# 論文 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

大貫 かほり\*1・高橋 典之\*2

要旨:本研究では、津波漂流物の衝突を受ける1 質点系構造物の弾塑性応答を、衝突側・被衝突側の特性を パラメータとした同一力積衝撃応答スペクトルとして表すことを試みた。縦軸に応答塑性率μ、横軸に荷重継 続時間τを建物初期固有周期Tで基準化した値をとった場合同一力積衝撃応答スペクトルが一つに定まるこ とが確認された。また、多質点系弾塑性時刻歴解析による応答推定を行い、同一力積衝撃応答スペクトルに よる応答推定結果と比較した結果、力積が大きくなるほど衝突階近傍での応答差が大きく、縮約系の応答還 元手法をさらに検討する必要があることが示唆された。

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, 応答スペクトル

# 1. はじめに

2011年に発生した東日本大震災においては強震に加 え、大規模な津波が甚大な被害をもたらした。ここで、 建築構造物の被害については津波流体力のみならず船 やコンテナ、瓦礫、車両等の漂流物の衝突による損傷 事例も散見されている。これらの被害を受け、2012年 には国土交通省により津波避難ビルの構造設計指針<sup>1)</sup> が示され、構造設計において考慮すべき津波波圧や浮 力の算定式等が規定されている。ただし、漂流物衝突 に対しては目標性能が示されているのみであり、発生 しうる漂流物衝突力に関する定量的な指標や設計用荷 重は示されていない。また、漂流物衝突力は地震力や 津波波力と比較して非常に短い時間に水平力が入力さ れるため、衝撃を受ける構造物の耐力評価のみならず、 弾塑性域での応答や、建物固有周期が及ぼす影響につ いても慎重な検討が必要である。

本研究では,落石や航空機等飛来物の衝突を受ける 鉄筋コンクリート構造物の衝撃応答について 2011 年 に武田らが提案している同一力積衝撃応答スペクトル を用いた応答推定法<sup>30</sup>を援用し,津波漂流物衝突を受 ける建築物の弾塑性応答推定を行う。また,これを多 質点系弾塑性時刻歴応答解析による応答と照らし合わ せることで,津波漂流物を対象とした衝撃応答スペク トルを用いた建築物の応答推定法の問題点を検討する。

# 2. 漂流物衝突荷重と荷重継続時間の関係

衝突荷重の評価においてはその大きさだけでなく荷 重継続時間も応答に影響を及ぼすとされており,文献 3),4)では構造物に入力される荷重を力積として評価す る式が提案されている。荷重継続時間は漂流物の剛性 により異なった値をとり<sup>5</sup>,想定される漂流物につい

\*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)

て逐一正しく設定する必要がある。

荷重継続時間の変化が建築物の応答に及ぼす影響を 確認すべく、4章にて後述する1階をピロティとする4 階建て RC 造建築物について漂流物衝突を想定した多 質点系弾塑性時刻歴応答解析を行った。衝突力の設定 においては式(1)に示す水谷らの算定式<sup>3</sup>を用いた。

$$F_m \tau = (\alpha \eta_m \rho B_d V \tau + W/g) V \tag{1}$$

ここに、 $F_m$ : 漂流物衝突力[kN],  $\tau$ : 荷重継続時間[sec],  $a\eta_m$ : 漂流物背面の水塊高[m],  $\rho$ : 津波の単位当たりの 質量 $[ton/m^3]$ (瓦礫等を含むため本研究では 1.1 とする),  $B_d$ : 漂流物幅[m], W: 漂流物重量[kN], g: 重力加速度  $[m/sec^2]$ , V: 漂流速度[m/sec]である。力積が一定の矩形 波として与えられる衝突荷重の作用継続時間を 0.001sec から 2.0sec まで変化させ,建物 2 階への衝突 を想定した応答解析を行った。漂流物は長さ 48m,高 さ 3.8m,幅 8.6m,質量 400ton の船舶が船腹から建物 に衝突するものと想定した。荷重継続時間と応答変位 との関係を図-1 に示す。応答変位は  $\tau$ =0.025sec,次い で 0.346sec の付近にピークが確認でき,荷重継続時間  $\tau$ の増加に伴って減少する傾向が見られる。ここで,  $\tau$ =0.346sec は建築物の 1 次固有周期(T=0.347sec)と概



ね一致している。これより,力積波形を用いる漂流物 衝突応答の推定は,荷重継続時間と建物固有周期の大 小関係について考慮する必要があることが示唆される。

本研究では同一力積衝撃応答スペクトル<sup>2</sup>による応 答推定法の津波漂流物衝突応答推定への適用を試みる。 なお、本検討においては衝突の影響のみを明確にする ため、建物浸水部分に作用する津波波力や衝突後に滞 留する漂流物背面に作用するせき止め力、また津波襲 来以前に発生し得る地震力の影響については考慮して いない。

# 3.漂流物衝突時同一力積衝撃応答スペクトルモデル

同一力積衝撃応答スペクトルは任意の衝撃力積 I に ついて、荷重継続時間を変化させた際の1 質点系最大 応答変位をプロットしたものである。ここで、構造物 の応答には衝突物・被衝突体双方の特性が関わってく ることから、衝突物側の物理量である衝撃力積 I(=Fr) を被衝突体側の最大耐力 Rm および弾性固有周期 T で 除することで力積パラメータ I/(RmT)として基準化して いる。なお、本手法は1 質点系に縮約可能な構造物を 条件としており、貫通・パンチング破壊等により落階 に至らずとも脆性的に層の水平抵抗を失うような応答 評価への適用は別途考慮が必要となる。

# 3.1 同一力積衝撃応答スペクトルの作成

同一力積衝撃応答スペクトルは、1 質点系弾塑性時 刻歴応答解析により作成した。ここで建築物(1 質点 系)の骨格曲線は文献 2)にならいバイリニア型とし、 降伏変形角を 1/200rad.とした。履歴則は Clough 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。数値積分法は $\beta$ =1/6 とした Newmark- $\beta$ 法を用い、 積分時間刻みは 0.001sec とした。図-2 に同一力積衝 撃応答スペクトル作成における被衝突建築物の縮約系 モデル概要および復元力モデルを示す。

衝撃荷重は図-3 に示す矩形波で与えられるものと し、衝撃力積を一定とするため荷重継続時間の増加に 応じてその値を減少させる。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。





なお,線形加速度法を用いていることから計算上入 力される波形は,荷重継続時間 0.001sec で三角波,そ れ以上で台形波となるが,いずれの場合も力積として は等価である。

# 3.2 津波漂流物衝突時の同一力積衝撃応答スペクトル に見られる各種傾向

本研究では、津波漂流物による同一力積衝撃応答ス ペクトルを、荷重継続時間  $\tau$  あるいは荷重継続時間  $\tau$  を 建物初期固有周期で基準化した  $\tau/T$  における、建築物 の最大応答  $\delta_{max}$  あるいは塑性率  $\mu$  をスペクトル表示し たものとする。津波漂流物の衝突で表されるスペクト ルの傾向を把握すべく、漂流物および建築物の特性を 3 ケース (Case a~Case c) 仮定し、各々のスペクトル の形状について検討を行う。漂流物および建築物の特 性 (Case a~c) 概要を表-1 および図-4 に示す。Case a~c は全て力積パラメータ  $I/(R_mT)$ の値が 1.0 となるよ うに各項目を設定し、衝撃力積 *I*、建築物最大耐力  $R_m$ および 1 次固有周期 *T* の積がそれぞれ異なる。

図-5(a)は縦軸(線形軸)に最大応答変位 $\delta_{max}$ ,対横軸(対数軸)に荷重継続時間  $\tau$ をとっている。いずれのケースにおいても、 $\tau \leq 0.05$ sec では最大応答変位 $\delta_{max}$ が其々ある値に収束する傾向を示し、このとき $\delta_{max}$ は *I*および $R_mT$ がともに大きいケースほど小さい値に収束した。また、0.05sec  $\leq \tau \leq 2$ sec の範囲では荷重継続時間の増加に伴い応答が低減し、 $\tau \geq 2$ sec では応答が0に収束していく様子が見られる。

次に、図ー5(b)では縦軸(線形軸)に塑性率 $\mu(=\delta_{max}/\delta_y)$ 、 横軸(対数軸)に  $\tau$  をとったところ、 $\tau \leq 0.05 \text{sec}$ の範囲 での塑性率 $\mu$ はいずれも同程度( $\mu=20$ )の値への収束 を示した。その一方で、 $0.05 \text{sec} \leq \tau \leq 2 \text{sec}$ の範囲では Iおよび  $R_m T$  がともに大きいケースほど、短い荷重継続 時間  $\tau$  で応答が低減した。

最後に,縦軸(線形軸)にμ,横軸(対数軸)にτ/T をとったスペクトルを図-5(c)に示す。このとき全ての τ/Tの範囲で3ケースのスペクトルが1本に収束した。

以上より,異なる荷重条件,異なる建築物特性を有 するケースにおいても,力積パラメータが等しければ



同一力積衝撃応答スペクトルが一つに定まることが確認された。そこで以降は、同一力積衝撃応答スペクトルとして図-5(c)に示した $\mu-\tau/T$ 関係を用いる。

なお、荷重継続時間を 0.001sec きざみとした場合、 荷重継続時間の短い範囲において図-5(a) Case b の赤 線部分のように計算結果が不安定となる。本検討では 0.004sec きざみの値をとったため黒線のカーブを描い ており、4 章で取り扱う事例程度の荷重継続時間であ れば問題は生じないものの、極端に短い荷重継続時間 について検討を行う場合には十分な注意が必要である。

ー般的なスペクトルを用いた応答推定法では,弾性 応答スペクトルに対して履歴減衰の影響を考慮する手 法が広く使われているが、本手法では Yield Point Spectraの同様、バイリニア型の弾塑性応答をベースとしたスペクトルを用いている。そこで、弾塑性応答をベースとしたスペクトルを用いていることの影響がどこに現れているかを把握すべく、Case a に関して、非減衰の弾塑性モデルを用いた場合と弾性応答モデル

(表-1 に定めた降伏点で降伏せず同じ弾性剛性を有 した弾性ばねモデル)を用いた場合の比較を図-6に, 弾塑性モデルにおいて減衰定数 h を 0 から 0.10 まで変 化させた場合の比較を図-7 に示す。

図-6の縦軸に示した「塑性率」は、弾性モデルにお いては弾塑性モデルの降伏点変位で弾性モデルの応答 を除した値を(両者の比較のために)便宜上用いてい る。弾塑性モデルと弾性モデルの応答は、荷重継続時 間  $\tau$ を建物初期固有周期で基準化した  $\tau/T$ が 0.1以下で は Newmark のエネルギーー定則が、1.5 程度以上では Newmark の変位一定則が成り立っているが、その中間 領域では Newmark 式を用いた簡単な応答値の可換関 係にはない。

図-7に示すように、減衰の影響は、非減衰の場合に 比べて減衰定数 h=0.10 とした場合で最大 5%程度の応 答の低減が見られたが、その低減率は荷重継続時間  $\tau$ の 増加に伴い縮小し、 $\tau/T \ge 1$ の範囲ではほとんど影響が 見られなかった。 $\tau/T < 1$ の範囲で(すなわち、塑性率 が大きく履歴減衰の影響が内部減衰に比べて大きいと 考えられる領域で)内部減衰の影響が現れやすくなっ ている一方、 $\tau/T \ge 1$ の範囲で(すなわち、塑性率が小 さく履歴減衰の影響が内部減衰に比べて小さいと考え られる領域で)内部減衰の影響が現れにくくなってい ることは、同一力積衝撃応答スペクトルの特徴として 注意すべき点であり、通常の弾性応答スペクトルを用 いた弾塑性応答推定への展開を今後検討する場合には この点が課題となることが考えられる。

#### 3.3 力積パラメータと同一力積衝撃応答スペクトル

力積パラメータの値を変化させた際の同一力積衝撃 応答スペクトルを作成し、これについて検討する。

建築物モデルは一般的な中規模 RC 造建築物の構造 性能を有すると考えられる表-1の Case b の弾塑性モ デルを用いた。

力積パラメータは,過去の被害事例から上限を以下 のように考える。まず漂流物の質量について、文献 7) によれば、岩手県釜石市の釜石港では 4700ton の船舶 が岸壁に乗り上げ、製鉄所の上屋に衝突し破壊してい る。次に漂流速度については津波流速とほぼ同程度と 考えることができるが、文献7)によれば港湾の岸壁を 越流し市街地に流入する津波流速はおよそ 3~8m/sec である。また漂流物の衝突位置については、地表面か らの浸水高として、宮城県女川市の女川港付近で 18m 超の浸水高が観測されている。以上より、浸水高 18m の地点で 4700ton 船舶 (漂流物長さ 100m, 高さ 20m と 仮定) が漂流速度 8m/sec で衝突する場合の衝突力を上 限として式(1)で求める。このとき荷重継続時間 τは同 一力積衝撃応答スペクトルにおいて塑性率が最大値と なる 0.05sec を採用する。以上より算出される漂流物衝 突力 F は 892800 kN, 衝撃力積 I は 44640kN・sec であ る。これは極めて特殊な条件をすべて重ね合わせた数 値であるが、衝撃力積 I が 50000kN・sec すなわち I/(RmT)=10.0 を超えない範囲で I/(RmT)をパラメータと した応答スペクトルを算出した。本研究では、一質点



系での縮約応答が現実的に建物応答として可能な範囲 を考慮すると *I*/(*R*<sub>m</sub>*T*)が 5.0 以下の検討が工学的に有意 義であると考えられること,一方で構造物側の応答評 価を基準に衝突外力を想定外事象としてしまわないこ とも必要と考え,本論文では紙面の都合も踏まえ, *I*/(*R*<sub>m</sub>*T*)が 0.1~5.0 までの応答スペクトルを示した。作 成した同一力積衝撃応答スペクトルを図-8,9に示す。

図-8 は力積パラメータ  $I/(R_m T)$ を 0.1 から 1.0 まで 0.1 きざみで変化させたもの、図-9 は 1.0 から 5.0 ま で 1.0 きざみで変化させたものである。いずれも力積 パラメータが大きい場合ほど  $\tau/T \leq 0.05$  での収束値は 大きく、荷重継続時間  $\tau$ の増加に伴い塑性率  $\mu$  は急減 した。 $\tau T \geq 2$ の範囲においては力積パラメータによら ず塑性率  $\mu$  は 0 に収束する傾向を示した。

# 4. 多層 RC 造建築物の弾塑性応答推定

本章では,既存の RC 造建築物を対象に,多質点系 弾塑性応答解析を用いた津波漂流物の衝突による応答 推定結果と,同一力積衝撃応答スペクトルによる応答 推定結果との比較を行う。

# 4.1 検討対象建物および想定漂流物概要

2014年に竣工し津波避難ビルに指定されている4階 建て RC 造ラーメン構造物を検討対象とする。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,単位床重量を 14kN/m<sup>2</sup>と仮定すると各階重量は7670kN,建物総重量 は30680kN である。1階柱断面は1000mm角,2階よ り上の柱断面は800mm角,大梁断面は450mm×800mm, 上部構造のコンクリート強度は $F_c=27$ N/mm<sup>2</sup>である。

床を剛体と仮定して4 質点系モデルに置換し,漂流 物が床高さ,すなわち質点位置に衝突するものとして 式(1)で算出される漂流物衝突力 Fmを入力した。なお, 2 章での検討と同様に津波波力や堰き止め力など衝突 力以外の外力については考慮しない。また,各層骨格 曲線,履歴特性,数値積分法に関しても2章と同様と し,減衰定数は 0.02 とした。検討対象建物の質点モデ ルを図-10(a)に示す。

漂流物は、2章で取り上げた船舶(幅48m,高さ3.8m, 奥行8.6m,質量400ton)を想定した。衝突速度Vを 3m/secおよび10m/secの2通り設定し、荷重継続時間 τはそれぞれ0.347secおよび0.116secとした。なお、衝 突速度Vが津波流速uと同等であるとした場合、この 津波のフルード数Frは0.23および0.75に相当する。 式(1)を用いて漂流物衝突力Fmをおよび衝撃力積を算 出した結果を表-2に示す。なお本検討では4層(屋 上階床高18.1m)への衝突を対象とし、衝撃荷重の作用 により1次モード形で全体応答することを想定する。
4.2 同一力積衝撃応答スペクトルによる応答推定

同一力積衝撃応答スペクトルを用いた応答推定にあ たっては検討対象建物を等価1質点系に縮約する必要 があるが、力積をベースに検討を行うことから、秋山 らの方法<sup>®</sup>を参考に、以下の3条件を満たすエネルギ 一入力が等価となる縮約方法を用いた。

- 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 Cds の最小値が等しい



(a) 多質点系弾塑性時刻歴応答解析で扱うモデル

検討対象建物の質点モデルを図-10(b)に示す。

等価1質点系に縮約した建築物のパラメータを表-3に示す。前章で作成した同一力積衝撃応答スペクト ルでは、V=3m/secのケースで塑性率 μ=0.52、V=10m/sec のケースで塑性率 μ=14.45 が得られた(図-11(a), (b))。 4.3 多質点系弾塑性時刻歴応答解析結果との比較

同一力積衝撃応答スペクトルにより得られた縮約系 の塑性率から、各層の最大応答変位を推定した。ここ で,前節でエネルギー法による縮約を行ったことから, 市之瀬らの提唱する推定法 %を参考に、塑性率が1を 超えるケースでは、衝突階の層せん断余裕率 fc が最小 となるようにfcを他階の層せん断余裕率fiに加え塑性 エネルギーを各階に分配することで応答変位を推定し た。図-12(a), (b)に, 推定された各層の最大応答変位 と,多質点系弾塑性時刻歴応答解析により求めた最大 応答変位を比較する。まず V=3m/sec のケースでは,ス ペクトルによる結果が多質点系応答解析による結果を 1.0~1.3 倍上回った。このとき、4 層の変位はスペクト ルによる推定値が 75.1mm, 多質点系応答解析結果が 73.3mmと、精度良く表された。V=10m/secのケースで は3層以下の応答ではスペクトルによる結果がやや上 回った一方で、衝突発生階である4層では0.1倍と大 きく下回る結果となった。ただし,多質点系応答解析 では衝突発生階の応答が突出する結果が得られている 傾向だけは、ある程度再現されていると考えられる。 多質点系応答解析によれば、両ケースにおいて衝突発 生階のみが塑性化しており、今後、多層建物における

表-2 弾塑性応答推定検討ケース

V[m/sec]	$\tau[sec]$	<i>F</i> <sub>m</sub> [kN]	<i>I</i> [kNsec]	$I/(R_mT)$	$\tau/T$
3	0.347	5264	1827	0.27	1
10	0.116	54547	6327	0.94	0.33

表-3 縮約後の建築物パラメータ

M[ton]	δy[mm]	$R_m[kN]$	T[sec]	$S_{cy}[N/m]$	$C_{ds}$
3131	19.34	19383	0.347	$1.00 \times 10^{9}$	0.63



(b) 同一力積衝撃応答スペクトルにより扱うモデル

図-10 検討対象建物モデル



衝突階の塑性化を考慮した一自由度応答からの縮約還 元法についての精度向上を検討する必要がある。

# 5. まとめ

本論文では、津波漂流物の衝突を受ける鉄筋コンク リート造建築物の応答について、1 質点縮約系におけ る同一力積衝撃応答スペクトルを用いた応答と、多質 点非線形時刻歴応答解析による応答を比較・分析し、 以下の知見を得た。

1) 漂流物衝突を受ける多質点モデルの時刻歴応答解

析を行ったところ、応答は衝突荷重Fおよび衝撃 力積Iの大小、荷重継続時間 $\tau$ の長短に影響され ることが分かった。特に荷重継続時間 $\tau$ が建物 1 次固有周期Tと一致する付近では応答の増幅が見 られ、応答を $\tau/T$ で整理する必要性が示唆された。

- 1)の結果を受け、文献 2)を参考に同一力積衝撃応 答スペクトルを用いた応答推定を試みた。同一力 積衝撃応答スペクトルは線形縦軸に塑性率 μ,対 数横軸に τ/T をとることで、異なる荷重条件や建 築物の特性に対しても、衝撃力積 I と建築物最大 耐力と弾性 1 次固有周期の積 R<sub>m</sub>T の比が等しけれ ば同一の値をとることが確認された。
- 3) 既存の建築物を対象に、同一力積衝撃応答スペクトルにより推定した等価1質点系モデルの応答と、 多質点系弾塑性時刻歴応答解析により推定した応答の比較を行った。衝撃力積の小さいケースではスペクトルによる推定値は多質点系応答解析による結果と概ね一致した。一方衝撃力積の大きいケースでは衝突発生階の推定応答値が下回ったが、 衝突階の応答が突出する傾向は表現できた。

今後は衝突階が変わった場合の縮約系応答との関係に ついて検討を行っていく予定である。

## 参考文献

- 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
- 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,構造工学論文集 Vol.57A,土木学会, pp.1225-1238, 2011.3
- 水谷法美ほか: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
- 浅井竜也,松川和人,崔琥,中埜良昭:建築物に作 用する津波漂流物衝突時の衝撃外力,日本地震工 学会大会梗概集,pp.2-4,2015.11
- P. Piran Aghl, C.J. Naito, H.R. Riggs : An experimental study of demands resulting from in-air impact of debris, ICOSSAR2013, 2013
- Aschheim, M. and Black, E., Seismic Design and Evaluation of Multistory Building Using Yield Point Spectra, Mid America Earthquake Center, University of Illinois, 2000
- 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
- 8) 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
- 9) 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 23(3), pp.1225-1230, 2001