PVA 短繊維を混入した曲げ破壊型 RC 梁の耐荷性状に関する数値解析的検討

Numerical analysis of load-carrying behavior of flexural-failure type RC beams with PVA short-fiber

フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正員	張 広鋒 (Guangfeng Zhang)
フェロー	三上 浩 (Hiroshi Mikami)
正員	栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
○学生員	山田 真司 (Shinji Yamada)
	フェロー 正 員 フェロー 正 員 ○学生員

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 PVA 短繊維を混入した RC 梁を対象とした実験を行 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¹⁾.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考えられる.

このような観点より、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 性状を適切に評価可能なように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²⁾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²⁾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150×350 mm, 純スパン長は3,200 mm で ある. 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.



図-1 試験体の形状寸法および配筋状況概要図

3. 数值解析概要

3.1 解析モデル

図-2には、要素分割図の一例として、SF0 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。なお、SF1 および SF2 試験体 の要素分割状況は SF0 試験体と同様である。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.

表-1 試験体の一覧

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

表-2 コンクリートの力学的特性一覧

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

表-3 PVA 短繊維の力学的特性(公称値)

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





図-3 コンクリートの材料構成則

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 μ までは土木学会コンクリート標準示方書(以後, 示方書) に基づいて定式化し, 3,500 μ 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.また,降伏の 判定には Drucker-Prager の降伏条件を適用し, 内部摩擦角 を 20°としている.一方,引張側に関しては, trilinear モデ ルを用いることとした.なお,引張軟化曲線における各パ ラメータは **表-4** に示すように設定している.

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,主鉄筋の周囲に配置した接触面要素を用いてモ デル化している.なお,接触面要素に適用した Bond-slip モデルには,図-4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.

接触面要素の配置に関しては,SF0 試験体の場合,解析 モデルの簡略化も考慮して主鉄筋のすべりのみをモデル 化することとし,主鉄筋の周囲に沿って配置した.一方, PVA 短繊維を混入した SF1 および SF2 試験体に関しては, 便宜的に SF0 試験体と同様の接触面要素を配置した.

4. 各パラメータに関する解析的検討

表-4 には、本数値解析における解析ケースを示している.ここで、SF1 および SF2 試験体に関しては、コンクリートの引張軟化曲線のパラメータのうち、 ε_3 と残存引張強度 f'_t に着目して 15 ケースの解析を行うこととし、PVA 短繊維を混入する場合のコンクリートの引張軟化曲線における ε_3 および残存引張強度 f'_t が曲げ耐荷性状に及ぼす影響を検討している.

4.1 ɛ₃ の影響

本節では、コンクリートの引張軟化曲線の ϵ_3 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、 $\epsilon_3 \approx 5$ 種類に変化させた場合の影響に関して検討す る. **図**-5には、 ϵ_3 に着目し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.

図-5(a) には、SF1 試験体に関する比較図を示している. $\varepsilon_3 = 10\varepsilon'_t$ と設定した場合には、解析結果は、 f'_t の値にかか わらず、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



図-4 接触面要素の応力-相対変位関係

表-4 各解析ケースの一覧

封驗休夕	コンクリートの引張軟化曲線のパラメータ			
叫你个口	f'_t	ε_1	ϵ_2	ϵ_3
SF0	$f_t/4$			$5\varepsilon'_t$
SF1	$f_t/4, f_t/3,$	f_t/E_{ci}	$0.75\varepsilon'_t$	$10\varepsilon'_t, 50\varepsilon'_t, 100\varepsilon'_t,$
SF2	および <i>f</i> t/2			200 <i>€</i> ′ および ∞

は,解析では,ε3の値を小さく設定していることから,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 加が抑制されたためと推察される.次に、 $\epsilon_3 = 50\epsilon'_t$ と設定 した場合には、 $\epsilon_3 = 10\epsilon'_{t}$ 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。また、実 験結果と比較すると、f^tの値によって主鉄筋降伏荷重は変 化するものの, 主鉄筋降伏後の剛性勾配は変位 45 mm 近傍 まで実験結果と同程度であり、それ以後は、実験結果の勾 配が解析結果よりも若干大きい. この剛性勾配の差異は, 実験時においては、PVA 短繊維がコンクリート中で完全に は均等化されておらず、ひび割れの発生場所によって引張 強度等に多少の差異があるためと推察される.また、 $\epsilon_3 \ge$ 100年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.一方, ɛ₃の値を大きくするに従い, 剛 性勾配も僅かではあるが大きくなっていることから, 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.この ことから, SF1 試験体に関しては $\epsilon_3 = \infty$ を用いることで 実験結果を大略再現可能であるものと考えられる.

一方, 図-5(b) に示す SF2 試験体に関する比較図を見ると, (a) 図の SF1 試験体と同様の傾向が見られることから, SF2 試験体に関しても $\varepsilon_3 = \infty$ と設定することにより, 実験結果を大略再現可能であるものと考えられる.

以上より、本数値解析の範囲内では、PVA 短繊維混入 RC 梁におけるコンクリートの引張軟化曲線の ε_3 は、残存 引張強度 f'_t の値にかかわらず、 $\varepsilon_3 = \infty$ を用いることによ り、実験結果を最も適切に再現可能であることが分かる. 4.2 残存引張強度 f'_t の影響

本節では、コンクリートの引張軟化曲線の残存引張強度 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 $\varepsilon_3 = \infty$ の場合に着目 し、 f'_t を3種類に変化させた場合の影響に関して検討する こととした. **図**-6 には、 f'_t に着目した各解析結果の荷 重-変位関係を実験結果と比較して示している.

図-6(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



図ー6 荷重ー変位関係に及ぼす残存引張強度 f'_t の影響($\varepsilon_3 = \infty$)

0 10 20 30

30

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一 致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.以上のことより、SF1 試 験体の場合には $f'_t = f_t/3$ を用い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.

30

0

10 20

30 40 50 60 70 80

変位 (mm)

(a) SF1 試験体

次に、 図-6(b) の SF2 試験体に関する比較図に着目す ると、 $f'_t = f_t/4$ 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.以上より,SF2 試験体の場合に関 しては $f'_t = f_t/2$ と設定することにより,実験結果を大略再 現可能であるものと考えられる.

70 80

5. 数値解析結果および考察

40 50

変位 (mm)

(b) SF2 試験体

60

ここでは、前章で同定した ϵ_3 および残存引張強度 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、 ϵ_3 および f'_t は、SF0 試験体は示方書に基づ いた値 (**表**-4 参照)を用いることとし、SF1 および SF2 試 験体の場合には、前述の検討結果に基づき、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 $f'_t = f_t/2$ とそれぞれ設定している.

5.1 荷重-変位関係

図-7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-7(a)の SF0 試験体に関する比較図より,解析結果



平成17年度

土木学会北海道支部 論文報告集

写真-1 主鉄筋降伏時におけるひび割れ状況

第62号

20

80

0 10 実験結果

解析結果

70 80

60

40 50

変位 (mm)

(c) SF2 試験体

30

112.0 11.8

は、載荷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.

(b) 図の 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 11 mm 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.

(c) 図の 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。

5.2 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 試験体の結果を見ると,等曲 げ区間および等せん断力区間において、1,200 μ以上の引 張歪の発生が数箇所で確認でき,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, (b) 図の短繊維を混入した SF2 試験体に関する結 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いて、引張歪が 1,200 μ を越える箇所が増えていることから、短繊維を混入するこ とにより,ひび割れ間隔が密になり,多数分散したことが 伺われる.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 が多く発生していることを確認できることから、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.

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 梁の耐荷性状を適切に評価可能 なように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 ε₃ の影響は, その値大きく設定する と, 主鉄筋降伏後の剛性勾配も大きくなる傾向にある.
- (2) 残存引張強度 ft 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 $\varepsilon_3 = \infty$ および $f'_t = f_t/3$, SF2 試験体では *ε*₃ = ∞ 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.