

論文 繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの破壊挙動

白根 勇二^{*1}・岩波 光保^{*2}・横田 弘^{*3}・山田 岳史^{*4}

要旨：衝撃荷重を繰返し受けるコンクリートはりの破壊挙動の把握し、PVA 短繊維を混入した場合の耐衝撃性向上効果を検討するため、重錘落下による繰返し衝撃載荷実験を実施した。実験の結果、コンクリートはりが破壊に至る繰返し回数は、重錘の衝突速度の影響を大きく受け、特に衝突速度 2m/s と 2.5m/s 間ではその差が大きいことがわかった。また、繰返し回数の増加に伴い、コンクリートはりの変位振幅や振動周期が変化し、重錘反力も減少することがわかった。さらに、PVA 短繊維を混入した場合、破壊までの繰返し回数が増加するとともに、曲げ剛性の低下が緩和され、繰返し衝撃荷重に対する抵抗性が向上した。

キーワード：港湾構造物、コンクリートはり、繰返し衝撃荷重、PVA 短繊維

1. はじめに

港湾構造物では、防波堤の衝撃砕波力、栈橋上部工の揚圧力、消波ブロック、船舶、漂流物等の衝突のように、巨大な衝撃荷重が作用することは珍しくない。これまでにこれらの衝撃荷重が構造物に繰返し作用し、損傷に至った事例も報告されている¹⁾。

衝撃荷重を受けるコンクリート部材の挙動について多くの研究成果^{2),3)}があるが、そのほとんどは衝撃荷重が 1 回だけ作用する現象を対象にしており、繰返し作用を対象にした例は少ない。

一方、ポリビニルアルコール短繊維（以下、PVA 短繊維）をコンクリートに混入することによって、静的荷重下および衝撃荷重下において鉄筋コンクリート部材の性能が向上したと報告する研究^{4),5)}がすでにあり、衝撃荷重を繰返し受ける部材にもその効果が期待される⁶⁾。

そこで本研究では、衝撃荷重を繰返し受ける鉄筋コンクリートはり（以下、RC はり）の破壊挙動の把握、PVA 短繊維を混入した場合の耐衝撃性向上効果の検討を目的に、重錘落下による RC はりの繰返し衝撃載荷実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 検討ケースおよび試験体概要

本実験の検討ケースを表-1 に示す。試験体の種類は、普通コンクリートを用いた RC はり（N シリーズ）と PVA 短繊維を外割りの体積比で 1.5%混入させたコンクリートを用いた RC はり（F シリーズ）の 2 種類とした。載荷条件は中央 1 点集中載荷による静的載荷のほか、重錘をはり中央に一定の衝突速度（2～4m/s）で繰返し落下させる衝撃載荷とした。なお、本実験の衝突速度は港湾構造物に発生する衝撃荷重の作用速度⁷⁾を想定している。

表-1 検討ケース

シリーズ	試験体名	短繊維混入率 (vol.%)	載荷条件	衝突速度 V(m/s)
N	N-S	0	静的載荷	—
	N-V2		繰返し載荷 (衝突速度を一定)	2
	N-V2.5			2.5
	N-V3			3
	N-V4			4
F	F-S	1.5	静的載荷	—
	F-V2		繰返し載荷 (衝突速度を一定)	2
	F-V2.5			2.5
	F-V3			3
	F-V4			4

*1 （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）

*2 （独）港湾空港技術研究所 構造強度研究室 主任研究官 工博（正会員）

*3 （独）港湾空港技術研究所 LCM 研究センター長 工博（正会員）

*4 （株）神戸製鋼所 機械研究所 構造強度研究室 工博（正会員）

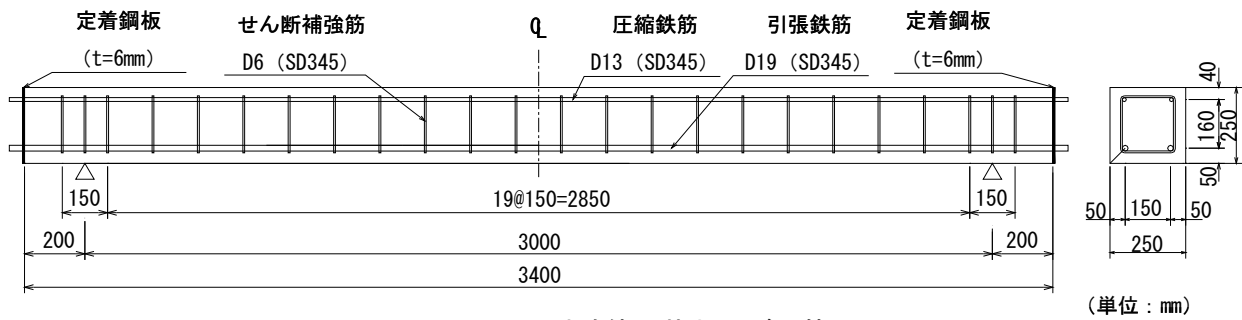


表-2 PVA 短繊維の物性値

直径 (mm)	標準 長 (mm)	アスベ 外比	密度 (g/cm ³)	引張 強度 (N/mm ²)	引張 伸度 (%)	弾性 係数 (N/mm ²)
0.66	30	45.5	1.3	861	9	23000

表-3 コンクリート示方配合

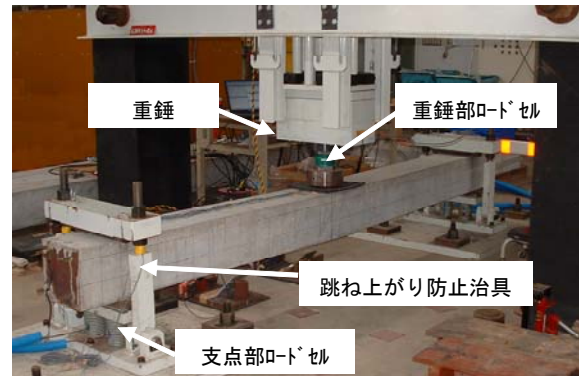
	短纖維 混入率 (vol.%)	W/C (%)	s/a (%)	SL (cm)	Air (%)	單位量 (kg/m ³)				
						W	C	S	G	Ad
N	0	55	46	18	4.5	178	325	807	991	3.46
F	1.5			-						

表-4 コンクリート物性値および試験体耐力

	コンクリート物性値			試験体耐力	
	材齢 (日)	圧縮 強度 (N/mm ²)	弾性 係数 (N/mm ²)	計算 曲げ耐力 (kN)	計算せん 断耐力 (kN)
N	56	33.0	26631	58.0	161.4
F	56	30.8	26027	57.6	159.1

図-1 に試験体の形状および配筋、表-2 に PVA 短繊維の物性値、表-3 にコンクリート示方配合を示す。本実験ではコンクリートの力学特性の変化を PVA 短繊維の混入による影響に限定するため、ベースコンクリート配合は同一とした。なお、F シリーズのスランブ試験の結果は 8.0cm であった。また、表-4 に各コンクリートの力学物性値と RC はりの計算曲げ耐力および計算せん断耐力の一例を示す。いずれも曲げ破壊型の RC はりとなるように設計している。

2.2 試験装置



重錘を自由落下させるものである。

重錘の先端形状は片当たりを防止するため、半径 565mm の球面仕上げとなっている。また、試験体の浮き上がりや脱落を防止するため、支点部に跳ね上がり防止治具を備え、試験体上面をナットで締め付ける構造となっている。また、繰返し载荷によってはり上面が損傷し、重錘反力応答のばらつきが発生する。これを抑えるため重錘落下位置に硬度 65 度のゴムシート（厚さ 10mm）を敷いて载荷し、ゴムシートが劣化した場合は適宜交換した。なお、重錘質量を 400kg とし、試験体の破壊ははり中央部の累積残留変位がスパン長の 2%(60mm)に達した時点と定義し、これに達するまで衝撃荷重を繰返し与えた。

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。重錘反力の計測には重錘部に組み込まれた容量 2MN のひずみゲージ式ロードセルを、支点反力の計測には支点部に組み込まれた容量 500kN のひずみゲージ式ロードセル（片側 2 点ずつ）を使用した。はり中央変位の計測には非接触型レーザ式変位計（サンプリング周期 20 ～1000 μ s）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、専用ソフトを用いて計測用パソコンへデータ収録した。計測間隔は $50\mu\text{s}$ とし、計測データのフィルタ処理は施していない。また、RC はりに発生したひび割れ状況を適宜観察した。

3. 実験結果

3.1 衝突速度とはり中央変位の関係

図-2 に試験体 N-S および F-S の静的載荷時の荷重と変位の関係を示す。両者はほぼ同様の関係を示し、スパン中央変位 12mm 程度で引張鉄筋の降伏が認められた。また、圧縮側コンクリートの破壊は両者ともスパン中央変位が約 30mm に達した時点で確認された。

図-3 に衝突 1 回目（損傷が全く無い RC はりへの載荷）における衝突速度とはり中央部の変位の関係を示す。衝突速度が 2m/s、2.5m/s、3m/s、4m/s におけるはり中央部の最大変位はそれぞれ、N シリーズで 13.3mm、18.4mm、25.0mm、38.2mm、F シリーズで 12.7mm、16.4mm、22.0mm、34.6mm となり、N シリーズの発生変位の方が F シリーズよりやや大きくなった。ここで、材料特性のひずみ速度依存性を無視し、衝撃載荷時と静的

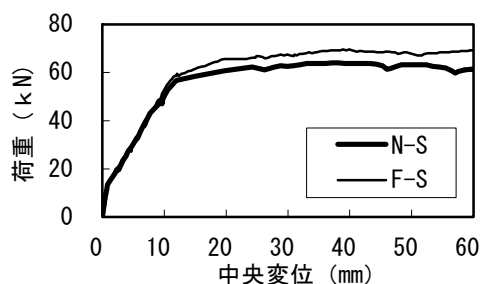


図-2 静的試験時の荷重・変位の関係

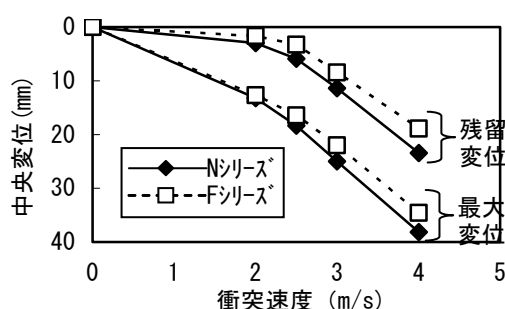


図-3 衝突速度と中央変位の関係（1 回目）

載荷時の変位挙動が同様であると仮定すると、衝撃繰返し載荷で設定した衝撃荷重は、衝突速度が 2m/s の場合、引張鉄筋ひずみが降伏点に達する程度の荷重、2.5m/s および 3m/s の場合、引張鉄筋が降伏するがコンクリートは圧縮破壊しない程度の荷重、4m/s の場合、引張鉄筋が降伏し、コンクリートも圧縮破壊する程度の荷重と概ね想定できる。

3.2 衝突速度と繰返し回数の関係

表-5 に各検討ケースにおける破壊に至るまでの繰返し回数を示す。衝突速度 2m/s の比較的小さな衝撃荷重でも、衝撃を繰返し受けることによって N-V2 では 105 回、F-V2 では 590 回で破壊に至った。また、衝突速度が大きいほど少ない回数で破壊に至り、2m/s と 2.5m/s の範囲でその差が顕著となった。

PVA 短繊維の有無で比較すると、F シリーズが破壊に至った繰返し回数は N シリーズと比べ、衝突速度 2m/s のとき 5.6 倍、2.5m/s のとき 1.7 倍、3m/s のとき 1.8 倍大きくなり、PVA 短繊維混入による耐衝撃性向上効果が見られた。しかし、衝突速度 4m/s では両シリーズとも 3 回で破壊に達し、衝突速度が大きいほど PVA 短繊維の効果が小さくなる傾向となった。

表-5 破壊に至った繰返し回数

	衝突速度 V (m/s)			
	2	2.5	3	4
試験体名	N-V2	N-V2.5	N-V3	N-V4
繰返し回数	105	15	5	3
試験体名	F-V2	F-V2.5	F-V3	F-V4
繰返し回数	590	25	9	3

3.3 繰返し回数と中央変位の関係

図-4 に繰返し回数とはり中央の累積最大変位と累積残留変位の推移を示す。衝突速度が 2m/s の場合、中央変位は繰返し回数が少ない段階で比較的大きく進展し、その後緩やかな勾配となった後、再び中央変位の進展が加速する傾向となっており、S 字曲線を描いている。一方、

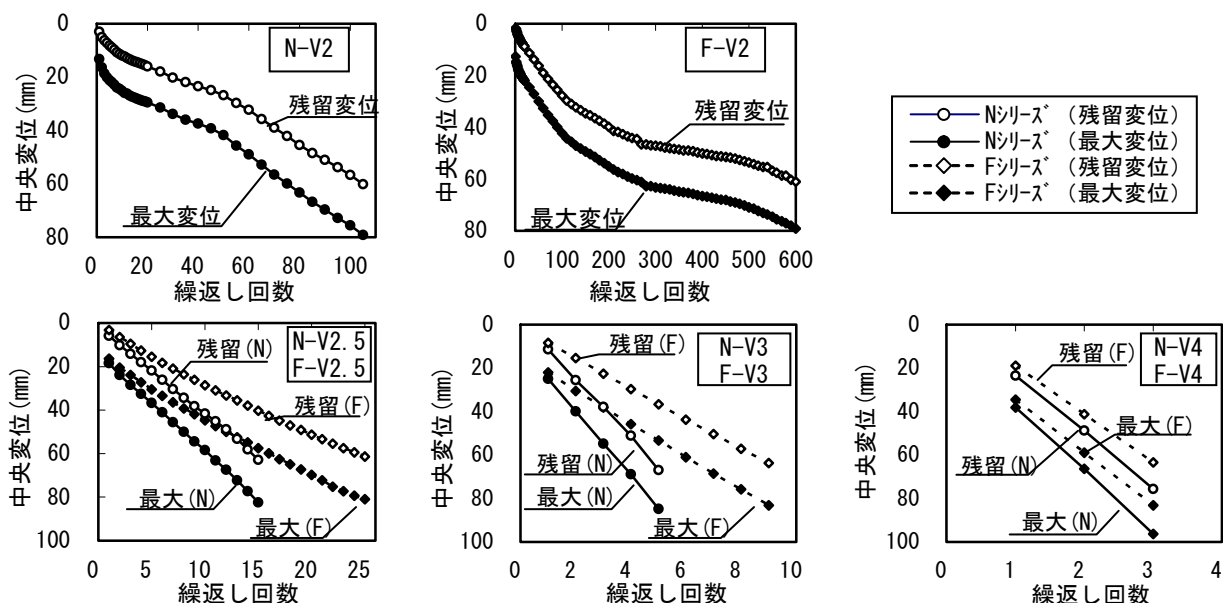


図-4 繰返し回数と中央変位の関係

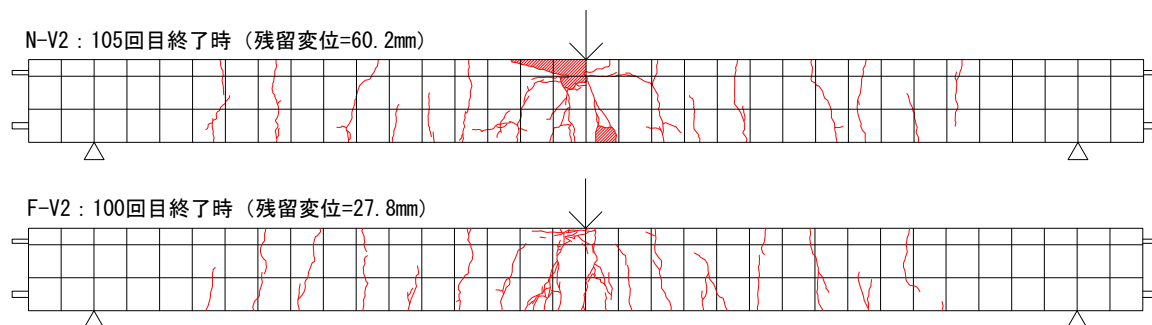


図-5 ひび割れ発生状況 (V=2m/s)

衝突速度が 2.5～4m/s のとき、繰返し回数の増加に伴う変位の進行は直線的となり、衝突速度が 2m/s の場合とは異なる推移を示した。この違いの原因として、前述のように衝突速度 2m/s は引張鉄筋を降伏させる程度の衝撃荷重であり、疲労破壊に似た変位推移を示したためと考えられる。表-5 のように衝突速度 2m/s と 2.5m/s で破壊に至る回数に大きな差がみられた理由も、このためと考えられる。

また、試験体 N-V2 では繰返し回数が 50 回(最大変位 42mm, 残留変位 27mm)を超えてから累積残留変位の進行が加速した。これは圧縮側コンクリートの剥離範囲が大幅に広がったときに一致した。一方、F-V2 は繰返し回数が 470 回(最大変位 69mm, 残留変位 52mm)を超えてから残留変位の進展がやや加速し破壊に至ったが、圧縮破壊の範囲が狭く、コンクリートの剥離も少

なく、1 回の衝撃荷重に対する残留変位増加量が小さかった。これは衝撃荷重下において PVA 短繊維が曲げ引張応力を負担するとともに、圧縮じん性やコンクリート材料物性のひずみ速度依存性が変化し⁸⁾、圧縮縁コンクリートが剥落せずに残存したためと考えられる。

図-5 に衝突速度が 2m/s のケースのひび割れ発生状況を示す。N-V2 は試験終了時におけるひび割れ状況を、F-V2 は N-V2 の試験終了時と同回数のひび割れ状況を示している。両者とも圧縮縁コンクリートの破壊に至ったが、N-V2 では圧縮縁コンクリートの剥離や下面コンクリートの剥落も見られた。しかし、F-V2 ではこれらの発生が抑制され、損傷低減効果が顕著であった。

3.4 繰返し回数とたわみ振動周期の関係

図-6 に、試験体 N-V2, F-V2 のはり中央変位の時刻歴応答の一例を示す。また、図-7 に各試

験体について時刻歴応答から求められるたわみ振動周期と繰返し回数の関係を示す。

図-6より、繰返し回数が増していくと、変位振幅が大きくなるとともにたわみ振動周期が長くなる傾向にあることがわかる。また、N-V2とF-V2の時刻歴応答を比較すると、衝突回数が少ない段階（载荷前変位0mm, 20mm）ではほぼ一

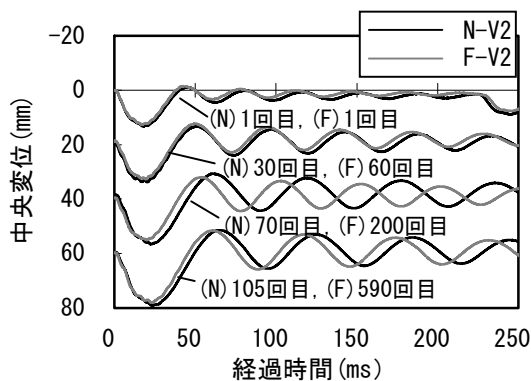


図-6 中央変位の時刻歴応答 (V=2m/s)

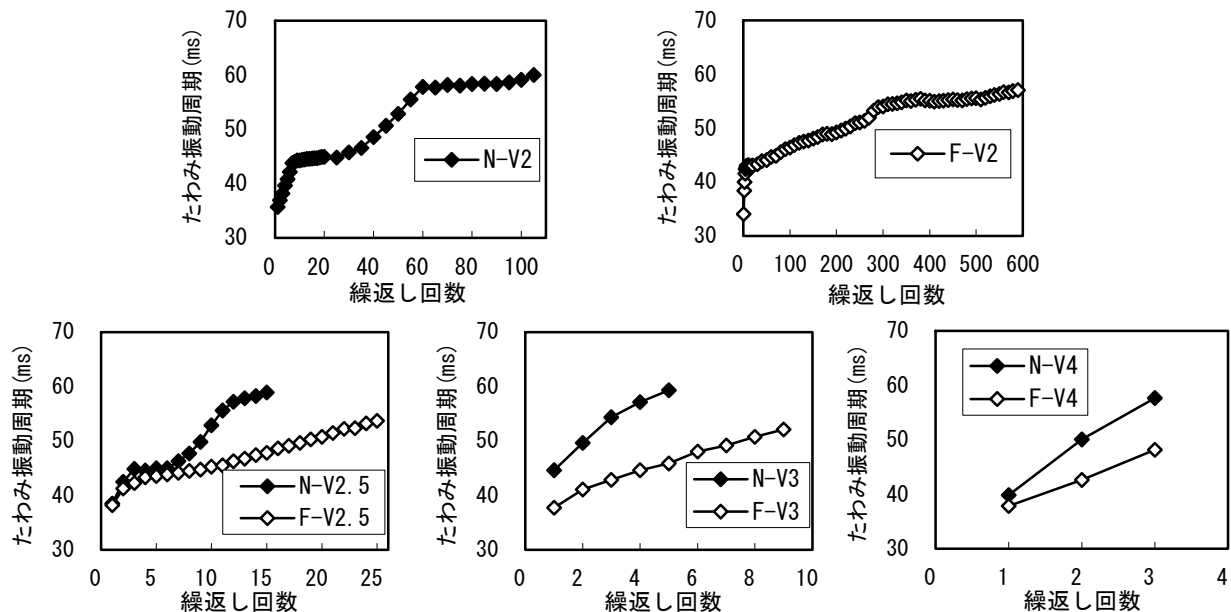


図-7 繰返し回数とたわみ振動周期の関係

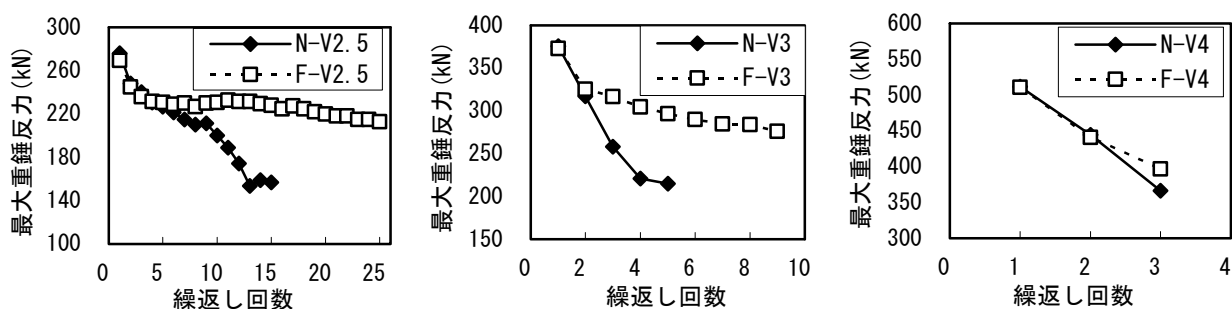


図-8 繰返し回数と最大重錘反力の関係

致しているが、载荷前変位が40mmになるとN-V2の振動周期の方が長くなっている。

図-7より、衝突速度2m/sと2.5m/sのケースにおけるたわみ振動周期は、衝突回数が少ない段階で急激に長くなり、一旦緩やかになった後、再び長くなる傾向にある。また、いずれのケースにおいても終局時までのたわみ振動周期はNシリーズの方が大きくなっている。

これらは、ひび割れの進展や圧縮縁コンクリートの破壊による曲げ剛性の低下が影響し、部材の損傷過程を反映した結果と考えられ、たわみ振動周期から推察すると、PVA短繊維を混入したFシリーズは破壊に至っても、部材の損傷がNシリーズより小さいことが裏付けられる。

3.5 繰返し回数と反力の関係

図-8と図-9に、繰返し回数と最大重錘反力および最大支点反力の関係を示す。

重錘反力は繰返し回数が多くなると徐々に低

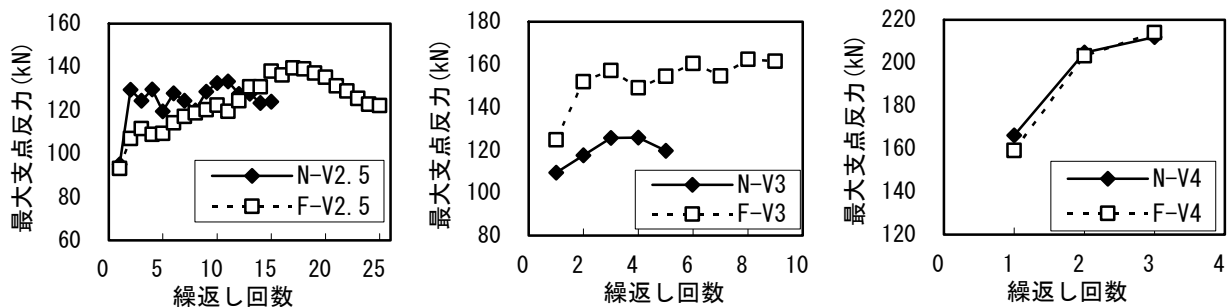


図-9 繰返し回数と最大支点反力の関係

下する傾向にあった。特に繰返し回数が少ない段階での低下が著しく、これはひび割れの進展によって曲げ剛性が低下したためと考えられる。また、N シリーズは破壊の進行に伴う重錘反力の低下が F シリーズよりも大きく、これは圧縮縁コンクリートが大きく損傷し、衝撃荷重に対する抵抗性が失われたためと考えられる。したがって、繰返し回数と重錘反力の関係は部材の損傷過程を反映しており、たわみ振動周期と同様に、PVA 短繊維を混入した場合、曲げ剛性の低下が緩和され、繰返し衝撃荷重に対する抵抗性が向上したことが確認できる。

一方、支点反力は繰返し回数が少ない段階で最大支点反力が一旦増加し、衝突速度 3m/s 以下のケースでは、損傷が進んだ段階で最大支点反力が減少する傾向となり、はりの損傷状態や抵抗性の変化を反映したたわみ振動周期や最大重錘反力とは異なる性状を示した。

4. まとめ

重錘落下による RC はりの繰返し衝撃実験を実施し、得られた知見を以下にまとめる。

- (1) RC はりは衝突速度が比較的小さい 2m/s の衝撃荷重でも、その繰返しによって残留変位が進行し、破壊に至った。今回の実験条件下では、衝突速度が 2m/s と 2.5m/s の間で繰返し衝撃荷重に対する抵抗性の変化が認められ、破壊の進行過程にも違いが見られた。
- (2) 繰返し回数が増加し、RC はりが損傷すると、曲げ剛性が低下し、はりの変位振幅やたわみ振動周期に影響を生じるとともに、衝撃荷重に対する抵抗性が失われ重錘反力が減少す

る傾向となった。

- (3) 短繊維を体積比で 1.5% 混入した RC はりは、衝突速度 3m/s 以下の繰返し衝撃荷重に対し、終局破壊に至るまでの繰返し回数が多くなった。また、コンクリートの剥離、剥落の抑制効果、曲げ剛性低下の緩和が認められ、繰返し衝撃荷重に対する抵抗性が向上した。

参考文献

- 1) 平山克也ら：2004 年に来襲した台風による波浪災害事例，港湾空港技術研究所資料，No.1101，2005
- 2) 例えば，岸徳光ら：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) 土木学会：衝撃実験・解析の基礎と応用，2004
- 4) 伊藤始ら：PVA 短繊維で補強した RC はりのせん断耐力評価に関する実験的研究，土木学会論文集，No.774/V-65，pp.123-138，2004.11
- 5) 岸徳光ら：ビニロン短繊維を混入した曲げ破壊型 RC 梁の耐衝撃挙動，構造工学論文集，Vol.51A，pp.1675-1686，2005
- 6) 白根勇二ら：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
- 7) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，1994
- 8) 白根勇二ら：高速載荷を受ける PVA 短繊維混入コンクリートの力学的特性，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集，5-567，pp.1129-1130，2006.9