

## スパン長の異なる H 形鋼梁の重錘落下衝撃実験

Falling-weight impact loading test of H-shaped steel beams with various span length

小室雅人<sup>†</sup>, 栗橋祐介<sup>\*</sup>, 岸徳光<sup>\*\*</sup>

Masato Komuro, Yusuke Kurihashi, Norimitsu Kishi

<sup>†</sup>博(工), 室蘭工業大学准教授, 大学院工学研究科 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27 番 1 号)

<sup>\*</sup>博(工), 室蘭工業大学講師, 大学院工学研究科 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27 番 1 号)

<sup>\*\*</sup>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)

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 with different span length were conducted with varying impact velocity and mass of the weight. Here, to control 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, the following results were 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 the loading condition.

*Key Words* : H-shaped steel, impact resistant behavior, falling-weight impact loading test, span length

キーワード : H 形鋼, 耐衝撃挙動, 重錘落下衝撃実験, スパン長

### 1. はじめに

我が国における耐衝撃用途構造物としては、原子炉格納容器の他、落石覆道や落石防護擁壁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などの鋼(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、小型の梁や版部材から実規模レベルの構造物に至るまで、数多くの研究者によって実験的あるいは数値解析的研究が実施されている<sup>1)~7)</sup>。

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などの変形を含めた全体挙動に着目した検討<sup>8)~14)</sup>が主であり、H形鋼や鋼管などの部材単体に対する検討<sup>15)~18)</sup>は必ずしも多くはない。Hoと梶谷<sup>17)</sup>は、鋼製落石覆道の頂版を模擬した敷砂を有するH形鋼梁の重錘落下衝撃実験を実施し、衝撃荷重の継続時間と鋼梁の固有振動

周期の関係を用いた動的応答倍率やエネルギー伝達率の計算式を定式化している。また、石井ら<sup>18)</sup>は鋼製砂防施設を念頭に鋼製単純梁に丸太や巨礫を衝突させる衝撃実験を実施し、累積衝突エネルギーと累積塑性変位には比例関係にあることなどを明らかにしているものの、衝撃荷重を受ける鋼部材単体の動的挙動特性に関してはまだ不明な点も多い。

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、純スパン長の異なる小型H形鋼を用いた梁部材を対象に、重錘落下衝撃荷重実験を実施した。実験は、入力エネルギーを漸増させる繰り返し衝撃荷重実験と単一衝撃荷重実験の2種類を行い、重錘衝撃力、載荷点変位および支点反力などに着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、載荷点部梁上に緩衝材(天然ゴム)を設置し、高周波成分を除去することとした。

<sup>†</sup> 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: komuro@news3.ce.muroran-it.ac.jp

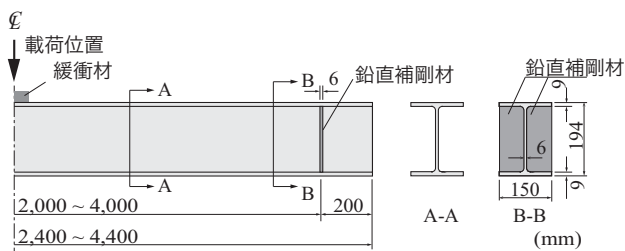


図-1 試験体の形状寸法

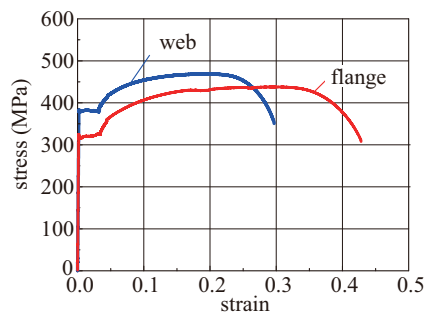


図-2 応力-ひずみ関係 (SS400)

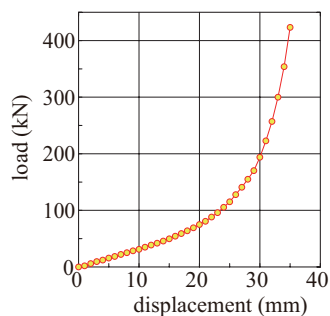


図-3 荷重-変位関係 (天然ゴム)

## 2. 実験概要

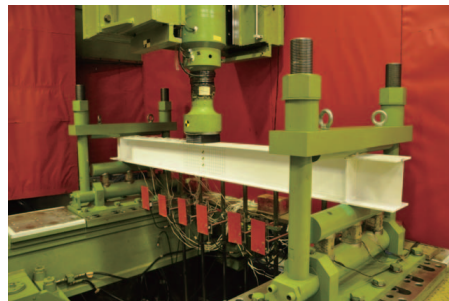
### 2.1 試験体概要

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荷重実験を実施した。図-1には、本実験で使用したH形鋼梁(鋼種:SS400)の形状寸法を示している。純スパン長 $L$ の異なる3種類( $L=2, 3, 4$  m)である。なお、梁材の断面寸法に関しては、既往の研究結果<sup>15)</sup>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、荷重点近傍部におけるH形鋼の耐衝撃挙動を詳細に検討することとして、荷重点直下部には鉛直補剛材を配置していない。

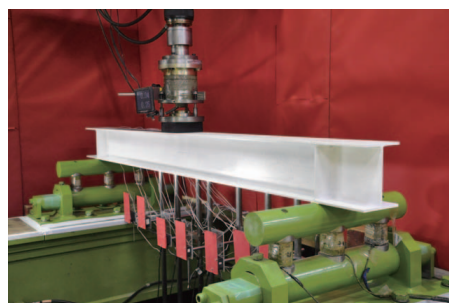
表-1および図-2には、別途実施した引張試験結果より得られた使用鋼材の材料物性値(降伏応力と引張強さ)および応力-ひずみ関係を示している。また、図-3

表-1 鋼材の材料物性値

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



(a) 衝撃荷重実験  
(重錘質量  $m = 500$  kg の場合)



(b) 静荷重実験

写真-1 実験状況 ( $L = 2$  m の場合)

には、別途実施した静的圧縮試験から得られた天然ゴムの荷重-変位関係を示している。なお、圧縮試験に使用した供試体の寸法は、本研究に使用した天然ゴムと同一寸法(150×150×50 mm)である。

### 2.2 実験方法および測定項目

本実験では、スパン長の異なる各5体の試験体を対象に、(1)静荷重実験、(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荷重する漸増繰り返し衝撃荷重実験(以後、単に繰り返し衝撃荷重実験)、および(3)繰り返し衝撃荷重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荷重実験を実施した。また、(3)の単一衝撃荷重実験に関しては、最終入力エネルギーおよびその条件下での入力運動量が等価となるように重錘質量を500 kgに変更し衝突速度を変化させた2種類の実験も実施している。

表-2には、実験ケースを一覧にして示している。表中の試験名のうち、第1項目は純スパン長( $L_n$ )、第2項目は荷重方法(S:静荷重、IC:繰り返し衝撃荷重荷、IS:単一衝撃荷重荷)、第3項目は入力エネルギー

表-2 実験ケース一覧

試験名	载荷方法	重錘質量 $m$ (kg)	実測衝突速度 $V$ (m/s)	実測入力エネルギー $E$ (kJ)	実測入力運動量 $p$ (kN·s)	力積* $I_e$ (kN·s)
(a) $L = 2$ m						
L2-S	静的	-	-	-	-	-
L2-IC-E15-3	繰り返し	300	3.21	1.54	0.96	1.27
L2-IC-E30-3			4.55	3.10	1.36	1.76
L2-IC-E45-3			5.50	4.55	1.65	2.10
L2-IC-E60-3			6.32	5.98	1.90	2.23
L2-IS-E60-3 / IS-p-3	単一	500	6.32	5.98	1.90	2.23
L2-IS-E60-5			4.96	6.15	2.48	3.21
L2-IS-p-5			3.87	3.75	1.94	2.79
(b) $L = 3$ m						
L3-S	静的	-	-	-	-	-
L3-IC-E15-3	繰り返し	300	3.23	1.56	0.97	1.48
L3-IC-E30-3			4.55	3.10	1.36	1.92
L3-IC-E45-3			5.56	4.63	1.67	2.19
L3-IC-E60-3			6.32	5.98	1.90	2.38
L3-IS-E60-3 / IS-p-3	単一	500	6.32	5.98	1.90	2.38
L3-IS-E60-5			5.00	6.25	2.50	3.46
L3-IS-p-5			3.87	3.75	1.94	2.95
(c) $L = 4$ m						
L4-S	静的	-	-	-	-	-
L4-IC-E15-3	繰り返し	300	3.21	1.54	0.96	1.51
L4-IC-E30-3			4.55	3.10	1.36	2.02
L4-IC-E45-3			5.50	4.55	1.65	2.23
L4-IS-E45-3 / IS-p-3			5.56	4.63	1.67	2.33
L4-IS-E45-5	単一	500	4.35	4.73	2.17	3.36
L4-IS-p-5			3.35	2.81	1.68	2.88

\*力積は後述の重錘衝撃力波形から算出

( $E \times 10$ ) または入力運動量 ( $p$ ), 第4項目は重錘質量 (3: 300 kg, 5: 500 kg) を示している。表中の入力エネルギーあるいは入力運動量は実測衝突速度を用いて算出された値である。また、衝撃荷重入力後の力積 ( $I_e$ ) は、衝撃荷重実験より得られた重錘衝撃力波形 (後述, 図-5 他) から算出した値である。なお、純スパン長が  $L = 4$  m の場合に関しては、他と異なり最終入力エネルギーが 4.5 kJ となっている。

衝撃荷重実験は、質量 300 kg および 500 kg の鋼製重錘を用いて、目標入力エネルギー  $E$  あるいは運動量  $p$  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) には純スパン  $L = 2$  m の場合における衝撃荷重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) を両面テープを用いて設置している。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、衝撃荷重実験と同一条件となるように梁材中央部に緩衝材を

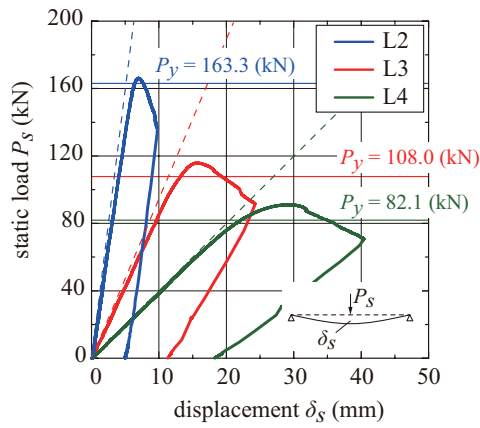
設置し、その上面に油圧ジャッキを用いて鉛直荷重を作用させている。なお、静载荷実験の場合には衝撃荷重実験の場合と異なり、跳ね上がり防止治具は取り付けしていない。

本実験の測定項目は、(1) 重錘に組み込まれたロー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載荷荷重  $P_s$ , (2) 非接触型レーザ式変位計による梁材のたわみ (以後、変位)  $\delta$ , (3) 支点治具に組み込まれたロードセルによる合支点反力 (以後、単に支点反力)  $R$ , (4) 光電センサーによる重錘衝突速度  $V$ , 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映像, である。なお、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。また、実験終了後における緩衝ゴムの塑性変形は目視では確認されていない。

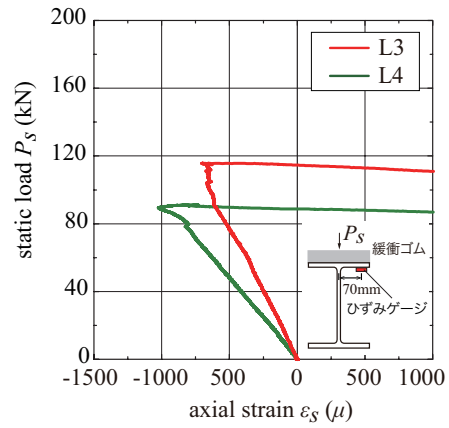
### 3. 実験結果

#### 3.1 静载荷実験結果

図-4 には、静载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  $\delta_s$  の関係、および荷重  $P_s$  とスパン中央点上フランジ下縁端部の軸方向ひずみ  $\epsilon_s$  の関係を示している。また、図中には曲げ変形のみを考



(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, L3-S)

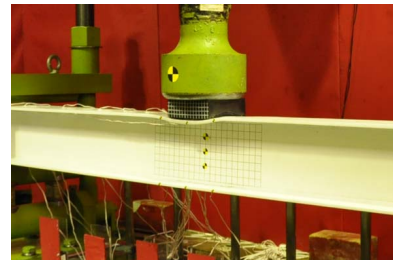


写真-3 上フランジの変形状況  
(衝撃荷重載荷実験終了後, L2-IS-E60-5)

慮した弾性梁理論による理論解(点線), および板引張試験より得られた降伏応力から算出される降伏荷重(細線)  $P_y$  も示している。

図-4(a)より, いずれのスパン長においても, 変位の増大とともに荷重がほぼ線形的に増大し, 降伏荷重  $P_y$  近傍から剛性勾配が徐々に低下して最大荷重に到達している。最大荷重到達後は, 上フランジに局部座屈が発生し, 剛性の低下とともに荷重も徐々に除荷され終局に至っている。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。なお, L2-S試験体に関しては, ひずみゲージの不具合によりデータが得られていない。なお, スパン長  $L$  の短い梁の剛性低下が顕著となっている。また, 実験結果の初期剛性は,  $L=4\text{m}$  の場合には理論解とほぼ一致しているのに対し,  $L \leq 3\text{m}$  では理論解よりも小さい。これは, スパン長  $L$  が短い場合の実験結果には, せん断変形成分が含まれているためと推察される。なお, 最大荷重値  $P_{s,max}$  は, スパン長  $L$  が短い場合ほど大きく, スパン長が短い梁から順に, それぞれ  $166.1\text{ kN}$ ,  $115.8\text{ kN}$ ,  $91.1\text{ kN}$  となっている。

写真-2には,  $L=3\text{m}$  の試験体(L3-S)を例に実験終了後の上フランジの変形状況を示している。写真より, 上フランジ下面が引張となるような局所変形によって終

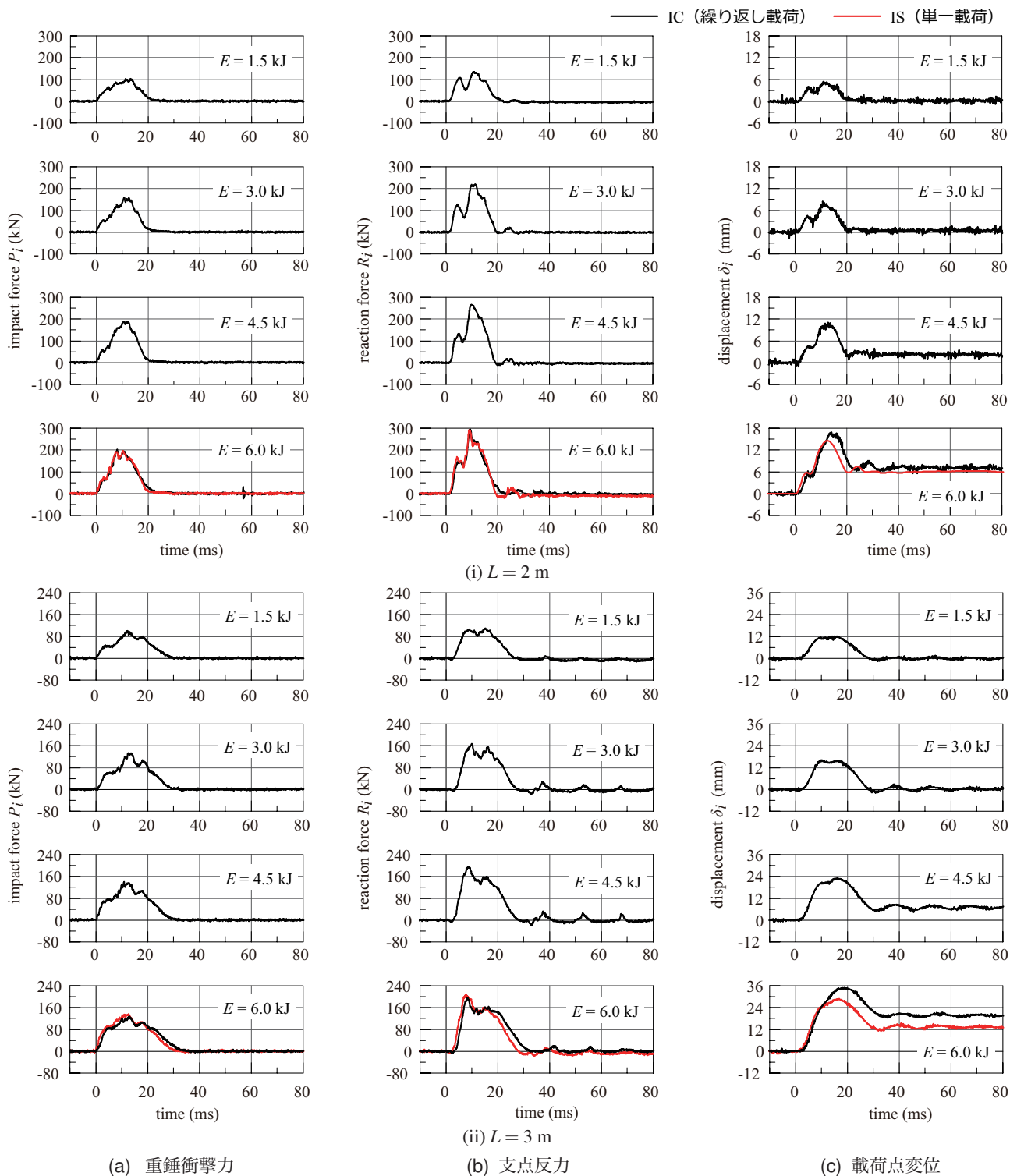
局に至っていることが分かる。

### 3.2 衝撃載荷実験結果

#### (1) 各種応答波形および載荷履歴の影響

図-5には, 純スパン長  $L=2, 3$  および  $4\text{m}$  における繰り返す衝撃荷重載荷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  $\delta_i$  の時刻歴応答波形を示しており, 図中のエネルギー  $E$  は目標入力エネルギーを示している。また, 最終入力エネルギーに関しては, 単一衝撃荷重載荷実験結果も併せて示している。なお, 純スパン長  $L=2, 3\text{m}$  の場合には,  $E=6.0\text{ kJ}$  載荷において写真-3に示すように静載荷実験と同様に上フランジに局部変形が生じて終局に至っている。一方, 純スパン長  $L=4\text{m}$  の場合には,  $E=4.5\text{ kJ}$  載荷において, 梁材に横倒れ座屈に類似した面外変形が生じたため, 他の試験体よりも1段階低い入力エネルギーで実験を終了している。

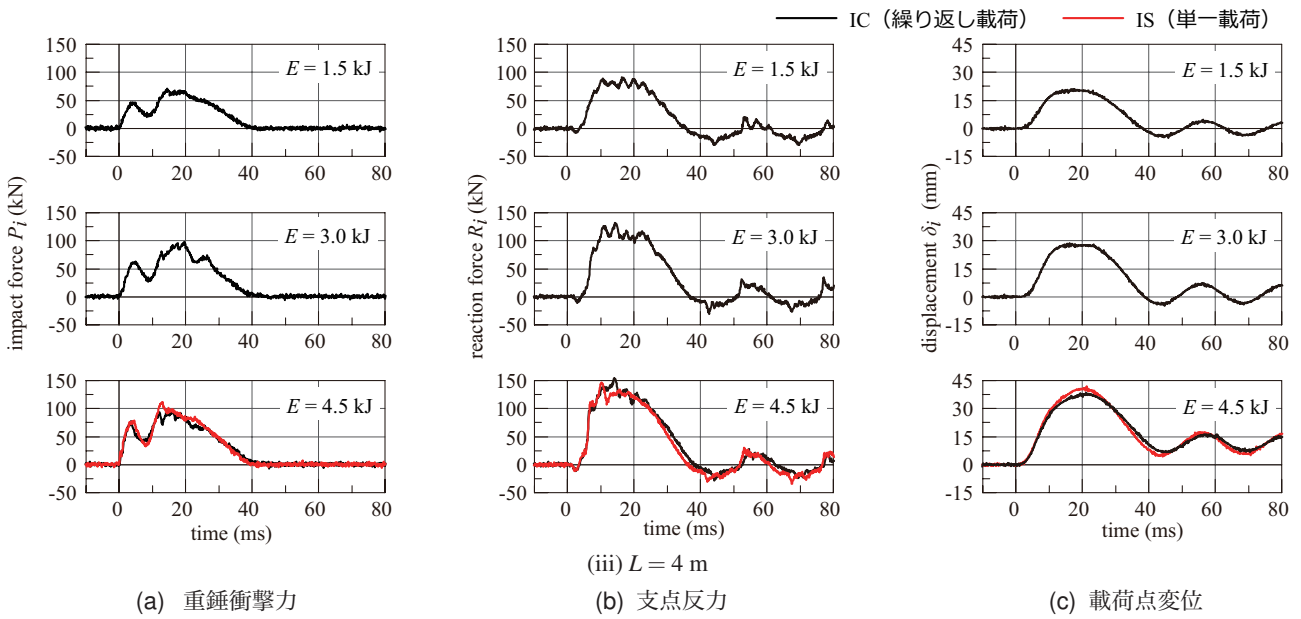
(a)図に示す重錘衝撃力波形を見ると, スパン長  $L$  にかかわらず, 入力エネルギー  $E$  の増大とともに重錘衝撃力は増加する傾向にあることが分かる。一方, その継続時間は, 入力エネルギー  $E$  の大きさにかかわらずほぼ一定となっている。同一入力エネルギーにおける最大重錘衝撃力を比較すると, スパン長が短い場合ほど大きい。



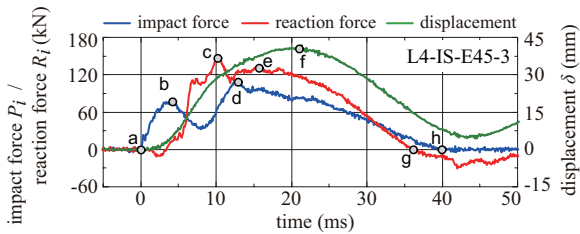
図一五 繰り返し载荷(IC)および単一载荷(IS)における各種時刻歴応答波形(重錘質量  $m = 300$  kg)

また、最大重錘衝撃力が発生する経過時間は、同一スパン長では入力エネルギーにかかわらずほぼ等しく、かつスパン長が長いほど遅くなる傾向がある。重錘衝撃力波形の継続時間もスパン長が長いほど長くなる事が分かる。これは、同一断面形状の梁材の場合には、スパン長が長いほど曲げ剛度 ( $I/L$ ) が小さくなることに起因しているものと推察される。

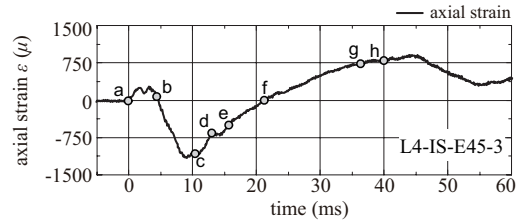
なお、スパン長の違いによる衝撃力波形を詳細に比較すると、スパン長が  $L \leq 3$  m の場合には、衝撃力は重錘衝突後、急激に立ち上がり約 8 ~ 12 ms で最大値を示した後、ほぼ線形に減少している。一方、 $L = 4$  m の場合には、重錘衝突後、衝撃力波形は急激に上昇するものの、5 ms 程度で一度減少し、その後再び増大して最大値に到達後、ほぼ線形に減少している。これは、衝突位



(iii)  $L = 4$  m  
 図-5 続き



(i) 重錘衝撃力、支点反力および载荷点変位波形



(ii) 軸方向ひずみ波形

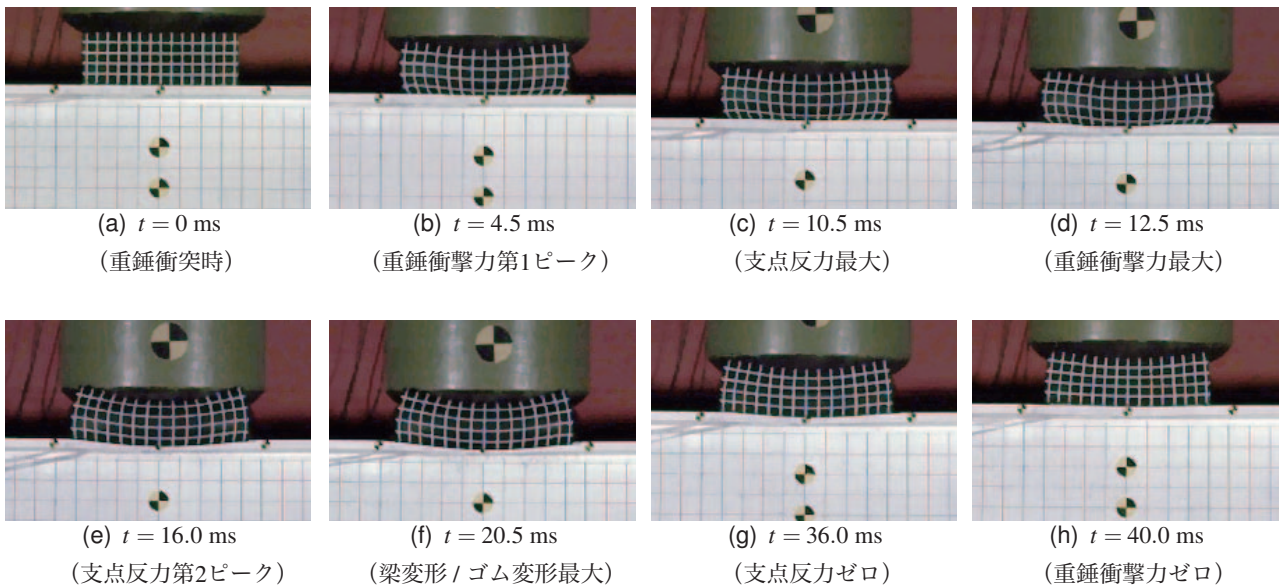


図-6 緩衝ゴムおよび試験体の変形状況 (L4-IS-E45-3)

置に緩衝材(天然ゴム)を設置していることにより、重錘衝突時における緩衝材の変形と梁材の応答がスパン長によって異なることに起因しているものと推察される。すなわち、 $L = 4$  m の場合には、梁材の曲げ剛度が小さく载荷点部が下方にたわむことにより、一時的に除荷状態になるためと推察される。このことは、重錘衝突後か

ら緩衝ゴムおよび試験体の変形状況を時系列的に示した図-6からも理解できる。なお、図はL4-IS-E45-3の場合における結果を示しており、各時刻は重錘衝撃力、支点反力および载荷点変位波形の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、 $t = 4.5$  ms (b点)で重錘衝撃力の第1ピークを迎え、その後、梁が

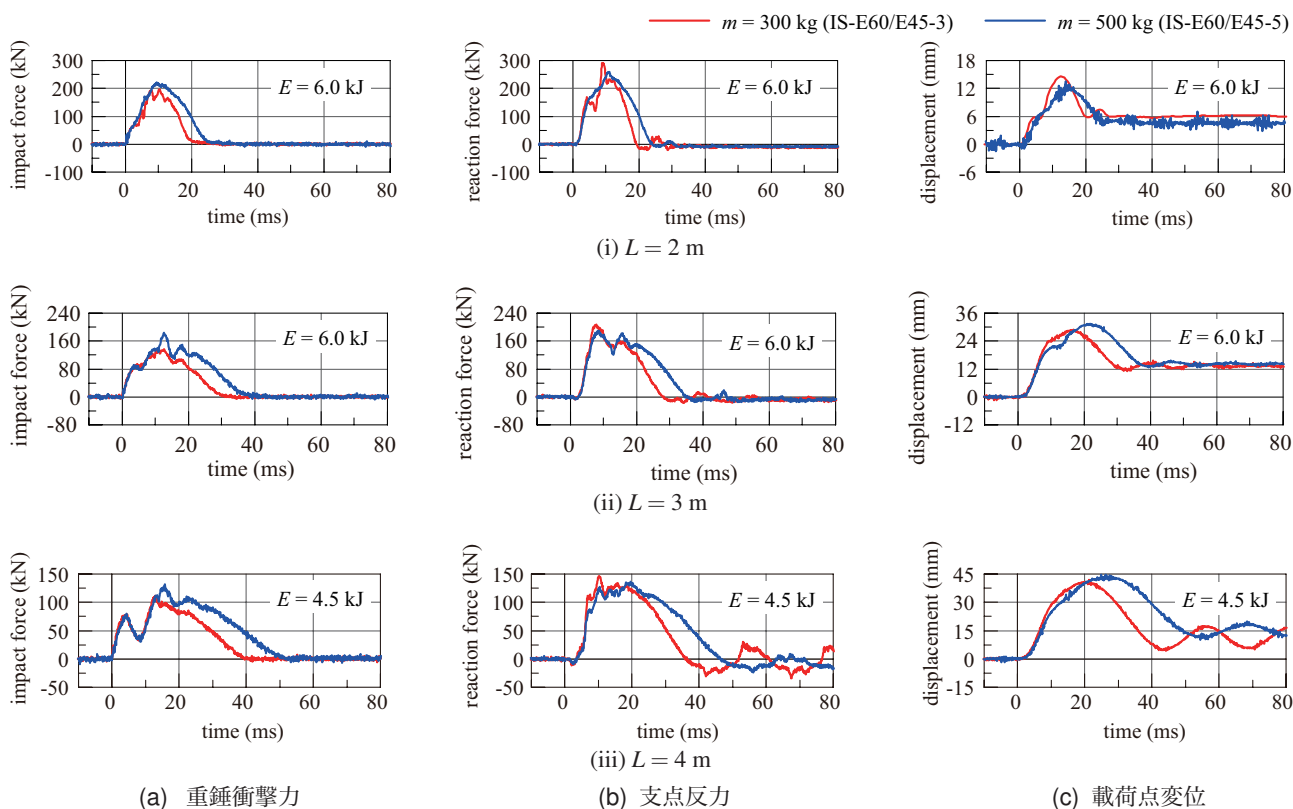


図-7 エネルギー等価載荷における重錘質量の影響

大きくたわみ始めていること分かる。すなわち、重錘衝撃力が減少しているのに対して、荷点変位が増大していることから、一時的に除荷状態になっていることが確認される。

また、図-6(ii)に示す軸方向ひずみの応答波形を見ると、 $t \approx 10 \text{ ms}$  で圧縮ひずみから引張ひずみに反転しており、上フランジ下面が引張りとなる局所変形が生じていることが分かる。また、その時刻は(i)図に示す変位波形において、変位の増加勾配が緩やかになる時刻と一致している。この傾向は、他の試験体でも確認されている。

入力エネルギーの等しい繰り返し載荷(IC)と単一載荷(IS)を比較すると、その波形形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。この両者の差は荷履歴の影響によるものであり、繰り返し載荷の場合には荷点近傍部における上フランジの面外変形などによる断面剛性の低下が影響しているものと推察される。なお、スパン長  $L = 4 \text{ m}$  の場合 ( $E = 4.5 \text{ kJ}$ ) には両者の差が極めて小さい。これは、 $E = 3.0 \text{ kJ}$  でほぼ弾性的な挙動を示していることから、繰り返し載荷における断面変形も小さく、単一載荷と類似した条件下での実験になったことによるものと考えられる。

次に、支点反力波形に着目する(図参照)。図より、支点反力波形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ことが分かる。また、最大支点反力が発生する経過時間は、同一スパン長では入力エネルギー

が大きいほど、同一入力エネルギーではスパン長が短いほど、早くなる傾向が見られる。

なお、 $L = 2 \text{ m}$  における支点反力波形を見ると、その波形は約  $5 \text{ ms}$  程度で一度減少し、その後再び増加して最大値を示している。これは、 $L = 2 \text{ m}$  の場合には、最低次固有振動周期が短いため、スパン長が大きい場合に比べて剛体のように挙動して梁全体が上方に浮く傾向を示したためと推察される。このことは、スパン中央部の変位波形からも類推できる。また、スパン長の差異による支点反力波形を比較すると、スパン長が短い  $L = 2 \text{ m}$  では、前述のように2つの波で構成されているが、スパン長が長くなるに連れて、1波で構成されていることが分かる。

繰り返し載荷(IC)と単一載荷(IS)を比較すると、支点反力波形は最大値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場合が短い。

(c)図に示す荷点変位波形を見ると、スパン長にかかわらず、入力エネルギーの増大とともに、荷点の変位も増加する傾向にあることが分かる。また、いずれのスパン長においても、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発生しており、入力エネルギーが大きいほど、かつスパン長が長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における荷履歴の影響(ISとIC)

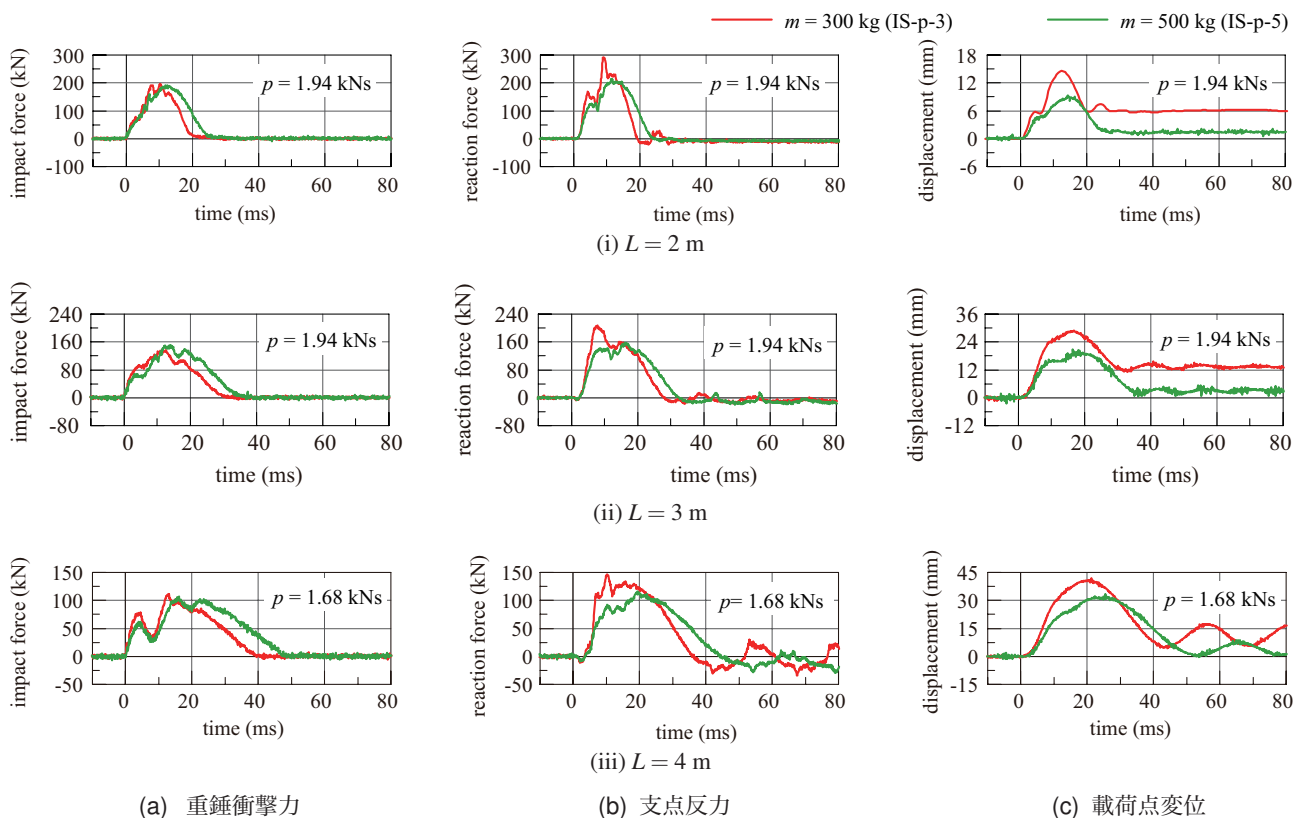


図-8 入力運動量等価荷荷における重錘質量の影響

を比較すると、繰り返し荷履歴の影響のない単一荷荷の場合が最大変位および残留変位ともに小さくなっている。なお、その理由は前述のとおりである。

## (2) 重錘質量の影響

ここでは、エネルギー等価荷荷および入力運動量等価荷荷における重錘質量の影響を各種応答波形より考察する。

図-7には、入力エネルギーが $E = 6.0 \text{ kJ}$  ( $L = 2, 3 \text{ m}$ ) および $E = 4.5 \text{ kJ}$  ( $L = 4 \text{ m}$ ) について、重錘質量を変化させた場合の各種応答波形を比較して示している。(a) 図より、重錘衝撃力波形に着目すると、衝撃力の立ち上がりから最大値の直前に至るまでの波形性状は両者で大略一致していることが分かる。最大重錘衝撃力は質量の大きい場合が若干大きくなる傾向にあり、また衝撃力の継続時間に関しても質量の大きい場合が長い。

(b) 図に示す支点反力波形に着目すると、いずれのスパン長においても、波形の立ち上がりから最大値に至るまで、両者でほぼ等しい応答性状を示していることが分かる。一方、最大値以降の波形性状は、質量の大きい場合が緩やかに減少し、荷重継続時間も長い。

荷点変位に関しても、 $L = 2 \text{ m}$  の場合を除き、重錘質量が大きい場合において変形量が若干大きくなっている。また、質量  $500 \text{ kg}$  の変位応答は、質量  $300 \text{ kg}$  における最大変位に至るまでの波形性状とほぼ等しい。これは、重錘衝撃力や支点反力波形の場合と同様である。な

お、 $L = 2 \text{ m}$  の場合には、変位応答に及ぼす重錘質量の影響が小さい。これは衝撃力波形の最大値がほぼ等しいことが一つの要因と考えられる。

図-8には、入力運動量が等価な $p = 1.94 \text{ kN}\cdot\text{s}$  ( $L = 2, 3 \text{ m}$ ) および $p = 1.68 \text{ kN}\cdot\text{s}$  ( $L = 4 \text{ m}$ ) について、重錘質量を変化させた場合の各種応答波形を比較して示している。

(a) 図より、両者の重錘衝撃力波形を比較すると、スパン長 $L$ にかかわらず、衝撃力の立ち上がりから最大値の直前に至るまでは、質量の大きい場合(緑線)が、質量の小さい場合よりも若干小さいことが分かる。一方、衝撃力波形の継続時間は、質量の大きい場合が長い。この傾向は、入力エネルギーが等価な場合と同様である。

(b) 図の支点反力を見ると、波動継続時間は重錘質量の小さい場合が大きい場合よりも短いものの、最大支点反力は大きく示されている。また、(c) 図の変位波形においても、最大変位は質量の小さい場合が大きい。

これより、緩衝材を設置した鋼梁の場合には、エネルギー等価荷荷において重錘質量が大きい場合の衝撃力や支点反力継続時間および最大荷点変位は若干大きくなるのに対し、入力運動量等価荷荷の場合には、最大重錘衝撃力は大きな差がないものの、最大支点反力および最大荷点変位は、質量が小さい場合が大きくなることが明らかになった。

また、表-2に示す重錘衝撃力波形より算出した衝撃荷重荷後の力積 $I_e$ と入力運動量 $p$ の比( $I_e/p$ )は、



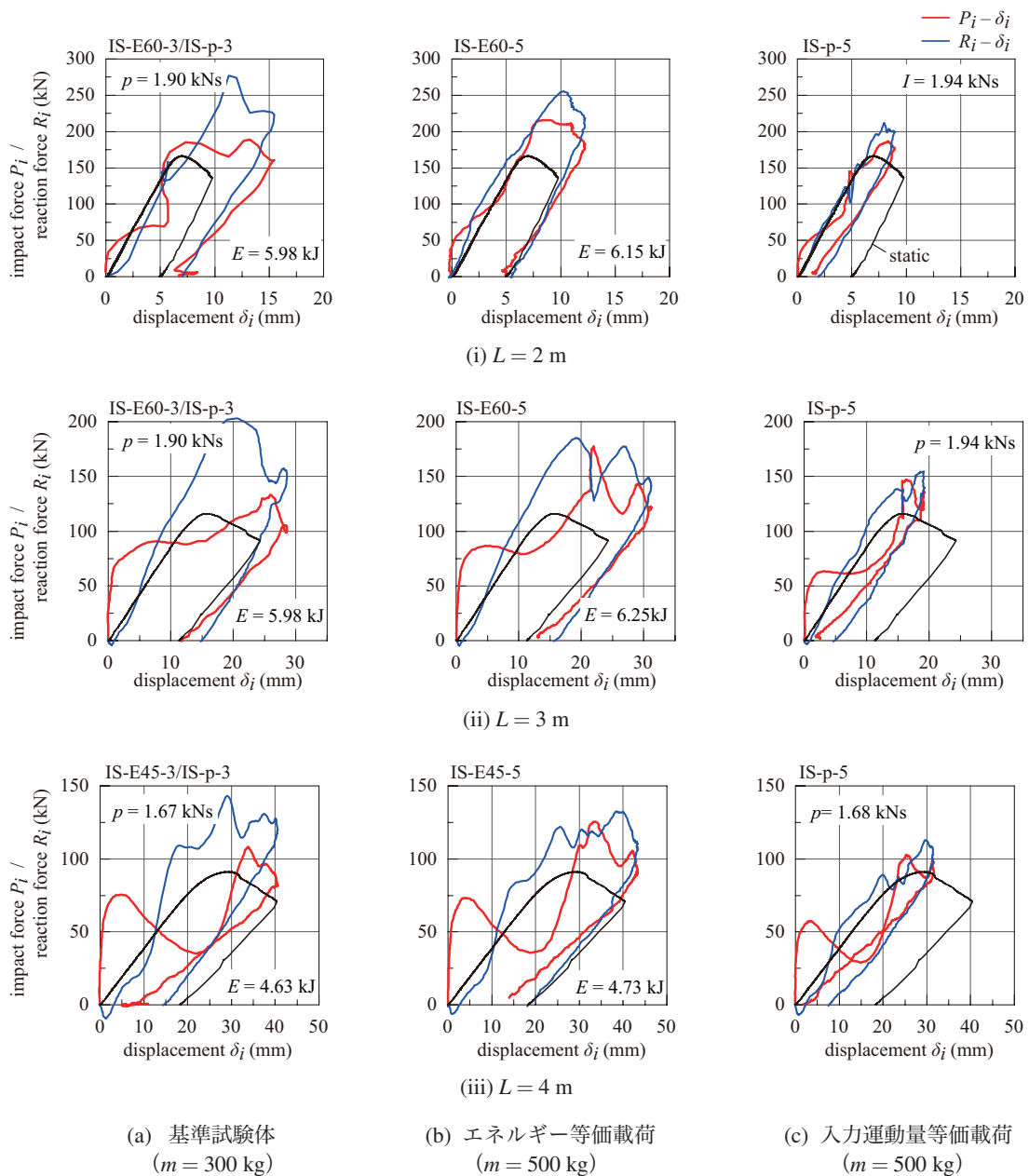


図-9 衝撃力および支点反力と変位関係

1.17～1.72程度であり、スパン長が長いほど大きくなる傾向にあることが分かる。

### 3.3 衝撃力あるいは支点反力と変位の関係

図-9には、単一衝撃荷重実験で得られた衝撃荷重 $P_i$ あるいは支点反力 $R_i$ と荷重点変位 $\delta_i$ の関係を静荷重実験結果と比較して示している。

まず、衝撃力と荷重点変位( $P_i - \delta_i$ )の関係について着目する。図より、 $L = 2\text{ m}$ の場合には、衝撃力-荷重点変位( $P_i - \delta_i$ )関係は、静荷重実験結果( $P_s - \delta_s$ 曲線)と比較的類似している。一方、衝撃荷重実験時の $P_i - \delta_i$ はスパン長 $L$ が長くなるほど静的な $P_s - \delta_s$ 関係とは異なる傾向を示し、静荷重時における単調増加時の変動が大きくなっている。すなわち、重錘衝突時には変位がほぼ零

の状態では衝撃力が急激に増大するものの、変位の増加とともに衝撃力が一時的に減少し、その後再び上昇し最大値を示している。この傾向はスパン長 $L$ が長いほど顕著である。これは、スパン長 $L$ の増加に対応して梁の最低次固有振動周期が長くなることにより、たわみ振動による振幅が大きくなることに起因しているものと推察される。

次に、支点反力と荷重点変位( $R_i - \delta_i$ )の関係について検討する。図より、スパン長 $L$ にかかわらず、 $R_i - \delta_i$ 曲線の傾きは、静的な $P_s - \delta_s$ 関係のそれとほぼ等しく、かつそのループ形状も静的な $P_s - \delta_s$ 関係と類似している。また、最大荷重は衝撃力よりも支点反力の方が大きい。これは、重錘衝撃力は緩衝材に衝突するとほぼ同時に励起されるのに対し、支点反力は図-5などに示すように

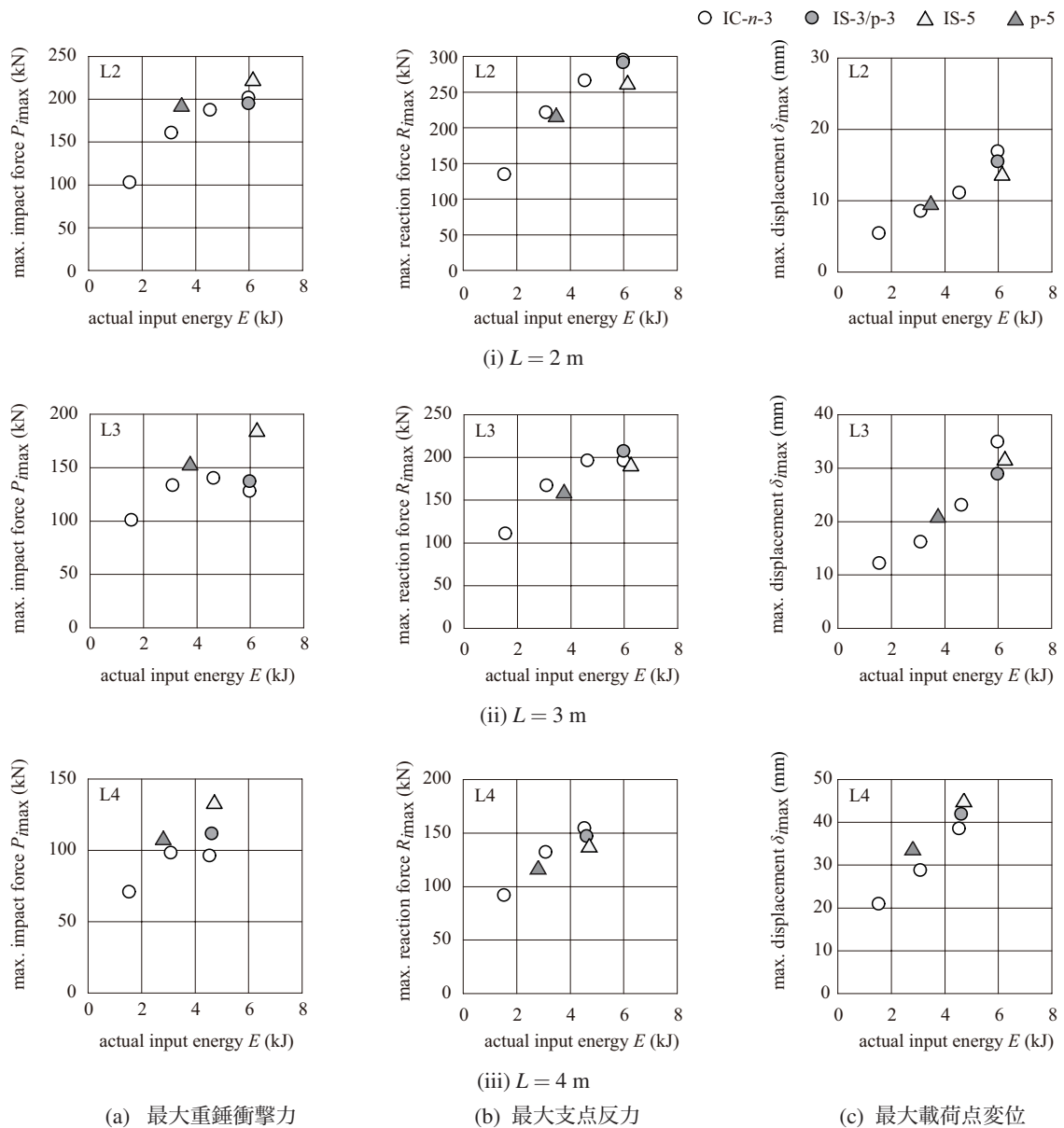


図-10 入力エネルギーと各種最大応答値の関係

重錘衝突後に発生する曲げ波動が支点に向かって伝播された後に励起されること、および支点反力には衝撃力の他に梁材のたわみ振動に伴う梁全体の慣性力が含まれることによるものと推察される。なお、衝撃荷重および支点反力の除荷勾配は、共に静載荷実験結果と概ね一致している。

### 3.4 入力エネルギーおよび運動量と最大応答値の関係

図-10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。

まず、繰り返し載荷 (○印) の結果に着目する。(a)図より、最大重錘衝撃力  $P_{i\max}$  は、スパン長にかかわらず入力エネルギー  $E$  の増大とともに増加する傾向が見られる。ただし、載荷履歴を有し上フランジの載荷点部が塑

性変形している場合には、同一入力エネルギーの単一載荷の場合 (●印) と比較して小さく評価される傾向にある。(b)図の最大支点反力  $R_{i\max}$  に関しては、最大重錘衝撃力と同様に入力エネルギー  $E$  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  $E$  に対してほぼ線形に増加することが分かる。なお、繰り返し載荷と単一載荷の最大変位を比較すると、前者のほうが後者よりも大きい。これは、載荷履歴の影響によって載荷点部の上フランジが塑性変形することにより、載荷点近傍部の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。

次に、エネルギー等価載荷の場合 (●, △印) を比較すると、重錘衝撃力に関しては両者で差異が見られるものの、最大支点反力や最大変位に関しては両者でほぼ等

しい値を示しており、その誤差は約 10 % 程度と小さいことが分かる。一方、入力運動量等価の場合(○, ▲印)を比較すると、最大重錘衝撃力に関しては、両者で比較的誤差が小さいものの、最大支点反力や最大変位に関しては大きな差が確認できる。また、重錘質量の影響を見ると、いずれの応答値も質量が大きい場合が小さく示されることが分かる。この傾向は、既往の軽量コンクリート RC 梁に関する実験結果<sup>19)</sup>と類似している。

#### 4. まとめ

本論文では、鋼部材の耐衝撃挙動に関する基礎資料の収集を目的に、純スパン長の異なる小型H形鋼を用いた梁部材を対象に、静載荷実験および重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。本研究では、重錘衝突時に発生する高周波成分を抑制するために、載荷点部の梁上に緩衝材(天然ゴム)を設置した。

衝撃荷重載荷実験は、入力エネルギーを漸増させる繰り返し衝撃荷重載荷実験と単一衝撃荷重載荷実験の2種類の他、入力エネルギー等価や入力運動量等価に着目した実験も実施した。ここでは、重錘衝撃力、載荷点変位、支点反力などに着目して検討を行っている。本研究で得られた結果を整理すると、以下のようである。

- 1) エネルギー等価載荷の場合には、最大重錘衝撃力において差異が見られるものの、最大支点反力や最大変位に関してはほぼ等しい値を示す。一方、入力運動量等価載荷の場合には、最大重錘衝撃力はほぼ等しいものの、最大支点反力や最大変位に関しては大きな差異が生じることが確認された。
- 2) 最大重錘衝撃力および最大支点反力は、載荷点部近傍の上フランジが大きく塑性変形する前までは、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) 静載荷および衝撃荷重載荷にかかわらず、本試験体は載荷点近傍の上フランジの局部変形によって終局に至る。

今後は、有限要素モデルを用いた詳細な弾塑性衝撃応答解析を実施し、数値解析結果と実験結果の比較を行う予定である。

#### 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。静載荷および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。

#### 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, 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, 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, 55A, pp. 1313-1326, 2009.
- 4) 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, Vol. 58A, pp. 967-980, 2012.
- 5) 別府万寿博, 三輪幸治, 伊東雅晴, 片山雅英, 大野友則: 剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊発生メカニズムに関する数値解析的検討, 構造工学論文集, 土木学会, 53A, pp. 1293-1304, 2007.
- 6) N. Kishi, S. Okada, H. Konno: Numerical impact response analysis of rockfall protection galleries, *J. Struct. Eng. Int.*, IABSE, Vol.19, No. 3, pp. 313-320, 2009.
- 7) 黒田一郎, 塩野谷昇, 山本佳士, 古屋信明, 中村佐智夫: せん断スパン比などを変えたPC梁の衝撃載荷実験, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 53A, pp. 1181-1190, 2007.
- 8) 窪田潤平, 中村浩喜, 吉田 博: 特殊ひし型金網および緩衝金具を配置した落石防護網の実斜面実験について, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 54A, pp. 11-22, 2008.
- 9) 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.
- 10) 前川幸次, 河上康太, 田島与典, 岩崎征夫: ポケット式落石防護網のシミュレーション解析に関する研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.57A, 1134-1144, 2011.
- 11) 園田佳巨, 畑 芳宏, 福永一基: SPH法を改良したワイヤリング防護柵の衝撃応答解析, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 57A, pp. 1155-1162, 2011.
- 12) 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.
- 13) 難波正和, 前川幸次, 田島与典, 横田哲也: 実斜面を用いた実規模重錘衝突実験によるポケット式落石防護網の評価, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 60A, pp. 1032-1041, 2014.

- 14) 高橋利延, 山本圭土, 香月 智, 高森 潔: 三次元個別要素法による落石防護網の衝撃応答解析, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 60A, 1042-1055, 2014.
- 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, 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.
- 16) 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, pp. 79-84, 2003.
- 17) Ho, T. S., Masuya, H.: An experimental study on the dynamic characteristics of steel beams using sand cushion subjected to falling weight, *Journal of Structural Engineering*, JSCE, Vol. 59A, pp. 1017-1024, 2013.
- 18) 石川芳治, 水山高久, 浅井信秀: 流木の衝突による鋼材の変形に関する実験的研究, 新砂防, Vol. 42, No. 5, pp. 11-20, 1990.
- 19) 竹本伸一, 岸 徳光, 田口史雄, 安藤智啓: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 24, No. 2, pp. 1483-1488, 2002.  
(2015年9月25日受付)  
(2016年2月1日受理)