

軽量コンクリートを用いたせん断補強筋のない せん断破壊型 RC 梁の重錘落下衝撃挙動解析

Impact response analysis of light-weight shear failure type RC beams without stirrup

岸 徳光* 三上 浩** 松岡健一* 竹本 伸一***

Norimitsu Kishi, Hiroshi Mikami, Ken-ichi Matsuoka and Shin-ichi Takemoto

* 工博 室蘭工業大学教授 工学部 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

** 博(工) 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

*** ドーピー建設工業(株) 部長 北海道本店設計部 (〒061-0001 札幌市中央区北 1 条西 6 丁目)

In order to establish a simple and rational impact response analysis method for light-weight shear failure type Reinforced Concrete (RC) beams without stirrup, three-dimensional elasto-plastic finite element analysis was conducted for total twenty RC beams under falling-weight impacting. Here, tensile strength of concrete was assumed as 1/16th of compressive one. An applicability of the proposed analysis method was confirmed comparing with the experimental results. From this study, following results were obtained: 1) impact response waves and crack patterns can be rationally predicted by using proposed analysis method, and 2) ultimate shear capacity of the RC beams under impact loading can be estimated by analyzing RC beams with more than five of shear-span ratio.

Key Words : *light-weight concrete, RC beam, impact response analysis, falling-weight impact test*

キーワード: 軽量コンクリート, RC 梁, 衝撃応答解析, 重錘落下衝撃実験

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, 新しい構造形式の開発のみならず, 新しい材料の開発やその適用性検討が盛んに行われている. 新材料として期待されているものの一つに, 粗骨材に焼成人工軽量骨材を用いたコンクリート¹⁾(以後, 軽量コンクリート)がある. 焼成人工軽量骨材(以後, 軽量骨材)は, 24 時間吸水率が 9~11 % と小さいにもかかわらず圧壊荷重が 1,000 N 以上であること, この骨材を用いて 35~65 MPa の圧縮強度を有するコンクリートの製作が可能になること, 有害化学物質を含まないことや, 塩分を含まずアルカリ骨材反応が生じないこと等, 従来の人工軽量骨材に比べて格段に品質が向上している.

軽量コンクリートの各種鉄筋コンクリート (RC) 構造物への適用を目的に, 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^{2), 3)}. 一方, 軽量コンクリートは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. その結果, 普通コンクリートを用いる場合と同程度の曲げ耐衝撃性状を期待できることが明らかとなっている^{4), 5)}.

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⁶⁾.

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. さらに, 衝撃荷重載荷時には, その破壊が脆性的であるため繰り返し載荷法による評価が困難であり, 同一断面に対しても入力エネルギーを種々変化させた多くの実験を実施しなければならない. これより, 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の研究の援用の下に実施されなければならないものと判断される. そのためには, 第 1 にせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃挙動に関する解析手法の確立が望まれる.

一方, 普通コンクリートを用いた RC 部材の耐衝撃挙動に関しては, 曲げ破壊型からせん断破壊型に至るまでの実験的研究^{7)~10)}がある. 数値解析的な研究に関しても, 重錘の衝突速度が 10 m/s 程度の中速度衝撃

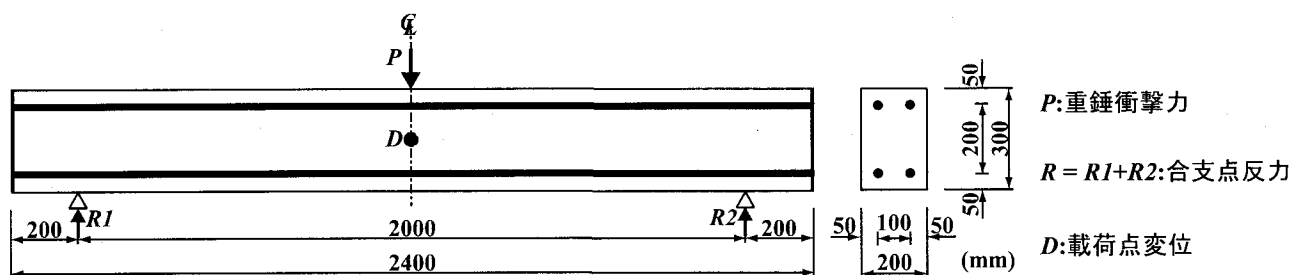


図-1 試験体の形状寸法 (LW4 梁)

表-1 静的設計値一覧

試験体名	主鉄筋比 P_t	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	実測静的せん断耐力 P_{us} (kN)	実測せん断余裕度 α'	衝突速度 V (m/s)
LW3	0.015	1.5	3.0	80.7	175.1	0.46	142.7	0.82	3, 3.5, 3.75, 4, 4.25
LW4		2.0	4.0		131.3	0.61	101.7	0.75	
LW5		2.5	5.0		105.0	0.77	90.5	0.86	
LW6		3.0	6.0		87.6	0.92	94.2	1.07	

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

までは、破壊性状にかかわらず質量比例型の粘性減衰を考慮しつつひずみ速度効果を無視した簡易な構成式を用いて解析可能であることが示されている^{11)~13)}。

このような観点より、本研究では、上述のこれまでに著者らによって検討されてきた数値解析手法を踏襲して、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を確立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、実験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構造解析用汎用コード LS-DYNA(ver.960)¹⁴⁾を用いている。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

本研究では、著者らによって過去に実施された軽量コンクリートを用いたせん断破壊型 RC 梁に関する重錘落下衝撃実験結果⁶⁾を用いて、提案の数値解析手法の妥当性を検討することとする。

本数値解析で対象とした軽量コンクリート RC 梁は、断面の形状寸法、軸方向鉄筋比が同一で純スパン長のみが異なる 4 種類の試験体である。試験体の断面寸法 (梁幅×梁高) はいずれも 200×300 mm であり、純スパン長は 1.5 m, 2 m, 2.5 m, 3 m の 4 種類である。図-1 には、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。軸方向鉄筋は D22-SD345 をいずれも芯かぶり 50 mm

の位置に配筋し、梁両端面で厚さ 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、試験体の静的設計値の一覧を示している。試験体名は、軽量コンクリートを表す LW とせん断スパン比の値を組み合わせで示している。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¹⁵⁾に準拠して算出している。特に V_{usc} の値は上述の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、各耐力値は表-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。

また、表には、あらかじめ実施したスパン中央点への静的集中荷重載荷実験により得られた耐力を、実測静的せん断耐力値として一覧にして示している。表より、いずれの試験体に関しても実測耐力が計算せん断耐力値よりも大きく、かつせん断スパン比の小さい試験体が大きい試験体に比較して大きな耐力を有していることが分かる。また、計算曲げ耐力に対する実測せ

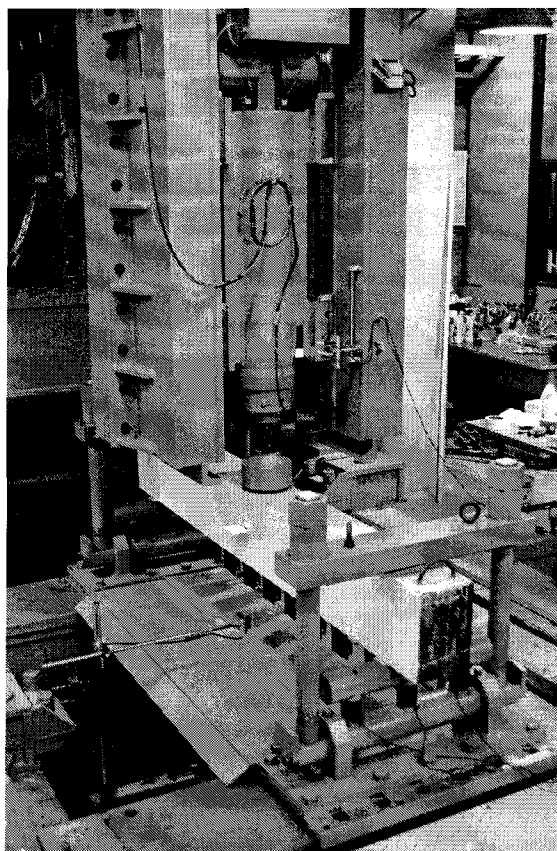


写真-1 重錘落下衝撃実験の状況 (LW4 梁)

ん断余裕度は、計算せん断余裕度よりも大きい。特に、LW6 試験体の場合には、実測せん断余裕度が 1.07 となり、静载荷時には曲げとせん断耐力が類似した値となっている。

このような状況下で、本研究では、各断面寸法を有する RC 梁の衝撃荷重载荷時における最大耐力を求めるために、300 kg 鋼製円柱重錘を用いて衝突速度 V を 3 m/s から 4.25 m/s までの 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。

2.2 重錘落下衝撃実験の概要

写真-1 には、本重錘落下衝撃実験の状況を示している。写真に示すように、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ている。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。重錘は、上述のように質量が 300 kg で、直径が $\phi = 200$ mm (载荷点部直径は 150 mm) の円柱状鋼製重錘である。なお、重錘底部は衝突時の片当たりを防止するために、半径 1,407 mm、高さ 2 mm のテーパを有する球形形状となっている。測定項目は、図-1 に示すように、重錘衝撃力 P 、合支点反力 R (以後、支点反力) および梁中央部側面における载荷点変位 D (以後、変位) に関する各応答波形である。ここで、 P の測定には起歪柱型ロードセルを用いている。このロードセルの容量お

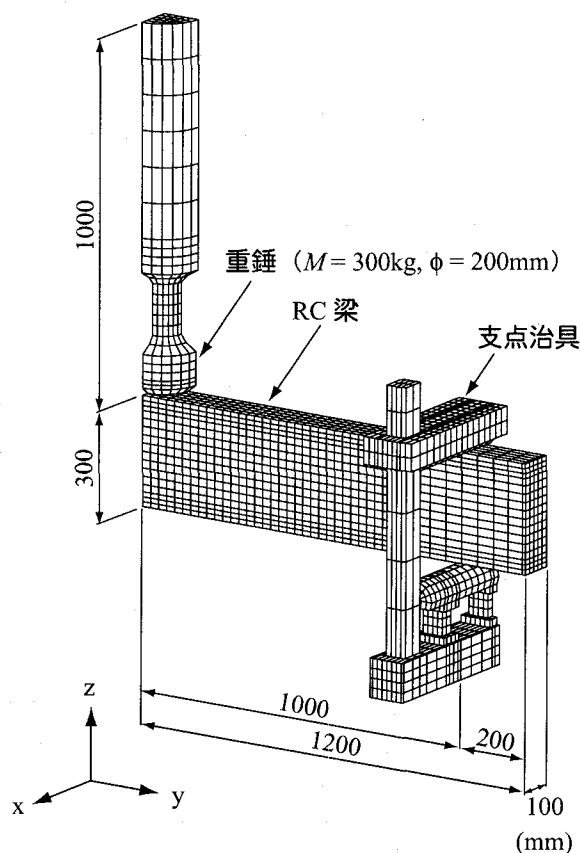


図-2 有限要素モデル (例 : LW4 梁)

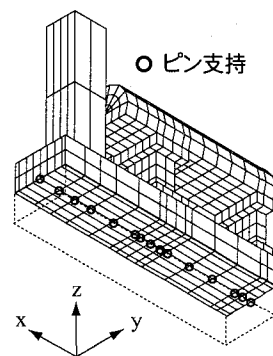


図-3 治具底部支持状況

よび応答周波数は、容量 1,470 kN、応答周波数 DC ~ 4.0 kHz、 R の測定には容量 1,000 kN、応答周波数 DC ~ 2.4 kHz である重錘衝撃力測定用と同型のロードセルを用いている。また、 D の測定には容量 200 mm、応答周波数 DC ~ 915 Hz の非接触式レーザ変位計を用いている。なお、重錘衝撃力波形 P および支点反力波形 R に関しては、各センサからの出力波形を直流アンプを用いて増幅し、また、レーザ式変位計からの出力はアンプユニットを介して、いずれの波形もデータレコーダ (DC ~ 40 kHz) に一括収録している。各波形データは 100 μ s / word のサンプリング間隔で A/D 変換を施し、数値解析結果との比較検討に用いている。

3. 数値解析および仮定

3.1 数値解析モデル

図-2には、一例としてLW4梁に関する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、鉄筋要素も含めて全て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LW4梁の場合でそれぞれ7,323, 5,418である。なお、LW3, 5, 6梁の場合も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LW3梁が6,303, 4,618, LW5梁が8,343, 6,218, LW6梁が9,363, 7,018である。

各構成要素に関するモデル化の詳細を述べると、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(図-3)。

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。

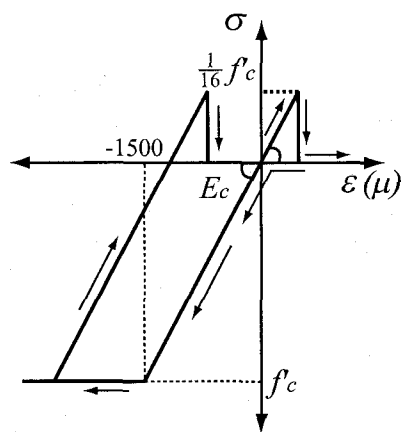
コンクリートと重錘および支点治具の要素間には、面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。また、コンクリートと軸方向鉄筋要素間には、完全付着を仮定している。衝撃荷重は、重錘要素の全節点に設定した衝突速度を付加することによりRC梁上に設置した形で与えている。なお、全数値解析時間は、重錘がRC梁に衝突した時点からRC梁がほぼ定常状態に至るまでの160ms間とした。

3.2 材料物性モデル

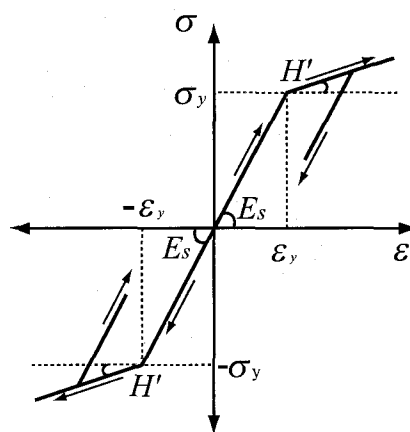
図-4には、本数値解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の応力-歪特性を示している。これらの材料物性モデルは、コンクリートに関する引張強度 f_t の値を除き文献11)の普通コンクリートを用いた曲げ破壊型RC梁の場合と同様である。以下に、コンクリートと鉄筋等に関する材料物性モデルの概要を述べる。

(1) コンクリート

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、



(a) コンクリート



(b) 軸方向鉄筋

図-4 応力-歪特性

図-4(a)のように、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で圧縮強度の1/10と仮定している。しかしながら、本実験に用いられている軽量コンクリートの場合には、材料試験結果が圧縮強度の1/16.5であることより、予備解析を実施し圧縮強度の1/16と仮定している。なお、降伏の判定には von Mises の降伏条件式を採用している。

(2) 鉄筋

図-4(b)には、軸方向鉄筋の応力-歪特性を示している。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_s 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。

(3) 重錘、支点治具および定着鋼板

重錘、支点治具および定着鋼板の要素に関しては弾

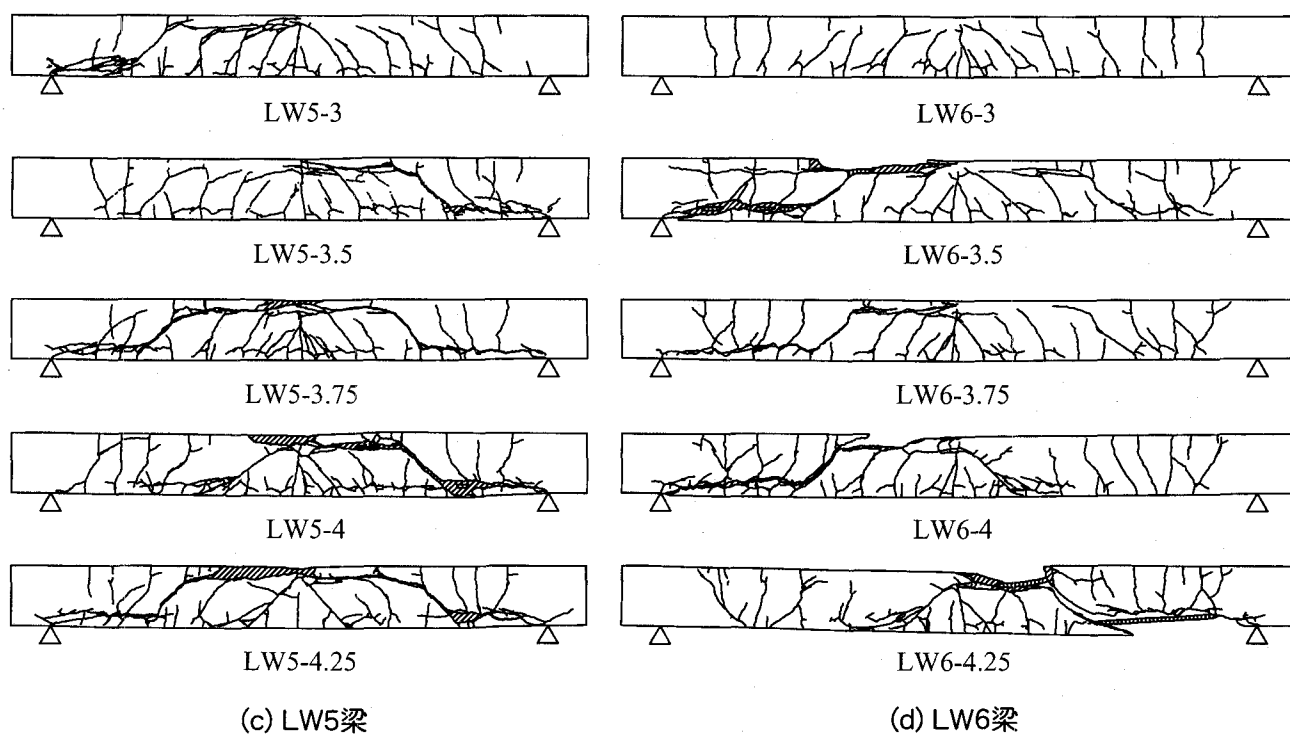
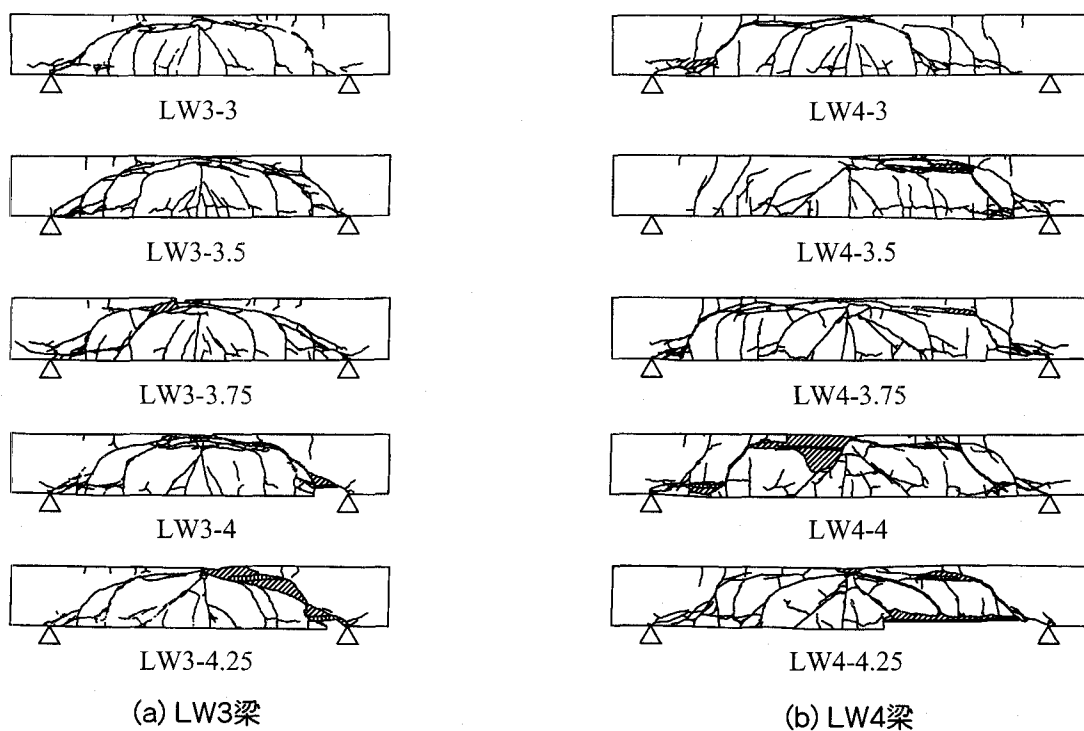


図-5 実験終了後の各梁のひび割れ分布

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 $E = 206 \text{ GPa}$ 、 $\nu = 0.3$ と仮定している。

(4) ひずみ速度効果および粘性減衰定数

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、各材料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. 実験結果のひび割れ分布図

図-5には、各応答波形に関する実験結果と解析結果の比較を容易にするために、実験終了後の各梁の各衝突速度毎のひび割れ分布図を示している。LW3 梁の場合には、衝突速度 $V = 3 \text{ m/s}$ 時より載荷点から支点に向かうアーチ状のひび割れが形成され、せん断破壊型のモードを示していることが分かる。その後、衝突速度の増大とともに、上述のアーチ状のひび割れの開口が大きくなる傾向を示している。特に $V = 4, 4.25 \text{ m/s}$ 時点では支点あるいは載荷点近傍部において上下端筋に沿う割裂ひび割れに起因するコンクリートの剥落が見られ、既に終局に至っていることが分かる。

LW4 梁の場合には、せん断スパン比が大きくなることにより、衝突速度 $V = 3 \text{ m/s}$ 時点ではアーチ状のひび割れと共に上下端筋に沿う割裂ひび割れも示されている。 $V = 3.5 \text{ m/s}$ 時点では上端でコンクリートが剥落している。 $V = 3.75 \text{ m/s}$ 時にはコンクリートが剥落していないものの損傷が顕在化していることが分かる。 $V = 4, 4.25 \text{ m/s}$ 時には LW3 梁と同様に、載荷点近傍部あるいは下縁かぶり部でコンクリートが大きく剥落しており、既に終局に至っているものと判断される。

LW5 梁、LW6 梁の場合は、せん断スパン比が大きいことより、衝突速度 $V = 3 \text{ m/s}$ 時点では曲げせん断型のひび割れがスパン全体に渡って発生していることが分かる。 $V = 3.5 \text{ m/s}$ 時には LW5 梁の場合において上下端筋に沿う割裂ひび割れの発生と共に右側スパンの斜めひび割れが開く傾向を示している。一方、LW6 梁の場合には左側スパンにおいて上縁かぶりコンクリートの剥落と下端に大きな割裂ひび割れが発生している。しかしながら $V = 3.75 \text{ m/s}$ 時には損傷が進行しているもののかぶりコンクリートの剥離・剥落は生じていない。LW5 梁の場合にはアーチ状ひび割れと下端筋に沿う割裂ひび割れの発生により、中央部がせん断破壊によって抜け落ちるような傾向を示している。 $V = 4, 4.25 \text{ m/s}$ 時の場合には、LW5, 6 梁とも載荷点部あるいは支点近傍部において上下端筋に沿う割裂ひび割れに起因してコンクリートの剥落が見られ、LW3, 4 梁同様既に終局に至っているものと判断される。

以上より、限界の衝撃せん断耐力は入力エネルギー的には衝突速度 $V = 3.5 \text{ m/s}$ あるいは 3.75 m/s 時点で発生しているものと推察される。

5. 数値解析結果と実験結果の比較

5.1 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

図-6には、衝突速度 $V = 3.5 \text{ m/s}, 4 \text{ m/s}$ における LW3, LW4, LW5 および LW6 梁の重錘衝撃力 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。

最初に、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方で非常に良く対応していることがわかる。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。

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高周波成分も含め両方で比較的良く対応していることがわかる。ただし、LW5-3.5, LW6-3.5, LW6-4 梁は、最大支点反力発生後の波形分布性状に関して解析結果と実験結果に差異が生じている。これは、図-5に示されているように、実験結果の斜めひび割れ発生とともに上縁コンクリートの剥離・剥落や下縁かぶり部の割裂ひび割れの発生によって軸方向鉄筋のみでせん断力に抵抗する性状を数値解析において再現できないためと推察される。

また、衝撃初期の負反力成分に関しては、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、初期締め付けを考慮していないことより負反力の評価が不可能となっている。

変位波形 D を見ると、立ち上がりから最大応答値程度までの波動は、両方で比較的良く対応していることが分かる。また、最大応答値以降から残留変位に至る波動に関しては、著しい破壊に至る場合を除き、大略類似した傾向を示している。

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た。

5.2 各応答波形の最大値

図-7には、全試験体の重錘衝撃力、支点反力および変位に関する最大値を数値解析結果と実験結果で比較して示している。図中の 45° 勾配を有する実線は、数値解析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、この実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。また、破線は両結果に対する誤差幅を表している。

図-7(a)の最大重錘衝撃力について見ると、いずれの試験体も数値解析結果が実験結果に比べて大きく示されている。しかしながら、その差はいずれの試験体の場合においてもほぼ 15% 以下と比較的小さい。

図-7(b)の最大支点反力に関しては、著しい損傷を受けている LW5-4.25 梁の場合で実験結果が若干大きく示されているもののその差は 20% 以下であり、その他の梁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。しかしながらその差もほぼ 20% 以下で

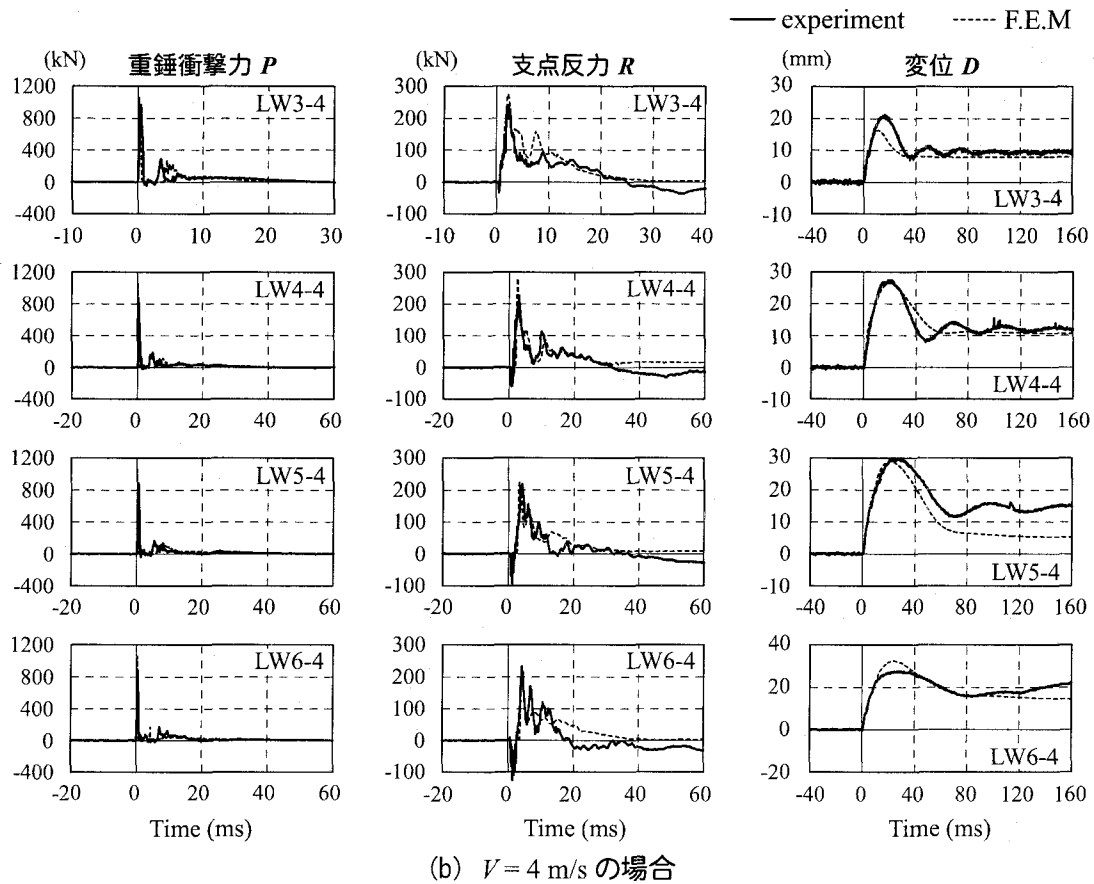
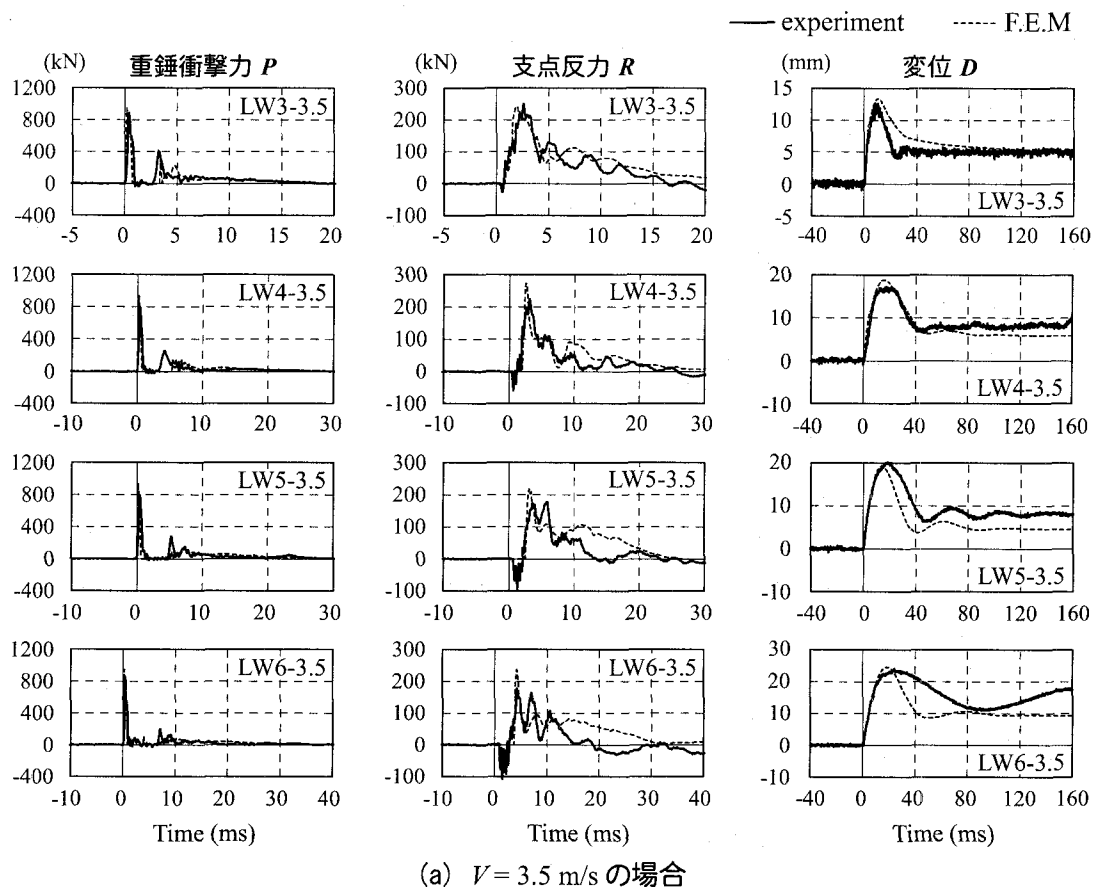


図-6 各応答波形に関する解析結果と実験結果の比較図

ある。

図-7(c)の最大変位に関しては、支点近傍部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 LW6-4.25 試験体を除き、解析結果と実験結果の差は 20 % 以下となっている。誤差はせん断スパン比が小さい場合は実験結果が解析結果より大きく、せん断スパン比が大きい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ようである。

以上より、本数値解析手法を用いることにより、最大重錘衝撃力は 15 % 程度以下の誤差幅で工学的に安全側で評価可能であり、最大支点反力および最大応答変位においても 20 % 程度以下の誤差幅で評価可能であることが明らかとなった。

5.3 せん断スパン比毎の最大応答値の比較

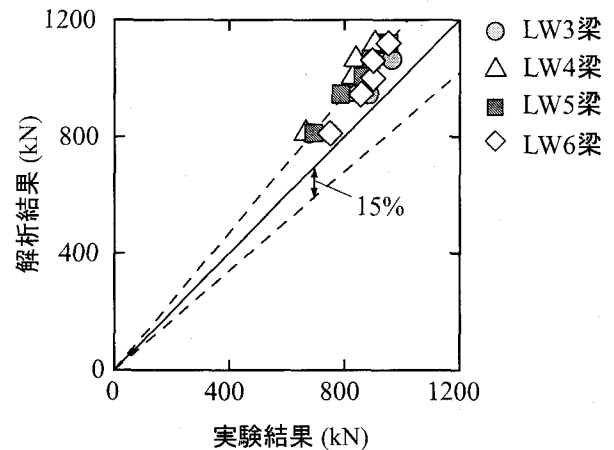
図-8には、各せん断スパン比毎の最大応答値の解析結果を実験結果と比較して示している。

図-8(a)の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。従って、衝突速度が大きいほど誤差割合は小さく評価されるものと考えられる。

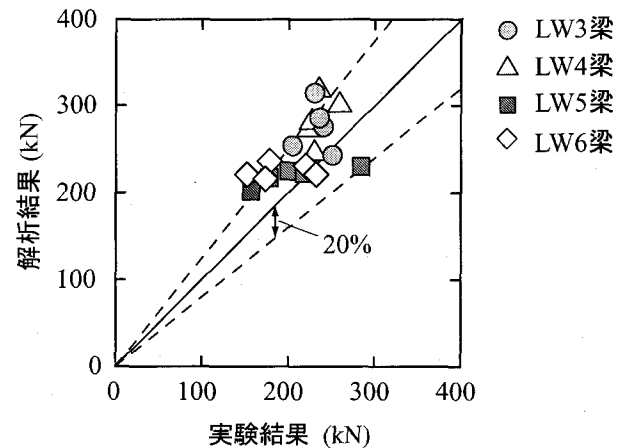
図-8(b)の最大支点反力に関しては、せん断スパン比の小さい LW3, 4 梁の場合にはほぼ解析結果が実験結果より大きくなる傾向を示している。一方、せん断スパン比の大きい LW5, 6 梁の場合には、解析結果と実験結果で分布性状が異なっている。すなわち、解析結果の場合には、衝突速度 V の大きさにかかわらず同程度の値を示している。一方、実験結果において、LW5 梁の場合は V の増加とともに大きくなる傾向を示し、LW6 梁の場合は $V = 4 \text{ m/s}$ までは V の増加とともに大きくなる傾向を示しているが、 $V = 4.25 \text{ m/s}$ では減少している。

また、LW3, 4 梁の $V = 3.75 \text{ m/s}$ における解析結果は $V = 3.5 \text{ m/s}$, 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、後述の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、 $V = 3.75 \text{ m/s}$ 時の解析結果ではスパン中央部に発生する曲げひび割れも $V = 4 \text{ m/s}$ 時の場合よりも明確ではなく、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 $V = 4 \text{ m/s}$ 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、 $V = 3.75 \text{ m/s}$ 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-5と後述の数値解析によるひび割れ分布の推定から明らかのように、実験結果では $V = 3.75 \text{ m/s}$ 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。

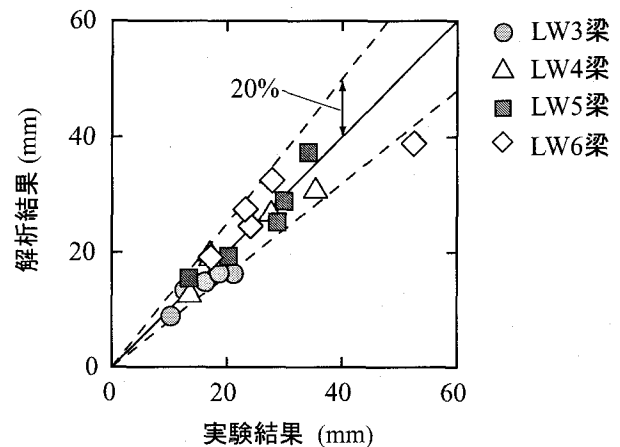
図-8(c)の最大変位に関してはせん断スパン比の大



(a) 最大重錘衝撃力



(b) 最大支点反力



(c) 最大変位

図-7 各最大応答値に関する比較

小にかかわらず衝突速度が大きく損傷が著しい LW6-4.25 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

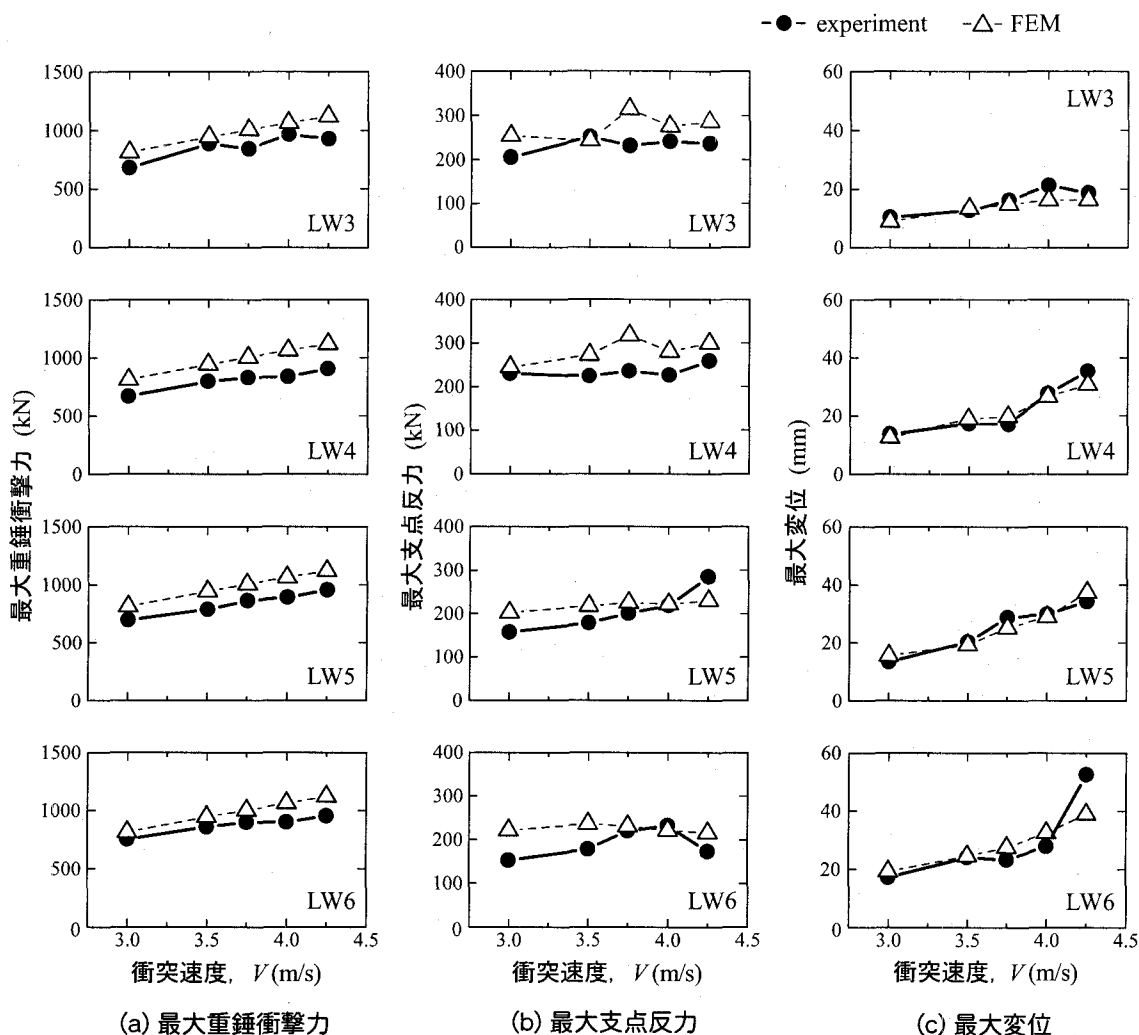


図-8 各最大応答値と衝突速度の関係図

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。

5.4 第1主応力分布を用いたひび割れ分布評価手法

数値解析において、前述のコンクリート要素に関する材料構成則の仮定により、コンクリート要素に生ずる負圧力がカットオフ値に達すると、要素にひび割れが発生したと見なされ、引張応力が零応力まで解放される。従って、コンクリート要素の第1主応力が零応力を示す場合には、その要素にひび割れが発生している可能性の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解析的ひび割れ分布予測と実験結果のひび割れ分布の比較を試みた。

過去の数値解析的研究¹²⁾から、実験終了後に観察されるひび割れ分布は、応答変位が最大応答値近傍に達した時点で形成されることが明らかとなっていること

より、ここでも、その結果を踏襲して検討を行うこととする。図-9には、限界耐力発生時近傍である衝突速度 $V = 3.5, 3.75, 4 \text{ m/s}$ 時における各試験体の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を合わせて示している。数値解析はRC梁の構造対称性と中央点載荷による変形の対称性を考慮して1/2スパンに対して実施していることより、図中のグレースケール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、ここでは零応力を強調し、ひび割れの発生領域が明瞭に示されるように等色レベルを設定している。白色分布は第1主応力が零応力であることを表しており、大きな応力が発生する領域において白色分布を示す場合には、ひび割れが発生していることを意味している。なお、黒色の実線は実験結果を表しており、斜線部はコンクリートの剥離を表している。

せん断スパン比の短いLW3とLW4梁の場合には、実験結果に見られる曲げおよびアーチ状に進展するひび割れや、載荷点から45°程度の角度で梁下縁に進展する斜めひび割れは比較的精度良く再現している。し

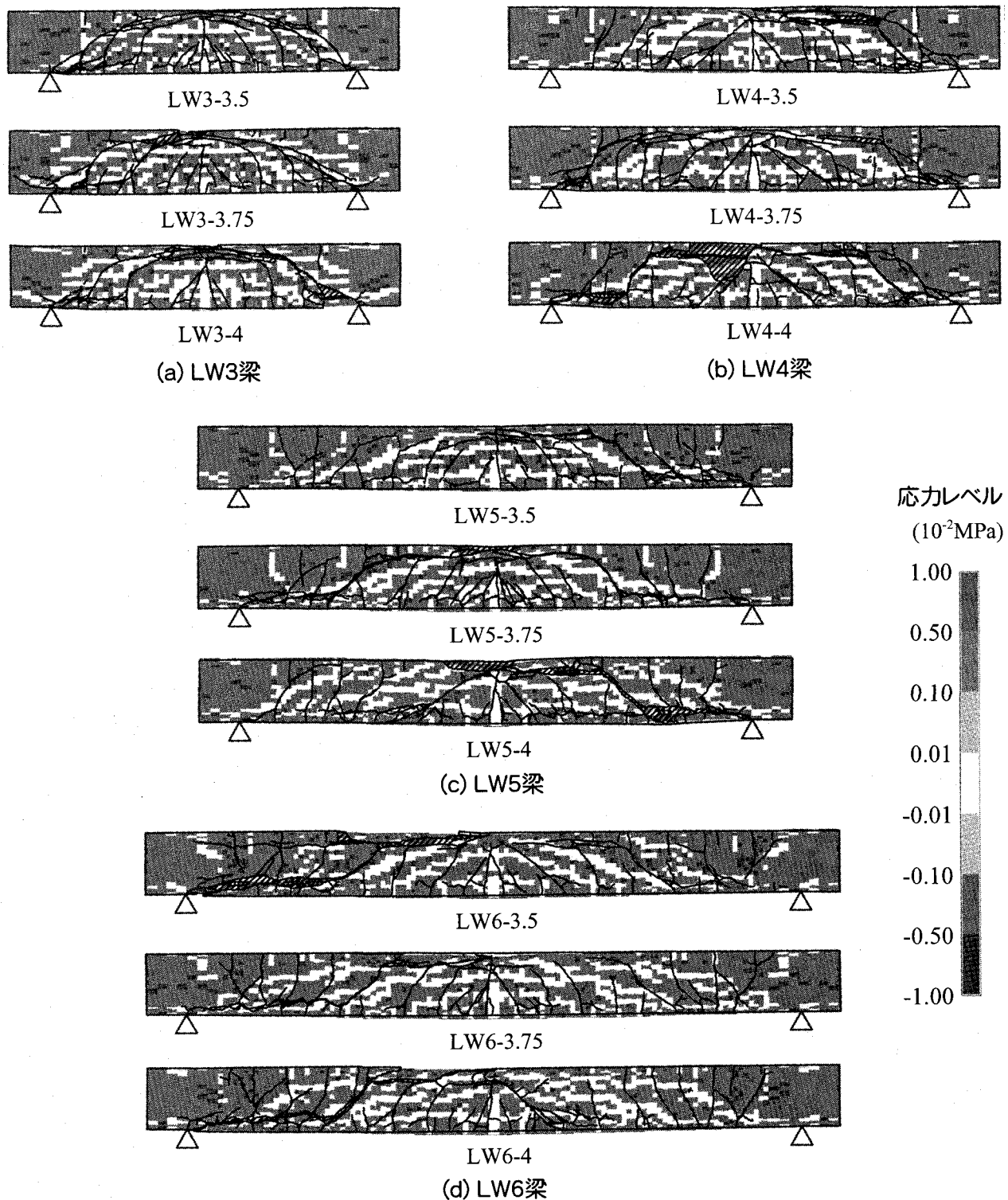


図-9 最大変位発生時近傍の第1主応力分布と実験終了後のコンクリートのひび割れ分布

かしながら、上端筋に沿う割裂ひび割れの進展やコンクリートの剥離は精度よく再現できていない。

一方、せん断スパン比の大きい LW5 梁と LW6 梁の場合には、実験結果は荷重点からアーチ状のひび割れが左右 1/4 スパン長程度まで進展し、かつ荷重点近傍上端筋や支点近傍下端に沿う割裂ひび割れが発生している。また、上端および下端筋に沿う割裂ひび割れに

起因してコンクリートの剥離も生じている。これに対して、数値解析結果はアーチ状に進展するひび割れと下端に沿う割裂ひび割れは実験結果とよく対応して示されているが、せん断スパン比の小さい場合と同様に上端筋に沿う割裂ひび割れや剥離に至る挙動は精度よくは再現できていないことが分かる。

以上より、ひび割れ分布に関しては曲げひび割れや

表-4 実験結果における最大支点反力

試験体名		最大支点反力 (kN)			
		LW 3	LW 4	LW 5	LW 6
衝突速度 (m/s)	V 3.00	205	230	157	152
	V 3.50	251	224	178	178
	V 3.75	231	235	201	220
	V 4.00	241	227	218	232
	V 4.25	237	259	285	173

表-5 解析結果における最大支点反力

試験体名		最大支点反力 (kN)			
		LW 3	LW 4	LW 5	LW 6
衝突速度 (m/s)	V 3.00	254	245	202	221
	V 3.50	242	273	217	236
	V 3.75	314	318	225	231
	V 4.00	275	281	222	221
	V 4.25	285	300	230	216

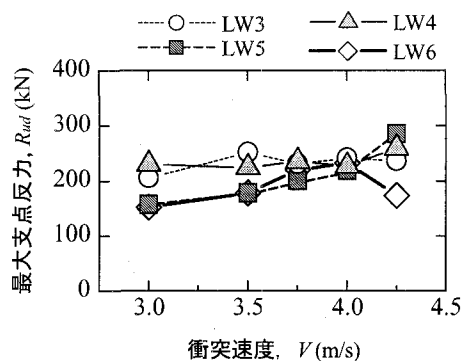
せん断破壊型に特有のアーチ状のひび割れおよび下端筋に沿う割裂ひび割れは比較的精度良く予測可能であるが、上端筋に沿う割裂ひび割れの傾向は完全には予測できないことが明らかとなった。

5.5 衝撃せん断耐力評価

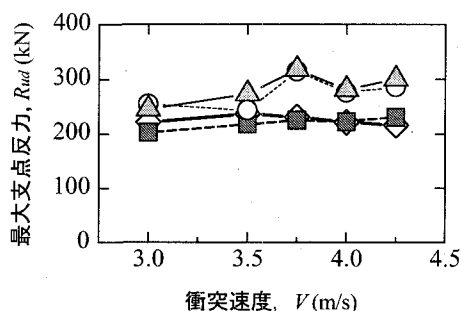
前述のように、最大重錘衝撃力は、RC 梁の損傷の程度にかかわらず衝突速度の増加に対応して増加する傾向を示すことが明らかになっている。従って、最大重錘衝撃力を衝撃荷重載荷時のせん断耐力として用いることは、設計的に危険側の評価を与えることとなる。これに対して、最大支点反力の場合には、実験結果および数値解析結果とも衝突速度に対して一定値を示す傾向にある。また、支点反力波形の場合には、載荷点から離れていることにより重錘衝突時の局所応答の影響が小さく、梁全体としての応答が卓越するものと推察される。これより、本論文では曲げ破壊型 RC 梁の耐力評価時⁸⁾と同様に、最大支点反力値を用いて評価することとする。

表-4, 5 および 図-10 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が発生するものとする。この時の全梁の平均耐力を求めると 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 LW3 梁、LW4 梁がせん断スパン比の大きい LW5, 6 梁の場合よりも大きい値を示している。しかしながら、逆に小さい値を用いる方が設計工学的に安全側の解を与えることより、ここでは、せん断スパン比が大きく、支点の影響が小さい LW5, 6 梁の最大支点反力



(a) 実験結果



(b) 解析結果

図-10 最大支点反力と衝突速度の関係

を用いて評価することとする。表-5 より、LW5, 6 梁の場合には、それぞれ $V = 3.50, 3.75$ m/s で極大の最大支点反力値を示していることより、両梁の $V = 3.50$ m/s と 3.75 m/s 時における最大支点反力の平均値を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は計算せん断耐力 V_{usc} に対して 2.8、実測せん断耐力 P_{us} に対して 2.5 程度となる。

以上より、軽量コンクリートを用いたせん断補強筋のない RC 梁の衝撃荷重載荷時におけるせん断耐力は、提案の数値解析手法を用い、せん断スパン比を 5 以上として解析することにより、安全側で適切に評価可能であることが明らかとなった。

6. 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 梁に関する重錘落下衝撃荷重載荷時の耐衝撃挙動を適切に評価可能な解析手法を確立することを目的に、同一断面形状でせん断スパン比の異なる合計 20 体の RC 梁を対象とした 3 次元有限要素法による弾塑性衝撃応答解析を行い、実験結果と比較する形で提案の解析手法の妥当性を検討した。本数値解析では、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を用い、コンクリートの引張強度を圧縮強度の 1/16 と仮定することにより実施している。なお、各材料のひずみ速度効果は考慮せず、また質量に比例する粘性減衰定数を RC 梁の最低次固有振動数に対して 0.5 % としている。本研究の範囲で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、本数値解析手法により大略推定可能である。
- 2) 本数値解析手法を用いることにより、最大重錘衝撃力は 15 % 程度の誤差幅で、また最大支点反力および最大応答変位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、20 % 程度の誤差幅で評価可能である。
- 3) 最大変位発生時の第 1 主応力分布図を用いることにより、曲げひび割れやせん断破壊型に特有のアーチ状のひび割れ、下端筋に沿う割裂ひび割れ分布は比較的精度よく予測可能であるが、載荷点近傍上端筋に沿う割裂ひび割れは精度よく予測するまでには至っていない。
- 4) 本数値解析手法を用いることにより、せん断スパン比を 5 以上として解析することにより安全側で衝撃荷重載荷時のせん断耐力を評価可能である。

謝辞：本研究を行うにあたり、室蘭工業大学大学院建設システム工学専攻 南波宏介君に多大なるご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 人工軽量骨材アサノライト, 太平洋マテリアル(株)
- 2) 岡本享久, 早野博幸, 柴田辰正: 超軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol.36, No.1, pp.48-52, 1998.1.
- 3) 二羽淳一郎, 岡本享久, 前堀伸平: 高品質軽量コンクリートの構造部材への適用, コンクリート工学, Vol.38, No.12, pp.3-9, 2002.12
- 4) 竹本伸一, 岸 徳光, 安藤智啓, 松岡健一: 高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型 RC 梁の耐衝撃挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.1339-1344, 2001.6
- 5) 岸 徳光, 安藤智啓, 松岡健一, 竹本伸一: 高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型 RC 梁に関する弾塑性衝撃応答解析, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.1267-1277, 2003.
- 6) 竹本伸一, 岸 徳光, 今野久志, 松岡健一: 軽量コンクリートを用いたせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性に及ぼすせん断スパン比の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1831-1836, 2003
- 7) 中田吉彦, 榎谷 浩, 梶川康男, 熊谷隆芳: 重錘衝突による鉄筋コンクリートはりの衝撃特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1831-1842, 2003.
- 8) 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
- 9) 岸 徳光, 三上 浩, 安藤智啓: せん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.45A, 1999.3, pp.1689-1699
- 10) 安藤智啓, 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 蟹江俊仁: スターラップを有しないせん断破壊型 RC 梁の単一載荷衝撃実験, 構造工学論文集, Vol.46A, 2000.3, pp.1809-1818
- 11) 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.
- 12) 岸 徳光, 三上 浩, 安藤智啓, 松岡健一: せん断補強筋を有するせん断破壊型 RC 梁の衝撃挙動に関する数値シミュレーション, 構造工学論文集, Vol.48A, 2002.3, pp.1555-1565
- 13) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: せん断補強筋を有しないせん断破壊型 RC 梁の弾塑性衝撃応答解析, 構造工学論文集, Vol.47A, 2001.3, pp.1093-1102
- 14) John O Hallquist: LS-DYNA User's Manual, LivermoreSoftware Technology Corporation, 2001.
- 15) コンクリート標準示方書(平成 14 年制定)設計編, 土木学会, 2002

(2003 年 9 月 12 日受付)