

論文

[1051] コンクリートの耐衝撃性に関する実験的研究

正会員○岡村雄樹（山梨大学土木環境工学科）

正会員 檜 貝 勇（山梨大学土木環境工学科）

1. まえがき

建設技術の進歩・向上から、コンクリートが今までに経験したことのないような新しい分野で使用されたり、計画や設計の段階で想定されていた荷重を大幅に上回る条件下で使用される機会が増えてきた。この使用条件の過酷化の一つに衝撃による負荷がある。コンクリート構造物が衝撃荷重を受てもその機能を果たすように設計し衝撃に対する安全性を確保する必要がある。しかし、脆性材料の一つであるコンクリートの衝撃荷重下での性状は、破壊現象が静的荷重の場合と異なりかなり複雑であること、さらに試験方法の難しさもあり、あまり明確になっていないのが現状である。特に、素材としてのコンクリートの衝撃による圧縮特性は、衝撃曲げ特性、高速載荷試験による圧縮特性及びコンクリート構造物として衝撃抵抗性などに関する研究に比較するとその研究は少ない。この理由の一つとして、コンクリートの衝撃圧縮強度が、静的荷重による圧縮強度のように明確に定めることが困難であることが挙げられる。

本研究は、コンクリートの衝撃による圧縮破壊現象の中から、衝撃条件を選択して、衝撃圧縮強度の評価法を検討することを目的としたものである。具体的には、落錘式衝撃圧縮試験を実施し、衝撃力作用時の供試体のひずみの計測、衝撃力作用後の供試体が持つ残留強度及び重錘の跳ね返り等を求め、衝撃体が比較的遅い速度で衝突する場合の衝撃圧縮特性について実験的に検討したものである。

2. 実験概要

2.1 落錘式衝撃試験装置

本実験に用いた衝撃試験機は、図-1に示すような落錘式（最大落下高さ：2.5m）で重錘の自由落下を利用したものである。この試験装置は、衝撃力を供試体に与える重錘を手動ハンドルで所定位置まで持ち上げ、重錘固定金具を取り外すことにより、重錘は垂直に建てられた二本のガイドレールに添って自由落下し、供試体に衝撃力を与える仕組みになっている。自由落下による衝撃試験では、重錘が跳ね返って2度打ちするので、これを防止するため重錘にロープを取り付け、重錘が跳ね返り再度落下する過程において人力により引き上げた。供試体の支持は、高強度コンクリートの充分大きな強固な基礎と一体となるようにした。また、供試体に一樣な衝撃力が加わるように直径16cmで厚さ5cmの鋼板を供試体上下面に配置し、

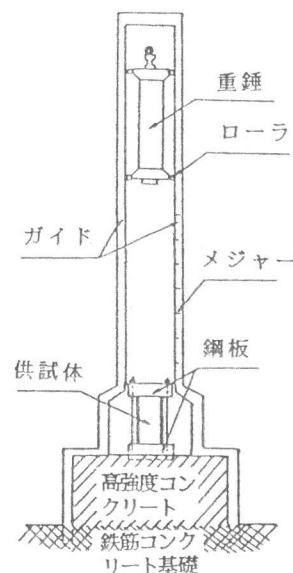


図-1 落錘式衝撃試験機

下面の鋼板は基礎と一体となるように固定した。なお、衝撃による供試体の移動・跳ね返りをなくすため、上下面の鋼板はボルトで連結しているが、ボルト自体は衝撃力に抵抗しない構造となっている。重錘は、円柱形で重量は本試験装置の重錘落下高さ内で供試体を破壊させることができること及び重錘速度が2~5m/s程度で供試体に衝突するように考

えて21.45kgとした。

2.2 ひずみ測定

衝撃によってコンクリートに発生するひずみは瞬時のひずみであるため、直流アンプ(応答周波数:DC~100kHz)を介して動ひずみを測定した。ひずみの測定は、ひずみを電気信号に変換し、変換された電気信号を1 μ 秒間隔で8192個サンプリングしたものをデジタル量として記憶させた。さらに、このデータをパーソナルコンピュータで処理を行った。なお、ひずみ測定には、ゲージ長30mmのワイヤーストレインゲージを用いた。ゲージは供試体長手方向中央部に張り付け、衝撃力作用時の供試体に生ずる縦方向ひずみを測定した。ひずみ測定結果の一例を図-2に示す。この時間-ひずみ曲線から最大ひずみ、残留ひずみ及び最大ひずみに到達するまでの平均ひずみ速度等を求めた。

2.3 残留強度及び重錘の跳ね返り高さの測定

残留強度は、衝撃力作用後の供試体の静的圧縮試験を実施し求めた。重錘の跳ね上がり高さの測定は、落錘式衝撃試験装置の近傍に設置したビデオカメラの撮影によって行った。この方法による重錘の跳ね返り高さの測定精度は1cmであった。

2.4 使用材料、配合及び供試体

実験に使用したセメントは早強ポルトランドセメントで、粗骨材は最大寸法20mmの砕石(比重2.66、吸水率1.76%)を用いた。細骨材は、富士川産川砂(比重2.62、吸水率1.80%、F.M.2.75)を使用した。コンクリートの配合は、材令14日における目標圧縮強度として300kgf/cm²及び450kgf/cm²が得られるよう表-1のように定めた。供試体は直径10cm高さ20cmの円柱体を用いた。供試体の養生は、試験日まで温度20 \pm 2 $^{\circ}$ C、相対湿度90 \pm 5%の養生室で供試体を湿布で覆って行った。養生期間は、主な実験ではコンクリート強度が安定すると思われる2ヶ月以上行った。なお、一部の試験では、養生期間を14日としたものもある。また、それぞれの試験条件に対して使用した供試体数は原則として3本とした。

3. 実験結果と考察

3.1 1回の衝撃荷重に対する挙動

まず、重錘の落下高さで残留強度の関係を図-3に示す。この図における残留強度比とは、衝撃荷重を受けた後に供試体が有している静的圧縮強度と衝撃を受けない供試体が有している静的

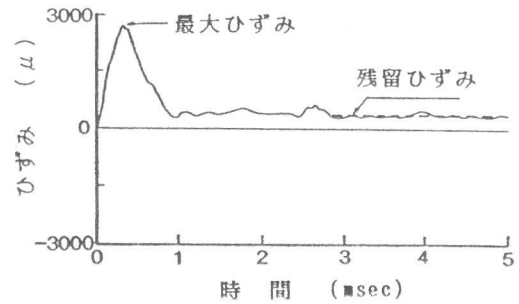


図-2 ひずみ測定結果の一例

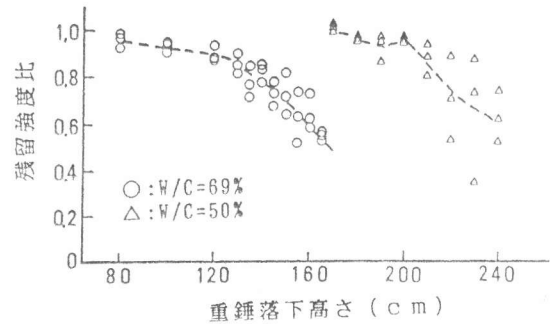


図-3 重錘の落下高さで残留強度比の関係

表-1 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	減水剤
20	12	50	43	193	386	776	1024	0.8
20	10	69	47	188	272	895	1013	0.5

圧縮強度の比である。なお、供試体は同一バッチより作製した供試体で養生及び材令は同じものである。これより、衝撃荷重を受けた供試体の残留強度の減少率は、残留強度比が0.9 以前と以後では異なったものとなり、残留強度比が0.9 以前では残留強度の減少は小さいが、0.9 以後となると残留強度の減少が急激になる。また、同一条件での残留強度の変動の程度をみると、特に残留強度比0.9 以下の範囲において残留強度のバラッキが大きくなることが認められる。衝撃試験では重錘が試験体に衝突した後跳ね返るので、重錘の跳ね返りを考慮し、衝撃によって供試体が吸収したと考えられるエネルギーと残留強度の関係を整理した結果が図-4 である。この吸収エネルギーは、式(1)で算定したもので、単位断面積当りの吸収エネルギーである。この結果からも、残留強度の減少傾向は残留強度比0.9 程度を境として異なったものとなることがわかる。

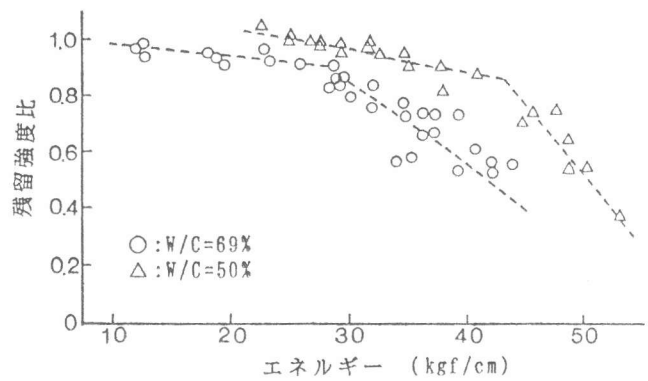


図-4 エネルギーと残留強度の関係

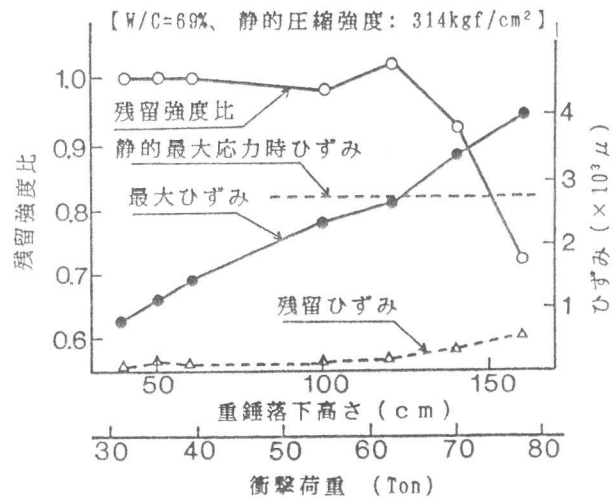


図-5 重錘の落下高さといずみの関係

$$\text{吸収エネルギー} = \left[\text{重錘重量} \times (\text{落下高さ} - \text{跳ね返り高さ}) \right] / \text{供試体断面積} \cdots \cdots (1)$$

次に、衝撃荷重を受けた供試体のひずみ挙動に着目してみる。図-5、6は、重錘の落下高さといずみの関係を示したものである。この図中に示した荷重は、ロードセルに重錘を落下させて測定したものである。ロードセルとコンクリート供試体に作用する荷重とが同一であると言う根拠はないが、衝撃荷重の目安として示したものである。この図-5、6より残留強度比が0.9 程度以下となると、最大ひずみは静的載荷試験の最大荷重時におけるひずみ(W/C=0.5の供試体で2560 μ 、W/C=0.69の供試体で2750 μ)を上回る3000 μ 以上となり、また残留ひずみも増大する傾向が認められる。表-2は、重錘の落下高さといずみ速度の関係を示したものであるが、これより、残留強度比が1程度でのひずみ速度は、おおよそ $6 \times 10^5 \mu / \text{秒}$ であることがわかる。一般に、コンクリートの圧縮強度は、供試体のひずみ速度(載荷速度)に影響されることが知ら

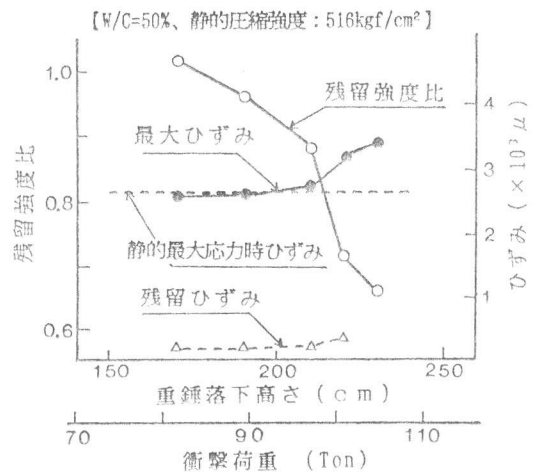


図-6 重錘の落下高さといずみの関係

れている。そこで、このような衝撃荷重によるひずみ速度の場合と、供試体と載荷体を最初から接触させた状態で行った衝突を伴わない、高速載荷試験による圧縮強度を比較してみる。高速載荷試験でひずみ速度を $6 \times 10^5 \mu/\text{秒}$ とすると得られる圧縮強度は、静的載荷試験(平均ひずみ速度: $2 \sim 5 \times 10 \mu/\text{秒}$)による強度の1.4倍程度である[1]。本実験で得られた結果の残留強度比が1を下回る時点(落下高さ:

W/C=0.69で120cm、W/C=0.5で170cm)で作用圧縮応力をみると、静的試験で求めた最大圧縮応力(圧縮強度)の2倍以上となっている。前述のように、本実験の場合は作用する圧縮力の正確さには問題があるが、衝撃荷重に対するコンクリートの圧縮強度は、高速載荷試験のものとは異なるようである。これは、衝撃載荷では供試体に作用する応力波の伝播、反射及び重複などが高速載荷試験とは異なったものになることによると考えられる[1]。

さらに、重錘の跳ね返り挙動に着目してみる。図-7は重錘の跳ね返り率と残留強度比の関係を示した。重錘の跳ね返り量は、鋼板の反発係数の影響を受け、その絶対量を比較することはできない。そこで重錘の跳ね返りの傾向をこの図より見ると、残留強度比が小さくなるに従って重錘の跳ね返り率が減少するが、残留強度比が0.9以前と以後では異なった減少傾向が認められる。即ち、残留強度比が0.9以前では跳ね返り率の減少は小さく、0.9以下となると跳ね返り率の減少が顕著となる。

最後に、衝撃荷重を受けた供試体の残留強度とひび割れ状況を検討してみ

表-2 重錘落下高さといずみ速度の関係

重錘落下高さ(cm)	ひずみ速度($\mu/\text{秒}$)	残留強度(kgf/cm ²)	残留強度比	衝撃応力(kgf/cm ²)
50	4.9×10^5	315	1.00	433
60	5.1×10^5	315	1.00	484
100	6.3×10^5	308	0.98	688
120	7.2×10^5	321	1.02	803
140	8.5×10^5	290	0.92	892
160	3.5×10^5	227	0.72	994

注) 供試体は水セメント比50%のものを使用

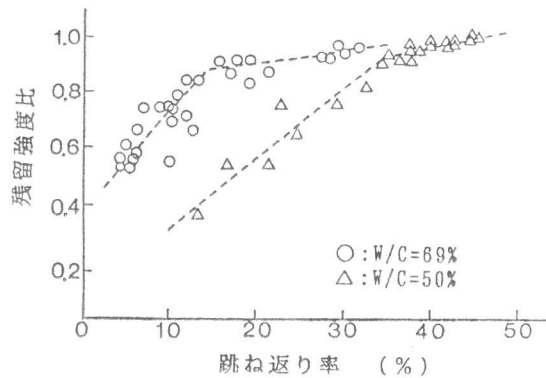
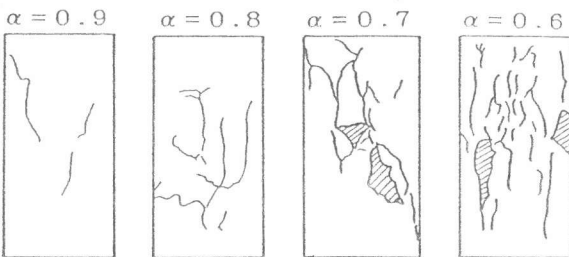
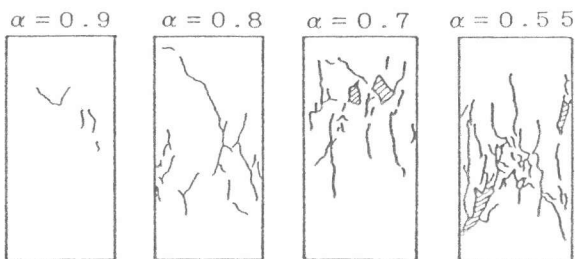


図-7 重錘の跳ね返り率と残留強度比の関係

【W/C=50%、静的圧縮強度: 516kgf/cm²】



【W/C=69%、静的圧縮強度: 314kgf/cm²】



α = 残留強度比

図-8 供試体のひび割れ発生状況

ると、1)残留強度比が1ではひび割れの発生は認められないこと、2)残留強度比が0.9程度のレベルでのひび割れは、揮発性物質(アセトン)の蒸発状態の違いによって観察できる程度であること、3)残留強度比が0.8程度のレベルでは、目視によってひび割れが観察でき、これ以下のレベルとなるとひび割れ本数も増加し供試体中央部付近でのコンクリートの剥離が認められるようになること、などがわかった(図-8参照)。

3.2 繰返し衝撃に対する挙動

まず、供試体が残留強度を有さなくなる状態までの繰返し衝撃回数を調べた。この結果が図-9である。この図によると、残留強度比が0.9となる落下高さ(120cm)の1/3(40cm)で重錘を繰返し落下させた場合には、供試体が破壊するまでには200回以上の繰返しが必要となるが、落下高さが僅か高くなると供試体が破壊するまでに要する繰返し衝撃回数が大幅に小さくなることわかる。例えば、図-3によると1回の衝撃における残留強度比が1でほとんど供試体の損傷ないと考えられる重錘落下高さ50cmにおいても、繰返し衝撃で破壊するまでの繰返し回数は50程度である。さらに、1回の衝撃荷重で残留強度比が0.9の落下高さ100cmでは、繰返し回数が5回程度と非常に少なくなる。この場合の重錘の跳ね返り率を、重錘の落下高さ40、50及び60cmで調べた結果が図-10である。これより、繰返し衝撃がある回数をこえると、それまで殆ど変化が見られなかった跳ね返り率が、急激に低くなり供試体が破壊に至っていくことが読み取れる。今回の結果からは、いずれの落下高さの場合でも、破壊に至るまでの繰返し衝撃回数の約7割で跳ね返り率の変化が現れている。繰返し衝撃における供試体のひび割れ状況を観察した結果、破壊までの繰返し衝撃回数の約8割までは目視あるいはアセトンを用いてもひび割れは確認できず、9割程度ではじめて目視によるひび割れが認められた。

次に、繰返し衝撃をうける供試体のひずみ挙動について着目してみる。図-11は、繰返し衝撃回数と最大ひずみの関係を落下高さ60cmの場合について示したものである。これによると、供試体が破壊に至るまでの繰返し衝撃回数の約7割の回数までは最大ひずみはほぼ直線的に増加している。しかし、これ以降の衝撃回数では、ひずみはほとんど増加しない傾向を示している。この

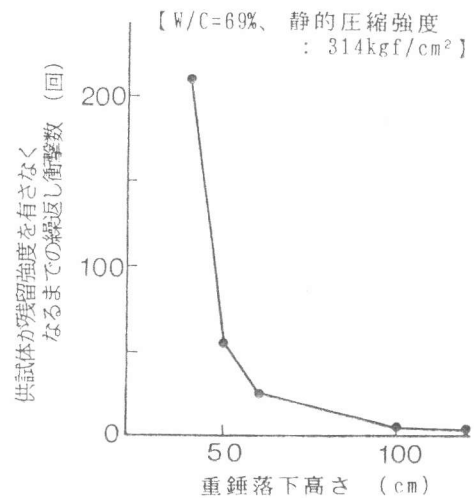


図-9 重錘落下高さと供試体残留強度がなくなるまでの衝撃回数との関係

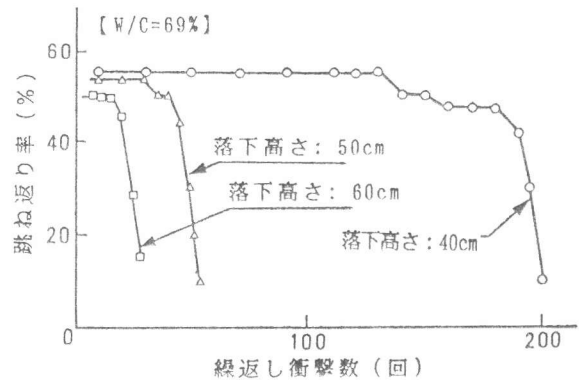


図-10 繰返し衝撃回数と跳ね返り率の関係

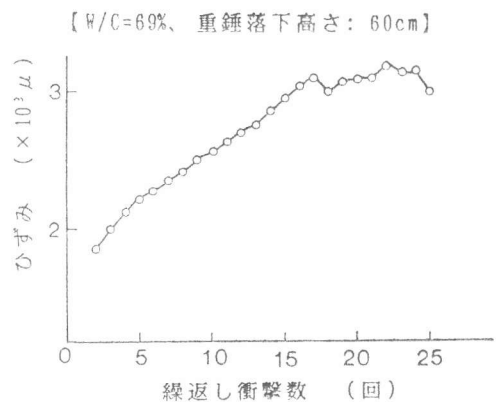


図-11 繰返し衝撃回数と最大ひずみの関係

変曲点は、重錘の跳ね返り率が変化する点と一致している。一方、図-12は、残留ひずみ及び平均ひずみ速度を示したものである。残留ひずみは繰返し衝撃回数が増大とともに単調に増加していることがわかる。また、ひずみ速度は、供試体が破壊に至るまでの繰返し衝撃回数の約7割の回数までは増加するが、これ以降の衝撃回数ではひずみ速度はほぼ一定で $8 \times 10^5 \mu/\text{sec}$ 程度となっている。

最後に、繰返し衝撃を受けた供試体の残留強度について検討を行った結果を図-13に示した。なお、この検討に用いた供試体は、これまでの実験で用いたものと材令(14日)が異なるため日、供試体が破壊に至るまでの繰返し衝撃回数は異なるものとなっていることをコメントしておく。これによると、重錘の落下高さが高くなるに従って繰返しに伴う残留強度の低下が著しいことがわかる。この場合の、重錘の跳ね返り率と残留強度の関係を示すと図-14のようになる。あまり明確ではないが、残留強度比が0.9程度で跳ね返り率に変化が現れていると考えられそうである。

4. まとめ

落錘式衝撃試験によってコンクリートの衝撃圧縮性状について基礎となる検討を行った。得られた結果を要約すると以下の通りである。

1) 1回の衝撃による検討結果を総合判断すれば、コンクリートに衝撃荷重が作用する前後の残留強度に着目することによって、衝撃圧縮による損傷の評価ができると考えられる。今回の検討においては、残留強度の値、重錘の跳ね返り率、ひずみ及びひび割れ状況等が残留強度比0.9を境として変化しており、この残留強度比0.9を一つの限界状態とみなしてもよさそうである。

2) 1回の衝撃による残留強度比が1.0以下である様な荷重が繰返し载荷されると、数回から数10回で破壊に至る。

参考文献

- 1) 竹田仁一・立川博之・藤本一男:コンクリートと衝撃 — 衝撃を受けるコンクリートの性状と実験 —、コンクリート工学、Vol.15、No.4、pp1~11、1977.4

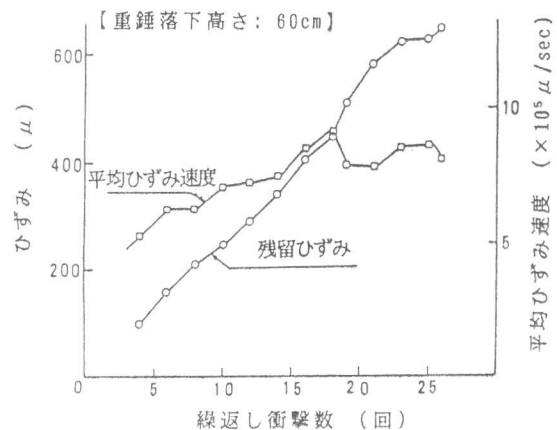


図-12 繰返し衝撃回数と残留ひずみ及び平均ひずみ速度の関係

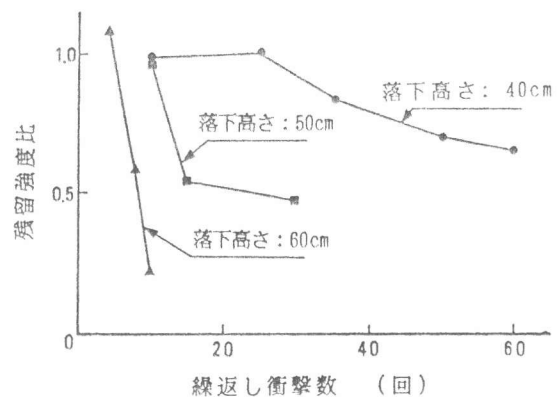


図-13 繰返し衝撃回数と残留強度比の関係

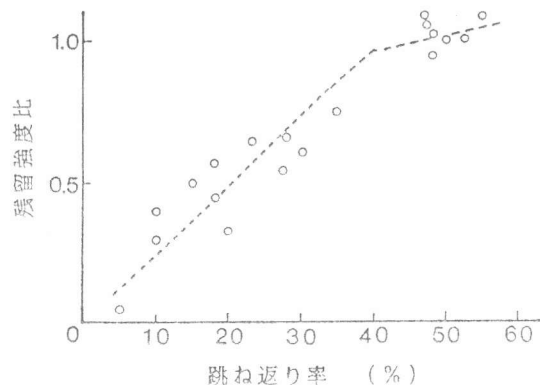


図-14 重錘の跳ね返り率と残留強度比の関係