

## 2011年東北地方太平洋沖地震津波による鉄筋コンクリート造建物の被災\*

秋田大学 松富 英夫  
秋田大学 山口枝里子  
秋田大学 能見 卓也

### 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波により大災害が発生した。とりわけ、津波災害が甚大で、木造の建物は多くが流出し、鉄骨造や鉄筋コンクリート造の建物が残った。ただし、鉄筋コンクリート造の建物にしても、津波浸水深に比べて高さや奥行きが十分でないものは移動や転倒の被害を受けた（写真-1）。

1933年昭和三陸地震津波以来、事業所や公共施設を想定して、防潮堤の役割を担わせた防浪ビルの考えがある。防浪ビルは背後地への津波の浸入を減らすばかりでなく、短期の避難場所としての機能を持つ。しかし、津波の浸水深に対して防浪ビルがどのくらいの高さや奥行きがあればよいかといった指針はない。鉄筋コンクリート造に比べて鉄骨造の建物は、壁が壊れやすいために防浪効果こそ落ちるが、避難ビルとして有効であることが今回の津波で証明された。

津波に対して安全・安心を確保するには宅地の高地移転が理想である。しかし、高地移転先が確保できない場合もあり、低平地では中規模の津波に対処するため、強度を向上させた防潮堤などの津波防災施設の再整備が重要である。そして、防災施設の整備にあたっては継続性を考慮する必要がある。防災施設はいずれ改修が必要となり、過大な整備は整備水準の維持を難しくする。防災・減災に対する工夫も生まれ難くなる。巨大津波に対しては、防災施設は避難時間を稼ぐものと捉え、防災体制の強化や防災まちづくりの推進により、迅速な高地への避難が第一義である。どうしても近場に高地が確保できない場合に限り、水没せず、傾斜、移動や転倒しない防浪ビルや避難ビル、避難タワーの設置を考えるべきである。

以上を背景に、本研究は地震が鉄筋コンクリート造建物の被害にどの程度関与したか不明であるが、被害は津波によると考え、鉄筋コンクリート造建物の移動や転倒の条件を検討する。

### 2. 現地調査

現地調査は、主に鉄筋コンクリート造建物を対象に、岩手県野田村海岸から宮城県岩沼市海岸にかけて実施した。調査項目は建物の位置、配置（周囲の状況）、造り（ブロック造、鉄骨



**写真-1** 桧基礎といっしょに70m程度流され、横転した四階建て建物（宮城県女川町）

\* Damage to Reinforced Concrete Buildings due to the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami  
by Hideo MATSUTOMI, Eriko YAMAGUCHI and Takuya NOUMI

表-1 2011年東北地方太平洋沖地震津波における建物被害の一覧（単位：m）

年月日	場所	通り	被災形態	地盤高	汀線距離	幅	奥行き	高さ	根入れ深さ	浸水深	緯度	経度	用途	杭周囲舗装
2011.03.26	津鉢石	2階フック	大きく陸側へ移動し、海側へ転倒	2.81	21.4	6.45	6.1	9.01R	39°35'01.2"	141°57'21.1"	集合住宅	なし	周囲舗装	
	津鉢石	2階フック	少し陸側へ移動し、陸側へ転倒	2.81	17	6.4	6.1	9.01R	39°35'01.2"	141°57'21.1"	集合住宅	なし	不明	
2011.03.28	大槌	3階鉄筋コン	持ち堪える	1.16	149	11.9	7.5	8.37	8.99I	39°21'19.6"	141°54'29.7"	集合住宅	不明	あり
	大槌	2階鉄筋コン	移動、転倒		6.7	6.3	5.7	1.2	8.99I	39°21'23.49"	141°54'07.02"	集合住宅、やや内陸	なし	不明
2011.03.31	陸前高田	5階鉄筋コン	持ち堪える	1.75	226	68.4	7.1	14.75	11.41I	39°00'55.0"	141°38'40.5"	集合住宅、洗浄あり	あり	不明
	陸前高田	5階鉄筋コン	持ち堪える	1.43	17	68.3	7.1	1	11.57I	39°00'55.3"	141°38'40.8"	集合住宅、上記の裏	あり	不明
	陸前高田	3階鉄筋コン	持ち堪える	0.85	108	2.3	8.2	8.48	11.43I	39°00'53.3"	141°38'40.8"	集合住宅、上記の裏	あり	不明
	陸前高田	3階鉄筋コン	持ち堪える	0.85	7.3	6.8	8.65	1.5	10.22I	39°01'03.95"	141°37'52.28"	個人住宅、内陸	なし	不明
2011.04.01	南三陸志津川	3階鉄筋コン	3階部分(鉄骨)が崩壊	0.93	26	18.5	13.1	11.42	12.99I	38°40'28.7"	141°25'45.8"	公会館	不明	不明
	南三陸志津川	3階鉄筋コン	持ち堪える	-0.08		9.5	12.4	10.77	12.99I	38°40'34.3"	141°25'56.2"	事務所	不明	あり
	戸倉	2階鉄筋コン	洗浄による傾斜(前面)	0.83	43	19	10.5	8.44	8.44I以上	38°38'50.1"	141°25'28.6"	公会館	不明	あり
2011.04.02	女川	3階鉄筋コン	少し海側へ移動し、転倒	0.115		11.8	6.7	10.4	11.02I	38°28'37.5"	141°26'49.6"	事務所兼住宅	なし	あり
	女川	3階鉄筋コン	持ち堪える	0.53		15.5	8.1	12.2	1	12.98I	38°28'36.0"	25'45.8"公会館兼住宅	あり	あり
	女川	3階鉄筋コン	持ち堪える	0.85		13.8	6.8	17.25	14.63I	38°28'36.0"	141°26'45.8"公会館兼住宅	あり	あり	
	女川	4階鉄筋コン	10m程度陸側へ移動し、転倒	0.085		7.1	5.3	13.1	1	14.63I	38°28'32.2"	141°26'42.0"旅館、上記の隣	あり	あり
	女川	2階鉄筋コン	浮上、少し陸側へ移動、横倒	0.085		23.4	9	9.05	1.25	14.63I	38°26'26.8"	141°26'41.2"冷蔵庫	あり	あり
	女川	2階鉄筋コン	その場で横転	0.22		10.7	5	6	0.9	11.02I	38°26'44.2"	141°26'49.2"警報器	あり	あり
	女川	3階鉄筋コン	移動、回転、傾斜し、崩壊	0.22		29.8	5.9	9.3	1.4	11.02I	38°26'41.97"	141°26'47.56"集合住宅	不明	不明
2011.04.10	石巻	4階鉄筋コン	持ち堪える	0.615		50.5	7.7	11.82	6.67I	38°24'59.1"	141°18'02.4"	集合住宅	不明	なし
	石巻	4階鉄筋コン	持ち堪える	0.3		52.9	7.2	12.3	5.93I	38°25'00.0"	141°18'02.4"集合住宅	不明	なし	
2011.04.16	山田	2階鉄筋コン	よじ登り、壁が抜けた	1.65	122	8.9	8.6	7.1	12.40I	38°21'32.2"	141°57'43.7"集合住宅	なし	なし	
	山田	2階鉄筋コン	よじ登り、壁が抜けた	0.93		11.3	5.6	5.8	3.59I	38°21'30.08"	141°57'34.8"集合住宅	なし	不明	
	大槌	2階フック	20m程度陸側へ移動し、横倒	0.48		16.3	6.4	6.5	11.14I	39°21'22.1"	141°54'40.0"集合住宅	床のスラブなし	なし	
	大槌	2階フック	持ち堪える	0.56		23.9	6.5	5.76	11.08I	39°21'32.4"	141°54'43.1"集合住宅	なし	なし	
	根浜	3階鉄筋コン	大きく傾斜(液状化、洗浄)	2.16		14.8	14.07	10.6	11.92I	39°19'33.6"	141°54'08.8"ストップバス	あり	あり	
	気仙沼	2階鉄筋コン	持ち堪える	0.865		27.0(17.1)	10.17(7.6)	9.09	8.47I	38°53'39.6"	141°35'03.9"施設処理施設	あり	あり	
	気仙沼沢口	鉄筋コン	持ち堪える、壁が抜けた	1.58		19.5	9.52		7.09I	38°53'17.27"	141°35'21.25"雨ポンプ場、壁が抜けた	不明	なし	
2011.04.29	東生浦水原アメニティ	鉄筋コン	持ち堪える、壁が抜けた	1.65		51	30.3	13.31	7.17.3I	38°39'45.45"	141°00'16.47"海水ポンプ場	不明	なし	
	東生浦水原アメニティ	鉄筋コン	持ち堪える、壁が抜けた	2.215		27.8	17.5	13.3	8.13I	38°40'39.30"	141°00'16.47"海水ポンプ場	不明	なし	
2011.05.01	山田	2階フック	0.85度傾き、逆折にによる?	1.2		6.4	13.8	6.18	4.92I	39°27'59.65"	141°57'12.12"集合住宅	不明	なし	
2011.06.04	大船渡	2階鉄筋コン	持ち堪える	1.795	160.4	12.2	11.4	7.27	7.045	39°03'42.3"	141°43'24.5"店舗兼集合住宅	不明	あり	
	2階鉄筋コン	傾き、折れ(洗掘)			41.55	6.61	6.74		39°00'11.18"	141°37'30.92"ユースホステル				
	陸前高田	3階鉄筋コン	持ち堪える	3.07		21.7	10.9	8.515	8.575I	39°00'35.0"	141°37'02.6"集合住宅	不明	あり	
	気仙町	3階鉄筋コン	持ち堪える	0.35		22.2	3.79	18.91	12.99I	38°40'31.9"	141°26'43.3"高齢会館	不明	不明	
2011.06.05	南三陸志津川	4階鉄筋コン	持ち堪える	0.35		39.2	18.8	19.32	38°40'30.3"	141°26'42.3"高齢会館	不明	不明		
	南三陸志津川	5階鉄筋コン	持ち堪える	0.35		65.5	14.2	12.7	12.61I	38°40'31.57"	141°26'43.3"高齢会館	不明	不明	
	南三陸志津川	4階鉄筋コン	持ち堪える	0.35		10	24	8.19	12.61I	38°40'33.8"	141°26'42.9"集合住宅	不明	なし	
	南三陸志津川	4階鉄筋コン	持ち堪える	2.87		72.93	11.01	13.57	11.07I	38°40'25.7"	141°26'42.8"集合住宅(避難ビル)	あり	あり	
	南三陸志津川	3階鉄筋コン	持ち堪える	6.1		16.5	7.51		11.07I	38°40'27.6"	141°26'42.8"タキシマ集会所			
	南三陸志津川	3階鉄筋コン	持ち堪える	2.595		24.4	12.6	9.74	10.91	38°40'28.6"	141°27'11.7"集合住宅			
	気仙沼滑石岸	3階鉄筋コン	持ち堪える			16.27	8.82	8.4	9.63I	38°52'28.4"	141°35'03.9"集合住宅	不明	あり	

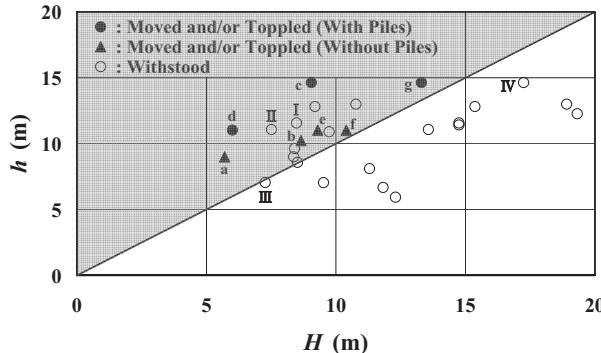
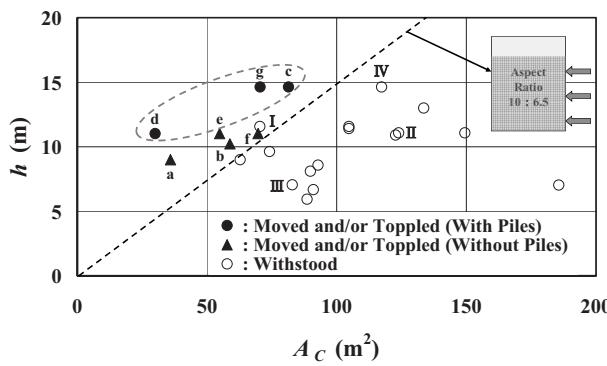
造、鉄筋コンクリート造)、構造条件(幅、奥行き、高さ、柱の大きさ、窓・戸口の面積)、根入れ深さ、杭基礎の有無、周囲舗装の有無、液状化の有無などと被害形態である。収集した調査データの一覧を表-1に示す。

傾斜を除き、移動や転倒した鉄筋コンクリート造建物は全部で7棟である。大槌町の二階建ての民家、陸前高田市の三階建ての民家、女川町の二階建て、三階建ての建物2棟ずつと四階建ての建物である。以下、大槌町の民家を(a)、陸前高田市の民家を(b)、女川町の二階建ての冷凍倉庫と警察署を(c)と(d)、三階建ての集合住宅と店舗を(e)と(f)、四階建ての旅館を(g)と表記する。建物(f)は海側に移動かつ転倒、他はすべて陸側に移動や転倒である。また、建物(a)、(b)、(e)、(f)には杭基礎が設けられておらず、建物(c)、(d)、(g)には杭基礎が設けられている。

### 3. 鉄筋コンクリート造建物の被害条件

鉄筋コンクリート造建物の高さH、津波浸水深hと被害形態(傾斜や浸水の被害は除く)の関係を図-1に示す。図中、●は移動や転倒(杭基礎あり)、▲は移動や転倒(杭基礎なし)、○は持ち堪えた建物である。これらの凡例は以下の図でも同じである。今回の津波で得られた鉄筋コンクリート造建物の最大浸水深は15 m弱であり(南三陸町の戸倉小学校を除く)、五階建て以上で、傾斜を含め、移動や転倒したものはなかった。水没していないもので移動や転倒したものもなかった。これらは貴重な事実であるが、たまたま五階建て以上で水没したものがなかったと考えるべきである。

水没しながら持ち堪えたものもある。被害には建物の立地・配置状況(後述)、建物前・背面の壁面における窓や戸口の占有割合(後述)、屋内や床下の空気の抜け易さ、根入れ深さ(後述)、杭基礎の有無、建物周囲舗装の有無、液状化の有無などが関係しよう。これらの影響の検討が課題である。

図-1 建物の高さ  $H$ , 浸水深  $h$  と被害形態の関係図-2 建物の津波氾濫方向の浸水縦断面積  $A_C$ , 浸水深  $h$  と被害形態の関係

建物の津波氾濫方向の浸水縦断面積  $A_C$ , 浸水深と被害形態の関係を図-2 に示す。図中の破線は建物の浸水深と奥行きの比が 10 対 6.5 の線で、建物が移動や転倒しないためには浸水深の 65%以上の奥行きが必要であることを示している。杭基礎の有無で建物の被害浸水深に違いが認められる。地盤条件にもよるが、単位面積当たりの自重が大きいときに杭基礎を設けると考えれば、この違いは当たり前である。さらに、建物の津波氾濫方向の浸水縦断面積で「建物の移動や転倒と持ち堪える」がよく分類されることも判る。参考までに、番号 I を付した○データの津波氾濫流が衝突する壁面の全浸水面積  $A_t$ に対する窓や戸口の浸水面積  $A_{wd}$ の割合(以下、開口率  $O_p$ と記す。図-3 参照)は 26%, 記号 (f) を付した▲データの開口率は 5%である。

開口率の評価方法と評価例を図-3 に示す。評価は建物の前面、背面と両側面から撮った写真に基づいている。壁面は海側を向いているもの(前面)を対象とするが、建物 (f) のように移動や転倒したときに力を受けた壁面が海側でない場合は、陸側のもの(背面)を採用する。

建物の浸水深  $h$ , 開口率  $O_p$ と被害形態の関係を図-4 に示す。図から、開口率は最大で 33%程度、開口率の小さい建物が移動や転倒しやすいことが判る。開口率が 5%程度、浸水深が 11 m 程度と同じでありながら、移動や転倒しなかった建物 (II) と移動や転倒した建物 (d), (f) がある。図-2 によれば、浸水縦断面積  $A_C$ の小さい建物が移動や転倒しており、建物 (II) は建物 (d), (f) に比べて浸水縦断面積が大きいために移動や転倒しなかったと考えられる。

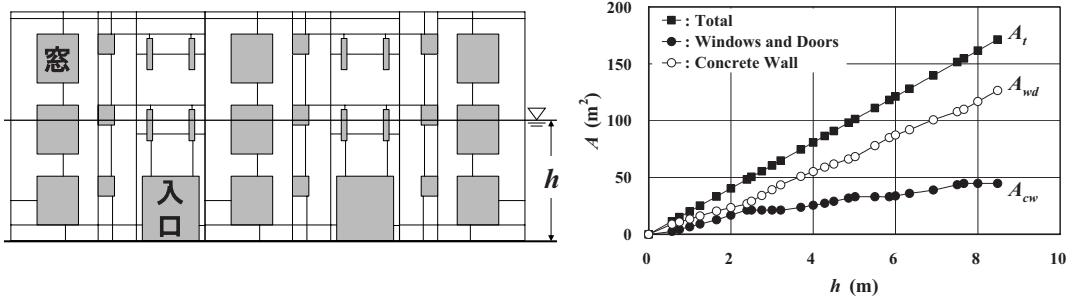


図-3 建物の開口率  $O_p$  の評価方法と評価例（陸前高田市の三階建て集合住宅）

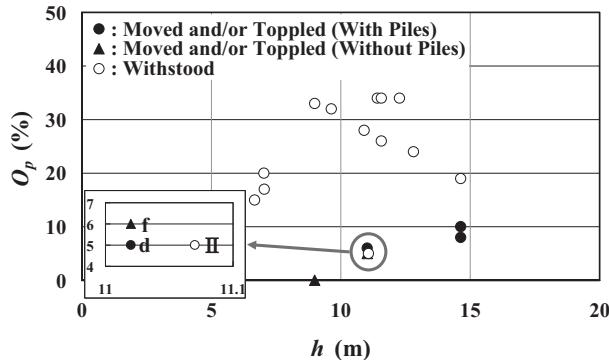


図-4 建物の浸水深  $h$ , 開口率  $O_p$  と被害形態の関係

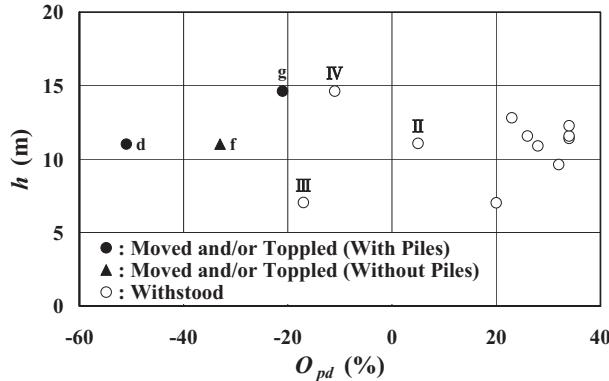


図-5 建物の開口率差  $O_{pd}$ , 浸水深  $h$  と被害形態の関係

また, 図-1において, 水没しながら ( $h \geq H$ ), 移動や転倒しなかった建物では, 建物 (II) 以外は開口率が 24~33%であり, 移動や転倒した建物の 0~10%より大きい。

建物の開口率差  $O_{pd}$ , 浸水深と被害形態の関係を図-5に示す。ここで, 開口率差とは, 海側壁面の開口率または移動や転倒したときに力を受けた壁面の開口率から, 反対側の壁面の開口率を差し引いた値(%)と定義している。図から, 移動や転倒した建物は開口率差が負値であることが判る。すなわち, 海側または力を受けた壁面と反対側の壁面の開口率が大きい。開口率差が負値でありますながら, 移動や転倒しなかった建物 (III) と (IV) がある。建物 (III) が移

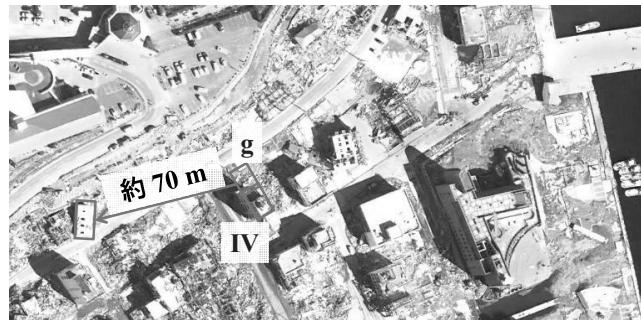


図-6 持ち堪えた建物（IV）と移動し、横転した建物（g）（Google Earth）

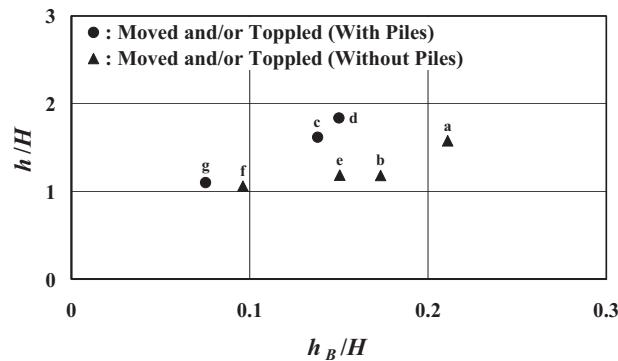


図-7 建物の相対根入れ深さ  $h_B/H$ 、相対浸水深  $h/H$  と被害形態の関係

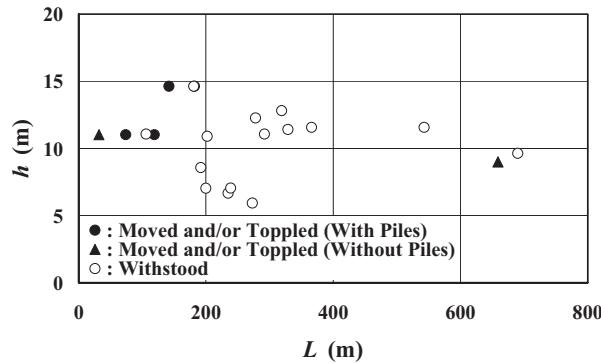


図-8 建物の海からの距離  $L$ 、浸水深  $h$  と被害形態の関係

動や転倒しなかった理由として、浸水深が 7.05 m と比較的浅くて水没せず、海側の開口率が大きかったことが考えられる。五階建ての旅館である（IV）については、図-6 に示すように、海側に体積の大きい建物が多く残ったこと（遮蔽効果）が考えられる。建物（IV）と移動かつ転倒した四階建ての建物（g）は位置が隣り合わせで、浸水深は 14.6 m である。両者の開口率を比べると、陸側の開口率はともに 29%程度であるが、海側の開口率は建物（g）が 8%，建物（IV）が 19%と、建物（IV）の方が大きい。さらに、図-1 と 2 から理解できるように、建物（IV）は建物の高さ、浸水縦断面積とともに大きいため、移動や転倒に至らなかったと考えられる。

建物の相対根入れ深さ  $h_B/H$ 、相対浸水深  $h/H$  と被害形態の関係を図-7 に示す。図から、相対根入れ深さが増加するにつれて、移動や転倒する相対浸水深が増加傾向であることが判る。また、図-2 のときと同様に、杭基礎の有無で建物の被害相対浸水深に違いが認められる。

建物の海からの距離  $L$ 、浸水深と被害形態の関係を図-8 に示す。ここで、海からの距離は湾口方向の水際から建物までの距離としている。また、表-1 に記載のない距離は Google Earth で評価している。限られたデータでの判断であるが、浸水深が大きければ（今回の津波では 9 m 以上）、海から距離が離れていても、鉄筋コンクリート造建物は移動や転倒することが判る。

「平坦な陸上域を氾濫する平面二次元的な津波の波圧は静水圧分布」という見解がある（朝倉ら、2000）。

一方、「動圧が無視できず、波圧は非静水圧分布」という見解もある（松富、2009）。非静水圧分布の理由の一つとして、建物の前面下部における斜め下に凸の流線（斜め下向きの遠心力）を考えられる。建物が水没し、津波が屋根や屋上を越流する場合は建物背面上部における斜め上に凸の流線（斜め上向きの遠心力）も建物の被害に関係しよう。その模式図を図-9 に示す。

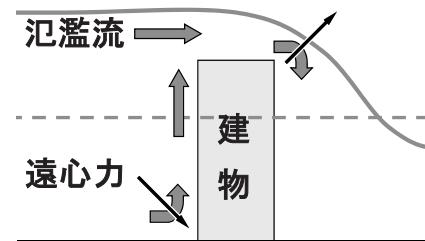


図-9 建物を越流する氾濫流による力の模式図

#### 4. おわりに

現地調査に基づき、鉄筋コンクリート造建物が移動や転倒する条件を検討した。本研究で得られた主な結果は次の通りである。

- ① 15 m 未満の浸水深  $h$  に対してであるが、水没していない鉄筋コンクリート造建物で移動や転倒したものはなかった（図-1）。
- ② 建物の津波氾濫方向の浸水縦断面積  $A_C$  は「建物の移動や転倒と持ち堪える」を分類するよいパラメータの一つである（図-2）。
- ③ 現地調査した建物の開口率  $O_p$  は 0~33% であった（図-4）。水没しても移動や転倒しなかった建物があったが（図-1），それらは開口率が 10% 以下であった（図-4）。
- ④ 建物の相対根入れ深さ  $h_B/H$  が増加するにつれて、建物が移動や転倒する相対浸水深  $h/H$  は増加傾向をもつ（図-7）。

**謝 辞：**本研究は北東北国立 3 大学連携推進研究「地震や津波の力を受けた建物の被災と海岸林の津波減勢効果に関する実証的研究」（代表 堀 茂樹）として行われた。謝意を表する。

#### 参考文献

- 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷 肇・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、海岸工学論文集、第 47 卷、pp. 911-915, 2000.  
 松富英夫：津波氾濫流による流体力への動圧の寄与と漂流物の衝突力の確率分布、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol. 65, No. 1, pp. 836-840, 2009.  
 松富英夫・原田賢治・A. Bagyo WIDAGDO・Subandono DIPOSAPTONO：Casuarina の倒伏・抜根条件と 2010 年 Mentawai 地震津波でのその検証、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol. 67, No. 2, pp. 301-305, 2011.