

論文

[2051] 衝撃を受ける鉄筋コンクリートばりの挙動に関する実験的研究

正会員○榎谷 浩（金沢大学土木建設工学科）

正会員 梶川康男（金沢大学土木建設工学科）

柴田 豊（鹿島建設株式会社）

1. まえがき

衝撃荷重が作用する構造物としては、落石を受けるロックシェッド、車両の衝突の可能性のある橋梁の高欄やガードレール、波、船舶により衝撃をうけるプラットホーム、防波堤、橋脚、飛来物の衝突を受ける原子力発電施設などが挙げられる。このような衝撃問題において、各ケースごとに衝撃体の速度、エネルギー、その性状が異なり、非衝撃体の材料特性、構造特性も異なるため、その取扱いの一般化が難しいと考えられてきた[1]。また、衝撃によりコンクリート構造には、貫入、貫通、表面剝離、裏面剝離などの現象が生ずることが知られており、貫通限界を中心とした設計のための実験式が提案されてきている[2]。しかし、1989年7月16日に越前海岸において岩石崩落によりロックシェッドが破壊して15名の犠牲者が奪われた事故を契機に、ロックシェッドのように比較的ソフトな衝撃を受ける構造物の設計に用いる衝撃荷重の評価、衝撃荷重下における構造物や部材の破壊挙動の解明が求められるようになってきた[3],[4]。

このような観点より、本研究では衝撃荷重に対する基礎的な問題として、重錘落下による比較的ソフトな衝撃を受ける鉄筋コンクリートばりの衝撃実験を行うことにより、荷重特性、破壊形態と吸収エネルギーについて議論したものである。

2. 実験方法

2.1 静的試験

実験に用いた供試体は、図-1に示すように断面が20cm×15cmのものであり、圧縮側と引張側にそれぞれ1本ずつ鉄筋（SD30, D16）を配置した複鉄筋矩形はりである。実験は、供試体の長さは1.5m, 2.0m, 2.5mの3種類とし、せん断補強筋については配置しないもの、15cm間隔で配置するもの、10cm間隔で配置するものの3種類とし溶接により主筋と結合させた。全体では表-1に示すように5種類（10本）について行った。また、測定項目は、図-2に示すように荷重、スパン中央の変位、4点の鉄筋ひずみとした。なお、実験に用いたコンクリートと鉄筋の材料試験結果は表-2に示す。

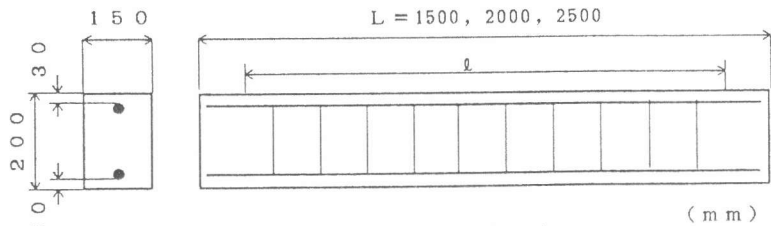


図-1 実験供試体

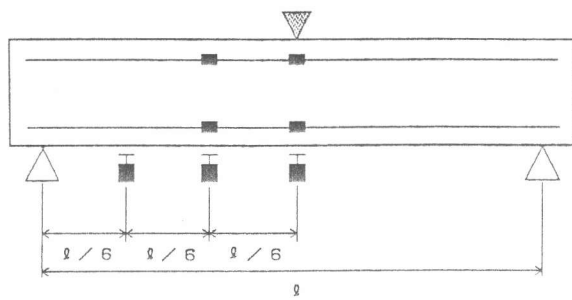
表-1 実験ケース（静的試験）

供試体長さ L (cm)	スパン長 l (cm)	せん断補強筋間隔	供試体本数
150	130	10 cm (14本)	2
		なし	2
200	180	10 cm (18本)	2
		15 cm (12本)	2
250	230	10 cm (24本)	2

全体では表-1に示すように5種類（10本）について行った。また、測定項目は、図-2に示すように荷重、スパン中央の変位、4点の鉄筋ひずみとした。なお、実験に用いたコンクリートと鉄筋の材料試験結果は表-2に示す。

2.2 衝撃試験

衝撃試験は、図-3に示すように、ロードセルと一体化させた重錘を電磁石で釣り上げ、供試体の上に所定の高さから自由落下させて行った。実験は、静的試験と同様に、供試体の長さ3種



- : 光学式変位計
- : ひずみゲージ (鉄筋)
- ▽ : ロードセル

図-2 測定項目と測定位置

類, せん断補強筋の有無により5種類の供試体について行い, 表-3に示すように重錘の落下高さおよび重錘の重量も変化させて行った. また, ロードセルにより荷重を, 光学式変位計により3点の変位(スパン中央, $l/3$ 点, $l/6$ 点)を, さらに鉄筋ひずみとして圧縮側2点(スパン中央, $l/3$ 点), 引張側2点(スパン中央, $l/3$ 点)の4点を測定した(図-2参照)なお, 衝撃荷重の作用時間を長くし表面剝離や裏面剝離が生じないようにソフトな衝撃とするために荷重作用点に厚さ1cmのゴム(ネオプレン)を敷いて実験を行った.

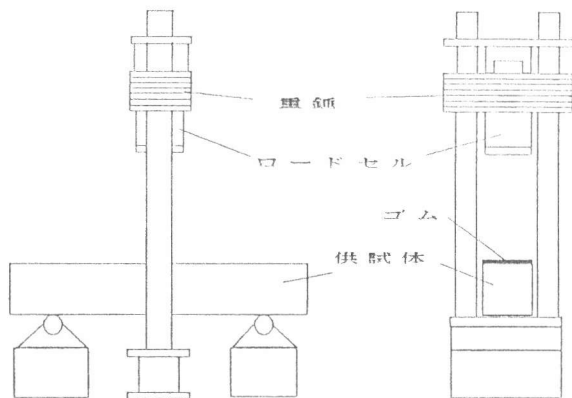
表-2 材料試験結果

(a) コンクリート

ヤング係数 (kgf/cm ²)	2.70 × 10 ⁵
ポアソン比	0.21
圧縮強度 (kgf/cm ²)	296.0
引張強度 (kgf/cm ²)	31.0

(b) 鉄筋

ヤング係数 (kgf/cm ²)	2.10 × 10 ⁶
降伏強度 (kgf/cm ²)	4354.1



正面図

側面図

図-3 衝撃試験装置

表-3 実験ケース (衝撃試験)

供試体長さ L (cm)	スパン長 l (cm)	せん断補強筋間隔	重錘落下高さ (cm)	重錘重量 (kgf)	供試体本数
150	130	10cm (14本)	7.5	116	2
			15.0		2
			22.5		2
200	180	なし	7.5	116	2
			15.0		2
			22.5		2
		10cm (18本)	7.5	116	2
			15.0		2
			22.5		2
			7.5	227	1
			15.0		1
			22.5		1
15cm (12本)	7.5	116	2		
	15.0		2		
	22.5		2		
250	230	10cm (24本)	7.5	116	2
			15.0		2
			22.5		2
			7.5		321

3. 実験結果および考察

3.1 供試体の破壊形式

(1) 静的試験

静的試験の長さ2.0m (スパン長1.8m)のはりで得られたひびわれ図を, 図-4に示す. 静的試験において, せん断補強筋のないものでは, 載荷点付近(スパン中央部)にだけ, 曲げひびわれが観測されたのに対し, せん断補強筋間隔10cmのものと15cmのものでは, 広い範囲に曲げひびわれが認められている. また, ひびわれの間隔がせん断補強筋の間隔とほぼ一致しており, せん断補強筋のある位置でひびわれが発生している. 他の長さのはりにおいても, 同様な傾向が認められている.

(2) 衝撃試験

図-5 はやはり長さ2.0m (スパン長1.8m) のはりに対して、質量 $m=116\text{kg}$ の重錘を高さ $H=225\text{cm}$ から自由落下させた衝撃試験のひびわれ図の一例を示したものである。せん断補強筋がない場合には、載荷点において大きく打ち抜かれるような直接せん断型の破壊を示しているが、せん断補強筋がある場合には、打撃点における曲げひびわれ幅が大きく、全体としては、曲げせん断あるいは曲げによる破壊となった。また、せん断補強筋なしの供試体では荷重の作用点まで一直線にひびわれが達しており、せん断補強筋のある供試体では途中で分かれたり、届かないでいることも確認している。なお、ひびわれの間隔を見ても、静的試験と同じようにクラックの間隔とせん断補強筋の間隔にはほぼ一致していることがわかる。

図-6 は、せん断補強筋間隔が10cmのほりに質量 $m=321\text{kg}$ の重錘を高さ $H=75\text{cm}$ から自由落下させた場合のひびわれ図の例を示したものである。スパンが1.3mの場合スパン中央にせん断ひびわれが認められ、それ以外の位置では曲げひびわれがあまり発達していないことより、全体としてはせん断による破壊形式となっている。それに対してスパン長が1.8mや2.3mと長い場合には、スパン中央部に曲げせん断ひびわれが認められるが、それ以外の部分すなわちスパン中央と支点の中央付近にいたるまでの比較的広い範囲に曲げひびわれが認められた。また、スパン長が大きい場合に、はり上面と下面を結ぶひびわれが認められるケースがいくつかあった。これは、衝撃荷重が作用するほりに特有のひびわれであると考えられる。なお、全ての衝撃試験において、はりが完全に破壊し2つに分離したものはなかった。

3.2 荷重波形

図-7 は衝撃試験における荷重波形を示したものであり、(a) は、スパン長の異なる3つの供試体を比較したものである。なお、これは重錘質量は116kg、落下高さが75cmの時のものである。最大荷重はスパン長が大きいほど小さくなっている。これらは、静的試験での最高荷重の3~5倍の値であった。また、荷重の作用時間はスパン長が大きいほど大きくなっている。なお、落下高さが大きくなるとスパン長の違いによる最大荷重と作用時間の違いは小さくなっている。ここには示していないが、せん断補強筋の有無や間隔の相違によっても、同様な結果となっている。

一方、(b) は重錘の落下高さの相違による結果を表している。ここでは、スパン1.8m、せん断補強筋間隔10cmの供試体について示している。重錘の落下高さが大きくなると、作用時間は短くなる傾向にあることがわかる。

3.3 荷重-変位関係

3.2 で示した供試体について、作用荷重とスパン中央の変位との関係を表したものを図-8 に示す。スパン長の違いによる結果を見ると、どの場合も鋭い立ち上がりした後、荷重の減少に伴

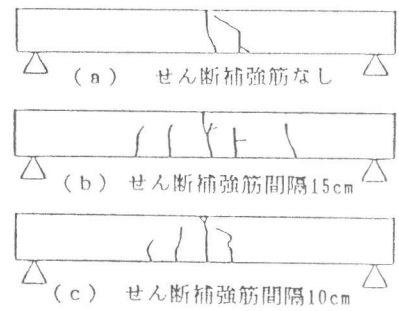


図-4 静的試験ひびわれ図

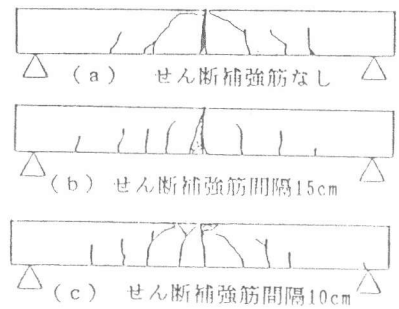


図-5 衝撃試験ひびわれ図
($m=116\text{kg}$, $H=225\text{cm}$)

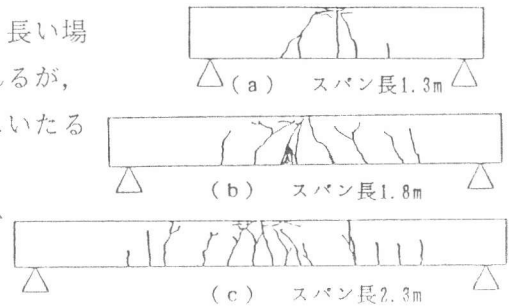


図-6 衝撃試験ひびわれ図
($m=321\text{kg}$, $H=75\text{cm}$, 補強筋間隔10cm)

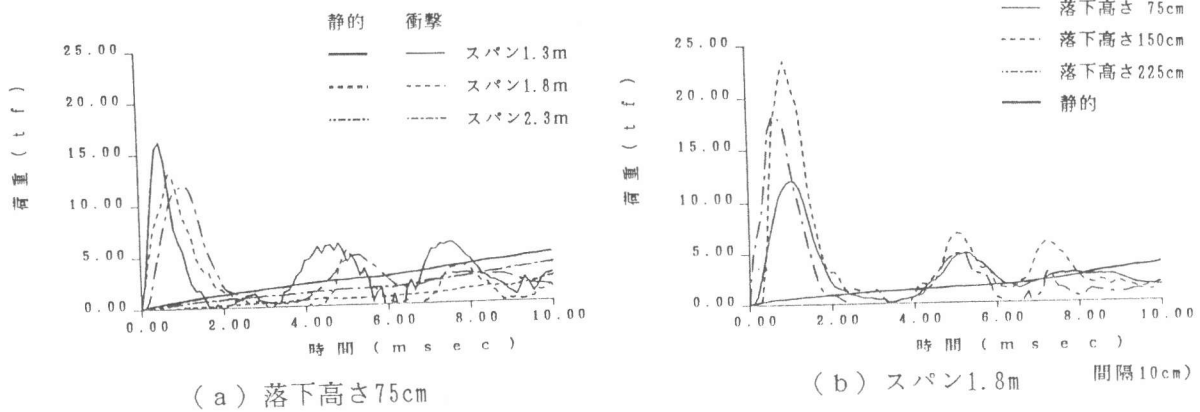


図-7 荷重波形 (せん断補強筋間隔10cm)

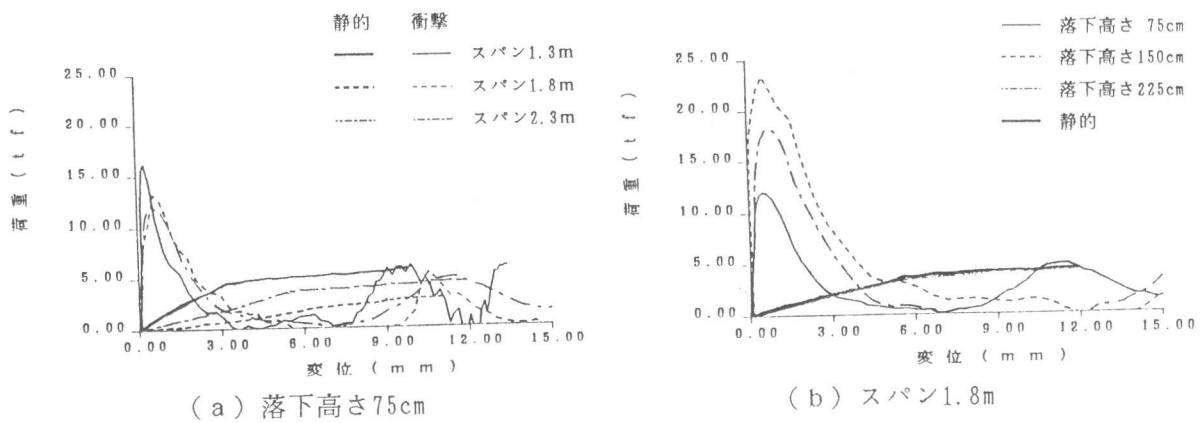


図-8 荷重-変位関係 (せん断補強筋間隔10cm)

い変位が増加していることがわかる。また、重錘落下高さの大きさの違いによる結果を見ると、荷重-変位関係は落下高さにより異なるが、荷重の最大値はほぼ同じ変位のとときに生じており、落下高さが大きいほど見かけ上剛性が大きくなっている。

3.4 吸収エネルギー

3.3に示した荷重-変位関係により、吸収エネルギーと落下高さの関係について検討する。ここで、吸収エネルギーは、図-8に示したような荷重-変位曲線の下側の面積で表されるもの

で、荷重や変形レベルが異なる2種を用いている。また、目視によるひびわれデータを用いたコンクリートのひびわれ形成に要した破壊エネルギーも参考にして、本実験の衝撃破壊の特性について調べている。

(1) 最大荷重までの吸収エネルギー

図-9に最大荷重ま

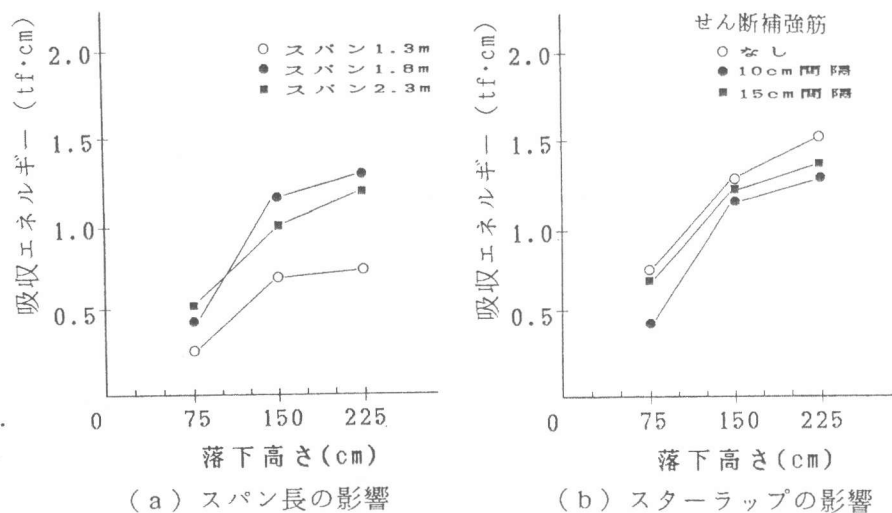
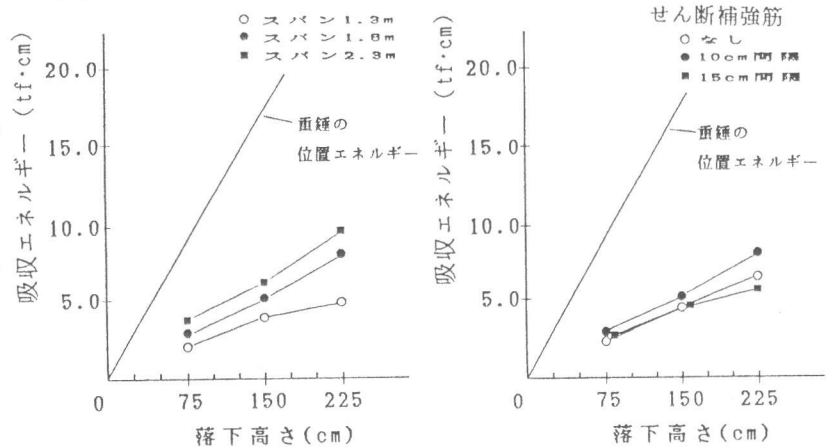


図-9 最大荷重までの吸収エネルギー

での吸収エネルギーと重錘の落下高さとの関係を示す。吸収エネルギーは最大荷重までの荷重-変位曲線の下側の面積として求めた。(a)は3種類のスパン長について表したものであり、(b)はスパン1.8mのはりの3種類のせん断補強筋間隔について表している。図中のプロットは、それぞれ、2本の供試体の平均値をとったものである。スパンが短い方が吸収エネルギーが小さく、落下高さが高くなるとその差は小さくなるのがわかる。また、せん断補強筋間隔による比較では、せん断補強筋のない供試体がエネルギーの吸収が少し大きくなっていることがわかる。これより、せん断補強筋が少ないほど衝撃初期に打撃点付近により大きな変形(破壊)を生じていることが推論される。

(2) 静的試験を基準とした吸収エネルギー

本研究では、耐力を完全に失うレベルまで達した実験はなかった。工学的には、終局限界状態をもとに吸収エネルギーを議論することが望ましいと考えられるが、ここでは、破壊レベルの一つの指標として静的試験において求められた引張側の鉄筋が降伏したときの変位を用いて、衝撃試験における吸収エネルギーを求めて



(a) スパン長の影響

(b) せん断補強筋の影響

図-10 静的試験を基準とする吸収エネルギー

みた。図-10はそれを示したものである。(1)の場合と同様に比較すると、やはり、スパンが短いと吸収エネルギーが小さいことがわかる。しかし、最高荷重までのエネルギーを考えた場合と逆に、せん断補強筋間隔が10cmと小さい場合は間隔が15cmのものと補強筋がない場合よりもエネルギー吸収がやや大きくなっているがそれほど大きな差異は認められない。

(3) ひびわれによる破壊エネルギー

コンクリートの破壊エネルギーの試験法はRILEMにより提案されている[5]。しかし、衝撃により生ずるひびわれに対する破壊エネルギーの試験法は確立されていないので、ここでは、RILEMに準じた方法で、すなわち無筋コンクリートを用いた衝撃試験により得られた図-11に示す荷重-変位曲線下の面積から、次式で表される破壊エネルギー G_f を求めることにした。

$$G_f = (W_0 + m_0 g \delta_0) / A_{lig} \quad (1)$$

ここに、 W_0 : 荷重-変位曲線下の面積、 m_0 : $m_1 + 2m_2$ 、 m_1 : はりの質量に荷重スパンと供試体長さとの比を乗じたもの、 m_2 : 供試体に載っている荷重用治具の質量、 g : 重力加速度、 δ_0 : はりの破断時の変位、 A_{lig} : はりの破断部分をはり軸に垂直な平面に投影した面積である。

ここでは、コンクリートはりにおける全てのひびわれ形成に要したエネルギー E_{cf} が、式(1)により算定された破壊エネルギー G_f と目視により確認された供試体のひびわれデータを用いて、次式のように与えられると仮定した。

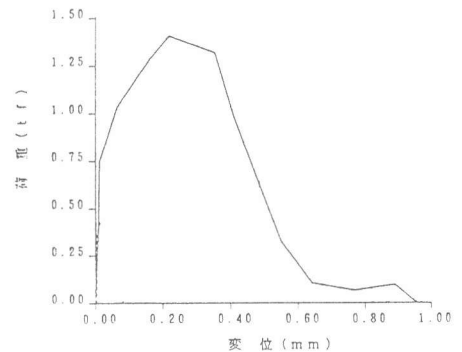


図-11 荷重-変位関係 (無筋コンクリート)

$$E_{of} = \Sigma G_f s \quad (2)$$

ここに、 s は、ひびわれ長さである。図-12はこのようにして求められたコンクリートのひびわれ破壊エネルギー E_{of} と落下高さの関係を示したものである。これより、どの場合においても落下高さが大きいほどすなわち衝突速度が大きいほど、破壊エネルギー E_{of} は大きくなるのがわかるが、スパン長が小さいほどその傾向が強く表れている。そして、スパン長の大きいほど、より広い範囲の曲げひびわれの発生により破壊エネルギー E_{of} は大きくなっている。また、せん断補強筋間隔がない場合補強筋がある場合よりもわずかに破壊エネルギー E_{of} が小さいようであるが、あまり明確ではない。スパン長が230cmと大きい場合、図-10で示した静的試験において求められた引張側の鉄筋が降伏したときの変位を規準とした吸収エネルギーよりも破壊エネルギーが大きくなっている。これは、曲げひびわれが他の場合に比べゆっくりと発生進展したためと推論される。

4. 結論

本研究では衝撃荷重を受ける基礎的な問題とし

て、重錘落下による比較的ソフトな衝撃による鉄筋コンクリートはりの衝撃実験を行い、荷重特性、破壊形態と吸収エネルギーについて検討したが、それらは以下のようにまとめられる。

- 1) 重錘落下による作用荷重は、スパン長が短くなるとその最大値は大きくなり、作用時間は短くなるが、衝突速度が大きくなるに従いその違いは小さくなる。
- 2) 最大荷重までの吸収エネルギーでは、せん断補強筋の少ない供試体がエネルギーの吸収が大きくなっていることとより、せん断補強筋が少ないほど衝撃初期に打撃点付近により大きな変形（せん断破壊）を生じていることが推論される。
- 3) コンクリートのひびわれによる破壊エネルギーは、スパン長が小さくせん断破壊する場合には衝突速度の影響を受けるが、スパンが大きく曲げひびわれが多くなると衝突速度にはそれほど影響を受けない。

参考文献

- 1) 藤井学, 宮本文穂: 衝撃荷重下におけるコンクリート構造物の挙動, コンクリート工学, Vol. 1. 21, No. 9, pp. 25-36, 1983年9月
- 2) Sliter, G. E.: "Assesment of Empirical Concrete Impact Formulas," Proceedings of ASCE, Vol. 106, No. st5, May, 1980.
- 3) 日経BP社: 日経コンストラクション創刊号, pp. 28-34, 1989年8月.
- 4) 梶谷浩, 前川幸次, 水木彰, 吉田博: 鋼製ロックシェッドの落石による衝撃力, 構造工学論文集, Vol. 36A, pp. 41-49, 1990年3月.
- 5) コンクリートの破壊力学研究委員会: コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム第1部委員会報告, 日本コンクリート工学協会, pp. 25-28, 1990年3月

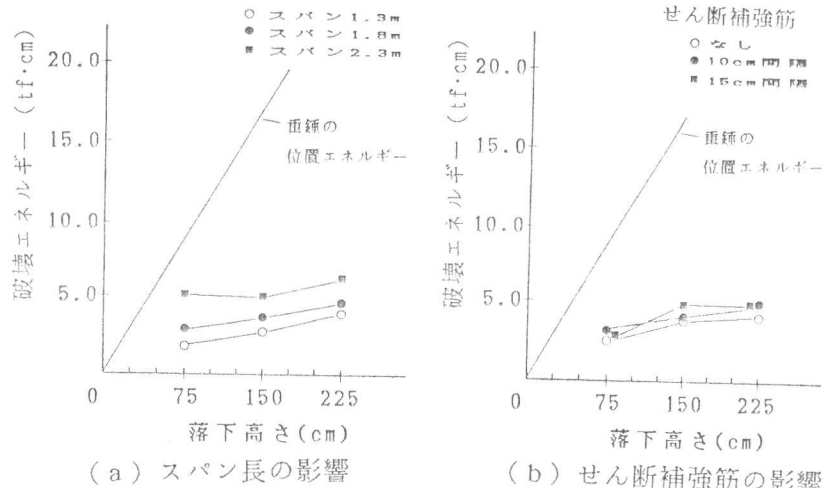


図-12 コンクリートの破壊エネルギー