モルタル試験体の静曲げ強度と衝撃曲げ強度との関係について*

佐 治 泰 次** 在 永 末 徳***

Relation between Static and Dynamic Flexural Strengths of Mortar Specimens

by

Taiji SAJI and Suenori ARINAGA

(Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka)

The purpose of this investigation was to examine what factors exert influence on the dynamic flexural strength of various mortar specimens, which was determined by a drop hammer testing apparatus.

The results obtained were summarized as follows:

- (1) The dynamic flexural strength of mortar specimens increased up to the age of 7 days.
- (2) When mortar specimens had the same static flexural strength, their dynamic flexural strength was hardly influenced by the ratio of sand to cement, S/C . For the specimens having the same S/C , the ones with a large ratio of water to cement W/C were stronger on dynamic flexural strength than the ones with a small W/C , even though the static flexural strength of the latter was large.
- (3) The dynamic flexural strength was not interrelated to the static flexural strength, but interrelated to the first or the second kink point of the load-strain curve of bending specimens with a notch. The dynamic flexural strength depended on the magnitude of the energy absorbed till the first or the second kink point.

(Received Nov. 29, 1979)

キー・ワード：衝撃曲げ破壊指数，下位特異点，上位特異点，吸収エネルギー係数

1 緒 言

モルタル・コンクリートなどの衝撃曲げ強度に関する研究は、杉木¹⁾、明石²⁾などの研究のほか種々の面から実施されている。

筆者等も、モルタルの衝撃曲げ強度は、静曲げ強度と単純な比例関係にないこと、同一静曲げ強度のモルタルとコンクリートの衝撃曲げ強度を比較すると、前者の衝撃曲げ強度の方が大きい傾向を示すことなどを述べた³⁾。

本報告の前半は、主としてモルタルの調合・材令の変化に対する静曲げ強度と衝撃曲げ強度の関係に関する実験的研究であり、後半は、モルタルの静曲げおよび衝撃曲げ破壊過程において試験体が示す力学的特性に着目し、衝撃曲げ強度と静曲げ試験から求めた吸収エネルギーとの相関性について実験的研究を行ったもの

である。

なお、コンクリートでは大きな試験体が必要であり、また、粗骨材が介在することにより、現象の解析が複雑になるなどのため、前段階の実験としてモルタルによる実験を行った。

2 モルタルの調合・材令と衝撃曲げ強度に関する実験（実験-I）

2・1 実験計画

（実験-I）では衝撃曲げ強度がモルタルの調合や材令によってどのように変化するかを把握するために、砂セメント比 S/C を一定にして水セメント比 W/C を変化させた場合と、水セメント比を一定にして砂セメント比を変化させた場合について、各材令における静曲げ強度と衝撃曲げ強度を求め、これらの相関性を求めた。

2・2 試験体について

試験体の作製についてセメントは、普通ポルトランドセメント、砂は海砂である。海砂の最大粒径・比重

* 原稿受理 昭和54年11月29日

** 正 会 員 九州大学工学部 福岡市東区箱崎

*** 九州大学工学部 福岡市東区箱崎

・吸水率は、それぞれ 2.5 mm, 2.60, 1.65%である。

静曲げおよび衝撃曲げ強度試験は、 $4 \times 4 \times 16$ (cm)の試験体により、静圧縮強度は、 $\phi 7.5 \times 15$ (cm)の円柱形試験体によった。

曲げ試験体は、(JIS R 5201)のセメント強度試験の供試体の作り方に準じて作製し、作製後養生室に静置し、4時間後に試験体の表面を平滑にし、24時間を経て脱型した。その後、水温 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温水槽に入れ、実験直前まで水中養生とし、実験時に布でその表面を拭って実験を行った。また材令1日のものは脱型後湿布養生とした。

実験材令は、モルタル試験体の衝撃曲げ強度と材令との関係を調べるために、1, 4, 7, 28, 60日の各日で実施した。

調査は、砂セメント比を一定にして水セメント比を0.32, 0.40, 0.47と変化させたものと、水セメント比を一定にして砂セメント比を1.0, 1.8, 2.5と変化させたものの2群に分けた。これらの調査はTable Iに示す。

各調査、材令ごとに準備した試験体の本数は、静曲げ試験に3本、衝撃曲げ試験に9本ずつである。

2・3 実験の方法

Table I. Mix proportion of mortar (Test-1).

Series	Mix proportions		
	Cement (C)	Sand (S)	Water (W)
I-A	1.0	1.0	0.40
I-B	1.0	1.8	0.40
I-C	1.0	2.5	0.40
I-D	1.0	1.8	0.32
I-E	1.0	1.8	0.47

Fig. 1. Impact bending test apparatus.

モルタル試験体の衝撃曲げ強度試験は、鋼球落下式衝撃曲げ試験装置で行い、その概要をFig. 1に示した。図のように試験体をスパン15 cmの単純支持とし、その中央に直径3.81 cm・重量0.225 kgの鋼球を落下衝突させ、衝撃曲げを加えた。

衝撃曲げ強度の大小は、その試験体がちょうど一打撃で破壊するときの打撃エネルギーの大きさと比較することとし、その大きさを衝撃曲げ破壊指数 $I_B = WH_0$ で表すことにした。ここに W は鋼球の重量 (kg), H_0 は試験体がちょうど一打撃で破壊するときの鋼球の落下高さ (破壊落高 cm) である。破壊落高は漸近去によって求めた^{*1}。

また、材料の力学的性状として、静圧縮強度および静弾性係数を3本の円柱形試験体 ($\phi 7.5 \times 15$ cm) の平均値、動弾性係数は超音波測定法によって測定し、3本の試験体の平均値から求めた。それらを一括してTable IIに示した。

2・4 実験の結果と考察

Table II. Physical properties of mortar (Test-1).

Series	Age (day)	Static test			
		Com- pressive strength F_c (kg/cm ²)	Flexural strength σ_B (kg/cm ²)	Statical elastic modulus $E_s (\times 10^5)$ (kg/cm ²)	Dynamic elastic modulus $E_D (\times 10^5)$ (kg/cm ²)
I-A	1	160	31.4	1.49	1.73
	4	308	59.0	2.33	2.57
	7	331	80.2	2.40	3.68
	28	446	91.1	2.90	3.99
	60	532	96.1	3.10	4.15
I-B	1	157	27.7	1.80	2.00
	4	326	51.9	2.63	2.83
	7	314	76.6	2.70	3.91
	28	443	82.7	3.10	4.25
	60	512	87.4	3.40	4.48
I-C	1	154	30.9	1.90	2.09
	4	301	59.0	2.73	2.92
	7	369	64.0	2.80	4.16
	28	460	75.5	3.30	4.36
	60	494	86.4	3.50	4.44
I-D	1	221	33.1	2.07	2.60
	4	374	59.3	3.13	3.66
	7	408	77.3	3.20	4.07
	28	510	90.5	3.70	4.73
	60	572	100.2	3.90	4.86
I-E	1	146	18.7	1.10	1.89
	4	281	45.4	1.63	2.72
	7	300	63.0	1.70	3.61
	28	401	80.7	2.20	4.03
	60	480	84.7	2.40	4.36

*1 漸近法は、試験体が一打撃で破壊すると予想される落下高さから鋼球を落下させ、破壊しなかった場合、そのつど新しい試験体を用いて落下高さを上・下させ、一打撃で破壊する落下高さ (破壊落高) H_0 を試行錯誤しながら求める方法であり、合計9~10本の試験体を使用する。また求めた H_0 は、統計的検討は加えられないが、精度は極めて高く、本実験では H_0 の誤差は ± 0.5 cm 程度と考えられる。

Fig. 2. Relation between age and I_B ($S/C=1.8$). Fig. 3. Relation between age and I_B ($W/C=40\%$).

2・4・1 材令と衝撃曲げ破壊指数 I_B との関係

以上の計画に基づいて実施した実験結果から、材令と衝撃曲げ破壊指数 I_B との関係を図示すれば、Fig. 2 および Fig. 3 が得られる。

各図によると、いずれの場合も材令7日の I_B 値が最大値を示し、以後、材令が増加しても I_B 値はほとんど増加しないという特徴がみられる。また Fig. 2 では、材令1日の場合を除き、水セメント比が小さい試験体の方が静曲げ強度 σ_B が大きいにもかかわらず、 I_B 値は小さい傾向にある。また Fig. 3 によって各材令ごとに砂セメント比の異なる試験体の I_B 値を比較すると、砂セメント比の変化に対する I_B 値の関係はあまり明確ではない。

2・4・2 静曲げ強度と衝撃曲げ破壊指数との関係

つぎに、静曲げ強度 σ_B と衝撃曲げ破壊指数 I_B との関係を砂セメント比 S/C ＝一定のものと、水セメント比 W/C ＝一定のものに分けて図示すると、Fig. 4 および Fig. 5 が得られる。

これらの図から、 σ_B と I_B 値との間には単純な比例関係はなく、 σ_B の値が $60 \sim 80 \text{ kg/cm}^2$ あたりを頂点

Fig. 4. Relation between σ_B and I_B ($S/C=1.8$). Fig. 5. Relation between σ_B and I_B ($W/C=40\%$). Fig. 6. Relation between σ_B and I_B (neglect age and proportion).

としてそれより σ_B の値が増加しても I_B 値は増加せず、むしろ低下する傾向がみられる。また Fig. 4 では、Fig. 2 と同様に水セメント比が小さいものの方が、 σ_B の値は大きいにもかかわらず I_B 値は小さくなる傾向があり、衝撃曲げ破壊の一つの特徴になっている。また、調合、材令などを無視した σ_B と I_B 値との関係を図示すると Fig. 6 が求まる。この図から、 σ_B が $40 \sim 100 \text{ kg/cm}^2$ の範囲で、 σ_B と I_B 値の間には、一定の相関性は認められない。

3 静曲げ試験における吸収エネルギーと衝撃曲げ破壊指数との関係の検討実験（実験-II）

3・1 実験計画

2節で、調合、材令などを無視したモルタル試験体の衝撃曲げ破壊指数 I_B と静曲げ強度 σ_B との間には、一定の相関性は見いだしたいことを述べた。

そこで上記二者の相関性不在の原因を追求すると、以下のことがその主な原因と考えられる。すなわち、通常のモルタルの静曲げ破壊の場合、曲げ応力が次第に増加すると、引張応力の大きな領域に極く微細な欠陥が、逐次発生・蓄積され、その後ひび割れが生じるが、ひび割れは直ちに拡大せず、骨材にその拡大を阻止されるなどの経過を経て破壊し、ぜい性破壊であってもかなり延性的な面をもつ。これに対し衝撃曲げ破壊の場合は、静曲げ破壊と比較し、その破壊はよりぜい性的で加力点下側近傍にひび割れが生じると、ひび割れはそのまま進展して試験体が破壊する。すなわち、2者の強度上の主要な差は、延・ぜい性的な破壊過程の差によると考えられる。

上記の点に着目して、この（実験-II）では、2節と同様のモルタル試験体を用いて、静曲げ強度と I_B 値との比較でなく、 I_B 値と静曲げ試験における吸収エネルギーとの関係について検討を試みた。

以上のことから、この（実験-II）では、静曲げ試験における試験体中央下側の引張りひずみを求めるために、モルタル試験体中央下側に電気抵抗線ひずみゲージを貼り、静曲げ試験における荷重-ひずみ関係を求め、これらの関係における曲げ破壊点のほか、各特異点までの吸収エネルギーと I_B 値との関係について、主にモルタル強度の高い場合を中心として実験を行った。

なお、試験体の半数は、曲げ試験体の引張応力作用側中央に切欠きを入れた試験体とした。静曲げ試験に切欠きをもつ試験体を用いたのは、切欠きをもつ試験体では曲げひび割れが必ず切欠き先端に生じ、曲げ破壊が単純化され、材料のぜい性を求める試験法として適切と判断したからである。

3・2 試験体について

試験体は2節と同様の $4 \times 4 \times 16$ (cm) の試験体で、作製に用いた各材料も同一のものである。試験体の調合および実験時材令を Table III に示した。

試験体は、引張側中央にひずみゲージ (PL-30) を貼るために、打設後24時間を経て脱型し、ポンドP2 (ポリエステル樹脂) で下地コーティングを行い、水温約20℃の恒温水槽に移し、実験時材令まで水中養生をつづけた。なお、一種類の試験体 (記号II-M) は、温度 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、湿度 $70 \pm 5\%$ の養生室で空中養生とした。

一試験に用いた試験体の本数は、衝撃曲げ強度試験

Table III. Mix proportion of mortar (Test-2).

Series	Age (day)	Mix proportions		
		Cement (C)	Sand (S)	Water (W)
II-A	7	1 0	1.0	0.40
II-B	28			
II-C	60			
II-D	7	1 0	1.8	0.40
II-E	28			
II-F	60			
II-G	7	1.0	2.5	0.40
II-H	28			
II-I	60			
II-J	28	1.0	1.8	0.32
II-K	28	1.0	1.8	0.47
II-L	28	1.0	0	0.40
II-M	28 (Dry)	1.0	1.8	0.40

Fig. 7. Static bending test of specimens with notch.

に9本、静曲げ試験に切欠きをもたないもの3本、切欠きをもつもの3本ずつである。切欠きは、試験体中央下側に、Fig.7のように設け、深さ6mm、幅1mmとした。なお、切欠き形状は、既往の研究および予備実験から選定したもので、両対数の応力-ひずみ関係において、弾性限界およびひび割れ発生点を示す二つの特異点が現れること、寸法比 $c/d=0.10 \sim 0.50$ の範囲であれば、特異点の応力値を破壊強度で相対化した値は、切欠きの寸法比 c/d にはあまり影響をうけないことなどから $c/d=0.15$ を採用した。

3・3 実験の方法と結果

まず、切欠きをもつ試験体ともしない試験体の両者についてスパン 10 cm の単純支持とし、静的に中央集中荷重を加えた。原則として荷重 5 kg を増すごとに試験体中央下側に生じる曲げひずみをひずみゲージから求め、自動デジタルひずみ測定機で記録した。

以上によって得られた測定結果を荷重-ひずみの両対数グラフ上にプロットして各試験体の特異点で求めた。特異点は切欠きをもたない試験体にかか所、切欠きをもつ試験体に二か所認められた。したがって、ここでは切欠きをもつ試験体の場合、下位の特異点を下位特異点、上位のそれを上位特異点と呼ぶことにする。

Fig. 8. Example of singular point (Case of test (II-A)).

Fig. 9. Measurement of absorbed energy.

特異点測定のを Fig. 8 に示した。また、倍率50倍の実体顕微鏡を用いて切欠き先端のひび割れの発生を観測した。その結果、上位特異点付近で切欠きの先端にひび割れが観測されることがわかった。

また、曲げ破壊点および各特異点までの吸収エネルギーは、Fig. 9 に示す面積から近似的に求めたが通常用いられるエネルギー単位 (kg・cm) とは異なるため、以後、吸収エネルギー係数として考察する。ここで各特異

Table IV. Physical properties of mortar (Test-2).

Series	Static test			
	Compressive strength F_c (kg/cm ²)	Flexural strength σ_B (kg/cm ²)	Statistical elastic modulus $E_s(\times 10^5)$ (kg/cm ²)	Dynamic elastic modulus $ED(\times 10^5)$ (kg/cm ²)
II-A	331	80.4	2.40	3.68
II-B	446	91.1	2.90	3.99
II-C	532	96.3	3.10	4.15
II-D	314	77.3	2.70	3.91
II-E	443	82.1	3.10	4.25
II-F	512	86.5	3.40	4.48
II-G	369	64.2	2.80	4.16
II-H	460	75.5	3.30	4.36
II-I	494	86.7	3.50	4.44
II-J	510	90.5	3.70	4.73
II-K	401	80.7	2.20	4.03
II-L	324	97.1	2.10	2.80
II-M	389	77.3	2.60	3.78

点の曲げひずみは、Fig. 8 に示した方法によって直接求めたが、破壊点の曲げひずみは正確に求めることが困難であり、この点では Fig. 8 での最大荷重と折線との交点の曲げひずみを、破壊点の曲げひずみとして採用した。また、切欠きをもつ試験体の各種曲げ応力は、便宜上切欠き部を除かない全断面を用いて計算した。これらによる算定の結果は、材料の静曲げ強度とともに Table V に整理して示した。また、各試験体の破壊落高 H_0 は、2 節と同様に漸近法で求めた。

なお、静圧縮強度、静弾性係数、動弾性係数を求め、Table IV に示した。

3・4 実験結果に対する考察

まず、切欠きをもたない試験体の曲げ破壊点および特異点までの吸収エネルギー係数と衝撃曲げ破壊指数 I_B の関係について考察してみる。

Table V から曲げ破壊点までの吸収エネルギー係数

Table V. Absorbed energy on the static test.

Series	Broken height H_0 (cm)	Broken factor of impact bending (kg・cm)	Specimen without notch						Specimen with notch								
			Kink point			Broken point			The first kink point			The second kink point			Broken point		
			σ_Y (kg/cm ²)	ϵ_Y ($\times 10^{-4}$)	$U_Y \times 10^4$ (kg/cm ²)	σ_B (kg/cm ²)	ϵ_B ($\times 10^{-4}$)	$U_B \times 10^4$ (kg/cm ²)	σ_{Y1} (kg/cm ²)	ϵ_{Y1} ($\times 10^{-4}$)	$U_{Y1} \times 10^4$ (kg/cm ²)	σ_{Y2} (kg/cm ²)	ϵ_{Y2} ($\times 10^{-4}$)	$U_{Y2} \times 10^4$ (kg/cm ²)	σ_b (kg/cm ²)	ϵ_b ($\times 10^{-4}$)	$U_b \times 10^4$ (kg/cm ²)
II-A	60.0	13.50	37.0	1.15	21.3	80.4	2.60	106.4	28.4	0.94	13.4	46.2	2.10	48.5	58.0	3.43	99.5
II-B	53.0	11.93	41.0	1.15	23.6	91.1	3.31	166.4	22.9	0.68	7.7	47.8	1.70	40.6	61.9	3.10	96.0
II-C	51.0	11.48	56.8	1.70	48.3	96.3	3.55	190.0	20.8	0.57	5.9	48.7	1.55	37.8	67.1	2.80	93.9
II-D	55.5	12.49	34.0	0.99	16.3	77.3	2.45	193.4	25.0	0.87	10.9	47.9	1.85	44.3	56.8	2.97	84.4
II-E	52.0	11.70	46.8	1.20	28.1	82.1	2.70	124.8	21.3	0.61	6.5	50.3	1.60	40.2	62.6	2.65	82.9
II-F	53.2	11.97	39.8	1.10	21.9	86.5	2.95	118.6	24.5	0.54	6.6	54.3	1.50	40.7	62.8	3.00	94.2
II-G	53.0	11.93	28.9	1.70	10.6	64.2	2.09	73.9	23.3	0.61	7.1	48.7	1.65	40.2	53.0	2.67	70.8
II-H	55.0	12.38	43.8	1.17	25.6	75.5	3.05	137.8	24.8	0.65	8.1	53.5	1.60	42.8	59.0	3.23	95.3
II-I	52.5	11.81	39.0	0.92	17.8	86.7	2.35	107.7	22.1	0.57	6.3	52.1	1.50	39.1	61.4	2.60	79.8
II-J	45.5	10.24	51.6	1.25	32.3	90.5	2.80	142.4	17.0	0.42	3.6	51.1	1.30	33.2	70.8	2.58	91.3
II-K	55.0	12.38	45.7	1.40	32.0	80.7	2.70	114.2	24.7	0.75	9.3	48.7	1.80	43.8	61.8	2.50	77.3
II-L	47.0	10.58	—	—	—	97.1	—	—	14.8	0.64	4.7	30.8	1.60	24.6	40.0	2.05	41.0
II-M	47.0	10.58	34.0	1.10	18.7	77.3	2.30	85.5	16.4	0.72	5.9	40.6	1.70	34.5	56.8	2.45	69.6

Fig. 10. Relation between U_Y and I_B . Fig. 13. Relation between U_{Y1} and I_B . Fig. 11. Relation between U_B and I_B . Fig. 14. Relation between U_b and I_B . Fig. 12. Relation between U_{Y1} and I_B .

U_B と I_B 値との関係を抽出して図示すると, Fig. 11 が得られ, 両者の間には, 一定の相関性は認められない。また, 同様にして特異点までの吸収エネルギー係数 U_Y と I_B との関係を求めたものは, Fig. 10 であるが, この両者の間には明らかな相関性は存在しない。

つぎに, 切欠きをもつ試験体の場合の下位特異点までの吸収エネルギー係数 U_{Y1} と I_B 値との関係を図示すると, Fig. 13 となり, 両者の間にある程度の相関性が認められる。さらに同様の操作によって切欠きをも

つ試験体の上位特異点までの吸収エネルギー係数 U_{Y2} と I_B 値との関係を図示すると, Fig. 12 が得られ, この場合も一応の相関性を認めることができる。しかし曲げ破壊時までの吸収エネルギー係数 U_b と I_B との関係を図示すると, Fig. 14 が得られるが, この場合, 両者の相関性は認め難い。

以上, この(実験-Ⅱ)では, モルタル試験体の衝撃曲げ破壊指数 I_B と吸収エネルギー係数との関係を, モルタル試験体の破壊現象(過程)といった面から再検討を試みたが, 検討結果として切欠きをもつ試験体の各特異点までの吸収エネルギー係数 (U_{Y1} , U_{Y2}) と衝撃曲げ破壊指数 I_B との間には, 一定の相関性が認められることが判明した。

このような相関性の存在理由は, 現在, 直ちに明らかとはなし得ないが, 切欠きをもつ試験体の下位特異点および上位特異点が, それぞれ材料の弾性限界および初期ひび割れ発生点に対応するとみれば, 衝撃曲げ破壊がぜい性的であるため, 材料の弾性限界あるいはひび割れ発生点あたりの材料の強度特性が, 衝撃曲げ強度に関与し, 以後の終局時までの耐力は, 衝撃曲げ破壊には関係しないことによるとしてよいように思われる。

4 結 び

本研究で得られた主な結果を要約して述べると、以下のようになる。

前半のモルタル試験体の調合、材令の変化に対応する静曲げ強度と衝撃曲げ強度の関係を求めた実験によると、

(1) いずれの調合の場合も材令7日までの間は、静曲げ強度と衝撃曲げ強度はほぼ材令に比例して強くなるが、以後、28日、60日の材令では、むしろ衝撃曲げ強度は低下の傾向を示す。

(2) 同一水セメント比の調合で砂セメント比を変えた場合、同一養生・材令の試験体の衝撃曲げ強度はその差が僅少で、砂の含有率の差によって衝撃曲げ強度はあまり影響をうけない結果が得られた。

(3) 砂セメント比を一定にして水セメント比を変化させた場合は、水セメント比の小さな試験体の方が、衝撃曲げ強度は低くなる傾向になった。

(4) 調合・材令などを無視して静曲げ強度と衝撃曲げ強度を比較した場合、この両者の間にはほとんど相関性は認められない。

後半の切欠きをもつ試験体の静曲げ強度と衝撃曲げ強度を比較した実験によれば、

(5) 切欠きをもつ試験体の静曲げ試験における下位

あるいは上位特異点応力と衝撃曲げ強度の間に一定の相関性が見いだされた。このことは、下位および上位特異点が、それぞれ材料の弾性限界あるいはひび割れ発生点に対応するとみれば、材料の弾性限界あるいはひび割れ発生点までの吸収エネルギーが衝撃曲げ強度に関係するとみることによって説明されると思われる。

また、本論文では言及しなかったが、文献3)で述べたように、衝撃曲げ強度が本質的には破壊までのじん性の大きさによって決まるものであれば、衝撃曲げ強度と破壊じん性 (G_{ey} や K_{ey}) との間にも、一定の相関性が存在するものと考えられるが、これについては今後の課題としたい。

本研究に際して、本学助手田口茂久氏、教務員中武幹男氏、技術員津賀山健次氏の協力を得た。文末に記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 杉木六郎, 鵜飼正保, 日本建築学会論文報告集, **103**, 17 (1964).
- 2) 明石外世樹, セメント技術年報, **19**, 354 (1965).
- 3) 佐治泰次, 田口茂久, 中武幹男, 在永末徳, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 43 (1975).
- 4) 小柳 治, 境 賢治, セメント技術年報, **25**, 264(1971).