

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

富田 祐介* 西畑 剛**

要 旨

本研究では、津波による外壁材の脱落に伴う波力低減を考慮した設計法の構築に向け、鉄骨造建築物の代表的な外壁材である ALC パネル、鋼板製外壁を対象として、簡便手法である静的加力試験および実大規模の水理実験を実施し、外壁材の最大耐力、破壊性状等を調査した。

水理実験では、全ケースにおいて、正圧のほうが負圧より最大水位が高くなる結果となった。水位は、設計津波波圧と等価な静水圧に変換されることから、外壁材の破壊による荷重低減を見込む設計においては、外壁材の正側耐力のほうに、より重点的な配慮が必要であることがわかった。また、鋼板製外壁を用いた正圧のケースを除き、パネルの脱落に伴い水位が一気に低下する傾向が確認された。

1. はじめに

東日本大震災における津波による鉄骨造建築物の被害では、外壁材が破壊され流失したものの構造躯体は残存した例が多く見られた¹⁾。これは、津波到達時に、外壁材が早期に流失したことにより、構造躯体に作用する力が減少したことが一因であると考えられる。このことから、外壁材の脱落による津波波力低減が構造躯体の残存、津波避難ビル上層階の保護に寄与する可能性が示唆される。

一方、現行の津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針による津波波力算定式では、開口部については、波力低減が可能である。しかし、外壁材については、破壊条件等がこれまでに実験等で明確にされていないことから、当面の安全側の措置として、外壁材の脱落による波力低減は考慮せず、構造躯体を設計する方針となっている。

本研究では、津波による外壁材の脱落に伴う波力低減を考慮した設計法の構築に向け、鉄骨造建築物の代表的な外壁材であるALCパネル、鋼板製外壁を対象として、簡便手法である静的加力試験および実大規模の水理実験により、外壁材の最大耐力、破壊性状等を調査した。本稿では、実験概要および実験結果について報告する。

2. 静的加力試験

2.1 試験概要

2.1.1 ALC パネルの試験

JIS A 5416に記載されるパネルの曲げ強さ試験および埋設部品の引抜き強さ試験を実施する。計測項目は、最大耐力、荷重－変形関係、歪みであり、破壊性状についても調査を行った。試験方法を図-1に、試験体を図-2に示す。試

験体は、曲げ強さ試験および引抜き強さ試験で同一であり、試験体数はそれぞれ4体の計8体とした。パネルの仕様は、厚さ100mmの厚形で、幅600mm、長さ3,250mmとし、設計荷重を1,500N/m²とした。補強筋はφ5を圧縮・引張で各5本とした。なお、引抜き強さ試験の試験体長は3,050mmとしている。

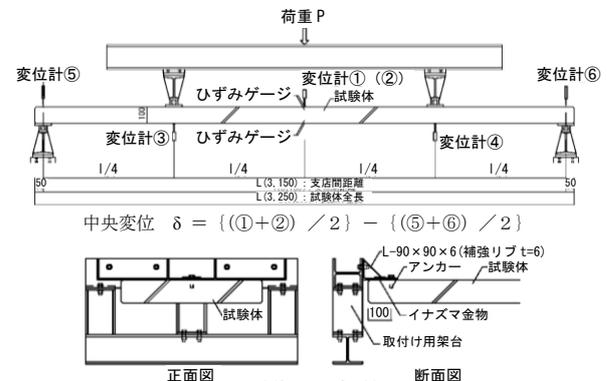


図-1 試験方法(上:曲げ試験、下:引抜き試験取付け部)

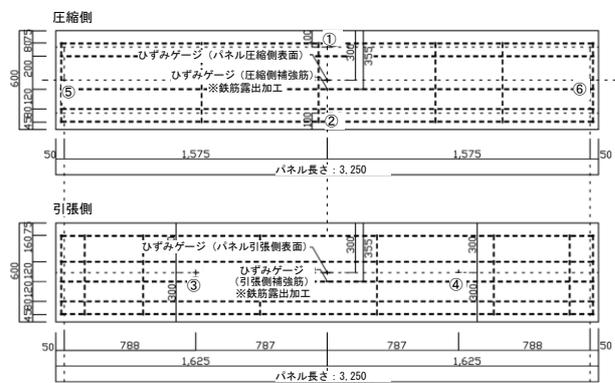


図-2 試験体(上:圧縮側、下:引張側)

*技術研究所 建築技術開発部

**技術研究所 土木技術開発部

載荷荷重はロードセルにより、試験体中央と載荷点および支点の鉛直変位は変位計により、それぞれ測定した。また、中央部の表面歪み(上下面各1点)と鉄筋歪み(上下筋各1点)は歪みゲージにより測定した。

2. 1. 2 鋼板製外壁の試験

鋼板製外壁構法標準(SSW2011)に記載される正曲げ試験および負曲げ試験を実施する。計測項目は、最大耐力、荷重-変形関係、歪みであり、破壊性状についても調査を行った。試験方法を図-3に、試験体を図-4に示す。試験体数は、正曲げ試験と負曲げ試験を各3体の、計6体とした。外壁の仕様は、角波の重ね形で厚さ0.4mm、山高16mm、留め付けねじφ5×19mm(パッキン付き)、胴縁C-100×50×20×2.3mmとした。なお、図-3において、負曲げ試験では、胴縁と端部変位計の上下が逆転する。

載荷荷重はロードセルにより、試験体中央と支点の鉛直変位は変位計により、それぞれ測定した。また、試験体中央付近の歪み(3点)は歪みゲージにより測定した。歪みゲージの貼付位置詳細を図-5に示す。3点の歪みゲージのうち、WSG-1は鋼板の谷部、WSG-2は山部端部、WSG-3は山部中央での測定位置と対応している。なお、図-5において、負曲げ試験では、歪みゲージ位置の上下が逆転する。

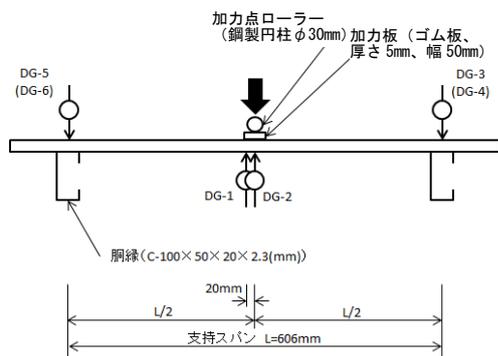
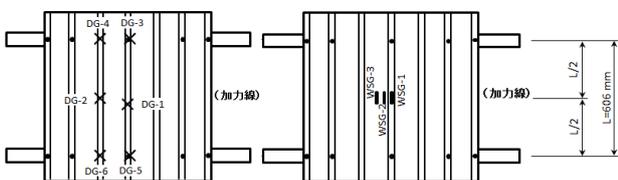


図-3 試験方法(正曲げ試験)



・変位量の計算式

$$\text{変位(1)} = \text{DG-1} - (\text{DG-3} + \text{DG-5}) / 2$$

$$\text{変位(2)} = \text{DG-2} - (\text{DG-4} + \text{DG-6}) / 2$$

図-4 試験体(正・負曲げ試験共通)

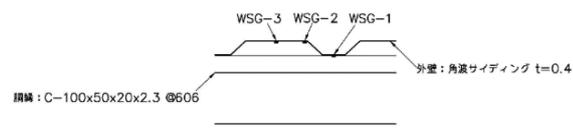


図-5 歪みゲージの貼付位置詳細(正曲げ試験)

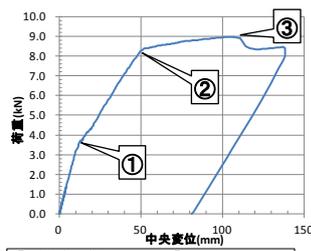
2. 2 試験結果

2. 2. 1 ALCパネルの試験

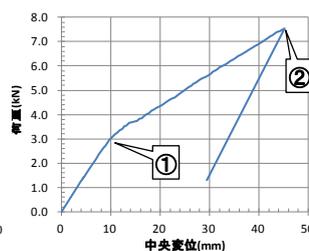
ALCパネルの静的加力試験の結果を表-1に示す。曲げ強さ試験における荷重変形関係の一例を図-6に示す。曲げ強さ試験では、パネル中央部のコンクリートひび割れ、内部鉄筋の降伏を経て、パネルが載荷中央部で圧壊し、脆性的な荷重低下傾向を示した。平均最大荷重は9.04kNで、許容荷重(曲げひび割れ発生時の荷重)の平均値の2.7倍であった。負側埋設金物の引抜き強さ試験における荷重変形関係の一例を図-7に示す。引抜き強さ試験では、取付け部周辺にコンクリートひび割れが発生し、最終的にはコンクリートがコーン破壊することで脆性的な荷重低下が生じた。平均最大荷重は7.81kNで、平均許容荷重の2.2倍であり、曲げ強さ試験よりやや低い値となった。

表-1 試験結果(左:曲げ強さ試験、右:引抜き強さ試験)

試験体 No.	最大荷重 (kN)	許容荷重 (kN)	最大荷重/許容荷重	試験体 No.	最大荷重 (kN)	許容荷重 (kN)	最大荷重/許容荷重
A-1	8.96	3.25	2.75	B-1	7.54	3.19	2.37
A-2	9.12	3.39	2.69	B-2	7.55	3.75	2.01
A-3	8.94	3.26	2.74	B-3	8.30	3.48	2.39
A-4	9.13	3.46	2.64	B-4	7.85	3.63	2.16
平均値	9.04	3.34	2.70	平均値	7.81	3.51	2.22



①: 曲げひび割れの発生 ②: 鉄筋降伏開始 ③: パネル中央部の圧壊



①: 曲げひび割れの発生 ②: 取付け部分の破壊

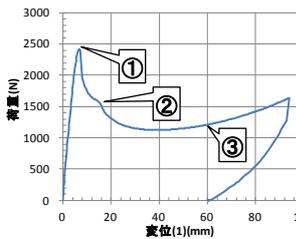
図-6 荷重変形関係(曲げ) 図-7 荷重変形関係(引抜)

2. 2. 2 鋼板製外壁の試験

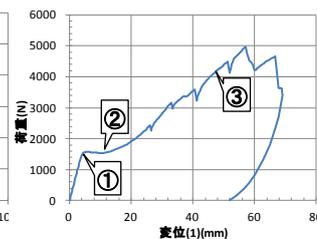
鋼板製外壁の静的加力試験の結果を表-2に示す。正曲げ試験における荷重変形関係の一例を図-8に示す。正曲げ試験では、鋼板山部の座屈により急激な荷重低下が見

表-2 試験結果(左:正曲げ試験、右:負曲げ試験)

試験体 No.	最大荷重 (kN)	試験体 No.	座屈荷重 (kN)	最大荷重 (kN)
C-1	2.42	D-1	1.57	4.96
C-2	2.40	D-2	1.54	6.54
C-3	2.43	D-3	1.57	5.82
平均値	2.42	平均値	1.56	5.77



①: 山部の座屈発生 ②: 座屈が全体に広がる ③: 胴縁の断面変形が発生



①: 谷部の座屈発生 ②: 座屈が全体に広がる ③: ねじ留め部に鋼板の切断発生

図-8 荷重変形関係(正曲) 図-9 荷重変形関係(負曲)

られたが、最大荷重の半分程度になると再び荷重が上昇し、胴縁部分が面内回転してねじれるように変形したため、載荷試験を終了した。従って、最終的な破壊までは確認できていない。平均最大(座屈)荷重は2.42kNであった。負曲げ試験における荷重変形関係の一例を図-9に示す。負曲げ試験では、低い荷重で鋼板谷部の座屈が発生したものの、再び荷重上昇が見られ、最終的にはねじ留め部分の鋼板が破断し、脆性的な荷重低下性状が確認された。平均座屈荷重は1.56kNであるが、鋼板破断時の最大荷重は5.77kNであり、初期座屈荷重の3.7倍の値を示した。

3. 水理実験

3.1 実験方法

実験装置の平面図およびA断面図をそれぞれ図-10、図-11に、鉄骨フレーム詳細図を図-12に示す。コンクリート壁と鋼製壁で囲われた半地下土槽空間(幅4.53m×長さ7m×高さ5m)を鉄骨フレームで区画し、面内1層1スパン(3m×3m)の領域に試験体である外壁材を設置した。水槽(20m³)3台に水を溜め、ポンプで水を汲み上げ、パイプで水を下ろし、消波材を介して、約2.6m/分の水位上昇速度で外壁材に水圧を作用させた。外壁材の設置には75cmの段差を設けており、背面側に漏水しても外壁材に水圧が作用しないよう配慮した。実験ケースはALCパネル4ケース(縦壁ロックンク構造・横壁アンカー構造の2種×正圧・負圧の2種)、鋼板製外壁4ケース(縦張り・横張りの2種×正圧・負圧の2種)の計8ケースを実施した。なお、正圧は建物の外部から内部、負圧は建物の内部から外部に水圧が作用する場合を想定している。

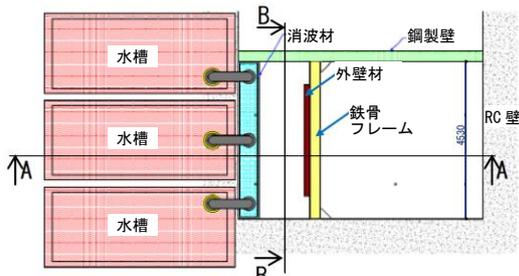


図-10 実験装置平面図

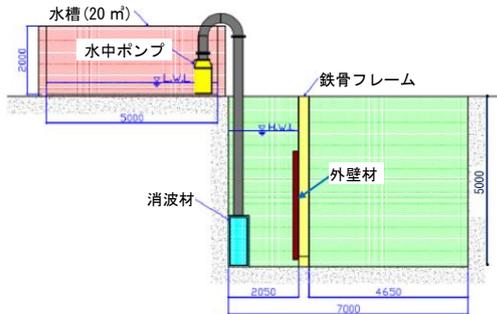


図-11 実験装置 A 断面図

計測機器の配置図および実験装置B断面図をそれぞれ図-13、図-14に示す。水位計、波圧計、変位計、歪ゲージを用いて、水位、外壁材・鉄骨フレームに作用する水圧、外壁材の変位と歪みを計測した。また、外壁材に水圧が作用してから破壊するまでの過程を水圧作用側および反対側からビデオ撮影した。実験終了後、試験体を鉄骨フレームから外し、破壊後の試験体の状況を調査した。

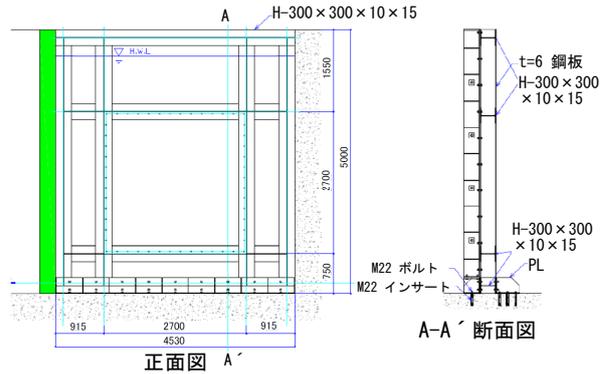


図-12 鉄骨フレーム詳細図

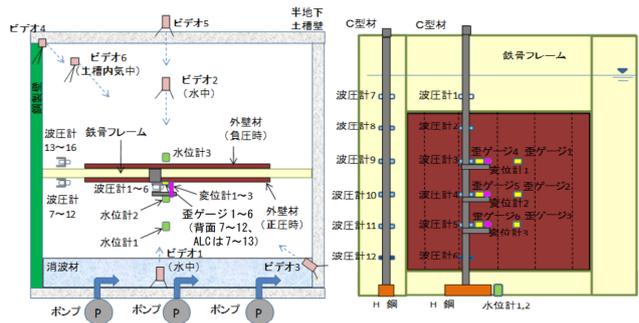


図-13 計測機器配置図

図-14 実験装置 B 断面図

3.2 試験体

ALCパネルの試験体を図-15、図-16に、鋼板製外壁の試験体を図-17、図-18に示す。同図にそれぞれ示した鉄骨(H形鋼)を鉄骨フレームに取り付けることにより、試験体を設置する。なお、外壁材の仕様は、静的加力試験のものと同ーとした。

ALCパネルの試験体については、図-15、図-16に示すように、枠鉄骨とALCパネルとの間には30mmのあきを設けており、枠鉄骨の下辺部にはALCパネルの自重をうける金物を取り付けた。また、枠鉄骨のフランジ外端部とALCパネルとの間には、シーリング処理を施している。

鋼板製外壁の試験体については、図-17、図-18に示すように、鋼板を取り付ける留め付けねじにはパッキン付のものを用いた。また、鋼板外周部にはシーリング処理を施している。

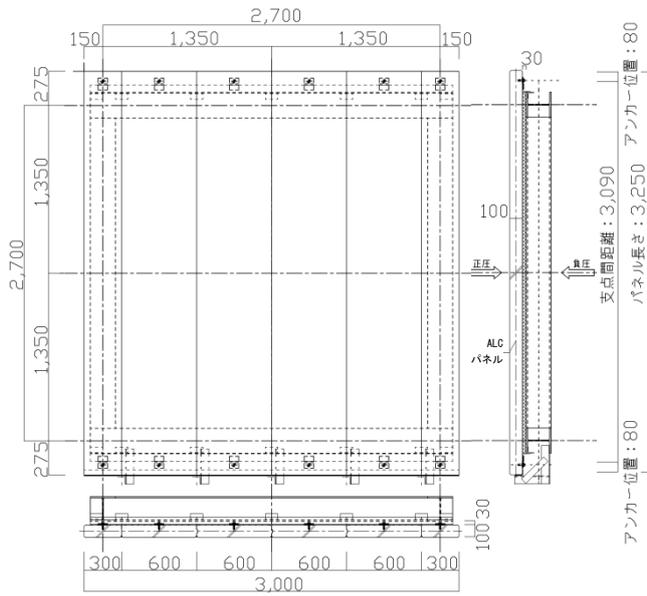


図-15 ALC パネルの試験体(縦張)

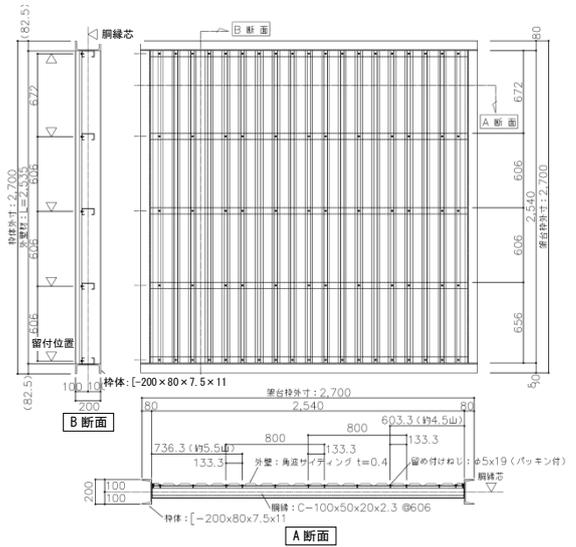


図-17 鋼板製外壁の試験体(縦張)

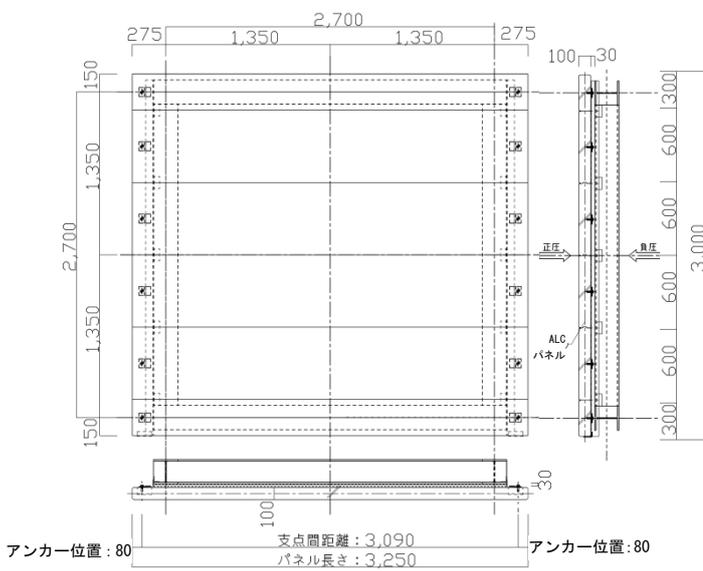


図-16 ALC パネルの試験体(横張)

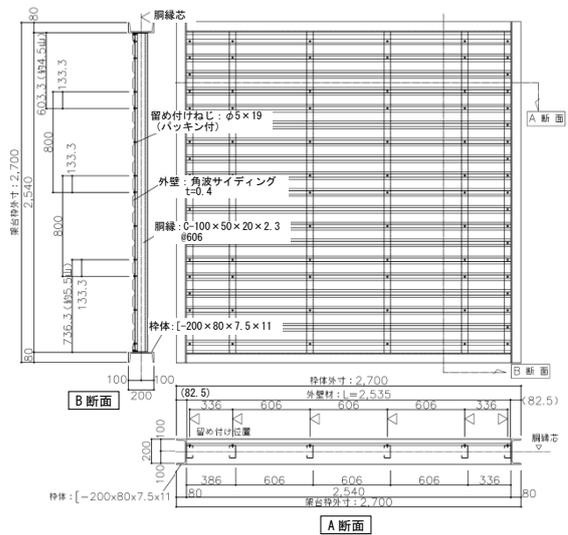


図-18 鋼板製外壁の試験体(横張)

3.3 実験結果

3.3.1 ALCパネル縦張の実験(正圧・負圧)

ALCパネルを縦張とした場合の、正圧・負圧作用時の実験よりそれぞれ得られた前面・背面の水位の時刻歴を図-19に併せて示す。また、正圧・負圧の試験体における破壊時以降の状況をそれぞれ写真-1、写真-2に示す。

正圧の試験体では、パネル4枚が中央部で曲げ破壊した後、4枚中3枚が上下端の埋設金物の取付け部分で破壊し、全面的に脱落することで水位が低下した。

負圧の試験体では、中央パネル2枚の下端の埋設金物の取付け部分で破壊が生じることにより、水位が低下した。中央パネル2枚は残留し、左右2枚のパネルに大きな損傷は確認されなかった。

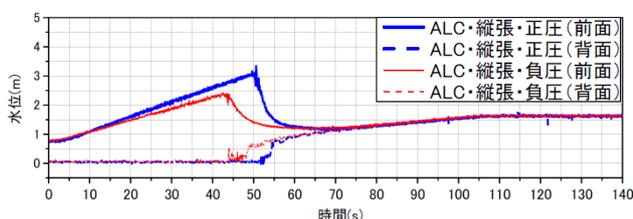


図-19 前面・背面の水位の時刻歴(ALC縦張)



(a) 破壊時 (b) 破壊直後
写真-1 破壊時以降の状況(縦張・正圧)



(a) 破壊時 (b) 終了時
写真-2 破壊時以降の状況(縦張・負圧)

3.3.2 ALCパネル横張の実験(正圧・負圧)

ALCパネルを横張とした場合の、正圧・負圧作用時の実験よりそれぞれ得られた前面・背面の水位の時刻歴を図-20に併せて示す。また、正圧・負圧の試験体における破壊時以降の状況をそれぞれ写真-3、写真-4に示す。

正圧の試験体では、下段3枚のパネルで曲げ破壊が生じて漏水し、水位上昇速度が緩やかになり、その後、最下段パネルが脱落することで、水位が低下した。

負圧の試験体では、最下段パネルの埋設金物の取付け部分で破壊が生じ、比較的早い段階で最下段パネルが脱落し、水位が低下した。

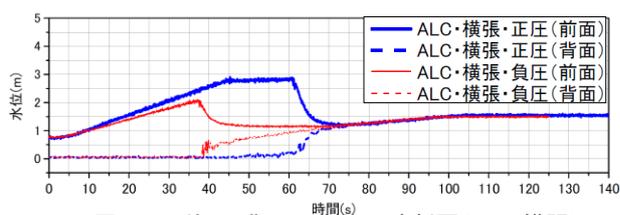


図-20 前面・背面の水位の時刻歴(ALC横張)



(a) 破壊時 (b) 破壊直後
写真-3 破壊時以降の状況(横張・正圧)



(a) 破壊時 (b) 破壊直後
写真-4 破壊時以降の状況(横張・負圧)

3.3.3 鋼板製外壁縦張の実験(正圧・負圧)

鋼板製外壁を縦張とした場合の、正圧・負圧作用時の実験よりそれぞれ得られた前面・背面の水位の時刻歴を図-21に併せて示す。また、正圧・負圧の試験体における座屈発生時以降の状況をそれぞれ写真-5、写真-6に示す。

正圧の試験体では、最下段スパンで鋼板山部に座屈が生じたものの水位は上昇し、右下段のねじ留め部で一部鋼板の破断が生じて漏水することにより水位が低下した。

負圧の試験体では、鋼板谷部での座屈に伴う変位増大後、各スパンのねじ留め部の多数箇所ではほぼ同時に鋼板の破断が生じ、全部の鋼板が胴縁から剥がれて水位が低下した。

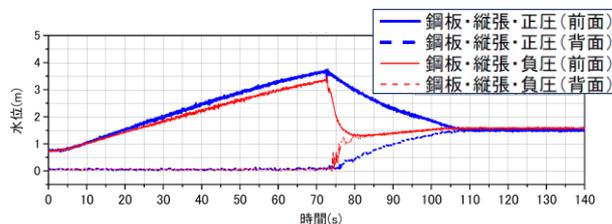


図-21 前面・背面の水位の時刻歴(縦張)



(a) 座屈発生時 (b) 終了時
写真-5 座屈発生時以降の状況(縦張・正圧)



(a) 座屈発生時 (b) 破壊直後
写真-6 座屈発生時以降の状況(縦張・負圧)

3.3.4 鋼板製外壁横張の実験(正圧・負圧)

鋼板製外壁を横張とした場合の、正圧・負圧作用時の実験よりそれぞれ得られた前面・背面の水位の時刻歴を図-22に併せて示す。また、正圧の試験体における座屈発生時以降の状況を写真-7に、負圧の試験体における破壊時以降の状況を写真-8に示す。

正圧の試験体では、縦張時と同様に右下段のねじ留め部で一部鋼板の破断が生じて漏水することにより、水位が低下した。胴縁は中央部で大きく撓んでいるものの、その他のスパンでは鋼板の破断は見られなかった。

負圧の試験体では、最下段のねじ留め部分で鋼板の破断が生じ、鋼板下層部分が胴縁からめくれ上がることによって水位が低下した。

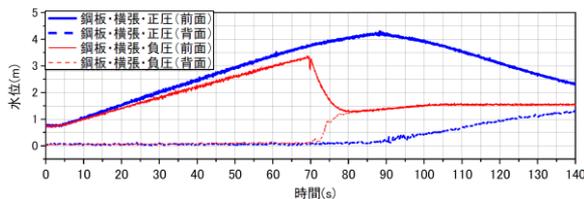


図-22 前面・背面の水位の時刻歴(横張)



(a) 座屈発生時 (b) 終了時
写真-7 座屈発生時以降の状況(横張・正圧)



(a) 破壊時 (b) 破壊直後
写真-8 破壊時以降の状況(横張・負圧)

3.3.5 最大水位および破壊性状

全ケースの実験より得られた最大水位(GLより測定したものを)を表-3に示す。全ケースにおいて、正圧の方が負圧より

表-3 最大水位(全ケース)

外壁材種類	ALCパネル				鋼板製外壁			
	縦張・正圧	縦張・負圧	横張・正圧	横張・負圧	縦張・正圧	縦張・負圧	横張・正圧	横張・負圧
最大水位(m)	3.1	2.4	2.8	2.1	3.7	3.4	4.3	3.3

最大水位が高くなる結果となった。水位は、設計津波波圧と等価な静水圧に変換されることから、外壁材の破壊による荷重低減を見込む設計においては、外壁材の正側耐力の方に、より重点的な配慮が必要であることがわかる。

ALCパネルと鋼板製外壁の実験ケースの比較では、前者は後者より早期に水位低下が生じた。ALCパネルについては、パネルの脱落に伴い水位が一気に低下する傾向が確認された。ただし、横張・正圧のケースについては、パネルの曲げ破壊から脱落までに約15秒の時間差があり、その間水位が平衡状態であった。一方、鋼板製外壁については、負圧においてはALCパネルと同様、水位が一気に低下する傾向が確認されたが、正圧では、全面にわたる脱落には至らなかったため、漏水による緩やかな水位低下が支配的であった。

4. まとめ

- 1) ALCパネルを用いた静的加力試験では、曲げ強さ試験および引抜き強さ試験において、最終的な破壊に至るまでの力学的性状をそれぞれ確認できた。平均最大荷重は前者が後者よりもやや高い値となった。鋼板製外壁については、正曲げ試験および負曲げ試験のいずれも、最終的な破壊までは確認できなかったが、座屈直後に至るまでの力学的性状については確認することができた。
- 2) 水理実験では、全ケースにおいて、正圧のほうが負圧より最大水位が高くなる結果となった。ALCパネルと鋼板製外壁の比較では、前者は後者より早期に水位低下が生じる結果となった。また、鋼板製外壁を用いた正圧のケースを除く全てのケースにおいて、パネルの脱落に伴い水位が一気に低下する傾向が確認された。

【謝辞】

本研究は、国土交通省総合技術開発プロジェクト「災害拠点建築物の機能継続技術の開発」として実施された、国土交通省国土技術政策総合研究所の発注による実験の一部を纏めたものである。実施に際し、津波外壁材WG(主査:岡田恒博士、(公財)日本住宅・木材技術センター)の委員の皆様、ALC協会および日本金属屋根協会の方々にご協力いただきました。関係各位に厚く御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所:平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震被害調査報告, 国土技術政策総合研究所資料, No.674, 2012.3