

CFRP シートを用いて下面接着曲げ補強を施した RC 梁の衝撃応答解析

Impact response analysis for RC beams strengthened with externally bonded CFRP sheet

室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
三井住友建設（株）
（株）構研エンジニアリング

○学生員
正 員
名誉会員
フェロー
正 員

瓦井 智貴 (Tomoki Kawarai)
小室 雅人 (Masato Komuro)
岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三上 浩 (Hiroshi Mikami)
鈴木 健太郎 (Kentaro Suzuki)

1. はじめに

近年、既設土木構造物の耐衝撃性向上法の1つとして軽量で高強度な連続繊維(FRP)シートを用いた接着工法が適用されている。著者らの研究グループでは本工法に着目し、数多くの実験的検討によって、本工法を適用することで構造物の耐衝撃性が向上することや、損傷の進展メカニズムを明らかにしてきた¹⁾。さらに、実験結果を適切に再現可能な解析手法の確立を目的として、FRP補強構造物特有のひび割れ分布を再現するためにコンクリート要素の梁軸方向要素長を6mm程度まで小さくし、かつ既往の研究²⁾で提案されている引張破壊エネルギー(G_f)等価の概念を適用した解析手法も提案し、その適用性について検討を行っている³⁾。しかしながら、これまでの数値解析的検討はいずれもAFRP材を用いて補強した場合のみについてであり、数値解析手法の汎用性を高めるには異なるFRP材料を用いた場合についても検討することが重要であると判断される。

このような観点より、本研究ではCFRPシート接着RC梁の耐衝撃挙動およびひび割れ分布の再現を目的とし、別途実施した重錘落下衝撃実験結果を対象に、三次元弾塑性

衝撃応答解析を実施した。また、実験結果と比較する形で本解析手法の適用性を検討した。なお、本数値解析には陽解法に基づく非線形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、本研究で対象としたCFRPシート下面接着補強RC梁(以後、シート補強RC梁)の形状寸法と配筋および補強状況を示している。試験体の形状寸法(梁幅×梁高×スパン長)は、200×250×3,000mm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9mmの定着鋼板に溶接固定している。せん断補強筋にはD10を用い、100mm間隔で配筋している。また、CFRPシートは、RC梁下面に支点5cm手前までエポキシ系含浸接着樹脂を用いて接着している。写真-1には本研究で用いたCFRPシートを、表-1にはその力学的特性値(公称値)を示している。

2.2 実験方法および測定項目

衝撃載荷実験は、質量300kg、先端直径200mm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ことで実施した。試験体の両支点部は、写真-2に示すように回転を許容し、浮き上がりを拘束するピン支持に近い構造となっている。

表-2には、本研究で対象とした試験体の一覧を示している。本研究では、シート補強RC梁を対象に重錘落下

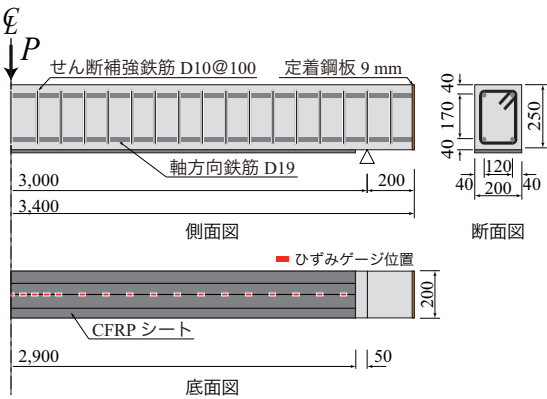


図-1 試験体の形状寸法と配筋



写真-1 CFRP シート

表-1 CFRP シートの力学的物性値(公称値)					
目付量 (g/m ²)	密度 (g/cm ³)	設計厚 (mm)	引張強度 f_{fu} (GPa)	弾性係数 E_f (GPa)	破断ひずみ ϵ_{fu} (%)
600	1.80	0.333	3.40	245	1.39



写真-2 実験装置と試験体の設置状況

表-2 試験体一覧

試験体名	設定 落下高 H (m)	実測 落下高 H' (m)	コンクリート 圧縮強度 f'_c (MPa)	軸方向鉄筋 降伏強度 f_{ya} (MPa)	せん断筋 降伏強度 f_{ys} (MPa)
CS-H1.0	1.0	1.12	32.4	318.7	461.9
CS-H2.0	2.0	1.77			
CS-H2.5	2.5	2.29			
CS-H3.0	3.0	3.07			

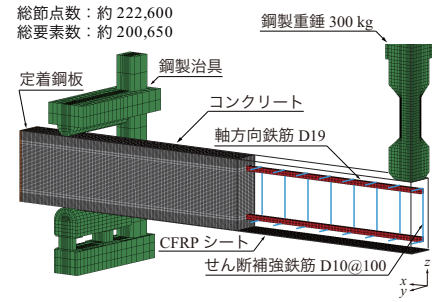


図-2 有限要素モデル

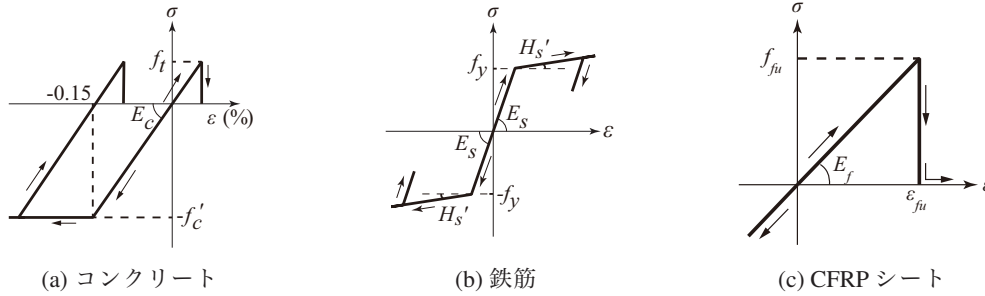


図-3 材料構成則

高さ H を 1.0 ～ 3.0 m と 4 種類に変化させた実験を実施した。表中の試験体名のうち、第 1 項目は CFRP シート補強を示し、第 2 項目の H に付随する数値は設定重錘落下高さ (m) を示している。実験においては、落下高さ $H = 3$ m 時に CFRP シートの剥離によって終局に至っている。なお、表中の実測落下高 H' (m) は実測衝突速度から換算した自由落下高さであり、コンクリートの圧縮強度 f'_c 、軸方向鉄筋およびせん断筋の降伏強度 f_{yi} 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) 支点反力の合計値 (以後、単に支点反力)、(3) スパン中央点変位 (以後、載荷点変位)、および (4) 図-1 に示すように CFRP シートに貼付したひずみゲージによる軸方向ひずみ分布である。また、実験終了後には RC 梁のひび割れ分布を記録した。

3. 数値解析概要

3.1 有限要素モデル

図-2 には、本研究で用いたシート補強 RC 梁に関する数値解析モデルを示している。解析モデルは、対称性を考慮してスパン方向および桁幅方向にそれぞれ 2 等分の 1/4 モデルを採用した。適用した要素タイプは、せん断補強筋には 2 節点梁要素、それ以外には全て 8 節点固体要素を用いている。なお、軸方向鉄筋は公称断面積と等価な正方形断面に簡略化している。要素の積分点数に関しては、8 節点固体要素に対して 1 点積分、2 節点梁要素に対して 4 点積分とした。

CFRP シートに関しては表-1 に示すように設計厚が 0.333 mm と非常に薄く、これを 8 節点固体要素を用いてモデル化する場合には、陽解法では計算時間が過大になる。このため、本研究では便宜的に厚さを仮想的に 10 倍にすることとし、その軸剛性が等価となるように、弾性係数を 1/10 とした。

コンクリートと重錘間およびコンクリートと支点治具

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た。また、接触反力の算定にはペナルティ法を適用している。ただし、摩擦は考慮していない。コンクリートと軸方向鉄筋およびせん断補強筋要素間には滑りなどを考慮せずに完全付着と仮定した。コンクリートと CFRP シート要素間についても同様に、完全付着と仮定した。

衝撃荷重は重錘要素を RC 梁に接触する形で配置し、その全節点に表-2 に示す実測落下高さ H' に相当する衝突速度を付加することで発生させている。また、減衰定数 h は質量比例分のみを考慮するものとし、予備解析により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 材料構成則

図-3 には、本数値解析で用いたコンクリート、鉄筋および CFRP シートの応力-ひずみ関係を示している。以下に、各材料物性モデルの概要を述べる。

図-3 (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バイリニア型としている。降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式を採用し、圧縮強度 f'_c に関しては別途実施した材料試験から得られた表-2 に示す値を入力している。

一方、引張側に対しては線形の相当応力-相当ひずみ関係を仮定し、破壊圧力に到達した段階で引張力を伝達しないモデル (カットオフモデル) を採用した。また、ここでは FRP 補強 RC 梁特有の梁全体に広がる多数のひび割れを適切に評価するために、コンクリート要素の梁軸方向要素長 L_i を 6 mm 程度まで小さくし、かつ既往の文献³⁾を参考に G_f 等価の概念を考慮した換算引張強度 f_{ti} を用いることとした。なお、換算引張強度 f_{ti} は次式で与えられ、本解析では予備解析より基準要素長 L_0 を 25 mm と決定した。

$$f_{ti} = f_{t0} \cdot \sqrt{\frac{L_0}{L_i}} \quad (1)$$

ここで、 f_{ti} : 換算引張強度、 f_{t0} : 材料試験から得られるコ

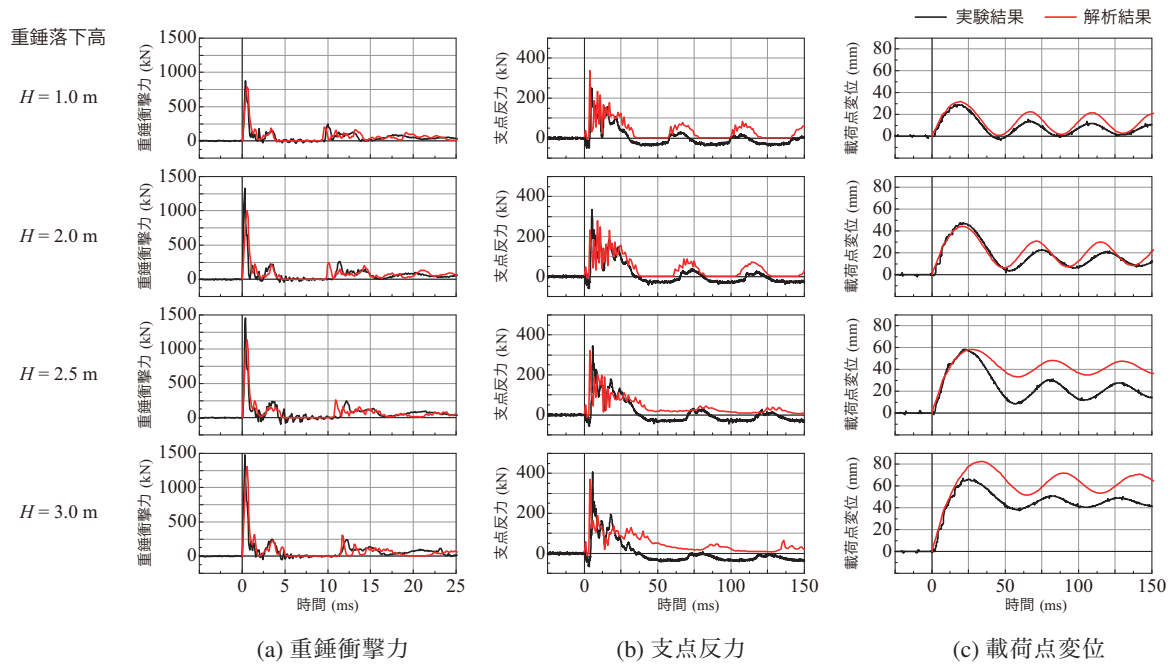


図-4 各種応答波形

ンクリートの圧縮強度に基づいた引張強度($=f_c^t/10$), L_0 : 基準要素長, L_f : 任意の要素分割長である. なお, 単位体積質量 ρ_c およびポアソン比 ν_c は, それぞれ $\rho_c = 2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\nu_c = 0.167$ を用いることとした.

図-3 (b)には, 軸方向鉄筋およびせん断補強筋に関する応力-ひずみ関係を示している. 本モデルは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る. 降伏応力 f_y は表-2に示す値を用いた. また, 単位体積質量 ρ_s , 弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s に関しては公称値を用い, それぞれ $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $E_s = 206 \text{ GPa}$, $\nu_s = 0.3$ とした. 降伏の判定は, von Mises の降伏条件に従うこととし, 塑性硬化係数 H' は弾性係数 E_s の1%と仮定している.

CFRPシートは, 図-3 (c)に示すように弾性体と仮定し, 破断ひずみ ε_{fu} に達した時点でカットオフされるものとした. 単位体積質量 ρ_f はシート厚さを10倍にしてモデル化していることより, 公称値である $\rho_f = 1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ の1/10とし, 弾性係数 E_f も同様に表-1に示す値の1/10とした. なお, 破断ひずみ ε_{fu} は表-1に示す値を用いた.

支点治具, 定着鋼板および重錘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. 弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s には公称値を用いることとし, それぞれ $E_s = 206 \text{ GPa}$, $\nu_s = 0.3$ と仮定している. 単位体積質量 ρ_s については, 支点治具および定着鋼板はともに公称値である $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を用いているが, 重錘に関しては重錘質量 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

4.1 各種時刻歴応答波形

図-4は, 本研究で対象とした全ケースに関して, 重錘衝撃力, 支点反力, 载荷点変位の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たものであり, 黒線が実験結果, 赤線が解析結果を表している. なお, 横軸は重錘がコンクリートに衝突した時刻を零としている.

まず, 図-4 (a)の重錘衝撃力波形に着目すると, 実験結果では, いずれの落下高さ H においても振幅が大きく継続時間が1 ms程度の第1波に, 振幅が小さい第2波目が後続する性状を示していることが分かる. 一方, 数値解析結果は最大重錘衝撃力を過小評価する傾向にあるものの, 実験結果をほぼ適切に再現可能であることが分かる.

次に, 図-4 (b)の支点反力波形に着目すると, 実験結果は, 継続時間が30~40 ms程度の主波動に高周波成分が合成された分布性状を示している. 数値解析結果に着目すると, 落下高さ $H = 1, 2 \text{ m}$ の場合には実験結果を概ね評価可能であるものの, $H = 2.5, 3 \text{ m}$ の場合には, 40 ms以降反力が零に収束していない. これは, 解析結果においては後述するようにシート剥離のような挙動を示し, 実験結果よりも変形が大きく, 支点の飛び跳ね防止治具を上方に押し上げるように梁が過大に変形したことが一因と考えられる.

最後に, 図-4 (c)の载荷点変位波形に着目すると, 落下高さ $H = 1, 2 \text{ m}$ の場合には数値解析結果は実験結果を精度良く再現可能であることが分かる. 一方で, $H = 2.5 \text{ m}$ の場合には, 実験時にシート剥離が生じていないものの, 数値解析結果においては下縁鉄筋に沿うようにひび割れ相当領域が広がったため, 残留変位を実験結果よりも過大に評価する傾向にある. $H = 3 \text{ m}$ の場合には解析結果は最大変位および残留変位に関して, 実験結果よりも大きい値を示しているものの, 後述するように実験結果と同様なシート剥離現象が生じていることを確認している.

4.2 ひび割れ分布

図-5には, 落下高さ $H = 2, 2.5, 3 \text{ m}$ における実験終了後の梁側面のひび割れ分布を解析結果から評価されるひび割れ分布と比較して示している.

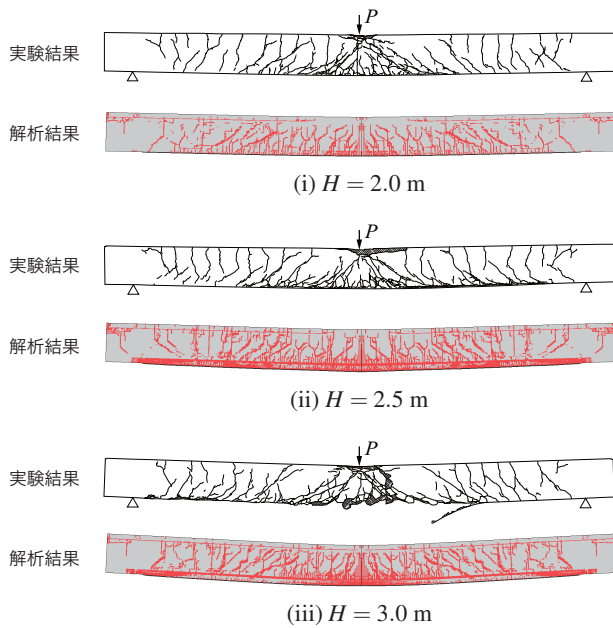


図-5 梁側面のひび割れ分布比較

図より、落下高さ $H = 2$ m の場合には実験結果および解析結果は、曲げひび割れやせん断ひび割れなどの分布性状が概ね一致している。一方で、 $H = 2.5$ m の場合には解析結果においては下縁鉄筋に沿うようにひび割れを示す赤色領域が生じ、シート剥離に至っており、実験結果よりも損傷を過大に評価している。しかしながら、実験結果においても梁右下縁に支点 20 cm 手前までひび割れの進展が確認でき、終局に非常に近い状態であることも読み取れる。シートの剥離で終局に至った落下高さ $H = 3.0$ m の場合には、解析結果において $H = 2.5$ m 同様に下縁鉄筋に沿うように赤色のひび割れ領域が広く分布していることが分かる。すなわち、実験結果と同様にシート剥離現象が生じているものと判断される。

4.3 CFRP シートの軸方向ひずみ分布

図-6 には、落下高さ $H = 2, 3$ m に関する CFRP シートの軸方向ひずみ分布について、解析結果と実験結果を時系列的 ($t = 1 \sim 40$ ms) に比較して示している。

図より、実験結果に関しては、いずれの落下高さ H においても、重錘衝突直後 ($t = 1$ ms) の時点で、梁中央部に引張ひずみが、また中央から 0.5 ~ 1 m の範囲には圧縮ひずみが生じていることが確認できる。これより、重錘衝突初期には両端固定梁のような状態で曲げ波が支点に向かって伝播することが確認できる。その後、最大変位到達時刻付近 ($t = 20$ ms) に至るまで、梁全体のひずみが増大していき、 $t = 20$ ms 以降で $H = 3$ m のみシートの軸方向ひずみが均一になっていることより、シートの剥離発生が見て取れる。

数値解析結果に着目すると、 $H = 2$ m では重錘衝突直後から最大変位到達時刻および減衰自由振動状態に至るまで、実験結果のひずみ分布を非常に良く再現している。一方、 $H = 3$ m の場合には、 $t = 10$ ms の時点でシートひずみが均一になっており、実験結果よりも早期にシート剥離現象が生じているものの、 $t = 30$ ms 以降においては実験結果と同様な分布を示している。

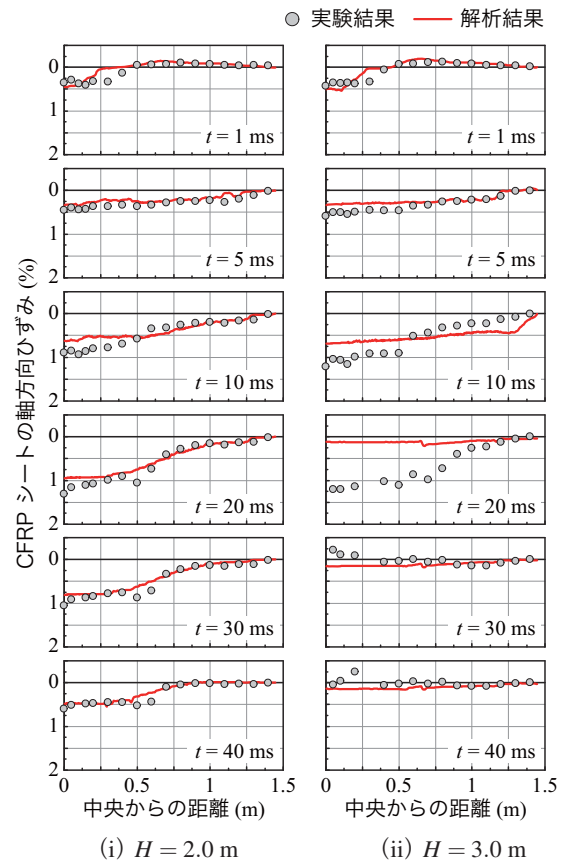


図-6 CFRP シートの軸方向ひずみ分布

5. まとめ

- 1) 既往の研究より提案されているコンクリートの要素長を 6 mm 程度まで小さくし、 G_f 等価の概念を適用する手法を用いることで、CFRP シート補強 RC 梁の耐衝撃挙動をほぼ適切に再現可能である。また、ひび割れ分布や CFRP シート軸方向ひずみ分布に関しても概ね再現可能である。
- 2) また、入力エネルギーが大きくなると、実験結果よりも早期にシート剥離現象が生じるものの、剥離現象自体の再現は可能であることが確認された。

謝辞

本研究で用いた接着剤等は住友ゴム工業(株)からご提供頂いた。ここに記して、感謝する次第である。

参考文献

- 1) N. Kishi, M. Komuro, T. Kawarai, and H. Mikami: Low-Velocity Impact Load Testing of RC Beams Strengthened in Flexure with Bonded FRP Sheets, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.24, pp.103-113, 2020.7.
- 2) Kishi, N. and Bhatti, A.Q.: 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*, Vol.37, pp.103-113, 2010.
- 3) 瓦井智貴, 小室雅人, 岸 徳光: 衝撃荷重荷時の FRP シート曲げ補強 RC 梁に関する数値解析-コンクリート構成則の適用性検討-, 構造工学論文集, Vol.66A, pp.1004-1015, 2020.3