

側方鉄筋を有する T 型 RC 梁の耐衝撃挙動に関する数値シミュレーション

Numerical simulation on impact response behavior of T-type RC beams with side rebars

室蘭工業大学大学院 ○正会員 小林 竜太 (Ryuta Kobayashi)
室蘭工業大学大学院 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学大学院 正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)

1. はじめに

著者らは、大規模地震時に桁端衝突を受ける橋台の弾塑性耐衝撃挙動を明らかにすることを目的として、三次元有限要素法を用いた数値解析的な検討を進めている¹⁾。その結果、1) 橋台のウィングは桁端衝突を受ける橋台の水平抵抗に大きく寄与していること、2) 橋桁が橋台に衝突する場合には、バラベットのみならず縦壁基部やウィング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。ウィングは鉛直および水平の2方向に鉄筋が配置されている部材であり、桁端衝突に対して厚さの薄い壁部材として水平力に抵抗することから、この種の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 梁を対象として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、RC 梁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²⁾。しかしながら、これまでの数値解析手法は、壁部材のように比較的せん断スパン比が小さく、鉄筋が2方向に密に配置された部材に対してはその適用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を模擬した、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 梁を対象として三次元有限要素法による弾塑性衝撃応答解析を試み、別途実施した重錘落下衝撃実験の結果と比較することによってその妥当性を検討した。

なお、本数値解析には陽解法に基づく非線形動的応答解析用汎用コードである LS-DYNA(Ver.971)を使用した。

2. 実験概要

図-1 には、本数値解析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支点部近傍の 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 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、フランジ部には軸方向鉄筋 D10 を計 10 本配置し、それらを D6 の囲筋を用いて閉合させた。なお、軸方向鉄筋は、全て梁端面に設置した厚さ 9 mm の定着鋼板に溶接して、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³⁾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。これより、本試験体はせん断余裕度 $\alpha (= V_{usd}/P_{usd}) > 1.0$ であることより、静載荷時には曲げ破壊型で終局に至る

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 α
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
28.8	2.2	18.4	0.2

表-3 鉄筋の力学的特性値

鉄筋径	降伏強度 σ_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比
D10	376.0	200.0	0.3
D6	295.0		

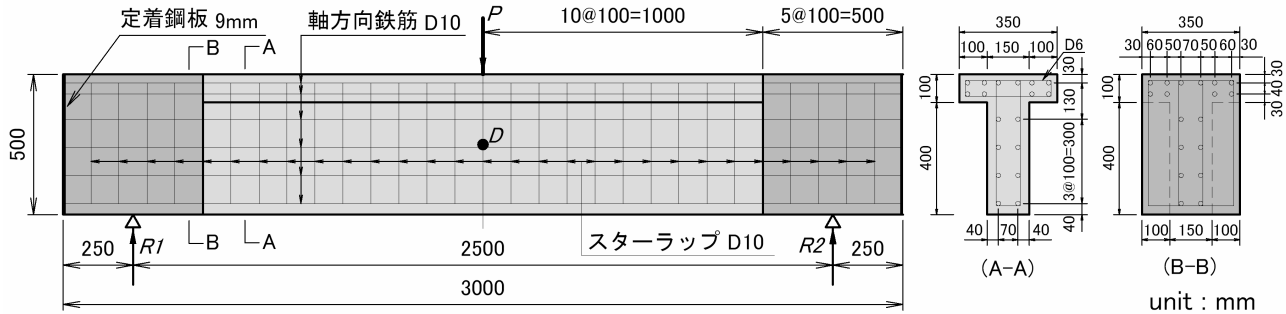


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

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．

重錘落下衝撃実験は，スパン中央部に質量 500 kg，載荷点部の直径が 150 mm の円柱状鋼製重錘を所定の高さから一度だけ落下させることにより実施している．なお，試験体は反力測定用のロードセルと跳ね上がり防止用治具が取り付けられている支点治具上に設置し，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構造となっている．実験時における測定項目は，重錘衝撃力 P ，合支点反力 R （以後，単に支点反力）および試験体側面における載荷点変位 D に関する各種応答波形である．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 0.5ms の矩形移動平均法により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．

3. 数値解析の概要

3. 1 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および断面方向に 2 等分した 1/4 モデルである．適用した有限要素タイプは，鉄筋要素は断面積，剛性，質量を等価とした 2 節点梁要素を用い，その他の要素に対しては全て 8 節点固体要素を用いた．なお，要素の積分点数はいずれも 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 のテーパも忠実に再現した．また，支点治具に関し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，支点治具底部には実験時と同様に治具全体の x 軸方向回りの回転を許容するように境界条件を設定している．

コンクリートと重錘および支点治具の要素間には，ペナルティー法に基づいた面と面の接触・剥離を伴う滑りの現象を考慮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 梁に接触させた状態で，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た．なお，本数値解析では，重錘衝突速度として $V = 1, 5, 6 \text{ m/s}$ の計 3 ケースに対して実施している．また，粘性減衰定数は質量比例分のみを考慮するものとし，RC 梁の鉛直方向最低次固有振動数に対して $\eta = 2.0\%$ を仮定した．

3. 2 材料物性モデル

図-3(a)には，コンクリート要素に用いた相当応力-相当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，降伏応力には圧縮強度を設定している．なお，圧力-体積ひずみ関係に関しては，文献 4)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，除荷時の勾配に関しても体積弾性係数と同勾配で除

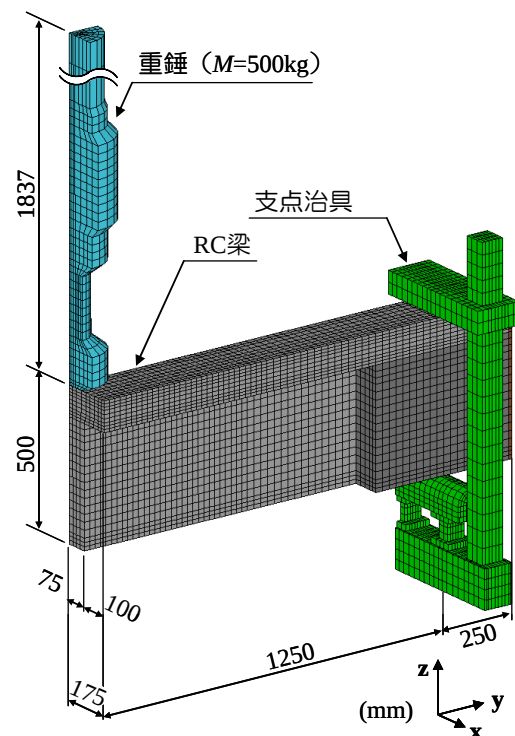


図-2 有限要素モデルの要素分割状況

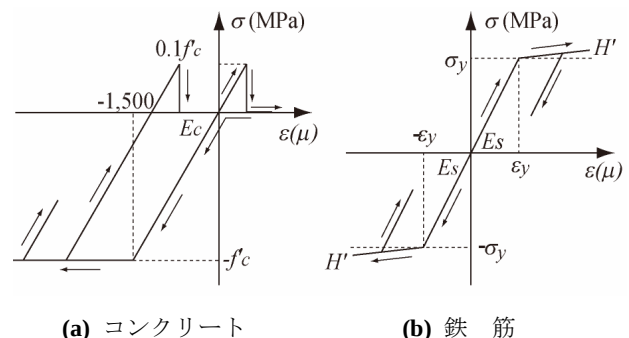


図-3 各材料の等価一軸応力-ひずみ関係

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に増加するが，引張破壊圧力に達した段階で零応力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，引張破壊圧力は圧縮強度の $1/10$ と仮定した．ここで，圧力とは要素内に生じる 3 方向の垂直応力の平均値である．なお，降伏判定には，コンクリートの静水圧依存性を考慮するために Drucker-Prager の降伏基準に従うものとした．

図-3(b)には，鉄筋要素に用いた相当応力-相当ひずみ関係を示している．鉄筋要素の物性モデルには，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，著者らのこれまでの研究成果²⁾を参考にして初期弾性係数の 1% を仮定し，降伏の判定は von Mises の降伏基準に従うものとした．なお，本数値解析では，コンクリートおよび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．

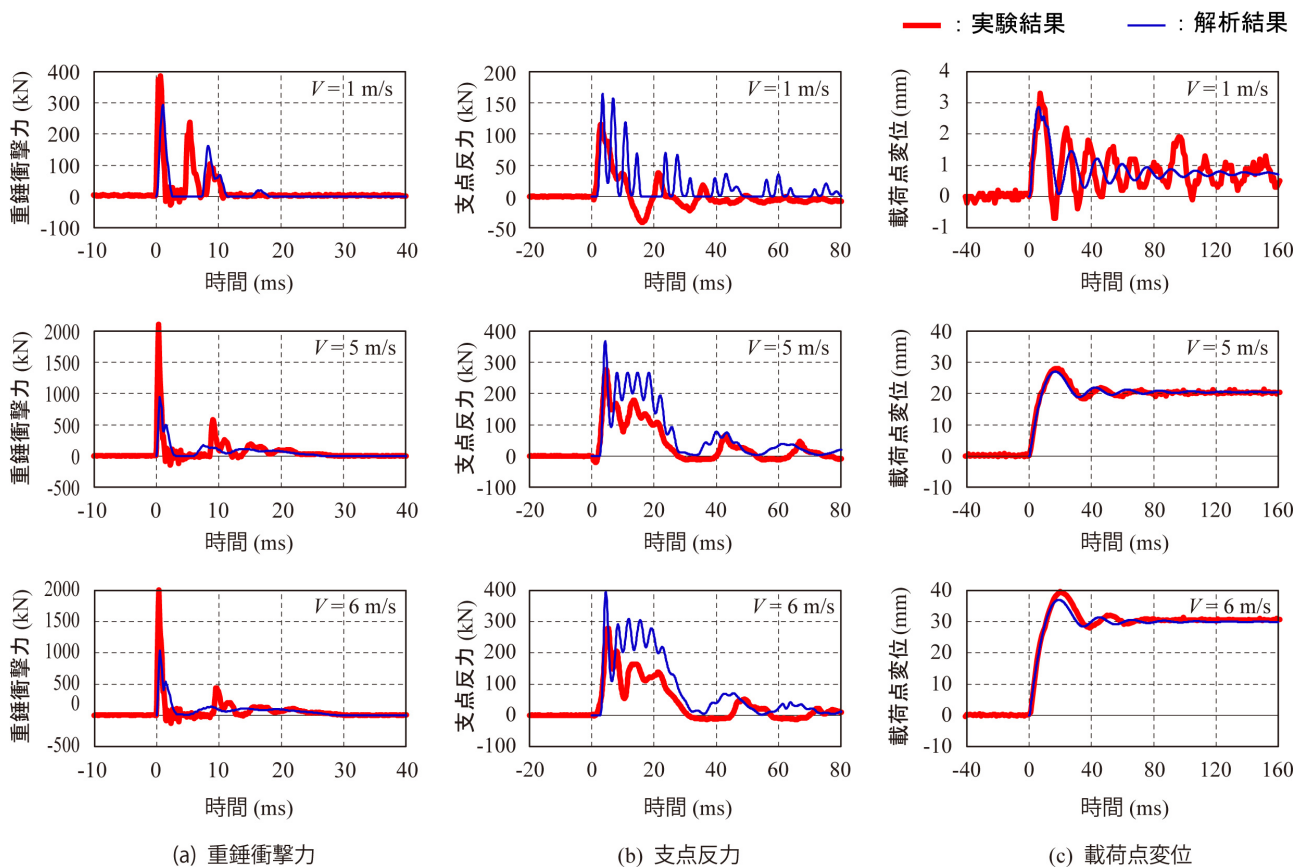


図-4 各種応答波形に関する実験結果と解析結果の比較

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ている。要素の弾性係数 E_s 、ポアソン比 ν_s 、単位体積質量 ρ_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、全ての材料物性モデルに対して、ひずみ速度効果は考慮していない。

4. 数値解析結果と実験結果の比較

図-4には、各衝突速度における重錘衝撃力、支点反力、载荷点変位の各応答波形を実験結果と解析結果で比較して示している。なお、数値解析における重錘衝撃力波形と支点反力波形に関しては、重錘および支点治具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。

4.1 重錘衝撃力波形に関する比較

図-4(a)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。図より、実験結果の重錘衝撃力波形は、衝撃荷重载荷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波から構成される分布性状を示している。ただし、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波も励起されていることが分かる。

実験結果と解析結果を比較すると、解析結果は、载荷初期に励起される第1波の波形性状に関しては実験結果をよく再現している。しかしながら、その後励起する第2波に関しては分布性状は類似しているものの、振幅

が小さく評価されている。また、衝突速度 $V = 1 \text{ m/s}$ の解析結果では、第2波、第3波ともに実験結果と比較して発生時刻が遅れて励起している。なお、いずれの衝突速度に関しても、解析結果の最大重錘衝撃力は実験結果と比較して小さい値を示しており、その傾向は特に $V = 5 \text{ m/s}$ 、 6 m/s の場合に顕著である。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や、ひずみ速度効果を考慮していないこと等に起因するものと推察される。

4.2 支点反力波形に関する比較

図-4(b)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。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ており、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性状を示していることが分かる。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30%程度大きく評価されているものの、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。

4.3 载荷点変位波形に関する比較

図-4(c)には、载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 $V = 1 \text{ m/s}$ に着目すると、実験結果、解析結果ともに衝撃荷重载荷初期に正弦半波状の第1波が励起した後に減衰自由振動を呈しており、実験結果と解析結果で若干の位相差が見られるものの、その振動性状は比較的良く一致している。

一方、衝突速度 $V = 5 \text{ m/s}$ 、 6 m/s に着目すると、実験

結果、解析結果とともに载荷初期に正弦半波状の第1波が励起した後、振動が過減衰的に減衰してほぼ直流成分（残留変位）のみが励起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、残留変位とともに解析結果は実験結果を精度良くシミュレートしている。

以上より、重錘衝撃力や支点反力波形に関しては解析結果と実験結果に誤差が生じるものの、全体的な応答波形の性状は概ね再現できているものと判断される。特に応答変位に関しては、最大応答値、減衰自由振動性状、残留変位値に至るまで実験結果を精度良く再現しており、従来から提案している解析手法の妥当性が確認された。

4. 4 ひび割れ分布性状に関する比較

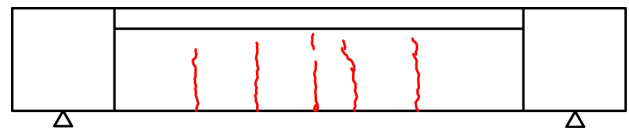
図-5 には、試験体側面に生じたひび割れ分布を実験結果と解析結果で比較して示している。数値解析における緑色に着色した領域は、圧力が設定した引張破壊圧力に達し、零応力にカットオフされたひび割れ要素を強調して示したものである。なお、解析結果のひび割れ図は試験体のスパン中心軸に対して鏡面展開して示している。

図より、衝突速度 $V = 1 \text{ m/s}$ の場合に注目すると、実験ではスパン方向に計5本の鉛直方向に進展する曲げひび割れが発生しており、解析結果は実験結果と比較して曲げひび割れが若干多く発生しているが、その分布性状は良く一致していることが分かる。また、衝突速度 $V = 5 \text{ m/s}$, 6 m/s に注目すると、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、载荷点部近傍から梁下縁に約 45° 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側方鉄筋の効果によってスパン方向に分散して約 10 cm 間隔で密に発生しており、それがフランジ部下縁にまで進展していることが分かる。一方、解析結果によると载荷点部近傍のフランジ部下縁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は実験結果と良く対応している。しかしながら、スパン方向に分散して発生した鉛直方向の曲げひび割れに関しては精度良く再現できておらず、数値解析におけるひび割れは载荷点部近傍に集中して発生する傾向にある。

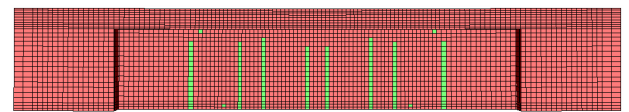
5. まとめ

本研究では、橋台のウィングを模擬した、側方鉄筋を有する、かつスターラップを密に配置した T 型 RC 梁の耐衝撃挙動を明らかにすることを目的として、三次元有限要素法による弾塑性衝撃応答解析を実施した。本数値解析手法の妥当性検討は、別途実施した重錘落下衝撃実験の結果と比較することにより行った。本研究の範囲内で得られた知見を要約すると、以下の通りである。

- 1) 提案の数値解析手法を用いることにより、重錘衝撃力波形や支点反力波形に関しては解析結果と実験結果に誤差が生じるものの、全体的な応答波形の性状は大略再現可能である。
- 2) 载荷点変位に関しては、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、実験結果を大略再現可能である。

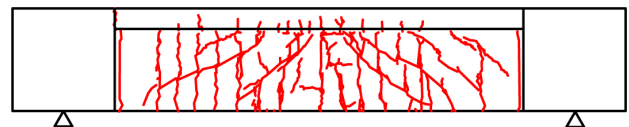


(実験結果)

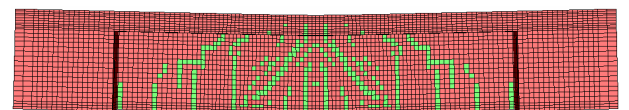


(解析結果)

(a) $V = 1 \text{ m/s}$

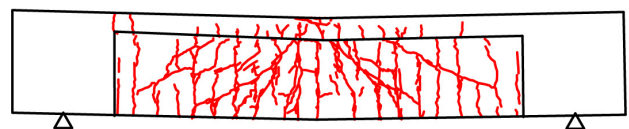


(実験結果)

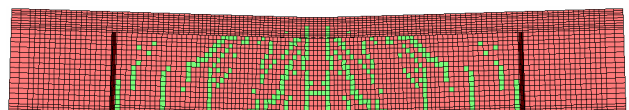


(解析結果)

(b) $V = 5 \text{ m/s}$



(実験結果)



(解析結果)

(c) $V = 6 \text{ m/s}$

図-5 ひび割れ分布に関する実験結果と解析結果の比較

今後は、繰り返し衝撃荷重実験結果との比較検討を行い、本数値解析手法の妥当性について検証していきたいと考えている。

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: 静载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.
- 3) 2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】, 土木学会, 2007.
- 4) 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する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1261-1272, 2007.