

重錘落下衝撃を受ける AFRP シート曲げ補強 RC 梁の衝撃応答解析

Impact response analysis of RC beams reinforced with AFRP sheet under falling-weight impact loading

室蘭工業大学大学院 ○ 学生員 田士 大輔 (Daisuke Tashi)
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)
(独) 寒地土木研究所 正 員 今野 久志 (Hisashi Konno)
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、劣化した既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補修・補強工法として連続繊維シート (FRP シート) 接着工法が広く用いられている。しかしながら、FRP シートを接着した部材の耐衝撃性に関しては、研究事例が少なく、その挙動特性に関しては十分に明らかにされていないのが現状である。

このような背景から、本研究ではアラミド連続繊維 (AFRP) シートを RC 梁下面に接着補強した場合の耐衝撃性を適切に評価可能な数値解析モデルの構築を最終目的に、別途実施された重錘落下衝撃実験¹⁾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、AFRP シートの材料構成則やコンクリートと AFRP シートの付着特性を簡易にモデル化した場合の適用性について、実験結果と比較することにより検討を行っている。なお、本解析には汎用プログラム LS-DYNA(Ver.971)²⁾を使用した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、本数値解析で対象とした試験体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体の形状寸法 (梁幅×梁高×純スパン長) は 200×250×3000 mm であり、軸方向鉄筋は D19 を上下端に複鉄筋配置とし、せん断補強筋は D10 を 100 mm 間隔で配筋している。

梁底部には、保証耐力 588 kN の AFRP シートをスパン中央から両端部に向かって 1,450 mm の領域に接着している。また、軸方向鉄筋は梁端部に設置した厚さ 9 mm の定着鋼板に溶接している。

表-1 物性値一覧

材料	密度 ρ (t/m ³)	弾性係数 E (GPa)	強度 (MPa)	ポアソン比 ν
コンクリート	2.35	24.5	23	0.167
D19	7.85	206	355	0.3
D10	7.85	206	359	0.3

2.2 実験方法および測定項目

実験は、RC 梁を専用の支点治具に設置し、スパン中央に鋼製重錘 (質量 300 kg) を所定の高さから落下させることにより実施した。支点治具は、回転を許容し試験体の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。本実験の落下高さ H は 1.5、2.0、2.5、3.0 m の 4 種類である。

表-1には、実験時における各材料物性値を一覧にして示している。測定項目は、重錘衝撃力 P 、合支点反力 R (以後、支点反力) および荷載点直下の変位 δ (以後、荷載点変位) である。また、実験終了後には、RC 梁の側面を撮影し、ひび割れ性状を観察している。

3. 数値解析概要

3.1 数値解析モデル

図-2には、本数値解析に用いた RC 梁の要素分割状況を示している。本数値解析では、重錘および支点治具も実形状を極力再現する形で詳細にモデル化を行っている。また、コンクリートの要素長に関しては、既往の研究³⁾を参考に、コンクリートのひび割れを適切に評価可能である 25 ~ 30mm 程度と設定している。解析モデルは、RC 梁

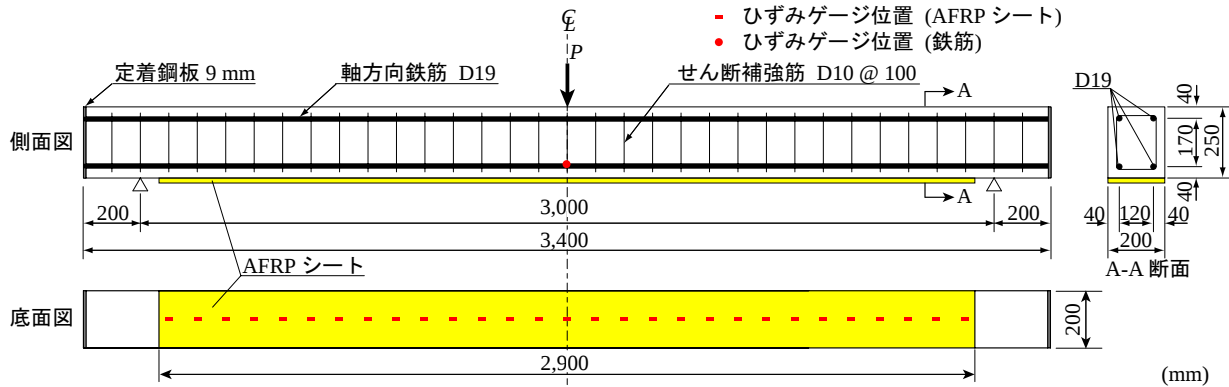
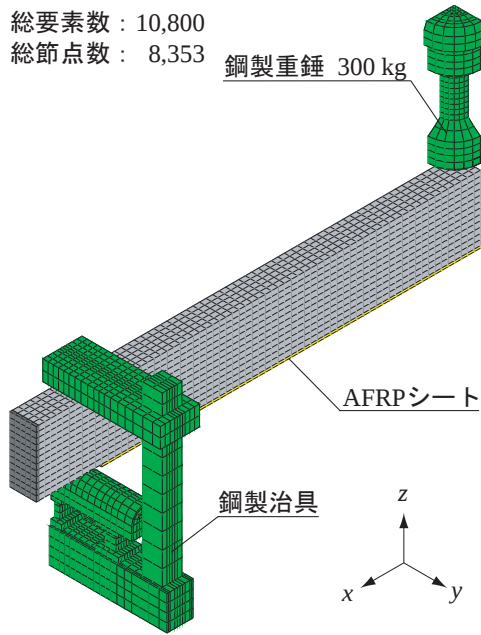


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

総要素数：10,800

総節点数：8,353



図－2 要素分割状況

表－2 AFRP シートの力学的特性値（公称値）

目付量 (g/m ²)	保証 耐力 (kN/m)	設計厚 (mm)	引張 強度 f_a (GPa)	弾性 係数 E_f (GPa)	破断 ひずみ ε_a (%)
415	588	0.286	2.06	118	1.75

の対称性を考慮して梁幅方向およびスパン方向にそれぞれ2等分した1/4モデルとした。適用した要素タイプは、鉄筋には2節点梁要素、AFRPシートには4節点シェル要素、その他の要素には全て8節点の固体要素を用いてモデル化を行っている。

固体要素の積分点数は1点積分を基本としているが、鉄筋に用いた梁要素に関しては 2×2 ガウス積分とした。また、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いる。なお、コンクリートと鉄筋、およびコンクリートとAFRPシートは完全付着と仮定した。

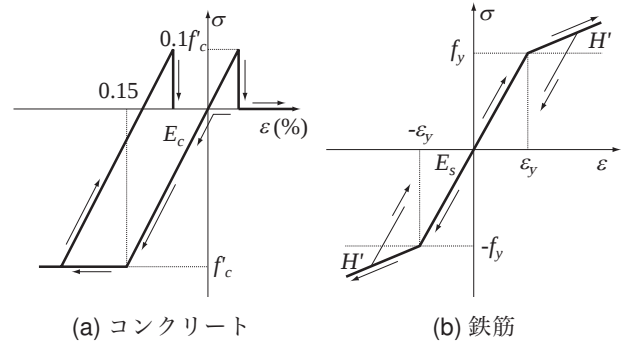
衝撃荷重の载荷方法に関しては、重錘の節点に落下高さから換算した衝突速度を初速度として付加することにより再現している。また、減衰定数は質量比例分のみを考慮するものとし、鉛直方向の最低次固有振動数に対して1.5%と設定した。なお、本数値解析で用いた数値解析モデルの総節点数および総要素数は8,353および10,800である。

3.2 材料物性モデル

図－3には、本数値解析で用いたコンクリート、鉄筋およびAFRPシートの応力－ひずみ関係を示している。なお、ひずみ速度効果は考慮していない。

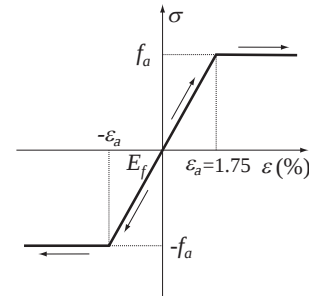
(1) コンクリート

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。圧縮側に関しては、相当ひずみが0.15%に達した段階でコンクリートが降伏するものとし、完全弾塑性体のバイリニア型にモデル化した。また、引張側に関しては引張強度に達した段階で応力を完全に解放するも



(a) コンクリート

(b) 鉄筋



(c) AFRP シート

図－3 材料構成則

のとしている。引張強度は圧縮強度の1/10と仮定している。なお、降伏の判定には、コンクリートの内部摩擦角を 30° とし、Drucker-Pragerの条件式を採用している。

(2) 鉄筋

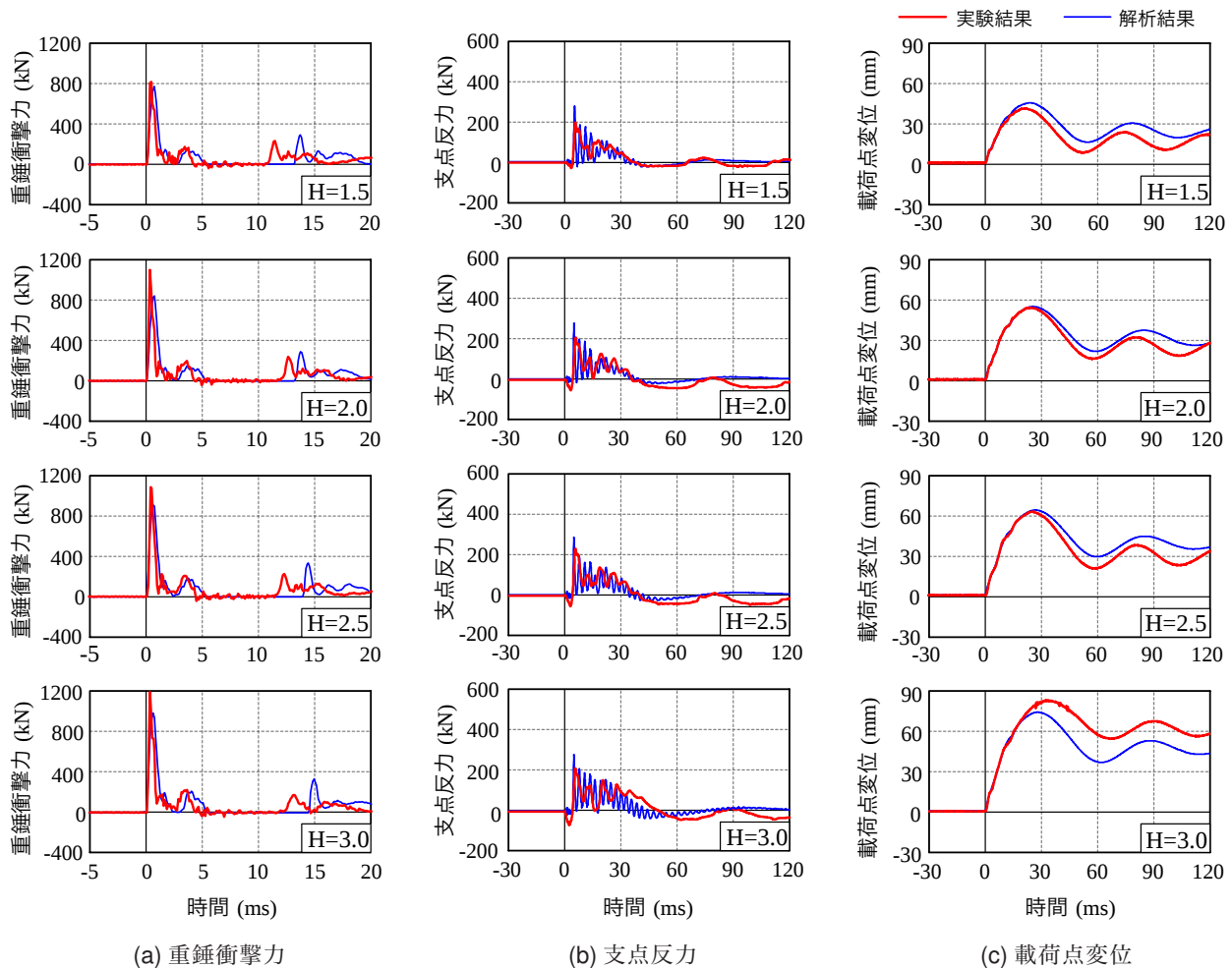
図－3(b)には、軸方向鉄筋およびせん断補強筋に関する応力－ひずみ関係を示している。鉄筋要素に用いた物性モデルは、降伏後の塑性硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルである。降伏応力、弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s には、表－1に示す材料試験結果の値を採用している。また、単位体積質量 ρ_s には公称値である $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を用いることとした。塑性硬化係数 H' は、弾性係数 E_s の1%と仮定し、降伏の判定はvon Misesの降伏条件に従うこととした。

(3) AFRP シート

図－3(c)には、AFRPシートに用いた応力－ひずみ関係を示している。AFRPシートは表－2に示すように、破断ひずみ($\varepsilon_a = 1.75\%$)に至るまでは弾性的な挙動特性を有している。ここでは便宜的に、破断ひずみに達した時点で降伏する等方弾塑性体モデルを適用した。降伏応力、弾性係数 E_f には表－2に示す引張強度および弾性係数の公称値を用いている。

(4) 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。要素の弾性係数 E_s 、ポアソン比 ν_s には鋼材の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。なお、単位体積質量 ρ に関しては、支点治具および定着鋼板には公称値である $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を用いることとし、重錘は重錘質量を重錘モデルの体積で除した値としている。



図－4 各種時刻歴応答波形

4. 数値解析結果および考察

4.1 時刻歴応答波形

図－4には、各RC梁の時刻歴応答波形について解析結果と実験結果を比較して示している。

図－4(a)より、重錘衝撃力波形に関する実験結果に着目すると、振幅が大きく継続時間が3ms程度の第1波に振幅の小さい第2波および第3波が後続する性状を示している。解析結果と実験結果を比較すると、最大衝撃力を過小に評価するものの、波形性状や波形の立ち上がりは概ね一致していることが分かる。

次に、図－4(b)に示す支点反力に着目する。実験結果では、いずれの試験体も落下高さに関わらず、継続時間の長い三角形波と高周波成分が合成された波形性状を示している。一方、解析結果では、実験結果よりも高周波成分の励起が大きく示されているものの、全体的な波形性状は概ね一致している。

図－4(c)より、実験における載荷点変位は、いずれの試験体も衝突荷重載荷初期に正弦半波状の振幅の大きな波形が励起した後、減衰自由振動状態に至り、最終的には変位が残留していることが分かる。一方、解析結果を見ると、 $H=3.0$ mの場合を除き、実験結果の最大変位をほぼ適切に再現していることがわかる。なお、 $H=3.0$ mにおける両者の差異に関しては、実験結果ではシートが破断しているのに対して、数値解析ではシートの破断を

モデル化していないことによるものと考えられる。

4.2 各応答値と入力エネルギーの関係

図－5には、重錘衝撃力 $P_{\max}$ 、支点反力 $R_{\max}$ 、載荷点変位 $\delta_{\max}$ および残留変位 δ_{res} と入力エネルギー E との関係を示している。

図－5(a)より、最大重錘衝撃力 $P_{\max}$ は、実験結果および解析結果ともに入力エネルギー E の増加に伴って増加する傾向にあることが分かる。なお、解析結果は、実験結果を平均約20%過小に評価している。

次に、図－5(b)より、実験結果における最大支点反力は、入力エネルギーの増大とともに増加する傾向が見られるものの、 $H=2.0$ mよりも大きい衝突速度では最大値が減少している。これは重錘衝突によってRC梁が激しく損傷し、耐荷性能が低下したことによるものと考えられる。一方、数値解析結果では、最大支点反力は $H=2.5$ mで発生しており、実験結果と必ずしも一致するまでには至っていない。

図－5(c)、図－5(d)においても、載荷点変位 $\delta_{\max}$ および残留変位 δ_{res} が入力エネルギー E の増加に伴って増加する傾向が見られる。 $H=3.0$ mで実験時の変位が解析結果と比較して大きく示されているが、これは前述のとおり、実験ではシートが破断しているのに対し、数値解析ではシートの破断を考慮していないことに起因しているものと考えられる。

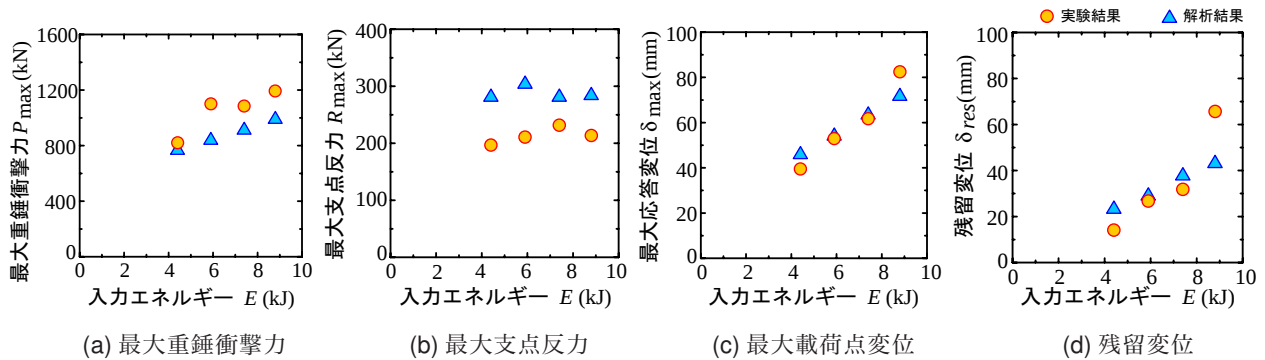


図-5 各応答値と入力エネルギーの関係

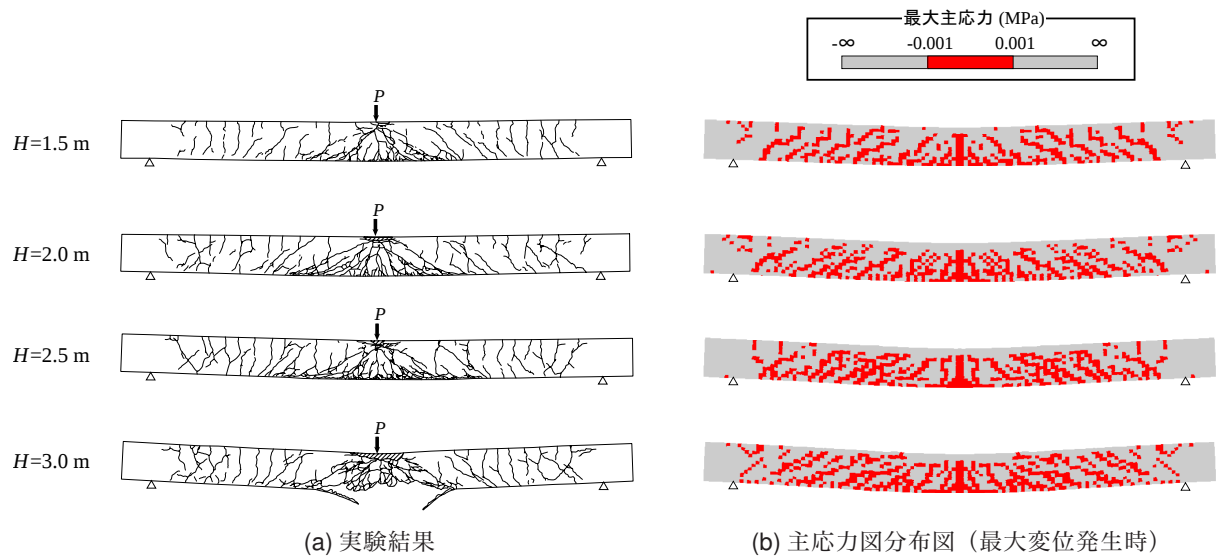


図-6 各試験体のひび割れ分布性状

4.3 ひび割れ分布性状

図-6には、衝撃载荷実験終了後における各RC梁側面のひび割れ分布性状および各解析ケースの最大変位時における主応力分布図を示している。

実験時におけるひび割れ分布性状は、いずれの試験体もスパン全域にわたって梁の上下縁からまっすぐに進展する曲げひび割れや、载荷点部近傍から梁下縁に約45°の角度で進展する斜めひび割れが発生している。なお、上縁から曲げひび割れが進展するのは、衝撃初期に発生する曲げの主波動が支点に向かって伝播する場合において、支点近傍が固定端と類似の変形状態になることによるものと推察される。

次に、解析結果を見ると、シート破断に至った $H=3.0\text{ m}$ の場合を除き、実験結果に見られる梁上部からの曲げひび割れやスパン中央部の斜めひび割れなどをほぼ適切に再現している。なお、 $H=3.0\text{ m}$ の数値解析結果では、シートに発生する軸ひずみが破断ひずみまで到達していない。このひとつの要因として、コンクリートとAFRPシート間の完全付着を仮定していることが考えられる。今後はコンクリートとAFRPシート間の付着特性に関して、見直しを行うことが必要と考えられる。

5. まとめ

- 1) 提案の解析手法を用いることによって、重錘衝撃力や最大変位、ひび割れ分布など、実験結果を大略再現可能である。
- 2) しかしながら、シート破断に至った試験体の、最大変位および耐衝撃挙動の再現には至っていない。
- 3) 以上より、今後はAFRPシートの材料構成則およびコンクリートとAFRPシート間の付着特性の見直しを行い、耐衝撃挙動を適切に評価可能な数値解析モデルの構築を行う必要がある。

参考文献

- 1) 中野 雄哉, 今野 久志, 栗橋 祐介, 三上 浩, 岸 徳光: AFRPシート接着による曲げ破壊型RC梁の耐衝撃性向上効果 2012.12
- 2) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- 3) 岸 徳光, A.B. Qadir, 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.