

# 論文 大型車両の衝突を受けた PC 桁の損傷度評価に関する解析的考察

合屋 智史\*1・玉井 宏樹\*2・園田 佳巨\*3

**要旨:** 車両や船舶の衝突事故により橋桁や橋脚が損傷した場合、部材の損傷度を適切に評価し、橋梁全体としての残存耐力を把握した上で、補修や補強を行う必要がある。本研究では、現実に大型車両の衝突により PC 主桁が損傷した事故を対象に、3次元弾塑性有限要素法による衝突解析を実施し、桁のひび割れ状況や残留変位を実際の損傷状況と比較した上で、鉄筋や PC 鋼線の破断の可能性を評価することで PC 主桁の損傷度を推定した。その結果、今回の事故で車両衝突部近傍には桁裏面まで達する貫通ひび割れが発生していたが、桁内部の鉄筋や PC 鋼線の破断の可能性は非常に小さく、残存耐力の顕著な低下は生じないことが推定された。

**キーワード:** PC 橋梁, 車両衝突, 残存耐力, 数値解析

## 1. はじめに

土木・建築構造物の中には、落石防護構造物や砂防堰堤のように衝撃荷重の作用を設計荷重として考慮すべき防護構造物が存在する。道路構造物の中にも、ガードレールに代表される車両用防護施設に関しては、車両の衝突を考慮して乗員の安全性能や車両の逸脱防止性能など様々な性能を満たすように設計することが規定されている。しかし、一般の橋梁では、橋脚、橋台、高欄については車両や船舶の衝突を想定し、衝突荷重を考慮した設計を行うことが規定されているが、他の部材については車両等の衝突は想定されていない。道路や航路と立体交差する橋梁では、ごく稀に車両や船舶などの衝突事故<sup>1)</sup>、<sup>2)</sup>などが予期せぬ形で生じる場合があるが、大型車両や大型船舶が衝突した場合、その重量が大きいことから、構造物に作用する衝撃力の影響は極めて大きくなると予想される。また、大型船舶の航路に位置する橋脚には、船舶や漂流物の衝突による衝撃力を和らげる緩衝材を設置している場合もあるが、高架橋の橋桁等に車両の衝突

を想定して緩衝材を設置するケースは殆どない。そのため、想定外の車両衝突事故が発生した場合、衝突を受けた部材には甚大な損傷が生じることが予想され、その場合に部材の残存耐力や橋梁全体系の耐荷性能を推定することは、適切な補修・補強方法を選定するために重要であると思われる。しかし、供用中の橋梁の事故後の健全度評価は容易でなく、目視によるひび割れ調査や限られた非破壊診断の結果を基に検討することが求められる。

そこで、本研究では、大型車両の衝突により PC 主桁が損傷した実際の事故を対象に、3次元弾塑性有限要素法による衝突解析を実施し、残留変位・ひび割れ状況・鉄筋や PC 鋼線の破断の可能性を検証し、PC 主桁の損傷度を推定した。

## 2. 深江第一高架橋における車両の衝突事故について

### 2.1 橋梁概要

本研究は、深江第一高架橋で発生した大型車両の衝突事故を対象とした。深江第一高架橋は福岡県糸島市二丈



図-1 解析対象橋梁の側面図

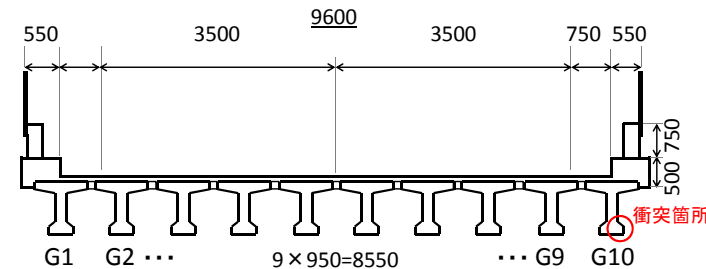


図-2 解析対象橋梁の断面図 (単位: mm)

表-1 解析対象橋梁の諸元

橋梁形式	PC プレテンション方式非合成連結桁橋
橋長	99.96m
桁長	5×19.860m
支間	5×19.260m
幅員	9.60m
設計荷重	B 活荷重

\*1 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 (学生会員)

\*2 九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門助教 (正会員)

\*3 九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門教授 (正会員)



写真-1 G10 桁側からの橋梁、交差道路の状況



写真-2 主桁に生じた損傷の状況

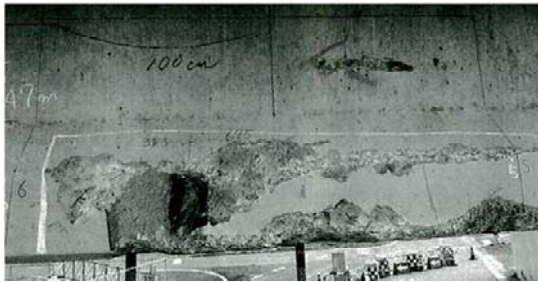


写真-3 衝突部近傍の損傷の状況



写真-4 主桁側面のひび割れ

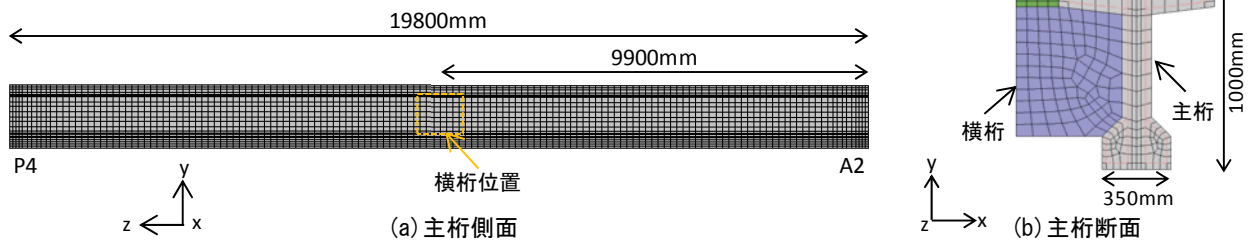


図-3 主桁の解析モデル図

町に位置し、国道 202 号の一部として供用中の道路橋である。本橋の下には市道が通っており、交差部の桁下高さは 4.0m である。対象橋梁の側面図および断面図を図-1、図-2 に示す。また表-1 に解析対象橋梁の諸元、写真-1 に G10 桁側から撮影した橋梁と道路状況を示す。

本橋梁に使用されている PC 主桁の形状は、桁長 19860mm、支間 19260mm、桁高 1000mm、上フランジ幅 750mm、下フランジ幅 350mm、ウェブ幅 150mm である。主鉄筋には D13、せん断補強筋には D10、PC 鋼材には PC 鋼より線 (φ 12.4mm×7 本より) が用いられている。

## 2.2 事故の詳細及び損傷状況

高架橋と交差する市道を走行していた大型車両が交差点を通過しようとした際、路面から積載コンテナの上端までの高さが桁下制限高さを上回っていたために、コンテナが A2 橋台から P4 橋脚区間の主桁に衝突した。コンテナの左上端が A2 橋台から 5.5m の位置に衝突し、最も外側の G10 桁のみが損傷を受けた。衝突時の車両の速度は 10km/h～15km/h 程度であったと推測されている。事故後、高架橋では片側通行規制が実施された。

車両の衝突を受けた G10 桁全体の損傷状況を写真-2 に示す。G10 桁の損傷は、写真-3 に示す衝突部近傍コ

ンクリートの圧縮破壊や、写真-4 に示す衝突側側面の広範囲にわたるひび割れといった損傷が生じていることが見て取れる。また、衝突部を中心として、主桁の橋軸直角方向の曲げ変形に起因すると思われる橋軸方向のひび割れが発生している。ウェブと上フランジの境界にもひび割れが生じており、衝突側および裏側の両方に同様のひび割れがみられることから、このひび割れは断面を貫通していると考えられる。

## 3. 大型車両の PC 主桁への衝突解析

### 3.1 解析モデル

#### (1) PC 主桁のモデル化

図-3 に主桁の解析モデルを示す。解析対象橋梁の A2 橋台から P4 橋脚の区間の主桁を 3次元有限要素を用いて忠実にモデル化した。対象橋梁は 10 本の主桁の連結方式であるが、本解析では車両の衝突により損傷を受けた G10 桁のみをモデル化した。これは衝突事故において G10 桁以外の主桁には損傷が生じていなかったことに加え、G10 桁の挙動は隣接する主桁の影響を受けないと判断したためである。主桁間の横桁は、主桁の橋軸直角方向の変形を拘束すると考えられるため、さらに、主桁間

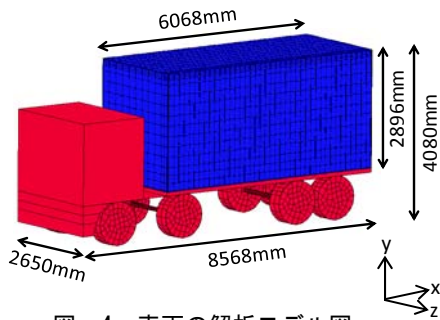


図-4 車両の解析モデル図

(青色部：コンテナ，赤色部：車両本体)

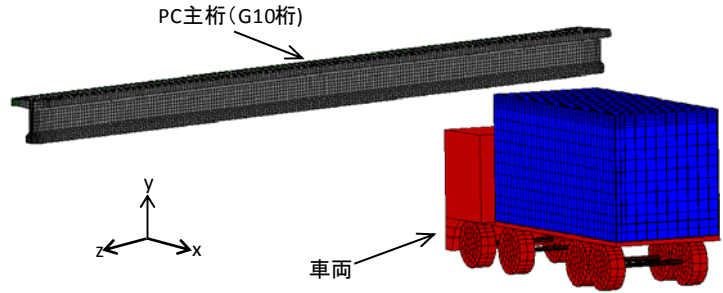


図-5 衝突解析モデルの全体図

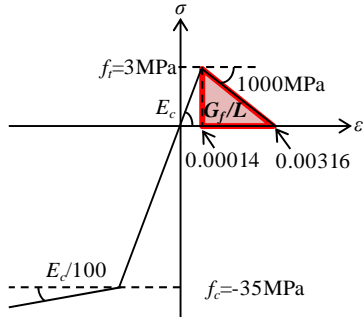


図-6 コンクリートの構成則

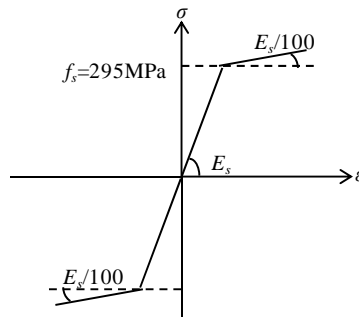


図-7 鉄筋の構成則

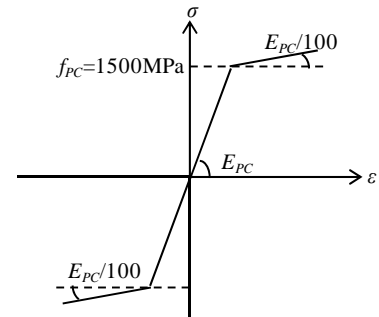


図-8 PC鋼線の構成則

の間詰め部についても衝撃緩衝効果が考えられるため、それぞれをモデル化した。コンクリート部には8積分点を有するソリッド要素を用い、鉄筋およびPC鋼線にはトラス要素を用いた。コンクリートと鉄筋およびPC鋼線は完全付着を仮定した。

PC主桁に作用するプレストレス力を解析で再現する方法としては、PC鋼材の両端にプレストレス力を外力として入力する方法、PC鋼材の要素に初期条件として引張ひずみを与え緊張力を発揮させる方法がある<sup>3)</sup>。後者の方法は、与える初期ひずみ量に応じて発生するプレストレス力が増加するため、所定のプレストレス力を得るまで初期ひずみ量を調整する予備解析が必要になる。一方、前者の方法では、外力として直接プレストレス力を与えることができ予備解析を行う必要がないため、本解析では前者の方法を採用した。

境界条件に関しては、図-1に示すようにA2橋台は可動支承、P4橋台は固定支承であり、可動支承部にあたる節点は鉛直方向拘束とし、固定支承部にあたる節点は鉛直方向および橋軸方向拘束とした。隣接する主桁との境界部については、全節点を全自由度拘束とした。また、主桁の自重を考慮するため主桁を構成する全要素に重力加速度  $9800\text{mm/s}^2$  を鉛直下向きに与えた。

## (2) 車両のモデル化

図-4に車両の解析モデルを示す。青色部分はコンテナ、赤色部分は車両本体および荷台を示している。車両のモデル化に関して、事故状況からコンテナのみが主桁と衝突したことが明らかになっており、本解析ではコン

テナのみを変形体と仮定し、8積分点を有するソリッド要素でモデル化した。車両本体および荷台については剛体面でモデル化した。コンテナと荷台は完全に接着しており、衝突時にコンテナが荷台から浮き上がることはないを仮定した。事故当時コンテナ内は空であったことからコンテナは中空とし、コンテナの板厚は20mm、質量は自重のみの3.2tonとした。車両本体と荷台を合わせた質量は12tonと大きく、衝突解析を行う上で無視できないと考えられるため、車両の重心位置に質量を与えた。図-5に衝突解析で用いた解析モデルの全体図を示す。

## 3.2 材料構成則ならびに材料特性

PC主桁のコンクリート要素、鉄筋要素、PC鋼線要素はいずれも弾塑性体とした。PC主桁のコンクリート要素は図-6に示すように、圧縮域ではバイリニア型の応力-ひずみ関係を有し、除荷時の剛性は初期剛性と等しいと仮定し、引張域に関しては、引張強度3MPaに達するまでは線形的に応力が増加するものとし、その後は線形的に徐々に応力が低下していくような軟化挙動を示すものを仮定した。また、この材料モデルにおける引張終局ひずみは、式(1)に示すCEB-FIP modelの引張破壊エネルギー  $G_f$ <sup>4)</sup> および主桁コンクリートの最小要素長さ  $L=100\text{mm}$  より算出した。

$$G_f = G_{f0} (f_{cm} / f_{cm0})^{0.7} \quad (1)$$

ここで、 $G_{f0}$ は粗骨材の最大寸法より決定されるパラメータで  $0.058\text{N/mm}$ 、 $f_{cm}$ はコンクリートの引張強度の90%の値、 $f_{cm0}$ は10MPaである。

鉄筋要素は図-7 に示すように、降伏強度以降は初期剛性の 1/100 の剛性でひずみ硬化を示すバイリニア型の応力-ひずみ関係を有し、除荷剛性は初期剛性と等しいと仮定した。PC 鋼線要素の応力-ひずみ関係は図-8 に示すように、鉄筋と同様と仮定した。間詰め部のモルタル要素および横桁部のコンクリート要素は、塑性化するほどの変形は生じないと考えられることから弾性体とした。車両モデルの要素に関しては、衝突後のコンテナには残留変形がほとんど生じていなかったことから、コンテナ要素は弾性体と仮定した。なお、本研究で設定した衝突条件では、想定される平均的なひずみ速度は比較的小さいため、全ての材料についてひずみ速度効果は考慮していない。本解析に用いた材料定数を表-2 に示す。

表-2 解析に用いた材料定数

	材料	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	強度 (MPa)
主桁	コンクリート	2.30	21	0.2	圧縮 35 引張 3
	鉄筋	7.85	210	0.3	295
	PC鋼線	7.85	210	0.3	1500
間詰め	モルタル	2.30	15	0.2	-
横桁	コンクリート	2.30	21	0.2	-
コンテナ	アルミニウム	1.79	70	0.33	-

### 3.3 解析条件および解析手法

対象橋梁とその下を通る交差道路の斜角は 68°である。よって交差道路を走行する車両が橋桁に衝突する場合、車両は橋桁に対し 22°の角度を有して衝突すると考えられる。そこで本解析では図-9 に示すように、車両を PC 主桁に対して 22°だけ傾けて配置した。また、本解析では車両モデルの全節点に初期条件として衝突速度を与えることで PC 主桁との衝突を再現した。実際の深江第一高架橋の衝突事故において車両の衝突速度は 10km/h ~ 15km/h であったと推察されており、解析では衝突速度 10km/h (解析ケース 1) および 15km/h (解析ケース 2) の 2 ケースを設定した。また、衝突時の衝突体と被衝突体の挙動に対しては慣性力が支配的であると考えられ、対象事故のように衝突体の一部のみが衝突する場合、衝突体の質量全てが慣性力として作用するか定かではない。そこで、車両質量を考慮しない場合でも解析を行い、車両質量のモデル化の影響について考察した。車両質量を考慮しない場合の衝突速度は 15km/h とした (解析ケース 3)。

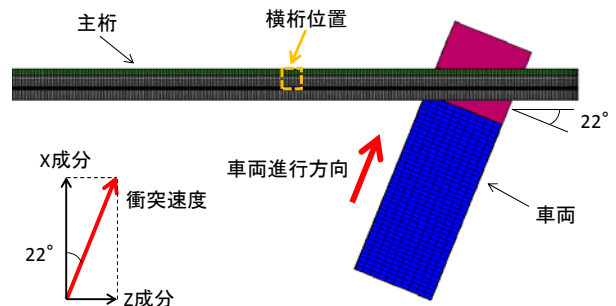


図-9 車両の衝突条件

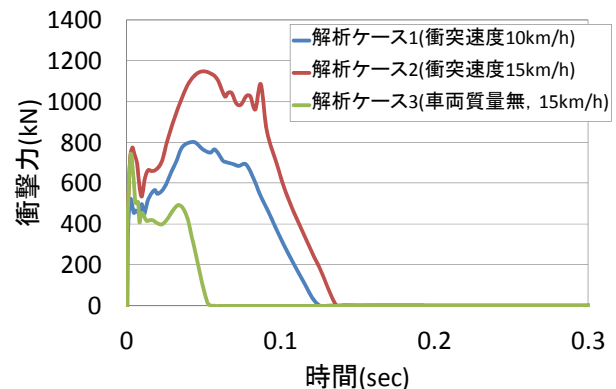


図-10 発生衝撃力

解析には、非線形有限要素解析ソフトウェア MSC.MARC2010 を使用した。直接時間積分法にはシングルステップフォーボルト法を用い、タイムステップが  $5.0 \times 10^{-7} \text{sec} \sim 2.5 \times 10^{-5} \text{sec}$  の間になるように自動制御した。

### 3.4 解析結果

#### (1) 発生衝撃力

図-10 に衝突から 0.3sec 後までの発生衝撃力を示す。解析ケース 1 と解析ケース 2 を比較すると、衝突速度が大きいケース 2 の方が最大衝撃力、衝撃力継続時間も大きくなっている。波形に関しては、両解析ケースで 1 波目の立ち上がりはほぼ共通しており、1 波目のピーク後に衝撃力はやや減少した後、再び値が増加して 2 波目でより大きな衝撃力が生じている。一般的な重錘落下衝撃試験で得られる衝撃力波形は、1 波目のピーク値が最大値となる場合が多いが、本解析では 2 波目が最大値となっている。大型車両のように質量が大きい物体の場合

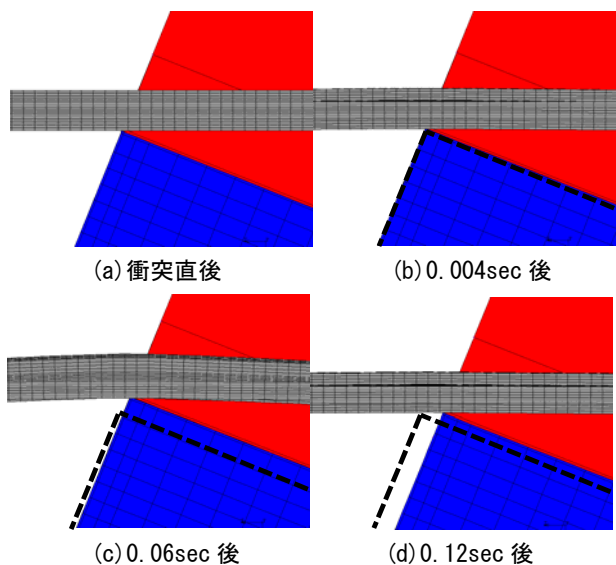


図-11 解析ケース 2 における衝突時の車両の挙動 (点線：衝突直後の車両位置)



は、衝突後すぐに跳ね返ることなく、運動エネルギーを保持したままさらに衝突方向へ移動しようとするため、衝突直後より遅れて衝撃力が最大になると考えられる。一方、解析ケース3では1波目で最大衝撃力が発生し、衝撃力継続時間も短くなっており、車両質量のモデル化の影響で衝撃力特性が変化することが確認できた。

図-11に解析ケース2における衝突時の車両の挙動を示す。図中の点線は衝突直後の車両位置を示している。この図より、1波目がピークを示す約0.004sec後にもさらに車両が衝突方向へ進行していることが確認できる。また、図-11(d)に0.12sec後の車両の衝突状態を示す。これより、車両は衝突直後の位置から横にずれながら接触していることが確認できる。

### (2) PC主桁の残留変位

図-12に衝突により最も大きく橋軸直角方向に変形した主桁断面の変位応答を示す。ここで、変位は車両の衝突方向を正とした。変位応答を出力した断面からA2橋台までの距離は5.5mである。解析ケース1における最大変位は約100mm、残留変位は約4mm、解析ケース2における最大変位は約170mm、残留変位は約15mm、解析ケース3における最大変位は約55mm、残留変位は約1mmであった。事故後に行われた調査結果によれば、変位応答を出力した断面と同位置の断面の残留変位は約16mmであり、解析ケース2の解析結果とほぼ等しいことが確認できた。このことから、対象とした事故における車両の衝突速度は15km/h程度であったと推察される。

### (3) 主桁のひび割れ分布性状

衝突により主桁に生じるひび割れを評価するために、引張りひずみに着目してひび割れ分布性状を検討した。図-13に残留変位時の引張りひずみのコンター図を示す。コンター図で表示した値は、応力が引張強度を超えた後の軟化領域におけるひずみ量である。この値が引張終局ひずみを上回った要素にはひび割れが生じたと仮定し、黒色で示した。図中の赤線は、実際の衝突事故により主桁に生じた主要なひび割れ分布を示している。なお、横桁からP2橋脚の区間では調査結果および解析結果の両方でひび割れ分布が確認されなかったため、図にはA2橋台から横桁位置までの結果のみを示した。

図-13より、衝突部を中心として左右に斜めひび割れが分布する様子がみられる。解析ケース1では、衝突部から左側のひび割れが生じておらず、右側のひび割れ領域も実際のひび割れ分布と比較して小さくなった。解析ケース2においては、左右両側に斜めのひび割れが生じており、左右のひび割れ領域は実際のひび割れと概ね一致している。解析ケース3では、衝突部近傍以外にはひび割れが生じておらず、衝突の規模が実際の事故よりも小さいと考えられる。以上より、残留変位と同様、解析

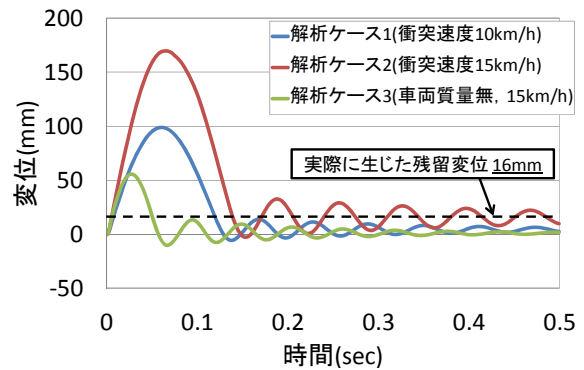


図-12 橋軸直角方向に最大変形した断面の変位応答

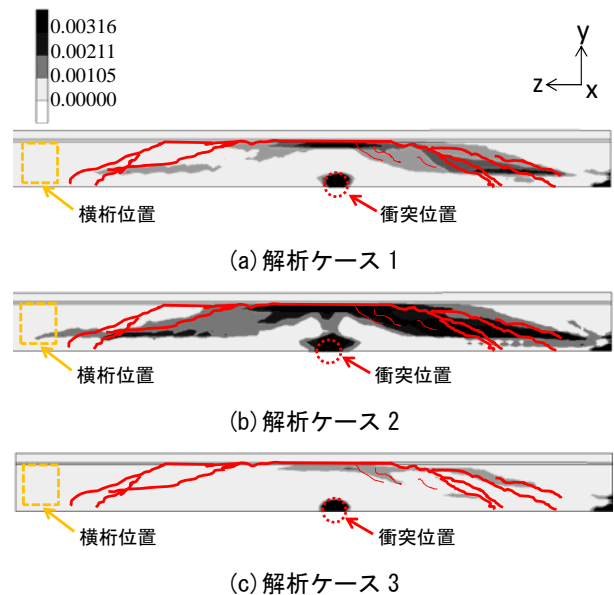


図-13 引張りひずみに着目した主桁のひび割れ分布性状 (赤線：実際に生じたひび割れ分布)

により得られたひび割れ分布性状からも、大型車両は衝突速度15km/hで衝突したことが推察される。また、衝突解析から得られたひび割れ分布性状は、事故で実際に生じたひび割れの位置を概ね再現出来ており、車両衝突により主桁に生じるひび割れをFEM解析により予測可能であることが確認できた。

### (4) 鉄筋およびPC鋼線のひずみ応答

主桁の鉄筋およびPC鋼線の降伏と破断の可能性について検討した。鋼材の降伏や破断は一般的にひずみ量で判断されるため、鉄筋、PC鋼線のひずみ応答に着目した。各鋼材のひずみ応答は、最も大きなひずみが生じた要素から出力した。図-14に各鋼材のひずみ応答を出力した要素積分点の位置を示す。なお、本研究では、鉄筋の降伏ひずみを0.0014、破断ひずみを0.2000、PC鋼線の降伏ひずみを0.0071、破断ひずみを0.0350と仮定した。また、上述の(2)、(3)の考察より、対象とした事故における車両の衝突速度は15km/h程度であったと推察されるため、解析ケース2についてのみ考察した。

図-15(a)、(b)、(c)に主鉄筋、せん断補強筋、PC鋼線

のひずみ応答を示す。各鋼材はトラス要素でモデル化したため、ひずみとして軸方向ひずみに着目した。図-15より、いずれの鋼材も破断ひずみを上回るひずみは生じておらず、衝突速度 15km/h 程度の大型車両の衝突では鋼材の破断は発生しないと予測される。主鉄筋については、残留ひずみが降伏ひずみより小さく、主鉄筋に損傷は生じていないと考えられる。また、せん断補強筋および PC 鋼線の残留ひずみはそれぞれ降伏ひずみを上回っており、いずれも降伏している可能性があるといえる。また、各鋼材の残留ひずみはピーク値に比べ大きく減少しているが、これは、図-12 に示す衝撃荷重作用時の部材の変形状況を見てもわかるように、部材の復元力特性に応じて部材内の鋼材もヒステリシスを描くためである。

以上の結果から、車両衝突部近傍には桁裏面まで達する貫通ひび割れが発生していたものの、桁内部の鉄筋や PC 鋼線の破断の可能性は非常に小さいため PC 鋼線の交換の必要性もほとんどなく、残存耐力の顕著な低下は生じないことが推定された。ただし、残存耐力の定量的評価を行うには、衝突後の桁に静的荷重を行うことで耐力評価を解析により評価する必要がある。

#### 4. 結論

本研究では、PC 桁が損傷した実際の事故を対象に、3次元 FEM による衝突解析を実施し、残留変位・ひび割れ状況・鉄筋および PC 鋼線の残留ひずみから PC 主桁の損傷度を推定した。

以下に、本研究より得られた知見を示す。

- 1) 対象とした事故の車両進入速度（衝突速度）は約 15km/h であったことが解析により明らかになった。
- 2) 実際の損傷度調査結果と比較すると、FEM を用いた衝突解析により、大型車両の衝突により生じる PC 主桁の残留変位やひび割れ分布性状などの損傷度を適切に把握できることが確認できた。
- 3) その際、車両重量により発生衝撃力の特性が変わることから、車両重量は車体やコンテナなど全てを適切にモデル化することが必要であることが確認できた。
- 4) 車両衝突部近傍には桁裏面まで達する貫通ひび割れが発生していたものの、桁内部の鉄筋や PC 鋼線の破断の可能性は非常に小さく、残存耐力の顕著な低下は生じないことが解析によって推定された。

#### 参考文献

- 1) 芝尾英一，西本久之輔，則武邦具，石川真一郎：クレーン船の衝突によって損傷した PC 橋（青海大橋）の復旧工事，プレストレストコンクリート，Vol.31，No.6，pp.23-30，1989.11
- 2) 磯邊雅敏，牧角龍憲，西原和彦，西尾浩志：船舶の

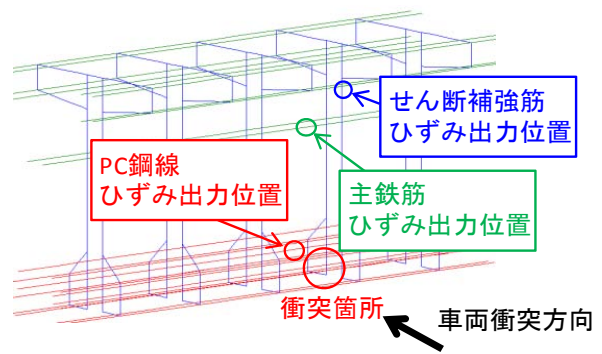
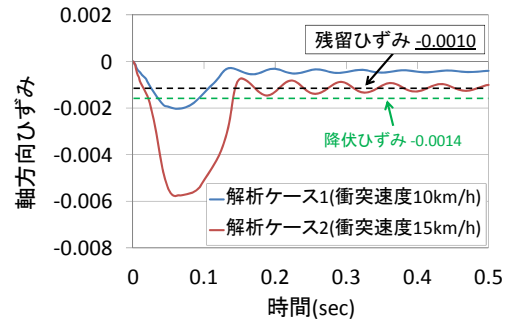
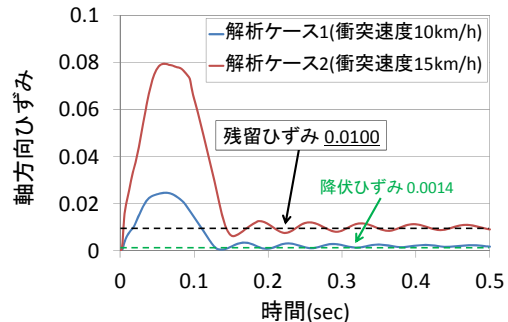


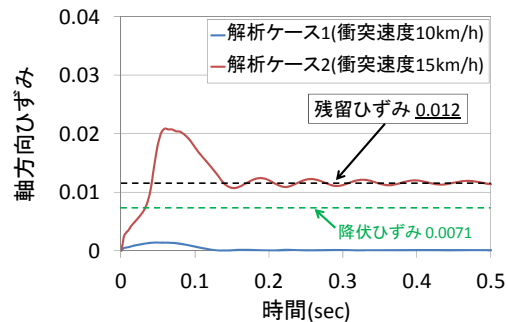
図-14 各鋼材のひずみ応答を出力した位置



(a) 主鉄筋



(b) せん断補強筋



(c) PC 鋼線

図-15 各鋼材のひずみ時刻歴応答

衝突により損傷した名島弁天橋の桁復旧工事の施工とこれに伴う諸検討，プレストレストコンクリート，Vol.35，No.3，pp.24-33，1993.5

- 3) 岡本晴彦，太田義弘，上林厚志，前中敏伸：よくわかる PC 構造物の FEM 解析，プレストレストコンクリート，Vol.43，No.6，pp.118-126，2001.11
- 4) Comite Euro-international du Beton : CEB-FIP model code 1990: design code，pp.35-37，1990