

軸圧力を受けるコンクリート短柱試験体の 衝撃圧縮強度に関する研究

松 藤 泰 典*

A Study on Impact Compressive Strength of Axial Loaded Concrete Specimen

by

Yasunori MATSUFUJI

(Department of Structural Engineering)

The purpose of this paper is to judge impact property of axial loaded concrete or mortar specimens, when they are subjected to impact compressive force by a drop weight impact testing machine.

Brief of these experimental results are as follows.

- (1) There is a correlation between impact fracture energy and statical strain energy of the specimens without reference to axial load.
- (2) Residual strength of axial loaded specimens begin to drop down over the critical impact level, then impact fracture energy and impact fatigue strength are both lower than that of un-loaded specimens.
- (3) Stress-strain curve of the specimen in impact fatigue test changes with increase of repeat number and shows the same process as compressive fatigue test.

1. 結 言

コンクリートの衝撃実験は、はじめ岩石、石炭等の破砕に関する研究の延長として行われたようで、竹田¹⁾によれば、Passov(1918)が円錐形の錘で立方形試験体に衝撃を加えて実験したのが最初であると言われる。以後、コンクリートの耐衝撃性に関する研究は各方面で多数実施されて現在に至っており、最近でもその研究は活発である。²⁾⁻⁶⁾

コンクリートを構造材料として用いる場合、その主要な用途は圧縮材としての使用であるが、先行圧縮荷重を受けるコンクリート部材の耐衝撃性に関するデータは少いようである。しかし、構造物が震央近くで激しい地震に曝されるような場合、柱部材には衝撃的な軸圧縮力が作用し、鉄筋コンクリート柱ではコンクリートがモルタルと粗骨材とに完全に分離してしまう

現象が知られており、看過できない要素を含んでいるようである。

本研究は、先行軸圧力が作用しているコンクリートあるいはモルタル短柱試験体の衝撃圧縮試験を実施し、衝撃特性の変化について基礎的考察を行ったものである。

衝撃に関する研究の目的は、いずれもコンクリートの耐衝撃性能を評価することにあるが、性能評価の基準には、普通、破壊までに吸収し得るエネルギー量か、あるいは、試験体に生ずる応力およびひずみ量がとられる。後者はコンクリートの耐衝撃機構を解析する上で妥当な方法であるが、計測機器のマッチングやノイズの処理その他種々の問題があるし、前者にも、試験機の剛性や試験体の形状寸法等を含めて試験体の衝撃吸収エネルギー値に代表される実験全体の系としての

* 構造工学科

Table-1 Details of Mix

Mixing	Max.S (mm)	Slump (cm)	Flow (mm)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	W C	S a	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)
CCO	20	18±1.5	—	409	204	0.50	0.48	846	903
CMO	5	—	230±15	568	284	0.50	1.00	1363	0
AC	20	18±1.5	—	293	200	0.68	0.52	933	863
AM	5	—	230±15	441	300	0.68	1.00	1405	0
RC	20	18±1.5	—	340	194	0.57	0.49	871	902
BM	5	—	230±15	526	300	0.57	1.00	1336	0
CC	20	18±1.5	—	390	195	0.50	0.49	842	888
CM	5	—	230±15	595	298	0.50	1.00	1286	0
DC	20	18±1.5	—	461	203	0.44	0.44	732	921
DM	5	—	230±15	715	315	0.44	1.00	1145	0

条件を明確にする必要があり、いずれにしても容易でないが、ここでは比較的簡単に実施し得る方法として落錘式衝撃試験機使用による衝撃エネルギーを基準値として検討した。

2. 実験の概要

2-1 使用材料

実験に用いたモルタルおよびコンクリートは、試験時の圧縮強度 $F_c = 200 \sim 400 \text{ kg/cm}^2$ を目標としたもので、調査を Table-1 に示す。

セメントは日本社製普通ポルトランドセメント、骨材は細骨材に唐津産の海砂、粗骨材に長崎産の砕石を使用した。調査 CCO、CMO 試験体に使用した海砂は、表乾比重：2.59、吸水量：2.12%、粗粒率：2.75、砕石は、表乾比重：2.74、吸水量：1.92%、粗粒率：7.04、その他の試験体に使用した海砂は、表乾比重：2.55、吸水量：2.04%、粗粒率：2.45、砕石は、表乾比重：2.60、吸水量：2.31%、粗粒率：6.75である。最大粒径は、海砂：5mm、砕石：20mm とした。

2-2 試験体

試験体は円柱試験体(直径10cm×高さ20cm)立て打ち、および、直方形試験体(10cm 正方形断面×長さ40cm)横打ちの2種類とし、打設後3~4時間で試験体上面をキャッピング用ストレートエッジで平滑に仕上げた。直方形試験体は養生中に長さ5~30cmに切断し、試験体高さあるいは容積の相違する試験体として使用した。

2-3 養生方法

試験体打設後24時間で脱型し、実験当日まで恒温水

槽(21±3°C)で水中養生とした。試験開始直前に表面水を拭き取り、試験機にセットした。繰返し衝撃試験は一要因を完了するのに数日を要するので、試験体材令は圧縮強度が安定したと思われる8週以降とした。

2-4 衝撃試験機および軸圧加力装置

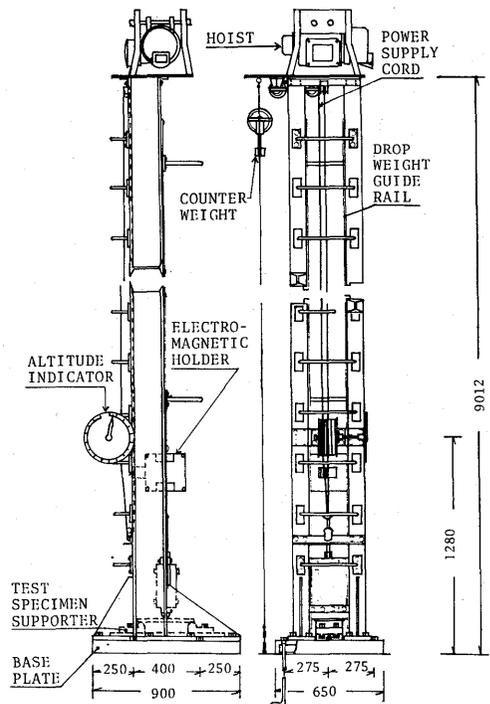


Fig. 1 Drop Weight Testing Machine.

衝撃荷重を与える落錘式衝撃試験機本体の概略の構造を Fig-1 に示す。図中、基礎台盤は、90×65×1.5cm

の鋼製定盤の上に、試験体受台固定用の溝2本を持った70×16×4cmの台盤を溶接したものである。本試験機は、60, 30, 5および2kgの4種類の鋼製重錘を具備している。重錘は電磁石付の重錘保持装置に保持され、ホイストによって任意の高さに吊り上げられる。落下時期はタイマー付電源装置で自由に設定できる。重錘の最大有効落差は7.5m, 最高衝撃速度は12.1m/secで、本実験では30kg重錘を使用した。60kg重錘を使用する場合の最大衝撃エネルギーは450kg-mに達する。

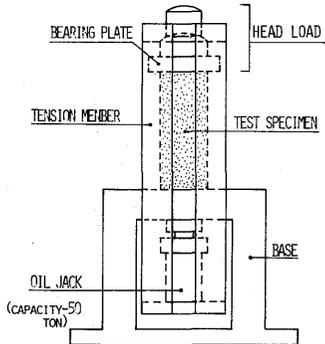


Fig. 2 Sketch of Axial Loading Apparatus.

軸圧加力装置は加力源に最大容量50TONの分離式油圧ジャッキを使用し、Fig-2に示すように、ジャッキの膨張圧を鋼板および載荷板を通して試験体に伝達し、軸圧力とした。試験体上部に置かれる載荷板の重量は、調査CCO, CMOの試験体に対して17.7kg, その他の場合13.8kgである。

試験体が1回の打撃で破壊しない場合、重錘が弾んで再打撃しないように落錘ストッパーを設けた。ストッパーは重錘が載荷板上のヘッドロードに当たって跳ね返った瞬間に重錘を受け止める方式である。

2-5 衝撃後の残存強度 F_r の測定

静的圧縮試験を実施し、応力ひずみ曲線および圧縮強度 F_c を求める。軸圧力 σ_c は圧縮強度を基準として、 $\sigma_c/F_c = n/m$, 但し、 $n=0, 1, 2, 3, m=3, 4$ とした。衝撃試験に使用可能な試験体は1シリーズ42体で、1軸圧力比について8~9体を当てる。試験の手順は、まず、試験体を落錘試験機の中心軸上の所定の位置にセットし、所要軸圧力を油圧ジャッキでかける。次に、重錘を予想破壊落下高さより若干低くセットし、落下させる。落錘はヘッドを通して試験体を打撃し、反発した瞬間にストッパーで落錘を受けとめ、再打を防ぐ。ジャッキ油圧を抜いて打撃を受けた試験体を取り出し、圧縮試験機で残存強度を求める。落下高さを高く

しながら以上の作業を繰返し、同時に丁度1回の打撃で破壊する重錘の落下高さ H_0 を求める。

2-6 衝撃疲労強度 N の測定

残存強度を求める場合と同様に軸圧力を設定し、試験体をセットする。試験体の上下圧盤間にダイヤルゲージをセットし、所定の軸圧力までの応力ひずみ関係を測定する。所定の軸圧到達後ダイヤルゲージを取りはずし、重錘を所定の高さにセットし落下させる。

ジャッキ油圧を抜いて軸圧力を解放し、再びダイヤルゲージをセットして試験体に所定の軸圧力が加えられなくなるまで以上の作業を繰返し、衝撃破壊回数すなわち衝撃疲労強度 N およびその間の応力ひずみ関係の変化を測定する。

3. 実験結果および考察

3-1 基礎的考察

圧縮荷重を受けるコンクリート試験体(断面積 A , 高さ h)の応力ひずみ関係を、Fig-3において、初期弾性係数 E_i で立ち上がり、点 C で圧縮強度 F_c を示した後、破壊点 D で終局ひずみ ϵ_D に到達すると仮定し、この間の応力ひずみ曲線を $\sigma = f(\epsilon)$ とすれば、破壊までのひずみエネルギー S_0 は、試験体体積 $V = Ah$ として、

$$S_0 = V \int_0^{\epsilon_D} f(\epsilon) d\epsilon \quad (1)$$

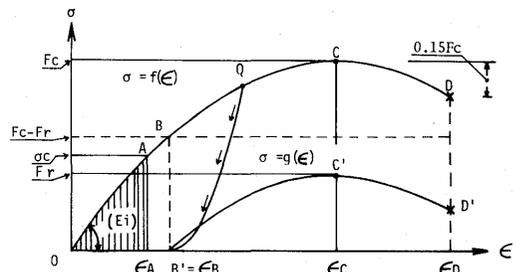


Fig. 3 Relation between Stress and Strain.

衝撃荷重を受けた試験体の残存強度試験における応力ひずみ関係を、Fig-3において、見掛上、点 Q まで加圧除荷後、再加力において $\widehat{B'C'D'}$ と推移し、点 C' で残存強度 F_r を示し、その終局ひずみは ϵ_D に等しいと仮定し、この間の応力ひずみ曲線 $\sigma = g(\epsilon)$ とする。

いま、点 B の座標を、 $(F_c - F_r), \epsilon_B$ とし、 $g(\epsilon)$ の曲線 $\widehat{B'C'D'}$ は $f(\epsilon)$ の \widehat{BCD} を平行移動したものに等しいと仮定すれば、 $g(\epsilon)$ は、

$$g(\epsilon) = f(\epsilon) - (F_c - F_r) \quad (2)$$

このとき、破壊までの残存ひずみエネルギー S_r は、

$$S_r = V \int_{\epsilon_B}^{\epsilon_D} g(\epsilon) d\epsilon$$

$$= V \int_{\epsilon_B}^{\epsilon_D} \{f(\epsilon) - (F_c - F_r)\} d\epsilon \quad (3)$$

衝撃によって生じるひずみエネルギーの損失 S は S_0 と S_r との差で与えられ、(1)、(3)式より、

$$S = V \left\{ \int_0^{\epsilon_B} f(\epsilon) d\epsilon + (F_c - F_r)(\epsilon_D - \epsilon_B) \right\} \quad (4)$$

この損失エネルギー S は、軸圧力と衝撃とによって試験体に生じた損傷の程度を表すものである。

さて、試験体に軸圧力を加えようとするれば必ず試験体に載荷板を置くことになり、この影響を無視することはできない。いま、重錘 W およびヘッドロード W_f を剛体と仮定して Fig.4 のようなモデルを考える。

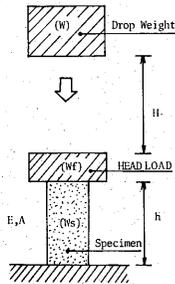


Fig. 4 Diagram of Impact Fracture Test.

高さ H より重錘 W を自由落下させるとき、衝突位置での衝撃エネルギー U は、 $U = WH$ 、丁度1回の打撃で破壊するときの落下高さを H_0 、そのときの衝撃エネルギーを衝撃破壊エネルギー U_0 とすれば、 U_0 は、 $U_0 = WH_0$ で与えられる。

重錘 W による圧縮応力 $\sigma_s = W/A$ 、同変形量 $\delta_s = Wh/EA$ 、重錘が高さ H から自由落下して衝突するときの試験体に生ずる衝撃圧縮応力を σ_a とすれば、 σ_a と σ_s の間に、 $\sigma_a = n\sigma_s$ が成立する。ここに n は衝撃係数で、試験体の衝撃変形が静的弾性変形と相似であると仮定し、衝突直後の系の速度に運動量保存則を適用すれば次式で与えられる⁷⁾。

$$n = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_s} k} \quad (5)$$

但し、

$$k = (1 + \frac{W_s}{3W} + \frac{W_f}{W}) / (1 + \frac{W_s}{2W} + \frac{W_f}{W})^2$$

係数 k は落錘のエネルギーと、試験体に弾性ひずみエネルギーとして吸収されるそれとの比である。

衝撃係数 n は、 $H \gg \delta_s$ のとき、 $n \cong \sqrt{2Hk/\delta_s}$ となり、 $U = WH$ および $\sigma_a = n\sigma_s$ より

$$U = \frac{\sigma_a^2 Ah}{2Ek} \quad (6)$$

(6)式は載荷板の影響を考慮した場合の、衝撃エネルギーと試験体に生ずる衝撃圧縮応力との関係を与えるものである。

S_0 および S に対応する衝撃エネルギーを、それぞれ U_0 および U とし、衝撃時に一定の比率でひずみエネルギーとして吸収されると仮定すれば、両者の間に(7)式が成立する。

$$\frac{U}{U_0} = \frac{S}{S_0} = \frac{\int_0^{\epsilon_B} f(\epsilon) d\epsilon + (F_c - F_r)(\epsilon_D - \epsilon_B)}{\int_0^{\epsilon_D} f(\epsilon) d\epsilon} \quad (7)$$

(7)式は破壊落下高さ H_0 以下で衝撃するときの、衝撃エネルギーと残存強度との関係を与えるものである。

次に、軸圧力 σ_c を受ける試験体が丁度1回の打撃で破壊する場合を考える。

Fig-3において、軸圧力 σ_c による試験体のひずみを ϵ_A とすれば、 ϵ_A までのひずみエネルギー S_A は、

$$S_A = V \int_0^{\epsilon_A} f(\epsilon) d\epsilon \quad (8)$$

試験体が破壊するまでのひずみエネルギー S_0 と S_A との差が軸圧力 σ_c を受ける試験体の残存ひずみエネルギー S_{rs} である。(7)式の場合と同様の仮定をし、軸圧力のないときの衝撃破壊エネルギーを U_{00} とすれば、 U_{00} は S_0 に、 U_0 は S_{rs} にそれぞれ対応し、

$$\frac{U_0}{U_{00}} = \frac{S_{rs}}{S_0} = 1 - \frac{\int_0^{\epsilon_A} f(\epsilon) d\epsilon}{\int_0^{\epsilon_D} f(\epsilon) d\epsilon} \quad (9)$$

(9)式は軸圧力と衝撃破壊エネルギーとの関係を与えるものである。

一般材料に対し、破壊点近傍までを含めた応力ひずみ関係式として古くから用いられているものに放物線式があり、コンクリートに対しては、細部は別として応力ひずみ関係の大体の性質を示し得る式として知られている。初期弾性係数を E_i とすれば、放物線式は(10)式で与えられる。

$$f(\epsilon) = \frac{2E_i}{a} \epsilon (1 - \frac{E_i}{2aF_c} \epsilon) \quad (10)$$

(7)、(10)式より、

$$\frac{U}{U_0} = \frac{4}{6-a} \left[1 - \left\{ 1 - \frac{2}{a} \left(1 - \frac{F_r}{F_c} \right) \right\}^2 \right] \quad (11)$$

ここに係数 a は終局ひずみ ϵ_D に関するもので、圧縮強度時に同時に ϵ_D に達する場合、 $a=2.0$ 、はりの理論強度算定時には破壊点 D の座標 $\sigma_D = 0.85F_c$ 、 $\epsilon_D = 3 \sim 4\%$ 程度にとられるが強度を越えて(10)式を仮定する場合、 $a=2.775$ となる。

$a=2$ とすれば(11)式は次のように整理される。

$$\frac{U}{U_0} + \left(\frac{F_r}{F_c}\right)^2 = 1 \quad (12)$$

また、(9)、(10)式より、

$$\frac{U_0}{U_{00}} + \frac{8}{a^2(6-a)} \left\{ 2 - \left(2 - \frac{\sigma_c}{F_c} \right) \sqrt{1 - \frac{\sigma_c}{F_c}} \right\} = 1 \quad (13)$$

(11)、(12)式は応力ひずみ関係を放物線式で表したときの、衝撃エネルギーと残存強度との関係を、(13)式は同じく、衝撃エネルギーと軸圧力との関係を与えるものである。

非線形材料の応力ひずみ関係式としては、その他にBachの指数関係式もよく用いられる。Bachの指数式は α, m を材料定数として $\epsilon = \alpha \sigma^m$ で与えられ、これを(9)式に代入すれば、

$$\frac{U_0}{U_{00}} + \left(\frac{\sigma_c}{F_c}\right)^{m+1} = 1 \quad (14)$$

$m=1$ のとき Hooke の法則に従う弾性材料を示す。

3-2 残存強度試験結果とその考察

(1) 静的特性と衝撃破壊エネルギーとの関係

残存強度試験は丁度1回の衝撃で破壊する重錘の落下高さを求める試験である。

衝撃破壊は種々の状況を呈し、残存強度が0になる状態を破壊とすることが必ずしも現実的であるとは言えず、定義が困難であったが、一般に試験体が次の状態になったときに破壊とみなした。

- ① 完全な爆裂の現象や、試験体が縦や横方向のひび割れ破壊を示すなど、試験体が複数に分離した場合

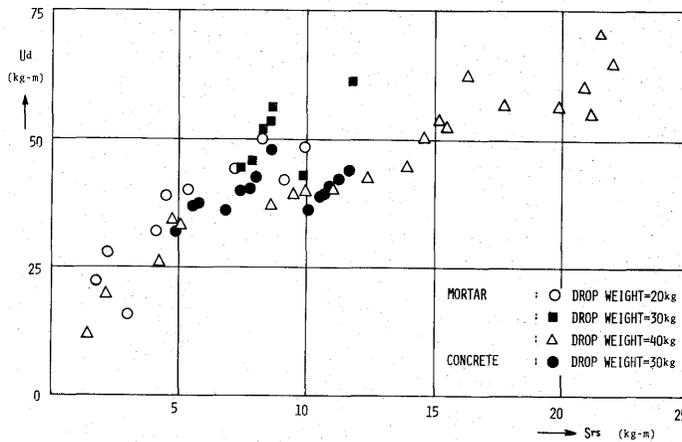


Fig. 5 Impact Failure Energy U_0 versus Statical Strain Energy Srs .

Table-2 Minimum Drop Height H_0 (cm) at Impact Failure

Mixing	Age (days)	F_c (kg/cm ²)	E ($\times 10^6$ kg/cm ²)	σ_c/F_c					
				0	0.25	0.33	0.50	0.67	0.75
CCO	9	169	1.61	128	—	125	—	108	—
	16	233	2.19	145	—	137	135	123	—
	17	251	1.86	138	—	132	123	—	—
	19	273	2.07	149	—	142	134	—	—
CMO	10	178	1.20	180	—	175	155	—	—
	10	187	1.31	190	—	170	—	150	—
AC1	71	209	2.38	150	135	—	110	—	85
BC1	56	241	2.31	159	146	—	118	—	83
CC1	43	312	2.55	154	135	—	100	—	—
DC1	54	423	3.05	200	150	—	125	—	85

- ② 試験体高さが低い時に多く見られたが、試験体上下端部が破壊して衝撃を加える度に粉末が飛散する状態になった場合
- ③ 軸圧力を受ける試験体では、衝撃後所定の軸圧まで再加力できなくなった場合

Table-2はこの定義によって得られた破壊落下高さ H_0 を示す。

軸圧力を受ける試験体の残存ひずみエネルギー S_{rs} は(1),(8)式より $S_{rs} = S_0 - S_A$ で得られる。この S_{rs} を消費するために衝撃破壊エネルギー U_0 が必要であったと仮定すれば両者の間には正の相関関係が成立しなければならない。

調査CCO, CMO試験体による U_0 と S_{rs} との関係を、材令条件の近い佐治の実験結果⁵⁾と対比してFig-5に示す。佐治の実験では軸圧力 O で落錘は20, 40kgの2種類を使用している。

S_{rs} の数値計算の際に E_i の代りに $0.3F_c$ 近傍の割線弾性係数を用いたので、結果的に終局ひずみ $\epsilon_D = 4.7\%$ 程度に想定したことになり、試験体のエネルギー吸収能力を過大評価しているかも知れないが、実験結果では $U_0/S_{rs} = 3 \sim 6$ の範囲にあり、静的残存ひずみエネルギーの増加に対し、衝撃破壊エネルギーの増加率は徐々に低下する。また、図から明らかなように、パラメーターに残存ひずみエネルギー S_{rs} を選べば、軸圧力を受ける試験体の衝撃特性を軸圧力を受けない試験体と同等に評価することが可能になる。

(2) 軸圧力と衝撃エネルギーとの関係

軸圧力を受けない試験体の衝撃破壊エネルギー U_{00} を基準として、Table-2から得られる衝撃破壊エネルギー比 U_0/U_{00} と軸圧力比 σ_c/F_c との関係を、(13),(14)式と共にFig-6に示す。

若材令コンクリートは軸圧力の影響が小さく、 $a = 2.775$ とした放物線式で表わされる。

経過材令の大きい試験体は完全弾性体と仮定した曲線で表わされ、モルタル、コンクリート共に高強度になるに従って軸圧力の影響を受け易くなる。

軸圧力の評価は最も安全側を考慮すれば(14)式で $m = 0$ とする場合が考えられよう。

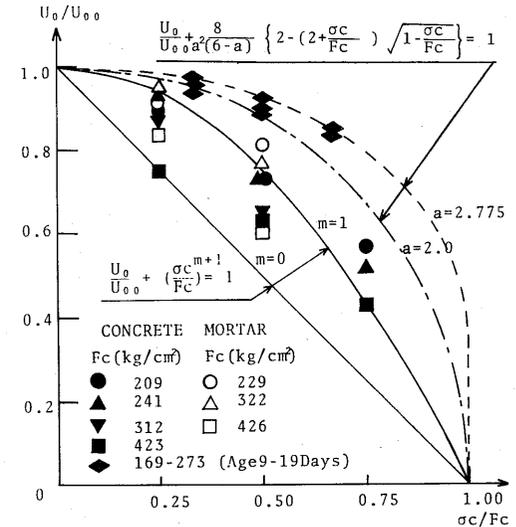


Fig. 6 Impact Energy Level U_0/U_{00} versus Axial Loading Ratio σ_c/F_c

(3) 軸圧力と残存強度との関係

衝撃破壊高さ H_0 を求める残存強度試験で、同時に H_0 に至る衝撃高さの変化に対する試験体の損傷の度合を知ることができる。軸圧力を受ける試験体の衝撃破壊エネルギー U_0 を基準として、衝撃エネルギー比 U/U_0 と圧縮強度に対する残存強度比 F_r/F_c との関係の一例をFig-7に示す。

Table-3 Residual Strength F_r (kg/cm²) (Effects of Head Load and Drop Height of Weight)

Mixing	Age (days)	F _c (kg/cm ²)	E (×10 ⁸ kg/cm ²)	$\frac{\sigma_c}{F_c}$	Wf (kg)	Drop Height H(cm) of Weight							
						50	100	150	200	250	300	350	400
AC 2	76	274	2.24	0	13.8	207	191	171	98	38	—	—	—
					19.5	223	168	120	61	14	—	—	—
					25.1	—	191	191	113	65	41	—	—
BC 2	66	316	1.96	0.40	13.8	—	264	159	67	—	—	—	—
					25.1	—	320	312	124	45	—	—	—
CC 2	59	321	2.37	0	13.8	—	—	327	210	54	—	—	—
					25.1	—	—	—	—	299	102	149	33
DC 2	56	423	2.98	0.50	13.8	—	364	389	0	—	—	—	—
					25.1	—	384	—	330	254	0	—	—

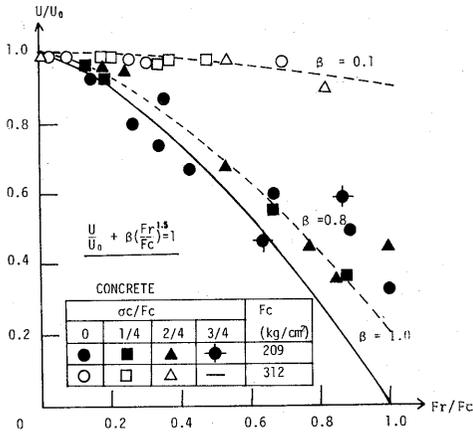


Fig. 7 Impact Energy Level U/U_0 versus Residual Strength Ratio Fr/F_c

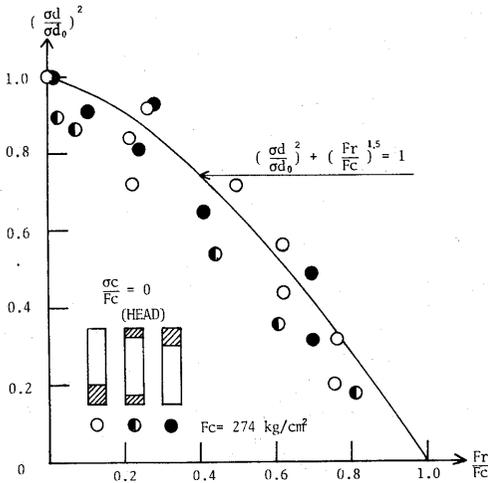


Fig. 8 Square of Impact Stress Level $(\sigma_d/\sigma_0)^2$ versus Residual Strength Ratio Fr/F_c (Effect of Head Load)

軸圧力は図示のようにも含めて4種類であるが、衝撃水準として U/U_0 をとれば、同一調査では軸圧力の差が残存強度比に影響しなくなることがわかる。(12)式より得られた実験式は実験値の傾向を十分に表わしているようである。重錘落下高さの増加による残存強度比の低下開始、即ち、試験体が明らかに損傷を受け始める衝撃水準には限界値が存在するようであり、同時にそれは調査の差異によって変化する傾向が伺える。

(4) ヘッドロードと残存強度との関係

前述のように試験体を加圧しようとするれば必ず載荷板を置かねばならない。その載荷板の影響を調べるために、高さ30cm 直方形試験体に、載荷板めめめて、

13.8kg, 19.5kg, 25.1kgの3種類のヘッドロードを載せ、軸圧力一定の残存強度試験を行った。実験結果を Table-3 に示す。

衝撃水準は(6)式によれば、ヘッドロードが変らなければ係数 k が一定となり衝撃エネルギー比で与えても差支えないが、ヘッドロードが変化するには不適當である。衝撃高さ H 、衝撃破壊高さ H_0 によって生ずる衝撃応力 σ_d 、 σ_{d_0} を(6)式によって求め、両者の比の2乗 $(\sigma_d/\sigma_{d_0})^2$ を衝撃水準として与え、残存強度比との関係を Fig-8 に示す。

図より明らかなように両者の関係には、同一調査の試験体においては、ヘッドロードの差異による影響が見られず、その変化は(12)式において U/U_0 を $(\sigma_d/\sigma_{d_0})^2$ に置換した式にほぼ一致する。これは衝撃水準としての両者のパラメーターが同等であることを示している。

3-3 衝撃疲労試験結果とその考察

(1) 静的特性の変化

衝撃荷重によってコンクリートの静的特性がいかに変化するかを調べるために各打撃毎に規定の軸圧力までの応力ひずみ曲線を求めた。その応力ひずみ曲線の一例を Fig-9 に示す。衝撃荷重を受けたコンクリートの応力ひずみ曲線は直線的な状態から繰返し回数が増加につれて上に凸な状態に推移し、さらに衝撃回数が増加するとS字形に変化し破壊に至っている。これは明石等が行った衝撃疲労試験の結果⁸⁾と同じである。

このことは圧縮疲労試験でも既に指摘されており⁹⁾、衝撃疲労試験も圧縮疲労試験と同様の疲労過程をたどるものと推測される。

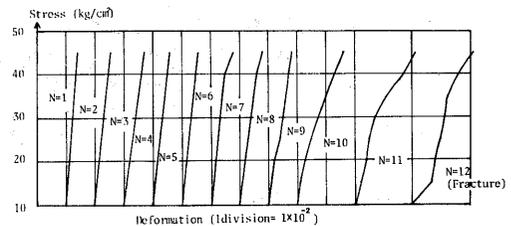


Fig. 9 Stress-Strain Diagrams.

(2) 軸圧力の影響

軸圧力を受ける試験体の破壊までの繰返し衝撃回数を Table-4 に示す。軸力を受けない試験体の衝撃破壊エネルギーを基準にした衝撃水準 U/U_0 をとり、衝撃回数 N の対数 $\log N$ との関係を示す。各調査において衝撃水準が低下すれば破壊までの繰返し回数は増加するが、軸圧力の大きい試験体ほど衝撃回数は減少

する。この傾向は衝撃水準が高い程顕著である。また、ある衝撃水準以下になると衝撃回数は急激に増加し始める。このことは、一定の衝撃水準以下になると試験体に生ずる損傷の成長は衝撃に対して鈍化し、繰返し

試験における特異点の存在を示唆している。

この値は、調合および軸圧力等によって変化するようであるが大体0.2~0.4の応力水準であり、 $U/U_0 \sim \log N$ の関係はこれを折点として直線関係を示す。

Table-4 Experimental Results of Repeat Number N to Failure
(Effects of Axial Loading Ratio σ_c/F_c and Drop Height of Weight)

Mixing	Age (days)	F _c (kg/cm ²)	E (×10 ⁵ kg/cm ²)	$\frac{\sigma_c}{F_c}$	H ₀ (cm)	Drop Height H (cm) of Weight																
						30	35	40	45	50	55	65	70	80	90	100	110	120	130	150	180	
AM1	121	229	1.46	0	160	-	-	54	-	31	18	14	7	-	4	-	4	-	-	-	1	
				0.25	145	-	-	43	-	24	19	8	6	-	4	-	2	-	2	1	1	1
				0.50	130	91	-	21	6	6	-	-	3	-	2	-	2	2	1	1	1	1
BM1	170	332	2.17	0	195	-	-	-	147	46	20	-	14	15	8	4	-	3	-	3	2	
				0.25	185	-	-	49	33	17	13	10	6	-	5	-	-	3	-	2	2	2
				0.50	150	-	-	49	20	11	7	-	3	-	3	-	2	3	-	1	1	1
CM1	170	426	3.79	0	250	-	-	-	-	66	-	27	32	14	-	-	8	-	7	3		
				0.25	210	-	-	-	128	38	32	-	15	-	7	-	-	5	-	3	2	2
				0.50	150	21	16	17	7	23	11	-	7	-	3	-	-	2	-	1	1	1

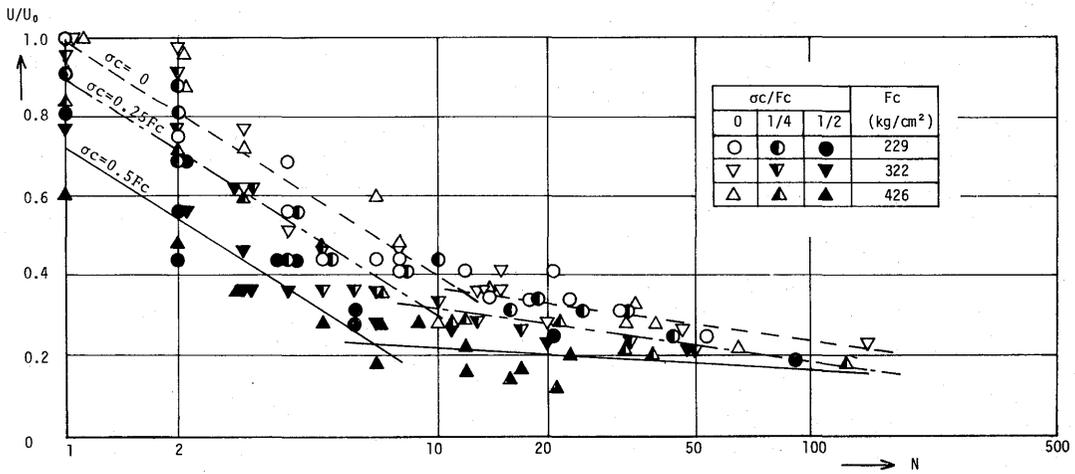


Fig. 10 Impact Energy Level U/U_0 versus Repeat Number N to Failure

(3) 試験体形状寸法の影響

一定の衝撃荷重を加えても試験体体積が変化する場合には、ヘッドロードを変える場合と同様に、試験体に生ずる衝撃応力度は変化する。これらの影響を調べるために、高さの異なる試験体に落下高 $H=70\text{cm}$ からの繰返し衝撃試験を実施した。結果は Table-5 に示

す。衝撃水準として $(\sigma_a/\sigma_{a_0})^2$ をとり、衝撃回数 N の対数 $\log N$ との関係を Fig-11 に示す。 σ_{a_0} は Table-4 の実験結果から推定した。両者の間にはほぼ直線関係が認められ、実験式として(15)式を得る。

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{a_0}}\right)^2 = 1 - 0.4 \log N \tag{15}$$

Table-5 Repeat Number N to Failure (Effects of Head Load and Drop Height of Weight)

Mixing	Fc (kg/cm ²)	E (×10 ⁵ kg/cm ²)	$\frac{\sigma_c}{F_c}$	Wf (kg)	Height of Specimen h(cm)				
					5	10	15	20	30
AM 2	219	1.46	0.21	13.8	21	19	11	20	39
				25.1	30	19	15	29	76
				32.8	45	20	24	44	—
				42.9	—	27	—	—	—
BM 2	322	2.17	0.40	13.8	14	14	—	—	49
				25.1	33	15	—	26	65
				32.8	44	13	—	72	—
				42.9	—	17	—	—	—
CM 2	424	2.67	0.40	13.8	29	24	9	22	56
				25.1	28	14	15	41	48
				32.8	64	25	17	58	—
				42.9	—	21	—	—	—

(Drop Height of Weight H=70cm, Age=180-200days)

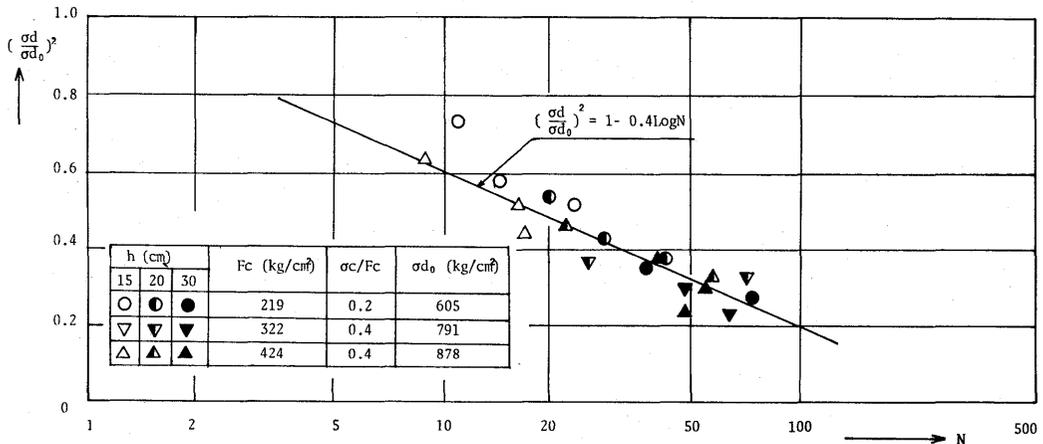


Fig. 11 Square of Impact Stress Level $(\sigma_d/\sigma_{d0})^2$ versus Repeat Number N to Failure (Effects of Head Load and Height of Specimen)

4. 結 言

本研究は、先行軸圧荷重を受けるモルタルおよびコンクリートについて、衝撃破壊高さ以下の範囲における衝撃特性を調べたものである。

試験体の乾燥の影響を避けるために湿潤状態の試験体を使用したり、衝撃時に試験体以外に吸収されるエネルギーも含めて評価の対象としているなど多くの問題を残しているが、検討結果を要約すれば以下になる。

(1) 衝撃破壊エネルギーは試験体の残存ひずみエネルギーと正の相関々係を示す。

(2) 軸圧力を受ける試験体の衝撃破壊エネルギーは低下するが、若材令および低強度の材料が軸圧力の影響は少ない。

(3) 衝撃後の残存強度は衝撃水準がある値を越えると低下するが、その限界値は静的圧縮強度が低下すれば同様に低下する。

(4) 衝撃疲労試験において、衝撃疲労強度に至る応力ひずみ曲線の変化は、片振り圧縮疲労試験と同様の経過を示し、両者の疲労過程は同質であると推測される。

(5) 衝撃水準が一定の場合、軸力比が上昇すれば衝撃

疲労強度は低下する。衝撃水準が高ければ軸圧力の影響も大きい。逆に衝撃水準が0.2~0.4以下に低下すれば衝撃疲労強度は急速に増大し、相対的に軸圧力の影響は低下する。

- (6) 試験体の形状寸法や載荷板質量の変化が残存強度および衝撃疲労強度に及ぼす影響は、巨視的に弾性体の衝突現象として求めた弾性解によって説明できそうである。

最後に、本研究の実施に際し、御指導頂いた九州大学佐治泰次教授、実験を担当した本学吉岡俊二助手、白浜敏行技官をはじめ関係諸氏に深く感謝します。

参考文献

- 1) 竹田・立川・藤本； コンクリートと衝撃，コンクリート工学，vol. 15，No. 4，4. 1977，pp. 1
- 2) 竹田・立川； 高速度荷重を受けるコンクリートの圧縮・引張・曲げ等に関する一連の研究，日本建築学会論文報告集，第63，66，77，78号，1959~1962
- 3) B. P. Hughes・R. Gregory； The Impact Strength of Concrete using Green's Ballistic Pendulum，Proc. of Inst. of Civil Eng，10. 1968，pp.731
- 4) W. Johnson； Impact Strength of Materials，Edward Arnold Ltd，1972
- 5) 佐治・在永・田口，落錘式試験機による衝撃圧縮強度に関する一連の研究，セメント技術年報，第28，29巻，1974~1975
- 6) 佐治・在永・田口・中武； 円柱形モルタル試験体の衝撃圧縮強度に関する基礎的実験，日本建築学会論文報告集，第254号，4. 1977，pp. 1
- 7) 例えば，津村； 材料力学ポケットブック，裳華房，1965，pp. 65
- 8) 明石・尼崎・竹内・桂木； コンクリートの衝撃疲労強度に関する研究，土木学会論文報告集，第217号，10. 1973，pp. 77
- 9) 近藤・坂； コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，1972，pp. 356