

CS 1-32〔V〕

コンクリートの直接引張試験における破壊メカニズムと引張強度の実験的研究

中部電力(株) 電力技術研究所 正会員○佐藤正俊 正会員 上田 稔 近藤久雄
名古屋工業大学 正会員 長谷部宣男

1. まえがき コンクリートの破壊力学やマスコンクリートの温度応力などにおいては、コンクリートの引張強度特性の解明が重要なテーマである。コンクリートの種々の要因に対する引張強度特性を明確にするためには破壊メカニズムを明らかにし、その要因が破壊過程に与える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骨材界面のはく離を起点として進行することはよく知られ、引張試験の応力-ひずみ曲線の変化をはく離やクラックの発生と結びつけた説明が行われている¹⁾。この様な説明や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、本研究は骨材に起因する破壊と干渉に着目し直接引張試験を実施し、応力-ひずみ曲線と破断面の観察結果等を基に、引張破壊メカニズムと引張強度について考察を行う。

2. 実験概要 既往の直接引張試験は供試体直径10~15cm程度以下、最大粗骨材寸法(Gmax)20mm程度以下のものがほとんどである。これに対し本試験は、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を見易くすることなどを考慮して、Gmax40mmの大きな粗骨材を含む、直方体供試体で実施した(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観察するために、30mmゲージを図-2に示すように供試体全面に配置した。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一様鋼板接着方式である²⁾。

3. 実験結果と破壊メカニズムの考察

(1) 供試体全体の挙動 例として供試体No.2の平均の応力-ひずみ曲線を図-3に示す。破断面平均と破断面外平均を比較すると、破断面平均は引張強度の約60%より緩やかに傾いている。これに対し破断面外平均はほとんど直線である。載荷初期は供試体全体が弾性的な変形をし、破壊直前では破断面となる位置で大きなひずみが生じ、引張破壊の局所化を示している。

(2) 粗骨材界面のはく離の発生 図-4は破断面の個々の位置での応力-ひずみ曲線であり、番号はゲージの番号(図-2)と対応している。低荷重レベルでは、ゲージの位置によらず弾性挙動を示している。図-4のA点でNo.5の傾きが緩く変化しておりはく離の発生を示していると考えられる。写真-1に破断面の状況を示すが、供試体打設方向に対し下側の骨材界面が破断面に現れている。はく離した骨材のはく離面積が上面と下面に占める比率は80%以上が骨材の下面である(表-3)。また、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が、Gmaxに近い比較的大きな粗骨材がはく離している。更に破断面で最大の粗骨材(写真-1)に近いゲージNo.5の結果はこの骨材が、最も早く界面はく離したことを示している。これらは骨材下面のブリーディングがはく離の起点となり易く、大きな粗骨材程ブリーディングが大きいのはく離が生じ易いことを表している。骨材上面ではく離している場合は、骨材は比較的大きく形状が尖っているものが多く、骨材界面に応力集中が生じ易いものが上面ではく離したと考えられる。

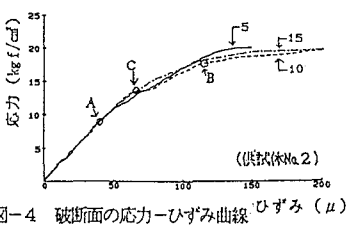
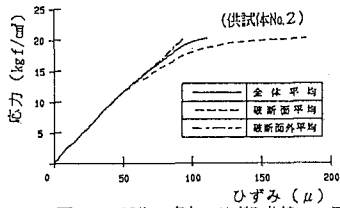
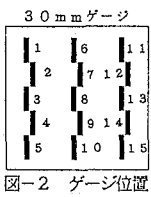
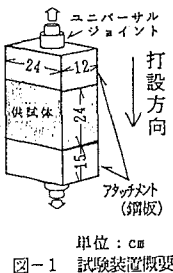


表-1 コンクリートの配合

最大粗骨材寸法 (mm)	水/セメント比 W/C (%)	細骨材 S/a (%)	単位量 (kg/m³)					合計	
			水 W	セメント C	細骨材 S				
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
材料	接着剤 2 日 供試体 28 日
荷重速度	0.06kg/cm²/sec (荷重試験相当)

(3) はく離の干渉と進展 図-4のA点でNo.5にはく離が発生すると、その影響を受けNo.10, 15の応力-ひずみ曲線が緩やかに傾き始める。しばらくしてNo.10の応力-ひずみ曲線が明確な折れ点を示す(C点)。これはNo.10付近の粗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はより緩やかな傾きを示す。そして荷重の増加と共に骨材界面のはく離が進展し徐々に傾きが小さくなる。既往の研究においては、応力-ひずみ曲線が緩やかな曲線であるのに対し、本試験において図-4の様な応力-ひずみ曲線が得られた。これは既往の研究は、Gmaxが小さく粗骨材の粒径範囲が狭いこと及び破断面にある程度の数の粗骨材があるために、連続的に骨材界面のはく離が発生進展するのに対し、本試験はGmaxが大きく破断面に存在する粗骨材の数も少ないためである。本試験より、ある粗骨材にはく離が発生しその後別の粗骨材に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ても進展することが示されたと考えられる。

(4) クラックの発生 荷重の増加と共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。図-4において応力-ひずみ曲線が横に大きく流れ始めるB点がクラックの発生を示している。

(5) 破断面の形成 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増す極めて急激な破壊である。このため破断面の応力-ひずみ曲線は横に大きく流れる。破断面にはGmax及びそれに近い大きさの抜け後が認められるが(表-4)、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容易に粗骨材界面のはく離とつながり、破断面が形成されると考えられる。一方破断した骨材も認められる。特にはく離した骨材寸法程度以下のものが破断している。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比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は急激な破壊であるため、クラックやはく離を結ぶ線上にある骨材、特にはく離の生じていない骨材が破断していると考えられる。

4. 破壊メカニズムと引張強度 骨材界面のはく離の発生、進展とそれはく離の干渉が不安定さを徐々に増し、はく離先端が破壊靱性値に達しクラックが発生する。更に幾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。普通の静的荷重ではクラックが発生すると、その後は不安定な破壊となる。破壊メカニズム上は、クラックが発生した時の応力が引張強度を与えらるると考えられる(B点)。表-5にクラック発生時の応力(σ_m , B点の応力)と破断面の状況を示す。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 が小さいことが分かる。これはNo.2の供試体においては、はく離が多いためその影響を受けクラックが発生する荷重レベルが低くなったと考えられる。クラック発生時のひずみは94~114 μ と比較的同程度の値となっている(表-6)。また、はく離した骨材面積を除いて求めたクラック発生時の応力(σ')のばらつきは、引張強度のばらつきに比べ小さい値となる(表-5)。これらにはく離先端の応力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裏付けていると考えられる。クラック発生後の破壊は不安定だが強度増加が認められるのは、クラックが骨材特にはく離を生じていない骨材に向かって進展し破断する時の、クラック先端の応力緩和効果のためであると考えられる。

表-3 はく離した骨材界面の上下面の割合

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

(供試体No.2)



表-5 破断面の状況と引張応力

供試体	はく離した骨材面積比 (%)	破断された骨材面積比 (%)	応力 σ_m (kgf/cm ²)	有効断面積*による応力 σ' (kgf/cm ²)
No.1	23	5	18.0	24.9
No.2	33	2	17.5	26.1
No.3	25	8	19.2	25.6

*破断面面積よりはく離した骨材面積を除いた面積

表-4 破断面の各骨材面積

供試体	はく離した骨材面積 (cm ²)				破断された骨材面積 (cm ²)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
No.1	9.3	7.7	4.9	3.2	2.2	2.2	1.4	1.1
No.2	10.3	6.9	6.4	5.4	2.8	2.3	1.8	0.4
No.3	12.1	4.7	4.7	3.5	4.5	3.1	3.1	2.4

写真-1 破断面状況

表-6 応力-ひずみ曲線の変曲点

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

参考文献

- 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.
- 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, 1992.