

RC 梁の繰り返し重錘落下衝撃挙動に関する数値シミュレーション

Numerical simulation of RC beams under consecutive falling-weight impact loading

岸 徳光*, 今野 久志**, 三上 浩***

Norimitsu Kishi, Hisashi Konno, and Hiroshi Mikami

* 工博 室蘭工業大学理事・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) 寒地土木研究所 主任研究員 寒地構造チーム(〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

*** 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)

In order to rationally analyze RC beams under consecutive impact loading, a numerical analysis method based on three-dimensional elasto-plastic finite element method is proposed. An applicability of the method is discussed following two impact tests of RC beams: 1) consecutive impact loading test up to RC beam reaching ultimate state setting 1 m/s of initial and incremental impact velocity; and 2) two-time impact loading test with impact velocity around RC beams reaching ultimate state. From this study, following results are obtained: 1) impact response behavior of the RC beams for two kinds of experiments can be better simulated by using proposed method; and then 2) accumulated damage level and residual impact resistant load-carrying capacity can be better evaluated.

Key Words : RC beam, Consecutive impact loading, Impact response analysis, Accumulated damage

キーワード: RC 梁, 繰り返し衝撃载荷, 衝撃応答解析, 累積損傷

1. はじめに

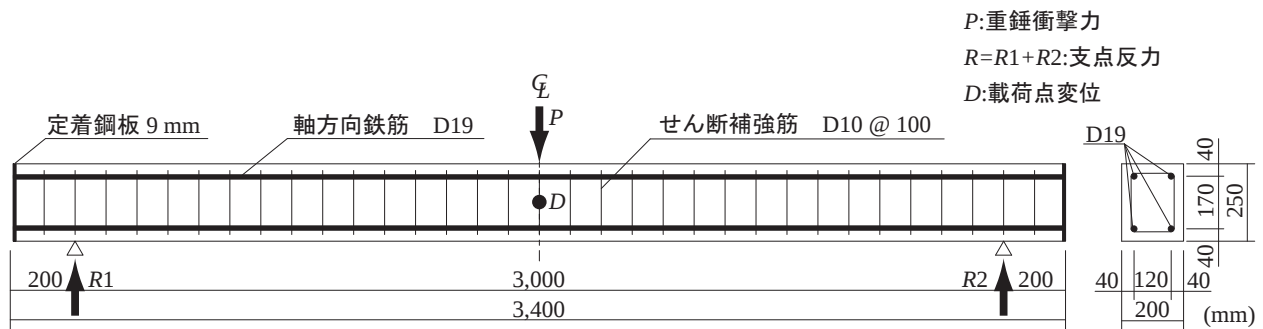
道路の安全対策用施設構造物の 1 つに落石防護構造物がある。この種の代表的な構造物としてロックシェッドがある。ロックシェッドは、通常頂版上に緩衝材を設置して衝撃力を緩和し、許容応力度法により断面設計が行われている。緩衝材には、90 cm 厚の敷砂がよく用いられている。その他、著者らによって開発された、上層に 50 cm 程度の敷砂層、芯材として 20 ~ 30 cm 厚の RC 版、下層に 50 ~ 100 cm 厚の発泡スチロール材を設置する三層緩衝構造^{1), 2)}も実用化され、大規模落石を対象として適用されている。

一方、構造物の設計法は、許容応力度設計法から構造物の性能を基本とするいわゆる性能照査型設計法への移行が世界的な趨勢となっている。我が国においても、2002 年に国土交通省から土木・建築構造物にかかる設計に関する性能照査型設計法の考え方に基づいた設計への移行が要望されている。このようなことから、土木学会構造工学委員会では小委員会を設置して、衝撃荷重を受ける構造物に対しても同設計法に則した耐衝撃設計の確立に向けた検討^{3), 4)}を行っている。性能照査型設計法の適用に当たっては、想定される各種の限界状態に適合した断面設計を行うことが、

必要十分条件となる。具体的には、少なくとも使用限界状態や終局限界状態の規定およびそれに対応した解析法を含む照査法の確立が必要となる。

このような状況下、著者らは最も単純な構造部材である RC 梁に着目して、スパン長、断面寸法、鉄筋比、静的耐力の異なる小型から大型に至る数多くの RC 梁を対象に重錘落下衝撃実験⁵⁾を行ってきた。また、これらの実験結果を基本にして数値解析手法の確立に向けた検討⁶⁾も行い、敷砂緩衝材を設置しない場合の実ロックシェッド規模の RC 梁に関しては、一回のみの衝撃荷重载荷（以後、単一载荷）に対する、残留変位と入力エネルギーや静的耐力、梁本体と重錘重量との比に関する関係式を定式化するに至っている⁷⁾。このことは、使用限界や終局限界状態を残留変位で規定する場合において、与えられた梁に対する耐力照査が可能であることを意味している。

また、衝撃荷重载荷によって使用限界状態に至らずとも鉄筋の降伏やひび割れの発生によって残留変位が生ずる場合には、繰り返し衝撃荷重载荷時における損傷の累積および残存耐力も評価しなければならない。しかしながら、この種の評価法に関する検討事例は少なく、園田らによる鉄筋やコンクリートに累積損傷モデルを適用した検討⁸⁾や、白根らの防波構造物を想定



図－１ 試験体の形状寸法および配筋状況

表－１ 静的設計値一覧

主鉄筋比	せん断 スパン比	計算 曲げ耐力	計算 せん断耐力	計算 せん断余裕度
p_t	a/d	P_{usc} (kN)	V_{usc} (kN)	α
0.011	7.14	57.2	289.5	5.06

表－３ 鉄筋の力学的特性値

鉄筋名称	材質	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
D19	SD345	404	206	0.3
D10	SD295A			

表－２ コンクリートの力学的特性値

材令 (日)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
47	23.7	1.94	20.4	0.26

表－４ 試験体一覧

試験体名	一次载荷時 衝突速度 V (m/s)	二次载荷時 衝突速度 V (m/s)	漸増繰り返し载荷 衝突速度 V (m/s)
IT6	-	-	1 ～ 6
I4I	4	6	-
I5I	5		
I6I	6		

した繰り返し衝撃荷重载荷実験⁹⁾以外見あたらない。もし、数値実験により繰り返し衝撃荷重载荷実験を再現することが可能になれば、合理的な性能照査型耐衝撃設計法の確立に向け、大きく前進するものと考えられる。

このような観点から、本研究では、梁部材を対象として、繰り返し衝撃荷重载荷実験が再現可能な解析手法を確立することを目的に、三次元弾塑性有限要素法に基づいた解析法を提案し、実験結果との比較によってその妥当性に関する検討を行った。解析手法の妥当性は、ひび割れ補修による耐衝撃性向上効果を検討するために、著者らによって実施された実験結果¹⁰⁾の一部を用いて行うこととした。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. 971)¹¹⁾を用いている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図－１には、本実験に用いた RC 梁の断面寸法および配筋状況を示している。RC 梁の形状寸法（梁幅×梁高×純スパン長）は 200×250×3,000 mm である。軸方向鉄筋は D19 を上下端に 2 本ずつとする複鉄筋配置、せん断補強筋は D10 を 100 mm 間隔で配筋している。また、軸方向鉄筋は梁端面に設置した厚さ 9

mm の定着鋼板に溶接し、その定着長を節約している。

表－１には、RC 梁の静的設計値一覧を示している。表中、静的曲げ耐力 P_{usc} および静的せん断耐力 V_{usc} は、コンクリート標準示方書¹²⁾に基づき算定している。RC 梁は、せん断余裕度が $\alpha (= V_{usc} / P_{usc}) > 1.0$ であることより、静载荷時には曲げ破壊型で終局に至ることが想定される。表－２、表－３には、それぞれコンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示している。

2.2 実験ケース

表－４には、本実験において対象とした試験体の一覧を示している。実験ケースは、RC 梁が終局に至る衝突速度を確認するために実施した、初期および増分衝突速度を 1 m/s とする漸増繰り返し衝撃荷重载荷実験と、終局に至る衝突速度近傍での 2 回の繰り返し衝撃荷重载荷実験を対象としている。漸増繰り返し衝撃荷重载荷実験結果に基づいて設定した終局に至る衝突速度は、 $V = 6$ m/s である。2 回の繰り返し衝撃荷重载荷実験では、二次载荷における重錘の衝突速度を全て等しく漸増繰り返し衝撃荷重载荷実験時の終局時衝突

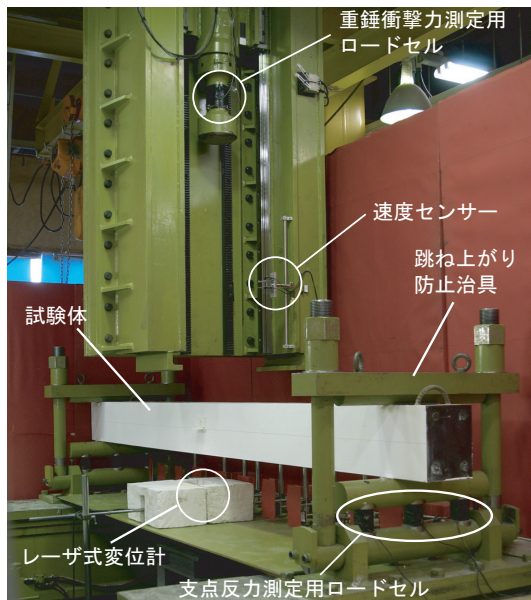


写真-1 実験状況写真

速度 ($V = 6 \text{ m/s}$) としている。

表中の試験体名において、“IT”は漸増繰り返し衝撃荷重実験を意味し、それに付随する整数は終局時衝突速度を意味している。また、InIにおいて、最初の“I”は重錘落下衝撃実験を意味し、整数 n は一次載荷時の衝突速度 $V \text{ (m/s)}$ を、整数 n の後に続くIは2回目の繰り返し衝撃荷重実験の実施を意味している。その時の衝突速度は、前述の通り $V = 6 \text{ m/s}$ である。表に示すとおり、一次載荷時の衝突速度は終局時衝突速度と同一速度 ($V = 6 \text{ m/s}$) および -1 、 -2 m/s である $V = 4, 5 \text{ m/s}$ とした。したがって、本数値解析において対象とした試験体数は全4体である。

2.3 実験方法

重錘落下衝撃実験において、RC梁試験体は支点反力測定用ロードセル付きの支点上に設置し、かつ重錘落下衝突時における試験体端部の跳ね上がりを防止するために、写真-1に示すように跳ね上がり防止装置を用いて固定している。なお、跳ね上がり防止装置は支点と共に軸を中心に回転できるように工夫されている。したがって、支点部の境界条件はピン支持に近い状態になっているものと推察される。

重錘落下衝撃実験は、重錘をRC梁のスパン中央部に所定の高さから自由落下させることにより行っている。用いた重錘は、質量が300 kg、載荷点部の直径が150 mmの円柱状鋼製重錘である。重錘底部は、衝突時の片当たりを防止するために、高さが2 mmのテーパを有する球面状となっている。重錘は十分に剛な重錘落下用鋼製ガイド塔に固定された2本のリニアウェイレールを介して、落下時およびRC梁に衝突後もその姿勢が前後、左右に正確に制御されている。また、

重錘の落下高さに関しては、予め速度センサーを用いた予備実験によって落下高さや設定衝突速度との関係を検定し、この検定表に則して決定している。

繰り返し衝撃荷重実験時における梁の終局は、既往の研究⁴⁾より累積残留変位が純スパン長の2% (60 mm) 程度とした。本実験での終局に至る衝突速度は累積残留変位が82.4 mmに達した $V = 6 \text{ m/s}$ とした。

本実験における測定項目は、重錘衝撃力 P 、合支点反力 R (以後、支点反力) および載荷点変位 δ (以後、変位) の各応答波形である。これらの測定には、写真-1からも明らかなように、重錘衝撃力に関しては重錘に取り付けた周波数特性4.0 kHz、容量1,470 kNの起歪柱型衝撃荷重測定用ロードセルを用いており、支点反力に関しては支点治具に取り付けた周波数特性2.4 kHz、容量490 kNの起歪柱型衝撃荷重測定用ロードセルを用いている。また、載荷点変位は周波数特性が915 Hz、最大ストロークが200 mmのレーザ式非接触型変位計を用いている。各センサーからの出力波形は、ロードセルの場合には歪ゲージタイプであることより直流増幅器を、またレーザ式変位計の場合には専用のアンプユニットを介して増幅した後、一括して広帯域用データレコーダ (応用周波数40 kHz) に収録している。その後、0.1 msのサンプリング間隔によりA/D変換を施している。支点反力波形、変位波形に関しては、ノイズを含んだ高周波成分を除去するために0.5 msの矩形移動平均法により数値的なフィルター処理を施している。また、実験終了後には梁側面に生じたひび割れ分布を記録している。

3. 数値解析概要

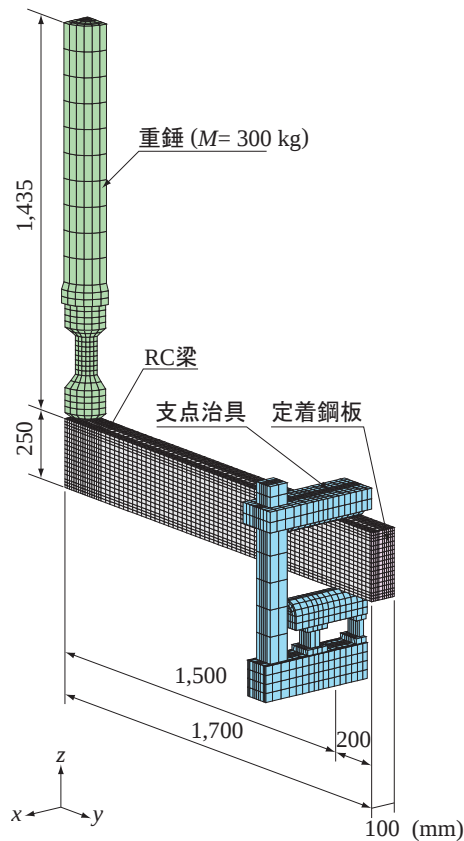
3.1 非線形衝撃応答解析コード

本数値解析に用いた構造解析プログラムは、解析手法に有限要素法を用いた非線形動的構造解析用汎用コードLS-DYNA (ver.971) である。LS-DYNAは、構造物の大変形問題、衝突体と被衝突体との接触問題等の非線形問題を解析することが可能なコードである。

3.2 数値解析モデル

図-2には、本数値解析に用いた有限要素モデルの要素分割状況を示している。本数値解析ではRC梁のみならず、重錘および支点治具も実形状を極力再現する形で詳細にモデル化している。また、有限要素モデルは、RC梁の対称性を考慮して梁幅方向 (x 方向) およびスパン方向 (y 方向) にそれぞれ2等分した1/4モデルである。

適用した要素タイプは、せん断補強筋要素には剛性、断面積、質量を等価とした梁要素を用い、その他の要素には全て8節点の三次元固体要素を用いている。



図－2 有限要素モデルの要素分割状況

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断面に簡略化している。重錘部は、実形状に即し、全長 1,435 mm で直径 230 mm 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 107 mm に絞り込み、また底部形状を高さ 2 mm の球形状に忠実にモデル化している。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、実構造に則してモデル化することとした。なお、支点治具底部には、実験時と同様に治具全体の x 軸回りの回転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。ここで定義している接触面は、具体的には、定義した面と面間で滑りと離れる現象を許容し、接触時にはペナルティ法により接触反力が求められ各接触点に接触反力が負荷される。

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、重錘要素を RC 梁に接触する形で配置し、その全節点に設定した衝突速度を初

速度として付加することにより作用させることとした。また、減衰定数は質量比例分のみを考慮するものとし、鉛直方向最低次固有振動数に対して 0.5 % と設定している。なお、本数値解析では自重を考慮していない。

3.3 繰り返し衝撃荷重載荷時の解析概要

本数値解析では、繰り返し衝撃荷重載荷実験を適切に再現するために、以下の手順で数値解析を実施することとした。

- 1) 重錘要素を繰り返し載荷回数分だけ、予め RC 梁上に仮想的に重複して設置する。
- 2) 一次載荷時に衝突させる重錘要素の全節点に所定の衝突速度を付加し数値解析を実施する。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とする。本研究の場合には予備解析を実施し 200 ms とした。なお、減衰定数は、3.2 に述べているように質量比例分のみを考慮するものとし、鉛直方向最低次固有振動数に対して 0.5 % とする。
- 3) 一次載荷時の数値解析終了後、計算を一度停止させて鉛直方向最低次固有振動数に対する臨界減衰定数を入力し、リスタート機能により計算を再開させて RC 梁を数値解析的に静止させる。なお、静止させるための解析時間は、予備解析を実施して 200 ms とした。また、リスタート時に一次載荷時に使用した重錘要素を除去する。
- 4) 二次載荷時に衝突させる重錘要素の全節点に所定の衝突速度を付加し数値解析を実施する。数値解析時間は一次載荷時と同様に 200 ms とする。なお、減衰定数は、一次載荷時と同様の値を入力する。
- 5) 以降 n 次載荷終了まで 3), 4) の手順を繰り返す。なお、この操作は、基本的に手動で行わなければならない。

以上により、数値解析を実施している。

3.4 材料物性モデル

図－3 には、本数値解析で用いたコンクリートおよび鉄筋の応力－ひずみ関係を示している。以下に、各材料物性モデルの概要を述べる。

(1) コンクリート

図－3(a) に示すように、コンクリート要素に用いた物性モデルは、LS-DYNA コードに組み込まれている弾塑性体モデルである。すなわち、圧縮側に対しては折線近似による応力－ひずみ関係、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モデルである。ここでは、圧縮側に関しては、相当ひずみが $1,500 \mu$ 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

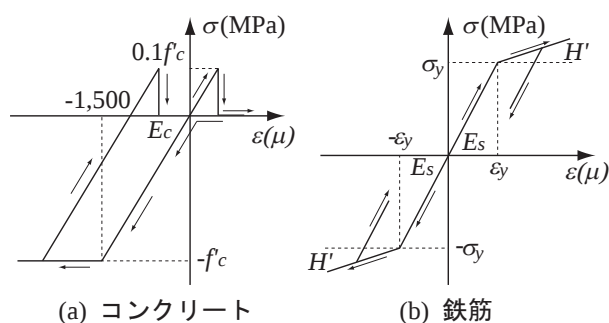


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

化した。圧縮強度は表-2に示されている値を採用することとし、引張強度は圧縮強度の1/10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-3(b)には、軸方向鉄筋およびせん断補強筋に関する応力-ひずみ関係を示している。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。また、単位体積重量 ρ_s には公称値である $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を用いることとした。降伏の判定は、von Mises の降伏条件に従うこととした。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全要素に関しては、実験時に塑性変形が確認されていないことより、弾性体モデルを適用している。要素の弾性係数 E_s 、ポアソン比 ν_s 、単位体積質量 ρ_s には公称値を用いることとし、全部材で等しく、それぞれ $E_s = 206 \text{ GPa}$ 、 $\nu_s = 0.3$ 、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と仮定している。

4. IT6 試験体に関する数値解析結果の妥当性検討

ここでは、本数値解析手法の妥当性を検討するために、漸増繰返し衝撃荷重実験 (IT6 試験体) を対象にして数値解析を実施した。検討項目は、重錘衝撃力波形、支点反力波形、荷点変位波形およびひび割れ分布状況である。なお、荷点変位波形に関しては、解析精度を詳細に論じるために、第1回目荷点からの累積変位波形ではなく、各荷点時点における応答変位波形について検討を行うこととした。

4.1 重錘衝撃力

図-4には、IT6 試験体における実験結果および解析結果の重錘衝撃力、支点反力、荷点変位に関する各応答波形を重ねて示している。

図-4(a)より、実験結果の重錘衝撃力波形は衝突速度によらず、衝撃荷重初期に励起する高周波で振幅の大きい第1波とその後励起する継続時間が長く振幅の小さい第2波で構成されていることが分かる。これらの波形の振幅、最大重錘衝撃力および継続時間は、衝突速度が増加するほど大きく示されている。また、約15ms経過時点で励起する後続の波形は、衝突速度が大きい場合ほど遅れて励起している。

実験結果と解析結果を比較すると、解析結果は荷初期に励起する高周波で振幅の大きい第1波とその後励起する継続時間が長く振幅の小さい第2波で構成されている実験結果の波形性状をよく再現していることが分かる。第2波目の発生時間も $V = 1 \text{ m/s}$ および $V = 5 \text{ m/s}$ を除き、実験結果とよく対応している。

最大重錘衝撃力に関しては、解析結果は $V = 1 \sim 5 \text{ m/s}$ までは衝突速度の増加とともに最大値も増加する傾向にあるが、 $V = 6 \text{ m/s}$ では減少傾向を示している。これより、RC梁は、数値解析的には、衝突速度が $V = 5 \text{ m/s}$ 時点までに損傷が蓄積され、剛性が著しく低下した状態に至っていることが推察される。

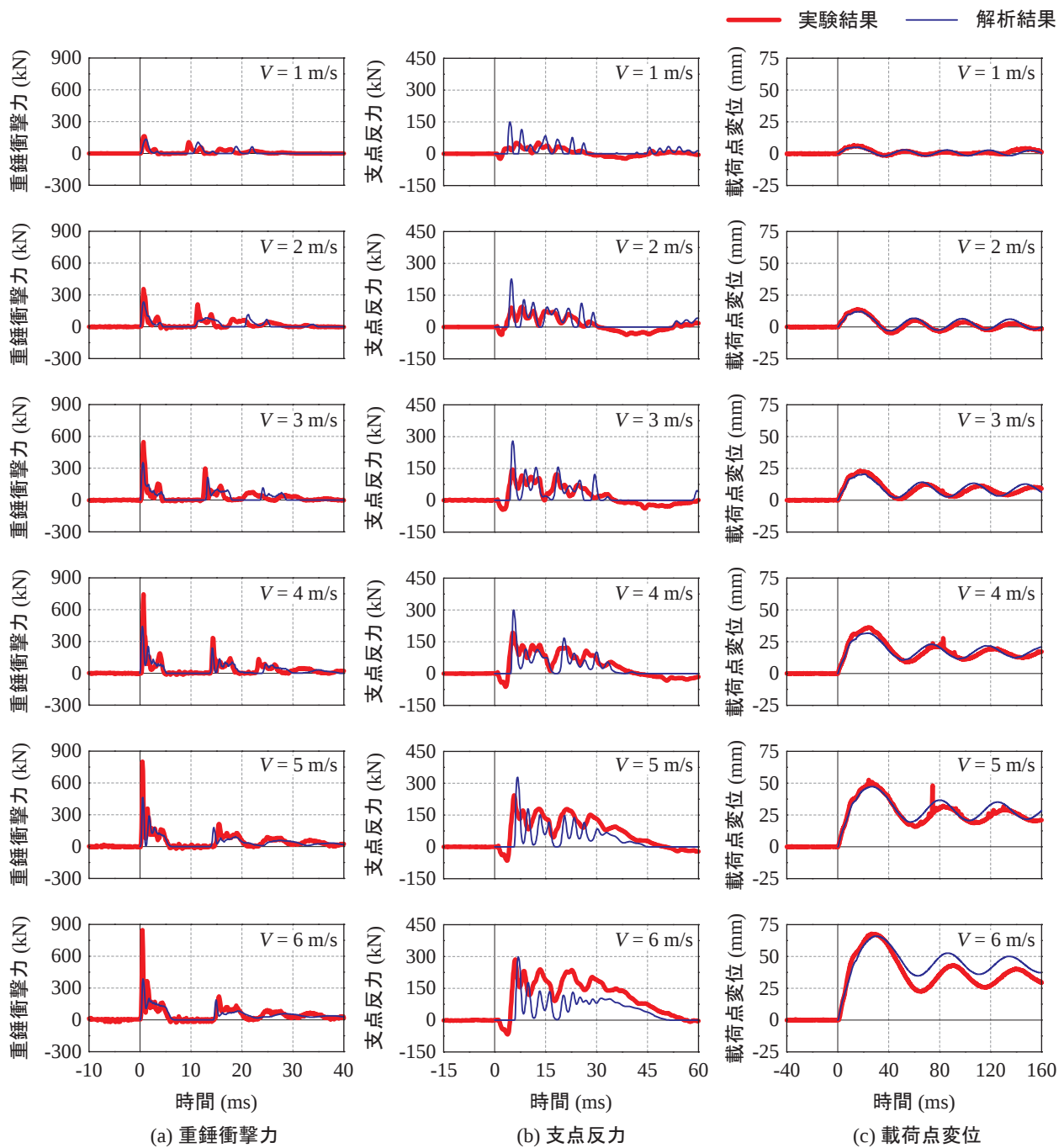
なお、いずれの場合においても、重錘衝撃力の最大値は実験結果と比較して小さい値を示している。これは、実験結果の場合には、荷点部のコンクリート表面が、実験前にはざらざらしているのに対して実験後には平滑化していることより、繰返し荷点によって密実化する傾向にあることや、ひずみ速度効果等により剛性が向上したような性状を示すことによるものと推察される。これに対して、数値解析の場合には、コンクリートの応力-ひずみ特性を圧縮強度で降伏に至るバイリニア型にモデル化していることや、ひずみ速度効果を考慮していないこと等により、衝突速度の増加に対応した最大重錘衝撃力の増加傾向を再現するに至っていないことによるものと推察される。

4.2 支点反力

図-4(b)より、支点反力波形は、実験結果と解析結果が共に、重錘衝突時点より遅れて励起し、かつ低周波の正弦減衰振動成分と高周波成分が合成された応答波形を示しており、両者類似した性状を示していることが分かる。

詳細に見ると、解析結果は、実験結果に比較して、衝突速度が小さい段階では高周波成分の振幅が大きく、衝突速度の大きい領域では若干小さい傾向にある。しかしながら、解析結果は、衝突速度の増加に対応して損傷が蓄積し、低周波成分の周期が延びていく実験結果の傾向をよく再現している。

なお、実験結果では負反力が生じているが、数値解析結果では生じていない。これは、以下のような理由による。すなわち、実験時には梁端部の跳ね上がりを防止するために、鋼横梁と梁支持部、支点反力用ロー



図－4 各応答波形（IT6 試験体）

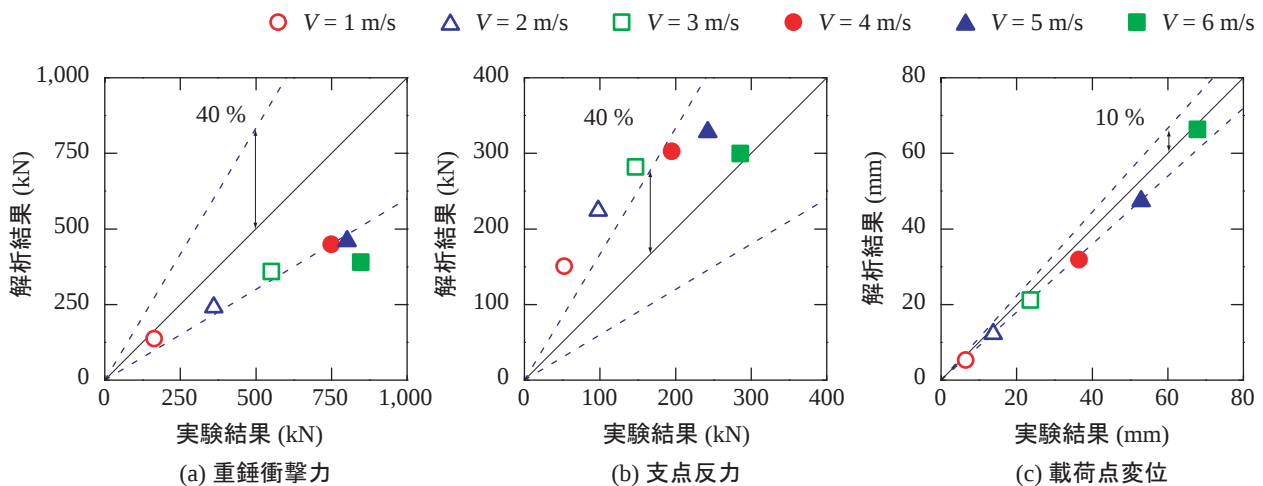
ドセルを介して梁を上縁から締め付けており、その状態でロードセルを初期化していることにより締め付け力だけの負反力が測定可能になっている。一方、数値解析では、鋼横梁は配置しているものの締めつめ力は導入していないことや、梁下縁と梁支持部間には面と面の接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義していることにより、負反力は評価不可能になっている。

4.3 載荷点変位

図－4 (c) より、実験結果は、いずれの衝突速度の

場合も衝撃荷重載荷初期に正弦半波状の第1波が励起した後、減衰自由振動を呈していることが分かる。また、衝突速度の増加に伴って最大振幅、残留変位成分および第1波目の継続時間が増加する傾向を示している。

解析結果を見ると、 $V = 6 \text{ m/s}$ の残留変位成分は実験結果と比較して若干大きく示されている。これは、重錘衝撃力波形の場合と同様に、RC 梁が繰り返し衝撃載荷によって著しく損傷を受けたことにより、数値解析的には残存剛性が実験結果よりも低く評価されたためと推察される。しかしながら、いずれの場合も重



図－5 各最大応答値に関する実験結果と解析結果の関係（IT6 試験体）

錘衝突後に最大変位を示す第1波目の正弦半波から除荷後の減衰自由振動波形に至るまで、最大応答値から残留変位量、周期ともに実験結果をほぼ再現していることが分かる。

これより、本解析手法を適用することにより、特に各载荷時点における変位波形の性状や残留変位を精度よく評価可能であることから、繰り返し衝撃荷重载荷時のRC梁に関する累積損傷度合いや残存耐力を精度よく評価可能であることが分かる。

4.4 最大応答値に関する解析結果と実験結果の比較

図－5には、各最大応答値に関して、解析結果と実験結果をそれぞれ縦軸および横軸に取って整理している。図中の45°勾配を有する実直線は、解析結果と実験結果が一致していることを、破線はそれに対する誤差幅を意味している。すなわち、実直線より下側の領域は実験結果が大きいことを、上側の領域は解析結果が大きいことを示している。

図－5(a)の重錘衝撃力に関する解析結果と実験結果の関係を見ると、解析結果と実験結果との誤差は $V = 6$ m/sを除き40%程度と大きく、解析結果は実験結果に対して小さく評価する傾向にあることが分かる。また、解析結果は増加傾向にあるもののその勾配も小さく、 $V = 6$ m/sでは衝撃力が減少していることが分かる。

図－5(b)の支点反力に関する解析結果と実験結果の関係図を見ると、解析結果は衝突速度が大きくなるほど誤差が小さくなる傾向にあるが、 $V = 1 \sim 3$ m/sでは誤差が40%以上となり、実験結果を再現できていないことが分かる。この要因は、解析結果の高周波成分に関する振幅が大きいことによるものであることは、前述の通りである。

次に、図－5(c)の変位に関する解析結果と実験結果の比較図を見ると、解析結果と実験結果との誤差

は、衝突速度の大きさに関わらず10%以下であり、両者の値が非常によく対応していることが分かる。

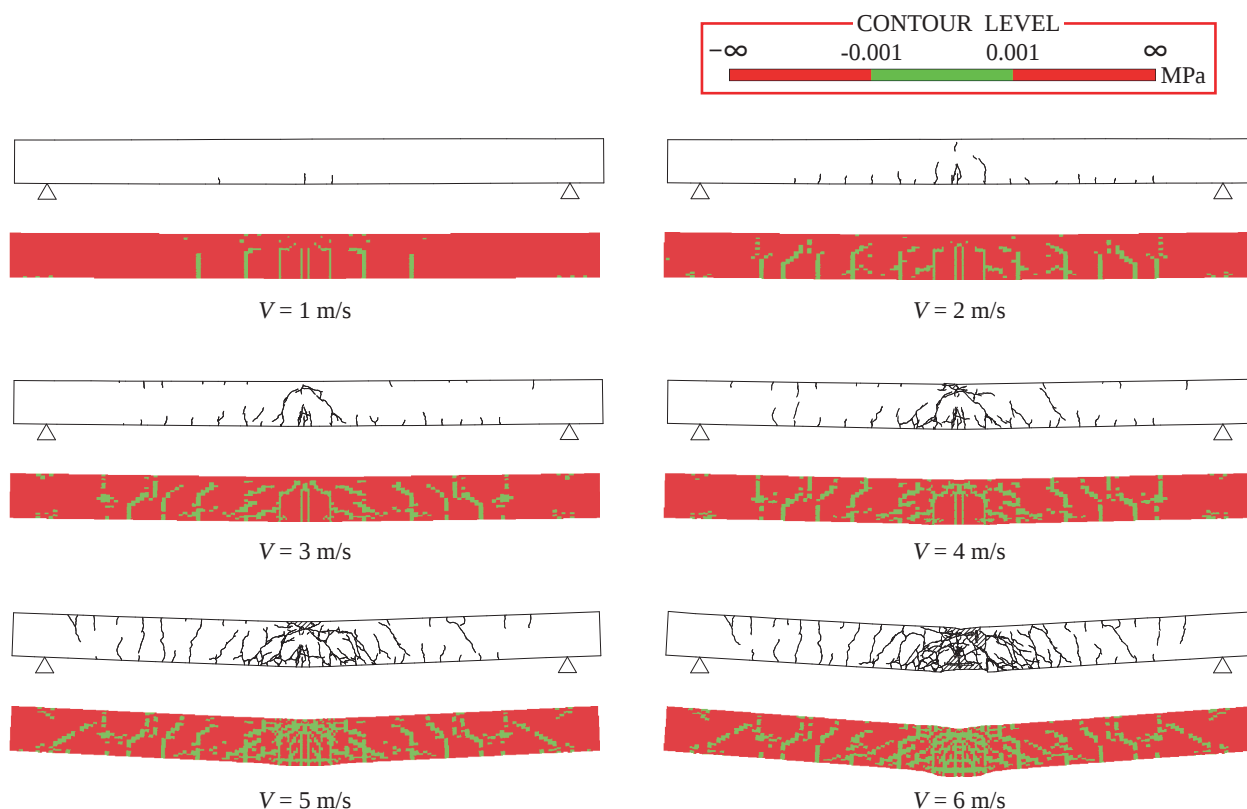
以上より、重錘衝撃力および支点反力の最大値に関しては解析結果と実験結果に誤差が生じるものの、全体的な波形性状に関しては概ね再現できているものと判断される。特に変位に関しては、最大応答値、減衰自由振動性状、残留変位値に至るまで実験結果を精度よく再現しており、本解析手法を適用することによって、繰り返し衝撃荷重载荷時の累積損傷度合いや残存耐力評価が実現象に則して適切に評価可能になるものと推察される。

なお、解析結果の最大重錘衝撃力や最大支点反力値が最大変位値に比較して精度的に劣ることは、空間的・時間的離散化の問題やひび割れを含む材料構成則の問題も挙げられる。しかしながら、一方でせん断力や荷重がそれぞれ変位の3回微分、4回微分で表されるため、特に高周波領域において容易に精度を確保することが困難であることから類推される。

4.5 ひび割れ分布性状

図－6には、実験終了後のひび割れ分布図および数値解析結果の最大変位時における第一主応力図を示している。なお、解析結果は、図－3(a)で仮定したコンクリートの材料構成則に基づいてひび割れ発生位置を特定できるようにするために、第一主応力が零近傍応力(± 0.001 MPa)状態を示す要素を緑色で示している。

図より、実験結果を見ると、衝突速度の増加とともにスパン全域に渡って梁の上下縁から鉛直方向に進展する曲げひび割れや、载荷点部から梁下縁に約45°の角度で進展する斜めひび割れが確認できる。 $V = 4$ m/s以降では、曲げひび割れの進展とともに载荷点近傍にひび割れが集中しており、 $V = 5$ m/sでは圧壊による上縁かぶりコンクリートの剥落が確認できる。終局衝



図－6 ひび割れ分布性状（IT6 試験体）

突速度の $V = 6 \text{ m/s}$ の場合には、載荷点近傍の損傷が著しく、下縁かぶりコンクリートも剥落しており、曲げ破壊により終局に至った状況が確認できる。

一方、解析結果を見ると、 $V = 1 \text{ m/s}$ および $V = 2 \text{ m/s}$ の場合には、解析結果は、実験結果よりも損傷が大きいものの、下縁からの曲げひび割れの発生も確認できる。 $V = 3 \text{ m/s}$ の場合には斜めひび割れの発生も確認でき、実験結果とよく対応していることが分かる。また、 $V = 4 \text{ m/s}$ 以降の場合に関しても、コンクリートの剥落は再現されていないものの、衝突速度の増加とともに曲げひび割れが進展し、載荷点近傍における損傷状況も実験結果とよく対応していることが分かる。

5. InI 試験体に関する数値解析結果の妥当性検討

ここでは、繰り返し衝撃荷重載荷実験によって決定された終局時衝突速度近傍における、3 試験体に対する 2 回の繰り返し衝撃荷重載荷実験（InI 試験体）を対象に、数値解析を実施した。検討項目は、前章と同様に重錘衝撃力波形、支点反力波形、載荷点変位波形およびひび割れ分布状況である。また、支点反力および載荷点直下の下端鉄筋応力と変位の履歴関係についても考察している。なお、載荷点変位波形に関しては、前章と同様に、各載荷時点における応答変位波形に着目して検討を行っている。

5.1 重錘衝撃力

図－7 には InI 各試験体における実験結果および解析結果の重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位の各応答波形を重ねて示している。

図－7(a) より、実験結果の重錘衝撃力波形を見ると、一次載荷時の衝突速度に関わらず、衝撃荷重載荷初期には高周波で振幅の大きい第 1 波とその後に励起する継続時間が長く振幅の小さい第 2 波で構成されている。また、15 ms 前後に出現する後続の波形は、一次載荷時には衝突速度が小さいほど早期に発生しているが、二次載荷時には衝突速度の違いに関わらずほぼ同一時間経過後に出現している。これは、以下のように考察される。すなわち、(1) 一次載荷時における重錘落下衝撃荷重載荷時には、初期衝突以降も重錘の落下速度が零に至るまで小さな衝突（以後、二次的衝突）と離散を繰り返し、リバウンド状態に推移する。(2) 損傷が小さい場合には、剛性低下も小さいことにより、より早期に二次的衝突現象が励起される。(3) 二次載荷時にはいずれの場合も剛性低下も類似なものとなり、したがって二次的衝突も同程度の時間経過後に励起するものと推察される。

解析結果を見ると、実験結果と同様の波形性状を示しており、二次的衝突の発生時間も実験結果と概ね一致している。ただし、最大重錘衝撃力に関しては一次載荷時と比較して二次載荷時には減少する傾向にあ

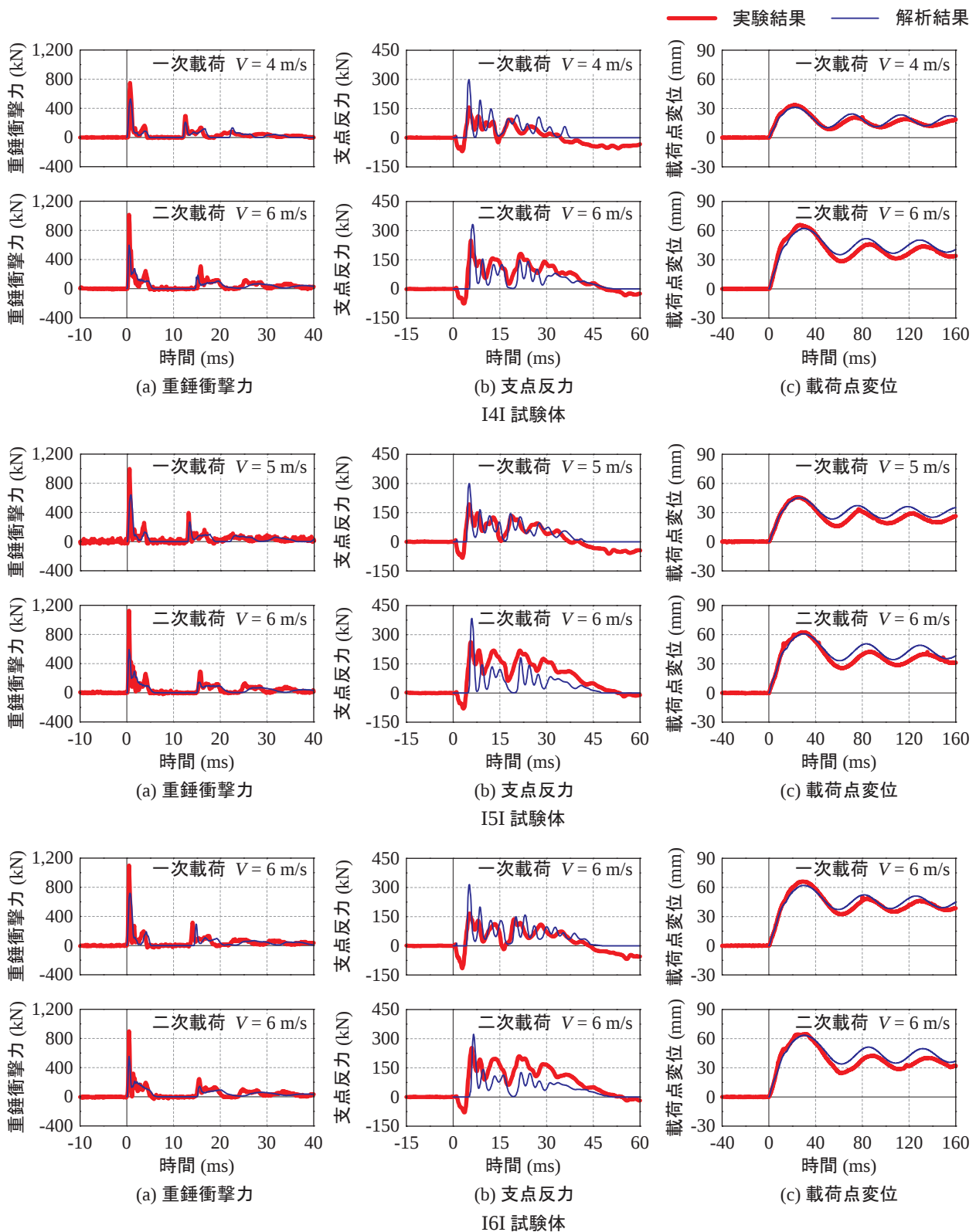


図-7 各応答波形 (I4I 試験体)

る。これは、前章における繰り返し衝撃荷重載荷時の場合と同様の原因によるものと推察される。すなわち、実験時には載荷点部のコンクリート表面が平滑化して密実になる傾向を示すことや、コンクリートのひずみ速度効果により局所的に剛性が向上したような性

状を示す。これに対して、数値解析の場合には、コンクリートの応力-ひずみ特性を簡易にバイリニア型にモデル化していることや、ひずみ速度効果を考慮していないこと等によるものと推察される。

5.2 支点反力

図－7(b)より支点反力波形を見ると、実験結果は、三角形の低周波成分と振幅の小さい高周波成分から構成されている。一次載荷から二次載荷における最大支点反力の増加量は一次載荷時の衝突速度に対応して多少差があり、その増加の程度は一次載荷時の衝突速度が最も小さいI4I試験体で最も大きく、I6I試験体で最も小さい。また、二次載荷時の波形は一次載荷時の衝突速度の大小に関わらず、いずれの試験体でも大略類似している。また、三角形の低周波成分の周期は、一次載荷時には衝突速度の小さい場合ほど短い。衝突速度が等しい二次載荷時には一次載荷時の衝突速度に関わらず大略類似している。

解析結果を見ると、いずれの場合も第1波目の最大支点反力値は実験結果よりも大きい値を示している。一次載荷時には最大支点反力値を除くと、波形の分布性状、波動継続時間共に実験結果と大略類似している。二次載荷時には、低周波成分の振幅が実験結果より若干小さい傾向を示しているが、波動継続時間は実験結果と大略類似している。

5.3 載荷点変位

図－7(c)は載荷点変位波形に関する解析結果と実験結果の比較を示している。図より、実験結果は、一次載荷、二次載荷を問わず、いずれの場合も衝撃荷重載荷初期に正弦半波状の第1波が励起した後、減衰自由振動を呈していることが分かる。また、一次載荷時の最大応答変位および残留変位は衝突速度の増加に対応して増大の傾向を示している。一方、衝突速度の等しい二次載荷時には、一次載荷時の衝突速度の大小に関わらず類似の変位応答、残留変位を示していることが分かる。これより、本実験の範囲内では、衝突速度が等しい場合には過去の履歴に関わらず、類似の損傷を受けることが類推される。

解析結果を見ると、一次載荷、二次載荷のいずれの場合においても、残留変位は実験結果との間で若干の差異が生じているものの、波形性状は両者類似しており、最大変位、減衰振動特性共に実験結果とよく対応していることが分かる。

以上の結果より、本解析手法を適用することによって、終局時衝突速度近傍における繰り返し衝撃荷重載荷に対しても、最大応答変位や残留変位、除荷後の減衰自由振動特性を含めた累積損傷の度合いや残存耐力を精度よく評価可能であるものと判断される。

5.4 支点反力、鉄筋応力と変位の履歴関係

図－8には各試験体に関する実験結果の支点反力と変位の履歴関係を示している。図より、一次載荷、二次載荷に関わらず、RC梁は除荷後に変位が残留した状態で減衰自由振動を呈し、かつ支点反力も正負交番

している状況が確認できる。また、残留変位に着目すると、前述のように一次載荷時の衝突速度の増加に対応して増大の傾向を示していることが分かる。二次載荷時には、いずれの試験体においても衝突速度が $V = 6 \text{ m/s}$ であることより、類似した増分残留変位を示している。したがって、累積残留変位はI6I試験体が最も大きい。

一方、下端鉄筋応力は擬似静的に考えると梁の曲げ応力として評価可能であることより、下端鉄筋応力から載荷荷重あるいは耐力に換算し評価することも可能となる。このようなことから、数値解析結果の載荷点直下における下端鉄筋応力と変位の履歴関係を求めると、図－9のように示される。図より、一次載荷時の履歴曲線を見ると、いずれの試験体においても変位零の状態に鉄筋が降伏応力に達していることが分かる。これは、衝撃初期の載荷点近傍に限定された局所的な応答によるもので、梁全体としての曲げ応力には対応しないものと考えられる。その後、一時的に除荷を示すが再載荷され、応力は塑性域に達し変位も増加している。しかしながら、やがて零応力状態まで除荷され減衰自由振動状態に至っている。これは、重錘がRC梁への初期衝突の後も落下運動する過程において、一時的にRC梁から離れて除荷状態に至るものの、未だ落下運動状態にあることより二次的衝突により載荷状態を示すが、やがて落下状態からリバウンドにより上方へと推移し、完全に除荷状態に至るためと考えられる。

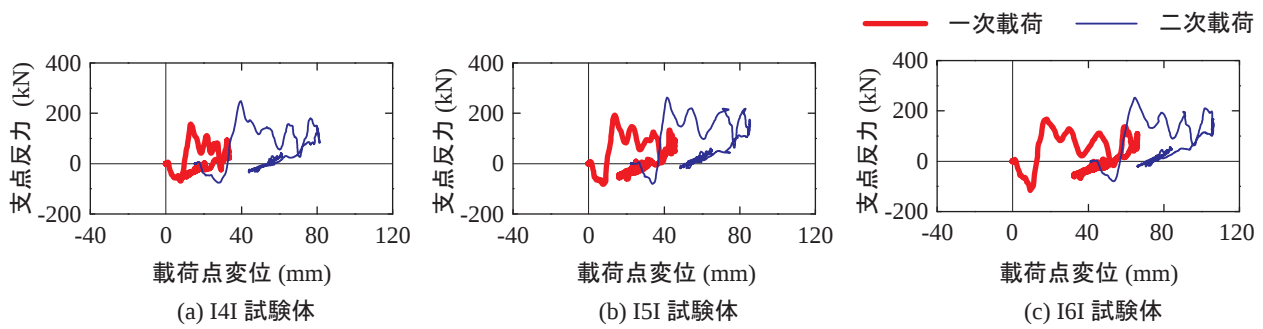
また、鉄筋応力を擬似静的に評価し、載荷荷重に換算できるものとして吸収エネルギーを大略評価すると、一次載荷時の各試験体の吸収エネルギーは衝突速度の増加に対応して増加の傾向を示している。また、二次載荷時の吸収エネルギーは3試験体で類似しており、前述のように一次載荷時の衝突速度に依存していないことが分かる。

以上より、本数値解析手法を適用して衝撃応答解析を行い、鉄筋応力と変位あるいは、擬似静的に換算した載荷荷重－変位の履歴関係を求め、吸収エネルギーを評価することにより、累積損傷評価や静的換算の残存耐力も評価可能であるものと推察される。

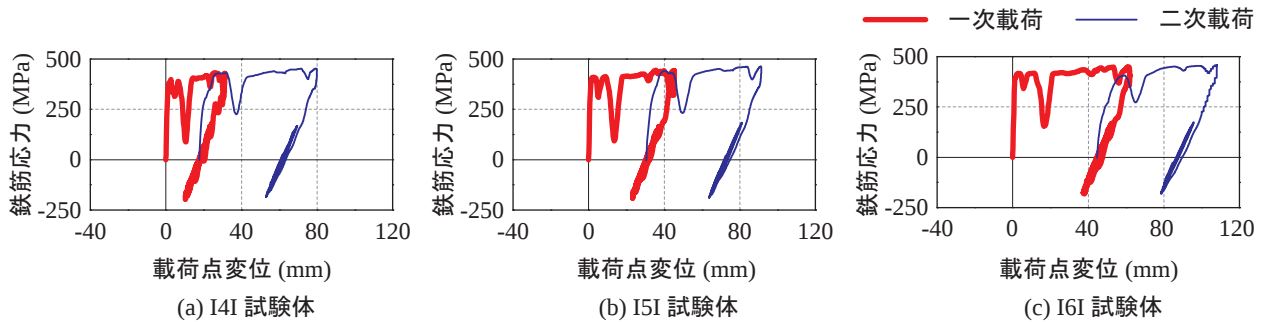
5.5 ひび割れ分布性状

図－10には、実験終了後のひび割れ分布図および数値解析結果の最大変位時における第一主応力図を示している。なお、数値解析結果においては、ひび割れ発生位置を特定できるようにするため、第4章の漸増繰り返し衝撃荷重載荷実験に関する検討時と同様に、第一主応力が零近傍応力($\pm 0.001 \text{ MPa}$)状態を示す要素を緑色で示している。

実験結果を見ると、全ての試験体においてスパン全域に渡って、梁の上下縁から鉛直方向に進展する曲げ



図－8 支点反力と変位の履歴関係（実験結果）



図－9 載荷点直下における下端鉄筋応力と変位の履歴関係（数値解析結果）

ひび割れや、載荷点部近傍から梁下縁に約 45° の角度で進展する斜めひび割れが確認できる。一次載荷時の結果を見ると衝突速度が大きい試験体ほど、ひび割れの発生が載荷点部近傍に集中していることが分かる。また、梁の上下縁から鉛直方向に進展する曲げひび割れも多く見受けられる。次に、二次載荷時におけるひび割れ分布を見ると、一次載荷による損傷により、かぶりコンクリートが剥落している場合（I5I, I6I 試験体）もあるが、いずれの試験体においても梁全体に曲げひび割れが進展して、載荷点近傍部にひび割れが集中していることが分かる。

解析結果において、一次載荷時におけるひび割れ分布を見ると、I4I, I5I 試験体では載荷点部近傍から梁下縁に約 45° の角度で進展する斜めひび割れの発生は認められないものの、梁下縁から進展する曲げひび割れは多く見受けられる。また、I6I 試験体では曲げひび割れの他に、載荷点近傍部から約 45° の角度で進展する斜めひび割れの発生も認められ、いずれの試験体に対しても実験結果と概ね一致しているものと判断される。

二次載荷時における解析結果のひび割れ分布図から、かぶりコンクリートの剥落は再現されていないものの、いずれの試験体も同様の損傷状況に陥っていることより、実験結果を精度よく再現していることが分かる。

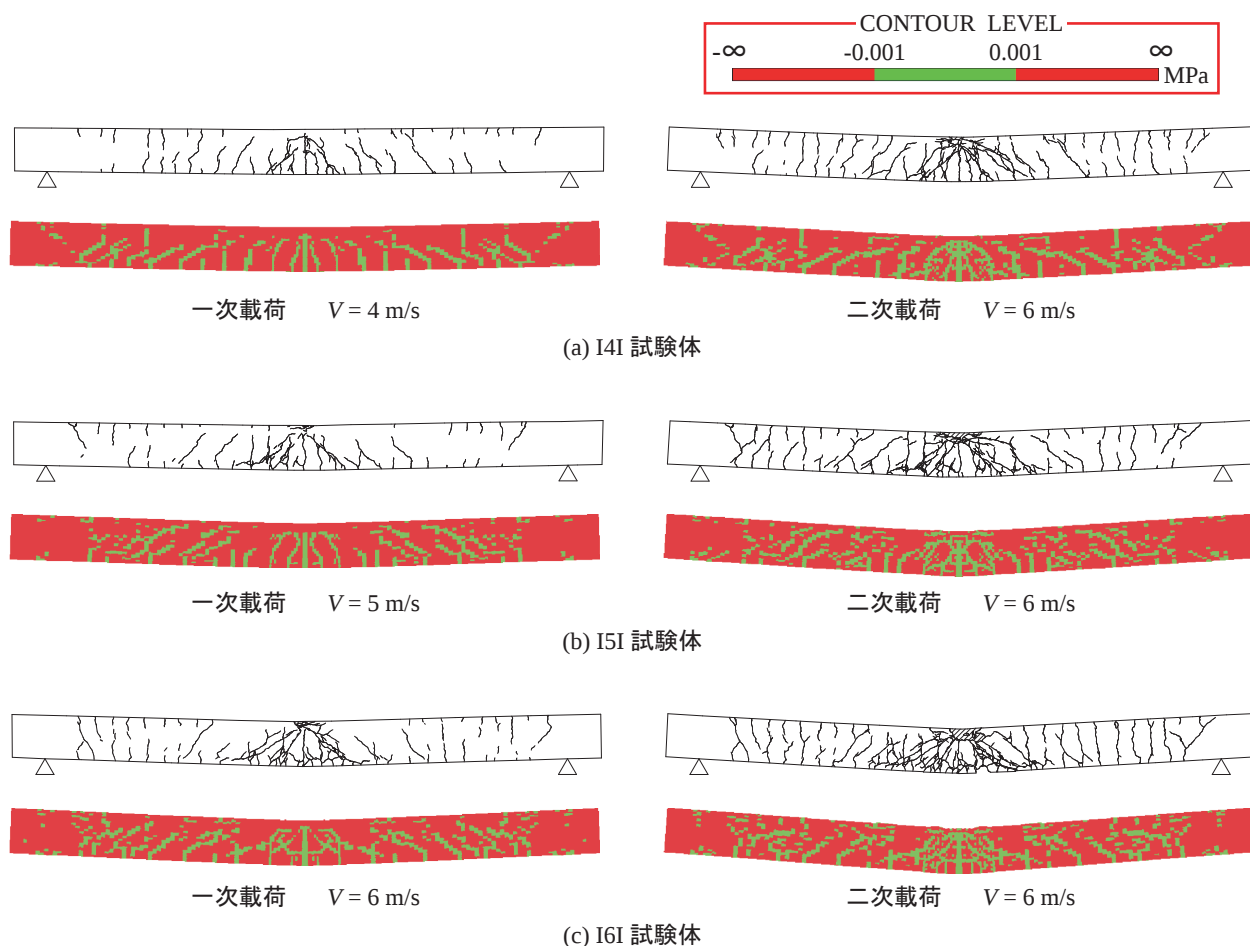
以上より、本数値解析においても、二次載荷時に終局に至る程度の衝撃荷重載荷の場合には、載荷履歴に

関わらず大略類似の損傷状態に陥ることを再現できることが明らかとなった。

6. まとめ

本研究では、耐衝撃用途 RC 構造部材の性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けた検討の一環として、梁部材を対象として繰り返し衝撃荷重載荷時の残存耐力評価法を確立することを目的に、三次元弾塑性有限要素法に基づいた解析手法を提案し、実験結果と比較することにより、その妥当性を検討した。本研究では、各衝撃荷重載荷に対する数値解析を実施後に、臨界減衰状態下での解析を行うことによって、RC 梁を数値解析的に静止させることとしている。提案の手法の妥当性検討には、初期と増分衝突速度を $V = 1 \text{ m/s}$ とする漸増繰り返し衝撃荷重載荷実験と、終局に至る衝突速度近傍での 2 回の繰り返し衝撃荷重載荷実験結果を用いることとした。本研究の範囲内で得られた結果を整理すると、以下のとおりである。

- 1) 提案の解析手法を用いることにより、各載荷時点の最大重錘衝撃力や最大支点反力値に関しては、実験結果に対応した解を得ることは困難であるが、重錘衝撃力波形や支点反力波形の分布性状は大略再現可能である。
- 2) 載荷点変位（以後、変位）波形に関しては、各載荷時の最大応答変位や、除荷後の減衰自由振動特性（振幅、周期）、残留変位を精度よく評価可能である。



図－ 10 ひび割れ分布性状（InI 試験体）

- 3) 梁側面に生じた各載荷時点における累積のひび割れ分布に関しても，実験結果を大略再現可能である。
- 4) したがって，RC 梁の繰り返し衝撃荷重載荷時の累積損傷の程度や残存耐力評価は，提案の手法を用い，数値解析結果の変位波形，最大応答変位，除荷後の減衰自由振動特性や残留変位等を用いることにより大略評価可能となるものと推察される。
- 5) さらに，下端鉄筋と変位の履歴関係あるいは，擬似静的な考え方の下に評価した載荷荷重と変位の履歴関係を数値解析的に求め，吸収エネルギーを評価することによっても，累積損傷度合いや残存耐力が評価可能であるものと推察される。

今後は，RC 梁のみならず各種 RC 部材の繰り返し衝撃荷重載荷実験結果との比較検討を行い，実務への適応性も含め本数値解析手法の汎用性に関する妥当性を検証していきたいと考えている。

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構造力学研究室の可知典久君に多大なるご支援を戴いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 構造工学シリーズ 8 ロックシェットの耐衝撃設計，土木学会，1998.
- 2) 川瀬良司，岡田慎哉，鈴木健太郎，岸 徳光：三層緩衝構造を設置したトンネル坑口部の衝撃挙動に関する実規模実験と数値解析的検討，構造工学論文集，土木学会，Vol. 54A, pp. 1055-1066, 2008.
- 3) 構造工学技術シリーズ 52 性能照査設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法，土木学会，2007.
- 4) 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.
- 5) 岸 徳光，三上 浩：衝撃荷重載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案，構造工学論文集，土木学会，Vol.

- 53A, pp. 1251-1260, 2007.
- 6) 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.
 - 7) 岸 徳光, 今野久志, 三上 浩, 岡田慎哉: 大型 RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 54A, pp. 1077-1088, 2008.
 - 8) 玉井宏樹, 園田佳巨, 坂田 力: 繰返し衝突を受ける RC はりの残存耐力評価に関する基礎的研究, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 1-522, pp.1043-1044, 2008.
 - 9) 白根勇二, 岩波光保, 横田 弘, 山田岳史: 繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの破壊挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.739-744, 2007.
 - 10) 岸 徳光, 今野久志, 西 弘明, 三上 浩: 衝撃荷重を受けた RC 梁のひび割れ補修前後における残存衝撃耐力, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 51A, pp. 1695-1706, 2005.
 - 11) John O.Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2006.3.
 - 12) コンクリート標準示方書(2002 年制定) 構造性能照査編, 土木学会, 2002.

(2008 年 9 月 18 日受付)