

平成 30 年 5 月 18 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04072

研究課題名(和文) 津波漂流物の衝突が建築物の応答に及ぼす影響とその作用荷重評価に関する研究

研究課題名(英文) Research on building response against tsunami-debris collision and evaluation of its impact load

研究代表者

中埜 良昭 (Nakano, Yoshiaki)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：10212094

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、これまで体系的な検討が十分に行われてこなかった、津波漂流物衝突に対する建築物の安全性評価手法を提案した。まず、津波漂流物として船舶を想定し、船舶が陸域遡上する条件の解明、外力波形の定義、高精度な最大応答評価法の提案を行った。これらの知見を踏まえ、津波漂流物衝突に対する設計フローを整理した。また、津波漂流物が柱に衝突した際の軸力保持能力評価法の精度検証、津波避難ビルに要求すべき復旧性能の検討を目的とした調査を実施した。

研究成果の概要(英文)：Safety evaluation methods for building structures against tsunami-debris impact load have not been systematically carried out in this research field. In this study, focusing on impact load of vessels and its effects on buildings, identification of conditions to cause their inland drifting, definition of impact load, proposal and validation of response estimation method were made. Furthermore, based on the results above, a flow diagram to design building structures against the impact load was proposed. In addition, residual axial-load-carrying capacity evaluation method after collision of ships to column was examined and field investigations of tsunami-inundated buildings were made.

研究分野：建築構造

キーワード：津波 漂流物 衝突 鉄筋コンクリート

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による大震災では、死者・行方不明者の多くが津波によるものであるとされている。本震災を受けて、研究者のみならず国においても、津波に強いまちづくりが今後の地震防災対策のひとつの大きな柱として強く再認識された。大震災以降、建築構造分野の津波荷重評価や耐(対)津波性能評価に関する研究活動は増加傾向にあり、津波荷重評価に関する体系化が試みられてはいるものの発展途上にあるものも多く、建築物の耐震設計における地震荷重評価などと比較するとそのデータや知見の蓄積はいまだ不十分である。

特に、本研究で主として対象としている津波漂流物の衝突による建築物への作用外力、および応答評価に関しては、その知見が蓄積されておらず、「津波防災地域づくりに関する法律」の技術基準においても未解決の課題とされている。

2. 研究の目的

そこで本研究では、津波避難ビルの設計用荷重の合理的な設定、ならびに津波避難ビルに要求すべき対津波性能の具体的な確認手法の提示を目的として、建築構造の立場からは具体的・系統的検討は未着手である「漂流物の衝突」を含む衝撃外力に特に着目し、調査・実験・解析等による検討を実施することで、(1)津波漂流物の衝突外力を明らかにし、その評価法を提案すること、(2)上記衝突外力による建築物の応答を評価し、その簡易評価手法を提案すること、(3)(1)~(2)の知見を用いて、津波避難ビルの設計フローをすること、を目的とする。加えて、本研究では、(4)津波漂流物が柱などの鉛直部材に衝突したときの軸力保持能力を明らかにすること、(5)被災地の復旧・復興に直接的に資する基礎的なデータ収集をも目的としている。

3. 研究の方法

(1) 津波漂流物の衝突外力評価法の開発

津波漂流物として船舶を想定し、船舶が陸上の建築物に衝突するためには船舶が陸域に遡上することが必要条件であることに着目し、津波来襲時における船舶の陸域遡上生起頻度を検討する。まず、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時における船舶のAIS(Automatic Identification System; 船舶の位置、速度等の情報をリアルタイムに送受信するシステム)データおよび海難防止協会から提供を受けた大震災時の避難行動アンケート結果等に基づき、船舶のデータベースを作成する。このデータベースを用い、船舶の陸域遡上生起頻度を分析する。

また、船舶の衝突時衝撃外力を定量的に評価するため、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波来襲時において、船舶が構造物(建築物、防波堤および岸壁)と衝突した5事例

について、その衝突時における船舶の運動量変化および運動エネルギー変化、被衝突防波堤ケーソンの滑動耐力、にそれぞれ基づくことで、各船舶の衝突時衝撃外力の大きさを評価する。上記に加え既往の文献調査に基づき、津波漂流物の外力波形評価法を提案する。

(2) 衝突外力による建築物の応答評価法の開発

建築物を多質点系モデルに置換し、並進系、並進+回転系それぞれについて、(1)で求めた衝突外力を入力し、時刻歴応答を算定する。また、最大応答を簡易に評価する手法を提案し、時刻歴応答との比較によりその妥当性を検証する。

(3) 津波漂流物衝突に対する設計フローの提案とケーススタディ

(1)~(2)の検討によって得られた知見に基づき、津波漂流船舶の衝突に対する建築物の設計手順を提案するとともに、同手順において建築物の応答評価に用いるパラメータを整理する。また、津波避難ビルを対象に、津波波力のみに対する必要耐力、津波波力と船舶衝突時衝撃外力との組み合わせ外力に対する必要耐力、および一般的な耐震建築物の必要耐力、の3つをケーススタディにより比較する。

(4) 津波漂流物衝突により損傷した柱の軸力保持能力評価法の開発

1/4スケールの鉄筋コンクリート造柱試験体を製作し加力実験を行い、津波漂流物衝突により損傷した柱の軸力保持能力を把握する。また、実験結果と既往の(過去に当研究グループで提案した)軸力保持能力評価モデルでの計算値を比較し、適用性を検討する。

(5) 被災地の復旧・復興に資する津波被災建築物の継続使用状況ならびに防潮堤等調査

津波漂流物衝突を含む津波被災建築物について、2011年被災後の継続利用状況を調査し、津波避難ビルに要求すべき復旧性能を分析する。加えて、調査においては防潮堤等の建設状況も調査する。

4. 研究成果

(1) 津波漂流物の衝突外力評価法の開発

上述のAISデータを用いて、まずは2011年津波来襲時の船舶挙動を分析した。図1はその一例で、福島県相馬港における船舶の漂流挙動である。このうち、SMA-01、および02の船舶については、発災後の船舶操舵が不可能となったため、座礁した。しかしながら、発災時の喫水については最大浸水深より大きく、結果として陸域遡上は免れた。一方、SMA-03~05については、操舵可能な状況であったため、港外への避難を行った。これらのことから、喫水および船舶の操舵可否が、船舶の陸域遡上に大きな影響を与える要素で

あることが分かる。図2は、船舶の陸域遡上生起/非生起の割合を、喫水 d と浸水深 h の関係および操舵可否から分類したものである。

図2より、陸域遡上した船舶は、その多くが操舵不可かつ $d < h$ の船舶であったことが分かった。また、別途行った分析により、操舵不可であった船舶の多くは、総トン数 500ton 未満の船舶であることが分かっている。

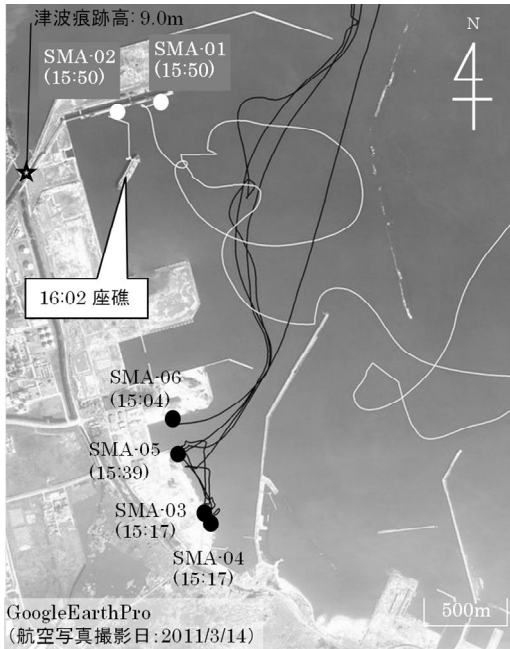


図1 相馬港における船舶挙動

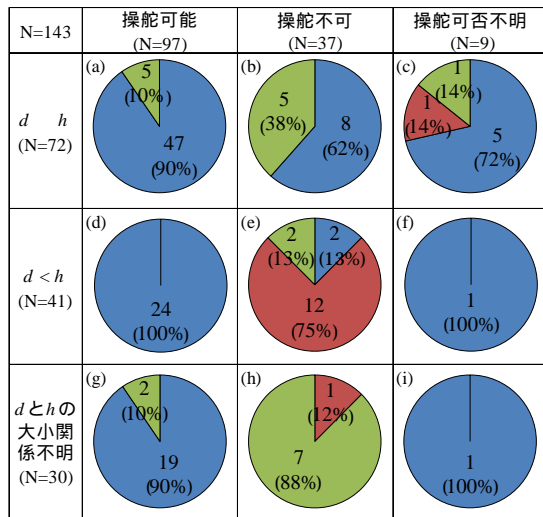


図2 陸域遡上生起/非生起の割合

続いて、衝突外力については、船舶衝突 5 事例および既往研究データから、式(1)の最大荷重 F および(2)の荷重作用継続時間を有する矩形パルス波が最も妥当性が高いことを明らかにした。ここに、 P_{cr} : 船首の破壊強度(tf), g : 重力

加速度(m/sec²), T_g : 船舶の総トン数(ton), m : 船舶の質量(ton), v : 船舶の衝突速度(m/sec)である。

$$F = P_{cr} g = 1.17 T_g^{1/3} (0.82 T_g^{1/6} + 1)^3 g \quad (1)$$

$$= m v / F \quad (2)$$

また、同 5 事例のうち衝突時の速度変化が把握可能であった 2 事例を対象にその衝突時の速度および船首方位を検討し、船舶が縦方向で構造物に接近する場合にはその接近に伴う漂流速度の低減は限定的であることを明らかにした。さらに、船舶が操舵されずに漂流した 5 事例について船舶の漂流速度およびその船首方位を検討し、船舶は数百 m 程度の漂流により最大漂流速度に達し得ること、その漂流速度は横方向よりも縦方向において比較的高いこと、をそれぞれ明らかにした。

(2) 衝突外力による建築物の応答評価法の開発

上記(1)で定義した衝撃外力に対する建築物の弾塑性応答を簡便に推定する手法を提案することを目的とし、衝撃外力による仕事と建築物の復元力による仕事とが等値と仮定し、最大応答層間変形の推定式(3),(4)を提案した。

$$\frac{\delta_{\max,j}}{\delta_{y,j}} = \frac{F_{w,j}}{Q_{y,j}} + \frac{\left(1 - \frac{F_{w,j}}{Q_{y,j}}\right)^2}{2 \left(1 - \frac{F_{w,j}}{Q_{y,j}} - \frac{F}{Q_{y,j}}\right)} \times \alpha \quad (3)$$

... $0.5 \leq F / (Q_{y,j} - F_{w,j}) < 1.0$ の場合

$$\frac{\delta_{\max,j}}{\delta_{y,j}} = \frac{F_{w,j}}{Q_{y,j}} + \frac{F}{Q_{y,j}} + i \frac{F}{\sum_{j=1}^N Q_{y,j}} \quad (4)$$

(記号の説明は紙面の都合上省略)

式(3)および(4)を、津波避難ビルを多質点系に置換したモデルの動的解析結果と比較した結果の例を図3に示す。一連の解析結果より、応答塑性率が 2 程度以下にとどまる場合には精度良く最大応答を推定することを明らかにした。

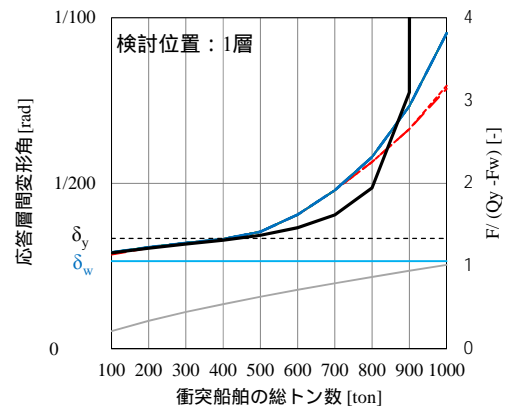


図3 応答解析結果と提案した評価式の比較結果の例(黒実線: 提案式, 他の色付き線: 解析結果)

加えて、並進系のみならず、並進 + 回転系の応答も評価した。これは、船舶が建物重心・剛心と異なる位置に衝突した場合、回転応答が支配的となることが考えられるためである。弾性系の応答増大率(並進系の最大応答に対する並進 + 回転系の最大応答の比)については、図4のように建物のバネ(柱や耐震壁)のx方向・y方向の本数比、層剛性のx方向・y方向の比率等が支配的な要素となり、弾性系であれば最大4倍程度の応答を生じることを明らかにした。

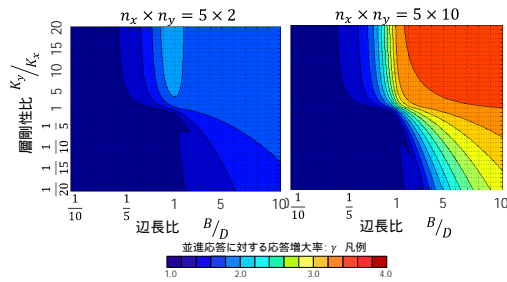


図4 並進系の応答解析結果に対する並進 + 回転応答解析結果の比較

(3) 津波漂流物衝突に対する設計フローの提案とケーススタディ

津波漂流船舶の衝突に対する建築物の設計手順を提案した。また、津波避難ビルを対象に、津波波力のみに対する必要耐力、津波波力と船舶衝突時衝撃外力との組み合わせ外力に対する必要耐力、および一般的な耐震建築物の必要耐力、の3つをケーススタディにより比較することで、耐震設計および耐津波波力設計された津波避難ビルであり相応の層せん断力を負担できる建築物であれば、一般的な港湾で想定される総トン数 500 ton 未満程度の船舶が衝突したとしても、崩壊等の著しい不具合が生じる可能性は低いことを明らかにした(図5: 建物奥行 D=12m の場合)。

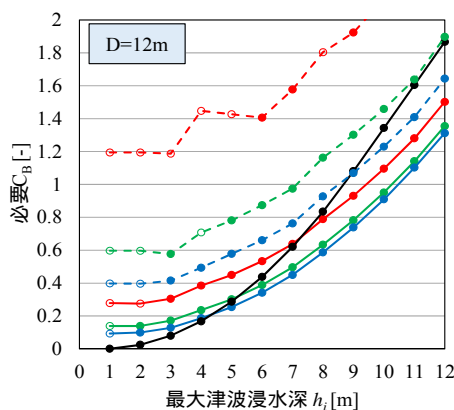


図5 漂流船舶の規模に応じた必要ベース係数(実線: 500 トン船舶, 破線: 4000 トン船舶, 黒実線: 対津波設計(漂流物衝突非考慮)で要求される耐力)

(4) 津波漂流物衝突により損傷した柱の軸力保持能力評価法の開発

上記(1)~(3)の検討は、津波漂流物が建築物の剛強な床スラブに衝突することを仮定しており、柱などの剛強でない部材に衝突する局所破壊を考慮していない。(4)では、柱部材に津波漂流物が衝突したときに、建築物が崩壊に至らない条件を検討するために必要となる、残存軸耐力評価式(既往の研究で当研究グループが提案)の適用性を実験的に検討した。その結果、図6に示す通り、既往の研究で提案されたモデルよりも、当研究グループで提案されたモデル(図6中の“本研究”のプロット)の方が、高い精度を有していることが分かった。

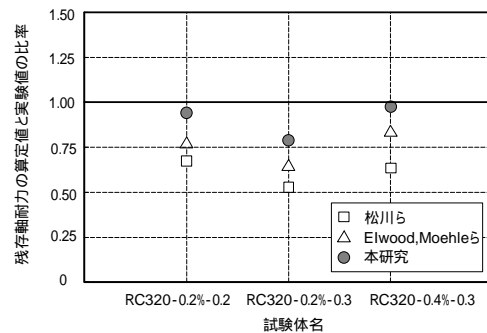


図6 残存軸耐力評価モデルを用いた実験結果に対する精度検証

(5) 被災地の復旧・復興に資する津波被災建築物の継続使用状況ならびに防潮堤等調査

東北地方太平洋沿岸部において、2011年に津波被害を受けた建築物の復旧状況を調査し、津波避難ビルに要求すべき復旧性能を検討した。その結果、図7に示す通り、 R_{ni} (最高浸水階/建物階数)が0.5以上1.0未満で半数程度が、1.0以上でそのほとんどが「非使用 (= 改築あるいは解体等)」に分類されるため、津波被災建築物の解体・改築判断には、浸水深が重要な要素となっていることが分かった。

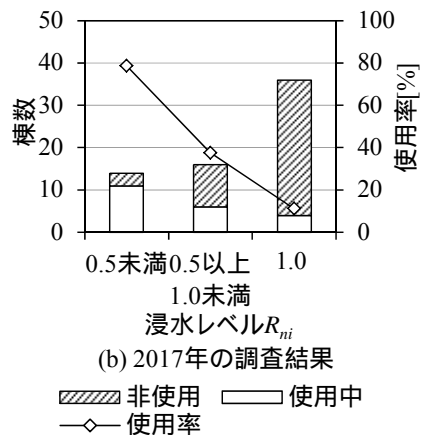


図7 津波被災建築物の復旧状況

また、同調査では、防潮堤等の津波防御施設も調査し、各自治体の津波防災対策の現況を把握した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計9件)

浅井竜也, 松川和人, 崔琥, 中埜良昭: 津波漂流物の衝突衝撃外力による建築物の弾性応答評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38 No.2, pp.973-978, 2016. (査読有)

Yoshiaki Nakano: Structural Design Requirement for Tsunami Evacuation Buildings in Japan, Proceedings of the First ACI & JCI Joint Seminar: Design of Concrete Structures Against Earthquake and Tsunami Disasters, 2017. (査読有)

Yong Yang, Kazuto Matsukawa, Ho Choi, Yoshiaki Nakano: Experimental study on the residual axial load-carrying capacity of shear-damaged RC columns, Journal of Advanced Concrete Technology, volume 16, pp.97-109, DOI10.3151/jact.16.97, 2018. (査読有)

浅井竜也, 松川和人, 崔琥, 中埜良昭: 津波漂流物衝突時の衝撃外力が作用する建築物の弾性応答簡易評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 構造, 日本建築学会, pp.347-348, 2016, 8

T. Asai, K. Matsukawa, H. Choi, Y. Nakano: Simplified Response Estimation Method of Buildings due to Tsunami-Driven Ship Impact Loads, Proceeding of the 16th World Conference on Earthquake, Paper No.319, 2017. (簡易な査読有)

根本雄平, 浅井竜也, 松川和人, 崔琥, 中埜良昭: 津波漂流物衝突時のねじれ応答を考慮した1層建物の弾性応答性状とその簡易評価法, 日本地震工学大会2016 梗概集, 2016. (査読無)

浅井竜也, 松川和人, 崔琥, 中埜良昭: 2011年東北地方太平洋沖地震における船舶の陸域遡上生起頻度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 構造, pp.721-722, 2017. (査読無)

根本雄平, 浅井竜也, 松川和人, 崔琥, 中埜良昭: 津波漂流物衝突時のねじれ応答を考慮したRC造建物の応答評価に関する研究 その2 多層建物における応答評価手法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造, pp.119-120, 2017. (査読無)

松川和人, 根本雄平, 浅井竜也, 崔琥, 中埜良昭: 津波漂流物衝突時のねじれ応答を考慮したRC造建物の応答評価に

関する研究 その1 1層建物の弾性応答性状とその簡易評価手法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造, pp.117-118, 2017. (査読無)

[学会発表](計8件)

浅井竜也: 津波漂流物の衝突衝撃外力による建築物の弾性応答評価, コンクリート工学年次大会, 2016.

Yoshiaki Nakano: Structural Design Requirement for Tsunami Evacuation Buildings in Japan, First ACI & JCI Joint Seminar: Design of Concrete Structures Against Earthquake and Tsunami Disasters, 2017.

浅井竜也: 津波漂流物衝突時の衝撃外力が作用する建築物の弾性応答簡易評価, 日本建築学会大会学術講演会, 2016.

T. Asai: Simplified Response Estimation Method of Buildings due to Tsunami-Driven Ship Impact Loads, 16th World Conference on Earthquake, 2017.

根本雄平: 津波漂流物衝突時のねじれ応答を考慮した1層建物の弾性応答性状とその簡易評価法, 日本地震工学大会, 2016.

浅井竜也: 2011年東北地方太平洋沖地震における船舶の陸域遡上生起頻度, 日本建築学会大会学術講演会, 2017.

根本雄平: 津波漂流物衝突時のねじれ応答を考慮したRC造建物の応答評価に関する研究 その2 多層建物における応答評価手法の提案, 日本建築学会大会学術講演会, 2017.

松川和人: 津波漂流物衝突時のねじれ応答を考慮したRC造建物の応答評価に関する研究 その1 1層建物の弾性応答性状とその簡易評価手法の提案, 日本建築学会大会学術講演会, 2017.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中埜 良昭 (NAKANO, Yoshiaki)
東京大学・生産技術研究所・教授
研究者番号: 10212094

(2) 研究分担者

崔 琥 (CHOI, Ho)
東京大学・生産技術研究所・助教
研究者番号: 40512009

松川 和人 (MATSUKAWA, Kazuto)
東京大学・生産技術研究所・助教
研究者番号: 50709186