

ガラスファサードに要求される強度

日本板硝子株式会社 建築硝子部

菊田 雅司

Mechanical Strength for Glass Facade

Masashi Kikuta

Nippon Sheet Glass Co. Ltd., Architectural Glass Department

近年、ビルの外装用として大寸法の透明ガラスが多く用いられてきている。外装の手段として様々な施工法が利用されており、一般的なアルミサッシによる施工法（Curtain Wallで総称される）、フレームを用いなくてシーリング材で支持する施工法（Structural Sealant Glazing: SSG 構法など）そしてビル低層部などに多く用いられているようなガラス面に加工した穴部やガラスエッジ部などで支持する施工法（Dot Point Glazing: DPG 構法など）などがあげられる。そしてそれぞれの施工においても、透明ガラスを多く用いて自然と共存していきさらにビル内部空間の快適性を考慮するために様々なガラス構成が考えられている。たとえば透明ガラスを2重に使い構成された内部空間で自然換気を促進するダブルスキンなどはその典型といえる。ほとんどは省エネルギーや居住者の快適空間形成のための手法であり強度とは関係ないように見えるが、その機能を実現するための施工として設計者は当然のこととして安全を最初に検討し、そしてその耐久性（ガラス強度の経年変化やシーリング材の経年変化など）までも考慮しなければならない。

時代は性能設計へと移り、ファサードの設計に関してもどのようにして人命の危険を避けるのか、どのようにして財産を守るのかについて設計者は技術に裏付けられた説明を求められることになり、要求される様々な強度に対して技術的に大変難しい課題を担うことになる。

1. 安全性の設定

板ガラスは脆性材料であるため、ある大きさの外力が加われば一瞬にして破壊する性質を持つ。板ガラスの強度試験で観察される強度は理論強度の数百分の一であると言われ、板ガラス表面に存在するき裂のモードIによるき裂進展によって説明される。また板ガラスの強度には、一定荷重でもその作用時間が長くなれば強度が低下していく静的疲労効果および作用する荷重の速度が遅い場合の方が速い場合より強度が低下していく動的疲労効果などが顕著に生じる時間依存性という特徴もある。さらに板ガラスの寸法が大きくなるほど強度が低下する性質（寸法効果）も比較的顕著に生じ、外力によって発生する応力が同程度であっても、板ガラスの寸法が異なるとその破損確率も異なってくる。ガラスファサードに負荷される外力には多くの種類があり、それによって引き起こされる

災害もまた多様である。現在、以下の手順において設計行為がなされている。

- ①外力の設定とその頻度
 - ②安全性の目標設定
 - ③実現のためのガラス品種と施工法の選定
- 安全目標をどの程度のレベルにするかについて、耐風圧、耐震性については最低限の値として法的な規制はあるものの、多くは施主または設計者にゆだねられている。ガラスファサードの設計には、板ガラスが破損しないような設計と、破損しても安全あるいは安心である2通りで行われる。ガラスファサードが破損しない設計において多くの場合、外力によって発生する最大応力と板ガラスの許容強度とを比較する設計がなされているが、板ガラス上に存在するき裂の確率分布に基づいて、目標とする安全性言い換えれば目標とする破損確率に対する荷重を許容とする信頼性設計を行うことが必要になってきている。特にビルにおいては、ガラスファサードが万一破損した場合に人体に与える傷害を最小限にする設計と、ビル内部の財産を守るような設計が必要となってきている。

このようにガラスファサードに必要な強度は唯一ではなく、どのような外力を想定するか、あるいは板ガラスの破損後の安全性についてどう考えるかによって変わってくるものである。

2. 予想される外力と必要な強度

板ガラスにおいては、平均強度に対する強度

のばらつきが大きいいためその統計的な処理が非常に難しい。現在多くの国において、2母数ワイブル処理が用いられているが、低い破損確率での精度の良い強度推定においては課題が多く残っている。参考のために、表1と表2にそれぞれ日本と欧州での板ガラスの許容強度の一例を示す。

2.1 風荷重

風荷重の考え方については、例えば「建築物加重指針・解説、日本建築学会編」*1や「動的外乱に対する設計—現状と展望—、日本建築学会編」*2などを参照されたい。現在、板ガラスの耐風圧強度は、強度の時間依存性を考慮して脈動繰り返し空気圧をガラス供試体に加圧する破壊試験の結果に基づいて定められているが、この脈動繰り返しの変動性状は実際の風圧変動の様子を充分反映しているとは言えず、新しい評価手法が検討されてきた。その一つとして、変動風圧の場合と等価な板ガラス強度になる一定圧力を求める手法が提案されている。法的な規制である建設省告示第109号においては風荷重としてはピーク風圧力を用いているが、提案されている手法は板ガラスの強度特性を考慮して、変動する風荷重と等価な定荷重を用いて設計するものである。また板ガラスメーカーにおける告示第109号の利用は、窓ガラスの4辺が単純支持と見なせる場合に限っており、支持条件が特殊な場合は有限要素法に代表される数値計算によって求められた最大応力と許容強度（あるいは許容曲げ応力）との比較

表1 短期・長期許容曲げ応力 (MPa)

ガラス品種	呼び厚さ (ミリ)	許容応力			
		<短期>		<長期>	
		面内	エッジ	面内	エッジ
フロート板ガラス	2・3・4・5・6・8	25	18	9.8	6.9
	10	25	18	9.8	6.9
	12・15・19	20	18	7.8	6.9
網入・織入麻線ガラス	6.8・10	20	9.8	7.8	6.9
網入・織入型板ガラス	6.8	15	9.8	5.9	6.9
強化ガラス	4・5・6・8・10・12・15・19	88	79	74	69
倍強度ガラス	6・8・10	44	35	29	25

表2 許容応力 (MPa)

Glass product	GlassType	Processing	Uniformly distributed load duration					
			Short duration loads Wind loads		Medium duration loads Snow loads, Climatic loads		Permanent loads Self-weight loads, Altitude loads	
			Ultimate limit state	Serviceability limit state	Ultimate limit state	Serviceability limit state	Ultimate limit state	Serviceability limit state
Float glass and sheet glass	annealed	17.0	30.7	8.5	15.3	6.4	11.5	
	heat strengthened	27.9	47.3	19.4	32.0	17.3	28.2	
	thermally toughened	49.6	80.7	41.1	65.3	39.0	61.5	
	chemically strengthened	62.7	100.7	54.2	85.3	52.0	81.5	
Enameled glass	heat strengthened	17.0	30.7	8.5	15.3	6.4	11.5	
	thermally toughened	30.1	50.7	21.6	35.3	19.4	31.5	
Patterned	annealed	13.3	23.6	6.7	11.8	5.0	8.8	
	heat strengthened	16.7	28.6	10.0	16.8	8.3	13.8	
	thermally toughened	28.3	46.1	21.7	34.3	20.0	31.3	
	chemically strengthened	48.3	76.1	41.7	64.3	40.0	61.3	
Wired	patterned wired glass	9.6	17.0	4.8	8.5	3.6	6.4	
	polished wired glass	13.3	23.6	6.7	11.8	5.0	8.8	

(注) 欧州での案であり、最終的に変更される可能性がある。

に頼っている。単純支持と見なせる場合とは、板ガラスがアルミサッシで代表されるフレームで支持されており、そのフレームのたわみ率が1/150程度までと考えられている。そのため現在のように、特にガラスファサードのように新しい板ガラスの支持が考えられ実際に施工される場合には、ほとんどが数値計算による最大応力と許容強度との比較で判断されていると考えて誤りではない。最大応力で判断する手法は、窓ガラスの破損に対して極めて安全側の設計になる。前述したDPG構法においても多くの場合、支持部となる穴周りや板ガラスエッジ部に最大応力が発生するため、穴加工による強度あるいは板ガラスのエッジ部許容強度が判断基準とされている。

諸外国の状況を調べると、米国には「ASTM E1300」が存在し、また欧州ではCEN (Comite Europeen de Normalisation: European Committee for Standardization) によって新しい設計手法が提案されている。ASTM におけるの基本は、最大応力ではなく信頼性設計によるものであり、CEN においてもその詳細は不明であるが、最大応力ではなく有効応力という概念を用いている。ただしCEN においてはその有効応力と板ガラスのも

つ許容強度（許容曲げ応力）との比較を判断基準としている。

日本、米国そして欧州での板ガラスの破損確率はそれぞれ1/1000, 8/1000, 1/1000となっている。これらの設計手法の国際的な統一のために、ISO/TC 160 において、板ガラスの強度の考え方や設計手法の議論がなされているのが現状である。

2.2 地震荷重

参考になる文献としては、文献*1, *2 や「建築知識：阪神大震災に学ぶ地震に強い建築の設計ポイント」*3などがあげられる。地震に対するガラスファサードの設計は、ビルの主要構造部やパネル、サッシなどの破壊以前に発生する変位に対して、出来る限り破損しないことであり、万一破損しても板ガラスの飛散・脱落がないことを目標としている。ガラスファサードの耐震設計において、法的には建設省告示第109号（1/150の層間変位に対して脱落しないこと）、告示第1622号による告示109号の改正（はめ殺し窓における硬化性シーリング材の使用規制）による規定がある。

地震によりビルに層間変位が生じると、外壁には面内・面外に複雑な変形が生じる。ガラスファサードはこの変形が直接作用しないよう

に、サッシと板ガラスの間に十分なクリアランスを取り、板ガラスがサッシ溝内で自由に移動・回転出来るような設計を基本としている。地震での窓ガラスの破壊は板ガラスとサッシとの接触によって生じるため、一般にはサッシ・ガラス間に必要なクリアランスを Bouwkamp の提案した計算式によって求めている。また数値計算を用いることで、地震時の変形に対応するシーリング材の選定も行っている。多くのサッシ施工においては、ガラスの許容強度は問題にはならない。

しかしながら新しいガラスファサードの施工においては、板ガラス支持部などに曲げ応力が発生するケースが多い。そのような場合には計算される最大応力と許容強度との比較で安全性の判断を行うことになる。SSG 構法や DPG 構法においては、ビルの躯体や板ガラス取り付け金物に予測される変位によって生じる板ガラスの最大応力が推定され判断される。この場合に必要な板ガラスの強度は、多くは曲げ強度であるが希に接触による圧縮強度も参考にされる。ガラスファサードの耐震設計は日本独自に発展し、国際規格としての ISO の場での議論には上らないものとなっている。

2.3 温度荷重

ガラスファサードが日射を受けた場合、照射された部分は熱吸収のために周辺部より高温になる。周辺部がサッシ施工であったりあるいは影を作る物体が存在している場合には、その温度差は大きくなる。またガラスファサード面の室内側にカーテンやブラインドがあれば、日射の反射・再放射の影響を受け板ガラス中央部の温度上昇が大きくなる。板ガラスの面内の温度差によりガラスエッジに単純引っ張り応力が発生し、この値が板ガラスのエッジ許容強度を超えると板ガラスの破損が生じることになる。この現象を一般に熱割れと呼ぶ。

シングルのガラスファサードにおいては、一般にエッジ許容強度が低い板ガラス（特に網入りガラス）について問題になる場合が多く、フ

ロート板ガラスや倍強度ガラスあるいは強化ガラスに関してはほとんど問題は生じない。しかしながら、現在のようにガラスファサードの複層化が進みさらに高断熱・高遮蔽の板ガラスを使用する場合には内部空気層の温度上昇と伴にガラスファサード中央の温度上昇が大きくなり、フロート板ガラスについての熱割れ検討が必須になってきている。

2.4 人体衝突による衝撃荷重

米国の安全規格団体 ANSI (American National Standard Institute) において、安全な窓ガラスとは以下のように定義されている。

Safety Glazing Material とは人体と接触して破損した場合、それによって切傷や刺傷が発生する可能性を最小限に減じるように製造し処理しまたは他の材料と組み合わせた窓ガラス材である。

このように人体衝突において注目される強度は、板ガラスが破損しても人体を傷つける可能性を極めて低く出来るものになる。人体衝突によつての板ガラスの破壊は、衝突による曲げ応力であり、板ガラス破損の有無はその曲げ応力と許容強度との比較で判断される。しかしこのように荷重速度が速い場合には、強度の時間依存性により見かけ上許容強度を大きく見なすことができる。

国内においては「ガラスを用いた開口部の安全設計指針：建設省通達平成3年4月改訂版通達」があり、公共の場での設計に利用されている。この中では、衝撃荷重によって破壊しない板ガラスと破壊しても安全な板ガラスという区分で早見表が作成されている。破壊しても安全であるということは、ガラス破片が極めて小さくまた落下する量も少ない板ガラスであり、たとえば網入りガラスや合わせガラスとなる。このように、破壊後の安全性を議論する場合には、板ガラス自身の強度ではなく、網や中間膜の強度が問題になる。現在 ISO の場で、主に米国対欧州という立場での設計基準が議論されているところである。

2.5 大規模台風による飛来物での衝撃荷重

2.1で述べた台風以上のもの、例えば竜巻とかハリケーンを対象にしたガラスファサードの安全性を検討する。国内においてはその対象となるビルはほとんど無いが、米国においては重大な問題であり板ガラスの強度として検討されている。しかしこの場合もほとんどの板ガラスは破壊するような状況であり、必要な強度は合わせガラスの中間膜ということになる。

2.6 犯罪行為による衝撃荷重

欧米では犯罪行為から自分自身の命・財産を守る目的でこのような荷重に対する板ガラスの需要が多い。国内でも金融機関などでの使用が注目されてきている。このような衝撃荷重に対して、まず板ガラスが破壊しないことが望まれる。板ガラスに発生する応力は多くの場合、鋭利な金属物あるいは弾丸の板ガラスへの接触によって生じるヘルツ破壊となる。しかし多層にした合わせガラスを用いることで接触面から発生したき裂の進展を止めることが出来る。荷重がさらに大きい場合には、最終的には接触面反対側の板ガラス表面での曲げ応力によって破壊が

生じる。したがって、必要なガラスファサードの強度は、やはり板ガラス表面での許容強度となる。

3. ま と め

外力として考えられるものとして火災荷重や積雪荷重などについてふれていないが、ビル用のガラスファサードで考えられるおもな荷重に対しての必要な強度について述べたものと考えている。板ガラスの破損を認めないならばほとんどの場合は板ガラス表面の曲げ強度が重要なものであることが分かる。しかし、非日常的な大きな荷重に対しては板ガラスの許容強度は極めて小さなものであり、板ガラス破損後の安全性設計ということが重要になってくる。

現在のガラスファサードの設計においては、板ガラスの破損確率が極めて小さい(1/1000未満)ものとなっているが、ビル内部の財産保全などを考えると破損後の安全性まで検討するという需要は増加するものと予想される。