



写真1 被害事例

力 M_c , 曲げ降伏耐力 M_y , 曲げ破断（主筋破断）耐力 M_u , 転倒耐力 M_{OR} , 滑動耐力 P_s を算定した。ここで, M_{OR} は重力式の防潮堤や転倒した石碑・門柱が, P_s 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時の係数 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。

$$q_z = \rho g (3h - z) \quad (1)$$

$$p_z = \rho g (a\eta_m - z) \quad (2)$$

q_z : 文献 2), 3) による構造設計用の津波波圧 (kN/m²)

ρ : 水の単位体積質量 (t/m³)

(本検討では 1.0 を仮定した)

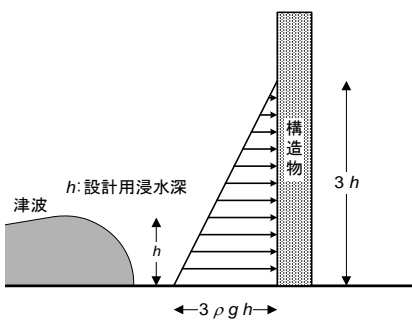


図2 設計用津波波圧分布^{2), 3)}

g : 重力加速度 (m/s²)

h : 設計用浸水深 (m)

z : 当該部分の地盤面からの高さ (m)

(1)式で $0 \leq z \leq 3h$ (2)式で $0 \leq z \leq a\eta_m$

p_z : 耐力相当時の津波波圧 (kN/m²)

a : [耐力相当時の浸水深 $a\eta_m$] / [計測浸水深 η_m]

η_m : 計測浸水深 (GL からの実測値で定義) (m)

(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⁵⁾。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, 高さ方向に一樣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

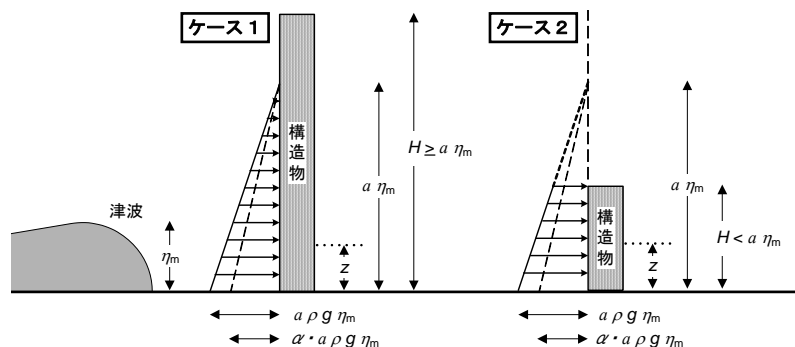


図3 本検討で想定した計測浸水深 η_m , 構造物高さ H と波圧分布 p_z の関係

当時の浸水深 $a\eta_m$ (計算値) の計測浸水深 η_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別されれば(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⁵⁾。

- 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 $a\eta_m$ を求める。 $a\eta_m$ 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 η_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 η_m 、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 (亶理町の石碑など) 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_m 」と「水深係数 a 」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れるため、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。

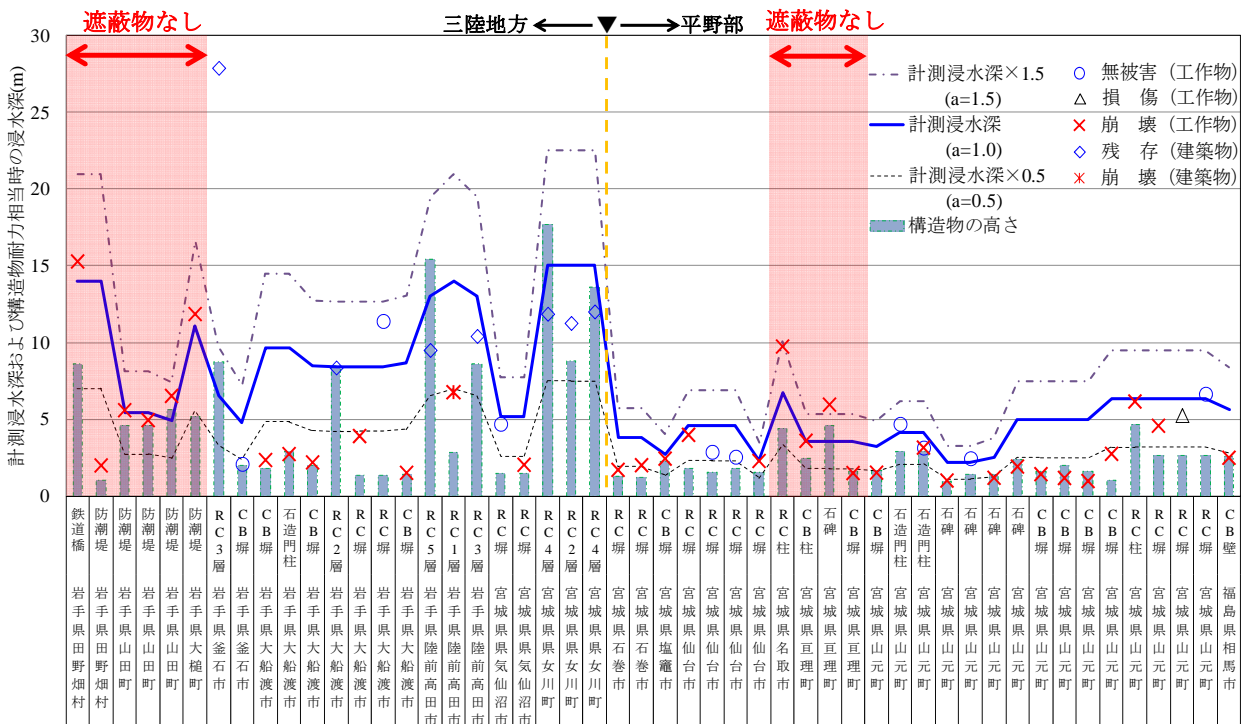
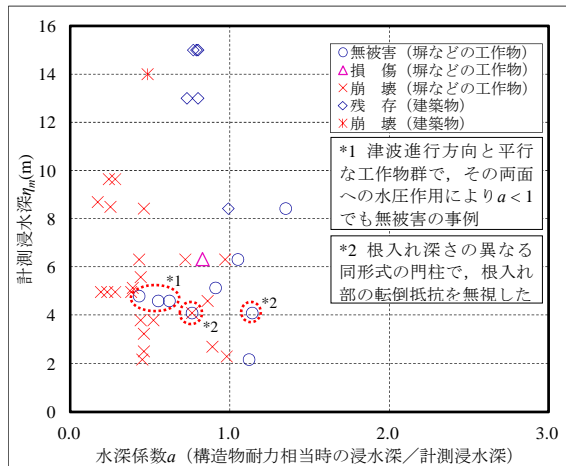
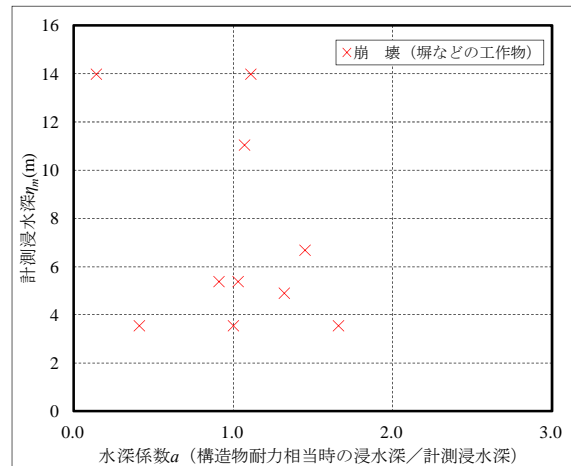


図4 計測浸水深、構造物耐力相当時の浸水深と被害程度の関係



(a) 遮蔽物による波力低減効果が期待できる場合



(b) 遮蔽物による波力低減効果が期待できない場合

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 η_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（○と×等）の境界は水深係数 $a=1$ 程度（計測浸水深 η_m 相当）であると考えられる。また計測浸水深 η_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⁵⁾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⁵⁾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助助教他ならびに、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。

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，石川志忠，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，館野公一，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－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.