

水族館の展示水槽に関する実践的研究 —水槽用板ガラスとアクリル樹脂板 との比較について（その１）—

山 本 和 夫

Practical Study on the Design of Exhibition Tanks of Aquaria —Comparison between Plate Glass and Acrylic Resin Plate of Exhibition Tanks (Part 1)—

Kazuo YAMAMOTO

Plate glass or acrylic resin plate is used in a window of an exhibition tank of an aquarium. This paper is the first report of the series of works, which describes the properties of these materials, their deflection by water pressure and method to support them to their circumstance etc.

The purpose of this study is to be useful to the design of an exhibiton tank in an aquarium.

1. はしがき

水族館における展示水槽の窓には、(1)見やすさ、(2)十分な安全性と水密性、(3)維持管理の容易さが求められる。水槽の窓には板ガラスまたはアクリル樹脂板が使用されるが、本文（その１）においては、これらの材料のもつ諸性質、水圧に対する板の応力やたわみの状態、周縁部への支持方法などについて比較検討する。

本研究は、水槽窓用透明板の具体的設計に役立てることを目的としたもので、既存水族館の水槽の実態調査から得られた設計上の基本となるいろいろの事項をもとにして記述を行なったものである。展示水槽にとって重要な水密性の問題については、水槽躯体の耐水性、シーリング技術など他方面からの設計施工の技術を必要とし、ゆるがせにできない問題であるが、本研究においては水槽用透明板そのものに限り記述する。

2. 板ガラスおよびアクリル樹脂板の変遷

(1) 板ガラス

板ガラス工業が本格的に隆盛になったのは、20世紀初頭からで、その企業的成功はアメリカに

においてなされた。その間にあって、イギリスのピルキントン社およびベルギーのサンプル社の板ガラスの研究開発には著しいものがあった。

磨板ガラスの製造は1922年頃から始まり、1955年には板ガラスを連続的に両面同時に研磨する方法が開発され、磨板ガラスの生産能率は一挙に向上した⁽¹⁾。

表1—1はわが国における板ガラス製造の変遷を示したもので、相当早期から官民ともその製造に努力したが成功せず、1920年から始めて板ガラスの製造が軌道に乗った⁽¹⁾。また表1—2はわが国の主要ガラス会社における普通板ガラスの製造に続く強化ガラス、強化合せガラス、複層ガラスの製造年代を示したものである⁽²⁾。

表1 わが国における板ガラス製造の沿革

1

西 暦	板ガラスの製造
明治初年 ～明治末年	明治初年（明治元年＝1867年）工部省経営のもとに板ガラスの製造が始められたが不成功に終わった。 その後明治末までの間に当時の財界の有力者が相集り、板ガラスの製造を始めたが失敗した。
1902 (明治35)	第16回帝国議会は板ガラス工業の育成を図るため巨額の金の交付を決議したが、日露戦争勃発のため中止となった。
	その後、東洋硝子製造株式会社がベルギー、フランス、イギリスの合弁で板ガラスの製造に着手したが、資金不足のため惜しくも解散した。
1907 (明治40)	旭硝子株式会社が設立された。1909年国産板ガラスの製造をはじめて本格的に行なった。発足当時はベルギー式製法によったが、次第に製造方式を改め、規模を拡大していった。
1918	日米板硝子が設立され、1920年から板ガラスの製造を開始した。1931年社名を日本板硝子株式会社に改めた。
1935	旭硝子はアメリカから磨板ガラスの製造技術を修得した。
1936	日本板硝子も磨板ガラス工場を建設した。
1958	セントラル硝子株式会社が設立された。

2

品 質	厚さ (mm)	市販年(西暦)	
		旭硝子KK	日本板硝子KK
強化ガラス	8 まで	1938	
	10, 12	1966	1956～57
	15	1966	1966～67
	19	1971	1971～72
強化合せ ガラス	最初のもの	1938	
	普 及	1965	
	10,12, 15の 組 合 せ		1966～67
	19		1976
複層ガラス		1952	

表2はわが国水族館の展示水槽用透明板の変遷を調査したものである。

初期の水族館では水圧に耐えるベルギー製やイギリス製の厚い普通板ガラスが用いられ、その後、国産の強度の大きいガラスの製造が開始されても、イギリス製品は1967年秋田県立男鹿水族館の頃まで根強く進出した。

水槽窓ガラスには、像にひずみがなく、水圧に耐え、たわみが少なく、大形であることが求められる。そのために普通ガラスの代りに磨ガラス、強化ガラス、強化合せガラスが、また冷水槽の結露防止用として強化複層ガラスが用いられるようになってきた。

(2) アクリル樹脂板

表2 展示水槽用板ガラスおよびアクリル樹脂板

番号	水族館名称	開館 (西暦)	水槽窓		板ガラスまたはアクリル樹脂板		備考
			幅 (m)	高さ(m)	厚 (mm)	種類	
1	第4回内国勧業博覧会	1895					
	(1) 岡崎水族室		1.05	0.90	9	外国製?	水圧によりガラスが破損、水深を下げ、ガラスを2枚接合。
	(2) 兵庫水族室		1.55	1.20	9	同上	水圧によりガラスが破損、水深を下げ、ガラス面外側中央に鉄製方立を設ける。
2	第2回水産博覧会水族館	1897	0.97	0.76	25	ベルギー製	ガラス継手を設けた幅広の水槽にはI形鉄製方立を用いる。事前にガラスの水圧試験を行なう。
3	浅草水族館	1899	3.04	1.52	25	同上	窓の中間に方立があったものと想像される。
4	第5回内国勧業博覧会 付属施設(堺水族館)	1903	1.20	1.60	38	ビルキントン社製(イギリス)	ガラス5連窓。方立鉄製。
5	観艦式記念海港博覧会 付属施設(湊川水族館)	1930	1.00	1.00	25, 32	外国製	
6	東京大学理学部付属臨海 実験所水族室標本室	1932	1.00	1.30	32	同上	
7	阪神パーク水族館	1934	1.50	0.94	30	ビルキントン社製(イギリス)	
8	東京大学農学部付属水産 実験所(新舞子水族館)	1936	1.50	1.00	38	サンゴバン社製(フランス)	
9	江ノ島水族館	1954	1.00	0.70	10	強化ガラス	
10	市立下関水族館	1956	1.00	0.80	12	同上	
11	みさき公園自然動物園 水族館	1957	1.04	1.05	30	ビルキントン社製(イギリス)	大水槽 水深2.75m
12	よみうりランド海水 水族館	1964	2.21	1.20	15×2	強化合せガラス	水深2.00m
			2.10	1.00	12	強化ガラス	水深1.25m
13	東京都恩賜上野動物園 水族館	1964	5.70(4枚継ぎ)	1.90	32×2	アクリル樹脂板	大水槽
			1.20	0.85	12+(12)+12	強化複層ガラス	冷水槽
14	大分生態水族館	1964	1.35	1.35	38	ビルキントン社製(イギリス)	回遊水槽 水深1.70m
			3.00	1.00	40	アクリル樹脂板	水深 1.40m
15	下田海中水族館	1967	0.50	0.50	15×2	強化合せガラス	大水槽 水深5.20m
16	秋田県立男鹿水族館	1967	1.35	1.35	38	ビルキントン社製(イギリス)	回遊水槽 水深1.90m
17	京急油壺マリンパーク	1968	1.50	2.20	12×2	強化合せガラス	回遊水槽 水深3.00m
18	屋島山上水族館 シーパレス	1969	10.05	2.00	35×2+5	アクリル樹脂板	回遊水槽(凹面)方立なし、水深2.00m、全館水槽アクリル樹脂板
19	東海大学海洋科学博物館	1970	2.50	6.00	37.5×4	アクリル樹脂板	大水槽、水深5.50m 高さ3枚継ぎ
			1.47	1.00	12+(12)+12	強化複層ガラス	冷水槽
20	鴨川シーワールド	1970	1.50	2.50	15×3	強化合せガラス	水中劇場 水深3.5m(水槽底面まで)
			1.50(直径)	2.50	40	アクリル樹脂板	円柱形水槽、大口径パイプの押出製品
21	みさき公園自然動物園 水族館(海中遊歩道)	1971	1.15	1.00	43	アクリル樹脂板 合せ板 (40+MR ₃ =43)	側壁 水深1.63m

22	宿毛市海洋博物館	1972	7.30	1.30	63	アクリル樹脂板 合せ板 ($60 + MR_3 = 63$)	回遊水槽（凹面）方立なし、水深 1.45m
23	鴨池マリンパーク （海中レストラン）	1972	0.91	1.10	76	アクリル樹脂板 合せ板 ($MR_3 + 35 + 35 + MR_3 = 76$)	水深6.50m
			円形(直径0.90)		76	同上	水深9.40m
24	小樽水族館（改築）	1974	8.47	1.78	80	アクリル樹脂板 合せ板	黒潮の海（回遊水槽）
25	高知県立足摺海洋館	1975	2.50	6.00	50×3	同上	
26	沖縄海洋博覧会記念公園 水族館	1975	4.00	3.77	200	同上 ($43 \times 4 + 12$)	黒潮の海（大水槽）
			3.47	2.10	150	同上(20×7)	さんごの海（大水槽）
27	サンシャイン国際水族館	1978	9.60	1.70	100	アクリル樹脂板 合せ板	回遊水槽

注：（１） 厚(mm)の欄 （ ）印は空気層の厚さ

（２） 種類の欄 MR_3 は耐擦傷性のアクリル樹脂板の商品名

展示水槽窓として、ガラスのほかに透明なアクリル樹脂板が登場したのは、アクリル樹脂板がガラスよりも厚い大板をつくり得るなどの利点を有するからであった。

わが国のアクリル産業は、第2次世界大戦のぼっ発に伴う航空機の風防ガラスの需要によって栄え、終戦を迎えその生産は一時完全に停止されたが、1950年頃から再び隆盛のきざしが見られた経過をたどっている。

展示水槽にアクリル樹脂板が利用されたのは1962年頃からである。旧上野動物園水族館(廃館)に増設された中型の幅広い水槽のアクリル樹脂板が最初のものと思われる。アクリル樹脂製の置水槽はこの時期に既に発売が始められていたが、高価な上に加工技術がすぐれていないため普及度が低かった。しかし、その後この種の製品は世間の需要に応じて漸次急速に伸びていった。表2にみられる改築後の上野動物園水族館(1964年)の大水槽のアクリル樹脂板は大形板の最初のものであり、その後屋島山上水族館(1969年)において回遊水槽をはじめとする全展示水槽にアクリル樹脂板が採用されたのを契機として、アクリル樹脂板は水槽窓に、特にその特性から大形窓用として著しい進出をとげ今日に及んでいる。

3. 板ガラスおよびアクリル樹脂板の特徴

3.1 板ガラス

(1) 磨板ガラス

磨板ガラスは物体の像にゆがみを生じないが、次記の強化ガラスに比べると強度が劣る。初期の水族館の頃以外には用いられていない。

(2) 強化ガラス（磨板）

強化ガラスは曲げ強度が普通板ガラスの5～6倍もあり、破損時にガラス全体が細かい粒状破片となる特徴を有している。市販品のうち、水槽用には10, 12, 15, 19mmが用いられる。強化ガラスはでき上ってからの切直しが不可能なので、形状寸法は強化加工前に正確に定めておかね

ばならない。

強化ガラスの縁（エッジ）の部分は衝撃に対して弱く割れ易い。特にかどの部分は尖っているため大きな弱点となる。従ってガラスの運搬、枠への嵌込み作業には細心の注意を必要とする。

強化ガラスの表面のきずは、振動その他の外力の作用を受けると深さを増し、これが引張応力層に達すると破壊することもある。また水槽内表面のきずは藻の胞子の付着により藻が発生しガラス面を汚す恐れがある。

(3) 強化合せガラス（磨板）

強化合せガラスは2枚の強化ガラスを強い接着力と強じん性を有するポリビニールブチラールの中間膜（厚さ0.3mm）で強く加圧接着したものである。強化ガラスと生板（強化しないガラス）とを接着することもできるし、また2枚でなく数枚の合せガラスもつくることができる。ただ強化ガラスと生板との合せガラスは強化ガラスの反りにより生板ガラスの強度低下をきたすので、水槽には避けられる。8, 10, 12, 15mm厚のものの2枚合せ、12, 15mm厚のものの3枚合せなどがある。

合せガラスは同厚の1枚もののガラスよりも強度が低下する。

合せガラスは衝撃による破壊時に強じんな中間膜の介在によってガラス破片は飛散しない。しかし同厚の1枚ガラスよりも衝撃に対しては弱い。なお可視光線透過率は中間膜の存在によってもあまり変わらない。

(4) 強化複層ガラス（磨板）

強化複層ガラスは2枚（または数枚）の強化ガラスを一定間隔に離して組合わせ、その周縁を金属で密封し、内部の空気を乾燥空気に置換したもので、普通の気象条件においては内部に水滴はたまらない。その特長は断熱性および結露防止の2点にあるので冷水槽用として用いられる。中間の空気層は狭いところに閉じ込められ対流が起りにくく、非常に熱を伝えにくい。実験によると、中間空気層の厚さを12mm以上にするのは熱的效果の増加をもたらさないことが知られている。強化複層ガラスは特殊構造のもので、(a)重量は少くとも2倍はあり取扱いにくい、(b)ガラスにねじれや衝撃を加えると、ガラスの破損のほかにガラスの接着金属に無理な力を生じ、密封してある乾燥空気の漏洩のおそれがある。(c)ガラスの製作後、切り直しなど寸法の変更はできない。

水槽に用いる強化ガラスには10, 12mm厚強化ガラスを2枚用い、空気層厚を12mmにしたものが主として用いられている。

(5) 板ガラスの防曇性コーティング

冷水用板ガラスには防曇性が求められる。放射線重合による粘性のあるコーティング液が開発され現在実用化の段階に入っているのは喜ばしい。ガラスにコーティング液を塗布しこれを100℃前後に加熱し塗膜を硬化させ結露防止に役立たせるのであるが、ただ現在のところ、もとのガラスにくらべてきずのつき易い欠点がある。

このほか放射線を利用した耐摩耗性コーティングの開発もあるが、これには防曇効果がなく、

これら両性質の併有は現在未解決だということである⁽³⁾。

(6) 板ガラスの耐用年数

板ガラスの材質の疲労を考慮して、耐用年数を40年とする。

3. 2 アクリル樹脂板

アクリル樹脂は一般的呼称で、正式にはメタクリル樹脂と呼ばれる。アクリル樹脂板は、

- (1) 透明度にすぐれている。
- (2) 軽量で強じんである。重さはガラスの約1/2、耐衝撃強度が大きく、可撓性があるので破損の危険はきわめて少ない。
- (3) 加工しやすい。板材のほか、ドーム状、円筒状のもの、さらに大口径肉厚パイプの押出品も製造できる。
- (4) 耐候性は10～14年程度といわれるが、屋外使用の場合は耐候性のほかに砂などの飛散によるきずが問題となる。
- (5) 熱伝導率が小さく、ガラスの約1/4である。冷水槽に用いた場合はガラスよりも結露を生じにくい。
- (6) 板の小口を接着して大板をつくり、また板を重ねて接着し厚板をつくることもできる。ただし重合接着による厚板の強度は同厚1枚板の強度よりも低下する。重合による接着層は殆んど無色透明であり、強度を必要とする水槽では各種接合法のうち最も完全な重合法が用いられる。
- (7) プラスチック板のなかには魚類その他の水生動物に対して有害な物質を溶出するものがあるが、アクリル樹脂は安全である。軟質の塩化ビニールは有害といわれる。

アクリル樹脂の欠点は、

- (1) 比較的軟かい。表面の硬度はアルミニウムと同程度で、表面を損傷しないよう注意を要する。損傷した場合は研磨剤で再仕上げすることが可能である。

軟質の欠点を補うため耐摩耗性アクリル樹脂板がある。外観は普通のアクリル樹脂板と異ならず、機械的強度、光学的性質、耐候性も殆んど差がない。なお前述の放射線重合による耐摩耗性コーティング液はプラスチック基材にも適用が可能である⁽³⁾。

- (2) 膨張しやすい。温度による線膨張係数は、鉄やガラスの約7～8倍である。また吸湿によっても膨張する。
- (3) 摩擦により帯電する。帯電防止剤による表面処理、1%濃度の石けん水を含ませた軟かい布で軽く拭うなどの防止法が行われる。
- (4) 塗料の溶剤の種類によっては板の表面にき裂がはいる。
- (5) 炎に触れると着火する（着火温度400℃）。しかし引火性はない。
- (6) クリープ性状が大きい。20℃、100kg/cm²の応力度のもとでは、見掛けの弾性係数は約5年で半減する（もとは3×10⁴kg/cm²）⁽⁴⁾。

水槽用パネルとして用いられるアクリル樹脂板の寸法は、3,300×2,500×50mm（最大厚さ）、

2,550×2,150×50mm (最大厚さ), 5,000×2,700×12mm (最大厚さ), なおディスプレイ用として大きさ2,000×1,000×300mmも製作されている。合せ板は通常3～4枚, 重合接着層の厚さは数mm程度である。ただし沖縄国際海洋博の水槽には5枚の積層重合板が用いられた。

4 板と水圧

4.1 初期の水槽用ガラスの場合

記録によれば, わが国の初期の頃の水圧を受けた水槽用ガラスの状態はつぎのようであった。

- (1) 第4回内国勸業博覧会京都水族室(1895年)では, 水槽のガラスとして幅1.05m, 高さ0.9m, 厚さ9mmのものをを用いたが, 水槽が満水になるとガラスがよく破壊したので, 水深を0.7mに下げ, ガラスを2枚重ねとした。また兵庫水族室ではガラスは幅1.55m, 高さ1.2m, 厚さ9mmであったが, 水圧による破損防止のため, ガラスの外側中央部に3cm角の鉄柱をたててガラスを2等分し, 柱には白いゴムを添えパテ止めとした。また水深は0.76mに下げた。
- (2) 第2回水産博覧会水族館(1897年)の水槽の1つは, ガラス1.5m, 高さ1.2m, 厚9mmでこれを横方向に4枚連続して並べ, 継目にはI形鋼柱をたてた。ガラスはベルギー製で, 横浜硝子株式会社から農商務省に納入されたものを東京帝国大学においてテストを行ない, その結果(破壊強度, 撓み)により各水槽の広狭に応じてガラスの厚さを決定した。ガラスには1インチ1/4, 1インチ, 7/8インチ, 5/8インチ厚のものが用いられた。

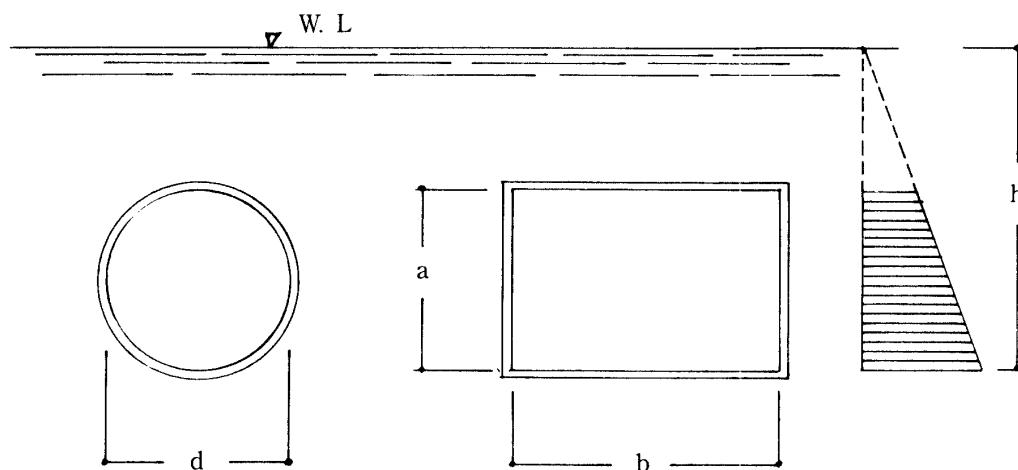
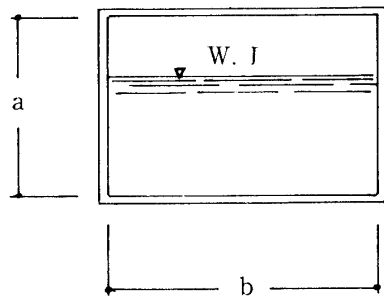
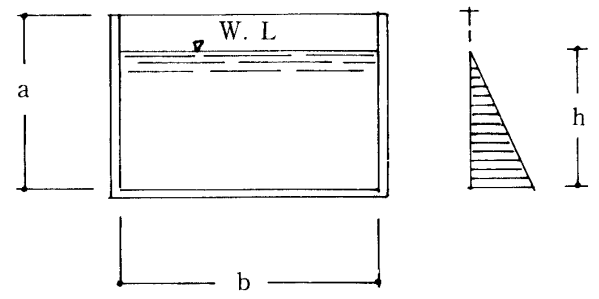


図1

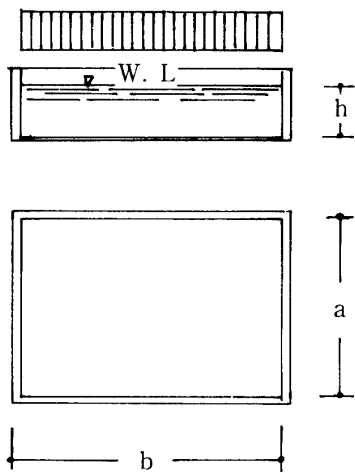
(1) 4辺支持または固定



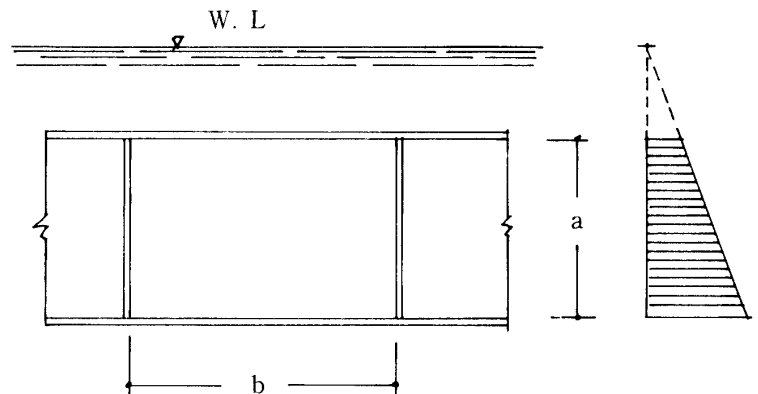
(2) 4辺支持または固定



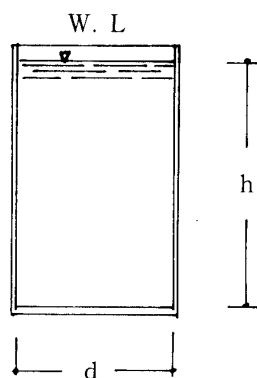
(3) 3辺支持または固定1辺自由



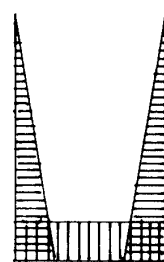
(4) 4辺支持(底面ガラス)



(5) 板を左右に連続して
継いだ場合



(a)



(b)

(6) 柱状水槽

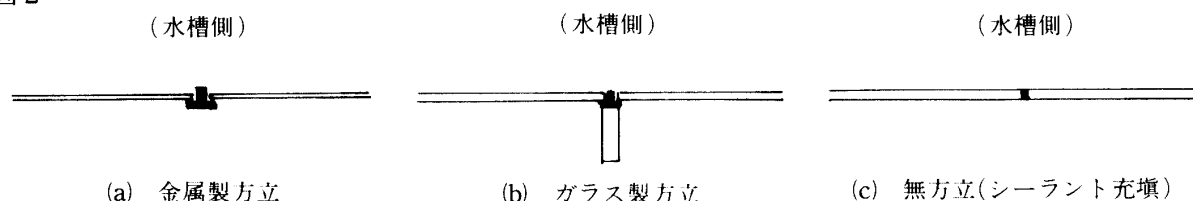
4.2 板の支持方法

各種水槽の透明板、(板ガラス、アクリル樹脂板とも)にかかる水圧の状態は図1(1)～(6)に示す通りである。(1)は固定水槽や側面透視型の大水槽の展示窓の場合である。水圧を少しでも減少させるには水面を窓上端よりあまり高くしない方がよい。窓の形状には長方形のほかには円形のものもある。板を周縁部に取付ける方法は初期においては支持と考えられる構法であったが、大型水槽の用いられる最近の傾向では水密性の点から取付け方法は固定に近いものとなっている。

(2)は(1)の場合の水面が板の中間にある半水位型の場合であり、(3)は支持枠が底辺および左右にあり、上側は自由になっている場合である。これは海獣ショープールの前面壁を透明板とした場合などである。

(4)は水平に置かれた板に上方から水圧がかかる天井水槽の場合である。置水槽の底板もこれに該当する。(5)は板を横方向に連続して継いだ場合で、板の継目には図2の(a)金属製方立、(b)ガラ

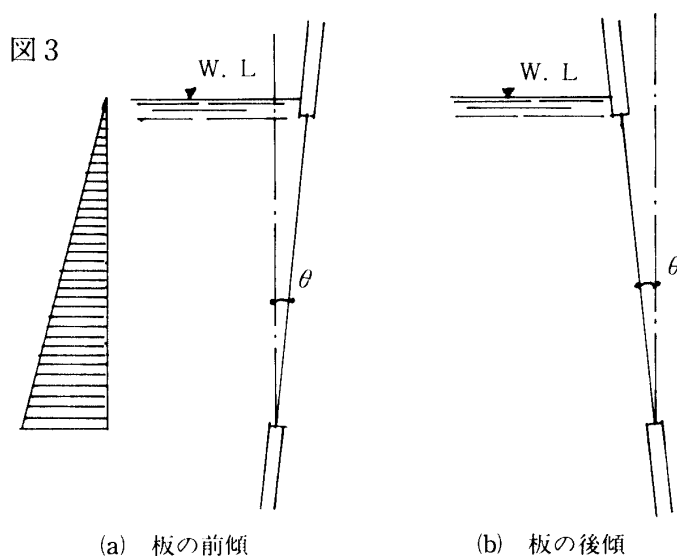
図2



ス製方立、(c)無方立(継目にシーラント充填)の場合がある。(c)の場合は上下両端を支えた版構造と考えられるもので、左右の接する板相互の変形が一致するように設計される。また図1の(6)は柱状の独立型水槽で円筒形のものが多く、応力の点からも有利な形であるが、ときには六角形、八角形など多角形柱のものもある。しかしこの場合は板の縦方向の接合部に押圧力(thrust)がかかるので構法上注意を要する。図3は板を観覧側に(a)前傾あるいは(b)後傾させた場合である。前者は観覧側からの光の反射緩和対策に、また後者は水中劇場のように高い桟敷から観覧し易くする場合に用いられる。

4.3 水圧による板の曲がりとなわみ

水圧による板(板ガラス、アクリル樹脂板とも)の板の曲げとなわみの計算には、一般的にTimoshenkoの平板理論式⁽⁵⁾が用いられる。ガラスメーカーの実験によると、この理論式から求められた数値は、耐水圧試験の実測値にくらべてみて、非常に実用に適するものであるということである。上掲図1の(1)、(4)などの場合は、ガラスメーカーから実用計算に便利な多くの図表が発表されている⁽⁶⁾。



4 辺支持板に生ずる最大曲げ応力やたわみは板の中央部に生じ、この場所にくらべて他の場所は全く問題にならぬほど小さい。これらの値は水深が大きくなるほど大きくなる。また板の形は正方形が最も有利で、寸法は小さい方がよい。板厚が薄くなると曲げ応力やたわみ量は著しく増して不利となる。同厚の板2枚を接着した合せ板は1枚板に水圧の1/2がかかるものとして計算するが、前述のように合せ板は同厚の1枚板より強度が減少するので注意しなければならない。

水槽に取付けられた板のたわみには、板そのもののたわみのほかに、板周辺と枠との接触部に生ずるたわみがある。後者については枠の移動やひずみを皆無にして板に不利なたわみ量を増大しないようにする。支持枠のうち方立の最大たわみは設計圧力時において長さの1/300程度に押えることが望ましい。また支持枠の加工精度が良くないと、板の安全率低下、水密性低下を招く。

板のたわみ量が多いと、レンズ効果を生じて像をひずませ、さらに観客に破壊の不安感を与えるとともに、枠からの引抜けによる水洩れの恐れがある。許容たわみ量は経験上板の短辺方向の長さの約1/200～1/300以内に制限すべきであると云われ、また他の見解では、矩形板の対角線の長さの0.5%以内、できれば0.3%以内にすることが望ましいという。たわみの感知限界は0.1%で、0.5%を越えると危険感が生ずるとも云われている。なお強化ガラスは生板よりも強度は大きいが同一荷重に対するたわみ量には変りはない。このように板の設計には強度のほかに発生たわみについても検討がなされねばならない。

板の支持枠へのかかり代が少ないと、板がたわみにより枠から引抜かれ水漏れの原因になる恐れがあり、また図4のように外部から板の小口が青く見えて見苦しい(板ガラス)。板のかかり代は水槽パネルの大きさ、形状、支持方法によって一定しないが、板ガラスの場合は厚さの1.2～1.5倍とされている。またアクリル樹脂板では、かかり代は①全周辺コンクリート支持枠の場合は10cm前後、②コンクリート内に挿入して固定する場合は15cm以上、板厚の2.5～3.0倍、③金属支持枠に納める場合は5cm以上とするのが大略の目安といわれ、また1辺の長さの3～5%程度という意見もある。

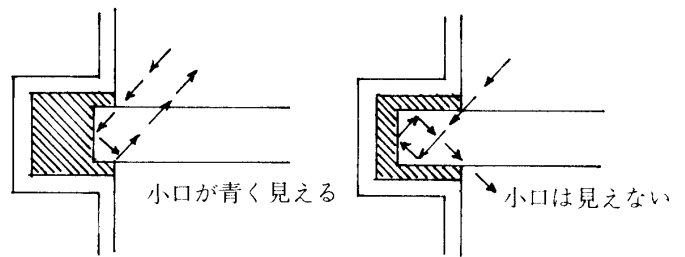


図4

4.4 板の許容応力度など

(1) 板ガラス

水槽用板ガラスの安全率は、①長期荷重時の疲労現象に対する安全率と、②ガラスの破損確率を考慮に入れた安全率との相乗積によって求められる。

板ガラスは長期間水圧を受けた場合、材質に疲労を生ずるので、これに対して安全率を採らねばならない。またガラスは同一材質のものでも破壊強度にかなりのバラツキがあるので、破損確率を導入した安全率を追加しなければならない。破損率はガラスがある荷重を受けた場合、その荷重でガラスが破壊するかも知れぬという統計的見地から求められた確率で、水槽用ガラスの確率の値は1/10,000～1/100,000、通常3/100,000の値が採用されている(耐風圧力強度計算の

場合は1/1,000)。

表3-(1~4)はガラスの安全率および許容曲げ応力度を示したものである。このうち設計に必要とするものは、総合安全率($F_1 \times F_2$)による最後の表3-4の許容曲げ応力度の値である。

表3-1 疲労に対する安全率(F_1)

品 種	荷重時間 100秒の時の強度を1とした40年後の強度	安全率(F_1)
普通板ガラス 磨板ガラス	$1/2.0 \sim 1/3.4 = 1/3$	3
強化ガラス	$1/1.5$	1.5

表3-2 用途別安全率(F_2)

品 種	曲げ試験結果 (kg/cm^2)	破損確率3/100,000と したときの安全率(F_2)
普通板ガラス(5~6mm)	500	$2.06 \approx 2.0$
磨板ガラス(5~12mm)	375	$2.01 \approx 2.0$
強化ガラス(5~12mm)	1500	$1.95 \approx 2.0$

表3-3 総合安全率($F_1 \times F_2$)

品 種	(40年疲労に対する安全率)×(破損確率3/100,000に対する安全率) =総合安全率
普通板ガラス 磨板ガラス	$3 \times 2 = 6$
強化ガラス	$1.5 \times 2 = 3$

表3-4 ガラスの許容応力度

品 種	許容応力度 (kg/cm^2) (曲げ強さ/ $F_1 \times F_2$)
普通板ガラス	$500/6 \approx 80$
磨板ガラス	$375/6 \approx 60$
強化ガラス	$1500/3 = 500$

(2) アクリル樹脂板⁽⁷⁾。

アクリル樹脂板を構造用の建築材料として採り上げたのは恐らく水槽用パネルが最初のものと思われる。しかしその性質には下記のように不安定な要素が多く、一般の建築材料に対する同一概念で考えることはできない。

- (1) 曲げ破壊強度は $1,050 \sim 1,200 \text{kg}/\text{cm}^2$ 、引張破壊強度は $760 \sim 800 \text{kg}/\text{cm}^2$ (単板の場合)、アクリル樹脂板はプラスチックの中では最も耐候性のよい材料であるが紫外線をうける屋外曝露使用のときはこれらの値は低下する。
- (2) 板のクリープ性状は比較的大きく、 20°C 、 $100 \text{kg}/\text{cm}^2$ の応力のもとで初期弾性係数は $3 \times 10^4 \text{kg}/\text{cm}^2$ 、6時間後には $2.5 \times 10^4 \text{kg}/\text{cm}^2$ 、約10年後には $1.25 \times 10^4 \text{kg}/\text{cm}^2$ と低下する。

水槽内の温度は大体10～28℃で、この範囲の水温に対しては、温度上昇とともに引張強度は825kg/cm²から725kg/cm²へ、また弾性係数は 3.3×10^4 kg/cm²から 2.7×10^4 kg/cm²へと、いずれも殆んど直線的に下降する。なお屋外使用時の引張強度は20℃の通常条件の場合にくらべて約80%の低い値を示す。

- (3) 単板を張合せた複層板では、接着層は厚さ2～3mmでアクリル樹脂とは分子量を異にする異質の物質でつくられている。パネルの突合せ強度は張合せ強度（単板の場合70～50kg/cm²）よりも低下する。それは突合せの場合は曲げがかかるからである。この場合の接着強度は接着剤の種類によって異なり、また接着時間をながくするほど強度が大きくなる。
- (4) 曲げ強度や弾性係数の値は測定条件に影響されるところが大きい。弾性係数値は載荷速度を早めると高くなり弾性的性質をあらわし、逆に遅めると弾性係数値は低くなり粘性的性質をあらわす。すなわちアクリル樹脂は粘弾性物質であり、しかも金属にくらべるともろい性質がある。

水槽用アクリル樹脂板の設計についてつぎの代表的なアクリル樹脂メーカー2社の設計方法を紹介しておく。

M社の場合：①弾性係数は初期の 3×10^4 kg/cm²を採用する。クリープ現象により見掛けの弾性係数は経時低下するが、パネルの初期変形をパネル短辺長の1/300以下に押えれば、経年変形は観覧上問題にならぬ最小値となる。ただし厳密に、長期間放置後のたわみを求める場合もある。たとえば沖縄海洋博の大水槽「黒潮の海」では見掛けの弾性係数を 3×10^4 kg/cm²の1/2とし、なおパネルの吸水による湾曲、温度差による湾曲も考慮してある。②許容引張強度を引張破壊強度760kg/cm²の約1/10、すなわち70kg/cm²とする。この値によれば長期荷重下における細かいひび割れなどの発生が防止できる。設計に際して、変形量を短辺長の1/300程度に押え、パネルに発生する応力はせいぜい40～50kg/cm²におさまる。③パネルを突き合せ接着により大板をつくるときの継目の接着曲げ強度は実験初期値として約800kg/cm²が得られるが、許容曲げ応力度は40kg/cm²に落す。ただし接着剤処方によっては接着強度に大きな変化をもたらすことを知っておかねばならぬ。また④パネルの継手を突付けのシーラント・ジョイントにする場合、たとえば前記の沖縄海洋博大水槽では隣接パネル間のたわみの相異による目違いが生じないように「変形に対する設計」を行ない、さらにその他の事項に対しての慎重な配慮から最大曲げ応力度を27kg/cm²程度と強度上の安全率を高めている。継目をシーラント・ジョイントにする場合は継目の変形量が側面から見て目立つおそれがあるので、初期変形量を短辺長の1/400程度に押えることが望ましい。⑤最近のパネルの大型化に対して留意することはパネルの継目の目地幅の採り方である。この個所ではパネルの片面吸水による伸びと、温度差による伸縮とが起る。計算によると前者の伸び率は大きくはないが、後者のパネル据付け時と水槽使用時との温度差による伸縮は大きな影響を与える。シーラントに生ずるひずみの値を考慮して目地幅を決定する。

S社の場合：①パネルのたわみを短辺長の1/150～1/200（特に経済的要求のきびしいときは1/100）として計算する。②許容引張応力度は（20℃の場合）は室内においては170kg/cm²を10

年後の $80\sim 90\text{kg}/\text{cm}^2$ とし、屋外（曝露時）では $140\text{kg}/\text{cm}^2$ を10年後の $70\text{kg}/\text{cm}^2$ とする。③単板の張合せ強度は $70\text{kg}/\text{cm}^2$ ，突合せ強度は $50\text{kg}/\text{cm}^2$ とする。この場合突合せ接着には十分時間をかけて強度の上昇をはかる（M社では接着時間が短くその代り突合せ強度を $20\text{kg}/\text{cm}^2$ としているという）。

参 考 文 献

- (1) セントラル硝子：板ガラスと施工
- (2) 旭硝子KKおよび日本板硝子KKの資料と教示による。
- (3) 日本原子力研究所高崎研究所の教示による。
- (4) 木村俊彦：水族館の構造，新建築 1975. 9
- (5) TIMOSHENKO：The theory of Plate and Shell, 1959
- (6) 旭硝子KK：GA71-1，他
- (7) 三菱レーヨンKKおよび住友化学工業KKの資料と教示による。