

# 論文 一端がピン支持され他端を基礎あるいは緩衝ゴム上に自由落下させる RC 梁の衝撃応答解析

川村 真生<sup>\*1</sup>・瓦井 智貴<sup>\*2</sup>・佐藤 京<sup>\*3</sup>・久慈 茂樹<sup>\*4</sup>

**要旨：**本研究では、段差防止構造上に橋桁が落下した場合を想定し、単純部材である矩形 RC 梁の一端を自由落下させた場合における耐衝撃挙動を適切に評価可能な数値解析手法の確立を目的として、有限要素法による三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。なお、梁落下地点への緩衝ゴム設置の有無を変化させた実験結果と得られた数値解析結果を比較することによって、本数値解析手法の妥当性検討を試みた。その結果、提案の数値解析手法を用いることによって、緩衝ゴム設置の有無によらず一端が自由落下する RC 梁の耐衝撃挙動をほぼ適切に再現可能であることが明らかとなった。

**キーワード：**RC 梁、緩衝ゴム、衝撃応答解析、段差防止、自由落下

## 1. はじめに

我が国は、世界有数の地震多発地帯であることより、しばしば地震災害が発生している。また、大規模な地震災害が発生した場合には、橋梁支承部が損傷し、**写真-1**に示すように路面に大きな段差が生じる事例が発生している<sup>1)</sup>。このような段差が生じた状況下においては、車両走行によって人命に関わるような事故が発生する場合や、緊急車両等の走行が困難となり避難や人命救護の遅れが危惧される。

このような被害を受ける橋梁の早期機能回復を目的とした対策工には、落橋防止装置や変位制限装置の他、段差防止構造がある。段差防止構造は、地震発生時に支承が破損し、橋桁がリバウンド状態に至って橋台に落下した場合においても、路面に生じる段差量を抑制させ、橋梁機能の早期復旧を図り緊急車両の走行を可能にすること等を目的に、橋台に設置されている。一方で、段差防止構造の性能規定<sup>2)</sup>は未だ不明確であることから、橋桁落下時における段差防止構造や橋桁自体の応答性状を明らかにすることが重要であるものの、段差防止構造の耐衝撃挙動や橋桁の落下損傷状況について未だ十分に検討が



写真-1 路面に段差が生じた被災事例<sup>1)</sup>

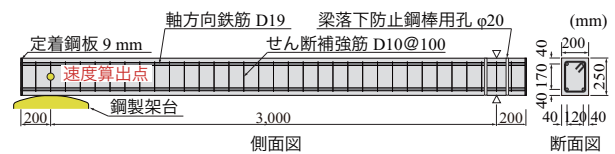


図-1 RC 梁の形状寸法および配筋状況

行われていないのが現状である。また、この種の研究を効率的に遂行するためには、実験的検討はもちろんのこと、経済的な観点からも実験結果を適切に評価可能な数値解析手法の確立が肝要であると考えられる。

このような観点から、段差防止構造上に橋桁が落下した場合を想定し、梁が落下した場合における耐衝撃挙動を適切に評価可能な解析手法の確立を目的として、有限要素法による三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。また、別途実施した実験結果と得られた数値解析結果を比較することによって、本数値解析手法の妥当性の検討を試みた。なお、実験では、橋桁が落下した場合の基礎的なデータの把握を念頭に、単純部材である RC 梁に着目することとし、破壊性状が明確になるように落下高を 0.5 m と設定した。また、RC 梁落下地点に緩衝ゴムを設置した場合と、比較のために直接、鋼製基礎上に落下する場合の 2 ケースの実験を実施している。本数値解析には汎用構造解析プログラム LS-DYNA<sup>3)</sup> (R15) を用いている。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

図-1 には、試験体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体の形状寸法 (幅 × 高さ × 全長) は、200 × 250 × 3,400 mm である。また、軸方向鉄筋には D19 を用

\*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科 博士前期課程 環境創生工学系専攻 (学生会員)

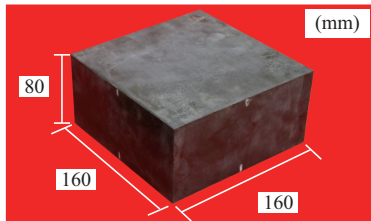
\*2 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 土木工学ユニット 助教 博(工) (正会員)

\*3 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム (非会員)

\*4 一般社団法人ゴム支承協会 (非会員)

表－１ 試験体の一覧

| 試験体名 | 緩衝ゴムの有無 | 設定落下高 $H$ (m) | 設定衝突速度 $V$ (m/s) | 実測衝突速度 $V'$ (m/s) | 主鉄筋降伏強度 $f_y$ (MPa) | せん断筋降伏強度 $f_{sy}$ (MPa) | コンクリート圧縮強度 $f'_c$ (MPa) |
|------|---------|---------------|------------------|-------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| N    | 無       | 0.5           | 3.13             | 3.56              | 386.7               | 377.2                   | 26.2                    |
| R    | 有       |               |                  | 3.52              | 372.3               |                         |                         |



写真－２ 緩衝ゴムの形状寸法

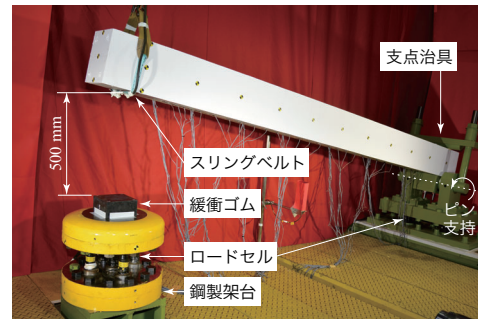
い上下端に各２本配置して、梁軸方向端面に設置した厚さ 9 mm の定着鋼板に溶接固定している。さらに、せん断補強筋には D10 を用い、100 mm 間隔で配筋した。なお、実験を行う上での安全面を考慮し、RC 梁を設定落下高 (= 0.5 m) まで吊り上げた際の滑り落ちを防止することを目的に、RC 梁の支点部を中心に梁軸方向左右 80 mm の位置に  $\phi 20$  の梁落下防止鋼棒用孔を２つ設けている。

表－１には、本数値解析で対象とした試験体の一覧を示している。試験体は、RC 梁の衝突部に段差防止構造を模擬した緩衝ゴム設置の有無を変化させた全２体である。いずれのケースも、上述の通り、試験体の形状寸法は同一である。表中の試験体名において、N は鋼製架台上に、R は鋼製架台に設置した緩衝ゴム上に試験体を落下させることを表している。表中、設定落下高  $H$ 、設定衝突速度  $V$ 、実測衝突速度  $V'$  や、コンクリートおよび鉄筋の材料強度も併せて示している。ここでは、いずれのケースも 0.5 m から自由落下させることとした。なお、実測衝突速度  $V'$  は、図－１に示されている速度算出点の変位を用いて評価している。

写真－２には、R 試験体の場合に用いた緩衝ゴムの形状寸法を示している。本実験では、設計要領<sup>4)</sup>を基に、一般的な段差防止構造用材料として採用されている硬度 55 のクロロプレンゴムを用いることとした。幅に関しては、試験体幅 (=200 mm) を考慮し、緩衝ゴムが圧縮変形した際に梁幅を超えない程度の 160 mm 四方と設定した。また、厚さに関しては、設計要領<sup>4)</sup>を参考に、基礎的な検討として形状係数が 0.5 となる 80 mm とした。

## 2.2 実験方法および測定項目

写真－３には衝撃荷重実験の状況を示している。実験の実施方法は以下の通りである。すなわち、1) 試験体端部にスリングベルトを設置し、2) 試験体はベルトを介してチェーンブロックを用い、手で試験体下面の衝突点から高さ 0.5 m の位置まで吊り上げ、3) ベルトに挿入し



写真－３ 実験状況 (R 試験体の場合)

ている電熱線に高圧電流を流し、4) ベルトを焼き切ることによって試験体を自由落下させる。なお、写真－３に示す通り、R 試験体の場合には平滑な鋼製架台に緩衝ゴムを設置し、試験体とゴムが面で衝突するように実験を実施した。一方で、N 試験体の場合には、緩衝ゴムを取り除くとともに、鋼製架台衝突部を取り替え、試験体と架台が点で衝突するように実施した。また、支点部に関しては、衝突時に試験体の跳ね上がりを防止するため、跳ね上がり防止治具によって片側のみ締め付けている。

本実験の測定項目は、試験体衝突位置における衝撃力 (以後、単に衝撃力)、支点反力、梁スパン中央および衝突位置における鉛直方向変位 (以後、それぞれ中央点変位、衝突点変位)、試験体上下縁における軸方向ひずみ、である。

## 3. 衝撃応答解析の概要

### 3.1 有限要素解析モデル

図－２には、図－１を基に作成した数値解析モデルを示している。ここでは、対称性を考慮して、梁幅方向に等分した 1/2 モデルを採用した。また、梁の衝突によって発生する波動伝播を実験に即した形で適切に評価するため、試験体から実験治具までを可能な限り詳細にモデル化した。一方で、支点治具に関しては、理想的なピン支持状況を仮定し、図に示す通り、回転軸と試験体締め付け治具および梁落下防止鋼棒のみをモデル化することとし、ロードセルを含むその他の支点治具のモデル化は省略した。なお、軸方向鉄筋および梁落下防止鋼棒は、公称断面積と等価な正方形断面に簡略化している。

鋼製架台に関しては、実験時と同様に、H 形鋼をベースとした架台の上に衝撃力波形計測用のロードセル一体型球形治具を配置し、可能な限り詳細にモデル化した。なお、図示するように、N/R 両試験体の場合において、それぞれ鋼製架台の形状を変化させた上で解析を実施している。

要素タイプは、せん断補強筋には２節点梁要素を、コンクリートや軸方向鉄筋、緩衝ゴムなどその他全てに 8 節点固体要素を適用した。また、積分点数はデフォルトの設定を用い、それぞれ 4 点、１点積分とした。

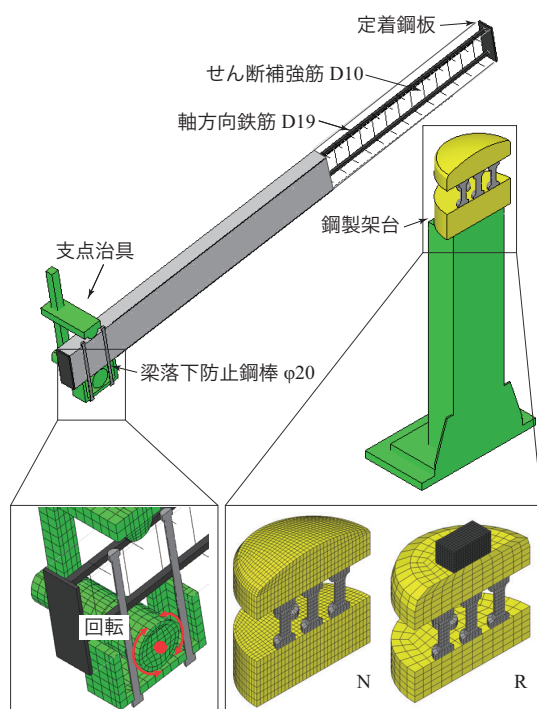


図-2 有限要素モデル

拘束条件は、実験時と同様に支点治具の回転軸を中心にピン支持と設定するとともに、梁幅方向対称切断面における法線方向変位成分を拘束し、鋼製架台底面は完全固定とした。接触条件に関しては、コンクリート-支点治具、鋼製架台および緩衝ゴム間に、それぞれ滑り・剥離を伴う面-面の接触を定義した。また、コンクリート-鋼製架台、支点治具間の摩擦は無視し、緩衝ゴム-コンクリート、鋼製架台間の摩擦は予備解析より 0.4 と設定した。減衰は考慮していない。数値解析は、梁の衝突速度が、表-1 に示す実測衝突速度  $V'$  と同等の値になるように、落下高を換算し重力で自由落下させることによって実施した。なお、梁は実験時と同様に、支点支柱断面部に跳ね上がり防止のための締め付け力を考慮した。

### 3.2 材料構成則

図-3 には、本数値解析で用いた各材料の応力-ひずみ関係を示している。図-3 (a) には軸方向鉄筋およびせん断補強筋に適用した応力-ひずみ関係を示している。図より、軸方向鉄筋およびせん断補強筋には塑性硬化係数を弾性係数の 1% とするバイリニア型の等方硬化則を適用し、降伏の判定には von Mises の降伏条件式を採用している。単位体積質量、弾性係数およびポアソン比は公称値である  $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $E_s = 206 \text{ GPa}$ ,  $\nu_s = 0.3$  とした。また、軸方向鉄筋およびせん断補強筋に関しては表-1 に示す降伏応力を入力した。

図-3 (b) には、コンクリートの応力-ひずみ関係を示している。図に示すように、圧縮側に関しては相当ひずみが 0.15% に達した時点でコンクリートが降伏するものと仮定し、完全弾塑性体のバイリニア型とした。降伏の

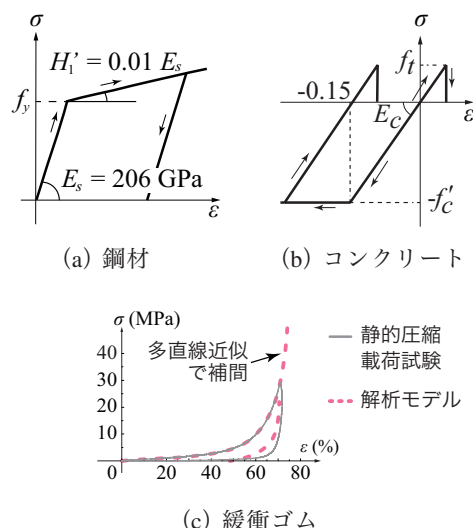


図-3 材料構成則

判定には Drucker-Prager の降伏条件式を採用している。また、引張側に関しては引張強度 ( $= f'_t/10$ ) に達した時点で引張力を伝達しないカットオフモデルを採用した。単位体積質量およびポアソン比は、 $\rho_c = 2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu_c = 0.167$  を用いた。なお、圧縮強度は別途実施した材料試験結果より  $f'_c = 26.2 \text{ MPa}$  とした。

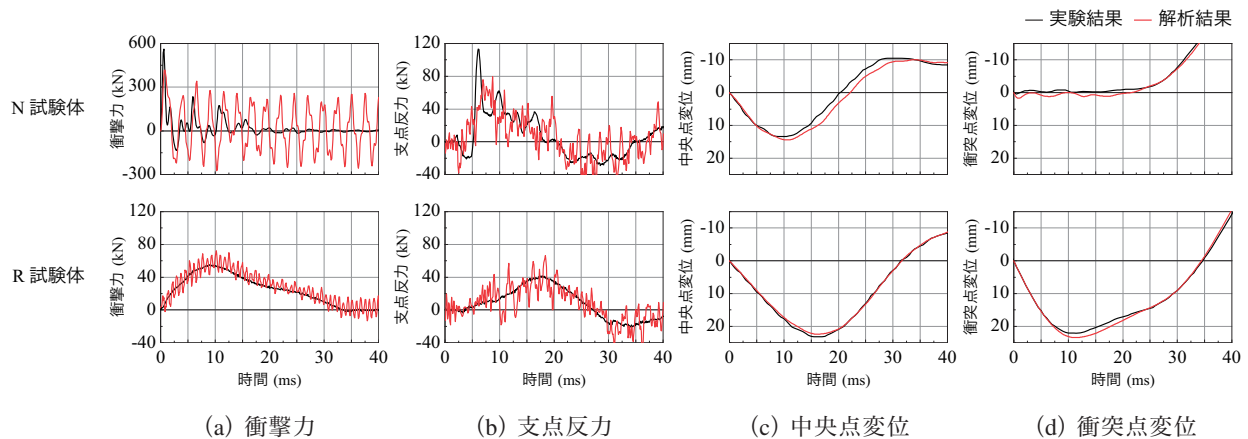
図-3 (c) には、写真-2 に示す緩衝ゴムを対象に、別途実施した静的圧縮载荷試験より得られた応力-ひずみ関係を示している。試験は载荷装置の最大容量まで载荷することとし、図の通り、圧縮応力 30 MPa 程度で最大ひずみ 70% 程度まで载荷を行った。本解析では、試験結果を基に多項式近似によって赤点線で示す曲線を作成し、緩衝ゴムの応力-ひずみ関係として定義した。なお、後述するように本実験結果においては、緩衝ゴムの最大圧縮ひずみは 20% 程度であることを確認している。また、実験時に用いた硬度 55 のクロロプレンゴムを想定し、単位体積質量およびポアソン比は、それぞれ  $\rho_r = 1.09 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu_r = 0.495$  とした。

支点治具、鋼製架台等のその他の部材に関しては、実験時に塑性変形が確認されていないことより、弾性体でモデル化した。また、単位体積質量、弾性係数およびポアソン比は  $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $E_s = 206 \text{ GPa}$ ,  $\nu_s = 0.3$  と設定した。なお、いずれの構成則においても、ひずみ速度効果は考慮していない。

## 4. 数値解析結果および考察

### 4.1 各時刻歴応答波形

図-4 には、N/R 両試験体に関する衝撃力、支点反力、中央点変位および衝突点変位の時刻歴応答波形を、実験結果と解析結果を比較する形で示している。なお、横軸はコンクリートが鋼製架台または緩衝ゴムに接触した時点を零とし、衝突後梁がリバウンド状態に移行する 0 ~



図－４ 各種時刻歴応答波形

40 ms までの結果を示した。また、実験結果は黒線で、解析結果は赤線で表示している。数値解析結果に関して、衝撃力は鋼製架台上に設置した衝撃力計測用ロードセル中央断面位置における鉛直断面力を用いて評価した。支点反力は、ピン支持と設定した支点回転中心軸における拘束節点より鉛直方向反力を求め評価した。中央点変位および衝突点変位は、実験時に高速度カメラで追跡したターゲットマーカと同様な位置における節点にて鉛直方向変位を求め評価した。

まず、図－４ (a) に示す衝撃力波形に着目すると、実験結果では、N 試験体の場合において約 1 ms 時点で最大値に到達し、その後振幅が徐々に減少しながら複数回に渡って衝撃力が励起する振動状態にあることが分かる。また、R 試験体においては約 10 ms 時点で最大値を示し、その後緩やかな除荷勾配を伴う正弦半波状の様相を呈していることが確認でき、両試験体ではその波形性状に大きな違いがあることが分かる。これは、緩衝ゴムによる荷重分散効果の有無による影響と推察される。最大衝撃力は、N/R 両試験体に関して、それぞれ 562, 55 kN であり、緩衝ゴムを設置することで最大衝撃力が 1/10 程度まで抑制されていることも読み取れる。数値解析結果に着目すると、いずれの試験体に関しても、実験結果では卓越していない高周波成分が確認できる。これは、本モデルにおいては減衰を考慮していないことが要因と推察される。しかしながら、高周波成分を除くと、数値解析結果は実験結果と概ね類似の傾向を示しているものと判断される。

次に、図－４ (b) に示す支点反力波形に着目すると、実験結果では、N/R 両試験体において载荷初期に負反力を示しており、最大でそれぞれ 20, 2 kN 程度の値が発生していることが分かる。これは、梁が鋼製架台または緩衝ゴムに衝突後、飛び跳ねるような傾向を示していることを暗示している。最大支点反力を見ると、N/R 両試験体に関して、それぞれ 113, 41 kN であり、緩衝ゴムを設置することによって、衝撃力波形と同様に、正負の反力値

は低減される傾向が確認できる。なお、その低減率は衝撃力波形と比較すると小さい。数値解析結果に着目すると、衝撃力波形と対応して、実験結果では卓越しない高周波成分が確認できる。しかしながら、最大到達時間や継続時間、および緩衝ゴムを設置することで最大反力が低減される傾向は実験結果と概ね対応している。

次に、図－４ (c) に示す中央点変位波形に着目すると、実験結果では、いずれの試験体においても最大変位に到達した後リバウンドによって上方に浮き上がる傾向を示していることが読み取れる。また、緩衝ゴムの設置により継続時間が延びる傾向も確認できる。最大変位を見ると、N/R 両試験体に関して、それぞれ 13, 23 mm であり、R 試験体の場合の方が大きく示されている。これは、緩衝ゴム自体の変形分も含まれているためである。数値解析結果に着目すると、いずれの試験体においても、実験結果と比較して類似の時間に最大変位に到達し、その後浮き上がる傾向に至るまで、ほぼ適切に再現できていることが確認できる。

最後に、図－４ (d) に示す衝突点変位波形に着目すると、実験結果では、N 試験体の場合において鋼製架台と直接衝突することより、ほぼ零付近で振動した後、リバウンドにより上方に浮き上がる傾向が確認できる。また、R 試験体の場合においては緩衝ゴムを設置していることより、N 試験体の場合と比較してその挙動は大きく異なる。ここで、最大変位を見ると、22 mm 程度変位していることから、緩衝ゴムの厚さを基に換算すると、最大で 25 % 程度圧縮ひずみが生じていることが分かる。数値解析結果に着目すると、両試験体ともに実験結果をほぼ適切に再現していることから、緩衝ゴムの変形状況も適切に評価できることが分かる。

#### 4.2 落下時における梁の応答性状に関する経時変化

図－５には、本数値解析結果より得られた軸方向ひずみ分布および、ひび割れ分布性状に関する経時変化 ( $t = 0.5 \sim 40$  ms) を示している。また、ひずみ分布のみ実験結果と比

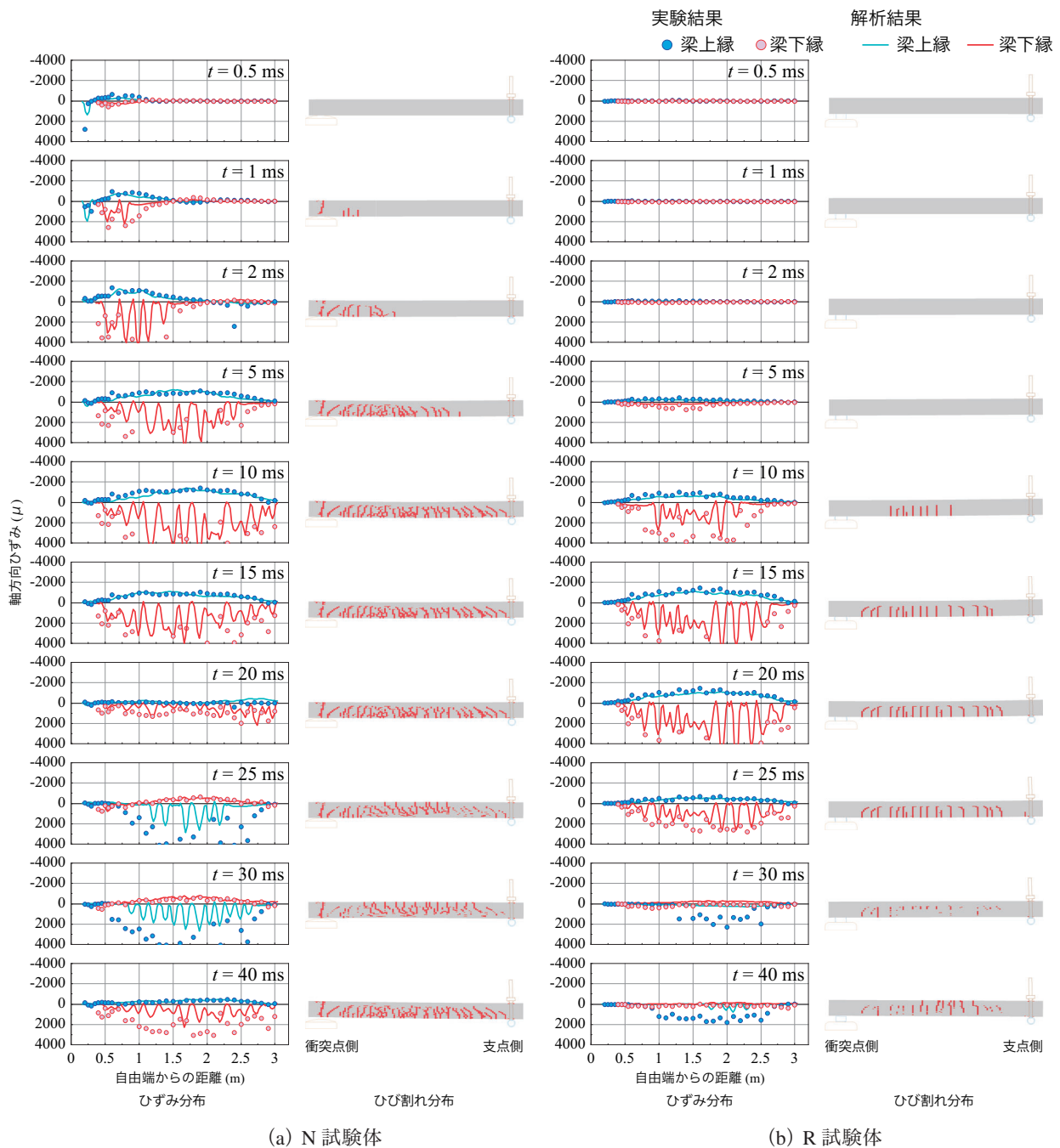
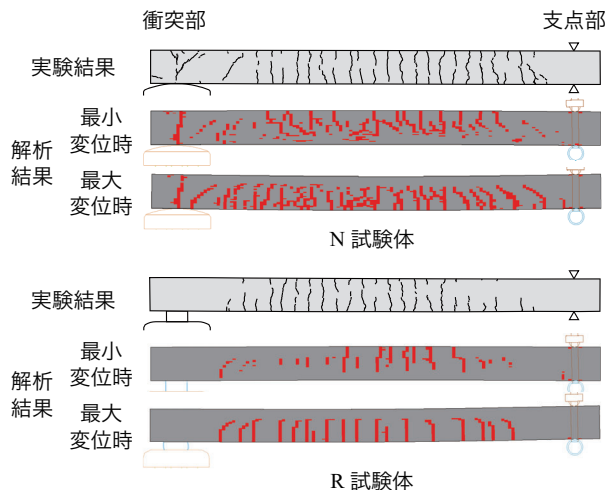


図-5 ひずみ分布およびひび割れ分布に関する経時変化

較する形で示しており、実験結果に関しては上縁、下縁ひずみをそれぞれ青丸、赤丸で、解析結果に関しては上縁、下縁ひずみをそれぞれ青線、赤線で示している。なお、本数値解析におけるひび割れの評価方法は、図-3 (b)に示す通り、コンクリート要素が引張強度到達後、引張応力を伝達しないカットオフモデルを採用していることより、第一主応力が零の値を示す要素を赤色表示し、ひび割れ相当要素として評価することとした。

まず、図-5 (a)に示すN試験体の実験結果に着目すると、 $t = 0.5 \text{ ms}$ 時点では衝突位置近傍上縁に引張ひずみが下縁には圧縮ひずみが発生していることが見て取れる。これは、衝突初期には衝突位置近傍が局所的に負曲げの性

状であることを示唆しており、数値解析結果においても、同様の傾向が確認できる。 $t = 1 \sim 2 \text{ ms}$ 時点を見ると、実験および数値解析結果ともに、衝突位置で生じたひずみが支点に向かって徐々に伝搬していく様子が見て取れる。また、上縁側と比較して下縁側ではひずみの乱れが確認できる。これは、数値解析結果より得られるひび割れ分布からも分かるように、ひび割れの発生とともに、局所的に鉄筋が降伏していることによるものと推察される。ひずみの発生領域やその値を詳細に見ると、両者で類似の傾向を示していることも分かる。 $t = 5 \sim 10 \text{ ms}$ 時点を見ると、両者で支点部に向かってさらにひずみが伝搬していく傾向が対応しており、スパン全長にわたって、下縁



図－6 梁側面におけるひび割れ分布の比較

には引張，上縁には圧縮ひずみが励起する正曲げの性状を呈していることがうかがえる。 $t = 10$  ms 以降においては，図－4に示す変位波形に対応し，徐々にひずみが復元するとともに自由振動状態に至り， $t = 25 \sim 30$  ms 時点では負曲げ， $t = 40$  ms 時点は再度正曲げの性状を呈していることが分かる。各ひずみ値を詳細に見ると，引張ひずみが生じる場合において，実験結果と解析結果で差異が確認できるものの，ひずみの発生領域や正負曲げの性状は両者で一致している。

次に，図－5 (b) に示す R 試験体の場合に注目すると，実験結果では， $t = 2$  ms 時点においてもひずみが未だ励起していないものの， $t = 5$  ms 時点においては自由端から 2 m 程度の範囲でひずみが分布していることが分かる。数値解析結果を見ると，当該時間範囲において実験結果と同様な傾向を示し，ひび割れも生じていないことが確認できる。 $t = 10 \sim 20$  ms 時点においては，N 試験体の場合における  $t = 5 \sim 10$  ms 時点のひずみ分布と類似の様子が確認でき，解析結果が実験結果を概ね適切に再現していることが確認できる。ここで，ひび割れ分布を比較すると，N 試験体の場合には衝突位置から，R 試験体の場合にはスパン中央部から，それぞれ両端に向かってひび割れが進展していく性状を示しており，ゴムの緩衝効果によってその進展状況が異なることを数値解析的に確認できる。 $t = 25$  ms 以降は，リバウンド状態に移行しており，N 試験体の場合と同様に，実験結果および数値解析結果ともに，負曲げの性状に移行していくものと推察される。

#### 4.3 ひび割れ分布

図－6には，N/R 両試験体に関する実験終了後および本数値解析結果より得られたひび割れ分布を比較して示している。また，数値解析においては，衝突後リバウンド状態に移行する 40 ms までの計算であることより，最大あるいは最小中央点変位を示した時間におけるそれぞれのひび割れ分布を示した。

図より，実験結果を見ると，N 試験体の場合においては，衝突位置近傍で上縁からの曲げひび割れや斜めひび割れが発生していることが分かる。また，スパン中央部においては，等間隔に上縁あるいは下縁からのひび割れが分布していることが確認できる。一方で，R 試験体の場合には，衝突位置近傍のひび割れは生じておらず，N 試験体の場合と比較して支点部近傍の損傷も小さい。ただし，スパン中央部においては両試験体ともに同様な分布性状を示している。数値解析結果に着目すると，正負の曲げに対応する形でひび割れ相当領域が分布しており，いずれの試験体に関しても実験結果を概ね適切に再現していることが分かる。なお，数値解析の場合，同一試験体間の各中央点変位発生時におけるひび割れ分布を比較すると，一度生じたひび割れが閉じ，赤色領域が灰色領域へと変化していることが見て取れる。これは，引張強度に到達した要素に圧縮応力が伝達されたためと考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では，段差防止構造上に橋桁が落下した場合を想定し，単純部材である矩形 RC 梁を対象に，梁が落下した場合における耐衝撃挙動を適切に評価可能な数値解析手法の確立を目的として，有限要素法による三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。なお，別途実施した衝撃荷重載荷実験結果と得られた数値解析結果を比較することによって，本数値解析手法の妥当性の検討を試みた。本研究で得られた事項を整理すると以下のように示される。

- 1) 提案の数値解析手法を用いることによって，一端が自由落下する RC 梁の衝撃力，支点反力，応答変位の時刻歴波形をほぼ適切に再現可能である。
- 2) 実験結果と同様に，数値解析結果においても，緩衝ゴムを設置することにより，衝撃力および支点反力が低減される傾向を確認した。
- 3) RC 梁の軸方向ひずみ分布およびひび割れ分布に関して，解析結果は実験結果を概ね再現可能である。また，緩衝ゴム設置の有無によってひび割れの進展状況が異なることを数値解析的に確認した。

#### 参考文献

- 1) 金沢工業大学：令和 6 年能登半島地震による長大橋梁の被害状況調査報告（第 2 版）参照：[https://www.kanazawa-it.ac.jp/kenkyu/earthquake-news\\_01.pdf](https://www.kanazawa-it.ac.jp/kenkyu/earthquake-news_01.pdf)（閲覧日：2025 年 1 月 10 日）
- 2) （公社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，2017。
- 3) ANSYS, Inc：LS-DYNA User's Manual, R15, 2024。
- 4) （株）高速道路総合技術研究所：設計要領 第二集 橋梁建設編，2016。