

# 論文 PVA短繊維を混入したRC梁の耐荷性状に関する数値解析的検討

山田 真司\*1・岸 徳光\*2・張 広鋒\*3・三上 浩\*4

**要旨：**本研究では、PVA短繊維を混入した曲げ破壊型RC梁の耐荷性状や破壊性状を適切に評価可能なコンクリートの引張軟化曲線を設定することを目的として、PVA短繊維の体積混入率の異なるRC梁を対象に3次元弾塑性数値解析を行った。その結果、1)コンクリートの引張軟化曲線における勾配変化点の引張応力を大きく設定することにより主鉄筋降伏荷重が大きくなる傾向にあること、2)本研究の範囲内では、提案の解析手法を用いることにより実験結果の曲げ耐荷性状やひび割れ状況を大略再現可能であること等が明らかになった。

**キーワード：**RC梁, PVA短繊維, 体積混入率, 引張軟化曲線, 耐荷性状, 非線形解析

## 1. はじめに

コンクリートの引張靱性能の向上を目的として、種々の短繊維を混入する方法が検討されている。著者らは、その中でもポリビニルアルコール(PVA)短繊維を混入したRC梁を対象とした静載荷実験を行い、短繊維混入によるRC梁のせん断耐力向上効果を確認している<sup>1)</sup>。一方、短繊維を混入したRC部材の合理的設計手法確立のためには、短繊維を混入した場合のせん断耐荷性状は勿論のこと、曲げ耐荷性状も明らかにすることが肝要である。しかしながら、短繊維混入によるRC部材の曲げ耐荷性能の向上効果に着目した検討事例は少ないのが実状であり、実験的検討は勿論のこと、数値解析的検討も重要な役割を果たすものと判断される。

このような観点より、本研究では、主鉄筋降伏荷重や剛性勾配等と関連性のあるコンクリートの引張軟化曲線に着目し、PVA短繊維を混入した曲げ破壊型RC梁の耐荷性状や破壊性状を適切に評価可能な引張軟化曲線を設定することを目的として、PVA短繊維の体積混入率(以後、短繊維混入率 $V_f$ )を変化させたRC梁に関する

3次元弾塑性解析を試み、実験結果<sup>2)</sup>との比較によりその妥当性を検討した。

## 2. 試験体概要

**表-1**には、解析対象とした試験体の一覧を示している。これらの試験体は、著者らが過去に行った実験の一部<sup>2)</sup>であり、PVA短繊維混入率を3種類に変化させた全3体の矩形RC梁である。試験体名は短繊維を示すSFと短繊維混入率 $V_f$ (vol.%) (ただし、SF0は無混入の場合)を用いて表している。

**図-1**には試験体の形状寸法、載荷点位置および配筋状況を示している。試験体は、いずれも上下端鉄筋にD19、帯鉄筋にD10を用いた複鉄筋矩形RC梁であり、断面寸法(幅×高さ)は150×350mm、純スパン長は3,200mmである。

**表-1 試験体の一覧**

試験体名	梁高 $h$ (mm)	せん断 スパン比	短繊維混入率 $V_f$ (vol.%)
SF0	350	4.0	0
SF1			1
SF2			2

\*1 北海道開発局 帯広開発建設部 修(工) (正会員)

\*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 教授 工博 (正会員)

\*3 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 助手 博(工) (正会員)

\*4 三井住友建設(株)技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

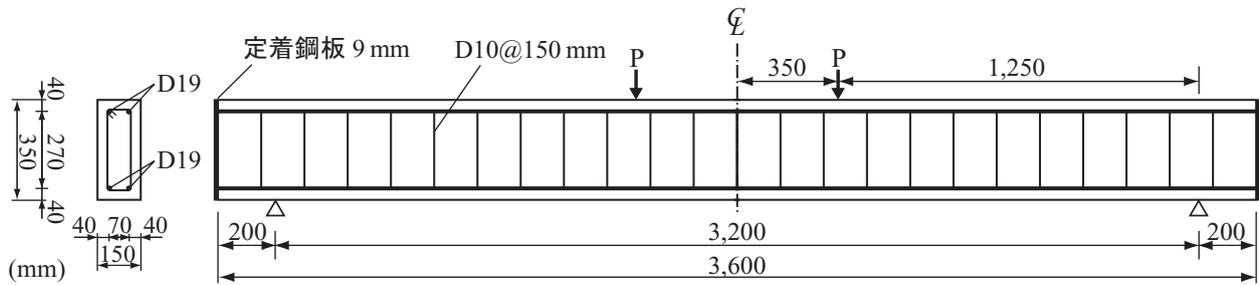


図-1 試験体の形状寸法，荷点位置および配筋状況概要図

表-2 および 表-3 には、実験時に実施したコンクリートの材料試験結果および PVA 短繊維の力学的特性値を一覧にして示している。また、鉄筋の降伏強度は D19 で 369.7 MPa であった。

なお、実験結果<sup>2)</sup>より、既往の研究の範囲内では、短繊維混入率が大きいほど主鉄筋降伏荷重が増大し、 $V_f = 0\%$  に対する向上割合は  $V_f = 2\%$  の場合で 13% 程度であった。

### 3. 数値解析概要

#### 3.1 解析モデル

図-2 には、本解析で用いた試験体に関する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スパンおよび断面方向に 2 等分した 1/4 モデルである。コンクリートおよび鉄筋は、8 節点固体要素を用いてモデル化している。境界条件は、解析対象の連続性を考慮して、対称切断面においてはその面に対する法線方向変位成分を拘束し、支点部においては節点の鉛直方向変位成分を拘束している。これらの条件は短繊維混入率  $V_f$  によらず同一とした。なお、収束計算には一般に広く用いられている Newton-Raphson 法を採用している。

#### 3.2 材料構成則

図-3 にはコンクリートの応力-歪関係を示している。コンクリートの材料構成則には、圧縮側に関しては、材料試験結果から得られた圧縮強度  $f'_c$  を用いて、圧縮歪  $3,500 \mu$  までは土木学会コンクリート標準示方書<sup>3)</sup> (以後、示方書) に基づいて定式化し、 $3,500 \mu$  以後は初期弾性係数の 0.05 倍で  $0.2 f'_c$  まで線形軟化するモデルとした。降伏の判定には Drucker-Prager の降伏

表-2 コンクリートの力学的特性一覧

試験体名	圧縮強度 $f'_c$ (MPa)	引張強度 $f_t$ (MPa)	弾性係数 $E_{ci}$ (GPa)	ポアソン比 $\nu$
SF0	59.7	3.51	40.9	0.2
SF1	60.3	3.54	41.1	
SF2	52.3	3.22	39.5	

表-3 PVA 短繊維の力学的特性 (公称値)

長さ (mm)	直径 (mm)	引張強度 $\sigma_f$ (GPa)	弾性係数 $E_f$ (GPa)	破断歪 (%)
30	0.66	0.88	29.4	7.0

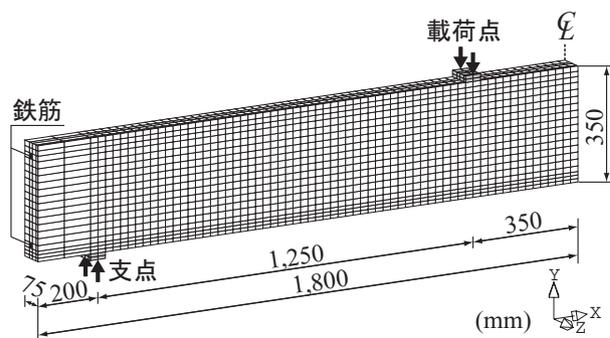


図-2 試験体の要素分割状況

条件を適用し、内部摩擦角を  $20^\circ$  としている。

引張側に関しては、示方書を参考にして 図-3 の拡大図に示す trilinear モデル (以後、示方書モデルと称す) を用いている。本研究では、示方書モデルを基本として、短繊維混入コンクリートの引張軟化曲線を適切にモデル化することを目的に、引張軟化曲線における勾配変化点の引張応力  $f'_t$  や引張応力が零になるひずみ  $\epsilon_3$  をパラメータにとって検討を行うこととしている。なお、示方書<sup>3)</sup>では、普通コンクリートの  $f'_t$  および  $\epsilon_3$  をそれぞれ、 $f_t/4$  および  $5\epsilon'_t$  と規定している。

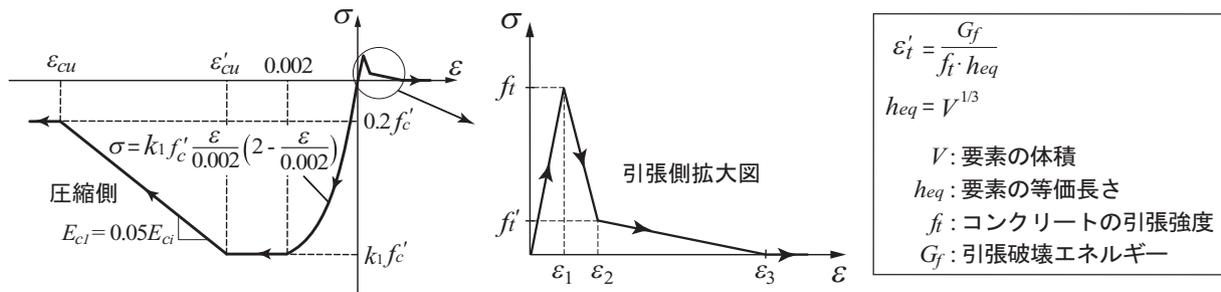


図-3 コンクリートの材料構成則

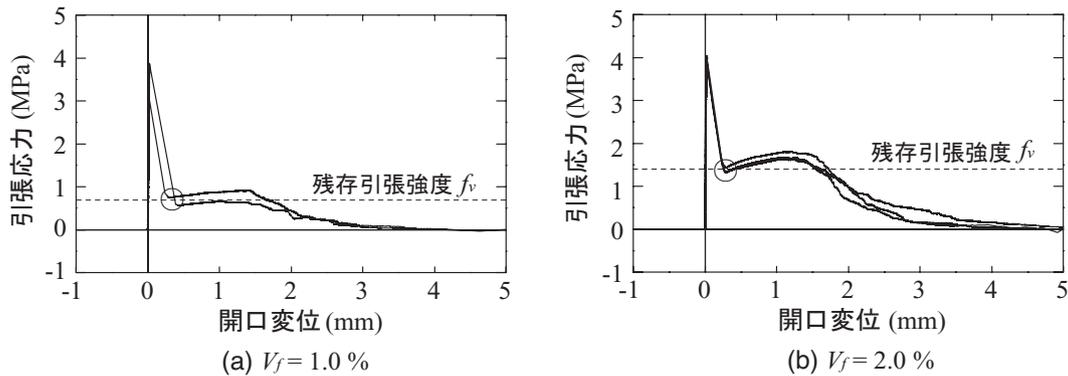


図-4 一軸引張試験による短繊維混入コンクリートの引張応力-開口変位関係

表-4 実験時における残存引張強度

短繊維混入率 $V_f$ (%)	残存引張強度 $f_v$ (MPa)	示方書モデルの $f'_t (=f_t/4)$ (MPa)	引張強度 $f_t$ (MPa)	$f'_t/f_t$ もしくは $f_v/f_t$
0	-	0.88	3.51	0.25
1	0.66	-	3.54	0.19
2	1.37	-	3.22	0.43

表-5 各解析ケースの一覧

試験体名	コンクリートの引張軟化曲線のパラメータ			
	$f'_t$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$
SF0	$f_t/4$			$5\epsilon'_t$
SF1	$f_t/4, f_t/3,$	$f_t/E_{ci}$	$0.75\epsilon'_t$	$10\epsilon'_t, 50\epsilon'_t, 100\epsilon'_t,$
SF2	および $f_t/2$			

一方、著者等の既往の研究では、PVA 短繊維混入コンクリートの一軸引張試験を実施しており、図-4 に示す引張応力-開口変位関係を得ている<sup>2)</sup>。この試験結果に基づいて引張軟化曲線をモデル化する場合において、ここでは簡略化して図-4 の残存引張強度  $f_v$  が示方書モデルの  $f'_t$  に対応するものと仮定した。しかしながら、表-4 に示しているように、 $V_f = 1\%$  の場合における残存引張強度は、示方書モデルの  $f'_t$  よりも小さく評価されている。これより、本数値解析においては、上述の残存引張強度を用いる場合には短繊維の架橋効果が適切に評価されない可能性がある。一方で、コンクリートは引張破壊時において、作用応力が急激かつ瞬間的に変動することから、試験結果に不確実性を含んでいる可能性もある。

以上のことより、本研究では、 $f'_t$  に関しては示方書による  $f_t/4$  を基準として、 $f_t/3, f_t/2$  と変化させて検討を試みることにした。また、 $\epsilon_3$  に関しても、 $10\epsilon'_t$  から  $\infty$  までを 5 水準に変化させて検討を行うこととする。なお、 $\epsilon_3 = \infty$  の場合には  $\sigma = f'_t (\epsilon \geq \epsilon_2)$  として処理することとする。

表-5 には、引張軟化曲線に関するパラメータの一覧を示している。本研究では、全ての試験体に対し各パラメータを変化させた場合における数値解析を実施して、実験結果の荷重-スパン中央点変位(以後、変位)関係と比較することにより、最適なパラメータの選定に向けた検討を行うこととした。

上下端鉄筋およびスターラップ要素には、塑性硬化係数  $H' (= 0.01E_s)$  を考慮した弾塑性体モデルを適用した。降伏は von Mises の降伏条件に従うものとしている。

### 3.3 接触面要素の配置および応力-相対変位関係

本数値解析では、主鉄筋のすべりに関する幾何学的不連続現象を考慮するために、主鉄筋の周辺に接触面要素を配置している。なお、接触面要素に適用した Bond-slip モデルには、図-5 に示すような CEB-FIP によるすべり-付着応力関係式を採用した。

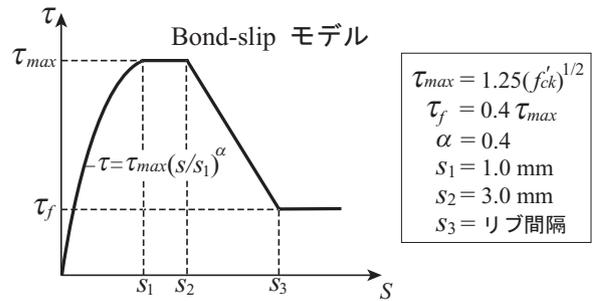


図-5 接触面要素の応力-相対変位関係

## 4. 各パラメータに関する解析的検討

### 4.1 $\epsilon_3$ の影響

図-6 には、 $\epsilon_3$  を変化させた各解析結果の荷重-変位関係を実験結果と比較して示している。ここでは、 $f'_t = f_t/2$  とした SF2 試験体を例に示している。

図より、 $\epsilon_3 = 10\epsilon'_t$  と設定する場合には、解析結果は主鉄筋降伏荷重およびその後の剛性勾配が、実験結果と比較して小さな値となっていることが分かる。これは、 $\epsilon_3$  の値が小さい場合には、実験結果よりも早期にひび割れが開口し、それ以後の荷重増加が抑制されるためと推察される。次に、 $\epsilon_3 = 50\epsilon'_t$  と設定する場合には、 $\epsilon_3 = 10\epsilon'_t$  の場合よりも、主鉄筋降伏荷重が大きく、その後の剛性勾配も大きくなっている。

$\epsilon_3 \geq 100\epsilon'_t$  の場合における解析結果を見ると、主鉄筋降伏荷重および剛性勾配は  $\epsilon_3 = 50\epsilon'_t$  の場合と同様の傾向を示していることが分かる。また、 $\epsilon_3$  の値を大きくするに従い、剛性勾配も僅かではあるが増加しており、次第に実験結果の剛性勾配に近づいている様子が伺える。

また、SF1 試験体の場合や、 $f'_t$  の値を変化させる場合においても、 $\epsilon_3$  による影響が類似の性状を示すことを確認していることより、 $\epsilon_3 = \infty$  と設定することで実験結果を大略再現可能であるものと考えられる。

### 4.2 $f'_t$ の影響

本節では、コンクリートの引張軟化曲線の  $f'_t$  が PVA 短繊維混入 RC 梁の曲げ耐荷性状に及ぼす影響を検討するために、前節で決定した  $\epsilon_3 = \infty$  の場合に限定し、 $f'_t$  を 3 種類に変化させた場合に関して検討を行うこととする。図-7 に

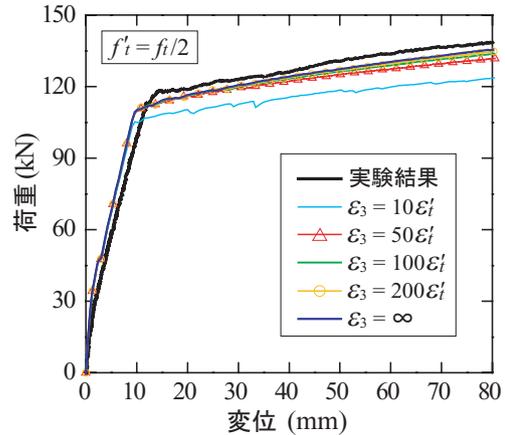


図-6 荷重-変位関係に及ぼす  $\epsilon_3$  の影響 (SF2 試験体)

は、 $f'_t$  に着目した各解析結果による荷重-変位関係を実験結果と比較して示している。

図-7(a) の SF1 試験体に関する比較図を見ると、 $f'_t = f_t/4$  の場合は、解析結果は変位 10 mm 近傍までは実験結果と大略一致しているものの、主鉄筋降伏荷重やそれ以後の剛性勾配は実験結果と比較して小さくなっている。 $f'_t = f_t/3$  の解析結果は、変位 45 mm 近傍まで実験結果と大略一致していることが分かる。それ以後は実験結果よりも若干低い剛性勾配となっているものの、解析結果は実験結果と大略対応しているものと判断される。 $f'_t = f_t/2$  の場合を見ると、解析結果は主鉄筋降伏荷重が実験結果よりも大きく、その後も変位 60 mm 近傍までは実験結果よりも勾配を若干過大に評価してしまう傾向にある。

図-7(b) の SF2 試験体に関する比較図より、 $f'_t = f_t/4$  および  $f'_t = f_t/3$  の解析結果は、両結果とも主鉄筋降伏荷重が実験結果と比較して小さく、その後の勾配も実験値を下回っている。一方、 $f'_t = f_t/2$  の場合に関しては、解析結果は主

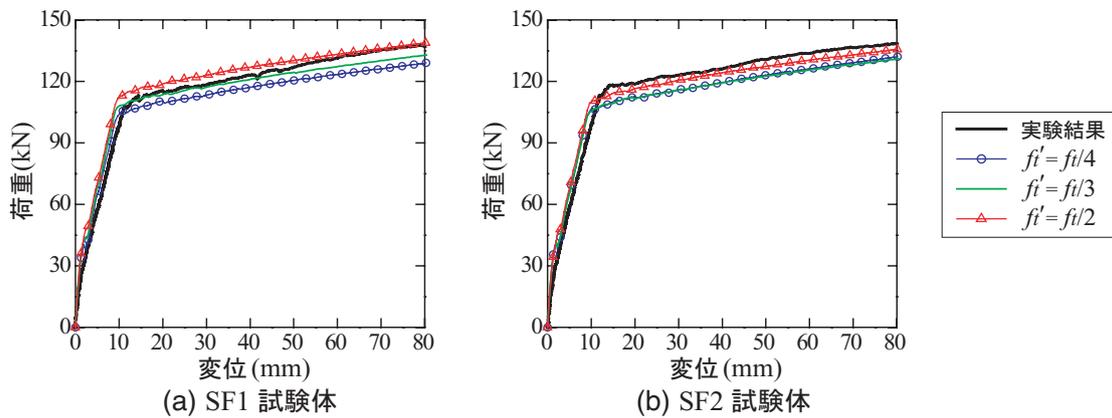


図-7 荷重-変位関係に及ぼす  $f_t'$  の影響 ( $\epsilon_3 = \infty$ )

鉄筋降伏荷重が実験結果よりも若干小さいものの、その後の剛性勾配は実験結果と大略一致しているものと判断される。

以上のことより、本研究の範囲内では、SF1試験体の場合には  $f_t' = f_t/3$ 、また、SF2試験体の場合に関しては  $f_t' = f_t/2$  とそれぞれ設定することにより、実験結果を適切に再現可能であるものと考えられる。

### 5. 数値解析結果および考察

ここでは、前章で同定した  $\epsilon_3$  および  $f_t'$  を用いた場合における解析結果と実験結果の比較を行うこととする。なお、SF0試験体に関する  $\epsilon_3$  および  $f_t'$  は、示方書に基づいた値（表-5 参照）を用いることとする。

#### 5.1 梁軸方向ひび割れ分布

図-8には、一例として、主鉄筋降伏後の変位 12 mm 近傍における SF0 および SF2 試験体の解析結果に関する変形状況およびコンクリートの軸方向歪コンター図を示している。

図-8(a) に示している SF0 試験体に関する解析結果を見ると、等曲げ区間および等せん断力区間において、1,200  $\mu$  以上の引張歪の発生が数箇所を確認できることより、この領域ではひび割れが発生しているものと推察される。

一方、図-8(b) の短繊維を混入した SF2 試験体に関する解析結果より、短繊維を混入していない SF0 試験体と比較して、等曲げ区間や等せん断力区間におけるひび割れ部の歪値は 1200 ~ 8000  $\mu$  に減少する傾向を示している一方、引張

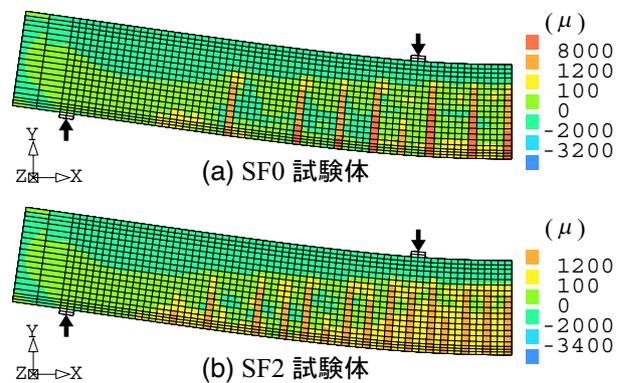


図-8 梁軸方向歪分布および変形図  
(変形倍率：15)

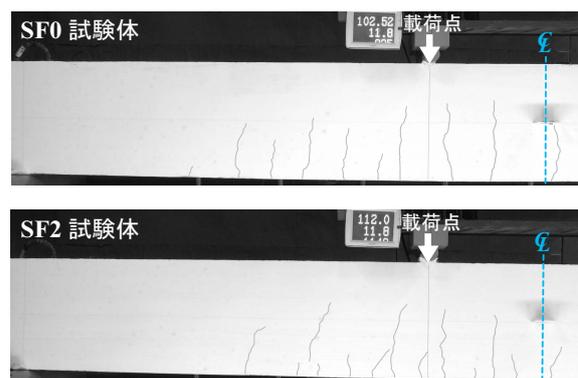


写真-1 主鉄筋降伏時におけるひび割れ状況

歪が 1,200  $\mu$  を越える箇所が増加している。これは、短繊維を混入することにより、ひび割れ間隔が密になり、分散して多数発生したためである。なお、実験時においても、写真-1 に示すように、SF2 試験体の場合には短繊維の架橋効果が現れることで、SF0 試験体と比較して、ひび割れが分散してその本数が多くなっていることを確認できる。このことより、解析結果は実験結果のひび割れ状況を大略再現しているものと判断される。

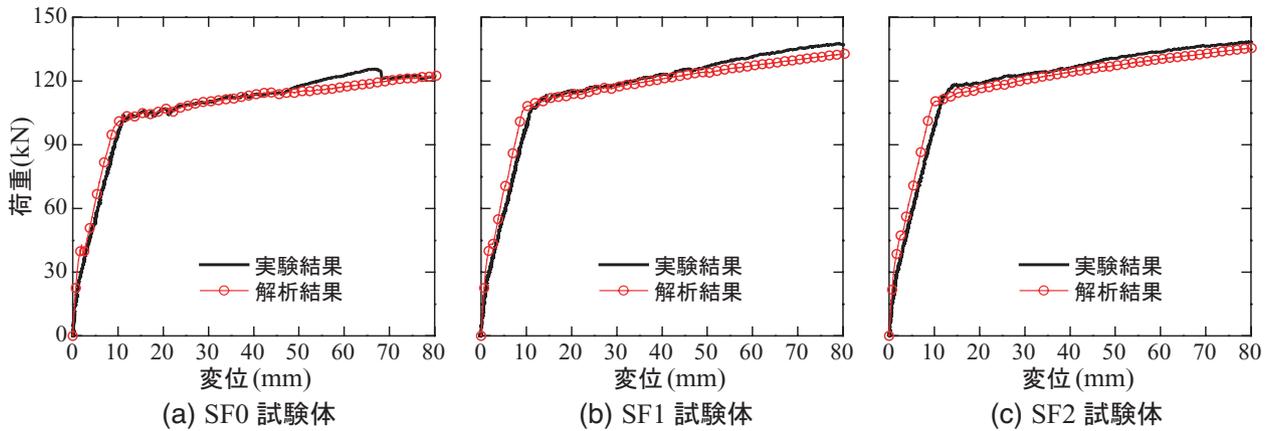


図-9 荷重-変位関係

## 5.2 荷重-変位関係

図-9には、各試験体における荷重-変位関係に関する解析結果を実験結果と比較して示している。

図-9(a)のSF0試験体に関する比較図より、解析結果は、荷重初期から実験結果とほぼ同様の分布性状を示していることから、解析結果は実験結果の耐荷性状を大略再現しているものと判断される。

図-9(b)のSF1試験体の比較図より、解析結果は主鉄筋が降伏した変位11mm近傍までは、実験結果と比較して剛性勾配が多少大きく示されているものの、主鉄筋降伏荷重やその後の剛性勾配に関しては、解析結果は実験結果とほぼ同様であり、両結果は大略対応していることが分かる。

図-9(c)のSF2試験体に関する比較図を見ると、SF1試験体と同様に、解析結果は主鉄筋降伏時までは剛性勾配が実験結果よりも若干大きく示されているものの、その後はほぼ同様の分布性状を示していることから、解析結果は実験結果の耐荷性状を大略再現しているものと判断される。

## 6. まとめ

本研究では、主鉄筋降伏荷重および剛性勾配等と関連性のあるコンクリートの引張軟化曲線に着目し、PVA短繊維を混入した曲げ破壊型RC梁の耐荷性状や破壊性状を適切に評価可能な引

張軟化曲線を設定することを目的として、短繊維混入率の異なる曲げ破壊型RC梁を対象として数値解析を行い、実験結果と比較する形で検討を行った。本研究より得られた結果を整理すると、以下の通りである。

- (1) 耐荷性状に及ぼすコンクリートの引張応力が完全に開放されるひずみ $\epsilon_3$ の影響は、その値を大きく設定することにより、主鉄筋降伏後の剛性勾配も大きくなる傾向にある。
- (2) コンクリートの引張軟化勾配変化点応力 $f_t'$ を大きく設定すると、主鉄筋降伏荷重も大きくなる傾向にある。
- (3) 本研究の範囲内では、コンクリートの引張軟化曲線において、SF1試験体は $\epsilon_3 = \infty$ および $f_t' = f_t/3$ 、SF2試験体では $\epsilon_3 = \infty$ および $f_t' = f_t/2$ と設定することによって、実験結果の曲げ耐荷性状やひび割れ状況を大略再現可能であるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 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, pp.283-288, 2005
- 2) 栗橋祐介, 岸 徳光, 田口史雄, 三上 浩: PVA短繊維を混入したRC梁の曲げ耐荷性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.277-282, 2005
- 3) コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] 2002