

ETFEフィルムを用いた四角形パネルの進行性ボンディング

河端昌也*
森山史朗**
薛学禎***

梗概

ETFEフィルムは伸びが大きい材料であるため、ボンディングにもなう荷重が大きく成長する場合がある。特に変形と貯水量の増加が循環的に進行して大変形に至る進行性のボンディングが生じないようにすることは、設計上重要である。本論文では、四角形フィルムパネルのボンディング実験とFEM解析によって、フィルムの材料特性と進行性ボンディングの関係、水勾配による効果について検討している。

1 はじめに

近年、エデンプロジェクトやドイツのワールドカップスタジアム、北京オリンピック競技施設など、ETFE(エチレン・四フッ化エチレン共重合樹脂)フィルムを空間構造建築物の屋根や外壁に用いる事例や計画が増えている。その構造形式には、フィルムを複数枚重ねて袋状にし、その内部の圧力を高めて膨らませるクッションタイプ(空気膜方式)と、単膜に初期張力を導入して安定させるテンションタイプ(張力膜方式)の2種類がある。

ETFEフィルムは、破断時の伸びが350~450%に達する延性の高い材料であるため、雨水や積雪、融雪水などの滞留によるボンディングが大きな荷重に成長する場合があり、注意が必要である。

ボンディングは有効な水勾配と水はけ路(樋)が確保されていれば問題になることはない。しかし、ドーム状屋根の天頂部のように勾配確保が困難な部分や、フィルムと外周フレームとの段差がある部分、雨水等の合流部分等にボンディングが発生する場合がある。またクッションタイプでは、自重および積雪等の荷重により内圧が相殺されてフィルム面が降下する場合や、停電等でフィルムがデフレートする場合もありうる。ボンディングは、パネルの外周部から水がオーバーフローして平衡状態になる場合と、変形と貯水量の増加が循環的に進行し大変形に至る場合がある。ここでは、後者を進行性のボンディングと呼ぶこととする。

ボンディングに関しては、高ライズ空気膜構造のボンディング^{1)~4)}に関するものや、テンションタイプのフィルムを用いた屋根のボンディング⁵⁾に関する研究例がある。合成樹脂であるETFEは降伏応力をこえ

ると引張弾性率が低下して、伸びを生じやすい性質をもっている⁶⁾。そこで本研究では、材料の降伏後の挙動が進行性のボンディングにおよぼす影響を検討することを目的として、ETFEフィルムを用いた正方形パネルのボンディング実験を実施し、実験とFEM解析の比較を通して解析手法の妥当性を検証したうえで、進行性のボンディング現象とETFEフィルムの弾塑性特性との関係を検討する。

2 実験概要

2.1 試験体形状

図1に試験体の概要を示す。フィルムは鉄骨製の外周フレーム(内法寸法2m)に固定する。フレームは傾斜を調整することで、フィルムに水勾配を設けられるようになっている。フィルムパネルでは、ボンディング時に水面が上昇して外周フレーム端部まで達すると水が流出し始めるため、パネル内の水量の増加は止まると考えられる。ここでは図3に示すように、外周フレームの最下点を基準面として、水圧で変形したフィルムの最下点との高低差を d 、フィルム最下点と水面の高低差を d_w として、その比を貯水率[%] $=d_w/d$ と定義し、満水状態は貯水率100%と表すことにする。実験では1回あたりの注水量を5kgとし、これによるフィルム面の鉛直方向変位をレーザー式変位計で測定する。変位計は水勾配なしの場合はパネル中央に固定とするが、水勾配がある場合はフィルムの最下点位置が水量の増加とともに移動するため、レーザー式変位計を水平移動テーブル上で走査させて、最下点高さを計測した。また、パネル中央にスケールを設置して水面の高さを目視により測定した。図2に実験の様子を示す。

* 横浜国立大学大学院工学府 社会空間システム学専攻 助教授 博士(工学)
** 横浜国立大学大学院工学府 社会空間システム学専攻 大学院生 修士(工学)
*** 横浜国立大学工学部 建設学科 学部生

2.2 試験体の種類

試験体の種類は表1に示すように、フィルムの厚さ(50, 100, 200 μm)と水勾配(なし, 2.5°, 5°)を各3通り設定する。またフィルムの形状は、最も単純なテンジョンタイプを想定した初期形状が平面のフィルムと、クッションタイプを想定して立体裁断された2枚のフィルムとする。テンジョンタイプは縮小率を設けていないが、クッションタイプは内圧300Pa時にライズが0.2m(スパンの1/10)となるように縮小率をかけて裁断し、パネル中央を30mm幅で熱溶着して製作している。なおクッションタイプの試験体は、停電等でフィルムがデフレートした状態を想定して、2枚重ねのまま懸垂した状態で実験を行う。

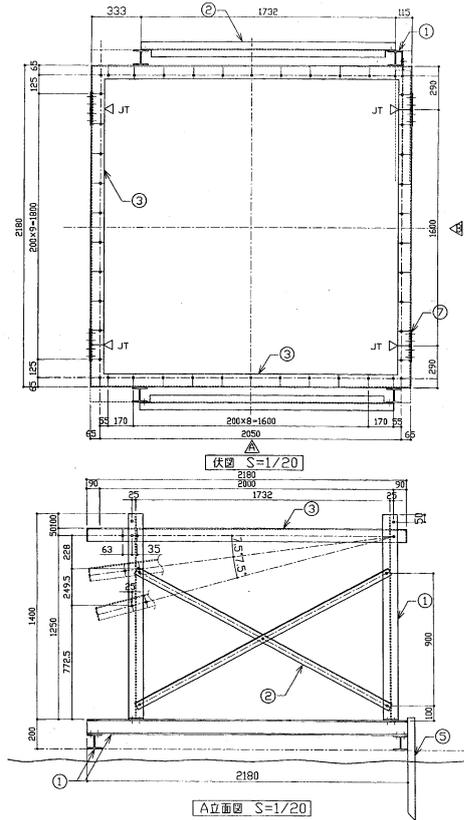


図1 試験体の形状

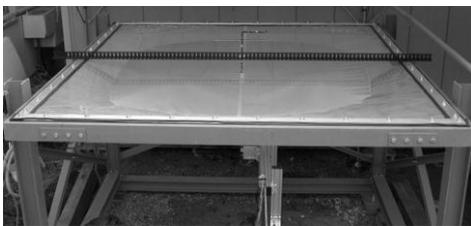


図2 実験の様子

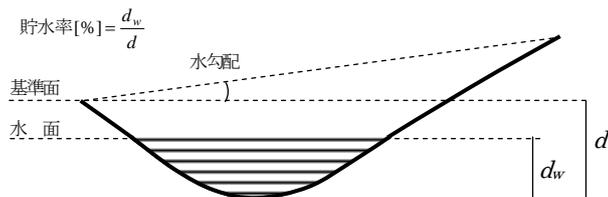


図3 貯水率の設定と荷重の評価方法

表1 供試体の種類

パネル形状	厚さ	水勾配		
		なし	2.5°	5°
平面フィルム (テンジョンタイプ想定)	50 μm	○	○	○
	100 μm	○	○	○
	200 μm	○	○	○
立体裁断フィルム (クッションタイプ想定)	200 μm 2枚	○	○	○

2.3 解析による検証

解析は定ひずみ三角形要素を用いて、材料および幾何学的非線形性を考慮した FEM 解析による。フィルムは等方性とし、自重は 0.0175N/m² μm とする。表2に解析に用いた材料定数を示す。降伏判定は次式の Mises の降伏条件式を

$$F = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 + 3\tau^2} \quad (1)$$

ただし、 F : 相当応力
 σ_1 : 引張応力 (x方向)
 σ_2 : 引張応力 (y方向)
 τ : せん断応力

用いて、2軸応力から相当応力を求め、これが 13N/mm²になった時点で降伏と判断する。降伏時の ETFE フィルムのひずみは2%程度で比較的小さいため、金属材料等でよく用いられる Mises の降伏条件式が適用可能と考える。貯水による荷重の評価は、各要素に対する法線方向単位荷重から等価節点力ベクトルを求め、これに節点位置の水圧を乗じて求めている。水面が要素内部を横切る場合には、水面より上の節点に作用する外力はゼロとする。また変形ともなう荷重ベクトルの変化に応じて収束計算を行い、つりあい状態を求めている。

表2 材料定数

	応力の範囲	引張弾性率	せん断弾性率	ポアソン比
弾性域	0~13 N/mm ²	565.2 N/mm ²	169.2 N/mm ²	0.44
塑性域	13~20 N/mm ²	44.6 N/mm ²	15.4 N/mm ²	0.44

3 テンジョンタイプのポンディング現象

3.1 フィルムの厚さによる違い

図4に50 μm 、水勾配なしのフィルムパネルにポンディングが生じた時の中央部鉛直変位と水の総重量(a)、貯水率(b)、相当応力の最大値(パネル中央の要素に発生)(c)、パネル中央の断面形状の変化(d)をそれぞれ示す。なお同図(d)の水平線は、各貯水率の水圧でつりあい状態に達した時の水面の高さを示している。総重量に対する変位の関係は、実験と解析が良好に一致している。また貯水率は、パネル中央に設置したスケールが水面から離れた時の計測ができなかったため、途中からのデータとなっているが、解析結果とおおむね一致している。解析では、変位 169mm でフィルム中央部の相当応力が降伏応力に達している。このとき貯水率は50%、総重量は0.4kNを示しており、これ以後は、フィルムの引張弾性率が低下するため貯水率のわずかな増加に対して変位が急増している。断面形状と水面の変化をみると、貯水率40%以上では水面が上昇せず、貯水率60%ではフィルムが大きく変形するため、水面はむしろ降下している。また貯水率60%では、塑

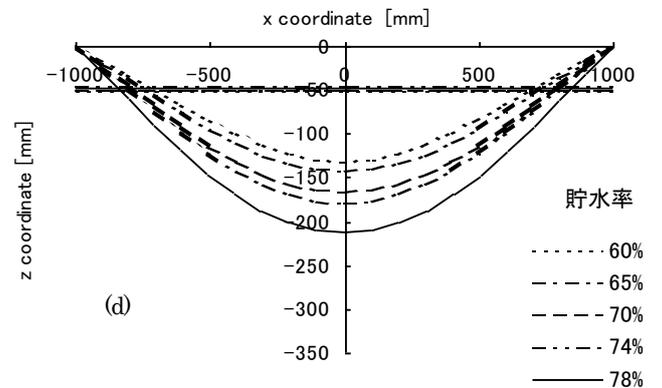
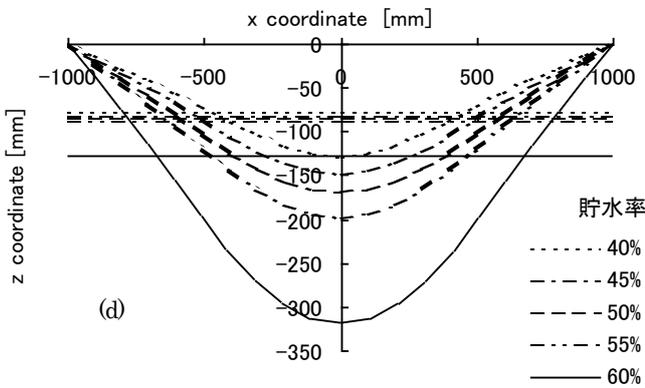
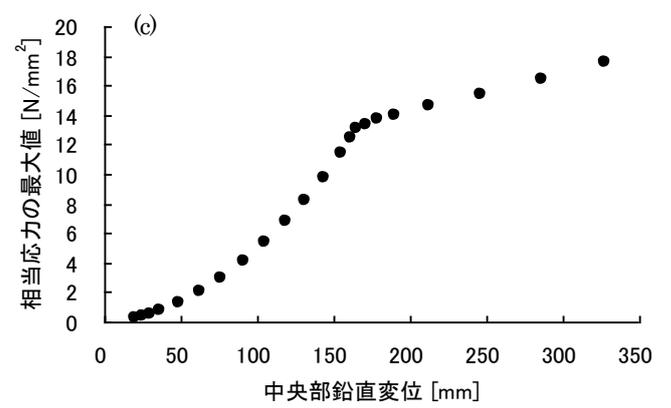
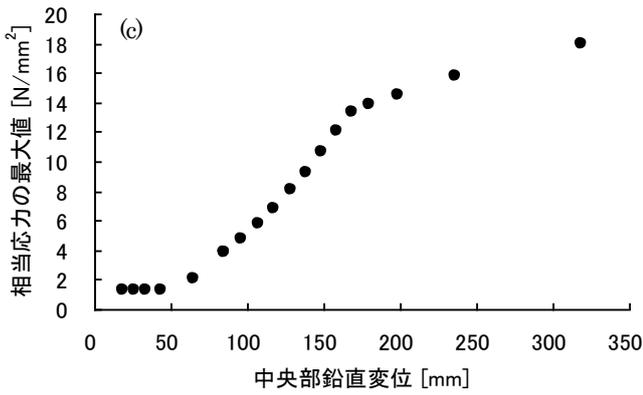
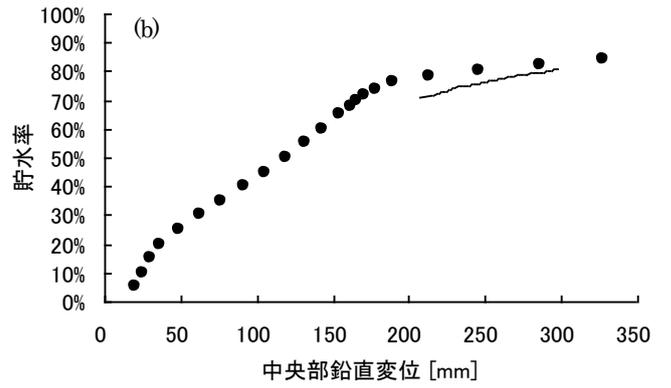
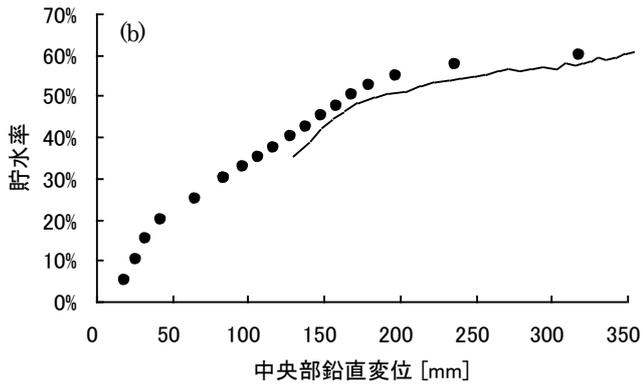
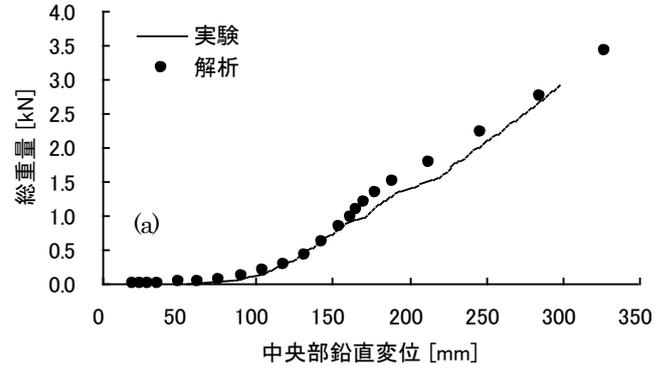
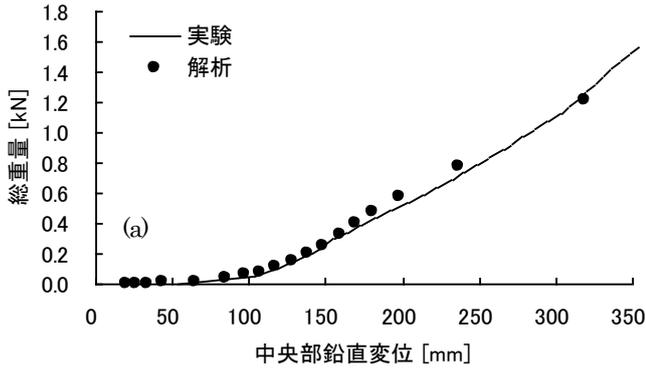


図4 平面フィルム(50 μm, 水勾配なし)の挙動

図5 平面フィルム(100 μm, 水勾配なし)の挙動

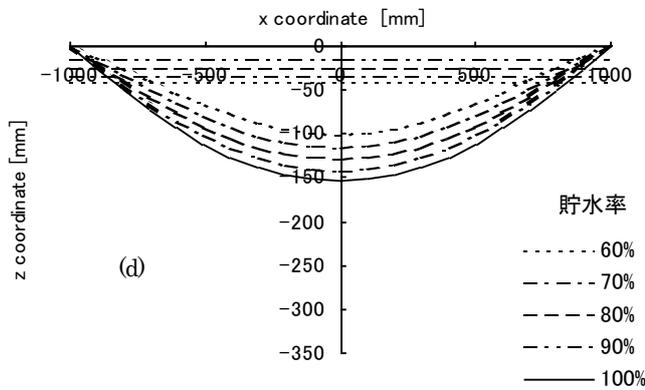
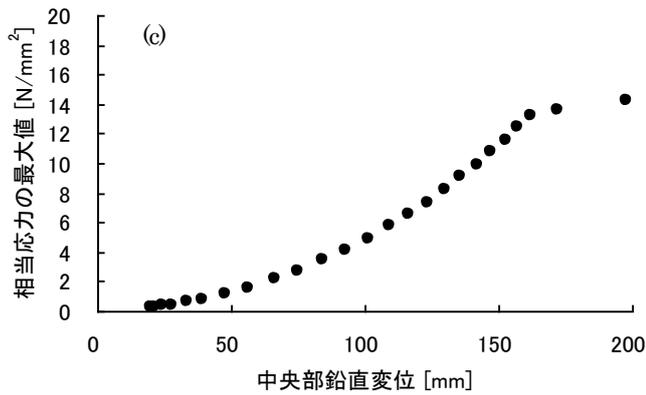
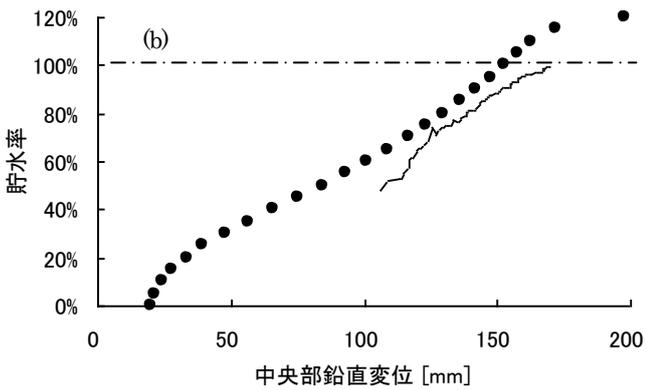
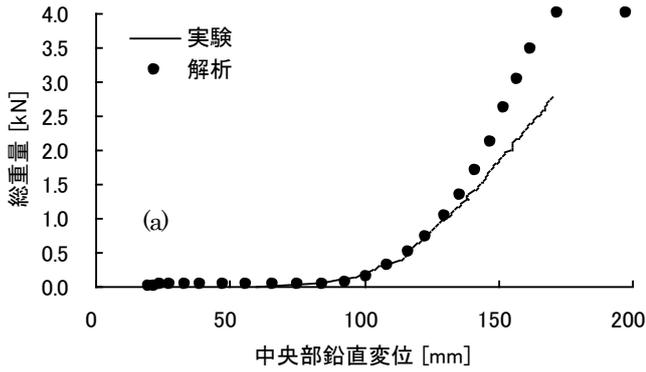


図6 平面フィルム(200 μ m, 水勾配なし)の挙動

性化した中央部の変形が顕著になっており、進行性のボンディングが生じていることが明らかである。

図5は、100 μ m, 水勾配なしの場合について同様に示したものである。フィルム中央部の相当応力が降伏応力に達するとき、変位は165mmで50 μ mの場合とほぼ同じであるが、貯水率は70%、総重量は1kNに達している。変位と総重量の関係(a)では、変位170mm以降に解析よりも実験結果の変位量の方が大きくなる傾向を示している。この傾向は50 μ mでも少し見られるが、100 μ mではより顕著になっている。このとき実験では、注水後に時間の経過とともにフィルムの変位が増加するのが観測されており、フィルムのクリープ変形による影響が顕著に現われ始めたと思われる。このことは、形状変化(d)にも現われており、貯水率60~78%の範囲では、水量の増加に対してフィルムの変形が大きく進み、水面の上昇がほとんどない状態になっている。よって、このパネルの場合にも進行性ボンディングが生じているといえる。一方、図6に示すように200 μ m, 水勾配なしの平面フィルムの場合には、満水状態でも相当応力の最大値は12N/mm²で降伏応力以下となっている。このとき変位は152mm、総重量は2.5kNであった。形状変化(d)についても、水量の増加に対してフィルムは変形が進むものの、水面も同時に上昇しており、満水状態でフィルムは弾性範囲内の応力状態で安定したつりあい状態になっている。ただし、実験では総重量1.5kN以上で注水後のクリープ変形が顕著になっており、同図(a)の実験と解析のような変位の差が生じている。したがって、さらにクリープ変形が生じて水量が増した場合には、フィルムが降伏応力をこえる可能性も考えられる。

3.2 水勾配による効果

厚さ50 μ mの平面フィルムについて、図7に水勾配2.5°、図8に水勾配5°の場合のボンディングによる挙動を示す。なお同図(a)~(c)の横軸は、各荷重時のフィルム最下点の高さを示している。また表3には、各パネルの進行性ボンディング発生の有無と総重量の関係を示す。水勾配なしの場合の変位は実験と解析が良好に一致していたが、同図では解析による変位が実験結果よりも20~30mm程度大きくなっている。これは実験のレーザー変位計走査による測定の誤差や、解析において水面と交差する要素の荷重評価に実際とのずれが生じているのではないと思われる。解析で相当応力の最大値が降伏応力に達するのは、水勾配2.5°の場合は貯水率65%(水量0.4kN)、水勾配5°の場合は貯水率85%(水量0.4kN)の時点となっている。

表3 進行性のボンディング発生の有無と貯水率、総重量の関係

パネル形状	厚さ	水勾配			
		なし	2.5°	5°	
平面フィルム	50 μ m	×	×	×	×
	100 μ m	×	○	○	○
	200 μ m	△	○	○	○
立体裁断フィルム	200 μ m	○	○	○	○
	2枚	100%	100%	100%	100%

×・・・進行性ボンディングの発生が確認された, △・・・可能性あり, ○・・・なし

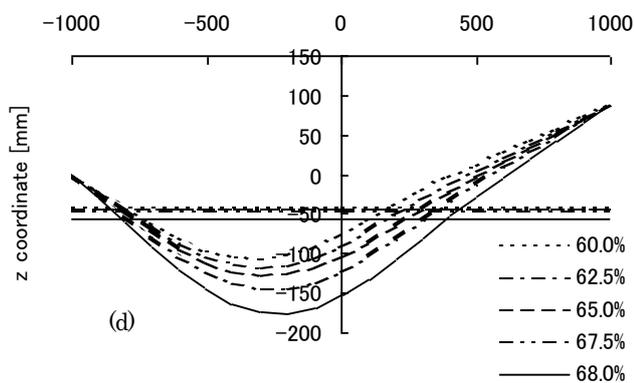
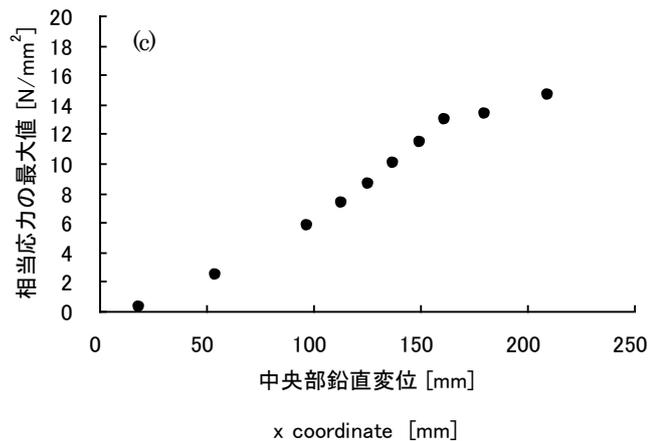
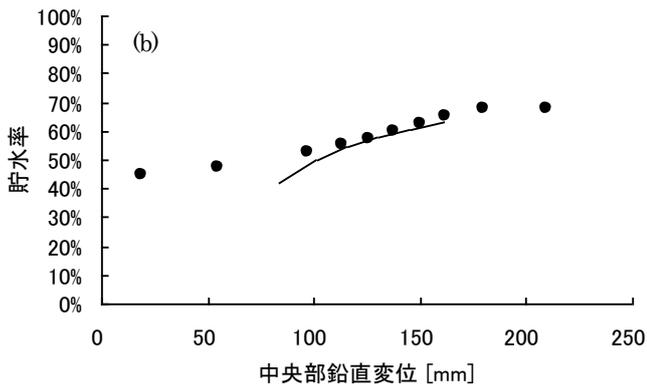
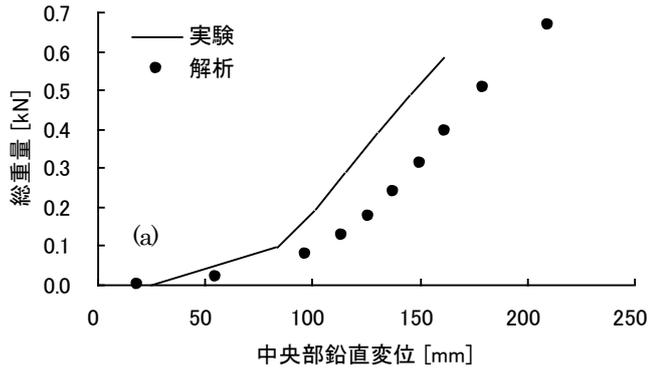


図7 平面フィルム(50 μ m, 水勾配2.5°)の挙動

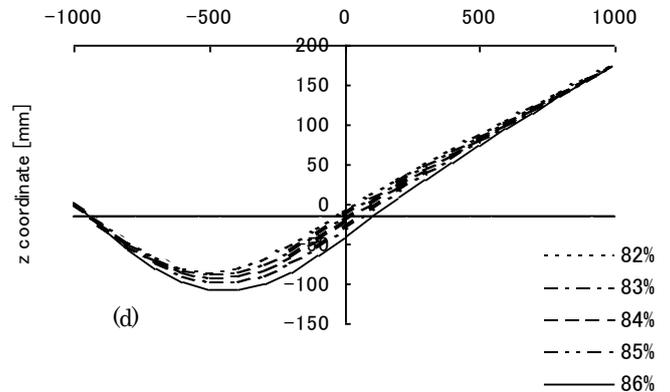
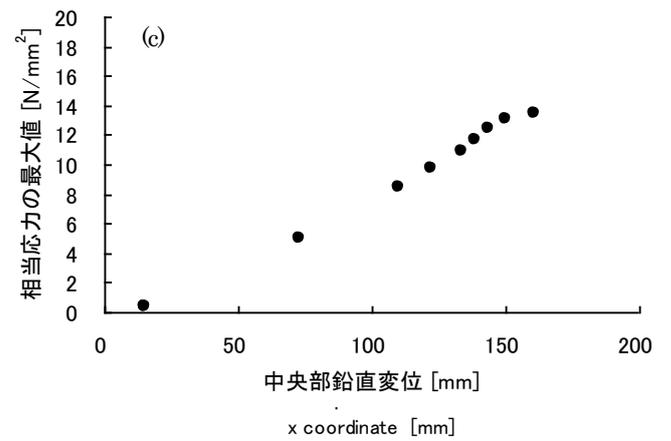
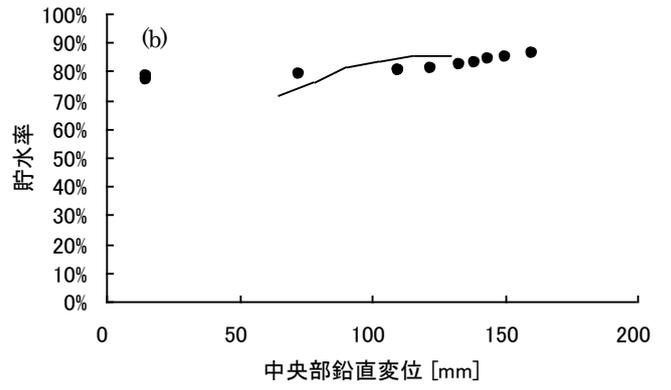
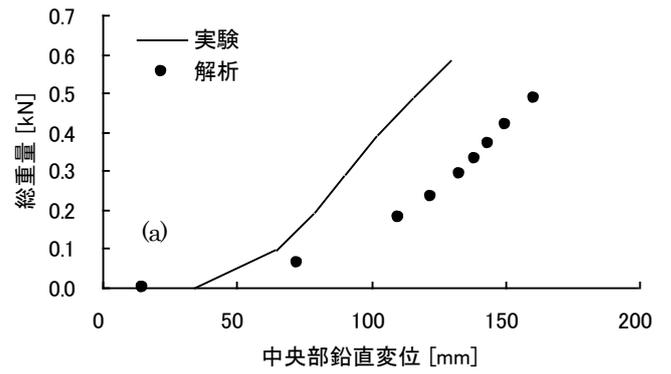


図8 平面フィルム(50 μ m, 水勾配5°)の挙動

4 クッションタイプのボンディング現象

立体裁断されたフィルムを2枚重ねたパネル(水勾配なし)のボンディング時の挙動を図9に示す。比較のために解析は厚さ400 μm の条件で行っている。総重量と変位の関係は実験と解析で良好に一致していることから、2枚のフィルムは同様に応力を負担しているものと思われる。自重時からスパンの1/10程度のサグを有しているため、満水時の総重量は3.5kN程度に達しているが、相当応力の最大値はフィルムの降伏応力の半分程度になっている。したがって、このパネルの場合には進行性のボンディングを生じる恐れはないと言える。

5 まとめ

本研究により、ETFEフィルムのボンディングにおいて、相当応力の最大値が降伏応力をこえると、フィルムの伸びが大きくなり、変形と貯水量の増加が循環的に進行して大変形に至る、進行性のボンディングを生じることが明らかとなった。フィルムのクリープ変形を考慮すると、フィルムパネルは満水時であっても降伏応力に対して余力を確保しておくことが必要である。ボンディングにともなう貯水量は、有効な水勾配を確保することによって大きく低減することが可能である。

謝辞

本実験の実施にあたっては、日本膜構造協会フィルム膜パネル委員会のご協力を頂きました。ここに深く感謝を表します。

参考文献

- 1) Glockner, P. G. and Szykowski, W., "Some Stability Considerations of Inflatable Structures", IASS Symposium, 1983
- 2) Glockner, P. G. and Dacko, A. K., "On The Very Large Deflection and Stability Behavior of Spherical Inflatables Under Rigid Axisymmetric Loads", IASS Symposium, 1989
- 3) Dalziet, G., "The Effect on Snow Loads on Cylindrical Air-Supported Structures", IASS Symposium, 1992
- 4) Stanuszek, M. and Glockner, P. G., "The Ponding Problem on Very Lofty Spherical Inflatable", IASS Symposium, 1992
- 5) 佐藤裕子, 斎藤公男, 黒木二三夫, 岡田章, 中島肇, 宮里直也, 宮田真紀: 張力膜構造のボンディング現象に関する基礎的研究 その1~2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.953~956, 2003
- 6) 正木佳代子, 河端昌也, 森山史朗: ETFE フィルムの機械的特性と構造挙動に関する基礎的研究, 日本建築学会大会梗概集, pp.941~942, 2003.

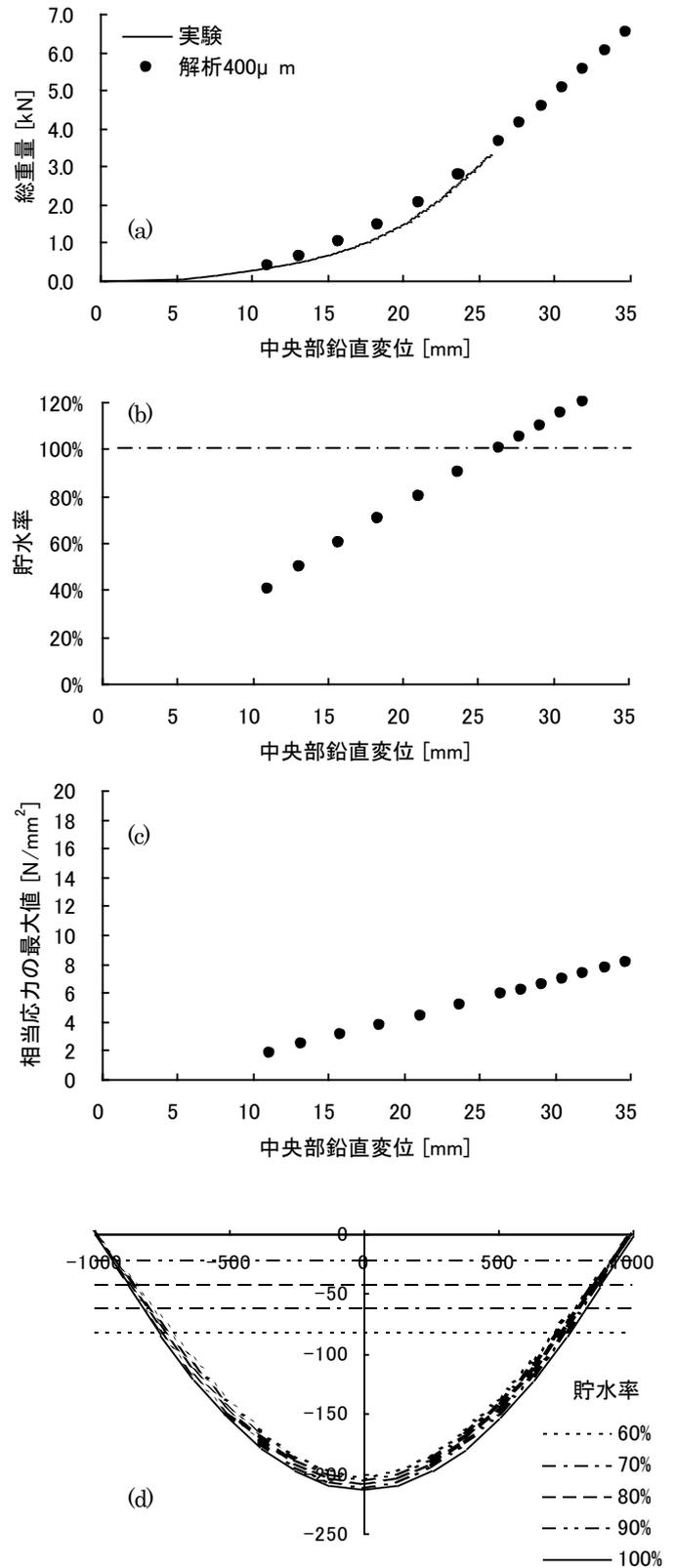


図9 クッションタイプ(200 μm ×2枚, 水勾配なし)の挙動

Study on progressive ponding of square panel using ETFE film

Masaya Kawabata ^{*)}

Fumio Moriyama ^{**)}

Gakutei Setsu^{***)}

SYNOPSIS

Tensile strain at break of ETFE film is remarkably high and huge water load is developed due to the ponding on ETFE film panel. Progressive ponding causes circulation of deformation of film and accumulation of water load and it is necessary to consider and avoid this phenomena. Experiment and FEM analysis are executed on square film panel and the relationship between material properties and progressive ponding, and the effect of weathered slope are described on this paper.

^{*)} Dr.-Eng. Associate Prof., Faculty of Engineering, Yokohama National University

^{**)} Graduate Student, Graduate School of Engineering, Yokohama National University

^{***)} Student, Department of Architecture and Building Science, Yokohama National University