

I-73

有限要素法を用いたせん断破壊型 RC 梁に関する弾塑性衝撃応答解析

室蘭工業大学	正 員	岸 徳 光
三井建設 (株)	フェロー	三 上 浩
室蘭工業大学	正 員	安 藤 智 啓
室蘭工業大学	○ 学生員	佐 井 拓 磨

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 部材の衝撃挙動に関する数値解析的研究は、主に曲げ破壊型 RC 梁部材に着目して各研究機関で実施されてきた¹⁾²⁾。これは、耐衝撃用途の RC 梁が静載荷時に曲げ破壊先行型になるように断面設計されているためである³⁾。著者等も曲げ破壊型 RC 梁に着目し、断面寸法や主鉄筋比が異なる場合の衝撃挙動に関して三次元有限要素法による数値解析を試みてきた⁴⁾。その結果、RC 梁に関しては、簡易かつ合理的な数値解析手法を提案するまでに至った⁵⁾。一方、平成4年に北海道日高支庁のルランベツ覆道において発生した岩塊崩落は、海側柱部にせん断ひび割れを発生させる被害をもたらした⁶⁾。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のあること、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。

このような観点より、本研究では静載荷時にせん断破壊型となる RC 梁に着目し、その衝撃挙動を正確に評価可能な簡易かつ合理的な RC 梁の数値解析手法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、別途実施した実験結果と比較することにより、本数値解析手法の妥当性に関する検討を行った。なお、本数値解析には陽解法に基づく非線形動的構造解析用汎用コード LS-DYNA (ver.940) を用いている。

2. 実験概要

図-1に本数値解析の対象とした RC 梁模型の形状寸法および配筋状況を示している。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。梁 A はスターラップを有しない場合、梁 B, C 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 300 kg、直径 200 mm (載荷点部直径は 150 mm) で底部が高さ 2 mm の球状となっている円柱状鋼製重錘を所定の高さから単一に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境界条件となっている。

実験における測定項目は、図-2に示すように重錘衝撃力 (P)、支点反力 (R)、梁側面中央部における変位 (D-1~D-5) の3項目である。ここで、重錘衝撃力および支点反力の測定には起歪柱型ロードセルを、変位の測定

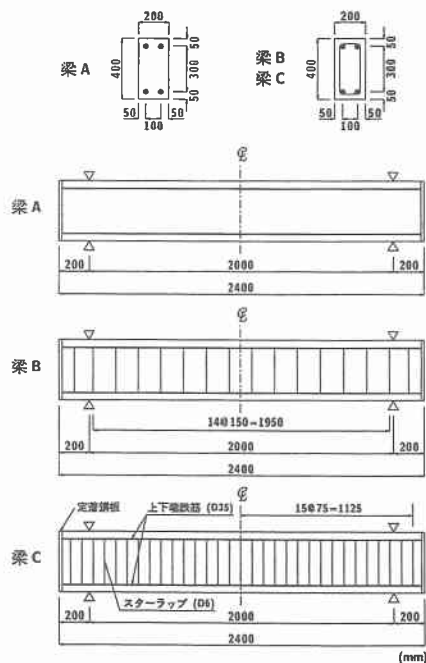


図-1 RC 梁模型の形状寸法および配筋状況

表－１ 試験体の設計値および重錘の衝突速度一覧

試験体名	スターラップの有無と間隔 ss (mm)	主鉄筋径	主鉄筋比 P_t (%)	純スパン長 L (m)	せん断スパン比 a/d	静的曲げ耐力 P_{usc} (kN)	静的せん断耐力 V_{usc} (kN)	静的せん断余裕度 $\alpha (= V_{usc}/P_{usc})$	衝突速度 V (m/s)
A	無し	D35	2.73	2.0	2.86	413.5	156.3	0.38	4 ～ 6
B	150						241.9	0.59	6 ～ 10
C	75						327.6	0.79	8 ～ 10

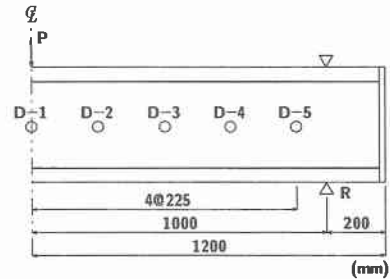
表－２ コンクリートの力学的特性値

試験体名	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
A, C	21	30.2	22.9	0.22
B	24	40.2	26.8	0.23

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
D6	SD295A	366	206	0.3
D35	SD345	375	206	0.3

には容量 200 mm の非接触式レーザ変位計を用いている。表－１には、本数値解析で対象とした試験体の設計値および重錘の衝突速度一覧を示している。ここで、せん断余裕度 α は、示方書より算出される静的せん断耐力 V_{usc} を静的曲げ耐力 P_{usc} で除した値であり、 $\alpha < 1.0$ は静载荷時に RC 梁がせん断破壊することを意味している。なお、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。

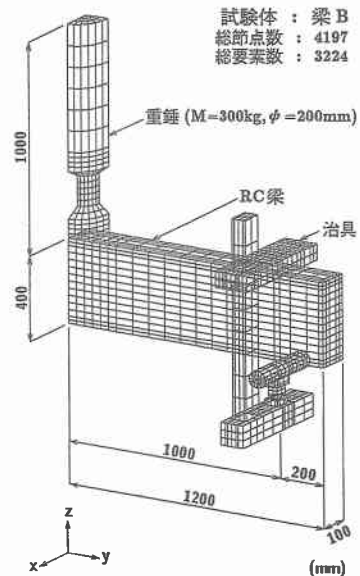


図－２ 測定名および測定位置

3. 数値解析条件および仮定

3.1 数値解析モデル

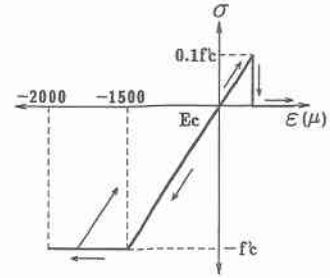
図－３には、梁 B に関する全体の有限要素モデルを示している。解析対象は、RC 梁の対称性を考慮してスパン方向および断面方向に 2 等分した 1/4 モデルとした。適用した要素タイプは、8 節点あるいは 6 節点の三次元固体要素を用いている。しかしながら、スターラップ要素に関しては、要素サイズが他の要素と比較して小さく解析所要時間に大きな影響を与えることが予想されるため、剛性、断面積、重量が等価な梁要素とした。なお、要素の積分点数は 1 点積分を基本としているが、上下端鉄筋要素に関しては断面方向に 1 要素でモデル化しているため、解析精度を考慮して完全積分としている。コンクリートと重錘および支点治具の要素間には、面一面間の接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義することで処理している。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対して所定の載荷速度を付加する形で入力している。全数値解析時間は 80 ms までとし、1 ケース当たりの解析所要時間は HP9000/C240 を使用して約 2 時間である。



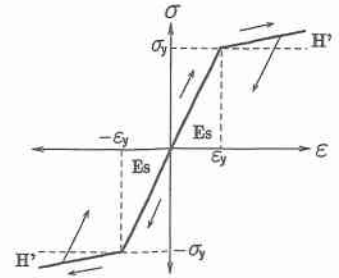
図－３ 有限要素モデルの一例

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、表-2に示す力学的特性値に基づき0.2%歪時の応力を降伏応力とし、0.15%歪に達した状態で降伏するもの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 を仮定し、引張側の破壊圧力は降伏応力の1/10とした。降伏の判定はvon Misesの降伏条件に従うこととしている。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。なお、材料定数は、表-3に示しているように弾性係数 E 、およびポアソン比 ν には公称値を、降伏応力 σ_y には引張試験結果を採用することとした。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 $E = 206 \text{ GPa}$ 、 $\nu = 0.3$ を入力している。図-4に本数値解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の応力-歪特性を示している。なお、質量に比例する粘性減衰係数は、過去の研究成果⁹⁾を参考にして、最低次固有振動状態に対して5%の減衰効果が発揮されるように決定した。



(a) コンクリート



(b) 鉄筋

図-4 数値解析に用いた応力-歪特性

4. 各種応答性状に関する数値解析結果と実験結果の比較

4.1 重錘衝撃力に関する比較

図-5には、RC梁の重錘衝撃力波形に関する数値解析結果と実験結果を比較して示している。なお、紙面の都合により、ここでは梁Aの衝突速度 $V = 5, 6 \text{ m/s}$ 、梁B、Cの $V = 10 \text{ m/s}$ の4体に着目して検討を行った。ここで、数値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接触反力を集積することにより算定している。なお、重錘衝撃力波形には高周波成分が卓越するため、解析および実験結果とも2.5 msの矩形移動平均法による数値的なフィルター処理を行い比較検討を行うこととした。図より、重錘衝撃力はいずれの試験体に関しても衝撃初期に波動の立ち上がりが急激で継続時間の比較的短い応答（第1波）を示しており、両方で類似の波形性状を示している。また、第2波目以降に関しても、梁B、Cでは両者の波形性状は良く一致しているものと判断される。しかしながら、梁Aに関しては、実験結果が解析結果より継続時間が長く示されている。この差は、衝突速度 $V = 5 \text{ m/s}$ より $V = 6 \text{ m/s}$ の場合でより顕著である。

図-6には、全試験体の最大重錘衝撃力に関する数値解析結果と実験結果を比較して示している。図中、45°の勾配を持つ直線は数値解析結果と実験結果が一致していることを意味している。すなわち、この直線より下側の領域は実験結果が大きいことを、上側の領域は数値解析結果が大きいことを表している。図より、全般的に解析値が実験値よりも大きく評価されている傾向が見られる。しかしながら、その差は15%以下であり、両者の値は比較的類似しているものと判断される。

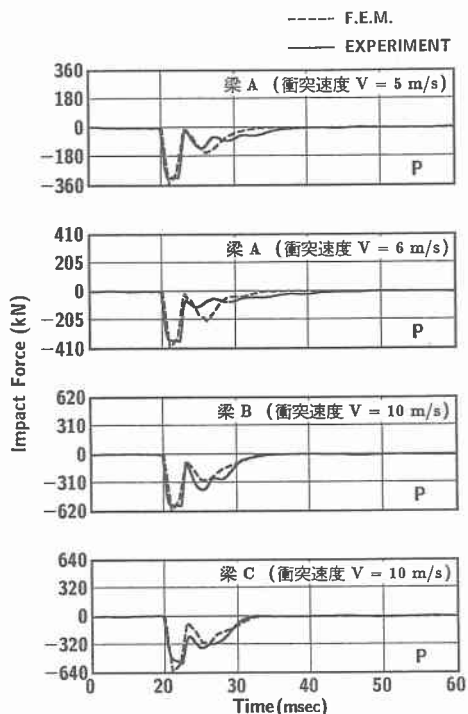


図-5 重錘衝撃力波形の比較

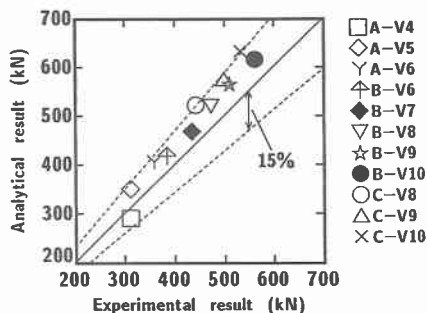


図-6 最大重錘衝撃力の比較

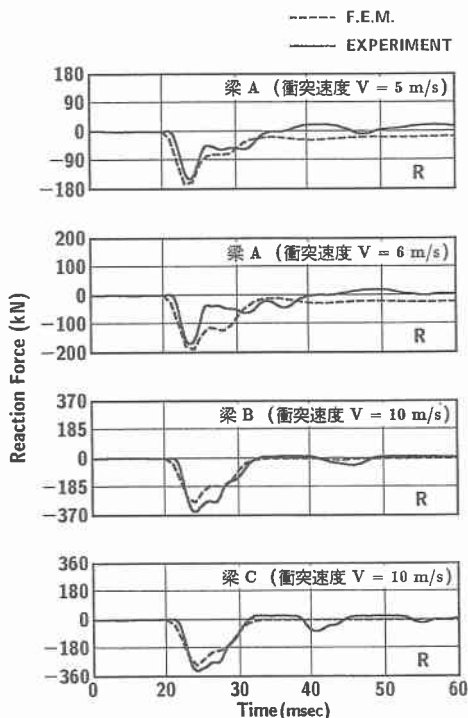


図-7 片側支点反力波形の比較

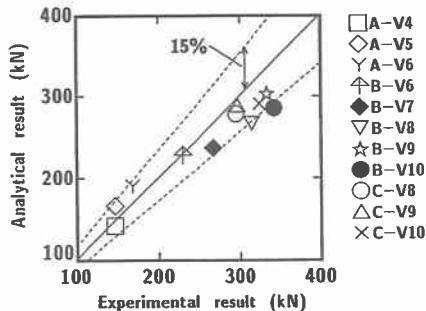


図-8 最大片側支点反力の比較

4.2 片側支点反力に関する比較

図-7には、RC 梁の片側支点反力に関する数値解析結果と実験結果を比較して示している。ここでも重錘衝撃力波形と同様の試験体に着目して考察を行う。なお、支点反力は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、重錘衝撃力波形の場合と同様に、解析および実験より得られる支点反力波形には 2.5 ms の矩形移動平均法による数値的なフィルター処理を施している。図より、梁 A に関して見ると、波動の立ち上がりから最大応答値までの波動は解析結果と実験結果で良く一致している。しかしながら、ピーク後の波形形状に関しては、衝突速度 $V = 5 \text{ m/s}$ の場合は両者で比較的一致しているものの、梁の損傷が著しい $V = 6 \text{ m/s}$ の場合には解析結果の応答値が実験結果より大きく示されている。梁 B、C について見ると、解析結果の最大値が実験結果より若干小さく示されているもののその差は小さく、両者の波動は立ち上がりから減衰に至るまで比較的良く一致している。

図一 8 には、全試験体の最大片側支点反力に関する解析結果と実験結果を比較して示している。図より、各梁とも衝突速度が増加し、支点反力が大きく示されるに伴い、解析値が実験値を下回る傾向が見られる。しかしながら、その差は 15 % 程度以下であり、両者の値は比較的類似しているものと判断される。

4.3 応答変位に関する比較

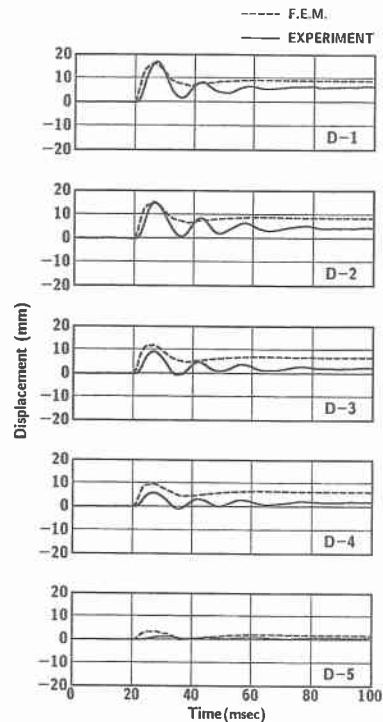
図一 9 には、RC 梁の各測定位置における応答変位波形の数値解析結果と実験結果を、梁 C の衝突速度 $V = 10 \text{ m/s}$ の試験体を例に比較して示している。図より、最大応答値までの波形に着目すると、載荷点部近傍の D-1、D-2 では立ち上がり勾配および最大値ともに数値解析結果と実験結果は良く対応していることがわかる。しかしながら、支点部に近づくに従い両者の立ち上がり勾配および最大応答値は異なってくる傾向が見られる。なお、実験結果の最大変位発生以降の波形を見ると、いずれの測定位置においても周期が 10 ms 前後の自由振動状態が示されている。

図一 10 には、全試験体の最大応答変位に関する数値解析結果と実験結果を比較して示している。図より、損傷が著しい梁 A の衝突速度 $V = 6 \text{ m/s}$ 試験体の場合には、解析結果の最大応答値は実験結果よりもかなり小さく示されている。しかしながら、その他の試験体に関しては、両者の最大応答値は良く対応していることがわかる。これより、梁下面のコンクリートが剥落するような著しい破壊に至る場合を除いては、本数値解析手法を用いることにより最大応答変位を精度良くシミュレート可能であることが明らかとなった。

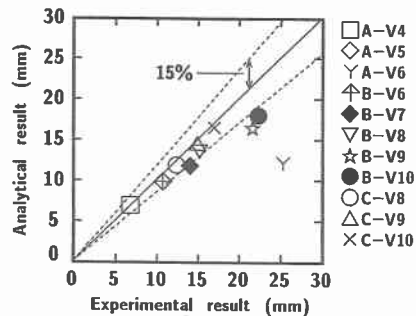
4.4 実験終了後のコンクリートのひび割れ分布と第 1 主応力分布の関係

最大応答時近傍における第 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結果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うものとする。図一 11 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と重ねて示している。数値解析結果の等色分布図はスパン中心軸に対して左右に展開して示している。また、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。なお、ここでも梁 A の衝突速度 $V = 5, 6 \text{ m/s}$ および梁 B、C の $V = 10 \text{ m/s}$ の 4 体についてのみの検討を行う。

梁 A について見ると、衝突速度 $V = 5 \text{ m/s}$ の場合には、載荷点部から支点部に至るアーチ状に進展する緑色分布が実験結果のひび割れ分布と比較的良好に対応していることがわかる。また、載荷点部梁下縁から垂直に進展している曲げひび割れも両結果で一致している。 $V = 6 \text{ m/s}$ の場合には、載荷点部から約 45° の角度で梁下縁に進展している緑色分布が実験終了後のひび割れ分布を良好に再現している。梁 B、C につい



図一 9 応答変位波形の比較
(梁 C, 衝突速度 $V = 10 \text{ m/s}$)



図一 10 最大載荷点変位に関する比較

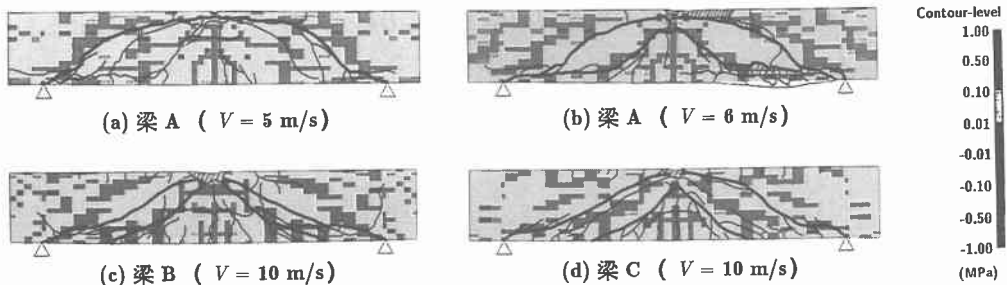


図-1 1 実験終了後のコンクリートのひび割れ分布と最大変位発生時近傍の第1主応力分布

て見ると、実験結果は載荷点部から支点部に至る直線的な斜めひび割れを呈しており、数値解析結果はこのようなひび割れ分布も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、静載荷時にせん断破壊型となる RC 梁に対して、提案している数値解析手法を適用した弾塑性衝撃応答解析を試み、実験結果と比較することによりその適用性について検討を行った。

本研究により得られた結果を要約すると、

- 1) 重錘衝撃力波形は、衝撃初期に急激に励起された後一旦減少し、再度増大した後徐々に減少する波形形状を示す。この傾向は解析結果と実験結果で類似である。
- 2) 最大重錘衝撃力に関しては、全般的に解析値は実験値を過大評価しているが、その差は 15 % 程度以内であり両者の値は比較的類似している。
- 3) 片側支点反力波形および最大片側支点反力は、実験終了後の RC 梁の損傷が著しい場合を除くと、本数値解析手法により大略推定可能である。
- 4) 梁下面のコンクリートが剥落するような著しい破壊に至る場合を除き、最大応答変位近傍までの変位波形を精度良くシミュレーション可能である。
- 5) 本数値解析手法を用いることにより、静載荷時にせん断破壊が卓越する RC 梁のひび割れ分布性状は比較的精度良く推定可能である。

参考文献

- 1) 井元勝慶, 大野友則, 佐々木晃, 小暮幹太: 重錘落下衝突を受ける RC はり部材の衝撃挙動と衝撃応答解析における材料の非線形特性, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.1201-1212, 1995.
- 2) 柴田俊文, 三上 隆, 佐藤昌志, 須藤敦史, 荏澤憲吉: 局所変形の影響を考慮した梁の衝撃力の一計算法, 構造工学論文集, Vol.44A, 1999.
- 3) 構造工学シリーズ8, ロックシェッドの耐衝撃設計, 土木学会, 1998.
- 4) 岸 徳光, 三上 浩, 小室雅人, 松岡健一: 弾塑性衝撃応答解析法の RC 梁への適用性, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.1579-1588, 1997.
- 5) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 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.
- 6) 佐藤昌志, 熊谷守見, 西 弘明, 松岡健一: ルランベツ覆道の落石災害時における衝撃挙動の解析, 構造工学論文集, Vol.41A, 1995.