

CS 56 コンクリートの直接引張強度のひずみ速度依存性 についての破壊メカニズムに基づく考察

中部電力 電力技術研究所 正会員 ○上田 稔・佐藤 正俊・奥田 宏明
名古屋工業大学 正会員 長谷部宣男

1. まえがき コンクリートの強度には、ひずみ速度が速くなる程強度が大きくなる、いわゆるひずみ速度依存性が存在することは、よく知られている¹⁾。しかし、この理由については、必ずしも明らかになっていない。著者らは、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、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を、破壊力学的に考察した²⁾。本研究はこの破壊メカニズムに基づき、一軸引張荷重下のプレーンコンクリートの強度のひずみ速度依存性の理由について、応力-ひずみ曲線（以下、 $\sigma-\varepsilon$ 曲線と略す）や破断面の観察結果をもとに考察する。破壊メカニズムに基づく考察が、ひずみ速度依存性の理由を明確にすると考えられる。なおひずみ速度として、1~数千 μ/sec 程度の範囲を対象とする。このひずみ速度は、地震荷重により発生する程度のもので、衝撃荷重と異なり、慣性力の影響が無視できる³⁾。即ち、慣性力の応力成分への寄与は無視できると考えられる。

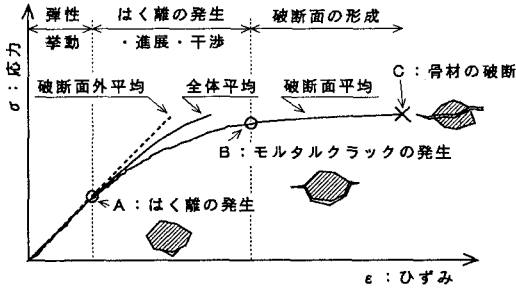
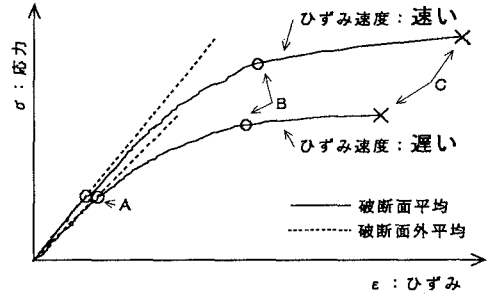
2. 引張破壊メカニズムと $\sigma-\varepsilon$ 曲線 図-1に、直接引張試験⁴⁾を行って得られる $\sigma-\varepsilon$ 曲線の例を示す。破断面外平均は直線で、弾性変形である。これに対し、破断面平均はある荷重レベルより緩やかに傾き始め、ピークに近い荷重レベルで横に流れ、引張破壊は局所的である。この破断面の $\sigma-\varepsilon$ 曲線と破壊メカニズムは、以下のとおりである²⁾。粗骨材の界面にはく離が発生し、 $\sigma-\varepsilon$ 曲線が直線性を失う【A点】。その後、いくつかの粗骨材界面にはく離が発生し、それらが互いに干渉し合いながら、はく離の進展と増加をもたらす、 $\sigma-\varepsilon$ 曲線の傾きが徐々に緩くなる。そして、粗骨材界面のはく離先端が、そこ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）に達すると、モルタルクラックが発生し【B点】、 $\sigma-\varepsilon$ 曲線が横に流れ始める。既に存在している粗骨材界面のはく離からのクラックの発生、成長、これらのクラックとはく離の連結を伴い、またいくつかのクラックは粗骨材界面へ到達する。最後に、クラック先端が粗骨材の破壊靱性値に達して【C点：引張強度】、粗骨材の破断が連鎖反応的に生じ、破断面が形成される。

3. ひずみ速度と $\sigma-\varepsilon$ 曲線 直接引張試験を行って得られる $\sigma-\varepsilon$ 曲線のひずみ速度による差異は、配合にかかわらず、図-2に示すとおりである。ひずみ速度の速い場合と遅い場合を対比して、それぞれ破断面平均を実線で、破断面外平均を点線で示す。破断面外平均はほぼ直線で、低荷重レベルでは破断面平均と一致し、その勾配はひずみ速度が速い程大きい。この点はよく知られている¹⁾。このことは破壊が進行する断面（破断面）に対して、ひずみ速度が速い程、荷重の増加に対して変位が抑制されていることを意味する。このようになる理由は、セメントペーストの粘性によるものと考えられる⁵⁾。なおB点のひずみは80~120 μ 程度である²⁾。以下では、図-2を用いて、2で述べた破壊メカニズムに基づき、直接引張強度のひずみ速度依存性について考察する。

4. ひずみ速度依存性に関する考察

(1) 粗骨材界面の最初のはく離発生【A点】 ひずみ速度が変わっても、A点の応力はほとんど変わらない。即ち、はく離を生ぜしめる応力は、ひずみ速度によらず同じである。

(2) はく離の干渉と進展【A~B点】 最初のはく離発生【A点】後、いくつかの粗骨材界面にはく離が発生し、 $\sigma-\varepsilon$ 曲線は徐々に緩やかになるが、その程度はひずみ速度が遅い方が大きい（図-2）。即ち、同じ応力レベルで比較すると、ひずみ速度が遅い方がひずみが大きく、荷重増加とともに、ひずみ速度が遅い方が速い場合より徐々に大きなひずみを生じ、ひずみの差も大きくなっている。このことは、同じ応力レベルではひずみ速度の遅い方が、発生しているはく離面積が大きく、荷重増加とともに、ひずみ速度が速い場合に比べはく離面積がより大きくなり、破壊が速く進行していることを示している。以下に、この理由について考察する。変位を制御しない場合の、はく離の進展特性は、粗骨材の円弧状、直線状の界面にかかわらず、ある荷重レベルで、はく離が進展し始めると、粗骨材界面のある範囲を荷重増加がなくとも進展する²⁾。このとき、はく離の進展と

図-1 $\sigma - \varepsilon$ 曲線と破壊の進行図-2 ひずみ速度と $\sigma - \varepsilon$ 曲線のモデル図

ともに変位が増大する。しかし荷重増加に対して、変位が抑制される場合は、はく離の進展が抑制される。このためひずみ速度が速い程、はく離が進展しにくいと考えられる。はく離は、破断面となる断面付近の粗骨材界面に発生する。ある程度以上の数と大きさのはく離が発生すると、はく離の干渉があらわれる。ひずみ速度が遅い方がはく離が進展しやすいため、低い応力レベルで、はく離の干渉があらわれ始める。はく離の干渉は、荷重増加とともに、はく離の進展と、はく離の発生していない粗骨材界面の引張応力の集中をもたらす、新たなはく離が発生する。はく離の数が多く、離間距離が小さい程、干渉の程度は大きい。このことから、はく離の増大と成長が、その干渉により、増々のはく離の増大と成長をもたらす。以上より同一応力レベルでも、ひずみ速度が違っていると、変位の拘束度合の程度が異なるため、ひずみの大きさに違いが現れている。同一応力レベルで、ひずみ速度の差異によるはく離の発生状況を比較すると、次のようになる。界面はく離は大きな粗骨材から順に発生し易い²⁾。よって、概ねひずみ速度の遅い方がより小さい粗骨材にもはく離が発生しており、はく離の数が多い。そして、厳密には粗骨材の形状等が影響するが、概ね同程度の大きさの粗骨材のはく離の大きさは、ひずみ速度が遅い方が速い場合より大きい。

(3) クラックの発生【B点】 一般にひずみ速度が速い程、破断面において粗骨材のはく離面が少なく、粗骨材の破断が多くなる。このことは Tinic⁶⁾ によっても指摘されている。このはく離面は、供試体破断時のものである。上述のとおり、粗骨材の界面はく離は、概ね大きい粗骨材から順に発生する。実際に破断面において、はく離せず破断している粗骨材は、はく離した粗骨材の大きさ程度以下である²⁾。よって面積からみた場合、破断面のはく離面の大部分は、A点からB点までに生じている。はく離面積が大きいひずみ速度が遅い方が、B点応力が小さい(図-2)。これは、はく離面積が大きい程、はく離の干渉の程度が大きい程、低い応力レベルで、はく離先端の応力特異性値がモルタルの破壊靱性値に達して、モルタルクラックが発生するからである。

(4) 破断面の形成と引張強度【B～C点】 A～B点のはく離の発生、成長と同様、ひずみ速度が速い程、B点以降のモルタルクラックやはく離の発生、成長による変位を抑制する。即ち、モルタルクラックやはく離が発生、進展しにくい。このため、B点以降もひずみ速度が遅い方がひずみ速度が速い場合に比べ破壊が速く進行し、 $\sigma - \varepsilon$ 曲線が緩やかになる(図-2)。C点はクラック先端が粗骨材の破壊靱性値に達した状態である。図-2より、応力レベルが低くてもひずみ速度の遅い方が、破壊の程度が大きく、はく離やクラックによる干渉の程度が大きいため、粗骨材を低い応力レベルで破壊している。

5. 結論 ひずみ速度が大きいことは、荷重増加に対して、破断面の変位を抑制している。このため、ひずみ速度の大きい方が、はく離やモルタルクラックの発生、進展が抑制され、それらの干渉の程度も小さくなるため、ひずみは小さい。したがって、最終破断に到るひずみに対する最終応力(引張強度)は大きくなる。即ちコンクリートには、材料固有の破壊メカニズムに起因して、ひずみ速度依存性がある。

参考文献 1) 土木学会：コンクリートの力学特性に関する調査研究報告，第7集，コンクリートライブラリー69，1991。

2) 上田 裕・長谷部 宜男・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-19，1993。

3) 藤井 学・宮本 文徳：衝撃荷重下におけるコンクリート構造物の挙動，コンクリート工学 Vol. 21, No. 9, pp. 25-36, 1983。

4) 佐藤 正俊・上田 裕・遠藤 孝夫・長谷部 宜男：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。

5) 大岸 佐吉・小野 博宣：硬化過程におけるコンクリートの圧縮強度，変形に及ぼす載荷速度の影響，材料，第29巻，第318号，pp. 279-285, 1980。

6) Tinic, C. and Bruhiler, 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。