

# 論文 津波漂流物の衝突力を受ける RC ラーメン高架橋の耐力照査に関する一考察

小尾 博俊\*1

**要旨:** 本稿では、RC ラーメン高架橋の脚柱に漂流物が衝突した場合を想定し、高架橋の耐力を簡易的に照査する方法について検討した。検証のための数値解析は、SPH（粒子）法により津波を表現し、漂流物および高架橋は非線形 FEM でモデル化した流体-構造連成解析とした。その結果、1) SPH 法による水理模型実験との比較解析では、衝突力の最大値や力積量を 1 割程度の誤差で再現できること、2) 運動量に基づいた考え方を適用すれば、構造物が許容できる漂流物の質量と衝突速度を推定できること、3) 数値解析によると、このときの高架橋脚柱の損傷は、概ね耐震照査における損傷レベル 3 程度に相当すること、等の知見が得られた。

**キーワード:** 津波漂流物、衝突力、運動量、鉄道 RC ラーメン高架橋、SPH 法

## 1. はじめに

2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震では、津波そのものによる被害の他に、沿岸部にあるコンテナや船舶、自動車等が漂流物となり、それらの衝突による被害が甚大なものとなった。これらの被害対策には、漂流物の衝突力を適切に評価することが求められるが、衝突力は衝突速度、漂流物およびその衝突を受ける構造物の質量、剛性等に大きな影響を受け、これらを正確に評価することは一般に困難さを伴う。

漂流物の衝突力に関する既往の研究には、流木を対象とした松富<sup>1)</sup>や池野ら<sup>2)</sup>の研究が、またコンテナを対象とした水谷ら<sup>3)</sup>、有川ら<sup>4)</sup>の研究があるが、これらの衝突力算定式による計算結果はばらつきが大きく、また、何れも対象とする漂流物が限定されており、様々な場合に対応できるような統一的な評価方法は確立されていないのが現状である。

そこで本稿では、漂流物の衝突を受ける構造物の耐力を簡易的に照査する方法として、衝突力の大きさそのものではなく、衝突時の運動量に基づいた考え方で評価できるか検討した。この検証事例としては、漂流したコンテナが RC ラーメン高架橋<sup>5)</sup>の脚柱に衝突した場合を想定し、検証のための数値解析には、粒子法の一つである SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法により津波を表現し、コンテナおよびその衝突を受ける高架橋は非線形 FEM でモデル化した流体-構造連成解析を用いた。数値解析結果から高架橋の損傷状態を推定し、運動量に基づいた簡易手法の適用性を検証した。また、これに先立ち、漂流物の衝突を模擬した水理模型実験<sup>6)</sup>に対する比較解析を行い、SPH 法の津波解析への適用性について確認した。なお、本稿での数値解析には衝撃解析プログラム LS-DYNA Version 971<sup>7)</sup>を用いた。

## 2. 漂流物の衝突模型実験

### 2.1 実験概要

図-1 に示すように全長 4,500mm×幅 800mm×高さ 910mm の 2 次元水路を用いて、縮尺 1/10 相当の水理模型実験を実施した。水路の上流側に長さ 1,200mm の貯水タンクを設け、ゲートから 1,000mm 下流側に漂流物を、さらに 200mm 下流側に 2 本の防衝工を配置した。貯水タンクに水を貯め、ゲートを上げることで津波を発生させ、漂流物が防衝工に衝突する力を計測した。また、水路の下流端は津波反射の影響がないように滝落としとした。

漂流物の衝突力は防衝工に設置したロードセルにより計測し、その間隔は 1/1,000 秒とした。漂流物の諸元は長さ 470mm×幅 170mm×高さ 170mm、質量 5.66kg (内部の錘を含む) で、防衝工は一辺が 100mm の角柱とし、材質は両者とも塩化ビニルで、板厚はそれぞれ 5, 20mm である。衝突実験は貯水タンクの水深およびゲートの開口高を調整しながら実施した。以下の比較解析では、その代表例として、水深 700mm、開口高 100mm のケースについて検討した。

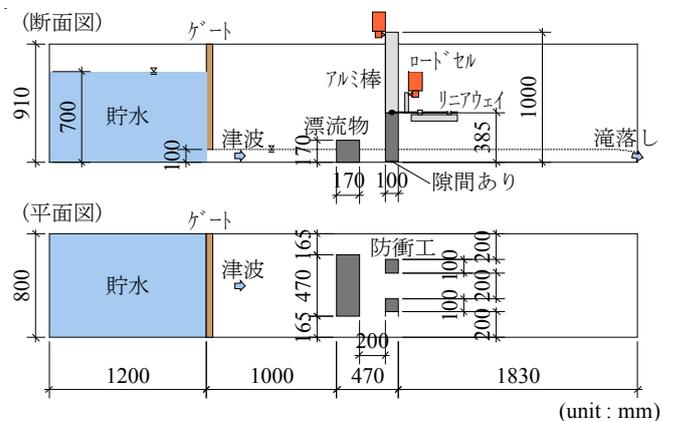


図-1 水理模型実験

\*1 大成建設 (株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 (正会員)

## 2.2 衝突力の比較解析

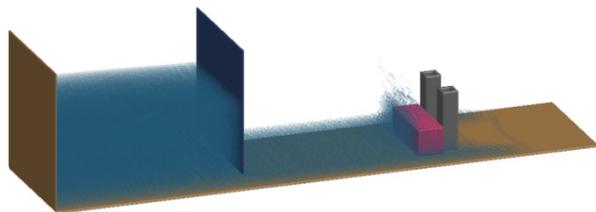
SPH 法による津波解析への適用性を確認する目的で、水理模型実験に対する比較解析を実施した。SPH 法は対象とする領域を粒子の集合体として表すため、空間的なメッシュを定義することなく、極端な変形や自由表面の含まれる流体問題などに有効とされている。また、粒子でモデル化された物体は、通常 FEM メッシュで分割された物体と接触相互作用を考慮できるため、比較的簡単に流体-構造連成問題などに適用することができる。

本稿では、津波の粒子間隔（分割数）の違いが解析結果に及ぼす影響を把握するため、粒子を 10mm 間隔（総数 67.2 万粒子）とした場合と、20mm 間隔（総数 8.4 万粒子）とした場合について比較検討した。漂流物および防衛工には FEM メッシュを用い、要素寸法は粒子間隔程度とした。漂流物はシェル要素で、防衛工はソリッド要素でそれぞれモデル化した。防衛工については実験条件を考慮し高さ 385mm の位置を固定条件とした。数値解析に用いた材料物性を表-1 に示す。

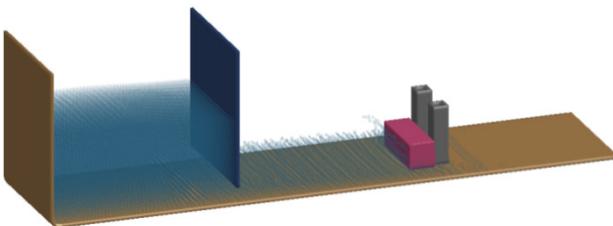
解析結果から、粒子間隔の違いによる影響について比較する。図-2 は漂流物が衝突した時刻付近の状況を示したものである。粒子間隔が異なると、津波が漂流物に

表-1 材料物性

	漂流物・防衛工 (塩化ビニル)	津波 (水)
ヤング率 $E$ (MPa)	2,800	—
体積弾性係数 $K$ (MPa)	—	2,254
粘性係数 $\mu$ (MPa・s)	—	$1.0 \times 10^{-9}$
ポアソン比 $\nu$	0.38	—
密度 $\rho$ (ton/m <sup>3</sup> )	1.45	1.0



(a)SPH 粒子\_10mm 間隔



(b)SPH 粒子\_20mm 間隔

図-2 衝突時 (T=0.68s) 付近の状況

衝突した際に跳ね上がる飛沫や、防衛工の脇を通過する津波の状況に違いが見られる。しかしながら、漂流物の衝突力については、図-3 に示すように、衝突時に生じるパルス的な波形や、その後の津波作用による定常的な波形は、粒子間隔が 10、20mm 何れの場合も実験結果と概ね整合している。衝突時付近の時間軸を拡大して見ると、実験と解析では波形形状にバラツキが見られるものの、粒子間隔の違いによる精度差は顕著ではない。また、表-2 には、衝突力の最大値と 0.0~2.0 秒までの力積を実験値に対する比率として示した。この表からも、解析結果は実験結果と 1 割程度の誤差を有するが、実用上、粒子間隔の違いによる影響は少ないものと考えられる。

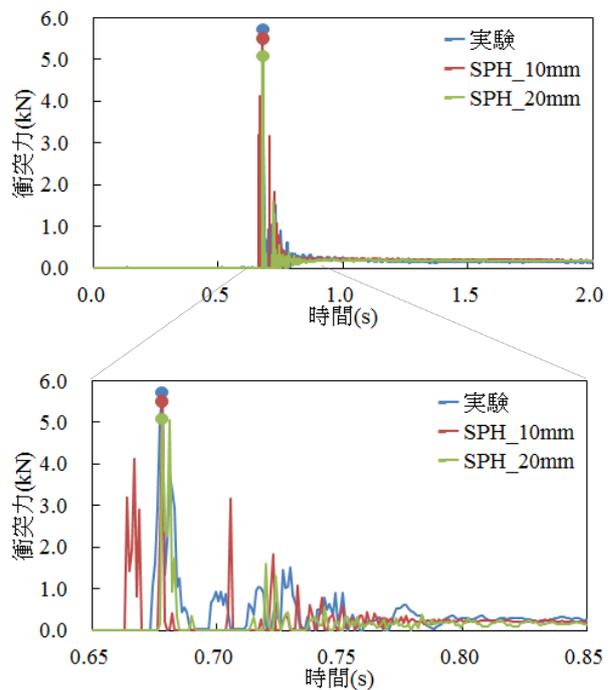


図-3 衝突力時刻歴

表-2 衝突力最大値と力積

	衝突力 最大値 (kN)	実験値 に対する 比率	力積 (kNs)	実験値 に対する 比率
実験	5.725	—	0.284	—
SPH_10mm	5.498	0.96	0.310	1.09
SPH_20mm	5.077	0.89	0.254	0.89

## 3. 簡易耐力照査の考え方

漂流物の衝突力、とりわけ衝突時の最大値や波形形状は、漂流物の衝突速度、漂流物およびその衝突を受ける構造物の質量、剛性等に大きな影響を受け、正確に評価することは一般に容易ではない。また、適切に評価できたとしても、衝突時の瞬間的な値をどのように設計行為に反映させるかについて、具体的な方法が確立されてい

るとは言えない。そこで本稿では、津波漂流物の衝突について、衝突力の大きさそのものではなく、衝突時の運動量に基づいた考え方で評価できるか検討する。

漂流物およびその衝突を受ける構造物について、衝突時に運動量保存則を適用すると以下のように表される。

$$mv_1 + MV_1 = mv_2 + MV_2 \quad (1)$$

ここで、 $m$  は漂流物の質量、 $M$  は構造物の質量、 $v_1$ 、 $v_2$  は漂流物の衝突前後の速度、 $V_1$ 、 $V_2$  は構造物の衝突前後の速度である。漂流物の衝突前は  $V_1=0$ 、衝突後は  $v_2=0$  と仮定すると、結局、上式は、

$$mv_1 = MV_2 \quad (2)$$

となる。対象とする構造物の質量  $M$  は既知量であり、衝突後の速度  $V_2$  は耐震設計時の応答加速度を  $a$  とすると、簡略的に、擬似応答速度として次のように表すことができる。

$$V_2 \approx a \times T / 2\pi \quad (3)$$

ここで、 $T$  は構造物の固有周期である。したがって、構造物の  $MV_2$  を概算することができ、その結果として、構造物が許容できる漂流物の質量  $m$  と衝突速度  $v_1$  を推定することが可能となる。

検証事例は漂流したコンテナが RC ラーメン高架橋の脚柱に衝突した場合を想定する。対象とした高架橋は鉄道構造物で用いられる最も一般的な構造形式であり、その構造図を図-4 に示す。全長は 5 径間、約 50m、幅員約 10m、脚柱の高さは 5.4m で、基礎は地中梁の下を径 1m、深さ 21m の場所打ちコンクリート杭で支持している。コンテナは高架橋の脚柱に橋軸直角方向から衝突するものと仮定し、今回の検討では、脚柱を中心に 1 径間 10m あたりの耐力を評価する。荷重および境界条件は図-5 に示すように、スラブ軌道や高欄等の上載荷重を考慮し、橋軸方向の境界は高架橋スラブの連続性からその方向を固定条件とした。また、基礎は漂流物の衝突により地中梁が移動することは考えづらいため、杭のモデル化は省略し地中梁の底面を完全固定条件とした。

高架橋躯体の FEM モデルを図-6 に示す。コンクリートは 8 節点ソリッドの低減積分要素で、鉄筋は 2 節点ビームの埋め込み要素としてモデル化した。上載荷重は密度を調整し、錘 (ソリッド) 要素としてスラブ上面に付加した。本モデルの質量は上載荷重と合わせて  $M=284.6\text{ton}$ 、固有周期は  $T=0.30\text{sec}$  となった。文献 5) によると、本高架橋の耐震設計時に想定している応答加速度の最大値は  $1,800\text{gal}$  であることから、式(3)より、擬似応答速度は、 $V_2 \approx 18\text{m/s}^2 \times 0.30\text{s} / 2\pi = 0.86\text{m/s}$  となる。したがって、高架橋 1 径間あたりが許容できる運動量は、 $MV_2 = 284.6\text{t} \times 0.86\text{m/s} = 244.8\text{tm/s}$  と求めることができる。今、漂流物として満載された 20 フィートコンテナ、総質量  $m=24\text{ton}$  を考えると、速度  $v_1 = 244.8\text{tm/s} \div 24\text{t} =$

10.2m/s までの衝突に耐えられることになる。次章では流体-構造連成解析を用い、津波漂流物の衝突について、上述した考え方が適用できるか検証する。

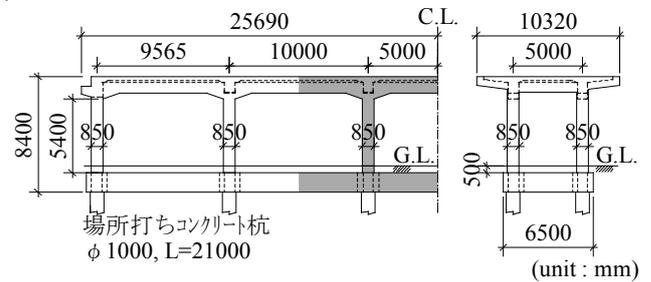


図-4 鉄道 RC ラーメン高架橋

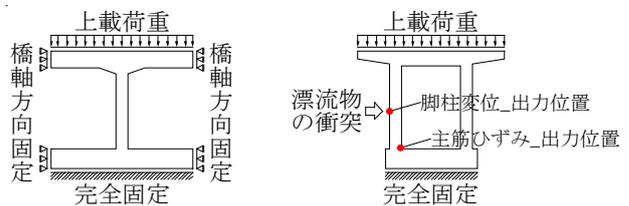


図-5 荷重・境界条件

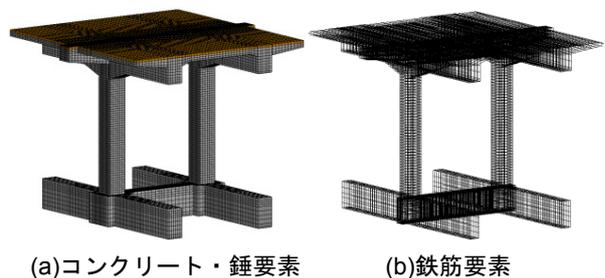


図-6 高架橋 FEM モデル

## 4. 検証のための数値解析

### 4.1 解析条件

漂流物は 20 フィートコンテナ (長さ 6.06m × 幅 2.44m × 高さ 2.59m) を想定し、満載時の総質量が規格値の 24ton となるように、積載物の密度を調整することで所定の質量を与えた。SPH 法による津波の粒子間隔は、2 章の解析結果や計算時間等の実用性を考慮し、200mm 間隔 (総数 27.9 万粒子) とした。津波は陸上に遡上した津波を想定し、初期条件として水深 3.0m、波先勾配 30° を仮定した。また、漂流物の衝突速度が 3 章から求められた 10.2m/s 以上となるように予備解析を行い、津波と漂流物の初速を 12.0m/s に設定した。さらに、津波粒子の最後部には造波板 (剛板) を設け、速度 12.0m/s で強制的に水平移動させている。このときの解析領域を図-7 に、また、数値解析モデルを図-8 に示す。

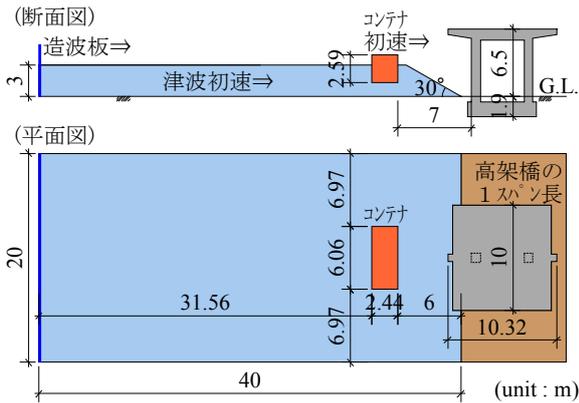


図-7 解析領域

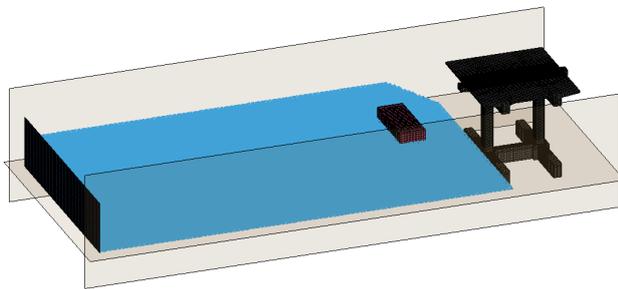


図-8 数値解析モデル

数値解析に用いた材料物性を表-3に、材料モデルを図-9にそれぞれ示す。コンクリートの材料モデルはプログラムに組み込まれている Winfrith モデルを用いた。この材料モデルはひび割れ後の挙動を考慮することができ、このときの破壊エネルギー $G_f$ は次式<sup>8)</sup>で求めた。

$$G_f = 10 \times (d_{max})^{1/3} \times (f_c)^{1/3} \quad (N/m) \quad (4)$$

ここで、 $d_{max}$ は最大骨材寸法、 $f_c$ は圧縮強度である。鉄筋・鋼板の材料モデルは bi-linear 型の応力-ひずみ関係とし、降伏後は初期剛性の 1/100 を仮定した。また、陽解法における時間増分は Courant の安定条件を満足するようにプログラムによる自動設定とし、減衰定数には質量比例型の 5%減衰を用いた。

解析ケースは表-4に示すように、漂流物の総質量が 24ton、材料は実強度相当の非線形材料とし、SPH 粒子で津波をモデル化したケース 1 を基本ケースとした。これに対し、ケース 2 は漂流物の材料を線形とした場合、ケース 3 は津波をモデル化せず漂流物を直接、高架橋に衝突させた場合、さらに、ケース 4 は漂流物の総質量を 1.5 倍の 36ton と仮定し、衝突速度が 6.8m/s (=244.8tm/s ÷ 36t) 以上となるように、津波および漂流物の初速を 7.5m/s とした場合である。なお、ケース 3 で与えた漂流物の衝突速度は、ケース 1 の計算結果から得られた速度 10.8m/s を用いた。また、ケース 4 では漂流物の喫水が大きくなるため、初期条件の水深は 4.2m とした。それぞ

れのケースで衝突力の大きさや高架橋の損傷状況について比較する。

表-3 材料物性

	コンクリート	鉄筋 SD345	鋼板 (コンテナ)
ヤング率 $E$ (MPa)	26,500	200,000	200,000
ポアソン比 $\nu$	0.2	0.3	0.3
密度 $\rho$ (ton/m <sup>3</sup> )	2.3	7.8	7.8
圧縮強度 $f_c$ (MPa)	27	—	—
引張強度 $f_t$ (MPa) または 降伏強度 $f_y$ (MPa)	2.1	345	345
最大骨材寸法 $d_{max}$ (mm) または 鉄筋呼び名 または 板厚 $t$ (mm)	25	D13~32	2.5~6.0

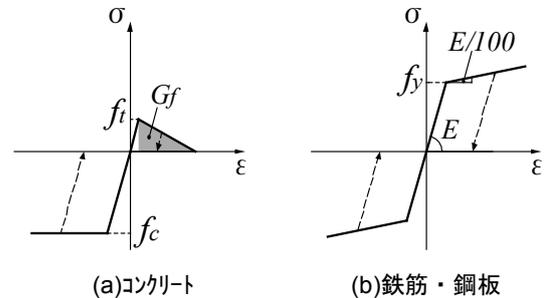


図-9 材料モデル

表-4 解析ケース

ケース	漂流物 (コンテナ)		津波のモデル化 (SPH 粒子)	初速または『衝突速度』 (m/s)
	総質量 (ton)	材料		
1 基本	24	非線形	あり	12.0
2		線形		
3		非線形	なし	ケース 1 で得られた『10.8』を付与
4	36	非線形	あり	7.5

#### 4.2 解析結果

漂流物の速度時刻歴を図-10に示す。ケース 1 および 2 の衝突速度は 10.8 (>10.2) m/s、ケース 4 は 7.6 (>6.8) m/s となり、いずれも事前に予定した衝突速度を上回ることから十分な運動量が得られている。この 3 ケースは衝突後、多少の振動を伴いながらほぼ速度 0m/s に収束している。ケース 3 は津波をモデル化せず 10.8m/s の速度で直接、高架橋に衝突させたケースであるが、衝突後はおおよそ 4.5m/s の速度で跳ね返っていることが分かる。

高架橋に作用する津波および漂流物の衝突力時刻歴を図-11に示す。衝突力のピーク値は、漂流物を線形材料としたケース 2 が最も大きく約 12,000kN、次にケース 1 が約 7,900kN、続いて漂流物の質量を 1.5 倍、衝突速度を

1/1.5 倍としたケース 4 が約 7,200kN となり、ケース 3 は約 7,000kN となった。ピーク値のみの比較からは、ケース 2 を除く他の 3 ケースに大きな違いは見られない。

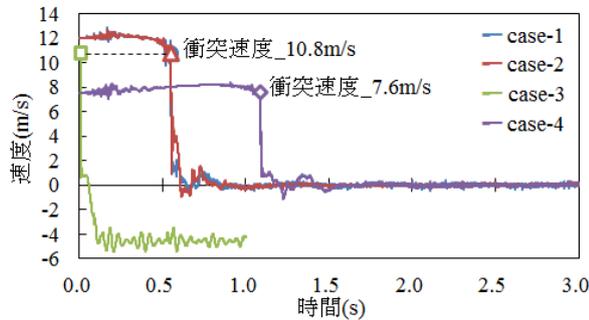


図-10 漂流物の速度時刻歴

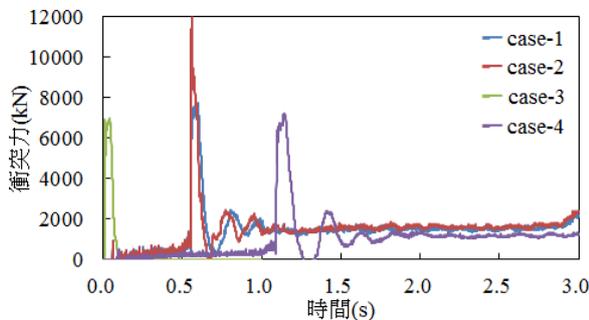


図-11 津波・漂流物の衝突力時刻歴

次に、衝突を受ける脚柱中央の変位時刻歴を図-12 に示す(出力位置は図-5を参照)。文献5)および9)によると、鉄筋コンクリート棒部材の曲げ破壊モードと損傷レベルの関係は図-13に示すような状態となり、また、本高架橋脚柱の損傷レベルと部材角限界値、それに対応する変位量は表-5に示すようになる。ここで、変位量は簡易的に部材角×脚柱の長さの1/2(=2,700mm)として求めた。図-12から、ケース1の最大変位は耐震照査における損傷レベル3の限界値にほぼ等しい変位量となっている。ケース2はレベル3の限界値を大きく上回っており、相当程度の損傷が見込まれる。また、ケース4は損傷レベル2の限界値程度であり、津波をモデル化しないケース3は他のケースに比べ極めて小さい変位量であ

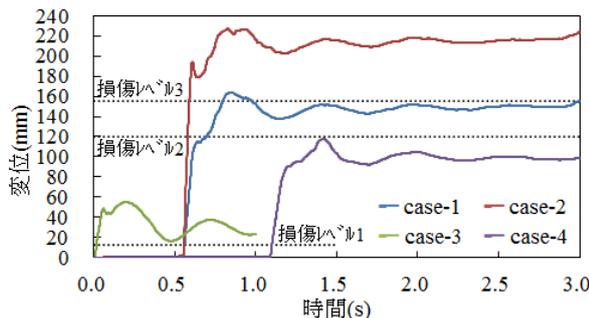


図-12 高架橋脚柱の変位時刻歴

ることが分かる。

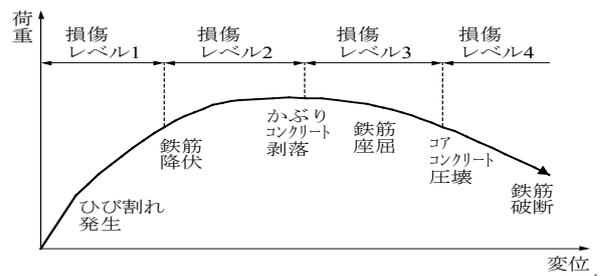


図-13 棒部材の曲げ破壊モードと損傷レベル

表-5 本高架橋脚柱の損傷レベルと限界値

損傷レベル	損傷状態	部材角の限界値 (対応する変位量)
1	無損傷	0.0047 rad (12.7 mm)
2	場合によっては補修が必要な損傷	0.0444 rad (119.9 mm)
3	補修が必要な損傷	0.0574 rad (155.0 mm)
4	補修が必要な損傷で、場合によっては部材の取替えが必要な損傷	

続いて、衝突を受ける脚柱下端の軸方向鉄筋ひずみの時刻歴を図-14に示す(出力位置は図-5を参照)。いずれのケースも衝突時に一気に立ち上がる波形を示し、図-12の変位時刻歴と強い相関にあることが分かる。また、最も大きいひずみが生じるケース2であっても、破断ひずみ(≒0.2)までには余裕が見込まれる。

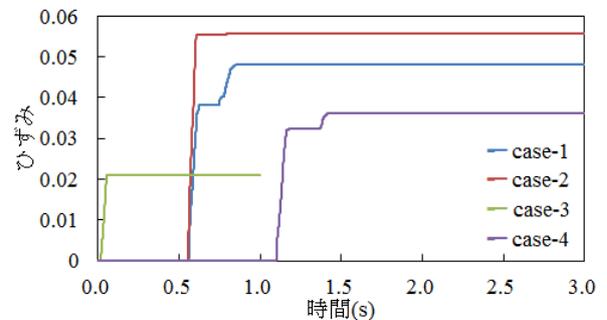


図-14 鉄筋ひずみ時刻歴

さらに、高架橋の躯体コンクリートおよび鉄筋に生じるひずみ分布を図-15に示す。出力時間はケース1, 2および4が3.0sec時、ケース3が1.0sec時である。漂流物の衝突を受ける脚柱はケース3を除き、コンクリートひずみがほぼ全域に渡り2,000μを超過しており、激しい損傷が予想される。特にケース2は脚柱が「く」の字に変形している様子が明瞭に分かる。津波をモデル化せず、直接、漂流物を衝突させたケース3は他のケースに比べ明らかに損傷程度は小さい。鉄筋ひずみも同様の傾向にあり、最も損傷の激しいケース2は、脚柱中央部の衝突面側を除き降伏ひずみを超過している。ケース1および

4は、脚柱上部の衝突面側、中央部の衝突面逆側、下部の全面で大きなひずみが生じている。これに対し、ケース3の降伏ひずみに達する領域は、他のケースに比べ明らかに狭い範囲となっている。

上述してきたように、ケース3の損傷程度は他のケースに比べ小さくなっている。これは、本稿では簡易照査を行うにあたり、式(2)に示すように衝突によって漂流物の運動量の全てが構造物に作用するものと仮定している。ところが、ケース3は衝突後、漂流物が跳ね返ることから、他のケースに比べ構造物に作用する運動量が小さかったものと解釈される。ケース3を除く他のケースでは、漂流物背後の津波が跳ね返りを防いだ結果、仮定したように漂流物の運動量のほぼ全てを構造物に入力すること

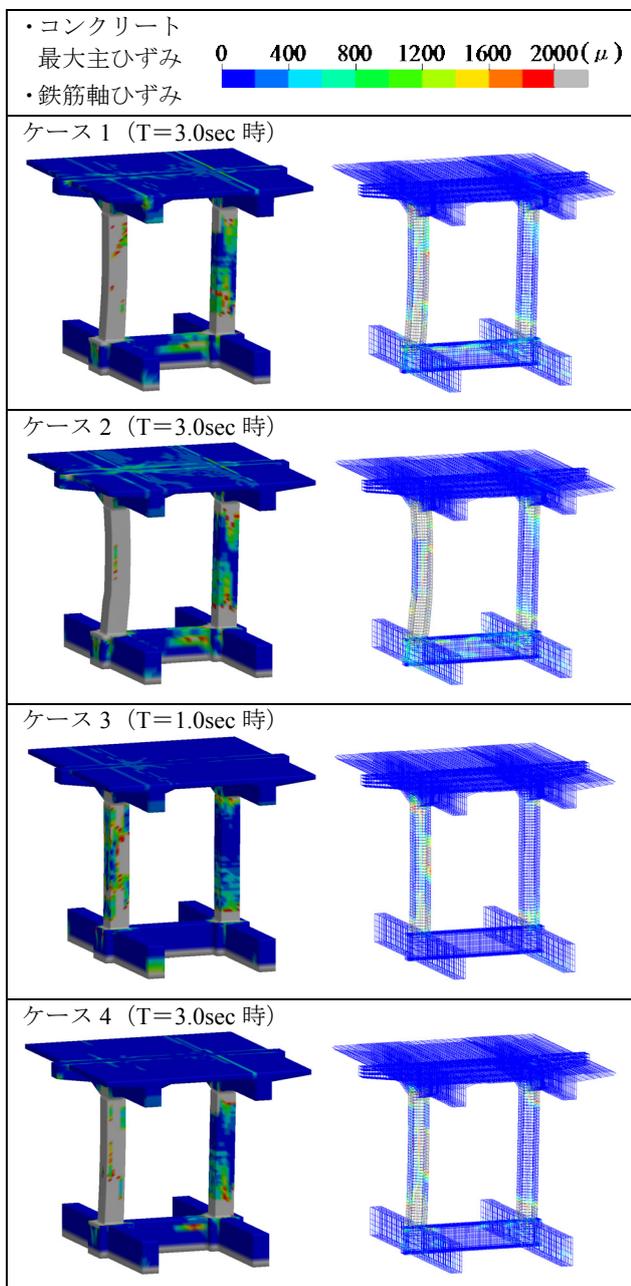


図-15 コンクリートおよび鉄筋のひずみ分布

ができたものと考えられる。以上より、衝突時の運動量に基づいた考え方を適用することにより、構造物が許容できる漂流物の質量とその衝突速度を推定することが可能になるものと考えられる。

## 5. まとめ

本稿では衝突時の運動量に基づいた考え方を適用し、高架橋の耐力を簡易的に照査する方法について検討した。以下に本稿の条件内で得られた知見をまとめる。

- (1) 津波解析への SPH 法の適用性を検討した水理模型実験との比較解析では、衝突力の最大値や力積量を 1 割程度の誤差で再現できる。
  - (2) 衝突時の運動量に基づいた考え方を適用することにより、構造物が許容できる漂流物の質量と衝突速度を推定することができる。
  - (3) この考え方を適用すると高架橋脚柱の損傷は、概ね耐震照査における損傷レベル 3 程度に相当する。
  - (4) 漂流物の剛性が高い場合（線形）を仮定しても、高架橋の崩壊にまでは至らないものと推定される。
- 今後は他の形式の構造物、とりわけ壁式構造物の耐力照査方法について検討を進める必要がある。

## 参考文献

- 1) 松富英夫：流木衝突力の実用的な評価式と変形特性，土木学会論文集，No.621，pp.111-127，1999.5
- 2) 池野正明，森 信人，田中寛好：砕波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第 48 巻，pp.846-850，2001
- 3) 水谷法美，廉 慶善，宇佐美敦浩，中村友昭，白石和睦：陸上津波によるコンテナの漂流と漂流衝突力に関する研究，第 20 回海洋工学シンポジウム，日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会，2008.3
- 4) 有川太郎，鷺崎 誠：津波による漂流木のコンクリート壁面破壊に関する大規模実験，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.66，pp.781-785，2010
- 5) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物 照査例 RC ラーメン高架橋，2005
- 6) 本田隆英，織田幸伸，伊藤一教，小尾博俊，高島知行：柱状構造物に作用する津波漂流物の荷重評価に関する基礎研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.70，No.2，pp.I\_961-I\_965，2014
- 7) LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME I，II Material Models，Version R7.0，LSTC，2013
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，2012
- 9) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，2004