

(13) 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

Structural performance of reinforced concrete beams subjected to cyclic impact loads

白根 勇二*, 岩波 光保**, 横田 弘***
Yuji Shirane, Mitsuyasu Iwanami, Hiroshi Yokota

* (独) 港湾空港技術研究所 構造強度研究室 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3丁目1番1号)
(前田建設工業 (株))

** 工博 (独) 港湾空港技術研究所 構造強度研究室 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3丁目1番1号)

*** 工博 (独) 港湾空港技術研究所 LCM研究センター (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3丁目1番1号)

キーワード: 港湾構造物, 繰返し衝撃荷重, PVA短繊維
(port structure, cyclic impact loads, PVA short fiber)

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、巨大な衝撃力が作用することは珍しくない。これまでにこれらの衝撃力が構造物に繰返し作用することによって損傷に至った事例も報告されている¹⁾。

衝撃砕波力がどのように発生し、どのような圧力分布で構造物に作用しているかについてすでに研究が行われ、現行の設計に反映されている²⁾。しかし現状では、時間的、空間的変動の大きい衝撃荷重を簡便な分布形状に置き換え、構造物の静的な耐力と比較して安全性を照査しており、衝撃荷重のばらつきや構造物の動的応答については考慮されていない。

また、衝撃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があるが、その多くは落石の衝突³⁾、爆発⁴⁾などの単発の現象を対象にしており、繰返し作用を対象とした例は少ない。

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ける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^{5),6)}がすでにあり、繰返し衝撃荷重を受ける部材にもその効果が期待される。

そこで本研究では、繰返し衝撃荷重を受けるコンクリート部材の破壊挙動の把握、PVA短繊維を混入したコンクリートの耐衝撃性の検討を目的に、重錘落下による鉄筋コンクリートはり (以下、RCはり) の衝撃実験を実施した。

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) と短繊維を混入し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、荷重条件をパラメータとした。Fシリーズに使用した短繊維種類はPVA短繊維とし、外割りの体積比で1.5%を混入させた。PVA短繊維の物性値を表-2に示す。

荷重方法は、中央集中荷重による静的荷重のほか、重錘の衝突速度を2, 4, 6, 6m/secとした衝撃荷重を順に4回与える漸増荷重、重錘の衝突速度を一定 (2または3m/sec) とし繰返し衝撃荷重を与える一定繰返し荷重の4ケースとした。なお、衝突速度は港湾構造物に発

表-1 検討ケース

シリーズ	試験体名	短繊維混入率 (体積比 %)	荷重条件	衝突速度 V (m/sec)
N	N-S	0	静的荷重	—
	N-STEP		衝撃漸増荷重	2, 4, 6, 6
	N-V2		衝撃一定	2
	N-V3		繰返し荷重	3
F	F-S	1.5	静的荷重	—
	F-STEP		衝撃漸増荷重	2, 4, 6, 6
	F-V2		衝撃一定	2
	F-V3		繰返し荷重	3

表-2 PVA短繊維の物性値

直径 (mm)	標準長 (mm)	アスペクト比	比重	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

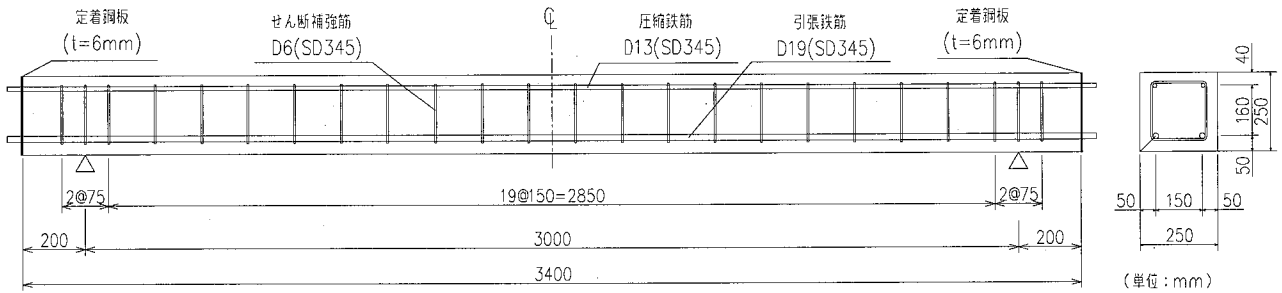


図-1 試験体形状および配筋

表-3 コンクリート配合

シリーズ	短繊維混入率 (vol.%)	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad
N	0	57.2	47.3	4.5	179	313	839	964	3.33
F	1.5			1.5					

表-4 コンクリート物性値および試験体耐力

シリーズ	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 (KN/mm ²)	計算曲げ耐力 (kN)	計算せん断耐力 (kN)	せん断余裕度
N	56	33.0	26.6	58.0	161.4	2.78
F	56	30.8	26.0	57.6	159.1	2.76

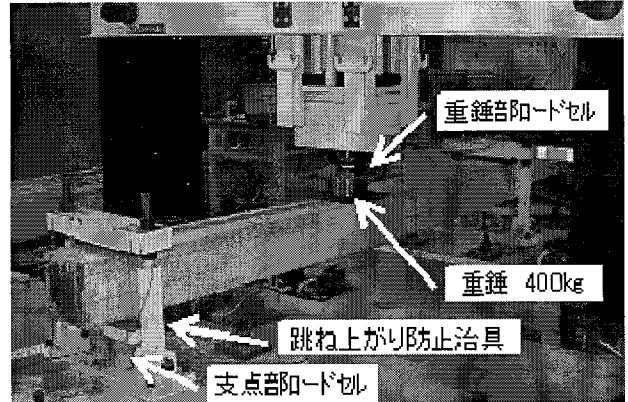


写真-1 試験装置外観

生ずる衝撃力の作用速度を想定している。

試験体の形状および配筋を図-1 に示す。寸法は高さ 250mm×幅 250mm×長さ 3400mm とし、せん断補強筋を 150mm 間隔で配置している。載荷点はやはり中央で、せん断スパンは 1500mm とし、曲げ破壊型の RC はりとなるように設計している。

表-3 に N シリーズおよび F シリーズのコンクリート配合を示す。コンクリートに短繊維を混入するとスランプが低下し、ワーカビリティが不足するため、通常の配合設計では s/a や単位水量、混和剤添加率を変化させる。しかし、同時にコンクリートの力学特性も変化するため、同一条件下での試験実施が困難となる。そこで本実験では、配合が異なることによる力学特性の変化を極力取り除くため、N シリーズと F シリーズのベースコンクリートの配合は同一とした。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を示す。なお、今回の試験実施期間はコンクリート材齢 52～113 日であり、養生期間は十分で、試験材齢の違いによるコンクリート強度の影響はないもの判断した。

2.2 試験装置

本実験に使用した試験装置を写真-1 に示す。原理は、所定の高さまで重錘をチェーンブロックで引き上げ、ロープを用いて重錘を吊っているフックを解除し、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、支点部には試験体の浮き上がりや脱落、軽微なねじれ挙

動を防止するため跳ね上がり防止治具を備え、試験体上面からナットでの締付けが可能な構造となっている。

なお、今回の実験では重錘質量を 400kg とした。また、繰返し載荷によっては上面が損傷し、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 (300mm×300mm×10mm) を敷いて実験を実施した。

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 のロードセル (片側 2 点ずつ) を使用した。いずれのロードセルもひずみゲージ式となっている。はり中央変位の計測には、最大計測レンジ 750mm、サンプリング周期を 20～1000μsec (6 段階可変) とした非接触型レーザ変位計を使用した。

計測には、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。計測のサンプリング間隔は 50μsec とし、取得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。

なお、重錘の衝突速度について、事前に重錘落下高さ と衝突速度の関係を計測し、今回の実験範囲では空気抵抗、ガイドレールの摩擦等による損失はなく、ほぼ理論値どおりの衝突速度が発生することを確認している。そのため今回の実験では衝突速度を計測項目に含めていない。

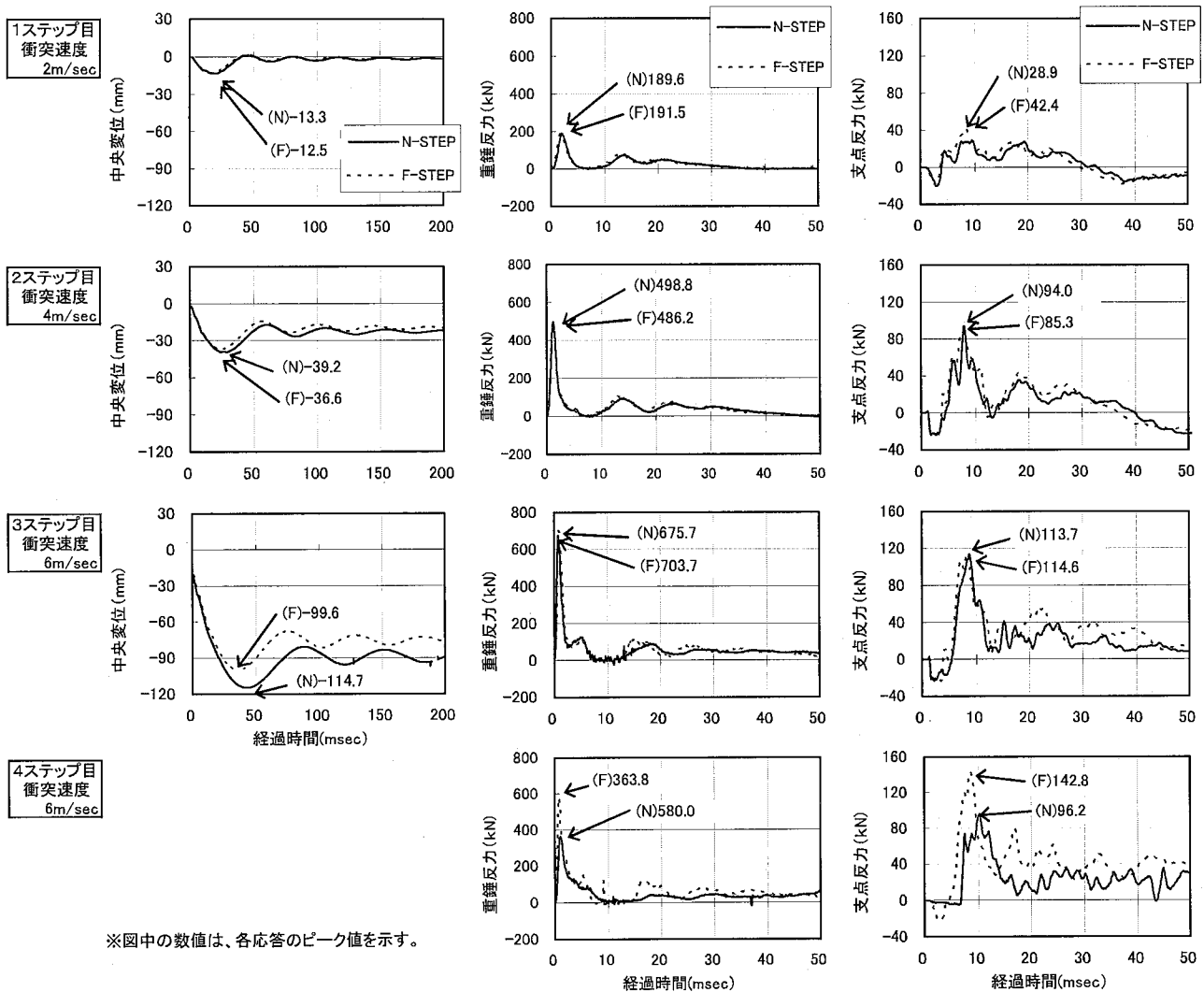


図-2 衝撃漸増載荷時の中央変位・重錘反力・支点反力の履歴

3. 実験結果

3.1 衝撃漸増載荷

図-2に衝撃漸増載荷時の中央変位、重錘反力、支点反力（両側平均）の応答履歴を、図-3に各ステップにおけるはりの中央の最大変位と残留変位を示す。また、図-4に3ステップ目終了時のひび割れ発生状況を示す。なお、4ステップ目（衝突速度6m/sec）では計測器の破損が懸念されたため、はり中央部の変位は計測せず、載荷終了時の残留変位のみを計測した。

図-2より、静的耐力がほぼ同等のRCはり（N-STEP）と短繊維を混入したRCはり（F-STEP）の重錘反力履歴と支点反力履歴は、3ステップ目までほとんど一致していることがわかる。また、中央変位は2ステップ目まで両者が同じ履歴を示している。2ステップ終了時のひび割れ観察では、N-STEPとF-STEPはともに圧縮側コンクリートが破壊していたが、損傷程度に大きな差は無く、この時点では短繊維混入による耐衝撃性向上効果は確認できない。しかし、3ステップ目でN-STEPの最大変位はF-STEPよりも約15mm大きくなり、押抜きせん断破壊時

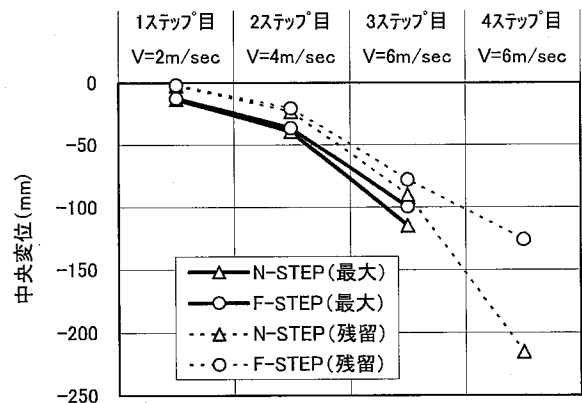


図-3 衝撃漸増載荷時の中央変位の推移

に発生するひび割れに似た斜めひび割れが発生するとともに、図-4に示すように圧縮側コンクリートが大きく剥落した。N-STEPでは4ステップ目で重錘反力と支点反力が大きく低下し、中央の残留変位が急激に増大した。これは、3ステップ目で圧縮側コンクリートが大きく損傷し、すでに衝撃荷重に対する抵抗性が失われていたためと考えられる。なお、F-STEPも3ステップ目で斜めひび割れの発生が見られていたが、大きく開口したひび割れ

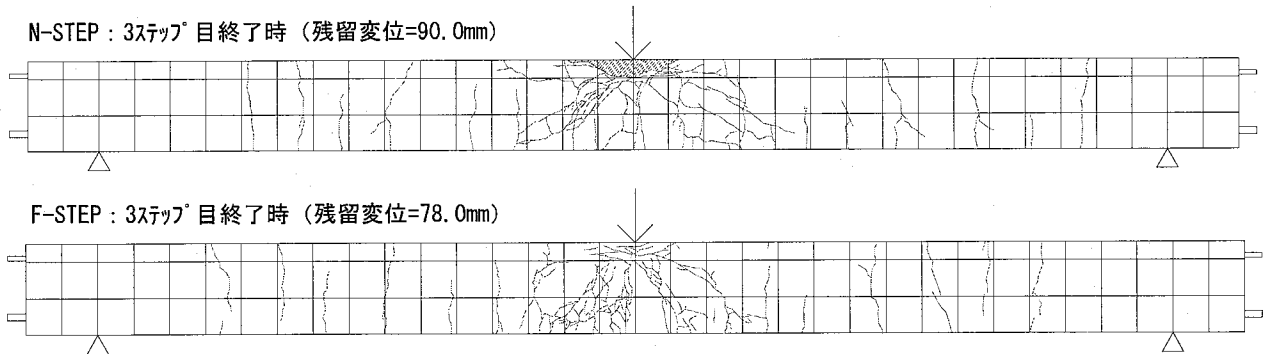


図-4 衝撃漸増載荷時のひび割れ発生状況 (3ステップ目終了時)

は少なく、圧縮側コンクリートの損傷範囲がN-STEPよりも狭くなっている。これは、短繊維がひび割れ開口を抑制するとともに、圧縮破壊したコンクリートをつなぎ留め、その部分が衝撃力を吸収することにより新たな破壊の進展を抑えたためと推察される。したがって、圧縮側コンクリートの残存が、大きな変形を伴う衝撃荷重に対して有効に働いたと考えられる。

3.2 衝撃一定繰返し載荷

図-5 および図-6 に、衝突速度をそれぞれ 2m/sec, 3m/sec で一定とした衝撃繰返し試験の繰返し回数と中央変位、最大重錘反力、最大支点反力 (両側平均) の関係を示す。試験体の終局状態は、はり中央部の残留変位がスパン長の2% (60mm) に達した時点と定義し、これに達するまで繰返し衝撃荷重を与えた。

衝突1回目 (損傷が全く無いRCはりへの載荷) では、はり中央の最大変位は、衝突速度 2m/sec のとき N-V2 で 13.3mm, F-V2 で 12.7mm, 衝突速度 3m/sec のとき N-V3 で 25.0mm, F-V3 で 22.0mm となり、同一衝突速度条件下では短繊維を混入した RC はりの方が変位量は小さくなる傾向となった。残留変位についても同様の傾向であった。

参考までに図-7 に、N-S および F-S の静的載荷時における荷重と変位の関係を示す。両者の履歴はほぼ一致しており、中央変位 12mm 程度で引張主鉄筋の降伏が認められる。また、圧縮側コンクリートの圧壊は両者とも中央変位が約 30mm に達した時点で確認された。したがって、衝撃繰返し載荷で設定した衝撃速度は、材料特性のひずみ速度依存性を無視し、静的載荷時の変位挙動で考えると、2m/sec は鉄筋ひずみが降伏点に達するレベルの衝撃荷重、3m/sec は鉄筋が降伏するがコンクリートは圧縮破壊しないレベルの衝撃荷重と想定できる。

図-5 より、衝突速度が 2m/sec のときの変位量推移は、繰返し回数の初期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、再び残留変位の進展が加速する傾向となっている。終局変位に達するまでに要した繰返し回数は、N-V2 で 105 回、F-V2 で 590 回となり、衝突速度が比較的小さい 2m/sec でも繰返し衝撃荷重を受けることによって最終的に破壊に至った。また、繰返し回数に着目すれば、短繊維を混入した RC はりは無混入の場合と比べ、5.6 倍の耐衝撃性を示した。N-V2 では繰返し回数が 50 回 (残留変位 27mm) を超えてから残留変位が加速しており、これは圧縮側コンクリートの剥落域が大幅に広がったときに一致し、圧縮側コンクリートの残存が

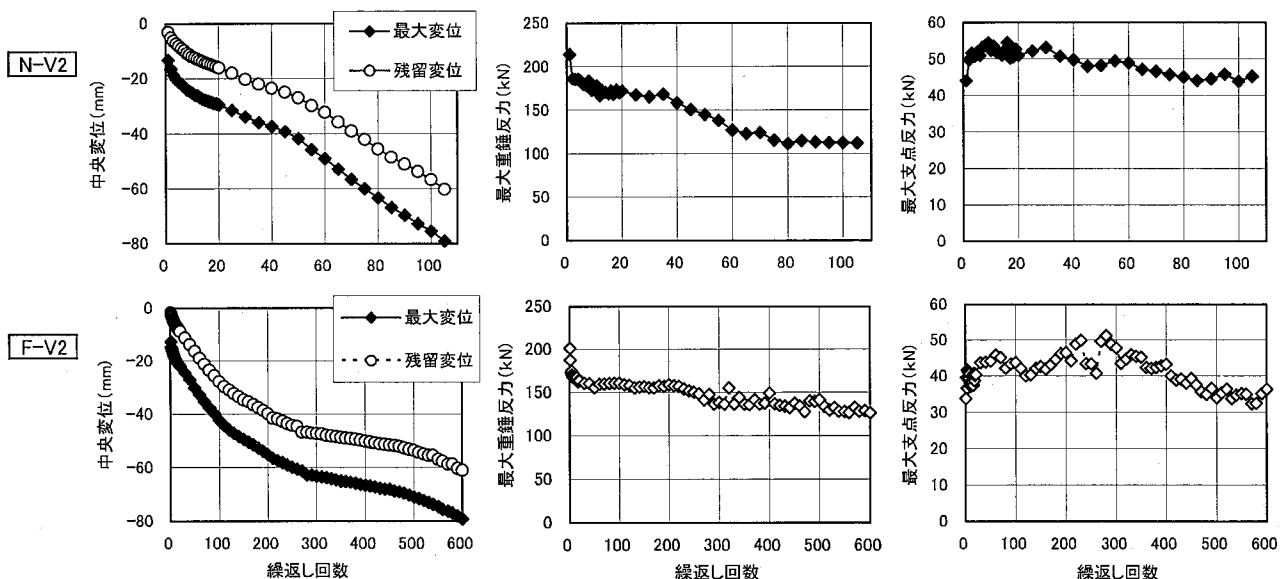


図-5 衝撃一定繰返し載荷の結果 (衝突速度 V=2m/sec)

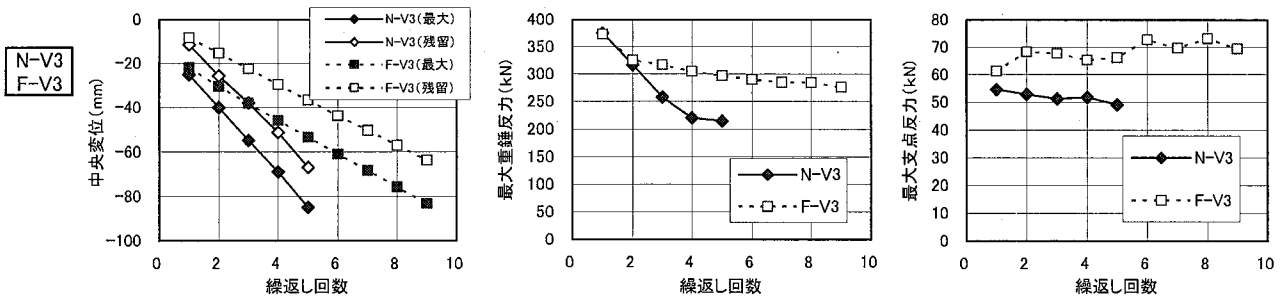


図-6 衝撃一定繰返し载荷の結果 (衝突速度 V=3m/sec)

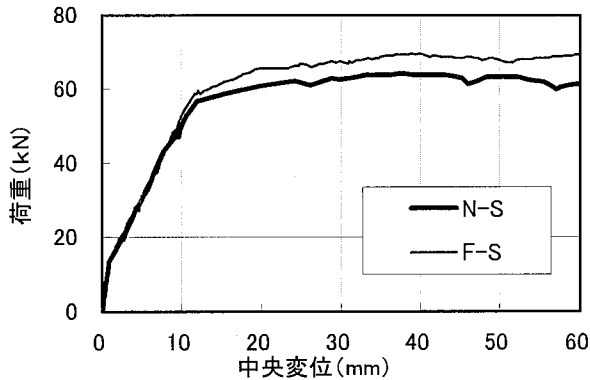


図-7 荷重変位曲線 (静的载荷試験)

耐衝撃性に寄与していたことが改めて確認できる。一方、F-V2では繰返し回数が470回(残留変位52mm)を超えてやや残留変位の進展が加速し終局変位に至ったが、N-V2と比較すると1回の衝撃荷重に対する残留変位増加量が小さい。この一要因として、短繊維補強コンクリートの高い衝撃吸収効果や、衝撃荷重下における材料物性のひずみ速度依存性の変化が影響し、圧縮側コンクリートが剥落せずに残存したためと考えられる。

一方、衝突速度が3m/secのときの変位量推移は、繰返し回数の増加に応じて直線的に進展している。終局変位

に達するまでに要した繰返し回数は、N-V3で5回、F-V3で9回となり、1.8倍の耐衝撃性となった。

また、衝突速度に着目すると、速度2m/secと3m/secでは終局変位に至る回数がNシリーズで1/21、Fシリーズで1/66であったことから、本実験条件下では衝突速度が2~3m/sec間の衝突で、繰返しによる耐衝撃性が急激に変化する境界があると考えられる。

図-5および図-6の繰返し回数と最大重錘反力の関係から、繰返し回数が増えると重錘反力は徐々に低下していく傾向にあることがわかる。特に衝突速度、コンクリート種類に関係なく、繰返し回数が少ない段階での低下が大きくなっており、この原因としてコンクリートにひび割れが進展したことによる硬さの低下と考えられる。一方で支点反力は、衝突速度2m/secの場合、繰返し回数が少ない段階では応答値が大きくなり、繰返し回数が増えれば損傷が進展すると、応答値が下がる傾向が見られた。

繰返し载荷時の応答履歴の一例として、N-V2およびF-V2の衝突1回目、载荷前変位約20mm、40mmにおける中央変位、重錘反力の履歴を図-8に示す。繰返し回数を増していくと、変位振幅が大きくなるとともに振動周期

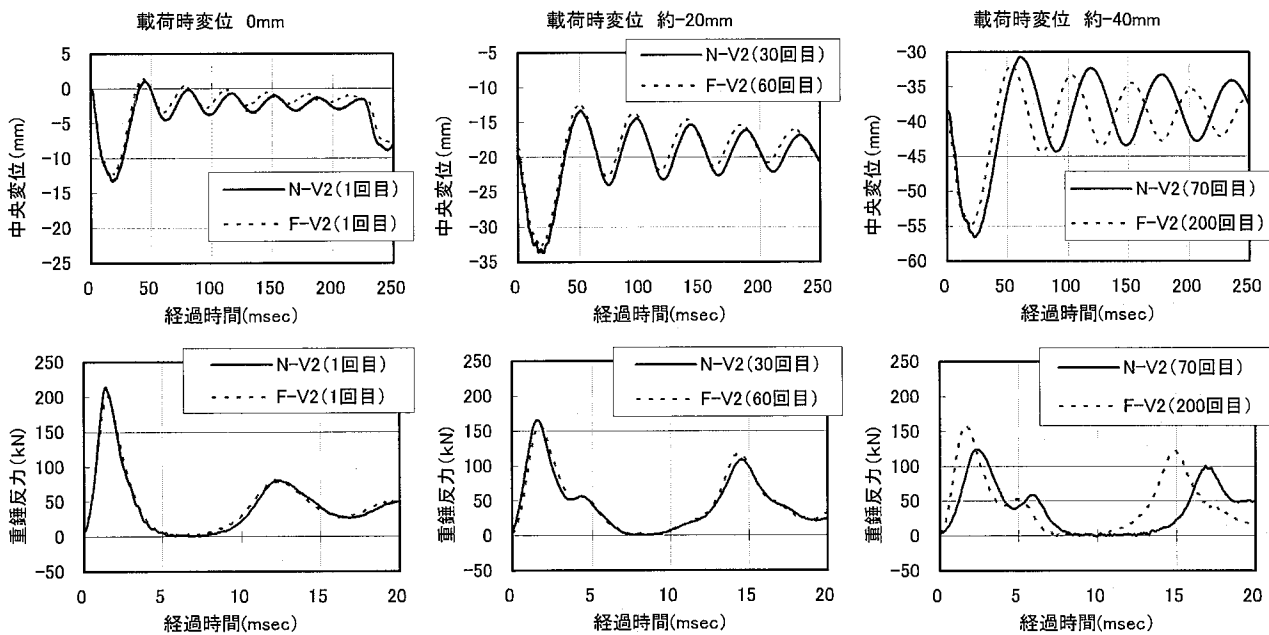


図-8 衝撃一定繰返し载荷時の中央変位・重錘反力の履歴 (衝突速度 V=2m/sec)

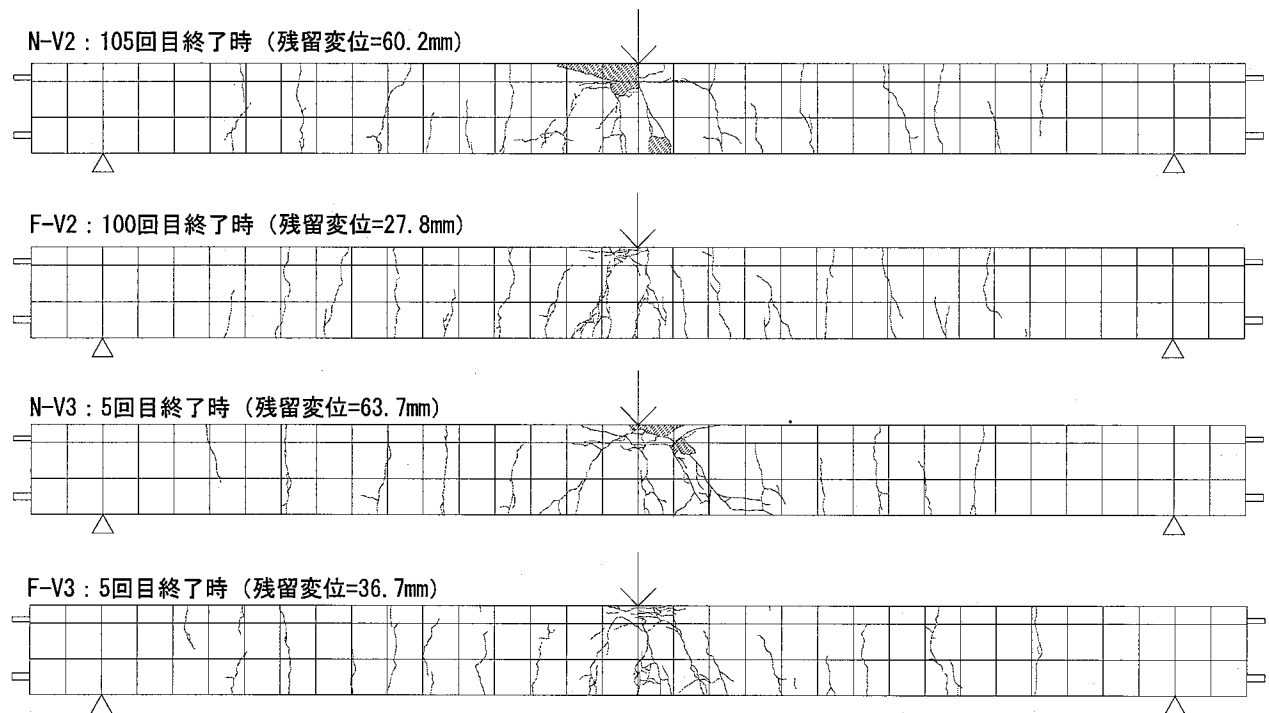


図-9 ひび割れ分布図（衝撃一定繰返し載荷）

が長くなり、重錘反力は小さく荷重作用時間がやや長くなる傾向となった。これは、はりの損傷が部材の自由振動特性を変化させたためと考えられる。また、衝突1回目、載荷前変位約20mmでは、N-V2、F-V2とも変位履歴、重錘反力履歴はほぼ一致しているが、載荷前変位40mmではN-V2の方がF-V2よりも振動周期、荷重作用時間が長くなっている。前述のようにN-V2は残留変位27mmで変位の進行が加速したのに対し、F-V2は残留変位40mmでは変位進行が依然緩やかであり、はりの耐衝撃性を反映した結果であると考えられる。

図-9に衝撃一定繰返し載荷時のひび割れ分布状況を示す。Nシリーズは終局変位時のひび割れ状況を示し、Fシリーズは同一衝撃速度のNシリーズが終局変位に達した回数とほぼ同一回数の時のひび割れ状況を示している。いずれの試験体でも衝撃破壊特有の断面を輪切りしたひび割れが多く発生している。しかし、N-V2とN-V3では終局変位時に広い範囲に渡り、圧縮破壊によるひび割れが発生し、圧縮側コンクリートの剥落も見られる。また、一部の下面コンクリートが剥落しており、短繊維を混入したはりと比較すると、損傷が顕著に現れている。

4. まとめ

本研究は、繰返し衝撃荷重を受けるコンクリート部材の破壊挙動の把握、PVA短繊維を混入したコンクリートの耐衝撃性の検討を目的に、重錘落下によるRCはりの衝撃実験を実施した。以下に本実験で得られた知見をまとめる。

(1) 短繊維を体積比で1.5%混入したRCはりは、圧縮部コンクリートの剥落が少なく、累積残留変位の進展

も緩やかであり、耐衝撃性が向上した。終局に至るまでの繰返し回数で比較すると、衝突速度2m/secでは5.6倍、3m/secでは1.8倍の効果があつた。

- (2) 衝突速度が比較的小さい2m/secでも、繰返し衝撃を受けることにより残留変位が進行し、破壊に至った。
- (3) 今回の実験条件下では、衝突速度が2~3m/secの範囲に繰返しによる耐衝撃荷重に対する抵抗性が急激に変化する境界が認められた。

参考文献

- 1) 平山克也, 南靖彦, 奥野光洋, 峯村浩治, 河合弘泰, 平石哲也: 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) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1999
- 3) 例えば, 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
- 4) 例えば, 森下政浩, 田中秀明: 繰返し爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷: 土木学会論文集, No.752/I-66, pp.317-322, 2004.1
- 5) 伊藤始, 岩波光保, 横田弘: 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
- 6) 岸徳光, 田口史雄, 三上浩, 栗橋祐介: 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
- 7) 土木学会: 衝撃実験・解析の基礎と応用, 2004