

論文

[1006] 石炭灰系軽量骨材を用いたコンクリートの引張性状

正会員 ○ 菊池雅史 (明治大学工学部)

正会員 向井 毅 (明治大学工学部)

1. はじめに

石炭灰軽量骨材は、火力発電所等の石炭焚ボイラーより排出されるフライアッシュを主原料とし、これを造粒・焼成して製造される骨材であり、資源の活用の観点から着目されている骨材である。筆者らは、かねてよりこの種の軽量骨材の適正使用を目的として、骨材特性、これを用いたコンクリートの基礎的性質、耐久性、RC部材としての適用性などに関する検討^{1)~3)}を進めてきている。本報告はこの一部をなすもので、コンクリートの乾燥収縮およびそれに起因するひびわれ、クリープ等に大きく関与している変形性状のうち、引張性状を中心とした検討結果をまとめたものである。

2. 試料コンクリートおよび試験体

2-1. 試料コンクリート

a) 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメントを用いた。骨材は、粗骨材として石炭灰系軽量骨材 (記号: F)、膨張頁岩系軽量骨材 (記号: L) および川砂利 (記号: G)、細骨材として川砂 (記号: N) を用いた。使用した骨材の種類およびその主要性質を表-1に示す。混和剤は、AE減水剤を用いた。水は水道水を用いた。

b) 種類および割合

骨材の組合せを3種類、水セメント比を50、55および60%に変化させた合計9種類の試料コンクリートを用意した。その種類および割合概略等を表-2に示す。

表-1. 本検討に用いた骨材の種類およびその主要性質

骨材種類		FM	絶乾 比重	吸水 率 (%)	実積 率 (%)	破砕 値 (%)	引張 強度 kgf/cm ²	
区分	種類および記号							
人工軽 量骨材	石炭灰系	F	6.64	1.38	14.0	61.0	40.0	11.6
	膨張頁岩系	L	5.99	1.29	7.8	69.0	37.9	13.9
普通 骨材	川砂利	G	6.84	2.64	0.8	64.0	-	-
	川砂	N	2.84	2.59	1.2	63.9	-	-

表-3. 本検討に用いた試験体種類およびその形状・寸法

サイズ	試験項目	試験体形状・寸法
I	純引張	・10×10×17.5cmの角柱形の材軸方向の上下端にボルト各4本を埋込んだもの (図-1参照)
II	割裂引張	・10φ×20cmの円柱形の上部2.5cm、下部0.5cmをコンクリートカッターで切断したもの (図-1参照)

表-2. 試料コンクリートの種類、割合および練上がり時性質の概略

区分	試料コンクリートの種類		W/C (%)	単 位 水 量 kg/m ³	細 骨 材 率 (%)	スラ ン プ (%)	空 気 量 (%)
	粗骨材	細骨材					
軽 量 コ ン ク リ ー ト	石炭 灰系	FN	50	169	45.8	17.5	3.5
			55	168	47.6	17.0	3.9
			60	167	48.7	17.9	4.5
1 種 コ ン ク リ ー ト	膨張 頁岩系	LN	50	171	45.9	17.6	4.2
			55	171	47.6	18.4	4.2
			60	172	48.7	17.0	3.8
普 通 コ ン ク リ ー ト	川砂利	GN	50	164	37.7	18.3	2.5
			55	164	39.3	17.7	2.5
			60	164	40.7	17.6	2.5

表-4. 各種試験体の養生方法および試験前の調整方法

サイズ	試験項目	養生方法および試験前の調整方法
I	純引張	・材令28日まで水中養生を行い、以下の調整を経て試験に供した。
		記号 水中養生終了後から試験までの調整方法
		A 直後に試験: 試験材令28日
		B 20°C、RH60%の室内で14日間乾燥後試験: 試験材令42日
II	割裂引張	C 20°C、RH60%の室内で28日間乾燥後試験: 試験材令56日
		・材令6ヶ月まで水中養生後、常温空气中で気乾状態に達するまで養生し、試験に供した。

2-2. 試験体

a) 種類および形状・寸法

シリーズⅠ実験用として角柱形純引張試験体、シリーズⅡ実験用として円柱形割裂引張試験体を用意した。試験体の形状・寸法を表-3および図-1に示す。

b) 養生方法および試験前の試験体の調整方法

各実験シリーズにおける試験体の養生方法および試験前の調整方法を表-4に示す。

3. 試験方法

3-1. 載荷方法

載荷は、いずれのシリーズにおいてもアムスラー型万能試験機を用いて行った。載荷方法の概略を図-2に示す。

試験は、コンクリートの破壊想定荷重の80%もしくは引張歪度が 100×10^{-6} に達するまでは荷重により制御し、その後は引張歪により制御して行った。

この方法による1試験体当たりの試験所要時間は10~15分程度とした。

3-2. 荷重および歪の測定方法

a) 純引張試験：コンクリートに作用する荷重は、試験機の荷重計により検出した。コンクリートの引張歪は、コンクリートの中央部に埋込んだ埋込み型ゲージにより測定した。

b) 割裂引張試験：荷重の検出は試験機の固定架台と加圧盤の間に装着したロードセルにより検出した。コンクリートの引張歪は、試験体の両端の中央に割裂破断面に直角に張付けたワイヤーストレインゲージにより測定した。

4. 実験結果および検討

4-1. 純引張試験（シリーズⅠ）

純引張試験結果の一覧を表-5に、応力-歪度曲線の測定結果の一例を図-3に示す。主な検討結果をまとめると以下のものである。

a) 水分発散率：水中養生終了後、14および28日間気中乾燥した石炭灰系軽量骨材を用いたコンクリートの水分発散率は、それぞれ平均で3.4%、4.6%であり、膨張頁岩系および川砂利を用いた場合に比べ大きな値を示した。

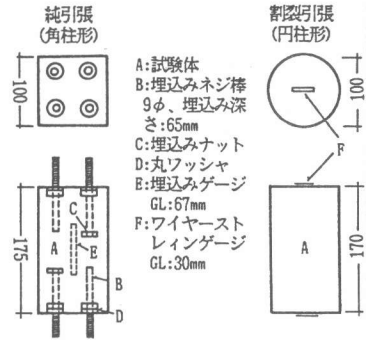


図-1. 本検討に用いた引張試験体の形状・寸法

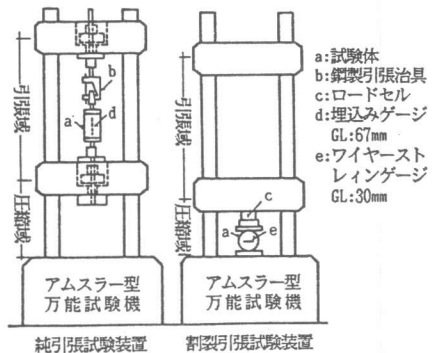


図-2. 本検討に用いた引張試験装置および試験方法の概略

表-5. 純引張試験結果の一覧(シリーズⅠ)

区分	記号	W/C (%)	調整記号	水分発散率 (%)	純引張強度	Ft max	ヤング係数 E	骨材破断率 (%)
					Ft (kgf/cm ²)	時歪度 ε _s (10 ⁻⁶)	×10 ⁵ (kgf/cm ²)	
軽量 コンク リート	FN	50	A	0	27.7	285	1.99	93.3
			B	3.2	20.3	122	1.89	96.3
			C	4.3	23.2	153	2.00	95.4
	LN	55	A	0	25.5	237	1.49	87.7
			B	3.4	21.6	146	1.87	92.3
			C	4.7	25.2	140	1.86	95.5
GN	60	A	0	23.7	276	1.72	88.9	
		B	3.6	21.5	133	1.93	89.8	
		C	4.8	30.1	166	2.11	91.0	
普通 コンク リート	LN	50	A	0	23.3	178	1.95	48.7
			B	2.8	23.5	102	2.29	57.9
			C	3.5	21.0	134	1.97	71.4
	GN	55	A	0	25.1	234	1.71	48.3
			B	3.2	24.4	116	2.18	63.5
			C	4.2	26.1	133	1.96	68.4
GN	60	A	0	21.4	288	1.72	51.0	
		B	3.5	24.7	194	2.02	57.3	
		C	4.5	27.4	153	2.02	61.6	
普通 コンク リート	GN	50	A	0	25.5	142	2.97	9.1
			B	1.3	28.2	149	3.60	26.2
			C	1.4	30.2	200	3.17	20.5
	GN	55	A	0	24.5	247	2.99	10.4
			B	1.5	32.1	207	3.17	30.8
			C	1.6	31.9	266	3.30	23.3
GN	60	A	0	24.9	182	2.68	22.8	
		B	1.6	30.3	141	3.41	21.6	
		C	1.8	34.8	158	3.18	16.7	

b) 純引張強度：石炭灰系軽量骨材コンクリートの材令28日における水中養生終了直後の試験体（以下、飽水状態試験体という）の純引張強度は、およそ24~28 kgf/cm²であり、水セメント比が高くなるのに伴い強度は低下した。

一方、乾燥14日間の試験体（記号：B）の純引張強度は約20~22 kgf/cm²であり、図-4に示すように、飽水状態試験体に比べて約9~27%の強度低下を示し、その低下割合は水セメント比の小さいものほど大きかった。

また、乾燥28日間の試験体（記号：C）の強度は約23~30 kgf/cm²であり、強度回復の傾向がみられた。この場合、水セメント比の大きいものほど強度および回復の割合も高くなるといえる。

川砂・川砂利コンクリートでは、乾燥が進行するのに伴い、また、水セメント比の大きいものほど強度が高くなる傾向がみられた。

膨張頁岩系コンクリートでは、水セメント比および乾燥による影響はあまりみられなかった。

c) 骨材破断率と純引張強度の関係：各種コンクリートの引張破断面上の骨材破断率と純引張

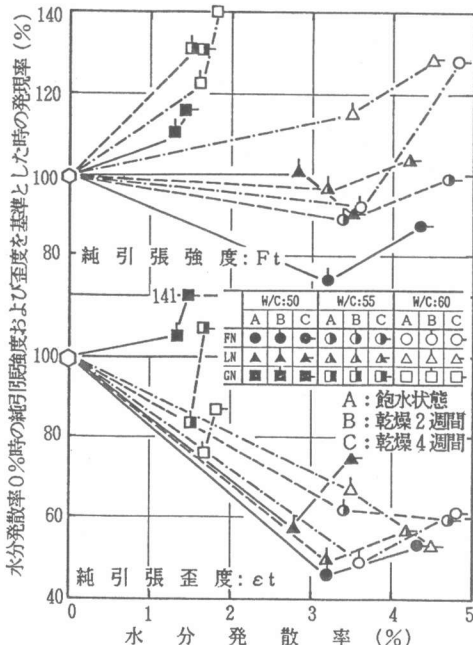


図-4. 水分発散量と純引張および歪度の発現状況 (シリーズI)

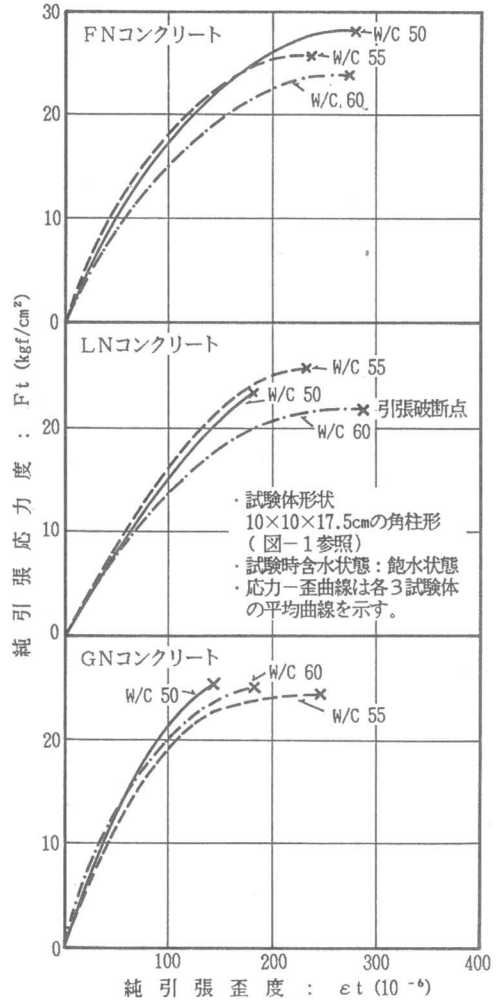


図-3. 純引張試験における応力-歪測定結果の一例 (シリーズI)

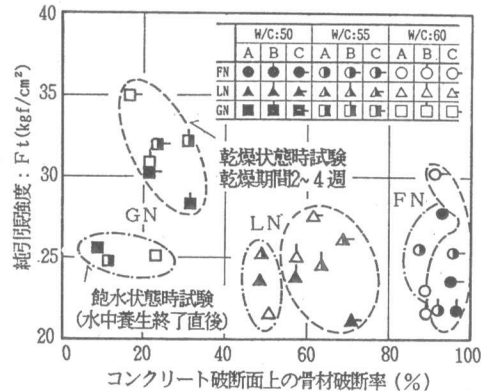


図-5. 各種コンクリートにおける骨材破断率と純引張強度の関係 (シリーズI)

強度の関係を図-5に示す。これによると、いずれのコンクリート種類においても乾燥に伴い、骨材破断率は増加する傾向がみられた。これは、乾燥により骨材とモルタルの界面の付着力が増進していることを示すものといえる。

d) 純引張歪度： 石炭灰系軽量骨材コンクリートの飽水状態試験体の破断時の純引張歪度は、約 $240 \sim 290 \times 10^{-6}$ (平均 266×10^{-6})であり、膨張頁岩系 (平均 233×10^{-6}) および川砂・川砂利コンクリート (平均 190×10^{-6}) に比べ、14~40%ほど大きな値を示した。一方、14~28日間乾燥した試験体 (記号：BおよびC) の破断時純引張歪度は、石炭灰系および膨張頁岩系コンクリートとも 140×10^{-6} 前後であり、乾燥に伴い飽水状態時に比べ40~46%の低下がみられた。このように、乾燥により骨材とモルタルの界面の付着強度が増進していると推定されるにも係わらず純引張強度および歪度の低下が、石炭灰系軽量骨材コンクリートで大きかった原因としては当該期間中における水分発散速度およびそれに伴う乾燥収縮の速度が3者の中で最も大きく、コンクリートの内部歪が純引張強度の低下に影響しているものと推定される。このことは、水分発散および収縮速度が幾分低減する乾燥期間4週時で強度が回復する現象からも想定できる。

e) 純引張応力ブロック係数：図-6に純引張試験における応力-歪のノーマライズ曲線の一例を示す。また、これらノーマライズ曲線より求めた K 、 K_1 および K_2 値を表-6に示す。

ここに、 K ：(1)式により求められる実験定数

$$(1 - \sigma_t / \sigma_{t \max}) = (1 - \epsilon_t / \epsilon_{t \max})^K \quad (1)$$

K_1 ：ノーマライズ曲線により区画される部分の面積比 (σ_{\max} 時)

K_2 ： K_1 の重心位置 (σ_{\max} 時) を示し、(2) および (3) 式より求められる。

$$K_2 = (1 - k_z) \quad (2)$$

$$k_z = \frac{\epsilon_0 \left\{ \frac{\epsilon_0^2}{2} + \frac{(1 - \epsilon_0)^{K+1}}{K+1} - \frac{(1 - \epsilon_0)^{K+2}}{K+2} - \frac{1}{K+1} + \frac{1}{K+2} \right\}}{\epsilon_0 + \frac{(1 - \epsilon_0)^{K+1} - 1}{K+1}} \quad (3)$$

これらの $\sigma_{t \max}$ 時の K_1 および K_2 について、圧縮試験により得られた圧縮応力ブロック係数と比較すると、いずれの軽量コンクリートにおいても飽水状態時では同程度か若干小さい値を示しているものの、乾燥履歴を有する場合にはかなり小さい値を示すといえる。川砂・川砂利コンクリートについては、コンクリートの含水状態に係わらず全般的に小さな値を示した。

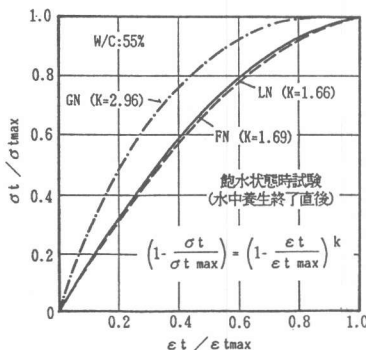


図-6. 純引張試験における応力-歪のノーマライズ曲線の一例 (シリーズI)

表-6. 各種コンクリートの純引張および割裂引張応力ブロック係数 (シリーズI、II)

試験体種類	試験体の含水状態による区分												
	記号	W/C (%)	純引張						割裂引張				
			K	K_1	K_2	K	K_1	K_2	K	K_1	K_2		
FN	50	1.82	0.64	0.37	1.06	0.51	0.34	1.58	0.61	0.36	1.46	0.59	0.35
	55	1.69	0.63	0.36	1.15	0.53	0.30	1.12	0.53	0.34	2.24	0.69	0.38
	60	2.12	0.68	0.38	1.14	0.53	0.34	1.20	0.55	0.34	2.01	0.67	0.38
LN	50	1.17	0.54	0.34	0.94	0.50	0.33	1.41	0.58	0.35	1.71	0.63	0.36
	55	1.66	0.62	0.39	1.03	0.51	0.35	1.12	0.53	0.34	1.86	0.65	0.37
GN	60	1.12	0.53	0.34	2.62	0.72	0.39	1.98	0.66	0.37	1.97	0.66	0.37
	50	1.51	0.60	0.39	1.97	0.66	0.37	1.96	0.66	0.37	1.58	0.61	0.36
	55	2.96	0.75	0.60	1.60	0.62	0.36	2.09	0.68	0.38	1.49	0.60	0.36
	60	2.00	0.67	0.37	1.51	0.60	0.36	1.40	0.58	0.35	1.78	0.64	0.37

4-2. 割裂引張試験 (シリーズII)

試験体作製後6ヶ月間水中養生を行い、その後、気乾状態に達するまで気中養生を行い割裂試験に供した。割裂引張試験結果の一覧を表-7に、応力-歪関係の測定結果の一例を図-7に示す。主要な検討結果を以下に示す。

a) 破壊状況：軽量コンクリートにおいては、試験体のいずれか一方の端部にひびわれが発生すると同時に破断に到った。これに対して、川砂・川砂利コンクリートの殆どは、まず、いずれか一方の端部にひびわれが生じ、そのひびわれ幅が漸増しながらも荷重は若干の増加を示し、他端のひびわれ発生をもって破断に到った。

b) 割裂引張強度：いずれの試験体においても割裂引張強度は約30~34 kgf/cm²の範囲であり、粗骨材種類および水セメント比の影響は極めて小さいといえる。

c) 骨材破断率と割裂引張強度の関係

図-8に骨材破断率と割裂引張強度の関係を示す。全体的な傾向としては、水セメント比の小さいもの程、骨材破断率は大きく、かつ割裂引張強度も大きい。さらに、骨材破断率の大きいもの程、すなわち骨材強度の小さいものほど割裂引張強度は小さいといえる。

また、これらの骨材破断率は、純引張試験時の骨材破断率と比較して石炭灰系軽量骨材コンクリートでは約7%小さく、一方、膨張頁岩系および川砂・川砂利コンクリートでは約10%大きい値であり、骨材種類により異なる傾向がみられた。

d) ひびわれ発生時の割裂引張歪度：各種コンクリートにおけるひびわれ発生時の割裂引張歪度は、石炭灰系軽量骨材コンクリートの場合で平均約 480×10^{-6} であり、膨張頁岩系(平均約 420×10^{-6})および川砂・川砂利コンクリート(平均約 340×10^{-6})に比べて、15~40%ほど大きい値を示した。

d) 割裂引張ヤング係数：いずれのコンクリート種類においても純引張試験時において得られたヤング係数の50~60%程度の値を示した。

表-7. 割裂引張試験結果の一覧(シリーズI)

区分	記号	W/C (%)	ひびわれ発生時		割裂引張強度: F_s (kgf/cm ²)	ヤング係数 $\times 10^5$ (kgf/cm ²)	骨材破断率 (%)
			応力度 (kgf/cm ²)	歪度 $\times 10^{-6}$			
軽量 コン クリ ート	FN	50	32.3	426	32.3	1.00	92.3
		55	30.4	554	30.4	1.01	88.0
		60	30.0	473	30.3	1.17	78.3
1種	LN	50	32.8	394	32.8	1.41	78.5
		55	31.0	450	31.0	1.12	73.9
		60	32.3	427	32.3	1.25	76.6
普通 コン クリ ート	GN	50	32.3	359	33.9	1.55	36.0
		55	31.8	331	33.3	1.60	33.3
		60	31.6	327	32.0	1.44	29.3

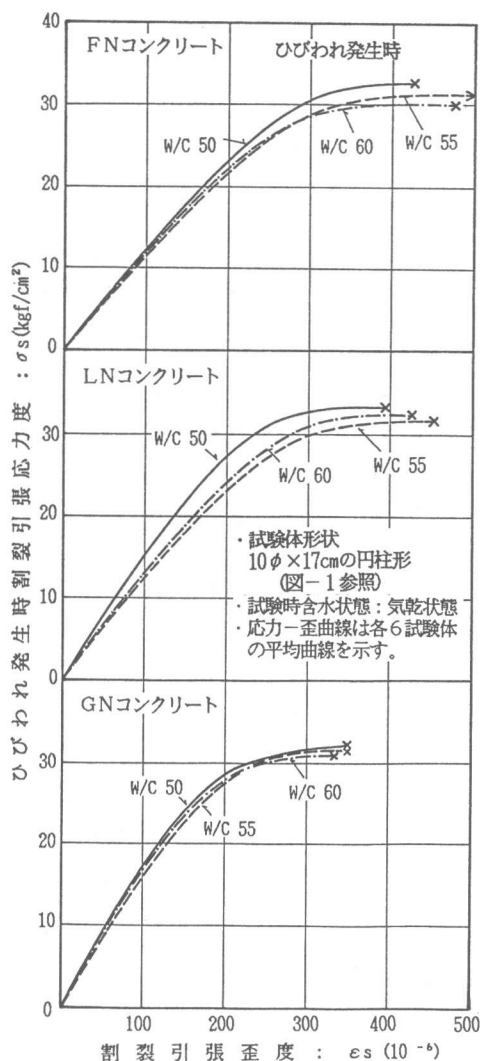


図-7. 割裂引張試験における応力-歪測定結果の一例(シリーズII)

e) 純引張応力ブロック係数：図-9に割裂引張試験における応力-歪のノーマライズ曲線の一例を、表-6に応力ブロック係数を示す。

これによると、割裂引張においては、軽量骨材を用いた場合、また、水セメント比が大きくなるほど応力ブロック係数は大きくなる傾向がみられた。

5. まとめ

石炭灰系および膨張頁岩軽量骨材ならびに川砂利を粗骨材として用いたコンクリートの引張性状について検討を行った。これをまとめると大要以下のものである。

1) 石炭灰系軽量骨材を粗骨材とするコンクリートでは、水中養生終了後の乾燥により引張強度および破断時の歪度は、水中養生終了直後に比べ一時期大幅に低下する。その後、強度は回復するが歪度の回復割合は小さい。

この現象は、コンクリートの水分発散速度硬化乾燥収縮の速度、骨材の特性すなわち骨材の表面性状、強度・剛性等に関連していると推定される。

2) 気乾状態の石炭灰系軽量骨材コンクリートの割裂引張性状は、強度的には膨張頁岩系および川砂利コンクリートと大差なく、変形能力においてはかなり優れているといえる。

3) 現在、コンクリートの引張クリープ、硬化収縮に伴うコンクリートの内部歪の進展状況等に関する実験を継続中であり、今後、これらの結果と併せて総合的な検討を進める予定である。

【参考文献】

- 1) 菊池、向井他『石炭灰軽量骨材を用いたコンクリートの応力-歪関係に関する検討』セメント技術年報 Vol 40 昭和61年
- 2) 菊池、向井他『石炭灰系軽量骨材を用いたコンクリートの基礎的性質に関する検討』第8回 コンクリート工学協会年次講演会論文集 1986
- 3) 菊池、向井『石炭灰系軽量骨材を用いたコンクリートの曲げおよび引張性状』第10回 コンクリート工学協会年次講演会論文集 1988

【謝 辞】 本研究に際し、九電産業株式会社および住友金属鉱山株式会社より骨材の提供を頂きました。また、実験に当たって、昭和63年度本学卒業生 岩崎 薫、鼻戸勝紀、水谷幸司の三君に協力頂きました。ここに厚く謝意を表します。

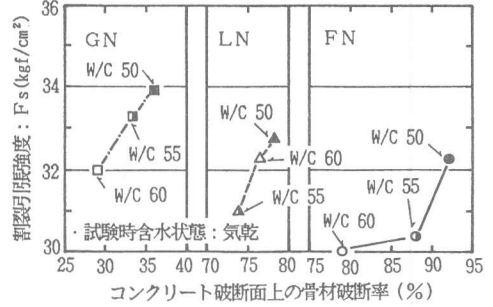


図-8. 各種コンクリートにおける骨材破断率と割裂引張強度の関係(シリーズII)

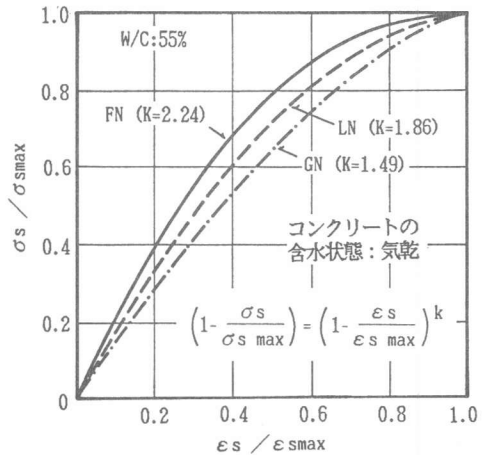


図-9. 割裂引張試験における応力-歪のノーマライズ曲線の一例(シリーズII)