

膜材料の鋼製部材との接触疲労

山本 拓也 #1
豊田 宏 #2
鳥居 壯 #3

梗概

膜構造建築物に使用されている膜材料が、鋼製部材（トラスなどのパイプ）と接触している箇所では風により変形してばたつきを起こす状態“フラッターリング”が発生することにより、鋼製部材と接触を繰り返す。この現象におけるその接触部分での膜材料の疲労を調査する実験を行った。また、疲労が見られる場合、鋼製部材に保護材を施す疲労防止策についても検討した。この結果、膜材料の疲労は鋼製部材の溶接部分に接触した箇所で見られたが、その部分に薄い保護材を施すことによって、疲労を防止することが確認できた。

1. まえがき

1987年11月に、「中規模膜構造建築物技術基準」および「特定膜構造建築物技術基準」が、建築基準法第38条の規定により一般認定された。これによって、従来仮設的な取扱いをされていた膜構造建築物は、これらの基準を充足する範囲内で、通常の建築物として取り扱われるようになり、四ふっ化エチレン樹脂（PTFE）-ガラス繊維布膜材料の普及と相伴って、恒久的な構造建築物が増えつつある。

しかし、恒久膜構造建築物として使用されていく上で、膜材料の耐久性の問題が生じてくる。今日まで、基本的な力学特性についての研究は数多く行われてきた。フラッターリングに関する研究として、膜材料の繰り返し疲労についてはいくつか見られ、[1]その他、振動解析や、形状解析についての報告もある。[2~5]

ところが、フラッターリングにより、膜材料が鋼製部材等と接触した場合の疲労についての報告は見られなかった。

そこで、本報告では、フラッターリングの状態を想定した試験機（図1）を作製し、膜材料の鋼製部材（トラスを想定したパイプ）との接触部分での疲労特性を把握する事を目的として行った実験の結果を報告する。

ここで、フラッターリングとは、膜材料の曲げ剛性が非常に小さい為、膜構造建築物上の膜材料に風よる動的外力が加わる事により、膜材料が振動する（ばたつき）状態の事を言う。

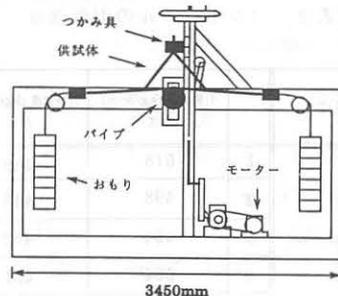


図1. フラッターリング試験機

- #1 太陽工業（株） 技術本部 企画部 技術開発室
#2 太陽工業（株） 技術本部 企画部 技術開発室 課長代理
#3 太陽工業（株） 環境事業部 膜構造研究室 部長

2. 試験内容

2.1 試験概要

まず、フラックリングを所定回数繰り返し行った後、膜材料のパイプとの接触部分を採取して引張試験を行ない、パイプと接触していない部分の引張強度と強度比較する事によって膜材料の疲労の程度を測定した。

また、疲労が見られる場合それを保護する最適な材料を選択した。

2.2 試験材料

今日、膜構造建築物に使用されている膜材料は、次の3種類に分けられる。

A種 —— 四ふっ化エチレン樹脂-ガラス繊維布

B種 —— 塩化ビニール樹脂等-ガラス繊維布

C種 —— 塩化ビニール樹脂等-合成繊維布

この中で今回試験に使用した膜材料は、A種(四ふっ化エチレン樹脂-ガラス繊維布)とした。表1に試験材料の詳細、表2にコントロールの引張強度(フラックリング試験を行っていないもの)を示す。

表1. 試験材料の詳細

色	——	ベージュ
繊維素材	——	ガラス150 4/2 ECB
被覆材	——	四ふっ化エチレン樹脂
織組織	——	平
質量 (g / m ²)	——	1 2 9 5
厚さ (mm)	——	0. 8
密度 (本/3cm)	——	3 0 × 2 3

表2. コントロールの引張強度

試験片		引張強度 (kg/3cm) たて	引張強度 (kg/3cm) よこ
コントロール	1	518	442
	2	498	448
	3	494	462
	4	504	461
	5	504	428
	\bar{x}	504	448

2.3 フラックリング試験

図2に供試体仕様、図3に試験状況立面図を示す。

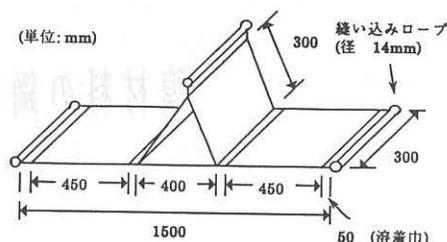


図2. 供試体仕様

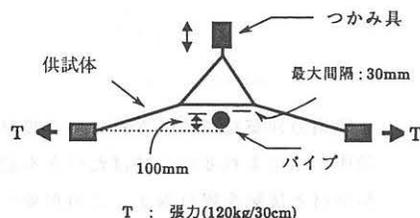


図3. 試験状況立面図

まず、供試体(図2)をフラックリング試験機に取り付け、供試体に120kg/30cmの張力をかけた状態で所定回数パイプに接触させる。パイプの種類は4タイプ(①~④)とした。表3に試験条件、表4に各パイプの種類、表5に各パイプの特徴を示す。

表3. 試験条件

パイプ径	1 0 0 mm
膜材料とパイプの最大距離	3 0 mm
繰り返し速度	1 回/sec
繰り返し数	1 0 万回
膜張力	120kg/30cm

表4. パイプの種類

① 通常のパイプ	1 種類
② パイプ中央に溶接のビート部があるもの	1 種類
③ パイプ中央に溶接ビート部を想定した針金を巻いたもの	5 種類
④ パイプ中央の溶接ビート部に保護材を施したもの	8 種類

表 5. 各パイプの特徴

- ①のパイプ 径 100 mm の通常のパイプ
- ②のパイプ ビート部の高さ — 2 ~ 3 mm
ビート部の幅 — 約 10 mm
- ③のパイプ 針金径の種類 5 種類
 - a ————— 0.5 mm
 - b ————— 1.0 mm
 - c ————— 2.0 mm
 - d ————— 3.0 mm
 - e ————— 4.0 mm
- ④のパイプ 保護材の種類 — 8 種類
保護材の幅 — 5 cm

保護材	厚さ	特徴
a CR ゴム	3 mm	硬度 55°
b EPDM+IIR ゴム	2 mm	硬度 45°
c PVC の間にウレタンフォームを挟んだ	5 mm	
d PE-アルミフィルム貼り	1.5mm	
e PEフォーム-アルミフィルム貼り	5 mm	
f EPDMフォーム	5 mm	粘着剤付
g ネット-アルミフィルム貼り (市販品)	0.3mm	粘着剤付
h 織物-テープ貼り (市販品)	0.2mm	粘着剤付

2.4 フラックリング試験終了後の引張試験

2.4.1 引張試験片採取方法

フラックリング試験終了後、パイプとの接触部分の疲労の程度を把握する為の引張試験片採取方法を次に示す。

まず、フラックリング試験により最も疲労していると思われる供試体の中央部分を A とし、その両端を B1 ~ B4 として供試体の幅方向に試験片を採取して引張試験を行なう。(図 4, 図 5 参照)

但し、①のパイプでフラックリング試験を行った供試体については、パイプに接触した所とパイプに接触していない所についてそれぞれ上記採取方向に対して直角方向に 5 本ずつ採取する。(図 6 参照)

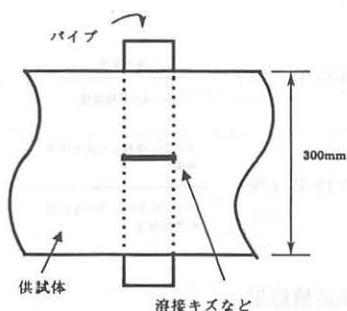


図 4. 供試体とパイプの接触部分平面図

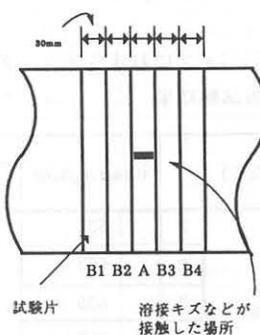


図 5. 試験片の採取方法

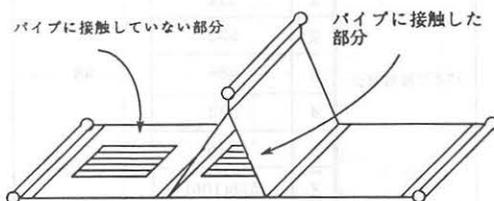


図 6. ①のパイプで試験後引張試験片の採取方法

2.4.2 引張試験後評価方法

試験は、JIS L 1096 カットストリップ法で行い、②~④のパイプの試験では、繰り返し伸縮を除いた純粋な凸部による疲労を知るために、(1)式により、B1~B4の引張強度の平均値に対するAの強度保持率を求めた。

また、①のパイプでフラックリング試験を行った供試体については、(2)式により、パイプに接触していない部分の引張強度平均値に対する供試体の中央部分の引張強度平均値の強度保持率を求めた。

表 8. ③のパイプにおけるフラッタリング試験後
引張試験結果

針金の径	試験片	引張強度 (kg/3cm)		パイプとの接触部分 Aの強度保持率(%)	
		たて	よこ	たて	よこ
0.5mm	B-1	482	374	102	106
	B-2	458	355		
	B-3	499	426		
	B-4	504	404		
	B-1~4の \bar{x}	486(96)	390(91)		
	A	495(98)	412(92)		
1.0mm	B-1	494	411	95	100
	B-2	488	411		
	B-3	504	416		
	B-4	476	386		
	B-1~4の \bar{x}	491(97)	406(91)		
	A	468(93)	407(91)		
2.0mm	B-1	487	398	105	101
	B-2	485	423		
	B-3	516	425		
	B-4	496	439		
	B-1~4の \bar{x}	496(98)	421(94)		
	A	523(104)	426(95)		
3.0mm	B-1	477	402	98	100
	B-2	461	371		
	B-3	504	371		
	B-4	464	376		
	B-1~4の \bar{x}	472(94)	380(85)		
	A	462(92)	380(85)		
4.0mm	B-1	477	349	51	93
	B-2	461	363		
	B-3	504	387		
	B-4	464	388		
	B-1~4の \bar{x}	477(95)	372(83)		
	A	243(48)	345(77)		

$$\text{強度保持率 (\%)} = \frac{\text{Aの強度}}{\text{B1~4の平均強度}} \times 100 (1)$$

$$\text{強度保持率 (\%)} = \frac{\text{パイプに接触した所の平均強度}}{\text{パイプに接触していない所の平均強度}} \times 100 (2)$$

3. 引張試験結果

次に、各パイプでのフラッタリング試験後の引張試験結果を示す。表中の () 内はコントロールに対しての強度保持率 % を示す。

表 6. ①のパイプにおけるフラッタリング試験後
引張試験結果 (たて糸方向)

試験片(たて)	引張強度 (kg/3cm)	パイプ接触部分の強度 保持率(%)
パイプ接触なし	1	537
	2	563
	3	535
	4	527
	5	540
	\bar{x}	540(107)
パイプ接触部分	1	534
	2	536
	3	486
	4	532
	5	549
	\bar{x}	528(105)

(但し、この試験でのパイプとの接触回数は
20万回とした)

表 7. ②のパイプにおけるフラッタリング試験後
引張試験結果

試験片	引張強度 (kg/3cm)		パイプとの接触部分 Aの強度保持率(%)	
	たて	よこ	たて	よこ
B-1	516	425	50	89
B-2	503	401		
B-3	506	437		
B-4	502	443		
B-1~4の \bar{x}	507(101)	427(95)		
A	252(50)	381(85)		

次に、表 8 の試験結果から図 7 に針金径とコントロールに対する針金に接触していない部分B1~B4の強度保持率との関係を、図 8 に針金径とB1~B4に対する針金に接触した部分Aの強度保持率との関係を、また、図 9 に針金径とコントロールに対するAの強度保持率を示す。

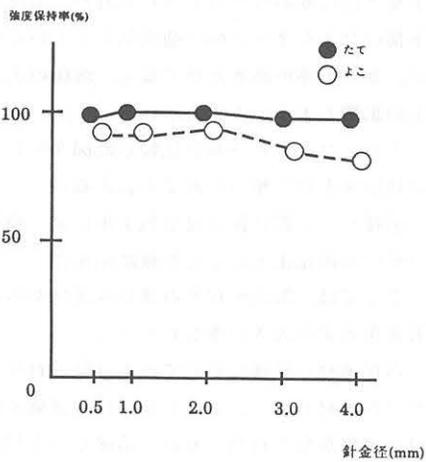


図7. 針金径とコントロールに対する針金に接触していない部分B1~B4の強度保持率

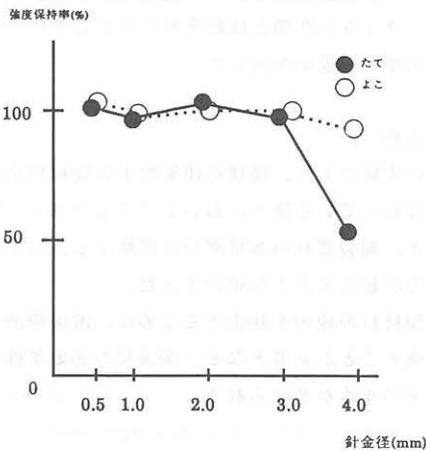


図8. 針金径と針金に接触していない部分B1~B4に対する針金に接触した部分Aの強度保持率

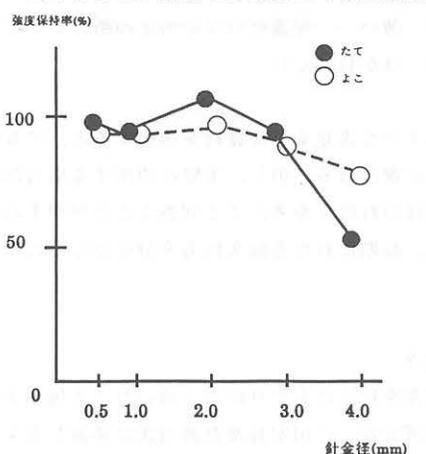


図9. 針金径とコントロールに対する針金に接触した部分Aの強度保持率

表9. ④のパイプにおいてフラックリング試験後引張試験結果

保護材	試験片	引張強度(kg/3cm)		パイプとの接触部分Aの強度保持率(%)	
		たて	よこ	たて	よこ
a	B-1	500	422	100	99
	B-2	501	421		
	B-3	536	413		
	B-4	502	400		
	B-1~4の \bar{x}	510(101)	414(92)		
A	512(101)	411(92)			
b	B-1	523	427	98	97
	B-2	514	424		
	B-3	497	408		
	B-4	484	420		
	B-1~4の \bar{x}	505(100)	420(94)		
A	495(98)	408(91)			
c	B-1	502	411	98	98
	B-2	523	412		
	B-3	525	425		
	B-4	496	423		
	B-1~4の \bar{x}	512(102)	420(94)		
A	504(100)	410(94)			
d	B-1	518	407	100	100
	B-2	520	420		
	B-3	509	396		
	B-4	496	393		
	B-1~4の \bar{x}	512(102)	404(90)		
A	513(102)	404(90)			
e	B-1	486	423	99	98
	B-2	507	391		
	B-3	485	423		
	B-4	496	401		
	B-1~4の \bar{x}	494(98)	410(92)		
A	491(97)	403(90)			
f	B-1	490	438	99	102
	B-2	496	450		
	B-3	523	460		
	B-4	499	427		
	B-1~4の \bar{x}	502(100)	444(99)		
A	498(99)	452(101)			
g	B-1	511	430	98	99
	B-2	487	449		
	B-3	510	421		
	B-4	472	445		
	B-1~4の \bar{x}	495(98)	436(97)		
A	485(98)	431(96)			

保護材	試験片	引張強度(kg/3cm)		パイプとの接触部分Aの強度保持率(%)	
		たて	よこ	たて	よこ
h	B-1	510	427	100	99
	B-2	494	435		
	B-3	480	403		
	B-4	493	451		
	B-1~4の \bar{x}	494(98)	429(94)		
	A	492(98)	423(94)		

4. 考察

- (1) 図7に示すように、コントロールの引張試験結果と比較して、パイプと接触していない部分の、フラックリングによる疲労は、全体的に小さい。しかし、針金を巻いたパイプの試験では、針金の径が太くなると僅かな強度低下が認められる。
- (2) 溶接ビート部のないパイプでのフラックリング試験においては、パイプと接触した箇所での強度低下は、見られなかった。
- (3) 溶接ビート部のあるパイプでのフラックリング試験においては、溶接ビート部に接触した箇所でも膜材料の疲労が大きく、たて方向で約50%、よこ方向で約10%強度低下があった。

たて方向での強度低下が大きい原因として、よこ糸の間隔がたて糸の間隔よりも広い事が考えられる。このために、よこ糸の間に溶接ビート部が入り込みたて糸を直接キズつけているものと思われる。逆によこ糸は、たて糸の間隔が狭い為に溶接ビート部が直接よこ糸に当たらず、たて糸がよこ糸を保護している形になっていると思われる。

また、たて糸よりもよこ糸の伸び率の方が大きいために、溶接ビート部に膜材料が接触した時、よこ糸は伸びる事により、糸にかかる応力を分散させているために、強度の低下がたて方向よりも小さいとも考えられる。

- (4) 図8に示す様に、溶接ビート部を想定した針金を巻いたパイプでのフラックリング試験では、針金径 0.5mm~3mm では、ほとんど強度低下は認められなかったが、針金径 4mm で溶接ビ-

ト部と同程度の強度低下が見られた。溶接ビート部の高さが2~3mmで強度低下している事から、ビート部の高さだけでなく、溶接の表面状態の影響も大きいと考えられる。

また、コントロールと比較した図9を見ても、ほぼ図8と同じ傾向にあると言える。

- (5) 溶接ビート部に保護材を施す事により膜材料の疲労を防止出来ることが確認出来た。

ここでは、0.2mm程度の薄い保護材を用いても養生効果の大きい事がわかった。

各保護材の保護性面での差は見られなかったが保護材 b, e, g においては、試験後保護材に損傷が見られた。bは、溶接ビート部にあたる部分で歪みがもとに戻らなくなっており、eは保護材の破れがあった。gは、表面のアルミフィルムが膜と接触を繰り返すことにより粉末化し、膜面を汚した。

5. まとめ

今回の実験により、膜構造建築物上の膜材料が鋼製部材と接触している箇所においてフラックリングが発生すると、鋼製部材の溶接部分に接触する部分で膜材料の疲労が起こることが確認できた。

その膜材料の疲労を防止するために、溶接箇所に保護材を施すことが必要となる。保護材の必要条件として、以下の4点が挙げられる。

- ① 膜材料に損傷を与えない
- ② 保護材の損傷が見られない
- ③ 薄い — 保護材のない所との断差が少ない
- ④ はがれにくい

この4点を満足する保護材を選択すると、“h”の保護材が選ばれる。但し、実際に使用する場合は、安全性とはがれ防止を考えて2回巻くことが望まれるがさらに、長期にわたる耐久性も充分確認しておく必要がある。

6. 謝辞

本研究を行うにあたり助言を頂いた 太陽工業(株)膜構造研究室 戸田室長及び渡辺氏に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 本橋健司, 榎木亮, 豊田宏, 鳥居壯, 河野吉雄
「膜構造用膜材料の耐久性能評価についてⅡ」
日本建築学会大会学術講演梗概集, 1983年
- 2) 大塚毅, 平島和弘: 「風洞実験によるHP吊屋
根の振動特性に関する研究」
工学院大学研究報告, 1980年
- 3) 吉村健, 鹿庭和史:
「一方向型吊屋根のフラッタについて」
九州産業大学工学部研究報告, 1981年
- 4) 内山和夫, 山田大彦, 植松康
「吊屋根の風による動的挙動」
風工学シンポジウム論文集, 1982年
- 5) 國枝治郎: 「風による吊屋根の振動」
京大防災研究所年報第18号B, 1975年

CONTACT FATIGUE OF MEMBRANE MATERIAL AT AREAS IN CONTACT
WITH STEEL COMPONENTS

Takuya Yamamoto *1
Hiroshi Toyoda *2
Tsuyoshi Torii *3

SYNOPSIS

Membrane materials used for membrane structures tend to be repeatedly in contact with steel components (tubes used as trusses, etc.) as they flutter in high winds. Experiments were carried out to determine fatigue of a fluttering membrane materials at areas in contact with the metal. Where the fatigue was observed, a fatigue-preventing measure have been used and evaluated which consisted of putting a protective material on the metal. The fatigue was in fact observed where the material fell in contact with the welded part of the steel component. It was also confirmed that such fatigue could be prevented by making use of a thin protective material.

*1,*2,*3 TAIYO KOGYO CORPORATION