

論文 セメントの種類がコンクリートの破壊力学特性値に及ぼす影響

松尾豊史^{*1}・二羽淳一郎^{*2}・岡本享久^{*3}・田邊忠顕^{*4}

要旨：本研究は、近年注目されている高ビーライト系の低発熱セメントを取り上げ、セメントの種類がコンクリートの破壊力学特性値に与える影響について、実験的に検討したものである。まず、コンクリートの破壊エネルギーに影響する要因として、粗骨材の界面とモルタルの付着に注目し、生成される遷移帯の観点から、骨材界面とモルタルとの付着力が強いものほど破壊エネルギーが大きくなることを説明した。そして、CaOの少ない高ビーライト系のセメントを用いたコンクリートは、材齢初期の強度の低い段階での破壊エネルギーが早強セメントに比べて大きいことを実験により明らかにした。

キーワード：ビーライトセメント、破壊エネルギー、遷移帯

1. はじめに

セメントの強度発現は主としてエーライトとビーライトの水和反応に起因しており、ビーライトはエーライトに比べて水和反応に伴う発熱量が小さく長期の強度発現性に優れているが、初期の強度発現では劣っている。

近年、わが国ではコンクリート構造物の大型化に伴い、コンクリートの温度ひび割れを抑制する観点から、セメントの水和熱が小さい低発熱セメントが要望されるようになり、発熱量の小さいビーライトの含有量の多いセメントが製造されるようになってきた。また最近、高ビーライト系のセメントは低発熱セメントとしてだけでなく、高耐久性の高強度セメントとしても注目されてきている。

さて、コンクリートの破壊力学に関する研究が現在各所で精力的に進められており、コンクリートの破壊現象を解析的に評価していく手法として、コンクリートの破壊エネルギーやコンクリートの引張軟化特性を考慮した破壊力学的な考え方が非常に有望視され、成果を収めている。本研究では、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用いたコンクリートの破壊特性を破壊力学的手法により定量的に評価し、コンクリートの破壊特性に及ぼすセメントの種類の影響について検討するものである。

2. 遷移帯について

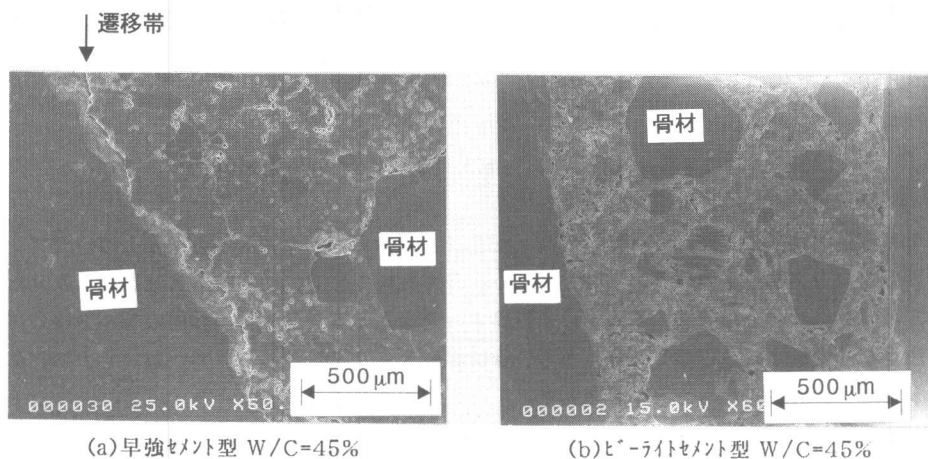
モルタルおよびコンクリートにおいて、骨材とセメントペーストとの界面にポーラスで結合力の弱い遷移帯(transition zone)」という領域が存在することが知られている[1]。この遷移帯は、骨材表面付近にできるCa(OH)₂を多く含んだ、他の部分と不連続な部分である。写真1(a)(b)は、走査型電子顕微鏡による観察結果である。カルシウム濃度の高い部分ほど白くなるので、濃淡で遷移帯部分の区別が可能である。

* 1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

* 2 名古屋大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

* 3 日本セメント(株)中央研究所セメント・コンクリート研究部、工博（正会員）

* 4 名古屋大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）



(a)早強セメント型 W/C=45% (b)ビーライトセメント型 W/C=45%
写真1 走査型電子顕微鏡による骨材界面の遷移帯像

写真1 (a)は、W/C=45%の早強セメント、写真1 (b)はW/C=45%のビーライトセメントを用いたコンクリートの観察結果である。観察は、早強セメントとビーライトセメントについてそれぞれW/C=45%、65%について行ったが、ビーライトセメントでは明確に遷移帯と認められるものは認められなかった。遷移帯は強度的に最弱部分になると考えられるので、骨材界面とモルタルとの付着力は、定性的にビーライトセメントで高く、早強セメントで弱いことになる。

なお、遷移帯の組成、細孔構造より、遷移帯の厚さは骨材粒径の増加に伴い、また水セメント比、単位水量が大きくなるに従い増加すると考えられている。単位体積当たりの遷移帯の生成量は、骨材量が増すほど、骨材の粒径が減少するほど増加すると考えられている。

3. 骨材界面とモルタルの付着について

コンクリートの実用強度範囲における、強度的な最弱点は骨材周辺部であり、ひび割れはまずこの部分で起こり、伝播していくと考えられる。コンクリートの強度、破壊のメカニズムを考えるためには、骨材界面とモルタル部との付着について考えなければならないが、この骨材界面とモルタルとの付着には、遷移帯の組成、生成量が大きく影響していると考えられるのである。ポーラスで結合力の弱い部分である遷移帯が厚く、また生成量が多いほど、強度的に弱いと考えられる。

そこで、骨材界面とモルタルとの付着強度の評価を行うための実験を行った。骨材界面とモルタルの付着強度を評価するための実験法は、現在のところ確立されていない。著者らは、直接引張試験なども試みたが、測定熟練を要しないこと、特殊な器具を用いないこと、また供試体作成の容易さなどから、以下のような実験を行うことにした。

3. 1 実験概要および実験結果

図1のように、粗骨材を、材齢約2ヶ月、圧縮強度1000(kgf/cm²)程度の高強度コンクリートで模し、骨材とモルタルの界面を得るために、図の左側に新コンクリートを打ち込んで、実験供試体を作成した。そして、割裂試験により引張強度を測定して、骨材界面とモルタルの付着特性を評価した。なお、コンクリートの配合、材料の物性値については、後に示す表2、3と同様である。なお、旧コンクリートの付着面はカッターの切断面であり、滑らかな状態になっている。

表1より、材齢28日ではビーライトセメントを用いたコンクリートの引張強度は早強セメントのものと同レベルとなるが、材齢7日では明らかにビーライトセメントを用いたコンクリートの引張強度は早強セメントのものよりも高いことが明らかになった。また、圧縮強度に対する引張強度の割合で考えると、引張強度/圧縮強度比はビーライトセメントを用いたコンクリートでさらに高くなると推測される。

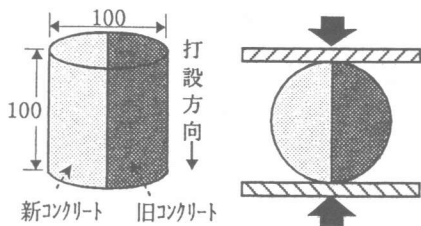


図1 実験供試体及び実験方法

表1 付着特性の実験結果

セメントの種類	W/C	引張強度 (kgf/cm ²)	
		材齢7日	材齢28日
早強セメント	65%	6.9	12.8
	45%	11.0	13.2
ビーライトセメント	65%	11.8	12.9
	45%	12.7	13.1

3. 2 破壊のメカニズムとエネルギー吸収について

上述の遷移帯、骨材界面とモルタルの付着特性という観点から、破壊のメカニズム、破壊の脆性度について考える。

コンクリートの実用強度範囲における、強度的な最弱点は一般に骨材周辺部であると考えられている。ひび割れはまずこの部分で起こり、伝播していく。伝播していく過程で、ひび割れが骨材にぶつくとひび割れの進展がストップするか、迂回するか、貫通するかは、その時の条件によって決まる。しかし、W/Cが小さくなり骨材周辺部の付着力が強くなると、付着強度が徐々に骨材強度に近いレベルになる。そうすると、ひび割れが骨材を迂回しなくなり、最初に出来たひび割れが支配的になり、ほぼ平面的なひび割れ面になる。従って、破壊時の吸収エネルギーも小さくなり、より脆性的になる。

ビーライトセメントを用いたコンクリートの破壊面の観察より、材齢初期の低強度時には、骨材周辺部で起こったひび割れが骨材を迂回して破壊面を形成しており、モルタル部そのものが破壊している。この段階では、モルタル部の破壊が破壊領域にかなり分散して起こるため、強度当たりの破壊エネルギーが高くなると考えられる。図2にその概念図を示す。

図2において、モードA部ではモルタル破壊が先行し、ひび割れが分散するため相対的な破壊エネルギーが大きくなる。モードB部は、骨材界面のひび割れが伝播していく骨材迂回型の破壊である。そして、モードCは、骨材貫通型の破壊になるので強度当たりの破壊エネルギーは相対的に小さくなる。モードA、B、C部でのひび割れの伝播の様子を図3に示した。また、図2において、骨材界面の付着強度が高くなると、初期の破壊エネルギーが大きい領域が増えることが説明できる。

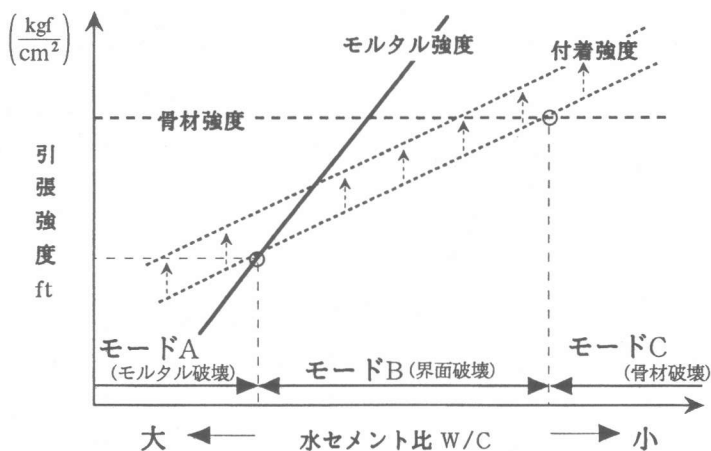


図2 強度最弱点の概念図

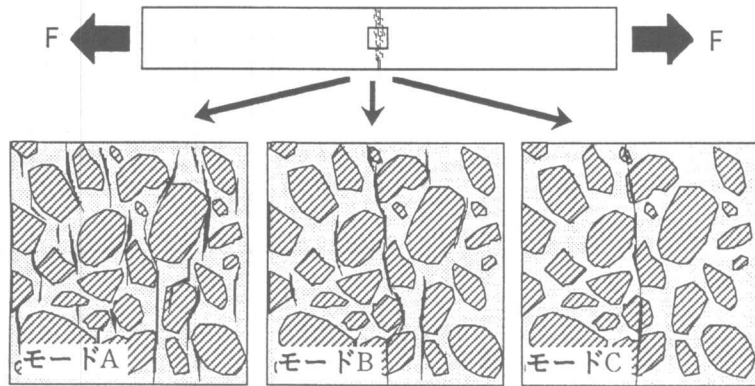


図3 ミクロ的なひび割れ伝播の概念図

4.セメント種類による破壊特性値の変化

4. 1 実験概要

表2に示すような配合で、セメントの種類、水セメント比を変えたコンクリート供試体を作成し、7、28、91日の材齢で曲げ試験を行った。表3は使用した材料の物性値である。図4のような切欠きを用い、変位制御で3等分点載荷し、荷重(P)-変位(δ)関係、及び変位(δ)-ひび割れ幅(w)関係を計測し、破壊エネルギー G_F 、引張軟化曲線などを求めた。なお、直径50mm、高さ100mmの円柱供試体を用いて圧縮強度も同時に求めた。

表2 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	目 標 値		セメントの 種類	分類	水セメント比 W / C (%)	細骨材率 s / a (%)	単位量(kg/m³)				
	スランプ (cm)	空気量 (%)					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤 (C×wt%)
13	8±1	3±0.5	早強	H55	55	51.5	172	312	900	888	0.6
				H45	45	49.5	171	381	838	896	
			普通	○55	55	51.5	172	313	900	888	0.8
				○45	45	49.5	172	382	838	896	
			ヒートライト	B55	55	51.5	173	315	900	888	1.2
				B45	45	49.5	173	385	838	896	

表3 材料の物性

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=11%、C ₃ S=65% 比表面積;4450cm ² /g
普通セメント (普通ポルトランドセメント)	N社製	3.16	C ₂ S=25%、C ₃ S=50% 比表面積;3210cm ² /g
ヒートライトセメント (低発熱ポルトランドセメント)	N社製	3.22	C ₂ S=59%、C ₃ S=23% 比表面積;3360cm ² /g
細骨材	豊田 山砂	2.51	粗粒率;F.M.=2.80 吸水率;1.469
粗骨材	春日井 採石	2.62	粗粒率;F.M.=6.62 吸水率;0.858
AE減水剤	T社製	—	ポリカルボン酸系

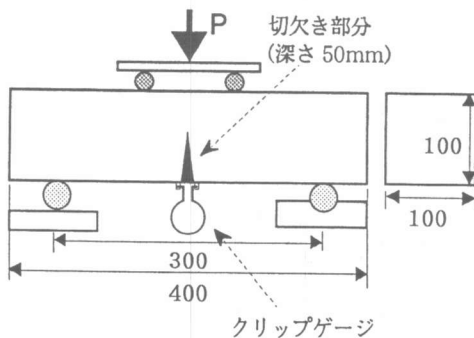


図4 実験装置例

4. 2 実験結果

式(1)に示すRILEMの方法[2]に準じて、荷重-変位曲線下の面積 W_0 から、供試体自重を補正し、破壊エネルギー G_F を求めた。なお、本実験では、実験設備の都合上、JCIの「コンクリート構造の破壊に関する共通解析及び実験」を参考にして、10x10x40cmの供試体寸法のものを用いた。図5、6に早強セメント、普通セメント、ビーライトセメントを用いたコンクリートについて、x軸に圧縮強度、y軸に破壊エネルギーを取ったグラフを示す。

$$G_F = \frac{W_0 + m \cdot \delta_0}{A_{lig}} \quad (\text{kgf/cm}) \quad (1)$$

W_0 ; 荷重-変位曲線下の面積

m ; 支点間のはりの重さであり、はりの重さに l/L (載荷スパンと供試体との長さとの比) をかけて計算する。

δ_0 ; はりの破断時の変位

A_{lig} ; はりの破断部分の面積であり、はり軸に垂直な平面に投影した破壊域の面積

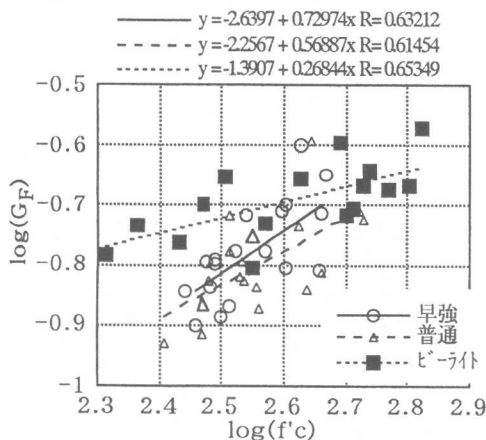


図5 $\log(G_F)$ - $\log(f'_c)$ 関係

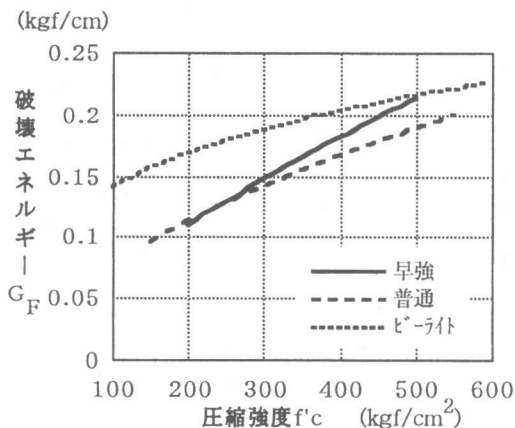


図6 近似曲線の G_F - f'_c 関係

4. 3 考察

図5、6より、ビーライトセメントを用いたコンクリートは早強セメントを用いたコンクリートよりも、材齢初期の低強度の時の破壊エネルギーが大きいことがわかる。このことは、図7の荷重-ひび割れ幅のグラフから、早強セメントの場合は強度上昇に従いほぼ相似な曲線を描くのに対して、ビーライトセメントは材齢7日のP-w曲線下の面積が大きくなっていることから裏付けられる。また、図8にビーライトセメントを用いたコンクリートは早強セメントのものよりも材齢初期の低強度時に、圧縮強度に比較して、破壊エネルギー、引張軟化特性との関連の深い曲げ最大荷重(曲げ強度)の割合が高くなっていることが示されている。

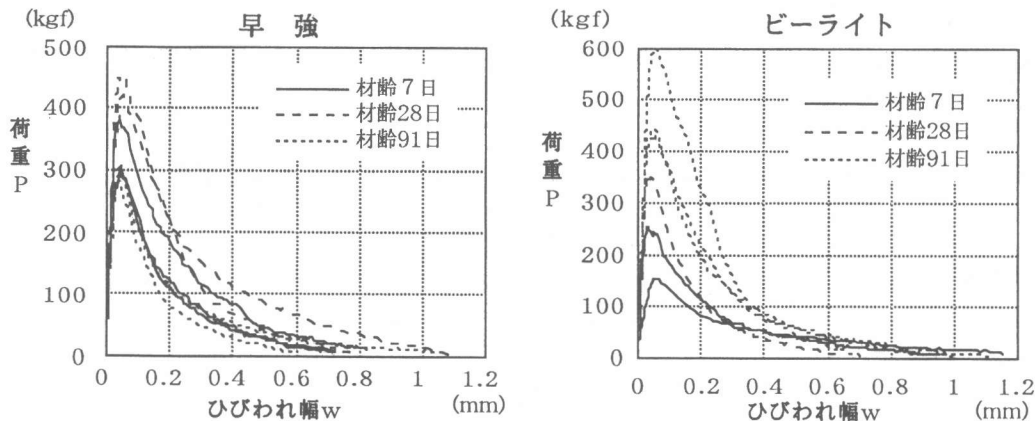


図7 早強セメントとビーライトセメントのP-w曲線

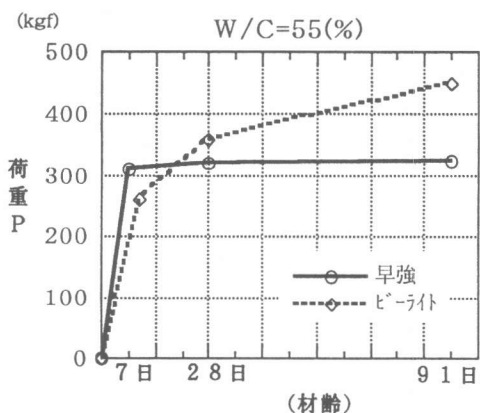
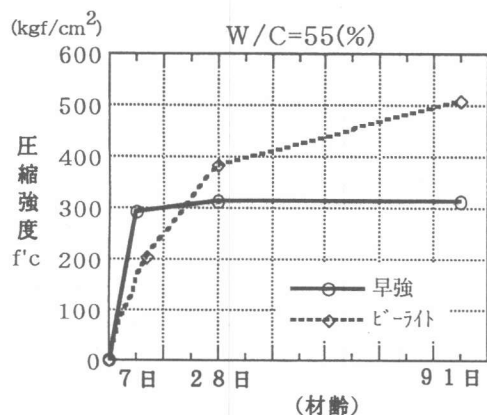
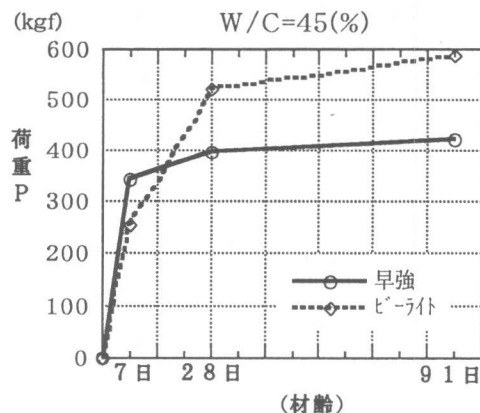
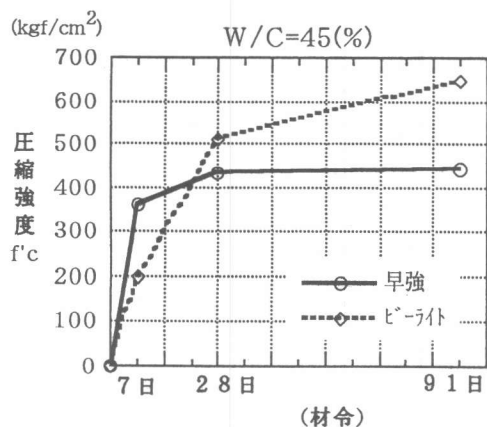


図8 早強セメントとビーライトセメントの圧縮強度及び曲げ最大荷重の経時変化

5. まとめ

- (1) 含有CaO量の多い早強セメントを用いたコンクリートでは、骨材とモルタルの界面に、CaOの水和物であるCa(OH)₂を多く含むポーラスで結合力の弱い遷移帯と呼ばれる領域が形成されやすい。
- (2) 破壊エネルギーの大小には、骨材界面とモルタルとの付着特性が関係しており、セメントの組成がその付着強度に大きく影響している。遷移帯が多く形成されるものほど、骨材とモルタルの界面の付着は弱い傾向がある。
- (3) ビーライトセメントを用いたコンクリートは、早強セメントを用いたセメントに比べて、材齢初期の低強度時に破壊エネルギーが大きくなる。

謝辞；本研究にあたり、愛知工業大学の森野奎二教授、日本セメント(株)の廣瀬 哲氏から多大な協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 羽原 俊祐：コンクリート構造とその物性、わかりやすいセメント科学、No.9、pp78～104、セメント協会、1993.3
- 2) コンクリートの破壊力学研究委員会：コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム、JCI、1990.3