

一定の衝撃荷重が繰り返し作用する AFRP シート下面接着曲げ補強 RC 梁に関する数値シミュレーション

Numerical simulation on RC beams strengthened in flexure with bonded AFRP sheet
under consecutive impact loads with a constant energy

室蘭工業大学大学院 ○ 学生員 瓦井 智貴 (Tomoki Kawarai)
室蘭工業大学大学院 正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
室蘭工業大学大学院 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学 石橋 和也 (Kazuya Ishibashi)

1. はじめに

本研究では、シート補強 RC 梁の一定繰り返し衝撃荷重
載荷時における耐衝撃挙動、およびひび割れ分布の再現
を目的として、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。ここでは、
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 6 mm 程度まで小さくし、かつ既往の研究で
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
用して数値解析を試みた。また、実験結果と比較する形
で同概念の汎用性に関する検討を行った。なお、本数値
解析には汎用構造解析用コード 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、200×250×3,000 mm
である。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している。
せん断補強筋には D10 を使い、100 mm 間隔で配筋して
いる。また、AFRP シートは、RC 梁下面の補強範囲にプ
ラスト処理を施し、エポキシ系プライマーを塗布して指
触乾燥状態であることを確認の後、エポキシ系含浸接着
樹脂を用いて接着している。なお、表-1には本研究で使
用した AFRP シートの力学的特性値(公称値)を示して
いる。

2.2 実験方法および測定項目

重錘落下衝撃荷重載荷実験は、質量 300 kg、先端直
径 200 mm の鋼製重錘を一定の高さから終局に至るまで
スパン中央部に自由落下させる繰り返し載荷法に基づいて
実施した。試験体の両支点部は、写真-1に示すように回
転を許容し、試験体設置後に梁状治具を載せボルトを介
して締めることで浮き上がりを防止する構造となっている。

表-2には、本研究で対象とした試験体の一覧を示して

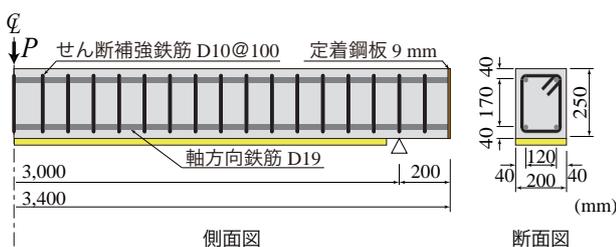


図-1 試験体の形状寸法と配筋

いる。本研究では、シート補強 RC 梁を対象にひび割れや
シートの劣化進展状況を把握することを目的として、重
錘を $H = 0.5$ m あるいは 1.0 m の高さから繰り返し落下さ
せることとした。表より、終局に至るまでの重錘落下回
数は、落下高さ $H = 0.5, 1.0$ m においてそれぞれ、9, 2 回で
ある。また、落下高さ $H = 0.5$ m の場合には梁上縁のコン
クリートの圧壊により終局に至っているものの、 $H = 1.0$
m の場合にはシート破断が発生し終局に至っている。

表中の試験体名のうち、第1項目は AFRP シート補強、
第2項目は繰り返し載荷、第3項目の H に付随する数値
は設定落下高さ (m) を示している。なお、表中の平均実
測衝突速度 V' (m/s) は同一試験体における全ケースの平
均値を示している。また、コンクリートの圧縮強度 f'_c お
よび鉄筋の降伏強度 f_{yi} に関して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) 重錘に内蔵されたロードセル
による重錘衝撃力、(2) 支点治具に設置されたロードセル
による支点反力の合計値(以後、単に支点反力)、(3)
レーザ式非接触型変位計によるスパン中央点変位(以後、
載荷点変位)である。また、実験終了後には RC 梁の側面
について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

表-1 AFRP シートの力学的物性値(公称値)

目付量 (g/m^2)	保証 耐力 (kN/m)	設計厚 (mm)	引張 強度 f_{au} (GPa)	弾性 係数 E_a (GPa)	破断 ひずみ ϵ_{au} (%)
280	392	0.193	2.06	118	1.75



写真-1 実験装置と試験体の設置状況

表-2 試験体一覧

試験体名	設定落下高さ H (m)	設定衝突速度 V (m/s)	平均実測衝突速度 V' (m/s)	重錘落下回数	コンクリート圧縮強度 f'_c (MPa)	主鉄筋降伏強度 f_{ya} (MPa)	せん断筋降伏強度 f_{ys} (MPa)	終局時の破壊性状
AS-C-H0.5	0.5	3.13	3.19	9	34.3	393.7	373.1	上縁圧壊
AS-C-H1.0	1.0	4.43	4.59	2				シート破断

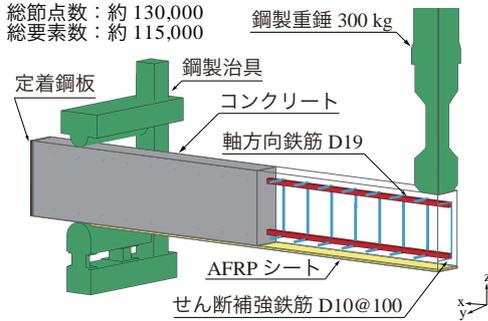


図-2 有限要素モデル

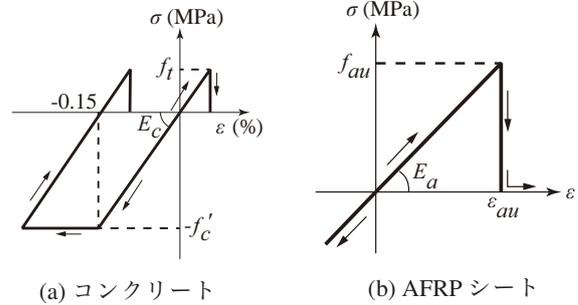


図-3 材料構成則

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、せん断補強筋は2節点梁要素、それ以外は全て8節点固体要素である。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。

AFRPシートに関しては、表-1に示すように設計厚が0.193 mmと非常に薄く、これを直接8節点固体要素を用いてモデル化する場合、計算時間が過大になる。このため、本研究では厚さを仮想的に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。また、厚さ方向の分割は1分割としている。

コンクリート-重錘間およびコンクリート-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、コンクリートとAFRPシート要素間については既往の研究と同様に完全付着を仮定した。

衝撃荷重は重錘要素をRC梁に接触する形で配置し、その全節点に実測重錘衝突速度 V' 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、予備解析に基づい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 材料構成則

図-3には、本数値解析で用いたコンクリートおよびAFRP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、シート補強RC梁の場合には梁全体に多数のひび割れが生じることより、シートの補強効果を適切に評価するためにはひび割れを精度よく評価することが必要になる。本研究では、予備解析を基に任意のコンクリート要素の梁軸方向要素長 y_i を6 mm程度まで小さくし、既往の研究を参考に G_f 等価の概念を考慮した仮想的な換算引張強度 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、本解析では基準要素長 y_0 を25 mmと設定した。

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

ここで、 f_{ti} : 換算引張強度、 f_{t0} : 材料試験から得られるコンクリートの圧縮強度に基づいた引張強度(= $f'_c/10$)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 $\rho_c = 2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_c = 0.167$ とした。

AFRPシートは、図-3(b)に示すように弾性体と仮定した。また、エロージョンを設定し破断ひずみ ϵ_{au} に到達した時点で要素が削除されるものとした。単位体積質量 ρ_a 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 $\rho_a = 1.204 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ の1/10とし、弾性係数 E_a もシート要素の軸剛性が等価になるように表-1に示す値の1/10とした。なお、破断ひずみ ϵ_{au} は表-1に示す値を用いている。

軸方向鉄筋およびせん断補強筋に関して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を適用した。降伏応力 f_{yi} は表-2に示す値を用い、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。また、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。

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

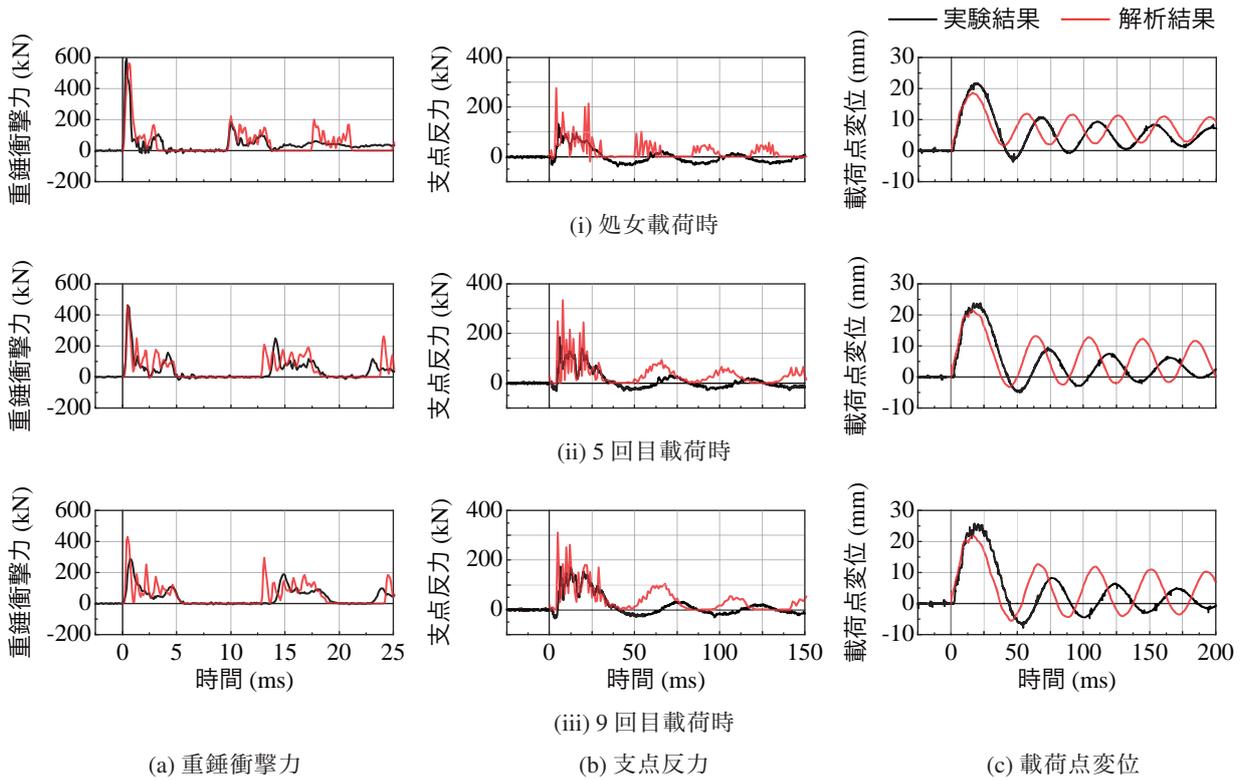


図-4 AS-C-H0.5 試験体に関する各種時刻歴応答波形

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共に公称値である $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 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および応答値比較

図-4には、AS-C-H0.5試験体に関する重錘衝撃力、支点反力、荷点変位の時刻歴応答波形について、各載荷時の実験結果と解析結果を比較して示している。図中、黒線が実験結果、赤線が解析結果を表しており、横軸は重錘がコンクリートに衝突した時刻を原点としている。

まず、図-4(a)に示す重錘衝撃力波形に着目すると、実験結果では、いずれのケースも振幅が大きく継続時間が1ms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。また、後述するように落下高さが0.5mの繰り返し載荷の場合には、梁上縁が徐々に圧壊して行き終局に至る。このため、落下回数を重ねることで最大衝撃力は小さくなっていく傾向にあることが確認できる。数値解析結果では、処女載荷時および5回目載荷時の最大衝撃力や第2波目以降の波形性状を非常によく再現していることが分かる。また、実験時に梁上縁が圧壊し終局に至った9回目載荷時においては、最大衝撃力を100kN程度過大評価しているものの、全体の波形性状を概ね再現していることが分かる。

次に、図-4(b)に示す支点反力波形に着目すると、実験結果は、継続時間が30~45ms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。また、繰り返し載荷時には、主波動の継続時間が長くなっていることか

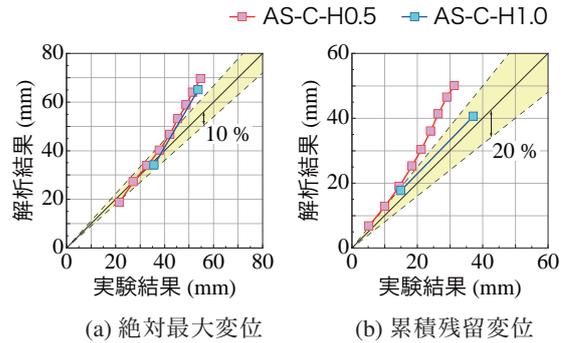


図-5 荷点変位の実験値および解析値比較

ら処女載荷時よりも剛性が低下していることが推察される。数値解析結果に着目すると、いずれのケースも実験結果よりも高周波成分が卓越しているものの、実験結果と同様に、繰り返し載荷時にはその継続時間が長くなっていることを確認できる。

最後に、図-4(c)に示す荷点変位波形に着目すると、数値解析結果は実験結果の最大変位や自由減衰振動状態の波形性状を、処女載荷時から9回目載荷時に至るまでほぼ適切に再現していることが分かる。なお、落下高さが $H = 0.5 \text{ m}$ の繰り返し載荷の場合には、実験時にシート破断に至っていないが、数値解析結果においても同様にシート破断は生じていないことを確認している。

図-5は、本研究で対象とした全ケースの絶対最大変位および累積残留変位について、縦軸に解析結果、横軸に実験結果を取って整理したものである。なお、黄色の網掛け部は図に示す実験結果と数値解析結果の誤差範囲を示している。

図より、絶対最大変位に着目すると、変位が大きくな

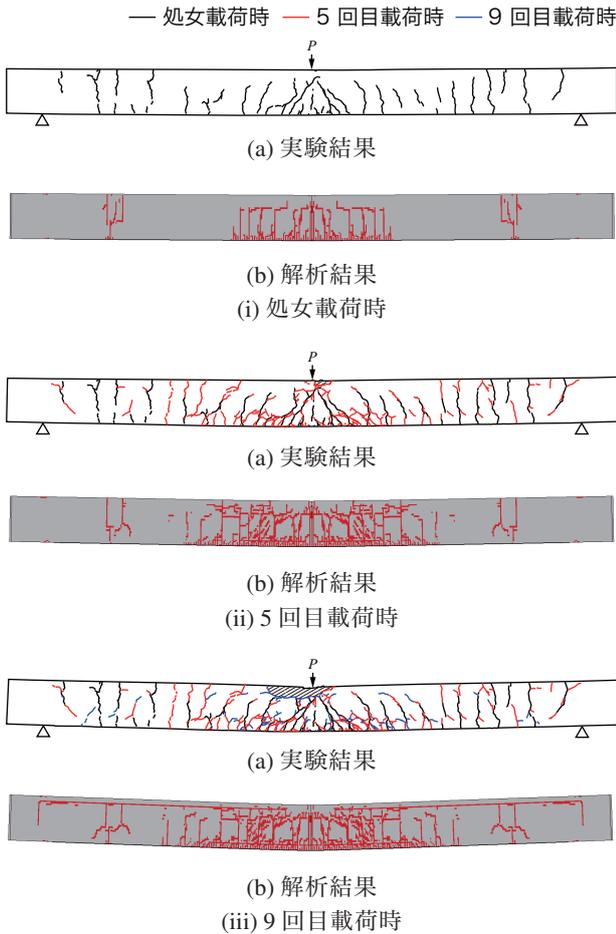


図-6 AS-C-H0.5 試験体に関するひび割れ分布比較

り終局状態に近づくにつれて、実験結果との誤差も大きくなる傾向にあるものの、いずれの落下高さに関しても、10%程度の誤差で実験結果を評価していることが分かる。

累積残留変位に着目すると、AS-C-H0.5 試験体においては特に5回目載荷以降、実験結果との誤差も大きくなっていくことが確認できる。これは、実験において5回目載荷時には梁上縁の圧壊傾向が現れるものの、本研究で用いたコンクリートモデルはバイリニア型であり、圧縮軟化モデルを採用していないことが一つの要因と考えられる。一方で、梁上縁の圧壊が卓越しないAS-C-H1.0 試験体では10%程度の誤差で実験結果を評価可能である。

4.2 各試験体に関するひび割れ分布比較

図-6には、AS-C-H0.5 試験体において、1, 5, 9回目載荷後の実験結果と解析結果から評価されるひび割れ分布を比較して示している。

実験結果に着目すると、処女載荷後は荷点直下において数本の曲げひび割れが生じており、斜め45°に梁下縁まで進展するせん断ひび割れも確認できる。また、支点部近傍では梁上縁から下縁に向かって生じているひび割れも確認できる。これは、重錘衝突初期には曲げ波の伝播により支点部が固定端のような挙動を示すことに起因する。5回目載荷後には、損傷が累積され、処女載荷後のひび割れが進展していくと共に、新たなひび割れも確認できる。また、荷点部近傍には圧壊の傾向も現れ始めている。9回目載荷後には上縁圧壊が卓越しており、この段階を終局と判断した。

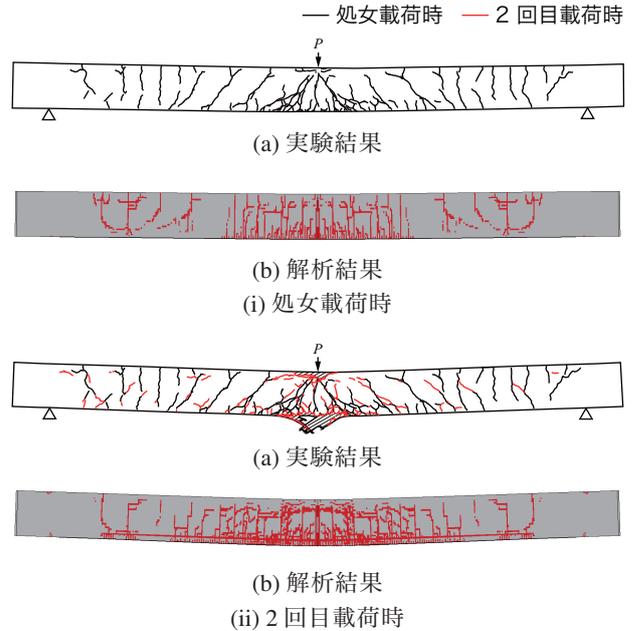


図-7 AS-C-H1.0 試験体に関するひび割れ分布比較

数値解析結果に着目すると、処女載荷後では荷点直下にひび割れが集中しており、曲げひび割れや斜めひび割れも確認できる。支点部近傍にもひび割れが生じているものの、その本数は実験結果よりも小さい。5, 9回目載荷後に着目すると実験結果のような上縁圧壊の忠実な再現には至っていないものの、梁全体に損傷が累積されていく傾向が確認できる。

図-7には、AS-C-H1.0 試験体における実験終了後のひび割れ分布と解析結果から評価されるひび割れ分布を比較して示している。

実験結果からは、処女載荷時には0.5mの処女載荷時よりも損傷が大きく、せん断ひび割れも卓越する傾向が確認できる。また、2回目載荷時には上縁が圧壊し角折れの性状を示すと共にシート破断によって終局に至っている。

数値解析結果においては、処女載荷後では実験結果よりも曲げひび割れが卓越している傾向にあるものの、2回目載荷時には梁下縁にひび割れを示す赤色領域が鉄筋に沿うように分布すると共に、実験結果と同様にシート要素が破断ひずみに到達し、要素削除(シート破断)に至っていることを確認している。

5. まとめ

各要素で1本のひび割れが確認できる程度に要素長を小さくし、 G_f 等価の概念を用いた本手法を適用することで、一定繰り返し衝撃載荷時においてもシート補強RC梁の耐衝撃挙動を概ね再現可能であることが明らかになった。また、シート破断についても実験結果と一致することが確認された。今後は、梁の上縁圧壊現象を再現可能なモデルについて検討していく予定である。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP17K06527 の助成により行われたものである。また、研究で使用したAFRPシートはファイバックス(株)、接着剤は住友ゴム工業(株)からご提供頂いた。ここに記して、感謝の意を表します。