

論文

[1091] コンクリートのフラクチャープロセスゾーンにおける破壊メカニズムに関する研究

正会員○ 上田 稔 (中部電力 電力技術研究所)

長谷部宣男 (名古屋工業大学)

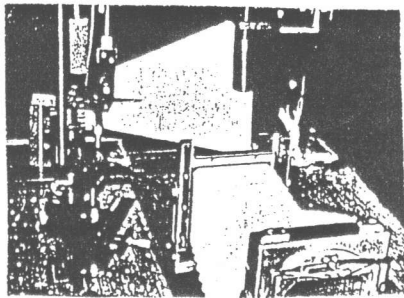
正会員 佐藤 正俊 (中部電力 電力技術研究所)

近藤 久雄 (中部電力 電力技術研究所)

1. まえがき

破壊力学によりコンクリートを扱う研究が多くなされ、力学特性の解明などに多くの成果が期待されている[1]。コンクリートの破壊力学において、最も重要な問題の一つが、コンクリートの破壊力学を特徴づけるクラック先端付近に形成されるフラクチャープロセスゾーン(以下FPZと略す)の問題である。Mindness[2]は多くの研究者によるFPZの観察結果をまとめ、FPZの明確な大きさはなく、それは供試体の寸法、形状や計測方法に大きく依存すると思われるとしている。また、FPZの存在によるコンクリートの非線形挙動を把握するために、そのモデル化とともに、引張軟化曲線や破壊エネルギー(以下TSC, G_F と略す)を求める試験が実施され、その要因と影響についての試験結果が示されている(例えば[3],[4],[5],[6])。TSCや G_F に及ぼす要因としては、骨材に関しては大きさ、形状、粒度分布、骨材の硬さ、骨材表面の粗滑度やブリージングなどによる骨材界面の欠陥の位置と大きさなどが上げられる。その他の要因としては水セメント比、供試体の形状、寸法、載荷速度、試験方法と多くの要因が指摘される。しかしこれらの要因は複雑に影響を与え、そのTSCや G_F に与える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。さらに同じ条件で試験を実施しても、ばらつきが大きく、ばらつきの多くは破面に介在する骨材の大きさ、量、および位置に依るとの報告もされている[1]。様々な試験条件のもとで、それぞれFPZが形成され、その結果としてTSCや G_F が求められていることを考えると、上述のFPZそのものや、試験結果の要因やばらつきに対する特性をより明確にするためには、FPZの破壊メカニズムを解明することが重要であると考えられる。

FPZの存在は、コンクリートが骨材とセメントペーストからなる、複合材料としての非均質性によるものと考えられる。コンクリートの破壊は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[7]、このはく離の進展状況がその後の破壊にも影響を及ぼすこと、そしてこのためと考えられるが、TSCや G_F 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、骨材界面のはく離や骨材から発生するクラックの進展特性の解明が、非常に重要であると考えられ、この点から本研究では、粗骨材に起因する破壊と干渉に着目し考察を加える。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には限界がある。しかし本研究では、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、はく離先端の応力特異性値や応力拡大係数(以下SIFと略す)を適用するもので、その適用はコンクリートを構成する粗骨材とモルタルの界面やモルタルであり、材料的に線形破壊力学が適用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[9]。そこで本



配 合	セメント：細骨材：粗骨材：水			
	1	2	2	0.55
切欠き長	4 inch	厚 さ	0.75 inch	
リガメント長	8 "	G max	0.375 "	

図-1 変位計測状況と供試体 [10]

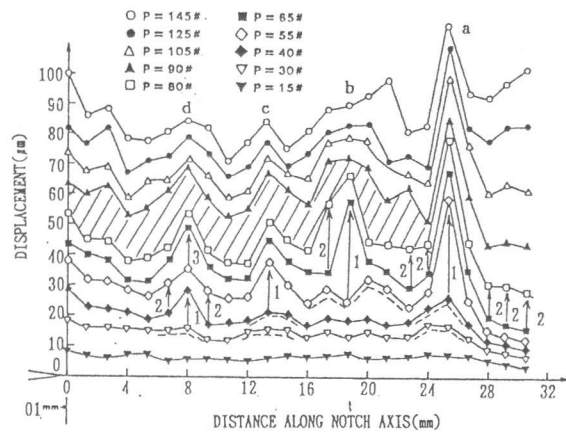


図-2 F P Zにおける変位計測結果 [10]

研究は、F P Zの変位計測結果や、骨材界面のはく離やクラックの線形破壊力学における応力特異性値の数理弾性解析結果等に基づき、F P Zの破壊メカニズムについて破壊力学的考察を行う。文献[8]に従えば、コンクリートの構造を中間レベルで説明するものである。

2. F P Zにおける変位計測結果

Ansari [10]はF P Zの破壊メカニズムを実験的に調べるために、図1に示す供試体に対し、リガメント上の不安定クラックが発生するまでの各荷重レベルごとの変位計測を、レーザースペックル法により行っている。結果は図2のとおりであるが、変位計測の間隔が粗骨材の最大粒径9.5mmに対し1.3 mmと細かく、F P Zの破壊メカニズムを考察する上で、極めて有益な計測結果であると考えられる。次節ではAnsariの指摘事項[10]に加え、図2を用いながら破壊メカニズムについて考察する。なお以下では、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」と称し区別して用いる。

3. 破壊メカニズム

(1) 粗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、その弾性係数は母材の弾性係数の数倍程度である[11]。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結果から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[12], [13], [14], く形状介在物の場合は引張荷重に面する位置の隅角部角度が小さい程[15], そして介在物が母材より硬い程[13], [14], [15]応力集中が大きい。実際のコンクリートにおいては粗骨材の大きさ、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、切欠き先端からの距離などから、切欠き先端延長線上付近の最も不利な粗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。一般的には大きな粗骨材程、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。八田ら[14]は、一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。この結果から初期欠陥がない場合であっても、形状が同一なら大きい粗骨材程はく離が生じやすい。図2において、ゆるやかな変位の増大(点線で示す)は、ブリージングや粗骨材の界面の接着の弱い箇所あるいは、粗骨材界面の応力集中による変位であると考えられる。粗骨材の最大粒径は

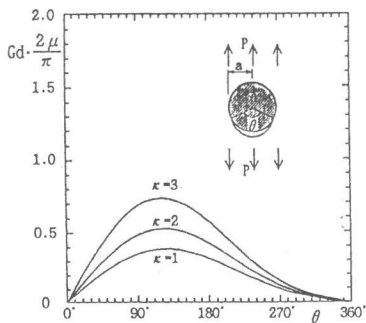


図-3 はく離進展のエネルギー解放率 [21]

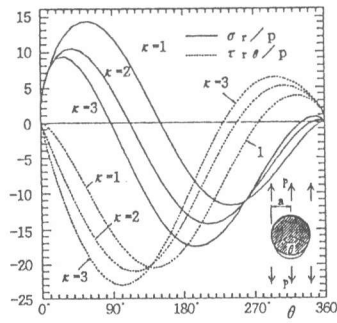


図-4 はく離先端近傍の応力 [21]

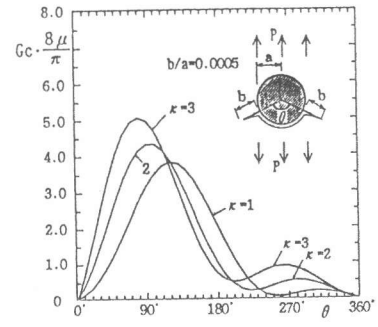


図-5 クラック発生のエネルギー解放率 [21]

9.5mmであるが、切欠き先端から約30mmの範囲に4ヶ所、変位が大きく（後述のとおりはく離が）あらわれている。また1ヶ所ごとのその変位が大きく表われる範囲は最大でも9.5mm以下程度である。このことは粗骨材に起因して破壊が始まっていることを示している。荷重の増加とともにはく離が発生する（図2のd1）。図2の供試体の場合、切欠き先端の応力集中の影響を受けて、d1に最初にはく離が発生したと思われる。切欠き先端からクラックが発生する前に、粗骨材の界面にはく離が発生して破壊が始まる理由（即ちFPZが形成される理由）は、次のとおり考察される。①上述したとおり、粗骨材に起因する応力集中が粗骨材界面に生じる。②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である[16]。実際、引張試験の破断面には粗骨材の抜けあとが多く認められる。供試体の切欠き先端はモルタルである。もし骨材界面の付着が非常に強く、破壊靱性値の大小がモルタル<モルタルと骨材の付着であれば、最も大きな欠陥である切欠き先端から破壊が始まるはずである。③切欠き先端付近に存在する粗骨材による切欠き先端の応力緩和効果が、切欠き先端からクラックを発生しにくくしている。母材より硬い介在物に向かうクラックのSIFは介在物により緩和される（図8、後述）[17]。

(2) 骨材界面はく離の進展特性

図3, 4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結果である[21]。はく離進展のエネルギー解放率は極値を有し上に凸の曲線である（図3、以下図3～5において κ はポアソン比 ν の関数[21]で、コンクリートの場合 $\kappa=2$ と3の間の値をとる）。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つ（図4）。これは、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。介在物を円形弾性体や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[18], [19]。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、粗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、そして荷重増加があればはく離は安定的に進展する。斎藤ら[20]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、供試体が破断する試験結果を示している（図6）。介在物がく形の場合ははく離先端の応力特異性値は単調増加である[15]。これははく離が大きくなっても、はく離と荷重の方向に変化がないためである。このため直線と隅角部をもつ形状の粗骨材の場合、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。以上粗骨材の形状にかかわらず、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。図2においてある荷重レベルで、急激な変位の

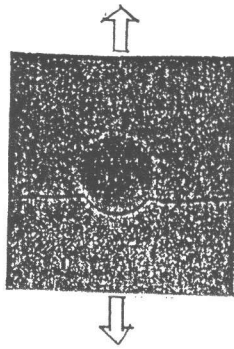


図-6 円形モデル骨材を用いた直接引張試験供試体の破壊状況 [20]

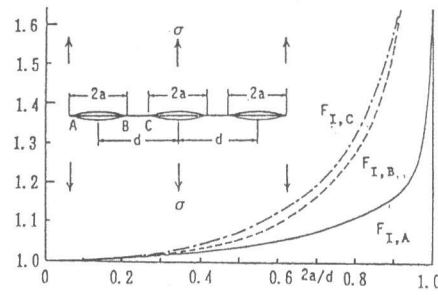


図-7 3個の等長クラックの応力拡大係数 [17]

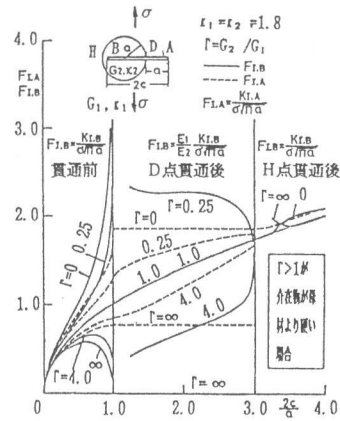


図-8 介在物に接近, 貫通するクラックの応力拡大係数 [17]

増加を示しているのはこのためであり (a 1, b 1, c 1, d 1), またはく離発生次の荷重レベルにおいて, 急激な変位増加を示した位置のすぐ横で, 比較的大きな変位の増加を示しているのは (a 2, b 2, d 2) はく離の安定的進展を示している。

(3) はく離の干渉と進展

粗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界面の破壊靱性値より大きいためである。図2においても, d 1のはく離が発生すると, 荷重の増加とともにはく離が進展する (d 2)。また a 1, c 1のはく離が発生する。それとともに b では変位が増大し次の荷重レベルではく離が進展する (b 1)。c 1のはく離発生の影響を受けて, d 1のはく離による変位も増加している。さらに荷重が増加すると, bのはく離が進展し (b 2), aのはく離も進展する (a 2)。荷重の増加とともに, このはく離の発生と進展及び切欠きの存在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。はく離の進展と増加は, それぞれのはく離や切欠き先端の応力場にも影響を与える。このはく離は大きさが概ね粗骨材の大きさまでで, 不均一なものであるが, 切欠き先端延長線上付近の粗骨材界面に発生する。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 S I F の干渉によって知ることができる。直線上に並ぶ2等長クラック, 3等長クラック (図7), 無限個の等長クラック, 2不等長クラックの S I F が求められている [17]。いまはく離が粗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7より干渉の影響がなくなるのは $2a/d=0.1$ 程である)。実際の粗骨材界面のはく離は, 必ずしも同一直線上に位置しない。しかし平行だが同一直線上に位置しないクラックの S I F の解析結果によれば, はく離の大きさ程度 (粗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 S I F の干渉の程度は, 同一直線上にある同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 [17]。

(4) クラックの発生

荷重の増加とともに粗骨材界面のはく離が増加し, 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。そして粗骨材界面のはく離先端から発生しようとするクラックの破壊靱性値 (モルタルの破壊靱性値) に達し, クラックが発生すると考えられる。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, はく離が円周角で 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4), クラック発生エネルギー解放率(図5)や, モードIに対するSIFが極値を有し, クラックが発生しやすくなることを示している[21]。この解析結果は斎藤ら[20]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6)。クラックを最初に発生させる粗骨材は, 必ずしも最初にはく離が発生した粗骨材にならない。粗骨材界面のはく離が大きいこと, はく離がまわりのはく離や切欠きの干渉を受けやすいこと, はく離が引張荷重に対し直交する方向にあること, はく離が応力集中が生じやすい鋭角な隅角点に達していること(はく離が達した隅角点は, 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, 応力集中が大きくなる[15])など, 種々の要因から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, はく離を有する粗骨材からクラックが発生する。粗骨材界面のはく離からでなく, 切欠き先端からクラックが進展することもあると考えられる。図2において, 斜線部がクラックの発生を示しており, クラックが発生したため, 骨材界面のはく離がつながり, 全体的な変位の増大が生じたものと考えられる。クラック発生以後, 粗骨材aの右側の変位の間隔が大きくなっているのも興味深い。このクラックの発生をもたらしたのは, 粗骨材界面のはく離の範囲が広く, はく離による変位が最も大きいこと及び, クラック発生時に変位の増大が小さいことから, aの粗骨材であると考えられる。

(5) 破断面の形成

変位制御を行うことなく荷重を単調に増加させる場合, クラック発生後の破壊は, クラック長の増大に伴い既に存在している他の粗骨材界面のはく離との干渉, 他の粗骨材界面はく離からのクラックの成長と合体など, 加速度的に不安定さをますます極めて急激な破壊である。この不安定さの加速の程度は骨材の離間距離, 大きさ, はく離の状況などによって異なってくるが, いずれにしても連鎖反動的に破壊が進行し破断面が形成される。引張破壊の破断面には, 粗骨材の抜けあとが認められる。母材より硬い円形介在物にクラックが接近するとそのSIFは減少するが(図8), 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[22]。このため粗骨材界面のはく離が比較的大きい場合には, 発生したクラックは荷重増加がなくとも容易に粗骨材界面のはく離とつながり, 破壊が進行すると考えられる。

一方, 骨材で破断しているものが認められるのも事実である[23]。これは骨材の破壊靱性値がモルタルと骨材の界面の破壊靱性値にくらべて十分大きいことを考えると, 納得し難いことに思われる。しかし上記のとおり, クラック発生後の破壊は不安定さを加速度的に増大させる急激な破壊である。このためこの破壊過程において骨材の破断が生じると考えられる。クラックやはく離を結ぶ線上にある骨材, とくにはく離が生じていないか小さい骨材が破断していると考えられる。また骨材そのものに欠陥を含む場合も考えられる。先にも記したとおり, はく離がなかったり, またあってもはく離が小さい骨材にクラックが接近すると, そのクラックのSIFは一定荷重のもとでは低下する。しかしクラック発生後の破壊過程においては, 不安定破壊のためSIFの増加が激しく骨材を破断してしまうと考えられる。動的試験において, 載荷速度が速い程骨材が破断されるものが増えるという結果[24]も, 静的な載荷において, クラック発生後の急激な破壊のときに骨材が破断されるという事実を裏付けている。著者らの行った大型供試体の直接引張試験($\phi=30\text{cm}$)の破断面においても, 最大粒径(150mm)及びそれに近いものは骨材の界面で破断しているが, それに次ぐ40mm程度のものは骨材が破断しているのが認められた。図8より円形介在物が母材より硬い場合, クラックのSIFは介在物に近づくにつれ低下するが, 介在物

に入ると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が小さく介在物がない場合の値に近づいていく。これはクラックが骨材に向かうためには荷重増加が必要であるが、骨材の破壊靱性値を越え一旦骨材に進入すると骨材を破断してしまうことを示している。この破壊過程において、破断される骨材の割合やその大きさは骨材の粒度分布や離間距離により異なり、最初にクラックが発生する時の荷重レベルと、その時までは離の発生状況に強く影響されると考えられる。

変位制御を行う場合は、クラックと骨材界面のはく離がただちにつながって破断面が形成されない。最初にクラックが発生する前のはく離の状況と変位制御の程度に応じて破壊が進行する。何ヶ所かからの粗骨材界面のはく離を起点としてクラックが発生する。それらクラックと粗骨材界面のはく離が干渉するとともに、上述したとおりクラックが粗骨材の影響を受けながら進展し、破断面が形成される。この破壊過程がブリッジングであり、TSCのピーク以降を主に特徴付けるものである。このブリッジングの段階においては、クラックの発生していないモルタル部や、はく離していない骨材部で応力伝達がなされ、破壊の進行とともに伝達応力が低下する。なおはく離の発生と干渉の過程においても、変位制御の程度に応じて破壊状況が異なると考えられる。

4. あとがき

F P Zの破壊メカニズムについて、F P Zの変位計測結果や、破壊力学における応力特異性値の解析結果等を用いて考察した。F P Zの破壊は骨材界面のはく離の発生、進展とそのはく離の干渉が不安定さを徐々に増し、クラックの発生が生じ、さらにいくつかのクラックとはく離の成長、合体により破面が形成されるメカニズムであることを破壊力学的に示した。この破壊メカニズムに対して、コンクリートの破壊の進行状況に影響を与える種々の要因に対する考察を行うことにより、F P ZやTSC、 G_F の特性に関する説明がより明確になされることが考えられる。

参考文献

- 1) 三橋博三：コンクリートの破壊力学の現状と展望，*コンクリート工学*，Vol. 25, No. 2, pp. 14-25, 1987.
- 2) Mindness, S.: The Fracture Process Zone in Concrete, in *Toughening Mechanisms in Quasi-Brittle Materials*, ed. by Shah, S. P., Kluwer Academic Publishers, pp. 271-286, 1991.
- 3) Hordijk, D. A., Vanmier, J. G. M., and Reinhardt, H. W.: Material Properties, in *Fracture Mechanics of Concrete Structures from Theory to Application*, ed. Elfgren, L., Chapman and Hall, pp. 67-127, 1989.
- 4) Wittmann, F. H. et al.: Influence of Age of Loadings, Water-Cement Ratio and Rate of Loading on Fracture Energy of Concrete, *Materials and Structures*, Vol. 20, pp. 103-110, 1987.
- 5) Mihashi, H., Wittmann, F. H., Simonin, P. and Rokugo, K.: C T試験によるコンクリートの破壊エネルギー評価に関する研究，*コンクリート工学年次論文報告集*，Vol. 9, No. 2, pp. 652-662, 1987.
- 6) 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，第3章，破壊靱性パラメータと試験法，pp. 18-34, 1990.
- 7) Slate, F. O. and Honer, K. C.: Microcracking in Concrete, in *Fracture Mechanics of Concrete Material Characterization and Testing*, ed. by Carpinteri, A. and Ingraffea, A. R., pp. 137-159, 1984.
- 8) 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.
- 9) 上田稔・東園豊二・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.
- 10) Ansari, F.: Analysis of Micro-Cracked Zone in Concrete, in *Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete*, ed. by Wittmann, F. H., Elsevier, pp. 229-240, 1986.
- 11) 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.
- 12) 村上敬宜：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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 長谷部宣男・上田稔：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, 1992.
- 16) 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.
- 17) Murakami, Y. et al.: *Stress Intensity Factors Handbook*, Pergamon Press, Oxford, 1987.
- 18) 中西博・馬川省吾：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.
- 19) 中西博：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.
- 20) 斎藤満・加場重正：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.
- 21) 山本泰幹・上田稔・長谷部宣男：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，1992.
- 22) 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*，Vol. 47, pp. 990-997, 1981.
- 23) 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.
- 24) Ting, C. and Bruhwilert, E.: Effect of Compressive Load on the Tensile Strength of Concrete at High Strain Rates, *Int. J. of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 7, No. 2, pp. 103-108, 1985.