

コンクリートの破壊進行領域の性状に及ぼす骨材寸法の影響

大塚浩司*・勝部宏明**

骨材の最大寸法を種々に変えたコンクリートで製作した供試体を引張り載荷し、切欠き先端近傍の内部をX線造影撮影法を用いて調べる実験を行った結果、微細ひび割れ群からなる破壊進行領域が発生・伸展する状況の検出に成功した。さらに、破壊進行領域の幅は、骨材の最大寸法の増加に応じて広がること、破壊進行領域で消費される単位体積当たりの破壊エネルギー値は骨材の最大寸法に関わらずほぼ一定となることなどを明らかにした。

Key Words : fracture process zone, x-ray, internal cracks, aggregate size, fracture energy

1.はじめに

鉄筋コンクリート構造物の破壊は、一般に、コンクリートのひび割れに起因することが多い。とくに、斜め引張、パンチングシアー、ねじり、割裂付着などの脆性的な破壊はひび割れの発生・成長が部材の破壊を直接的に支配する。このような破壊を取り扱うには破壊力学的考え方を導入するとよいと考えられるが、現在の設計には、ほとんどそれが用いられていない。それは、金属やガラスのように均質で脆性的な材料に適用され発展してきた破壊力学を、そのままの形でコンクリートのように幾重にも複合された構造を持ち、ひび割れによるひずみ軟化現象を生じ、ひび割れ先端における非線形領域が部材寸法に比べて無視できない大きさとなる材料には、適用できないからである。しかし、破壊力学的考え方をコンクリート構造物の設計に取り入れれば、設計の精度を向上できる等の顕著な利益があると考えられることから、近年、破壊力学をコンクリートに応用するための研究が盛んに行われている。

コンクリートの破壊力学を確立するためには、まずその破壊過程を明確にし、その破壊進行領域の性状を明らかにすることが重要である。これまで、コンクリートの破壊進行領域の状態については、光学顕微鏡、電子顕微鏡、ホログラフィ、レーザースペックル、AEなどの方で観察されているが、AEを除いて、それらの多くはコンクリートの表面を観察したもので、コンクリート内部の破壊進行領域の性状に関する研究は少なく、未だ十分に明らかにされているとはいえない。

本研究は、粗骨材の最大寸法や種類を変えたコンクリートで作製した引張供試体の内部において発生・成長

する微細ひび割れを、X線造影撮影法を用いて検出するとともに、荷重とひび割れ開口変位との関係から破壊エネルギーを求める実験を行い、コンクリートの破壊進行領域の性状に及ぼす粗骨材の寸法や種類の影響を明らかにすることを目的としている。

2. 実験材料および実験方法の概要

(1) 実験材料および供試体

実験に用いたセメントは早強ポルトランドセメントである。細骨材は川砂を用い、粗骨材は砕石1種と川砂利1種を用いた。また骨材の最大寸法は、モルタルの場合が5 mm、砕石コンクリートの場合が10 mm、15 mm、20 mm、川砂利コンクリートの場合が10 mm、15 mm、20 mm、25 mmである。コンクリートの配合はすべて水セメント比50%とした。

供試体は、図-1に示すような形状をもつ引張供試体である。供試体の一辺中央部に引張載荷用のL型フックを取り付けるためのくぼみを設け、さらにその中央部に、図に示すような幅3 mm、深さ50 mm(Aタイプ)または120 mm(Bタイプ)の切欠きをダイヤモンドソーを用いて設けた。また、X線造影撮影のための造影剤注入パイプおよび注入孔(直径2 mm)を図のような間隔で設置した。供試体の寸法は、表-1に示すような、50×250×250 mmのAタイプ供試体と90×350×350 mmのBタイプ供試体の2種類である。X線造影撮影実験に用いた供試体は、Aタイプ26体(砕石コンクリート12体、砂利コンクリート14体)、Bタイプ11体(砕石コンクリート)、計37体である。また、破壊エネルギー測定のためのひずみ制御載荷実験に用いた供試体は全てAタイプの計28体(砕石コンクリート16体、砂利コンクリート12体)である。供試体は、乾燥の影響を除くために、実験直前まで湿潤状態とした。

(2) 載荷方法

* 正会員 工博 東北学院大学教授 工学部土木工学科
(〒985 多賀城市中央1-13-1)

** 正会員 工修 宮城県黒川高等学校教諭

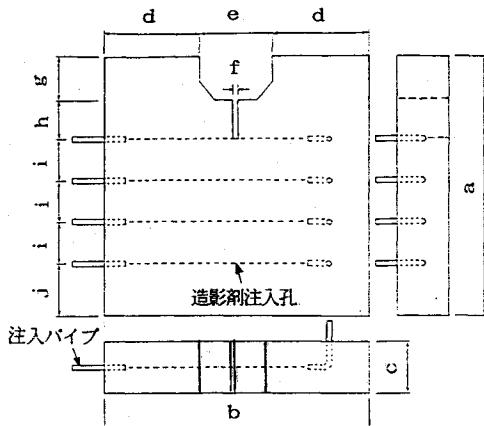


図-1 供試体形状

表-1 供試体寸法 (mm)

	Aタイプ	Bタイプ
a	250	350
b	250	350
c	50	90
d	90	145
e	60	60
f	3	3
g	30	30
h	50	120
i	40	50
j	50	40

載荷装置は図-3に示すように、L型フックを上部および下部クロスヘッドに取り付け、自重の影響を除くために、供試体を動滑車を用いて吊るし、自重の半分の重りで安定させた。また図中のA, Bの部分は、ヒンジとし、供試体に余分な反力が作用しないように工夫した。さらに、荷重を測定するためのロードセルと、ひび割れ開口変位を測定するためのクリップゲージが取り付けてある。

(3) X線造影撮影方法

コンクリート内部に発生した微細ひび割れを非破壊的に検出するためのX線造影撮影システムは図-2に示すとおりで、X線発生装置からX線を放射し、イメージアンプリファイアで受け、制御室のモニターで画像を観察するTVモードと、供試体に直接フィルムを張り付けて撮影を行うフィルムモードの2種類がある。造影剤は市販の医学用血管造影剤の中から比較試験により選定したもの¹⁾および工業用造影剤として独自に開発したものを使用した。

TVモードでは、実験供試体中央よりX線発生装置を60cm程度、イメージアンプリファイアを30cm程度離し、X線を電圧60KV程度、電流2mAの条件で連続的に照射し、画像処理の施されたX線TVモニター画面により、供試体内の微細ひび割れ発生状況をリアルタイムで観察でき、VTRで録画したり、その画像をポ

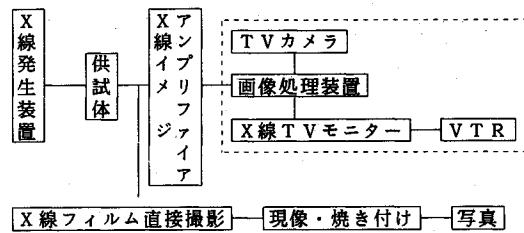


図-2 X線システム

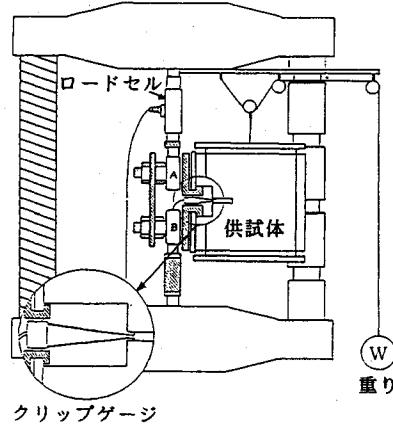


図-3 引張載荷装置

ラロイドカメラで出力することもできる。

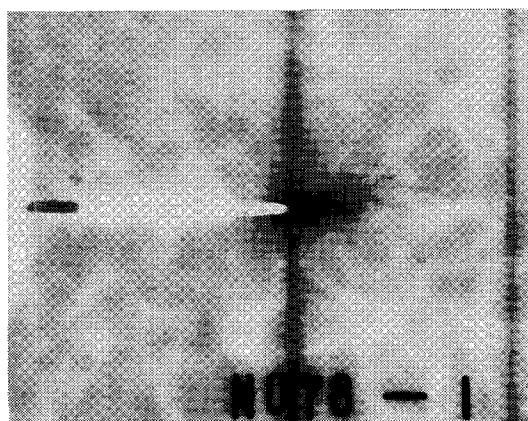
フィルムモードでは、実験供試体中央よりX線発生装置を、20cmから60cmの範囲の距離に置き、X線電圧100KV、電流2mA、照射時間3分から20分の範囲で照射し、供試体に直接密着させた工業用X線フィルムに供試体内的微細ひび割れ発生状況を直接撮影することができる。このフィルムモードでは、撮影のためのX線照射中、荷重を一定に持続しなければならないという欠点はあるが、TVモードよりも微細なひび割れを鮮明に観察することができる利点がある。本論文では、主としてこのフィルムモードによる実験の結果について述べる。

3. 実験結果および考察

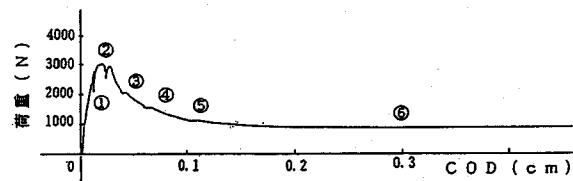
(1) 破壊進行領域の伸展状況

図-4は、一例として、粗骨材最大寸法が20mmの碎石コンクリートを用いたAタイプ供試体の場合の荷重-ひび割れ開口変位関係を示す。図の曲線上の①～⑥の点でX線造影撮影を行った。

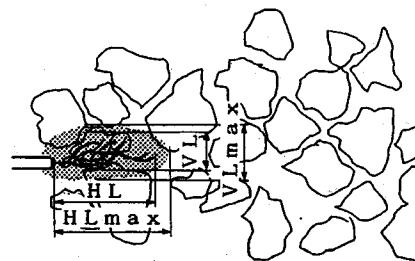
写真-1は、図-4の曲線上の①の点でX線造影撮影を行ったものである。写真上において黒く写っている部分が造影剤が注入されている部分であり、縦方向に等間隔に造影剤注入孔が配置されているのが分かる。また造影剤が注入されている部分ほど黒くはないが、薄く黒くまだらに写っている部分は骨材である。この時点は、最



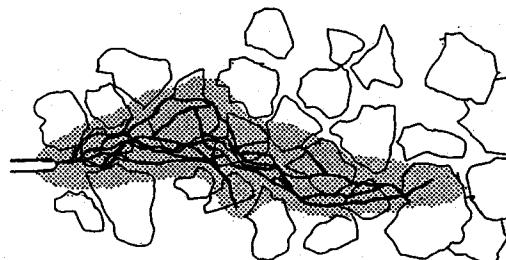
写真一1 撮影点①における内部ひび割れ状況



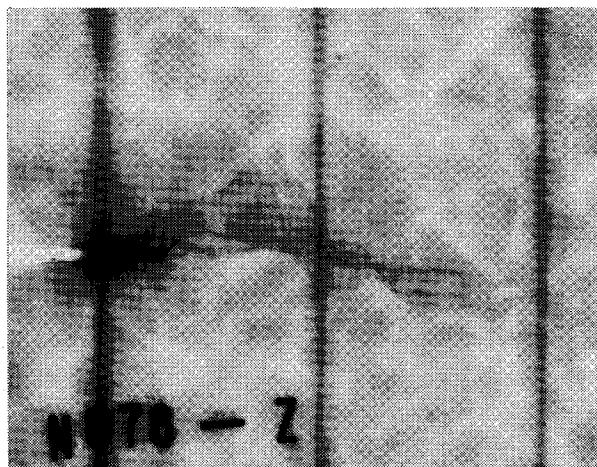
図一4 荷重-ひび割れ開口変位曲線



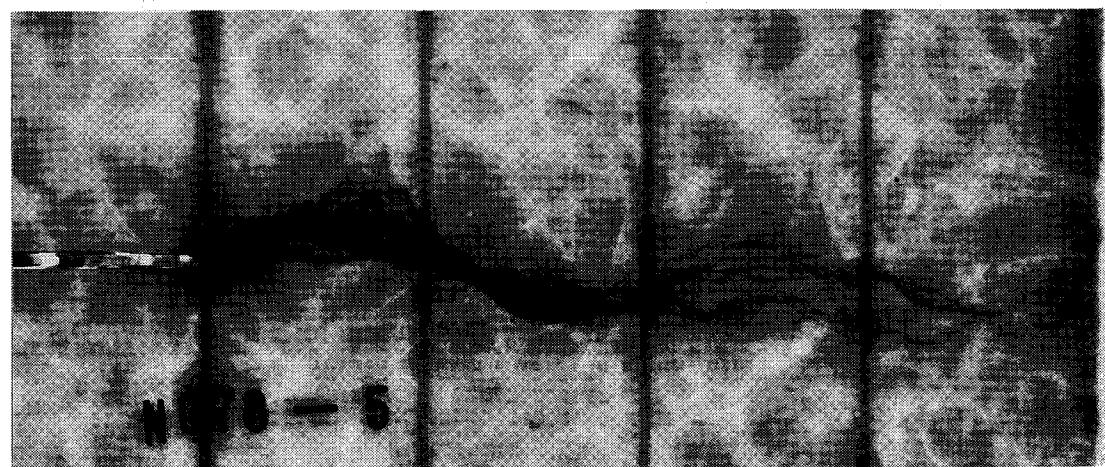
図一5 写真一1のトレース



図一6 写真一2のトレース



写真一2 撮影点②における内部ひび割れ状況



写真一3 撮影点⑤における内部ひび割れ状況

大荷重のおよそ 80% であるが、写真から分かるように、切欠き先端から微細なひび割れが複数発生しているのが観察された。印画紙にプリントした写真ではあまり明瞭には見られないが、直接 X 線フィルムをシャーカスチン（読影装置）で観察すると、この微細ひび割れ群の周囲に、明らかに他とは明度の差が生じている領域が見られた。この領域は、さらに微細なひび割れ群に造影剤が浸透したためにできた領域と考えられたので、この部分も破壊進行領域に含めて検討した。なお、この雲状領域の発生には、他の原因、例えばセメント細孔に造影剤が浸透したため、なども考えられるが、この点の解明は今後の課題とした。

図-5 は、この写真-1 のフィルムをシャーカスチンを用いてトレースしたものである。図中の影をつけた部分は、写真上でひび割れの周辺に広がる雲状領域を表したものである。ノッチ先端から発生した微細ひび割れは、荷重の増加につれて複数に枝分かれをし、複雑に絡み合いながら成長している。ひび割れ伸展方向のひび割れ領域および雲状領域の長さの最大値をそれぞれ HL , HL_{\max} とし、ひび割れ伸展方向に対して直角方向のひび割れ領域および雲状領域の幅の最大値を VL , VL_{\max} とした。このとき $HL=27 \text{ mm}$, $HL_{\max}=30 \text{ mm}$, $VL=7 \text{ mm}$, $VL_{\max}=12 \text{ mm}$ となった。

写真-2 は、図-4 の曲線上の②の点で X 線造影撮影を行ったもので、荷重が最大点に達した場合である。進展したひび割れ群は、ある幅をもつひび割れ領域を形成し、その領域の幅 VL および VL_{\max} はこの時点でき最大となつた。

図-6 は、写真-2 のフィルムをトレースしたもので、このとき $HL=84 \text{ mm}$, $HL_{\max}=92 \text{ mm}$, $VL=16 \text{ mm}$, $VL_{\max}=25 \text{ mm}$ であった。

写真-3 は、図-4 の曲線上の⑤の点で X 線造影撮影を行ったものである。伸展してきたひび割れ領域の幅は、軟化領域に入るとやや狭くなる傾向があり、ひび割れは供試体のほぼ先端までに達していた。このとき $HL=160 \text{ mm}$, $HL_{\max}=170 \text{ mm}$, $VL=35 \text{ mm}$, $VL_{\max}=45 \text{ mm}$ であった。

(2) 破壊進行領域の性状に及ぼす骨材寸法の影響

破壊進行領域の性状に及ぼす骨材最大寸法の影響を調べた結果を以下に示す。

この実験には、モルタルと碎石コンクリートを使用した。モルタル供試体の骨材最大寸法 (G_{\max}) は 5 mm 、碎石コンクリート供試体の G_{\max} は、 10 mm , 15 mm , および 20 mm の 3 種を用いた。また、供試体の種類は、A タイプ供試体と B タイプ供試体との 2 種類用いた。

図-8 は、骨材最大寸法 G_{\max} が 5 mm から 20 mm までの範囲で異なる 4 種のコンクリートを用いた A タイプ供試体におけるひび割れ伸展状況を X 線フィルムの

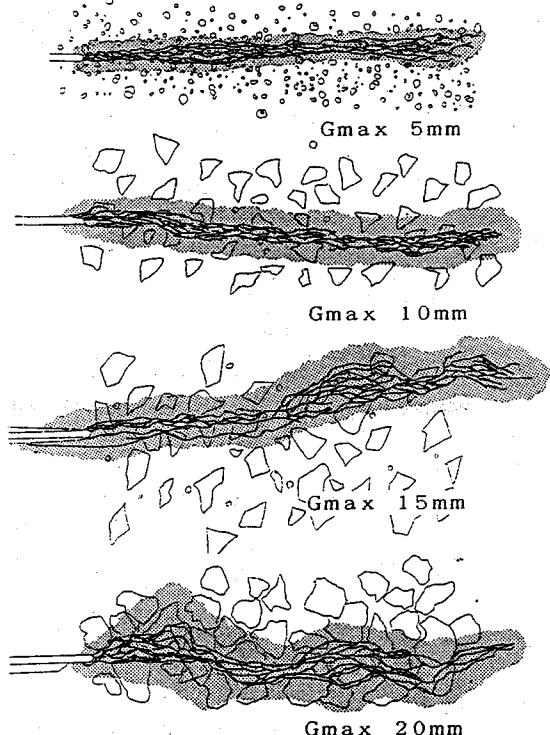


図-8 ひび割れ領域に及ぼす G_{\max} の影響

トレース図で示したものである。これらは何れも載荷の最終段階に近く、ひび割れは他端に達する直前の状態である。これらの図に示されるように、骨材の G_{\max} によってひび割れの伸展状況はかなり異なる。 G_{\max} が大きくなるとひび割れ領域の幅 VL および VL_{\max} も増加する傾向がみられる。 G_{\max} が 5 mm の場合のひび割れは、あまり蛇行せず、絡み合いながら 1 本の束状のひび割れ群となってほぼ直線的に伸展している。ところが、 G_{\max} が 20 mm の場合のひび割れは、骨材に沿って蛇行するものもあり、全体にひび割れ群の幅が大きくなり、またその幅の変動も大きくなる傾向が見られる。 G_{\max} が 10 mm および 15 mm の場合は、 5 mm と 20 mm との中间の性状を示している。

表-3 は、A タイプ供試体の場合の G_{\max} とひび割れ領域の幅 VL および VL_{\max} を示す。また、図-9 はそれらの関係を示す。これらの表および図から分かるように、 G_{\max} の増加に伴って VL , VL_{\max} もほぼ線形関係で増加する。 G_{\max} に対する VL , VL_{\max} の比率を比較すると、 G_{\max} が 5 mm の場合にはそれらは G_{\max} の 2.6 倍および 4.0 倍となるが G_{\max} が 20 mm の場合にはそれらは 1.1 倍および 1.6 倍となり、骨材の最大寸法が増加するとその比率は減少する傾向が見られる。これは、A タイプ供試体の厚さが 50 mm であり、 G_{\max} が大きいコンクリートに対しては供試体厚さが十分でなかったことも考

表-3 G_{\max} と破壊進行領域の大きさ
(A タイプ, 碎石コンクリート)

G_{\max} (mm)	VL (mm)	VL _{max} (mm)	VL/G _{max}	VL _{max} /G _{max}
5	11	17	2.2	3.4
	12	12	2.4	2.4
	10	15	2.0	3.0
	19	35	3.8	7.0
平均	13	20	2.6	4.0
10	9	19	0.9	1.9
	16	25	1.6	2.5
	平均	13	22	1.3
15	16	25	1.1	1.7
	15	24	1.0	1.6
	15	23	1.0	1.5
平均	15	24	1.0	1.6
20	25	30	1.3	1.5
	14	28	0.7	1.4
	26	35	1.3	1.8
平均	22	31	1.1	1.6

表-4 G_{\max} と破壊進行領域の大きさ
(B タイプ, 碎石コンクリート)

G_{\max}	VL (mm)	VL _{max} (mm)	VL/G _{max}	VL _{max} /G _{max}
5	16	23	3.2	4.6
	13	22	2.6	4.4
	11	20	2.2	4.0
	10	20	2.0	4.0
平均	13	21	2.5	4.2
10	24	35	2.4	3.5
	22	30	2.2	3.0
	22	30	2.2	3.0
平均	23	32	2.3	3.2
15	20	30	1.3	2.0
	21	30	1.4	2.0
	21	30	1.4	2.0
平均	21	30	1.4	2.0
20	25	50	1.3	2.5
	20	45	1.0	2.3
	23	48	1.1	2.4

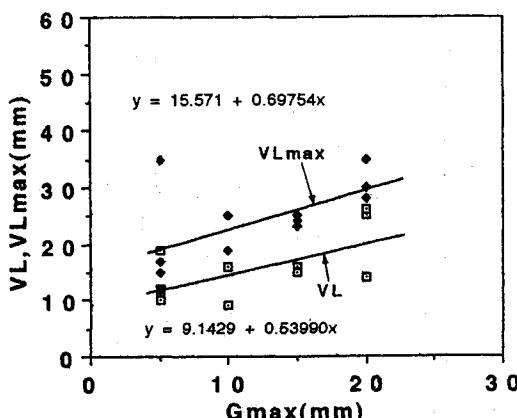


図-9 G_{\max} と破壊進行領域の幅との関係 (A タイプ)

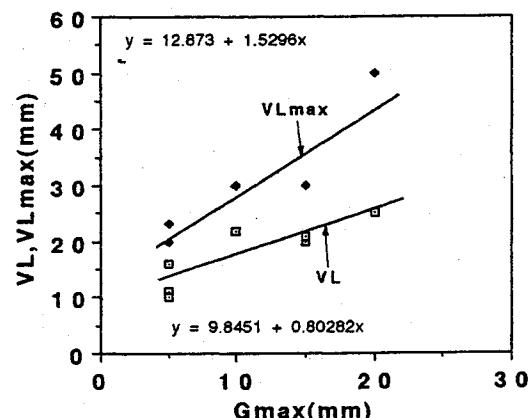


図-10 G_{\max} と破壊進行領域の幅との関係 (B タイプ)

えられる。そこで、供試体の厚さが 90 mm と大きい B タイプ供試体を用いて、同様の実験を行った。

表-4 は、B タイプ供試体の場合の G_{\max} とひび割れ領域の幅との示す。また、図-10 はそれらの関係を示す。これらの表および図から分かるように、 G_{\max} の増加に伴って VL , VL_{\max} も、A タイプ供試体の場合と同様に、ほぼ線形関係で増加するが、直線に対する値のばらつきの程度はやや小さくなる。 G_{\max} に対する VL および VL_{\max} の比率は、 G_{\max} が 5 mm のとき 2.5 倍および 4.3 倍となり、表-3 の A タイプ供試体の場合と比べてもそれほどの違いはみられない。しかし、 G_{\max} が 10 mm より大きくなると、それらの比率は大きくなり G_{\max} が 20 mm のときの VL_{\max} は G_{\max} の 2.4 倍となっている。しかし、その比率は G_{\max} が 5 mm の場合に比べてかなり小さい。このような実験の場合、ひび割れ伸展時の内部拘束メカニズムが活性化され、破壊進行領域が十分形成されるには供試体の幅が G_{\max} の 4 倍程度以上必要だ

との説⁴⁾があるが、本実験の結果からみると、その値をさらに大きくする必要があるのではないかと考えられる。

(3) 破壊エネルギーに及ぼす粗骨材の最大寸法の影響

図-11 は、 G_{\max} が 5 mm のモルタルおよび G_{\max} が 10, 15 および 20 mm の碎石コンクリート供試体各 1 体から得られた荷重-ひび割れ開口変位曲線をオーバープロットしたものである。この図から、荷重-開口変位曲線の軟化領域の形状に及ぼす G_{\max} の影響を比較すると、 G_{\max} が大きくなると軟化領域に入ってからの傾きが緩くなり曲線下の面積が増加していく傾向がみられた。

表-5 は、 G_{\max} が 5 mm のモルタルおよび G_{\max} が 10, 15 および 20 mm の碎石コンクリート供試体各 4 個の荷重-ひび割れ開口変位曲線下の面積を破壊に用いられたエネルギーとし、それを破壊投影面積（切欠き先端から水平方向供試体端部までの距離に供試体厚さを乗じた面

表-5 G_{\max} と破壊エネルギー（A タイプ、碎石コンクリート）

G_{\max} (mm)	圧縮強度 (MPa)	G_F		$W_F (\times 10^3)$	
		(N/m)	平均	(N/m ²)	平均
5	30.0	64	53	42	
	30.0	51	42	51	
	30.0	61	51	49	49
	30.0	59	59	49	49
10	30.0	93	62	77	
	34.5	116	77	93	
	34.5	139	93	82	
	34.5	141	122	94	82
15	33.0	149	76		
	34.1	143	73		
	34.1	145	74		
	34.1	175	153	90	78
20	36.6	176	80		
	32.7	189	86		
	28.7	156	71		
	28.7	151	168	68	76

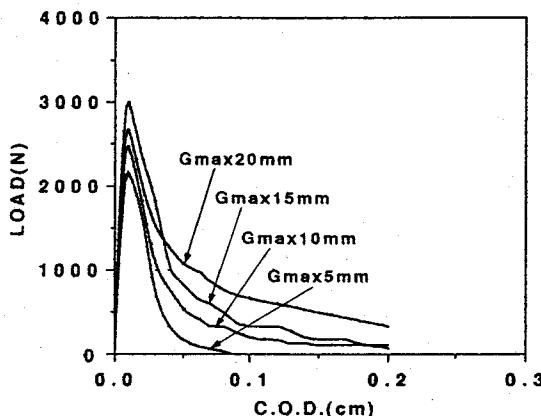


図-11 荷重-ひび割れ開口変位曲線

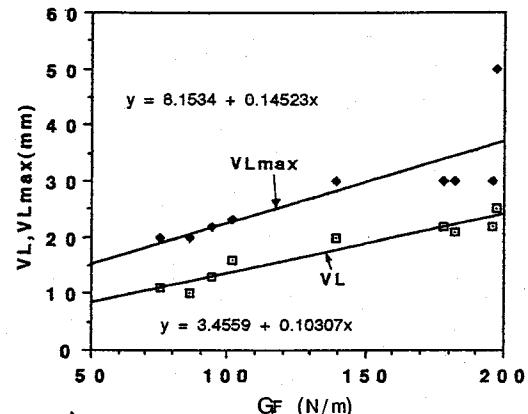
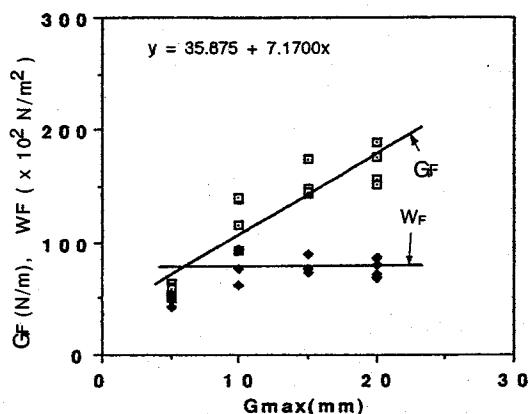


図-12 破壊進行領域の幅と破壊エネルギーとの関係（碎石）

図-13 G_{\max} と破壊エネルギーとの関係（碎石）

積)で除して算出した破壊エネルギー G_F を示す。この表から分かるように、コンクリートの圧縮強度には多少のばらつきがあるにも関わらず、 G_{\max} が大きくなるにつれて、 G_F の値も増加している。

図-12 は、この算出された G_F と前述の破壊進行領域の垂直幅 VL および VL_{\max} との関係を示す。この図から、明らかに破壊エネルギー G_F は破壊進行領域の幅に関係していることが分かる。このことから、破壊のエネルギーは、破壊の一面ではなくて破壊領域の全体（体積）で消費されているのではないかと推定された。そこで、破壊に用いられたエネルギーを、図-8 で示した、破壊進行領域の実測結果（雲状領域の垂直幅の平均値）に供試体厚さを乗じた体積で除して破壊エネルギー W_F を算出した結果を表-5 に示す。

図-13 は、 G_{\max} と算出した G_F および W_F との関係を示す。この図に示すように、 G_F は、直線的に増加するが、 W_F は、 $G_{\max} 5 \text{ mm}$ の場合を除いてほぼ一定値となつた。これは、破壊エネルギーが破壊領域の体積で平均的に消費されたとする考えが正しいことを示していると思われる。なお、モルタルの場合の値が他の最大寸法

のコンクリートの場合とやや異なるのは、モルタルが比較的均質で、破壊領域の幅が狭く、破壊がかなり脆性的であるためであると考えられる。

（4）破壊進行領域の性状に及ぼす骨材の種類の影響

粗骨材に川砂利を用いたコンクリートで、前述の碎石コンクリートによる（1）、（2）および（3）と同様な実験を行い、破壊進行領域の性状に及ぼす使用骨材の種類の影響を調べた結果を以下に示す。

図-14 は、 G_{\max} が 10, 20 および 25 mm の砂利コンクリートの A タイプ供試体を用いて、X 線造影撮影によって観察された微細ひび割れ発生状況のトレースを示す。図-8 の碎石コンクリートの場合はひび割れが骨材を貫通して伸展するものが多くみられが、この図のように砂利コンクリートの場合は、微細ひび割れが骨材を迂回して蛇行するものが多くみられ、微細ひび割れ群の VL も碎石コンクリートの場合よりやや大きくなる傾向が見られる。これは、川砂利の場合表面が滑らかなためペーストとの剥離が生じ易いのに対して、碎石の場合は表面が粗く、形も角張っているので、モルタルとの付着が強くなるためと考えられる。

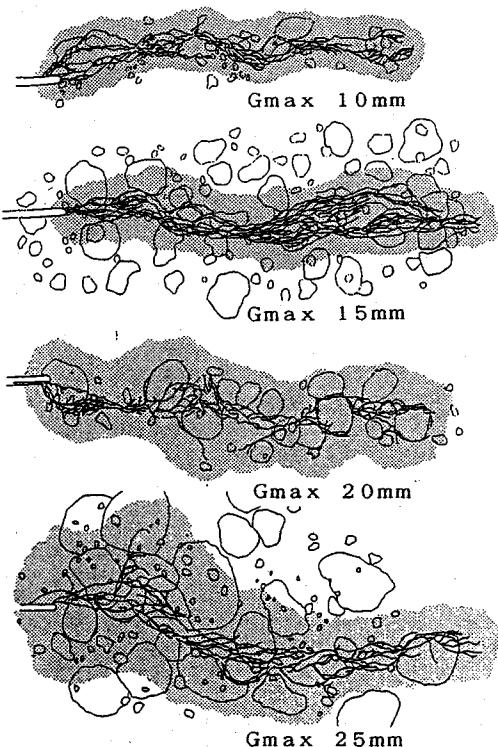


図-14 川砂利コンクリートの微細ひび割れ発生状況

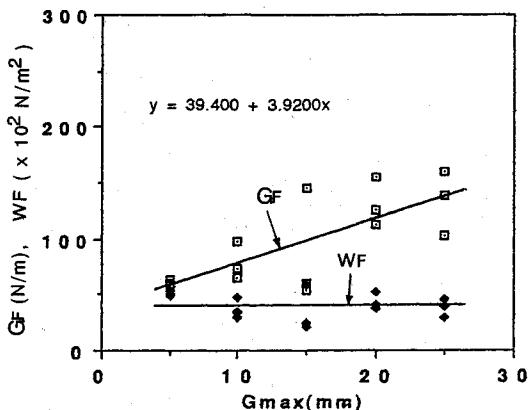
図-15 G_{\max} と破壊エネルギーとの関係(川砂利)

表-6は、Aタイプ供試体を用いて、砂利コンクリートの場合の破壊進行領域の寸法を測定した結果を示す。この場合も G_{\max} の増加に伴って VL および VL_{\max} は大きくなっている。この表の値と表-3の値との比較から分かるように、川砂利を用いたコンクリートの方が幾分破壊進行領域の大きさが大きくなっている。

表-7は、表-5で述べたと同様な方法で算出した破壊エネルギー G_F および W_F を示す。また、図-15は、比較のためにその結果を図-13と同様に、 G_{\max} との関係図として示すものである。これらの図表から分かるよ

表-6 G_{\max} と破壊進行領域の大きさ
(Aタイプ、砂利コンクリート)

G_{\max} (mm)	VL (mm)	VL_{\max} (mm)	VL/V_{\max}	VL_{\max}/G_{\max}
10	17	21	1.7	2.1
	12	35	1.2	3.5
	22	35	2.2	3.5
	12	25	1.2	2.5
平均	16	29	1.6	2.9
15	19	30	1.3	2.0
	10	20	0.7	1.3
	21	30	1.4	2.0
	平均	17	27	1.1
20	30	40	1.5	2.0
	20	25	1.0	1.3
	35	52	1.8	2.6
	20	35	1.0	1.8
平均	26	38	1.3	1.9
25	35	43	1.4	1.7
	16	30	0.6	1.2
	25	60	1.0	2.4
	平均	25	44	1.0
				1.8

表-7 G_{\max} と破壊エネルギー (Aタイプ、砂利コンクリート)

G_{\max} (mm)	圧縮強度 (MPa)	G_F		W_F ($\times 10^2$ N/m ²)	
		(N/m)	平均	(N/m ²)	平均
5	30.0	64		53	
	30.0	61		51	
	30.0	59	61	49	51
10	38.7	98		47	
	43.7	74		35	
	43.7	65	79	30	37
15	42.8	145		58	
	32.0	53		22	
	32.0	61	86	25	35
20	17.2	125		41	
	17.2	155		52	
	40.7	113	131	37	43
25	22.2	159		45	
	45.3	103		29	
	45.3	138	133	39	38

うに、砂利コンクリートの場合も、 G_{\max} の増大に伴って、 G_F は増大し、一方 W_F はほぼ一定値となる傾向は碎石コンクリートの場合と同じである。しかし、砂利コンクリートの場合の G_F や W_F の値は全体的に、かなり碎石コンクリートの場合より小さくなっている。コンクリートの圧縮強度にそれほど差はないのにこのような違いが生じているのは、引張荷重下でひび割れが伸展する際に骨材を貫通するものが多い碎石コンクリートと骨材とペーストとの剥離が生じることの多い砂利コンクリートの違いによると考えられる。このことは、 G_F や W_F が材料の特性評価の一つの指標として使用できることを示していると考えられる。

4. 結 論

粗骨材の最大寸法や種類を変えたコンクリート引張供試体を用い、載荷中のコンクリート内部の破壊状況をX線造影撮影法により非破壊的に観察するとともに荷重とひび割れ開口変位との関係から破壊エネルギーを求め、破壊進行領域の性状に及ぼす骨材寸法の影響を検討した結果、実験の範囲内で次のことがいえる。

(1) X線造影撮影法により、引張載荷過程において、最大荷重の約80%の段階で切欠き先端のコンクリート内部に微細ひび割れが発生し、荷重の増加につれて多数に枝分かれをし、複雑に絡み合いながら伸展する状況を検出できた。

(2) コンクリート内部に発生した微細ひび割れ群は、ある幅をもつひび割れ領域を形成し、その領域のひび割れ伸展方向と直角方向の幅は、最大荷重付近で最大となり、ひずみ軟化領域にはいるとやや狭くなる傾向がみられた。

(3) X線造影撮影したフィルム上で、微細ひび割れ群の周辺にひび割れとは判定が困難であるが他の部分と区別できる雲状の領域が観察された。この領域は、さらに微細なひび割れ群からなる破壊進行領域と考えられる。

(4) 微細ひび割れ群の領域の進行方向と直角方向の幅は、粗骨材の寸法 G_{max} が大きくなるほど広くなる傾向がみられた。その最大幅は、 G_{max} が5 mm の場合は13 mm (G_{max} の2.6倍) 程度であり、雲状の領域も含めると21 mm (G_{max} の4.2倍) 程度であった。そして、 G_{max} が20 mm の場合のそれらは23 mm (G_{max} の1.4倍) 程度および48 mm (G_{max} の2.4倍) 程度となった。

(5) 荷重-開口変位曲線の面積を、破壊面の投影面積で除して求めた、破壊エネルギー G_F の値は、粗骨材の寸法が大きくなるほど増加する傾向が見られたが、それを体積で除して求めた破壊エネルギー W_F は、粗骨材の寸法に関わらず、ほぼ一定値となった。このことは、破壊エネルギーは破壊進行領域全体積で平均的に消費されると考えることが正しいことを示している。

(6) 砂利を用いたコンクリートの場合の微細ひび割れ領域の幅は碎石コンクリートの場合よりもやや広くなる傾向が見られた。これは、川砂利コンクリートの微細ひび割れは粗骨材を迂回するように蛇行しながら伸展す

る傾向があり、碎石を用いたコンクリートの場合のひび割れは骨材を貫通して伸展する傾向があるためである。

(7) 砂利コンクリートの場合の G_F および W_F の値は全体に、かなり碎石コンクリートの場合より小さくなっている。コンクリートの圧縮強度にそれほどの差はないのにこのような違いが生じているのは、引張荷重下でひび割れが伸展する際の両コンクリートの性状の違いによると考えられる。このことは、 G_F および W_F が材料の特性を評価するための一つの指標として使用できることを示していると考えられる。

謝 辞

本研究は、文部省科学研究費補助金（一般研究C：課題番号 04650426）の交付を受け、その課題の一部として行ったものである。ここに付記し、厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 大塚浩司：DETECTION OF FRACTURE PROCESS ZONE IN CONCRETE BY MEANS OF X-RAY WITH CONTRAST MEDIUM, FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE, Fram Cos1, ELSEVIER APPLIED SCIENCE, pp.485～490, 1992.
- 2) 大塚浩司・庄司芳之：X線造影撮影によるコンクリートの破壊プロセスゾーンの検出、日本コンクリート工学協会「コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム」論文集II, pp.1～4, 1990.
- 3) 大塚浩司：X線造影撮影による鉄筋コンクリート内部の微細ひびわれ検出に関する研究、土木学会論文集No. 451/V-17, pp. 169～178, 1992.8.
- 4) Folker H. Wittmann : FRACTURE PROCESS ZONE AND FRACTURE ENERGY, FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE, Fram Cos1, ELSEVIER APPLIED SCIENCE, pp.391～403, 1992.

(1993.4.13 受付)

INFLUENCES OF AGGREGATE SIZE ON THE BEHAVIOR OF FRACTURE PROCESS ZONE IN CONCRETE

Koji OTSUKA and Hiroaki KATUBE

Experiments were carried out by an alternative x-ray technique using contrast medium to investigate the inside behavior of the compact tension concrete specimens. As a result, successful detection of fracture process zone that was consists of numerous fine cracks forming from the tips of notch cut in the tension specimen was possible. The fracture process zone increased in width with larger aggregate. The fracture energy G_F calculated by the area of the fracture plane also increased with larger aggregate. The fracture energy W_F calculated by the volume of the fracture process zone was nearly constant regardless of the aggregate size.