

論文 コンクリートの破壊エネルギーに断面欠損率ならびに骨材寸法が与える影響

中嶋 彩乃^{*1}・大野 健太郎^{*2}・宇治 公隆^{*3}・上野 敦^{*4}

要旨: 薄肉コンクリート部材に対する破壊エネルギーの低減手法を提案するため、断面欠損率および骨材の最大寸法をパラメータとして破壊エネルギー試験を実施した。その結果、リガメント領域内のエネルギー分布は、ひび割れ進展方向に存在する供試体自由境界面の存在で局所的に変化することが示され、その変化は骨材寸法に影響を受けず、自由境界面からおよそ 20mm 程度であることが示された。また、供試体形状に依存しない非寸法依存破壊エネルギーを算出し、各断面欠損率から得られる寸法依存破壊エネルギーとの比を得ることで、供試体形状に対応する破壊エネルギーを算出出来る可能性を示した。

キーワード: 破壊エネルギー、断面欠損率、骨材の最大寸法、局所破壊エネルギー、遷移リガメント長さ

1. はじめに

コンクリートの破壊エネルギーは、単位面積あたりのひび割れを形成するのに消費されるエネルギーであり、材料特性値として式(1)より算出される¹⁾。

$$G_f = 10(d_{max})^{1/3} \cdot f_{ck}^{1/3} \quad (1)$$

ここに、 G_f : 破壊エネルギー (N/m), d_{max} : 粗骨材の最大寸法 (mm), f_{ck} : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

筆者ら²⁾はこれまで、部材厚 200mm 以下の薄肉コンクリート部材を対象とした終局曲げ耐力評価手法の提案を行ってきた。この中で、部材厚 100mm 以下の部材については、引張軟化特性を考慮することで耐力算定精度が向上することを示している。しかし、より簡易かつ合理的に耐力算定を行うためには、部材厚に応じた破壊エネルギーの低減手法を確立することが望まれる。そこで、湯浅ら³⁾は、部材厚を h として、破壊エネルギーと断面骨材寸法比 (h/d_{max}) の関係を実験的に示し、 $h/d_{max} < 6$ の条件の断面に対し、低減係数を実験値から決定している。しかし、薄肉部材を対象とした破壊エネルギーの導出に関する理論的アプローチは未だ明確に示されていない。

ここで、RILEM や JCI 規準から得られる破壊エネルギーは、リガメント領域内で平均的に消費されるエネルギーとして定義される。しかし、これらの破壊エネルギー試験に寸法依存性が存在することは、多くの研究者が示しており、その合理的説明手法としてリガメント領域内におけるエネルギー分布の局所化^{4), 5)}が提案されている。すなわち、切欠きはりの 3 点曲げ試験における、切欠き先端からひび割れが形成される際のエネルギー分布は、リガメント領域内で一様ではなく、ひび割れ進展方向の

自由境界面 (供試体における載荷面) の存在により、そのエネルギーが減少することを示している。ただし、これらの成果は、JCI 規準の供試体寸法と比較し、大きな断面を有し、骨材の最大寸法 1mm として、 h/d_{max} が比較的大きい条件下での結果に基づくものである。

本研究では、部材厚が 100mm 以下の薄肉コンクリート部材の曲げひび割れ強度算定において、寸法効果を合理的に説明できるとされるコンクリートの破壊エネルギーについて検討を行っており、ここでは、薄肉部材を対象として、コンクリートの破壊エネルギー低減手法を提案することを目的としている。すなわち、リガメント領域内のエネルギー分布の推移を実験的に示すとともに、エネルギー分布を支配するパラメータについて検討した。実験では、供試体寸法を JCI 規準 (100×100×400mm) として、切欠き高さおよび骨材の最大寸法をパラメータとして、切欠きはりの 3 点曲げ試験を行った。

2. リガメント領域内の破壊エネルギー

2.1 概説

破壊エネルギーは、リガメント領域内の破壊進行領域の発達過程で消費されるエネルギーであり、リガメント領域内のエネルギー分布は、供試体の載荷面 (自由境界面) では、破壊進行領域が形成されないため、消費されるエネルギーは 0 と考えられる。また、切欠き直上では、破壊進行領域が十分に発達することから、消費エネルギーは大きいと考えられる。このように、リガメント領域内において、破壊エネルギー分布は相違するとの考えに基づき、以下では、リガメント領域内のエネルギー分布について示す。

*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)

2.2 寸法依存破壊エネルギーと非寸法依存破壊エネルギーの関係

RILEM や JCI 規準から得られる破壊エネルギーは、単位面積あたりのひび割れが形成される際の、リガメント領域で平均的に消費されるエネルギーとして、式(2)より得られる。

$$G_f(a) = \frac{1}{(W-a)B} \int P d\delta \quad (2)$$

ここに、 $G_f(a)$: RILEM や JCI 規準から得られる破壊エネルギー(N/m)、 W : 供試体断面高さ(m)、 a : 切欠き高さ(mm)、 B : 供試体断面の幅(m)、 P : 載荷荷重(N)、 δ : 載荷点変位(m)

ただし、ここでは理論的アプローチを目的とし、供試体および載荷治具などの自重に関連する項は省略している。

式(2)において、破壊エネルギー $G_f(a)$ が a の変化に依存せず、寸法依存性を示さない場合は、 $G_f(a)=G_F$ とし、この G_F を非寸法依存破壊エネルギーと定義する。すなわち、 G_F は供試体形状が大きい場合、つまり W に対して a が非常に小さい場合の G_f に漸近する。

また、 G_f は引張軟化曲線(σ - w 曲線)下の面積として得られる。

$$G_f = \int_0^{w_c} \sigma dw \quad (3)$$

ここに、 σ : 結合応力(N/mm²)、 w_c : 最大ひび割れ幅(mm)

式(3)の意味するところは、寸法依存破壊エネルギー $G_f(a)$ が得られた場合、引張軟化曲線はひび割れ進展経路に沿って異なることにある。例えば、引張軟化曲線がひび割れ進展経路に沿って変化しないならば、非寸法依存破壊エネルギーが得られるはずである。ところが、切欠き高さ a が大きくなるにつれて、破壊進行領域幅が小さくなり⁶⁾、最大ひび割れ幅 w_c も小さくなる²⁾。また、破壊進行領域は、リガメント領域内で一様に発達せず、供試体自由境界面に近づくにつれて減少する⁴⁾、⁵⁾、⁶⁾。このことから、リガメント領域上で破壊エネルギーは一定ではなく、局所的に分布すると仮定し、これを局所破壊エネルギー g_f と定義する。ここで、切欠き先端を原点とし、ひび割れ進展方向に x 軸をとると、RILEM や JCI 規準か

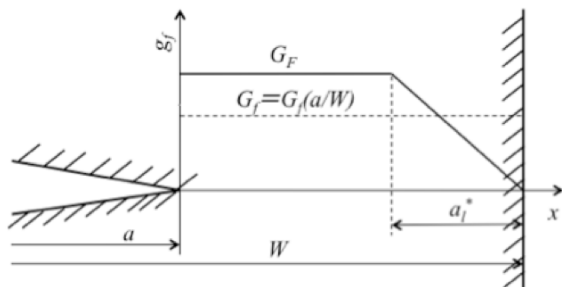


図-1 供試体断面と局所破壊エネルギーの概要図

ら得られる破壊エネルギー $G_f(a)$ は、局所破壊エネルギーをリガメント領域全体で積分することで得られる。すなわち、式(2)は、以下のように表わされる。

$$G_f(a) = \frac{1}{(W-a)} \int_0^{W-a} g_f(x) dx \quad (4)$$

ここで、 $g_f(x)$ が一定であれば、 $g_f=G_F$ となり、 $g_f(x)$ が一定でなければ、 $G_f(a)$ は局所破壊エネルギー分布をリガメント領域全体で平均したものとなる。つまり、図-1に示すように、供試体の自由境界面の存在により、ひび割れが自由境界面に近づくにつれて、破壊進行領域形成が制限されるために、局所破壊エネルギーが減少し、 $G_f(a)$ もその影響を受けることになる⁷⁾。また、自由境界面からある程度離れた領域上で局所破壊エネルギーは、寸法依存のない材料特性値となる⁴⁾としている。さらに、 $G_f(a)$ の測定値から、局所破壊エネルギー分布は次式より算出でき⁵⁾、 $g_f(x)$ は、切欠き長さに独立であると仮定し、切欠き先端での局所破壊エネルギーを表わす。

$$g_f(a) = G_f(a) - (W-a) \frac{dG_f(a)}{da} \quad (5)$$

2.3 局所破壊エネルギー分布のモデル化

破壊進行領域の供試体長軸方向の幅は、ひび割れが自由境界面に近づくにつれて減少する⁵⁾、⁶⁾。K.Duan らはこの特徴をより簡潔にモデル化するために、局所破壊エネルギーを二直線分布として式(6)のように提案している⁴⁾。

$$g_f(x) = \begin{cases} G_F & x < W-a-a_i^* \\ G_F(W-a-x)/a_i^* & x \geq W-a-a_i^* \end{cases} \quad (6)$$

ここに、 $g_f(x)$: 局所破壊エネルギー (N/m)、 G_F : 非寸法依存破壊エネルギー (N/m)、 W : 供試体断面の高さ (m)、 a : 切欠き高さ (m)、 a_i^* : 遷移リガメント長さ (m)、 x : 供試体断面の位置 (m)

これは、図-2および式(6)に示すように、切欠き近傍では、ひび割れ形成が一定のエネルギー消費で行われるため、非寸法依存破壊エネルギー G_F で表し、供試体自由境界面付近では、境界面上でエネルギーが0となるように減少する直線で示される。また、二直線の交点を、供試体自由境界面からの距離として、遷移リガメント長さ a_i^*

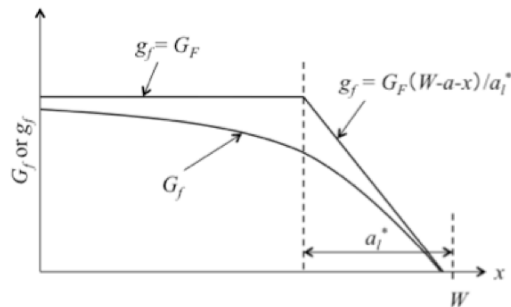


図-2 局所破壊エネルギーの分布モデル

表-1 コンクリートの示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	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	混和剤* Ad
20, 10	8.0	4.5	58	45.9	172	297	826	981	1.20

*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

骨材の 最大寸法 (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
5	40.0	3.98	27.5
10	45.4	4.00	25.9
20	40.5	3.35	24.7

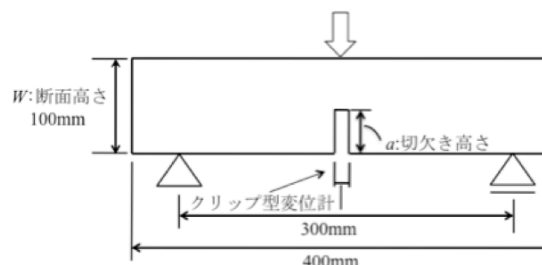


図-3 供試体概要

とする。また、式(6)を式(4)に代入することで、寸法依存破壊エネルギー G_f が得られる⁴⁾。

$$G_f = \begin{cases} G_F \left[1 - \frac{a_i^*}{2(W-a)} \right] & W-a > a_i^* \\ G_F \frac{(W-a)}{2a_i^*} & W-a \leq a_i^* \end{cases} \quad (7)$$

式(7)から得られる G_f は、図-1中の破線で表わされ、リガメント領域で平均されたものである。

3. 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、細骨材には津久井産砕砂（表乾密度 2.61g/cm³，吸水率 1.49%，粗粒率 2.83）および富津産山砂（表乾密度 2.61g/cm³，吸水率 3.32%，粗粒率 1.54）を質量比 9:1 で混合した混合細骨材を、粗骨材には津久井産碎石 2005（表乾密度 2.63g/cm³，吸水率 1.02%，粗粒率 6.68，実積率 60.0%）を用いた。

本研究では、骨材の最大寸法を 5, 10, 20mm とした 3 種類のコンクリート供試体を用いて破壊エネルギー試験を行った。ここで、破壊エネルギーに対する骨材の最大寸法の影響を考察するため、骨材の最大寸法が 10mm と 20mm の供試体ではモルタル分の配合を統一し、同じ示方配合とした。骨材の最大寸法が 5mm の供試体では、粗骨材部分を取り除いた配合とし、打設を行った。破壊エネルギー試験に使用した供試体は、100×100×400mm の鋼製型枠に、30, 50, 70 および 80mm の切欠き高さの樹脂製 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、破壊エネルギー試験を行う直前に取り外し、作製した。供試体数は、各切欠き高さにつき 5

本を各骨材の最大寸法 (5, 10, 20mm) に対して作製し、計 60 本とした。供試体は打設後 1 日で脱型し、以後材齢 28 日まで 20℃水中養生を行い、破壊エネルギー試験を行った。試験は、容量 2000kN の油圧式耐圧試験機を使用して、材齢 28 日が経過後、4～8 日間で破壊エネルギー試験を行った。

試験は容量 2000kN の油圧式耐圧試験機を使用し、図-3に示すように切欠き下部に設置したクリップゲージ（感度 1/1000mm）で切欠き先端の開口変位（Crack Mouth Opening Displacement, CMOD）の計測を行った。載荷は 50kN レンジで 0.05kN の最小目盛にて手動で行い、切欠き開口変位が 0.001mm/sec となるように制御した。なお、供試体の水平拘束をなくすため、供試体と載荷治具との間にテフロンシートを挿入し、供試体を指で軽打し、水平拘束が生じていないことを確認した。

4. 結果および考察

4.1 破壊エネルギー試験結果

(1) 骨材の最大寸法と破壊エネルギー

表-3に実験で得られた破壊エネルギーの平均値、変動係数、および最大荷重と CMOD の最大値を示す。また、図-4に断面欠損率（ a/W ：供試体の断面高さに対する切欠き高さの比）と実験で得られた破壊エネルギーの関係を示す。なお、図中の線は、各 a/W の平均値を結んだものである。ただし、 $a/W=0.5$ ， $d_{max}=20mm$ の供試体 1 本は、打設時に作製を失敗したため、このデータは除いており、以降の考察においても、この供試体に関するデータは除外している。

表-3と図-4において、同一の断面欠損率で比較した場合、 $a/W=0.3\sim 0.7$ では、骨材の最大寸法が大きくなると、破壊エネルギーも大きくなるのがわかる。一方、

表-3 破壊エネルギー試験の結果

d_{max} (mm)	a/W	G_f (N/m)	変動係数	CMOD (mm)	最大荷重 (kN)
5	0.3	77.2	0.0881	0.738~1.11	3.74~4.58
	0.5	75.1	0.140	0.819~2.16	1.90~2.35
	0.7	65.0	0.210	0.627~1.04	0.756~0.975
	0.8	43.5	0.123	0.440~0.701	0.330~0.367
10	0.3	124	0.0659	1.12~2.13	4.59~5.12
	0.5	134	0.138	1.51~1.92	2.33~2.96
	0.7	91.6	0.0757	1.17~1.41	0.617~0.720
	0.8	105	0.278	0.991~1.56	0.287~0.422
20	0.3	146	0.184	1.70~2.73	3.87~4.73
	0.5	147	0.0892	1.74~2.34	2.28~2.48
	0.7	104	0.177	1.31~1.91	0.671~0.953
	0.8	83.5	0.168	1.08~1.66	0.201~0.405

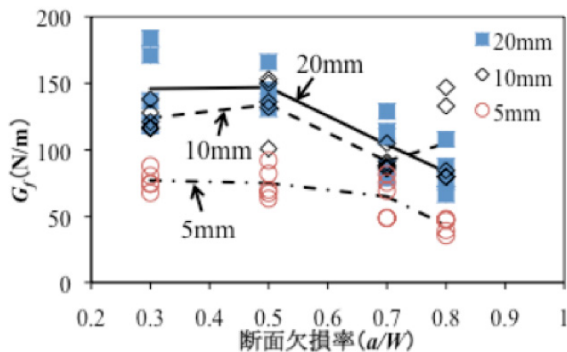


図-4 断面欠損率 (a/W) と破壊エネルギー

$a/W=0.8$ においては、そのような傾向は得られていない。これは、表-3 より、 $d_{max}=10\text{mm}$ 、 $a/W=0.8$ の条件では、変動係数が他の供試体条件より大きく、図-5 に示す荷重-CMOD 曲線も大きくばらついており、供試体番号 4、5 では、荷重が残った状態で破断した。このことから、安定した試験が困難であったことが挙げられる。また、表-2 より、 $d_{max}=10\text{mm}$ のコンクリートの圧縮強度は、 $d_{max}=5\text{mm}$ 、 $d_{max}=20\text{mm}$ を使用したコンクリートよりも約 10% 高い値を示している。しかし、式(1)から、破壊エネルギーはコンクリートの圧縮強度と骨材の最大寸法から算出され、これが 1/3 乗されることを踏まえると、本実験のコンクリートでは圧縮強度の変動幅が骨材寸法の変動幅と比較して小さいことから、圧縮強度が破壊エネルギーに与える影響は小さく見積もられると考えられる。

以上のことから、本実験で行った同一の a/W における破壊エネルギーの差は、 $d_{max}=10\text{mm}$ 、 $a/W=0.8$ の条件を除けば、骨材寸法の差によるものと考えられる。

(2) 断面欠損率と破壊エネルギー

図-4 より、同一の骨材寸法で断面欠損率が $a/W=0.3\sim 0.5$ の範囲では、断面欠損率の変化による破壊エネルギーの違いはほとんど確認されず、同等の破壊エネルギーを示している。また、同様に、同一の骨材寸法で $a/W=0.7$

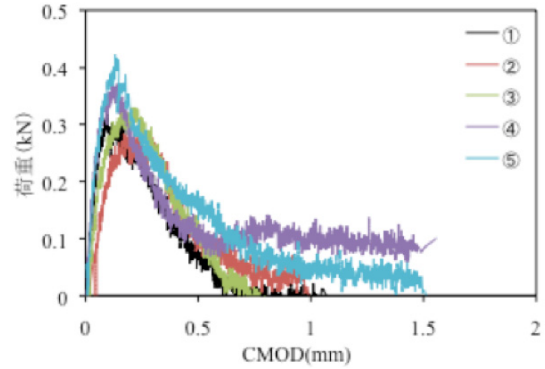


図-5 $d_{max}=10\text{mm}$ 、 $a/W=0.8$ の荷重-CMOD 曲線

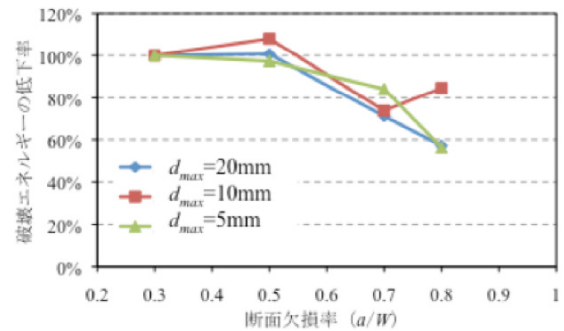


図-6 破壊エネルギーの低減率と断面欠損率の関係

~ 0.8 の範囲では、断面欠損率の増加に伴い、破壊エネルギーが低下している。このことから、低い断面欠損率では供試体形状の違いが破壊エネルギーに及ぼす影響は小さく、高い断面欠損率では、その影響が顕著になることが示唆される。

ここで、供試体形状が破壊エネルギーに及ぼす影響について考察するため、図-6 に、各骨材寸法において、 $a/W=0.3$ の破壊エネルギーに対する各 a/W の破壊エネルギーの割合を示す。図より、断面欠損率の増加に伴う破壊エネルギーの減少割合は、 $d_{max}=5, 20\text{mm}$ の骨材寸法で同程度であり、 $a/W=0.8$ では、 $a/W=0.3$ の 60% 程度となることからわかる。したがって、供試体形状が破壊エネルギーに及ぼす影響は、骨材寸法の違いによらず、断面欠損率により、一定の割合で低下することが確認された。

4.2 局所破壊エネルギー分布の適用性

(1) 非寸法依存破壊エネルギーと遷移リガメント長さの算出方法

2.3 で示した局所破壊エネルギーのモデル化を行うために、ここでは、非寸法依存破壊エネルギー G_F と遷移リガメント長さ a_l^* の算出方法を概説する。

G_F および a_l^* の算出は、図-7 に示すフローとなり、実験で得られた破壊エネルギー分布図 (図-4) と式(7)を用いて実施する。まず、一つの骨材最大寸法に対して、 a_l^* を仮定し、式(7)に仮定した a_l^* と W, a および実験で得られた破壊エネルギー G_f を代入し、一つの d_{max} および

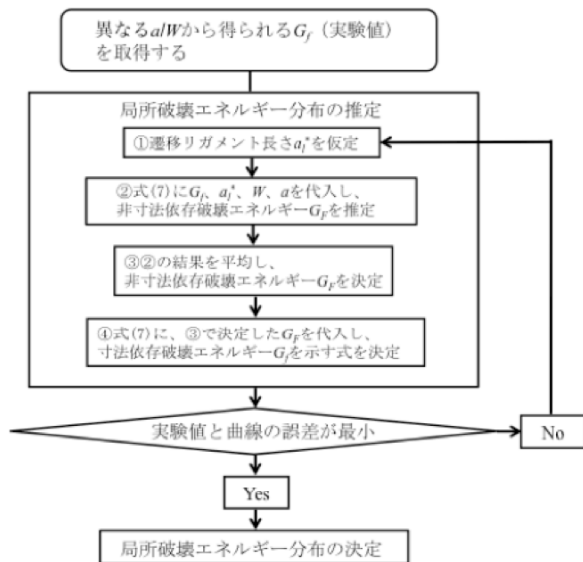


図-7 局所破壊エネルギー分布推定の流れ

a/W に対する G_F が算出され、この作業を他の 3 個の a/W で繰り返し行い、それぞれの G_F を算出する。このように求めた 4 つの G_F を平均して、一つの d_{max} に対する G_F を決定する。次に、得られた G_F を式(7)に代入し、曲線 G_f を求め、実験値と推定曲線の差が最小となる場合、一つの d_{max} に対して G_F および a_l^* を決定する。他の骨材寸法に対しても同様の作業を行い、それぞれの骨材寸法における G_F および a_l^* を求める。なお、 a_l^* の仮定に際して、本研究では、既往の成果⁴⁾を参考に $a_l^*=20\text{mm}$ と仮定して、 $a_l^*=\pm 20\text{mm}$ の範囲で検討した。

(2) 非寸法依存破壊エネルギーと遷移リガメント長さ

図-8 に上記の算出により得られた曲線 G_f 、遷移リガメント長さ a_l^* 、実験で得られた破壊エネルギーを示す。図より、 $d_{max}=5\text{mm}$ と 20mm では、曲線 G_f は実験値に漸近しており、高い相関を得ている。 $d_{max}=10\text{mm}$ では、 $a/W=0.8$ の実験値のばらつきが大きいので、曲線 G_f と実験値の相関は低い。ただし、ここでは示していないが、図-4 の $d_{max}=10\text{mm}$ 、 $a/W=0.8$ の実験値において、 100N/m 付近にプロットされた破壊エネルギーを用いれば、曲線 G_f は実験値に漸近し、相関が高くなる可能性がある。

表-6 および図-9 に、骨材の最大寸法と非寸法依存破壊エネルギー G_F および遷移リガメント長さ a_l^* の関係を示す。非寸法依存破壊エネルギー G_F は骨材の最大寸法が大きくなるほど増加することがわかる。ただし、その増加傾向は骨材寸法に比例せず、 $d_{max}=10\text{mm}$ と $d_{max}=20\text{mm}$ の非寸法依存破壊エネルギー G_F はほぼ同等の値を示し、 $d_{max}=5\text{mm}$ の G_F は $d_{max}=20\text{mm}$ の G_F の約 1/2 程度であることがわかった。すなわち、非寸法依存破壊エネルギー G_F は、コンクリートの構成材料に支配されるパラメータとなり、コンクリートの特性値となり得る可能性が示された。

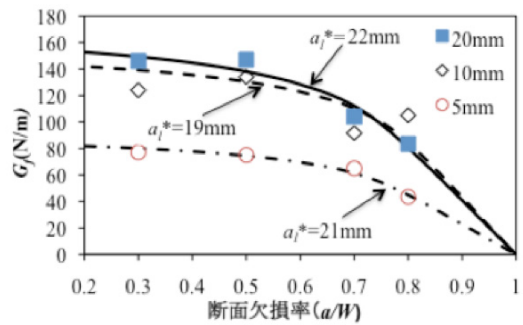


図-8 局所破壊エネルギー分布

表-6 骨材の最大寸法、 a_l^* 、 G_F

骨材の最大寸法 d_{max} (mm)	a_l^* (mm)	G_F (N/m)
5	21	94.3
10	19	161
20	22	177

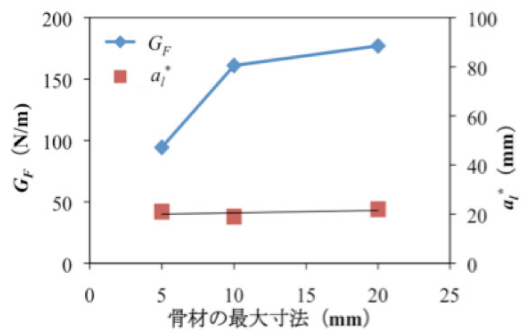


図-9 骨材の最大寸法と G_F 、 a_l^*

次に、遷移リガメント長さ a_l^* は、骨材寸法に依存せず、様な値を示している。このことから、供試体の自由境界面 (3 点曲げ試験における載荷面) の存在により、局所破壊エネルギーがリガメント領域内で低下を開始するポイントは、コンクリートの骨材寸法、すなわち構成材料による影響はなく、自由境界面のみで決定されるパラメータであることが示された。

ここで、K.Duan ら⁴⁾の結果では、 $d_{max}=1\text{mm}$ のモルタルで、 $200 \times 200 \times 15\text{mm}$ の供試体を使用した場合、 $a_l^*=26\text{mm}$ とされており、本研究で算出された遷移リガメント長さとはほぼ同等の値である。このことから、本研究で対象とした供試体数、条件に限りはあるものの、既往の成果⁴⁾と併せて、供試体断面の大きさ、供試体の材料構成およびスパンが異なった破壊エネルギー試験においても同様の結果が得られる可能性が示唆される。

また、非寸法依存破壊エネルギー G_F に対する寸法依存破壊エネルギー G_f の関係は断面欠損率をパラメータとして図-10 のように表わされる。図より、全ての骨材寸法で、非寸法依存破壊エネルギーに対する各 a/W の寸法依

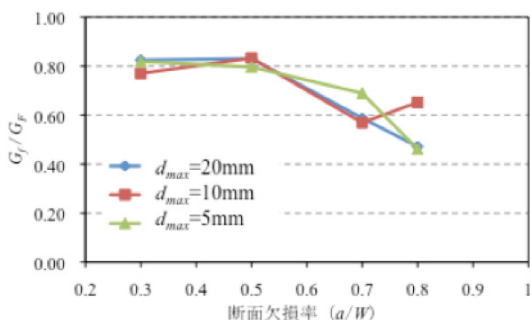


図-10 非寸法依存破壊エネルギーに対する寸法依存破壊エネルギーの比と断面欠損率の関係

存破壊エネルギーは、一定の割合で変化することがわかる。このことから、JCI 規準の試験寸法、すなわち、切欠き高さ 30mm で $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体による 3 点曲げ試験を実施し、破壊エネルギー試験を実施した場合、薄肉部材への破壊エネルギーの低減手法は、 G_f/G_F と a/W の関係から導出できる可能性がある。しかし、本研究で得られた結果は、限られた供試体本数のものであるため、更なるデータの蓄積が必要である。

5. 結論

本研究は、薄肉コンクリート部材に対する破壊エネルギーの低減手法を提案するため、断面欠損率および骨材の最大寸法をパラメータとして破壊エネルギー試験を実施し、リガメント領域内のエネルギー分布に関する考察を行った。骨材の最大寸法を 5, 10 および 20mm とし、同等の圧縮強度が得られたコンクリートに対する破壊エネルギー試験を実施した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 実験で得られた破壊エネルギーと断面欠損率 a/W の関係から、 $a/W=0.3 \sim 0.5$ の範囲では、破壊エネルギーはほぼ同等であり、 $a/W=0.7 \sim 0.8$ の範囲では、断面欠損率の増加に伴い、破壊エネルギーは減少することが示された。すなわち、 $a/W=0.7 \sim 0.8$ の範囲では、破壊エネルギーは寸法依存性を示した。
- (2) $a/W=0.7 \sim 0.8$ の範囲の破壊エネルギーは、骨材の最大寸法の違いによらず、 $a/W=0.3$ の破壊エネルギーに対して断面欠損率により一定の割合で低下し、この範囲の破壊エネルギーの低下要因は、供試体形状が支配的であることが示された。
- (3) 実験から得られた破壊エネルギーでは、リガメント領域内で局所的に変化することを既往の研究に基づいて示し、本実験で得られた破壊エネルギーに適用した。その結果、実験値と局所破壊エネルギーの推定式が高い相関を示すことがわかった。
- (4) 供試体形状に依存しない非寸法依存破壊エネルギーは、骨材の最大寸法が大きくなるほど増加する

が、その増加傾向は骨材寸法 10mm と 20mm ではほぼ同等となり、5mm の骨材寸法の非寸法依存破壊エネルギーは、20mm のそれと比べて 1/2 程度である。また、非寸法依存破壊エネルギーは、コンクリートの構成材料（骨材の最大寸法）に支配されるパラメータであることが示された。

- (5) リガメント領域内で局所破壊エネルギーが低下を開始する位置、すなわち遷移リガメント長さは、供試体の載荷面から 20mm 程度であり、これは、コンクリートの骨材の最大寸法の影響を受けないことが確認された。
- (6) 非寸法依存破壊エネルギーに対する各 a/W の寸法依存破壊エネルギーは、骨材の最大寸法に依存せず、一定の割合で低下することが示され、薄肉部材への破壊エネルギー低減手法の導出に適用できる可能性が示され、更なるデータの蓄積が必要である。

謝辞

本論文の作成にあたり、査読者の方々から多くのご助言・ご意見を頂いた。ここに記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：2007 年版・コンクリート標準示方書[設計編]，2008.3
- 2) 宇治公隆，大野健太郎，中嶋彩乃，國府勝郎，清水和久：薄肉鉄筋コンクリート部材の終局曲げ耐力評価手法の提案，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.67, No.3, pp.361-373, 2011.
- 3) 湯浅憲人，國府勝郎，清水和久：プレキャストコンクリート製品の曲げひび割れ耐力の計算方法，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.67, No.4, pp.474-481, 2011.
- 4) K.Duan, X.-Z.Hu, F.H.Wittmann: Explanation of size effect in concrete fracture using non-uniform energy distribution, Materials and Structures, Vol.35, pp.326-331, July,2002
- 5) X.-Z.Hu, F.H.Wittmann: Fracture energy and fracture process zone, Materials and Structures, Vol.25, pp.319-326, 1992.
- 6) 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.
- 7) 村上聖，平居孝之：RILEM 法による破壊エネルギーの試験体寸法依存性に関する考察，日本建築学会構造系論文集，第 585 号，pp.1-6, 2004.11