

論文 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

長岡 貴紀*1・大野 健太郎*2・宇治 公隆*3・上野 敦*4

要旨: 本研究では、切欠き高さを変えたコンクリート供試体を用いて破壊エネルギー試験を実施し、同時にAE計測を行った。実験より、切欠き高さの増加に伴い破壊エネルギーの減少が認められた。そこで、実験で得られた荷重—CMOD 曲線に着目し、荷重別に外力エネルギーを算出したところ、最大荷重から20%低下する区間で切欠き高さの増加に伴い外力エネルギーが減少し、他の区間では切欠き高さによらず同程度の外力エネルギーを有することが認められた。このことから破壊エネルギーの寸法効果には、この区間の外力エネルギーが影響を及ぼすことが示唆された。

キーワード: 破壊エネルギー, 破壊進行領域, 断面欠損率, 骨材最大寸法, AE 法

1. はじめに

コンクリートの破壊エネルギーは、圧縮強度、弾性係数、引張強度などと同様にコンクリートの材料特性値として扱われる。近年、コンクリートの破壊エネルギーは鉄筋コンクリート部材の曲げひび割れ強度算定のみならず、コンクリートの靱性向上¹⁾や材料開発時の評価項目²⁾にも採用され、材料試験の評価項目としての取り扱いが増加してきている。

コンクリートの破壊エネルギーを求める方法として、切欠きを有するはりの3点曲げ試験方法が日本コンクリート工学会において規定されている³⁾。この試験方法は、リガメント領域内に1本のひび割れを形成するために必要な単位面積あたりのエネルギーを算出する手法である。しかしながら、供試体寸法を変えた場合には、同一配合のコンクリートであっても得られる破壊エネルギーは異なり、いわゆる寸法効果が存在する。

コンクリートの寸法効果の要因に、破壊進行領域の存在が挙げられる。この破壊進行領域は他の脆性材料や金属材料などと異なり、供試体寸法に対して大きいため無視できないのが特徴である⁴⁾。コンクリート内部に形成される破壊進行領域が大きくなるとコンクリートの破壊エネルギーは大きくなるが⁵⁾、破壊進行領域の移行特性に関する検討は少ない現状にある⁶⁾。本研究では、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を各荷重段階で把握し、3点曲げ試験による破壊エネルギーの評価方法について検討した。実験では、切欠き高さ

を変化させた供試体に破壊エネルギー試験を実施し、同時にAE法を適用した。実験結果から、各荷重段階での外力エネルギーと破壊進行領域を算出し、両者の関係について検討した。

2. 実験方法

2.1 供試体概要および実験方法

骨材の最大寸法 d_{max} を 5, 10, 20mm とし、水セメント比を 40% としたコンクリート供試体を作製した。作製したコンクリートの計画配合は表—1 に示すとおりである。なお、 $d_{max}=5\text{mm}$ における配合は表—1 中の粗骨材を除いた配合とした。これは、全供試体において、モルタル相の配合を統一することで、骨材最大寸法が破壊エネルギーに与える影響を検討するためである。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(表乾密度 2.62g/cm^3 , 吸水率 1.65%, 粗粒率 2.92) および相模原産陸砂(表乾密度 2.65g/cm^3 , 吸水率 2.89%, 粗粒率 1.58) を質量比 9:1 で混合した混合細骨材を、粗骨材には相模原産碎石(表乾密度 2.63g/cm^3 , 吸水率 1.15%, 粗粒率 6.51, 実積率 59.6%) を用いた。ここで、前述の粗骨材の粗粒率は $d_{max}=20\text{mm}$ のものであり、 $d_{max}=10\text{mm}$ の配合では、目開き 9.5mm のふるいにてふるい分けた骨材を使用した。なお、粒度分布が破壊エネルギーに及ぼす影響は小さいことから⁷⁾、本実験では粒度分布の調整は行わなかった。供試体寸法は図—1 に示すように $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ であり、各骨材最大寸法 d_{max} (5, 10, 20mm)

表—1 コンクリートの配合

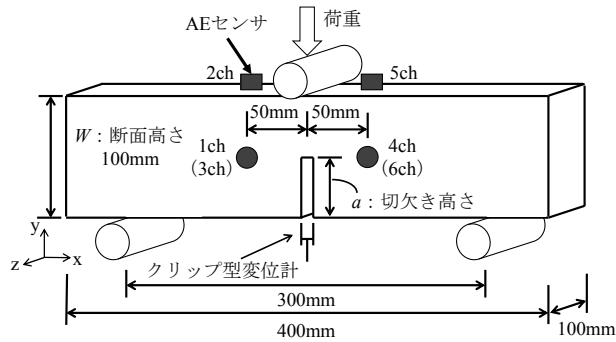
粗骨材の最大寸法 [mm]	スランブ [cm]	水セメント比 W/C [%]	空気量 [%]	細骨材率 s/a [%]	単位量 [kg/m^3]				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤
10,20	8.0	40	4.5	43.1	172	430	731	968	C×0.45%

*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)



図—1 供試体概要

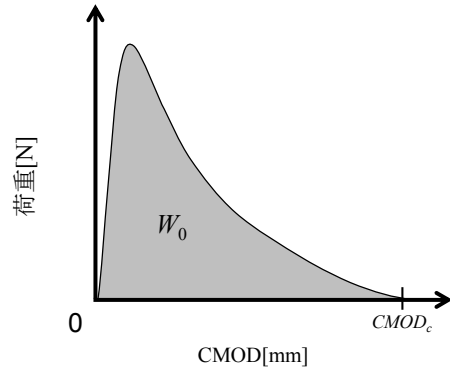
表—2 コンクリートの力学特性

d_{max} [mm]	a/W	圧縮強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	弾性係数 [kN/mm ²]	弾性波速度 [m/s]
5	0.3~0.4	85.2	3.41	28.9	4200
	0.5~0.8	92.6	3.53	29.0	3900
10	0.3~0.4	63.0	3.38	31.2	4400
	0.5~0.8	62.1	3.68	29.4	4300
20	0.3~0.4	51.2	3.21	28.8	4300
	0.5~0.8	62.6	3.62	29.7	4300

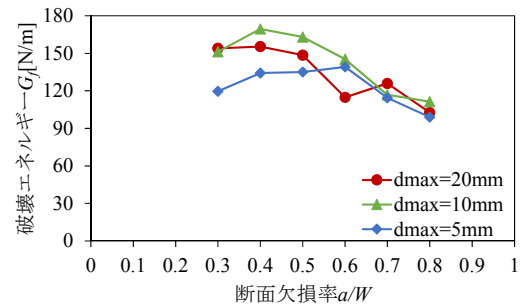
に対して、切欠き高さ a を 30, 40, 50, 60, 70, 80mm と変化させた。なお、供試体の切欠き幅は 3mm とした。供試体数は各水準につき 5 体とし、破壊エネルギーの算出には平均値を用いた。切欠きの作製方法は、鋼製型枠内に、切欠き高さ相当の樹脂製 T 型スペーサをスパン中央に固定した状態で、コンクリートを打設し、硬化後に取り除くことで作製した。供試体は材齢 14 日まで樹脂製 T 型スペーサを挿入したままの状態 で 20°C の水中養生を行い、その後供試体から樹脂製 T 型スペーサを取り除き、材齢 28 日まで 20°C、60%R.H. の恒温恒湿環境下で気中保管を行った。破壊エネルギー試験は材齢 28 日から 4 日以内で実施した。実験に使用したコンクリートの力学特性を表—2 に示す。ここで、表中の a/W は供試体断面高さに切欠き高さが占める割合である断面欠損率を表す。また、弾性波速度は、角柱供試体にてペンシルロードブレイク法にて求めた。

試験は、容量 100kN の試験機にて 3 点曲げ試験を行い、切欠き下部に設置したクリップ型変位計（感度：1/1000mm）にて切欠き下部の開口変位（Crack Mouth Opening Displacement, CMOD）を測定し、同時にロードセル（容量 20kN と 5kN）にて荷重を測定した。供試体と治具との摩擦により発生する AE 信号を防ぐために、供試体が治具と接する箇所にはテフロンシートを挿入した。載荷速度は載荷点変位で 0.05mm/min とした。

供試体には図—1 に示すように共振周波数 150kHz の AE センサを 6 個貼付し、AE 信号の計測を行った。検出信号は、プリアンプにて 40dB 増幅後に周波数帯域を 10~400kHz とし て記録し、設定しきい値を 35dB とした。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。



図—2 荷重—CMOD 曲線の概略図



図—3 破壊エネルギー試験結果

2.2 破壊エネルギーの算出方法

破壊エネルギーは、JCI-S-001「切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法³⁾」に従って式(1)、(2)より算出した。図—2 に荷重—CMOD 曲線の概形を示す。

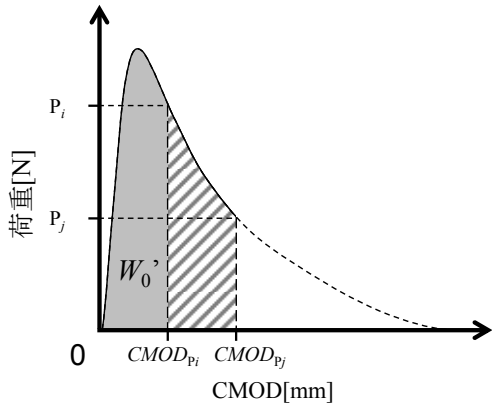
$$G_f = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (1)$$

$$W_1 = 0.75 \left(\frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \cdot CMOD_c \quad (2)$$

ここに、 G_f : 破壊エネルギー[N/mm]、 W_0 : 供試体が破断するまでの荷重—CMOD 曲線下の面積[N・mm]、 W_1 : 供試体の自重および載荷治具がなす仕事[N・mm]、 A_{lig} : 破断投影面積 ($b \times h$) [mm²]、 b : リガメント部の幅[mm]、 h : リガメント部の高さ[mm]、 m_1 : 供試体の質量[kg]、 S : 載荷スパン[mm]、 L : 供試体の全長[mm]、 m_2 : 試験機に取り付けられておらず、破断するまで供試体に載っている治具の質量[kg]、 g : 重力加速度 (9.807m/s²)、 $CMOD_c$: 破断時のひび割れ開口変位[mm]

3. 破壊エネルギー試験結果

破壊エネルギー試験によって得られた破壊エネルギー G_f と断面欠損率 a/W の関係を図—3 に示す。この図から、全ての骨材最大寸法において、断面欠損率の増加に伴い、破壊エネルギーは減少している。すなわち、寸法効果が現れている。また、 $a/W=0.7 \sim 0.8$ では、骨材最大寸法が異なる場合でも同程度の破壊エネルギーが得られており、骨材最大寸法が破壊エネルギーに与える影響は小さいと



図—4 特定区間における荷重—CMOD 曲線

いえる。ここで、 $d_{max}=10, 20\text{mm}$ 、 $a/W=0.7\sim 0.8$ において、破断面に骨材の存在を確認し、リガメント面における材料分離は生じていないと考えられる。一方、 $a/W=0.3\sim 0.6$ では、 $d_{max}=10\text{mm}$ 、 20mm では同程度の破壊エネルギーを示すが、 $d_{max}=5\text{mm}$ では $d_{max}=10, 20\text{mm}$ と比較して破壊エネルギーは小さい。以上のことから、コンクリートの破壊エネルギー試験において、断面欠損率が破壊エネルギーに影響を及ぼすことが確認でき、骨材最大寸法の影響は断面欠損率により異なることが示唆された。

4. 最大荷重前後における外力エネルギーと破壊進行領域の関係

4.1 特定区間における外力エネルギーの算出方法

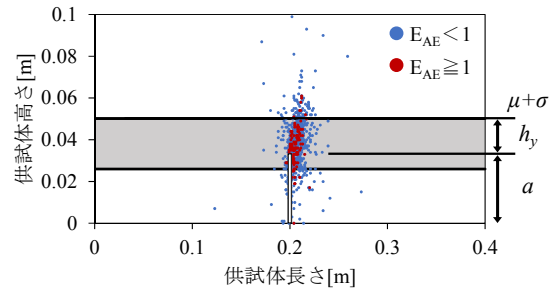
本研究では、コンクリートの破壊エネルギーに切欠き高さが及ぼす影響を各荷重段階で把握することを目的とし、各荷重段階の外力エネルギーの算出を行った。具体的には、図—4に示すように、荷重 P_i から荷重 P_j までの外力エネルギーの算出では、荷重 P_j までの外力エネルギー E_{P_j} と荷重 P_i までの外力エネルギー E_{P_i} の差より求めた(式(3))。荷重 P_i までの外力エネルギーの算出は、荷重—CMOD 曲線下の面積のうち、載荷開始から荷重 P_i まで(図—4のグレー部分)の面積を W_0' とした(式(4))。なお、自重等のなす仕事量 W_1' は、式(2)中の破断時のひび割れの開口変位 $CMOD_c$ を荷重 P_i 時のひび割れ開口変位 $CMOD_{P_i}$ に置き換えることで算出した(式(5))。

$$E_{P_i-j} = E_{P_j} - E_{P_i} \quad (3)$$

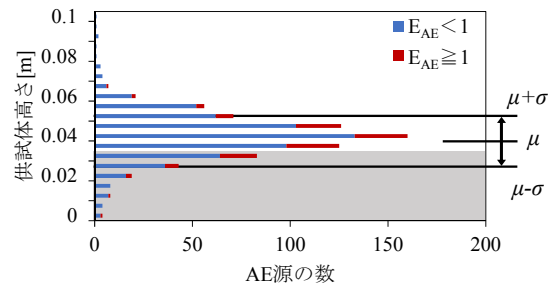
$$E_{P_i} = \frac{0.75W_0' + W_1'}{A_{lig}} \quad (4)$$

$$W_1' = 0.75 \left(\frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \cdot CMOD_{P_i} \quad (5)$$

ここで、外力エネルギーは、破壊による消費エネルギーと弾性ひずみエネルギーの和であるが、本実験から、消費エネルギーのみの算出が困難であるため、以降では外力エネルギーの変化に着目した考察を行う。



図—5 AE エネルギー別 AE 源位置標定結果 ($d_{max}=20\text{mm}$ 、 $a/W=0.3$ 、最大荷重まで)



図—6 供試体高さ方向における AE 源の発生状況 ($d_{max}=20\text{mm}$ 、 $a/W=0.3$ 、最大荷重まで)

4.2 破壊進行領域の推定方法

大野ら⁵⁾は、AE エネルギー E_{AE} が高い AE 源($E_{AE} \geq 1$)を対象として、破壊進行領域を推定し、破壊進行領域の大きさと破壊エネルギーの関係について報告している。そこで、本研究においても、AE エネルギーが高い AE 源($E_{AE} \geq 1$)に着目して、破壊進行領域の推定を行う。ここで、AE エネルギーは計測によって得られた AE 信号の最大振幅値の二乗と継続時間の積(式(6))より求めた。

$$E_{AE} = V^2 \cdot T \quad (6)$$

ここに、 E_{AE} : AE エネルギー[$\text{V}^2 \cdot \mu\text{s}$]、 V : AE 信号の最大振幅値[V]、 T : AE 信号の継続時間[μs]

ただし、本研究において、1つの AE 源に対する AE エネルギーは、6個の AE 信号から得られる AE エネルギーの平均値として算出した。

最大荷重までの AE 源位置標定結果の一例を図—5 および図—6に示す。図—5には AE エネルギー別 AE 源位置標定結果を、図—6には供試体高さ方向における AE 源発生状況を示す。

AE 源の高さ方向の発生数は、図—6に示すように正規分布であると仮定でき、高さの平均値 μ および標準偏差 σ より $\mu \pm \sigma$ で表される範囲は、AE エネルギーが $E_{AE} \geq 1$ となる AE 源の多くを網羅していると考えられる。本研究では、この範囲を破壊進行領域と仮定し、また、図—5に示すように、切欠き先端から載荷点方向への距離を破壊進行領域高さ h_y と定義し、各断面欠損率の h_y の平均値を破壊進行領域高さとした。

4.3 最大荷重前の外力エネルギーと破壊進行領域の関係

(1) 外力エネルギー

図-7に、最大荷重までの外力エネルギー E_{Pmax} と断面欠損率 a/W の関係を示す。図より、最大荷重までの外力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であることがわかる。これに対して、図-3に示したように、最終的に得られる破壊エネルギー G_f は断面欠損率の増加に伴い減少傾向を示していることから、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であると推察される。

(2) 破壊進行領域の高さ

図-8に、最大荷重までの破壊進行領域高さ h_{y1} と断面欠損率 a/W の関係を示す。ここで、 $d_{max}=20\text{mm}$ の $a/W=0.8$ および $d_{max}=5, 10\text{mm}$ の $a/W=0.7, 0.8$ における供試体については、最大荷重までに得られたAE源が非常に少ないことから、検討対象から除外した。図より、いずれの骨材最大寸法においても、 $h_{y1}=20\text{mm}$ 程度であり、 a/W に関係なく同程度となっている。すなわち、最大荷重まで

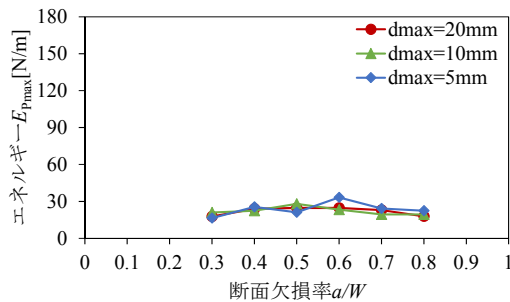


図-7 最大荷重時までの外力エネルギーと断面欠損率の関係

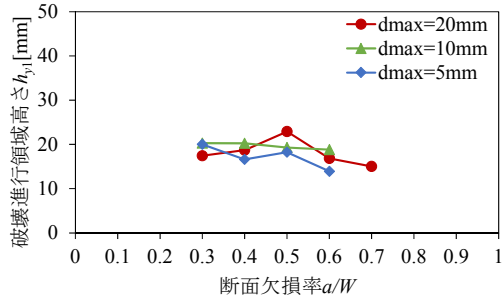


図-8 最大荷重時までに形成された破壊進行領域高さ

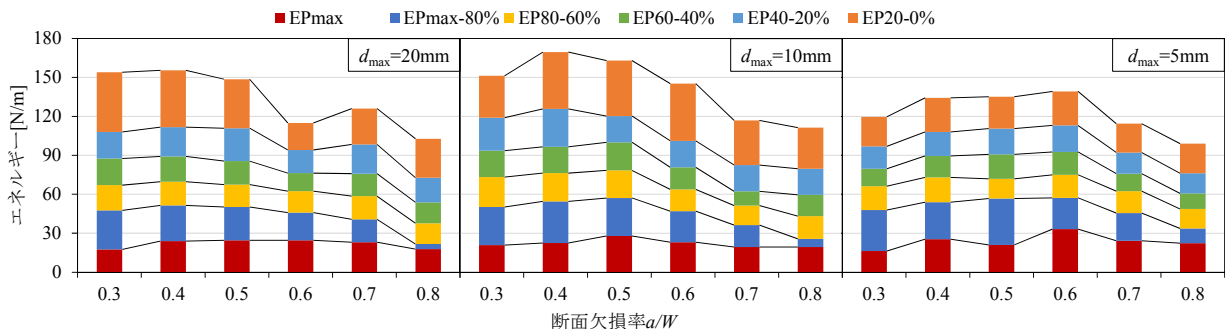


図-10 各荷重段階の外力エネルギーの内訳

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、最大荷重時までの外力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。

4.4 最大荷重後の外力エネルギーと破壊進行領域の関係

(1) 外力エネルギー

最大荷重後の外力エネルギーを把握することを目的とし、最大荷重後の外力エネルギーを最大荷重 P_{max} から破断時 P_0 まで荷重を20%間隔で5段階に分けて検討した。荷重-CMOD 曲線の分割のイメージ図を図-9に示す。ここで、本研究では、最大荷重に対する各荷重段階を P_i とし、 P_{max} から $P_{80\%}$ までの外力エネルギーを $E_{Pmax-80\%}$ 、 $P_{80\%}$ から $P_{60\%}$ までの外力エネルギーを $E_{P80-60\%}$ 、それ以後の区間での外力エネルギーについても同様に、 $E_{P60-40\%}$ 、 $E_{P40-20\%}$ 、 $E_{P20-0\%}$ とする。各荷重段階の外力エネルギーの内訳を図-10に示す。図より、断面欠損率の増加に伴い外力エネルギーが減少する区間は、骨材最大寸法によらず $E_{Pmax-80\%}$ の区間であり、特に、 $a/W=0.8$ での外力エネルギーが小さい。他の区間では、 $E_{P20-0\%}$ においてやや変動が大きいものの同程度の外力エネルギーである。このことは、ひび割れが進展する際に、同程度のエネルギー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、 $E_{Pmax-80\%}$ では図-11に示すように、断面欠損率の増加によって外力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。本区間で外力エネルギーが異なる理由については、後述する破壊進行領

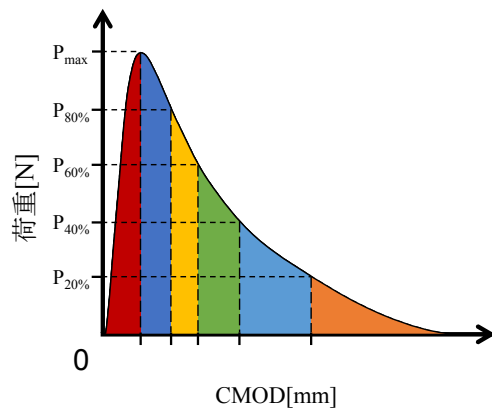
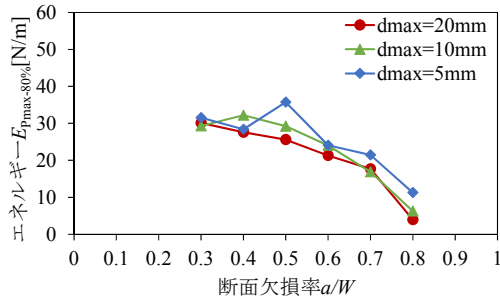
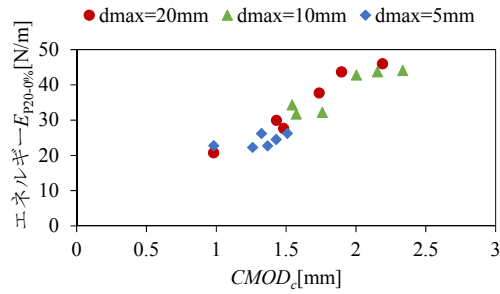


図-9 荷重-CMOD 曲線の分割イメージ図



図—11 最大荷重から 20%低下した区間の外力エネルギーと断面欠損率の関係



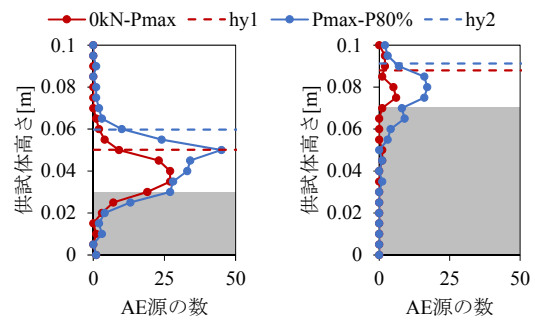
図—12 最大荷重の 20%から破断時までの外力エネルギーと断面欠損率の関係

域高さとの比較から検討する。

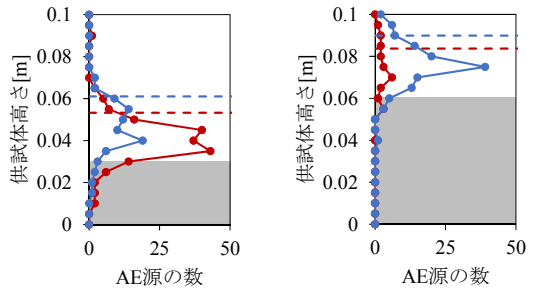
次に、 $E_{P20-0\%}$ における外力エネルギーの変動要因について検討する。図—12 に $E_{P20-0\%}$ と破断時の開口変位 $CMOD_c$ の関係を示す。図より、破断時の開口変位 $CMOD_c$ の増加に伴い、外力エネルギーも大きくなる傾向にある。また、骨材最大寸法別では、 $d_{max}=5mm$ の場合、 $CMOD_c$ の取りうる範囲は 1.0~1.5mm の範囲内にあるが、 $d_{max}=10, 20mm$ では、1.0~2.5mm の範囲内にあり、骨材最大寸法によって破断時開口変位が異なる。これは骨材最大寸法によって変形抵抗性が異なることを示唆しており、 $d_{max}=5mm$ では、供試体の変形に対する抵抗性が低く、破断は比較的小さな変位で起きるが、 $d_{max}=10, 20mm$ では変形抵抗性が $d_{max}=5mm$ と比較して大きく、 $d_{max}=5mm$ より靱性の高い挙動を示した結果であると考えられる。

(2) 破壊進行領域の高さ

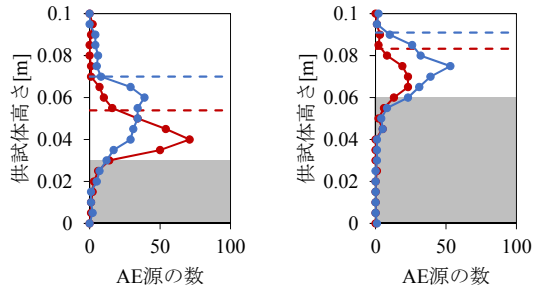
ここでは、外力エネルギーが断面欠損率によって異なる最大荷重から荷重が 20%低下した区間での破壊進行領域高さ h_2 を推定する。図—13 に、最大荷重までの区間 (0-P_{max}) と最大荷重から 20%低下した区間 (P_{max}-P_{80%}) における供試体高さ方向の AE 源発生状況を示す。図中には、それぞれの区間で推定した破壊進行領域高さ h_{y1} および h_{y2} を破線で示している。図より、破壊進行領域を示す AE 源の分布域は破壊が進行するにつれて載荷点方向に推移していることがわかる。ここで、最大荷重時 (P_{max}) と最大荷重から 20%低下した区間 (P_{80%}) における破壊進行領域高さの変化量、すなわち、 h_{y1} と h_{y2} の差 Δh_y は、



(a) $d_{max}=20mm, a/W=0.3$ (b) $d_{max}=20mm, a/W=0.7$

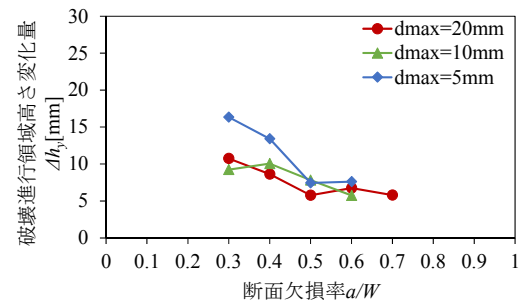


(c) $d_{max}=10mm, a/W=0.3$ (d) $d_{max}=10mm, a/W=0.6$



(e) $d_{max}=5mm, a/W=0.3$ (f) $d_{max}=5mm, a/W=0.6$

図—13 供試体高さ方向における AE 源の発生状況



図—14 破壊進行領域高さ変化量と断面欠損率の関係

破壊進行領域の移行特性を表すパラメータであると考えられる。図—14 に Δh_y と断面欠損率の関係を示す。図より、断面欠損率の増加に伴い Δh_y は減少しており、この傾向は、図—11 に示した同区間における外力エネルギーの低下傾向と整合している。すなわち、破壊進行領域の変化量の大きさに依存して外力エネルギーは変化することが推察される。

4.5 外力エネルギーと破壊進行領域の関係

これまでに得られた結果より、最大荷重までの外力エネルギーおよび破壊進行領域高さは、断面欠損率および骨材最大寸法によらず同程度であることが示された。しかし、最大荷重から 20%低下した区間では、外力エネル

ギーおよび破壊進行領域高さの変化量は断面欠損率の増加に伴い減少することが認められた。それ以降の区間では、外力エネルギーは断面欠損率に対してほぼ一定である。このときの破壊進行領域高さは、検出 AE 信号が少なかったことから推定できていない。載荷開始から最大荷重までに形成された破壊進行領域の高さがリガメント高さに占める割合を表す破壊進行領域率 (h_{y1}/h) および最大荷重から 20%低下した区間までの破壊進行領域変化率 ($\Delta h_y/h=(h_{y2}-h_{y1})/h$) を図—15、図—16 にそれぞれ示す。

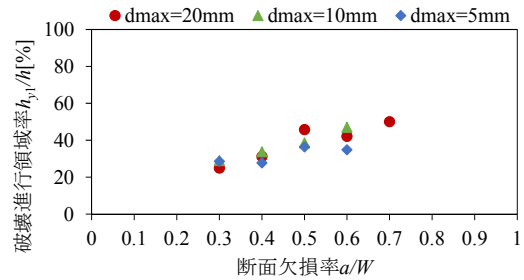
これらの図より、最大荷重までは断面欠損率の上昇に伴い、破壊進行領域率 (h_{y1}/h) は高くなり、最大荷重から 20%低下した区間において $\Delta h_y/h$ は断面欠損率によらず同程度となり、傾向が異なる。その後の挙動は、リガメント高さに応じて破壊進行領域が載荷点方向に一定の割合で進行するものと考えられる。

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となり、それに伴い、破壊進行領域高さも一定量となるが、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外力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。

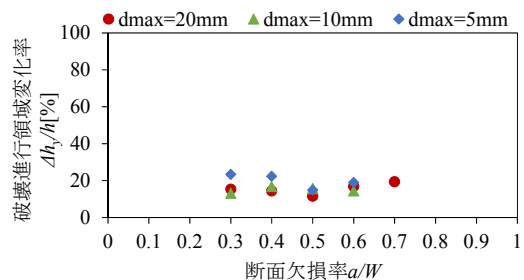
5. 結論

本研究では、切欠き高さを変化させたコンクリートの破壊エネルギー試験を実施し、各荷重段階における外力エネルギーと破壊進行領域高さの関係について検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 各荷重段階での外力エネルギーは、最大荷重から荷重が 20%低下した区間以外において、いずれの骨材最大寸法においても、断面欠損率によらず同程度であることが認められた。最大荷重から 20%低下した区間では、断面欠損率の増加に伴い、外力エネルギーは減少傾向を示した。
- (2) 破壊進行領域高さの移行特性は、最大荷重までは骨材最大寸法および断面欠損率によらず一定の高さとなり、最大荷重から 20%低下した区間において、断面欠損率の増加に伴い、破壊進行領域高さの変化量が低下する傾向が確認された。
- (3) コンクリートの破壊エネルギー試験における外力エネルギーの推移、および破壊進行領域の移行特性は、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が消費されず、最大荷重直後の区間でリ



図—15 破壊進行領域率と断面欠損率の関係



図—16 破壊進行領域変化率と断面欠損率の関係

ガメント高さに応じたひび割れの安定成長過程に変化することで、この区間において外力エネルギーが断面欠損率の増加に伴い減少する可能性がある。

参考文献

- 1) 例えば、橋高義典, 上村克郎, 中村成春, 小野正樹: 高強度コンクリートの破壊靱性に及ぼすポリマー混入の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.481-486, 1992.
- 2) 例えば, Mwangi M Macharia, 大西裕士, 河合研士, 佐藤良一: 廃瓦細骨材を用いた高炉 B 種コンクリートの破壊エネルギーの実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.34, No.1, pp352-357, 2012.
- 3) 日本コンクリート工学会: 切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法, JCI-S-001-2003
- 4) 三橋博三: コンクリートの破壊力学の現状と展望, コンクリート工学, Vol.25, No.2, pp.14-25, 1987.
- 5) 大野健太郎, 川瀬麻人, 宇治公隆, 上野敦: AE 法による切欠き高さが異なるコンクリートはりの破壊進行領域形成に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1805-1810, 2011.
- 6) S.Muralidhara, B.K. Raghu Prasad, Hamid Eskandari: Fracture process zone size and true fracture energy of concrete using acoustic emission, Construction and Building Materials, Vol.24, pp.479-486, 2010.
- 7) 清水大輔, 名和真一, 内田裕市, 小柳洽: コンクリートの引張軟化特性に及ぼす骨材の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.157-162, 1998.