木質構造の現状と課題

3. 大規模木構造の現状と課題[†]

小 松 幸 平*

The State of the Arts on Current Timber Structures

Ⅲ : The State of the Arts on Large Scale Timber Structures

by

Kohei KOMATSU*

Key words : Glued laminated timber (glulam), Arch, Dorm, Multi-layer timber structure, Moment-resisting joints

1 大規模木構造とは

大規模木構造とは何か？適切で厳密な答えはなかなか難しい。例えば、図1は日本の伝統木造建築界に革命の変革をもたらしたことで有名な東大寺南大門（国宝）の雄姿を示す。鎌倉時代（1119年）に創建された桁行き29m、高さ25.46mの木造半剛節ラーメン架構で、東大寺再興を託された勸進職の僧重源が中国南宋の建築様式を参考に、独自に考案した建築様式と言われている。¹⁾

現在では当たり前となっている「貫構造」が本格的に導入され、当時としては異色の「天井を貼らない吹き抜けの大空間構造」を作り出した。この建築は、総合的な意味で、極めて優れた大規模木構造である。木材同士の組合せ（嵌合接合と呼ぶ）だけで、これだけの大がかりな構造を、精緻な構造解析など皆無であった時代に造り上げ、しかも、その後800年以上の歳月にわたって、地震・台風等の外力から、そして紫外線や腐朽菌、シロアリ等の木材劣化因子から、構造を守り抜いてきた智恵と技術は、まさに驚異と言わざるを得ない。しかし、現在の方の認識では、このような伝統技術によって建設さ

れた木構造は、これから本稿で取り扱う「大規模木構造」とは別物と見なされている。

図2は杉山博士²⁾による木質構造の分類に筆者が加筆したものである。平成12年までは、「大規模の建築物」という用語が建築基準法の中で使われており、高さ13m、軒高さ9m、延べ床面積3000m²を越える建築物の場合は、主要構造物を木造とはできないと規定していた。この条件のいずれかに抵触する場合は、高度な構造設計が義務づけられたり、条件によっては大断面（小径15cm以上、断面積300cm²以上）の集成材等を使用することが求められたり、場合によっては建設大臣の特別認定（38条認定）が要求されたりしていた。結果的に、大規模木構造⇌集成材構造となる場合が多くなり、現在に至っている。今のところ、大規模木構造の主要構造部材として、集成材の他に単板積層材（LVL）の使用が認められているが、天然の木材については、明確に言及されておらず、ケースバイケースである。従って、大規模木構造は、集成材もしくはLVLを用いて建設するというのが、ほぼ原則のようである。

2 集成材のメリットとは何か

木材は太古の昔から、相対的に軽くて強い構造部材として、建築、土木、造船、交通・運輸、家具、その他の分野で広く活用されてきた。東大寺南大門が建設された当時のように、天然の大径木が豊富であった時代には、可能な限り直径の大きな木材を切り出し、それを丸太の

図1 東大寺南大門

図2 木質構造の分類

[†] 原稿受理 平成15年6月16日 Received June 16, 2003

* 正会員 京都大学 木質科学研究所 構造機能分野 〒611-0011 宇治市五ヶ庄, Wood Res. Inst., Kyoto Univ., Gokasyo, Uji, 611-0011

図3 東大寺金堂の
合成柱

まま柱として、あるいは必要に応じて小割りして、桁、貫、挿し肘木等に利用していた。

しかし、近世に近づくにつれて、天然の大径良材を入手することが次第に困難となり、江戸期再々建の東大寺大仏殿（金堂）に見られるように、極めて大規模な木構造（正面 57m、高さ 49m）を建造する場合にも、比較的直径の小

さな木材を使わざるを得なくなってきた。図3に示すように、東大寺金堂の場合は、小径木を多数の和釘で結束して1本の合成柱を構成している。

天然の木材は、現在社会問題化しているシックハウス症候群を起こさない健康的な構造部材として再評価されているものの、節や腐れなど構造材料として評価される場合は、どうしても欠点となる因子を多く持ち合わせている。天然の良木が豊富に入手できた時代には、そのような欠点は断面の大きさとカバーできたのであるが、利用可能な木材の断面が小さくなってくると、欠点が部材の強度に与える影響が無視出来ないものとなってきた。

20世紀に入って現在の形式に近い集成材がスイスで発明されて以来、欠点の人為的排除と最適部材配置を可能とする集成材と、天然木材の強度性能における信頼性の違いが科学的に説明されるようになった。

図4はラミナ1枚の場合（天然の木材）とラミナ数が増加した場合（集成材）の曲げヤング係数の出現頻度の違いを模式的に示した有名な図である。³⁾ 平均値はそれ程変わらないが、積層数が増加するとバラツキが少なくなるので、下限値が相対的に高くなって、設計に使用できる許容値を高く設定できるということを意味している。

我国では、上述した積層効果や乾燥が行き届いている等の理由により、建築基準法上の措置として、高い構造信頼性が要求される大規模な木構造には、専ら集成材を使用するよう規定していた時期があった。今日では、この規定はやや緩和されているが、これまでの実績から言うと、圧倒的に集成材が使用され今日に至っている。

我国の構造用集成材の製造基準⁴⁾によると、集成材とは、厚さ5cm未満のラミナと呼ばれる木材の挽板（鋸で挽いた板）を強力な接着剤を用いて積層接着して製造したものと定義される（図5参照）。これによって、図6に示すような任意形状の、また要求に応じて任

図4 ラミナの積層効果

図5 集成材の製造工程概念図

図6 集成材の可能な形状・形態

意断面寸法の集成材が製造可能となり、大規模な木構造の建設を可能とした。

図7はスイスで発明され、その後間もない黎明期に製造された集成材を用いて建設されたアーチ構造の内部を示す。断面は今日では珍しいI型断面をしている。場所はスイスのサン・モリッツで、乗馬クラブの室内馬場として現在も使われている。集成材の接着にはカゼインが使用されたい。持ち主によると、1917年に建設されたという。建設後80年以上が経過しており、集成材建築としては貴重な建物であるが、まだ東大寺南大門の経た年月の1/10に過ぎない。

3 集成材構造建築物の代表的な形態

アーチ構造は、自重や積載荷重のような鉛直荷重に対して、部材内の応力が圧縮応力となる場合が多いので、集成材に限らず、大スパンをとばすのに有利な構造である。

形式としては、図8に示す例のように、円弧状アーチの単位骨組みを1方向に何本か敷き並べて薄鉄状の大空間を構成するタイプと、図9のように、一定の曲率を持った集成材の部材を3次元空間に張り巡らせ、

図7 築80年以上経過した現
役の集成材アーチ構造

図8 集成材アーチ構造の例（鹿児島県根占）

図9 建設中の純木造ドーム構造（横浜ドーム）

ドーム状の大空間を構成するタイプに分けられる。構造設計の難易度から言えば、前者は比較的容易であり、単位骨組み幅に作用する外力を想定し、スパン方向の2次元アーチについて構造的検討を行うことが主たる課題となる。

一方、3次元の大空間構造となりがちな後者の場合は、高度な構造設計が要求される場合が多い。大空間を構成するためには、3次元空間に広がっていくアーチ部材を様々な箇所で接合する必要がある、これまでに幾つかの構造システムが提案されている。また、単層の集成材アーチ構造だけでは大空間を支えることが困難となることも多く、そのような場合はスチール部材の助けを借りたハイブリッド構造となることがしばしばである（図10参照）。逆に、最近ではむしろ、大空間木構造と言えばハイブリッド構造が当たり前となっている。

図10 建設中のハイブリッド木造ドーム構造（出雲ドーム）

上述した集成材によるアーチやドーム構造は、大規模木構造のいわば先駆者であった。これに対して、通直な集成材の柱や梁を用いたオフィスビルのような多層集成材構造は比較的新しく登場してきた形式である。多層と言っても、日本で木造に許されている階数は最大3階までである。

図11にその代表例の一つである帯広営林支局庁舎棟の建設中の状態を示す。この建物は集成材3階建て建築物としては我国最大規模で、延べ床面積が3000m²を超えている。⁵⁾この他に「木三共」と呼ばれる木造3階建て共同住宅を集成材やLVLで建設する例が多くなっている。

これらに加えて、集成材を用いた大規模な木構造には様々な形態が存在するが、特に最近、湾曲材に比べ相対的に製造単価の安い通直集成材を用いて、自由な形状をした中・大規模な構造物を構築してゆく傾向が増加している。

図12は、通直集成材で大空間の屋根を覆った物産館の例を示す。このような構造を可能にしているのが、次に詳述する各種の現場接合法である。

4 接合法の現状

4・1 軸力・せん断力を受け持つ接合

軸力やせん断力を確実に伝達し、モーメントを意図的に伝達しない接合部には、図13のようなアーチ頂部のヒンジ接合部や図14のような木造トラス構造のヒンジ接

図11 集成材3階建て事務所建築物（帯広営林支局）

図12 通直集成材を用いた任意形状の木構造

図13 アーチ頂部のヒンジ接合部

合部の例がある。図14の接合部は、通常の建築物に比べて格段に大きな荷重が掛かる木橋の例^{6), 7)}である。斜材からの大きな引張力を直接上弦材に伝達するのではなく、一旦鋼板に荷重を流し、鋼板から多数の釘に力を分散させて、最終的に大径のボルトにせん断力を伝達するという思想がこめられている。一般に、木材に直接大きなせん断荷重を伝えることは局部破壊を招く恐れがあるので、このような段階的な力の伝達を考える事が、大規模な木構造におけるヒンジ接合部の設計では重要である。

一方、集成材の事務所建築等においては、床梁を柱に固定する場合、一般の住宅構造と同様に梁受け金物的なせん断力の伝達に重点を置いた図15のような接合部が用いられる場合もある。

4・2 モーメント抵抗接合

一方、モーメントの伝達を意図した接合法としては、図16に示すような幾つかの形式が提案された。⁸⁾このような接合法を特に「モーメント抵抗接合」と呼ぶが、図16-a)のガセット板接合タイプについては、著者も開発研究^{8)~12)}の一端を担当したため、資料が手元にあり、少し解説を加えたい。

図17は最初に開発されたもので、比較的断面の大きな集成材の柱・梁部材に、予めスリットと先孔を加工し、現場で孔明鋼板ガセット板を落とし込み、集成材とガセット板とを多数のドリフトピンを打込んで接合するというものであった。

ところで、建設現場で重く、大きな鋼板ガセットを集

図15 集成材構造用梁受け接合部

図16 初期に提案されたモーメント抵抗接合法

図17 初期の鋼板挿入ドリフトピン接合法

図14 木橋におけるヒンジ節点の構成例

成材に挿入し、多数のドリフトピンを現場で打ち込むという作業は、施工性が悪く、精度が確保できない等の不具合が指摘された。そこで改良法として、図18に示すように、接合部を予め設備の整った工場内で完成させておき、プレファブ化された部材を現場に搬入して、現場では鋼板同士を数本のハイテンションボルトで結合するだけで接合部を完成させる構法が開発された。

この改良型モーメント抵抗接合法によって、現場施工性が大幅に向上し、建て上げが迅速となった。また、ハイテンションボルト接合部の降伏耐力を木材接合部の降伏耐力より低く設定することによって、木部での初期破壊が回避でき、図19に示すように、接合部は見かけ上ハイテンションボルトで接合された鉄骨接合部と同じ挙

図18 改良型モーメント抵抗接合法

動を示し、エネルギー吸収能力も大幅に向上した。

ガセット板型モーメント抵抗接合法は適切な設計⁸⁾を行えば初期剛性、終局耐力、じん性のいずれにおいても満足すべき性能を発揮することが可能であり、図11の集成材3階建て庁舎建築をはじめ、大小様々な木造ラーメン構造に採用されてきた。しかし、接合具の有効長さ l と直径 d の比 l/d を8～10倍以上に採ること、端距離 $(7d)$ 以上、縁距離 $(4d)$ 以上、接合具間隔 $(7d)$ を十分採ることを前提条件としているため、往々にして接合部が大きくなりがちである。部材寸法が接合部寸法から決定されて不経済であるとの批判もあった。

4・3 鋼棒接着拘束接合 (Glued-in-Rod)

図16-dに示す引きボルトタイプは、接合具使用量を最小化できる方法として、当初より注目されていた。その後、機械的接合法だけではめり込み変形が大きく、剛性が低いため、鋼棒をLVLや集成材内に挿入し、「接着剤で固定する」（化学的に接着されているかどうかは問題にしない）より強固な接合法が世界各国で開発されてきた。鋼棒接着拘束接合 Glued-in-rod (GIR) 構法等と呼ばれる

図19 改良型モーメント抵抗接合部の高いエネルギー吸収能力

図20 GIR接合法による柱-梁モーメント抵抗接合

もので、そのルーツはデンマークの Riberholt の研究^{13), 14)}にある。

GIR 構法は、欧州をはじめ、NZ、ロシア、日本でも盛んに研究された。図20に示す例はNZの開発例で、鋼棒を集成材に現場で挿入し、エポキシ樹脂接着剤を用いて固着させる現場施工型柱-梁接合法（図20-a）と、工場で予め鋼棒を固着した後、現場では中間ブラケットを介して部材同士を接合する現場組立型（図20-b）が提案されている。¹⁵⁾ 我国でも GIR 接合は木造3階建て共同住宅や大規模な体育館等の構造に適用されている。¹⁶⁾

GIR 接合と形は少し異なるものの、荷重伝達メカニズムは共通しているものとして、図21に示す大館樹海ドームに採用された接着拘束接合法がある。¹⁷⁾

この接合法では、縞鋼板の凸凹の突起に固化したエポキシ樹脂が拘束され、引抜き抵抗 Q が発生するものと考えられている。図中の全ネジボルトは万一接着剤が熱のため柔らかくなった場合でも、最低限ドームの自重を短期的に支えるためのフェイルセーフ機構のために設けられたものである。実際のドームでは、この接合部が6m間隔でトラス節点を構成し、長径178m、短径157m、高さ52mの世界最大級の木造ハイブリッドドーム構造を支えている。図22は建設中の大館樹海ドームの姿を示す。

4・4 木ダボ接合法

現在の木構造には、大量の金属系接合具が使用されている。実績、信頼性、そして性能等の面から、金属系接合具を今すぐ全面否定することはできないが、その使用量を極力減らし、木造に相応しい接合法のメニューを増やすことは重要なことである。

図23に示す木ダボ接合法は、このような考え方から生まれた温故知新型の新しい接合法である。スギ集成材の木口にダボ用の先孔を明け、カエデの木ダボを挿入し、ポリウレタン樹脂接着剤を注入してダボを固定するというものである。鋼棒の場合は、接着力には期待せず、異形鉄筋の凸凹に起因した機械的抵抗力によって引抜き耐力が発揮されていると考えられているのに対し、木ダボの場合は、接着力に全面的に依存している。

一連の実験の結果、^{18)~21)} 木ダボ接合した接合試験体の曲げ強度が母材であるスギ集成材の曲げ強度を上回る組合せが存在することが確認された。木材の接合において、

図21 大館ドームに採用された接着拘束接合

図22 建設中の大館樹海ドーム

図23 木ダボを用いた集成材梁の縦接合 (概念)

母材強度を上回る接合強度が発揮された例は少なく、この結果は木ダボ接合の実力と将来の可能性を世間に強く印象付けた。

5 今後の課題

大規模木構造の話しを進めて行くうちに、いつの間にか接合の話しになってしまった。実際問題として、これはある意味では当然の成り行きである。木構造の規模が大きくなればなるほど、接合をどうするかという問題が構造設計サイドに大きくのしかかってくる。

本稿でも概説したように、大規模木構造における接合の基本はボルトやドリフトピン等を用いた「機械的接合法」であることには当面変わらないであろう。しかし、構造の規模が年々大きくなる傾向にあり、純粋な機械的接合法だけでは、初期剛性や長期荷重に対するクリープ性能に十分対処できない状況が見受けられる。今後は、大館樹海ドームで開発されたような、ハイブリッド型接合部への要求が益々増えてくるものと予想される。しかし、ハイブリッド接合に関しては、固化した接着剤層が接合部の剛性、終局耐力、じん性等に及ぼす影響が定量化されておらず、普遍性のある接合部設計法は未だに確立されていない。更なる大規模木構造に備えるためには、この種の接合法の耐力発現機構をより明確に解明すべきであろう。

一方、金属一辺倒の現在の接合技術に対する根強い拒否反応があることも事実である。冒頭で紹介した東大寺の南大門の例を引くまでもなく、我が国が世界に誇る伝統木造の技術には、現代工学が忘れかけている優れた智慧と技が秘められている。これらの技術を真摯な態度で再検討し、現代の木構造の中に適合させていく努力も価値あるものと考ええる。

参考文献

- 1) たとえば、木造建築フォーラム編集, “図説木造木造建築事典 [実例編]”, p.27 (1995) 学芸出版社.
- 2) 杉山英男編著, “木質構造 (第2版)”, p.2 (2001) 共立出版.
- 3) 林 知行, “エンジニアードウッド”, p.78 (1996) 日刊木材新聞社.
- 4) 構造用集成材の日本農林規格, 農林水産省告示第 235 号 (2003).
- 5) 向山松秀, 長尾昌高, 日経アーキテクチャー, No.410, 242 (1991).
- 6) E. Gehri, “Brücken und Stege aus Holz”, p.97 (1989) SAH.
- 7) K. Gartl, “Holzbrücke über die Simme bei Reutigen-Wimmis BE”, LIGNUM informiert zu Holz.
- 8) 小松幸平, “木質構造設計ノート”, 6 章 (1994) 日本建築学会.
- 9) 小松幸平, 木材学会誌, **34**, 581 (1988).
- 10) K. Komatsu, F. Kamiya and Y. Hirasima, Proceedings of the 1988 International Conference on Timber Engineering, **2**, 205 (1988).
- 11) 小松幸平, 前田典昭, 堀江和美, 木材学会誌, **35**, 201 (1989).
- 12) 小松幸平, 川元紀雄, 原田真樹, 木材学会誌, **39**, 1393 (1993).
- 13) H. Riberholt, “Glued Bolts in Glulam”, Department of Structural Engineering, Technical University of Denmark, Series R, No.210 (1986).
- 14) H. Riberholt, “Glued Bolts in Glulam-Part 2”, Department of Structural Engineering, Technical University of Denmark, Series R, No.8 (1988).
- 15) R. H. Fairweather, “Beam Column Connections for Multi-Story Timber Buildings”, Research Report 92/5, Department of Civil Engineering, University of Christchurch, New Zealand (1992).
- 16) RH 構法 (1995) (株) RHS 技術研究所.
- 17) 伊津野國宏, “大館樹海ドーム 一雪国に架ける世界最大級の木造架構—” p.77 (1997) 龍源社.
- 18) 佐々木貴信, 小泉章夫, ヨルゲン・イェンセン, 飯島泰男, 田村靖夫, 小松幸平, 木材学会誌, **45**, 17 (1999).
- 19) 小泉章夫, ヨルゲン・イェンセン, 佐々木貴信, 飯島泰男, 松本裕一, 小松幸平, 木材学会誌, **45**, 230 (1999).
- 20) 小泉章夫, 佐々木貴信, ヨルゲン・イェンセン, 飯島泰男, 小松幸平, 木材学会誌, **47**, 14 (2001).
- 21) 佐々木貴信, 小泉章夫, ヨルゲン・イェンセン, 飯島泰男, 小松幸平, 木材学会誌, **48**, 23 (2002).