

発泡充填式空気膜チューブ構造を用いた空間構築に関する研究

白髪 誠一
大阪工業大学ロボティクス&デザイン工学部空間デザイン学科

Seiichi Shiraga
Dept. of Design and Architecture, Osaka Institute of Tecnology

1. はじめに

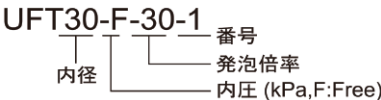
本研究は、硬質発泡ウレタンを空気膜チューブ構造の内部で発泡させることで、その発泡ガスにより空気膜を膨らませ発泡ウレタンを充填することでパビリオンを構築することを目的としている。これを発泡充填式空気膜チューブ構造と呼ぶ。この構造方式では、空気膜構造を自立させるために必要な内圧の高さと加压された空気膜内で発泡ウレタンが十分に発泡し充填されることを確認する必要がある。

本研究では、加压されたパイプ内で発泡ウレタンが十分に発泡するかを確かめるために発泡充填実験を実施している。さらに、空気膜チューブが自立するために必要な内圧を調べるための形態探査を行っている。

2. 発泡充填実験

図 1 に実験装置を示す。発泡パイプには塩化ビニルパイプを用い、下部の投入口より発泡ウレタンを注入し、空気弁より圧縮空気を注入してパイプ内の内圧を高める。内圧は上部のリリーフバルブによって一定に保ち、圧力計で内圧を計測する。発泡ウレタンは発泡しながら発泡パイプ内に充填され、その充填高さを超音波センサにより計測した。

実験供試体名は以下のルールに従う。



発泡パイプは内径 φ30mm、発泡ウレタンは 1:1 で混合する 30 倍発泡を用いた。内圧は、0 ～ 30kPa を設定した。発泡パイプの外側で反射板を用いて充填高さを計測した。

実験結果を図 2、図 3 および表 1 に示す。内圧の上昇によって発泡ウレタンの充填高さが低くなり充填効率が低下することが分かった。また、表 1 に示すように平均発泡倍率が約 20 倍に低下している。これは、内圧の影響よりもチューブ径やウレタンの自重が影響している可能性がある。

3. 空気膜チューブの内圧を最小化する形態探査

発泡ウレタンが充填される過程において空気膜チューブが自立するために必要な最小内圧を調べるための形態探査を行った。解析モデルは図 4 に示すように曲げモーメントが小さく軸力が主となる放物メッシュドーム形状を対象にした。図 5 のように高さ方向に 6 つのレベルに分け、各レベルのチューブ径を設計変数とた。チューブ内圧を目的関数とて、これを最小化することを目的とする。チューブの自重とウレタンの重量による圧縮応力度と曲げ応力度に対して、内圧による引張応力度が上回ることを制約条件として設定した。構造解析には Karamba3D、最適化には Galapagos を使い、空間のスケール (100, 80, 60)、分割サイズ (250, 350, 450, 550mm)、膜厚 (0.1, 0.02mm) を設定

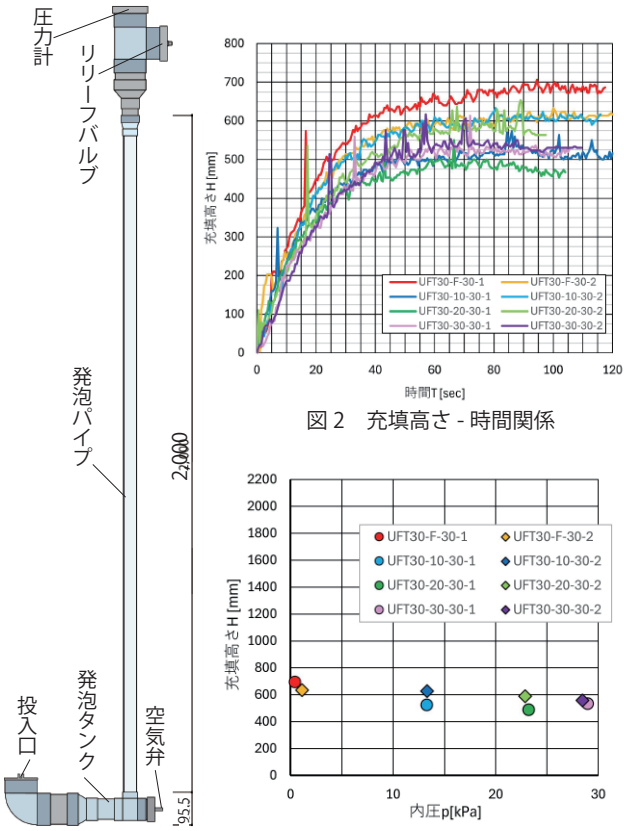


図 1 充填実験装置

図 3 充填高さ - 内圧関係

表 1 実験結果

供試体	最高充填高さ	80秒平均内圧	充填率	発泡倍率	平均最高充填高さ	平均発泡倍率
	mm	kPa	%	倍	mm	倍
UFT30-F-30-1	695	0.43	68.5	20.5	665	20.3
UFT30-F-30-2	635	1.13	67.0	20.1		
UFT30-10-30-1	524	13.26	64.3	19.3	576	19.7
UFT30-10-30-2	628	13.28	66.8	20.1		
UFT30-20-30-1	488	23.20	63.5	19.0	538	19.4
UFT30-20-30-2	588	22.87	65.9	19.8		
UFT30-30-30-1	533	28.95	64.5	19.4	546	19.5
UFT30-30-30-2	558	28.45	65.1	19.5		

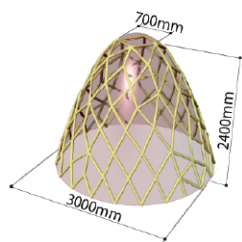


図4 解析モデル

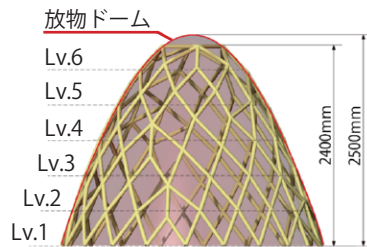


図5 高さ方向レベル分割図

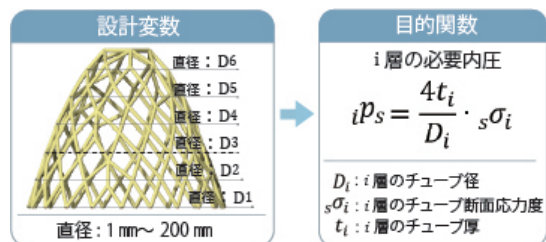


図6 形態探索における設計変数と目的関数

した。図6に設計変数と目的関数の設定を示す。i 層 (i=1 ~ 6) のレベルの必要内圧は $i p_s$ として次式となる。

$$i p_s = \frac{4 t_i}{D_i} \cdot s \sigma_i \quad \dots 1)$$

ここで、 D_i : Lv.i のチューブ径

t_i : Lv.i のチューブ厚

$s \sigma_i$: Lv.i の自重によるチューブ断面応力度

この p_s を最小化するように最適化を行う。また、解析モデルの呼び名を以下のように設定した。

T1-S100-M25-B

① ② ③ ④

① T1: 膜厚 0.1 mm
T02: 膜厚 0.02 mm

② S100: 100% スケール
S80: 80% スケール
S60: 60% スケール

③ M25: メッシュ-辺幅 250 mm
M35: メッシュ-辺幅 350 mm
M45: メッシュ-辺幅 450 mm
M55: メッシュ-辺幅 550 mm

④ B: 充填前
A: 充填後

解析の結果得られた形態を図7に示す。メッシュサイズが 350mm のモデル (M35) と 550mm のモデル (M55) を比較すると、チューブ径に大きな差異が生じなかった。メッシュが細かくすることでウレタン重量が大きくなり、それに伴って内圧を小さくするためにチューブ径が細くならなかったものと考えられる。スケールが 60% のモデル (S60) についても、100% のモデル (S100) に比べてチューブ径はあまり変わらない結果となった。図8に各モデルの自立するための必要内圧を示す。100% のモデル (S100) の必要内圧は約 12 ~ 13 kPa となった。各レベルでの必要内圧はほぼ同じである。この内圧は、発泡充填実験において充填可能な内圧となっている。スケールが 60% のモデル (S60) の必要内圧は約 6 ~ 7 kPa であり、スケールが小さくなると必要内圧が低下する結果となった。

4. まとめ

発泡充填実験では、内圧の上昇に伴い充填高さが低下する傾向が見られた。ただし、内圧がない状態であっても発泡倍率が 20 倍程度に低下し、十分な発泡倍率が得られない結果となった。これは、細いチューブ内に充填する際の摩擦抵抗が影響していると考えられる。今後、チューブ径が発泡倍率に与える影響についての検討が必要である。

内圧を最小化する形態探索では、10kPa 程度の内圧でも自立可能な形態を得ることができた。発泡ウレタンが充填可能な内圧を求め、これを制約条件として形態探索を行えば、より最適な形態を得ることができると考えられる。

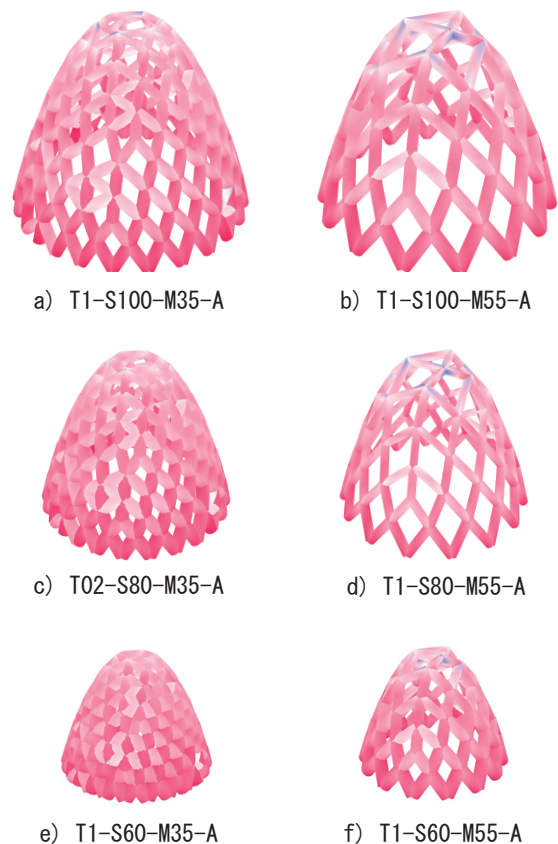


図7 形態探索結果

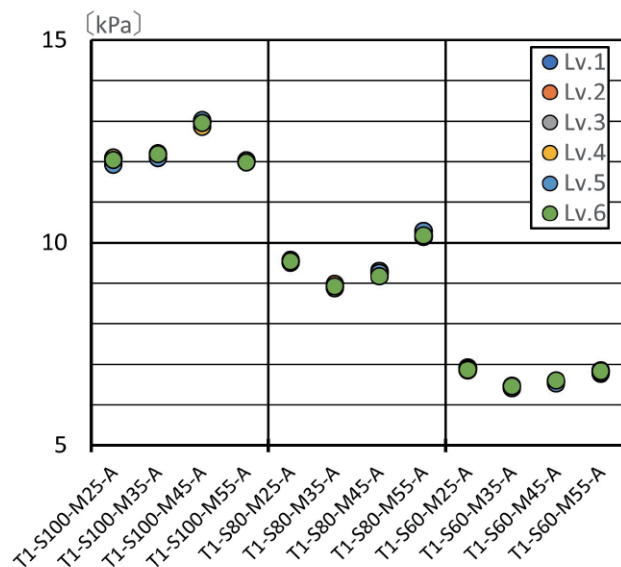


図8 必要内圧結果