

各種コンクリートの圧縮軟化について

渡部 憲* 大岡 督尚**

要約： 本研究では、4種類のコンクリート（普通強度ブレン、高強度鋼繊維補強、軽量ブレンおよび軽量ピニロン繊維補強コンクリート）の1軸圧縮実験を行い、各種コンクリートの材料特性に与える試験体寸法、短繊維（ピニロン繊維長さ12mm、鋼繊維長さ30mm）の影響について検討を行った。また、以前から指摘されている1軸圧縮実験時の載荷板の拘束による影響についても検討を行った。結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) テフロンシートの有無が圧縮強度に与える影響は、圧縮強度比（テフロン有り/テフロン無し）の平均値で0.94であった。
- 2) 繊維補強によるコンクリートの圧縮靱性改善効果は、引張靱性ほど顕著ではない。
- 3) コンクリートの圧縮応力-塑性変形関係は、2直線モデルで概ね近似できる。

キーワード： 圧縮軟化挙動、鋼繊維、ピニロン繊維、軽量、高強度

- 目次：**
- | | |
|----------------|----------|
| 1. はじめに | 4. 結果と考察 |
| 2. 実験方法 | 5. まとめ |
| 3. 圧縮軟化挙動の評価方法 | |

1. はじめに

近年、コンクリートに対する要求性能は、高強度、高靱性、超軽量、リサイクル等、非常に多様化しており、今後、これらの諸性能を有するコンクリートを使用する機会も増えてくると思われる。前述のような性能の中でも、コンクリートの高靱性をねらったものとして、短繊維をコンクリート中に混入した繊維補強コンクリートが挙げられるが、繊維補強コンクリートを使用した鉄筋コンクリート構造物の性能を評価する場合、材料レベルでの性能を明確にしておく必要がある。コンクリートの引張軟化挙動については、コンクリートの破壊力学のめざましい発達により、多くの部分が解明され²⁾³⁾、モデル化された⁴⁾。そして、高い引張靱性を有する繊維補強コンクリートの靱性評価方法も示された⁵⁾。コンクリートの圧縮軟化挙動については、非常に多くの研究成果が報告されているが、繊維補強されたコンクリートの圧縮軟化

挙動に与える短繊維の影響を明確に示した研究成果は少ない。

そのため本研究では、4種類のコンクリート（普通強度ブレン、軽量ブレン、軽量ピニロン繊維補強および高強度鋼繊維補強コンクリート）の1軸圧縮実験を行い、各種コンクリートの材料特性に与える試験体寸法、短繊維（ピニロン繊維長さ12mm、鋼繊維長さ30mm）の影響について検討を行った。また、以前から指摘されている1軸圧縮実験時の載荷板の拘束による影響¹⁾についても検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験概要

本研究で用いた試験体（円柱供試体）の一覧を表1に示す。コンクリート種類は、普通強度ブレン、軽量ブレン、軽量ピニロン繊維補強および高強度鋼繊維補強

表1 試験体一覧

試験体名	コンクリート調合	試験体寸法 (mm)	短繊維 種類	載荷方法および 試験体数		
Nc5	Ncon (普通強度ブレン)	50φ×100	無補強	1軸圧縮 テフロン無し	1軸圧縮 テフロン有り	割裂引張
Nc10		100φ×200				
Sc5	SLCplain (軽量ブレン)	50φ×100	ピニロン繊維	試験体数 各3体	試験体数 各3体	試験体数 各3体
Sc10		100φ×200				
SVF5	SLVFRM (軽量ピニロン繊維補強)	50φ×100	鋼繊維	試験体数 各3体	試験体数 各3体	試験体数 各3体
HSF5	HSFRC (高強度鋼繊維補強)					

の4種類(繊維補強コンクリートの繊維体積混入率は1.0%), 試験体寸法は50φ×100mm(全試験体)および100φ×200mm(普通強度プレーンおよび軽量プレーン)の2種類, 載荷板の拘束は, 鋼製載荷板で試験体を直接載荷したもの(テフロン無し)および2枚のテフロンシート(厚0.1mm)の間にシリコンオイルを塗布し, 鋼製載荷板と試験体の上下間に挿入したもの(テフロン有り)の2種類とし, 各3体製作した。コンクリートの調合を表2に示す。試験体は, コンクリート打設直後に封緘状態とし, 試験時(約1年)まで実験室内で養生を行った。なお, HSFRCは, 試験装置の能力の関係で試験体寸法を50φ×100mmとした。

2.2 載荷および計測方法

載荷は2000kNアムスラー型長柱試験機および簡易高剛性試験装置を使用し, 載荷速度は, 応力上昇域では, 応力増分を毎秒0.2MPa(Nc5, Nc10およびHSP5試験体), および毎秒0.1MPa(Sc5, Sc10およびSVF5試験体), 応力下

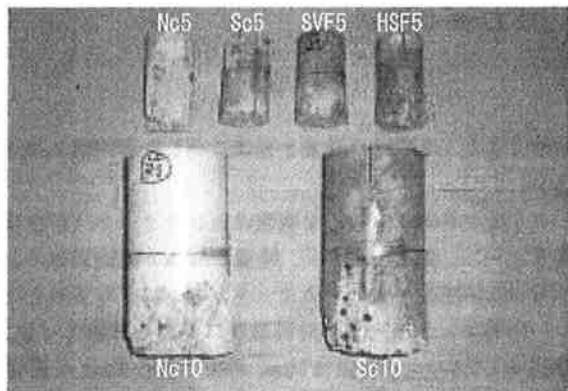


写真1 試験体の破壊状況 (テフロン有り)

表2 コンクリートの調合
(a) Necon

Necon	W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G	繊維	高性能AE減水剤 (C×%)	空気量調整剤	合計
重量(kg/m ³)	54	48	195	359	811	887		0.25		2252

C: 早強セメント S: 山砂: 砕砂=3:7 (最大寸法: 5mm)
G: 碎石 (砂岩, 最大寸法: 10mm)

(b) SLCplain

SLCplain	W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G	繊維	高性能AE減水剤 (C×%)	空気量調整剤	合計
重量(kg/m ³)	35	76	170	486	364	124		2.0	0.05	1143

C: 早強セメント S: 廃ガラス発泡細骨材 (最大寸法: 5mm)
G: 超軽量粗骨材 (最大寸法: 10mm)

(c) SLVFRM

SLVFRM	W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G	繊維	高性能AE減水剤 (C×%)	空気量調整剤	合計
重量(kg/m ³)	30	100	180	600	413		13	3.0	0.05	1206

C: 早強セメント S: 廃ガラス発泡細骨材 (最大寸法: 5mm)
繊維: ビニロン (長さ: 12mm)

(d) HSFRC

HSFRC	W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G	繊維	高性能AE減水剤 (C×%)	空気量調整剤	合計
重量(kg/m ³)	20	45	160	800	632	789	79	3.0		2459

C: ハイフローセメント: シリカフェーム=17:3 S: 山砂 (最大寸法: 5mm)
G: 碎石 (石英片岩, 最大寸法: 10mm) 繊維: 鋼 (長さ: 30mm)

降域では, 縦ひずみ増分を毎分1000μ(全試験体)となるように制御した。図1に試験体の載荷および計測方法を示す。計測項目は, 荷重, コンクリート面に貼付たひずみゲージによる縦および横ひずみ(1試験体あたり縦2箇所および横2箇所)および載荷板間変形(1試験体あたり4箇所)とした。各計測データは, データロガーを使用して取込んだ。

3. 圧縮軟化挙動の評価方法

コンクリートの1軸圧縮載荷を行った場合, 最大耐力以降, 変形の局所化が起こることが知られている⁷⁾。中村等は, 試験体寸法, 骨材寸法, 圧縮強度の異なるコンクリートの1軸圧縮実験を行い, コンクリートの変形が局所化する領域(破壊領域長さ:lc)を示した⁸⁾。それによれば, lcは, 寸法, 形状には関係なく, 最大骨材寸法(Gmax), 平均骨材間距離(η)および圧縮強度(fc)の影響を受けるとしており, コンクリートの圧縮強度が42MPa程度でlcは200mmとなる。

写真1に実験におけるコンクリートの最終破壊状況の一例を示す。コンクリート種類に関係なく, 50φ×100mmと100φ×200mm試験体では, 明らかに破壊している領域が著しく異なっている。50φ×100mm試験体では, 試験体全長にわたって著しく破壊しているが, 100φ×200mm試験体では, 著しく破壊している領域は試験体全長のおよそ半分程度となっている。ただし, 100φ×200mm試験体では, 縦方向に長さ160~180mm程度のひび割れが数本入っている。このことから, 今回使用したコンクリートのlcは, 100mm以上であると考えられ, 普通強度プレーンおよび軽量プレーンコンクリートのlcは,

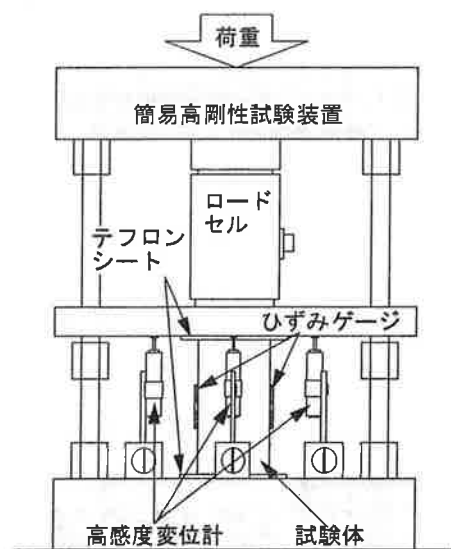


図1 載荷および計測方法

200mm以内であると考えられる。

以上より、本研究では、全試験体のlcを200mmとして検討を行うこととした。なお、今回の実験のみでは各種コンクリートのlcを明確にすることができないため、今後、試験体の長さを300～400mm程度に変化させた実験を行う必要がある。

図2に、コンクリートの圧縮軟化挙動の評価方法について示す。まず、実験により得られた圧縮荷重(P)－縦変形関係を圧縮応力(σc)－塑性変形(δc)関係に変換する(図(a)および図(b)参照)。次に、σc－δc関係からδcが3.0mmまでの面積(図(b)の網掛け部分)を求める。本研究では、これを圧縮破壊エネルギー(GFc)とする。この時、実験結果でδcが3.0mmまで得られていないものについては、実験データを外挿する。また、δc ≤ 3.0mmで、σcが0MPaになるのものについてはその変形までに得られた値をGFcとする。なお、本実験では、lcを200mmとするため、50φ×100mm試験体については塑性変形量を2倍して検討を行う。最後に、実験で得られたσc－δc関係は、図(c)に示すように2直線で近似できると仮定し、式(1)および式(2)の係数α、β、γおよびd1を定める。

$$d1 < \beta \cdot d1 \leq 3.0 \text{ の場合,} \\ GFc = 0.5(1.0 + \alpha \cdot \beta) f_c \cdot d1 \quad (1)$$

$$3.0 < \beta \cdot d1 \text{ の場合,} \\ GFc = 0.5(1.0 + \alpha \cdot \beta - \beta \cdot \gamma) f_c \cdot d1 \\ + 1.5 \gamma \cdot f_c \quad (2)$$

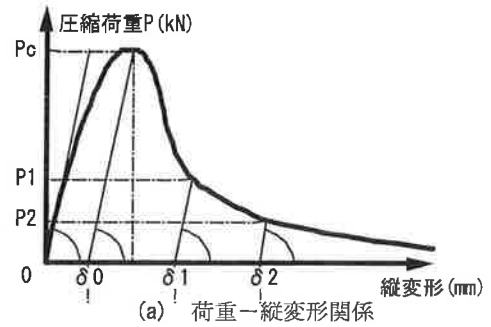
4. 結果と考察

4.1 圧縮強度までの材料特性

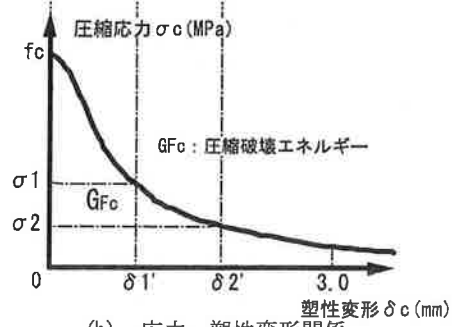
表3に本実験で得られたfcまでの材料特性の一覧を示す。表には、ヤング係数(Ec)に関するNewRC式およびRC規準式を用いて計算したEcの推定値も併記してある。Ecの推定値は、NcおよびHSF5試験体についてはNewRC式の値、ScおよびSVF5試験体についてはRC規準式の値が、それぞれ実験結果に近い値となっている。なお、各強度の標準偏差の最大値は、fcで6.66MPa (HSF5テフロン無

し)、引張強度(ft)で1.08MPa (HSF5)、Ecで1.1GPa (HSF5テフロン無し)であった。

テフロンシートの有無がfcに与える影響については、Sc5試験体以外、テフロンシートが有る場合は圧縮強度が低下している(Sc5試験体を除いた圧縮強度比(テフロン有り/テフロン無し)の平均値は0.94)。なお、Sc5試



(a) 荷重－縦変形関係



(b) 応力－塑性変形関係



(c) 2直線近似応力－塑性変形関係

図2 圧縮軟化挙動の評価方法

表3 圧縮強度までの材料特性一覧

試験体	テフロンシート	ヤング係数の計算値			実験値										
		New RC ¹⁾ (GPa)	RC規準 ²⁾ (GPa)	ヤング係数 ³⁾ Ec (GPa)	圧縮強度fc (MPa)	圧縮強度時ひずみ ³⁾			ひび割れ強度 ⁴⁾		引張強度ft ⁵⁾ (MPa)	単容積γ (ton/m ³)	ポアソン比	ヤング係数比	圧縮強度比
Nc5	無し	20.0	22.1	20.0	30.85	2668	1561	0.585	—	—	2.60	2.07	0.195	1.00	1.00
	有り	19.6	21.5	20.2	29.25	2474	1418	0.573	—	—	2.60	2.07	0.205	1.01	0.95
Nc10	無し	23.5	25.9	24.5	35.98	2619	1301	0.497	—	—	2.59	2.19	0.184	1.00	1.00
	有り	23.4	25.7	23.8	35.41	2725	1301	0.477	—	—	2.59	2.19	0.169	0.97	0.98
Sc5	無し	6.8	9.8	11.3	29.57	2743	1066	0.367	—	—	2.17	1.22	0.246	1.00	1.00
	有り	7.7	10.8	12.2	30.80	2687	845	0.314	—	—	2.17	1.29	0.244	1.08	1.04
Sc10	無し	6.0	8.6	10.7	26.87	2634	829	0.315	—	—	1.95	1.16	0.238	1.00	1.00
	有り	5.4	7.9	10.2	24.70	2536	817	0.322	—	—	1.95	1.12	0.231	0.95	0.92
SVF5	無し	9.4	13.4	14.3	40.41	2955	1045	0.354	2.93	—	3.53	1.36	0.253	1.00	1.00
	有り	9.6	13.5	15.3	39.20	2687	758	0.282	2.93	—	3.53	1.38	0.254	1.00	0.97
HSF5	無し	46.8	66.4	41.5	144.5	3726	1514	0.406	6.10	—	10.16	2.58	0.242	1.00	1.00
	有り	46.6	63.1	41.4	127.5	3426	943	0.275	6.10	—	10.16	2.60	0.233	1.00	0.88

*1 NewRC式 Ec=k1·k2·3.35·10³·(γ/2.4)²·(fc/60)^{1/3} *2 RC規準式 Ec=210/10.1972·(γ/2.3)^{1.5}·(fc/200·10.1972)^{0.5}
 *3 ひずみゲージの値より算出 *4 割裂引張試験時のひび割れ発生強度 *5 割裂引張試験より得られた値

験体の圧縮強度比が1.0を上回ったのは、単位容積質量(γ)の相違に起因すると思われる。

テフロンシートの有無が E_c に与える影響については、Sc5試験体以外、ヤング係数比(テフロン有り/テフロン無し)は1.0程度となっており、テフロンシートの影響は観察されない。なお、Sc5試験体のヤング係数比が1.0を上回ったのは、 γ の相違に起因すると思われる。

各種材料特性と f_c の関係について、本実験値およびNewRC⁹⁾、向井等¹⁰⁾、友沢等¹¹⁾、高羽等¹²⁾および依田等¹³⁾の研究報告の図・表中より読取った実験値を使用して検討した結果を図3～図5に示す。まず、図3はコンク

リートの E_c と f_c の関係を示す。軽量コンクリート(軽量骨材を使用したもの)の E_c についてはRC規準式で、普通コンクリート(普通骨材を使用したもの)の E_c についてはNewRC式でおおよそ評価できている。次に、図4はコンクリートの圧縮強度時の縦ひずみ(ϵ_c)と f_c の関係を示す。軽量コンクリートおよび普通コンクリートの ϵ_c と f_c の関係を直線で近似すると、図中に示す近似式が得られた。最後に、図5はコンクリートの f_t と f_c の関係を示す。軽量コンクリートの両者の関係は直線で近似でき、普通コンクリートの f_t と f_c の関係はコンクリート標準示方書(設計編)式に準じた近似式で、それぞれ

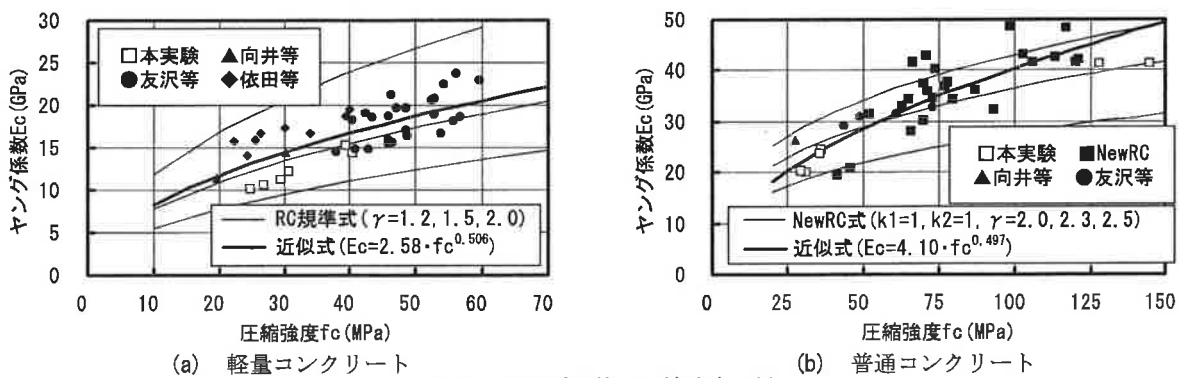


図3 ヤング係数—圧縮強度関係

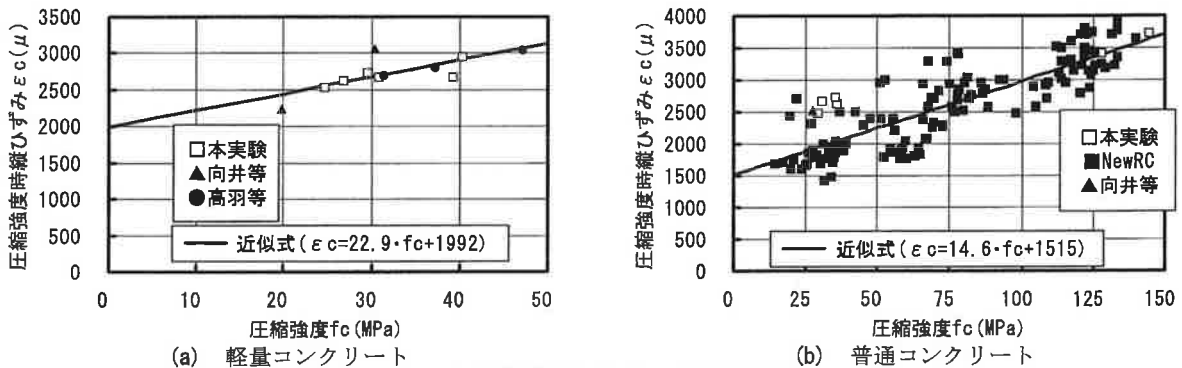


図4 圧縮強度時縦ひずみ—圧縮強度関係

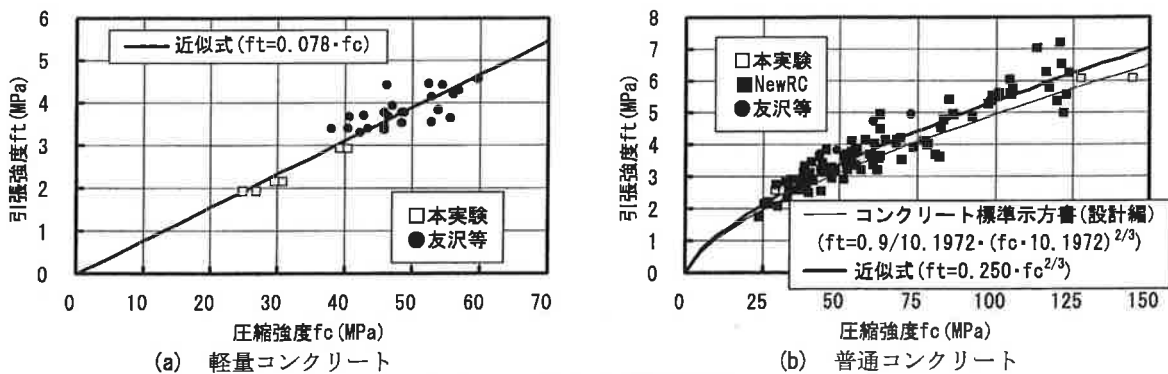


図5 引張強度—圧縮強度関係

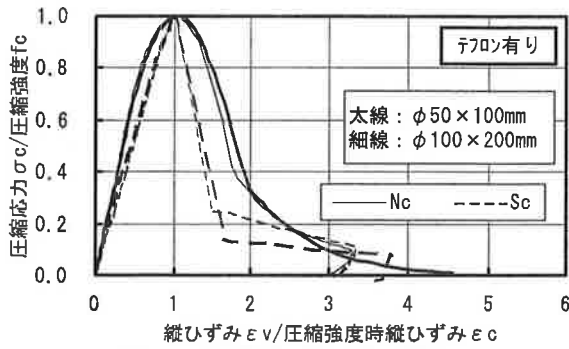


図6 圧縮応力-縦ひずみ関係 (試験体寸法の影響)

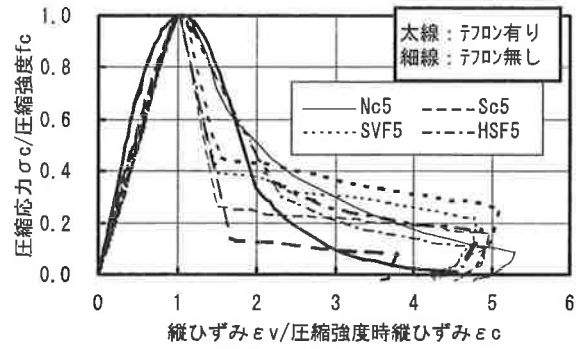


図7 圧縮応力-縦ひずみ関係 (載荷板摩擦の影響)

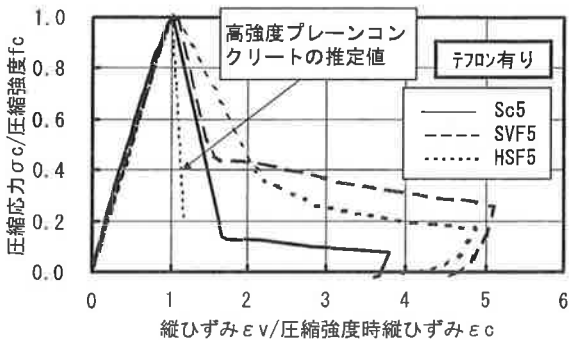


図8 圧縮応力-縦ひずみ関係 (繊維補強の影響)

評価できることがわかる。

4.2 圧縮応力-縦ひずみ関係

図6に、NcおよびSc試験体の $\sigma_c/f_c - \epsilon_v/\epsilon_c$ 関係を示す。なお、 ϵ_v は変位計より得られた値から計算した。図によれば、コンクリート種類に関わらず試験体寸法の影響は観察されない。中村等は、普通強度プレーンコンクリートの l_c は試験体を長くした場合でも一定値に収束するとしており、 f_c および η/G_{max} と l_c の関係を示している⁹⁾。それによれば、本実験の普通強度プレーンコンクリート(Nc10)の f_c (平均35.70MPa)では、 l_c は218mm、 η/G_{max} (0.380)では、 l_c は190mm程度となる。このことと、図6および写真1より、本実験で使用した普通強度プレーンコンクリートの l_c は160~200mm程度であったと考えられる。

図7に、Nc5、Sc5、SVF5およびHSF5試験体の $\sigma_c/f_c - \epsilon_v/\epsilon_c$ 関係を示す。なお、 ϵ_v は変位計より得られた値から計算した。図によれば、Nc5およびSc5試験体では、応力下降域でテフロンシートの影響が観察される。すなわち、圧縮強度直後の急激な応力低下が収まるレベルが、テフロンシート有りの結果と比較してテフロンシート無しの方が高くなっている。しかし、SVF5およびHSF5試験体では、このような傾向は観察できない。これは、繊維補強コンクリートでは、圧縮強度以降に与えるテフロンシートの影響は、繊維補強の影響と比

表4 圧縮軟化挙動パラメーター一覧

試験体	テフロンシート	圧縮破壊エネルギー GFc (N/mm)	引張破壊エネルギー GF (N/mm)	係数				
				GFc/GF	d1 (mm)	α	β	γ
Nc5	無し	29.97	0.151	198.5	0.986	0.314	3.091	0.227
	有り	17.93		118.8	0.934	0.145	2.159	0.000
Nc10	無し	33.59	0.151	222.4	0.967	0.346	2.691	0.000
	有り	22.84		151.3	0.848	0.218	2.393	0.000
Sc5	無し	25.81	0.013	1985.6	0.562	0.285	9.268	0.135
	有り	19.29		1483.6	0.739	0.148	4.876	0.031
Sc10	無し	21.96	0.013	1688.9	0.627	0.255	7.344	0.103
	有り	15.58		1198.3	0.556	0.280	4.880	0.000
SVF5	無し	45.29	0.582	77.8	0.616	0.366	10.721	0.221
	有り	49.31		84.7	0.649	0.425	9.868	0.252
HSF5	無し	172.18	1.591	108.2	1.428	0.246	3.506	0.138
	有り	155.98		98.0	1.341	0.271	4.484	0.175

*1 切欠き入りコンクリート梁3点曲げ実験の逆解析より得られた、ひび割れ幅0.5mmまでの破壊エネルギー

較して、小さいことを示している。

図8に、Sc5、SVF5およびHSF5試験体の $\sigma_c/f_c - \epsilon_v/\epsilon_c$ 関係を示す。なお、図中にはHSF5試験体の繊維補強効果を検討するため、応力上昇域をFafitis・Shah式、応力下降域をKent・Park式で推定した高強度プレーンコンクリートの結果(E_c 、 f_c および ϵ_c をHSF5試験体と同じ値とした)も示してある。まず、Sc5試験体とSVF5試験体では、圧縮強度直後の急激な応力低下が収まる応力レベルが、Sc5試験体と比較してSVF5試験体の方が高くなっている。次に、HSF5試験体と高強度プレーンコンクリートの推定値では、圧縮強度直後の急激な応力低下を生じる部分の勾配が、高強度プレーンコンクリートの推定値と比較してHSF5試験体の方が緩やかである。以上より、コンクリートの $\sigma_c - \epsilon_v$ 関係の応力下降域の形状は、テフロンシートおよび繊維補強の影響を受ける。

4.3 圧縮軟化挙動

表4に本実験で得られた圧縮軟化挙動パラメーターの一覧を示す。なお、表中には、引張破壊エネルギー(GF)についても示してある。テフロンシート有り試験体より得られたGFcは、Sc試験体(15.85~19.29N/mm) < Nc試験体(17.93~22.84N/mm) < SVF5試験体(49.31N/mm) < HSF5試験体(155.98N/mm)となっており、繊維補強効果が明確に現れている。なお、SVF5試験体のGFはSc試験体のGFと比較して非常に大きくなっているが、SVF5試

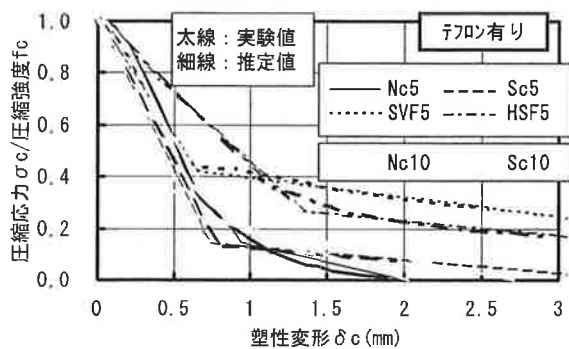


図9 圧縮応力-塑性変形関係

験体の GF_c は Sc 試験体の GF_c と比較して GF の場合ほど大きくなっていない。これは、繊維補強によるコンクリートの圧縮靱性改善効果は引張靱性ほど顕著ではないこと

謝辞

実験結果の整理に際して有益なる御助言を賜りました日本大学の白井伸明教授および森泉和人助手に謝意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺 明 他 32名:新機能・高性能に挑戦するコンクリート, コンクリート工学, Vol. 36, No. 1, pp. 4-66, 1998. 1
- 2) 破壊力学の応用研究委員会:破壊力学の応用研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 1993. 10
- 3) Nomura, N., Mihashi, H. and Izumi, M.: Correlation of Fracture Process Zone and Tension Softening Behavior in Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 21, pp. 545-550, 1991
- 4) 六郷 恵哲 他 3名:各種コンクリートの破壊力学パラメータ, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 11, No. 1, pp. 247-252, 1989. 6
- 5) CEB:CEB-FIP MODEL CODE1990, Thomas Telford, pp. 33-58
- 6) 大岡 督尚, 橋高 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, No. 2, pp. 111-116, 1997. 6
- 7) RILEM TC 148-SSC: Report of the Round Robin Test carried out by RILEM TC 148-SSC, Materials and Structures/Materiaux et Constructions, Vol. 30, May 1997, pp. 195-209
- 8) Nakamura, H., Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on post-Peak Behavior of RC Structures subjected to Seismic Loads, pp. 259-272, 1999. 10
- 9) (財) 国土開発技術研究センター:平成4年度高強度コンクリート分科会報告書, 建設省総合技術開発プロジェクト(鉄筋コンクリート造建物の超軽量・超高層化技術の開発), 1993. 3
- 10) 向井 毅 他 4名:人工軽量骨材とそれを用いたコンクリートの性質に関する研究(その10. コンクリートの応力-歪関係について), 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp. 103-104, 1978. 9
- 11) 友沢 史紀, 榎田 佳寛, 安田 正雪:高強度軽量コンクリートの基礎的物性-超高層RC建物への適用-, コンクリート工学, Vol. 24, No. 4, pp. 14-21, 1986. 4
- 12) 高羽 登 他 3名: $f_c=360\text{kgf/cm}^2$ 級の高強度軽量コンクリートの基礎的性質, 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp. 367-368, 1992. 8
- 13) 依田 和久, 桜本 文敏, 池田 賢吾:超軽量骨材の性質がコンクリート強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 493-498, 1997. 6

Compression Softening Behavior of Various Type of Concrete

K. Watanabe and T. Oh-oka

In order to investigate the effect of size of specimens, fiber reinforcement and friction at the specimen-loading platen interfaces on the strength and the ductility of concrete, various types of concrete cylinders were tested under uniaxial compression. Normal strength plain concrete, light weight plain concrete, light weight vinylon fiber reinforced concrete and high strength steel fiber reinforced concrete were utilized.

The following conclusions were obtained through this study:

- 1) The effect of fiber reinforcement on compressive ductility of concrete is smaller than that on tensile ductility of concrete.
- 2) It is assumed that the compressive stress-plastic deformation response of concrete can be approximated by the bi-linear relation.