AFRP シートで曲げ補強された RC 梁の衝撃応答解析

室蘭工業大学大学院　学生会員　○田士　大輔　　室蘭工業大学大学院　正会員　小室　雅人
(独)寒地土木研究所　正会員　今野　久志　　釧路工業高等専門学校　フェロー　岸　徳光

1. はじめに

本研究では，アラミド連続繊維（AFRP）シートを下面に接着補強した RC 梁の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目的として，重錘落下衝撃を受ける RC 梁の衝撃応答解析を実施した．ここでは，数値解析結果を，別途行われた衝撃実験結果と比較することにより，解析手法の妥当性に関する検討を行った．なお，解析には弾塑性衝撃応答解析用コード LS-DYNA（Ver. 971）を使用した．

2. 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 × 3,000 mm であり，軸方向鉄筋は D19 を上下端に複鉄筋配置とし，せん断補強筋には D10 を 100 mm 間隔で配筋している．軸方向鉄筋は梁端部に設置した厚さ 9 mm の定着鋼板に配置している．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．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 および 3.0 m の 4 種類であり，全て単一載荷とした．

3. 数値解析概要

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．解析モデルは，RC 梁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．本数値解析では，重錘および支点治具に関して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，コンクリートのひび割れを適切に評価できるよう 25 ～ 30 mm 程度と設定した．使用した要素タイプは，鉄筋には 2 節点梁要素，その他の要素には全て 8 節点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 Gauss 積分とした．また，実験条件と同様となるように，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（摩擦係数：0）を定義している．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．境界条件は，対称切断面において法線方向変位成分を，支点部では鉛直方向変位成分を拘束した単純支持状態としている．

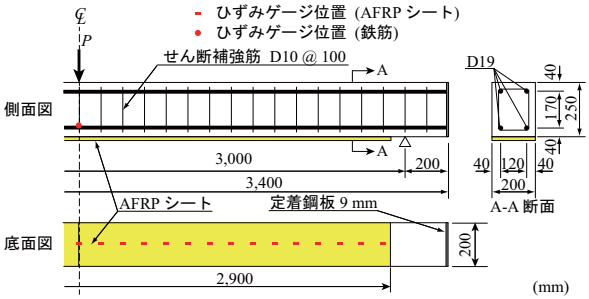

図 1　試験体の形状寸法および配筋状況

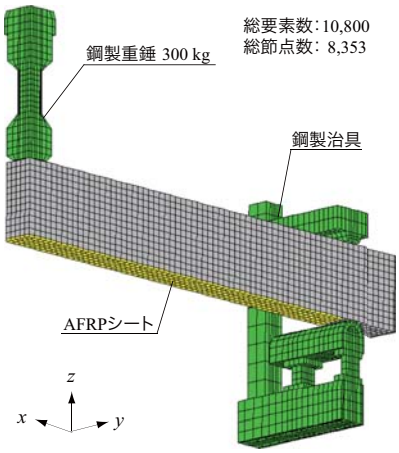

図 2　要素分割状況

衝撃荷重の載荷方法に関しては，重錘の節点に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，減衰に関して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要素数および総節点数は 10,800 および 8,353 である．

4. 材料構成則

コンクリートの材料物性値は，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．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のとしており，引張強度は圧縮強度の 1/10 と仮定している．降伏の判定には，Drucker-Prager の条件式を採用し，コンクリートの内部摩擦角を 30° としている．

キーワード：AFRP シート，RC 梁，衝撃挙動，弾塑性衝撃応答解析
連絡先：〒 050-8585 室蘭工業大学大学院 くらし環境系領域 社会基盤ユニット TEL/FAX:0143-46-5228

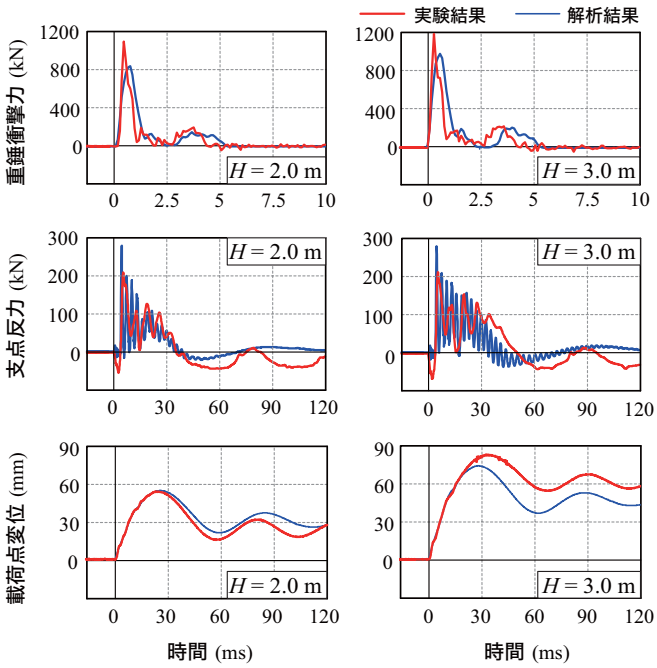

図 3　各種時刻歴応答波形

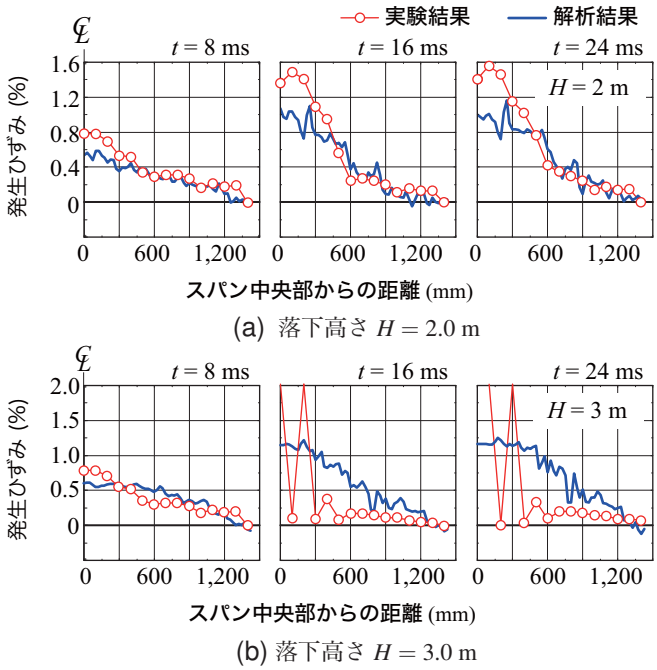

図 4　AFRP シートの軸方向ひずみ分布

鉄筋要素には，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を用いた．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．

AFRP シートは，圧縮側の剛性は無視し，引張側のみを考慮するものとし，破断ひずみ ($\varepsilon_a = 1.75\%$) に至るまで弾性的な挙動特性を示し，破断ひずみに達した時点でカットオフされるモデルとした．なお，AFRP シートは，その厚さが 0.286 mm と非常に薄いため，本数値解析で採用している陽解法では，計算時間が膨大に必要となることより，便宜的に厚さを 30 倍にし， 8 節点固体要素を用いてモデル化を行っている．また，AFRP シートは引張材として衝撃荷重に抵抗するものと考え，軸剛性が等価となるように，弾性係数を 1/30 としている．

5.　数値解析結果および考察

図 3 には，$H = 2.0, 3.0$ m における重錘衝撃力，支点反力，載荷点変位波形について数値解析結果と実験結果を比較して示している．

まず，重錘衝撃力波形に関する実験結果に着目すると，いずれの衝突速度においても，衝突初期に振幅が大きく継続時間が 3 ms 程度の第 1 波と振幅の小さい第 2 波から構成されることが分かる．解析結果を実験結果と比較すると，解析結果は最大衝撃力を過小に評価しているものの，第 2 波目の振幅や衝撃力継続時間は大略一致していることがわかる．

次に，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，波形が重錘衝突時点より若干遅れて励起し，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が大きく，かつ最大支点反力を過大に評価しているものの，全体的な波形性状は概ね一致している．

実験結果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．数値解析結果をみると，$H = 2.0$ m の場合は，波形の立ち上がりから最大値まで非常に良く一致している．一方，$H = 3.0$ m の場合には，解析結果の最大値が実験結果のそれと比較して小さく示されていることが分かる．

図 4 には，AFRP シートに発生する軸方向ひずみ分布の一例として，$H = 2, 3$ m の場合について解析結果と実験結果を比較して示している．実験結果と解析結果を比較すると，解析結果はスパン中央部のシートひずみを若干過小に評価しているものの，全体的な分布性状は概ね一致している．一方，$H = 3$ m の実験結果をみると，$t = 16$ ms 以降において，ひずみが破断ひずみを超え，シートが破断しているのに対し，数値解析結果ではシートの破断が生じず，両者のひずみ分布が大きく異なっていることがわかる．

6.　まとめ

1) 提案の解析手法を用いることにより，実験結果の重錘衝撃力や最大変位などを大略再現可能であることが明らかになった．
2) 一方，実験時にシート破断に至った試験体に関しては最大変位を過小評価している．これは，本数値解析ではシートの破壊現象を適切に再現できていないことによるものと考えられる．