

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

上田 稔*・長谷部宣男**・佐藤正俊***・
奥田宏明****

コンクリートの直接引張試験を行う。そしてコンクリートの一軸引張荷重下における引張強度に到る破壊メカニズムについて、粗骨材に起因する破壊に着目し、直接引張試験における応力-ひずみ曲線や破断面の観察結果、¹⁾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弾性解析結果等を用いて、破壊力学的考察を行う。

Key Words: plain concrete, fracture mechanism, direct tensile strength, aggregate, crack, stress intensity factor, stress intensity of debonding

1. ま え が き

コンクリートの引張試験は多くの研究者により実施され、その引張強度に及ぼす要因について、いくつかの試験結果が示されている(例えば^{1)~14)}。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、骨材量、骨材界面の欠陥の形状、位置、大きさなどが上げられる。その他の要因としては材令、水セメント比、供試体の長さ、断面の大きさ、載荷速度、供試体打設方向と載荷方向、試験方法(直接引張、割裂引張、曲げ引張)などが指摘されている。しかしこれらの要因は複雑に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えない点もいくつかあると思われる。その配合、寸法、試験方法など様々な試験条件により決定される破壊の過程を経て、試験結果やそのばらつきが得られている。したがってコンクリートの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、上述の種々の要因が破壊メカニズムに及ぼす影響について考察することが重要である。

コンクリートの破壊は粗骨材の界面のはく離を起点として発生することはよく知られているが¹⁵⁾、このはく離の進展状況がその後の破壊に影響を及ぼし、そして上述した引張強度特性に及ぼす骨材に関する要因が種々にわたることを考えると、粗骨材界面のはく離及び粗骨材から発生するクラックの進展特性の解明が、非常に重要である。コンクリートの直接引張試験における、応力-ひ

ずみ曲線(以下 σ - ε 曲線と略す)や破断面の観察結果等は破壊メカニズムの解明に有益な情報を与える。本研究では粗骨材に起因する破壊に着目した直接引張試験を行う。そして σ - ε 曲線の測定や破断面の観察結果、他の研究者の直接引張試験結果、及び著者らや他の研究者によって得られている、骨材周辺の応力分布、骨材界面のはく離先端の応力の強さ、クラックの応力拡大係数(以下SIFと略す)や、エネルギー解放率の数理弾性解析結果を用いて、コンクリートの一軸引張荷重下における引張強度に到る破壊メカニズムの破壊力学的考察を行う。様々な大きさの骨材とセメントペーストの複合体であるコンクリートに、線形破壊力学を直接適用することには限界がある。しかし本研究においては、粗骨材をモデル化した粗骨材界面のはく離や、はく離が生じた粗骨材からモルタル中に発生するクラックに対し、その応力特異性値を適用するもので、その適用はコンクリートを構成している粗骨材とモルタルの界面やモルタルそのものであり、線形破壊力学の適用が可能であると考えられる。著者らは線形破壊力学における応力特異性値を用い、円形やく形のモデル骨材を有する供試体の圧縮試験のはく離やクラックの進展状況が、定性的に説明可能であることを示している¹⁶⁾。Wittmannの「コンクリートの内部構造と力学的特性」¹⁷⁾に従えば、主としてコンクリートの構造レベルを中間レベルで説明するものである。なお本研究では荷重を単調に増加させる場合を対象とする。

2. 直接引張試験の概要

既往の直接引張試験は供試体直径10~15 cm程度以下、最大粗骨材寸法(G_{max})20 mm程度以下のものがほとんどである。これに対し本試験では、粗骨材に起因する破壊の観察を容易にすること、粗骨材の大きさの範囲を広くし、骨材の大きさの違いによる破壊状況の違い

* 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

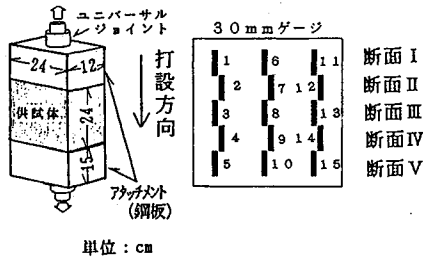


図-1 直接引張試験装置とひずみゲージの配置

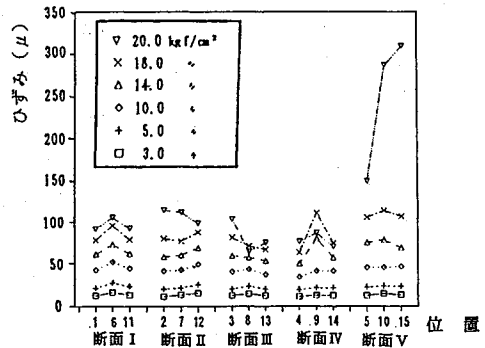


図-3 供試体 No. 2 の各断面 (図-1) のひずみ分布

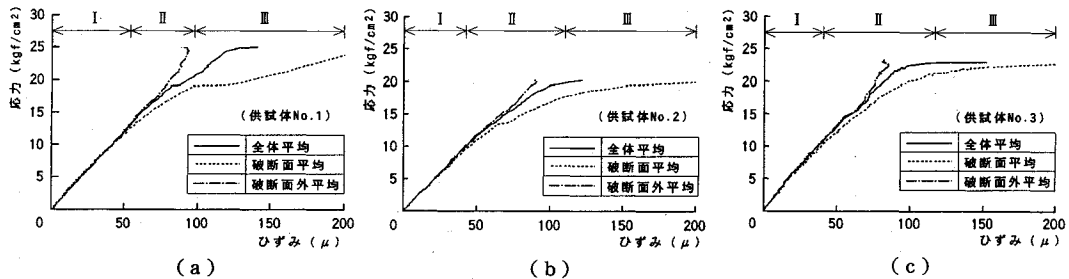


図-2 各供試体の平均の応力-ひずみ曲線

表-1 供試体の配合

最大粗骨材寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m³)						
			水 W	セメント C	粗骨材			合計	
					細骨材 S	40~20 mm	20~10 mm		10~5 mm
40	46	43	157	338	783.4	537.0	317.3	169.6	1024.0

表-2 試験条件

供試体数	3 体
材令	接着剤 2 日 供試体 28 日
荷重速度	0.06 kgf/cm²/sec (割裂試験相当)

を観察しやすくすることなどを考慮して、 G_{max} 40 mm の大きな粗骨材を含む、24×24×12 cm の直方体の供試体を用いた直接引張試験を実施した (図-1)。供試体全体の挙動や破断面での破壊の進展を詳細にとらえるために、30 mm ゲージを図-1 に示すように供試体全面に配置し、 $\sigma-\epsilon$ 曲線の測定を応力レベルで 0.12 kgf/cm² あたりに 1 回とした。供試体の配合、試験条件を表-1、2 に示す。試験方法は、鋼板及び供試体断面が一般的な鋼板接着方式である¹⁸⁾。試験は 3 体実施した。

以下本論文においては、粗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」と称し区別して用い、粗骨材を単に「骨材」と称することにす。

3. 破壊メカニズムと引張強度

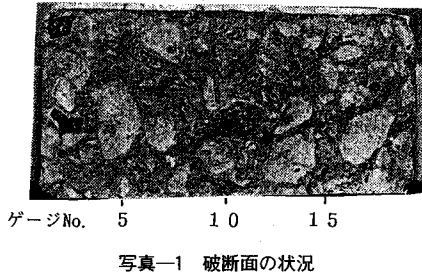
(1) 供試体全体の挙動

本試験における各供試体の平均の $\sigma-\epsilon$ 曲線を図-2 (a)~(c) に示す。直接引張試験で得られた $\sigma-\epsilon$ 曲線の変化をはく離やクラックと結び付け、引張破壊に関する説明が行われている¹⁵⁾。弾性挙動の範囲 (領域 I)、

はく離が発生し非直線的な範囲 (領域 II)、クラックが発生し横に流れる範囲 (領域 III) に分けられるが、図-2 の結果にもそれがよくあらわれている。図-2 において、破断面外平均と破断面 (供試体 No. 1 と No. 3 は断面 II、供試体 No. 2 は断面 V) 平均を比較すると、破断面外平均はほとんど直線であり弾性変形である。これに対し破断面平均は引張強度の約 50% より緩やかに傾き始め、ピーク荷重付近で横に大きく流れている。図-3 に、例として供試体 No. 2 の荷重レベルごとのひずみ分布を示す。載荷初期にはひずみは一般的な分布であり、ある荷重レベルからは破断面となる位置で大きなひずみが生じ、引張破壊は局所的であることがわかる。

(2) 骨材界面のはく離の発生

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¹⁹⁾。そのため、骨材の概ね引張荷重の作用方向に面する位置に引張応力が発生する。円形やだ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ってもこのことは明らかである。だ円形介在物の場合は引張荷重に面する位置の曲率半径が小さい程^{20)~22)}、く形状介在物の場合は引張荷重に面する位



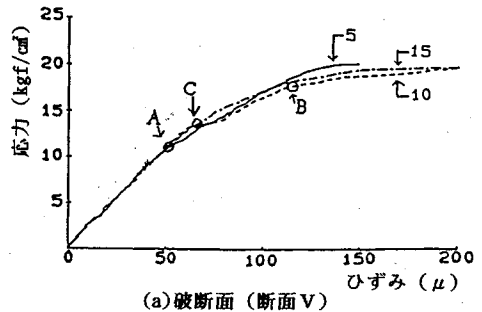
表—3 骨材のはく離面が骨材の上面に生じている場合と下面に生じている場合の比率

供試体	骨材下面 (%)	骨材上面 (%)
No. 1	77	23
No. 2	88	12
No. 3	94	6

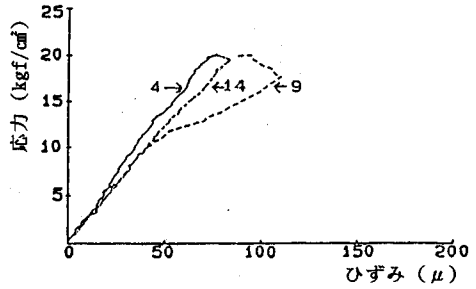
表—4 はく離または破断した骨材の面積 (大きさの順)

供試体	はく離した骨材面積 (cm ²)				破断した骨材面積 (cm ²)			
	Max	2	3	4	Max	2	3	4
No. 1	9.9	7.7	4.9	3.2	2.2	2.2	1.4	1.1
No. 2	10.8	6.9	6.4	5.4	2.6	2.3	1.8	0.4
No. 3	12.1	4.7	4.7	3.5	4.5	3.1	3.1	2.4

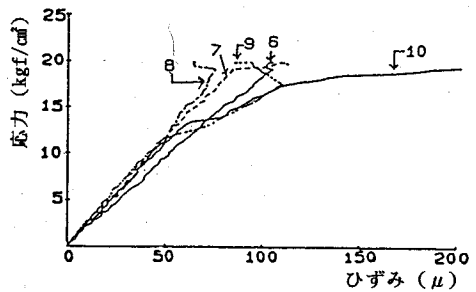
置の隅角部角度が小さい程²³⁾、そして介在物が母材より硬い程^{21)~23)}応力集中が大きい。実際のコンクリートにおいては骨材の大きさ、形状、即ち応力集中が生じやすい隅角部とその角度、曲率半径、界面の付着強さの不均一、荷重の方向との関係などから、応力上最も不利な骨材の界面にはく離が発生する。荷重載荷前から存在するブリージングによる空隙や、骨材界面の非接着部などの初期欠陥が破壊の起点となることも多い。実際引張試験の破断面には骨材の抜け跡が認められる^{11), 51), 12), 26), 27)}。Fenwick ら⁹⁾は供試体の打設方向と引張荷重方向の違いによる破断面の観察結果を示している。それによれば供試体の打設方向と引張荷重方向が同じ場合 (この場合引張荷重方向に面する骨材の下面にブリージングがあり、骨材とモルタルの付着の弱い部分が存在する)、破断面では骨材の大部分がブリージングのない上側に付着していたが、供試体の打設方向と引張荷重方向が直交する場合 (この場合概ね引張荷重と骨材下面のブリージングは同方向となる) には、破断面の両側は同程度骨材が付着していると報告している。写真—1 に著者らが行った試験の破断面の状況を示す。供試体の打設方向と引張荷重方向は同じである。破断面において、骨材のはく離面が骨材の上面に生じている場合と下面に生じている場合の比率は、表—3 のとおりで、ほぼ 80% 以上が骨材の下面である。表—4 に破断面に現れたはく離した骨材界面の面積を大きい順に示す。G_{max} に近い比較的大きな骨材のはく離していることがわかる。これらの観察結果は、はく離が引張荷重方向に面する付着の弱い片側の骨材界



(a)破断面 (断面V)



(b)破断面上部断面 (破断IV)



(c)供試体中央縦断面

図—4 供試体 No. 2 の各断面 (図—1) の応力-ひずみ曲線

面に生じ、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。骨材の上面ではく離している場合は、骨材が比較的大きく上面の形状が尖っているものが多く、上面で応力集中が生じ易いもののはく離したと考えられる。八田ら²²⁾は、同様引張荷重を受ける母材より硬い 2 個の大きさの異なる円形介在物の、また著者ら²⁴⁾は、2 個の大きさの異なるく形剛体介在物の応力解析を行い、大きい介在物の方が、介在物界面にはく離を起こす引張応力の集中が大きいことを示している。これらの結果から初期欠陥がない場合でも、形状が同一なら大きい骨材程はく離が生じやすい。破壊靱性値の大小は、骨材 ≫ モルタル > モルタルと骨材の付着の順である²⁵⁾。したがって上述したとおり、骨材に起因する応力集中が骨材界面に生じ、そして骨材の界面にはく離が発生して破壊が始まる。図—4 (a) は破断面の個々の位置での $\sigma-\epsilon$ 曲線であり、番号はゲージの番号 (図—1) と対応している。破断面においても

表-5 応力-ひずみ曲線における変曲点のひずみと応力

供試体	A 点			B 点			引張強度 σ_t (kgf/cm ²)
	ひずみ ϵ_d (μ)	応力 σ_d (kgf/cm ²)	σ_d / σ_t	ひずみ ϵ_m (μ)	応力 σ_m (kgf/cm ²)	σ_m / σ_t	
No. 1	55	12.7	0.51	94	18.0	0.72	24.9
No. 2	46	10.0	0.50	111	17.5	0.87	20.2
No. 3	46	10.8	0.47	114	19.2	0.83	23.0

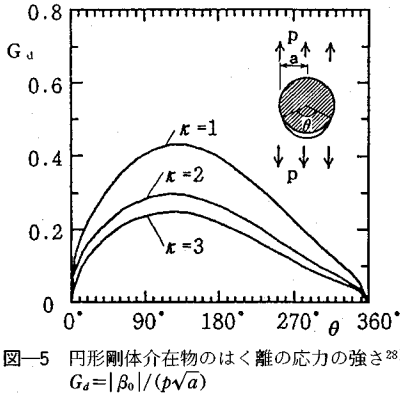


図-5 円形剛体介在物のはく離の応力の強さ²⁸⁾
 $G_d = |\beta_0| / (p\sqrt{a})$

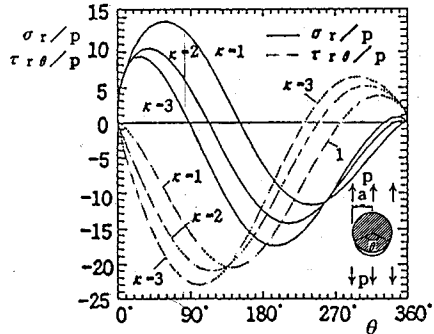


図-6 円形剛体介在物のはく離先端近傍の応力²⁸⁾
(σ_r : 法線方向応力, $\tau_{r\theta}$: せん断方向応力)

低荷重レベルでは、ゲージの位置によらず様な変形と弾性挙動を示している。ある荷重レベルに達すると骨材の界面にはく離が発生する。図-4 (a) の A 点で No. 5 の傾きがゆるく変化しており、はく離の発生を示している。本試験の場合 A 点の応力 (σ_d で表わす) は引張強度 (σ_t で表わす) に対し、 $\sigma_d / \sigma_t = 0.5$ 程度である (表-5)。写真-1 より、ゲージ No. 5 の近くに最大の骨材があり、ゲージ No. 5 の結果は、この骨材で最も早く界面はく離したことを示している。なお図-4 (b) は、破断面の $\sigma-\epsilon$ 曲線でないが、ゲージ No. 9 は No. 5 よりわずかに大きい荷重レベルで、傾きが変化している。これは破断面外でも、部分的にはく離が発生する場合があることを示していると考えられる。No. 1, 3 の供試体では、このようなものは認められなかった。

(3) 骨材界面のはく離進展特性

介在物の形状を円形、だ円形及びびく形として介在物界面のはく離に対する応力解析が行われている。介在物の形状が円形、だ円形の場合は川砂利など丸みを有する骨材の円弧状の界面、く形の場合は砕石など角を有する骨材の隅角部と直線状の界面のモデルと考えることができる。これらの介在物のはく離に対する応力解析結果等をもとに、骨材界面のはく離進展特性について考察する。図-5, 6 は数理弾性解析により著者らが、円形剛体介在物に対して求めたはく離の応力の強さ²⁸⁾ ($|\beta_0|$: はく離先端の応力特異性の大きさを示す値ではく離進展特性が評価ができる²⁹⁾)、およびはく離先端近傍の応力である²⁸⁾。はく離の応力の強さは極値を有し上に凸の曲線である (図-5、以下図-5, 6, 8, 11~14 において κ はポアソン比 ν の関数で、平面ひずみの場合 $3-4\nu$ 、一般化した平面応力の場合 $(3-\nu)/(1+\nu)$ である。モルタ

ルの場合 κ は 2 程度の値をとる。また図-5, 6, 8, 10~14 の縦軸はすべて無次元化した値である)。介在物を円形弾性体やだ円形剛体とした場合にも、はく離先端の応力特異性値は極値をもつ²⁹⁾⁻³¹⁾。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 $\theta = 50^\circ$ 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圧縮に変化する。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、法線方向応力が圧縮に変化するあたりで極値をもちその後は減少する (図-6)。これは、はく離の進展方向が荷重の方向に対し徐々に変化するためである。これらから、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、骨材界面が円弧状の場合、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する。そしてその後は荷重増加があれば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。斎藤ら³²⁾は円形モデル骨材 ($\phi = 3.2$ cm) を有するコンクリートの直接引張試験を行い、円形モデル骨材界面の一部をはく離が進展し、最終的に供試体が破断する結果を示している (図-7)。

介在物がく形の場合ははく離の応力の強さは単調増加である (図-8)²⁹⁾。これははく離が大きくなっても、はく離の進展方向と荷重の方向に変化がないためである。著者らは、同様引張荷重を受ける、非対称な 2ヶ所はく離を有する対称なく形剛体介在物 (図-9) のはく離進展特性を、はく離の応力の強さにより調べている³³⁾。これによれば、一方のはく離が進展するともう一方のはく離の応力の強さはゆるやかな単調減少である (介在物を円形弾性体²⁹⁾、だ円形剛体³¹⁾ とした場合もこれと同様の

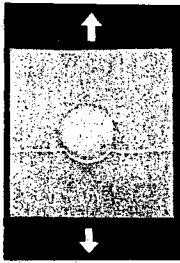


図-7 円形モデル骨材を用いた直線引張試験供試体の破壊状況³²⁾

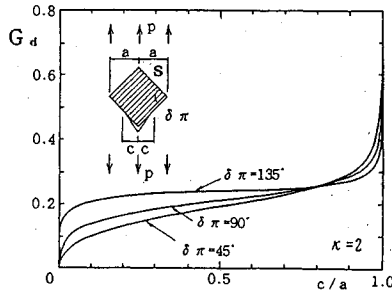


図-8 く形剛体介在物のはく離の応力の強さ²³⁾
 $G_d = |\beta_0| / (\rho\sqrt{a})$

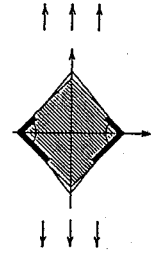


図-9 非対称な2ヶ所のはく離を有する対称なく形剛体介在物

ことが言える)。またはく離が大きい方がはく離の応力の強さが大きい。このことは、はく離が両側に対称にある状態から、何らかの理由で片側のはく離が進展し始めると、そのはく離は介在物の片側にわたって進展し、一方のはく離は止まっていることを示している。また一樣引張荷重を受ける、片側にはく離を有する対称なく形剛体介在物(図-8の説明図)に対し、片側のはく離が進展するにつれ、はく離のない隅角部(S点)の応力の強さ(隅角部の応力特異性の大きさを示す値ではく離の発生が評価できる)は単調減少し、その隅角部からはく離が発生しにくくなることを示している²³⁾。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。このため直線状界面と隅角部を有するく形状の骨材の場合、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。そして隅角点に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。しかし界面と荷重の方向によっては、はく離は進展しない。

以上円弧状、直線状の界面にかかわらず、はく離が進展を始めると骨材界面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。引張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、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。

(4) はく離の干渉と進展

骨材の界面にはく離が発生し、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。これは既に述べたとおり、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。このため、荷重増加にともない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。はく離の影響が大きいので最初にはく離が発生した骨材に近く、骨材に起因

する応力集中が大きい骨材界面に次のはく離が発生しやすい。荷重の増加とともに、このはく離の発生と進展は互いに干渉を及ぼしながら、はく離の進展と増加をもたらす。図-4(a)において、ゲージNo.5付近の骨材にはく離が発生すると(A点)、その影響を受けNo.10の $\sigma-\epsilon$ 曲線が明確な折れ点を示す(C点)。これはゲージNo.10付近の骨材にはく離が発生したことを示し、この影響を受けてNo.5, 15の $\sigma-\epsilon$ 曲線はさらにゆるやかな傾きを示す。そして、荷重の増加と共に骨材界面のはく離が進展し、 $\sigma-\epsilon$ 曲線は徐々に傾きが小さくなる。平均の $\sigma-\epsilon$ 曲線(図-2)がゆるやかな曲線状の非線形性をもつのにに対し、破断面においては図-4(a)の様な $\sigma-\epsilon$ 曲線が得られた。これは平均の $\sigma-\epsilon$ 曲線では、ある程度連続的に骨材界面のはく離が発生進展しているためである。これに対し破断面の個々の場所の $\sigma-\epsilon$ 曲線には、ある骨材にはく離が発生し、その後別の骨材のはく離が発生し、それらが干渉していること及びはく離が一旦進展すると荷重増加がなくともある範囲を進展することが示されている。

はく離は大きさが概ね骨材の大きさまでで、不均一なものであるが、同一断面付近の骨材界面に発生する。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。引張荷重作用方向と直交する直線上に並ぶ2等長クラック、3等長クラック(図-10)、無限個の等長クラック(図-10)、2不等長クラックのSIFが求められている³⁴⁾。いまはく離が骨材の界面にあることを無視して、近似的にはく離を均質弾性体の中にあるクラックと考えると、はく離の10倍程度までの離間距離のはく離は干渉があることがわかる(例として図-10より干渉の影響がなくなるのは $2a/d=0.1$ 程度である)。実際の骨材界面のはく離は、必ずしも同一断面上に位置しない。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、はく離の大きさ程度(骨材の大きさと同程度)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、同一直線上にある同

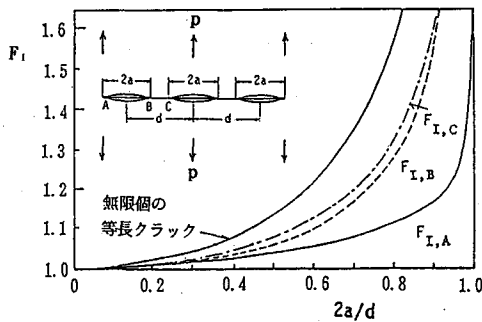


図-10 等長クラックの干渉による応力拡大係数³⁴⁾
 $F_I = K_I / (\rho\sqrt{\pi a})$
 ($F_{I,A}$, $F_{I,B}$, $F_{I,C}$ は説明図に示す 3 個の等長クラックのそれぞれ A, B, C 点の応力拡大係数)

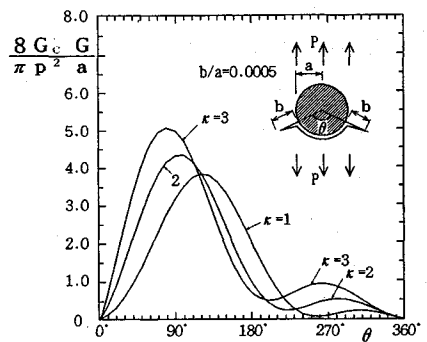


図-11 円形剛体介在物からのクラック発生エネルギー解放率²⁸⁾ G_c (G :せん断弾性係数)

表-6 コンクリートの直接引張試験におけるモルタルクラック発生時のひずみ

著者	ひずみ μ	配合 水 : セメント : 細骨材 : 粗骨材	Gmax mm
吉本 ⁷⁾	110	0.59 : 1.00 : 2.57 : 2.43	25
畑野 ¹⁾	110程度 **	0.37 : 1.00 : 1.84 : 3.41	25
	120 "	0.50 : 1.00 : 2.37 : 4.21	
	80 "	0.65 : 1.00 : 3.55 : 5.80	
渡辺 ³⁷⁾	110	0.50 : 1.00 : 1.91 : 2.59	*
著者 (表-5再掲)	94~114	0.46 : 1.00 : 2.32 : 3.03	40

*) 文献に記載されず ***) 文献の図から明確な値としては
 識別し難いので程度と記す

表-7 モルタルの直接引張試験における応力-ひずみ曲線が
 直線性を失い始めるひずみ

著者	ひずみ μ	配合 水 : セメント : 細骨材
吉本 ³⁸⁾	80	0.59 : 1.00 : 2.57
畑野 ¹⁾	60	0.50 : 1.00 : 3.00
Gopalratnam ¹⁰⁾	80	0.45 : 1.00 : 2.00
著者 ⁸⁾	70	0.52 : 1.00 : 2.75

じ水平方向の離間距離をもつクラックの干渉と同程度である³⁴⁾。

(5) クラックの発生

図-4 (a) において B 点で $\sigma-\epsilon$ 曲線が横に大きく流れ始めている。図-4 (b), (c) にはそれぞれ破断面に対し直上のひずみ計測断面 (断面 IV) と、供試体中央縦断面の個々のゲージごとのひずみを示す。B 点に対応した応力レベル以後、ひずみが減少する傾向が認められる。これは B 点でクラックが発生し、その後破壊の進行にともない破断面 (断面 V) にひずみが集中していることを示している。Zaitsev³⁵⁾ は種々の大きさの多くの円形の骨材を有するモデルコンクリートのはく離やクラックの発生、進展のシミュレーションを行い、その $\sigma-\epsilon$ 曲線を示している。その結果においても $\sigma-\epsilon$ 曲線が骨材界面のはく離が発生するまでは直線的で、はく離が発生するとやや非直線的になり、クラックが発生すると横に流れることを示している。

3 体の供試体のクラック発生時の破断面のひずみは 94

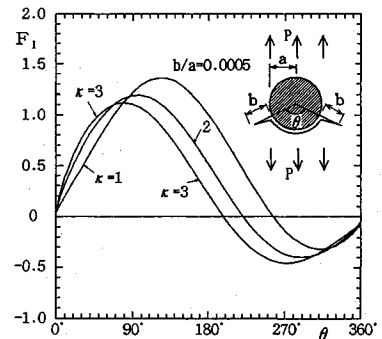


図-12 円形剛体介在物からのクラック発生モード I の応力
 拡大係数²⁸⁾ $F_I = K_I / (\rho\sqrt{\pi a})$

~114 μ と同じ程度の値となっている (表-5)。表-6 は、この結果も含め、他の研究者によるコンクリートの直接引張試験の $\sigma-\epsilon$ 曲線が横に流れ始めるとき (図-4 (a) の B 点に相当)、モルタルクラックが発生したとして、そのときのひずみを整理したものである。その値は配合の違いにもかかわらず、80~120 μ 程度の範囲にあることがわかる。一方、吉本はモルタルの直接引張試験を行い、供試体から切りとったモルタルの薄片を顕微鏡で調べ、 $\sigma-\epsilon$ 曲線が直線性を失い始めるひずみは、ペーストクラックの発達が目著しになり始めるひずみとよく一致することを示し、そのひずみは 80 μ であることを示している³⁸⁾。同様のことがモルタルの曲げ試験供試体において認められることも示している³⁹⁾。表-7 は吉本の結果も含め、著者らや他の研究者によるモルタルの直接引張試験において、 $\sigma-\epsilon$ 曲線が直線性を失い始めるひずみを整理したものである。これよりセメントペーストの破壊が目著しになるモルタルの破壊が始まるひずみは、モルタルの配合によっても異なるが 60~80 μ 程度であり、概ねひずみで表わしたモルタルの破壊靱性値に対応していると考えられる。表-6 と 7 のひずみを比較すると、全般的に表-6 のひずみが大きめの値である。また吉本の結果は、モルタルの配合、試験方法、供試体寸法、測

表-8 破断面の状況と引張応力

供試体	はく離した骨材面積比 (%)	破断した骨材面積比 (%)	応力 σ_m (kgf/cm ²)	$\sigma_t - \sigma_m$ (kgf/cm ²)
No. 1	23	5	18.0	6.9
No. 2	34	2	17.5	2.7
No. 3	25	8	19.2	3.8

定ゲージ長と位置が同一のものであるが、表-6のひずみの方が大きい。以上のことはコンクリートの場合、モルタルクラック発生時のひずみは、骨材界面のはく離によるひずみも含まれるため、モルタルの破壊靱性値に対応するひずみより大きめの値になっている。そしてはく離先端がモルタルの破壊靱性値に達して、クラックが発生していることを示している。

著者らは、円形剛体介在物のはく離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、はく離が円周角100°前後で、はく離先端近傍の法線方向応力は引張から圧縮に変化するので、はく離が進展しにくくなる一方(図-6)、クラック発生エネルギー解放率や(図-11)、モードIに対するSIFが極値を有し(図-12)、クラックが発生しやすくなることを示している²⁸⁾。この解析結果は斎藤ら³²⁾の試験における、クラックの発生位置(円周角で100°程度)ともよく一致している(図-7)。角ばった形状の粗骨材の場合、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、隅角点近傍の応力場の応力集中が大きくなりクラックが発生しやすくなる²³⁾。

以上荷重の増加とともに骨材界面に発生するはく離が増加し、かつ個々のはく離が大きくなり干渉の程度が高まってくる。そして骨材界面のはく離先端からクラックが発生する。クラックを最初に発生させる骨材は、必ずしも最初にはく離が発生した骨材にならない。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からクラックが発生する。はく離先端の応力集中の程度は、骨材界面のはく離の大きさ、まわりのはく離による干渉の程度、はく離と引張荷重の作用方向などから決定される。表-8には破断面の状況とB点の応力(これを σ_m で表わす)を示す。はく離した骨材面積が他に比べて大きいNo.2の供試体の σ_m が最も小さいことがわかる。これはNo.2の供試体は、はく離が多いためその干渉の程度が大きく、クラックの発生する荷重レベルが低くなったためである。

(6) 破断面の形成と引張強度。

Carinoら⁴⁰⁾は円形のモデル骨材を有する供試体を破断後、X線写真により観察し、致命的なクラックの周辺にはクラックは認められず、最初のクラックが供試体を破断させるクラックに成長すると説明している。本試

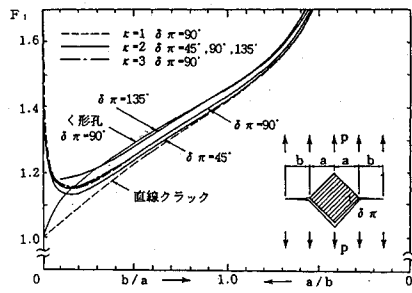


図-13 はく離を有する形剛体介在物及びく形孔から発生したクラックのモードIの応力拡大係数²³⁾
 $F_I = K_I / (\sqrt{p\sqrt{\pi a}})$

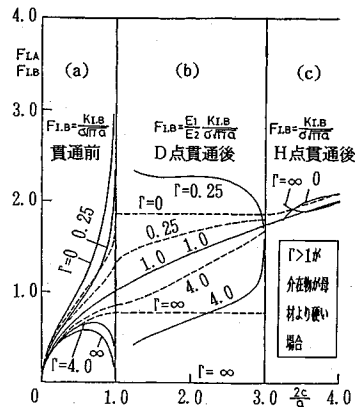
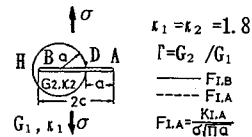


図-14 介在物に接近、貫通するクラックの応力拡大係数⁴²⁾
 ($F_{I,A}$, $F_{I,B}$ はそれぞれ説明図のA, B点の応力拡大係数)

験においても、破断面以外でクラックの発生を示す、 $\sigma - \epsilon$ 曲線が横に流れるものは認められない(図-4(b), (c))。これらの試験結果は、クラックが発生するとその断面で破断面が形成されることを示している。

著者らは介在物界面のはく離から発生するクラックのSIFを検討するため、く形孔⁴¹⁾及び片側にはく離を有する形剛体介在物の隅角部から発生したクラック²⁸⁾のSIF(図-13)を解析している(孔と剛体介在物は剛性が両極限の場合に相当し、一般の弾性介在物の場合はこの両者の中間に存在する)。これによれば介在物が母材より硬い場合、隅角部から発生したクラックのSIFは、介在物の大きさに比べて十分短いクラック長さで極小値をとり、それ以上のクラック長さに対しては単調増加する。つまり上記は介在物が単一で形状をく形とした場合であるが、発生したクラックは不安定成長することを示している。母材より硬い円形介在物にクラックが接近す

ると、一定荷重のもとではその SIF は減少するが (図—14)⁴²⁾、円形介在物のはく離を有し、そのはく離がある大きさ以上になると、円形介在物による 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。またクラックが円形介在物に近づくにつれ、はく離先端の応力特異性値も大きくなる³⁰⁾。以上の解析結果から骨材界面のはく離が比較的大きい場合には、骨材界面のはく離に骨材界面はく離先端から発生した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、荷重増加がなくてもつながる。このためクラック発生後は、 σ - ϵ 曲線が横に流れる (図—4 (a))。これらのことは前にも述べたように、引張破壊の破断面に、骨材の抜け跡が^{5), 12), 26), 27)}、本試験 (表—4) においても、破断面には最大粒径及びそれに近い大きさの骨材の抜け跡が認められることに対応する。この結果は、(2) で述べたとおり、ブリージングの存在や引張応力の集中により、大きい骨材程はく離が発生しやすく、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ためである。

クラック発生後も強度増加がみとめられる。最初の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、本試験では 72~87% (表—5)、他の研究者の試験では、畑野¹⁾は 70% 程度、吉本⁷⁾、渡辺³⁷⁾は 95% 程度、Slate⁴⁵⁾は約 75% であると述べている。このことより、上述のはく離とはく離のつながりが、荷重増加を必要としないことから、クラック発生後においても強度増加をもたらす別の機構が生じていると考えられる。一方引張試験の破断面には骨材の破断が認められる^{1), 11), 27)}。本試験においてもとくにはく離した骨材の大きさより小さいものが破断している (表—4)。著者らは、骨材の大きさの違いを見るために、さらに骨材の大きさの範囲を広くし最大粒径 150 mm の骨材を含む直径 30 cm の円柱供試体の直接引張試験¹⁸⁾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 40 mm 程度のものは骨材が破断しているのが認められた。このことは骨材の破壊靱性値が、モルタルのそれより十分大きいことから、最初に骨材自身の破断が生じるのではなく、クラックが骨材に向かって進展し骨材を破断することによる。上述のとおり骨材界面のはく離が比較的大きい場合には、はく離はクラックによりつながりやすいことから、破断する骨材ははく離がないか小さい。またその骨材の大きさは大きな骨材ははく離が発生しやすいので ((2) 参照)、上述の試験結果のとおりある大きさ以下の骨材である。モルタルと骨材の付着の破壊靱性値が小さいので、はく離がないか小さい骨材は存在しにくいように思われる。しかし破断される骨材が存在するという事は、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と考えられる。

はく離がないかあっても小さい、母材より硬い円形介在物にクラックが接近すると、一定荷重のもとではその SIF は減少する^{42), 30)}。図—14 において (a) の領域で Γ が 1 以上の場合で $2c/a=1.0$ 付近がこれに相当する。この解析結果は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には、骨材によって進みにくくなることを示している。さらにクラックが骨材に到達してもただちに骨材の破断は生じない。骨材の破壊靱性値がモルタルのそれに比べて十分大きいからである。以上より、荷重増加とともにいくつかの骨材界面に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、抜ける骨材もあるかもしれない。しかしクラックが到達した骨材界面の方向と引張荷重の方向によっては、はく離は発生しにくいと考えられ、クラックは骨材に到達したままの状態で停止している。

荷重増加により、骨材に到達したクラック先端が骨材の破壊靱性値に達すると骨材の破断が生じる。クラックが母材より硬い円形介在物に進入すると、クラックの SIF は介在物がない場合に比べて大きく単調増加し、貫通後は介在物の影響は小さく介在物がない場合の値に近づいていく (図—14 (b), (c) の領域)⁴²⁾。このことはクラックが骨材の破壊靱性値を越え一旦骨材に進入すると、その後破断は不安定で骨材を貫通してしまうことを示している。そのためこの影響を受けて、その時までには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先端の SIF が連鎖反動的に大きくなり、いくつかの骨材の破断が生じる。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、引張強度に対応していると考えられる。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十分生じている場合には、破断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、荷重増加も小さい。表—8 において、クラック発生後の強度増加 ($\sigma_t - \sigma_m$) は、はく離した骨材の面積比が最も大きく、破断した骨材の面積比が最も小さい、供試体 No. 2 が最も小さいこともこのことを裏付けている。

4. あとがき

プレーンコンクリートの引張破壊メカニズムについて

て、コンクリートの直接引張試験を行い、得られた応力-ひずみ曲線や破壊性状等の試験結果と、数理弾性論により得られた応力解析結果や、破壊力学における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。コンクリートの引張強度に到る破壊は、まずいくつかの骨材界面のはく離の発生、進展とそのはく離の干渉により、クラックが発生する。つぎに発生したクラックと既に存在している骨材界面のはく離との干渉によるクラックとはく離の成長、さらに他のいくつかの骨材界面のはく離からのクラックの発生、成長、そしてこれらのクラックとはく離の連結、いくつかの骨材界面へのクラックの到達、最後にクラックによる骨材の破断が連鎖反動的に生じ、破断面が形成される破壊メカニズムである。

参考文献

- 1) 畑野正：衝撃引張荷重によるコンクリートの挙動，土木学会論文集，第73号，pp.28~34，1961.
- 2) Spetla, Z. and Kadlecck, V. : Effect of the Slenderness on the Direct Tensile Strength of Concrete Cylinders and Prisms, BULLETIN RILEM, No.33, pp 403~412, 1966.
- 3) Kadlecck, V. and Spetla, Z : Effect of Size and Shape of Test Specimens on the Direct Tensile Strength of Concrete, BULLETIN RILEM, No.36, pp.175~184, 1967.
- 4) Johnston, C.D. : Strength and Deformation of Concrete in Uniaxial Tension and Compression. Magazine of Concrete Research, Vol.22, No.70, pp.5~16, 1970.
- 5) Fenwick, R.C. and Sue, C.F.C. : The Influence of Water Gain upon the Tensile Strength of Concrete. Magazine of Concrete Research, Vol.34, No.120, pp.139~145, 1982.
- 6) Saito, M. and Imai, S. : Direct Tensile Fatigue of Concrete by the Use of Friction Grips, ACI Journal, September-October pp.431~438, 1983.
- 7) 吉本彰・長谷川博・川上正史：コンクリートおよびモルタルの純引張，圧裂および曲げ強度の比較，セメント・コンクリート，No.435，pp.42~48，1983.
- 8) Ditommaso, A. : Evaluation of Concrete Fracture, Fracture Mechanics of Concrete, ed. by Carpinteri, A. and Ingrassia, A.R., Martinus Nijhoff Publishers, pp.31~65, 1984.
- 9) Raphael, J.M. : Tensile Strength of Concrete, ACI Journal, March-April, pp.158~165, 1984.
- 10) Gopalaratnam, V.S. and Shah, S.P. : Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension, ACI Journal, May-June pp.310~323, 1985.
- 11) Tinic, C. and Brühwiler, E. : Effect of Compressive Loads on the Tensile Strength of Concrete at High Strain Rates, The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol.7, No.2, pp.103~108, 1985.
- 12) Guo, Z. and Zhang, X. : Investigation of Complete Stress-Deformation Curves for Concrete in Tension, ACI Materials Journal, July-August, pp.278~285, 1987.
- 13) Xie, N. and Liu, W. : Determining Tensile Properties of Mass Concrete by Direct Tensile Test, ACI Materials Journal, May-June, pp.214~219, 1989.
- 14) 永山功・渡辺和夫・尾畑伸之：ダム用コンクリートの直接引張強度試験とその試験結果についての考察，ダム技術，No.54，pp.38~46，1991.
- 15) Slate, F. O. and Hover, K.C. : Microcracking in Concrete, in Fracture Mechanics of Concrete Material Characterization and Testing, ed. by Carpinteri, A. and Ingrassia, A.R., pp.137~159, 1984.
- 16) 上田稔・東側豊二・長谷部宣男・梅原秀哲：ダムコンクリートの粗骨材に起因する内部挙動の破壊力学的研究，土木学会第46回年次学術講演会，V-244，pp.504~505，1991.
- 17) 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.
- 18) 佐藤正俊・上田稔・遠藤孝夫・長谷部宣男：コンクリートの大型供試体直接引張試験装置に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.549~554，1992.
- 19) 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.
- 20) 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巻，499号，pp.413~425，1988.
- 21) 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巻，511号，pp.515~522，1989.
- 22) 八田正俊・村上敬宜・石田誠：2個のだ円形介在物の干渉における応力場，日本機械学会論文集，Vol.451，pp.990~1065，1985.
- 23) 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.38A，pp.369~382，1992.
- 24) 中根純：く形剛体介在物の干渉問題，名古屋工業大学卒業論文，1992.
- 25) Ziegeldorf, S. : Fracture Mechanics Parameters of Hardened Cement Paste, Aggregates, and Interfaces, in Fracture Mechanics of Concrete, ed. Wittmann, F.H., Elsevier, pp.371~409, 1983.
- 26) Saito, M. : Characteristics of Microcracking in Concrete under Static and Repeated Tensile Loading, Cement and Concrete Research, Vol.17, pp.211~218, 1987.
- 27) Wolinski, S., Hordijk, D.A., Reinhardt, H.W. and Cornelissen, H.A.W. : Influence of Aggregate Size on Fracture Mechanics Parameters of Concrete, Int. J. of Cement Composites and Lightweight Concrete Vol.9, No.2, pp.95~103, 1987.
- 28) 山本泰幹・上田稔・長谷部宣男・中村卓次：介在物から発生したクラックやはく離の応力解析，第41回応用力学連合講演会予稿集，pp.271~272，1992.
- 29) 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，機械学会論文報告集（A編），52巻，479号，pp.1655~1662，1986.

- 30) 中西博・北沢正敏・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.
- 31) 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, 機械学会論文報告集 (A 編), 55 巻, 516 号, pp. 1756~1762, 1989.
- 32) 斎藤満・柳場重正・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.
- 33) 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.
- 34) Murakami, Y. et al. : Stress Intensity Factors Handbook, Pergamon Press, Oxford, 1987.
- 35) Zaitsev, Y. : Crack Propagation in a Composite Material, Fracture Mechanics of Concrete, ed. by Wittmann, F.H., Elsevier, Amsterdam, pp.251~299, 1983.
- 36) 吉本彰：コンクリートの変形と破壊, 学献社, pp. 64~66, 1990.
- 37) 渡辺夏也・橋場光雄：コンクリートの引張強度に関する研究, セ技年報, Vol.38, pp. 294~297, 1984.
- 38) 吉本彰・長谷川博・川上正史：引張クリープ機構に関する研究, セ技年報, Vol. 36, pp. 333~336, 1982.
- 39) 吉本彰・川上正史：曲げ引張力によるセメントペースト中のマイクロクラック, セ技年報, Vol. 26, pp. 275~277, 1972.
- 40) Carino, N.J. and Slate, F.O. : Limiting Tensile Strain Criterion for Failure of Concrete, ACI Journal, March, pp.160~165, 1976.
- 41) Iida, J., Hasebe, N. and Nakamura, T. : Approximate Expressions for SIF of Crack Initiating from Notch for Thin Plate Bending and Plane Problems, Engrg. Fract. Mech., Vol.36, No.5, pp.819~825, 1990
- 42) 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.

(1992. 6. 18 受付)

FRACTURE MECHANISM OF PLAIN CONCRETE UNDER UNIAXIAL TENSION

Minoru UEDA, Norio HASEBE, Masatoshi SATO and Hiroaki OKUDA

Paying the attention to the fracture around coarse aggregates and of mortar, fracture mechanism of plain concrete under uniaxial tension is investigated. The direct tensile tests of plain concrete are carried out. Stress-strain curves are obtained and broken-sections are observed. These experimental results and some analytical results in plane elastic problem are used to investigate the fracture mechanism. These analytical results are stress singular values at a debonded tip, stresses near the tip and stress intensity factors at a crack tip. On the basis of the fracture mechanism, the direct tensile strength of concrete is discussed.