

ゴム緩衝材を設置した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 with elastomeric rubber pad

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、落石覆道や落石防護擁壁など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的あるいは数値解析的研究が実施されている^{1)~3)}。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⁴⁾が多く、H形鋼等の部材単体に対する検討⁵⁾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、スパン長の異なる3種類のH形鋼梁を対象に、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着目して検討を行った。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、両者の間に緩衝材(天然ゴム)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鋼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載荷実験を実施した。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、既往の研究成果⁵⁾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、載荷点近傍部に

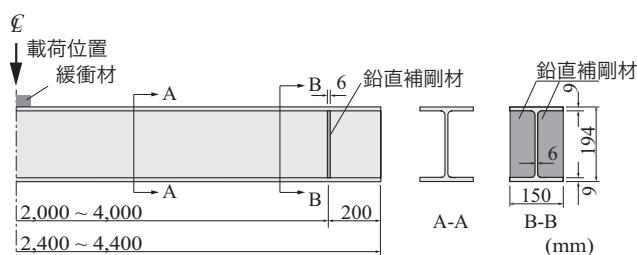


図-1 試験体の形状寸法

おける H 形鋼の耐衝撃挙動を詳細に検討するために、載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、スパン長の異なる各2体の試験体を対象に、(1)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載荷する漸増繰り返し衝撃荷重載荷実験(以後、繰り返し衝撃荷重載荷実験)、および(2)繰り返し衝撃荷重載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荷重載荷実験を実施した。

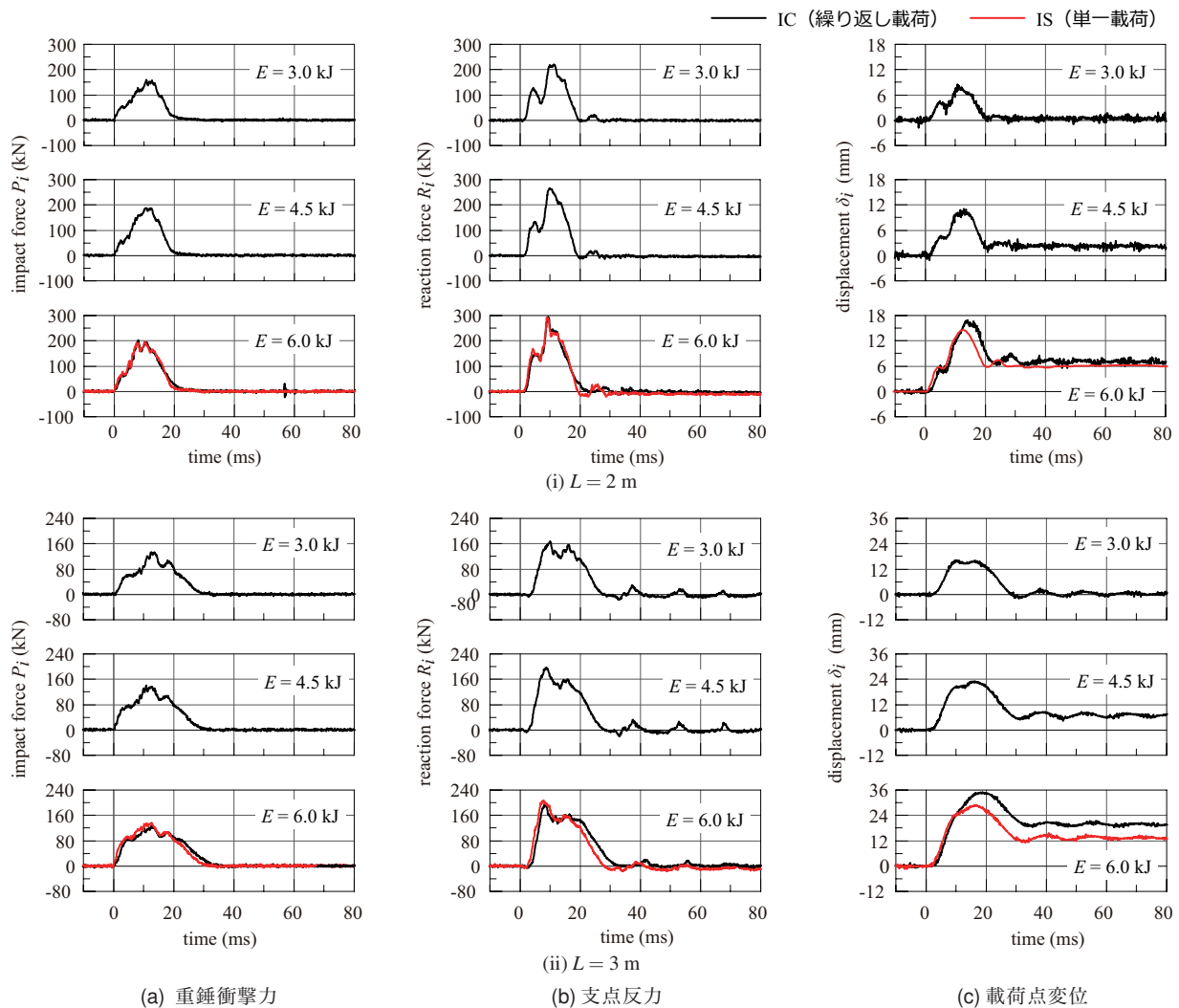
表-1には、実験ケースを一覧にして示している。表中の試験名のうち、第1項目は純スパン長(L_n)、第2項目は載荷方法(IC:繰返し衝撃載荷、IS:単一衝撃載荷)、第3項目は入力エネルギー($E \times 10$)を示している。表中の入力エネルギーは実測衝突速度を用いて算出された値である。なお、純スパン長が $L=4\text{ m}$ の場合に関しては、他と異なる



写真-1 試験体の設置状況 ($L=3\text{ m}$ の場合)

表-1 実験ケース一覧

試験名	載荷方法	実測衝突速度 V (m/s)	実測入力エネルギー E (kJ)
(a) $L = 2$ m			
L2-IC-E15	繰り返し	3.21	1.54
L2-IC-E30		4.55	3.10
L2-IC-E45		5.50	4.55
L2-IC-E60		6.32	5.98
L2-IS-E60	単一	6.32	5.98
(b) $L = 3$ m			
L3-IC-E15	繰り返し	3.23	1.56
L3-IC-E30		4.55	3.10
L3-IC-E45		5.56	4.63
L3-IC-E60		6.32	5.98
L3-IS-E60	単一	6.32	5.98
(c) $L = 4$ m			
L4-IC-E15	繰り返し	3.21	1.54
L4-IC-E30		4.55	3.10
L4-IC-E45		5.50	4.55
L4-IS-E45	単一	5.56	4.63



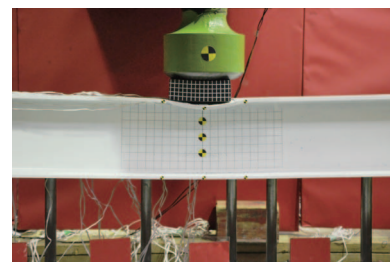
図－２ 繰り返し載荷 (IC) および単一載荷 (IS) における各種時刻歴応答波形

り最終入力エネルギーが4.5 kJとなっている。

写真－１にはスパン長 $L = 3 \text{ m}$ の場合における試験体の設置状況を示している。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 ($150 \times 150 \times 50 \text{ mm}$) 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。

衝撃載荷実験は、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に自由落下させることにより行った。

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 、(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 、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、緩衝材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。

写真－２ 上フランジの変形状況
(実験終了後, L3-IC-E60)

3. 実験結果

3.1 各種応答波形および載荷履歴の影響

図－２には、入力エネルギー $E = 3.0, 4.5, 6.0 \text{ kJ}$ の場合における繰り返し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 δ_i の時刻歴応答波形を純スパン長 L ごとについて示している。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、純スパンが $L = 2, 3 \text{ m}$ の場合には $E = 6.0 \text{ kJ}$ 載荷において**写真－２**に示すようにフランジに局部変形が生じて終局に至っている。一方、純スパンが $L = 4 \text{ m}$ の場合には、 $E = 4.5 \text{ kJ}$ 載荷において、梁材に横倒れに類

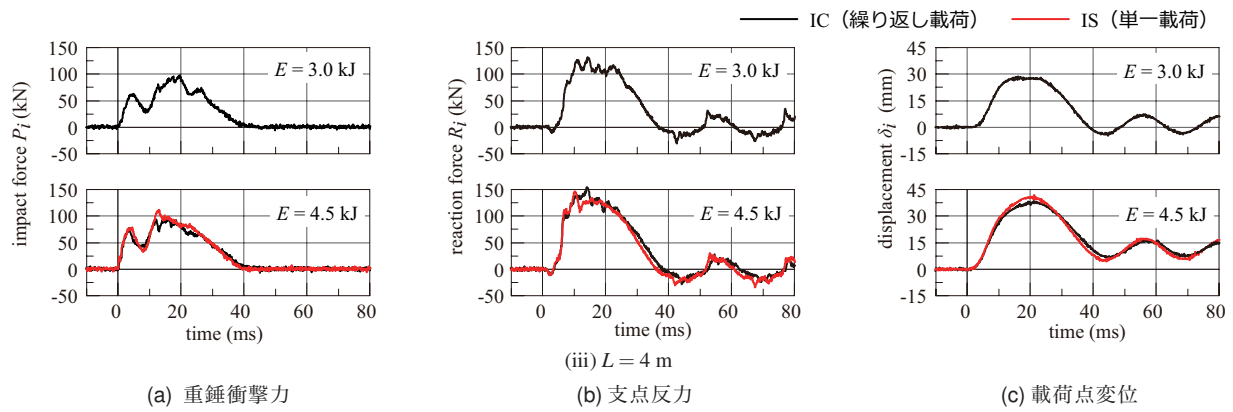


図-2 続き

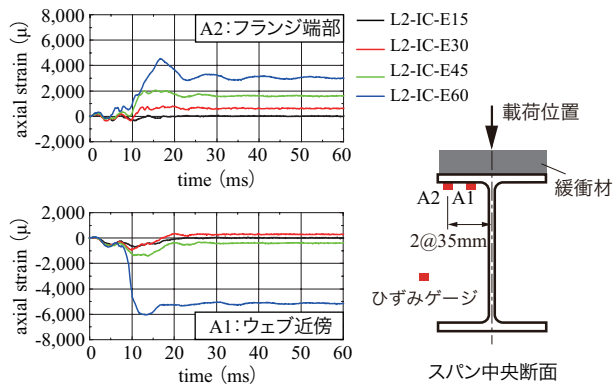


図-3 軸方向ひずみ波形(繰り返し载荷, $L = 2$ m)

似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。また、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ことが分かる。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剛度 (I/L) が小さくなることに起因しているものと考えられる。

入力エネルギーの等しい繰り返し载荷(IC)と単一载荷(IS)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载荷の方が若干短い。この両者の差は、载荷履歴の影響によるものであり、繰り返し载荷の場合には载荷点近傍部における上フランジの面外変形等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。このことは、図-3に示す、载荷点の上フランジ下面に貼付したひずみゲージからも理解できる。すなわち、入力エネルギーの増加とともに、ウェブ近傍の上フランジ下面では圧縮ひずみが発生しているのに対し、フランジ端部では逆に引張ひずみとなっている。これは上フランジに局部的な変形が生じていることを裏付けており、断面剛性が低下していることが実験的に確認される。なお、スパン長 $L = 4$ m の場合 ($E = 4.5$ kJ) には両者の差が極めて小さい。これは $E = 3.0$ kJ でほぼ弾性的な挙動を示していることか

ら、繰り返し载荷における断面変形も小さく、単一载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(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くほど、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、 $L = 2$ m における支点反力波形を見ると、その波形は約 5 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、 $L = 2$ 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。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 $L = 2$ 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。

繰り返し载荷(IC)と単一载荷(IS)を比較すると、支点反力波形は最大支点反力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载荷の場合が短い。

(c) 図に示す载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、载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 $E \leq 3$ 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 $E \geq 4.5$ 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くほど、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载荷履歴の影響(ISとIC)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。

3.2 入力エネルギーと最大応答値の関係

図-4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、繰り返し载荷(○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

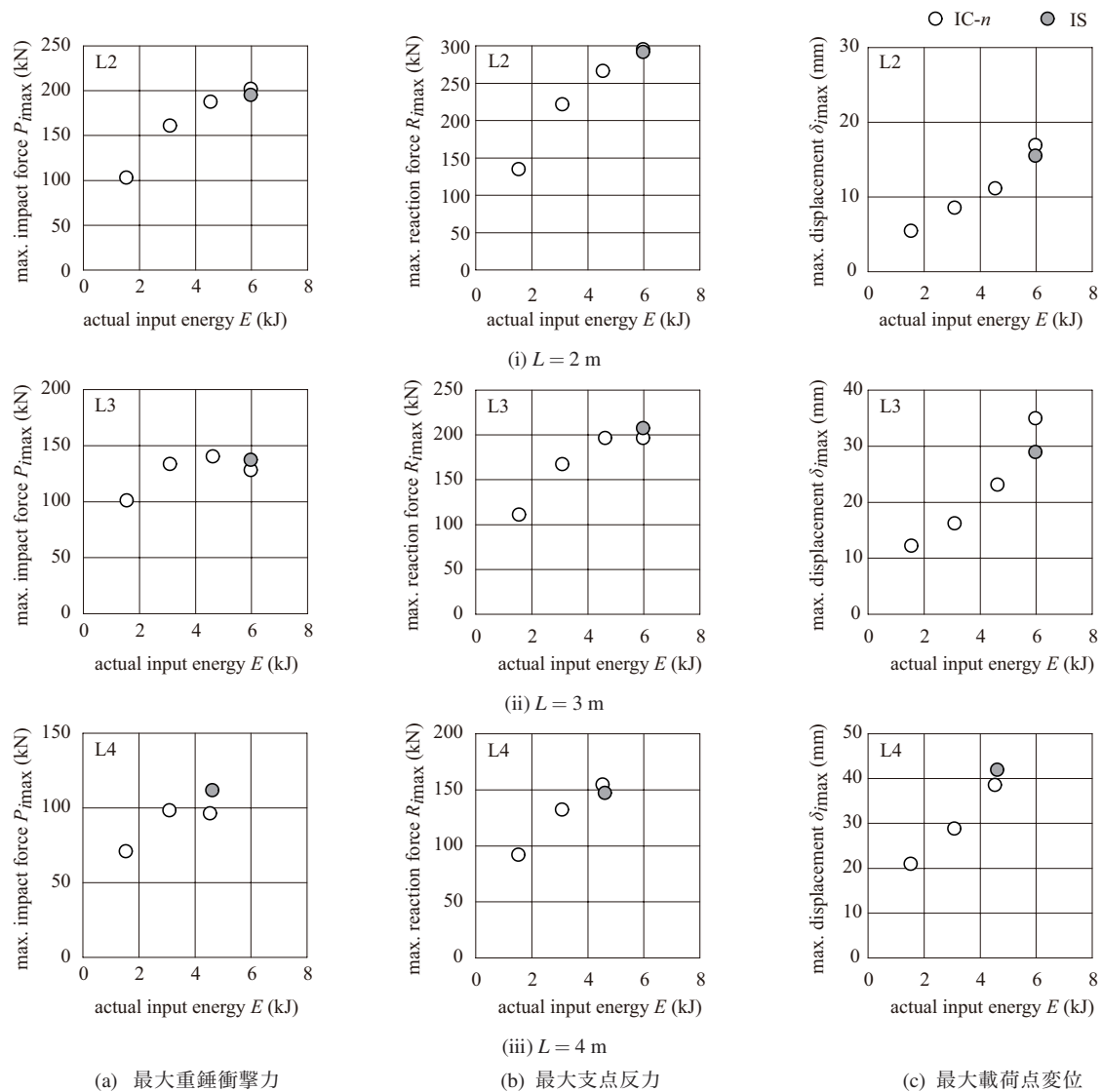


図-4 入力エネルギーと各種最大応答値の関係

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、前者のほうの方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。

4. まとめ

- 1) 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。
- 2) 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) 載荷方法にかかわらず、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。

謝辞

本研究は、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) の助成を受けたものである。

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) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.