

論文

[1066] 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

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

石炭灰系軽量骨材は、資源の活用化を目標として開発され、石炭焼きボイラーより産出されたフライアッシュを原料とし、これを造粒・焼結して製造される人工軽量骨材である。この種の骨材およびこれを用いたコンクリートの性質については、筆者らの検討結果<sup>1) 3)</sup>によれば、総体的には在来の膨張頁岩系軽量骨材ならびにそのコンクリートと大差ないといえる。しかし、骨材の製造方法の相違に起因する骨材表面および内部構造の差異がコンクリートの性質に及ぼす影響も比較的大きいことも指摘してきた。本報告は、これに継続するもので、コンクリートの曲げおよび引張性状についての検討結果をまとめたものである。なお、本研究は、明治大学科学技術研究所昭和62年度特別研究費により行ったものである。

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。骨材は粗骨材に石炭灰系軽量骨材 (記号：F)、膨張頁岩系軽量骨材 (記号：L) および川砂利 (記号：G)、細骨材に川砂 (記号：N) を用いた。

b) 種類および割合：スランブ18±2cm、空気量5±1%を目標とし、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種類である。各試料コンクリートの割合の概略を表-2に示す。

2-2. 試験体

a) 種類および形状・寸法：曲げ、引張および圧縮試験用の試験体を作製した。各シリーズにおける試験体の種類およびその形状・寸法を表-3に、シリーズII実験における引張試験体の形状・寸法を図-1に示す。

b) 養生および試験前の試験体の調整方法

シリーズIおよびII実験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。

表-1 本検討に用いた骨材の種類およびその主要性質

区分	骨材種類		主要性質				
	種類および記号	FM	絶乾比重	吸水率 (%)	40ton 破砕値 (%)	純引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
人工軽量骨材	石炭灰系膨張頁岩系	F	6.54	1.38	18.4	40.0	11.6
		L	6.11	1.25	20.6	37.9	13.9
普通骨材	川砂利	G	6.84	2.64	0.8	—	—
		N	2.84	2.59	1.2	—	—

表-2 試料コンクリートの種類およびその割合概略

区分	試料コンクリートの種類			W/C (%)	単水量 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材率 (%)
	粗骨材	細骨材	記号			
軽量コンクリート1種	石炭灰系	川砂	FN	50	167	45.8
			55	167	47.5	
			60	165	48.7	
	膨張頁岩系	川砂	LN	50	158	45.9
			55	160	47.6	
			60	159	48.7	
普通コンクリート	川砂利	GN	50	152	37.7	
		55	151	39.3		
		60	164	40.7		

表-3 本検討に用いた試験体種類およびその形状・寸法

シリーズ	試験項目	試験体種類およびその形状・寸法
I	曲げ	・10×10×40cmの角柱形
	割裂引張	・10φ×20cmの円柱形 ・曲げ試験終了後の折片のA片
	圧縮	・10φ×20cmの円柱形 ・曲げ試験終了後の折片のB片
II	純引張	・10φ×17.5cmの円柱形 <sup>1)</sup> ・10×10×17.5cmの角柱形 (図-1参照)
	割裂引張	・10φ×17.5cmの円柱形 <sup>1)</sup>

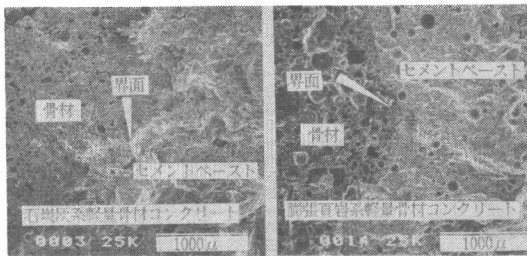


写真-1. コンクリート断面のSEM写真の一例

1) 10φ×20cmの円柱形試験体の上部2.5cmを切断したもの

### 3. 試験方法

#### 3-1. シリーズ I 実験

a) 水分発散量：水中養生終了直後の試験体重を基本重量とし、乾燥による重量減少量を基本重量で除し、その百分率を水分発散量とした。

b) ひびわれ発生状況：所定の水分発散量に達した曲げ試験体について、コンクリート打込み時の底面に発生したひびわれの長さおよび最大幅をクラックスコープを用いて測定し、最大ひびわれ幅の1/2を平均ひびわれ幅とした。

c) 強度および圧縮歪試験：曲げ、割裂および圧縮試験は、当該 J I S に規定する方法により行った。また、曲げ折片試験体を用いた場合、圧縮試験は上・下面に10×10cmの加圧板を介した部分圧縮とし、割裂試験では、上下面に直径30mm、長さ100mmの加圧棒を介して行った。圧縮歪はコンプレッソメーター法により測定した。試験は所定の水分発散量に達した10~15分後に行った。

#### 3-2. シリーズ II 実験

a) 載荷方法 (図-2 a)、b) 参照)：本方法の純引張試験の原理は、アムスラー型万能試験機の引張域にセットした試験体の引張変形を、圧縮域に挿入させたコンクリートの圧縮変形によりコンクリートの引張変形量を制御するものである。同様に、割裂引張試験ではアムスラーの引張域に鉄筋をセットし、この変形により、コンクリートの圧縮および引張変形量を制御する方式とした。

b) 応力および歪の測定方法：試験体の応力は、純引張試験では引張用鋼製治具(B)に、割裂引張試験では荷重検出用リング(H)にそれぞれ貼り付けたワイヤーストレインゲージ(A、D)により検出した。また、試験体(C、J)に生じた歪はそれぞれの試験体に貼り付けたワイヤーストレインゲージ(D、K)により検出した。

c) ひびわれ発生時応力およびその時の引張歪

度の検出：引張用鋼製治具および荷重検出用リングに貼り付けたワイヤーストレインゲージの歪が上昇から下降に転ずる直前の値から、ひびわれ発生時応力を求め、その時の歪をひびわれ発生時引張歪度とした。

表-4 各種試験体の養生方法および試験前の調整方法

シリーズ	養生方法および試験前の調整方法
I	<ul style="list-style-type: none"> <li>・脱型後材令28日まで20℃水中養生を行った。</li> <li>・材令28日以降は、乾燥期間 0~8日の範囲内での試験体の水分発散量 0、0.6、1.2、1.8、2.4、3.6、4.2%を目標とし、20℃、RH60%もしくは30℃気中で乾燥させた。</li> <li>・試験は、材令28~36日の範囲で行った。</li> </ul>
II	<ul style="list-style-type: none"> <li>・脱型後材令28日まで20℃水中養生を行った。</li> <li>・材令28日以降、20℃、RH60% 気中で2~4日間乾燥させた後、引張試験用治具ならびに歪測定用ワイヤーストレインゲージを貼り付けて試験した。</li> </ul>

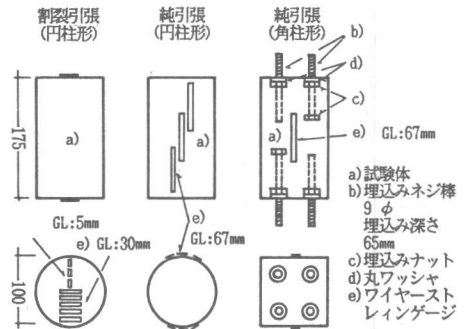


図-1 シリーズ II 実験で用いた各種引張試験体の形状・寸法

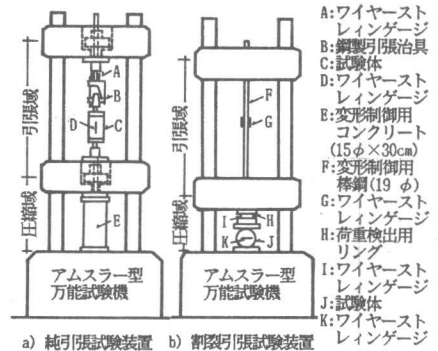


図-2 シリーズ II 実験で用いた各種引張試験装置の概略

表-5 シリーズ I 実験における主要試験結果の一覧 (水分発散量0%試験体について)

試験体種類	区分	記号	W/C (X)	強度試験結果 (kgf/cm <sup>2</sup> )			弾性試験結果	
				曲げ	引張	圧縮	E/10 <sup>4</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	F <sub>cmax</sub> 歪度 (X)
軽量コンクリート	FN	50	45.8	28.9	348	2.16	0.25	
		55	43.0	28.0	307	1.90	0.25	
		60	40.6	23.8	270	1.79	0.28	
	1種	LN	50	52.0	33.2	385	1.93	0.26
		55	47.0	28.1	356	1.97	0.25	
		60	46.2	25.7	305	1.90	0.24	
普通コンクリート	GN	50	53.6	27.1	357	3.47	0.18	
		55	55.9	26.7	354	3.35	0.16	
		60	52.7	27.9	322	3.42	0.17	

#### 4. 実験結果および検討

##### 4-1. シリーズI実験（コンクリートの水分発散量と曲げ強度の関係）

主な試験結果を表-5、図-3、4および5に示す。

##### a) 水分発散に伴うひびわれ発生状況

図-3は、乾燥温度と乾燥時間の積の和（以下、水分発散係数という）と試験体底面に発生したひびわれの長さ（以下、ひびわれ係数という）との関係を示したものである。これによると、20℃気中で乾燥させた試験体では、64時間（水分発散係数1280℃・hr）程度までひびわれの発生はみられなかった。しかし、30℃気中で乾燥させた場合には、水分発散係数540℃・hr以上で、幅0.01mm以上のひびわれの発生がみられた。

##### b) 曲げ強度

水分発散量と諸強度の関係を図-4に示す。これによると、軽量コンクリート1種の水分発散に伴う曲げ強度の低下率は、水分発散量が約0.6%（水分発散係数：540℃・hr以下）時で、石炭灰系および膨張頁岩系でそれぞれ平均8.3%、22.4%であり、普通コンクリートでは32.5%であった。この時、軽量コンクリートではいずれもひびわれ発生は認められず、普通コンクリートの一部にひびわれの発生が認められた。その後、水分発散に伴い曲げ強度は徐々に低下する傾向を示すが、水分発散量4.5%以下における曲げ強度低下率の全平均は、石炭灰系、膨張頁岩系および普通コンクリートでそれぞれ約24%、33%、28%であった。このように、石炭灰系軽量コンクリートで曲げ強度低下率が他のコンクリートに比べて小さかった原因としては、この種の骨材では骨材外殻にガラス質のシェルが構成されておらず、骨材内部の空隙も連続気泡で形成されていると考えられることなどから、モルタル中の水分発散に対して、骨材内部からの水分の補給が他骨材に比べて比較的容易であり、表面からの乾燥によるひびわれ発生を抑制しているとも推察される。

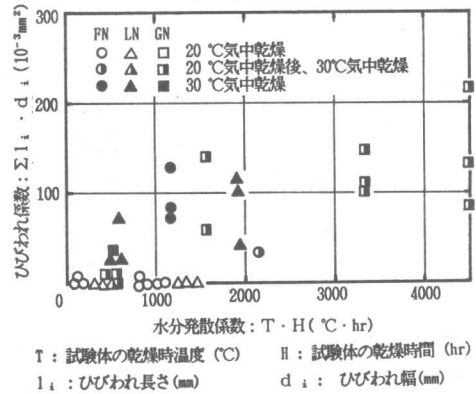


図-3 水分発散係数とひびわれ係数の関係（シリーズI実験）

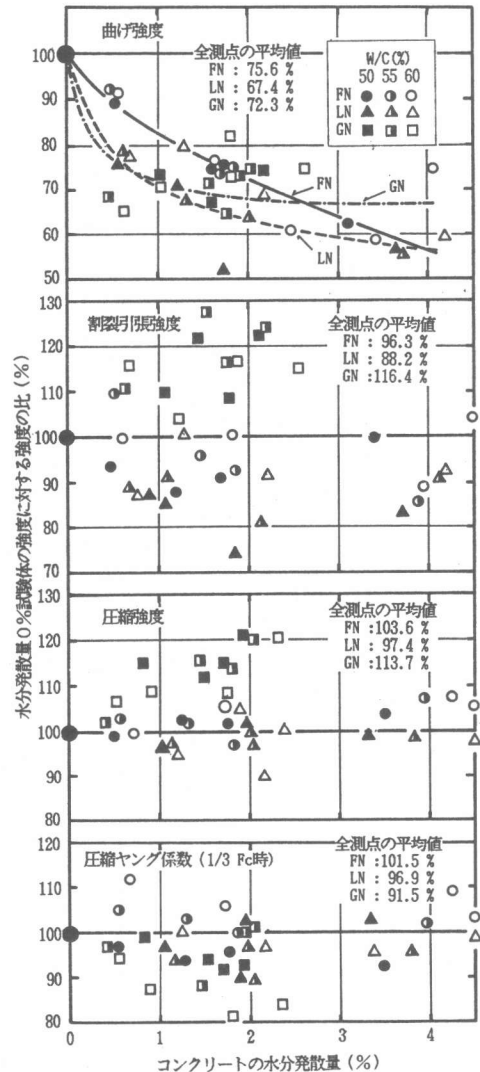


図-4 コンクリートの水分発散量と諸強度の関係（シリーズI実験）

b) 割裂引張強度 (図-4 参照)

水分発散に伴う割裂引張強度の変動は、軽量コンクリート1種では全体的には低下する傾向があり、その時の強度低下率は石炭灰系および膨張頁岩系で、それぞれ平均約4%、12%であった。これに対して、普通コンクリートでは水分発散に伴い強度は増加する傾向がみられ、平均で約16%の強度増を示した。一方、曲げ折片を用い、丸鋼を介して行った割裂引張試験では、図-5にもみられるように、強度の変動は大きいものの、普通コンクリートの強度比の全平均は99%であり、水分発散による影響はみられなかった。また、この試験方法による軽量コンクリート1種の強度低下率は10~12%であった。

4-2. シリーズII実験 (引張性状について)

主な試験結果を表-6、図-6、7および8に示す。

a) 引張強度：純引張強度はいずれの骨材を用いた場合にも20kgf/cm<sup>2</sup>前後であり、骨材種類および水セメント比の影響は殆どみられなかった。このことは、本実験においては水中養生終了後から試験開始までの間に、引張治具およびワイヤーストレインゲージ貼り付けのため2~4日間程度の乾燥期間を要しているため、シリーズIで見られたような水分発散に伴う強度低下が生じ骨材種類、水セメント比等の及ぼす影響が弱められたためと推察される。

一方、割裂引張試験体に関しては、まず、コンクリート打込み上面側にひびわれが発生(この時の荷重をひびわれ発生荷重とした)するが、荷重は漸増しながら、ついでコンクリート打込み下面側にひびわれが発生し、コンクリートの割裂破壊に至った。全体的に水セメント比の影響は認められなかったものの、普通コンクリートでは、軽量コンクリート1種の強度(平均20.4kgf/cm<sup>2</sup>)に比べ、約30%大きい強度を示した。また、割裂引張強度と純引張強度の関係については、図-6にもみられるように、一般的にいわれる割裂引張強度>純引張強度の関係は普通コンクリートではみられたものの、軽量コンクリート1種ではみられなかった。この原因としては、本検討においては、ひびわれ発生時の応力度を割裂引張強度としたためといえる。

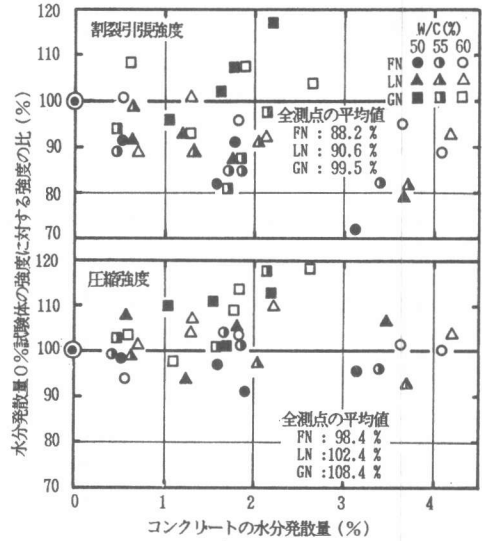


図-5 コンクリートの水分発散量と諸強度の関係(曲げ折片試験体による結果)(シリーズI実験)

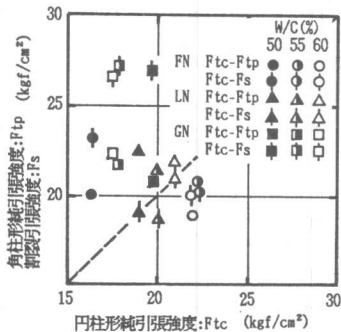


図-6 試験方法及各種引張強度の関係 (シリーズII実験)

表-6 シリーズII実験における主要試験結果の一覧

試験体種類		純引張試験結果						割裂引張試験結果			
区分	記号	W/C (%)	円柱形試験体			角柱形試験体			円柱形試験体		
			Ft	Et	e <sub>t</sub>	Ft	Et	e <sub>t</sub>	Fs	Es	e <sub>s</sub>
軽量 コン クリ ート	FN	50	16.5	2.43	150	20.0	2.32	172	23.1	0.94	490
		55	22.3	1.88	187	20.8	1.92	166	20.3	0.77	610
		60	22.0	2.06	162	18.8	2.29	137	20.1	0.98	570
1種	LN	50	18.9	2.35	177	22.6	2.24	173	19.1	0.88	265
		55	19.9	2.66	131	21.4	2.52	161	18.7	0.98	308
		60	20.7	2.72	140	22.0	2.44	155	21.2	1.00	253
普通 コン クリ ート	GN	50	19.7	3.38	118	20.9	2.91	131	26.8	1.83	393
		55	17.8	3.62	130	21.8	2.77	147	27.3	1.32	376
		60	17.5	3.14	133	22.3	2.64	155	26.8	1.74	413

Ft、Fs: 引張ひびわれ発生時応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 Et、Es: Ft/3 時の引張ヤング係数 (10<sup>5</sup>kgf/cm<sup>2</sup>)  
 e<sub>t</sub>、e<sub>s</sub>: 破断時引張歪度 (10<sup>-4</sup>)

b) 引張歪度

i) 純引張試験における引張歪度

図-2 a) に示す方法によるコンクリートに生ずる引張歪の制御は、破断直前までは効果的であり、ひびわれ発生直前の若干の塑性変形域を測定できた。しかし、破断時には引張用鋼製治具の引張変形の回復が急激に生じ、そのため、円柱形および角柱形試験体のいずれの場合においても、塑性域以降における引張変形の測定は困難であった。

引張歪度と引張応力度の関係を図-7 示す。図中の応力-歪曲線は、ワイヤーストレインゲージ内で破断した試験体について、それぞれ応力-歪関係を求め、これらの平均値から求めた曲線を示したものである。これによると、本方法により測定された円柱形試験体のひびわれ発生時の引張歪度は石炭灰系、膨張頁岩系および普通コンクリートでそれぞれ  $162 \times 10^{-6}$ 、 $156 \times 10^{-6}$ 、 $136 \times 10^{-6}$  であり、前2者において大きな引張変形能を有していることが確認された。

また、純引張角柱試験体では、その殆どがゲージ中央で破断したにもかかわらず、ひびわれ発生時の歪は円柱形の歪を若干上回る程度であった。

ii) 割裂引張試験における引張歪度 (図-7 参照)

図-2 b) に示す方法により、試験体にひびわれ発生後においても引張変形量の制御は可能であった。いずれのコンクリート種類においても、ひびわれ発生時応力度の90~95%に相当する応力度までは、ほぼ直線的な応力-歪関係を示し、その時の引張歪度は  $120 \sim 150 \times 10^{-6}$  であった。

その後は荷重の増加が殆どみられないまま引張塑性変形が進行し、ひびわれ発生に至った。ひびわれ発生時の引張歪度は、石炭灰系、膨張頁岩系および普通コンクリートで、それぞれ平均  $557 \times 10^{-6}$ 、 $275 \times 10^{-6}$ 、 $394 \times 10^{-6}$  であり、石炭灰系軽量コンクリートで最も大きな変形能を有することが確認された。また、これらの結果と純引張試験の結果を総合すると、コンクリートが引張塑性域に達する時の歪度は、普通コンクリートで  $100 \sim 120 \times 10^{-6}$  程度、軽量コンクリート1種で  $120 \sim 150 \times 10^{-6}$  程度と推察される。

iii) 引張ヤング係数

ひびわれ発生時応力度の1/3 時のヤング係数は、膨張頁岩系および普通コンクリートでは円柱形試験体に比べて角柱形試験体で小さくなる傾向を示したが、石炭灰系ではほぼ同程度かやや大きめの値を示した。また、割裂引張試験により得られた引張ヤング係数は円柱形試験体の値の1/2 程度の値を示したが、この原因については試験方法の相違によるものと考えられるが、今後の検討を要するところである。

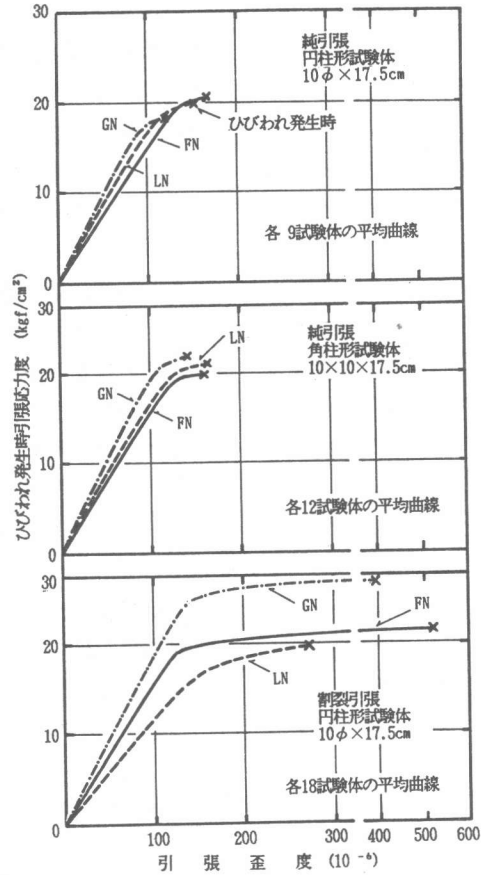


図-7 各種試験体における応力-引張歪曲線 (シリーズII実験)

iv) 割裂引張試験における歪度分布について

割裂引張試験における試験体円断面上の引張および圧縮歪度の分布の一例を図-8に示す。これによるとひびわれ発生荷重 ( $F_s$ ) の2/3までは中央と周辺部の引張歪度にあまり大きな差異はみられない。しかし、0.9  $F_s$  時以降では中央部の歪が急激に大きくなり、ひびわれ発生に至ることが判明した。また、石炭灰系軽量コンクリートにおいては、0.9  $F_s$  時まで、膨張頁岩系および普通コンクリートに比べやや小さな引張歪を示しているにもかかわらず、ひびわれ発生時の歪度でむしろ大きな値を示した。

これは筆者らの過去の実験<sup>2)</sup>における通常の圧縮試験体を用いた時の応力-歪関係において観察された結果と一致するものであり、石炭灰系軽量骨材の特質、すなわち骨材表面が粗いことによる骨材とモルタルの界面における良好な附着性状に起因しているためと推察できる。

(写真-1参照)

5. まとめ

以上の検討結果をまとめると、大要次のようなことがいえる。

- 1) 石炭灰系軽量骨材を用いたコンクリートは、コンクリート中の水分発散の進行に伴い曲げ強度は次第に低下するが、その低下の割合は膨張頁岩系軽量コンクリートおよび普通コンクリートに比べて幾分小さく、乾燥に伴う圧縮強度、ヤング係数および割裂引張強度の変動も小さい。
- 2) また、純引張強度および割裂引張強度は膨張頁岩系軽量コンクリートと同程度であるが、引張変形能は、すぐれているといえる。
- 3) これらの現象は主としては、石炭灰系軽量骨材の表面性状が粗く、骨材外殻に溶解したガラス層が形成されていないなどの、この種の骨材の特質に起因すると考えることができる。

【参考文献】

- 1) 向井、菊池他『石炭灰軽量骨材を用いたコンクリートおよびRC部材の力学的性状に関する研究』昭和60年度 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)
- 2) 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
- 3) 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』1986 第8回コンクリート工学協会年次講演会論文集
- 4) J.A.HANSON『Effects of Curing and Drying Environments on Splitting Tensile Strength of Concrete』1968 ACI JOURNAL/ JULY TITLE NO.65-40 pp.535~543

【謝辞】 本研究に際し、石炭灰系軽量骨材を九電産業株式会社および住友金属鉱山株式会社より提供頂きました。また、実験に際しては、昭和62年度本学卒業生 鈴木康一、照海清貴、平沢祐行の3君に協力を頂きました。ここに厚く謝意を表します。

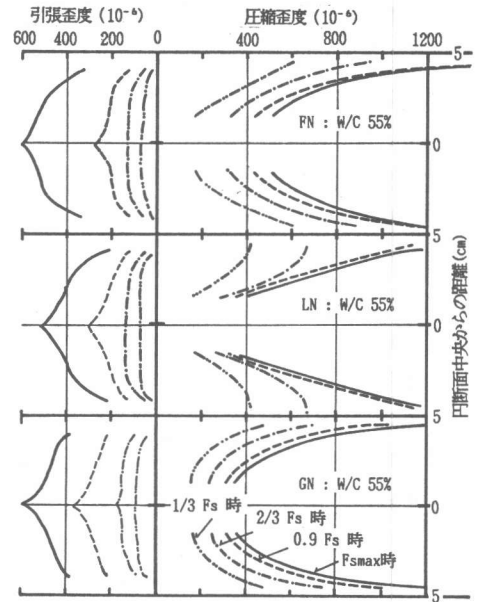


図-8 割裂引張試験体の円断面上における引張および圧縮歪度分布状況の一例(シリーズII実験)