

論文 直接衝撃荷重を受ける扁平RC梁のファイバー要素解析

牛渡 裕二^{*1}・栗橋 祐介^{*2}・西 弘明^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨: 本論文では、直接衝撃荷重が作用する扁平RC梁の衝撃荷重載荷実験を適切に評価可能な解析手法を確立することを目的に、ファイバー要素を用いた二次元動的骨組解析を実施し、実験結果との比較検討を行った。また、数値解析におけるファイバー要素次数を変化させることによる影響について検討を行った。その結果、提案の数値解析モデルを用いることにより、1) 残留変位や断面欠損を生じない範囲においては、要素次数によらず解析結果は実験結果を精度良く再現可能であること、2) 圧壊等の断面欠損を生じるような損傷が生じる場合の解析では、要素次数の影響が顕著に生じる傾向にあることが明らかとなった。

キーワード: 扁平RC梁, 衝撃荷重載荷実験, 動的骨組解析, ファイバー要素, 要素次数

1. はじめに

近年、地震や集中豪雨に起因する落石や土石流、強風や竜巻による飛来物被害などの災害発生件数が増加しており、衝撃的な外力によって構造物が損傷する災害も多発している。これら構造物の損傷を防止するため、衝撃荷重作用面に緩衝材を設置する事例が多く見受けられる¹⁾。また、構造物の耐荷力向上あるいは損傷を受けた構造物の補修・補強に連続繊維を用いる事例も多い²⁾。このような経緯から、著者らもロックシェッドをはじめとする各種落石防護施設のほか、緩衝材や連続繊維に着目した耐衝撃問題に関する研究を多数行っており^{3~6)}、ロックシェッドの性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けた実規模実験も実施し、その衝撃挙動を明らかにした。また、実規模実験結果に対する三次元弾塑性衝撃応答解析(FEM)や三次元動的骨組解析を用いた再現解析を実施することで、その適用性についても検討を行ってきた。

しかしながら、衝撃荷重が繰り返して作用する場合における構造物の耐衝撃挙動に関する検討事例の多くは三次元有限要素法等の高価なプログラムによるものが多く、より簡易かつ広く普及されている骨組解析プログラムによる検討事例は少ないのが現状である。老朽化していく多数の落石防護施設等の社会インフラに対して、より合理的な耐衝撃設計を行うためには、骨組解析等の広く普及するプログラムによって、これらの問題に対して適切に評価可能な数値解析手法を確立することが急務であると考えられる。

そこで本研究では、ロックシェッド頂版を想定し、衝突位置に緩衝材を設置しない扁平RC梁の衝撃荷重載荷実験を適切に評価可能な解析手法を確立することを目的とし、ファイバー要素を用いた二次元動的骨組解析を実施し、実験結果と比較することでその解析手法の妥当性

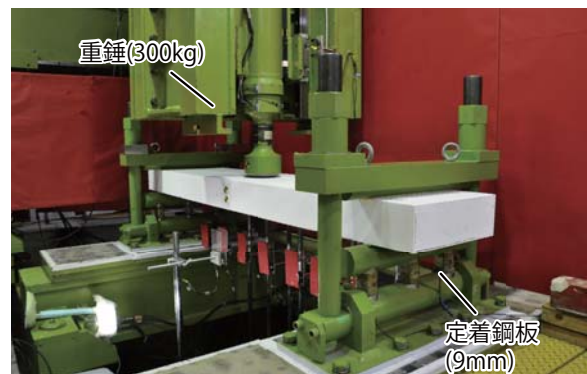


写真-1 実験状況

について検討を行った。また、数値解析結果の精度向上を目的として、部材のファイバー要素次数を変化させる場合についても解析を併せて実施し、その影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

写真-1に実験状況写真を示す。表-1に実験および解析を実施したケースの一覧を示す。試験体は載荷方法を2種類に変化させた計7体である。表中の試験体名の第1項目は載荷方法(S:単一, C:繰返)を示し、第2項目は落下高さH(m)を示している。図-1には、試験体の概要を示している。試験体は、断面寸法(幅×高さ)が450×150mmの扁平断面を有する複鉄筋RC梁である。試験体の配筋状況は、一般的なロックシェッドの頂板部を模擬しており、上縁および下縁鉄筋にはそれぞれD10およびD13を4本ずつ配置している。かぶり厚は、鉄筋からの芯かぶり度で高さ方向40mm、幅方向45mmとしている。また、中間拘束筋として軸直角方向にD6を120mm間隔で配筋している。また、実験時におけるコンクリートの

*1 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部部長 博(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工) (正会員)

*3 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 上席研究員 博(工) (正会員)

*4 (独) 高専機構 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)

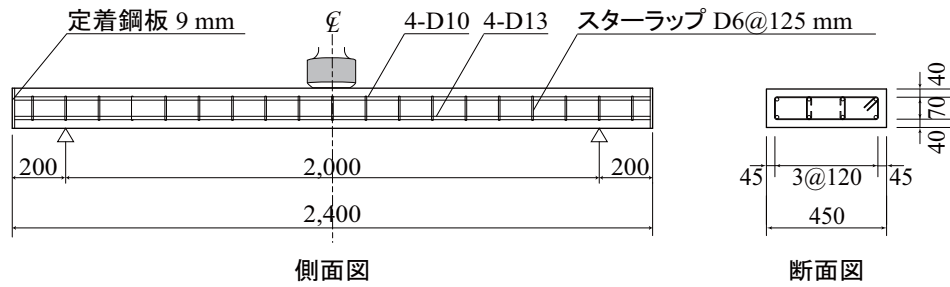


図-1 試験体図

表-1 実験・解析ケース一覧

ケース名	荷重方法	落下高 (m)	入力エネルギー (J)
S-0.5	単一	0.5	1,470
S-1.0		1.0	2,940
S-1.5		1.5	4,410
C-0.1	繰返	0.1	294
C-0.25		0.25	735
C-0.5		0.5	1,470
C-0.75		0.75	2,205

※単一荷重：解析ケース G1, G2, G3 を実施

繰返荷重：解析ケース G1, G2 を実施



写真-2 ひび割れ状況写真 (S-1.5 上面)

させて行った。繰返荷重実験では、同一の試験体に対して落下高さ $H = 0.1 \text{ m}$, 0.25 m , 0.5 m , 0.75 m の順番で荷重する漸増繰返荷重実験を各 1 回ずつ実施している (1 試験体 \times 4 ケース)。単一荷重実験では、繰返荷重実験での損傷状況を参考にして、個別の試験体に対して落下高さ $H = 0.5 \text{ m}$, 1.0 m , 1.5 m で実施した (3 試験体 \times 各 1 ケース)。実験に用いた重錘の底部は、2 mm のテーパを有する球面状となっている。扁平 RC 梁は、浮き上がり防止治具付きの支点上に設置しており、治具全体が回転を許容できる構造になっている。重錘衝撃力の測定は、重錘に内蔵した容量が 1,470 kN、応答周波数が DC 4.0 kHz のロードセルを用いて行った。荷重点変位は、容量 200 mm、応答周波数 915 Hz の非接触式レーザ変位計を用いて測定した。実験では、これらの応答波形を広帯域用メモリレコーダを用いて一括収録した。なお、実験終了後には扁平 RC 梁を撮影し、ひび割れ性状を観察している。

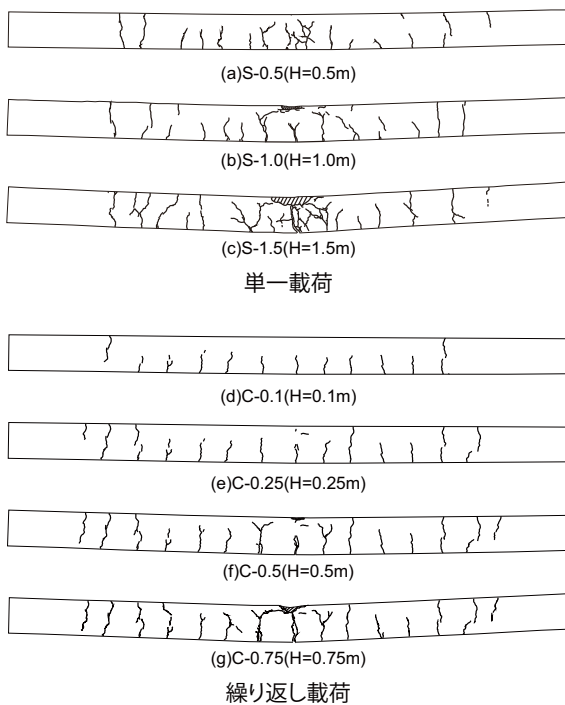


図-2 ひび割れ分布図 (側面図)

圧縮強度は 25.2 MPa, 軸方向鉄筋の降伏強度は D10 および D13 でそれぞれ 375, 377 MPa であった。

2.2 実験方法および計測方法

衝撃荷重実験は、質量 300 kg, 先端直径 200 mm の鋼製重錘を所定の高さから RC 梁のスパン中央部に自由落下

2.3 実験後のひび割れ性状

図-2 には、実験終了時における試験体側面のひび割れ性状を各落下高さ毎に示している。なお、圧壊により梁上面のコンクリート片が剥落した部分はハッチングにて表現している。図より、いずれの試験体においても広い範囲に曲げひび割れが発生していることが分かる。また、落下高さが増加すると曲げひび割れが上縁まで進展し、梁全域にわたり梁下縁から生じた曲げひび割れが上縁まで連続することが分かる。落下高さ $H = 0.75 \text{ m}$ を超える場合には梁上面に圧壊が生じ大きく損傷していることが分かる (写真-2 参照)。

3. 解析概要

図-3 に骨組解析で使用した骨組モデルおよびファイバー断面モデルを示す。なお、用いた解析プログラムは三次元動的骨組解析に対応しているが、実験内容を考慮

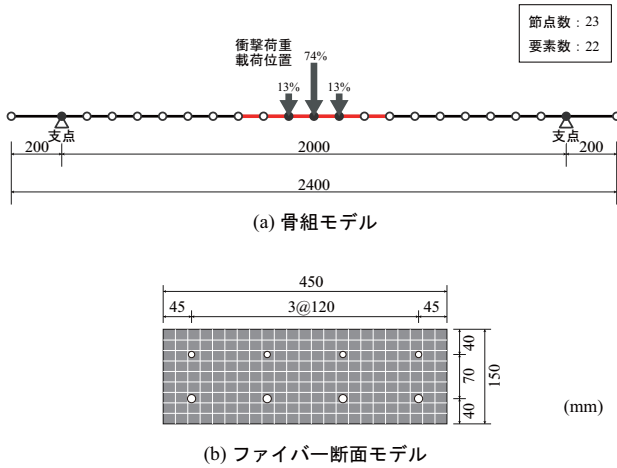


図-3 数値解析モデル

し、本検討では二次元動的骨組解析を実施した。コンクリートの耐衝撃問題に動的骨組解析を適用する場合には、既往の研究⁶⁾により計算条件として最小要素分割長を梁高 D の半分程度 ($0.5D$) 以上とすることが望ましく、かつ、解析精度を確保する場合は $1.0D$ 程度以下にする必要がある。そのため、本解析では要素長を 100 mm ($100/110 = 0.9D$) と設定した。

境界条件については、両支点の上下方向への変位を拘束し、回転および水平方向への変位を許容している。また、梁の鉛直方向変位を評価するため荷重点の水平方向への変位を拘束した。ファイバー要素断面のセル分割においては、セル要素の中心近傍に主鉄筋が配置されるように設定している。分割数は既往の研究成果⁶⁾に基づき、 20 mm 角程度の要素分割となるように縦横でそれぞれ等分割している。また、かぶりコンクリートの破損も考慮し、かぶり部に2分割以上のセルが配置されるように設定している。なお、本研究では骨組解析の適用性を検討することを目的とするため二次元解析を行っているが、プログラムの入力上の必要事項であるため梁幅方向へも要素分割している。減衰定数 h は、質量比例型減衰項のみを考慮することとし、事前に本解析モデルを用いた固有振動解析を行うことで、鉛直方向の一次曲げ振動モードに対応した固有振動数に対して、 $h = 1.0\%$ と設定している。

衝撃荷重作用方法は、図-3に示すように節点と重錘の接触面積比で各節点に荷重を入力している。入力荷重は既往の研究成果^{7~8)}より、実験で得られた重錘衝撃力波形を用いた。なお、繰返載荷の場合には後述する図-6に示すように、実験で得られた各落下高における重錘衝撃力波形を連続させた波形を使用し、波形入力間隔は梁の振動が十分に収束するように設定した。

また、落下高さが大きい場合には曲げひび割れのほか梁上面の圧壊が実験結果より確認されていることから、損傷の影響を評価することを目的として、ファイバー要

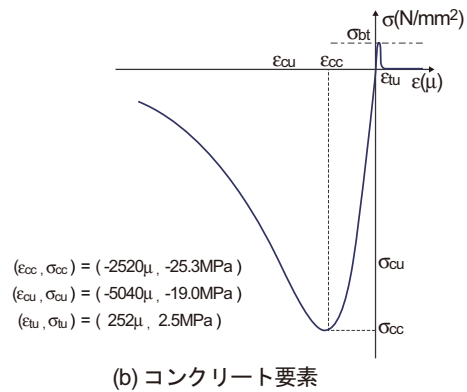
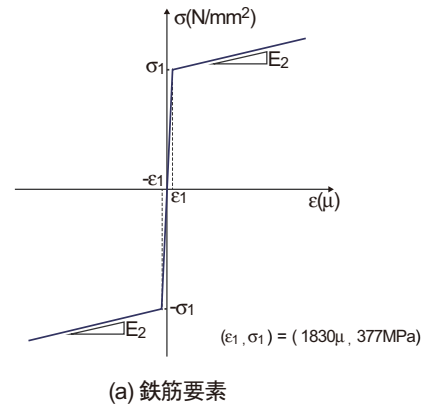


図-4 材料構成則モデル

素の要素次数を変えて解析を実施した。すなわち、すべての要素に2節点1次要素（曲率分布は要素長で一定）を採用したケース（以後、G1）、すべての要素に3節点2次要素（曲率分布は要素長さ方向に線形分布）を採用したケース（以後、G2）について解析を行い、要素次数の違いが耐衝撃挙動に及ぼす影響について検討した。さらに、単一載荷の場合には、荷重点近傍の6要素のみ（図-3(a)の赤色部分）を3節点2次要素とし、それ以外は2節点1次要素を採用したケース（G3）についても併せて解析を行い要素次数の適用範囲について検討を行った。

図-4には、解析に用いた材料物性モデルとしてコンクリート要素および鉄筋要素に用いた応力-ひずみ関係を示している。コンクリート要素の構成則モデルは、既往の研究⁶⁾と同様に東京大学コンクリート研究室で開発されたコンクリートの除荷・再載荷を含む経路依存型の構成則モデル^{9),10)}を採用している。なお、引張側に関しては圧縮強度の $1/10$ に達した段階で応力を伝達しないモデルとした。鉄筋要素は降伏後の塑性硬化係数 $H = 0.01 E_s$ とするバイリニア型の等硬化則を適用した。

図-5および図-6に、数値解析に使用した入力荷重を示す。入力荷重は、実験で得られた重錘衝撃力波形を用いて実施している。また、図-6には各繰返載荷の時刻を括弧内に示している。

なお、本数値解析には Engineer's Studio Ver.5.00.04 を使用している。

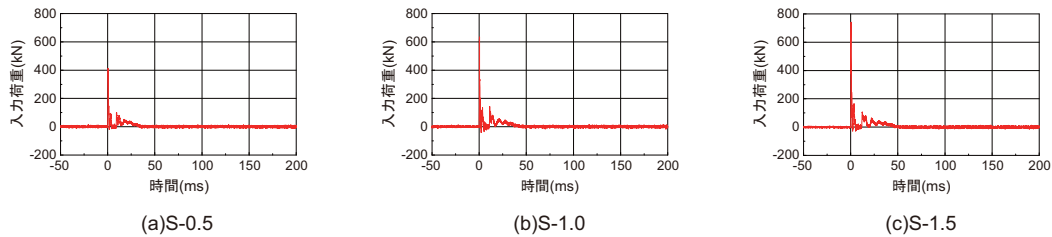


図-5 入力波形（単一載荷）

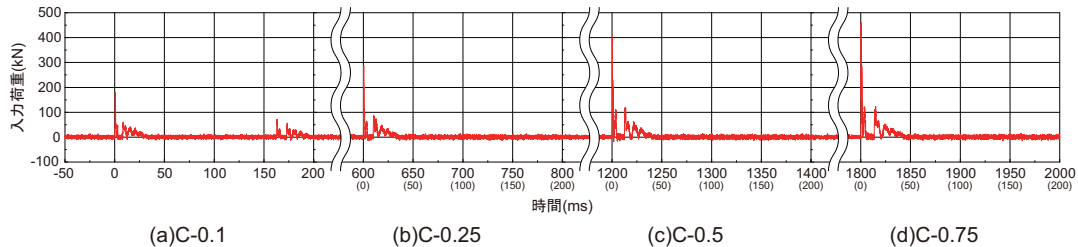


図-6 入力波形（繰返載荷）

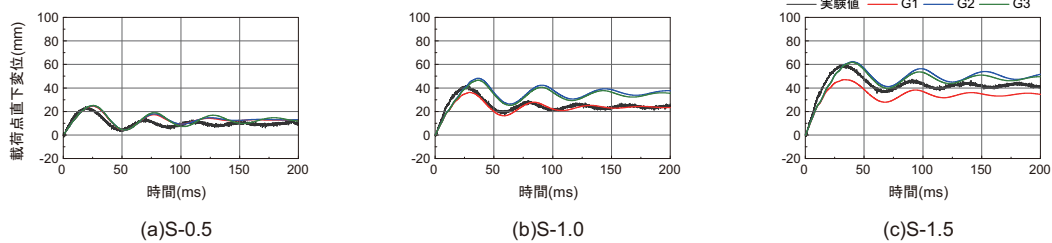


図-7 荷点変位波形（単一載荷）

4. 数値解析結果

4.1 単一載荷

(1) 荷点変位波形

図-7に、単一載荷の荷点直下における時刻歴変位波形を示す。また、図-8には $H = 1.0\text{ m}$ における最上縁セル要素の最大・最小ひずみ包絡線分布図を示す。なお、図は左右対称であることから右半分は省略している。

図より、 $H = 0.5\text{ m}$ 落下の場合には要素次数の影響は小さく、いずれも立ち上がりから最大応答値、残留変位まで実験結果を比較的精度よく再現できていることが分かる。

$H = 1.0\text{ m}$ 以降の場合に着目すると、1次要素を採用した場合 (G1) の荷点最大変位が実験結果よりも小さく評価されていることが分かる。これは、図-2および写真-2からも分かるように、実験では重錘衝突部が圧壊し著しい損傷が生じているのに対し、本解析における要素長は最小に設定しているものの1次要素を使用した場合には要素内変形の曲率分布が一定であることから、圧壊等の著しい損傷が生じる際には、変形を適切に評価することが困難であるためと推察される。一方、全要素に2次要素を採用した場合 (G2) および荷点近傍の一部の要素に2次要素を採用した場合 (G3) は、両者ともにほぼ同様な波形性状を示しており、実験結果よりも大きな変位が生じていることが分かる。また、図-8に示す

最上縁ひずみの包絡線分布図より、要素次数にかかわらず梁中央部から 0.1 m の範囲を除く全域で $252\ \mu$ 以上となり、特に梁中央部から $0.5 \sim 0.9\text{ m}$ 程度の範囲では $2,000\ \mu$ を超える大きなひずみが発生していることから、梁上縁からも曲げひび割れが生じる状況にあることが分かる。これは、図-2に示す実験時のひび割れ分布図より、支点付近で上縁まで達するひび割れを確認しており、同様の傾向であることを確認した。一方、圧縮ひずみは梁中央部から 0.1 m の範囲を除く全域で数百 μ 以上の圧縮ひずみが生じ、梁中央部 0.1 m の範囲では $-2,520\ \mu$ を大きく超過しており、実験結果と同様に圧縮破壊に至る傾向を示している。

なお、実験結果と解析結果において、減衰自由振動に位相差が認められるが、これは解析では支点の水平方向および回転を拘束しない条件で実施しているのに対し、実験では浮き上がり防止の支点治具の摩擦による影響で若干の水平方向および回転の拘束が作用したことから、試験体が見かけ上固くなる挙動を示したため、実験よりも解析の周期が若干長くなったものと推察される。また、この傾向は G2 および G3 のように、より損傷を評価出来ているケースにおいて顕著であることが分かる。

以上より、損傷が小さい場合には、要素次数の影響が認められず、いずれも実験結果を精度よく再現可能であ

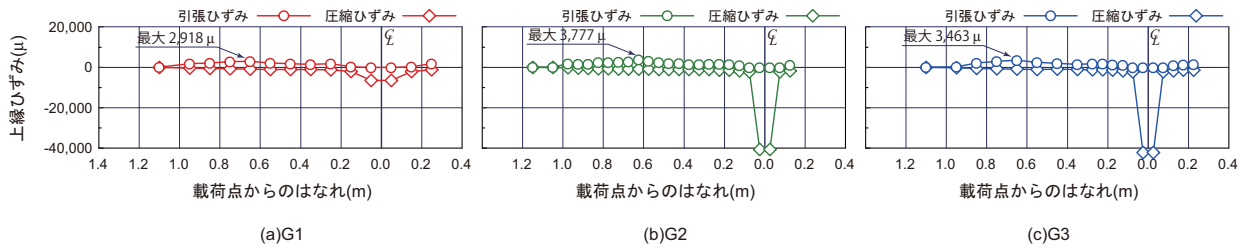


図-8 上縁ひずみ包絡線分布 (S-1.0)

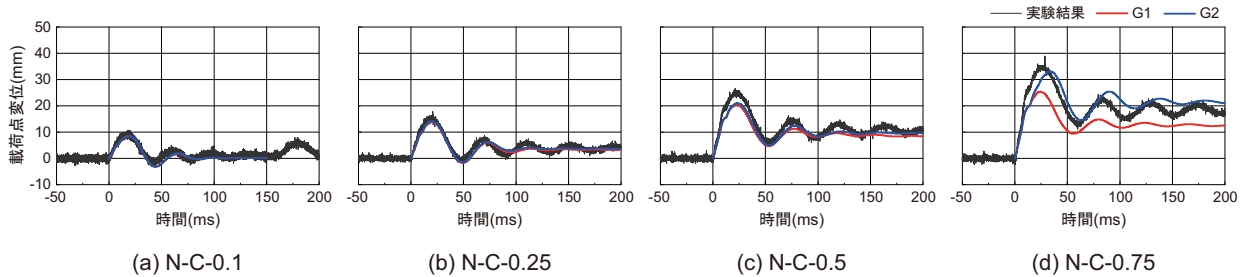


図-10 載荷点変位波形 (繰返載荷)

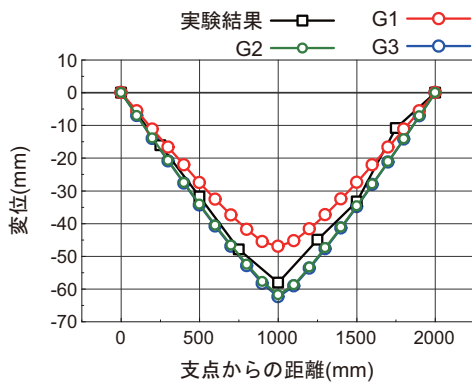


図-9 変位分布図 (S-1.5)

ること、損傷が大きい場合には、2次要素を使用することで載荷点変位を評価しうることが分かった。また、著しい損傷が生じると想定される範囲の要素のみに2次要素を使用することで、すべて2次要素とした場合と同程度の解析結果が得られることが明らかとなった。

(2) 変位分布

図-9に、 $H=1.5\text{ m}$ の場合における最大変位発生時の変位分布図を示す。図より、G1の場合には最大変位が小さく、また、変形曲率も大きく示されており、図-2(c)図に示されるような角折れ状態を再現できていないことが分かる。一方、G2およびG3の場合には、実験結果と同様に最大変位が大きく、また、載荷点近傍の変形曲率が小さく角折れ状態となっていることが分かる。これは、図-2(c)のように載荷点近傍が圧壊するような挙動を再現するためには、要素長を小さくするほか、2次要素の適用についても検討する必要があることを示唆している。

4.2 繰返載荷

図-10に、繰返載荷の載荷点直下における時刻歴変位波形を示す。

図より、単一載荷の場合と同様に、 $H=0.5\text{ m}$ 落下までは要素次数の影響は小さく、実験結果を比較的精度よく再現していることが分かる。また、 $H=0.75\text{ m}$ 落下では、G1の場合には実験結果よりも載荷点変位の最大値が小さいものの、G2の場合には実験結果と同程度の最大値を示しており実験結果をより再現できていることが分かる。これは、図-2(g)より、単一載荷と同様に $H=0.5\text{ m}$ よりも落下高さが大きい場合には梁上面に圧壊が生じており、G2においては、セル内の局所的なひずみ変動をある程度評価できたため、より実験を再現する結果が得られた一方で、G1において解析結果が実験よりも変形が小さくなる傾向を示していることは、要素内の積分点数が少なく、局所的なひずみ変動を考慮できなかったこと、および要素断面保持の仮定により、除荷後も要素には一定の抵抗力が残存し、断面が欠損する圧縮破壊のような離散現象を評価できなかったため、と推察される。

以上より、動的骨組解析においてコンクリート梁の損傷を適切に評価し、大変形問題に対応させるためには、比較的損傷が激しくなると想定される部材については、モデル化の段階で要素分割長を梁高 D の0.5倍程度とし、更に、より積分点数の多い要素を適用することが望ましい。

4.3 各種応答値の比較

図-11には、最大変位および残留変位に関する実験結果と数値解析結果の比較を分布図で示している。図より、(a)図の最大変位に着目すると、全体としてG1の数値解析結果が実験結果よりも小さい傾向を示していることが分かる。これは、図-8からも分かるように、G1の場合には本来局所的となる梁の破壊が要素単位で計算されるために、変形を過小に評価し、G2およびG3の場合には要素次数が多いことから、断面欠損するような破壊に至る

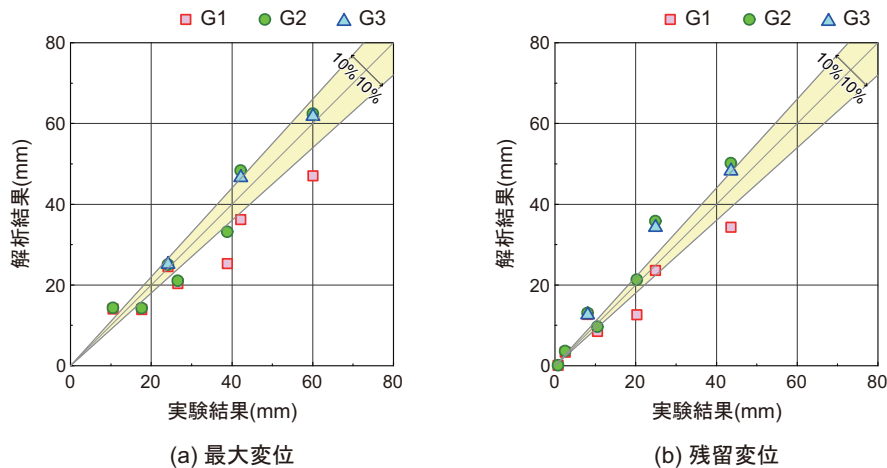


図-11 各種応答値の比較

までの計算上の過程をより局所的に評価できたため、梁の変形に関する再現性が高くなったものと推察される。

(b) 図の残留変位では、最大変位と同様に G1 の結果が実験結果よりも小さく示されている。また、G2 および G3 では全体的に実験結果と同程度以上の残留変位を示す傾向となる。

5. まとめ

本研究では、緩衝材を設置しない扁平 RC 梁の衝撃荷重実験を適切に評価可能な解析手法を確立することを目的とし、ファイバー要素を用いた二次元動的骨組解析を実施し、ファイバー要素次数を変化させることで実験結果との比較検討を行った。

本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) 残留変位や断面欠損を生じないレベルの解析では、要素次数によらず解析結果は実験結果を比較的精度良く再現可能である。
- 2) 圧壊等の断面欠損を生じるような損傷が生じる場合の解析では、要素次数の影響が顕著に生じる傾向にある。
- 3) 動的骨組解析においては、2次要素を使用することにより、1次要素を使用した場合に比較して、解析結果は実験結果をより適切に評価可能である。
- 4) 実験時に損傷の激しかった箇所にのみ2次要素を使用した場合においても、全ての要素を2次要素とした場合と同程度の結果を得ることが可能であるため、比較的損傷が激しくなると想定される部材については、モデル化の段階で要素分割長を梁高 D の 0.5 倍程度とし、更に、より積分点数の多い要素を適用することが望ましい。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧, 2000.6
- 2) 北海道開発局：道路防災工調査設計要領(案)(落石対策編), 2001.3
- 3) 岸徳光, 山口悟, 川瀬良司, 栗橋祐介, 佐伯侑亮：ロックシェットの衝撃荷重載荷時における設計断面力の安全余裕度に関する一検討, 構造工学論文集, Vol.61A, 2015.3
- 4) 山口悟, 小室雅人, 栗橋祐介, 今野久志, 岸徳光：敷砂または碎石緩衝材を用いた落石防護覆道の実規模衝撃載荷実験, 構造工学論文集, Vol.61A, 2015.3
- 5) 内藤直人, 前田健一, 山口悟, 今野久志, 牛渡裕二, 鈴木健太郎：二次元個別要素法解析による敷砂緩衝材の衝撃力伝達メカニズム, 構造工学論文集, Vol.61A, 2015.3
- 6) 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, 2014.7
- 7) 牛渡裕二, 今野久志, 小室雅人, 保木和弘, 岸徳光：RC 製ロックシェットに関するファイバー要素を用いた三次元骨組動的応答解析法の適用性検討, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.1008-1016, 2013.3
- 8) 牛渡裕二, 小室雅人, 今野久志, 岸徳光：衝撃荷重を受けた RC 製ロックシェットに関する三次元骨組動的応答解析の適用性検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.703-708, 2013.7
- 9) 岡村甫, 前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.5
- 10) K.Maekawa, A.Pimanmas and H.Okamura：Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spn Press, 2003.