

論文 曲げ破壊型RCはりの耐衝撃設計法に関する研究

山田 岳史^{*1}・岩波 光保^{*2}・白根 勇二^{*3}・竹ヶ鼻 直人^{*4}

要旨: 衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの耐衝撃設計を目的として、重錘の衝突速度、試験体の支間長、重錘質量をパラメータとした重錘落下試験を実施した。試験の結果、衝突速度と最大応答支点反力は極めて強い線形関係であることが判明し、本試験で対象とした速度 1.0~7.0m/sec の範囲では、衝突時の曲げ剛性は一定であり、引張コンクリートを無視したRC断面の剛性であることも把握した。本論文では、力学的エネルギー保存則によって、衝突速度から最大応答支点反力の算定の可能性があることを示し、最大応答変位の算定にエネルギー一定則の適用が有用であり、残留変位の算定も可能であることを示した。

キーワード: RCはり, 耐衝撃設計, エネルギー一定則, 残留変位

1. まえがき

偶発荷重の一種である衝撃荷重を受けるRC部材について、これまで多くの実験的、数値解析的検討¹⁾がなされ、はり部材に関しては設計法にまで言及した文献²⁾も見られる。ただし、部材設計を考えた場合、最大応答支点反力、最大応答変位、残留変位などの設計に必要なデータが十分にあるとは言えず、新たに検討する場合には、各種パラメータの下での試験を実施しなければならないのが現状である。

一方、偶発荷重のもう一つの代表例である地震荷重に目を移せば、部材の静的特性を活用した耐震設計法³⁾が存在する。例えば、エネルギー一定則は、地震動による慣性力を受けた橋脚を1質点系構造物に置換し、弾性応答と弾塑性応答の入力エネルギーがほぼ同値であるという考えに基づいた近似的手法である。この設計法では、部材の塑性化を前提としており、耐衝撃設計の基本思想と一致するものと考えられる。

耐衝撃設計では、ロックシェッド⁴⁾には生存空間の確保が要求され、また、その他の構造物でも損傷後の補修などを考えると塑性率あるいは

残留変位を制限するところから設計の手続きが始まるものと言える。

したがって、耐衝撃設計では、残留変位や最大応答変位が算定できなければならないと考えられる。そこで、本論文では、古典的力学理論である力学的エネルギー保存則とエネルギー一定則によって、最大応答支点反力と最大応答変位を求めることを考えた。その適用性を把握するために、静的に曲げ破壊が先行する試験体を対象とし、重錘の衝突速度、試験体の支間長、重錘質量をパラメータとした重錘落下試験を実施した結果を示すとともに、比較的簡易に両応答値と残留変位を算定する手法を提示する。

2. 試験概要

2.1 試験パラメータおよび試験体概要

本試験に用いた試験体および試験法の概要を表-1に示す。試験は単一衝撃試験を基本としているが、(5)L3.0-V2.0と(6)L3.0-V2.5については、単一衝撃試験後に繰返し衝撃試験を実施した。

表-2にはコンクリートの示方配合を示す。

*1 (株) 神戸製鋼所 機械研究所 構造強度研究室 博(工) (正会員)

*2 (独) 港湾空港技術研究所 構造強度研究室 主任研究官 博(工) (正会員)

*3 (独) 港湾空港技術研究所 構造強度研究室 依頼研修員 (前田建設工業(株)) (正会員)

*4 (株) 神戸製鋼所 機械エンジニアリングカンパニー 鋼構造本部 鉄構・砂防部

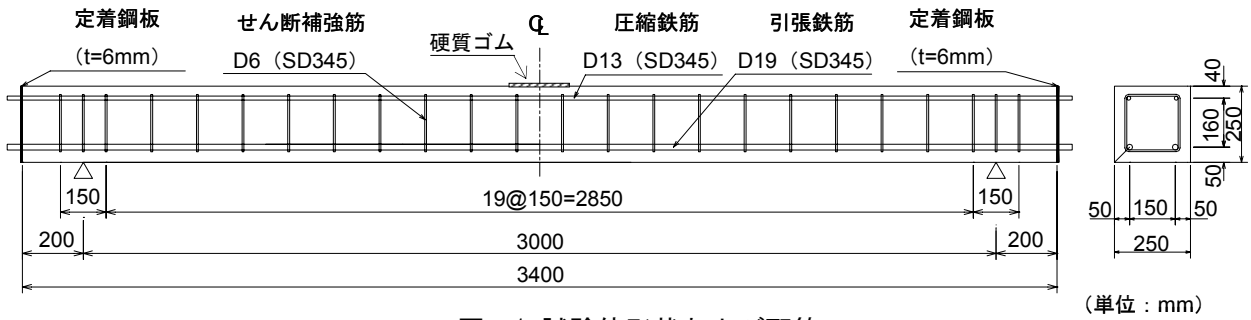


図-1 試験体形状および配筋

表-1 試験パラメータと試験体一覧

試験体名	支間長 (m)	重錘質量 (kg)	衝突速度 (m/sec)	
			単一	繰返し
(1) L2.0-V2.5	2.0	400	2.50	
(2) L2.0-V3.0			3.00	
(3) L2.0-V4.0			4.00	
(4) L3.0-V1.0	3.0	400	1.00	
(5) L3.0-V2.0			2.00 → 4.0 → 6.0	
(6) L3.0-V2.5			2.50 → 3.0 (14回繰返し)	
(7) L3.0-V3.0			3.00	
(8) L3.0-V4.0			4.00	
(9) L3.0-V5.5			5.50	
(10) L3.0-V7.0			7.00	
(11) L3.0-V2.8-200	200	400	2.83	※(5)
(12) L3.0-V3.5-200			3.54	※(6)
(13) L3.0-V4.2-200			4.24	※(7)
(14) L5.0-V2.0	5.0	400	2.00	
(15) L5.0-V2.5			2.50	
(16) L5.0-V3.0			3.00	
(17) L5.0-V4.0			4.00	

※(5), (6), (7) 相当の入力エネルギーであることを示す。

表-2 コンクリートの示方配合

スランブ (cm)	w/c (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad
18	55	46	4.5	178	325	807	991	3.46

また、全試験体ともに断面性能は同一であるが、支間が 2.0m, 3.0m, 5.0m のものを合計 17 体用意した。図-1 と図-2 に、それぞれ支間 3.0m の試験体の概要とその試験体の静的載荷試験結果（荷重-変位関係）を示す。静的載荷試験は支間中央での 3 点曲げ試験であり、降伏荷重 P_y はおよそ 60kN, 終局は曲げ破壊を呈した。なお、試験時のコンクリートの圧縮強度 f_c は 33.0N/mm^2 であり、ヤング係数は 26.6kN/mm^2 であった。

2.2 試験装置の概要⁵⁾

試験装置は、写真-1 のとおりガイドレール付きの自由落下型落重装置である。本試験で使用した重錘質量は 200kg と 400kg であり、先端形状は $\phi 200\text{mm}$ のヘッドに半径 565mm の球面仕

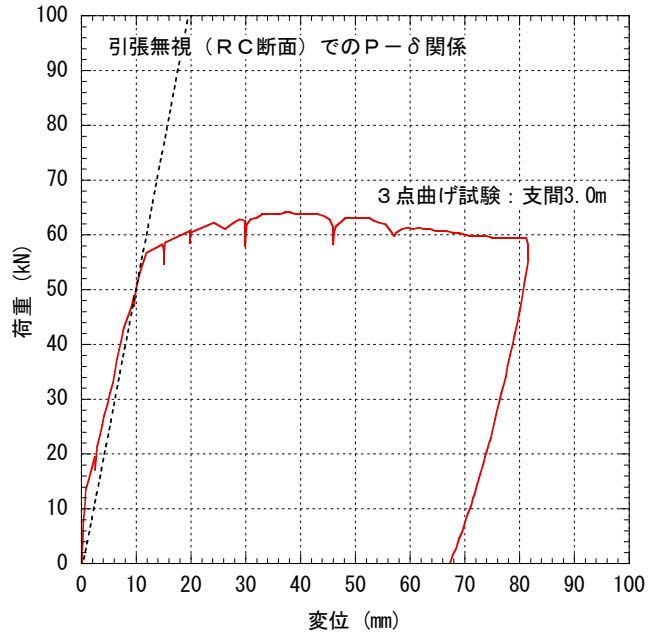


図-2 支間長 3.0m 試験体の P- δ 関係

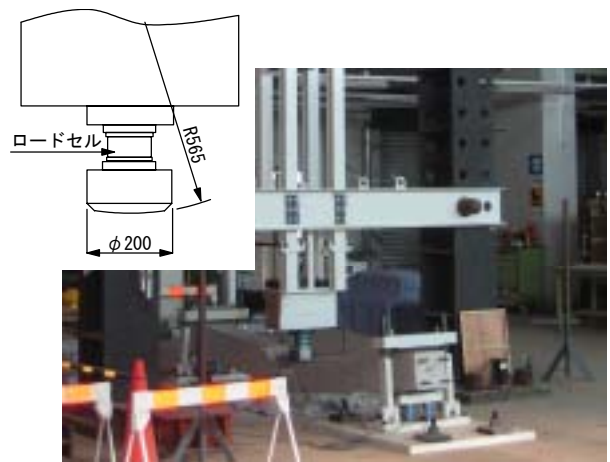


写真-1 重錘落下装置の外観と重錘形状

上げを施している。さらに、重錘の損傷防止と応答反力のばらつきを防止するために、硬度 65 度、厚さ 10mm のゴム板を 1 枚用いている。なお、ゴムの有無が反力などに及ぼす影響がほとんどないことは確認済みである。また、支点には、跳ね上がり防止ジグを取り付けている。

2.3 計測方法

計測項目は、重錘反力、支点反力、はり中央変位である。はり中央の変位計測には非接触型レーザ変位計（最大計測レンジ 750mm）を使用した。計測機器には、A/D 変換器を内蔵したデジタル動ひずみ計を使用し、サンプリングタイム 50 μ sec にて、パソコンへデータ収録した。計測データのフィルタ処理は施していない。

3. 単一衝撃試験

3.1 支間長 3.0m 試験体の試験

(1) 試験結果

図-3 に支間長 3.0m 試験体(表-1 (4)～(10))の重錘衝突速度と最大応答支点反力の関係を示す。衝突速度 1.0～7.0m/sec の範囲で単一衝撃試験を実施した。最大応答支点反力が静的試験での降伏荷重 60kN をはるかに超過する場合においても、衝突速度と極めて強い線形性を有することが明らかになった。このことから、本試験の衝突速度の範囲では、衝突時の曲げ剛性は衝突速度に依存することなく一定であるものと推察される。したがって、すべての衝突速度に対して同一の方法で最大応答支点反力が求められるものと考えられる。そこで、古典的理論の力学的エネルギー保存則によって最大応答支点反力を算定することを検討した。

なお、落重試験後の試験体の状態は、衝突速度 1.0～3.0m/sec では、目視によってわずかに曲げひび割れが確認できる程度であり、5.5m/sec 以上では、図-4 のとおり圧縮側コンクリートが剥離した。

(2) エネルギー保存則による最大応答支点反力の算定⁶⁾

RC はりを 1 質点系のばねと仮定し、エネルギー保存則によって、最大応答支点反力の算定の可能性を検討する。衝突直後の重錘速度と R

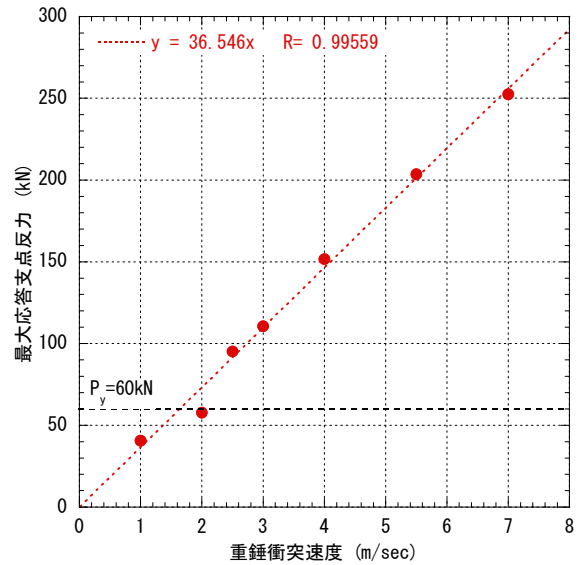


図-3 重錘衝突速度-最大応答支点反力の関係

$$U_1 = \frac{1}{2} Mv^2 + \frac{1}{2} \frac{17}{35} mv^2 \quad (1)$$

M : 重錘質量

m : RC はりの質量

v : 衝突直後の重錘速度,
RC はりの変形速度

$$U_2 = \frac{1}{2} k\delta^2 = \frac{24EI}{l^3} \delta^2 \quad (2)$$

$$k = \frac{48EI}{l^3}$$

E : コンクリートのヤング係数

I : 曲げ剛性 (RC 断面)

δ : 最大応答変位

$$U_1 = U_2 \quad (3)$$

$$v = \frac{M}{M + 17/35 m} V \quad (4)$$

V : 衝突直前の重錘速度

$$\delta = V \sqrt{\frac{Ml^3}{48EI} \frac{M}{M + 17/35 m}} \quad (5)$$

C はり支間中央の変形速度が等しいと考えれば、はりの有効質量を考慮して、運動エネルギーは式(1)となる。また、RC はりの変形によるひず

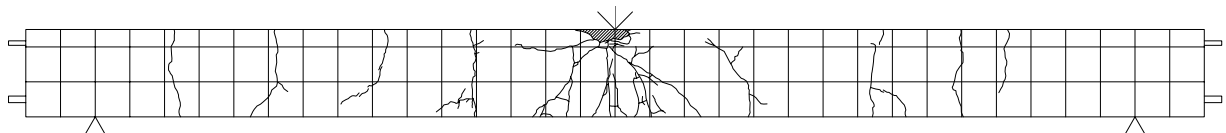


図-4 重錘落下後の(9)L3.0-V5.5 試験体の損傷状況

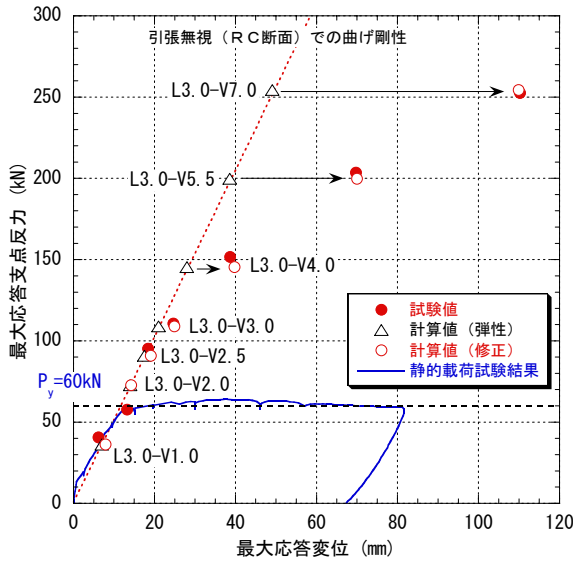


図-5 最大応答変位-最大支点反力の関係

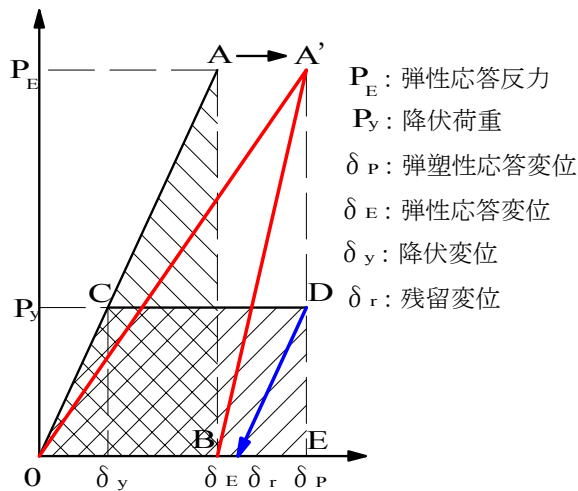


図-6 エネルギー一定則の概念図

みエネルギーは式(2)となる。式(3)のとおり U_1 と U_2 が等しいと仮定し、衝突前後の速度の関係を(4)で示し、両者を連立させて最大応答変位 δ について解くと、式(5)となる。

式(5)によって求めた最大応答変位 δ と引張域を無視した断面(RC断面)の曲げ剛性によって最大応答支点反力を算定した結果を図-5中の△印として示す。

最大応答支点反力に限っては、試験値と算定値とはほぼ一致することが分かる。しかし、最大応答変位に関しては、衝突速度が大きくなるほど一致しないことが明らかとなった。

この結果より、力学的エネルギー保存則によって最大応答変位 δ を算定し、RC断面の曲げ剛性によって、その変位に対応する支点反力を

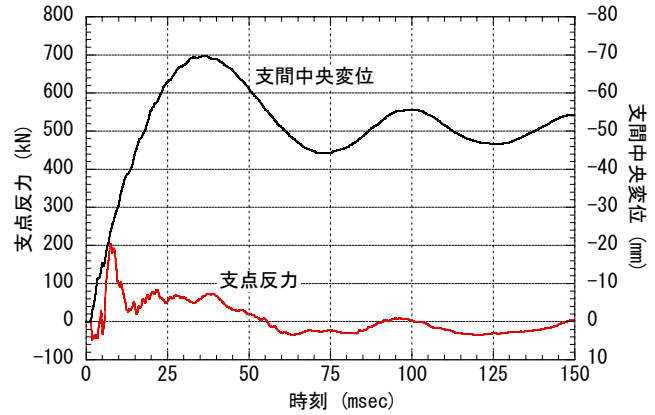


図-7 L3.0-V5.5 試験体の時刻歴応答

表-3 最大応答支点反力, 最大応答変位一覧

衝突速度 (m/sec)	試験値		算定値		
	応答反力 (kN)	応答変位 (mm)	応答反力 (kN) P_E	応答変位(mm) δ_E δ_P	
1.0	40.6	6.2	36.3	7.0	
2.0	57.8	13.3	72.7	14.0	→ 14.3
2.5	95.2	18.4	90.9	17.5	→ 19.1
3.0	110.6	24.7	109.0	21.0	→ 24.9
4.0	151.8	38.7	145.4	28.1	→ 39.8
5.5	203.7	69.8	199.9	38.6	→ 70.1
7.0	252.5	110.3	254.4	49.1	→ 109.9

降伏変位 $\delta_y=11.6\text{mm}$

算定することで、最大応答支点反力を求めることは可能であると言える。ただし、最大応答変位に関して課題が残ることから、エネルギー一定則によって修正することを検討する。

(3) エネルギー一定則による最大応答変位算定

図-6に示すエネルギー一定則の概念は、重錘衝突によりRCはり支間中央が塑性域に入った場合、 $\triangle OAB$ と $\square OCDE$ の面積が等しくなるように弾塑性応答するという考え方³⁾である。

この考え方に則って、最大応答変位を補正した結果を表-3に示す。表中、右端の列が修正した最大応答変位であり、ほぼ一致する結果を得ることが明らかになった。衝撃荷重に対する挙動では、最大応答支点反力の発生時刻と最大応答変位の発生時刻が異なり、図-7に示すとおり同時性が成立しない。そこで、静的な捉え方のように、最大値-最大値に同時性を持たせるには、図-6の $\triangle OAB$ が $\triangle OA'B'$ へ見かけの上で変形すると考え、図-5の○印となる。

3.2 その他のパラメータ試験による適用性検討

表-1の(1)~(3), (11)~(17)の試験体によって、試験体支間長、重錘質量をパラメータとした検討を行う。前述の手法によって算定した最大応答支点反力と最大応答変位を図-8に示す。図中、■, □はそれぞれ支間長 2.0m 試験体の試験値と計算値、同様に●, ○は 3.0m 試験体、◆, ◇は 3.0m 試験体で重錘質量 200kg、▲, △は 5.0m 試験体を表す。

2.0m 試験体 (■, □) では、試験値にばらつきが見られるもののその傾向はほぼ捉えられている。しかし、5.0m 試験体 (▲, △) では、試験値▲がRC断面での曲げ剛性線よりも上にプロットされており、力学的エネルギー保存則の適用性に課題があることが判明した。この傾向は、◆, ◇の 3.0m 試験体、重錘質量 200kg の場合にも若干現れており、重錘質量と試験体質量の関係に起因するものと考えられる。

◆, ◇の 3.0m 試験体質量はおよそ 530kg (重錘: 200kg) であり、▲, △の 5.0m 試験体質量は 840kg (重錘: 400kg) である。本試験の範囲から判断すれば、RCはり質量の 1/2 以下の重錘質量では、適合性が劣化する傾向にあると言える。この原因についてはさらなる検討が必要であり、今後の課題として、試験体と重錘質量の関係について詳細に整理することが重要と考えられる。

4. 繰返し衝撃試験

4.1 試験結果

繰返し衝撃荷重を受けた場合の部材性能の変化を把握するために、衝突速度一定繰返し試験と衝突速度漸増繰返し試験の2ケースを実施した。両試験は前出の単一衝撃試験に引き続き実施したものであり、それぞれ(6)L3.0-V2.5, (5)L3.0-V2.0 試験体である。

衝突速度一定繰返し試験の結果を表-4(a)に示す。各載荷毎の応答変位が繰返し回数とともに徐々に増大する傾向にあること、2回目以降、支点反力が大きくなることから分かる。処女載荷では支間中央部に曲げひび割れが確認される程

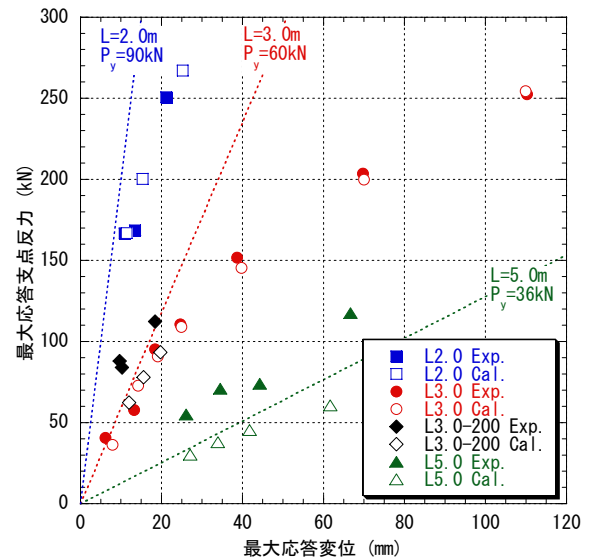


図-8 各パラメータにおける最大応答支点反力と最大応答変位の関係

表-4(a) 衝突速度 2.5m/sec の一定繰返し試験結果 ((6) L3.0-V2.5)

回数	衝突速度 (m/sec)	試験結果			算定結果		
		支点反力 (kN)	応答変位 (mm)	残留変位 (mm)	各載荷毎の応答変位 (mm)	支点反力 (kN)	各載荷毎の応答変位 (mm)
1	2.5	95.2	18.4	5.9	18.4	90.9	19.1
2		105.8	23.9	10.1	18.0		
3		107.6	28.5	14.1	18.4		
4		121.4	32.6	18.0	18.5		
5		109.4	36.8	21.9	18.8		
6		109.2	41.0	26.1	19.1		
7		109.8	45.5	30.4	19.4		
8		105.6	50.1	34.3	19.7		
9		113.6	54.5	38.2	20.2		
10		120.6	58.4	41.6	20.2		
11		121.8	63.1	45.2	21.5		
12		111.8	67.4	48.8	22.2		
13		110.0	72.2	53.3	23.4		
14		106.2	77.2	58.1	23.9		
15		108.6	82.4	63.4	24.3		

表-4(b) 衝突速度漸増繰返し試験結果 ((5) L3.0-V2.0)

回数	衝突速度 (m/sec)	試験結果			算定結果		
		支点反力 (kN)	応答変位 (mm)	残留変位 (mm)	各載荷毎の応答変位 (mm)	支点反力 (kN)	各載荷毎の応答変位 (mm)
1	2.0				13.3	72.7	14.3
2	4.0	57.8	13.3	2.1	37.1	145.4	39.8
3	6.0	188.0	39.2	23.2	91.5	218.1	82.3
		227.4	114.7	90.0			

度であったが、回数の増大とともに全長にわたってひび割れが分布することを確認した。すなわち、ひび割れでの骨材のかみ合わせの損耗

や圧縮側コンクリートの剥離が徐々に進行するなどの局所的な劣化の累積が影響する衝撃疲労の場合には、試験値は算定値から徐々に離れていく傾向にあると言える。

次に、衝突速度漸増繰返し試験の結果を表-4(b)に示す。各繰返し回数での各載荷毎の応答変位、応答支点反力は算定値とほぼ一致することが明らかになった。また、衝突速度漸増繰返し試験では、写真-2に示すとおり、圧縮側主鉄筋の座屈により終局を迎えた。

表-5 残留変位の検討結果

回数	衝突速度 (m/sec)	試験結果		算定結果	
		残留変位 (mm)	各載荷毎の 応答変位 (mm)	残留変位 δ_r (mm)	各載荷毎の 応答変位 δ_p (mm)
1	2.0	2.1	13.3	2.7	14.3
2	4.0	23.2	37.1	28.2	39.8
3	6.0	90.0	91.5	70.7	82.3

$\delta_y = 11.6\text{mm}$

4.2 残留変位の算定

最大応答支点反力と最大応答変位が同時に発生しないことから、最大応答変位発生時には、図-5に示す概念図のD点（降伏荷重 P_y 上）にあるものと考えられる。D点を基点にアンロードするものと考えれば、残留変位は $\delta_r = \delta_p - \delta_y$ となる。例えば、表-4(b)について残留変位を算定すれば、表-5のとおりとなる。3回目の衝突速度 6.0m/sec の場合には、圧縮主鉄筋が座屈したため、最大応答変位ならびに残留変位も一致しないが、1回目の 2.0m/sec と2回目の 4.0m/sec の結果より、ある程度の精度で簡便に残留変位を算定できる可能性があることが分かった。また、その他の単一衝撃試験でも、残留変位はほぼ計算値と一致したことを付記しておく。

5. まとめ

本論文では、RCはりを対象に静的な取り扱いによる耐衝撃設計の可能性を検討するため、各種パラメータでの重錘落下試験を実施し、最大応答支点反力、最大応答変位、そして残留変位の算定法について検討を行った。



写真-2 衝突速度漸増繰返し試験での破壊性状

以上のことをまとめると以下のとおりである。

- (1) 単一衝撃荷重を受けるRCはりの最大応答支点反力、最大応答変位について力学的エネルギー保存則、エネルギー一定則を用いて算定できる可能性を示した。
- (2) ただし、重錘質量と部材質量の関係によっては適合性が劣化する場合があることが明らかになった。実構造物、特に港湾構造物を対象とした場合、衝突物よりも構造物の質量がはるかに大きいことから、質量の関係には注意を要し、適用性の拡大を考える場合、この点が今後の最重要課題と言える。
- (3) 残留変位は最大応答変位と降伏変位の差 ($\delta_r = \delta_p - \delta_y$) で算定できる可能性を示した。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静的載荷時に曲げ破壊が卓越するRC梁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.215-233, 1999.4.
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静的載荷時に曲げ破壊が卓越するRC梁の耐衝撃設計法に関する一提案, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.177-190, 2000.4.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書 V 耐震設計編, 2002.3.
- 4) 土木学会: ロックシェッドの耐衝撃設計, 構造工学シリーズ8, 1998.11.
- 5) 白根勇二, 岩波光保, 横田弘: 繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの耐荷性状, 第8回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.81-86, 2006.11.
- 6) 土木学会: 衝撃実験・解析の基礎と応用, 2004.