

重錘落下衝撃を受ける H 形鋼梁の耐衝撃挙動に関する実験的検討

Experimental study on impact resistant behavior of H-shaped steel beam under falling-weight impact loading

室蘭工業大学大学院	学生員	○葛西 勇輝 (Yuki Kasai)
室蘭工業大学	正会員	小室 雅人 (Masato Komuro)
室蘭工業大学	正会員	栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
釧路工業高等専門学校	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

我が国における耐衝撃構造物としては、落石覆道に代表される鉄筋コンクリート (RC) あるいはプレストレストコンクリート (PC) 構造と落石防護網等の鋼 (S) 構造に大きく分類される。前者の RC/PC 構造に関しては、これまで著者らの研究グループを始め、数多くの実験あるいは数値解析が実施されている^{1)~4)}。一方、S 構造に関しては、主に柔構造で衝撃力を受け止めることより、それらを構成するケーブルや金網の変形を含めた全体挙動に着目した検討^{5), 6)}が多く、H 形鋼等の部材単体に対する検討^{7), 8)}は必ずしも多くはない。

このような背景のもと、本研究では鋼部材の耐衝撃挙動に関する基礎資料の収集を目的に、小型H形鋼を用いた梁部材を対象に、重錘落下衝撃実験を実施した。実験は、入力エネルギーを漸増させる繰返し載荷実験と単一載荷実験の2種類を行い、重錘衝撃力、載荷点変位および支点反力等に注目して検討を行った。なお、H形鋼梁の静的耐荷性状を確認するために静載荷実験も実施している。また、鋼製重錘を鋼部材に直接衝突させる場合には、高周波成分が励起されるとともに実験装置にも大きな負荷がかかることより、本研究では、両者の間に天

然ゴム(緩衝材)を設置し、高周波成分を除去している。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、本実験で使用したH形鋼梁(鋼種:SS400, 全長:3,400 mm, 純スパン:3,000 mm)の形状寸法を示している。梁材は、文献8)を参考にH194×150×6×9のH形鋼を使用した。使用鋼材の降伏応力 f_y および引張強度 f_u は、ミルシートによるとそれぞれ $f_y=331$ MPa, $f_u=441$ MPaである。また、支点部近傍の局部座屈を抑制するために、端部より200 mmの位置に板厚6 mmの鉛直補剛材を溶接している。なお、載荷点直下には鉛直補剛材は配置していない。

2.2 実験方法および測定項目

本論文では、H形鋼梁の静的・動的挙動特性を明らかにするために、重錘落下衝撃実験の他に静載荷実験も実施している。表-1には、実験ケースを一覧にして示している。実験は、載荷方法、入力エネルギー E をおよび重錘質量を変化させた全8ケースである。また、表中の試験体名のうち、第1項目は載荷方法(S:静載荷、IC:繰

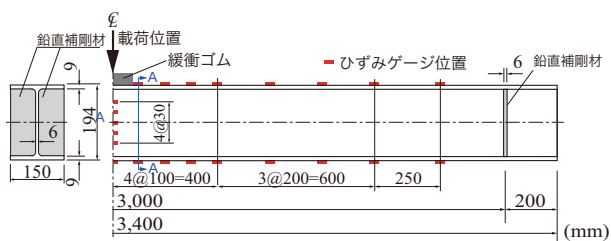


図-1 試験体の形状寸法



写真-1 衝撃実験状況

表-1 実験ケース一覧

試験体名	載荷方法	重錘質量 (kg)	衝突速度 V (m/s)	入力エネルギー E (kJ)	力積 (N·s)
S	静的	-	-	-	-
IC-E15	繰り返し	300	3.2 (3.23)	1.5 (1.56)	949 (968)
IC-E30			4.5 (4.55)	3.0 (3.10)	1,342 (1,364)
IC-E45			5.5 (5.56)	4.5 (4.60)	1,643 (1,667)
IC-E60			6.3 (6.32)	6.0 (5.98)	1,897 (1,895)
IS-E60-3	単一	500	6.3 (6.32)	6.0 (5.98)	1,897 (1,895)
IS-E60-5			4.9 (5.00)	6.0 (6.25)	2,449 (2,500)
IS-I-5			3.8 (3.87)	3.6 (3.75)	1,897 (1,935)

() : 実測値

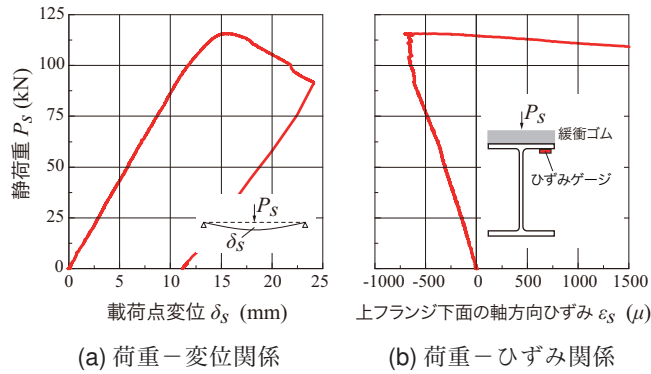


図-2 静載荷実験結果

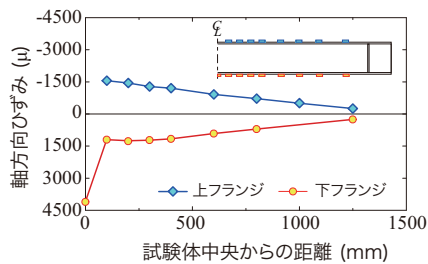


図-3 最大荷重時における軸方向ひずみ分布

り返し衝撃載荷, IS: 単一衝撃載荷), 第2項目は入力エネルギー(E)または力積(I)を示している. なお, 単一載荷の場合には, 第3項目として重錘質量(m)を意味する数字を付している. また, 表中の()内の数値は実測衝突速度, およびその値を用いて算出された入力エネルギーと力積である.

衝撃載荷実験は, 質量 300 kg あるいは 500 kg の鋼製重錘を用いて, 目標入力エネルギー E に対応した所定の高さより, 重錘を梁材のスパン中央に自由落下させることにより行った. 写真-1 には衝撃載荷実験の実験状況について示している. 写真からも分かるように, 支点部の上下縁では鋼製治具を用いて試験体を拘束し, 重錘の衝突による試験体の跳ね上がりを防止している. 治具全体は回転を許容し, ピン支持に近い状態となっている. また, 重錘落下を受ける衝突点近傍には, 緩衝材として天然ゴム (150×150×50 mm) を設置している.

本実験の測定項目は, (1) 重錘内蔵に埋設されたロードセルによる重錘衝撃力 P_i または静載荷荷重 P_s , (2) 非接触式レーザ変位計による梁材のたわみ(以後, 変位) δ , (3) ひずみゲージによるウェブ, フランジ各点の軸方向ひずみ (図-1 参照), および (4) 載荷点近傍の挙動を詳細に把握するための高速度カメラの映像, である. なお, 上フランジの載荷点近傍には, 緩衝ゴムを設置していることより軸方向ひずみの測定は実施していない. また, 緩衝ゴムは衝撃実験ごとに取り替え, 常に新しいものを使用した.

静載荷実験は, 重錘衝撃実験と同一条件となるように, 梁材中央部に緩衝ゴムを設置し, その上面に油圧ジャッキを用いて鉛直荷重を作用させている.

3. 実験結果

3.1 静載荷実験結果

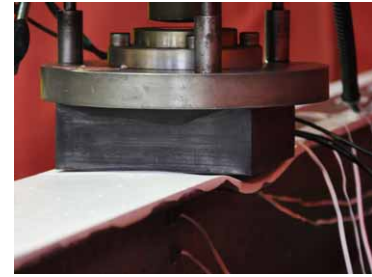
写真-2 上フランジの変形状況
(静載荷実験終了後)

図-2 には, 静載荷実験から得られた荷重 P_s とスパン中央変位 δ_s の関係, および荷重 P_s と載荷点直下における上フランジ下面の軸方向ひずみ ϵ_s の関係を示している.

図より, 変位が $\delta_s < 13$ mm 程度まではほぼ線形に荷重が増大しており, 弾性的な挙動を示していることが分かる. 一方, 最大荷重到達後は荷重が徐々に低下している. これは, 静載荷実験では最大荷重到達後に上フランジの局所変形が発生していることから, 最大荷重値以降の剛性の低下は, 上フランジの局所変形によるものと考えられる. このことは, 図-2 (b) に示す上フランジ下面の軸方向ひずみが, 最大荷重到達後に圧縮側から引張側に推移していることから理解できる. なお, 写真-2 には, 実験終了後における上フランジの変形状況を示しており, フランジ下面が引張となるような局所変形によって終局に至っている.

図-3 には, 最大荷重時における上下フランジの軸方向ひずみ分布を示している. 図より, 軸方向ひずみは支点から載荷点に向かってほぼ線形な分布をしていることが分かる. なお, 載荷点直下の下フランジ下面の軸方向ひずみ ϵ_s が降伏ひずみ ϵ_y ($\approx 1650 \mu$) を超えていることから, 載荷点近傍の下フランジは降伏しているものと考えられる.

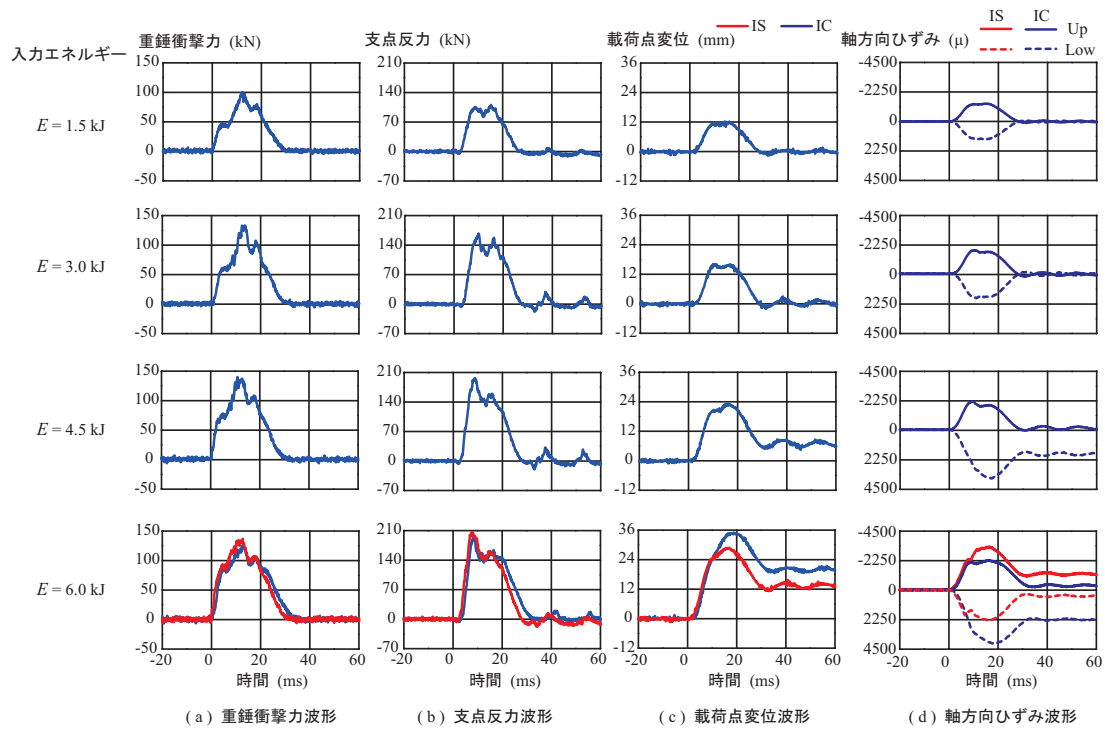
3.2 衝撃載荷実験結果

(1) 各種応答波形

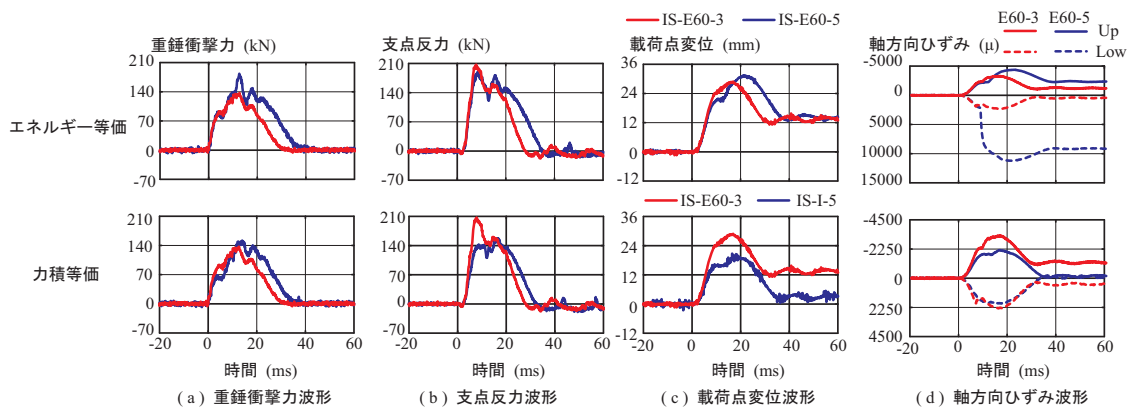
図-4 には, 質量 300 kg の場合の衝撃実験結果より得られた重錘衝撃力 P_i , 支点反力 R_i , 載荷点変位 δ_i , および載荷点近傍の上下フランジ軸方向ひずみ (図-1, A-A 断面参照) ϵ_i の時刻歴応答波形を示している.

(a) 図に示す重錘衝撃波形を見ると, 衝撃力は重錘衝突後, 急激に立ち上がり約 15 ms で最大値を示した後, ほぼ線形に減少している. また, その継続時間を見ると, 入力エネルギーの大きさにかかわらず, ほぼ 30 ms 程度であることが分かる. なお, 入力エネルギー ($E = 6.0$ kJ) の等しい繰り返し載荷(IC-E60)と単一載荷(IS-E60)を比較すると, その波形性状はほぼ一致しているものの, 衝撃力の継続時間は単一載荷の方が若干短いことが分かる. この両者の差は載荷履歴の影響によるものと推察される.

次に, 支点反力波形に着目する(b図参照). 図より, 支点反力は重錘衝撃力の立ち上がりよりも若干遅れて励起している. 一方, 最大支点反力が生じる時刻を見ると, 重錘衝撃力よりも若干早いものの, その継続時間は重錘衝撃力波形とほぼ同じである. また, 同一入力エネルギー



図－4 各種時刻歴応答波形(重錘質量 300 kg の場合)



図－5 各種時刻歴応答波形(入力エネルギーおよび力積を等しくした場合)

の IC/IS-E60 を比較すると、最大支点反力に至るまではほぼ等しいものの、継続時間は重錘衝撃力と同様に単一載荷の方が短い。

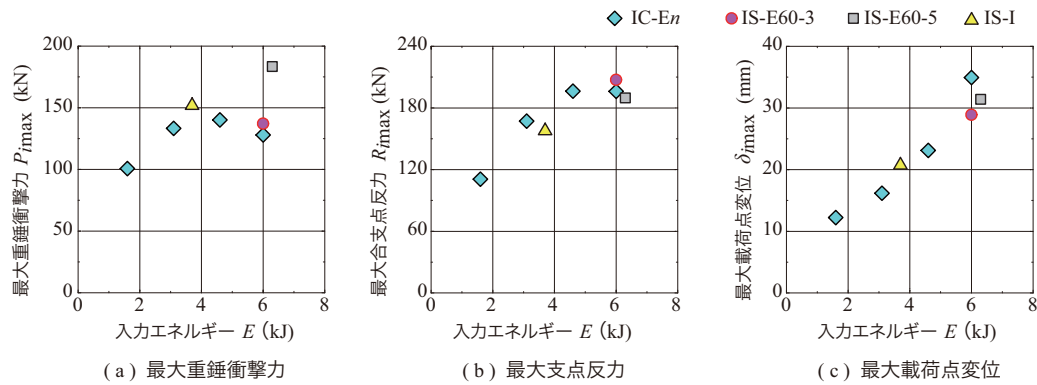
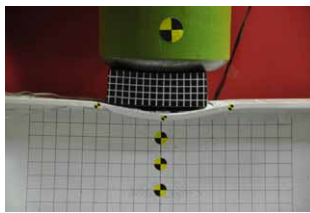
(c) 図に示す載荷点変位波形を見ると、入力エネルギーの増大とともに、載荷点の変位も増加する傾向にあることが分かる。また、入力エネルギーが $E \leq 3 \text{ kJ}$ までは残留変位が生じていないことより、弾性的な挙動を示すことが分かる。一方、入力エネルギーが $E > 4.5 \text{ kJ}$ の場合には残留変位が発生しており、入力エネルギーが大きいほど残留変位も大きくなる傾向にある。同一入力エネルギーの IC/IS-E60 を比較すると、繰り返し載荷履歴の影響のない単一載荷の方が最大変位および残留変位ともに小さくなっている。

(d) 図の軸方向ひずみに着目すると、入力エネルギーが小さい場合 ($E \leq 3 \text{ kJ}$) には、上・下フランジに発生するひずみの最大値は、ほぼ等しく残留ひずみの発生も確認できない。一方、入力エネルギーが $E > 4.5 \text{ kJ}$ の場合には、

下フランジに降伏ひずみ ε_y を超える大きなひずみが発生し残留ひずみが発生しているものの、上フランジにおける残留ひずみはほぼ 0 である。

繰り返し載荷と単一衝撃載荷を比較すると、前者では上・下フランジに残留ひずみが確認されるのに対し、後者では上・下フランジにほぼ対称なひずみが発生している。また、上・下フランジには残留ひずみが発生しているものの、その大きさは繰り返し載荷と比較して小さい。

図－5 には、入力エネルギーもしくは力積が同一の衝撃実験結果を示している。図より、同一入力エネルギーの場合 (IS-E60-3, IS-E60-5) を比較すると、重錘質量の大きい IS-E60-5 の方が質量の小さい IS-E60-3 よりも最大応答値が大きくなる傾向にある。また、荷重の継続時間も長い。一方、力積を等価とする場合には、質量の小さい IS-E60-3 の方が質量の大きい IS-I-5 よりも最大応答値が大きくなる。なお、重錘質量の大きい IS-I-5 の場合には残留変位が非常に小さく、上下フランジのひずみ分布も上下でほぼ

図-6 入力エネルギー E と各種最大応答値の関係写真-3 上フランジの変形状況
(衝撃载荷実験終了後)

対称であることより、弾性応答に近いものと推察される。

(2) 入力エネルギーと各種応答値の関係

図-6には、入力エネルギー E と実験結果から得られた最大重錘衝撃力 $P_{i\max}$ 、最大支点反力 $R_{i\max}$ 、最大変位 $\delta_{i\max}$ の関係を示している。

(a) 図より、最大重錘衝撃力 $P_{i\max}$ は、入力エネルギー E の増大とともに増加する傾向が見られる。ただし、载荷履歴を有し部材の一部が塑性化している場合(IC-E45/E60)には、単一载荷と比較して小さく評価されることが分かる。

(b) 図の最大合支点反力 $R_{i\max}$ に関しては、最大重錘衝撃力と同様に入力エネルギーに比例して増加する傾向が確認される。

(c) 図に示す最大変位 $\delta_{i\max}$ に関しては、入力エネルギーに対してほぼ線形に増加することが分かる。なお、IC-E60の場合には最大変位が若干過大に評価されているが、これは载荷履歴の影響によって梁部材の一部が塑性化していることに起因しているものと考えられる。

(3) 変形状況

写真-3には、衝撃実験終了後における梁材の変形状況の一例として、IC-E60の結果を示している。写真より、衝撃载荷の場合にも静载荷実験と同様に、上フランジの局所変形によって終局に至っていることが確認される。

4. まとめ

本研究では、H形鋼梁の耐衝撃挙動と特性を明らかにすることを目的として、重錘落下衝撃実験を実施した。本論文で得られた結果を整理すると、以下のようになる。

- 1) 入力エネルギーと最大載荷点変位にはほぼ線形の関係が成立する。
- 2) 静的・衝撃荷重にかかわらず、本試験体は上フランジの局所変形によって終局に至る。

今後は、詳細な有限要素モデルを用いた弾塑性衝撃応答解析を実施し、数値解析結果と実験結果を比較する予定である。

謝辞

本研究で使用した緩衝ゴムは、シバタ工業株式会社からご提供頂いた。また、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C) (課題番号 25420566) の援助を受けた。衝撃実験の実施にあたっては、室蘭工業大学構造力学研究室の学生諸君に多大なるご協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 今野久志, 岸 徳光, 池田憲二, 竹本伸一: 各種大型 PRC 桁の耐衝撃挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, 土木学会, 46A, 1819-1830, 2000.3.
- 2) 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, 53A, 1251-1260, 2007.3.
- 3) 川瀬良司, 岡田慎哉, 鈴木健太郎, 岸 徳光: 敷砂緩衝工を設置した RC 製アーチ構造の耐衝撃挙動に関する実規模重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, 土木学会, 55A, 1313-1326, 2009.3.
- 4) N. Kishi, S. Okada, H. Konno: Numerical impact response analysis of rockfall protection galleries, *J. Struct. Eng. Int.*, IABSE, 19(3), 313-320, 2009.8.
- 5) 原本大輔, 香月 智, 田代元司: 円柱形要素を用いた個別要素法による落石防護網の衝撃応答解析, 土木学会論文集 A, Vol. 65, No. 2, pp. 536-553, 2009.
- 6) 山口 悟, 今野久志, 西 弘明, 佐々木哲也, 小室雅人: 従来型ポケット式落石防護網の実規模重錘衝突実験, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 21, pp. 104-110, 2013.
- 7) 河西良幸, 澤本佳和: 重錘衝突を受ける鋼梁の実験前予測解析と実験後シミュレーション解析, 前橋工科大学研究紀要, 7, 79-84, 2003.3.
- 8) 衝撃実験・解析の基礎と応用, 構造工学シリーズ 15, 土木学会構造工学委員会衝撃実験解析法の標準化に関する研究小委員会, 土木学会, 2004.5.