

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1163

September 2007

PVA短繊維補強コンクリートの耐衝撃性向上効果の検討

岩 波 光 保
白 根 勇 二
横 田 弘
山 田 岳 史
竹 鼻 直 人

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. PVA短繊維補強コンクリートの材料特性のひずみ速度依存性	4
2.1 実験概要	4
2.2 圧縮特性への影響	6
2.3 割裂引張特性への影響	8
2.4 曲げ特性への影響	9
3. PVA短繊維補強コンクリートはりの耐衝撃性状	10
3.1 実験概要	10
3.2 結果および考察	11
4. まとめ	16
5. あとがき	16
謝 辞	16
参考文献	16
付 録	18

Improvement of Impact Loading Resistance of Reinforced Concrete Members by Mixing PVA Short Fiber

Mitsuyasu IWANAMI*
Yuji SHIRANE**
Hiroshi YOKOTA***
Takeshi YAMADA****
Naoto TAKEHANA****

Synopsis

It is reported that huge impulsive forces are acting repeatedly on such port structures as breakwaters consisting of concrete caissons, resulting in failure of their concrete members. Therefore, it is necessary to examine countermeasures to improve impact loading resistance, that is applicable to port structures.

In this study, to investigate the applicability of PVA short fiber to improvement of impact loading resistance of port structures, loading tests on concrete and falling-weight impact loading tests on reinforced concrete beams were conducted. As the results of compressive tests, splitting tensile tests, and bending tests on concrete specimens with and without PVA short fiber, dependence of strain-rate on mechanical properties of concrete was observed in concrete with PVA short fiber as well as normal concrete. Also, the dependence on compressive strength of concrete with PVA short fiber was larger than that of splitting tensile strength and bending strength. From the results of falling-weight impact loading tests on reinforced concrete beams, where PVA short fiber content and impact velocity were changed, it was confirmed that the number of repetition of impact loading until failure was increased in case of reinforced concrete beams with PVA short fiber. It was because degradation of flexural rigidity of the beams was not severe due to improved mechanical properties of concrete with PVA short fiber. Accordingly, it was concluded that impact loading resistance of concrete and concrete members were improved by mixing PVA short fiber.

Key Words: port structure, reinforced concrete beam, repeated impact load, falling-weight impact loading test, PVA short fiber

* Senior Researcher of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
** Ex-Trainee of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
*** Executive Researcher, Director General of LCM Research Center for Coastal Infrastructures
**** Kobe Steel, Co. Ltd.

3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5059 Fax : +81-46-844-0255 E-mail : iwanami@pari.go.jp

PVA 短繊維補強コンクリートの耐衝撃性向上効果の検討

岩波 光保*
白根 勇二**
横田 弘***
山田 岳史****
竹鼻 直人****

要 旨

港湾構造物では、防波堤における衝撃砕波力のような衝撃力が繰り返し作用することによって損傷に至った事例が報告されている。そのため、港湾構造物に適用可能な耐衝撃性の向上方策を検討する必要がある。

本研究では、PVA短繊維補強コンクリートの適用性について調べるため、要素レベルのコンクリート供試体の高速載荷実験と重錘落下による鉄筋コンクリートはりの繰り返し衝撃載荷実験を実施し、PVA短繊維補強による耐衝撃性の向上効果について検討を行った。コンクリート供試体の高速載荷実験では、圧縮試験、割裂引張試験および曲げ試験を実施した。その結果、PVA短繊維を混入したコンクリートの力学特性においても、一般的なコンクリートと同様に、ひずみ速度依存性が認められ、圧縮強度のひずみ速度依存性は割裂引張強度や曲げ強度のものより大きいことがわかった。さらに、鉄筋コンクリートはりの繰り返し衝撃載荷実験の結果、PVA短繊維を混入した場合、破壊までに要する繰り返し載荷回数が増加した。これは、PVA短繊維の補強効果により曲げ剛性の低下が緩和されたためであり、繰り返し衝撃荷重に対する抵抗性が向上することが示された。

キーワード：港湾構造物，コンクリートはり，繰り返し衝撃荷重，重錘落下実験，PVA短繊維

* 地盤・構造部 構造強度研究室 主任研究官（構造性能評価担当）
** 地盤・構造部 構造強度研究室 前 依頼研修員（所属：前田建設工業株式会社）
*** 研究主監，LCM研究センター長
**** 株式会社 神戸製鋼所
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5059 Fax：046-844-0255 E-mail：iwanami@pari.go.jp

1. まえがき

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な巨大な衝撃力が作用し、これまでにこれらの衝撃力が構造物に繰り返し作用することによって損傷に至った事例が報告されている^{1),2)}。これに対して、港湾構造物に適用可能な耐衝撃性の向上方策の開発が求められている。

コンクリート部材の衝撃破壊に対する対策として、コンクリート中に鋼繊維を混入する方法がすでに検討されており、その耐衝撃性向上効果が確認されている³⁾。しかし、鋼繊維補強コンクリートはコンクリート仕上がり面に鋼繊維が露出するため、耐食性や美観が問題となることがあり、港湾構造物への適用は難しい。

コンクリート中に混入する短繊維として、鋼繊維以外に、ポリビニルアルコール（以下、PVAと呼ぶ）やポリエチレンなどの合成繊維を対象とした研究も行われおり、港湾構造物に適用可能な合成繊維として、作業性や耐食性、コンクリートとの付着性、耐アルカリ性に優れるPVA短繊維の適用が検討されている⁴⁾。伊藤ら⁵⁾は、PVA短繊維を混入することによって、静的荷重下における鉄筋コンクリートはりのせん断特性の改善に効果があることを確認している。

コンクリートの力学特性には、一般的に荷重の作用速度の影響を受けてその性質が変化するひずみ速度依存性があることが知られている⁶⁾。しかし、PVA短繊維を混入したコンクリート（以下、PVA短繊維補強コンクリートと呼ぶ）の力学特性のひずみ速度依存性を検討した研究は過去に見当たらない。

また、PVA短繊維を混入した鉄筋コンクリートはり（以下、RCはりと呼ぶ）は、静的荷重下ばかりでなく、衝撃荷重下でも部材性能が向上したという報告⁷⁾が既にあり、港湾構造物のように衝撃荷重が繰り返し作用する場合にも耐衝撃性向上効果が期待される。

そこで本研究では、PVA短繊維を混入したコンクリートが通常のコンクリートよりも高い耐衝撃性を有し、港湾構造物に適用可能であるかを検討するため、以下の2種類の実験的検討を行った。まず、高速荷重を受けるPVA短繊維補強コンクリートの材料特性について検討するため、荷重速度とPVA短繊維の混入率を変化させ、圧縮試験、割裂引張試験および曲げ試験を実施し、力学特性のひずみ速度依存性を調べた。次に、PVA短繊維を混入したRCはりとはりとの混入のRCはりをを用いて、重錘落下による繰り返し衝撃荷重実験を実施し、PVA短繊維を混入した場合の耐衝撃性向上効果について検討を行った。

2. PVA短繊維補強コンクリートの力学特性のひずみ速度依存性

2.1 実験概要

(1) 検討ケース

高速荷重を受けるPVA短繊維補強コンクリートの力学特性を検討するため、PVA短繊維の混入率と荷重速度をパラメータとした圧縮試験、割裂引張試験および曲げ試験を実施した。

検討ケースを表-1に示す。PVA短繊維の混入率は、コンクリートに対する外割りの体積比で、0%、0.5%、1.0%、1.5%の4水準とした。荷重速度は、圧縮試験と割裂引張試験では5水準（S1、S2、D1、D2およびD3）、曲げ試験では4水準（S2、D1、D2およびD3）とした。ここで、荷重速度は、使用した荷重装置のストローク速度のことであるが、実験結果の検討では、(4)で後述するひずみ速度を用いている。荷重速度S2は、『コンクリートの圧縮強度試験方法（JIS A 1108-2006）』、『コンクリートの割裂引張強度試験方法（JIS A 1113-2006）』、『コンクリートの曲げ強度試験方法（JIS A 1106-2006）』に規定されている荷重増加速度の範囲内になるように設定した荷重速度である。本研究では、5つの荷重速度のうち、S1およびS2を静的載

表-1 検討ケース

試験の種類	PVA 短繊維 混入率 (%)	荷重速度 (mm/s)				
		静的荷重		高速荷重		
		S1	S2	D1	D2	D3
圧縮試験	0	0.002	0.02	2	20	100
割裂引張試験	0.5	0.002	0.02	2	20	100
	1.0					
曲げ試験	1.5	—	0.02	2	20	100

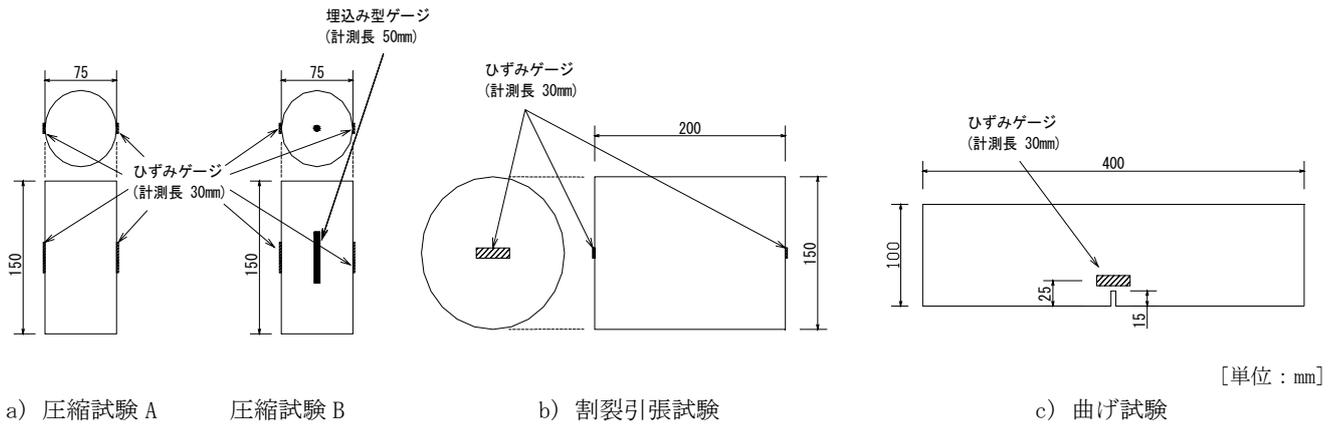


図-1 供試体形状およびひずみ計測位置

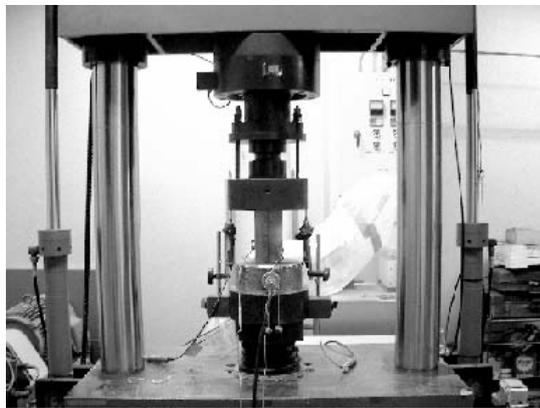


写真-1 サーボ制御油圧式載荷装置

荷, D1, D2およびD3を高速載荷と考えた。供試体数量は1ケースにつき3本とした。

(2) 試験方法および計測方法

各試験は、写真-1に示すサーボ制御油圧式載荷装置（動的最大荷重：320kN）を使用して実施した。

圧縮試験に用いた供試体は、載荷装置の能力を考慮して、図-1のa)に示すように、直径が75mm、高さが150mmのコンクリート円柱とした。圧縮試験は2回に分けて実施し、1回目は相対する供試体側面の高さ方向中央に貼付け型ひずみゲージ（計測長：30mm）を供試体軸方向に貼り付け、表-1に示す全ケースについて圧縮試験を実施した（これを圧縮試験Aと呼ぶ）。しかし、コンクリートが圧縮破壊すると貼付け型のひずみゲージはその変形に追従することができないため、最大荷重到達後の変形挙動を評価することができない。そこで、2回目では、PVA短繊維補強コンクリートの最大荷重後の変形挙動を評価するため、貼付け型ひずみゲージに加えて、供試体内部に埋込み型ひずみゲージを設置して圧縮試験を行った（これを圧縮

試験Bと呼ぶ）。圧縮試験Bにおける検討ケースは、PVA短繊維混入率を0%と1.5%とし、載荷速度を表-1に示すS2, D1およびD3とした。なお、埋込み型ひずみゲージ（計測長：50mm）の型枠内への設置にあたっては、高速載荷時の供試体の変形に追従できるように、接着剤を用いてあらかじめゲージ表面に砂を付着させておき、コンクリートとの一体性を確保した。

割裂引張試験に用いた供試体は、図-1のb)に示すように、直径が150mm、高さが200mmのコンクリート円柱とし、供試体端面には載荷方向と直角方向にひずみゲージ（計測長：30mm）を貼り付け、表-1に示す全ケースについて試験を実施した。

曲げ試験に用いた供試体は、図-1のc)に示すように、寸法が100×100×400(mm)のコンクリート角柱とし、ひび割れ発生位置を供試体中央に限定するため、深さ15mmの切欠きを設けてから、中央載荷点法（スパン長：300mm）による載荷を行った。ひずみ計測位置は切欠き直上とし、供試体軸方向に計測長が30mmのひずみゲージを貼り付けた。また、スパン中央のたわみを計測するため、接触型変位計を設置した。

(3) 使用材料

表-2に、使用したコンクリートの示方配合を示す。コンクリートの練混ぜには、セメントに普通ポルトランドセメント、細骨材に砕砂と山砂を混合したもの、粗骨材には砕石、混和剤にAE減水剤を用いた。

表-3と写真-2に、PVA短繊維の物性および外観を示す。PVA短繊維の混入率は、コンクリートに対する外割りの体積比とし、混練はアジテータトラックのホッパーからコンクリートに直接投入し、その後数分間ドラムを高速回転させることで行った。このような方法でPVA短繊維補強コンクリートを製造した場合、繊維の分散状況や硬化物

表-2 コンクリートの示方配合

配合名	W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	PVA短繊維混入率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
						W	C	S	G	Ad
F0	57.2	8±2.5	4.5±1.5	47.3	0	179	313	839	964	3.30
F0.5		—*			0.5					
F1.0		—*			1.0					
F1.5		—*			1.5					

* PVA短繊維混入前のベースコンクリートの配合をF0と同一としたため、スランブの規格値は設定しなかった。

表-3 PVA短繊維の物性

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 (%)	ヤング率 (kN/mm ²)
0.66	30	45.5	1.3	861	9	23

表-4 コンクリートのフレッシュ性状

配合名	PVA短繊維混入率 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
F0	0	17.5	5.1	20.0
F0.5	0.5	15.0	5.2	20.0
F1.0	1.0	10.0	3.8	20.0
F1.5	1.5	5.0	3.9	20.0



写真-2 PVA短繊維の外観

性のばらつきなどに問題がないことを既報⁹⁾にて確認している。なお、本実験ではコンクリートの材料特性の変化をPVA短繊維の混入による影響のみに限定するため、PVA短繊維補強コンクリートのベースコンクリート（繊維混入前のコンクリート）の配合をPVA短繊維無混入の配合F0と同一にした。表-4に、供試体作製時のコンクリートのフレッシュ性状を示す。

(4) ひずみ速度の定義

荷重の作用速度の指標として、一般的にひずみ速度が用いられており、本実験においても各試験で得られたひずみの時刻歴応答からひずみ速度を算出し、これを荷重の作用速度の指標として、実験結果の検討に用いた。

圧縮試験では、荷重初期においてひずみの増加が緩やかとなるため、最大荷重の1/3の荷重作用時と最大荷重作用時のひずみ増加量を経過時間で除した値をひずみ速度と定義した。また、割裂引張試験と曲げ試験では、圧縮

試験と同様に、荷重初期においてひずみの増加が緩やかとなることに加えて、供試体破壊時に局所的にひずみが増大することから、最大荷重の1/3の荷重作用時と2/3の荷重作用時のひずみ増加量を経過時間で除した値をひずみ速度と定義した。

また、各荷重速度のケースで得られた力学特性を、JIS規格に定められた静的荷重試験（本実験では荷重速度S2に該当する）によって得られた力学特性で除し、これを強度比または係数比などと定義し、荷重速度による影響を検討した。

2.2 圧縮特性への影響

図-2～6に、圧縮試験Aの結果を示す。圧縮試験Aでは、円柱供試体側面にひずみゲージを貼り付け、コンクリート表面に発生するひずみを計測している。

図-2に、PVA短繊維混入率が異なるコンクリートのひず

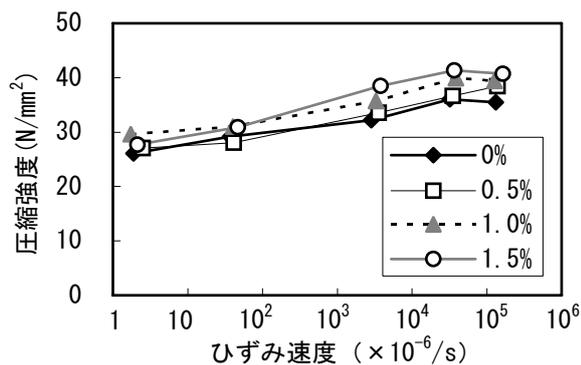


図-2 ひずみ速度と圧縮強度の関係

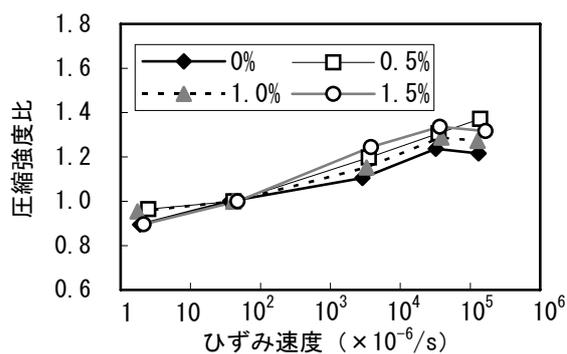


図-3 ひずみ速度と圧縮強度比の関係

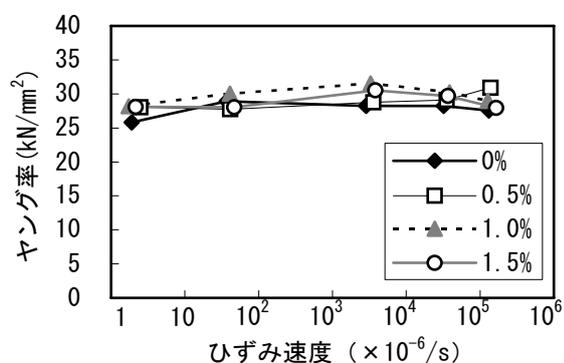


図-4 ひずみ速度とヤング率の関係

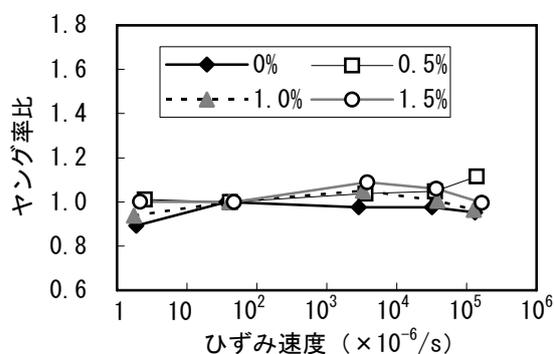


図-5 ひずみ速度とヤング率比の関係

み速度と圧縮強度の関係を示し、図-3に、荷重速度S2の場合の圧縮強度を基準にした圧縮強度比とひずみ速度の関係を示す。これらより、ひずみ速度が増加すると圧縮強度は増大する傾向にあり、PVA短繊維の有無にかかわらず、いずれの配合においてもコンクリートの力学特性にひずみ速度依存性が認められた。圧縮強度比は、PVA短繊維補強コンクリートの方が混入率0%のコンクリートより常に大きく、1.1~1.4の範囲となった。このように、PVA短繊維補強コンクリートの圧縮強度比が大きくなったのは、圧縮破壊時に発生する横方向の引張応力をPVA短繊維が負担し、3次元的な拘束効果を発揮したためと考えられる。なお、PVA短繊維の混入率が圧縮強度のひずみ速度依存性に及ぼす影響は明確でなかった。

図-4に、ひずみ速度とヤング率の関係を示し、図-5に、荷重速度S2の場合のヤング率を基準にしたヤング率比とひずみ速度の関係を示す。ヤング率は圧縮強度とは異なり、PVA短繊維混入率と荷重速度が及ぼす影響は小さく、ヤング率比は0.95~1.1の範囲でほぼ一定となった。

図-6に、圧縮試験Aで得られた応力-ひずみ曲線を示す。試験は各ケース3本ずつ実施したが、図中には3本のうち

平均的な結果となった1本の結果のみを図示している。これより、応力-ひずみ曲線の初期勾配は、荷重速度やPVA短繊維混入率によらずほぼ一致したが、PVA短繊維混入率が増加するほど、応力-ひずみ曲線の勾配が緩やかになる点が最大圧縮応力点に近づき、最大圧縮応力時のひずみが増加する傾向にあった。ただし、圧縮試験Aでは貼付け型ひずみゲージを用いたため、最大圧縮応力以降のひずみ計測が正確に行えなかった。

図-7に、圧縮試験Bにおける応力-ひずみ曲線を示す。圧縮試験Aの結果と同様に、PVA短繊維混入率が1.5%のケースは0%のケースよりも最大圧縮応力が大きく、最大圧縮応力時のひずみが増加した。また、PVA短繊維混入率が0%の場合は最大圧縮応力到達以降、急激に応力が低下したのに対し、1.5%の場合は緩やかに応力が低下した。このことから、PVA短繊維を混入することによって最大圧縮応力以降のコンクリートの力学特性が変化し、圧縮じん性が向上することがわかった。

写真-3および写真-4に、荷重速度D3におけるPVA短繊維混入率0%と1.5%の供試体の圧縮破壊状況を示す。両者とも荷重装置のストローク変位が3mmに達するまで荷重を

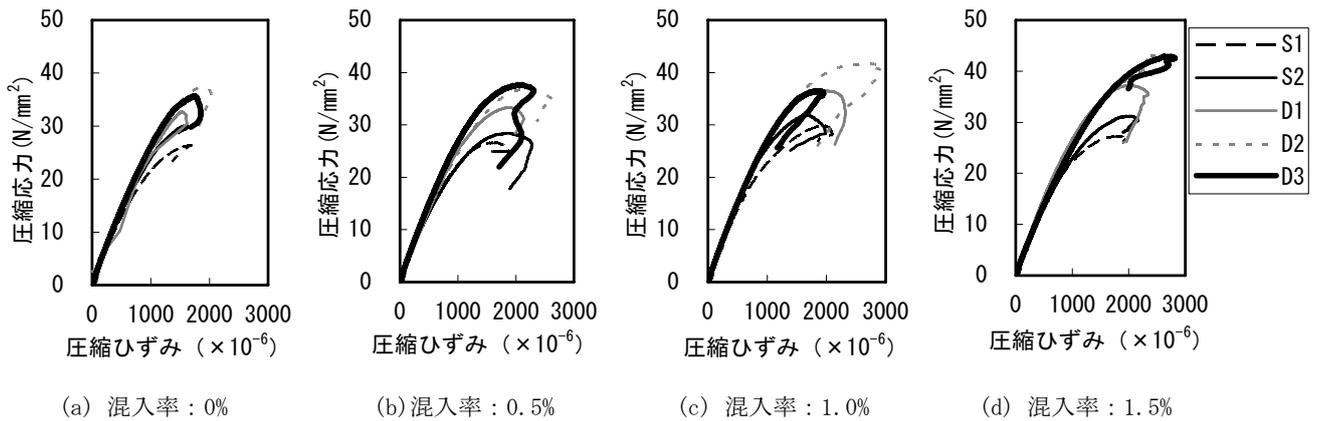


図-6 応力-ひずみ曲線 (圧縮試験 A)



写真-3 荷速度 D3 の圧縮破壊状況
(PVA 短繊維混入率 : 0%)

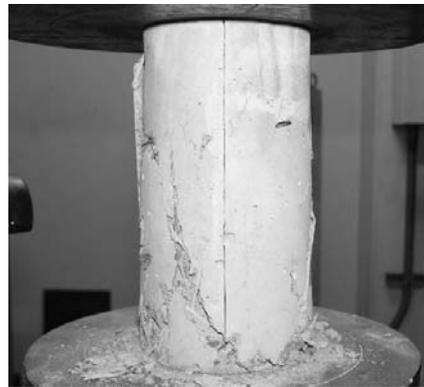


写真-4 荷速度 D3 の圧縮破壊状況
(PVA 短繊維混入率 : 1.5%)

行った。PVA短繊維混入率が0%の場合、コンクリート片が飛散し、供試体の破壊性状は、供試体下部が円錐状に残存する破壊、または斜めひび割れによるせん断破壊となり、脆性的な破壊性状を示した。一方、PVA短繊維混入率が1.5%の場合、コンクリート片が飛散することなく、最大圧縮応力到達以降もコンクリート片がPVA短繊維によって繋ぎとめられた。このように、PVA短繊維の混入によって破壊性状が異なり、結果的にコンクリートの圧縮じん性が向上したものと考えられる。

以上より、高速圧縮荷を受けるPVA短繊維補強コンクリートの力学特性は、通常のコンクリートと比較して同等もしくはそれ以上であることが確認でき、PVA短繊維の混入によるコンクリートの耐衝撃性向上が可能であると考えられた。

2.3 割裂引張特性への影響

図-8に、PVA短繊維混入率が異なるコンクリートのひずみ速度と割裂引張強度の関係を、図-9に、荷速度S2の

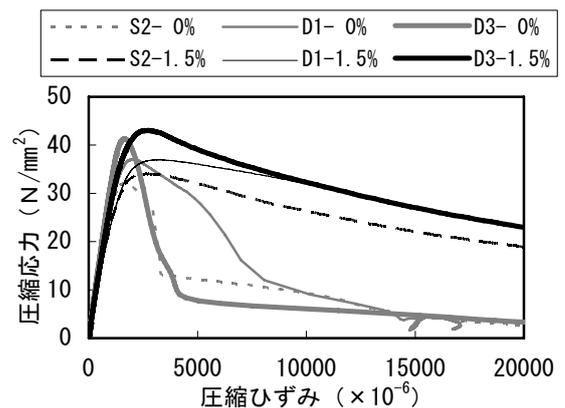


図-7 応力-ひずみ曲線 (圧縮試験B)

場合の割裂引張強度を基準にした割裂引張強度比とひずみ速度の関係を示す。これらより、圧縮強度と同様に、ひずみ速度が増加すると割裂引張強度が増加することがわかり、割裂引張強度のひずみ速度依存性が認められた。

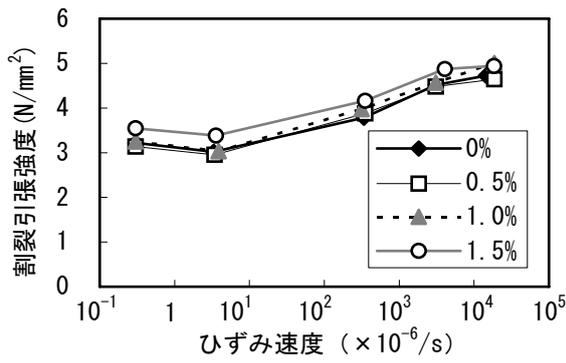


図-8 ひずみ速度と割裂引張強度の関係

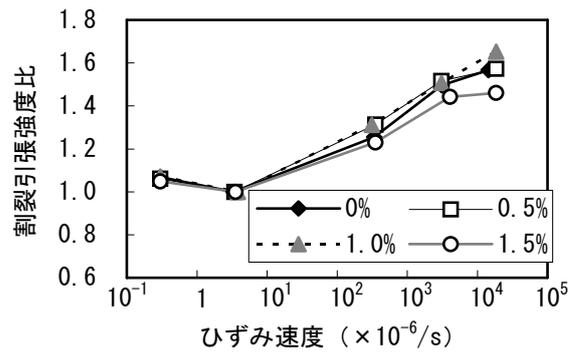


図-9 ひずみ速度と割裂引張強度比の関係

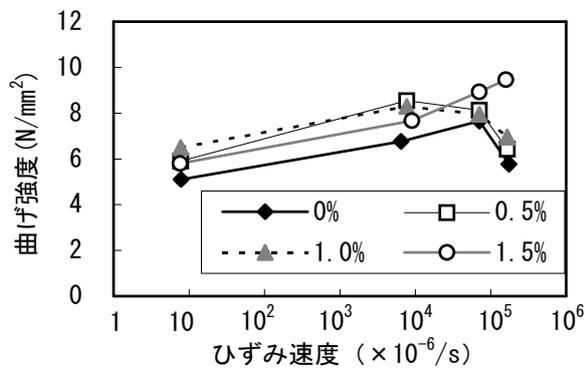


図-10 ひずみ速度と曲げ強度の関係

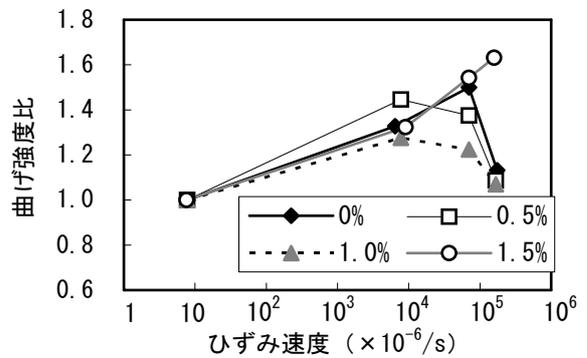


図-11 ひずみ速度と曲げ強度比の関係

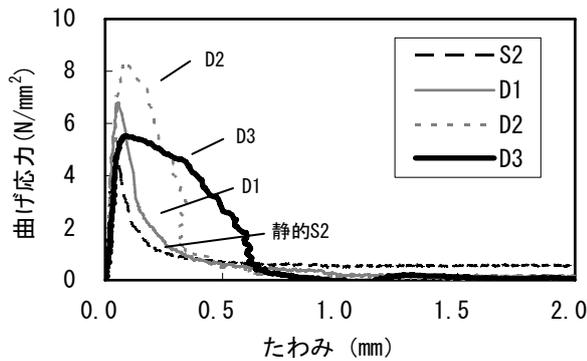


図-12 曲げ応力-たわみ曲線
(PVA短繊維混入率：0%)

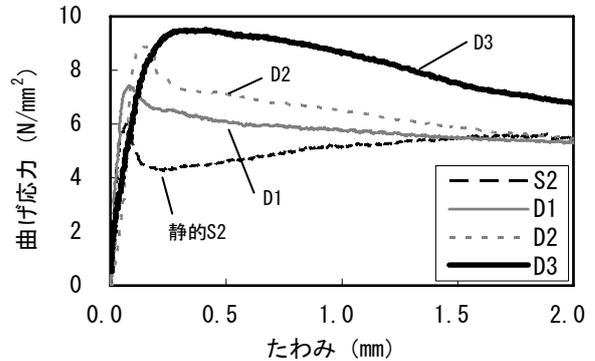


図-13 曲げ応力-たわみ曲線
(PVA短繊維混入率：1.5%)

図-9より、割裂引張強度比は1.2~1.6の範囲にあり、割裂引張強度の増加割合は圧縮強度の増加割合よりも大きく、割裂引張強度は圧縮強度よりもひずみ速度依存性が大きいことがわかった。また、PVA短繊維混入率で比較すると、PVA短繊維混入率が1.5%の場合、高速載荷時の強度比は若干小さくなったが、0~1.0%ではほとんど差はなく、

PVA短繊維混入率の影響についての明確な違いは本実験の範囲内では認められなかった。

2.4 曲げ特性への影響

図-10にPVA短繊維混入率が異なるコンクリートのひずみ速度と曲げ強度の関係を、図-11に載荷速度S2の場合の

曲げ強度を基準にした曲げ強度比とひずみ速度の関係を示す。これらより、圧縮強度および割裂引張強度と同様に、ひずみ速度が増加すると曲げ強度は増加する傾向にあり、曲げ強度にもひずみ速度依存性が認められた。図-11より、曲げ強度比は1.2~1.6の範囲にあり、割裂引張強度と同様に、曲げ強度は圧縮強度よりもひずみ速度依存性が大きいことがわかった。しかし、PVA短繊維混入率で比較すると、PVA短繊維混入率が0%の場合に高速載荷D3（ひずみ速度：約 10^{-1} /s）の時に曲げ強度が小さくなったが、これを除くと、PVA短繊維混入率が曲げ強度比に及ぼす影響は認められなかった。

図-12および図-13に、PVA短繊維混入率が0%と1.5%の場合の曲げ応力-たわみ曲線を示す。載荷速度が大きくなると最大曲げ応力が増大するとともに、最大曲げ応力時のたわみも大きくなる傾向となった。特にPVA短繊維混入率が1.5%のケースではこの傾向が顕著で、ひび割れ発生後も急激な破壊の進展が抑制され、たわみの増加とともに応力が緩やかに低下した。

図-14に、載荷荷重-たわみ曲線下の面積として定義される曲げじん性係数の算定結果を示す。ここでは、たわみが2mmの時点までの面積を求めた。この曲げじん性係数は、曲げを受けるコンクリートのじん性や粘りを表す指標である。PVA短繊維を混入すると、ひずみ速度の増加とともに曲げじん性係数も大きくなり、曲げを受けるコンクリートにPVA短繊維を混入することで衝撃的な荷重に対する抵抗性が改善することが確認できた。

以上より、高速曲げ載荷を受けるPVA短繊維補強コンクリートの力学特性は、通常のコンクリートと比較して同等もしくはそれ以上であることが確認でき、PVA短繊維の混入によるコンクリートの耐衝撃性向上の可能性が要素レベルで確認できた。

3. PVA短繊維補強コンクリートはりの耐衝撃性状

PVA短繊維を混入したRCはりの耐衝撃性について検討するため、重錘落下による繰返し衝撃載荷実験を実施した。

3.1 実験概要

(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-5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%混入したコンクリートを用いたRCはり（Fシリーズ）の2種類である。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

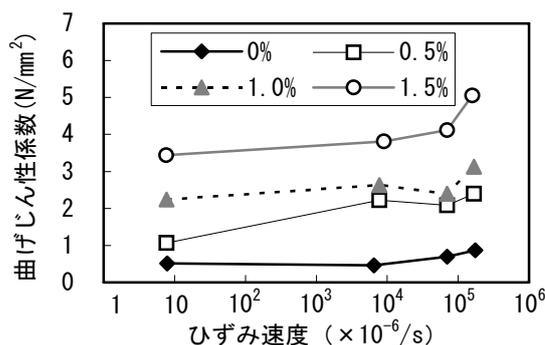


図-14 ひずみ速度と曲げじん性係数の関係

一定の衝突速度（2.0、2.5、3.0および4.0m/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^{9),10)}を想定したものである。

図-15に、試験体の形状および配筋を示す。用いた試験体は、長さが3400mm、断面が250mm×250mmのRCはりであり、引張鉄筋としてD19を2本、圧縮鉄筋としてD13を2本配置した。また、せん断補強筋として、D6のスターラップを150mm間隔ではりの全長にわたって配置した。

使用したPVA短繊維とコンクリートは、2.の高速載荷実験で用いたものと同一であり、それぞれ表-2と表-3に示すものである。また、表-6に、各コンクリートの力学特性とRCはりの計算曲げ耐力および計算せん断耐力を示す。いずれのRCはりも曲げ破壊型となるように設計されている。

(2) 試験装置

本実験に使用した試験装置を写真-5に示す。原理は、

表-5 検討ケース

シリーズ	試験体名称	短繊維混入率 (%)	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 (衝突速度一定)	2.0
	N-V2.5			2.5
	N-V3			3.0
	N-V4			4.0
F	F-S	1.5	静的載荷	—
	F-V2		繰返し載荷 (衝突速度一定)	2.0
	F-V2.5			2.5
	F-V3			3.0
	F-V4			4.0

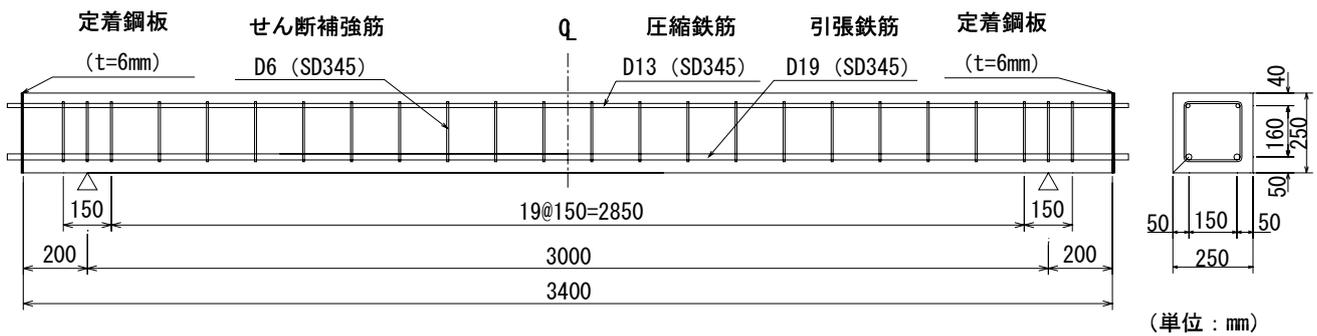


図-15 試験体形状および配筋

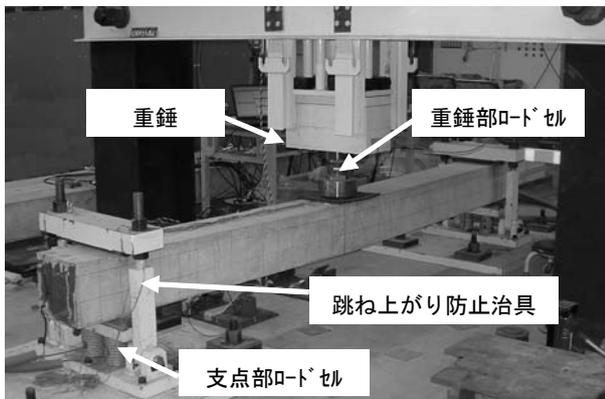


写真-5 試験装置外観

所定の高さまで重錘をチェンブロックで引き上げ、ロープを用いてフックを解除し重錘を自由落下させるものである。実験に供するRCはり、スパンを3000mmとして2つの支点上に設置した。

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、試験体上面からナットで締め付ける構造となっている。また、繰返し衝撃荷重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とがある。これを抑えるため重錘衝突位置に硬度65度のゴムシート（厚さ：10mm）を敷いて実験を行い、ゴムシートが劣化した場合は適宜交換した。

重錘質量については、400kgで一定とし、試験体の破壊ははり中央の累積残留変位がスパン長の2% (60mm) に達した時点¹⁾と定義し、これに達するまで衝撃荷重を繰り返した。

(3) 計測方法

計測項目は、重錘反力、支点反力および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が

表-6 コンクリートの力学特性とRCはり計算耐力

シリーズ	コンクリートの力学特性			RCはりの計算耐力	
	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)	曲げ耐力 (kN)	せん断耐力 (kN)
N	56	33.0	26.6	58.0	161.4
F	56	30.8	26.0	57.6	159.1

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が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：20～1000μs）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50μsとし、計測データのフィルタ処理は施さなかった。また、RCはりに発生したひび割れ状況を適宜観察した。

付録Aに、各ケースの計測器の詳細な配置図を示す。

3.2 結果および考察

(1) 静的荷重試験結果

図-16に、試験体N-SおよびF-Sの静的荷重時における荷重とはり中央変位の関係を示す。両者はほぼ同様な傾向を示し、荷重が約12kNの時点で曲げひび割れが発生した後、はり中央変位が約12mmの時点で引張鉄筋が降伏した。その後、圧縮側コンクリートの圧壊がいずれの場合もはり中央変位が約30mmの時点で確認された。曲げ耐力は、試験体N-Sでは約60kN、試験体F-Sでは約65kNとなり、両者にほとんど差異はなかった。また、表-6に示した計算曲げ耐力とほぼ等しかった。

(2) 繰返し衝撃荷重を受けるRCはりの破壊過程

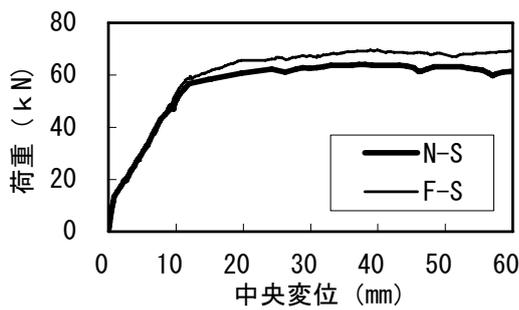


図-16 静的荷重試験時の荷重と変位の関係

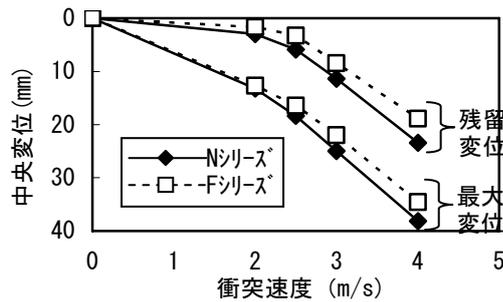


図-17 衝突速度とはり中央変位の関係
(衝突回数：1回目)

本実験のような重錘落下による繰返し衝撃荷重を受けるRCはりの破壊過程については既報¹²⁾で詳述されているが、おおよそ以下のとおりである。

衝突速度が2.5m/s以上、4.0m/s以下の場合、1回目の衝撃荷重により、RCはりには曲げ変形が卓越し、曲げひび割れが発生し、引張鉄筋は降伏する。その後、はり中央変位は最大となり、復元力の作用によりRCはり中央に負曲げが発生し、圧縮側コンクリートにもひび割れが発生する。その後重錘落下の繰返しによって、RCはりの変形は徐々に進行し、累積最大変位および累積残留変位は増加する。このとき、曲げひび割れは、その数および幅ともに増加し、中立軸位置が高くなり、圧縮側コンクリートの負担が増大する。この結果、圧縮側コンクリートは圧壊に至り、かぶりが剥離・剥落していく。これにより、圧縮力を伝達できなくなるため、RCはりは終局状態を迎える。

衝突速度が2.0m/sの場合には、1回目の衝撃荷重により、曲げひび割れは発生するものの、引張鉄筋は降伏しない。したがって、RCはりの変形の進行は緩やかとなり、圧縮側コンクリートの圧壊や終局状態に至るまでの繰返し荷重回数は多くなり、衝撃疲労のような挙動を示した。

本実験の結果、PVA短繊維補強コンクリートを用いたRCはりにおいても、ここで述べた破壊過程は同様のもので

表-7 破壊に至った繰返し荷重回数

	衝突速度 V (m/s)			
	2.0	2.5	3.0	4.0
試験体名	N-V2	N-V2.5	N-V3	N-V4
繰返し荷重回数	105	15	5	3
試験体名	F-V2	F-V2.5	F-V3	F-V4
繰返し荷重回数	590	25	9	3

あった。以下に、PVA短繊維補強コンクリートはりと通常のコンクリートはりの違いに着目して、検討を進める。

(3) 衝突速度と中央変位の関係

図-17に、衝突1回目（損傷が生じていないRCはりへの荷重）における衝突速度とはり中央変位の関係を示す。衝突速度が2.0、2.5、3.0および4.0m/sにおけるはり中央における最大変位は、Nシリーズでは、それぞれ13.3mm、18.4mm、25.0mm、38.2mm、Fシリーズでは、それぞれ12.7mm、16.4mm、22.0mm、34.6mmとなり、Fシリーズの発生変位量の方がNシリーズより10%程度小さくなった。これは、PVA短繊維がひび割れを架橋することで、曲げひび割れの進展を抑制したためと考えられる。このように、1回の衝撃荷重を受ける場合において、PVA短繊維混入による耐衝撃性向上効果を発生変位量の観点から確認できた。

(4) 衝突速度と繰返し荷重回数の関係

表-7に、各検討ケースにおける破壊に至るまでの繰返し荷重回数の一覧を示す。衝突速度が2.0m/sの比較的小さい衝撃荷重でも、衝撃を繰り返すことによって最終的に破壊に至ることがわかった。また、衝突速度が大きいほど、破壊までの繰返し荷重回数が急激に少なくなった。

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荷重回数はNシリーズと比べ、衝突速度が2.0m/sのとき5.6倍、2.5m/sのとき1.7倍、3.0m/sのとき1.8倍多くなり、PVA短繊維混入による耐衝撃性向上効果を破壊に至るまでの繰返し荷重回数の観点から確認できた。しかし、衝突速度が4.0m/sのケースでは、両シリーズとも3回で破壊に達し、衝突速度がある程度以上大きい場合にはPVA短繊維の効果が小さくなった。

(5) はり中央変位と繰返し荷重回数の関係

図-18に、代表的な検討ケースについて、繰返し荷重回数とはり中央の累積最大変位および累積残留変位の関係を示す。すべての検討ケースに対する結果については、

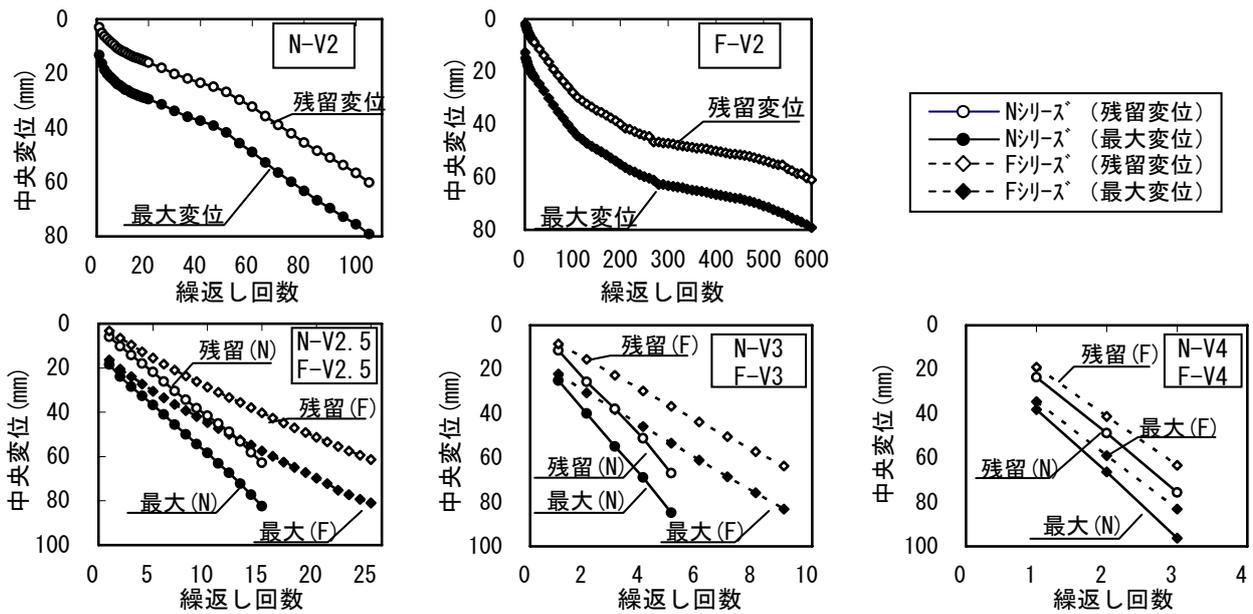


図-18 はり中央変位と繰返し载荷回数の関係

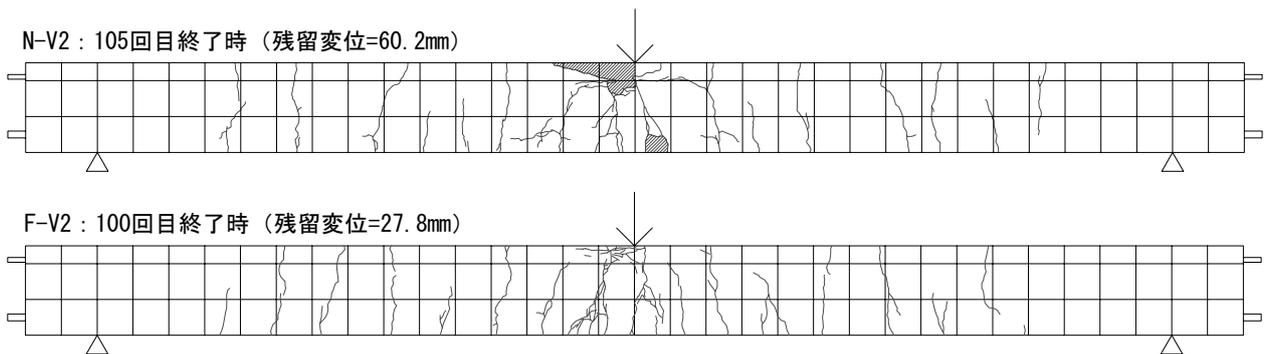


図-19 ひび割れ発生状況 (V=2.0m/s)

付録Cに示す。これらによれば、いずれの衝突速度においてもPVA短繊維を混入したRCはり、無混入のRCはりよりも繰返し载荷回数の増加に伴う累積残留変位の増加量が小さかった。

衝突速度が2.0m/sの場合、試験体N-V2およびF-V2ともはり中央変位は繰返し载荷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、再び変位の進展が加速する傾向となり、S字曲線を描いた。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が、この段階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・剥落も少なかったため、1回の衝撃

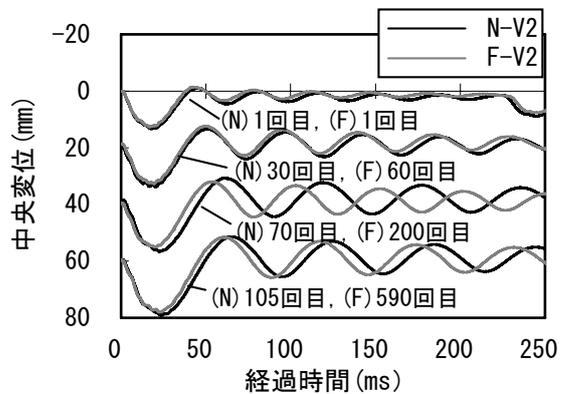


図-20 はり中央変位の時刻歴応答 (V=2.0m/s)

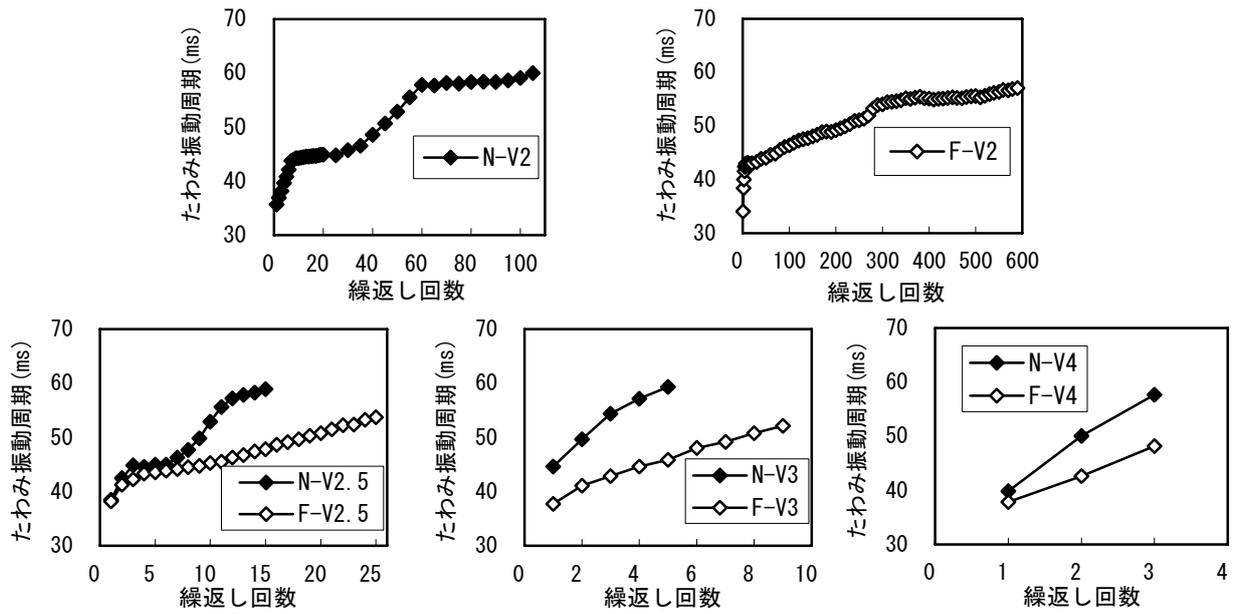


図-21 たわみ振動周期と繰返し载荷回数との関係

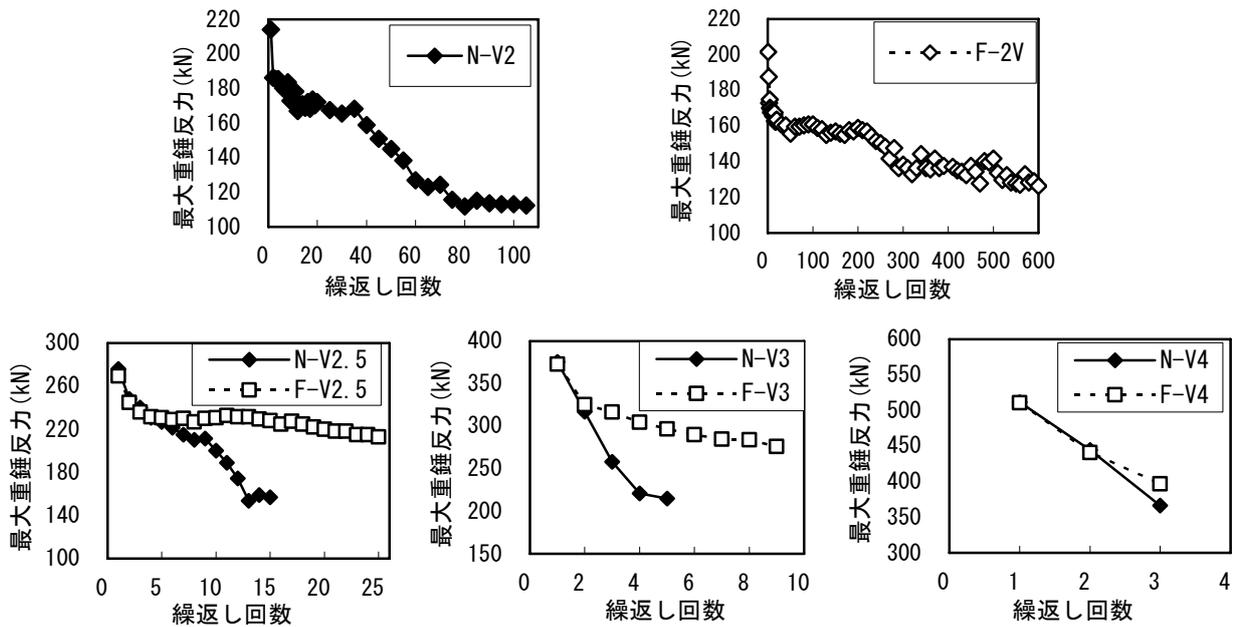


図-22 最大重錘反力と繰返し载荷回数との関係

荷重に対する残留変位の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の材料特性のひずみ速度依存性が変化し、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-19に、衝突速度が2.0m/sのケースのひび割れ発生状

況を示す。他の検討ケースに対するひび割れ発生状況については、付録Bに示す。

試験体N-V2については、試験終了時（繰返し载荷回数：105回）におけるひび割れ発生状況を、試験体F-V2については、N-V2の試験終了時とほぼ等しい繰返し载荷回数（100回）でのひび割れ発生状況を示している。両者とも

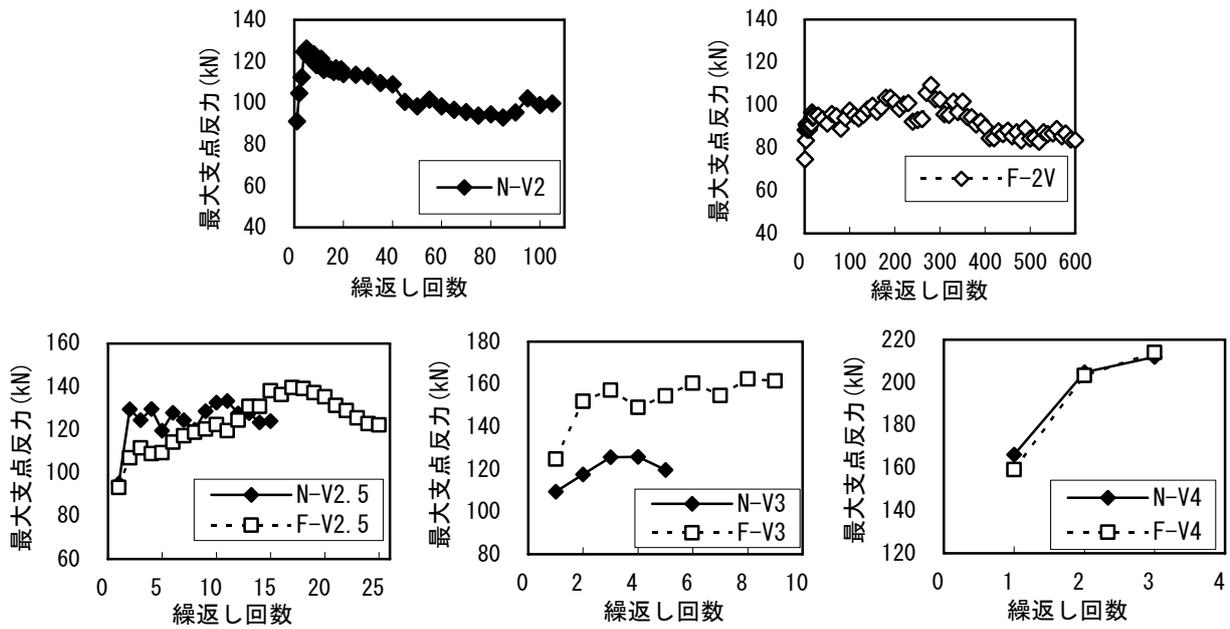


図-23 最大支点反力と繰返し载荷回数の関係

圧縮側コンクリートは圧壊に至っているが、N-V2では圧縮側かぶりコンクリートの剥離や下面コンクリートの剥離が見られた。しかし、F-V2では、PVA短繊維の効果によって、圧縮側コンクリートの剥離や下面コンクリートの剥離は認められなかった。PVA短繊維の効果は、引張側コンクリートでは、繊維の架橋効果によって、曲げひび割れの進展抑制や鉄筋の付着破壊抑制の形で、圧縮側コンクリートでは、圧壊後のかぶりコンクリートの剥離・剥落の抑制の形でもたらされていると推測される。その結果、RCはりの損傷の進行が抑制され、最大変位および残留変位の進展が緩やかになったものと考えられる。

(6) たわみ振動周期と繰返し载荷回数の関係

図-20に、試験体N-V2およびF-V2におけるはり中央変位の時刻歴応答の一例を示す。すべての検討ケースに対する結果は、付録Dに示す。これより、繰返し载荷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を示した。また、繰返し载荷回数が少ない段階（载荷前のはり中央変位：0mm、20mm）では両者の時刻歴応答はほぼ一致したが、载荷前のはり中央変位が40mm以上になると、試験体F-V2のたわみ振動周期の方が短くなった。

図-21に、各試験体について時刻歴応答から求めたたわみ振動周期と繰返し载荷回数の関係を示す。これより、衝突速度が2.0m/sと2.5m/sのケースにおけるたわみ振動周期は、繰返し载荷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、再び長くなる傾向を示した。また、いずれのケースにおいても終局時におけるたわみ振動周期はFシリーズの方が短くなった。これらの違いは、PVA短繊維の混入によって、ひび割れの進展や圧縮側コンクリートの剥離・剥落などによるRCはりの曲げ剛性の低下が緩やかとなり、はりの損傷進展過程が変化した結果を反映したものと考えられる。たわみ振動周期の違いから推察すると、PVA短繊維を混入したFシリーズでは、破壊に至っても部材の損傷レベルがNシリーズより低いと考えられる。

(7) 重錘反力・支点反力と繰返し载荷回数の関係

図-22と図-23に、最大重錘反力および最大支点反力と繰返し载荷回数の関係を示す。付録Eおよび付録Fに、すべての検討ケースに対する重錘反力と支点反力の時刻歴応答を示す。なお、ここでの支点反力は、1つの支点に2個ずつ配置した合計4個のロードセルによる計測値の合計値である。

図-22より、最大重錘反力は繰返し载荷回数が多くなると徐々に低下する傾向にあり、特に繰返し载荷回数が少ない段階での低下が著しかった。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シリーズでは破壊の進行に伴う重錘反力の低下がFシリーズよりも顕著であった。これは、(5)で述べたように、圧縮側コンクリートが著しく損傷し、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、最大

重錘反力の推移ははりの損傷進展過程を反映したのとなっており、たわみ振動周期の推移と同様に、PVA短繊維を混入した場合の曲げ剛性の低下抑制や繰返し衝撃荷重に対する抵抗性向上を確認できた。

一方、最大支点反力は繰返し载荷回数が少ない段階で一旦増加する傾向を示した後、衝突速度が3.0m/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した。このように、最大支点反力の推移は、はりの損傷状態や衝撃荷重に対する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の推移とは異なっていた。これは、重錘衝突位置と支点反力計測位置が離れていたため、応力の伝達に時間を要したこと、衝突後のはりの振動が支点反力の応答値に影響を与えたことなどによると考えられるが、今後さらなる検討が必要である。

4. まとめ

本研究では、PVA短繊維補強コンクリートの耐衝撃性を検討するため、要素レベルのコンクリート供試体の高速载荷実験および重錘落下によるRCはりの繰返し衝撃载荷実験を実施した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) PVA短繊維補強コンクリートにおいては、通常のコンクリートと同様に、力学特性のひずみ速度依存性が認められ、载荷速度が大きくなると強度は大きくなり、破壊時のひずみやたわみも大きくなった。
- (2) PVA短繊維補強コンクリートの割裂引張強度と曲げ強度は、PVA短繊維の混入率によらず载荷速度の増加による強度増加はほぼ同じ傾向を示したが、圧縮強度はPVA短繊維混入率が大きいほど増加割合が大きかった。
- (3) PVA短繊維を体積比で1.5%混入したRCはりは、衝突速度が3.0m/s以下の場合、1回の衝撃载荷による発生変位量が小さくなり、破壊に至るまでの繰返し载荷回数が多くなった。
- (4) PVA短繊維を混入したRCはりにおいては、曲げひび割れの進展が抑制されるだけでなく、圧縮側コンクリートの剥離・剥落が抑制されるため、はりの曲げ剛性の低下が緩やかとなった。これにより、繰返し衝撃荷重に対するRCはりの抵抗性が向上した。

5. あとがき

本研究において、PVA短繊維補強コンクリートの力学特性のひずみ速度依存性や、衝撃荷重を繰返し受けるRC

はりの耐衝撃性向上効果を把握することができた。PVA短繊維補強コンクリートの耐衝撃性は、荷重の作用速度が小さい場合にその効果が特に発揮されることが明らかとなったが、港湾構造物では低速度（およそ数m/s）の衝撃荷重を繰返し受けるという特徴があるため、PVA短繊維補強コンクリートの有用性は十分高いと思われる。

コンクリート部材の耐衝撃性向上のための方策としては、他にも部材厚の増大や鋼・コンクリート合成構造の採用など、様々なものが考えられる。これらによる耐衝撃性向上効果についても今後検討していく予定である。これらの検討を通じて、設計条件や施工条件などに応じて、いずれの耐衝撃性向上方策を採用するかを判断できる資料を提供していきたい。

さらに今後、港湾構造物の耐衝撃設計手法の確立に向けて、ケーソン壁を想定したRC版試験体の衝撃载荷実験や実際の波力を想定した面圧载荷衝撃実験、さらにはケーソン中詰材がRC部材の衝撃挙動に及ぼす影響の解明といった実構造物に即した検討を行う必要がある。

(2007年5月10日受付)

謝辞

本資料の一部は、(独)港湾空港技術研究所と(株)神戸製鋼所の共同研究「鋼・コンクリート合成構造物の耐衝撃性評価に関する共同研究」の成果としてとりまとめたものである。

また、本研究を実施するにあたり実験にご協力頂いた実習生の森田浩史君(当時 東京理科大学卒論生)に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 宮井真一郎, 大平勝司, 塩見雅樹: 被災防波堤集覧(その4), 港湾技研資料, No. 765, 1993
- 2) 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
- 3) 尼崎省二, 明石外世樹: 高強度コンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートの衝撃疲労強度に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 262, pp. 143-151, 1977
- 4) 伊藤始, 横田弘, 岩波光保: 短繊維補強コンクリートの港湾構造物への適用性評価に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 44, No. 2, pp. 3-38, 2005
- 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
- 6) 土木学会: コンクリートの力学特性に関する調査研

究報告, コンクリートライブラリー, No. 69, pp. 61-78,
1991

- 7) 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
- 8) 伊藤始, 岩波光保, 横田弘: 短繊維補強コンクリートの施工性に関する検討, 港湾空港技術研究所資料, No. 1087, 2004
- 9) 有川太郎, 織田朋哉, 黒田豊和, 下迫健一郎: 消波工によるケーソン壁面衝突力に関する大規模実験, 海岸工学論文集, Vol. 50, pp. 716-720, 2003
- 10) 林卓夫, 田中吉之助: 衝撃工学, 日刊工業新聞社, 1998
- 11) 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
- 12) 岩波光保, 白根勇二, 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破壊性状, 港湾空港技術研究所資料, 2007

付録 A 計測器配置

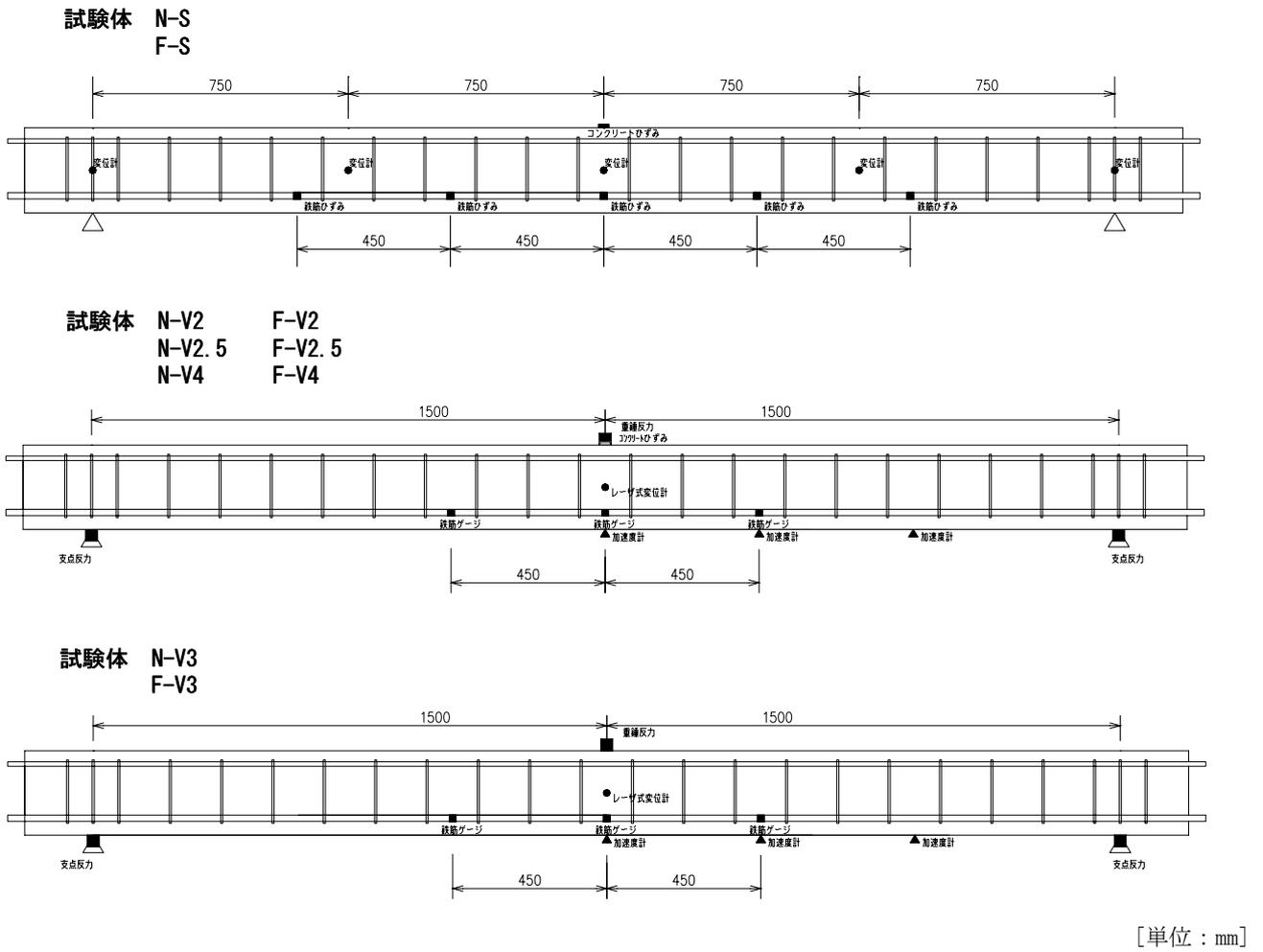


図-A.1 計測器配置

付録 B ひび割れ発生状況

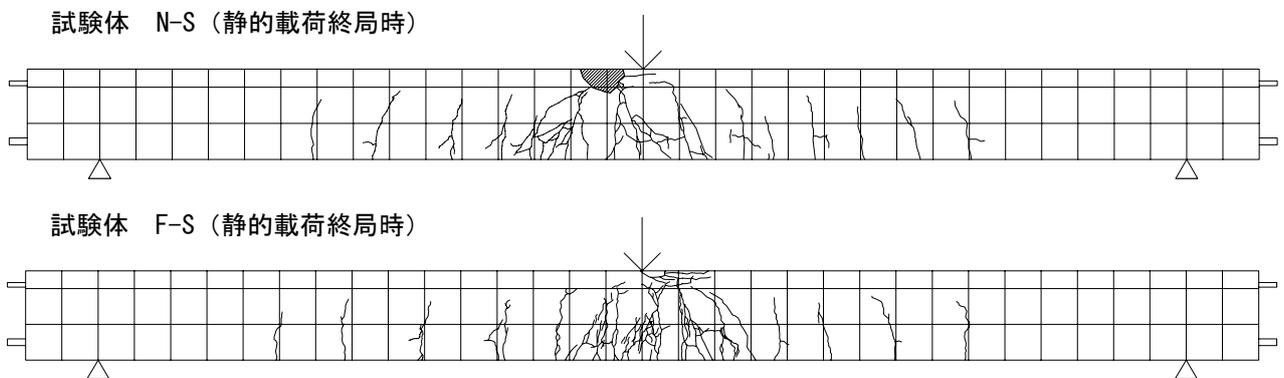


図-B.1 ひび割れ発生状況(1)

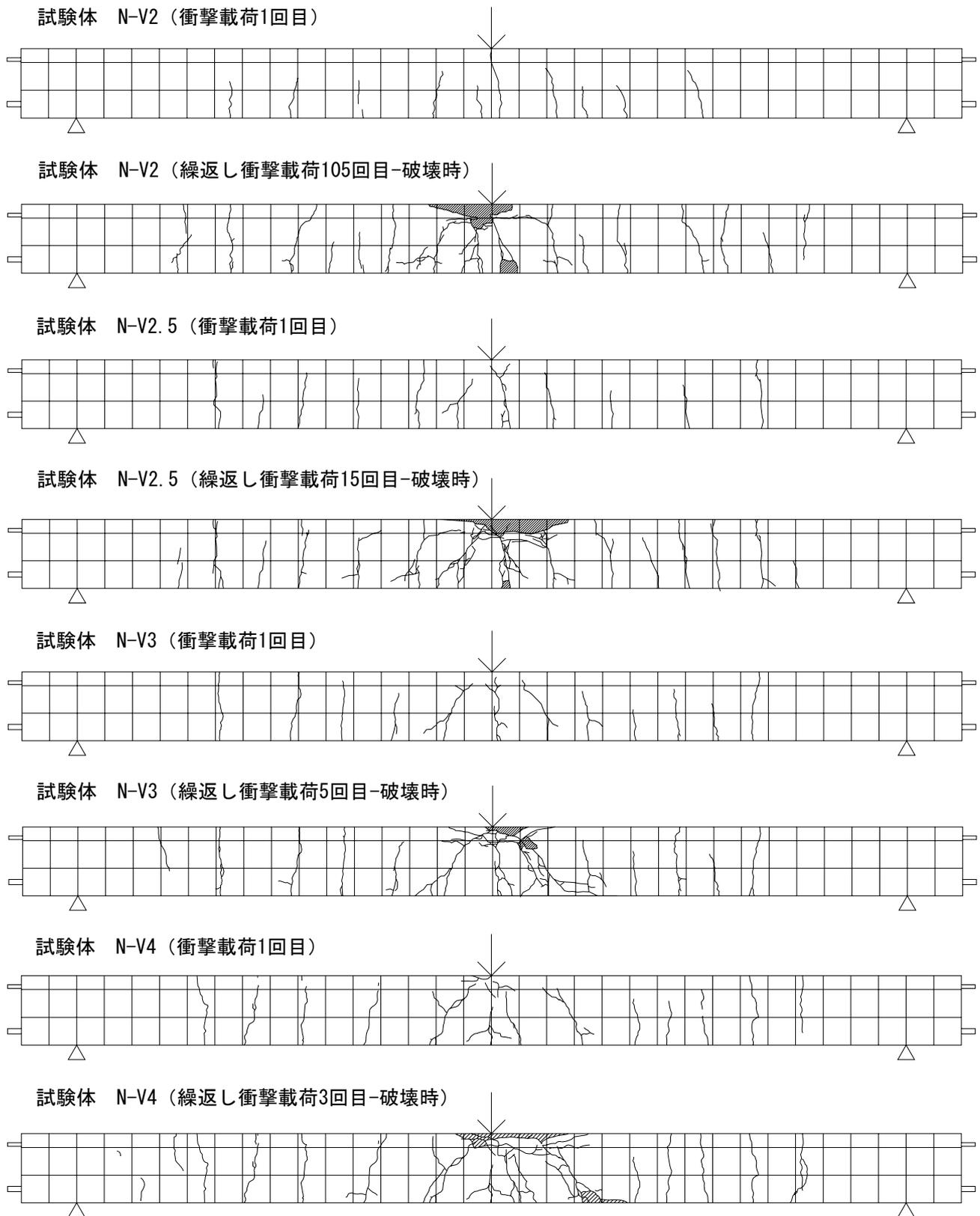


図-B.2 ひび割れ発生状況(2)

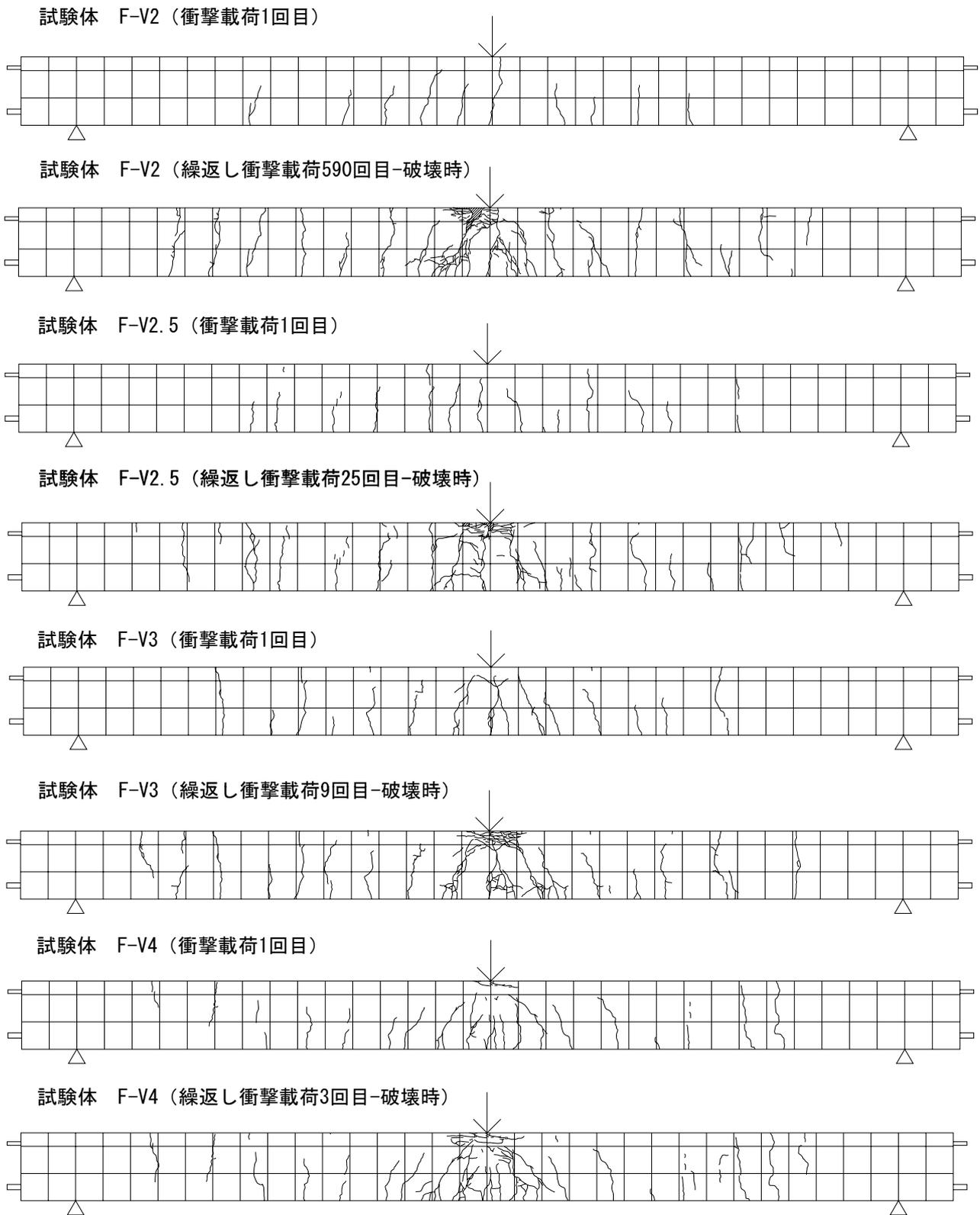


図-B.3 ひび割れ発生状況(3)

付録C はり中央変位と繰返し载荷回数との関係

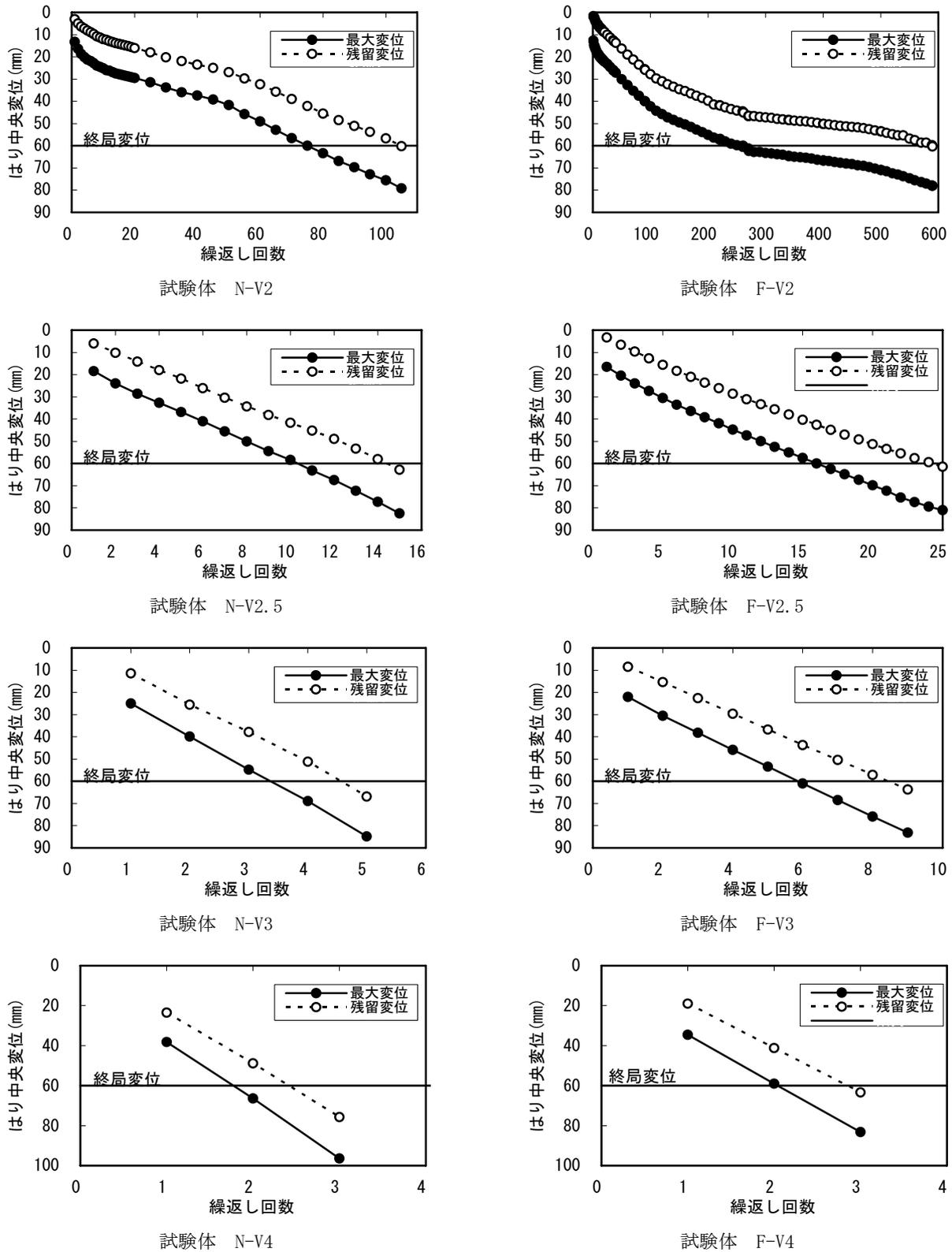
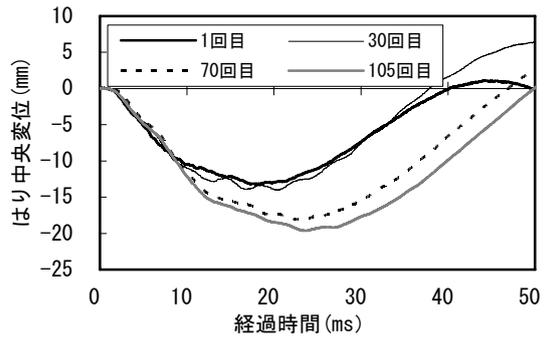
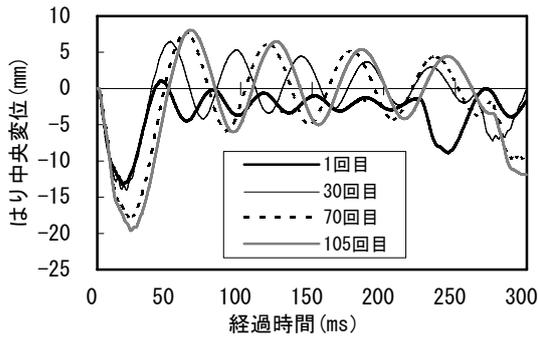
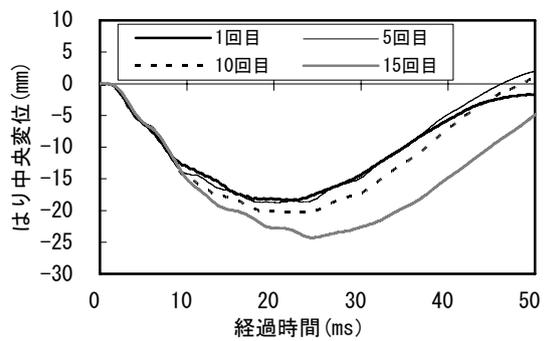
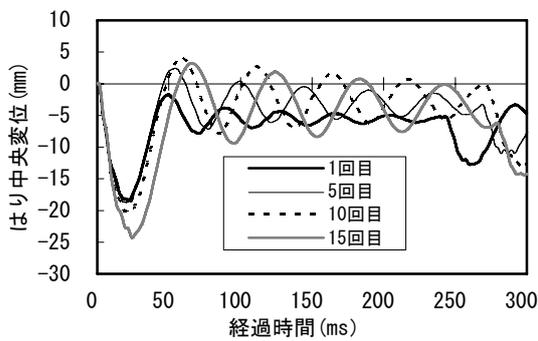


図-C.1 繰返し载荷回数とはり中央変位との関係

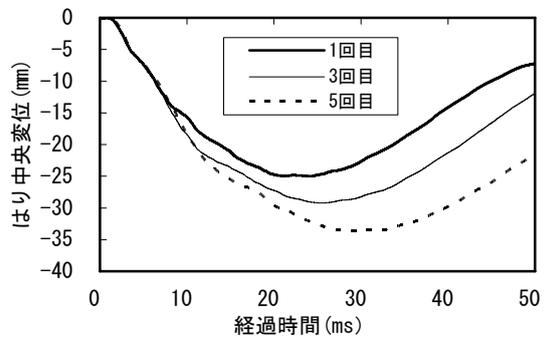
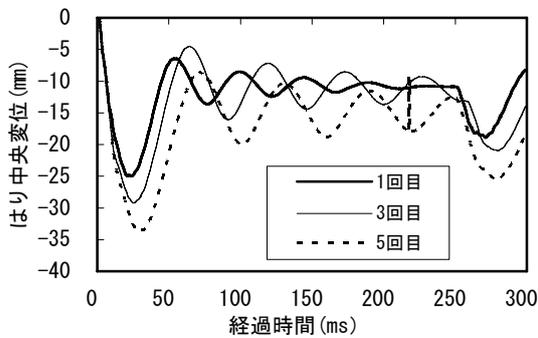
付録D はり中央変位時刻歴応答



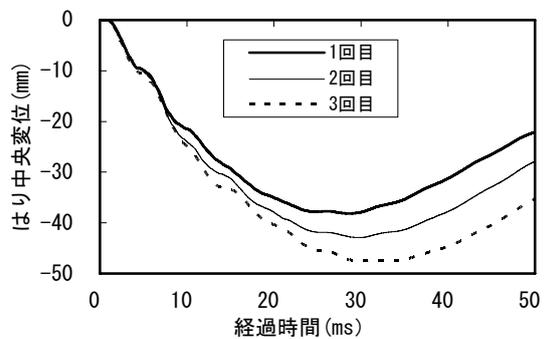
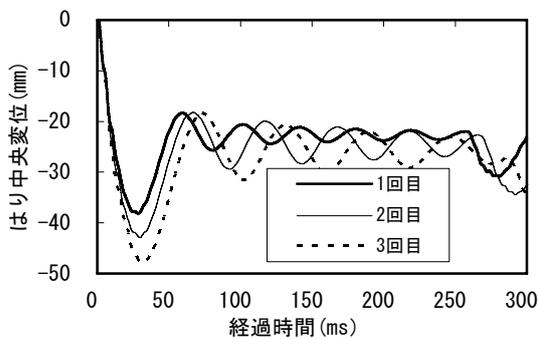
試験体 N-V2



試験体 N-V2.5

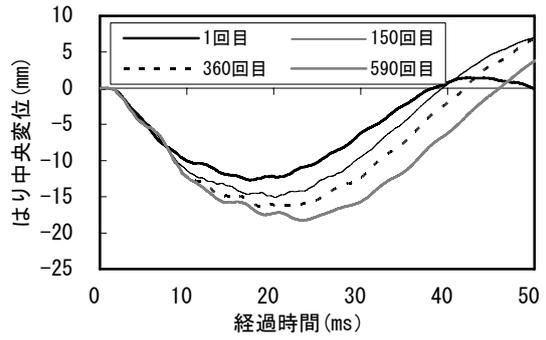
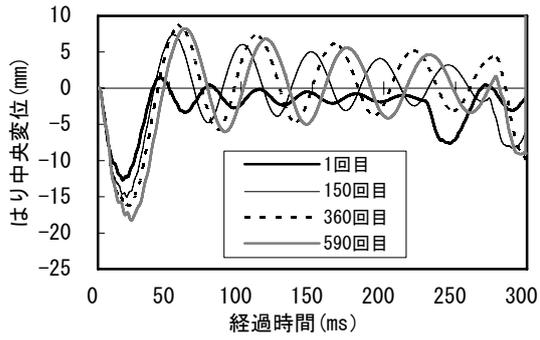


試験体 N-V3

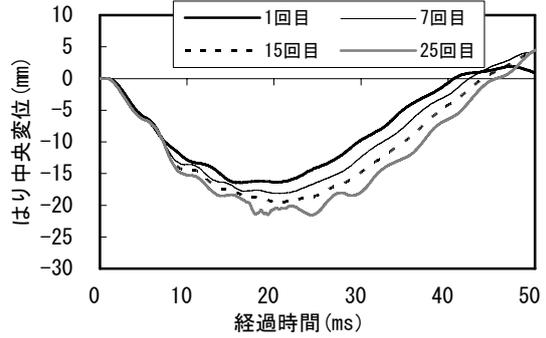
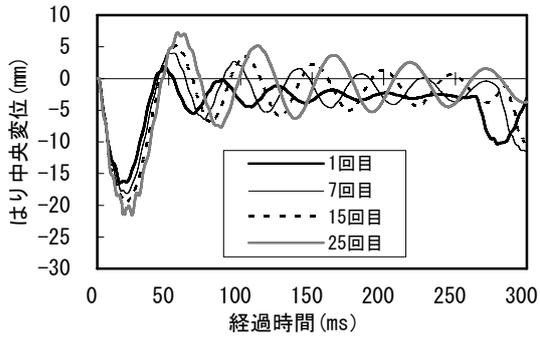


試験体 N-V4

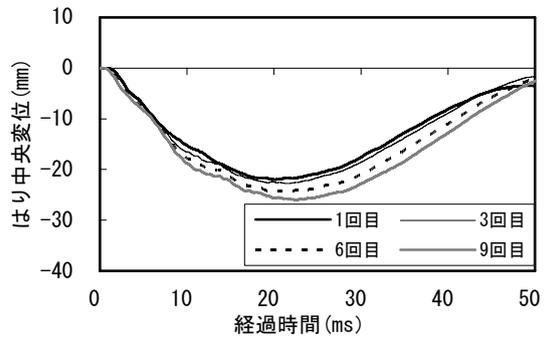
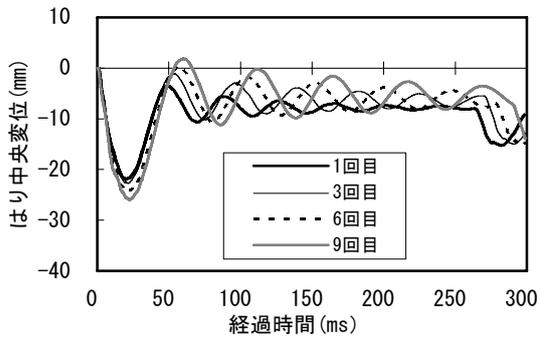
図-D.1 はり中央変位時刻歴応答(1)



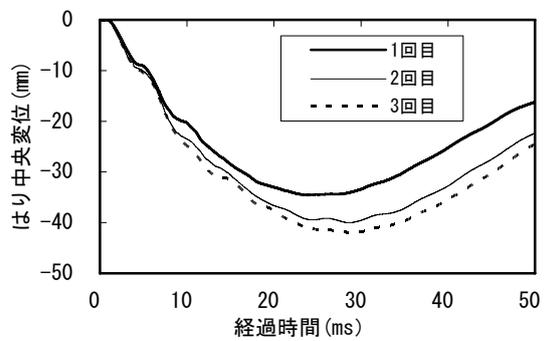
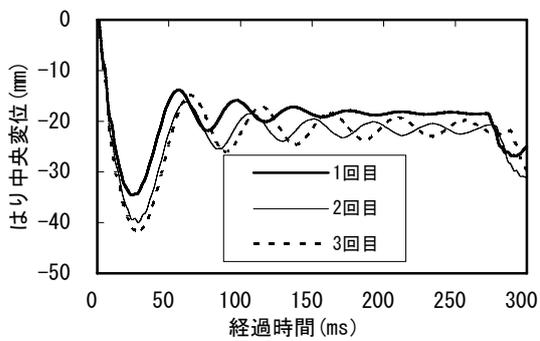
試験体 F-V2



試験体 F-V2.5



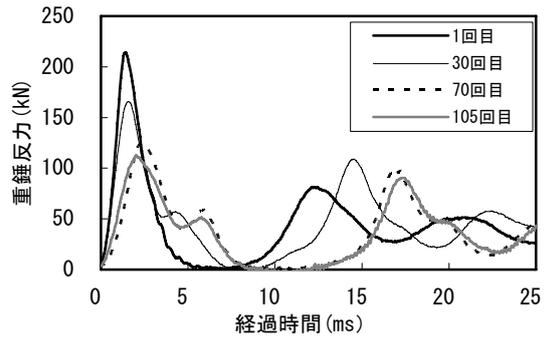
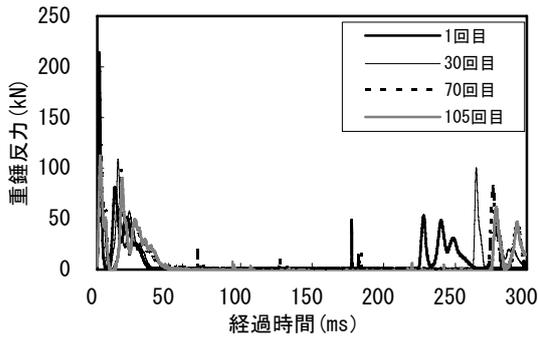
試験体 F-V3



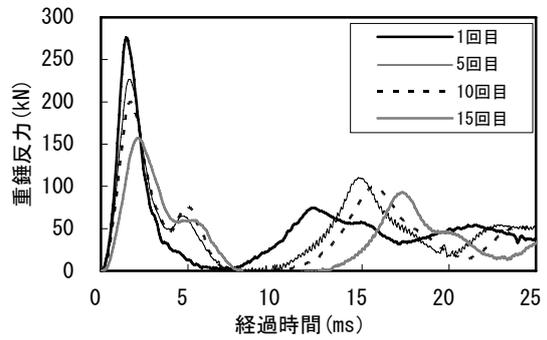
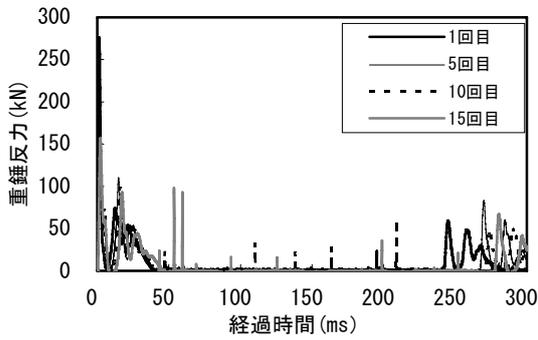
試験体 F-V4

図-D.2 はり中央変位時刻歴応答(2)

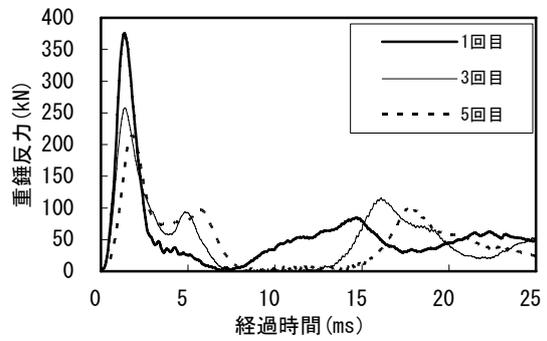
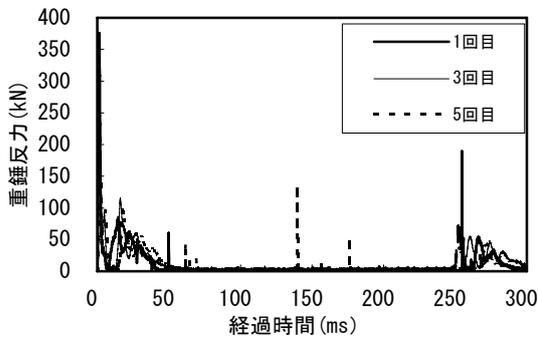
付録 E 重錘反力時刻歴応答



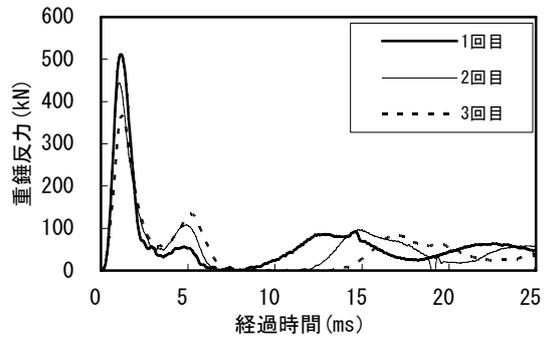
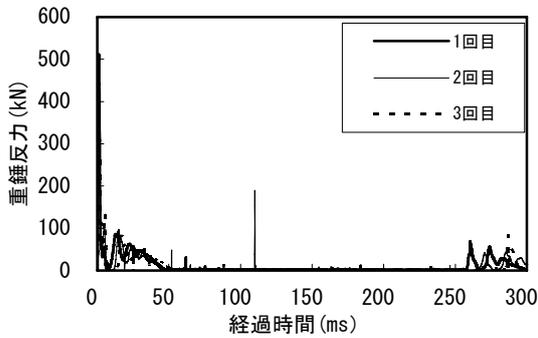
試験体 N-V2



試験体 N-V2.5

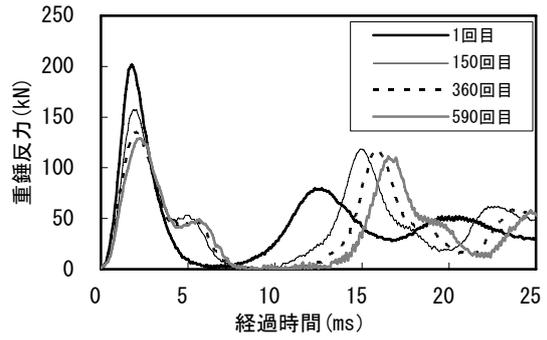
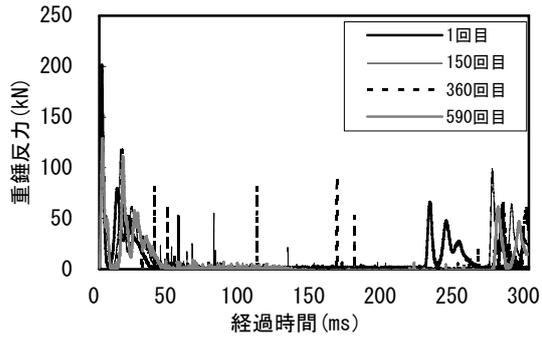


試験体 N-V3

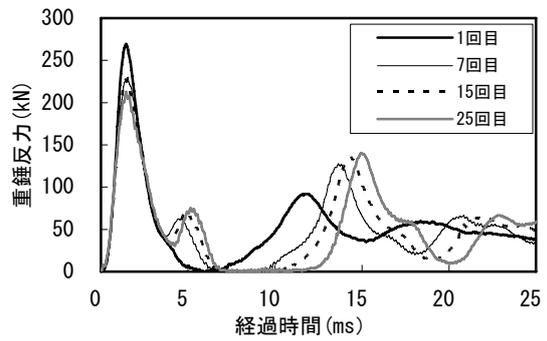
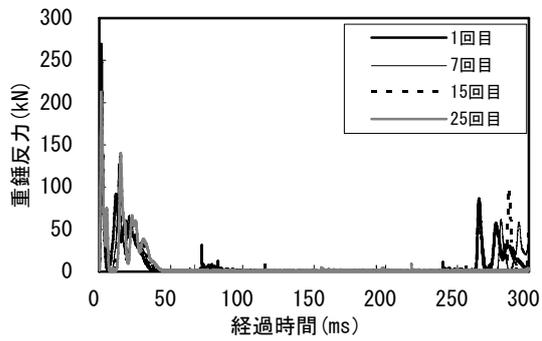


試験体 N-V4

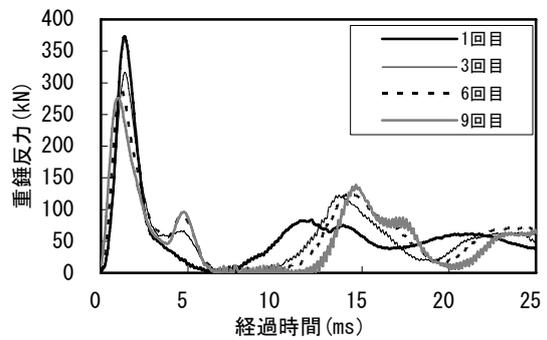
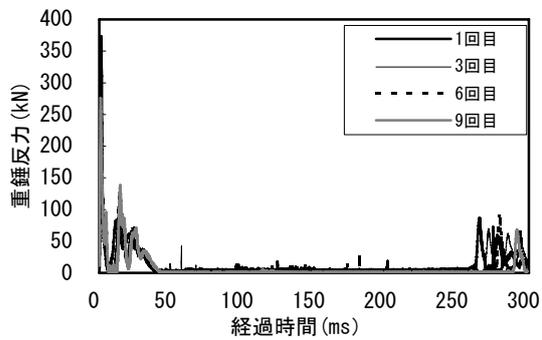
図-E.1 重錘反力時刻歴応答(1)



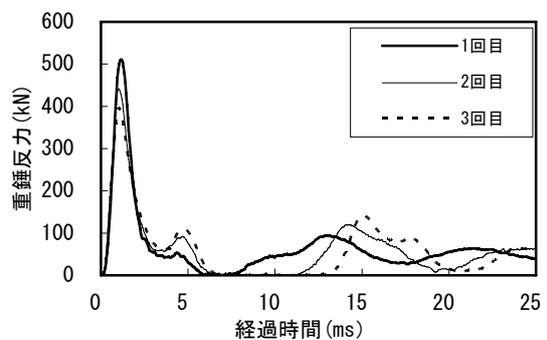
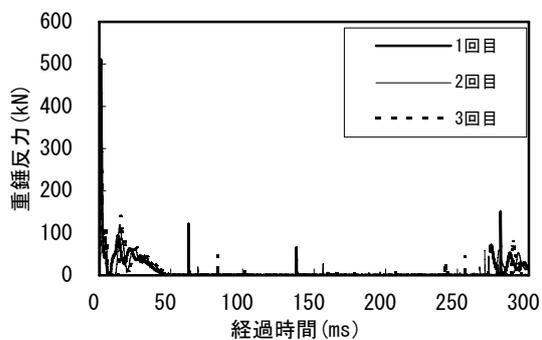
試験体 F-V2



試験体 F-V2.5



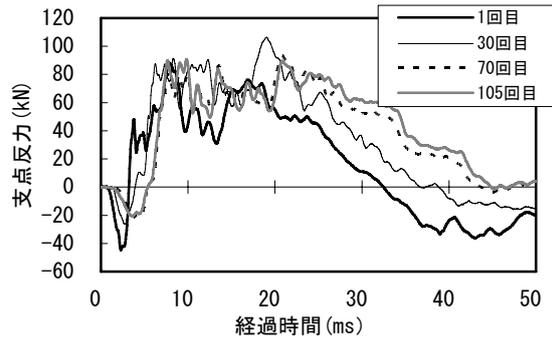
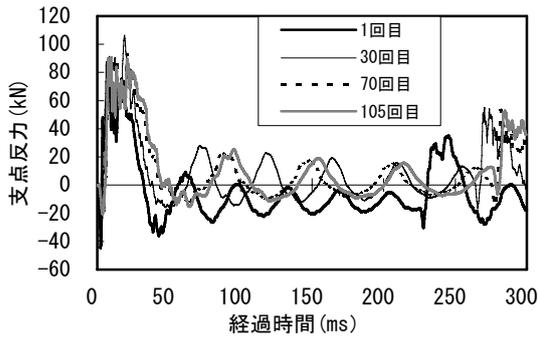
試験体 F-V3



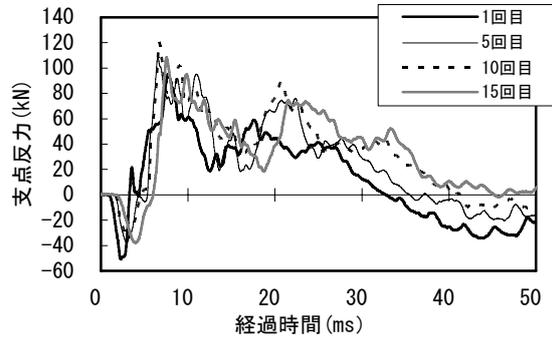
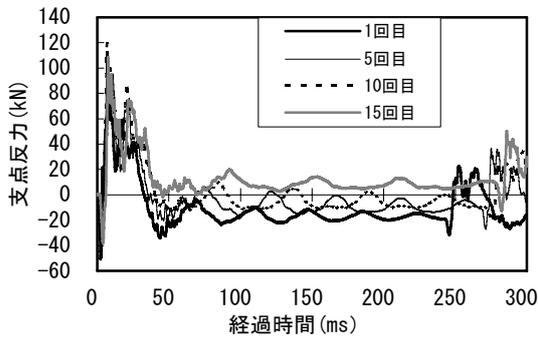
試験体 F-V4

図-E.2 重錘反力時刻歴応答(2)

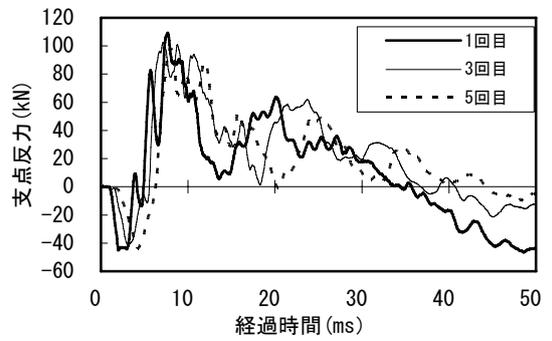
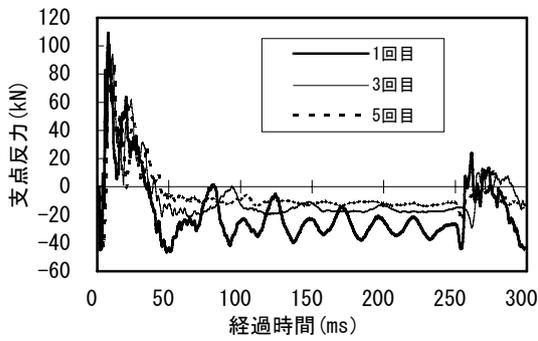
付録 F 支点反力時刻歴応答



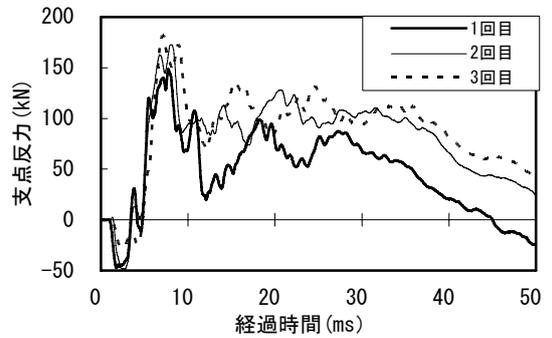
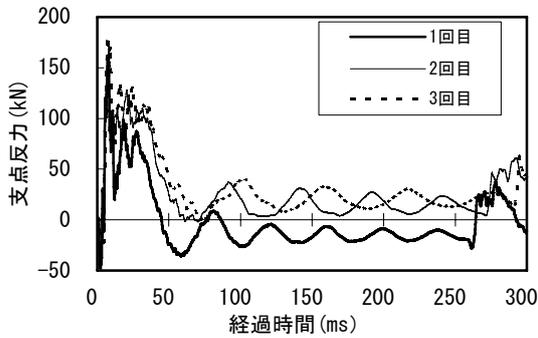
試験体 N-V2



試験体 N-V2.5

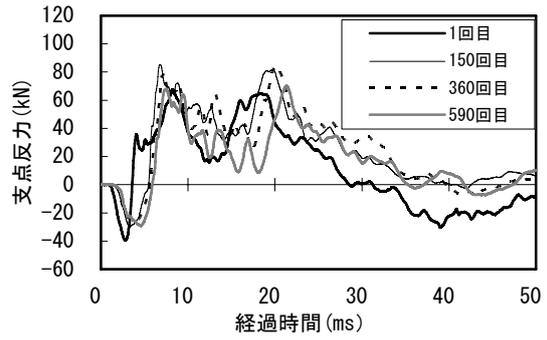
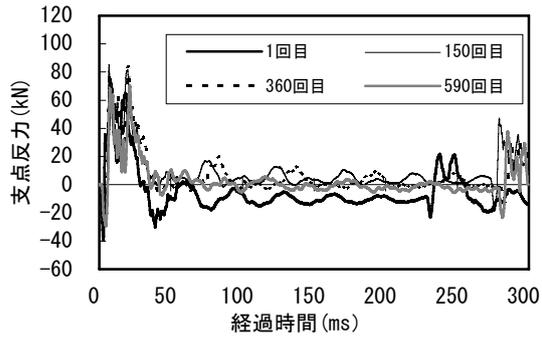


試験体 N-V3

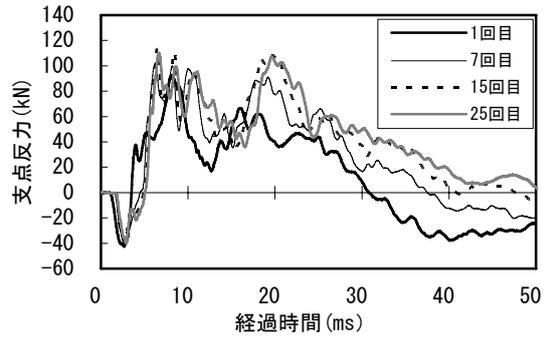
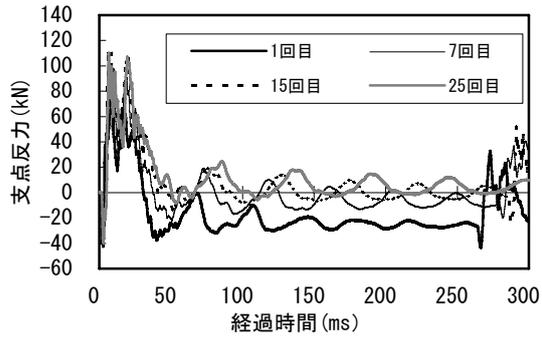


試験体 N-V4

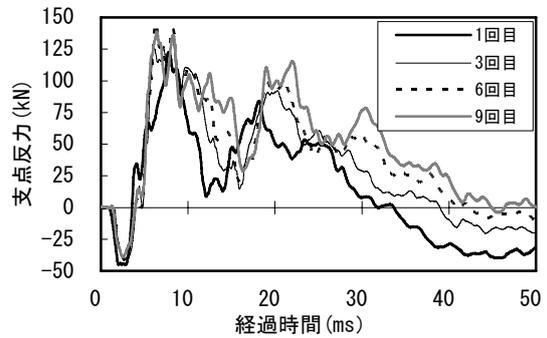
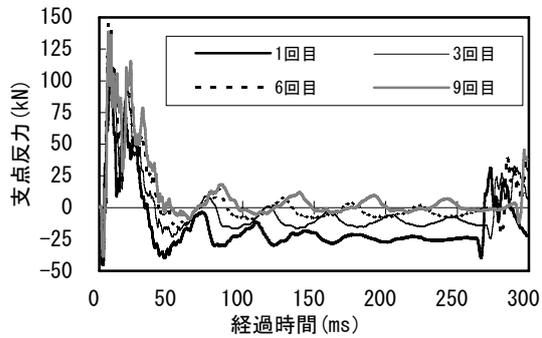
図-F.1 支点反力時刻歴応答(1)



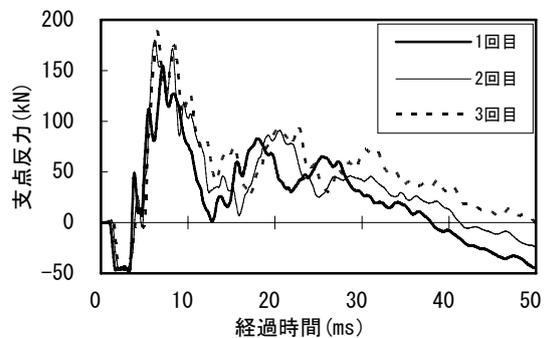
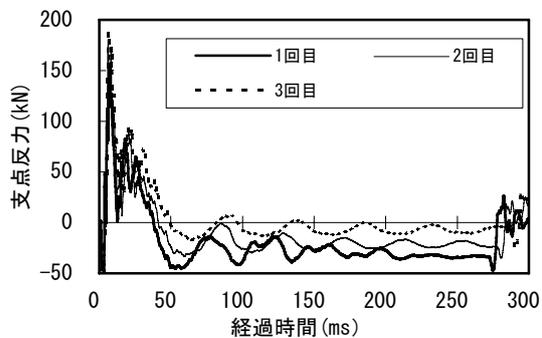
試験体 F-V2



試験体 F-V2.5



試験体 F-V3



試験体 F-V4

図-F.2 支点反力時刻歴応答(2)

