

岐阜大学工学部 正 小柳 治 正 六郷恵哲
 岐阜大学大学院 岩佐正徳 鈴木泰生

1. まえがき

ひびわれの進展によって生じるコンクリートの各種の破壊現象のシミュレーションを行う場合に、ひびわれ域におけるコンクリートの引張ひずみ軟化曲線（減少する引張応力と開口変位との関係）を取り入れることにより、実際の現象により忠実なシミュレーションを行うことができる。

本研究では、直接引張試験によって鋼繊維補強コンクリート（SFRC）の引張ひずみ軟化曲線を計測するとともに、引張あるいは曲げを受けるSFRC供試体の荷重変位曲線のシミュレーションを有限要素法によって行い、引張ひずみ軟化曲線の計測方法の妥当性ならびに曲げ強度の寸法依存性について検討した。

2. SFRCの引張ひずみ軟化曲線の計測

両引き法による直接引張試験方法を図-1に示す。10x10x40cmの角柱供試体両端にネジ付き鋼棒を埋め込み、供試体側面中央部の対称面に切り欠き（幅5mm、深さ15mm）を加工した供試体（1条件につき4個）を使用した。切り欠き部の開口変位（左右の平均）を合計4個の高感度変位計を用いて計測した。さらに、開口変位計によっても、左右の切り欠き部の開口変位をそ

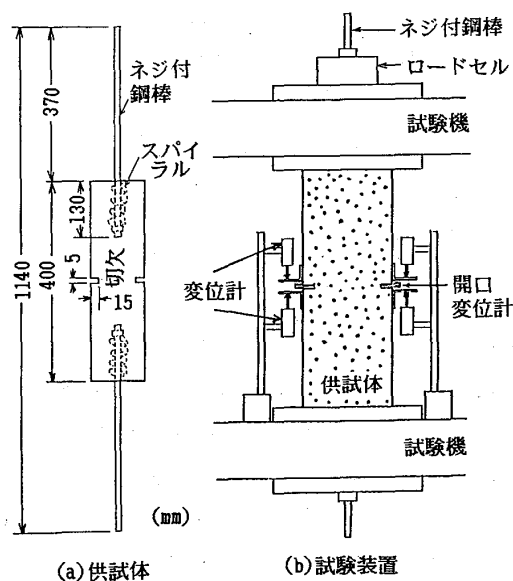


図-1 直接引張試験

れぞれ計測した。ストレート鋼繊維（インデント付き $\phi 0.5 \times 25 \text{ mm}$ ）を容積比で1%または2%混入したSFRC（圧縮強度 f_c はそれぞれ 593 kgf/cm^2 、 627 kg/cm^2 ）を使用した。

鋼繊維混入率が1%と2%の場合について、それぞれ4個の供試体から高感度変位計によって求めた荷重開口変位曲線を平均し、さらに引張ひずみ軟化曲線に換算して図-2に示す。鋼繊維混入率が1%の場合、ひびわれ発生直後の急激な破壊の進展を制御できなかったため、この領域の曲線は鋼繊維混入率が2%の場合の試験結果をもとに推定した。開口変位計によって計測した左右の開口変位と荷重との関係の一例を図-3に示す。左右の開口変位は等しくはならず、ひびわれは主に片方の切り欠きから他方へと進展した。

SFRCの破壊エネルギー（図-2に示す引張ひずみ軟化曲線の面積）は鋼繊維混入率が1%および2%の場合でそれぞれ 6.11 kgf/cm 、 8.81 kgf/cm となった。

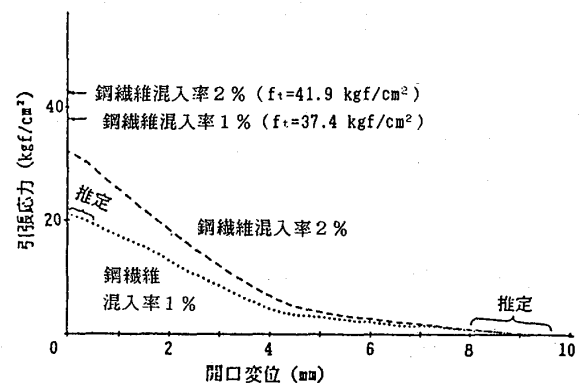


図-2 引張ひずみ軟化曲線の計測結果

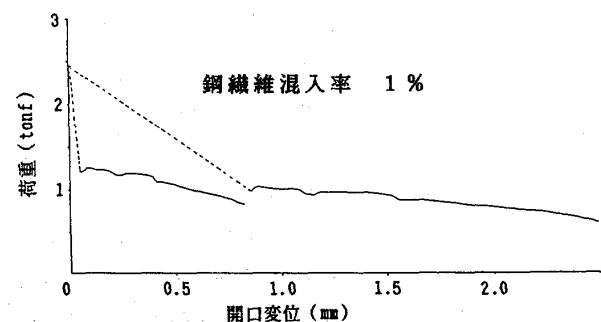
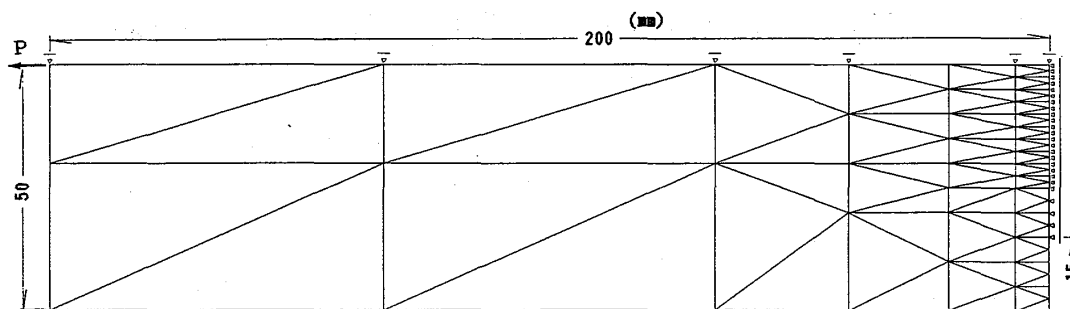
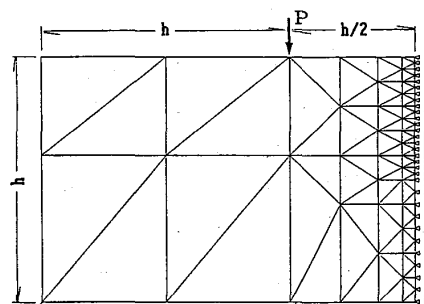


図-3 荷重開口変位曲線の一例



(a) 引張供試体



(b) 曲げ供試体

(h = 10, 20, 30, 40, 50 cm)

図-4 有限要素モデル

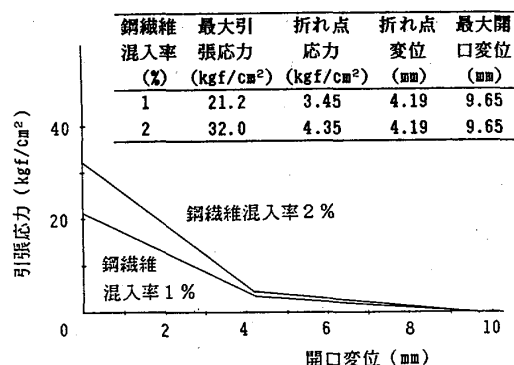


図-5 引張ひずみ軟化曲線のモデル

3. 引張荷重変位曲線のシミュレーション

実測した荷重開口変位曲線を換算（縦軸の荷重を応力に換算）して得られた引張ひずみ軟化曲線（図-2）を用いて、有限要素法によって荷重変位曲線のシミュレーションを行った場合に、シミュレーション結果が実測結果と一致するかどうかについての検討を行った。

引張供試体の有限要素モデル（要素数94、節点数70）を図-4（a）に示す。試験から得られた引張ひずみ軟化曲線（図-2）をもとに二直線状にモデル化した引張ひずみ軟化曲線を図-5に示す。供試体中央部の両側の切り欠きからひびわれが対称に進展すると仮定し、ひびわれ線上の節点に、引張ひずみ軟化曲線から定まる結合力を等価節点力として作用させた。

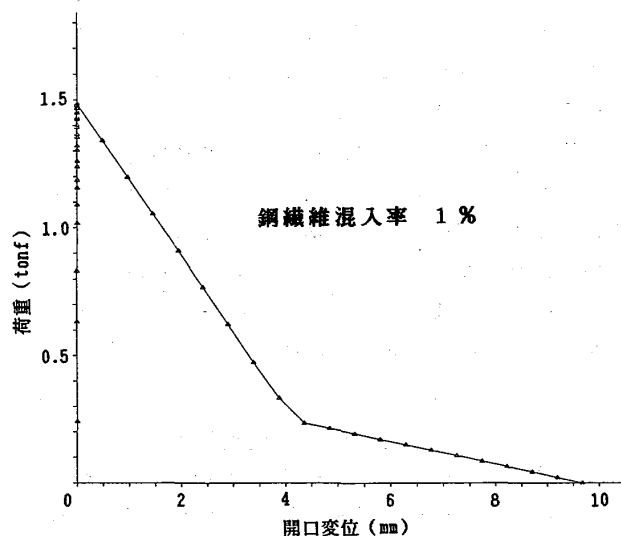


図-6 荷重開口変位曲線のシミュレーション結果

表-1 シミュレーションの条件

シリーズ名	鋼繊維混入率 (%)	供試体寸法 (cm)
F1S1	1	10×10×30
F1S2	1	20×20×60
F1S3	1	30×30×90
F1S4	1	40×40×120
F1S5	1	50×50×150
F2S1	2	10×10×30
F2S2	2	20×20×60
F2S3	2	30×30×90
F2S4	2	40×40×120
F2S5	2	50×50×150

鋼繊維混入率が1%の場合について、図-5の引張ひずみ軟化曲線を用いて引張供試体の荷重開口変位曲線のシミュレーションを行った結果を図-6に示す。シミュレーションによって得られた荷重開口変位曲線の形状は、シミュレーションに用いたひずみ軟化曲線の形状とよく一致した。なお、ひびわれが一方の切り欠きから他方へ進展する場合についても検討を行う予定である。

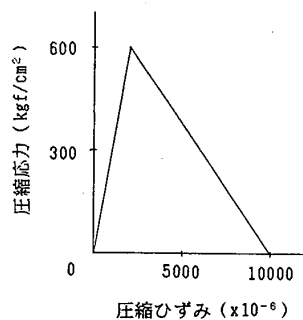


図-7 圧縮応力ひずみ曲線のモデル

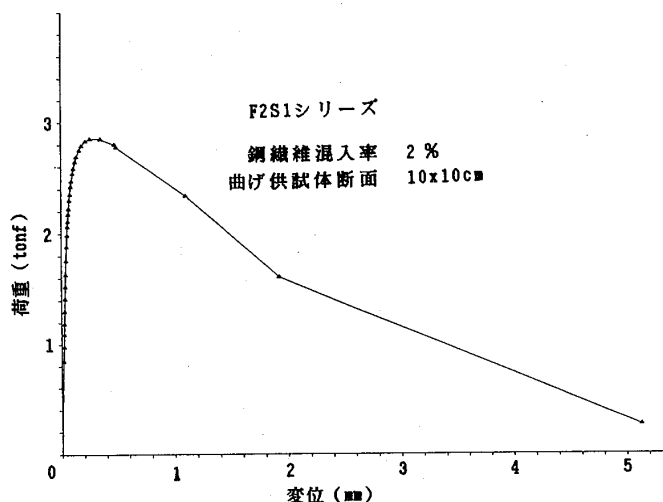


図-8 荷重変位曲線のシミュレーション結果

4. 曲げ荷重変位曲線のシミュレーション

表-1に示すように、鋼繊維混入率を1%または2%とし、断面が10x10cm、載荷スパンが30cmの供試体と、全体の寸法がその2、3、4、5倍の、5種類の供試体について3等分点載荷した場合の荷重変位曲線のシミュレーションを、図-5に示すひずみ軟化曲線のモデルを用いて行った。供試体の有限要素モデルを図-4(b)に示す。ひびわれは供試体中央部の引張縁から進展するものと仮定し、自重の影響は考えないものとした。また供試体および載荷方法が左右対称であるので左半分の要素を用いてシミュレーションを行った。はりの圧縮域の応力ひずみ曲線としては図-7に示すモデルを用い、強度破壊点($f_c=600\text{kgf/cm}^2$)を超えた要素の弾性係数を低下させることにより、圧壊現象をシミュレーションに組み込んだ。

シミュレーションによって求めた荷重変位曲線の例としてF2S1シリーズ(鋼繊維混入率2%)の結果を図-8に示す。引張側のひびわれの進展と圧縮側の圧壊とを考慮して、最大荷重点以降をも含む完全な荷重変位曲線を得ることができた。

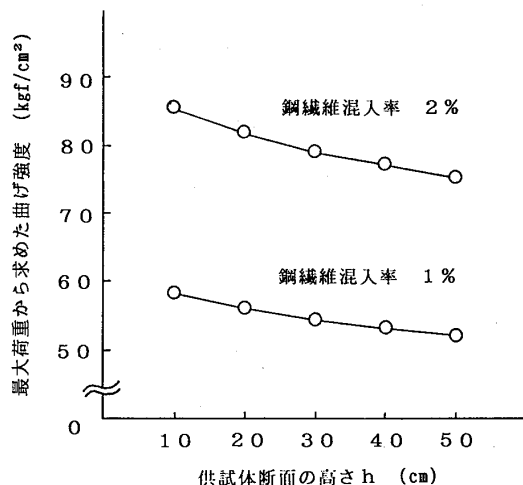


図-9 曲げ強度の供試体寸法依存性

5. 曲げ強度の寸法依存性

日本コンクリート工学協会の規程¹⁾においても、3等分点載荷したSFRCは供試体(断面 $b \times h$ 、スパン L)の示す最大荷重 P_m から曲げ強度 f_b を求めるには、材料の非線形性を考慮せずに普通コンクリートの場合と同様に次式が用いられる。

$$f_b = P_m L / (bh^2) \quad (1)$$

シミュレーションによって得られた最大荷重から、(1)式により曲げ強度を求め図-9に示す。供試体寸法が大きくなるほど曲げ強度は低下し、低下の度合は鋼繊維混入率が2%の場合(破壊エネルギー大)の方が1%の場合よりも大きい。

供試体寸法が大きいくほど曲げ強度が低下することが知られており²⁾、その理由としては、鋼繊維の分散と配向特性、供試体各部位の強さのばらつき、表面と内部の乾燥の度合の差、材料の非線形性などが考えられる。本研究では、材料の非線形性が曲げ強度に及ぼす影響を定量的に明らかにした。

6. あとがき

SFRCの引張ひずみ軟化曲線を直接引張試験によって計測するとともに、引張ひずみ軟化曲線を取り入れて引張ならびに曲げ供試体の荷重変位曲線のシミュレーションを行った。さらに引張ひずみ軟化特性に起因する曲げ強度の寸法依存性を定量的に明らかにした。

参考文献

- 1) 繊維補強コンクリートの試験方法に関する規程、日本コンクリート工学協会、1984年
- 2) 岡村雄樹他、鋼繊維補強コンクリートの曲げ特性に及ぼす部材寸法の影響、土木学会第38回年講概要集、V、pp、293~294、1983年