

軽量コンクリートせん断破壊型RC梁の衝撃せん断耐力評価に関する数値解析的検討

Numerical study on evaluation of impact resistant shear-capacity of shear-failure type LW-RC beams

室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光	(Norimitsu Kishi)
三井住友建設(株)	フェロー	三上 浩	(Hiroshi Mikami)
ドービー建設工業(株)	正員	竹本 伸一	(Shin-ichi Takemoto)
室蘭工業大学	○学生員	南波 宏介	(Kosuke Namba)

1. はじめに

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、粗骨材に焼成人工軽量骨材を用いたコンクリート（以後、軽量コンクリート）を適用する工法が一部で実用化されている。この軽量コンクリートを用いた梁や柱部材の静的な曲げおよびせん断耐荷性状に関する実験的・解析的研究が既に実施されている一方で、耐衝撃用途構造物への応用も考えられ、著者らは曲げ破壊型RC梁を対象とした重錘落下衝撃実験を実施している。しかしながら、合理的な耐衝撃設計を実施するためには曲げ耐力のみならず、せん断耐力評価法も確立しなければならない。著者らはその試みとして、静的にせん断破壊に至るせん断補強筋のない軽量コンクリート製RC梁に関する重錘落下衝撃実験を実施して、せん断スパン比、重錘衝突速度を変化させた場合のせん断耐荷性状について実験的に検討している。RC梁のせん断耐力は主にコンクリート強度、主鉄筋やスターラップの鉄筋比、断面寸法の影響を大きく受けるため、その評価法を確立するためには静的耐力に関しても多くの実験を必要とする。従って、衝撃荷重載荷時のせん断耐力評価法の確立に向けた検討を効率的に行うためには、実験的研究は数値解析的研究の援用の下を実施するべきものと判断される。

このような観点より、本研究では、軽量コンクリートRC梁の断面形状が耐衝撃挙動に及ぼす影響を数値解析的に検討することを目的として、静載荷時にせん断破壊で終局に至るせん断補強筋のない軽量コンクリートRC梁を対象に3次元有限要素法による弾塑性衝撃応答解析を試み、一部実験結果と比較することによって検討を行った。本研究では、普通コンクリートを用いる場合と同様に簡易な構成則を用いて数値解析を行うことを前提に検討を行った。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.960)を用いている。

2. 実験概要

図-1には、本数値解析で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の一例を測定項目と合わせて示している。対象としたRC梁は断面の形状寸法、純スパン長が異なる3種類の試験体である。試験体の断面寸法（梁幅×梁高）はA試験体が200×300mm、B試験体が220×270mm、C試験体が250×250mmである。純スパン長は2m、2.5m、3mの3種類である。軸方向鉄筋はD22、D25、D29を用い、いずれも芯かぶり50mmの位置に配筋し、梁両端面で厚さ9mm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、試験体の静的設計値の一覧を示している。試験体名は、断面形状の種類を表し、その後の整数値は純スパン長(m)の値を組み合わせ示している。表中の計算せん断耐力 V_{usc} 、計算曲げ耐力 P_{usc} はいずれもコンクリート標準示方書（以後、示方書）に準拠して算出している。特に V_{usc} の値は示方書に則して計算値の70%に低減して評価している。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。

なお、A試験体に関しては、衝撃荷重載荷時における各梁の最大耐力を求めるために、質量300kgの鋼製円柱重錘を用いて衝突速度 V を3m/sから4.25m/sまで5段階に変化させた単一の重錘落下衝撃実験を実施している。ここではこれらの実験結果と比較することにより数値解析法の妥当性を確認の後、B、C梁についても解析を行うこととする。

3. 数値解析および仮定

3.1 数値解析モデル

図-2には、一例としてA2梁に関する有限要素モデル

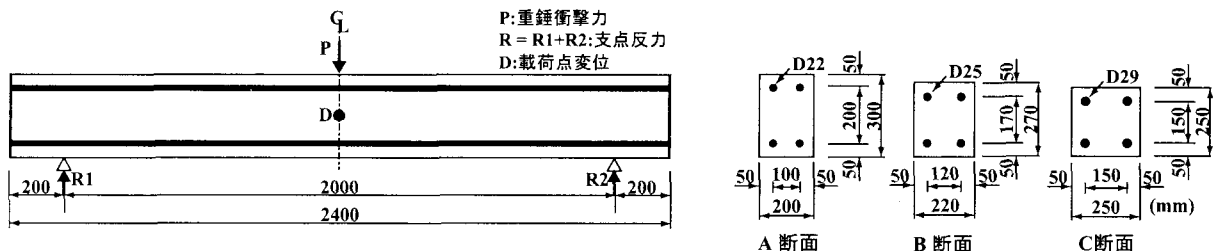


図-1 試験体の形状寸法（例：A2梁）

表-1 RC梁の静的設計値一覧

試験体名称	純スパン長 (m)	せん断スパン比 a/d	計算静的せん断耐力 V_{usc} (kN)	計算静的曲げ耐力 P_{usc} (kN)	せん断余裕度 α
A2/2.5/3 梁	2.0, 2.5, 3.0	4.0, 5.0, 6.0	80.7	131.1, 105.0, 87.6	0.61, 0.77, 0.92
B2/2.5/3 梁		4.54, 5.68, 6.82	87.9	145.95, 116.76, 97.30	0.60, 0.75, 0.90
C2/2.5/3 梁		5.0, 6.25, 7.5	99.51	163.58, 130.86, 109.05	0.61, 0.76, 0.91

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, D25, D29	SD345	367	206	0.3

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3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7,323, 5,418である。また、A2.5梁は8,343, 6,218, A3梁は9,363, 7,018である。なお、B, C梁の場合もA梁と同様のモデル化を行っている。RC梁部は実験に用いた梁の形状寸法に基づき忠実にモデル化している。ただし、軸方向鉄筋は公称断面積と等価な正方形要素として簡略化している。重錘部は、実形状に即し、全長1.0mで直径200mmの円柱状を基本としてロードセル部を実際の重錘と同様な直径107mmに絞り込んだ形にモデル化し、底部形状を高さ2mmの球形形状から扁平状に簡略化してモデル化している。支点治具部は、ロードセルや跳ね上がり防止用治具も含め、実構造に即してモデル化することとした。なお、支点の底部には、実験時と同様に治具全体のx軸回りの回転のみを許容するように境界条件を設定している。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、数値解析は、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160ms間について実施した。

3.2 材料物性モデル

材料物性モデルは、コンクリートの物性モデルにおける引張強度 f_t の値を除いて文献1)の普通コンクリートを用いた曲げ破壊型RC梁の場合と同様である。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圧縮強度の1/10と仮定してきたが、本実験で用いている軽量コンクリートの場合には、予備解析結果を参考に圧縮強度の1/16と仮定している。また、重錘、支点治具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

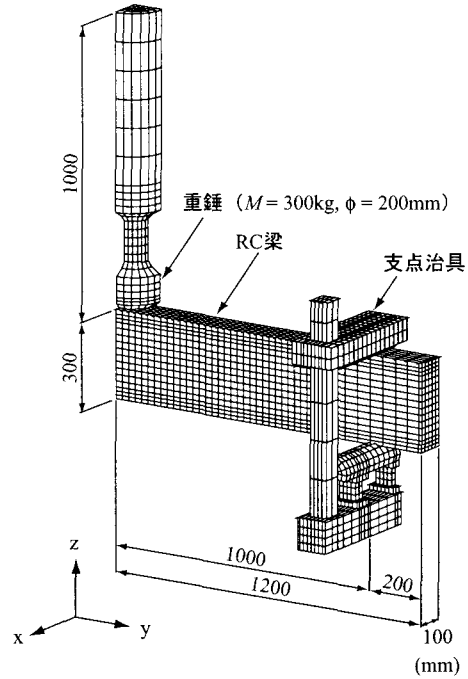


図-2 有限要素モデル (例:A2梁)

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

A試験体に関しては既往の研究により、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、本数値解析手法を適用することによって各応答波形を大略評価可能であることが明らかとなっている。

4.1 せん断スパン比毎の最大応答値の比較

図-3には、各せん断スパン比毎の最大応答値の解析結果を実験結果と比較して示している。最大重錘衝撃力に関してはいずれのせん断スパン比に対しても解析結果が実験結果より大きい値を示している。その差異は衝突速度にかかわらず同程度の衝撃力値である。最大支点反力に関しては、せん断スパン比の小さいA2梁の場合には解析結果が実験結果より大きくなる傾向を示している。一方、せん断スパン比の大きいA2.5, A3梁の場合には、解析結果と実験結果で分布性状が異なっている。

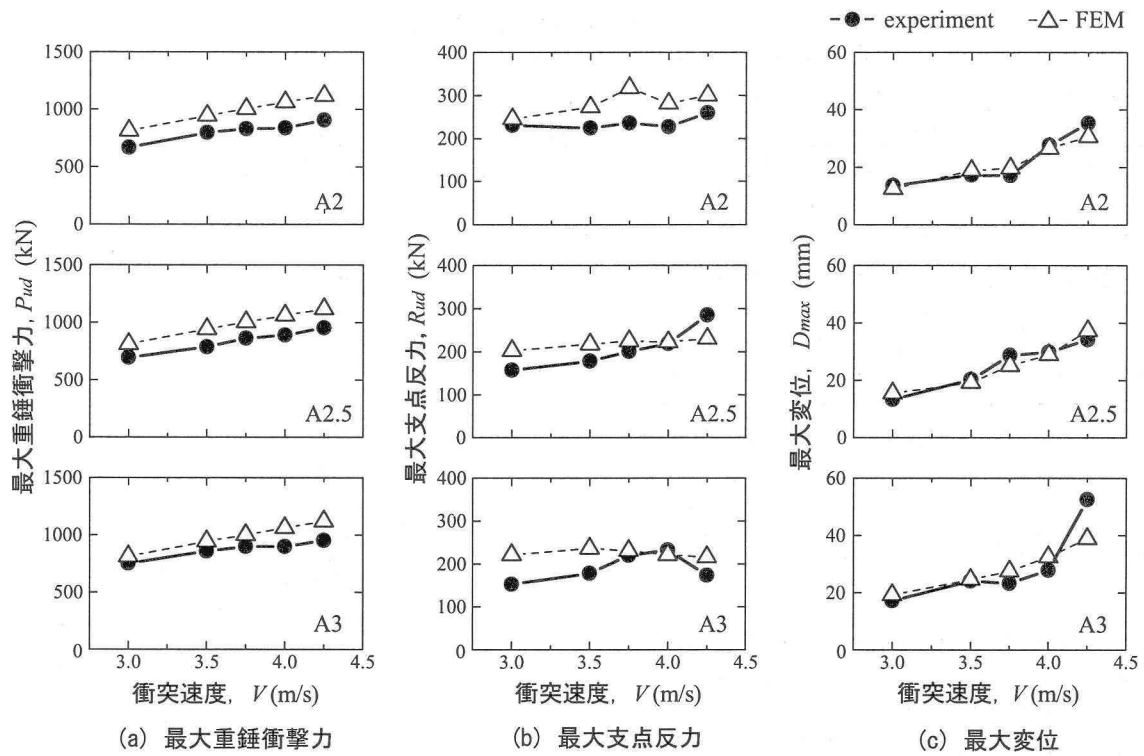


図-3 各最大応答値と衝突速度の関係図

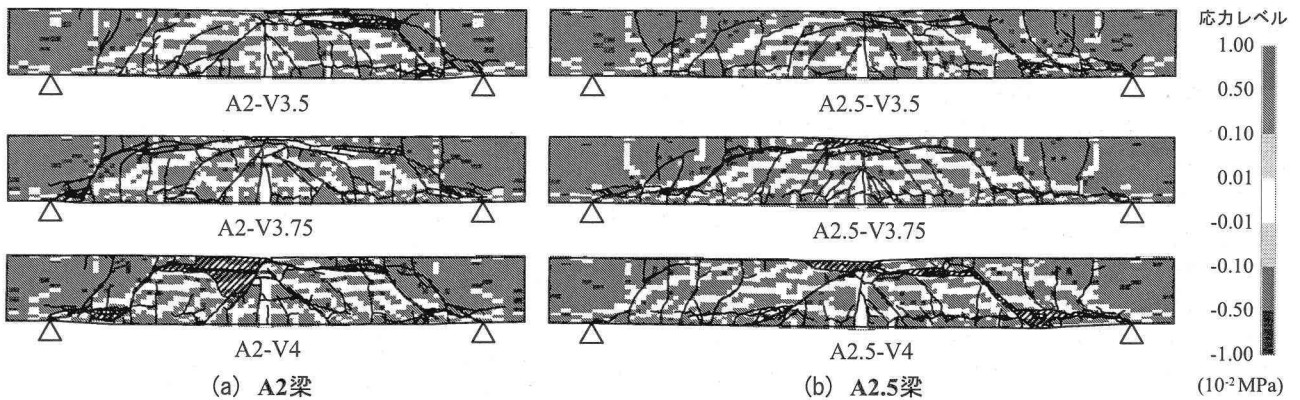


図-4 A梁に関する実験後のひび割れ分布と第一主応力分布図

すなわち、解析結果の場合には、衝突速度 V の大きさにかわらず同程度の値を示している。一方、実験結果において、A2.5梁の場合は V の増加とともに大きくなる傾向を示し、A3梁の場合は $V = 4$ m/sまでは V の増加とともに大きくなる傾向を示しているが、 $V = 4.25$ m/sでは減少している。また、A2梁の $V = 3.75$ m/sにおける解析結果は $V = 3.5$ m/s、4 m/s時における値よりも大きく、かつ実験結果とも最も差が大きい。これは、図-4に示している梁側面におけるひび割れ分布特性からも明らかのように、 $V = 3.75$ m/s時の解析結果ではアーチ作用が卓越したよりせん断破壊型の状態を示している。これに対して $V = 4$ m/s時の場合には、曲げひび割れの発生とともに下端鉄筋に沿う割裂ひび割れも発生していることから、 $V = 3.75$ m/s時に比して耐力が小さく評価されたものと推察される。また実験結果との差は、図-4のひび割れ分布から明らかのように、実験結果では $V = 3.75$ m/s時においても上端鉄筋に沿う割裂ひび割れが発生し

ているのに対して、数値解析ではこの挙動が再現できていないことによるものと推察される。最大変位に関してはせん断スパン比の大小にかかわらず衝突速度が大きく損傷が著しいA3-V4.25梁の場合を除いて、解析結果と実験結果はほぼ対応していることが分かる。

以上より、提案の数値解析手法を用いることにより、最大重錘衝撃力や最大変位に関してはせん断スパン比を変化させた場合の各衝突速度に対する実験結果の分布特性を損なわずに評価可能であることが明らかになった。一方、最大支点反力に関しては上端筋に沿う割裂ひび割れやそれに起因するコンクリートブロックの剥離、剥落傾向を評価できないために、衝突速度毎の分布に若干差異を生じる傾向にあることが明らかになった。

4.2 せん断耐力評価

前述のように、最大重錘衝撃力分布は衝突速度の増加に対応して増加する傾向を示すことが明らかになっている。しかしながら、最大支点反力値は最大値あるいは一

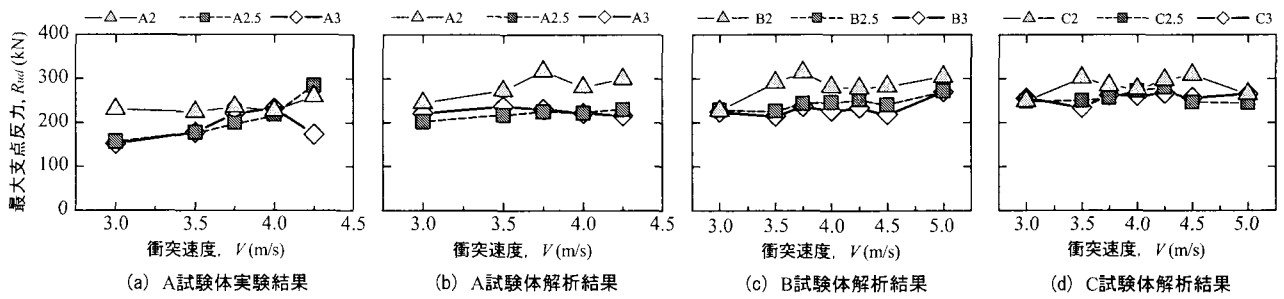


図-5 最大支点反力と衝突速度の関係

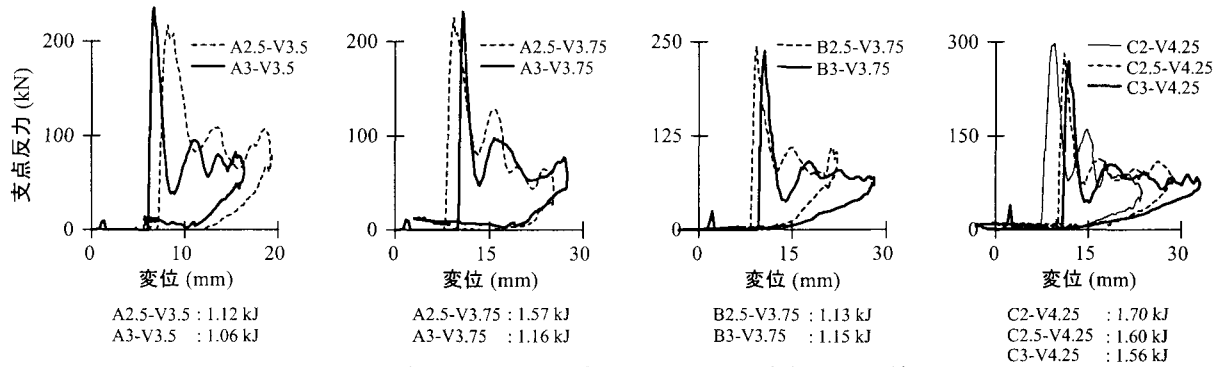


図-6 各梁の終局時における支点反力-変位履歴曲線

定値を示す傾向にある。したがって最大重錘衝撃力を衝撃荷重載荷時のせん断耐力として用いることは、設計的に危険側の評価を与える可能性があることより、本論文では曲げ破壊型RC梁の耐力評価時²⁾と同様に、最大支点反力値を用いて衝撃せん断耐力として評価することとする。

図-5には、実験の結果と数値解析結果の各衝突速度における最大支点反力値を比較して示している。前述のように、実験結果に関してはRC梁の損傷状態も考慮に入れて衝突速度 $V = 3.5 \sim 3.75$ m/s時に限界せん断耐力に達しているものとして評価することとする。この時の全梁の平均耐力を求めると $V_{cd} = 215$ kNとなる。一方、数値解析結果の場合には、せん断スパン比の小さいA2梁がせん断スパン比の大きいA2.5, A3梁の場合よりも大きい値を示している。ここでは、設計工学の観点からせん断スパン比が大きく支点の影響が小さいA2.5, A3梁の最大支点反力を用いて評価することとする。図-5(b)でそれぞれ $V = 3.50, 3.75$ m/sで極大値を示していることより、両梁の $V = 3.50$ m/sと 3.75 m/s時の平均値を衝撃せん断耐力として評価することとすると227 kNとなる。これより、数値解析によって評価された衝撃荷重載荷時の衝撃せん断耐力は損傷の程度は異なるものの、実験結果より得られた耐力とよく対応していることが明らかになった。この時の静的耐力に対する割合(以後、動的応答倍率)は計算せん断耐力に対して2.8程度となる。

図-5(c), (d)には、このような数値解析結果の妥当性をよりどころに実施したB梁, C梁に関する解析結果を示している。図より、B試験体では $V = 3.75$ m/s時に、C試験体では $V = 4.25$ m/sに限界せん断耐力が発生しているものと推察される。なお、ここでもB梁に関しては、せん断スパン比の小さいB2梁を除き評価することとした。これより、衝撃せん断耐力はB梁で265kN, C梁で

282kNとなる。この時の動的応答倍率は2.73, 2.83となる。これより、動的応答倍率は2.7~2.85程度であることが分かる。

4.3 終局時のエネルギー比

図-6には、各試験体の支点反力-変位履歴曲線を示している。ループに囲まれた部分を吸収エネルギーとし、最大支点反力発生時の吸収エネルギー E_a と入力エネルギー $E_k (= MV^2/2)$ の比をエネルギー比(E_a/E_k)とすると、各梁の平均はA梁で0.62, B梁で0.54, またC梁で0.60となった。これより、エネルギー収支は0.5~0.62程度であるものと推察される。

5. まとめ

本研究では、せん断補強筋のない静的にせん断破壊型で終局に至る軽量コンクリート製RC梁に関する3次元有限要素法による弾塑性衝撃応答解析を行い、本研究の範囲で得られた結果を要約すると、

- 1) 本数値解析手法を適用し、最大支点反力を用いることにより、各試験体の衝撃せん断耐力を評価可能である。
- 2) 試験体の断面形状に関わらず衝撃せん断耐力の動的応答倍率は2.7~2.85程度、エネルギー吸収比は0.5~0.62程度であるものと推察される。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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梁の耐衝撃設計法に関する一提案, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.177-190, 2000.4