

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

二羽淳一郎¹・松尾豊史²・岡本享久³・田邊忠顕⁴

¹正会員 工博 アジア工科大学院助教授 構造工学科 (G.P.O. Box 2754, Bangkok 10501, Thailand)

²正会員 工修 電力中央研究所 構造部建設材料グループ (〒270-11千葉県我孫子市我孫子1646)

³正会員 工博 日本セメント中央研究所セメントコンクリート研究部 (〒135 東京都江東区清澄1-2-23)

⁴正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (〒464 名古屋市千種区不老町)

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の種類の影響を、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。ピ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なるが、これは骨材界面に脆弱な遷移帯がほとんど存在しないことにより説明できると考えられる。一方、早強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、材齢初期の破壊エネルギーが小さくなる。これらの実験的な知見を説明するため、界面強度と破壊エネルギーの関係について考察を行い、現象を説明するための定性的な考え方を示した。

Key Words : transition zone, belite cement, high early cement, ordinary portland cement, fracture energy, tension softening curve, fracture mechanics

1. 序論

コンクリートの力学特性を破壊力学のパラメータにより表現していく研究が随所で進められている。これは最近の研究により、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が、コンクリート内部の微細ひび割れの発生、凝集ならびに進展過程により、説明できることが、広く認められるようになってきたためと考えられる。さらに、そのひび割れ進展過程をマクロ的にモデル化したパラメータであり、また同時にコンクリートの材料特性値とも考えることのできる破壊エネルギー G_F と引張軟化曲線を用いることにより、解析的にコンクリート構造体強度の寸法依存性を表現できることも、破壊力学的なアプローチが注目を集めてきている所以である。

破壊エネルギー G_F は、単位面積の、完全な、引張応力を全く伝達しないひび割れ面を形成するために要するエネルギーと定義されている。この定義により、破壊エネルギーは、マクロ的に捉えたひび割れの発生以後、言い換えれば引張強度到達以後、ひび割れ面に作用する引張応力とひび割れ幅のマクロ的な関係、すなわち引張軟化曲線によって囲まれる面

積として求められることになる。破壊エネルギーは、引張軟化曲線とともに、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。

一般には、破壊エネルギーはそれぞれのコンクリート固有の値、すなわち材料特性値として考えられており、各種の評価式が提案されている。ただし、現行の設計規準でコンクリートの破壊エネルギーを規定しているのはCEB-FIP Model Code 90¹⁾のみである。ここでは破壊エネルギーは、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(1)で与えられている。

$$G_F = G_{F0} \left(\frac{f_c'}{f_{c0}'} \right)^{0.7} \quad (1)$$

ただし、 G_F :破壊エネルギー (N/mm), 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 (N/mm²), f_{c0}' :10N/mm² なお、式(1)に取り入れられていない様々な要因の影響のため、式(1)による破壊エネルギーの予測精度が低いことも、MC 90には述べられている。

破壊エネルギーが材料特性値と考えられながら、

このような大きなバラツキを示す原因はどこにあるのであろうか。

篠原らは、広範な実験に基づいて、破壊エネルギーならびに引張軟化特性に及ぼす、切欠きはり試験体のノッチ深さ、載荷速度、コンクリートの粗骨材最大寸法、水セメント比、養生方法、ならびに材齢の影響を実験的に明らかにしている²⁾が、破壊エネルギーそのもののバラツキの大きさは、この実験的研究からも明らかとなっている。

また、野村らはコンクリートの内部構造にさかのぼって引張軟化特性について考察しているが、その中でセメントペースト硬化体の水和進行の程度が、コンクリートの引張軟化特性に影響を及ぼすことを指摘している³⁾。これらの研究は非常に示唆に富むものと言える。いずれにせよ、以上のことから類推されるのは、たとえ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、これを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したのでは、推定精度が低くなるということ、さらに破壊エネルギーに対して精度の高い予測を行うためには、セメント水和物レベルにさかのぼっての検討が必要であるということである。

これはコンクリート中の微細ひび割れが、骨材とモルタルとの界面の結合部分や、セメントペースト硬化体内部での弱点部等から発生していくことを考えれば、容易に予想できるところである。

しかしながら、現在までのところ、セメント水和物レベルにまでさかのぼって、コンクリートの破壊力学特性を論じた研究はほとんどない。著者らは、ピーライト系セメントを用いたコンクリートの力学特性について、破壊力学的な検討を試みたのであるが、その過程で、 C_2S 含有量の多いピーライト系セメントと C_3S 含有量の多い早強セメント、あるいは普通セメントというセメントの種類が硬化コンクリートの破壊力学特性に大きな影響を与えることを見出した⁴⁾。

本研究は、これまでに得た実験的な知見を基に、なぜセメントの種類が硬化コンクリートの破壊力学特性値に影響を与えるのかについて考察を行い、さらにモルタルならびにコンクリートを用いた実験結果に基づき、セメントの種類とコンクリートの破壊力学特性値との関係を明らかにしていくものである。

2. SEMによる硬化コンクリートの観察

セメントクリンカー鉱物の内、 C_3S と C_2S は水和して、けい酸カルシウム水和物(C-S-H)と水酸化



(a) 早強セメントを用いたコンクリート



(b) ピーライト系セメントを用いたコンクリート

写真-1 SEMによる骨材界面の観察

カルシウムを生成する。しかしながら、水酸化カルシウムの生成量は C_2S に比較して、 C_3S の方が多く、したがって、これを大量に含む早強セメントでは、 C_2S に富むピーライト系セメントに比べて、生成される水酸化カルシウム量が多いことになる。これらの水酸化カルシウムが、骨材とセメントペースト界面に析出した場合、いわゆる「遷移帯」を形成していく⁵⁾。水酸化カルシウムに富むこの遷移帯は、比較的、疎な組織であり、他のセメントペースト部分とは不連続である。また、遷移帯の厚さは、骨材が粗大化するほど、水セメント比が高くなるほど、単位水量が大きくなるほど、増加すると言われている⁵⁾。

以上の知見は、セメント化学分野における研究成果であるが、骨材とモルタルとの界面からの微細ひび割れの発生に着目する破壊力学の視点に立っても、無視できない情報である。すなわち、骨材界面の脆弱な薄膜層である遷移帯の生成量の少ないピーライト系セメントを用いたコンクリート⁶⁾は、相対的に遷移帯生成量の多い早強セメントを用いたコンクリートよりも、破壊力学特性に優れるという仮説が成り立つのである。

表-1 使用材料の物性

材料種別	出所	比重	その他
早強セメント	N社製	3.14	C ₂ S=9.3%, C ₃ S=65.2%, 比表面積=4450 cm ² /g
普通セメント	N社製	3.16	C ₂ S=28.7%, C ₃ S=45.5%, 比表面積=3210 cm ² /g
ビーライト系セメント	N社製	3.22	C ₂ S=58.6%, C ₃ S=23.0%, 比表面積=3360 cm ² /g
細骨材	豊田産山砂	2.51	FM=2.80, 吸水率=1.47%
粗骨材	春日井産碎石	2.62	FM=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

表-2 コンクリートの配合 (SEM観察)

骨材最大寸法 mm	セメント種別	W/C %	s/a %	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	AE剤 C×%
13	早強	45	49.5	171	381	838	896	0.6
13	ビーライト系	45	49.5	173	385	838	896	1.2

写真-1(a)(b)は、走査型電子顕微鏡 (SEM) による、硬化コンクリートの骨材界面の観察結果の一例である。(a)は早強セメントを用いたコンクリート、(b)はビーライト系セメントを用いたコンクリートである。いずれの場合も、W/C=45%である。実験に使用した材料の物性値を表-1に、コンクリートの配合を表-2に示す。

写真-1(a)において、骨材とモルタルの界面に観察される色の淡い部分(相対的に白い部分)が遷移帯(水酸化カルシウム層)である。早強セメントを用いたコンクリートでは、この存在が明確に認められるのに対して、写真-1(b)のビーライト系セメントを用いたコンクリートでは、これがほとんど認められない。これは、羽原⁵⁾、内川⁶⁾の研究成果とも一致している。

ここに示した写真-1(a)(b)は、SEMによる骨材界面の観測結果の一例であるが、先に述べたセメントの種類と遷移帯生成量の関係から考えても、ビーライト系セメントを用いたコンクリートでは、骨材界面の破壊力学特性が、早強セメントを用いたコンクリートよりも改善されているのではないかと考えられるのである。

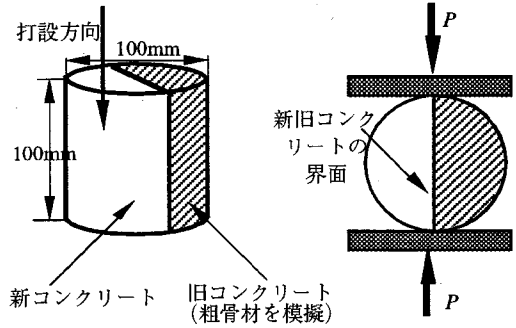


図-1 付着特性評価のための試験体と載荷方法

3. 割裂試験を用いた骨材界面の付着特性の評価

(1) 骨材界面の付着特性

骨材界面の付着特性には、そこでの遷移帯生成量が大きく関係すると考えられる。2.における考察によれば、ビーライト系セメントを用いたコンクリートの骨材界面の付着特性の方が、早強セメントを用いたコンクリートよりも優れていると予想されるが、このことを直接的に実証するには、骨材界面の付着強度そのものを調べればよい。

しかしながら、骨材界面の付着強度を評価する試験法は、現在までのところ確立されていない。著者らは、骨材界面の付着強度を測定するため、骨材とモルタルをシリアルに配置して意図的に付着させた供試体を作成し、直接引張試験を試みたのであるが、実験操作が困難で、しかもデータのバラツキが相当に大きかった。そこで、このような供試体を用いた直接引張試験は、骨材界面の付着強度の評価には不適當であると判断した。

試験操作が簡単で試験結果のバラツキが少ないこと、また測定に特殊な治具を要しないこと等を考えあわせ、直接引張試験に代わるものとして、以下に示すような、割裂試験法による界面の引張試験により、付着特性を評価することとした。

(2) 割裂試験による界面の付着特性評価

圧縮強度1000kgf/cm²クラスの高強度コンクリートで直径10cm、高さ10cmの円柱供試体を作成する。所定の高強度が得られた後、これをコンクリート切断機で半分に切断する。この高強度コンクリートは粗骨材を模したものである。図-1に示すように、切断された高強度コンクリートの半円柱体を型枠内にセットし、残り部分に、新コンクリートを打設する。このようにして円柱体の直径に沿った付着面を得る。この付着面は、切断機による切断面であるた

表-3 高強度コンクリート用使用材料の物性

材料種別	出所	比重
ビーライト系セメント	C社製	3.22
シリカフューム (SF)	E社製	2.21
細骨材	大井川産川砂	2.63
粗骨材	段戸山産碎石	2.61
高性能AE減水剤(SP)	T社製	-

表-4 高強度コンクリートの配合

骨材最大寸法 mm	セメント種別	W/(C+SF) %	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	SF	S	G	SP
15	ビーライト系	15	90	522	78	631	1164	18

表-5 コンクリートの配合 (付着特性評価用)

骨材最大寸法 mm	セメント種別	W/C %	s/a %	単位量 (kg/m ³)					AE剤 C×%
				W	C	S	G	AE剤 C×%	
13	早強	65	53.5	172	264	955	870	0.6	
		45	49.5	171	381	838	896		
13	ビーライト系	65	53.5	173	266	955	870	1.2	
		45	49.5	173	385	838	896		

め、骨材表面とは異なって、滑らかなものとなっている。また、この高強度コンクリートの切断面には骨材部とモルタル部が混在しており、粗骨材そのものでないことは明らかである。

しかしながら、ここでの実験の趣旨は、セメントの種類が、界面でのコンクリート付着特性にどのような変化を及ぼすかを評価することにある。高強度コンクリートを用いて模擬的な界面を作り出し、この界面の付着を意図的に破壊することにより、セメントの種類による付着特性変化の相対比較が可能であると考えたのである。

この付着面が上下方向となるように供試体を試験機に据え付け、割裂試験により、引張強度を測定した。そして、これにより界面の付着特性を評価することとした。

(3) 実験ならびに考察

付着特性評価のためのコンクリート (新コンク

表-6 付着特性に関する実験結果

セメント種別	W/C %	界面の引張強度 kgf/cm ²		コンクリートの圧縮強度 kgf/cm ²	
		材齢 7日	材齢 28日	材齢 7日	材齢 28日
早強セメント	65	6.9	12.8	235	263
	45	11.0	13.2	356	428
ビーライト系セメント	65	11.8	12.9	165	310
	45	12.7	13.1	196	506

界面の引張強度 (kgf/cm²)

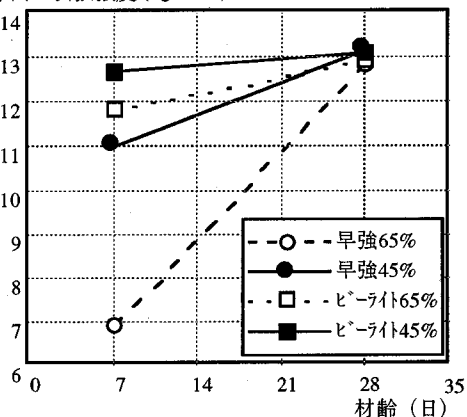


図-2 材齢に伴う界面の引張強度の変化

リート) に使用した材料の物性値は表-1に示した通りである。また、その配合を表-5に示した。一方、高強度コンクリート (旧コンクリート) 用使用材料の物性と配合をそれぞれ表-3、表-4に示した。

高強度コンクリートではさらにオートクレーブ養生を行った。試験時 (材齢4週以上) における高強度コンクリートの圧縮強度は平均で1930kgf/cm²であった。

付着特性評価のための供試体は、新コンクリート打設後、1日で脱型し、その後は試験前日まで、水中養生した。なお、実験の結果、割裂によるひび割れは、すべて新旧コンクリートの界面に発生することが確認された。

表-6および図-2に実験結果を示す。

材齢7日における実験結果から、ビーライト系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、界面の引張強度が高く、界面の付着特性が良好であることが認められた。これに対して早強セメントを用いたコンクリートでは、特に水セメント比65%の場合、界面の引張強度

はかなり小さいものとなっており、付着特性に劣ることを示している。材齢7日、水セメント比65%の早強セメントを用いたコンクリートの圧縮強度は、ピーライト系セメントを用いた対応するコンクリートよりも約40%大きいのであるが、界面の付着強度は、逆に約40%減となっているのである。なお、水セメント比45%の場合は、引張強度はあまりピーライト系とは異なるものの、わずかにこれを下回っている。

材齢28日になると、セメントの種類による界面の引張強度の差は、いずれの場合においてもほとんど見られなくなった。この時点では、ピーライト系セメントを用いたコンクリートの圧縮強度の方が、早強セメントを用いたコンクリートを上回っているのであるが、界面の引張強度は、これとは無関係にほぼ一定となっている。

以上の結果を総括すれば、ピーライト系セメントを用いたコンクリートと比較した場合、早強セメントを用いたコンクリートでは、特に水セメント比の大きい場合、材齢7日程度の初期材齢時において、骨材界面の付着特性に劣ると判断される。またこの付着特性が、経時変化していくことも明らかである。さらに、この付着特性変化のメカニズムは圧縮強度の発現とは無関係のようである。

セメント化学の分野における研究によれば、骨材界面の遷移帯の厚さは経時変化し、材齢7日で最大となり、それ以後は、徐々に減少していくと言われている^{5), 6)}。ただし、本試験における界面の付着特性の変化を、遷移帯の存在のみに帰着させて説明することは現状では困難である。しかしながら、早強セメントを用いたコンクリートならびにピーライト系セメントを用いたコンクリートにおいて、遷移帯を含む水和生成物の相違がこれらの界面の付着特性に大きく影響していることは明らかである。そして、遷移帯の存在はその中でも重要な部分を占めていると考えられるのである。

4. モルタル供試体を用いた破壊力学特性値の計測

(1) 実験の概要

遷移帯の生成厚さは骨材径の粗大化とともに増加していくと言われている。そこで、この点について検討するため、最大径の異なる細骨材を用いて供試体を作成し、硬化モルタルの破壊力学特性値を計測し、セメントの種類が破壊力学特性値に及ぼす影響について考察することとした。細骨材は、粒径によってふり分けして2種類用意した。便宜上、これを粗砂と細砂と呼ぶこととする(表-7参照)。

表-7 モルタル供試体の概要

セメント種別	早強セメント		ピーライト系セメント	
W/C(%)	50		50	
C:S	1:3		1:3	
細骨材の粒径(mm)	0.85 ~1.19 (細砂)	1.19 ~2.38 (粗砂)	0.85 ~1.19 (細砂)	1.19 ~2.38 (粗砂)

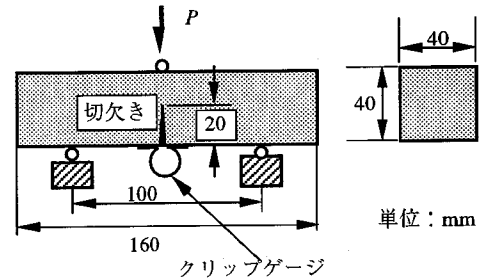


図-3 切欠きはりの三点曲げ試験(モルタル)

実験は、図-3に示す、切欠きはりの三点曲げ試験により行った。供試体の断面は4×4cm、長さは16cm、単純支持された荷重スパンは10cmである。スパン中央の荷重点直下には、ひび割れが局所化するよう、あらかじめ高さ2cmの切欠きを設けてある。切欠きは、荷重試験の直前に岩石用のダイヤモンドカッターを用いて設けたものである。

荷重-変位関係に加えて、ひび割れ幅の開口変位も測定した。なお、試験時の材齢はいずれも28日である。

(2) 実験結果

RILEMの方法に準じ、式(2)により、破壊エネルギー G_F を求める。

$$G_F = \frac{W_o + m \cdot \delta_o}{A_{lig}} \quad (2)$$

ただし、 W_o : 荷重-変位曲線下の面積

m : 支点間の供試体重量

δ_o : はり破断時の変位

A_{lig} : 切欠き上のはりの破断部分面積(リガメント面積)ではり軸に垂直な平面に投影した面積

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。したがって、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

表-8 材齢28日のモルタルの破壊エネルギーと A_0

セメント種類	骨材種類	圧縮強度 kgf/cm ²	G_F kgf/cm	定数 A_0 $\times 10^{-3}$	
早強セメント	細砂	447	0.0562	0.785	平均 0.685
	粗砂	458	0.0426	0.580	
ビーライト系セメント	細砂	216	0.0280	0.650	平均 0.720
	粗砂	249	0.0375	0.790	

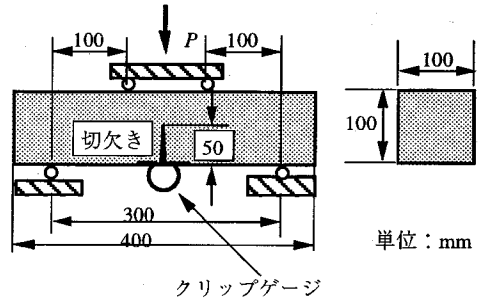


図-5 切欠きはりの3等分点載荷試験 (コンクリート)

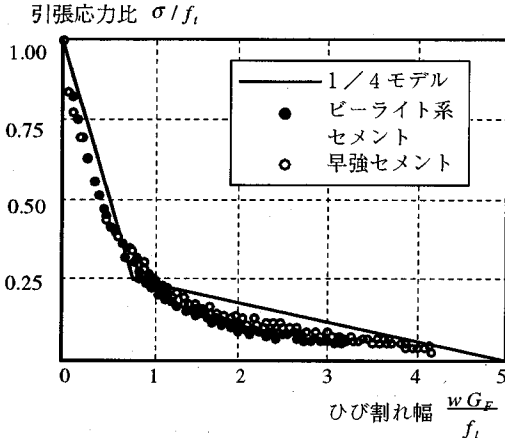


図-4 モルタルの引張軟化曲線 (細砂)

ないと考えられる。そこで、CEB-FIP Model Code 90のコンクリートの破壊エネルギーの評価式(式(1))を参考にして、実測されたモルタルの破壊エネルギーをモルタルの圧縮強度の0.7乗で補正した定数 A_0 (式(3))についても検討してみることにした。

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

さらに、内田らの提案した新J積分法を用いれば、計測された荷重-変位関係、および荷重-ひび割れ幅関係より、引張軟化曲線を求めることができる。硬化モルタルについて、得られた実験結果を表-8ならびに図-4に示す。

(3) 破壊力学特性値に関する考察

表-8によれば、材齢28日における破壊エネルギーの値は、早強セメントを用いたモルタルの方が、ビーライト系セメントを用いたモルタルよりも大きかった。ただし、細骨材の粒径と破壊エネルギーの間には明確な関係は認められなかった。

ここで、ビーライト系セメントを用いたモルタルの強度発現の程度を考慮し、式(3)により圧縮強度

による補正を行い、定数 A_0 による比較を行ってみた。

これによれば、表-8に示す通り、粗砂の場合にはビーライト系セメントを用いたモルタルの A_0 が大きく、細砂の場合は少し小さくなる程度であった。また、平均的には、ビーライト系セメントを用いたモルタルの方が大きかった。

すなわち、ビーライト系セメントを用いたモルタルの破壊エネルギーは、強度発現の影響を考慮し、圧縮強度による補正を行えば、早強セメントを用いたモルタルの場合と同程度以上となるのである。

この結果は、2.で述べた遷移帯の存在と破壊エネルギーに関する定性的な関係と同様の傾向であると言える。ただし、前述の通り、細骨材の粒径と遷移帯の影響については、明確な関係は得られず、この程度の粒径の差では、遷移帯の存在に及ぼす影響は比較的小さいのではないかと考えられる。

なお、図-4は細砂を用いたモルタルの引張軟化曲線の実測結果を1/4モデルとともに示したものである。モルタルの引張軟化曲線は、セメントの種類に関係なく、1/4モデルと良い一致を示していることがわかる。

なお、折れ曲がり点以降、1/4モデルは実験結果を多少大きめに評価しているが、これは、実験において、想定した破壊断面位置(=切欠き断面位置)以外での微細ひび割れの発生によるエネルギー吸収があったためと考えられる。しかしながら、その相違はわずかであって、1/4モデルは、コンクリート同様、モルタルの引張軟化曲線としても十分に適用可能であると判断される。

5. コンクリート供試体による破壊エネルギーの計測

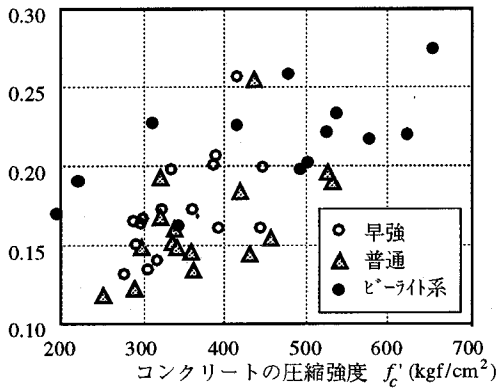
(1) 実験の概要

モルタルの場合には、圧縮強度による補正を行うことにより、セメントの種類が破壊エネルギーに及ぼす影響を確認することができた。ここでは、モルタ

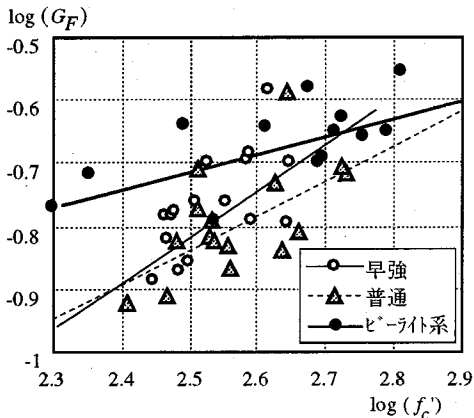
表-9 コンクリートの配合

骨材 最大寸法 mm	セメント 種別	W/C %	s/a %	単用量(kg/m ³)				AE剤 C×%
				W	C	S	G	
13	早強	55	51.5	172	312	900	888	1.2
		45	49.5	171	381	838	896	
13	普通	55	51.5	172	313	900	888	0.8
		45	49.5	172	382	838	896	
13	ビー ライト系	55	51.5	173	315	955	888	0.6
		45	49.5	173	385	838	896	

破壊エネルギー G_F (kgf/cm)



(a) $G_F - f'_c$ 関係



(b) $\log(G_F) - \log(f'_c)$ 関係

図-6 圧縮強度と破壊エネルギーの関係

ルに続いて、硬化コンクリートの破壊エネルギーを計測し、セメントの種類がこれに及ぼす影響を実験的に明らかにすることとした。実験は図-5に示す、切欠きはりの3等分点曲げ試験により行った。

供試体の断面は、10×10cm、長さは40cm、載荷スパンは30cmである。載荷点直下にはコンクリート用カッターにより、高さ5cmの切欠きを設けた。

表-9に示す配合で、セメントの種類(早強、普通、ビーライト系)、水セメント比を変化させたコンクリート供試体を作成し、材齢7日、28日、91日で曲げ試験を行い、荷重-変位関係、荷重-ひび割れ幅関係を計測した。なお、コンクリートの使用材料は表-1に示すものと同一である。また粗骨材の最大寸法は13mmですべて一定である。

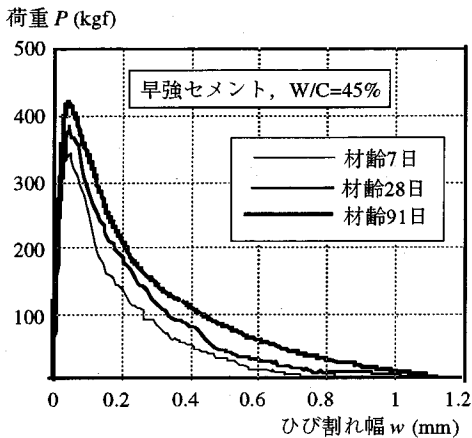
(2) 実験結果

図-6(a)(b)は計測された破壊エネルギーとコンクリートの圧縮強度の関係を示したものであり、(a)は通常表示、(b)は両対数表示である。コンクリートの破壊エネルギーがコンクリートの圧縮強度の関数として表され、CEB-FIP Model Code 90のように、例えば指数関数で表示できるものとすれば、両対数表示された場合、各セメントを用いて作成されたコンクリートに対する回帰直線の勾配は一致するはずである。ところが、図-6(b)に示された実験結果と回帰直線を見れば、普通セメント、早強セメントと比較して、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に対する回帰直線の勾配は緩やかであることがわかる。

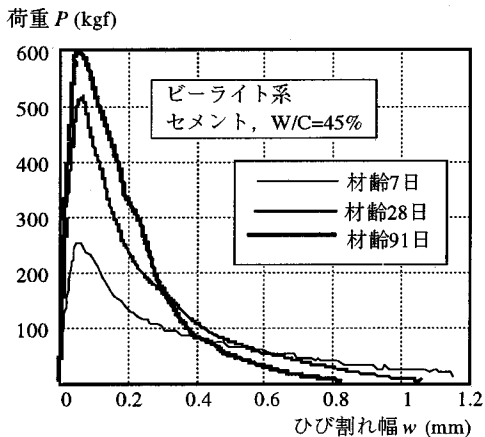
図-6(b)に示されるように、材齢の進行に伴う圧縮強度の発現により、セメントの種類がコンクリートの破壊エネルギーの大きさに及ぼす影響には、次第に違いが認められなくなっていく。しかしながら、材齢初期の低強度時において、ビーライト系セメントを用いたコンクリートの破壊エネルギーは、早強セメントあるいは普通セメントを用いたコンクリートよりも明らかに大きいのである。

なお、回帰直線の勾配が緩やかであることからわかるように、ビーライト系セメントを用いたコンクリートの、圧縮強度に伴う破壊エネルギーの増加は、材齢の進行とともに次第に小さくなる傾向にある。ただし、ビーライト系セメントは長期の強度発現性に優れているので、他のセメントを用いた場合よりも、破壊エネルギーは常に大きい傾向にある。

図-7(a)(b)は、切欠きはりの曲げ試験から得られた荷重-ひび割れ幅関係である。(a)に示す、早強セメントを用いたコンクリートの場合、荷重-ひび割れ幅関係は、材齢とともに相似的に拡大していく様子が認められる。一方、(b)のビーライト系セメントを用いたコンクリートの場合、材齢初期の曲線のテール部がひび割れ幅の増加にもかかわらず、あまり急激に減少せず、長期材齢の曲線と交差しており、破壊エネルギーが大きいことを表している。



(a) 早強セメントを用いたコンクリートはりの荷重-ひび割れ幅関係の経時変化



(b) ビーライト系セメントを用いたコンクリートはりの荷重-ひび割れ幅関係の経時変化

図-7 実測された引張軟化曲線

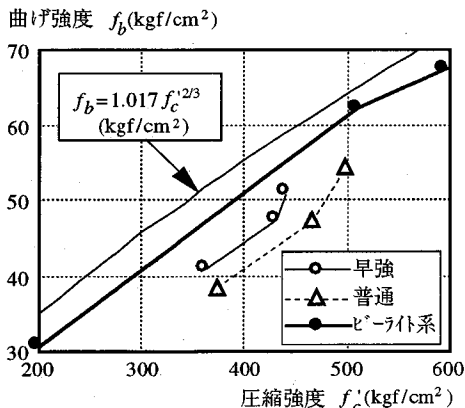


図-8 圧縮強度と曲げ強度との関係

このように、材齢初期での破壊エネルギーの大きいことが、ビーライト系セメントを用いたコンクリートの特徴である。

(3) コンクリートの曲げ強度

コンクリートの破壊エネルギーが大きくなるということは、引張軟化特性の影響を受ける曲げ強度、あるいは、鉄筋コンクリート部材としての斜め引張破壊強度が高くなることを意味している。

図-8はW/C=0.45の場合の各セメントを用いたコンクリートの圧縮強度と曲げ強度の関係を示したものである。図中には参考のため、 $f_b = 1.017 f_c'^{2/3}$ として求めた、曲げ強度の予測値も示してある。

予想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、他のセメントを用いたコンクリートよりも、同一の圧縮強度に対して、常に大きくなっており、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大きさを裏付けている。また、これが最も予測式に近い曲げ強度を示している。

6. 界面強度と破壊エネルギーに関する考察

コンクリートの破壊エネルギーの大小は、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他に、骨材とモルタルとの界面の付着特性にも影響されることが、セメントの種類を変化させた実験の結果、明らかとなった。ここでは、この界面の強度とコンクリートの破壊エネルギーの関係について考察する。

通常の場合、コンクリートの微細ひび割れは強度的な弱点部である骨材とモルタルの界面、あるいはモルタル内部の欠陥部等から発生していく。骨材界面に発生するひび割れは、一般にボンドひび割れと呼ばれている。これらの微細ひび割れは、成長してマトリクスひび割れを形成し、さらに伝播していく。この過程で、マトリクスひび割れが骨材と交差すると、その際の条件に応じて、ひび割れが骨材を迂回するか、貫通するかが決まる。

ここで、骨材界面の強度は、コンクリート自体の強度に加えて、界面に析出する遷移帯の生成量に関係すると仮定する。一方、モルタル部の強度には遷移帯生成量の影響は小さいと仮定する。これにさらに骨材自体の強度を加え、コンクリートの水セメント比に対して概念的に示したのが、図-9である。

図-9において、領域Aはモルタル部の強度に支配される領域、Bは界面強度が支配的な領域、Cは骨材強度が支配的な領域を示している。強度的には、Aが最も弱く、B、Cの順である。しかしながら、領

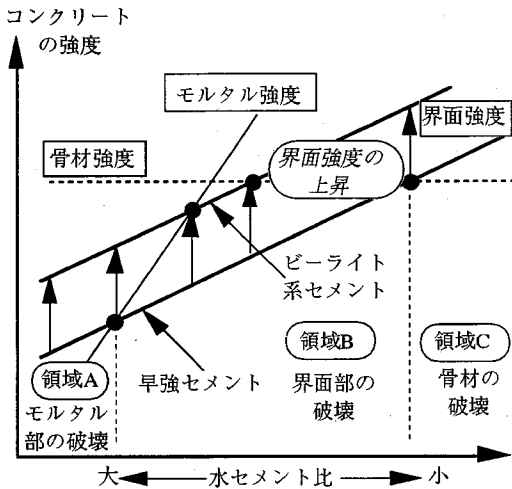


図-9 界面強度と破壊モードとの関係

領域Aでは、ひび割れがモルタル部に多数発生し、さらにこれらのひび割れは骨材を迂回していくので、コンクリート単位体積当たりに吸収される破壊エネルギーは大きく、またこの領域が低強度であることを考えると、強度当たりの破壊エネルギーは相対的にさらに大きくなる。

逆に領域Cでは、ひび割れが分散せず局所化し、しかも形状的には骨材を貫通した直線型のひび割れとなるので、吸収される破壊エネルギーは小さくなり、さらにこの領域が高強度域であることにより、強度当たりの破壊エネルギーは小さくなる。領域Bはこの中間である。結局、強度当たりの破壊エネルギーはAが最も大きく、以下、B、Cの順となると考えられる。

ビーライト系セメントを用いたコンクリートでは、骨材界面での遷移帯生成量のごくわずかであり、したがって界面強度は高いと考えられる。このため、図-9に示されるように、界面強度線が上昇して領域Bの範囲が狭まり、特に材齢初期の低強度時の挙動は領域Aに支配されることになる。この結果、強度当たりの破壊エネルギーは大きくなると予測できる。

逆に、早強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、界面強度が低下するので、界面強度線が低下して、領域Bが拡大し、これに支配される挙動となる。結果として破壊エネルギーは、ビーライト系と比較して、相対的に小さくなる。

このように、遷移帯の存在に影響される骨材の界面強度の変化と、その影響の少ないモルタル部の強度の両者を考えあわせることにより、実験的に観測された材齢初期における、セメントの種類とコンクリートの破壊エネルギーの関係を説明することがで

きるのである。

7. 結論

本研究は、セメントの種類とコンクリートの破壊力学特性値との関係を、骨材界面とモルタルとの付着特性に着目して、検討したものである。本研究により得られた結論は以下の通りである。

(1) C_3S を多く含む早強セメントを用いたコンクリートでは、骨材界面に遷移帯と呼ばれるポーラスで結合力の弱い領域が存在する。このことを電子顕微鏡観察によって確認した。さらに、骨材とモルタルの界面の付着強度が、 C_2S を多く含むビーライト系セメントを用いたコンクリートで高く、一方 C_3S を多く含む早強セメントを用いたコンクリートで弱くなることを割裂試験により実証した。

(2) ビーライト系セメントを用いたモルタルの材齢28日での破壊エネルギーは、圧縮強度による補正を行えば、早強セメントを用いたモルタルと同程度以上となる。

(3) 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は、早強セメントを用いたコンクリートに比べて、低強度時に特に大きくなる傾向がある。材齢の進行に伴う強度発現にしたがって、圧縮強度に伴う破壊エネルギーの増加はむしろ減少していく傾向にあるが、ビーライト系セメントを用いたコンクリートでは長期の強度発現性に優れるので、絶対的な破壊エネルギーは常に早強セメントを用いたコンクリートの破壊エネルギーを上回る傾向にある。

(4) ビーライト系セメントを用いたコンクリートでは、骨材界面に遷移帯がほとんど生成せず、したがって界面強度が大きくなる。このため、骨材貫通型の局所化したひび割れによる脆性的な破壊が起きやすいとも考えられるが、材齢初期の低強度時には、このような脆性的な破壊よりもむしろモルタル部そのものの破壊が支配的であって、界面での付着特性が強いほど、モルタル部の破壊が起こりやすくなる。このモルタル破壊の場合には、ひび割れが分散し、コンクリート単位体積当たりに吸収される破壊エネルギーが増加していくと考えられる。

(5) 一方、早強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、界面強度が低下し、界面破壊が先行すると考えられる。モルタル破壊に比較して、ひび割れが界面に集中するので、吸収される破壊エネルギーも減少していく。この考え方により、材齢初期の低強度時に、早強セメントを用いたコンクリートよりも、ビーライト系セメント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るこ

とが説明できる。

謝辞：本研究にあたり、愛知工業大学工学部土木工学科・森野奎二教授ならびに日本セメント（株）中央研究所セメントコンクリート研究部・廣瀬 哲氏から多大の協力を受けました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) CEB: CEB-FIP Model Code 1990, *Bulletin d'Information*, No. 213/214, 437 pp., 1993.
- 2) 篠原保二, 安部武雄, 古村福次郎: ノッチ深さ, 載荷速度, 骨材寸法, 水セメント比, 載荷法, 養生および材令がコンクリート曲げ試験体の引張軟化特性に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文報告集, 第442号, pp. 13-22, 1992.12.
- 3) 野村希晶, 三橋博三, 加藤敏史, 和泉正哲: コンクリートの内部構造と引張軟化特性, 材料, 第40巻, 第456号, pp. 15-21, 1991.9.
- 4) 松尾, 二羽, 岡本, 田邊: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 2, pp. 1311-1316 1995.6.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳 治: 曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測, 土木学会論文集, No. 426, V-14, pp. 203-212, 1991.2.

(1995.10.30受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN TYPE OF CEMENTS AND FRACTURE PROPERTIES OF CONCRETE

Junichiro NIWA, Toyofumi MATSUO, Takahisa OKAMOTO and Tada-aki TANABE

The influence of type of cements on fracture properties of concrete has been investigated experimentally in relation to transition zone on aggregate surface. Even in early ages, concrete in which belite cement is used can exhibit relatively high fracture energy compared with its low strength developed. This behavior can be explained by the fact that transition zone rarely exists on aggregate surface in this concrete. On the other hand, concrete in which high-early strength cement is used shows smaller fracture energy because of the existence of transition zone. Based on the relationship between surface strength and fracture energy, this phenomenon has been explained qualitatively.