論文　多層 RC 造建築物の津波漂流物衝突に対する構造性能評価

大貫　かほり[*1]・高橋　典之[*2]

要旨：本研究では，沿岸部に建設される多層 RC 造建築物を対象として，船舶等の津波漂流物の衝突を想定した構造性能評価指標の作成を試みた。ここで，想定される漂流物をその重量に応じて「レベル 1～3」に設定し，各レベルの衝突発生時における建物の最大応答層間塑性率 μ_{maxi} と終局塑性率 μ_{ui} との大小関係により構造性能を決定した。衝突発生時の応答塑性率推定については，同一力積衝撃応答スペクトルを用いた 1 質点系応答推定と多質点系弾塑性時刻歴応答解析の 2 通りの手法により行った。また，既存の建築物を対象にケーススタディを行い，提案した評価基準にて耐漂流物衝突性能ランクを判定した。

キーワード：耐衝撃性能，津波漂流物衝突，弾塑性応答，RC 造建築物，構造性能評価

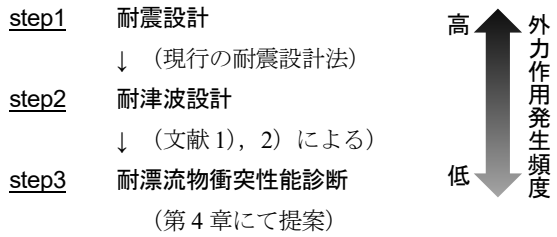
1. はじめに

海域で発生する地震はときに大規模な津波を誘発し，沿岸部広域に被害をもたらす。2011 年の東日本大震災がその一例であるが，東海・東南海，北海道などの他の地方においても地震に伴う津波被害が懸念されている。日本における建築物の耐津波設計の現状は，国土交通省の告示する津波避難ビルの構造設計指針 [1)]や，日本建築学会の制定する建築物荷重指針 [2)]により，考慮すべき諸設計荷重が規定されている。津波発生時には津波の波力が作用するだけでなく，港湾付近にある船舶やコンテナ，瓦礫，車両等が津波とともに遡上し，構造物に損傷を与える事例も報告されている。しかし，前述の指針中では，耐漂流物衝突設計について設計目標の提示と衝突荷重算定式が紹介されているものの，想定される漂流物衝突のレベルに応じて満たすべき定量的な構造性能を確保するための設計手法について，具体的に示されているわけではない。

本研究では，津波漂流物の衝突が想定される多層建築物の設計における構造性能評価について検討し，耐漂流物衝突性能設計手法を提案する。ここで，構造性能評価に要する衝突応答塑性率推定手法については，筆者らがこれまで検討を行った，多質点系時刻歴応答解析および同一力積衝撃応答スペクトルを用いる。

2. 耐漂流物衝突設計法の位置づけ

建築物に対する津波漂流物衝突の発生頻度は，地震，津波の発生頻度と比較して低い。そこで**図－1** に示すフローのように，まず現行の設計基準に則り耐震設計を行い（step1），次に耐津波設計要件に対する確認を行い（step2），最後に耐漂流物衝突性能の診断を行う（step3）ものとする。なお，耐漂流物衝突性能評価手法については，第 4 章にて詳述する。



図－1　諸外力に対する構造設計の流れ

3. 被衝突建築構造物の応答評価手法

漂流物衝突を受ける建築物の構造性能診断に先立ち，任意の規模の漂流物衝突を想定した弾塑性応答推定を行う。本章では以下の応答推定手法について説明する。

(1) 多質点系弾塑性時刻歴応答解析

(2) 同一力積衝撃応答スペクトル

各手法を用いた際の応答推定フローを**図－2** に示す。(1) 多質点系弾塑性時刻歴応答解析を用いた手法では各層の応答を精度良く推定可能で，解が一意に定まる。(2)同一力積衝撃応答スペクトルを用いた手法では応答の大小傾向が視覚化され，パラメトリックな検討や設計検討過程において有用であると考えられる。

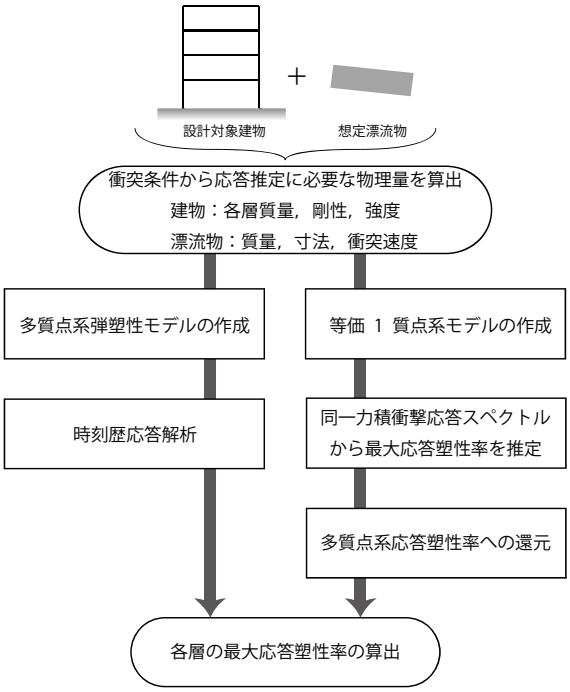
衝突荷重については，廉らの算定式(1)[3)]により導出される衝突荷重が衝突階に入力されることとした。

$$F_m = \left(\alpha\eta_m \rho B_d V\tau + W/g\right)V/\tau \qquad (1)$$

ここに，F_m：漂流物衝突力[kN]，$\alpha\eta_m$：漂流物背面の水塊高[m]（本検討条件下では漂流物高さと等しい），ρ：津波の密度[ton/m^3]（瓦礫等を考慮し 1.1 とした），B_d：漂流物幅[m]，τ：荷重継続時間[sec]，V：漂流速度[m/sec]，W：漂流物重量[kN]，g：重力加速度[m/sec^2]である。

なお，質点系における衝突は剛と仮定した床の高さに発生するものとし，壁，柱等部材の局所破壊については考慮しない。

*1 東北大学大学院　工学研究科　都市・建築学専攻　博士前期課程　(学生会員)
*2 東北大学大学院　工学研究科　准教授　博（工）　(正会員)



図－2　被衝突建築構造物の弾塑性応答推定フロー
（左：多質点系弾塑性時刻歴応答解析
右：同一力積衝撃応答スペクトル）

3.1 多質点系弾塑性時刻歴応答解析

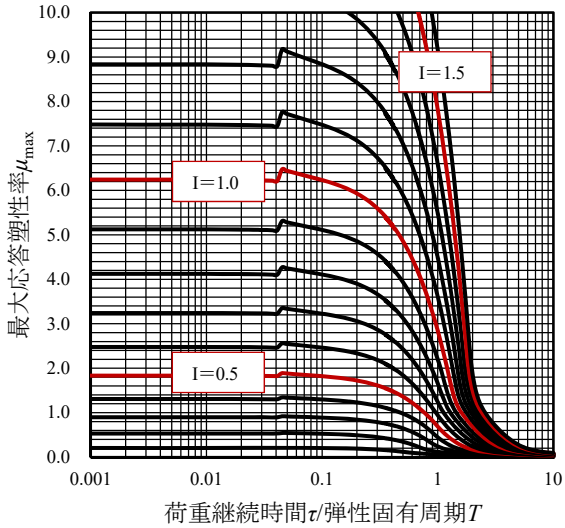
数値解析ソフト MATLAB[4]を用いて数値積分を行う。対象とする建築物の各層について質点質量，骨格曲線，減衰定数を設定し，式(1)により算定した衝突荷重および荷重作用継続時間を台形波として入力する。なお，本研究では骨格曲線は降伏変形角を 1/200rad.としたトリリニア型とし，ひび割れ強度 Q_c を降伏強度 Q_y の 1/3 倍，ひび割れ変位 δ_c を降伏変位 δ_y の 1/10 倍とした。履歴則は Takeda モデルを仮定し，減衰は瞬間剛性比例型で減衰定数を 0.02 とした。また，数値積分法は β=1/6 とした Newmark-β 法を用い，積分時間刻みは 0.001sec，外力時間刻みは 0.002sec とした。

3.2 同一力積衝撃応答スペクトル

同一力積衝撃応答スペクトルは任意の衝撃力積 $I(=F_m\tau)$について，荷重作用継続時間 τ を変化させた際の 1 質点系最大応答塑性率μ_{max}をプロットしたものである。ここで，建築物の弾性 1 次固有周期 T と荷重作用継続時間 τ の大小関係が構造物の応答に影響を及ぼすことから，衝突物による衝撃力積 I を建築物の最大耐力 R_m および弾性 1 次固有周期 T で除することで力積パラメータ $I/(R_mT)$として基準化し，時間軸（横軸）も同様に τ/T として基準化した値を用いてスペクトルを表示する。基準化を行うことで，異なる構造特性をもつ建築物や漂流物を対象とした場合でも同じスペクトルで応答推定を行うことが可能となる[5]。

同一力積衝撃応答スペクトルは，1 質点系弾塑性時刻歴応答解析の結果をもとに作成した。時刻歴応答解析における数値計算条件は前節に示したものと同様である。**表－1** の構造特性を持つ 1 質点系モデルをもとに作成した同一力積衝撃応答スペクトルを**図－3** に示す。ここで，荷重継続時間は 0.001sec から 1.001sec までを 0.004sec 刻み，1.1sec から 10sec までを 0.1sec 刻みで変化させた。また，力積パラメータ $I/(R_mT)$は 0.1 から 1.6 まで 0.1 刻みで設定した。

なお，荷重継続時間の短い範囲においては計算結果が不安定となり，本検討では 0.004sec きざみの値をとったため，τ/T=0.05 付近で不連続な歪みが生じている。今回の検討で取り扱う衝突荷重継続時間程度の値（τ/T=1.00）であれば問題は無いと考えられるが，τ/T が 0.10 を下回るような衝突条件について検討を行う場合にはより細かい時間刻みでスペクトルをプロットする必要がある。



図－3　同一力積衝撃応答スペクトル

3.3 多層建築物の 1 質点系モデルへの縮約・還元手法

同一力積衝撃応答スペクトルを用いるにあたり，検討対象とする多層 RC 造建築物を適切に 1 質点系モデルへ縮約し，得られた応答推定結果を適切に層ごとの応答へと還元する（**図－2**）。

表－1　同一力積衝撃応答スペクトル作成に用いた 1 層 RC 造建築物モデル

建物質量	建物降伏変位	建物耐力	弾性固有周期	降伏点割線剛性	ベースシア係数
M[ton]	δy[mm]	Rm[kN]	T[sec]	Scy[N/m]	Cds
1266	333	5000	1.00	1.50×10^7	0.40

(1) 1 質点系モデルへの縮約

同一力積衝撃応答スペクトルは力積をベースとした検討手法であることから，建築物に入力されるエネルギーが等価となる縮約方法を用いた。秋山らの方法 [6]を参考に，以下の 3 点を縮約条件と定めた。

1) 総質量 M が等しい
2) 1 次固有周期 T が等しい
3) 層せん断力係数 C_{ds} の最小値が等しい

(2) 1 質点系応答推定結果の還元

同一力積衝撃応答スペクトルにより得られた 1 質点系最大応答塑性率 $\mu_{\max}$ に対し，その塑性化の有無によって以下の還元法を選択する。

$\mu_{\max}$＜1 の場合：モード重合法 [7]

多層モデルの各層質量と剛性から決定される固有モード$\{{}_s u_i\}$および刺激係数 ${}_s\beta$ に基づき，次数ごとに最大応答層間塑性率 ${}_s\mu_{\max i}$ を算出する。さらに，全次数での最大応答層間塑性率を SRSS（2 乗和平方根）法により重ね合わせる。

まず，N 層建築物の第 i 層における s 次最大応答層間塑性率 ${}_s\mu_{\max i}$ は，式(2)のように表される。

$$ {}_s\mu_i = {}_s\beta\left({}_s u_i - {}_s u_{i-1}\right)\times\mu_{\max} \tag{2} $$

次に，式(3)により SRSS 法で全モードを重ね合わせる。

$$ \mu_{\max i} = \sqrt{\sum_{s=1}^{N} {}_s\mu_i^2} \tag{3} $$

$\mu_{\max}$≧1 の場合：塑性エネルギー法

塑性率が 1 を超えるような比較的規模の大きい衝突ケースでは，衝突発生階の近傍での応答が増大する。そこで，市之瀬らの提唱する，塑性エネルギーの分配に基づく推定法 [8]を参考に，衝突高さを考慮した算定式(4)を設定した。

$$ \mu_{\max i} = \frac{Q_{B1}}{Q_{yi}}\cdot\frac{\delta_Y}{\delta_{yi}}\cdot\left(\mu_{\max}-1\right)\cdot\frac{\left(f_{psi}'+1\right)^{-25}}{\sum_i\left(f_{psi}+1\right)^{-25}}+1 \quad \cdots(4) $$

c 層床高さに衝突するとき，

$$ f_{psi} = \begin{cases} f_c & (i=c) \\ f_i + f_c & (i\neq c) \end{cases} $$

$$ f_{psi}' = \begin{cases} f_c \quad /\alpha & (i=c) \\ f_i + \gamma f_c & (i\neq c) \end{cases} $$

ただし，

$$ f_i = Q_{yi}/Q_{Bi} - 1 $$

ここに，Q_{Bi} : 全体崩壊時の i 層せん断力[kN]，Q_{yi} : i 層降伏時せん断力[kN]，δ_Y : 全体崩壊時の等価 1 質点系代表変位[mm]，δ_{yi} : i 層降伏変位[mm]である。また，係数 α，γ は衝突条件に応じて設定する係数で，本論文ではいずれも 1.0 を用いた。

4. 耐漂流物衝突性能評価手法

本章では，耐震・耐津波設計基準を満たす建築物について（図－1：step1，step2），衝突規模（漂流物質量，衝突速度）ごとに耐漂流物衝突性能ランクを設定する（step3）。

4.1 漂流物質量の目安

大津波来襲時に沿岸地域で想定される漂流物としては，船舶，コンテナ，車両，材木，周辺建築物より流出した瓦礫等がある。中でも船舶は，小型船舶（質量およそ 50ton 未満）から貨物船等大型船舶（満載での質量およそ 5 万～20 万 ton）まで，港湾の用途別に様々な規模のものが想定される。過去の被害事例として，文献 9)によれば，岩手県釜石市の釜石港では推定質量およそ 5000ton の貨物船が湾岸の建築物に衝突し，崩壊に至らしめている。

また浅井らは，東日本大震災における船舶の漂流挙動調査から，総トン数 500ton 未満の船舶の陸域遡上生起頻度が高くなることを示している [10]。なお，船舶の規模を表す際に一般的に用いられる「総トン数 T_G[ton]」は船舶の容積規模を示す単位であり，船舶そのものの質量とは対応していない。本研究では，漂流物の種別に関わらず式(1)を用いて漂流物質量から衝突荷重を算定すること，また，船舶の総トン数は文献 10)，11)より概ねの実質量（排水量）に換算が可能であることから，質量 m[ton]を用いて検討を進めることとする。

東日本大震災での津波来襲時に陸域遡上が確認された船舶としては，漁船の漂流が多く確認された。ここで，一般的な漁船の質量は大型のものでも概ね 500ton 未満（総トン数にして 200ton 程度）であること，また，このクラスの津波であれば，漂流物の発生条件とされる浸水深が船舶喫水を上回る可能性が高いことから，漂流物質量 500ton を耐漂流物衝突性能ランクの閾値と定める。

4.2 衝突速度の目安

東日本大震災で映像により観測された津波流速 U はおよそ 3～10m/s であり，漂流物の漂流・衝突速度 V も津波流速 U と概ね等しいとされている。文献 11)によれば，U は式(5)から推定することができる。

$$ U = F_r\sqrt{gh} \tag{5} $$

ここに，F_r : フルード数[-]，g : 重力加速度[m/sec^2]，h : 浸水深[m]である。フルード数 F_r は流れの勢いを表す数

で，一般的な地形における水流では 1 以下の値をとり，F_r=0.9 と設定しても良いとされている。

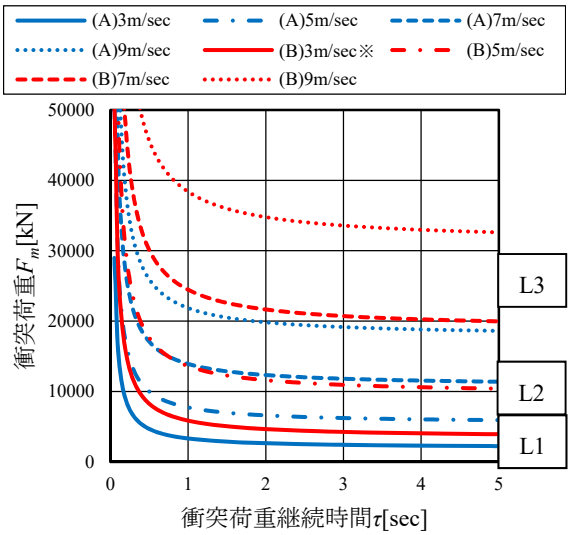
ここで，喫水 3m 程度の漁船が陸域に遡上し，階高 4m の建築構造物に衝突することを想定する。式(5)より，フルード数 0.9，重力加速度 9.8m/sec^2，浸水深 4m の場合の津波流速は 5.6m/sec である。前述のとおり，漁船程度の規模の船舶が陸域遡上する可能性は高く，また，筆者らの過去の研究では，衝突速度 6m/sec 以上で，衝突を受ける建築物が塑性化する危険性も明らかになっている [5]。これらを踏まえ，本研究では衝突速度 6m/sec をひとつの閾値とする。

4.3 耐漂流物衝突性能ランクの設定

図－4 は，質量 500ton 未満および以上の 2 つの想定漂流物（**表－2**）について，式(1)により衝突荷重を算出したものである。衝突速度は 3,5,7,9m/sec の 4 通り仮定した。

表－2　想定漂流物諸元

漂流物	幅[m]	高さ[m]	奥行[m]	質量[ton]
A	50	4	9	450
B	70	5	12	800



図－4　漂流物質量・速度による衝突荷重比較

前節までの衝突規模の分析に従い，漂流物 A が 6m/sec 未満で衝突した場合，衝突荷重継続時間 τ が 0.50sec 以上の範囲では，衝突荷重 F_m は 10000kN 以下に留まっている。ここで，「衝突速度 V<6m/sec」の衝突条件を「衝突レベル 1（L1）」と定義する。次に，漂流物 B が 6m/sec 以上で衝突する場合，τ<5sec のほぼ全範囲で，F_m が 20000kN 以上となっている。また，漂流物 A が 9m/sec で衝突した場合にも，これに近い傾向が見られる。したがって，「漂流物質量 m<500ton かつ衝突速度 V≧9m/sec，もしくは m≧500ton かつ V≧6m/sec」の衝突条件を「衝突レベル 3（L3）」と定義する。さらに上記の以外の条件を，「衝突レベル 2（L2）」とする。ただし，**図－4** に赤実線で示した「漂流物 B，V=3m/sec」の衝突条件（定義上は L2，衝突荷重の規模では L1）は，式(5)から導出される浸水深では漂流が発生する可能性は低いと考えられるため，今回は考慮しない。各衝突レベルの定義を**表－3** に示す。

以上の衝突レベルを参考に，沿岸部に建設される RC 造建築物の耐漂流物衝突性能ランク（A～C）を，**表－4** に設定する。ここで，第 3 章に示した応答推定結果をもとに，性能ランクを以下のように決定する。

・最大応答層間塑性率 μ_{maxi}<終局層間塑性率 μ_{ui}→○

・最大応答層間塑性率 μ_{maxi}≧終局層間塑性率 μ_{ui}→×

表－3　衝突レベル L1～L3 の定義

	m<500ton	m≧500ton
V<6m/sec	L1	L2
6m/sec≦V<9m/sec	L2	L3
9m/sec≦V	L3	L3

表－4　耐漂流物衝突性能マトリクス

衝突レベル	ランク A	ランク B	ランク C
L1	○	○	○
L2	○	○	×
L3	○	×	×

5. ケーススタディ

評価方法の計算例の一つとして，第 3，4 章にて提案した手法を用い，既存の中層 RC 造建築物を挙げ，耐漂流物衝突性能の評価を行う。なお，検討対象は**図－1** における耐震・耐津波設計要件を満たしているものとし，ここでは地震動や津波波力等の外力については考慮しない。

5.1 検討対象建築物

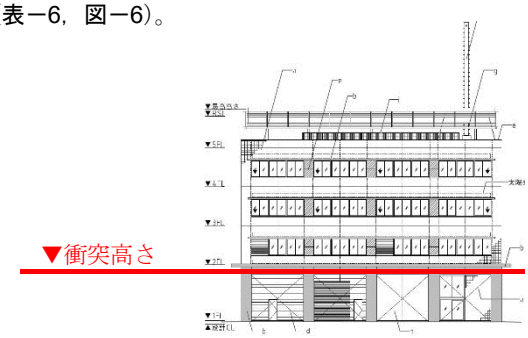
2014 年に竣工し津波避難ビルに指定されている，宮城県石巻市の I 庁舎をモデルとして検討を行う（**図－5**）。本建物は 4 階建て RC 造ラーメン構造物で，階高は 1 階（ピロティ）部分のみ 6.1m，2～4 階は 4m である。床面積は各階 21.4m×25.6m であり，単位床重量は 14kN/m^2 と仮定する。柱断面は 1 階のみ 1000mm 角，2 階より上では 800mm 角，大梁断面は 450mm×800mm，上部構造のコンクリート強度は F_c=27N/mm^2 である。時刻歴応答解析および同一力積衝撃応答スペクトルによる検討に先立ち，当該建物における津波の遡上方向（＝漂流物衝突発生方向と仮定）について静的漸増載荷解析を行い，各層降伏時の強度および剛性を算出する。ここで，各層の降伏変形角を 1/200rad.，終局変形角を 1/50rad.と設定し，このとき終局塑性率 μ_u は 4 となる。

5.2 衝突条件設定と各層最大応答塑性率

発生しうる漂流物として大型漁船を想定し，その規模を「幅 51m，高さ 3.8m，奥行 8.9m，質量 470ton」とする。また，衝突高さはピロティ上端部である 2 階床高さ（6.1m）とする。衝突速度は 3m/sec（L1），7m/sec（L2），9m/sec（L3）の 3 通りについて検討する。これまでの検討[5]により，衝突荷重継続時間 τ＝建物弾性 1 次固有周期 T の付近で応答が増大する傾向が明らかになっていることから，本検討では，いずれの条件についても $\tau=T$（＝0.347sec）とした。

3.1 節の多質点系弾塑性時刻歴応答解析を行うにあたっては，建物の床を剛体と仮定して 4 質点系モデルに置換し，式(1)で算出される漂流物衝突荷重 F_m を入力した。ここで，同建物の東日本大震災時の周辺浸水深が 4.1m であったことを踏まえ，漂流物は 2 階床高さ，すなわち 1 層目の質点位置に衝突するものと仮定した。

3.2 節の同一力積衝撃応答スペクトルによる応答推定を行うにあたっては，3.3 節(1)の縮約手法より，**表－5** の等価 1 質点系モデルを設定した。ここでも式(1)を用いて漂流物衝突荷重 F_m および衝撃力積 I を算出し，同一力積衝撃応答スペクトルより最大応答塑性率 μ_{max} を導出した（**表－6**，**図－6**）。



図－5　検討対象建物南側（衝突発生面）立面図

表－5　縮約後の建築物諸元

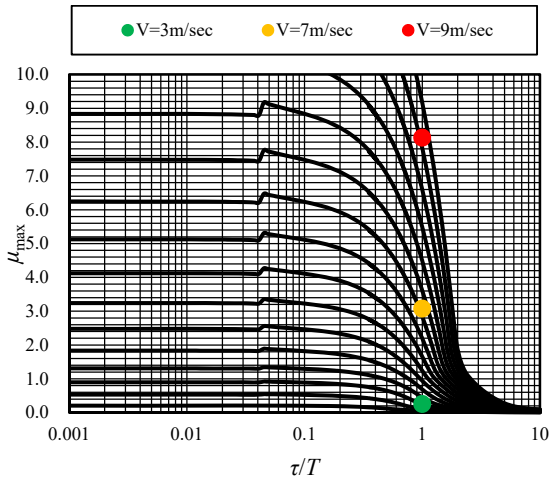
M[ton]	δ_y[mm]	R_m[kN]	T[sec]	C_{ds}
3131	35.78	19330	0.347	0.63

表－6　弾塑性応答推定検討ケース

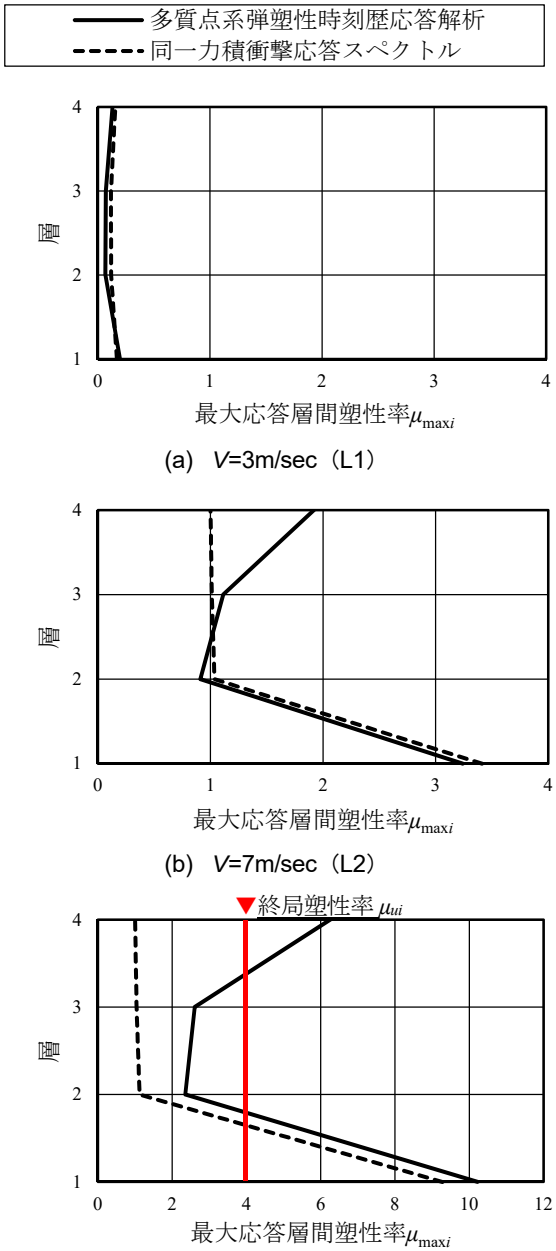
V[m/sec]	F_m[kN]	I[kNsec]	$I/(R_mT)$	μ_{max}
3	5982	2076	0.31	0.26
7	19927	6915	1.03	3.08
9	29458	10222	1.52	8.14

次に，3.3 節(2)の還元手法を用いて，各衝突条件での最大応答層間塑性率 μ_{maxi} を算出する。V=3m/sec のケースではモード重合法，それ以外のケースでは塑性エネルギー法を用いた。

以上より得られた時刻歴応答解析および同一力積衝撃応答スペクトルによる各 μ_{maxi} を，**図－7** に併記する。



図－6　同一力積衝撃応答スペクトル上での応答



(a)　V=3m/sec（L1）

(b)　V=7m/sec（L2）

(c)　V=9m/sec（L3）

図－7　最大応答層間塑性率

1 質点系にて検討を行った同一力積衝撃応答スペクトルによる結果は，多質点系時刻歴応答解析結果と比較して，衝突速度が速く，建物が塑性化するケースで上階の応答を過小評価したものの，最大応答発生階の応答推定結果は 0.9～1.1 倍の誤差に留まった。

5.3 検討対象建築物の耐漂流物衝突性能

今回の検討では，いずれの応答推定手法を用いた場合でも，最大応答発生階において，衝突速度 V=3m/sec（L1）および 7m/sec（L2）のケースで $\mu_{maxi}<\mu_{ui}$，V=9m/sec（L3）のケースで $\mu_{maxi}\geqq\mu_{ui}$ という結果が得られた。したがって，第 4 章における定義より，本建築物の耐漂流物衝突性能は「ランク B」と決まる。

検討対象とした建物は海岸線からおよそ 120m の距離に位置し，前述のとおり東日本大震災での周辺浸水深は 4.1m であった。式(5)により推定される津波流速はフルード数 F_r=0.9 と仮定した場合 V=5.7m/sec であり，L1～L2 クラスの漂流物衝突が懸念される。今回の検討結果ではこれらの衝突条件に「耐えうる」という結果が得られたが，より規模が大きく，漂流速度が速い漂流物の来襲が想定される場合，特に衝突階および最上階で変形が危険域に達することが予想され，衝突速度を低減させるための衝突防止柵の設置などの対策が必要と考えられる。

6. まとめ

本論文では，沿岸部に建設される多層 RC 造建築物を対象に，大津波来襲時に発生が予想される漂流物の衝突に対する構造性能評価手法を検討した。検討過程を以下に示す。

1) 漂流物衝突は，海域での地震，および陸域に遡上する津波が生起した後に発生することから，耐漂流物衝突性能は耐震・耐津波設計要件を満たした建築物について検討を行うものとした。
2) 耐漂流物衝突性能の診断にあたっては，全層の応答層間塑性率が終局塑性率を下回ることを条件とし，多層建築物の最大応答層間塑性率を，多質点系時刻歴応答解析および同一力積衝撃応答スペクトルを用いた 2 通りの推定手法を提案した。同一力積衝撃応答スペクトルを用いるにあたっては，等価 1 質点系モデルへの縮約・還元手法を併せて示した。衝突荷重については，水谷らの提案する衝突力積評価式から算定した。
3) 過去の被害事例および既往の研究を参考に，漂流物質量と衝突速度により「衝突レベル L1～L3」を定義した。この衝突条件を基準に，各層の最大応答塑性率と終局塑性率の大小関係から建築物の耐漂流物衝突性能を「ランク A～C」で判定することとした。
4) 既存の 4 層 RC 造建築物を例として，2)，3)の手順で性能評価を行った。500ton 未満の漂流物を想定し，衝突レベル L1～L3 にそれぞれ則る衝突速度を 3 通り設定した。最大応答層間塑性率の推定過程において，多質点系時刻歴応答解析と同一力積衝撃応答スペクトルを用いた手法との結果には，衝突高さよりも上の階の応答に誤差が生じたものの，最大応答発生階の塑性率はいずれも近い値を示した。ここで，「衝突レベル L3」に該当する衝突速度で 1，4 層の最大応答塑性率が終局塑性率を上回ったことから，検討対象とした建築物の耐漂流物衝突性能は「ランク B」と判断された。これは，東日本大震災クラスの津波発生時でも，大型漁船程度の規模を有する漂流物衝突には耐えうるが，衝突条件（漂流物規模，衝突速度）が厳しくなると層崩壊に至る危険性があることを示している。

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) 一般社団法人 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2015.2
3) 廉慶善ほか：陸上遡上津波によるコンテナの漂流挙動と漂流衝突力に関する研究，海岸工学論文集 第 54 巻，土木学会，pp.851-855，2007
4) MathWorks：MATLAB R2007b
5) 大貫かほり，高橋典之：津波漂流物衝突を受ける RC 造建築物の同一力積衝撃応答スペクトルモデルを用いた弾塑性応答推定，コンクリート工学年次論文集 Vol.39，No.2，pp.31-36，2017.7
6) 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，1999
7) 柴田明徳：最新耐震構造解析 第 3 版，森北出版株式会社，2014
8) 籠橋英仲，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
9) 独立行政法人 港湾空港技術研究所：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.1231，2011.4
10) 浅井竜也：津波漂流船舶の衝突時における衝撃外力が建築物の応答に与える影響評価に関する研究，東京大学学位論文，2017
11) 一般財団法人 沿岸技術研究センター，一般社団法人 寒地港湾技術研究センター：津波漂流物対策施設設計ガイドライン，2014.3