

論文 セメント構成成分がコンクリートの破壊力学特性値に及ぼす影響

斉藤 稔^{*1}・二羽 淳一郎^{*2}

要旨：本研究は、コンクリートの破壊力学特性値に及ぼすセメント構成成分の影響を、骨材界面での「遷移帯」の存在と結びつけて実験的に検討したものである。ビーライト系セメントを用いたコンクリートは、材齢初期の低強度時においても破壊エネルギーが大きく、また早強セメントでは、材齢初期の破壊エネルギーが小さくなる傾向がある。そこで、これらのセメントを混ぜ合わせ、セメントの C_2S 含有率を変化させることで、コンクリートの破壊力学特性値にどのような影響を及ぼすのかを破壊エネルギーの観点から検討する。

キーワード：破壊エネルギー、遷移帯、ビーライトセメント、早強セメント、破壊力学

1.はじめに

コンクリート構造物のひび割れ発生から破壊に至る一連の現象を、圧縮強度や引張強度などの強度特性ばかりでなく、材料特性値とも考えられる破壊力学パラメータにより、表現していく研究が多くなされている。

破壊エネルギーは、単位投影面積のひび割れの形成に必要なエネルギーであり、引張軟化曲線下の面積で表現される。また、引張軟化曲線はひび割れの成長に伴って減少する引張伝達応力と引張ひずみまたはひび割れ幅との関係とされている。これらの値は、コンクリートの破壊力学における最も重要なパラメータであり、これらの値が与えられれば、コンクリート構造物のひび割れ進展過程を数値解析的に評価していくことが可能となる。

コンクリート中の微細ひび割れは、骨材とモルタルとの界面の結合部や、セメントペースト硬化体内部の弱点部等から発生している。そのため、破壊エネルギーを材料特性値として扱うことができると仮定しても、コンクリートの圧縮強度や粗骨材最大寸法といったマクロな尺度のみから評価するのでは、十分な精度が得られないと考えられる。精度よく破壊エネルギーを予測するためには、

セメント水和物レベルにさかのぼって、検討する必要がある。

コンクリートの物性には、水和したセメントが形成するセメントペーストの微構造、ならびにコンクリートの構造および組織が大きく関与している。特にセメントペーストと骨材界面に存在する遷移帯は、セメントペーストの体積の約 1/3 を占め、コンクリートの特性に決定的な影響を与える¹⁾。

本研究では、この遷移帯の形成に関係のある、ユーライト (C_3S 固溶体) およびビーライト (C_2S 固溶体)が、硬化コンクリートの破壊力学特性値に及ぼす影響を調べるために、ビーライトの含有量の少ない早強セメントと高ビーライト系のセメントを任意の割合で混ぜ合わせたコンクリートを作成し、実験的に検討する。さらに得られた破壊エネルギー値を組み込んだ数値解析により、この種のセメントを用いたコンクリートの曲げ強度特性をシミュレートしていく。

2. 遷移帯について

モルタルおよびコンクリートにおいて、骨材とセメントペーストとの界面にポーラスで結合力

^{*1} 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

^{*2} 名古屋大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

の脆弱な遷移帯(transition zone)という領域が存在することが知られている。この遷移帯は主として、骨材表面付近にできる $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を多く含んだ、他の部分と不連続な部分であり、その厚さは骨材表面より $30\sim 40\mu\text{m}$ 程度であると言われている²⁾。ここで早強セメントを用いたコンクリートの骨材周辺部分を倍率 150 倍で拡大し、走査型電子顕微鏡(SEM)により観察した後方散乱電子像とその模式図を写真-1 に示す。

この写真は化学組成情報を示しており、Ca 濃度が高いほど色調が白くなることから、骨材表面は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 結晶により被覆されていることが観察される。つまり、この部分が遷移帯であると考えられる。遷移帯は、コンクリートの強度特性、破壊特性に大きく影響を与えると考えられるため、骨材界面付近の微細ひび割れ発生状況をセメントの C_2S 含有率によって分類、比較し、破壊力学の観点から検討していくこととした。

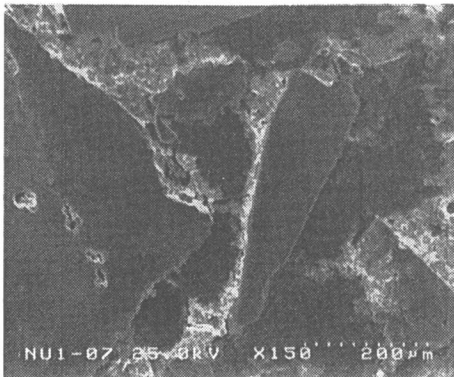


写真-1 SEMにより観察した後方散乱電子像とその模式図

3. コンクリート供試体による破壊エネルギーの計測

3.1 実験の概要

1) 破壊エネルギーの実測

コンクリートの破壊エネルギーは、RILEM の推奨法を参考にして、切欠きを有する無筋コンクリートはりの 3 点曲げ試験により求めることとした(図-1)。供試体寸法は、 $100\times 100\times 400\text{mm}$ (荷重スパン 300mm)、切欠き深さ 50mm である。切欠きは、厚さ 5.5mm の切欠き板をコンクリート打設時に供試体中央部に設置し、硬化前にそれを引き抜くことにより設けた。実測された荷重-変位曲線下の面積 W_o 、支点間の供試体重量 mg とはり破断時の変位 δ_o の積 $mg\delta_o$ 、および切欠き位置でのはりの破断部分の投影面積(リガメント面積) A_{lig} から、式(1)で破壊エネルギー G_F が求められる。

$$G_F = (W_o + mg\delta_o) / A_{lig} \quad (1)$$

2) 使用材料および配合

この試験に使用した材料の特性値を表-1 に示す。なお粗骨材の最大寸法は 13mm 、スランブ 8cm 、空気量 2% ですべて一定である

コンクリートの配合を表-2 に示す。また、水セメント比を 50% と一定にし、早強セメントおよびビーライトセメントを混ぜ合わせることにより C_2S 含有率を $10.4, 20, 30, 40, 55\%$ と変化させたコンクリート供試体を作成し、水中養生を

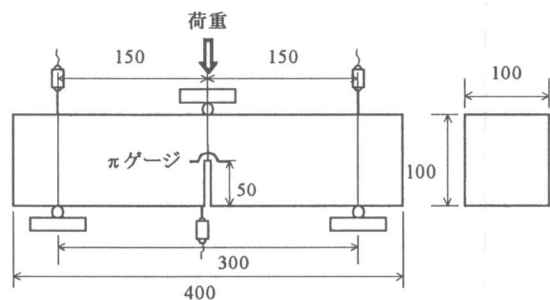


図-1 切欠きはりの 3 点曲げ試験

表-1 材料の特性値

C ₂ S %	W/C %	s/a %	単位量(kg/m ³)					AE 剤
			W	C	S	G		
10.4	50	48	170	340	845	955	0.2	
20.0	50	48	170	340	845	956	0.2	
30.0	50	48	170	340	845	956	0.2	
40.0	50	48	170	340	846	957	0.2	
55.0	50	48	170	340	848	959	0.2	

表-2 コンクリートの配合表

種類	産出	比重	その他
早強セメント (早強ポルトランドセメント)	N社製	3.14	C ₂ S=10.4% C ₃ S=64.7% 比表面積; 4450cm ² /g
ビーライトセメント (低発熱ポルトランドセメント)	N社製	3.22	C ₂ S=55.0% C ₃ S=25.7% 比表面積; 3360cm ² /g
細骨材	豊田産 山砂	2.51	粗粒率(F.M); 2.80 吸水率; 1.47%
粗骨材	春日井 産砕石	2.62	粗粒率(F.M); 6.62 吸水率; 0.86%
高性能AE減水剤	T社製	—	ポリカルボン酸系

行った。材齢 7 日, 28 日で曲げ試験を各材齢 2 本ずつ行って平均化し, 荷重-変位関係に加えて, ひび割れ幅の開口変位も計測した。

3.2 実験結果および考察

材齢 7 日, 28 日に得られた実験結果を表-3 に示す。またセメント中の C₂S 含有率と破壊エネルギー G_F (N/mm) の関係を図-2 に示す。

表-3 材齢 7 日, 28 日の実験結果

セメント 種別 C ₂ S (C ₃ S) 含有率 (%)	圧縮強度 MPa		引張強度 MPa		曲げ強度 MPa		G _F N/mm		A ₀ × 10 ³	
	7 日	28 日	7 日	28 日	7 日	28 日	7 日	28 日	7 日	28 日
	10.4 (64.7)	39.5	42.0	3.55	3.14	4.55	5.72	0.0783	0.0836	1.120
20.0(56.0)	35.5	40.6	2.85	3.72	4.94	5.63	0.0825	0.0930	1.362	1.398
30.0(47.4)	18.2	29.9	2.07	3.02	3.46	5.03	0.0549	0.1079	1.444	2.006
40.0(38.7)	18.4	37.1	1.89	3.20	4.62	5.54	0.0699	0.1296	1.827	2.071
55.0(25.7)	11.8	41.4	1.79	3.71	2.54	6.88	0.0540	0.1400	1.931	2.077

図-2 によれば, 材齢 28 日における C₂S-G_F の関係は, C₂S の含有率が増加するにつれて G_F も緩やかに増加する傾向にある。しかしながら, 材齢 7 日においては, 明確な関係は認められず, むしろ C₂S の含有率の増加とともに G_F が低下していく傾向にあった。

一般に引張強度, あるいは圧縮強度が大きくなるほど破壊エネルギーは大きくなる。従って, 引張強度や圧縮強度が相当に違うレベルで, 破壊エネルギーの絶対値そのものを比較することは適当ではないと考えられる。例えば, CEB-FIP Model Code90⁹⁾では, コンクリートの破壊エネルギーはコンクリートの圧縮強度と粗骨材最大寸法の関数として式(2)で与えられている。

$$G_F = G_{F0} (f_c' / f_{c0}')^{0.7} \quad (2)$$

ただし, G_F: 破壊エネルギー, G_{F0}: 粗骨材最大寸法に依存する破壊エネルギーの基本値, f_c': コンクリートの圧縮強度, f_{c0}': 定数 (10MPa) である。

そこで, 式(2)を参考にして実測されたコンクリートの破壊エネルギーを圧縮強度の 0.7 乗で補正した定数 A₀(式(3))を材料の特性値と見なし, この値を比較することにした。

$$A_0 = \frac{G_F}{f_c'^{0.7}} \quad (3)$$

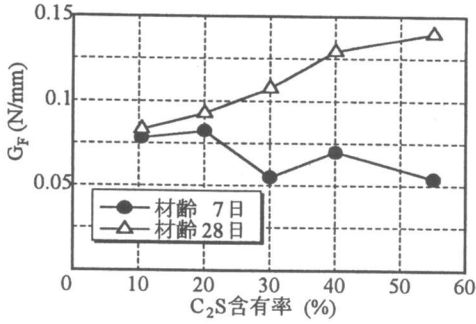


図-2 C₂S含有率とG_Fの関係

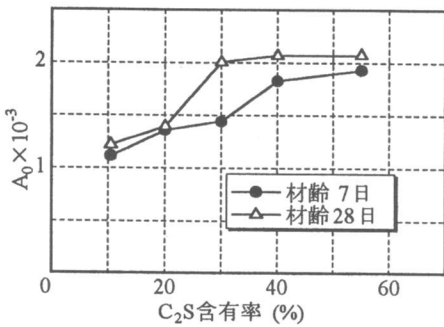


図-3 C₂S含有率とA₀の関係

図-3は式(3)による補正を行った定数A₀とC₂S含有率の関係である。

コンクリートの圧縮強度の発現性を考慮すれば、材齢7日、28日ともに、定数A₀はC₂S含有率が増加するにつれて緩やかに増加する傾向となる。

コンクリートの破壊エネルギーの大小は骨材とモルタルとの界面の付着特性に影響されると考えられている⁴⁾。コンクリートの微細ひび割れは、強度的な弱点部分である骨材とモルタルの界面もしくは、モルタル内部の欠陥部等から発生する。この微細ひび割れは、凝集してマトリクスひび割れとなり、成長の過程で骨材にぶつかる。そのとき、骨材を迂回したり貫通したりするが、その条件は骨材界面強度、モルタル部の強度、骨材自体の強度によって決定される。骨材界面強度は、界面部に析出する遷移帯の生成量および厚さに大きく影響を受けるが、モルタル部の強度は、骨材界面強度よりも遷移帯による影響を受けにくい¹⁾。

C₂S含有率の高いセメントを用いたコンクリートは、遷移帯の厚さおよび生成量の減少により界面強度が大きくなる。しかしC₂S含有率の高いセメントは強度発現が遅いため、材齢初期の強度が低くなる。このため、破壊モードは骨材貫通型のひび割れによる脆弱的な破壊よりもむしろモルタル部そのものの破壊となりやすい。このモルタル破壊が起こる強度範囲では、ひび割れが広範囲に分散し、強度あたりの破壊エネルギーは高くなると考えられる。

逆に、C₂S含有率が小さいセメントを用いたコンクリートでは、遷移帯の存在により界面強度がモルタル部の強度より低くなる。したがって破壊モードは、界面破壊が先行した平面的なひび割れになる。モルタル破壊に比べて、ひび割れが界面に集中するので、最初にできたひび割れが支配的となりひび割れが広範囲に分散しない。したがって、強度あたりの破壊エネルギーは小さくなると考えられる。

4 曲げ強度の数値シミュレーション

4.1 概要

コンクリートの単位強度あたりの破壊エネルギーは、C₂S含有率が増加するにしたがって緩やかに増加していく傾向が認められた。そこで、早強セメントおよびビーライト系セメントを用いたコンクリートの破壊エネルギーの相違が、曲げ強度特性にどの程度影響するかを明らかにするために、引張軟化特性を組み込んだFEMにより、シミュレーションを行うこととした。

4.2 引張軟化特性を組み込んだ有限要素解析

本解析では、ひび割れ位置におけるコンクリートの非線形性を表すものとして図-4に示すような非線形ロッド要素⁹⁾を用いた。非線形ロッド要素は、概念的に単位長さL=10(mm)を有するものとして仮定している。引張強度到達後、直線的な軟化を仮定するとすれば、非線形ロッド要素の応力-ひずみ関係は次のように与えられる。

$$\text{引張強度到達前} : \sigma = E_R \cdot \varepsilon \quad (4)$$

$$\text{引張強度到達後} : \sigma = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\text{peak}}} f_t \quad (5)$$

ただし、 $E_R=100 \cdot E_C$ 、 $\varepsilon_{\max} = W_{cr} / L$ 、 W_{cr} ；限界ひび割れ幅、 $\varepsilon_{\text{peak}}$ ；引張強度に対応するひずみである。図-4 の曲線下の面積が破壊エネルギーに対応するが、引張強度到達までの弾性領域におけるエネルギーを無視しうる程度に小さくするため、応力が f_t に達するまでの剛性は意図的に増加させてある。これは、ひび割れ発生までは、コンクリートを連続体とみなし、解析の上では 2 重節点を分離しないことにしているためである。なお、コンクリートの軟化曲線として、図-5 に示すような 1/4 モデルを用いた。

また、はり供試体の要素分割は図-6 に示すような 3 点曲げを受ける無筋の切欠きばりを想定し、切欠きの高さは、はり高さの 1/2 とした。はりの高さを h 、せん断スパン $4h$ 、はりの幅は 100mm で一定である。はり高さを $h=100, 200, 500, 750, 1000, 2000, 3000(\text{mm})$ と変化させた。なお、解析は変位制御で行った。

解析に用いたコンクリートの強度パラメータは、弾性係数 $E_C=29400(\text{MPa})$ 、ポアソン比 $\nu=0.16$ 、また、材齢 28 日の実験結果より、早強セメントを用いたコンクリートの引張強度、破壊エネルギーを 3.14(MPa)、0.0836(N/mm)、ビーライトセメントを用いたコンクリートの引張強度、破壊エネルギーを 3.71(MPa)、0.1400(N/mm) とした。

本解析を行う前にモデルの検証解析として、実験と同様の寸法(はり高さ 10cm、せん断スパン 15cm)で解析を行い、実験で得られた材齢 28 日の曲げ強度と比較をした。

4.3 解析結果および考察

曲げ強度の検証解析の結果を表-4 に示す。表-4 によれば、解析値は実験値をやや下回っているものの、実験値を精度良く予測できていることがわかる。

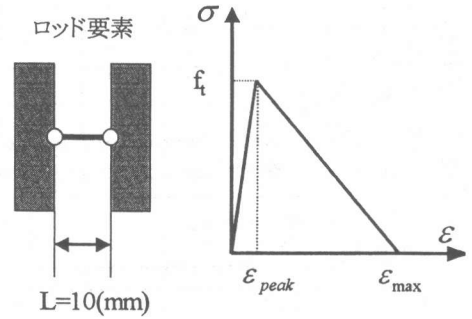


図-4 ロッド要素の応力-ひずみ関係

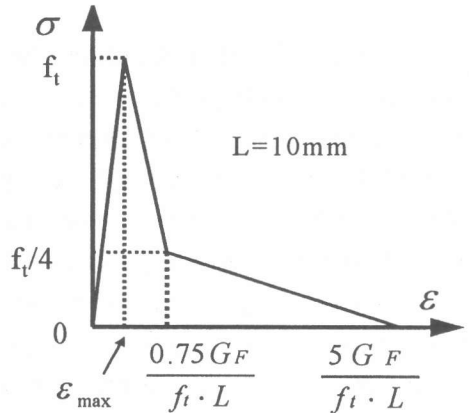


図-5 引張軟化曲線の 1/4 モデル

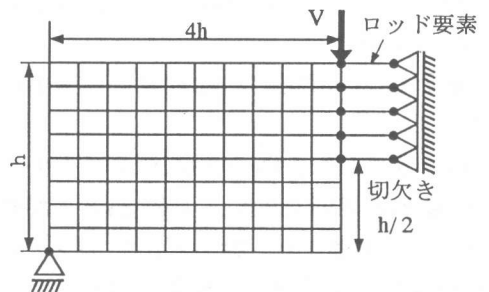


図-6 要素分割図

表-4 曲げ強度の検証解析の結果

種類	実験値 MPa	解析値 MPa
早強 セメント	5.72	5.33
ビーライト セメント	6.88	6.77

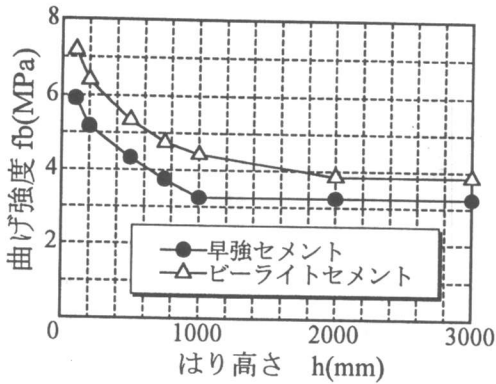


図-7 曲げ強度寸法効果の数値解析結果

次に、せん断スパン $4h$ の解析の結果を図-7 に示す。図-7 に示される通り、ビーライト系セメントを用いたコンクリートの曲げ強度は、早強セメントを用いたコンクリートと比較して大きい。早強セメントを用いたコンクリートの曲げ強度は、はり高さが 1000mm を超えると一定になるが、ビーライト系セメントを用いたコンクリートでは緩やかに強度低下していることがわかる。したがって、はり高さが数メートルに達する巨大な部材では、早強セメントを用いるよりも、ビーライト系セメントを用いたほうが、曲げひび割れ抵抗性に優れたコンクリートが作成できると考えられる。

5. まとめ

本研究により得られた結論は以下の通りである。

- (1) ビーライト系セメントを用いたコンクリートの強度発現の程度を考慮し、圧縮強度による補正を行えば、材齢 7 日、28 日ともに、コンクリートの破壊エネルギーは、 C_2S 含有率が増加するにしたがって緩やかに増加していく傾向があることがわかった。
- (2) C_2S 含有率の高いセメントを用いたコンクリートは、遷移帯の厚さおよび生成量の減少により界面強度が大きくなる。しかし C_2S 含有率の高いセメントは強度発現が遅いため、材齢初期の強度が低くなる。このため、破壊モードは骨材貫通型のひび割れによる脆弱的な破壊よりもむしろモルタル部そのものの破壊となりやすい。このモル

タル破壊が起こる強度範囲では、ひび割れが広範囲に分散し、強度あたりの破壊エネルギーは高くなると考えられる。

(3) C_2S 含有率が小さいセメントを用いたコンクリートでは、遷移帯の存在により界面強度がモルタル部の強度より低くなる。したがって破壊モードは、界面破壊が先行した平面的なひび割れになる。モルタル破壊に比べて、ひび割れが界面に集中するので、最初にできたひび割れが支配的となりひび割れが広範囲に分散しない。したがって、強度あたりの破壊エネルギーは小さくなると考えられる。

(4) ビーライト系セメントを用いたコンクリートの曲げ強度は、早強セメントを用いたコンクリートと比較して大きくなるのが数値シミュレーションによりわかった。特にはり高さが数メートルに達する巨大なはりでは、早強セメントを用いるよりも、ビーライト系セメントを用いたコンクリートのほうが、曲げひび割れ抵抗性に優れていることが示された。

参考文献

- 1) 内川 浩：セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響，コンクリート工学，Vol.33, No.9, pp.5-17, 1995.9.
- 2) 羽原俊祐：コンクリートの構造とその物性，わかりやすいセメント科学，セメント協会，pp.78-104, 1993.3.
- 3) CEB：CEB-FIP Model Code 1990, Bulletin d'Information, No.213/214, 437 pp., 1993.
- 4) 二羽，松尾，岡本，田邊：セメントの種類とコンクリートの破壊力学特性値に関する実験的研究，土木学会論文集，No.550, V-33, pp.43-51, 1996.11.
- 5) 二羽淳一郎：非線形ロッド要素を用いたコンクリートはりの曲げ強度寸法効果解析，コンクリート年次論文報告集，Vol.15.No.2, pp.75～80, 1993.6.