

東北地方太平洋沖地震津波での建築物被害傾向に基づく転倒判定法の提案

長谷部 雅伸 佐川 隆之 ファム・フック
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Assessment of Building Damages caused by the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Disaster

Masanobu Hasebe, Takayuki Sagawa and Pham Van Phuc

Abstract

An assessment was carried out to clarify the damages of buildings caused by tsunami in the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Disaster based on inundation depth and structural characteristics of buildings. It was shown that the falling damages were dominantly distributed in buildings of 4 stories or less with small aperture ratio under the conditions of high inundation depth. Some formulae of the tsunami force have been proposed to analyze the buildings' falling damages based on the results of the field survey. The main reason of building falling could be explained by these horizontal tsunami forces. The results of computational fluid dynamic simulations also showed that the vertical tsunami forces included not only static forces such as buoyancy but also dynamic component caused by the collision of water hitting the ceilings and floors through apertures.

概 要

2011年東北地方太平洋沖地震による建築物の津波被害の実態を整理し、浸水深や構造条件を軸とした分析を元に、建物の転倒被害を対象とした評価手法を提案した。主要な津波被災地における建物の転倒被害は、階数が4階以下で壁面の開口部分が小さな建物に顕著に発生する傾向が見られ、浸水深以外の条件によっても被害の度合いが異なることがわかった。陸上での津波外力の算定については、(1)津波衝突時の初期段階と、(2)その後の浸水状態を想定したそれぞれの評価式を提案し、被災事例が概ね説明できることを示した。また、数値流体解析(CFD)により一連の荷重変化を調べたところ、水平荷重については本手法で概ね評価できることが示されたが、鉛直方向の力については浮力等の他、開口部から侵入した津波と天井および床との衝突によって動的な成分が発生しうることが判明した。

§ 1. はじめに

2011年3月11日、宮城県沖を震源とするMw9.0の東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震によって発生した津波は、岩手県宮古市において1896年の明治三陸津波を上回る最大遡上高40.5mを記録し¹⁾、仙台平野では876年の貞観津波に匹敵する内陸6kmまでの範囲が浸水する²⁾など、既往最大の規模であった。

この津波により、東北地方から関東地方の太平洋沿岸では深刻な被害がもたらされた。人的被害については、死者・行方不明者およそ2万人のうち、90%以上が津波によるものであるとの報告があり³⁾、津波被害が今回の大震災を特徴づける決定的な要因となった。建物被害については、全半壊あわせておよそ23万棟におよび⁴⁾、その97%が岩手県、宮城県、福島県に集中していることから、地震動ではなく津波を原因とするものが大半を占めていると推測される。

津波による建築物の被害について、首藤⁵⁾は浸水深

に対する構造種別の被災度分類を示している。しかし、整理された被災事例の数が限られているため、被災度の区分に不明瞭な部分が残されている。また今回の津波被害では、鉄筋コンクリート造(以下RC造)の建築物が転倒するなど^{6),7)}、従来の知見とは異なる被災事例が多く確認されている。このことから、津波の規模だけでなく、建物規模や基礎構造、荷重受圧面の開口率などといった建物の構造的条件や、標高、海岸からの距離、周囲の構造物状況などの立地条件によっても被害の度合いと発生メカニズムが異なってくるものと考えられる。

建築物を対象とした津波荷重の算定指針としては、現状では津波避難ビル等に係るガイドライン⁸⁾(以下、ガイドラインと呼ぶ)が広く用いられている。しかし、ガイドラインで提案されている荷重算定式は、津波が衝突する瞬間の衝撃力を想定したものであり、その後の建物が浸水した状況における浮力と流れの抗力の相

相互作用が十分に考慮されているとは言い難い。特に津波避難ビルの設計では、津波に耐えられる構造が人命確保の観点から必然的に求められるため、適切な外力の評価が極めて重要な課題となる。

そこで本研究では、はじめに津波による建築物の被害傾向を詳細に把握することを目的とした被災事例の整理を行う。既往の研究と整合する被災事例の他、特に今回の震災で注目された建物の転倒被災事例を紹介する。次いで津波による建物被害の実態について、浸水深だけではなく階高や受圧面の開口率を軸とした分析を行い、建物全体が転倒などの大規模な被災に至る要因を考察する。こうした現地調査結果を踏まえ、本研究では転倒被害に着目した荷重算定法を提案し、実際の被災事例への適用を試みる。最後に、本算定法の妥当性の検証と、津波の衝突から没水に至るまでの一連の荷重状態を詳細に把握するために、数値流体解析(CFD)による検討を加える。

§ 2. 津波による建物被害の実態

2.1 調査対象建物

本研究で調査対象とした建物を表-1にまとめる。調査対象建物は、(1)筆者らが2011年4月～5月の間に実施もしくは参加した現地学術調査¹⁾、(2)外部の研究機関等による震災関連の調査報告書等²⁾より、総数92棟を選定した。木造建築物については調査した被災地のほとんどで浸水深が大きく壊滅的な状況であったこと、またここでは特に既往の被災事例があまり知られていないRC造建物と一部の鉄骨造(以下S造)やコンクリートブロック造(以下CB造)の被害の実態に焦点を絞ることとし、調査対象からは敢えて除外した。

2.2 構造形式別の代表的な被害形態

写真-1に宮古市田老地区の被災状況を示す(2011年4月6日撮影)。周辺の浸水深は現地調査から3.5m～4.8mと推測される。この浸水条件下では、RC造やS造の建物が残存しているのに対し、木造の建築物はほぼ全てが倒壊、流失していることがわかる。既往の研究では、木造建物は浸水深が2mを超える場合ほぼ全てが全壊に至るとされているが³⁾、これは本調査結果とも整合する。

S造やRC造の建物は、一般に木造建物に比べ津波の浸水によって持ちこたえるケースが多い。S造建物の場合は、外装・内装が流失し、浸水部分の構造だけが残るパターンが最も多くみられる(例えば写真-2)。これは、外装材が流出することで、津波の波力を受ける部分が減少し、構造自体の損傷が軽減されたためであ

表-1 調査対象建物一覧

調査地域		構造形式			
		RC	S	CB	その他
岩手県	田野畑村	1			
	宮古市	7	26	2	3
	山田町	1		1	
	大槌町			1	
	釜石市	2		1	
	大船渡市	3		1	
	陸前高田市	25		1	
宮城県	南三陸町	6			
	女川町	10	1		
合計		55	27	7	3



写真-1 宮古市田老地区の被災状況
(田老地区：周辺での浸水深は地盤から3.5m～4.8m程度)



写真-2 S造建物の被災事例(宿泊施設)
(宮古市田老：周辺での浸水深は地盤から11.7m)



写真-3 RC建物の被災事例(野球場)
(宮古市湾奥部：周辺での浸水深は地盤から4.3m)

ると推測される。RC 造建物については、一部非構造壁や開口部周りが損傷しているケースがあったとしても、写真-3のように躯体の損傷がほとんど無いケースが大半を占める。

2.3 建物の転倒被害の例

写真-4、5はそれぞれ宮城県女川町の3階建てS造建物、および2階建てRC建物であるが、建屋全体が基礎部分から倒壊している。女川町周辺ではおよそ15mの浸水深が確認されており¹⁾、写真-4に示した以外でも建物の転倒被害が数例確認されている⁶⁾。こうした転倒被害の原因としては大まかに、(1)津波が直接建物に衝突した際の過大な水平荷重の作用と、(2)その後建物が浸水した状況での浮力と流れによる水平荷重で発生する転倒モーメントの作用の、両者ないしはいずれかが主原因と考えられる。また、本研究では考慮しないが、場合によっては地盤の液状化の影響や津波遡上に伴う洗屈効果により地盤・基礎が脆弱になっていたという可能性も考えられる。

ただし女川町には写真-6のように、同程度の浸水深であるにもかかわらず転倒しなかった建物も存在している。このため、津波の浸水深以外にも階高等の構造的条件や、周囲の構造物による遮蔽効果といった立地条件も被災度を左右する要因になると考えられる。他、文献⁷⁾では、津波の到来方向に大きな開口が存在しているため、受ける荷重が軽減されたために持ちこたえた建物の事例が紹介されている。

§ 3. 建物被害の分析

3.1 浸水深と被災度の関係

図-1は首藤⁵⁾が提案した浸水深による被災度を整理した表に、調査対象建物の代表的な事例を一部加筆したものである。浸水深6m~16mの範囲では、浸水深と被災度の関係が明確に示されておらず、今回の調査結果でも被災度が混在している様子がわかる。特に階高の低い、小規模な建物に被害が多い傾向がみられる。このことから、立地条件や建物自体の構造的条件なども被災度に関係していることが推測される。

3.2 構造的条件と被災度の関係

図-2には、調査対象としたRC造建物(表-1参照、全55例のうち、小屋や倉庫など工作物に近いものを除く52例)の被災度⁹⁾と建物階数の関係を示す。調査対象建物周辺での浸水深は2.5mから15mの範囲である。今回の調査範囲では、大破や転倒といった深刻な被害



写真-4 転倒したS造建物の例(宮城県女川町)



写真-5 転倒したRC造建物の例(宮城県女川町)



写真-6 転倒を免れたRC建物の例(宮城県女川町)

浸水深[m]	1	2	4	8	16
S造	持ちこたえる		(資料なし)	○ホテル(写真-2) ○製氷ターフ(宮古・田老) ×水産加工工場(宮古・田老) ×事務所(写真-4)	破壊
RC造 CB造	○学校(陸前高田) ○蔵(宮古)	○学校(陸前高田) ×集合住宅(大槌) △集合住宅(女川)	○野球場(写真-3) ×CB倉庫(大船渡) ×集合住宅(山田) ×住宅(山田、洗屈による)	○商工会議所(大船渡) ×店舗(宮古・田老) ○集合住宅(陸前高田) △住宅(陸前高田) ×住宅(陸前高田) ○RCビル(釜石)	○集合住宅(陸前高田) ×住宅(写真-5) ×RCビル(写真-6)

凡例: ○構造は無事, △中破(構造の一部損壊), ×大破(倒壊、転倒など)

図-1 浸水深と被災度の関係

は5階建て以上の建物では見られなかった。4階建てに1例のみ転倒被害が見られた他は、被害の発生は3階以下の建物に集中していることがわかる。

また、転倒した建物に共通してみられる構造的特徴として、窓が少ないなど津波受圧面の建物開口率が小さいという点も見いだされた。そこで図-3に示すように、浸水深と開口率による被災度の整理を行った。ここで、開口率は調査写真から推算し、図の縦軸は開口率、横軸は浸水深とした。転倒被害に着目すると、図中の点線で示すように浸水深が10m以上かつ開口率30%以下のケースで顕著に発生していることがわかる。

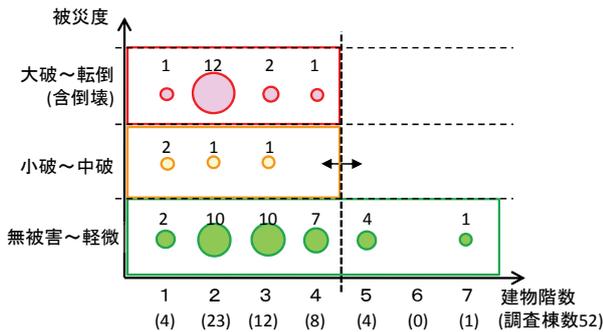


図-2 被災度と建物階数の関係

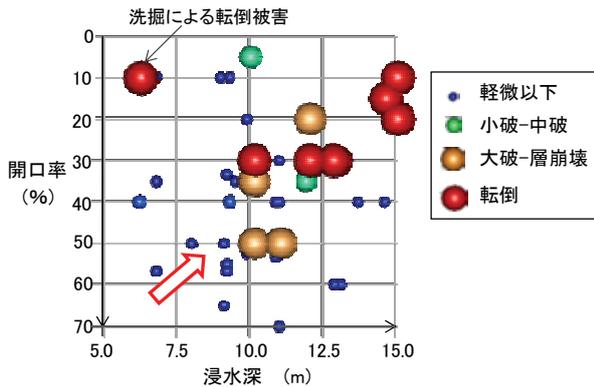


図-3 開口率と浸水深による被災度分類

§ 4. 転倒被害に関する評価手法

4.1 転倒に関する評価手法の提案

4.1.1 外力の評価方法

陸上で津波遡上流によって作用する外力について、本研究では以下のように2つの段階に分けて考える。

- (a) 津波遡上流の先端が建物に衝突する初期段階。
- (b) 建物の周囲および内部が浸水する浸水段階。

上記(a)の初期段階では、建物前面に衝撃的な水平方向の荷重のみが作用し、その後(b)の浸水段階では流れによって発生する水平荷重と、建物の内外部の浸水によって付随的に発生する上下方向の力が作用すると考える。

(a)の初期段階で発生する水平方向の衝撃波力 F_I については、ガイドライン⁸⁾で提案されている以下の波圧算定式を用いて評価する。

$$F_I = \rho g \int B(ah - z)(1 - \varepsilon) dz \quad (1)$$

ここで、 B : 建物幅(流れに直交する方向)、 ρ : 海水の密度(1030kg/m³)、 g : 重力加速度、 h : 浸水深、 ε : 幅方向の開口率である。 a は浸水深係数であり、ガイドライン⁸⁾では $a=3$ としている。この値は朝倉ら¹⁰⁾が行った水理模型実験を元にしており、建物前面に障害物がなく遡上流が直撃するケースについては、衝撃力の最大値を概ね評価できることが他の研究でも確認されている(例えば¹¹⁾)。これに対し中埜¹²⁾は、東北地方太平洋沖地震津波の被災地での建造物の被害調査結果を元に、立地条件によって遮蔽効果が作用する場合には $a=1$ とすることを提案している。

上記(b)の浸水段階での水平荷重 F_C については、モリソン式¹³⁾を参考に以下のように評価する。

$$F_C = \frac{C}{2} \rho \int B(1 - \varepsilon) v^2 dz \quad (2)$$

ここで、 C : 抗力係数(=2.0、角柱状の物体を対象とした係数)、 v : 陸上における津波の遡上流速である。ただし本研究では、遡上速度 v の推定が困難な場合には段波の波速算定式¹⁴⁾を参考に以下の式で近似的に評価する。なお、この近似法では流速の鉛直分布は一定となる。

$$v = \sqrt{gh} \quad (3)$$

式(3)を式(2)に代入すると、以下のように浸水深から水平荷重を評価できる式を得る。

$$F_C = \frac{C}{2} \rho gh \int B(1 - \varepsilon) dz \quad (4)$$

浸水段階で作用する鉛直荷重 F_B については、ガイドライン⁸⁾では浮力のみを考慮した式が示されている。しかし、実際に建物に作用する鉛直荷重としては、主に(i)建物内部の天井付近に発生する空気だまりによる浮力、(ii)建物内部に侵入した海水による床面への荷重(海水重量)、(iii)開口部からジェット状に突入した海水が天井面や床面に衝突することで生じる動的な力、の3つが想定される。このうち(iii)の動的な力については、簡便な算定が困難であるため、後に数値解析を用いた検討を行うこととする。ここでは(i)と(ii)の静的な力のみを考慮する。例えば N 階まで浸水した場合には以下の式で鉛直荷重を評価することとする。

$$F_B = \rho g \sum_{n=1}^{N-1} V_n - \rho ghA \quad (5)$$

ここで、 V_n : n 階天井部の空気だまりの体積、 A : 一階の床面積である。図-4に概略を示すが、ここでは

浸水深がある階の腰壁よりも低い場合にはその階の内部への浸水が発生せず、腰壁の高さを超えたときに浸水するとした。すなわち、ある階が浸水した場合、その海水の荷重分だけ下階の空気だまりの浮力が相殺されることとなる。以上の仮定に基づくと、式(5)の値は浸水深に対し不連続な変化を示すことになる。

まとめとして、初期段階と浸水段階における荷重の作用状況を図-5に模式的に示す。特に水平荷重については、各段階で鉛直方向の分布形状が異なることを留意する必要があることがわかる。

4.1.2 建物の転倒評価方法

建物が転倒するかどうかは、文献7)にならい建物の転倒耐力 M_{tr} と建物に作用する転倒モーメント M_r によって評価する。具体的には $M_t > M_{tr}$ (あるいは $M_t / M_{tr} > 1$) となった場合、転倒と判定する。

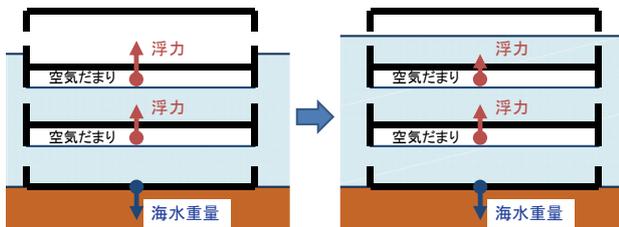


図-4 静的な鉛直荷重の評価法

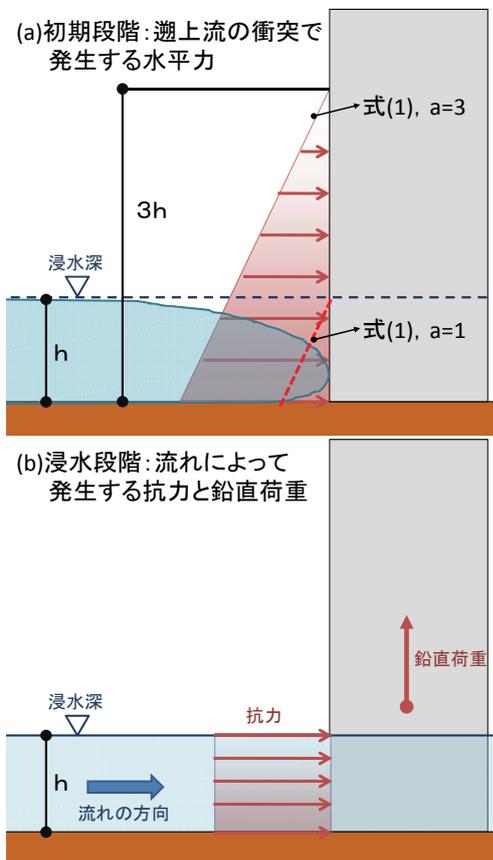


図-5 浸水段階に応じた外力評価の概要

建物の転倒耐力 M_{tr} は以下の式により求める。

$$M_{tr} = \frac{L}{2} \Sigma W + \Sigma L_p R_{TC} \quad (6)$$

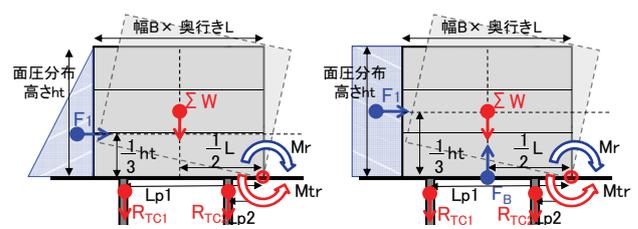
ここで、 L : 建物の津波到来方向の長さ、 ΣW : 建物重量、 L_p : 建物転倒中心位置から杭までの長さ、 R_{TC} : 杭引抜抵抗力⁷⁾である。ここでは簡単のため、建物重心は平面上の中心にあるものと仮定している。

建物に作用する転倒モーメント M_r については、図-5に示す F_t 、 F_c および F_v の分布形を考慮し、以下のいずれかで評価する。

$$M_r = \frac{1}{3} h_t F_t \quad (7)$$

$$M_r = \frac{1}{2} h_t F_c + \frac{1}{2} L F_B \quad (8)$$

具体的には津波衝突時の転倒を評価する場合には式(7)で、浸水状態を想定する場合には式(8)によって評価する。図-6に本判定手法の概略を示す。



(a) 津波衝突の初期段階 (b) 津波衝突後の浸水段階

図-6 建物に作用する転倒モーメント

4.2 被災事例への適用例

以下、前節で提案した判定手法を実際の被災建物に適用した事例を示す。いずれのケースも津波の遡上流速が不明であるため、式(8)による浸水段階での水平荷重 F_c の推定には式(5)を用いて近似した。また、これまでと同様に建物の開口率は被災写真から求めた。

4.2.1 女川町の2階建RC造建物(転倒被害)

写真-5で示した2階建女川町のRC造建物(開口率20%、空気だまり高さ1.5m)の例を示す。本建物周辺での浸水深は15mであり、周囲には建物が存在する市街地に立地していた。なお、海岸からの距離はおおよそ100mである。図-7に示すように、浸水深を変数として転倒モーメントの耐力比 (M_t / M_{tr}) を、式(7) ($a=3$ としたケースを図中実線で、 $a=1$ としたケースを図中破線で示す) および式(8) (図中点線) で求めた。前述したように、縦軸の M_t / M_{tr} が1以上となる場合は転倒と判定される。本建物の例では周囲の建造物の遮蔽効果を考慮して式(7)の $a=1$ のケースと式(8)のケース(それぞれグラフの破線と点線)で評価されるが、いずれも浸水深15m以下

で転倒と判定されており、実際の被害状況と整合することがわかる。

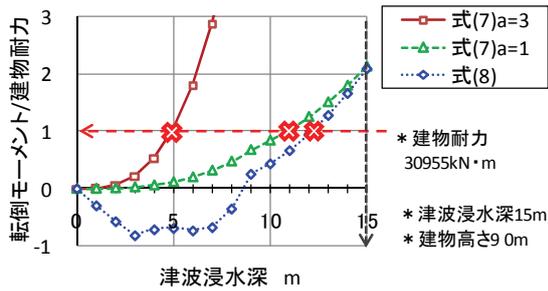


図-7 女川町の2階建RC造建物の転倒評価

4.2.2 南三陸町のRC造3階建建物⁷⁾(転倒せず)

本建物⁷⁾周辺での浸水深は10.9m、周囲には建物が存在しており、海岸からの距離はおよそ500mである。また、本建物の津波到来方向の壁面の開口率は50%であり、空気だまり高さを0.5mと仮定した。この建物の転倒評価例を図-8に示す。本建物の例では、式(7)で $a=3$ とした場合は転倒、他の場合では転倒しないと判定される。このことから、上述の立地条件による遮蔽効果等で津波が直撃せず、残存することができたものと考え、実際の被災状況が説明できる。ただし、仮にこの建物が海岸に隣接するような立地条件であった場合には、津波により転倒する可能性も考えられる。

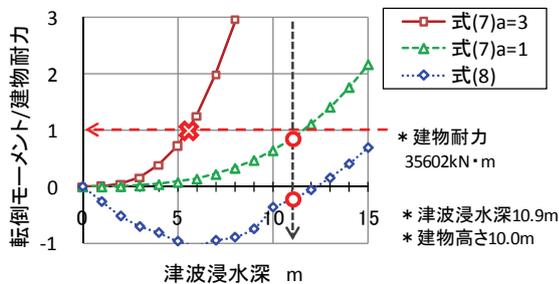


図-8 南三陸町の3階建RC造建物の転倒評価

4.2.3 女川町の5階建RC造建物(転倒せず)

この建物(写真-6)は海岸から100mの市街地に立地しており、さらに周囲の浸水深も15mと、4.2.1で検討した建物とほぼ同じ条件であるが転倒被害を免れている。なお、この建物の開口率は20%であり、空気だまり高さを1mと想定し、建物耐力には杭基礎耐力を考慮した。図-9に転倒評価例を示すが、いずれの評価式を用いても転倒と判定されることになり、実際の状況とは整合しない。この理由として、周囲の建物配置による影響で津波の直撃を免れたうえに、近傍での遡上流速が周辺の地形や構造物の状況により局所的に小さかった可能性が考えられる。ここで建物周りで

の津波流速について、式(2)において $v=5.5\text{m/s}$ であったと仮定すると、図-10中の点線で示すように浸水深15mで転倒と判定されることがわかる。このことから、本建物周りでは地形や周囲の構造物による影響で流速が 5.5m/s 以下であった可能性が考えられる。

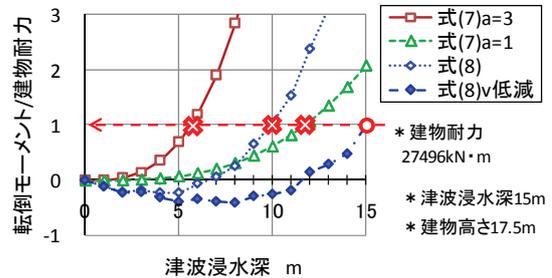


図-9 女川町の5階建RC造建物の転倒評価

§ 5. CFDによる建物への津波荷重の評価

ここでは、陸上に遡上した津波が建物に衝突してから浸水段階に至るまでの一連の荷重状態の把握と、本転倒評価手法の検証を目的として、CFDによるシミュレーションを行う。

5.1 数値モデルの概要と精度検証

津波伝搬シミュレーションでは、数百キロメートルにも及ぶ広い範囲を対象とするため、通常は非線形長波方程式モデルが用いられる。しかし、静水圧近似が適用されているため、流れによる圧力変動を直接評価することができないという問題がある。

そこで本研究では、静水圧近似を適用しない、一般的な数値流体解析モデルを用いた津波荷重の評価を行う。支配方程式は以下の連続式(質量保存則)と運動量保存の式によって構成される。これらの方程式により空気と水の速度及び圧力を直接に解き、建物に作用する津波荷重を評価する。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla(p) + \mu \nabla(\nabla \mathbf{u}) + \rho \mathbf{g} \quad (10)$$

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (11)$$

ここで、 \mathbf{u} : 流速ベクトル、 p : 圧力、 μ : 流体の分子粘性係数、 \mathbf{g} : 重力加速度ベクトルである。本研究では津波の水面形状を再現と、建物内部への海水の浸入および空気だまりの影響を考慮するため、水と空気で作成される二相流モデルを用いる。両者の界面(水面)の挙動はVOF法(Volume of Fluid)¹⁵⁾により再現する。なお、式(11)中の ρ_1 、 ρ_2 はそれぞれ水と空気の密度であり、 α は水の体積分率、

ρ は両者の混在を考慮した見かけの流体密度である。

基礎方程式(9)、(10)の空間的離散化には有限体積法を用い、流速と圧力の連成解法にはPISO法を採用した。また、移流項の空間的離散化には1次精度中心差分を、時間発展には1次精度陰解法を用いた。

本数値モデルの検証のため、チャルレスら¹⁶⁾の水理実験を模擬した解析を実施した。図-10に実験装置(平面水槽)の概要を示す(縮尺比は1/200)。解析領域はこの平面水槽全体とし、図-11に示すように直方体の計算格子を用いて再現した。境界条件として、建物と水槽の壁面はno-slipの不透過境界とし、水槽の上端は空気が自由に出入りする開境界とした。さらに水槽に設置された可動式の造波板については移動境界とした。このため、造波板に隣接する部分の計算格子は時間発展とともに自動的に再構築を行っている。

図-12は遡上した津波が建物に衝突する瞬間(時刻127s)を海側から見た解析結果である。なお、建物表面の赤い部分は高い圧力値が発生していることを示すものである。この図から、建物前面では衝突した津波が打ち上げられることで、周囲の遡上水深よりも上の位置でも高い圧力が発生しうることがわかる。

図-13は護岸から沖合へ860mおよび50m(模型スケールで4.3m、0.25m)離れた海域上の点での、実験¹¹⁾、¹⁶⁾及び本解析結果の水位変動量の比較である。また、図-14には陸域(護岸から40m内陸、模型スケールで0.2m)での浸水深の比較を示す。両図とも解析結果(Cal.)は実験結果(Exp.)とほぼ一致している。図-15は建物全体に作用する津波荷重の時間変化であるが、解析結果は実験結果に比べ、荷重が立ち上がるタイミングがやや速いものの、ピークの値とその後の現象傾向に関しては良好に一致していることが確認できる。なお、図-15の縦軸の津波荷重は式(1)で得られる値($a=3$)で無次元化している。ピーク時の値が1を下回っていることから、ガイドラインの算定式の範囲内に収まっていることが確認できる。

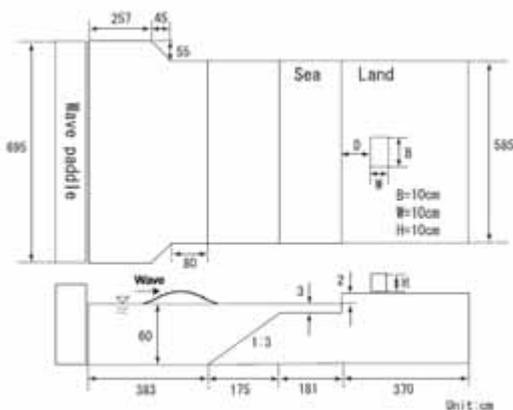


図-10 水理実験の概要(チャルレスら¹⁵⁾より)

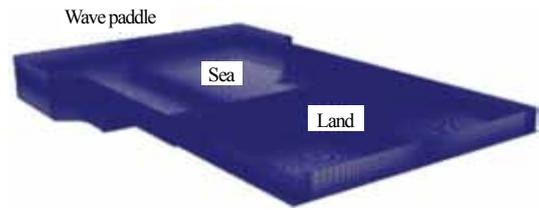


図-11 解析モデルの計算格子

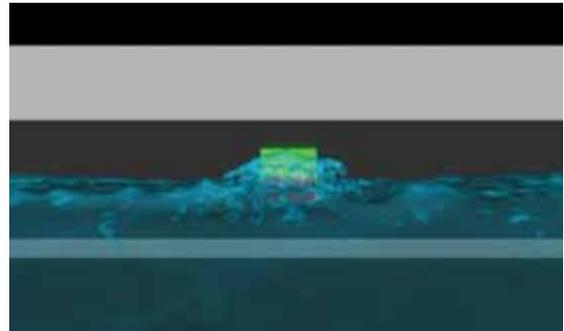


図-12 遡上津波が建物に衝突する瞬間

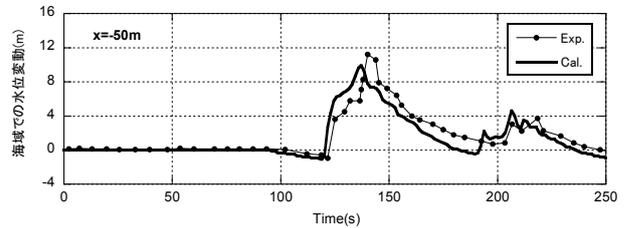
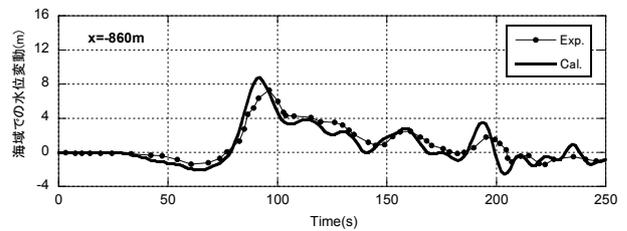


図-13 海域での水位変動の比較

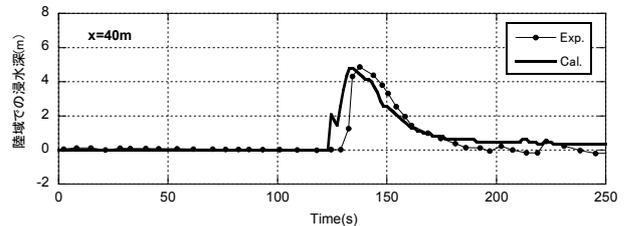


図-14 陸域での浸水深の比較

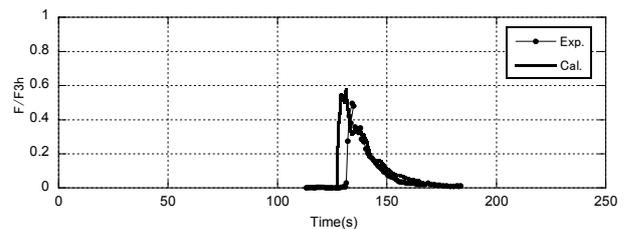


図-15 建物に作用する津波荷重(水平方向)

5.2 建物開口率による津波荷重の変化

ここでは表-2と図-16に示すように開口率の異なる3つの建物を対象とした解析を行い、それぞれのケースでの津波荷重を評価した。建物の高さは9m、幅奥行きは10m×10mである。図-16の建物モデル(いずれも高さ9m、平面寸法10m×10m)を用い、縮尺比1/400での解析を行った。なお、津波浸水深は建物が存在しない状態で、実スケール換算で10mとなるよう設定した(計算では2.5cmの浸水深)。図-17は各解析ケースから得られた津波荷重について、前項の模型実験の再現ケースと同様の無次元化を施した値を示す。この図から、開口率の大きな建物ほど水平荷重の最大値が小さくなること、また開口のある建物では水平荷重のピークの直後(ケースB)、もしくはほぼ同時(ケースC)に鉛直荷重の最大値が発生していることがわかる。なお、ケースAでは建物と地盤が密着しており、開口も無いため鉛直荷重は算出されない。図-18は津波が建物に衝突する瞬間の建物中央断面図であり、赤い部分は水、青い部分は空気を表している。ケースB、Cでは、津波衝突時に開口から侵入した海水が建物の天井に衝突しており、このため鉛直荷重のピークが生じるものと考えられる。このことから、津波で被災する建物では、浮力などの静的な力だけではなく、実際には開口部から侵入した海水が天井や床面に衝突することで動的な鉛直荷重が生じる可能性も考えられる。なお、ピーク後に下向きの力が作用しているが、これは主に建物内部に侵入した海水が床面に溜まることで生じる静的な荷重によるものと考えられる。

5.3 建物転倒判定手法との比較検証

図-19は数値解析より得られた津波荷重を元に算出した転倒モーメント M_r の時間変化を示す(実線)。図中には建物耐力 M_p (一点鎖線)、本研究で提案した算定式による値(衝突段階の式(7) $a=3$ および $a=1$ 、浸水段階の式(8)の各ケース)を併記した。

いずれのケースにおいても津波衝突直後($t=176$ 秒時点)に建物耐力 M_p を大きく上回る転倒モーメント M_r が作用していることが分かる。ケースA(開口率0%)については、転倒モーメントの最大値が評価式(7)で $a=3$ とした値とほぼ一致しているが、他のケース(B、C)では数値解析により得られた値が本研究で提案した評価式の値を上回っている。これは式(7)において、建物に生じる鉛直荷重を浮力等の静的な力のみと想定しているためである。先に示したように、数値解析では開口部からジェット状に突入した海水が天井面や床面に衝突することで動的な荷重が生じている。この動的な成分を含んだ鉛直荷重に起因するモーメントは、図-20

表-2 建物形状と解析条件

ケース	開口率(%)	高さ(m)	浸水深(m)
A	0	9	10
B	30	9	10
C	70	9	10

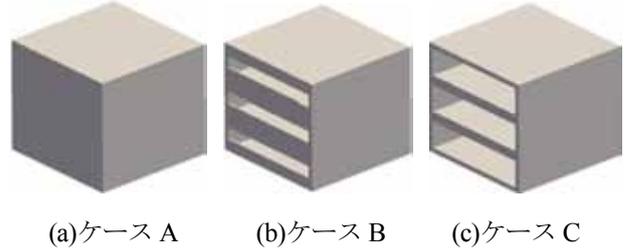


図-16 建物モデル

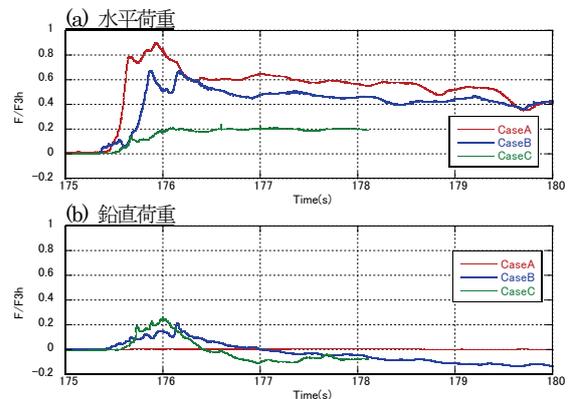


図-17 建物に作用する津波荷重の時刻歴

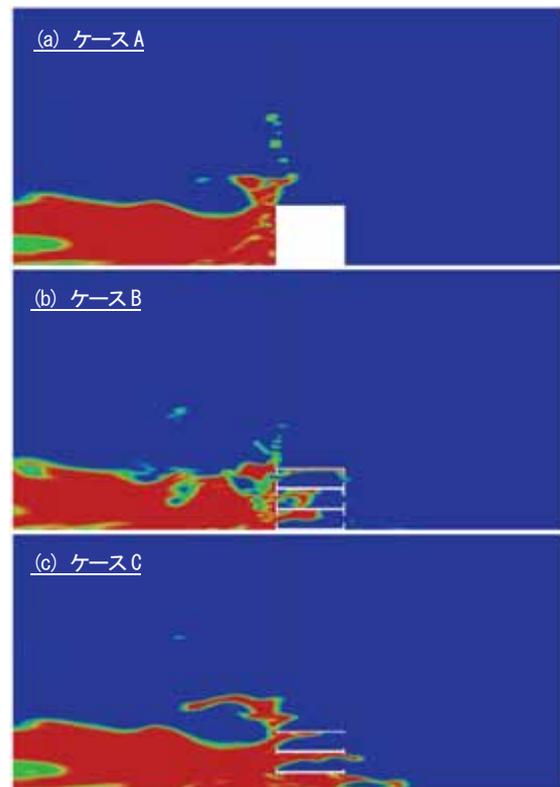


図-18 津波が建物に衝突する瞬間(176s)

に示すようにケース B、C でそれぞれ全モーメントの 30%、60%を占めており、浮力等の静的な成分と比較しても大きな値となっている。

津波浸水段階の転倒モーメントについては、いずれのケースでも時間経過とともに減少傾向を示し、初期段階に比べて小さな値となる。ケース A では、 $t=180s$ で式(8)により得られた値とほぼ等しくなることから、津波荷重による転倒モーメントを概ね評価出来ていると言える。一方、ケース B、C では評価式(式(8))の値に比べ、数値解析で得られた転倒モーメントが大きくなっている。これは浸水段階においても開口部から海水が流入し続け、天井面や床面への衝突による動的な力が継続的に作用するためであると考えられる。

ただし、上記の検討は建物に直接津波が衝突する場合を前提としたものである点に注意を要する。実際には建物周囲の構造物や地形の影響により、津波の衝突の状況や浸水段階に至る過程が異なってくるものと考えられる。また、建物内部への浸水によって発生する動的な荷重については、窓ガラスやガラリ、天井材等

の部材によって変化するものと考えられる。今後はこれらの課題に対する検討を進める予定である。

§ 6. おわりに

2011 年東北地方太平洋沖地震による建築物の津波被害の実態を整理・分析し、建物の転倒被害を対象とした評価手法を提案した。主要な結論を以下に示す。

- (1) 建物の被災度合いは概ね津波の浸水深と対応するが、構造条件や立地条件の違いによって同じ浸水深でも差異が生じる事例が確認された。
- (2) 建物の転倒被害に着目すると、階数が 4 階以下で壁面の開口部分が小さな建物に顕著に発生する傾向が見られ、浸水深以外の条件によっても被害の度合いが異なることがわかった。
- (3) 陸上での津波外力の算定については、衝突時の初期段階とその後の浸水状態を想定したそれぞれの評価式を用いることで、現地調査で確認された建物の転倒被災事例を概ね評価できることが示された。ただし、周囲の地形状況等の影響を考慮した対象建物周辺での正確な流速の評価には課題が残る。
- (4) 数値流体解析(CFD)による検討では、開口率が大きいほど水平荷重が小さくなり、その結果、転倒モーメントの値も小さくなる傾向が定量的に示された。
- (5) 一方、鉛直方向の荷重については、算定式で想定した浮力等の他、津波の衝突とほぼ同時に、海水の開口部からの流入によって動的な成分が発生することが確認された。この動的な鉛直荷重は転倒モーメントを増加させる要因となるため、今後より詳細な検討を行う必要がある。
- (6) 本研究では、段波状の津波が建物前面に直接衝突するケースを対象としたものである。今後の課題として、建物周囲の構造物や地形の影響、窓ガラスやガラリ、天井材などの影響を考慮することが挙げられる。

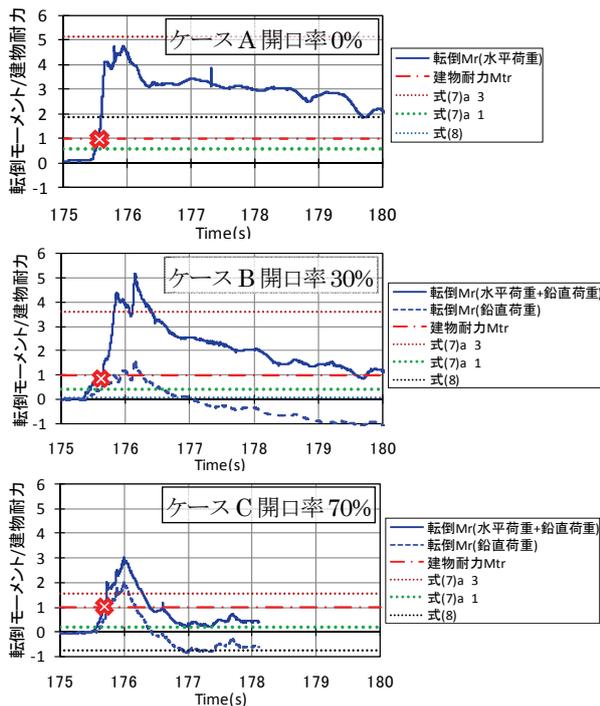


図-19 転倒モーメントと建物耐力比の時刻歴

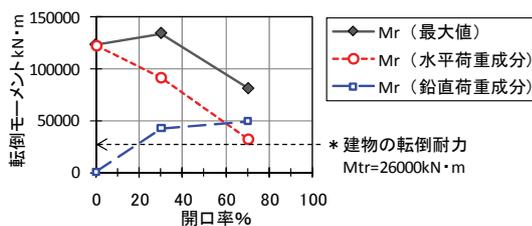


図-20 転倒モーメントの最大値における、水平荷重と鉛直荷重の寄与の割合

謝辞

防衛大学校の鳴原良典助教、大阪大学の有田守助教、パシフィックコンサルタンツの大久保陽介氏には宮古市の現地調査で、秋田大学の小林淳教授、西田哲也教授をはじめとする皆様には岩手県の現地調査で、それぞれ共同で調査に当たって頂きました。その後もデータの提供、整理等でご協力を頂くとともに、貴重なご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ : <http://www.coastal.jp/tjit>, 2011/11/15 閲覧.
- 2) 国土地理院, 浸水範囲概況図 : <http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku60003.html>, 2011/11/15 閲覧.
- 3) 内閣官房 : 第 12 海東日本大震災復興構想会議 (平成 23 年 6 月 25 日), <http://www.cas.go.jp/jp/fukkou/#12>, 2011/11/15 閲覧.
- 4) 消防庁災害対策本部, 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震東日本大震災) について (第 133 報), <http://www.fdma.go.jp/bn/higaihou/pdf/jishin/133.pdf>, 2011/11/15 閲覧.
- 5) 首藤伸夫 : 津波強度と被害, 津波工学研究報告 9, pp. 101-136, 1992/3.
- 6) 高橋重雄ら : 2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報, 港湾空港技術研究所資料, No 1231, pp. 157-168, 2011/4.
- 7) 国土交通省国土技術政策総合研究所, (独) 建築研究所 : 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震調査研究 (速報) (東日本大震災), pp.6-29-6-116, 2011/5.
- 8) 津波避難ビル等に係るガイドライン検討会 : 津波避難ビル等に係るガイドライン (巻末資料②構造的要件の基本的考え方), pp. 6-10, 2005.
- 9) 日本建築防災協会 : 震災建築物の被災度判定基準および復旧技術指針, pp.15-34, 2005/12.
- 10) 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, pp. 911-915, 2000.
- 11) 中村 友昭, 水谷 法美, 藤間 功司 : 遡上津波の変形と陸上構造物に作用する津波力に関する 3 次元数値シミュレーション, 日本流体力学会誌 29(2), pp.107-117.
- 12) 中埜良昭 : “津波と建築構造”, JABS・建築雑誌, No.1623/V-126, 2011.10.
- 13) Morison, J. R., O'Brien, M. P., Johnson, J. W. and Schaaf, S. A.: The force exerted by surface waves on piles, Petroleum Trans., 189, TP 2846, pp. 149-154. 1950.
- 14) 福井芳朗, 中村充, 白石英彦, 佐々木泰雄 : 津波の研究 一段波津波の防波堤に及ぼす影響一, 第 9 回海岸工学講演会講演集, pp.50-54, 1962.
- 15) C. W. Hirt and B. D. Nichols : Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, J. Comput. Phys., 39, pp.201-225, 1981.
- 16) チャルレス シマモラ, 鳴原良典, 藤間功司 : 建物群に作用する津波波力に関する水理実験, 海岸工学論文集, 第 54(2007), pp.831-835.