

超音波伝播速度の測定による集成材接着はく離の検出*1

柳川 靖夫

集成材の接着はく離を非破壊的に検出する技術を検討した。まず、木材中の超音波伝播速度（伝播速度）に影響を及ぼす因子として、密度、木理、および含水率について調べた。次に、等級の異なるスギ小断面集成材を作製し、集成材の等級が伝播速度に及ぼす影響について、測定方向別に調べた。また、人為的に接着はく離を設けたスギの小断面集成材および中断面集成材を作製し、接着はく離の幅および位置、集成材の断面寸法、および測定方法と伝播速度との関係を調べた。その結果、木材密度と伝播速度との間に明確な相関は認められず、伝播速度は、接線方向、半径方向、繊維方向の順に増加し、含水率が増加すると低下した。集成材等級と伝播速度との関係は、幅方向および厚さ方向で不明確で、曲げヤング係数の高い集成材が必ずしも大きい伝播速度を示さなかった。繊維方向の伝播速度は、曲げヤング係数の高い集成材ほど大きかった。接着はく離が一定幅以上であれば伝播速度は低下し、伝播速度が低下する接着はく離の幅は、接着はく離の位置、超音波周波数等の測定条件、および集成材断面の大きさにより異なっていた。

1. はじめに

今後の集成材の品質管理上の課題として、接着はく離の検査が挙げられる。現在、集成材の接着はく離の検査は目視によるしかなく、製造ラインの高速化および製造量の増加に伴い、きわめて少量の製品しか検査されていないものと考えられる。他の木質材料を鑑みた場合、同様に接着はく離の発生が問題とされる合板では、超音波を使用した非破壊の接着はく離検出機が実用化され、製品の全数検査が行われている。その方法としては、一つは合板に加力した際に発生する音波を検出する手法¹⁾（アコースティック・エミッション、AE）であり、もう一つは超音波を合板に透過させて音圧の変化を測定する手法である²⁾。合板や単板積層材の製造では、この他に単板の超音波伝播速度を測定して単板を等級区分する装置が実用化されている³⁾。今後、集成材製造においても接着はく離の非破壊検査技術が必要とされるものと予想され、合板と同様に超音波を使用した測定は有望な手法と考えられる。

そこで、本研究では超音波の伝播速度（以下伝播速度）を測定して集成材の接着はく離を検出することを試みた。超音波を使用した非破壊検査は、RC建築物等で実用化されている。木材に関しては、伝播速度と木材物性との関係は以前より研究されているもの^{5,9)}、接着に応用した研究は少ない^{10,11)}。本研究では、まず、木材の密度、含水率、および木理が伝播速度に及ぼす影響について調べた。次に、スギ4プライ小断面

集成材を作製し、集成材等級と伝播速度、および超音波の伝播方向と伝播速度との関係を調べた。更に、スギ4プライ小断面集成材およびスギ10プライ中断面集成材の一部に接着はく離を人為的に作製し、接着はく離の幅や位置、および測定方法と伝播速度との関係を検討した。

2. 材料および方法

2.1 木材中の伝播速度

2.1.1 密度と伝播速度

スギ、ヒノキ、スプルー、オウシュウアカマツ、およびベイマツの無欠点あるいは節の少ない含水率11～13%の気乾ラミナを、幅150mm、厚さ24mm、長さ1000mmに調製した。各ラミナは概ね板目材であったものの、ヒノキは芯持ちラミナが含まれていた。図1に示すとおり、幅方向および厚さ方向とも100mm間隔で、1枚当たりそれぞれ9カ所で伝播速度を測定した。測定には（株）秋田エスケイ製のDoctor Woodを使用し、発信周波数は70kHzであった。伝播時間を1カ所あたり3回測定し、伝播時間を幅または厚さで除して伝播速度を算出し、3回の平均値を1カ所の伝播速度とした。更に、9カ所の測定値の平均値を算出してラミナの伝播速度とした。測定ラミナ数は、スギ7枚、ヒノキ6枚、スプルー5枚、オウシュウアカマツ3枚、ベイマツ8枚であった。

*1：本研究の一部は第64回日本木材学会年次大会（松山市）において発表した。

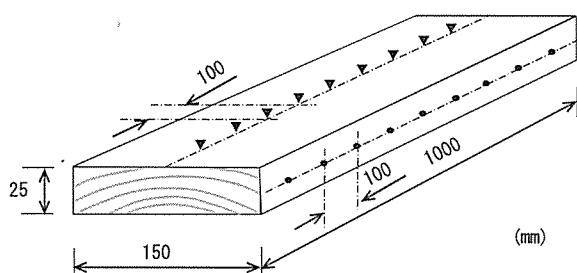


図1 ラミナでの方向別超音波伝播速度の測定
●：幅方向測定でのセンサー位置、
▼：厚さ方向測定でのセンサー位置

2.1.2 含水率と伝播速度

幅 102mm、厚さ 107mm、長さ 1000mm のスギ 4 プライ同一等級小断面集成材を、レゾルシノール樹脂接着剤（アイカ工業（株）製 PR10、以下 PRF とする）で作製し、長さ 100mm の試験片を 6 個採取した。これら試験片を、直径 240mm のデシケータを使用して、20℃ 雰囲気中において以下の 6 条件で 1 個ずつ調湿した。

- ①酢酸カリウム飽和水溶液（相対湿度 22.8%、20℃ 時平衡含水率 5%）
- ②硫酸水素ナトリウム飽和水溶液（相対湿度 52%、同 9%）
- ③塩化ナトリウム飽和水溶液（相対湿度 75% 同 14%）
- ④塩化カリウム飽和水溶液（相対湿度 85% 同 18%）
- ⑤硫酸カルシウム飽和水溶液（相対湿度 98% 同 29%）
- ⑥硫酸銅

①～⑤の飽和水溶液を 300ml の時計皿に入れてデシケータ底部に静置し、試験片は底部とのしきり板の上に静置した。⑥では、より低い相対湿度で調湿を行うため、①～⑤と同じ大きさのデシケータの底部に硫酸銅粒を入れ、同様に試験片を静置して調湿を行った。なお、⑥の調湿後含水率の実測値は 4.6% であった。

調湿期間は、①～⑤は 20、30、60 日、および 120 日で、⑥は 120 日とした。所定の調湿期間で、図 2 に示すとおり、幅方向および厚さ方向の伝播速度を 2.1.1 と同様に測定した。その際に試験片重量を測定し、調湿 120 日の測定終了後に試験片の全乾重量を求め、各調湿期間での含水率を算出した。

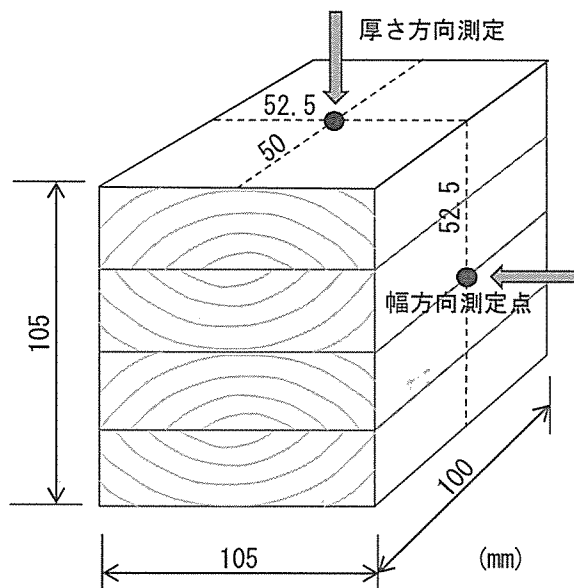


図2 含水率変化に使用した試験片と超音波伝播速度の測定位置

2.1.3 集成材等級と伝播速度

無欠点のスギ気乾ラミナ（含水率 13%）の曲げヤング係数を測定して等級区分し、集成材の日本農林規格で規定される、E65、E75、E85、および E105 のスギ 4 プライ同一等級小断面集成材を作製した。接着剤には PRF を使用し、仕上がり寸法は幅 105mm、厚さ 105mm、長さ 500mm とした。幅方向、厚さ方向、および長さ方向について、2.1.1 と同様にして伝播速度を求めた。なお、測定位置は図 3 に示すとおりとした。

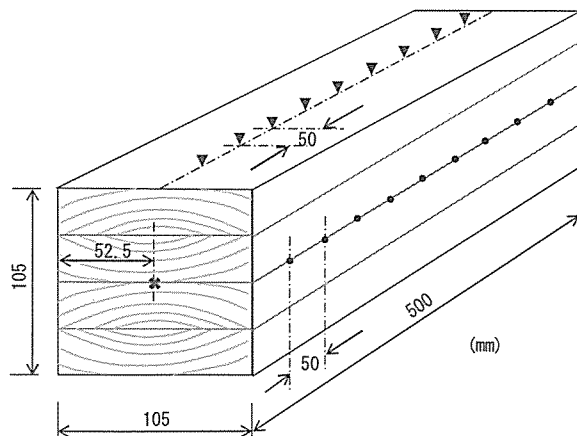


図3 集成材での方向別超音波伝播速度の測定
●：幅方向測定でのセンサー位置、▼：厚さ方向でのセンサー位置、×：長さ方向測定でのセンサー位置。

2.2 接着はく離と伝播速度

2.2.1 小断面集成材

2.1.3と同様にスギ無欠点気乾ラミナを使用して、2.1.3と同寸法のスギ4プライ同一等級小断面集成材を、PRFを使用して作製した。集成材の等級はE75で、図4に示すとおり2層目接着層に接着はく離を作製した。その手法は以下のとおりとした。

- ①ラミナと同寸法の0.5mm厚スギ単板を調製し、その一部を切り欠く。
- ②単板に接着剤を塗布した後、ラミナ間に挿入する。
- ③単板の切り欠き部分に0.4mm厚のテフロンシートを挿入して圧縮する。
- ④接着剤硬化後にテフロンシートを除去する。

接着はく離の位置は、図5に示すとおり長さ方向の端部および中央部とし、はく離長さはいずれも250mmとした。接着はく離の幅（以下はく離幅）は、端部はく離は5、10、15、20、30、40、および50mmとし、中央部はく離は5、10、15、20、30、および40mmと

した。

伝播時間の測定は厚さ方向のみとし、図5に示すとおり、接着層を含む面にセンサーを配置した測定（以下側面測定とする）、および接着層を上下より挟んでセンサーを配置した測定（以下対面測定とする）を行った。測定には、Doctor Wood および PUNDIT 7 (CNS Farnell Ltd. 製) を使用した。

Doctor Wood では側面測定および対面測定を行い、側面測定でのセンサー中心間距離は82mmとし、接着はく離を含む接着層から等距離の位置に2つのセンサーを配置した。対面測定では、図5に示すとおりセンサー中心を集成材側面から12.5mm および 20mm とした。伝播速度の算出は2.1.1と同様に行った。

PUNDIT 7は対面測定のみとし、センサー中心は集成材側面より12mmとした。測定条件は、発信周波数200kHz、発信電圧1000V、および受信周波数を10Hzとした。モニター表示が変動しなくなった時点での数値を伝播時間とし、これを集成材厚さで除して伝播速度を算出した。測定は1回のみとした。

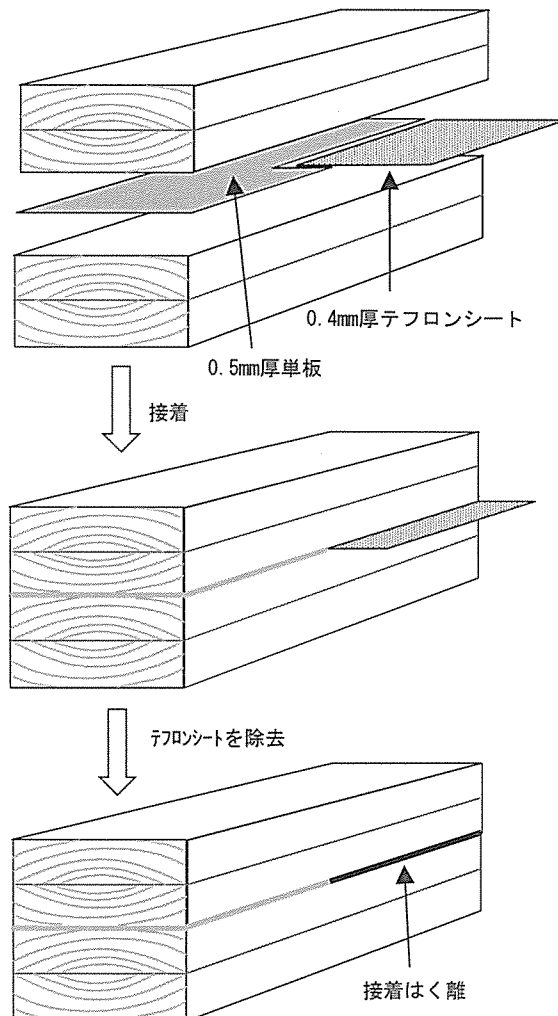


図4 集成材での接着はく離の作製方法

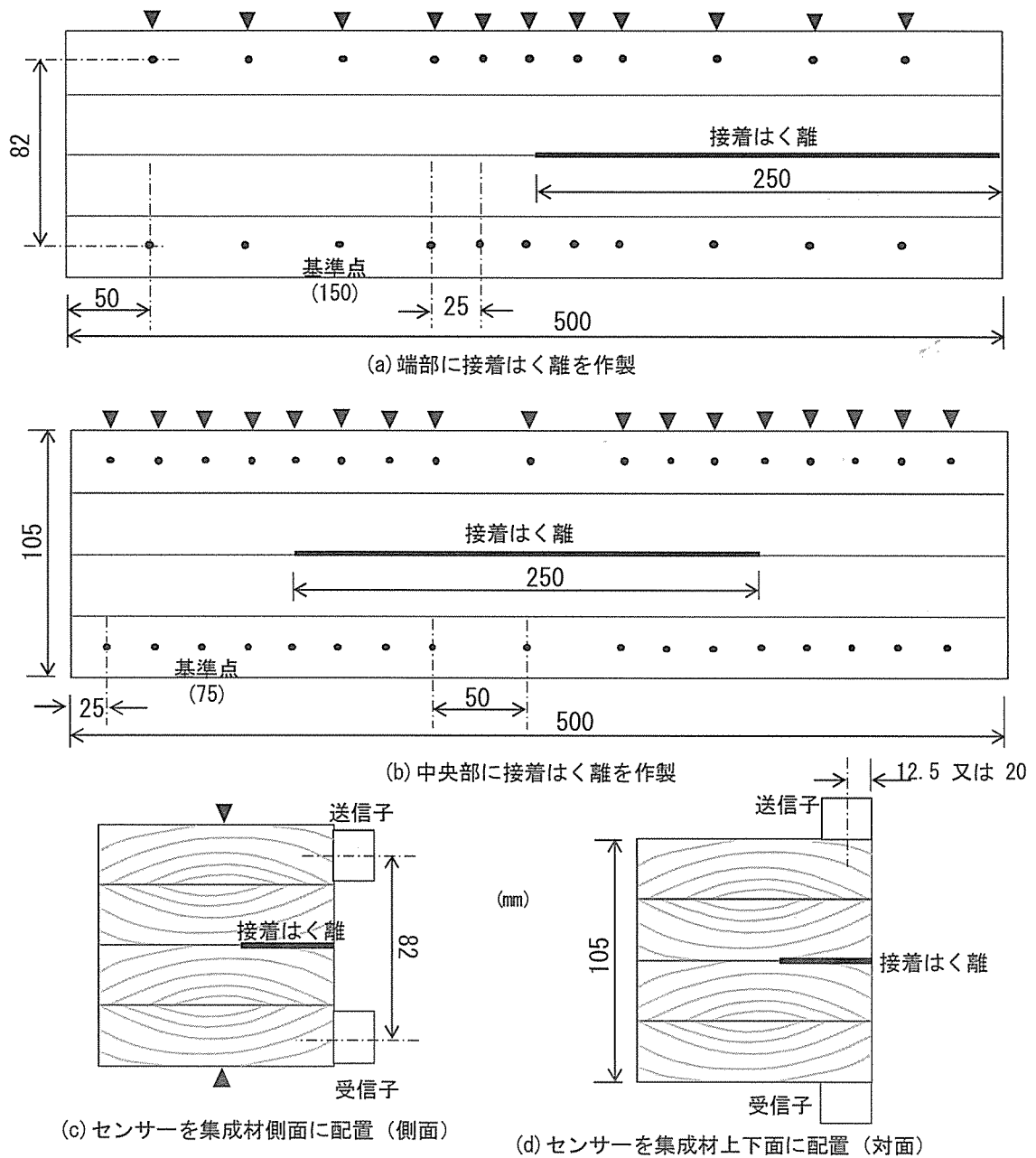


図5 小断面集成材での超音波伝播速度の測定方法およびセンサーの配置

●：センサー側面での測定位置、▼：センサー対面での測定位置。

2.2.2 中断面集成材

2.1.3と同様にスギ無欠点気乾ラミナを使用して、スギ10プライ同一等級中断面集成材を、PRFを使用して作製した。等級はE75で、2.2.1と同様にして5層目接着層にはく離を作製した。長さ方向における接着はく離の位置は端部および中央部とし、はく離長さはいずれも250mmで、はく離幅は20mmおよび40mmとした。測定にはDoctor WoodおよびPUNDIT 7を使用した。Doctor Woodは側面測定のみとし、セン

サーの中心間距離は、図6に示すとおり53、78、105、131、158、および184mmとした。長さ方向における測定間隔は2.2.1の小断面集成材と同じで、伝播速度は2.1.1と同様にして求めた。

PUNDIT 7は対面測定のみを行い、センサー中心は集成材側面から12mmとし、長さ方向における測定間隔および伝播速度の算出は2.2.1の小断面集成材と同様とした。

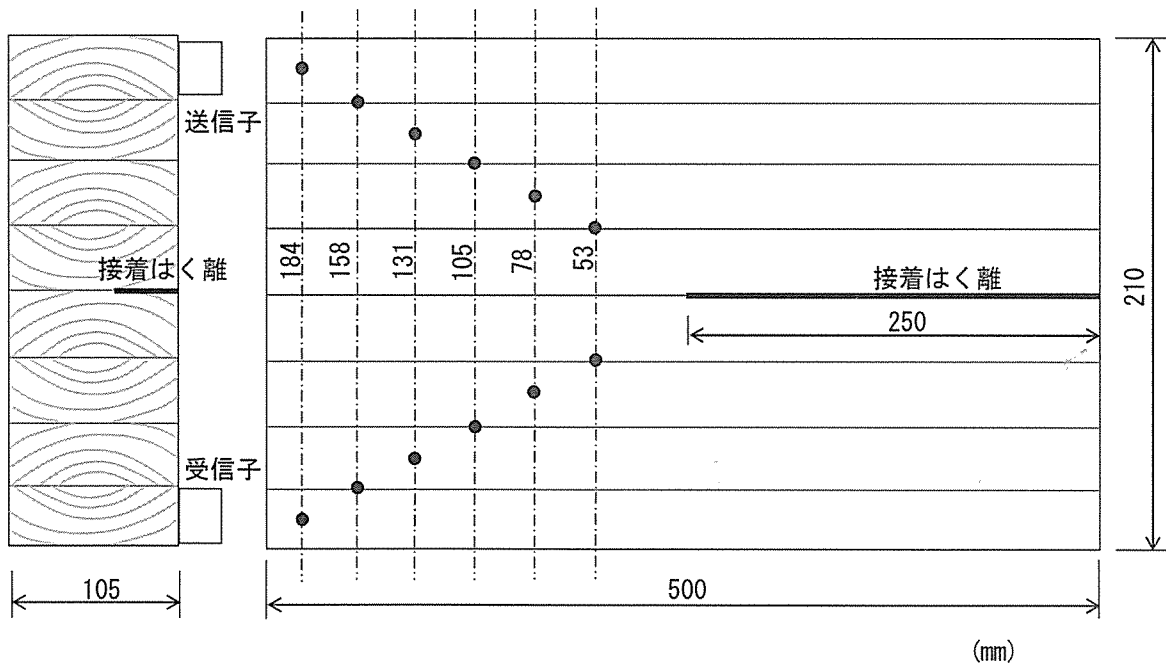


図6 中断面集成材の超音波伝播速度の測定におけるセンサー配置およびセンサー間距離

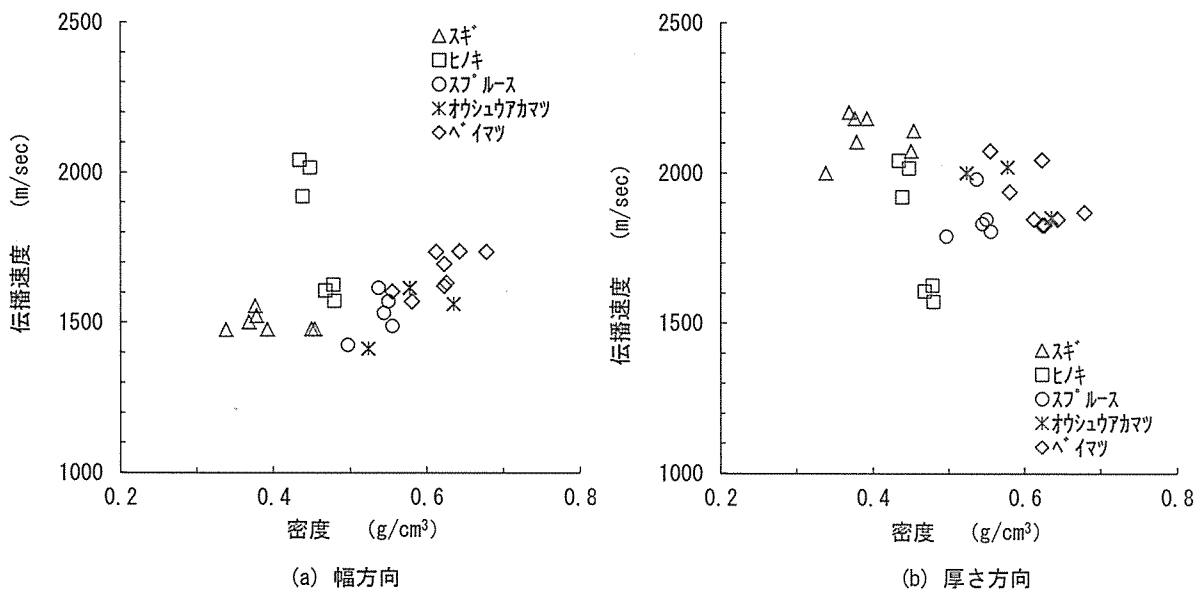


図7 樹種別の超音波伝播速度と密度との関係

3. 結果と考察

3.1 木材中の伝播速度

3.1.1 密度および木理と伝播速度

図7に、密度と伝播速度との関係を測定方向別に示す。

半径方向および接線方向では、密度が増加すると伝

播速度は大きくなることが報告されている⁹⁾。また、伝播速度は、繊維方向>半径方向>接線方向、であることが報告されている⁹⁾。図7(a)は幅方向の測定結果であり、密度が増加すると伝播速度は漸増する傾向が見られた。一部のヒノキラミナの伝播速度が大きかったのは、木理の影響と考えられる。すなわち、これらラミナは芯持ちラミナであったため、幅方向測定での

超音波の伝播方向は半径方向であった。そのため、他の同密度のラミナより伝播速度が大きかったものと推測される。一方、他のラミナは板目材であり、超音波の伝播方向は接線方向と見なせた。

図7(b)は厚さ方向の測定結果であり、幅方向よりも相対的に伝播速度は大きかった。ヒノキで伝播速度が低かったラミナは、芯持ちラミナであった。これらラミナの芯は幅方向の中央に位置しておらず、また、厚さ方向の測定は幅方向の中央で行ったことから、超音波の伝播方向は接線方向であった。そのため、他の同密度ラミナより伝播速度が低かったものと考えられる。

3.1.2 含水率と伝播速度

図8に、含水率と伝播速度との関係を測定方向別に示す。縦軸は、調湿前の伝播速度に対する調湿後の伝播速度の比（対初期値比）である。

既報⁹⁾では、含水率が増加すると伝播速度は低下することが報告されている。本研究でも、含水率が増加すると幅方向（図8(a)）および厚さ方向（図8(b)）とも伝播速度は低下し、幅方向の低下は厚さ方向よりも大きかった。幅方向および厚さ方向とも、含水率と伝播速度の間には相関が認められた。JASで規定される集成材の含水率、すなわち8～15%の範囲での伝播速度の対初期値比を回帰式より算出すると、幅方向は0.94～1.06であり、厚さ方向では0.95～1.03であった。したがって、集成材では、含水率に起因する伝播速度の変動は最大で10%前後と予測される。

3.1.3 集成材等級と伝播速度

表1に、各等級の集成材の伝播速度を測定方向別に示す。

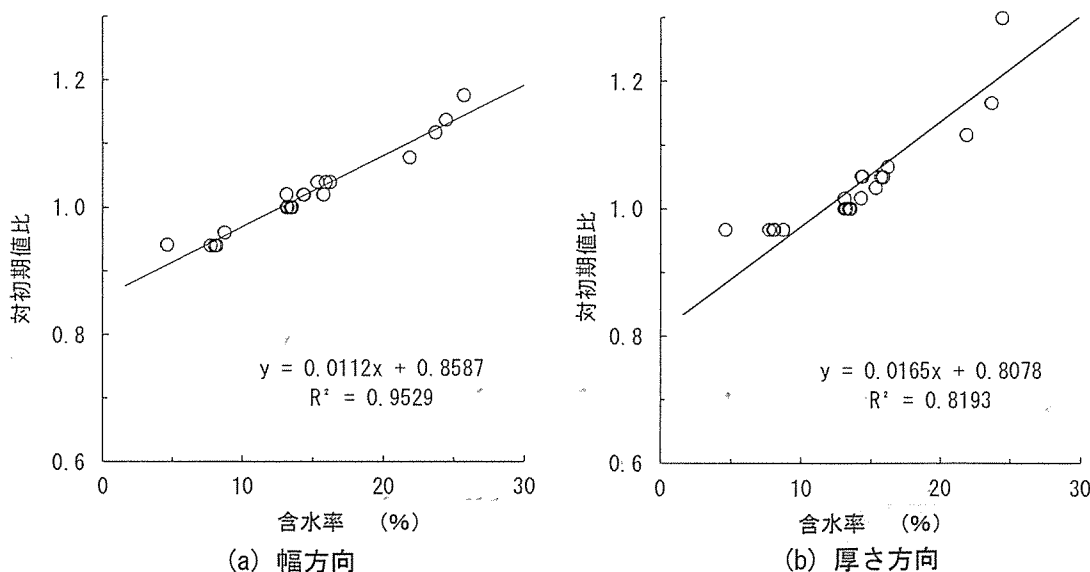


図8 含水率と超音波伝播速度との関係 注：対初期値比：調湿前の伝播速度を基準とした比。

幅方向および厚さ方向では、集成材等級と伝播速度との間に正の相関は見られなかった。例えば、厚さ方向の伝播速度は、集成材等級が上位になるほど、すなわち曲げヤング係数が大きくなると低下した。一方、長さ方向の伝播速度は、集成材等級が上位になると大きくなった。これらの結果は、既報⁹⁾と同じであった。

3.2 接着はく離と伝播速度

3.2.1 小断面集成材

図9(a)～(f)に、小断面集成材の測定結果を示す。使用機器はいずれもDoctor Woodで、図9(a)および(b)は側面測定の結果であり、(a)は端部はく離、(b)は中央部はく離である。図9(c)および(d)は端部はく離の対面測定の結果で、(c)はセンサー中心が集成材側面より12.5mmで、(d)は20mmである。図9(e)および(f)は中央部はく離の対面測定の結果で、(e)はセンサー中心が集成材側面より12.5mmであり、(f)は20mmの結果である。

図9(a)に示すとおり、端部はく離の側面測定では、はく離幅が10mm以上で伝播速度が低下した。はく離幅が15mm、20mmおよび30mmでは、伝播速度の低下は類似していた。はく離幅が40mmおよび50mmでは、試験体の端部付近で伝播速度が顕著に低下したものの、接着はく離の境界付近、すなわち横軸の測定位置250mmから300mmでは、伝播速度の低下は顕著ではなかった。これは、接着はく離の一部が接触し、超音波が伝播したためと推測される。すなわち、はく離幅が広がると接着はく離は閉じる傾向が見られ、はく離部分のラミナが部分的に接触していたため超音波が伝播し、伝播速度は大きく低下しなかったものと推測される。

表1 集成材等級別の超音波伝播速度

集成材等級	E65	E75	E85	E105
測定方向	幅			
平均値 (m/sec)	1387	1304	1422	1359
標準偏差	10	17	7	11
変動係数 (%)	0.7	1.3	0.5	0.8
測定方向	厚さ			
平均値 (m/sec)	1636	1620	1547	1528
標準偏差	35	29	12	12
変動係数 (%)	2.1	1.8	0.8	0.8
測定方向	長さ			
平均値 (m/sec)	4973	5129	5204	5536
標準偏差	88	165	160	71
変動係数 (%)	1.8	3.2	3.1	1.3

中央部はく離の側面測定では、図9 (b) に示すとおりはく離幅15mm以上で伝播速度の低下が認められ、はく離幅が20mm以上では、伝播速度の低下は類似していた。また、いずれのはく離幅でもはく離境界から伝播速度は漸減し、はく離の長さ方向中央部分、すなわち測定位置250mm付近で伝播速度は最低値を示した。

はく離幅30mmおよび40mmの伝播速度の低下は類似しており、いずれもはく離幅15mmおよび20mmよりも伝播速度の低下は小さかった。

これは、先述したとおり接着はく離が部分的に接触して超音波が伝播したためと推測される。

対面測定では、接着はく離における伝播速度の低下は相対的に小さかった。センサー中心を集成材側面より12.5mmとした端部はく離では、図9 (c) に示すとおりはく離幅20mm以上で伝播速度は低下したものの、はく離幅が30mm以上であっても低下は小さかった。センサー中心が集成材側面より20mmでは、伝播速度の低下は更に小さく、図9 (d) に示すとおりはく離幅50mmのみで明確に低下が認められた。中央部はく離の対面測定では、図9 (e) および (f) に示すとおり、センサー中心が集成材側面より12.5mmおよび20mmとも、はく離幅40mmのみで伝播速度の低下が認められ、低下は12.5mmの方がわずかに大きかった。

以上の結果より、Doctor Woodを使用した測定では、側面測定の方が接着はく離の検出感度は高く、また、端部はく離の方が検出し易いものと思われる。

一方、PUNDIT 7は側面測定が不可能であったため、対面測定のみとした。端部はく離では、図10 (a) に示すとおりはく離幅15mm以上で伝播速度の低下が生じ、概ねはく離幅の増加とともに伝播速度は低下した。また、図10 (b) に示す中央部はく離では、はく離

幅30mm以上で伝播速度は顕著に低下した。PUNDIT 7での測定では、センサー中心部と集成材側面との距離は12mmであり、Doctor Woodの対面測定では12.5mmであった。これは、発信周波数の相違によるものと推測される。すなわち、PUNDIT 7の発信周波数は200kHzであり、Doctor Woodは70kHzであった。超音波周波数が高いほどセンサー直径は小さいため、発射された超音波の拡散は少なく方向性は高い。そのため、PUNDIT 7の対面測定では、一定以上のはく離幅であれば伝播速度は顕著に低下するものと考えられる。

3.2.2 中断面集成材

図11 (a) ~ (d) に、中断面集成材の結果を示す。いずれも、Doctor Woodの側面測定の結果である。図11の(a) および (b) は端部はく離で、(a) のはく離幅は20mmで (b) が40mmである。(c) および (d) は中央部はく離の結果で、(c) のはく離幅は20mmで (d) が40mmである。なお、Doctor Woodの対面測定での伝播速度の低下はわずかであったため、結果は省略した。

図11 (a) に示すとおり端部はく離では、はく離幅が20mmではセンサー中心間距離が狭くなると伝播速度の低下が認められ、センサー中心間距離が105mm以下では顕著に低下した。一方、はく離幅が40mmではセンサー中心間距離が184mm以下で伝播速度が顕著に低下した。

中央部はく離も端部はく離と同様の傾向が見られ、図11 (c) のはく離幅20mmでは、センサー中心間距離が131mm以下で伝播速度が低下した。40mm幅では、センサー中心間距離が184mm以下で伝播速度は低下した。

以上のとおり、Doctor Woodによる中断面集成材の側面測定では、接着はく離の検出感度はセンサー中心間距離および接着はく離の幅により変化した。そのため、検出目標とするはく離幅によりセンサー中心間距離を決定する必要があるものと考えられる。

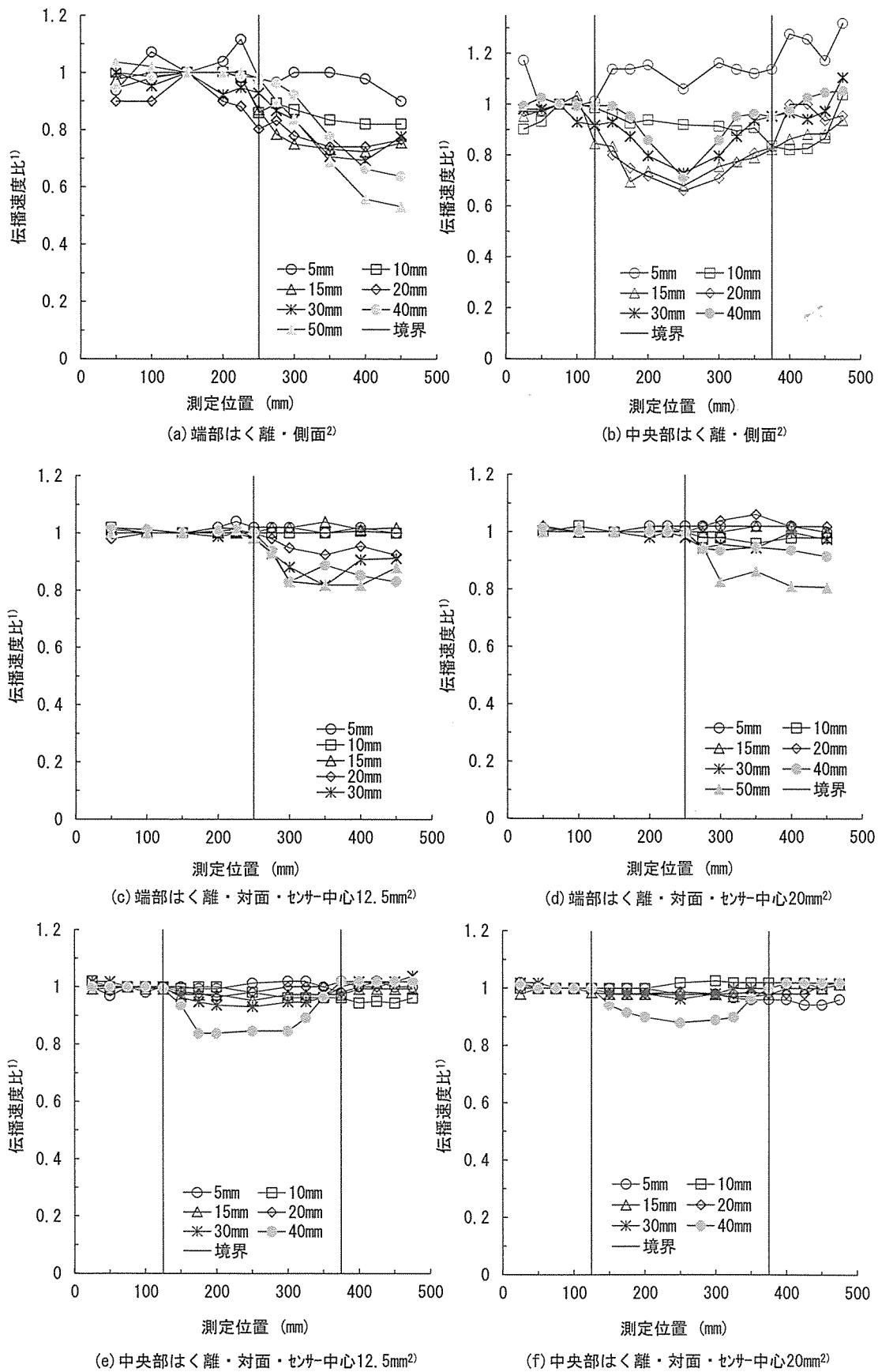
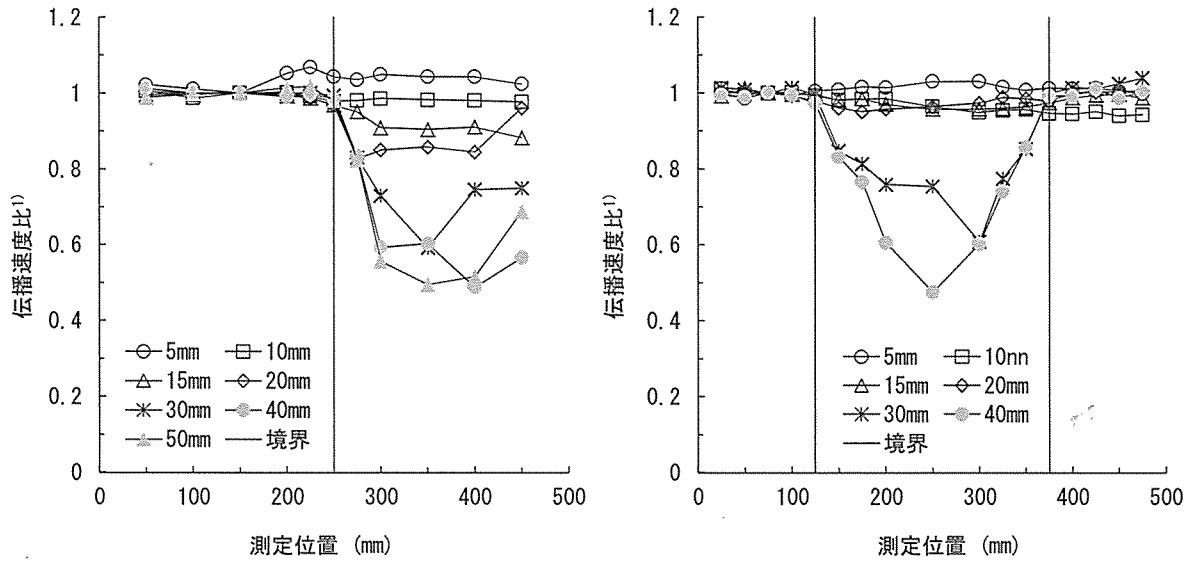


図9 小断面集成材での接着はく離の幅と超音波伝播速度との関係(1)

注：Doctor Woodを使用。¹)：端部はく離は測定位置150mmを基準とし、中央部はく離は測定位置75mmを基準とした伝播速度の比。²)：図5を参照。

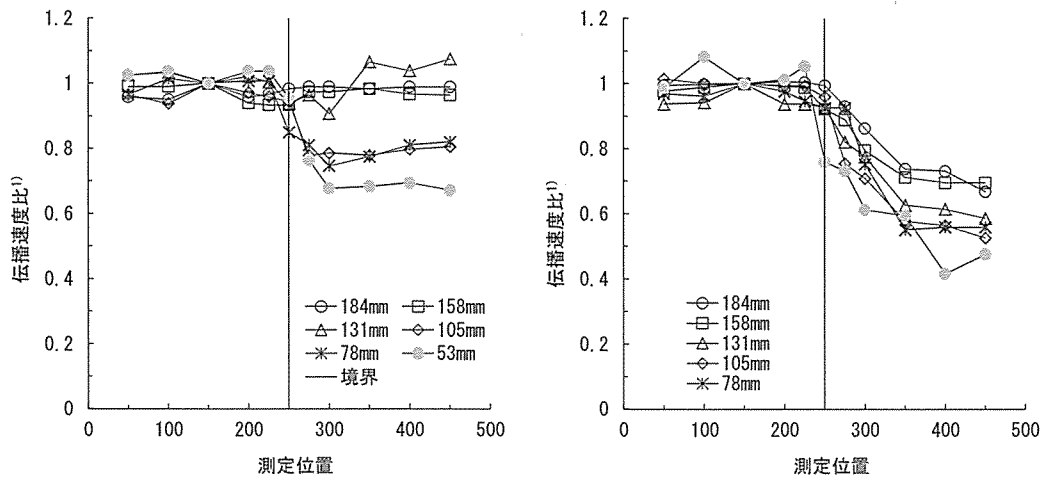


(a) 端部はく離・対面・センサー中心12mm²⁾

(b) 中央部はく離・対面・センサー中心12mm²⁾

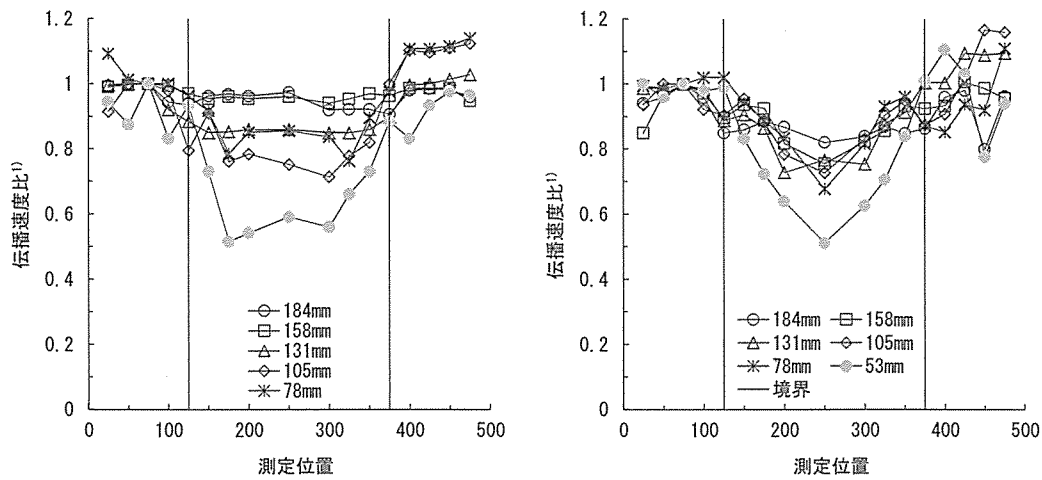
図10 小断面集成材での接着はく離の幅と超音波伝播速度との関係(2)

注：PUNDIT 7を使用。^{1), 2)}：図9を参照。



(a) 20mm幅端部はく離・側面²⁾

(b) 40mm幅端部はく離・側面²⁾



(c) 20mm幅中央部はく離・側面²⁾

(d) 40mm幅中央部はく離・側面²⁾

図11 中断面集成材でのセンサー間距離と超音波伝播速度との関係

注：Doctor Woodを使用。^{1), 2)}：図9を参照。

図 12 に、PUNDIT 7 の対面測定の結果を示す。図 12 (a) は端部はく離の結果であり、図 12 (b) は中央部はく離の結果である。

端部はく離のはく離幅 20mm では伝播速度はほとんど低下しなかったのに対し、はく離幅 40mm では顕著に低下した。これは、3.2.1 で記したとおり超音波の方向性が高いことが原因であると推測される。すなわち、PUNDIT 7 でのセンサー中心と集成材側面との距離は 12mm であり、センサーの直径は約 20mm であった。はく離幅 20mm はセンサーの直径とほぼ等しく、超音波の伝播はほとんど阻害されなかった。しかし、はく離幅 40mm はセンサー直径を上回るため、超音波の方向性が高かったことと相まって伝播が阻害されたものと推測される。PUNDIT 7 を使用した中央部はく離の対面測定では、はく離幅 20mm の伝播速度の低下はわずかであり、はく離幅 40mm では、接着はく離の境界から 25 ~ 50mm 以上離れると超音波は伝播しなかった。端部はく離の 40mm 幅では伝播し、中央部はく離の 40mm 幅では伝播しなかった理由は不明である。しかし、高い超音波周波数を使用すると、一定厚さ以下の集成材であれば、対面測定により大きな接着はく離を精度良く検出できるものと思われる。

4. 結論

人為的に接着はく離を設けた集成材を作製し、2 種類の装置を使用して超音波伝播速度（伝播速度）を測定し、接着はく離を非破壊的に検出することを試みた。まず、木材や集成材における伝播速度の変化を調べるため、密度、木理、含水率および集成材等級が伝播速度に及ぼす影響を調べた。その結果、接線方向では密度の増加とともに伝播速度が漸増する傾向が見られ、半径方向では、密度が増加しても伝播速度は増加しなかった。含水率の増加に伴い伝播速度は低下し、接線方向と半径方向とでは低下の大きさが異なっていた。集成材等級が上位、すなわち曲げヤング係数が高くなると、長さ方向の伝播速度は増加したものの、幅方向および厚さ方向の伝播速度は増加しなかった。小断面集成材を使用した測定では、超音波の発信子および受信子の位置、接着はく離の位置、接着はく離の幅、および超音波周波数により接着はく離の検出精度は変化した。中断面集成材でもほぼ同様の結果が得られ、超音波伝播速度を測定することにより、一定幅以上の接着はく離であれば検出可能であることが示された。

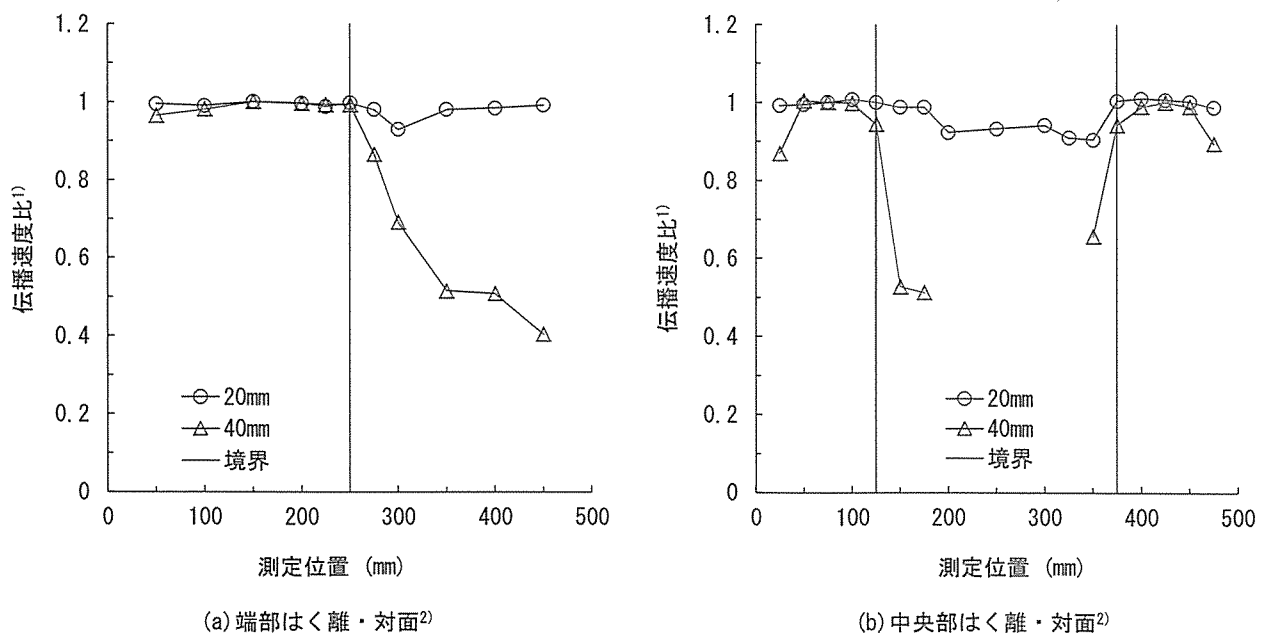


図 12 中断面集成材での接着はく離の幅と超音波伝播速度との関係

注:PUNDIT 7 を使用。^{1), 2)}: 図 9 を参照。

引用文献

- 1) 佐藤敬一：平成元年度科学研究費補助金 研究成果報告書“木材および木質材料の加工ならびに材料評価への AE の適用”，36-41(1990).
- 2) 佐藤敬一：平成2年度科学研究費補助金 研究成果報告書“AE法およびTDR法を用いた木質材料のオンライン品質管理システムの開発”，pp70(1991).
- 3) Nondestructively Inspect Material Integrity With An Airborne Ultrasonic Beam <http://www.ndt.net/article/1298/ndts/ndts.htm>. Accessed April 29, 2014
- 4) Logan J. D. : Proceedings Washington State University International Particleboard/Composite Materials Symposium “ Machine Sorting of Wood Veneer for Structural LVL Applications”, 34, 67-77(2000).
- 5) 角谷和男：木材研究, 34, 22-36(1965)
- 6) 酒井春江, 高木堅士郎：Mokuzai Gakkaishi, 39(7), 757-762(1993)
- 7) 川元スミレ：Mokuzai Gakkaishi, 40(7), 772-776(1994)
- 8) 三城昭義：Mokuzai Gakkaishi, 42(2), 211-215(1996)
- 9) 三城昭義：Mokuzai Gakkaishi, 42(9), 887-894(1996)
- 10) Frank C. Beall：Wood and Fiber Science, 21(3), 231-238(1989)
- 11) James P. Armstrong, David W. Patterson, John E. Sneckenberger, Jackson C. Mallory, Roy F. Pellerin：Forest Prod. J., 41(11/12), 61-66(1991)
(2014年4月16日受理)