木枠一板ガラス接着構法による 開口部部品の開発

DEVELOPMENT OF TIMBER FRAME STRUCTURAL GLAZING SYSTEM

網野 禎昭 ————— * 1 石田 光 ————— * 2
小見 康夫 ————— * 3 ヤン・ハム ————— * 4
ユリウス・ナッテラー ————— * 5 和久井 智 ————— * 6

Yoshiaki AMINO ————— * 1 Hikaru ISHIDA ————— * 2
Yasuo OMI ————— * 3 Jan HAMM ————— * 4
Julius NATTERER ————— * 5 Satoru WAKUI ————— * 6

キーワード：
木造, 板ガラス, 接着, 複合材料

Keywords:
Timber construction, Glazing, Adhesion, Composite

This paper reports on the recently developed glazing system with timber frames. By means of adhesion, sheet glasses are to be composed with the bordering timber frames. The composite behavior of these materials enables the diminution of frame dimensions and the improvement of security aptitude of glazing. This glazing system is considered applicable not only to glazing facades but also to load bearing elements like timber-glass composite beams. The latter part of the paper demonstrates the adaptation of the system to the facades of a real building project in Japan. This glazing system, originally conceived under European condition, was elaborated in order to satisfy Japanese local criteria.

1. はじめに

建築物の開口部にとって、板ガラスは欠くことのできない材料である。その支持方法は、意匠性・安全性・快適性などの建築の様々な側面に影響を与える重要な要素であることに疑いはなく、それは、近年のグレーディング構法の多様化と高度化においても見て取ることができる。ここで報告する木枠によるガラス支持方法もその一つである。木材の入手性・加工性の良さ、そして樹種の豊富さから、ガラスと木枠との接合方法については、多様な構法への展開が可能である。

本報では、木造建築におけるガラス接合構法の開発の一環として、スイス連邦工科大学木造建築研究所にて研究開発がなされてきた木枠一板ガラス接着構法の概要と開発の経過を前半に述べると共に、後半部分においては、当技術の日本における応用例について報じることとする。

2. 木枠一板ガラス接着構法の概要と研究経過

一般的に、木枠に板ガラスを固定する場合においては、板ガラスは木材との接触を避けるように、適度な遊びや緩衝材を介して固定される。この場合、板ガラスと木枠は構造的に非連続であり、板ガラスによる自重や受風圧力は、すべて枠のみで支持することになる。これは伝統的に行われている構法であり、製作施工が容易であること、構造体の挙動を勘案しなくてもよいことなどの簡便性に優れている。ただし、ガラスの呑み込み代を充分確保した上で、風圧力支持のための曲げ剛性を木枠に期待するため、枠寸法が比較的大きくなるという点が意匠上の問題とされる。鉄骨軸組と比べた場合、木

造では軸組そのものがより大きな断面寸法を必要とするため、さらに構造体に取り付き見付面積を増やす木枠は、開口率を重んじる箇所には好まれない。

これに対して、スイス連邦工科大学においては、木枠と板ガラスを構造的に接合する構法が提案され研究されてきた。木枠の設計に際して、板ガラスの剛性・強度を評価できるため、枠の寸法を節約することが可能である。

構造的に枠と板ガラスを接合させる方法としては、穿孔加工した板ガラスを機械的に接合する方法や、ガラスと支持材を部分的に接着する方法などが挙げられるが、いずれも接合部分に多大な応力集中を起こすため、当構法では、板ガラスの周辺部に帯状に接着剤を塗布し、これに木枠を接着している。

使用される接着剤は、ガラス、木材両面との接着性に優れたものであると同時に、硬化後の強度と弾性係数を考慮して選択される。接着剤の弾性率の程度により、木枠ーガラスの複合弾性係数の増減と、両者間のエネルギー伝達の度合いが調整される。このように、意図的な滑りを利用することで、当構法を以下の様な異なった目的に応用することができる。

(1) ファサード・システム

日射によるガラス面の加熱を受ける開口部などに当構法を利用する場合には、熱膨張率の違いにより木枠一板ガラス間に大きな剪断応力が発生する。このため、ある程度の滑り変形を許容できるシリコーン等の樹脂を用い板ガラスと木枠を接着する。図1及び図2に当構法によるファサード用部品の詳細と、風圧力による曲げ変形を

*1 スイス連邦ローザンヌ工科大学木造建築研究所 助手・Ph.D.
(EPFL-ENAC-IBOIS, CH-1015, Lausanne, Suisse)

*2 旭硝子板ガラスカンパニー技術開発部 主席技師

*3 小見建築計画室 博士(工学)

*4 スイス木材工業技術学校 研究開発部長・Ph.D.

*5 スイス連邦ローザンヌ工科大学木造建築研究所 教授

*6 旭硝子板ガラスカンパニー技術開発部 グループリーダー

*1 Research Assoc., Swiss Federal Institute of Technology Lausanne—IBOIS, Ph.D.

*2 Chief Engineer, Technology & Development Div. Japan/Asia Pacific General Div. Flat Glass Company, Asahi Glass Co., Ltd.

*3 Omi Architect Office, Dr. Eng.

*4 Manager, R&D Dept., Swiss School of Engineering for the Wood Industry, Ph.D.

*5 Prof., Swiss Federal Institute of Technology Lausanne—IBOIS

*6 Group Leader, Technology & Development Div. Japan/Asia Pacific General Div. Flat Glass Company, Asahi Glass Co., Ltd.

想定した実験の様子¹⁾を紹介する。後半に詳述する日本での実施例は、このファサード部品開発の一環である。

図1 木枠-板ガラス接着構法によるファサード・システムの例

図2 ファサード用パネルの載荷実験

(2) 構造部品

直射日光の遮れた屋内など、比較的安定した環境下において、板ガラスの剛性・強度を積極的に評価し架構に組み入れる場合などには、滑りのすくないポリウレタン樹脂やエポキシ樹脂のような接着剤を利用し、板ガラスを強固に固定する。以下、図3～5に当構法を梁として応用した例を挙げる。

図3の実験¹⁾では、ポリウレタン樹脂を用いて数種類の異なる木枠を10ミリ厚フロートガラスの両側面に接着し、長さ4メートル、梁背250ミリの試験体を用意した。これに対する四点曲げ試験の結果から、図4に代表される荷重-変形曲線を得た。

図3 木枠-板ガラスによる複合梁（載荷試験後）

図4 木枠-板ガラスによる複合梁の荷重-変形曲線

梁の曲げ剛性は、フロートガラスと木枠の複合剛性に依るところとなり、高い値を得ている。むしろ問題となるのは、引張応力によるガラスの脆性破壊であるが、木枠との複合効果により、ガラス単体の強度を上回る耐力が確認された。つまり、図4に見る階段状の強度発現が示すように、数回にわたるガラスのクラック発生後も、ガラスは木枠により、脱落することなく梁面内に拘束され続ける。その間、応力は圧縮側に位置するガラスと引張側の木枠上に分布し、ガラスが梁面外に崩落するまで強度は上昇する。木枠の弾性率がガラスに比して低いため、クラックの発生を妨げることはできないが、載荷時の安全率は格段に向上することとなる。

図5は、フロートガラスにかえて、より強度の高い12ミリ厚の強化ガラスを用いて施工した実施例である。

図5 木枠-板ガラスによる複合梁の実施例^{2) 3)}

3. ファサード・システムの日本における応用例

3.1 接着ディテールの改善

前述の木枠―板ガラス接着構法によるファサード・システムの日本での応用に際しては、気候条件等の日本固有の使用環境を考慮する必要から、旭硝子株式会社の協力を得た。その結果、特に日本の湿度が木材の接着力に与える影響が指摘された。日本では、西ヨーロッパに比べ降雨量が多く、同時に年間を通して湿度変化が大きいいため、木枠の著しい収縮膨張が予想される。長期にわたる使用の間に、この木材の動きによる接着力の低下が懸念されたため、木枠との接着ディテールに独自性の高い改良を加えることとした。

当初の接着ディテールは図1のように、矩形の木枠と板ガラスが、相互間に薄く塗布された樹脂層により接着されているものであった。これに対し新たに提案されたディテールでは、木枠に鍵型の溝が施され、この溝に充填された高モデュラスのシリコーンシーラントを介して強化ガラスが接着された(図6)。木枠への鍵型の溝加工により、硬化後の剛性が高い高モデュラスのシリコーンシーラントは、懸念される接着剤と木材面の剥離が起こった場合においても、鍵型に硬化した樹脂が木枠の溝に引っかかり、板ガラスの脱落を防ぐことができる。いわば、この改良案は樹脂の接着接合に嵌合効果を加えて安全性の向上を意図したものである。

このシステムによる引き戸の詳細を図7に、施工後の状態を図8に示す。木枠の組みあがり寸法に対して、板ガラスの面積を大きくとっている。そのため両者の接着後に、板ガラスが木枠外側にはみ

出す形状となる。引き戸下辺においては、このはみ出した板ガラス部分が水切りとして働き、側面においては、柱にオーバーハングして木枠と柱の外面を雨がかりから保護し、木材の劣化を防いでいる。また、意匠面においても、ガラス外面に木枠の凸部がなく透明感のある外観が実現できた。

ガラスの接着技術と直接の関連性は持たないが、しばしば木製建具の難点とされる気密性確保の問題については、柱・敷居・鴨居といった開口部周囲の部材と木枠との取り合い詳細を下記のように工夫することで対応した。図7、図8に示されるように、敷居の上端は床レベルから一段低い高さに設定されているため、下枠は常に床レベル以下に納まることになる。このため引き戸下辺―敷居―床端部の取り合いはS字型となる。建具自体には気密性を高める特殊なレールや加工を施すことなく、外気と室内間の通気経路を長くとることができ、ここに充分な気密材を設置することができる。この仕組みは、閉鎖時に柱外面の欠き込みに収納される縦枠、鴨居受の横架材外側に隠れる上枠とともに共通する詳細である。また、クレセント錠による施錠により、枠を室内側に引きつけ気密材を圧着させることによって気密性の改善が見込まれる。

本来ここでの接着構法は、垂直に配されたガラスの自重による剪断力にも抗することを意図したものであるが、シーリング材とガラスの構造接着は実施経験が少ないため、安全策として、引き戸の下辺に金物を取り付け、板ガラスの自重をこれに負担させる方法をとった。

図6 嵌合効果を意図した木枠―板ガラスの接着ディテール

(撮影：成田俊幸)

図8 木枠―板ガラス接着構法による開口部実例⁴⁾

図7 引き戸詳細⁴⁾

3.2 促進劣化試験

今回の日本における施工に先立ち、前述の懸念事項を確認すべくシリコンシーラントの接着耐久性試験を実施した。試験は JIS B 7753「サンシャイン カーボンアーク灯式耐光性及び耐候性試験機」に準拠したサンシャイン・ウェザーメーターを用いた促進劣化試験、その後万能試験機による引張強度試験を行った。

試験体は、ガラス、木材ともに、それぞれプライマーを介してシリコンシーラントを打設し、各3体ずつ作製した。表1に促進劣化試験の試験条件、図9に試験体断面形状を示す。また、図10に試験状況を示す。

表1 促進劣化試験の試験条件

サイクル	60分サイクル (48分の照射、12分の噴霧及び照射)
温度	槽内温度 $43 \pm 3^{\circ}\text{C}$ (ブラックパネル温度* $63 \pm 3^{\circ}\text{C}$ に相当)
湿度	試験槽空気出口で $50 \pm 5\% \text{RH}$
噴霧水量	噴霧圧力 0.1MPa に対して、 ノズル1個当たり 0.53 ± 0.1 リットル/分
曝露時間	1000時間

*ブラックパネル温度:試験槽内の試験片の表面温度代表値。

図9 試験体の断面形状

図10 試験状況

試験結果の平均値の一覧を表2に示す。促進劣化試験を行う前の初期状態のものにおいて、試験体の設計荷重76N(実物件での設計風圧785Pa)に相当する設計荷重時のシリコンシーラントの伸び量は平均で0.68mm、最大荷重時には設計荷重に対して9.3倍の強度があることを確認した。さらに、促進劣化試験後の試験体についても初期状態とほぼ同等の結果であり、問題のないことを確認した。

試験体の破壊性状は、ガラスの清掃不良による部分的な界面剥離

が生じたものがあつたが、ほとんどが凝集破壊であり、懸念された木材面とシリコンシーラントの間での界面剥離は全く生じることではなく、木枠に設けた鍵型の溝の効果を確認した。

表2 試験結果(平均値)一覧

		初期	促進劣化試験後
設計荷重時の伸び(mm)		0.68	0.55
最大荷重	伸び(mm)	6.57	8.90
	荷重(N)	704	673
	応力(kPa)	315	300
破壊荷重	伸び(mm)	9.50	8.90
	荷重(N)	623	673

3.3 開発成果と課題

一個人住宅の新築工事を機会とした開発であった為、多角的な試験による検証は時間的に許されなかったが、接着ディテールの改善と促進劣化試験により安全性を確認し、当構法を実現する事ができた。その結果、木枠と板ガラスが構造的に接着される利点が十分に反映された意匠性の高い開口部が可能となったと言える。また、意匠性だけではなく、板ガラスを木部の保護部材としても活用する詳細も実現した。

今後も当構法の実用性を高めてゆくためには、様々な検証を経ねばならず、特に木材接着の経年変化については十分な実験が必要とされる。商品化されるまでに至った板ガラス同士の構造的接着と異なり、太陽光線や外気にさらされる木材上の接着層の耐久性に関する経験は今のところ皆無に等しい。

また、用途や部位によっては、ガラス破損の際の取り替え方法についても検討を要するところである。木枠を保存したままガラスの再接着が可能であるのか、むしろ木枠の交換も必要であるのか、各材料のコストを考慮し合理的な交換方法を検討しなくてはならない。

4. まとめ

板ガラスと木枠を接着により構造的に組み合わせる構法が研究され、その成果が西ヨーロッパ、日本という異なる気候条件下において、開口部のグレーディング構法として実用化された。また、同組み合わせによる屋根梁も実用化され、当構法の構造部材への有用性も示された。また、ファサードや梁などの部材の設計時に、ガラスの剛性・強度を積極的に評価するという方向性は、今後も開発の継続に値する十分な合理性をもったものといえる。

以後、当構法の汎用化を意図した場合、ガラスの脆性破壊と接着剤用樹脂の経年劣化の影響について十分な議論が必要不可欠である。そのためには、詳細の改良、材料開発、そして使用条件の限定、これら3つの視点から、問題へのアプローチがとられることとなろう。

注

- 1) Hamm, J.: Tragverhalten von Holz und Holzwerkstoffen im Statischen Verbund mit Glas, Thèse No 2065, EPFL, Lausanne, 2000
- 2) 設計: Kurt Hofmann、構造: Bois Consult Natterer
- 3) Kreher, K.: Versuchsbericht und Versuchsauswertung zum Bauvorhaben « Biegeträger aus Holz und Glas im statischen Verbund » zur EXPO 2002, Internal publication, IBOIS-EPFL, Lausanne, 2002
- 4) 設計: 網野禎昭、構造: Luregn Caspescha、監理: 小見建築計画室、施工: マルエイ工務店(新建築住宅特集 2001年1月号掲載)

[2002年10月18日原稿受理 2003年2月25日採用決定]