

ファイバー要素を用いた扁平 RC 梁の動的骨組解析

Dynamic frame analysis of flat RC beam by means of fiber element approach

(株) 構研エンジニアリング	○ 正会員	高橋 浩司 (Koji Takahashi)
(株) 構研エンジニアリング	正会員	牛渡 裕二 (Yuji Ushiwatari)
室蘭工業大学	正会員	栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
(株) 構研エンジニアリング	非会員	岡 宣克 (Nobukatsu Oka)
(国研) 寒地土木研究所	正会員	西 弘明 (Hiroaki Nishi)
釧路工業高等専門学校	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

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への動的骨組解析による検討事例は少なく、落石防護施設等の社会インフラの維持管理および補強に関する耐衝撃設計を行うためには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必要がある。

そこで本研究では、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。

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。試験体数は荷重方法を変化させた全 4 体、実験ケース数は計 7 ケースである。表中の試験体名の第 1 項目は敷砂緩衝材の有無 (N: 無, S: 有)、第 2 項目は荷重方法 (S: 単一, C: 繰返) 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 × 150 mm 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で高さ方向 40 mm、幅方向 45 mm としている。また、中間拘束筋として軸直角方向に D6 を 120 mm 間隔で配筋している。また、実験時における



写真-1 実験状況

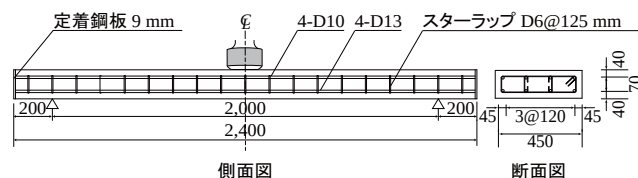


図-1 実験供試体

コンクリートの圧縮強度は 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

衝撃載荷実験は、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させて行った。重錘底部は、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、支点部の境界条件はピン支持に近い状態になっている。扁平 RC 梁の終局状態は、既往の研究と同様に残留変位量が純スパン長の 2% 程度に達した状態と定義している。測定項目は重錘衝撃力、荷重点変位である。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。

表-1 実験・解析ケース一覧

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



(a) N-S-0.5(H=0.5m)



(b) N-S-1.0(H=1.0m)



(c) N-S-1.5(H=1.5m)



(d) N-C-0.5(H=0.5m)



(e) N-C-0.75(H=0.75m)

図-2 ひび割れ分布図(側面図)

2.3 実験結果

図-2には、繰返し载荷実験終了時における側面のひび割れ性状を示している。ここでは、紙面の都合上 N-C-0.1/0.25 は省略している。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、いずれも両支点付近まで広い範囲に曲げひび割れが発生している。また、落下高さ $H=0.5$ 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

3.1 解析モデル

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。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、文献⁶⁾より計算条件として最小要素分割長は $0.5D$ 程度以上が望ましく、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

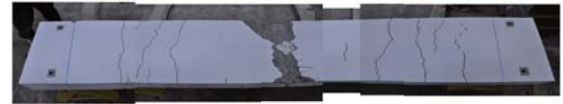
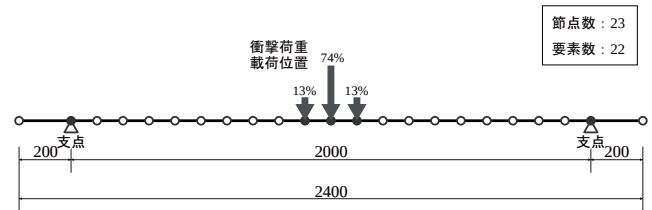
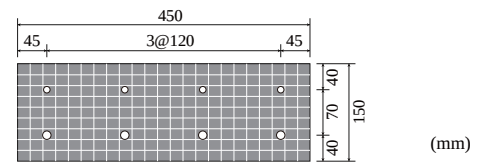


写真-2 ひび割れ状況写真(N-S-1.5 上面)

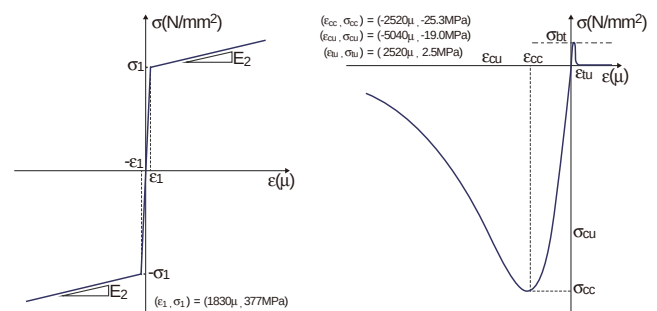


(a) 骨組みモデル



(b) ファイバー断面モデル

図-3 数値解析モデル



(a) 鉄筋要素

(b) コンクリート要素

図-4 材料構成則モデル

め、本解析では要素長を 100 mm ($100/110 = 0.9D$) と設定した。境界条件は支点の上下方向への変位を拘束し、回転は許容している。また、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。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、载荷点が卓越する鉛直方向曲げ振動モードに対応した固有振動数に対して、 $h = 2.5\%$ と設定している。

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素を2節点1次要素の場合(曲率分布は要素長で一定、以後、G1)

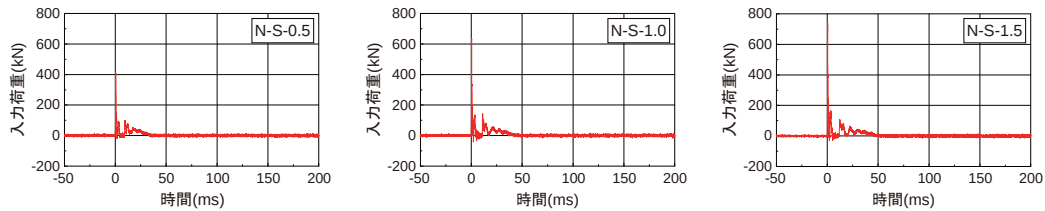


図-5 入力波形（単一載荷）

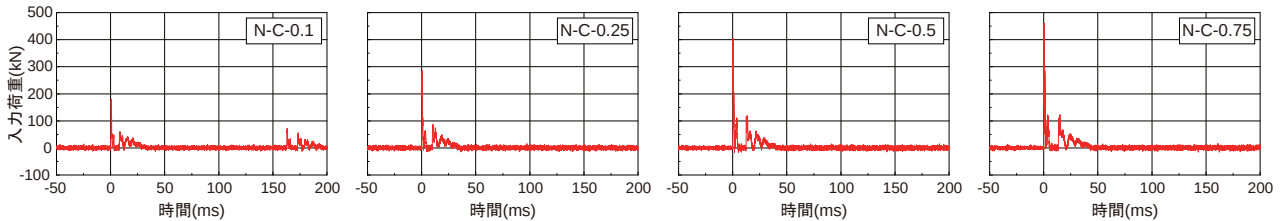


図-6 入力波形（繰返し載荷）

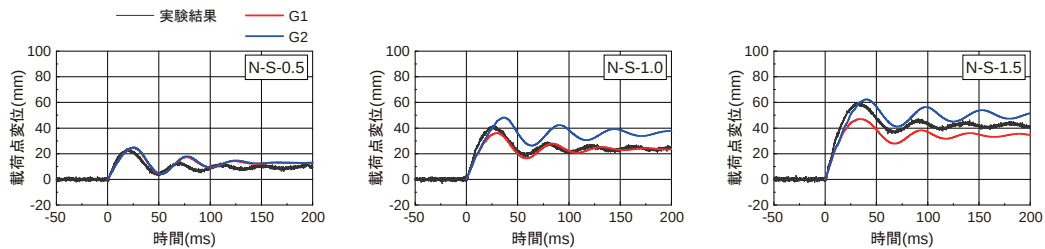


図-7 載荷点変位波形（単一載荷）

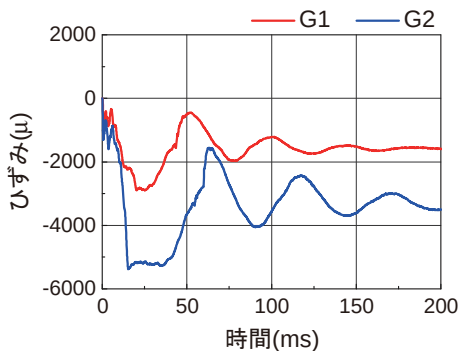


図-8 上縁ひずみ波形 ($H = 1.0$ m)

および3節点2次要素の場合（曲率分布は要素長さ方向に線形分布。以後、G2）について解析を実施し、曲率分布の違いが耐衝撃挙動に及ぼす影響について検討した。

図-4には、解析に用いた材料物性モデルを示している。(a)、(b)図には、鉄筋要素およびコンクリート要素に用いた応力-ひずみ関係を示している。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方硬化則を適用し、コンクリート要素の引張側にはひび割れが発生した段階で応力を伝達しないものとした。

図-5および図-6に、数値解析に使用した時刻歴入力荷重を示す。入力荷重は、実験で得られた重錘衝撃力を用

いて実施している。

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

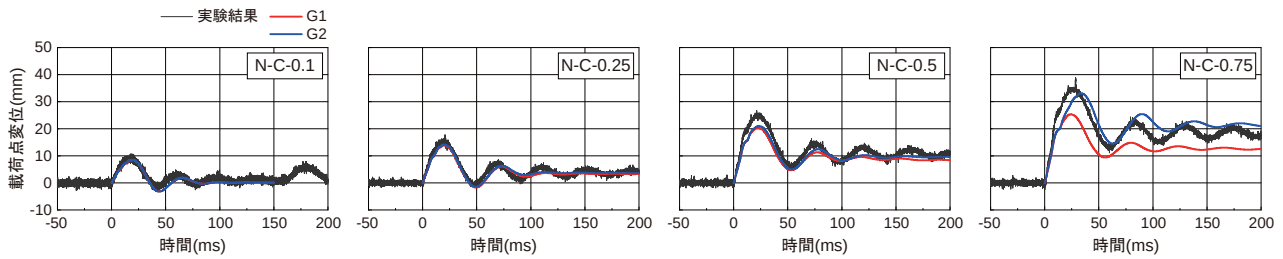
4. 数値解析結果

4.1 単一載荷

図-7に、単一載荷の載荷点直下における時刻歴変位波形を示す。また、図-8には $H = 1.0$ mにおける載荷点直下の要素における上縁コンクリートひずみの時刻歴波形を示している。

図より、 $H = 0.5$ m落下は要素次数の影響は小さく、両者ともに立ち上がりから最大応答値、残留変位まで実験結果を精度よく再現していることが分かる。 $H = 1.0$ m落下以降の場合にはG1の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、実験では重錘衝突部が圧壊して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（G1）の場合には各要素の曲率が一定であることから、圧壊等の激しい損傷が生じる場合には、変形に関する適切な評価が困難であることを示唆している。

一方、G2の場合には実験結果よりも大きな変位が生じていることが分かる。これは、図-8より、G1のにおけるコンクリート上縁ひずみが $\epsilon = 3,000 \mu$ 未満であることにに対し、G2の場合は $\epsilon = 5,000 \mu$ 以上となり圧縮軟化のひずみ域に至っていることによるものと考えられる。



図－9 載荷点変位波形（繰返し載荷）

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両者ともに実験結果を精度よく再現可能であること、損傷が大きい場合には要素長を最小とし、かつ、2次要素を使用することで載荷点変位を安全側に評価可能であることが明らかとなった。

4.2 繰返し載荷

図－9に、繰返し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、 $H = 0.5$ 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、 $H = 0.75$ m 落下の場合はG1の場合に実験結果よりも載荷点変位の最大値が小さく、G2の場合には実験結果を精度よく再現していることが分かる。これは、図－2(e)図より、単一載荷と同様に $H = 0.5$ m よりも大きい場合において梁上面に圧壊が生じていることより、G1の場合には要素次数が少なく、変形に関する適切な評価がなされ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、最小要素長を採用し、かつ、2次要素とすることが必要であることが分かった。

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、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高次要素（2次要素）を使用することにより、解析結果は実験結果をより適切にかつ安全側に評価可能である。
- 4) 比較的激しい損傷が想定されるRC部材の耐衝撃挙動を再現するためには、その範囲の部材を最小要素分割長かつ2次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