

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510244

研究課題名(和文)津波による鉄筋コンクリート造建物と海岸林の被災の要因と条件に関する実証的研究

研究課題名(英文)Empirical study on the damage factor and condition of RC building and coastal trees due to tsunami

研究代表者

松富 英夫(MATSUTOMI, Hideo)

秋田大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20134083

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：現地調査に基づいてRC造建築物の移動・転倒実態を示した。水理実験に基づいて、RC造建築物に作用する津波の水平力と鉛直力の特性を明らかにし、鉛直力の低減法を提示した。入射津波条件を用いたRC造建築物前面における浸水深の推定法も提示した。  
現地調査に基づいて海岸黒松の津波被害実態を示した。現地試験に基づいて、海岸黒松の実用的な被害条件式を提示し、ほとんどの試験データが提示式計算値の±5割以内に収まることを確認した。

研究成果の概要(英文)：The moving-overturning state and condition of RC building due to tsunami were presented through field surveys in the inundation area of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami. Based on the hydraulic experiments, the basic characteristics of tsunami horizontal and vertical forces acting on a solitary RC building with the aperture were clarified and a method for reducing the tsunami vertical force was proposed. A method using the incident tsunami condition was also developed for estimating the inundation depth at the front of a solitary wide RC building with aperture.  
The damage state and condition of coastal black pine tree were presented through the field surveys. Based on the field tests in the inundation area of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami, a macroscopic damage condition of coastal black pine tree was proposed and it was confirmed that the condition could predict the field test data within the 50% error.

研究分野：水工学

キーワード：津波 RC造建築物 海岸黒松 被害条件 水理実験 現地調査 現地試験

1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震津波(以下、今回の津波)に襲われた仙台市のような平滑な海岸線を有する低平地の海岸域では、一線堤として防潮堤、二線堤として道路盛土、そしてこれらの中に鉄筋コンクリート造(以下、RC造)の津波避難ビルや海岸林を設ける多重防護案が提示されている。しかし、避難ビルの候補であるRC造建築物に作用する津波の水平力や鉛直力、両力への建築物開口率の影響などはよく判っておらず、避難ビルは想定津波に対してどの程度の高さや奥行きがあれば安全かといった指針がない状況である。また、海岸林を津波の減勢に向けて積極的かつ計画的に活用するにはその効果や限界、被害条件といった特性を十分に知っておく必要があるが、不十分な状況である。

2. 研究の目的

本研究は、(1)津波避難ビルの候補であるRC造建築物の移動や転倒の要因と条件を現地調査と水理実験に基づいて、(2)海岸黒松の幾何諸元、樹幹と地盤を一体として考えたときの合成弾性係数といった力学特性や被害条件を、今回の津波により被災した黒松の活用を念頭に、現地調査と現地試験に基づいて実証する。

3. 研究の方法

(1)「RC造建築物の移動や転倒の要因と条件の実証」は現地調査と水理実験の両面から行う。現地調査では津波浸水深、建築物の諸元、建築物の前背面壁における窓や戸の占有割合(開口率)などのデータを収集し、第一近似の移動・転倒条件を導出する。水理実験はフルードの相似則を考慮した建築物模型を用いて行い、建築物に作用する津波の水平力や鉛直力および前面浸水深などのデータを収集し、両力の特性などを明らかにする。  
 (2)「海岸黒松の幾何諸元、力学特性や被害条件の実証」は現地調査と現地試験の両面から行う。現地調査では津波浸水深、海岸黒松の幾何諸元、被災形態などのデータを収集し、第一近似の被害条件を導出する。現地試験では水平載荷荷重、載荷位置樹幹部の変位を測定(写真判読)しながら抜根に至るまでの荷重試験を行い、樹幹と地盤を一体として考えたときの合成弾性係数といった力学特性や被害条件を明らかにする。

4. 研究成果

(1)洗掘による傾斜を除き、今回の津波で移動や転倒した2階建て以上のRC造建築物は全部で7棟であった。それらを表1に示す。建築物(f)は海側に移動かつ転倒で、他は陸側に移動や転倒である。また、建築物(a)、(b)、(e)、(f)には杭基礎が設けられておらず、建築物(c)、(d)、(g)には杭基礎が設けられていた。  
 RC造建築物の津波氾濫方向の浸水縦断面積 $A_c$ (前面浸水深×建築物の奥行き)、前面浸水

深 $h$ と被害形態の関係を図1に示す。図中、●は移動や転倒(杭基礎有り)、▲は移動や転倒(杭基礎無し)、○は持ち堪えた建築物である。図中の破線は建築物の奥行きが6.8mの線で、建築物が移動や転倒しないためには奥行きが6.8m以上必要であったことを示している。杭基礎の有無で建築物が被害に至る浸水深に違いが認められる。建築物の津波氾濫方向の浸水縦断面積で「建築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前面の全浸水面積に対する窓や戸の浸水面積の割合(=実質の開口率)は26%、記号(f)を付した▲データの割合は5%である。

表1 移動や転倒したRC造建築物の一覧

場所	階数・用途	表記	場所	階数・用途	表記
大槌	2階・民家	(a)	女川	3階・集合住宅	(c)
陸前高田	3階・民家	(b)	女川	3階・店舗	(f)
女川	2階・冷凍庫	(e)	女川	4階・旅館	(g)
女川	2階・警察署	(d)			

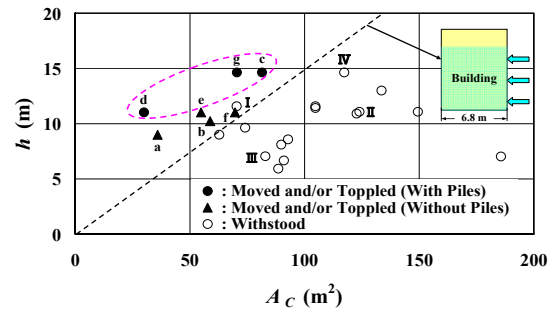


図1 建築物の浸水縦断面積 $A_c$ 、前面浸水深 $h$ と被害形態の関係

(2)水理実験に基づいて、RC造建築物に作用する津波の水平力と鉛直力の特性、既設建築物にも適用可能な鉛直力の低減法を検討し、次の結果を得た。①開口率 $O_p$ が増すと、準定常部の水平力 $F_x$ は直線的に減少する(図2)。②開口部が無い場合、準定上部の鉛直力 $F_z$ は上向きで、建築物の奥行きが増すと、非線形的に増加する(図3)。③開口部が有る場合、鉛直力は下向きで、開口率が増すと、減少する。ただし、各階の開口部下端高さが互いに同じ場合、鉛直力は開口率や奥行きにほとんど依存しない(図3)。④提示した高さの低いコ

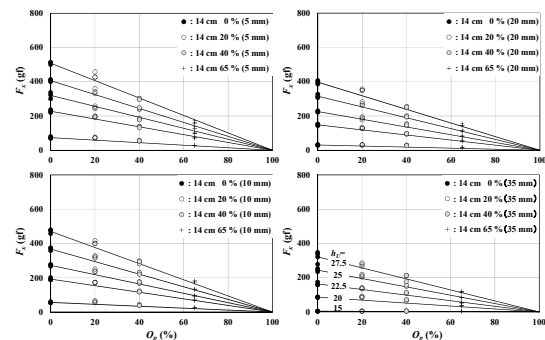


図2 開口率 $O_p$ と水平力 $F_x$ の関係(準定常部)

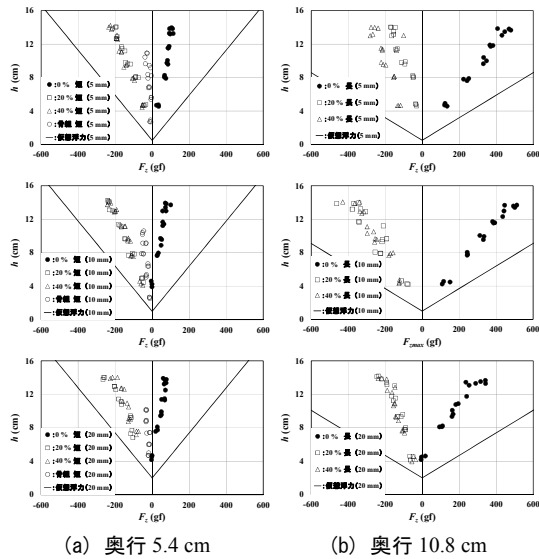


図3 鉛直力  $F_2$  と前面浸水深  $h$  の関係例 (準定常部)

の字型または全周型の鉛直工により最大で60%程度の鉛直力の低減が期待できる。

(3) 入射津波条件を用いた孤立した幅広の開口部を有するRC造建築物前面における浸水深  $h$  の推定法として次式を提案した。

$$\frac{h}{h_i} = 1 + \frac{1}{2} \left\{ 1 + \zeta - \left( \frac{u_f}{u_i} \right)^2 \right\} \frac{u_i^2}{gh_i} = 1 + \frac{1}{2} \left\{ 1 + \zeta - \left( \frac{u_f}{u_i} \right)^2 \right\} F_{ri}^2 \quad (1)$$

$$\frac{u_f}{u_i} = \frac{1}{F_{ri}} \sqrt{\left( \frac{h}{h_i} - \frac{y_p}{h_i} \right) a^2 \frac{h_p^3}{h_i^3} - Aa^2 \frac{h_p^2}{h_i^2} - \left[ \frac{h_p}{h_i} + f \left( 1 + \frac{h_p}{aB} \right) \frac{D}{h_i} \right] \frac{h^2}{h_i^2} - a^2 \frac{h_p^3}{h_i^3}} \quad (2)$$

ここで、 $h_i$  と  $u_i$  は建築物の影響を受けていない入射津波の氾濫水深と断面平均氾濫流速、 $u_f$  は入射津波衝突後の建築物前面における断面平均流速、 $\zeta$  は広義のエネルギー損失係数 (新定義)、 $g$  は重力加速度、 $F_{ri}$  は入射津波のフルード数、 $h_p$  は開口部の換算高さ、 $y_p$  は地面から開口部中心までの高さ、 $a$  ( $0 < a \leq 1$ ) は開口部幅/建築物幅  $B$ 、 $D$  は建築物の奥行、 $f$  は開口部の合成摩擦係数、 $A$  は開口部への建築物背面からの圧力項である。

無次元前面流速  $u_f/u_i=0$  (2次元直立壁) の場合の無次元前面浸水深  $h/h_i$  に関する式(1)の理論値 ( $\zeta=0.4, 1.7$ ) と自他の実験値の比較例を図4に示す。図から、 $\zeta$  が適切に推定されれば、式(1)は実験値の変化傾向をよく説明できることが判る。

(4) 今回の津波における海岸黒松の胸高直径  $D$ 、浸水深  $h$  と被害形態 (倒伏 (Lodging) : ●、抜根 (Uprooting) : ▲、折損 (Breaking) : ◆) の関係を図5に示す。被害を受けたものと持ち堪えたもの (Withstanding : □) が入り交じった遷移領域 (破線で囲まれた領域) が広いが、両者が胸高直径と浸水深で比較的よく分類されることが判る。浸水深と胸高直径の比が大きくなるにつれて、折損の傾向が強いことも判る。抜根の力が倒伏の力より小

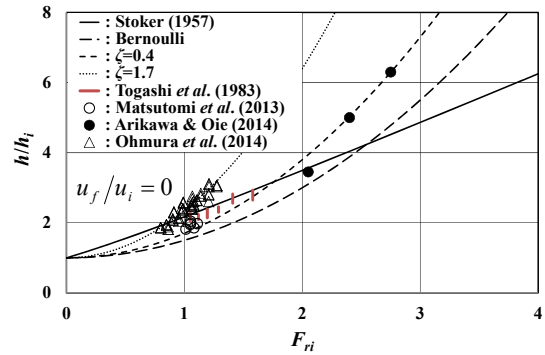


図4 無次元前面浸水深  $h/h_i$  の理論値 (式(1)) と実験値の比較

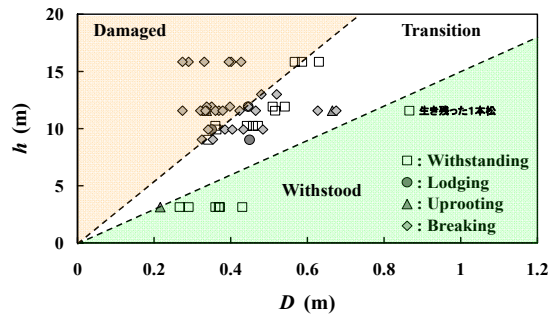


図5 海岸黒松の胸高直径  $D$ 、浸水深  $h$  と被害形態の関係

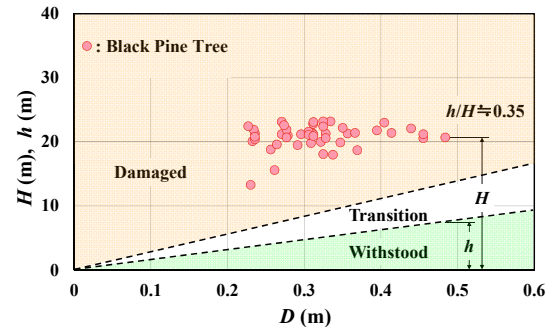


図6 胸高直径  $D$ 、樹高  $H$ 、被害有無の境界浸水深  $h$  の関係

い傾向にある。これには地盤条件や地下水位の他に、倒伏段階における横に張った根の破断が考えられる。

今回の津波により陸前高田市高田松原海岸の黒松 (胸高直径  $D=0.07 \sim 0.87$  m、植生密度  $k=0.62 \sim 0.65$  %) や赤松は2本を残して倒伏、抜根や折損した。この海岸における津波浸水深は11.6 m程度で、ほとんどの松は水没しなかったにもかかわらず、このような被害を受けた。

海岸黒松の胸高直径  $D$  と樹高  $H$ 、被害有無 (Damaged、Withstood) の境界浸水深  $h$  (図5の2本の破線) の関係を図6に示す。図中のデータ (●) は今回の津波に持ち堪えた本研究の試験黒松である。上述の陸前高田市の事例や図6から、津波先端部衝突時の衝撃的な波力による最前列樹木の折損被害を除けば、海岸黒松は樹高の35%程度以下の浸水深であれば持ち堪えると判断される。

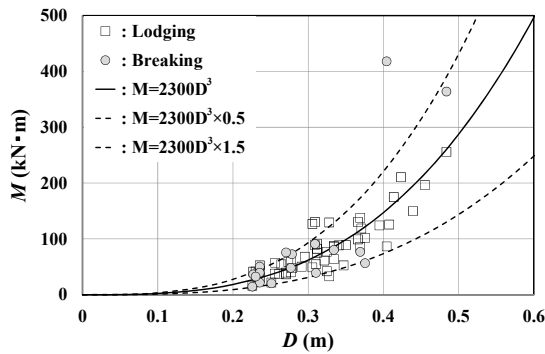


図7 胸高直径  $D$  と被害限界モーメント  $M$  の関係 (実線: 式(3))

(5) 胸高直径  $D$ 、被害限界モーメント  $M$  と被害形態の関係を図7に示す。図中の実線は  $M \propto D^3$  としたときの回帰式(3)で、倒伏と折損の両被害形態に対する被害条件である。

$$M = 2300D^3 \quad (kN \cdot m) \quad (3)$$

ここで、 $0.22 \text{ m} < D < 0.49 \text{ m}$  である。

図中の破線は回帰値を 0.5 と 1.5 倍したときのものである。ほとんどの試験値が回帰値から  $\pm 5$  割の偏差内に含まれることが判る。偏差がやや大きい、式(3)は三陸海岸黒松の簡易かつ実用的な被害条件式と言える。

#### <引用文献>

- ① 富樫宏由、古賀克志、直立壁による反射津波段波の水利と波力のメカニズム、第30回海岸工学講演会論文集、1983、332-336
- ② 有川太郎、大家隆行、防潮堤背後の建物に作用する津波力に関する実験的検討、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.70、No.2、2014、806-810
- ③ 大村智宏、八木 宏、中山哲巖、森 健二、河野大輔、加藤広之、門 安曇、滑川 順、胸壁に作用する非越流時の津波波力に関する実験的研究、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.70、No.2、2014、881-885

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- ① 松富英夫、原田賢治、鴨澤明志、決得元基、嶋津朋、力の作用高さ、生存・枯死、生育場所からみた三陸海岸黒松の被害条件、査読有、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.70、No.2、2014、366-370
- ② 松富英夫、決得元基、嶋津朋、長沼駿介、桜井 亮、開口部を有する RC 造建物における津波の水平力と鉛直力の低減、査読有、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.70、No.2、2014、371-375

③ 松富英夫、決得元基、齋藤雅大、開口部を有する鉄筋コンクリート造建物に働く津波流体力に関する基礎実験、査読有、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.69、No.2、2013、326-330

④ 松富英夫、原田賢治、星 孟志、齋藤可織、決得元基、現地試験に基づく東北地方太平洋沖地震津波浸水域における黒松の特性と被害条件、査読有、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.69、No.2、2013、416-420

⑤ Matsutomi, H., E. Yamaguchi, K. Naoe and K. Harada, Damage to Reinforced Concrete Buildings and Coastal Trees due to the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami, 査読無、Proc. of Intl. Conf. on Coastal Eng., Santander, Spain, 2013, Paper # management.51, <http://journals.tdl.org/ICCE/>

⑥ 松富英夫、山口枝里子、直江和典、原田賢治、東北地方太平洋沖地震津波における鉄筋コンクリート造建物と海岸黒松の被害条件、査読有、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.68、No.2、2012、351-355

[学会発表] (計25件)

- ① Matsutomi, H. and Ono, N., A simple method for estimating the reflected tsunami inundation depth at the front of RC building with aperture, Abstract of the 4th International Tsunami Field Symposium, 2015, 27-30, 2015年3月24日、Phuket (Thailand)
- ② 藤井俊典、決得元基、松富英夫、開口部を有する RC 造建築物に働く津波荷重の特性、土木学会東北支部技術研究発表会、2015、II-81 (CD-ROM)、2015年3月7日、東北学院大学 (多賀城市)
- ③ 富井達也、決得元基、松富英夫、RC 造建築物に働く津波荷重の簡易な低減工法の検討、土木学会東北支部技術研究発表会、2015、II-82 (CD-ROM)、2015年3月7日、東北学院大学 (多賀城市)
- ④ 松富英夫、小野奈那子、開口部を有する RC 造建築物前面における最大浸水深の簡易推定法、東北地域災害科学研究、第51巻、2015、109-114、2015年1月10日、山形大学 (鶴岡市)
- ⑤ 松富英夫、有川太郎、嶋津 朋、決得元基、開口部を有する RC 造建築物の前面浸水深、広義のエネルギー損失係数と移動・転倒条件、第14回日本地震工学シンポジウム論文集、2014、2651-2660、2014

年 12 月 6 日、幕張メッセ（千葉市）

- ⑥ 松富英夫、有川太郎、嶋津 朋、決得元基、開口部を有する RC 造建物における前面浸水深と広義のエネルギー損失係数、第 33 回日本自然災害学会学術講演会講演概要集、2014、49-50、2014 年 9 月 25 日、鹿児島大学（鹿児島市）
- ⑦ 嶋津 朋、決得元基、松富英夫、開口部を有する RC 造建物の前面浸水深について、土木学会東北支部技術研究発表会、2014、II-43 (CD-ROM)、2014 年 3 月 8 日、八戸工業大学（八戸市）
- ⑧ 長沼駿介、松富英夫、開口部を有する RC 造建物に働く津波鉛直力、土木学会東北支部技術研究発表会、2014、II-44 (CD-ROM)、2014 年 3 月 8 日、八戸工業大学（八戸市）
- ⑨ 松富英夫、長沼駿介、決得元基、開口部を有する RC 造建物に働く津波鉛直力の変動パターン、東北地域災害科学研究、第 50 巻、2014、115-120、2014 年 1 月 7 日、秋田大学（秋田市）
- ⑩ 松富英夫、原田賢治、鴨澤明志、決得元基、嶋津 朋、力の作用高さ、生存・枯死、成育場所からみた海岸黒松の津波耐力、東北地域災害科学研究、第 50 巻、2014、121-126、2014 年 1 月 7 日、秋田大学（秋田市）
- ⑪ 松富英夫、決得元基、嶋津 朋、開口部を有する RC 造建物の前面浸水深、移動・転倒条件と水平力の低減、日本地震工学会大会梗概集、2013、41-42、2013 年 11 月 12 日、東京・国立オリンピック記念青少年総合センター（東京）
- ⑫ Matsutomi, H.、G. Kettoku and M. Saitoh、Experiments on tsunami Fluid Force Acting on RC Building with Aperture、Abstract of the 26th International Tsunami Symposium、2013、59、2013 年 9 月 26 日、Gocek (Turkey)
- ⑬ 決得元基、松富英夫、東北地方太平洋沖地震津波における鉄骨造建物の被害条件、土木学会東北支部技術研究発表会、2013、II-50 (CD-ROM)、2013 年 3 月 9 日、東北大学（仙台市）
- ⑭ 松富英夫、星 孟志、原田賢治、決得元基、現地試験に基づく東北地方太平洋沖地震津波被災域における黒松の特性、東北地域災害科学研究、第 49 巻、2013、199-203、2012 年 12 月 26 日、弘前大学（弘前市）

- ⑮ 松富英夫、齋藤雅大、決得元基、鉄筋コンクリート造建物に働く津波流体力に関する模型実験、東北地域災害科学研究、第 49 巻、2013、205-210、2012 年 12 月 26 日、弘前大学（弘前市）
- ⑯ 松富英夫、星 孟志、原田賢治、決得元基、海岸黒松の被害条件に関する現地試験、日本地震工学会大会梗概集、2012、2-3、2012 年 11 月 8 日、東京・国立オリンピック記念青少年総合センター（東京）
- ⑰ 原田賢治、松富英夫、津波による直接的な海岸林被害条件に関する基礎的検討、日本地震工学会大会梗概集、2012、4-5、2012 年 11 月 8 日、東京・国立オリンピック記念青少年総合センター（東京）
- ⑱ 松富英夫、星 孟志、原田賢治、決得元基、現地試験に基づく海岸黒松の被害条件、第 31 回日本自然災害学会学術講演会講演概要集、2012、139-140、2012 年 9 月 18 日、弘前大学（弘前市）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松富 英夫 (MATSUTOMI, Hideo)  
秋田大学・大学院工学資源学研究所・教授  
研究者番号：20134083

### (2) 研究分担者

原田 賢治 (HARADA, Kenji)  
静岡大学・防災総合センター・准教授  
研究者番号：40378922