

論文

[1068] 高強度コンクリートの破壊エネルギーに及ぼす骨材マトリックスの相互作用の影響

中村成春*¹・橋高義典*²・上村克郎*³

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の大型化、高強度化、多様化に伴い、コンクリート材料の合理的な性能評価基準が求められている[1]。従来の普通強度コンクリートの破壊は、モルタルマトリックス強度に比べ粗骨材強度が高いために、粗骨材の介在により主びわれ進展モードがアレスト、偏向、分散され、ダクタイルな性質を示す。しかし、マトリックス強度を高めた高強度コンクリートの破壊は、相対的に粗骨材強度が低下するために、主びわれ進展モードが粗骨材を貫通するモードになり、変形能が低下し脆性的な性質を示す[2]。さらに、平滑な破断面がひびわれ補修による靱性能の付与を減少させる[3]。このように、破壊形態の異なるコンクリート材料を単一の設計基準で評価するのは合理的ではない。現状の設計基準値は、許容平均応力値として位置づけられる圧縮強度によるが、ひびわれ伝播に伴って消費されるエネルギーを考慮したエネルギー基準での評価も必要と考えられる。従って、エネルギー評価基準においては、ひびわれ進展の抵抗性に及ぼす粗骨材の作用の把握が重要であるが、まだ十分な検討はなされていない。

本研究は、粗骨材とモルタルマトリックスの相互作用が、高強度コンクリートの破壊エネルギーに及ぼす影響について、破壊力学的手法により実験検討することを目的とする。

2. 解析方法

2.1 破壊エネルギー概念

コンクリートの破壊に及ぼす粗骨材の研究は、古くから数多くなされている[4-7]。しかし、破壊プロセスに関する定量的研究は少ない。近年、ひびわれ進展過程を定量的に捉えるために、破壊力学的手法が用いられるようになり、RILEMから破壊エネルギー G_f 概念とその実験の評価法が提案された[8]。破壊エネルギーとは、物体を完全に破断するのに要した全仕事量（破断に至るまでの完全な荷重変位曲線下の全面積）を破断投影面積で除して、主びわれが単位面積進展するのに必要な平均的なエネルギーとして評価される。高強度コンクリートの G_f は、圧縮強度に比例せず頭打ちになる[2]が、粗骨材の種類によって G_f の値は異なり[9]、エネルギー吸収の点で優れる粗骨材が存在する。モルタルマトリックスに適量のポリマーを混入することで G_f は向上する[10]が、マトリックスとインクルージョン（粗骨材）からなる二相状態のコンクリートにおいては、ひびわれ進展に対して骨材が如何なる効果を持つかが靱性向上の重要な因子と考えられる。

2.2 破壊エネルギーに及ぼすインクルージョンの評価式

コンクリートの G_f をモルタルマトリックスの破壊エネルギー G_{fm} とインクルージョンの存在により分担される破壊エネルギー G_{fi} （骨材自体、界面、アレスト作用等に生じる吸収エネルギーの総和）との和によるエネルギーバランスで定義し[11]、 G_{fi} を評価することとした。

* 1 宇都宮大学大学院 工学研究科生産・情報工学専攻、工修（正会員）

* 2 宇都宮大学助手 工学部建設学科、工博（正会員）

* 3 宇都宮大学教授 工学部建設学科、工博（正会員）

図1にエネルギーバランスの概念を、以下にGfのバランス式を示す。

$$Gf = (W0 + mg \cdot \delta 0) / A_{lig} \quad (1)$$

$$Gf \cdot A_{lig} = G_{fm} \cdot A_m + G_{fi} \cdot \Sigma A_i \quad (2)$$

ここに、W0：荷重変位曲線下の面積、mg：試験体の自重、 $\delta 0$ ：破断時の垂直変位、 A_{lig} ：破断投影面積、 A_m ：モルタル破断投影面積、 A_i ：粗骨材破断投影面積とする。

さらに、 ΣA_i を $A_{lig} - A_m$ と表し、破壊面積比S_{ir}を $\Sigma A_i / A_{lig}$ と定義することにより、骨材のエネルギー的評価が可能となる。

$$G_{fi} = (Gf - (1 - S_{ir}) \cdot G_{fm}) / S_{ir} \quad (3)$$

3. 実験概要

3.1 実験の要因と水準

表1に実験の要因と水準を示す。実験は2シリーズに分けて川砂利、石灰岩碎石、硬質砂岩碎石、人工軽量骨材、粗骨材のないモルタル(RI, LI, SA, AL, MO)の5水準で行った。シリーズIは、マトリックス強度に及ぼす影響を検討するため、水結合材比W/Bを8水準とし試験体条件を単一骨材並びに粗骨材量一定コンクリートの2水準とした。シリーズIIは、粗骨材量に及ぼす影響を検討するため、マトリックス強度5水準に対して粗骨材絶対容積VGを4水準とした。

3.2 骨材の品質

表2に実験に使用した骨材の品質を示す。特に粗骨材自身の強度を把握するため、一種類につき50個の点荷割裂引張試験を行った。

3.3 モルタルマトリックスの調合条件

表3にモルタルマトリックスの調合条件を示す。上段がシリーズI、下段がシリーズIIの調合条件である。セメントは普通ポルトランドセメント、シリカフェュームはマイクロシリカ、高性能AE減水剤はマイティ2000WHを使用した。コンクリートの条件では、粗骨材寸法を5~10mmとし、シリーズIではVGを286 l/m³一定とした。

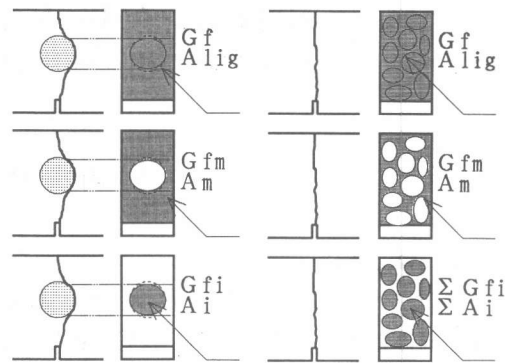


図1 エネルギーバランスの概念

表1 実験の要因と水準

要因	水準
粗骨材	川砂利, 石灰岩碎石, 人工骨材 ^{*1} 硬質砂岩碎石, (モルタル)
I	W/B* ² ・SF* ³ % 20・20, 20・10, 25・10, 25・5, 25, 35, 50, 65
試験体	単一骨材, コンクリート
II	W/B・SF % 20・10, 25, 35, 50, 65
	VG* ⁴ l/m ³ 0, 200, 300, 400

*1 人工軽量骨材

*2 水結合材比 (B=C+SF)

*3 シリカフェューム容積 (% of cement)

*4 粗骨材絶対容積

表2 骨材の品質

種類		SG* ¹	WA* ² %	WV* ³ kg/l	RV* ⁴ %	FM* ⁵
川砂	-	2.65	1.85	1.72	66.2	2.96
川砂利	RI	2.60	0.41	1.69	65.4	6.67
石灰岩碎石	LI	2.65	0.19	1.63	61.5	6.84
硬質砂岩碎石	SA	2.62	1.13	1.53	59.1	6.70
人工軽量骨材	AL	1.61	22.1	0.81	61.4	6.40

*1 表乾比重

*2 吸水率

*3 単位容積重量

*4 実績率

*5 粗粒率

表3 モルタルマトリックスの調合条件

W/B・SF %	モルタルの単位量 g/l				SF content %	S.P. wt %	
	W	C	SF	S			
20・20	166	728	182	1325	31.8	20	3.5
20・10	171	843	93		32.8	10	3.5
	171	844	94				
25・10	203	772	85		23.1	10	2.7
25・5	201	825	43		23.5	5	2.7
	203	864	-		34.6	-	4.0
35	207	881	-		35.2	-	-
	253	734	-		7.3	-	1.0
50	258	749	-		7.5	-	-
	300	599	-		-	-	-
65	306	612	-		-	-	-
	329	507	-		-	-	-
	336	517	-		-	-	-

3.4 破壊エネルギー試験概要

図2に試験体概要を示す。試験体は鋼製型枠に打設後2日で脱型、以降20℃水中養生とした。試験は材齢4週目に行い、試験直前にコンクリートカッターで中央下部に5mmせいの切欠きを作製した。単一骨材条件では骨材の中心が破断推定面になるよう埋込んだ。試験体数は、単一骨材条件が6体、コンクリート条件が3体とした。

図3に破壊エネルギー試験概要を示す。2000 kNアムスラー試験機を用いて、20N/secほぼ一定の速度で载荷した。5N感度のロードセルより荷重を検出し、1μm感度の変位計より試験体に取り付けた治具を介して荷重点変位を測定した。同時に切欠き端部にクリップゲージを取り付け開口変位を測定した。測定値はすべてデータアナライザーに0.1sec間隔で記録し、荷重-荷重点変位曲線から式(1)によりGfを求めた。

4. 実験結果及び考察

4.1 粗骨材の強度

図4に粗骨材の点载荷割裂引張試験結果を示す。RIは、骨材の組成が不揃いなため測定していない。点载荷値 f_{ta} は、かなり大きくばらついているが、本図からSAは高強度な骨材と判断できる。ALはLI、SAと比較して、ばらつきは少ないが非常に低強度である。

4.2 モルタルマトリックスの性能

図5にモルタルマトリックスの性能試験結果を示す。性能試験は、各関連JIS規格に従い行った。フレッシュ性状では、フロー値FLは高強度になるほど単位セメント量の増加のために低下する。しかし、シリカフュームの置換に伴い流動性が付与され、FLは頭打ちになる。強度性状では、圧縮強度 f_{cm} が100MPaを越える超高強度域において、 f_{cm} は増加しているにもかかわらず、曲げ強度 f_{fm} は低下している。これは、FLの低下からもわかるように、シリカフュームの過混入により分散性が阻害されたためと考えられる。また、ヤング係数 E_m は、 f_{cm} の増加に比例せず、高強度域において頭打ちになる傾向にある。

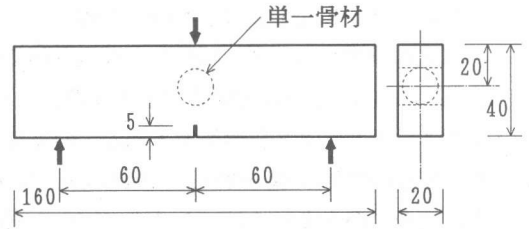


図2 試験体概要

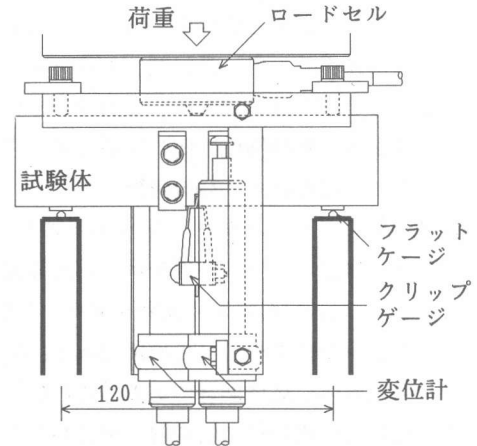


図3 破壊エネルギー試験概要

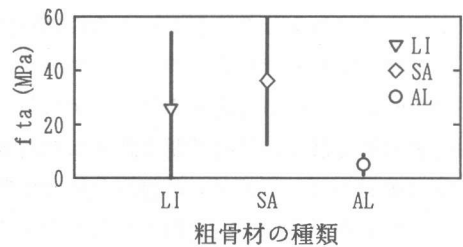


図4 f_{ta} と粗骨材との関係

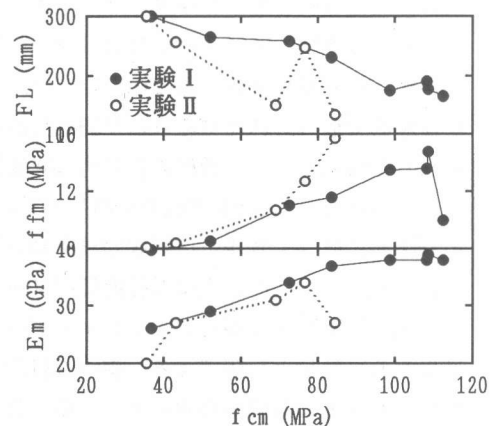


図5 モルタルマトリックスの性能

4.3 f_f , K_{1c} に及ぼす f_{cm} の影響

図6に破壊エネルギー試験から求められる公称曲げ強度 f_f 並びに限界応力拡大係数 K_{1c} とモルタルマトリックス圧縮強度 f_{cm} との関係を示す。超高強度域の単一骨材LI、SAの f_f 、 K_{1c} 低下の度合いが大きいのは、シリカフェーム過混入により骨材との付着が阻害されたためと考えられる。破壊形態も超高強度域であるにも関わらずマトリックスとの界面破断であった。粗骨材による差異は、単一骨材並びにコンクリートともALの低下が顕著である。これは、 f_{ta} からわかるように骨材強度が弱いためと考えられる。

4.4 G_f に及ぼす f_{cm} の影響

図7に破壊エネルギー G_f とモルタルマトリックス圧縮強度 f_{cm} との関係を示す。超高強度域の G_f は、粗骨材の種類に関わらずMOより低く、その破壊形態は骨材自身の破断である。特に、骨材強度が弱いALで顕著である。これは、 f_{cm} の増加に伴い相対的に粗骨材の強度が低下したため、主ひびわれ進展に対する骨材のアレスト効果が発揮されなかったためと考えられる。SAでは単一骨材よりコンクリートの G_f 値が高い。これは、骨材形状によりディフレクション効果が加味されたためと考えられる。すなわち、SAの実績率は低く、骨材破断の顕著な超高強度域では差異がないことから不整形な形状の集積が主ひびわれの偏向を引き起こしたと考えられる。

4.5 G_{fi} に及ぼす G_{fm} の影響

図8に粗骨材とモルタルマトリックスの各々が分担する破壊エネルギー G_{fi} と G_{fm} との関係を示す。単一骨材試験6体での G_f のばらつきは変動係数が最大約30%であり、平均的な値が得られたと考えられる。骨材の相対的な強度低下が起こる $G_{fm}=80\text{N/m}$ までSAの G_{fi} は高く、ひびわれ進展に伴うエネルギー吸収効果が高い骨材と評価できる。ALのように低強度骨材は付着強度が高くても断面欠損となり、エネルギー吸収効果が低い骨材と評価できる。単一骨材並びにコンクリートとも同一傾向にあり、単一骨材試験による骨材の靱性能評価が可能と考えられる。

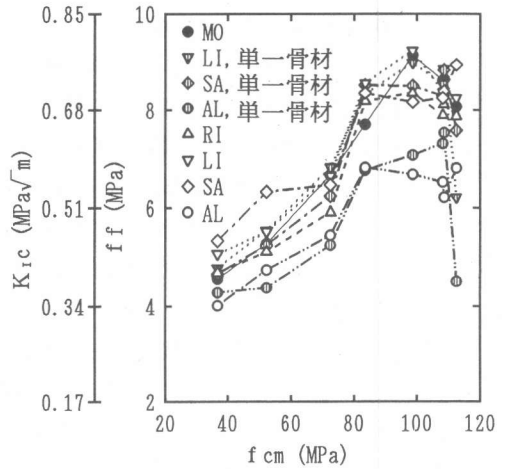


図6 f_f , K_{1c} と f_{cm} との関係

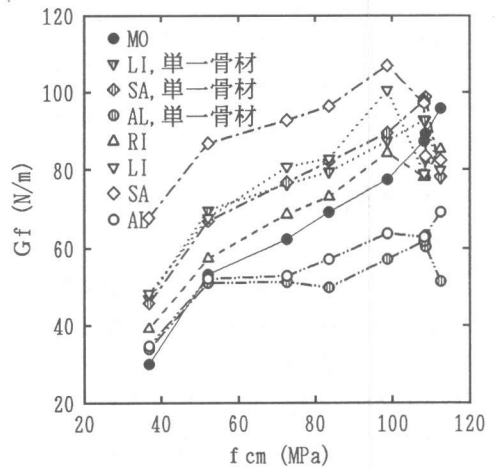


図7 G_f と f_{cm} との関係

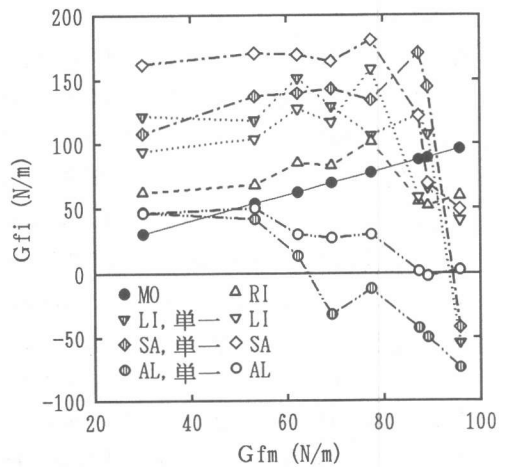


図8 G_{fi} と G_{fm} との関係

4.6 f_f 、 K_{rc} に及ぼすVGの影響

図9に破壊エネルギー試験から求められる公称曲げ強度 f_f 並びに限界応力拡大係数 K_{rc} と粗骨材絶対容積VGとの関係を示す。高W/Bではすべての粗骨材において、VGの増加に伴い f_f 、 K_{rc} も増加している。しかし、W/Bの低減とともに粗骨材の種類により挙動が異なり、低マトリックス強度でALの低下が表れ、マトリックス強度の向上とともにRI、LIが頭打ちとなり、超高強度域ではSA以外低下している。これは、低マトリックス強度においては粗骨材が強化相となり、粗骨材量の増加が総体の強化になる。しかし、マトリックス強度の向上とともに粗骨材の存在がマトリックスの断面欠損となり、粗骨材量の増加が総体の弱体化になると考えられる。

4.7 G_f 、 G_{fi} に及ぼすVGの影響

図10に破壊エネルギー G_f 並びに粗骨材が分担する破壊エネルギー G_{fi} と粗骨材絶対容積VGとの関係を示す。粗骨材の種類による差異は f_f 、 K_{rc} と同様の傾向がある。すなわち、VGの増加に伴い、W/B=50、65%では G_f 、 G_{fi} も増加している。これは、強化相である粗骨材量の増加により、ひびわれ伝播が分散され破壊進行領域が増大したためと考えられる。W/B=25、35%では、SAは増加するがRI、LIは頭打ちとなりALは低下する。W/B=20%では、SA以外は低下している。これは、相対的に弱体化した骨材の増加が、マトリックスの断面欠損の増量となり、骨材-マトリックス間のブリッジングによるアレスト効果が発揮されなかったためと考えられる。

以上より、マトリックスが超高強度域になると、粗骨材の存在が破壊を助長していると考えられ、粗骨材強度とマトリックス強度との適度のバランスが必要である。バランスが優れると骨材自身の靱性能と骨材-マトリックス間の相互作用が生じ、総体の高強度、高靱性化に有効となる。また、その骨材容積比は大きいほど良い。さらに、 G_{fi} 値は G_f 値との関係から、粗骨材が破壊を助長しているか否かの程度を判定でき、バランスの指標に有効と考えられる。

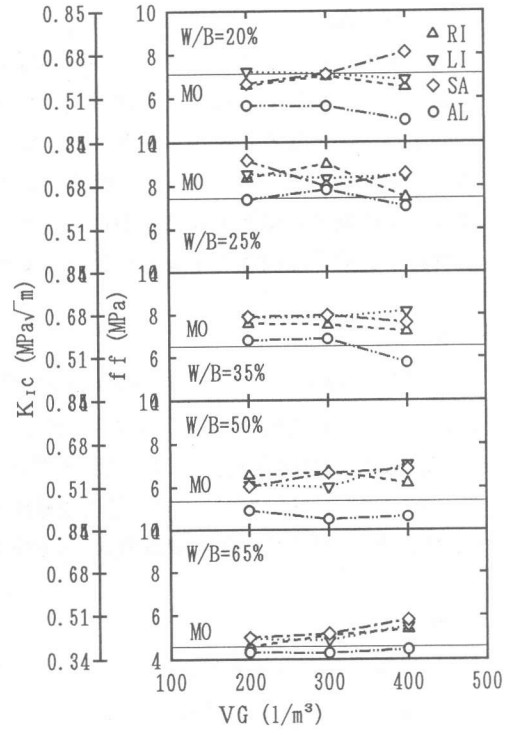


図9 f_f 、 K_{rc} とVGとの関係

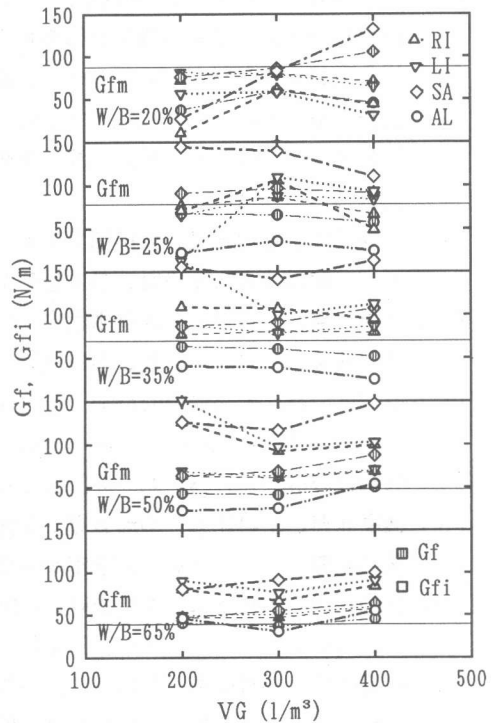


図10 G_f 、 G_{fi} とVGとの関係

5. 結論

粗骨材とモルタルマトリックスの相互作用が、高強度コンクリートの破壊エネルギーに及ぼす影響について検討した結果、粗骨材のアレスト効果の発揮並びに粗骨材の増量が、破壊エネルギー向上の一因となることが示された。また、粗骨材とモルタルマトリックスとの相互作用の発揮には、粗骨材強度とマトリックス強度との適度なバランスが必要であり、高強度コンクリートでは粗骨材の効果が低下することが示された。さらに、エネルギーバランスに基づいて定義された粗骨材の分担する破壊エネルギー G_{fi} により粗骨材の性能の評価が可能であることが示された。

謝 辞

本研究の一部は平成4年度文部省科学研究費補助金・一般研究C (No. 04650512) によりました。感謝致します。実験試料にご協力頂きました、(財)建材試験センター、建設省建築研究所、日本セメント工業(株)、山宗化学(株)、吉澤石灰工業(株)並びに各社に感謝致します。実験にご協力頂きました、スミヤコンクリートエンジニアリング(株)宇都宮試験所の皆様、東京都立大学山本研究室の皆様、金子和人氏(本学技官)、当時卒論生の菅野義人氏(本学大学院)並びに山内 衛氏(浅沼組)に感謝致します。

参考文献

- [1] 三橋博三、白井伸明、六郷恵哲：コンクリート構造への破壊力学の応用、コンクリート工学、Vol. 30、No. 6、pp. 5-17、1992. 6
- [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. 10
- [3] 橋高義典、上村克郎、中村成春：コンクリート切り欠き試験体の曲げ試験によるひびわれ補修材料の評価、日本建築学会構造系論文報告集、第432号、pp. 1-9、1992. 2
- [4] 川上英男：粗骨材とコンクリート強度に関する基礎的研究(その1)、日本建築学会論文報告集、第166号、pp. 19-27、1969. 12
- [5] 岡島達雄：圧縮応力を受ける混合複合材の力学的性質、日本建築学会論文報告集、第176号、pp. 1-9、1970. 10
- [6] 小阪義夫、谷川恭雄、太田福男：コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響、第1報：モデル解析法による検討、日本建築学会論文報告集、第228号、pp. 1-11、1975. 2
- [7] 和泉正哲、三橋博三、佐々木達夫：コンクリートの圧縮破壊発生機構に関する基礎的研究、日本建築学会論文報告集、第289号、pp. 11-25、1980. 3
- [8] RILEM Draft Recommendation, 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
- [9] 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、Vol. 13、No. 1、pp. 245-250、1991. 6
- [10] 橋高義典、上村克郎、中村成春、小野正樹：高強度コンクリートの破壊韌性に及ぼすポリマー混入の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、No. 1、pp. 481-486、1992. 6
- [11] 橋高義典、中村成春、上村克郎、小西敏正：高強度コンクリート複合材の破壊に及ぼす骨材マトリックスの相互作用に関する破壊力学的考察 - その1, 2 -、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、pp. 373-376、1992. 8