

軽量コンクリートを用いたせん断破壊型 RC 梁の重錘落下衝撃挙動解析

Numerical Simulation of Shear-Failure Type LW RC Beams under Falling-Weight Impact Load

(独)北海道開発土木研究所 ○正員 今野 久志 (Hisashi Konno)
 室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 ドービー建設工業(株) 正員 竹本 伸一 (Shin-ichi Takemoto)
 室蘭工業大学 フェロー 松岡 健一 (Ken-ichi Matsuoka)

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 部材の耐衝撃挙動に関する数値解析的研究は、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、解析結果と実験結果を比較する形で検討を行ってきた¹⁾。その結果、曲げ破壊型 RC 梁の衝撃挙動を簡易な構成則を用いて精度良くシミュレート可能な数値解析手法を提案している。

一方、近年道路橋や鉄道橋等の上部構造の軽量化を図ることを目的として、粗骨材に軽量骨材を用いたコンクリート (以後、軽量コンクリート) を実橋に適用する方法が考えられ、一部実用化されている。著者等も、既に不慮の事故による車両衝突に対して安全性の確保が必要とされるコンクリート橋壁高欄部等、耐衝撃用途構造部材への適用性に着目して、軽量コンクリートの実験結果と比較する形で RC 梁を用いた衝撃実験を実施している。しかしながら、数値解析的研究において、合理的な耐衝撃設計法を確立するためには実験的研究と数値解析的研究を併用して推進することが肝要である。著者等の提案した解析手法の妥当性は、普通コンクリートの梁を対象として検討されており、軽量コンクリートを用いる場合については未だ検討されるに至っていない。

このような観点より、本研究では、軽量コンクリート RC 梁の耐衝撃挙動を精度良く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、静載荷時にせん断破壊で終局に至る軽量コンクリート RC 梁を対象に三次元有限要素法による弾塑性衝撃応答解析を試み、本数値解析手法の妥当性を検討した。本数値解析では、基本的に著者等が普通コンクリートを用いる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、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.960)を用いている。

2. 実験概要

図-1には、本数値解析において対象とした軽量コンクリート RC 梁の形状寸法および配筋状況を B 試験体 (後述) を例として測定項目と合わせて示している。対象とした RC 梁は純スパン長の異なる 4 種類の試験体である。各試験体は、断面寸法 (梁幅×梁高) がいずれも $200 \times 300 \text{ mm}$ であり、純スパン長は A, B, C, D 梁でそれぞれ 1.5 m , 2 m , 2.5 m , 3 m である。また、軸方向鉄筋はいずれも真かぶり 50 mm の位置に配筋され、梁両端面で厚さ 9 mm の定着鋼板に溶接されている。

実験は、RC 梁を跳ね上がり防止用治具付の支点治具上に設置し、梁スパン中央部に質量 300 kg の円柱状鋼製重錘を所定の高さより自由落下させることにより行っている。支点治具全体は、RC 梁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。

表-1には、荷重をスパン中央部に作用させた場合の試験体の静的設計値を一覧にして示している。表中には、主鉄筋比 P_s 、せん断スパン比 a/d の他、コンクリート標準示方書に準拠して算出した静的せん断耐力 V_{usc} 、静的曲げ耐力 P_{usc} および静的せん断余裕度 α を示している。 V_{usc} 値は、軽量コンクリートを用いていることより、示方書式から算出される値を 70% に低減している。また、せん断余裕度 α は、 V_{usc} を P_{usc} で除した値である。いずれの梁も $\alpha < 1.0$ であることから、本研究で用いた RC 梁は、静載荷時には設計的にせん断破壊型で終局に至ることが想定される。なお、各耐力は表-2および表-3に示しているコンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を用いて算出している。

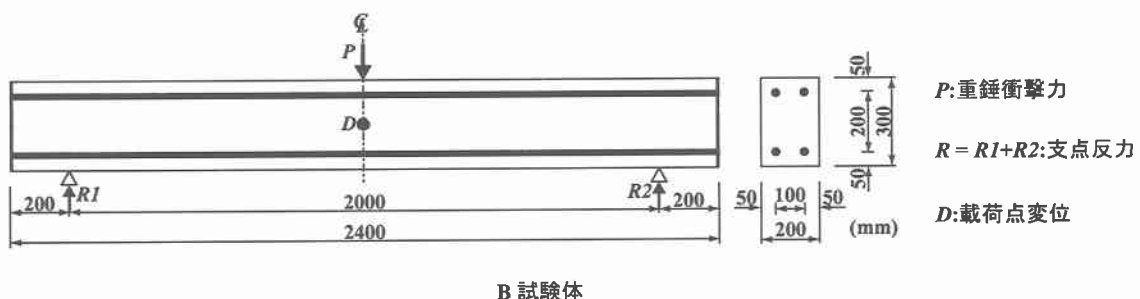


図-1 RC 梁の形状寸法および測定項目

表－１ RC 梁の静的設計値一覧

梁タイプ	静的 せん断耐力 V_{usc} (kN)	静的 曲げ耐力 P_{usc} (kN)	せん断 余裕度 α
A 試験体	80.7	175.1	0.46
B 試験体		131.3	0.61
C 試験体		105.0	0.77
D 試験体		87.6	0.92

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)	引張強度 f_t (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c
52	41.8	2.53	21.1	0.21

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
D22	SD345	367	206	0.3

表－４ 試験体名および実験時の衝突速度

試験体名	衝突速度 V (m/s)
A3～A4.25	3, 3.5, 3.75, 4, 4.25
B3～B4.25	
C3～C4.25	
D3～D4.25	

表－４には、試験体名と実験時の衝突速度を示している。表中、試験体名は、RC 梁のタイプと重錘の衝突速度 (m/s) を組み合わせて示している。

3. 数値解析および仮定

3.1 数値解析モデル

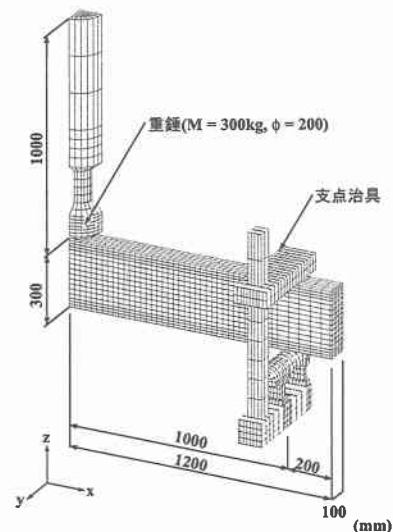
図－２には、B 試験体に関する全体の有限要素モデルを示している。解析対象は、RC 梁の対称性を考慮してスパン方向および断面方向に 2 等分した 1/4 モデルである。適用した要素タイプは、8 節点あるいは 6 節点の三次元固体要素である。全節点数および全要素数は、図－２に示すモデルの場合でそれぞれ 7,467, 5,531 である。なお、A, C, D 試験体の場合も B 試験体と同様な方法でモデル化を行っている。総節点数と総要素数はそれぞれ A 試験体が 6,447, 4731, C 試験体が 8,487, 6,331, D 試験体が 9,507, 7,131 である。

要素の積分点数は 1 点積分を基本としているが、軸方向鉄筋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、面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。また、コンクリートと軸方向鉄筋要素間には、完全付着を仮定している。衝撃荷重は、重錘要素の全節点に設定した衝突速度を付加することにより RC 梁上に設置した形で与えている。なお、全数値解析時間は、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 160 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



図－２ 有限要素モデル (例：B 試験体)

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 μ に達した状態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にモデル化した。引張側の破壊圧力に関しては、普通コンクリートの場合には降伏強度の 1/10 と仮定している。しかしながら、本実験で用いている軽量コンクリートの引張強度 f_t は表－２に示されているとおり圧縮強度 f'_c の 1/10 よりも小さい。ここでは、コンクリートの引張強度がひび割れの発生や各応答性状に大きく影響するものと判断し、試験結果の引張強度を用いることとした。なお、降伏の判定は von Mises の降伏条件を採用している。

軸方向鉄筋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 には、表－３に示されている値を採用している。降伏の判定は、ここでも von Mises の降伏条件に従うこととした。また、塑性硬化係数 H' は、弾性係数 E_s の 1% と仮定している。

重錘、支点治具、スターラップおよび定着鋼板の要素に関しては弾性体モデルを適用している。これらの要素の弾性係数 E 、ポアソン比 ν には公称値を用いることとし、それぞれ $E = 206$ GPa, $\nu = 0.3$ と仮定している。

本研究では、市販の汎用コードに組み込まれている程度の単純な構成則を用いた RC 梁の弾塑性衝撃応答解析手法の確立を目的としていることより、コンクリートおよび鉄筋のひずみ速度効果やコンクリートのひずみ軟化現象は考慮していない。また、質量に比例する粘性減衰定数は、予備解析を行い RC 梁の最低次固有振動数に対して 0.5% と仮定している。

4. 数値解析結果と実験結果の比較

4.1 各応答波形の比較

図－３には、A, B, C および D 試験体の重錘衝撃力 P 、支点反力 R および載荷点変位 D の各種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。これらの応答波形に関する検討は、紙面の都合により、各試

..... F.E.M. — Experiment

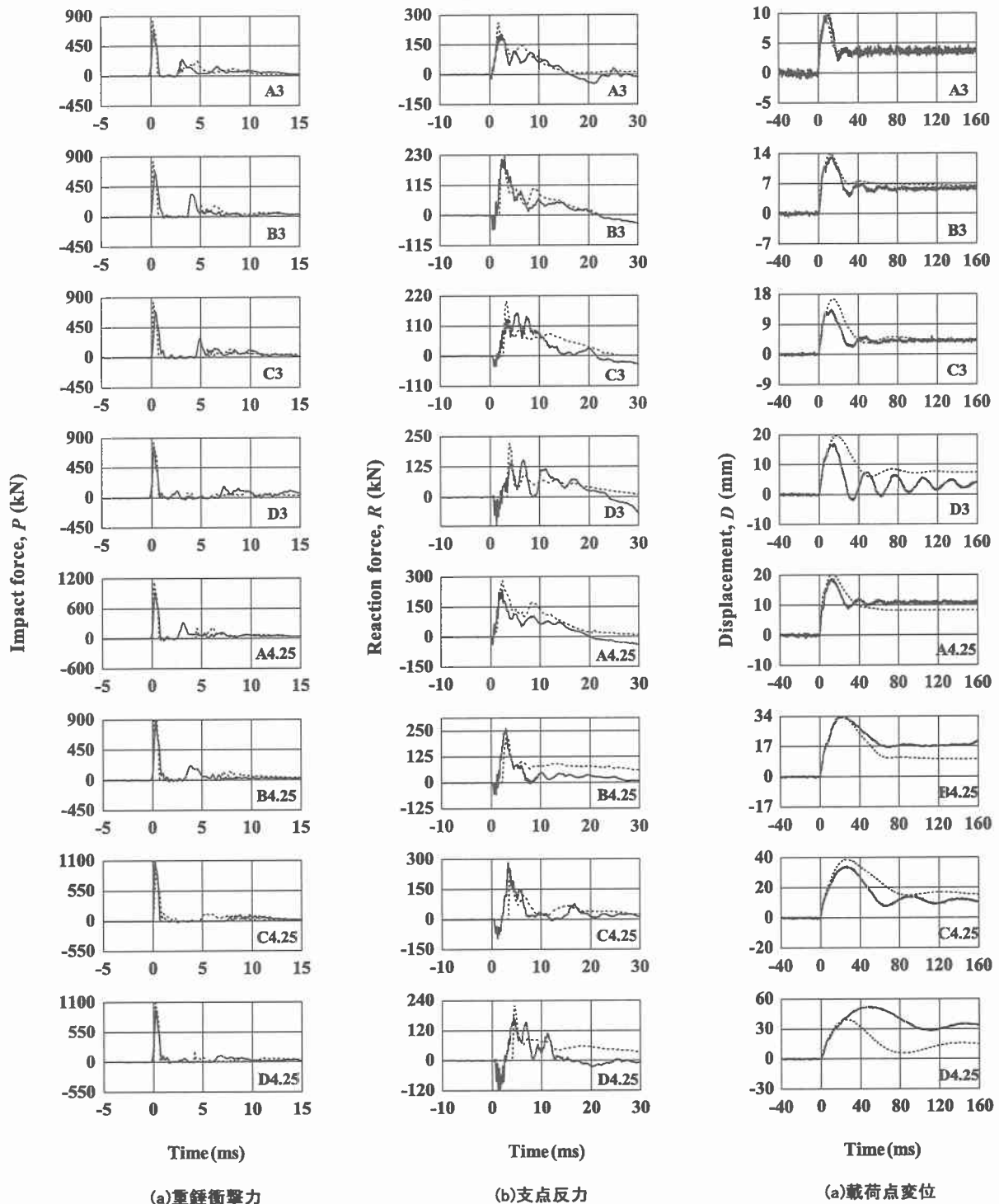


図-3 各種応答波形に関する比較

験体2体ずつに着目して行うこととする。なお、各波形は原波形を用いて整理している。また、数値解析における重錘衝撃力および支点反力波形は、重錘および支点治具とコンクリートと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。

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形の立ち上がりから減衰に至るまで両者で非常に良く対応していることが分かる。すなわち、両波形は衝

撃初期における振幅が大きく継続時間の短い波形成分と、その後励起される振幅が小さく継続時間の比較的長い波形成分の2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、数値解析結果と実験結果は負反力成分を除き両者で比較的良好に対応していることがわかる。すなわち、数値解析結果は波動の立ち上がりから5ms経過程度までは負反力が励起される波形成分を除き高周波成分も含め実験結果と良く対応している。その後、実験結果は、継続時間が

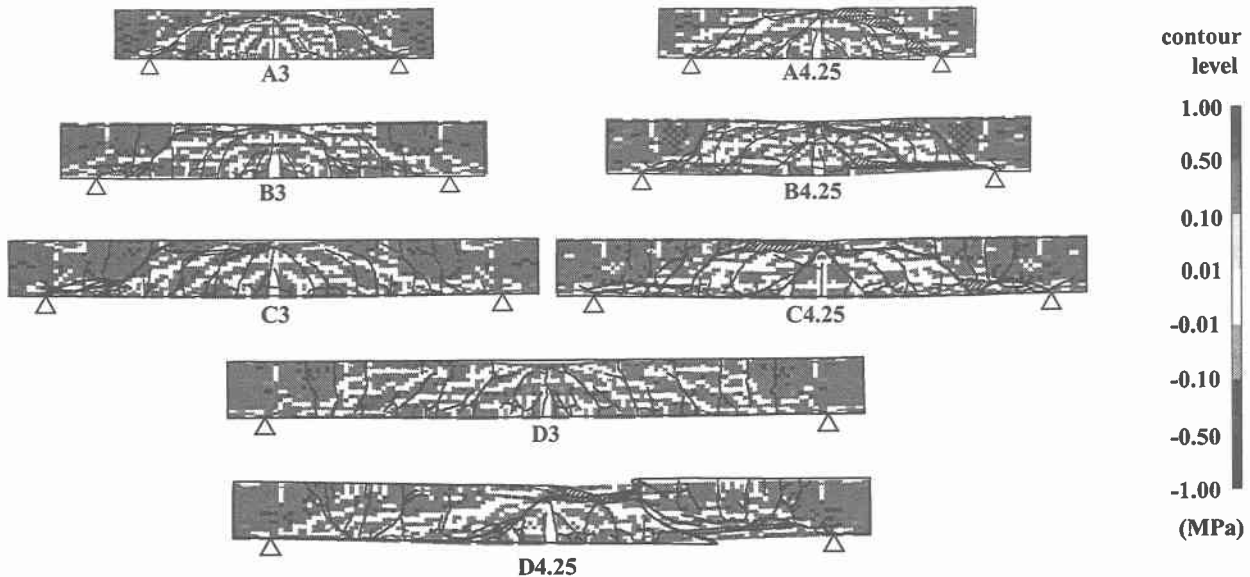


図-4 最大変位発生時近傍の第1主応力分布と実験終了後のコンクリートのひび割れ分布

10～30 ms 程度の正弦半波波形の波頭が鋭角な高周波成分に合成されている。一方、数値解析結果は、C3, C4.25 および D4.25 試験体を除くと、大略実験結果と類似している。なお、C3, C4.25 および D4.25 試験体に関して R の分布性状が異なるのは、実験において後述の図-4に見られるように斜めひび割れ発生位置近傍における下端鉄筋のばね作用によってコンクリートの剥落が発生し、軸方向鉄筋のみでせん断力に抵抗する性状を解析結果が再現できていないためであると推察される。また、衝撃初期の負反力成分に関して、実験の場合には、支点治具に初期力を導入して締め付けていることにより、負反力波形も測定可能となっている。一方、数値解析においては、梁底面と支点治具間の接触力を用いて評価していることより、負反力の評価が不可能となっている。

最後に、図-3(c)の荷重点変位波形 D を見ると、D4.25 試験体の場合を除くと、立ち上がりから最大応答値程度までの波動は、両者で比較的良く対応しており、最大応答値以降から残留変位に至る波動に関しては大略類似した傾向を示している。なお、D4.25 試験体の場合には、実験における $2/3$ 程度の変位量に達した時点から両者の波動に差異が生じている。これは、実験結果において、支点近傍の軸方向鉄筋が大きく塑性変形し、かつ梁下面のコンクリートが剥落した状態となったことによるものと推察される。

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き、本数値解析手法は各応答波形を大略評価可能であることが明らかとなった。

4.2 第1主応力分布を用いたひび割れ分布評価手法

コンクリート要素に適用した材料構成則の考え方に基づくと、最大応答変位発生時近傍におけるコンクリート要素の第1主応力が零応力（図中、白色分布）を示している場合には、衝撃初期より応力レベルが小さい状態であるか、その要素にひび割れが発生し、除荷された状態にあることを意味している。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、本評価方法の妥当性について検討を行った。

て検討を行った。

図-4には、RC梁の最大変位発生時近傍におけるRC梁側面の第1主応力分布を実験終了後のひび割れ分布（図中、黒色実線）と比較して示している。図中、実験結果の斜線部分は、コンクリートが剥落したことを示している。

図より、梁のスパン長にかかわらず、数値解析結果は実験結果に見られる荷重点直下から上縁に向かって進展する曲げひび割れや荷重点部から支点部に至るアーチ状に進展するひび割れ、荷重点部から 45° 程度の角度で梁下縁に進展する斜めひび割れ等を比較的精度良く再現していることが分かる。

以上より、ひび割れ分布に関する本評価手法は、軽量コンクリートRC梁が斜めひび割れに伴い脆性的なせん断破壊を生じる場合に対しても、比較的精度良く予測できることが明らかとなった。

5. まとめ

本研究では、せん断補強筋なしの静的にせん断破壊で終局に至る軽量コンクリートRC梁に対する弾塑性衝撃応答解析を行い、実験結果と比較する形で本数値解析手法の妥当性を検討した。本研究より得られた結果を要約すると、

- 1) 重錘衝撃力、支点反力および変位波形は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、大略評価可能である。
- 2) 最大変位発生時の第1主応力分布図を用いてることにより、RC梁に発生するひび割れ分布を、比較的精度良く予測することができる。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静荷荷時に曲げが卓越するRC梁の弾塑性応答解析, 土木学会論文集, No.619 / I-47, pp.215-233, 1999