室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

高靭性コンクリート及び高靭性軽量コンクリートを用いた構造部材の性能照査型設計に関する研究(平成20年度共同研究プロジェクト成果)

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 室蘭工業大学地域共同研究開発センター 公開日: 2016-12-06 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 三上, 浩, 栗橋, 祐介, 岸, 徳光 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009092

高靭性コンクリート及び高靭性軽量コンクリートを用いた構造部材の性能照査型設計に関する研究

三上 浩[*1]・栗橋 祐介[*2]・岸 徳光[*2]

Hiroshi MIKAMI[*1],Yuusuke KURIHASI[*2] and Norimitsu KISHI[*2]

1　はじめに

近年，鉄筋コンクリート (RC) やプレストレストコンクリート (PC) 製の橋梁等上部構造の軽量化にともなう下部構造の耐震性向上，建設コスト縮減をねらいとして, 軽量コンクリートの適用が検討され, 一部で実用化されている。しかしながら，軽量コンクリートは引張強度が普通コンクリートに比べて小さく, 耐衝撃性についても劣ることが知られている。最近ではコンクリートの引張靭性能を改善する方策として, ポリビニルアルコール (PVA) 短繊維を混入する方法が提案され，その適用方法に関する検討が盛んに行われている。

著者らはこれまで普通コンクリートおよび軽量コンクリートに PVA 短繊維を混入した RC 梁や RC 版の静的および衝撃荷重載荷実験を実施し, PVA 短繊維混入による耐荷性能および耐衝撃性向上効果を確認している。また，RC 部材の衝撃挙動解析に関しても，小型 RC 部材を対象に各種解析手法の妥当性検討を実施しており，境界条件や減衰定数に留意することによって信頼性の高い解析を実施することが可能であることを示した(1)。さらに，PVA 短繊維を混入した普通コンクリート製 RC 梁を対象とした数値解析的な検討も実施し，耐衝撃性状を精度よく評価可能な数値解析手法を提案するに至っている(2)。

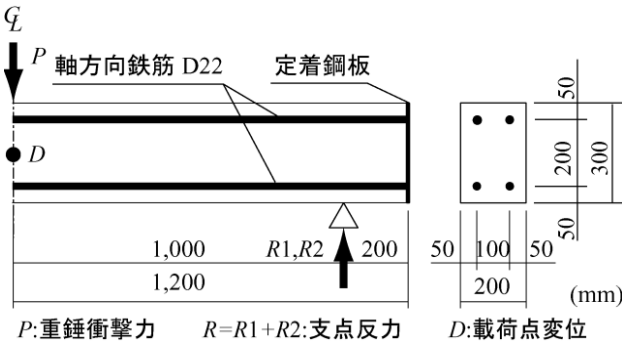
しかしながら，本数値解析手法の妥当性に関する検討は普通コンクリートを用いた場合に対してのみで, 軽量コンクリート製 RC 梁に対しては行われていない。短繊維混入コンクリートを用いた RC 部材に関する耐衝撃設計法の確立に向けた研究は，普通コンクリート製 RC 梁のみならず軽量コンクリート製 RC 梁に対しても，数値解析手法の妥当性を検討し，実験的検討に数値解析的検討を援用して推進されなければならない。

このような観点より，本研究では，PVA 短繊維混入軽量コンクリート製 RC 梁の耐衝撃性を適切に評価可能な数値解析手法の確立を目的に，単一衝撃荷重載荷および繰り返し衝撃荷重載荷を受ける，短繊維混入 RC 梁を対象とした三次元弾塑性衝撃応答解析を行い，実験結果との比較によりその妥当性を検討した。なお，本数値解析には，非線形動的構造解析用汎用コード LS-DYNA (ver. 971)(3)を用いている。

2　実験概要

2．1　試験体概要

図－1には，RC 梁の形状寸法および配筋状況を示している。本実験に用いた試験体は, 断面寸法（幅



図－1　形状寸法および配筋状況

*1 三井住友建設(株)　技術開発センター
*2 くらし環境系領域

表－１　試験体の一覧

試験体名	短繊維混入率 V_f (%)	単一載荷時衝突速度 V (m/s)	計算曲げ耐力 P_{usc} (kN)	計算せん断耐力 V_{usc} (kN)	せん断余裕度 α (=V_{usc}/P_{usc})
F0-Vn	0	3, 4	144.8	82.5	0.57
F0.5-Vn	0.5	4, 5	140.9	77.6	0.55
F1.0-Vn	1.0	7, 8	144.3	82.5	0.57
F1.5-Vn	1.5	7, 8	134.0	64.0	0.48

表－２　コンクリートの力学的特性

短繊維混入率 V_f (%)	圧縮強度 f'_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c	比重
0	49.4	2.2	21.2	0.2	1.8
0.5	38.9	3.1	18.8	0.3	1.9
1.0	47.9	4.3	20.5	0.2	2.0
1.5	21.8	3.2	14.5	0.2	1.7

表－３　鉄筋の力学的特性

鉄筋名称	材質	降伏強度 σ_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D22	SD345	402	206	0.3

表－４　PVA 短繊維の力学的特性

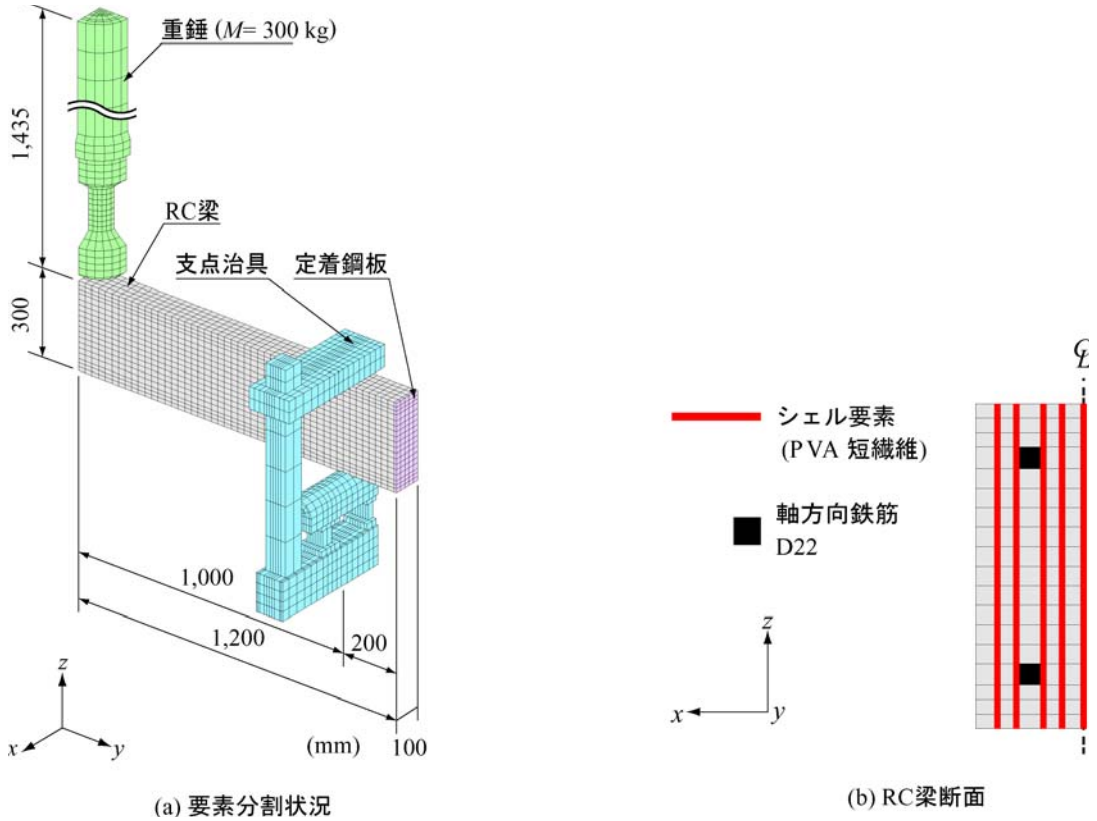
長さ l (mm)	直径 d (mm)	アスペクト比 l/d	引張強度 σ_p (GPa)	弾性係数 E_p (GPa)	破断ひずみ (%)
30	0.66	45	0.88	29.4	7.0

×高さ）が 200×300 ㎜，純スパン長が 2,000 mm，軸方向筋に D22 (SD345) を用いた複鉄筋 RC 梁である。なお，せん断補強筋は配置していない。表－１には，本研究において数値解析の対象とした試験体の一覧を示している。試験体は，RC 梁の短繊維混入率 V_f を 4 種類 (V_f = 0, 0.5, 1.0, 1.5 %)，単一衝撃荷重載荷時（以後，単に単一載荷）においては重錘衝突速度（以後，単に衝突速度 V）を２種類に変化させた全 8 ケースである。試験体名の第一項目は，英文字の F と短繊維混入率 V_f (%) の組み合わせとして示している。第二項目は英文字の V と衝突速度の組み合わせとして示している。

表中の計算曲げ耐力 P_{uc} および計算せん断耐力 V_{uc} は，コンクリート標準示方書に基づいて算定している。表より試験体のせん断余裕度が α (= V_{usc} / P_{usc}) < 1.0 であることより，静載荷時には設計的にせん断破壊型で終局に至ることが推察される。また，表－２～４には，実験時におけるコンクリート，鉄筋および PVA 短繊維の力学的特性値を示している。

２．２　実験方法

衝撃荷重載荷実験は，重錘を所定の高さから RC 梁のスパン中央部に一度だけ自由落下させる単一載荷により実施した。用いた重錘は質量 300 kg，載荷点部直径 ϕ= 150 mm の円柱状鋼製重錘である。な



図－２　数値解析モデル

お，重錘底部は衝突時の片当たりを防止するために，半径 1,407 mm，高さ 2 mm のテーパを有する球形状となっている。試験体は跳ね上がり防止用治具付きのロードセル内蔵型支点治具上に設置している。また，支点治具全体は，RC 梁の回転のみを許容するピン支持に近い構造となっている。

測定項目は，図－１に示されている重錘衝撃力 P，合支点反力 R（以後，単に支点反力）および載荷点変位 D（以後，変位）に関する各応答値である。重錘衝撃力 P は，重錘に内蔵されている衝撃荷重測定用ロードセル（容量：1,470 kN，応答周波数：DC～4.0 kHz）を用いて測定した。支点反力 R は，両支点治具に３つずつ内蔵されている衝撃荷重測定用ロードセル（容量：1,000 kN，応答周波数：DC～2.4 kHz）を用いて測定し，全ての応答値を総和して合支点反力とした。変位 D は，レーザ式非接触型変位計（ストローク：200 mm，応答周波数：DC～915 Hz）により測定した。

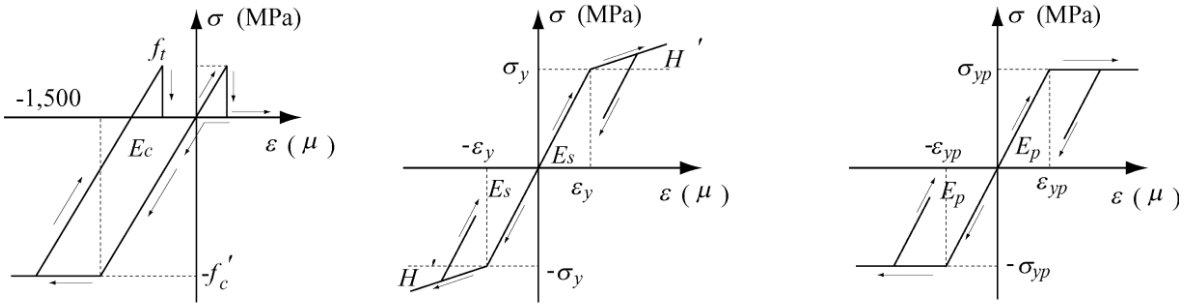
これらの応答波形は，デジタルメモリレコーダによりサンプリング周期 0.1 msec で一括収録し，数値解析結果との比較検討に供した。支点反力波形，変位波形に関しては，ノイズを含んだ高周波成分を除去するために 0.5 ms の矩形移動平均法によりフィルター処理を施している。

３　数値解析概要

３．１　数値解析モデル

図－２(a) には，本数値解析に用いた解析モデル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（x 方向）およびスパン方向（y 方向）にそれぞれ 2 等分した 1/4 モデルである。

適用した要素タイプは，PVA 短繊維の架橋効果をモデル化したシェル要素以外には全て 8 節点の三次元固体要素を用いている。モデル化の詳細を述べると，RC 梁部は実験に用いた梁の形状寸法に基づき忠実にモデル化している。ただし，軸方向鉄筋は公称断面積と等価な正方形断面要素として簡略化している。重錘部は，実形状に即してモデル化し，底



(a) コンクリート　　(b) 鉄筋　　(c) PVA短繊維の架橋効果

図－３　各材料の応力－ひずみ関係

部形状を高さ 2 mm の球形状に忠実にモデル化している。支点治具部は，ロードセルや跳ね上がり防止用治具も含め，実構造に則してモデル化することとした。なお，支点治具底部には，実験時と同様に治具全体の x 軸回りの回転を許容するように境界条件を設定している。

図－２(b)には，数値解析モデルにおける RC 梁の断面図を示している。短繊維の架橋効果を簡易かつ合理的に再現するため，コンクリート要素の分割境界面部に PVA 短繊維の架橋効果を考慮したシェル要素を配置する複合要素を採用することとした。また，断面方向に配置した各シェル要素は全て等厚と仮定した。その厚さ t は，梁幅 b において，各短繊維混入率 V_f に対応した厚さとなるように式(1) により算出した。

$$t = b \times (V_f / 100) / n \qquad (1)$$

ここで，n は断面方向に配置したシェル要素の数である。なお，シェル要素には，短繊維混入率 V_f に応じた厚さ t が設定されていることより，要素の物性値に対応した面外曲げ剛性も考慮される形になっている。要素の積分点数は，いずれの要素に対しても 1 点積分を基本としているが，主鉄筋要素に関しては断面方向に１要素でモデル化していることより，解析精度を考慮して 8 点で積分を行っている。RC 梁と重錘，および RC 梁と支点治具の要素間には，それぞれ面と面の接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。また，コンクリート要素と軸方向鉄筋および PVA 短繊維の要素間には，完全付着を仮定している。

重錘落下衝撃荷重は，重錘が RC 梁に接触した状態で，重錘要素の全節点に所定の衝突速度を付加する形で作用させている。質量に比例する粘性減衰定数は，RC 梁の最低次固有振動数に対して 0.5 % を設定した。

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，軸方向鉄筋および PVA 短繊維の応力－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。

(1) コンクリート

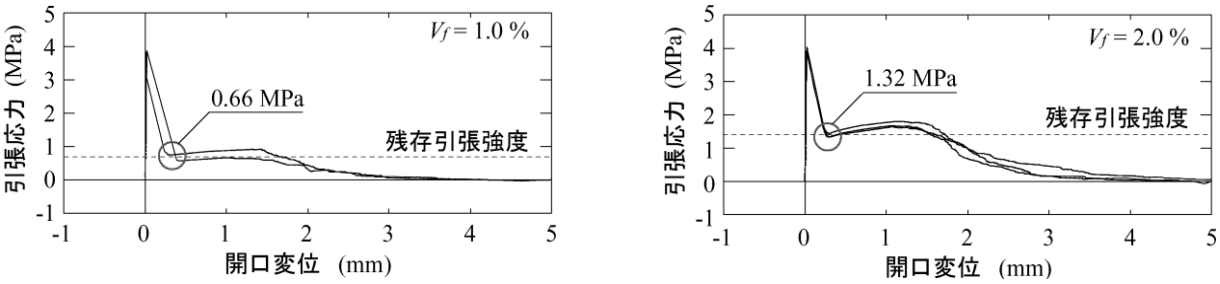
図－３(a)に示すように，コンクリート要素には圧縮側に対しては折線近似による応力―ひずみ関係，引張側に対しては破壊圧力に達した段階で引張力を伝達しないとする弾塑性体モデルを適用した。特に圧縮領域に関しては，0.15 % ひずみに達した状態で降伏するものと仮定する完全弾塑性体のバイリニア型にモデル化した。既往の研究成果[4]より，軽量コンクリートを用いる場合には，引張強度は圧縮強度の 1 / 16 となるように設定してる。なお，コンクリートの降伏の判定には von Mises の降伏条件を採用した。

(2) 軸方向鉄筋

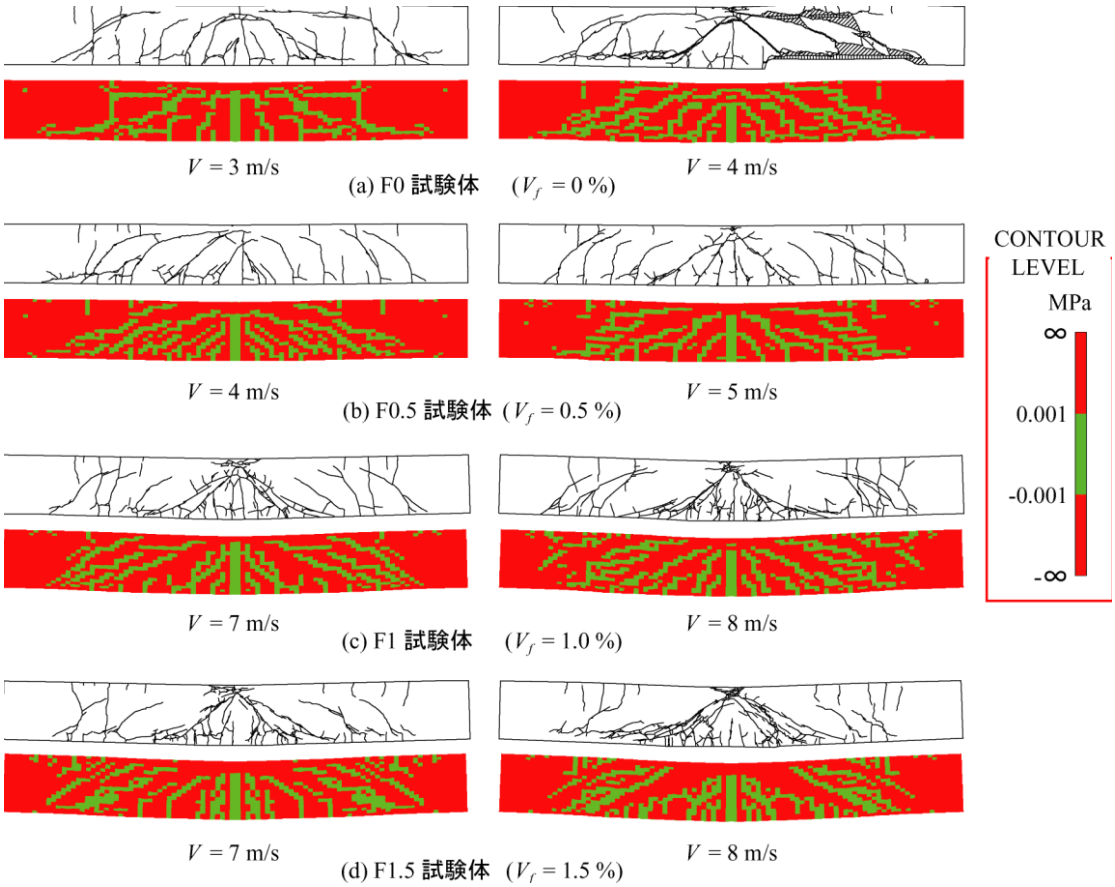
図－３(b)には，鉄筋に関する応力－ひずみ関係を示している。構成則には，降伏後の塑性硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルを採用している。塑性硬化係数 H' は，弾性係数 Es の 1 % を仮定している。降伏の判定は von Mises の降伏条件に従うこととした。

(3) PVA 短繊維の架橋効果

PVA 短繊維の架橋効果は，図－３(c)に示すように完全弾塑性型にモデル化した。降伏までは弾性係数 E_p を有する弾性体として挙動し，降伏後は降伏強度 σ_{yp} を保持する引張特性を有するものとして



図－４　短繊維混入コンクリートの引張応力－開口変位関係



図－５　ひび割れ分布性状

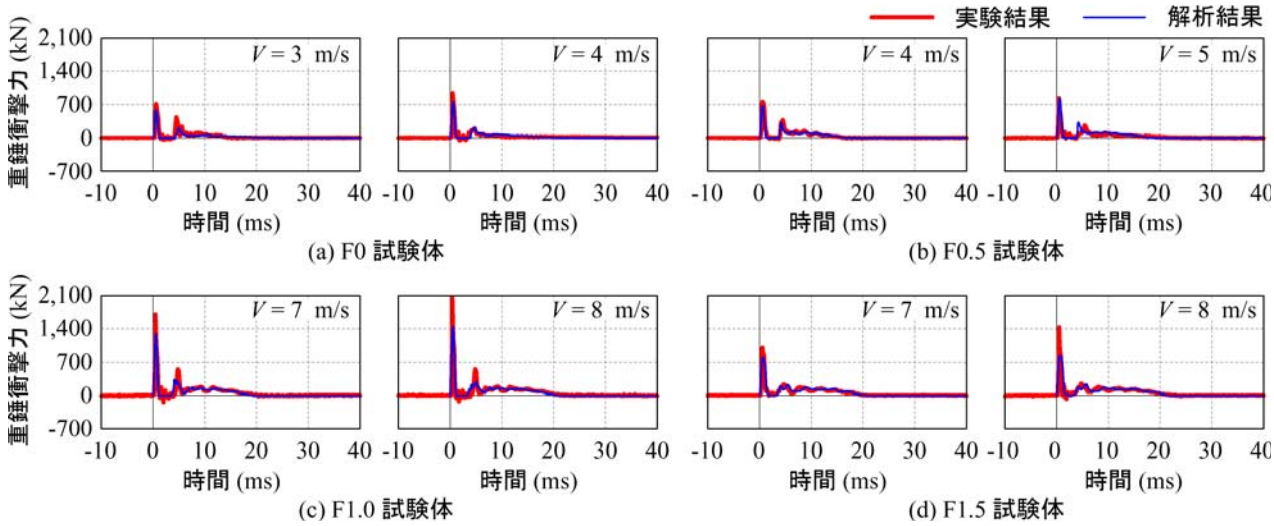
モデル化した。ここで，降伏強度 σ_{yp} は，短繊維の架橋効果をモデル化したシェル要素の降伏強度であることから，短繊維混入コンクリートの残存引張強度 f_r を短繊維のみで負担するものと仮定し，式（2）により算出した。

$$\sigma_{yp} = (f_r / V_f) \times 100 \qquad (2)$$

残存引張強度 f_r に関しては，本研究では，短繊維混入軽量コンクリートを用いた一軸引張試験を実施していないことから，短繊維混入普通コンクリートに関する試験結果[5]（図－４）を用いて評価することとした。図－４より，V_f = 1 % に対して f_r = 0.66 MPa を式（2）に代入すると，降伏強度は σ_{yp} = 66 MPa として得られる。弾性係数 E_p および単位体積質量 ρ_p には，表－４に示している PVA 短繊維の公称値を用いた。また，降伏の判定には von Mises の降伏条件を採用している。

（4）重錘，支点治具および定着鋼板

重錘，支点治具，および定着鋼板には弾性体モデ



図－６　重錘衝撃力波形

ルを適用している。各要素の弾性係数 E, ポアソン比 ν はそれぞれ E = 206 GPa, ν = 0.3 と仮定している。単位体積質量 ρ_s には公称値である $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg / m^3 を用いることとした。

４　実験および数値解析結果

４．１　ひび割れ分布性状

図－５には，実験終了後のひび割れ分布図および数値解析結果の最大変位時における第一主応力図を示している。なお，解析結果はひび割れ発生位置を特定できるようにするために，第一主応力が零近傍応力（± 0.001 MPa）状態を示す要素を緑色で示している。

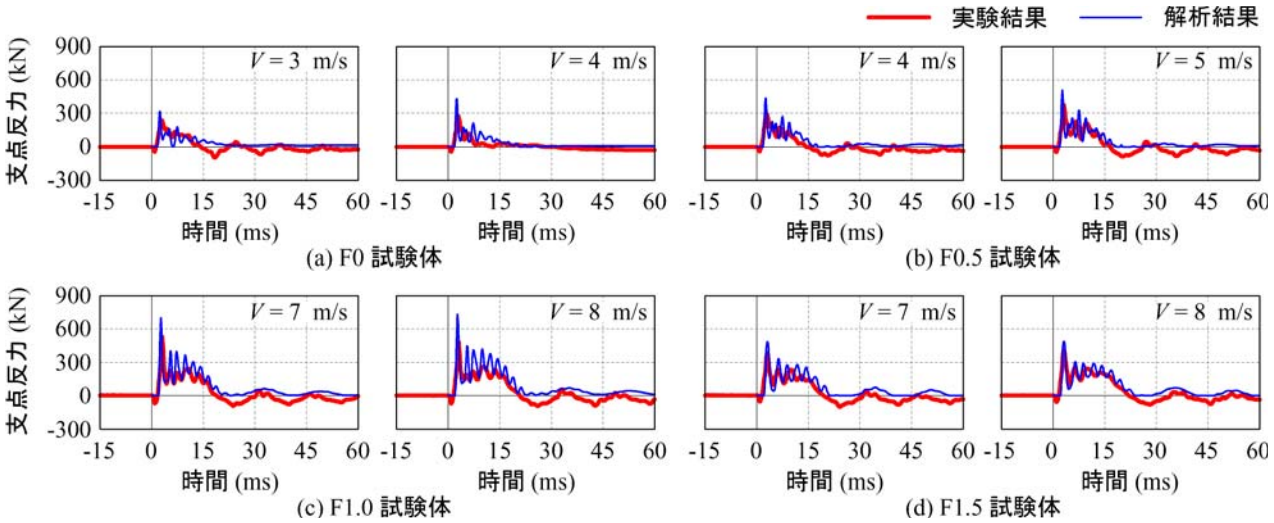
実験結果より，短繊維を混入していない F0 試験体の場合には，載荷点から両支点側に進展する斜めひび割れの他，アーチ状ひび割れも発生していることがわかる。また，F0-V4 試験体では下縁かぶりコンクリートの剥落も生じており，衝突速度 V が大きい場合ほど損傷が著しい．一方，短繊維を混入した F0.5/1/1.5 試験体の場合には，衝突速度 V が大きい場合ほど損傷が著しくなる傾向にあるものの，かぶりコンクリートの剥落は見られない。また，短繊維混入量の増加とともにアーチ状ひび割れや斜めひび割れの大きな開口はみられず，曲げ変形が卓越する破壊形式に移行していることが分かる。

一方，解析結果を見ると，F0/0.5 試験体の場合には，載荷点から支点側に向かって進展する斜めひび割れやアーチ状のひび割れの発生が多く見受けられ，せん断破壊のモードが強く現れていることが分かる。特に，F0-V4 試験体の場合には，斜めひび割れやアーチ状ひび割れの形状が実験結果と良く対応している。これに対し，F1/1.5 試験体では，アーチ状ひび割れの他，曲げひび割れや曲げせん断ひび割れの発生も多く見られる。また，短繊維の架橋効果によりひび割れの開口が抑制され，載荷点近傍下縁に微細なひび割れが集中する様子も，再現されていることが分かる。特に，F1.5 試験体の場合には，ひび割れ分布性状が実験結果と良く対応しており，破壊モードが曲げ破壊型に移行していることが分かる。

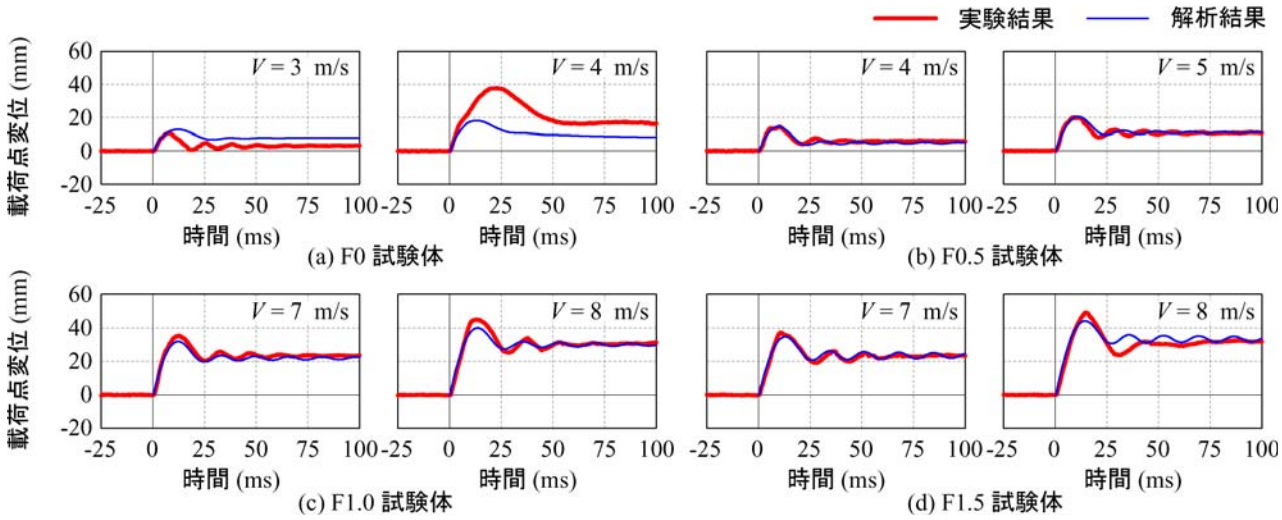
４．２　重錘衝撃力

図－６には，各解析ケースにおける実験結果および解析結果の重錘衝撃力波形を重ねて示している。図より実験結果の重錘衝撃力波形を見ると，衝突速度によらず，衝撃荷重載荷初期に励起する高周波で振幅の大きい第 1 波とその後に励起する継続時間が長く振幅の小さい第 2 波で構成されていることが分かる。これらの波形の振幅，最大重錘衝撃力および継続時間は，衝突速度が増加するほど大きく示されている。

実験結果と解析結果を比較すると，解析結果は衝撃荷重載荷初期に励起する高周波で振幅の大きい第 1 波とその後に励起する継続時間が長く振幅の小さい第 2 波で構成されている実験結果の波形性状をよく再現していることが分かる。



図－７　支点反力波形



図－８　載荷点変位波形

４．３　支点反力

図－７には，各解析ケースにおける実験結果および解析結果の支点反力波形を重ねて示している。実験結果の支点反力波形を見ると，重錘衝撃力の波動継続時間に対応して，衝撃初期には継続時間が 15～20 ms 程度の主波動に周期 3 ms 程度の高周波成分が合成された波形性状を示している。また，F0 試験体においても $V = 3$ m/s の場合には，衝撃荷重除荷後も交番する波形を示しており，自由振動状態にあることが分かる。

一方，$V = 4$ m/s の場合には，衝撃荷重除荷後に支点反力が励起していないことより，梁はせん断破壊により終局に至っていることが推察される。これに対して，短繊維を混入している試験体の場合には，いずれの場合も衝撃荷重除荷後も減衰自由振動状態にあり，短繊維の架橋効果によって，未だ復元力を保持しており終局に至っていないことが分かる。

解析結果を見ると，F0-V4 試験体の場合には，載荷初期の性状は実験結果とほぼ対応しているものの，その後の波形性状は，解析結果が実験結果を若干上回っている。これは，解析結果では，荷重載荷初期の耐衝撃挙動は再現されているものの，その後の著しいせん断破壊の性状までは再現できていないことを示している。しかしながら，その他の試験体に関しては最大応答値および波形の継続時間を含めて，実験結果をよく再現した波形性状を示していること

がわかる。

４．４　載荷点変位

図－８には，各解析ケースにおける実験結果および解析結果の載荷点変位波形を重ねて示している。実験結果の載荷点変位波形を見ると，いずれの試験体の場合も載荷初期に正弦半波状の第１波が励起した後，減衰自由振動を示していることが分かる。ただし，F0-V4 試験体の場合には，振動が過減衰的に減衰し，直流成分のみが励起している。これは，斜めもしくはアーチ状ひび割れが大きく開口してせん断破壊に至っていることを示唆している。その他の梁の場合には, 減衰自由振動を呈していることより，短繊維の架橋効果によって破壊モードが，せん断破壊型から曲げ破壊型に推移し，未だ復元力を保持していることが分かる。

解析結果と実験結果を比較すると, F0 試験体の場合には，第 1 波の最大振幅や継続時間が対応していないことが分かる。これは，前述の支点反力波形の場合と同様，解析結果は著しいせん断破壊の性状までは再現できないことによる。一方，短繊維を混入した F0.5，F1.0 および F1.5 試験体の場合には，重錘衝突後に最大変位を示す第 1 波目の正弦半波から除荷後の減衰自由振動波形に至るまで，最大応答値から残留変位量，周期ともに実験結果をよく再現していることが分かる。

以上のことより，本数値解析手法を用いることにより，短繊維混入軽量コンクリート製 RC 梁の耐衝撃挙動は，せん断破壊の性状が顕在化する場合には実験結果と対応しない場合があるものの，実験結果の耐衝撃挙動を概ね評価可能であることが明らかになった。

５　まとめ

本研究では，短繊維混入軽量コンクリート製 RC 梁の耐衝撃性状を適切に評価可能な数値解析手法の確立を目的に，短繊維混入率 V_f を 4 種類に変化させた軽量コンクリート製 RC 梁を対象に，数値解析を実施し重錘落下衝撃実験結果と比較することにより，その妥当性に関する検討を行った。提案の解析手法を用いることによって，以下のような結果が得られた。

(1) 各応答波形に関しては，短繊維を混入せずにせん断破壊に至る場合には，実験結果と対応しない場合もあるものの，短繊維を混入した場合には耐衝撃挙動を概ね評価可能である。

(2) ひび割れ分布性状は，短繊維を混入しないことによりせん断破壊に至る場合も含めて，実験結果と良く対応しており，短繊維混入による破壊モードの変化も再現可能である。

(3) 以上より，提案の解析手法を適用することによって，普通コンクリートを用いる場合と同様に PVA 短繊維混入軽量コンクリート製 RC 梁の耐衝撃挙動を適切に評価可能である。

文献

(1) 岸　徳光，三上　浩，松岡健一，安藤智啓：静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の弾塑性衝撃応答解析，土木学会論文集，No.619/I-47，(1999) ,p215-233.

(2) 岸　徳光・栗橋祐介・三上　浩：PVA 短繊維を混入した RC 梁の重錘落下衝撃挙動に関する数値シミュレーション，構造工学論文集，Vol. 54A, (2008),p1044-1054.

(3) John O.Hallquist：LS-DYNA User's Manual，Livermore Software Technology Corporation, (2006).

(4) 岸　徳光，三上　浩，松岡健一，竹本伸一：軽量コンクリートを用いたせん断補強筋のないせん断破壊型 RC 梁の重錘落下衝撃挙動解析，構造工学論文集，Vol.50A,(2004),p1361-1372.

(5) 田口　史雄，岸　徳光，三上　浩，栗橋　祐介：PVA 短繊維の架橋効果による RC 梁のせん断耐力向上効果，コンクリート工学年次論文集，Vol. 27,No.1(2005) , p 283-288.

(6) 岸　徳光・今野　久志・三上　浩：RC 梁の繰り返し重錘落下衝撃挙動に関する数値シミュレーション，構造工学論文集，Vol. 55A , (2009).