

高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型 RC 梁のエネルギー一定則に関する実験的検討

Experimental Study on a Constant Energy Law for Flexural-Failure-Type RC Beams with HP-LWC

ドービー建設工業(株) 〇正 員 竹本 伸一 (Shin-ichi Takemoto)
 室蘭工業大学 正 員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 北海道開発土木研究所 正 員 田口 史雄 (Fumio Taguchi)
 防衛庁第4研究所 正 員 安藤 智啓 (Tomohiro Ando)

1. はじめに

著者らは、既に高性能軽量コンクリートの耐衝撃用途構造部材への適用性を検討することを目的として、コンクリート構造部材の基本である RC 梁に着目し、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試み、その耐衝撃性能が普通コンクリートを用いた RC 梁の耐衝撃性能とほぼ同様であることを明らかにしている¹⁾。これにより、高性能軽量コンクリートを用いる場合の RC 梁の耐衝撃設計は、普通コンクリートを用いる場合に対する著者らによって提案された簡易設計法²⁾と同様な手法に基づいて実施できる可能性のあることが明らかになっている。

しかしながら、上述の設計法は、限界状態設計の概念に基づき、エネルギー論的な考え方を取り入れたものとなっている。このため、高性能軽量コンクリートを用いた RC 梁を同手法に基づいて設計する場合には、エネルギー一定則の成立の可否や吸収エネルギー量関係を明らかにしておく必要がある。

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 梁に関する重錘落下衝撃実験を実施し、RC 梁の耐衝撃挙動に関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) を用いた 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 × 250 × 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、

軸方向鉄筋を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、用いた試験体の静的設計値を一覧にして示している。表中、静的曲げ耐力 P_{usc} および静的せん断耐力 V_{usc} は、示方書³⁾に基づき算定している。各耐力算定時の部材係数は $\gamma_b = 1.0$ としている。せん断余裕度 α は、 V_{usc} を P_{usc} で除した値であり、ここでは $\alpha > 1.0$ であることより、RC 梁は静載荷時には設計的に曲げ型で破壊に至ることが予想される。

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、寸法 5 ~ 15 mm の高性能軽量骨材 (比重 1.20) を粗骨材として用いている。

製作した RC 梁は、実験時にはリバウンド防止用治具付の支点治具上に設置している。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、このような試験体の設置条件の下 RC 梁のスパン中央部に重錘を所定の高さから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。いずれも載荷点部の直径が 150 mm で、底部に高さ 2 mm の球状のテーパを有する円柱状鋼製重錘である。なお、ここでは載荷方法として繰り返し載荷方法を採用している。この方法は、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。なお、RC 梁の破壊は、著者らの過去の研究に基づき²⁾、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。

表-4には、本実験ケースの一覧を示している。表中、試験体名は重錘質量 M と載荷条件を組み合わせで示している。このうち、 $M = 300$ kg を用いる場合を本実験における基準載荷としている。 $M = 400$ kg の重錘を用

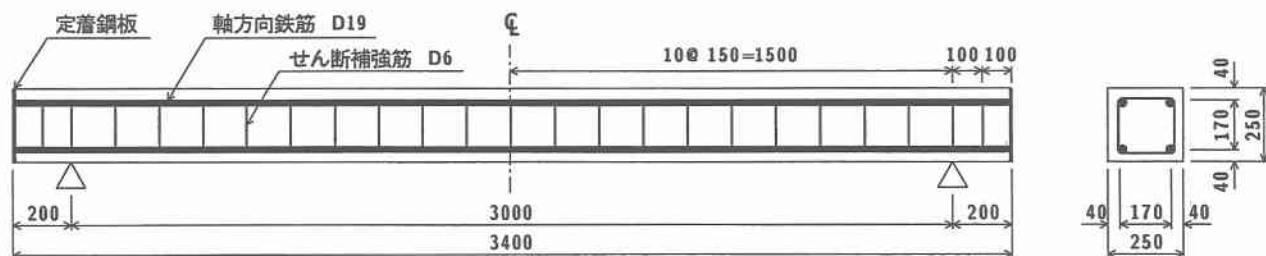


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

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 $\alpha (= V_{usc} / P_{usc})$	実測曲げ耐力 P_{us} (kN)
0.011	7.14	129.7	59.2	2.18	75.1

表－２ コンクリートの力学的特性

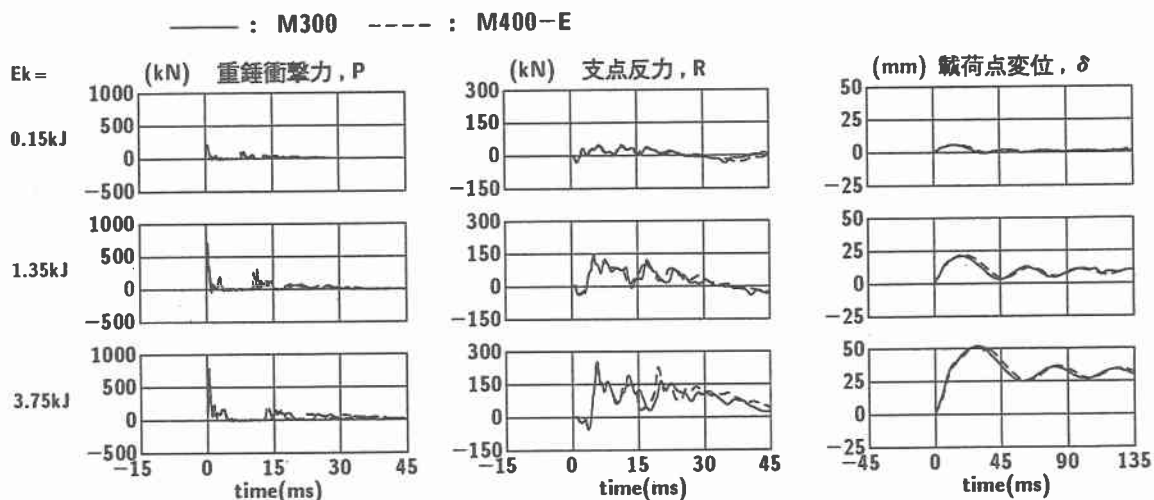
実験時材令 (日)	圧縮強度 f'_c (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c
16	37.6	21.9	0.21

表－３ 鉄筋の力学的特性

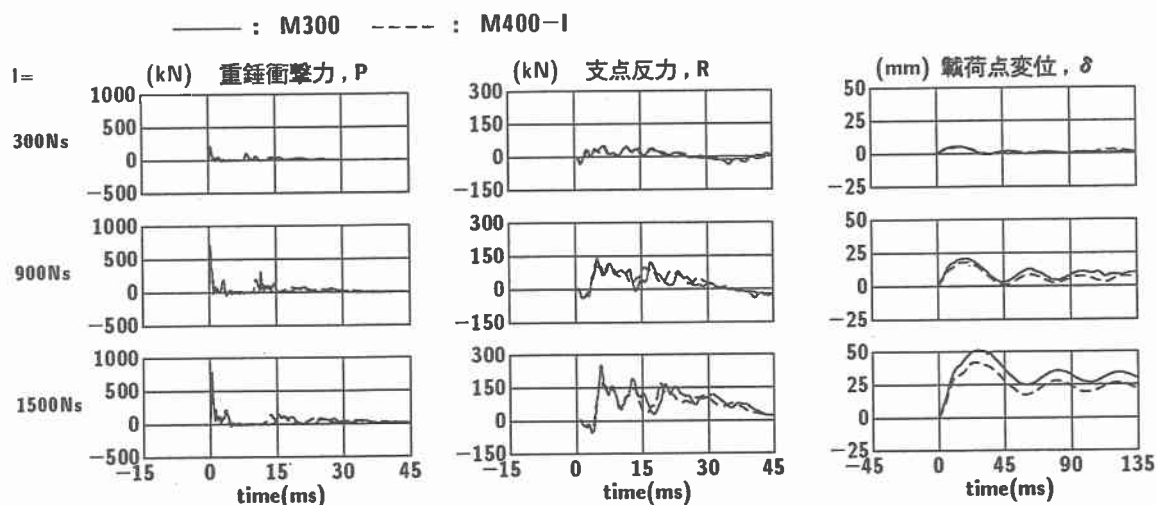
鉄筋名称	材質	降伏強度 σ_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D19	SD345	392	206	0.3
D6	SD295A	376	206	0.3

表－４ 実験ケースの一覧

試験体名	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 (Ns)
M300	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



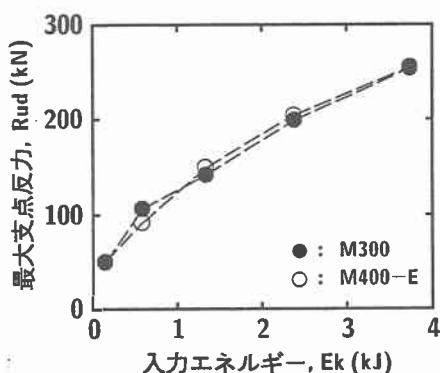
図－２ 重錘衝撃力，支点反力および変位の応答波形（エネルギー等価載荷の場合）



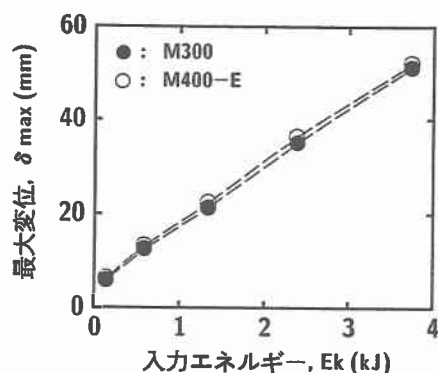
図－３ 重錘衝撃力，支点反力および変位の応答波形（力積等価載荷の場合）

いる場合の載荷条件としては、基準載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（エネルギー等価載荷）と、入力力積 $I (= MV)$ を一定とする場合（力積等価載荷）の２種類を設定している。試験体

M 400-E, M 400-I に対する衝突速度 V は、M 300 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。なお、本実験ケースは、各試験体に対して５体ずつの全１５ケースである。

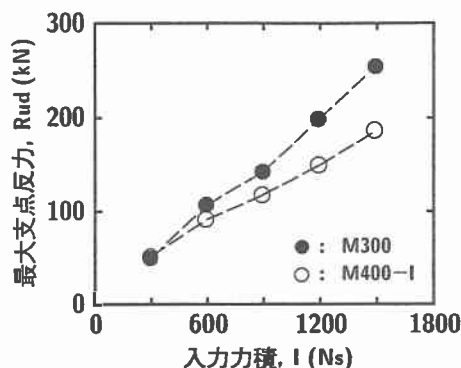


(a) 最大支点反力と入力エネルギー関係

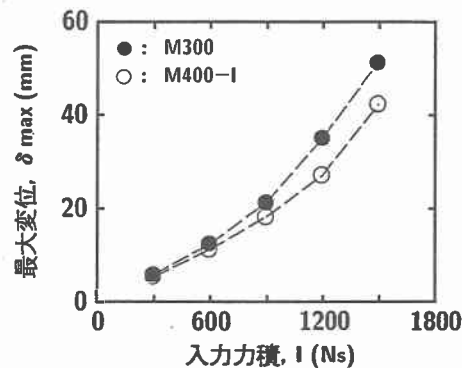


(b) 最大変位と入力エネルギー関係

図-4 エネルギー等価載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 力積等価載荷における最大支点反力および最大変位の比較

3. 実験結果および考察

3.1 重錘衝撃力、支点反力および変位の応答波形の比較

図-2には、M300とM400-E試験体の重錘衝撃力 P 、支点反力 R および変位 δ に関する応答波形を入力エネルギー E_k 毎に比較して示している。また、図-3には、M300とM400-I試験体の場合に関して入力力積 I 毎に比較して示している。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0msとして整理している。

最初に、図-2のエネルギー等価載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の波動は、入力エネルギー E_k に拘わらず、衝撃初期に振幅が大きく継続時間の短い波形成分と後続の振幅が小さく継続時間の長い波形成分から構成される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 に関しても、正弦半波状の波動に高周波成分が含まれた同様の性状を示している。 R の場合、全体的な分布性状のみならず、高周波成分の性状に至るまで両梁で非常に良く対応した分布性状となっている。変位波形 δ に関しても、両梁の波動は立ち上がりから自由振動状態に至るまで非常に良く対応していることが分かる。

次に、図-3の力積等価載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、全体的な分布性状が、入力力積 I に拘わ

ずM300およびM400-Iで良く対応していることが分かる。しかしながら、変位波形 δ に関しては、波動の振動特性は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試験体の方で小さく示されている。これは、力積等価載荷の場合には変位波形の振幅が両梁で対応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 δ_{max} と入力エネルギー E_k の関係を比較して示している。また、図-5には、M300とM400-I試験体の R_{ud} 、 δ_{max} と入力力積 I の関係を示している。

図-4より、エネルギー等価載荷の場合には、最大支点反力 R_{ud} および最大変位 δ_{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。

一方、図-5より、力積等価載荷の場合には、 R_{ud} および δ_{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。

以上より、エネルギー等価載荷の場合には、重錘衝撃力、支点反力、変位に関する応答波形や最大支点反力、

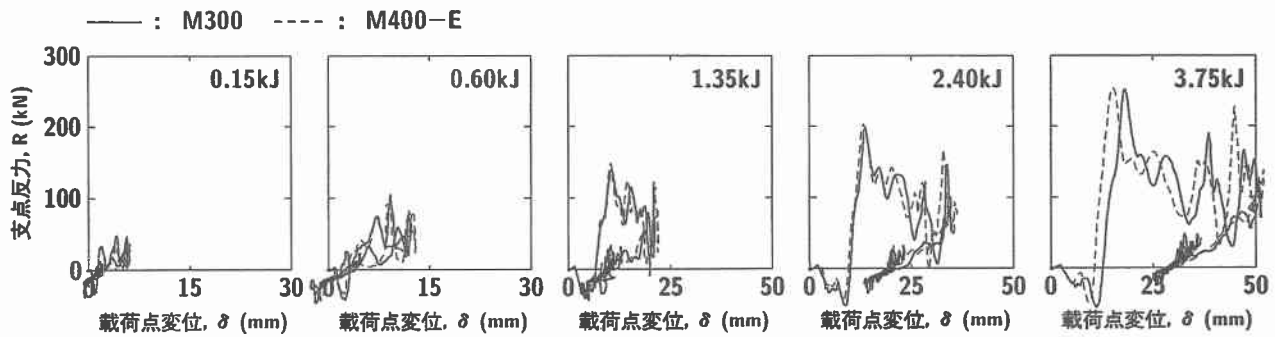


図-6 支点反力-変位曲線（エネルギー等価載荷の場合）

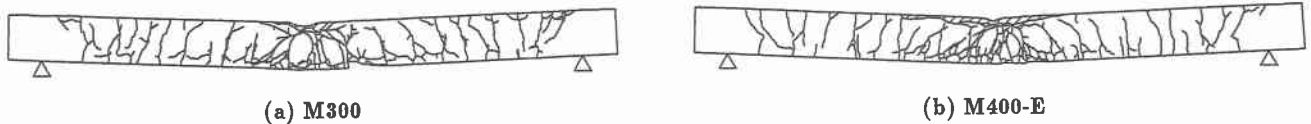


図-7 繰り返し載荷実験終了後のひび割れ状況

最大変位が両梁で良く対応することが明らかとなった。

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、M 300 と M 400-E 試験体の支点反力-変位曲線（ $R-\delta$ 曲線）を入力エネルギー毎に示し比較することとした（図-6）。

図より、 $R-\delta$ 曲線は、入力エネルギー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が小さく、梁が弾性的に挙動していることを同わせる分布を示している。さらに、 E_k を増大させると吸収エネルギー量が増大し、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 は負載荷状態から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 は増減を繰り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。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。

3.4 ひび割れ分布の比較

図-7には、繰り返し載荷実験終了後の M 300 と M 400-E 試験体のひび割れ分布を示している。

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分散性や本数は、両者で良く対応しているものと判断される。さらに、載荷点部に着目すると、両梁には載荷点部近傍から梁下縁に 45° 程度の角度で貫通する斜めひび割れが同様に見られる。しかしながら、M 400-E の場合には、微細なひび割れが M 300 のそれに比べて多く発生している。これは、M 400-E の場合には、衝突速度が M 300 の場合より小さいことに起因しているものと推察される。

4. まとめ

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る曲げ破壊型 RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を行い、RC 梁の耐衝撃挙動に関するエネルギー一定則の検討を試みた。実験より得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

- 1) 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、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、波動の立ち上がりから減衰に至るまで類似した分布性状となる。
- 2) 一方、入力力積が同様である場合には、最大支点反力や最大変位の値が対応しない。また、入力力積が大きくなる程、その差異は増大する。
- 3) 載荷点部における微細なひび割れは、重錘質量が大きく衝突速度の小さい場合で多く発生する。しかしながら、スパン全域に渡って生じる曲げひび割れの分布は、入力エネルギーが等しければほぼ同様となる。
- 4) 1) ~ 3) より、高性能軽量コンクリートを用いる曲げ破壊型 RC 梁に関しても、普通コンクリートを用いる場合と同様、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。

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.3，2001
- 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-51，177-190，2000.4
- 3) コンクリート標準示方書（平成8年制定）設計編，土木学会，1996