

5-3 板ガラスの強度と強度設計

板ガラスに各種の荷重が作用する場合は、まず荷重条件を設定し、強度計算で求めた発生応力がガラスの許容応力以下となるよう、また同様に発生たわみが使用時間問題を誘起することのないように、それぞれ確認し、板ガラスの品種、厚さ、使用面積、支持方法を決定します。

1 板ガラスの強度

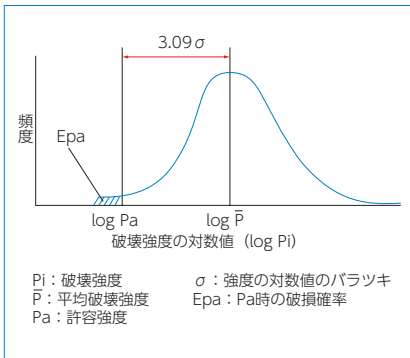
●ガラスの強度特性

ガラスは鉄鋼などと材質的に異なり、脆性破壊し、その破壊形状も危険な場合が多くあります。また破壊強度には相当のバラツキがあるので、強度設計時にはこれらを考慮した安全率を含む許容応力を用いなければなりません。

●安全率と破損確率

数多くのサンプルを用いた破壊試験で、ガラスの強度を求めると、破壊強度の対数値(log Pi)が正規分布します【図1】。これから統計処理により、安全率と破損確率の関係が導かれています。

【図1】破壊強度分布図



1 安全率

強度のバラツキを見込む安全率(S₁)は次の通り表されます。

$$\text{バラツキを見込む安全率}(S_1) = \frac{\text{平均破壊強度}(\bar{P})}{\text{許容強度}(Pa)}$$

2 破損確率

破損確率1/1000とは[ガラスに荷重がかかり、許容応力に等しい応力が発生した際、1000枚中1枚破損する確率がある]という意味です。曲げ破壊試験結果のバラツキから安全率と破損確率の関係は【表1】の通りとなります。

【表1】安全率と破損確率の関係(曲げ破壊試験)

ガラス品種	安全率(S1)	破損確率
フロート板ガラス 呼び厚さ2~8ミリ	1.00	0.5
	1.68	0.01
	2.00	0.001
	2.30	0.0001
	2.60	0.00001

建築物の強度設計の場合は、通常破損確率1/1000を考え、安全率2.0が採用されています。

2 板ガラスの許容曲げ応力

●適用方法

強度計算に用いる各種板ガラスの許容応力は、【表2】の通り基準安全率を考慮して定めています。また、許容応力は荷重の種類によって<短期>と<長期>とで異なり、さらに<面内>と<エッジ>とで異なるので適正に選定します【表3】。

【表2】許容応力の適用方法と基準安全率

	<短期>許容応力	<長期>許容応力
適用荷重	●短期荷重 風荷重など短期間の荷重	●長期荷重 水圧・積載・積雪荷重やガラスの自重など長期間の荷重
基準安全率	●バラツキを見込む安全率S ₁ 一般ガラス S ₁ =2 強化ガラス S ₁ =2	●総合安全率 S=S ₁ ×S ₂ S ₁ :バラツキを見込む安全率 S ₂ :疲労を見込む安全率 一般ガラス S=S ₁ ×S ₂ =3~5 強化ガラス S=S ₁ ×S ₂ =3

注: 水槽用ガラス・棚板ガラスや積雪のある屋根ガラスなどのように、長期荷重となる場合は、疲労による強度低下が起こるので、バラツキを見込む安全率(S₁)の他に、疲労を見込む安全率(S₂)を考慮しなければなりません。

【表3】各種板ガラスの短期・長期許容応力

単位:MPaまたはN/mm²{kgf/cm²}

	呼び厚さの合計 ミリ	平均破壊応力		許容応力			
		面内 σc	エッジ σe	<短期>		<長期>	
				面内 σac	エッジ σae	面内 σac	エッジ σae
フロート板ガラス レフライト レフシャイン を含む	8以下	54.9 {560}	35.3 {360}	24.5 {250}	17.7 {180}	9.8 {100}	6.9 { 70}
	8を超え12以下	51.5 {520}	35.3 {360}	22.1 {225}	17.7 {180}	8.8 { 90}	6.9 { 70}
	12を超え20以下	48.1 {490}	35.3 {360}	19.6 {200}	17.7 {180}	7.8 { 80}	6.9 { 70}
	20を超えるもの	46.6 {475}	35.3 {360}	18.6 {190}	17.7 {180}	7.4 { 75}	6.9 { 70}
網入・線入磨板ガラス	6.8・10	36.8 {375}	19.6 {200}	19.6 {200}	9.8 {100}	7.8 { 80}	3.9 { 40}
網入・線入型板ガラス	6.8	29.4 {300}	19.6 {200}	14.7 {150}	9.8 {100}	5.9 { 60}	3.9 { 40}
強化ガラス(水平強化)	4・5・6・8・10・12・15・19	142.2 {1450}	131.4 {1340}	88.3 {900}	79.4 {810}	73.5 {750}	68.6 {700}
倍強度ガラス	6・8・10・12	78.5 {800}	70.6 {720}	44.1 {450}	35.3 {360}	29.4 {300}	24.5 {250}

※ガラスエッジは全てカッターによるクリアカットとします。

注:
1.ここに示したガラスの許容応力は、板ガラスの強度検討に弊社が慣用的に使用している数値で保証値ではありません。
2.S1単位の数値はkgf/cm²で表示された値に0.0980665を乗じて小数第2位を四捨五入し、小数第1位を表示としています。
3.網入板ガラスや型板ガラスなどエッジ強度の低い品種は原則四辺支持で使用願います。

3 板ガラスの強度設計

●強度設計のポイント

1 計算式

強度計算式はTimoshenkoの微小変形理論式によります。ただし、四辺単純支持の耐風圧計算は許容耐力計算式(告示式P44)を使います。

2 支持状態

ガラス支持辺、および支持点は十分剛性のある部材により、強度上支障のない状態で支持します。

3 最大曲げ応力、最大たわみ発生位置

支持方法および荷重条件により最大値の発生位置が異なります。

次頁計算式において、 σ_c 、 δ_c は面中央部に、 σ_e 、 δ_e は辺中央部に最大値が発生することを示します。 σ_c 、 σ_e はP60に示す許容応力の面内 σ_{ac} 、またはエッジ σ_{ae} と比較し判定します。

4 長期荷重

水槽用ガラス・棚板ガラスや積雪のある屋根ガラスなどのように長期荷重となる場合は、疲労による強度低下が起これるので、長期許容応力と比較し判定します。

5 たわみ・揺れ

負荷時、たわみや揺れが大きく発生すると、不安感や外観上問題となる場合があるので、使用状態を想定のうえ判定します。特に強度の大きい強化ガラスの場合、許容応力近くまで負荷させると、たわみが大きくなりやすいので、必ずたわみのチェックを行なってください。

6 合わせガラス

合わせガラスの厚さは中間膜の剛性を考慮した単板ガラスとみなします。

合計板厚より次の近似式で等価な単板ガラスの板厚を求めます。

$$t = 0.866T - 0.268$$

t : 等価な単板ガラスの板厚[mm]

T : 中間膜を除く合わせガラスの合計板厚[mm]

等価な単板ガラスの板厚を理論式に代入し応力および、たわみの計算を行ってください。

なお、等価な単板ガラスの板厚計算式における適用範囲は、次の通りとします。

- ・ 中間膜がPVB(ポリビニルブチラール)、あるいはPVBと同等なものとする。
 - ・ 極端に高い温度で使用されないこと。
 - ・ 人体に影響を及ぼす可能性のある水槽などでないこと。
- *適用範囲外の条件で使用する場合は各々の板厚による荷重分担計算とする。

また、使用する許容応力は、

- ・ その合計板厚と同厚のフロート板ガラスの許容応力
- ・ 構成する各ガラスの許容応力のなかで最も低い値を合わせガラスの許容応力とします。

ただし、強化ガラスおよび、倍強度ガラスのみで構成する場合は、その構成する各ガラスの低い方の値を許容応力とします。

7 複層ガラス

力学的には重ね梁として作用するものとしますが、荷重側の荷重分担率の増大と、気圧変化を考慮し、分担荷重は次式(簡略計算)で求めます。

$$P_1 = \left(\frac{t_1^3}{t_1^3 + t_2^3} \right) \times \frac{P}{0.75}$$

$$P_2 = \left(\frac{t_2^3}{t_1^3 + t_2^3} \right) \times \frac{P}{0.75}$$

P : 設計荷重

$t_1 \cdot t_2$: ガラスの厚み

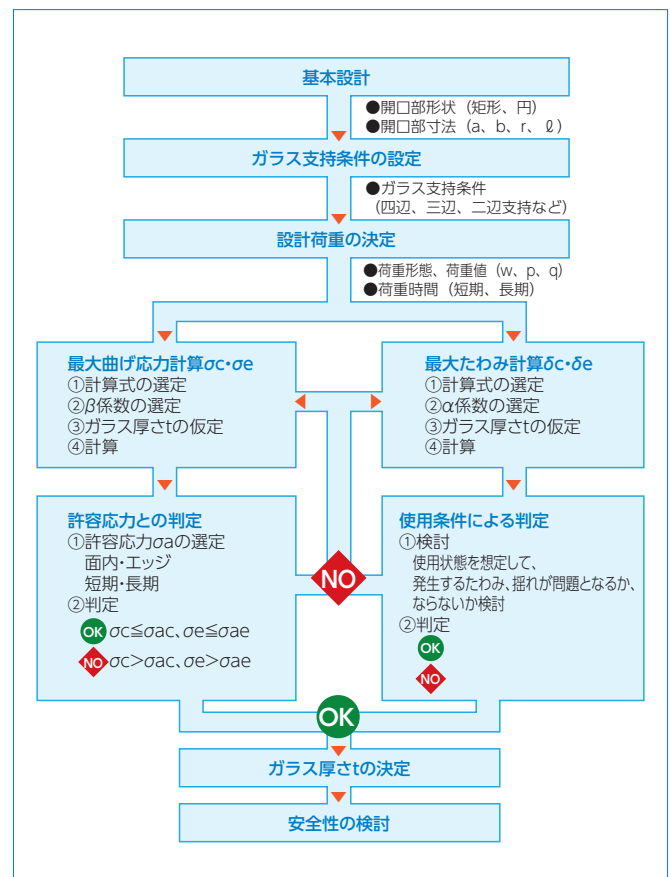
P_1 : t_1 の分担荷重

P_2 : t_2 の分担荷重

8 複層ガラス

強度上問題はなくても、特に高い安全性が要求される水槽用ガラス、床板ガラスなどの場合は、合わせガラスを用いてください。その他についても、安全性を検討してください。

●強度設計標準プロセス



5章 板ガラスの強度と安全

●強度計算式

ガラス形状、支持条件、荷重形態に応じて計算式を選定してください。一般に水槽設計に用いる三角荷重、台形荷重による計算式はガラス建材総合カタログ「商品編」の水槽ガラス施工法をご参照ください。

※各種ガラスの強度計算は弊社ホームページからご利用いただけます。
<https://glass-wonderland.jp/architectural-glass/simulation/>
 各種板ガラスの耐風圧・耐積雪計算プログラム (Design-G) をご利用ください。

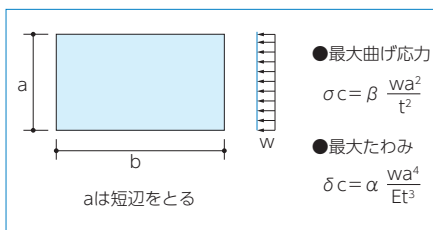
■記号の説明 ※SI単位 { }内は従来単位

<曲げ応力>	σ_c : ガラス面中央部の最大発生曲げ応力	MPaまたはN/mm ²	{kgf/cm ² }
	σ_e : ガラス辺中央部の最大発生曲げ応力	MPaまたはN/mm ²	{kgf/cm ² }
<たわみ>	δ_c : ガラス面中央部の最大のたわみ	mm	{cm}
	δ_e : ガラス辺中央部の最大のたわみ	mm	{cm}
<荷重>	w: 等分布荷重	MPaまたはN/mm ²	{kgf/cm ² }
	P: 集中荷重	N	{kgf}
<寸法>	a: 矩形の一辺 (円の場合は半径)	mm	{cm}
	b: 矩形の他辺	mm	{cm}
	t: ガラス厚さ	mm	{cm}
<係数>	E: ガラスのヤング率	7.16 × 10 ⁴ MPaまたはN/mm ²	{7.3 × 10 ⁵ kgf/cm ² }
	β : ガラス辺比による応力係数		
	α : ガラス辺比によるたわみ係数 (板ガラスのポアソン比は0.23とする)		

[表] 計算式の選定

ガラス形状	支持条件	計算式	ガラス建材総合カタログ「商品編」 水槽ガラス施工法 (参照)	
矩形	四辺単純支持	等分布荷重	①	(5) 等分布荷重を受ける四辺単純支持矩形板
		部分荷重	②	
		三角荷重	②	(1) 三角荷重を受ける四辺単純支持矩形板
		台形荷重	②	(3) 台形荷重を受ける四辺単純支持矩形板
	三辺単純支持	等分布荷重	③	
		三角荷重	③	(7) 三角荷重を受ける三辺単純支持矩形板
	二辺単純支持	等分布荷重	④	
円形	全周支持	集中荷重	⑤	
		等分布荷重	⑥	
		等分布荷重	⑦	(6) 等分布荷重を受ける全周単純支持円形板
		三角荷重	⑦	(2) 三角荷重を受ける全周単純支持円形板
		台形荷重	⑦	(4) 台形荷重を受ける全周単純支持円形板

①等分布荷重を受ける四辺単純支持矩形板

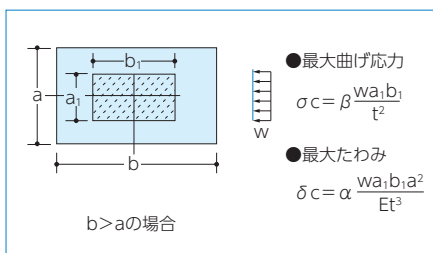


[表] $\beta \cdot \alpha$ 係数値

b/a	1	1.2	1.5	2	3	4	5
β	0.272	0.362	0.476	0.603	0.711	0.740	0.748
α	0.047	0.065	0.088	0.116	0.139	0.146	0.148

(注) 許容耐力計算式 (告示式、P44) を使用します。

②部分等分布荷重を受ける四辺単純支持矩形板



[表] $\beta \cdot \alpha$ 係数値

b/a	a1/a	1						1.4				2					
		0.01	0.2	0.4	0.6	0.8	1	0.01	0.4	0.8	1.2	0.01	0.4	0.8	1.2	1.6	2
0.01	β	2.988	1.720	1.322	1.075	0.888	0.732	3.158	1.501	1.087	0.824	3.226	1.587	1.184	0.942	0.767	0.628
	α	0.132	0.128	0.118	0.106	0.092	0.077	0.169	0.156	0.133	0.107	0.188	0.176	0.155	0.133	0.112	0.093
0.2	β	1.720	1.206	1.024	0.866	0.729	0.603	1.683	1.200	0.925	0.713	1.636	1.288	1.023	0.831	0.683	0.561
	α	0.128	0.124	0.115	0.103	0.090	0.075	0.164	0.153	0.130	0.105	0.183	0.172	0.152	0.130	0.110	0.091
0.4	β	1.322	1.024	0.801	0.694	0.592	0.492	1.286	0.968	0.778	0.610	1.230	1.051	0.872	0.721	0.598	0.492
	α	0.118	0.115	0.107	0.097	0.084	0.070	0.153	0.143	0.122	0.099	0.171	0.161	0.143	0.123	0.104	0.086
0.6	β	1.075	0.866	0.694	0.563	0.483	0.403	1.042	0.794	0.654	0.517	1.010	0.870	0.739	0.620	0.517	0.426
	α	0.106	0.103	0.097	0.087	0.076	0.064	0.138	0.129	0.111	0.090	0.154	0.146	0.130	0.112	0.095	0.079
0.8	β	0.888	0.729	0.592	0.483	0.397	0.331	0.860	0.656	0.546	0.435	0.831	0.723	0.622	0.525	0.439	0.363
	α	0.092	0.090	0.084	0.076	0.066	0.056	0.120	0.113	0.097	0.079	0.134	0.128	0.114	0.098	0.083	0.069
1	β	0.732	0.603	0.492	0.403	0.331	0.272	0.708	0.540	0.451	0.360	0.684	0.596	0.515	0.436	0.365	0.302
	α	0.077	0.075	0.070	0.064	0.056	0.047	0.101	0.095	0.082	0.066	0.113	0.107	0.096	0.083	0.070	0.058

(中央部の矩形領域に荷重)

③等分布荷重を受ける三辺単純支持矩形板

●最大曲げ応力
 $\sigma_e = \beta \frac{W \cdot a^2}{t^2}$

●最大たわみ
 $\delta_e = \alpha \frac{W \cdot a^4}{E \cdot t^3}$

a はフリー辺とする
 ○最大応力位置
 ×最大たわみ位置

【表】β・α係数値

b/a	0.1	0.3	0.5	0.7	1.0	1.2	1.5	2	3	∞
β	0.071	0.195	0.350	0.511	0.661	0.715	0.758	0.783	0.791	0.791
α	0.005	0.036	0.076	0.108	0.139	0.150	0.158	0.164	0.165	0.165

④等分布荷重を受ける二辺単純支持矩形板

●最大曲げ応力
 $\sigma_e = \beta \frac{wa^2}{t^2}$

●最大たわみ
 $\delta_e = \alpha \frac{wa^4}{Et^3}$

a はフリー辺とする
 ○最大応力位置
 ×最大たわみ位置

【表】β・α係数値

b/a	0.5	1	2	∞
β	0.765	0.782	0.791	0.791
α	0.160	0.163	0.165	0.165

⑤集中荷重を受ける二辺単純支持矩形梁

$a_1 \geq a_2$ とする
 ガラス幅bとする

●最大曲げ応力
 $\sigma_e = \frac{6a_1a_2P}{(a_1+a_2)bt^2}$

●最大たわみ
 $\delta_e = \frac{4Pa_2}{9Ebt^3(a_1+a_2)} \sqrt{3[(a_1+a_2)^2 - a_2^2]^3}$

⑥等分布荷重を受ける四点支持正方形板

●最大曲げ応力
 $\sigma_e = 0.916 \frac{wa^2}{t^2}$

●最大たわみ
 $\delta_e = 0.294 \frac{wa^4}{Et^3}$

○最大応力位置
 ×最大たわみ位置

⑦等分布荷重を受ける全周単純支持円形板

aは半径をとる

●最大曲げ応力
 $\sigma_e = 1.212 \frac{wa^2}{t^2}$

●最大たわみ
 $\delta_e = 0.756 \frac{wa^4}{Et^3}$