

FRP構造の設計基準とその事例

Design Criterion of FRP Structures and Their Applications

邊 吾一*

Goichi BEN

ABSTRACT FRP (Fiber reinforced plastics) are utilizing to various fields of structures because they have superior properties, for example, specific strength, specific rigidity and corrosion resistance. This paper explains the present state of design criterions for FRP structures and also shows the structural analyses and design methods in water tanks set on the highest building, corrosion tanks for chemicals and pressure vessels.

Key Words : 繊維強化プラスチック、設計基準、水槽、耐食円筒タンク、圧力容器
Fiber reinforced Plastics, Design Criterion, Water tank,
Cylindrical Corrosion Tank, Pressure vessels

1. はじめに

CFRP (炭素繊維強化プラスチック) やGFRP (ガラス繊維強化プラスチック) などの利点は、繊維方向の引張りに対する比剛性 (引張り弾性係数/密度)・比強度 (引張り強さ/密度) が大きく、耐食性に優れており、その利点を生かして、最近では宇宙・航空分野のみならず、自動車や船舶、土木・建築、スポーツ用具や日用品まで幅広く用いられている¹⁾。

本報告では、建築の付帯設備として長年の使用実績がある高置水槽と耐食薬品タンク、さらに最近注目を浴びている天然ガス自動車用の圧力容器に関して、それらの構造解析と設計基準について述べる。

2. 高置水槽

FRP水槽は、その耐食性・軽量性・成形の自由性など多くの利点と特色を活かし、高置水槽や受水槽として数多く用いられてきたが、

*工博 日本大学生産工学部教授

(〒275-8575 習志野市泉町 1-2-1)

昭和53年の伊豆大島近海の地震 (マグニチュード7.0) と宮城沖地震 (マグニチュード7.4) を契機にその耐震性が問題となった。そこで、建設省の要請もあって、(社) 強化プラスチック協会は昭和55年に「FRP水槽耐震設計基準」を作成し、続いて「FRP水槽構造設計計算法」を、昭和58年には同書の増補改訂版を出版し、FRP水槽の耐震構造設計の指針を提示した。その後、平成7年に発生した兵庫県南部地震の震度6と7の地域で昭和55年以後施工した耐震基準の設備の内、高置水槽17.3%、受水槽の17.3%が被害を受け、その内におおよそ半数が保水機能を失った。一方で、昭和55年以前に設置した設備の被害は昭和55年の基準に対してほぼ2倍程度となり、昭和55年に制定された耐震設計基準と構造計算法はそれなりの効果を上げた。しかし、震災後の水確保の重要性から、再度基準を見直し、平成8年に新たに「FRP水槽耐震設計基準改訂委員会」が設置され、用途係数の一部強化などを行い、耐震基準の全体的な見直しを計った。そ

の結果、「FRP水槽耐震設計基準（1996年版）²⁾」が制定され、「FRP水槽構造設計計算法（1996年版）³⁾」が出版された。ここでは、この「設計基準」と「設計計算法」について紹介すると共に、水槽の中で円筒形水槽の構造設計法について述べる。また、FRP製の耐食薬品タンクの構造設計基準も JISK7012 に制定されているが、この基準は円筒形FRP水槽の基準に準じている。

2. 1 外力基準

本基準適用の範囲は、地上並びに軒高4.5m以下の建物の内部及び地上に設置される容量50m³程度以内、水深4m程度以内の円筒形、角形、球形の水槽である。

1) 設計用地震荷重

水槽の構造設計に最も影響を与える地震荷重を、まず取り上げる。水槽は床応答振動の加速度成分により加速度応答（バルジング）を示し、床応答の変位成分の周期が近接した場合、スロッシング応答を示す。水槽の設計の際には、両応答を別々に取り扱う。

①水平震度 k_H 一般的に次式

$$k_H = \beta \cdot k_{FH} \leq 2.0 \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 β は水槽の加速度応答倍率であり、水槽が堅固な基礎の場合に据え付けられている場合を前提として

$$\beta = 2.0 \quad (\text{地下、1階及び地上の場合})$$

$$\beta = 1.5 \quad (\text{屋上階の場合}) \quad (2)$$

をとり、中間階は直線補間とする。 k_{FH} はn階床の水平震度で、1階床の水平震度を $k_{0H}(=0.4)$ とくと、次式で求まる。

$$k_{FH} = I \cdot K_1 \cdot Z \cdot k_{0H} \quad (3)$$

ここで、Iは重要度係数で次の3つとする。

$$I = 1.5 \quad (\text{耐震性を特に重視する場合})$$

$$I = 1.0 \quad (\text{耐震性を重視する場合})$$

$$I = 0.7 \quad (\text{その他の場合}) \quad (4)$$

K_1 は設置階による係数で

$$K_1 = 1.0 \quad (\text{地下階及び1階})$$

$$K_1 = 2.5 \quad (\text{屋上階}) \quad (5)$$

をとり、中間階ではNを建物地上層数（N+1は屋根床・屋上階を示す）iを水槽設置階として、まず $\alpha_i = (N+2-i)/(N+1)$ を求め、次式に

$$K_1 = 1/\sqrt{\alpha_i} \leq 2.5 \quad (6)$$

代入すれば K_1 を計算できる。また、Zは地域係数で、地震活動の地域による差を考慮するための係数で、その値（1.0～0.7）は建築基準法による。

②水槽設計用標準水平震度 水槽、建物の動特性を考慮し、地域係数および用途係数0.7,1.0,1.5の場合を考えると、設計用水平震度 k_H は次の表1となる。

表1 水槽耐震設計基準

	I=0.7	I=1.0	I=1.5
上 層 階 屋上及び塔屋	$k_H=1.0$ $S_V=263$	$k_H=1.5$ $S_V=375$	$k_H=2.0$ $S_V=375$
中 間 階	$k_H=2/3$ $S_V=135$	$k_H=1.0$ $S_V=190$	$k_H=1.5$ $S_V=285$
地 階 1階及び地上	$k_H=2/3$ $S_V=105$	$k_H=1.0$ $S_V=150$	$k_H=1.5$ $S_V=225$

③設計用速度応答スペクトル値 S_V 水槽の設計用速度応答スペクトル S_V も表1に示したが、この値は $S_{V0}(=150\text{cm/sec})$ を基準速度応答スペクトル値とすると次式で計算できる。

$$S_V = I \cdot K_1 \cdot Z \cdot S_{V0} \quad (7)$$

2) 加速度応答荷重

①水平荷重 F_H 設計用水平荷重は短期荷重として扱い、Wを水槽の有効重量、 W_0 を水槽の全重量とすると次式で計算する

$$F_H = k_H \cdot W \quad (8)$$

表2 水槽の有効重量比

円筒形水槽	$h/2r \leq 0.75$
	$\alpha_r = \frac{\tanh\left(0.866/\frac{h}{2r}\right)}{\left(0.866/\frac{h}{2r}\right)}$
	$h/2r > 0.75$
	$\alpha_r = 1 - \frac{0.218}{\left(\frac{h}{2r}\right)}$

$$\text{ここで } W = \alpha_T \cdot W_0 \quad (9)$$

であり、 α_T は有効重量比でる。表2に円筒形水槽の場合の値を示す。

②水槽内に作用する変動水圧 p_w, p_b 内容水の比重量を γ 、 y を水面からの深さ、 ϕ を地震方向からの周方向角度として、円筒形水槽の加速度応答による変動水圧の式は表3に、その分布を図1にそれぞれ示す。

③水平荷重の作用点高さ h_{0G} 水槽の転倒モーメント等を求める際に必要な水平荷重の作用点高さは、 h を水位として次式で与えられる。

$$h_{0G} = \beta_T \cdot h \quad (10)$$

ここで、 β_T は作用点高さと水位の比を表し、円筒形水槽の場合は表4に示される。

④鉛直荷重 F_V 設計用鉛直荷重 F_V を考慮する必要がある場合は、次式を用いる。

$$F_V = k_V W_0 = 0.5 k_H W_0 \quad (11)$$

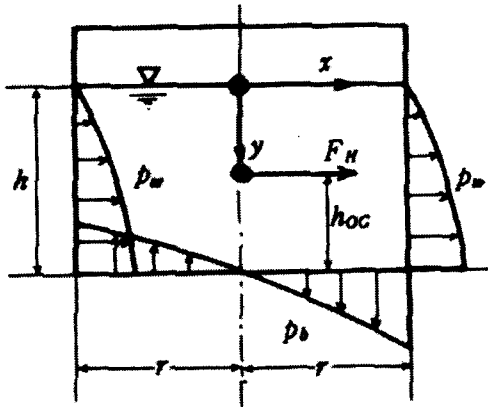


図1 加速度応答による円筒形水槽の変動水圧

表4 水平荷重の作用点高さ

円筒形水槽	$h/2l \leq 0.75$
	$\beta_T = \frac{\left(0.866 / \frac{h}{2r}\right)}{2 \cdot \tanh\left(0.866 / \frac{h}{2r}\right)} - 0.125$
	$h/2l > 0.75$
	$\beta_T = \frac{\frac{0.75}{\left(\frac{h}{2r}\right)} \left\{ \frac{0.151}{\left(\frac{h}{2r}\right)} - 0.29 \right\} + 0.5}{1 - \frac{0.218}{\left(\frac{h}{2r}\right)}}$

3) スロッシング応答荷重

①1次のスロッシング固有周期 T_s 円筒形水槽の1次固有周期は r, h, g を半径、水位及び重力加速度とすると次式で与えられる。

$$T_s = \frac{2\pi}{\sqrt{1.84 \frac{g}{r} \tanh\left(1.84 \frac{h}{r}\right)}} \quad (12)$$

②水槽天井板に作用する変動水圧 p_r 波高を H_w 、 $\omega_s = 2\pi/T$ をスロッシング固有円振動数、 S_V を前述の速度応答スペクトルとすると、

$$H_w = 0.84r \cdot \omega_s \cdot S_V / g \quad (13)$$

をまず求め、次に波高速度 $\dot{H}_w$ と加速度 $\ddot{H}_w$

$$\dot{H}_w = \omega_s \cdot H_w \quad (14)$$

$$\ddot{H}_w = \omega_s \cdot \dot{H}_w = \omega_s^2 \cdot H_w \quad (15)$$

表3 円筒形水槽に作用する変動水圧

	側壁に働く変動水圧	底壁に働く変動水圧
円筒形水槽	$h \leq 1.5r$ の場合 $p_w = \sqrt{3} \gamma k_H h \left\{ \frac{y}{h} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right\} \times \tanh \left(\sqrt{3} \frac{r}{h} \cdot \cos \phi \right)$	$p_b = \frac{\sqrt{3}}{2} \gamma k_H h \frac{\sinh \left(\sqrt{3} \frac{x}{h} \right)}{\cosh \left(\sqrt{3} \frac{r}{h} \right)}$ ただし、水槽が $1.5r < h$ の場合は $h=1.5r$ として計算する。
	$h > 1.5r$ の場合 $0 \leq y \leq 1.5r$ の部分は上式で、 $h=1.5r$ として計算し、 $1.5r \leq y \leq h$ の部分は、次式による $p_w = \gamma k_H r \cos \phi$	

を求める。次に、 h_s を水槽上部の空隙として基準変動水压 p_{r0} を円筒の形状に応じて

$$0 < h/(2r) < 0.62 \text{ の場合は} \\ p_{r0} = (1.6h/\pi + h_s)\rho \cdot \ddot{H}_w + \rho \cdot \dot{H}_w^2 \quad (16)$$

$$h/(2r) > 0.62 \text{ の場合は} \\ p_{r0} = (2r/\pi + h_s)\rho \cdot \ddot{H}_w + \rho \cdot \dot{H}_w^2 \quad (17)$$

を計算する。最後に、 $D_s(=0.5)$ を構造特性係数とすると、水槽天井板に作用する変動水压 p_r は次式で与えられる。

$$p_r = D_s \cdot p_{r0} \quad (18)$$

③水槽側壁に作用する変動水压 スロッシング応答による側壁に作用する変動水压を図2に示すが、この場合は次式で表せる。

$$p_{rx} = 0.9375\rho \cdot r \frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{28}{8}}\left(\frac{y}{r}\right)\right)}{\cosh\left(\sqrt{\frac{27}{8}}\left(\frac{h}{r}\right)\right)} \left(1 - \frac{1}{3}\cos^2\phi - \sin^2\phi\right) \\ \times \cos\phi \cdot \omega_s \cdot S_v \quad (19)$$

ここで y は底板からの距離、 ϕ は地震方向からの周方向角度である。

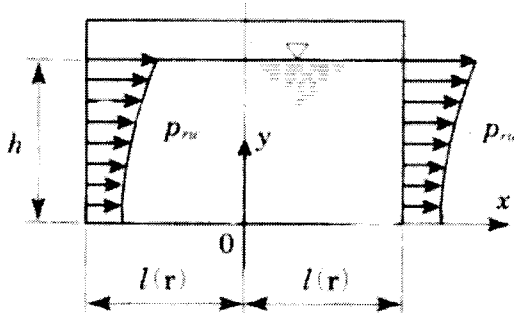


図2 スロッシング時の側壁の変動水压

4) 他の設計用外力

水槽には、表5に示すように、地震荷重以外に内容水による静水压、水槽の自重による固定荷重、雪による積雪荷重、水槽上部に積載される設備の積載荷重、さらに風による風荷重が作用する。水槽の設計にはこれら外力によって槽構造内に発生する諸応力の組み合わせを考慮して設計するが、これらの外力についての記述は紙面の都合上省略する。

2, 2 設計基準と安全率

FRP水槽の設計は基本的に次式による。

$$\text{許容応力} = \text{限界値} / \text{安全率} \quad (20)$$

限界値として次の2種類がある。

1) 材料の破損基準が基準となる場合

①永久形が問題となる場合は比例限度力

②破損が問題となる場合は破壊強さ

の2つの場合がある。FRPは金属のように延性がなく、応力～ひずみ間の線形性は少なく、比例限度力も定義し難く、一般に材料強度として破壊強さが求められているので、材料の破壊強度が基準となる場合には限界値として破壊強さを採用する。

水槽でのFRPの材料特性は、試験水槽で問題となる部位から採取した材料か、あるいは同一成形条件の下で製作された試験片を用いて常温での静的試験を行う。通常構造計算に必要な静的特性値の種類を表6に示す。

水槽の耐用年数は15年とし、その間浸水しているため浸水効果があり、また屋外暴露による低下もあるので、特性値の低下を表6の右欄のように見込み、限界値として用いる。

2) 構造としての剛性が問題となる場合

材料として何ら破損するわけではないが、変形が大きいか、座屈現象や共振現象を起こす場合など、運用上支障をきたすことがある。この時は水槽の構造寸法や弾性係数が問題となる。

表5 設計用外力の組み合わせ

応力の種類	想定する状態	内容水の荷重 F	固定荷重 G	積雪荷重 S	積載荷重 P	地震荷重 K	風荷重 W	備考
長期	常時	○	○					
短期	積載時	○	○		○			
	暴風時	○	○				○	
	地震時	○	○			○		
	積雪時	○	○	○				

表6 GFRP材の静的特性値と限界値

破壊強さの種類	静的(常温での)特性値 (kgf/mm ²)	限界値 (kgf/mm ²)
引張試験	F_t	$0.7 \times F_t$
曲げ強さ	F_b	$0.6 \times F_b$
面内せん断強さ	F_s	$0.7 \times F_s$
層間せん断強さ	F_{IS}	$0.7 \times F_{IS}$
横せん断強さ	F_T	$0.6 \times F_T$
面圧強さ	F_B	$0.7 \times F_B$

弾性係数の種類	静的(常温での)特性値 (kgf/mm ²)	限界値 (kgf/mm ²)
引張弾性係数	E_t	$0.8 \times E_t$
曲げ弾性係数	E_b	$0.8 \times E_b$
面内せん断弾性係数	G	$0.8 \times G$
ポアソン比(ν)	0.3	0.3

(注1) 静水圧や固定荷重など常時作用する長期荷重のみの場合はクリープを考慮して(1/1.5)倍とする。

3) 安全率

安全率は、これに影響する因子を考慮して、その各々に対応する係数の相乗によって求める。

①基本の安全率 F_0 材料の強さが基準となる場合は $F_0=1.3$ 、構造としての剛性(弾性係数)が基準となる場合は $F_0=1.2$ とする。

②材料特性値の信頼度係数 L_1 材料試験は水槽と同一成形条件の下で製作された試験片を用いて行うが、材料試験を行わないで、既存のデータを参照する場合は、 $L_1=1.1$ とする。

③用途・重要度係数 L_2 地震荷重等で考慮した場合には、 $L_2=1.0$ としてよい。

④外力荷重推定の不確定係数 L_3 外力の基準が所管官庁・研究所、協会や学会の委員会で審議・承認されたものに準拠している場合は、 $L_3=1.0$ とおける。

⑤構造計算での精度係数 L_4 発生応力が有限要素法などの精度のよい計算法により水槽自体の構造寸法・材料特性に基づいて正確に求められ、かつ構造実験で正確に確認されている場合は、 $L_4=1.0$ としてよい。しかし、構造をモデル化し、材料力学・構造力学を用いて応力が検討されている場合は、 $L_4=1.2$ とする。

⑥材料特性のバラツキ係数 L_5 FRPの材料特性はばらつきが大きいので、引張りおよび曲げ試験は少なくとも各々10本以上行う。破壊強さあるいは弾性係数の平均値と標準偏差を $\bar{x}, \sigma$ とすると、バラツキ係数 L_5 は

$$L_5 = 1/[1 - k_p(\sigma/\bar{x})] \quad (21)$$

で与えられる。 k_p の値は信頼度によるが、標準的な設計で信頼度を99.9%(破壊確率1%)とすれば、 $k_p=3.09$ となる。

⑦安全率の数値例 破壊強さの材料試験での変動率 $\sigma/\bar{x}=0.07$ とすると、

$$L_5 = 1/[1 - 3.09 \times 0.07] = 1/0.784 = 1.28$$

$$F_1 = F_0 \times L_1 \times \dots \times L_5 \\ = 1.3 \times 1.1 \times 1.0 \times 1.0 \times 1.2 \times 1.28 = 2.20$$

弾性係数の材料試験での変動率 $\sigma/\bar{x}=0.05$ とすると、次の値となる。

$$L_5 = 1/[1 - 3.09 \times 0.05] = 1.18$$

$$F_2 = F_0 \times L_1 \times \dots \times L_5 \\ = 1.3 \times 1.1 \times 1.0 \times 1.0 \times 1.2 \times 1.18 = 1.87$$

2. 3 円筒形水槽の構造解析

円筒形FRP水槽は円筒本体、屋根、底板部で構成され、主としてマットのハンドレイアップ成形で作られている。本体の板厚は根元固定部に向かって厚く、可変である。ここでは水槽本体部だけを取り上げ、等方性で板厚一定とおく。

1) つりあい式

半径、高さ、板厚を R, H, t 、軸、周、半径方向座標を x, θ, z (以後 $r \rightarrow R, r \rightarrow R, h \rightarrow H, \phi \rightarrow \theta$ とする)、それらの変位成分を u, v, w 、面内合力成分を $N_x, N_\theta, N_{x\theta}, N_{\theta x}$ 、面外せん断合力成分を Q_x, Q_θ 、合モーメント成分を $M_x, M_\theta, M_{x\theta}$ 、半径方向圧力成分を p とする。軸、周及び半径方向の力のつりあい条件と軸及び周方向回りの力のモーメントのつりあい条件から、最終的に次の w のみの8階の偏微分方程式⁴⁾を得る。

$$A \partial^8 w / \partial x^8 + (4B/R^2) \partial^8 w / \partial x^6 \partial \theta^2 + (6C/R^4) \cdot \partial^8 w / \partial x^4 \partial \theta^4 + (8-2\nu^2)/R^4 \partial^6 w / \partial x^4 \partial \theta^2 + (6L/R^4) \partial^4 w / \partial x^4 + (4/R^6) (\partial^8 w / \partial x^2 \partial \theta^6 + 2 \partial^6 w / \partial x^2 \partial \theta^4 + \partial^4 w / \partial x^2 \partial \theta^2) + (1/R^8) (\partial^8 w / \partial \theta^8 + 2 \partial^6 w / \partial \theta^6 + \partial^4 w / \partial \theta^4) = (1/D) (A \partial^4 p / \partial x^4 + \{2U/R^2\} \partial^4 p / \partial x^2 \partial \theta^2 + (B/R^4) \partial^4 p / \partial \theta^4) \quad (22)$$

ここで、 $A=1+(1/3)(t/R)^2, B=1+(1/12)(t/R)^2, U=1+\{(2-2\nu+\nu^2)/12(1-\nu)\}(t/R)^2, V=1-\{\nu/6(1-\nu)\}(t/R)^2, C=1+\{(1-\nu^2)/72\}(t/R)^2, L=2(1-\nu^2)(R/t)^2 A$ である。

2) 境界条件と変動水圧分布

下端部は通常架台に固定されているので完全固定固定、上端部は屋根部との結合により拘束を受けているが、それは弱いと考え自由とすると、境界条件式は次のようになる。

$$\begin{aligned} x=0; u=v=w=\partial w/\partial x &=0 \\ x=H; N_x &= N_{\theta x} - 2M_{\theta x}/R \\ &= Q_x + \partial M_{\theta x}/R \partial \theta = M_x = 0 \end{aligned}$$

表 3 に示した変動水圧の式の周方向関数 $\tanh\{\sqrt{3}(R/H)\cos\theta\}$ を解析の便宜上、面積近似を用いて、 $\cos\theta$ だけで表す。さらに Housner の式では $H/R > 1.5$ の時に下端部付近で軸方向に一定値となるが、すべての H/R に対して安全側設計のため、 $H/R < 1.5$ の場合の分布式（2次式）を用いる。

3) 解析結果

式 22) の右辺 p に近似した変動水圧を代入して得られる特解に斉次解を加えれば、半径方向変位 w は次式となる。

$$\begin{aligned} (w/R) = & \{-P_E R / (72B^2 Et) \} [3B + 12U(R/H)^2 \\ & - 2(t/H)^2 / (1-\nu^4)] [x/R]^4 + [R^3 p_E / (360EtH^2 B)] \\ & \cdot (x/R)^6 + K_1(x/R)^3 + K_2(x/R)^2 + K_3(x/R) \\ & + K_4 + K_5 R [\cos(\lambda x/R)] + K_6 I [\cos(\lambda x/R)] \\ & + K_7 R [\sin(\lambda x/R)] + K_8 I [\sin(\lambda x/R)] \end{aligned} \quad (23)$$

ここで、 λ は次の 4 次方程式

$$A\lambda^4 + 4B\lambda^2 + 12(1-\nu^2)(R/t)^2 B^2 = 0$$

の根であり、 $R[\]$ と $I[\]$ は $[\]$ の複素関数のそれぞれ実数部と虚数部を表す。 w から u, v が求まり、次に合力、合モーメント成分が求まる。図 3 に $R/H = 1.0, t/R = 0.01$ の場合の $\theta = \pi$ における無次元化した M_x と w の軸方向分布を示す。

t/R と R/H 変えた場合の合モーメント、合力、変位成分の最大値を求め、それらを次式

$$\begin{aligned} N_{x \max} &= C_{N_x} [p_E R / (1-\nu^2)] \cos \theta \\ N_{\theta \max} &= -C_{N\theta} [p_E R / (1-\nu^2)] \cos \theta \\ N_{\theta x \max} &= C_{N\theta x} [p_E R / 2(1+\nu)] \sin \theta \\ M_{x \max} &= -C_{M_x} [p_E R^2 / 12(1-\nu^2)] \cos \theta \\ Q_{x \max} &= -C_{Q_x} [p_E R / 12(1-\nu^2)] \cos \theta \\ w_{\max} &= -C_w (p_E / E)(R^2 / t) \cos \theta \end{aligned} \quad (24)$$

で表す。ここで、 p_E は変動水圧の大きさであり、 $C_{N_x} \dots C_w$ は R/H と t/R の関数になる。一例として、最大軸方向曲げ応力の結果を図 4 に示す。

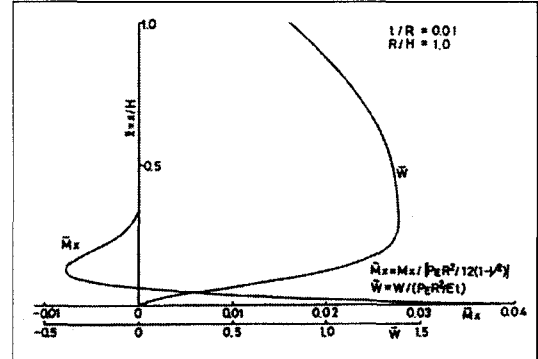


図 3 $\theta = \pi$ における $\bar{M}_x, \bar{w}$ の軸方向分布

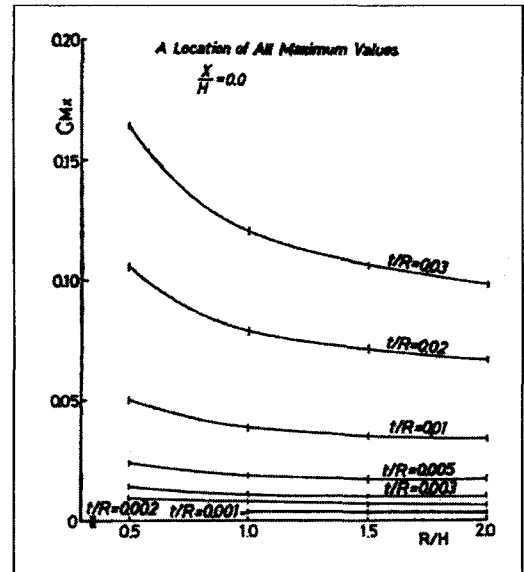


図 4 C_{M_x} に関する線図

3. 圧力容器⁵⁾

比強度・比剛性の大きい CFRP や GFRP などの繊維強化プラスチック材は内圧により主に引張り応力が作用する圧力容器は最も適した応用例である。その中でもプラスチックライナーに CFRP 材を巻きつけたオールコンポジットの天然ガス容器は、高压容器の重量による車体重量増加がもたらす燃費の悪化、積載重量の減少といった従来の容器の欠点を補い、燃費の改善と従来車なみの貨物積載を可能にする。

3. 1 弾性設計と初期破損

民需用では長期に渡って使用し、安全性を重視する場合には、初期破損も許さないとすると、繊維直角方向応力 σ_T による F_T 破損、あるいは面内せん断応力 τ_{LT} による F_{LT} 破損が設計限度となる。たとえ初期破損が起こっても最終破壊までに漏れという警告段階があるので、安全性を確保する上で望ましい。円筒形圧力容器は両端の鏡板部と円筒部を一体巻きで閉じた構造である。円筒部の弾性解析は比較的容易なので、耐圧解析の基本を示すため、円筒部を取り上げる。

図5に示す内圧 p を受ける半径 R 、全肉厚 t の積層円筒殻の主軸（軸方向 x 、周方向 y ）方向の平均応力は

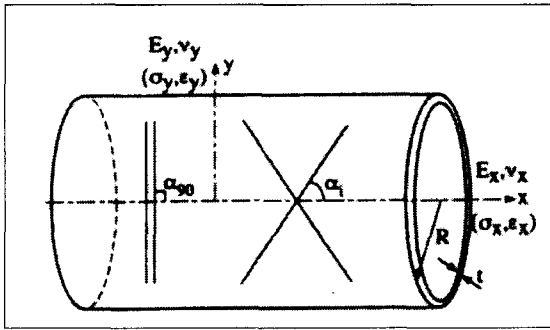


図5 内圧を受ける圧力容器の円筒部

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_0 = pR / 2t \\ \sigma_y &= 2\sigma_0 = pR / t\end{aligned}\quad (25)$$

であり、主軸方向の平均ひずみは次式となる。

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= (pR / 2t)(1/E_x - 2\nu_y / E_y) \\ \varepsilon_y &= (pR / 2t)(2/E_y - \nu_x / E_x)\end{aligned}\quad (26)$$

円筒部を構成する各層はこの主軸面内のひずみ状態にある。座標変換により、各層の繊維方向を基準としたひずみ ($\varepsilon_L, \varepsilon_T, \gamma_{LT}$) と応力 ($\sigma_L, \sigma_T, \tau_{LT}$) が求まる。FW 円筒の最終破壊は、繊維と直角方向の引張り強度 F_T と繊維を含む面内で繊維と ϕ の角度をなす方向のせん断強さ $F_{LT, \phi}$ に支配される。図6に母材の弾性率 $E_m = 3\text{GPa}$ として、巻き角度 α の変化に対して σ_0 で無次元化した $\sigma_L, \sigma_T, \tau_{LT, \phi}$ の最大値を実線で示した。 $\sigma_L > \sigma_T > \tau_{LT, \phi}$ であるが、それぞれの強さと比較すると、初期破損は F_T 破損によっておきる。問題となる σ_T は巻き角度 $\alpha = 55^\circ$ で

最小となり、この角度が最適巻き角度である。

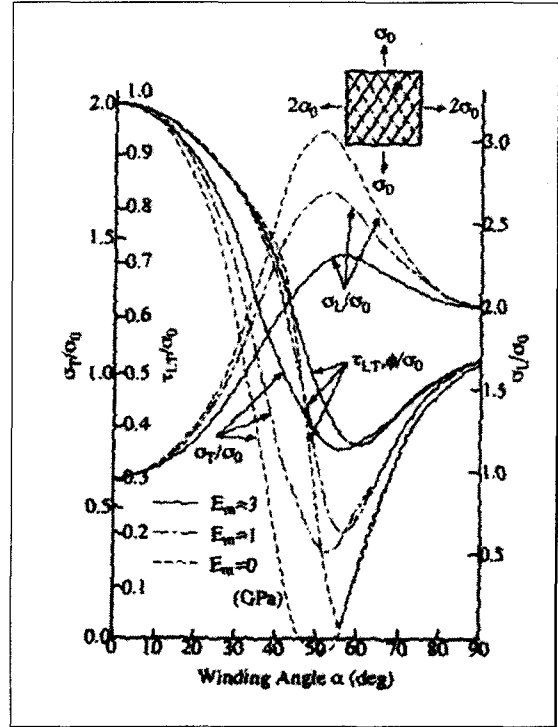


図6 巻き角度に対する各応力の無次元量の変化

3. 1 初期破損後の最終破壊強さと破壊設計

σ_T によって繊維に沿ってクラックが入り、初期破損し始めると、 E_L, G_{LT} などの剛性が低下し、応力分布が変化する。この塑性応力を求めるためには、 E_L, E_T, G_{LT}, ν_L 等の弾性係数の式中の母材のヤング率 E_m のみを、クラック発生に伴って低下させて検討する。図6に E_m を 1GPa および 0 と変化させた場合を鎖線と破線で示す。 $\sigma_T, \tau_{LT, \phi}$ が実線で示す弾性解よりも増加するときは、そのまま F_T もしくは $F_{LT, \phi}$ 破壊に至る。 $\alpha = 50^\circ$ から 55° の場合のように $\sigma_T, \tau_{LT, \phi}$ が著しく低下し、 σ_L が逆に増加するときは、 F_L が大きいので内圧はさらに増加し、繊維の引張り破断で最終破壊する。

GFRP ヘリカル巻き円筒で $E_m \rightarrow 0$ において、 $\sigma_T = F_T (20\text{MPa})$, $\tau_{LT, \phi} = F_{LT, \phi} (40\text{MPa})$, $\sigma_L = F_L (1\text{GPa})$ の条件から、破壊内圧 p_0 を求め、 $F_0 = p_0 R / 2t$ にして図7に示す。実験値を黒丸印で記入するが、 $E_m \rightarrow 0$ の破線と一致する。 $0 \leq \alpha \leq 35^\circ$ と $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ では E_m 低下による

σ_T 低下は殆どなくて、そのまま F_T 破壊する。
 $35^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ$ と $55^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ では、 E_m 低下により、 $\tau_{LT,\phi}$ は減少するので、初期破壊圧力よりも大きい $F_{LT,\phi}$ 破壊し、 $50^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ$ の範囲のみ、最終的に σ_L による F_L 破壊する。実験による破壊様相も上述の破壊解析が予言するメカニズムによく一致している。したがって、ヘリカル巻き円筒容器では $\alpha = 50^\circ \sim 55^\circ$ で、初期破損と同様に破壊圧力が最大となる。

3. 2 破壊設計における網目理論との比較

網目理論(Netting Theory)では、繊維方向の耐荷能力しか考えないので、内圧を受ける FW 円筒では

$$\text{軸方向分力 } \alpha_x = \sigma_L \cos^2 \alpha = \sigma_o$$

$$\text{周方向応力 } \alpha_y = \sigma_L \sin^2 \alpha = 2\sigma_o \quad (27)$$

となる。 $\tan 2\alpha = 2$ ($\alpha = 54.7^\circ$) の場合には、繊維張力が内圧による応力発生にバランスし、 $\alpha = 55^\circ$ で耐圧力が最大になることとたまたま一致している。これは初期破損後に $\sigma_T, \tau_{LT,\phi}$ が低下し、 $E_m \rightarrow 0$ 極限で $\alpha = 55^\circ$ の場合に限って $\sigma_T = \tau_{LT,\phi} = 0$ となるため、網目理論そのものは $\alpha = 55^\circ$ 以外には適用できない。したがって、

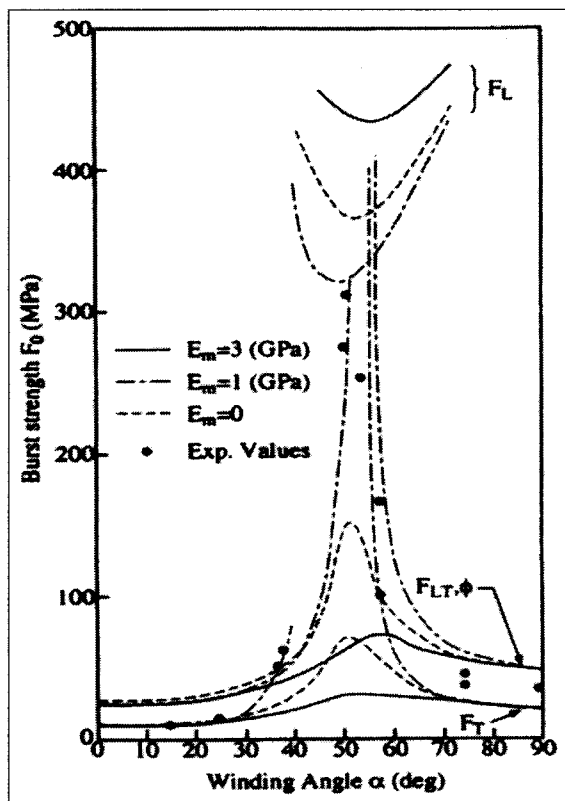


図7 樹脂のヤング率が変化した場合の破壊強度

網目理論を各種巻き角度の多層積層の FW 円筒殻に適用し、破壊設計をすることは誤りである。

4. おわりに

本文では GFRP 材の代表的な応用構造である円筒形 FRP 水槽や耐食薬品タンクの構造設計基準と構造解析を、CFRP 材を用いた天然ガス用圧力容器の構造設計基準と構造解析について述べた。本文で述べた以外にも、GFRP 製の合併浄化槽、CFRP 製のフライホイールなど多くの分野で構造材料として、FRP が用いられている。FRP はその成形の自由性により、可変厚さで、力学特性や機能に応じて複雑な構造形態の成形が可能である。しかし、場所や方向によって力学特性異なり、その分だけ金属材料などの等方性材料に比べて構造設計基準や解析が複雑となる。

参考文献

- 1) 日本複合材料学会編：複合材料活用事典、産業調査会、2001 年 1 月（発刊予定）
- 2) 強化プラスチック協会：FRP 水槽耐震設計基準（1996 年版）、1996 年 12 月
- 3) 強化プラスチック協会：FRP 水槽構造設計算法（1996 年版）、1996 年 12 月
- 4) 邊吾一他：円筒形 FRP 水槽の耐震および耐風構造解析、強化プラスチック Vol.28, No.3、
- 5) 邊吾一他：天然ガス自動車用 FRP 圧力容器の構造解析、圧力技術、Vol.35, No.2, 1997 年 2 月