

論文

[1080] 高強度コンクリートの破壊靱性に及ぼすポリマー混入の影響

正会員 橋高義典 (宇都宮大学建設学科)

正会員 上村克郎 (宇都宮大学建設学科)

正会員 ○中村成春 (宇都宮大学大学院)

小野正樹 (宇都宮大学大学院)

1. はじめに

コンクリート構造物の高強度化は、断面寸法を小さくするばかりでなく、自重の軽減にもつながり、構造物の合理的設計においてその効果は極めて大きい[1]。しかし、圧縮強度の増大に伴いコンクリートの破壊は、脆性的な傾向を示すことが指摘されており[2][3]、強度の増加に加えて靱性の改善も大きな課題となっている。コンクリートの高靱性化のために繊維補強コンクリートあるいは、コンファインドコンクリート等の研究が多くなされているが、コンクリート素材自体の靱性の改善に関する研究例は少ない。近年、新素材を用いたセメント複合材料として、超微粒子ポリマーを混入したポリマーセメントコンクリートの適用性が検討されている[4]。モルタルマトリックス中にポリマー微粒子を混入することにより、セメント粒子及び骨材がポリマー微粒子により架橋化されマトリックスの結合力と伸び能力が増加することが期待できる[5][6]。このことは、高強度コンクリートの脆性化の改善にも応用できると思われるが、高強度域のコンクリートにポリマーディスパージョンを混入した研究例は少なく、詳細な検討はなされていない。

本研究は、高強度コンクリートの強度性状および破壊靱性に及ぼすポリマー混入ならびに粗骨材種類の影響について、破壊力学手法を用い実験検討することを目的とする。

2. 破壊靱性の評価方法

コンクリートの靱性評価を行うためには、安定した荷重-変位曲線から破壊時までの吸収エネルギーを精度よく求める必要があり、近年そのコンクリート工学への適用が検討されている破壊力学手法に着目し、モードⅠの破壊靱性試験により靱性評価を行うこととした。すなわち、中央に切り欠きを有するコンクリート試験体の3点曲げ試験を行い、荷重-変位曲線を求め曲げ強度及び破壊靱性値を求めた。破壊靱性値は、荷重-変位曲線で囲まれた面積を破壊面の投影面積で除した破壊エネルギー G_F [7]とした。同時に切り欠き先端部の開口変位を計測し、新J積分法[8]による引張軟化曲線を推定し、変形能を評価した。通常、引張軟化曲線を求める場合、最大引張強度は割裂強度あるいは近似法によるが、ここでは曲げ試験体の引張強度に近似させるために、曲げ試験時の最大曲げ強度から換算式[9]により算出した。RILEMが提唱する破壊エネルギー G_F (kgf/cm)[7]、切り欠き試験体での最大曲げ強度 f_b (kgf/cm²)[10]、最大引張強度 f_t (kgf/cm²)の換算式[9]は、下式のとおりである。

$$G_F = (W_0 + mg \cdot \delta_0) / A_{11g} \quad (1)$$

$$f_b = 1.5 \cdot l \cdot (F_{max} + mg/2) / (A_{11g} \cdot h) \quad (2)$$

$$f_t = 0.514 \cdot f_b \quad (3)$$

ここに、 W_0 : 荷重-変位下の面積(kgf・cm) mg : 試験体自重(kgf) δ_0 : 破断垂直変位(cm)

A_{11g} : リガメント面積(cm²) l : スパン(cm) F_{max} : 最大荷重(kgf) h : リガメント長さ(cm)

3. 実験概要

3.1 実験条件

実験は、ペーストマトリックス中の単位セメント容積を一定とし、ペースト容積に対するポリマー粒子の容積比%（以下、ポリマー容積比、 P_v と呼ぶ）を段階的に変化させ、2シリーズに分けて実施した。すなわち、シリーズIはコンクリートの強度性状の影響を検討するためにポリマー無混入の水結合材比を25、35、50%の3条件とし、シリーズIIは高強度域の粗骨材の影響を検討するために水結合材比25%の条件において粗骨材を川砂利、石英片岩、硬質砂岩碎石（以下、各K、H、Sと呼ぶ）の3種類とした。実験の要因と水準を表-1に示す。

3.2 ポリマーディスパージョンの種類

実験に使用したポリマーディスパージョンは、特にコンクリートの強度増加に有効と思われるセメントとの混和性が良好な低粘度で微粒子系のアクリル系共重合樹脂水性エマルジョンを用いた。その性質を表-2に示す。

3.3 コンクリートの種類

セメントには、普通ポルトランドセメントを用いた。水結合材比25%の条件では、セメント重量の10%をシリカフェーム（マイクロシリカ）により置換した。水結合材比25%及び35%では、高性能減水剤（アニオン型特殊活性剤、WH2000）を使用し、添加量はポリマー無混入でのスランプが15~25cmになるように調整した。粗骨材の絶対容積は、すべての調合条件で 400l/m^3 一定とした。使用した骨材の性質を表-3に、コンクリートの調合条件を表-4に示す。

3.4 曲げ試験体の概要

3点曲げ試験に用いるコンクリートの試験体の寸法は $100 \times 100 \times 450\text{mm}$ 、リガメント長さは試験体せいの1/2の50mmとし、試験体総数は各条件について4体とした。試験体の概要を図-1に示す。試験体は鋼製型枠に打設後2日で脱型、以降 20°C で水中養生とした。材令4週目に曲げ試験を行うこととし、試験体の切り欠きは、試験直前にコンクリートカッターで作製した。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準	
実験シリーズ	I	II
水結合材比 W/B %	25, 35, 50	25
粗骨材の種類	川砂利(K)	川砂利(K), 石英片岩(H) 硬質砂岩碎石(S)
ペースト中のポリマー容積比 P_v %	K25 : 0~12.5 K35, K50 : 0~25.0	K25, H25 : 0~10.0~12.5 S25 : 0~7.5

* : 25%のみシリカフェーム(SF)10%置換, $B=C+SF$

表-2 ポリマーディスパージョンの性質

ポリマーの種類	比重	濃度 %	粒子径 μm	粘度 cP	pH 20°C
アクリル系共重合樹脂	1.04	50	約 0.1	200 以下	7.5~9.0

表-3 骨材の性質

種類	記号	最大寸法 mm	比重		吸水率 %	単重 kg/l	粗粒率 F.M.
			表乾	純乾			
川砂	-	5	2.63	2.58	2.13	1.62	2.84
川砂利	K	20	2.60	2.59	0.41	1.69	6.67
石英片岩	H	20	2.55	2.53	0.47	1.78	6.75
硬質砂岩碎石	S	20	2.62	2.59	1.13	1.53	6.70

表-4 コンクリートの調合条件

記号	P_v %	P/B %	W/B %	SP Bx %	単位量 kg/m^3						Air 実測 %
					W	C	S	G	SF	P	
K25	0	0	25	3.4	129					0	3.3
	2.5	1.5	24		122					8	1.9
	5.0	3.0	22		114	461	782	1030	51	16	2.1
	7.5	4.6	21		107					23	2.5
	10.0	6.1	19		99					31	2.4
	12.5	7.6	18		92					39	2.7
H25	0	0	25	3.4	129					0	3.2
	2.5	1.5	24		121					8	1.9
	5.0	3.0	22		114	463	795	1012	51	16	3.2
	7.5	4.6	21		106					23	2.2
	10.0	6.1	19		99					31	2.1
S25	0	0	25	3.6	129					0	3.9
	2.5	1.5	24		121					8	2.2
	5.0	3.0	22		114	463	795	1048	51	16	2.3
	7.5	4.6	21		106					23	2.1
K35	0	0	35	0.5	157					0	2.1
	5.0	3.5	32		142					16	2.1
	10.0	6.9	28		127	450	795	1040	0	31	2.0
	15.0	10.4	25		112					47	1.8
	20.0	13.9	22		97					62	1.9
	25.0	17.4	18		82					78	2.4
K50	0	0	50	0	183					0	2.6
	5.0	4.3	46		168					16	2.1
	10.0	8.5	42		153	367	795	1040	0	31	1.2
	15.0	12.8	38		138					47	0.7
	20.0	17.0	34		123					62	1.2
	25.0	21.3	30		106					78	1.6

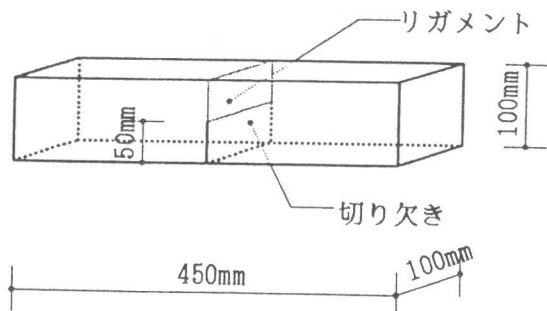


図-1 試験体の概要

3.5 曲げ試験の概要

油圧サーボ型載荷試験機に試験体を図-2のように取り付け、試験体中央に一定速度6~8 kgf/secで載荷した。垂直荷重は500g感度のロードセルにて検出し、載荷点下部の垂直変位は、治具に取り付けた1 μ m感度の変位計により2点測定し、いずれもデータアナライザーに入力し0.1secの間隔で記録した。同時にリガメント端部(試験体中央)の開口変位もクリップゲージにて計測した。ひびわれ破断時の垂直変位 δ と開口変位COD₀は、アナライザーに記録したデータを分析し変位が急激に増加し始めた点とした。また、加圧面を研磨した10 ϕ ×20cmの円柱供試体を用い、各関連JIS規格に従い材令4週目に圧縮強度試験と静弾性係数の測定を行った。

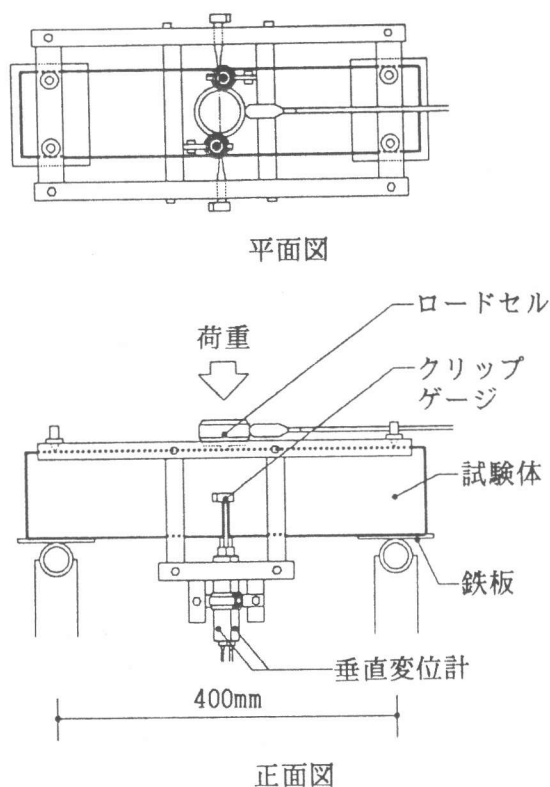


図-2 曲げ試験概要

4. 実験結果及び考察

4.1 フレッシュコンクリート

図-3にフレッシュコンクリートのスランブの測定結果を示す。K50では、ポリマーディスバージョンに含まれる界面活性剤の分散作用からP_vが増加するほどスランブは大きくなる。しかし、K35はP_vが15%でピークとなり、K25、S25、H25ではP_vの増加と共に小さくなる。これは、低水セメント比になるほど、単位水量が減少するためであり、ポリマー粒子の混入量が増すほどさらに単位水量が減少し、分散効果が低下するためと思われる。

4.2 圧縮強度に関する結果及び考察

図-4に圧縮強度とP_vとの関係を示す。K35、K50では、P_vが5%程度で圧縮強度にピークがみられ、その後低下している。これは、ポリマー粒子混入により相対的に水セメント比が低下しペーストマトリックスの強度が増加するが、過混入ではポリマー自体の低剛性の影響、および、単位水量の減少によるセメントの水和率の低下などのために強度が低下するものと考えられる。K25、S25では、P_vの増加と共に圧縮強度は低下しているが、これはセメントの水和率の低下の影響の方が大きいと思われる。

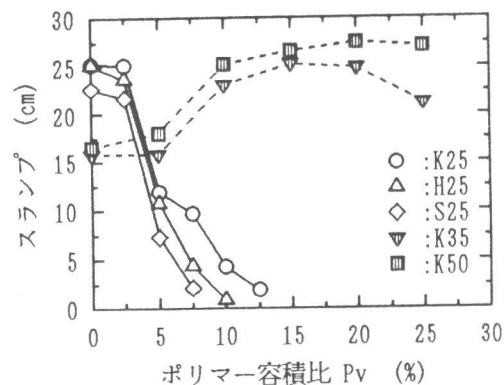


図-3 スランブとポリマー容積比との関係

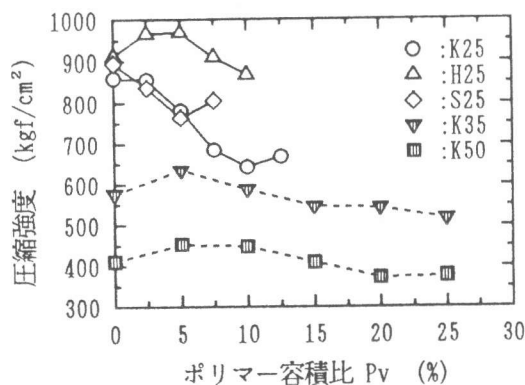


図-4 圧縮強度とポリマー容積比との関係

H25 にはピークがみられるが、この理由は、粗骨材自体の強度が高いためと思われる。

4.3 静弾性係数に関する結果及び考察

図-5 に静弾性係数と P_v との関係を示す。K50 では P_v が15%でピークがあるがそれ以外は P_v の増加により静弾性係数は低下傾向を示す。これは、 P_v 混入量が増すとポリマー粒子の低剛性の影響を受け易くなるためと思われる。

4.4 曲げ試験結果

図-6 に曲げ試験で得られた荷重-変位曲線の測定例を示す。図-6 a に $P_v = 0\%$ における各種コンクリートの場合を示し、図-6 b に K25 における各 P_v の場合について示した。荷重-変位曲線は破断時まで安定した曲線が得られた。図-6 a より低水セメント比の試験体ほど最大耐力は増加するが、最大荷重後の減少度が大きくなる傾向にあり、荷重-変位曲線で囲まれる面積は必ずしも増大していない。図-6 b より K25 では P_v の増加と共に初期剛性は低下する傾向にあるが、適度なポリマー混入により荷重-変位曲線で囲まれる面積は増大する。

図-7 に新J積分法ならびに引張強度換算による引張軟化曲線の推定例を示す。本法により比較的なめらかな曲線が得られるといえる。図-7 a より高強度域の軟化特性がよく現れているのがわかる。すなわち、引張強度が増大しても軟化域は増大せず、靱性能は減少する。図-7 b より P_v の増加と共に引張軟化特性は変化し、適度なポリマー混入により軟化曲線で囲まれる面積は増加し、靱性能は増加する。

4.5 曲げ強度に関する考察

図-8 に曲げ強度と P_v との関係を示す。K35、K50 ではポリマー混入量の増加に伴い曲げ強度はやや増加していく。これはポリマー混入によりセメント粒子と骨材間がポリマー粒子により架橋化され、両者の結合力が増加し[4]引張強度が増加したためと考えられる。25%シリーズでは石英片岩(H)が増加傾向にあるが、川砂利(K)は減少傾向にある。すなわち、低水セメント比では、粗骨材の強度が大きい場合ほど、

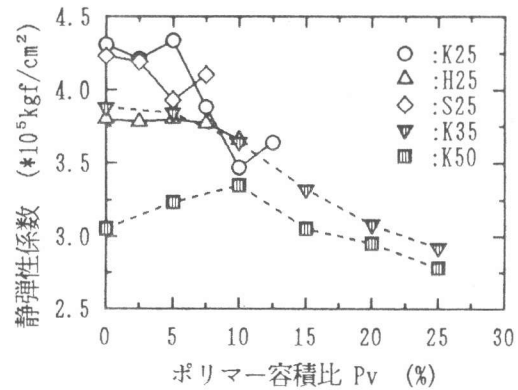


図-5 静弾性係数とポリマー容積比との関係

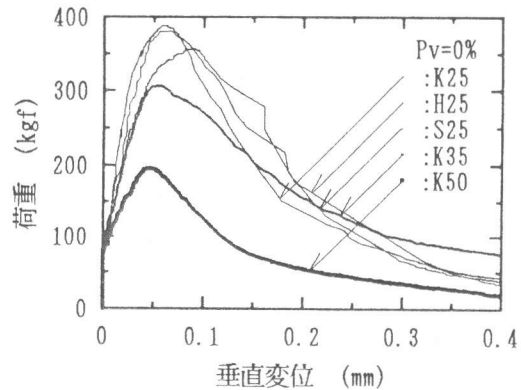


図-6a 各種コンクリートの曲げ試験結果

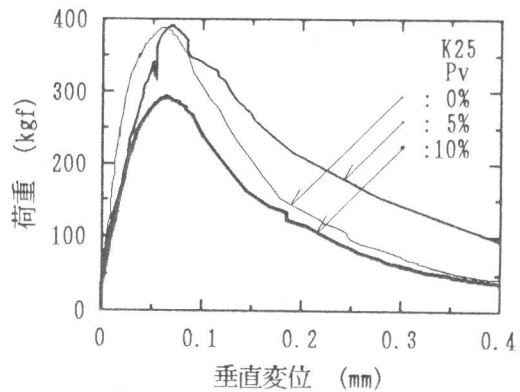


図-6b 各ポリマー容積比の曲げ試験結果

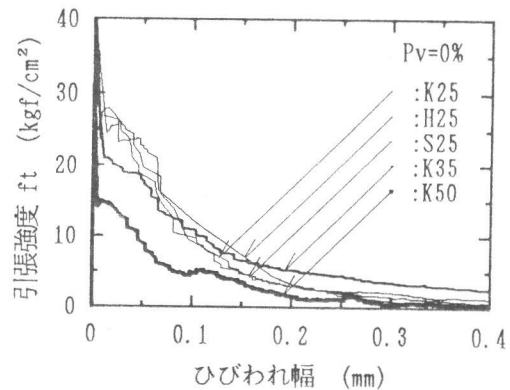


図-7a 各種コンクリートの引張軟化曲線

ポリマー粒子の効果が発揮され易いものと思われる。この理由は、粗骨材強度が低い場合には、ペーストマトリックスの強度の増大に伴い、破壊モードが骨材界面の付着破壊から骨材を貫通するモードとなり、コンクリート強度が骨材強度に支配され易くなるのに対し、粗骨材強度が大なる場合は、破壊モードが骨材界面の付着破壊に支配されるため、セメント水和物、骨材間のポリマー粒子の架橋効果がコンクリート強度に及ぼす影響が大きくなり、曲げ強度が増加するものと考えられる。

4.6 破壊エネルギーに関する考察

図-9に破壊エネルギー G_F と P_v との関係を示す。K50は、 P_v の増加に伴い G_F は増大するが、全体的に G_F 値はある P_v によりピークを持つ。すなわち、ポリマーを適量混入することにより破壊エネルギーの増大が期待できる。この理由は以下による。ポリマー混入によりセメント水和物、骨材間にポリマーフィルムが架橋化されることにより、モルタルマトリックスの伸び能力が改善[4]され、コンクリート内部の変形ひずみエネルギーの蓄積が拡散され、応力集中を緩和することで局所的な破壊を減少させるためと考えられる。過混入では、ペースト自体の強度低下により、破壊エネルギーは減少するものと思われる。

図-10に破壊エネルギー G_F と圧縮強度との関係を P_v 別に示す。 P_v が0%では、圧縮強度の増加と共に G_F も増大するが、ピークがみられ、圧縮強度900kgf/cm²前後で大きく減少し、脆性的な傾向を示す。 P_v が5%では、 G_F の低下は $P_v=0\%$ ほどは大きくなく、ポリマー混入は、高強度域のコンクリートの靱性改善に寄与することがわかる。しかしながら、 $P_v=10\%$ では、500kgf/cm²前後で G_F のピークがみられ、900kgf/cm²付近では大きく低下している。以上より、高強度コンクリートの破壊靱性はポリマーの混入により改善可能であるが、圧縮強度に応じて、適度なポリマーの混入量があり、過混入はマイナス効果となる。

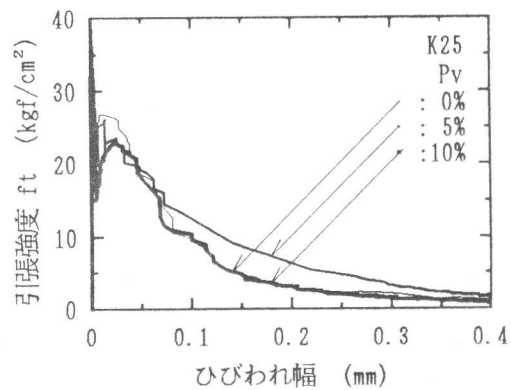


図-7b 各ポリマー容積比の引張軟化曲線

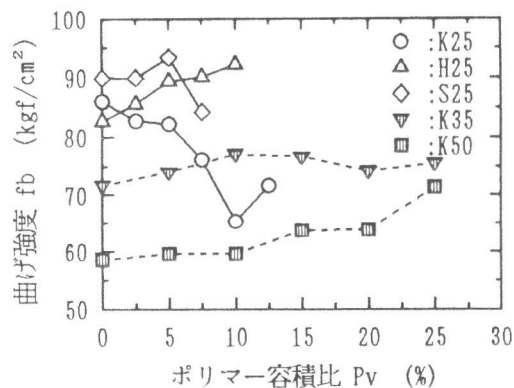


図-8 曲げ強度とポリマー容積比との関係

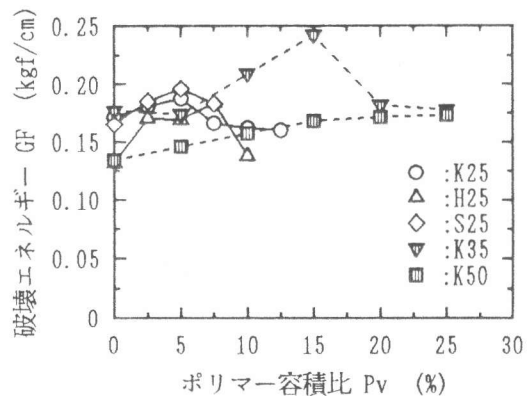


図-9 破壊エネルギーとポリマー容積比の関係

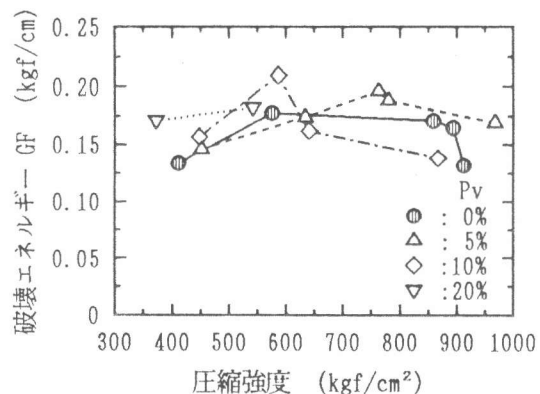


図-10 破壊エネルギーと圧縮強度との関係

5. 結 論

高強度コンクリートの強度性状および破壊靱性に及ぼすポリマー混入の影響について検討した結果、本実験の範囲で以下が明らかになった。

- (1) スランプに及ぼす影響は、高水セメント比ではポリマーの混入量を増すほどスランプは増加するが、低水セメント比では低下する。
- (2) 高強度コンクリートの圧縮強度は、ポリマーを混入することにより低下する傾向にあるが、粗骨材強度を増加させることにより強度低下は緩和される。
- (3) 高強度コンクリートの静弾性係数は、ポリマー混入により低下する傾向にある。
- (4) 高強度コンクリートの曲げ強度は、粗骨材が低強度の場合はポリマーを混入することにより低下傾向を示すが、粗骨材の強度を増加させると増加傾向を示す。
- (5) 高強度コンクリートの破壊エネルギーは、ポリマーを混入することにより増加するが、圧縮強度に応じた最適な混入量があり、過混入では低下する。

謝 辞

実験試料にご協力頂きました、ヤマト合成(株)、山宗化学(株)、出来山鉱山(株)に感謝致します。また実験にご協力頂きました、ミヅコンクリートエンジニアリング(株)ならびに金子和人氏(宇大技官)に感謝致します。

参考文献

- [1] 長滝重義：高強度コンクリートに関する研究とその実用化、コンクリート工学年次論文報告集10-1、pp.61-68、1988
- [2] 野村希晶、三橋博三、鈴木篤、和泉正哲：非線形破壊力学手法に基づく高強度コンクリートの脆性化機構の考察、日本建築学会構造系論文報告集、第416号、pp.9-16、1990年10月
- [3] 橋高義典、上村克郎、高瀬憲克：高強度コンクリートのボルトの引抜き耐力に及ぼす粗骨材種類の影響、コンクリート工学年次論文報告集13-1、pp.245-250、1991
- [4] 大濱嘉彦：ポリマーコンクリートの研究、開発の現状と動向、材料、Vol.36、No.406、pp.679-689、1987年7月
- [5] 田澤栄一、笠井哲朗、大津一郎、森田浩：超微粒子既架橋ポリマーラテックスを混入したセメント硬化体、セメント・コンクリート論文集、No.44、pp.228-233、1990
- [6] 芦田公伸、松本雅夫、坂井悦朗：超微粉を用いたポリマーセメントモルタルの基本物性、セメント・コンクリート論文集、No.45、pp.726-731、1991
- [7] 50-FMC Committee on Fracture Mechanics of Concrete: Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-point Bend Tests on Notched Beams, Materials and Structures, Vol.18, No.106, pp.285-290, July-August, 1985
- [8] 六郷恵哲、岩佐正徳、瀬古繁喜、小柳治：J積分法を用いた曲げ試験によるコンクリートの引張軟化曲線の定量化、第43回セメント技術大会講演集、pp.398-403、1989
- [9] 大岸佐吉、小野博宣：コンクリートおよび繊維補強モルタルの破壊力学特性値(G_{IC} , G_F)に及ぼす試験要因の影響、コンクリート工学、Vol.26、No.9、pp.91-105、1988年9月
- [10] 中村成春、上村克郎、小西敏正、橋高義典：硬化樹脂によりひびわれ補修したコンクリートの力学的性状に関する研究—破壊力学的手法による検討—、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp.195-196、1991年9月