

重錘落下衝撃を受けるH形鋼梁の耐衝撃挙動

メタデータ	言語: jpn 出版者: 日本鋼構造協会 公開日: 2019-03-04 キーワード (Ja): H形鋼, 耐衝撃挙動, 重錘落下衝撃実験 キーワード (En): H-shaped steel, impact resistant behavior, falling-weight impact loading test 作成者: 葛西, 勇輝, 小室, 雅人, 栗橋, 祐介, 岸, 徳光 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009708

重錘落下衝撃を受ける H 形鋼梁の耐衝撃挙動

Impact resistant behavior of H-shaped steel beam under falling-weight impact loading

○葛西 勇輝* 小室 雅人** 栗橋 祐介*** 岸 徳光****

Yuki KASAI Masato KOMURO Yusuke KURIHASHI Norimitsu KISHI

ABSTRACT In this paper, in order to develop more understanding of the impact resistant behavior of steel structures, static and falling-weight impact tests of the small-scale H-shaped steel beams were conducted with varying impact velocity of the weight. Here, to restrain occurrence of the high-frequency components in dynamic response of the beam under impact loading, a plain elastomeric rubber pad was placed on the impacted area of the beam. From this study, following results are obtained: (1) maximum vertical displacement at the loading point was linearly increased with an increment of the input energy; and (2) all beams considered here were failed by the impacted area of the upper flange being locally deformed regardless of loading condition.

Keywords: H 形鋼, 耐衝撃挙動, 重錘落下衝撃実験

H-shaped steel, impact resistant behavior, falling-weight impact loading test

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) 構造と落石防護網や防護柵等の鋼 (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、数多くの研究者によって実験あるいは数値解析の研究が実施されている^{1)~5)}。一方、S 構造に関しては、主に柔構造的に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^{6)~8)}が多く、H 形鋼等の部材単体に対する検討^{9), 10)}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り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。また、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。なお、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、載荷点部梁上

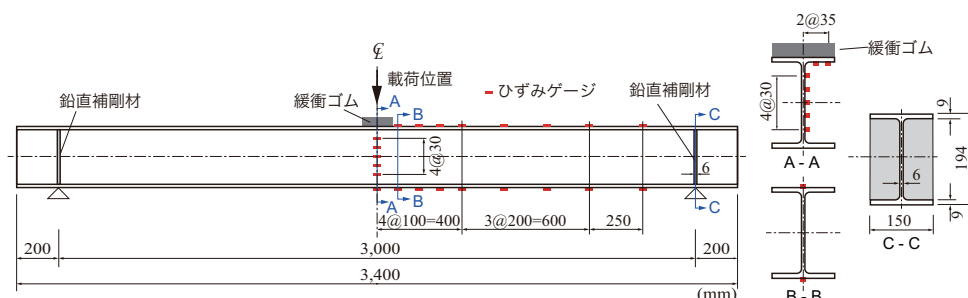


図 1 試験体の形状寸法

* 室蘭工業大学大学院 工学研究科 環境創生工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

** 博 (工) 室蘭工業大学 准教授 大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1) 第 2 種正会員

*** 博 (工) 室蘭工業大学 講師 大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

**** 工博 釧路工業高等専門学校 校長 (〒084-0916 釧路市大楽毛西 2 丁目 32-1) 第 2 種正会員

表 1 実験ケース一覧

試験名	载荷方法	衝突速度 V (m/s)	入力エネルギー E (kJ)
S	静的	-	-
IC-E15	繰り返し	3.2 (3.23)	1.5 (1.56)
IC-E30		4.5 (4.55)	3.0 (3.10)
IC-E45		5.5 (5.56)	4.5 (4.60)
IC-E60		6.3 (6.32)	6.0 (5.98)
IS-E60	単一	6.3 (6.32)	6.0 (5.98)

(): 実測値

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

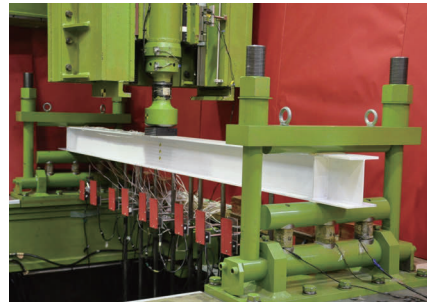
2.1 試験体概要

本研究では、重錘落下衝撃を受ける部材の動的応答に関する基礎資料の収集を目的としていることより、最も単純な構成部材の一つである梁材を対象に衝撃実験を実施した。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。なお、梁材の寸法に関しては、既往の研究成果¹⁰⁾を参考に H194×150×6×9 の H 形鋼を使用した。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、本研究では、载荷点近傍部における H 形鋼の耐衝撃挙動を詳細に検討することとして、载荷点直下部には鉛直補剛材を配置していない。

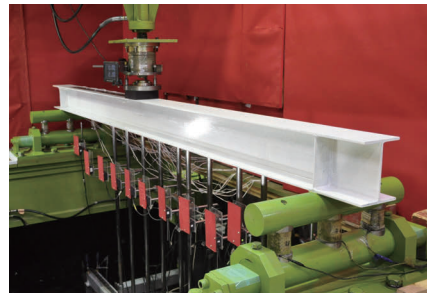
2.2 実験方法および測定項目

本実験では全 3 体の試験体を対象に、(1) 静载荷実験、(2) 初期入力エネルギーおよび増分入力エネルギーを 1.5 kJ とし、それらを漸増させて繰り返し载荷する漸増繰り返し衝撃载荷実験(以後、単に繰り返し衝撃载荷実験)、および(3) 繰り返し载荷実験における最終入力エネルギーと同一条件で一度だけ重錘を落下させる単一衝撃载荷実験を実施した。

表 1 には、実験ケースを一覧にして示している。実験は、载荷方法、入力エネルギーを変化させた全 6 ケースである。また、表中の試験名のうち、第 1 項目は载荷方法(S: 静载荷, IC: 繰り返し衝撃载荷, IS: 単一衝撃载荷)、第 2 項目は入力エネルギー(E)を示している。なお、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である。



(a) 衝撃载荷実験状況



(b) 静载荷実験状況

写真 1 実験状況

表 2 鋼材の材料物性値

	鋼種	降伏応力 f_y (MPa)	引張強さ f_u (MPa)
フランジ	SS400	312	436
ウェブ		392	469

衝撃载荷実験は、質量 300 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部に自由落下させることにより行った。写真 1 (a) には衝撃载荷実験の状況を示している。写真に示すように、両支点部の上・下縁では鋼製治具を用いて試験体を拘束し、重錘衝突による試験体の跳ね上がりを防止している。なお、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、重錘落下を受ける上フランジ部には、緩衝材として天然ゴム(150×150×50 mm)を設置している。なお、実験に使用した緩衝材は、硬度 65 の天然ゴムである。

静载荷実験は、写真 1 (b) に示すように、重錘衝撃载荷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。なお、静载荷実験の場合には衝撃载荷実験の場合と異なり、跳ね上がり防止治具は取り付けしていない。

本実験の測定項目は、(1) 重錘に埋設されたロー

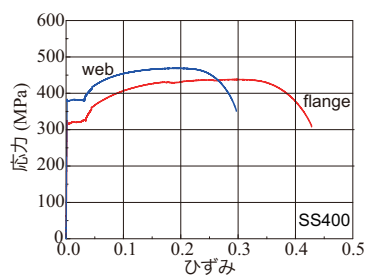


図2 応力-ひずみ関係 (鋼材)

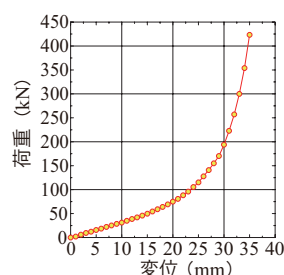
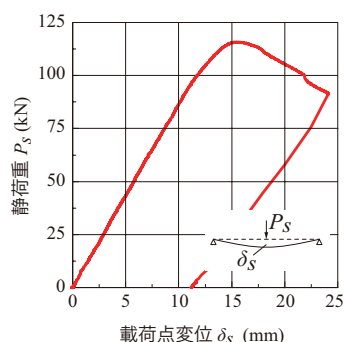
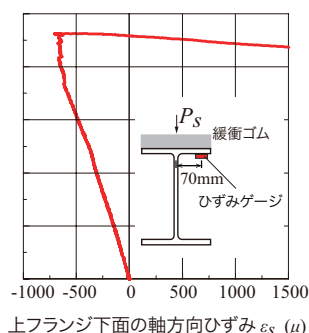


図3 荷重-変位関係 (天然ゴム)



(a) 荷重-スパン中央点下フランジ部
変位関係



(b) 荷重-スパン中央点上フランジ下
縁端部ひずみ関係

図4 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)

ドセルによる重錘衝撃力 P_i または油圧ジャッキ先端に取り付けたロードセルによる静載荷荷重 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) 支点治具に組み込まれたロードセルによる支点反力 R , (4) 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 (5) 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, 上フランジのスパン中央部には緩衝ゴムを設置していることより, ひずみゲージの貼り付けは行っていない. また, 緩衝ゴムは各衝撃試験ごとに取り替え, 常に新しいものを使用した.

表2 および図2には, 板引張試験より得られた鋼材の材料物性値および応力-ひずみ関係を示している. また, 図3には, 別途実施した静的圧縮試験から得られた緩衝ゴムの荷重-変位関係を示している.

3. 実験結果

3.1 静載荷実験結果

図4には, 静載荷実験から得られた荷重 P_s とスパン中央点下フランジ中央部変位 δ_s の関係, およ

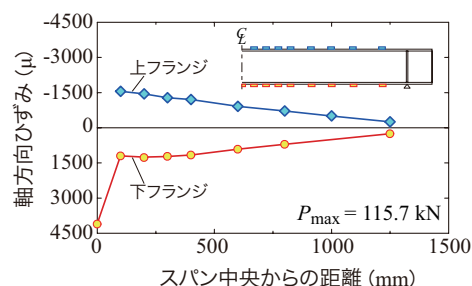


図5 最大荷重時における梁の軸方向ひずみ
分布

び荷重 P_s とスパン中央点上フランジ下縁端部の軸方向ひずみ ϵ_s の関係を示している.

図4(a)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, 静載荷実験時に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, 最大荷重到達以降の剛性低下は, 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4(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. 写真2には, 実験終了後の上フランジの変形状況を示しており,

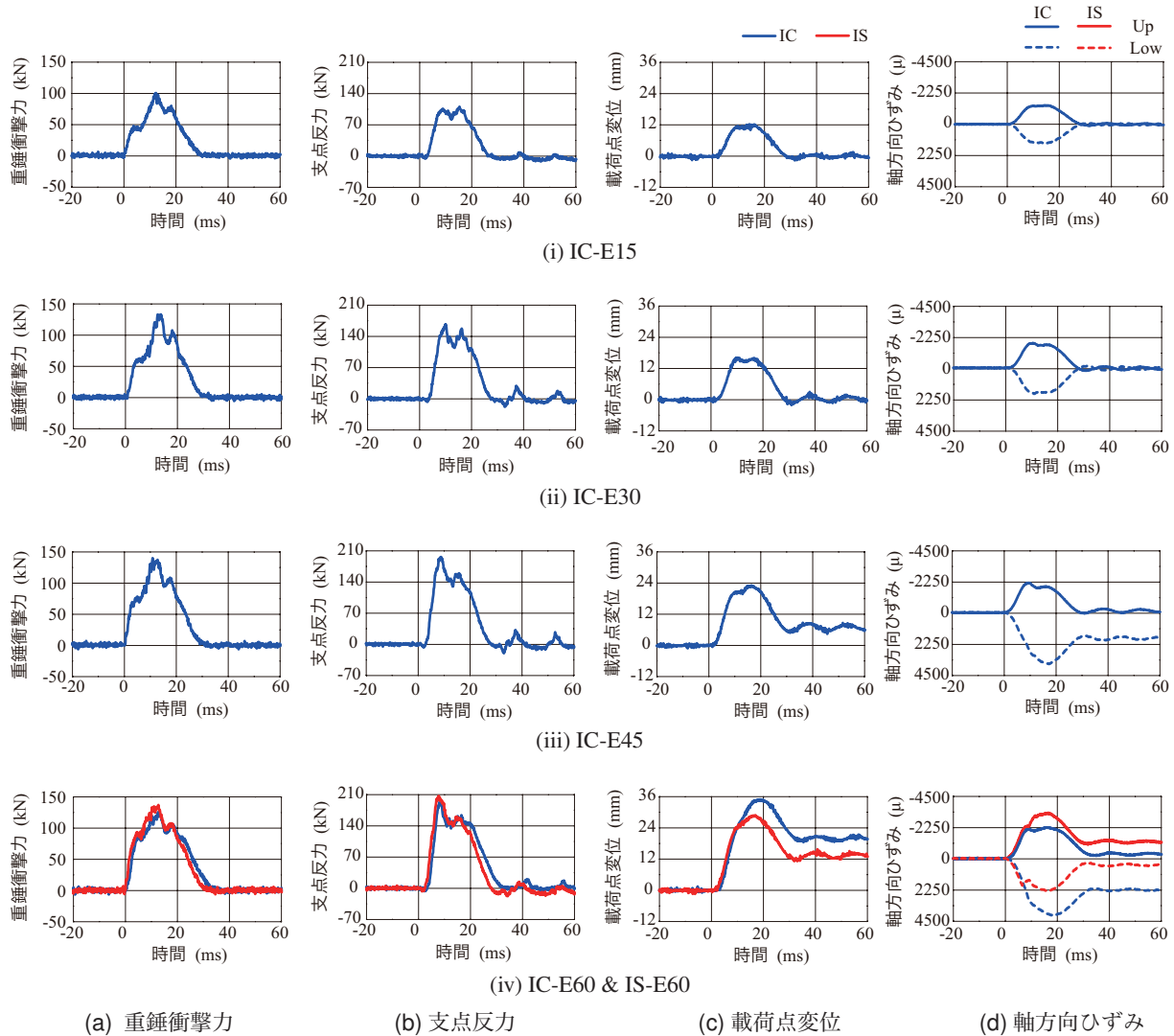


図6 各種時刻歴応答波形

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ことが分かる。なお、ウェブに関しても、1~2 mm 程度の面外変形が確認されている。

図5には、最大荷重時における上フランジ(上縁中央部)と下フランジ(下縁中央部)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縁の軸方向ひずみ ε_s が降伏ひずみ ε_y ($\approx 1,560 \mu$) 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ことが推察される。

3.2 衝撃載荷実験結果

3.2.1 各種応答波形

図6には、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。なお、支点反力は両支点反力の合計値である。

(a) 図に示す重錘衝撃力波形を見ると、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 ($E = 6.0 \text{ kJ}$) 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

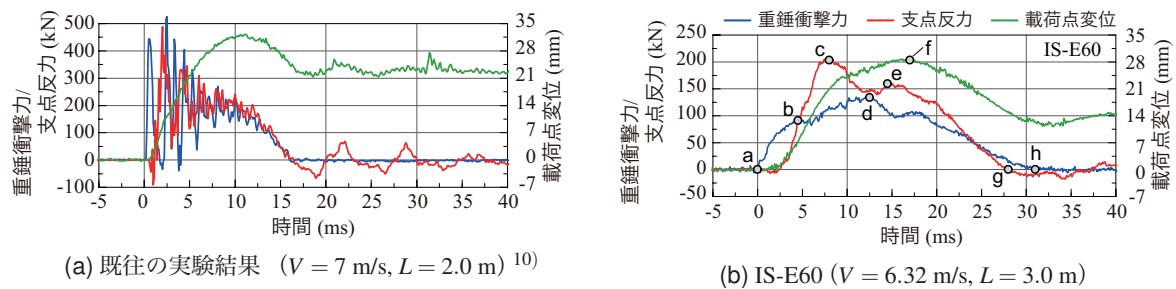


図 7 重錘衝撃力、支点反力および载荷点波形に関する既往の実験結果との比較

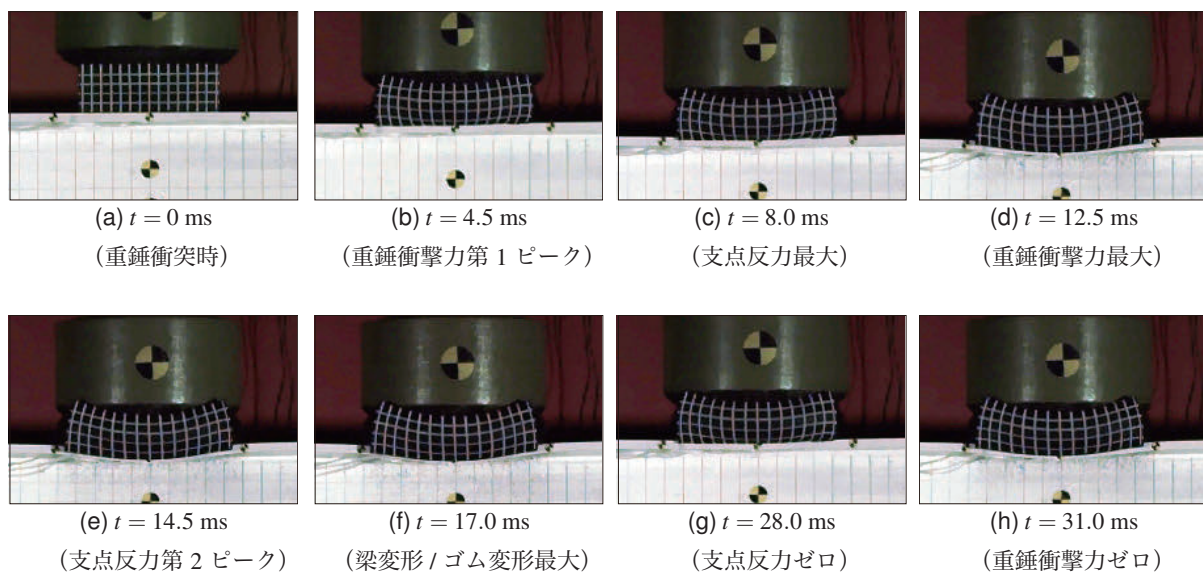


図 8 緩衝ゴムの変形状況 (IS-E60)

時間は単一载荷の方が若干短いことが分かる。この両者の差は载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(図 6 (b) 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。同一入力エネルギーの 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载荷の方が短い。また、最大支点反力と最大重錘衝撃力を比較すると、前者の方が後者よりも大きく示されている。このような現象は、ゴム緩衝材を設置していない既往の研究結果(図 7 (a) 参照)¹⁰⁾とは異なる傾向を示しているが、その要因については現時点では未解明であり、今後有限要素解析による数値解析的な検

討も踏まえて詳細に分析を行う必要がある。

なお、図 7 (a) に示すゴム緩衝材を設置していない場合には、純スパン長 (L) や衝突速度 (V) が異なることより、図 7 (b) に示す本実験結果と直接的な比較はできないものの、重錘衝突時に衝撃力が励起され、若干遅れて支点反力が生じる現象は本実験結果と同様である。一方、ゴム緩衝材を設置していない場合の衝撃力および支点反力波形は、ともに高周波成分を有する正弦半波状を呈し、かつその継続時間は 15 ms 程度であり、本実験結果とその波形性状は大きく異なることが確認される。

図 6 (c) に示す载荷点変位波形を見ると、入力エネルギーの増大とともに、载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、弾性的な挙動を示していることが分かる。一方、入力エネルギーが $E \geq 4.5 \text{ kJ}$ の場合には残留変位が

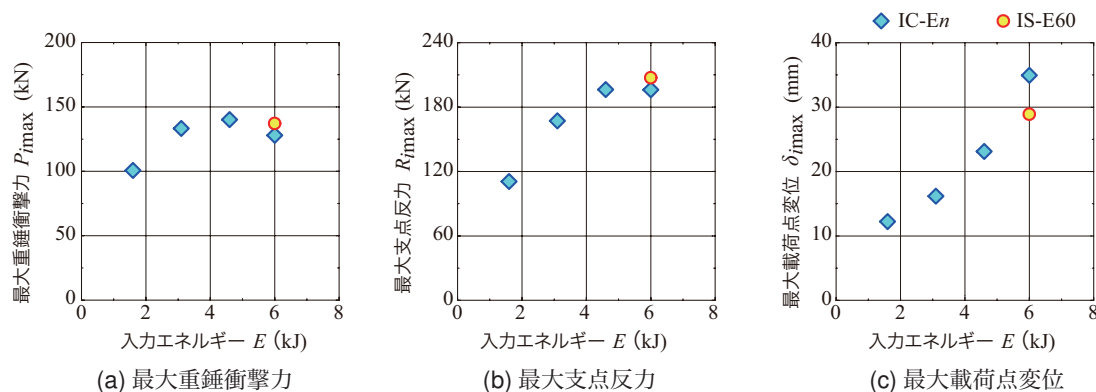


図9 入力エネルギー E と各種最大応答値の関係

発生しており、入力エネルギーが大きいほど残留変形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、繰り返し载荷履歴の影響のない単一载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 ($E \leq 3$ 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 $E \geq 4.5$ 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。

繰り返し载荷と単一衝撃载荷を比較すると、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载荷と比較して小さい。

3.2.2 緩衝ゴムおよび試験体の変形状況

図8には、緩衝ゴムおよび試験体の変形状況を重錘衝突後から時系列的に示している。図は IS-E60 の結果であり、時間は図7(b)に示す a~h に対応している。両図より、重錘衝突後、緩衝ゴムは徐々に変形し、 $t = 8.0$ ms で最大支点反力が生じ、若干遅れて重錘衝撃力が最大値を迎えることが確認される。その後、 $t = 17.0$ ms で最大変位が生じるとともに除荷状態に入り、 $t = 31.0$ ms で重錘衝撃力が 0 となっている。

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。なお、ウェブに関しては、静

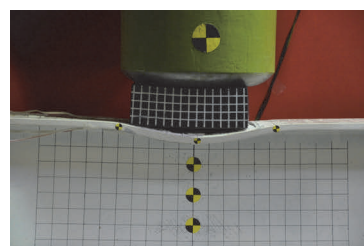


写真3 実験終了後の変形状況 (IC-E60)

载荷実験と同様に 1~2 mm 程度の面外変形が確認されている。

3.2.3 入力エネルギーと各種応答値の関係

図9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_{max} 、最大支点反力 R_{max} 、最大载荷点変位 δ_{max} の関係を示している。

(a) 図より、最大重錘衝撃力 P_{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、载荷履歴を有し上フランジの载荷点部が塑性変形している場合 (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) 図の最大支点反力 R_{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) 図に示す最大载荷点変位 δ_{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 IS-E60 の場合に比して大きい。これは载荷履歴の影響によって载荷点部が局所的に変形し、梁の中央断面部曲げ剛性が小さく評価されることに起因しているものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、H 形鋼梁の耐衝撃挙動に関する基礎

資料の収集を目的として、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) 緩衝ゴムを重錘落下位置に設置した場合には、最大重錘衝撃力よりも最大支点反力が大きくなる。ただし、この傾向は緩衝ゴムを設置していない既往の研究成果と異なることから、その要因については今後詳細な分析が必要である。
- 2) 最大重錘衝撃力および最大支点反力は、上フランジの載荷点部が大きく塑性変形に至る前までは入力エネルギーの増加とともに大きくなる。また、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。
- 3) 静載荷および衝撃載荷にかかわらず、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) の助成を受けた。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, Vol. 46A, pp. 1819-1830, 2000.
- 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, Vol. 53A, pp. 1251-1260, 2007.
- 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, Vol. 55A, pp. 1313-1326, 2009.
- 4) N. Kishi, S. Okada, H. Konno: Numerical impact response analysis of rockfall protection galleries, *J. Struct. Eng. Int.*, IABSE, 19(3), pp. 313-320, 2009.
- 5) 松林 卓, 岩波光保, 川端雄一郎, 横田 弘: 繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート版の押抜きせん断抵抗性能評価に関する実験的研究, 構造工学論文集, 土木学会, 58A, pp. 967-980, 2012.
- 6) 原木大輔, 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.
- 7) 田島与典, 前川幸次, 岩崎征夫, 河上康太: 実物大重錘衝突実験による緩衝装置を用いたポケット式落石防護網の評価, 構造工学論文集, Vol. 56A, pp. 1088-1100, 2010.
- 8) 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.
- 9) 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, Vol. 7, pp. 79-84, 2003.
- 10) 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, 第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 第 II 編委員会経過報告, pp.99-111, 2000.