

コンクリートの割裂試験における破壊メカニズムの 破壊力学的研究

上田 稔*・長谷部宣男**・佐藤正俊***・
奥田宏明****

コンクリートの円柱形割裂試験供試体の、割裂引張強度に到る破壊メカニズムについて、コンクリートを粗骨材とモルタルの複合体ととらえ、割裂試験を行って得られた応力-ひずみ曲線や、破壊性状等の観察結果と、はく離やクラックの破壊力学における応力特異性値の数理弹性解析結果により、粗骨材に関わる個々の内部破壊現象の理論的裏付けを示しながら、破壊力学的考察を行う。

Key Words : plain concrete, split-cylinder tensile strength test, fracture mechanism, aggregate, biaxial load, crack, stress intensity factor, debonding.

1. まえがき

割裂試験は多くの研究者により実施され、割裂引張強度に及ぼす各種要因の影響について、いくつかの試験結果が示されている^{1)~9)}。その要因として、骨材に関しては、大きさ、離間距離、粒度分布、表面の粗滑度、形状、骨材そのものの強度、粗骨材量、骨材界面の欠陥の形状などが挙げられる。荷重に関しては、載荷方法(線載荷、点載荷)、分布板の有無と大きさ、供試体打設方向と載荷方向、載荷速度が、その他には、配合、材令、水セメント比、供試体の長さ、断面の大きさなど多くの要因が指摘されている。しかし、これらの要因は、複雑に割裂引張強度に影響を与え、その定性的な影響の理由についても、明確にされているとはい難い点もある。いくつかある。また、割裂試験は、コンクリートの引張強度を、簡便に得るために考案された、実用的な試験であるが、供試体の載荷面(以下供試体の中心軸を含む、載荷位置を結ぶ断面をこう呼ぶ、図-1のL-L断面)は引張・圧縮の二軸応力状態であり、一軸引張強度との違いについても、必ずしも、明確にされていない。その配合、寸法、試験方法など、様々な試験条件による破壊の過程を経て、試験結果が得られている。従って割裂引張強度特性を明確にするためには、その破壊メカニズムを解明し、種々の要因が破壊メカニズムに及ぼす影響について知ることが重要である。

そこで本研究は、割裂試験における引張破壊メカニズムの、破壊力学的研究を行う。コンクリートの内部破壊

は、粗骨材とモルタルの界面、モルタル、粗骨材の破壊に分けられる。この点から、本研究では、コンクリートを粗骨材とモルタルの複合体としてとらえる。そして、破壊韌性値が、複合体としてのコンクリートのそれではなく、粗骨材とモルタルの界面、モルタル、粗骨材のそれぞれに、材料固有の値として与えられ、その大小が、粗骨材とモルタルの付着<モルタル<<粗骨材であることをもとに、コンクリートの破壊を考える。文献(11)に従えば、コンクリートの構造を、中間レベルとして説明するものである。

円柱供試体の割裂試験の破壊性状について、町田¹²⁾は、高速度カメラ撮影を、川上ら¹³⁾は、AE法による破壊位置標定を行って調べている。また柳場ら^{14),15)}は、モデル粗骨材を有する円盤供試体の割裂試験を行い、供試体の破壊状況を観察している。これらの研究は、破壊メカニズムの解明に、極めて貴重な情報を与えている。本研究では、応力-ひずみ曲線(以下 $\sigma-\varepsilon$ 曲線と略す)の測定や破断面の観察結果、粗骨材をモデル化した介在物の隅角部先端、その界面のはく離、はく離先端から発生するクラック、介在物に接近するクラックなどの破壊力学における応力特異性値[隅角部の応力の強さ、はく離の応力の強さ、クラックのエネルギー解放率や応力拡大係数(以下SIFと略す)]の数理弹性解析結果により、主に、粗骨材に関わる個々の内部破壊現象の理論的裏付けを示しながら、割裂引張強度に到る破壊メカニズムの考察を行う。破壊力学における応力特異性値を用いることは、破壊メカニズムの把握を、より明確にするものと考えられる。なお本研究では、荷重を単調に増加させる場合を対象にしている。以下では、骨材界面のボンドクラックを「はく離」、モルタルクラックを「クラック」と区別して用い、粗骨材を単に「骨材」と呼ぶことにする。

* 正会員 工博 中部電力(株) 電力技術研究所
(〒459 名古屋市緑区大高町字北関山20-1)

** 正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部 社会開発工学科

*** 正会員 工修 中部電力(株) 電力技術研究所

**** 正会員 中部電力(株) 電力技術研究所 土木建築担当部長

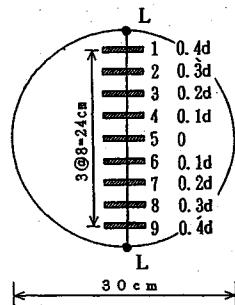


図-1 ひずみゲージの配置

表-1 供試体の配合

G _{max} (mm)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材 率/a (%)	単位量(kg/m ³)					
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
						20~10 mm	10~5 mm	
20	41	43	163	398	745	664	357	1021

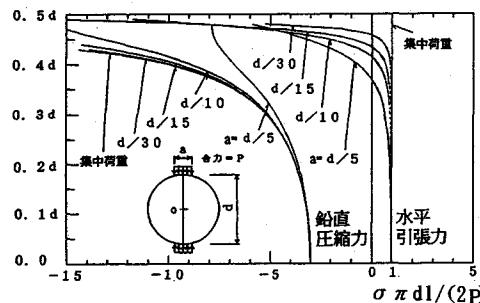
図-2 分布幅の違いによる載荷面上の応力分布 σ (弾性理論解, p: 荷重, l: 供試体の長さ)

表-2 試験条件

供試体数	3体
材令	28日
荷重速度	0.06 kgf/cm ² /sec

2. 割裂試験の概要

骨材に起因する破壊をとらえやすくするため、最大骨材寸法（以下 G_{\max} と略す）を 20 mm と、ある程度大きくする一方、載荷面上の位置による破壊の進行状況の違いを調べるために、骨材の大きさに対して、載荷面が大きくなる、直径 30 cm の円柱供試体の割裂試験を実施した。割裂試験は破断面を特定した試験で、その破壊は、大体載荷面付近の骨材界面から進行する。本試験ではこの点を考慮して、載荷面から両側に、最大骨材寸法程度以上の範囲のひずみをとらえるために、ゲージ長は 60 mm とし、図-1 のように供試体端面に配置した。また $\sigma-\varepsilon$ 曲線の変化を詳細にとらえるために、測定は応力レベルで、0.11 kgf/cm²あたりに 1 回と、こまかくした。供試体の配合、試験条件を表-1, 2 に示す。試験は分布板を使用しない方法で、3 体実施した。

3. 割裂試験の応力状態

弾性理論解による応力状態は、等分布荷重の載荷幅により異なるが^{5), 7), 12)}、図-2 のとおり、載荷面は二軸応力状態で、中央部は水平方向引張、鉛直方向圧縮で、その比は 1:3 以上、載荷位置に近い端部が、二軸圧縮状態である。町田^{5), 12)}は、割裂試験供試体（供試体直径 15 cm, $G_{\max}=12.5$ mm, 分布板を使用せず）の端面において、載荷面直角方向の引張ひずみを測定し、弾性理論解と比較している。実測ひずみ分布は、供試体載荷点附近の局部破壊のため、破壊荷重の 80% 程度の荷重レベルまでは、供試体直径（以下 d と記す）の 1/15 の分布幅を有する、等分布荷重が載荷された場合の理論値（図-2）と、よく一致することを示している。さらに、破壊荷重の 90~95% の荷重に至っても、供試体の中心か

ら $0.4d$ （中心から直径の 4 割の位置、図-1 参照）の範囲で、実測ひずみ分布は理論値とよく一致し、しかも、供試体のこの部分は弾性的に挙動し、応力分布も、これより小さい荷重レベルのそれと、大差がないとしている。また、分布板を用いる場合の実測ひずみは、破壊荷重の 80% 程度までは、分布板の幅に等しい等分布荷重が作用する場合の、弾性理論解によく一致するとしている。

本研究では、載荷面付近に存在する骨材をモデル化した、介在物に対する応力特異性値の解析結果を用いるが、その介在物に作用する外力として、分布幅 $d/15$ の場合の、載荷面上の弾性理論解を用いる。この解析条件は、本試験においても、町田が述べているのと同様、載荷面上の $\sigma-\varepsilon$ 曲線は、最後のクラック発生までは、ほぼ直線に近く（後述、図-3）、さらに、破壊が生じている載荷面付近の応力状態でなく、破壊が進行する領域に対する外力として、弾性理論解を用いるものであることから、概ね妥当なものと考えられる。

4. 破壊メカニズムと割裂引張強度

（1）骨材界面の最初のはく離発生

コンクリートの破壊は、粗骨材の界面のはく離から始まることはよく知られている¹⁰⁾。普通の骨材は、周囲のモルタルより硬く、その弾性係数はモルタルの数倍程度である¹⁶⁾。そのため、引張力に対しては、骨材の引張力に面する位置に、圧縮力に対しては、その作用方向と平行な面に面する位置に、引張応力が発生する。円形や楕円形の弾性介在物や、く形の剛体介在物などの応力解析によつても、このことは明らかである。楕円形介在物やく形状介在物の場合、引張力に面する位置の、圧縮力に対しては、その作用方向と平行な面に面する位置の曲率半径^{17)~19)}や、隅角部の角度が小さい程²⁰⁾、そして介在

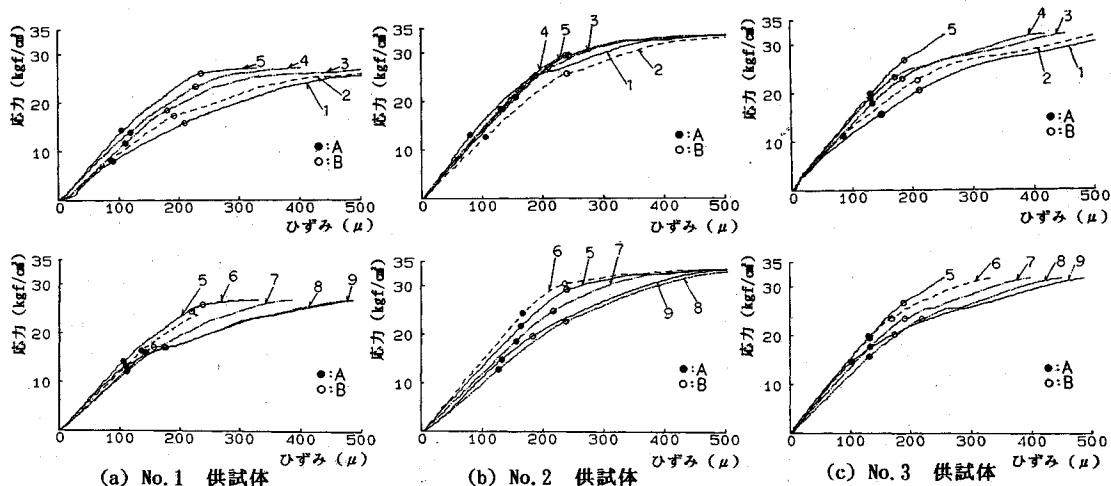


図-3 応力-ひずみ曲線（上段…ゲージ No. 1~5, 下段…ゲージ No. 5~9）

表-3 載荷面上のはく離（A点）及びクラック（B点）の発生順序

ゲージ No.	ゲージ 位置	供試体					
		No. 1		No. 2		No. 3	
		A点	B点	A点	B点	A点	B点
1	0.4d	1	1	3	4	3	2
2	0.3d	1	4	1	4	1	3
3	0.2d	3	7	5	6	5	5
4	0.1d	6	8	5	7	7	8
5	0	7	9	8	7	9	9
6	0.1d	9	4	9	9	8	6
7	0.2d	8	4	5	3	5	6
8	0.3d	5	3	1	2	3	4
9	0.4d	4	2	4	1	2	1

表-4 応力-ひずみ曲線より求めたはく離（A点）及びクラック（B点）発生応力と引張強度

供試体	A点				B点				引張強度 σ_t (kgf/cm²)	
	FIRST		LAST		FIRST		LAST			
	応力 σ_{df} (kgf/cm²)	$\frac{\sigma_{df}}{\sigma_t}$	応力 σ_{sf} (kgf/cm²)	$\frac{\sigma_{sf}}{\sigma_t}$	応力 σ_{sf} (kgf/cm²)	$\frac{\sigma_{sf}}{\sigma_t}$	応力 σ_{sf} (kgf/cm²)	$\frac{\sigma_{sf}}{\sigma_t}$		
No. 1	8.0	0.30	16.5	0.61	16.5	0.61	26.0	0.96	27.1	
No. 2	12.8	0.38	23.3	0.69	19.9	0.59	30.5	0.90	33.8	
No. 3	10.9	0.34	20.0	0.62	19.7	0.61	26.8	0.83	32.2	

ゲージの位置によらず、 $\sigma-\varepsilon$ 曲線は直線で、弾性挙動を示している。個々の $\sigma-\varepsilon$ 曲線の勾配が異なるのは、載荷面上の位置によって、二軸応力状態に違いがあるためである(図-2)。ある荷重レベルに達すると、 $\sigma-\varepsilon$ 曲線が直線性を失う。図-3に、この位置を●印(以下A点と呼ぶ)で示すが、これは、骨材界面にはく離が発生したことを示している。表-3に、A点のゲージ位置による発生順序を示す。最初に、はく離が発生する位置は、供試体の上半分と下半分のどちらにおいても、供試体中心から0.3~0.4d離れた位置であることがわかる。また表-4に、最初にはく離が発生したときの応力(σ_{df} で表わす)を示すが、 σ_{df} は引張強度(σ_t で表わす)に対し、 $\sigma_{df}/\sigma_t=0.3\sim0.4$ 程度である。

川上ら¹³⁾は、分布板を用いない場合と、用いる場合($G_{max}=20$ mm, 分布板はテフロンシートでその大きさは $d/10$)に対し、AE法による破壊位置標定を行い、破壊荷重の60%程度以下の荷重レベルで、最も供試体中心から離れた破壊位置は、0.35~0.4d程度であることを示している(図-4)。この破壊は、荷重レベルからはく離の発生と考えられ、その位置は、本試験の最初にはく離が発生した位置と、よく一致している。

上記の観察される、最初のはく離発生位置について、

物が母材より硬い程^{18)~20)}応力集中が大きい。実際のコンクリートにおいては、骨材の大きさ、形状、隅角部角度、曲率半径、界面の接着強さの不均一、荷重の方向、ブリージングによる空隙や、骨材界面の非接着部などの初期欠陥などから、応力集中が生じやすい最も不利な骨材の界面に、はく離が発生する。一般的には大きな骨材程、ブリージングによる空隙や非接着部などの初期欠陥も大きく、応力集中の程度も大きいため破壊の起点となりやすい。

破壊靭性値の大小は、モルタルと骨材の付着<モルタル<<骨材の順である²¹⁾ので、上述したように、骨材に起因する応力集中が骨材界面に生じ、はく離が発生して破壊が始まる。

図-3(a)~(c)は、各供試体ごとの、載荷面上の個々の位置での $\sigma-\varepsilon$ 曲線であり、番号はひずみゲージの番号(図-1)と対応している。縦軸の応力 σ は、 $2p/(\pi dl)$ (p :荷重、 l :供試体の長さ)をとっている。上段が供試体の上半分(ゲージ No. 1~5)、下段が下半分(ゲージ No. 5~9)の、 $\sigma-\varepsilon$ 曲線である。低荷重レベルでは、

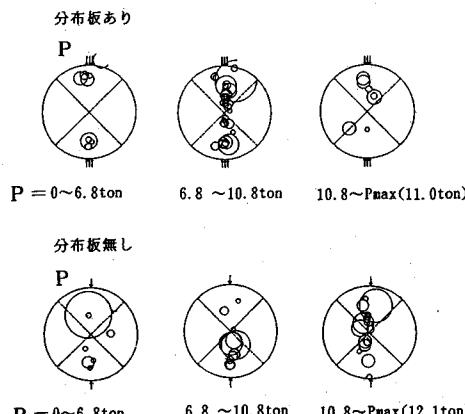


図-4 割裂試験におけるAE法による破壊位置標定図 (P : 荷重)¹³⁾

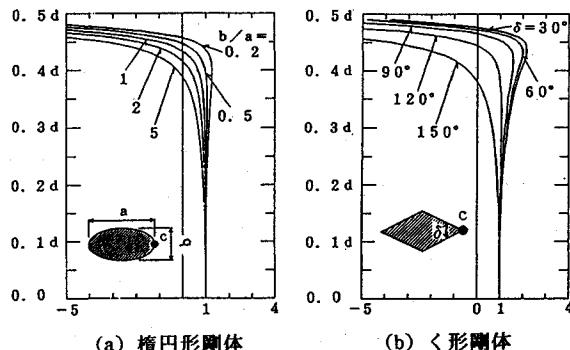


図-5 載荷面上における剛体介在物界面に発生する (a) c 点の引張応力及び (b) 隅角部の応力の強さ

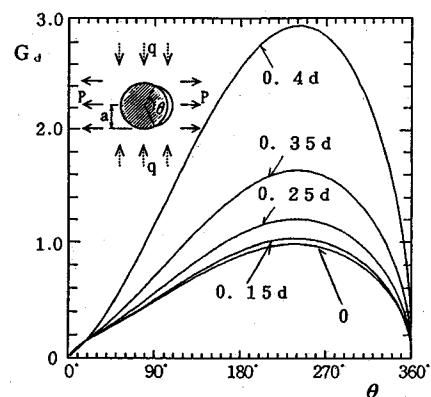


図-6 円形剛体介在物のはく離の応力の強さ $G_d = |\beta_0| / (P\sqrt{a})$

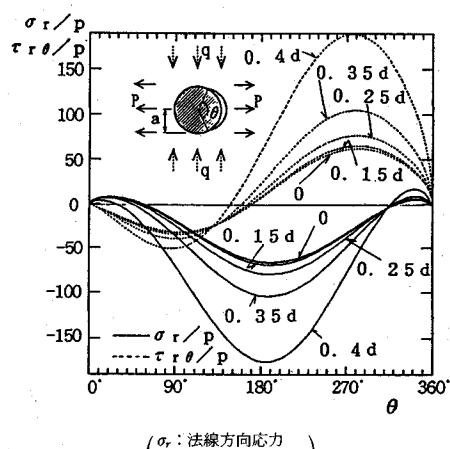


図-7 円形剛体介在物のはく離先端近傍の応力

理論的に考察する。図-2のとおり、載荷面の応力状態は一様でない。このため、水平引張力と鉛直圧縮力の組み合わせで、骨材界面の引張応力の集中が、最も大きい位置の骨材に、最初にはく離が発生する。図-5(a), (b)は、それぞれ介在物を楕円形剛体、V形剛体とし、図-2の載荷面上の二軸応力を外力の大きさとし、介在物界面にはく離を発生させる引張応力の大きさを、供試体中心での値を基準に、示したものである。二軸荷重の方向と介在物の対称軸とを一致させた場合、図-5の説明図のC点の位置で、引張応力が最大となる。なお、V形剛体の場合は角点であるため、隅角部の応力の強さ²⁰⁾(隅角部の応力特異性の大きさを示す値)で示してある。[図-5の解析において、 κ はボアソン比 ν の関数で $\kappa=3-4\nu$ (平面ひずみ状態)、 $\kappa=(3-\nu)/(1+\nu)$ (一般化された平面応力状態)である。モルタルの場合は、 $\kappa=2$ 程度の値をとる。以下の図-6, 7, 11, 12も $\kappa=2$ を用いる]。介在物の形状が円形、楕円形の場合は、川砂利など丸みを有する骨材の界面、V形の場合は、碎石など角を有する骨材のモデルと考えることができる。

-5より、楕円形剛体は、曲率半径が小さい場合(b/a が小さい場合)、V形剛体は、隅角部角度 δ が小さい場合に、介在物の形状にもよるが、0.4~0.45dあたりで極値を有し、引張応力がほぼ一定値とみなせる値1.0より大きいのは、0.3~0.45dの範囲である。このことは、供試体の中央部(0~0.3d)より、0.3~0.45dの範囲で、はく離が発生しやすいことを示している。この位置は、本試験や川上ら¹³⁾の試験の、最初のはく離発生位置と、一致している。

(2) 骨材界面はく離の進展特性

介在物の形状を円形、楕円形及び、V形としての、介在物界面のはく離に対する解析結果をもとに、骨材界面のはく離進展特性について考察する。

数理弹性解析により得られた、円形剛体介在物のはく離先端の応力の強さ²⁰⁾($|\beta_0|$:はく離先端の応力特異性の大きさを示す値)を、図-6に示す。中心からの距離が0, 0.15d, 0.25d, 0.35d, 0.4dの位置での、載荷面上のそれぞれの応力に対して示されている(以下、図-7, 11, 12についても同じで、いずれも縦軸は無次元

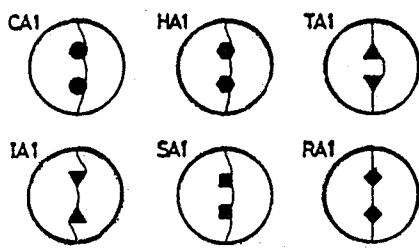


図-8 モデル骨材を用いた割裂試験における供試体の破壊状況¹⁵⁾

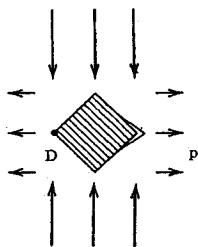


図-9 片側にはく離を有するく形剛体介在物

化した値である)。はく離先端の応力の強さは、極値を有し上に凸の曲線である。介在物を円形弾性体^{22), 23)}や楕円形剛体²⁴⁾とした場合にも、はく離先端の応力特異性値は、極値をもつ。また図-7より、載荷面上の位置により多少異なるが、はく離先端近傍の法線方向応力は、はく離が小さいとき引張で、はく離の大きさが円周角で $\theta = 20^\circ$ あたりに極値をもち、それまでは単調増加、その後は単調減少で、 $\theta = 50^\circ$ 前後から圧縮となり、その絶対値は単調増加する。一方、せん断応力の絶対値は、はく離の進展とともに単調増加し、 $\theta = 80^\circ$ あたりで極値に達した後、単調減少する。これらのこととは、はく離の進展方向が、荷重の増加とともに、徐々に変化するためと考えられる。以上図-6, 7 から、厳密には、はく離進展の破壊条件が、明確にされなければならないが、骨材が円弧状の場合、荷重がはく離進展の破壊靱性値に達すると、荷重増加がなくとも、はく離は骨材界面のある範囲を進展して止まる。そして、その後は荷重増加により、はく離は安定的に進展するが、はく離の進展方向と、荷重の方向との変化にともない、徐々に進展しにくくなる。枷場ら¹⁴⁾は、円形モデル骨材を 1 個 ($\phi = 3.2 \text{ cm}$)、または 2 個 ($\phi = 1.9 \text{ cm}$) 有する円盤 ($d = 10 \text{ cm}$, 厚さ 3 cm) の割裂試験を行い、円形モデル骨材界面の一部をまずはく離が進展し、最終的に、供試体が破断する試験結果を示している(図-8 左上)。

次に、骨材がく形状の場合について考察する。著者らは二軸応力状態における、片側にはく離を有する対称な形状のく形剛体介在物(図-9)の、はく離先端の応力の強さは、はく離の進展方向と荷重の方向に変化がないため、単調増加であることを示している²⁵⁾。また図-9

において、はく離のない隅角部(D点)の応力の強さは、片側のはく離が進展するにつれ、引張力 p に対しては、はく離の進展とともに単調減少し、圧縮力 q に対しては、ほとんど変化しないので、隅角部の D 点から、はく離が発生しにくくなることを示している²⁰⁾。枷場ら¹⁵⁾は正六角形、正三角形および正方形の同一形状の 2 個のモデル骨材(いづれもモデル骨材は最大長が 2.0 cm)を、対称軸上に有する円盤 ($d = 10 \text{ cm}$, 厚さ 3 cm) の割裂試験を行い、その破壊状況を示している(図-8)。これによれば、まずモデル骨材の片側で、モデル骨材の隅角点から隅角点までを結ぶ範囲にはく離が生じ、それを結ぶクラックが発生している。はく離の進展状況は、上記の解析結果と整合している。これらの結果は、骨材を対称形とした場合であるが、実際の非対称形の骨材に対しては、1ヶ所ではく離が発生、進展という上述の現象が、よりあらわれやすくなると考えられる。よって、直線状界面と隅角部をもつ骨材の場合、はく離が進展を開始すると荷重増加がなくとも、隣の隅角点まではく離は進展する。そして、界面と荷重の方向によっては、隅角点に到達したはく離は、ある荷重レベルに達すると、再び別の隅角点まで進展する。

以上より、円弧状、直線状の界面にかかわらず、はく離が進展し始めると、骨材のある範囲をただちに進展する。さらに荷重増加と、後述するはく離やクラックの干渉により、はく離は進展するが、それにともない、はく離の進展方向と荷重の方向に変化が生じると、はく離は進展しにくくなる。割裂試験の破断面において、片側の破断面には骨材の抜け跡が^{11), 21), 3), 8)}、もう一方の破断面には、骨材が付着した状態が認められることも、上述のはく離進展特性を裏付けている。

(3) はく離の発生、進展と干渉

最初にはく離が発生した骨材において、はく離が進展しても、ただちに、母材のモルタルにクラックは発生しない。モルタルの破壊靱性値が、モルタルと骨材の付着の破壊靱性値より大きいためである。上述したとおり、はく離の進展は安定的である。このため、最初にはく離が発生した骨材以外の、骨材界面にも、はく離が発生し進展する。図-3、表-3 より、供試体中心から 0.3~0.4 d 程度離れた位置で、最初にはく離が発生すると(0.3 d 付近で発生した場合には、0.4 d 付近ではく離が発生した後)、荷重増加とともに、ほぼ供試体の中心に向かう位置に、順にはく離が発生している。先の川上ら¹³⁾の AE 法による、破壊位置標定結果も、0.3~0.4 d 付近での破壊の後、荷重増加にともない、本試験と同様、供試体の中心側で破壊が生じることを示している(図-4)。

図-5 によれば、引張応力の集中が大きくはく離が発生しやすい即ち、楕円形剛体では曲率半径が小さく(b/a

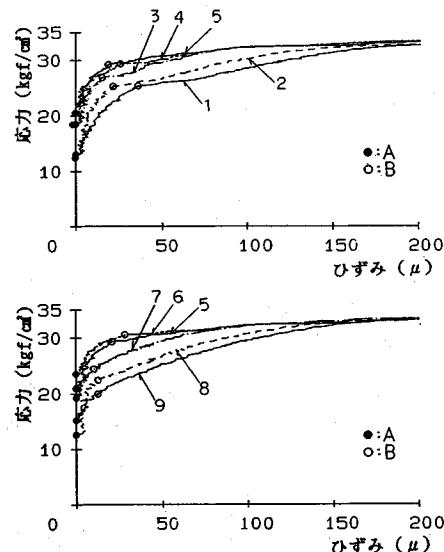


図-10 弾性ひずみを除いたはく離発生後の応力とひずみの関係 (No. 2 供試体)

が小さく), \vee 形剛体では隅角部角度 δ が小さい場合に, 極値をとる位置から, 供試体の中心に向かって, 徐々に, 引張応力や隅角部の応力の強さは小さくなっている。またこの位置から, 供試体の外側に向かっては, それらは急激に小さくなり, 圧縮力に変わっている。はく離が発生すると、その影響のためその近くではなく離がより発生しやすくなる。以上のことから, 荷重増加とともに, はく離発生位置は, 中心に向かう。

図-3 の $\sigma-\epsilon$ 曲線は, はく離が発生して, 直線性を失い始めると, 傾きが少しづつ緩くなっている。この点をより明確に示すために, 図-10 は, 例として, No. 2 供試体に対し個々の $\sigma-\epsilon$ 曲線と, その弾性挙動の範囲の直線部を延長した線とのひずみの差を, 各ゲージの●印を縦軸上の起点にして示したものである。それぞれの $\sigma-\epsilon$ 曲線の傾きが, 徐々に緩くなることが, よくわかる。このことは, はく離が発生した後のはく離の進展, その他の骨材界面のはく離の発生, 進展と, それらとの干渉を表わしている。

はく離の大きさは, 骨材の大きさ以下であり, 不均一なものであるが, ほぼ載荷面付近の骨材に発生する。お互いにはく離がどの程度, 干渉し合うかの概略は, 次のようなクラックの SIF の干渉によって, 知ることができる。直線上に並ぶ 2 個の等長クラック, 3 個の等長クラック, 無限個の等長クラック, さらに 2 個の不等長クラックの応力拡大係数が求められている²⁶⁾。これらの解析結果によれば, いまはく離が骨材の界面にあること, 及び鉛直圧縮力の影響を無視して, 近似的に, はく離を均質弾性体の中にある, 一様引張力を受けるクラックと考えると, はく離の大きさの, 10 倍程度までの離間距

離の位置にあるはく離は干渉がある。実際の骨材界面のはく離は, 必ずしも載荷面上に位置しない。しかし, 平行だが同一直線上に位置しない, クラックの SIF の解析結果によれば²⁶⁾, はく離の大きさ程度の鉛直方向と水平方向に離間距離をもつ, 2 個のクラックの SIF の干渉の程度は, 同一直線上にある, はく離の大きさ程度の離間距離をもつクラックの干渉と同程度である。

(4) クラックの発生

荷重の増加とともに, 載荷面付近のはく離の数は増加し, かつ個々のはく離が大きくなり, またお互いの干渉の程度も高まってくる。そして, はく離先端がモルタルの破壊靱性値に達し, クラックが発生する。はく離先端の応力集中が最も大きく, 最初にモルタルの破壊靱性値に達する, はく離先端から, クラックが発生する。

図-10において, はく離発生 (A 点) 後, ひずみは緩やかに増加するが, その後部分的に水平に近い箇所があり, その前後で傾きが変化したり, 水平に近い箇所はないが, 傾きの変化の程度が変わる箇所が観察される。この位置を○印 (以下 B 点と呼ぶ) で示す。なおこの位置を図-3 にも示している。これは前述したとおり, はく離は徐々に進展しにくくなる特性を有していること, 及び, その前後でひずみの増加の程度が変化していることから, B 点はクラックの発生を示している。表-3 に, 載荷面上のクラックの発生順序を示すが, ほぼ載荷面上の $0.4 d$ 附近が最初で, その後中心側に向かう位置の順に発生していることがわかる。また載荷面上の位置により, クラック発生時の荷重レベルに差がある。クラック発生時の応力 (最初と最後のクラック発生時の応力をそれぞれ σ_{mf} , σ_{ml} で示す) の割裂引張強度 (σ_t で示す) に対する比は, 最初のクラックが $\sigma_{mf}/\sigma_t = 0.59$ 程度, 最後のクラックが $\sigma_{ml}/\sigma_t = 0.83 \sim 0.96$ である (表-4)。

以上のことを踏まえ, 円形剛体介在物の, はく離先端を起点とするクラック発生の可能性について, 解析的に検討したのが図-11 で, 載荷面上の各位置それぞれに対して, エネルギー解放率の解析結果が示してある。はく離の進展とともに, 前述したとおり, はく離が進展しにくくなる一方, クラック発生のエネルギー解放率は単調増加し, はく離の大きさが, 円周角で $\theta = 80^\circ$ あたりで極値を有し, クラックが発生しやすくなることがわかる。この解析結果は, 図-8 の円形モデル骨材を用いた割裂試験の, 円周上のクラック発生位置とも, 概ね一致している。著者らは, 一軸応力状態の場合に対して, 図-11 と同様の解析を行い, 円形のモデル骨材を用いた試験の, クラック発生位置²⁷⁾が説明できることを示している²⁸⁾。なお角ばった形状の骨材の場合は, 前述のとおりはく離は隅角点まで進展する。はく離が隅角点に到達すると, 隅角点は骨材が付着している境界で形成される

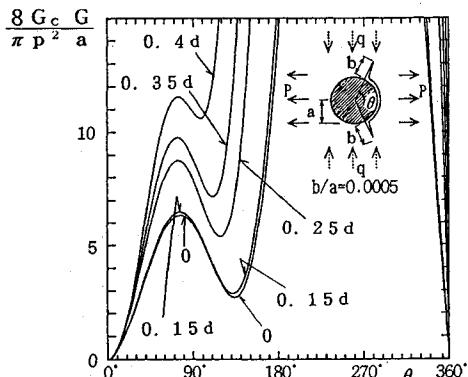


図-11 円形剛体介在物からのクラック発生のエネルギー解放率 G_c

隅角点から、はく離による応力自由境界と、骨材が付着している境界で形成される隅角点となり、隅角点近傍の応力集中が大きくなり、クラックが発生しやすくなる²⁰⁾。

図-11より、はく離先端からのクラック発生のエネルギー解放率の大きさは、 $0.4d$ から供試体の中心側に向かうにつれ、順に小さくなっていることがわかる。このことが、クラック発生の順序(表-3)と、その荷重レベルの大小(図-3)を、説明している。

(5) クラックの進展とはく離の連絡

図-3, 10よりクラック発生後、それぞれの $\sigma-\epsilon$ 曲線の傾きは緩やかになるが、強度増加が認められる。クラック発生時の応力 σ_m の、引張強度 σ_t に対する比 σ_m/σ_t は、載荷面上の位置により異なるが、59~96%でかなりの強度増加がある(表-4)。この強度増加の大きさは、供試体の外側($0.4d$)程大きい。すなわち、クラックは、 $0.4d$ 付近で最初に発生するが、すぐにこのクラックが成長して、最終破断に到るのはない。上述したとおり、中心側に向かって順次、はく離先端からクラックが発生する。発生したクラックは、荷重増加とはく離やクラックとの干渉により、進展する。

はく離先端から発生したクラックのうち、はく離がないか、あっても小さい骨材に向かうクラックが存在する(この理由は次節(6)の最初の段落で説明する)。このようなクラックの進展について考察する。母材より硬い円形介在物にクラックが接近すると、載荷面に対する二軸の外力である、クラック進展方向と直交方向の引張力²⁰⁾、及びクラック進展方向と同方向の圧縮力²⁰⁾いずれに対しても、そのSIFは減少する。図-12はAtkinson²⁰⁾の解析結果をもとに、載荷面上の各位置の応力を用いて、母材より硬い円形介在物に接近するクラックの介在物側の先端のSIFを、円形介在物とクラックの離間距離を横軸にとって、示したものである。この場合のクラックは、骨材のはく離とその先端から発生したクラックをまとめてモデル化したものに相当する。載荷面上の外側の

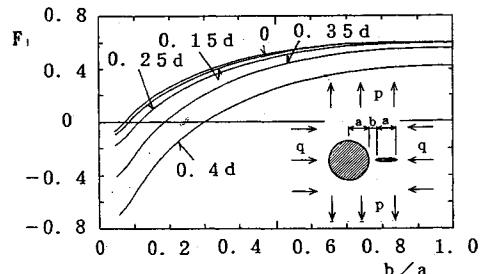


図-12 円形介在物に接近するクラックの応力拡大係数 $F_I = K_I / (p\sqrt{\pi a})$

クラック程SIFは小さく、介在物に接近するとき、SIFの減少の程度も大きく、値も負になる。よって、クラックは荷重増加とともに、骨材に向かって安定的に進展するが、供試体の中心から離れた位置のクラック程、進展しにくく、骨材に接近しにくい。すなわち骨材により、クラックの進展が止められる。以上より、供試体の外側程、クラックは早く発生するが、その進展は遅られ、大きな強度増加を許容する(図-3)。一方、荷重増加とともに、中心部($0 \sim 0.15d$)にも、クラックが発生する。大体、中心に近い位置程 $\sigma-\epsilon$ 曲線は、クラック発生後横に流れる。これは中心に近い位置程、クラック発生後の荷重レベルが大きく(図-3、表-3)、かつ発生後のクラックのSIFが大きいので、クラックが進展しやすく、骨材にも接近しやすいためである(図-12)。なお、Atkinson²⁰⁾の解析結果は、介在物界面にはく離がない場合であるが、はく離があっても小さい場合は、その影響は小さく、図-12と同様、クラックが接近するとSIFが減少すると考えられる。文献23)には、クラック進展方向と直交する方向の引張力が作用する場合、はく離がないか、あっても小さい場合、母材より硬い円形介在物にクラックが接近すると、SIFが減少することが示されている。

一方、逆に、はく離がある大きさ以上になると、SIFの減少の割合が小さくなり、さらにはく離が大きくなるとSIFを大きくする。かつクラックの接近とともに、はく離先端の応力特異性値も大きくなる²³⁾。この解析結果から、はく離が比較的大きい場合には、はく離にクラックが近づくと、はく離が進展したり、進展したはく離からクラックが発生して、はく離とクラックあるいはクラックとクラックがつながりやすい。No.3供試体の、ゲージNo.7, 8の $\sigma-\epsilon$ 曲線[図-3(c)]は、クラック発生(B点)後にも、部分的に横に流れているのが認められる。これは、上記はく離とクラックの連結が、現れたものと思われる。星野ら⁸⁾は、整粒骨材(骨材の粒径がある一定の範囲としたもので5~10 mm, 10~15 mm, 15~20 mm, 20~25 mの4ケース)を用いて線載荷割裂試験を行い、破断面における、破断した骨材の面

積は、骨材の抜け跡面積に比べて、極めて小さい（5～10%）としている。これは整粒された骨材の場合、骨材にはく離が発生する荷重レベルに大差がなく、クラックが発生する以前に、ほとんどの骨材にはく離が発生し、はく離とはく離がクラックにより連結しやすいためである。そして、骨材の整粒径が同じであっても、骨材の抜け跡面積が大きい程、割裂引張強度が低いことを示している（割裂引張強度については次項で述べる）。

クラック発生後の荷重増加は、クラックが発生する荷重レベルや、クラック発生前まではく離の分布状況、はく離の生じていない骨材の位置や大きさ、硬さに影響される。例えばクラック発生前に、はく離が発生している割合が多いと、クラック発生後、破面が形成されやすく、はく離がないか、あっても小さい骨材に向かって進展するクラックは少ないため、クラック発生後の荷重増加も小さい。

（6）骨材の破断と割裂引張強度

松木²⁾は、線載荷割裂試験（ $G_{max}=40\text{ mm}$ ）の破断面を調べ、骨材面積 80 mm^2 以上のもののうち、破断した骨材の割合は、付着した骨材の 31～62% あったとしている。本試験でも、骨材の破断が破断面の全体にわたり多くみられ、骨材の抜け跡は、大きな骨材のものが多い。骨材の大きさによる破壊状況の違いを見るために、著者らは本試験よりさらに、骨材の大きさの範囲を広くし、最大粒径 40 mm の骨材を含む、直徑 30 cm の円柱供試体の割裂試験を実施した。この試験の破断面においても、最大粒径及びそれに近いものは、骨材の界面ではく離しているが、それに次ぐ大きさ以下の骨材に、破断しているのが認められた。大きな骨材は、はく離が発生しやすく [(2) 参照]、はく離も大きくなりやすく、さらにクラックも発生しやすい。また骨材界面のはく離が大きい場合は、はく離はクラックによりつながりやすい [(5) 参照]。これらのことから、破断する骨材は、はく離がないかあっても小さい。モルタルと骨材の付着の破壊非性値が小さいので、はく離がないか小さい骨材は、存在しにくく思われる。しかし破断される骨材が存在するということは、上述のように骨材の大きさ、形状、骨材とモルタルの付着の程度などによって、はく離の発生、進展がしにくい場合がある。そして骨材の破壊非性値が、モルタルのそれより十分大きいことから、先に骨材自身の破断が生じるのでなく、クラックが骨材に到達して、骨材の破断が生じると考えられる。

町田¹²⁾は、破断直前の供試体端面の高速度カメラ撮影を行い、端面に現れる最初のひびわれ [(4) で述べた荷重段階のクラックとは異なる] は、供試体の中心より大略 0.1～0.15 d 離れた、ほぼ一定の位置に発生すると述べている。これは、この荷重段階から考えると、骨材の破断が生じ、そのため、ある程度の長さと幅を有する

ひびわれが形成されたため、供試体の端面において、初めてひびわれが観察されたものと考えられる。さらに町田¹²⁾は、最初のひびわれが認められて、大略 1/400～2/400 秒経過すると、他の部分に最初のものと連続しないひびわれが認められる。そして、時間が経過すると、別の部分にもひびわれが認められ、いずれも上下の載荷点に向かって進展する。ついには、最初のひびわれ発生後、約 7/400～16/400 秒の、極めて短い時間に、すべてのひびわれが連続し、載荷点の近傍に到達して破壊に至る。後に認められたひびわれの進展は最初のものに比べて顕著でなく、供試体の破壊の進行に、もっとも支配的な影響を及ぼすのは、0.1～0.15 d に発生した、最初のひびわれであるとしている。

荷重増加と多くの、はく離やクラックの発生、進展による破壊の進行の影響をうけて、骨材にクラックが到達する。図-12より、SIF が大きい供試体中心部（0～0.15 d）のクラックが骨材に到達しやすく、0.15 d 付近より外側のクラックは骨材の手前で止められている。クラックが骨材に到達しても、ただちに骨材の破壊は生じない。骨材の破壊非性値が、モルタルのそれに比べて、十分大きいからである。このため、荷重増加とともに、いくつかの骨材界面でクラックが到達する。なお骨材に到達したクラック先端から、骨材界面にはく離を生ぜしめて、抜ける骨材もあると思われる。中心部（0～0.15 d）の範囲では、載荷面上の応力状態がほぼ同じため（図-2），はく離の発生（図-5）と、その進展（図-6, 7），クラックの発生（図-11）と、その進展（図-12）からみれば、いずれも、破壊が進行する荷重レベルはほぼ同じである。しかし、はく離やクラックの発生による破壊は、この中心部から離れた外側から順に生じている。従って、0.1～0.15 d の位置が、0～0.1 d より、外側の干渉の影響によって、クラックの SIF は大きいと考えられる。よって 0.1～0.15 d の位置で最も先に、骨材にクラックが到達し、そのクラック先端が、骨材の破壊非性値に達して、骨材の破断が生じる。

最初の骨材の破断が生じると、この影響を受けて、クラック先端の SIF が大きい、供試体中心側で、骨材の破断が生じ、それにともないその時までに、他の骨材に到達しているクラックや、骨材に向かっているクラックの SIF が連鎖反応的に大きくなり、いくつかの骨材の破断が生じる。中心部（0～0.15 d）で先に破断が生じることと、図-12の供試体の外側のクラック程、SIF が小さいことからもわかるとおり、外側程この時点までの破壊の進行が遅いことから、この骨材の破断は、供試体の外側に向かう順に生じやすい。骨材の破断が始まると、骨材の破断部と既に形成された破面が連続し、極めて不安定な破壊となり、ただちに供試体は破断に到る。このことから、骨材の破断が始まった時が、割裂引張強

度に対応している。

最後に、分布板を用いる場合は、用いない場合に比べて、割裂引張強度が増加する¹²⁾ことについて考察する。分布板を用いると(図-2のd/10やd/5の場合)、用いない場合に比べて0.2d付近より外側において、載荷面に対する水平引張力、鉛直圧縮力がともに小さくなるとともに、載荷位置付近の二軸圧縮応力状態の範囲が広くなる(図-2)。従って、骨材界面に発生する引張応力は小さくなる(図-5)。また、クラック発生のエネルギー解放率も小さくなる(図-11)。さらに、図-12と同じものを、分布幅が大きい場合について計算してみると、骨材に向かって進展するクラックのSIFも、小さくなる。以上のことから、分布幅が大きい程、一連の破壊は、より高荷重レベルで起こり、引張強度は大きくなる。

5. あとがき

割裂試験供試体の破壊メカニズムについて、割裂試験を行い得られた、応力-ひずみ曲線や破壊性状等の試験結果と、数理弹性論により得られた応力解析結果、応力拡大係数や、はく離の応力の強さなどの応力特異性値の解析結果を用いて、破壊力学的に考察した。コンクリートの割裂引張強度に到る破壊は、まず骨材界面のはく離が0.3~0.45d付近の位置で発生し、その後、供試体の中心側に向かって、順にはく離が発生する。そして荷重増加により、0.4d付近の骨材のはく離先端から、最初にクラックが発生する。さらにクラックは、供試体の中心側に向かう位置で順々に発生する。発生したクラックは、供試体の中心部(0~0.15d)で進展しやすく、この範囲から離れた外側程、進展しにくい。破壊の進行と荷重増加により、中心部で骨材にクラックが到達する。しかし、はく離やクラックの干渉により応力拡大係数が大きい、供試体中心から、0.1~0.15dの位置で、最初に骨材の破断が生じ、さらに中心部へ、次に外側へと、連鎖反応的に骨材の破断が生じ、破面が連続して供試体は破断する。

初期の載荷面に生ずる応力分布(図-2)が、はく離やクラックの発生後も大きく影響し、割裂試験供試体の破壊メカニズムを特徴付けている。割裂試験の二軸応力状態と、直接引張試験の一軸応力状態²⁸⁾の破壊メカニズムを比較することにより、両試験の引張強度特性の相違に関する説明が、より明確になされると考えられる。

謝 辞: 本研究を行うにあたり、当時名古屋工業大学大学院生であった山本泰幹氏(首都公団)には、多大な協力を頂きました。ここに記し厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 小阪義男・谷川恭雄・太田福男:コンクリートの引張強度におよぼす骨材の影響、セメント・コンクリートNo. 284, pp. 9~14, 1970.
- 2) 松木三郎:コンクリートの引張り強度における異方性について、セメント・コンクリートNo. 285, pp. 37~41, 1970.
- 3) 十代田知三:引張強度にみられるコンクリートの異方性、日本建築学会論文報告集、第230号、pp. 1~9, 1975.
- 4) 十代田知三:コンクリートの引張異方性におよぼす調合および粗骨材の影響、日本建築学会論文報告集、第235号、pp. 1~8, 1975.
- 5) Machida, A.: Studies on Tests for Splitting Tensile Strength of Concrete, Proc. of JSCE, No. 242, pp. 115~124, 1975.
- 6) Raphael, J.M.: Tensile Strength of Concrete, J. of ACI, pp. 158~165, 1984.
- 7) 長谷川俊昭・塩屋俊幸・岡田武二:コンクリートの割裂引張強度に関する寸法効果、コンクリート工学年次講演会論文集、Vol. 7, pp. 309~312, 1985.
- 8) 星野政幸・苦米地司:コンクリートの強度異方性に及ぼす粗骨材粒度の影響、セメント技術年報42, pp. 367~370, 1988.
- 9) Bazant, Z.P., Kazemi, M.T., Hasegawa, T. and Mazars, J.: Size Effect in Brazilian Split-Cylinder Tests: Measurements and Fracture Analysis, ACI Materials Journal, pp. 325~332, May-June 1991.
- 10) Slate, F.O. and Hover, K.C.: Microcracks in Concrete, in Fracture Mechanics of Concrete Material Characterization and Testing, ed. by Carpinteri, A. and Ingraffea, A.R., pp. 137~159, 1984.
- 11) ウィットマン(三橋博三訳):コンクリートの内部構造と力学的特性、コンクリート工学、Vol. 21, No. 3, pp. 19~30, 1983.
- 12) 町田篤彦:コンクリートの圧裂試験に関する基礎研究、土木学会論文報告集、第279号、pp. 99~111, 1978.
- 13) 川上泰司・魚本健人:AE法による二次元破壊進展位置標定を用いたコンクリート割裂試験の破壊挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 10, No. 2, pp. 385~390, 1988.
- 14) 柳場重正・川村満紀・斎藤満:圧裂試験におけるコンクリートの破壊挙動に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第238号、pp. 69~76, 1975.
- 15) 柳場重正・斎藤満・宮北啓・今井悟:コンクリートの破壊機構に関する基礎的研究、セメント技術年報29, pp. 296~301, 1975.
- 16) 川上英男:骨材種類がコンクリートの力学的挙動に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13, No. 1, pp. 63~68, 1991.
- 17) 村上敬宜・清水真佐男:疲労強度に及ぼす介在物、微小欠陥、微小き裂の影響、日本機械学会論文集(A編), 54卷, 499号, pp. 413~425, 1988.
- 18) 長谷川久夫・熊本国夫:だ円形介在物をもつ帯板の引張り、日本機械学会論文集(A編), 55卷, 511号, pp. 515~522, 1989.
- 19) 八田正俊・村上敬宜・石田誠:2個のだ円形介在物の干涉における応力場、日本機械学会論文集、Vol. 451, pp. 990~1065, 1985.

- 20) 長谷部宣男・上田稔・山本泰幹・中村卓次：隅角部を有する介在物周辺の破壊メカニズムに関する解析的研究，構造工学論文集，Vol. 38 A, pp. 369～382, 1992.
- 21) Ziegeldorf, S. : Fracture Mechanics Parameters of Hardened Cement Paste, Aggregates and Interfaces, in Fracture Mechanics of Concrete, ed. by Wittmann, F.H., Elsevier, pp.371～409 1983.
- 22) 中西博・馬川省吾・赤崎智康・鈴木恵：円形介在物のはく離の応力拡大係数，日本機械学会論文報告集（A編），52巻，479号，pp.1655～1662, 1986.
- 23) 中西博・北沢正俊・岩本正治・鈴木恵：複合材料における界面はく離とき裂の進展，日本機械学会論文集（A編），Vol. 47, pp. 990～997, 1981.
- 24) 中西博・馬川省吾・鈴木恵：だ円形剛体介在物の界面はく離の応力拡大係数，日本機械学会論文報告集（A編），55巻，516号，pp.1756～1762, 1989.
- 25) 上田稔・長谷部宣男・兒島清隆・中村卓次：ひし形剛体介在物の界面はく離進展特性の破壊力学的研究，土木学会論文集，No. 455/I-21, pp. 45～54, 1992.
- 26) Murakami, Y. et al. : Stress Intensity Factors Handbook. Pergamon Press, Oxford, 1987.
- 27) 斎藤満・柳原重正・川村満紀：複合材料としてのコンクリートの引張り強度特性に関する研究，日本複合材料学会誌，Vol. 6, pp. 16～22, 1980.
- 28) 上田稔・長谷部宣男・佐藤正俊・奥田宏明：コンクリートの引張破壊メカニズムと引張強度の破壊力学的研究，土木学会論文集，No. 466/V-19, pp. 69～78, 1993.
- 29) Atkinson, C. : The Interaction between a Crack and an Inclusion, Int. J. Engrg. Sci., Vol. 10, pp. 127～136, 1972.
- 30) 石田誠・野口博司：円形介在物と任意き裂群を持つ無限体の面内荷重問題，日本機械学会論文集（A編），49巻，438号，pp. 147～155, 1983.

(1993.1.19 受付)

FRACTURE MECHANISM OF CONCRETE ON SPLIT-CYLINDER TENSILE TEST

Minoru UEDA, Norio HASEBE, Masatoshi SATO and Hiroaki OKUDA

Paying the attention to the fracture around coarse aggregates and of mortar, fracture mechanism of concrete on split-cylinder tensile test is investigated. Split-cylinder tensile tests on specimens with the diameter 30 cm are carried out. Stress-strain curves are obtained. These experimental results and the analytical results in plane elastic problem are used to investigate the fracture mechanism. These analytical results are stress singular values at a corner of inclusion, a debonded tip and a crack tip in linear fracture mechanics. On the basis of the fracture mechanism, splitting tensile strength of concrete is discussed.