

論文 ハイパーコンクリートの靱性評価方法に関する研究

橋高義典¹・上村克郎²・中村成春³

要 旨：コンクリートの破壊靱性試験より得られる荷重-荷重点変位曲線から、多直線近似解析法により引張軟化曲線を求め、コンクリートの靱性を評価するパラメータの算定方法を破壊力学的手法により検討し、有効破壊エネルギー、タフネス指数等を提案した。各種短繊維を高強度モルタルマトリックスに混入した高強度・高靱性コンクリート（ハイパーコンクリート）について、各種パラメータを評価しその特徴を把握した。

キーワード：ハイパーコンクリート、短繊維、破壊力学、タフネス指数、破壊エネルギー

1. はじめに

近年、高強度コンクリートの開発研究が多くなされ、高層RC構造物への適用も現実のものとなってきている。しかしながら、高強度コンクリートは圧縮強度の増加に比較し引張強度・破壊エネルギー等が必ずしも増加せず頭打ちになる傾向があり破壊の形態も極めて脆性的になる[1]。これらは、高強度RC部材の耐力・終局変形性能等において大きな弱点となる。これを解決するためには、コンクリートの靱性の改善が必要である。靱性の改善は、ひびわれ発生・拡大の防止、かぶり部分の剥落防止等で、耐久性の観点からも重要となるのは言うまでもない。このような、高強度・高靱性コンクリート（以下、ハイパーコンクリートと呼ぶ）を得るためには、繊維混入・粒子分散等による高強度マトリックスの高靱化が有効と考えられる。図-1には、靱性改善の観点から、各種コンクリートの圧縮強度と破壊エネルギーのゾーニングの概念を示した。

本研究では、コンクリートの靱性評価試験方法を破壊力学的手法に基づき検討するとともに、ハイパーコンクリートの物性に関する基礎的実験を行う。

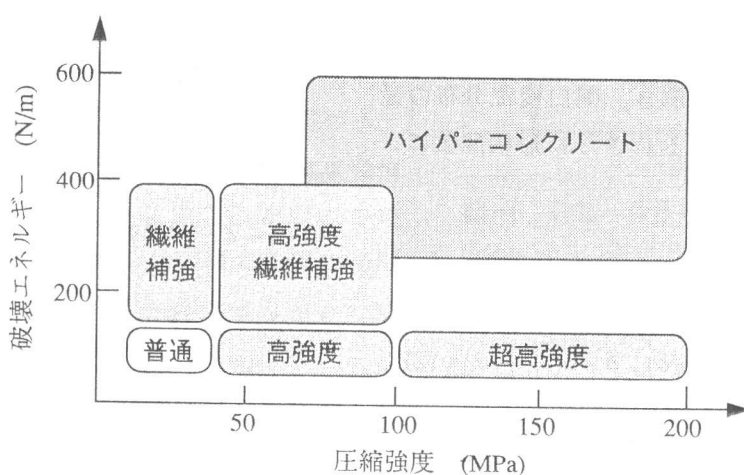


図-1 各種コンクリートの圧縮強度と破壊エネルギーのゾーニング

- * 1 東京都立大学助教授 工学部建築学科, 工博 (正会員)
- * 2 関東学院大学教授 工学部建築学科, 工博 (正会員)
- * 3 宇都宮大学大学院 工学研究科生産・情報工学専攻, 工修 (正会員)

2. 引張軟化曲線に基づく靱性パラメータ

コンクリートの破壊過程のモデルには図-2に示す結合力モデルがある。初期切欠き長さ a_0 、仮想ひびわれ長さ a を有する一本のひびわれに、外力に釣り合う伝達応力（結合応力 $\sigma(a, x)$ ）を開口変位 $\delta(a, x)$ に応じ作用させることにより、モードI（引張変形型）での破壊進展がモデル化される。開口変位と結合応力との関係は引張軟化曲線(Tension softening diagram, TSD)でありコンクリートの基本的な材料特性となる。

TSDの推定は多直線近似解析法による[2]。TSDを図-3に示すように、傾き m_k および σ 軸切片 n_k で示される直線要素で近似する。解析手順は図-4に示すとおりである。まず、荷重-荷重点変位曲線（以下、LPD曲線とする）の初期勾配からヤング率 E および初期結合応力 σ_0 等を最適化する。仮想ひびわれを1節点進める毎に軟化曲線の勾配 m_k を仮定し、ひびわれ進展解析からLPD曲線の計算値を求め、実測値との一致性から m_k を最適化する。

ひびわれ進展解析は、式(1)に示す試験体形状、外力等から定まる結合応力と開口変位の条件式と、式(2)に示す引張軟化曲線の多直線近似式から、離散化連立方程式（ひびわれ方程式）を立て、開口変位解と結合応力との関係が式(2)の構成関数式を満たすまで m_k を変化させながら線形方程式を繰返し解き、開口変位分布の最適解を求めるものである。さらに形状関数によりLPD曲線を求める。

$$\int_0^a \sigma(a, c) \cdot H(a, x, c) dc - \delta(a, x) = 0 \quad \cdots \cdots (1)$$

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

ここに、 $\sigma(a, x)$ 、 $\delta(a, x)$ 、 $H(a, x, c)$ ：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、形状関数、 c ：結合応力の作用点（図-2、3参照）である。

TSDから、図-5に示すように各種破壊パラメータが求められる[3]。

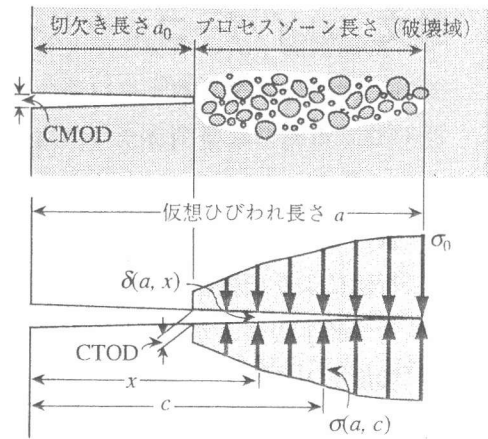


図-2 結合力モデル

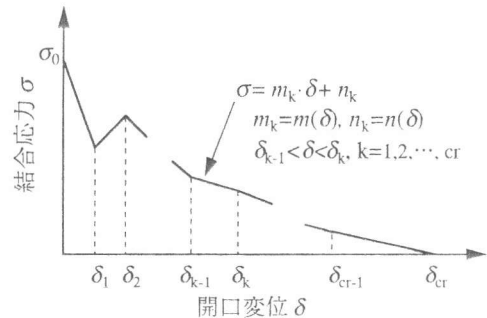


図-3 多直線近似引張軟化曲線

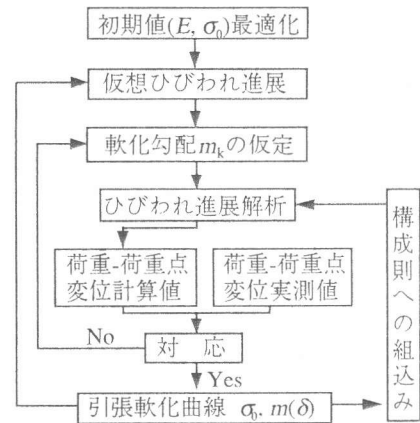


図-4 引張軟化曲線の多直線近似解析法のフロー

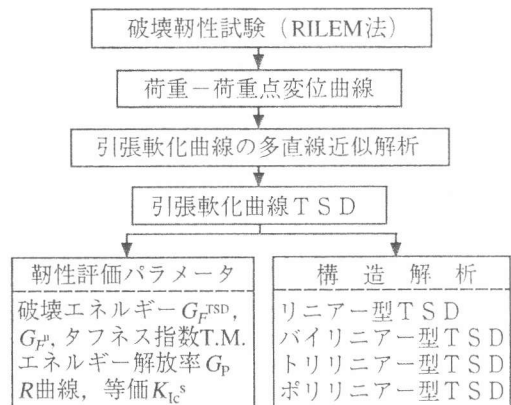


図-5 パラメータの評価フロー

3. 靱性評価パラメータ

TSDで囲まれた面積は、仮想ひび割れ節点を $\delta = \delta_{cr}$ (限界開口変位) となるまで完全に分離するために必要な破壊エネルギー G_F^{TSD} であり、靱性能の評価指標となる。しかし、繊維補強コンクリートでは繊維のブリッジング作用により、コンクリートが完全な破断に至らず δ_{cr} が特定できない場合もあり G_F^{TSD} の評価が難しい。そこで、TSDにおいて有効ひびわれ幅 δ_u までで囲まれる面積を有効破壊エネルギー G_F^u と定義する (図-6 参照)。 δ_u は、これ以上ひびわれ幅が大きくなると部材の機能が低下する上限値とする。今回その値は、耐久性の観点から漏水の許容幅[4]を考慮し0.5mmとした。

破壊エネルギーが同一でもTSDの形状によって荷重-変位曲線は変化する。そこで、TSDの形状を考慮したタフネス指数 (T.M.) を式(3)で定義する。本式は、図-6に示す各開口変位 δ_i までの面積 g_i を積算したものであり、初期ひびわれ部分でのエネルギー吸収を有効に評価するよう重みづけしたものである。

$$T.M. = \sum_{i=1}^n g_i ; g_i = \int_0^{\delta_i} \sigma(\delta) d\delta \quad \dots\dots(3)$$

図-7には、破壊エネルギーが同一のさまざまな形状のバイリニア型TSDを示し、それぞれのT.M.計算値を記した。図-8はそれに基づき、ひびわれ進展解析から求めた荷重-荷重点変位曲線を示した。この結果より、T.M.の大きいTSDほど、LPD曲線解析結果の最大荷重、初期のエネルギー吸収能 (靱性) が大となり、T.M.による評価の有効性がうかがえる。

図-9は一例として理想的な弾塑性材料である普通鋼材のTSD解析結果ならびに靱性評価値を示した。破壊靱性試験は、切欠きはり試験体 (400×50×100 mm, 50mmノッチ) の3点曲げ (後述) によった。初期結合力は引張強度よりも大となった。TSDはDugdale型 (矩形型) に近い構成曲線となっており、鋼材の塑性変形能をよく表しているといえる。

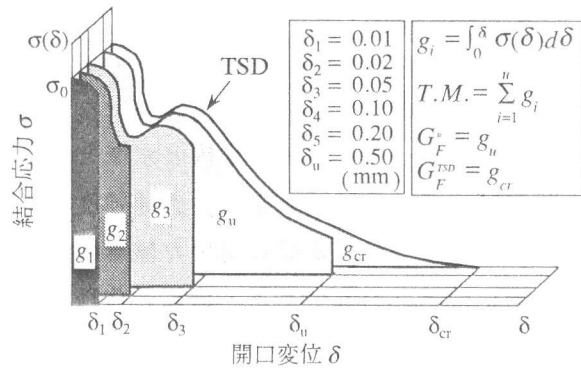


図-6 TSDに基づく靱性評価パラメータ概念図

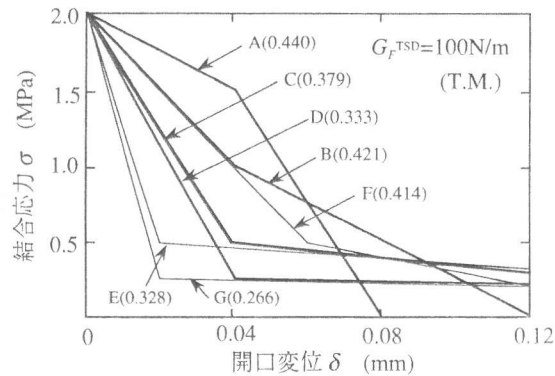


図-7 破壊エネルギーが等しいバイリニア型TSD

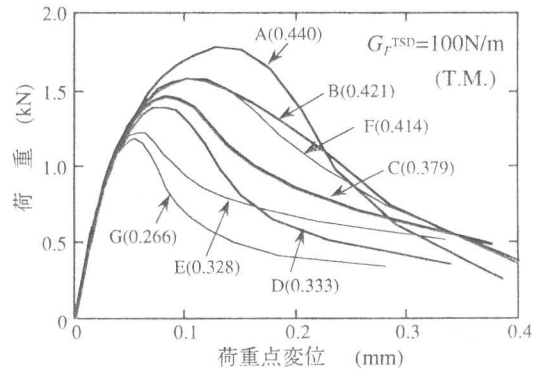


図-8 荷重-荷重点変位曲線の解析結果とT.M.

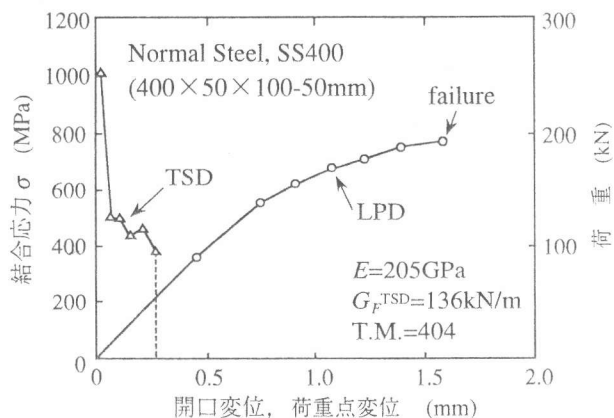


図-9 普通鋼の荷重-荷重点変位曲線LPDと引張軟化曲線TSDの解析結果

4. モルタル・コンクリートの靱性評価試験

4.1 試験概要

各種短繊維を混入したモルタル・コンクリートについて提案した各種靱性評価パラメータを求めた。表-1に実験の要因と水準を示す。高強度域の試験体はモルタル、普通強度域はコンクリートとした。実験に用いた繊維の概要は表-1に示すとおりである。繊維の体積混入率はすべての試験体で一定とし、低W/Bでのコンシステンシーを考慮し0.5%とした。

表-2にモルタル・コンクリートの調合条件及び力学特性の測定結果を示す。靱性評価は、RILEM法[5]に準じる切欠きはりの3点曲げ試験によった。試験体は、100×100×450mmのはり型とし、中央にはりせいの半分の50mmの切欠きを入れた。支点間スパンは400mmである（スパンはりせい比=4）。

試験方法の概要を図-10に示す。荷重を5N感度のロードセルにて計測し、荷重点変位を、サポートに取付けた変位計で測定し、荷重-荷重点変位曲線を求めた。荷重点変位は、最大荷重近傍までの極小変形と破断点近傍の大変形を高精度で測定するために、それぞれ別々の変位計を用いた。加力には高剛性試験機を用いた。コンクリートは打設後2日で脱型、以後水中養生とした。材齢は12週である。同一条件について4本の試験体を共した。

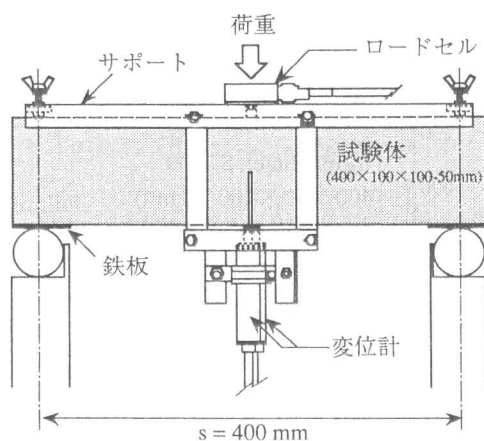


図-10 切欠きはり試験体の曲げ試験

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
水結合材比 W/B (%)	15, 25 (モルタル, M)
	50, 65 (コンクリート, C)
短繊維種類	ビニロン A (VA), 38 μ m×10mm, Ft=1570MPa
	ビニロン B (VB), 38 μ m×24mm, Ft=1570MPa
	カーボン(CO), 18 μ m×6mm, Ft=590MPa, ピッチ系

表-2 モルタル・コンクリートの調合および特性

記号	W/B %	単位容積重量 (kg/m ³)							圧縮強度 (Mpa)	引張強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)
		W	C	SF	S	G	SP	Fib.			
M15PL	15	154	1122	280	777	-	112	-	130	6.3	35.7
M15VA	15	153	1116	279	774	-	111	6.5	120	6.0	33.8
M15VB	15	153	1116	279	774	-	111	6.5	109	6.0	33.7
M15CO	15	153	1116	279	774	-	111	8.3	108	6.1	33.4
M25PL	25	217	818	91	1217	-	21	-	104	7.6	36.3
M25VA	25	216	814	90	1211	-	20	6.5	97	7.2	33.7
M25VB	25	216	814	90	1211	-	20	6.5	84	7.3	32.2
M25CO	25	216	814	90	1211	-	20	8.3	77	5.8	28.6
C50PL	50	222	409	-	808	894	-	-	45	3.9	33.6
C50VA	50	221	407	-	804	889	-	6.5	39	3.8	32.9
C50VB	50	221	407	-	804	889	-	6.5	44	3.8	29.3
C50CO	50	221	407	-	804	889	-	8.3	44	4.0	33.1
C65PL	65	223	344	-	861	891	-	-	42	3.4	30.6
C65VA	65	222	342	-	857	887	-	6.5	30	3.0	26.5
C65VB	65	222	342	-	857	887	-	6.5	34	3.1	25.4
C65CO	65	222	342	-	857	887	-	8.3	34	3.0	25.8

表-3 各種パラメータ

Type	σ_o (MPa)	δ_{cr} (mm)	$G_F^{(1)}$ (N/m)	$G_F^{(2)}$ (N/m)	T.M. (N/m)	破壊モード
M15PL	11.14	0.000	9.9	9.9	0.059	不安定破壊
M15CO	8.77	0.107	127.9	127.9	0.578	繊維破壊
M15VA	5.85	0.427	174.4	174.4	0.626	繊維破壊
M15VB	5.42	0.693	426.7	393.1	0.908	繊維破壊
M25PL	10.90	0.000	44.5	44.5	0.272	不安定破壊
M25CO	6.89	0.148	142.2	142.2	0.632	繊維破壊
M25VA	10.83	1.179	359.9	290.6	0.888	引抜け破壊
M25VB	8.57	1.148	835.3	541.5	1.131	引抜け破壊
C50PL	6.12	0.355	139.4	139.4	0.539	安定破壊
C50CO	6.04	0.734	224.5	215.2	0.724	繊維破壊
C50VA	4.97	0.645	277.6	268.7	0.769	引抜け破壊
C50VB	4.97	0.838	462.3	397.9	0.962	引抜け破壊
C65PL	6.03	0.578	139.9	138.9	0.508	安定破壊
C65CO	5.20	0.604	194.7	191.7	0.600	引抜け破壊
C65VA	6.01	0.652	340.2	325.8	0.838	引抜け破壊
C65VB	5.65	1.085	464.5	351.5	0.859	引抜け破壊

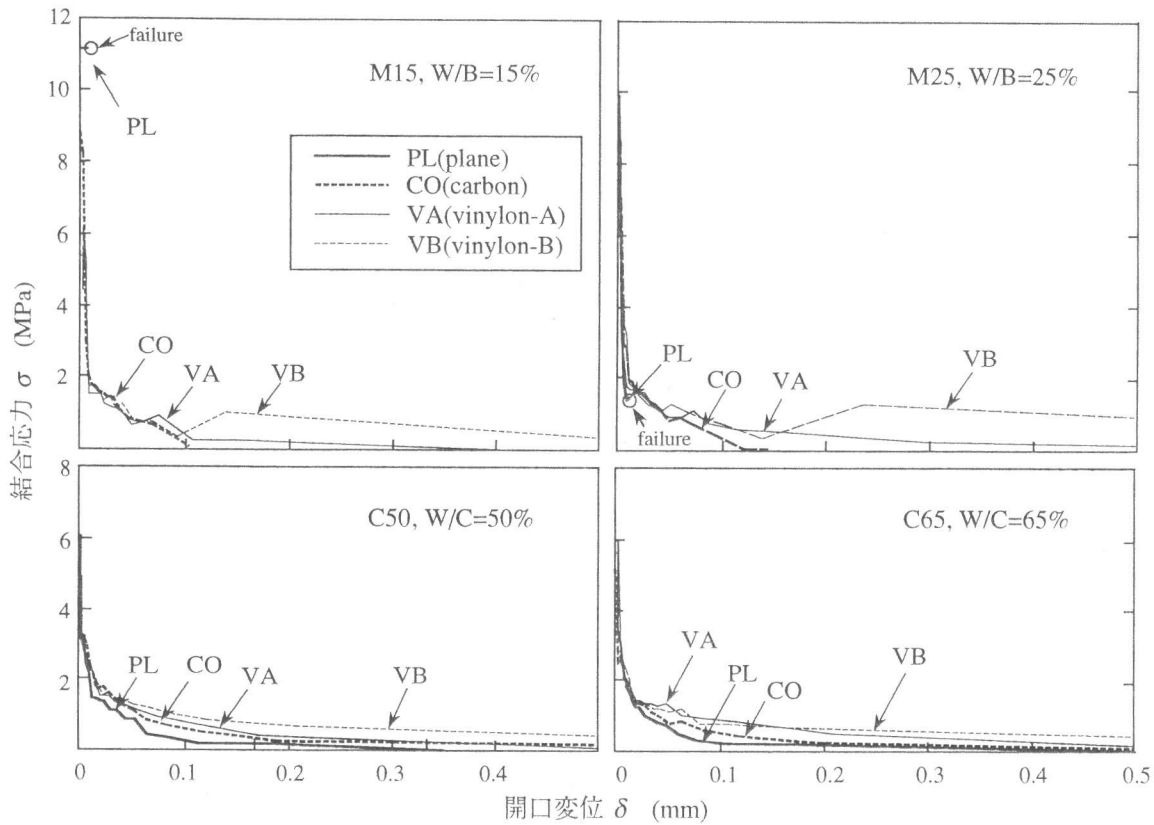


図-11 引張軟化曲線TSDの解析結果

4.2 実験結果及び考察

表-3に、図-4、5の評価フローから求めた各試験体の評価パラメータをまとめて示した。

図-11に、多直線近似解析法により求めた各試験体の引張軟化曲線(TSD)を示す。各試験体とも低W/Bになるほど、初期結合応力が增大する傾向がある。

W/B=15%の超高強度マトリックスでは、プレーン(PL)は軟化域が殆ど見られない脆性破壊を示した。それに対して繊維混入の試験体はいずれも軟化域が見られ、靱性が改善されている。W/B=25%においては、プレーンは軟化を示すが途中で脆性破壊となる。繊維混入の試験体は、靱性の向上がみられる。

W/C=50%, 60%の普通強度のマトリックスでも繊維を混入した試験体はTSDの面積が大となる傾向があるが、プレーンとあまり大きな差はない。これは、繊維混入率を低W/B試験体に合わせ0.5%と低い値に設定したためである。

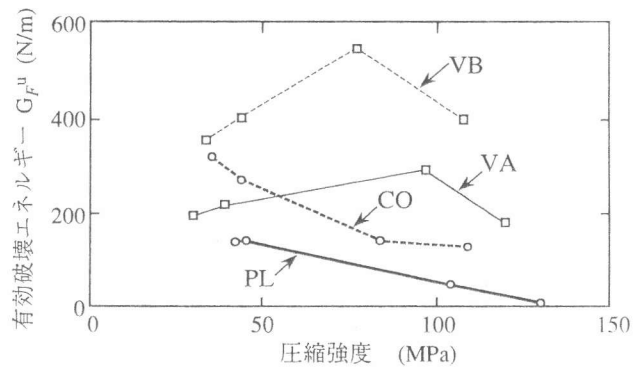


図-12 有効破壊エネルギーと圧縮強度

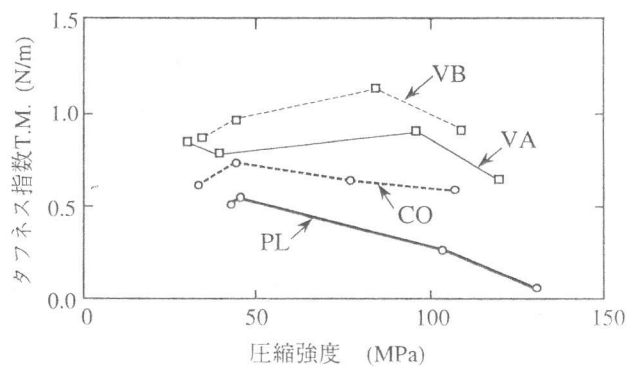


図-13 タフネス指数T.M.と圧縮強度

有効破壊エネルギー G_F と圧縮強度との関係を図-12に示す。プレーン (PL) では、圧縮強度の増大に伴い G_F は低下し脆性的になる。繊維を混入した試験体においては $W/B=25\%$ の値が 15% よりも高い傾向にある。特に VB で顕著である。これは $W/B=15\%$ の高強度マトリックスでは、マトリックス強度の増大に伴い、繊維の付着強度が増大し、破壊モードが繊維破断となり、脆性的な破壊挙動を示すためと考えられる。 $W/B=25\%$ では適当な付着応力のもとでマトリックス-繊維界面でのずり抜け破壊が進行し、十分なブリッジング作用が生じているものと思われる。繊維別では $CO < VA < VB$ の順にエネルギー吸収が大となるが、この理由は、繊維の強度が大きく、また繊維長が大きいものほど、ブリッジング作用が大きく働き、エネルギー吸収が大となるためと考えられる。図-13には、タフネス指数 T.M. と圧縮強度との関係を示す。有効破壊エネルギーと同様の傾向を示し、繊維混入の試験体では $W/B=25\%$ でピークとなる傾向がある。

今後のハイパーコンクリートの実用化のためには、高強度マトリックス中でも繊維破断を起こさない高引張強度の繊維の使用、低 W/B でも繊維混入率を多くでき、十分なコンシステンシーを有す混和剤、特殊繊維の適用などが課題として挙げられる。

5. まとめ

- 1) コンクリートの靱性評価方法として、引張軟化曲線の多直線近似解析に基づく破壊パラメータの解析法を示し、有効破壊エネルギー G_F 、タフネス指数 T.M. 等の評価パラメータを提案した。
- 2) 短繊維を高強度マトリックス中に分散混入することにより、高強度マトリックスの脆性的性質の改善が可能であり、ハイパーコンクリート実現の可能性が示された。

謝辞

実験にご協力頂いた宇大卒論生・大須賀秀明氏に感謝致します。また、実験試料等にご協力頂いた、建設省建築研究所・栢田佳寛氏、山宗化学(株)、ユニチカ(株)に感謝致します。

参考文献

- [1] 中村成春, 橋高義典, 上村克郎: 高強度コンクリートの破壊エネルギーに及ぼす骨材-マトリックスの相互作用の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15-1, pp.411-416, 1993.6
- [2] 橋高義典, 上村克郎, 中村成春: コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析, 日本建築学会構造系論文報告集, No.453, pp.15-25, 1993.11
- [3] 橋高義典: 引張軟化曲線の多直線近似解析によるコンクリートの弾塑性破壊パラメータの評価, 日本建築学会構造系論文報告集, (掲載予定), No.469, 1995.3
- [4] 日本コンクリート工学協会, 「コンクリートのひびわれ調査, 補修・補強指針」
- [5] RILEM, Draft Recommendation: Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams, Materials and Structures, Vol.18, No.106, pp.285-290, 1985.