

せん断破壊型 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 Resistant Behavior of Shear-Failure Type RC Beams

室蘭工業大学	正 員	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三井建設 (株)	フェロー	三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学	正 員	安藤 智啓 (Tomohiro Ando)
室蘭工業大学	○ 学生員	佐井 拓磨 (Takuma Sai)

1. はじめに

鉄筋コンクリート梁 (RC 梁) の耐衝撃挙動に関する数値解析的研究は、静載荷時の設計概念に基づき主に曲げ破壊型 RC 梁に着目して各研究機関で実施されてきた。著者等もこれまで断面寸法やスパン長が異なる曲げ破壊型 RC 梁に関する三次元有限要素法による弾塑性衝撃応答解析を試み、解析結果の妥当性を実験結果と比較する形で検討してきた。その結果、曲げ破壊型 RC 梁の衝撃現象を精度良くシミュレート可能な簡易な構成則を用いた数値解析手法を提案するまでに至っている。

一方、平成4年に発生した北海道日高支庁様似町での岩塊崩落では、落石覆道の海側柱部にせん断ひび割れが生じる被害をもたらした。これは、衝撃荷重載荷時には RC 部材がせん断破壊する危険性を有していること、また、衝撃荷重載荷時においても RC 部材は常に曲げ耐力以上のせん断耐力を確保しなければならないことを再認識させる災害であった。これより、RC 部材の合理的な耐衝撃設計法を確立するためには、衝撃荷重載荷時の曲げ耐力のみならずせん断耐力評価法を確立することが肝要であるものと判断される。また、その確立に向けての検討には、実験的方法は勿論のこと数値解析的方法の援用の下に効率的に実施されなければならない。

このような観点より、本研究ではせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃挙動を適切に評価可能な簡易かつ合理的な数値

解析手法の確立を目的として、せん断補強筋量の異なる2種類のせん断破壊型 RC 梁に着目し、三次元有限要素法に基づいた弾塑性衝撃応答解析を試み、その妥当性について検討を行った。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形で行うこととした。また、本数値解析には、基本的に著者等が曲げ破壊型 RC 梁の場合に提案した数値解析手法と同様の手法を採用している。なお、解析には一般に市販されている衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA (ver.950) を用いている。

2. 実験概要

図-1には本数値解析の対象とした RC 梁模型の形状寸法を測定項目と合わせて示している。試験体は、いずれも断面寸法 200×400 mm、純スパン長 $L = 2.0$ m の複鉄筋矩形 RC 梁である。A, B 試験体はスターラップ間隔をそれぞれ 150 mm および 75 mm に配置したものである。なお、上下端鉄筋は梁端面で厚さ 22 mm の定着鋼板に溶接・定着されている。実験は、RC 梁のスパン中央部に質量 400 kg、直径 200 mm (載荷点部直径は 150 mm) の円柱状鋼製重錘を所定の高さから自由落下させることにより行っている。支点部には、重錘衝突時の梁の跳ね上がりを防止するために鋼製治具を用いて梁の上下を固定している。また治具全体は、RC 梁の回転のみを許容するピン支持に近い支持状態となっている。

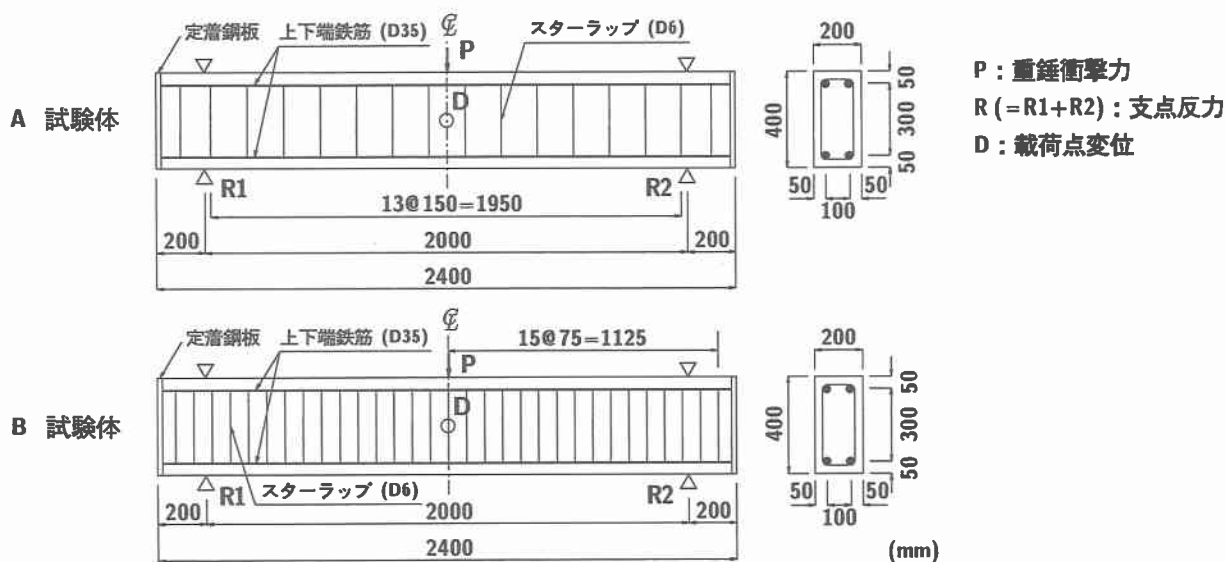


図-1 RC 梁の形状寸法および測定項目

表－１ 試験体一覧

試験体名	せん断補強筋比	静的せん断耐力 V_{usc} (kN)	衝突速度 V (m/s)
A37～A84	0.00211	253.8	3.7, 4.6, 5.6, 6.5, 7.4, 8.4
B37～B102	0.00422	343.0	3.7, 4.6, 6.5, 7.4, 8.4, 9.3, 10.2

表－２ コンクリートの力学的特性値

実験時材令 (日)	圧縮強度 f'_c (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c
37	41.2	25.7	0.19

表－３ 鉄筋の力学的特性値

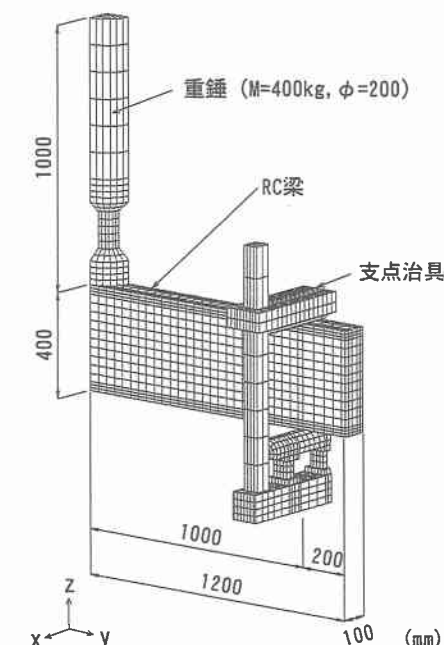
鉄筋名称	材質	降伏強度 σ_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D35	SD345	373	206	0.3
D6	SD295A			

実験における測定項目は、図－１に示すように重錘衝撃力 P 、支点反力 R ($R1$ と $R2$ の合算値) および梁側面中央部における載荷点変位 D (以後、単に変位) に関する各応答波形である。ここで、 P および R の測定には 起歪柱型ロードセル (それぞれ容量 1,960 kN, 1,470 kN) を、 D の測定には非接触式レーザ変位計 (容量 200 mm) を用いている。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。表中、試験体名は梁タイプと衝突速度を組み合わせて示している。なお、実験時におけるコンクリートおよび鉄筋 (上下端鉄筋、スターラップ) の力学的特性値は、表－２、３に示すとおりである。

3. 数値解析条件および仮定

3.1 数値解析モデル

図－２には、B 試験体に関する全体の有限要素モデルを示している。解析対象は、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。適用した要素タイプは、8 節点あるいは 6 節点の三次元固体要素である。しかしながら、スターラップ要素には、要素サイズが他の要素と比較して小さく解析所要時間に大きな影響を与えることが予想されるため、剛性、断面積、重量が等価な梁要素を適用した。なお、要素の積分点数は 1 点積分を基本としているが、上下端鉄筋要素に関しては断面方向に 1 要素でモデル化しているため、解析精度を考慮して 8 点積分としている。コンクリートと重錘および支点治具の要素間には、面一面間の接触・剝離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。また、コンクリートと上下端鉄筋およびスターラップの要素間には、完全付着を仮定している。RC 梁に作用する衝撃荷重は、重錘要素の全節点に実験と対応した衝突速度を付加する形で与えている。なお、全数値解析



図－２ 有限要素モデルの一例 (B 試験体)

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 80 ms 間とした。

3.2 材料物性モデル

コンクリート要素に用いた物性モデルは、圧縮側に対しては折線近似による相当応力-相当歪関係、引張側に対しては破壊圧力に達した段階で引張力を伝達しないとする弾塑性体モデルである。ここでは、相当歪が $1,500 \mu$ に達した状態でコンクリートが降伏すると仮定して、完全弾塑性のバイリニア型にモデル化した。なお、降伏応力には圧縮強度 f'_c を、また引張側の破壊圧力には降伏応力の 1/10 を仮定した。降伏の判定には von Mises の降伏条件を採用している。

一方、上下端鉄筋およびスターラップ要素に用いた物性モデルは、降伏後の塑性硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルである。降伏応力 σ_y 、弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s には、材料試験結果に基づき表－３に示す値を採用している。降伏の判定は、前述のコンクリートモデルと同様に von Mises の降伏条件に従うこととし、塑性硬化係数 H' は弾性係数 E_s の 1 % と仮定した。その他の要素 (重錘、支点治具および定着鋼板) に関しては弾性体モデルを適用し、弾性係数、ポアソン比にはそれぞれ $E = 206$ GPa, $\nu = 0.3$ を用いている。

4. 数値解析結果と実験結果の比較

4.1 重錘衝撃力、支点反力、変位波形の比較

図－３には、重錘衝撃力 P 、支点反力 R および変位 D の各応答波形に関する数値解析結果を実験結果と比較して示している。ここでは、紙面の都合により、全試験体のうち衝突速度の最も小さい A37, B37 および最も大きい A84, B102 に着目して検討することとする。以降の検討も、これと同様の方法により行うこととする。な

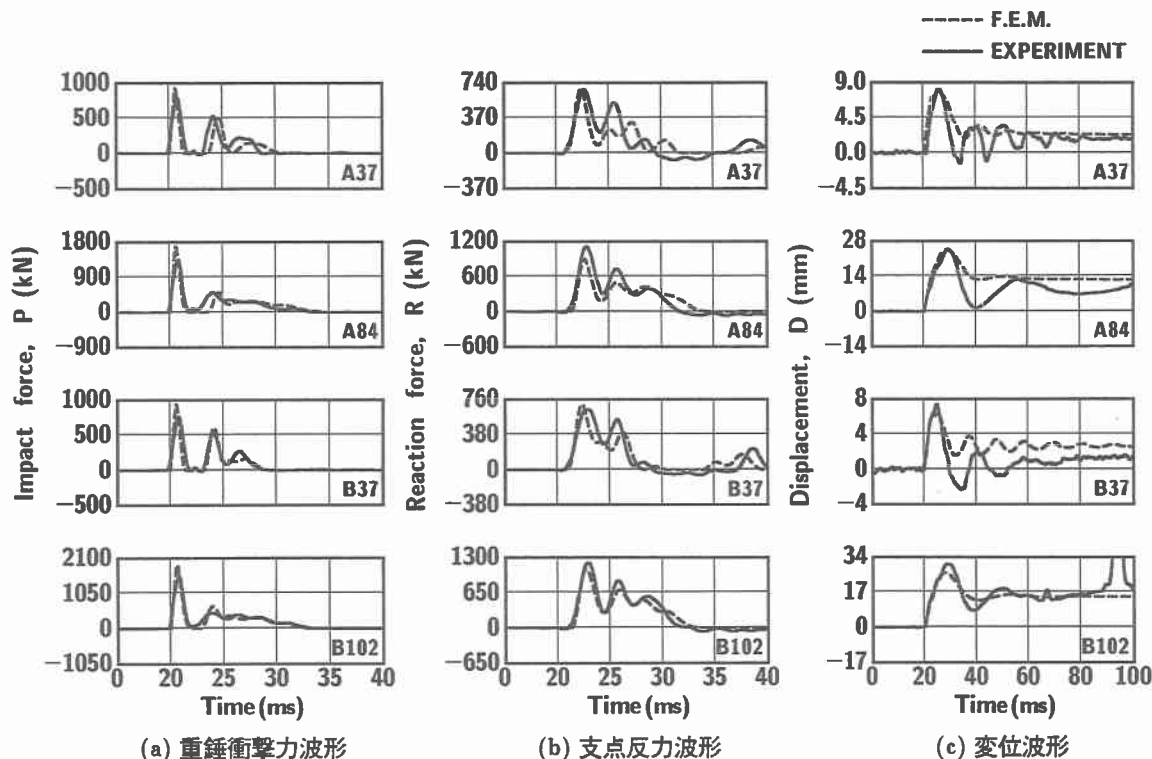


図-3 各種応答波形に関する比較

お、数値解析における重錘衝撃力および支点反力は、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。また、重錘衝撃力および支点反力には、波動に高周波成分が含まれてくるため、本研究では、これを取り除いて評価するために 1.0 ms の矩形移動平均により数値的にフィルター処理を施している。

最初に、図-3(a)の重錘衝撃力波形 P について見ると、数値解析結果と実験結果は、いずれの試験体に関しても波動の立ち上がりから減衰に至るまで両者良く対応していることがわかる。すなわち、両波動は衝撃初期の振幅が大きく継続時間の短い波形成分と、その後の振幅が小さく継続時間が比較的長い波形成分の二波から成る分布性状を示している。

次に、図-3(b)の支点反力波形 R について見ると、ここでも両波動は、いずれの試験体に関しても比較的良く対応していることがわかる。すなわち、最大応答値到達までの挙動に関しては、立ち上がり勾配や最大振幅値が両者で良く対応している。また、最大振幅発生後の挙動に関しては、一旦除荷後に再度振幅が増大する性状や、第2ピーク値後の減少勾配が両者でほぼ類似している。

図-3(c)の変位波形 D に関して見ると、最大応答値までは、立ち上がり勾配や最大値が数値解析結果と実験結果で良く対応していることがわかる。一方、最大値発生時以降に関しては、実験結果は、衝突速度が小さい場合には直流成分の大きさが小さく、比較的高周波の減衰振動を示しており、衝突速度の大きい場合には直流成分の大きさも大きくかつ周期が 30~40 ms 程度で振幅の小さい低周波振動状態を呈している。一方、解析結果は実験結果と類似の傾向を示すものの、実験結果に比較し

て振幅の小さな低周波振動状態を呈している。特に衝突速度の大きい場合には、減衰が大きくほとんど直流成分のみの状態となっている。しかしながら、残留変位値に関しては B37 を除き両者でほぼ一致している。

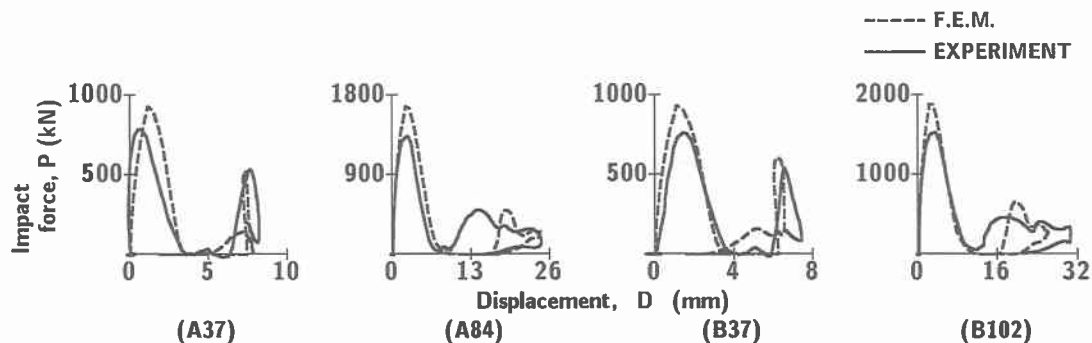
4.2 重錘衝撃力および支点反力の変位に関する履歴曲線

図-4には、解析結果の重錘衝撃力および支点反力と変位に関する履歴曲線 $P-\delta$, $R-\delta$ を実験結果と比較して示している。まず、図-4(a)の $P-\delta$ 履歴曲線について見ると、第1ループに関しては数値解析の最大応答値が若干実験のそれより大きく示されているが、両者は大略類似の三角形の分布性状を示していることがわかる。一方、第2ループに関してはその分布性状が複雑であることより、両者の分布性状は完全には一致していない。しかしながら、第2ピーク値や最大変位値は両者で良く対応している。

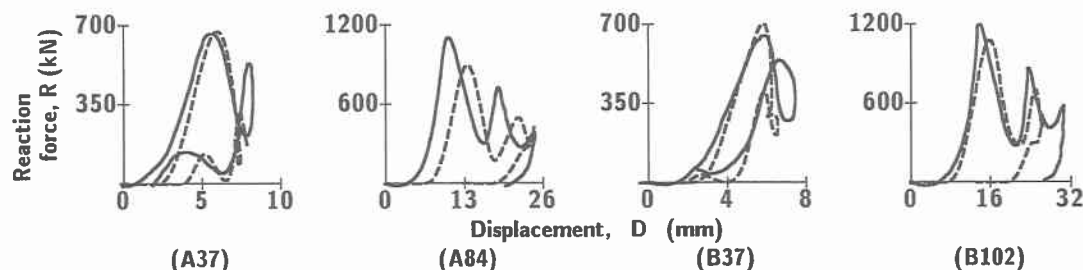
次に、図-4(b)の $R-\delta$ 履歴曲線を見ると、衝突速度の小さい A37, B37 では立ち上がりから最大応答値、さらには除荷に至るまでの分布が両者で良く対応した性状を示している。これに対して、A84 および B102 では、前者の場合には支点反力の立ち上がり時の変位値に、また後者の場合には支点反力除荷後の残留変位値に数値解析と実験結果に差異が見られる。しかしながら、支点反力が最大値到達後に一旦最大振幅の 1/3 程度まで減少し再度増大する性状等、全体的な分布性状は両者で比較的類似しているものと判断される。

4.3 実験終了後のひび割れ分布と第1主応力分布の関係

数値解析において最大応答変位発生時近傍における第1主応力が零応力を示している場合には、仮定した構成



(a) 重錘衝撃力-変位履歴曲線



(b) 支点反力-変位履歴曲線

図-4 重錘衝撃力および支点反力の変位に関する比較

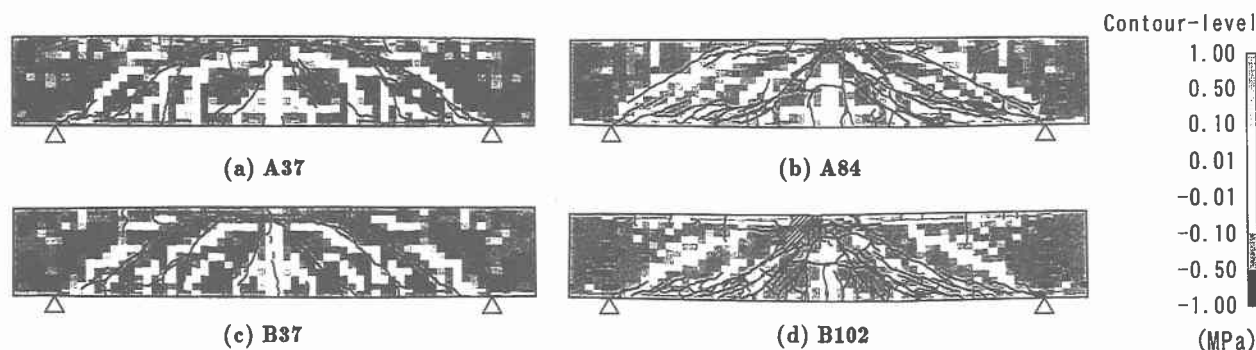


図-5 実験終了後のコンクリートのひび割れ分布と最大変位発生時近傍の第1主応力分布

則よりコンクリート部にひび割れが発生しているものと推察される。ここでは、このようにして得られるひび割れ分布予測と実験より得られるひび割れ分布を比較することにより、この評価方法の妥当性について検討を行った。図-5には RC 梁の最大応答変位発生時近傍における梁側面の第1主応力分布を実験終了後の RC 梁側面に発生したひび割れ分布（図中、黒色実線）と重ねて示している。なお、実験結果のひび割れ分布に見られる斜線部分は、コンクリートが剥離したことを示している。

図より、各試験体の実験結果を見ると、B102を除き荷重点部から両支点部に向かい明瞭なアーチ状の斜めひび割れが発生していることがわかる。また、いずれの試験体にも荷重点部から 45° 程度の角度で梁下縁に進展するひび割れが見られる。数値解析より予測されるひび割れ分布は、B102のアーチ状ひび割れの有無を除くと実験終了後のひび割れ分布を非常に良く再現していることがわかる。

以上より、ひび割れ分布に関する本評価手法は、RC 梁が斜めひび割れに伴う脆性的なせん断破壊を生じる場合に対しても、比較的精度良く推定できることが明らか

となった。

5. まとめ

本研究では、せん断破壊型 RC 梁の耐衝撃挙動を適切に評価可能な簡易かつ合理的な数値解析手法の確立を目的として、三次元有限要素法による弾塑性衝撃応答解析を試み、実験結果と比較する形で本解析結果の妥当性について検討した。本研究より得られた結果を要約すると、

- 1) 解析結果の重錘衝撃力波形および支点反力波形は、立ち上がりから減衰に至るまで実験結果と類似の波形性状を再現することが可能である。
- 2) 荷重点変位波形は、ピーク後の振動状態を除くと、数値解析結果と実験結果で比較的良く対応している。
- 3) 数値解析結果の重錘衝撃力および支点反力-変位曲線は、ループの立ち上がりから最大荷重値および最大変位値に達し除荷に至るまで、実験結果と良く対応した分布性状を示す。
- 4) 本数値解析手法を用いることにより、せん断破壊型 RC 梁に発生するひび割れ分布性状が比較的精度良く予測できるものと判断される。