# 23019 選抜梗概

建築物等の被害調査結果に基づく津波荷重の評価 その1 静水圧式に基づく検討

2011 年東北地方太平洋沖地震 津波 津波避難施設 設計用津波荷重

### 1. はじめに

津波に強い建築物を構造設計するためには、建築物に作 用する津波荷重を定量的に評価し設計荷重に適切に反映す ることが第一歩である.内閣府においても津波避難ビルの 選定基準が議論され、「津波避難ビル等に係るガイドライ ン」<sup>1)</sup>では(財)日本建築センターの津波避難ビルの構造設 計法等<sup>2)、3)</sup>を参照し、直立護岸を越流する津波を想定した2 次元水理模型実験結果<sup>4)</sup>に基づく荷重算定式が提案されてい る.また、2004年スマトラ島沖地震津波の被害調査結果に 基づき、その荷重算定式の妥当性が検討されている<sup>5)</sup>.しか しながら、特に建築構造の分野では、依然津波被害の定量 的調査や津波荷重の評価に関する研究は極めて少ないのが 現状である.一方で、2011年東北地方太平洋沖地震による 津波被害は甚大であり、今後の津波防災の観点から津波荷 重の定量的な評価は急務となっている.そこで筆者らは、 津波を経験した構造物の耐力とその被害程度の比較に基づ

き文献2)および3)で提示された設計用津波荷重の妥当性を検 討すべく,2011年東北地方太平洋沖地震による被災地域を 調査した.本報(その1)および次報(その2)では,そ の調査概要ならびに設計用津波荷重の検討結果<sup>6</sup>に基づき報 告する.なお本報(その1)および次報(その2)は国土交 通省 平成23年度建築基準整備促進事業「40.津波危険地域 における建築基準等の整備に資する検討(研究代表者:中埜 良昭)」において議論された内容を一部含むものであり,こ こで用いたデータの詳細はその報告書<sup>7</sup>を参照されたい.

#### 2. 調査概要

調査は、2011 年4月初旬から6月下旬にかけて、青森県 八戸市から福島県相馬市にて実施した(図1).

本調査では、建築物に加えて橋脚や防潮堤などの土木構 造物、塀や門柱などの単純な工作物も調査対象とし、(1)調 査対象の耐力が実測結果から比較的容易に推定できること、 (2)建物の壁面等に津波痕が残されており、調査対象位置で の浸水深が明確であること、(3)可能な限り海岸直近に位置 し、津波荷重を直接的かつ単純に評価できること、の三つ の条件を満たす構造物については、津波荷重と構造耐力の 関係を検討すべく、採寸、配筋調査を含む詳細調査を行っ た.詳細調査を行った構造物の中から、耐力評価対象構造物 として選定した構造物の代表的な被害事例を写真1に示す.

なお,上記(2)の浸水深に関して,文献 2),3)で示される津 波波圧算定式(後述)で用いる設計用浸水深 h は,主に自

Tsunami Load Evaluation Based on Damage to Structures Part 1: Discussions Based on Hydrostatic Pressure Profile

正会員	○芳賀	勇治 <sup>*1</sup>	同	浅井	竜也 <sup>*2</sup>
司	舘野	公一*3	同	中埜	良昭*4
同	福山	洋*5	同	菅野	忠*6
名誉会員	岡田	恒男*7			



図1 調査地域

治体等が公開する津波ハザードマップから得ることを想定 している. 今回, 各地で撮影された津波来襲時の記録映像 では、主に三陸地方で見られたように、津波が何波にも分 かれて来襲し徐々に浸水深を増していくような波や、急斜 面を跳ね上がる波,仙台平野で見られたように,低い浸水 深で数キロ内陸まで押し寄せる波など、津波の形状は多種 多様であり設計用浸水深 h に対応する計測浸水深 η をどの ように定義するかは難しい問題であった. そこで、津波ハ ザードマップ作成時には建築物等の地上の構造物による局 所的な影響は無視したシミュレーションによる、いわゆる 通過波に基づくのが通例であることを考慮して、本検討で は次のように定義し計測した. すなわち, 久慈から女川ま での三陸地方では記録映像からも確認できるように、津波 を受けた建築物の前面と背面の津波の痕跡深に違いはあま り見られなかったため、津波の痕跡の最大位置を検討用の 計測浸水深 nm とした.一方,石巻から相馬までの平野部で は、筆者らの調査によると前面の津波の痕跡深は側面もし くは背面の痕跡深の約 1.25 倍~1.35 倍であり, 前面に跳ね 上がりの痕跡が見られたため、側面もしくは背面の津波の 痕跡深を検討用の計測浸水深η<sub>m</sub>とした.

#### 3. 水平耐力の評価

-73-

構造物の水平耐力は、現地で実測した構造物の寸法や、 材料試験結果をもとに評価した.建築物の水平耐力は、耐 震診断基準<sup>8)</sup>の第1次診断法に基づき算定し、単純な工作物 の水平耐力は、観察された破壊形式に応じて、ひび割れ耐



層崩壊した建築物 (陸前高田市, RC 造平屋)





残存する建築物 (女川町, RC 造 4 階)



崩壊したブロック塀 (亘理町, CB 造)



残存する RC 塀 (大船渡市, RC 造)



崩壊した鉄道橋 (田野畑村, RC造)

崩壊した柱 (亘理町, CB 造) 写真 1

転倒した石碑 (亘理町,石造) 被害事例



(山田町, RC 造)

力 Mc,曲げ降伏耐力 My,曲げ破断(主筋破断)耐力 Mu, 転倒耐力 Mor, 滑動耐力 Ps を算定した. ここで, Mor は重 力式の防潮堤や転倒した石碑・門柱が、Ps は滑動の見られ る石碑がそれぞれ対象である.

なお、本検討の対象建築物には転倒したものは含まれてい ないこと,構造物が衝撃波力を受ける場合は浮力は耐力評価 の主要因ではないことから、浮力の影響は考慮していない.

## 4. 津波荷重の評価と実被害の比較

# 4.1 構造物に作用する津波荷重の波圧分布の仮定

構造物に作用した津波荷重は (1)式で表される文献 2), 3) の設計用津波波圧算定式を参考に(2)式の形式で設定し、こ れによる波力と3章で求めた耐力が等しくなるときの係数 a を水深係数 a と定義し、調査対象ごとに水深係数 a を逆 算した.

$q_z = \rho g (3 h - z)$	(1)
$p_{z} = \rho g (a \eta_{m} - z)$	(2)

$$p_z = \rho g (a \eta_m - z)$$

: 文献 2), 3)による構造設計用の津波波圧 (kN/m<sup>2</sup>) q-

- :水の単位体積質量 (t/m<sup>3</sup>) D
  - (本検討では1.0を仮定した)



図2 設計用津波波圧分布<sup>2),3)</sup>



- h : 設計用浸水深 (m)
- : 当該部分の地盤面からの高さ (m)
  - (1)式で $0 \le z \le 3h$  (2)式で $0 \le z \le a\eta_m$
- *p*<sub>z</sub> : 耐力相当時の津波波圧 (kN/m<sup>2</sup>)
- *a* : 「耐力相当時の浸水深 *an*<sub>m</sub>] / 「計測浸水深 *n*<sub>m</sub>]
- :計測浸水深(GLからの実測値で定義)(m) n...

(1)式による波圧分布は、図2に示すとおり設計用浸水深 h の3倍の高さに達する三角形分布(波圧分布の最下部で 静水圧の3倍となる最大波圧)を想定したものである.な お津波荷重は浸水深、構造物の高さ、立面形状等の影響を 受けるため、文献2)、3)ではいくつかのケースで評価法が提 示されているが、ここでは最も基本と考えられる図3の2 ケースを対象とした<sup>5)</sup>. なお、受圧面に開口を有する建築物 に津波荷重が作用する場合は、1 から受圧面の開口率(受 圧面の開口部面積/受圧面の建築物見付け面積)を減じた 数値を低減率 α と定義し、高さ方向に一様に乗じて波圧を 低減させた.

### 4.2 水深係数 *a* の算定手順

(2)式と3章の耐力から逆算される水深係数 a は、耐力相



図 3 本検討で想定した計測浸水深 η<sub>m</sub>,構造物高さ Hと波圧分布 p<sub>z</sub>の関係

当時の浸水深  $a\eta_m$  (計算値)の計測浸水深  $\eta_m$  (実測値)に 対する比率で定義し,もし a=3 で被害と無被害が区分され れば(1)式が妥当であることを示す.水深係数 aの具体的な 算定手順は以下のとおりである<sup>5)</sup>.

①調査対象の耐力を破壊形式に応じて算定する(3 章参照).②(2)式の波圧分布により構造物の損傷位置に作用する力

- (またはモーメント) がその耐力に等しいとして算出さ れる浸水深 *a*η<sub>m</sub>を求める. *a*η<sub>m</sub>が構造物の高さを超える場 合は,図 3 に示す構造物の高さ *H* までの台形波圧分布 (ケース 2) を仮定する.
- ③ $a\eta_m$  と調査地点における計測浸水深  $\eta_m$  との比率として水 深係数 a を算定する.

4.3 構造物の被害程度と水深係数 a の関係に基づく津波荷重評価 調査事例のうち前述の検討が可能と判断した比較的単純 な工作物 43 件および RC 造建築物 8 棟を選定し、これらに ついて、まずは各構造物を北から順に左から並べ、それぞ れの構造物の種類,高さ,計測浸水深 nm,耐力相当時の浸 水深  $a\eta_m$ , 被害程度をプロットした (図4). 被害程度は被 害のない工作物と残存する建築物をそれぞれ○と◇で、崩 壊した工作物と建築物をそれぞれ×と\*で、わずかな傾斜 やひび割れ等の軽微な損傷が見られる工作物を△で示した. すなわち○と◇は作用した津波波力が構造物の耐力より小 さかったこと、×と\*は作用した津波波力が構造物の耐力 より大きかったこと、△は両者が同程度であったこと、を それぞれ意味する.よって、○および◇と×および\*の境 界を探ることで津波波力の推定を試みた. なお, 図4では 計測浸水深に加えて、その 0.5 倍および 1.5 倍の浸水深につ いてもあわせて示した. これらは 4.2 節で求めた水深係数 a=1.0, 0.5, 1.5 にそれぞれ相当する.

まず,図4の▼印に示す牡鹿半島付近がリアス式海岸 (三陸地方)と仙台平野に代表される平野部との異なる地 形特性の境界と考えられ、その南北での比較から北側の計 測浸水深はそれ以南に比較して深い特徴があることがわか る. また,前述のとおり,浸水深計測時の津波痕跡の特徴 や津波来襲時の記録映像から、平野部の津波流速は三陸地 方に比べて大きいと考えられるため、被害の有無を区分す る水深係数 a の値は前者の方が大きいと予想したが, 図4 に示すとおり,被害構造物(×と\*)は数値の低い領域に, 無被害構造物(○と◇)は高い領域にプロットされる傾向 にあるものの、地域のみによる被害の有無の境界値の差違 は明確でない.一方,防潮堤や海岸直近の構造物(亘理町 の石碑など)は、耐力相当時の浸水深が計測浸水深を超え る場合にあっても崩壊している事例が見られる(図4のハ ッチ部分). そこで、津波波力が構造物の立地条件により異 なることを想定し、津波高さと防波堤や防潮堤などの津波 防災施設の規模等を総合的に勘案し、海側に津波の波力低 減を期待し得る遮蔽物がある構造物と、ない構造物とに分 類して図5に「計測浸水深 η<sub>m</sub>」と「水深係数 α」との関係 を示す.なお、本検討において、遮蔽物としては釜石市、 大船渡市, 女川町に設置された湾口防波堤と, 陸前高田市, 石巻市、仙台市などに見られる津波高さに対し十分な高さ を有すると考えられる防波堤・防潮堤を想定した.また, 気仙沼湾の内部に来襲した津波は、蜂ヶ崎地区を通過し波 力が低減されていると考えらえるため、蜂ヶ崎地区を遮蔽 物と想定した.ただし、山田町や大槌町のように津波高さ に対して十分な高さを有すると考えられる防潮堤が設置さ れていても,防潮堤自身を検討対象とする際は,遮蔽物が ない場合に分類した.







図5 計測浸水深と被害程度の関係(比較的単純な工作物および RC 造建築物)

図5によると遮蔽物による波力低減効果が期待できる場合(図5(a))は、計測浸水深 $\eta_m$ が概ね 10m 以下の場合では図中の\*1 のデータ群を除けば被害の有無(〇と×等)の境界は水深係数 a=1 程度(計測浸水深 $\eta_m$ 相当)であると考えられる.また計測浸水深 $\eta_m$ が概ね 13m を超える場合では水深係数 a が 1 を下回る建築物も残存し、これらには計測浸水深相当の静水圧荷重は作用しなかったと推察される. 一方、波力低減効果が期待できない場合を同図(b)に示す. 調査対象群には該当する建築物はなく、比較的単純な工作物のみである.×が水深係数a=1を超えて数例プロットさ

れており,計測浸水深の概ね 1.7 倍以上の静水圧に相当す る波力が作用したものと考えられ,遮蔽物の有無による波 力低減効果の差が見られる.これらの結果を表1にまとめ て示す.

2004 年スマトラ島沖地震津波を経験した構造物を対象と した検討結果<sup>5)</sup>によると、水深係数 *a* は 2~2.5 程度で本調 査研究による結果と比較して大きい.これは、前者の調査<sup>5)</sup> では遮蔽物による波力低減効果を期待できる構造物が全く ない海岸直近の工作物および建築物に直接的に津波が作用 した事例が多かったことが理由の一つとして考えられる.

表 1	被害・	無被害の境界となる水深係数。	a の値

	遮蔽物あり	遮蔽物なし
三陸地方 平野部	a=1*	a=1.7 以上

\* ただし浸水深が概ね 13m 以上の地域では1を下回る

#### 5. まとめ

2011 年東北地方太平洋沖地震による津波被害を経験した 構造物の調査結果に基づき,津波荷重算定に関わる水深係 数 *a* について検討した.本検討により表1にまとめた数値 が得られた.

#### 謝辞

本報(その1)および次報(その2)は、国土交通省 平成23 年度建築基準整備促進事業「40.津波危険地域における建築基準等 の整備に資する検討(研究代表者:中埜良昭)」において議論され た内容を一部含んでいる.また調査にあたっては、東京大学生産技 術研究所中埜研究室・高橋典之および崔琥両助教他ならびに、秋田 県立大学建築構造学研究室・西田哲也教授他の諸氏に協力を得た. 関係各位に謝意を表する.

#### 参考文献

- 1) 内閣府:津波避難ビル等に係るガイドライン, 2005.6
- 2) 岡田恒男, 菅野忠, 石川忠志, 扇丈朗, 高井茂光, 浜辺千佐 子:津波に対する建築物の構造設計法について -その 1:予備 検討-, ビルディングレター, 2004.10
- 3)同上 -その2:設計法(案)-,ビルディングレター,2004.11
- 4)朝倉良介,岩瀬浩二,池谷毅,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巻(2000), pp.911-915
- 5) 中埜良昭:スマトラ島沖地震津波の被害調査結果に基づく津波 避難施設の設計外力評価,日本建築学会技術報告集,第 13 巻 第 25 号, pp.337-340, 2007.6
- 6)浅井竜也,舘野公一,中埜良昭,福山洋,藤間功司,芳賀勇治, 菅野忠,岡田恒男:2011年東北地方太平洋沖地震による建築物等の被害調査に基づく津波荷重の評価一比較的単純な工作物および建築物の被害調査結果に基づく検討,構造工学論文集, Vol.58B, pp.97-104, 2012.3
- 7)東京大学生産技術研究所:平成23年度 建築基準整備促進事業 「40.津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」報 告書,平成24年3月
- 8)(財)日本建築防災協会:既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説,2001.10

\*1 (財) 日本建築防災協会 審議役・工修 \*2 東京大学大学院 大学院生・修士(工学) \*3 鹿島建設 建築設計本部・修士(工学) \*4 東京大学生産技術研究所 教授・工博 \*5 (独) 建築研究所 構造研究グループ長・工博 \*6 (財) 日本建築センター 審議役・工博 \*7 (財) 日本建築防災協会 理事長・工博 Senior Technical Adviser, The Japan Building Disaster Prevention Association, M. Eng. Graduate Student, The University of Tokyo, M. Eng. Architectural Design Division, Kajima Corporation, M. Eng. Professor, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Dr. Eng. Director, Department of Structural Engineering, Building Research Institute, Dr. Eng. Senior Technical Adviser, The Building Center of Japan, Dr. Eng.

President, The Japan Building Disaster Prevention Association, Dr. Eng.