

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246093

研究課題名(和文) 建築物に作用する津波荷重の定量化とその耐津波性能の向上に関する総合的研究

研究課題名(英文) Comprehensive Research for Quantification of Tsunami Load and Improvement of Tsunami Resistance of Building Structures

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) 33,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の成果は下記の通りである。

1) 津波漂流物の衝突外力並びに衝突外力が作用した際の応答を実験・解析を通して評価し、その簡便な評価法を提案した。2) 津波漂流物の衝突により柱に局所的な破壊が生じた状況を想定し、破壊された柱の軸力(自重)保持能力評価法を提案した。3) 津波外力により生じるひび割れの抑制とそれによる劣化の防止を目的として、既存の縮小部材実験における損傷量データを実大部材のそれへと換算するための損傷量換算評価手法を提案した

研究成果の概要(英文)：1) Experimental and analytical studies of structural responses due to tsunami debris impacts were carried out and its practical evaluation method was established. 2) An evaluation formula for residual axial capacity of reinforced concrete column damaged by tsunami debris impacts was proposed and its accuracy was verified. 3) Numerical translation methods of damage, crack width and length, observed in scaled reinforced concrete specimen to those in full-scale members were proposed to apply laboratory test results for predicting material deterioration after tsunami inundation.

研究分野：防災

キーワード：対津波性能 漂流物 衝突 応答 荷重評価

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、2011年東北地方太平洋沖地震の発生直後から被害調査を行い、津波避難ビルを対象として、その津波波力の設計荷重暫定案を国土交通省を通じて発表した。

しかしながら、より合理的な設計荷重を設定するには被災後の現地調査結果の分析のみでは限界があることも明らかとなり、その不足領域をより詳細な実験的・解析的検討により学術的に明らかにし、補完することが必須であった。特に、津波漂流物の衝突現象は、建築物の崩壊を容易に発生させることが予想されるが、建築構造の立場からは具体的・系統的な検討が未着手の課題となっていた。

「津波防災地域づくりに関する法律」の技術基準である「津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」には、津波漂流物の衝突により建築物に局所的な破壊が生じたとしても、崩壊に至らないことを設計段階で確認することが要求されているが、その具体的な確認方法は提示されていない。従って、建築物の対津波性能向上のためには、津波襲来時の安全性を確保する観点から、津波漂流物衝突による局所的な破壊に対する安全性評価、ならびに衝突による建築物全体の応答性状の把握に基づく対津波安全性評価手法を開発する必要がある。

さらに、上述した被害調査、並びに他機関で行われてきた浸水建築物の調査の結果から、津波避難ビルの総合的な対津波性能向上のためには、鉄筋コンクリート造部材に生じるひび割れからの海水の侵入を防ぎ劣化を防止することが肝要であることが明らかとなっていた。

2. 研究の目的

以上の背景のもと、本研究では、(1) 津波漂流物の衝突による建築物の応答の簡便な評価法を実験並びに解析により提示すること、(2) 津波漂流物衝突による局所的破壊が生じた柱の崩壊防止のための限界性能である軸力保持能力評価法を提案すること、(3) 津波外力により生じるひび割れの抑制に資するデータを蓄積することを研究目的として設定した。

3. 研究の方法

(1) 津波漂流物の衝突による建築物の応答評価法の提案

本課題では、まず、鋼製船舶を模した鋼棒と津波避難ビルを模した鉄筋コンクリート製スタブによる衝突実験を行う。衝突実験は1/40スケールで行い、主に最大衝突力 F_{max} 、衝撃荷重作用継続時間 τ 、力積 I の特性及び反発係数 e を把握することを目的とする。衝突試験体は船舶を一樣棒と仮定し、丸鋼で製作する。質量 4.8kg (300t 船舶 $\times 1/40^3$)、材長 1000mm ($= 40\text{m}$ 船舶 $\times 1/40$) の試験体を基本に、質量及び材長を変化させた計5体の衝突試験体を用いる。また実衝突現象を再現する

ため、各試験体の衝突面には想定船舶と同程度の曲率半径をもたせる。被衝突試験体は反力床に完全固定した質量無限大と見なせる鉄筋コンクリートスタブで簡略化し、質量の影響は実験結果の分析の際に実建物を想定して換算評価しなおすこととする。加力は衝突試験体を吊るした簡易振り子を用いて(図1)、目標衝突速度に応じて衝突試験体を所定の高さまで引き上げ衝突させ、高速度カメラを用いた計測システムにより得られる衝突試験体の加速度から、図2に示した衝突力時刻歴波形を得た。

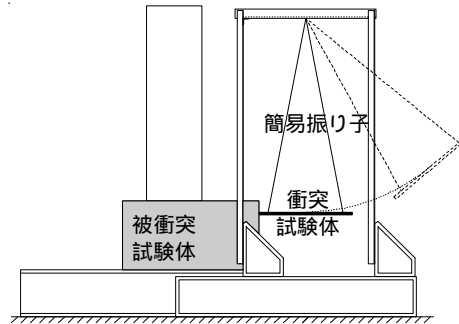


図1 簡易振り子を用いた衝突実験の概要

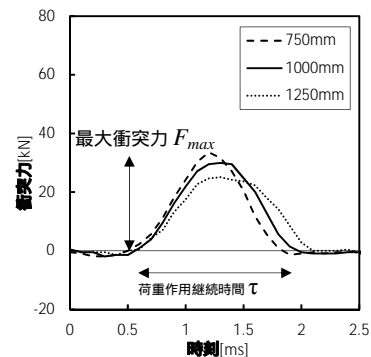


図2 衝突力時刻歴波形
(凡例は衝突試験体材長を示す)

加えて、実験により得られる衝突力を用いた解析的検討に基づき、津波来襲時に発生する碎波・津波漂流物衝突に代表される衝撃外力に対する弾性応答特性を把握し、簡便な応答評価手法を検討する。まず、予備的検討としてRC造6層の津波避難ビル設計例を対象とし、衝撃外力として正弦パルス波を作用させた。荷重作用継続時間 τ は、 0.004s (4ms) \sim 0.4s (400ms) とし、力積 I が一定値となるよう F_{max} を定め、特定階 (2階 \sim R階) に作用させた。その結果、図3のような各層の応答が得られ、荷重作用継続時間が短い方が応答が大きいこと、荷重作用階の上下で応答性状が異なること、が明らかとなった。このことを利用し、衝撃荷重作用継続時間、荷重作用階の上下でそれぞれ異なる応答の評価式を提案する。

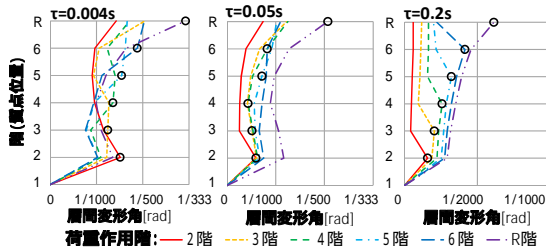


図3 層間変形角の応答解析結果 図中の荷重作用階の応答を示す

(2) 津波漂流物衝突による局所破壊に対する柱の残存軸耐力評価

本課題では、津波漂流物が鉄筋コンクリート造柱に衝突することにより柱が破壊し、かつ柱内部のコンクリートが完全に流出し、露出した鉄筋のみが軸力抵抗要素となる状況における力の釣合いから、局所破壊が生じた柱の残存軸耐力評価式を提案する。提案される残存軸耐力評価式は、同じく鉄筋が露出した試験体5体(図4)を製作し、作用させる軸力の大きさをパラメータとした加力実験を行い、軸崩壊に至らしめることで、その妥当性の検証を行う。

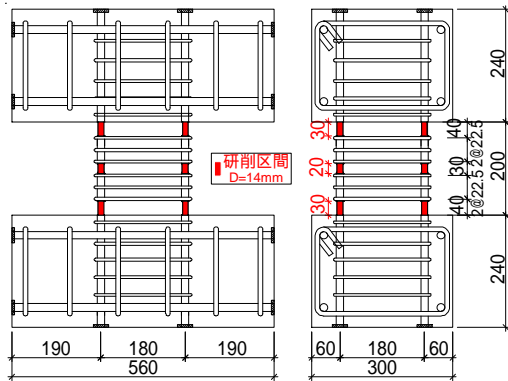


図4 鉄筋が露出した試験体 (R200-1 試験体)

(3) 津波外力により生じるひび割れの抑制に資するデータの蓄積

ひび割れからの海水の侵入を防ぎ劣化を防止することを目的とした鉄筋コンクリート造部材の損傷評価実験を行う。具体的には、これまで行われてきた多種多様な諸元の部材を縮小した試験体による損傷評価実験で得られた部材損傷データを、実大の津波避難ビルにも適用可能とすべく、縮小試験体と実大試験体の寸法の差異がひび割れ幅・長さ等の損傷量に与える影響を検討する。試験体は表1に示す実大試験体、1/2~1/3縮小試験体を含む計4体で、図5のように片持ち梁形式の載荷を行う。また、縮小試験体で得られる損傷量を実大部材のそれへと換算評価する手法を開発し、既往の実験研究で計測されてきた縮小試験体の損傷量を用いることで、新たに実大の実験を行わなくとも実大部材の損傷量を評価可能にする方法を提案する。

表1 損傷量評価実験における試験体一覧

試験体名	$b \times D$ (mm)	h (mm)	c (mm)	主筋 ρ_c (%)	補強筋 ρ_w (%)	せん断 余裕度*
F-1/1	360×600	1800	50.5	8-D19 0.53	D13@180 0.39	2.69
FG-1/2	180×300	900	25	8-D10 0.53	D6@90 0.39	2.92
FG-1/3	120×200	600	17	8-D6 0.53	D4@60 0.39	3.42
F-1/3			25	4-D10 0.59		2.85

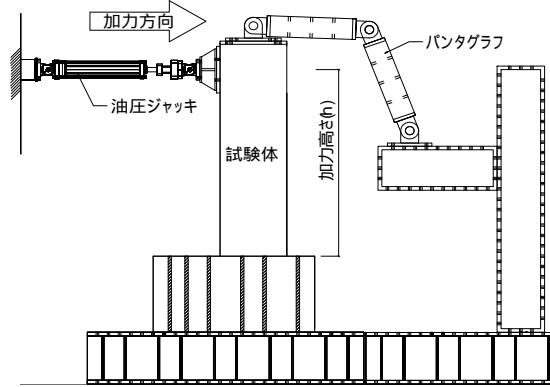


図5 加力セットアップ図

4. 研究成果

(1) 津波漂流物の衝突による建築物の応答評価法の提案

衝突実験結果を用いた分析により、衝撃外力を設定するために必要となる反発係数は、衝突船舶の単位長さあたりの排水量(質量)に反比例することが分かった。図6に、実大換算した単位長さあたりの質量を用いて実験から得られた反発係数を整理したものを示した。図6より得られる反発係数から、最大衝突力は式(1)で求められる。また、力積 I は、式(2)で求めることができる。

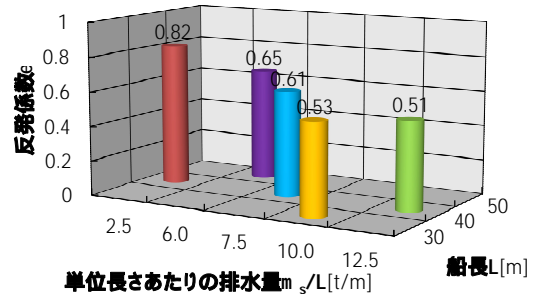


図6 単位長さあたりの排水量と反発係数の関係

$$F_{\max} = 2(1+e) \frac{m_s \cdot m_b}{m_s + m_b} v_s \frac{1}{\tau} \quad (1)$$

$$I = \int F \cdot \tau = (1+e) \frac{m_s \cdot m_b}{m_s + m_b} v_s \quad (2)$$

ここに、 m_s 、 m_b は衝突及び被衝突体の質量、 v_s は衝突速度である。

続いて、津波漂流物衝突などの衝撃外力が作用した際の建築物の弾性応答を、第3章で述べた予備解析結果及び弾性振動論、さらには で述べた実験結果も参照しつつ主たる応答の成分を簡易に評価する式を、以下のように提案した。

・荷重作用継続時間が建物1次固有周期と同程度またはそれ以上の場合における荷重作用階より上階の応答

$$|y_j - y_{j-1}| = \left| u_i (i u_j - u_{j-1}) \frac{p^2 l}{K \cdot \max(p, \omega)} \right| \quad (3)$$

・荷重作用継続時間が建物1次固有周期と同程度またはそれ以上の場合における荷重作用階以下の応答

$$|y_j - y_{j-1}| = \frac{p l}{2 K_i} \quad (4)$$

・荷重作用継続時間が建物1次固有周期よりも十分小さい場合の各階の応答

$$|y_j - y_{j-1}| = \frac{I}{M \cdot \omega} \quad (5)$$

ここに、 j は層番号、 i は荷重作用階番号、 $|y_j - y_{j-1}|$ は j 層の層間変形、 u_i は i 階に荷重が作用した際の1次の振動モード、 p, ω は外力および j 次の角振動数を、 M, K, K_i は質量、1次の広義剛性、 i 階の剛性を、それぞれ表す。

続いて、式(3)-(5)による各層の応答の推定値を解析値と比較して図7に示す。同図では、推定値は解析値を概ね包絡している。ただし、特に下階に荷重が作用したときの上階の層間変形は、式(3)に考慮されていない2次モードの影響により過小評価となった。

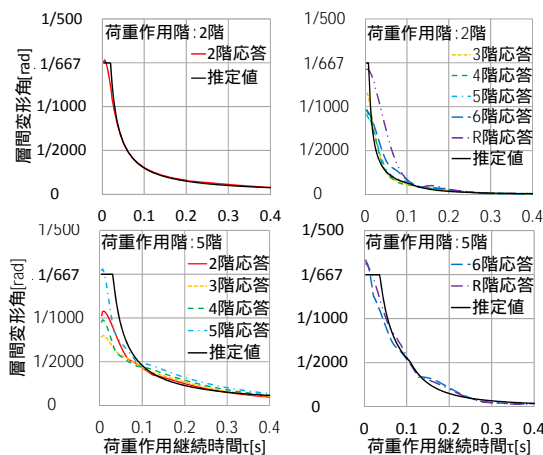


図7 各層の応答値の推定値と解析値

以上の結果より、高次モードの影響評価に現時点では課題が見られるものの、式(3)-(5)を用いて架構の応答を算定することにより、津波漂流物衝突に代表される衝突外力が作用する場合の建築物の応答評価が可能となった。

(2) 津波漂流物衝突による局所破壊に対する柱の残存軸耐力評価

主筋のみが鉛直抵抗要素として残存している状況を想定し、軸崩壊時にはそれらの主筋が全塑性状態となると仮定することにより、柱の残存軸耐力 N_s の簡略な評価式を式(6)のように提案した。

$$N_s = \frac{0.25\pi d^2 \cdot f_y}{\sqrt{1 + \frac{9\pi^2 \delta^2}{16d^2}}} \quad (6)$$

式(6)は、水平変形 δ の関数となっており、水平変形の増大に伴いその軸力保持能力が減少することを意味している。続いて、式(6)の妥当性検証を目的として行われた、加力実験の結果を図8に示す。同図より、試験体が軸崩壊時まで保持していた軸力(図中のプロット)は式(6)の計算結果とほぼ一致し、式(6)の妥当性を裏付けている。

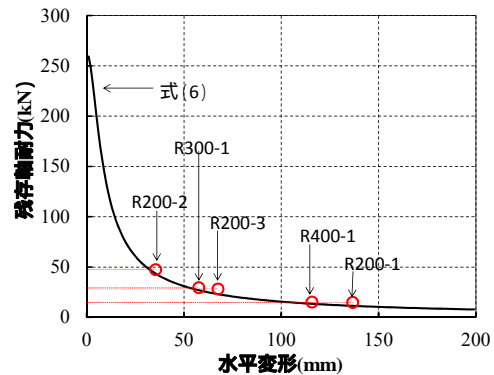


図8 式(6)と実験結果の関係

本成果は、「津波避難ビル等の構造増の要件に係る暫定指針」における局所破壊が生じた津波避難ビルの安全性検討手法の基礎資料として活用されることが期待できる。

(3) 津波外力により生じるひび割れの抑制に資するデータの蓄積

ひび割れ損傷の幾何学的関係モデル(図9、図10)を用いて、縮小試験体に生じる最大ひび割れ幅 $\max W_{f, \text{縮}}$ と実大部材に生じる最大ひび割れ幅 $\max W_{f, \text{実}}$ の関係及び、ひび割れ長さ $\Sigma L_{f, \text{縮}}$ 、 $\Sigma L_{f, \text{実}}$ の関係を下式の通り定式化した。

$$\frac{\max W_{f, \text{縮}}}{\max W_{f, \text{実}}} = \frac{\frac{D_{\text{縮}} - x_{n, \text{縮}}}{d_{\text{縮}} - x_{n, \text{縮}}} \max \varepsilon_{s, \text{縮}} \cdot S_{ave, \text{縮}}}{\frac{D_{\text{実}} - x_{n, \text{実}}}{d_{\text{実}} - x_{n, \text{実}}} \max \varepsilon_{s, \text{実}} \cdot S_{ave, \text{実}}} = \frac{S_{ave, \text{縮}}}{S_{ave, \text{実}}} = k_s \quad (7)$$

$$\frac{\Sigma L_{\text{縮}}}{\Sigma L_{\text{実}}} = \alpha \cdot k_n \quad (8)$$

ここに、 D は部材せい、 d は部材有効せい、 x_n は部材中立軸位置、 $\max \varepsilon_s$ は危険断面位置における最大ひずみ度、 S_{ave} は平均ひび割れ間

隔である。

続いて、第3章で示した実験の結果計測された $\max W_f, \Sigma L_f$ について、縮小試験体から得られた両者の値を式(7),(8)を用いて実大試験体のそれに換算し、実大試験体で計測された値と比較した(図11)。同図より、式(7),(8)により縮小試験体に生じた損傷量を実大試験体に換算評価した損傷量は、実大試験体に実際に生じた損傷量と概ね整合的であった。

式(7),(8)を用いることにより、津波外力その他により生じる損傷量を予測する際には、新たに構造実験を行うことなく、既往の膨大な実験結果を参照することで必要となる損傷量を概ね推定可能となる。

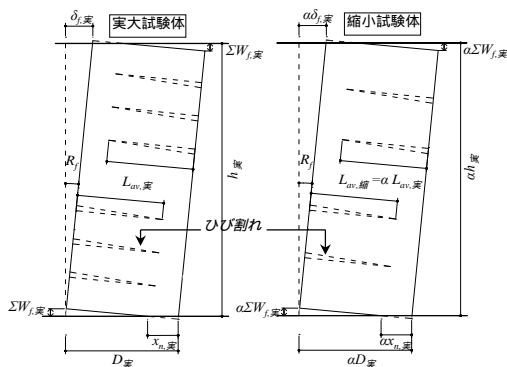


図9 ひび割れと変形の幾何学的関係モデル

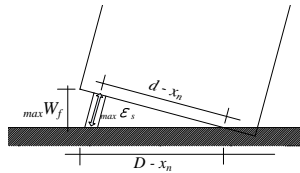


図10 $\max W_f$ と鉄筋ひずみ度との関係

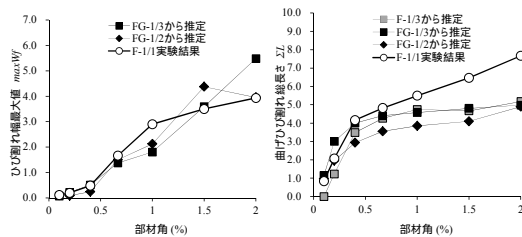


図11 縮小試験体から推定した実大試験体のひび割れ幅・長さを実験にて計測された実大試験体の損傷量の比較

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 4件)

- 1) 松川和人、津波漂流物衝突時の衝撃外力評価に基づく RC 造建築物の応答特性 その1 縮小試験体を用いた振り子衝突実験、日本建築学会大会、2015年9月5日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市)
- 2) 板倉正英、津波漂流物衝突時の衝撃外力評価に基づく RC 造建築物の応答特性

その2 実験結果に基づく衝撃外力評価と非線形時刻歴応答解析による建物応答評価、日本建築学会大会、2015年9月5日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市)

- 3) 浅井竜也、衝撃外力が作用する津波避難ビルの弾性応答評価手法、日本建築学会大会 学術講演会、2015年9月4日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市)
- 4) Ho Choi, Response characteristics of R/C buildings considering impulsive force of tsunami drifting objects, Proceedings of New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, 2013.October.10, Hanoi (Vietnam).

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

有川 太郎 (ARIKAWA, Taro)
 独立行政法人港湾空港技術研究所・海洋研究領域・上席研究員
 研究者番号: 00344317

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

藤間 功司 (FUJIMA, Koji)
 防衛大学校・総合教育学群、人文社会科学群、電気情報学群及びシステム工学群・教授
 研究者番号: 00546187

奥田 泰雄 (OKUDA, Yasuo)
 国土技術政策総合研究所・危機管理技術研究センター・建築災害対策研究官
 研究者番号: 70201994

高橋 典之 (TAKAHASHI, Noriyuki)
 東北大学・建築・社会環境工学科・准教授
 研究者番号: 60401270

(3)連携研究者

福山 洋 (FUKUYAMA, Hiroshi)
 独立行政法人建築研究所・構造研究グループ・上席研究員
 研究者番号: 60344008