

H 形鋼梁の耐衝撃挙動に関するファイバーモデルの適用性検討

Applicability of FE analysis for impact resistant behavior of H-shaped steel beams by means of fiber element approach

小室雅人[†], 栗橋祐介^{*}, 牛渡裕二^{**}, 鈴木健太郎^{***}, 岸徳光^{****}

Masato Komuro, Yusuke Kurihashi, Yuji Ushiwatari, Kentaro Suzuki and Norimitsu Kishi

[†]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 27-1)

^{*}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 27-1)

^{**}博(工), (株)構研エンジニアリング防災施設部, 部長 (〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

^{***}修(工), (株)構研エンジニアリング防災施設部, 主任技師 (〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

^{****}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)

In this study, in order to establish a simple and engineered analysis method for appropriately evaluating the dynamic response characteristics of steel beams under impact loading, impact response analysis method based on a fiber element approach was proposed. An applicability of the method was discussed comparing with the experimental results of a total of nine small-scale H-shaped steel beams having different span length and impact velocities of impact striker. From this study, the following results were obtained: 1) applying the proposed method, the deflection behavior of the beams can be appropriately predicted; and then 2) the method may be able to use as a tool for evaluation of the dynamic response characteristics of the H-shaped steel beams under the impact loading

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

キーワード: *H 形鋼, 耐衝撃挙動, 重錘落下衝撃実験, ファイバーモデル*

1. はじめに

我が国における耐衝撃用途構造物としては, 原子力発電用格納容器の他, 落石防護擁壁, 砂防堰堤に代表される無筋コンクリート (C) 構造, 落石覆道等の鉄筋コンクリート (RC) 構造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の支柱等に用いられる鋼 (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の研究が実施されている^{1)~7)}。

その結果, 有限要素法による三次元弾塑性衝撃応答解析を実施することにより, 実験結果を大略再現可能なことを明らかにしている。さらに, 実務設計への適用を念頭に, 高度な弾塑性衝撃応答解析手法に代わる簡易数値解析手法として, ファイバー要素を用いた有限要素解析 (三次元非線形動的骨組解析) の適用が検討され, 重錘落下衝撃を受ける小型矩形 RC 梁や実規模 RC 覆道模型の動的応答特性をほぼ適切に評価できる

ことが明らかになっている^{8)~10)}。一方, 同解析手法の汎用性を確認するためには, RC 部材 (構造物) のみではなく, S 部材 (構造物) に対する適用性の検討が必要となる。

このような背景より, 本研究では衝撃荷重を受ける鋼部材の動的挙動と損傷評価を簡易な手法 (実務設計レベル) で適切に行うために, ファイバー要素を用いた有限要素法に着目し, その適用性について検討を行うものである。具体的には, スパン長の異なる 3 種類の小型 H 形鋼梁に関する重錘落下衝撃実験を対象にファイバー要素を用いた数値解析を実施し, 載荷点変位および支点反力に着目してその適用性に関する検討

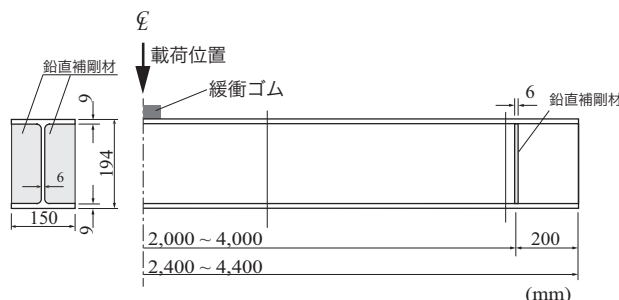


図-1 H 形鋼梁の形状寸法

[†] 連絡著者 / Corresponding author

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

表－１ 実験ケースの一覧

試験名	荷 方 法	実測 衝突速度 V (m/s)	実測入力 エネルギー E (kJ)	解析実施 の有無
L2-S	静的	—	—	○
L2-IC-E15	繰返	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	○
L3-S	静的	—	—	○
L3-IC-E15	繰返	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	○
L4-S	静的	—	—	○
L4-IC-E15	繰返	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	○

を行った。なお、数値解析に用いた構造解析プログラムは、ファイバー要素を用いた三次元非線形動的骨組解析コード Engineer's Studio (Ver.5.00.02) である。

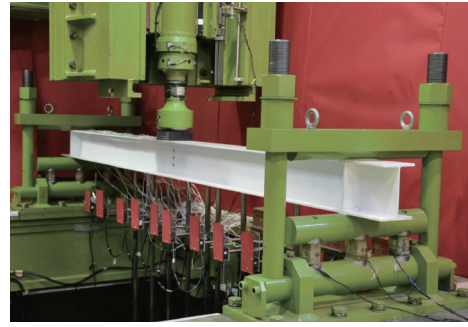
2. 実験概要

2.1 試験体概要

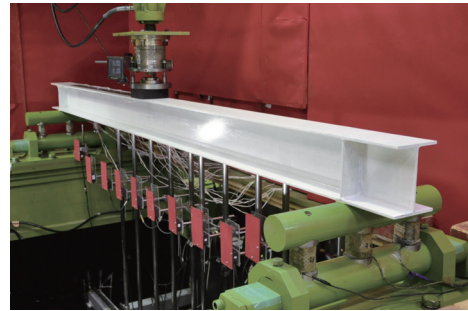
本研究では、スパン長 L の異なる小型 H 形鋼梁を対象に衝撃荷重実験を実施した。図－１には、本実験で使用した H 形鋼梁（鋼種：SS400）の形状寸法を示している。試験体は純スパン長 L の異なる 3 種類（ $L=2, 3, 4$ m）である。なお、梁材の寸法に関しては、既往の研究成果¹¹⁾を参考に H194×150×6×9 の H 形鋼を使用した。また、支点部近傍の局部座屈を抑制するために、端部より 200 mm の位置に板厚 6 mm の鉛直補剛材を溶接している。なお、本研究では、荷重点近傍部における H 形鋼の耐衝撃挙動を詳細に検討することとして、荷重点直下部には鉛直補剛材を配置していない。

2.2 実験方法

本実験ではスパン長 L の異なる小型 H 形鋼梁を対象に、(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返し荷重する漸増繰返し衝撃荷重実験（以後、単に繰返し衝撃荷重実験）、および (3) 繰返し衝



(a) 衝撃荷重実験



(b) 静荷重実験

写真－１ 実験状況

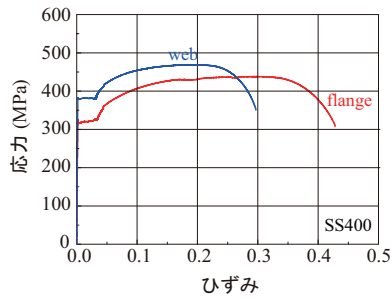
撃荷重実験における最終入力エネルギーと同一条件で一度だけ重錘を落下させる単一衝撃荷重実験を実施した。表－１には、実験ケースの一覧を示している。試験体名の第 1 項目にはスパン長を、第 2 項目には荷重方法、第 3 項目に入力エネルギーを示している。

衝撃荷重実験は、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。

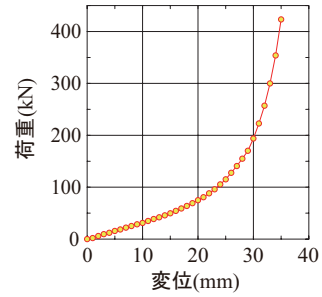
写真－１ (a) には衝撃荷重実験の状況を示している。写真に示すように、両支点部の上・下縁では鋼製治具を用いて試験体を拘束し、重錘衝突による試験体の跳ね上がりを防止している。治具全体は回転を許容し、ピン支持に近い状態となっている。また、重錘落下を受ける上フランジ部には、緩衝材として天然ゴム（150×150×50 mm）を設置している。なお、実験に使用した緩衝材は、硬度 65 の天然ゴムである。

静荷重実験は、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、静荷重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。

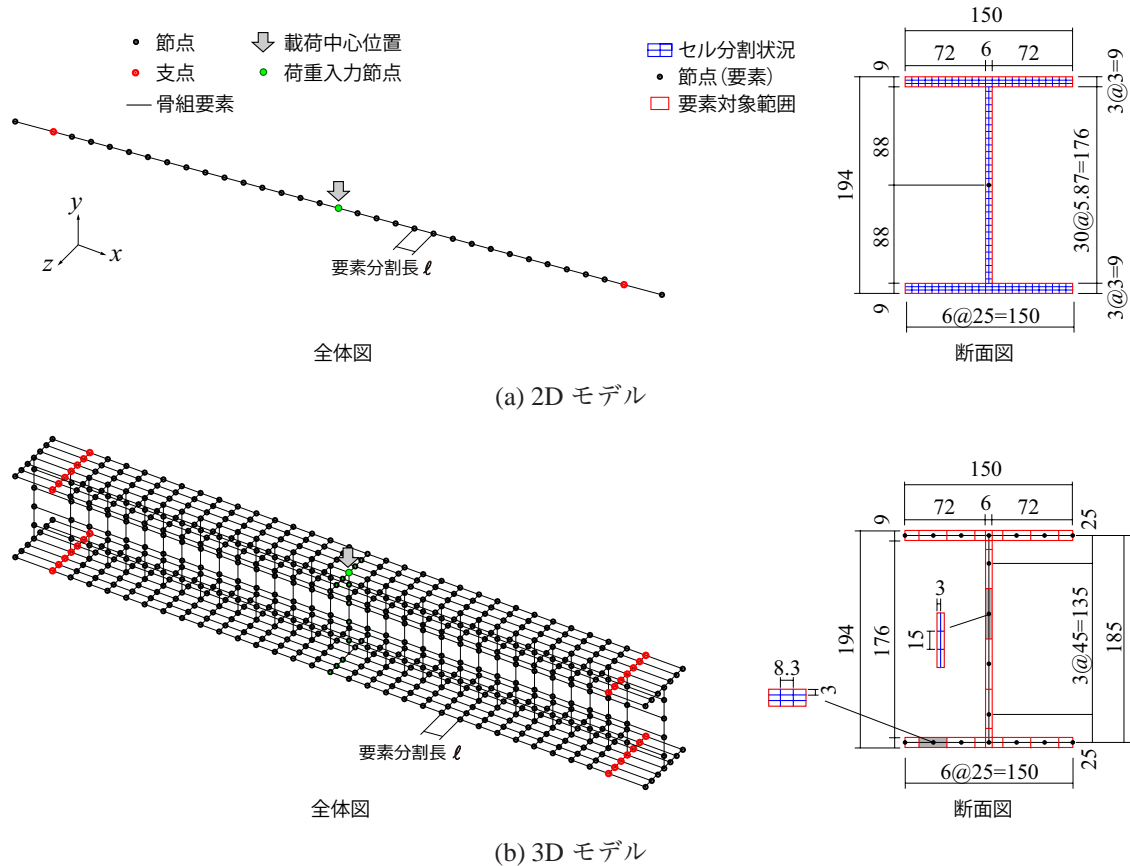
本実験の測定項目は、(1) 重錘に埋設されたロードセルによる重錘衝撃力 P_i または油圧ジャッキ先端に取り付けたロードセルによる静荷重荷重 P_s 、(2) 非接



図－２ 鋼材の公称応力－公称ひずみ関係



図－３ 緩衝ゴムの荷重－変位関係



図－４ 骨組モデルおよび要素分割状況（要素分割長 $\ell = 100$ mm の場合）

表－２ 使用鋼材の材料物性値

	鋼種	降伏強度 f_y (MPa)	引張強度 f_u (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
ウェブ	SS400	312	436	206	0.3
フランジ		392	469		

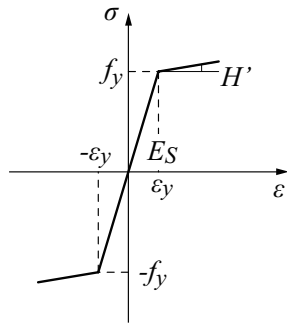
触式レーザ変位計による梁材のたわみ(以後、変位) δ 、(3) 支点治具に組み込まれたロードセルによる支点反力 R 、および(4) 光電センサによる重錘衝突速度 V である。また、緩衝ゴムは実験ケース毎に取り替え、常に新しいものを使用した。

表－２および図－２には、JIS14号B試験片を用いた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. 数値解析概要

3.1 数値解析モデル

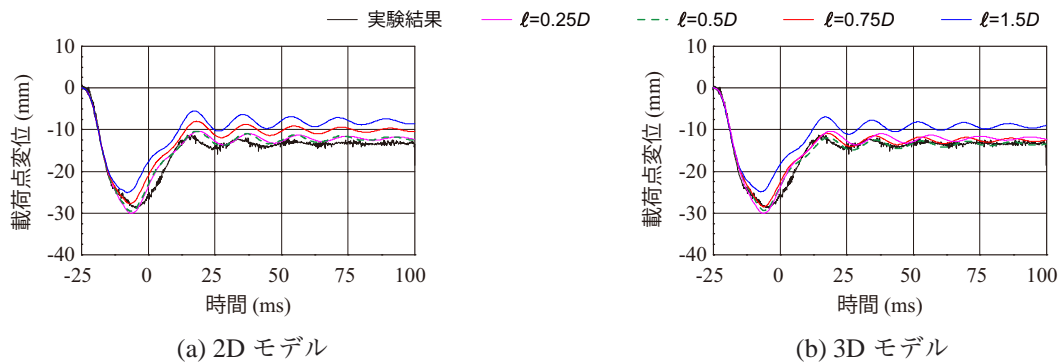
図－４には、本数値解析に用いた骨組モデルの軸方向および断面方向の要素分割状況を示している。ここでは、２種類の解析モデルについて検討を行っている。すなわち、(1) H形鋼を棒部材でモデル化した2Dモデル



図－5 数値解析に用いた鋼材の構成則

表－3 要素分割長 ℓ と最大変位の関係

要素 分割長 ℓ (mm)	最大変位 (mm)			
	実験 結果	解析結果		誤差 (%)
		2D モデル	3D モデル	
50 (0.25D)	28.9	29.8	30.0	3.8
100 (0.5D)		29.4	29.5	2.1
150 (0.75D)		28.4	27.7	-4.2
300 (1.5D)		24.9	25.1	-13.1



図－6 要素分割長と載荷点変位波形の関係 (L3-IS-E60)

ル (a 図)，および (2) フランジとウェブを忠実に反映させた 3D モデル (b 図) である。前者はより簡易なモデルにおける動的挙動の再現性を，後者はフランジやウェブをモデル化することにより各部の局所変形を含めた挙動の再現性を検討する目的で実施した。

3.2 境界条件

支点の境界条件に関しては，2D モデルでは既往の小型 RC 梁に関する事前解析⁹⁾により，支点治具が動的応答性状に及ぼす影響が極めて小さいことが明らかになっていることより，支点治具の詳細なモデル化は実施していない。なお，支点位置に相当する節点に z 軸回りの回転を許容することによって支点部の挙動を再現することとした。3D モデルでは支点位置に相当する上下フランジの節点のうち，片側支点の下フランジ中央の節点のみを x ， y ， z 軸の 3 方向を固定とし，残りの節点は y 方向のみ固定としている。

衝撃荷重の入力方法は，緩衝ゴムを設置した実験結果より得られた重錘衝撃力波形をスパン中央の節点に作用させることによって再現した。また，時間増分 Δt_{cr} は $\Delta t_{cr} = 0.1 \text{ ms}$ とした。

3.3 材料物性モデル

図－5 には，ファイバー要素に用いた H 形鋼梁に関

する応力－ひずみ関係を示している。ここでは，塑性硬化係数 H' を弾性係数 E_s の 1% とするバイリニア型の等方硬化則を適用している。なお，フランジおよびウェブの降伏応力に関しては，表－2 に示す値を使用した。

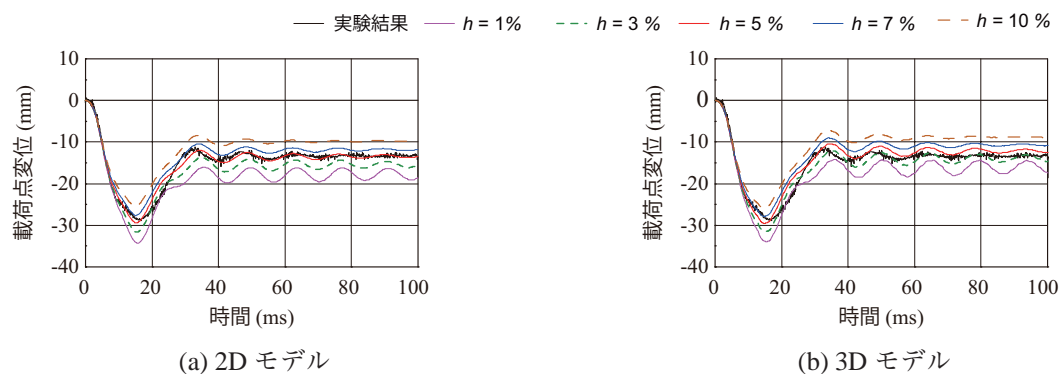
4. 数値解析結果と実験結果の比較

ここでは，H 形鋼梁の耐衝撃挙動へのファイバー要素を用いた有限要素解析の適用性を検証するために，スパン長 $L = 3 \text{ m}$ で入力エネルギーが最も大きい L3-IS-E60 試験体を対象に，(1) 要素分割長 ℓ および (2) 減衰定数 h が解析結果に与える影響を検討し，その後，同定された最適値を用いて全ての実験ケースに対して数値解析を実施した。

4.1 要素分割長に関する検討

本節では，要素分割長 ℓ が解析結果に及ぼす影響について検討を行った。本研究では実務設計への適用を視野に入れていることより，解析精度を担保しつつ，計算コスト (時間) を抑える要素分割長 ℓ について検討を行う。

表－3 には，L3-IS-E60 について 2D および 3D モデルを対象に要素分割長 ℓ を梁高 D の約 0.25 倍から 1.5



図－7 荷点変位波形と減衰定数 h の関係 (L3-IS-E60)

倍 ($\ell = 50 \sim 300$ mm) まで変化させた場合の荷点における最大変位(以後、最大変位)を実験結果と比較して示している。また、図－6には、要素分割長 ℓ と荷点変位波形の関係を示している。

表－3より、要素分割長 ℓ が大きくなるほど、最大変位は小さくなる傾向を示していることが分かる。また、要素分割長 ℓ を梁高 D の0.5倍程度($\ell = 100$ mm)とすることで、実験結果を5%以内の誤差、1倍程度($\ell = 200$ mm)以下にすることによって概ね10%以内の誤差で再現可能となることが分かる。さらに、2Dと3Dモデルを比較すると、2Dモデルでは梁高 D の約0.25～0.75倍($\ell = 50 \sim 150$ mm)までは、誤差が3%程度以下となっているのに対し、3Dモデルでは0.75倍程度($\ell = 150$ mm)から誤差が若干大きく示されており、3Dモデルの方が要素分割長 ℓ に対する感度が高いことが分かる。なお、図－6より、荷点変位の時刻歴応答波形は、要素分割長 ℓ が大きいほど最大値は小さくなる傾向が見られるものの、周期に関してはその影響が小さいことが分かる。

以上より、最適な要素分割長 ℓ は、2Dモデルでは梁高 D の0.5～0.75倍程度、3Dモデルでは0.5倍程度であることが明らかになった。

4.2 減衰定数に関する検討

表－4には、L3-IS-E60について2Dおよび3Dモデルを対象に減衰定数を $h = 1, 3, 5, 7, 10\%$ と変化させた場合の最大変位と実験結果の関係を、図－7には、それらの応答波形を比較して示している。なお、減衰定数 h は、質量比例分のみを考慮し、鉛直方向最低次曲げ振動モードに対応した固有振動数を用いて設定している。

表－4および図－7より、減衰定数 h が大きくなるほど、いずれのモデルにおいても最大変位および残留変位は小さくなる傾向を示している。また、減衰定数を $h = 3 \sim 7\%$ とすることで実験結果を概ね10%の誤差で再現可能であることが分かる。さらに、減衰定数 $h = 5\%$ とした場合には、2Dおよび3Dモデルの波

表－4 減衰定数 h と最大変位の関係

減衰定数 h (%)	最大変位 (mm)				
	実験結果	解析結果			
		2Dモデル	誤差 (%)	3Dモデル	誤差 (%)
1	28.9	34.2	18.3	33.9	17.3
3		31.6	9.3	31.5	9.0
5		29.4	1.7	29.5	2.1
7		27.6	−4.5	27.8	−3.8
10		25.4	−12.1	25.8	−10.7

形性状が実験結果とほぼ一致しており、また最大変位の誤差はともに2%以下と、本解析結果の中では最も比較的精度よく実験結果の再現が可能であることが分かる。

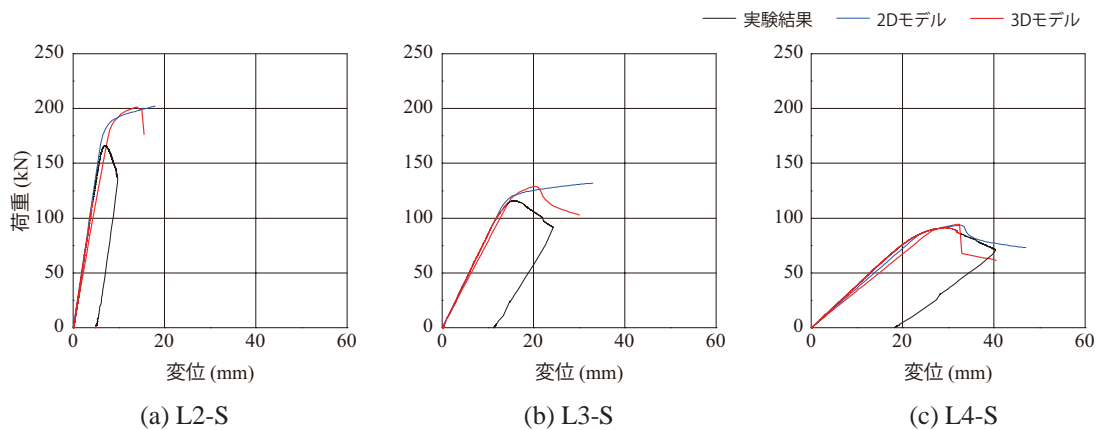
以上より、本研究で対象とした小型H形鋼梁の衝撃応答解析に関しては、減衰定数を $h = 5\%$ 程度とすることで解析精度が確保されることが明らかになった。

4.3 解析結果と実験結果の比較

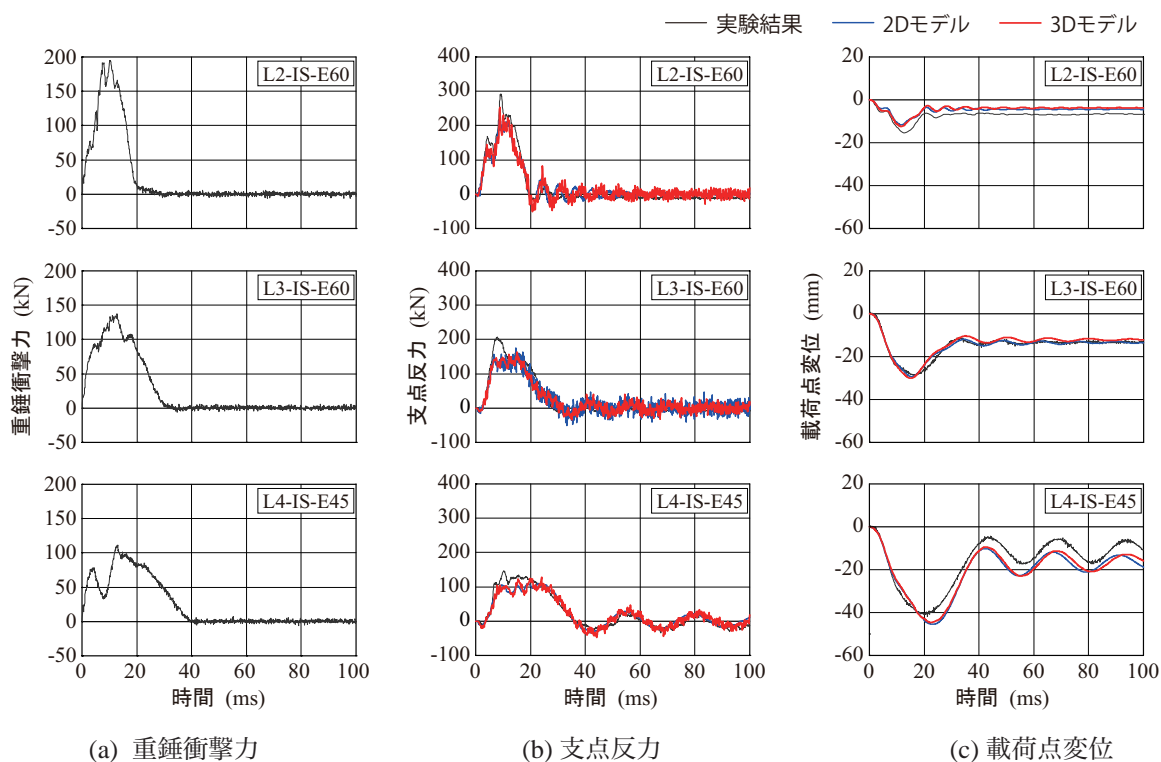
ここでは、前節で同定された最適な要素分割長 ($\ell = 100$ mm) および減衰定数 ($h = 5\%$) を適用した場合について、静荷重実験を含めて数値解析を実施した。なお、本解析では、繰返し衝撃荷重載荷実験における荷履歴を考慮せず、全ての試験体に対して単一荷状態での解析を実施している。したがって、表－1に示すように、L2/L3-IC-E60 および L4-IC-E45 に関しては、L2/L3/L4-IS-En と同一条件となることより、数値解析は実施していない。

図－8には、L2～L4試験体における静荷重実験結果で得られた荷重とスパン中央下フランジ中央部変位の関係に解析結果を重ね、比較して示している。

図より、実験結果は変位の増大とともに荷重がほぼ線形に増大し、降伏荷重近傍より剛性勾配が徐々に低下して最大荷重に到達後、徐々に荷重が低下し終局に



図－8 荷重－変位関係



図－9 各種応答波形

至っている。一方、数値解析結果ではいずれのモデルにおいても最大荷重に至るまでの荷重－変位関係は概ね実験結果を再現できることが分かる。降伏荷重および最大荷重については解析結果の方が最大で 10 % 程度大きな結果となっている。これは、実験では最大荷重到達後、上フランジに局部座屈が発生し荷重が低下するのに対して、2D モデルでは棒モデルあること、3D モデルについては便宜上ウェブ直上の上フランジ中心に载荷していることから、この局部座屈を適切に再現することが困難であり、最大荷重を大きく評価しているものと推察される。また、3D モデルにおいて降伏荷重までの剛性勾配が実験結果よりも若干小さく示されているが、これは実験では支点の拘束条件が半

固定状態に近い状態に対して、数値解析では荷重が小さい段階から支点部に x 方向変位が生じ、剛性勾配が緩やかになったものと推察される。さらに、L4 試験体の 3D モデルにおいて、最大荷重到達後大きく荷重が低下しているが、これは横倒れ座屈に起因したものであり、本解析モデルの面外方向の剛性が実際よりも若干小さく評価されている可能性があることを示唆している。

図－9 には、解析結果の一例として各スパン長における最大入力エネルギーの場合について、実験で得られた重錘衝撃力波形(解析に用いた入力荷重)、合支点反力(以後、支点反力)および载荷点変位に関する時刻歴応答波形を実験結果と解析結果を比較する形で示し

表－5 各種応答値一覧

解析ケース	最大支点反力 (kN)			最大変位 (mm)			残留変位 (mm)		
	実験結果	2D モデル	3D モデル	実験結果	2D モデル	3D モデル	実験結果	2D モデル	3D モデル
(a) $L = 2$ m									
IC-E15	134.3	110.4	122.5	5.4	3.8	6.0	0.1	0.0	0.0
IC-E30	221.3	172.7	184.0	8.5	5.9	7.3	0.5	0.0	0.1
IC-E45	266.2	207.8	218.1	11.1	9.2	11.1	2.2	2.3	2.6
IS-E60	291.5	213.9	253.0	15.5	11.7	12.4	6.7	4.4	3.8
(b) $L = 3$ m									
IC-E15	110.7	98.8	102.8	12.2	11.0	11.7	0.1	0.1	0.1
IC-E30	167.2	132.6	138.9	16.2	14.7	16.0	0.3	0.5	0.5
IC-E45	196.3	139.0	151.2	23.1	20.0	21.7	7.0	4.7	4.6
IS-E60	207.3	174.7	162.7	28.9	29.4	30.0	13.3	13.4	12.1
(c) $L = 4$ m									
IC-E15	91.7	72.0	88.8	20.9	18.7	20.1	0.0	0.1	0.1
IC-E30	132.0	100.4	118.1	28.8	26.1	28.0	1.6	1.7	2.1
IS-E45	146.9	109.4	127.5	41.9	45.4	44.7	11.3	16.1	16.1

ている。

図－9 (b) より、支点反力に関する実験結果はいずれのケースも重錘衝突直後に負の値を示し、その後、正に反転し最大応答値に至っている。その後は高周波の振動を伴いながら徐々に低下し、減衰自由振動に移行している。減衰自由振動に至るまでの時間に着目すると、(a) 図の重錘衝撃力作用時間とほぼ対応していることが分かる。一方、数値解析結果は、実験結果の最大支点反力を若干過小評価しているものの、波形性状は大略再現していることが分かる。

図－9 (c) の載荷点変位応答波形に着目すると、実験結果は重錘衝突後 10～20 ms で最大応答値に到達し、その後減衰自由振動となり残留変位が生じている。数値解析結果に着目すると、L3 試験体では実験結果の最大変位、残留変位および応答波形が精度よく再現できていることが分かる。一方、L2 試験体では実験結果と比較して最大変位および残留変位は小さく評価されている。これは、L2 試験体は他の試験体と比較して曲げスパンが短いことから、実験結果においてせん断変形の影響が相対的に大きいものの、ファイバー要素を用いた本解析手法ではせん断変形の影響を過小に評価していることによるものと推察される。また、L4 試験体における解析結果の最大変位および残留変位は、実験結果よりも大きく評価されている。これは、L4 試験体の場合には、実験終了後に鉛直方向の残留変位の他に面外方向にも残留変位が生じていることを確認しているが、数値解析ではこのような面外方向の変位は生じておらず、入力エネルギーが全て鉛直方向成分に消費されたため、最大変位が大きく評価されたものと推察される。

表－5 には全解析ケースにおける最大支点反力、最

大変位および残留変位を一覧にして示している。また、図－10 には表－5 に示した各種応答値について、解析結果と実験結果をそれぞれ縦軸および横軸に取って整理している。なお、図中の 45° 勾配を有する実線は、解析結果と実験結果が一致していることを、網掛け部分はそれに対する誤差幅 10 % を意味している。

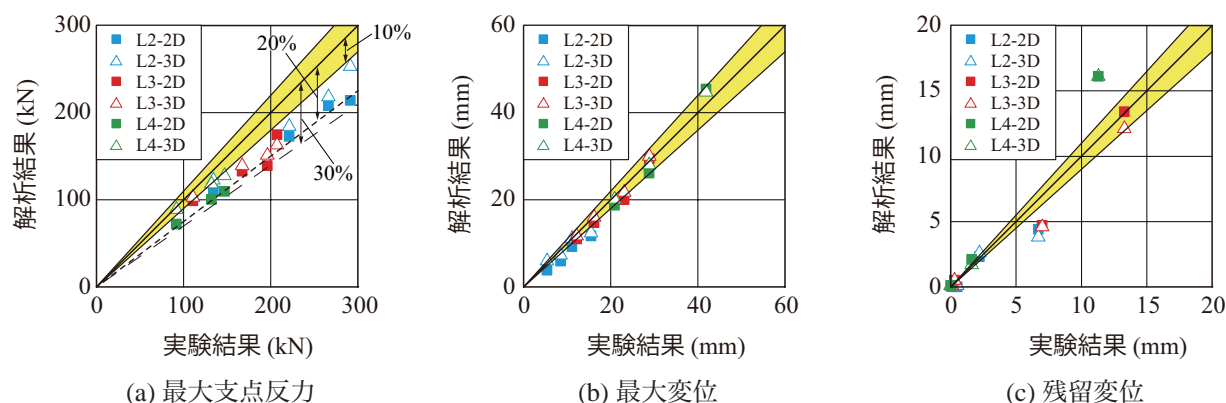
表－5 および 図－10 より、2D および 3D モデルにおける最大支点反力は、ともに実験結果と比較して過小に評価する傾向にあることが分かる。その差は 2D モデルで約 30 % 程度、3D モデルで約 25 % 程度であり、3D モデルの方が精度は若干高くなっている。

数値解析による最大変位は、L3 および L4 試験体では概ね 10 % 程度の範囲で実験結果を再現していることが分かる。なお、L2 試験体の解析結果は、実験結果を過小評価する傾向が示されているが、この理由は前述のとおりである。また、2D と 3D モデルの最大変位を比較すると、最大支点反力の場合と同様に 3D モデルの方が若干精度が高いことが分かる。一方、残留変位については、L4 試験体の単一載荷条件を除いて、実験結果と同程度もしくは若干過小評価の傾向を示すことが分かる。

以上より、本解析手法は最大支点反力を過小に評価する傾向にあるものの、最大変位を 10 % 以内の誤差で評価できることが明らかになった。

5. まとめ

本研究では、ファイバー要素を用いた三次元非線形動的骨組解析の適用性を検討することを目的に、スパンの異なる 3 種類の H 形鋼梁の重錘落下衝撃実験を対象に衝撃応答解析を行った。また、要素分割長 l お



図ー 10 各応答値に関する数値解析結果と実験結果の比較

よび減衰定数 h が解析結果に与える影響についても検討を行った。本研究の範囲内で得られた結果を整理すると、以下のように示される。

- (1) 小型 H 形鋼梁における要素分割長 ℓ は、2D および 3D モデルにかかわらず、梁高 D の 0.5 倍程度とし、減衰定数を $h = 5\%$ とすることにより、衝撃荷重載荷位置における梁の応答変位を 10% 以内の誤差で再現可能である。
- (2) 支点反力に関しては、最大応答値を過小評価する傾向にあるものの、その波形性状を大略再現可能である。
- (3) スパン長が短い場合や局部変形が卓越するような場合には、3D モデルの方が 2D モデルに比較して、解析精度は若干高い。

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) の助成を受けて実施したものである。また、本数値解析を実施するにあたり、室蘭工業大学構造力学研究室の木村ゆき君に多大なご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

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, 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, 19(3), pp. 313-320, 2009.
- 7) 黒田一郎, 塩野谷昇, 山本佳土, 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) 牛渡裕二, 小室雅人, 今野久志, 岸 徳光: 衝撃荷重を受ける RC 製ロックシェッドに関する三次元骨組動的応答解析法の適応性検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.703-708, 2013.
- 9) 小室雅人, 牛渡裕二, 武田雅弘, 岸 徳光: 衝撃荷重を受ける RC はりの動的応答性状に関するファイバー要素解析法の適用性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.529-534, 2014.
- 10) 今野久志, 山口 悟, 牛渡裕二, 岸 徳光: 実規模 RC 製ロックシェッドの三次元動的骨組における各種解析パラメータの影響に関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.607-612, 2015.
- 11) 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.

(2015 年 9 月 25 日受付)

(2016 年 2 月 1 日受理)