

重錘衝突による鉄筋コンクリートはりの衝撃特性に関する実験的研究

Impact behavior of reinforced concrete beam under impact by the free fall of a weight

中田 吉彦*, 榎谷 浩**, 梶川 康男***, 熊谷 貴秀****

Yoshihiko NAKATA, Hiroshi MASUYA, Yasuo KAJIKAWA and Takahide KUMAGAI

*工修 金沢大学大学院 自然科学研究科後期課程 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)
(小松市 都市整備部駅周辺整備課)

**工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

***工博 金沢大学大学院教授 自然科学研究科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

****金沢大学大学院 自然科学研究科前期課程 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

In this study, we achieved the experiments under relatively low speed impact to make fundamental behavior of those clear. At first, the failure modes, the crack patterns and characteristics of load and response of reinforced concrete beams under many conditions are concretely investigated. Secondary, the absorbed energy consumed by the deformation including the failures of the beam had been investigated. The curvature of the reinforced concrete beam and the length of plastic range under impact were also shown. Finally, the knowledge gotten by this study are summarized.

Key Words: impact, reinforced concrete beam, absorbed energy, curvature

1. まえがき

山地が国土の大半を占める我が国においては、記憶に新しいものとして平成8年の豊浜トンネルの岩盤崩落事故で多くの犠牲者が出たことから、山岳地における安全な交通の確保が要求されている。しかしながら、落石は自然現象であることから、設計時に想定していなかった規模の落石や岩盤崩落が発生し、構造物の破壊に至ることが少なくない。また、衝撃荷重下での鉄筋コンクリート(以下 RC と呼ぶ)構造の挙動は静的な場合と比べて大きく異なることが知られており、不明な点が多いのが現状である。最近では、実験研究に使用する各種測定機器の計測精度が飛躍的に向上し、従来測定困難とされていた現象も徐々に解明されるに至っており、耐衝撃性に対する研究が盛んに行われている¹⁾²⁾³⁾。

衝撃を受ける構造物で代表的なものに落石覆工があるが、これは橋梁などの土木構造物と同様にはり、柱そして板によって構成されるのが一般的である。構造物の挙動を知る上では構造を構成する個々の部材の衝撃破壊挙動を解明することが必要とされる⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。このような観点より本論文では、もっとも基本的な部材である RC はりの比較的低速度の重錘衝突による衝撃破壊挙動の解明をめざし、静的実験と重錘落下衝撃実験を行った。

最初に、さまざまな条件の相違によるはりの破壊形態や、荷重や変位等の応答特性に及ぼす影響について考察する。

次に、はりの変形に費やされる吸収エネルギーを2つの計測荷重(載荷点荷重及び支点反力)からそれぞれ求め、同様にさまざまな条件の相違による影響を比較し考察した。また、衝撃実験からはり全体における終局時の曲率分布を求め、静的実験から求めたものと比較し考察する。最後に、本研究から得られた衝撃応答特性、曲率分布等に関して得られた知見を示す。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

供試体は図-1 に示すようにスパン長、せん断補強筋比の異なる5種類の複鉄筋 RC はりを用いた。また載荷条件については重錘の載荷位置、質量、落下高さ(衝突速度)の相違をパラメータとし、静的および衝撃実験結果を比較、検討するため、合計 30 本の供試体を制作した。ここで TYPE-○□の最初の文字○はスパン長の相違を示し、A ; 200cm, B ; 110cm, C ; 70cm であり、2つ目の文字□は、せん断補強筋比の相違を示し、4 ; 0.38%, 8 ; 0.84%, 0 ; 0%とする。

表-1 にコンクリートの配合を示す。コンクリートは普通セメントを使用し、粗骨材に川砂利(最大寸法 25mm, 実積率 63.0%)を、細骨材に川砂(粗粒率 2.53)を用いた。混和剤は AE 減水剤(ボゾリス NO70)を使用した。鉄筋は、圧縮側、引張側ともに横フシ型異形棒鋼 D13(JIS G 3112)を、せん断補強筋には D6(JIS G 3112)を用いた。なお、用いたコンクリ

ート(材令 28 日)と鉄筋の材料特性を表-2 に示す。

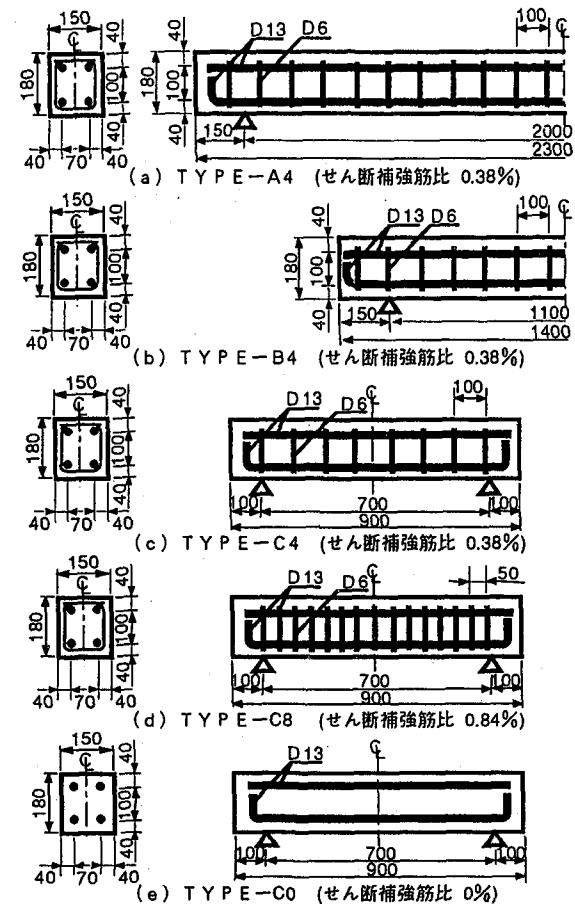


図-1 供試体諸元

表-1 コンクリート配合表

粗骨材の最大寸法(mm)		25
スランプ(cm)		12
水セメント比(%)		62
細骨材率(%)		45.5
単位量(kg/m ³)	水	165
	セメント	267
	細骨材	825
	粗骨材	1001
	混和剤	0.668

表-2 コンクリート、鉄筋の材料特性

コンクリート	
圧縮強度(kgf/cm ²)	283
引張強度(kgf/cm ²)	28.8
弾性係数(kgf/cm ²)	2.19×10 ⁵
ポアソン比	0.19
鉄筋	
降伏応力(kgf/cm ²)	4680
弾性係数(kgf/cm ²)	2.13×10 ⁶

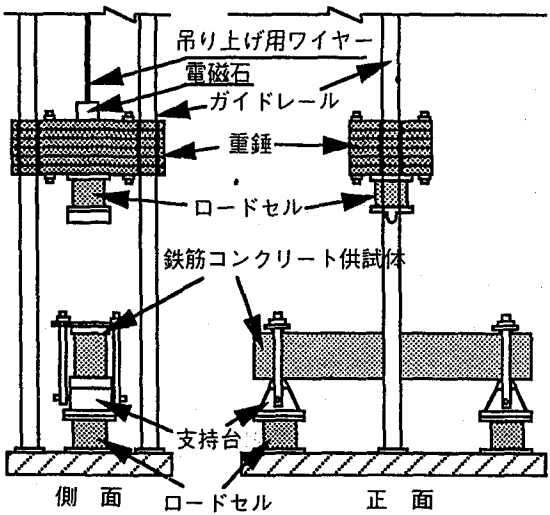
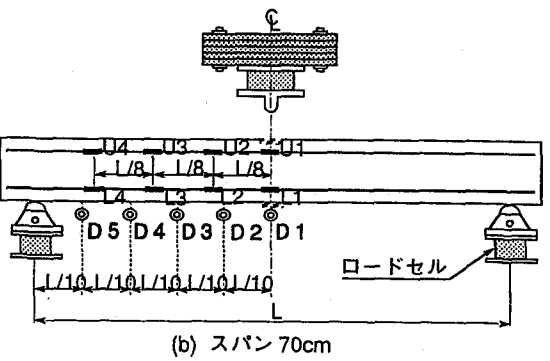
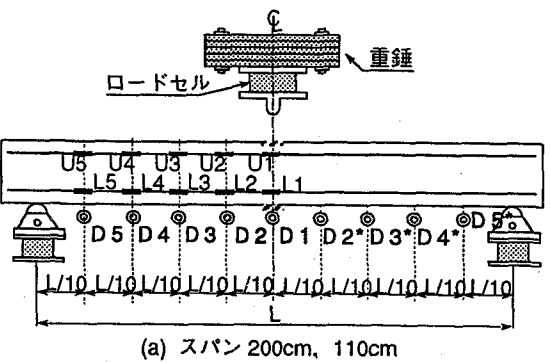


図-2 重錘落下式実験装置図



- ひずみゲージ (鉄筋)
- - - ひずみゲージ (コンクリート)
- 変位計

図-3 計測位置

2.2 実験方法

実験装置としては、静的実験には油圧性圧縮試験装置(島津製作所, UH-C500A)を使用した。衝撃実験には、図-2 に示すような重錘落下実験装置を使用した。これは、質量約 14kg の鋼板を所定の質量に重ね合わせたものとロードセルとを一体化した重錘を、磁石を用いて所定の高さまで釣り上げ自由落下させる自由落下式の実験装置である。はりの支点部ではリバウンドを防ぐため、鋼製の治具により上下

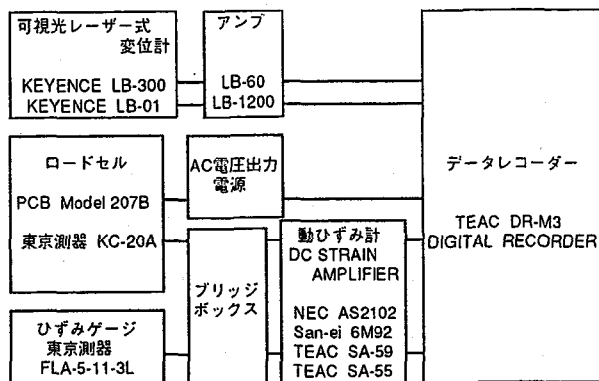


図-4 計測システム

方向変位を拘束した。

図-3 は衝撃実験の計測項目および計測位置を、図-4 は衝撃実験計測システムを示したものである。計測項目としては、荷重、支点反力、供試体の変位、鉄筋およびコンクリートのひずみである。荷重は重錘下部に取り付けたロードセル(PCB 社、207B)で、支点反力は支持点部のロードセル(東京測器社、KC-20A)で計測を行った。鉄筋およびコンクリートのひずみは、ひずみゲージを所定の計測位置に貼付し、変位の計測はレーザー変位計を用いて測定を行った。サンプリング間隔は20μsとした。

静的および衝撃実験における供試体および載荷方法の一覧を示したものが表-3 である。表中の凡例で示す通り、供試体種類、載荷方法、載荷位置、重錘質量、衝突速度、供試体番号を表現できるように供試体名を設定した。

3 実験結果および考察

3.1 破壊状況

(1) スパン長の相違による影響

図-5 は、各スパンにおける破壊状況を示したものである。静的実験において、スパン 200cm やスパン 110cm では、はり中央の上面の圧壊や剥離と広い範囲に主筋にほぼ直交する曲げひびわれが認められ、載荷点を中心に曲げ破壊をしていることが確認できる。スパン 70cm では、はり中央の上面で圧壊や剥離が確認でき、またはり下面では、主筋に直交して発生した曲げひびわれが圧縮主応力線に沿って徐々に傾斜していくひびわれ(曲げせん断ひびわれ)や支点とはり上面を結ぶひびわれ(斜め引張ひびわれ)が進展し、最終的にはせん断破壊に至っていることがわかる。一方衝撃実験においては、スパン 200cm では、静的実験の同じケースに比べてひびわれの領域が広いことが確認でき、また載荷点付近での曲げせん断ひびわれと負の曲げモーメントによるはり上面でのひびわれも確認できる。スパン 110cm では、はり中央の上面では圧壊や剥離、はり下面では曲げせん断ひびわれが見られ、最終的には押し抜きせん断破壊に至っていることがわかる。スパン 70cm では、静的実験の同じケースに比べてはり上面の圧壊や剥離、曲げせん断ひびわれや斜め引張ひびわれがはっきり現れ、押し抜きせん断破壊に至っていることがわかる。

表-3 供試体名一覧

	No.	供試体		載荷方法		
		供試体名	供試体種類	載荷点	重錘質量(kg)	落下高さ(cm)
静的実験	1	A4S1	TYPE-A4	スパン中央	—	—
	2	A4S2	TYPE-A4	スパン3/10点	—	—
	3	A4S3	TYPE-A4	スパン2/10点	—	—
	4	B4S1	TYPE-B4	スパン中央	—	—
	5	C4S1	TYPE-C4	スパン中央	—	—
	6	C8S1	TYPE-C8	スパン中央	—	—
	7	C0S1	TYPE-C0	スパン中央	—	—
衝撃実験(単一落下)	8	A4D1(H5)-1	TYPE-A4	スパン中央	194	128
	9	A4D1(H5)-2	TYPE-A4	スパン中央	194	128
	10	A4D2(H5)-1	TYPE-A4	スパン3/10点	194	128
	11	A4D2(H5)-2	TYPE-A4	スパン3/10点	194	128
	12	A4D3(H5)-1	TYPE-A4	スパン2/10点	194	128
	13	A4D3(H5)-2	TYPE-A4	スパン2/10点	194	128
	14	A4D1(L4)-1	TYPE-A4	スパン中央	109	100
	15	A4D1(L4)-2	TYPE-A4	スパン中央	109	100
	16	A4D1(L6)-1	TYPE-A4	スパン中央	109	227
	17	A4D1(L6)-2	TYPE-A4	スパン中央	109	227
	18	B4D1(H5)-1	TYPE-B4	スパン中央	194	128
	19	B4D1(H5)-2	TYPE-B4	スパン中央	194	128
	20	C4D1(H5)-1	TYPE-C4	スパン中央	194	128
	21	C4D1(H5)-2	TYPE-C4	スパン中央	194	128
	22	C4D1(H3)-1	TYPE-C4	スパン中央	194	46
	23	C4D1(H3)-2	TYPE-C4	スパン中央	194	46
	24	C8D1(H3)-1	TYPE-C8	スパン中央	194	46
	25	C8D1(H3)-2	TYPE-C8	スパン中央	194	46
衝撃実験(繰返落下)	26	C0D1(H3)-1	TYPE-C0	スパン中央	194	46
	27	C0D1(H3)-2	TYPE-C0	スパン中央	194	46
	28	A4R1(H2)	TYPE-A4	スパン中央	194	32
	29	B4R1(H2)	TYPE-B4	スパン中央	194	32
	30	C4R1(H2)	TYPE-C4	スパン中央	194	32

例

A4D1(H5)-1

①②③④⑤⑥

- ①: 供試体諸元(図-1)
- ②: 載荷方法
 - S: 静的実験
 - D: 衝撃実験(単一載荷)
 - R: 衝撃実験(繰返し載荷)
- ③: 載荷点
 - 1: スパン中央
 - 2: スパン3/10点
 - 3: スパン2/10点
- ④: 重錘質量
 - H: 194kg
 - L: 109kg
- ⑤: 重錘衝突速度
 - 2: 2.5m/s
 - 3: 3.0m/s
 - 4: 4.4m/s
 - 5: 5.0m/s
 - 6: 6.7m/s
- ⑥: 供試体番号(同じ条件で複数回の実験をした供試体のみ)

但し、④、⑤は衝撃実験のみ

(2) 載荷点の相違による影響

図-6 はスパン 200cm における載荷点の異なる場合の破壊状況を示したものである。静的実験において、載荷位置がスパン中央の場合、主筋と直交する曲げひびわれしか現れていない。一方載荷位置がスパン 3/10 とスパン 2/10 の場合、図中の載荷点と左側支点の間に曲げせん断ひびわれが確認できる。載荷点の右側には、曲げひびわれしか現れていないことがわかる。一方、衝撃実験では、どのケースを見てもわかるように、はり上面の圧壊や剥離が大きく認められ、静的実験では見られない負の曲げモーメントによるはり上面からのひびわれや上下につながったひびわれも確認でき

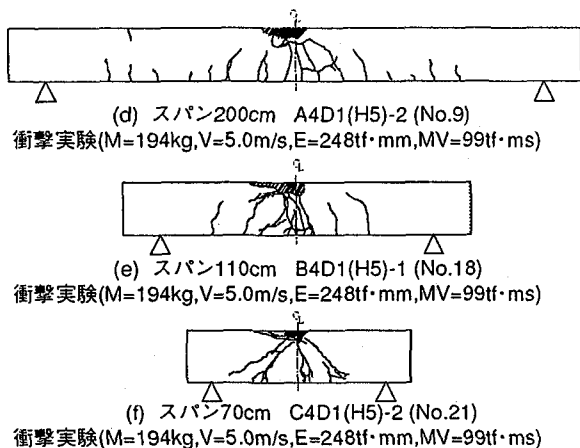
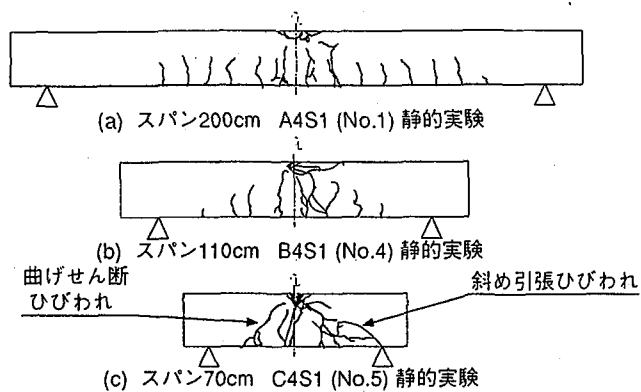


図-5 各スパンにおける破壊状況

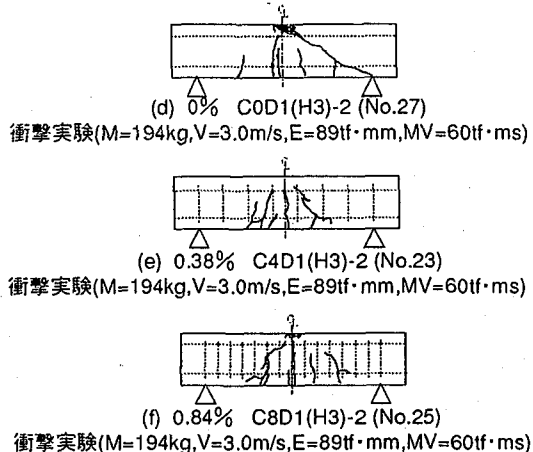
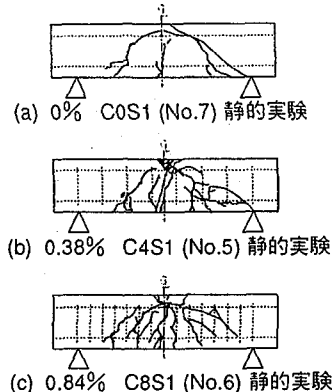


図-7 セン断補筋筋の異なる場合の破壊状況

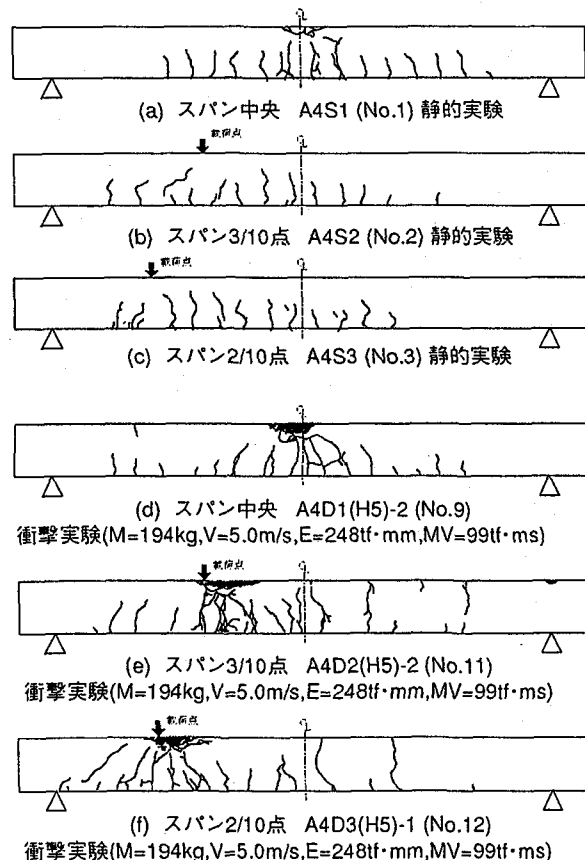


図-6 載荷点の異なる場合の破壊状況

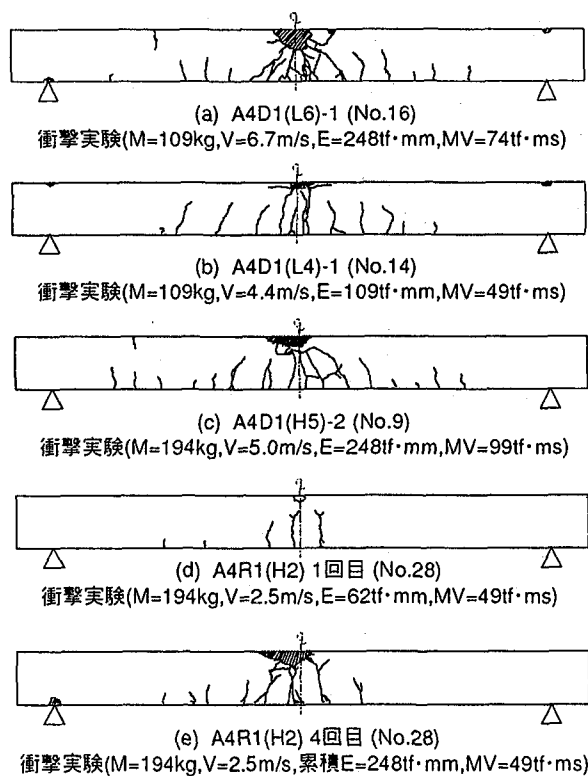


図-8 載荷条件の異なる場合の破壊状況

る。また、載荷点が支点到近いほど載荷点近傍でせん断力による破壊が顕著に現れている。

(3) せん断補強筋の相違による影響

図-7 はスパン 70cm におけるせん断補強筋の異なる場合の破壊状況を示したのである。静的実験において、せん断補強筋のない場合、載荷点と支点を結んだ線に沿ってひびわれ(斜め引張ひびわれ)が進展するせん断破壊が顕著に現れている。曲げ耐力に到達する前に、載荷点付近の 1 本の曲げひびわれが認められるものの、数本のせん断ひびわれが急速に発達し、部材のせん断破壊に至っている。一方せん断補強筋を有する場合、曲げひびわれや曲げせん断ひびわれの本数が増え、そのひびわれの本数は、せん断補強筋比が大きいほど多い。衝撃実験では、せん断補強筋のない場合、静的実験と同様に載荷点と支点を結んだ線に沿ってひびわれが進展するせん断破壊が顕著に現れている。一方、せん断補強筋を有する場合、ない場合に比べ曲げひびわれや曲げせん断ひびわれの本数が増えてはいるものの、静的実験の同じケースと比べると曲げひびわれの本数が少ないことがわかる。これは、重錘の衝突速度(落下高さ 46cm)が低く、重錘の持つ初期エネルギーが比較的小さいため、十分な破壊に至らなかったことが考えられる。

(4) 衝突速度の相違による影響

図-8(a)と(b)および(c)と(d)は、同一の重錘質量のもと、衝突速度が異なる衝撃実験の破壊状況を示したものである。衝突速度が大きいほど重錘の運動エネルギーと運動量が大きくなるため、衝突速度の大きい(a)および(c)は、(b)および(d)に比べて曲げひびわれの領域が広く、またひびわれの本数も多く、はり上面の圧壊・剥離も顕著に認められる。以上より、重錘の質量が一定の場合、重錘の衝突速度(運動エネルギー、運動量)が大きいほど、局所破壊及び全体的破壊ともに卓越することがわかる。

(5) 同一運動エネルギーの下、運動量の相違による影響

図-8(a)と(c)は、重錘質量と衝突速度を組み合わせることにより、重錘の運動エネルギーを一定にし運動量を変化させた場合の衝撃実験の破壊状況を示したものである。これより、衝突速度が大きい(a)は、(c)に比べはり上面の圧壊・剥離や載荷点付近の曲げせん断ひびわれの進展が大きいことがわかる。一方、重錘質量及び運動量が大きい(c)は、(a)に比べ曲げひびわれの領域が広く、ひびわれの本数も多くなっている。以上より、重錘のもつ運動エネルギーが一定の場合、重錘の速度が大きいほど局所破壊が、また重錘の質量や運動量が大きいほど全体的破壊が卓越することがわかる。

(6) 同一運動量の下、運動エネルギーの相違による影響

図-8(b)と(d)は、重錘質量と衝突速度を組み合わせることにより、重錘の運動量を一定にし運動エネルギーを変化さ

せた場合の衝撃実験の破壊状況を示したものである。これより、衝突速度及び運動エネルギーが大きい(b)が、曲げひびわれの領域が広く、またひびわれの本数も多く、はり上面の圧壊・剥離も顕著に認められる。以上より、重錘のもつ運動量が一定の場合、重錘の運動エネルギーおよび速度が大きいほど、局所破壊及び全体的破壊ともに卓越することがわかる。

(7) 同一エネルギーの下、単一落下実験と繰り返し実験の比較

図-8(e)の繰り返し衝撃実験は、同一重錘質量のもと 4 回の落下で単一落下衝撃実験(c)の衝突時の運動エネルギーと等しくなるように設定している。1 回目の落下で曲げ破壊によるひびわれが生じ、2 回目でそのひびわれの長さが増大した。3 回目では、曲げひびわれから曲げせん断ひびわれとなり曲げせん断破壊が起こり、はり上面での圧壊・剥離も見られた。4 回終了時の破壊状況では、単一落下に比べ上面の圧壊・剥離や曲げせん断ひびわれは進展しているが、曲げひびわれの領域は単一落下よりも狭いことが確認できる。以上より、繰り返し実験の場合、1 回で与えるエネルギーは小さいが載荷点付近に複数回衝突するため、単一落下実験に比べ局所破壊が卓越することがわかる。

3.2 荷重、変位の応答特性

(1) スパン長の相違による影響

図-9 は、各スパンにおける衝撃実験の荷重波形、変位波形を示したものである。荷重波形より、スパンが長いほど荷重作用時間が大きく、力積が小さいことがわかる。また荷重の最大値はスパンが長いほどわずかながら大きくなっている。また変位波形より、スパン長に対する最大変位の割合は、それぞれスパン 200cm で 0.031、110cm で 0.034、70cm で 0.026 であり、スパンの相違による傾向は見られなかった。これより、衝突初期の荷重にははりの慣性力が関係し、はりの質量が大きいほど最大荷重が大きい。その後ははりに変位が生ずるためスパン長が大きいほど作用時間が長くなるものの発生荷重が小さくなり結果として力積は減少したものと考えられる。

(2) 衝突速度の相違による影響

図-10 はスパン 200cm における衝突速度の異なる衝撃実験の荷重波形および変位波形を示したものである。荷重波形より、衝突速度が大きいほど最大荷重、荷重作用時間、力積ともに大きいことが確認できる。また衝突速度が大きいほど、最初に時間的に短い大きな波のあと比較的平坦な小さい波が継続する形状になることがわかる。変位波形より、最大変位についても同様に衝突速度が大きいほど大きいことがわかる。これより、重錘質量が同一の場合、速度が大きいほど運動エネルギーや運動量が大きくなるが、それらは最大荷重、荷重作用時間、力積、最大変位と正の相関関係にあることがわかる。

(3) 同一エネルギーの下、運動量の相違による影響

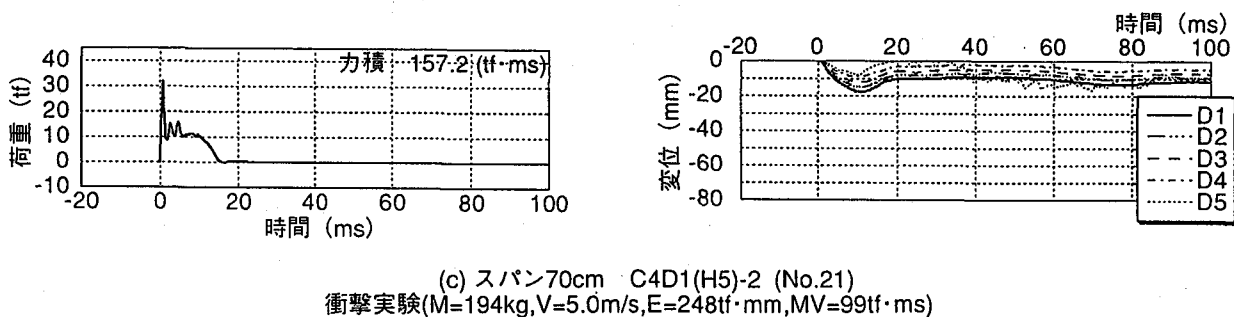
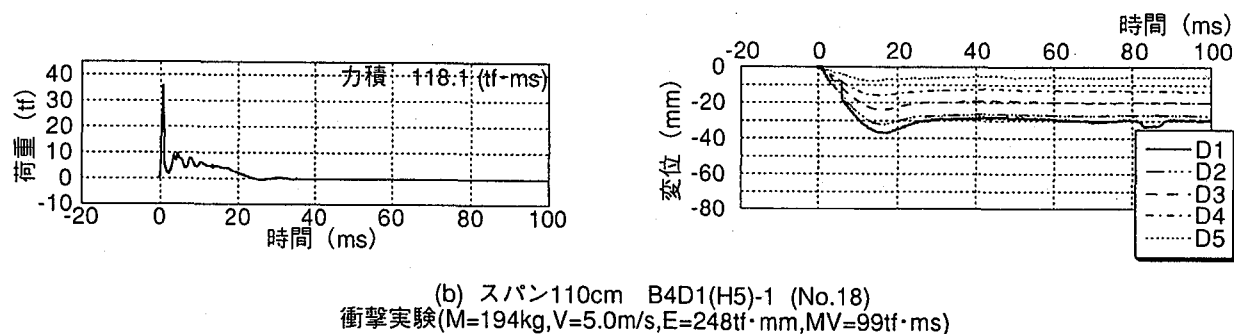
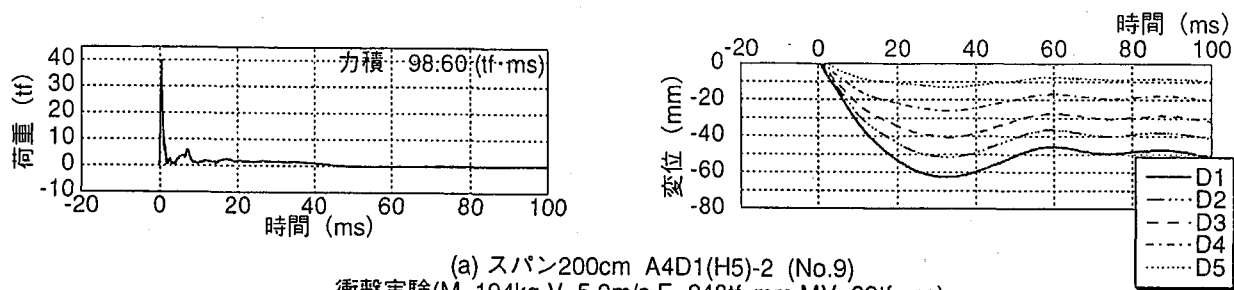


図-9 スパンの相違による影響

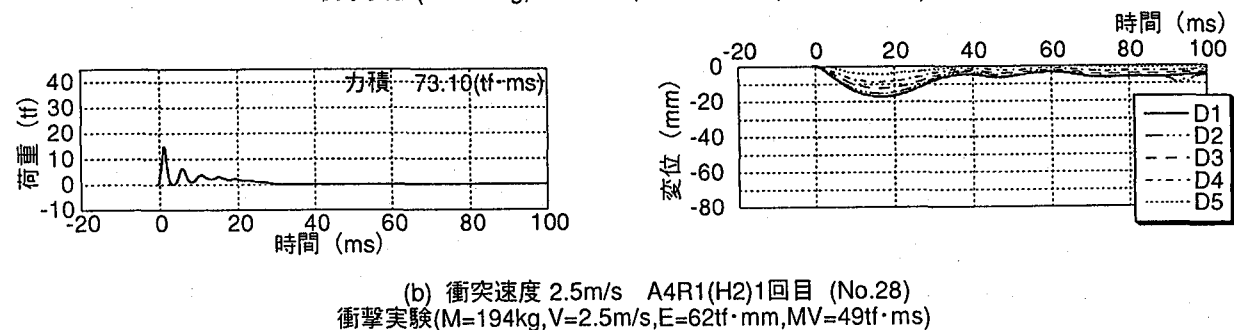
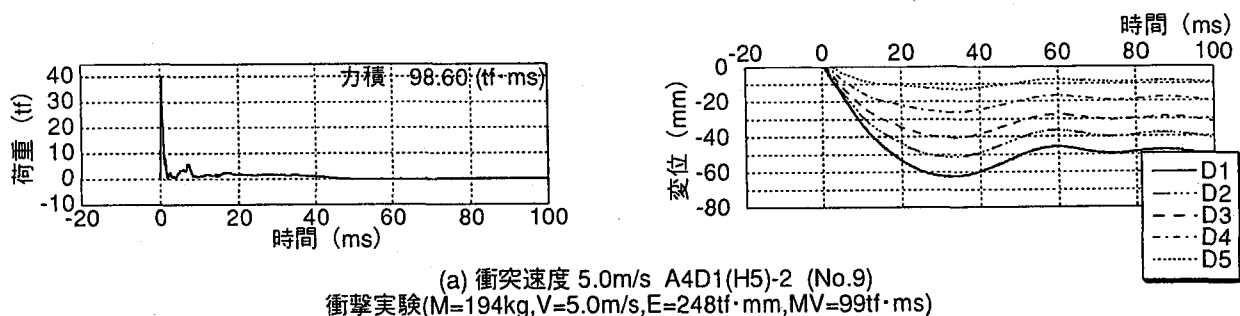


図-10 衝突速度の相違による影響

図-11 は、重錘質量と衝突速度を組み合わせることにより重錘の運動エネルギーを一定にし、運動量を変化させた場合の衝撃実験の荷重波形および変位波形を示したものである。荷重波形より、運動量(重錘の質量)が大きいほど、最大

荷重、荷重作用時間、力積ともに大きいことが確認できる。また変位波形より、最大変位についても同様に運動量(重錘の質量)が大きいほど大きいことがわかる。本例では運動量の34%の増加に対し、最大変位は23%、力積は12%増加し

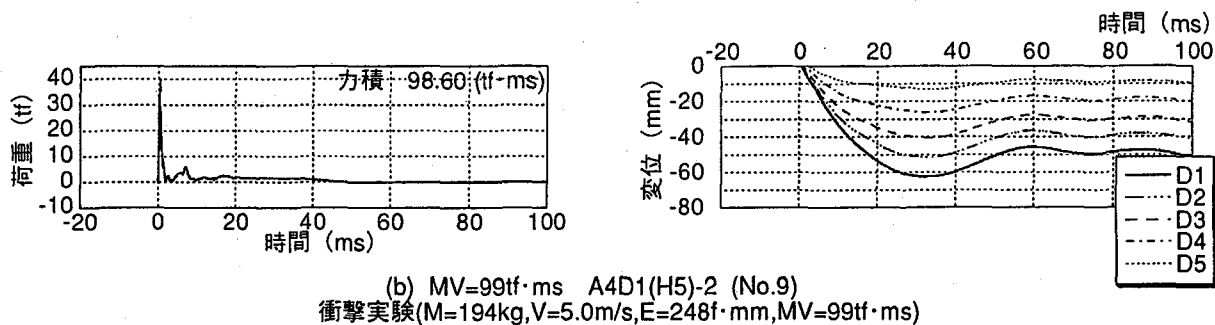
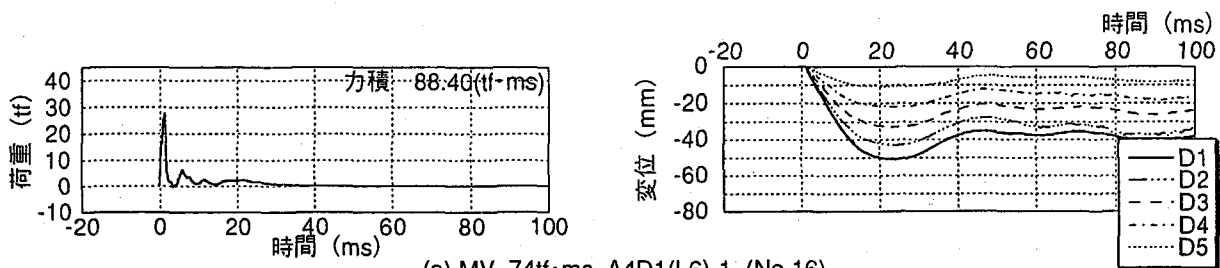


図-11 同一運動エネルギーの下,運動量の相違による影響

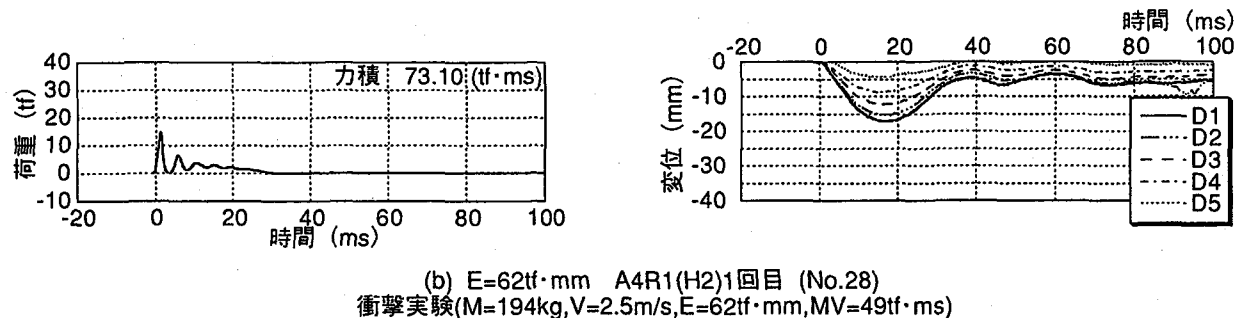
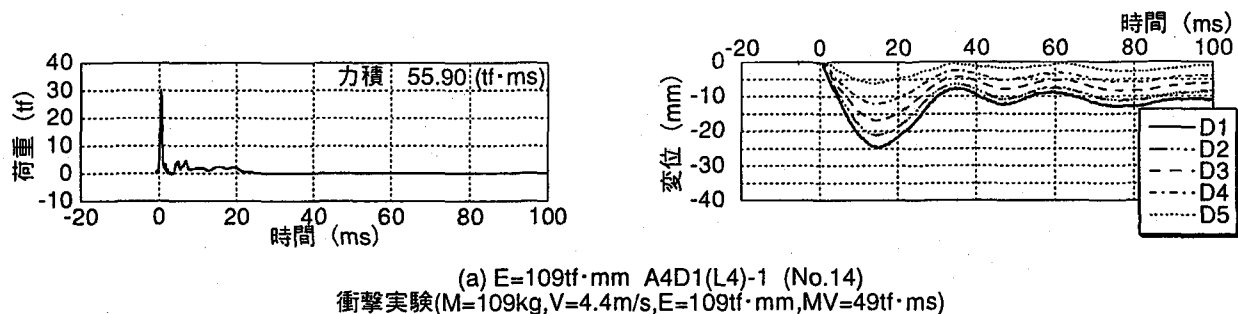


図-12 同一運動量の下,運動エネルギーの相違による影響

ている。これより、同一エネルギーの場合、運動量(重錘の質量)は最大荷重、荷重作用時間、力積、最大変位と正の相関関係にあることがわかる。

(4) 同一運動量の下、重錘の運動エネルギーの相違による影響

図-12 は、重錘質量と衝突速度を組み合わせることにより重錘の運動量を一定にし、運動エネルギーを変化させた場合の衝撃実験の荷重波形および変位波形を示したものである。荷重波形より、運動エネルギーが大きいほど最大荷重が大きく、荷重作用時間や力積が小さいことがわかる。ま

た変位波形より、運動エネルギーが大きいほど最大変位が大きいことがわかる。本例ではエネルギーの76%の増加に対し、最大変位は46%増加、力積は24%減少している。これより同一運動量の場合、運動エネルギー(衝突速度)は、最大荷重や最大変位と正の相関関係に、荷重作用時間や力積とは負の相関関係にあることがわかる。

なお、載荷点の相違による影響についての応答特性図は省略したが、載荷点がスパン中央から支点到近づくほど、最大荷重、荷重作用時間、最大変位が小さいことがわかった。しかし力積は、載荷点の相違による影響は認められな

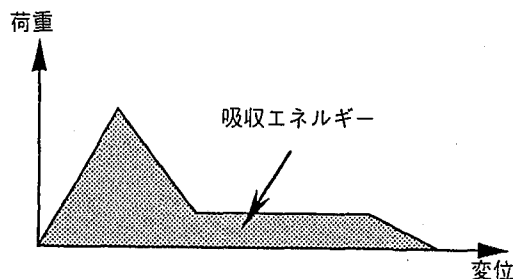


図-13 吸収エネルギーの定義

表-4 吸収エネルギー一覧表

供試体名		P(荷重)・ δ 積分値 (tf・mm)	R(支点反力)・ δ 積分値 (tf・mm)
No.8	A4D1(H5)-1	158.4	190.7
No.9	A4D1(H5)-2	157.4	176.6
No.10	A4D2(H5)-1	208.9	172.1
No.11	A4D2(H5)-2	207.5	171.2
No.12	A4D3(H5)-1	178.7	154.7
No.13	A4D3(H5)-2	186.8	157.4
No.14	A4D1(L4)-1	48.30	63.50
No.15	A4D1(L4)-2	76.80	61.90
No.16	A4D1(L6)-1	192.7	138.0
No.17	A4D1(L6)-2	170.0	143.7
No.18	B4D1(H5)-1	192.2	224.7
No.19	B4D1(H5)-2	204.1	215.2
No.20	C4D1(H5)-1	-	274.4
No.21	C4D1(H5)-2	203.1	173.2
No.22	C4D1(H3)-1	46.00	10.50
No.23	C4D1(H3)-2	53.80	21.60
No.24	C8D1(H3)-1	-	19.20
No.25	C8D1(H3)-2	44.40	18.60
No.26	C0D1(H3)-1	61.90	24.60
No.27	C0D1(H3)-2	47.80	22.60
No.28	A4R1(H2)1回目	48.10	29.70
No.29	B4R1(H2)1回目	46.20	20.20
No.30	C4R1(H2)1回目	30.20	17.30

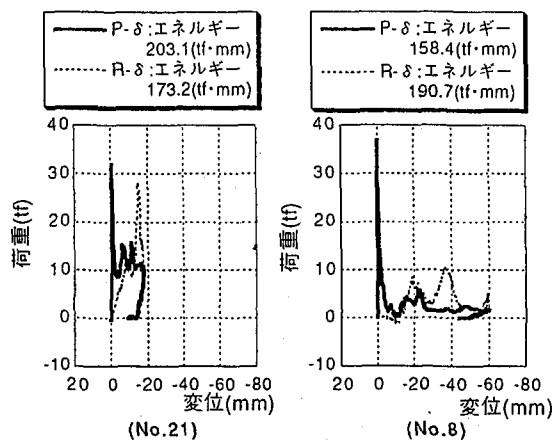
かった。またせん断補強筋の相違による影響については、せん断補強筋の有無は、 a/d が小さい限りでは衝撃性状に影響を与えることが考えられるが、本ケースでは重錘の持つエネルギーが比較的小さいため、最大荷重、荷重作用時間、力積、変位ともに、せん断補強筋の有無による明確な差異は認められなかった。

3.3 吸収エネルギー

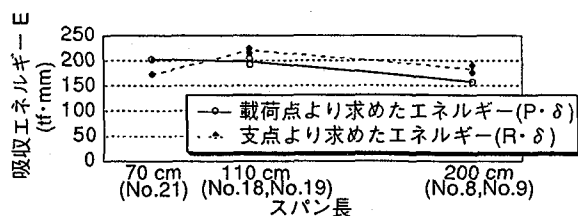
ここでは、はりの変形に費やされる吸収エネルギーについて考察する。なお、吸収エネルギーとは、図-13 に示すように荷重-変位曲線を積分して得られた値である。用いる荷重は、載荷点荷重 P と支点反力 R とし、変位はスパン中央のはり下面の変位 δ である。各実験で得られた吸収エネルギーの一覧を表-4 に示す。支点反力と載荷点荷重とは、波形形状も位相も異なるため、ここで示すように吸収エネルギーは一般には一致しない。

(1) 静的実験と衝撃実験の比較

表-5 はスパン長の 1% 変形量(載荷点)に対する吸収エネルギーを示したものである。なお、表中の()の数値は静的実験を基準とした値である。スパン長の 1% 変形量に対する吸収エネルギーは、衝撃実験では、静的実験に比べ約 1.1

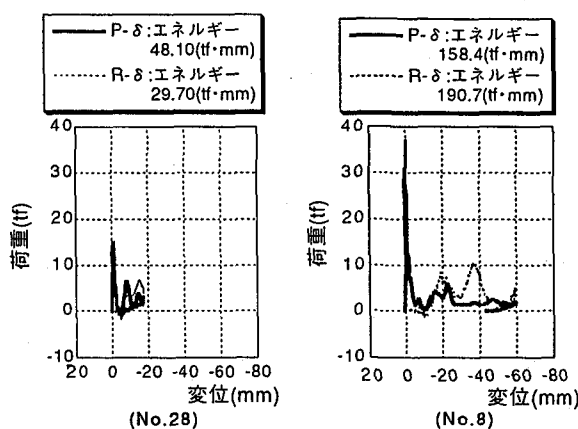


(a) P- δ , R- δ 関係

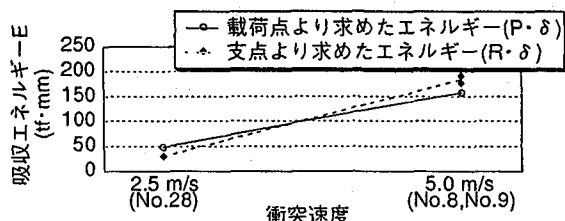


(b) 吸収エネルギーEの比較

図-14 スパン長の相違による影響



(a) P- δ , R- δ 関係



(b) 吸収エネルギーEの比較

図-15 衝突速度の相違による影響

～1.6 倍大きく、またスパンが短いほど大きいことがわかる。

(2) スパン長の相違による影響

図-14 はスパンの相違による吸収エネルギーを比較したものである。載荷点荷重より求めたエネルギーは、スパンが長いほど減少することがわかる。これは力積と相関があり(図-9 参照)、載荷点の力積が大きいほど吸収エネルギーが大きくなっている。スパン長の相違により P - δ 曲線は大き

表-5 スパン長の1%変形量に対する吸収エネルギー

供試体名	スパン長 (cm)	スパンの1%の変形量に対する 吸収エネルギー(P- δ 積分値) (tf $\cdot$ mm)
No.1	A4S1	200
No.8	A4D1(H5)-1	200
No.9	A4D1(H5)-2	200
No.4	B4S1	110
No.18	B4D1(H5)-1	110
No.19	B4D1(H5)-2	110
No.5	C4S1	70
No.20	C4D1(H5)-1	70
No.21	C4D1(H5)-2	70

()内は同一スパン長で静的
実験を基準に比較した値

く異なり、荷重の最大値と変位の最大値からエネルギーは単純に定まらないことがわかる。反力より求めたエネルギーに関しては、スパンの相違による影響は認められなかった。

(3) 衝突速度による影響

図-15 は衝突速度の相違による吸収エネルギーを比較したものである。載荷点荷重より求めたエネルギーおよび反力より求めたエネルギーは、どちらも衝突速度が大きいほど大きいことがわかる。また、吸収エネルギーは速度の二乗と比例していることがわかる。

(4) 同一エネルギーの下、運動量の相違による影響

図-16 は、重錘質量と衝突速度を組み合わせることにより、運動エネルギーを一定にし運動量を変化させた場合の吸収エネルギーを示したものである。載荷点荷重より求めたエネルギーは運動量が大きい場合わずかに小さいが、大きな差は認められない。反力より求めたエネルギーは運動量が大きい場合大きくなっている。吸収エネルギーを求める際の衝撃力については、支点反力は、重錘衝撃力の急激な作用（1波目）の後、徐々に増加することが確認できる。これは、重錘衝撃力と支点反力には位相差があることを意味し、吸収エネルギーの評価は、衝突点近傍の P- δ 関係から求めたものが、支点反力を用いるものより理想的であると考えられる。衝突時の運動エネルギーが同じ場合、3.2 (3) の結果を合わせて考えると一般には運動量の違いは衝突初期の最大荷重及び最大変位にかなり影響を与えるが、はりの吸収エネルギーに与える影響が比較的小さいと推論される。

(5) 同一運動量の下、重錘の運動エネルギーの相違による影響

図-17 は、重錘質量と衝突速度を組み合わせることにより、運動量を一定にし運動エネルギーを変化させた場合の吸収エネルギーを示したものである。載荷点荷重より求めたエネルギーおよび反力より求めたエネルギーは、運動エネルギーが大きい場合大きいことがわかる。

4. はりの曲率分布

ここでは静的及び衝撃実験において、載荷条件及びせん

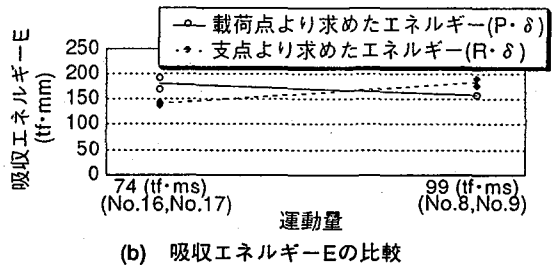
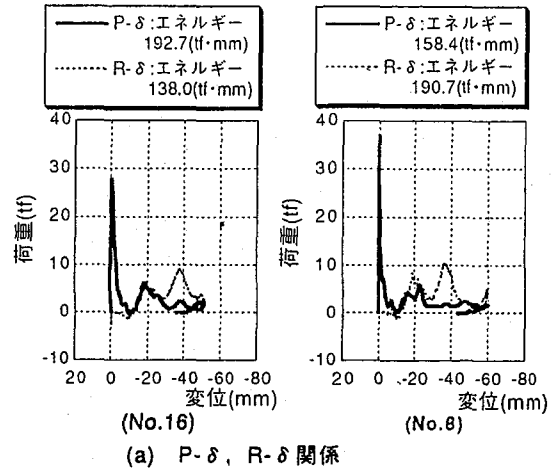


図-16 同一運動エネルギーの下、運動量の相違による影響

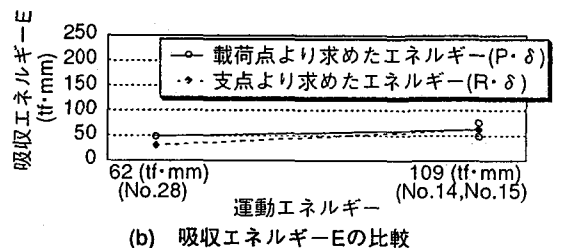
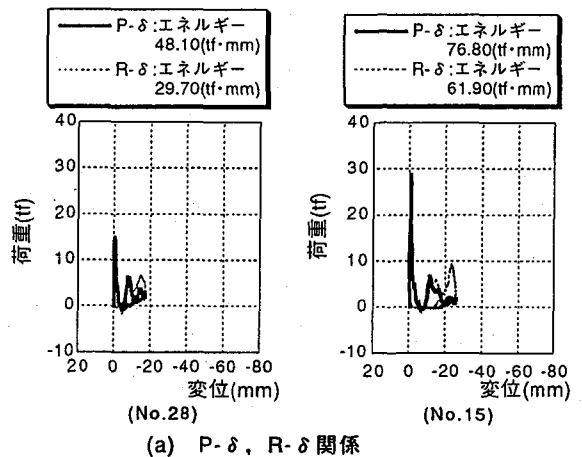


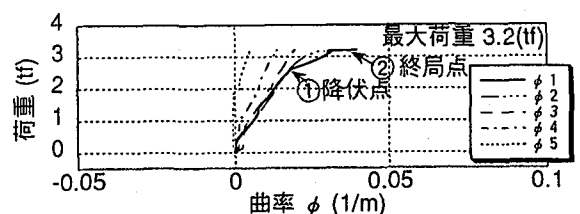
図-17 同一運動量の下、運動エネルギーの相違による影響

断スパン比の異なる供試体に関して、各測点の鉄筋ひずみから求めた曲率分布の考察を行い、さらに曲率分布から塑性状態に到達している領域の長さを比較、検討する。この曲率分布、塑性領域の長さを求めることは、部材の衝撃破壊挙動の解明において、重要な要素であり、著者らは衝撃荷重下における RC 構造物の合理的設計に向けて、実験の他に個別要素法を用いてパラメトリックな数値解析を行っ

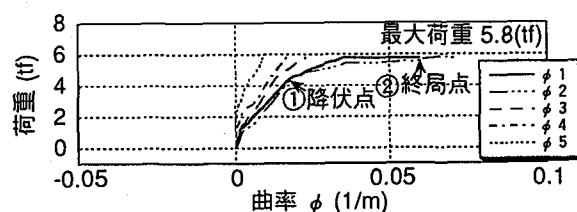
表-6 静的実験における荷重、曲率

スパン長 (cm)	せん断 スパン 比 a/d	測点1(スパン中央)					
		降伏時		終局時		じん性 ϕ_{ys}/ϕ_{us}	
		荷重 P_{ys} (tf)	曲率 ϕ_{ys} (1/m)	荷重 P_{us} (tf)	曲率 ϕ_{us} (1/m)		
200	7.14	2.6	0.017	3.2	0.040	2.35	
110	3.92	4.6	0.020	5.8	0.060	3.00	
70	2.14	8.9	0.024	9.8	0.056	2.33	

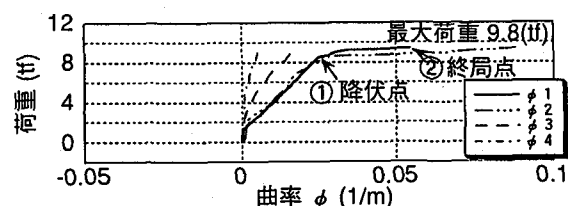
便宜上、スパン1%のたわみが生じた時点を終局時と呼ぶ



(a) スパン200cm A4S1 (No.1)



(b) スパン110cm B4S1 (No.4)



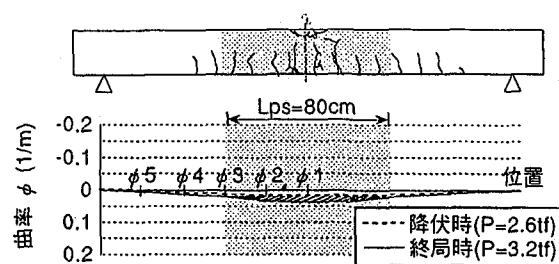
(c) スパン70cm C4S1 (No.5)

図-18 各スパンにおける荷重-曲率関係
(静的実験・スパン中央載荷)

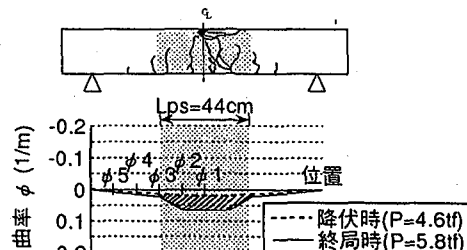
てきているが、塑性している領域とその進展について明らかにできれば、今後の耐衝撃設計に有用な情報が得られると考えている。スパン長(せん断スパン比)は、70cm($a/d=2.14$)、110cm($a/d=3.92$)、200cm($a/d=7.14$)の3種である。なおここでは、はりの曲率を(下側鉄筋ひずみ-上側鉄筋ひずみ)/(上側鉄筋と下鉄筋間の距離)とした。

4.1 静的実験

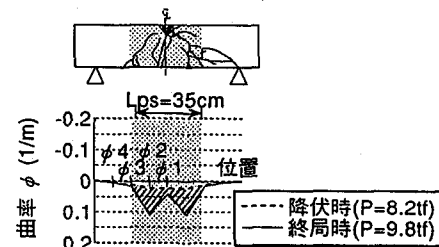
図-18 は、静的実験時における各測点の荷重-曲率関係を示したものである。測点1のデータより、①は引張鉄筋の降伏点に対応しており、②は荷重の増加がほとんど認められないが、引張鉄筋の塑性ひずみ増加により曲率が増加する、いわゆる終局点に対応している。なおこの実験では、測定上の問題から変位がスパン1%の変形量に達した時を便宜上終局点とした。また表-6 は、図-18 の各ケースにおける降伏及び終局時の荷重、曲率を一覧にまとめたものである。これより降伏時では、スパン長が短いほど荷



(a) スパン 200cm A4S1 (No.1)



(b) スパン 110cm B4S1 (No.4)



(c) スパン 70cm C4S1 (No.5)

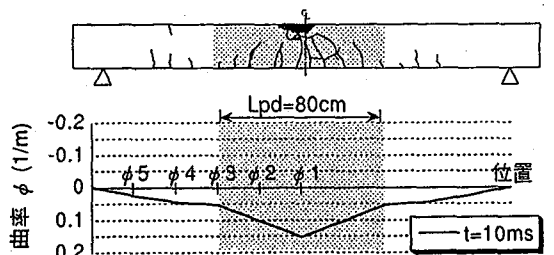
図-19 各スパンにおける降伏時及び終局時の
曲率の状況(静的実験)

重、曲率とも大きい傾向にあることがわかる。しかし終局時では、荷重は、降伏時と同様にスパン長が短いほど大きい、曲率はスパン 110cm 方がスパン 70cm より大きいことが確認できる。これは、破壊性状とも関係があり、曲げ破壊型のスパン 110cm の方が、せん断破壊型のスパン 70cm より、じん性が期待できることを意味する。

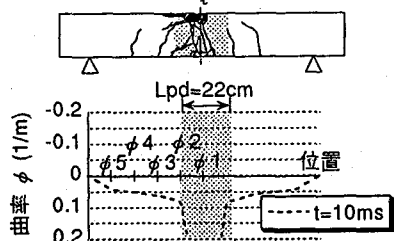
図-19 は、図-18 の各スパンにおける降伏点及び終局点に対応した各測点の曲率分布を態に到達している領域示したものである。ここで、ハッチの部分は引張鉄筋が降伏し塑性性状を意味し、この領域で塑性回転が生じていることが考えられる。ここで塑性状態に達している領域の長さを L_{ps} (以後、静的塑性長さと呼ぶ) とすると、スパン 200cm では L_{ps} は 80cm、スパン 110cm では L_{ps} は 44cm、スパン 70cm では L_{ps} は 35cm であることがわかる。これよりスパン長 L に対する静的塑性長さの比(L_{ps}/L)は、破壊形態が曲げ破壊型のスパン 200cm および 110cm の場合でスパン長の 0.4 程度、破壊形態がせん断破壊型のスパン 70cm の場合で、スパン長の半分程度であり、スパン長が短いほどその割合が大きいことがわかる。

4.2 衝撃実験

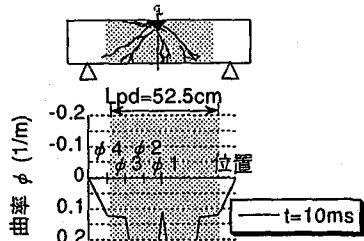
図-20 は、スパン長の異なる場合の曲率分布を示したものである。衝撃実験においては、はり上面の圧壊・剥離やはり下面から上面へ向かうひびわれ等が載荷点近傍に顕著に現



(a) スパン200cm A4D1(H5)-2 (No.9)
衝撃実験(M=194kg,V=5.0m/s,E=248tf・mm,MV=99tf・ms)

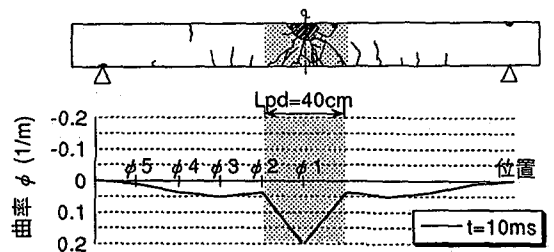


(b) スパン110cm B4D1(H5)-1 (No.18)
衝撃実験(M=194kg,V=5.0m/s,E=248tf・mm,MV=99tf・ms)

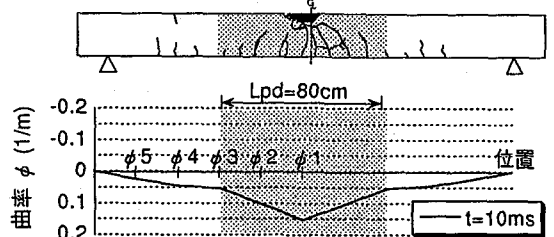


(c) スパン70cm C4D1(H5)-1 (No.20)
衝撃実験(M=194kg,V=5.0m/s,E=248tf・mm,MV=99tf・ms)

図-20 スパン長の相違による影響



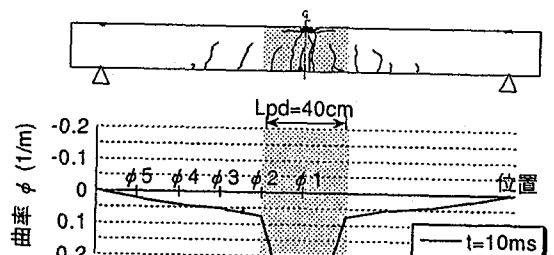
(a) MV=74tf・ms A4D1(L6)-1 (No.16)
衝撃実験(M=109kg,V=6.7m/s,E=248tf・mm,MV=74tf・ms)



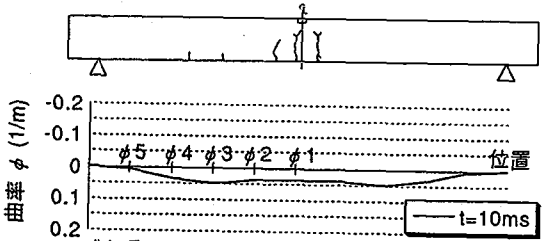
(b) MV=99tf・ms A4D1(H5)-2 (No.9)
衝撃実験(M=194kg,V=5.0m/s,E=248tf・mm,MV=99tf・ms)

図-21 同一運動エネルギーの下、
運動量の相違による影響

れるため、曲率分布は載下点近傍に集中し、載荷点近傍とそれ以外とで凹凸が生じる。そのため降伏点や終局点については、衝撃実験では静的実験のように降伏点や終局点が



(a) E=109tf・mm A4D1(L4)-1 (No.14)
衝撃実験(M=109kg,V=4.4m/s,E=109tf・mm,MV=49tf・ms)



(b) E=62tf・mm A4R1(H2)1回目 (No.28)
衝撃実験(M=194kg,V=2.5m/s,E=62tf・mm,MV=50tf・ms)

図-22 同一運動量の下、運動エネルギーの
相違による影響

表-7 静的塑性長さとの動的塑性長さの比較(1)

供試体	せん断スパン比 a/d	M (kgf)	V (m/s)	E (tf・mm)	MV (tf・ms)	L_{pd} (cm)	L_{pd}/L	L_{pd}/L_{ps}
No.9	7.14	194	5.0	248	99	80	0.4	1.0
No.18	3.92	194	5.0	248	99	22	0.2	0.5
No.20	2.14	194	5.0	248	99	52.5	0.75	1.5

ただし、 $L=200\text{cm}$ の場合 $L_{ps}=80\text{cm}$
 $L=110\text{cm}$ の場合 $L_{ps}=44\text{cm}$
 $L=70\text{cm}$ の場合 $L_{ps}=35\text{cm}$

明確に判断できない。ここでは、急激な曲率変化点により判断して、動的塑性長さ(L_{pd})を定めた。これより各スパンにおける動的塑性長さを検討すると、スパン 200cm : $L_{pd}=80\text{cm}$, スパン 110cm : $L_{pd}=22\text{cm}$, スパン 70cm : $L_{pd}=52.5\text{cm}$, と推定できる。表-7 は図-20 に基づき各ケースにおいて静的塑性長さとの動的塑性長さを一覧したものである。実験数が少ないため明確な結論は下せないが、これより曲げ破壊型のスパン 200cm および 110cm について、動的塑性長さは、スパン長の 0.2~0.4 程度、静的塑性長さの半分から同等程度であることはわかる。また、せん断破壊型のスパン 70cm について、動的塑性長さは、スパン長の 0.8 程度、静的塑性長さの 1.5 倍程度であることがわかる。

図-21 は、スパン 200cm において重錘の運動エネルギーを一定にし運動量を変化させた場合の曲率分布を示したものである。これより衝突速度が大きい(a)の方は、(b)に比べ載下点近傍の曲率が大きいことが確認できる。一方、領域 L_{pd} は、重錘質量の大きい(b)の方が、(a)の約2倍と大きいことが確認できる。これは破壊状況で述べた記述と整合し、局所的・部分的な破壊挙動については、曲率と衝突速度は正の相関関係にあり、一方全体的な破壊挙動については、動的塑性長さ L_{pd} と重錘質量(運動量)は正の相関関係がある

表-8 静的塑性長さとの動的塑性長さの比較(2)

供試体	せん断スパン比 a/d	M (kgf)	V (m/s)	E (tf·mm)	MV (tf·ms)	L_{pd} (cm)	L_{pd}/L	L_{pd}/L_{ps}
No.8	7.14	194	5.0	248	99	80	0.4	1.0
No.9	7.14	194	5.0	248	99	80	0.4	1.0
No.14	7.14	109	4.4	109	49	40	0.2	0.5
No.15	7.14	109	4.4	109	49	40	0.2	0.5
No.16	7.14	109	6.7	248	74	40	0.2	0.5
No.17	7.14	109	6.7	248	74	40	0.2	0.5
No.28	7.14	194	2.5	62	49	-	-	-

ただし、 $L=200\text{cm}$, $L_{ps}=80\text{cm}$

ことがいえる。

図-22 は、スパン 200cm において運動量を一定にし運動エネルギーを変化させた場合の曲率分布を示したものである。運動エネルギーや衝突速度の大きい(a)は、載荷点近傍(測点1と測点2の間)の曲率が大きいことが確認でき、動的塑性長さ L_{pd} は 40cm であることが確認できる。一方、(a)に比べ重錘の質量が大きく、また運動エネルギーの小さい(b)は、測点1～測点3の曲率がほぼ一様分布し、またそれ以外との凹凸も見られず、塑性状態に達していないことが確認できる。表-8 は、図-21～22 に基づき各ケースにおける動的塑性長さについて、静的塑性長さと比較して示したものである。これより動的塑性長さは、スパン長の 0.2～0.4 程度であり、静的塑性長さの半分から同等程度であることがわかる。

5. まとめ

本研究では、鉄筋コンクリートはりの比較的低速度の重錘衝突による基本的衝撃破壊挙動の解明をめざし一連の実験を行った。本研究で得られた主な結論は、以下の通りである。

1. 各種条件下の鉄筋コンクリートはりのひびわれ性状ならびに破壊性状について実験的にその特徴を明らかにした。
2. スパン中央点に衝撃を受ける場合、スパン長は、最大荷重、荷重作用時間と正の相関関係があり、力積、吸収エネルギーと負の相関関係にあることがわかった。
3. 重錘質量が同一の場合、速度が大きいほど運動エネルギーや運動量が大きい、それらは最大荷重、荷重作用時間、力積、最大変位、吸収エネルギーと相関関係にあることがわかった。
4. 同一エネルギーの衝撃を受ける場合、運動量(重錘の質量)は最大荷重、荷重作用時間、力積、最大変位と正の相関関係にあることがわかり、吸収エネルギーは、運動量の相違による影響は認められなかった。
5. 同一運動量の衝撃を受ける場合、運動エネルギー(衝突速度)は、最大荷重、最大変位、吸収エネルギーと正の相関関係にあり、荷重作用時間や力積と負の相関関係にあることがわかった。
6. 静的荷重を受ける場合、スパン長 L に対する載荷点近傍の曲率分布から判断した静的塑性長さ L_{ps} の比(L_{pd}/L)

は、破壊形態が曲げ破壊型のスパン 200cm および 110cm の場合は 0.4 程度、せん断破壊型のスパン 70cm の場合は 0.5 程度であり、スパン長が短いほどその割合が大きかった。

7. 衝撃実験においては、スパン長 L に対する動的塑性長さの比(L_{pd}/L)は、曲げ破壊型のスパン 200cm、110cm の場合で 0.2～0.4 程度であり、静的塑性長さの半分から同等程度であることがわかった。またせん断破壊型のスパン 70cm の場合では 0.8 程度で、静的塑性長さの 1.5 倍程度であることがわかった。
8. 同一運動エネルギーの下、運動量を変化させた場合には、衝突速度の大きいほど載荷点近傍の曲率が大きいことが、また重錘質量が大きいほど塑性状態に達している領域が大きいことがわかった。これは破壊状況で述べた記述と整合し、局所的・部分的な破壊挙動については、曲率と衝突速度(運動量)は正の相関関係にあり、一方全体的な破壊挙動については、動的塑性長さ L_{pd} と重錘質量は相関関係があることがわかった。
9. 同一運動量の衝撃を受ける場合、載荷点近傍の曲率分布から判断した動的塑性長さは、運動エネルギーが大きいほど大きいことがわかった。

参考文献

- 1) 榎谷浩，御嶽諒，梶川康男：鋼製ロックシェッド上への落石衝突実験とエネルギー分担に関する一考察，構造工学論文集，Vol.37A，pp.1627-1636，1991年3月。
- 2) 土木学会：構造工学シリーズ8，ロックシェッドの耐衝撃設計，1998年。
- 3) 佐藤弘史，間瀬利明，二川英夫，園林栄喜，石川信隆，若林修：靱性を高めた PC ロックシェッドの斜め衝撃載荷実験，第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.91-96，1998年6月。
- 4) 中田吉彦，榎谷浩，梶川康男，森嶋芳大：個別要素法による鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動解析，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1761-1771，1998年3月。
- 5) 園林栄喜，香月智，石川信隆，太田俊昭：簡易動的解析法による PC はりの動的終局変形の推定，構造工学論文集，Vol.45A，pp.1665-1676，1999年3月。
- 6) 岸徳光，三上浩，安藤智啓：せん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.45A，pp.1689-1699，1999年3月。
- 7) 宮本文穂，中村英明，北山篤：RC版の衝撃挙動解析におけるコンクリートの引張軟化特性の影響，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1745-1752，1998年3月。
- 8) 園田恵一郎，高田直俊，石丸和宏，林道廣，奥田洋一：水中線爆装置による高架橋 RC 橋脚衝撃破壊実験，第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.251-256，1998年6月。

(1999年9月17日 受付)