した。HLJ、SJ3、SJ6 は引張側の接合面に亀裂が入る際にやや荷重が低下し、その後また荷重が増加していく傾向が認められた。HLJ は最大荷重到達後の急激な荷重低下が見られないのが特徴的であった。これは、HLJ の接合部では引張り側接合面に亀裂が入った後は接合面に沿って水平方向に亀裂が進展するために、断面が急速に減少しないこと<sup>123,124)</sup>が影響しているものと推察された。再生合板の場合では、いずれの接合形状においても NJ に比べて最大荷重時の変位が小さく、最大荷重値に達した後は急激な荷重低下が見られた。これは引張側の心板接合面付近の単板が破断し、心板の接合面に沿った形で破断が急激に進展するためと思われる。いずれのタイプとも接合形状によって最大荷重値は異なるものの、荷重－変位曲線の挙動に大きな違いは認められなかった。Fig.15 は平行型の再生合板における破壊性状の例であるが、いずれのタイプとも引張側の接合面に起因する曲げ破壊であった。接合部の破断面は、SJ3 と SJ6 は木部破断が生じていたが、BJ と HLJ は木部破断をほとんど伴わない破壊が支配的であった。また、BJ と HLJ の一部では、破壊時に完全に 2 つに分断されるものがあり、極めて脆性的な破壊性状を示した。

Table 7. Results of bending tests of core plywood and reconstituted plywood.

| Sort of plywood       | Type | Joints | Moisture content |     | Density              |      | $E_b$ |      | $\sigma_b$ |      | $E_b/E_{bNJ}$ | $\sigma_b/\sigma_{bNJ}$ |
|-----------------------|------|--------|------------------|-----|----------------------|------|-------|------|------------|------|---------------|-------------------------|
|                       |      |        | Ave              | CV  | Ave                  | CV   | Ave   | CV   | Ave        | CV   |               |                         |
|                       |      |        | (%)              | (%) | (g/cm <sup>3</sup> ) | (%)  | (GPa) | (%)  | (MPa)      | (%)  |               |                         |
| Core plywood          | P    | BJ     | 10.2             | 3.3 | 0.61                 | 4.3  | 4.92  | 34.0 | 3.5        | 46.1 | 0.82          | 0.09**                  |
|                       |      | HLJ    | 10.3             | 5.0 | 0.61                 | 3.5  | 4.11  | 16.6 | 11.3       | 12.8 | 0.68**        | 0.31**                  |
|                       |      | SJ3    | 10.5             | 1.1 | 0.61                 | 9.2  | 6.24  | 12.5 | 17.9       | 11.9 | 1.04          | 0.49**                  |
|                       |      | SJ6    | 10.5             | 1.1 | 0.54                 | 14.2 | 5.31  | 14.8 | 18.7       | 17.9 | 0.89          | 0.51**                  |
|                       |      | NJ     | 11.0             | 1.0 | 0.59                 | 2.3  | 6.00  | 20.3 | 36.8       | 28.7 | 1.00          | 1.00                    |
| Reconstituted plywood | P    | BJ     | 8.9              | 1.2 | 0.59                 | 2.4  | 7.17  | 6.0  | 32.9       | 8.4  | 0.97          | 0.62**                  |
|                       |      | HLJ    | 10.0             | 3.2 | 0.59                 | 6.9  | 7.02  | 9.1  | 48.0       | 7.8  | 0.95*         | 0.91**                  |
|                       |      | SJ3    | 10.7             | 5.7 | 0.63                 | 5.0  | 8.48  | 12.1 | 45.3       | 7.7  | 1.14          | 0.86**                  |
|                       |      | SJ6    | 10.7             | 4.3 | 0.59                 | 6.8  | 7.62  | 17.1 | 51.9       | 9.5  | 1.03          | 0.98                    |
|                       |      | NJ     | 9.0              | 1.6 | 0.61                 | 8.6  | 7.41  | 2.4  | 52.9       | 2.9  | 1.00          | 1.00                    |
|                       | V    | BJ     | 8.9              | 2.3 | 0.59                 | 4.0  | 6.59  | 2.4  | 35.2       | 9.1  | 0.82**        | 0.56**                  |
|                       |      | HLJ    | 10.2             | 2.8 | 0.58                 | 8.3  | 7.03  | 6.7  | 43.4       | 8.7  | 0.87**        | 0.69**                  |
|                       |      | SJ3    | 10.2             | 6.0 | 0.61                 | 8.5  | 7.67  | 10.4 | 42.9       | 9.9  | 0.95          | 0.68**                  |
|                       |      | SJ6    | 10.6             | 0.4 | 0.61                 | 6.6  | 8.14  | 6.2  | 58.8       | 6.6  | 1.01          | 0.94                    |
|                       |      | NJ     | 10.2             | 3.2 | 0.61                 | 1.5  | 8.07  | 10.7 | 62.7       | 17.7 | 1.00          | 1.00                    |

Note:

P and V are shown in Fig.9., BJ, HLJ, SJ3 and SJ6 are shown in Fig.11.,

Ave, CV: Refer to Table 2., NJ: No joint specimens,  $E_{bNJ}$ : MOE of the plywood without a joint,

$\sigma_{bNJ}$ : MOR of the plywood without a joint. \*\*: Significant at 1% level, \*: Significant at 5% level.

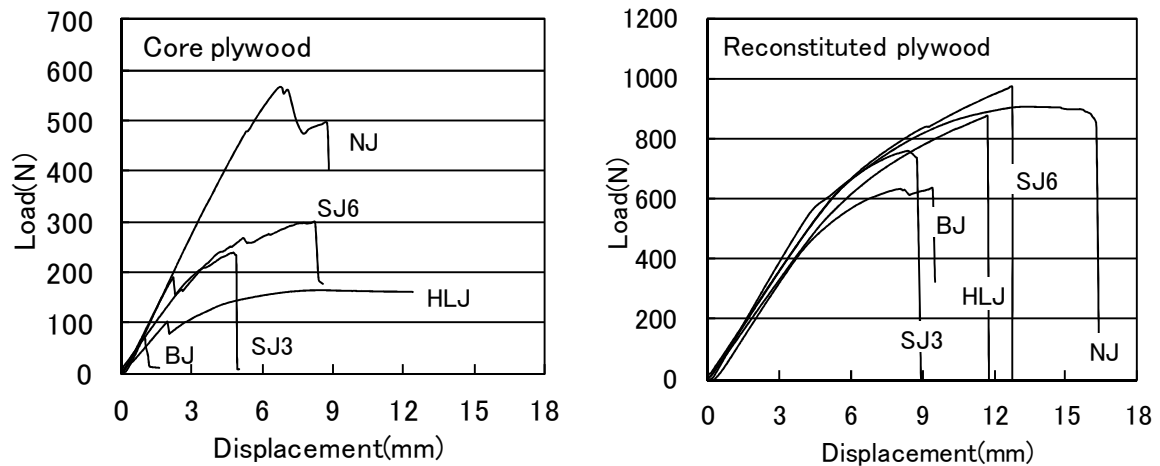


Fig.14. Typical Load-displacement curves in bending tests.

Note: BJ,HLJ,SJ3,SJ6 : Refer to Fig.11, NJ : No joint specimens.

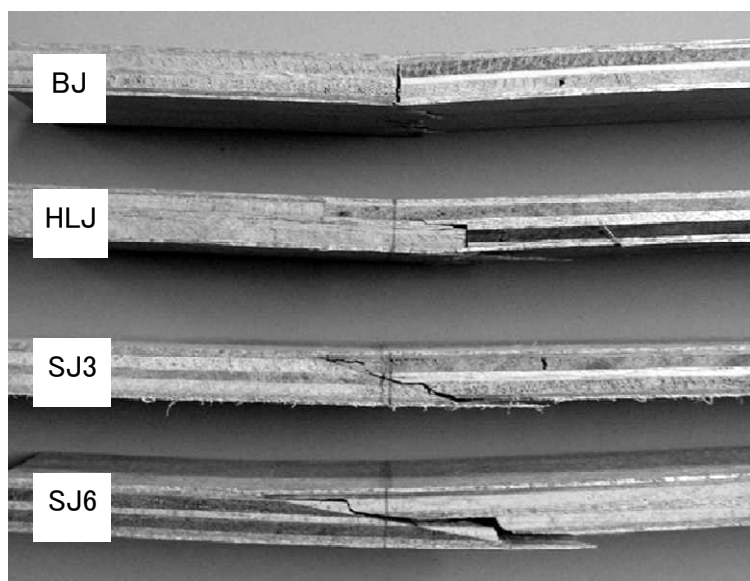


Fig.15. Typical failure modes observed in the bending tests.

Note:

BJ,HLJ,SJ3,SJ6: Refer to Fig.11.

## (2) 曲げヤング係数と曲げ強さ

密度と  $E_b$  および  $\sigma_b$  の関係を心板のみの場合と再生合板の場合を合わせて Fig.16 に示す。心板のみの場合は、 $E_b$  は BJ の 1 体が 1.1GPa と非常に低い値を示したが、その他は 3.5GPa 以上の値を示し、接合形状による明確な傾向は認められなかった。 $\sigma_b$  は  $NJ > SJ6 > SJ3 > HLJ > BJ$  の順となり、接合形状の違いが明確に表れた。再生合板の場合は、平行型、直交型とも  $E_b$  は密度との相関が高かったのに対して、 $\sigma_b$  は密度との相関は認められなかった。通常の合板では、 $E_b$  および  $\sigma_b$  は密度と正の相関が認められること<sup>107)</sup>から、再生合板は  $E_b$  に関しては、通常の合板とほぼ同様の性能が付与されたと考えられるが、 $\sigma_b$  に関しては、通常の合板とは異なる性能を示すと考えられる。再生合板の  $\sigma_b$  の平均値は  $NJ > SJ6 > HLJ > SJ3 > BJ$  の順となり、心板とほぼ同様の傾向であったことから、再生合板の  $\sigma_b$  には表裏単板の性能に加えて心板の性能も複合的に作用するものと考えられた。

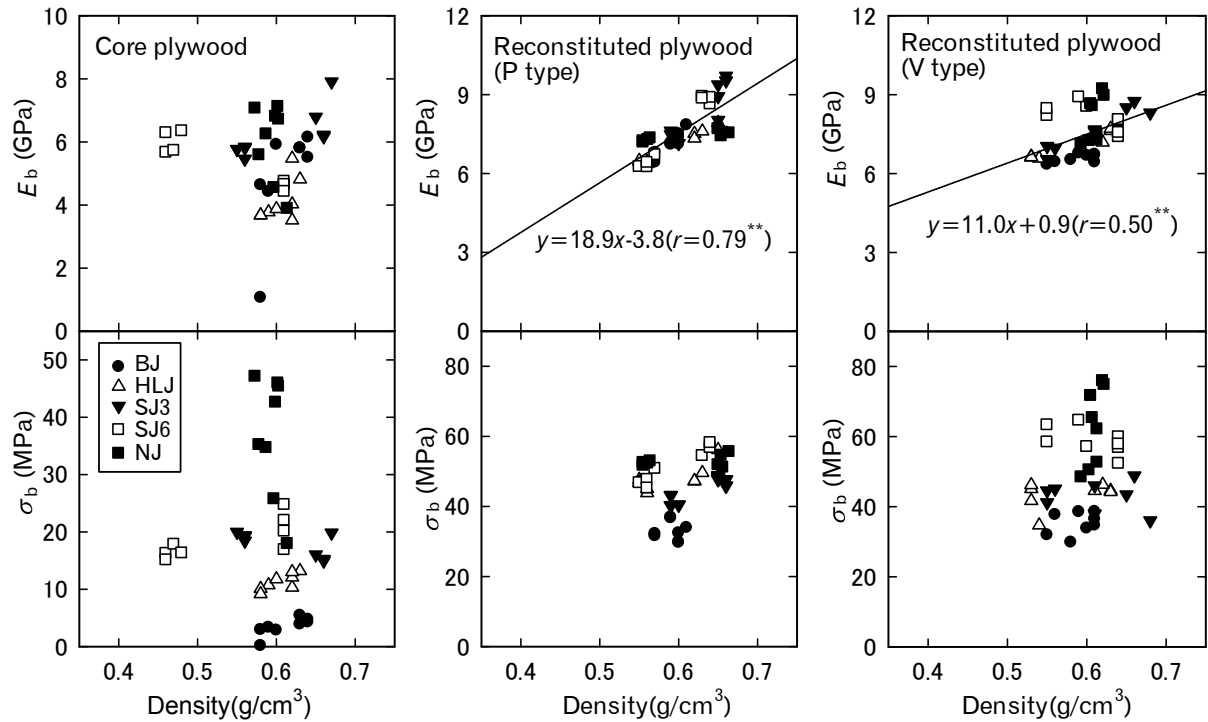


Fig.16. Relationship between Density and  $E_b$  or  $\sigma_b$  of core and reconstituted plywood.

Note: BJ,HLJ,SJ3,SJ6 : Refer to Fig.11, NJ : Refer to Table 7,  $E_b$ ,  $\sigma_b$  : Refer to Table 6.

\*\*: Significant at 1% level.

ここで、再生合板の曲げ性能に及ぼすこれらの構成要素の影響を把握するため、次式を用いて再生合板の曲げヤング係数、曲げ強さを計算してみた。

$$E_b = \frac{I_V}{I_P} E_V + \frac{I_C}{I_P} E_C \quad (7)$$

$$\sigma_b = \frac{Z_V}{Z_P} \sigma_V + \frac{Z_C}{Z_P} \sigma_C \quad (8)$$

ここで、 $E_b$ 、 $E_V$ 、 $E_C$ はそれぞれ再生合板、表裏単板、心板の曲げヤング係数、 $\sigma_b$ 、 $\sigma_V$ 、 $\sigma_C$ はそれぞれの曲げ強さ、 $I_P$ 、 $I_V$ 、 $I_C$ はそれぞれの合板中立軸に対する断面二次モーメント、 $Z_P$ 、 $Z_V$ 、 $Z_C$ はそれぞれの断面係数である。

$E_V$ および $\sigma_V$ は、本研究で使用した 1mm 厚さの単板から製造した 5plyLVL の曲げ試験により得られた値 ( $E_V=10.6\text{GPa}$ 、 $\sigma_V=66.1\text{MPa}$ 、試験体数 8 ) を用い、 $E_b$  と  $\sigma_b$  を計算した結果を Table 8 に示す。 $E_b$  の計算値は実測値とよく一致し、実用上十分な精度が得られると

考えられる。 $\sigma_b$ は実測値が計算値をやや上回る結果となったが、概ね再生合板の性能を安全側に評価できると考えられる。なお、表裏単板のみが曲げ応力を負担すると仮定した場合、(8)式は第1項のみが有効であり、その値はいずれの再生合板においても26.1MPaとなる。 $\sigma_b$ 全体に占める第1項の割合は、BJで0.93、HLJで0.79、SJ3で0.71、SJ6で0.70であり、このことから、BJでは $\sigma_b$ に及ぼす表裏単板の影響が非常に大きいのに対し、SJ3やSJ6では心板の性能が少なからず $\sigma_b$ に影響を与えていることがわかる。

次に、平行型における心板の $\sigma_b$ に対する再生合板の $\sigma_b$ の比を見てみると、BJでは9.5、HLJでは4.2、SJ3では2.5、SJ6では2.8となり、心板の $\sigma_b$ が低いものほど補強効果が大きいことがわかる。したがって、心板の接合のみでは合板としての十分な $\sigma_b$ が得られない場合でも、表裏面に単板を接着した再生合板とすることで十分な性能が得られることが確認された。

### (3) 接合の有無と曲げ性能の関係

NJの $E_b$ に対するそれぞれの接合タイプの $E_b$ を剛性比、NJの $\sigma_b$ に対するそれぞれの接合タイプの $\sigma_b$ を強度比としてTable 7に記載した。心板のみの場合では、剛性比は0.68～1.04、強度比は0.09～0.51となった。構造材の一般的な接合法であるフィンガージョイントでは、剛性比で1.0程度、強度比で0.8程度の値が得られており<sup>125)</sup>、スカーフジョイントにおいては傾斜が1/5の時の強度比で0.6程度という報告<sup>126)</sup>がある。本試験での心板における強度比は、最も高いSJ6においても0.51であり、これらの報告よりも低い値となっている。これは集成材ラミナ等の製材に比べて、合板は裏割れや目ぼれ等の影響で接合面に微細な欠損が生じて有効な接着面積が減少すること、接合面の単板繊維方向によって接着剤の木部への浸透が異なり、均一な接着剤塗布が難しいことなどが考えられる。さらに、接合面が長いことで合板の狂いや圧縮時の圧力の不均一さの影響を受けやすいこと等も推察される。合板の接合において、十分な接合強度を得るためにはスカーフジョイントの傾斜を更に小さくする必要があるが、歩留まりの大きな低下を招くことが問題として残される。再生合板の場合では、剛性比は直交型のBJとHLJでそれぞれ0.82、0.87となりNJに比べやや低くなった。しかし、その他の接合における剛性比は0.95～1.14の範囲となり、

平均値の t 検定の結果、NJ との間に危険率 1%水準での有意差は認められなかった。再生合板の強度比は、いずれの接合タイプとも NJ よりも低く、平均値の t 検定の結果、SJ6 以外は NJ との間に危険率 1%水準での有意差が認められた。しかし、BJ を除けば強度比は 0.7 程度以上あり、心板のみに比べて大幅に接合性能を向上できたと言える。

Table 8. Measured and calculated values of the bending properties.

| Joints | $E_{b\_cal}$ | $E_b/E_{b\_cal}$ | $\sigma_{b\_cal}$ | $\sigma_b/\sigma_{b\_cal}$ |
|--------|--------------|------------------|-------------------|----------------------------|
| BJ     | 7.17         | 1.00             | 28.2              | 1.17                       |
| HLJ    | 6.68         | 1.05             | 32.9              | 1.46                       |
| SJ3    | 7.98         | 1.06             | 36.9              | 1.23                       |
| SJ6    | 7.41         | 1.03             | 37.4              | 1.39                       |
| NJ     | 7.83         | 0.95             | 48.4              | 1.09                       |

Note:

$E_b$ ,  $\sigma_b$ : Refer to Table 6.

$E_{b\_cal}$ : Calculated values by equation (7)

$\sigma_{b\_cal}$ : Calculated values by equation (8)

### 3.3.3 実大再生合板の評価

実大再生合板の曲げ試験結果を Table 9 に示す。 $E_b$  の平均値は平行型で 9.0GPa、直交型で 8.2GPa となり、平行型の方がやや高くなった。この試験結果を Table 7 の小試験体による結果と比較すると、 $E_b$  は実大サイズの方が 25%程度大きな値を示した。このように小試験体よりも実大サイズにおける  $E_b$  が高くなる傾向は、既往の研究<sup>127,128)</sup>でも報告されており、これは小試験体では全体のたわみに対するせん断たわみの割合が大きくなるが、これを見無視していることなどによるものと考えられる。したがって、型枠用合板としての  $E_b$  は、JAS に規定される実大サイズによる試験で評価することが望ましい。本試験では、直交型の 1 枚を除き、JAS 基準値の 7.0GPa を上回っており、再生合板は型枠用合板として十分な  $E_b$  を有していることが確認された。

1 類浸せきはく離試験の結果、すべての試験片について、心板と表裏単板の接着面のはく離は認められなかった。従って、本試験の製造条件や接着条件においては、心板と表裏単板の間の接着性能には問題が無いことが示された。

各工程における歩留まりを Table 10 に示す。なお、ここに示す歩留まりは心板のみの値であり、表裏単板の歩留まりは考慮していない。最終製品における歩留まりは平行型で 50.0%、直交型で 39.6%となった。いずれの合板とも、心板裁断後の歩留まり低下が著しいが、これらの値は使用済み合板の入手時の寸法に大きく左右された。このように、再生合板の歩留まりは入手材料により大きく変動するものと考えられるため、本試験による結果は 1 つの参考値と考えるのが妥当であろう。

Table 9. Results of full-scale bending tests of reconstituted plywood.

| Symbol | <i>n</i> | Density(g/cm <sup>3</sup> ) |       | <i>E<sub>b</sub></i> (GPa) |      |      |       |
|--------|----------|-----------------------------|-------|----------------------------|------|------|-------|
|        |          | Ave                         | CV(%) | Ave                        | Max  | Min  | CV(%) |
| PBJ    | 12       | 0.60                        | 8.0   | 8.98                       | 9.65 | 7.68 | 5.8   |
| VBJ    | 14       | 0.59                        | 6.6   | 8.22                       | 9.06 | 6.72 | 8.2   |

Note:

*n*: Number of samples, *E<sub>b</sub>*: Refer to Table 6., Ave, CV: Refer to Table 2.,

Max: Maximum value, Min: Minimum value, PBJ,VBJ: Refer to Table 5.

Table 10. Yields of core plywood at each stage.

| Symbol |                         | Initial    | After sanding | After trimming | After trimming                         |
|--------|-------------------------|------------|---------------|----------------|----------------------------------------|
|        |                         | (stage(1)) | (stage(6))    | (stage(6))     | of reconstituted plywood<br>(stage(9)) |
| PBJ    | Volume(m <sup>3</sup> ) | 0.3120     | 0.2692        | 0.1714         | 0.1559                                 |
|        | Yield(%)                | 100        | 86.3          | 54.9           | 50.0                                   |
| VBJ    | Volume(m <sup>3</sup> ) | 0.4223     | 0.3616        | 0.1843         | 0.1673                                 |
|        | Yield(%)                | 100        | 85.6          | 43.6           | 39.6                                   |

Note:

PBJ,VBJ: Refer to Table 5.

Stage (1), (6), (9): Manufacturing stage shown in Fig.10.

### 3.3.4 実用化に向けた課題

本研究により明らかになった実用化に向けた技術的課題を以下に挙げてみる。バットジョイントにより製造した再生合板は JAS 基準を満たしており、性能面において大きな問題は無いと考えられたが、単板を接着するまでの心板の運搬等で自重による接合面の破損が生じやすく、作業性において問題が残された。従って、実用的にはスカーフジョイントのような強度の高い方法を選択すべきであろう。本研究では厚さ規正の無いベルトサンダーによって研削を行ったが、心板の厚さに多少のバラツキが生じた。厚さのバラツキが大きくなると冷圧時に均等な圧力がかからずに接着不良の原因にもなるため、厚さ規制のあるサンダーを用いるなどして、一定の厚さに研削する必要がある。また、実用化に当たって



は、可能な限り歩留まりを高めることが重要であり、そのためには心板の合板長手方向の長さ（ $A$ ）を一定とせずに歩留まりが最も高くなるような木取りをすることが望ましい。したがって、長手方向の長さ（ $A$ ）の最小値や継ぎ手が多くなった場合の検討も必要であろう。15mm 厚合板では、曲げ試験によりせん断破壊する試験体が散見されたが、これには心板自体の接着性能の低下が関与している可能性があり、心板自体の接着性能が大きく低下したものをどのように選別していくかが重要な課題である。

### 3.4 結論

使用済み合板を心板として利用して表裏面に新たな単板を接着することによる再生合板を製造し、曲げ性能や歩留まり等について評価した。その結果、以下の結論が得られた。表裏単板厚さが厚くなるほど、0 度方向の合板の  $E_b$ 、 $\sigma_b$  が増加し、90 度方向の  $E_b$ 、 $\sigma_b$  が低下したが、表裏単板厚さを 1.0mm 程度にすることで十分な曲げ性能が得られた。再生合板の  $E_b$  は、密度との相関が高く接合形状による影響は小さかったが、 $\sigma_b$  は接合形状の影響を受けることが確認された。心板の接合のみでは十分な  $\sigma_b$  は得られなかったが、表裏面に単板を接着した再生合板とすることで  $\sigma_b$  は 2.5～9.5 倍となり、大きな補強効果が得られることが確認された。

実大サイズにおける再生合板の製造歩留まりは 39.6～50.0%となり、使用済み合板の入手時の寸法に大きく左右された。心板と表裏単板の間の接着性能は JAS1 類の基準を満たした。合板の JAS に規定される実大サイズの曲げ試験の結果、再生合板はコンクリート型枠用合板の基準値を満たす性能が得られた。

## 第4章 床下地材として長期使用された合板の接着性能劣化評価

### 4.1 はじめに

長期優良住宅普及促進法の施行により、構造躯体の耐震性や耐久性に優れた住宅が強く求められている。合板等の木質面材料を耐力壁や水平構面に使用した構造躯体は高い耐震性が期待できることから、これらの木質面材料で構成された構造躯体が増加している。従って、構造躯体の耐久性を把握するためには、面材料やその接合部の経年劣化を明確化することが重要になっている。

木材自体は構造部材としての長い使用実績があり、適切な管理の下では数百年といった長い年月にも耐えることが示されている。一方、合板等の木質材料では、構造部材として数十年程度の使用実績しかなく、構造部材として長期使用された場合の経年劣化については定量的な評価がなされておらず、これらの耐用年数の把握が強く求められている。合板の耐久性については、比較的短期間で評価が可能な促進劣化試験<sup>129)</sup>や屋外暴露試験<sup>130)</sup>によりこれまで多くの検討がなされており、促進劣化処理の回数を屋外暴露の年数に換算する手法<sup>131,132)</sup>も検討されている。一方で、住宅部材としての実際の使用環境下での劣化に関するデータは非常に乏しいのが現状である。これは、使用実績の少なさに加えて、実際の使用環境下で一定の劣化を生じさせるためには長い年月を要し、実験的にこれを行うことは不可能であること、実際の住宅に使用された合板を採取しても、合板製造条件や初期の性能が不明であり、性能劣化を適切に数値化できないこと<sup>133)</sup>等によるものと考えられる。このような劣化評価の難しさがあるものの、住宅構造部材としての合板の劣化を的確に把握するためには、やはり実用環境下での調査に基づいた定量的な評価を行うことが不可欠であると考えられる。現在のところ、国内において住宅の構造部材として使用された合板の性能劣化を調査した事例は、渋沢ら<sup>134)</sup>による築19年経過した枠組壁工法住宅の外壁下地に使用された合板についての報告しかない。実用環境下での合板の耐久性を明確にし、耐用年数を推定するためには、このような調査事例の蓄積とともに、性能劣化を評価する手法の検討が必要であると考えられる。

構造用合板の JAS の制定は 1969 年であるが、1972 年の建築基準法の改正や 1974 年の枠組壁工法住宅のオープン化等が契機となって合板が住宅構造部材として徐々に利用されるようになったと考えられる。当初は、構造用合板が市場に定着していなかったことや合板の規格、性能に対する理解不足から、床下地については当時既に市場流通していた型枠用合板が構造用合板の代替材としても使用されていた<sup>135)</sup>。型枠用合板は曲げ性能や板面品質等の基準が構造用合板とは若干異なるが、その用途から接着耐久性に関しては 1 類の性能が要求されており、構造用合板 1 類と同等の性能を有している。従って、構造用合板の実用環境における経年劣化に関しては、使用例の多い型枠用合板も有用な参考資料となるものと考えられる。合板の構造利用に関連する法整備から 40 年程が経過し、現在解体や改修される住宅からの合板の排出量は増加傾向にある。

本章では、実際の住宅の床下地に使用されていた型枠用合板について、接着性能の調査を行うとともに、性能劣化を数値化する手法の検討を行った。また、対照用の新品型枠用合板について、合板の JAS に準じた煮沸繰り返し処理による促進劣化試験を行い、実用環境下での性能劣化との比較分析を試みた。

## 4.2 試験方法

### 4.2.1 調査物件と採取合板の概要

調査物件と採取した床下地合板（解体合板）の概要を Table 11 に、調査物件の平面図と採取位置の一例を Fig.17 に示す。調査物件の築年数は最長で 33 年であり、これは合板が構造用部材として使用された初期のものと考えられる。採取時は、合板に過度な応力がかからないよう、釘を引き抜くか丸鋸で切り取って合板を分離した。D16-KF については下地合板と複合フローリングが接着剤で固定されていたため、そのままの状態を試験体としたが、その他は下地合板のみを分離した。解体合板には目視の結果、腐朽や接着層のはく離の発生しているものは見られなかった。解体合板は、いずれも 12mm 厚 5 プライ構成の南洋材を使用した型枠用合板であった。調査物件の建設年である 1979 年から 1993 年の間に JAS1 類用として使用されていた接着剤は、そのほとんどがメラミン・ユリア共縮合樹

脂接着剤（MUF）であると考えられるが、1980 年前後に一部使用されていたフェノール・メラミン樹脂接着剤（PMF）<sup>136)</sup>である可能性も否定できない。PMF の接着耐久性については、煮沸による促進劣化処理を行うと煮沸の熱によりフェノール成分の硬化が進行し、MUF よりも高い耐久性を示す<sup>131,137)</sup>ものの、屋外暴露試験による性能低下は MUF よりもやや大きい<sup>131,138,139)</sup>と報告されている。床下地材のように極度の高温状態にならない実用環境においては、PMF と MUF の接着耐久性に大きな差はないものと推察されること、現状ではこれらの識別は困難なことから、本研究では、PMF と MUF を区別しなかった。

解体合板は、採取直後に電気抵抗式含水率計（(株)ケット科学研究所製 MT-900）を用いて含水率を測定した。測定点数は合板 1 枚当たり 5 点とした。ここでは、南洋材合板における含水率計による測定値と絶乾法による測定値の関係式をあらかじめ求めておき、 $(u_{od}=0.97u_{mm}+3.07)$ 、ここで  $u_{od}$ ：絶乾法による測定値、 $u_{mm}$ ：含水率計による測定値）含水率計測定値を絶乾法測定値に補正した。

解体合板の劣化を評価するためには評価基準となる合板が必要になるが、施工当初の合板が入手できないため、正確にマッチングされた材料による劣化評価は困難である。解体合板の初期性能はそれぞれ異なると考えられることから、比較対照用の合板についても性能の分布幅をできるだけ広くする必要がある。本研究では、対照用として製造元の異なる 3 種類の市販の型枠用合板（JAS1 類、B-C、12mm 厚、記号 NP1、NP2、NP3）を用いた（以下、新品合板とする）。いずれも南洋材を用いた 5 プライ合板であり、MUF を用いて製造されている。これら 3 種類の新品合板の試験体数はそれぞれ 5 枚とした。

これらの解体合板および新品合板から、合板の JAS の A 型引張せん断試験片（せん断面積 25×25mm）を合板 1 枚あたり 20 片ずつ採取した。試験片は、表側順方向、表側逆方向、裏側順方向、裏側逆方向それぞれ 5 片ずつとした。解体合板については、室内側と床下側を区別した。また、解体合板の木取りの際には、釘穴や釘抜き時の破損部分等の欠点を除いた。

#### 4.2.2 促進劣化処理

上記の新品合板および解体合板の評価とは別に、促進劣化処理による合板の劣化を調べ

るために、上記の新品合板（NP1、NP2、NP3）から各 3 枚を選び、合板の JAS における 1 類の処理に準じた促進劣化処理を行った。すなわち、各合板から採取した引張せん断試験片について、「4 時間煮沸－60℃で 20 時間乾燥」を 1 サイクルとした促進劣化処理を 0、1、2、4、6、8 サイクル繰り返し行った。試験片数は、2.1 と同様に合板 1 枚あたり 20 片とした。

Table 11. Summary of the houses and plywood.

| Mark of house | Area      | Construction method | Durations of use | Total floor area(m <sup>2</sup> ) | Mark of plywood | The gathering place              | Composition of floor | Dampproof sheet |
|---------------|-----------|---------------------|------------------|-----------------------------------|-----------------|----------------------------------|----------------------|-----------------|
| A             | Asahikawa | CB                  | 30               | 242.38                            | A30-JF          | Japanese style room of 1st floor | III                  | ×               |
| B             | Sapporo   | JC                  | 30               | 107.03                            | B30-LF          | Living room of 1st floor         | I                    | ○               |
| C             | Sapporo   | JC                  | 28               | 96.47                             | C28-KF          | Kitchen of 1st floor             | II                   | ○               |
| D             | Sapporo   | JC                  | 16               | 124.62                            | D16-KF          | Kitchen of 1st floor             | I                    | ○               |
| E             | Sapporo   | JC                  | 25               | 93.36                             | E25-LF          | Living room of 1st floor         | I                    | ○               |
| F             | Muroran   | JC                  | 33               | 99.37                             | F33-JF          | Japanese style room of 1st floor | III                  | ○               |
|               |           |                     |                  |                                   | F33-JF2         | Japanese style room of 2nd floor | III                  | ○               |
| G             | Sapporo   | JC                  | 28               | 100.52                            | G28-SF          | Store room of 2nd floor          | IV                   | ×               |
| H             | Sapporo   | JC                  | 29               | 111.78                            | H29-JF          | Japanese style room of 1st floor | III                  | ○               |
|               |           |                     |                  |                                   | H29-JF2         | Japanese style room of 2nd floor | III                  | ○               |
| I             | Kushiro   | JC                  | 24               | 161.68                            | I24-LF          | Living room of 1st floor         | V                    | ○               |
|               |           |                     |                  |                                   | I24-WF          | Western style room of 2nd floor  | V                    | ×               |

Note:

CB: Concrete block construction, JC: Japanese conventional post and beam construction,

I : Flooring+Plywood, II : Plastic sheet+Plywood, III : Tatami+Plywood, IV : Carpet+Plywood,

V : Carpet+Plywood+Boarding,

○: Present, ×: Absent.

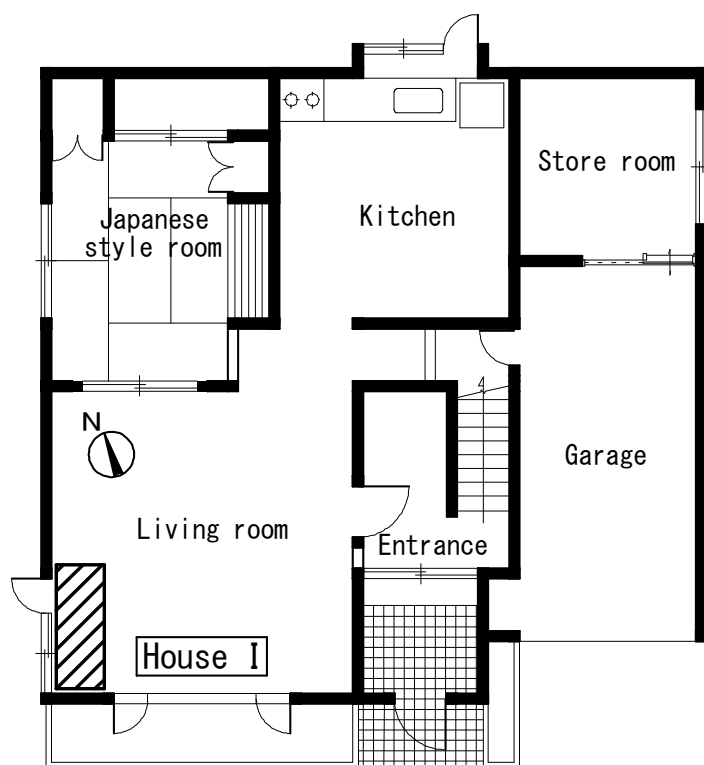
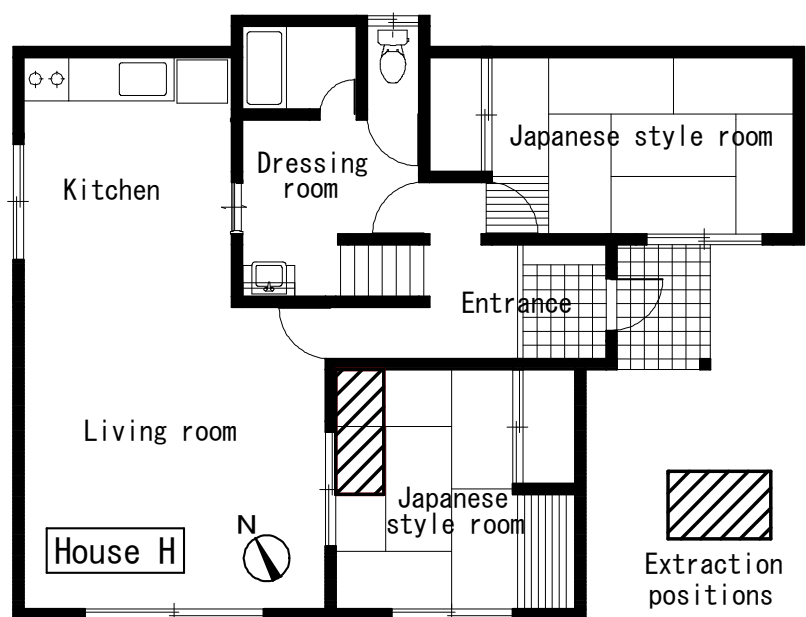


Fig.17. Examples of first-floor plans and extraction positions of the used plywood in investigated houses.

### 4.2.3 引張せん断試験

新品合板、解体合板および促進劣化処理した合板それぞれについて、合板の JAS に準じ、引張りせん断試験を行い、せん断強さおよび木部破断率を求めた。なお、合板の JAS では、表板に対する心板の厚さの比が 1.5 以上 2.0 未満の場合は 1.1 を、2.0 以上 2.5 未満の場合は 1.2 をせん断強さに乗じることとなっており、本研究においてもこの係数に乗じたせん断強さで評価した。引張せん断試験は、すべて試験片を 20°C65%R.H.の恒温恒湿室で調湿し、重量が恒量に達した後に行った。促進劣化処理した合板については、次式によりせん断強さ残存率  $R$  を算出した。

$$R = S_A / S_0 \quad (9)$$

ここで、 $S_A$  は劣化処理後のせん断強さ、 $S_0$  は劣化処理前のせん断強さである。

## 4.3 試験結果

### 4.3.1 実用環境における合板の含水率

実用環境下における合板採取時の含水率を Fig.18 に示す。G28-SF は、平均で 30.9%と非常に高い値を示した。この合板は 2 階の小屋裏収納に使用されたものであるが、合板とカーペットの境界面に結露水が付着しており、非常に厳しい水分環境に置かれていたものと考えられる。また、A30-JF は平均で 18.2%と高い値を示した。この住宅はコンクリートブロック造であるが、床下が露出地盤になっているにも関わらず、地盤面、床組ともに防湿措置が施されておらず、床下環境に下地合板が直接曝されていた。合板の平衡含水率は、製造時の熱の影響により木材素材よりも低いとされ、関野ら<sup>140)</sup>は、MUF で接着した南洋材合板の 20°C95%R.H.での平衡含水率は吸湿過程で 17.1%、放湿過程で 17.7%であったと報告している。A30-JF はこれを上回る含水率であることから、この住宅の床下はかなりの高湿度環境であったものと推察される。

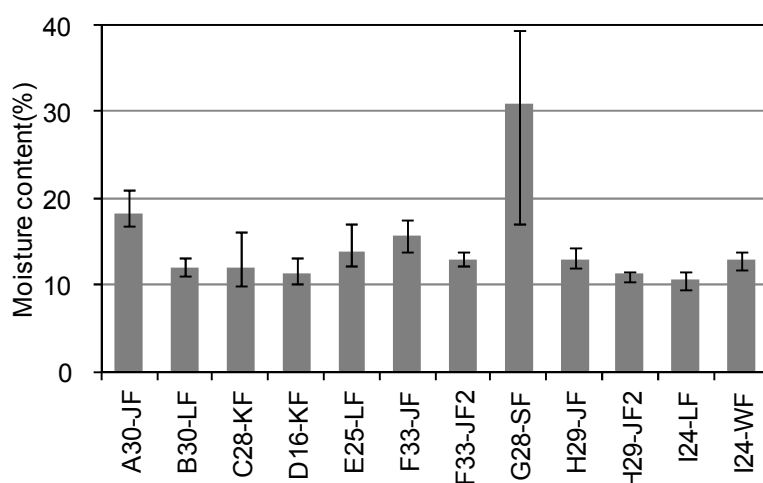


Fig.18. Moisture content of used plywood.

Note:

Vertical bars denote the maximum and minimum values.

#### 4.3.2 実用環境における合板のせん断強さと木部破断率

解体合板および新品合板の密度と接着性能試験の結果を Table 12 に示す。また、せん断強さと木部破断率を室内側と床下側（新品合板については表側と裏側）に分けて Fig.19 に示す。解体合板のせん断強さは 0.8～1.9MPa となり、概ね NP1 と比べても遜色ない十分な性能を有していた。室内側と床下側を比較すると、A30-JF では床下側のせん断強さが低い傾向を示した。この住宅は、前述のように床下の防湿措置が施されていなかったことで、床下側のみが高湿度環境に曝されていたことが影響した可能性が考えられる。その他の合板では、このような水分の勾配が無かったためか、両者に明確な違いは認められなかった。

木部破断率については、A30-JF、B30-LF、G28-SF が 50%に満たない低い値を示したが、その他の解体合板では、木部破断率は概ね 50%を超えており、新品合板と同程度かやや低い値を示した。木部破断率は接着剤の性能と単板強度の大小関係が影響し、通常、単板強度が高い場合は木部破断率が低くなる傾向を示すため、その数値自体を単独で評価するのは望ましくない。しかし、A30-JF および G28-SF の木部破断率が低い理由の一つとして、前述のように高含水率であったため、水分の蓄積が木部破断率の低下に関与した可能性が考えられる。ユリア樹脂接着剤（UF）や MUF 等のアミノ系樹脂では、水分の存在下にお



いてメチレン結合が加水分解されることが知られている<sup>139)</sup>。MUF の性能劣化機構が接着剤の膨潤<sup>141)</sup>や加水分解であるとすれば、長期間にわたって水分が接着層へ作用したことで、木部破断率の低下を引き起こしたことが推察できる。一方で、水分の作用が少ない場合では、30 年程度の使用でも比較的高い木部破断率が保たれる傾向が認められることから、接着層自体の劣化は少ないものと推察される。本研究で採取した合板では、含水率が高い場合でも腐朽の発生は認められなかったが、性能低下を抑制するには、やはり適切な防湿対策が重要であると言える。

Table 12. Results of adhesive properties tests.

| Mark<br>of<br>plywood | Density<br>(g/cm <sup>3</sup> ) |       | Shear strength<br>(MPa) |       | Wood failure<br>(%) |     |     | $R_{SS}$ | $R_{TL}$ |
|-----------------------|---------------------------------|-------|-------------------------|-------|---------------------|-----|-----|----------|----------|
|                       | Ave                             | CV(%) | Ave                     | CV(%) | Ave                 | Max | Min |          |          |
| NP1                   | 0.48                            | 7.0   | 1.37                    | 26.0  | 70.6                | 100 | 10  | -        | -        |
| NP2                   | 0.59                            | 9.0   | 2.22                    | 24.1  | 92.4                | 100 | 10  | -        | -        |
| NP3                   | 0.66                            | 8.9   | 2.26                    | 15.7  | 70.6                | 100 | 10  | -        | -        |
| A30-JF                | 0.58                            | 1.9   | 1.05                    | 24.1  | 40.0                | 100 | 20  | 0.53     | 0.29     |
| B30-LF                | 0.65                            | 2.0   | 1.43                    | 10.1  | 18.0                | 50  | 0   | 0.62     | 0.75     |
| C28-KF                | 0.52                            | 5.3   | 1.23                    | 16.6  | 64.0                | 100 | 20  | 0.73     | 0.86     |
| D16-KF                | 0.57                            | 3.4   | 1.81                    | 14.7  | 71.0                | 100 | 30  | 0.92     | 1.01     |
| E25-LF                | 0.70                            | 2.6   | 1.40                    | 11.7  | 43.0                | 100 | 10  | 0.55     | 0.58     |
| F33-JF                | 0.61                            | 1.4   | 1.42                    | 11.1  | 52.5                | 100 | 20  | 0.67     | 0.62     |
| F33-JF2               | 0.62                            | 4.4   | 1.45                    | 19.1  | 49.5                | 100 | 20  | 0.67     | 0.69     |
| G28-SF                | 0.71                            | 1.6   | 1.71                    | 21.6  | 27.5                | 60  | 10  | 0.67     | 0.40     |
| H29-JF                | 0.46                            | 1.8   | 1.13                    | 21.2  | 69.5                | 100 | 40  | 0.78     | 0.77     |
| H29-JF2               | 0.48                            | 1.9   | 1.32                    | 10.1  | 68.5                | 100 | 20  | 0.87     | 1.38     |
| I24-LF                | 0.72                            | 3.2   | 1.81                    | 17.5  | 76.5                | 100 | 20  | 0.70     | 0.83     |
| I24-WF                | 0.61                            | 2.8   | 1.53                    | 21.8  | 69.0                | 100 | 20  | 0.73     | 0.85     |

Note:

$R_{SS}$ : Shear strength retention calculated by the simple regression line.

$R_{TL}$ : Shear strength retention calculated by the 95% confidence limit line.

Ave, CV: Refer to Table 2.

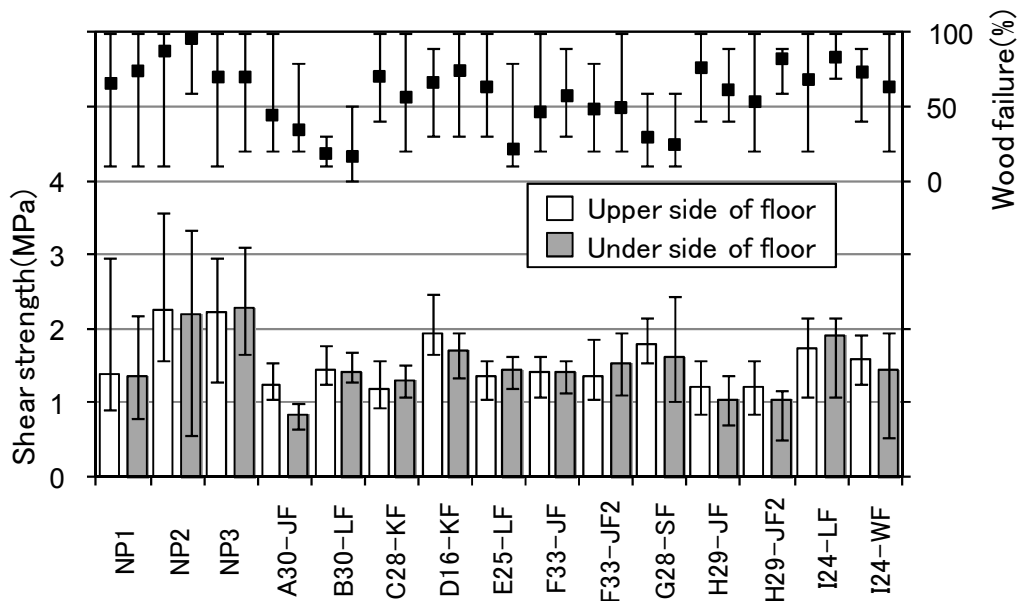


Fig.19. Shear strength and Wood failure of plywood.

Note: Vertical bars denote the maximum and minimum values.

#### 4.3.3 促進劣化試験における接着性能低下

常態時および促進劣化処理した合板について、密度とせん断強さの関係を Fig.20 に示す。Fig.20 は裏割れの方向が順方向および逆方向のみを表示したもの、さらにこれらを一括したものの 3 種類の図で示している。裏割れの方向別に見ると、順方向よりも逆方向が全体的にやや低い値を示しているが、常態時および劣化処理後の相対的な位置関係は同様の傾向を示していることから、両者を一括して考察しても実用上は問題ないものと考えられる。一括表示した場合、常態時における密度とせん断強さの相関係数は 0.76 となり、1%水準で有意な正の相関が認められた。同一製造条件で接着した場合、密度が高いほどせん断強さが高くなることがよく知られている<sup>142,143)</sup>。供試した新品合板は、初期の製造条件がそれぞれ異なると考えられるものの、JAS1 類の基準を満たすよう適切な製造管理がなされた合板においては、両者に高い相関が得られることが確認された。

促進劣化処理した合板では、処理の回数が増えるに従いせん断強さが徐々に低下する傾向が認められた。処理回数ごとのデータを直線で回帰すると、処理回数の増加とともに直線が下へ移動し、直線の傾きが徐々に減少した。すなわち、密度の高い合板ほど性能低下が顕著である傾向を示した。山岸<sup>144)</sup>はユリア樹脂および酢酸ビニルエマルジョン樹脂で

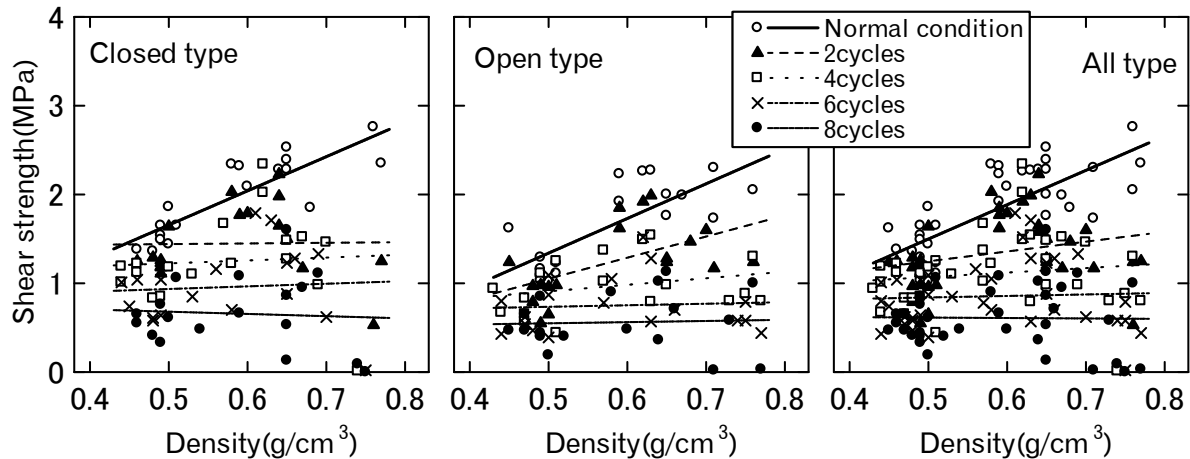


Fig.20. Relationship between density and shear strength in accelerated aging treatments.

Note: The regression lines are as follows.

Normal condition: Closed type;  $y=3.849x-0.268$ , Open type;  $y=3.905x-0.613$ , All type;  $y=3.867x-0.435$

2cycles: Closed type;  $y=0.072x+1.405$ , Open type;  $y=2.380x-0.139$ , All type;  $y=1.107x+0.694$

4cycles: Closed type;  $y=0.326x+1.062$ , Open type;  $y=0.739x+0.539$ , All type;  $y=0.508x+0.816$

6cycles: Closed type;  $y=0.295x+0.788$ , Open type;  $y=0.173x+0.649$ , All type;  $y=0.169x+0.756$

8cycles: Closed type;  $y=-0.252x+0.806$ , Open type;  $y=0.131x+0.484$ , All type;  $y=-0.050x+0.639$

南洋材を接着し、乾湿繰り返し処理後のせん断強さを調べた結果、密度が高いものほど接着性能の低下が大きかったと報告しており、これは、密度の高い材の方が処理中の試験片の吸湿乾燥に伴い発生する内部応力が大きく作用するためであるとしている。本研究では、使用した接着剤や劣化処理条件が山岸の報告と異なるものの、同様に高密度の合板ほど劣化処理により発生する内部応力が大きくなり、性能低下が顕著になったものと推察される。

合板密度を低密度（ $0.55\text{g/cm}^3$ 未満）、中密度（ $0.55\text{g/cm}^3$ 以上  $0.65\text{g/cm}^3$ 未満）、高密度（ $0.65\text{g/cm}^3$ 以上）の3種類に分類した時のそれぞれのせん断強さ残存率  $R$  と木部破断率の変化を Fig.21 に示す。 $R$  はいずれの密度においても煮沸2回目までの低下が顕著であり、その後の低下はやや緩やかな直線となって推移した。 $R$  は4回処理後で  $0.5\sim 0.7$ 、6回処理後で  $0.4\sim 0.5$  程度に低下したが、この結果は、井上<sup>91)</sup>による MUF を用いた合板の煮沸繰り返し試験結果と概ね一致した。

木部破断率については、常態時では高密度合板が 64%と最も低く、中密度および低密度合板では 80%程度であった。いずれの密度においても処理回数とともに木部破断率は低下

しており、高密度合板は煮沸処理後においても相対的に低い値を推移した。

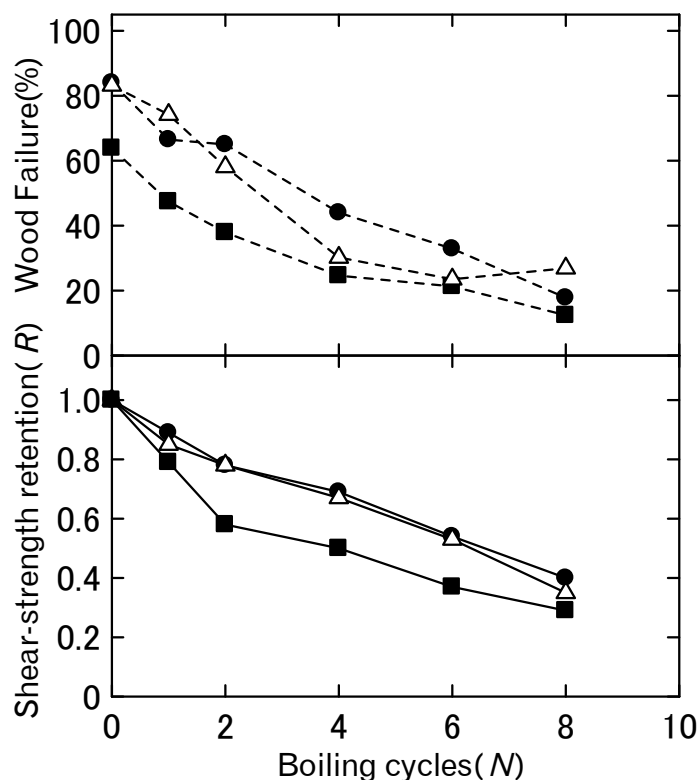


Fig.21. Shear-strength retention and wood failure in accelerated aging treatments.

Legend: ●: Low density ( $\rho < 0.55 \text{ g/cm}^3$ ),  $\triangle$ : Medium density ( $0.55 \leq \rho < 0.65 \text{ g/cm}^3$ ),  
 ■: High density ( $0.65 \text{ g/cm}^3 \leq \rho$ ).

#### 4.3.4 実用環境での合板のせん断強さの劣化評価

新品合板および解体合板の密度とせん断強さの関係を Fig.22 に示す。新品合板の密度とせん断強さの間には 1%水準で有意な正の相関が認められた。解体合板のせん断強さは、いずれも新品合板の回帰直線の下部に分布していることから、長期間の使用によりせん断強さが低下したことが看取される。また、新品合板のせん断強さについて 95%信頼区間を求めると、解体合板のせん断強さは、低密度ではこの区間内に収まったが、高密度では 95%下側信頼限界値を下回った。この結果を Fig.20 の煮沸処理後のせん断強さと比較すると、合板の密度が高いほどせん断強さの低下が顕著であるという特徴的な類似点が見られる。前述のように、解体合板の初期性能の正確な推定はできないが、新品合板のせん断強さが密度と高い相関が認められること、生物劣化が無ければ経年による木材密度の変化は

無視できる<sup>145)</sup>と考えられることを用いれば、およそその劣化評価が可能である。ここでは、解体合板のせん断強さ残存率  $R_{SS}$  を次式から求めた。

$$S_N = a\rho + b \quad (10)$$

$$R_{SS} = S_U / S_N \quad (11)$$

ここで、 $S_N$  は新品合板のせん断強さの推定値、 $S_U$  はそれぞれの解体合板のせん断強さの平均値、 $a$  は新品合板の回帰直線の傾き、 $\rho$  はそれぞれの解体合板の平均密度、 $b$  は新品合板の回帰直線の  $y$  切片である。

(11) 式は新品合板と解体合板のせん断強さの平均値を比較したものであり、解体合板の劣化の程度を示す指標となる。一方、より信頼性のある評価のためには、せん断強さのバラツキを考慮した評価が重要になる。そこで、次式によりバラツキを考慮した残存率  $R_{TL}$  についても算出した。

$$R_{TL} = S_{UTL} / S_{NTL} \quad (12)$$

ここで、 $S_{UTL}$  はそれぞれの解体合板の信頼水準 75% における 95% 下側許容限界値（以下、下限値）、 $S_{NTL}$  はそれぞれの解体合板の密度に対応する新品合板のせん断強さの 95% 下限信頼限界値である。

まず、(11) 式による残存率の精度を確認するため、促進劣化処理した合板について、前述した (9) 式による  $R$  と  $R_{SS}$  を比較した (Fig.23)。その結果、残存率が大きいほど誤差が大きくなる傾向が認められた。残存率が 0.8 を超える場合、残存率の最大誤差は 0.19 となったが、これは新品合板の真のせん断強さよりも (10) 式で計算したせん断強さを 0.4MPa 程度小さく見積もったために生じたものである。一方、残存率が 0.6 未満の場合では、残存率の誤差は最大でも 0.09 となり、比較的精度の高い評価ができていると思われる。また、 $R$  と  $R_{SS}$  の相関係数は 0.95 と非常に高く、平均値の差を検定したところ、5% 水準で有意差は認められなかった。したがって、せん断強さの低下が比較的軽微な場合は精度の良い評価は難しいものの、ある程度劣化が進行した合板については、(11) 式を用いることにより、概ね妥当な劣化評価ができるものと考えられる。(11) および (12) 式により算出した解体合板の残存率を Table 12 に示す。 $R_{SS}$  では 0.53～0.92 の範囲に分布しているが、 $R_{TL}$  での分布

は 0.29～1.38 と広範囲にわたり、初期性能を上回ることを示す 1 以上の値も散見された。構造部材の強度評価では、一般にバラツキを考慮した下限評価が行われており、せん断強さの低下に伴う合板の耐用年数を考える際にも、同様の評価が望ましいと思われるが、ここで得られた  $R_{TL}$  はバラツキ範囲が広く、このデータのみから適切な評価を行うことは難しい。また、実使用環境下での経年劣化には大きな変動幅があり、現時点では高精度の推定は難しいと考えられることから、ここでは  $R_{SS}$  による評価を用いるのが妥当であると思われる。

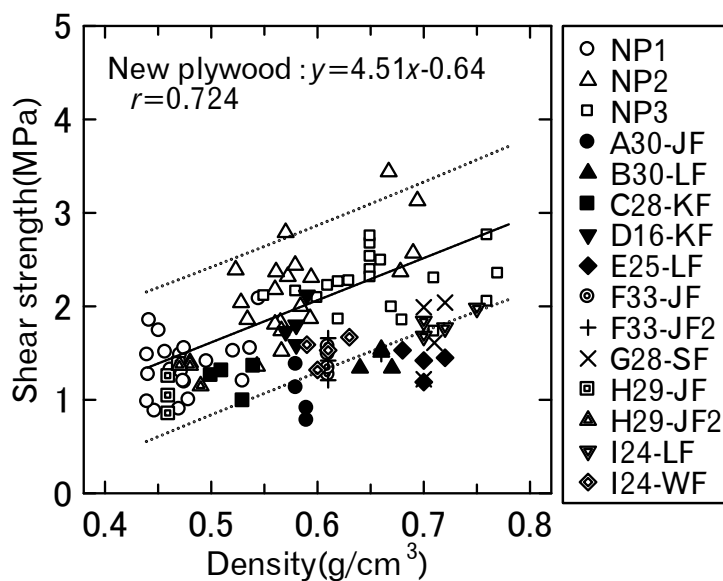


Fig.22. Relationship between density and shear strength in actual use.

Note:

The solid line indicates the regression line of the new plywood.

The dotted lines indicate the 95% confidence limits of the new plywood.

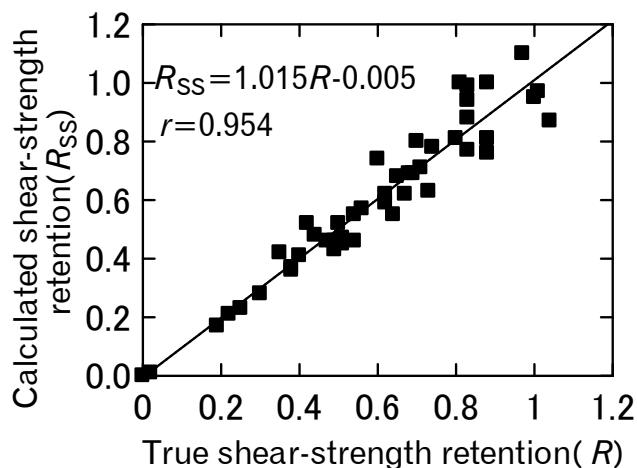


Fig.23. Relationship between calculated shear-strength retention ( $R_{SS}$ ) and true shear-strength retention ( $R$ ) in accelerated aging tests.

Fig.24 は築年数と  $R_{SS}$  の関係を 4.3.3 節で分類した密度ごとに示したものである。 $R_{SS}$  は低密度合板で 0.78～0.92、中密度合板で 0.53～0.92、高密度合板で 0.55～0.70 となった。この実験の範囲では中密度合板と高密度合板の残存率には明確な差が認められなかったが、低密度合板の残存率はそれらよりも高くなっており、実用環境下での変動幅の大きさを考慮すると、概観的には Fig.20 に示した促進劣化試験結果と同様の傾向を示していると考えられる。含水率と残存率の関係に着目してみると、比較的含水率の高かった A30-JF は全体で最も低い残存率を示しているが、含水率の最も高かった G28-SF は高密度合板の中では高い残存率を示しており、含水率と残存率の関係は必ずしも明確な傾向を示さなかった。

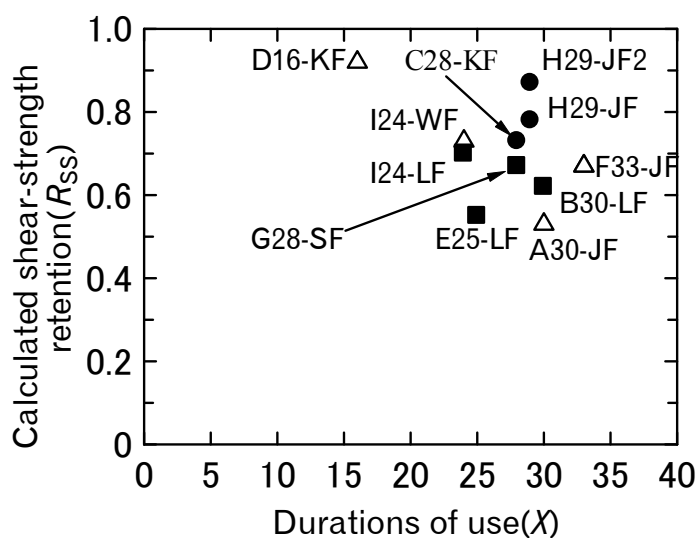


Fig.24. Calculated shear-strength retention in actual use.

Legend: ●, △, ■: Refer to Fig.21.

#### 4.3.5 促進劣化試験と実使用環境下での性能劣化の関係

木質材料の接着耐久性に関する既往の研究<sup>131,146)</sup>では、促進劣化試験での劣化と同程度の劣化を引き起こす屋外暴露試験の年数を求め、促進劣化処理の繰り返し数を屋外暴露の年数に換算する手法が検討されている。本研究においても、これらと同様の検討を行うために、まず、Fig.21 に示したせん断強さ残存率の低下について曲線近似を行い、それと同様の近似式を Fig.24 の実用環境下の劣化にも当てはめた。近似式としては既報<sup>146,147)</sup>を参考に、比較的決定係数の高い以下の二式を用いた。

$$R=1-kt^{1/2} \quad (13)$$

$$R=k^t \quad (14)$$

ここで、 $R$  は残存率、 $k$  は劣化速度定数、 $t$  は煮沸処理回数 ( $N$ ) または使用年数 ( $X$ ) である。なお、実用環境における劣化は、使用年数や数量の限定された調査データを用いており、このデータのみに基づいて信頼性の高い推定式を与えることは難しい。しかし、この種の耐久性能予測に関する実用的要求が高まることを想定すると、推定精度が不十分であっても、その時点で可能な試行を積み重ねることが必要である。ここでは、このような認識の上で可能な提案を試みた。算出したそれぞれの近似曲線を Table 13 に示す。また、Fig.21



および Fig.24 に 近似式を当てはめたものを Fig.25 に示す。促進劣化試験における決定係数は、いずれも 0.9 以上の値を示し、低密度および中密度では(13)式が、高密度では(14)式が高くなった。促進劣化試験および実用環境における近似曲線から残存率  $R$  を消去すると繰り返し数 ( $N$ ) と使用年数 ( $X$ ) の関係が得られる。このようにして算出した  $X/N$  を Table 13 に示す。 $X/N$  は煮沸処理 1 サイクルと同じ性能低下を引き起こす使用年数を示している。 $X/N$  は(13)式よりも(14)式を用いた方が小さくなり、(14)式を用いた場合、煮沸処理 1 サイクルは、低密度で 13 年、中密度で 9 年、高密度で 11 年と同等であるものと算出された。ここで求めた煮沸処理回数の使用年数への時間換算は、解体合板の平均的な数値を示しているが、実用環境下での残存率自体に誤差があること、近似式によって差が生じていること等から、この数値の定量的な精度はそれほど高くないと考えるのが妥当であろう。この時間換算の精度をさらに高めるためには、サンプル数の増加や使用環境や含水率によって分類するなどの検討が必要であると考えられる。

Table 13. Results of regression analysis.

| Regression equations | LD                                | MD                            | HD                            |
|----------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| (13) $R=1-kt^{1/2}$  | AAT $R=1-0.184N^{1/2} (r^2=0.93)$ | $R=1-0.196N^{1/2} (r^2=0.93)$ | $R=1-0.255N^{1/2} (r^2=0.98)$ |
|                      | AU $R=1-0.039X^{1/2} (r^2=0.75)$  | $R=1-0.059X^{1/2} (r^2=0.70)$ | $R=1-0.071X^{1/2} (r^2=0.89)$ |
|                      | $X/N$ 22.8                        | 11.1                          | 13.1                          |
| (14) $R=k^{-t}$      | AAT $R=0.899^N (r^2=0.99)$        | $R=0.890^N (r^2=0.98)$        | $R=0.834^N (r^2=0.94)$        |
|                      | AU $R=0.992^X (r^2=0.74)$         | $R=0.987^X (r^2=0.78)$        | $R=0.983^X (r^2=0.88)$        |
|                      | $X/N$ 13.3                        | 8.6                           | 10.7                          |

Note:

LD: Low density ( $\rho < 0.55 \text{g/cm}^3$ ), MD: Midium density ( $0.55 \leq \rho < 0.65 \text{g/cm}^3$ ),

HD: High density ( $0.65 \text{g/cm}^3 \leq \rho$ ),

$t$ : Cycles of boiling ( $N$ ) or periods of use ( $X$ ),  $k$ : Regression coefficient,

$r^2$ : Coefficient of determination,

AAT: Accelerated aging tests, AU: Actual use,

$X/N$ : The periods of use which causes the adhesive deterioration equal to one cycle of boiling.

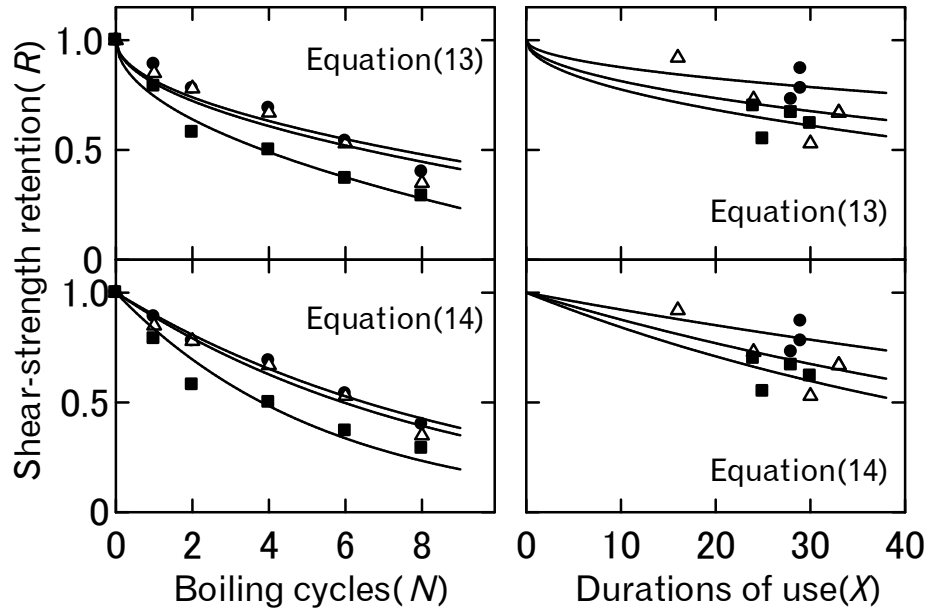


Fig.25. Shear-strength retention with regression curve in accelerated aging treatments and actual use.

Legend: ●,△,■: Refer to Fig.21.

Note:

The regression curves are as follows.

Equation (13): Low;  $R=1-0.184N^{1/2}$ ,  $R=1-0.039X^{1/2}$ , Medium;  $R=1-0.196N^{1/2}$ ,  $R=1-0.059X^{1/2}$ , High;  $R=1-0.255N^{1/2}$ ,  $R=1-0.071X^{1/2}$ ,

Equation (14): Low;  $R=0.899^N$ ,  $R=0.992^X$ , Medium;  $R=0.890^N$ ,  $R=0.987^X$ , High;  $R=0.834^N$ ,  $R=0.983^X$ .

#### 4.3.6 長期使用時の性能劣化予測

せん断強さの低下に伴う合板の耐用年数を推定する場合には、残存率の数値自体よりも経年後にせん断強さがどの程度残存しているかが重要になる。そこで、Fig.25 に示した実用環境での劣化曲線について、縦軸をせん断強さに置き換え、時間軸の外挿を試みた。(13)、(14)式とも促進劣化試験の範囲内では実測値を良く表現しているが、(13)式は時間軸を延長していくと負の値となるため、ここでは(14)式を用いた。合板の初期のせん断強さをFig.22における下限値に設定し、Fig.25 右下の図のようにせん断強さが低下するものと仮定すると、合板の密度が 0.5、0.6、0.7g/cm<sup>3</sup> の場合における長期使用時のせん断強さの変化はFig.26 のようになる。高密度合板では、初期値が高い一方で劣化速度が速いため、長期間の使用においては低密度合板の性能と逆転する結果となった。現行の木質構造設計基準

<sup>148)</sup> では構造用合板のせん断強さの許容応力度を 0.4MPa と定めており、数十年程度の使用ではこの基準を上回っているが、長期優良住宅のように、数世代にわたった構造躯体の使用を想定する場合にはこれを下回る可能性が示唆された。この試算では、初期性能を新品合板の下限値と仮定して算出しているため、概ね安全側の評価になっていると考えられる。ただし、この結果は本研究で採取した試験体を基に算出した限定的なものであり、使用環境が本研究のものとは大きく異なる条件に置かれる場合も考えられ、様々な使用環境での劣化の検証も重要である。さらに、本研究では採取材料がすべて型枠用合板であったが、より信頼性の高い資料とするためには、現行規格に従って製造された構造用合板での調査データを蓄積していく必要がある。

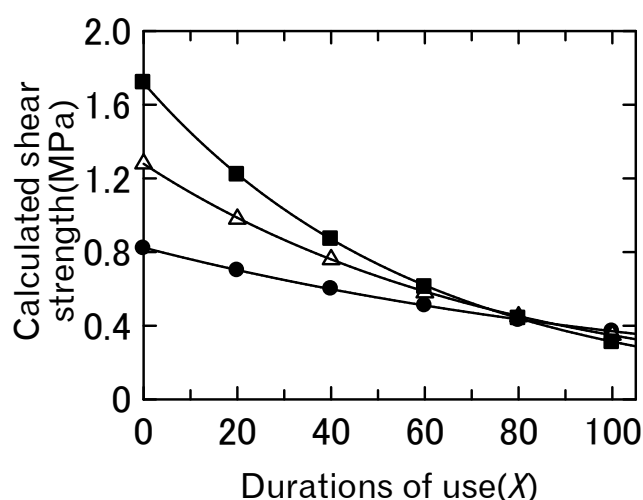


Fig.26. Calculated shear strength for a long periods.

Legend: ●: Low density ( $\rho=0.5\text{g/cm}^3$ ),  $\triangle$ : Medium density ( $\rho=0.6\text{g/cm}^3$ ),  
 ■: High density ( $\rho=0.7\text{g/cm}^3$ ).

Note:  $k, X$ : Refer to Table 13.

本研究では、合板の接着性能の劣化のみを扱っているが、構造材料として実用上要求される性能<sup>149)</sup>は曲げ性能や面内せん断性能、釘接合性能等の多くの項目があり、使用部位と使用環境によって各種性能の劣化が異なると考えられる。構造材料としての耐用年数は、実用上要求される基準を下回る性能によって決定されるものである。木質構造の設計においては、初期の性能に加えて、長期使用による劣化を加味していくのが望ましい<sup>150)</sup>が、

現状では長期使用時の経年劣化に関するデータが無く、初期設計に反映させるための明確な判断基準が示されていない<sup>151)</sup>。特に合板や木質ボード類等の接着製品については、木材素材に比べて経年劣化が著しいことから、信頼性の高い設計体系の構築のためにも、本研究のような手法を用いて長期使用時の劣化に関するデータを蓄積していく必要がある。

#### 4.4 結論

築後 16～33 年経過した住宅から床下地に使用された南洋材合板（型枠用合板、JAS1 類）を採取し、接着性能低下を調査した。また、市販の新品合板について、促進劣化試験による接着性能低下を調べ、実用環境での劣化との比較分析を行った。

煮沸繰り返しによる促進劣化試験では、煮沸処理回数の増加とともに、せん断強さ、木部破断率とも低下し、密度が高い合板ほどせん断強さの低下が顕著であった。これは密度の高い合板ほど吸水乾燥により試験片に作用する内部応力が大きくなり、接着層への負担が増加することが主な原因と考えられた。

実用環境下では、採取時含水率の高い合板において木部破断率が低い傾向が認められた。新品合板の密度とせん断強さの間には高い相関が認められることを利用して、解体合板のせん断強さの残存率を定義すると、密度が高い合板ほど残存率が低くなり、促進劣化試験の結果と同様の傾向を示した。促進劣化試験および実用環境下でのせん断強さの低下について、近似曲線を求めることで、煮沸処理の繰り返し数を実用環境下での使用年数に換算できる可能性が示された。ただし、実用環境下での初期性能を正確に推定することはできないため、算出したせん断強さの残存率に誤差が生じることは避けられない。煮沸繰り返し数の使用年数への時間換算や長期使用時における接着性能の劣化予測の精度をさらに高めるためには、今後サンプル数の増加や使用環境や含水率によって分類するなど、詳細な検討が必要であると考えられる。また、本研究での測定対象が型枠用合板であったことから、現行規格に従った構造用合板についても調査データの蓄積が必要である。

## 第 5 章 床下地材として長期使用された合板の曲げ・面内せん断性能劣化評価

### 5.1 はじめに

構造用合板の実用環境下における接着性能の低下を明確化するために、第 4 章では、実際の住宅の床下地に使用された合板を採取し接着性能を調べるとともに、煮沸繰り返し処理による促進劣化試験における性能低下との比較分析を行った。合板を床下地材として使用する場合、固定荷重や積載荷重の他、歩行による曲げ応力が繰り返し作用するため、曲げ性能の確保が非常に重要となる。さらに、床構面は地震力や風圧力に対する重要な抵抗要素であり、これらの力を耐力壁（鉛直構面）へ伝達する役割を果たしている。この際、鉛直構面へ均等にバランスよく力を伝達することが要求され、このためには、床構面の面内せん断性能に優れた剛性の高い床である必要がある。合板の曲げ性能の劣化については、屋外暴露試験<sup>7,152,153)</sup>や促進劣化試験<sup>154,155)</sup>等によるいくつかの検討事例があるが、住宅構造物として使用した場合の劣化を数値化した報告は見られない。また、合板の面内せん断性能の劣化に関する知見<sup>156,157)</sup>は非常に少ない。そこで本章では、合板の曲げ性能および面内せん断性能について、第 4 章と同様の検討を行い、住宅床下地材として長期間使用された合板の性能低下について検討した。

### 5.2 試験方法

#### 5.2.1 調査物件と採取合板の概要

調査物件および採取材料については第 4 章と同様であるが、D16-KF については下地合板と複合フローリングが接着剤で固定されており、試験体の採取が困難であったため除外した。比較対照用の新品合板についても第 4 章と同様の 3 種類の南洋材合板（JAS1 類、B-C、12mm 厚、メラミン・ユリア共縮合樹脂接着剤（MUF）使用：記号 NP1、NP2、NP3）をそれぞれ 5 枚ずつ用意した。

各合板から、曲げ性能測定用として、幅 50mm、長さ 338mm の試験体を表板の繊維方向と試験体の長手方向が平行なもの（0 度方向）と直交するもの（90 度方向）を合板 1 枚あ

たりそれぞれ 4 体ずつ採取した。また、面内せん断性能測定用として、幅 85mm、長さ 255mm の試験体を表板繊維方向と試験体長手方向が平行となるように合板 1 枚あたり 3 体（一部 2 体）ずつ採取した。試験体には釘穴が入らないように配慮したが、試験体の制約から釘穴を避けられない場合は、できるだけ試験体端部に配置するようにした。また、C28-KF については合板表面に張られたビニルシートをはがしてから試験体を作成した。

### 5.2.2 促進劣化処理

上記の新品合板および解体合板の評価とは別に、促進劣化処理による合板の曲げ性能および面内せん断性能の劣化を調べるために、合板の JAS における 1 類の処理に準じた促進劣化処理を行った。上記の新品合板（NP1、NP2、NP3）から各 3 枚を選び、合板の JAS における 1 類の処理に準じて促進劣化処理を行った。すなわち、「4 時間煮沸－60℃で 20 時間乾燥」を 1 サイクルとし、これを 2、4、6 サイクル繰り返し行った。処理後、試験体の 4 側面におけるはく離長さを測定し、次式によりはく離率を算出した。

$$DR=L_{DL}/L_{GL} \quad (15)$$

ここで、 $DR$  ははく離率、 $L_{DL}$  は 4 側面のはく離長さの合計、 $L_{GL}$  は 4 側面の接着層長さの合計である。

### 5.2.3 曲げ試験

新品合板、解体合板および促進劣化処理した合板それぞれについて、スパンを 288mm とした 3 等分点 4 点曲げ試験を行い、各方向における曲げヤング係数（ $E_{B0}$ 、 $E_{B90}$ ）および曲げ強さ（ $\sigma_0$ 、 $\sigma_{90}$ ）を算出した。平均荷重速度は毎分 14.7MPa 以下とした。促進劣化処理した合板については、得られた合板の曲げヤング係数および曲げ強さを、後述する計算式により単板の曲げヤング係数および曲げ強さに換算し、処理前後の各種性能の比から、曲げヤング係数残存率  $R_{EV}$  および曲げ強さ残存率  $R_{\sigma V}$  を算出した。

### 5.2.4 面内せん断試験

合板の面内せん断性能の測定は、米国の ASTM 規格<sup>158)</sup>や欧州規格<sup>159)</sup>において採用されている Two-Rail-Shear (TR) 法や、ASTM<sup>160)</sup>および構造用合板の JAS<sup>12)</sup>の 1 級試験法として採用されている Edgewise-Shear (ES) 法などにより行われている。本研究では、採取合

板のサイズに限度があり、大型試験体による評価は困難なことから、比較的試験が簡便な ES 法を用いることにした。ES 法の規格においては、せん断弾性係数 ( $G$ ) の測定は規定されていないが、ES 法による  $G$  の測定値は TR 法による測定値と高い相関が認められるとの報告<sup>161)</sup>があることから、 $G$  の測定には大きな支障はないと考えられる。新品合板、解体合板および促進劣化処理した合板それぞれについて、合板の JAS (構造用合板 1 級) に準じ、Fig.27 に示す方法で面内せん断試験を行い、面内せん断強さ ( $\tau$ ) を求めた。また、試験体中央部の表裏面にひずみゲージを貼付して測定したひずみから、次式によりせん断弾性係数 ( $G$ ) を求めた。

$$G = \frac{\Delta P / \Delta \varepsilon}{2th} \quad (16)$$

ここで、 $t$  は合板厚さ、 $h$  は合板長さ、 $\Delta P$  は荷重たわみ曲線の直線域における荷重の増分、 $\Delta \varepsilon$  は  $\Delta P$  に対応するひずみの増分である。加力速度は毎分 0.5mm とした。促進劣化処理した合板については、処理前後の性能の比からせん断弾性係数残存率  $R_G$  および面内せん断強さ残存率  $R_\tau$  を算出した。曲げ試験および面内せん断試験は、すべて試験片を 20℃ 65%R.H. の恒温恒湿室で調湿し、重量が恒量に達した後に行った。



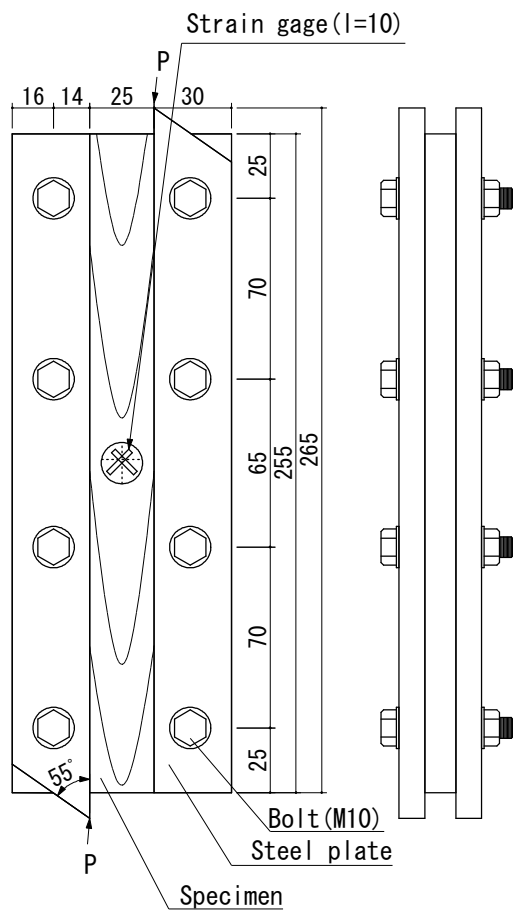


Fig.27. Method of edgewise shear test.

## 5.3 試験結果

### 5.3.1 促進劣化試験における曲げ性能低下

合板密度を低密度 ( $0.55\text{g/cm}^3$  未満)、中密度 ( $0.55\text{ g/cm}^3$  以上  $0.65\text{ g/cm}^3$  未満)、高密度 ( $0.65\text{ g/cm}^3$  以上) の3種類に分類した時のはく離率の平均値を Fig.28 に示す。処理回数の増加とともにはく離率も増加した。低密度合板では煮沸処理4回目までは全くはく離が認められなかったが、高密度合板では煮沸処理2回目に一部の試験体ではく離が見られ、高密度合板ほどはく離率が高くなる傾向を示した。Fig.29 は4回および6回処理後の密度とはく離率の関係を示したものであるが、はく離率は6回処理後においても、概ね15%以内の値となっているが、密度が  $0.7\text{g/cm}^3$  を超える一部の試験体において、はく離率30%を超える大きなはく離を示した。

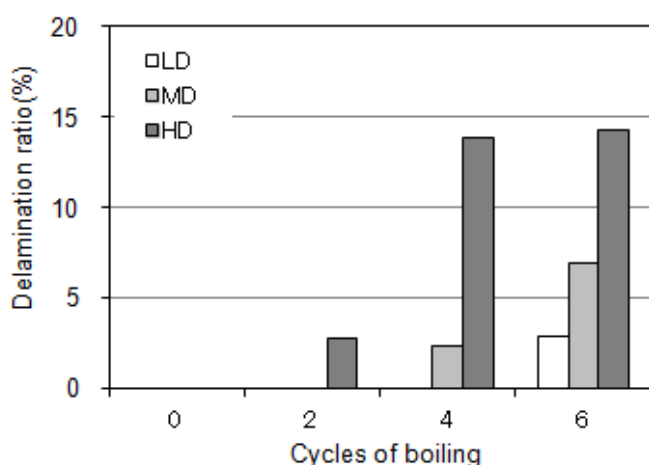


Fig.28. Delamination ratio of plywood in accelerated aging treatments.

Note: LD,MD,HD: Refer to Table 13.

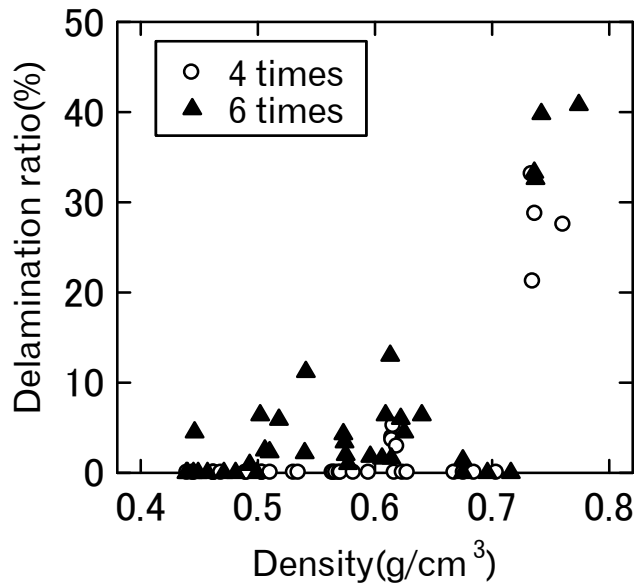


Fig.29. Relationship between density and delamination ratio.

合板の曲げ性能の評価を行うにあたり、合板の曲げ性能に及ぼす単板構成の影響を検討しておく必要がある。本研究で用いた合板はすべて5プライ構成であるが、それぞれの単板厚さが多少異なっており、特に後述する新品合板と解体合板の性能比較を行う際には、単板構成の違いが合板の曲げ性能に与える影響を考慮することが望ましいと考えられる。第2章でも触れたが、Fig.30に示されるような5プライ合板の曲げヤング係数は、直交方向単板のヤング係数を無視した次式で近似的に表現できる。

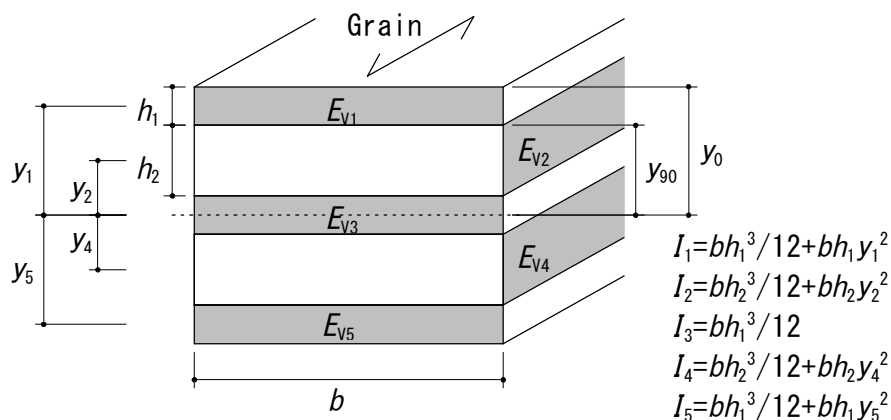


Fig.30. Veneer construction of 5ply plywood.

$$E_{B0} = (E_{V1}I_1 + E_{V3}I_3 + E_{V5}I_5) / I_P \quad (17)$$

$$E_{B90} = (E_{V2}I_2 + E_{V4}I_4) / I_P \quad (18)$$

ここで、 $E_{B0}$ 、 $E_{B90}$  は、0(90)度方向の合板の  $E_B$ 、 $I_P$  は合板の断面 2 次モーメント、 $I_1 \sim I_5$  は各層における単板の合板中立軸に対する断面 2 次モーメント、 $E_{V1} \sim E_{V5}$  は各層における単板のヤング係数である。

ここでは、計算を単純化し、各合板間の性能比較を可能にするために、既報<sup>72,163)</sup>に従い、単板のヤング係数を 0 度方向、90 度方向でそれぞれ同じであるもの ( $E_{V1}=E_{V3}=E_{V5}=E_{V0}$ 、 $E_{V2}=E_{V4}=E_{V90}$ ) とすると、(17)、(18)式は次式に変形できる。

$$E_{B0} = E_{V0} I_0 / I_P \quad (19)$$

$$E_{B90} = E_{V90} I_{90} / I_P \quad (20)$$

ここで、 $I_0 = I_1 + I_3 + I_5$ 、 $I_{90} = I_2 + I_4$  である。

同様に、単板の曲げ強さが 0 度方向、90 度方向でそれぞれ同じであるものとする、合板の曲げ強さは構成する単板の曲げ強さをを用いて近似的に次式で表現できる。

$$\sigma_0 = \sigma_{V0} Z_0 / Z_P \quad (21)$$

$$\sigma_{90} = \sigma_{V90} Z_{90} / Z_P \quad (22)$$

ここで、 $\sigma_0$ 、 $\sigma_{90}$  は 0 度 (90 度) 方向の合板の曲げ強さ、 $\sigma_{V0}$ 、 $\sigma_{V90}$  は 0 度 (90 度) 方向の単板の曲げ強さ、 $Z_P$  は合板の断面係数 ( $=I_P / y_0$ 、 $y_0$  は合板中立軸から合板外縁までの距離)、 $Z_0$  ( $=I_0 / y_0$ )、 $Z_{90}$  ( $=I_{90} / y_{90}$ 、 $y_{90}$  は合板中立軸から直交単板外縁までの距離) は 0 度 (90 度) 方向の有効な単板の断面係数である。

(19)～(22)式を用いて、実測した合板のヤング係数、曲げ強さから、 $E_{V0}$ 、 $E_{V90}$ 、 $\sigma_{V0}$ 、 $\sigma_{V90}$  を算出した。これらの値は、合板の曲げ性能を単板の曲げ性能に換算しているため、それぞれの合板について、単板構成の違いの影響を取り除いた比較が可能となっている。

常態時および促進劣化処理した合板について、密度と  $\sigma_V$  の関係を Fig.31 に示す。各プロットは試験体 4 体の平均値で示している。常態時における密度と  $\sigma_V$  の相関係数は、0 度方向で 0.87、90 度方向で 0.60 となり、いずれも 1%水準で有意であった。促進劣化処理した合板では、処理回数の増加とともに  $\sigma_V$  は低下した。処理回数ごとのデータを直線回帰する

と、0 度方向では処理回数の増加とともに直線の傾きが減少し、高密度合板ほど性能低下が顕著であったが、90 度方向では明確な傾向は認められなかった。処理回数と  $E_v$  および  $\sigma_v$  の残存率を Fig.32 に示す。残存率は、 $E_v$  よりも  $\sigma_v$  で、90 度方向よりも 0 度方向で低い値を示した。6 回処理後の残存率に着目すると  $E_v$  で 0.7~0.8、 $\sigma_v$  で 0.5~0.6 となったが、これらは前報のせん断強さ残存率 0.4~0.5 よりも大きく、煮沸処理による曲げ性能の低下は接着性能の低下よりも軽微であることがわかる。

Fig.33 は曲げ試験時にせん断破壊した試験体の割合を示している。常態時では、せん断破壊する試験体の割合は全体の 1 割未満であったが、処理回数の増加とともにこの割合が増加し、6 回処理後では 6 割以上を示しており、煮沸処理による接着層の部分的なはく離や接着性能の低下が  $\sigma$  の低下に大きく影響したことが推察される。なお、せん断破壊した試験体については、破壊荷重値から算出した合板の曲げ強さは本来よりも低い値となり、(21)、(22) 式により  $\sigma_{v0}$ 、 $\sigma_{v90}$  を求めることは望ましくない。しかし、この場合の破壊荷重値は実用的には重要な意味を持つことや、各種合板の劣化比較を可能にする観点から、ここでは破壊モードによらず、すべての試験体について同様に  $\sigma_{v0}$ 、 $\sigma_{v90}$  を求めた。

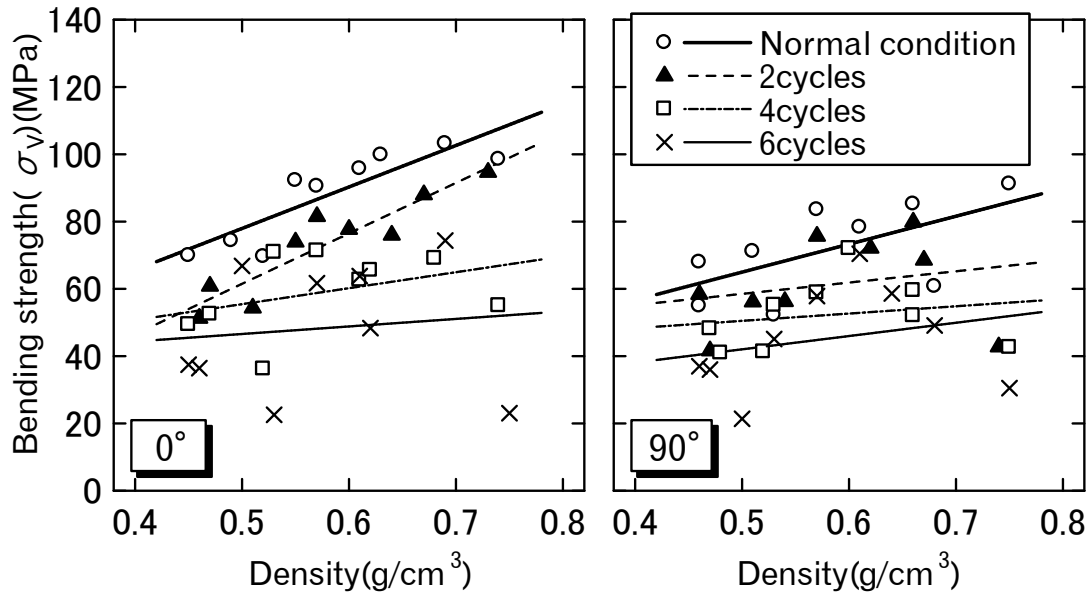


Fig.31. Relationship between density and bending strength of veneer.

Note:

0° : Span direction is parallel to the grain of face veneer.

90° : Span direction is perpendicular to the grain of face veneer.

The regression lines are as follows.

Normal condition: 0° ;  $y=123.3x+16.29$ , 90° ;  $y=83.09x+23.43$

2cycles: 0° ;  $y=150.0x-13.46$ , 90° ;  $y=33.58x+41.75$

4cycles: 0° ;  $y=47.47x+31.73$ , 90° ;  $y=21.68x+39.66$

6cycles: 0° ;  $y=22.38x+35.40$ , 90° ;  $y=39.51x+22.28$

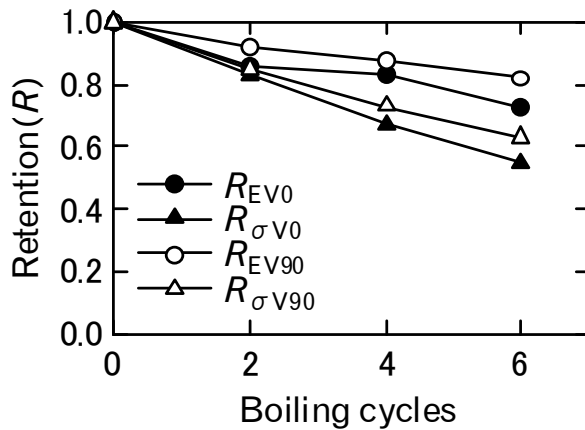


Fig.32. Bending performance retention in accelerated aging treatments.

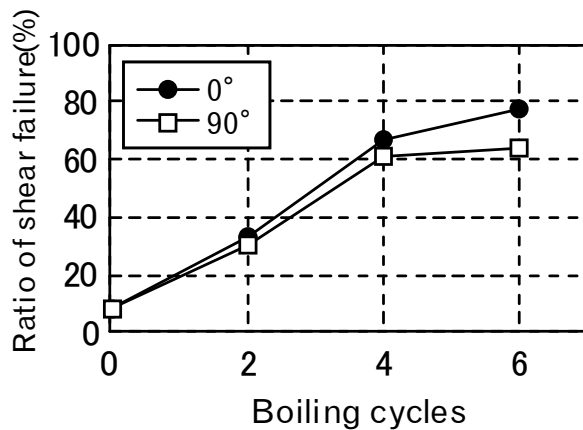


Fig.33. Ratio of shear failure in bending test of accelerated aging treatments.

### 5.3.2 実用環境における合板の曲げ性能

新品合板および解体合板の曲げ試験結果を Table 14 に示す。現行の合板の JAS において、構造用合板 1 級におけるヤング係数と曲げ強さの基準は厚さ 12mm、板面品質 B-C の場合、0 度方向がそれぞれ 5.5GPa、24MPa、90 度方向がそれぞれ 3.5GPa、20MPa と定められている。0 度方向においてはすべての合板でこの基準値を上回っており、十分な性能を保持していたと言える。90 度方向では、C28-KF と H29-JF2 において曲げ強さの基準に満たなかった。

新品合板および解体合板について、合板密度と (19)、(20) 式により計算した  $E_v$  の関係を Fig.34 に、合板密度と (21)、(22) 式により計算した  $\sigma_v$  の関係を Fig.35 に示す。解体合板の  $E_v$  は両方向とも新品合板の回帰直線の周囲に分散しており、性能低下は比較的軽微であることが窺える。一方、解体合板の  $\sigma_v$  は概ね回帰直線の下部に分布していることから長期使用により性能低下したものと考えられる。このような  $E_v$  よりも  $\sigma_v$  において性能低下が顕著である傾向は、前述の促進劣化試験結果と同様の傾向であり、既往の屋外暴露試験結果<sup>7,130,132,162)</sup>とも一致するものである。また、 $\sigma_{v90}$  が特異的に低い値を示した C28-KF、H29-JF および H29-JF2 を除けば、概ね 90 度方向よりも 0 度方向の性能低下が顕著である。0 度方向の性能低下は (17)、(18) 式からわかるように、主に表層単板の劣化<sup>163)</sup>に起因するものである。このような傾向についても既往の屋外暴露試験<sup>130,162)</sup>において報告されており、

Table 14. Results of bending tests in actual use.

| Mark of plywood | Direction | Density(g/cm <sup>3</sup> ) |       | $E_B$ (GPa) |       | $\sigma$ (MPa) |       |
|-----------------|-----------|-----------------------------|-------|-------------|-------|----------------|-------|
|                 |           | Ave                         | CV(%) | Ave         | CV(%) | Ave            | CV(%) |
| NP1             | 0°        | 0.50                        | 3.0   | 7.85        | 10.3  | 47.9           | 8.9   |
|                 | 90°       | 0.50                        | 2.2   | 3.46        | 6.4   | 29.1           | 8.6   |
| NP2             | 0°        | 0.57                        | 5.1   | 8.74        | 9.4   | 51.5           | 12.3  |
|                 | 90°       | 0.57                        | 9.2   | 5.02        | 12.7  | 43.8           | 18.7  |
| NP3             | 0°        | 0.68                        | 8.7   | 8.87        | 9.0   | 56.8           | 15.8  |
|                 | 90°       | 0.68                        | 11.6  | 6.38        | 14.8  | 48.7           | 26.2  |
| A30-JF          | 0°        | 0.59                        | 0.8   | 6.70        | 4.5   | 36.9           | 3.4   |
|                 | 90°       | 0.58                        | 1.2   | 4.94        | 5.0   | 39.7           | 27.2  |
| B30-LF          | 0°        | 0.65                        | 1.2   | 7.43        | 5.4   | 42.2           | 4.5   |
|                 | 90°       | 0.64                        | 0.5   | 6.85        | 2.2   | 43.1           | 6.8   |
| C28-KF          | 0°        | 0.49                        | 0.9   | 6.06        | 6.0   | 25.0           | 5.0   |
|                 | 90°       | 0.50                        | 3.8   | 3.72        | 18.5  | 15.2           | 27.0  |
| E25-LF          | 0°        | 0.70                        | 2.3   | 10.97       | 6.8   | 53.2           | 9.0   |
|                 | 90°       | 0.69                        | 0.7   | 8.37        | 2.6   | 53.4           | 5.3   |
| F33-JF          | 0°        | 0.61                        | 1.1   | 8.59        | 9.2   | 41.4           | 3.9   |
|                 | 90°       | 0.62                        | 1.6   | 6.06        | 5.0   | 42.7           | 3.8   |
| F33-JF2         | 0°        | 0.62                        | 0.8   | 8.59        | 2.8   | 44.7           | 3.0   |
|                 | 90°       | 0.62                        | 2.0   | 5.61        | 5.2   | 47.9           | 2.1   |
| G28-SF          | 0°        | 0.62                        | 0.9   | 8.74        | 6.1   | 45.7           | 4.4   |
|                 | 90°       | 0.63                        | 3.6   | 4.66        | 13.8  | 38.0           | 19.8  |
| H29-JF          | 0°        | 0.50                        | 0.7   | 6.93        | 5.8   | 35.5           | 5.6   |
|                 | 90°       | 0.50                        | 2.0   | 4.46        | 5.5   | 22.0           | 7.5   |
| H29-JF2         | 0°        | 0.47                        | 0.7   | 6.88        | 3.6   | 27.7           | 16.8  |
|                 | 90°       | 0.47                        | 1.5   | 5.61        | 3.5   | 16.9           | 10.2  |
| I24-LF          | 0°        | 0.74                        | 1.0   | 11.53       | 13.2  | 58.8           | 13.1  |
|                 | 90°       | 0.72                        | 3.7   | 6.39        | 17.2  | 51.3           | 4.6   |
| I24-WF          | 0°        | 0.58                        | 2.3   | 9.17        | 5.6   | 40.4           | 21.1  |
|                 | 90°       | 0.60                        | 1.4   | 3.86        | 6.2   | 35.1           | 6.7   |

Note:

Ave, CV: Refer to Table 2.



温湿度変化により合板に作用する収縮膨張応力や、積載荷重や歩行者によって繰り返し作用する曲げ応力は、主に表層部に大きく作用するため、表層単板の劣化が顕著になり、主として0度方向の曲げ性能低下として出現したものと推察される。なお、解体合板の個別の劣化評価については、5.3.5 節で行うこととする。

新品合板と解体合板について、曲げ試験時にせん断破壊した試験体の割合を Fig.36 に示す。新品合板はせん断破壊が1割程度であるのに対して、解体合板は両方向ともせん断破壊が5割を超えている。このように合板の劣化の進行とともにせん断破壊の割合が増す傾向についても、促進劣化試験の場合と同様であり、実用環境での合板の曲げ強さの低下には表層単板の劣化に加えて、接着性能の低下が大きく関与しているものと考えられる。

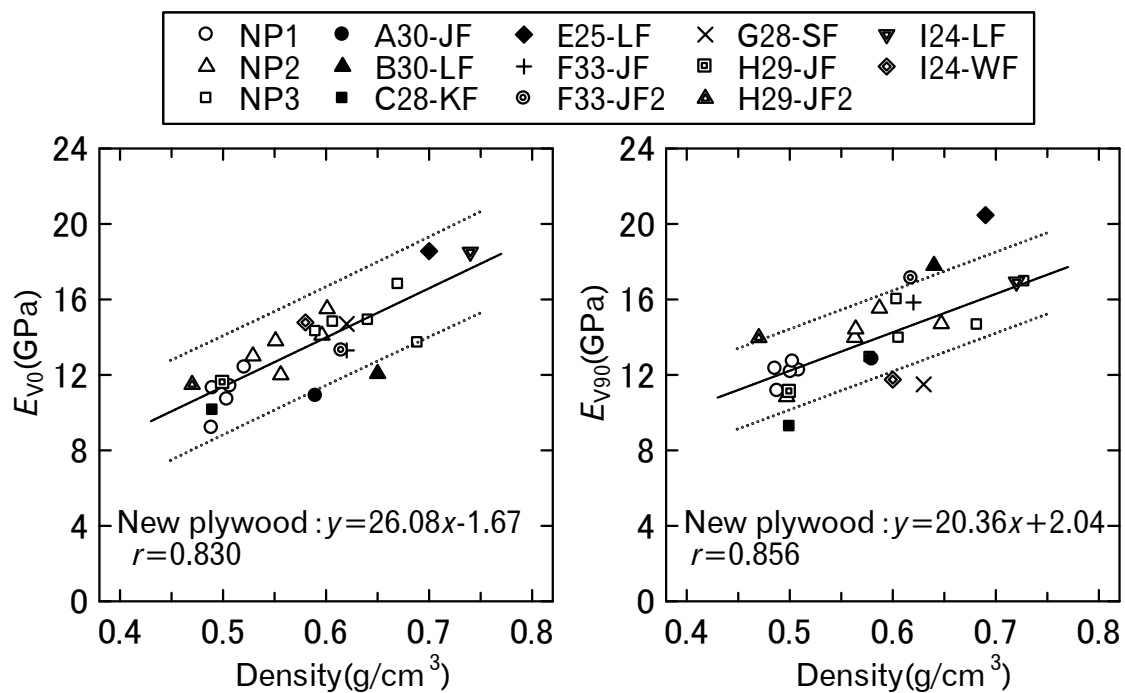


Fig.34. Relationship between density and  $E_v$ .

Note:

The solid line indicates the regression line of the new plywood.

The dotted lines indicate the 95% confidence limits of the new plywood.

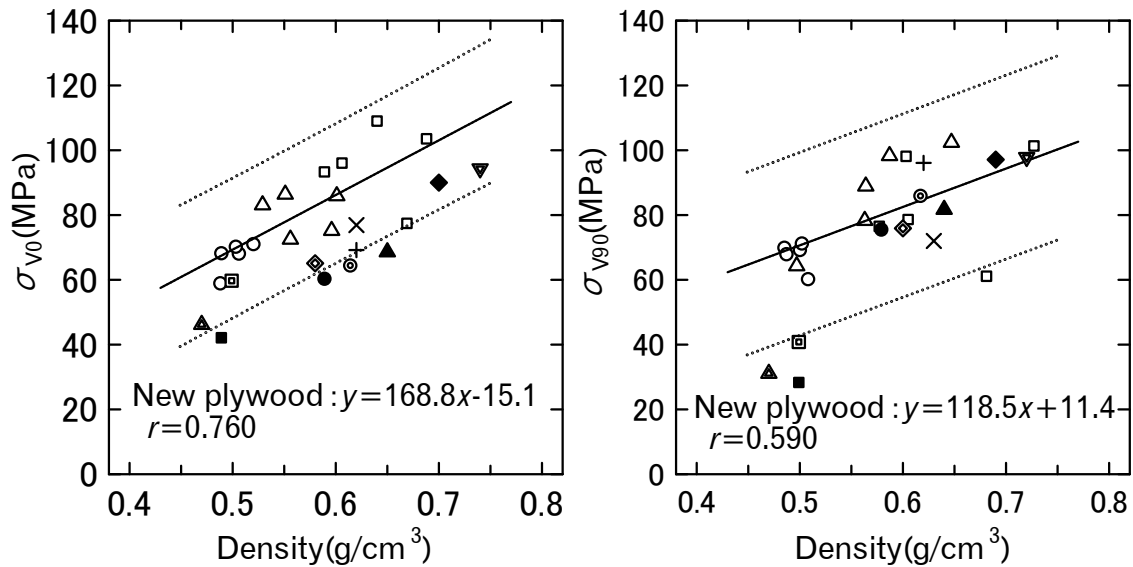


Fig.35. Relationship between density and  $\sigma_v$ .

Legend: Refer to Fig.34.

Note: The solid line and the dotted lines are same as Fig.34.

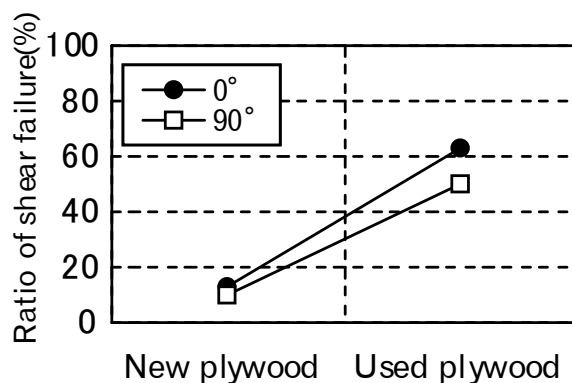


Fig.36. Ratio of shear failure in bending test of actual use.

### 5.3.3 促進劣化試験における合板の面内せん断性能低下

常態時および促進劣化処理した合板について、密度と  $G$  および  $\tau$  の関係を Fig.37 に示す。試験時の合板の破壊形態は、いずれも鋼製レール間の試験体のせん断破壊であり、ボルト穴のめり込みによる割裂等は認められなかった。青木<sup>164)</sup>は市販の構造用合板 7 種類について密度と  $G$  および  $\tau$  の関係を求めており、両者に非常に高い相関関係を認めている。本研究においても、常態時における合板の  $G$  および  $\tau$  は密度と高い正の相関が認められた。面内せん断性能は煮沸処理回数の増加とともに低下したが、合板密度と性能低下の間に明

確な傾向は認められなかった。処理回数と  $G$  および  $\tau$  の残存率の関係を Fig.38 に示す。6 回処理後の残存率は  $G$  で 0.72、 $\tau$  で 0.66 となり、 $G$  よりも  $\tau$  の低下が著しかった。吉田ら<sup>156)</sup> は屋外暴露した合板のせん断性能の低下は、 $\tau$  よりも  $G$  で顕著であると報告しており、本研究とは逆の結果を得ている。吉田らの試験ではフェノール樹脂接着剤による合板を用いていることから、屋外暴露による合板の劣化は主に表層単板の割れの影響を指摘している。本研究で使用した合板はメラミン樹脂系接着剤を用いているため、表層単板の割れよりも接着層の劣化の方が顕著に出現し、これが  $\tau$  の性能低下に影響したものと推察される。

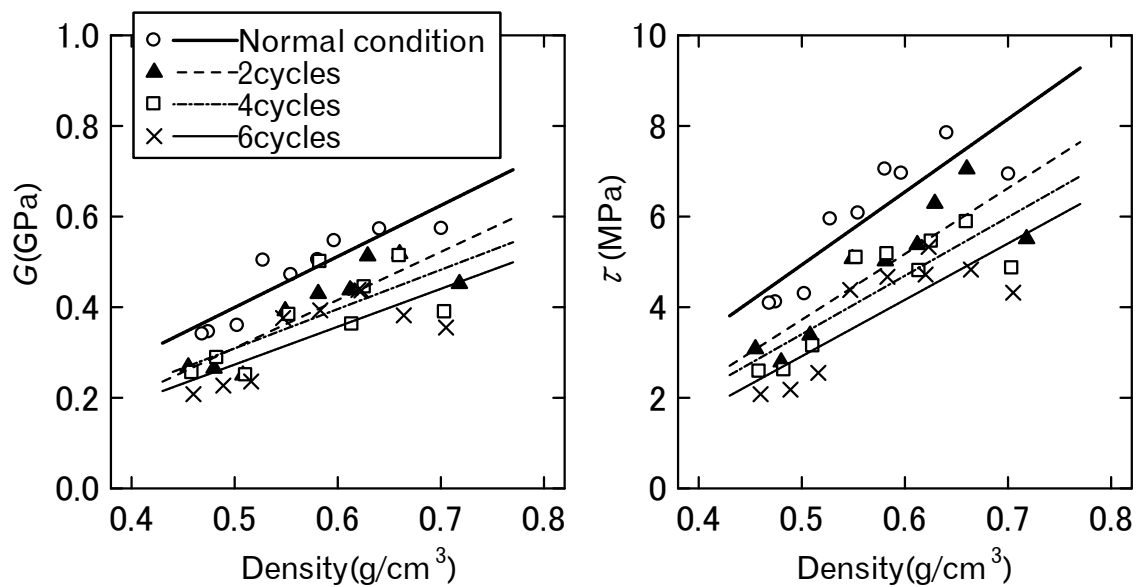


Fig.37. Relationship between density and shear properties in accelerated aging treatments.

Note:

The regression lines are as follows.

Normal condition:  $G$  ;  $y=1.13x-0.164$ ,  $\tau$ ;  $y=16.1x-3.11$

2cycles:  $G$  ;  $y=1.06x-0.221$ ,  $\tau$ ;  $y=14.5x-3.54$

4cycles:  $G$  ;  $y=0.868x-0.125$ ,  $\tau$ ;  $y=12.9x-3.05$

6cycles:  $G$  ;  $y=0.836x-0.145$ ,  $\tau$ ;  $y=12.4x-3.30$

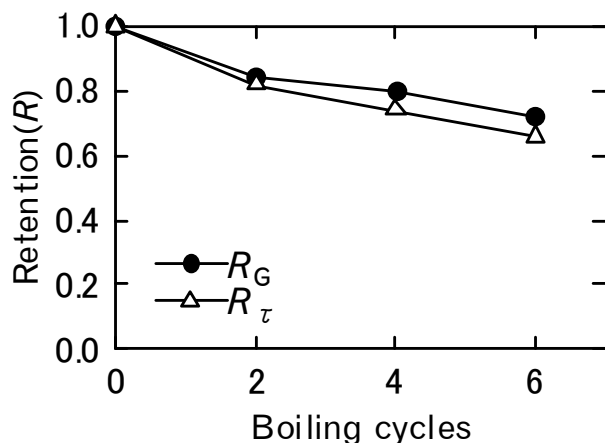


Fig.38. Shear performance retention in accelerated aging treatments.

#### 5.3.4 実用環境における合板の面内せん断性能

合板の面内せん断試験結果を Table 15 に示す。また、新品合板および解体合板について、密度と  $G$  および  $\tau$  の関係を Fig.39 に示す。現行の合板の JAS（構造用合板 1 級）では、 $\tau$  の基準値を 3.2MPa と定めているが、新品合板、解体合板ともこの基準値を上回っており、30 年程度の実使用では JAS の要求性能を満たしていることが確認された。しかし、解体合板の  $G$  および  $\tau$  の分布は新品合板の分布とは明らかに異なっており、長期使用により性能が低下したものと考えられる。名波ら<sup>165)</sup>は枠組壁工法の外壁下地に使用された特類合板の面内せん断試験の結果、長期使用による  $G$  や  $\tau$  の低下を示唆している。また、湿潤状態における合板の  $G$  の低下は著しいこと<sup>148,166)</sup>などから判断しても、長期間の温湿度変化や外力の作用による合板の面内せん断性能の低下は比較的顕著であるものと推察される。

Table 15. Results of edgewise shear test.

| Mark of plywood | $n$ | Density(g/cm <sup>3</sup> ) |       | $G$ (GPa) |       | $\tau$ (MPa) |       |
|-----------------|-----|-----------------------------|-------|-----------|-------|--------------|-------|
|                 |     | Ave                         | CV(%) | Ave       | CV(%) | Ave          | CV(%) |
| NP1             | 15  | 0.48                        | 3.9   | 0.35      | 10.3  | 4.10         | 6.0   |
| NP2             | 15  | 0.56                        | 8.7   | 0.51      | 8.2   | 6.39         | 13.5  |
| NP3             | 15  | 0.65                        | 10.2  | 0.53      | 9.2   | 6.92         | 8.2   |
| A30-JF          | 2   | 0.57                        | —     | 0.37      | —     | 4.14         | —     |
| B30-LF          | 2   | 0.61                        | —     | 0.35      | —     | 3.80         | —     |
| C28-KF          | 3   | 0.45                        | 2.9   | 0.30      | 5.2   | 3.31         | 6.1   |
| E25-LF          | 3   | 0.68                        | 0.3   | 0.35      | 3.2   | 4.14         | 3.2   |
| F33-JF          | 3   | 0.61                        | 0.4   | 0.36      | 7.9   | 5.12         | 1.5   |
| F33-JF2         | 3   | 0.63                        | 2.4   | 0.39      | 10.5  | 4.43         | 8.5   |
| G28-SF          | 3   | 0.62                        | 0.1   | 0.37      | 3.0   | 4.61         | 1.3   |
| H29-JF          | 3   | 0.46                        | 1.2   | 0.32      | 2.5   | 3.32         | 2.9   |
| H29-JF2         | 3   | 0.49                        | 1.9   | 0.30      | 1.7   | 3.81         | 2.8   |
| I24-LF          | 3   | 0.69                        | 1.2   | 0.44      | 5.1   | 5.34         | 3.1   |
| I24-WF          | 3   | 0.59                        | 1.2   | 0.42      | 5.6   | 4.76         | 5.2   |

Note:

$n$ : Number of specimen, Ave, CV: Refer to Table 2.

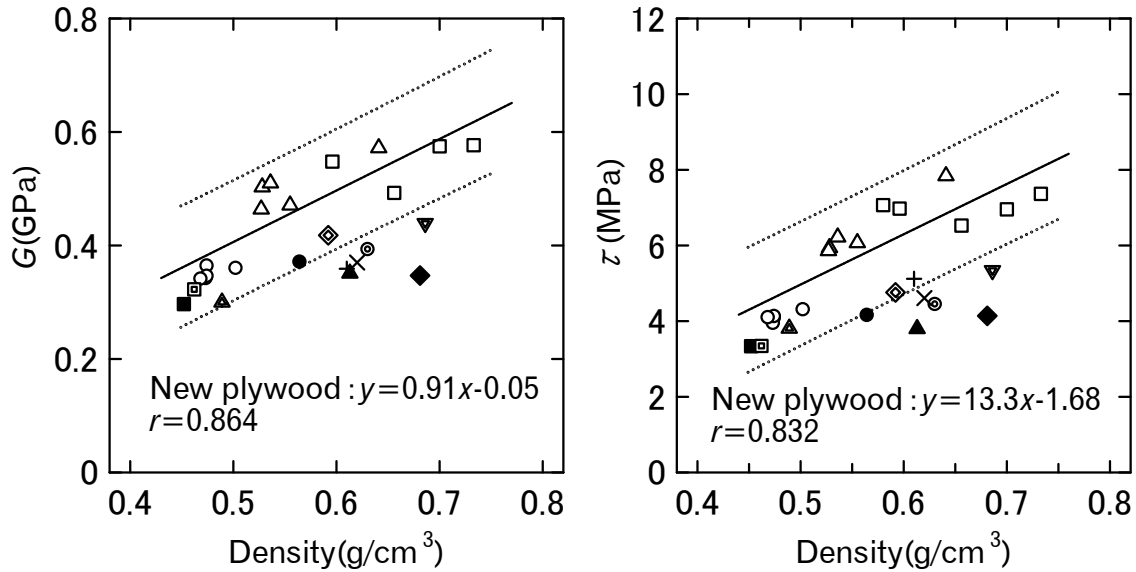


Fig.39. Relationship between density and shear properties of plywood in actual use.

Legend: Refer to Fig.34.

Note: The solid line and the dotted lines are same as Fig.34.

### 5.3.5 実用環境下での性能劣化評価

解体合板の曲げおよび面内せん断性能の劣化を明確化するために、4.3.4 節と同様の手法により性能劣化評価を試みた。すなわち、解体合板の各種性能残存率  $R$  を次式から求めた。

$$R = S / (a\rho + b) \quad (23)$$

ここで、 $S$  は解体合板の各種性能の平均値、 $a$  は新品合板の回帰直線の傾き、 $\rho$  はそれぞれの解体合板の平均密度、 $b$  は新品合板の回帰直線の  $y$  切片である。

(23) 式により算出した解体合板の各種性能残存率を Table 16 に示す。まず、曲げ性能について着目すると、曲げヤング係数残存率 ( $R_{EV0}$ ,  $R_{EV90}$ ) は 1.0 の周囲に分散しており、性能劣化が軽微であることがわかるが、劣化が軽微な場合の残存率の精度は低いため<sup>109)</sup>、ここでの詳細な考察は割愛する。0 度方向の曲げ強さ残存率 ( $R_{\sigma V0}$ ) は 0.63~0.88、90 度方向の曲げ強さ残存率 ( $R_{\sigma V90}$ ) は 0.39~1.13 となり、90 度方向でのバラツキが大きくなった。C28-KF、H29-JF、H29-JF2 では  $R_{\sigma V90}$  が特に低い、これらの合板は採取時含水率が比較的 low、接着性能の低下についても軽微である<sup>109)</sup> ことから、本試験の結果のみから残存率が低くなった原因を特定することは困難である。考えられる原因の一つとして、当初の型枠用合板の JAS では 90 度方向の曲げ性能の規定が無く、厳密な品質管理がなされて

いなかったことから、90 度方向の曲げ強さが施工当初から低かった可能性が推察される。前章で求めた接着性能（せん断強さ）の残存率( $R_{ss}$ )と  $R_{\sigma v0}$ 、 $R_{\sigma v90}$  の関係を Fig.40 (A)に示すが、両者の間には明確な相関が認められず、JAS による規定のない 90 度方向の性能については大きく変動していることがわかる。さらに、促進劣化試験では、前述のように高密度合板の接着層のはく離率が高く、その影響からか 0 度方向の曲げ強さの低下も高密度合板で顕著になっているが、実用環境ではそのような傾向が認められなかった。このように促進劣化試験と実用環境での劣化傾向が異なった理由の一つとして、曲げ性能の低下には接着性能の劣化が影響するのみならず、合板中の部分的な欠点や試験体の局所的な繊維走行などの多くの因子の影響を受け、その劣化機構が複雑であることが挙げられる。また、合板の製造においては、0 度方向と 90 度方向の単板で樹種や品質の異なるものを使用する場合があり<sup>167)</sup>、例えば 0 度方向に高密度、90 度方向に低密度の単板を使用した場合、(17)式から明らかなように 0 度方向のみが高強度の合板になると考えられ、この場合、本研究のように採取合板の密度から予測した合板の曲げ強さは、0 度方向では過小評価、90 度方向では過大評価することになる。従って、実用環境での合板の曲げ性能低下を的確に評価するためには、各層の単板品質の違いを考慮する必要があると考えられる。

次に面内せん断性能について着目すると、せん断弾性係数残存率 ( $R_G$ ) は 0.61~0.85、面内せん断強さ残存率 ( $R_t$ ) は 0.59~0.80 であり、残存率は概ね  $R_G > R_t$  となり、促進劣化試験における傾向と同様であった。接着性能の残存率( $R_{ss}$ )と  $R_G$  および  $R_t$  の関係 Fig.40 (B)では、 $R_G$  および  $R_t$  は概ね  $R_{ss}$  よりやや高い値となり、両者には正の相関が認められた。従って、合板の面内せん断性能の低下は接着性能の低下と密接に関連しているものと推察される。

Table 16. Calculated value of bending and panel shear properties retention in actual use.

| Mark of plywood | $R_{EV0}$ | $R_{EV90}$ | $R_{\sigma V0}$ | $R_{\sigma V90}$ | $R_G$ | $R_\tau$ |
|-----------------|-----------|------------|-----------------|------------------|-------|----------|
| A30-JF          | 0.79      | 0.92       | 0.70            | 0.93             | 0.80  | 0.71     |
| B30-LF          | 0.80      | 1.18       | 0.73            | 0.94             | 0.69  | 0.59     |
| C28-KF          | 0.92      | 0.76       | 0.63            | 0.39             | 0.80  | 0.76     |
| E25-LF          | 1.13      | 1.27       | 0.88            | 1.04             | 0.61  | 0.56     |
| F33-JF          | 0.93      | 1.17       | 0.72            | 1.01             | 0.71  | 0.80     |
| F33-JF2         | 0.92      | 1.08       | 0.78            | 1.13             | 0.75  | 0.66     |
| G28-SF          | 1.02      | 0.77       | 0.86            | 0.83             | 0.72  | 0.70     |
| H29-JF          | 1.02      | 0.91       | 0.86            | 0.57             | 0.85  | 0.74     |
| H29-JF2         | 1.10      | 1.21       | 0.73            | 0.46             | 0.75  | 0.79     |
| I24-LF          | 1.05      | 1.01       | 0.86            | 1.01             | 0.77  | 0.72     |
| I24-WF          | 1.09      | 0.83       | 0.78            | 0.92             | 0.85  | 0.77     |

Note:

$R_{EV0}$ : Modulus of elasticity retention parallel to the grain direction of face veneer.

$R_{EV90}$ : Modulus of elasticity retention perpendicular to the grain direction of face veneer.

$R_{\sigma V0}$ : Bending strength retention parallel to the grain direction of face veneer.

$R_{\sigma V90}$ : Bending strength retention perpendicular to the grain direction of face veneer.

$R_G$ : Modulus of rigidity retention.

$R_\tau$ : In-plane shear strength retention.

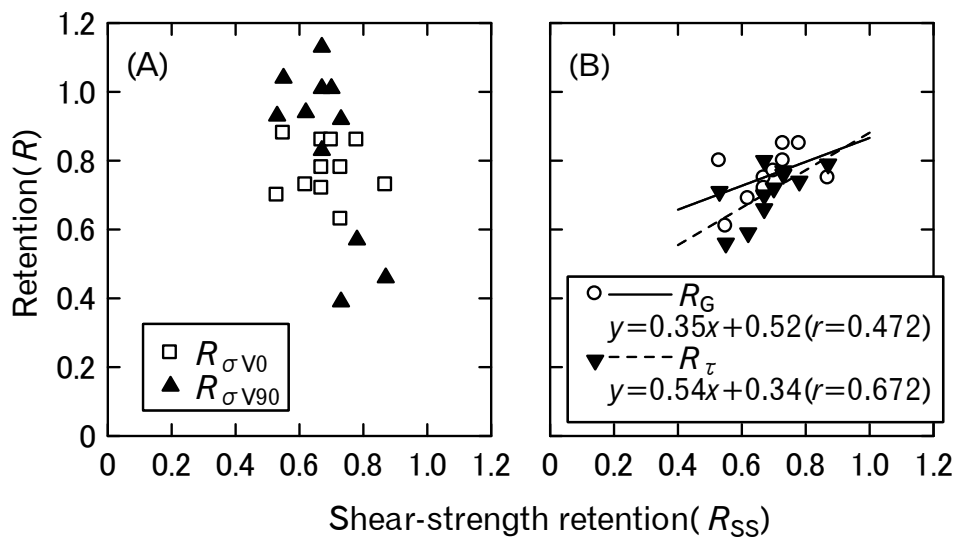


Fig.40. Relationship between shear-strength retention ( $R_{SS}$ ) and  $R_\sigma$ ,  $R_G$ , or  $R_\tau$ .



### 5.3.6 促進劣化試験と実用環境下での性能劣化の関係

煮沸処理回数および使用年数と残存率の関係について、近似曲線を当てはめることで、両者の性能劣化比較を試みた。ここでは実用環境での性能劣化が軽微である  $R_{EV0}$  および  $R_{EV90}$  と初期値の推定精度が低いと考えられる  $R_{\sigma v90}$  を除外し、比較的推定精度が高いと思われる  $R_{\sigma v0}$ 、 $R_G$  および  $R_t$  について着目した。合板密度と性能劣化の関係については、促進劣化試験と実用環境において統一した見解が得られなかったため、密度を一括して曲線近似することとした。近似式には、促進劣化試験での決定係数が高かった  $R=k'$  ( $k$  は劣化速度定数、 $t$  は煮沸処理回数  $N$  または使用年数  $X$ )<sup>147)</sup> を採用した。煮沸処理回数および使用年数と残存率の関係とこれらの近似曲線を Fig.41 に示す。劣化速度定数  $k$  は、促進劣化試験で 0.90~0.94、実用環境で 0.99 程度となり、これらはいずれも接着性能試験における定数よりも大きく、接着性能低下よりは軽微であることがわかる。促進劣化試験と実用環境での近似式から残存率  $R$  を消去し、煮沸処理回数 ( $N$ ) と使用年数 ( $X$ ) の関係 ( $X/N$ ) を求めてみると、 $R_{\sigma v0}$  で 11.3、 $R_G$  で 5.9、 $R_t$  で 6.2 となった。すなわち、煮沸処理 1 サイクルと同程度の性能低下を引き起こす使用年数は、曲げ強さ (0 度方向) で約 11 年、面内せん断性能で約 6 年と算出された。しかし、実用環境下での残存率自体の誤差や各種性能のバラツキの大きさ等を考慮すると、この時間換算の数値はおおよその目安として捉えるべきであろう。

長期使用時における合板の曲げ強さおよび面内せん断強さの劣化挙動を把握するために、Fig.41 に示した実用環境での劣化曲線について、縦軸をそれぞれの強度に置き換え、時間軸の外挿を試みた。ここでは、安全側の評価として強度性能の低い低密度合板 (密度  $0.45\text{g/cm}^3$ ) に着目し、合板の初期の  $\sigma_{v0}$  および  $\tau$  は、Fig.35 および Fig.39 の下限値であるものとし、Fig.41 の実用環境での劣化曲線のように強度が低下するものと仮定する。なお、 $\sigma_{v0}$  は単板の曲げ性能を示したものであるため、ここでは(21)式の  $Z_0/Z_p$  をこれに乗じて合板の曲げ性能に逆算した。 $Z_0/Z_p$  については、市販の 5 プライ合板の標準的な値として  $0.6^{168)}$  を用いた。試算結果を Fig.42 に示す。現行の木質構造設計基準<sup>148)</sup>では、南洋材合板を対象とした構造成用合板 1 級 (12mm 厚) の許容応力度の最低の基準は、曲げ強さで 5.5MPa、面内せん断強さで

1.2MPa と定めている。本試算においては、曲げ強さは数十年程度の使用では許容応力度の基準を満たしているが、面内せん断強さでは、70 年程度でこれを下回る結果となった。ただし、合板の JAS での 12mm 厚合板の 0 度方向の曲げ性能の規定においては、構造用合板 1 級よりも型枠用合板の方が高い性能が要求されており、規格上の初期基準値が異なることを念頭に置く必要がある。今後、これらの劣化予測精度を向上させるためには、各層の単板品質の考慮、調査データ数の増加、あるいは使用環境ごとの分類等の詳細な検討が必要である。また、より信頼性のある資料とするためには、現行規格に従って製造された構造用合板での調査データの蓄積が望まれる。

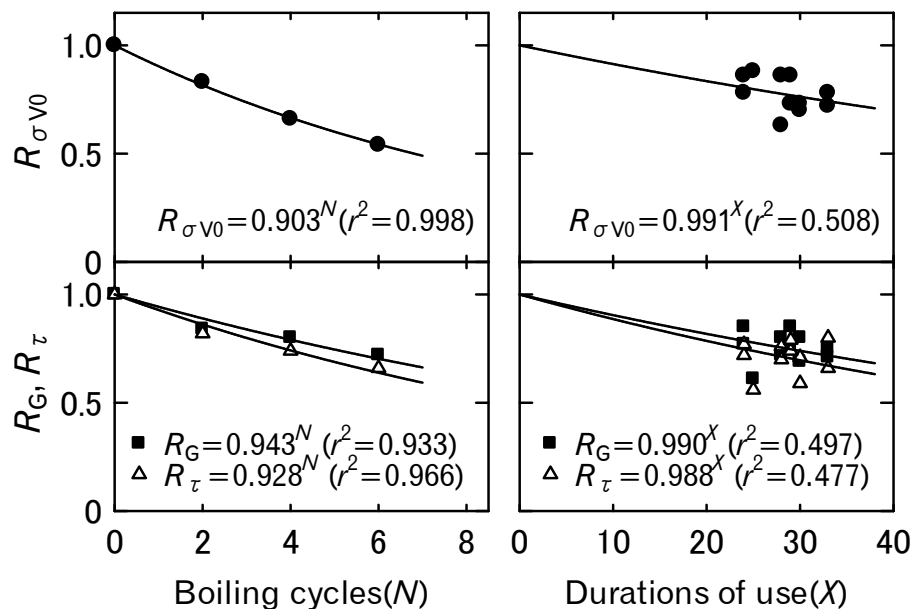


Fig.41. Bending and shear performance retention in accelerated aging treatments and actual use.

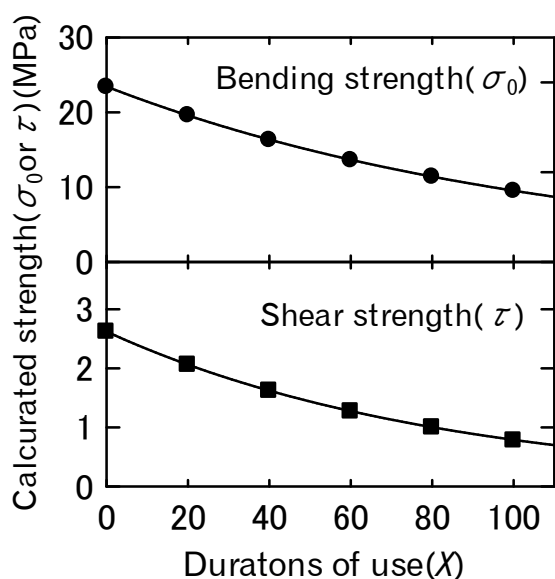


Fig.42. Calculated bending and shear strength for long periods.

#### 5.4 結論

築後 24～33 年経過した住宅から床下地に使用された型枠用合板を採取し、曲げ性能および面内せん断性能を調査した。また、市販の新品合板について促進劣化処理によるこれらの性能低下を調べ、実用環境での劣化と比較した。

煮沸繰り返しによる促進劣化処理では、高密度の合板ほどはく離が大きくなる傾向が認められた。また、曲げ試験においては処理回数の増加とともにせん断破壊する試験体の割合が増加したことから、接着性能低下の影響が示唆された。煮沸処理を 6 回繰り返した後の各種性能残存率は、 $E_v$  および  $G$  で 0.7～0.8、 $\sigma_v$  で 0.5～0.6、 $\tau$  で 0.6～0.7 となり、いずれも前章で求めた接着性能の残存率の 0.4～0.5 よりも高い値を示した。 $\sigma_{v0}$  においては高密度合板ほど性能低下が顕著であったが、その他の性能では密度と性能低下に明確な傾向は認められなかった。

実用環境下においては、床下地材として長期使用した後も、曲げ性能、面内せん断性能とともに、概ね現行の合板の JAS 基準（構造用合板 1 級）を満たす性能を保持していた。また、曲げ試験においては、解体合板は新品合板よりもせん断破壊の割合が多くなり、促進劣化試験と同様の傾向を示したことから、接着性能低下の影響が示された。新品合板の密度と各種性能の関係を用いて残存率を算出すると、解体合板の残存率は、剛性よりも強度

において低い値となり、促進劣化試験と同様の傾向を示した。しかし、解体合板の曲げ性能残存率と接着性能残存率には明確な相関は認められず、劣化に及ぼす影響因子が明確ではなかったことから、実用環境での合板の曲げ性能低下を的確に評価するためには、各単板層の材質を考慮するなど、より詳細な検討が必要と考えられた。

煮沸処理回数および使用年数と残存率の関係について、近似曲線を求めることで、煮沸処理 1 サイクルと同等の性能低下を引き起こす使用年数が算出でき、長期使用時の性能低下を推定できる可能性が示された。

## 第 6 章 床下地材として長期使用された合板の釘接合性能劣化評価

### 6.1 はじめに

第 4 章および第 5 章では実際の住宅に使用された合板の接着・曲げ・面内せん断性能の劣化を調べるとともに、長期使用された合板の性能劣化予測を試みた。床下地材として合板を使用する際、床構面に作用する地震力や風圧力をバランス良く耐力壁に伝達することが重要であることはすでに述べたが、その際に重要となるのが釘接合部の性能である。長期間の使用によって釘接合性能に変化が生じた場合、耐力壁や床水平構面等の構造耐力要素としての性能に大きく影響することが予測されるため、接合部の性能変化を明確化することは非常に重要である。構造耐力要素の長期使用による性能低下を調べる手法としては、長期使用後の耐力壁や床水平構面を取り出して面内せん断試験を行うことが最も正確であると考えられるが、構造体を損傷することなく取り出すことは現実的には不可能に近い。一方で、耐力壁や床水平構面としての面内せん断性能は、面材料の面内せん断剛性や釘接合部の一面せん断性能がわかれば、計算により求められることが示されており<sup>169-171)</sup>、長期使用後の面材料を部分的に取り出してこれらの試験を行うことで、構造耐力要素の性能劣化をある程度推定可能であると思われる。構造耐力要素の経年劣化は、合板自体の劣化、釘の腐食<sup>172)</sup>、主材の腐朽による劣化<sup>173)</sup>等が複雑に関与すると考えられるが、これらの劣化をまとめて扱うことは困難であるとともに本論文では合板の劣化に主眼を置いていることから、ここでは実使用時の合板自体の経年劣化を調べることにした。

本章では、住宅の床下地材として長期使用された合板について、釘側面抵抗性能、釘頭貫通性能、および釘一面せん断性能を調べ、これまでと同様の手法により性能低下の数値化を試みた。また、これらの試験結果から、床水平構面としての性能低下の推定を試みた。

### 6.2 試験方法

#### 6.2.1 調査物件と採取材料の概要

調査物件と採取材料の概要を Table 17 に示す。物件 F～I は 4.2.1 節と同様であり、物件

J のみが新たに追加した物件である。比較対照用の新品合板についても前報と同様の 3 種類の南洋材合板（JAS1 類、B-C、12mm 厚、メラミン・ユリア共縮合樹脂接着剤（MUF）使用：記号 NP1、NP2、NP3）をそれぞれ 5 枚ずつ用意した（以下、新品合板とする）。

Table 17. Summary of the houses and plywood.

| Mark of house | Area    | Construction method | Durations of use | Total floor area(m <sup>2</sup> ) | Mark of plywood | The gathering place              | Composition of floor | Dampproof sheet |
|---------------|---------|---------------------|------------------|-----------------------------------|-----------------|----------------------------------|----------------------|-----------------|
| F             | Muroran | JC                  | 33               | 99.37                             | F33-JF          | Japanese style room of 1st floor | III                  | ○               |
|               |         |                     |                  |                                   | F33-JF2         | Japanese style room of 2nd floor | III                  | ○               |
| G             | Sapporo | JC                  | 28               | 100.52                            | G28-SF          | Store room of 2nd floor          | IV                   | ×               |
| H             | Sapporo | JC                  | 29               | 111.78                            | H29-JF          | Japanese style room of 1st floor | III                  | ○               |
|               |         |                     |                  |                                   | H29-JF2         | Japanese style room of 2nd floor | III                  | ○               |
|               |         |                     |                  |                                   | H29-LF          | Living room of 1st floor         | III                  | ○               |
| I             | Kushiro | JC                  | 24               | 161.68                            | I24-LF          | Living room of 1st floor         | V                    | ○               |
|               |         |                     |                  |                                   | I24-WF          | Western style room of 2nd floor  | V                    | ×               |
| J             | Sapporo | JC                  | 30               | 103.68                            | J30-WF          | Western style room of 1st floor  | II                   | ○               |

Note:

JC, I, II, III, IV, V, ○, ×: Refer to Table 11.

## 6.2.2 釘側面抵抗試験

試験は ASTM D1037<sup>160)</sup> に準じて行った。試験体は、50×100mm とし、釘位置は長さ方向の端から 12mm の位置とした (Fig.43)。加力用釘は、CN50 では最大耐力に到達する前に釘が折れ曲がり、合板の性能を適切に評価できないため、直径 2.9mm 長さ 50mm の高速度工具鋼鋼材 SKH51 を用い、直径 2.5mm の先穴を開けてからこれを打ち込んだ。加力スケジュールは一方加力とし、速度 2mm/min で荷重が最大耐力 ( $P_{max}$ ) の 80%未満に低下するまで加力した。また、枠組壁工法建築物構造計算指針に従い、荷重変位曲線において 0.1  $P_{max}$  と 0.4  $P_{max}$  の 2 点を直線で結び、初期剛性 ( $K$ ) を算出した。試験体は、表層繊維と長手

方向が平行なもの（0度）と直交するもの（90度）を合板1枚からそれぞれ3体ずつ採取した。3体の試験終了後に試験体の上下を逆にして再度試験を行い、繰り返し数は合計6体とした。

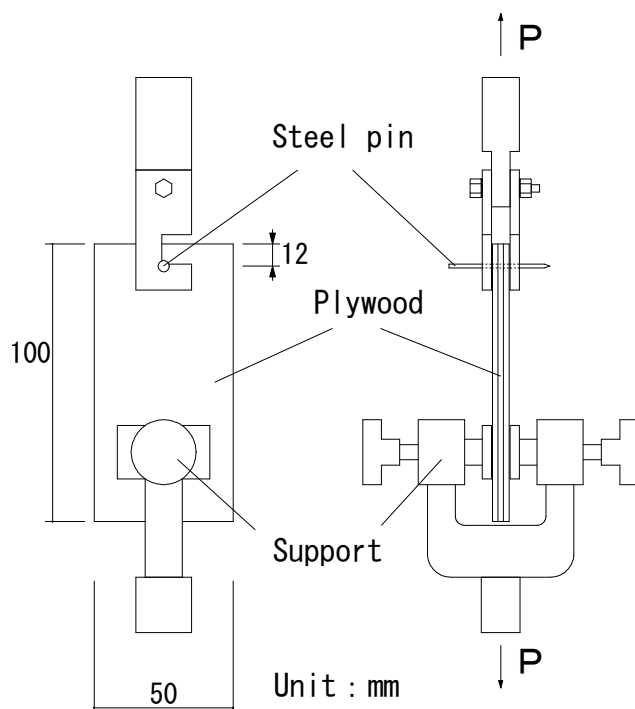


Fig.43. Method of lateral nail resistance test.

### 6.2.3 釘頭貫通試験

試験は ASTM D1037<sup>160)</sup>に準じて行った。試験体は、75×75mmとし、試験体中央部に直径 2.5mm の先穴を開けてから CN50 釘を打ち込んだ (Fig.44)。釘の胴部をチャックで掴み、加力速度 1.5mm/min で荷重が最大荷重の 80%未満に低下するまで加力した。試験体は合板1枚から3体ずつ採取した。

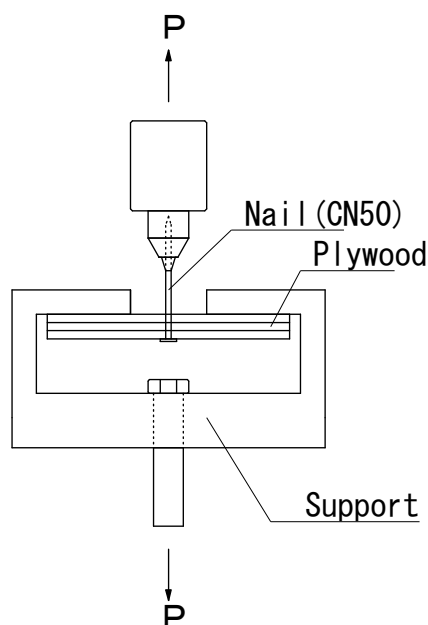


Fig.44. Method of nail-head pull-through test.

#### 6.2.4 釘一面せん断試験

合板釘打ち接合部の荷重－すべり関係を得るため、Fig.45 に示す釘一面せん断試験を行った。合板の表板および主材の繊維方向は、加力方向に対し平行とした。主材には、寸法  $50 \times 105 \times 190\text{mm}$  のオウシュウアカマツ構造用集成材 (E95－F315、平均気乾密度  $0.53\text{g/cm}^3$ 、変動係数 4.2%) を用いた。側材寸法は  $12 \times 50 \times 170\text{mm}$  とし、あらかじめ直径 2.5mm の先穴をあけてから CN50 釘を打ち込んだ。主材と側材の間には、初期摩擦が生じないように 0.6mm 程度のギャップを設けた。試験体の作製にあたっては、主材の気乾密度の平均値と分布範囲がそれぞれの試験体でほぼ同じになるように振り分けた。試験はテンシロン万能試験機を用いて行った。加力方法は正負交番繰り返し加力とし、繰り返し設定変位は、0.25、0.5、1.0、2.0、4.0mm 各 1 回ずつとした。加力速度は  $5\text{mm/min}$  とし、荷重が最大耐力の 80% 未満に低下するまで加力を続けた。合板 1 枚あたりの試験体数は、新品合板は 3 体、解体合板は 6 体とした。なお、上記の面内せん断試験、釘側面抵抗試験、釘頭貫通試験および釘一面せん断試験は、いずれも合板試験体を  $20^\circ\text{C}65\%\text{R.H}$  の恒温恒湿室内で調湿し、重量が恒量に達した後に行った。



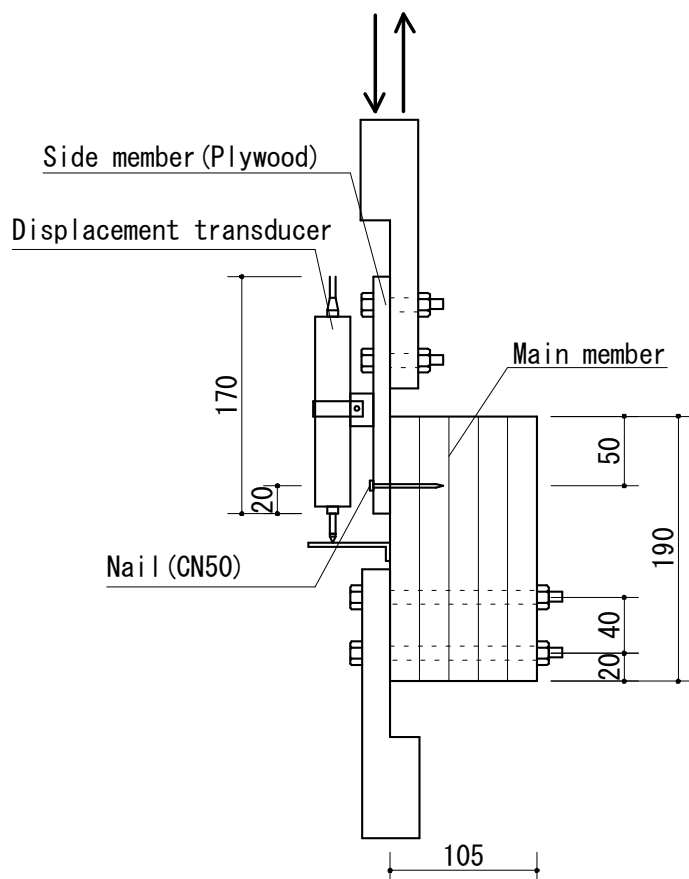


Fig.45. Method of single shear joint test.

## 6.3 試験結果

### 6.3.1 釘側面抵抗性能

釘側面抵抗試験結果を Table 18 に示す。0 度方向と 90 度方向の特性値を比較すると、概ね 90 度方向が高い値を示し、これはラーチ 3ply 合板<sup>106,174)</sup>や南洋材 5ply 合板<sup>175)</sup>による既往の報告と同様の傾向であった。荷重変位曲線の例を Fig.46 に示す。新品合板では最大耐力に到達後も急激に荷重が低下せず、比較的粘り強い破壊を示した。解体合板においても概ね新品合板と同様の荷重変位曲線となったが、G28-SF 等の一部の試験体で最大耐力到達後に急激に荷重が低下するものが存在した。合板の密度と  $P_{\max}$  の関係を Fig.47 に示す。新品合板では密度と  $P_{\max}$  の相関係数は、0 度方向で 0.88、90 度方向で 0.93 と非常に高く、1% 水準で有意であった。 $P_{\max}$  は 0 度、90 度方向とも、解体合板の値は概ね新品合板の回帰直線の下部に分布しており、長期使用によって性能が低下したものと考えられる。

Table 18. Results of lateral nail resistance test.

| Mark of plywood | 0°                          |                 |             |          | 90°                         |                 |             |          |
|-----------------|-----------------------------|-----------------|-------------|----------|-----------------------------|-----------------|-------------|----------|
|                 | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $P_{\max}$ (kN) | $K$ (kN/mm) | $R_{LN}$ | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $P_{\max}$ (kN) | $K$ (kN/mm) | $R_{LN}$ |
| NP1             | 0.49(5.6)                   | 1.08(11.6)      | 1.84(21.1)  | —        | 0.48(5.6)                   | 1.24(8.2)       | 2.03(16.8)  | —        |
| NP2             | 0.58(9.2)                   | 1.87(19.2)      | 2.14(14.2)  | —        | 0.58(10.9)                  | 2.03(18.9)      | 2.31(13.8)  | —        |
| NP3             | 0.67(10.0)                  | 2.27(14.2)      | 2.62(18.3)  | —        | 0.69(9.4)                   | 2.39(18.4)      | 2.54(19.6)  | —        |
| F33-JF          | 0.62(0.6)                   | 1.61(5.1)       | 1.50(12.6)  | 0.83     | 0.62(0.9)                   | 1.52(3.6)       | 1.77(11.0)  | 0.74     |
| F33-JF2         | 0.63(2.1)                   | 1.44(8.2)       | 2.01(21.0)  | 0.73     | 0.61(0.5)                   | 1.42(12.2)      | 2.42(16.1)  | 0.70     |
| G28-SF          | 0.68(0.7)                   | 1.63(9.3)       | 2.40(12.1)  | 0.73     | 0.66(1.7)                   | 1.81(7.4)       | 2.40(18.5)  | 0.80     |
| H29-JF          | 0.49(0.7)                   | 1.09(2.3)       | 2.12(10.4)  | 0.88     | 0.46(0.8)                   | 0.99(5.6)       | 1.52(26.3)  | 0.83     |
| H29-JF2         | 0.50(1.8)                   | 1.18(3.8)       | 2.40(24.0)  | 0.90     | 0.47(2.7)                   | 1.11(9.6)       | 1.60(29.0)  | 0.88     |
| H29-LF          | 0.44(0.8)                   | 0.94(5.5)       | 1.82(20.6)  | 0.94     | 0.45(1.1)                   | 1.10(6.5)       | 1.34(18.2)  | 0.98     |
| I24-LF          | 0.69(1.0)                   | 1.66(15.3)      | 2.29(10.2)  | 0.73     | 0.71(4.2)                   | 1.87(13.2)      | 2.41(19.2)  | 0.73     |
| I24-WF          | 0.59(0.6)                   | 1.30(7.6)       | 2.71(6.5)   | 0.73     | 0.58(1.1)                   | 1.62(5.5)       | 2.04(9.1)   | 0.87     |
| J30-WF          | 0.56(0.3)                   | 1.23(7.0)       | 2.13(14.5)  | 0.75     | 0.55(1.4)                   | 1.22(7.1)       | 2.60(16.5)  | 0.73     |

Note:

$K$ : Initial stiffness,  $R_{LN}$ : Retention of  $P_{\max}$  in lateral nail resistance test,

Parenthetic value means coefficient of variation.

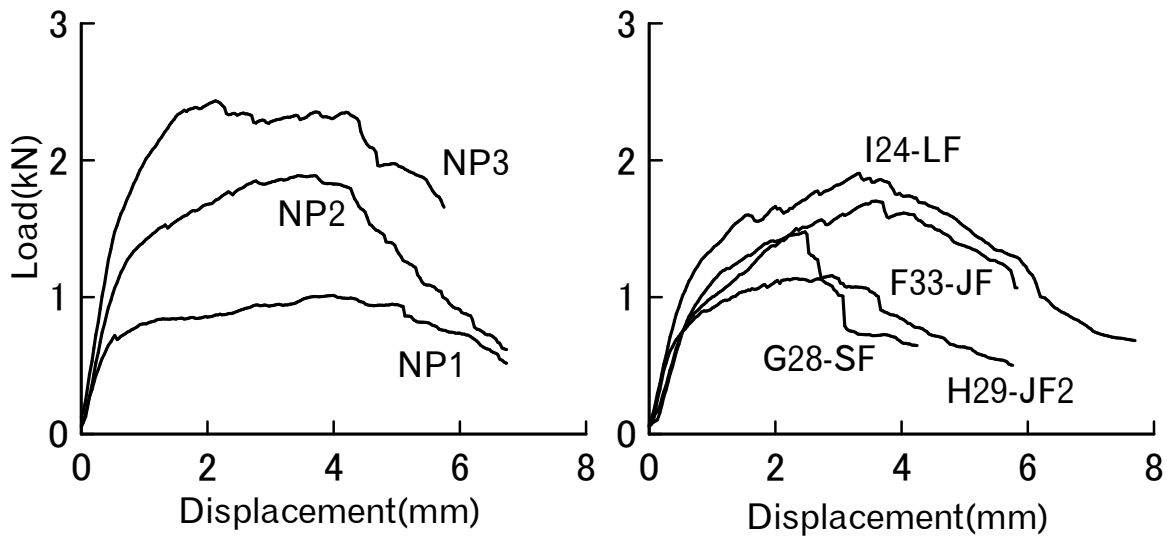


Fig.46. Typical load-displacement curves in ateral nail resintance tests.

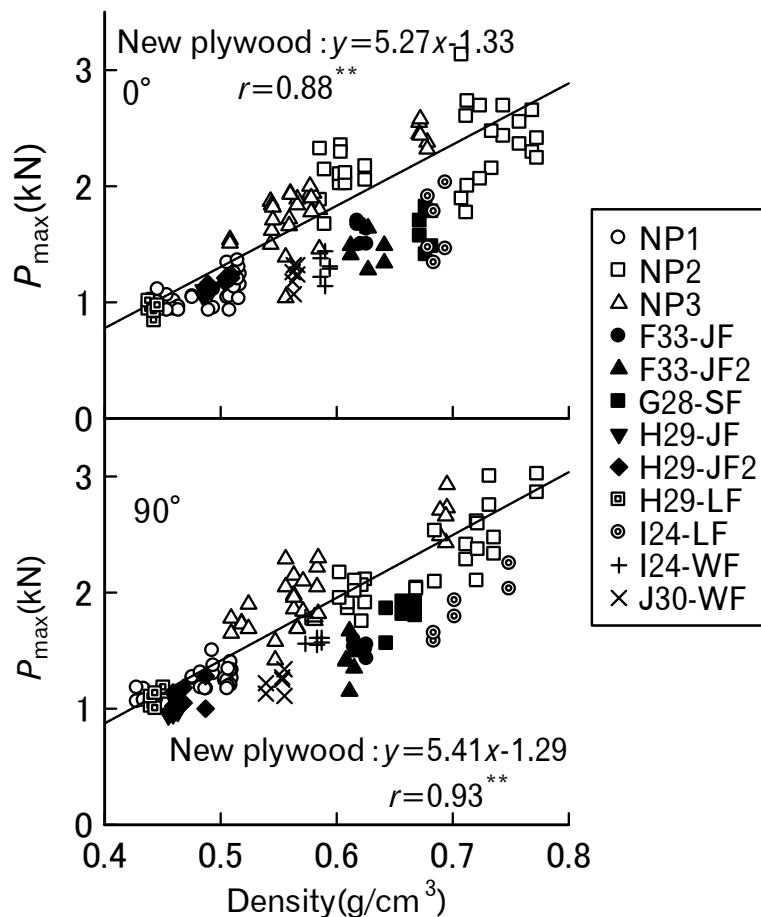


Fig.47. Relationship between density and  $P_{\max}$  of plywood in lateral nail resistance tests.

Note: \*\*: Significant at 1% level.

新品合板の密度と  $P_{\max}$  の回帰直線を利用して、4.3.4 節と同様の手法により残存率の算出を行った。以降すべての性能において同様の手法で残存率を算出することとする。釘側面抵抗試験における  $P_{\max}$  の残存率  $R_{\text{LN}}$  を求めたものを Table 18 に併せて示す。名波<sup>174)</sup>はラージ 3ply 合板に水分作用処理を繰り返し行い、側面抵抗性能を調べた結果、0 度方向より 90 度方向の劣化が大きいことを報告しており、これは加力方向に対して木材繊維方向が直交する単板は平行な単板よりも抵抗性能が大きい、水分作用による性能低下は直交方向の単板が大きいためであるとしている。本研究における  $R_{\text{LN}}$  は 0.70~0.98 となり、0 度方向と 90 度方向で性能の違いは認められなかった。これは、名波の報告では等厚の 3ply 合板を使用したため、平行方向と直交方向の単板の構成比率に大きな差があるが、本研究で測定した合板はすべて 5ply 合板であり、構成比率にほとんど差が無かったためと考えられる。

密度と初期剛性( $K$ )の関係を Fig.48 に示す。密度と  $K$  の間の相関係数は、0 度方向で 0.66、90 度方向で 0.55 となり、いずれも 1%水準で有意であったが、密度と  $P_{\max}$  の関係と比較すると相関は低かった。解体合板の値は新品合板と同様にバラツキがやや大きく、新品合板の回帰直線の上下に分散しており、両者に明確な差は認められなかった。合板の釘側面抵抗試験における  $K$  については既往の報告がほとんど無いが、釘一面せん断試験においては、 $K$  は最大耐力や終局耐力よりも変動幅が大きい傾向があること<sup>176,177)</sup>が報告されている。これは、主材―側材間のギャップの大小や釘の打ち込み角度の微少なずれ、合板の裏割れの程度などが大きく影響するためと考えられる。釘側面抵抗試験においては、これらの要因のうち、釘の打ち込み角度や合板の裏割れ等が  $K$  に影響したものと考えられ、新品合板と解体合板の  $K$  の値を定量比較することは難しいものと考えられる。

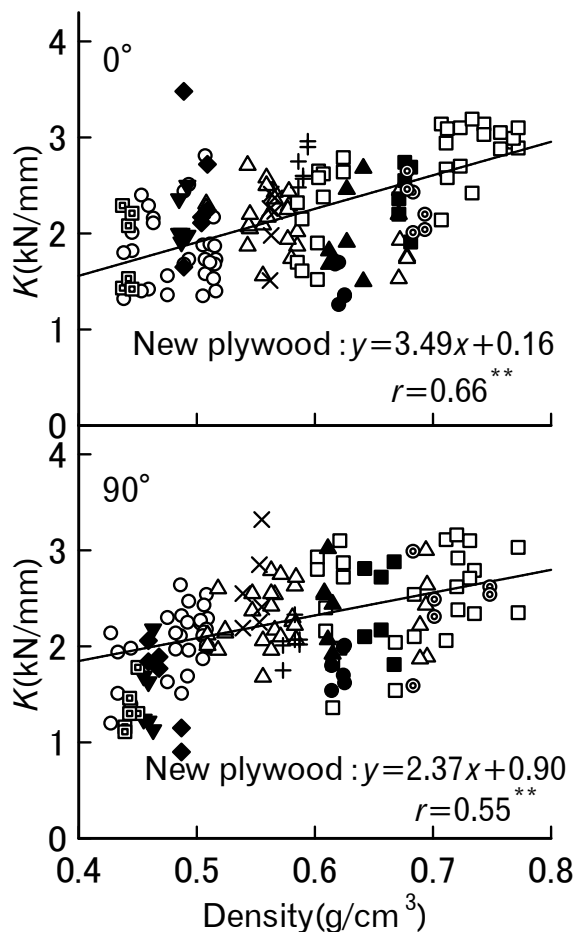


Fig.48. Relationship between density and  $K$  of plywood in lateral nail resistance tests.,

Legend: Refer to Fig.47.

Note: \*\*: Refer to Fig.47.

### 6.3.2 釘頭貫通性能

釘頭貫通試験結果を Table 19 に示す。荷重－変位曲線の例を Fig.49 に、合板の密度と  $P_{\max}$  の関係を Fig.50 に示す。新品合板と解体合板の荷重－変位曲線の間に明確な違いは認められなかった。新品合板の密度と  $P_{\max}$  の相関係数は 0.90 と非常に高く、1%水準で有意であった。解体合板の値は新品合板の回帰直線上かやや下に分布しており、若干の性能低下が認められる。残存率  $R_{NH}$  を求めると 0.75～1.06 となり、釘側面抵抗試験での値よりも高い値を示した。関野ら<sup>178)</sup>は合板および木質ボード類の屋外暴露試験の結果、木質ボード類の内部結合力が低下しても釘頭貫通力の低下が小さいことを報告している。また、青木ら<sup>179)</sup>も針葉樹合板の 72 時間の水中浸せき処理や乾湿繰り返しによる促進劣化試験では、釘側面抵抗試験においては若干の性能低下が認められるものの釘頭貫通試験ではほとんど性能が低下しないことを報告しており、本研究においてもこれらの報告と同様の傾向となった。長期使用による釘接合性能の低下は、主に合板に繰り返し作用する収縮膨張応力によるものと考えられるが、この応力は主に合板の裏割れを開閉する方向に作用するため、裏割れを寸断する方向に力が作用する釘側面抵抗性能の方がこの影響を受けやすく、釘頭貫通性能に及ぼす影響は小さいものと推察される。

Table 19. Results of nail-head pull-through test.

| Mark of plywood | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $P_{\max}$ (N) | $K$ (N/mm) | $R_{NH}$ |
|-----------------|-----------------------------|----------------|------------|----------|
| NP1             | 0.49(4.5)                   | 1.45(10.4)     | 0.58(35.1) | —        |
| NP2             | 0.58(8.4)                   | 2.09(17.0)     | 0.86(38.3) | —        |
| NP3             | 0.69(11.4)                  | 2.49(23.8)     | 2.16(21.2) | —        |
| F33-JF          | 0.63(1.2)                   | 1.68(8.2)      | 1.61(13.0) | 0.75     |
| F33-JF2         | 0.60(0.5)                   | 1.73(4.6)      | 0.68(7.6)  | 0.84     |
| G28-SF          | 0.68(0.3)                   | 2.38(5.0)      | 0.56(25.2) | 0.95     |
| H29-JF          | 0.48(1.9)                   | 1.36(1.7)      | 0.44(18.1) | 0.96     |
| H29-JF2         | 0.46(0.3)                   | 1.33(4.8)      | 0.45(35.0) | 1.01     |
| H29-LF          | 0.45(1.0)                   | 1.36(3.3)      | 0.61(24.8) | 1.06     |
| I24-LF          | 0.71(4.5)                   | 2.24(16.6)     | 0.80(11.4) | 0.85     |
| I24-WF          | 0.66(2.9)                   | 2.03(6.6)      | 0.85(29.0) | 0.84     |
| J30-WF          | 0.56(0.4)                   | 1.68(5.0)      | 0.77(7.8)  | 0.90     |

Note:

$R_{NH}$ : Retention of  $P_{\max}$  in nail-head pull-through test,

Parenthetic value means coefficient of variation.

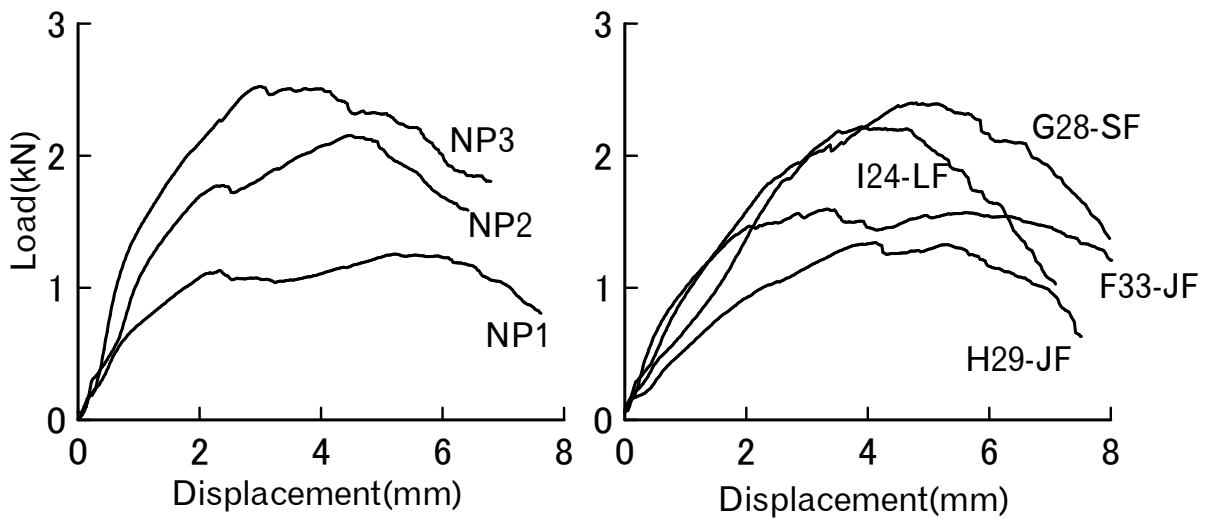


Fig.49. Typical load-displacement curves in nail-head pull-through tests.

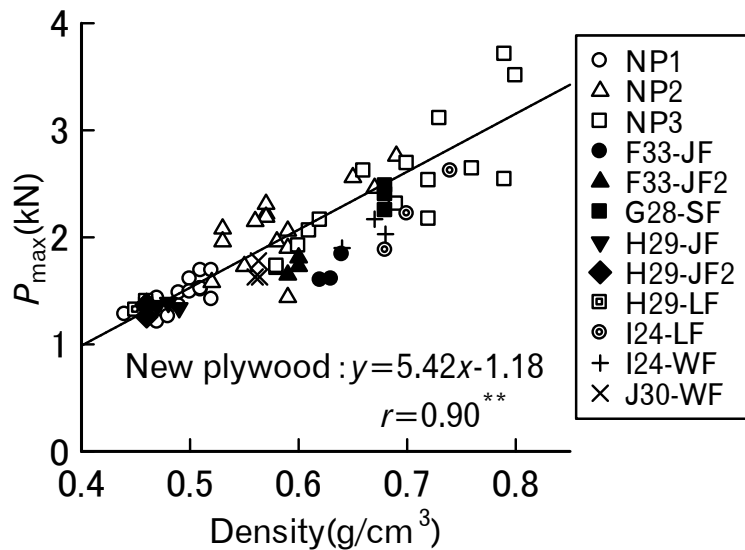


Fig.50. Relationship between density and  $P_{\max}$  of plywood in nail-head pull-through test.

Note: \*\*: Refer to Fig.47.

### 6.3.3 釘一面せん断試験

各合板の密度、最大耐力および完全弾塑性モデルによる評価値を Table 20 に、接合部の荷重－すべり曲線の例を Fig.51 に示す。新品合板と解体合板で荷重－すべり曲線に明確な違いは認められなかった。合板の密度と  $P_{\max}$ 、 $K$  および吸収エネルギーの関係を Fig.52 に示す。なお、吸収エネルギーは完全弾塑性モデル化して算出した。新品合板の密度と  $P_{\max}$  および  $K$  の相関係数は 0.73、0.85 と高い正の相関を示した。一方、密度と吸収エネルギーの関係は、相関係数 0.38 の負の相関が認められたが、これは主に密度が高いほど終局耐力  $P_U$  がやや増加する一方で終局変位  $\delta_U$  が小さくなったことによるものと考えられる。いずれの特性値においても、解体合板の値は概ね新品合板のバラツキの範囲内に分布している。釘一面せん断試験における  $P_{\max}$  の残存率  $R_{SJ}$  は 0.95～1.10 の範囲となり、30 年程度の使用では合板自体の劣化による釘一面せん断性能の低下はほとんど認められないものと考えられた。なお、実施工では主材や側材の収縮膨潤によって釘頭部が浮き上がり、主として初期剛性が低下する可能性がある<sup>102)</sup>ことに注意を要する。

Table 20. Results of shear tests of joints.

| Mark of plywood | $\rho(\text{g/cm}^3)$ |       | $P_{\max}(\text{N})$ |       | $K(\text{N/mm})$ |       | $\delta_v(\text{mm})$ |       | $\delta_u(\text{mm})$ |       | $P_U(\text{mm})$ |       | $R_{SJ}$ |
|-----------------|-----------------------|-------|----------------------|-------|------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|------------------|-------|----------|
|                 | Ave                   | CV(%) | Ave                  | CV(%) | Ave              | CV(%) | Ave                   | CV(%) | Ave                   | CV(%) | Ave              | CV(%) |          |
| NP1             | 0.48                  | 7.4   | 1.21                 | 7.8   | 263.7            | 32.3  | 4.45                  | 34.9  | 20.2                  | 10.3  | 1.06             | 9.8   | —        |
| NP2             | 0.57                  | 13.5  | 1.31                 | 9.2   | 458.4            | 33.0  | 2.75                  | 37.0  | 19.0                  | 18.0  | 1.13             | 7.6   | —        |
| NP3             | 0.68                  | 10.2  | 1.46                 | 10.0  | 593.9            | 15.5  | 2.11                  | 11.5  | 14.5                  | 11.7  | 1.24             | 9.0   | —        |
| F33-JF          | 0.63                  | 0.4   | 1.49                 | 6.5   | 383.8            | 22.9  | 3.43                  | 29.9  | 15.4                  | 5.7   | 1.25             | 8.2   | 1.08     |
| F33-JF2         | 0.62                  | 1.8   | 1.46                 | 6.7   | 419.4            | 8.1   | 2.97                  | 7.8   | 16.5                  | 17.8  | 1.24             | 7.3   | 1.06     |
| G28-SF          | 0.61                  | 4.2   | 1.31                 | 3.6   | 497.5            | 11.9  | 2.27                  | 11.2  | 19.5                  | 13.1  | 1.12             | 4.1   | 0.96     |
| H29-JF          | 0.49                  | 1.4   | 1.17                 | 5.5   | 272.4            | 22.6  | 3.97                  | 25.4  | 18.3                  | 8.8   | 1.03             | 7.3   | 0.95     |
| H29-JF2         | 0.46                  | 1.5   | 1.30                 | 8.4   | 240.9            | 32.5  | 5.33                  | 40.4  | 20.9                  | 7.9   | 1.15             | 10.9  | 1.08     |
| H29-LF          | 0.45                  | 0.5   | 1.24                 | 6.7   | 267.8            | 27.2  | 4.35                  | 30.0  | 20.0                  | 14.1  | 1.09             | 9.0   | 1.05     |
| I24-LF          | 0.72                  | 4.4   | 1.44                 | 7.2   | 571.2            | 23.8  | 2.26                  | 22.5  | 16.9                  | 10.7  | 1.23             | 5.8   | 0.97     |
| I24-WF          | 0.61                  | 2.8   | 1.38                 | 5.0   | 513.7            | 15.8  | 2.38                  | 19.3  | 17.3                  | 2.4   | 1.19             | 4.3   | 1.01     |
| J30-WF          | 0.57                  | 0.6   | 1.45                 | 9.1   | 385.0            | 30.8  | 3.86                  | 57.1  | 20.3                  | 7.5   | 1.28             | 11.5  | 1.10     |

Note:

$P_{\max}$ : Maximun load (kN),  $K$ : Initial stiffness (N/mm),  $\delta_v$ : Yield slip (mm),  $\delta_u$ : Ultimate slip (mm),  $P_U$ : Ultimate load (kN),  $R_{SJ}$ : Retention of  $P_{\max}$  in single shear joint test.



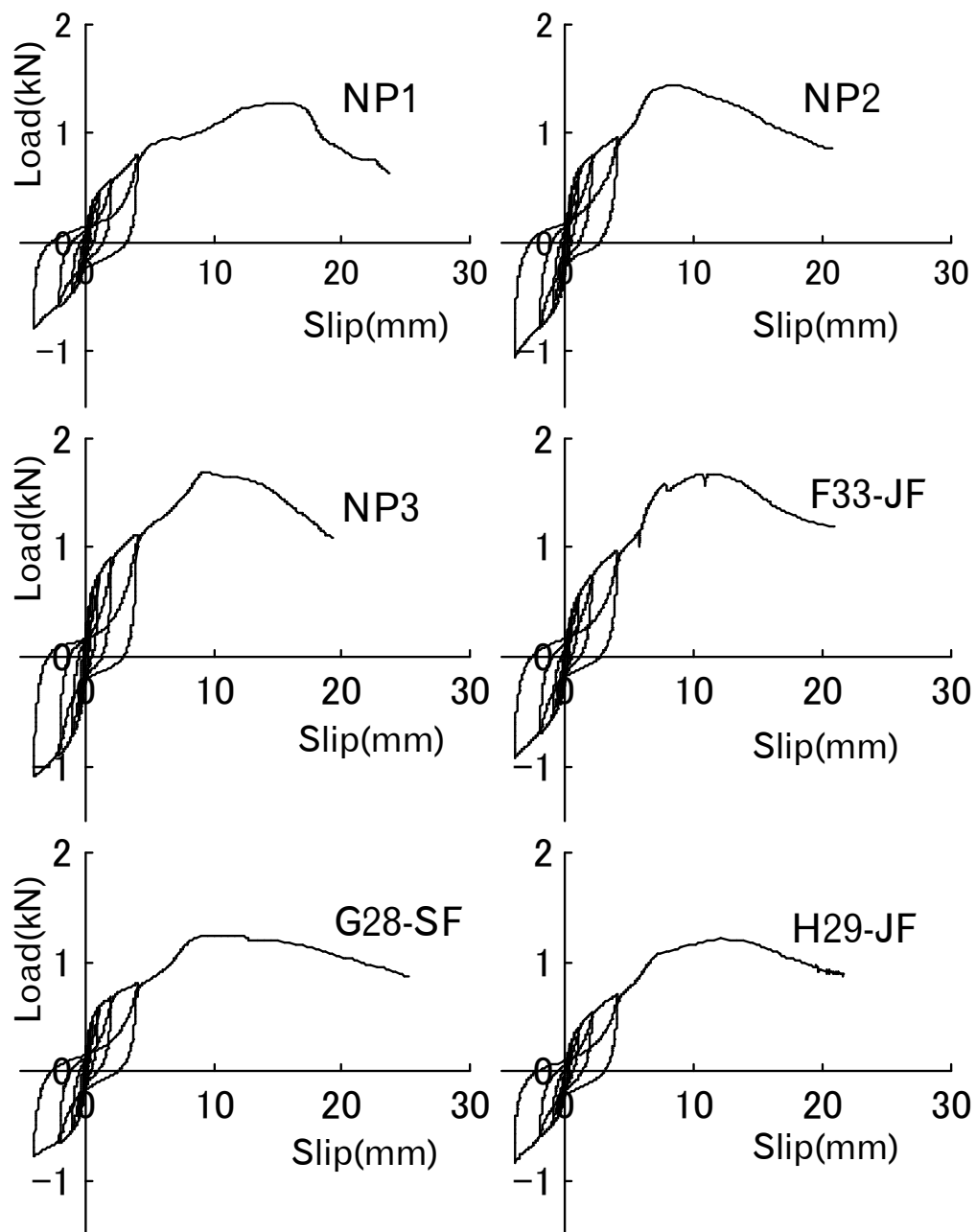


Fig.51. Typical load-slip curves in single shear tests.

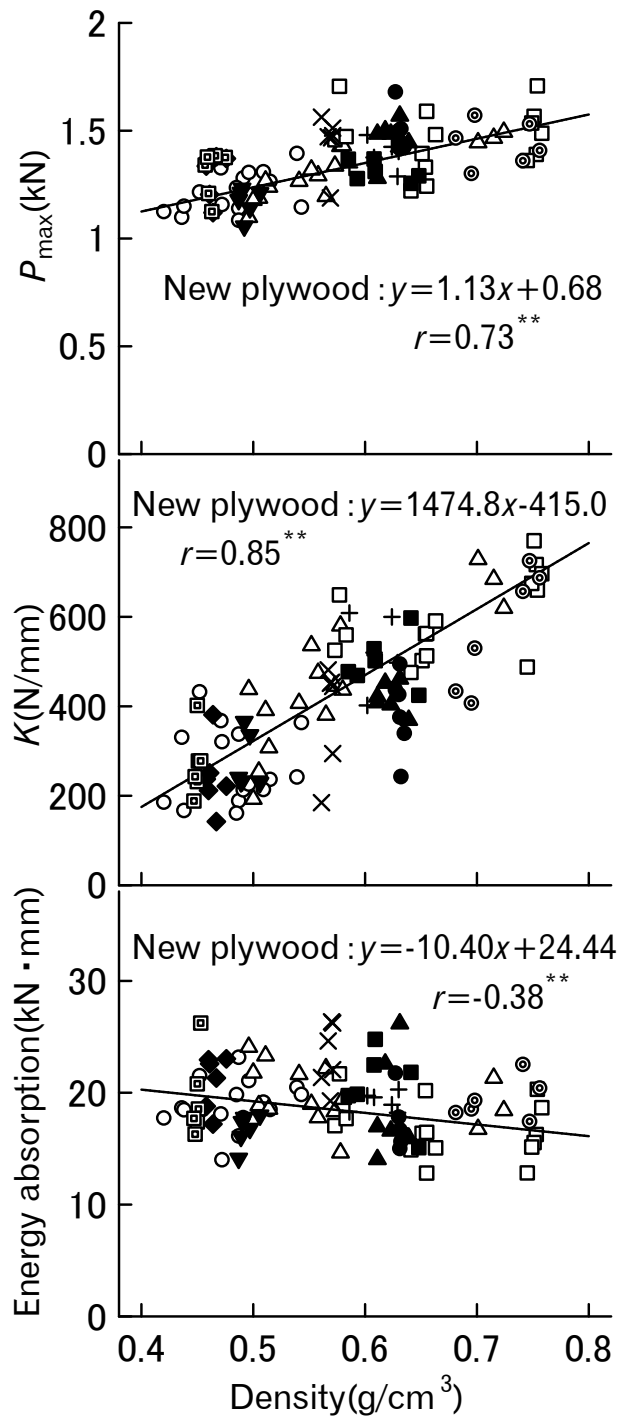


Fig.52. Relationship between density and  $P_{\max}$  ,  $K$  and energy absorption of plywood in single shear tests.

Legend: Refer to Fig.50.

Note: \*\*: Refer to Fig.47.

Fig.53 は密度と  $P_{\max}$  の関係を破壊形態別に示したものである。破壊形態は合板密度が  $0.45\text{g/cm}^3$  を下回ると釘頭貫通となり、 $0.57\text{g/cm}^3$  を上回ると釘の引き抜け、 $0.45\sim 0.57\text{g/cm}^3$  では両者が混在した。釘頭貫通で破壊する場合は、主として合板の性能により最大耐力が決定されと考えられるが、釘の引き抜けで破壊する場合は、主に主材側の引き抜き抵抗によって最大耐力が決定される<sup>180)</sup>ため、合板自体の性能低下の影響をほとんど受けないものと考えられる。本研究の試験条件では、釘の引き抜けによるものが全体の7割を占めたことから、合板の劣化の影響が比較的少なかったものと考えられる。また、釘頭貫通で破壊した3割の試験体についても、前述のように30年程度の使用では合板の釘頭貫通性能の低下が比較的小さいことから、明確な性能低下を示さなかったものと推察される。したがって、合板自体の劣化に伴う釘一面せん断性能の低下を考える際、主材として用いる樹種が重要な役割を担っていると考えられる。本研究では平均密度  $0.53\text{g/cm}^3$  のオウシュウアカマツ集成材を主材として用いているが、国産のスギやトドマツ等に代表される低密度材を用いた場合は、多くの試験体で釘の引き抜けで破壊する可能性が高く、合板の長期使用による性能低下の影響がさらに小さくなり、逆にベイマツ等の高密度材を使用した場合は、釘頭貫通による破壊が増えると予想され、本試験結果よりは合板の長期使用による性能低下が顕著になるものと考えられるが、このことについては更なる検証が必要となる。

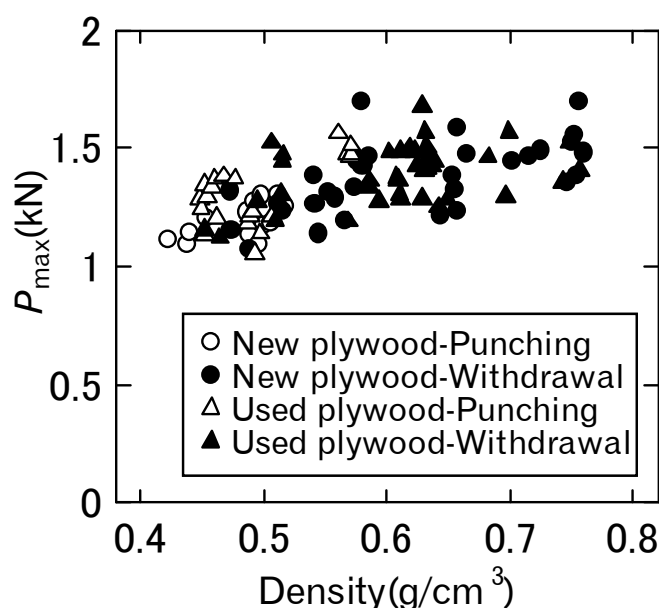


Fig.53. Relationship between density and  $P_{\max}$  in single shear tests.

### 6.3.4 床水平構面としての性能推定

木材で構成される軸組に合板を釘で打ち付けた耐力壁や床水平構面の力学的性能評価に関しては、これまで多くの研究成果が報告されている<sup>169-171)</sup>。これらの理論では、合板のせん断弾性係数および釘一面せん断試験における荷重－すべり関係がわかれば、床水平構面の性能は計算により求められることが示されている。そこで、新品合板と解体合板について、5.3.4 節で求めた合板のせん断弾性係数および 6.3.3 節で求めた釘一面せん断試験による評価値を用いて、合板張り床水平構面の許容せん断耐力の推定を試みた。ここでは従来型の一般的な床のモデルとして、Fig.54 に示すような根太間隔 455mm、釘を川の字に 150mm 間隔で打ち付けた床水平構面を考えた。根太寸法は 45×105mm とし、根太を梁の根太堀に半分落とし、N75 釘を 2 本斜め止めとした。

まず初めに、任意の釘配列での計算が可能な木造軸組構法住宅の許容応力度設計（以下、グレー本）に示された詳細計算法<sup>181)</sup>に従い、床水平構面の性能推定を行った。床構面全体のせん断ひずみ  $\gamma$  は、面材のせん断ひずみ ( $\gamma_s$ )、釘接合部のせん断ひずみ ( $\gamma_N$ )、根太のねじれによるせん断ひずみ ( $\gamma_Y$ )、根太端部接合部のせん断ひずみ ( $\gamma_I$ ) を重ね合わせたものとして以下の式で表される。

$$\gamma = \gamma_s + \gamma_N + \gamma_Y + \gamma_I \quad (24)$$

詳細計算法においては、床構面に荷重  $P$  が作用した場合のそれぞれのせん断ひずみは以下の式で表される。

$$\gamma_s = \frac{P}{GHt} \quad (25)$$

$$\gamma_N = \frac{P}{I_{XY}kH} \quad (26)$$

$$\gamma_Y = \frac{Ppe^2B}{G_W I_P HL} \quad (27)$$

$$\gamma_I = \frac{2Pp}{k_I HL} \quad (28)$$

ここで、 $t$ は面材厚さ、 $H$ は有効幅、 $G$ は合板のせん断弾性係数、 $I_{XY}$ は釘配列二次モーメント、 $k$ は面材釘1本あたりの一面せん断剛性、 $p$ は根太ピッチ、 $e$ は根太上面からの梁上端までの高さ、 $B$ は合板幅、 $G_w$ は根太のせん断弾性係数、 $I_p$ は根太断面のサンプナンねじり定数、 $k_f$ は根太端部接合部のせん断剛性である。ここでは、根太や根太接合に関する諸定数はグレー本に示された数値を用いて計算した。

以上の計算は、床組の変形を完全弾塑性とした時のせん断変形であるが、釘接合部のせん断ひずみ( $\gamma_N$ )については、この計算に加えて、神谷の理論<sup>169)</sup>に基づく詳細な推定(以下、神谷式)についても試みた。神谷式では、各釘のせん断力の $x$ 成分によるモーメント ${}_xM$ および $y$ 成分によるモーメント ${}_yM$ の釣り合い式から、任意の釘のすべり量 $\delta_i$ およびその $x$ 成分 ${}_x\delta_i$ と $y$ 成分 ${}_y\delta_i$ が求められる。釘をすべて通し番号で表記すると、各モーメントは以下の式で表される。

$${}_xM = \sum {}_xq_i(y_i - y_G) \quad (29)$$

$${}_yM = \sum {}_yq_i(x_i - x_G) \quad (30)$$

$$\delta_i = \sqrt{{}_x\delta_i^2 + {}_y\delta_i^2} \quad (31)$$

$${}_xq_i = \frac{{}_x\delta_i}{\delta_i} f(\delta_i) \quad (32)$$

$${}_yq_i = \frac{{}_y\delta_i}{\delta_i} f(\delta_i) \quad (33)$$

ここで、 ${}_xq_i$ 、 ${}_yq_i$ は各釘のせん断力の $x$ 、 $y$ 成分、 $y_i$ 、 $x_i$ は各釘の $x$ 、 $y$ 座標、 $x_G$ 、 $y_G$ は面材中心の座標、 $\delta_i$ 、 ${}_x\delta_i$ 、 ${}_y\delta_i$ は各釘のすべり量および $x$ 、 $y$ 成分、 $f(\delta)$ はすべり量 $\delta$ のときの釘の荷重であり異方性は無視できるものとした。 ${}_xM = {}_yM$ を満たすコーナー釘のすべり量 ${}_x\delta_c$ と ${}_y\delta_c$ は数値計算で求めることができ、このときのせん断ひずみ $\gamma_N$ は次の式で表される。

$$\gamma_N = \frac{2}{H} \frac{x \delta_c}{H} + \frac{2}{B} \frac{y \delta_c}{B} \quad (34)$$

さらにこの釘接合部のすべりによって生じる内部仕事  $U_N$  は以下のように表される。

$$U_N = \sum \frac{f(\delta_i) \cdot \delta_i}{2} \quad (35)$$

また構面が  $\gamma_N$  だけせん断ひずみを生じる間に外力  $P$  のなす仕事  $U_P$  は下式で表される。

$$U_P = \frac{PH\gamma_N}{2} \quad (36)$$

$U_N$  と  $U_P$  が等しいことから、 $\gamma_N$  と  $P$  との関係が得られる。

以上の 2 つの計算式により得られた荷重とせん断ひずみの関係から、新品合板および解体合板それぞれについて、変形角  $1/150\text{rad}$  時の耐力  $P_{150}$ 、降伏耐力  $P_y$ 、および  $P_u$  ( $0.2/D_s$ ) ( $P_u$ : 終局耐力、 $D_s$ : 構造特性係数) を算出した。また、計算したこれらの特性値の最小のものを  $1.96\text{kN/m}$  で除して相当床倍率を求めた。

計算結果を Table 21 に示す。合板の密度と  $P_{150}$ 、 $P_y$ 、 $P_u$  ( $0.2/D_s$ ) および床倍率の関係について、詳細計算法によるものを Fig.55 に、神谷式によるものを Fig.56 に示す。許容せん断耐力は、詳細計算法では 9 割の試験体において  $P_{150}$  で決定されたが、神谷式では 9 割の試験体において  $P_y$  で決定された。青木<sup>182)</sup>は針葉樹合板を用いた軸組構法耐力壁について、合板密度と各種特性値の関係を検討しており、特定変形時の荷重、最大耐力、壁倍率等はいずれも密度と正の相関を認めている。本研究においても、新品合板の  $P_{150}$ 、 $P_y$ 、および  $P_u$  ( $0.2/D_s$ ) はいずれの計算法においても密度との間に正の相関が認められた。新品合板と解体合板の特性値を比較してみると、詳細計算法では  $P_y$ 、および  $P_u$  ( $0.2/D_s$ ) は新品合板と解体合板の分布に明確な違いは認められなかったが、 $P_{150}$  については、解体合板の分布が新品合板よりもやや低い傾向が看取された。解体合板の  $P_{150}$  の若干の低下は、主に前述した合板の  $G$  の低下による影響を受けたためと考えられる。神谷式では、いずれの特性値も新品合板と解体合板の値に大きな差は認められなかった。相当床倍率について、残存率  $R_{FL}$  を求めたものを Table 21 に示すが、 $R_{FL}$  は詳細計算法では  $0.83 \sim 1.06$ 、神谷式では  $0.91$

～1.06 となり、神谷式の方が概ね高い値となりバラツキはやや小さくなった。また、いずれの計算法においても、解体合板の値はすべて新品合板の 95%信頼限界の範囲内に分布しており、性能劣化の程度は比較的軽微であると考えられる。長期使用による合板の釘接合性能の低下について、これまでに得られた結果から総合的に判断すると、合板の釘一面せん断性能や釘頭貫通性能の低下が小さいこと、合板自体の面内せん断性能の低下は比較的顕著であるが、このことが床水平構面全体の性能へ与える影響は比較的小さいこと等から、本研究で採取した合板の劣化から推定される一般的な床組のモデルについては、30 年程度の長期使用においても、概ね初期の 9 割程度の耐力を保持されているものと推察された。ただし、主材や釘の種類、釘間隔等によって、算出される床構面の性能も変化すると考えられることから、今後は様々な条件においての検討が望まれる。

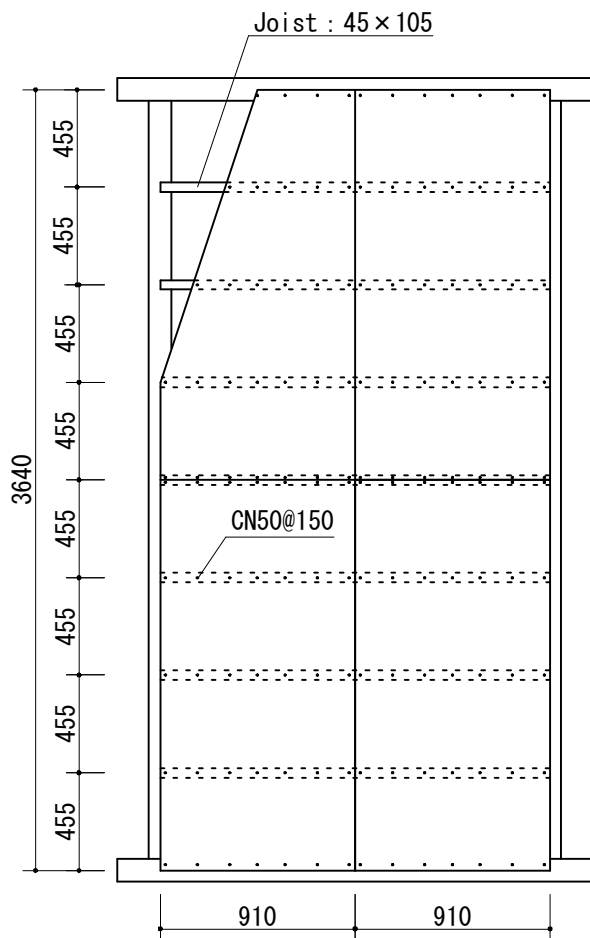


Fig.54. Specifications of floor diaphragm.

Table 21. Calculated values of racking performance of floor diaphragms.

| Mark of<br>plywood | $P_{150}(\text{kN/m})$ |      | $P_y(\text{kN/m})$ |      | $P_u(0.2/D_s)(\text{kN/m})$ |      | $N$  |      | $R_{FL}$ |      |
|--------------------|------------------------|------|--------------------|------|-----------------------------|------|------|------|----------|------|
|                    | CAL1                   | CAL2 | CAL1               | CAL2 | CAL1                        | CAL2 | CAL1 | CAL2 | CAL1     | CAL2 |
| NP1                | 1.94                   | 2.60 | 4.01               | 2.55 | 2.65                        | 2.97 | 0.99 | 1.28 | -        | -    |
| NP2                | 2.88                   | 3.17 | 4.31               | 2.87 | 3.32                        | 3.52 | 1.47 | 1.47 | -        | -    |
| NP3                | 3.42                   | 3.65 | 4.70               | 3.18 | 3.40                        | 3.70 | 1.70 | 1.62 | -        | -    |
| F33-JF             | 2.54                   | 3.13 | 4.74               | 2.89 | 2.91                        | 3.28 | 1.30 | 1.48 | 0.84     | 0.97 |
| F33-JF2            | 2.72                   | 3.08 | 4.72               | 2.80 | 3.21                        | 3.31 | 1.39 | 1.43 | 0.91     | 0.94 |
| G28-SF             | 2.99                   | 3.09 | 4.24               | 2.75 | 3.50                        | 3.48 | 1.53 | 1.40 | 1.02     | 0.93 |
| H29-JF             | 1.99                   | 2.51 | 3.92               | 2.37 | 2.54                        | 2.73 | 1.02 | 1.21 | 0.90     | 0.91 |
| H29-JF2            | 1.82                   | 2.56 | 4.38               | 2.64 | 2.64                        | 2.83 | 0.93 | 1.31 | 0.89     | 1.01 |
| I24-LF             | 3.29                   | 3.51 | 4.69               | 3.13 | 3.53                        | 3.65 | 1.68 | 1.59 | 0.93     | 0.97 |
| I24-WF             | 3.09                   | 3.23 | 4.53               | 2.86 | 3.43                        | 3.47 | 1.58 | 1.46 | 1.06     | 0.97 |
| J30-WF             | 2.49                   | 3.07 | 4.85               | 2.98 | 3.21                        | 3.68 | 1.27 | 1.52 | 0.94     | 1.06 |

Note:

$P_{150}$ : Load at 1/150rad (kN),  $P_y$ : Yield load (kN),  $P_u$ : Ultimate Load (kN),

$D_s$ : Structural characteristic factor,  $N$ : Shear load factor of floor,  $R_{FL}$ : Retention of shear load factor of floor, CAL1: Calculated value of detailed calculation method<sup>181)</sup>, CAL2: Calculated value of Kamiya's theory<sup>169)</sup>.



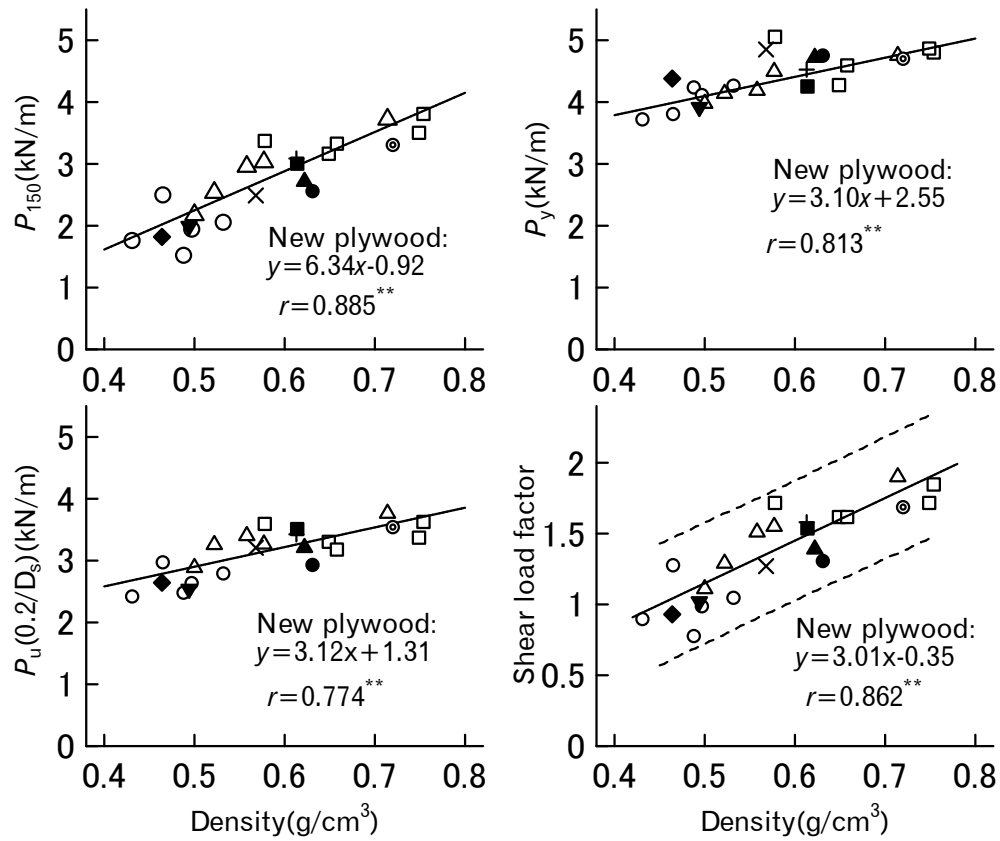


Fig.55. Relationship between density and  $P_{150}$ ,  $P_y$ ,  $P_u(0.2/D_s)$  or shear load factor calculated by detailed calculation method.

Legend: Refer to Fig.50.

Note: The solid line and the dotted lines are same as Fig.34., \*\*: Refer to Fig.47.

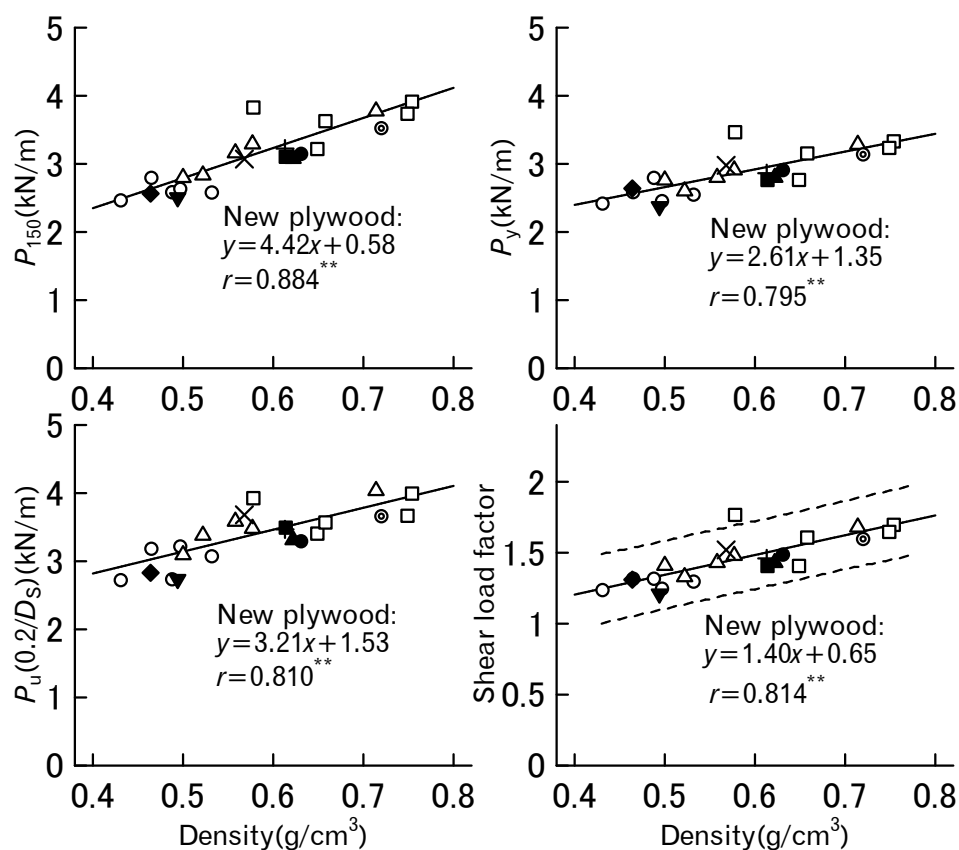


Fig.56. Relationship between density and  $P_{150}$ ,  $P_y$ ,  $P_u(0.2/D_s)$  or shear load factor calculated by Kamiya's theory.

Regend: Refer to Fig.50.

Note: The solid line and the dotted lines are same as Fig.34., \*\*: Refer to Fig.47.

耐力壁や床構面の倍率の算定にあたっては、用途、耐久性、施工性等による耐力の低減を見込み、低減係数を乗じることとなっている<sup>151)</sup>。これらの因子の内、耐久性に係る低減に関しては、数十年間といった長期使用時の劣化を確かめることが困難であり、現状では材料の促進劣化試験等の結果を基にした工学的判断に頼らざるを得ない状況にある。長期使用時の劣化の低減については、材料の種類、使用場所、釘接合条件あるいは想定される使用年数等に応じた実験データによる裏付けが望まれている。構造耐力要素の経年劣化には、面材の劣化、釘の腐食、主材の腐朽による劣化等様々な影響因子が関連するため、これらの因子を個別に検討した上で、構造耐力要素の性能の検証へと展開していくことが必要であろう。

## 6.4 結論

築後 24～33 年経過した住宅の床下地に使用された南洋材合板について、釘側面抵抗性能、釘頭貫通性能および釘一面せん断性能を調べ、新品合板の性能と比較した。また、これらの試験により求められた特性値を用いて、長期使用された床組の水平構面の性能推定を試みた。

釘側面抵抗性能、釘頭貫通性能および釘一面せん断性能のいずれにおいても、新品合板における合板密度と強度特性値の相関は高く、解体合板の値と新品合板の回帰直線上の値の比から残存率を算出することによる劣化評価が可能であった。これらの性能の残存率は、いずれも接着性能試験におけるせん断強さの残存率よりも高く、釘側面抵抗性能＞釘頭貫通性能＞釘一面せん断性能の順に残存率が低くなった。釘一面せん断試験においては、釘の引き抜けによる破壊が 7 割を占めたことから、合板自体の劣化が接合部の性能低下にほとんど影響を与えなかったものと考えられた。本研究で採取した合板の面内せん断試験と釘一面せん断試験により得られた特性値を用いて、一般的な床水平構面の許容せん断耐力を推定すると、30 年程度の長期使用においても概ね初期の 9 割程度の耐力を保持しているものと推察された。

## 第 7 章 総括

本論文では、昨今の合板を取り巻く状況を踏まえ、合板を建築材料として実際に使用した場合の様々な性能変化に関する研究を行った。また、型枠用合板については、南洋材消費の削減を目指した再利用技術の開発を行った。

第 2 章では、建設現場において実際に使用され廃棄処分される型枠用合板について、接着性能や曲げ性能等の劣化を調査し、新品合板の性能と比較することで再利用の可能性を検証した。その結果、合板の繰り返し使用により、接着性能の劣化が確認されたが、曲げ性能は単板表層部のみの劣化に限定され、内層部の単板はほとんど性能劣化が見られないことが明らかとなり、再利用の可能性が示された。

第 3 章では、第 2 章の結果を踏まえ、使用済み型枠用合板を新たな合板の心板として再利用する手法とその性能について検証した。その結果、使用済み合板を接合するだけでは十分な曲げ性能が得られなかったが、表裏に厚さ 1.0mm 程度の単板を接着した再生合板とすることで、いずれの接合形状においても十分な性能が得られることが確認された。合板の JAS に規定される実大サイズの曲げ試験の結果、試作した再生合板は型枠用合板の現行の基準値を満たす十分な性能が得られることが確認された。

第 4 章では、住宅の床下地材として長期間使用された南洋材合板（解体合板）を採取し、接着性能低下を調査するとともに、市販の新品合板について、促進劣化試験による接着性能低下を調べ、実用環境での劣化との比較分析を行った。その結果、新品合板の密度とせん断強さの関係から、解体合板のせん断強さの残存率を定義すると、密度が高い合板ほど残存率が低くなり、促進劣化試験の結果とほぼ同様の傾向を示した。促進劣化試験および実用環境下でのせん断強さの低下を曲線近似することで、煮沸処理の繰り返し数を実用環境下での使用年数に換算できる可能性が示された。

第 5 章では、住宅の床下地材として長期間使用された合板および促進劣化処理された新品合板について、曲げ性能および面内せん断性能を調べ、両者の比較分析を行った。その結果、煮沸繰り返し処理による促進劣化試験では、煮沸処理回数の増加とともに曲げ性能、

面内せん断性能とも低下し、性能低下は剛性よりも強度において顕著であった。また、合板密度と各種特性値の関係をj用いて実用環境の残存率を算出すると、促進劣化試験の結果とはば同様の傾向を示した。各強度特性値について、煮沸処理回数を実用環境下での使用年数に換算可能であったが、曲げ性能においては特に残存率に影響を与える因子が複雑であるため、推定精度の向上が課題となった。

第6章では、住宅の床下地材として長期間使用された合板について、釘接合性能の劣化を調べるとともに、床組の水平構面の劣化の推定を行った。合板密度と各種特性値の関係をj用いて実用環境における残存率を算出すると、解体合板の釘接合性能は、釘側面抵抗性能>釘頭貫通性能>釘一面せん断性能の順に残存率が低くなった。釘一面せん断試験では、釘の引き抜けによる破壊が全体の7割を占めたことから、合板自体の劣化に伴う性能低下が非常に小さかった。本研究で採取した合板の面内せん断試験と釘一面せん断試験により得られた特性値をj用いて一般的な床水平構面の性能を推定すると、30年程度の長期使用においても概ね初期の9割程度の耐力を保持しているものと推察された。

最後に、住宅構造材としての合板の性能劣化の総括として、第4章から第6章において得られた解体合板の各種性能の残存率を基に、劣化速度の総合比較を試みる。実用環境の劣化曲線はすべての性能においてこれまでj用いてきた  $R=k^X$  ( $R$ は残存率、 $k$ は劣化速度定数、 $X$ は使用年数)であるものとし、それぞれの解体合板で算出した残存率から劣化速度定数  $k$ を個別に算出したものを Table22 にまとめて示す。これらの中には残存率の推定精度が低いと考えられるものもあるが、ここでは各種性能間の劣化比較を行うため、すべての性能について  $k$ を算出した。なお、 $k$ が1.0を超えたものはすべて1.0として表示した。各解体合板間で  $k$ の平均値を比較すると、 $R_{SJ} > R_{EV0} > R_{EV90} > R_{FL} > R_{NH} > R_{GV90} > R_{LN} > R_{GV0} > R_G > R_t > R_{SS}$ の順となった。すなわち、合板の長期使用による劣化が著しいものとしては、接着性能や面内せん断性能が挙げられ、劣化が軽微であるものとしては、釘一面せん断性能、曲げヤング係数、床構面の性能等であることがわかる。算出した  $k$ の値をj用いて対応する使用年数における残存率  $R$ を算出すれば、50年以上長期使用した場合の残存強度を求めることができる。長期使用による合板の性能低下に

伴う耐用年数を考慮する場合、各特性値の初期の性能、劣化速度、構造材として実用上要求される性能等を総合的に勘案する必要がある。実用上の要求性能に対して初期の性能が大きく上回る場合でも劣化速度が大きい場合は、比較的短い耐用年数となる可能性があり、逆に要求性能に対して初期性能の余裕が小さい場合でも、劣化速度が小さければ、耐用年数が長くなる可能性も考えられる。本研究で採取した解体合板は、採取時の含水率が比較的低く、良好な使用環境に置かれたものが多かったが、劣化速度は使用環境に大きく依存するものと考えられるため、予測精度の向上のためには、環境ごとの各種性能劣化についてのデータも必要と考えられる。合板の長期使用時の劣化に関する普遍的特性を把握するためには、更なるデータ蓄積が必要となるであろう。

以上のように、本論文では、近年の合板を取り巻く環境と使用状況を考慮し、型枠用合板や構造用合板として実使用された場合の各種特性値の性能劣化評価を行った。さらに、型枠用合板については、木質材料のカスケード型利用と南洋材消費量の削減を目指した再利用技術の開発を行った。国内での合板製造の歴史は百年を超え、近年の合板製造工程や製造技術についてはほぼ確立された観があるが、合板の原材料や接着剤、あるいは用途適正についてはその時の資源背景や社会情勢等によって変化していくものと考えられるため、これらの状況変化を見据えた研究開発や性能評価については、今後も継続して検討すべき課題である。本論文では、型枠用合板、構造用合板ともに南洋材合板を対象として劣化評価を行っている。型枠用合板については、針葉樹合板を使用するには、未だに解決しなければならない課題があるものの、針葉樹型枠用合板についても現在研究開発が進みつつあり、針葉樹合板の劣化についてもデータの蓄積が望まれる。構造用合板については、国内の合板メーカーにおいては針葉樹材への樹種転換がほぼ完了し、現在新築住宅に使用されている合板の大半が針葉樹合板であるが、住宅への使用実績は10年程度と浅いため、現時点では本研究のような劣化評価を行うのは困難である。今後は、針葉樹構造用合板を住宅部材として使用した場合の劣化評価が望まれる。さらに、床下地材については、根太を省略して厚物合板を使用する構法が現在の主流となっており、今後は厚物合板の劣化評価についても検討が必要となるであろう。住宅の耐力壁については、枠組壁工法住宅の増

加、在来軸組構法住宅における木質面材料の使用の増加などから、面材耐力壁の耐久性が重要度を増しており、合板のみならず木質パネル全体についての実用環境での劣化評価も非常に重要になってくるであろう。また、今後はより大規模な木造建築物への木質材料の使用の増加が見込まれており、構造用集成材や構造用 LVL、あるいはクロス・ラミネーティッド・ティンバー（CLT）等の木質積層材料についても、実用レベルでの接着耐久性・強度耐久性評価が重要になると思われる。本研究で用いた実用環境での劣化評価手法は、合板のみならず木質材料全体へ適用できる可能性を秘めている。本論文が、合板を含む新たな木質材料の性能評価、様々な木質材料の耐久性評価の一助となれば幸いである。

Table 22. Regression coefficients in several strength properties.

| Mark of plywood | $R_{SS}$ | $R_{EV0}$ | $R_{\sigma V0}$ | $R_{EV90}$ | $R_{\sigma V90}$ | $R_G$ | $R_\tau$ | $R_{LN}$ | $R_{NH}$ | $R_{SJ}$ | $R_{FL}$ |
|-----------------|----------|-----------|-----------------|------------|------------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| A30-JF          | 0.979    | 0.992     | 0.988           | 0.997      | 0.998            | 0.992 | 0.989    | –        | –        | –        | –        |
| B30-LF          | 0.984    | 0.992     | 0.990           | 1.000      | 0.998            | 0.988 | 0.982    | –        | –        | –        | –        |
| C28-KF          | 0.989    | 0.997     | 0.983           | 0.990      | 0.967            | 0.992 | 0.990    | –        | –        | –        | –        |
| D16-KF          | 0.995    | –         | –               | –          | –                | –     | –        | –        | –        | –        | –        |
| E25-LF          | 0.977    | 1.000     | 0.995           | 1.000      | 1.000            | 0.981 | 0.977    | –        | –        | –        | –        |
| F33-JF          | 0.988    | 0.998     | 0.990           | 1.000      | 1.000            | 0.990 | 0.993    | 0.994    | 0.992    | 1.000    | 0.999    |
| F33-JF2         | 0.988    | 0.998     | 0.992           | 1.000      | 1.000            | 0.991 | 0.988    | 0.991    | 0.995    | 1.000    | 0.998    |
| G28-SF          | 0.986    | 1.000     | 0.995           | 0.991      | 0.993            | 0.988 | 0.987    | 0.989    | 0.998    | 0.998    | 0.997    |
| H29-JF          | 0.991    | 1.000     | 0.995           | 0.997      | 0.981            | 0.995 | 0.990    | 0.996    | 0.999    | 0.998    | 0.997    |
| H29-JF2         | 0.995    | 1.000     | 0.989           | 1.000      | 0.974            | 0.990 | 0.992    | 0.997    | 1.000    | 1.000    | 1.000    |
| I24-LF          | 0.985    | 1.000     | 0.994           | 1.000      | 1.000            | 0.989 | 0.986    | 0.987    | 0.993    | 0.999    | 0.999    |
| I24-WF          | 0.987    | 1.000     | 0.990           | 0.992      | 0.997            | 0.993 | 0.989    | 0.987    | 0.993    | 1.000    | 0.999    |
| J30-WF          | –        | –         | –               | –          | –                | 0.984 | 0.990    | 0.991    | 0.996    | 1.000    | 1.000    |
| Ave             | 0.987    | 0.998     | 0.991           | 0.997      | 0.992            | 0.990 | 0.988    | 0.991    | 0.996    | 0.999    | 0.999    |

Note:

$R_{SS}$ : Shear strength retention,  $R_{EV0}$ : Modulus of elasticity retention parallel to the grain direction of face veneer,  $R_{EV90}$ : Modulus of elasticity retention perpendicular to the grain direction of face veneer,  $R_{\sigma V0}$ : Bending strength retention parallel to the grain direction of face veneer,  $R_{\sigma V90}$ : Bending strength retention perpendicular to the grain direction of face veneer,  $R_G$ : Modulus of rigidity retention,  $R_\tau$ : In-plane shear strength retention,  $R_{LN}$ : Retention of  $P_{max}$  in lateral nail resistance test in parallel direction,  $R_{NH}$ : Retention of  $P_{max}$  in nail-head pull-through test,  $R_{SJ}$ : Retention of  $P_{max}$  in single shear joint test,  $R_{FL}$ : Retention of shear load factor of floor calculated by Kamiya's theory.



## 謝 辞

本研究の遂行、本論文の作成にあたり、終始にわたり懇切なご指導を賜りました北海道大学大学院農学研究院・流動研究部門・社会・地域・国際連携分野の平井卓郎教授に心より御礼申し上げます。また、本論文の作成にあたり、ご指導と貴重なご助言を賜りました、北海道大学大学院農学院・環境資源学部門・森林資源科学分野の小泉章夫准教授ならびに澤田圭助教に厚く御礼申し上げます。

長きに渡り合板製造と性能評価を行う多くの機会の提供とご助言を頂きました、元D I C北日本ポリマ（株）の玄野修氏に深く感謝申し上げます。また、合板製造技術と性能評価について、多くのご指導を頂きました元林産試験場職員の高谷典良氏に心より感謝致します。

本研究の使用済み型枠用合板の調査および改修物件の調査におきましては多くの方々のご協力を頂きました。使用済み型枠用合板を提供して下さいました、株式会社丸惣佐藤組、株式会社丸善建設、株式会社高組、株式会社中里建設、三基開発株式会社の皆様方に深く御礼申し上げます。地方独立行政法人北海道立総合研究機構北方建築総合研究所の植松武是博士には物件調査と試験の遂行に多くのご協力とご助言を賜りました。NPO法人北海道住宅の会の高倉俊明氏には物件調査に関するご尽力を頂き、本研究の円滑な進行が可能となりました。厚く御礼申し上げます。一連の物件調査にご協力頂きました元ツーバイフォー建築協会の芳野裕次氏、株式会社C I S計画研究所の皆様方に深く御礼申し上げます。住宅の改修時に床下地合板を提供して下さいました竹内建設株式会社、株式会社札幌、株式会社ホームトピア、高橋十郎工務店、三王建設興産株式会社、久末弘信建設株式会社、有限会社住宅夢工房阿部、株式会社伊藤建業の皆様方に深く御礼申し上げます。

独立行政法人森林総合研究所の渋沢龍也博士には、合板の性能評価手法について懇切なご指導・ご助言を賜りました。また、セイホク株式会社の神谷文夫博士、岩手大学農学部の間野登教授には本研究を進める上で有益なご助言を賜りました。深く感謝申し上げます。

北海道立総合研究機構林産試験場の職員の皆様にも日頃らご協力・ご助言を頂きまし

た。宮崎淳子博士、平林靖博士には本研究の一連の実験について多くのご協力を頂きました。大橋義徳博士には日頃から温かいご支援と本論文をまとめる上での貴重なご助言を頂きました。戸田正彦氏には主に釘接合せん断試験と性能評価方法に関するご指導とご助言を頂きました。北澤康博氏の試験体製造から性能評価試験に至るまでの多くのご支援なくしては本研究の完遂はなかったことと思います。深く御礼申し上げます。また、本研究の実験や調査、試験結果の考察等にご協力頂きました橋本裕之氏、野田康信博士をはじめ、多くの試験場職員のご支援に対し、深く御礼申し上げます。

最後に、これまでの生活を支え励ましてくれた私の家族と両親に心から感謝いたします。

## 文 献

- 1) 日本木材学会編：“木質の物理”，文永堂出版, 2007, pp.50-66.
- 2) 平井信二：“合板”，堀岡邦典，槇書店, 1971, pp.1-11.
- 3) 渡辺治夫：“合板の製造”，森北出版, 1967, pp.7-16.
- 4) 宮良孝：木材工業 **61**(11), 493-495 (2006).
- 5) 日本繊維板工業会：“ファイバーボード・パーティクルボード”，No.126, 2009.
- 6) 宮本康太，鈴木滋彦：木材工業 **52**(7), 342-347(1997).
- 7) 池田正行，鈴木滋彦：静岡大学農学部附属演習林報告 **23**, 25-36 (1999).
- 8) 日本合板工業組合連合会：“合板百年史”，2008.
- 9) 財団法人日本合板技術研究所：“合板レポート”，No.101, 1979.
- 10) 北海道：“北海道山林史”，1953, pp.1012-1022.
- 11) 高橋利男：林産試だより 9月号, 1-6 (1988).
- 12) “合板の日本農林規格”，農林水産省告示第 1751 号 (2008).
- 13) 農林水産省大臣官房統計部：合板統計，昭和 48 年～平成 23 年.
- 14) 日本合板工業組合連合会：原料転換技術開発事業報告書，平成 5 年 3 月.
- 15) 渋谷龍也：合板技術講習会テキスト, 2012.
- 16) 財団法人秋田県木材加工推進機構：“コンサイス木材百科”，2002, pp.26-27.
- 17) 浅野信治：木材工業 **22**(7), 318-323 (1967).
- 18) 柳下正，唐沢仁志：林業試験場研究報告 **218**, 273-285 (1968).
- 19) 柳下正，唐沢仁志：林業試験場研究報告 **269**, 65-73 (1974).
- 20) 高谷典良，野崎兼司，田口崇：林産試験場月報 **294**, 12-18 (1976).
- 21) 堀岡邦典，堀池清，野口美保子：林業試験場研究報告 **89**, 1-55 (1956).
- 22) 梶田熙，中戸莞二：京大演習林報告 **38**, 215-229 (1966).
- 23) 山岸祥恭：木材学会誌 **2**(1), 36-42 (1956).
- 24) Freeman, H.A. : *Forest Prod. J.* **9**(12), 451-458 (1959).

- 25) Bodig, J. : *Forest Prod. J.* **12**(6), 265-270 (1962).
- 26) 後藤輝男, 作野友康, 往西弘次 : 島根農科大学研究報告 **15**, 53-60 (1967).
- 27) 作野友康, 後藤輝男 : 島根大学農学部研究報告 **4**, 103-109 (1970).
- 28) 阪口宏司, 中塚友一郎 : 木材工業 **24**(11), 515-517 (1969).
- 29) 田村靖夫, 山田忠和, 長谷行正, 嶋崎善夫 : 木材工業 **38**(2), 59-65 (1983).
- 30) 深沢厚, 宮崎泰顕 : 木材工業 **24**(10), 467-472 (1969).
- 31) 田村靖夫, 山田忠和, 長谷行正, 嶋崎善夫 : 木材工業 **38**(3), 126-132 (1983).
- 32) 今村博之, 高橋利夫, 安江保民, 柳下正, 唐沢仁志, 川村二郎 : 林業試験場研究報告 **232**, 65-96 (1970).
- 33) 寺沢真, 蕪木自輔 : 木材工業 **23**(2), 63-68 (1968).
- 34) 山川廣之介 : 日本接着協会誌 **29**(11), 34-39 (1993).
- 35) 小倉高規, 野崎兼司, 吉田弥明, 田口崇 : 林産試験場月報 **218**, 1-4 (1970).
- 36) 田口崇, 野崎兼司, 吉田弥明, 小倉高規 : 林産試験場月報 **282**, 11-15 (1975).
- 37) 金田利之 : 岡山県木材加工技術センター業務報告書, 31-33 (1992).
- 38) Chow, S.Z. : *Forest Prod. J.* **19**(4), 21-29 (1969).
- 39) Suchland, O., Stevens, R.R. : *Forest Prod. J.* **18**(1), 38-42 (1968).
- 40) 筒本卓造, 佐藤庄一, 柳下正 : 林業試験場研究報告 **176**, 151-171 (1965).
- 41) 野崎兼司, 吉田弥明, 田口崇 : 林産試験場月報 **216**, 10-14 (1970).
- 42) 佐久間正至, 山川廣之介 : 木材工業 **24**(12), 568-571 (1969).
- 43) 柳下正, 唐沢仁志 : 林業試験場研究報告 **176**, 173-185 (1965).
- 44) Northcott, P.L. : *Forest Prod. J.* **7**(1), 10-16 (1957).
- 45) Hancock, W.V. : *Forest Prod. J.* **13**(2), 81-88 (1963).
- 46) Chow, S.Z. : *Wood Sci. Tecnol.* **5**(1), 27-39 (1971).
- 47) Kaufert, F.H. : *FPL Report*, No.1351, 1-10 (1943).
- 48) Walters, E.O. : *Forest Prod. J.* **23**(6), 46-53 (1973).
- 49) 柳下正, 唐沢仁志 : 林業試験場研究報告 **225**, 145-172 (1969).

- 50) 日本合板工業組合連合会：「原料轉換技術開發事業報告書」平成6年3月。
- 51) 武内義夫, 新井寿昭：日本建築学会学術講演梗概集, 北海道, 2004, pp.1157-1158.
- 52) 小柳光夫：建築技術, No.597, 1999, pp.98-101.
- 53) 酒井寛二, 松原隆志：木材工業 **47**(3), 133-137 (1992).
- 54) 高谷典良, 田口崇, 新岡輝一, 安藤康光：日本木材学会北海道支部講演集第25号, 30-33 (1993)
- 55) 堀長生, 青山幹, 小川晴果, 高橋晃一郎, 小柳光夫：日本建築学会学術講演梗概集, 北陸, 1992, pp.775-776.
- 56) 善本知孝, 南享二：木材工業 **30**(1), 23-26 (1975).
- 57) 安田征市, 松下泰幸：木材工業 **58**(6), 252-257 (2003).
- 58) 豊田律次：日本建築学会学術講演梗概集, 九州, 1998, pp.341-342.
- 59) 河村進, 大畑敬, 黄箭波, 松下清, 二見鎌次郎：日本木材加工技術協会第28回年次大会講演要旨集, 奈良, 41-42 (2010).
- 60) 高見勇：林業試験場研究報告 **208**, 1-84 (1968).
- 61) 沢田稔, 上田恒司：北大演習林研究報告 **25**, 61-84 (1967).
- 62) 浅野猪久夫, 都築一雄：材料 **12**(121), 761-768 (1963).
- 63) 大熊幹章：木材学会誌 **12**(1), 15-20 (1966).
- 64) 上田恒司：北大演習林研究報告 **26**, 143-169 (1968).
- 65) 吉田弥明：林産試験場月報 **295**, 5-9 (1976).
- 66) 大熊幹章, 信田聡, 大橋誠：木材学会誌 **29**(6), 438-443 (1983).
- 67) 大熊幹章, 中村昇, 山田耕造：木材学会誌 **30**(6), 440-447 (1984).
- 68) 平嶋義彦, 神谷文夫, 畑山義男：木材学会誌 **30**(4), 287-292 (1984).
- 69) 平嶋義彦, 神谷文夫, 畑山義男：木材学会誌 **30**(4), 293-300 (1984).
- 70) 谷川信江：木材工業 **61**(11), 537-540 (2006).
- 71) 谷川信江, 渋沢龍也, 名波直道, 山村浩介, 渡邊洋子：日本建築学会学術講演梗概集, 関東, 2001, pp.45-46.

- 72) 渋谷龍也, 名波直道, 渡邊洋子, 谷川信江, 神谷文夫 : 日本建築学会学術講演梗概集, 北陸, 2002, pp.5-6.
- 73) 渋谷龍也, 名波直道, 岡崎康男, 東野正, 大西裕二, 神谷文夫 : 日本建築学会学術講演梗概集, 東海, 2003, pp.495-496.
- 74) 満久崇麿 : 木材研究資料 **8**, 1-15 (1974).
- 75) Biblis, E.J. : *Forest Prod. J.* **19**(6), 47-54 (1969).
- 76) Chiu, Y. : *Wood and Fiber Sci.* **1**(1), 154-161 (1969).
- 77) Bohlen, J.C. : *Forest Prod. J.* **25**(12), 26-31 (1975).
- 78) Palka, L.C. : *Forest Prod. J.* **27**(4), 49-53 (1977).
- 79) McSween, J.R., Seleers, T.J. : *Forest Prod. J.* **35**(7), 27-533 (1985).
- 80) Shupe, T.F., Hse, C.Y., Grozdits, G.A., Choong, E.T. : *Forest Prod. J.* **47**(10), 101-106 (1997).
- 81) Shupe, T.F., Hse, C.Y., Choong, E.T., Groom, L.H. : *Forest Prod. J.* **47**(11), 101-106 (1997).
- 82) Northcott, P.L., Kreibich, R.E. : *Forest Prod. J.* **18**(5), 58-65 (1968).
- 83) Gillespie, R.H. : *Forest Prod. J.* **15**(9), 369-378 (1965).
- 84) Gillespie, R.H. : *Forest Prod. J.* **18**(8), 35-41 (1968).
- 85) 山岸祥恭 : 北海道立林産試験場研究報告 **46**, 1-76 (1966).
- 86) 後藤輝男 : 島根大学農学部研究報告 **2**, 92-98 (1968).
- 87) 金田弘, 満久崇麿 : 木材学会誌 **10**(8), 403-408 (1960).
- 88) Northcott, P.L., Colbeck, H.G.M. : *Forest Prod. J.* **18**(5), 58-65 (1968).
- 89) Caster, D. : Proc. of a symposium, Wood adhesives research, Madison, USA, 1980, pp.199-208.
- 90) 吉田弥明 : 木材学会誌 **32**(6), 432-438 (1986).
- 91) 井上明生 : 木材学会誌 **38**(10), 923-930 (1992).
- 92) 井上明生 : 木材工業 **55**(1), 7-13 (2000).
- 93) 金田弘, 満久崇麿 : 木材学会誌 **22**(3), 173-183 (1976).
- 94) 金田弘, 満久崇麿 : 木材学会誌 **24**(10), 726-731 (1978).

- 95) Kreibich, R.E., Freeman, H.G. : *Forest Prod J.* **20**(4), 44-49 (1970).
- 96) 大熊幹章, 森泉周 : 木材学会誌 **23**(10), 513-518 (1977).
- 97) 吉田弥明 : 北海道立林産試験場研究報告 **69**, 68-159 (1980).
- 98) 高谷典良, 田口崇 : 林産試験場月報 **361**, 10-16 (1982).
- 99) 関野登, 大熊幹章 : 木材学会誌 **32**(3), 163-169 (1986).
- 100) 有馬孝禮, 佐藤雅俊, 益田恵吾 : 建築研究報告 **95**, 1-94 (1981).
- 101) 青木謙治, 渋沢龍也, 神谷文夫, 谷川信江 : 第 58 回日本木材学会研究発表要旨集, つくば, 2008, pp.193-194.
- 102) 神谷文夫, 平嶋義彦, 畑山義男 : 木材学会誌 **29**(12), 925-929 (1983).
- 103) 張沛文, 上田恒司, 平井卓郎 : 木材学会誌 **43**(12), 1030-1034 (1997).
- 104) 宮村雅史, 佐藤雅俊 : 日本建築学会大会学術講演梗概集, 関東, 1984, pp.2705-2706.
- 105) 平井卓郎, 張沛文, 入江康孝, 若島嘉朗 : 木材学会誌 **45**(2), 120-129 (1999).
- 106) 大畑敬, 河村進 : 島根県産業技術センター研究報告 **46**, 25-28 (2010).
- 107) 古田直之 : 日本建築学会技術報告集 **15**(29), 45-50 (2009).
- 108) 古田直之, 橋本裕之, 平林靖, 平井卓郎 : 木材学会誌 **57**(2), 110-119 (2011).
- 109) 古田直之, 宮崎淳子, 平林靖, 平井卓郎 : 木材学会誌 **59**(1), 45-54 (2013).
- 110) 斉藤吉之 : 木材工業 **54**(11), 572-574 (1999).
- 111) (財) 日本住宅・木材技術センター : 木質廃棄物再資源化技術開発事業報告書, 1997, pp.21-40.
- 112) 岩淵文, 佐々木陽, 平原英俊, 會澤純雄, 高橋諭, 成田栄一 : 第 54 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 札幌, p.444, 2004.
- 113) 農林水産省大臣官房統計部 : 合板統計, 平成 14 年～平成 19 年.
- 114) 大島 明, 菊池雅史, 小山明男, 福部 聡, 柳 啓 : 日本建築学会学術講演梗概集, 近畿, 2005, pp.975-976.
- 115) 名波直道, 渋沢龍也, 宮崎朋美, 有馬孝禮, 河合誠 : 日本接着学会第 37 回年次大会要旨集, 1999, pp.187-188.

- 116) 神谷文夫, 渋谷龍也, 平嶋義彦 : 第 50 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 京都, 2000, p.297.
- 117) 大熊幹章 : 平成元年度科学研究費補助金研究成果報告書, 1990.
- 118) 矢永国良, 相原庸夫, 藤田和彦, 槌本敬大 : 日本建築学会学術講演梗概集, 近畿, 2005, pp.247-248.
- 119) 赤木光志, 槌本敬大, 村田 忠, 原田浩司, 平原むつみ, 荒武志朗 : 日本建築学会学術講演梗概集, 近畿, 2005, pp.251-252.
- 120) 鈴木滋彦 : 材料 **53**(4), 465-470 (2004).
- 121) 日本建築学会 : “建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事”, 丸善, 東京, 2009, pp.281-307.
- 122) 渋谷龍也, 名波直道, 渡邊洋子, 谷川信江, 神谷文夫 : 日本建築学会学術講演梗概集, 東海, 2003, pp.495-496.
- 123) 平井卓郎, 沢田 稔 : 北海道大学農学部演習林研究報告 **36**(2), 387-420 (1979).
- 124) Dansoh, A.B., Koizumi, A., Hirai, T. : *J. Wood Sci.* **49**(5), 405-410 (2003).
- 125) 宮島 寛, 生田晴家 : 北海道大学農学部演習林研究報告 **33**(1), 167-198 (1976).
- 126) 森 徹, 今泉勝吉 : 日本建築学会研究報告 **39**, 51-56 (1957).
- 127) McNatt, J.D., Wellwood, R.W., Bach, L. : *Forest Prod. J.* **40**(9), 10-16 (1990).
- 128) 吉田弥明 : 林産試験場月報 **295**, 5-9 (1976).
- 129) Gillespie, R.H. : *Forest Prod. J.* **15**(9), 369-378 (1965).
- 130) 金田弘, 満久崇麿 : 木材学会誌 **21**(11), 596-603 (1975).
- 131) 井上明生 : 木材学会誌 **38**(10), 923-930 (1992).
- 132) Kojima, Y., Suzuki, S. : *J. Wood Sci.* **57**(2), 126-133 (2011).
- 133) 関野登 : 木材工業 **58**(7), 298-303 (2003).
- 134) 渋谷龍也, 名波直道, 有馬孝禮, 河合誠 : 日本建築学会学術講演梗概集, 中国, 1999, pp.177-178.
- 135) 日本木材学会編 : “木材の工学”, 文永堂出版, 東京, 1991, pp.43-44.



- 136) 田村靖夫, 山田忠和, 長谷行正, 深沢厚 : 木材工業 **36**(7), 9-14 (1981).
- 137) 廬正官, 樋口光夫, 坂田功 : 木材学会誌 **33**(12), 963-968 (1987).
- 138) 吉田弥明 : 木材学会誌 **32**(6), 432-438 (1986).
- 139) 樋口光夫, 坂田功 : “日本木材学会研究分科会報告書 木材の科学と利用技術 1. 接着耐久性”, 日本木材学会編, 日本木材学会, 東京, 1989, pp. 97-103.
- 140) 関野登, 末松充彦, 高麗秀昭, 安井悦也 : 木材学会誌 **45**(3), 237-243 (1999).
- 141) 山岸祥恭 : 林産試験場研究報告 **46**, 1-76 (1966).
- 142) 日本木材加工技術協会 : “木材の接着・接着剤”, 産調出版, 1996, pp.42-75.
- 143) 作野友康, 後藤輝男 : 島根大学農学部研究報告 **4**, 103-109 (1970).
- 144) 山岸祥恭 : 木材工業 **25**(3), 115-124 (1970).
- 145) 平嶋義彦, 杉原未奈, 佐々木康寿, 安藤幸世, 山崎真理子 : 木材学会誌 **50**(5), 301-309 (2004).
- 146) 柳川靖夫, 増田勝則 : 木材学会誌 **57**(5), 265-275 (2011).
- 147) Caster, D. : Proc. of a symposium, Wood adhesives research, Madison, USA, 1980, pp.199-208.
- 148) 日本建築学学会 : “木質構造設計基準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法”, 日本建築学会編, 丸善, 東京, 2006, pp.408-412.
- 149) 渋谷龍也 : *Journal of Timber Engineering*. **18**(4), 104-109 (2005).
- 150) 平井卓郎 : 木材学会誌 **53**(3), 117-126 (2007).
- 151) (財) 日本住宅・木材技術センター : 木造軸組構法住宅の許容応力度設計, 572-574 (2008).
- 152) 金田弘, 満久崇麿 : 木材学会誌 **21**(11), 596-603 (1975).
- 153) 藤平真紀子, 中村嘉明, 疋田洋子 : 木材保存 **24**(5), 324-329 (1998).
- 154) 大熊幹章, 森泉周 : 木材学会誌 **23**(10), 513-518 (1977).
- 155) Kojima, Y., Suzuki, S. : *J. Wood Sci.* **57**(2), 126-133 (2011).
- 156) 吉田弥明, 田口崇 : 木材学会誌 **24**(10), 720-725 (1978).

- 157) Sugimoto, T., Sasaki, Y. : *J. Wood Sci.* **53** (3), 211-217 (2007).
- 158) ASTM D 2719, Standard Test Method for Structural Panels in Shear Through-the-Thickness (1993).
- 159) European Standard, EN-789, Timber structures-Test methods-Determination of mechanical properties of wood based panels (1995).
- 160) ASTM D 1037, Standard Test Method for Properties of wood-Based Fiber and Particle Panel Material, Edgewise Shear (1993).
- 161) 鈴木滋彦, 縄大輔, 宮本康太, 渋谷龍也 : 材料 **49** (4), 395-400 (2000).
- 162) 吉田弥明, 田口崇 : 木材学会誌 **23** (11), 547-551 (1977).
- 163) 吉田弥明, 田口崇 : 木材学会誌 **23** (11), 552-556 (1977).
- 164) 青木謙治, 渋谷龍也 : 日本建築学会学術講演梗概集, 関東, 2011, pp.227-228.
- 165) 名波直道, 渋谷龍也, 山村浩介 : 日本建築学会学術講演梗概集, 東北, 2000, pp241-242.
- 166) Palka, L.C. : *Forest Prod. J.* **27** (2), 54-57 (1977).
- 167) 渋谷龍也, 名波直道, 岡崎泰男, 東野正, 大西裕二, 神谷文夫 : 日本建築学会学術講演梗概集, 東海, 2003, pp.495-496.
- 168) 神谷文夫, 渋谷龍也, 杉本健一, 三井信宏 : 第 52 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 岐阜, 2002, p.265.
- 169) 神谷文夫 : 日本建築学会構造系論文集 **309**, 86-91 (1981).
- 170) 村上雅英, 稲山正弘 : 日本建築学会構造系論文集 **519**, 87-93 (1999).
- 171) 杉山英男 : 木材学会誌 **39** (1), 75-79 (1993).
- 172) 石山央樹, 腰原幹雄 : 日本建築学会構造系論文集 **676**, 911-918 (2012).
- 173) 戸田正彦, 森満範, 大橋義徳, 平井卓郎 : 木材学会誌 **56** (1), 41-47 (2010).
- 174) 名波直道 : 第 1 回坪井記念研究助成報告書, (社)日本ツーバイフォー建築協会, 2005.
- 175) 関野登, 森崎信 : 木材学会誌 **33** (9), 694-701 (1987).
- 176) 青井秀樹, 三井信宏, 杉本健一, 高麗秀昭, 神谷文夫 : *Journal of Timber Engineering* **17** (2), 27-33 (2004).

- 177) 平井卓郎, 張沛文, 入江康孝, 若島嘉朗 : 木材学会誌 **45**(2), 120-129 (1999).
- 178) 関野登, 高麗秀昭, 野上英孝, 藤本嘉安: 第 58 回日本木材学会大会研究発表要旨集, つくば, 2008, p235-236.
- 179) 青木謙治, 渋沢龍也, 神谷文夫, 谷川信江 : 第 58 回日本木材学会大会研究発表要旨集, つくば, 2008, p192-193.
- 180) 神谷文夫, 鷲海四郎 : 木材学会誌 **35**(4), 313-319 (1989).
- 181) (財) 日本住宅・木材技術センター : 木造軸組構法住宅の許容応力度設計, 368-379 (2008).
- 182) 青木謙治, 杉本健一, 神谷文夫, 谷川信江 : 日本建築学会学術講演梗概集, 中国, 2008, pp447-448.