

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25820195

研究課題名(和文) コンクリートの破壊エネルギー試験の寸法依存性に関する検討

研究課題名(英文) Size Effect on Fracture Energy Test in Concrete

研究代表者

大野 健太郎 (OHNO, Kentaro)

首都大学東京・都市環境科学研究科・助教

研究者番号：80571918

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、コンクリートの破壊エネルギー試験における寸法依存性について検討した。断面内の不均一性を表す指標である断面骨材寸法比と破壊進行領域幅および破壊エネルギーの関係を検討した結果、同一の断面骨材寸法比であっても、破壊進行領域幅および破壊エネルギーは、骨材最大寸法によって異なることが示された。

また、破壊エネルギー試験では、最大荷重までの外力仕事は断面欠損率および骨材最大寸法によらず一定の値を示すことが認められた。一方、最大荷重以降の外力仕事は、荷重が20%低下した区間以外では断面欠損率によらず一定であったが、荷重が20%低下した区間においては、断面欠損率の増大に伴い減少することが認められた。

研究成果の概要(英文)：In this study, size effect on fracture energy test in concrete are investigated based on acoustic emission monitoring during fracture energy test. The experimental results show the fracture energy increases with increase in the maximum size of aggregate and heights of specimens. It is confirmed that the fracture energy correlates with the width of AE cluster, as the energy increase when the width of fracture process zone expands. In addition, focusing on the energy by the applied load during loading history, it is demonstrated that energy before maximum load shows constant, regardless of specimen height and the maximum size of aggregate. On the other hand, energy between maximum load and 20% decrease from maximum load gradually decreases as decrease specimen height. Furthermore, heights of fracture process zone before maximum load are not change by specimen height. Therefore, size effect on fracture energy test in concrete is caused after the applied load reaches maximum load.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート 破壊エネルギー 寸法依存性 アコースティック・エミッション法 骨材最大寸法 切欠き高さ 破壊進行領域

1. 研究開始当初の背景

建設材料・構造に関わる国際研究機関・専門家連合 (RILEM) や日本コンクリート工学会 (JCI) において、コンクリートの破壊エネルギー試験方法が提案されている。これらによれば、切欠きはりの3点曲げ試験時に、切欠き部の開口変位または荷重点変位を測定し、試験から得られる荷重-変位曲線下の面積に重力による補正項を加えた後、これを破断面積 (リガメント面積) で除すことで破壊エネルギーを求めるとされている。

今日まで、RILEM 法や JCI 法に基づく破壊エネルギー試験において、供試体寸法の違いにより得られる破壊エネルギーが異なる、すなわち、寸法依存性が存在することは多くの研究者により報告されているが、その支配要因は未だ特定されていない。これらの破壊エネルギー試験に寸法依存性が存在するにも関わらず、当該試験法から得られるコンクリートの破壊エネルギーをコンクリートの特性値として扱う場合もあり、未解決課題を抱えたまま、コンクリート部材の設計法に取り入れられている。

2. 研究の目的

本研究では、コンクリートの破壊エネルギー試験における寸法依存性の要因を把握するため、以下の3点について検討した。

- (1) 断面欠損率 (切欠き高さ/供試体高さ) と骨材最大寸法をパラメータとし、破壊進行領域幅と破壊エネルギーの関係の検討。
- (2) 断面欠損率と骨材最大寸法をパラメータとし、破断面の凹凸性状が破壊エネルギーに及ぼす影響の検討。
- (3) 切欠き高さがコンクリートの破壊エネルギーに及ぼす影響について、各荷重段階での外力仕事 (エネルギー) と寸法効果の関係の検討。

3. 研究の方法

(1) コンクリートの破壊エネルギーと破壊進行領域幅に関する検討を実施した。実験では、コンクリートの骨材最大寸法を 5、10、20mm とし、水セメント比を 40% とした 100×100×400mm の角柱供試体に、切欠きを 20~80mm まで 10mm 刻みで変化させた供試体を作製した。コンクリートの配合は、表-1 に示すとおりである。破壊エネルギー試験は、図-1 に示すように、切欠き下部に設置したクリップ型変位計にて開口変位 (CMOD) を測定し、同時に荷重を記録した。また、試験中に微細ひび割れ発生に伴うアコースティック・エミッション (AE) を計測し、微細ひび割れの進行および破壊進行領域を推定した。

表-1 コンクリートの配合

d max (mm)	SI (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					W	C	S	G
10 or 20	8	4.5	40	43.1	172	430	731	968

*d max=5mmは、粗骨材を除いた配合とした

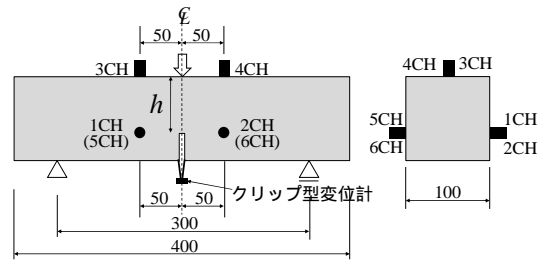


図-1 供試体概要図

(2) 破壊エネルギー試験後の破断面の凹凸性状と破壊エネルギーの関係を検討した。実験では、切欠き高さを 30、50、60、70mm とし、図-1 に示すように破壊エネルギー試験を実施した。また、破壊後の表面積を非接触三次元形状測定器にて測定した。破断面の凹凸率を図-2 に示すように、切欠き中央を基準とし、主ひび割れ全表面積に対する、±2.5mm 以上の表面積の割合として算出した。なお、荷重点とひび割れ最終到達点の距離が 5mm を超え、主ひび割れが予定破断面から大きく外れた供試体は、検討対象から除いた。

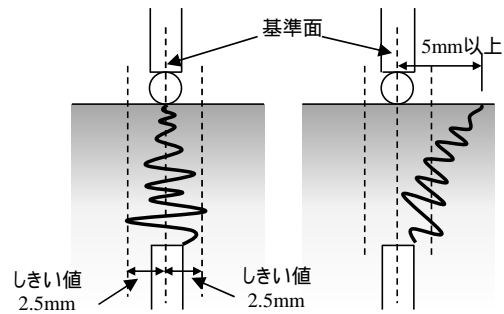


図-2 破断形状測定の概要

(3) 破壊エネルギー試験における、荷重過程での外力仕事 (エネルギー) を検討するため、図-3 に示すように、荷重別に区間分けを行い、エネルギーを算出した。なお、各段階におけるエネルギーは、図-4 に示すように荷重 P_i から荷重 P_j までのエネルギーの算出では、荷重 P_j までのエネルギー E_{P_j} と荷重 P_i までのエネルギー E_{P_i} の差より求めた。

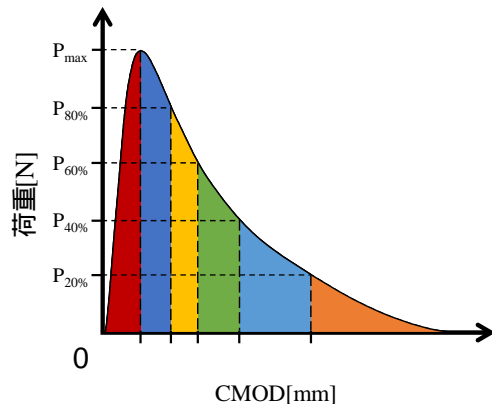


図-3 荷重 - CMOD 曲線の分割概念図

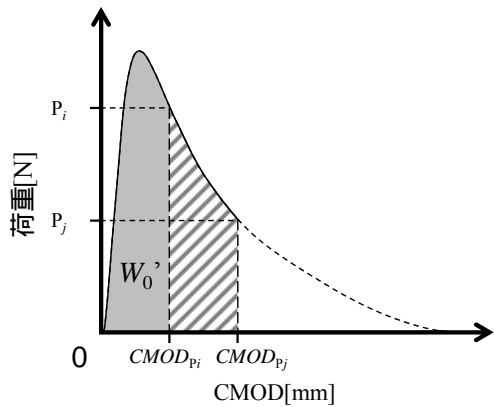


図-4 特定区間における荷重 - CMOD 曲線

4. 研究成果

(1) 破壊進行領域幅と破壊エネルギーの関係

破壊エネルギー試験中に得られた AE 信号を対象に位置標定を行い、エネルギー別に整理した結果を図-5 に示す。ここで、AE エネルギーが低い AE 源がコンクリートのひび割れ形成に直接影響を及ぼすとは考えにくい。そのため、AE 源位置標定結果を対象に、供試体長軸方向の AE イベント数が正規分布であると仮定し、AE 源位置の平均値 μ および標準偏差 σ より、 $\mu \pm \sigma$ で表される範囲を AE 源発生領域の幅、すなわち破壊進行領域幅と定義した。

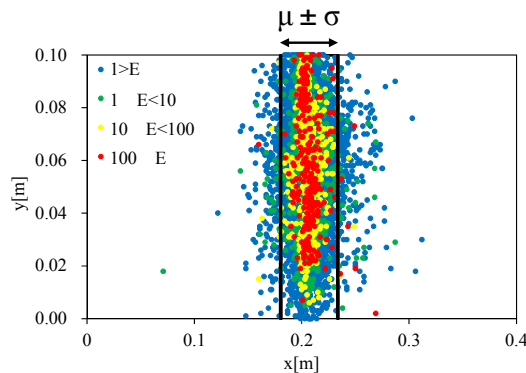
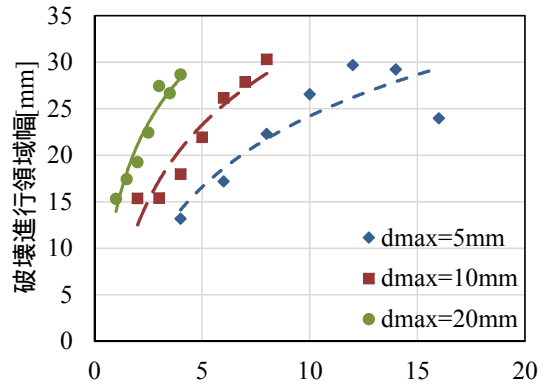


図-5 エネルギー別 AE 源位置標定結果

図-6 および図-7 に断面骨材寸法比 $((W-a)/d_{max})$ と破壊進行領域幅および破壊エネルギーの関係を示す。断面骨材寸法比とは、供試体高ささと骨材最大寸法の比であり、断面内の不均一性を表す指標である。図-6 および図-7 より、同一の断面骨材寸法比であっても、すなわち断面内の不均一性が同程度であっても、破壊進行領域幅および破壊エネルギーは、骨材最大寸法によって異なることがわかる。なお、骨材最大寸法 5mm では、破壊進行領域幅は断面骨材寸法比が大きく変化しても、10 および 20mm 骨材の破壊進行領域幅(15 ~ 30mm)と同程度となる特徴を有する。このことは、破壊進行領域幅がとる範囲は骨材最大寸法に依存せず、供試体形状に依存してい

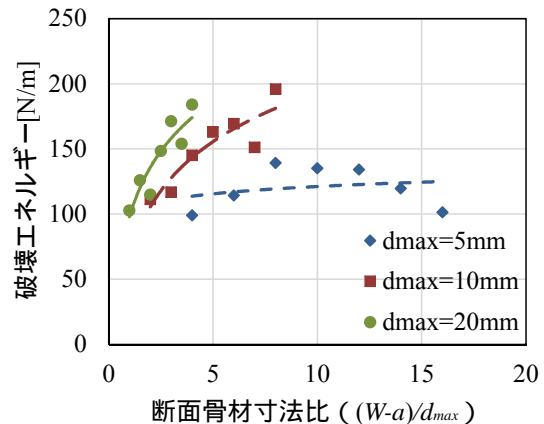
ることを示唆すると考えられる。また、骨材最大寸法 5mm の破壊エネルギーはほぼ一定の値を示し、5mm と 10 および 20mm では大きく異なる傾向にある。破壊エネルギーと破壊進行領域幅の関係(図-8)から、破壊エネルギーは破壊進行領域幅のみで評価できず、骨材最大寸法も考慮する必要がある。



断面骨材寸法比 $((W-a)/d_{max})$

図-6 破壊進行領域幅と断面骨材寸法比

図-7 破壊エネルギーと断面骨材寸法比



断面骨材寸法比 $((W-a)/d_{max})$

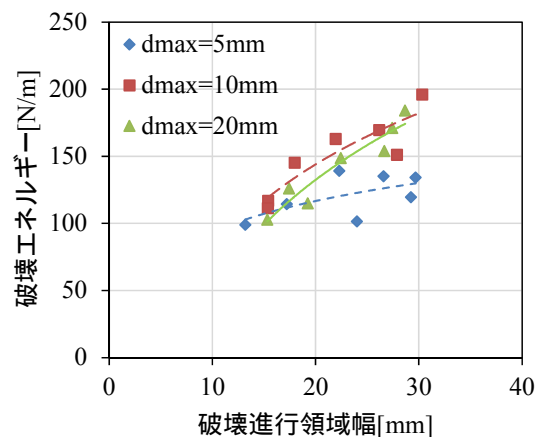


図-8 破壊エネルギーと破壊進行領域幅

(2) 破断面の凹凸性状と破壊エネルギーの関係

図-9 に W/C=50% のコンクリート供試体の破壊エネルギーと破断面の凹凸率の関係を示す。図より、破断面の凹凸率の増加に伴い破

壊エネルギーが増加することがわかる。次に、破壊進行領域幅と破断面の凹凸率の関係を図-10に示す。図より、破壊進行領域幅の増加に伴い破断面の凹凸率が増加する傾向にある。このことから、破断面の凹凸率が破壊エネルギーおよび破壊進行領域幅と関連があることがわかり、破壊時のひび割れ進展経路の差が破壊エネルギーの差に寄与する可能性が示唆された。

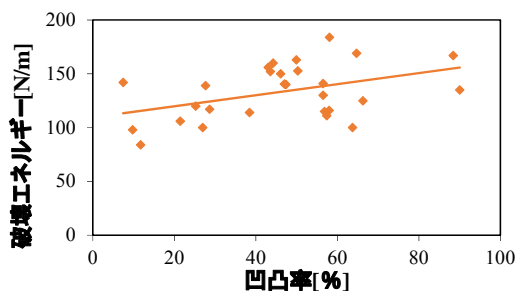


図-9 破壊エネルギーと破断面の凹凸率の関係

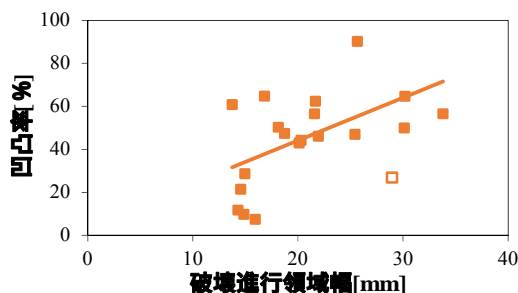


図-10 破断面の凹凸率と破壊進行領域幅の関係

(3) 各荷重段階でのエネルギーと寸法効果の関係

図-11に $W/C=40\%$ としたコンクリート供試体の破壊エネルギーと断面欠損率の関係を示す。また、図-12に最大荷重時までの外力仕事（エネルギー）と断面欠損率の関係を示す。図-12より、最大荷重までのエネルギーは断面欠損率および骨材最大寸法によらずほぼ一定の値を示している。これに対し、図-11に示した破壊エネルギーは、断面欠損率の増加に伴い減少傾向を示している。さらに、AE源位置標定結果から得られた最大荷重までの破壊進行領域高さ（図-13に示す）と断面欠損率の関係を図-13に示す。図より、いずれの骨材最大寸法においても、最大荷重時までの破壊進行領域高さは20mm程度であり、断面欠損率に依存せず同程度となっている。このことから、最大荷重までの目視可能なひび割れが生じていない比較的均質と考えられる範囲では、最大荷重時までのエネルギーは一定となり、そのために形成される破壊進行領域の範囲も切欠き高さや骨材最大寸法によらず一定となる。ところが、最大荷重後のエネルギーおよび破壊進行領域の発達の程度が異なることによって、最終的に得られる破壊エネル

ギーは異なり、寸法依存性を示すと考えられる。したがって、コンクリートの破壊エネルギーの寸法効果は、最大荷重以後のひび割れ進展特性によるものと推察される。

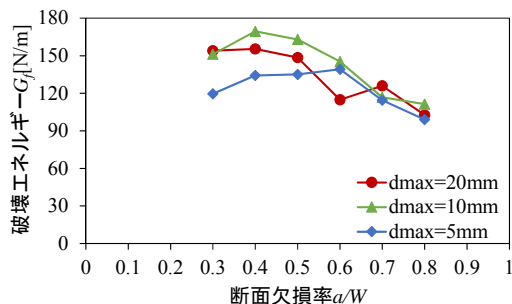


図-11 破壊エネルギーと断面欠損率

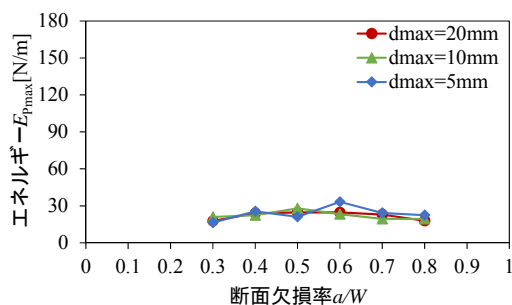


図-12 最大荷重時までの消費エネルギーと断面欠損率の関係

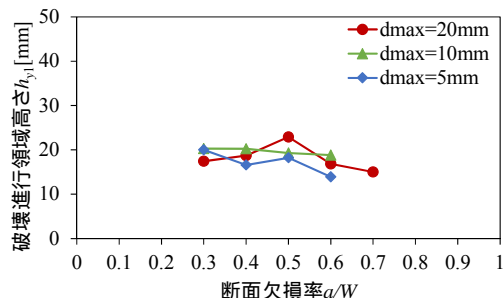


図-13 最大荷重時までに形成された破壊進行領域高さ（図-13）と断面欠損率の関係

ここで、各荷重段階でのエネルギーの検討を行った結果を図-14に示す。なお、最大荷重に対する各荷重段階を $P_i\%$ とし、 P_{max} から $P_{80\%}$ までのエネルギーを $E_{P_{max}-80\%}$ 、 $P_{80\%}$ から $P_{60\%}$ までのエネルギーを $E_{P_{80}-60\%}$ 、それ以降の区間でのエネルギーについても同様に、 $E_{P_{80}-40\%}$ 、 $E_{P_{40}-20\%}$ 、 $E_{P_{20}-0\%}$ とする。図-14より、断面欠損率の上昇に伴いエネルギーが減少する区間は、骨材最大寸法によらず $E_{P_{max}-80\%}$ の区間であり、特に、 $a/W=0.8$ のエネルギーが小さい。他の区間では、 $E_{P_{20}-0\%}$ においてやや変動が大きいものの、同程度のエネルギーである。このことは、ひび割れが進展する際に、同程度の外力仕事を消費しながらひび割れが成長することを示唆するものである。ところが、 $E_{P_{max}-80\%}$ では図-15に示すように、断面欠損率の増加によってエネルギーは低下しており、他の区間とは

異なる傾向を示している。

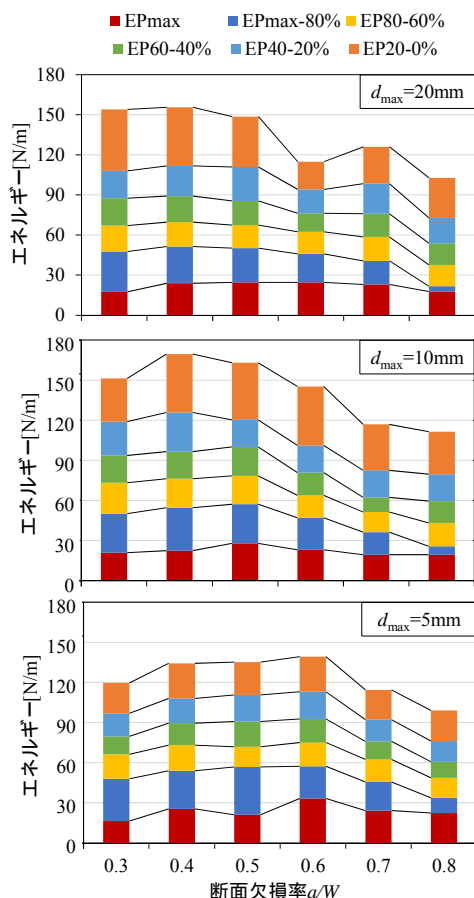


図-14 各荷重段階における消費エネルギー

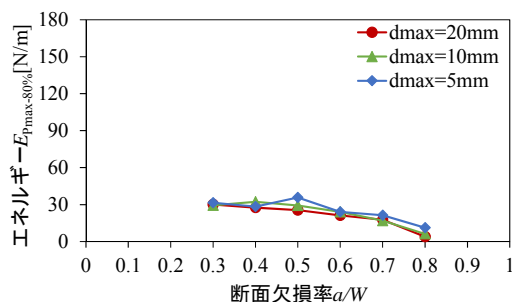


図-15 最大荷重から20%低下した区間の消費エネルギーと断面欠損率の関係

以上のことから、最大荷重まではひび割れ等のない比較的均質なコンクリートの組織を破壊するため、断面欠損率に依存しないエネルギーが消費され、それに伴い破壊進行領域高さも一定となるが、その後はリガメント高さに応じた一定の割合で破壊進行領域が移行するものと考えられる。すなわち、最大荷重時において、リガメント高さに応じたエネルギー消費が生じないために、破壊進行領域高さが断面欠損率で一定となり、次の区間でリガメント高さに応じてひび割れが安定成長しようとする挙動に変化するためにエネルギーが断面欠損率によって大きく変化した可能性が挙げられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

(1) 長岡貴紀, 大野健太郎, 宇治公隆, 上野敦: コンクリートの破壊エネルギーに切欠き高さが及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.627-632, 2016, 査読有

(2) 大野健太郎: コンクリートの破壊エネルギー試験における寸法効果に関する研究事例, コンクリート工学, Vol.53, No.4, pp.364-369, 2015.4, 査読有

(3) Kentaro OHNO, Kimitaka UJI, Atsushi UENO and Masayasu OHTSU: Fracture Process zone in notched concrete beam under three-point bending by acoustic emission, Construction and Building Materials, Vol.67, pp.139-145, 2014.5, 査読有

〔学会発表〕(計 4 件)

(1) 松崎晃, 大野健太郎, 宇治公隆, 上野敦: コンクリートの引張軟化特性に着目した破壊エネルギーの寸法依存性に関する検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 2017 年 9 月 (発表確定), 九州大学 (福岡県福岡市)

(2) 長岡貴紀, 大野健太郎, 宇治公隆, 上野敦: コンクリートの破壊エネルギー試験におけるマイクロクラック形成モードに関する一考察, 第 20 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス, 2015 年 11 月 19 日, 愛知県産業労働センター (ウインクあいち) (愛知県名古屋市)

(3) 板東真輝, 大野健太郎, 宇治公隆, 上野敦: コンクリートの破壊エネルギー試験における破断形状と破壊エネルギーの関係, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 2015 年 9 月 16 日, 岡山大学 (岡山県岡山市)

(4) 長岡貴紀, 大野健太郎, 宇治公隆, 上野敦: コンクリートの破壊エネルギー試験における破壊進行領域と破壊エネルギーの関係に関する検討, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 2014 年 9 月 11 日, 大阪大学 (大阪府吹田市)

〔図書〕(計 1 件)

(1) Kentaro OHNO (Edited by Masayasu OHTSU): Acoustic Emission (AE) and Related Non-destructive Evaluation (NDE) Techniques in the Fracture Mechanics of Concrete Fundamentals and Applications, Woodhead Publishing, 総頁数 286, 2015

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大野 健太郎 (OHNO KENTARO)

首都大学東京・都市環境科学研究科・助教

研究者番号: 80571918