

FRP 製冷却塔の開発

Development of FRP Cooling Towers



(気)生産部 技術第2課
鮫島 誠
Makoto Sameshima

Shinko Pantec Co., Ltd. has supplied so far, since 1962, approximately 4 000 units of various kinds of cooling towers mainly made of wood. In the meantime, we have used resin materials such as fiberglass-reinforced polyester resin, vinyl chloride, polypropylene, fiberglass-reinforced vinyl chloride as materials of construction for cooling tower components so that the cooling towers can be made lightweight and require less maintenance.

However, the importance of preserving forest resources and problems with disposal of industrial wastes have recently been highlighted. This has prompted us to take up as a major theme the application of new raw materials which not only have an excellent durability as alternatives to natural materials for the cooling tower components, but a continued stable supply of which is assured as well.

This paper attempts to demonstrate our development of the cooling tower mainly made of fiberglass-reinforced polyester resin (FRP) which has high mechanical strength and excellent durability, and also give an outline of the FRP cooling tower Unit No. 1 which we have recently manufactured.

まえがき

弊社は1962年(昭和37年)以来、木製冷却塔を主体として延べ4 000基にわたる各種冷却塔を納入してきた。この間、冷却塔の軽量化、省メンテナンスを目的としガラス繊維強化プラスチック、塩化ビニル、ポリプロピレン、ガラス繊維強化塩化ビニルなどの樹脂材料を冷却塔部材として採用している。

しかし、近年、森林資源の保護問題、産業廃棄物処理問題が大きくクローズアップされており、弊社においても天然材に代わって将来も安定的な供給が得られ、かつ耐久性と優れた新素材の冷却塔構造材への適用が大きなテーマとして取りあげられてきた。

ここに高強度で、かつ耐久性の優れたガラス繊維強化プラスチック(FRP)を主構造材としたFRP製冷却塔の製品開発結果を報告すると共に、FRP製冷却塔第1号機の概要も併せて紹介する。

1. 新素材としてのFRP製冷却塔

冷却塔とは温水と空気の接触を図り熱交換を行う充填層、充填層に多量の外気を供給する送風装置、温水を充填層に均一に分散させる散水装置、水滴飛散を防止するドリフトエリミネータなどが主な構成要素であり、これらを機能的にサポートしているのが主構造材である。

新開発のFRP製冷却塔は、この主構造材に新素材としてFRP材を適用するものである。この主構造材はその機能上、構造材としての十分な強度と耐久性を要求されるが、耐用年数経過後には、部分的な補修が必要になり、メンテナンス費用のかかる部位となっていた。

従って、主構造材をFRP化することは耐久性を向上させ、メンテナンス費を軽減させることになる。

冷却塔主構造材の新素材としてはFRP製引抜材を選定

した。この引抜材の強度は鋼材に匹敵し、単位体積あたりの重量はアルミニウムより軽量である。更に品質が均一であり、耐久性も優れていることなどがこの材料の特長として掲げられる。

FRPは従来より冷却塔部品として20年間以上の使用実績があるが、その全てがハンドレイアップ製法によるものであり、主に軽量化、耐久性の向上を主目的に使用されてきた。

今回主構造材に適用するFRP引抜材は軽量化、耐久性の向上と共に構造材に必要な十分な強度を備えた新素材といえることができる。

主構造材をFRP化することにより、冷却塔部材である充填材、エリミネータの樹脂化および送風装置であるプロペラ、ファンスタックのFRP化が既に実施済みであることから、冷却塔構成部材のほとんどの樹脂化が進むことになる。

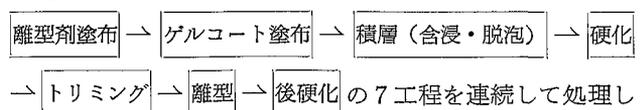
2. FRP引抜材

FRP引抜材は連続引抜法(フルトルージョン法)により成形され、角パイプ、丸パイプ、チャンネル材、アングル材などの製作が可能である。この成形方法は実用化されて20年以上にもなるが、近年技術の向上が目ざましく、複雑な形状のものや大型のものなどを生産性よく成形できるようになり、注目を浴びるようになってきている。

次に成形方法、特長、物性について紹介する。

2.1 成形方法

連続引抜法は従来のハンドレイアップ法に見られる

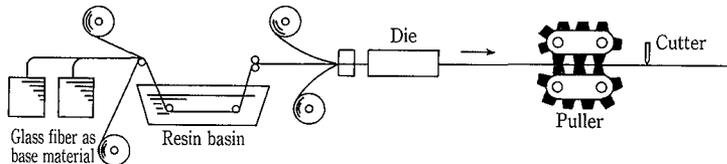


てゆくものである。その工程を第1図に示す。

第 1 表 FRP引抜材と各種材料との強度比較

Table 1 Comparison of strength between FRP drawn product and various material

Item	Unit	FRP Drawn product	FRP Hand lay up	Wood (Douglas fir)	Structural steel	Aluminum	Hard PVC
Specific gravity	---	1.7~1.9	1.4~1.8	0.54	7.8	2.7	1.4
Tensile strength	L.W.	35~55	6~14	2.85	34~50	7~28	3.9~6.3
	C.W.	3~7		—			
Tensile elasticity	L.W.	2 200~3 000	560~1 270	1 000	21 000	7 000	250~420
	C.W.	500~700		—			
Bending strength	L.W.	25~50	14~28	2.85	34~45	7~28	5.6~10.5
	C.W.	7~18		—			
Bending elasticity	L.W.	1 000~2 000	800~1 300	1 200	21 000	7 000	250~420
	C.W.	700~900		—			
Compressive strength	L.W.	30~50	11~18	2.25	45	—	6.3~7.7
	C.W.	10~15		—			
Shearing strength	L.W.	14~18	—	0.24	38	7~9	—
	C.W.	5~7		—			
Glass content	%	45~60	24~40	—	—	—	—
Coefficient of water absorption	%	0.2 max	0.1~0.6	30 max.	—	—	—



第 1 図 引抜き成形法
Fig. 1 Forming by drawing

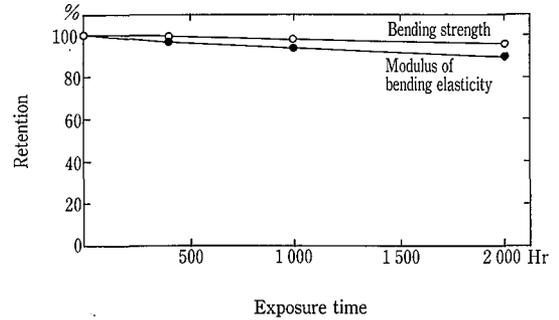
連続引抜法の基本的な考え方は、ガラスロービングを主体とし補強材としてマットなどを併用したガラス繊維基材を樹脂槽を通して、過剰の樹脂をスクイズ、脱泡した後に金型の中へ導入する。金型の中で加熱され、完全硬化した成形品を引抜き装置で引抜き、その後所定の長さに切断され製品となる。

2.2 FRP引抜材の特長

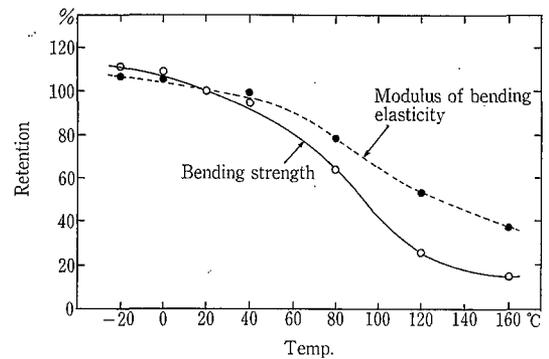
- 1) 角パイプ、チャンネル、アングル、丸棒などの種々の断面材を容易に製作できる。
- 2) ガラス繊維基材の構成を変えることで種々の物性を持った製品が得られる。
- 3) 物性が均一で、強度が高くかつ長尺材が得られる。などが掲げられる。

2.3 物性

- 1) FRP引抜材と各種材料との強度比較を第 1 表に示す。引抜材の引張強度、曲げ強度、圧縮強度はほぼ構造用鋼に匹敵し、比重量はアルミニウムより軽い。FRP引抜材は軽くて強いという FRP の特性を十分に発揮している。
- 2) FRP引抜材の耐候性について促進ばく露試験結果を第 2 図に示す。サンシャインカーボンアーク型ウェザーメーターによる 2 000 時間（屋外ばく露 4 年間に相当）の試験結果では曲げ強さで 2 %、曲げ弾性率では 4 % の強度劣化が見られる。また、14 年間の屋外ばく露確認試験では、曲げ強さと曲げ弾性率はそれぞれ強度低下は見られず、引張強さにおいて 5 % の強度劣化にとどまってい



第 2 図 促進ばく露試験結果
Fig. 2 Result of accelerated exposure test



第 3 図 熱間強度保持率
Fig. 3 Retention of high temperature strength

る。これらの強度劣化については限界強度の設定時に配慮されなければならない。

- 3) 引抜材の熱間における曲げ強さ、弾性率の保持率を第 3 図に示す。

低温物性と高温物性を比較すると、低温下においては強度は低下せず、むしろ良好な結果が見られる。一方、高温側では曲げ強度の大きな低下が見られる。入口温度の高い場合の冷却塔設計においては十分な配慮が必要となる。

3. 冷却塔主構造材の割り振り

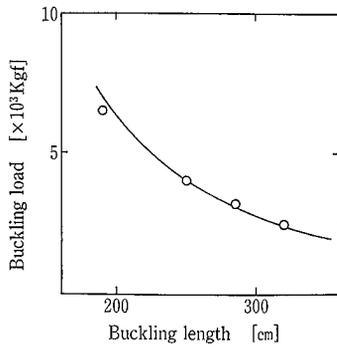
主構造材を FRP 化するにあたり、塔体の 1 スパン長さや 1 段高さの寸法の決定によって最適モジュールの検討を行った。その例として塔体長さ 10 m、高さ 6 m、幅方向 6 m の主構造を高さ方向に 3 ケース、幅方向に 4 ケースの合計 12 ケースについて、材料費、工事費、仮設費の総額比較を行った。

材料費は使用部材の合計額とし、組立費および仮設費は使用部材重量、部材接点数、総仮設材数量などから実績値をもとにして費用を算出した。

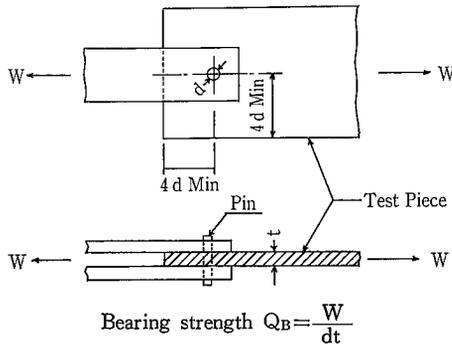
これらの結果、最も経済的な主構造材の割り振り寸法が得られ、最適なスパン、1 段当りの高さを決定することができた。今後のシリーズ化においては、これらの割り振り寸法を基にし、部材加工、組立性をも考慮したモジュール化を行ってゆく。

4. 部材強度確認

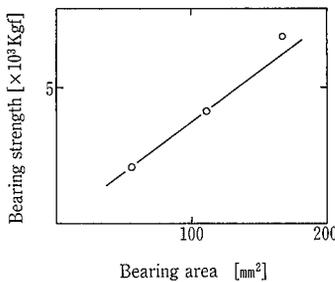
冷却塔構造材の長期荷重、短期荷重（風圧、地震力）に



第4図
オイラー座屈値と実荷重
Fig. 4
Euler's buckling value and actual load



第5図 支え強さの測定
Fig. 5 Measurement of bearing strength



第6図
ボルト接合における支え面積 (D x t) と支え強さ
Fig. 6
Bearing strength vs. bearing area at bolted connection

よる部材荷重を検討する上で長柱材の座屈耐力、部材末端部の支え強度の2点が重要なポイントとなる。主構造材をFRP化するにあたって、これら2項目の確認試験の結果について報告を行う。

4.1 座屈耐力について

冷却塔主構造は、その構造上最上部に送風装置、温水槽、各段に充填層が配置されていることより長期荷重による長柱座屈の問題がある。また、斜柱材の配置によっては更に風圧力などの短期荷重による座屈力に加わる。この座屈耐力は構造検討を行う上で最も重要なポイントの一つである。

これらの理由により冷却塔主構造材をFRP化するにあたってはFRP長柱材の座屈限界値を把握しておく必要がある。

座屈限界値についてはオイラー座屈値(第2表)との比較を行う。第4図はオイラー座屈値と実座屈限界値とを示したものである。写真1は座屈試験風景である。

座屈試験の結果、FRP長柱材の座屈限界値はオイラー座屈値とおおむね一致しており、座屈限界値としてはオイ

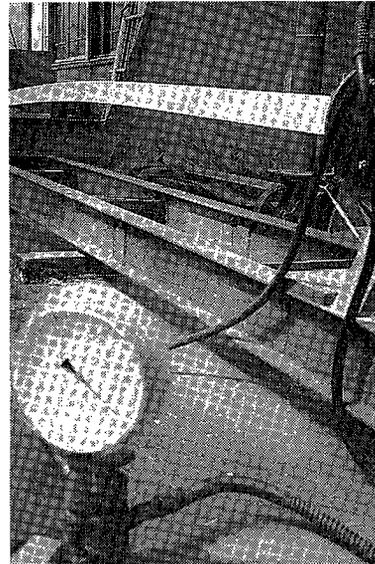


写真1 座屈試験
Photo. 1 Buckling test

第2表 オイラー座屈値
Table 2 Euler's buckling value

Condition of end and buckling forms				
Fixing coefficient : c	1/4	1	2.046	4
Euler's buckling load	$P_{cr} = c\pi^2 E I / l^2$			

ラー座屈値を採用することができる。

4.2 支え強度について

ボルト接合およびリベット接合などの機械的接合において重要な要素となる最大ささえ強さ(第5図参照)はピンを差し込む穴の直径の4倍程度の距離を端部からとっておけば、最大ささえ強さはほぼ安定した数値を得ることができる。

FRP引抜材ではガラスロービングの配列方向の場合で25~30 kgf/mm²の最大ささえ強さが得られる。

第6図はボルト接合における支え面積(d x t)と支え強さを示したものである。写真2は支え強さ試験風景である。試験結果より支え強さは支え面積に比例していることが分る。

以上より部材の支え強さを考える場合、その荷重条件により支え面積(ボルト本数に比例)を増減することにより強度を保持することができるものである。

また、リベット接合においても同じ傾向のデータが得られている。

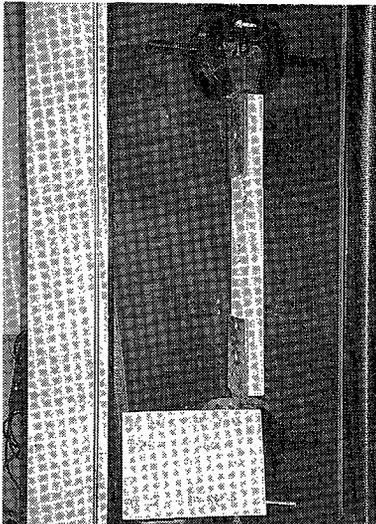
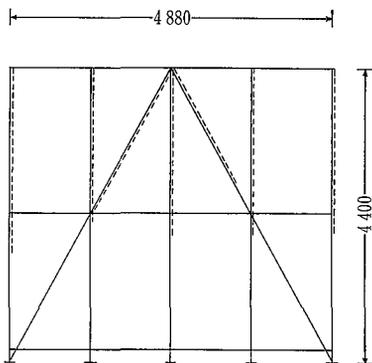


写真 2 支え強度試験
Photo. 2 Bearing strength test



第 7 図
主構造ライン図
Fig. 7
Lines of main structure

5. 冷却塔の振動について

冷却塔の振動については、まず主構造体の固有振動数が外力振動数に近い場合は共振現象を起こし起動に支障がある場合があること。次に運転中の過大振動によって連続運転に障害となる場合があることの 2 点が掲げられる。

以上より、冷却塔の振動問題においては主構造体の固有振動数および運転時の振動値を確認する必要がある。

5.1 固有振動

第 7 図に示す主構造ラインの理論解析による 1 次固有振動数は 9.04 Hz である。この時の振動モードを破線にて示す。

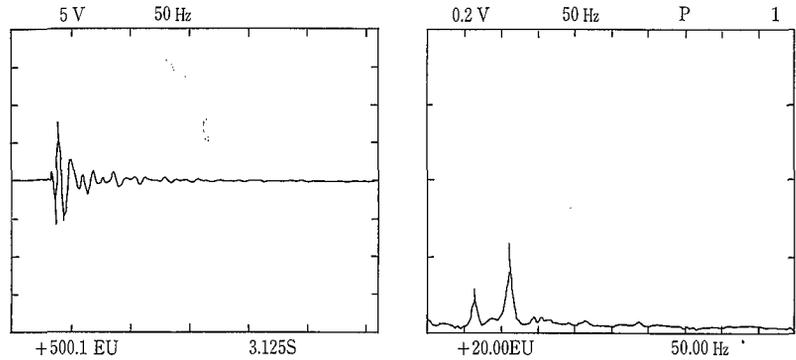
また実機測定による固有振数は 11 Hz である。この時の振動波形および周波数分析結果を第 8 図に示す。

計算値と測定値での固有振動値に差が生じているが、これは荷重条件設定の差と、計算上の接点構造をピン構造としているのに対し、実機では必ずしもそれに相当する接点構造になっていないことなどが原因と考えられる。

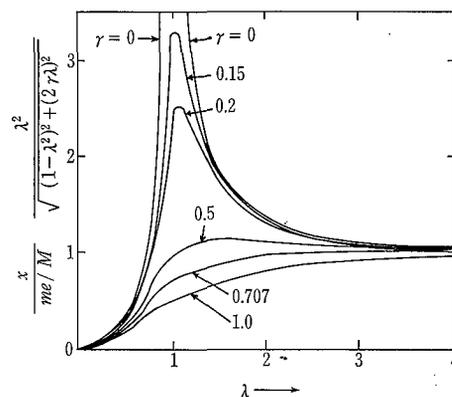
しかし、これらの固有振動数は加振周波数となる伝動軸回転数、ファン通過周波数などに比べ充分小さな値であることから、主構造材と回転機械との共振現象は発生しないと考えられる。

5.2 運転振動について

冷却塔送風装置の運転振動、揺れの原因については伝動



第 8 図 固有振動波形と周波数分析
Fig. 8 Wave form of natural vibration and frequency analysis



第 9 図 アンバランス応答
Fig. 9 Magnification of unbalance response

軸、プロペラの残留アンバランスによる所が大きい。運転振動を考える場合には、加振力による静たわみ量と、加振周波数とそれを支える系の固有振動数との差による応答倍率とを考慮する必要がある。

第 9 図に振動数比によるアンバランス応答曲線を示す。この曲線は $\lambda=1$ 、すなわち系の固有振動数と外力による加振周波数が一致する点の近傍では共振のために振動倍率が非常に増大することをあらわし、逆に $\lambda>1$ の場合には振動値は系の固有振動数の影響を受けにくくなることをあらわしている。

ここで第 7 図に示す主構造における伝動軸による運転振動値を考える。加振力としては JIS B 0905「回転機をつり合い良さ」に示される等級 6.3 相当の回転体残留アンバランス量とし、この加振力によるたわみ量をアンバランス応答曲線を用いて補正した。

これらより、伝動軸による運転振動値は 28 μm であり、小さな振動値といえることができる。

以上のことにより主構造材を FRP 化した場合の振動についても従来塔との間に大きな差は無いと考えられる。

6. FRP 製冷却塔実績紹介

当社は FRP 製冷却塔の第一号機として株式会社神戸製鋼所加古川製鉄所殿より 1450 m^3/h 冷却塔を受注し、本年 6 月に据付工事を完了した。この冷却塔仕様および構造

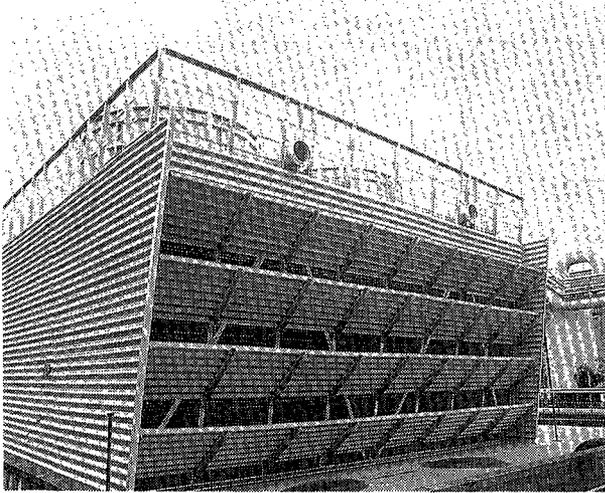


写真 3 冷却塔全景
Photo. 3 Panoramic view of cooling tower

材の材質を紹介する。また写真 3 にて全景、写真 4 にて塔内主構造材を紹介する。

- | | |
|-----------|--------------------|
| (1) 塔型式 | 強制通風式クロスフロー冷却塔 |
| (2) 塔番号 | 2XPA-4F4a2-37G37 |
| (3) 基数 | 1基(2セル/1基) |
| (4) 塔諸元 | |
| ・全長 | 9 920 mm |
| ・全幅 | 9 428 mm |
| ・全高 | 6 533 mm (塔柱ベースより) |
| (5) 機器明細 | |
| ①送風機 | |
| ・型式 | 軸流型(可変ピッチ翼) |
| ・直径・翼数 | 3 660 mmφ |
| ②送風機用電動機 | |
| ・型式 | 屋外型全閉外扇三相誘導電動機 |
| ・定格 | 37 kW, 4/6 pole |
| ③減速機 | |
| ・型式 | スパイラルベベルギア |
| (6) 構造材材質 | |
| ①主構造 | FRP |
| ②外装板 | FRP波板 |
| ③ルーバー | FRP波板 |
| ④ファスタック | FRP |

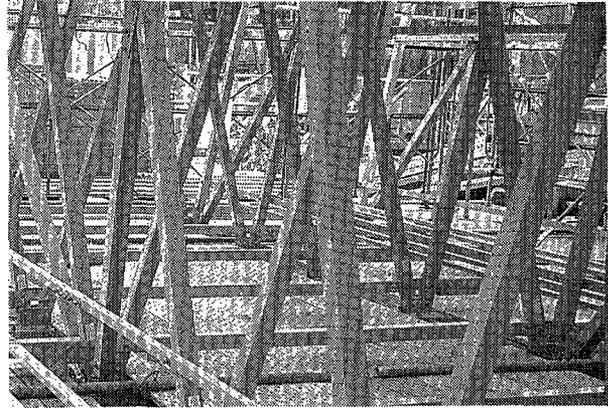


写真 4 FRP主構造
Photo. 4 Main structure of FRP

- | | |
|-------------|-------------------|
| ⑥塔上手摺 | FRP |
| ⑥充填材 | 硬質塩化ビニル |
| ⑦エリミネータ | 硬質塩化ビニル |
| ⑧ファン甲板 | 木(防腐処理) |
| ⑨温水槽/蓋 | 木(防腐処理) |
| ⑩階段/手摺 | 木(防腐処理) |
| ⑪塔内歩廊/手摺 | 木(防腐処理) |
| ⑫金具/ボルト・ナット | 溶融亜鉛鍍金鋼(S S 41) |
| ⑬釘 | ステンレス鋼(S U S 304) |

む す び

FRP製冷却塔の開発はその主構造材に新素材としてのFRP引抜材を適用し、耐久性の向上を主な目的としている。

冷却塔は鉄鋼、石油、化学、パルプ、食品などあらゆる業界で使用されており、メンテナンスに関するユーザの関心も高く、また、稼動後20年近くになる冷却塔も多くあり、更新を計画されている所も少なくない。

これらによりFRP製冷却塔の需要も今後高まってゆくものと期待している。各位が冷却塔を選定される際に、本稿が参考になれば幸いである。

FRP冷却塔の開発を進めるにあたり、FRP引抜材について多大のご教示を頂いた大日本硝子工業株式会社殿の関係者の皆様に深く感謝の意を表します。

〔参考文献〕

- FRP設計便覧 社団法人強化プラスチック協会
FRP構造強度設計の実際 社団法人強化プラスチック協会