

論文 高強度コンクリートおよび自己充填コンクリートの破壊力学特性

二羽 淳一郎*1・Somnuk Tangtermsirikul*2

要旨: 新しいコンクリート技術として注目されている高強度コンクリートおよび自己充填コンクリートの力学特性を、破壊力学の観点から検討した。測定された破壊エネルギーの経時変化を通常のコンクリートの破壊エネルギー値と比較し、配合面からの考察を加えた。また、曲げ強度の寸法効果についての数値シミュレーションを行い、自己充填コンクリートの曲げ強度特性を通常のコンクリートの曲げ強度特性と比較した。

キーワード: 高強度コンクリート、自己充填コンクリート、破壊エネルギー、曲げ強度

1. はじめに

高強度コンクリートおよび自己充填コンクリートは、21世紀に向けた新しいコンクリート技術として注目されている。これらのコンクリートの製造方法に関する基礎的な研究の蓄積により、現在では、適当な高性能AE減水剤と粉体があれば、その実現は比較的容易となってきた。とりわけ、経済成長の著しい東アジア各地では、施工の急速化の観点から自己充填コンクリートに対する期待が大きく、今後その使用量が格段に増加していくことが期待されている[1]。

現在までに、高強度コンクリートおよび自己充填コンクリートに関して、多くの基礎的な研究がなされてきているが、その多くはいかにして容易に、そして経済的にこの種のコンクリートを実現するかという方法論、もしくは、この種のコンクリートの強度、弾性係数、収縮特性といった基礎的な物性評価が中心であったように思われる。しかしながら、高強度コンクリートおよび自己充填コンクリートの使用を促進していくためには、製造に関する方法論や基礎物性の評価に加えて、硬化後の力学特性に関する基礎的な理解が不可欠である。本研究では、破壊力学の手法を用いて、高強度コンクリートおよび自己充填コンクリートの破壊エネルギーの経時変化を測定し、これらを通常のコンクリートの破壊エネルギーと比較し、配合面からの考察を行っていく。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. 実験の概要

2.1 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の推奨する、切欠きを有する無筋コンクリートはり（高さ10cm×幅10cm×スパン80cm）の曲げ試験[2]より求めるものとした。切欠きはスパン中央の載荷点直下に設けてあり、その高さは5cmである。コンクリート打設前に厚さ5mmの鋼板を型枠内に設置しておき、コンクリートの硬化前にこれを引き抜くことにより切欠きを設けた。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射影面積（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。

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

*1 アジア工科大学院助教授 構造工学専攻、工博（正会員）

*2 タマサート大学助教授 国際工学部土木工学科、工博（正会員）

表一1 コンクリートの配合

コンクリートの種類	W/(C+F) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	C	Fly Ash	S	G	混和剤(%)*	空気量(%)
高強度 コンクリート	40	42	160	400	----	737	1093	0.5	1.0
自己充填 コンクリート	30	58	172	401	172	853	664	2.0	2.0
普通強度 コンクリート	65	45	195	300	----	788	1035	----	1.0

*混和剤の使用量は粉体量に対する比率

表一2 強度および破壊エネルギーの実測値

材齢 (日)	1			3			7			28		
	f'_c	f_t	G_F	f'_c	f_t	G_F	f'_c	f_t	G_F	f'_c	f_t	G_F
高強度 コンクリート	249	23.5	0.104	339	27.5	0.123	369	30.8	0.127	438	34.0	0.137
自己充填 コンクリート	367	27.8	0.092	449	34.0	0.107	550	38.3	0.114	685	46.0	0.116
普通強度 コンクリート	89	11.5	0.051	188	20.6	0.083	246	23.0	0.097	303	26.0	0.107

* f'_c : kgf/cm², f_t : kgf/cm², G_F : kgf/cm

2.2 使用材料および配合

使用した材料は、普通ポルトランドセメント（比重3.15）、タイ北部の Mae Moh 火力発電所産のフライアッシュ（比重1.98、比表面積2621cm²/g、ASTMのF種相当品）、川砂（比重2.50、FM=3.22、吸水率0.26%）、石灰岩碎石（比重2.69、吸水率0.90%、最大寸法19mm）、およびナフタレン系の高性能AE減水剤である。

実験に用いた3種類のコンクリートの配合を表一1に示す。高強度コンクリートのW/Cは40%である。自己充填コンクリートには、セメントに加えフライアッシュを使用しており、W/(C+F)は30%である。自己充填コンクリートの粉体量と細骨材率が著しく大きいのは、流動性に加えて、コンクリート打設時の材料分離抵抗性を高めることを意図したためである。本研究では、表一1に示す3種類の配合により、高強度コンクリート、自己充填コンクリートならびに普通強度コンクリートを模擬することとした。

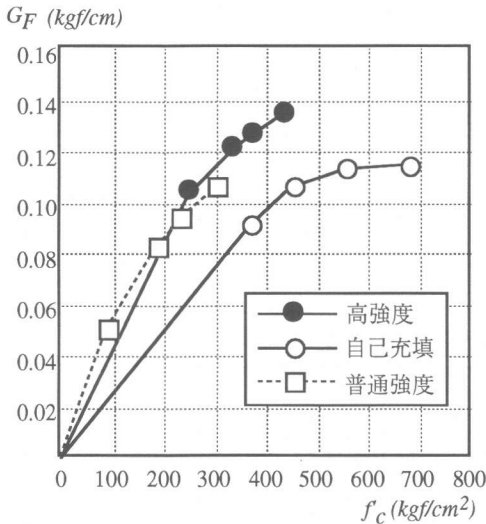
3. 実験結果および考察

3.1 破壊エネルギー

コンクリートの破壊エネルギーは、一般に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考えられている。例えば、CEB-FIP Model Code 90[3]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(2)で与えられている。

$$G_F = G_{Fo} (f'_c / f'_{co})^{0.7} \quad (2)$$

ただし、 G_F : 破壊エネルギー、 G_{Fo} : 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 : コンクリート圧縮強度、 f'_{co} : 定数。



図一1 圧縮強度と破壊エネルギー

い、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することを明らかにしている[5]。著者らも、セメントの種類と水和生成物の関係に着目し、破壊エネルギーとセメントの種類に関する定性的な考察を行ってきている[6]。

今回得られた実験データによっても、圧縮強度のようなマクロな尺度のみでは、破壊エネルギーの推定が困難であることが明らかとなったが、ここでは使用したコンクリートの配合に着目して、何故、自己充填コンクリートの破壊エネルギーが他のコンクリートに比べて相対的に小さくなるのかという点について考察することとした。

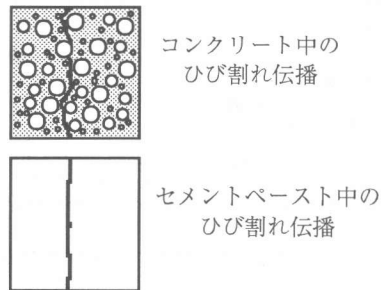
3.2 コンクリートの配合と破壊エネルギー

使用したコンクリートの配合に着目し、以下のような定性的な考察を行った。

(1) 自己充填コンクリートにおける粉体量は、今回作成した高強度コンクリートおよび普通強度コンクリートに比べて、相対的に多い(表一3)。このため、コンクリート中に含まれるペースト部分の体積が増加する。ところが、ペースト中でのひび割れの伝播は、骨材の強度が十分に高い場合、骨材を含むコンクリート中でのひび割れ伝播よりも容易であるため、破壊エネルギーが低下していく。図一2はひび割れ伝播を模式的に示したものであるが、骨材がひび割れ伝播の障害となるので、ひび割れは骨材と交差した際に方向を変えざるを得ず、このためより多くのエネルギーが必要となる。一方、ペースト中ではひび割れ面が直線的となり、相対的に小さいエネルギーでひび割れを伝播させることが可能となる。

表一3 配合中の粉体量

コンクリートの種類	配合中の粉体量 kg/m ³
自己充填 コンクリート	573
高強度 コンクリート	400
普通強度 コンクリート	300



図一2 ひび割れ伝播の模式図

表一2に材齢1、3、7、28日において測定された圧縮強度、引張強度、および破壊エネルギーを示す。式(2)によれば、圧縮強度の増加とともに破壊エネルギーが増加していくことになるが、表一2の結果を図示した図一1によれば、自己充填コンクリートは、その高い圧縮強度にもかかわらず、高強度コンクリートや普通強度コンクリートに比較して、破壊エネルギーが伸びていないことが認められる。

式(2)では、圧縮強度と粗骨材最大寸法の影響が考慮されているが、この他の考えねばならない要因として、篠原らは、切欠きはり試験体のノッチ深さ、載荷速度、水セメント比、養生方法、ならびに材齢の影響を指摘している[4]。また野村らはコンクリートの内部構造にさかのぼって考察を行

表—4 コンクリートの配合 (その2)

コンクリートの種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	C	Fly Ash	S	G	混和剤(%)*	空気量(%)
セメントペースト	40	----	557	1394	----	----	----	----	----
高強度コンクリートB	40	42	229	573	----	605	899	0.5	1.0

*混和剤の使用量は粉体量に対する比率

表—5 強度および破壊エネルギーの実測値 (その2)

材齢 (日)	1			3			7			28		
	f'_c	f'_t	G_F	f'_c	f'_t	G_F	f'_c	f'_t	G_F	f'_c	f'_t	G_F
セメントペースト	152	16.5	0.025	216	21.0	0.031	239	22.3	0.033	261	23.7	0.035
高強度コンクリートB	225	21.5	0.091	346	28.5	0.121	439	33.0	0.132	508	37.0	0.138

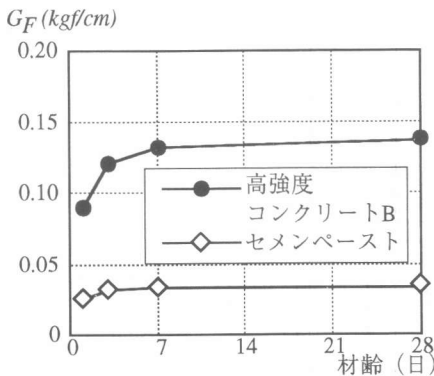
* f'_c : kgf/cm², f'_t : kgf/cm², G_F : kgf/cm

(2) 配合表 (表—1) によれば、自己充填コンクリートの細骨材率s/aは、今回作成した高強度コンクリートおよび普通強度コンクリートに比較して、相当に大きい。これは、コンクリート中に含まれる粗骨材量の大幅な減少を意味している (表—1)。これは、既に述べた通り、自己充填コンクリートの流動性と分離抵抗性を高めるための意図的な操作であるが、ひび割れ進展の観点からみると、この操作は前記(1)と同様な理由から、破壊エネルギー低下の要因になりうるのである。

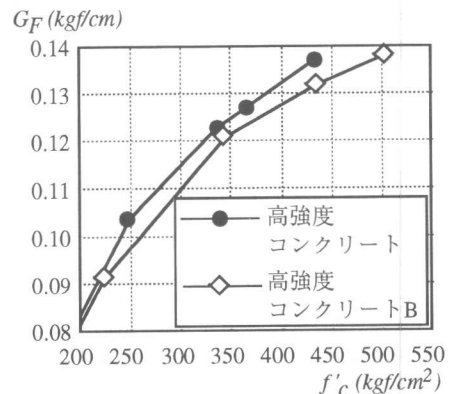
そこで、上記の考察の妥当性、すなわち粉体量とs/aが破壊エネルギーに及ぼす影響を明らかにするため、新たに実験を行うこととした。

3.3 粉体量とs/aが破壊エネルギーに及ぼす影響

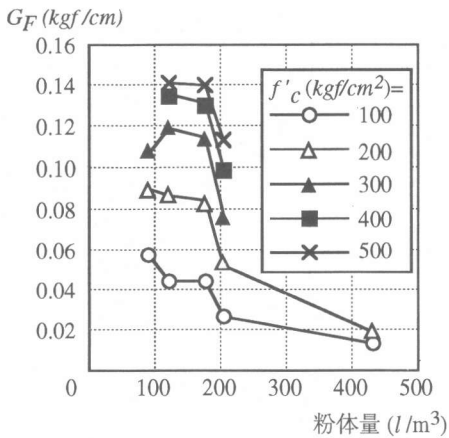
粉体量ならびに細骨材率s/aが破壊エネルギーに及ぼす影響を明らかにするため、自己充填コンクリートと同一の粉体量を有する高強度コンクリート(B)、および高強度コンクリートと同一のW/Cを有するセメントペーストを作成し、その破壊エネルギーを求めた。表—4にその配合を示す。また、表—5に得られた試験結果を示す。図-3は破壊エネルギーの経時変化、図—4は2種類の高強度コンクリートの破壊エ



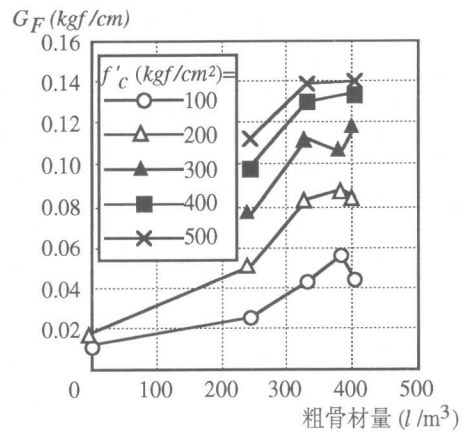
図—3 破壊エネルギーの経時変化



図—4 破壊エネルギーと圧縮強度



図—5 破壊エネルギーと粉体量



図—6 破壊エネルギーと粗骨材量

エネルギーと圧縮強度の関係を示している。これらの図より、骨材を含まないセメントペーストの破壊エネルギーは明らかにコンクリートに比較して小さいこと、また粉体量を増加させ自己充填コンクリートの粉体量と同一とした高強度コンクリートBの破壊エネルギーは、同じ強度の高強度コンクリートの破壊エネルギーよりも相対的に小さいことが確認できる。

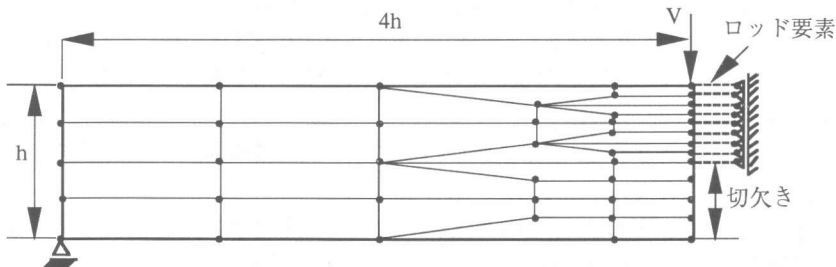
図—5は、得られた全ての実験データを整理して、圧縮強度をパラメータとして、破壊エネルギーと粉体量の関係をプロットしたものである。また、図—6は同様にして、破壊エネルギーと粗骨材量の関係をプロットしたものである。これらの図より、コンクリート中の粉体量の増加および粗骨材量の低下によって、破壊エネルギーが低下していく状況が観察できる。自己充填コンクリートにおける相対的な破壊エネルギーの低下は、このことに起因するものと考えられる。

4. 曲げ強度の数値シミュレーション

今回対象とした3種のコンクリートの内、自己充填コンクリートの破壊エネルギーは、同じ強度レベルの高強度コンクリートならびに普通強度コンクリートに比べて、相対的に小さいことが認められた。こ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、数値計算によるシミュレーションを行うこととした。

図—7に示すように3点曲げを受ける無筋の切欠きはりを想定する。切欠きの高さは、はり高さの1/2である。はりの高さ、載荷スパン、幅はそれぞれh、8h、10cmとする。はりの高さhを10cmから300cmまで変化させて曲げ強度の寸法効果を検討する。軟化曲線には1/4モデル[7]を用い、コンクリートの破壊特性値は実験結果に基づき、表—6のように定めた。数値解析の結果を図—8に示す。

図—8に示される通り、自己充填コンクリートの曲げ強度は、同じ強度レベルの高強度あるいは普通



図—7 曲げ強度解析用の有限要素メッシュ

表—6 各コンクリートの破壊エネルギー

コンクリートの種類		高強度	自己充填	普通強度
f'_c (kgf/cm ²)	f_t (kgf/cm ²)	G_F (kgf/cm)	G_F (kgf/cm)	G_F (kgf/cm)
200	19.8	0.084	0.050	0.087
300	26.0	0.117	0.075	0.105
400	31.5	0.133	0.098	-----

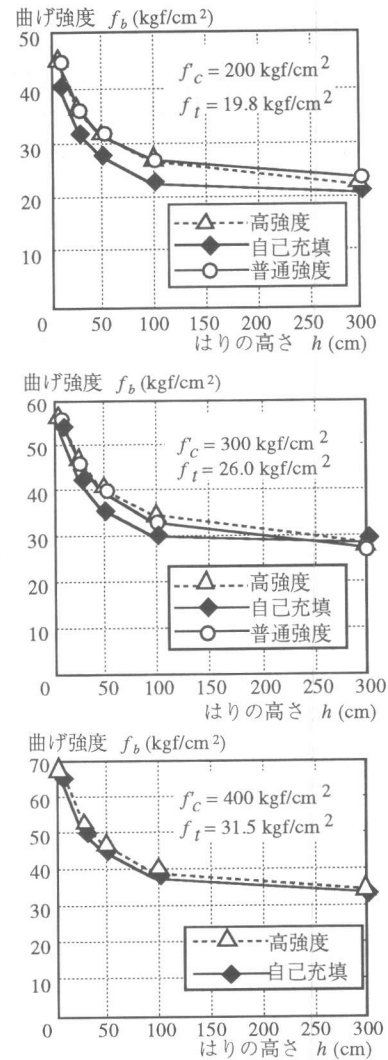
強度コンクリートに比較して小さい。ただし、この差は圧縮強度の増加とともに次第にわずかとなっていく。なお、曲げ強度の寸法効果特性は、コンクリートの種類に関係なく、概ね同様の傾向にある。

5. 結論

今回の実験によれば、高強度コンクリートの破壊エネルギー特性は普通強度コンクリートと概ね同様であったが、自己充填コンクリートについては、相対的に小さい破壊エネルギー特性が得られた。これは、流動性と材料分離抵抗性の向上のため、配合中に大量の粉体を含むことと、細骨材率が高いことによるものと考えられる。したがって、自己充填コンクリートの引張に対する抵抗性は、通常のコンクリートに比べて敏感であると言える。実際に、数値シミュレーションによる自己充填コンクリートの曲げ強度は、明らかに高強度および普通強度コンクリートに比較して低い値を与えていた。ただし、その相違は強度の増加とともに顕著ではなくなってくる。自己充填コンクリートが一般に高い強度を示すことを考慮すれば、破壊エネルギーの低下の影響は次第に緩和されてくるものと考えられる。

参考文献

- [1] Okamura, H. and Ozawa, K.: Self-compacting High Performance Concrete in Japan, Proc. of International Workshop on High Performance Concrete, Bangkok Thailand, pp. 1-16, 1994.
- [2] RILEM : Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bent Tests on Notched Beams, Materials and Structures, Vol. 18, No.93, pp. 285-290, 1983.
- [3] CEB : CEB-FIP Model Code 1990, Bulletin d'Information, No.213/214, 437 pp., 1993.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 二羽淳一郎、松尾豊史、岡本享久、田邊忠顕：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.43-52、1996.
- [7] Rokugo, K., et al. : Testing Method to Determine Tensile Strain Softening Curve and Fracture Energy of Concrete, Fracture Toughness and Fracture Energy, pp. 153-163, Balkema, 1989.



図—8 曲げ強度寸法効果の数値解析