

構造用集成材の変遷とその部材特性に関する近年の研究*

森 拓 郎**

The History of Glulam and Recent Researches on Structural Glulam Properties*

Takuro MORI**

(平成14年8月31日受理)

1. は じ め に

木質構造の技術の進歩はめざましく、従来の製材だけによる建築から、集成材・LVLなどのエンジニアードウッドを使った建築作品が増えてきている。これらのエンジニアードウッドは、戸建て住宅から3階建てなどの集合住宅、大空間建築へと様々な建築物に生かされてきている。現在、大空間木造建築の主流であるドーム建築に用いられているエンジニアードウッドの代表格が集成材である。ここで述べる集成材とは構造用集成材である。

集成材とは、丸太から挽き板（以下、構成材料としての挽き板をラミナと呼ぶ）を挽き、そのラミナを乾燥し、乾燥したラミナの繊維方向をそろえて積層接着することによって、所定の寸法にする木質材料である。作成方法の略図を図1に示す。集成材の特徴は、ラミナ製造時点で大きな欠点を除去・積層時点で欠点が分散されるため強度信頼性が向上する、ラミナ段階で十分に乾燥されるため寸法安定性が高い、断面構成が自由であり大断面材を工業的に生産することが出来る、燃焼時に表面を炭化層が覆い炭化速度を遅らせるため耐火性能も優れていることなどである。また、木としての特徴である美しい木目やしなやかさを残し、木ならではの吸脱湿などの性能も引き継いでいる。

さて、集成材の歴史をひもとくと以下のようになる²⁾。

最初に集成材が使われたのは、1804年にアメリカ・ニュージャージー州のデラウェア河に架けられたトレントブリッジであるという。また、建物としては1893年にスイスのバーゼルで開催された歌曲大会のオーデトリウムがスパン40mの3ヒンジ式アーチで建てられている。

現代的な集成材としては、ドイツのオットー・ヘツァルが1901年にスイスの特許を得ている。その後、第一次世界大戦による鋼材不足から、駅舎、工場、体育館などの集成材建築がドイツをはじめとするヨーロッパで建てられた。アメリカでは1920年代から発展し、1934年にはウィスコンシン州マジソンの林産研究所で湾曲集成材アーチの実験などが行われている。1940年代には、フェノールおよびレゾルシノール樹脂系の接着剤が開発され、構造材としての集成材の基礎が築かれた。

* 第57回木研公開講演会（平成14年5月17日）において講演した。

** 木質材料機能部門 構造機能分野 (Laboratory of Structure Function)

Key words : Glulam, The History of Glulam, Bending Strenght, Creep Behavior Hybrid Material

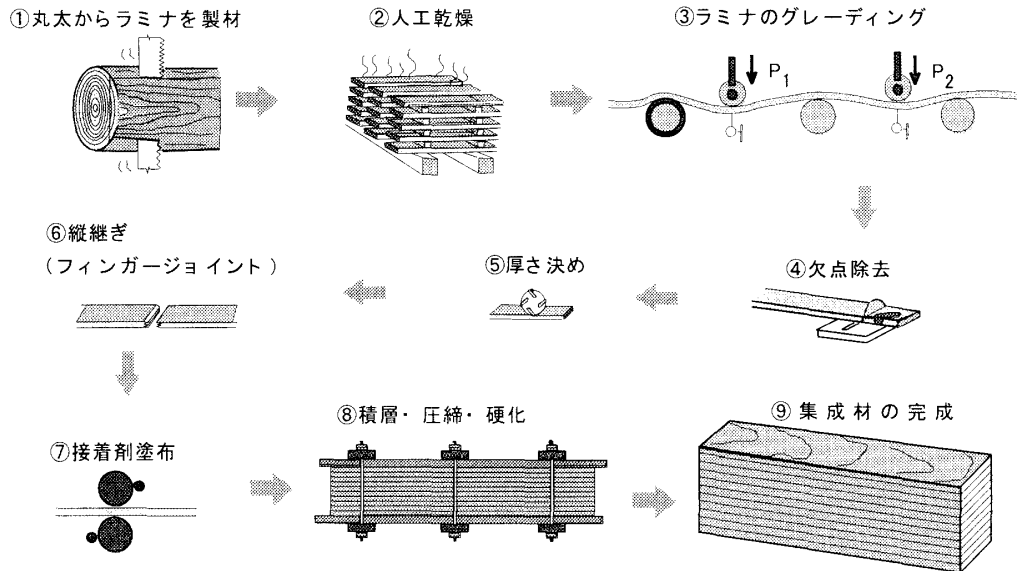


図1 集成材の作成方法¹⁾

日本では、古くは合成柱として東大寺大仏殿や出雲大社などに鉄製の帯で巻いたものが使用されている。現代的な集成材では、第二次世界大戦中に研究が始められ、戦後になって竹山謙三郎や久田俊彦が林業試験場（現独立行政法人森林総合研究所）において、実験室等を集成材アーチで建てている。同じ頃、後藤一雄は膠着梁の研究を行っている。集成材建築としては、1951年に東京・四谷に建てられた森林記念館が最初で円弧状アーチ材が使われている。昭和30年代に入って湾曲集成材による構造が広がり、飯塚五郎蔵による新発田市厚生年金体育館をはじめとして、千数百棟が建てられている。しかし、このあと鉄骨造の普及に伴い衰退していくこととなる。

再び集成材が脚光を浴びるようになるのは、1986年の大断面構造用集成材（断面の最小径15cm、かつ断面積300cm²以上）のJASの制定や1987年の建築基準法改正による。この基準法改正により、大断面集成材を梁、柱などの主要構造部に用いた場合、最高高さ13mを超える大規模建築物を造ることが可能となり、現在の木質構造ブームにつながっている。そして、2000年の建築基準法改正により限界耐力設計法が制定され、設計者の責任において木質構造の設計に新たな可能性がでてきている。

2. 集成材の曲げ強度推定

現段階で木質構造の構造計算は、二次加工品を用いたものについて行うことが出来るようになってきている。これは、集成材など木質材料の強度特性の信頼性に後押しされている。集成材とはラミナを積層接着することにより製造されているため、強度特性は構成材料であるラミナの強度特性に大きく影響される。実際、我が国においてもこのような考えに基づくいくつかの強度推定モデルが提案され、その適合性が議論されている。たとえば林³⁾は、等価断面法を用いて引張側2層の外縁部の応力より集成材全体の曲げ破壊係数を求め、最小値で破壊するとして曲げ破壊係数を計算するモデルを作成した。ラミナの強度には曲げ強度と集中節径比とヤング係数の関係を用いた。平嶋ら⁴⁾は、最終荷重時までひずみは弾性域内にあると仮定して、2次の複合応力式を用いて曲げ破壊係数を計算するモデルを作成した。ラミナの強度には引張実験におけるヤング係数と強度の回帰式を用いた。三橋ら⁵⁾は、2次の複合応力式を用い、積層によるラミナの補強効果、圧縮応力による塑性化を加味した曲げ破壊係数を計算するモデルを作成した。ラミナの強度には引張、圧縮および曲げ実験におけるヤング係数と強度の回帰式を用

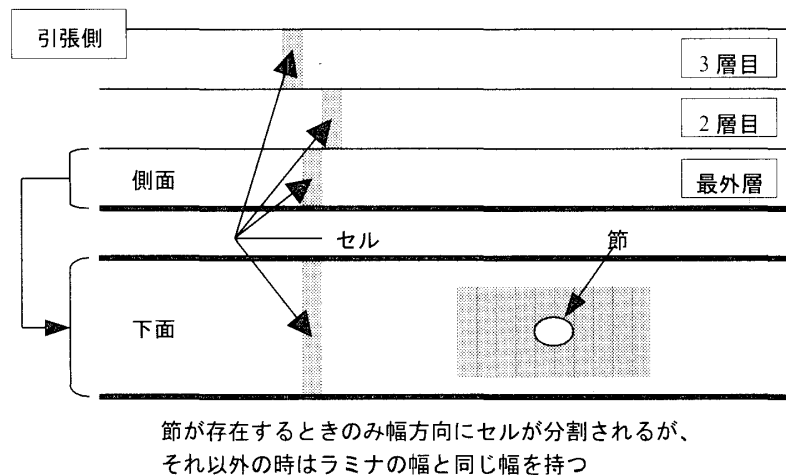


図2 セルの定義について

いた。小松⁶⁾は、最終荷重時までひずみは弾性域内にあると仮定して、1次の複合応力式を用いて各層ラミナの強度から曲げ破壊係数を計算するモデルを作成した。ラミナの引張および曲げ強度は実験値の平均値を用いている。これらの強度推定モデルは断面や応力状態が異なる場合にはそれらに応じてモデルの変更が必要となる。そこで筆者らは、汎用性のある強度推定モデルの作成とラミナによる強度評価を目的に、様々な寸法の集成材の曲げ実験をおこない、その抵抗形態と破壊に至る過程を解明した⁷⁾。また、解明した抵抗形態と破壊に至る過程を用いて、破壊現象を正確に表現する詳細で正確な強度推定モデルに取り入れる仮定を示した⁸⁾。これらの知見を取り入れた強度推定モデルを提案し、モデルの汎用性を明らかにするためにモンテカルロシミュレーションをおこない、その整合性を様々な集成材の実験結果^{7), 9), 10)}との比較により検証した¹¹⁾。

筆者らが提案した強度推定モデル¹¹⁾について簡単に説明する。このモデルの特徴は、図2に示すように集成材を有限要素（セル）に分割し、各々に強度を与える点である。分割方法は、材厚方向ではラミナ毎に強度を考えるためラミナ厚で分割し、長さ方向には応力の集中をラミナ厚さによって評価している既往の研究¹²⁾を踏襲し、ラミナ厚さを単位とした。さらに節近傍については節の破壊による幅方向の応力の集中を考えるため、節の大きさにより割れる範囲が異なることを考慮し節径を単位とした。

本モデルにおける破壊と強度推定の仮定について説明する。ここで破壊は引張側で起こると仮定し、外力に対する任意セルの存在応力が、そのセルの強度に達した時点で当該セルは消滅すると考える。さらに割れの進展と応力の集中を考慮するため近傍のセルも同時に消滅させる。強度は順次外力を増加させながらセルを消滅させ、残ったセルで外力を支えられなくなった時点のモーメントとした。なお、引張側は弾性を仮定し、圧縮側は完全弾塑性性を仮定する。圧縮側の塑性化は中立軸の移動として強度に反映される。これらの条件を満たすモデルを用いて集成材の曲げ強度を推定した結果と実験値の比較を図3に示す。この結果より、様々な集成材について強度推定が可能であることがわかった。

これらの集成材の強度推定手法が確立されていくことにより、集成材を用いた構造物の構造計算が容易となり、構成ラミナの違いによる材料強度特性を個別化することが可能になり、設計の幅が広がっていくと考える。

3. 集成材のクリープ変形

構造部材に要求される性能で最も重要なことは使用期間内に予想される外力に耐えることである。木

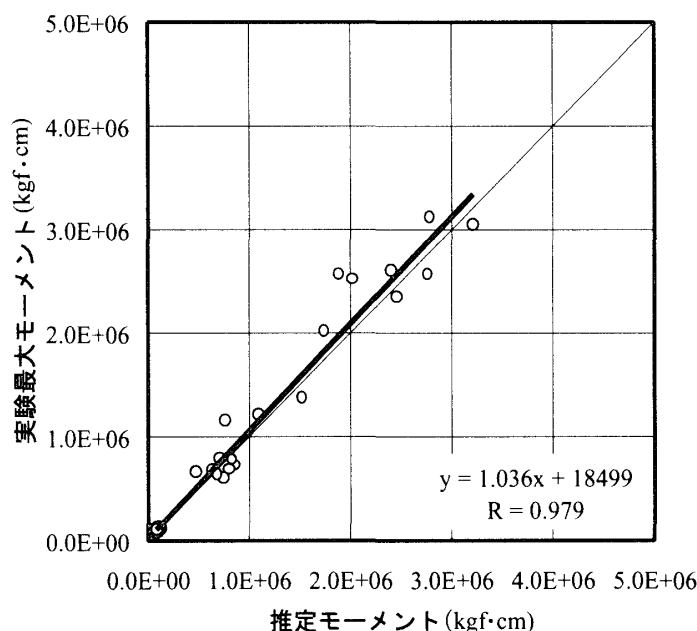


図3 全推定モーメントと実験最大モーメントの比較

質材料を主要構造材として用いた構造物においては、鉄骨造、鉄筋コンクリート造などに比べ、床などの水平構面のたわみが大きくなりがちであり、居住性、機能性を確保する上で、たわみ応答の計算は重要な構造設計時の確認事項となる。たわみ応答を生じる要素は、部材のたわみに加え、接合部のすべり変形、そして部材、接合部それぞれに対するクリープ変形である。接合部のすべり変形、そしてクリープ変形の性能評価が木質構造の他構造と異なる主たる課題とされ、これまで数多くの研究実績がある。しかし、接合部を持つ集成材のクリープ変形に関する研究はきわめて少ない。ここでは、構造物使用時を念頭に置いた大気下および接合部に関するクリープ変形の既往について述べる。

接合部のすべり変形の性能評価は、地震動などの水平力に対する応答を評価する上でも重要であり、線形はもとより非線形挙動の追跡を含め、実験的、解析的な検討がなされ、小松¹³⁾は、解析的に弾性床上のはり理論を適用し、非線形挙動を求めている。

一方、部材、接合部に生じるクリープ挙動については、クリープ変形、耐力の低減を適正に評価するために温度、湿度を管理した小試験体に対する実験¹⁴⁾などや、近年ヨーロッパや我が国などで再び見受けられるようになった自然環境下における含水率変化にともなうクリープ変形の増減、いわゆるMechano-sorptive挙動との関連に主体をおいた実験¹⁵⁾などが精力的におこなわれてきた。また、洪ら¹⁶⁾などは、ベイマツ集成材の温湿度変動下における釘接合部の曲げクリープや、ベイマツLVLの曲げモーメントが作用する釘接合部のクリープとMechano-sorptive挙動の定量的評価について検討している。

現在では、材料レベルあるいは部材レベルで、クリープ式に温度あるいは湿度の項を追加することにより、温湿度変動下におけるクリープ変形の追跡の可能性が議論されている¹⁷⁾など。

一般に、定量的な扱いを目的とした木材のクリープ曲線の実験式は、以下に示すPOWER則で近似されるものが多い¹⁸⁾。

$$\delta c(t) = A t^N$$

$\delta c(t)$: クリープ変形

t : 時間

A, N : 定数 (A : クリープ定数、 N : 減速指数)

表1 クリープ実験の概要

試験体			荷重 (kgf)	開始日	載荷日数	ヤング係数 (tf/cm ²)	表面含水率 (%)	初期値 (mm)
種類	接合	荷重						
はり	通直材	中間	3645	92/3/10	570	111	10	35.26
		長期	2430			110	11	24.26
	継手材	中間	1366	96/9/25	495	131	14	26.33
		長期	910			132	12	10.64
	仕口材	中間	2560	98/5/20	882	151	18	23.43
		長期	1712			153	19	15.89
接合部	平行	中間	1707	96/9/25	495	125	22	0.39
		長期	1138				19	0.27
	直角	中間	642	99/5/19	517	90	19	0.43
		長期	428				19	0.26
	45度	中間	1096	99/5/19	517	82	20	0.61
		長期	730				21	0.41

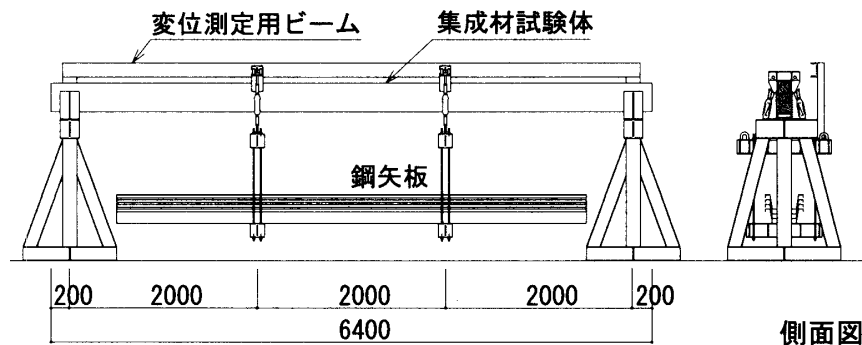


図4 クリープ試験概要

筆者らは、このクリープ式に温度及び湿度の変動量に比例する変形の変動量をさらに加えることにより、クリープ変形の定量化¹⁹⁾などを試みている。

また、特に接合部に注目した場合には、部材と比べ著しく研究実績が少ないものの、金属的な接合により温湿度の影響を受けにくいこと²⁰⁾や、接合部の有無で挙動が異なる¹⁷⁾といった報告が近年なされている。なお、周知のことであるが、現状の構造設計におけるクリープ変形の評価は、材料、部材レベルでなく、当該部分、例えば床組などの初期たわみを計算し、その2倍あるいは温湿度条件によっては3倍の変形と見なすことによりなされる²¹⁾。さらに、枠組壁工法建築物構造設計指針²²⁾では、実験によりその変形を評価する際には、5週間の実験の後、回帰的に50年後の変形を予測することになる。

ここで、筆者らが取り組んできた集成材はりクリープに関する実験的研究²³⁾について紹介したい。この実験は、構造計算を必要とする集成材架構を対象に、変形を生じる各要素の大気下でのクリープ挙動に関するものである。つまり、部材のクリープ変形、接合部のクリープ変形に関する実験を通じて、それぞれの挙動について一考している。詳しくは、文献²³⁾を参照されたい。この実験は長期的な視点からクリープ変形を追跡することを意識し、最低でも1年以上といった期間の実験をおこなっている。クリープ実験の概要を表1に、試験概要を図4に示す。また、はり試験結果の一覧を図5に、接合部試験体の

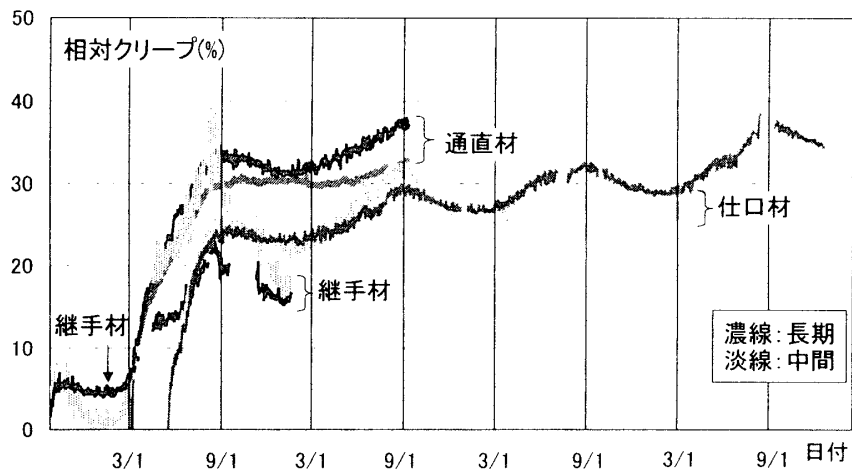


図5 はりの経年変化

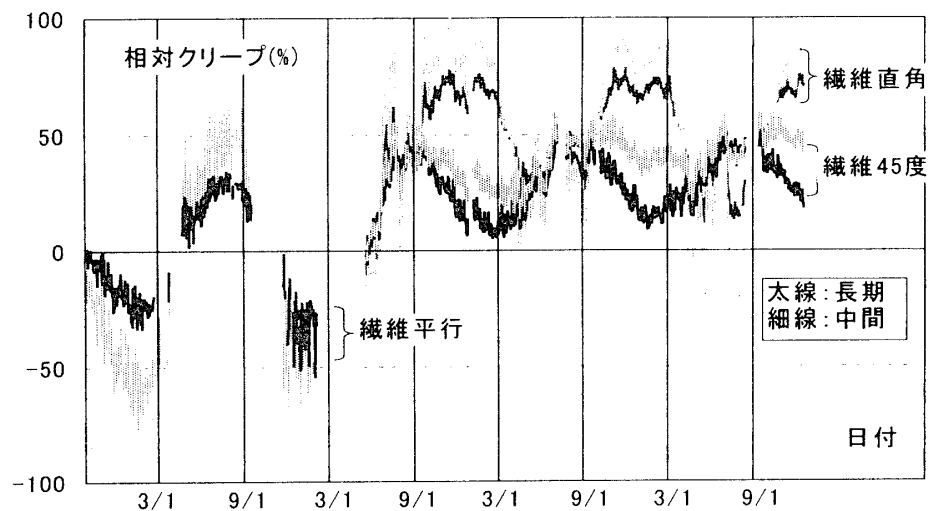


図6 接合部の経年変化

試験結果を図6に示す。

全実験結果を元にPOWER則を用いて長期推定をおこない、木質構造設計規準・同解説²¹⁾と比較し、設計時の安全性について検討している。50年後の長期推定結果を図7、8に示す。この結果より、推定値は木質構造設計規準・同解説で設計で用いるように設定している値を下回る結果となった。よって、本実験でおこなったカラマツ集成材については安全であることがわかった。また、文献²³⁾により接合部を含むはりのクリープ変位に占める接合部のクリープ変位は小さいという結果がでている。しかし、実験に長時間を要するため、集成材のクリープ変形、特に接合部を含むものについては、十分なデータがそろわず、未だに確立されているとは言い難いのが現状である。今後は、樹種や接合部の異なる試験をおこない、データを蓄積して検証していくことが重要であり、これらの成果によってより精度の高い推定が可能になると考える。

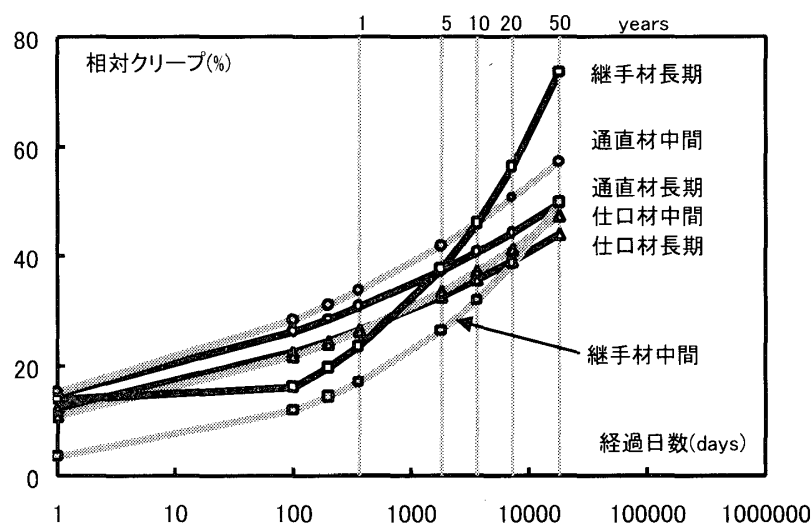


図7 はりの長期クリープ推定結果

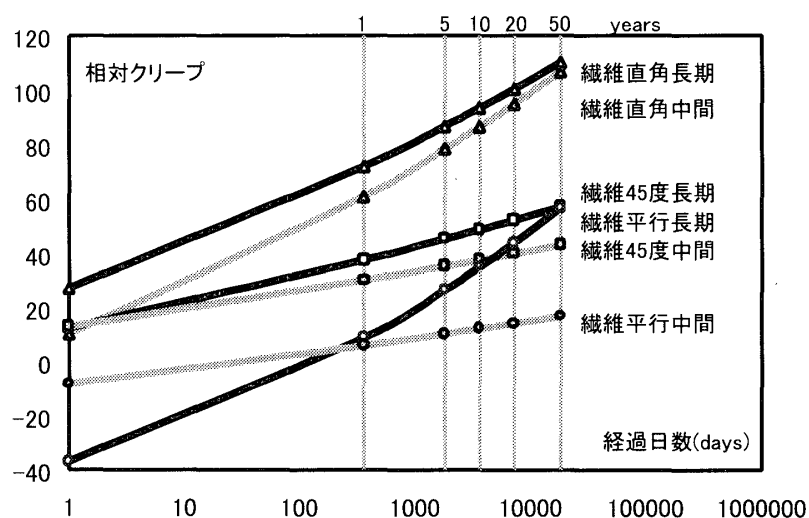


図8 接合部の長期クリープ推定結果

4. ま と め

これら木質構造の主要構造材料である集成材の強度特性に関する研究は様々におこなわれてきており、大空間建築への展開も見られるようになってきている。しかし、今後は中層・高層への展開をにらむために軸方向部材としての性能評価などが必要となってくると考えられる。現在、筆者らは集成材の引張強度の推定を可能にするために引張実験をおこなっている²⁴⁾。また、圧縮についても同様の研究が平行しておこなわれている。加えて、国土交通省が主体の総合技術プロジェクトとして、「木質複合建築構造技術の開発」が動いている。このプロジェクトにおいても多数の実験²⁵⁾などがおこなわれており、それらの成果が待たれている。

まだ発展途上ではあるが着実に研究成果が積み上げられてきている。これらのデータの蓄積や成果は、集成材建築、強いては木質建築物の発展に大きく寄与するものであると考える。

参考文献

- 1) 小松幸平：日本およびヨーロッパにおける近代木橋の現状、木質科学研究所公開講演発表資料、1999.5
- 2) 坂本 功：木質構造の技術 構造用集成材、建築技術、1994.11
- 3) 林 知行：確率モデルによる集成加工材料の性能予測（第3報）－5 プライ集成材の曲げ強度予測確率モデル－、材料、Vol.39、No.444、pp.1197-1202、1990
- 4) 平嶋義彦、山本幸雄、鈴木滋彦：集成材の強度計算モデルおよび確率モデル、木材学会誌、Vol.40、No.11、pp.1172-1179、1994
- 5) 三橋博三、板垣直行、伊東彦紀、鈴木 登：スギ集成材の力学的性能設計のための解析モデル（第1報）積層による補強効果及び塑性領域を考慮した集成材の曲げ破壊予測モデル、木材学会誌、Vol.42、No.2、pp.122-129、1996
- 6) 小松幸平：任意断面構成集成材の最大モーメントの推定と実験結果による検証、木材学会誌、Vol.43、No.11、pp.934-939、1997
- 7) 伊熊清朗、笹川 明、五十田博、森 拓郎：ラミナ厚の異なる信州産からまつ集成材の曲げ強度実験（その2 実験の概要）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 17-18、1998.9
- 8) 五十田博、森 拓郎、笹川 明：曲げを受ける集成材はりの抵抗形態と破壊過程の解明、日本建築学会構造系論文集、第529号、pp.13-20、2000.3
- 9) 飯島泰男、板垣直行、森 拓郎、林 知行：スギ材による大断面構造用集成材の性能とその予測（1）製造条件と実大実験結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 13-14、1999.9
- 10) 森 拓郎、笹川 明、五十田博：信州産からまつ集成材の曲げ強度実験とその強度推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 217-218、2000.9
- 11) 森 拓郎、五十田博、笹川 明：破壊過程を再現した集成材の曲げ強度推定モデルの提案と実験による検証、日本建築学会構造系論文集、第541号、pp.51-57、2001.3
- 12) 丸山則義、有馬孝禮：フィンガー・ジョイントにより縦継ぎされた構造用集成材の曲げ性能、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.2683-2684、1984
- 13) 小松幸平：接合具の非線形特性を考慮に入れた集成材骨組み構造の解析（第2報）、木材学会誌、Vol.35、No.3、pp.201-211、1989.3
- 14) 例えば、飯塚五郎蔵、森 尚治：集成材の曲げクリープに及ぼす温湿度の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.187-188、1968.10
- 15) 例えば、荒武志朗、有馬孝禮：湿度変動過程におけるスギ大断面材のクリープ、木材学会誌、Vol.41、No.4、pp.359-366、1995.4
- 16) 例えば、洪 淳一、有馬孝禮：木質材料及び接合部のcreepとmechano-sorptive変形（3）－Driftpin接合部のcreep特性－、第44回日本木材学会大会、pp.381、1994.4
- 17) 例えば、有馬孝禮、鴛海四郎：温湿度変動下での集成材、LVL及び接合部のクリープ特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.23-24、1992.8
- 18) 日本建築学会：木質構造設計ノート、丸善、1995.1
- 19) 例えば、森 拓郎、笹川 明、五十田博、高橋茂男、北村俊夫：信州産からまつ集成材を用いた集成材の曲げクリープ性状に関する実験的研究（その3 クリープ式による評価）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.23-24、2001.9
- 20) 集成材構造委員会：技術開発推進事業報告書：集成材構造開発、日本住宅・木材技術センター、1994.3
- 21) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説、1995.1

森：構造用集成材の変遷とその部材特性に関する近年の研究

- 22) 日本ツーバイフォー建築協会：1998年枠組壁工法建築物構造計算指針、1998.
- 23) 高橋茂男、北村俊夫、森 拓郎、笹川 明、五十田博：大気下の集成材はり、接合部、建物のクリープ変形と季節変動、日本建築学会構造系論文集、第551号、pp.87-94、2002.1
- 24) 森 拓郎、小松幸平、野田康信、原田浩司、渡辺公昭：異樹種集成材の引張強度特性に関する実験的研究、第52回日本木材学会大会、pp.197、2002.4
- 25) 例えば、瀧野眞二郎、小松幸平、森 拓郎、中谷 誠：集成材鋼板挿入ドリフトピン接合部のアラミド繊維による端部補強効果、第52回日本木材学会大会、pp.238、2002.4