

# 論文 側方鉄筋を有する T 型 RC 梁の耐衝撃挙動に関する弾塑性応答解析

小林 竜太<sup>\*1</sup>・岸 徳光<sup>\*2</sup>・三上 浩<sup>\*3</sup>

**要旨:** 本研究では、橋梁下部構造の橋台ウィング部材のように壁部材に面内方向の衝撃荷重が作用する場合の衝撃応答解析手法を確立することを目的として、側方鉄筋を有しスターラップを密に配置した T 型 RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を実施し、実験結果と比較することにより数値解析手法の妥当性に関する検討を行った。検討の結果、1) 重錘衝撃力および支点反力波形に関しては、全般的な応答性状を概ね再現可能であること、2) 最大変位および残留変位ともに実験結果を比較的精度良く再現可能であること、3) ひび割れ分布性状に関しても実験結果を大略再現可能であること、等が明らかとなった。

**キーワード:** T 型 RC 梁, 側方鉄筋, 重錘落下衝撃実験, 有限要素法, 弾塑性衝撃応答解析

## 1. はじめに

著者らは、大規模地震時に桁端衝突作用を受ける橋梁下部構造（以後、橋台と称す）の耐衝撃挙動を明らかにすることを目的として、実規模橋梁を対象として三次元有限要素法に基づいて橋桁、橋台、裏込め土および基礎地盤を忠実にモデル化した数値解析的な検討を行った<sup>1)</sup>。

その結果、1) 橋台の翼壁（以後、ウィングと称す）は桁端衝突作用を受ける橋台の水平抵抗に大きく寄与すること、2) 橋桁が橋台に衝突する場合には、胸壁（バラベツト）のみならず堅壁基部やウィング壁部にも損傷が及ぶ可能性があること、等を明らかにしている。また、ウィング部材は鉄筋が鉛直方向および水平方向の 2 方向に格子状に配置された部材であり、橋桁による桁端衝突に対しては比較的厚さの薄い壁部材として面内方向の水平力に抵抗することから、この種の RC 部材の耐衝撃挙動を明らかにする必要性が示唆された。

一方、著者らはこれまで RC 部材の耐衝撃挙動を簡易かつ適切にシミュレート可能な数値解析手法の確立を目的として、基本的な構造部材である RC 梁等を対象とした有限要素法による三次元弾塑性衝撃応答解析を数多く実施してきた。その結果、各種の重錘落下衝撃実験結果との比較を通して RC 部材の耐衝撃挙動を精度良く予測可能な数値解析手法を提案するに至っている<sup>2)</sup>。しかしながら、壁部材に面内方向の衝撃荷重が作用する場合に関しては、提案の数値解析手法の妥当性が必ずしも保証されたものにはなっていない。

このような観点から、本研究では橋台のウィング部材のように、2 方向に鉄筋が配置された壁部材に面内衝撃荷重が作用する場合の衝撃応答解析手法を確立することを目的として、側方鉄筋を有しかつスターラップを密に配置した T 型 RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を実施し、

実験結果と比較することにより、著者らによる既提案の数値解析手法の妥当性に関する検討を行った。

検証項目は、重錘衝撃力、支点反力、応答変位およびひび割れ分布性状である。なお、本研究における弾塑性衝撃応答解析には、陽解法に基づく非線形動的応答解析汎用コードである LS-DYNA(Ver.971)<sup>3)</sup>を適用した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体の概要

図-1には、本研究で対象とした試験体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体の断面寸法（梁幅×梁高）は 150 mm×500 mm を基本としているが、本実験では重錘衝突部の局所的な損傷を防止するために幅 350 mm、高さ 100 mm のフランジを設けた T 型断面とした。また、梁幅が 150 mm と薄いことから、実験時の試験体の転倒を防止するために両支座位近傍の 500 mm 区間は矩形断面としている。なお、試験体の純スパン長は 2,500 mm であり、せん断スパン比は 2.72 である。

軸方向鉄筋およびスターラップには、いずれも D10 (SD345)を用いて、それぞれ 100 mm 間隔で格子状に配置している。また、フランジ部には D10 の軸方向鉄筋を計 10 本配置し、D6 (SD295)の囲い筋を用いてそれらを閉合させた。なお、軸方向鉄筋は梁端面に設置した厚さ 9 mm の定着鋼板に溶接することでその定着長を節約している。

表-1には、土木学会コンクリート標準示方書<sup>4)</sup>に準拠して算出した試験体の静的設計耐力値を示している。なお、設計耐力値は部材係数および材料係数を 1.0 とし求めた。これより、本試験体はせん断余裕度が 1.0 以上であることより、静載荷時には曲げ破壊型で終局に至ることが想定される。表-2、表-3には、それぞれコンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示している。

\*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科 博士後期課程 建設工学専攻 修(工) (正会員)

\*2 室蘭工業大学大学院 工学研究科 くらし環境系領域 教授 工博 (正会員)

\*3 三井住友建設(株) 技術研究開発本部 技術開発センター 主席研究員 博(工) (正会員)

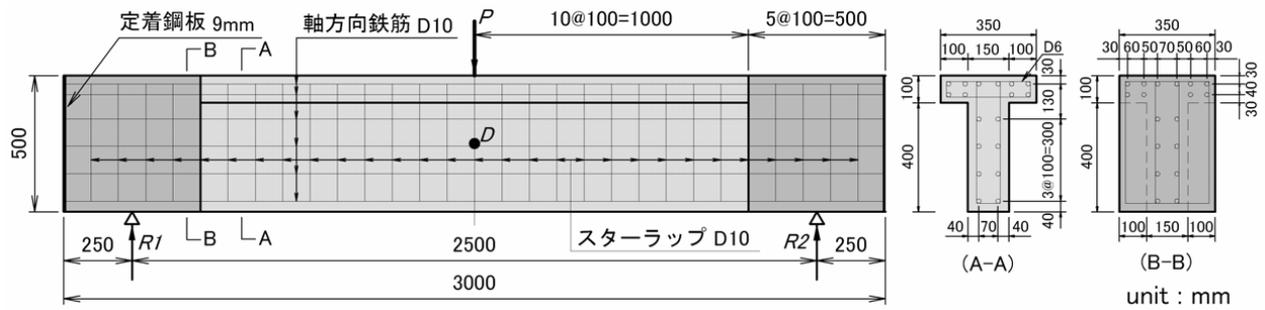


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

表-1 試験体の静的設計耐力値

設計曲げ耐力 $P_{usd}$ (kN)	設計せん断耐力 $V_{usd}$ (kN)	せん断余裕度 $\alpha$ ( $V_{usd}/P_{usd}$ )
109.0	521.2	4.78

表-2 コンクリートの力学的特性値

圧縮強度 $f'_c$ (MPa)	引張強度 $f_t$ (MPa)	弾性係数 $E_c$ (GPa)	ポアソン比 $\nu_c$
28.8	2.16 <sup>**</sup>	18.4	0.2

※圧縮強度からの推定値 (コンクリート標準示方書に準拠)

## 2.2 衝撃载荷実験の方法

重錘落下衝撃実験は、鋼製重錘を試験体のスパン中央部に所定の高さから一度だけ自由落下させる単一载荷とした。なお、本実験では重錘衝突速度を  $V = 1, 5, 6$  m/s とした計3ケースに対して実施している。実験で用いた重錘は、質量500 kg、载荷点部の直径が150 mmの円柱状鋼製重錘であり、重錘底部は衝突時の片当たりを防止するために高さ2 mmのテーパを有する球面状になっている。重錘は十分に剛な重錘落下用鋼製ガイド塔に固定された2本のリアウェイレールを介して、落下時および試験体への衝突後もその姿勢が前後・左右に正確に制御されている。また、重錘の落下高さは、速度センサーを用いた予備実験によって落下高さと設定衝突速度との関係を検定し、この検定表に則して決定している。

なお、試験体は支点反力測定用ロードセル付きの鋼製の支点上に設置しており、かつ重錘衝突時の試験体の跳ね上がりを防止するために写真-1に示すような跳ね上がり防止用治具を用いて固定している。また、跳ね上がり防止用治具は支点とともに軸を中心に回転できるようになっているため、治具全体は試験体の回転のみを許容するピン支持に近い状態となっている。

本実験における測定項目は、重錘衝撃力  $P$ 、支点反力  $R$  (片側支点反力の合計:  $R = R_1 + R_2$ ) および試験体側面のスパン中央部における载荷点変位  $D$  に関する各種応答波形である。ここで、重錘衝撃力および支点反力は、それぞれ重錘と支点治具に内蔵された起歪柱型衝撃荷重測定用ロードセルを用いて測定し、応答変位は非接触型レーザ式変位計を用いて測定している。なお、支点反力波形に関しては、ノイズを含んだ高周波成分を除去するために原波形に対して0.5 msの矩形移動平均法によって数値的なフィルター処理を施している。また、実験終了後には試験体側面に生じたひび割れ分布を記録している。

表-3 鉄筋の力学的特性値

鉄筋径	降伏強度 $\sigma_y$ (MPa)	弾性係数 $E_s$ (GPa)	ポアソン比 $\nu_s$
D10	376.0	200.0 <sup>**</sup>	0.3 <sup>**</sup>
D6	295.0		

※コンクリート標準示方書に準拠した標準値を設定

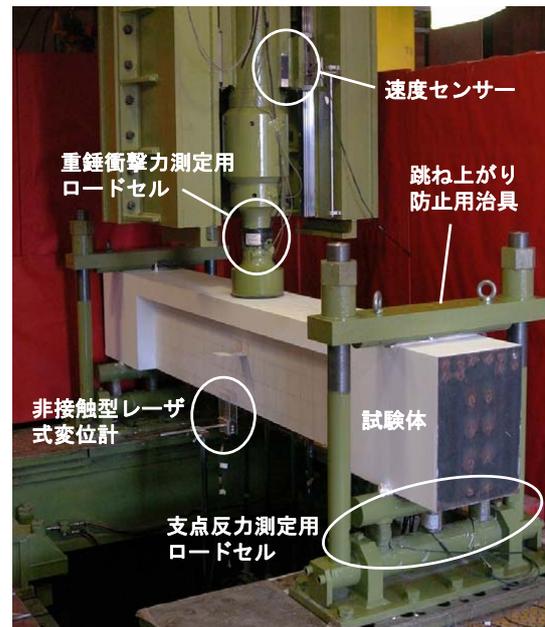


写真-1 重錘落下衝撃载荷実験の状況

## 3. 数値解析の概要

### 3.1 衝撃応答解析コードの概要

本数値解析に用いた構造解析プログラムは、有限要素法による空間の離散化と陽解法による時間積分法を採用した衝撃応答解析汎用コード LS-DYNA (Ver.971)<sup>3)</sup>である。LS-DYNAは、構造物の大変形問題や衝突体と被衝突体間的高速な衝突・衝撃問題等の非線形動的問題に適した汎用の有限要素解析コードである。

### 3.2 数値解析モデル

図-2には、有限要素モデルの要素分割状況を示している。本数値解析ではRC梁のみならず、重錘および支点治具も実形状を極力忠実に再現する形で詳細にモデル化を行っている。また、有限要素モデルは、RC梁の対称性を考慮してスパン方向(y方向)および断面方向(x方向)にそれぞれ2等分した1/4モデルとし、総節点数および総要素数はそれぞれ20,130、17,070であった。

適用した有限要素タイプは、鉄筋要素には断面積、剛性、質量を等価とした2節点の梁要素を用い、その他の要素に対しては全て8節点の固体要素を用いている。なお、要素の積分点数はいずれの要素も1点積分である。

重錘要素は実形状に即してモデル化を行い、片当たりを防止するための重錘底部の高さ2mmのテーパも再現した。また、支点治具についてもロードセルや跳ね上がり防止用治具も含めて忠実にモデル化している。なお、支点治具底部中心の回転軸上の全節点には実験時と同様にx軸方向回りの回転のみを許容する境界条件を設定している。コンクリートと重錘、コンクリートと支点治具の要素間には、ペナルティ法に基づいた面と面の接触・剥離を伴う滑りの現象を再現可能な接触面を定義している。RC梁に作用する衝撃荷重は、重錘要素をRC梁のスパン中央部で接触させた状態で、その全節点に設定した衝突速度を初速度として付加することにより作用させている。粘性減衰は質量比例項のみを考慮するものとし、予備解析を行ってRC梁の鉛直方向最低次固有振動数( $f_1 = 87.9$  Hz)に対して $h = 2.0$  %の減衰定数を設定した。数値解析時間は、重錘がRC梁に衝突した時点からRC梁がほぼ定常状態に至るまでの $t = 200$  ms間とした。なお、本数値解析では自重による影響は考慮していない。これは、著者らの既往の検討によって、室内実験レベルにおけるRC梁試験体を対象とした衝撃応答解析では、自重の有無が各種応答値に与える影響は小さいことが確認されているためである。

### 3.3 材料物性モデル

図-3(a)には、コンクリート要素に用いた応力-ひずみ関係を示している。コンクリート要素にはLS-DYNAに組み込まれている引張破壊を考慮した土質体・クラッシュャブルモデルを適用した。圧縮領域に関しては、完全弾塑性体とするバイリニア型にモデル化し、圧縮ひずみが $1,500 \mu$ に達した段階でコンクリートが降伏するものと仮定した。降伏応力には圧縮強度( $f'_c = 28.8$  MPa)を設定している。圧力-体積ひずみ関係に関しては、文献5)を参考にして初期の体積弾性係数の傾きで一定と仮定し、また、除荷時の勾配に関しても体積弾性係数と同じ勾配で除荷されるものとした。一方、引張領域に関しては、圧力が圧縮領域における体積弾性係数と同勾配で線形的

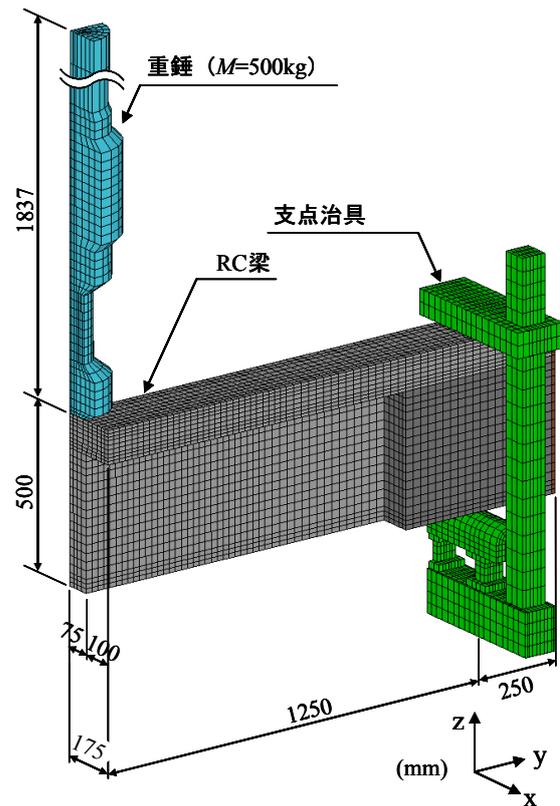


図-2 有限要素モデルの要素分割状況

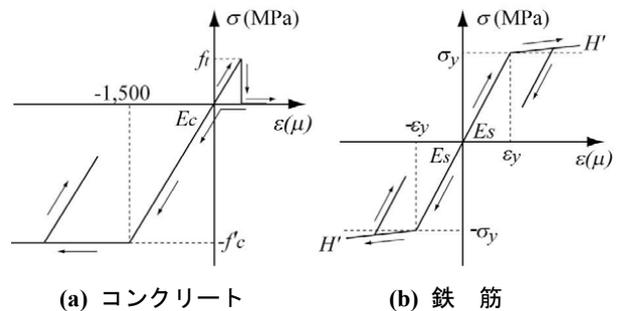


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

に増加するが、引張破壊圧力に達した段階で応力が零まで除荷されるテンションカットオフモデルを定義した。なお、引張破壊圧力にはコンクリートの引張強度 $f_t$ を仮定し、引張強度は土木学会コンクリート標準示方書<sup>4)</sup>に準拠してコンクリートの圧縮強度から推定することとした。なお、降伏条件は文献6)にならってDrucker-Pragerの降伏基準およびvon-Misesの降伏基準を適用し、降伏条件の違いが解析結果に及ぼす影響についても検討を行った。なお、Drucker-Pragerの降伏基準パラメータは文献6)を参考にしてW.F.Chenの方法に基づいて決定している。図-3(b)には、鉄筋要素に用いた応力-ひずみ関係を示している。鉄筋要素には、降伏後の塑性硬化を考慮したバイリニア型の等方弾塑性体モデルを適用した。降伏後の塑性硬化係数(2次勾配 $H'$ )は、著者らの既往の

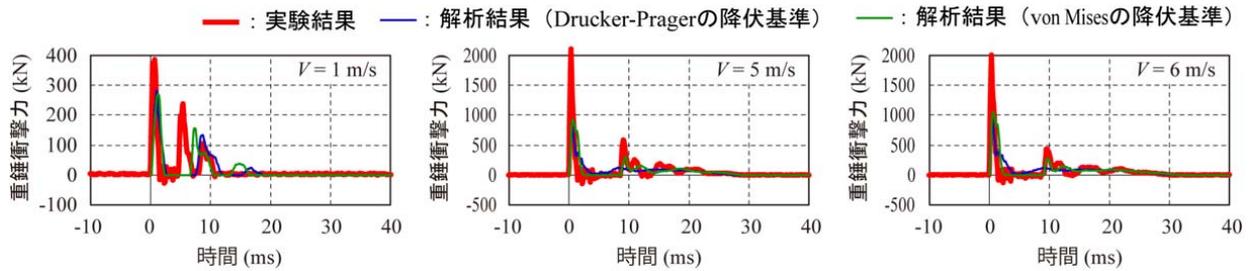


図-4 重錘衝撃力波形に関する実験結果と解析結果の比較

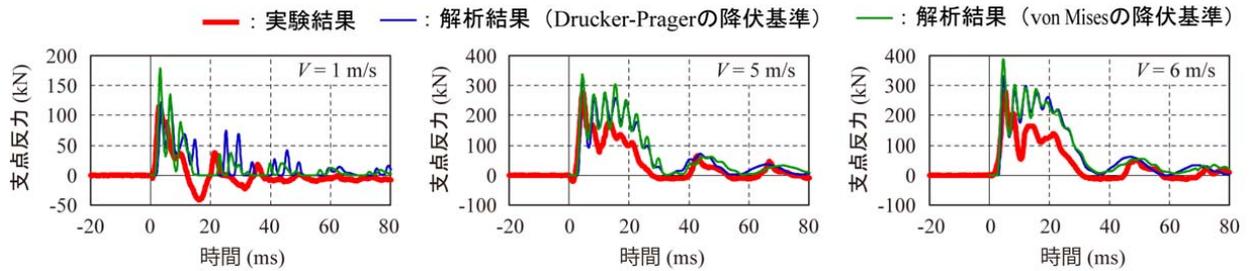


図-5 支点反力波形に関する実験結果と解析結果の比較

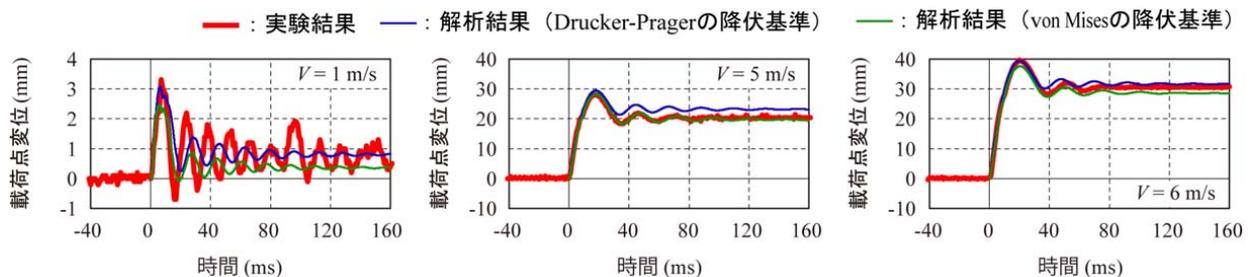


図-6 載荷点変位波形に関する実験結果と解析結果の比較

研究成果<sup>2)</sup>を参考にして初期弾性係数の1%を仮定し、降伏条件には von Mises の降伏基準を採用した。なお、コンクリートと鉄筋の要素間には完全付着を仮定しており、鉄筋の滑り等の影響は考慮していない。

重錘、支点治具および定着鋼板の全要素に対しては、実験時に塑性変形が確認されていないことから弾性体モデルを適用した。弾性係数  $E_s$ 、ポアソン比  $\nu_s$ 、単位体積質量  $\rho_s$  には公称値を用いることとし、それぞれ  $E_s = 200.0 \text{ GPa}$ 、 $\nu_s = 0.3$ 、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  を仮定した。

なお、本数値解析では、衝突速度が最大でも  $V = 6 \text{ m/s}$  と小さいことから、解析結果の応答性状に及ぼすひずみ速度効果の影響は小さいものと判断して、全ての材料物性モデルに対してこれを考慮しないものとした。

#### 4. 数値解析結果と実験結果の比較

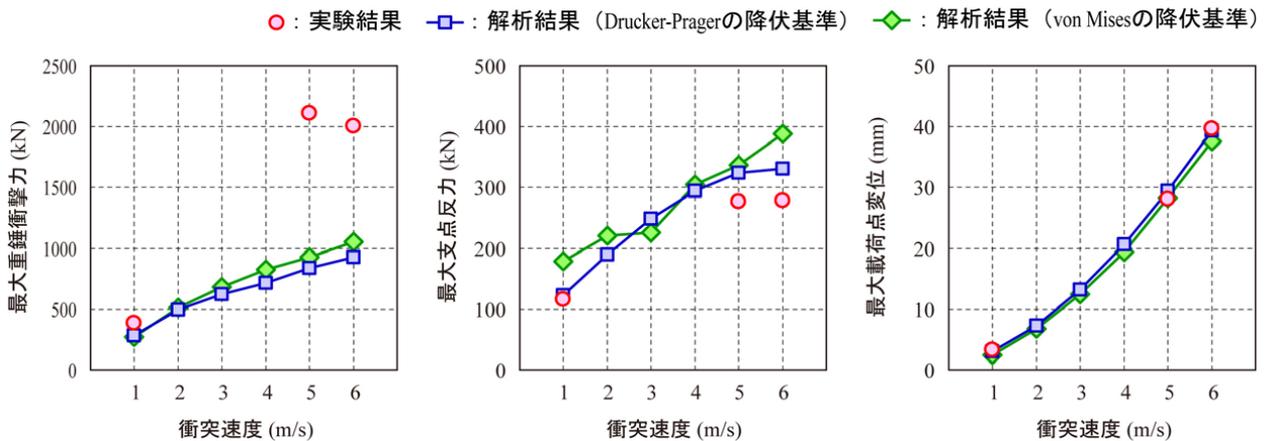
##### 4.1 重錘衝撃力波形

図-4 には、重錘衝撃力波形を実験結果と解析結果で比較して示している。なお、解析における重錘衝撃力は重錘とコンクリートの要素間に定義した接触面に生じる鉛直方向の接触反力を集積することにより算定している。

図より、実験結果に着目すると、衝撃荷重初期に高周波で振幅の大きい第1波と、その後の振幅が小さく継続時間の比較的長い第2波から構成される波形を示していることが分かる。なお、衝突速度の小さい  $V = 1 \text{ m/s}$  の場合には、リバウンドにより第2波に継続して第3波も励起している。一方、解析結果に着目すると、載荷初期に励起される第1波の波形性状に関しては、いずれの衝突速度の場合にも最大振幅を除いて、最大値の発生時刻や継続時間は実験結果の傾向をよく再現している。その後励起する第2波に関しては、von Mises の降伏基準の場合には衝突速度  $V = 1 \text{ m/s}$  の場合を除き、その発生時刻や振幅は実験結果をよく再現している。しかしながら Drucker-Prager の降伏基準の場合には振幅が過小に評価されている。なお、衝突速度  $V = 1 \text{ m/s}$  の場合には、いずれの降伏基準においても実験結果と比較して第2波、第3波の発生時刻が遅れて励起していることが分かる。

##### 4.2 支点反力波形

図-5 には、支点反力波形を実験結果と解析結果で比較して示している。図より、支点反力波形は、実験結果と解析結果がともに重錘衝突時点より少し遅れて励起し、



図一七 各種最大応答値と衝突速度の関係

かつ低周波の正弦減衰振動成分と高周波成分が合成された応答を示していることが分かる。なお、実験結果では負反力が生じているが解析結果では生じていない。これは、実験では跳ね上がり防止用治具を梁上縁から締め付けた状態でロードセルを初期化しているため負反力が測定可能であるが、数値解析では締め付け力を考慮していないことや、梁と支点治具間に接触面要素を定義しているために負反力の評価が不可能になっていることによる。

実験結果と解析結果を比較すると、最大支点反力は解析結果が実験結果よりも若干大きいものの、応答波形の立ち上がりから減衰に至るまで大略類似した性状を示していることが分かる。また、降伏条件の違いが支点反力に及ぼす影響はそれほど顕著ではないが、von Mises の降伏基準の場合には Drucker-Prager の降伏基準の場合と比較して若干大きく評価する傾向にある。

#### 4.3 載荷点変位波形

図一六には、載荷点変位波形を実験結果と解析結果で比較して示している。図より、衝突速度  $V=1$  m/s に着目すると、実験結果、解析結果はともに衝撃荷重初期に正弦半波状の第1波が励起した後減衰自由振動を呈しており、実験結果と解析結果では振幅や位相に差が見られるものの、その振動性状は大略類似している。

一方、衝突速度  $V=5$  m/s,  $6$  m/s に着目すると、実験結果、解析結果ともに載荷初期に正弦半波状の第1波が励起した後、減衰自由振動状態に移行していることが分かる。この分布性状は実験結果と解析結果で良好に一致しており、波形の立ち上がり勾配や最大応答値、残留変位ともに解析結果は実験結果を精度良く再現している。なお、Drucker-Prager の降伏基準の場合には、von Mises の降伏基準の場合と比較して最大変位、残留変位ともに若干大きく評価する傾向にある。

#### 4.4 各種最大応答値に関する比較

図一七には、重錘衝撃力、支点反力および載荷点変位の最大応答値と衝突速度の関係を実験結果と解析結果で

比較して示している。なお、数値解析では衝突速度を  $V=2, 3, 4$  m/s としたケースも実施している。

図より、解析結果に着目すると、重錘衝撃力および載荷点変位は降伏条件の違いに関わらず衝突速度の増加に対応してほぼ直線的に増加していることが分かる。一方、支点反力は、von Mises の降伏基準の場合にはほぼ直線的に増加するものの、Drucker-Prager の降伏基準の場合には衝突速度  $V=6$  m/s の段階で増加傾向が抑制されており、その傾向は実験結果と一致している。

実験結果と解析結果を比較すると、重錘衝撃力の解析結果は実験結果と比較して過小に評価している。特に、衝突速度  $V=5, 6$  m/s の場合には1/2程度の衝撃力となっている。これは、本数値解析ではコンクリート要素の圧縮側の材料構成則をバイリニア型に簡略化していること等に起因するものと推察される。また、支点反力に関しては逆に解析結果が実験結果と比較して若干大きく評価している。一方、載荷点変位に関しては、いずれの降伏条件の場合においても解析結果は実験結果を良好にシミュレートしていることが分かる。

#### 4.5 ひび割れ分布性状

図一八には、試験体側面に生じたひび割れ分布を実験結果と解析結果で比較して示している。数値解析における緑色に着色した領域は、圧力が設定した引張破壊圧力に達して応力が零にカットオフされたひび割れ要素を強調して示したものである。なお、解析結果のひび割れ図は試験体スパン中心軸に対して鏡面展開して示している。

図より、衝突速度  $V=1$  m/s の場合に着目すると、実験ではスパン方向に数本の鉛直方向に進展する曲げひび割れが発生しており、その分布性状は解析結果と良く一致している。なお、Drucker-Prager の降伏基準の場合には von Mises の降伏基準の場合と比較して、ひび割れがスパン方向に分散して発生していることが確認できる。

衝突速度  $V=5$  m/s,  $6$  m/s に着目すると、実験では梁下縁から鉛直方向に進展する曲げひび割れや、載荷点部

近傍から梁下縁に約 45 度の角度で進展する斜めひび割れが確認できる。特に、曲げひび割れに関してはスパン方向に分散して約 10 cm 間隔で密に発生しており、それがフランジ下縁にまで進展していることが分かる。一方、解析結果に着目すると、荷重点近傍のフランジ下縁にまで及ぶ曲げひび割れや梁下縁に進展する斜めひび割れの分布性状は実験結果と良く一致しており、降伏条件の違いに関わらず、全体的にほぼ類似した分布を呈している。

## 5. まとめ

本研究では、橋台のウイング部材のように壁部材に面内方向の衝撃荷重が作用する場合の数値解析手法を確立することを目的として、T型でウェブに2方向に鉄筋を配置したRC梁に関する重錘落下衝撃実験を実施し、実験結果と比較する形で解析手法の妥当性に関する検討を行った。本研究で得られた結論を以下に要約する。

- 1) 重錘衝撃力波形および支点反力波形に関しては、解析結果と実験結果に若干の差異が生じるものの、一般的な応答波形の性状は大略再現可能である。
- 2) 荷重点変位に関しては、応答波形の立ち上がり勾配や最大応答値、減衰自由振動性状、残留変位値を比較的精度良く評価可能である。
- 3) 試験体側面に生じたひび割れ分布性状に関しても、解析結果は実験結果を大略再現可能である。
- 4) コンクリートの降伏条件に Drucker-Prager あるいは von Mises の降伏基準を用いる場合、その違いが各種応答値やひび割れ分布性状に与える影響は比較的小さく、両者で類似の耐衝撃性評価が可能である。

以上より、設計工学的に重要であるものと判断される最大変位や残留変位に着目すると、提案の数値解析手法を用いることにより、ここで設定した2つの降伏条件式に関わらず、本研究で対象としたT型RC梁の損傷等を適切に評価可能であるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 小林 竜太, 岸 徳光: 桁端衝突を受ける橋台の耐衝撃挙動に関する数値シミュレーション, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.787-792, 2009.
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡 健一, 安藤 智哲: 静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.215-233, 1999.4.
- 3) John O.Hallquist: LS-DYNA Use's Manual, livermore Software Technology Corporation, 2006.3.
- 4) 2007年制定コンクリート標準示方書【設計編】, 土木学会, 2007.
- 5) 安藤 智哲, 齋藤 和伸: 爆発荷重を受ける RC はりの応答に与えるコンクリートの材料モデルの影響に関

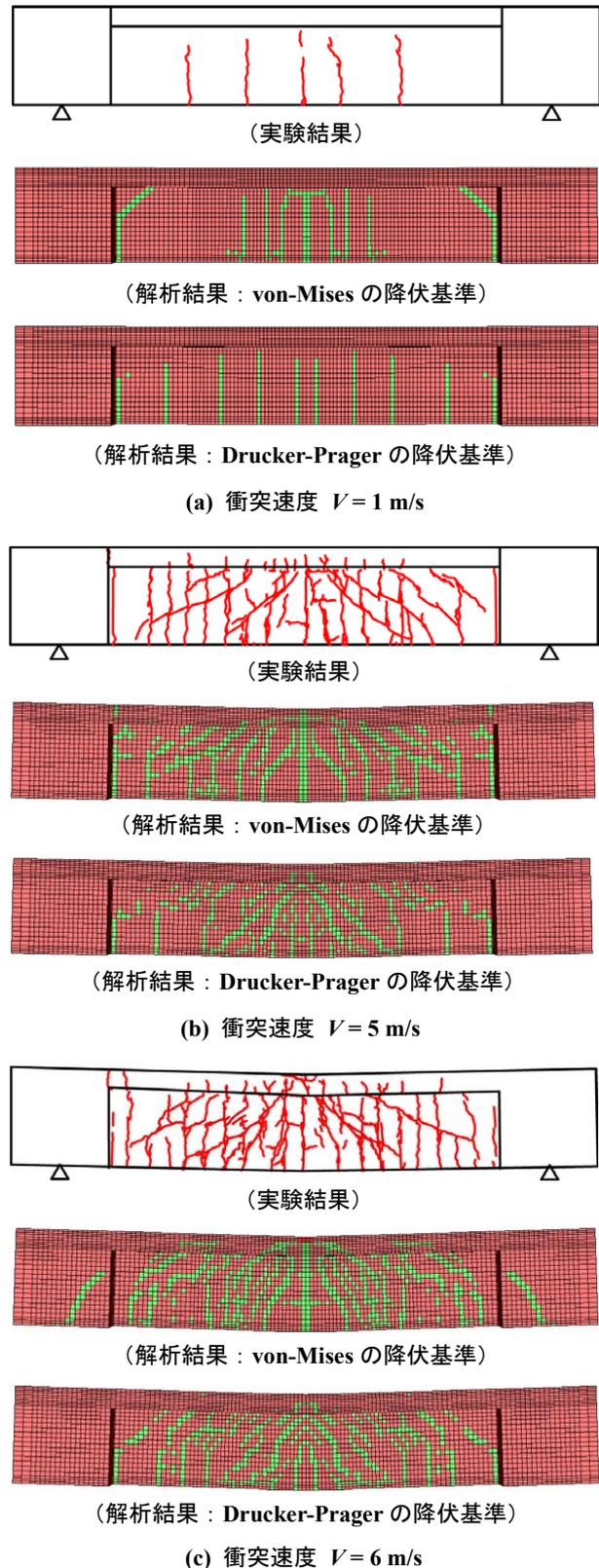


図-8 試験体側面に発生したひび割れ分布に関する実験結果と解析結果の比較

- する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1261-1272, 2007.3.
- 6) 構造工学シリーズ 15: 衝撃実験・解析の基礎と応用, 土木学会, pp.219-242, 2004.3.