

高性能軽量骨材を用いたコンクリートの 破壊挙動に関する実験的研究

石川 雄康¹・國府勝郎²・森 大介³・岡本 享久⁴

¹正会員 工博 太平洋マテリアル株式会社 営業本部 (〒103-0023 中央区日本橋本町4-8-15)

E-mail: yuko-ishikawa@taiheiyo-m.co.jp

²フェロー会員 工博 東京都立大学大学院 教授(〒192-0397 八王子市南大沢1-1)

E-mail: kokubu@comp.metro-u.ac.jp

³正会員 工修 太平洋セメント株式会社 中央研究所 (〒285-8655 佐倉市大作2-4-2)

E-mail: daisuke_mori@taiheiyo-cement.co.jp

⁴正会員 工博 太平洋セメント株式会社 建材事業推進室(〒101-8357 千代田区西神田3-8-1)

E-mail: takahisa_okamoto@taiheiyo-cement.co.jp

近年、従来の人工軽量骨材に比べて強度が大きく、吸水率の小さい高性能軽量骨材が開発されている。本研究では、この最近開発された高性能軽量骨材を用いた軽量コンクリートの破壊挙動を、A Eを併用した圧縮および曲げ破壊靱性試験から考察し、モルタルと同時に骨材にもひび割れが発生する脆性的な破壊形態を示すことや、軽量骨材の強度を大きくすることは脆性の改善に繋がることなどを明らかにした。さらに、品質の異なる各種の軽量骨材と強度の異なるマトリックスとを組み合わせたコンクリートなどで、破壊靱性を含む各種の強度試験を行い、骨材品質がコンクリートの力学特性に与える影響を明らかにした。そして、骨材強度とモルタル強度のバランス、単位粗骨材量、粗骨材最大寸法などによる破壊靱性の変化を定量的に示した。

Key Words: high performance artificial lightweight aggregate, lightweight concrete, fracture mechanics, fracture energy, acoustic emission

1. はじめに

軽量コンクリートは、構造躯体の自重を軽減できるため、超高層ビルや長大スパン橋梁などの構造物の高層化、長大化、大断面化への応用、地震力の影響の軽減、軟弱地盤への施工、揚重量の低減、断熱性の向上など、多様化してきているコンクリート構造物の技術的要求に広範囲に適用できる可能性をもった材料である。しかしながら、軽量コンクリートの実構造物への施工実績は年々減少してきており、特に土木構造物では使用実績が極めて少なくなっている。この様に普及を阻害している原因は、これまでの人工軽量骨材を用いた軽量コンクリートではポンプ圧送性、耐久性および部材としての構造性能等において解決および検討しなければならぬ多くの技術的な課題を有していることによると考えられる。すなわち、これまでの人工軽量骨材は表面に多数の開気孔を有するポーラスな材料であり、吸水率が大きいので、骨材の含水率が小さい状態ではポンプ圧送が極めて難しかった。そこで、ポンプ圧送を行うコンクリートに用いる軽量骨材は、プレウェッティングにより高含水率の状

態にして練り混ぜる方法が一般的に用いられてきたが、この場合にはコンクリート施工時の骨材含水率が20~30%と非常に大きくなり、凍結融解抵抗性が低下しやすくなる。また骨材強度が小さく、特にコンクリートの引張強度やせん断強度が小さく、軽量コンクリート部材の設計上の不利な条件となっている。しかしながら、従来からの膨張頁岩を主原料とした人工軽量骨材に比べて、吸水率が非常に小さくかつ高強度の人工軽量骨材^{1),2)}(以下、高性能軽量骨材と記す)が最近開発され、この骨材を用いた軽量コンクリート(以下、高性能軽量コンクリートと記す)の研究が盛んに行われてきており、上記の課題を解決できる新しい軽量骨材として多くの期待が寄せられている。

本研究では、この高性能軽量コンクリートの研究の中で、弱点とされている破壊特性を体系的に調べるために、著者らが実施した既往の研究^{3),4)}に、実験を追加してデータをまとめ直し、破壊特性に及ぼす要因効果をより定量的に評価した。すなわち、普通細骨材と高性能軽量粗骨材とを組み合わせ用いた高性能軽量コンクリートの破壊特性を定量的に評価するために、A Eを併用した一軸

表-1 使用材料

使用材料	記号	種類	摘要
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度:3.12g/cm ³ , 比表面積:4490cm ² /g
細骨材	S	青梅産砕砂	絶乾密度:2.58 g/cm ³ , 吸水率:1.63%, 粗粒率:3.07
粗骨材	G	青梅産碎石	絶乾密度:2.62 g/cm ³ , 吸水率:0.74%, 最大寸法:15mm
	HL08	高性能軽量骨材	絶乾密度:0.86 g/cm ³ , 24h 吸水率:4.08%, 最大寸法:15mm
	HL12	高性能軽量骨材	絶乾密度:1.19 g/cm ³ , 24h 吸水率:1.80%, 最大寸法:15mm
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤	主成分:ポリカルボン酸エーテル系複合体
	AE	AE 助剤	主成分:変性アルキルカルボン酸化合物

表-2 コンクリートの配合

コンクリートの種類	記号	骨材密度 (g/cm ³)*	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)**						SP (C×%)	AE (C×%)
						W	C	S	G	HL08	HL12		
普通コンクリート	NC	2.62	60	46.5	5.0	181	302	819	950	—	—	1.05	0.002
軽量コンクリート	LC08	0.86	42	47.0	5.0	165	389	813	—	301	—	0.8	0.002
	LC12	1.19	42	47.0	5.0	165	389	813	—	—	417	0.8	0.002

*) 骨材密度は絶乾状態の密度 ***) 高性能軽量骨材の単位量は絶乾質量で表記

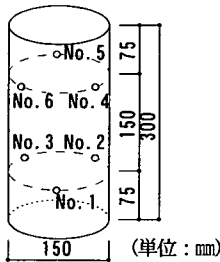


図-1 圧縮試験時の AE センサの位置

表-3 各コンクリートの力学特性 (水中養生, 材齢 28 日)

記号	密度 (kg/L)	圧縮強度f _c (N/mm ²)	引張強度f _t (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	脆度係数 (f _c /f _t)
NC	2.38	42.5	3.5	33.3	12.2
LC08	1.73	43.0	2.3	17.7	18.9
LC12	1.84	56.9	3.6	21.9	15.9

圧縮および曲げ破壊靱性試験を行い、その挙動を考察するとともに、品質の異なる各種の軽量粗骨材と強度の異なるマトリックスとを組合せたコンクリート、単位粗骨材量および粗骨材最大寸法を変化させたコンクリートについて破壊靱性を含む強度試験を行い、骨材品質がコンクリートの力学特性に与える影響を明らかにした。

2. 圧縮応力下における破壊プロセス

(1) 実験概要

コンクリートのひび割れ発生から破壊に至る一連の挙動は、微細なひび割れの発生、進展ならびに連結の過程に起因するとされている。この微細ひび割れによる微視的な構造変化を調べる方法として、微小破壊にともなって発生する弾性波であるAE波を解析することは有効な手段となる。

ここでは、高性能軽量骨材を用いた軽量コンクリートの一軸圧縮応力下における微細ひび割れの発生過程を中心とする破壊挙動を調べる目的で、載荷試験と同時にAE波の測定を行うとともに、普通コンクリートについて

も同様の実験を行い、その破壊挙動を比較検討することにした。

(2) 試験方法

本実験で使用した材料を表-1に示す。高性能軽量骨材は、絶乾密度0.86g/cm³のHL08と絶乾密度1.19g/cm³のHL12を使用した。なお、高性能軽量骨材の強度は密度の影響を大きく受け、呼び寸法16mmのふるいを通過し11.2mmのふるいに留まる骨材を平滑な載荷板に挟んで圧壊させた時の最大荷重値である圧壊強度は、HL08が0.8kN、HL12が2.2kNであった。圧縮強度試験用のコンクリート供試体はφ150×300mmとし、表-2の配合に基づいて、普通コンクリート(NC)と同等の強度レベルのHL08を用いた軽量コンクリート(LC08)と、このLC08と同じ配合(単位粗骨材容積も350L/m³と等量)でHL12を用いた軽量コンクリート(LC12)を作製した。なお、軽量骨材は24時間吸水状態に調整して使用した。試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮試験方法」に準じて、高剛性試験機を用いて毎分0.5mmの変位速度で行った。圧縮試験時にはAE波の測定を行った。AEセンサは、150kHz共振型ものを使用し、図-1に示す位置に取り付

けた。測定はAE波形収録装置を用い、プリアンプにて40dB増幅後、しきい値を60dBとして6チャンネル同時に収録し、収録した波形からモーメントテンソル解析⁹⁾を行い、AE発生位置とひび割れのタイプを求めた。モーメントテンソル解析は、6個の波形で構成されるAE波形セットに弾性波理論に基づく解析を行い、ひび割れに伴うAE発生位置の3次元的位置、ひび割れの種類、傾きなどに関する情報を定量的に評価する波形解析手法である。ひび割れの種類は引張型のモードとせん断型のモードに区分し、それぞれの発生確率を算出した。なお、上記の測定に加えてヤング係数(JSCG-G502)および割裂引張強度(JIS A 1113)もそれぞれの方法に基づいて測定した。

(3) 実験結果および考察

a) コンクリートの力学特性

コンクリートの力学特性を表-3に供試体3体の平均値で示す。引張強度(f_t)に対する圧縮強度(f_c)の比を脆度係数(f_c/f_t)として記した。コンクリートを高強度化すると、一般的に引張強度は圧縮強度に比例して増大せず一定値に収束していく状態になることは、軽量コンクリートでも知られている⁹⁾。高性能軽量骨材を用いた本実験でも、普通コンクリートの脆度係数が12程度であるのに対し、高性能軽量コンクリートは16~19と大きい値となった。また、圧縮強度試験および割裂引張強度試験を行った供試体の破断面は、普通コンクリートの場合ではモルタルならびにモルタルと粗骨材との界面で破壊しているのに対し、軽量コンクリートの場合にはモルタル部分だけでなく粗骨材自体も破壊していることがわかった。高性能軽量骨材の種類間で比較すれば、密度 1.19 g/cm^3 のHL12および密度 0.86 g/cm^3 のHL08を用いたコンクリートでは、圧縮強度は骨材密度が大きい方が大きくなったが、脆度係数は逆に小さくなった。破断面を観察すると、HL08を使用したコンクリートでは、ほぼ100%の粗骨材が破壊したが、HL12を使用した場合には、約40%の粗骨材が破壊せずにひび割れが骨材を迂回して破壊していることが観察された。このように、骨材の密度すなわち強度の大きなものを使用することで、脆度係数は小さくなるものと推察される。

また、ヤング係数は、高性能軽量コンクリートにおいても普通コンクリートと同様に圧縮強度および密度の関数であるといえ、コンクリートの単位容積質量の低下とともにヤング係数も低下した。

b) 圧縮応力下の破壊プロセス

図-2に圧縮応力下におけるAEの発生頻度を示す。図の横軸は最大応力度に対する応力度比を0.25刻みで区分し、縦軸はこの応力度比の刻みに入るAE波のヒット数を各AEセンサから検出したAE信号波の数

の測定開始から破壊まで総ヒット数に対する割合で示して供試体毎のAE発生頻度の傾向を調べた。普通コンクリートでは応力度比80%まではほとんどAEが発生せず、その後急激に発生数が増加している。これに対し、軽量コンクリートでは初期からAEの発生が認められ、応力の増加とともにAEの発生頻度が漸増し、その挙動に違いが認められる。

普通コンクリートでは一般的に骨材のヤング係数はモルタルのヤング係数よりも大きいのが、軽量コンクリートではその逆になる。したがって、圧縮応力下で軽量骨材はモルタルの変形に追従するのにに対し、普通骨材はモルタルの変形に追従できないため、骨材周囲の両者の応力状態は図-3に示すように異なると考えられる⁷⁾。圧縮応力下における軽量コンクリート内部のひび割れの発生が、骨材またはモルタル部分のいずれに卓越しているかを明らかにするため、AE波形からモーメントテンソル解析を行った。大津⁹⁾はせん断型のモードの発生比率が60%以上のひび割れをせん断型、40~60%のものを中間型、40%以下のものを引張型の3つに分類しており、ここではこの分類を採用して検討した。図-4に各供試体の応力50%までと破壊時までに出検されたすべてのAE波を用いてモーメントテンソル解析して得られたひび割れのタイプとひび割れ発生位置の推定結果を、また図-5に破壊に至るまでのひび割れのタイプ別発生率を示した。これらの図によれば、普通コンクリートでは、AE波の発生頻度は少なく、破壊時までの解

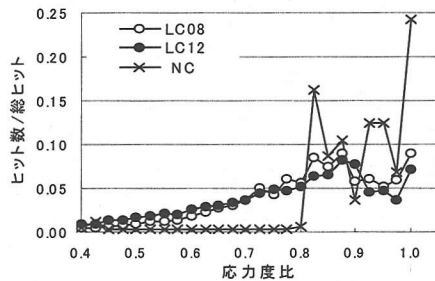


図-2 AE発生頻度

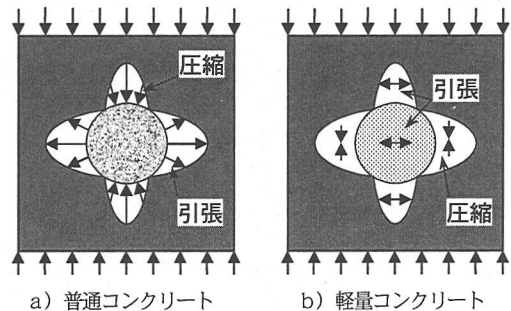
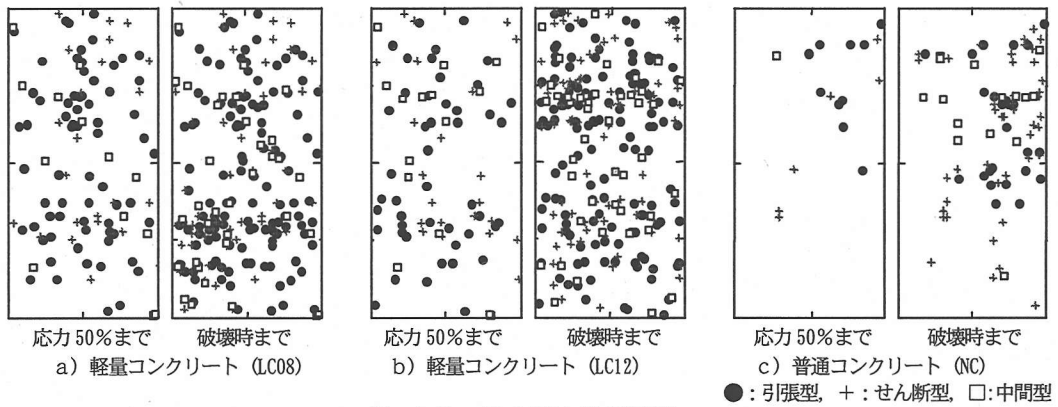


図-3 骨材周辺の応力状態



析結果ではせん断型ひび割れが 50%以上観察されている。これ対して、軽量コンクリートでは初期から多くの引張型ひび割れが発生し、破壊時までは引張型ひび割れが 50%以上観察された。また、HL12 を使用した場合よりも HL08 を使用した場合のほうがやや引張型が多く測定された。コンクリート破断面の骨材の破損状況とひび割れモードとを併せて考えれば、軽量コンクリートは普通コンクリートより引張型ひび割れが多く、骨材破壊を生じているため、軽量コンクリートで検出された多くの引張型ひび割れは骨材または骨材とマトリックスの界面の引張ひび割れであると推察される。

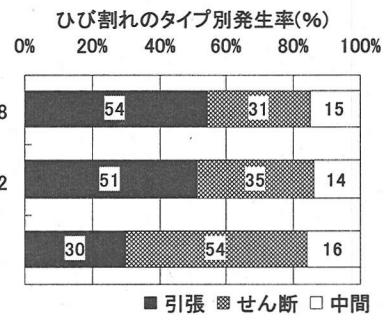


図-5 ひび割れのタイプ別発生率(破壊時)

3. 曲げ応力下における破壊プロセス

(1) 実験概要

本節では、高性能軽量骨材を用いた軽量コンクリートの曲げ応力下における微細ひび割れの発生挙動を調べる目的で RILEM の「切欠き梁の 3 点曲げ試験によるモルタルならびにコンクリートの破壊エネルギーの測定」を実施した。

(2) 試験方法

使用した材料ならびに配合は、表-1、表-2 と同じである。供試体は、図-6 に示すように、高さ 200×幅 100×長さ 1200mm で、コンクリートの打込み後 20±2℃ で保管し、材齢 2 日で脱型した。供試体の養生は、材齢 28 日まで 20±2℃、湿度 RH90% 以上とした。また、荷重試験前にダイヤモンドカッター(刃厚 2 mm)で中央部にはりせいの半分(100mm)まで切欠きを入れた。

荷重は、変位制御型の荷重試験機を用いて毎分 0.5mm の変位速度で 3 点曲げ荷重(支点間距離 1130mm)を行い、支点間中央のたわみおよび開口変位を測定した。また、

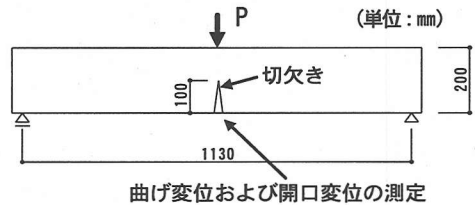


図-6 試験体および荷重試験の概要

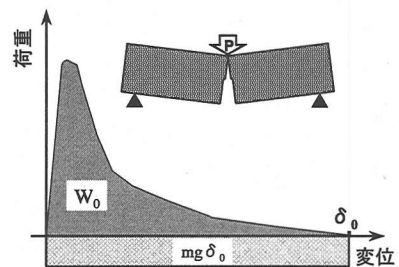


図-7 荷重-変位曲線による破壊エネルギーの測定

前章2.と同様に載荷中のAE波の測定を行った。測定時のAEセンサの位置は、切欠き上部付近を囲む形で配置した。

なお、破壊エネルギーは、式(1)に示すように、ひび割れを形成するのに必要な単位面積当りのエネルギーであり、図-7に示すように、荷重-変位曲線の囲む面積 W_0 に供試体の自重の影響を加えて計算した。

$$G_F = \frac{W_0 + mg \cdot \delta_0}{A_{hg}} \quad (\text{J/m}^2) \quad (1)$$

ただし、 G_F :破壊エネルギー (J/m^2)、 W_0 :荷重変位曲線の囲む面積 ($\text{N}\cdot\text{m}$)、 m :支点間の梁の質量 (kg)、 g :重力加速度 (m/sec^2)、 δ_0 :梁の破断時の変位 (m)、 A_{hg} :はりの破断部分の面積 (m^2)。

引張軟化曲線は、測定した荷重-開口変位関係を用い、供試体中央に仮想ひび割れモデルを組み込んだ有限要素法を用いた多直線近似解析^{9,10}により推定した。

(3) 実験結果および考察

a) 破壊エネルギー

各供試体の力学特性の試験結果を表-4に供試体3体の平均値で示す。軽量コンクリートの破断時の変位および破壊エネルギーの値は、普通コンクリートより小さく、破壊エネルギーは1/3~1/4となった。高性能軽量骨材の

表-4 各コンクリートの力学特性
(水中養生, 材齢28日)

記号	密度 (kg/L)	圧縮強度 (N/mm ²)	破断時の変位 (mm)	破壊エネルギー (J/m ²)
LC08	1.73	43.0	0.46	43.3
LC12	1.87	56.9	0.52	52.9
NC	2.38	42.5	1.41	163.9

種類間で比較すれば、密度 1.19 g/cm^3 の HL12 を使用した場合は、密度 0.86 g/cm^3 の HL08 を使用した場合よりも破断時の変位および破壊エネルギーともにやや大きくなった。

図-8に示す荷重-変位曲線によれば、普通コンクリートと高性能軽量コンクリートでは、最大応力後の下降域の挙動に大きな違いが認められる。

図-9は、破壊に至るまでに測定したすべてのAE波をモーメントテンソル解析して得られた微細ひび割れの発生位置とその破壊モードを示したものである。普通コンクリートの場合には、切欠き上部からはり上端部まで断面の高さ全体および幅の広がりをもって微細ひび割れの発生が観察されている。これに対して、高性能軽量骨材を使用したコンクリートでは、より破壊が急激であるためデータが拾い難いが、密度の小さいHL08を使用したコンクリートの場合には切欠き直上部だけに微細ひび割れの発生が集中し、密度の大きいHL12を使用した場合には高さ方向に分布して測定されている。ひび割れ発生位置の分布が広く測定されているLC12の方が、破壊が急激でなく、粘りながら破壊していることを示しており、その結果としてLC08の破壊エネルギーより大きな値(表-4)となったものと考えられる。普通コンクリートでは

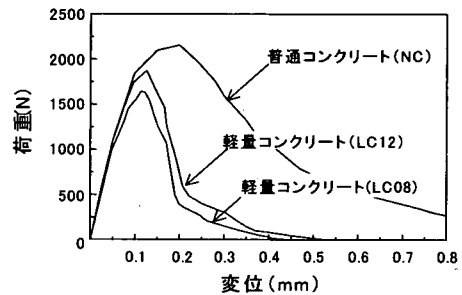


図-8 荷重-変位曲線図

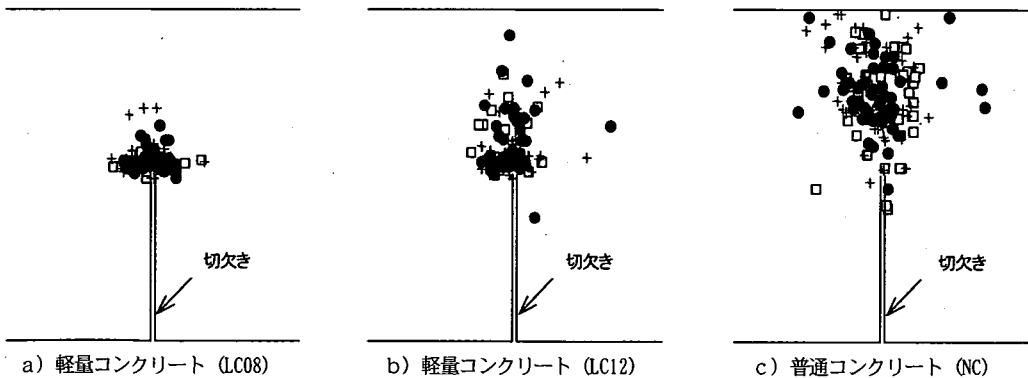


図-9 モーメントテンソル解析結果

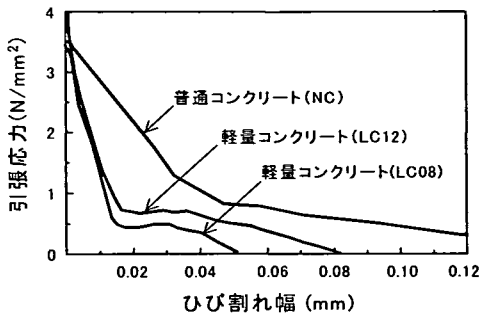


図-10 引張軟化曲線の推定結果

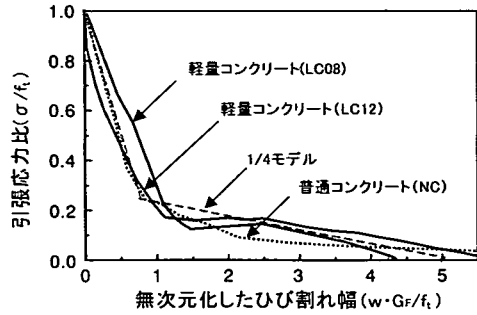


図-11 無次元化した引張軟化曲線

微細ひび割れが粗骨材を迂回して分散して発生するのに対して、高性能軽量骨材を使用したコンクリートでは、切欠き直上部に微細ひび割れの発生が集中して骨材破壊をとまなう脆性的な破壊形態を示す。

普通コンクリートの場合には、引張応力を受けると微細ひび割れのほとんどはモルタル部分あるいは骨材との界面に発生し、粗骨材を迂回する形でひび割れが進展する。これに対して、軽量コンクリートの場合には、粗骨材自体が割裂し、モルタル部分と粗骨材部分とを貫通する破壊を生じやすい。LC12 でやや破壊エネルギーが大きくなるのは、骨材強度の増加のため、破断面付近の約30%の粗骨材ではひび割れが骨材を貫通せずに迂回しているためと考えられる。

b) 引張軟化特性

多直線近似法により推定した引張軟化曲線を図-10に示す。この図より、コンクリートの種類によって引張軟化挙動に大きな違いが認められ、骨材の密度が大きい、すなわち骨材の強度が高いコンクリートほど軟化勾配が緩やかなより優れた靱性を示すことがわかった。

図-11は、引張軟化曲線を無次元化¹⁾したものである。高性能軽量コンクリートの破壊エネルギーは小さいものの、第1勾配領域と第2勾配領域の面積のバランスは普通コンクリートと大差なく、普通コンクリートの場合と同様に1/4モデルに近い形状を示すことがわかった。

4. 骨材品質がコンクリートの力学特性に与える影響

(1) 実験概要

前節では、高性能軽量コンクリートの圧縮および曲げ応力下での破壊挙動を検討したが、ここでは、主として軽量骨材の品質と強度の異なるマトリックスとを組合せたコンクリートで、破壊靱性を含む強度試験を行い、骨材品質がコンクリートの力学特性に与える影響を検討した。実験はシリーズIからIIIに分けて行った。各シリーズの実験に使用した材料を表-5に、実験因子および水準を表-6に示す。シリーズIでは、粗骨材の種類とマトリックス強度との組合せがコンクリートの力学特性

表-5 使用材料

使用材料	記号	種類	摘要
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3,350cm ² /g
細骨材	S	小笠産陸砂	絶対密度:2.58g/cm ³ , 吸水率:1.19%
粗骨材	HL08	真珠岩系高性能軽量骨材	造粒型, 絶対密度:0.88g/cm ³ 24h吸水率:2.26%
	HL12	真珠岩系高性能軽量骨材	造粒型, 絶対密度:1.20g/cm ³ 24h吸水率:1.76%
	HL18	石灰系高性能軽量骨材	造粒型, 絶対密度:1.80g/cm ³ 24h吸水率:2.42%
	AL12	膨張頁岩系従来軽量骨材	非造粒型, 絶対密度:1.22g/cm ³ 24h吸水率:10.2%
	CS26	青梅産6号砕石	絶対密度:2.64g/cm ³ , 吸水率:0.67%
混和材料	B	石灰石微粉	密度:2.70g/cm ³ , 比表面積:4,000cm ² /g
	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系
	AE	AE助剤	変性アルキルカルボン酸化合物

表-6 因子および水準

シリーズ	因子	水準				
		1	2	3	4	5
I	A:骨材種類	HL08	HL12	HL18	AL12	CS26
	B:マトリックス強度 (N/mm ²)	15 (M15)	30 (M30)	45 (M45)	60 (M60)	75 (M75)
II	A:単位粗骨材容積(L/m ³)	300 (Gv300)	350 (Gv350)	400 (Gv400)	—	—
	B:マトリックス強度 (N/mm ²)	30 (M30)	60 (M60)	—	—	—
III	A:粗骨材最大寸法(mm)	10 (Gs10)	15 (Gs15)	20 (Gs20)	—	—
	B:マトリックス強度 (N/mm ²)	30 (M30)	60 (M60)	—	—	—

に与える影響について検討した。なお、実験で使用した軽量骨材の形状は製造方法により異なり、造粒して製造される高性能軽量骨材 (HL08, HL12, HL18) は球形であり、破砕した原料を発泡させて製造される従来軽量骨材

(AL12) は碎石の角を少し丸めたような形状である。また、シリーズIIでは単位粗骨材容積、シリーズIIIは粗骨材最大寸法がコンクリートの力学特性に与える影響について検討した。比較のために強度レベルの異なる2種類の普通コンクリートならびにコンクリートからウエットスクリーニングして採取したマトリックスモルタルについても実験を行った。

(2) 試験方法

実験に用いたコンクリートの配合は、表-7に示すとおりである。マトリックスモルタルの強度の調整は、比

表面積が $4000\text{cm}^2/\text{g}$ の反応性の低い石灰石微粉末でセメントの一部を置換し、水セメント比を変化させて行った。シリーズIおよびIIIの単位粗骨材容積は $350\text{L}/\text{m}^3$ 、シリーズIおよびIIの粗骨材最大寸法は 15mm とした。目標スランプは $8 \pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量は $5.5 \pm 1.5\%$ となるように高性能AE減水剤とAE剤の添加量を適宜調整した。また、軽量骨材は24時間吸水状態に調整して使用した。

コンクリートの練混ぜは30Lのオムニミキサで、セメント、石灰石微粉末、細骨材、粗骨材を15秒間空練りした後、水、化学混和剤を加えて合計2分間の練混ぜを行った。フレッシュコンクリートの性状は、スランプ(JIS A 1101)、単位容積質量・空気量(質量方法)(JIS A 1116)および、空気量(圧力方法)(JIS A 1128)により所要の品質であることを確認し、1バッチにつき3体の供試体を作製した。なお、マトリックスモルタル供試体は、HL12を

表-7 コンクリートの配合

シリーズ	記号	粗骨材の種類	単位粗骨材容積(L/m ³)	粗骨材最大寸法(mm)	目標マトリックス強度(N/mm ²)	石灰微粉置換率(vol.%)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量(kg/m ³ *)					混和剤(C×%)		単位容積質量(kg/m ³)	
										W	C	B	S	G	SP	AE	計算値	測定値
I	HL08M15	HL08	350	15	15	70	116.7	44.4	5.5	165	141	282	739	308	0.20	0.008	1642	1635
	HL08M30				30	55	77.8				212	222			0.25	0.005	1653	1610
	HL08M45				45	40	58.3				283	161			0.25	0.000	1663	1648
	HL08M60				60	20	43.8				377	81			0.35	0.000	1677	1661
	HL08M75				75	0	35.0				471	0			0.60	0.009	1690	1687
	HL12M15	HL12	350	15	15	70	116.7	44.4	5.5	165	141	282	739	419	0.25	0.008	1754	1751
	HL12M30				30	55	77.8				212	222			0.30	0.005	1765	1742
	HL12M45				45	40	58.3				283	161			0.30	0.005	1774	1753
	HL12M60				60	20	43.8				377	81			0.45	0.002	1788	1777
	HL12M75				75	0	35.0				471	0			0.55	0.002	1802	1798
	TL18M15	HL18	350	15	15	70	116.7	44.4	5.5	165	141	282	739	625	0.20	0.007	1968	1957
	TL18M30				30	55	77.8				212	222			0.20	0.005	1978	1972
TL18M45	45				40	58.3	283				161	0.25			0.004	1988	1952	
TL18M60	60				20	43.8	377				81	0.40			0.001	2002	2004	
TL18M75	75				0	35.0	471				0	0.65			0.002	2016	2020	
AL12M15	AL12	350	15	15	70	116.7	44.4	5.5	165	141	282	739	427	0.10	0.008	1900	1929	
AL12M30				30	55	77.8				212	222			0.10	0.006	1911	1939	
AL12M45				45	40	58.3				283	161			0.20	0.003	1921	1926	
AL12M60				60	20	43.8				377	81			0.20	0.002	1935	1928	
AL12M75				75	0	35.0				471	0			0.45	0.001	1948	1930	
II	G v 300M30	HL12	300	15	30	55	77.8	44.4	5.5	165	141	282	739	419	0.25	0.008	1820	1850
	G v 300M60				60	20	43.8				212	222			0.30	0.005	1846	1846
	G v 350M30		350		30	55	77.8				283	161			0.30	0.005	1765	1742
	G v 350M60				60	20	43.8				377	81			0.45	0.002	1788	1777
	G v 400M30				400	30	55				77.8	471			0	0.55	0.002	1716
G v 400M60	60	20	43.8	471		0	0.55	0.002	1738	1738								
III	Gs10M30	HL12	350	10	30	55	77.8	44.4	5.5	165	141	282	739	419	0.25	0.008	1767	1778
	Gs10M60				60	20	43.8				212	222			0.30	0.005	1791	1798
	Gs15M30			15	30	55	77.8				283	161			0.30	0.005	1765	1742
	Gs15M60				60	20	43.8				377	81			0.45	0.002	1788	1777
	Gs20M30			20	30	55	77.8				471	0			0.55	0.002	1734	1777
	Gs20M60				60	20	43.8				471	0			0.55	0.002	1758	1762
比較	CS26M30	CS26	350	15	30	55	77.8	44.4	5.5	165	212	222	739	931	0.30	0.003	2269	2242
	CS26M60				60	20	43.8				377	81			0.45	0.001	2293	2264

*) 軽量骨材の単位量は絶対質量で表記

用いたコンクリートを練り混ぜた後、ウェットスクリーニングでモルタル部分を採取して作製した。コンクリートの打込み後 20±2℃で保管し、材齢 1 日で脱型後、20℃の水中養生を材齢 28 日まで行って試験した。強度試験は、圧縮強度 (JIS A 1108)、割裂引張強度 (JIS A 1113)、曲げ強度 (JIS A 1106)、二面せん断強度 (JSCE-G553) について行った。

破壊エネルギーの測定は、RILEM の「切欠き梁の 3 点曲げ試験によるモルタルならびにコンクリートの破壊エネルギーの測定」に準じて行った。供試体の寸法は 100×100×400mm、供試体数を各配合 3 体とし、養生方法および試験材齢は強度試験と同様とした。また、型枠側面に高さ 50mm、厚さ 3mm のアクリル板を設置して切欠きを入れた。荷重は変位制御式載荷装置を用いて、支点間距離 300mm、毎分 0.1mm の変位速度で行い、供試体中央のたわみをレーザー変位計 (分解能 0.05 μm) で、荷重をロードセルで計測した。破壊エネルギーは、前実験と同様に式 (1) から算出した。

(3) 力学的特性の結果および考察

以下に示す各試験結果は、各試験水準毎の供試体数 3 体の平均値で示した。

a) 骨材強度とマトリックス強度の

組合せの影響

異なる軽量骨材を用いたコンクリートの各種強度をマトリックス強度の実測値との関係で整理して図-12 に示した。いずれのコンクリート強度も、マトリックス強度が大きくなるほど大きくなるが、マトリックス強度が大きいレベルにおいては、コンクリート強度に一定値に収束していく傾向が認められる。骨材の種類ごとの比較では、密度の大きな骨材を用いたコンクリートほど各種強度も大きくなるが、その強度差はマトリックスの強度レベルが大きいほど顕著となる。また、密度の小さい骨材を用いたコンクリートほどマトリックス強度との強度差が大きくなっている。そこで、式 (2) に示す Bache の方法¹²⁾により粗骨材粒の圧縮強度を推定した。

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_m} = \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_m} \right)^n \quad (2)$$

ただし、 $2 < \sigma_a / \sigma_m < 15$, $0 \leq n \leq 0.5$, σ_a : 粗骨材粒の強度, σ_m : マトリックスの圧縮強度, σ_c : コンクリートの圧縮強度, n : コンクリート中の粗骨材の絶対容積率

式 (2) は、骨材強度に対してマトリックス強度が相対的に大きい範囲で導かれた実験式であるので、マトリックスが M60 および M70 の場合の実測値を用いて粗骨材粒の強度を推定すると HL08: 24.3N/mm², AL12: 32.1N/mm²,

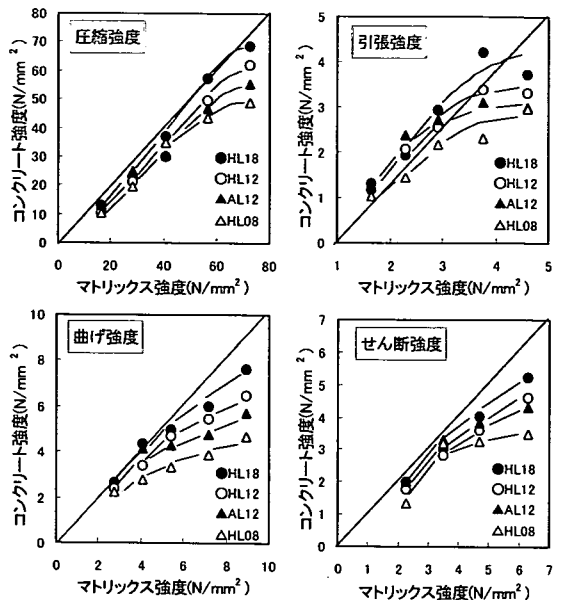


図-12 マトリックス強度とコンクリート強度の関係

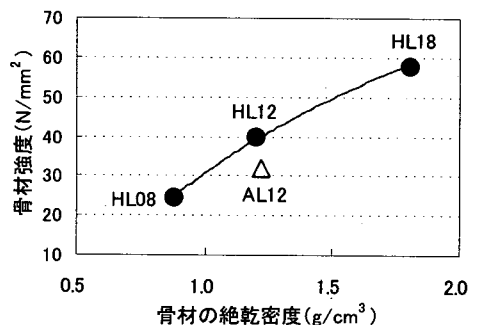


図-13 骨材の絶対乾密度と骨材強度の関係

HL12: 40.0N/mm², HL18: 57.8N/mm² となる。骨材の絶対乾密度とここで求めた骨材強度の関係を図-13 に示す。この図によれば、高性能軽量骨材 (HL08, HL12, HL18) の密度と強度の関係は従来軽量骨材 (AL12) よりも約 8 N/mm² ほど高いレベルにある。したがって、図-12 に示した骨材の密度によるコンクリート強度の変化は、軽量骨材の強度に支配されているものと考えられる。

高性能軽量コンクリートの破壊エネルギーと骨材強度との関係を図-14 に、マトリックス強度との関係を図-15 に示す。図-14 より、軽量コンクリートの破壊エネルギーは、一般的に骨材強度が大きいほど、またマトリックス強度が大きいほど大きくなるといえる。しかし、骨材強度とマトリックス強度の組合せに着目すると、マ

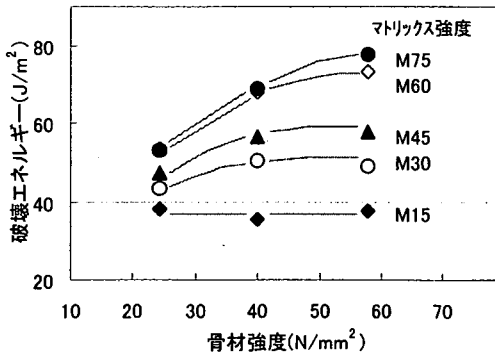


図-14 骨材強度と破壊エネルギー(高性能軽量骨材)

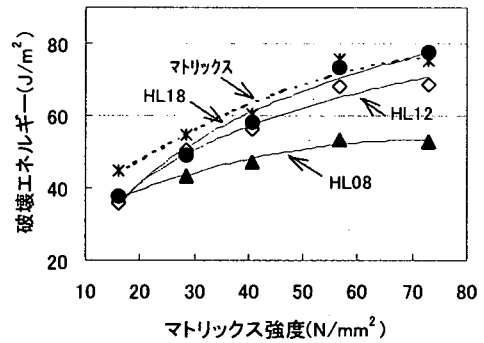


図-15 マトリックス強度と破壊エネルギー(高性能軽量骨材)

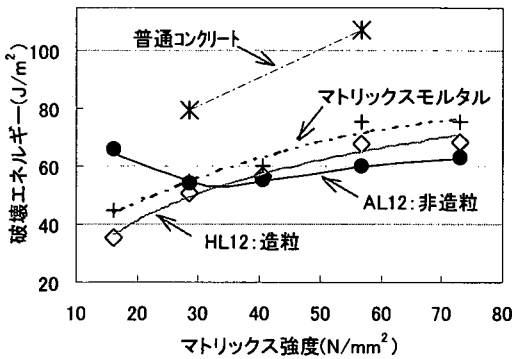


図-16 マトリックス強度と破壊エネルギー(骨材種類比較)

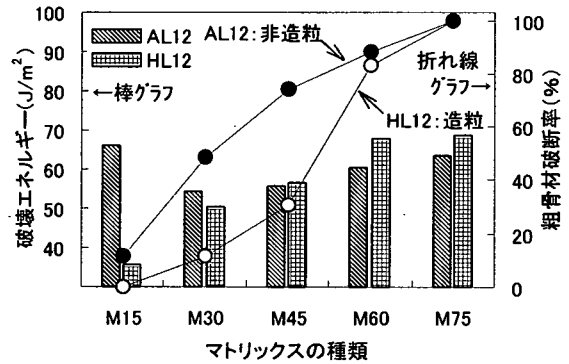


図-17 粗骨材破断率と破壊エネルギー

トリックス強度が小さい範囲では骨材強度がコンクリートの破壊エネルギーに与える影響は小さくなり、マトリックス強度が大きくなるにつれて、コンクリートの破壊エネルギーは骨材強度の影響が大きくなる。すなわち、骨材強度とマトリックス強度の組合せがコンクリートの破壊エネルギーに大きな影響を与えていると言える。また、図-15 からマトリックス強度の大きなレベルでは、コンクリートの破壊エネルギーは一定値に収束していく傾向にあるが、骨材強度の大きなものほどその収束する破壊エネルギーは大きくなっている。

次に、高性能軽量コンクリート (HL12 使用)、従来軽量骨材コンクリート、普通コンクリート、マトリックスモルタルの比較を図-16 に示す。高性能軽量コンクリートはマトリックスモルタルとほぼ同程度の破壊エネルギーを示したが、普通コンクリートは高性能軽量コンクリートの1.5倍から2倍とかなり大きな値を示した。従来軽量骨材 AL12 を用いたコンクリートとの比較では、マトリックス強度が40N/mm² 以上の高強度レベルでは高性能軽量コンクリートの破壊エネルギーの方が大きい、マトリックス強度が30N/mm² 以下の低強度レベルでは従来

軽量骨材を用いたコンクリートの方が破壊エネルギーが大きくなっている。図-17 は同等の密度を有する従来軽量骨材と高性能軽量骨材を用いたコンクリートの破壊エネルギー (棒グラフ) および粗骨材破断率 (折れ線グラフ) とを示したものである。粗骨材破断率は、コンクリート破断面に存在する粗骨材総数に対する、破断した骨材の個数の割合として表したものである。この図によれば、HL12 ではマトリックス強度が小さくなるにつれて粗骨材の破断率および破壊エネルギーも減少していくが、AL12 ではマトリックス強度が小さくなるにつれて粗骨材の破断率は減少するが、破壊エネルギーは最もマトリックス強度の小さい M15 において逆に増大している。この理由としては、粗骨材強度がマトリックス強度よりも大きい場合、球形である HL12 の破断面は、ひび割れの迂回距離が小さくかつ骨材表面が露出して付着破壊している部分が多いのに対し、AL12 のように粗骨材粒子の形状が不定形であると、ひび割れの進展を骨材が遮り、ひび割れの迂回距離が長くなること、ひび割れ面での骨材のかみ合いによるひび割れの進展に対する抵抗性が大きくなることなどが考えられ、これらの原因で破壊エネルギー

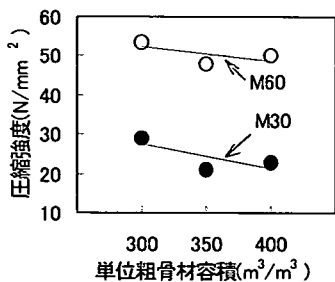


図-18 単位粗骨材容積と圧縮強度

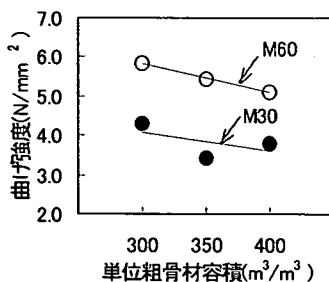


図-19 単位粗骨材容積と曲げ強度

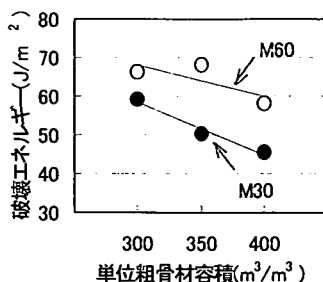


図-20 単位粗骨材容積と破壊エネルギー

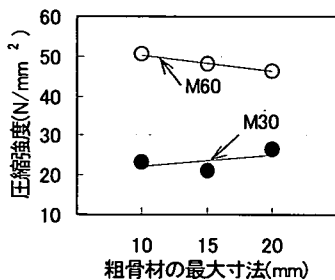


図-21 粗骨材最大寸法と圧縮強度

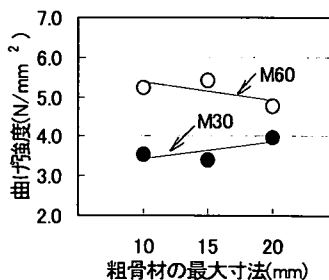


図-22 粗骨材最大寸法と曲げ強度

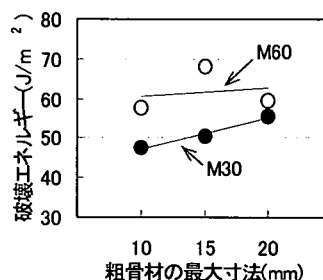


図-23 粗骨材最大寸法と破壊エネルギー

が大きくなったものと考えられる。

b) 単位粗骨材量および粗骨材最大寸法の影響

シリーズIIの実験結果として、単位粗骨材容積と圧縮強度、曲げ強度および破壊エネルギーとの関係を図-18~20に示す。単位粗骨材量が大きくなるほど、各特性値が低下する傾向が認められた。特に破壊エネルギーに関しては、単位粗骨材量の影響が強度特性に関する場合よりも顕著に認められた。また、マトリックス強度の小さいM30はこの低下傾向が大きくなっている。この供試体の破断面は、単位粗骨材量が大きくなるほど骨材表面が露出して破壊している部分が多くなっているため、骨材量の増加による破断面の迂回効果より骨材とマトリックスの低い付着強度に支配されて、破壊エネルギーが減少したものと推察される。

シリーズIIIの実験結果として、粗骨材最大寸法と圧縮強度、曲げ強度および破壊エネルギーの関係を図-21~23に示す。普通コンクリートでは、水セメント比が一定のもとでは、粗骨材寸法が大きくなればコンクリート強度は一般に小さくなる傾向にある¹³⁾。高性能軽量コンクリートでは、圧縮強度においてマトリックス強度が大きい(M60)場合にこの傾向がわずかに読み取れるが、他の特性値はほとんどこのような傾向は認められない。また、マトリックス強度が低強度レベル(M30)ではわずかながら逆の傾向、すなわち、粗骨材の最大寸法が大きい方が各コンクリートの特性値も大きくなり、シリーズIIの単

位粗骨材量の影響と同様に、破壊エネルギーに関しては特にその影響が顕著に認められた。すなわち、単位骨材量に関して図-20で迂回効果は小さいと説明した内容と異なり、骨材寸法が大きいものほどわずかながら破壊エネルギーが大きくなる傾向となり、迂回効果¹⁴⁾があるような結果を示した。骨材寸法が大きくなれば粗骨材の比表面積が小さくなり、一般的に付着強度は小さくなるが、破断面の凹凸が大きくなることにより破断面のモルタル部分も多くなることなどが影響したものと考えられる。しかし、この傾向は微小であるため、迂回効果について言及するにはより多くの実験が必要である。

軽量コンクリートの破壊エネルギーとマトリックス強度との関係を図-24に模式的に示し、破壊エネルギーに影響を与える因子を定性的に整理した。なお、ひび割れが骨材を貫通しているか、迂回しているか、これらが複合的であるのかを示す破断面の代表的な例を写真で示した。粗骨材強度(例えば4.(3)で求めたBacheの方法などにより求めた骨材強度)がモルタル強度を卓越する領域($\sigma_a > \sigma_m$)では、ひび割れは粗骨材を迂回して進展するため、粗骨材粒子の形や寸法などの骨材の形状因子が破壊エネルギーに大きな影響を及ぼしやすい。すなわち、骨材が不定形であると粗骨材のかみ合いによる効果およびひび割れの迂回距離が大きくなることなどから、破壊エネルギーは増大する。また、骨材寸法が大きい場

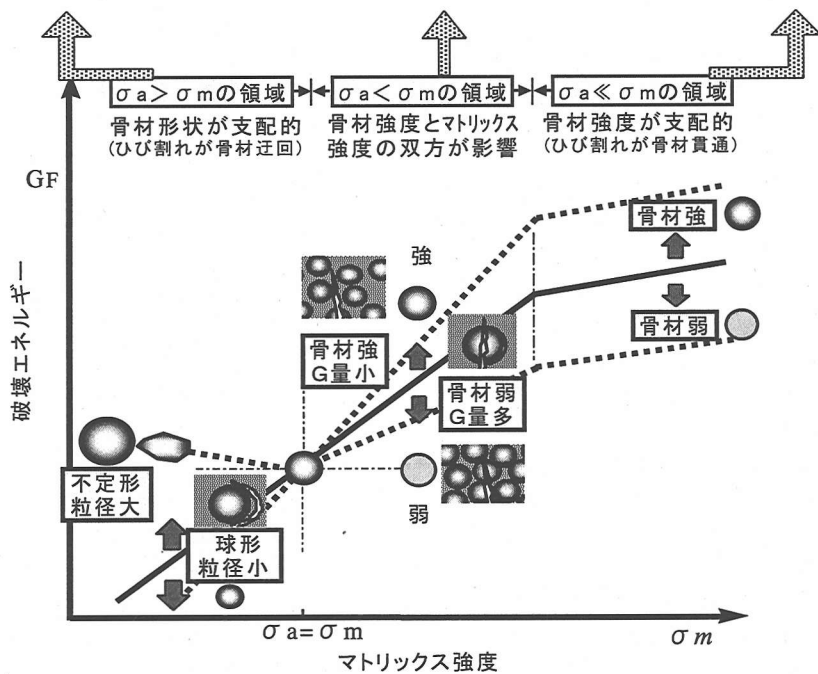
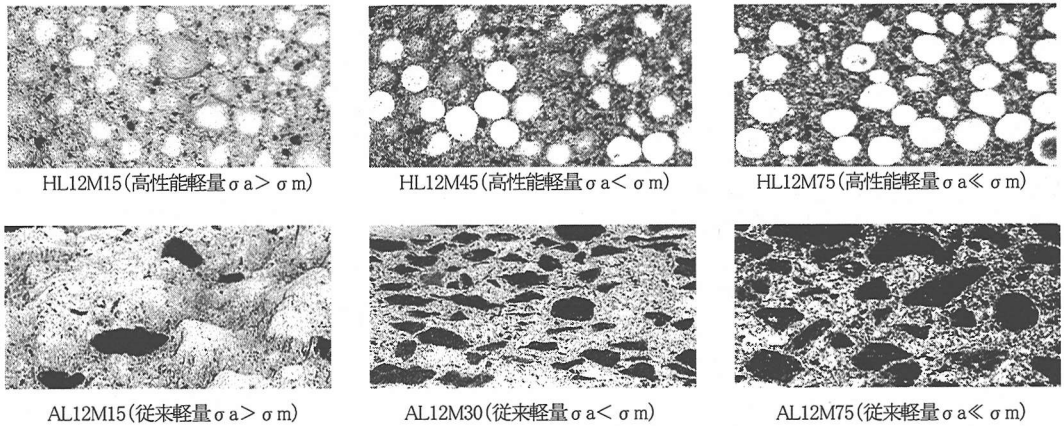


図-24 コンクリートの破壊エネルギーに影響を与える因子

合も、ひび割れの迂回距離が大きくなるため増大する。なお、このように骨材強度が卓越しており、骨材を迂回してひび割れが進展する領域において、骨材とマトリックスの付着強度に支配される場合は界面の付着破壊を起こし、骨材界面に沿ってひび割れが進展するものと考えられる。一方、マトリックス強度が粗骨材強度を卓越する領域($\sigma_a < \sigma_m$)では、ひび割れは粗骨材を貫通して進展するため、骨材強度ならびにマトリックス強度の双方が破壊エネルギーに影響する。この領域では、マトリックスより軽量骨材の強度が小さいため、骨材の量も影響を与え、単位粗骨材容積が大きくなるほど破壊エネルギーは小さくなる。また、マトリックス強度が粗骨材強度

よりかなり大きい領域 ($\sigma_a \ll \sigma_m$; 本実験の範囲ではマトリックス強度が骨材強度の1.5~2倍以上の領域)では、モルタル強度を高めても破壊エネルギーは増加せず一定値に収束する傾向を示す。この領域においては、破壊エネルギーは主として骨材の強度レベルに影響を受けると推察される。

5. まとめ

普通細骨材と高性能軽量粗骨材とを組み合わせ用いた高性能軽量コンクリートの破壊特性を定量的に評価す

るために、A Eを併用した一軸圧縮および曲げ破壊靱性試験を行い、その挙動を考察するとともに、品質の異なる各種の軽量粗骨材と強度の異なるマトリックスとを組合せたコンクリートについて破壊靱性を含む強度試験を行い、骨材品質がコンクリートの力学特性に与える影響を調べた。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1)高性能軽量骨材を使用した高強度軽量コンクリートの圧縮応力下における破壊挙動は、普通コンクリートと比較してひび割れ発生頻度が高く、引張型のひび割れが多い。
- (2)高性能軽量骨材を使用した高強度軽量コンクリートの曲げ応力下における破壊挙動は、切欠き直上部に微細ひび割れの発生が集中して骨材破壊をともなう脆性的な破壊形態を示す。
- (3)高性能軽量骨材を使用した高強度軽量コンクリートは、普通コンクリートより破壊エネルギーが小さくなるが、骨材強度が大きいものを用いることにより破壊特性を改善することができる。
- (4)独立空隙を多く有する高性能軽量骨材の強度は密度と比例関係があり、その強度は従来軽量骨材よりも高いレベルにある。
- (5)軽量粗骨材を使用したコンクリートの破壊エネルギーは、粗骨材強度、マトリックス強度、単位粗骨材容積、粗骨材寸法などの影響を受けるが、その影響は粗骨材強度とマトリックス強度のバランスにより異なる傾向を示す。
- (6)粗骨材強度がモルタル強度を卓越する領域では、粗骨材の形や寸法などの骨材の形状因子が破壊エネルギーに大きな影響を及ぼす。骨材粒子が不定形であると粗骨材のかみ合いによる効果およびひび割れの迂回距離が大きくなることなどから破壊エネルギーは増大し、また、骨材寸法が大きい場合もひび割れの迂回距離が大きくなるため増大する。
- (7)マトリックス強度が粗骨材強度よりやや大きい領域では、ひび割れは粗骨材を貫通して進展するため、骨材強度ならびにマトリックス強度の双方が破壊エネルギーに影響する。また、軽量骨材の強度がマトリックスモルタルより小さいため、単位粗骨材容積が多くなるほど破壊エネルギーは小さくなる。
- (8)マトリックス強度が粗骨材強度よりかなり大きい領域では、モルタル強度を高めても破壊エネルギーは増加せず一定値に収束する傾向を示す。この領域においては主として骨材の強度レベルが破壊エネルギーに影響を与える。

謝辞：本研究の実施に当たり、西松建設株荒井孝文氏、太平洋コンサルタント株柴田辰正氏に協力頂いたことを記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 岡本享久, 石川雄康, 榎木隆, 笹嶋昌男: 高性能軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol. 37, No. 4, pp. 12-18, 1999. 4.
- 2) 曾根徳明, 曾根徳明: 石炭灰を主原料とした高強度人工骨材, コンクリート工学, Vol. 36, No. 12, pp. 3-10, 1998. 12.
- 3) 柴田辰正, 石川雄康, 荒井利奈, 岡本享久: 高性能軽量骨材を使用したコンクリートの破壊時のマイクロクラック発生挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 2, pp. 913-918, 1999. 6.
- 4) 森大介, 石川雄康, 國府勝郎, 荒井孝文: 人工軽量粗骨材を使用したコンクリートの破壊エネルギー挙動について, 日本コンクリート工学協会「軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大」に関するシンポジウム論文集, pp. 11-16, 2000. 8.
- 5) 大津政康: アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版, 1988.
- 6) 西岡思郎, 江口勇, 国本公瑞: 軽量骨材を用いたコンクリートの研究, セメント技術年報, No. 18, pp. 478-486, 1964.
- 7) 岡田清編: 最新コンクリート工学, オーム社, 1986.
- 8) Ohtsu, M.: Simplified Moment Tensor Analysis and Unified Decomposition of Acoustic Emission Source, *Journal of Geophysical Research*, 96(B4), pp. 6211-6221, 1991.
- 9) 橋高義典, 上村克郎, 中村成春: コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 453, pp. 15-25, 1993. 11.
- 10) 栗原哲彦, 安藤貴宏, 国枝稔, 内田裕市, 六郷恵哲: 多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ性状, 土木学会論文集, No. 532/V-30, pp. 119-129, 1996. 2.
- 11) 土木学会コンクリート委員会寸法効果小委員会: コンクリートの寸法効果と引張軟化曲線, 土木学会コンクリート技術シリーズ, No. 18, 1997. 5.
- 12) Ramos, C. and Shah, S.P.: Strength of Lightweight Aggregate and concrete, *Journal of Materials*, Vol. 7, No. 3, pp. 380-387, Sept. 1972. Sept. 1972.
- 13) Cordon, W.A. and Gillespie, H.A.: Variables in Concrete Aggregates and Portland Cement Paste which Influence the Strength of Concrete, *ACI Journal*, Vol. 60, No. 8, pp. 1029-1050, Aug. 1963.
- 14) 野村希晶, 三橋博三, 新関茂: コンクリートの破壊エネルギーと引張軟化特性に及ぼす粗骨材粒径の影響, コンクリート工学論文集, Vol. 2, pp. 57-66, 1991.

(2001. 1. 5 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON FRACTURAL BEHAVIOR OF CONCRETE USING HIGH-PERFORMANCE LIGHTWEIGHT AGGREGATE

Yuko ISHIKAWA, Katsuro KOKUBU, Daisuke MORI and Takahisa OKAMOTO

A high performance lightweight aggregate which has been recently developed has higher strength and lower absorption than conventional artificial lightweight aggregates. The purpose of this study is to investigate the fracture mechanism of concrete made with the high performance lightweight aggregate. We mainly focused on the combination of matrix strength and aggregate strength. As the result, it was clarified that the fracture energy of the high performance lightweight concrete depends on the strength of matrix and aggregate and the combination of their strengths as well as unit volume, shape and size of aggregate.