

引張破壊エネルギー等価の概念を考慮した小型 RC 梁の衝撃応答解析

Impact response analysis for small-sized RC beams by means of an equivalent fracture energy concept

室蘭工業大学大学院 ○学生員 瓦井 智貴 (Tomoki Kawai)
釧路工業高等専門学校 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学大学院 正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
三井住友建設 (株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)

1. はじめに

我が国における土木構造物の設計法は、かつては許容応力度設計法が採用されていた。しかし、近年は仕様設計型からより合理的とされる性能設計型に移行しつつあり、静的荷重に対する設計のみならず衝撃荷重載荷等、動的荷重載荷に対しても検討が行われている。

このような状況の下、著者らは最も単純な構造要素である RC 梁に着目し、耐衝撃性能を実験的・数値解析的に明らかにしてきた。例えば、実規模 RC 桁を対象とした重錘落下衝撃実験^{1)~3)}では、単一衝撃荷重載荷に対する設計式を提案するとともに、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施している。さらに、大型コンクリート構造物を精度良く解析するために、引張破壊エネルギー等価 (G_f) の概念を適用し、その妥当性も明らかにしてきた。

一方で、RC 梁の耐衝撃性の向上を目的に、小型 RC 梁を対象に新素材繊維 (FRP) シートやロッドを用いた補強工法を提案し、衝撃荷重載荷実験^{4)~7)}を実施している。その結果、いずれの補強工法に関しても、これらの RC 梁は、ひび割れの開口に伴うシートあるいはロッドの剥離や破断によって終局に至ることが明らかになっている。したがって、このような FRP 材を用いた補強 RC 梁の終局状況を精度よく推定、評価するためには、実験結果のひび割れ分布の再現性をより高める必要がある。

このような観点より、本論文では前述の G_f の概念を適用し、小型 RC 梁を対象にコンクリート要素を小さくすることによる、ひび割れ分布や各種応答波形の再現性について検討を行った。なお、本数値解析には、陽解法に基づく非線形動的構造解析用汎用コード LS-DYNA[®]を用いている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1 には、試験体の形状寸法と配筋を示している。試験体の形状寸法 (梁幅 × 梁高 × スパン長) は、200 × 250 × 3,000 mm である。また、軸方向鉄筋は上下端に D19 を各 2 本配置し、梁端面に設置した厚さ 9 mm の定着鋼板に溶接固定

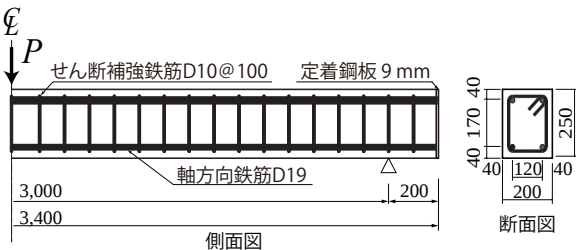


図-1 試験体の形状寸法と配筋

している。さらに、せん断補強鉄筋には D10 を用い、100 mm 間隔で配筋している。

2.2 実験方法

衝撃荷重載荷実験は、質量 300 kg、先端直径 200 mm の鋼製重錘を所定の高さから一度だけ梁のスパン中央部に自由落下させる単一載荷法に基づいて行っている。また、試験体の両支点部は、回転を許容し、浮き上がりを拘束するピン支持に近い構造である。写真-1 には、実験装置と試験体の設置状況を示している。なお、本数値解析では、設定落下高さ $H = 2.5$ m における無補強小型 RC 梁の単一衝撃載荷試験を対象として行った。

表-1 および表-2 には、コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を示している。なお、コンクリートの圧縮強度 f'_c および各鉄筋の降伏強度 f_y 、破断強度 f_u は別途実施した材料試験から得られた値である。

本実験の測定項目は、(1) 重錘衝撃力、(2) 合支点反力 (以後、単に支点反力)、(3) 載荷点変位 (以後、変位) である。なお、重錘衝撃力と支点反力は、起歪柱型の衝撃荷重測定用ロードセルを用いて計測した。また、変位波形はレーザ式非接触型変位計を用いて計測している。なお、実験終了後、RC 梁の側面を撮影しひび割れ性状の観

表-1 コンクリートの材料特性値

材料	圧縮強度 f'_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)	ポアソン比 ν_c
コンクリート	32.4	3.24	0.167

表-2 鉄筋の材料特性値

呼び径	降伏強度 f_y (MPa)	破断強度 f_u (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D10	461.9	614.0	206	0.3
D19	381.7	582.4		

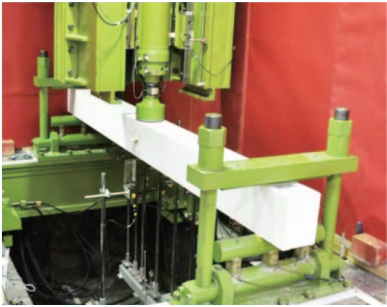


写真-1 実験装置と試験体の設置状況

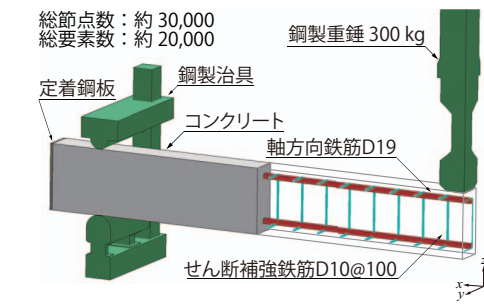


図-2 数値解析モデル

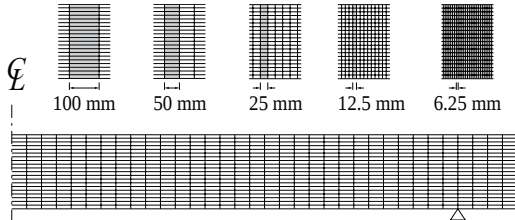


図-3 要素分割長

察を行った。

3. 数値解析概要

3.1 有限要素モデルおよび境界条件

図-2には、本研究で用いた数値解析モデルを示している。解析モデルは、RC梁の対称性を考慮し1/4モデルとした。梁軸方向の要素分割長に関しては、後述の数値解析結果より25 mm程度が妥当であることが明らかになっている。このため、本研究では図-3に示すように、 $L=25$ mmを基準に、100 mm, 50 mm, 12.5 mm, 6.25 mmに変化させて解析を行うこととした。

コンクリートと重錘および支点治具の要素間には、面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義しており、摩擦係数は0.25と仮定した。ここで定義している接触面は、2面間の接触と分離に伴う解析が可能であり、ペナルティ法を適用して接触反力が算定可能となっている。また、コンクリートと軸方向鉄筋要素間、コンクリートとせん断補強鉄筋間には完全付着を仮定している。衝撃荷重は、重錘要素をRC梁に接触する形で配置し、その全節点に実測衝突速度を付加することによって発生させることとした。また、減衰定数 h は、質量比例分のみを考慮するものとし、予備解析を実施して鉛直方向最低次固有振動数に対して0.5%と設定した。

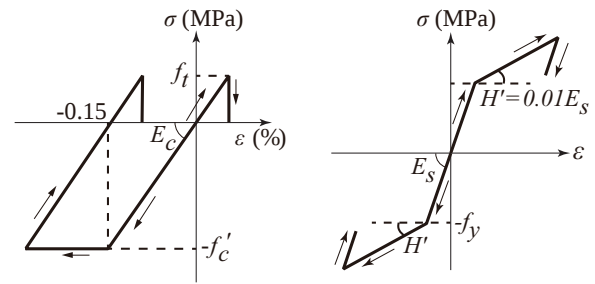
3.2 各材料における構成則モデル

(1) コンクリート

図-4(a)には、コンクリートの応力-ひずみ関係を示している。圧縮側は、相当ひずみが0.15%に達した段階で完全降伏するものとした。一方、引張側は要素分割長による影響を考慮して、既往の文献^{1)~3)}を参考に、 G_f 等価の概念を考慮した換算引張強度 f_t を用いることとし、引張応力がその値に到達した時点でカットオフされるモデルとしている。なお、換算引張強度 f_t は次式で与えられ、本解析では基準要素長 y_0 を25 mmと設定した。

$$f_t = f_{t0} \cdot \sqrt{\frac{y_0}{y_i}} \quad (1)$$

ここで、 f_{t0} : 材料試験から得られるコンクリートの引張強度 ($= f'_c/10$)、 y_0 : 基準要素長、 y_i : 要素分割長である。



(a) コンクリート

(b) 鉄筋

図-4 材料構成則

表-3 要素分割長と換算引張強度の関係

要素分割長 L (mm)	換算引張強度 f_t (MPa)
100	1.62
50	2.29
25 ^{#1}	3.24
12.5	4.58
6.25	6.48

^{#1} 基準要素長

表-3には、要素分割長 L と換算引張強度 f_t との関係を示している。なお、ポアソン比 ν_c は0.167を、単位体積質量 ρ_c には $\rho_c = 2.35$ g/cm³を用いることとした。

(2) 鉄筋

図-4(b)には、軸方向鉄筋およびせん断補強鉄筋に関する応力-ひずみ関係を示している。降伏後の塑性硬化を考慮したバイリニア型の構成則モデルであり、塑性硬化係数 H' は、弾性係数 E_s の1%と仮定している。降伏の判定は、von Misesの降伏条件に従うこととした。降伏応力 f_y 、弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s に関しては、表-2に示す値を用いた。なお、単位体積質量 ρ_s には公称値である $\rho_s = 7.85$ g/cm³を用いている。

(3) 重錘、支点治具および定着鋼板

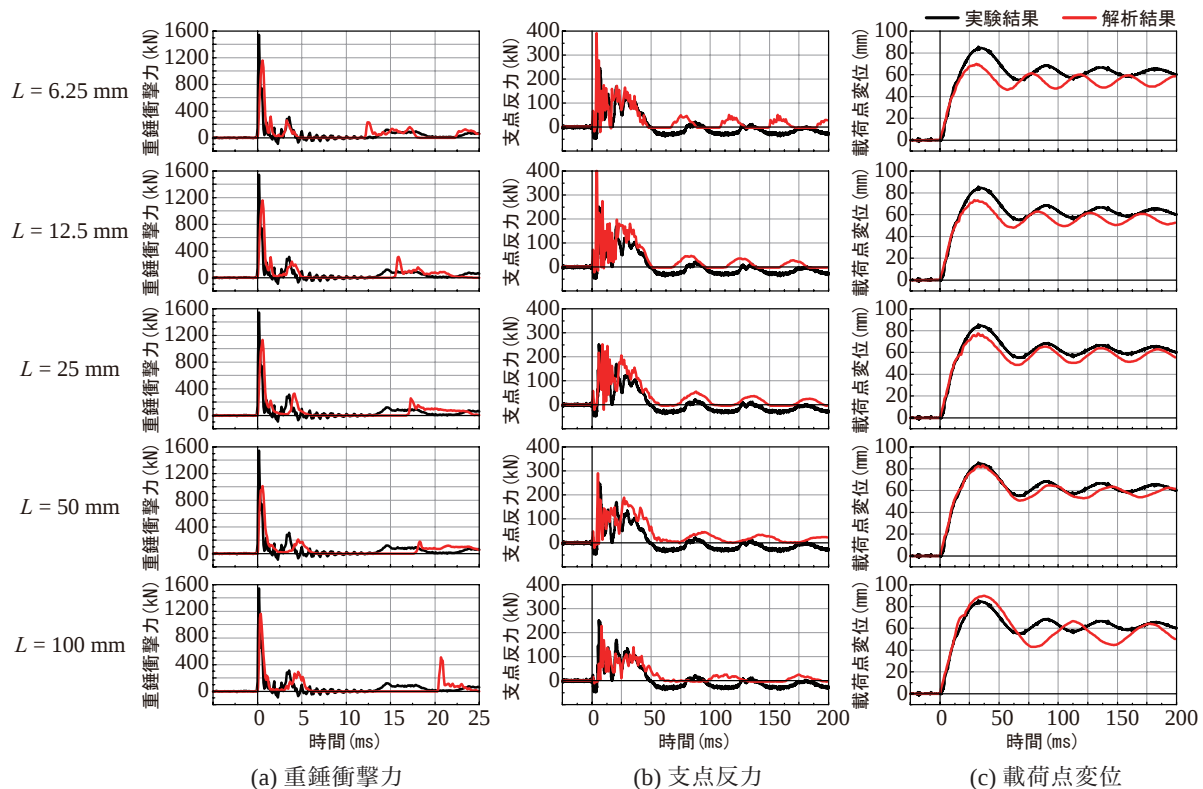
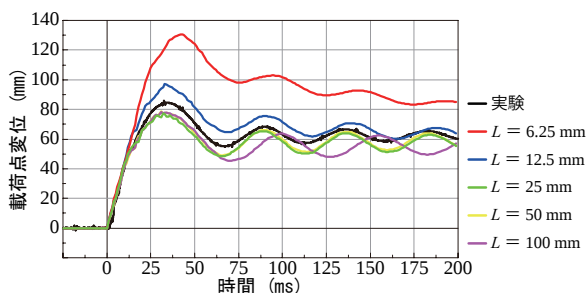
重錘、支点治具および定着鋼板の全要素に関しては、実験時に塑性変形が確認されていないことより、弾性体モデルを適用している。支点治具および定着鋼板の弾性係数 E_s 、ポアソン比 ν_s 、単位体積質量 ρ_s には公称値を用いており、それぞれ $E_s = 206$ GPa、 $\nu_s = 0.3$ 、 $\rho_s = 7.85$ g/cm³と仮定している。重錘に関しては、弾性係数 E_s 、ポアソン比 ν_s は同様の値を用い、単位体積質量 ρ_s は重錘質量300 kgを解析モデルの体積で除した値を入力している。

4. 数値解析結果および考察

本研究で提案する引張破壊エネルギー等価の概念を小型RC梁に適用するために、まずは基準要素長に関する検討を行う。その後、要素長を変化させた数値解析を実施し、実験結果との比較によって同概念の妥当性を検討した。

4.1 基準要素長に関する検討

図-5は、梁軸方向の要素長のみを $L=100, 50, 25, 12.5, 6.25$ mmに変更し、それぞれの載荷点変位を比較したものである。図より、要素長が小さいほど、数値解析結果における最大変位は実験結果よりも大きく示されていることが分かる。これは、要素分割が細くなると、RC

図-6 G_f を考慮した場合の各種応答波形図-5 G_f を考慮しない場合の載荷点変位

梁の損傷程度が実験結果よりも過大に評価されることによるものと考えられる。これより、本論文では実験結果を精度よく再現可能な要素長である 25 mm を基準要素長として採用し、以後の検討を行うこととした。

4.2 引張破壊エネルギー等価の概念に関する適用性検討

図-6 には、 G_f 等価の概念を適用した各要素長における各種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ている。なお、各要素における引張強度 f_t は表-3 に示すとおりである。

(a) 図に示す重錘衝撃力波形に着目すると、いずれの要素長においてもほぼ同様な解析結果を示しており、最大重錘衝撃力は実験結果よりも 400 kN 程度小さい。一方、第 2 波目のピーク時刻に着目すると、要素長が小さい $L = 6.25$ mm の場合には実験結果とよく一致しているのに対し、要素長が大きくなるにつれて解析結果は実験結果よりも遅れて励起されていることが分かる。

(b) 図に示す支点反力波形に着目すると、最大支点反力は基準要素長よりも小さい要素において実験結果よりも 200 ~ 300 kN 程度大きく、かつ減衰自由振動時における周期が短くなっている。しかしながら、波形の継続時間

については両者でほぼ一致していることが分かる。

(c) 図に示す変位波形に着目すると、要素長が小さくなるほど実験結果よりも最大変位を小さく評価しており、全体的な剛性が大きく示される傾向にあることが分かる。一方、基準要素長よりも大きい場合には、減衰自由振動における振幅が大きく評価されているものの、最大変位に関しては実験結果をほぼ適切に評価していることが分かる。

図-7 は、 G_f 等価の概念の適用有無と各要素長について最大変位と残留変位に着目して整理したものである。なお、縦軸は実験結果に対する解析結果の誤差を意味している。

(a) 図に示す最大変位に着目すると、 G_f を考慮しない場合には要素長が小さいほど最大変位は大きく評価され、実験結果との誤差も大きく示されている。また、要素長が大きくなると実験結果よりも小さく評価する傾向が見てとれる。

一方、 G_f の概念を適用する場合には、要素長によって誤差が異なるものの、いずれの要素長においてもその誤差は 20 % 以内に収まることが確認できる。さらに、基準要素長よりも大きな要素長を用いる場合には、その誤差は 10 % 以内であり、 G_f の概念を適用する場合には、要素長が大きい場合の方が精度が高い傾向にあることが分かる。

(b) 図に示す残留変位に関しても、最大変位とほぼ同様な傾向があることが分かる。

4.3 ひび割れ分布

図-8 には実験終了後の試験体上面、側面および底面のひび割れ分布と G_f を考慮した各解析結果 (要素長 $L = 50, 25, 6.25$ mm) におけるひび割れ分布を比較して示している。

まず実験結果に着目すると、(a) 図より側面のひび割れ

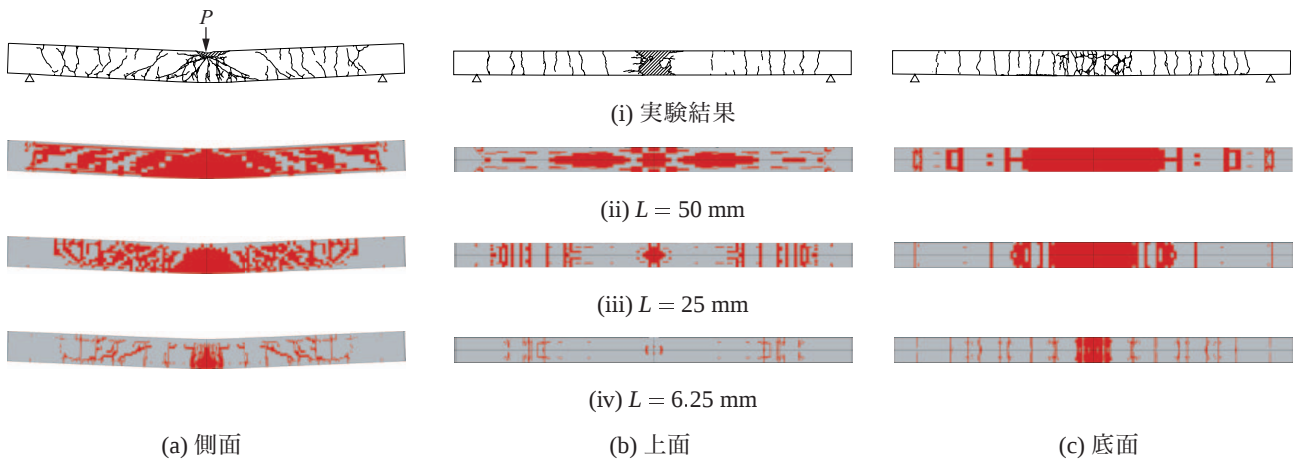


図-8 ひび割れ分布の比較

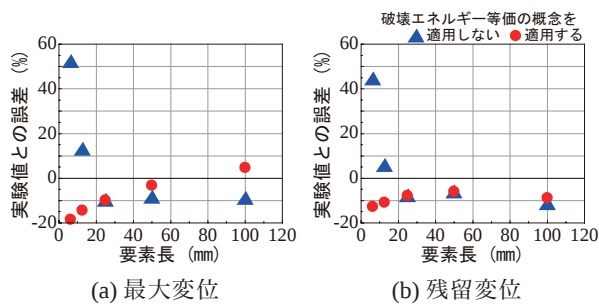


図-7 実験値と解析値の誤差

は、梁下縁から鉛直方向に進展する曲げひび割れや、荷重点近傍から梁下縁に向かって進展する斜めひび割れが発生していることが分かる。(b)図に示す梁上面では、重錘衝突部にひび割れが確認されるとともに、支点近傍にもひび割れが発生している。これは、衝撃初期に曲げ波が両端固定梁のような状態で支点に向かって伝播することによるものと推察される。また、梁底面のひび割れは荷重点直下から支点に向かってほぼ一定の間隔で発生している。

一方、数値解析結果に着目すると、分割長の大きい $L = 50 \text{ mm}$ の場合には、梁側面の広範囲にひび割れを示す赤色領域が分布しており、実験結果と大きく異なる。また、上面や底面に関しても実験結果のひび割れの再現性は低いことが確認される。 $L = 25 \text{ mm}$ の場合には、 $L = 50 \text{ mm}$ の場合と比較して、側面の損傷が軽減されており、上面のひび割れ分布も実験結果に近づいているものの、底面の損傷は実験結果よりも大きいことが分かる。一方で、要素長 $L = 6.25 \text{ mm}$ の場合には、側面や上面のひび割れが実験結果と比較して若干少ないものの、実験結果に見られる曲げひび割れや荷重点近傍から梁下縁に向かう斜めひび割れを適切に再現していることが分かる。

5. まとめ

本研究では、小型 RC 梁の耐衝撃挙動やひび割れ分布を適切に評価可能な解析手法の確立を目的とし、コンクリート要素に引張破壊エネルギー等価の概念を適用した三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。本研究により得られた結果は、以下の通りである。

- 1) 引張破壊エネルギーを考慮せずに、要素分割を細くする場合には、実験結果を適切に再現することは困難である。
- 2) 引張破壊エネルギーを考慮し、基準要素長よりも大きな要素長を用いる場合には、ひび割れ分布を除き実験結果を大略再現可能である。
- 3) 一方、要素分割を細くする場合には、ひび割れ性状は実験結果とよく対応するものの、最大変位に関しては実験結果を過小評価する傾向にある。

今後は、ひび割れ性状を適切に再現可能にするために、要素長の小さい場合においても実験結果をより再現できる解析手法について検討を進める予定である。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP15K06199 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 岸 徳光, A.Q. Bhatti, 今野久志, 岡田慎哉: 重錘落下衝撃荷重載荷時の大型 RC 桁に関する衝撃応答解析法の適用性検討, 構造工学論文集, Vol. 52A, pp. 1261-1272, 2006.3
- 2) 岸 徳光, A.Q. Bhatti, 三上 浩, 岡田慎哉: 破壊エネルギー等価の概念を用いた大型 RC 桁に関する衝撃応答解析手法の妥当性検討, 構造工学論文集, Vol. 53A, pp. 1227-1238, 2007.3
- 3) Kishi, N, and A. Q. Bhatti: An equivalent fracture energy concept for nonlinear dynamic response analysis of prototype RC girders subjected to falling-weight impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, 37(1), pp. 103-113, 2010.1
- 4) 今野久志, 西 弘明, 栗橋祐介, 岸 徳光: AFRP シート接着補強による損傷 RC 梁の耐衝撃挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, pp.721-726, 2013.7
- 5) 三上 浩, 今野久志, 栗橋祐介, 岸 徳光: AFRP シート曲げ補強 RC 梁の耐衝撃挙動に及ぼすシート目付量の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, pp. 523-528, 2014.7
- 6) 栗橋祐介, 三上 浩, 今野久志, 佐藤元彦, 岸 徳光: AFRP シート曲げ補強した RC 梁のシート破断抑制法に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 62A, pp. 1043-1052, 2016.3
- 7) 佐藤元彦, 岸 徳光, 栗橋祐介, 三上 浩, 小室雅人: AFRP ロッドで曲げ補強した RC 梁の重錘落下衝撃実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 72 号, A-03(CD-ROM), 2016.1
- 8) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2014.