

現場接着接合部の信頼性向上に関する研究

井上 明 生

①

現場接着接合部の信頼性向上に関する研究

Studies on the Improvement in
Reliability of Field-Glued Joints

井上 明生

A_KI_O I_NO_UE

1992年10月

現場接着接合部の信頼性向上に関する研究

井上明生

目 次

第1章	緒 論	1
第2章	現場接着に関する既往の研究	4
第3章	現場接着用接着剤の接着性能	7
3. 1	エラストマ接着剤の強度特性と接着耐久性	7
3. 1. 1	実 験	8
(a)	接着剤・釘併用接合の耐力試験	8
(b)	温度依存性試験	8
(c)	疲労試験	10
(d)	接着耐久性試験	10
3. 1. 2	結果および考察	11
(a)	接着剤・釘併用接合耐力	11
(b)	温度依存性	14
(c)	疲労特性	17
(d)	接着耐久性	18
3. 2	1液型ポリウレタン接着剤の生材接着性能と接着耐久性	22
3. 2. 1	実 験	23
(a)	スギ生材の接着試験	23
(b)	接着耐久性試験	23
3. 2. 2	結果および考察	25
(a)	スギ生材の接着性能	25
(b)	接着耐久性	25
3. 3	要 約	27
第4章	現場接着における接着条件と接着性能	28
4. 1	実 験	28
(a)	木材含水率	30
(b)	スギ材のプレーナ加工	30
(c)	接着剤の塗布方法と塗布量	30
(d)	圧縮方法	30
(e)	製作温度、養生温度および養生期間	32
(f)	接着性能の試験方法	32
4. 2	結果および考察	32
(a)	圧縮圧力と適正塗布量	32
(b)	接着性能に及ぼす養生期間の影響	34
(c)	接着性能に及ぼす木材の表面性の影響	36
(d)	接着性能に及ぼす木材含水率の影響	36
(e)	接着性能に及ぼす温度の影響	37
(f)	接着性能に及ぼすボルト間隔の影響	40
4. 3	要 約	40

第5章	現場接着接合部の実態調査	4 2
5. 1	現場接着床組の接着性能と接着層形成状態の実態調査	4 2
5. 1. 1	調査方法	4 3
	(a) 調査対象建物	4 3
	(b) 試料の採取	4 3
	(c) 接着剤の分析	4 3
	(d) 接着性能の調査	4 3
5. 1. 2	結果	4 5
	(a) 各部屋の床組の構造	4 5
	(b) 接着剤の分析	4 6
	(c) 接着性能	4 6
5. 1. 3	考察	4 9
	(a) 接着性能に影響を及ぼした因子	4 9
	(b) 現場接着の問題点と対策	5 3
5. 2	曲げ試験された接着重ね梁の接着層形成状態の実態調査	5 3
5. 2. 1	調査方法	5 4
	(a) 接着重ね梁の製作条件	5 4
	(b) 曲げ試験方法	5 4
	(c) 接着層の形成状態の測定	5 4
5. 2. 2	結果および考察	5 4
5. 3	要約	6 0
第6章	現場接着における接着層の形成状態と接着性能	6 1
6. 1	エラストマ接着剤の釘打ち圧縮による接着層形成状態と接着性能	6 2
6. 1. 2	実験	6 4
6. 1. 2	結果および考察	6 4
	(a) 接着層厚さと接着剤の広がり幅	6 4
	(b) 接着層厚さと破壊荷重	6 6
	(c) 接着剤の広がり幅と破壊荷重	6 6
	(d) 有効接着面積と破壊荷重	6 7
	(e) 接着層の形成状態に及ぼす圧縮条件の影響	6 7
	(f) 釘打ち圧縮による接着層の形成状態	6 9
6. 2	各種接着剤の釘打ち接着適性	6 9
6. 2. 1	実験	7 0
	(a) 供試材	7 0
	(b) 試験体の作製	7 1
	(c) 接着剤の広がり面積と接着層厚さの測定	7 1
	(d) 接着強さの測定	7 3
6. 2. 2	結果および考察	7 3
	(a) 接着層の形成状態と接着性能	7 3
	(b) 接着剤の釘打ち接着適性	7 8
	(c) 塗布量と接着性能	8 2
6. 3	1液型ポリウレタン接着剤のボルト圧縮による接着層形成状態と接着性能	8 2
6. 3. 1	実験	8 3
6. 3. 2	結果および考察	8 3
	(a) 接着層の形成状態	8 3
	(b) 接着性能	8 8
6. 4	带状塗布された接着剤の死荷重による接着層の形成状態	8 8
6. 4. 1	実験	8 8
6. 4. 2	結果および考察	8 9
6. 5	带状塗布された接着剤の釘打ち圧縮による接着層の形成状態	9 3
6. 5. 1	実験	9 3
6. 5. 2	結果および考察	9 5
6. 6	要約	1 0 1

第7章 現場接着における接着性能の非破壊検査の可能性	104
7.1 超音波伝播時間と接着性能	104
7.1.1 実験	104
7.1.2 結果および考察	105
7.2 固有振動数と接着層の形成状態	107
7.2.1 実験	108
(a) 床組モデルにおける合板の固有振動数の測定	108
(b) 実大床組における合板の固有振動数の解析	108
7.2.2 結果および考察	110
(a) 床組モデルにおける固有振動数と接着層の形成状態	110
(b) 実大床組における固有振動数と接着層の形成状態	113
7.3 スキマゲージによる接着層の形成状態の非破壊測定	115
7.3.1 実験	115
7.3.2 結果および考察	117
7.4 要約	119
第8章 総括	120
謝辞	127
引用文献	128
Summary	131

第1章 緒 論

接着により、強度および剛性の高い接合部の製造が可能である。接着とは、
いうまでもなく、接着剤を媒介として、化学的または物理的な力またはその両
者によってふたつの面が結合している状態をいう¹⁾。接着による接合法の最も
大きな利点は、接着面全体に応力を分散緩和できるということである²⁾。この
ような利点は、釘、ボルトおよび接合金物による他の接合法では得られない。
木材を分割したラミナおよび単板を接着して一体化することにより、大型木造
建築物にも使われる構造用集成材および構造用合板のような木質材料が製造さ
れている。木材を分割および接着する過程で、節等の木材の欠点が除去される
ため、これらの構造用木質材料はもとの木材よりも強度性能が優れている。こ
のような強度性能の優れた構造用木質材料の製造は、接着によらなければ不可
能である。接着により強度および剛性の高い接合が可能であり、接着接合法は
木材を有効利用するための不可欠の加工法のひとつとなっている。

強度性能の優れた接合が可能な接着接合法を、建築現場においても行うこと
ができるようになれば、接合部および建築物の強度および剛性の向上が期待で
きる³⁾。建築現場における接着（いわゆる現場接着）が可能となれば、木造建
築物における枠材と面材との接合、合板ガセット等による各部材間の接合およ
びボックスビーム等の組立梁の製造を接着により行うことができるようになる。
各接合を接着により行うことにより、接合部および建築物の強度および剛性を
向上させることが可能となり、さらには材料の節約および木材の有効利用にも
つながると考えられる。

しかし、枠組壁工法住宅における現場接着床組を除いて、現場接着による接
合部の構造的性能は認められていない。すなわち、現場接着による接合耐力が
設計計算上0とみなされている。その理由は、品質管理の十分な工場で行われ
る接着とは異なり、現場接着では接着性能に影響を及ぼす種々の因子が変化す
るため、安定した接着性能が得られにくいとためと考えられる。構造的性能を期
待する新たな現場接着工法を開発・実用化するためには、現場接着による接合
部の信頼性を低下させる原因を究明して、それを除去していき、現場接着接合
部の信頼性をさらに向上させることが必要であると考えられる。

そのため、本研究は現場接着接合部の信頼性を向上させることを目的としており、以下の研究からなっている。

接着性能は、大きく分けて、被着材である木材の性質、用いられる接着剤の特性および接着条件に影響されるが、特に用いられる接着剤の影響は大きい。そこで、まず第3章では、現場接着に用いられる接着剤の基本特性および接着性能について検討した。3.1節では、すでに構造的性能が認められている現場接着床組に用いられるエラストマ系床用現場接着剤の強度特性と耐久性について検討した。床用現場接着剤は合板と枠材を接着するための接着剤であり、構造的性能を期待する素材-素材間の現場接着法は開発されてきていない。そこで、3.2節では、素材同士の現場接着を考慮して、1液型ポリウレタン接着剤の生材接着性能および接着耐久性について検討した。

接着剤の特性と同様に、接着条件は接着性能に大きな影響を及ぼす。特に現場接着においては、接着性能に影響を及ぼす種々の因子が大きく変化し、またそれらの影響因子を制御することも困難である。したがって、接着性能に及ぼす現場接着における接着条件の影響を把握しておくことは重要であると考えられる。そこで、第4章では、現場接着における接着条件と接着性能の関係について検討した。ここでは、スギ正角の生材を用いて接着重ね梁を製作する場合の、接着性能に及ぼす木材含水率、木材の表面性、塗布方法および塗布量、養生温度および養生期間等の影響を調べ、接着重ね梁の最適製作条件について検討した。

接着接合部の性能は用いられる接着剤の種類と接着条件に影響されるため、接着接合部の信頼性は、ある接着剤を用いてある接着条件で接着されたものに定義される。接着接合部の信頼性を向上させるためには、接着されたものについて、信頼性を低下させる原因を明らかにし、その原因を除去していくことが必要である。したがって、接着されたものである現場接着接合部の実態調査を行い、接着性能を低下させる原因および現場接着の問題点を究明することは、現場接着接合部の信頼性を向上させるために必要なことである。そこで、第5章では、現場接着接合部の実態調査により、現場接着の問題点について検討した。5.1節では、すでに構造的性能が認められている現場接着床組の接着性能と接着層形成状態の実態調査を行い、現場接着の現状把握と問題点抽出を行

った。また、5. 2節では、前章の成果をもとに製作され、曲げ試験された接着重ね梁の接着層形成状態を調査し、曲げ性能および曲げ破壊形態に及ぼす接着層形成状態の影響について検討した。

第6章では、前章の現場接着接合部の実態調査により明かとなった問題点、すなわち、現場接着における接着層の形成状態と接着性能について検討した。6. 1節では、エラストマ系床用現場接着剤を用いて合板と素材を釘打ち接着した場合の接着層の形成状態と接着性能について検討した。6. 2節では、市販の各種接着剤を用いて合板と素材を釘打ち接着した場合の接着層の形成状態と接着性能を調べ、各種接着剤の釘打ち接着適性について検討した。6. 3節では、1液型ポリウレタン接着剤を用いて素材と素材をボルト圧縮により接着した場合の接着層の形成状態と接着性能の関係について検討した。6. 4節では、帯状塗布された接着剤の死荷重による接着層形成状態を調べ、接着層形成状態に影響する因子を明らかにし、その結果をもとに、6. 5節では、釘打ち圧縮による接着層の形成機構および形成状態予測法について検討した。

接着性能を非破壊的に検査することができれば、現場接着接合部の信頼性を向上させることが可能である。そこで、第7章では、現場接着における接着性能の非破壊検査の可能性について検討した。7. 1節では、超音波伝播時間と接着性能の関係について検討した。また、接着性能を直接的に検査することができなくても、接着層の形成状態を検査することができれば、接着性能を推定することが可能であるため、7. 2節では、固有振動数と接着層形成状態の関係について検討し、7. 3節では、スキマゲージを用いての接着層形成状態の非破壊的測定方法について検討した。

このように、本研究は、現場接着用接着剤の性能の検討から始まって、接着性能に及ぼす接着条件の影響、現場接着の問題点、現場接着における接着層の形成状態と接着性能、および現場接着における接着性能の非破壊検査の可能性の検討に至るまで一貫して現場接着接合部の信頼性向上を追求したものである。

第2章 現場接着に関する既往の研究

構造的用途に現場接着工法を適用するための最初の研究はRose³⁾により報告されている。Roseは、床根太と合板を釘打ち接着する床組(現場接着床組)について、そこに使われる構造用接着剤の品質と現場接着床組の構造性能について検討した。広範囲の温度と含水率条件のもとで、現場接着により信頼できる性能を得るためには、現場接着用の構造用接着剤に以下の5点の特性が必要であるとしている。①接着剤のせん断強さが合板のローリングシアー応力を大きく越えること。②接着剤の使用が温度および湿度条件に制約されないこと。③接着剤が空隙充填性を有すること。④開放体積時間が長くても接着性能が低下しないこと。⑤耐久性があること。また、床根太に合板を現場接着することにより床組の剛性が著しく増加し、床根太間隔を広くすることができること、または、床根太の寸法を小さくできることを明らかにしている。これらの成果を基に、床用現場接着剤の規格が整備され⁴⁾、また、アメリカ合衆国では現場接着床組が実用化され、はじめて現場接着による構造的性能が認められることになった⁵⁾。

Vick⁶⁾は、エラストマ系接着剤の現場接着床組に対する適性について検討している。すなわち、接着剤の空隙充填性、湿潤木材の接着性、耐水性、耐クリープ特性、および酸素老化性により、20種類のエラストマ系接着剤の現場接着適性を評価している。

Vick⁷⁾およびCasterら⁸⁾はフェノール・レゾルシノール樹脂接着剤の空隙充填性について検討している。Vickはアスベスト等の充填剤を添加して接着剤の稠度(consistency)を増加させることが、接着剤の空隙充填性および釘打ち接着適性の改良に効果的であるとしている。Casterらは、集成材の製造において、空隙充填性の改良されたフェノール・レゾルシノール樹脂接着剤を用いることにより、表面の荒いラミナまたはプレーナ加工していないラミナの接着が可能であるとしている。

Zorningら⁹⁾は、釘打ち接着接合部の性能に及ぼす釘打ち方法および接着剤の稠度の影響について検討している。接着剤の稠度により異なるが、機械打ちより手打ちによる釘打ちのほうが良好な接着性能が得られ、また、釘打ち間隔が60cm以下であれば、釘打ち方法および接着剤の稠度に関わらず、釘打ち間隔の

影響がないとしている。

我国では、現場接着に関する最初の研究が海老原¹⁰⁾により報告されている。海老原は、レゾルシノール樹脂接着剤を用いて枠材と合板を釘打ち接着したときの枠材-合板間の圧力、接着強さおよびT形梁の曲げ剛性について検討しており、レゾルシノール樹脂接着剤に充填剤を添加することにより、空隙充填性が改良されること、および釘打ち接着によりT形梁の曲げ剛性が著しく増加することを明らかにしている。

また、海老原¹¹⁾は木造建築における現場接着について検討している。現場接着による接合部に剛性および耐力を期待するには、接着性能に絶対的な信頼が必要であると、そのために要求される接着剤の性能を以下の6点にまとめている。①取り扱いが簡単なこと。②開放体積時間が長くてよいこと。③接着性能が環境条件の影響を受けにくいこと。④空隙充填性があること。⑤釘打ちによる低圧力で良好な接着性能が得られること。⑥耐水性および耐久性があること。

平嶋¹²⁾らは枠組壁工法住宅床組に接着剤を併用した場合の構造耐力について検討し、接着剤を併用することにより床組の曲げ剛性が増加することを明らかにした。この成果を基に、1979年から住宅金融公庫の枠組壁工法住宅工事共通仕様書¹³⁾に釘打ちのみの施工法による床根太スパン表の他に、釘と接着剤を併用した場合のスパン表が新たに加えられることになった。すなわち、接着剤を併用することにより、根太スパンを大きくすること、または根太の寸法を1ランク下げることができるようになり、我国でも、はじめて現場接着による構造的性能が部分的にはあるが認められることになった。これに伴い、日本住宅・木材技術センターでは、アメリカ合板協会の規格AFG-01¹⁴⁾を基に、床用現場接着剤の性能試験方法¹⁵⁾を定め、床用現場接着剤の認定を行っている。この試験には、湿潤材、凍結材および乾燥材での接着試験の他に、空隙充填性、耐水性および酸素老化性試験が含まれている。

佐藤ら¹⁶⁾および吉田ら¹⁶⁾は、釘打ち接着したボックスビームの強度性能について検討しており、釘打ち接着ボックスビームの強度性能が、釘着接合ボックスビームより大きく、機械接着したボックスビームと同程度であることを明らかにしている。

これらの研究により、釘打ち接着でも剛性および強度の大きい構造部材を製

造できることが、実験室的には明かとなったが、現場接着床組を除いて、構造的用途への現場接着工法の適用は認められていない。その理由は、海老原も指摘しているように、釘打ち接着で信頼性の高い接合部が得られるかどうかという基礎的資料が不足しているためと考えられる。そのため、釘打ち接着および釘打ちによる圧縮効果についての研究が多く行われた。

吉田ら¹⁷⁾は、釘打ち接着による接合部の性能に及ぼす、接着剤の種類、釘の種類、釘打ち間隔、塗布量および被着材厚さの影響について検討している。また、吉田ら¹⁸⁾は、釘打ちの圧縮効果について検討しており、釘打ち点から離れると釘打ちの圧縮効果が急激に低下すること、釘打ち間隔が10cmの場合、釘間中央部での圧力が0.5~1.0kgf/cm²であることを明らかにしている。また、風間ら¹⁹⁾は、釘の押し込み抵抗と押し込み圧縮圧力について検討している。

楊ら^{20), 21)}はボルト・クランプによる圧縮における圧縮圧分布と接着性について検討しているが、圧縮位置から被着材の厚さの1.5倍程度離れると圧縮圧力がほとんど存在しなくなること、および接着性能が低下してばらつきが大きくなることを示している。

釘打ちおよびボルトによる部分圧縮の効果に関して主に接着剤が存在しない場合の圧縮圧力のみが検討されてきた。筆者²²⁾は、接着剤の粘弾性的性質を考慮して、帯状塗布したエラストマ系接着剤の接着層形成状態に圧縮圧力だけでなく、圧縮時間が影響することを示し、また、エラストマ系の接着剤が釘打ちにより線状の不均一な接着層を形成すること、破壊荷重が有効接着面積に比例することを明らかにした。また筆者²³⁾は、帯状塗布した1液型ポリウレタン接着剤の釘打ち圧縮による接着層の形成状態に影響する因子が、主に接着剤の粘度、塗布量、釘打ち間隔および面材の曲げ剛性であることを示し、接着剤の粘度と温度が一定の条件における接着層の形成状態予測法を提案している。

さらに、筆者らは、現場接着接合部の信頼性を向上させるための一連の研究を行っており、床用現場接着剤の強度特性と耐久性²⁴⁾、現場接着床組の実態および問題点²⁵⁾、各種接着剤の釘打ち接着適性²⁶⁾、1液型ポリウレタン接着剤による接着重ね梁の製作条件²⁷⁾、および接着接合部の非破壊検査法²⁸⁾について検討を行っており、現場的な条件での製作をも考慮した接着重ね梁の製作マニュアルおよび検査マニュアルを提案している²⁹⁾。本論文は、これらの一連の研究をとりまとめたものである。

第3章 現場接着用接着剤の接着性能

接着接合部の性能は、大きく分けて、被着材である木材の性質、接着剤の特性、および接着条件に影響されるが、特に接着剤の特性は接着接合部の性能を決定する重要な影響因子である。現場接着接合部の性能および信頼性を考慮する場合も、まず、現場接着に用いられる接着剤の性能を把握しておくことが重要であり、また必要であると考えられる。したがって、本章においては、現場接着用接着剤の特性および接着性能について検討した。

現場接着床組にはエラストマ系の床用現場接着剤が用いられるが、エラストマ接着剤は、従来から構造用木質材料の製造に使われる熱硬化性樹脂接着剤とは異なる性質を有していると考えられる。したがって、エラストマ接着剤に特有の性質（温度依存性および疲労特性等）および接着耐久性を調べておくことは、現場接着床組の信頼性を向上させ、さらには、新たな現場接着法を開発するために、必要であると考えられる。そこで、3.1節では、エラストマ接着剤の強度特性と耐久性について検討した。

現場接着床組は合板と素材を接着接合したものであるが、構造的性能を期待する素材-素材間の現場接着法は開発されてきていない。そこで、3.2節では、素材同士の現場接着を考慮して、1液型ポリウレタン接着剤のスギ生材の接着性能および耐久性について検討した。

3.1 エラストマ接着剤の強度特性と耐久性

現場接着床組には、日本住宅・木材技術センターの定めた「床用現場接着剤の性能試験方法」の基準に合格し、認定された接着剤を使用することになっている。現在認定されている床用現場接着剤はゴム系の成分を主成分とするエラストマ系の接着剤がほとんどであり、いままで構造用途に使われていた熱硬化性の接着剤とは異なった性質を有すると考えられる。しかし、海老原¹⁾も指摘しているように、エラストマ接着剤の耐久性および耐熱性等のデータはほとんどない。したがって、エラストマ接着剤を構造用途に使用する場合、その接着剤に特有の性能（接着強さの経時変化、温度依存性、耐熱性および疲労特性等）および耐久性を把握しておくことは、現場接着床組の信頼性を向上させ、さ

らには、新たな現場接着の可能性を見いだすために重要であると考えられる。

そこで本節においては、まず、1)釘のせん断試験体にエラストマ系の床用現場接着剤を適用して、釘接合と接着接合の接合耐力の比較、接着剤・釘併用接合の接合耐力に与える養生期間、面材料の種類および繊維方向の影響について検討し、次に、2)エラストマ接着剤の温度依存性、3)疲労特性、4)接着耐久性について検討した。

3. 1. 1 実 験

(a) 接着剤・釘併用接合の耐力試験

釘のせん断試験体にエラストマ系の床用現場接着剤（コニシボンドG77、クロプレングム・フェノール樹脂系接着剤）を適用し、試験体を作製した。Fig. 1に示すように204材（Hem-Fir、比重0.41～0.62）を主材として、その両側面の中央付近に接着剤を带状（beads状）に1本塗布し、CN50釘4本（片面につき2本）を用いて側材とした各種面材を打ちつけた。釘打ち間隔は8cmとし、接着剤の塗布量は、釘打ち後に接着剤が側面からはみ出す程度、すなわち接着剤が接着面全体に広がる程度とした。接着面積は両面で126cm²であった。試験体の作製時期は8月～9月であり、室温は30℃を超えていた。養生時期は8月～12月で、室内に放置した。側材には広葉樹合板（南洋材、厚さ12mm、比重0.50～0.75、5プライ構成）、針葉樹合板（Hem-Fir、厚さ12mm、比重約0.45、4プライ3層構成）、パーティクルボード（PB、比重約0.78）および中質繊維板（MDF、比重約0.72）を用いた。なお、合板を側材とした場合は、表単板の繊維方向が主材である木材の繊維方向（加力方向）と平行または垂直となるように試験体を作製した。

試験にはオルセン型材料試験機を使用し、主材と側材のすべりの測定には2個の歪変換式変位計を使用してX-Yレコーダで記録した。試験2日前に試験体を20℃の恒温室内に入れて雰囲気温度に調整した後、同恒温室内で試験した。試験数は各条件につき5個とした。

(b) 温度依存性試験

カバ桎目材（長さ180mm、幅25mm、厚さ5mm）2枚を、(a)で用いたものと同じ接着剤を用いて接着した。圧縮は死荷重により、0.2kgf/cm²の圧力で24時間とした。比較のため、レゾルシノール樹脂接着剤（RF）および酢酸ビニル樹脂エ

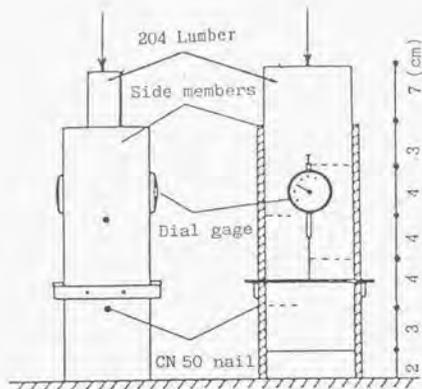


Fig. 1. Test specimen for shear test of nailed-glued joint.

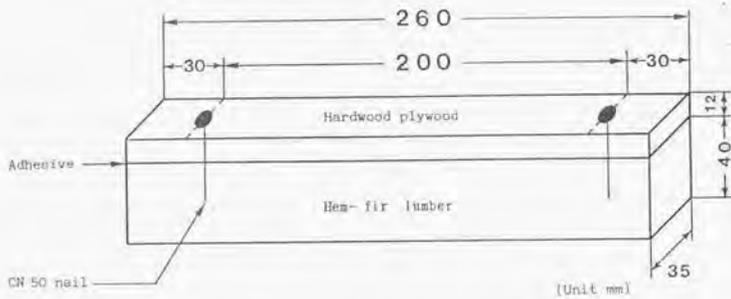


Fig. 2. Configuration and dimensions of joint for testing durability.

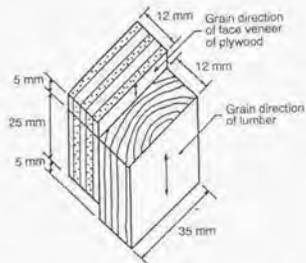


Fig. 3. Configuration and dimensions of block-shear specimen.

マルジョン接着剤 (PVAc) を用いてカバ材を接着した。この場合の圧縮条件は、 15kgf/cm^2 の圧力で24時間とした。室温で1カ月以上養生した後、幅10mm、長さ80mm、鋸目間隔5mm、接着面積 0.5cm^2 の引張りせん断試験片に仕上げた。

恒温槽付きのインストロンタイプ (ストログラフ) 試験機を用いて、 -40°C 、 0°C 、 25°C 、 36°C および 70°C の雰囲気中での接着強さを測定した。なお、試験前に試験片を各雰囲気温度に24時間静置した後、試験に供した。試験速度は試験機のクロスヘッドの速度としたが、荷重速度がほぼ一定となるよう、温度 -40°C 、 0°C および 25°C においては 2mm/min 、 36°C および 70°C においては 5mm/min に設定した。

(c) 疲労試験

試験体は温度依存性試験に用いたものと同じものとした。

疲労試験には、ASTM-D-671-63T B法に従った荷重一定型の振動疲労試験機 (東洋精機製) を用いた。繰り返し速度は 1800cpm (cycle per minute) であり、両振りで行った。試験温度は 20°C として、各接着剤の疲労特性を比較するための試験を行った。エラストマ接着剤については、6カ月以上養生して接着剤が十分硬化したと思われる試験片をこの試験に供した。また、エラストマ接着剤の接着性能に養生期間および温度が影響することが静的な試験から推測されたため、エラストマ接着剤については、より過酷な条件 (養生1~3カ月、温度 30°C) での疲労試験も行った。

(d) 接着耐久性試験

日本住宅・木材技術センターの定めた「床用現場接着剤の性能試験方法」に準じて試験体を作製した。Fig. 2に示すように、素材 (Hem-Fir) に接着剤を帯状に塗布して、オープンアッセンブリタイムを10~15分とり、広葉樹合板を重ねて、CN50釘2本打ちとした。釘間隔は20cmとし、塗布量は 300g/m^2 を目安とした。この場合、釘打ち後に接着剤は側面からはみ出し、接着剤が接着面全体に広がっていることが確認されたため、十分な塗布量と判断された。8月~9月に試験体を作成し、室内で2週間以上養生した後、釘を付けたまま熱劣化、温水浸せき繰り返しおよび屋外暴露の各処理を施した。熱劣化処理は 100°C 、 120°C および 140°C で24時間加熱とした。温水浸せき繰り返し処理は、 45°C 温水浸せき4時間 - 45°C 乾燥20時間を1サイクルとし、10サイクルまで行った。また屋外暴露

は、森林総合研究所の暴露試験地（つくば）に設置された架台に試料を取り付けて、南面垂直で行った。なお試験体数は各条件とも5個とし、各処理後、室温で2週間程度養生した後、1試験体から5個（合計25個）のブロックせん断試験片（Fig. 3）を作製して接着強さを測定した。

3. 1. 2 結果および考察

（a）接着剤・釘併用接合耐力

側材に広葉樹合板を用いて表単板の繊維方向を荷重方向と平行とした場合の接着剤・釘併用接合の最大耐力と養生期間の関係をFig. 4に示す。この結果は5体の試験体の平均値で示してある。今回用いたエラストマ接着剤は、溶剤が揮散することにより硬化するため、硬化には長期間を要する。養生期間1カ月程度まで接合耐力の増加は急で、その後養生期間4カ月まで徐々に増加した。Fig. 5に各養生期間における試験体ごとの荷重—すべり曲線を示す。また、Fig. 6は各養生期間における5体の試験体の各変位における荷重を平均したものである。養生期間10日までの間は、すべり量0.7mm~0.9mmの位置に降伏点があり、降伏点を過ぎても耐力の低下は少なく、接着剤がまだ流動的な状態にあると考えられる。養生期間1カ月になると、降伏点の位置はすべり量1.0mmと大きくなり、接着剤は粘り強い状態にある。養生期間4カ月になると、降伏点の位置はすべり量0.64mmと小さくなり、降伏点を過ぎると耐力は急激に低下した。これは、現場接着剤が養生期間4カ月程度まで硬化が進行して、ゴム状態からややガラス様状態に近づくためと考えられる。

次に養生期間4カ月における釘と接着剤の接合耐力の差をFig. 7に示す。釘のみの接合試験体の最大耐力は、釘4本で644kgfであり、そのときのすべり量は13mm以上に達した。一方、養生後に釘を抜いて接着剤のみとした試験体の接合耐力は2867kgf（接着強さは22.8kgf/cm²）であり、そのときのすべり量は0.69mmであった。すべり量が0.69mmのときの釘が受け持つと考えられる荷重は釘4本で300kgf程度であり、接着剤と釘を併用した場合の接合部では、ほとんど接着剤が耐力を負担していると考えられる。接着剤と釘を併用した試験体の最大耐力は3464kgfであり、接着剤のみの場合よりも600kgf程度増加している。この増加は釘が受け持つと考えられる300kgfより大きい。この原因は明らかではないが、試験時の観察からすると釘は試験体の下部の面材の開きを抑える効果があ

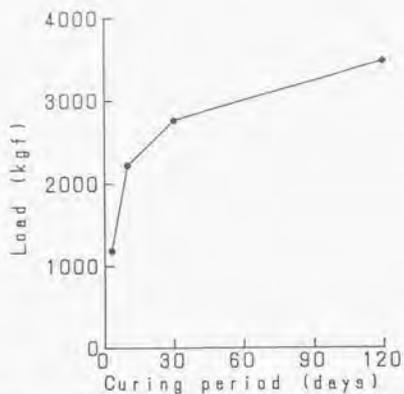


Fig. 4. Effect of curing period on maximum shear-strength of nailed-glued joints.

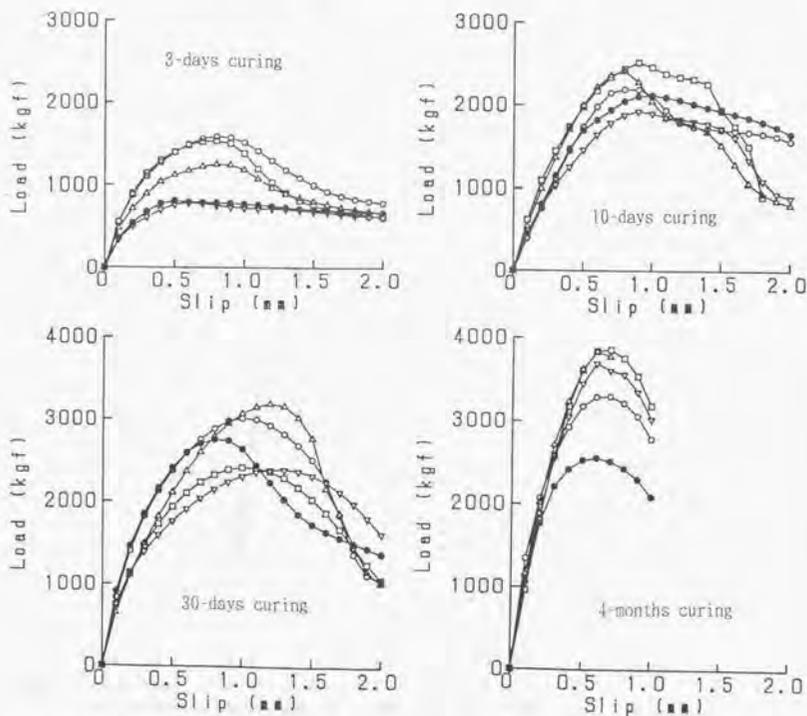


Fig. 5. Load-slip curves of nailed-glued joints.

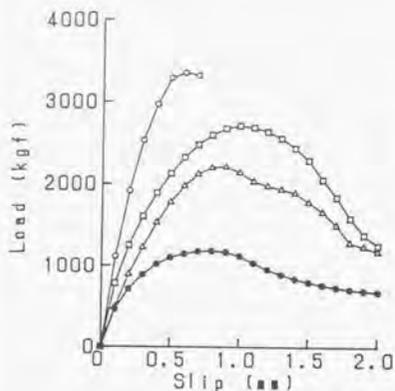


Fig. 6. Effect of curing period on load-slip curves of nailed-glued joints.

Legend of curing period:

- : 3 days.
- △: 10 days.
- : 30 days.
- : 4 months.

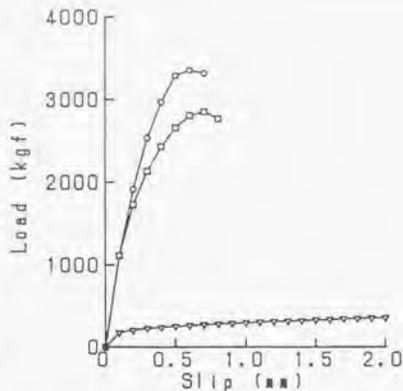


Fig. 7. Load-slip curves of joints.

Legend: ○: Nailed-glued joint.
□: Glued (unnailed) joint.
▽: Nailed joint.

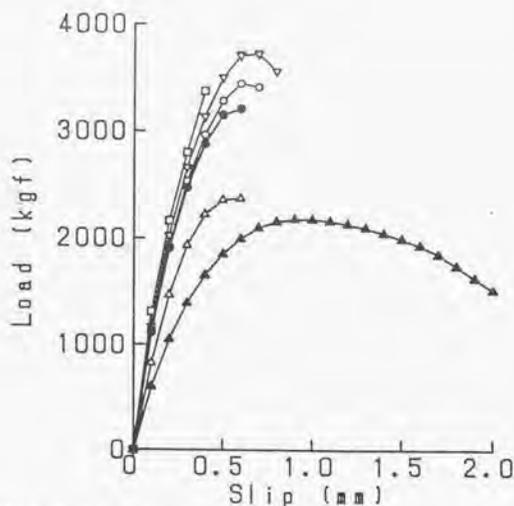


Fig. 8. Effect of side members on load-slip curves of nailed-glued joints.

Legend of side members and grain direction:

- : Hardwood plywood, parallel.
- : Hardwood plywood, perpendicular.
- △: Softwood plywood, parallel.
- ▲: Softwood plywood, perpendicular.
- : Particleboard.
- ▽: Medium-density fiberboard.

り、そのために接着剤と釘を併用した場合の最大耐力が、接着剤と釘の耐力の単純な和より大きくなったと考えらる。

側材の種類と合板の表単板の繊維方向が耐力に与える影響を比較した結果をFig. 8に示す。この試験は4か月養生した後に行ったもので、接着剤は十分硬化していたと判断される。広葉樹合板を側材とした場合は合板の表単板の繊維方向と加力方向のちがいにより、耐力の差はなかった。PBおよびMDFを側材とした場合も、広葉樹合板と同様な荷重-すべり曲線を示している。これらの材料を側材とした場合は、接着剤の凝集破壊または界面破壊が生じ、最大耐力は接着剤の強さで決まるため側材による耐力の差が生じなかったものと考えられる。これに対し、針葉樹合板を側材とした場合では、他の材料を側材としたときより最大耐力は低く、また、表単板の繊維方向を加力方向と垂直にした場合には、平行にした場合よりも最大耐力は低下した。針葉樹合板を側材とした場合は、針葉樹合板のローリングシアにより破壊する試験体が多く観察された。この針葉樹合板はアメリカ製のもので4プライ3層構成で心単板2枚が同じ方向になっており、また、単板の裏割れが合板の表面に出ている試料もあった。針葉樹合板を側材とした場合の最大耐力は合板のせん断強さで決まり、そのために他の材料を側材とした場合よりも最大耐力が低下したと考えられる。

(b) 温度依存性

カバ材2枚合わせ引張りせん断試験の結果をTable 1に示す。エラストマ接着剤は、釘打ち圧縮により網目状の接着層を形成するが、 0.2kgf/cm^2 の死荷重を24時間かけることにより均一な面の接着層が得られた(Fig. 9)。養生期間1か月におけるエラストマ接着剤の接着強さは、レゾルシノール樹脂接着剤および酢酸ビニル樹脂接着剤の接着強さが $170\sim 180\text{kgf/cm}^2$ 程度であるのに対し、その3分の1の 62kgf/cm^2 であり、養生期間6か月となると2分の1を上回る 104kgf/cm^2 となった。また、接着層にスペーサとして 0.8mm の針金を挿入し、接着層を厚くした場合の接着強さは、挿入しない場合の2分の1の 51kgf/cm^2 となった。このときの接着層の形成状態は網目状(Fig. 10)となり、釘打ちにより形成される接着層の状態(Fig. 15、16)とよく似ていた。

養生期間1か月における各雰囲気温度における接着強さをFig. 11に示す。 -40°C での接着強さは、常温におけるレゾルシノールと同等の 166kgf/cm^2 に達し、

Table i. Result of two-ply tensile shear test.

Adhesive	Temperature (°C)	Curing period (months)	Bond strength (kgf/cm ²)		Wood failure (%)
			Mean	σ_a^{*3}	
R ^{b2}	20	1	172.2	32.2	100
PVAc ^{c2}	20	1	179.0	38.8	28
G ^{d2}	25	1	62.2	11.7	0
G	20	6	104.6	14.4	5
G, Spacer ^{e2}	20	6	51.3	18.4	0
G	-40	1	166.0	11.1	50
G	0	1	85.8	13.4	0
G	36	1	50.2	7.8	0
G	70	1	23.2	4.9	0

^{a2} Standard deviation.

^{b2} R: Resorcinol resin adhesive.

^{c2} PVAc: Polyvinyl acetate emulsion adhesive.

^{d2} G: Elastomeric adhesive.

^{e2} Spacer: Spacers (0.8 mm thick) were inserted into the glue line to form a thick glue-line.



Fig. 9. A uniform glue line obtained by a pressure of 0.2 kgf/cm² for 24 hrs.



Fig. 10. A thick and net-shaped glue line resulting from spacers.

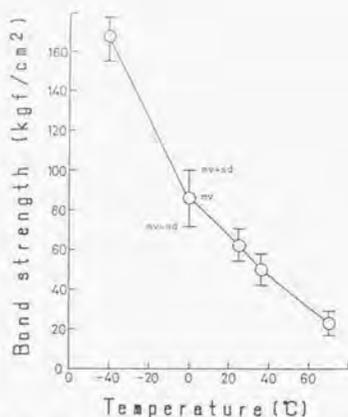


Fig. 11. Temperature dependence of bond strength in tensile shear for an elastomer-based adhesive.

Legend: mv: mean value.
sd: standard deviation.

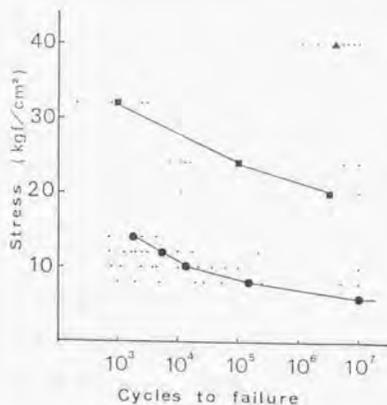


Fig. 12. Stress versus number of cycles to failure.

Legend: ●: Elastomer-based adhesive after 1 to 3 months-curing.
■: Elastomer-based adhesive after more than 6 months-curing.
▲: Resorcinol adhesive.

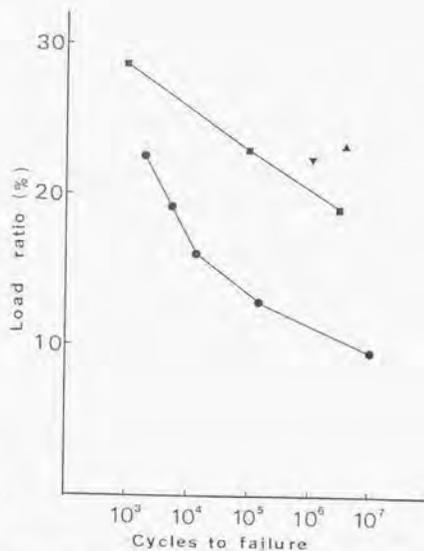


Fig. 13. Load ratio versus number of cycles to failure.

Legend: ●: Elastomer-based adhesive after 1 to 3 months-curing.
■: Elastomer-based adhesive after more than 6 months-curing.
▲: Resorcinol adhesive.
▼: Polyvinyl acetate emulsion adhesive.

カバ材の木部破断も観察された。一方、70℃での接着強さは23.2kgf/cm²となり、すべて接着剤の凝集破壊によるものであった。他の中間温度ではほとんどが界面破壊を示した。今回用いたエラストマ接着剤は合成ゴム系であるため、接着強さに対する温度の影響が大きく、20℃での接着強さを100%とすると、40℃および60℃での接着強さはそれぞれ71%および48%となる。より実大のサイズに近い接着剤・釘併用接合耐力試験で得られた20℃での接着強さ19.4~25.2kgf/cm²を基準に換算すると、40℃および60℃での接着強さはそれぞれ13.8~17.9および9.3~12.1kgf/cm²と推測される。

(c) 疲労特性

疲労試験の結果をFig. 12, 13に示す。Fig. 12は縦軸に応力をとり、横軸に繰り返し数をとったもので、個々の測定結果を小さい点で示し、各応力水準における寿命の対数平均を大きな点で示したものである。Fig. 13は縦軸に荷重比（繰り返し応力/静的接着強さ）をとり、対数平均だけを示したものである。エラストマ接着剤の養生期間1~3カ月の場合の荷重比は、養生期間1カ月の室温（約25℃）での静的接着強さを基準とし、養生期間6か月以上の場合の荷重比は養生期間6か月の20℃での静的接着強さを基準としている。

レゾルシノールおよび酢酸ビニル樹脂接着剤の場合は、応力が40kgf/cm²のときの寿命は10⁶~10⁷の範囲にあった。養生6か月以上において20℃で試験したときのエラストマ接着剤の疲労強度（繰り返し数が10⁷回のときの時間強度）は20kgf/cm²弱であり、これはレゾルシノールの2分の1程度である。しかし、養生期間1~3か月において30℃で試験したときのエラストマ接着剤の疲労強度は6kgf/cm²程度であり、これはレゾルシノールの6分の1程度である。

荷重比でみると、養生6か月以上において20℃で試験したときのエラストマ接着剤の疲労強度は静的強度の20%弱であり、レゾルシノールおよび酢酸ビニルと同等であるが、養生1~3か月において30℃で試験したときの現場接着剤の疲労強度は静的強度の10%以下となり、荷重比からみても養生期間が短く、温度が高いときの疲労強度は低い。

疲労破壊の破壊形態は、レゾルシノールの場合はすべてカバ材の木部破断であった。酢酸ビニルの場合は強度的にはレゾルシノールなみであったが、接着剤の凝集破壊の傾向が認められた。この破壊形態の差は熱硬化性樹脂と熱可塑

性樹脂の差によると考えられる。黒田ら³⁰⁾は、熱可塑性樹脂を疲労試験すると内部発熱により樹脂が軟化するとしているが、そのために熱可塑性樹脂である酢酸ビニルの凝集破壊が生じたと考えられる。エラストマ接着剤の場合はすべて接着剤の凝集破壊によっており、破壊直前にはたわみが著しく増加し、接着層の温度も上がり破壊に至った。接着層に熱電対を入れて破壊時の温度を測定したところ、60℃まで上がることが確認された。接着層の温度が上がると接着強さは低下するため、実際には荷重比が上がることになる。繰り返し速度が速い場合は、エラストマ接着剤は発熱を伴い荷重比が大きくなるため、疲労強度が小さくなると考えられる。

(d) 接着耐久性

養生期間1か月および3か月における試験結果のすべてをFig. 14に示す。線で結んだ点は1試験体から採取した試験片の接着強さを示す。横軸に示す番号で1および5は釘に近い部分から、3番は釘と釘の中央部分から採取した試験片を示す。この図から次のことが推察される。すなわち、①接着強さのばらつきが大きい。②1試験体の中のばらつきよりも、試験体間のばらつきの方が大きい。③釘間隔を20cmとした今回の場合、1試験体の中で、釘からの距離と接着強さには特定の関係が認められない。このような接着強さのばらつきの主な原因は、ここで用いた接着剤が釘打ち圧縮によっては面としての均一な接着層を形成することができず、網目状の接着層を形成するため、実際に接着に関与している有効接着面積がばらつくためと考えられる。Fig. 15は接着強さが比較的大きく、有効接着面積も大きいと思われる試験片の破壊面の写真であり、一方、Fig. 16は接着強さが小さく、有効接着面積も小さいと思われる試験片の破壊面の写真である。

各処理後の接着強さをTable 2に示す。100℃および120℃で加熱処理した場合は接着強さの低下は認められなかったが、140℃で加熱処理した場合は接着強さが著しく低下した。このとき接着層は黒色化していたため、接着剤の熱分解または炭化等の化学変化が生じたものと推察される。

温水浸せき繰り返し処理では、3サイクルで接着強さが低下しているが、10サイクルでは初期の接着強さと同程度の値を示し、また木部破断率が増加している。この木部破断部位は合板側であった。こうしたことから、3サイクルめでの

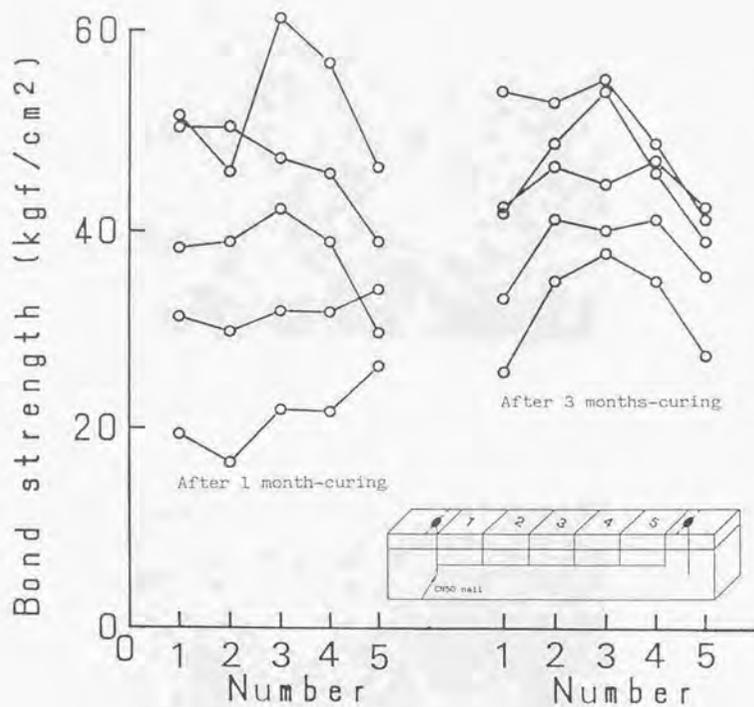


Fig. 14. Result of block-shear test.

Notes: Numbers on lateral axis show the positions of specimens. Nos. 1 and 5 are specimens cut from near nails, whereas No. 3 is the specimen cut from the center between two nails.



Fig. 15. Photograph of the fractured surface for a block-shear specimen.
Notes: Bond strength of this specimen was 50.3 kgf/cm^2 and the effective glue-spreading area was relatively wide.

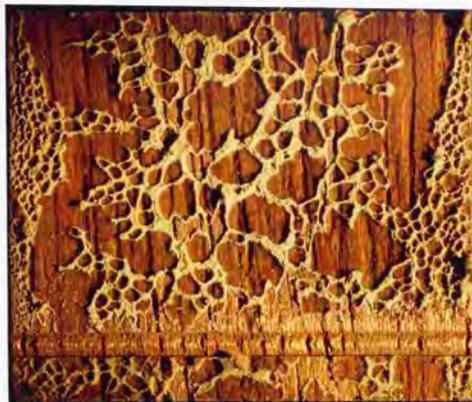


Fig. 16. Photograph of the fractured surface for another block-shear specimen.
Notes: Bond strength of this specimen was 26.3 kgf/cm^2 and the effective glue-spreading area was relatively narrow.

Table 2. Bond strength after accelerated-aging treatment.

Accelerated aging treatment	Bond strength (kgf/cm ²)		Wood failure (%)
	Mean	σ_s ^{a)}	
(After one-month curing)	37.5	11.8	12.0
(After three-month curing)	42.1	7.6	0
Heating at 100 °C, 24 hrs	36.8	11.7	0
Heating at 120 °C, 24 hrs	39.8	9.2	0
Heating at 140 °C, 24 hrs	26.4	8.7	0
Hot-water soaking ^{b)} , 1 cycle	44.3	13.5	15.6
Hot-water soaking ^{b)} , 3 cycles	32.1	6.5	0
Hot-water soaking ^{b)} , 10 cycles	48.9	11.6	19.2
Outdoor exposure, 1 year	55.4	9.7	0
Outdoor exposure, 2 years	45.5	10.2	0
Outdoor exposure, 3 years	47.3	9.3	22.4

^{a)} Standard deviation.

^{b)} Hot-water soaking: 45 °C hot-water soaking, 4 h; 45 °C drying, 20 h.

接着強さの低下はばらつきによるものと考えられる。なお、比較のために釘のみで接合した試験体に温水浸せきを繰り返すと釘が抜けてきて合板と素材の間に隙間ができたが、接着剤を併用すると隙間ができずに釘の頭が合板からとびだすことが観察された。こうした現象から判断して、接着剤を併用することによって、長期間床鳴りを防止する効果があることが予測される。

屋外暴露では、1年後の接着強さは初期の値より大きい。これはばらつきがあるとしても、硬化が促進されたためと考えられる。3年後においても初期と同程度の接着強さを保持し、また合板の木部破断率が増加している。この木部破断は、合板と枠材との間の接着層付近に生じたものではなく、合板自体のローリングシア—または合板の接着層における破断であった。合板の屋外暴露試験²¹⁾によれば、東京において、メラミン・ユリア共縮合樹脂接着剤を用いた無塗装の合板を屋外暴露した場合、3年程度ではく離れたことが報告されている。これらの結果から今回用いたエラストマ系の床用現場接着剤による接合部の耐久性を検討すると、合板のJASで規定する1類と同等以上であると判断できる。

3. 2 1液型ポリウレタン接着剤の生材接着性能と接着耐久性

すでに構造性能が認められている現場接着法に現場接着床組があるが、現場接着床組は合板と素材とを接着したものであり、構造性能を期待する素材—素材間の現場接着法は開発されてきていない。現場接着床組に用いられるエラストマ系の床用現場接着剤も、合板と素材との接着を意図されており、合板のローリングシア—に相当する強度性能が要求されているにすぎない。構造的な性能を期待する素材—素材間の新たな現場接着法を開発するためには、エラストマ接着剤よりも強度性能の優れた接着剤が必要になると考えられる。また、現場接着を考慮すれば、含水率の高い木材でも接着することが可能であることが接着剤に要求される。さらに、接合部に構造的な性能を期待するには、接着耐久性が高いことが必要である。このような要求に見合う接着剤としては、湿気硬化型の1液型ポリウレタン接着剤が考えられる。

本節では、素材—素材間の現場接着の可能性を追求するため、湿気硬化型1液型ポリウレタン接着剤の生材接着性能、耐熱性および接着耐久性について検討した。

3. 2. 1 実 験

(a) スギ生材の接着試験

供試接着剤には、1液型ポリウレタン接着剤【日本ポリウレタン工業(株)製ウッドロック】と比較のために、生材でも接着可能と考えられる2種類のエポキシ樹脂接着剤【ホーネンコーポレーション(株)製ホーネンレジングル-E-82およびE-1001】を選んだ。E-82は、樹脂率100%の標準的な2液型エポキシ樹脂接着剤であり、一方、E-1001は充填剤を含んだ高粘度タイプの2液型エポキシ樹脂接着剤である。

供試材はスギである。Fig. 17に示す木取りで、長さ30mm、幅25mmおよび厚さ10mmの試料を採取した。このうちFig. 17の1、3、4、5、11、13、14および16番の試験片の接着面は追征となり、他のものは板目となっていた。試料の含水率は60~100% (全乾法)であった。

試料を供試接着剤により接着し、集成材のJASで規定するブロックせん断試験片を作製した。接着条件は、圧縮圧力を 2kgf/cm^2 、圧縮時間を24時間、温度を 20°C とした。含水率変化を抑えるため、ブロックせん断試験片をビニール袋にいれ、同温度で10日間養生した後、集成材のJASに従ってブロックせん断試験を行った。また、耐熱性を調べるため、 20°C で10日間養生した試験片を、 100°C の雰囲気中に24時間放置した後、 100°C の雰囲気中でブロックせん断試験を行った。

(b) 接着耐久性試験

1液型ポリウレタン接着剤は、空気中や木材中の水分と反応して硬化するため、水分不足の場合硬化不十分となり、接着性能が低下するという報告^{2,3)}がある。そこで、乾燥した試料(含水率10~15%)を用いてブロックせん断試験片を作製し、乾燥材の接着性について検討した。

また、生材を接着してそれが乾燥した後の接着性能を調べるため、生材の試料を用いてブロックせん断試験片を作製し、それを温度 20°C 、湿度45%RHの条件で10日間乾燥した後、ブロックせん断試験を行った。

1液型ポリウレタン接着剤の耐水性を調べるため、煮沸・乾燥繰り返し試験を行った。すなわち、生材の試料を用いてブロックせん断試験片を作製し、先の条件で乾燥後、さらに煮沸・乾燥繰り返し処理(100℃煮沸4時間→60℃乾燥20時間→100℃煮沸4時間)を行い、湿润状態でブロックせん断試験を行った。

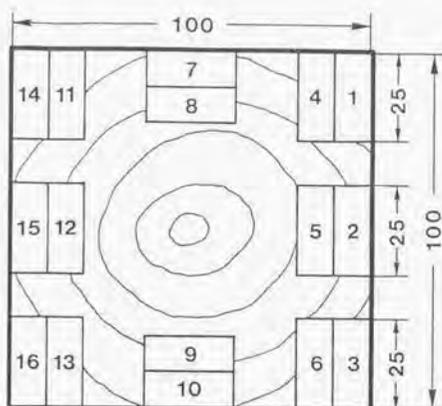


Fig. 17. Types of cutting of specimens (Unit: mm).

Table 3. Result of block-shear test of green *sugi* joints.

Adhesive	Grain direction	Moisture content (%)	Temperature (°C)	Bond strength (kgf/cm ²)		Wood failure (%)
				Mean value	σ_n^{*2}	
E-1001	Flat	68	20	5.2	2.8	0
	Diagonal	112	20	4.7	1.9	0
	Average	90	20	5.0	2.4	0
E-1001	Flat	68	100	0	0	0
	Diagonal	112	100	0	0	0
	Average	90	100	0	0	0
E-82	Flat	68	20	19.2	7.9	0
	Diagonal	112	20	29.9	6.4	0
	Average	90	20	24.6	9.0	0
E-82	Flat	68	100	13.7	14.1	16
	Diagonal	112	100	22.6	16.2	10
	Average	90	100	18.1	15.8	13
PU	Flat	63	20	23.6	7.8	0
	Diagonal	81	20	69.5	2.6	70
	Average	72	20	46.5	23.6	35
PU	Flat	67	100	35.3	8.2	17
	Diagonal	94	100	93.3	5.1	73
	Average	81	100	64.3	29.8	45

*2 Standard deviation.

3. 2. 2 結果および考察

(a) スギ生材の接着性能

スギ生材接着試験の結果をTable 3に示す。スギ生材を高粘度タイプのエポキシE-1001で接着した場合は、20℃および100℃の両温度において、ほとんど接着強さを期待することはできない。E-1001の20℃での破壊は、接着剤の凝集破壊によるものであり、接着剤が十分硬化していない状態であった。一方、E-1001の100℃での破壊は、界面破壊によるものであった。標準タイプのエポキシE-82の場合、接着強さは20kgf/cm²程度であり、大きな接着強さを期待することはできない。この場合の破壊面を観察すると、接着剤が流れ出てしまっていて、欠膠が生じているように思われた。1液型ポリウレタンの場合、板目面の接着強さが追根目面の接着強さより小さくなる傾向が認められた。この理由は明かではないが、平均すれば、20℃での接着強さが46.5kgf/cm²となり、100℃ではさらに増加して64.3kgf/cm²となった。また、木部破断率も、それぞれ35%および45%であった。したがって、ここで用いた1液型ポリウレタン接着剤はスギ生材の接着でもある程度の接着性能が期待できる接着剤であると判断できる。

(b) 接着耐久性

Table 4に、ポリウレタン接着剤で接着したスギ接合部の、各処理後の接着強さを示す。構造用集成材のJASにおいてスギ材の適合基準は、接着強さが55kgf/cm²以上、木破率が60%以上となっており、乾燥材を接着した場合は基準をみたしていた。生材を接着して生材状態で10日間養生した場合、接着強さが46.5kgf/cm²、木部破断率が35%となり基準値に達していないが、生材を接着した場合でも、20℃で10日間乾燥した場合は基準をみたしていた。一般の使用条件では木材は乾燥していくので、生材を用いて接着した接合部の乾燥後の接着性能が基準に合格することは意味のあることである。煮沸・乾燥繰り返し試験は熱硬化性樹脂接着剤の耐久性を調べるための最も苛酷な促進劣化試験のひとつである。今回用いた1液型ポリウレタン接着剤は煮沸繰り返し試験を行ってもはく離することはなく、これだけで接着耐久性が十分と結論することはできないが、今回用いたポリウレタン接着剤は煮沸繰り返し処理にも耐える接着剤であり、構造用途への適用が可能であると判断できる。

Table 4. Result of block-shear test for polyurethane adhesive.

Grain direction	Moisture content (%)	Test condition	Bond strength (kgf/cm ²)		Wood failure (%)
			Mean value	σ_n^{*2}	
Flat	11.7	Dry, 20°C	88.2	7.0	100
Diagonal	10.6	Dry, 20°C	87.7	6.7	100
Average	11.1	Dry, 20°C	88.0	6.9	100
Flat	63	Wet, 20°C	23.6	7.8	0
Diagonal	81	Wet, 20°C	69.5	2.6	70
Average	72	Wet, 20°C	46.5	23.6	35
Flat	67	100°C	35.3	8.2	17
Diagonal	94	100°C	93.3	5.1	73
Average	81	100°C	64.3	29.8	45
Flat	48	After drying	69.8	22.8	61
Diagonal	75	After drying	102.4	9.4	100
Average	62	After drying	87.3	24.4	81
Flat	51	After cyclic boiling	22.9	6.2	0
Diagonal	85	After cyclic boiling	38.3	7.4	12
Average	68	After cyclic boiling	30.6	10.3	6

*² Standard deviation.

3.3 要 約

現場接着床組に用いられるエラストマ系の床用現場接着剤の性能、および素材-素材間の現場接着を考慮して、1液型ポリウレタン接着剤の性能について検討した。本章で得られた結果は以下のとおりである。

1) エラストマ接着剤・釘併用接合では、すべり量0.7~1.0mmのところに降伏点があり、接着剤がほとんど耐力を負担している。最大耐力は養生期間4カ月まで増加し、4カ月後の最大耐力から計算される接着強さは 22.8 kgf/cm^2 と見積られた。広葉樹合板、PBおよびMDPを側材としたときの接合耐力は、接着剤の強さで決まるため差がなかった。針葉樹合板を側材とした場合の耐力は、合板のローリングシアにより支配され、最大耐力は低下した。

2) エラストマ接着剤の接着強さは温度が高くなると低下し、温度 20°C での接着強さを100%とすると、温度 40°C および 60°C での接着強さはそれぞれ、70%および50%程度になると推測された。

3) エラストマ接着剤の疲労強度は養生期間1~3カ月では静的強さの10%弱、6カ月以上では20%程度であり、レゾルシノール樹脂接着剤の疲労強度と比較するとそれぞれ6分の1および2分の1程度と見積られた。

4) エラストマ接着剤による接合部は、メラミン・ユリア共縮合樹脂接着剤を用いた構造用1類合板と同等以上の耐水性および接着耐久性を有することが、温水浸せき繰り返しおよび屋外暴露試験により判断された。

5) 本研究で用いた1液型ポリウレタン接着剤は、スギ生材の接着が可能である。

6) 本研究で用いた1液型ポリウレタン接着剤による接合部は、煮沸・乾燥繰り返し試験に耐える。

第4章 現場接着における接着条件と接着性能

前章では現場接着用接着剤の性能について検討し、1液型ポリウレタン接着剤によりスギ生材の接着が可能であることを明らかにした。また、1液型ポリウレタン接着剤により、ズブ生状態のスギ正角材を接着して接着重ね梁を製作することが可能であることが報告されている²⁷⁾。それによれば、冬の北海道で製作したものも含めて、接着重ね梁はすべて曲げで破壊し、曲げ強さは建築基準法で規定されているスギの許容応力度の4.1~5.5倍であり、また曲げヤング係数は構成材が完全に一体化したとみなして計算できることが示されている。このように、1液型ポリウレタン接着剤は、低温条件で生材の接着が可能であるという従来の木材用接着剤にはない特性を有しており、素材-素材間の接着接合部に構造的な性能を期待することが、1液型ポリウレタン接着剤を用いた現場接着により可能であることが示唆される。

しかし、接着性能は用いられる接着剤のみならず、接着条件の影響を大きく受ける。特に、現場接着においては、接着性能に影響する種々の因子が変化し、また、それらの影響因子を制御することが困難であるため、接着性能に及ぼす接着条件の影響を把握しておくことは重要であると考えられる。

したがって、本章では、1液型ポリウレタン接着剤を用いてスギ正角材の接着重ね梁を現場的な条件で製作する場合に問題となる、接着性能に及ぼす木材の含水率および表面性、接着剤の塗布方法および塗布量、圧縮条件（ボルト間隔）、製作時および養生中の温度、および養生期間の影響について調べ、接着重ね梁の最適製作条件について検討した。

4.1 実 験

1液型ポリウレタン接着剤【日本ポリウレタン工業（株）製ウッドロック】を用いて、スギ正角材（約10.5cm角、長さは1.5mまたは4m）を3段に重ね合わせて接着し、接着重ね梁を製作した（Fig.18）。製作過程の概要は、スギ正角材の接着面のプレーナ加工、ボルト穴用の15mmの穴あけ加工、接着剤の塗布、スギ正角材の重ね合わせ（接着剤の塗布と重ね合わせを2回繰り返して3段重ねとする）、ボルト通しおよびボルト締めによる圧縮、および養生という順序である。

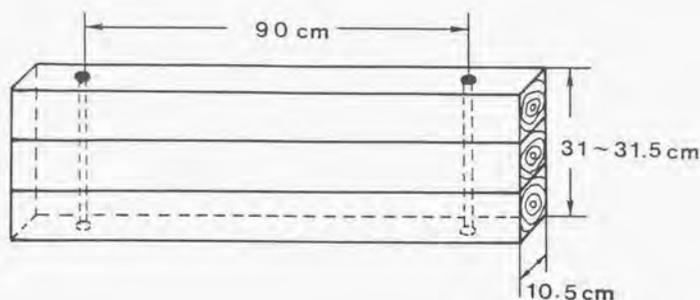


Fig. 18. Configuration of glued timber beam.

Table 5. Result of shear test of glued-timber beams.

Sample	Moisture content	Spread (g/m ²)	Aging period (days)	Temperature (°C)	Bolt spacing (cm)	Surface	Bond strength (kgf/cm ²)		Wood failure (%)
							Mean value	σ_n^{13}	
a	103	372	1	4	90	Planed	26.8	3.6	13
b	103	380	3	4	90	Planed	27.1	3.2	18
c	103	371	7	4	90	Planed	31.7	4.6	16
d	103	394	15	4	90	Planed	31.6	4.0	18
e	103	425	7	4	90	Sawed	10.8	6.3	3
f	35	419	8	4	90	Planed	43.3	3.2	98
g	21	363	7	Room	90	Planed	over 47.6	—	—
h	103	466	7	Outdoor ²²	90	Planed	37.1	6.1	17
i ⁴³	103	347	7-8	Outdoor ²³	60	Planed	23.2	8.3	17
j	103	408	7-8	Outdoor ²³	90	Planed	40.2	4.4	64
k	103	381	7-8	Outdoor ²³	120	Planed	36.4	6.3	23

¹³ Standard deviation.

²² The temperature during manufacture was -3 °C and the minimum temperature before manufacture was -13 °C.

²³ The temperature during manufacture was 0 °C and the minimum temperature before manufacture was -10 °C.

⁴³ Lumbers had frozen.

接着重ね梁の製作条件をTable 5に示す。この表において、a~hは長さ1.5mのスギ材を用い、i~kは長さ4mのスギ材を用いた。a~hについては各条件につき3体ずつ、i~kについては1体ずつの接着重ね梁を製作した。各条件の詳細を以下に述べる。

(a) 木材含水率

接着重ね梁の製作には、伐採後すぐに製材され、ビニルシートで覆われたスギ正角材を用いた。これから無作為に抽出した6本の試料の平均含水率は103% (標準偏差21%) であった。接着性能に及ぼす木材含水率の影響を調べるため、一部は天然乾燥して、含水率35% (乾燥時期は1985年12月6日~1986年1月21日) および21% (乾燥時期は1985年12月6日~1986年4月9日) とした。

(b) スギ材のプレーナ加工

スギ正角材の接着面となる部分についてはプレーナ加工を施した。ただし、接着性能に及ぼす表面性の影響を調べるため、一部はプレーナ加工をせず、ひきたてのままの製材品を用いた。

(c) 接着剤の塗布方法と塗布量

今回用いたポリウレタン接着剤はカートリッジに入っていたため、コーキングガンを用いて1接着層に帯状に2本片面塗布した (Fig. 19)。なお、接着剤塗布後に、ヘラ等で接着剤を広げることは行わなかった。

塗布した接着剤の重量を測定して塗布量を算出することは、現場的な条件では手間がかかりすぎると考えられたため、塗布した接着剤の帯幅と、塗布量および圧縮後の接着剤の広がり割合の関係を調べ、適正塗布量について検討した。

(d) 圧縮方法

圧縮にはボルト (M12) を用いた。接着剤塗布後直ちにスギ材3本を重ね合わせ、ボルトを通して締め込むことにより圧縮した。長さ1.5mの接着重ね梁では、ボルト間隔を90cmとして、2本のボルトにより圧縮した。接着性能に及ぼすボルト間隔の影響を調べる実験では、長さ4mのスギ材を用いて、ボルト間隔を60cm、90cm、120cmの3水準として各1体ずつの接着重ね梁を製作した。圧縮力は、ボルトの締め付けトルクをトルクレンチにより測定し、250~300kgf・cmとした。このとき、4cm角、厚さ4mmの座金がスギ材にめり込んだため、スギ生材を用いた場合はこの圧縮力が限界であると思われる。

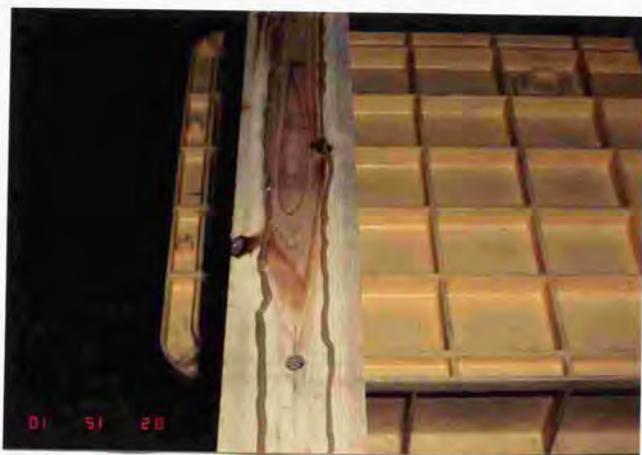


Fig. 19. Bead spreading method.

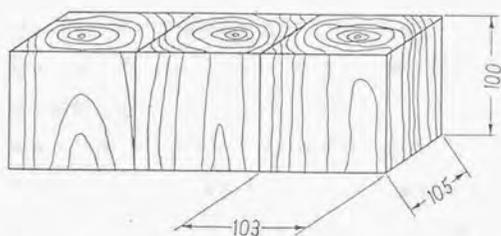


Fig. 20. Test joint for measuring shear strength (Unit: mm).

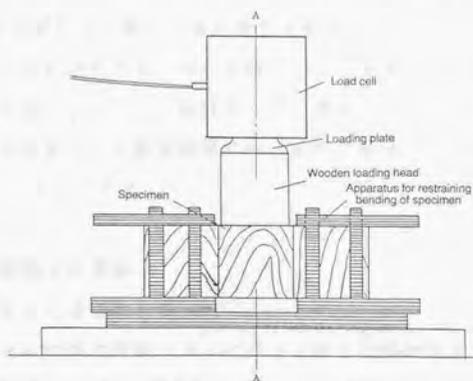


Fig. 21. Test apparatus for measuring shear strength.

このボルトの締め付けトルクによる圧縮力と実際に接着層に加わる圧縮圧力の関係を調べるため、次のような実験を行った。乾燥した2本のスギ正角材（長さ1.5m）の間にロードセルをはさみ、2本のボルトを用いてボルト間隔90cmで締めつけた。このときのボルトの締め付けトルクと圧縮力（ボルトの張力）の関係を調べた。

（e）製作温度、養生期間および養生期間

接着性能に及ぼす製作時および養生期間中の温度の影響を調べるための実験では、4℃の冷蔵庫および氷点下となった戸外で接着重ね梁を製作した。接着重ね梁を製作したときの戸外（森林総合研究所実験棟北側、茨城県荖崎町）の温度条件は、最低温度が-13℃（午前8時前後）であり、製作時は-3℃（午前10時前後）であった。

接着性能に及ぼす養生期間の影響を調べるための実験では、温度4℃において、養生期間を1日、3日、7日および15日としてせん断試験を行った。養生期間中は、含水率変化を抑えるため、ビニールシートで接着重ね梁を覆った。

（f）接着性能の試験方法

本実験では、接着重ね梁の製作直後からの接着性能を調べることを目的としたため、集成材のJAS等で規定する通常のブロックせん断試験片を作製する時間がないことと、通常の小さなブロックせん断試験片では、接着重ね梁の接着層の全体的な性能を表すことはできないと考えたため、実大の接着重ね梁のはじから10cmの長さで順次切断して、Fig. 20に示すせん断試験体を切り出した。この試験体の2接着層にせん断力を加え最大荷重を測定した。このとき、曲げの力により中央部の構成材の下部に割れが発生するのを抑えるため、曲げ抑制治具を作製して用いた（Fig. 21）。試験機には、最大荷重10tonのものを用了。接着強さは、最大荷重をせん断試験体のせん断面の面積（ $10.5\text{cm} \times 10\text{cm} \times 2 = 210\text{cm}^2$ ）で割ることにより算出した。

4. 2 結果および考察

（a）圧縮圧力と適正塗布量

Fig. 22にボルトの締め付けトルクとボルト張力の関係を示す。生材では限界と考えられる $300\text{kgf}\cdot\text{cm}$ のトルクのと看、ボルト1本当たりの張力は 432kgf であ

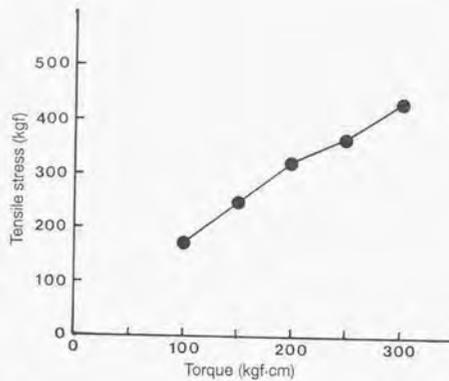


Fig. 22. Relationship between torque and pressing force for bolts.

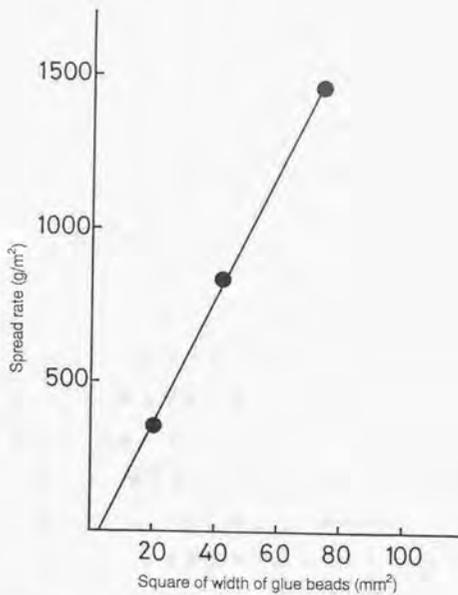


Fig. 23. Correlation of widths of glue beads with spread rates.

った。ボルトによる圧縮力が接着面に均一に分布すると仮定すると、幅10.5cm、長さ1.5mの接着重ね梁をボルト2本で圧縮した場合の圧縮圧力は 0.55kgf/cm^2 となる。集成材の製造時には、 10kgf/cm^2 程度の圧縮圧力を加えるので、それと比べると、ボルトによる圧縮圧力はかなり小さいことがわかる。

塗布した接着剤の帯幅と 1m^2 当たりの重量で表す塗布量の関係をFig. 23に示す。塗布量は帯幅の2乗に比例し、10.5cmの幅の角材に帯状に2本塗布した場合の接着剤の帯幅と塗布量の関係は次式で示された。

$$s = 20.5 w^2 - 56.4$$

ここで、 s : 塗布量 (g/m^2)

w : 塗布した接着剤の帯幅 (mm)

帯幅が4.5mm、6.5mmおよび8.6mmのときの塗布量は、それぞれ、 349g/m^2 、 830g/m^2 、および 1456g/m^2 であった。これから、帯幅が少し増加するだけで、塗布量がかなり大きくなることがわかる。帯幅が4.5mmのとき、ボルトによる圧縮後に、接着剤は接着面となる表面の76%を覆った。帯幅が6.5mmおよび8.6mmのときは、接着剤は接着面の100%を覆った。接着重ね梁に要求される接着性能が得られるならば、必ずしも接着剤が接着面の100%を覆う必要があるわけではない。帯幅でいえば、4mmでは少なく、4.5mm~5mm程度にして1接着層に2本塗布すればよいのではないかと考えられる。面積当たりの塗布量に換算すれば $359\text{g/m}^2 \sim 456\text{g/m}^2$ 程度は必要であると思われる。接着重ね梁の製作では圧縮圧力が低いため、集成材の製造における塗布量 ($250\text{g/m}^2 \sim 300\text{g/m}^2$) より多くする必要があると考えられる。

本実験では、ここで得られた結果を目安に接着重ね梁を製作したが、実際の塗布量は $347\text{g/m}^2 \sim 466\text{g/m}^2$ の範囲であった。

(b) 接着性能に及ぼす養生期間の影響

養生期間と接着強さの関係をTable 5およびFig. 24に示す。このときの木材含水率は103%、製作時および養生期間中の温度は 4°C 、ボルト間隔は90cmである。養生1日で、接着強さは 26.8kgf/cm^2 に達した。集成材のJASで規定される通常のブロックせん断試験で得られる接着強さと比較すると、この 26.8kgf/cm^2 という値は小さなものであるが、本実験では大きな断面で試験しているので単純な比較はできない。建築基準法施工令はスギ材の曲げ許容応力度を 75kgf/cm^2 、材料

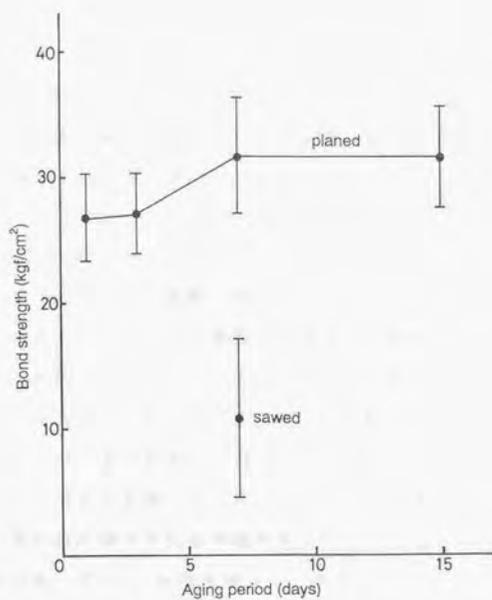


Fig. 24. Effect of aging period on bond strength.

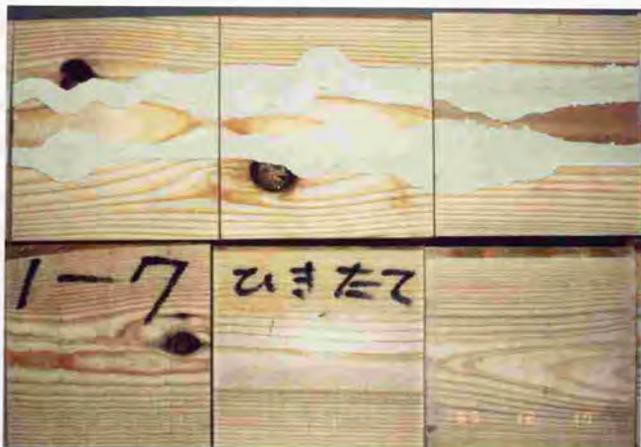


Fig. 25. Poor glue spread on the sawed surface at the center between bolts.

強度を225kgf/cm²と規定している。それらから接着層に発生するせん断応力を次式により計算した。

$$T = 3S(h^2 - 4y^2) / 2bh^3$$

ここで、 T ：接着層に発生するせん断応力 (kgf/cm²)

S ：せん断力 (kgf)

h ：はりせい (cm)

b ：材幅 (cm)

y ：中心からの距離 (cm)

それによれば、スギ材の曲げ許容応力度および材料強度に対応する接着層のせん断応力はそれぞれ2.9kgf/cm²および8.7kgf/cm²となる。養生1日後の接着強さは、それらを大きく上回っている。また、実際の接着重ね梁の曲げ試験で接着層に発生した最大せん断応力は22.7kgf/cm²とされており²⁷⁾、養生1日後の接着強さは、この値をも上回っている。したがって、温度4℃における1日の養生でも、接着重ね梁に要求される接着性能が得られるものと考えられる。7日日間養生した場合は、さらに1割程度増加し、頭打ちとなった。したがって、養生期間は1週間みれば十分と考えられる。以下の試験においては養生期間をほぼ1週間とした。

(c) 接着性能に及ぼす表面性の影響

スギ材表面をプレーナ加工して製作した接着重ね梁は、十分な接着強さを示した (Table 5のc)。また、ボルト間の中央部における接着剤の広がり状態も良好であった。一方、プレーナ加工せずにひきたて材を用いて製作した接着重ね梁の接着強さは10.8kgf/cm²と極端に低い値になった (Table 5のeおよびFig. 24)。このときの破壊後の接着層を観察すると、帯状に塗布した接着剤が十分広がっていない状態であった。特に、ボルト間の中央部では、帯状塗布した接着剤がほとんど広がっていない状態であった (Fig. 25)。したがって、ひきたて材を用いて製作した接着重ね梁の接着強さが小さくなった大きな原因のひとつは、帯状塗布した接着剤が十分広がらなかったことであると考えられる。高い接着強さを期待するには、接着面のプレーナ加工が必要である。

(d) 接着性能に及ぼす木材含水率の影響

含水率100%前後のズブ生材を用いて製作した接着重ね梁でも十分な接着強さ

が得られた (Table 5のc) が、木部破断率は18%とあまり高くなかった。この接着重ね梁から採取したせん断試験体を温度19℃～22℃および湿度30%～50%の室内に放置して急激に乾燥した場合、乾燥応力による乾燥割れに伴い、接着層のはく離が観察された (Fig. 26)。このような接着層のはく離は、木口面をウレタン系の塗料でシールすることにより若干緩和されたが、完全になくすことはできなかった (Fig. 27)。しかし、長さ1.5mの接着重ね梁を温度20℃および湿度65%の恒温室で乾燥した場合、乾燥割れは認められたが、接着層のはく離は観察されなかった。したがって、急激な乾燥が生じる条件でなければ、実際には接着層のはく離が生じる心配はないものと考えられる。

スギ直角材を天然乾燥して含水率を35%程度まで下げてから製作した接着重ね梁は、さらに接着強さが43.3kgf/cm²まで増加し、木部破断率も98%となった (Table 5のf)。また、せん断試験体を乾燥した後も接着層のはく離は認められなかった。天然乾燥して含水率を21%まで下げてから製作した接着重ね梁の接着性能はさらに増加し、最大荷重が試験機の容量の10tonを超え、試験体を破壊することができなかった (Table 5のgでは、接着強さを47.6kgf/cm²以上と示している)。

以上のように、生材から気乾材の範囲では、含水率が低いほど接着性能 (接着強さ、木破率および乾燥後の接着層のはく離) がよくなった。初期の接着性能からすれば、スギ材の含水率が100%程度でも、接着重ね梁に要求される接着性能が得られるが、乾燥後の木材の割れおよび接着層のはく離を考慮すると、スギ材の含水率は35%程度以下であることが望ましいと考えられる。

(e) 接着性能に及ぼす温度の影響

4℃の温度条件で製作および養生した接着重ね梁は十分な接着強さを示した (Table 5のc)。氷点下となった戸外において製作した接着重ね梁 (Table 5のh-k) では、iを除いて、十分な接着強さを示した。iの重ね梁に用いたスギ材は、山積みの最上部にあったため、表面に霜または氷等が付着していた。この氷は、4℃で7日間養生した後のせん断試験後の破壊面にも観察された。したがって、iの接着強さが極端に小さくなったのは、木材表面に氷が存在していたために、接着剤が直接木材に接触することができず、接着不良を起こしたためと考えられる。したがって、氷点下の温度条件では、接着面に霜または氷等が付着して



Fig. 26. Delamination of joints after drying.



Fig. 27. Delamination of coated joints after drying.

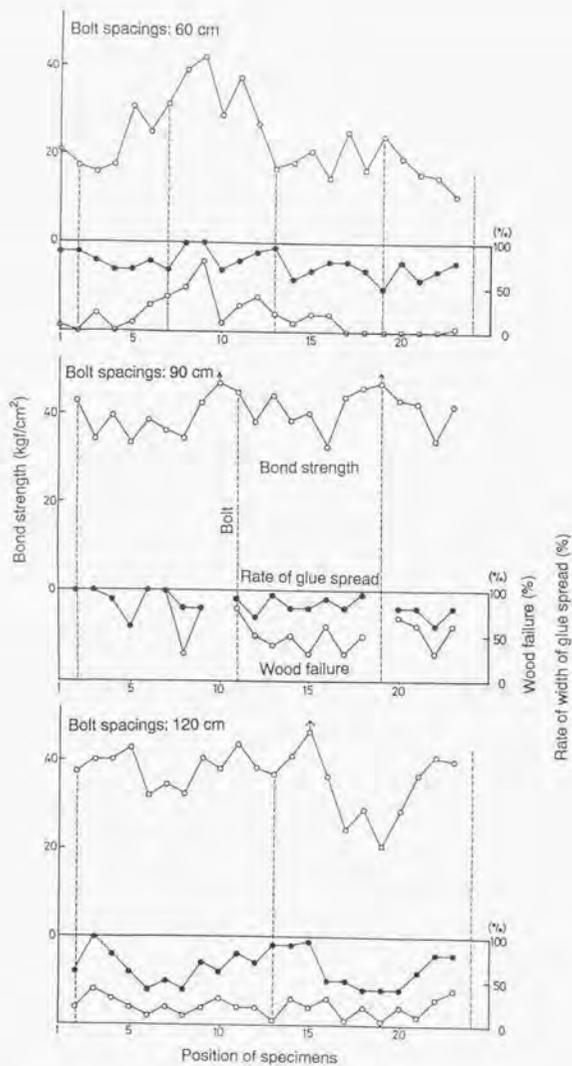


Fig. 28. Effect of bolt spacing on width of glue spread and bonding property.

いない場合は接着可能であるが、接着面に霜または氷等が付着している場合は接着不良を起こすと考えられる。安全性を考慮すれば、木材の保管および接着重ね梁の製作には0℃以上の温度条件が必要であると考えられる。

(f) 接着性能に及ぼすボルト間隔の影響

ボルト間隔を60cmとして製作した接着重ね梁 (Table 5のi) は、スギ材の接着面に霜および氷が付着していたため、接着不良を起こした。そのため、接着強さによって、接着強さに及ぼすボルト間隔の影響を検討することができなくなった。そこで、接着強さは接着剤の広がり面積に関係するので、接着剤の広がり割合 (せん断試験体のせん断面積に対する接着剤の広がり面積の割合) を測定して、接着剤の広がり割合に及ぼすボルト間隔の影響について検討した (Fig. 28)。ボルト間隔60cmおよび90cmにおいては、接着剤の広がり割合の平均が80%以上となり、ボルト間の中央でも比較的良好に接着剤が広がっていた。しかし、ボルト間隔120cmでは、ボルト間の中央部での接着剤の広がり割合が小さく、平均値は65%まで低下した。また、ボルト間の中央部で接着剤の広がり割合が小さくなると、接着強さも小さくなる傾向が認められた。作業の点からはボルト間隔を大きくして、ひとつの接着重ね梁に使うボルト本数をなるべく少なくしたほうがよいわけであるが、接着剤の広がり状態も考慮すれば、10cm角のスギ生材を用いて接着重ね梁を製作する場合は、ボルト間隔は90cm程度が適当であると考えられる。

4. 3 要 約

1 液型ポリウレタンを用いてスギ正角材による接着重ね梁を製作する場合の、接着性能に及ぼす接着条件の影響について検討し、最低限必要な製作条件を明らかにした。得られた結果は以下のとおりである。

1 液型ポリウレタン接着剤により、10.5cm角のスギ正角材を用いて接着重ね梁を製作する場合に、最低限必要な製作条件は以下のとおりである。

木材含水率：35%以下にする。

木材の表面性：プレーナ加工が必要である。

接着剤の塗布方法：連続した帯状に2本塗布し、塗布後に接着剤を広げない。

塗布量：360g/m²以上必要である。塗布する接着剤の帯幅に換算すると、

4.5mm以上にして2本必要である。

圧縮方法：ボルト（M12）により行う。ボルト間隔は90cm以下とする。

圧縮圧力：角座金が木材にめり込む程度とする。

温度：0℃以上の条件で製作および養生する。

養生期間：1週間以上とする。

第5章 現場接着接合部の実態調査

第3章においては現場接着用接着剤の性能について検討し、また、第4章においては接着性能に及ぼす接着条件の影響について検討した。その結果、新たな素材-素材間の現場接着が1液型ポリウレタン接着剤により可能であることが示唆された。しかし、現場接着接合部に構造的性能を期待するには、接着性能が安定していて、接合部の信頼性が十分高いことが必要である。接着接合部の信頼性を向上させるためには、信頼性を低下させる原因を明らかにして、それを除去していくことが必須である。そのためには、まず、現場接着の問題点を明らかにすることが必要である。そこで、本章では、現場接着接合部の実態調査を行い、現場接着の問題点を抽出した。

5. 1節では、すでに構造的性能が認められている現場接着床組の実態調査を行い、現場接着の現状と問題点について検討した。

また、5. 2節では、接着重ね梁の強度性能を担保するための方法を開発するための基礎的資料を得ることを目的として、曲げ試験が行われた接着重ね梁の接着層形成状態を調査し、曲げ性能および曲げ破壊形態に及ぼす接着層形成状態の影響について検討した。

5. 1 現場接着床組の接着性能と接着層形成状態の実態調査

構造的性能が認められた現場接着工法は、現場接着床組以外開発されてきていない。構造的用途への現場接着が認められない大きな原因は現場接着による接合部の信頼性が低いためと考えられる。新たな現場接着法を開発するためには、現場接着接合部の信頼性を向上させる必要がある。現場接着接合部の信頼性を向上させるためには、信頼性を低くする原因を調べてそれを除去していくことが必須である³⁾。したがって、現在すでに認められている現場接着法である枠組壁工法住宅の現場接着床組の実態を調査し、現場接着の問題点を究明することは非常に重要であるが、現場接着床組の実態を調査した例はほとんど報告されていない。

本節では、建築後5年7カ月経過した枠組壁工法住宅の現場接着床組における床根太と床下張り材との間の接着接合部の実態を調査する機会を得たので、調

査の結果をもとに、現場接着の問題点について考察した。

5. 1. 1 調査方法

(a) 調査対象建物

調査対象建物は昭和54年10月に東京都に建てられた地下室付き枠組壁工法住宅である。この建物は、建築後展示住宅として使用されたものであり、一般的な住居とは異なり入浴や炊事のような生活上の劣化因子は受けていないと考えられるが、展示住宅としての歩行などの影響はむしろ大きい可能性がある。調査時期は昭和60年5月であり、対象建物は建築後5年7カ月経過していたものである。

(b) 試料の採取

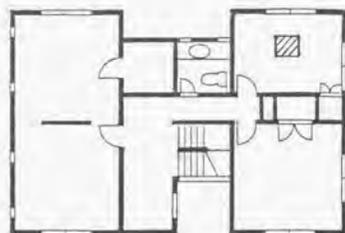
建物の間取りと試料の採取場所ををFig.29に示す。試料の採取場所は、床根太と床下張り材との間を接着接合していた地下のトレーニングルーム（地下室）、1階の和室および2階の6畳洋室とした。地下室より長さ約120cmの根太を2本、1階和室より長さ約80cmの根太を5本および2階洋室より長さ約80cmの根太を2本、床下張り材または床板を付けたまま採取した。試料採取時には、根太と床下張り材との間の接着接合部に外力が加わらないように細心の注意を払った。

(c) 接着剤の分析

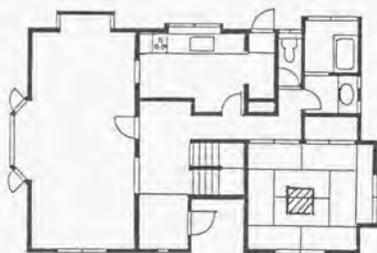
1階和室および2階洋室から採取した接着剤と日本住宅・木材技術センター（住・木センター）に認定されている市販の床用現場接着剤の赤外吸収スペクトル（IRスペクトル）を測定して、分析および比較を行った。IRスペクトル測定用の試料調製法を述べると、採取した床組から接着剤を削り取り、それをクロロホルム（ CHCl_3 ）に溶解・ろ過し、ろ液に無水硫酸ナトリウム（ Na_2SO_4 ）を加えて脱水した後、再びろ過してKBr錠剤に塗り付けた。IRスペクトルの測定には日立製作所製赤外分光光度計モデル260-30を使用した。

(d) 接着性能の調査

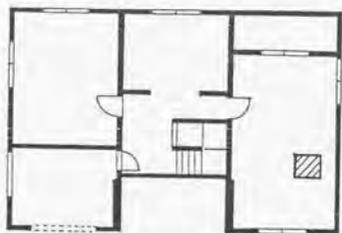
住・木センターの定めた「床用現場接着剤の性能試験方法」に準じて、各部屋から採取した試料よりブロックせん断試験片（Fig.30）を作製した。ただし、合板は表単板の繊維方向が根太方向と垂直に張り付けられていたため、試験片の合板の表単板の繊維方向は加力方向と垂直になった。試験片にはもとの位置がわかるように連続番号をつけて、接着強さを測定した。



(The second floor)



(The first floor)



(Underground)

Fig. 29. Floor plan.

Notes: Samples were taken from the hatched areas.

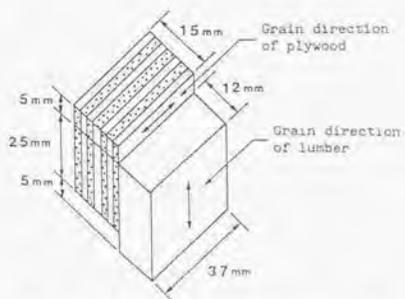


Fig. 30. Configuration and dimensions of block-shear specimen.

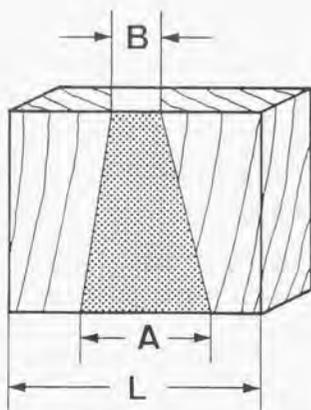


Fig. 31. Measurement of the rate of glue spread.

ブロックせん断試験前にはく離した試料については、根太幅に対する帯状塗布された接着剤の根太の幅方向に広がった長さの割合（以下これを接着剤の広がり割合と呼ぶ）を測定した。すなわち、試験片作製時または試験片作製後にはく離した試験片については試験片の両端面における接着剤の広がり幅を測定して、次式により接着剤の広がり割合を算出した（Fig. 31）。

$$R_v = \frac{A+B}{2L} \times 100$$

ここで、 R_v ：接着剤の広がり割合（%）

A, B ：試験片の両端面における接着剤の広がり幅（cm）

L ：根太幅（cm）

試料採取時にはく離した試料については、調査現場において長さ8cmごとに区分し、目視により接着剤の広がり割合を測定した。

また、界面破壊した試験片については、厚さ測定用のダイヤルゲージを用いて、接着層の厚さを測定した。接着層の厚さは、木材と接着層の最大厚さと、木材の厚さの差とした。

5. 1. 2 結 果

（a）各部屋の床組の構造

1階和室および2階洋室の床組における床下張り材は、JASで定める構造用合板（厚さ15mm、7プライ）であった。また、床根太の寸法は4cm×23cm（幅×高さ）であり、根太間隔は45cmであった。釘打ち間隔はばらつきがあったが、約15cmであった。これらのことから、1階および2階の床組は住宅金融公庫の枠組壁工法住宅工事共通仕様書に従った構造と考えられ、今回の調査対象である枠組壁工法住宅の現場接着床組と判断された。

地下室に使われていた床板はJASで定める天然木化粧複合フローリングであり、雄ぎねの付け根から45度の斜角に隠し釘打ちされて、根太に張り込まれていた。これから地下室の床組は工法的には建設省の建築工事共通仕様書および日本フローリング工業会のフローリング張り仕様書に従った構造と考えられる。したがって、地下室の床組は今回調査対象とした枠組壁工法住宅の現場接着床組とは異なり、接着接合部に定量的な構造性能を期待しているものではないと判断された。

(b) 接着剤の分析

工法的には1階と2階の床組は現場接着床組と判断されるが、そこに使用されていた接着剤が認定されている床用現場接着剤であるかどうか調べておく必要がある。そこで1階和室と2階洋室の床組に使われていた接着剤および住・木センターに認定されているいくつかの市販の床用現場接着剤のIRスペクトルを測定して比較を行った。その結果をFig. 32に示す。各波数領域における吸収帯の帰属を示すと、

700および750 cm^{-1} : フェニル基のC-H変角振動

910 cm^{-1} : 末端のビニル基(-CH=CH₂)のCH₂変角振動

965 cm^{-1} : トランス-CH=CH-のCH変角振動

1500および1600 cm^{-1} : ベンゼン環の骨格振動

と考えられる^{34, 35})。以上の吸収帯の帰属から、これらの接着剤の主成分はスチレン-ブタジエン共重合体であると判断される^{34, 35})。今回調査した接着剤と市販の接着剤のIRスペクトルがほぼ一致したこと、使用されていた接着剤が帯状塗布するタイプの接着剤であったこと、および床組の構造が住宅金融公庫の仕様書に従った構造であったことから、総合的に判断して、1階および2階の床組に使われていた接着剤は住・木センターにより認定されている市販の床用現場接着剤のひとつであると判断される。

地下室に使われていた接着剤については特に分析を行わなかったが、フローリング張り仕様書では酢酸ビニル樹脂エマルジョン接着剤を使用することが定められていることと、外観等から判断して酢酸ビニル樹脂エマルジョン接着剤が使われていたと推察される。

(c) 接着性能

地下室の床組は今回調査対象とした現場接着床組とは異なるが、そのブロックせん断試験の結果をFig. 33に示す。地下室からは2個の試料を採取したが、No. 1の試料はほとんど接着されていなかった。No. 2の試料は部分的に接着されているが、約半分はまったく接着されていなかった。接着剤は根太全面に塗布されていたが、接着層の状態は、凹凸がはげしく、接着されている部分は凸部の頂点に限られていた(Fig. 34)。釘打ちを圧縮の代わりに使う現場的な条件において、酢酸ビニル樹脂エマルジョン系の接着剤を面状に塗布して使うこと

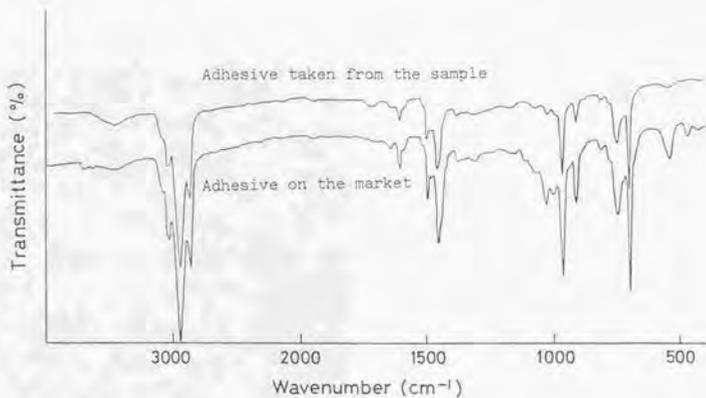


Fig. 32. Infrared spectra of adhesive used for field-glued plywood floors.

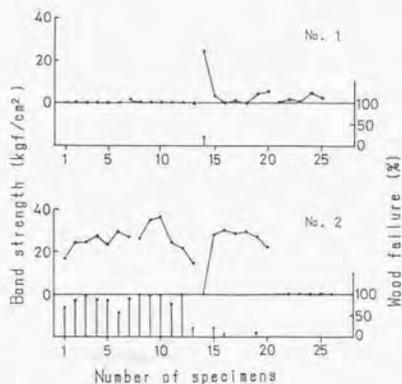


Fig. 33. Result of block-shear test for the specimens taken from the underground room.

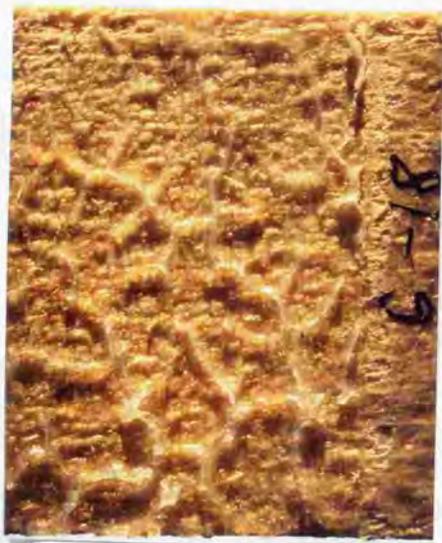


Fig. 34. Fractured surface of block-shear specimen taken from the underground room.

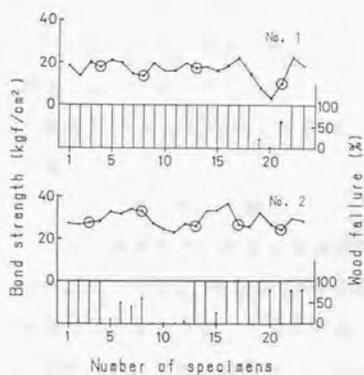


Fig. 35. Result of block-shear test for the specimens taken from the second floor.

Notes: White dots (○) show the positions of nails.

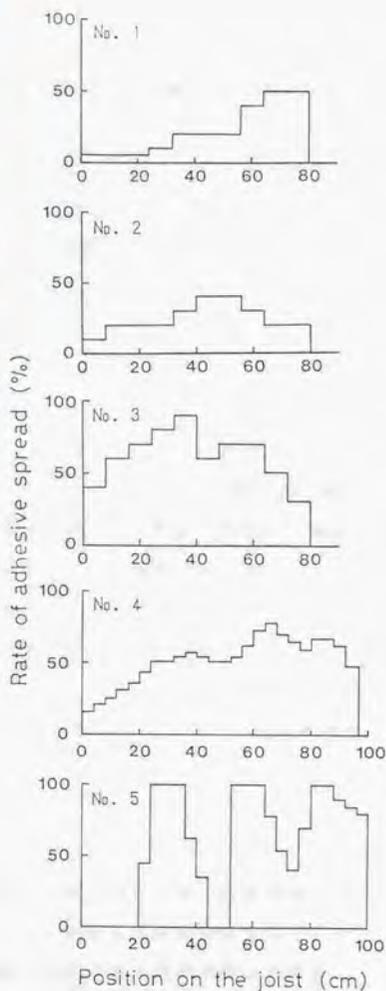


Fig. 36. Rate of adhesive spread of the specimens taken from the first floor.

は好ましくないように思われた。

2階洋室から採取した2個の試料についてのブロックせん断試験の結果をFig. 35に示す。No. 2の接着強さはすべて 20kgf/cm^2 以上であった。No. 1の接着強さは 15kgf/cm^2 であり、No. 2に比べるとやや小さな値であるが、木部破断率はほぼ100%であった。なお、木部破断は合板のローリングシアーによるものであった。これらのことから2階床組における床根太と床下張り材との接着接合部は十分な性能を保持していたと判断される。

1階和室からは5本の試料について調査したが、すべてブロックせん断試験前にはく離が生じ、接着強さは0であった。5本のうち、3本の試料は試料の採取時にはく離が生じ、他の2本は試験片作製時または試験片作製後にはく離が生じた。そこで根太幅に対する帯状塗布された接着剤の広がった幅の割合（接着剤の広がり割合）を測定した。試料採取時にはく離した3本（No. 1～3）については、長さ8cmごとに区分して目視により接着剤の広がり割合を測定し、試験片作製時または試験片作製後にはく離が生じた他の2本（No. 4および5）については、試験片の端面における接着剤の広がり幅を測定して、接着剤の広がり割合を算出した。それらの結果をFig. 36に示す。この図から、1階床組の根太と床下張り材との間の接着接合部の接着剤の広がり割合は小さいことが分かる。特にNo. 1およびNo. 2の試料の接着剤の広がり割合は非常に小さく、平均すると25%以下であった。このときの状態は、帯状塗布された接着剤がほとんど根太幅方向に広がっていないように観察された。また、No. 5の試料においては、接着剤の広がり割合のばらつきが大きく、100%との部分と0%との部分がある。接着剤の広がり割合が0%というのは、接着剤がまったく塗布されなかったということの意味する。

5. 1. 3 考 察

(a) 接着性能に影響を及ぼした因子

以上のように、1階和室と2階洋室から採取した床組の接合部の接着性能には顕著な差が生じたが、この差が生じた原因を究明することは非常に重要であると考えられたため、検討を行った。今回の現場接着床組の実態調査は森林総合研究所の住宅調査グループが行ってきた住宅調査の一貫として行われたもので、同時に各部屋の部材含水率²⁶⁾、温湿度^{27, 28)}および、釘の劣化²⁹⁾等が調査さ

れた。それらの結果をTable 6に示す。この表をみると、試料を採取した1階和室と2階洋室での温湿度にはほとんど差はなく、また部材含水率についても同様に差は認められない。さらに、1階と2階の床組に使われていた釘の劣化状況は、今村が提案した目視による釘の劣化度評価基準⁴⁰⁾によればいずれも1.5~2と軽微であり、また差は認められなかった(Fig. 37)。これらのことから、1階和室と2階洋室では環境因子には大きな差がなかったものと推測される。また、市販の接着剤と床組から採取した接着剤のIRスペクトルにほとんど差がなかったが、このことは両者の接着剤の主要成分であるスチレン-ブタジエン共重合体の化学的構造および組成がほとんど同じであることを示唆している。これらのことから、床組から採取した接着剤に大きな化学変化は生じていないと考えられる。したがって、1階床組の接合部の接着性能が低くなった原因は接着剤の化学的な劣化によるものではないと判断される。

一方、1階と2階の床組の接着層の形成状態を比較すると(Table 7)、2階洋室の床組の接着剤の広がり割合は、一部の試験片を除いてほぼ100%に近く、接着層厚さは0.20mm程度以下であったのに対して、1階和室の場合は、接着剤の広がり割合が小さく、接着層厚さが0.44mmまたは0.92mmと大きくなっている。住・木センターの定める「床用現場接着剤の性能試験方法」には空隙充填性を調べる試験方法が含まれていて、認定されている接着剤は空隙充填性を有するとみなされている。しかし、3.1節で明らかにしたように、エラストマ系の床用現場接着剤による接合部では、接着層が厚くなると網目上の不均一な接着層が形成され、接着強さが著しく低下する。したがって、今回調査した1階和室の床組における接着接合部の性能が低くなった原因は、ひとつには帯状塗布された接着剤の広がり割合が小さく、また接着層の厚さが大きくなったために、施工直後から接着性能が低水準であったこと、もうひとつには、そのようなもとでも低水準の性能の接合部に歩行等による外力および木材の膨潤収縮等による応力が繰り返し作用したために、接着層のはく離が生じたことが考えられる。

6.1節で検討しているが、帯状塗布された接着剤の接着層形成状態に影響する因子には、圧縮圧力、圧縮時間、接着剤の粘度および塗布量があるとされている⁴¹⁾。それによれば、圧縮圧力が大きく、圧縮時間が長く、塗布量が多く、接着剤の粘度が低い場合に接着剤の広がり幅が大きくなり、また、圧縮圧力が

Table 6. Environmental condition of the floor in each room.

Room location	Temperature ^{a)} (°C)			Relative humidity ^{a)} (%)			Moisture content ^{b)} (%)	
	Min. ^{c)}	Mean	Max. ^{d)}	Min. ^{c)}	Mean	Max. ^{d)}	Joist	Plywood
Underground	17	18.6	20	48	62.4	68	10.0	18.0
First floor	17	21.6	26	40	51.8	62	10.5	11.5
Second floor	19	23.6	28	37	48.1	55	9.0	11.5

a) Temperature and relative humidity were measured from April 30 to May 7 in 1985 by Kiguchi³⁸⁾.

b) Moisture content was measured on the 6th and 7th of May in 1985 by Tanaka and Suzuki³⁹⁾.

c) Minimum value.

d) Maximum value.

Table 7. Bonding property and the status of glue lines of the floor in each room.

Sample number	Bond strength (kgf/cm ²)	Wood failure (%)	Rate of spread ^{a)} (%)	Thickness of glue line (mm)	
First floor	No. 1	0	0	22	—
	No. 2	0	0	25	—
	No. 3	0	0	62	—
	No. 4	0	0	52	0.44
	No. 5	0	0	58	0.92
Second floor	No. 1	16.4	90	90	—
	No. 2	28.8	67	100	0.20

a) Rate of the width of glue spread to the width of joist.

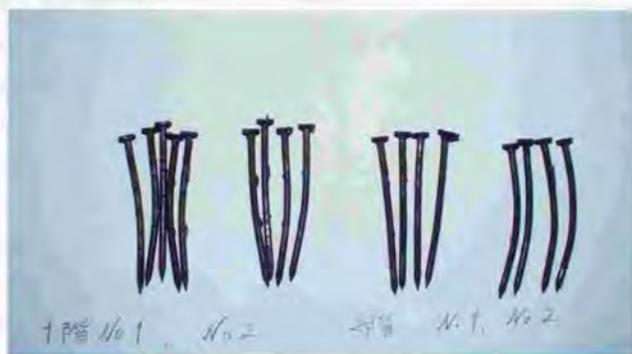


Fig. 37. Nails taken off the floors.

小さく、圧縮時間が短く、塗布量が多く、接着剤の粘度が高い場合に接着層厚さが大きくなる。したがって、うすくて広がり少ない接着層は塗布量が少なかったことを示唆し、厚くて広がり少ない接着層は、圧縮圧力が小さく、圧縮時間が短く、また、接着剤の粘度が高かったことを示唆することになる。これらのことから、1階和室の床組の接着層が、2階洋室の床組の接着層に比べて、著しく厚く、接着剤の広がり割合が小さくなった原因として、塗布量が不足したこと、釘打ちにより十分な圧縮圧力が接着剤に加わらなかったこと、またはアッセンブリータイム（接着剤を塗布してから床下張り材を重ね、釘打ちするまでの時間）が長くなったために、接着剤の粘度が増加したことが考えられる。いずれの因子が主な原因かを特定することは困難であるが、1階床組のNo.1およびNo.2の試料では、接着剤の広がり割合が22%および25%と著しく小さく、これは明らかに塗布量不足が主な原因であり、それに不十分な圧縮または接着剤の粘度増加が影響したものと考えられる。調査時の観察によっても、塗布量不足、塗布量のばらつき、および接着剤がまったく塗布されていない部分が確認された。また、1階床組のNo.4の試料では、接着剤の広がり割合が52%で、接着層厚さが0.44mmと厚くなっている。この試料で接着層厚さが、2階床組の接着層のように0.2mm以下になれば、接着剤の広がり割合は100%近くになったと推測される。なぜならば、塗布量が一定のとき、接着剤の広がり割合は接着層厚さと反比例の関係があるからである。したがって、No.4の試料の接着剤の広がり割合が小さくなったのは、塗布量不足というよりも、釘打ちにより接着剤に圧縮圧力が十分加わらなかったこと、または接着剤の粘度増加が原因していると考えられる。調査時の観察でも、釘が床根太をはずれてうたれていたので確認された。したがって、2階床組に比べて、1階床組の接着剤の広がり割合が小さく、接着層が厚くなったのは、ひとつには塗布量不足が、もうひとつには、釘打ちにより接着剤に十分な圧力が加わらなかったことが主な原因と判断される。また、アッセンブリータイムの増加による接着剤の粘度増加が影響している可能性も推察される。

以上のことから、1階和室と2階洋室の床組の接着性能に顕著な差が生じた原因は、環境因子の差によって接着剤の化学的な劣化状態が異なるためではなく、施工条件が異なり、接着層の形成状態が異なるためと判断される。

(b) 現場接着の問題点と対策

1回の現場接着床組の調査で現場接着全体の問題点を論ずることはできないが、逆に1回の調査で確認された問題は、これが起こる確率が非常に高いことを意味している。さきに述べたように、現場接着床組の接着接合部における大きな問題は、簡易な圧縮法を用いた場合、帯状塗布された接着剤が十分広がらないことがあり、それにより接着性能が低下するということである。このことが現場接着床組の構造性能に与える影響については検討していない。しかし、構造的により重要な部分に現場接着を適用する場合、この問題はより重大となり、この問題が生じないような現場接着工法を確立する必要がある。

接着剤の広がりに影響する因子には塗布量があるが、塗布作業を人間が行う限り、塗布量はばらつくと考えられる。したがって、製造条件の整備だけで、必要十分かつ一定の接着剤の広がり状態、さらには接着性能を期待することは難しいと思われる。そこで、接着された接合部についての検査が必要であると考えられるが、現在のところ接着性能を直接的、非破壊的かつ現場的に検査する方法は開発されていない。しかし、本節の調査によれば、接合部の接着性能は接着層の形成状態と密接な関係がある。そこで、製造された接合部の接着層の形成状態を調べ、良好な接着層が形成されている接合部を使うことにすれば、現場接着接合部の信頼性はより向上するものと期待できる。

5. 2 曲げ試験された接着重ね梁の接着層形成状態の実態調査

前章において、1液型ポリウレタン接着剤により、接着重ね梁の製作が可能であることを明らかにした。また、接着剤を用いて、現場的な条件でスギ正角材を重ね合わせ、スパン2間を想定した接着重ね梁が製作され、1液型ポリウレタン接着剤を使えば、低温でズブ生材を接着した場合でも十分な強度があり、完全に一体化していると考えられることが報告されている²¹⁾。

しかし、現場的な条件で製作された接着重ね梁の強度の信頼性の問題が残されており、接着重ね梁を実用化するためにはその接着性能および曲げ性能を保証(担保)してやる方法を開発することが必要である。そのために、接着性能の非破壊的検査方法の開発が強く望まれているが、接着強さそれ自体を直接的に非破壊検査する方法はないのが現状である。

そこで、ここでは接着剤の広がり状態に着目し、接着重ね梁の接着性能および曲げ性能を担保するための方法を開発することを目的として、曲げ試験が行われた接着重ね梁⁴²⁾について、接着層の形成状態を調査し、曲げ性能および曲げ破壊形態に及ぼす接着層形成状態の影響について検討した。

5. 2. 1 調査方法

(a) 接着重ね梁の製作条件

長さ6mのスギ生材を用いて、スパン2.5~3間を想定した3種類の断面の接着重ね梁が4体ずつ製作された。すなわち、10.5cm角3段重ね、12cm角3段重ね、および15cm角2段重ねの接着重ね梁である。含水率については測定されていないが、ズブ生材がしばらく放置されて、表面が乾いた程度とされている。

接着重ね梁の製作方法は、前章の結果をもとに作製された接着重ね梁の製作マニュアル⁴³⁾に従ったとされている⁴²⁾。概略は以下の通りである。スギ材の接着面となる部分はハンドプレーナにより表面研削され、ボルトを通すための直径15mmの穴が90cm間隔であけられた。接着剤には1液型ポリウレタン接着剤が用いられ、塗布量は800g/m²を目安とし、10cm角および12cm角では帯状に2本、15cm角では帯状に3本塗布された。塗布後直ちにスギ材が重ね合わされ、M12ボルト(直径12mm)により接合された。圧縮圧力については、座金(4cm×4cm×4.5mm)がスギ材にめり込む程度とされた。養生は室内放置1週間以上とされた。

(b) 曲げ試験方法

曲げ試験は、Fig. 38に示すように、3等分点2点荷重方式で、スパン540cmで行われた⁴²⁾。

(c) 接着層の形成状態の測定

曲げ試験が行われた接着重ね梁の端部から長さ10cm間隔で順次切断して、接着剤の広がり幅測定用の試験体とした(Fig. 39)。この試験体の木口面の接着剤の広がり幅を測定し、材幅に対する接着剤の広がり割合を計算した。3段重ねでは接着層が2層あるが、曲げ試験で接着層のはく離が生じたものについてはその接着層の広がり幅を、はく離しなかったものについては小さいほうの広がり幅を採用した。

5. 2. 2 結果および考察

接着重ね梁の曲げ試験の結果をTable 8に示す。なお、この表における試料番

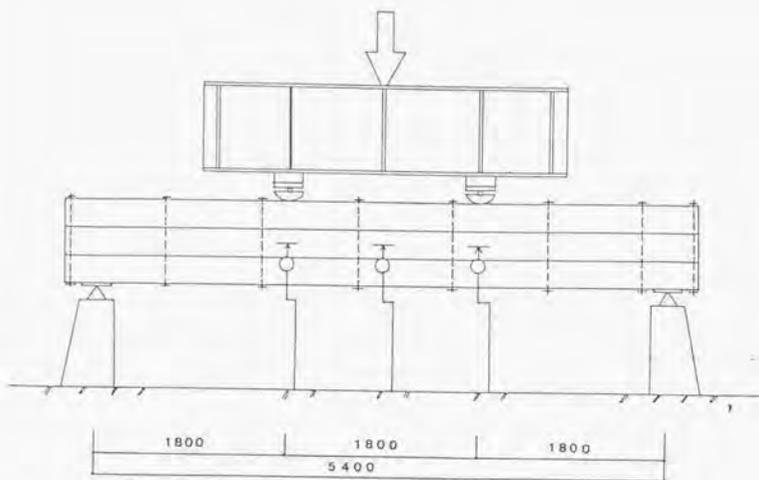


Fig. 38. The apparatus of bending test.

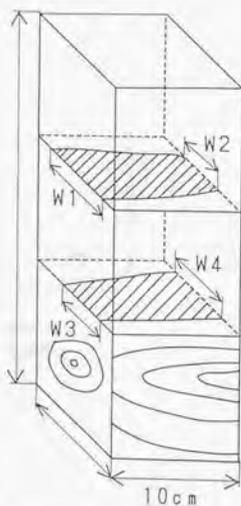


Fig. 39. Measuring method for width of glue spread.

Table 8. Result of bending test of glued-timber beams.

Sample	Maximum load (kgf)	Bending Strength (kgf/cm ²)	Young's modulus (ton·f/cm ²)	Shearing stress at glue line (kgf/cm ²)	Rate of glue spread (%)	Effective shearing stress (kgf/cm ²)	Fracture appearance
10-1	8700	356	82.0	15.0	52	29	bending
10-2	7950	333	85.2	13.9	71	20	bending
10-3	7600	314	85.6	13.2	59	22	glue line
10-4	7850	332	91.8	13.8	61	23	glue line
12-1	11100	314	88.5	15.0	58	26	glue line
12-2	9880	287	86.5	13.6	46	30	glue line
12-3	12050	336	86.8	16.1	63	26	bending
12-4	7530	212	86.6	10.1	-	-	glue line
15-1	9000	328	78.2	14.1	63	22	bending
15-2	9700	336	88.8	14.8	69	21	bending
15-3	11100	396	81.5	17.2	72	24	bending
15-4	10900	395	82.4	17.1	59	29	glue line

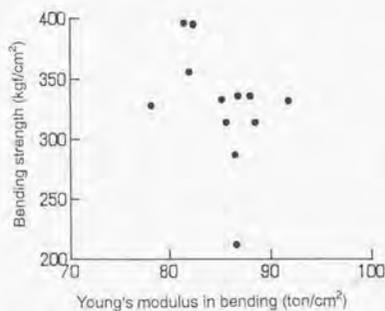


Fig. 40. Relationship between Young's modulus and bending strength.

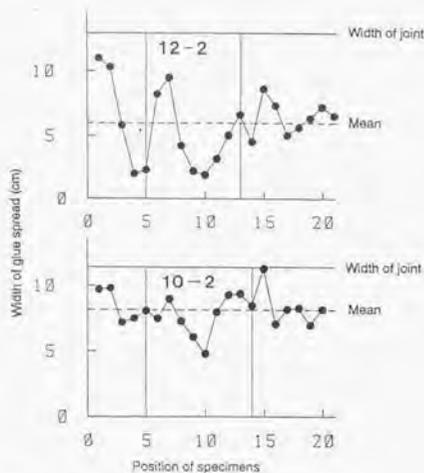


Fig. 41. The status of glue spread.

号の最初の数字10、12および15は、それぞれ接着重ね梁の幅が10.5cm、12cmおよび15cmであることを示している。プレーナ加工を施さなかった12-4を除いて、接着重ね梁の曲げ強さは建築基準法で定める 225kgf/cm^2 を上回っており、さらに、構造用大断面集成材の日本農林規格に定める2級の曲げ強さ 285kgf/cm^2 をも上回っていた。曲げヤング係数については、プレーナを施さなかった12-4も含めて、木構造設計基準に示すスギの $70\text{ton}\cdot\text{f/cm}^2$ をすべて上回っていた。接着重ね梁の性能は構成材が完全に一体化したとみなしたときの性能に匹敵するが、今回の試験での特徴を前回のスパン2間を想定した接着重ね梁²⁷⁾と比較すると以下のような差異が認められた。

①スパン2間を想定した接着重ね梁の曲げ試験では、すべて構成材の曲げ破壊が生じた²⁷⁾が、今回の接着重ね梁では接着層のせん断破壊を示したものが多くあった。

②前章で示したように、スパン2間を想定した接着重ね梁では、ボルト間隔が90cmのときの接着剤の広がり割合が80%以上であり、ボルト間隔が120cmのときでも接着剤の広がり割合が65%程度であったのに対して、今回の接着重ね梁では、ボルト間隔が90cmであるにも関わらず、接着剤の広がり割合が46~72%と小さいものであった。

このような差異を考慮して、以下接着重ね梁の曲げ性能に影響を及ぼした因子について検討した。

まず、Fig. 40は接着重ね梁の曲げヤング係数と曲げ強さの関係を示しているが、両者に相関は認められない。一般に、素材においては、曲げヤング係数と曲げ強さには正の相関が認められており、曲げヤング係数を測定することにより曲げ強さを推定する方法の開発が試みられている。しかし、接着重ね梁においては、両者に相関は認められず、むしろヤング係数がほぼ一定の値を示し、曲げ強さの変動が大きい傾向がある。したがって、素材において行われている、曲げヤング係数による曲げ強さの推定方法は、接着重ね梁には適用できないと考えられる。

次に、接着剤の広がり状態を測定した1例をFig. 41を示す。12-2は接着層のせん断破壊が生じた接着重ね梁の接着剤の広がり幅を示しているが、ボルト間の中央部における接着剤の広がり幅が極端に小さくなっており、接着剤の広がり

割合の平均が46%と小さくなっていった。一方、10-2は曲げ破壊が生じた接着重ね梁のものであるが、接着剤の広がり幅は比較的大きく、接着剤の広がり割合の平均は71%であった。

Fig. 42は接着剤の広がり割合と、曲げ強さおよび曲げ破壊形態の関係を示している。この図の中で、白丸は曲げ破壊が生じたものであり、黒丸は接着層のせん断破壊が生じたものである（以下Fig. 44まで同様）。接着剤の広がり割合が61%を越えたものはすべて曲げ破壊が生じているのに対して、61%以下になると接着層のせん断破壊が生じたものがほとんどである。さらに、接着層のせん断破壊を示したものは、接着剤の広がり割合が小さくなると曲げ強さが小さくなる傾向が認められる。したがって、接着剤の広がり割合が小さくなると、実際に接着層に作用するせん断応力（実効せん断応力）が大きくなるため、接着層のせん断破壊が生じる確率が高くなり、また曲げ強さが小さくなるのではないかと推測される。そこで、次式により実効せん断応力を計算し、接着剤の広がり割合との関係を調べた。

$$T_a = T / R_w \times 100$$

ここで、 T_a ：接着層に作用する実効せん断応力（kgf/cm²）

T ：接着層に作用するせん断応力（kgf/cm²）

R_w ：接着剤の広がり割合（%）

Fig. 43は接着剤の広がり割合と実効せん断応力の関係を示しているが、両者には負の相関が認められる。すなわち、接着剤の広がり割合が小さくなると実効せん断応力が大きくなる傾向が認められる。したがって、接着剤の広がり割合が小さくなると、接着重ね梁に一定荷重が作用したときの接着層のせん断応力が大きくなり、接着層のせん断破壊が生じ易くなるものと考えられる。

ただし、接着層のせん断破壊が生じる実効せん断応力の範囲は22~30kgf/cm²とばらつきがあり、実効せん断応力だけで接着層のせん断破壊を説明することはできない。接着層のせん断破壊を示した接着重ね梁の破断面を観察すると、接着剤が広がっている部分には木材が付着しているのが確認された。すなわち、重ね梁の接着層の破壊は木部破断によるものであり、接着剤の凝集力および木材と接着剤との界面の接着力には問題がなかったと考えられる。したがって、接着層のせん断破壊が生じる応力は木材の強度（凝集力）の影響を受けると考

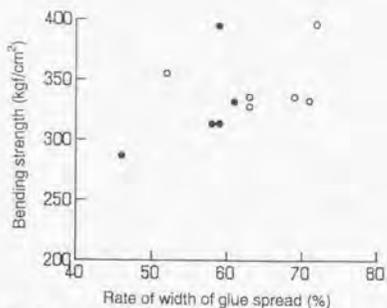


Fig. 42. Relationship between the rate of width of glue spread and bending strength.

Legend of fracture appearance: ●: glue line, ○: bending.

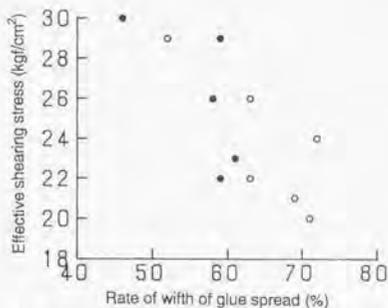


Fig. 43. Relationship between the rate of width of glue spread and effective shearing stress at glue line.

Legend of fracture appearance: ●: glue line, ○: bending.

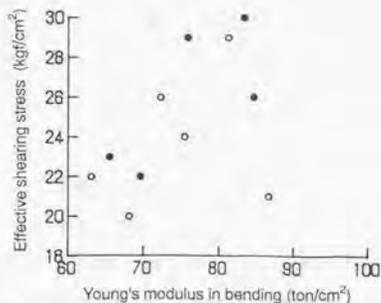


Fig. 44. Relationship between Young's modulus and effective shearing stress at glue line.

Legend of fracture appearance: ●: glue line, ○: bending.

えられる。

Fig. 44は、接着層に接した各スギ材の曲げヤング係数の最低値と実効せん断応力との関係を示しているが、曲げヤング係数が小さくなると接着層のせん断破壊が生じる実効せん断応力が小さくなる傾向が認められる。これは、曲げヤング係数の小さなスギ材は、比重が小さく、木材の凝集力も小さいために、小さな実効せん断応力で接着層の破壊が生じるためと推測される。

以上のことから、接着重ね梁における接着剤の広がり幅が十分大きい場合は、曲げ試験において木材の曲げ破壊が生じ、構成材が完全に一体化したとみなしたときの曲げ強度と曲げ剛性が期待できるのに対して、接着剤の広がり幅が小さくなると、接着重ね梁に曲げの力が作用したときに生じる接着層の実効せん断応力が大きくなるために接着層のせん断破壊が生じ易くなり、曲げ剛性は低下しないものの曲げ強度は低下すると考えられる。したがって、接着重ね梁の接着剤の広がり幅を測定することにより、接着重ね梁の曲げ性能を推定することが可能であると考えられる。

5. 3 要 約

1) 枠組壁工法住宅の現場接着床組における床根太と床下張り材との間の接着接合部の性能を調査した。2階洋室から採取した試料は十分な性能を保持していたが、1階和室から採取した試料はまったく接着されていなかった。この1階と2階での差が生じた原因は、接着剤の化学的な劣化状態が異なるためではなく、接着層の形成状態、すなわち帯状塗布された接着剤の広がり幅と接着層厚さが1階と2階で異なるためと推測された。それゆえ、現場接着による接合部の信頼性を低下させる大きな原因のひとつは、釘打ちを圧縮としたときに帯状塗布された接着剤が十分広がらないことがあり、それにより接着性能が低下するということである。

2) 接着重ね梁の曲げ試験において、接着剤の広がり幅が小さくなると、接着層に作用する実効せん断応力が大きくなるため、接着層のせん断破壊が生じ易くなり、曲げ強さが低下する。接着層のせん断破壊が生じる実効せん断応力は木材の凝集力の影響を受ける。したがって、接着剤の広がり状態から接着重ね梁の曲げ性能を推定することが可能である。

第6章 現場接着における接着層の形成状態と接着性能

現場接着接合部の信頼性を向上させるためには、現場接着の問題点を明らかにして、それを除去していくことが必須であるが、前章の現場接着接合部の実態調査において、以下のような現場接着の問題点を明らかにした。現場接着床組の問題点は、帯状塗布されたエラストマ系の床用現場接着剤が釘打ち圧縮により十分広がらないことがあり、それによって接着性能が低下することであった。また、接着重ね梁においても、帯状塗布された1液型ポリウレタン接着剤が十分広がらない場合、接着層に作用する実効せん断応力が大きくなり、接着層のせん断破壊が生じやすくなり、曲げ強さが低下することを明らかにした。このように、現場接着の大きな問題点のひとつは、釘打ち圧縮またはボルトによる圧縮といった簡易な圧縮法で、良好な接着層が形成されない場合があり、それによって接着性能が低下することであった。現場接着接合部の信頼性を向上させるためには、このような問題点を除去することが必要であるが、そのためには、現場接着における簡易な圧縮法によってどのような接着層が形成されるのか、またどのような接着性能が得られるのかを把握しておく必要がある。そこで、本章では、現場接着における接着層の形成状態と接着性能について検討した。

6. 1節では、エラストマ接着剤を用いて合板と素材を釘打ち圧縮により接着した場合の接着層の形成状態と接着性能について検討した。

6. 2節では、各種市販の接着剤を用いて合板と素材を釘打ち圧縮により接着した場合の接着層形成状態と接着性能を調べ、各種接着剤の釘打ち接着適性について検討した。

6. 3節では、前節で選定した1液型ポリウレタン接着剤を用いて素材と素材をボルト圧縮により接着した場合の接着層形成状態と接着性能について検討した。

6. 4節では、帯状塗布された接着剤の死荷重による接着層形成状態を調べ、接着層形成状態に影響する因子について検討した。

6. 5節では、前節の結果をもとに、帯状塗布された接着剤の釘打ち圧縮による接着層の形成機構および形成状態予測法について検討した。

6. 1 エラストマ接着剤の釘打ち圧縮による接着層の形成状態と接着性能

接着には一般に圧縮操作が不可欠であるが、釘打ちを圧縮に利用することができれば建築現場で簡易な接着工法が可能となる。しかし、現場接着床組を除いて、構造的性能が認められた釘打ち接着工法はない。その理由は、前章でも明らかにしたように、釘打ち接着では接着性能のばらつきが大きく、釘打ち接着の信頼性が確立されていないためと考えられる。

接着性能に影響を及ぼす因子としては、被着材側として木材含水率、表面性能等があり、圧縮に関しては温度、塗布量、オープンアッセンブリータイム、圧縮圧力および圧縮時間等があげられるが、現場的な釘打ち接着において特に問題となるのは圧縮圧力と圧縮時間であると考えられる。

一般に圧縮には死荷重およびプレスのように一定の圧力を継続的に保つものと、ボルト締めのように圧力が緩和していくものの2種類があるが、釘打ち圧縮は後者に属し十分解析されていない。

一方、接着剤側から圧縮について考えると以下のようなになる。2枚の板の間に接着剤があり (Fig. 45)、圧縮されたときの接着剤の広がり は次式で示される⁴¹⁾。

$$f t = \frac{4 \eta V^2}{5 T^4 l^2} = \frac{4 \eta W^2}{5 T^2} = \frac{4 \eta W^4 l^2}{5 V^2} \quad \dots \textcircled{1}$$

ここで、 f : 圧縮圧力

t : 圧縮時間

η : 接着剤の粘度

V : 接着剤の体積

T : 圧縮後の接着剤の厚さ

W : 圧縮後の接着剤の広がり幅

l : 紙面の奥行き方向の長さ

すなわち、接着剤の広がり幅および厚さは、接着剤の粘度と塗布量が一定のとき、圧力と時間の積によって決まる。釘打ち圧縮の場合は、接着剤が広がることによる圧力の緩和および接着剤の粘度変化により接着層の形成過程は非常に複雑となるが、定性的には①式に従うと考えられる。また、塗布量と粘度の条件が同じならば、接着剤の広がり幅と厚さから圧縮条件 (圧力と時間の積)

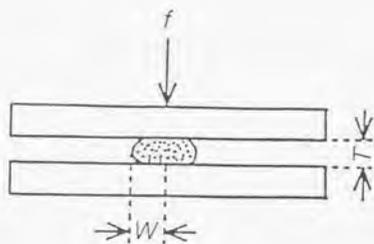


Fig. 45. Glue-bead spreading by pressure between two boards.

Table 9. Bonding condition of test joints.

Sample sign	Spread (g/cm ²)	Open assembly time (min)	Pressing	Spacer
A0	500	0	0.1 kgf/cm ² , 1 min	-
P1	513	10	0.1 kgf/cm ² , 1 min	-
P10	500	10	0.1 kgf/cm ² , 10 min	-
P100	419	10	0.1 kgf/cm ² , 100 min	-
P24h	688	10	0.1 kgf/cm ² , 24 h	-
N	425	10	nailing	-
NS8	494	10	nailing	0.8 mm
NS16	563	10	nailing	1.6 mm
NS16M	1244	10	nailing	1.6 mm

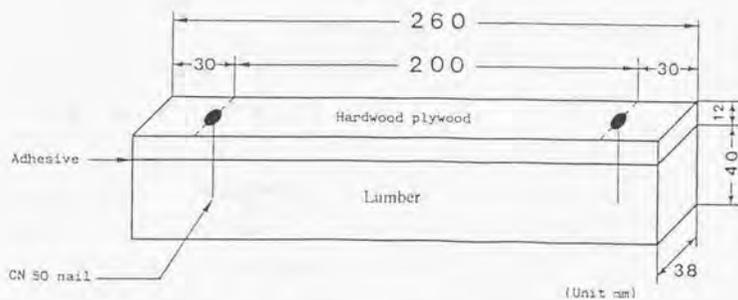


Fig. 46. Configuration and dimensions of test specimen.

をある程度推測することが可能である。

本節ではエラストマ系の床用現場接着剤の種々の圧縮条件における接着層の形成状態（広がり幅と厚さ）および接着強さを測定し、釘打ち圧縮で形成される接着層の状態および接着強さと比較し、釘打ち圧縮の特徴について検討した。

6. 1. 1 実 験

ベイツガ【*Tsuga heterophylla* (RAF.) SARG.】材に床用現場接着剤（コニシボンドG-77）を帯状に1本塗布し、厚さ12mmの広葉樹合板（*Shorea* spp.）を重ねて、Table 9に示す条件で接着し、Fig. 46に示す試験体を作製した。圧縮には死荷重と釘打ちの2種類を用いた。死荷重の場合は0.1kgf/cm²の圧力で圧縮時間を1分、10分、100分および24時間とした。釘打ちの場合は、CN 50釘を用いて釘打ち間隔を20cmとし、スペーサとして0.8mmまたは1.6mmの針金を接着層に入れたものと入れないものを作製した。また、1.6mmの針金を入れた場合は、塗布量を標準と多めの2種類を作製した。

約1カ月養生した後、Fig. 47に示すブロックせん断試験片を作製し、両端面（木口面）の接着剤の広がり幅を測定し、次式によりみかけの接着面積を計算した。

$$A_s = 2.5 \times (W_1 + W_2) / 2$$

A_s : みかけの接着面積 (cm²)

W_1, W_2 : 両端面の接着剤の広がり幅 (cm)

また試験片の両側面を万能投影機で50倍に拡大して接着層厚さを測定した。

ブロックせん断試験終了後、破断面を万能投影機で50倍に拡大し、ランダムに100個の点をプロットした半透明の方眼紙を投影面に置き、接着に関与していた点の数 (N) を数えた。この点の数とみかけの接着面積から、次式を用いて有効接着面積 (A_e) を計算した。

$$A_e = A_s \times N / 100$$

A_e : 有効接着面積 (cm²)

N : 接着に関与していた点の数

6. 1. 2 結果および考察

(a) 接着層厚さと接着剤の広がり幅

接着層厚さと接着剤の広がり幅の関係をFig. 48に示す（各ドットは1試験体か

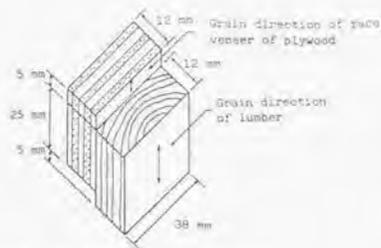


Fig. 47. Block shear specimen.

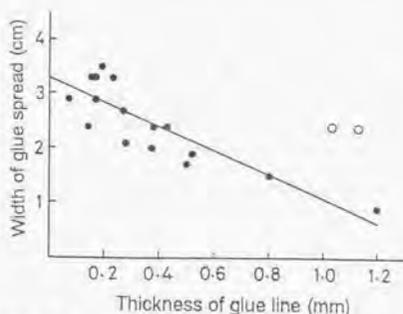


Fig. 48. Relationship between thickness of glue line and width of glue spreads.

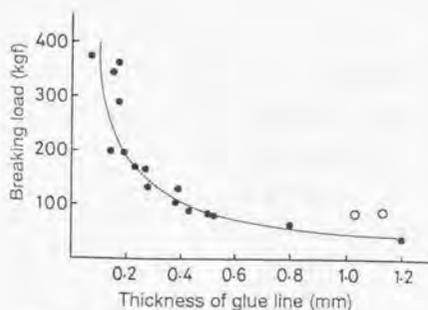


Fig. 49. Relationship between thickness of glue line and breaking load.

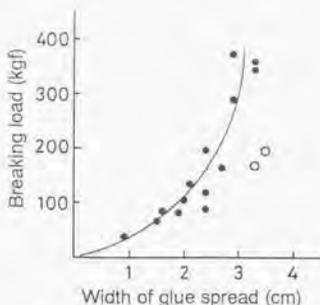


Fig. 50. Relationship between width of glue spread and breaking load.

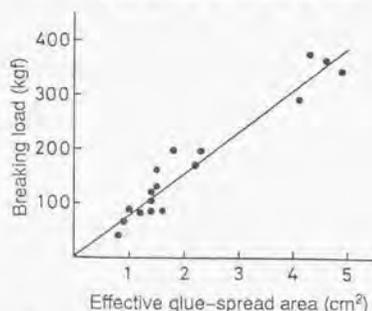


Fig. 51. Relationship between effective glue-spread area and breaking load.

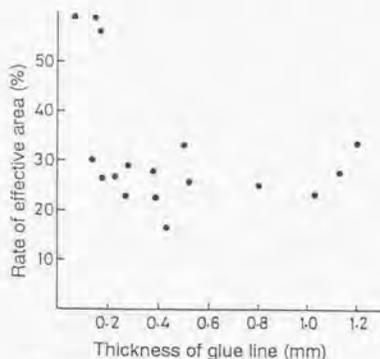


Fig. 52. Relationship between thickness of glue line and rate of effective glue-spread area.

ら得られた5個のブロック試験片についての平均であり、以下Fig.52まで同様)。塗布量が一定のとき、接着剤の広がり幅と接着層厚さには負の相関があり、相関係数は0.86となった。したがって、接着層が厚くなったときの問題のひとつは接着剤の広がり幅が小さくなることであると考えられる。そこで、塗布量を増やして試験したところ、Fig.48の白丸で示すように、接着層が厚くなっても塗布量を増やすことにより、接着剤の広がり幅を大きくすることができた。以上の関係を式で示せば、

$$V = k T W$$

となると考えられる。ここで、 V は塗布量、 T は接着層厚さ、 W は接着剤の広がり幅、 k は比例定数である。なぜならば、塗布量は接着剤の体積に比例し、接着剤の体積は接着層の断面積(接着層厚さ×接着剤の広がり幅)に比例するからである。したがって、接着性能と密接な関係のある接着剤の広がり幅は、塗布量に比例し、接着層厚さに反比例することになる。

(b) 接着層厚さと破壊荷重

Fig.49に接着層厚さとブロックせん断試験における破壊荷重の関係を示す。接着層が厚くなると破壊荷重は減少するが、その減少傾向は直線的ではなく、接着層厚さが0.1mm~0.2mm程度の範囲では破壊荷重が急激に低下し、それ以上の範囲では減少の程度がゆるやかとなり、さらに0.4mm以上になるとほぼ一定の値を示した。また、接着層が厚いとき、塗布量を増加させて接着剤の広がり幅を大きくしても、破壊荷重の増加はあまり大きくならなかった(Fig.49の白丸)。接着層厚さと接着剤の広がり幅の関係が直線的であったのに対して、接着層厚さと破壊荷重の関係が直線的でないことは注目すべき点である。

(c) 接着剤の広がり幅と破壊荷重

接着剤の広がり幅と破壊荷重の関係をFig.50に示す。接着剤の広がり幅が大きくなると破壊荷重が増加するが、その増加傾向は直線的ではなく指数関数的であった。また、接着層が厚いときに塗布量を多くして接着剤の広がり幅を大きくしたもの(Fig.50の白丸)は、他の接着剤の広がり幅が同程度のものに比べて破壊荷重が小さくなった。これらのことは、破壊荷重が接着剤の広がり幅、すなわちみかけの接着面積だけで決まらず、他の因子が関与していることを示す。

(d) 有効接着面積と破壊荷重

以上のように接着剤の広がり幅と破壊荷重には密接な関係があるが、単にみかけの接着面積だけで破壊荷重は決まらないことが明らかになった。これは今回用いた接着剤が釘打ち圧縮では均一な接着層を形成せず、3. 1節で示したように線状または網目状の接着層 (Fig. 15、16) を形成するため、みかけの接着面積と実際に接着に関与している有効接着面積が異なるためと考えられた。そこで、木材の組織率等の測定法のひとつである算点法 (ランダムに配置した点の数を数える方法) により、有効接着面積を求めて破壊荷重との関係を検討した (Fig. 51)。破壊荷重は有効接着面積と原点を通る直線関係があり、相関係数は0.97となった。したがって、破壊荷重は有効接着面積に比例し、有効接着面積によって決まると考えられる。

Fig. 52は、接着層厚さと、みかけの接着面積に対する有効接着面積の割合との関係を示す。接着層厚さが0.15mm程度以下のとき、有効接着面積の割合は50%以上であるが、0.2mm以上になると、同割合は20~30%程度の範囲まで低下して、ほぼ一定となる。このことから、Fig. 49における接着層厚さの増加に伴う破壊荷重の低下が説明できる。すなわち、接着層厚さ0.1~0.2mmでの破壊荷重の急激な低下は、みかけの接着面積の減少と、みかけの接着面積に対する有効接着面積の割合の減少との相乗効果によるものであり、その後のゆるやかな低下は単にみかけの接着面積の減少のみによるものと考えられる。

(e) 接着層の形成状態に及ぼす圧縮条件の影響

Table 10およびFig. 53に各圧縮条件における接着層の形成状態および破壊荷重を示す (各値は、同一条件で作製した2体の試験体からの10個の試験片についての平均)。Table 10において、オープンアッセンブリータイムをとらず、接着剤塗布後直ちに合板を重ねて釘打ち接着したA0に比べて、オープンアッセンブリータイムを10分として他の条件を同じにしたP1のほうが接着層が厚く、接着剤の広がり幅が小さくなった。これは、オープンアッセンブリータイムを長くすると、接着剤の粘度が増加して、接着剤が流動しにくくなるためと考えられる。

また、記号P1、P10、P100、P24hは圧縮圧力が一定で圧縮時間を変化させたものであるが、圧縮時間が長くなると接着剤の広がり幅が大きくなり、接着層厚

Table 10. Effect of press condition on the status of glue lines and bonding property.

Sample sign	Thickness of glue line (mm)	Width of glue spread (cm)	Apparent bonding area (cm ²)	Rate of effective area (%)	Effective bonding area (cm ²)	Breaking load (kgf)	
						Mean	σ_n^{*2}
A0	0.21	3.4	8.6	27	2.3	182.1	40.7
P1	0.40	2.3	5.8	24	1.4	124.1	57.0
P10	0.41	2.4	6.0	20	1.2	104.3	29.2
P100	0.21	2.3	5.7	30	1.7	165.7	75.4
P24h	0.16	3.1	7.8	58	4.5	317.5	70.1
N	0.12	3.1	7.8	58	4.5	368.7	67.9
NS8	0.44	1.9	4.7	31	1.4	76.1	23.2
NS16	1.00	1.2	3.1	29	0.9	52.5	17.2
NS16M	1.08	2.4	6.0	25	1.5	86.4	9.8

*2 Standard deviation.

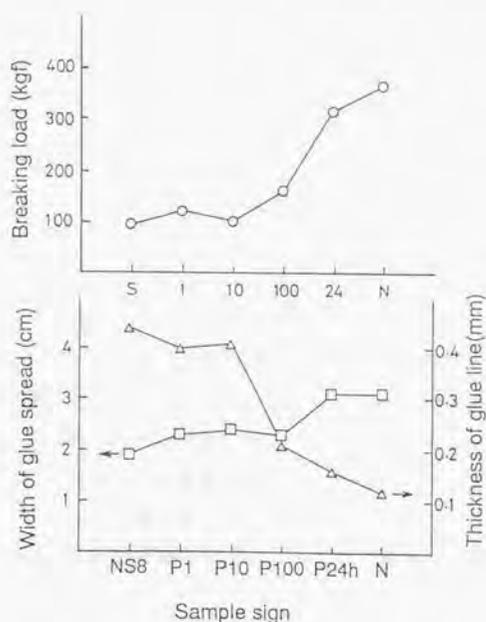


Fig. 53. Effect of press condition on status of glue line and bonding property.

さが小さくなり、破壊荷重が大きくなっている。これは①式にしたがっている。すなわち、接着剤の広がり幅と接着層厚さは圧縮圧力だけで決まるのではなく、圧縮時間の影響を大きく受ける。

(f) 釘打ち圧縮による接着層の形成状態

以上のように、接着層厚さと接着剤の広がり幅は圧縮条件の影響を受けるが、逆に接着剤の広がり幅と厚さから圧縮条件を比較することができる。そこで、死荷重で形成された接着層の状態と釘打ち圧縮で形成された接着層の状態を比較すると以下ようになる。

スペーサを入れないときの釘打ち圧縮により形成された接着層は 0.1kgf/cm^2 、24時間の死荷重による圧縮で形成された接着層厚さより小さく、広がり幅は同程度であるが、破壊荷重が大きい。すなわち、スペーサを入れないときの釘打ち圧縮の効果は、 0.1kgf/cm^2 、24時間の死荷重による圧縮の効果より大きい。一方、スペーサを入れたときの釘打ち圧縮により形成された接着層は、 0.1kgf/cm^2 、1分の死荷重による圧縮で形成された接着層厚さより大きく、広がり幅が小さく、破壊荷重も小さい。すなわち、スペーサを入れたときの釘打ち圧縮の効果は、 0.1kgf/cm^2 、1分の死荷重による圧縮の効果よりも小さい。

以上のように、釘打ち圧縮で形成される接着層は、スペーサがある場合とない場合では著しく異なる。これはスペーサがある場合とない場合では、釘打ち圧縮の効果が異なることを意味する。このスペーサの存在は、実際の接着においては、材料表面の荒れおよび反り等に相当すると考えられる。スペーサのない場合、すなわち被着材の加工精度が高く、接着面の密着がよければ釘打ち圧縮でも安定した接着が期待できる。しかし、スペーサのある場合、すなわち材料表面が荒れている場合または床組のように目違いにより接着面が同一平面上にない場合、釘打ち圧縮でそれを矯正することができなければ接着層は厚くなり接着強さは低いものとなると考えられる。釘打ちを現場的な圧縮手段に用いる場合、材料の接着面の密着を考慮すれば、より信頼性の高い接着が可能になると考えられる。

6. 2 各種接着剤の釘打ち接着適性

現場接着床組に使用されるエラストマ系接着剤は、日本住宅・木材技術セン

ターに認定されているものであり、空隙充填性の高い接着剤とされている。しかし、前節で明らかにしたように、エラストマ系接着剤による接合部は、接着層が厚くなると接着剤の広がり面積の減少および接着強さ自体の減少との相乗効果により、破壊荷重の低下が比較的大きいことが示された。現場接着による接合部の信頼性を向上させるためには、より空隙充填性の高い接着剤が必要である。

そこで、本節では、空隙充填性が改良されたいくつかの市販の接着剤を用いて、合板と枠材を釘打ち接着したときの接着層の形成状態と接着性能の関係を調べ、各種接着剤の釘打ち接着適性について検討した。

6. 2. 1 実 験

(a) 供試材

面材には厚さ12mmの構造用1類合板【メラランチ (*Shorea spp.*)、気乾比重約0.56】を使用した。枠材にはスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) の気乾材 (平均含水率18%、気乾比重約0.41) を使用した。

供試接着剤の略号、名称、配合割合、および配合した接着剤の性状 (仕様書による) を以下に示す。

- PU: 湿気硬化型1液型ポリウレタン接着剤 (ホーネンレジンルーIF-310)、
粘度5000~15000 (Poise/25°C)、不揮発分83~87%
- FG: クロロプレンゴム系の床用現場接着剤 (コニシボンD-77)、粘度1000
~2000 (Poise/25°C)、不揮発分40~46%
- EX: エポキシ樹脂接着剤 (ホーネンレジンルーE-100)、主剤100部に対して
硬化剤100部添加、粘度2000~3000 (Poise/25°C)、不揮発分約100%
- LE: ラテックス・エポキシ樹脂接着剤 (ホーネンレジンルーES-760)、主
剤100部に対して硬化剤100部添加、粘度約1000 (Poise/25°C)、不揮発
分70~75%
- RF: レゾルシノール樹脂接着剤 (大日本インキプライオフェン6000)、主
剤100部に対して硬化剤15部添加、粘度20~45 (Poise/25°C)、不揮発分
56~60%
- AI: 水性高分子・イソシアネート系接着剤 (光洋KR-120)、主剤100部対
して硬化剤15部添加、粘度80~140 (Poise/25°C)、不揮発分44~50%

PUは接着重ね梁の製作²⁷⁾に使用された接着剤と同タイプのもので、低温条件下で高含水率材の接着にも適することが確認されている。FGは日本住宅・木材技術センター(住木センター)により床用現場接着剤として認定されているものである。EXとLEは充填剤を多く含み、空隙充填性が改良された接着剤である。RFとAIは集成材等の製造に使われる標準的な接着剤であり、特に釘打ち接着に適するとは考えられないが、比較のため採用した。

(b) 試験体の作製

試験体は、住木センターの定める“床用現場接着剤の試験方法”に準じて作製した(Fig. 54)。スギ材に各接着剤を塗布し、オープンアッセンブリタイムを10分とり、合板を重ねて釘打ちした。釘打ち間隔は30cmとした。各接着剤につき、1.6mmの針金をスペーサとして接着層に挿入した試験体を5個、スペーサを挿入しない試験体を5個作製した。スペーサは試験体の長さ方向に垂直に、各釘打ち部分の外側に1本ずつ挿入した。1試験体より8個のブロックせん断試験片を作製した(Fig. 55)。接着剤の塗布方法は、PUとFGについては、カートリッジに入っているため、コーキングガンを用いて带状(beads状)に1本とした。RFとAIはへらを用いて接着面全体に広げた。EXとLEについては、接着層にスペーサを挿入しない場合はへらを用いて接着面全体に広げたが、スペーサを挿入した場合は接着面の中央部に接着剤をのせただけで、全面に広げなかった。これはスペーサを接着層に挿入した場合、接着剤を全面に広げると、接着剤が合板に接触しない可能性があるためである。接着剤の塗布量は、接着層にスペーサを挿入しない場合は300~500g/m²程度とし、スペーサを挿入した場合は、塗布量と接着性能の関係を調べるため、400~1000g/m²程度の範囲で意識的に変化させた。釘打ちの方法は、スペーサを接着層に挿入しない場合は通常の手打ちにより行ったが、スペーサを挿入した場合は、あらかじめ合板の釘打ち部分にドリルにより穴を施し、接着層が厚くなるように釘打ちした。ただし、RFとAIについては接着剤の粘度が低く流動してしまうため、スペーサを挿入して接着層の厚さを1.6mmにすることは不可能と思われたので、スペーサを挿入した場合も、合板に穴を施さず、釘打ちした。

(c) 接着剤の広がり面積と接着層厚さの測定

ブロックせん断試験片の両端面(木口面)において、接着剤の広がり幅を測

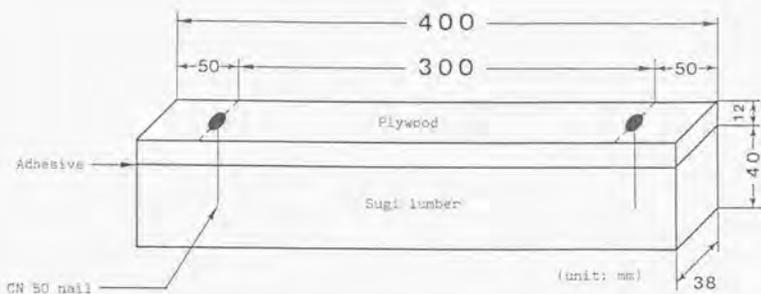


Fig. 54. Configuration and dimensions of test joint.

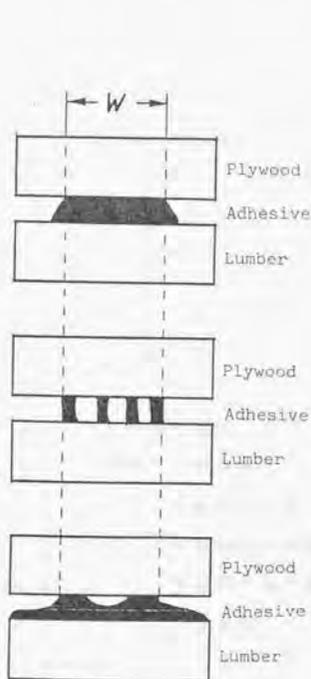


Fig. 56. Measurement of width of adhesive spread on the cross section of block-shear specimen.

Notes: Area of adhesive spread of block-shear specimen is calculated with the formula:

$$A = 2.5 \times (W_1 + W_2)/2$$

where A is the area of adhesive spread (cm^2), W_1 and W_2 are widths of adhesive spread on both cross sections of block-shear specimen (cm).

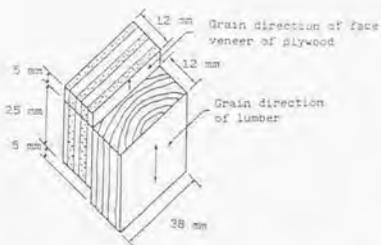


Fig. 55. Configuration and dimensions of block-shear specimen.

定し、次式により接着剤の広がり面積を計算した。

$$A = 2.5 \times (W_1 + W_2) / 2$$

ここで、 A ：接着剤の広がり面積 (cm^2)

W_1 および W_2 ：試験片の両端面の接着剤の広がり幅 (cm)

2.5：試験片のせん断面の繊維方向の長さ (cm)

接着剤の広がり幅は、接着層内部に欠膠部分がある場合はこれを無視してみかけの幅を測定した (Fig. 56)。この接着剤の広がり幅から計算される接着剤の広がり面積は、接着層内部に欠膠がある場合、実際に接着に関与している接着面積 (以下これを有効接着面積と呼ぶ) とは異なる。

接着層の厚さは、万能投影機でブロックせん断試験片の両側面の被着材間の距離を50倍に拡大して測定し、これを平均して求めた。

(d) 接着強さの測定

試験片を室温で約2カ月養生した後、インストロンタイプ試験機を用いてせん断強さを測定した。通常、接着強さはブロックせん断試験における最大荷重 (以下これを最大せん断強さと呼ぶ) を試験片のせん断面積で割ることにより計算される。しかし、今回の実験では接着剤が試験片のせん断面全体に広がっていない状態が多く観察されたため、本節では最大せん断強さを (c) で求めた接着剤の広がり面積で割ることにより接着強さを計算した。

6. 2. 2 結果および考察

(a) 接着層の形成状態と接着性能

各接着剤についてのブロックせん断試験の結果をスペーサを接着層に挿入した場合と挿入しない場合に分けて Table 11 に示す。PU、EX、RF および AI を用いて接着した試験片の破壊はほとんどすべて合板の木部破断であった。これらの傾向は、スペーサを接着層に挿入した場合も同様で、接着剤が合板と接触している部分で合板の木部破断が観察された。FG および LE を用いて接着した試験片の破壊はほとんど接着剤の凝集破壊であった。

RF および AI では、接着層にスペーサを挿入した場合でも、最大せん断強さおよび接着強さの低下は認められなかった。これは、スペーサを挿入しても、通常の釘打ちを行うと、スペーサが木材にめり込み、また合板がたわむため、スペーサの影響がなくなるためと考えられる。RF においてスペーサの有無により

Table 11. Result of block-shear test.

Adhesive	Glue spread (g/m ²)	Thickness of glue line (mm)	Area of spread (cm ²)	Maximum shear strength (kgf)	Bond strength ^{a)} (kgf/cm ²)
PU ^{b)}	542	0.38	8.1	606	74.8
PUS ^{b)}	773	1.10	4.6	351	76.3
FG ^{c)}	487	0.27	8.3	318	38.3
FCS ^{c)}	771	0.69	6.8	191	28.1
EX ^{d)}	574	0.24	9.3	616	66.2
EXS ^{d)}	564	0.96	4.3	288	67.0
LE ^{e)}	394	0.27	9.5	289	30.4
LES ^{e)}	507	0.75	4.8	209	43.5
RF ^{f)}	440	0.14	9.5	622	65.5
RFS ^{f)}	460	0.15	9.0	570	63.3
AI ^{g)}	372	-	9.5	575	60.5
AIS ^{g)}	464	-	8.8	522	65.0

a) Bond strength = maximum shear strength/area of spread.

b) PU: Polyurethane adhesive.

c) FG: Elastomer-based adhesive for gluing plywood-floor.

d) EX: Epoxy resin adhesive.

e) LE: Latex-epoxy resin adhesive.

f) RF: Resorcinol formaldehyde resin adhesive.

g) AI: Water-based polymer-isocyanate adhesive.

h) Spacers were inserted into the glue lines.

接着層厚さに変化がないことがこのことを裏付けている。A1については、接着剤と被着材の区別がつきにくいので、接着層厚さの測定は一部しか行っていないが、接着層厚さはRFとほぼ同程度であり、また、スペーサの有無によりほとんど差はなかった。

その他の接着剤については、釘打ち前にドリルにより合板に穴を施し、接着層が厚くなるように試験体を作製した。そのため、これらの接着剤では、接着層にスペーサを挿入した場合、接着層が厚く、接着剤の広がり面積が小さくなり、最大せん断強さが低下している。これらの厚い接着層が得られたPU、PG、EXおよびLBについて、接着層の形成状態と接着性能の関係をより詳細に調べた。

Fig. 57は接着剤の広がり面積と最大せん断強さの関係を、Fig. 58は接着層厚さと接着強さ（最大せん断強さ/接着剤の広がり面積）の関係を示す。PUの場合、接着層厚さが1.5mm程度以下の範囲では、接着層厚さの増加に伴う接着強さの低下は認められない。PUの接着強さの最低値は48.4kgf/cm²であり、2個のデータを除けば、他のすべての接着強さは60kgf/cm²以上である。そのため、接着剤の広がり面積と最大せん断強さのとの間に高い相関が認められる。接着層厚さ測定時の観察（50倍）によれば、形成されたPUの接着剤層内部に気泡等による欠陥部分はほとんど認められず、均一な接着層が形成されているのが確認された。これから、今回測定したPUの接着剤の広がり面積と実際に接着に寄与している接着面積（有効接着面積）はほぼ等しいと考えられる。前節で示したように、接着層厚さおよび広がり幅に影響する因子には圧縮圧力（接着剤に加わる圧力）、圧縮時間、塗布量および接着剤の粘度があり、それらの因子により接着層の形成状態が決定される。逆に、形成された接着層の状態は、それらの因子の総合された結果を表していると考えられる。PUの接着強さが接着層厚さの影響を受けないということは、PUの接着強さが、接着層厚さを決定する因子である圧縮圧力、圧縮時間、塗布量の影響を、今回の接着層が得られた条件の範囲では受けないということを示す。接着強さに影響する因子には、その他に、雰囲気温度、木材の含水率および表面性等多くあるが、今回用いたタイプのPUは、第3章および第4章で明らかにしたように、低温条件でスギ生材の接着が可能である。したがって、PUを帯状に塗布して接着した接合部の強度は、接合

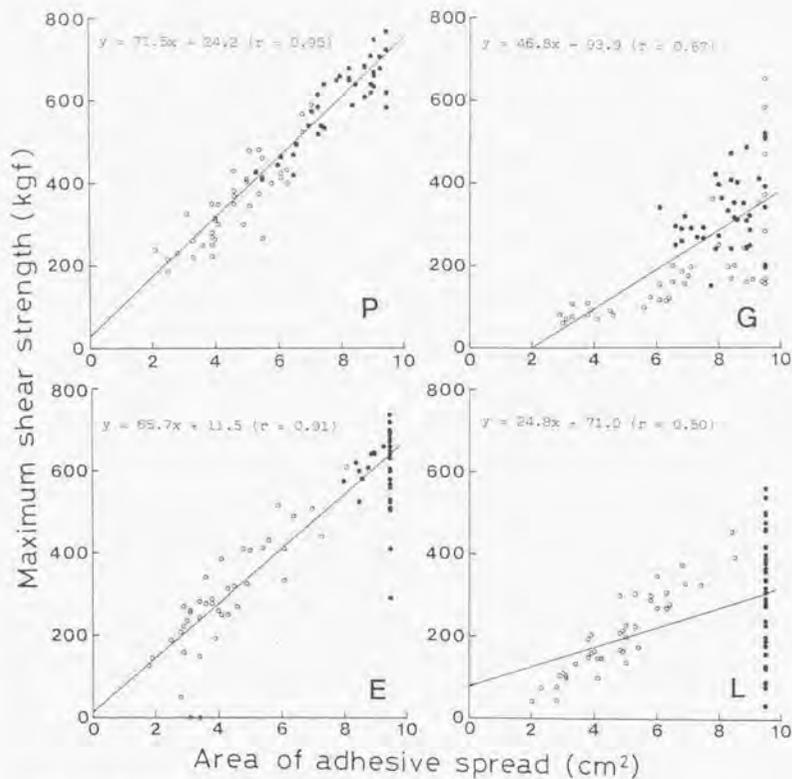


Fig. 57. Relationship between area of adhesive spread and maximum shear strength.

Legend: P: Polyurethane adhesive.

E: Epoxy resin adhesive.

G: Elastomer-based adhesive for gluing plywood-floor.

L: Latex-epoxy resin adhesive.

○: Spacers were inserted into glue lines.

●: Specimen bonded without spacers.

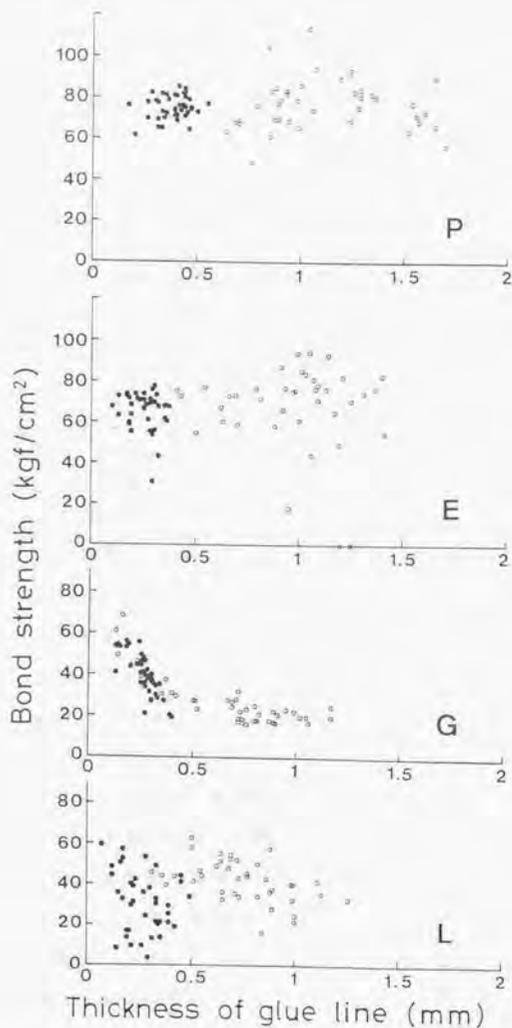


Fig. 58. Relationship between thickness of glue line and bond strength.

Legend: P: Polyurethane adhesive.

E: Epoxy resin adhesive.

G: Elastomer-based adhesive for gluing plywood-floor.

L: Latex-epoxy resin adhesive.

○: Spacers were inserted into glue lines.

●: Specimen bonded without spacers.

部の側面からの欠膠部分の平均的な深さと接合部の長さから接着剤の広がり面積を求め、これにより推定することが可能であると考えられる。

FGについては前節で詳細に検討したが、今回も同様な結果が得られた。FGの場合、接着剤の広がり面積と最大せん断強さの相関は低い。接着層厚さが0.1~0.4mm程度の範囲では、接着層厚さの増加に伴うFGの接着強さの低下は急であるが、接着層厚さが0.5mm以上になると接着強さは約20kgf/cm²でほぼ一定の値となっている。したがって、FGは空隙充填性がまったくないわけではないが、PUに比べると接着層が厚くなったときの接着強さは小さい。FGの接着強さは接着層厚さの影響をうけるため、FGによる接合部の性能は接着剤の広がり面積だけで精度高く推定することはできない。

EXの場合、接着剤の広がり面積と最大せん断強さの相関は高く、PUと同様な回帰式が得られている。しかし、いくつかのデータは回帰直線から大きく下にはずれている。接着層が厚くなってもEXの接着強さの低下傾向は認められないが、PUに比べるとEXの接着強さはばらつきが大きく、極端に低いレベルのものがいくつかある。これらの接着強さが小さい試験片の破壊後の接着層を観察すると、今回測定した接着剤の広がり面積の中に大きな欠陥部分（接着剤が合板に接触していない部分）が認められた。また、はく離した試験片の場合、スギ桝材に塗布した接着剤が合板側にほとんど接触していない状態であった。したがって、これらの試験片の接着性能が低くなったのは、接着剤自体の性質というよりも、後で述べるように接着剤の塗布方法に主な原因があると考えられる。

LEの場合、全体では接着剤の広がり面積と最大せん断強さの相関は低く、相関係数は0.50であるが、接着層にスペーサを挿入した場合だけの相関は高く、相関係数は0.93であった。一方、接着層にスペーサを挿入しない場合、せん断強さのばらつきは大きい。このような傾向はEXにおいても認められる。この原因はスペーサの有無によるものではなく、接着剤の塗布方法の差によるものと考えられる。すなわち、LEおよびEXでは、接着層にスペーサを入れない場合は接着面全体に接着剤を塗布したが、スペーサを入れた場合は接着面の中央部に接着剤をのせただけであり、どちらかといえば帯状塗布に近い。

(b) 接着剤の釘打ち接着適性

接着剤を帯状塗布した場合と接着面全体に均一に塗布（面状塗布）した場合

の接着層厚さと接合耐力の関係をモデル的に考えるとFig. 59のようになる。ここではモデルを単純化するため、最大せん断強さは被着材に接触している接着剤の広がり幅（有効広がり幅）に比例し、接着剤は硬化にともない収縮しないものとする。幅50mmの木材に接着剤を帯状塗布した場合の接着剤の広がり幅が6mm、厚さが5mm（接着層の断面積は30mm²）になったとする。同量（同断面積）の接着剤を面状塗布した場合、接着剤の広がり幅は50mm、厚さは0.6mmとなる。面状塗布の場合、被着材間の距離が0.6mm以下のときは有効広がり幅は50mmであるが、なんらかの原因で被着材間の距離が0.6mmより大きくなったときは有効広がり幅は0となる。一方、接着剤を帯状塗布した場合、被着材間の距離が0.6～5mmの範囲で、有効広がり幅と被着材間の距離には反比例の関係がある。したがって、被着材間の距離と有効広がり幅の関係はFig. 59のようになる。以上のことから、釘打ち等の低圧力の圧縮で、被着材間の距離が大きくなるような条件での接着工法では、接着剤を面状塗布するよりも、帯状塗布の方が接着剤がより有効に接着に寄与すると判断される。実際には、接着剤を面状塗布した場合でも、接着剤は均一な平面を形成せず、凹凸があるため、凸部の頂点だけ接着に寄与している場合がある。

また、帯状塗布のもうひとつの利点として、オープンアッセンブリータイムの影響をうけにくくなるということが考えられる。面状塗布した場合は、接着剤の表面に皮膜が形成されるまたは若干前硬化する等により表面が変質するため、合板側に接触したときに、接着不良を起こす確率が高くなると考えられる。一方、帯状塗布した場合は、接着剤表面は変質するが、圧縮により帯状の接着剤が広がるときに内部の新鮮な接着剤が表面にでてきて合板側に接触するため、接着不良を起こす確率は低くなると考えられる。

今回は接着剤自体の物理的および化学的な性質と釘打ち接着適性または空隙充填性についての実験的な検討をしていないが、以上のことと接着剤の性状から被着材間の距離が大きくなる釘打ち接着に適する接着剤の条件をまとめれば以下になると考えられる。①帯状塗布できること。②自重で流動しない程度の粘度を有すること。③不揮発分が多く、硬化にともない収縮しないこと、または膨張すること（EXは収縮が少ないと考えられる、また、PUは硬化時の水とイソシアネート基の反応により二酸化炭素が生成するため、かさが増加する

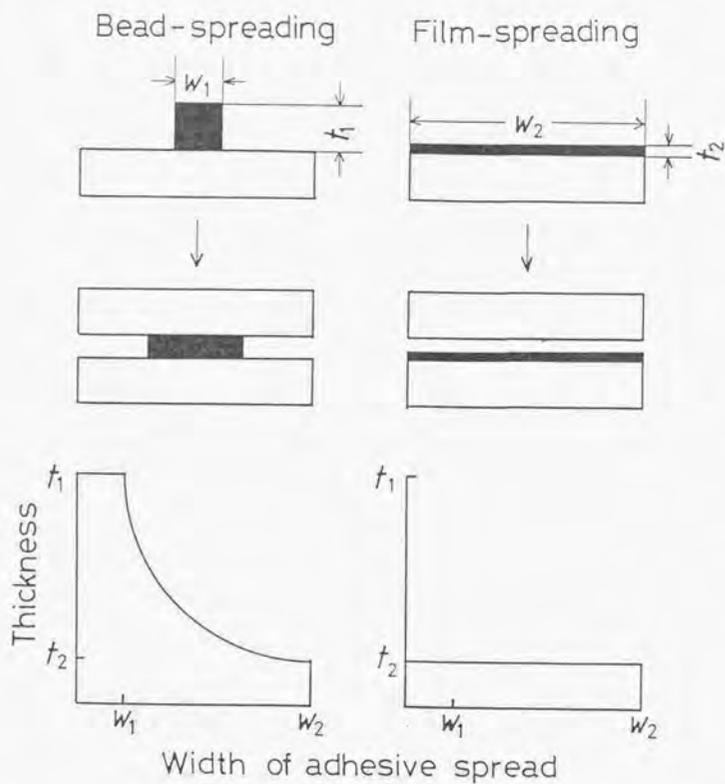


Fig. 59. Models of adhesive spreads for bead-spreading and uniform film-spreading.

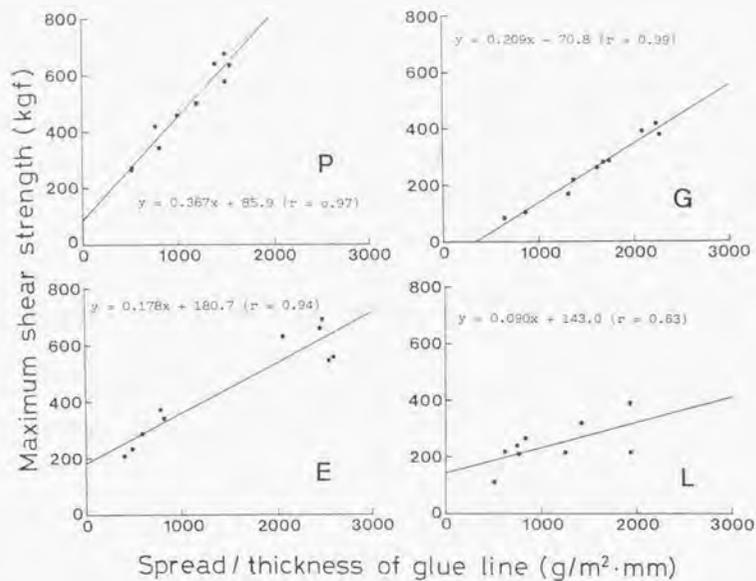


Fig. 60. Relationship between spread/thickness of glue line and maximum shear strength.

Legend: P: Polyurethane adhesive.

E: Epoxy resin adhesive.

G: Elastomer-based adhesive for gluing plywood-floor.

L: Latex-epoxy resin adhesive.

とされている²²⁾。

(c) 塗布量と接着性能

製造条件を整備するためには、塗布量と接着性能の関係を把握しておく必要がある。しかし、最大せん断強さと塗布量それだけでは特定の関係は認められなかった。一方、塗布量と接着層の断面積（接着剤の広がり幅×接着層厚さ）との間には、各接着剤とも高い相関が認められた。したがって、塗布量/接着層厚さ（ S/T ）と接着剤の広がり、さらには最大せん断強さとの間には相関があると考えられる。Fig. 60は S/T と最大せん断強さの関係を示している。LEを除いて、両者の間に高い相関が認められる。FGの S/T と最大せん断強さとの相関係数は0.99であり、これは接着剤の広がり面積と最大せん断強さとの相関係数よりも著しく大きい。この原因のひとつとして、接着剤の広がり面積とせん断強さとの相関係数が個々の試験値を用いて計算しているのに対して、 S/T とせん断強さとの相関係数は、各試験体から採取した8個の試験片の試験値の平均値を用いて計算していることが考えられるが、それよりもFGの接着強さが接着層厚さの影響を受けることが、 S/T とせん断強さの関係に取り入れられていることが大きな原因と考えられる。

6. 3 1液型ポリウレタン接着剤のボルト圧縮による接着層形成状態と接着性能

前節では、1液型ポリウレタン接着剤を帯状塗布して接着した合板-素材間の接合部の接着強さが接着層厚さの影響を受けず、接合耐力は接着剤の広がり面積に比例することを明らかにし、同接合部の性能が接着剤の広がり面積から推定可能であることを示した。また、第4章においては、同接着剤が低温条件におけるスギ生材の接着が可能であることを明らかにした。このように、1液型ポリウレタン接着剤は、生剤の接着が可能であるという点と接着層の形成状態から接着性能が推定可能であるというふたつの機能を有していて、現場接着による素材-素材間の接合部に構造的性能を期待することが同接着剤により可能であることが示唆される。しかし、5.2節で示したように、1液型ポリウレタン接着剤を用いてボルト圧縮により製作した接着重ね梁において、接着剤の広がり状態が十分でない場合、接着層のせん断破壊が生じやすくなり、曲げ

強さが低下するという問題点が明らかとなった。このような問題点を解決するためには、1液型ポリウレタン接着剤を用いたボルト圧縮による素材-素材間の接合部の接着層形成状態と接着性能を明らかにしておくことが必要である。

本節では、1液型ポリウレタン接着剤を用いてスギ材をボルト圧縮により接着した場合の接着層の形成状態と接着性能について検討した。

6. 3. 1 実 験

厚さ4cm、長さ100cm、幅10cmまたは15cmのスギ材 (*Cryptomeria japonica* D. Don) 2材を、1液型ポリウレタン接着剤 (日本ポリウレタン工業製ウッドロック) を用いて接着し、試験体を作製した (Fig. 61)。接着条件をTable 12に示す。塗布量は、300または500g/m²を目安として、2水準とした。塗布方法は帯状に1本または2本とした。圧縮は、M12ボルトを用い、ボルト間隔90cmで行った。

試験体のはじから、長さ10cm間隔で順次切断して、各木口面における接着剤の広がり幅と接着層厚さを測定した。

試験体から切断した試料から、Fig. 62に示すブロックせん断試験片を作製し、せん断試験における最大荷重 (以下これを最大せん断強さと呼ぶ) を測定した。最大せん断強さの測定には、JIS K 6852で規定する取付け具と同じ構造で、今回の試験片を取り付けることができる治具を作製して使用した。クロスヘッドスピードは1mm/minとした。また、試験片の接着剤の広がり面積を測定して、これと最大せん断強さとの関係を調べた。

6. 3. 2 結果および考察

(a) 接着層の形成状態

ボルト圧縮による接着層の形成状態をFig. 63および64に示す。ボルトの位置は測定位置番号1と2、および9と10の中間にあり、測定位置番号1、2、3、4および5はボルトの位置から、それぞれ、5、15、25、35および45cm離れており、5~9も同様である。ボルト位置では接着剤はほぼ材幅に広がっているが、ボルト位置から離れるにしたがって、接着剤の広がり幅は小さくなり、接着層厚さが大きくなっている。ボルト間中央付近の接着剤の広がり幅は4cm程度であり、接着層厚さは0.8~1mm程度となった。ボルト間中央付近の接着層形成状態に及ぼす塗布量および塗布本数の影響は、あまり大きくないが、塗布量が大きくなると接着層厚さが大きくなる傾向が認められる。

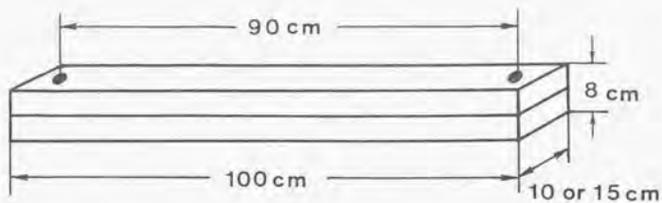


Fig. 61. Test joint bonded by using bolts.

Table 12. Bonding condition of test joints.

Sample sign	Width of lumber (cm)	Spread (g/cm ²)	Numbers of glue beads
10-311-1	10	311	1
10-360-2	10	360	2
10-467-1	10	467	1
10-517-2	10	517	2
15-397-1	15	397	1
15-384-2	15	384	2
15-510-1	15	510	1
15-503-2	15	503	2

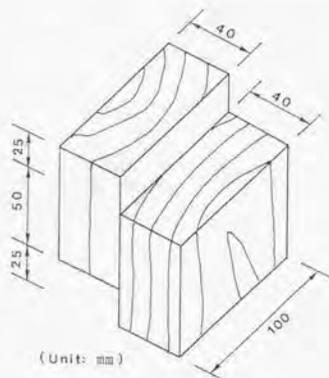


Fig. 62. Block-shear specimen.

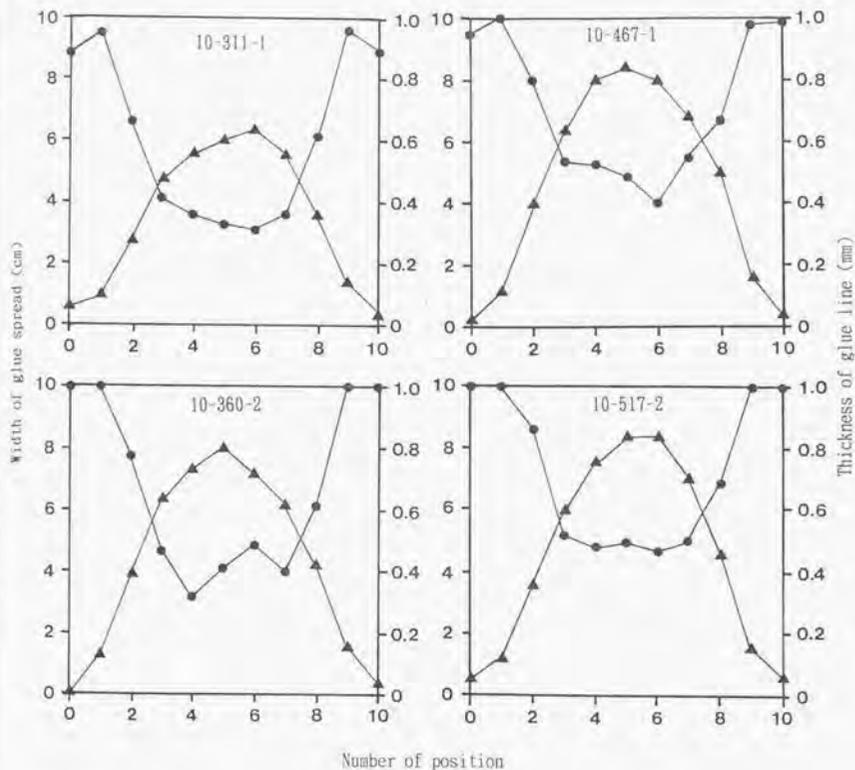


Fig. 63. Status of glue lines in the test joints of 10 cm width.
 Legend: ●: Width of glue spread; ▲: Thickness of glue line.

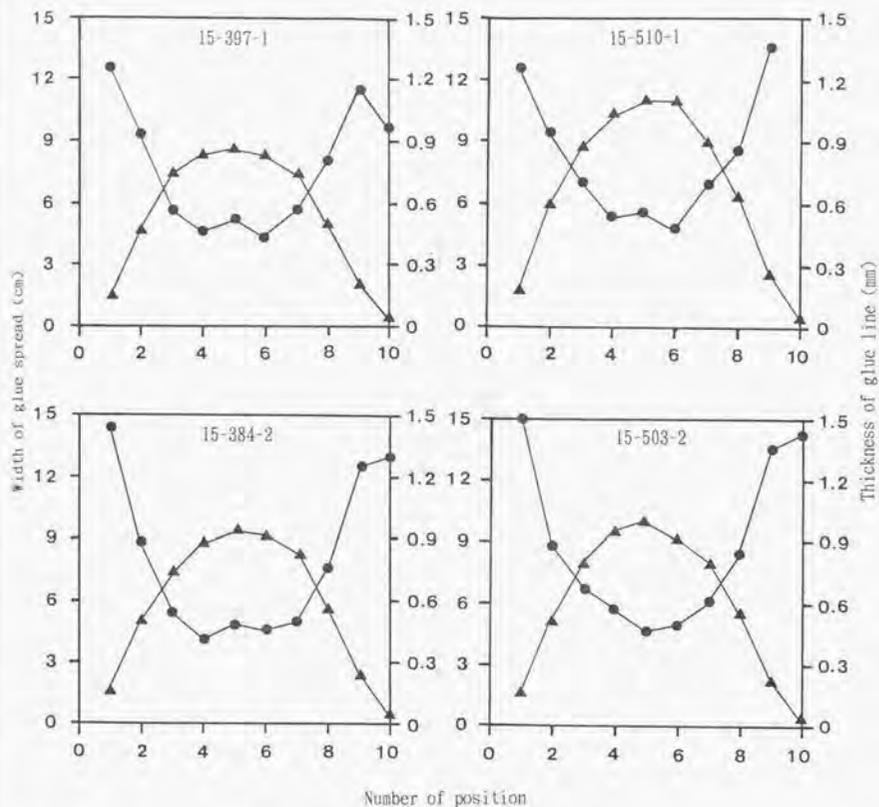


Fig. 64. Status of glue lines in the test joints of 15 cm width.
 Legend: ●: Width of glue spread; ▲: Thickness of glue line.

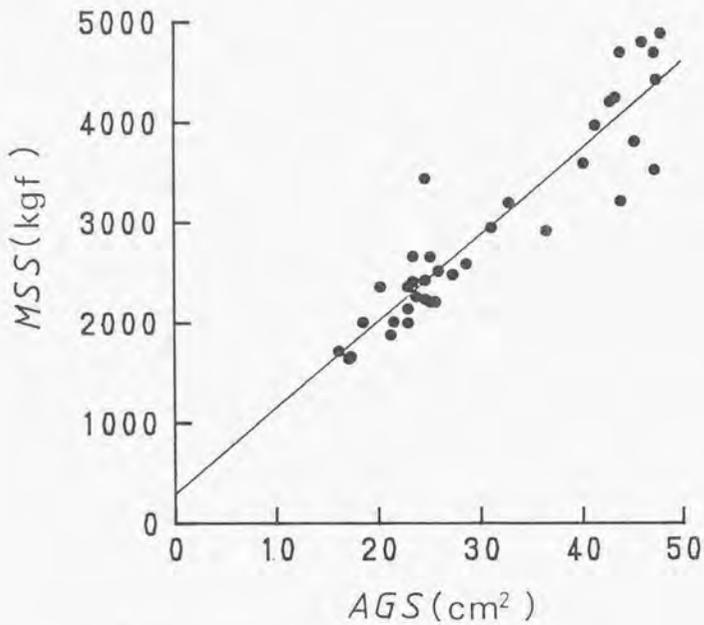


Fig. 65. Relationship between area of glue spread (AGS) and maximum shear strength (MSS).

Notes: $MSS = 86.04 AGS + 292$ ($r = 0.93$).

(b) 接着性能

接着剤の広がり面積 (AGS , cm^2) と最大せん断強さ (MSS , kgf) との関係を図.65に示す。両者には高い相関が認められ、相関式は、 $AGS = 86.0 MSS + 292$ であり、相関係数は0.93であった。得られた最大の接着層厚さは0.84mmであった。破壊の形態はおおむねスギ材の破壊であった。このことは、相関係数が若干低くなったのがスギ材自体の強度（凝集力）のばらつきに起因し、接着剤の凝集力または接着剤と木材との界面の接着力のばらつきによるものではないことを示唆している。したがって、ポリウレタン接着剤を帯状に塗布して接着した接合部の接着強さが接着層厚さの影響を受けず、接合耐力は接着剤の広がり面積に比例するというスギ材と合板の接合部において認められた関係が、スギ材同士の接合部にも適用できると判断される。

6. 4 帯状塗布された接着剤の死荷重による接着層形成状態

1液型ポリウレタン接着剤を帯状に塗布して接着した接合部の単位面積当たりの接着強さは接着層厚さの影響を受けず、破壊荷重は接着剤の広がり面積に比例することを6. 2および6. 3節で明らかにした。したがって、接着された接合部の接着層の形成状態を検査し、良好な接着層が形成されている接合部を使用することにすれば、現場接着によっても安定した性能を有する接合部を供給することが可能である。安定した性能を有する接合部を実用に供するためには、最終的には接着剤の広がり状態の検査が必要であると考えられるが、そのような検査に合格する、接着剤の広がり状態が良好な接合部を製作するためには、最終的には接着剤の広がり状態の検査が必要であると考えられる。そのためには帯状塗布された接着剤の接着層の形成状態に影響する因子を明らかにして、現場接着における接着層形成状態予測法を開発する必要がある。

そこで本節では、帯状塗布された1液型ポリウレタン接着剤の死荷重による接着層形成状態を調べ、接着層形成状態に影響する因子について検討した。

6. 4. 1 実 験

帯状塗布された接着剤の接着層の形成状態に関する理論式によれば、接着層の形成状態に影響する因子には、圧縮圧力、圧縮時間、接着剤の粘度および塗布量があるとされている⁴¹⁾。しかし、実際には、接着剤に加わる圧縮圧力が、

接着剤の流動により時間とともに変化すると考えられ、また、接着剤の粘度も時間の経過とともに変化すると考えられるため、帯状塗布された接着剤の接着層の形成過程はより複雑になると考えられる。本節および6.5節における研究では、接着層の形成過程をより単純化するため、オープンアッセンブリータイム0および温度20℃の一定の条件で実験を行い、接着剤の粘度変化は一定とみなして解析を行った。

Fig.66に示すように、長さ200mm、幅100mm、厚さ12mmの広葉樹合板の中央部に1液型ポリウレタン接着剤（ホーネンレジングルーIW-310）を帯状に100mmの長さで塗布した。接着剤の単位長さ当たりの塗布量は16~87g/mの範囲で4水準とした。接着剤塗布後直ちに同寸法の合板を重ね合わせて、死荷重により24時間圧縮した。圧縮後、接着剤はほぼ硬化していた。塗布した接着剤の単位長さ当たりの圧縮力は、0.41、1.0、2.1および4.1kgf/cmの4水準とした。接着剤が十分硬化した後、試料を20mmの長さで順次切断して、6.2節と同様に各切断面における接着層厚さと接着剤の広がり幅を測定した。

6.4.2 結果および考察

接着層の断面積（接着層厚さ×接着剤の広がり幅）と塗布量の関係を、各圧縮力別に、Fig.67に示す。なお、接着剤を塗布した両端の部分では、接着剤は死荷重により長さ方向にも広がっていたため、本節における接着層厚さと接着剤の広がり幅は、塗布した接着剤の中間部分の4点の測定値の平均である。圧縮力が一定のとき、接着層の断面積は塗布量に比例している。しかし、圧縮力が2.1kgf/cm以上になると、塗布量が同じでも断面積が小さくなる傾向が認められる。このことは、圧縮力が大きくなると、硬化に伴う接着剤の収縮が大きくなるか、または硬化時の接着剤の体積の増加が小さくなることを示している。1液型ポリウレタン接着剤は、硬化時のイソシアネート基と水との反応により二酸化炭素を生成して発泡するため、かさが増加する^{2,3)}とされているが、圧縮力が大きくなるとそのような発泡が抑えられて、塗布量が同じでも硬化後の体積が小さくなると考えられる。しかし、接着層厚さ測定時の観察（50倍に拡大）では接着層に気泡は観察されなかった。単位長さ当たりの圧縮力が0.41~1.0kgf/cmの範囲においては、両者の関係について次の実験式が得られ、相関係数は0.998であった（Fig.67）。

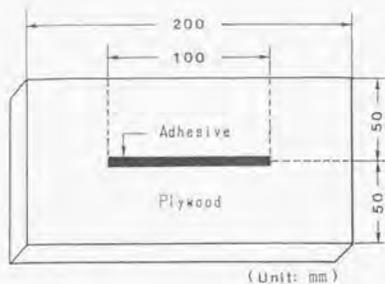


Fig. 66. The specimen for measuring the status of the glue line formed by using a dead load.

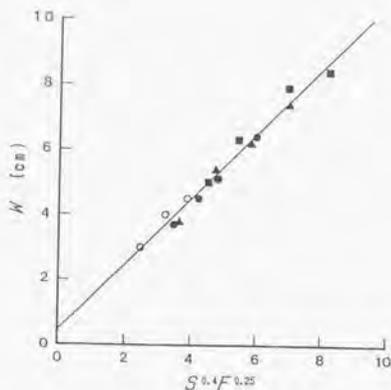


Fig. 68. The correlation of $S^{0.4} F^{0.25}$ with W .
Legend: F , S , W . \circ , \bullet , \blacktriangle and \blacksquare : See legend of Fig. 67.

Notes: $W = S^{0.4} F^{0.25} + 0.48$ ($r = 0.988$)

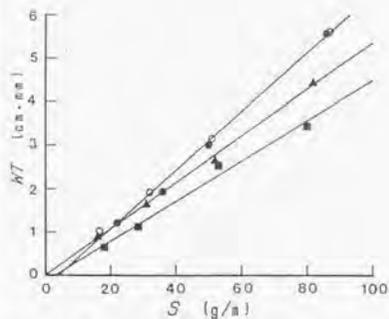


Fig. 67. Relationship between spread rate (S) and the section area of glue line (WT) under various pressing forces (F).

Legend: S : Spread rate per unit length (g/m).
 W : Width of glue spread (cm).
 T : Thickness of glue line (mm).
 F : Pressing force per unit length (kgf/cm).

Legend of pressing forces:

\circ : 0.41 kgf/cm. \bullet : 1.0 kgf/cm,
 \blacktriangle : 2.1 kgf/cm. \blacksquare : 4.1 kgf/cm.

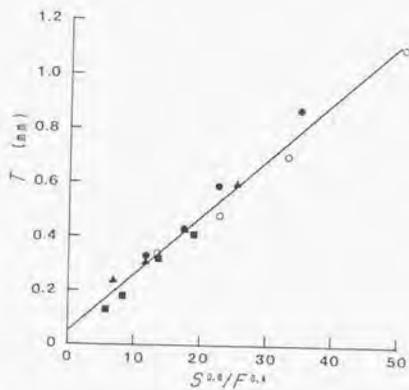


Fig. 69. The correlation of $S^{0.8} / F^{0.4}$ with T .
Legend: F , S , T . \circ , \bullet , \blacktriangle and \blacksquare : See legend of Fig. 67.

Notes: $T = 0.0212 S^{0.8} F^{-0.4} + 0.049$ ($r = 0.987$)

$$WT = 0.067S - 0.26 \quad \dots \textcircled{1}$$

ここで、 W : 接着剤の広がり幅 (cm)

T : 接着剤厚さ (mm)

S : 単位長さ当たりの塗布量 (g/m)

接着剤の広がり幅と塗布量および圧縮力の関係については、次の実験式が得られ、相関係数は0.988であった (Fig. 68)。

$$W = S^{0.4} F^{0.35} + 0.48 \quad \dots \textcircled{2}$$

ここで、 F : 塗布した接着剤の単位長さ当たりの圧縮力 (kg/cm)

また、接着剤厚さと塗布量および圧縮力との関係については、次の実験式が得られ、相関係数は0.987であった (Fig. 69)。

$$T = 0.0212 S^{0.2} / F^{0.4} + 0.049 \quad \dots \textcircled{3}$$

帯状塗布した接着剤の形成状態に関しては次の理論式が示されている⁴⁾³⁾。

$$f t = (4 \eta V^2) / (5 l^2 T^4) = (4 \eta l^2 W^4) / (5 V^2)$$

ここで、 f : 圧縮圧力

t : 圧縮時間

η : 接着剤の粘度

V : 接着剤の体積

T : 圧縮後の接着剤厚さ

W : 圧縮後の接着剤の広がり幅

l : 板の長さ

なお、 $V = TWl$ である。

いま単位長さについて考えると、 $l = 1$ および $f = F/W$ であるので、理論式は次式のように書き換えることができる。

$$F t / W = (4 \eta V^2) / (5 T^4) = (4 \eta W^4) / (5 V^2)$$

ここで、接着剤の粘度と圧縮時間を一定とみなし、 $4 \eta / 5 t = k_3$ として整理すると次式が得られる。

$$F = k_3 V^2 W / T^4 = k_3 W^5 / V^2$$

また、 $V = TWl$ (ここでは $l = 1$) であるので、 $W = V / T$ となり、これを上式に代入すると次式が得られる。

$$F = k_3 V^3 / T^5 = k_3 W^5 / V^2$$

したがって、次式が得られる。

$$W = (1/k_3)^{0.2} V^{0.2} F^{0.2}$$

$$T = k_3^{0.2} V^{0.6} / F^{0.2}$$

ここで、接着剤の体積 (V) と塗布量 (S) とが比例する、すなわち、 $V = k_4 S$ (k_4 は比例定数) であるとすると、次式が得られる。

$$W = (1/k_3)^{0.2} k_4^{0.2} S^{0.4} F^{0.2}$$

$$T = k_3^{0.2} k_4^{0.6} S^{0.6} / F^{0.2}$$

ここで、 $(1/k_3)^{0.2} k_4^{0.2} = k_1$ 、 $k_3^{0.2} k_4^{0.6} = k_2$ とすれば、次式が得られる。

$$W = k_1 S^{0.4} F^{0.2} \quad \dots \textcircled{4}$$

$$T = k_2 S^{0.6} / F^{0.2} \quad \dots \textcircled{5}$$

ただし、 k_1 および k_2 は定数である。

②式と④式、および③式と⑤式を比較すると、実験式と理論式から誘導された式はよく似ている。特に②式と④式はほぼ合致している。しかし、③式と⑤式を比較すると、実験式における塗布量および圧縮力の指数が理論式における指数よりも大きくなっている。実際、接着層厚さは塗布量の1乗に比例する傾向が認められた。これは、接着層厚さに対する塗布量および圧縮力の影響が、今回得られた結果では理論式で示されるよりも大きいことを示すと考えられる。この原因のひとつとして、先に述べたように圧縮力が大きくなると塗布量が同じでも硬化後の接着剤の体積が小さくなることが関与していると考えられる。すなわち、圧縮力が大きくなると接着剤の流動が大きくなって接着層厚さが小さくなるのに加えて、接着剤の体積も小さくなるために、接着層厚さに対する圧縮力の影響が実際には理論式で示されるより大きくなると考えられる。

実験式と理論式から誘導した式はよく似ているが、元の理論式には時間の因子が含まれているのに対して、実験式には時間の因子が含まれていない。元の理論式は、接着剤の粘度が一定で圧縮時間が無限に大きくなると接着層厚さは0になり、接着剤の広がり幅が無限に大きくなることを示している。しかし、実際には、24時間の圧縮で接着剤はほぼ完全に硬化しており、圧縮時間をそれ以上長くしても接着層の形成状態が変化するとは考えられない。このように、実際には、圧縮時間が一定以上長くなると圧縮時間は接着層の形成状態に影響す

る因子でなくなるのは、一定の荷重で圧縮した場合、接着剤が広がることにより、接着剤に加わる圧縮圧力が小さくなり、一方、接着剤の粘度は増加していき、圧縮圧力が接着剤の有する降伏値（接着剤が塑性変形を起こす最低応力）まで低下して、接着剤の流動が停止するためと考えられる。したがって、②および③式で示されている長さ当たりの圧縮力 F は、塗布量 S で塗布された接着剤が広がり幅 W または接着層厚さ T になったときの、接着剤の降伏値に相当する単位長さ当たりの圧縮力を示していると考えることができる。

6. 5 带状塗布された接着剤の釘打ちによる接着層形成状態

1液型ポリウレタン接着剤を带状に塗布して接着した合板—スギ材間の接合部の接着性能は、接着剤の広がり面積で決まる。したがって、1液型ポリウレタン接着剤の釘打ち圧縮による接着層形成状態に影響する因子を明らかにして、接着層の形成状態を予測することができれば、釘打ち接着接合部の信頼性を向上させることが可能であると考えられる。

そこで本節では、前節の結果をもとに、带状塗布された1液型ポリウレタン接着剤の釘打ち圧縮による接着層形成状態に影響する因子を明らかにして、接着層形成状態の予測法について検討した。

6. 5. 1 実 験

带状塗布された接着剤の接着層の形成状態に関する理論式によれば、接着層の形成状態に影響する因子には、圧縮圧力、圧縮時間、接着剤の粘度および塗布量があるとされている²¹⁾。しかし、釘打ち圧縮では、接着剤に加わる圧縮圧力が接着剤の流動により時間とともに変化すると考えられ、また、接着剤の粘度も時間の経過とともに変化すると考えられるため、带状塗布された接着剤の釘打ち圧縮による接着層の形成過程はより複雑になると考えられる。本節では、釘打ち圧縮による接着層の形成過程をより単純化するため、オープンアッセンブリータイム0および温度20℃の一定の条件で実験を行い、接着剤の粘度変化は一定とみなして解析を行った。

Fig. 70に示すように、長さ400mm、幅50mm、厚さ45mmのスギ材 (*Cryptomeria japonica* D. Don) に1液型ポリウレタン接着剤(ホーネンレジンブルーIW-310)を带状に塗布し、長さ400mm、幅50mm、厚さ12mmまたは7.5mmの広葉樹合板を重

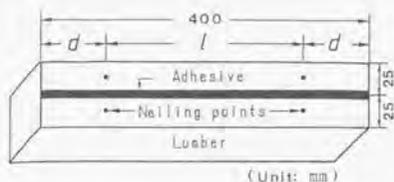


Fig. 70. The specimen for measuring the status of the glue line formed by nailing.

Legend: l : Nail spacing.

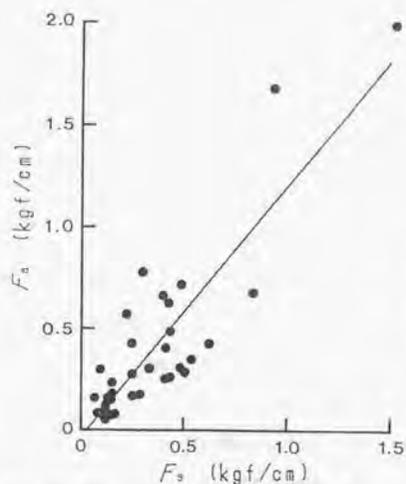


Fig. 71. The correlation of F_a with F_s .

Legend: F_s : Uniform load calculated from the equation ⑥ (kgf/cm).

F_a : Pressing force calculated from the equation ⑦ (kgf/cm).

Notes: $F_a = 1.233 F_s - 0.033$ ($r = 0.87$)

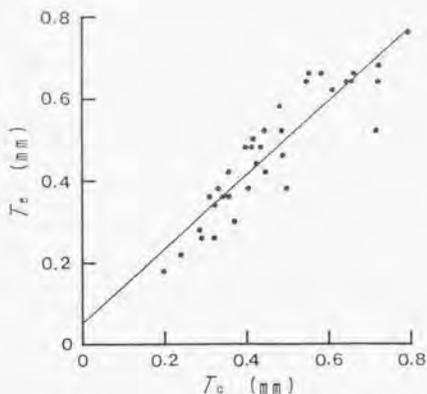


Fig. 72. Correlation between T_c and T_e at the midpoint between nails.

Legend: T_c : Calculated thickness of glue line (mm).

T_e : Experimental thickness of glue line (mm).

Notes: $T_e = 0.90 T_c + 0.053$ ($r = 0.91$)

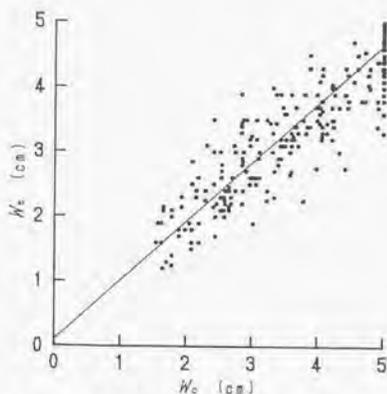


Fig. 73. Correlation between W_c and W_e .

Legend: W_c : Calculated width of glue spread (cm).

W_e : Experimental width of glue spread (cm).

Notes: $W_e = 0.91 W_c + 0.10$ ($r = 0.93$)

ね合わせて釘打ちし、試験体とした。合板については、あらかじめ曲げヤング係数を測定した。また、厚さ7.5mmの合板については、あらかじめ弓反り（合板の長さに対する内曲面の最大矢高の百分率）を測定した。厚さ12mmの合板を使用した場合、釘打ち間隔（ l ）は15、20、25および30cmの4水準とし、接着剤の単位長さ当たりの塗布量は10~35g/m（200~700g/m²）の範囲で3水準（ただし、釘打ち間隔15cmの場合は2水準）とし、合計11体の試験体を作製した。厚さ7.5mmの合板を使用した場合、釘打ち間隔は20および30cmとして、12体ずつ合計24体の試験体を作製した。この場合、接着剤の塗布量は11~35g/mの範囲で変化させ、また、弓反りは-0.3~0.25%の範囲で変化させた。なお、ここでは接着面に対して凹の反りを正、接着面に対して凸の反りを負とする。釘にはN38釘を用いたが、幅方向の接着層厚さがほぼ一定となるように幅方向に2本ずつ、合計4本（ただし、釘打ち間隔15cmの場合は6本）の釘を打った。接着剤が硬化した後、釘と釘の間を10等分（ただし、釘打ち間隔15cmの場合は5等分）に切断して、各切断面における接着層厚さと接着剤の広がり幅を測定した。

6. 5. 2 結果および考察

接着剤を帯状に塗布して、合板を枠材に釘打ちすると、まず、釘打ち付近で接着剤が試験体の側面からはみ出してきて、時間の経過とともにそのはみ出しは釘から離れたところまでおよぶことが観察された。これは、釘打ちした後も接着剤になんらかの圧縮力が作用していることを示す。釘打ちにより形成された接着層の厚さは、釘打ち部分では小さく、釘から離れるにしたがって大きくなる傾向を示した。この接着層厚さの分布は、合板を釘間隔をスパンとする単純支持梁とみなし、そこになんらかの等分布荷重が作用したときのたわみの分布とよく近似していた。このことから、釘打ち後に接着剤に作用した力は、吉田ら¹⁴⁾がいうように合板の剛性によるものであると考えられる。釘打ち部分での合板の支持は実際には拘束されていて、合板は固定梁に近いと考えられるが、接着層厚さの分布は固定梁のたわみの分布より単純支持梁のたわみの分布に似ていた。

そこで、各条件で得られた釘と釘の中央部の接着層厚さから、次式により相当等分布荷重 F_0 を求めた。

$$F_0 = (384 E I T_0) / (50 l^4) \quad \dots \textcircled{8}$$

ここで、 F_0 : 等分布荷重 (kgf/cm)

$E I$: 合板の曲げ剛性 (kgf \cdot cm 2)

T_0 : 釘と釘の中央部の接着層厚さ (mm)

l : 釘間隔 (cm)

F_0 は、単純支持梁とみなした合板に作用した等分布荷重であるが、同時に、その反力として合板から接着剤に作用した単位長さ当たりの圧縮力に関連するものと考えられる。

また、③式から次式を誘導して、接着層厚さが決定されたときの釘と釘の中央部の接着層に作用したと考えられる単位長さ当たりの圧縮力 F_a を求めた。

$$F_a = (0.212 / (T_0 - 0.049))^2 \cdot S^2 \quad \dots \textcircled{7}$$

死荷重による接着層の形成のところで述べたように、圧縮時間が一定以上長くなると、圧縮圧力が接着剤の降伏値まで低下して、接着剤の流動が停止すると考えられる。したがって、⑦式で示される F_a は S という塗布量の接着剤が T_0 という接着層厚さになったときの接着剤の降伏値に相当する単位長さ当たりの圧縮力を示していると考えられる。もし接着層に加わる圧縮力が⑦式で示される F_a より大きいときは接着剤はさらに流動するが、圧縮力が⑦式で示される値以下になると接着剤の流動は停止すると考えられる。したがって、 F_a は接着剤を流動させるために必要な単位長さ当たりの力を示していると考えられる。

以上のように、 F_0 は合板から接着剤に作用する単位長さ当たりの圧縮力に関連すると考えられ、一方、 F_a は接着剤を流動させるために必要な単位長さ当たりの力、すなわち、降伏値に関連すると考えられるため、 F_a と F_0 の関係を調べた。その結果、次の実験式が得られ、相関係数は 0.87 であった (Fig. 71)。

$$F_a = 1.233 F_0 - 0.033$$

このように F_a と F_0 に相関が認められたということは、次のふたつのことを示唆している。

1) 釘と釘の中央部で合板から接着剤に作用した単位長さ当たりの圧縮力を F_0 (kgf/cm) とすれば、接着層厚さが決定されたときの F_a と F_0 とは等しくなるはずであるから、 F_0 が次式で示される。

$$F_0 = 1.233 F_a - 0.033 \quad \dots \textcircled{8}$$

2) 釘打ち後に接着層厚さが小さくなると、合板から接着剤に作用する力 F_a が低下し、接着剤を流動させるために必要な単位長さ当たりの圧縮力 F_a まで達する。その時点で接着剤の流動が停止し、接着層厚さが決定される。

以上の結果を考慮して、釘打ちによる釘間中央部の接着層の形成過程が以下のようにになると仮定して、接着層の状態を予測するための計算式を誘導した。

1) ハンマーの打撃等により、釘打ち部分の接着層厚さが0となる。このとき、釘と釘の間では、接着剤の流動抵抗（粘性）による力が合板に作用するため、合板はたわむ。

2) 釘間中央部では、たわんだ合板の復元力 F_p が接着剤に作用するため、接着剤は流動し、接着層厚さが小さくなる。 F_p は⑥および⑧式で示されるとする。

3) 接着層厚さが小さくなり、釘間中央部での合板が接着剤を押す力 F_p が接着剤の降伏値に相当する単位長さ当たりの圧縮力 F_a (⑦式) まで低下すると接着剤の流動が停止し、接着層の状態が決定される。すなわち、釘間中央部の接着層厚さは、 $F_a = F_p$ を満たす T_s になる。

接着剤の塗布量、合板の曲げ剛性および釘打ち間隔がわかると、以上の仮定で釘間中央部における接着層厚さを計算することができる。この接着層厚さの計算には電子計算機を用い、接着層厚さを順次（例えば、1.50mm、1.49mm、1.48mm、・・・）インプットし、⑥、⑦および⑧式から F_s 、 F_a および F_p をそれぞれ求め、 $F_a = F_p$ となる T_s および F_s を求めた。これらの仮定で求めた各条件における釘間中央部での接着層厚さの計算値と実測値の関係を Fig. 72 に示す。両者はよく一致している。したがって、接着剤の塗布量、合板の曲げ剛性および釘打ち間隔がわかれば、釘間中央部の接着層厚さを予測することが可能である。

以上の計算法で求めた釘間中央部の接着層厚さ T_s を⑥式に代入すると F_s を求めることができる。各位置における接着層厚さは、単純支持梁に等分布荷重 F_s が作用するとして、次式により計算することができる。

$$T_s = 10 F_s (1^3 x / 24 - 1 x^3 / 12 + x^4 / 24) / E I \quad \dots \textcircled{9}$$

ここで、 x ：釘からの距離 (cm)

T_s ：釘から x cm 離れたところの接着層厚さ (mm)

各位置における接着剤の広がり幅は各位置の接着層厚さから①式を使って計算することができる。しかし、①式で計算するより、釘打ちにより形成された

接着層の解析から得られた塗布量と接着層の断面積の関係式 ($WA = 0.062 S + 0.02$ 、相関係数0.99) から誘導した次の実験式により求めた計算値の方が実測値とよく一致した (Fig. 73)。

$$W_x = (0.062 S + 0.02) / T_x \quad \dots \textcircled{10}$$

ここで、 W_x : 釘から x cm 離れたところの接着剤の広がり幅 (cm)

死荷重により形成された接着層の解析では、圧縮力が大きくなると、接着層の断面積が小さくなることが示されたが、釘打ちにより形成された接着剤の広がり幅を予測するには、 $\textcircled{10}$ 式のみで十分と考えられる。

Table 13は各条件の各試験体ごとの接着剤の広がり幅の計算値と実測値を示しているが、各条件において計算値と実測値はよく一致している。また、Fig. 74は、1試験体における各位置の接着層厚さと接着剤の広がり幅の計算値と実測値の比較を示しているが、計算値と実測値はよく一致している。その他の例は図示していないが、各位置の計算値と実測値はよく一致していた。したがって、今回提案した計算法は、接着層の形成状態を予測するのに有効であると考えられる。ただし、今回提案した接着層の形成過程に関する仮定にはいくつかの問題点がある。まず第1に、釘打ち部分の接着層厚さが0となり一定と仮定しているが、実際には0にならず、また、塗布量が多くなると釘打ち部分の接着層が厚くなる傾向が認められた。第2に、今回は合板を単純支持梁とみなしているが、実際には釘打ち部分における合板の支持は拘束されていると考えられる。第3に、合板に等分布荷重が作用するとしたが、実際には釘打ち部分に近いところの圧縮力は大きく、釘から離れるにしたがって小さくなると考えられる。今回の接着層の形成過程に関する仮定には以上の問題点があるが、しかし、今回提案した計算法ではそのような問題点が総合的に相殺されて、実際の接着層の形成状態がよく表されると考えられる。

以上のことから、釘打ちによる帯状塗布した接着剤の形成状態に影響する因子は、接着剤の粘度変化が一定の条件では、主に塗布量、釘打ち間隔および面材の剛性であると判断され、それらの因子により接着層の形成状態を予測することが可能である。ただし、接着剤の粘度およびその変化は、温度、オープンアッセンブリタイムおよび木材含水率等の影響を受けると考えられるため、接着層の形成状態もそれらの因子の影響を受けると考えられる。

Table 13. Comparison of experimental widths (W_e) of glue spreads with calculated ones (W_c).

Plywood		Nail spacing (cm)	Spread (g/m)	W_c (cm)	W_e (cm)	W_e/W_c
Thickness (mm)	$E I^{**}$ ($\times 10^3 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)					
12	34.7	30	13.0	2.75	3.25	0.86
12	40.0	30	27.5	3.93	4.22	0.93
12	39.7	30	35.0	4.22	4.40	0.96
12	40.4	25	12.0	2.99	3.55	0.84
12	40.0	25	24.3	4.15	4.46	0.93
12	38.4	25	35.5	4.45	4.78	0.93
12	37.8	20	11.0	4.02	4.11	0.98
12	34.2	20	20.3	4.39	4.67	0.94
12	36.3	20	35.5	4.84	5.00	0.97
12	34.2	15	12.5	4.43	4.72	0.94
12	35.7	15	27.8	4.71	5.00	0.94
7.5	18.5	30	11.8	2.31	2.62	0.88
7.5	18.5	30	12.3	2.77	2.90	0.96
7.5	21.6	30	12.8	2.70	3.19	0.85
7.5	21.4	30	13.0	2.96	3.20	0.93
7.5	24.2	30	18.3	3.21	3.51	0.91
7.5	20.1	30	19.8	3.21	3.33	0.96
7.5	19.8	30	22.8	3.51	3.59	0.98
7.5	24.2	30	24.8	3.81	3.78	1.01
7.5	19.0	30	26.3	4.16	3.69	1.13
7.5	20.1	30	27.8	3.45	3.78	0.91
7.5	24.9	30	31.5	4.16	4.04	1.03
7.5	21.0	30	34.3	4.05	4.01	1.01
7.5	19.7	20	11.5	3.21	3.68	0.87
7.5	17.6	20	13.3	3.39	3.84	0.88
7.5	20.4	20	14.5	3.94	4.13	0.95
7.5	19.1	20	15.8	3.70	4.18	0.89
7.5	21.6	20	18.3	3.87	4.36	0.89
7.5	20.7	20	19.3	3.91	4.25	0.92
7.5	25.1	20	20.0	3.87	4.46	0.87
7.5	22.0	20	23.0	4.17	4.56	0.91
7.5	19.5	20	24.3	4.20	4.55	0.92
7.5	23.4	20	24.5	4.36	4.65	0.94
7.5	23.4	20	25.5	4.28	4.69	0.91
7.5	24.2	20	30.3	4.56	4.83	0.94

** $E I$: Bending stiffness.

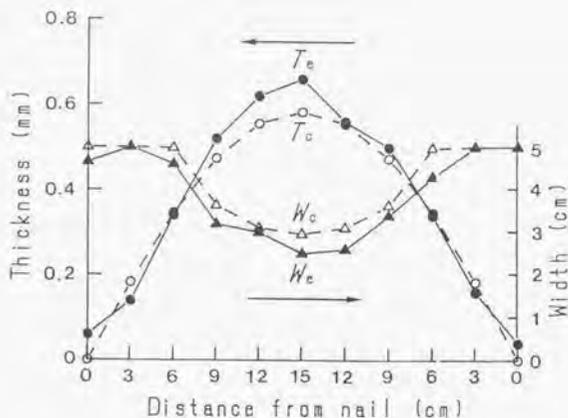


Fig. 74. Comparison of T_c and W_c with T_e and W_e , respectively.

Legend: T_c : Calculated thickness of glue line (mm).
 T_e : Experimental thickness of glue line (mm).
 W_c : Calculated width of glue spread (cm).
 W_e : Experimental width of glue spread (cm).

Notes: The thickness of the plywood was 12 mm, the nail spacing was 30 cm, and the spread rate was 27.5 g/m in this specimen.

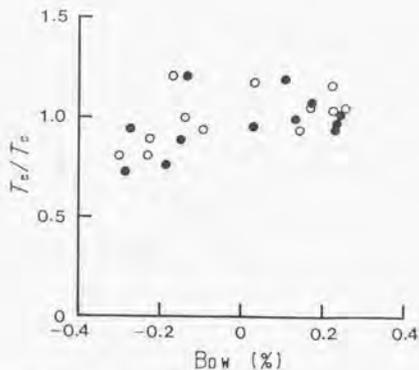


Fig. 75. Effect of the bow of the plywood on T_e/T_c .

Legend: T_c : Calculated thickness of glue line (mm).
 T_e : Experimental thickness of glue line (mm).
○ : Nail spacings were 20 cm.
● : Nail spacings were 30 cm.

Fig. 75は、厚さ7.5mmの合板を使用した場合の釘と釘の中央部の接着層厚さの実測値 (T_e) と計算値 (T_c) との比 (T_e/T_c) に対する合板の反りの影響を示している。ここでは、接着面に対して凹の反りを正とし、凸の反りを負としている。反りが-0.2%程度以下になると、 T_e/T_c が小さくなる傾向が認められる。この原因は、反りが小さくなる(接着面に対する凸の反りが大きくなる)と、合板の接着剤を押す力が実際には⑧および⑨式で計算される値よりも大きくなり、接着層厚さがより小さいところで、合板の接着剤を押す力が接着剤の降伏値に相当する単位長さ当たりの圧縮力に達するためと考えられる。これから、面材に反りが生じている場合は、凹面を接着面とするよりも凸面を接着面としたほうが、接着層厚さが小さく、接着剤の広がり幅が大きくなると考えられる。

6. 6 要 約

現場接着接合部の実態調査により明らかとなった現場接着の問題点、すなわち現場接着における接着層の形成状態と接着性能について検討した。得られた結果の概要を以下に示す。

1) エラストマ接着剤の釘打ちによる接着層の形成状態と接着性能に関する研究から得られた結果は以下の通りである。

帯状塗布された接着剤を圧縮したときの接着剤の広がり幅は、塗布量に比例し、接着層厚さに反比例する。

帯状塗布された接着剤を圧縮したときの接着剤の広がり幅と接着層厚さは、圧縮圧力と圧縮時間の積に密接に関係し、前者は正の相関、後者は負の相関があった。

エラストマ接着剤による接合部の破壊荷重はみかけの接着面積と正の相関があり、有効接着面積に比例した。

釘打ち圧縮により形成される接着層の状態はスペーサの有無により異なり、釘打ち圧縮の効果がスペーサの有無により異なることが示唆された。

エラストマ接着剤は線状の不均一な接着層を形成し、接着層が厚くなると、接着強さが低下することおよび帯状塗布した接着剤の広がり幅が小さくなることの相乗効果により、破壊荷重の低下が大きく、空隙充填性があまりよくなか

った。

2)各種接着剤の釘打ち接着適性に関する研究から得られた結果は以下の通りである。

被着材間の距離が大きくなる可能性がある釘打ち接着に適する接着剤に必要な条件は、①帯状塗布できること、②自重で流動しない程度の粘度を有すること、③不揮発分が多く、硬化に伴う収縮が少ないことである。それらの条件を満たす接着剤は1液型ポリウレタン接着剤であった。

1液型ポリウレタン接着剤を帯状塗布して接着した合板—スギ材間の接着強さは接着層厚さの影響を受けず、破壊荷重は接着剤の広がり面積に比例した。したがって、同接合部の性能は、接着剤の広がり面積から推定可能である。

3)1液型ポリウレタン接着剤のボルト圧縮による接着層形成状態と接着性能から得られた結果は以下の通りである。

1液型ポリウレタン接着剤を帯状に塗布して接着した接合部の接着強さが接着層厚さの影響を受けず、接合耐力は接着剤の広がり面積に比例するという合板とスギ材との接合部において認められた関係が、スギ材同士の接合部にも適用できた。

4)死荷重および釘打ち圧縮による接着層形成状態に関する研究から得られた結果は以下の通りである。

死荷重により形成された接着層の分析により、圧縮力、塗布量および接着層厚さの関係が明らかになった(②および③式)。

釘打ちにより合板を材材に接着した場合の接着層厚さの分布は、合板を釘間隔をスパンとする単純支持梁とみなし、そこに等分布荷重が作用したときのたわみの分布とよく近似していた。これから、釘打ちによる接着層の形成過程が以下になると仮定して、接着層の状態を予測するための計算法を提出した。まず釘打ち部分の接着層厚さが0に近づく。釘と釘の間では、接着剤の流動抵抗(粘性)による力が合板に作用するため、合板はたわむ。釘間中央部では、たわんだ合板の復元力(F_0)が接着剤に作用するため、接着剤は流動し、接着層厚さが小さくなる。 F_0 は⑥および⑧式で計算されるものとする。接着層厚さが小さくなることにより、 F_0 が低下し、接着剤の降伏値に相当する単位長さ当たりの圧縮力(F_a)に達すると、接着剤の流動が停止し、接着層の状態が決定

される。 F_a は⑦式で計算されるものとする。以上の仮定にしたがって計算した釘間中央部の接着層厚さの計算値と実測値はよく一致した。釘と釘の間の各位置における接着層厚さは、単純支持梁に等分布荷重が作用したときのたわみに関する式から近似的に計算することができた(⑨式)。接着層の断面積と塗布量は比例するため、各位置の接着剤の広がり幅は各位置の接着層厚さから計算することができた(⑩式)。これらの計算法で計算した接着層の状態は実際の接着層の状態とよく一致した。接着剤の塗布量、合板の剛性および釘打ち間隔がわかると、接着層の状態を予測することが可能である。

第7章 現場接着における接着性能の非破壊検査の可能性

接着性能を非破壊的に検査することができれば、現場接着による接合部の信頼性向上に大きく寄与するものと考えられる。そこで、本章では、現場接着における接着性能の非破壊検査の可能性について検討した。

まず、7.1節では、超音波伝播時間による非破壊検査の可能性を追求するため、各種接着剤による接合部の超音波伝播時間と接着性能について検討した。

また、第4章および前章で明らかにしたように、1液型ポリウレタン接着剤は低温条件における生材の接着が可能であり、同接着剤を帯状に塗布して接着した接合部の性能は接着剤の広がり面積で決まるため、同接合部の性能は接着剤の広がり面積から推定することが可能である。

そこで、7.2節および7.3節では、1液型ポリウレタン接着剤を帯状に塗布して接着した接合部における接着剤の広がり幅の非破壊的な測定方法について検討した。まず、7.2節では、合板と素材との接合部の代表として床組を取り上げ、合板の固有振動数と接着剤の広がり状態との関係について検討した。また、7.3節では、素材同士の接合部の代表として接着重ね梁を取り上げ、スキマゲージを用いた接着剤の広がり幅の非破壊的測定方法について検討した。

7.1 超音波伝播時間と接着性能

接着性能を非破壊的に検査することができれば、現場接着による接合部の信頼性向上に大きく寄与するものと考えられる。本節では、超音波伝播時間による接着性能の非破壊検査の可能性を見いだすため、各種接着剤を用いて釘打ち接着した接合部の超音波伝播時間と接着性能の関係について検討した。

7.1.1 実験

供試接着剤および試験体は、6.2節で用いたものと同じである。すなわち、供試接着剤は1液型ポリウレタン接着剤(PU)、エラストマ系床用現場接着剤(FG)、エポキシ樹脂接着剤(EX)およびラテックス・エポキシ樹脂接着(LE)である。供試接着剤を用いて、スギ材に合板を釘打ちにより接着し、試験体を作製した(Fig.54)。この試験体から、ブロックせん断試験片(Fig.55)を

作製し、ブロックせん断試験片の厚さ方向の超音波伝播時間を測定した (Fig. 76)。超音波伝播時間の測定には永昇電子 (株) 製の木材腐朽判定装置 (WOOD TESTER WTD-II) を用いたが、超音波発信周波数は約78kHzである。超音波伝播時間を測定した後、ブロックせん断試験を行い、破壊荷重 (最大せん断強さ) を測定した。

7. 1. 2 結果および考察

超音波伝播時間と最大せん断強さの関係をFig. 77に示す。接着層を含む試験片の厚さは24.6~24.8mm程度であった。PUおよびFGでは、超音波伝播時間と最大せん断強さに相関は認められない。また、両者の超音波伝播時間の分布はほぼ同じになっている。PUは合板の木部破断を生じさせる性能を有していたのに対して、FGは合板の木部破断を生じさせることはほとんどなかった。このことはPUの接着剤の凝集力および木材界面との接着力がFGのそれらよりも大きいことを示す。また、今回の結果からPUの単位面積当たりの接着強さはFGよりも大きかった。これらのことを考慮すると、両接着剤による接合部の超音波伝播時間の分布がほぼ同じであったということは、接合部の超音波伝播時間が単位面積当たりの接着強さ、さらに、それを決定する因子となる接着剤の凝集力および接着剤と木材界面との接着力の影響をほとんど受けないことを示すと考えられる。

しかし、EXおよびLEでは、超音波伝播時間が長くなると最大せん断強さが低下する傾向が認められる。特に、伝播時間が34 μ s以上の試験片のせん断強さは極端に低く、はく離状態に近いものであった。これらの試験片の破壊後の接着層を観察すると、接着剤の広がり面積の中に欠陥部分 (接着剤が合板に接触していない部分) が認められた。また、超音波伝播時間が長くなった試験片でも、発信器および受信器の位置を接着していると思われる部分に移すと超音波伝播時間は30 μ s程度になった。したがって、これらの試験片の超音波伝播時間が長くなった原因は、超音波の発信器と受信器との最短経路と接着層との交わる部分に欠陥が存在するため、超音波が遠回りするためと考えられる。なお、木材の繊維方向により、超音波発信器と受信器との距離的な最短経路が必ずしも超音波伝播時間が最も短くなる時間的な最短経路になるとは限らないので、ここでいう最短経路とは距離的な最短経路というよりも時間的な最短経路と考える

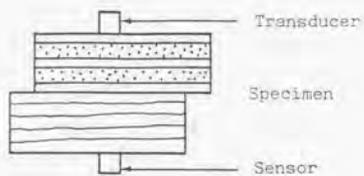


Fig. 76. Measurement of ultrasonic transit-time.

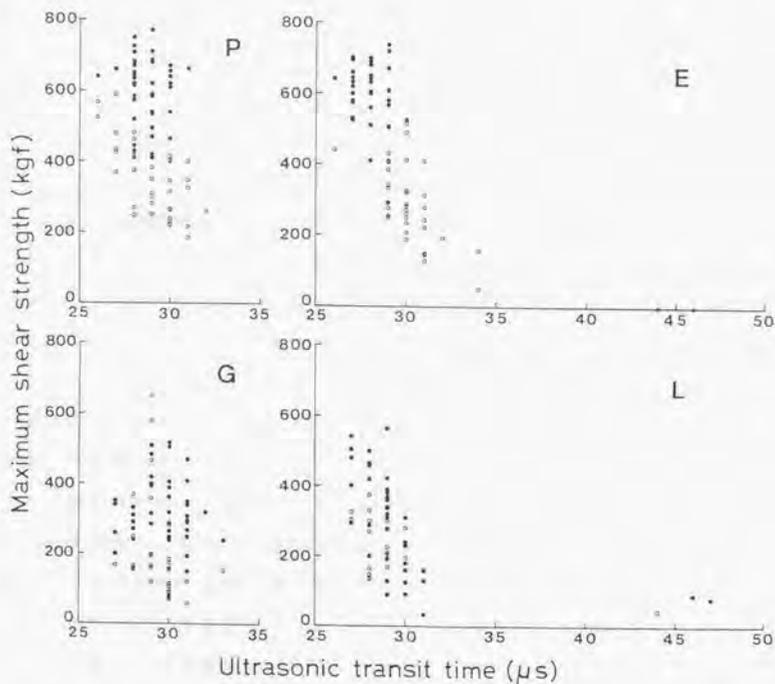


Fig. 77. Relationship between ultrasonic transit-time and maximum shear strength.

Legend: P: Polyurethane adhesive.

E: Epoxy resin adhesive.

G: Elastomer-based adhesive for gluing plywood-floor.

L: Latex-epoxy resin adhesive.

○: Bonded with spacers

●: Bonded without spacers.

べきであろう。

FGの接着層にも欠陥部分は存在するが、せん断強さが低く、欠陥部分が多く存在すると思われる試験片の超音波伝播時間は長くなっていない。接着層の観察によれば、この原因はFGが均一な接着層を形成せず、線状で網目状の接着層（第3章のFig.15、16）を形成するため、発信器および受信器の最短経路と接着層との交わる部分に接着している部分が一部存在するためと考えられる。

以上のことから、接合部の超音波伝播時間を測定することにより、超音波発信器と受信器との時間的な最短経路にある一定の大きさ以上の接着層の欠陥部分を確認することが可能であると考えられる。しかし、超音波伝播時間が長い試験片では、接着層に欠陥があり、接着性能は低くなると考えられるが、超音波伝播時間が短いからといって良好な接着層が形成されていて、接着性能が高いということとはできないと考えられる。超音波伝播時間により接着性能を非破壊検査するためには、さらに検討を要する。

7. 2 固有振動数と接着層の形成状態

第5章における枠組壁工法住宅の現場接着床組の実態調査によれば、釘打ちを圧縮に利用する現場接着の大きな問題点は、①釘打ち圧縮では接着層が厚くなること、②接着層が厚くなるとエラストマ系の床用現場接着剤による接合部の接着性能が低下することであった。そのため、構造的により重要な部位に現場接着法を適用するためには、このような問題が生じないように現場接着工法を確立する必要があることが示唆された。

一方、第6章では、1液型ポリウレタン接着剤を帯状に塗布してスギ材と合板を釘打ち接着した場合、接着強さは接着層厚さの影響を受けず、接合耐力は接着剤の広がり面積に比例することを明らかにした。また、第4章における接着重ね梁の製作に関する研究では、このタイプの接着剤が低温条件におけるスギ生材の接着が可能であることを明らかにした。したがって、1液型ポリウレタン接着剤を帯状に塗布して接着した接合部の性能は、接着剤の広がり面積から推定することが可能である。実際、接着重ね梁において、接着剤の広がり面積が小さくなると接着重ね梁の曲げ性能が低下することが明らかになった。そこで、1液型ポリウレタン接着剤による接合部の接着層の形成状態を検査して、

良好な接着層が形成されている接合部を使用することとすれば、現場接着によっても安定した性能を有する接合部を供給することが可能になると考えられる。なお、圧縮により形成される帯状塗布した接着剤の広がり面積は接着剤の広がり幅と接合部の長さから計算することができる。そこで、本節および次節では、1液型ポリウレタン接着剤を帯状塗布して接着した接合部における接着剤の広がり状態の非破壊的測定方法について検討した。

まず、本節では、合板と枠材との接合部の代表として、床組における合板と根太との接合部の接着剤の広がり幅の非破壊的測定方法について検討した。このような合板と枠材との接合部では、接着層が露出していない場合があるため、スキマゲージ等を接着層に直接挿入することはできない。そこで、枠材間の合板の振動特性により、接着剤の広がり幅を測定する方法について検討した。

7. 2. 1 実 験

(a) 床組モデルにおける合板の固有振動数の測定

長さ400mm、幅38mm、厚さ45mmのスギ材2個を枠材とし、長さ400mm、幅40mm、厚さ12mmの南洋材合板4個を面材として、Fig. 78に示す床組モデルを5体作製した。合板については、あらかじめ比重とヤング率を測定した。各床組モデルに接着した4個の合板の比重は0.53~0.61の範囲で変化させた。3体の床組モデルについては、接着剤が枠材幅に完全に広がるようにして、枠材間の距離(L)を260、300および320mmとした。この場合の接着剤の広がり幅は43mm程度となり、枠材幅より若干大きくなった。そのため、これらの床組モデルにおいて振動する合板のスパンは枠材間の距離より小さくなり、それぞれ255、294および315mmになったと考えられる。その他の2体については、枠材間の距離を300mmにして、ひとつは塗布量を少なくすることにより、もうひとつは接着層を厚くすることにより接着剤が枠材幅に完全に広がらないようにした。この場合の接着剤の広がり幅は、それぞれ33および12mmとなった。したがって、これらの床組における振動する合板のスパンは枠材間の距離より大きくなり、それぞれ305および325mmになったと考えられる。

各床組モデルを水平なコンクリート床に置き、枠材を片手と両足の3点でおさえ、各合板の中央付近に硬式テニスボールを約10cmの高さから落下させたときの合板の振動数を測定した。振動解析にはエー・アンド・ディ(株)製のポー

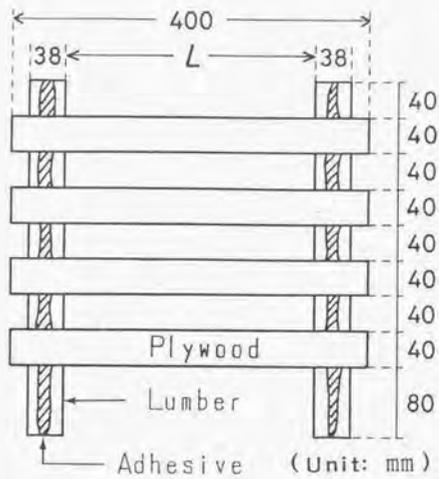


Fig. 78. Model of floor.

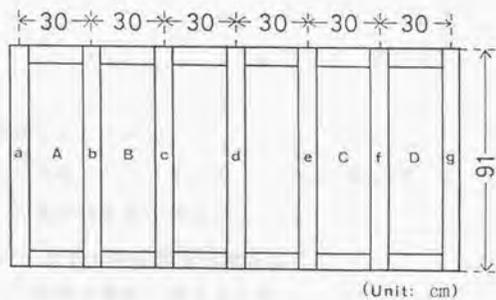


Fig. 79. Joist assembly for a full-sized floor.

ダブルFFTアナライザー (AD-3522) と加速度センサー (AD-1225、重量35g) を使用した。加速度センサーは各合板の中心に両面テープで取り付けられた。

枠材と合板の接合部の接合条件を決定するため、各床組モデルの両枠材に20kgずつ、合計40kgの死荷重をのせたとき (固有振動数を測定したときとほぼ同じ条件) の合板の剛性を測定し、接合部の接合係数 η およびパラメータ δ を求めた^{4,5)}。

(b) 実大床組における合板の振動解析

Fig. 79に示す枠材の上に厚さ7.5mmの南洋材合板 (182cm×91cm) を、釘打ちにより接着した。合板が接触する枠材は7本あるが、そのうち左側から3本の枠材 (a~c) では接着剤が枠材幅に完全に広がるようにした。この場合の枠材間で振動する合板 (AおよびB) のスパンは262mmであったと考えられる。右側から3本の枠材 (e~g) では、塗布量を少なくして接着剤が枠材に完全に広がらないようにした。この場合の接着剤の広がり幅は18~23mmであり、枠材間で振動する合板 (CおよびD) のスパンは、平均すると280mmであったと考えられる。中央部の枠材 (d) には接着剤を塗布しなかった。

床組を水平なコンクリート床に置き、接着剤を塗布した枠材間の合板 (A~D) について、Chlandi法^{4,5)}により振動のモード形状を調べた後、被測定合板の振動を制約しないように体重約60kgの人が乗っておさえ、約10cmの高さからゴルフボールを落下させたときの振動を解析した。加速度センサーは枠材間の合板の中心に両面テープで取り付けられた。ボールの落下位置は原則として加速度センサーの付近とした。

7. 2. 2 結果および考察

(a) 床組モデルにおける合板の固有振動数と接着層の形成状態

合板のスパンと固有振動数の関係をFig. 80に示す。ここで、単純支持梁の固有振動数 (f_2)、弾性支持梁の固有振動数^{4,5)} (f_3) およびスパン中央部に質量 m が付加された単純支持梁の固有振動数^{4,5)} (f_4) は以下の式を用いて計算した。

$$f_2 = \frac{\pi^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{w}} = \frac{1.57}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{w}}$$

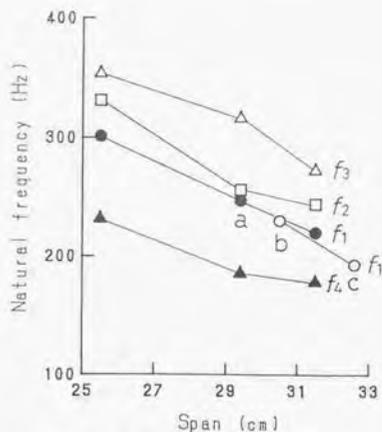


Fig. 80. Relationship between span and natural frequency of plywood in floor models.

Legend: f_1 : Measured.

f_2 : Calculated with the formula for a simple beam.

f_3 : Calculated with the formula for a beam with restrained support.

f_4 : Calculated with the formula for a simple beam with a dead load at midspan.

a: Distance between two pieces of lumber was 300 mm, width of glue spread was 43 mm, and span was 294 mm.

b: Distance between two pieces of lumber was 300 mm, width of glue spread was 33 mm, and span was 305 mm.

c: Distance between two pieces of lumber was 300 mm, width of glue spread was 12 mm, and span was 325 mm.



Fig. 81. Chladni pattern of full-sized floor.

$$f_3 = \frac{\xi^2}{2\pi I^2} \sqrt{\frac{EI}{w}}$$

$$f_4 = \frac{1.58}{I^2} \sqrt{\frac{EI I}{2.06m + w I}}$$

ここで、 I : スパン (m)

$E I$: 曲げ剛性 (N・m²)

w : 単位長さ当たりの梁の重量 (kg/m)

ξ : 弾性支持梁の係数⁴⁴⁾

実測された固有振動数は合板を単純支持梁とみなして計算した値に近似しているが、これは床組モデルにおける合板が単純支持梁に近いのではないと考えられる。単純支持梁の端部が拘束されて弾性支持梁となり、そのスパン中央部に加速度センサーの質量が付加されたために、実測値が得られたと考えられる。実測値と各式により計算した振動数は、絶対値は異なるが、スパン増加による振動数の低下傾向は同様である。一般に、木材の比重と曲げヤング係数には正の相関が認められていることと、固有振動数は(ヤング率/比重)の平方根に比例することから、固有振動数はヤング率および比重の影響を大きく受けないと考えられる。今回の実験でも、比重と固有振動数には一定の関係は認められなかった。一方、固有振動数はスパンの2乗に反比例するため、スパンの変化を顕著に表すと考えられる。

Fig. 80における白丸は、枠材間の距離を300mmとして、接着剤の広がり幅を小さくしたモデルにおける合板の振動数を示す。これらの接着剤の広がり幅は33mmまたは12mmであり、振動する合板のスパンはそれぞれ305mmおよび326mmであったと考えられる。接着剤が完全に広がっている場合の固有振動数 (Fig. 80のa) が、245~250Hzであったのに対して、接着剤の広がり幅が33mmおよび12mmの場合の固有振動数 (Fig. 80のbおよびc) は、それぞれ223~235Hzおよび190~203Hzとなった。したがって、枠材間の距離が一定の条件でも、接着剤の広がり幅が小さくなると、合板の実質的なスパンが長くなるため、合板の固有振動数が低下すると判断される。接着剤の広がり幅が12mmのときの合板の固有振動数

(Fig. 80のc)は、枠材間の距離が同じで、接着剤が枠材幅に完全に広がっているときの固有振動数 (Fig. 80のa) より、2割程度低下している。したがって、枠材間の合板の固有振動数を測定することにより、接着剤の広がり幅が極端に小さい接合部を識別することが可能であると考えられる。

〈b〉実大床組における合板の固有振動数と接着層の形成状態

Chladni法により枠材間の合板の振動のモード形状を調べた結果、枠材間の合板の中央部にゴルフボール落下させた場合は枠材部を節とし、枠材間中央部を腹とする曲げ振動が主に生じていることが確認された (Fig. 81)。枠材上にボールを落下させた場合はこのような合板の曲げ振動はChladni法では確認されなかった。

接着剤を塗布した各枠材間の合板の周波数応答曲線 (パワースペクトル) の一部をFig. 82に示す。Aのスペクトルは、Fig. 79における枠材aとbの間、すなわちAの位置の合板について、その合板の中心、すなわちAの位置にボールを落下させたときのものであり、一方、A₁のスペクトルは、同じAの位置の合板について、枠材上、すなわちFig. 79のaの位置にボールを落下させたときのものである。両者のスペクトルにおける各ピーク位置はまったく同じであるが、Aにおける470および933Hzのピークの相対強度はA₁のそれよりも大きくなっている。したがって、470および933Hzの振動は枠材間の合板の曲げ振動に起因するものであると考えられる。以下これらの周波数に着目してスパンとの関連を考察した。

Aは接着剤が完全に広がっている枠材間の合板のスペクトルである。このときの振動する合板のスパンは262mmなっていたと考えられる。Dのスペクトルは、接着剤が完全に広がっていない枠材間の合板 (Fig. 79における枠材fとgの間のDの位置の合板) のものである。このときの接着剤の広がり幅は18~23mmであり、振動する合板のスパンは280mm程度になっていたと考えられる。図には示していないが、Fig. 79におけるBの位置の合板についてのスペクトルはAのスペクトルとほとんど同じであり、また、Fig. 79におけるCの位置の合板についてのスペクトルはDのスペクトルとほとんど同じであった。AとDのスペクトルを比較すると、Aにおいて合板の振動に帰属すると考えられる470および933Hzのピークが、Dではそれぞれ424および901Hzと低周波側に認められる。Fig.

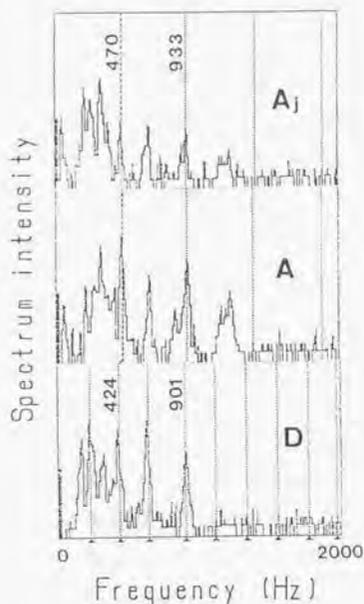


Fig. 82. Frequency response curves of full-sized floor.

Notes: The symbols of A_j , A and D show positions in the full-sized floor. The symbols of A_j and A correspond to the symbol A in Fig. 79, and the symbol of D corresponds to the symbol of D in Fig. 79. Spans of the plywood of A and D were 262 mm and 280 mm, respectively. A ball was dropped above the joist (A_j) and at the center of the plywood between the two pieces of lumber (A and D).

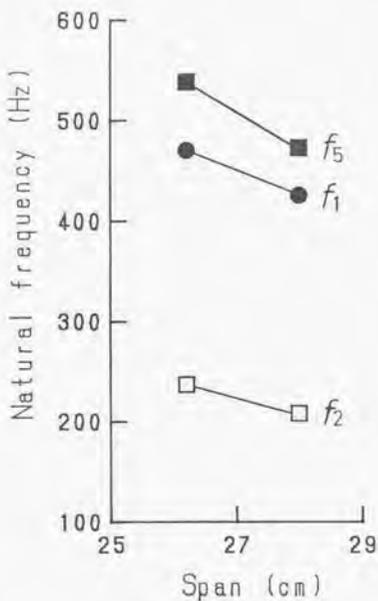


Fig. 83. Relationship between span and natural frequency of plywood in a full-sized floor.

Legend: f_1 : Measured.
 f_2 : Calculated with the formula for a simple beam.
 f_3 : Calculated with the formula for a fixed beam.

83は、スパンと合板の曲げ振動に起因すると思われる450Hz付近のピークの振動数の関係を示しているが、実測された振動数は枠材間の合板を固定梁とみなして計算した値に近似している。また、スパンの増加による振動数の低下傾向は計算値と同様な傾向を示している。したがって、枠材における接着剤の広がり幅が小さくなると、枠材間の合板の実質的なスパンが長くなるために、枠材間の合板の振動数は低周波側に移動すると考えられる。

実大の床組における枠材間の合板は厳密には板振動しているため、今回の研究では十分解析されていない。しかし、合板が接着されている隣接する枠材間の合板の中心付近にボールを落下させて、それらの枠材を節とし、落下点を腹とする合板の曲げ振動を生じさせ、その振動数を測定することにより、接着剤の広がり幅の小さい接合部を識別することができる可能性は高い。

7. 3 スキマゲージによる接着層の形成状態の非破壊測定

1液型ポリウレタンによる接着接合部の接着性能および接着重ね梁の曲げ性能は、接着剤に広がり面積に影響される。したがって、それらの接着接合部の性能は接着剤の広がり面積から推定可能である。そこで、本節では、1液型ポリウレタン接着剤を帯状に塗布して接着した接着重ね梁における接着剤の広がり幅の非破壊的測定方法について検討した。接着重ね梁のような素材同士の接合部では接着層が露出しているため、スキマゲージを接着層に挿入することが可能である。そこで、本節では、現場的な条件でも測定が可能と考えられるスキマゲージを用いた接着剤の広がり幅の簡易な測定方法について検討した。

7. 3. 1 実 験

厚さ4cm、長さ100cm、幅10cmまたは15cmのスギ材 (*Cryptomeria japonica* D. Don) 2材を、1液型ポリウレタン接着剤 (日本ポリウレタン工業製ウッドロック) を用いて接着した。塗布量は、300または500g/m²を目安として、2水準とした。塗布方法は帯状に1本または2本とした。圧縮は、M12ボルトを用い、90cm間隔で行った。養生後、JIS B 7524で規定する100A10型のスキマゲージ (0.05mm厚さを使用) を、接着重ね梁の両側面から接着層に10cm間隔で挿入し、その侵入深さを測定した (Fig. 84)。このスキマゲージの侵入深さから、以下の式を用いて接着剤の広がり幅を算出した。

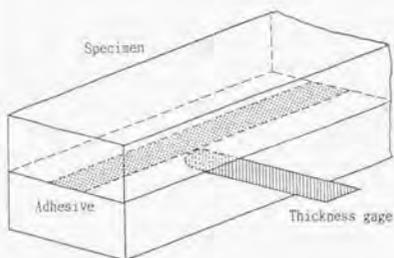


Fig. 84. Measuring method of the width of glue spread.

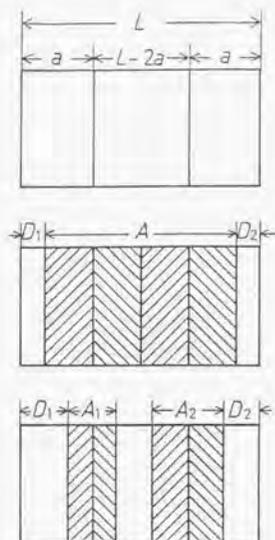


Fig. 85. Calculation of the width of glue spread from the length of the thickness gage inserted into glue line.

- Legend: L : Width of lumber.
 a : Distance from the edge of lumber to the position of spread.
 D : Length of the thickness gage inserted into glue line.
 A : Width of glue spread.
- Notes: If $D_1 + D_2 < 4a - L$, $A = L - 2a$.
 If $D_1 + D_2 > 4a - L$,
 $A_1 + A_2 = 4a - 2D_1 - 2D_2$.

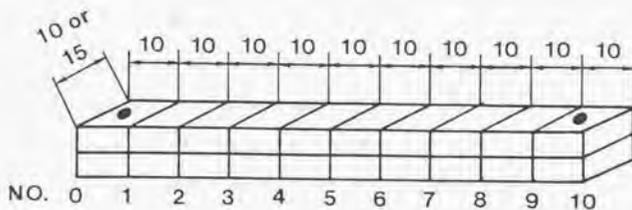


Fig. 86. Cutting of test joint for measuring the width of glue spread.

1) 1本塗布の場合

$$A = L - D_1 - D_2$$

A は接着剤の広がり幅

L は材幅

D_1 および D_2 は両側面のスキマゲージの侵入深さ

2) 側面から a だけ離れた所に2本塗布した場合 (Fig. 85)

ただし、 $L/4 < a < L/2$ とし、帯状塗布された接着剤は圧縮により両側に同じ距離だけ広がるものと仮定する。

①中央に欠膠がないとき、すなわち、 $a - D_1 + a - D_2 > L - 2a$ のとき、

$$A = L - D_1 - D_2$$

②中央に欠膠があるとき、すなわち、 $a - D_1 + a - D_2 < L - 2a$ のとき、

$$A = 4a - 2D_1 - 2D_2$$

各測定点を切断して接着剤の広がり幅を実測し (Fig. 86)、スキマゲージの侵入深さから計算した値と比較した。

6. 1. 2 結果および考察

スキマゲージを挿入して測定した接着剤の広がり幅と実測した接着剤の広がり幅の関係をFig. 87-90に示す。

接着剤を帯状に1本塗布した場合 (Fig. 87および88)、材幅および塗布量に関係なく、スキマゲージの侵入深さにより計算した接着剤の広がり幅 (計算値) と実測値はよく一致した。相関係数はすべて0.996以上であった。すなわち、1本塗布の場合、材料を切断して実測すると同程度の精度で、スキマゲージにより接着剤の広がり幅を測定可能である。

2本塗布した場合、幅10cmの接着重ね梁では計算値と実測値はよく一致し、相関係数は0.994であったが (Fig. 89)、幅15cmの接着重ね梁では計算値と実測値には若干の誤差が生じ、相関係数も0.986とわずかに低くなった (Fig. 90)。この原因は、塗布する位置が指定された位置からずれたことによるものと考えられる。すなわち、2本塗布の場合、スキマゲージにより測定される接着剤の広がり幅の精度は、接着剤が塗布される位置の精度に影響されるものと考えられる。今回の実験では、塗布量が同程度の場合、1本塗布と2本塗布による接着剤の広がり幅の差はほとんど認められなかった。したがって、幅15cm程度以下の材料

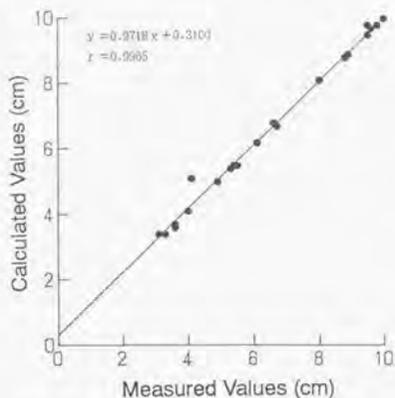


Fig. 87. Relationship between calculated value and measured value of the width of glue spread.

Notes: A single bead of glue was applied to lumber of 10 cm width.

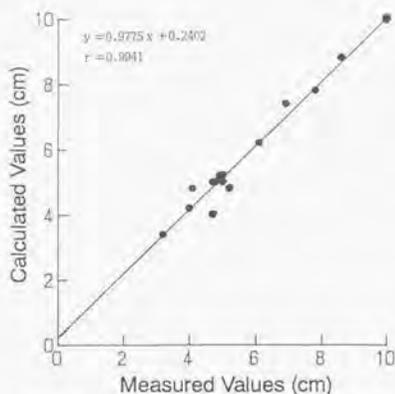


Fig. 89. Relationship between calculated value and measured value of the width of glue spread.

Notes: A double bead of glue was applied to lumber of 10 cm width.

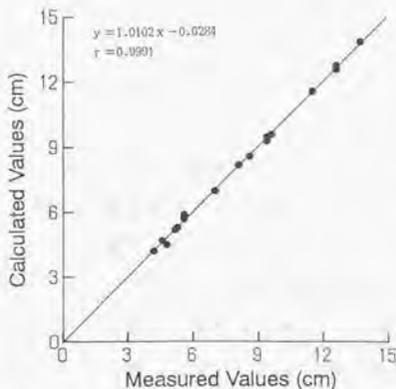


Fig. 88. Relationship between calculated value and measured value of the width of glue spread.

Notes: A single bead of glue was applied to lumber of 15 cm width.

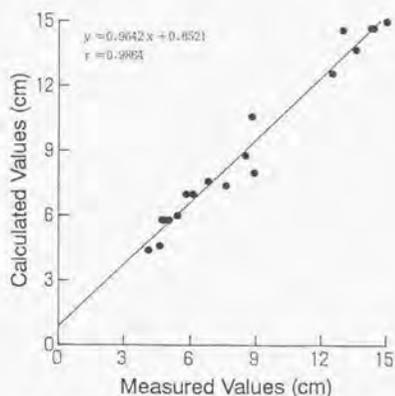


Fig. 90. Relationship between calculated value and measured value of the width of glue spread.

Notes: A double bead of glue was applied to lumber of 15 cm width.

を接着する場合、スキマゲージによる接着剤の広がり幅の測定精度を高めるためには1本塗布の方が有利である。

以上示したように、接着層が露出している接合部では、スキマゲージを接着層に挿入することにより、現場的な条件でも簡単に、精度高く接着剤の広がり幅を測定することが可能である。

7. 4 要 約

現場接着における接着性能の非破壊検査の可能性について検討した。得られた結果の概要を以下に示す。

1) 超音波発信器と受信機の時間的な最短経路に、一定の大きさ以上の欠陥部分(接着剤が被着材に接触していない部分)がある場合、超音波が遠回りするため、伝播時間が長くなった。したがって、超音波伝播時間を測定することにより、接着層における一定の大きさ以上の欠陥を確認することが可能である。しかし、超音波伝播時間により、小さな欠陥を確認することはできず、超音波伝播時間が短いからといって、接着性能が良好であるということとはできない。

2) 床組モデルにおいて、接合部の接着剤の広がり幅が小さくなると、枠材間の合板の実質的なスパンが長くなるため、合板の固有振動数が低下した。したがって、枠材間の合板の固有振動数を測定することにより、接着剤の広がり幅が極端に小さい接合部を識別することが可能である。

3) 実大床組においても、接合部の接着剤の広がり幅が小さくなると、枠材間の合板の振動に基づくと考えられる振動数が低周波側に移動した。これは、枠材間の合板の実質的なスパンが長くなるためと考えられた。したがって、枠材間の合板の振動特性を測定することにより、接着剤の広がり幅の極端に小さい床組を識別できる可能性がある。

4) 1液型ポリウレタン接着剤を帯状に1本塗布して接着した重ね梁の接着剤の広がり幅は、材料を切断して実測するのと同程度の精度で、スキマゲージを接着層に挿入することにより測定可能である。

第8章 総括

接着による接合法の最も大きな利点は、接着面全体に応力を分散緩和できるということである。このような利点は、釘、ボルトおよび接合金物による他の接合法では得られない。接着により強度および剛性の高い接合が可能であり、接着接合法は木材を有効利用するための不可欠の加工法のひとつとなっている。

強度性能の優れた接合が可能な接着接合法を、建築現場においても適用することができるようになれば、接合部および建築物の強度および剛性の向上が期待できる。建築現場における接着（いわゆる現場接着）が可能となれば、木造建築物における枠材と面材との接合、合板ガセット等による各部材間の接合およびボックスビーム等の組立梁の製作を接着により行うことができるようになり、接合部および建築物の強度および剛性の向上が期待でき、さらには材料の節約および木材の有効利用にもつながると考えられる。

しかし、枠組壁工法住宅における現場接着床組を除いて、現場接着による接合部の構造的な性能は認められてきていない。すなわち、現場接着による接合耐力が設計計算上 0 とみなされている。その理由は、品質管理の十分な工場で行われる接着とは異なり、現場接着では接着性能に影響を及ぼす種々の因子が変化するため、安定した接着性能が得られにくいとめとえられる。新たな現場接着工法を開発・実用化するためには、現場接着の問題点を除去し、現場接着による接合部の信頼性を向上させることが必要である。

本研究は、現場接着による接合部の信頼性を向上させることを目的としており、1)現場接着用接着剤の接着性能、2)現場接着における接着条件と接着性能、3)現場接着接合部の実態調査、4)現場接着における接着層の形成状態と接着性能、5)現場接着における接着性能の非破壊検査の可能性について検討したものである。

1) 現場接着用接着剤の接着性能

接着性能は、用いられる接着剤の特性、被着材である木材の性質および接着条件に影響されるが、特に用いられる接着剤の影響は大きい。そこで、まず第3章では現場接着用接着剤の接着性能について検討した。

すでに構造的性能が認められている現場接着床組にはエラストマ系の床用現場接着剤が用いられるが、このエラストマ接着剤は、従来から構造用木質材料に使われている熱硬化性樹脂接着剤とは異なる性質を有していると考えられた。そこで、第1番目に、エラストマ接着剤の強度特性と耐久性について検討した。その結果、エラストマ接着剤による接合部の荷重-たわみ曲線、それに及ぼす養生期間の影響および面材料の種類と繊維方向の影響、エラストマ接着剤の温度依存性、疲労特性および接着耐久性が明らかになった。

現場接着床組は、合板と素材を接着したものであり、構造的性能を期待する素材-素材間の現場接着法は開発されてきていない。エラストマ系の床用現場接着剤も合板のローリングシアーに相当する性能が要求されているにすぎない。そこで、第2番目に、素材同士の現場接着を考慮して、1液型ポリウレタン接着剤の生材接着性能と接着耐久性について検討し、以下の結論が得られた。

『1液型ポリウレタン接着剤はスギ生材の接着が可能であり、また、煮沸繰り返し試験にも耐える接着剤である。1液型ポリウレタン接着剤による素材-素材間の接着接合部に構造的性能を期待することが可能である。』

2) 現場接着における接着条件と接着性能

接着性能は、用いられる接着剤の特性のみならず、接着条件の影響も大きく受ける。特に現場接着においては、接着性能に影響する種々の因子が大きく変化し、またその影響因子を制御することも困難であるため、接着性能に及ぼす接着条件の影響を把握しておくことは重要である。そこで、第4章では現場接着における接着条件と接着性能の関係について検討した。

ここでは、構造的性能を期待する新たな素材-素材間の現場接着法を開発することを考慮して、1液型ポリウレタン接着剤を用いてスギ生材を接着し、接着重ね梁を製作する場合の接着性能に及ぼす接着条件の影響について検討した。その結果、木材の含水率条件、木材の表面性に関する条件、接着剤の塗布方法と塗布量に関する条件、圧縮方法(ボルト間隔)に関する条件、製作時および養生期間中の温度条件、および養生期間が接着重ね梁の接着性能に及ぼす影響が明らかになり、1液型ポリウレタン接着剤を用いて現場的な条件で接着重ね梁を製作することが可能であることが示唆された。また、接着重ね梁の最適製

作条件が明らかになり、接着性能を損なう因子としては、木材表面がプレーナ加工されていないこと、および木材表面が凍結していることがあることが明らかになった。

3) 現場接着接合部の実態調査

1 液型ポリウレタン接着剤は低温条件における生材の接着が可能であり、現場的な条件における接着重ね梁の製作が可能であることが示唆されたが、同接着剤による素材-素材間の現場接着接合部に構造的な性能を期待するためには、接着性能が十分安定して満足な水準であることが必要である。すなわち、接着接合部の信頼性が十分高いことが必要である。接着接合部の信頼性を向上させるためには、信頼性を低下させる原因を明らかにして、それを除去していくことが必須である。そこで、第5章では、現場接着接合部の実態調査により現場接着の問題点について検討した。

第1番目に、すでに構造的な性能が認められている枠組壁工法住宅の現場接着床組の実態調査により、現場接着の現状と問題点について検討した。ここで得られた結論は以下のとおりである。

「釘打ちを圧縮の代わりに利用する現場接着による接合部の信頼性を低下させる大きな原因は、釘打ちを圧縮とした場合に帯状塗布された接着剤が十分広がらないことがあり、それにより接着性能が低下するということである。」

接着重ね梁を実際に使用する場合、接着重ね梁の性能を担保してやる必要があるため、第2番目に、接着重ね梁の性能を担保するための基礎的資料を得ることを目的として、曲げ試験が行われた接着重ね梁の接着層形成状態を調査し、接着剤の広がり状態と曲げ性能の関係について検討した。得られた結論は以下のとおりである。

「接着重ね梁の曲げ試験において、接着剤の広がり幅が小さくなると、接着層に作用する実効せん断応力が大きくなるため、接着層のせん断破壊が生じ易くなり、曲げ強さが低下した。したがって、接着重ね梁の曲げ性能は接着剤の広がり面積から推定可能である。」

4) 現場接着における接着層の形成状態と接着性能

第6章では、現場接着接合部の実態調査により明らかとなった現場接着の問題点、すなわち現場接着における接着層の形成状態と接着性能について検討した。

現場接着床組はエラストマ接着剤を用いて釘打ちを圧縮の代わりにして製作されることから、第1番目として、エラストマ接着剤の釘打ち圧縮による接着層の形成状態と接着性能との関係について検討した。その結果、塗布量と接着層の形成状態（接着層厚さと接着剤の広がり幅）との関係、圧縮条件と接着層の形成状態との関係、および接着層の形成状態と接着性能との関係が明らかになったのに加えて、以下の結論が得られた。

「接着層の形成状態には圧縮圧力だけでなく、圧縮時間も影響する。」

「エラストマ系の床用現場接着剤による接合部では線状の不均一な接着層が形成され、接着層が厚くなると単位面積当たりの接着強さが低下すること、および帯状塗布した接着剤の広がり幅が小さくなることの相乗効果により、破壊荷重が著しく低下した。すなわち、本研究で用いたエラストマ系の床用現場接着剤は空隙充填性があまりよくない。」

第2番目には、接着層が厚くなるとエラストマ接着剤による接合部の性能が著しく低下するという問題点を考慮し、エラストマ接着剤よりも釘打ち接着に適する接着剤を選定することを目的として、市販の各種接着剤の釘打ちによる接着層の形成状態と接着性能について検討し、以下の結論が得られた。

「被着材間の距離が大きくなる可能性がある釘打ち接着に適する接着剤に必要な条件は、帯状塗布できること、自重で流動しない程度の粘度を有すること、不揮発分が多く、硬化に伴う収縮が少ないことである。それらの条件を満足する接着剤は1液型ポリウレタン接着剤であった。」

「1液型ポリウレタン接着剤を帯状に塗布して接着した合板—スギ材材間の接合部の接着強さは接着層厚さの影響を受けず、破壊荷重は接着剤の広がり面積に比例した。これらのことは、同接合部の接着強さが、接着層の形成状態に影響する因子である圧縮条件の影響を受けないこと、および同接合部の性能が接着剤の広がり面積により推定可能であることを示唆している。」

第3番目に、素材—素材間の新たな現場接着を考慮し、1液型ポリウレタン接着剤のボルト圧縮による接着層形成状態と接着性能について検討した。その結果、ボルトによる圧縮点から離れるにしたがって、接着層が厚くなり、接着

剤の広がり幅が小さくなることが明かになったが、また、次のような結論も得られた。

『1液型ポリウレタン接着剤を帯状に塗布して接着したスギ材同士の接合部においても、接着強さは接着層厚さの影響を受けず、接合耐力は接着剤の広がり面積に比例した。したがって、1液型ポリウレタン接着材を帯状塗布して接着した接合部の性能は接着剤の広がり面積から推定可能である。』

1液型ポリウレタン接着剤による接合部の性能が接着剤の広がり面積により決まるため、接着層の形成状態に影響する因子を明らかにして、釘打ち圧縮による接着層の形成状態を予測できれば、接着接合部の信頼性を向上させることが可能である。そこで、第4番目には、1液型ポリウレタン接着剤の死荷重による接着層形成状態について検討し、接着層形成状態に影響する因子を明らかにした。さらにその結果をふまえて、第5番目として、釘打ち圧縮による接着層形成状態予測法について検討した。死荷重により形成された接着層の分析により、圧縮力、塗布量および接着層厚さの関係が明らかになった。また、釘打ち圧縮による接着層の形成状態に関する分析から以下の結論が得られた。

『接着剤を帯状に塗布して合板と枠材を釘打ち接着したときの接着層の形成過程は以下のとおりである。まず釘打ち部分の接着層厚さが0に近づく。釘と釘の間では、接着剤の流動抵抗（粘性）による力が合板に作用するため、合板はたわむ。釘間中央部では、たわんだ合板の復元力（ F_0 ）が接着剤に作用するため、接着剤は流動し、接着層厚さが小さくなる。接着層厚さが小さくなることにより F_0 が低下し、接着剤の降伏値に相当する単位長さ当たりの圧縮力（ F_a ）に達すると、接着剤の流動が停止し、接着層の状態が決定される。』

『接着剤を帯状に塗布して合板と枠材を釘打ち接着したときの接着層の形成状態に影響する因子は、接着剤の粘度変化が一定の条件においては、接着剤の塗布量、合板の剛性および釘打ち間隔であり、これらの因子により接着層の状態を予測することが可能である。』

5) 現場接着における接着性能の非破壊検査の可能性

接着接合部の性能を非破壊的に検査することができれば、現場接着接合部の信頼性を向上させることが可能である。そこで、第7章では、現場接着におけ

る接着性能の非破壊検査の可能性について検討した。

まず、第1番目に、各種接着剤による釘打ち接着接合部の超音波伝播時間と接着性能の関係を調べ、超音波伝播時間による接着性能の非破壊検査の可能性について検討した。その結果、接着接合部の超音波伝播時間を測定することにより、超音波発信器と受信機の時間的な最短経路にある、一定の大きさ以上の欠陥部分（接着剤が被着材に接触していない部分）を確認できることが明らかになった。しかし、超音波伝播時間により全ての欠陥部分を確認できるわけではない。

また、1液型ポリウレタン接着剤による接合部の性能は、接着剤の広がり面積により推定可能であるため、接着層の形成状態を非破壊的に測定することができれば、接着性能を推定することが可能である。そこで、第2番目には、床組の合板の固有振動数と接着層の形成状態の関係について検討し、第3番目には、スキマゲージを用いた接着剤の広がり幅の非破壊的測定方法について検討し、以下の結論を得た。

「床組モデルにおいて、接合部の接着剤の広がり幅が小さくなると、枠材間の合板の実質的なスパンが長くなるため、合板の固有振動数が低下した。したがって、枠材間の合板の固有振動数を測定することにより、接着剤の広がり幅が極端に小さい接合部を識別することが可能である。」

「実大床組においても、接合部の接着剤の広がり幅が小さくなると、枠材間の合板の振動に基づくと考えられる振動数が低周波側に移動した。これは、枠材間の合板の実質的なスパンが長くなるためと考えられた。したがって、枠材間の合板の振動特性を測定することにより、接着剤の広がり幅の極端に小さい床組を識別できる可能性がある。」

「ポリウレタン接着剤を帯状に1本塗布して接着した重ね梁の接着剤の広がり幅は、材料を切断して実測するのと同程度の精度で、スキマゲージを接着層に挿入することにより測定可能である。」

以上のように、本研究では、現場接着用接着剤の接着性能、接着性能に及ぼす現場接着における接着条件の影響、現場接着の問題点が究明され、そのような問題点を除去するための接着剤として1液型ポリウレタン接着剤が選定され、

さらにその使用法から非破壊検査法まで提案されている。現場接着においては、用いられる接着剤の特性のみならず、圧縮圧力がいかに接着剤まで作用するか、良好な接着層がいかに形成されるかということが非常に重要な問題である。本研究で得られた結論は、今後、現場接着による接合部の信頼性を向上させ、構造的性能を期待する現場接着法を開発していくうえで有意義な指針を与えるものである。

謝 辞

本研究の取りまとめに際して、種々ご教示、ご指導を賜った東京大学農学部大熊幹章教授に対し、衷心より感謝の意を表します。

本研究を行うにあたり、終始温かいご配慮とご教示を賜った森林総合研究所唐沢仁志元材質改良科長に、心からなる謝意を表します。

実験を行うにあたり、数多くのご教示をいただき、また便宜をはかっていた森林総合研究所千葉保人木材化工部長、同小野拓邦接着研究室長、同大黒昭夫主任研究官、同金谷紀行研究管理官、同小松幸平接合研究室長、同林知行主任研究官、同川元紀雄研究員、また試験片の作製に際しご協力いただいた同高橋一三技官および木工室の方々に対して心より感謝の意を表します。

接着重ね梁の実験を行うにあたり、数多くのご教示と多大なご助力をいただいた静岡大学農学部平嶋義彦助教授ならびに(財)日本住宅・木材技術センター複合梁委員会委員諸氏に心から感謝の意を表します。

1992年10月

森林総合研究所

井上 明生

引用文献

- 1) 山口章三郎監修: "接着・粘着の事典" 朝倉書店、1986、p.184.
- 2) J. D. Rose: Field-Glued Plywood Floor Test. American Plywood Association Laboratory Report 118 (1970).
- 3) American Plywood Association: Adhesives for Field Gluing Plywood to Wood Framing. Adhesive Performance Specification AFG-01 (1971).
- 4) American Society for Test and Standard: Standard Specification for Adhesives for Field-Gluing Plywood to Lumber Framing for Floor System. ASTM D 3498-76 (1976).
- 5) American Plywood Association: APA Glued Floor System. Form U405
- 6) C. B. Vick: Elastomeric Adhesives for Field-Gluing Plywood Floor. Forest Product J., 21(8), 34-42 (1971).
- 7) C. B. Vick: Gap-Filling Phenol-Resorcinol Resin Adhesives for Construction. Forest Products J., 23(11), 33-41 (1973).
- 8) R. W. Caster, M. F. Gillen and J.T. Howell: A Gap-Filling Phenol-Resorcinol Adhesive for Laminating. Forest Product J., 23(11), 55-59 (1973).
- 9) H. F. Zornig and C. B. Vick: Method of Nailing and Adhesive Consistency Affect the Strength of Nailed-glued Construction Joints. Forest Products J., 24(12), 17-22 (1974).
- 10) 海老原徹、木口三郎: 現場接着に関する基礎的研究(第1報) 釘打ち接着による枠材と合板の接合、木材学会誌、24(6)、400-405 (1978).
- 11) 海老原徹: 木造建築における現場接着について、木材工業、33(5)、192-196 (1979).
- 12) 平嶋義彦、鷺海四郎: 枠組壁工法住宅床組の構造耐力試験(IV)、木材工業、36(3)、118-123 (1981).
- 13) 住宅金融公庫: 枠組壁工法住宅工事共通仕様書 (1979).
- 14) 日本・住宅木材技術センター: 床用現場接着剤の性能試験方法 (1979).
- 15) 佐藤雅俊、安藤直人、鷺海四郎: 合板ボックスビームの釘打ち接着接合と接着性能、木材工業、38(11)、523-529 (1983).

- 16) 吉田弥明、吉川双介：釘打ち接着接合ボックスビームの強度性能、木材工業、40(6)、274-279 (1985).
- 17) 吉田弥明、嶋智恵、吉川双介：釘打ち接着接合部の接着性能、木材工業、38(8)、375-380 (1988).
- 18) 吉田弥明、吉川双介：現場接着接合法としての釘打ち接着接合法(第1報) 合板-枠材釘打ち接着における釘の圧縮効果、木材学会誌、34(2)、126-132 (1988).
- 19) 風間正行、小林純、小西信：建築現場におけるのり・くぎ併用接合-くぎ押し込み抵抗とくぎ押し込み圧縮圧力、木材学会誌、36(1)、22-28 (1990).
- 20) 楊 萍、秦正徳、佐々木光、小西信、鷺海四郎：接着面の圧縮圧分布と接着性(第1報) ボルト・クランプ圧縮接着における圧縮圧分布と接着性、木材学会誌、37(7)、611-618 (1991).
- 21) 楊 萍、秦正徳、佐々木光：接着面の圧縮圧分布と接着性(第2報) クランプ圧縮接着における圧縮条件と圧縮圧分布、木材学会誌、37(7)、619-624 (1991).
- 22) 井上明生：釘圧縮による接着層の形成、木材工業、42(4)、168-171 (1987).
- 23) 井上明生：帯状塗布された接着剤の釘打ちによる接着層形成状態の予測、木材学会誌、37(9)、802-829 (1991).
- 24) 井上明生、唐沢仁志、大黒昭夫：床用現場接着剤の強度特性と耐久性、木材学会誌、36(4)、314-322 (1990).
- 25) 井上明生、大黒昭夫、唐沢仁志：枠組壁工法住宅における現場接着床組の実態調査、木材学会誌、36(9)、765-771 (1990).
- 26) 井上明生：釘打ち接着接合部の接着層の形成状態、超音波伝播時間および接着性能、木材学会誌、37(2)、142-150 (1991).
- 27) 平嶋義彦、鷺海四郎、井上明生、小野泰、小松幸平：正角材を用いた接着重ね梁の曲げ性能、木材工業、43(2)、63-67 (1988).
- 28) 井上明生：1液型ポリウレタン接着剤を帯状に塗布して接着した接合部における接着剤の広がり幅の非破壊的測定方法、木材学会誌、37(2)、151-157 (1991).
- 29) 日本住宅・木材技術センター複合梁分科会：昭和63年度技術開発推進事業報告書-複合梁開発-、p. 2-28 (1989).

- 30) 黒田寿紀、小牧和夫：熱可塑性樹脂の疲労試験、材料、14(138)、172-175 (1965).
- 31) 日本接着協会：昭和49年度接着耐久性研究委員会報告、p.75-100 (1975).
- 32) 高島清峰：湿気硬化型ポリウレタン樹脂接着剤、接着の技術、5(2)、12-17 (1985).
- 33) 野中保雄：膜の密着性に対する信頼性工学、金属表面技術、37(9)、34-47 (1986).
- 34) 日本分析化学会編：“高分子分析ハンドブック”、朝倉書店、1985、p.470.
- 35) 神原周ら編：“合成ゴムハンドブック”、朝倉書店、1967、p.897.
- 36) 田中俊成、鈴木憲太郎：地下室付き枠組み壁工法住宅の耐久性調査報告－部材含水率－、林業試験場木材利用部資料、60(3)、21-40 (1985).
- 37) 木口実、今村浩人：各種木造住宅の温湿度環境、木材工業、43(3)、117-122 (1988).
- 38) 木口実、今村浩人：地下室付き枠組み壁工法住宅の耐久性調査報告－室内温湿度環境－、林業試験場木材利用部資料、60(3)、5-15 (1985).
- 39) 今村浩人、木口実：地下室付き枠組み壁工法住宅の耐久性調査報告－釘の劣化－、林業試験場木材利用部資料、60(3)、41-48 (1985).
- 40) 今村浩人：鉄網モルタル壁における釘の劣化度の経年変化、木材学会誌、30(8)、693-696 (1984).
- 41) 井本立也：“概説レオロジー(上)”、東京化学同人、1963、p.63-67.
- 42) 日本住宅・木材技術センター複合梁分科会：昭和61年度技術開発推進事業報告書－複合梁開発－、p.4-20 (1987).
- 43) 日本住宅・木材技術センター合成ばり等の利用開発委員会：木造軸組構法等の開発業務報告書－合成梁等の利用開発－、p.5-16 (1986).
- 44) Naoto ANDO and Hideo SUGIYAMA: Dynamic Properties of Wood Floors I, Effect of supporting conditions on the natural frequency of joints, Mokuzai Gakkaishi, 29(11), 738-743 (1983).
- 45) 外崎真理雄、岡野健、浅野猪久夫：板振動試験による木材の音響的性質の評価、木材学会誌、31(3)、152-156 (1985).
- 46) 安藤直人、杉山英男：木質床の振動性状(第2報) ストレス・スキン・パネルの振動性状、木材学会誌、31(2)、89-96 (1985).

Summary

One of the most important advantages of adhesive bonding is that it can transfer stresses efficiently from one member of a composite to another through a wide bonding area. This advantage cannot be attained by mechanical fasteners, such as nails and bolts. When bonded with adhesive, wooden joints and composites have stiffnesses and strengths much greater than when assembled with mechanical fasteners. Adhesive bonding is one of the most important wood-processing methods for the efficient utilization of wood.

If adhesive bonding can be applied to the fabrications of assemblies at the location of building construction, the joints of the wooden-construction houses, such as T-beam floor systems, thin-shell structures and rigid frames, can be assembled by adhesive bonding. Those bonded joints would have stiffnesses and strengths greater than when assembled with mechanical fasteners. This would lead to the saving of cost, weight and volume of wood, and to the efficient utilization of wood.

However, structural performance of adhesive bonding at the location of service (field gluing or onsite bonding) is not authorized by building-related regulatory agencies, except the field-glued floors in the wooden-frame construction house. The reason why the structural performance of the field-glued joints is not authorized is that it is difficult to achieve the satisfactory bonding under the service environmental conditions, where variables affecting bond strength are difficult to control. In order

to develop new structural field-gluing techniques, it is necessary to elucidate the variables affecting bonding properties, to solve and remove the problems causing poor bonding, and to improve the reliability of field-glued joints.

The objective of this study was to improve the reliability of the field-glued joints, and investigated were 1) bonding properties of adhesives for field gluing, 2) the effects of bonding conditions in field gluing on bonding properties, 3) actual conditions of field-glued joints, 4) the formations of glue lines and bonding properties in field gluing, 5) the possibility of non-destructive inspection of bonding properties of the field-glued joints. Based on the all results in this study, a manual for field gluing was proposed to allow to achieve satisfactory bonding when fabricating glued-timber beams.

1) Bonding properties of adhesives for field gluing

Bonding properties are affected by the qualities of adhesives and adherents (wood), and bonding conditions. The effects of the qualities of adhesives are especially very important. Therefore, first of all, bonding properties of adhesives for field gluing were investigated in Chapter 3.

Elastomer-based adhesives are used in the field-glued floors, which are the only structural field-gluing technique authorized at present. It is important to clarify the characteristic properties and durability of elastomer-based adhesives because elastomer-based adhesives are different from thermosetting resin adhesives which have been used for the structural wood-based materials, such as structural

laminated woods and structural panels. In the first place, mechanical properties and durability of an elastomer-based adhesive for field-gluing plywood floors were investigated. The stress-slip curves of the nailed-glued panel-to-lumber joints were obtained. The strength of nailed-glued joints increased as aging periods became longer. Bond strength after 4 months-aging was 22.8 kgf/cm² and the slip between plywood and lumber at yield point was 0.69 mm. Glue lines bore almost all stresses in the nailed-glued joints. The strength of the joints depended on the strength of the elastomer-based adhesive when hardwood plywoods, particle boards and medium density fiberboards were used as side members. On the other hand, the strength of the joints with softwood plywoods as side members depended on the strength of plywoods, hence they showed lower strength. Bond strength at 40 °C and 60 °C were 71 % and 48 % of bond strength at 20 °C, respectively. Fatigue strength after 1 to 3 months-aging was lower than 10 % of static bond strength, and after more than 6 months-aging it increased up to 20 % of static bond strength. Cyclic soaking-drying tests and outdoor exposure tests indicated that the joints bonded with the elastomer-based adhesive had better abilities for both water-resistance and weather-proofing than JAS Type-1 plywood bonded with melamine-urea formaldehyde resin adhesives.

Field-glued floors are the joints of plywood to lumber. There is no field-glued lumber-to-lumber joints where structural performance is expected. In the second place, in order to develop a new field-gluing technique for structural lumber-to-lumber joints, an one-part polyurethane

adhesive was investigated for its bonding properties of green wood and bond durability. The following results were obtained.

"Green Sugi lumber could be bonded satisfactorily with an one-part polyurethane adhesive. Green Sugi joints bonded with the one-part polyurethane adhesive endured the cyclic boiling and drying tests. Therefore, it is possible to expect structural performance of Sugi lumber-to-lumber joints bonded with the one-part polyurethane adhesive."

2) The effects of bonding conditions in field gluing on bonding properties

Bonding properties are affected by not only the quality of adhesives but also bonding conditions. In field gluing, variables on bonding conditions affecting bonding properties change a lot and it is difficult to control those variables. It is very important to elucidate the effects of bonding conditions on bonding properties. In Chapter 4, therefore, the effects of bonding conditions in field gluing on bonding properties were investigated. In this Chapter, in order to develop a new field-gluing technique for structural lumber-to-lumber joints, glued-timber beams were fabricated from square and green Sugi timber using an one-part polyurethane adhesive, and variables on bonding conditions affecting bonding properties were investigated.

Clarified were the effects of moisture contents and surface roughness of Sugi timber, spreading methods and spread rates, pressing procedures (bolts spacings), temperatures, and aging periods on bonding properties. Then the optimum fabrication conditions were obtained for

glued-timber beams. It was possible to fabricate the glued-timber beams satisfactorily with one-part polyurethane adhesive from green Sugi timbers under the outdoor conditions in winter when timbers surfaces were planed and not frozen.

3) Examinations of actual conditions of field-glued joints

The results in Chapter 3 and 4 indicated that green lumber could be bonded and glued-timber beams could be fabricated in service conditions with one-part polyurethane adhesive. However, when field-glued lumber-to-lumber joints are used for construction, it is necessary that the bonded joints have stable and satisfactory bonding properties. The field-glued joints must be reliable. In order to obtain reliable field-glued joints, it is necessary to elucidate and remove the problems of field gluing. Therefore, in Chapter 5, the actual conditions of field-glued joints were examined and the problems of field gluing were solved.

In the first place, actual conditions of the field-glued floors in a wooden-frame construction house were examined and the problems of field-gluing were investigated. The field-glued joints on the second floor were bonded satisfactorily, but the joints on the first floor were not bonded at all. Temperature, relative humidity, moisture contents of floors and deterioration of nails on the first floor were not different from those on the second floor. This indicated that the cause of poor bonding properties of the joints on the first floor was not chemical deterioration of the adhesive used in floors. On

the other hand, the glue lines of the joints on the first floor were remarkably thicker than those on the second floor, and widths of glue-bead spreads by nailing on the first floor were remarkably narrower than those on the second floor. These results indicated that the cause of poor bonding properties of the joints on the first floor was an absence of good bond techniques, such as the lack of spread and pressure intensity in pressing. Therefore, the following important problem was revealed as to nail gluing.

"Thick glue-lines may be formed by nail gluing. Thick glue-lines cause narrow spreading of glue-beads and poor bonding properties."

In the case of using the glued-timber beams in service, it is necessary to assure the bonding property and performance of the glued-timber beams. In the second place, in order to obtain the basic data for the development of the assuring method of the performance of the glued-timber beams, the statuses of glue lines were examined for glued-timber beams subjected to bending tests, and the relations between the widths of glue-bead spreads and bending strengths were investigated for the glued-timber beams built-up from green and square Sugi timber. The following results were obtained.

"The glued-timber beams had satisfactory bending strengths and ruptured by bending stresses in bending tests when the widths of glue spreads were more than 61 % of the widths of the beams. However, when the glue-spread widths became less than 60 % of the beam widths, the beams tended to rupture at the glue lines by horizontal shearing stresses and showed lower bending strengths. Therefore, the bonding

property and performance of the glued-timber beams were predictable from the glue-line formations."

4) The formations of glue lines and bonding properties in filed gluing

In Chapter 6, glue-line formations and bonding properties in field gluing, which were important problems of field-gluing as shown in previous Chapter, were investigated.

Field-glued floors are fabricated by using nailing for pressing. In the first place, the glue-line formation and bonding properties of an elastomer-based adhesive were investigated under various pressing conditions including nailing. Clarified were the relation between spreads, thicknesses of glue lines and widths of glue spreads, the relation between pressing conditions and glue-line formations, and the relation between glue-line formations and bonding properties. The following important conclusions were also obtained.

"Glue-line formations of a bead of elastomer-based adhesive were affected by not only pressing forces but also pressing times."

"The elastomer-based adhesive used in this study forms uneven and net-shaped glue lines. Both bond strengths and the widths of glue-bead spreads decreased, as glue lines became thicker, and the maximum shearing loads dramatically decreased. The elastomer-based adhesive used in this study had a poor gap-filling ability."

As mentioned above, maximum shearing loads of the joints bonded with an elastomer-based adhesive for gluing

plywood floors dramatically decreased as the glue lines became thicker. In order to achieve a satisfactory bonding in nail-gluing, adhesives must have a gap-filling ability better than the elastomer-based adhesive. In the second place, several commercial adhesives were investigated on the suitability for nail-gluing. The following conclusions were obtained.

"In order to attain satisfactory bonding when thick glue-lines may be formed by nail gluing, adhesives must have the following requirements; to be extruded as a bead; to have high solid contents; and not to shrink when curing. An One-part polyurethane adhesive had the satisfactory requirements."

"When a single bead of one-part polyurethane adhesive is extruded on lumber and plywood bonded to it by nailing, the bond strength of this joints was constant even though the glue lines became thick and the maximum shearing loads of the joints was proportional to the areas of glue-bead spreads after nailing and curing. This means that the bond strength of the joints bonded with one-part polyurethane adhesive is not affected by press conditions which affect the glue line formations, and that bonding properties of the joints are predictable from the areas of glue-bead spreads."

In the third place, in order to improve the reliability of glued-timber beams, glue-line formations and bonding properties were investigated for Sugi lumber-to-lumber joints bonded with one-part polyurethane adhesive using bolts. At the positions near bolts, satisfactory glue-lines were formed. However, glue lines became thicker and glue-bead spreads became narrower at the positions apart

from bolts. The following important conclusion was also obtained.

"The maximum shearing loads were proportional to the areas of glue-bead spreads for the Sugi lumber-to-lumber joints bonded with beads of one-part polyurethane adhesive as well as for the plywood-to-lumber joints. Therefore, the bonding properties are predictable from the area of glue-beads spreads for the joints bonded with beads of one-part polyurethane adhesive."

As mentioned above, the maximum shearing loads are proportional to the areas of glue spreads for the joints bonded with one-part polyurethane adhesive. If the glue line formations are predicted, the bonding properties of the joints are predicable. In the fourth place, the glue-line formations of the polyurethane adhesive were investigated using dead loads to clarify the variables affecting the glue-line formations. Then the correlations among pressing forces, spreads and the thicknesses of glue lines were obtained.

Based on the results of the glue-line formations using dead loads, in the fifth place, the prediction method of the glue-line formations by nailing was investigated for plywood-to-lumber joints. The following results were obtained.

"When lumbars and plywood were bonded by nailing with a bead of one-part polyurethane adhesive, the processes of the glue-line formations were as follows: at first two adherents contacted and the thicknesses of the glue lines became 0 mm at the nailing points; the plywood was bent by the viscosity resistance of the glue between nailing points;

the recovering force of the plywood acts on the glue at the midpoints between nails and made the glue flow; the thickness of glue line and recovering force of the plywood decreased; when the recovering force reached the force corresponding to the yield value of the glue, the flow of the glue was stopped and glue-line formation was determined."

"The glue-line formations of plywood-to-lumber joints nailed-glued with a single bead of adhesive were mainly affected by spreads, the bending stiffnesses of plywood and nail spacings when viscosity changes of glue were constant. The glue-line formations were predictable from those variables."

5) Possibility of non-destructive inspection of bonding properties of the field-glued joints.

If the bonding properties of the joints could be measured by non-destructive methods, it would be possible to improve the reliability of the field-glued joints. In Chapter 7, non-destructive inspection methods of bonding properties were investigated.

In order to develop a non-destructive inspection method for bonding properties using ultrasound, in the first place, the relations between bonding properties and ultrasonic transit times were investigated for the nailed-glued plywood-to-lumber joints with several commercial adhesives. The joints which had longer ultrasonic transit times than well-bonded joints had poor bonding properties and defects in the glue lines, where adhesives did not contact one of the adherents. It was considered that the cause of longer

ultrasonic transit times of poorly bonded joints was that a ultrasonic pulse could not transit by the shortest time-based course but by a roundabout course because of the defects in the glue line. Therefore, it is possible to detect the defects in the glue lines by measuring ultrasonic transit times of the joints if the defects have a certain size and exist in the shortest time-based course between a ultrasonic transducer and a censor.

The preceding studies indicated that the maximum shearing loads were proportional to the areas of glue-bead spreads in joints bonded with beads of one-part polyurethane adhesive. If the widths of the glue-bead spreads of the joints can be measured by a non-destructive method, the mechanical properties of the joints are predictable. In the second place, in order to develop a non-destructive measuring method of the widths of glue-bead spreads for field-glued plywood-to-lumber floors, the relationships between the widths of glue-bead spreads and natural frequencies of plywood were investigated. The following results were obtained.

"The natural frequencies of the plywoods in floor models decreased as the distances between two joists became longer. When the distances between two joists were constant and the widths of glue-bead spread narrowed, the natural frequencies of the plywoods decreased because of the increase of the length of practical span between the two joists. The natural frequencies of the plywoods changed from 245-250 Hz to 190-203 Hz when the widths of glue-bead spread changed from 43 mm to 12 mm. Therefore, it is possible to distinguish the joint having a poor glue-bead

spread and a poor bonding property by measuring the natural frequency of the plywood between the adjacent two joists."

"When the widths of glue-bead spreads of a full-sized floor became narrow, each peak due to the bending vibration of the plywood between the adjacent two joists in the frequency response curves shifted downward. It may be possible to distinguish a floor having a poor glue-bead spread by analyzing the frequency response curves of the plywood bending vibration."

In the third place, a non-destructive measuring method of widths of glue-bead spreads in glued-timber beams were investigated by inserting a thickness gage into the glue lines. The following results were obtained.

"The widths of glue-bead spreads in the glued-timber beams could be measured precisely by inserting thickness gage into the glue lines. When a double bead of the adhesive was applied, the precision obtained depended on the precision of the spreading position."

In this study, bonding properties of adhesives for field gluing and the effects of bonding conditions on bonding properties were clarified, the principal problem of the field-gluing was solved, one-part polyurethane adhesives were selected in order to remove the problems, and how to use the adhesives and how to inspect the bonding property of the joints bonded with the adhesives were suggested. The satisfactory pressing and formations of glue lines are very important to obtain the reliable field-glued joints as well as the suitability of the adhesive for field-gluing. The results in this study will contribute to the development of new structural field-gluing techniques.

