

論文 ハイパーコンクリートの破壊靱性に関する研究

大岡督尚*¹・橘高義典*²

要旨：高強度コンクリートの靱性改善を目的として、短繊維を混入した試験体を作製し、切欠きはり3点曲げ試験を行った。試験で得られた荷重-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、その曲線から算出した各種破壊パラメータにより、靱性改善効果を比較検討した。その結果、短繊維の材質別の靱性改善効果、および粗骨材最大寸法が高強度コンクリートの靱性に及ぼす影響などが明らかとなった。

キーワード：ハイパーコンクリート、短繊維、破壊力学、77値指数、破壊エネルギー、引張軟化曲線

1. はじめに

高強度コンクリートの場合、水セメント比の低減などがモルタルマトリックス強度を大きくするが、その強度が粗骨材強度を上回ると、コンクリート破断時に粗骨材も破断し、極めて脆的な破壊形態を示す。また、エネルギー吸収能も圧縮強度の増加の割には、必ずしも大きくならない[1]。このことは、鉄筋コンクリート部材の設計や、構造体の耐久性上不利な要因であり、コンクリートにとって重要な課題のひとつである。

本研究の目的は、高強度コンクリートの靱性を改善することにある。高靱性化を図る方法として、短繊維の混入やポリマーの混入などが挙げられるが、今回は適切な性能をもつ短繊維を混入した高強度・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]について検討した。これまでに、モルタルマトリックス部分を用いた実験により、各種短繊維の靱性改善効果を把握しているため[3]、今回は粗骨材を含むコンクリートについて検討した。試験は、切欠きはり3点曲げ試験とし、荷重-荷重点変位測定結果から、筆者らが提案している多直線近似引張軟化曲線[4]を求め、破壊力学的手法に基づいた破壊パラメータ[5]を算出して、靱性改善効果を検討した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料および調合

表-1にコンクリートの基本調合を、表-2に使用短繊維の種類と特性を示す。粗骨材最大寸法は、20mmと15mmの2種とした。また、表-1の調合から粗骨材を除いたモルタル試験体も作製した。短繊維は、前報[3]より高強度モルタルの靱性改善効果に有効と考察されたものを選定し、細骨材の一部を置換して混入した。ビニロン繊維は容積混入率(Vf)で2%、鋼繊維はVf2%とVf3%とし、アラミド繊維はVf2%が混練不可能であったため、約1%の混入率とした。

表-1 基本調合（繊維無混入, kg/m³）

W/B	W	C	SF	S	G	SP
20%	160	680	120	675	789	B×3~5%

C:高ビーライト系セメント（比重 3.20）
 SF:粉体シリカフューム SF/(C+SF)=15%（比重 2.20）
 S:八王子市美山産砕砂・富津市鶴岡産山砂混合（比重 2.60）
 G:段戸産石英片岩（比重 2.63）
 SP:高性能AE減水剤（ポリカルボン酸系）
 B:粉体量（C+SF）

表-2 使用短繊維の種類と特性

材質	記号	長さ (mm)	径 (μm)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)	比重
ビニロン	VF	30	240×720	900	29	1.30
鋼	SS	30	600	1160	206	7.85
アラミド	AT	30	400*	3000	69	1.39

*収束タイプ

*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）

表-3 試験体の種類および各コンクリートの性質

試験体 記号	条件			フレッシュ時試験結果			硬化後強度試験結果			
	繊維 種類	混入量 Vf (%)	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ [*] (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)	割裂引張 強度 [*] (N/mm ²)	単位容積 質量 (ton/m ³)
PL20 PL15 PL5	無混入	—	20	23.8	3.2	22	93.5	53.0	6.19	2.44
		—	15	18.0	3.4	23	109	37.5	6.25	2.43
		—	モルタル	25.5	2.8	22	122	48.0	5.63	2.32
VF20-2 VF15-2 VF5-2	ビニロン	2	20	7.0	2.0	25	96.7	37.9	6.75	2.43
		2	15	6.5	1.6	26	98.4	37.0	6.35	2.44
		2	モルタル	21.0 ^{*1}	3.9	23	92.6	—	5.73	2.30
SS20-2 SS15-2 SS5-2	鋼	2	20	10.5	2.6	26	112	50.6	7.67	2.57
		2	15	13.8	1.8	27	123	40.4	11.2	2.56
		2	モルタル	23.5 ^{*1}	4.2	22	100	35.3	11.1	2.48
SS20-3 SS15-3 SS5-3	鋼	3	20	9.2	1.5	26	70.9	43.8	14.2	2.63
		3	15	3.3	2.3	25	137	46.0	12.9	2.65
		3	モルタル	22.5 ^{*1}	3.3	22	117	47.1	13.0	2.60
AT20-1 AT15-1 AT5-1	アラミド	0.8	20	6.5	1.1	24	115	41.2	7.44	2.46
		0.9	15	4.0	0.8	23	111	40.6	8.25	2.45
		1.4	モルタル	8.5	1.8	24	112	41.6	10.3	2.37

*1 モルタルマトリックスと繊維が分離

*2 最終破断まで至らなかった

2.2 混練方法

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、加水して2分間混練後、短繊維を少しずつ投入しながら4分間混練した。

2.3 試験体形状寸法および養生方法

靱性評価用曲げ試験体寸法は 100×100×450mm、圧縮および割裂引張強度試験用供試体はφ 100×200mmとし、各調合3本ずつ作製した。

試験体は打設後、材齢2日目に脱型し、20℃水中で試験時（材齢28日）まで養生した。

2.4 試験体の種類およびコンクリートの性質

表-3に試験体の種類と各コンクリートの性質を示す。

2.5 試験方法

破壊靱性評価試験は、RILEMの切欠きはり3点曲げ試験法[6]に準じた。ダイヤモンドカッター(刃厚2mm)を使用して、試験体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、クロスヘッド速度の制御により載荷した。繊維混入試験体(VF・AT・SS)は

0.2mm/secの載荷速度としたが、繊維無混入試験体(PL)は最大荷重後の急激な荷重低下を防ぐため、0.01mm/secの載荷速度とした。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。

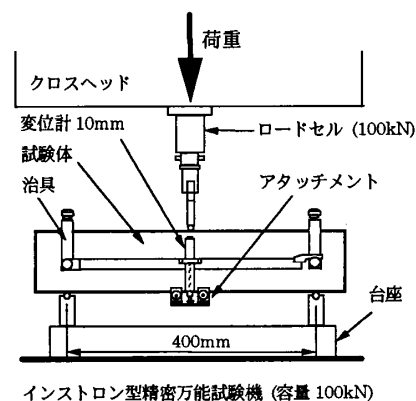


図-1 切欠きはり3点曲げ試験方法

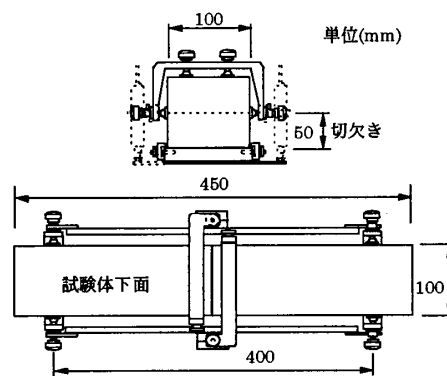


図-2 変位測定用治具

3. 破壊パラメータ算出方法

破壊パラメータの算出方法は既往の研究[3]と同一である。図-3に示す結合力モデルを用いて、材料のモードⅠ（引張変形型）での破壊進展をモデル化した。開口変位と結合応力の関係が引張軟化曲線（以下 TSD）であり、実験で得られた荷重-荷重点変位曲線（以下 LPD）から逆解析して、多直線で近似した[4,5]。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_u （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^u 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。開口変位が小さいときのTSD形状は材料特性として重要であるため、その部分を過大に評価したタフネス指数（ $T.M.$ ）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。

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

ここに、 $i = 1, 2, 3, 4, 5, u$ $\left(\begin{array}{l} \delta_1 = 0.01, \delta_2 = 0.02, \delta_3 = 0.05 \\ \delta_4 = 0.10, \delta_5 = 0.20, \delta_u = 0.50(mm) \end{array} \right)$

4. 結果および考察

4. 1 引張強度とヤング率

図-5に解析時に最適化した初期結合応力 σ_0 と引張軟化曲線から求めた有効引張強度 f_{teff} 、および割裂引張強度試験結果を示す。割裂引張強度と比較して、 σ_0 は大きめとなるが、 f_{teff} はほぼ等しい値を示しているものが多い。

図-6に解析時に最適化したヤング率と圧縮強度試験で測定したヤング率を示す。ヤング率はほぼ等しい値を示している。

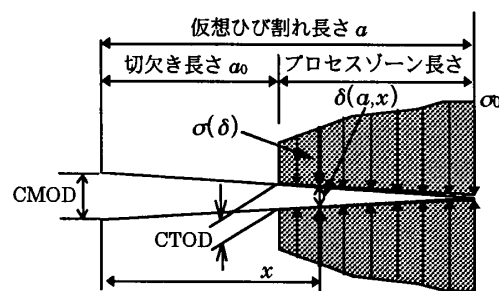


図-3 結合力モデル

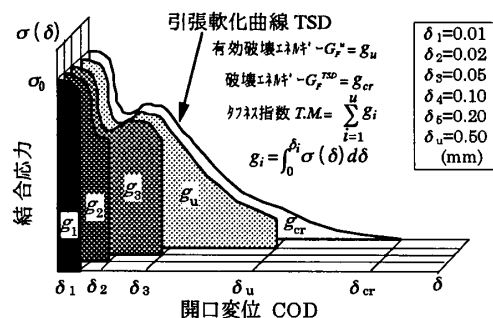


図-4 引張軟化曲線に基づく靱性評価パラメータ

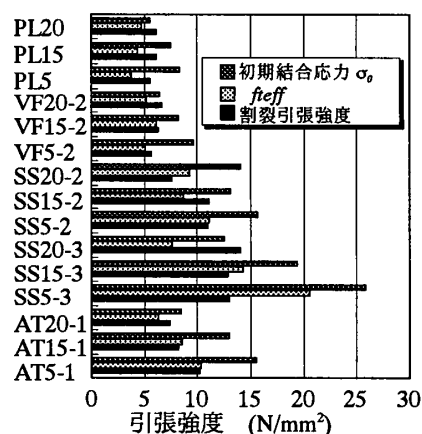


図-5 引張強度

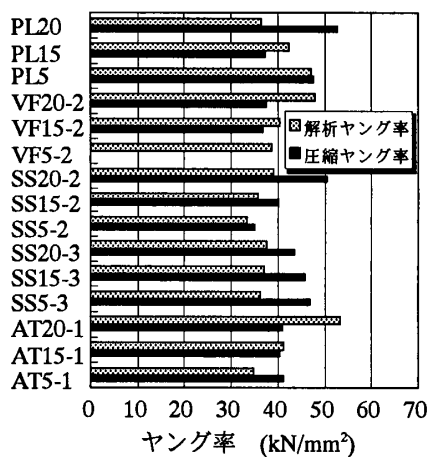


図-6 ヤング率

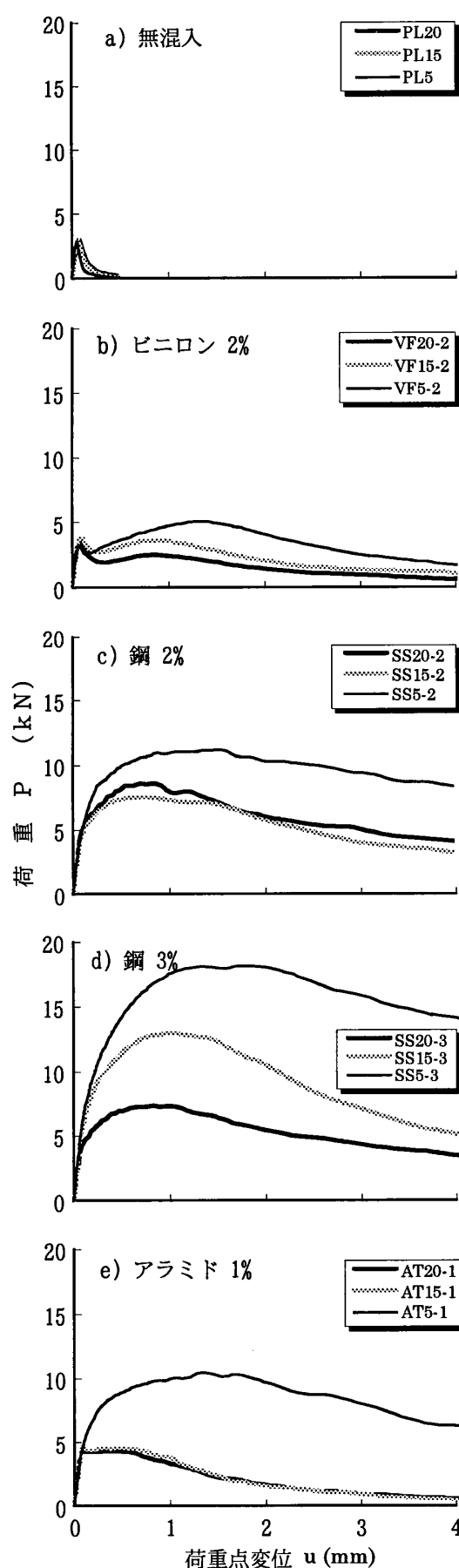


図-7 荷重-荷重点変位曲線 (計測値平均)

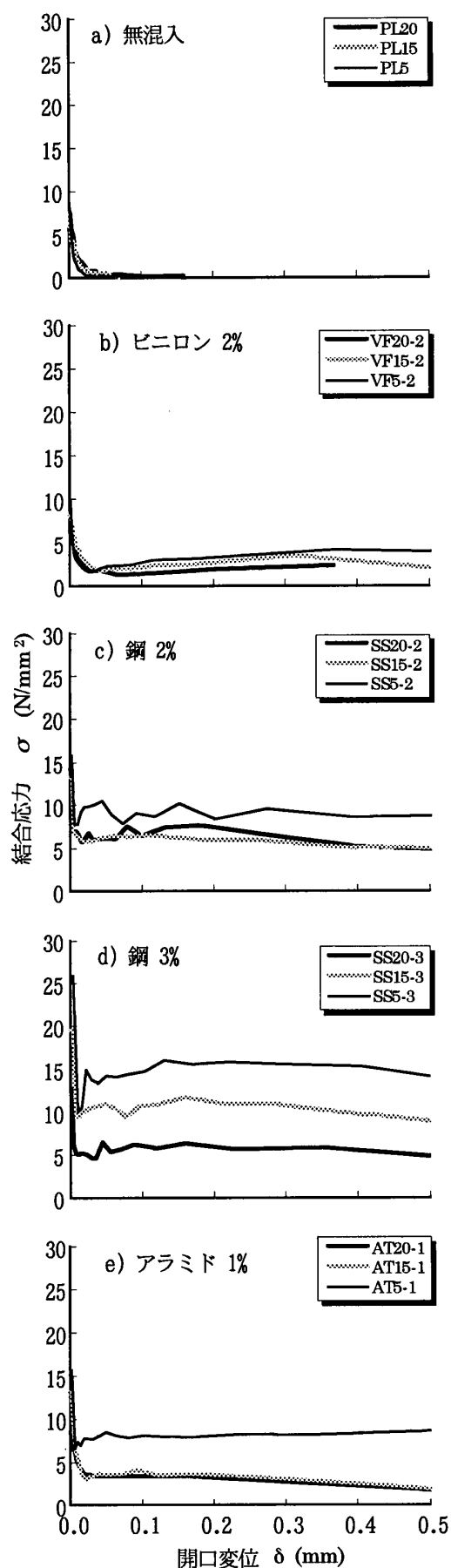


図-8 引張軟化曲線 (解析値)

表-4 破壊パラメータ一覧

試験体 記号	ヤング 率	破壊 エネルギー WOF ^{*1}	破壊 エネルギー TSD ^{*1}	有効 破壊 エネルギー G _F ^u	初期 結合 応力 σ_0	限界 開口 変位 ^{*1} δ_c	タフ ネス 指数 T.M.	有効 引張 強度 f _{teff}	限界 荷重点 変位 u ₀	等価応 力拡大 係数 ^{*2} K _{IC} ^s	等価限界 ひび割れ 長さ ^{*2} a _c	限界 CTOD ^{*2} CTOD _c	等価 曲げ 強度 f _b
	E (kN/mm ²)	G _F ^{WOF} (kN/m)	G _F ^{TSD} (kN/m)	G _F ^u (kN/m)	σ_0 (N/mm ²)	δ_c (mm)	T.M. (kN/m)	f _{teff} (N/mm ²)	u ₀ (mm)	K _{IC} ^s (N/mm ^{3/2})	a _c (mm)	CTOD _c (mm)	f _b (N/mm ²)
PL20	36.6	0.11	0.11	0.11	5.59	0.160	0.53	4.76	0.464	1.28	56.8	0.007	7.07
PL15	42.5	0.10	0.09	0.09	7.52	0.071	0.46	4.48	0.479	1.32	57.3	0.006	7.12
PL5	47.3	0.07	0.06	0.06	8.42	0.111	0.32	3.80	0.468	1.24	57.3	0.005	6.65
VF20-2	48.2	1.50	0.73	0.73	6.44	0.368	1.56	5.24	—	1.65	58.9	0.006	8.47
VF15-2	40.5	2.05	1.52	1.38	8.33	0.579	2.46	6.19	—	1.75	58.2	0.008	9.26
VF5-2	38.9	3.14	2.64	1.73	9.76	0.740	2.80	5.18	—	4.17	71.8	0.013	11.6
SS20-2	39.2	5.58	6.02	3.17	14.1	1.260	5.83	9.30	—	6.51	70.3	0.021	19.5
SS15-2	35.9	4.88	5.48	2.90	13.2	1.275	5.39	8.81	—	5.75	70.5	0.020	17.5
SS5-2	33.5	9.03	13.7	4.52	15.7	1.954	8.13	11.2	—	10.2	73.7	0.033	24.0
SS20-3	37.9	4.97	5.15	2.83	12.6	1.171	5.09	7.71	—	5.37	69.6	0.019	17.5
SS15-3	37.2	8.12	10.5	5.24	19.5	1.838	9.44	14.4	—	8.65	67.8	0.033	30.9
SS5-3	36.3	14.7	23.5	7.59	25.9	2.644	13.3	20.6	—	13.6	70.1	0.048	42.3
AT20-1	53.5	1.91	1.48	1.44	8.53	0.526	2.91	6.32	—	3.41	70.8	0.008	10.4
AT15-1	41.6	1.95	1.78	1.58	13.1	0.731	3.21	8.66	—	2.03	56.7	0.009	11.3
AT5-1	35.0	7.80	10.3	4.09	15.6	1.713	7.21	10.5	—	9.45	73.7	0.029	22.0

*1) PL以外は破断せず, u₀=4.8mmまでのデータで算定

*2) 2パラメータ法での等価パラメータ解析結果[7]

4. 2 荷重-荷重点変位曲線(LPD)

図-7に切欠きはり3点曲げ試験で得られた荷重-荷重点変位曲線(LPD)を示す。短繊維を混入することにより、破壊エネルギーは大きくなり、靱性改善効果が表れている。

4. 3 引張軟化曲線(TSD)

図-8にLPDから逆解析によって求めた引張軟化曲線(TSD)を示す。TSDにおいても短繊維の混入による靱性改善効果が表れており、特にビニロン(VF)・鋼繊維(SS)においては一時的に右上がりになる傾向、すなわち部分的に引張硬化の傾向もみられる。

4. 4 破壊パラメータ

表-4に破壊パラメータ一覧を示す。

図-9にPL(プレーン)試験体のG_F^u, T.M., f_{teff}を示す。各破壊パラメータは、粗骨材最大寸法が大きいほど大きな値を示している。今回の曲げ試験では、粗骨材はすべて破断していたが、粗骨材の存在によって、モルタル試験体よりも、ひび割れの偏向・屈曲等が起こり易く、破壊時のエネルギー吸収が大きくなったと考えられる。

図-10に各試験体の有効引張強度f_{teff}を示す。短繊維を混入することによりf_{teff}は大きくなり、特に鋼繊維(SS)・アラミド繊維(AT)混入試験体のf_{teff}が大きい。

図-11に破壊エネルギーG_F^uを、図-12に応力拡大係数K_{IC}^sを、図-13にタフネス指数T.M.を示す。各破壊パラメータは、短繊維を混入することにより著しい増加を示し、高強度コンクリートの靱性改善に短繊維の混入が有効であ

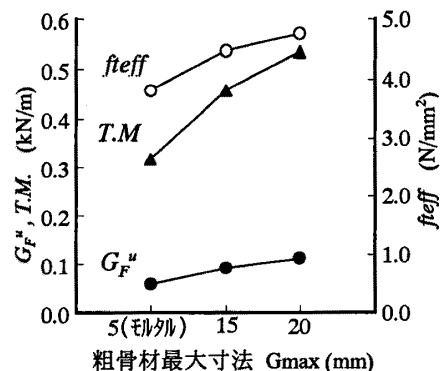
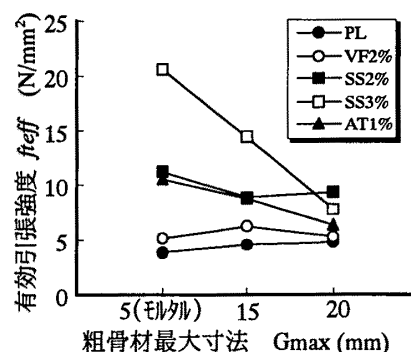
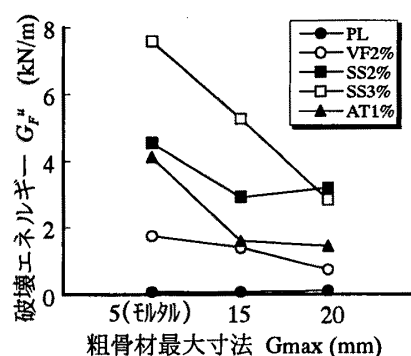


図-9 PL試験体の破壊パラメータ

図-10 有効引張強度 f_{teff}図-11 破壊エネルギー G_F^u

ることを示している。特に鋼繊維の混入は有効で、さらに VF2%より VF3%の方が靱性改善効果が高い。アラミド繊維の場合は、VF1%程度しか混入できなかったが、靱性改善効果はビニロンの VF2%の試験体より大きかった。また、粗骨材を除いたモルタルマトリックス試験体($G_{max}=5mm$)は、繊維の絶対量が多いため、コンクリート試験体と比較して、靱性改善効果はより高くなっている。

また、粗骨材最大寸法の影響は繊維の種類や混入量によって異なるが、最大寸法が大きいほど靱性改善効果は小さくなる傾向がある。これは、最大寸法が大きいほど繊維の集中する部分が偏り、逆に最大寸法が小さいほどコンクリートの単位体積に占める繊維の分散度が大きく、ひび割れ分散も大きくなり、エネルギー吸収が大きくなるためと考えられる。なお、これらの結果は、粗骨材・繊維の種類などによって異なると考えられ、今後の更なる検討が必要である。

5. まとめ

高強度コンクリートの高靱性化を目的として、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）の試験体を作製し、切欠きはり3点曲げ試験による靱性評価を行った。その結果、本研究の範囲では、短繊維を混入することにより、高強度コンクリートの靱性は大きく改善できることが分かった。また、繊維を混入した高強度コンクリートにおいては、粗骨材の最大寸法が大きくなるほど靱性は低下する傾向が見られた。

謝辞

本研究を行うに当たり、実験にご協力頂いた都立大大学院生の中村則清氏、および卒論生の竹中淳一氏（現・長谷エコーポレーション）・佐渡一太氏（現・東京電力）、神奈川大学卒論生の斉藤伸樹氏（現・タカムラ建材工業）に深く感謝いたします。さらに、試料を提供してくださった(株)ポソリス物産・(株)クラレ・総武生コン(株)の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 橘高義典, 中村成春: 高強度コンクリートの破壊パラメータに及ぼす粗骨材の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.490, pp.7-16, 1996.12
- [2] 橘高義典, 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] 大岡督尚, 橘高義典: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18-1, pp.1143-1148, 1996.6
- [4] 橘高義典, 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集, No.453, pp.15-25, 1993.11
- [5] 橘高義典: 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集, No.467, pp.17-24, 1995.3
- [6] 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.
- [7] Jenq, Y.S., and Shah, S.P.: Two Parameter Fracture Model for Concrete, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.111, No.10, pp.1227-1241, 1985

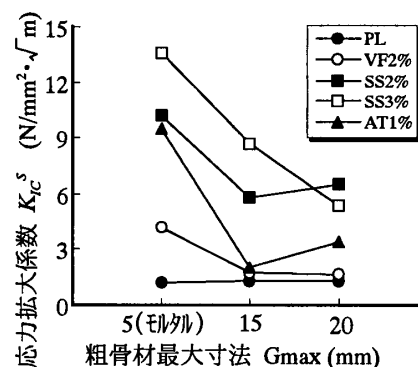


図-12 応力拡大係数 K_{IC}^s

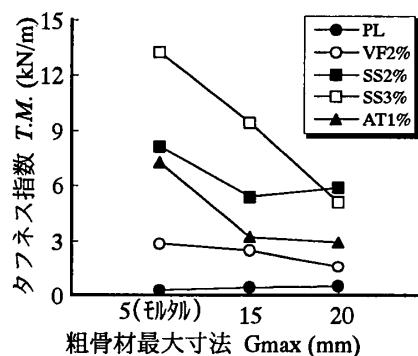


図-13 タフネス指数 $T.M.$