

論文 ハイパーコンクリートにおける高強度モルタルマトリックス部の破壊靱性に関する研究

大岡督尚*1・橘高義典*2

要旨：各種短繊維を混入した高強度・高靱性コンクリート(ハイパーコンクリート)のモルタルマトリックス部の靱性評価を行う目的で、切欠きはりの3点曲げ試験を行い、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た。引張軟化曲線から、有効破壊エネルギーやタフネス指数等のパラメータを算出し、靱性評価を行った。その結果、各種短繊維の靱性改善効果の特徴を把握し、靱性評価指標としてのタフネス指数の有効性を確認した。

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、引張軟化曲線

1. はじめに

近年、超高層 RC 建物に関する開発研究が盛んに行われ、セメントや混和材および高強度用高性能 AE 減水剤などが開発されたことにより、圧縮強度が 100MPa を超える超高強度コンクリートの製造が可能となった。しかしながら、超高強度や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や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]。これを解決するためには、高強度コンクリートの靱性の改善が必要であり、これにより、ひび割れ発生・拡大の防止、かぶりコンクリートの剥落防止等も可能となり、耐久性の観点からも重要となる。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)[2]を得るひとつの方法として、適切な性能をもつ短繊維の混入が考えられる。

本研究では、各種短繊維を混入したハイパーコンクリートのモルタルマトリックス部について、切欠きはりの3点曲げ試験を行った。その試験で得られる荷重-荷重点変位曲線から、筆者らが提案している多直線近似引張軟化曲線[3]を用い、破壊力学的手法に基づいた靱性評価パラメータ[2]を算出し、各繊維の靱性改善効果について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

本研究の最終目的は、各種混和材料を混入したハイパーコンクリートの調合方法の確立であるが、今回は基礎的検討を目的としたので、試験体は、表-1に示すコンクリート調合をベースとしたモルタル部分とした。セメントは、高流動・高強度用の高ビーライト系とし、高性能 AE 減水剤(SP)はポリカルボン酸系のものを使用した。短繊維を混入する場合は、細骨材の一部を置換するものとした。なお、細骨材は千葉県木更津産の山砂である。

使用した短繊維の種類と特性およびモルタルフロー値を表-2に示す。繊維混入量は、コンクリートの調合としたときの容積率 Vf1%~3%の範囲とした。

*1 東急建設(株)技術研究所建築研究部建築材料研究室(正会員)

*2 東京都立大学助教授 工学部建築学科, 工博(正会員)

2. 2 混練方法

練り混ぜには50lパン型強制練りミキサーを使用し、短繊維を除いて空練りを30秒間行い、水(高性能AE減水剤を含む)を加えて4分間混練した。その後、回転させたまま短繊維を少しずつ投入してさらに4分間混練した。繊維の種類によっては、VF3%や2%が混練できなかった。また、コンクリートとした場合、ワーカビリティが充分確保できないようなモルタルもあり、繊維の種類によって調合を変更することも考えたが、今回は基礎データ蓄積の目的で、同一調合での比較実験とした。

2. 3 試験体形状寸法および養生方法

靱性評価用の曲げ試験体の寸法は、100×100×500mmで、圧縮強度および割裂引張強度用供試体はφ100×200mmとし、各調合3本を標準とした。

モルタルの混練から脱型までの2日間は20℃で養生し、脱型後材齢7日までは60℃水中の温水養生、材齢7日以降は20℃水中で養生した。試験は材齢6週で行った。

2. 4 試験方法

破壊靱性評価試験は、RILEM法[5]に準じる切欠きはりの3点曲げ試験によった。試験体には、ダイヤモンドカッター(刃厚2mm)を使用して、中央にはりせいの半分(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-1に示す。加力は最大容量100kNのインストロン型精密万能試験機を用い、クロスヘッド速度によって载荷を制御した。繊維無混入試験体(NON)は0.01mm/sec、炭素繊維・ガラス繊維混入試験体(CD18・CD10・GA25・GA13)は0.02mm/sec、その他の繊維は0.1mm/secの载荷速度で加力した。

荷重は100kNロードセル(測定精度:指示値の±0.5%以内)で測定し、荷重点変位は図-2に示す変位測定治具を試験体に取り付け、10mm変位計(感度:0.001mm)で測定した。

3. 靱性評価パラメータ算出方法

靱性評価のパラメータは、引張軟化曲線から求めることとし、仮想ひび割れモデルによるコンク

表-1 基本調合(繊維無混入, kg/m³)

W/B	W	C	SF	S	(G)	SP
17%	150	706	176	616	(800)	44

SF:シリカフェューム SP:高性能AE減水剤

SF/(C+SF)=20% (C+SF)×5%

表-2 短繊維の種類と特性およびモルタルフロー値

種類	記号	長さ mm	径 μm	引張 強度 MPa	ヤング 率 GPa	フロー値 mm		
						1%	2%	3%
ビ ニ ロ ン	VF30	30	240x 720	900	29	253	242	154
	VF12	12	200			210	181	150
	VK30	30				157	—	—
鋼	VK15	15	43	1,000	22	145	122	—
	SS30	30	600	1,000 以上	206	256	239	212
ガラ ス	GA25	25				137	112	—
	GA13	13	20	2,500	74	143	129	—
炭 素	CD18	18				164	135	—
	CD10	10	17	1,800	176	163	151	—
ポリ プロ ピレン	PC12	12	35x 400	430	10.5	135	116	—
	PK12	12	18			162	123	—
なし	NON	—	—	—	—	203		

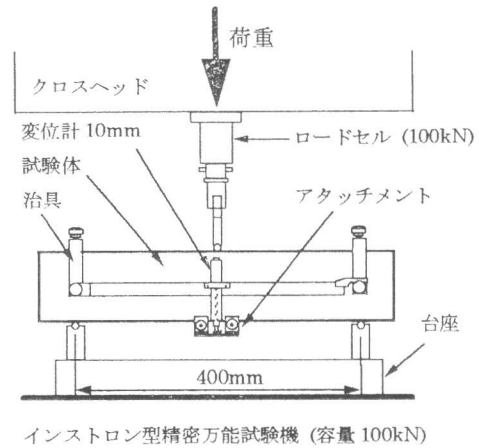


図-1 切欠きはり試験体の曲げ試験方法

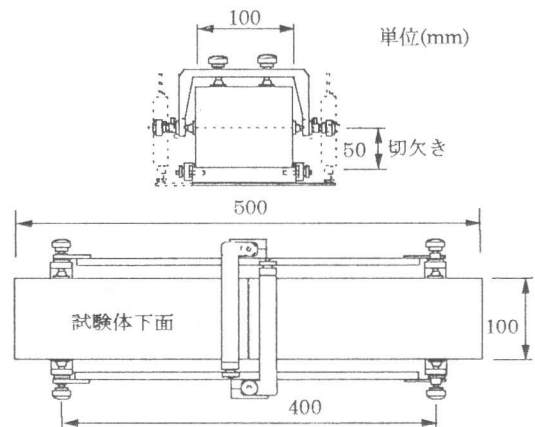


図-2 変位測定用治具

リートのひび割れ進展数値解析手法を用い、実験で得られた荷重-荷重点変位曲線（以下LPD曲線とする）から逆解析して求めた[3,4]。解析手順を図-3に示す。ヤング率 E および初期結合応力 σ_0 はLPD曲線の初期勾配ならびに一時的に一定結合応力を仮定して最適化した。結合応力と開口変位の関係は、引張軟化曲線（以下TSD）に対応し、図-4に示すように多直線で近似した。図-4のTSDで囲まれた面積は、仮想ひび割れ節点が $\delta = \delta_{cr}$ （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} であるが、繊維補強コンクリートでは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において有効ひび割れ幅 δ_v (0.5mmに設定) までで囲まれる面積を有効破壊エネルギー G_F^v と定義した。また、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ため、TSDの形状を考慮したタフネス指数 ($T.M.$) を式(1)で定義した[2]。さらに、本解析手法で求まる初期結合応力の値は、ばらつきやすいので、開口変位 0.01mm までの平均結合応力を有効引張強度 (f_{teff}) と定義した。

$$T.M. = \sum_{i=1}^u g_i \quad ; \quad g_i = \int_0^{\delta_i} \sigma(\delta) d\delta \quad \dots (1) \quad \text{ここに、} i=1,2,3,4,5, u \quad \left(\begin{array}{l} \delta_1 = 0.01, \delta_2 = 0.02, \delta_3 = 0.05 \\ \delta_4 = 0.10, \delta_5 = 0.20, \delta_u = 0.50(mm) \end{array} \right)$$

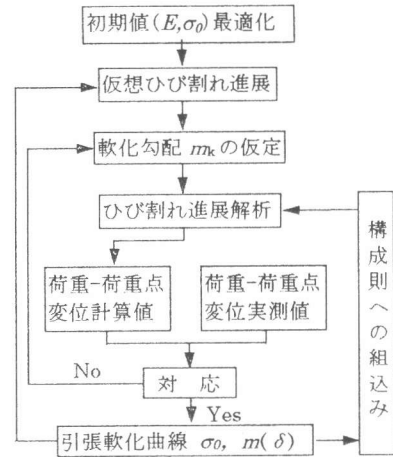


図-3 引張軟化曲線の多直線近似解析法のフロー

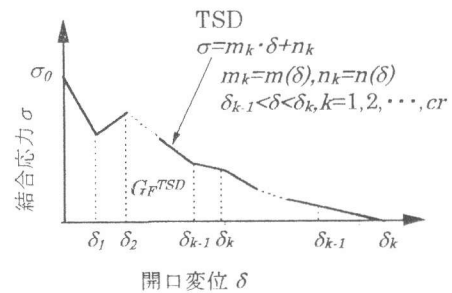


図-4 多直線近似引張軟化曲線

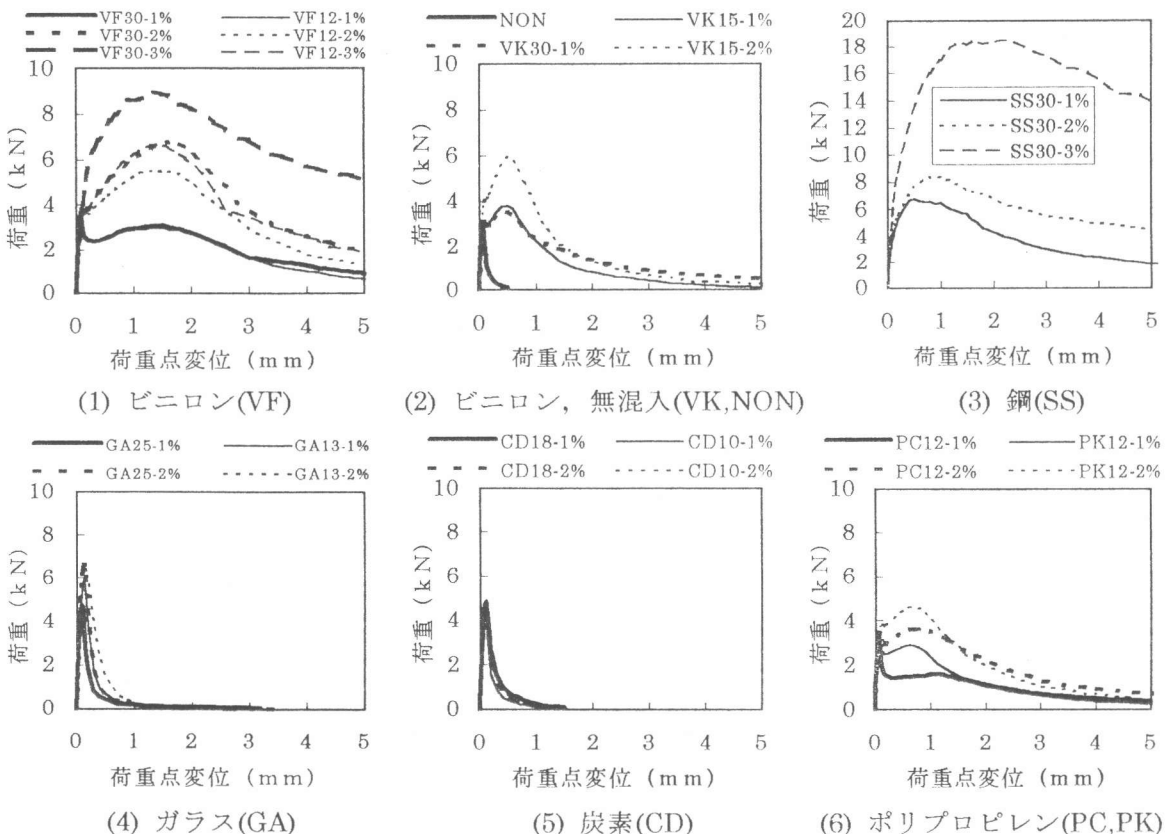


図-5 各試験体の荷重-荷重点変位曲線(LP D 曲線)

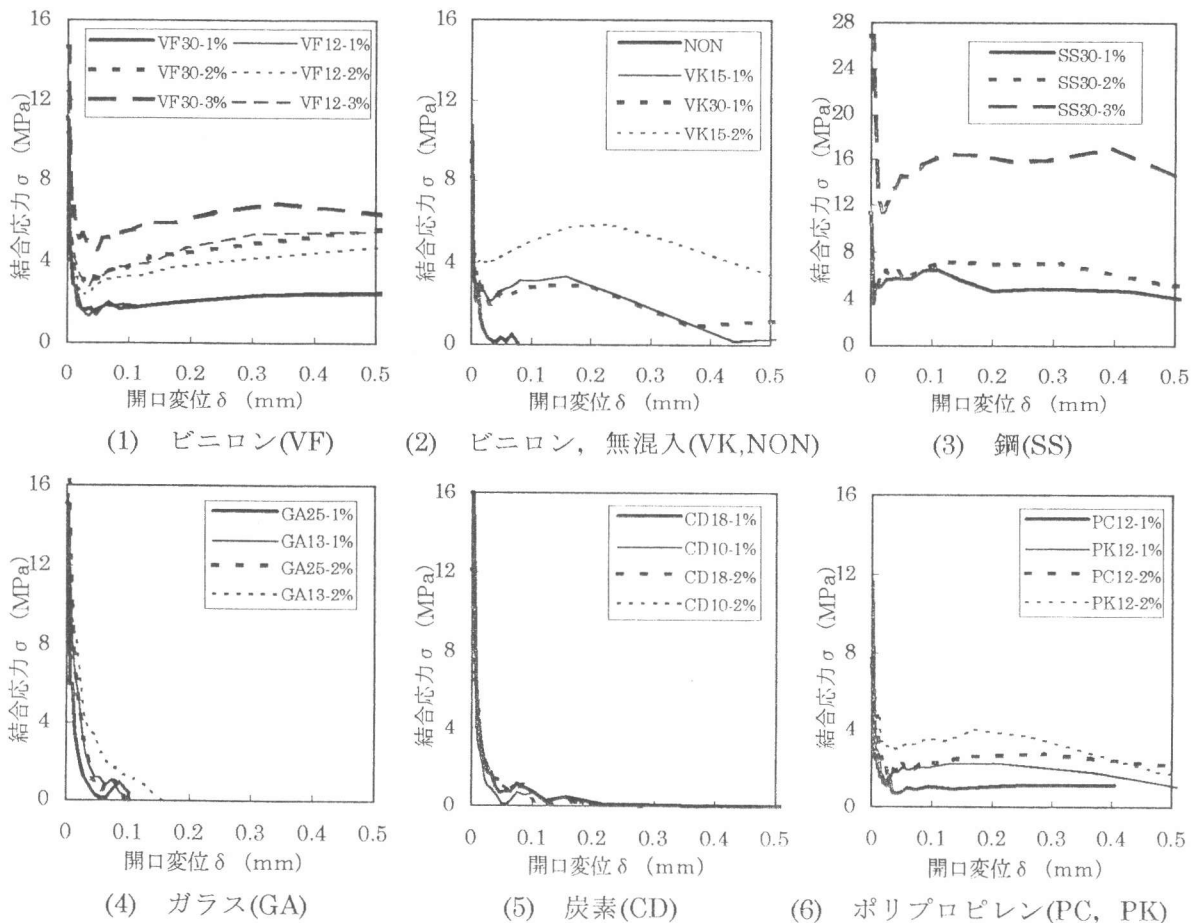


図-6 引張軟化曲線(TSD)の解析結果

4. 結果および考察

4. 1 荷重-荷重点変位曲線 (LPD 曲線)

図-5 (1)~(6)に実験で得られた荷重-荷重点変位曲線 (LPD 曲線) を示す。最大荷重は、炭素繊維試験体(CD)を除いて、繊維混入量 Vfが増加するに従い大きくなる傾向があった。特に、ビニロン(VF, VK), 鋼(SS), ポリプロピレン(PC, PK)の繊維を混入した試験体において、その傾向が顕著であった。

4. 2 引張軟化曲線 (TSD)

図-6 (1)~(6)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。VF, VK, SS, PC, PK の試験体では、同じ開口変位でも繊維混入量が増加すると結合応力が大きくなる傾向がある。また、これらの試験体では、一時的に引張硬化する傾向がみられた。

4. 3 靱性評価パラメータ

表-3に、解析によって算出した靱性評価パラメ

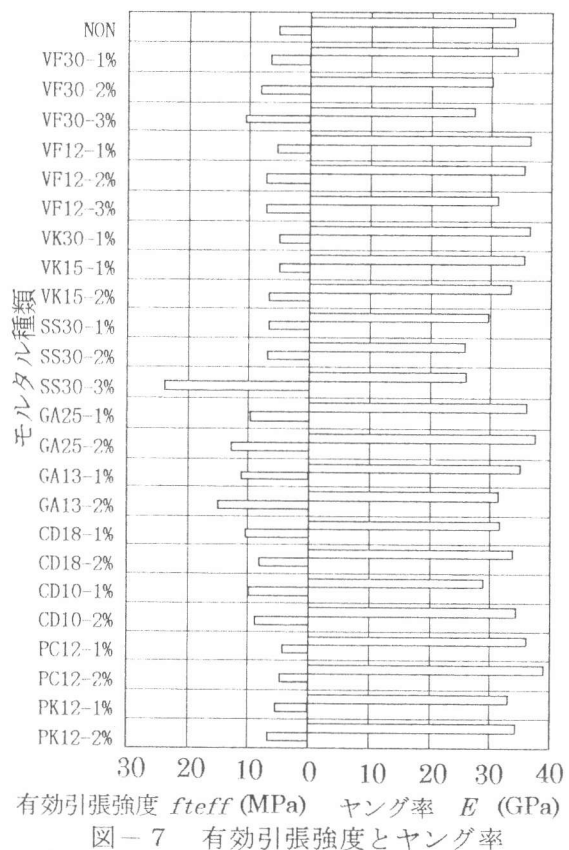


図-7 有効引張強度とヤング率

表-3 実験結果および解析結果

試験体		破壊靱性評価パラメータ							曲げ強度 (MPa)	強度試験結果		
記号	Vf (%)	E (GPa)	G_{F^u} (N/m)	σ_0 (MPa)	$T.M.$ (N/m)	f_{teff} (MPa)	K_{Ic}^S (MPa \sqrt{m})	$CTOD_c$ (mm)		引張 (MPa)	圧縮 (MPa)	ヤング率 (GPa)
NON	0	34.0	87	10.2	462	5.2	1.36	0.0076	7.06	4.31	85	39.5
VF30-1%	1	34.3	1218	11.9	2207	6.5	2.21	0.0114	9.18	7.13	105	42.2
VF30-2%	2	30.1	2123	12.5	3667	8.1	5.16	0.0191	14.14	10.16	104	36.2
VF30-3%	3	27.3	3359	14.1	5999	10.5	6.52	0.0344	20.24	11.66	120	38.8
VF12-1%	1	36.7	1089	9.3	1954	5.4	1.42	0.0074	7.97	5.97	111	46.3
VF12-2%	2	35.5	2052	12.6	3524	7.2	5.01	0.0158	13.23	5.38	121	45.9
VF12-3%	3	31.2	2506	11.3	4175	7.1	6.05	0.0227	16.60	9.09	127	39.4
VK30-1%	1	36.4	1014	9.4	2068	4.9	2.90	0.0094	7.79	5.54	112	43.4
VK15-1%	1	35.5	938	10.5	2151	5.0	3.22	0.0107	9.28	7.51	103	35.4
VK15-2%	2	33.5	1716	11.8	3622	6.6	4.38	0.0179	14.81	8.77	92	35.9
SS30-1%	1	29.6	2510	11.0	4560	6.6	3.86	0.0181	15.88	10.04	118	40.6
SS30-2%	2	25.7	2848	10.9	4980	7.0	5.33	0.0306	17.50	12.87	109	39.6
SS30-3%	3	25.9	7614	26.0	13457	23.9	12.33	0.0689	42.49	14.01	105	41.9
GA25-1%	1	36.0	259	13.1	1227	9.6	2.22	0.0117	11.81	5.49	100	43.3
GA25-2%	2	37.6	435	15.4	1746	12.7	2.72	0.0140	14.03	7.20	98	42.7
GA13-1%	1	35.1	330	13.9	1462	11.2	2.50	0.0136	12.91	4.59	98	40.0
GA13-2%	2	31.5	519	18.8	2250	15.0	2.84	0.0174	15.02	6.00	99	39.2
CD18-1%	1	31.7	232	15.4	1096	10.4	2.06	0.0125	11.33	5.14	98	44.0
CD18-2%	2	34.0	225	11.7	1027	8.1	1.82	0.0103	9.89	4.46	106	37.4
CD10-1%	1	28.9	175	15.3	897	9.9	1.80	0.0134	10.54	5.56	98	36.1
CD10-2%	2	34.4	303	11.5	1252	8.8	2.03	0.0115	10.63	5.62	90	36.0
PC12-1%	1	36.0	493	7.7	1090	4.3	1.32	0.0070	6.69	5.37	99	44.5
PC12-2%	2	39.0	1255	8.6	2256	4.7	2.73	0.0087	7.39	8.05	86	35.6
PK12-1%	1	33.0	948	9.8	1843	5.4	1.35	0.0079	7.75	5.88	94	35.2
PK12-2%	2	34.5	1727	11.2	3230	6.7	4.53	0.0141	12.23	7.91	89	29.3

ータおよび圧縮強度試験・割裂引張強度試験の結果を示す。

図-7は有効引張強度 f_{teff} と解析時に最適化したヤング率 E である。無混入試験体(NON)と比較すると、 f_{teff} はVF30-2%、VF30-3%、SS30-3%、およびガラス繊維(GA)と炭素繊維(CD)のすべての試験体が、NONの1.5倍を越えており、その他はNONと同等の値であった。ヤング率はNONと比較して大きな差は見られず、ビニロン繊維および鋼繊維においては、繊維混入量が増加すると逆にヤング率が低下する傾向がみられた。

図-8に繊維混入量 Vf と有効破壊エネルギー G_{F^u} の関係を、図-9に有効引張強度 f_{teff} との関係、図-10に応力拡大係数 K_{Ic}^S との関係、図-11にタフネス指数 $T.M.$ との関係を示す。

今回実験した範囲では、繊維長による明確な差はみられなかったが、繊維混入量 Vf が増加すると、 G_{F^u} は大きくなる傾向がある。特に鋼繊維、ビニロン繊維、ポリプロピレン繊維の上昇率が大きく、靱性向上の効果がうかがえる。ガラス繊維や炭素繊維は、破壊エネルギーはそれほど大きくならないが、 f_{teff} は大きくなっている。 K_{Ic}^S は、 G_{F^u} と f_{teff} の特性を合わせもった傾向を示しているが、 G_{F^u} が特に大きかった鋼繊維混入試験体(SS)の値が下がる傾向がある。ひび割れ進展初期の特性に重み付けを行った $T.M.$ の場合は、 G_{F^u} が大きいものほど、かつ f_{teff} が大きいものほど大きくなる傾向がある。たとえば、ガラス繊維や炭素繊維のように、 G_{F^u} が小さくても f_{teff} が大きければ、評価は高くなる。このことから $T.M.$ は、強度と靱性を考慮した材料のタフネスの評価にふさわしいパラメータであると考えられる。

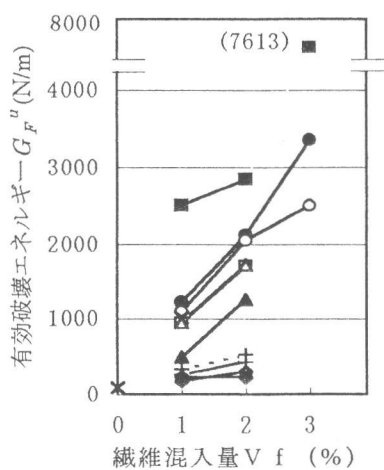
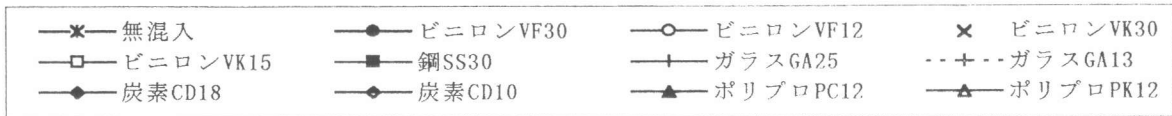


図-8 Vfと G_F^u の関係

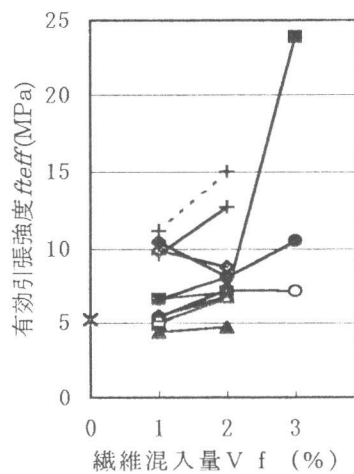


図-9 Vfと f_{eff} の関係

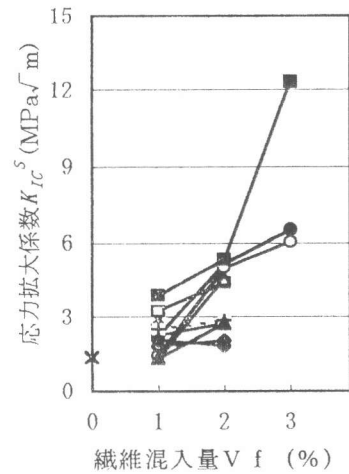


図-10 Vfと K_{Ic}^S の関係

5. まとめ

各種短繊維を混入した高強度・高靱性コンクリート（ハイパーコンクリート）の開発のため、基礎実験としてモルタルマトリックス部の靱性評価を行った。

モルタルマトリックス部分を混練した結果、繊維の種類によっては、コンクリートを混練する際、十分なワーカビリティを得ることができないモルタルフロー値もあった。

靱性評価を行った結果、鋼繊維・ビニロン繊維・ポリプロピレン繊維が靱性改善効果が高く、ガラス繊維・炭素繊維は強度向上に効果があることが分かった。また、タフネス指数は高靱性材料の靱性評価指標として有効であることを示した。

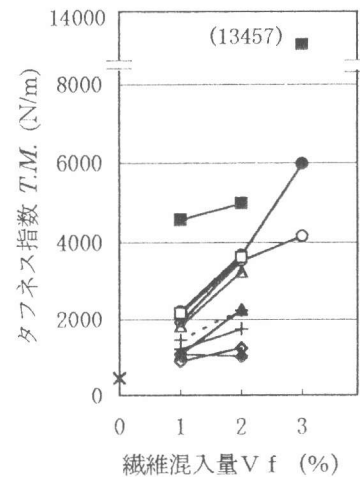


図-11 Vfと $T.M.$ の関係

謝辞

資料提供にご協力を頂いた、(株)ポゾリス物産、秩父小野田(株)、(株)クラレ、旭硝子(株)、三菱化学(株)、(株)神戸製鋼に感謝いたします。

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: ハイパーコンクリートの靱性評価方法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17・1, pp.451-456, 1995.6
- [3] 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
- [4] 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, No.467, pp.17-24, 1995.3
- [5] RILEM, Draft Recommendation: Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-point Bend Test on Notched Beams, Materials and Structures, Vol.18, No.106, pp.285-290, 1985.