論文 コンクリートの割裂引張強度試験における破壊過程に関する考察

川瀬 麻人^{*1}·大野 健太郎^{*2}·宇治 公隆^{*3}·上野 敦^{*4}

要旨:本研究では、割裂引張強度試験の破壊過程を検討するため、直径を100,150,200 および 300mm とし、長さを200mmに統一した円柱供試体の割裂引張強度試験を行った。また、破壊過程をアコースティック・エミッション(AE)法の解析結果およびひずみ分布より考察した。その結果、載荷速度をJIS 規格の1/10 とした場合、得られる強度は直径が200mm以下の供試体ではほぼ同等となり、300mmでは低下することが確認された。これは、断面内のひずみ分布が直径200mm以下の供試体では一様な分布となり、直径300mmでは一様とならないことに起因しており、これらはAE 解析結果とも整合することが示された。 キーワード:割裂引張強度、載荷速度、寸法効果、ひずみ分布、AE 法、SiGMA 解析

1. はじめに

コンクリートの引張強度は,JISA1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」より求められ,引張強度は以下の式より計算される。

$$f_{l} = \frac{2 \times P}{\pi \times d \times l} \tag{1}$$

ここに、 f_t : 引張強度 (N/mm²) 、P: 最大荷重 (N) 、 d: 供試体の直径 (mm) 、l: 供試体割裂面の長さ (mm)

割裂引張強度試験方法の原理は、1943年に赤澤¹⁾によ り発表された後、「コンクリートの引張強サ係数試験方 法」として1951年にJISで規格化された²⁾。制定時の供 試体直径は「最小寸法が粗骨材の最大寸法の4倍以上」 と規格された。その後、「直径は粗骨材の最大寸法の4 倍以上、かつ、15cm以上」と改正され、現在では、「直 径は粗骨材の最大寸法の4倍以上、かつ、100mm以上」 と規格されている。

長谷川ら³⁾によると,直径 500mm以下の円柱供試体の 割裂引張強度は,直径が小さくなるにつれて強度が高く なるが,供試体長さの変化は割裂引張強度に影響を及ぼ さないことが示されている。このことから,割裂引張強 度は,供試体直径に対して寸法効果が存在する。

また,コンクリートの割裂引張試験の破壊過程には, 不明瞭な点が残されている。これらに関する研究は古く から行われており,アコースティック・エミッション

(AE) 法を用いた大津ら⁴⁾の結果によれば,割裂引張強 度試験におけるひび割れ進展過程は以下のようである。 供試体と載荷板との接触による損傷により,供試体の一 端部から破壊領域が形成される。その後,破壊領域が拡 大し,主破壊に至ることが報告されている。しかし,こ の研究では,載荷条件を漸増繰返し載荷としており,実 際の割裂引張強度試験とは異なる載荷条件であることに 注意が必要である。

一方, AE 法を用いた川上ら⁵⁾や, ひずみゲージを供試 体に貼付した上田ら⁶⁰の結果によれば,供試体断面中心 から上下対称に 0.3~0.4*d*(*d*:供試体直径)付近で破壊 が開始し,大津らの結果とは異なる。モルタルと粗骨材 界面の剥離(bond crack)が最初に発生する。発生した剥 離は,供試体断面の中心側に向かって順々に発生し,ク ラック(mortar crack)の発生,クラックの進展を経て, 供試体は破壊に至るとしている。

これらの結果から,破壊領域の形成が始まる場所は, ある特定の位置から開始され,主破壊に至ると考えられ るが,破壊過程,特に破壊起点には統一した見解が得ら れていない。

本研究では、供試体直径の異なるコンクリートの割裂 引張強度試験の破壊過程を円柱供試体の断面内の応カー ひずみ関係および AE 源位置標定結果から検討し、供試 体の直径の変化に伴う破壊過程の違いと得られる強度に ついて考察した。供試体は、長さを 200mm、直径を 100、 150、200 および 300mm とした4種類の円柱供試体とし、 それぞれの破壊過程と得られる強度を比較・検討した。 また、破壊試験に AE 法を適用し、検出された AE 波に SiGMA (simplified Green's functions for moment tensor analysis) 解析⁷⁾を適用することで、AE 発生源の発生位 置および形成モードを同定し、主破壊に至る過程を検討 した。

2. 実験概要

実験に使用したコンクリートの示方配合および力学 的特性を表-1,表-2に示す。セメントには,普通ポ ルトランドセメントを使用し,細骨材には相模原産砕砂 S1(表乾密度 2.63g/cm³,吸水率 1.25%,粗粒率 2.68)お

*1	首都大学東京大学院	都市環境科学研究科	都市基盤環境学域(学生会員)	
*2	首都大学東京大学院	都市環境科学研究科	都市基盤環境学域助教(博士(工学)	(正会員)
*3	首都大学東京大学院	都市環境科学研究科	都市基盤環境学域教授(博士(工学)	(正会員)
*4	首都大学東京大学院	都市環境科学研究科	都市基盤環境学域准教授(博士(工学)	(正会員)

粗骨材の	スランプ	水セメン	空気量	細骨材率	単位量(kg/m ³)						
最大寸法		下比			水	セメント	細骨材粗目	細骨材細目	粗骨材	混和剤*	
(mm)	(cm)	(%)	(%)	(%)	W	С	S 1	S 2	G	Α	
20	8.0	56.7	4.0	44.0	174	307	712	79	1011	1.23	

表-1 コンクリートの示方配合

*スルホン酸系 AE 減水剤を使用

表-2 コンクリートの力学的特性

圧縮強度 割裂引張強度 静弹性係数 弹性波速度 (N/mm^2) (N/mm^2) (kN/mm^2) (m/s)3.01 38.3 29.0 4000

表-3 各円柱供試体のひずみゲージ貼付位置

y (mm)		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
	<i>ø</i> 100	87.5	75	62.5	50	37.5	25	12.5
供⇒⊬⊬々	<i>ø</i> 150	131	113	93.8	75	56.3	37.5	18.8
供訊件泊	<i>ø</i> 200	175	150	125	100	75	50	25
	ø300	263	225	188	150	113	75	37.5

**割裂引張強度にはø150mm×200mmの供試体を使用

***圧縮強度,静弾性係数には¢100mm×200mmの供試体をそれぞれ使用

供試休名		¢100			¢150			¢200			\$300		
		x v z		x y z		x v z			x	φ 500 V	Z.		
Ì	1ch	-43	75	-50	-65	113	-50	-87	150	-50	-130	225	-50
	2ch	-43	75	50	-65	113	50	-87	150	50	-130	225	50
かい 井 二 夕	3ch	-43	25	0	-65	38	0	-87	50	0	-130	75	0
ビンリー治	4ch	43	75	0	65	113	0	87	150	0	130	225	0
	5ch	43	25	50	65	38	50	87	50	50	130	75	50
	6ch	43	25	-50	65	38	-50	87	50	-50	130	75	-50

表-4 各円柱供試体の AE センサ設置座標

よび富津産山砂 S2 (表乾密度 2.61g/cm³, 吸水率 3.32%, 粗粒率 1.55) を質量比 9:1 で混合した混合細骨材を使用 した。粗骨材には相模原産砕石 2005(表乾密度 2.64g/cm³, 吸水率 1.26%, 粗粒率 6.34, 実積率 57.9%) を用いた。 また、供試体形状、ひずみゲージ貼り付け位置および AE センサ設置位置を表-3,表-4 および,図-1 に示 す。供試体の形状は、 Ø100×200mm (以下、 Ø100), *ϕ*150×200mm(以下, *ϕ*150), *ϕ*200×200mm(以下, *ϕ*200) および #300×200 mm (以下, #300)の円柱供試体であり, 各直径につき3体ずつ、計12体の供試体を作製した。型 枠は、 Ø100 および Ø150 の円柱供試体には鋼製型枠を使 用し、 #200 および #300 の円柱供試体には、 側面をボイ ド管、底面をコンクリート型枠用合板により作製した型 枠を使用した。供試体は、コンクリート打設後、材齢 1 日目に脱型を行い、その後、材齢 28 日まで 20℃水中養 生を行った。割裂引張強度試験は、養生終了後、3 日間 で行った。材齢28日以後は、試験直前まで、乾燥防止の 目的で、濡れウエスで供試体を覆った。なお、いずれの 円柱供試体の割裂引張強度試験も, JIS A 1113「コンクリ ートの割裂引張強度試験方法」に準じて実施した。試験 機には、容量 2000kN の耐圧試験機を使用し、載荷は手 動で行った。載荷速度は、AE 計測でより多くの AE 信 号を取得するとともに、断面内のひずみを詳細に把握す るため, 引張応力度の増加率を JIS 規格の 1/10 となる毎 秒 0.006N/mm² として載荷を行った。また,そのときの 荷重およびひずみの計測をデータロガーにより1kNごと に行った。ひずみの計測には、ゲージ長 30mm のひずみ ゲージを使用し、図-1のように載荷方向と直交するよ う貼付した。なお、供試体と載荷治具との摩擦で発生す



る AE 信号を抑制するため、供試体と治具との間にテフ ロンシート(厚さ 0.3mm)を挿入した。また, 表-2 中 の弾性波速度は、100×100×400mm の角柱供試体にて、 ペンシルリードブレイク法により求めた。

AE 計測は、共振周波数 150kHz の AE センサにて周波 数帯域を 1kHz~400kHz として信号記録を行った。検出 信号はプリアンプにて 40dB 増幅後, 記録し, 設定しき い値は、35dB として計測した。AE 波形はサンプリング 周波数 1MHz で A/D 変換し、1 波形を 1024 個の振幅値 データとして記録した。



3. 結果および考察

3.1 割裂引張強度の比較

図-2 に各円柱供試体で得られた割裂引張強度を示す。 載荷速度をJIS 規格の1/10とした場合, Ø300を除く供試 体で,ほぼ同等の割裂引張強度であった。本実験結果は, 長谷川ら⁴⁾が示す,供試体直径の増加に伴い強度が低く なる,寸法効果は認められなかった。しかし,Ø300の 割裂引張強度は,Ø100の割裂引張強度に対して14.8%低 くなった。

ここで, **表**-2 中の割裂引張強度と図-2 中の¢150 の 強度が異なる結果を得ている。本実験では,載荷速度を JIS 規格の 1/10 としており, ¢100 についても JIS 規格の 載荷速度で割裂引張強度試験を行った結果, 3.44N/mm² となった。このことから, JIS 規格速度に対して, 1/10 の載荷速度で行った本実験では¢100 の場合 15.7%, ¢150 の場合 5%引張強度が低下することが確認され,載荷速



度が割裂引張強度に与える影響は,直径が小さいほど顕 著となる可能性が示された。なお,JIS 規格速度の場合 には,寸法の影響があるともいえる。

3.2 AE 発生頻度

割裂引張強度試験を行った3体の供試体による試験結 果は、AE 発生頻度やAE 発生源の発生位置および形成モ ードが同様な傾向で検出された。このため、以下では各 供試体においてAE 信号が最も多く検出できた結果につ いて考察する。検出されたAE ヒット数と荷重の時間的 変化を図-3に示す。 ϕ 100および ϕ 150は、主破壊に至る 時にAE ヒット数が急激に増加しているが、 ϕ 200および ϕ 300 では主破壊のほか、載荷治具と供試体との接触に より、AE が発生したことが確認できる(図-3の〇印)。 また、直径が大きくなるほど、載荷中にAE ヒットが発 生し続けており、特に ϕ 300 ではその傾向が顕著である。 この結果から、供試体直径の大きさにより、損傷領域が 異なると推察される。

3.3 SiGMA 解析結果

(1) AE イベント位置標定結果と形成モード

図-4 に各円柱供試体における断面の SiGMA 解析結 果を示す。図-4 について,載荷面に垂直な方向に AE イベントが主に発生している。直径が大きくなるにつれ て,供試体中心部よりも載荷面付近で AE イベントが集 中して発生する傾向が確認された。これは,供試体の中 心より 0.3~0.45d (d は直径)離れた位置で他点より大き なひずみが検出された既往の研究結果⁵⁾と整合する。

さらに,各円柱供試体の AE イベント形成モードの発 生状況を示した図-5より, ¢100 および¢150 では破壊直



形成モード別の発生状況

前まで,引張型, せん断型, 混合型が同程度発生して破壊に至るのに対し, ¢200 以上の供試体では, 引張型が 卓越して破壊に至ることがわかる。このことから, ¢150 以下と¢200以上の供試体で, AE イベントを発生さ せる要因が異なることが推察される。

(2) AE 発生源位置の時間的推移

図-6 に供試体高さ方向に関する AE イベントの時間 的推移を示す。なお、丸で囲んだ赤色の破線および紫色 の実線に関しては、後述する 3.4 (2) で示す。¢100 で は、供試体が破壊するまでに同定された AE イベント数 は、他の供試体と比較して少ないが、供試体高さ全域で AE イベントの発生が確認できる。次に、¢150 では、ま ず載荷直後に上下両端部から AE イベントが発生する。 その後、供試体中心から底面側に 0.2~0.3d 離れた位置



の時間的推移と塑性ひずみ発生との関係

でAEイベントが頻発し、底面から上面へ破壊が進行したことがわかる。引張強度に達すると、¢100と同様に全ての位置でAEイベントが発生し、破壊した。¢200では、載荷後、供試体断面中心より底面側に0.25~0.5d、上面側に0.15~0.4d離れた位置でAEイベントが発生し、引張強度に至るまでこの領域でAEイベントが主に発生した。その後、引張強度の約85%に達すると、集中的に底面側でAEイベントが発生し、破壊する。¢300では、載荷直後に供試体断面中心から上面で多くのAEイベントが発生した。載荷直後~引張強度の約30%に達するまで、供試体断面中心から上面に0.17~0.4d離れた位置を



中心に AE イベントが形成される。引張強度の約 30%に 達すると,供試体断面中心から底面に 0.33~0.5d の領域 で AE イベントが頻発し始める。引張強度の約 50%の時 点で底面の AE イベント形成に加え,それまでに発生し ていた上面の領域から再び AE イベントが頻発し始め, 上面,下面それぞれで AE イベントが集積していく。こ の地点から引張強度に至る間に載荷面端部から中心側へ 破壊領域が進展していき,破壊した。以上の結果から, ¢100 と¢150, ¢200 および¢300 で破壊過程に違いがある ことが明らかとなった。

3.4 ひずみ計測結果

(1) 応カーひずみ曲線

図-7 に各供試体断面の応力-ひずみ曲線を示す。こ こで、各供試体で得られた割裂引張強度を表-2 のコン クリートの弾性係数で除して理論的な弾性域を求め、図 -7 に実線で示した。図-7 より、供試体断面高さによ ってひずみの大きさに違いがあることがわかる。また、 断面中心を軸として上下対称位置のひずみの大きさが異 なる。これは、供試体断面内に発生している応力が、高 さ方向に一様でないことを表している。図-8 に示す供 試体側面の SiGMA 解析結果より、載荷治具と供試体が 接触したときに多数の AE イベントが同定され、その後 1.0N/mm² を超えるときに供試体の片面の端部から破壊 が進行していることがわかる。このことから、断面内の 応力の不一致性は、破壊が供試体長さ方向で異なること に起因すると考えられる。また、 ¢300 に着目すると、 供試体断面中心から底面に0.375d離れた位置でひずみが 顕著に大きくなっている。一方、他点のひずみは¢100、 ¢150 および¢200 の供試体と比較して、破壊時のひずみ が小さい特徴を有している。

(2) 応カーひずみ曲線とSiGMA 解析結果との比較

各円柱供試体の応力を $0.2N/mm^2$ 間隔とした応カーひ ずみ曲線にて,各点間を微分した実験結果例を図-9 に 示す。この図において,微分した値の変化が小さい $\sigma=0$ ~ $0.8N/mm^2$ の範囲では,応カーひずみ曲線の傾きの変化 が小さく,直線とみなせる。また,微分した値の変化が 大きい $\sigma=0.8\sim2.0N/mm^2$ の範囲では,応カーひずみ曲線 の傾きに変化が生じたと読み取ることができる。そのた め,図-9に示すように,応力の微分値は3段階に分け て考えることができる。図-9中で $\sigma=0\sim0.8N/mm^2$ の範 囲を弾性域と定義し,図-9 に〇印で示した境界点を弾 塑性境界点とする。この結果を図-6 に紫色の実線で示 し,また図-7 に〇印で示す。

図-7 において、○印で示される弾性域との境界点は 供試体の直径が小さい場合、弾性論から求められる弾性 域内に集中するが、直径が大きくなると境界点のばらつ きが大きくなることが確認される。ここで、図-6 にお いて、これらの境界点とAE イベント発生位置を比較し た。その結果、 ¢100 では弾性域でAE イベントがほとん ど発生していないが、 ¢150 および¢200 では、載荷初期 の弾性域内で、赤い破線で示す供試体中心部から±0.25d 付近でAE イベントが発生している。さらに、¢300 では、 境界点の発生位置が比較的高い応力で得られているが、 供試体底部では低応力下で得られており、断面の不均一 性を表している。このように、¢200 以下の供試体では、 全ての断面高さで約 1N/mm²の応力で弾塑性域の境界が 現れており、¢300 の供試体では、断面高さ中央部より も上下面付近で塑性となりやすいことが明らかとなった。 さらに、SiGMA 解析から得られる AE イベント位置標定 結果は、ひずみ計測による弾塑性境界点よりも早い段階 で、内部の破壊開始位置を得ることができる。

以上のことから, ¢200 以下の供試体と¢300 の供試体 では、断面のひずみ分布が異なるため、主破壊に至るま での破壊過程が異なると示唆された。

4. 結論

本研究は、コンクリートの割裂引張強度試験における 破壊過程について、直径が Ø100、 Ø150、 Ø200 および Ø300mm の円柱供試体に、AE 計測およびひずみ計測を行 い、SiGMA 解析結果およびひずみ分布に基づいて破壊過 程の検討を行った。以下に、結論を示す。

- (1) 載荷速度を JIS 規格の 1/10 とした場合、 Ø200mm 以下の供試体において、割裂引張強度が同等となり、 寸法効果は確認されなかった。 Ø300mm の供試体では、他の供試体と比較して、割裂引張強度が低くなった。また、Ø100mm とØ150mm の供試体について、 載荷速度を JIS 規格とした場合、Ø100mm の供試体の割裂引張強度は、Ø150mm の供試体の14%高い結果を示し、寸法効果が確認された。
- (2) 割裂引張強度試験に AE 法を適用し, AE 発生頻度 を検討した結果, Ø100mm およびØ150mm の供試体 では,最大荷重に達した直後に AE ヒットが急激に 検出され,破壊することを確認した。また,Ø200mm 以上の供試体では,低荷重レベルから AE ヒット数 が頻発した。これより,割裂引張強度試験の損傷領 域が供試体寸法により異なる可能性が考えられる。
- (3) SiGMA 解析の結果, ¢150mm 以下の供試体では, 引張型, せん断型および混合型の AE イベントがほ ぼ同数発生し, ¢200mm 以上の供試体では,引張型 AE イベントが卓越した。この結果から, ¢150mm 以下の供試体と¢200mm 以上の供試体で,発生する AE イベントの種類に違いがあることが示され,微 細ひび割れの形成過程が異なると考えられる。
- (4) 断面内の応力-ひずみ曲線において、 Ø300mm の供

試体の場合,破壊時のひずみは他の供試体の破壊時 のひずみより小さくなることが示された。応カーひ ずみ曲線の傾きの第一次変化点を弾塑性境界点と すると,供試体の直径が小さい場合,その境界は弾 性論から求められる弾性域内に集中するが,直径が 大きくなると境界点のばらつきが大きくなること を明らかにした。

(5) SiGMA解析結果と応力-ひずみ曲線の弾塑性境界点 から, ¢200mm以下の供試体では,全ての断面高さ で約 1N/mm²の応力で弾塑性域の境界が現れて, ¢300mmの供試体では,断面高さ中央部よりも載荷 面付近で塑性となりやすいことが明らかとなった。 以上のことから, ¢200mm以下の供試体と¢300mm の供試体では,断面のひずみ分布が異なるため,主 破壊に至るまでの破壊過程が異なることが明らか となった。

謝辞

本研究は、平成 23 年度科学研究費補助金(基盤(B), 課題番号 22360173)によって実施した。

参考文献

- 赤沢常雄:コンクリートの圧縮に依る内部応力を 求むる新試験法(圧裂強度試験法に就いて)(其の 一)」,土木学会誌,pp.777-787,1943.
- (社) 日本コンクリート工学協会:コンクリートに 関連する品質基準・試験方法の解釈研究委員会報 告書, JIS 社団法人 日本コンクリート工学協会, pp.54-59, 2011.3
- 長谷川俊昭,塩谷俊幸,岡田武二:コンクリートの割裂引張強度に関する寸法効果,コンクリート工学年次講演会論文集,pp.309-312, 1985.
- 4) 大津政康, 野崎渉太, 川崎佑磨: AE-SiGMA 解析に よるコンクリート割裂破壊の考察, コンクリート 工学論文集, pp.27-33, 2011.9
- 5) 川上泰司,魚本健人:AE 法による二次元破壊進展 位置標定を用いたコンクリート割裂試験の破壊挙 動に関する研究,コンクリート工学年次論文報告 集,Vol.10, No.2, pp.385-390, 1988.
- 6) 上田稔,長谷川宣男,佐藤正俊,奥田宏明:コン クリートの割裂試験における破壊メカニズムの破 壊力学的研究,土木学会論文集,Vol.21, No.478, pp. 61-70, 1993.11
- 7) 大津政康,重石光弘,湯山茂徳,岡本享久:AE モ ーメントテンソル解析のための SiGMA コードの開 発,非破壊検査, Vol.42, No.10, pp570-575, 1993.