

論文 漂流物衝突を受けるピロティ形式 RC 造建築物の使用性能・安全性能評価に関する研究

三富 皓介*1・高橋 典之*2

要旨：津波避難施設建物にピロティ形式を採用する事例が多い。ピロティ形式の場合、ピロティ部を通り抜ける津波が運ぶ漂流物の衝突に対し、応答および各構造的な性能の評価が重要になる。本研究では、等価 1 質点系モデルにおける同一力積衝突スペクトルを用いた最大応答変位の評価を試み、層せん断余裕率を用いた衝突階最大応答変形推定値が時刻歴応答解析結果を概ね再現することを確認した。また、時刻歴応答解析を用いて衝突時の使用性能・安全性能を評価した結果、漂流物規模によらず避難階における什器の転倒は生じること、3,000 トンを超える船舶でなければ過大な水平変形に起因する崩壊は生じないことを確認した。

キーワード：ピロティ形式建築物, 津波避難施設, 漂流物衝突, 弾塑性応答, 構造的な性能評価

1. はじめに

2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震では地震後の大規模な津波が沿岸部の建築物に甚大な被害を与え、津波流体力のみならず漂流物の衝突による損傷・崩壊事例も散見された。この被害に鑑み、国土交通省により港湾地域の一時的な避難を目的として指定・設計される津波避難ビル等の構造的要件を示したガイドラインが定められ¹⁾、日本建築学会が示す建築物荷重指針では津波漂流物による衝突力評価式が提示された²⁾。国外の事例では、ASCE 7-16 “Chapter 6 Tsunami Loads and Effects”³⁾が、漂流物衝突力の評価式に加え、コンテナ等の比較的大規模な漂流物の衝突を考慮すべき建築物の立地条件範囲を提示している。しかし前述した現行の耐漂流物衝突設計法において、衝突に対する検討対象は主に部材の局所的な損傷であり、衝突時の建築物全体の挙動について考慮していない。特にピロティ形式建築物は大きな開口により建物が受ける流体力が低減されることから、各自治体が津波避難施設にピロティ形式を多く採用しているが、漂流物を含む津波の進行速度・方向が阻害されずにピロティ部分を通り抜けることから、津波が運ぶ漂流物衝突の観点からは不利な構造形式になる可能性がある。加えて、津波避難施設においては、避難先の機能として、漂流物衝突時の設備を含めた使用性能および構造安全性が担保されているかを検討する手法の確立が必要である。

そこで本研究では、津波漂流物衝突が想定されるピロティ形式の RC 造建築物を対象に、衝突に対する各構造的な性能の評価手法確立を目的とし、まず漂流物による衝突力積から建築物の最大応答変位を簡便に推定する手法の提案を行う。また本研究で提案する簡便法に加え、著者らの既往の研究⁴⁾で検討した多質点系時刻歴応答解析結果を用いて、漂流物衝突時のピロティ形式の津波避難施設

の使用性能および安全性能の評価及び考察を行う。

2. 漂流物衝突を受けるピロティ建築物の応答評価手法

武田ら⁵⁾は、落石や航空機等の飛来物による衝突を受ける RC 造建築物の衝撃応答について同一力積衝突スペクトルを用いて推定する手法を提案した。本章では、この推定手法を参考に、漂流物衝突による力積(運動量)に基づく建築物の最大応答変位の評価手法について検討し、多質点系時刻歴応答解析結果との比較を行う。

2.1 検討対象とするピロティ建築物のモデル化

实在津波避難施設である I 港湾合同庁舎を検討対象建物とする。1 階部分に階高 6.1m のピロティを有し、上階は階高 4m の 4 階建て RC 造建築物である。床面積は各階 21.4m×25.6m で単位床重量は 14kN/m²とする。

モデル化に先立ち、津波の進行方向について静的漸増荷重解析を行い、図-1 に示す層せん断力-層間変形関係を求めた。時刻歴応答解析で扱うモデルは、対象建物の床を剛体と仮定した 4 質点系モデルで図-2(a)のように置換した。各層の骨格曲線は、降伏変形角 1/200rad のトリリニア型とし、既往の被害調査⁶⁾において RC 造建物に対して仮定された降伏点剛性低下率 0.3 を参考に、ひ

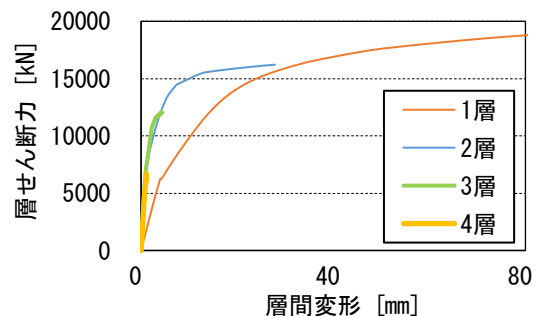
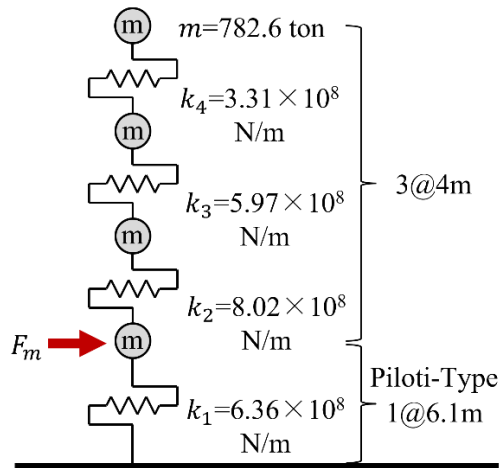


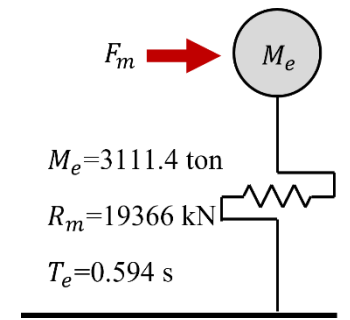
図-1 静的漸増荷重解析の結果

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 准教授・博士 (工学) (正会員)



(a) 4 質点系モデル



(b) 等価 1 質点系縮約モデル

図-2 検討対象建物のモデル化

び割れ強度 Q_c を降伏強度 Q_y の 1/3, ひび割れ変位 δ_c を降伏変位 δ_y の 1/10 と設定した。

また同一力積衝突応答スペクトルを用いた応答評価においては, 対象建物を等価一質点系モデルに縮約する必要があるが, 図-1 からピロティ形式である 1 層部分に変形が集中しており, 2 層以上では弾性範囲内で収まっていることを踏まえ, ピロティ形式対象建物の降伏時周期と等価一質点系モデルの固有周期 T_e が等しくなるよう縮約した。骨格曲線はピロティ層の荷重-変形関係をトリリニア型に置換し, 一質点系モデルの降伏耐力 R_m は, 安全限界とした 1/75rad.変形時の耐力と仮定してピロティ層の最大耐力と等しくなるように設定した。一質点系モデルの等価質量 M_e は, ピロティ層に塑性化が集中することを踏まえ, 降伏時の各質点の質量と変位の関係から算定した。図-2 (b) に一質点系モデルの概要を示す。

2.2 多質点系時刻歴応答解析

前節で示した多質点系モデルに対して, 後述する漂流物衝突力の時刻歴モデルを外力として入力し, 各層層間変形や床応答加速度を算出する。多質点系モデル各層の履歴特性は Takeda モデルとし, 減衰は瞬間剛性比例型で減衰定数は 0.02 とした。時刻歴応答解析における数値積分法は $\beta=1/6$ とした Newmark- β 法を用い, 積分時間刻みは 0.001 秒とした。外力作用時間は 10 秒間で衝突時刻 t_c

表-1 解析ケース

Case	漂流物種類	衝突階	質量 m [t]	衝突速度 v_x [m/s]
C-1	20ft コンテナ	2 階	24	12.6
C-2	40ft コンテナ	2 階	24	12.6
C-3	40ft コンテナ	2,3 階	30	12.6
C-4	40ft コンテナ	2,3 階	30	14.9
S-1	船舶	2 階	5200	4.0
S-2	船舶	2 階	5200	6.0

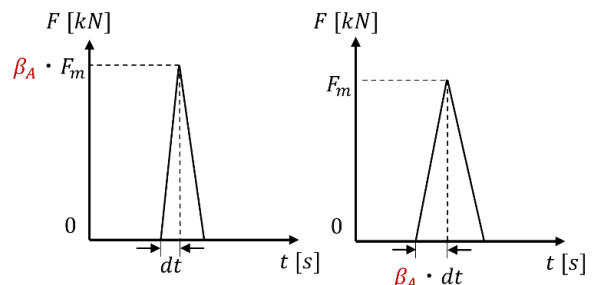


図-3 コンテナによる衝突力時刻歴モデル⁴⁾

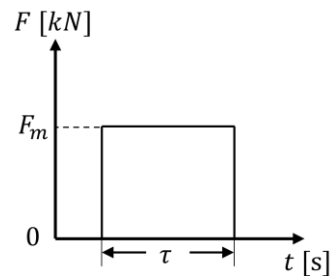


図-4 船舶による衝突力時刻歴モデル⁶⁾

は時刻 $t=0$ から 3.0 秒の時点とした。

表-1 に解析ケースを示す。漂流物は比較的中規模なコンテナ, 大規模な船舶を対象とし, 前者については文献 4) で流体解析結果を用いて提案した衝突力時刻歴モデル (図-3) を入力する。式(1)にコンテナによる漂流衝突力の算定式を示す。

$$F_m = 2\rho_w \eta_m B_c v_x^2 + \left(\frac{mv_x}{dt} \right) \quad (1)$$

ここに, ρ_w :水の密度, η_m :最大遡上水位, B_c :コンテナ幅, v_x :遡上流速, m :コンテナ質量, dt :衝突時間(荷重立ち上がりからピークまでの時間)である。図-3の衝突面積補正係数 β_A は, 壁面だけでなくピロティ柱のような細い部材に衝突する場合も考慮する係数で, 同一力積条件となるよう衝突力または衝突時間を補正したモデルについて検討する。後者については浅井ら⁷⁾が定義した船舶の衝突力モデル (図-4) を入力する。式(2)に船舶による衝突力, 式(3)に荷重継続時間 τ の算定式を示す。

$$F_m = 1.17T_G^{\frac{1}{3}} \left(0.82T_G^{\frac{1}{6}} + 1 \right)^3 g \quad (2)$$

$$\tau = \frac{mv_x}{F_m} \quad (3)$$

ここで、 T_G :船舶の総トン数、 v_x は衝突速度、 m :質量(本研究では $1.3T_G$ とする)を表す。コンテナの衝突については2階床高さに作用するケースに加え、3階床高さに衝突する場合についても検討する。船舶の衝突は浅井ら⁹⁾が実施した東北地方太平洋沖地震のデータ調査において陸域遡上が生じた船舶の質量を参考に解析ケースを設定した。なお、ピロティに作用する流体力は現行設計法¹⁾で無視できること、また本研究の目的が漂流物衝突時の構造応答評価であることを踏まえ、流体力自体の構造物への作用はここでは考慮しない。

2.3 同一力積衝突応答スペクトルを用いた応答評価

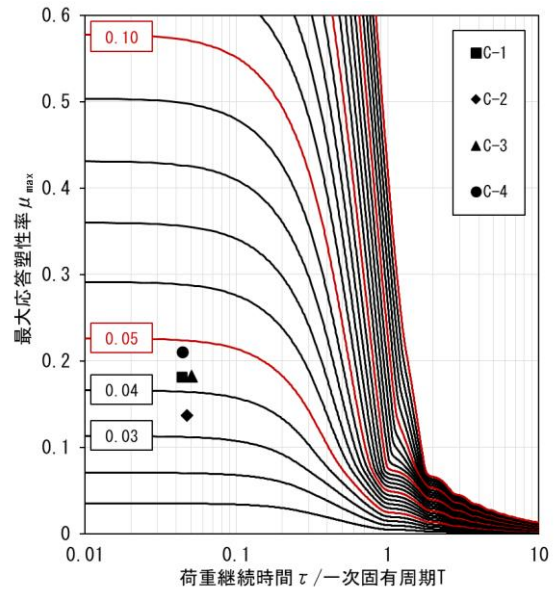
(1) 同一力積衝突応答スペクトルの作成

同一力積衝突応答スペクトルは任意の衝突力積 I に対して、荷重継続時間を変化させた際の1質点系モデルの最大応答変位をプロットしたものである。ここで応答変位は衝突物と被衝突建物双方の特性が関わることから、衝突力積 I を被衝突建物の最大耐力 R_m および等価固有周期 T_e で基準化した力積パラメータ $I/(R_m T_e)$ を用いた検討を行う必要があり、文献5)ではこの力積パラメータが等しい時、衝突応答変位が一意に定まることが確認された。

そこで、前述した等価一質点系モデルを対象に、1質点系時刻歴応答解析により同一力積衝突応答スペクトルを作成した。ここで、入力したコンテナの衝突力モデルは三角波形、船舶は矩形波形であり、波形による応答値の違いが生じることを考慮し、図-5のように各波形に対して同一力積衝突応答スペクトルを作成した。矩形波形のスペクトルについて、荷重継続時間が極端に短い範囲では計算結果が不安定となった。本研究で扱うケースでは問題ないが極端に荷重継続時間が短い衝突について検討する場合はこの点に注意が必要である。なお、漂流物の質量 m と衝突速度 V_x の積で求まる運動量がそのまま力積として作用するものとし、本研究で入力する力積 I は漂流物が衝突時に保有している運動量 mV_x とした。

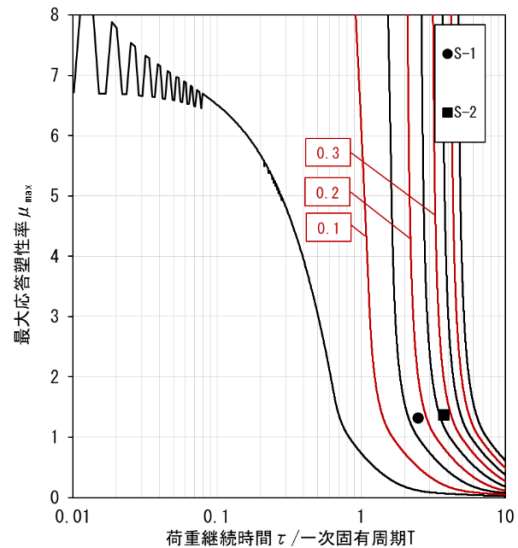
(2) 多質点系モデルへの還元手法の提案

図-5 から得られた1質点系最大応答塑性率 μ_{max} を多質点系モデルの各層変形に還元する。一般に、耐震設計工学において等価一質点系に縮約した応答を多質点系に還元し、各層最大応答変位を予測する手法としてモード重合法⁸⁾が用いられるが、地震と漂流物衝突とではモードの重ね合わせが異なる。検討対象建物が弱点階を有するピロティ形式建物で、漂流物衝突発生階の近傍での応答が増大することを考慮すると、モード重合法を漂流物衝突応答の還元法に適用するのは適当ではない。そこで籠橋・市之瀬ら⁹⁾の層せん断余裕率と崩壊エネルギーの関係から応答変位を予測する手法を参考に、漂流物衝突時の応答評価手法を提案する。特に本研究では、弱点階



(a) 三角波形の衝突力モデル

(力積パラメータ $I/R_m T$ は0.01刻み)



(b) 矩形波形の衝突力モデル

(力積パラメータ $I/R_m T$ は0.05刻み)

図-5 同一力積衝突応答スペクトル

であるピロティ層に衝突時変形が集中する挙動を層せん断余裕率の補正によって再現する手法を新たに提案する。

まず、検討対象建物各層の層せん断余裕率 f_i を式(4)により算出する。

$$f_i = \frac{Q_{si}}{Q_{ui}} - 1 \quad (4)$$

ここで、 Q_{si} は i 層が層崩壊する時の層せん断力、 Q_{ui} は崩壊機構を形成するときの i 層の層せん断力であり、 f_i は層崩壊のしにくさを表す係数である。また漂流物衝突階の変形が増大する挙動を再現するべく、衝突階における層せん断余裕率 f'_i は式(5)により算出する。

$$f'_i = f_i - (f_{i-1} + f_{i+1}) \quad (f'_i \geq 0) \quad (5)$$

次に検討対象建物の静的漸増荷重解析結果から、建物全体の層崩壊エネルギー E_{ps} （各層エネルギーの総和とある層がメカニズムに達するまでに入力されるエネルギーの差）を算出し、既往の研究による関係式⁹⁾から、各層層崩壊エネルギー E_{psi} を算出する。

$$E_{psi} = \frac{1 - 2(f_i - f_{min})}{N} \times E_{ps} \quad (6)$$

ここで、 N は階数であり、ピロティ形式のような弱点階を持つモデルにおいては、まず一般階の層崩壊エネルギー E_{psi} を式(6)から算出し、弱点階の E_{psi} は、1から他階の合計を差し引いた値とする。各階のエネルギー分配比 s_i は1階の層崩壊エネルギー E_{psi1} に対する当該層の層崩壊エネルギー E_{psi} の値として求める。

またピロティ層のような変形が集中する弱点階により大きなエネルギーを分配する必要がある。降伏せん断力係数分布の最適分布からの隔たり度合を表す係数 p_i を用いて¹⁰⁾、各層のエネルギー分配量 E_{si} を式(7)から求める。

$$E_{si} = \frac{s_i \cdot p_i^{-n}}{\sum s_i \cdot p_i^{-n}} \times E_{ps} \quad (7)$$

ここで、 n は損傷集中指数を表し、 n が大きいほど、 p_i への損傷配分の依存度が増すようになる。検討対象のピロティ建物が層崩壊しない条件を満足し、柱と梁の剛度の比から算定した値として、本論文では $n=5$ と定めた。最後に算出したエネルギー分配量を用いて、式(8)から各層の最大層間変位を推定する。

$$\delta_i = (\delta_y + \frac{E_{si}}{Q_{si}}) \cdot \mu_{max} \quad (\mu \leq 1.0) \quad (8)$$

$$\delta_i = \delta_y + \frac{E_{si}}{Q_{si}} \cdot (\mu_{max} - 1) \quad (\mu > 1.0)$$

ここで、 δ_y は各層降伏変位とする。

(3) 応答評価の比較・分析

図-6に多質点系時刻歴応答解析および同一力積衝撃スペクトルによる全時刻での各層最大応答変位の比較を示す。コンテナの時刻歴応答解析による応答評価は、上述した衝突面積補正係数 β_A を用いて衝突力（黒実線）および衝突時間（黒点線）をそれぞれ補正した2種類の結果を示しており、両者は同一力積の関係である。

コンテナの衝突による最大応答変形について、(a)のように衝突速度が小さいケースでは同一力積スペクトルによる応答が時刻歴応答解析結果を概ね再現し、(e)や(f)のように衝突速度が大きいケースでは過小に評価したが、衝突階の変形が増大し、最上階の変形が最も大きくなる変形挙動は全ケースにおいて概ね再現した。(b)と(c)の同一力積スペクトルによる応答を比較すると、コンテナの質量の増加による応答の変化度合いは、時刻歴応答解析による応答評価と同等であることが確認できる。また、衝突階が異なる場合においても、コンテナが衝突

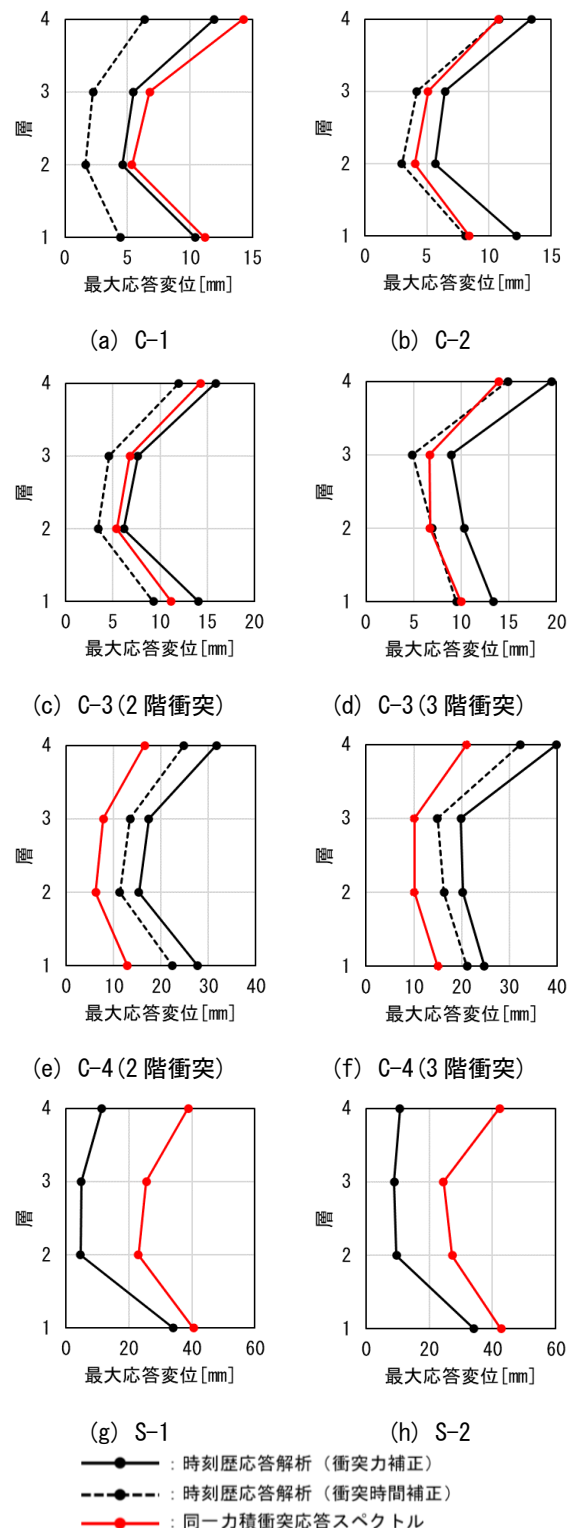


図-6 漂流物衝突時の各層最大応答変位の比較

時に持つ運動量から建築物全体の変形機構を推定することができた。このようにコンテナの衝突に対しては、層崩壊エネルギーと層せん断余裕率の関係を考慮した還元法により多質点系へ展開した変形応答が、時刻歴応答解析結果を概ね再現した。また、衝突が想定される漂流物の運動量から、衝突時の最大層間応答変形を算出し、許容層間変形を超えないことを確認するといった簡易的な

検討手法の適用可能性を確認した。一方で、(g)や(h)のような比較的大きな外力かつ荷重作用継続時間 τ が長い船舶の衝突に対しては、衝突階の変形応答は概ね再現可能であるものの、非衝突階である上部階の変形応答の評価精度は欠く結果となった。

なお次章以降の各構造性能評価手法の検討では、本章での検討結果および床応答加速度評価を用いることを踏まえ、多質点系時刻歴応答解析結果を用いることとする。

3. 漂流物衝突時の使用性能評価

検討対象建物は津波避難施設に指定されており、4階に自家発電設備、屋上階に避難スペースや備蓄倉庫が設けられている。そこで、漂流物衝突時の津波避難施設建物の使用性能（機能維持）を評価するために、時刻歴応答解析結果を用いて什器の転倒発生可能性の検討を行う。

検討方法は、耐震設計における地震時の什器や家具の転倒可能性について最大床応答加速度 A_f および最大床応答速度 V_f から算出される床応答の等価振動数 F_e に応じて求められる転倒限界加速度 A_o を算定し¹⁾、式(9)、式(10)および式(11)により評価する方法を用いる。

$$A_o = \frac{b}{h} \cdot g \quad (F_b > F_e) \quad (9)$$

$$A_o = \frac{F_e}{F_b} \cdot \frac{b}{h} \cdot g \quad (F_b \leq F_e)$$

$$F_e = \frac{A_f}{2\pi V_f} \quad (10)$$

$$F_b = \frac{11}{\sqrt{h}} \quad (11)$$

ここで、什器の奥行 $B=2b$ 、高さ $H=2h$ である。対象とする什器は事務所に設置されることが多い、本棚 ($B=30\text{cm}$, $H=180\text{cm}$)、コピー機 ($B=75\text{cm}$, $H=120\text{cm}$) とした。なお前章の時刻歴応答解析で最大応答変形が降伏域に達し2階床高さ衝突したケース C-4、S-2 を検討対象とした。

図-7 に漂流物衝突時における什器の転倒可能性を示す。各ケースにおいて、災害発生時に利用する建築設備が設置されている4階、避難階である屋上階の最大床応答加速度 A_f はコピー機の転倒限界加速度を下回ったが、本棚に関しては各ケースにおいて転倒限界可能加速度を上回る結果となった。また、漂流物規模の違いによって本棚の転倒発生可能性の有無が分かれなかったことから、避難階における什器の固定等の配慮は、衝突が想定される漂流物の規模によらず必要となることが示唆された。

4. 漂流物衝突時の安全性能評価

次に、漂流物衝突を受けるピロティ形式建築物の安全性能評価を行うため、コンテナや船舶の衝突に耐えうる建築物のベースシア係数の最低値を算出し、衝突に対す

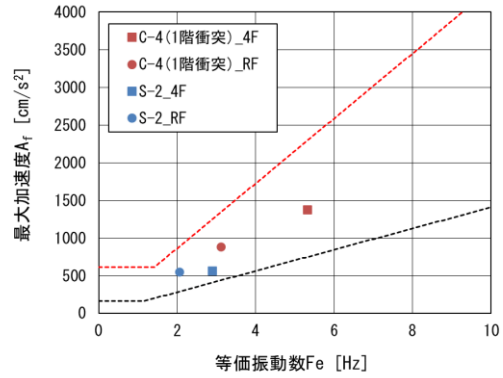


図-7 漂流物衝突時における什器の転倒発生可能性 (赤点線：コピー機 黒点線：本棚)

る余裕度について検討した。ここで、漂流物の衝突力に対するピロティ形式建築物の最大応答塑性率がある層で2.0になるとき即ち層間変形角が $1/100\text{rad}$ に達したときのベースシア係数を「必要ベースシア係数 C_B 」と定義し、多質点系時刻歴応答解析においてベースシア係数を0.01ずつ変化させながら最大応答塑性率を逐一算出した。コンテナの衝突については、20ft、40ftコンテナ（いずれも満載時）の衝突力モデル（図-3）を一層部分に作用させた。ここで用いる最大遡上水位 η_m は式(12)のフルード数の関係式から算出し、ここでフルード数 F_r は流体解析結果⁴⁾に合わせた値とした。

$$F_r = \frac{v_x}{\sqrt{gh_{max}}} \quad (12)$$

船舶の衝突については、図-4のモデルを2階床高さ、2階と3階の中間高さ、3階床高さに作用させるとし、衝突速度は 6m/s とした。ここで階間中間高さへの衝突力モデルの入力は、当該の各質点にそれぞれ長さ比を用いて分配されるようにした。

図-8 にコンテナの衝突に耐えうる建築物のベースシア係数を示す。ここで、検討対象建物のベースシア係数は0.63であり、比較のため図中では黒点線で示している。衝突速度の増加により、必要耐力も増加するが、20ft、40ftいずれにおいても検討対象建物のベースシア係数 C_B および耐震設計されたRC造建築物の C_B （およそ0.3から0.5の値である）を下回った。但し、コンテナの規模（主に漂流物の質量）によって必要ベースシア係数の値は変化し、質量が大きいほど必要ベースシア係数も大きくなる。

図-9 に船舶の衝突に耐えうる建築物のベースシア係数を示す。総トン数 T_g が大きいほど、必要となるベースシア係数が増加する傾向は、コンテナと同様であり、また衝突高さが高いほど、必要となる耐力が大きくなることが示された。各ケースにおいて、衝突階が先行して最大応答塑性率が2.0に達したが、これは3章で船舶の衝突時には衝突階の変形が増大することと同様のメカニズ

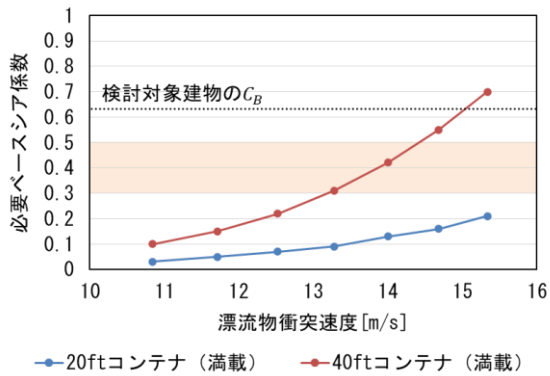


図-8 コンテナ衝突時における必要ベースシア係数

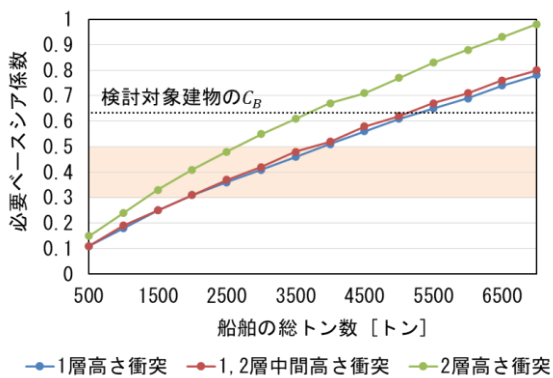


図-9 船舶衝突時における必要ベースシア係数

ムで生じた結果と言える。また、3,000 トンを超えるような非常に大規模な船舶の衝突でなければ、耐震設計がなされたピロティ形式 RC 造建築物は漂流物衝突に対して構造安全性を確保し、過大な水平変形に起因する崩壊は生じないことを確認された。

5. まとめ

漂流物衝突を受けるピロティ形式建築物の各層最大応答変位を 1 質点系縮約モデルにおける同一力積衝撃スペクトルから評価する手法について検討した。また、多質点系時刻歴応答解析を用いて、ピロティ形式建築物における漂流物衝突時の使用性能・安全性能の評価を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 漂流物による衝突力積から建築物の最大応答変位を簡便に推定する手法として、同一力積衝撃スペクトルを用いた評価手法を提案した。スペクトルから得た等価一質点系モデルの最大応答塑性率を、層せん断余裕率と崩壊エネルギーの関係を考慮した還元手法を用いて多質点系モデルへ展開したところ、コンテナの衝突に対しては、多質点系時刻歴応答解析による最大応答変位を概ね再現した。大規模な漂流物である船舶の衝突に対しては、衝突階の変形は概ね精度よく評価できたが、非衝突階の上部階については精度を欠く結果となった。

- 2) 多質点時刻歴応答解析により算出した各階の床応答加速度および床応答速度を用いて、什器等の転倒発生可能性について検討し、漂流物衝突時における建築物の使用性能の評価を行ったところ、比較的スレンダーな什器に関しては漂流物の規模によらず転倒が生じる恐れがあることを確認した。
- 3) 多質点系時刻歴応答解析により、漂流物の衝突に耐えるピロティ形式建築物のベースシア係数を算定し、漂流物衝突時の安全性能の評価を行った。その結果、コンテナの衝突に対しては検討対象建物を含め耐震設計がなされたピロティ形式 RC 造建築物で崩壊は生じにくいこと、船舶の衝突に対しては 3,000 トンを超える船舶でなければ過大な水平変形に起因する崩壊は生じないことを確認した。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：津波避難ビル等の構造上の要件の解説, 2012.2
- 2) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説, 2015.2
- 3) American Society of Civil Engineers, Structural Engineering Institute (ASCE/SEI): Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-16, 2017.6
- 4) 三富皓介, 高橋典之：ピロティ形式 RC 造構造物に作用するコンテナの漂流衝突力時刻歴モデルの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.19-24, 2022.7
- 5) 武田慈史, 河西良幸：同一力積衝撃応答スペクトルによる衝撃応答算定法の提案, 土木学会構造工学論文集, Vol.57 A, pp.1225-1238, 2011.3
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震被害調査報告, 国土技術政策総合研究所資料第 674 号, 2012.3
- 7) 浅井竜也, 松川和人, 崔琥, 中埜良昭：津波漂流船舶の衝突に対する建築物の安全性に関する研究—2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波襲来時の船舶挙動に基づく検討—, 日本建築学会構造系論文集, 第 87 巻, 第 795 号, pp.413-423, 2022.5
- 8) 柴田明德：最新耐震構造解析 第 3 版, 森北出版株式会社, 2014
- 9) 籠橋英伸, 市之瀬敏勝, 本上忠：エネルギー分布による RC 骨組みの応答変位予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.1225-1230, 2001.7
- 10) 秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1999
- 11) 日本建築学会：非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領, 2003.1