

CS 1-33〔V〕 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

中部電力（株）電力技術研究所 正員○上田 稔 佐藤 正俊
名古屋工業大学 正員 長谷部宣男

1. まえがき コンクリートの一軸引張荷重下における破壊メカニズムについて、骨材に起因する破壊と干渉に着目し、骨材をモデル化しての骨材界面のはく離や、はく離が生じた骨材からモルタル中に発生するクラックに対し、破壊力学における応力特異性値の数値弾性解析結果等を用いて破壊力学的考察を行う。そして破壊メカニズムに基づき、直接引張強度はどのように決定されるかについて考察する。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」と称し区別して用いる。

2. 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。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。だ円形介在物の場合は曲率半径が小さい程、く形状介在物の場合は隅角部角度が小さい程、そして介在物が母材より硬い程応力集中が大きい。また母材より硬く形状が同一の2個の大きさの異なる介在物の場合、大きい介在物の方が介在物界面の引張応力の集中が大きい。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これらのことは示されている。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、界面の接着強さの不均一、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。上述のとおり、粗骨材に起因する応力集中が粗骨材界面に生じ、また破壊靱性値の大小は、大きい順に骨材>>モルタル>モルタルと骨材の付着である。これらの理由によりまず粗骨材の界面にはく離が発生して破壊が始まる。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。

(2) 骨材界面はく離の進展特性 図-1, 2は数値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¹⁾。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-1, 以下図-1~3において κ はポアソン比 ν の関数で、コンクリートの場合 $\kappa=2$ と3の間の値をとる)。介在物を円形弾性体やだ円形剛体とした場合も、はく離先端の応力特異性値は極値をもつことが示されている。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-2)。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。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すると考えられる。さらに荷重増加があればはく離は安定的に進展する。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²⁾。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。以上より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はく離は進展する。

(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。上記のとおり、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るためである。このため、最初にはく離が発生した粗骨材以外の粗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粗骨材に近く、粗骨材に起因する応力集中が大きい粗骨材界面に次のはく離が発生しやすい。荷重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。

(4) クラックの発生 荷重増加とともに粗骨材界面のはく離が増加し、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検討し

た。これによればはく離が円周角で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なく離が進展しにくくなる一方(図-2), クラック発生エネルギー解放率や(図-3), モードIに対するSIF(応力拡大係数)が極値を有し¹⁾, クラックが発生しやすくなることを示している。この結果は斎藤³⁾の試験における, クラックの発生位置ともよく一致している(図-4)。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。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, 粗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などから決定される。はく離が引張荷重に対し直交する方向にあったり, はく離が鋭角な隅角点に達していると応力集中の程度が大きくなる²⁾。

(5) 破断面の形成 変位制御を行うことなく荷重を単調増加させる場合, 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発生と合体など, 加速度的に不安定さを増す急激な破壊である。この不安定さの程度は骨材の離間距離, 大きさ, はく離の状況などにより異なるが, 連鎖反動的に破壊が進行する。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-5)⁴⁾, 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⁵⁾。よって粗骨材界面のはく離が比較的大きい場合には, 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ると考えられる。一方骨材が破断しているのも認められる。上記のとおりはく離がなかったり, はく離が小さい骨材にクラックが接近すると, 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は, 不安定さを加速度的に増す急激な破壊である。このためSIFの増加が激しく骨材を破断する。クラックとはく離を結ぶ線にある骨材, とくにはく離の生じていない骨材が破断する。破断される骨材の割合や大きさは, 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荷重レベルとそれまではく離の発生状況に影響されると考えられる。

3. 破壊メカニズムと直接引張強度 クラックが発生する前のはく離の発生, 干渉によるはく離の進展までは安定的な破壊である。しかしクラックが発生すると変位制御を行わない場合は, 引張試験の応力-ひずみ曲線かもわかるとおりそれ以前に比して不安定な破壊となる。破壊メカニズム上は最初にクラックが発生する時の応力が引張強度を与えると考えられる。クラック発生後もある程度の強度増加がある。これはクラックが骨材とくにはく離を生じていない骨材や小さいはく離を有する骨材に向かって進展し破断する時の応力緩和効果のためで, その程度はクラック発生前まではく離の分布状況や, はく離の生じていない骨材の位置や大きさ, 硬さに影響されると考えられる。

参考文献

- 1) 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, pp. 271-272, 1992.
- 2) 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, pp. 369-382, 1992.
- 3) 斎藤満・柳場重正: 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.
- 4) Murakami, Y. et al.: Stress Intensity Factors Handbook, Pergamon Press, Oxford, 1987.
- 5) 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.

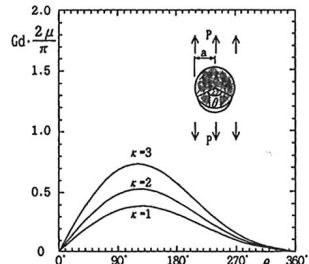


図-1 はく離進展のエネルギー解放率

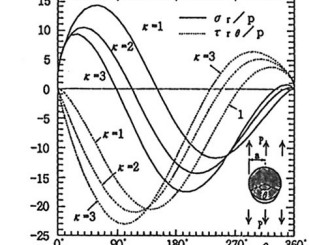


図-2 はく離先端近傍の応力

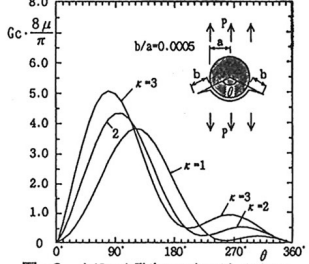


図-3 クラック発生エネルギー解放率

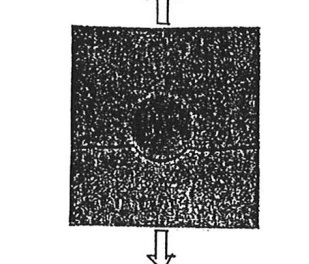


図-4 円形モデル骨材を用いた直接引張試験供試体の破壊状況

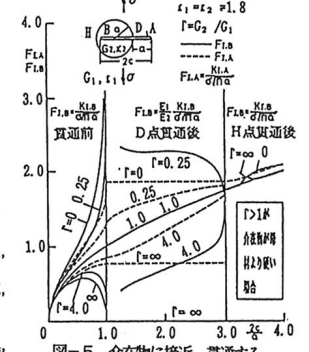


図-5 介在物に接近, 貫通するクラックの応力拡大係数