

# 論文 高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型 RC 梁に関するエネルギー一定則の検証実験

竹本 伸一\*<sup>1</sup>・岸 徳光\*<sup>2</sup>・田口 史雄\*<sup>3</sup>・安藤 智啓\*<sup>4</sup>

**要旨：**本研究では，入力エネルギーおよび入力力積が一定条件の下，質量の異なる2種類の重錘を使用して，高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型 RC 梁の衝撃挙動に対するエネルギー一定則の検討を試みた。検討結果，重錘質量が異なる場合も入力エネルギーが同様である場合には，重錘衝撃力，支点反力，変位波形および支点反力ー変位曲線は，載荷方法に拘わらず類似した分布性状となることが明らかになった。これより，高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型 RC 梁の場合にも，工学的にはエネルギー等価載荷に関するエネルギー一定則が成立するものと判断される。

**キーワード：**高性能軽量コンクリート，RC 梁，曲げ破壊，衝撃挙動，エネルギー一定則

## 1. はじめに

近年，道路橋や鉄道橋の上部構造の軽量化を図る試みの一つとして，粗骨材に高性能軽量骨材を用いたコンクリート（以後，高性能軽量コンクリート）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。

著者らも，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の壁や高欄部等，耐衝撃用途構造部材への適用性に着目して，高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型 RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を実施している。その結果，衝撃応答性状は，静的曲げ耐力が同程度である場合には，コンクリートの弾性係数や引張強度が異なる普通コンクリートを用いた RC 梁のそれとほぼ同様となることが明らかになっている<sup>1)</sup>。これは，高性能軽量コンクリートを用いる場合の曲げ破壊型 RC 梁の耐衝撃設計が，普通コンクリートを用いる場合の簡易設計法<sup>2)</sup>と同様な手法に基づいて行える可能性のあることを示唆している。

しかしながら，より信頼性の高い設計法とするためには，高性能軽量コンクリートを用いる場合に関しても，1) 重錘質量  $M$  および衝突

速度  $V$  が異なる条件下で，入力エネルギー ( $MV^2/2$ ) やあるいは入力力積 ( $MV$ ) を等しくする場合に，RC 梁が類似の衝撃応答性状を示すか否かや，2) 断面寸法は異なるものの静的曲げ耐力が等しい場合に，RC 梁の耐衝撃性が同様となるか否か，等を明らかにしておく必要がある。

本研究では，上述1)の場合に着目し，2種類の重錘を用いた高性能軽量コンクリート曲げ破壊型 RC 梁の重錘落下衝撃実験を実施し，衝撃挙動に対するエネルギー一定則の検討を試みた。

## 2. 実験概要

図-1には，本実験に用いた高性能軽量コンクリート (High-Performance and Light-Weight Concrete) RC 梁の形状寸法および配筋状況を示している。本 RC 梁の形状寸法 (梁幅×梁高×純スパン長) は  $250 \times 250 \times 3,000$  mm である。軸方向鉄筋には D19-SD345 を，せん断補強筋には D6-SD295A を用いている。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，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

\*1 ドーピー建設工業(株) 部長 北海道本店設計部 (正会員)

\*2 室蘭工業大学教授 建設システム工学科 工博 (正会員)

\*3 (独)北海道開発土木研究所室長 材料研究室 (正会員)

\*4 防衛庁第4研究所研究員 施設構造研究室 博(工) (正会員)

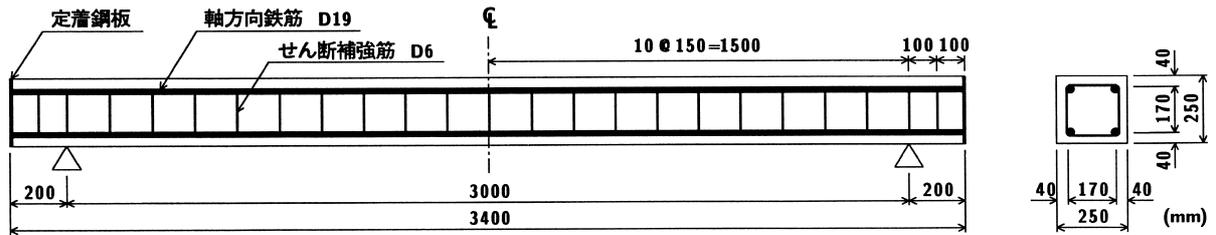


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

表-1 試験体の静的設計値一覧

主鉄筋比 $P_t$	せん断スパン比 $a/d$	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 $\alpha (= V_{usc} / P_{usc})$	実測静的曲げ耐力 $P_{us}$ (kN)
0.011	7.14	129.7	59.2	2.19	75.1

表-2 コンクリートの力学的特性

実験時 材令	単位体積 重量 ( $\text{kN/m}^3$ )	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 $\nu_c$
16日	17.7	37.6	2.37	21.9	0.21

表-3 鉄筋の力学的特性

鉄筋 名称	材質	降伏強度 $\sigma_y$ (MPa)	弾性係数 $E_s$ (GPa)	ポアソン 比 $\nu_s$
D19	SD345	392	206	0.3
D6	SD295A	376	206	0.3

表-4 実験ケースの一覧

試験 体名	荷重方法	重錘質量 $M$ (kg)	衝突速度 $V$ (m/s)	入力エネルギー $E_k$ (kJ)	入力力積 $I$ ( $\text{N}\cdot\text{s}$ )
M300	繰り返し	300	1, 2, 3, 4, 5	0.15, 0.60, 1.35, 2.40, 3.75	300, 600, 900, 1200, 1500
M400-E		400	0.87, 1.73, 2.60, 3.46, 4.33	0.15, 0.60, 1.35, 2.40, 3.75	—
M400-I		400	0.75, 1.50, 2.25, 3.00, 3.75	—	300, 600, 900, 1200, 1500
M300	単一	300	5, 6	3.75, 5.40	1500, 1800
M400-E		400	4.33, 5.20	3.75, 5.40	—
M400-I		400	3.75, 4.50	—	1500, 1800

ている。表中、静的曲げ耐力  $P_{usc}$  はコンクリート標準示方書に基づき算定している。なお、表中の  $V_{usc}$  値は、示方書式から算出される値を70%に低減した値である。せん断余裕度  $\alpha$  は、 $V_{usc}$  を  $P_{usc}$  で除した値である。ここでは  $\alpha > 1.0$  であることより、静荷重時には設計的に曲げ型で破壊に至ることが想定される。表-2および表-3には、実験時のコンクリートおよび鉄筋の力学的特性を示している。なお、高性能軽量コンクリートには、粗骨材として寸法 5~15 mm の高性能軽量骨材（比重 1.20）を用いている。

RC 梁はリバウンド防止用治具付支点上に設置している。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。実験は、このような条件下で、重錘を所定の高さから RC 梁のスパン中央部に自由落下させることにより実施している。用いた重錘は、質量

300 kg と 400 kg の 2 種類である。いずれも荷重点部の直径が 150 mm で、底部に高さ 2 mm の球面状のテーパを有する円柱状鋼製重錘である。

荷重方法には、繰り返し荷重方法と単一荷重方法を採用している。前者は、同一試験体に対して梁が破壊に至るまで、重錘の衝突速度を徐々に増大させ繰り返し落下させる方法である。本実験の場合には、各試験体の場合とも後述する表-4中の衝突速度欄に示す5段階の衝突速度で重錘を落下させている。なお、各段階での荷重回数は1回である。一方、後者は、繰り返し荷重の最終速度とその一段大きい速度で1回だけ試験体に落下させる方法である。衝突速度は、各試験体の場合とも表-4に示すとおりである。なお、RC 梁の破壊は、著者らの過去の研究に基づき<sup>2)</sup>、RC 梁の累積残留変位が純スパン長の 2% (60 mm) に達した状態と設定している。

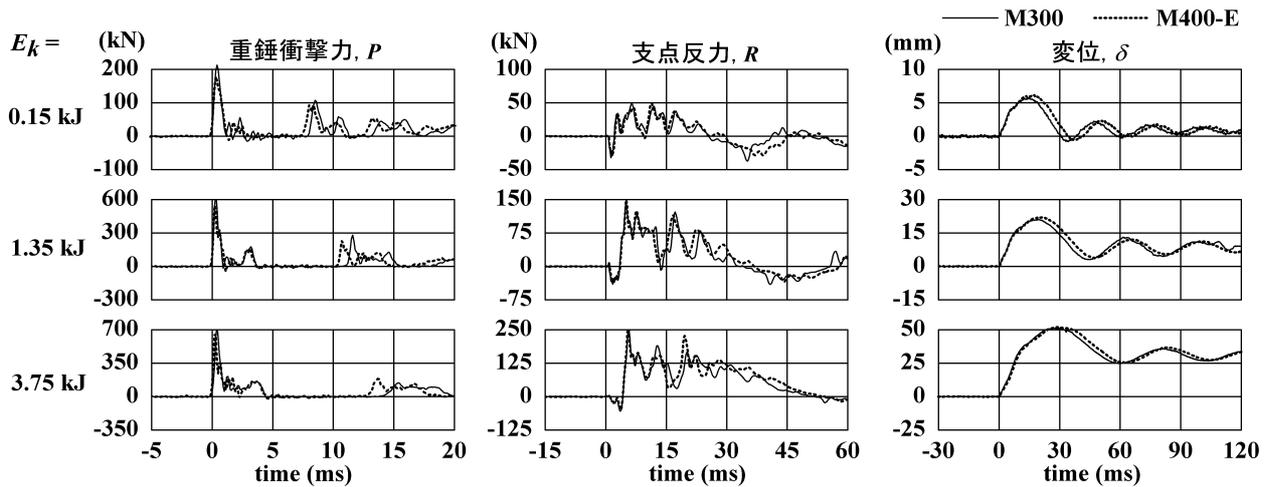


図-2 エネルギー等価载荷における各種応答波形（繰り返し载荷の場合）

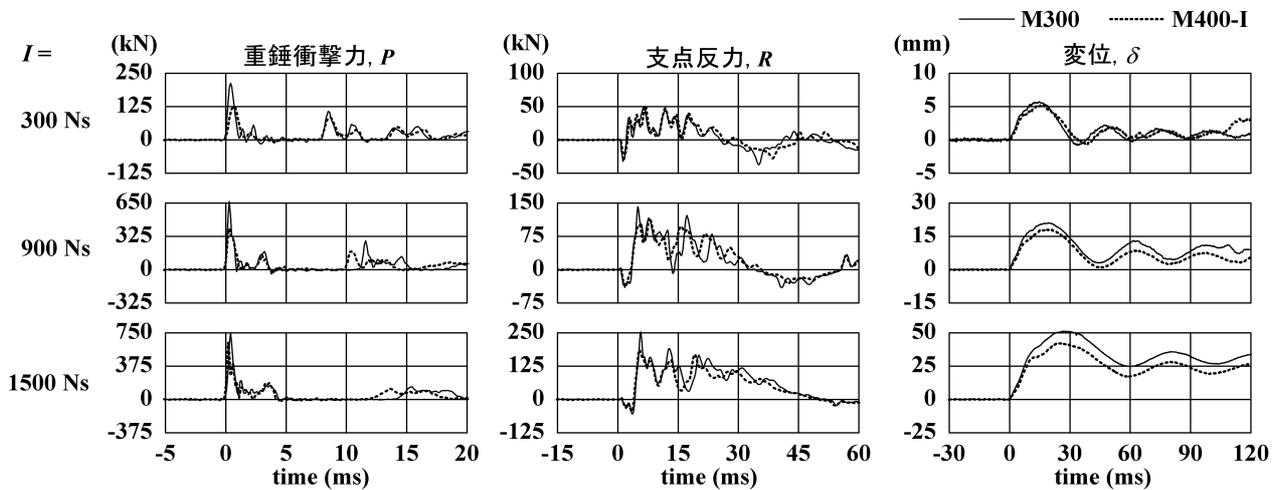


図-3 力積等価载荷における各種応答波形（繰り返し载荷の場合）

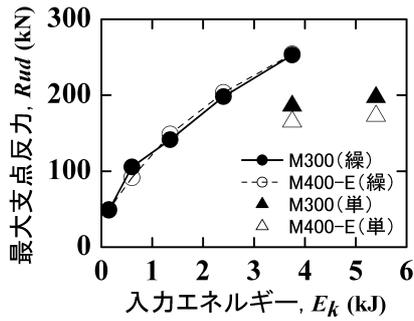
表-4には、本実験ケースを一覧にして示している。表中、試験体名は重錘質量  $M$  と载荷条件を組み合わせ示している。このうち、 $M=300$  kg を用いる場合を本実験の基準载荷としている。 $M=400$  kg の重錘を用いる場合の载荷条件としては、基準载荷に対して入力エネルギー  $E_k (=MV^2/2)$  を一定にする場合（エネルギー等価载荷）と、入力力積  $I (=MV)$  を一定にする場合（力積等価载荷）の2種類を設定している。試験体 M400-E, M400-I に対する衝突速度  $V$  は、それぞれ M300 の場合の  $E_k$  および  $I$  と等しくなるように、表のとおり設定している。従って、本実験ケースは、M300, M400-E, -I に対して繰り返し载荷の場合で表中の衝突速度欄に示す5ケースずつ、単一载荷の場合で同欄に示す2ケースずつの全21ケースである。

### 3. 各種応答波形の比較

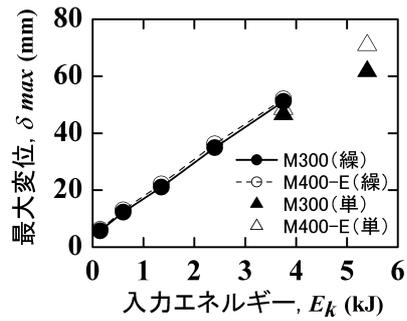
#### 3.1 各種応答波形の比較

図-2には、M300 と M400-E 試験体の重錘衝撃力  $P$ 、合支点反力  $R$ （以後、支点反力）および载荷点変位  $\delta$ （以後、変位）に関する応答波形を入力エネルギー  $E_k$  毎に示している。また、図-3には、M300 と M400-I 試験体の場合に関する応答波形を入力力積  $I$  毎に示している。ここでは、紙面の都合により、入力エネルギーおよび入力力積に対して繰り返し载荷のうちの3ケースずつに着目して示している。なお、各応答波形は、重錘衝突時を 0 ms として整理している。

最初に、図-2のエネルギー等価载荷の結果に関して検討する。図より、重錘衝撃力波形  $P$  について見ると、M300 および M400-E の波形は、入力エネルギー  $E_k$  に拘わらず、衝撃初期に振幅

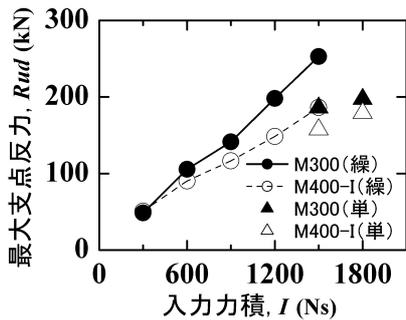


(a) 最大支点反力と入力エネルギー関係

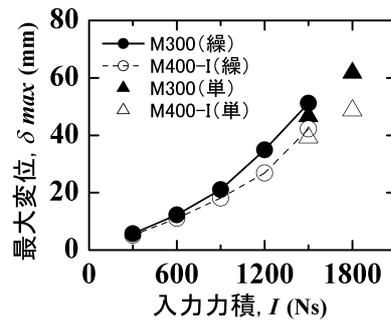


(b) 最大変位と入力エネルギー関係

図-4 エネルギー等価载荷における最大支点反力および最大変位の比較



(a) 最大支点反力と入力力積関係



(b) 最大変位と入力力積関係

図-5 力積等価载荷における最大支点反力および最大変位の比較

が大きく継続時間の短い波形成分と 7 ms 以降に励起される振幅の小さい数波が連なった波形成分から構成された類似の分布性状を示していることが分かる。また、支点反力波形  $R$  に関して、周期が 45 ms 以上の減衰型の低周波振動成分と周期が 3 ms 程度の高周波振動成分から構成された両者で同様の分布性状を示している。さらに、変位波形  $\delta$  に関して、両梁の波形は立ち上がりから自由振動状態に至るまで、かつ直流成分の大きさまで非常に良く対応している。

次に、図-3の力積等価载荷の結果に関して検討を行う。図より、重錘衝撃力波形  $P$  および支点反力波形  $R$  に関しては、全体的な分布性状は、入力力積  $I$  に拘わらず M300 および M400-I でほぼ対応していることが分かる。しかしながら、各波形の最大振幅値には両者で差異が見られ、M400-I の場合で小さく示されている。変位波形  $\delta$  に関して、波形の振動特性が両梁で類似しているものの、振幅は重錘質量の大きい M400-I の場合で小さく示されている。これらの結果は、力積等価载荷の場合には、重錘衝撃力

や支点反力波形の最大値および変位波形の振幅が両梁で対応せず、力積一定則が成立しないことを意味している。

### 3.2 最大支点反力および最大変位の比較

図-4には、M300 と M400-E 試験体の最大支点反力  $R_{ud}$ 、最大変位  $\delta_{max}$  と入力エネルギー  $E_k$  の関係を比較して示している。

図より、繰り返し载荷の場合には (●, ○印)、最大支点反力  $R_{ud}$  および最大変位  $\delta_{max}$  が、入力エネルギー  $E_k$  に拘わらず M300 と M400-E で非常に良く対応していることが分かる。また、 $R_{ud} - E_k$  曲線および  $\delta_{max} - E_k$  曲線の分布は、それぞれ前者の場合には若干双曲線的な分布を、後者の場合には線形的な分布を示している。単一载荷の場合には (▲, △印)、 $R_{ud}$  値は  $E_k$  に拘わらず M300 試験体の場合で若干大きく示されている。しかしながら、その差は 10% 以下と小さい。一方、 $\delta_{max}$  値は、 $E_k = 3.75$  kJ の場合には両梁で対応しているものの、 $E_k = 5.40$  kJ の場合には M300 の場合で小さく示されている。これは、後述のひび割れ分布に見られるように、M300 の場合に

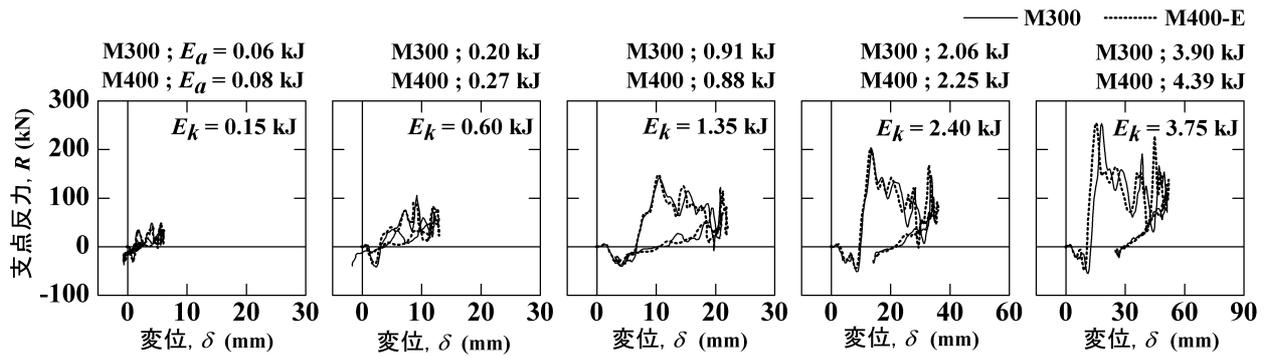


図-6 エネルギー等価載荷における支点反力-変位曲線（繰返し載荷の場合）

は載荷点部のコンクリートが剥落し、入力エネルギーの一部が消費されたためと考えられる。

載荷方法の違いに着目すると、 $R_{ud}$  値に関しては、単一載荷の場合が繰返し載荷時よりも小さく示されている。これは、単一載荷の場合には RC 梁の載荷点部が健全であることより、重錘衝撃力の振幅が大きく周期も短いため、これらの成分がより減衰することによるものと推察される。一方、 $\delta_{max}$  値に関しては、単一載荷の場合が若干小さく示されているものの、その差異は非常に小さい。なお、これらの傾向は、後述の力積等価載荷の場合にも同様に見られる。

図-5には、M300とM400-I試験体の $R_{ud}$ 、 $\delta_{max}$ と入力力積 $I$ の関係を示している。図より、繰返し載荷の場合には（●，○印）， $R_{ud}$ および $\delta_{max}$ がM300とM400-Iで異なっており、かつ入力力積 $I$ の増加に伴い両梁の差異も増大していることが分かる。また、両曲線の分布に着目すると、 $R_{ud}-I$ 曲線の場合には線形的な分布を、 $\delta_{max}-I$ 曲線の場合には二次放物線的な分布を示している。単一載荷の場合にも（▲，△印）， $R_{ud}$ 値および $\delta_{max}$ 値には両梁で差異のあることが分かる。特に、 $\delta_{max}$ 値の場合には、その差異が繰返し載荷の最終載荷時に比べて、同程度あるいはそれ以上となっている。

以上より、RC梁の載荷点部のコンクリートが剥落するような衝突速度レベルを除くと、エネルギー等価載荷の場合には、重錘衝撃力、支点反力、変位の応答波形や最大支点反力、最大変位が両梁で比較的良く対応することが明らかになった。

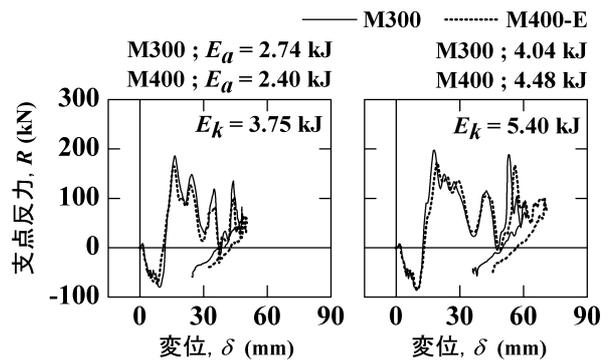


図-7 エネルギー等価載荷における支点反力-変位曲線（単一載荷の場合）

### 3.3 支点反力-変位曲線の比較

前節までの検討結果より、ここではエネルギー等価載荷の場合のみに着目し、M300とM400-E試験体の支点反力-変位曲線（ $R-\delta$ 曲線）に関する比較を試みることにする。図-6には繰返し載荷実験の結果を、図-7には単一載荷実験の結果を示している。

図-6より、 $R-\delta$ 曲線は、入力エネルギー $E_k$ に拘わらず両梁で良く対応していることが分かる。詳細に見ると、入力エネルギーの小さい $E_k = 0.15, 0.60$  kJでは、ループの面積として評価される吸収エネルギー量 $E_a$ が小さく、梁が弾性的に挙動していることを伺わせる分布を示している。さらに、 $E_k$ を増大させると $E_a$ が増大し、梁の弾塑性的な挙動に対応した分布となっている。 $E_k \geq 1.35$  kJの分布を見ると、支点反力 $R$ は負荷荷状態から正載荷状態に移行した後、最大値までほぼ線形に増大している。その後、 $R$ は増減を繰返し徐々に減少するものの、最大変位値近傍で再度最大値程度まで増大している。この $R$ の増減は、図-2に示されている支点反力波形の

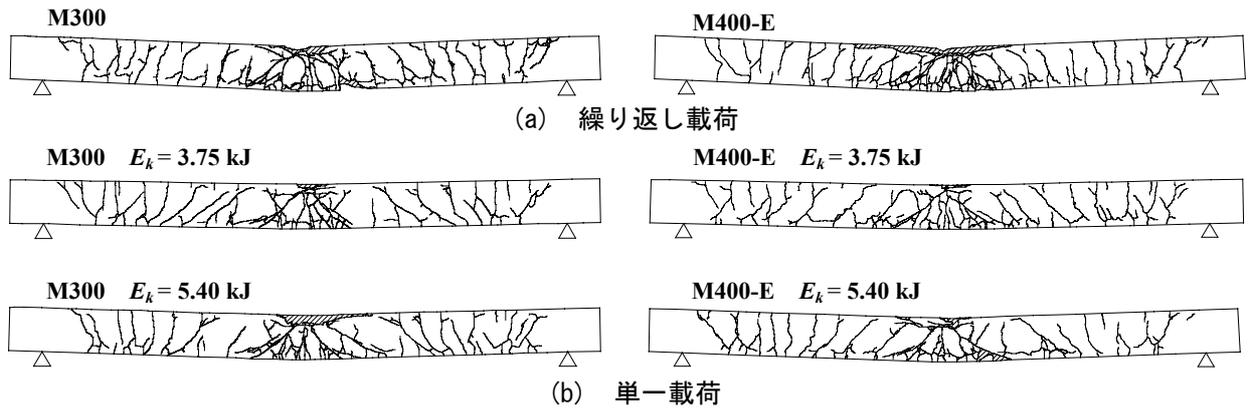


図-8 実験終了後のひび割れ分布

高周波振動成分に起因するものである。最大変位到達後には、 $R$  は初期よりは勾配の小さい剛性で除荷されている。

一方、図-7からも、 $R-\delta$  曲線は、全体的に両梁で良く対応している様子が伺える。また、 $E_k = 3.75$  kJ に着目して図-6の繰返し載荷における  $R-\delta$  曲線と比較すると、吸収エネルギー量  $E_a$  が単一載荷の場合に小さく示されていることが分かる。これは、単一載荷の場合には梁が載荷履歴の影響を受けていないためにより健全であることを意味している。

### 3.4 ひび割れ分布の比較

図-8には、繰返し載荷実験終了後および単一載荷実験終了後の M300 と M400-E 試験体のひび割れ分布を示している。

(a) 図より、両梁ともスパン全域に渡って梁下縁から上縁に鉛直方向に貫通する曲げひび割れの発生していることが分かる。また、これら曲げひび割れの本数や分散性は、両者で良く対応しているものと判断される。さらに、載荷点部には、載荷点部近傍から梁下縁に  $45^\circ$  程度の角度で貫通する斜めひび割れが同様に見られる。

一方、(b) 図からも M300 と M400-E 試験体のひび割れ分布は、 $E_k = 5.40$  kJ の場合で M300 の載荷点部コンクリートが剥落している点を除くと、曲げひび割れの本数や分散性、載荷点部における斜めひび割れの発生等、 $E_k$  に拘わらず両梁で良く対応していることが分かる。また、これらの分布性状は、微細なひび割れの本数を除くと、繰返し載荷の場合と同様であることも

伺える。

### 4. まとめ

本研究では、高性能軽量コンクリート曲げ破壊型 RC 梁の衝撃挙動に対するエネルギー一定則について実験的に検討を行った。本検討結果を要約すると、以下のとおりである。

- 1) 入力エネルギーが等しい場合には、重錘衝撃力、支点反力、変位波形および支点反力-変位曲線は、載荷方法に拘わらず、類似した分布性状となる。
- 2) 一方、入力力積が等しい場合には、最大支点反力や最大変位の値が対応しない。
- 3) 入力エネルギーが等しい場合におけるスパン全域に渡って生じる曲げひび割れの分布は、載荷方法に拘わらずほぼ同様となる。
- 4) 従って、高性能軽量コンクリート曲げ破壊型 RC 梁に関しても、普通コンクリートの場合と同様、衝突速度が  $10$  m/s 以下の場合において工学的にはエネルギー一定則が成立するものと判断される。

### 参考文献

- 1) 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.
- 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考案，土木学会論文集，No.647/I-51, pp.177-190, 2000.