土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 72, No. 2, I_545-I_550, 2016.

空気袋構造形式の津波堤防に関する実験的研究

西畑　剛[1]・前田　勇司[2]・桝尾　孝之[3]・山本　浩二[4]

[1]正会員　五洋建設（株）技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
E-mail: Takeshi.Nishihata@mail.penta-ocean.co.jp
[2]正会員　五洋建設（株）技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
E-mail: Yuuji.Maeda@mail.penta-ocean.co.jp
[3]正会員　太陽工業（株）国土環境エンジニアリングカンパニー　技術センター
（〒154-0001 東京都世田谷区池尻 2-33-16）
E-mail: mt001304@mb.taiyokogyo.co.jp
[4]正会員　太陽工業（株）国土環境エンジニアリングカンパニー　技術センター
（〒154-0001 東京都世田谷区池尻 2-33-16）
E-mail: yk003478@mb.taiyokogyo.co.jp

本研究では，空気を注入して起立する空気袋構造形式の堤防に対し，その耐津波性能を水理模型実験から検証した．陸上遡上時の水深が比較的小さい津波を対象とし，実スケールの実験を実施した．半地下土倉を壁で仕切った上で，壁面開口部に試験体堤防を設置して注水し，設計津波波圧分布を模擬した静水圧を膜体の堤防に作用させて，膜の歪みや変位，内部気圧の変化などを計測した．

実験の結果，空気袋構造形式では，津波作用時に袋内の空気圧縮と内部圧の上昇に伴う材料変形や空気圧を介在した背面側の袋体の変動，初期内部気圧と大気圧のずれによる材料歪みの変化などに留意が必要である．一方，津波作用時の袋内の圧力上昇は，膜体前面の歪みを緩和するため，耐津波性能は向上する．

Key Words : *tsunami, hydraulic experiment, coastal dike, air bag structure, air expansion*

1.　はじめに

東日本大震災以降，沿岸部の津波想定が見直されている．津波を防護水準クラスおよび想定最大クラスの２レベルに分けて対応する耐津波設計概念が導入され，内閣府等から新たな津波想定も公表されている[1)]．臨海施設を有する施設管理者は，重要度に応じて各レベルの津波に対する新たな備えを迫られるが，低頻度・重大災害である津波への対応は，施設の利便性やB/Cの観点も重要と考えられる．

津波から臨海施設を防護する対策構造物としては，護岸パラペット工や盛土築堤，胸壁や陸閘などが代表的であるが,海際へのアクセスを阻害する,用地を占有する，景観を損ねる，コストが高いなどそれぞれ課題が挙げられる．そこで筆者らは，浸水深が比較的小さい津波（3m以下）を対象にこれらの問題点を解決する対策工として膜を用いた空気袋構造形式の津波堤防を検討している．**図-1**にイメージを示すが，堤防本体は可撓性の膜を主材料とし，倒伏可能な支保工で支える構造である．常時は地下格納され，非常時は膜内へ空気を注入することで膨張・起立させて津波に備える．そのため，常時は通行の妨げにならず景観性も良く，コンクリートや鋼製の堤防等に比べて材料費も安価である．その一方で，空気袋構造を主体とした堤防は河川のゴム引布製起伏堰等があるものの[2)]，用途が異なるため耐津波性能は検証されていない.筆者らが提案する構造形式の津波堤防に関しても，その耐津波性能は不明であるのが現状である．

そこで本研究では，実規模スケールの水理模型実験を実施してその性能を確認する．水理模型実験では，堤防模型に津波設計波圧相当の水圧を載荷することで実施し，提案構造の津波作用時の基礎的な性能を検証することを研究目的とする．

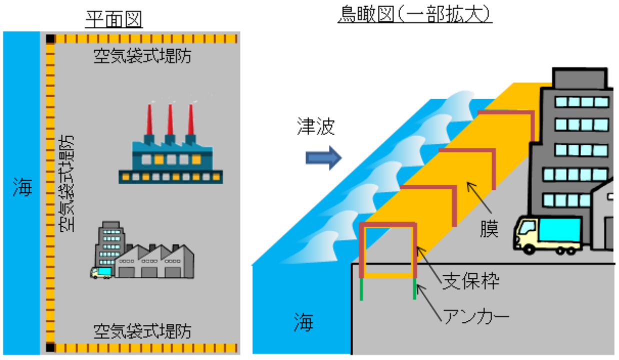

図-1　提案堤防のイメージ（起立時）

2. 空気袋構造形式の津波堤防

本研究で提案する空気袋構造形式の津波堤防は，堤防本体となる可撓性の膜，それを支える倒伏可能な鋼製材支保枠および地中基礎から成る．**図-2**に提案構造の倒伏時及び起立時の構造概要を示す．常時はヒンジで連結された支保枠が倒伏して膜も地中に格納されるため景観性も良く，車両通行も可能なため施設利便性を損なわない．津波時には袋構造であるため空気（流体）を送ることで起立し，堤防として機能させられることが利点である．

可撓性の膜材料として，本研究では補強繊維入りの汎用キャンバス材（ポリ塩化ビニル製）を用いた．支保枠材としては，既存のH鋼，地中基礎としてはグラウンドアンカーや鋼材基礎が想定される．

なお，本研究は本体工となる可撓性膜材の津波作用時の性能検証を主眼とするため，水理模型実験において支保枠材および地中基礎をモデル化と性能検証までは実施しない．模型実験の詳細は次章で述べる．

3. 水理模型実験

(1) 実験概要

実験は幅4.53m，長さ7m，深さ5mの半地下土倉内に開口部を有する鉄骨仕切壁を壁面から2.05mの位置に設置し，開口箇所（幅2.5m，高さ2.5m）に膜材料を固定・止水した上で注水することで，支保枠1スパン分の膜材料に作用する設計津波波圧を模擬する．なお，半地下土倉および仕切壁・開口部の詳細なセッティングに関しては，別研究の実験[3]に類似するので参照されたい．

現地で運用する堤防に対し，実験対象とする堤防部材ユニット箇所を**図-3**に示す．実機は膜体の3辺固定（上辺のみ未固定）を想定するのに対し，本実験は漏水防止のため4辺固定となる．次章で記すが下側が大きい三角形分布の波圧のため，上側の変位・歪みは比較的小さく，袋構造形式における上辺固定の影響は無視できると考えた．実験平面および断面を**図-4**に示す．実験では，水中ポンプを用いて最大+4.5mまで湛水させ，膜材最下端に3.6m分の静水圧を作用させる．これは朝倉らの津波設計波圧式[4]によると1.2mの進行波津波の設計波圧（水深係数3）に相当する（**図-4**参照）．模型前面・背面の膜中央・端部それぞれに歪計を設置し，縦・横方向の材料歪を計測する．また試験体前後には前背面の膜材中央付近に変位計を配置することで，材料の水平変動を計測する（正

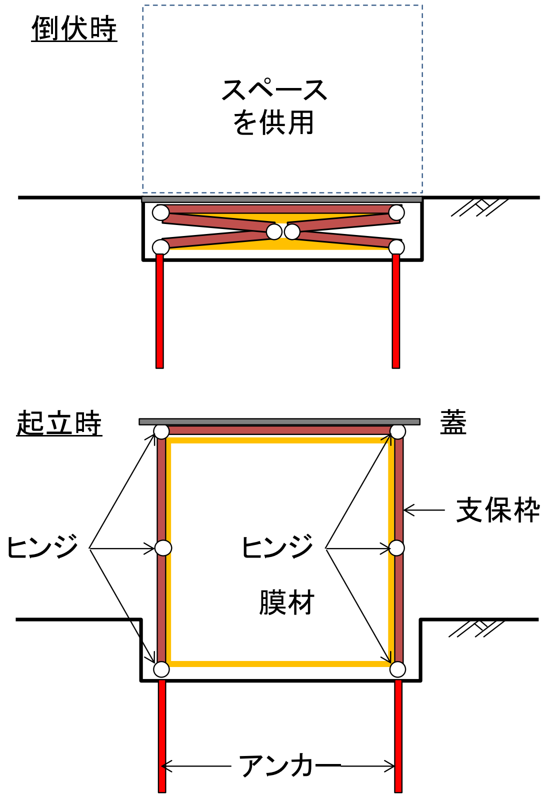

図-2 膜構造堤防の構造概要（上：倒伏時，下：起立時）

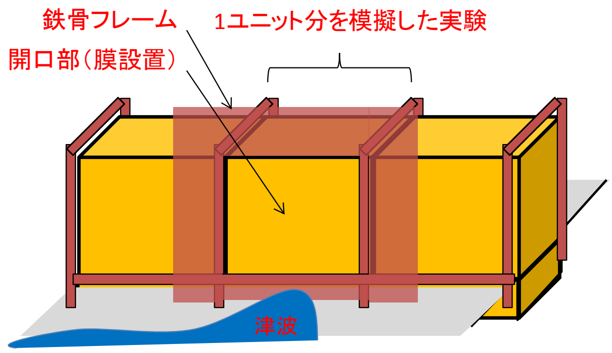

図-3 実験対象とする堤防部材ユニット

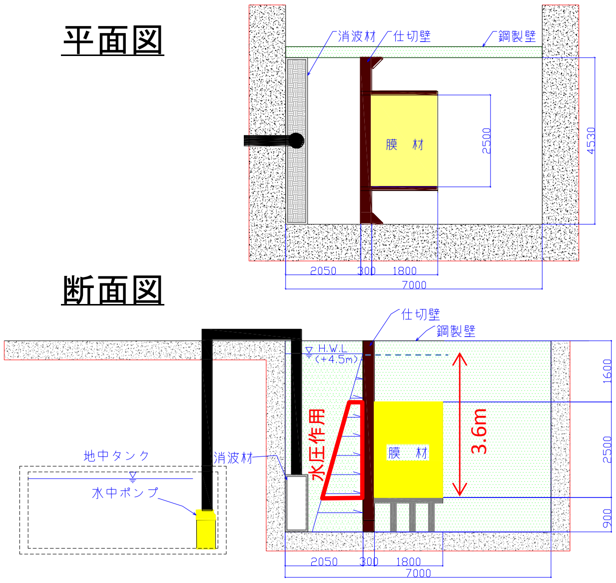

図-4 実験図（上：平面図，下：断面図；単位：mm）

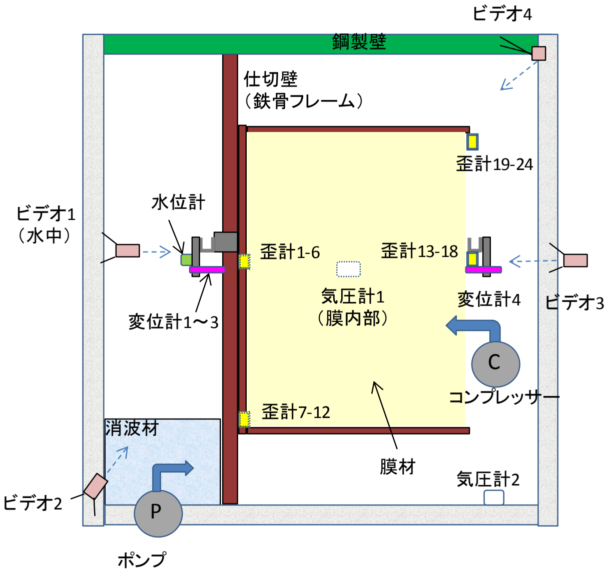

図-5　計測機器配置平面図（ケース 2,3）

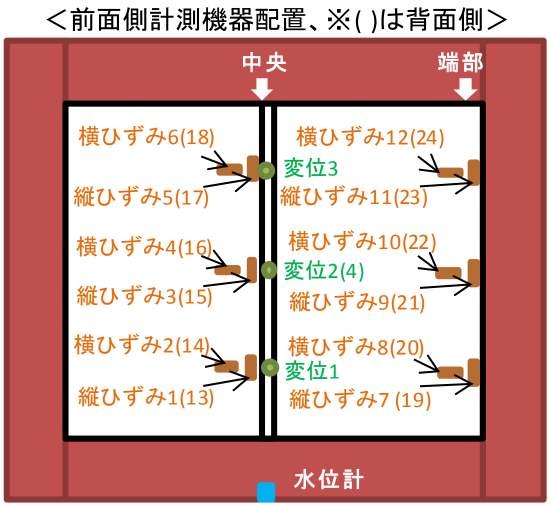

図-6　計測機器配置正面図

方形膜は前面のみ)．その他，水圧計を試験体注水側前面，圧力計を試験体内外に配置することで，前面水位のほか袋体形状の膜試験体のケースでは内外の気圧変動も計測した．なお，袋体形状の膜に対しては，実験前，コンプレッサーで送気の上，膜内部が所望の気圧になるよう調整した．また水中ポンプによる注水を行ったが，乱れが大きくならないように吐出口付近には消波材を設置した．実験状況は周辺に配置されたビデオやカメラで適宜，撮影した．**図-5**，**図-6** に計測機器の配置を示す．

(2)　堤防模型

実験は，膜の標準的な材料特性を把握するため形状を正方形としたほか，空気を注入・膨張させる直方体形状のもの，さらに膨張起立後，津波来襲まで待機している間の大気圧変動も勘案して内部気圧を外気圧より大きくしたものの 3 ケースを設定した（**表-1**）．**写真-1** に使用

表-1　検討ケース

ケース	膜形状	膜内部気圧
1	正方形	-
2	直方体	大気圧
3	直方体	大気圧+25hPa

写真-1　使用膜材料（上：正方形，下：直方体形状）

した膜材料を示す．現地での運用時，膜材料はプレキャスト化して現地組立することを想定し，材料中央鉛直方向に溶着目地を設けた．また直方体形状の膜は支保枠との接続を考慮し，膜体前面部の四辺には仕切壁と接続するアオリ形状の部材を溶着した．仕切壁への接続は C 型材などを使用し，正方形形状の試験体では端部を直接，直方体形状の試験体はアオリ部を巻き込む形で設置する．接続材は仕切壁とボルト等で結合の上，コーキング材で止水処理を施した．

4.　実験結果

(1)　実験概況

実験状況例としてケース 1 を**写真-2**，ケース 3 を**写真-3** にそれぞれ示す．各ケースとも注水後，膜前面は下側から変形していく．注水完了時，正方形膜（ケース 1）では膜材料の中央部やや下側が水平方向に最も変位する形状となった．一方，直方体形状のケース 2 およびケース 3 では，前面側は正方形膜と同様，中央部やや下側が水平方向に最も変位したが，背面側では，側面や上面を

写真-2　実験状況（ケース 1）

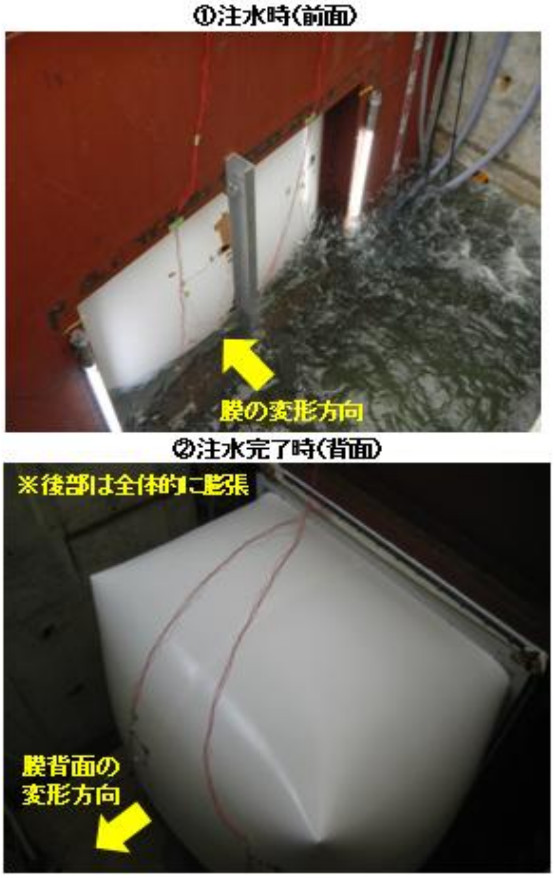

写真-3　実験状況（ケース 3）

含めた袋体全体が膨張した．次節で述べる通り，膜内部の気圧上昇に伴う変動と考えられる．

(2)　計測結果（ケース 1）

ケース 1（正方形膜）の計測結果を以下にまとめる．

a)　水平変位

注水後，水位 90cm 以上で膜下端に水圧が作用し始めて，膜材料が変形する（**写真-2**）．**図-7** に水位および変位の計測結果を示す．なお実験当初，接触型の変位計を使っており，最終的変位に対し変位計の計測レンジが不足しているが，背面での最大 80cm 以上変位している．

b)　歪み

図-8 に歪計の計測結果を示す．スパン中央では縦方向（実線）、壁面に拘束される端部では横方向（破線）の歪みが卓越する傾向で、いずれも最大で 12%程度の歪みとなった（図中の膜中央部の歪み計 3 は計測途中で破損している）．本使用膜材料の設計破断歪は 30%であり、膜本体が破損することはなかった．但し，実験後の膜体は塑性変形しており、永久歪みが残った。

(3)　計測結果（ケース 2）

次にケース 2（直方体形状膜，内部気圧：大気圧）の計測結果を以下にまとめる．

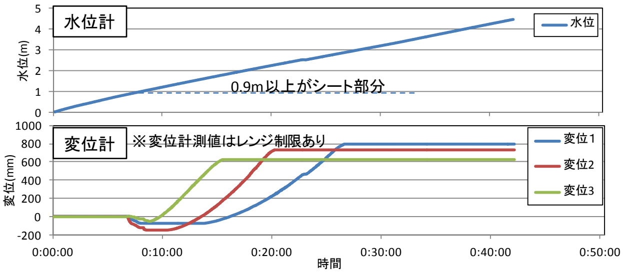

図-7　水位・水平変位計測結果（ケース 1）

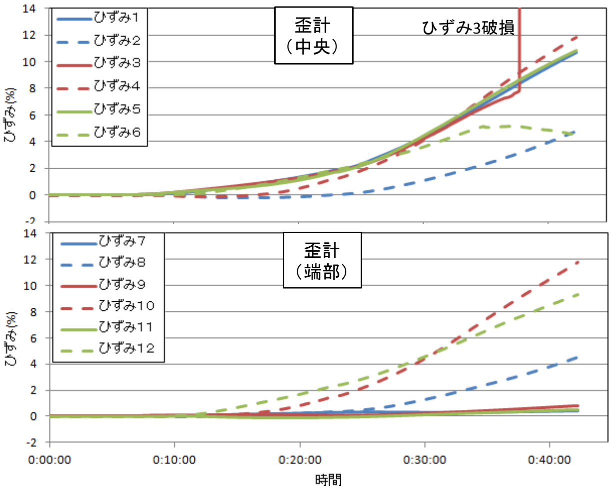

図-8　歪み計測結果（ケース 1）

a)　圧力変動

図-9 にケース 2 の水位および圧力変動を示すが，水圧の作用に伴い内部圧が 80hPa 程度（水位 80cm 相当）上昇している．すなわち直方体形状のケースは膜前面の変形に伴って膜内空気が断熱圧縮して高圧化する．参考までに空気の断熱圧縮を仮定し，内部圧力変化から袋体の体積圧縮率も図中に併記した．津波作用時，袋体内部の圧力上昇とそれに伴う材料変形等への影響に留意が要る．

b)　水平変位

膜材前面中央における変位は，最終的に中央部（変位 2）で最大 492mm の水平変動が見られた（**図-9** 下）．背面（変位 4）でも内圧上昇に伴って 95mm 程度の水平変動が見られた．ケース 1 正方形膜と比較し，直方体形状のケース 2 の前面水平変位は内圧上昇によって抑制される傾向にあると言えるが，背面側も変形するため堤防配置時，周辺構造との離隔に注意が必要である．

c)　歪み

正方形膜のケース 1 において最大 12%程度歪が生じたのに対し，直方体形状のケース 2 では 8%程度となり（**図-10**），内部圧の上昇が波圧による材料変位を抑制することで歪みの緩和効果が見られ材料強度の裕度が増す（使用材料の破断歪は約 30%）．なお，前面中央および固定端部中段の横歪で最大歪を記録したほか，内部気圧上昇に伴い，背面側でも若干歪みの上昇が見られた（**図-11**）．

(4)　計測結果（ケース 3）

ケース 3（直方体形状膜，内部気圧：大気圧+25hPa）の計測結果を以下にまとめる．

a)　圧力変動

図-12 にケース 3 の水位および圧力変動を示すが，初期加圧+25hPa 分も含めると水圧の作用に伴い内部圧は 120hPa 程度（水位 120cm 相当）まで増加している．ケース 2 に比べ，膜内空気の圧縮・高圧化は促進されている．

b)　水平変位

膜材前面中央における変位は，最終的に中央部（変位 2）で最大となり，ケース 3 で注水終了後，最大 722mm の水平変動が見られた（**図-12** 下）．背面（変位 4）でも内圧上昇に伴って 104mm 程度の水平変動が見られた（**写真-1**）．ケース 2 以上に背面側が変形するため，周辺構造との離隔により注意が必要である．

c)　歪み

初期内部気圧をさらに+25hPa 分付加したことにより，正面側の最大歪みが 4%程度とケース 2 と比べてさらに

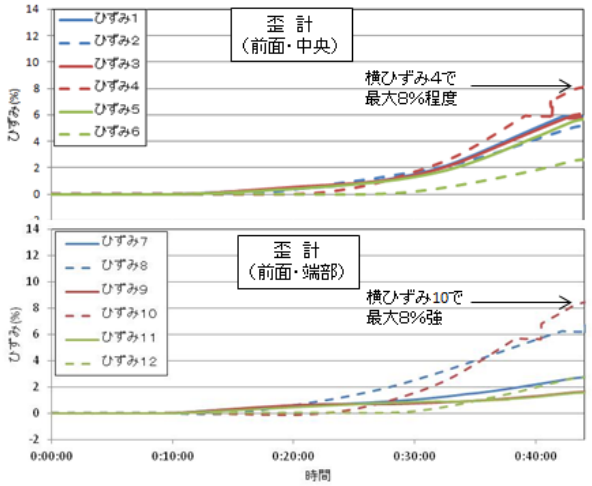

図-10　歪み計測結果（ケース 2； 上：前面中，下：前面端）

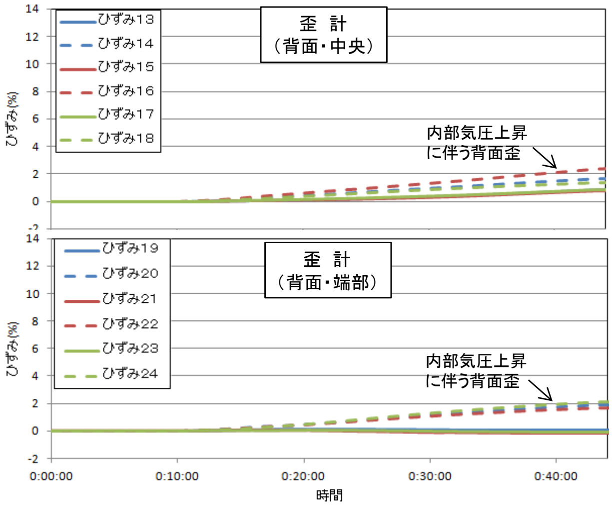

図-11　歪み計測結果（ケース 2； 上：背面中，下：背面端）

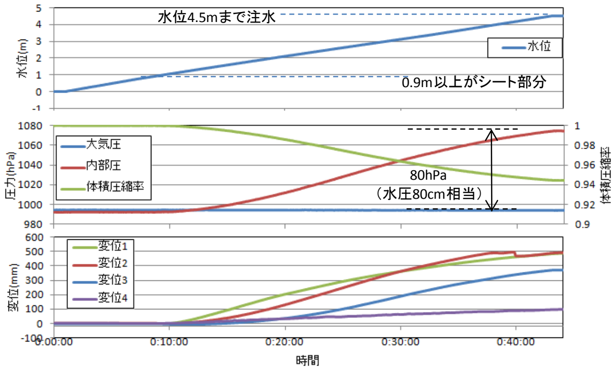

図-9　計測結果（ケース 2； 上：水位，中：内気圧，下：変位）

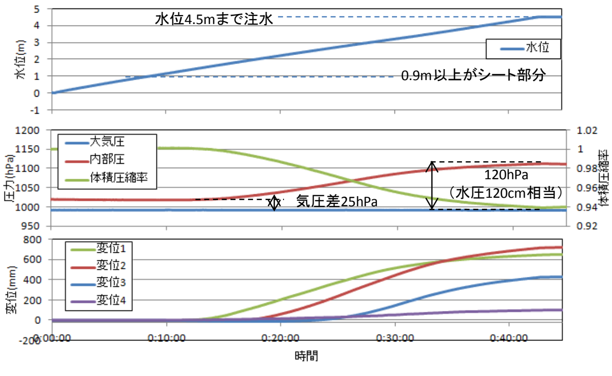

図-12　計測結果（ケース 3； 上：水位，下：内気圧）

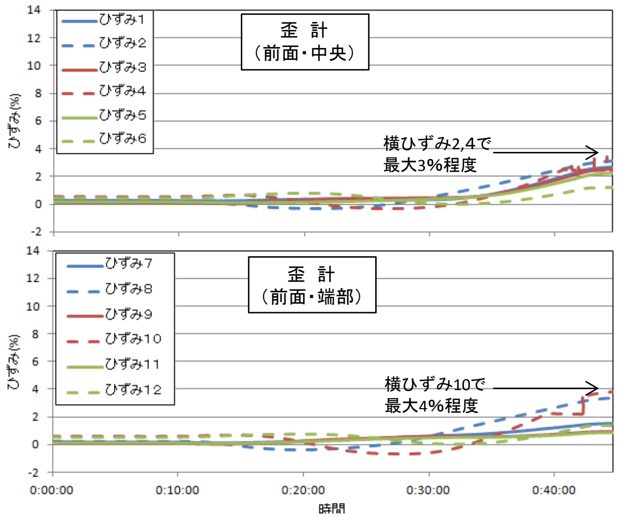

図-13　歪み計測結果（ケース3；　上：前面中，下：前面端）

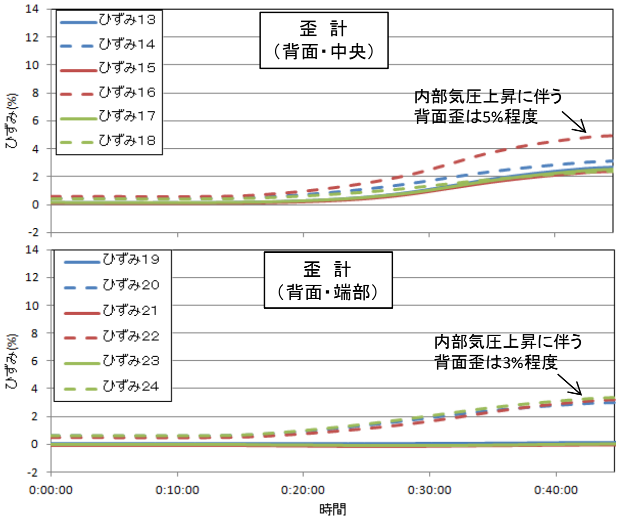

図-14　歪み計測結果（ケース3；　上：背面中，下：背面端）

緩和するが，背面側の歪は最大5%程度まで増大した（図-13，14）．津波到達に時間を要する場合，大気の気圧変動も設計上は考慮する必要がある．

5.　おわりに

実スケールモデルの水理模型実験を実施し，膜構造形式の津波堤防の小規模津波に対する耐津波性能を検証し，確認した．得られた結論を以下にまとめる．

1) 空気膨張形式の膜構造は，津波作用時，前面の変形に伴って膜内空気が断熱圧縮・高圧化する．よって，袋体内部の圧力上昇と材料変形等への影響に留意が要る．

2) 本構造の前面水平変位は内圧上昇によって抑制傾向にあったが，背面側も変形するため堤防配置時，周辺構造との離隔に注意が必要である．

3) 津波作用時の内圧上昇は，空気袋体表面の歪を緩和し，材料強度に裕度を持たせる効果が見られる．

4) 内部気圧を大気圧より相対的に大きくした場合，膜の挙動に差が生じた．津波到達に時間を要する場合，低気圧通過等の大気圧の変動も設計上，見込む必要がある．

なお，材料の経年劣化や内部気圧変動を含めた設計手法の確立および膜の空気膨張に伴う支保枠の起立の確認検証等は，今後の研究課題としたい．

参考文献

1) 例えば，内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）　津波断層モデル編，100pp，2012.

2) SR 堰技術検討会：鋼製起伏堰（ゴム袋体支持式）設計指針，57pp，2007.

3) 岩田善裕，本多直巳，奥田泰雄，喜々津仁密，壁谷澤寿一，都祭弘幸，冨田祐介，西畑剛：外壁材の脱落による津波波力低減効果に関する実験的研究　その1　実験概要，日本建築学会学術講演梗概集（近畿），pp.75-76, 2014.

4) 朝倉良介，岩瀬浩二，池谷毅，高尾誠，金戸俊道，藤井直樹，大森政則：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，土木学会，海岸工学論文集，第47巻，pp.911-915, 2000.

(2016.2.4 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON TSUNAMI COASTAL DIKE IN AIR BAG STRUCTURAL TYPE

Takeshi NISHIHATA, Yuuji MAEDA, Takayuki MASUO and Koji YAMAMOTO

In this study, tsunami resistance performance for a tsunami coastal dike of air bag structural type which can be stood with air expansion has been inspected through some experiments. Relatively small tsunami when flooding on the land is targeted, whereas full-scale experiments have been executed in an underground tank. The tank is separated by a wall on a reveal part of which test dike material is installed and water is poured in the front side of the test dike surface to exert the hydrodynamic pressure imitating the tsunami design pressure distribution and to measure strain, displacement and inner pressure change of the membrane surface.

It is necessary to remark that air compression and inner pressure raise on tsunami may cause material deformation and back side membrane surface movement intermediated by air pressure change, and membrane strain variation with initial inner air pressure also cause material distortion. On the other hands, pressure raise inside the air bag mitigates membrane distortion in the front surface of the structure which will improve tsunami resistance performance of the proposed dike.