

論文

[1100] コンクリートの破壊エネルギーに及ぼす試験方法の影響に関する
実験的研究

正会員○成田 健 (東北大学建築学科)

正会員 三橋博三 (東北大学建築学科)

正会員 金 鎮根 (韓国科学技術院土木学科)

桐越一紀 (東北大学建築学科)

1. はじめに

近年、コンクリートの高性能化が計られるとともに、コンクリートの利用が高度化されるようになったことに伴い、コンクリートの破壊に関するより詳細な研究や破壊についての高精度な予測手法の確立が必要とされている。また、コンクリートの圧縮強度や引張強度などの強度特性ばかりでなく、より根本的な材料特性が数値解析に組み込まれることが必要とされている。そして、引張応力下のコンクリートの破壊エネルギーや引張軟化曲線などの引張軟化特性を数値解析や理論に組み込みんだコンクリートの破壊力学に関する研究が最近盛んに行われている [1]。

本論文では、骨材の質及び量を一定にして硬化セメントペーストの微細構造のみを3段階に変化させたコンクリートを用いて、RILEM (材料と構造物の試験研究機関国際連合) 推奨試験とくさび挿入試験の双方を行い、更にくさび挿入試験体の寸法を3段階に変化させた破壊実験を行い、コンクリートの破壊エネルギーに及ぼす試験体形状による影響と試験体の寸法効果の影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び調合

セメントは、普通ポルトランドセメント (比重: 3.16、圧縮強度: 37.2MPa) を使用した。細骨材は宮城県阿武隈川産川砂 (表乾比重: 2.55、吸水率: 2.75%) を、粗骨材は安山岩系碎石 (最大寸法: 7mm、表乾比重: 2.70、吸水率: 2.20%) を使用した。また、硬化セメントペース

表-1 コンクリートの調合

調合強度 (MPa)	シリカ 添加率 (%)	骨材最大寸法 (mm)	スラン プ (cm)	水セ メント 比 (%)	水結 合材 比 (%)	細骨 材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
							水 W	セ メント C	細 骨材 S	粗 骨材 G	フ リ カ ム SF	混 和 剤 (1/ m ³) SP
20	0	7	12± 2.5	65	65	43.1	226	348	719	1003	0	0
60	15	7	12± 2.5	47	40	43.1	168	357	758	1057	63	9.40
100	20	7	12± 2.5	25	20	43.1	117	467	758	1057	117	26.6

トの微細構造を変化させるために、ノルウェー産粉末シリカフューム（粒径： $0.16\mu\text{m}$ 、比表面積： $20\text{m}^2/\text{g}$ ）を加え、流動性を調整するために芳香族アミノスルホン酸系高性能減水剤を使用した。本実験で使用するコンクリートの調合は表-1に示す通りである。調合強度は、 20MPa （以降、20シリーズと呼ぶ）、 60MPa （60シリーズ）及び 100MPa （100シリーズ）である。

2. 2 試験体

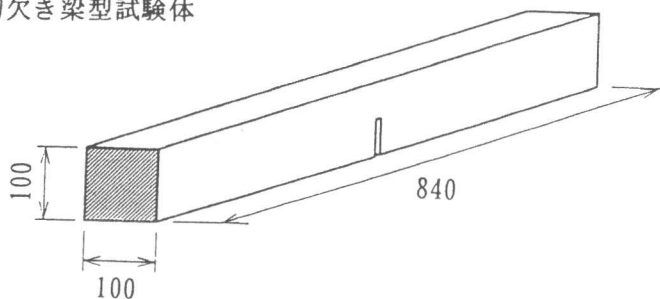
試験体の作製は JIS A 1138 に準じて各調合につき3バッチずつコンクリートを作り、それぞれの試験体型枠に打設した。なお、混練りには強制練りミキサーを使用した。

各試験体形状は、図-1に示す通りである。切欠き梁試験体はRILEM推奨試験法に準拠し、 $100\times 100\times 840\text{mm}$ とした。また、くさび挿入型試験体に於いては試験体の高さ寸法を100、200、400mmと変化させ、それぞれS、M、Lシリーズとした。なお、試験体厚さの影響は最大骨材粒径に関係するものと考え、全シリーズに於いてリガメントの厚さを100mm一定とした。梁型試験体は1種類、くさび挿入型試験体は2種類のコンクリート試験体を、それぞれ木製型枠を使用して作製した。また、コンクリートの圧縮強度試験用、引張強度試験用に $\phi 100\times 200\text{mm}$ の円柱試験体も同時に作製した。各調合における試験体数は、梁型試験体、くさび挿入型試験体とも3体ずつであり、強度試験用円柱試験体については、各バッチにつき6本ずつ作製し合計18本である。なお、 $100\times 120\times 100\text{mm}$ のくさび挿入型試験体は、曲げ試験終了後の梁型試験体よりコンクリートカッターを用いて切り出し、同時に切欠きを加工した。くさび挿入型試験体には、中央に厚さ2mmの亚克力板を使用して切欠きを設け、その切欠きに沿って深さ10mmの溝を両面に取り付けた。また、梁型試験体の切欠きは試験前日にコンクリートカッターを用いて設けた。なお、各試験体共、コンクリート打込み後24~48時間後に脱型し、その後材令28日まで湿空養生（温度 20°C 、湿度100%（RH））を行った。

2. 3 コンクリートの力学特性試験

使用したコンクリートの圧縮強度、引張強度及び動弾性係数の測定は、それぞれ JIS A 1108、A 1113、A 1127に準じて行った。また、静弾性係数の測定は JIS原案〔2〕に準じて行った。更に圧縮試験体の試験片を用いて、水銀圧入法によりコンクリートの細孔分布測定も行った。

切欠き梁型試験体



くさび挿入型試験体

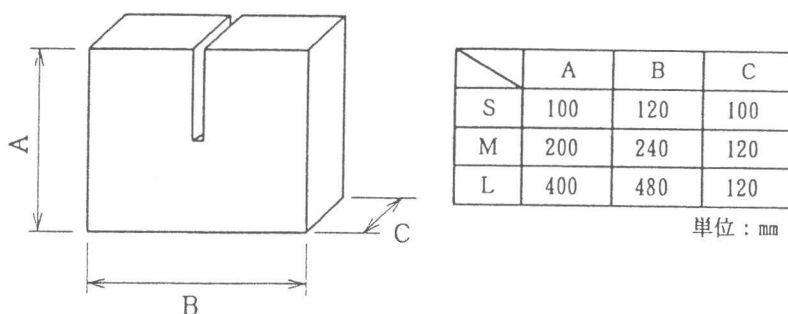


図-1 試験体形状

表-2 コンクリートの力学的特性

シリーズ		圧縮強度 F _c (MPa)	引張強度 F _t (MPa)	静弾性係数 E _c (GPa)	動弾性係数 E _d (GPa)	密度 ρ (g/cm ³)	総細孔容積 TPV (x10 ⁻² cm ³ /g)
20	平均値	20.9	2.36	22.7	27.3	2.29	9.44
	標準偏差	1.01	0.20	0.74	0.68	0.008	
60	平均値	61.1	3.83	35.3	41.8	2.41	4.96
	標準偏差	7.79	0.27	0.75	0.68	0.014	
100	平均値	105.9	6.08	39.8	46.6	2.45	2.26
	標準偏差	3.01	0.25	0.73	0.71	0.013	

2.4 コンクリートの

破壊エネルギー試験

載荷試験には最大能力 196kNの油圧サーボ式疲労試験機を使用した。切欠き梁の3点曲げ試験はRILEMの試験方法[3]に準じて行った。また、くさび挿入試験では、荷重が最大荷重の95%程度に低下した時点で除荷するパターンの繰り返し載荷試験を行った。なお、切欠き先端位置での変位速度は各大きさの試験体とも一定になるように注意した。更に切欠き開口変位と合わせて試験体両側面の切欠き先端開口変位も記録した。載荷試験終了後、結果の解析に使用するために試験体やリガメント寸法及び質量の測定を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 コンクリートの力学特性

コンクリートの力学特性試験結果を表-2に示す。なお、表中の数値は9本の円柱試験体の平均値である。

表-2より、圧縮強度の増加割合に対して引張強度の増加割合はそれほど大きくはない。また、静弾性係数、動

弾性係数及び密度においては、20シリーズと比べて60シリーズの増加割合が大きい、100シリーズの増加割合は60シリーズに比して大きくはない。一方、総細孔容積は圧縮強度の増大に伴い減少している。更に、各コンクリートの細孔分布を示したものが図-2である。図-2より、最も多く分布している細孔径は20シリーズで43~75nm、60シリーズで24~43nm、100シリーズで

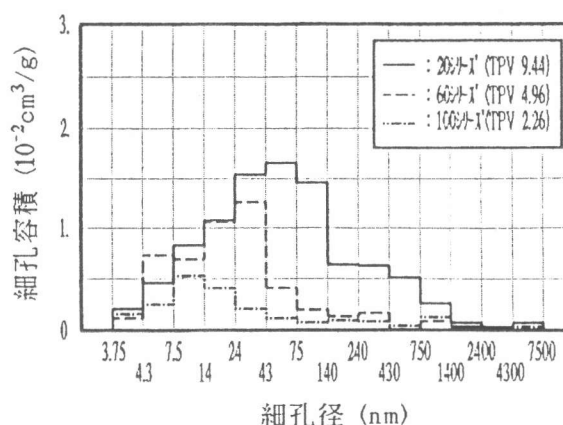


図-2 コンクリートの細孔分布

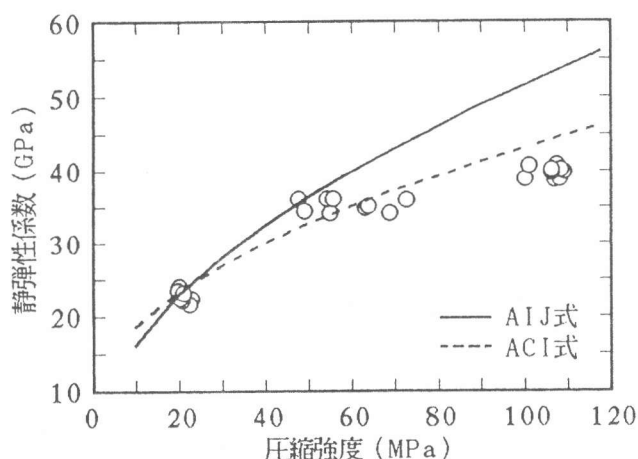


図-3 静弾性係数と圧縮強度の関係

7.5~14mmと強度増大に伴い小さくなることが明らかである。図-3に、コンクリートの静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。図-3より、ACI式[4]がAIJ式[5]よりも本実験結果を良く表わしているが、100シリーズの部分でやや過大評価となっている。

3.2 コンクリートの破壊特性

コンクリートの切欠き梁の3点曲げ試験結果を表-3に、くさび挿入試験結果を表-4に示す。

表-3 切欠き梁の3点曲げ試験結果

試験体 No.	最大荷重 (kN)	破断時 の変位 (mm)	リガメント 面積 (m^2)	荷重-変位 曲線の面積 (Nm)	破壊 エネルギー (N/m)
B20-1	0.723	0.8788	0.003959	0.2127	92.8
B20-2	0.785	0.7917	0.004075	0.1768	77.7
B20-3	0.622	0.9562	0.004012	0.1897	88.8
B60-2	1.308	0.9513	0.005025	0.3542	106.0
B60-3	1.340	1.0071	0.005108	0.4007	115.0
B100-1	1.738	0.6660	0.005093	0.3219	88.0
B100-2	1.935	0.6438	0.005123	0.3620	94.8
B100-3	1.667	0.7883	0.005103	0.3953	106.9

表-4 くさび挿入試験結果

試験体 No.	最大荷重 (kN)	破断時 の変位 (mm)	リガメント 面積 (m^2)	荷重-変位 曲線の面積 (Nm)	破壊 エネルギー (N/m)
S20-1	2.18	1.7665	0.005177	0.3349	64.70
S20-2	1.90	1.6048	0.005131	0.4073	79.38
S20-3	1.60	1.9334	0.005080	0.4146	81.62
M20-1	3.31	2.4742	0.010120	1.0985	108.55
M20-2	2.87	2.1033	0.010151	0.8497	83.71
M20-3	2.86	2.0640	0.010115	0.7733	76.45
L20-1	5.61	2.7369	0.020307	2.3523	115.83
L20-2	5.35	2.3043	0.020009	1.9938	99.65
L20-3	5.34	1.2654	0.019849	1.6025	80.73
S60-1	2.74	1.1620	0.005085	0.3813	74.97
S60-2	2.87	1.3559	0.005106	0.4587	89.84
S60-3	3.08	1.0495	0.005121	0.4566	89.16
M60-1	4.56	1.9883	0.010165	1.0749	105.74
M60-2	4.60	2.0260	0.010201	1.0160	99.60
M60-3	5.15	1.6254	0.010125	1.0053	99.29
L60-1	9.37	1.4373	0.020158	2.1794	108.12
L60-2	8.10	1.2174	0.020125	1.8952	94.17
L60-3	9.11	1.6392	0.020219	2.2317	110.38
S100-1	3.71	0.9546	0.005138	0.4218	82.09
S100-2	3.83	1.0228	0.005204	0.4284	82.31
S100-3	3.88	0.9413	0.005138	0.4346	84.58
M100-1	6.03	1.2097	0.010105	0.8390	83.02
M100-2	6.53	1.2156	0.010976	0.9326	84.96
M100-3	6.44	1.4415	0.010000	0.9082	90.82
L100-2	10.49	0.6336	0.019924	1.7189	86.27
L100-3	12.71	1.2035	0.021508	2.5067	116.54

更に、それらの荷重-変位曲線を図-4に示す。

図-4より、コンクリート強度が増大するにつれて、最大荷重に達した後の荷重下降領域で荷重が急激に低下する傾向が顕著に認められる。

3.3 破壊エネルギーと圧縮強度

表-3より、切欠き梁の3点曲げ試験から得られた破壊エネルギーの平均を示すと20シリーズが86.4N/m、60シリーズが110.5N/m、100シリーズが96.6N/mである。これらより破壊エネルギーは圧縮強度の増大と同様に単純に増加するのではなく、60シリーズよりも100シリーズの方が低下している。また、同様の傾向がくさび挿入試験より求められた破壊エネルギーにも認められる(表-4)。

各試験体の破壊エネルギーと圧縮強度の関係を示した図-5より、切欠き梁試験体及び寸法の異なる3種類のくさび挿入型試験体とも、圧縮強度60MPaをピークとする上側に凸の変化を示した。特に、切欠き梁試験体とくさび挿入型試験体のSシリーズを比較すると、同一断面積ではあってもひずみ勾配の影響により切欠き梁試験体の方が、より大きな破壊エネルギー値を示している。

強度が高くなるにつれ、組織が緻密になることは明らかであるが、破壊エネルギーが低下することにより破壊が脆性化している。したがって、より靱性を向上させる手法の開発が高強度化に際しては重要である。

3.4 破壊エネルギーと

試験体寸法

くさび挿入試験における各圧縮強度毎の破壊エネルギーと高さ100mmのものに対する試験体寸法比の関係を図-

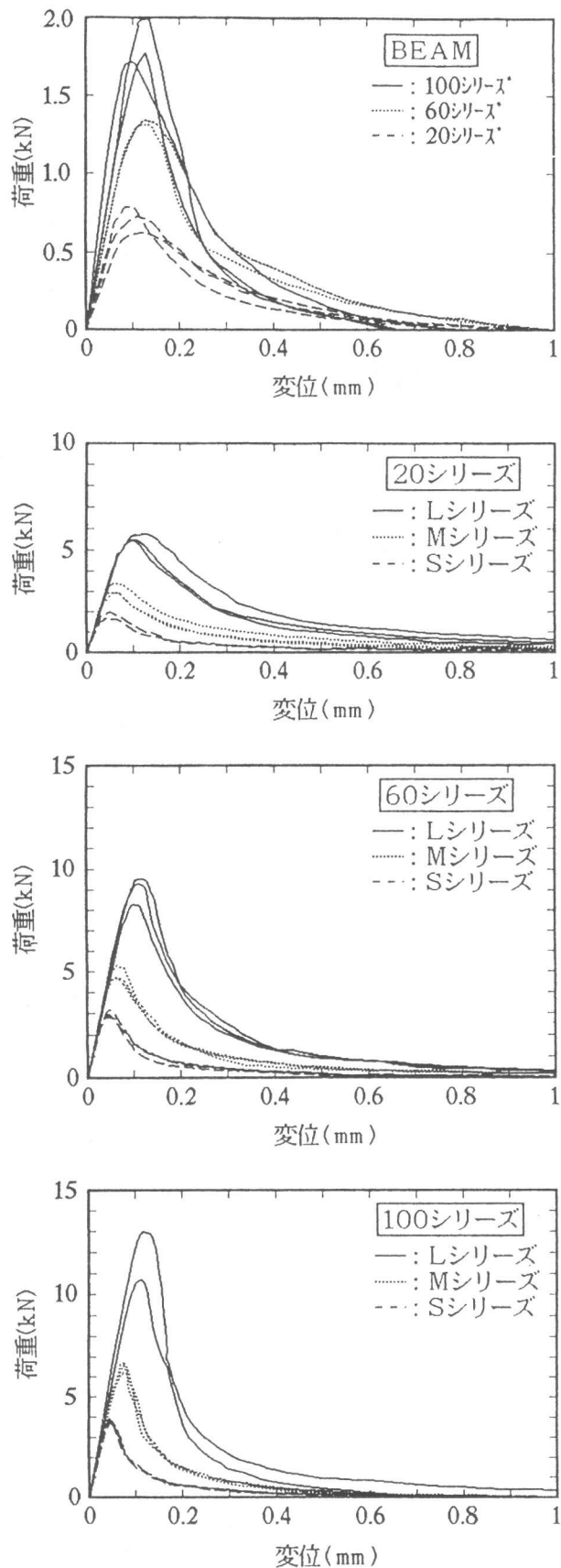


図-4 荷重-変位曲線

6に示す。図-6より、全体的には試験体寸法比の増加に伴い破壊エネルギーも増加している。20及び60シリーズでは、リガメント長さが最大骨材寸法の30倍を過ぎてようやく破壊エネルギーが一定値に近づく傾向を見せた。ただし、100シリーズの増加率が他の2シリーズとは異なっており、この点は今後更に検討する必要がある。

4. まとめ

硬化セメントペーストの微細構造のみを3段階に変化させたコンクリートを使用して切欠き梁試験体と3段階に寸法の異なるくさび挿入試験体を作製し、コンクリートの破壊エネルギー特性について、試験体形状及び寸法効果の影響を検討した。その結果、圧縮強度の増大に伴って、約60MPaまでは破壊エネルギーが増大するものの、100MPa程度の高強度になると破壊エネルギーはむしろ低下した。また、切欠き梁試験体では圧縮強度の増大による破壊エネルギーの変化は大きい、くさび挿入型試験体では中間サイズの例を除いて、圧縮強度が60MPaから100MPaに増加しても破壊エネルギーの低下は極僅かであった。更に、試験体寸法比の増加に伴い破壊エネルギーも増加した。

本研究の一部は平成3年度(財)牧田国際育英会の補助を受けて行ったものであり、ここに記して謝意を表します。また、本研究の実施に当り便宜を計って戴いた東北大学工学部 平井和喜教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) コンクリート工学協会: コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム, JCI-C19, 1990. 3
- 2) 鈴木計夫: コンクリートの静弾性係数試験方法(案), コンクリート工学 Vol. 23 No. 3, pp. 12-16, 1985
- 3) RILEM Draft recommendation(TC50-FMC): Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend test on notch beams, Material and Structures, No. 18, pp. 285-290, 1985
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, pp. 44-46, 1986
- 5) ACI Committee 363: State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, ACI Journal 81, pp. 364-411, 1984

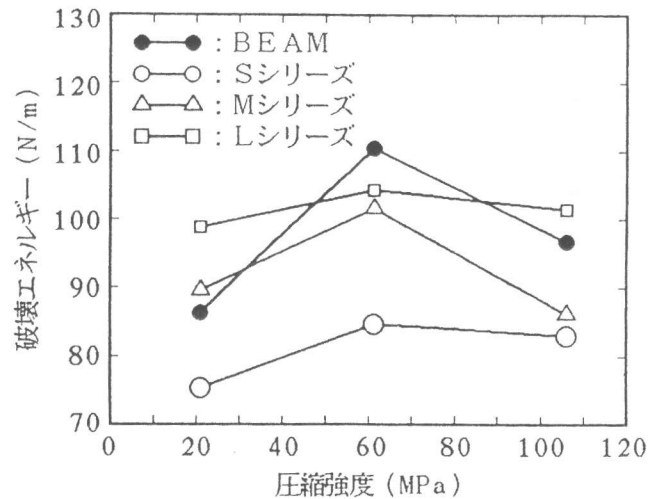


図-5 破壊エネルギーと圧縮強度の関係

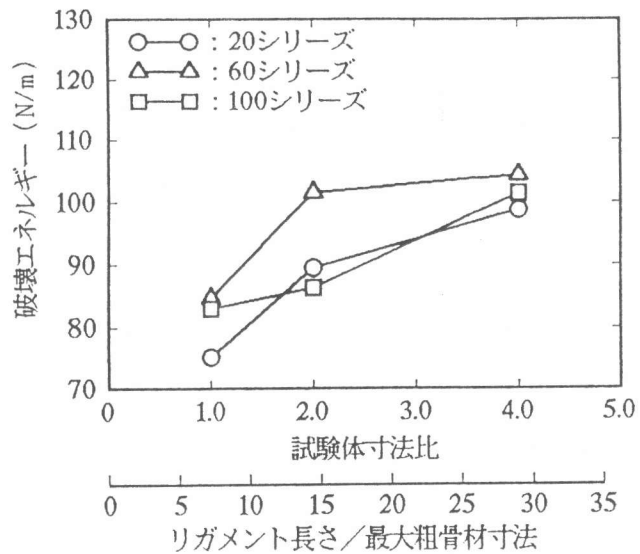


図-6 破壊エネルギーと試験体寸法比の関係