

論文 繊維補強コンクリートの破壊パラメータに及ぼす材齢の影響

大岡督尚^{*1}・橋高義典^{*2}

要旨: コンクリート材齢の経過ごとに切欠きはり3点曲げ試験を行い、破壊パラメータに及ぼす材齢の影響について検討した。試験体は繊維混入コンクリートおよびプレーンコンクリートとし、圧縮強度は30MPa級・60MPa級・100MPa級の3種類とした。

試験で得られた荷重-荷重点変位曲線、および逆解析により求めた多直線近似引張軟化曲線から、各種破壊パラメータを算出して靱性評価を行った。その結果、プレーンコンクリートでは、強度が大きくなっても破壊エネルギーはほとんど変化しないが、繊維を混入した場合は、強度が大きくなるに従い破壊エネルギーも大きくなることが明らかとなった。

キーワード: 短繊維、破壊力学、引張軟化曲線、破壊エネルギー、コンクリート材齢

1. はじめに

鉄筋コンクリート造において、ひび割れの発生を完全に防止することは困難である。このため一般的に、鉄筋による補強や、誘発目地の設置などの対策が施されている。これらの他に、ひび割れ幅制御対策に有効と考えられるひとつの方法として、短繊維混入による高靱性コンクリートの採用が挙げられる。

しかし、短繊維補強による靱性改善効果は、コンクリート強度が十分発現してからのデータは整っているが^{1,2)}、若材齢時のものはほとんどない。温度応力や自己収縮応力によるひび割

れの場合は、比較的早期に発生するため、若材齢時の靱性能が重要となる。そこで、本研究は短繊維補強コンクリートの若材齢時における靱性能を把握する目的で、材齢の経過ごとに数回の破壊靱性試験を行い、破壊パラメータに及ぼすコンクリートの材齢の影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体種類

表1にコンクリート調合とフレッシュ時特性、および28日間標準養生試験体の強度試験結果を示す。コンクリートは、Fc100MPa級の超高

表1 コンクリート調合・フレッシュ時特性・強度試験結果(標準養生)

強度区分	記号	調合 (kg/m ³)									フレッシュ時特性		強度試験結果(材齢28日標準養生)			
		W/B (%)	W	C	SiF	S	G	VF	SF	SP (%)	スラブ ^o (70-)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	単容質 (ton/m ³)	割裂強度 (MPa)
100 MPa	H-PL	20	160	680	120	695	789	-	-	3.0	(95×90)	1.4	116	38.5	2.43	3.57
	H-VF	20	160	680	120	669	789	13.0	-	2.0	17.5	2.4	93.7	32.2	2.37	5.39
	H-SF	20	160	680	120	669	789	-	78.5	2.0	23.0	5.5	106	36.8	2.41	9.12
60 MPa	HF-PL	34	170	500	-	825	830	-	-	1.6	(72×69)	7.4	58.6	39.6	2.33	3.20
	HF-VF	34	170	500	-	799	830	13.0	-	1.6	(51×46)	6.6	66.3	39.1	2.35	4.43
	HF-SF	34	170	500	-	799	830	-	78.5	1.6	(56×52)	9.4	69.0	40.4	2.39	6.10
30 MPa	N-PL	60	180	300	-	821	968	-	-	0.3	21.5	2.7	36.1	27.6	2.37	2.57
	N-VF	60	180	300	-	795	968	13.0	-	0.3	4.0	2.3	36.0	25.2	2.36	3.54

C: [H] 高ビーライト系セメント(比重3.20), [HF] 高炉セメントB種(比重3.05), [N] 普通セメント(3.15)

SP: [H] 高強度用高性能 AE 減水剤, [HF] 高性能 AE 減水剤, [N] AE 減水剤

S: 山砂(比重2.62)

G: [H] [N] 石英片岩碎石(比重2.63), [HF] 石灰碎石(比重2.70)

SiF: シリカフェウム(比重2.30)

VF: ピニロン繊維

SF: 鋼繊維

*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 東京都立大学大学院助教授 工学研究科建築学専攻 工博(正会員)

強度コンクリート(H)・Fc60MPa 級の粉体系高流動コンクリート(HF)・Fc30MPa 級の通常強度コンクリート(N)の 3 種類である。また、混入した短繊維は、表 2 に示す特性を持つビニロン繊維(VF)と鋼繊維(SF)である。鋼繊維はフック付きのものを使用した。

2.2 試験体形状寸法

靱性評価用曲げ試験体の寸法は 100×100×500mm、強度試験用供試体は ϕ 100×200mm とし、試験体数は各試験ごとに 3 本とした。

2.3 養生方法および試験材齢

靱性評価用試験体は、コンクリート打設翌日に脱型し、試験材齢まで恒温恒湿室(20°C, 60%RH)に静置した。

試験材齢は、Fc100MPa 級(H)と Fc30MPa 級(N)が 2,7,28,91 日、Fc60MPa 級(HF)が 7,14,28,91 日である。

2.4 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³⁾に準じた。試験直前に、ダイヤモンドカッター(刃厚 2mm)を使用して、試験体中央に深さ 50mm の切欠きを入れた。支点間のスパンは 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。試験は最大容量 100kN のインストロン型精密万能試験機を用いて行い、クロスヘッド速度を制御して载荷した。繊維混入試験体(VF・SF)は 0.2mm/min の载荷速度としたが、プレーン試験体(PL)は最大荷重後の急激な荷重低下を防ぐため、0.02mm/min の载荷速度とした。荷重は 100kN ロードセル(測定精度: 指示値の $\pm 0.5\%$ 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. 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^{2,4)}と同一である。図 3 に示す結合力モデルを用い、実験で得られた荷重-荷重点変位曲線(以下 L PD)から逆解析して、引張軟化曲線(以下 TSD)

表 2 使用短繊維の種類と特性

記号	材質	長さ (mm)	径 (μ m)	引張強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	比重
VF	ビニロン	30	240×720	882	29	1.30
SF	鋼	30	600	1078 以上	206	7.85

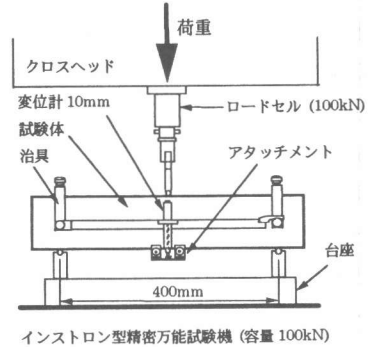


図 1 切欠きはり 3 点曲げ試験方法

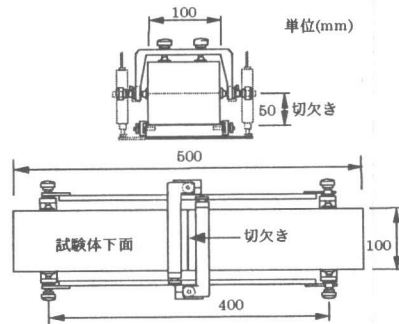


図 2 変位測定用治具

を、多直線で近似した^{5,6)}。

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) となるまでの完全に分離するために必要な破壊エネルギーであるが、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。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、引張強度を比較するには初期結合応力が適当であるが、本解析手法で求め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。

4. 結果および考察

4.1 コンクリートの強度試験結果

図5に圧縮強度試験結果を、図6に割裂引張強度試験結果を示す。また、図7に単位容積質量を、図8に圧縮試験結果から求めた1/3割線ヤング率を示す。材齢の進行に伴い強度やヤング率は増加する傾向にある。靱性評価用試験体は脱型後気中養生としたため、表1に示した標準水中養生の場合と比較して、材齢28日時点ではすべて低い値を示している。

4.2 LPDとTSD

図9～14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(LPД)と、引張軟化曲線(TSD)を示す。LPDは3本の試験結果を平均化したものであり、TSDは平均化したLPDから逆解析で多直線近似したものである。

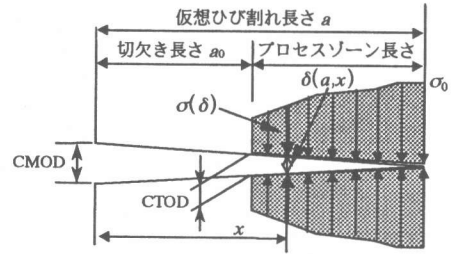


図3 結合力モデル

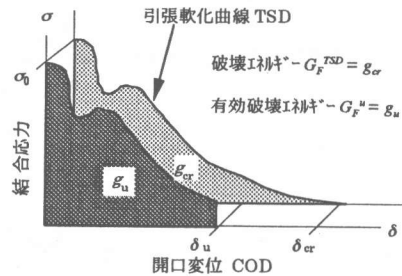


図4 引張軟化曲線に基づく靱性評価パラメータ

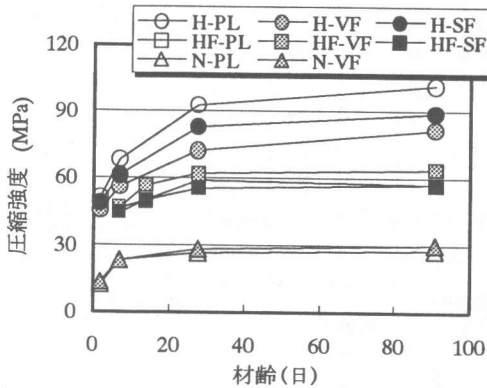


図5 圧縮強度試験結果

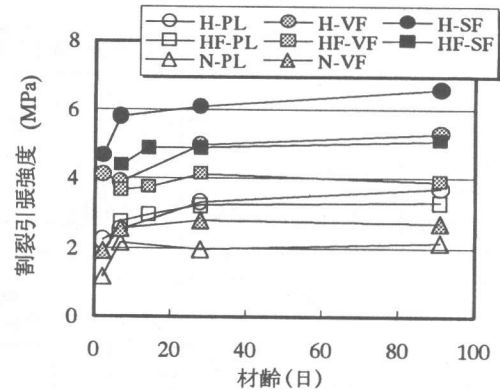


図6 割裂引張強度試験結果

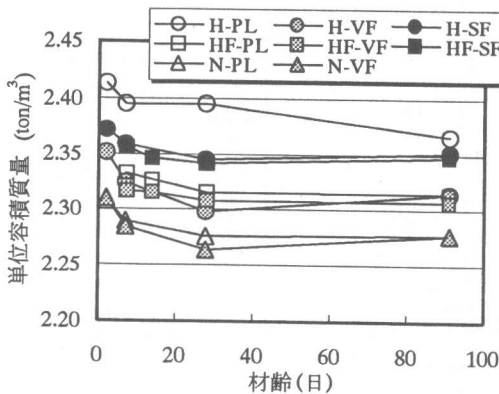


図7 圧縮試験時の単位容積質量

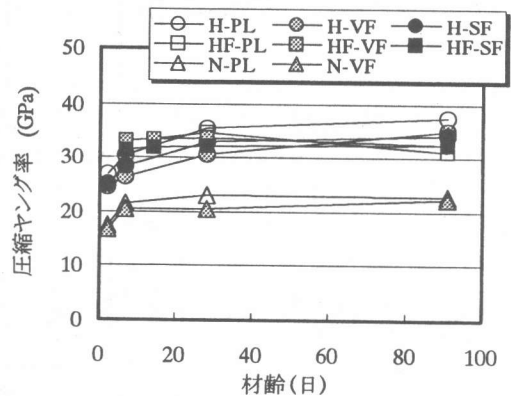


図8 圧縮ヤング率

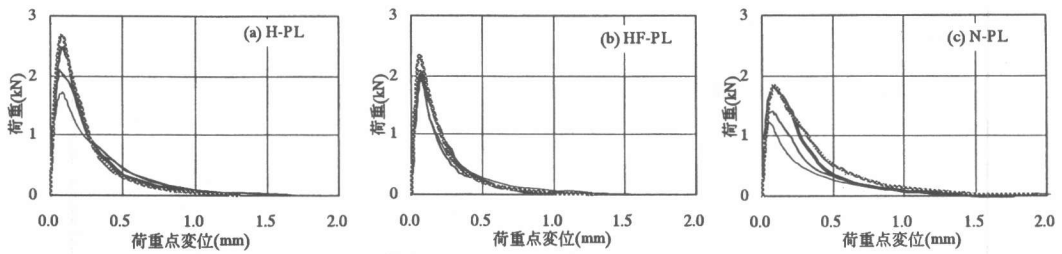


図9 荷重-荷重点変位曲線(LPD) [PL試験体]

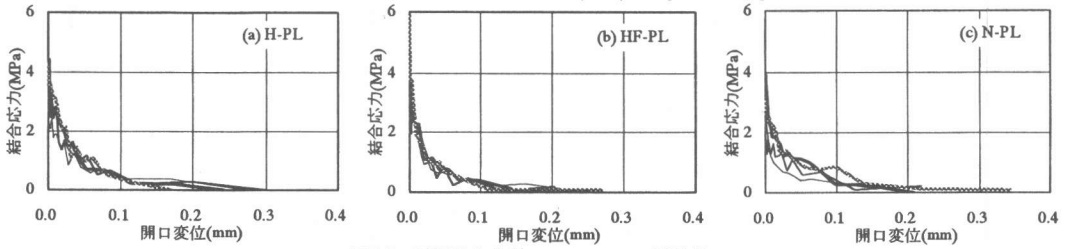


図10 引張軟化曲線(TSD) [PL試験体]

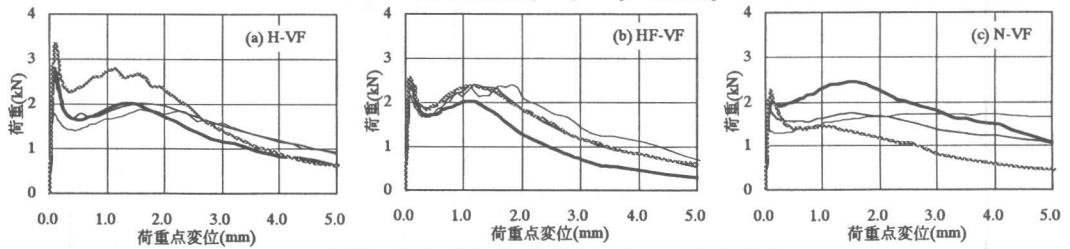


図11 荷重-荷重点変位曲線(LPD) [VF試験体]

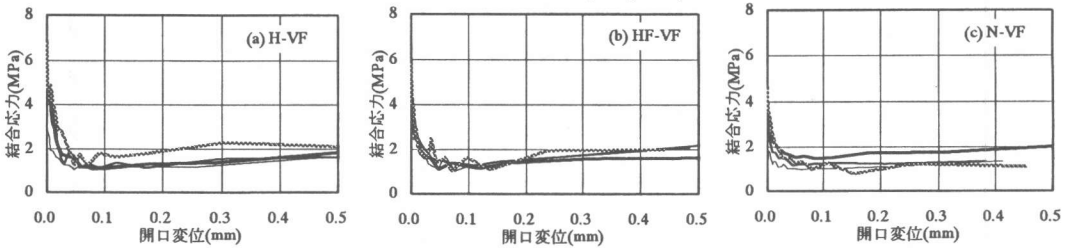


図12 引張軟化曲線(TSD) [VF試験体]

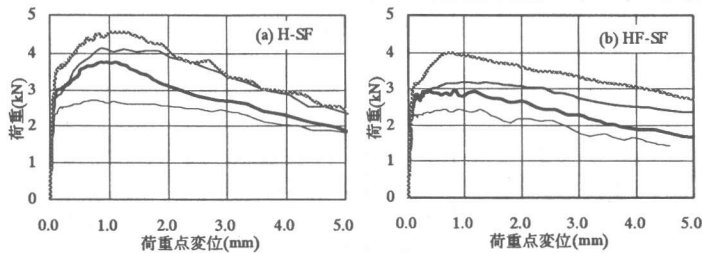


図13 荷重-荷重点変位曲線(LPD) [SF試験体]

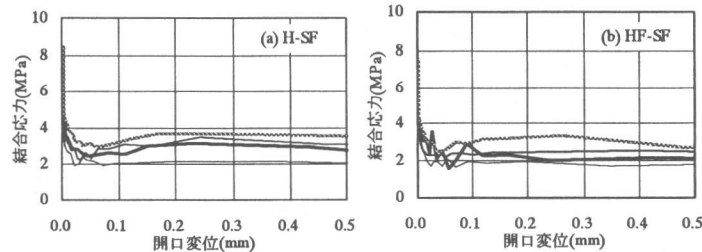


図14 引張軟化曲線(TSD) [SF試験体]

図9～図14の凡例	
超高強度 (a)	—— 材齢2日
	—— 材齢7日
	—— 材齢28日
	—— 材齢91日
高流動 (b)	—— 材齢7日
	—— 材齢14日
	—— 材齢28日
	—— 材齢91日
通常強度 (c)	—— 材齢2日
	—— 材齢7日
	—— 材齢28日
	—— 材齢91日

これらの図から、短繊維を混入することによって靱性は大きく改善されることが明らかであり、ビニロン繊維混入試験体(VF)・鋼繊維混入試験体(SF)ともに、荷重点変位が5mmを越えても完全破断には至らなかった。

4.3 限界荷重点変位 u_0 (プレーン試験体)

プレーン試験体(PL)の限界荷重点変位 (以下 u_0)を図 15 に示す。通常強度である F_c 30MPa 級(N)と比較して、強度の大きい F_c 100MPa 級(H)や F_c 60MPa 級(HF)の u_0 は小さい。また、材齢の経過とともに強度が発現するため、 u_0 は小さくなる傾向がある。

4.4 有効引張強度 f_{eff}

図 16 に有効引張強度を示す。 f_{eff} はコンクリート強度の影響が大きく、強度が大きくなるほど f_{eff} は大きくなり、材齢経過に伴った強度発現の影響も受ける。

4.5 等価曲げ強度 f_b

切欠きは 3 点曲げ試験における最大荷重と、ひび割れが進展するリガメント断面から求めた曲げ強度 (等価曲げ強度 f_b) を図 17 に示す。 f_b においても f_{eff} と同様の傾向がある。

4.6 LPD から求めた破壊エネルギー G_F^{WOF}

図 18 は、 u_0 が得られたプレーン試験体(PL)において、RILEM法に準じた破壊エネルギー (以下 G_F^{WOF}) を算出した結果である。圧縮強度が 30 MPa~100MPa の範囲では、強度の違いによる G_F^{WOF} の差はほとんどなく、材齢経過による顕著な傾向も見られない。

4.7 有効破壊エネルギー G_F^u

繊維混入試験体(VF・SF)における有効破壊エネルギー (以下 G_F^u)を図 19 に示す。繊維を混入した場合は、強度が大きいコンクリートほど G_F^u は大きくなり、また、材齢経過により強度が発現するほど大きくなる傾向がある。

この傾向は、混入した短繊維とモルタルマトリックスとの付着強度に影響されると考えられ、コンクリート強度が大きくなるほど付着強度が大きくなり、破壊エネルギーが大きくなったものと考えられる。

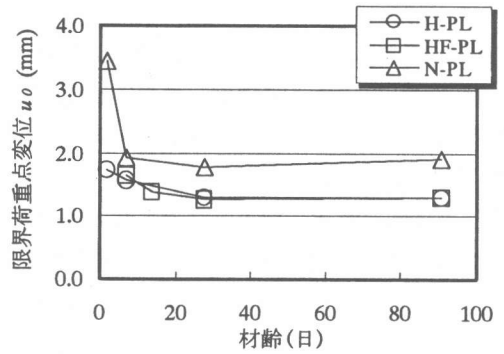


図 15 PL 試験体の限界荷重点変位 u_0

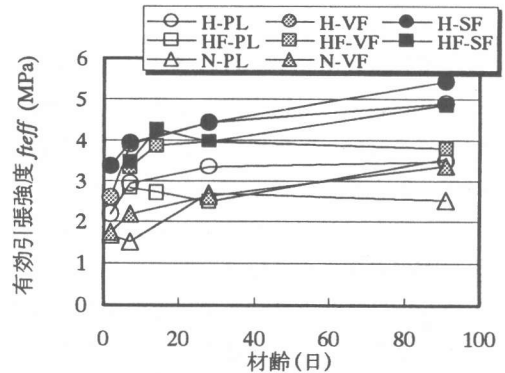


図 16 有効引張強度 f_{eff}

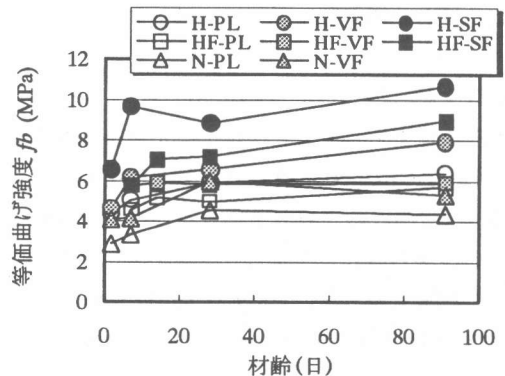


図 17 等価曲げ強度 f_b

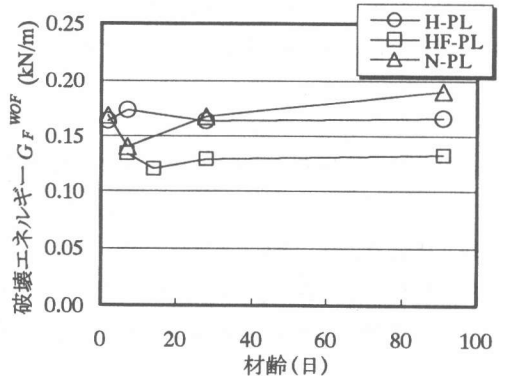


図 18 PL 試験体の破壊エネルギー G_F^{WOF}

4.8 破壊エネルギーと等価曲げ強度との関係

図20にプレーン試験体(PL)における G_F^{WOF} と等価曲げ強度 f_b との関係を示す。また、図21に繊維混入試験体(VF,SF)における G_F^u と等価曲げ強度 f_b との関係を示す。PL試験体の場合は、 G_F^{WOF} と f_b との間に顕著な傾向は見られないが、VF・SF試験体の G_F^u と f_b との間には強い相関が見られる。

5. まとめ

繊維補強コンクリートおよびプレーンコンクリートにおいて、材齢の経過ごとに数回の破壊靱性試験を行い、各種破壊パラメータを比較した結果、以下のことが判明した。

- 1) プレーンコンクリートにおいて、強度が大きいくほど限界荷重点変位は小さくなる。
- 2) プレーンコンクリートでは、強度が大きくなっても破壊エネルギーはほとんど変わらない。
- 3) 繊維補強コンクリートでは、強度が大きくなるほど破壊エネルギーは大きくなる。

参考文献

- 1)日本建築学会：スチールファイバーコンクリート技術の現状，丸善（株），1984年
- 2)大岡督尚，橘高義典：ハイパーコンクリート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.19-2，pp.111-116，1997.6
- 3) 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.
- 4)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
- 5)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

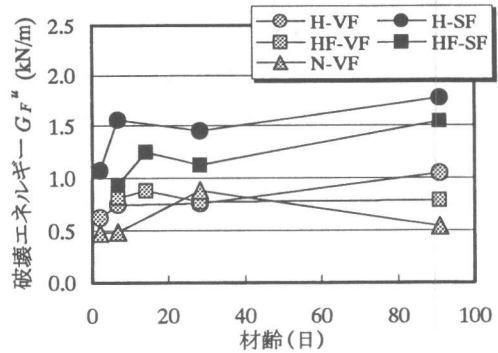


図19 VF・SF試験体の有効破壊エネルギー G_F^u

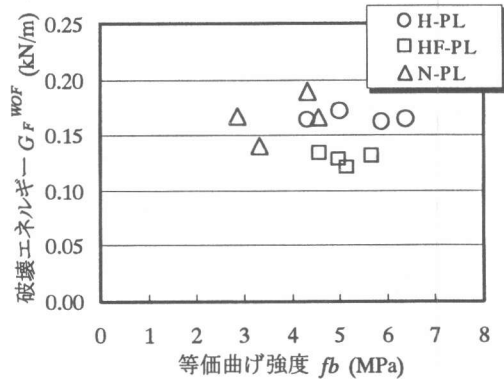


図20 G_F^{WOF} と f_b との関係 (PL 試験体)

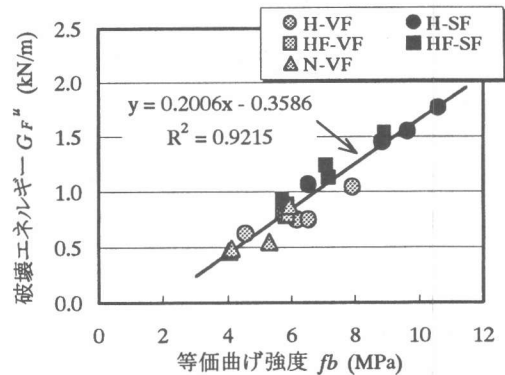


図21 G_F^u と f_b との関係 (VF・SF 試験体)

築学会構造系論文報告集，No.453，pp.15-25，1993.11

- 6)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報告集，No.467，pp.17-24，1995.3