

論文 高強度繊維補強コンクリートの靱性に及ぼす引張軟化特性の影響の解析的研究

佐渡一太*¹・橋高義典*²

要旨：高強度繊維補強コンクリートを想定した種々の形状のトリリニア型引張軟化曲線について、結合力モデルを用いたひび割れ進展数値解析により荷重変位関係を解析し、引張軟化曲線の初期結合応力、軟化勾配、ならびにヤング率等の各種特性値が最大強度および靱性に及ぼす影響を考察した。

キーワード：高強度コンクリート、靱性、引張軟化曲線、数値解析、荷重変位曲線

1. はじめに

コンクリートの破壊現象を解析するためには、材料特性となる引張軟化特性（破壊エネルギー、引張軟化曲線の形状）を組み込んだ数値解析手法が有用である。また、高強度コンクリートは強度の増加に伴って脆性的な性質を示すため、靱性の改善が目標となっている。靱性は材料特性となる引張軟化曲線あるいはその面積で評価される破壊エネルギー等と密接な関係がある。しかし、同一破壊エネルギーであっても、引張軟化曲線の形状により靱性は異なる。三橋[1]は、バイリニア型引張軟化曲線の形状が荷重変位曲線に及ぼす影響を考察し、繊維補強等の複合材料の設計指針を述べている。しかし、最近の高強度繊維補強コンクリートの引張軟化曲線の逆解析例[2, 3]を見ると、バイリニアのみの評価では不十分で、トリリニア、またはそれ以上の多直線モデルの引張軟化曲線についてその形状効果を検討する必要がある。本研究では引張軟化曲線の形状と荷重変位曲線との関係を、高強度繊維補強コンクリートをモデルにして解析的に考察し、高強度コンクリートの靱性向上に必要な材料条件を破壊力学的観点から明らかにすることを目的とする。

2. 高強度コンクリートの高靱化手法とその評価

コンクリートの強度および靱性を向上させる手法は図1のようになる。強度を改善させる手法は比較的微小なレベルであり、シリカヒューム等の微粒子の混入、特殊混和材の利用等がある。靱性の改善は、比較的大きなレベルであり、繊維補強、粒子補強、高強度骨材の使用などがある。両レベルの手法を組み合わせることで、高強度高靱性コンクリート（ハイパーコンクリート）が得られる。各レベルでの改善効果は引張軟化曲線の形状的特徴及びヤング率で評価しうると考えられる。

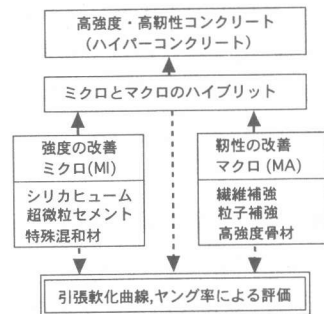


図1 コンクリートの高強度・高靱性化プロセスとその評価

* 1 東京電力（株）（正会員）

* 2 東京都立大学工学部建築学科，工博（正会員）

3. 解析方法

ひび割れ進展の解析はモードI型（引張開口型）の結合力モデル（図3）による。本モデルは、多くの微細なひび割れが広域に発生し、それによって形成される非線形領域を、一本の仮想ひび割れに開口変位に応じた伝達応力（結合応力）を作用させモデル化したものである。この結合応力と開口変位との関係が引張軟化曲線（図4）である。また、引張軟化曲線（TSD）で囲まれた面積が破壊エネルギー G_F^{TSD} となる。本解析では、切欠き梁の三点曲げ（図2）を対象とした。解析の手順は、まず、(1)式に示す試験体形状から定められる結合応力と開口変位の条件式と、(2)式に示す引張軟化曲線の多直線近似式（ m は傾きの関数、 n はY切片の関数）から、結合応力を消去し開口変位を未知数とした離散化連立方程式（ひびわれ方程式）を立て、それを解くことで開口変位の分布を求め、形状関数により荷重変位曲線（LPD曲線）を求める。

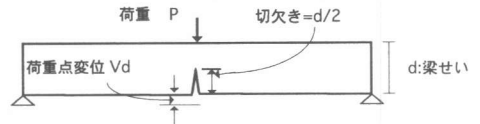


図2 切欠き梁の三点曲げ

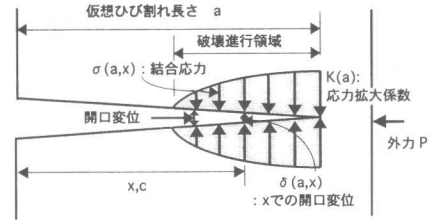


図3 結合力モデル

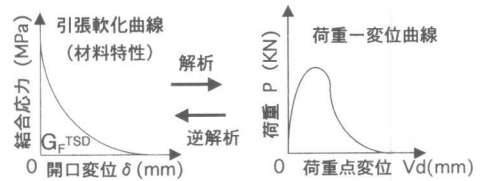


図4 引張軟化曲線から荷重-変位曲線の推定

$$\int_0^a \sigma(a,x) \cdot H(a,x,c) dx = \delta(a,x) \cdots \cdots (1)$$

$$\sigma(a,x) = m(\delta(a,x)) \cdot \delta(a,x) + n(\delta(a,x)) \cdots \cdots (2)$$

ここに、 $\sigma(a,x)$ 、 $\delta(a,x)$ ：それぞれ、仮想ひびわれ長さ a の時の節点 x での結合応力、開口変位、 c ：結合応力の作用点（図3）である。また、 $H(a,x,c)$ は形状関数であり、仮想ひび割れ先端の応力の連続条件ならびに、開口変位の釣合条件から定められる。

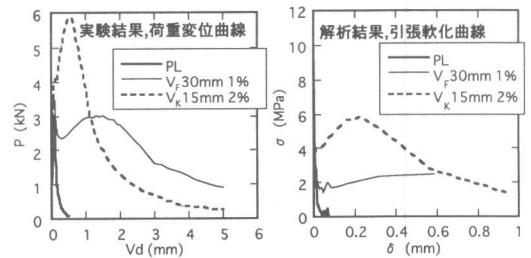


図5 荷重-変位曲線の実験例[2]と引張軟化曲線の解析結果

4. トリリニア型引張軟化曲線

図5に高強度繊維補強モルタルでの荷重変位曲線とその引張軟化曲線を多直線近似法により求めた例を示す。PLはプレーンモルタルを、 V_F 30 mm、 V_K 15mmは、長さ30mm、15mmのビニロン繊維を表している。解析結果の引張軟化曲線に注目すると、PLはバイリニア（2直線）で類型化できるが、 V_F 、 V_K は、バイリニアでは困難であり、トリリニア(3直線)による類

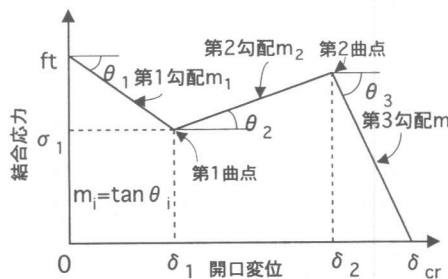


図6 トリリニア型引張軟化曲線

型化が妥当と考えられる。

トリリニア型の引張軟化曲線の形状の特徴を定量化するために図6に示すパラメータを定義した。トリリニア型引張軟化曲線は結合応力軸の切片である初期結合応力 f_t を始点とする第1直線、第2直線、第3直線により構成されており、各々の直線の交点を左から第1曲点、第2曲点とする。また、第1直線の勾配を第1勾配 m_1 、同様に第2勾配 m_2 、第3勾配 m_3 とした。第1曲点での結合応力を σ_1 とし、この値の f_t に対する割合を第1曲点応力比 σ_1/f_t とし、さらに、第2曲点での開口変位 δ_2 の第1曲点での開口変位 δ_1 との比を開口変位倍率 δ_2/δ_1 と定義する。

表1に、荷重変位解析に用いるトリリニア型引張軟化曲線のパラメータ設定値を示す。各パラメータは図6の概念図に示されたものである。これらは、既往の高強度繊維補強コンクリートでの引張軟化曲線の解析結果等[2, 3]を基に、想定し得る値を設定した。また、引張軟化曲線の他にも韌性に影響するパラメータとしてヤング率を変化させることとした。表中のアスタリスクを標準値とした。

各条件の引張軟化曲線について先に述べたたびわれ進展解析を行い、荷重変位関係を求めた。その結果から、各パラメータと荷重変位曲線の形状、最大荷重およびエネルギー吸収能等の比較を行った。エネルギー吸収能は、今回は、図7に示すように、荷重点変位が1mmまでの荷重変位曲線で囲まれた面積で相対的に評価することとした。

5. 解析結果

5.1 荷重変位曲線

図8は、引張軟化曲線の形状は同じ標準値でヤング率 E のみ変化させた場合の、荷重-変位曲線の解析結果である。この図を見ると引張軟化曲線が同一でも、ヤング率によって荷重-変

表1 解析でのトリリニアTSDのパラメータ設定

パラメータ	設定値
ヤング率 E (GPa)	20, 40*, 80
初期結合応力 f_t (MPa)	2, 4, 8*, 16
第1勾配 m_1	-20, -40*, -80
第1曲点応力比 σ_1/f_t	0.25, 0.5*, 0.75
第2勾配 m_2	-5, 0*, 5
開口変位倍率 δ_2/δ_1	1, 4*, 16
第3勾配 m_3	m_1

*基本値

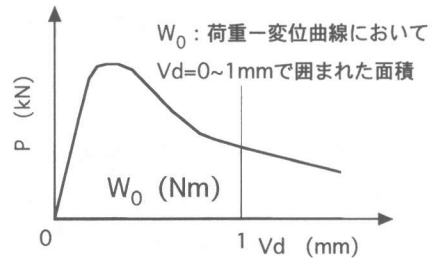


図7 エネルギー吸収能評価値 W_0

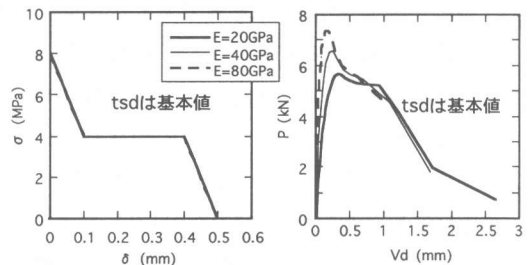


図8 ヤング率を変化させた場合の荷重-変位曲線(P-Vd)解析結果

位曲線が変化することが分かる。特に、ヤング率が大きな場合には、最大荷重値も大きくなるが、それ以降は荷重が低下する割合も多く、脆性的な破壊形態を示す。ヤング率の小さな試験体は、最大荷重までの剛性が低く、最大荷重も低い値となるが、最大荷重以降の変形量は他よりも大きく、延性的な性質を示している。

図9の1)は、初期結合応力 f_t のみ変化した場合の荷重変位解析結果である。この図より、初期結合応力が大なるほど最大荷重値は大きくなる。しかしながら、最大荷重以降は各条件とも同じ様な形状となる。これは、引張軟化曲線の初期結合応力以外の形状が同一であるためと考えられる。

図9の2)は、第1勾配 m_1 を変化させた場合の荷重変位解析結果である。他のパラメータは基準値としている。この図より、第1勾配が大きいほど最大荷重値は大きくなる。最大荷重以降の挙動は第1曲点以後の引張軟化曲線の形状の影響を受けている。

図9の3)は、第1勾配 m_1 を一定にし、第1曲点の位置を変化させた場合の荷重変位解析結果である。この図より第1曲点応力比 σ_1/f_t が大きい(3/4)場合には最大荷重も大きくなる。しかしながら、曲点の位置が、1/2では、1/4での解析結果とほぼ同様の値となる。

図9の4)は、第2勾配の傾き m_2 を変化させた場合の荷重変位解析結果である。この場合は第一曲点が最大荷重を1/2に設定しており、先ほどの考察のように最大荷重には影響がない。しかしながら、最大荷重以降の形状は、引張軟化曲線の形状に類似し、 m_2 が大きいほど、荷重変位曲線の軟化域での硬化の度合いが大きい。

図9の5)は、第2勾配 m_2 を0とし、第1曲点の変位に対する第2曲点までの変位量を開口変位倍率 δ_2/δ_1 として変化させた場合の荷重変位解析結果である。変位量が大きいほど、荷重変位曲線の最大荷重以降の延性度が大きく、靱性の向上に効果的となる。

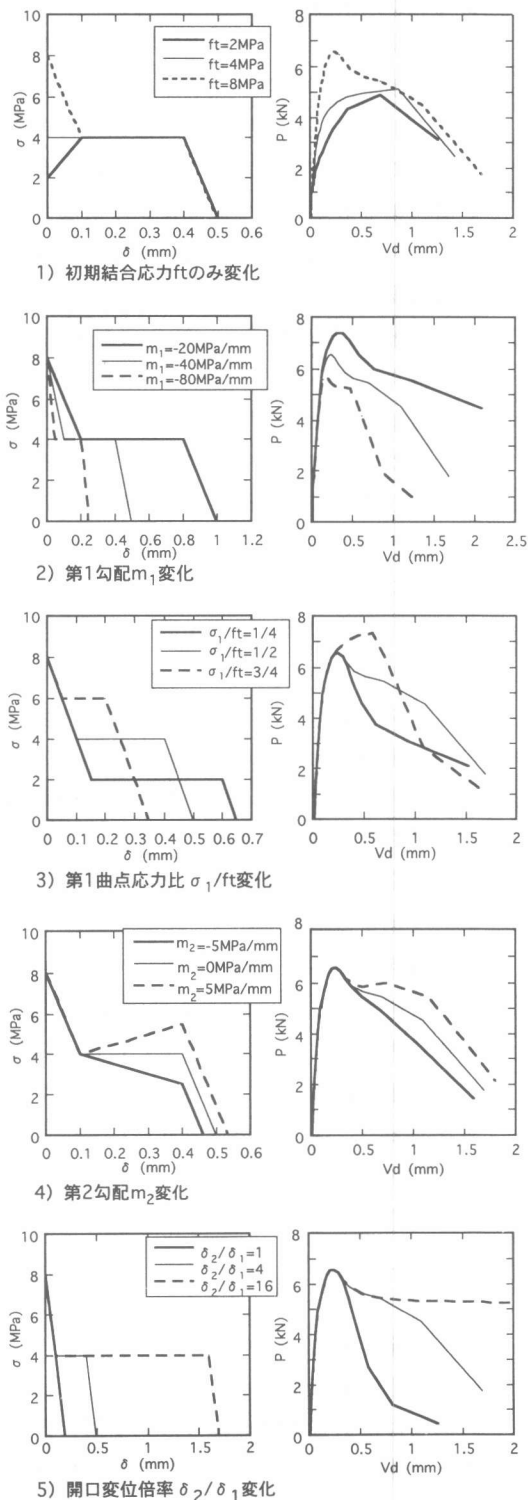


図9 種々引張軟化曲線 ($\sigma-\delta$) と荷重-変位曲線 ($P-Vd$) 解析結果

5.2 最大荷重およびエネルギー吸収能

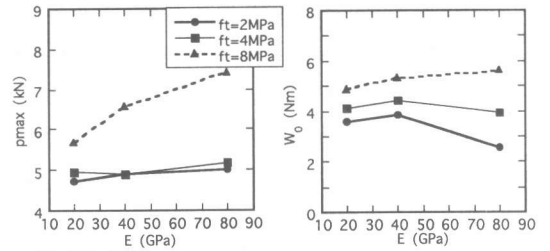
図10の1)は、ヤング率Eを変化させた場合の、最大荷重およびエネルギー吸収能を示す。最大荷重は、ヤング率が大きいほど大きくなり、その増加傾向は初期結合応力が大きいほど顕著に表れる。エネルギー吸収能に関しては、初期結合応力が大きい場合にはヤング率に比例してやや増加する傾向があるが、初期結合応力の低い場合には逆に低下し脆性化している。

図10の2)は、第1勾配 m_1 を変化させた場合の最大荷重およびエネルギー吸収能を示す。第1勾配が大きいほど両評価値とも大きくなっている。第1曲点の位置による差はあまりみられない。したがって、第1勾配が大きい材料は強度・靱性とも大となる。

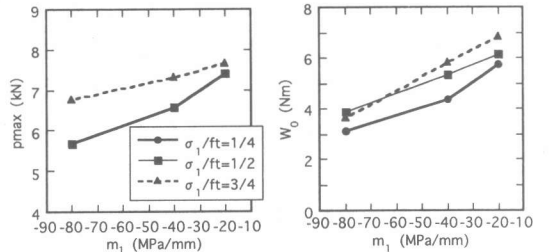
図10の3)は、第1勾配を一定にし、第1曲点の位置を変化させた場合の最大荷重およびエネルギー吸収能である。この図より、第1曲点応力比 σ_1/ft がおおよそ0.5以下では、第2勾配に関わらず最大荷重およびエネルギー吸収能は等しい。逆に、0.5以上では、第2勾配が大きく影響するようになる。注目すべきは、第1曲点0.5以上の場合で、第2勾配が負の場合には、最大荷重は増加するが、エネルギー吸収能は低下する点であり、また、ひびわれ初期の段階から伝達応力を増加させることは強度増加に効果があるといえる。また、靱性の向上は第2勾配を大きくすることが効果的となる。

図10の4)は、第2勾配 m_2 を変化させた場合の最大荷重およびエネルギー吸収能である。第2勾配 m_2 が大きいほど、最大荷重、エネルギー吸収能ともに大きくなる傾向がある。

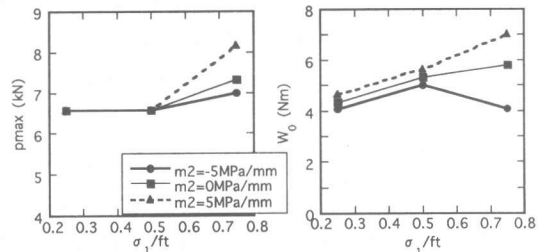
図10の5)は、開口変位倍率の影響を見たものであるが、この値が大きいほど強度・エネルギー吸収能とも増加する傾向にある。しかしながら、第1曲点応力比が低い場合には、増加の割合は小さくなる。



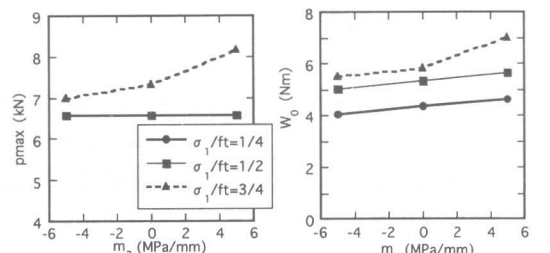
1) ヤング率E



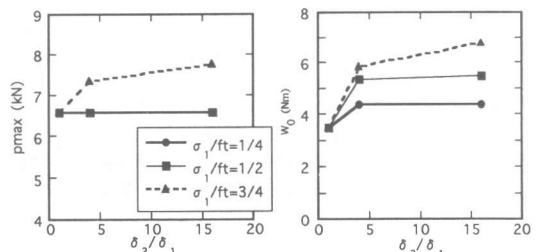
2) 第1勾配 m_1



3) 第1曲点応力比 σ_1/ft



4) 第2勾配 m_2



5) 開口変位倍率 δ_2/δ_1

図10 各パラメータと最大荷重 p_{max} および W_0 との関係

6. 韌性向上のための引張軟化曲線の特性

以上より、引張軟化曲線の各パラメータの最大強度および韌性への影響度をまとめると表2のとおりとなる。最大強度には、特にヤング率、初期結合応力および第1勾配が影響すると考えられる。第1曲点の応力比は、約0.5以上の値から最大強度に大きく影響する。第2勾配および開口変位倍率とも影響するが、影響度は小さいと考えられる。韌性に関しては、最大強度とは逆の傾向で、ヤング率、初期結合応力は、あまり大きな影響はない。第1勾配は最大強度と同様、影響度が大きく重要な因子と考えられる。第1曲点の応力比は、最大強度同様、約0.5以上の値から大きく影響する。また、第2勾配および開口変位倍率の影響度が大きい。

以上をまとめると、最大強度は引張軟化曲線の初期の特性が大きく影響し、韌性は引張軟化曲線の開口変位が大きい領域が影響するといえる。このことは、引張軟化曲線と荷重変位曲線との関係を全体的に見ても、引張軟化曲線の形状の変化の傾向と荷重変位曲線の変化点の傾向が似ていることから推測できる。これらの考察より、コンクリートの高強度高韌性化の設計ためには、ミクロな特性となる強度に関しては、引張軟化曲線の初期特性およびヤング率により評価することができ、それらの値を向上させることが強度増大につながる。また、マクロな特性となる韌性の改善効果に関しては、引張軟化曲線の初期以降の特性により評価でき、これらの値を向上させるような材料開発が重要となる。

7. まとめ

引張軟化曲線の形状と荷重変位曲線との関係を、高強度繊維補強コンクリートをモデルにし解析的に考察した結果、強度特性は引張軟化曲線の初期の特性およびヤング率が大きく影響し、韌性は引張軟化曲線の初期以降の軟化域の特性が影響することが明らかとなった。これらの結果から高強度コンクリートの韌性向上に必要な条件を明らかにした。今後はこれらの各特性を簡便に評価し材料設計にフィードバックできる枠組みが必要である。

参考文献

- [1] 三橋博三：セメント系複合材料設計への破壊力学の応用，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12-1，pp.1175-1180，1990
- [2] 大岡督尚，橘高義典：ハイパーコンクリートにおけるモルタルマトリックス部の破壊韌性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18-1，pp.1143-1148，1996.7
- [3] 栗原哲彦，安藤貴宏，国枝 稔，内田裕市，六郷恵哲：多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状，土木学会論文集，No.532/V-30，pp.119-129，1996.2.

表2 パラメータの影響度

パラメータ	強度	韌性
ヤング率 E	◎	△
初期結合応力 f_t	◎	△
第1勾配 m_1	◎	◎
第1曲点応力比 σ_1/f_t	○	◎
第2勾配 m_2	○	◎
開口変位倍率 δ_2/δ_1	○	◎
引張軟化曲線		