

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1152 June 2007

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

岩波 光保

白根 勇二

横田 弘

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. 実験概要	4
2.1 検討ケース	4
2.2 試験体概要	4
2.3 試験装置	6
2.4 計測概要	6
3. 実験結果および考察	6
3.1 衝撃载荷1回目のRCはりの挙動	6
3.2 繰返し衝撃荷重を受けるRCはりの挙動	14
4. 衝撃荷重作用時の応答値の算定	20
4.1 力学的エネルギー保存則による応答値の算定	20
4.2 エネルギー一定則による最大中央変位の補正	21
4.3 繰返し衝撃载荷への適用	22
5. 結論	22
6. あとがき	23
謝辞	23
参考文献	23
付録	24

Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams Subjected to Repeated Impact Loads

Mitsuyasu IWANAMI*

Yuji SHIRANE**

Hiroshi YOKOTA***

Synopsis

It is reported that huge impulsive forces are acting repeatedly on such port structures as breakwaters consisting of concrete caissons, resulting in ultimate failure of concrete members. In the present design of such concrete structures, impulsive forces, which have large variations with regard to time and space, are converted equivalently to simple distribution of static loads in order to compare to load carrying capacity of structures in static conditions. Therefore, it is one of the problems that scatters of impulsive forces and dynamic behaviors of structures are not taken into account. In this study, to establish an integrated design method of port concrete structures subjected to repeated impact loads, structural behaviors of reinforced concrete beams subjected to repeated impact loads were investigated through falling-weight impact loading tests.

In the tests, span length of beam, mass of falling weight and impact velocity were changed to investigate their influences on impact responses and failure mechanism of the beams, clarifying difference in structural behaviors with those in static loading conditions. Also, it was examined how the repeated impact loads affected dynamic responses of reaction forces at supporting points and deflection at mid-span of the beams. According to the mechanical energy conservation law and Newmark law of constant energy, it was possible to calculate accurately the maximum reaction force and the maximum and residual deflection during impact loading. This calculation method was confirmed applicable to the cases under repeated impact loading.

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

* Senior Researcher of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Trainee of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

*** Executive Researcher, Director General of LCM Research Center for Coastal Infrastructures

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

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

岩波 光保*
白根 勇二**
横田 弘***

要 旨

港湾構造物では、巨大な衝撃荷重が繰返し作用し、破壊に至った事例が報告されている。港湾構造物の衝撃荷重に対する現行設計では、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。したがって、繰返し衝撃荷重に対する設計法の確立が課題となっている。そこで本研究では、衝撃荷重を繰返し受ける RC はりの破壊挙動の把握を目的に、重錘落下による RC はりの繰返し衝撃実験を実施した。

実験では、RC はりのスパン長、重錘質量および衝突速度を変化させ、各応答値に及ぼす影響やひび割れ分布性状等を比較することにより衝撃破壊現象を把握し、静的荷重作用時の挙動との違いを明らかにした。また、重錘反力応答、支点反力応答および発生変位量が、破壊の進行とともにどのように推移するかについても検討した。さらに、力学的エネルギー保存則とエネルギー一定則によって、衝撃荷重を受ける RC はりの発生変位量および最大支点反力を精度良く算定でき、衝撃荷重が繰返し作用する場合にも適用できることを確認した。

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，重錘落下実験

* 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 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

〒239-0826 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り返し作用し、損傷に至った事例も報告されている¹⁾。例えば、消波ブロック被覆堤では消波ブロックがケーソン壁に繰り返し衝突し、コンクリートのひび割れやかぶりの剥落が発生することとどまらず、最終的に貫通孔に至る局部破壊が発生している。ケーソン壁の穴あき損傷は、中詰材の流出を招き、ケーソン重量を減少させるため、防波堤滑動に対する安定性も低下させる恐れがある。

防波堤の衝撃荷重に対する現行設計では、まずケーソン本体に大きな衝撃砕波力が発生しないようマウンド高やマウンド勾配等を決定することが前提となっている。しかし、ここで決定される構造物の形状は、主に防波堤の滑動や転倒に対する安定性の確保を目的としており、ケーソン壁の穴あき損傷のようなコンクリート部材の局部破壊を抑制するための設計ではない。また、部材の設計においても時間的、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²⁾、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。

一方、衝撃荷重を受けるコンクリート部材の挙動について、これまで多くの研究成果^{3), 4), 5), 6), 7)}があり、はり部材に関する設計法を提案している文献³⁾もある。しかし、その多くの研究は落石、飛行機の衝突、爆発等の荷重について検討したもので、荷重が作用する回数が極めて少ない構造物を対象にしている。したがって、衝撃荷重が繰り返し作用するコンクリート部材の破壊メカニズムや耐荷性状について不明確であり、これらを解明し、設計手法を確立することが課題となっている。

そこで本研究では、衝撃荷重が繰り返し作用したときの破壊性状を把握するため、試験条件の設定が簡便な鉄筋コンクリートはり（以下、RCはり）を用いて重錘落下によるRCはりの繰り返し衝撃実験を実施した。また、力学的エネルギー保存則とエネルギー一定則により衝撃荷重作用時の変位応答や荷重応答を算出する方法を提案し、実験値との比較によりその適用性について検討した。

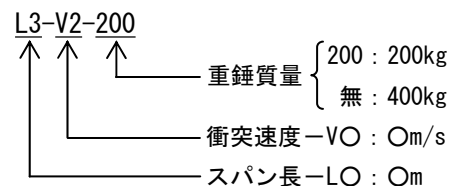
2. 実験概要

2.1 検討ケース

本研究では、衝撃荷重が繰り返し作用するRCはりの破

壊挙動を把握することを目的としており、RCはりの寸法、重錘の質量および衝突速度を変化させ、RCはりの破壊性状に与える影響について検討した。表-1に検討ケースを示す。RCはりの寸法に関わる条件として、スパン長を2m、3mおよび5mの3水準とし、衝撃荷重に関わる条件として、衝突速度を1m/s～7m/s、重錘質量を200kgまたは400kgとした。港湾構造物に発生する衝撃荷重の作用速度は一般的に数m/s程度と言われており⁷⁾、本実験で設定した衝突速度もこの作用速度を想定した。また、重錘質量と試験体の寸法はこの作用速度の衝撃荷重が数回作用したときに、RCはりが破壊に至ることを目標に決定した。なお、重錘質量が200kgのケースは、重錘質量400kgの各ケースと重錘衝突時の運動エネルギーが等しくなるよう衝突速度を設定した。載荷方法は、中央1点集中静的載荷のほか、損傷のない試験体に一度だけ重錘を落下させる載荷（以下、単一衝撃載荷）、同条件の衝撃荷重を試験体が破壊するまで与え続ける載荷（以下、繰り返し衝撃載荷）である。また、スパン長3mのはり試験体では単一衝撃載荷後に静的載荷を行い、静的残留耐力についても検討した。

なお、試験体名は以下のとおり定めた。



2.2 試験体概要

試験体の形状寸法および配筋を図-1に示す。試験体は全長が3.4mと5.4mの2種類のRCはりとし、スパン長が2mと3mの載荷実験では全長3.4mの試験体を、スパン長が5mの載荷実験では全長5.4mの試験体を使用した。試験体の断面性状は全て同一とし、幅250mm、高さ250mmである。いずれのスパン長の場合でも、静的載荷における最終的な破壊形式が曲げ破壊型となるように設計している。

表-2に使用したコンクリートの示方配合を示す。また、表-3にコンクリートの力学物性値、RCはりの計算曲げ耐力および計算せん断耐力を示す。今回の実験実施時期はコンクリート材齢52日以降であり、養生期間は十分で、試験材齢の違いがコンクリート強度等に及ぼす影響はないものと判断した。

図-2に、試験体① (L3-St) に対する静的載荷時の荷重と変位の関係を示す。スパン中央の変位が約12mmに達し、荷重が約57kNとなったとき、引張鉄筋の降伏が認められた。その後、約64kNまで荷重が上がり、スパン中央変位が約30mmに達した時点で、圧縮縁コンクリートの破壊が

確認された。

表-1 検討ケース一覧

試験体名	スパン長L (m)	重錘質量W (kg)	衝突速度V (m/s)	載荷方法		備考		
				単一衝撃	繰返し衝撃			
① L3-St	3.0	-	-			中央1点集中静的載荷		
② L2-V2.5	2.0	400	2.50		○			
③ L2-V3			3.00		○			
④ L2-V4			4.00		○			
⑤ L3-V1	3.0	400	1.00	○				
⑥ L3-V2			2.00	○	○			
⑦ L3-V2.5			2.50		○			
⑧ L3-V3			3.00	○	○			
⑨ L3-V4			4.00	○	○			
⑩ L3-V5.5			5.50	○				
⑪ L3-V7			7.00	○				
⑫ L3-V2.8-200	200	200	2.83		○	⑥と入力エネルギーが等しい。		
⑬ L3-V3.5-200			3.54		○	⑦と入力エネルギーが等しい。		
⑭ L3-V4.2-200			4.24		○	⑧と入力エネルギーが等しい。		
⑮ L5-V2			5.0	400	2.00	○		
⑯ L5-V2.5	2.50				○			
⑰ L5-V3	3.00				○			
⑱ L5-V4	4.00				○			
⑲ L5-V3.5-200	200	200			3.54		○	⑯と入力エネルギーが等しい。
⑳ L5-V5.7-200					5.66		○	⑱と入力エネルギーが等しい。

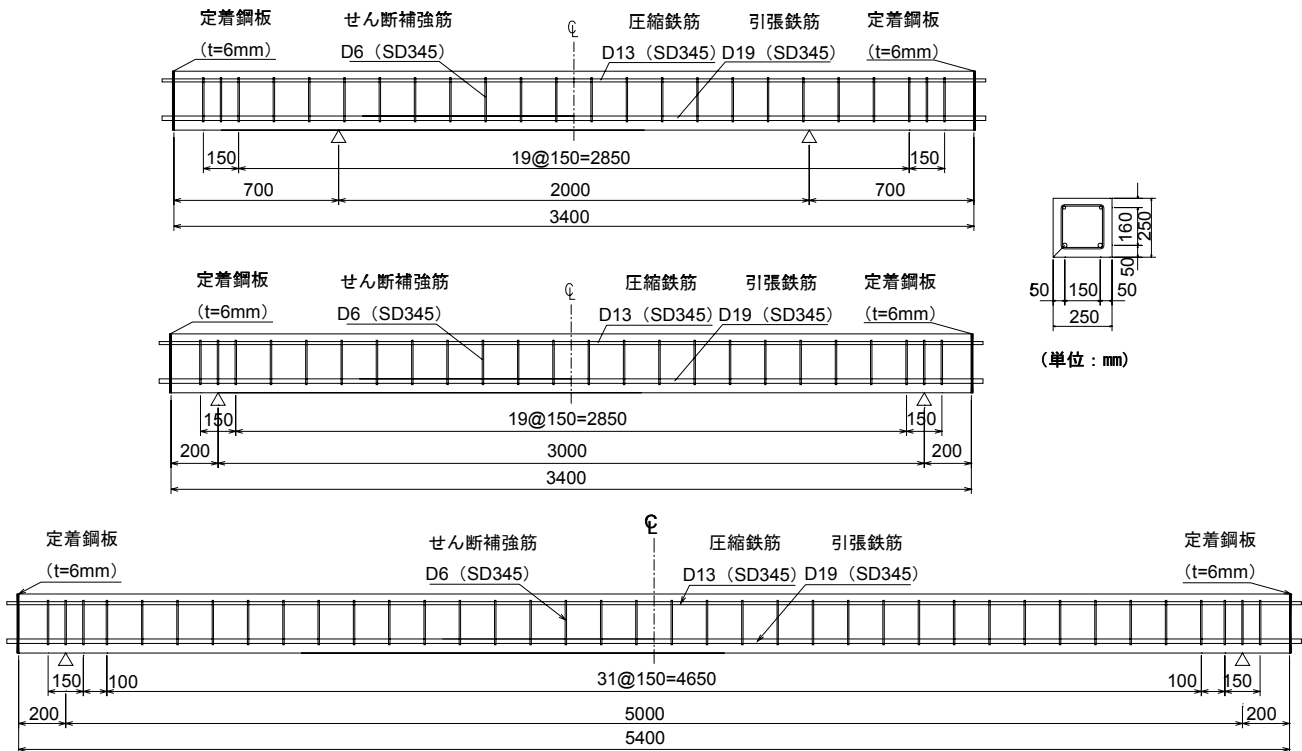


図-1 試験体形状（上段：スパン長2m，中段：同3m，下段：同5m）

表-2 コンクリートの示方配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	粗骨材最大寸法 G _{max} (mm)	スランプリング (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad
54.9	45.6	20	18	4.5	178	325	807	991	3.46

表-3 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)	スパン長 (m)	計算曲げ耐力 (kN)	計算せん断耐力 (kN)
56	33.0	2.66×10 ⁴	2	87.0	161.4
			3	58.0	161.4
			5	34.8	161.4

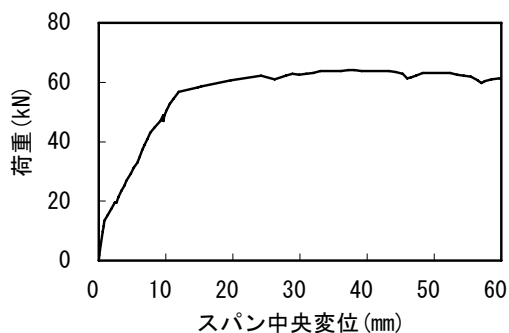


図-2 静的載荷時の荷重変位曲線
(試験体①L3-St)

2.3 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、所定の高さまでチェンブロックで重錘を引き上げ、重錘を吊っているフックをロープにより解除し、重錘を自由落下させるものである。本装置では、重錘の落下高さに対して理論値どおりの衝突速度が発生し、空気抵抗、ガイドレールの摩擦等によるエネルギー損失がないことを予備実験により確認している。

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、支点到に跳ね上がり防止治具を

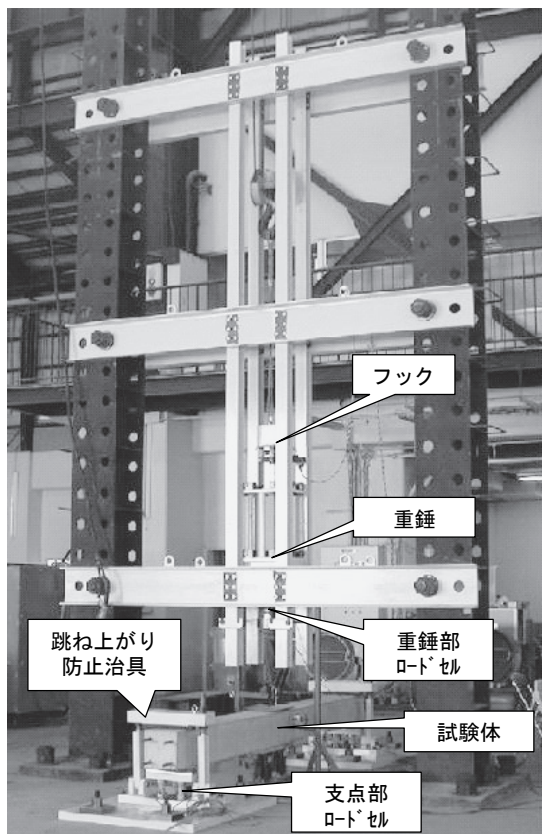


写真-1 試験装置外観

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、繰返し衝撃载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。なお、ゴムシートを使用した場合(厚さ10mm)、使用しない場合と比べて最大重錘反力が小さくなるとともに応答時間が長くなり、応答値のばらつきが少なくなることを予備実験で確認している。

本実験における試験体の破壊は、既往の研究³⁾を参考に、スパン中央の累積残留変位がスパン長の2%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。

2.4 計測概要

主な計測項目は、衝撃荷重作用時に重錘部と支点到に発生する反力とはり中央鉛直変位で、これらの計測項目は全ての試験体で計測した。反力の計測には、重錘部に組み込まれたひずみゲージ式ロードセル(容量2MN)と、支点到に組み込まれたひずみゲージ式ロードセル(容量500kN、支点到片側2点ずつ)を使用し、本報では計測された反力をそれぞれ重錘反力および支点到反力と呼ぶことにする。はり中央鉛直変位の計測には非接触型レーザ式変位計(最大計測レンジ750mm、サンプリング周期20~1000μs)を使用した。

また、計測点数の制約のため試験体によって異なるが、上記計測項目以外に、はり下面における加速度、引張鉄筋ひずみ、コンクリートひずみ、重錘の高さを計測した。各試験体の計測項目および計測位置は付録Aに示す。

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していない。また、試験体に発生したひび割れ状況も適宜観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 衝撃载荷1回目のRCはりの挙動

(1) 重錘とRCはりの運動過程

衝撃荷重を受ける部材は、極めて短時間で衝撃荷重が作用し、応力波の発生や振動を伴う変形をするため、荷重応答や変位応答は非常に複雑な挙動となり、静的荷重下における応答とは全く異なる性状を示す。したがって、衝撃実験の実施およびデータ整理にあたり、衝突体と被衝突体が時間の経過とともに、どのように挙動している

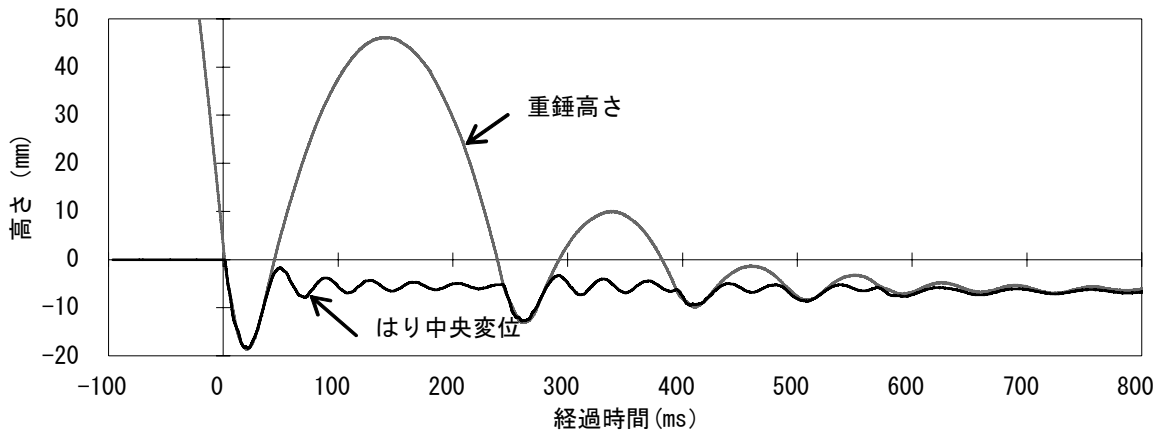


図-3 衝撃荷重用時の重錘高さとはりの変形挙動

か把握しなければ、計測で得られた各応答値を理解することはできない。このため、まず本研究で実施した代表的なケースを取り上げ、衝撃荷重用時の各応答値を時系列で整理し、重錘とRCはりの運動を図解する。

図-3に、試験体⑦L3-V2.5の衝撃载荷1回目における重錘の高さとはり中央変位を時刻歴応答で示す。なお、基準高さははり上面で、経過時間0msを重錘とはりの衝突時刻としており、両者の挙動を容易に把握できるようにするため、図-3中には衝突位置のゴムシート厚さ（10mm）を省いて重錘高さを表示した。図-3より、重錘ははりに衝突した直後、はり中央部の変形にほぼ追従して下降するが、はりの変位が一旦復元するとき、その勢いで重錘を上方へ飛ばし（ $t=40\text{ms}$ ）、重錘が宙に浮いている間、はりは減衰しながらも自由振動していることがわかる。再び重錘がはり上面に落下すると（ $t=240\text{ms}$ ）、はりは再び曲げ変形し、上述の動きを繰り返す。最終的にはりが静止するまでに重錘は数回落下する。

図-4に、同試験体の重錘衝突後50msまでの重錘の高さ、はり中央変位の時刻歴応答を示す。また、重錘の高さからはりの変形を差し引いて求めたゴムシートの厚さの変化についても図示した。同様に同時間における重錘反力と支点反力の時刻歴応答を図-5に、重錘の落下速度とはりの変形速度の時刻歴応答を図-6に示す。また、表-4に各段階における重錘とはりの位置、速度および反力応答の関係を示す。

図-5より、重錘反力は衝突1.5ms後に最大値に達し、極めて短時間で衝撃荷重が作用していることが確認できる。しかし、図-4よりはりはこの時点でまだほとんど変形せず、ゴムシートの変形だけが進み、図-5より支点反力も応答していないことがわかる（表-4中の②を参照）。

はりの変形は、重錘反力が最大値に達した1.5msからようやく始まる。はりが変形を始めると、重錘反力は減少

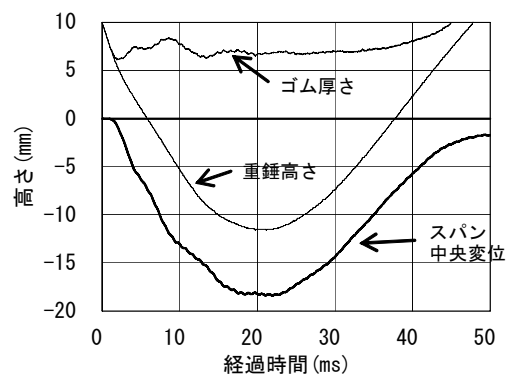


図-4 重錘高さとはりの変形挙動

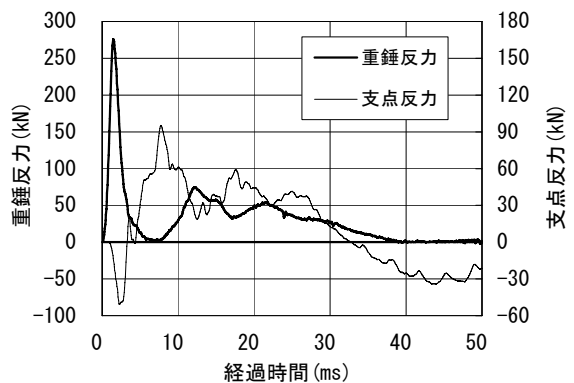


図-5 重錘反力と支点反力の時刻歴応答

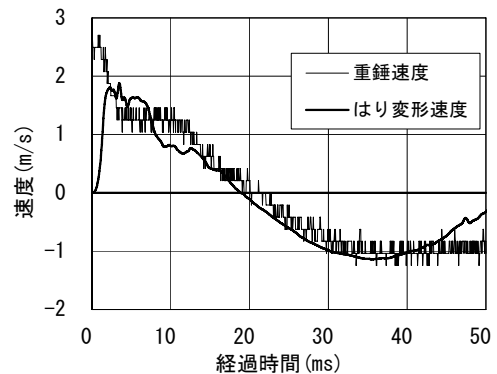


図-6 重錘速度とはりの変形速度の時刻歴応答

し、7msで一旦ゼロまで低下する。これは同時刻におけるゴムシート厚さの復元（図-4）や、はりの変形速度が重錘速度よりも大きくなっていること（図-6）から推察できるように、重錘の衝突によってはりが下方に突き飛ばされ、両者が離れて運動しているためである。また、支点

反力ははり変形開始時に負の値を示している（図-5）が、これは重錘の衝突によって支点近傍に上向きの慣性力が作用したためである（表-4中の③を参照）。

7ms以降、重錘反力は再び大きくなる（図-5）が、これははりの復元力によってはりの変形速度が減少し、重錘がはり上面に再び接触したためである。このとき、支点近傍に慣性力が再び作用し、支点反力が減少している（表-4中の⑤を参照）。

はりは20msで最大変位に達した後、はりの復元作用により重錘を押し上げるが、その勢いで重錘は上方へ飛ばされ（ $t=40ms$ ）、はりから離れる（図-4）。载荷条件によって異なるが、RCはりが弾性範囲内の変形であれば、はり復元時の変形は負曲げ状態となり、上面側に曲げひび割れを発生することもある（表-4中の⑧を参照）。

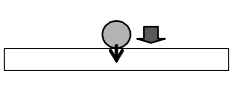
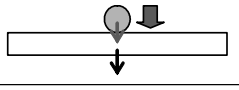
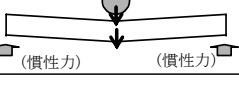
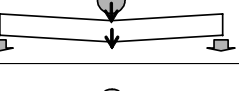
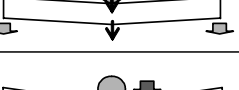
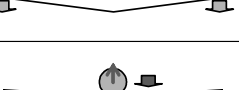
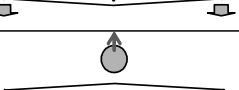
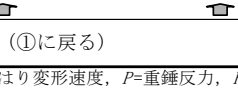
なお、衝撃荷重作用時のはりの挙動は、衝突速度、重錘質量、RCはりの剛性、スパン長、ゴムシートの有無等の影響を大きく受けると考えられる。したがって、ここで示した挙動は限られた実験条件下での一例であるため、全ての衝撃挙動において同様でないことに注意を要する。

(2) ひび割れ分布

図-7に、衝撃载荷1回目のひび割れ分布の一例として、試験体①L3-St、試験体⑥L3-V2および試験体⑩L3-V5.5について示す。静的载荷時のひび割れ分布状況はスパン中央の最大変位がスパン長の2%（60mm）に達した時点について示している。また、その他の試験体のひび割れ分布状況は付録Bに示す。

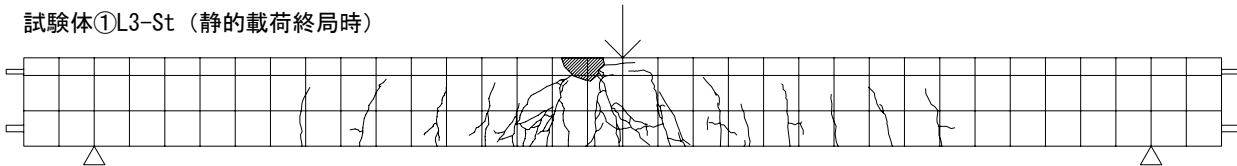
試験体⑥L3-V2（衝突速度2m/s）はスパン中央の最大変位が13.3mmとなり、静的载荷時に発生する曲げひび割れと同様のひび割れ分布を示したが、载荷点のひび割れは

表-4 重錘とはりの運動過程（試験体⑦L3-V2.5）

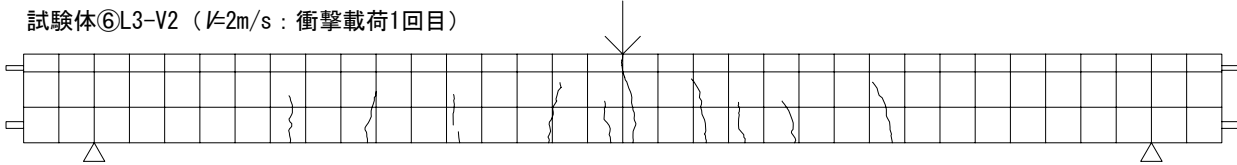
①	重錘衝突時		$v_1 > v_2 = 0$ $P > 0$ $R = 0$
②	重錘反力最大時		$v_1 = v_2$ $P = P_{max}$ $R = 0$
③	はり変形開始直後 (慣性力作用)		$v_2 > v_1 > 0$ $P = 0$ $R < 0$
④	はり変形途中 (慣性力消失)		$v_2 > v_1 > 0$ $P = 0$ $R > 0$
⑤	はり変形途中 (重錘再接触)		$v_1 \approx v_2 > 0$ $P > 0$ $R > 0$
⑥	中央変位最大時		$v_1 = v_2 = 0$ $P > 0$ $R > 0$
⑦	はり復元		$v_1 \approx v_2 < 0$ $P > 0$ $R > 0$
⑧	復元変位最大時		$v_1 < 0 = v_2$ $P = 0$ $R < 0$
⑨	自由振動後、再衝突（①に戻る）		

v_1 : 重錘落下速度, v_2 : はり変形速度, P = 重錘反力, R : 支点反力

試験体①L3-St（静的载荷終局時）



試験体⑥L3-V2（ $V=2m/s$: 衝撃载荷1回目）



試験体⑩L3-V5.5（ $V=5.5m/s$: 衝撃载荷1回目）

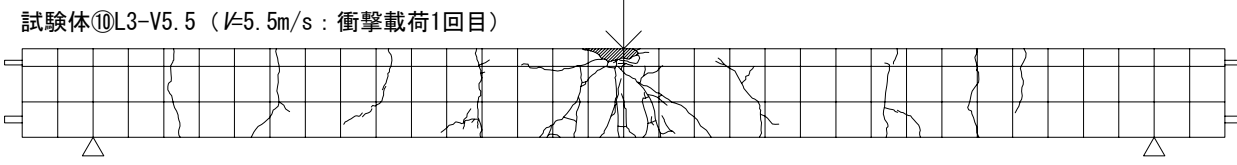


図-7 ひび割れ分布状況（上段：①L3-St，中段：⑥L3-V2，下段：⑩L3-V5.5）

圧縮縁まで到達し、断面を一周していた。これは、はりが復元したときに負曲げ状態となり、上面側にも曲げひび割れが発生したためと考えられる。

試験体⑩L3-V5.5（衝突速度5.5m/s）はスパン中央の最大変位が69.8mmとなり、静的荷重時や衝突速度2m/sのときと異なるひび割れ状況を示し、押抜きせん断破壊時に発生するような斜め方向のひび割れがはり下面から荷重点に向かって発生した。斜め方向のひび割れはせん断スパンの中間にも発生しており、衝突速度5.5m/sの衝撃荷重ではRCはりの応力分布が静的荷重下と異なっていることが推察できる。また、全体的にはり上面側のひび割れを確認できる。このひび割れ発生原因についての考察は、3.1(5)で後述する。

また、今回の実験条件下では、スパン長や重錘質量が異なるケースでも上記と同様のひび割れが発生することを確認した（付録B）。荷重速度が小さいときは静的荷重下と同様のひび割れ分布となるが、荷重点上面に負曲げひび割れが発生した。荷重速度が大きくなると、はり下面から荷重点に向かう斜め方向のひび割れや、せん断スパン内のはり上面に負曲げによるひび割れが発生した。

(3) 重錘反力応答

図-8に、重錘質量を400kgとした試験体（合計17体）と200kgとした試験体（合計5体）の衝撃荷重1回目における衝突速度と最大重錘反力の関係を示す。図-8より、最大重錘反力にスパン長の影響は認められず、重錘質量が同じケースの試験体は、衝突速度が上がると最大重錘反力は直線的に大きくなり、両者は比例関係にあることがわかる。

図-9は、重錘質量200kgのケースと400kgのケースを比較するため、重錘質量と衝突速度から求められる重錘落下エネルギー（重錘のポテンシャルエネルギー）と最大重錘反力との関係を示したものであるが、最大重錘反力は重錘落下エネルギーとの相関が大きく、スパン長や重

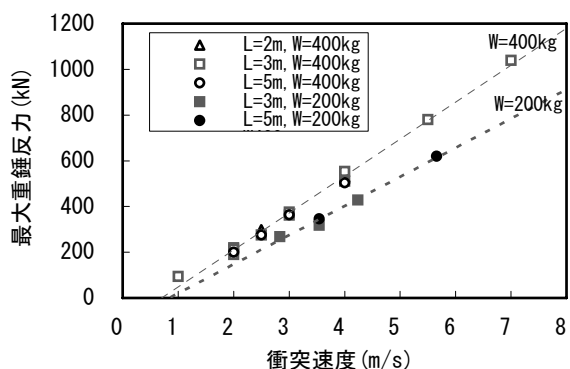


図-8 衝突速度と最大重錘反力の関係

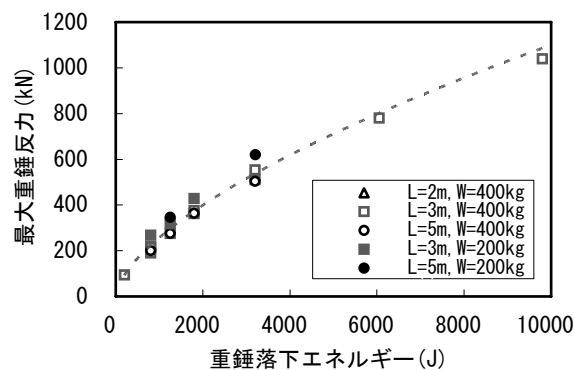


図-9 重錘落下エネルギーと最大重錘反力の関係

錘質量に関わらず、同一曲線上に図示された。

通常、静的荷重下として取り扱うRCはりの断面計算では、降伏変位に達した曲げ破壊型のRCはりに作用する荷重はほぼ一定となり、このときの荷重はスパン長が大きくなるほど小さくなる。しかし、衝撃荷重下における重錘反力はスパン長の影響が見られず、静的荷重下の荷重応答と全く異なる結果となった。この理由として、静的荷重下では荷重と変位の関係に同時性が成立し、静的荷重は曲げ変形に対する抵抗性を計測したものであるのに対し、衝撃荷重下の重錘反力は、衝突した瞬間の重錘とはりの反発を計測したものであり、荷重点で計測される荷重の応答機構が異なるためと考えられる。

図-10～図-12に重錘反力の時刻歴応答を示す。図-10は衝突速度のみが異なるケース、図-11はスパン長のみが異なるケース、図-12は重錘落下エネルギーが同じだが重錘質量と衝突速度が異なるケースの重錘反力応答を比較している。図-10より衝突速度が大きくなると、最大重錘反力が大きくなるとともに、最大値に到達するまでの時間や重錘反力の作用時間が短くなっている。本実験では、衝突位置にゴムシートを敷いて荷重実験を実施したが、ゴムシートが無い剛体同士の衝突の場合、前述のように最大値に達するまでの時間、荷重の作用時間が更に短くなることを予備試験で確認している。図-11より、スパン長が変化しても重錘反力が最大値に達し、応答値が一旦下がるまでの時刻歴応答はほぼ一致する履歴となった。はりの固有周期が異なるためその後の履歴は一致しなくなるが、重錘反力の初期応答にはスパン長の影響が認められない。図-12より、重錘落下エネルギーが等しい場合、重錘質量が小さい方が最大値に達するまでの時間がやや短くなり、重錘反力がやや大きくなる傾向となった。これは重錘質量が小さい方が衝突速度が大きいため、重錘とRCはりの接触時間が短いことが影響していると考えられる。

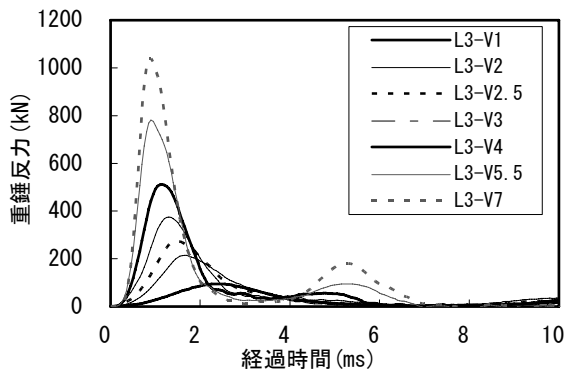


図-10 重錘反力の時刻歴応答 (衝突速度の影響)

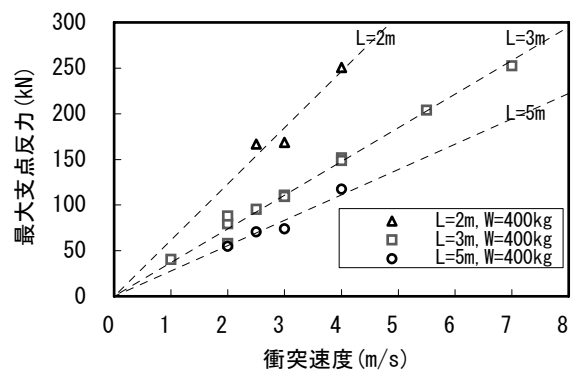


図-13 衝突速度と最大支点反力の関係 (W=400kg)

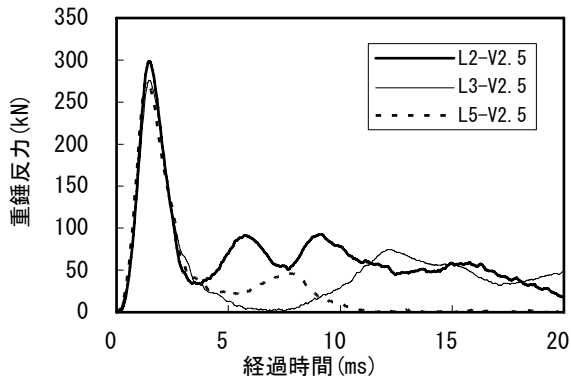


図-11 重錘反力の時刻歴応答 (スパン長の影響)

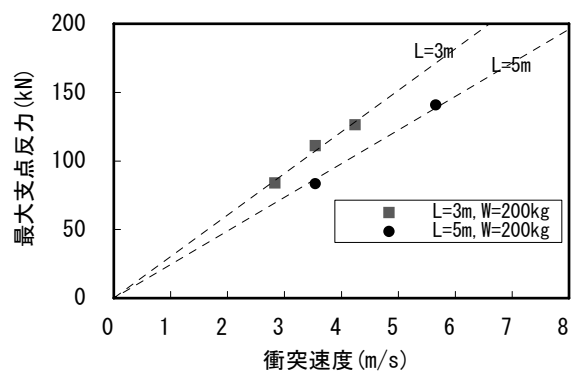


図-14 衝突速度と最大支点反力の関係 (W=200kg)

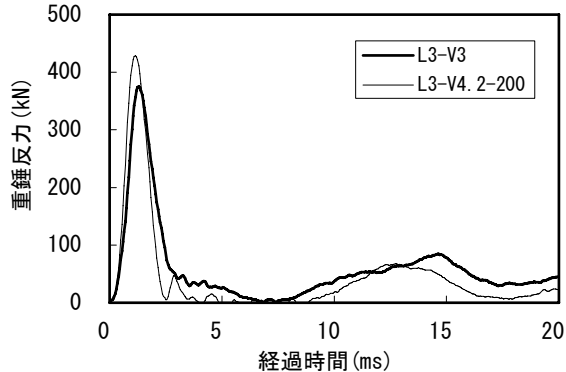


図-12 重錘反力の時刻歴応答
(重錘落下エネルギー同一ケース)

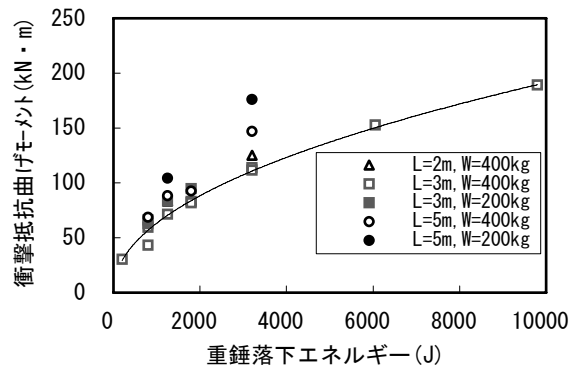


図-15 重錘落下エネルギーと衝撃抵抗曲げモーメントの関係

(4) 支点反力応答

図-13および図-14に、重錘質量が400kgの試験体と重錘質量が200kgの試験体の、衝撃载荷1回目における衝突速度と最大支点反力の関係を示す。図より、重錘反力の応答と同様に、衝突速度が大きくなると最大支点反力は直線的に大きくなっている。しかし、最大重錘反力応答とは異なり、最大支点反力はスパン長が大きくなると小さくなっており、このことから最大支点反力はスパン長の影響を受け、静的载荷時と同様にRCはりの曲げ変形に対する抵抗性との関係が大きいことが示唆される。

ここで、最大支点反力を静的荷重と同様に扱い、この時の曲げ耐力(衝撃抵抗曲げモーメント)を求め、図-15に重錘落下エネルギーとの関係を示す。スパン長3m以下の試験体では、重錘落下エネルギーと衝撃曲げモーメントの相関性が認められた。しかし、スパン長5mの試験体では重錘落下エネルギーに対し、衝撃抵抗曲げモーメントが他の試験体よりも大きくなり、この傾向は重錘質量が200kgの試験体で特に大きかった。これは、スパン長や重錘の衝突速度の違いが、はりの固有周期の変化や衝突荷重が支分部へ伝播するまでの減衰傾向に影響を与えた

めと考えられる。

図-16～図-18に支点反力の時刻歴応答を示す。図-16は衝突速度のみが異なるケース、図-17はスパン長のみが異なるケース、図-18は重錘落下エネルギーが同じだが重錘質量と衝突速度が異なるケースについて比較している。図-16より衝突速度が大きくなると、重錘反力と同様に支点反力は大きくなる傾向が認められるが、荷重の作用時間等には明確な差は見られない。はりのスパン長、断面形状が同じであれば、はりの固有振動に大きな差がない

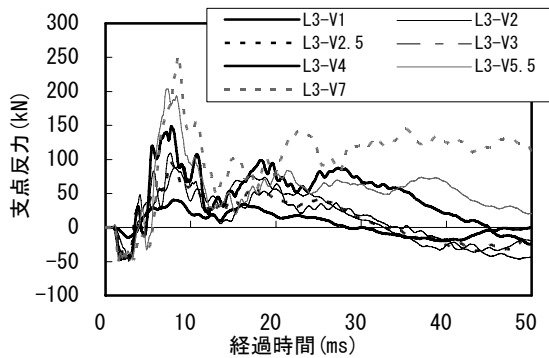


図-16 支点反力の時刻歴応答（衝突速度の影響）

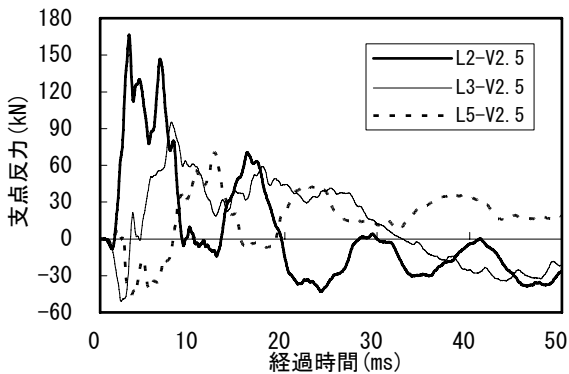


図-17 支点反力の時刻歴応答（スパン長の影響）

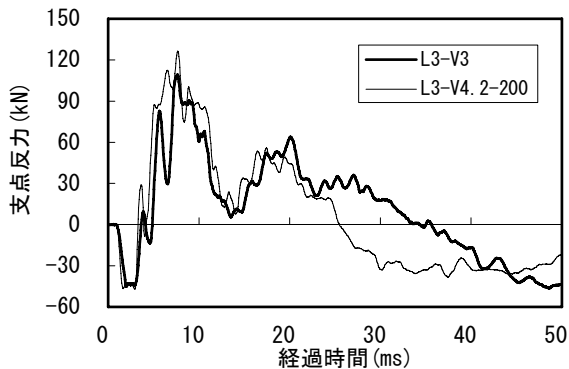


図-18 支点反力の時刻歴応答
（重錘落下エネルギー同一ケース）

ためと考えられる。図-17より、スパン長が大きくなると支点反力は小さくなる傾向にあることがわかる。また、スパン長3mと5mの試験体では、重錘衝突直後に支点反力が負の値となり、上向きの慣性力が働いていることが確認できる。この上向きの力はスパン長が短い2mでは応答が小さく、スパン長が大きいほど発生時刻が遅れる傾向である。図-18より、重錘落下エネルギーが等しい場合、重錘質量や衝突速度の影響は見られず、支点反力応答はほぼ一致していることがわかる。

(5) 変形性状

図-19および図-20に、重錘質量が400kgの場合の、衝撃载荷1回目における衝突速度とはりスパン中央の最大変位および残留変位の関係を示す。また、図-21および図-22に重錘落下エネルギーとはりスパン中央の最大変位および残留変位の関係を示す。

図-19および図-20より、衝突速度が大きくなると、スパン中央に発生する最大変位と残留変位は加速度的に大きくなることがわかる。また、図-21および図-22より、最大変位と重錘落下エネルギーとほぼ直線的な関係であることがわかる。

図-20および図-22より、スパン中央の残留変位はある衝突速度または重錘落下エネルギーから増加する傾向に

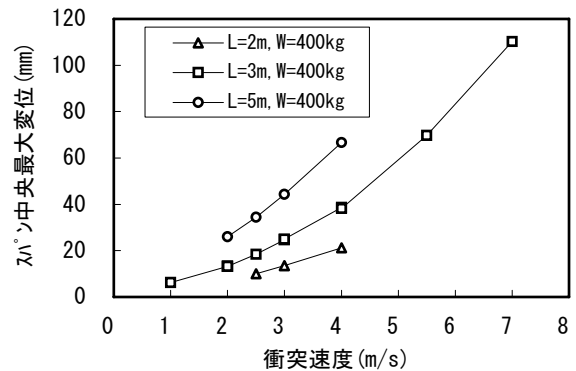


図-19 衝突速度と最大変位の関係（W=400kg）

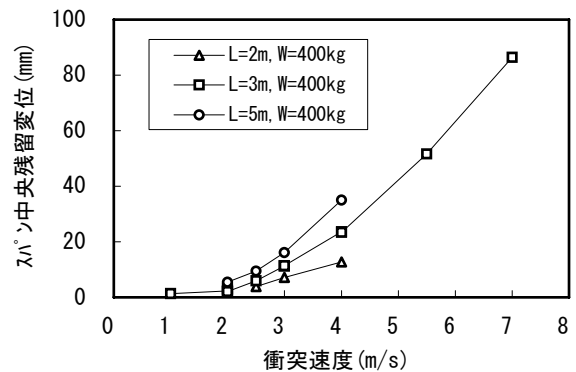


図-20 衝突速度と残留変位の関係（W=400kg）

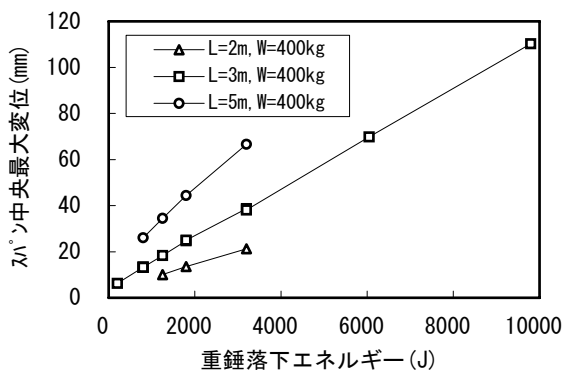


図-21 重錘落下エネルギーと最大変位の関係 (W=400kg)

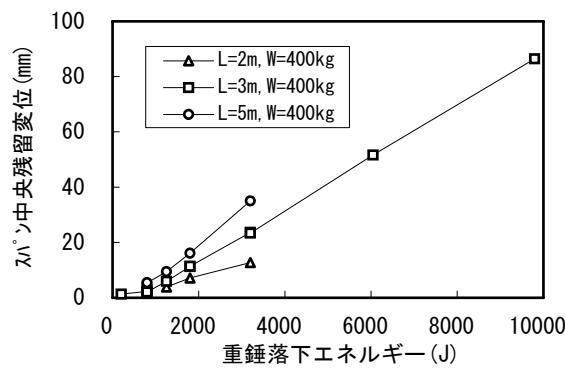


図-22 重錘落下エネルギーと残留変位の関係 (W=400kg)

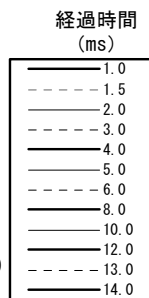
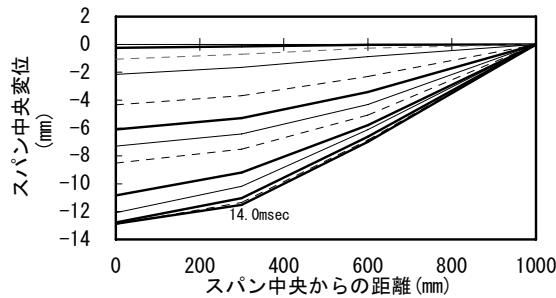
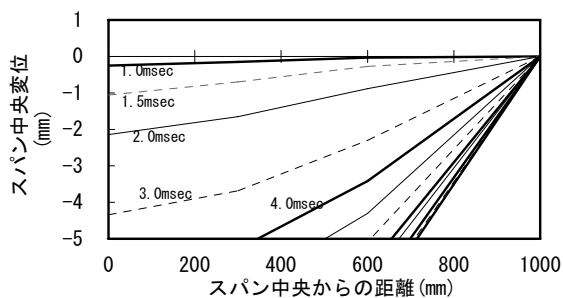


図-23 試験体③ (L2-V3) の変形過程

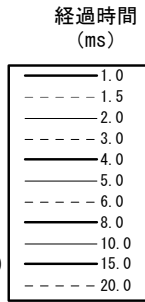
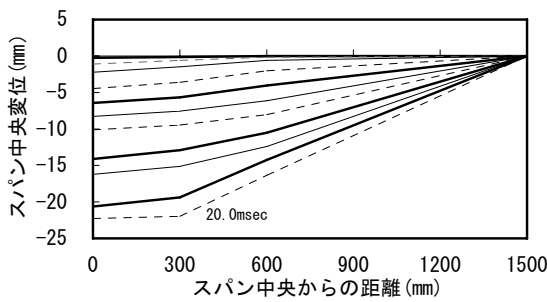
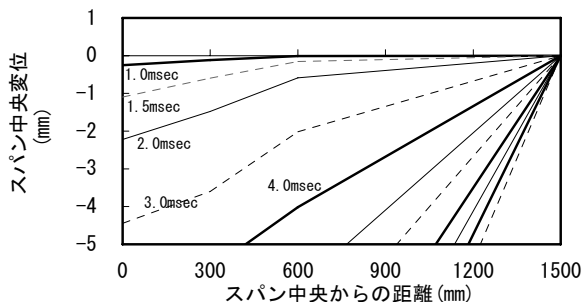


図-24 試験体⑧ (L3-V3) の変形過程

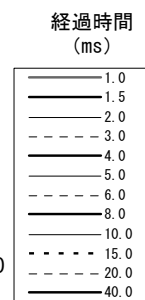
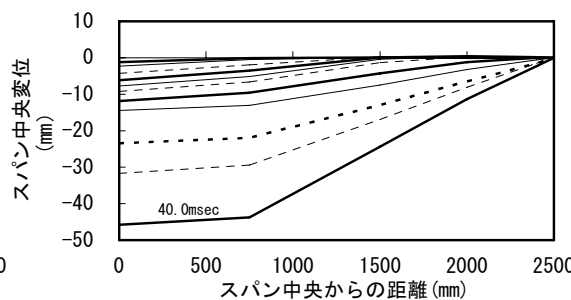
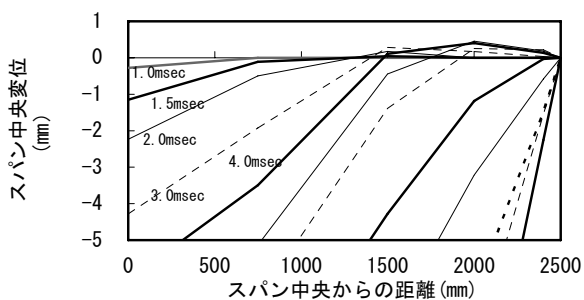


図-25 試験体⑩ (L5-V3) の変形過程

あり、スパン長3mの試験体の場合、衝突速度2.5m/s以上で顕著な残留変位が発生した。図-2にスパン長3mの試験体の静的載荷試験時における荷重-変位曲線を示したが、引張鉄筋が降伏したときのスパン中央変位は12mmで、これは同スパンの試験体に対する衝突速度2m/sの衝撃載荷の最大変位 (13.3mm) にほぼ一致した。したがって、衝撃載荷1回目の最大変位がRCはりの弾性変形範囲内であ

れば残留変位の発生は小さく、降伏変位に達すれば残留変位が大きくなることを確認できる。

図-23～図-25および付録Fに、衝撃荷重を受けてから最大変位に到達するまでの各試験体の変形過程を示す。ここでのはりの変形量は、はり下面に取り付けた加速度計で得られた波形を2回積分することで算出した。各試験体の加速度計設置位置は付録Aのとおりである。ただし、一

部の試験体では重錘落下位置の加速度データにノイズが発生し、変形量を算出することができなかったため、レーザ式変位計から得られたデータで補完している。図-23～図-25に、スパン長が異なる試験体の変形過程を示しているが、試験体⑧L3-V3と試験体⑩L5-V3では、重錘衝突直後に荷点を中心とした局所的な変形を確認できる。また、試験体⑩L5-V3では、重錘衝突直後に支点側はり上面が上方に反る負曲げが発生し、スパンが長いために慣性力による曲げ変形も大きいことがわかる。図-17に示した支点反力の時刻歴応答結果からもわかるように、衝撃荷重が作用したときに支点側に慣性力が発生したため、図-7に示したように、はりのせん断スパン内の上面にひび割れが発生した原因もこのためであると考えられる。試験体③L2-V3と試験体⑧L3-V3では、支点近傍に加速度計を設置しなかったため、負曲げの発生が明確に表れなかったが、支点側上面にひび割れの発生が確認されており、同様の現象が起きていたことが推察される。

(6) ひずみ応答

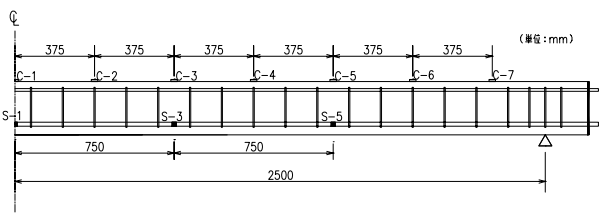


図-26 ひずみ計測位置 (試験体⑩L5-V2)

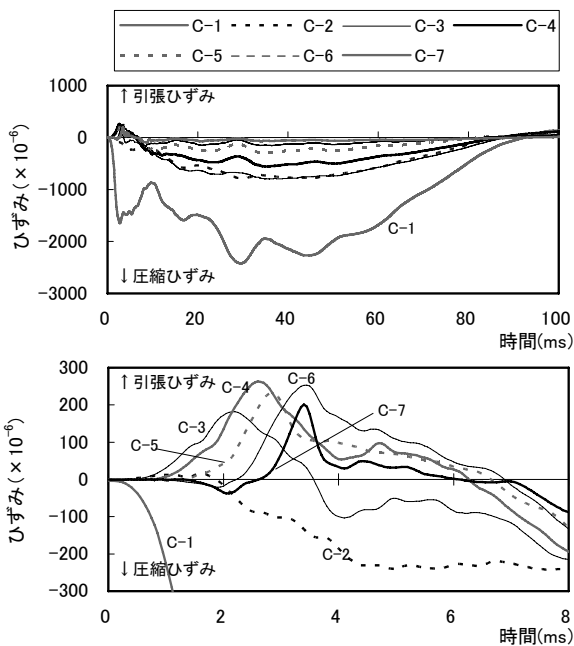


図-27 コンクリートひずみ時刻歴応答 (試験体⑩L5-V2)
(上段：0～100ms間、下段：0～8ms間)

衝撃荷重が試験体⑩L5-V2 (はりスパン長5m, 衝突速度2m/s, 重錘質量400kg) に作用したときに、図-26の位置のコンクリートと鉄筋に発生するひずみの時刻歴応答を図-27および図-28に示す。いずれもはり軸方向に発生するコンクリート上面と下段鉄筋のひずみを計測した。参考までに、このときのはり中央変位の時刻歴応答を図-29に示すが、試験体⑩は重錘衝突約1.6ms後に変形が始まり、約40ms後に変位量が最大となり、約100ms以降からRCはりが上方に反る負曲げとなった。

図-27は、はり上面のコンクリートひずみを計測した結果である。荷点のはり上面のコンクリートひずみ (C-1) は、重錘衝突直後に急激に圧縮ひずみが大きくなり、ひずみの増減を繰り返しながら最大ひずみに達し、その後ひずみが減少する傾向となった。一方、C-2～C-7のコンクリートひずみはC-1のひずみ発生時刻からやや遅れて

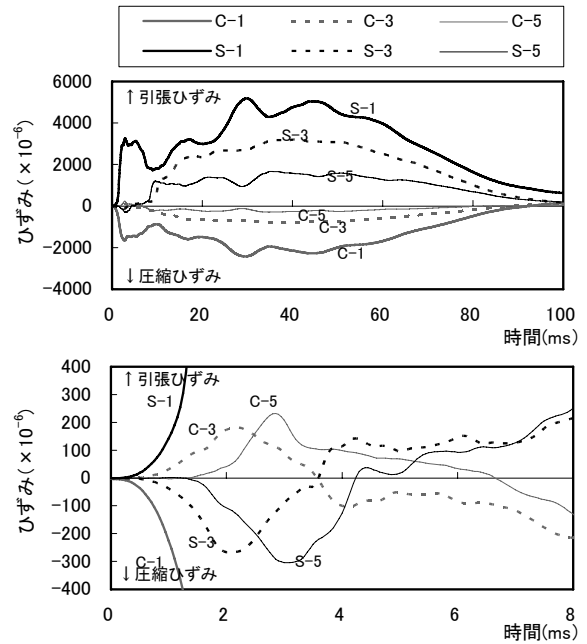


図-28 コンクリート・鉄筋ひずみ時刻歴応答 (試験体⑩L5-V2)
(上段：0～100ms間、下段：0～8ms間)

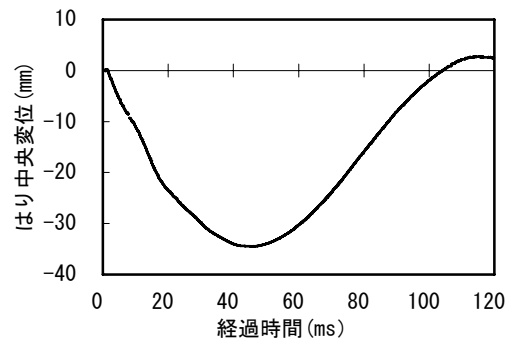


図-29 はり中央変位の時刻歴応答 (試験体⑩L5-V2)

応答が始まり、約3msまでに載荷点に近い順に引張ひずみが発生し、約7msまでに圧縮ひずみに転じた。載荷後のひび割れ観察では、C-5およびC-7の付近のはり上面にひび割れの発生を確認しており、このひび割れは重錘衝突直後の引張ひずみ応答時に発生したと考えられる。

図-28には、はり中央断面(C-1, S-1)、はり中央から750mmの断面(C-3, S-3)および1500mmの断面(C-5, S-5)におけるはり上面のコンクリートひずみと下段の鉄筋ひずみの時刻歴応答を示す。はり中央断面では、重錘衝突直後のはりの変形が始まるより前の時点で、急激にひずみが増加しているが、これは重錘衝突時に衝撃波が伝播したために発生したひずみであると考えられる。またははり中央断面では、はりの変形が復元して負曲げ状態になる約100msまでの間、はり上面に圧縮ひずみ、下段鉄筋に引張ひずみが常に発生し、静的曲げ載荷時と同じひずみ分布を示した。しかし、スパン中央から750mmの断面では、重錘衝突約0.5ms後に上面のコンクリートで引張ひずみが、下段の引張鉄筋で圧縮ひずみが発生し、約3.5ms時にひずみの符号が逆転するまで、中央断面と異なる性状を示した。同様に1500mmの断面でも、重錘衝突約1ms後に上面のコンクリートで圧縮ひずみが、下段の引張鉄筋で圧縮ひずみが発生した。このことから、衝撃荷重を受けるRCはりは、はりの変形が復元するまで載荷点では常に正曲げによるひずみ分布を示すが、載荷点から離れた位置では上下面のひずみの符号が逆となる負曲げを発生し、時間の経過とともにこの負曲げ発生位置が載荷点から支点方向に移動し、その後正曲げに転じることがわかる。

前述のように、加速度波形から求めた変形過程でも同様の挙動を確認しており、重錘衝突時に慣性力が作用したため負曲げが発生し、はり上面にひび割れを発生させたと考えられる。

(7) 静的残存耐力

衝撃荷重を受けたRCはりの静的耐力（以下、静的残存

表-5 衝撃載荷後の静的載荷試験結果

試験体名	衝突速度 (m/s)	衝撃載荷後の 残留変位 (mm)	静的載荷 最大荷重 (kN)
①L3-St	—	—	64.1
⑤L3-V1	1.0	1.4	67.4
⑥L3-V2	2.0	2.4	66.8
⑧L3-V3	3.0	11.2	65.6
⑨L3-V4	4.0	23.6	65.3
⑩L3-V7	7.0	86.5	63.8

※○数字は、試験体番号で表-1と同じである。

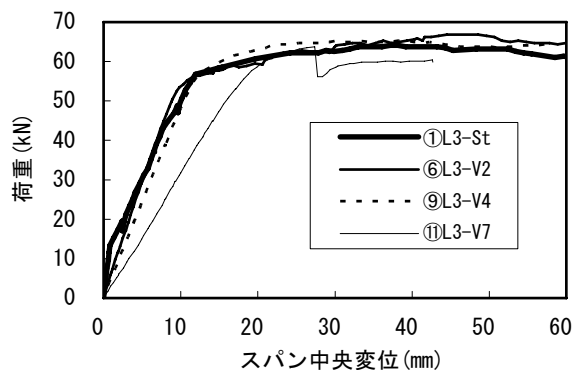


図-30 衝撃載荷後の静的載荷試験結果

耐力)を確認するため、衝撃荷重を一度だけ受けたRCはり（スパン長3mの試験体）の静的曲げ実験を行った。載荷方法は、2点支持による1点中央集中載荷とした。

表-5に、実験を実施した試験体ケースおよび実験結果を示す。また、図-30に試験体①L3-St、⑥L3-V2、⑨L3-V4、⑩L3-V7の荷重-変位曲線を示す。衝撃荷重を受けたRCはりの荷重と中央変位の勾配の関係と最大荷重は、試験体⑩L3-V7を除いて、試験体①L3-Stと概ね一致し、衝撃荷重を受けたRCはりの静的残存耐力には明確な差は表れなかった。試験体⑩は、衝撃載荷時の圧縮縁コンクリートの破壊が顕著で、他の試験体と比べて断面剛性の低下が大きかったため、荷重と変位の勾配が緩やかになった。

3.2 繰返し衝撃荷重を受けるRCはりの挙動

(1) 破壊までの繰返し回数

表-6 各ケースの破壊までの繰返し回数

試験体名	スパン長 (m)	重錘 質量 (kg)	衝突 速度 (m/s)	重錘落下 エネルギー (J)	破壊までの 繰返し回数
② L2-V2.5	2.0	400	2.50	1250	10
③ L2-V3			3.00	1800	7
④ L2-V4			4.00	3200	3
⑥ L3-V2	3.0	400	2.00	800	105
⑦ L3-V2.5			2.50	1250	15
⑧ L3-V3			3.00	1800	5
⑨ L3-V4			4.00	3200	3
⑫ L3-V2.8-200			2.83	800	(161)*
⑬ L3-V3.5-200			3.54	1250	21
⑭ L3-V4.2-200	4.24	1800	6		
⑯ L5-V2.5	5.0	400	2.50	1250	12
⑰ L5-V3			3.00	1800	6
⑱ L5-V4			4.00	3200	3
⑲ L5-V3.5-200			3.54	1250	15
⑳ L5-V5.7-200			5.66	3200	4

※試験体⑯は、実験工程の都合により累積残留変位が1%に達した時点で実験を終了した。

表-6に、同条件の衝撃荷重を繰り返し与え、破壊までに要した回数を示す。このときの試験体の破壊は、スパン中央変位がスパン長の2%に達した時点と定義した。なお、試験体⑫L3-V2.8-200は、実験工程の都合により累積残留変位がスパン長の1%に達した時点で実験を終了させた。また、図-31に重錘質量が400kgのケースの衝突速度

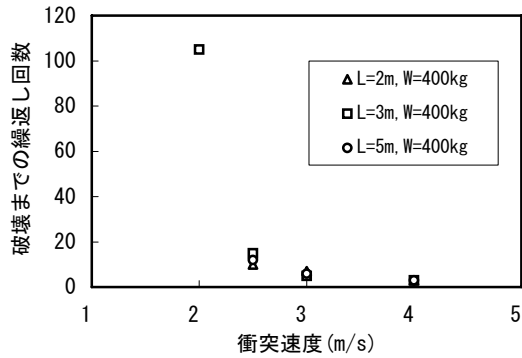


図-31 衝突速度と破壊までの繰返し回数 (W=400kg)

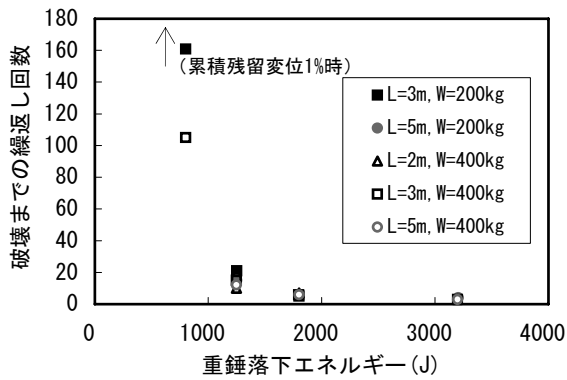


図-32 重錘落下エネルギーと破壊までの繰返し回数

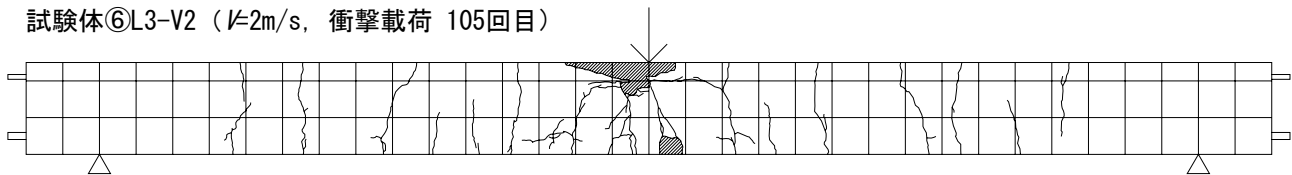
と破壊までの繰返し回数の関係を、図-32に全てのケースについて载荷1回の重錘落下エネルギーと破壊までの繰返し回数の関係を示す。

まず、衝突速度の影響に着目すると、表-6および図-31より、スパン長および重錘質量が同条件の場合、衝突速度が小さいほど破壊までの繰返し回数は増加する傾向であった。スパン長3m、重錘質量400kgのケースでは、試験体⑦(衝突速度2.5m/s)の破壊までの繰返し回数は15回、試験体⑥(衝突速度2.0m/s)では105回となり、両者の差は大きく、同様に、重錘質量200kgのケースでも試験体⑬(衝突速度3.5m/s)と試験体⑫(衝突速度2.8m/s)で繰返し回数の差が大きくなった。したがって、载荷条件によって破壊までの繰返し回数が急激に変化する境界があることが類推された。

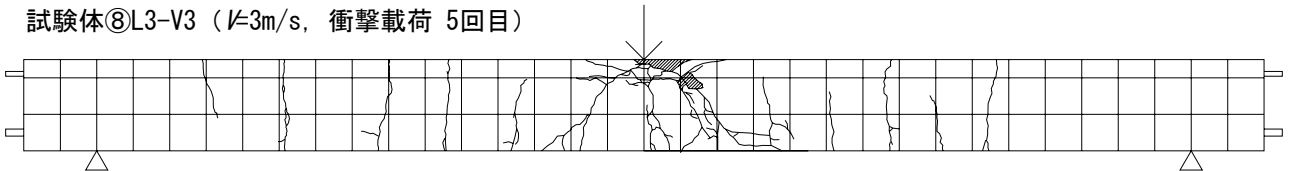
次にスパン長の影響に着目する。静的荷重下では、同一断面のりではスパン長が大きいほど曲げ耐力は小さくなるが、試験体②L2-V2.5、⑦L3-V2.5、⑧L5-V2.5の破壊までの繰返し回数は、それぞれ10回、15回、12回となり、繰返し衝撃荷重下でのスパン長の影響が認められなかった。

重錘落下エネルギーが同条件のケースについて比較すると(図-32)、重錘落下エネルギーが1800J以上の場合、重錘質量が異なるケース間で、破壊までの繰返し回数に差はほとんど見られなかった。しかし、重錘落下エネルギーが1250Jの場合、試験体⑦L3-V3で15回、試験体⑬L3-V3.5-W200で21回となり、重錘質量が小さいほど繰返し回数が多くなった。試験体⑫は累積残留変位がスパン長の1%に達した時点で試験を終了したが、重錘落下エネルギーが800Jの場合、この傾向が更に顕著となり、重錘

試験体⑥L3-V2 (V=2m/s, 衝撃载荷 105回目)



試験体⑧L3-V3 (V=3m/s, 衝撃载荷 5回目)



試験体⑨L3-V4 (V=4m/s, 衝撃载荷 3回目)

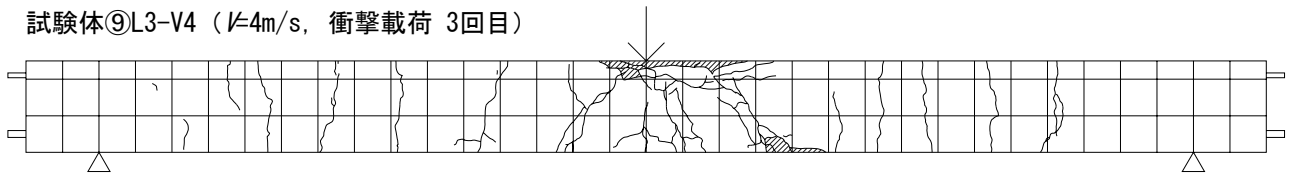


図-33 ひび割れ分布状況 (上段：⑥L3-V2, 中段：⑧L3-V3, 下段：⑨L3-V4)

落下エネルギーが同じでも、重錘質量が違えば繰返し回数に差が見られた。

(2) ひび割れ分布

図-33に、試験体⑥L3-V2、⑧L3-V3および⑨L3-V4の繰返し衝撃载荷による最終破壊時のひび割れ分布を示す。他の試験体のひび割れ分布は付録Bに示す。

いずれの試験体においても、最終破壊時には圧縮縁コンクリートが剥離し、引張側コンクリートの剥落が見られ、せん断スパン上面に負曲げによると考えられるひび割れが発生した。試験体⑧と⑨では、押抜きせん断破壊時に発生するような斜め方向のひび割れが载荷点に向かって発生した。しかし、载荷速度が比較的小さい試験体⑥では、静的载荷時と同じように、中立軸付近までは鉛直にひび割れが伸びた後、载荷点に向かってひび割れが進展しており、衝突速度が载荷点付近のひび割れ分布に影響を与えることが確認された。

(3) 繰返し回数と中央変位の関係

図-34～図-37に、試験体⑥L3-V2、⑦L3-V2.5、⑧L3-V3および⑨L3-V4について、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の試験体⑥では、繰返し回数が少ない段階で中央変位が比較的大きく進展し、その後緩やかな勾配となった後、再

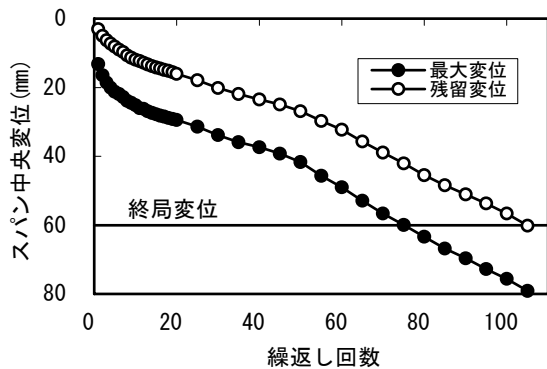


図-34 繰返し回数とスパン中央変位 (試験体⑥L3-V2)

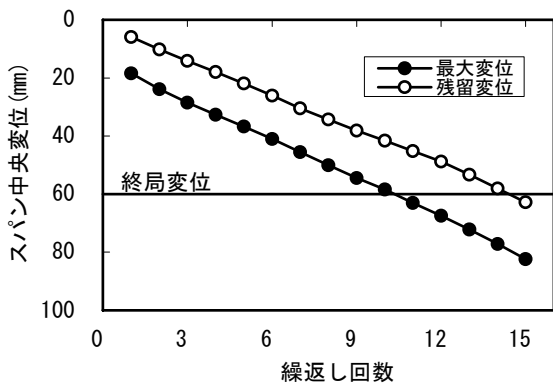


図-35 繰返し回数とスパン中央変位 (試験体⑦L3-V2.5)

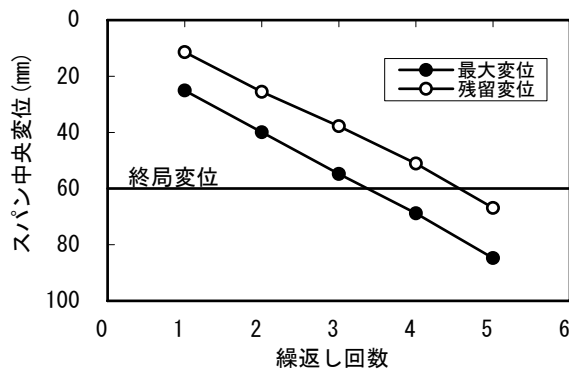


図-36 繰返し回数とスパン中央変位 (試験体⑧L3-V3)

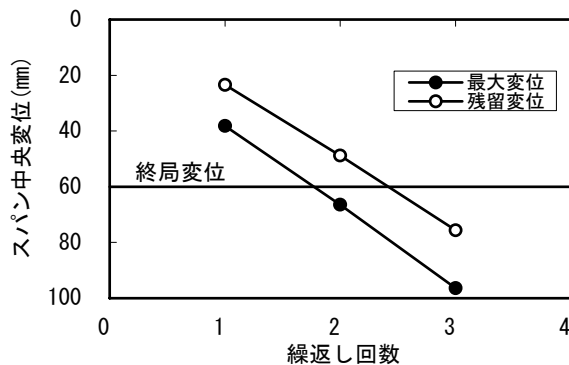


図-37 繰返し回数とスパン中央変位 (試験体⑨L3-V4)

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。また、変位の進行が再び加速したのは繰返し回数 50回 (最大変位42mm, 残留変位27mm) を超えた時点であったが、これは圧縮縁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。また、付録Gに全ケースの繰返し回数と変位の推移を示すが、破壊までの衝突回数が比較的多い試験体⑩L3-V2.8-200と⑬L3-V3.5-200でも、同様にS字曲線を描き、変位が進展した。

一方、図-35～図-37に示すように衝突速度が2.5～4m/sのとき、繰返し回数の増加に伴う変位の推移は、1回の変位の変化量がほとんど変化しない直線的な進展、または1回の変位の変化量が徐々に多くなる加速度的な進展となり、試験体⑥とは異なる傾向を示した。

3.1.(5)で前述のように、衝突速度2m/sは、1回の衝撃载荷で発生する最大変位が静的载荷時のRCはりの降伏変位に近く、弾性限界程度であったため残留変位が抑えられ、疲労破壊に似た変位推移を示したと考えられる。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。

(4) 繰返し回数とたわみ振動周期の関係

図-38に、試験体⑥L3-V2のはり中央変位の時刻歴応答を示す。繰返し回数の増加に伴い、1回の衝撃荷重に対す

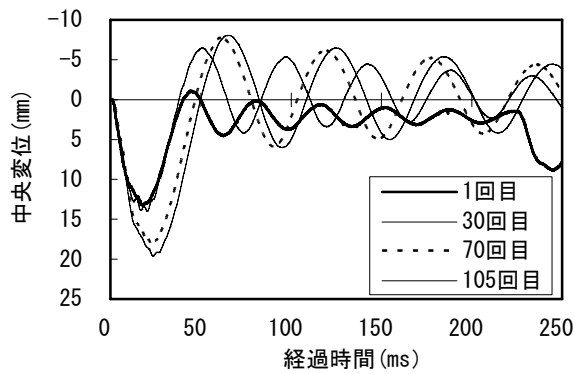


図-38 中央変位の時刻歴応答の変化 (試験体⑥L3-V2)

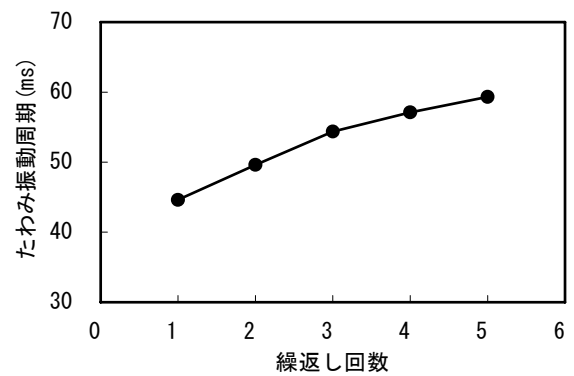


図-41 繰返し回数とスパン中央変位 (試験体⑧L3-V3)

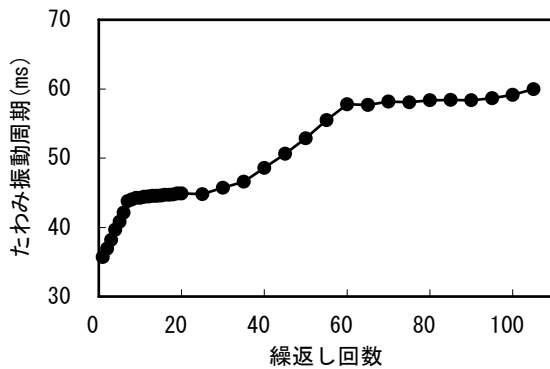


図-39 繰返し回数とスパン中央変位 (試験体⑥L3-V2)

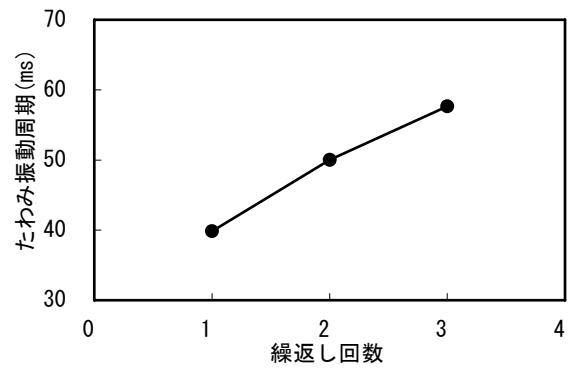


図-42 繰返し回数とスパン中央変位 (試験体⑨L3-V4)

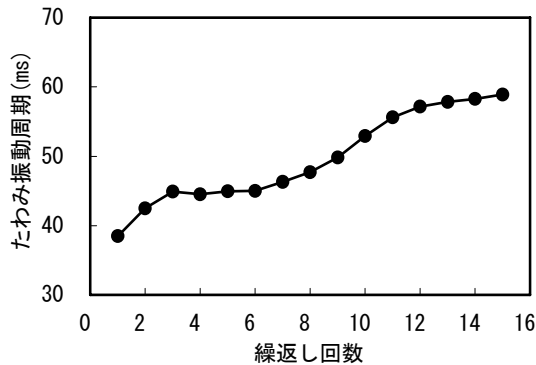


図-40 繰返し回数とスパン中央変位 (試験体⑦L3-V2.5)

る変位量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。付録Eに他の試験体の中央変位時刻歴応答を示すが、この振動特性の変化は、スパン長、重錘質量、衝突速度によらず全ケースで同様の傾向となった。

図-39～図-42に、試験体⑥L3-V2、⑦L3-V2.5、⑧L3-V3および⑨L3-V4について、スパン中央変位の時刻歴応答から求めたたわみ振動周期の推移を示す。いずれの試験体も、繰返し回数の増加に伴い、たわみ振動周期が長くなっている。また、試験体⑥と⑦のたわみ振動周期は、衝突回数が少ない段階で変化が大きく、一旦緩やかになっ

た後、再び大きく変化した。たわみ振動の変化が大きい段階では、ひび割れの進展や圧縮縁コンクリートの破壊の進行を目視で確認しており、たわみ振動周期の推移は部材の損傷による曲げ剛性の低下を反映したものとなっていると考えられる。

単純ばりの1次振動モードの固有振動数は以下の式で与えられる。

$$\omega = \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

ただし、

ω : 固有振動数 l : スパン長

E : 弾性係数

I : 曲げ剛性 (RC断面と仮定する)

ρ : 密度

A : 部材断面積

とする。

したがって、はりの剛性 EI は、

$$EI = \left(\frac{l}{\pi}\right)^4 \rho A \omega^2 = \left(\frac{l}{\pi}\right)^4 \frac{\rho A}{T^2} \quad (2)$$

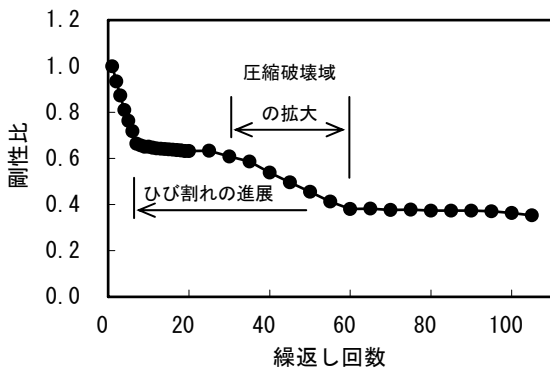


図-43 繰返し回数と剛性比の関係 (試験体⑥L3-V2)

で表わせる。ただし、

$$T : \text{振動周期} \quad \left(T = \frac{1}{\omega} \right)$$

とする。

ここで、実験結果から算出されたたわみ振動周期 T から各繰返し回数におけるはりの剛性 EI を求め、衝撃载荷1回目との比を剛性比とした。試験体⑥の繰返し回数と剛性比の関係を図-43に示す。ひび割れの進展や圧縮縁コンクリートの破壊進行に伴い、剛性比が低下し、部材の損傷を反映していることがわかる。

(5) 繰返し回数と重錘反力の関係

図-44に、試験体⑥L3-V2の重錘反力の時刻歴応答を示す。図より、繰返し回数の増加に伴い、最大重錘反力が減少し、荷重の作用時間が長くなる傾向にあることがわかる。付録Cに他の試験体の重錘反力の時刻歴応答を示すが、スパン長、重錘質量、衝突速度によらず同様の傾向であった。

図-45～図-48に、重錘落下エネルギーごとの最大重錘反力の推移を示す。図-45と図-46より、重錘落下エネルギーが800Jと1250Jの場合、中央変位やたわみ振動周期の推移と同様に、重錘反力の低下が著しい段階が2回あることが確認できる。1回目は繰返し回数が少ない段階で、ひ

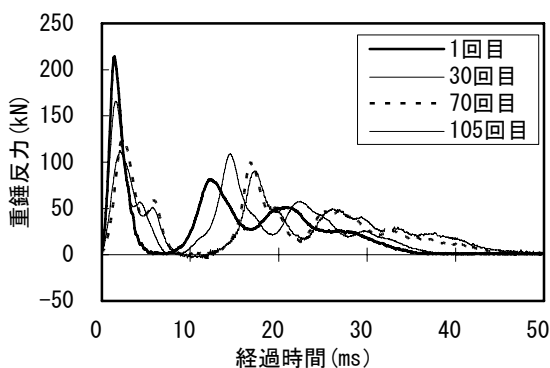


図-44 重錘反力の時刻歴応答の変化 (試験体⑥L3-V2)

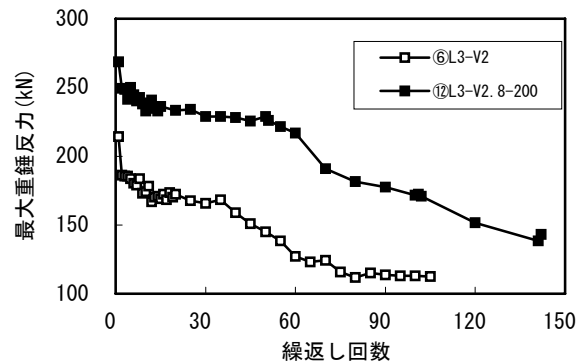


図-45 繰返し回数と最大重錘反力 (重錘落下E=800J)

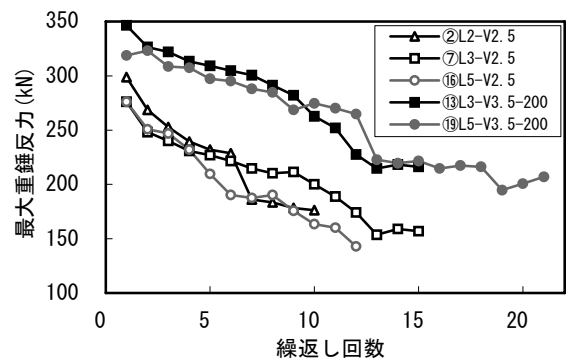


図-46 繰返し回数と最大重錘反力 (重錘落下E=1250J)

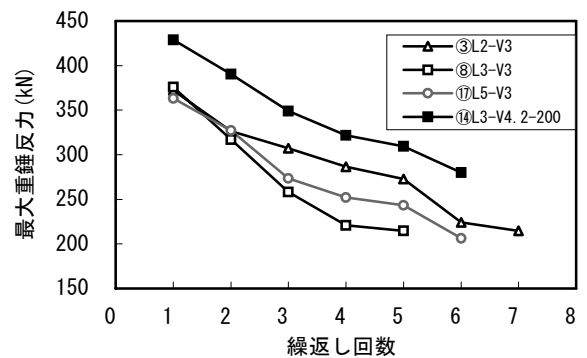


図-47 繰返し回数と最大重錘反力 (重錘落下E=1800J)

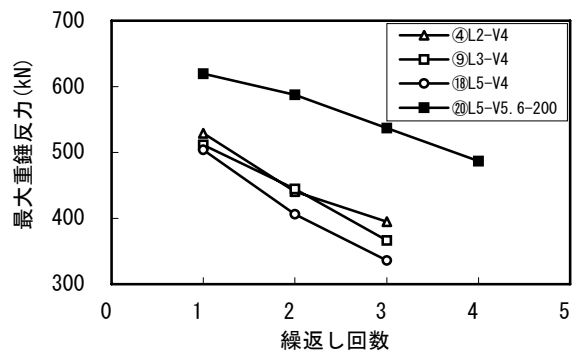


図-48 繰返し回数と最大重錘反力 (重錘落下E=3200J)

び割れが進展しているときに一致し、2回目は圧縮縁コンクリートの破壊が始まり、徐々に破壊領域が拡大したときに一致する。したがって、部材の損傷によって曲げ剛性が低下し、衝撃荷重に対する抵抗性が失われたため、最大重錘反力が急激に低下したと考えられる。

また、重錘落下エネルギーと重錘質量が同じケースでは、最大重錘反力がほぼ同じ推移で低下し、繰返し衝撃荷重下における重錘反力応答はスパン長の影響がほとんど無いことがわかる。重錘質量が異なる場合では、繰返し回数を重ねても重錘質量の小さい方が重錘反力は大きい、その減少傾向は一致しており、重錘落下エネルギーが同じ場合、部材の損傷過程が同様であると推察できる。

(6) 繰返し回数と支点反力の関係

図-49に、試験体⑥L3-V2の支点反力の時刻歴応答を示す。支点反力は繰返し回数の増加に伴い、荷重の作用時間が長くなる傾向にある。この傾向は、スパン長の違い、重錘質量の違いに関係なく、全ての試験体で同様となった。はり部材が徐々に損傷したため、はりの剛性が低下し、たわみ振動特性が変化したためと考えられる。

図-50～図-53に、重錘落下エネルギーごとの最大支点反力の推移を示す。多くの試験体で繰返し回数が少ない

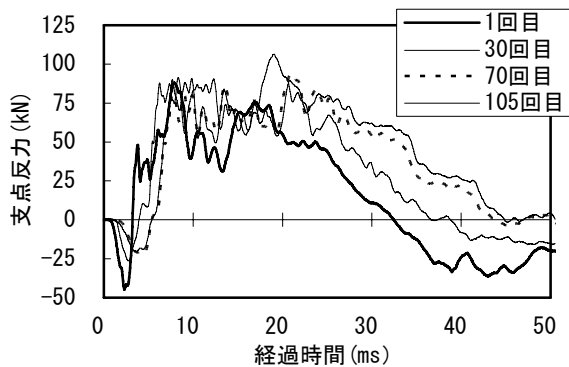


図-49 支点反力の時刻歴応答の変化 (試験体⑥L3-V2)

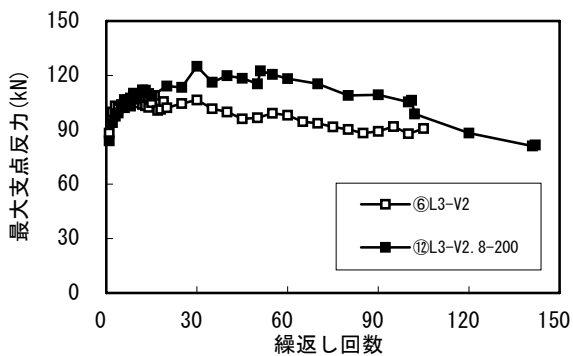


図-50 繰返し回数と最大支点反力 (重錘落下E=800J)

段階で最大支点反力が一旦増加し、損傷が進んだ段階で最大支点反力が減少する傾向にある。しかし、はりの損傷状態や抵抗性の変化を反映した最大重錘反力、たわみ振動周期と異なり、繰返し回数と最大支点反力には明確な関係が表れていない。最大支点反力は、はりの振動特性や衝撃荷重が支点部に伝播されるまでの減衰等が複雑に影響していると考えられるが、静的荷重において(図-2)、降伏変位到達以降に荷重がほぼ一定で推移していたことから、最大支点反力は静的荷重における荷重応答と相関があったと推察される。

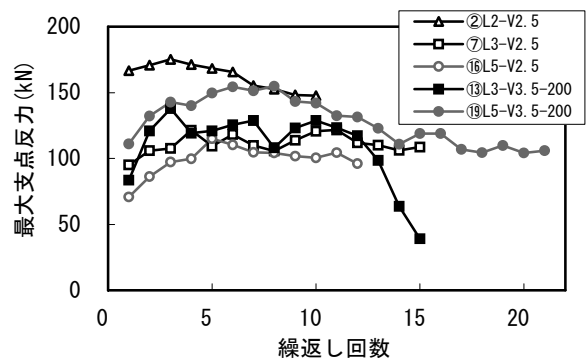


図-51 繰返し回数と最大支点反力 (重錘落下E=1250J)

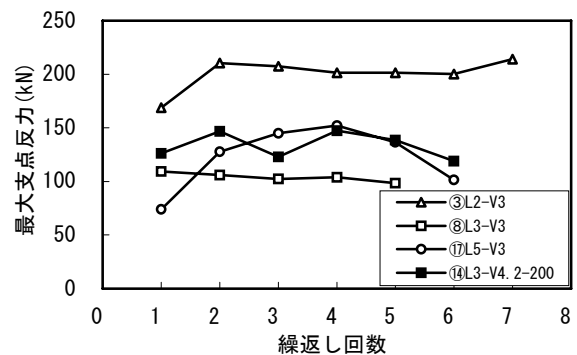


図-52 繰返し回数と最大支点反力 (重錘落下E=1800J)

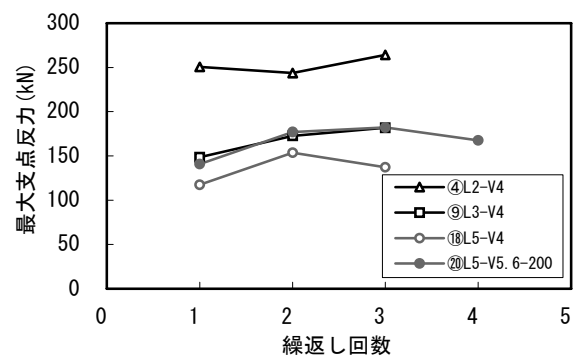


図-53 繰返し回数と最大支点反力 (重錘落下E=3200J)

4. 衝撃荷重作用時の応答値の算定

4.1 力学的エネルギー保存則による応答値の算定

(1) 算定方法

衝撃荷重は偶発荷重に位置づけられ、構造物の終局状態を定義するためには、衝撃荷重作用時の最大変位や残留変位が算定できる必要がある。

部材の静的特性を活用したエネルギー一定則による耐震設計は、地震動による慣性力を受けた橋脚等を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。

そこで、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、最大変位と最大支点反力を求め、実験値と比較し、その適用性を検討した。

まず、RCはりを一質点系のばねと仮定し、力学的エネルギー保存則によってはり中央の最大変位と最大支点反力を算定する⁷⁾。

衝突直後の重錘速度とRCはり中央の変形速度が等しいと考えれば、両者の運動エネルギーの総和 U_1 ははりの有効質量を考慮して式(3)となる。

$$U_1 = \frac{1}{2}Mv^2 + \frac{1}{2} \frac{17}{35}mv^2 \quad (3)$$

M : 重錘質量

m : RCはりの質量

v : 衝突直後の重錘およびRCはりの変形速度

また、RCはりの変形によるひずみエネルギー U_2 は式(4)となる。

$$U_2 = \frac{1}{2}k\delta^2 = \frac{24EI}{l^3}\delta^2 \quad (4)$$

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

E : コンクリートの弾性係数

I : 曲げ剛性 (RC断面と仮定する)

δ : 最大中央変位

式(5)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として式(6)を用い、両者を連立させて最大中央変位 δ について解くと、式(7)となる。

$$U_1 = U_2 \quad (5)$$

$$v = \frac{M}{M + \frac{17}{35}m}V \quad (6)$$

V : 衝突直前の重錘速度

$$\delta = V \sqrt{\frac{MI^3}{48EI} \frac{M}{M + \frac{17}{35}m}} \quad (7)$$

これにより、 V 、 M 、 m から δ を算定できることとなる。

(2) 実験値と算定値の比較

図-54に、スパン長を3m、重錘質量を400kgとした試験体について、式(7)によって最大中央変位 δ を求めた結果と実験値を示す。衝突速度が2.5m/s以下では計算値と実験値がほぼ一致する結果となったが、衝突速度3m/s以上では実験で得られた最大中央変位の方が計算値よりも大きくなり、衝突速度が大きくなるほどこの差が広がった。この原因として、静的荷重下におけるRCはりの弾性限界ははり中央変位で12mmであり、衝突速度3m/s以上では、1回の载荷での最大中央変位がこの弾性限界を大きく超え、圧縮縁コンクリートの破壊も発生し、塑性化が顕著となったためと考えられる。

付録Hに、他試験体の最大中央変位 δ の計算結果と実験値を示すが、衝突速度が4m/sを超える载荷を実施しなかったため、計算結果と実験値が大きく相違することはなかったが、衝突速度が大きくなると実験値が計算値よりも大きくなる傾向は確認できた。

ここで、衝撃载荷時のたわみ変形は静的载荷時のたわみ変形と同一形状であると仮定し、計算で得られた最大中央変位 δ を発生させるために必要なRC断面の静的最大荷重 P_s を求める。

$$p_s = \frac{48EI}{l^3}\delta \quad (8)$$

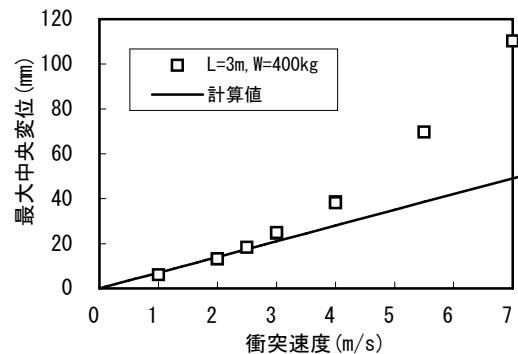


図-54 衝突速度と最大中央変位の関係

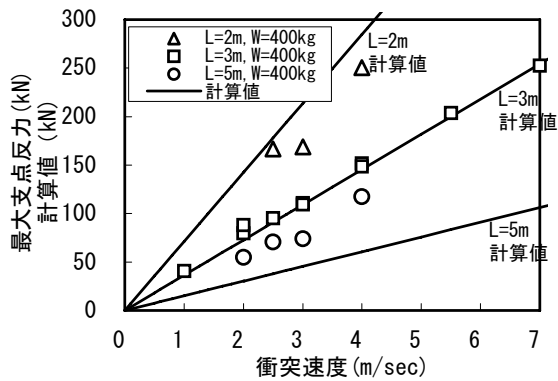


図-55 衝突速度と最大支点反力の関係

図-55に、重錘質量が400kgの場合の求めた静的最大荷重 P_s と、実験から得られた最大支点反力の結果を比較したものを示す。スパン長3mの試験体は、最大支点反力の実験値と静的最大荷重の計算値がほぼ一致していることがわかる。

したがって、以上の方法によって衝撃荷重作用時のはりの最大中央変位を算出し、同変位を発生させるための静的最大荷重を求め、これを最大支点反力に置き換えることが十分可能であると判断できる。しかし、スパン長が2mあるいは5mに変化した場合や、重錘質量が200kgとなった場合、計算値と実験値が若干異なる結果となった。これらの結果は、はりの振動モードの変化、重錘とRCはりの質量比の違いや局所変形の影響等の複合的要因に起因していると考えられるので、今後詳細な検討を実施し、精度を向上させる必要があると言える。

また、衝突速度3m/s以上のように、はりの塑性化が顕著となった場合のはりの最大中央変位の算定についても精度向上を図る必要があり、次節でエネルギー一定則によって修正することを検討した。

4.2 エネルギー一定則による最大中央変位の補正

図-56にエネルギー一定則の概念⁹⁾を示す。重錘の衝突によってRCはりのスパン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考え、最大中央変位を補正する。4.1で求めた任意の衝突速度における最大中央変位は、図-56中のA点(P_B, δ_p)であるが、補正の結果、A'点($P_{B'}, \delta_{p'}$)となる。

この考えに基づいて最大中央変位を補正した結果(スパン長3mはりの試験体)を図-57に示す。なお、図-57中の降伏荷重 P_y は、静的試験結果(図-2)をもとに60kNとした。補正の結果、3mはり試験体の最大中央変位についても実験値とほぼ一致する結果を得ることができた。

同様に全ての試験体について、最大中央変位と最大支

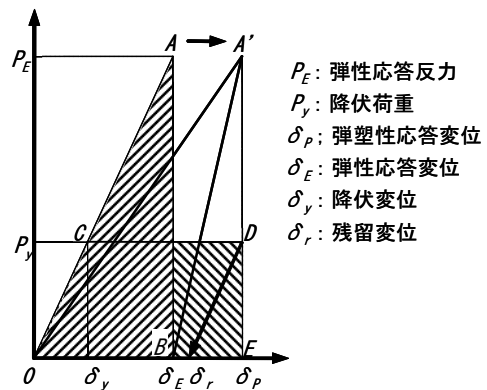


図-56 エネルギー一定則の概念図⁹⁾

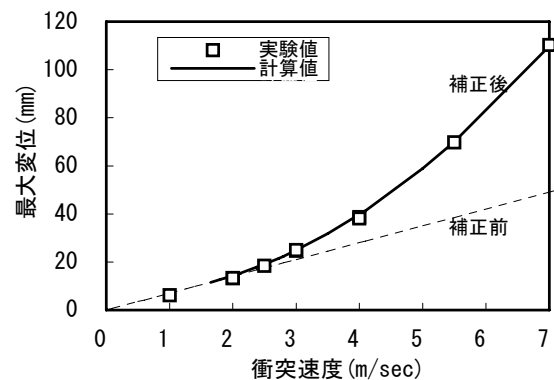


図-57 衝突速度と最大中央変位の関係
(エネルギー一定則による補正)

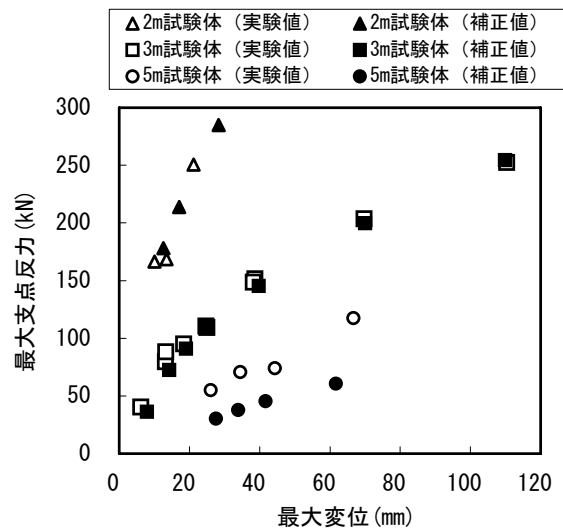


図-58 最大中央変位と最大支点反力の関係
(エネルギー一定則による補正)

点反力を算出し、得られた両者の関係を図-58に示す。この図から、他のケースについても力学的エネルギー保存則およびエネルギー一定則による最大中央変位と最大支点反力の算定が可能であることが確認できる。しかし、

はりスパン長が5mの試験体や重錘質量を200kgとした試験体は、実験値と算定値が若干異なる傾向（実験値>計算値）にあり、今後はりの振動状態の変化、重錘とRCはりの質量比や局所変形等の影響を考慮して検討する必要がある。

4.3 繰返し衝撃荷重への適用

エネルギー一定則で補正したはりの最大中央変位の結果をもとに、繰返し衝撃荷重時の残留変位と破壊までの繰返し回数を算定し、繰返し衝撃荷重への適用を検討する。図-59に算定の概念図を示す。まず、衝撃荷重を1回受け、弾塑性応答したはりの最大中央変位は δ_{max1} に達し、その後、静的荷重時の降伏変位 δ_y だけ復元すると仮定する。このときの残留変位 δ_1 は最大中央変位 δ_{max1} から降伏変位 δ_y を引くことで求められ、この計算を累積残留変位 δ_n が終局変位に達するまで繰り返す。破壊までに要する繰返し回数を算出した。

上記の手順に従い、はりスパン長が3mの試験体について、衝撃荷重を1回だけ受けたときの残留変位を求め、実験値と比較した結果を図-60に示す。実験結果から得られた残留変位と計算から得られた残留変位はほぼ一致する結果となり、残留変位の算定方法が妥当であることがわかる。

累積残留変位がスパン長の2%に達するまでこの計算を繰り返す。破壊までの繰返し回数を算出した結果を表-7に示す。なお、算出した繰返し回数は小数点以下を切り上げている。破壊までの繰返し回数は、衝突速度が2.5m/s以下では実験結果と計算結果に差が見られたが、衝突速度3m/s以上では実験結果と計算結果が等しくなった。また、実験結果では衝突速度2m/sと2.5m/sの間で、破壊までの繰返し回数（それぞれ105回および15回）に大きな差が出たが、計算結果でもそれぞれ22回および9回となり、同様にこの境界において差が表れ、本手法による残留変位算定が妥当であると判断できる。なお、衝突速度2.5m/s以下のケースで破壊までの繰返し回数に差が生じた理由

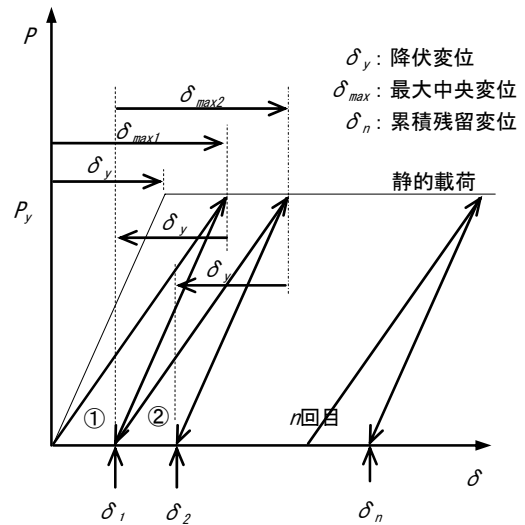


図-59 繰返し衝撃荷重の残留変位算定の概念図

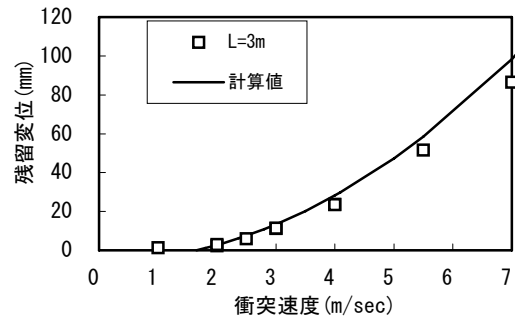


図-60 衝撃荷重1回目の残留変位算定結果
(スパン長3mはり試験体)

として、発生変位量が降伏変位をわずかに超える程度であり、材料の力学的物性値の設定誤差や、高速変形による材料物性の変化、ひび割れ部における骨材のかみ合わせ等による残留変位蓄積、部材の曲げ剛性の変化等の要因が複雑に影響したためと考えられる。

5. 結論

本研究では、衝撃荷重を繰り返して受けるRCはりの破壊性状の把握を目的に、重錘落下によるRCはりの繰返し衝撃実験を実施した。以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) RCはりに衝撃荷重が作用したときの各応答値を比較することにより、重錘とRCはりの運動過程を把握し、静的荷重作用時の挙動との違いを明らかにした。
- (2) 衝撃荷重を受けるRCはりでは、重錘衝突時に上向き慣性力が支点付近に作用し、はり上面に負曲げによるひび割れが発生した。また、衝突速度が3m/s以

表-7 破壊までの繰返し回数の比較

	衝突速度 (m/s)	破壊までの繰返し回数	
		実験結果	計算結果
⑤L3-V2	2.0	105	22
⑥L3-V2.5	2.5	15	9
⑦L3-V3	3.0	5	5
⑧L3-V4	4.0	3	3

上のケースでは、押抜きせん断破壊時に発生する斜めひび割れが発生し、静的載荷時のひび割れ分布とは異なる傾向を示した。

- (3) 重錘反力応答、支点反力応答および発生変位量は、重錘質量、衝突速度、重錘衝突エネルギーとの相関が大きかった。しかし、重錘反力応答はスパン長の影響がほとんど無く、RCはりの断面剛性で決定されるため、重錘反力の静的荷重への単純な置換えは難しいと考えられる。
- (4) 衝突速度が比較的小さい場合、破壊までの繰返し回数は増加し、破壊の進行は緩やかで低サイクル疲労型の破壊性状を示した。また、載荷条件によって繰返し衝撃荷重に対する抵抗性が急激に失われる速度上の境界が存在し、破壊までの繰返し回数の差が大きくなった。1回の衝突荷重に対して、RCはりが弾性的な変形をしていれば繰返し回数は増加し、塑性的な変形をすれば、繰返し回数が減少した。
- (5) 繰返し回数の増加に伴い、最大重錘反力は低下し、たわみ振動周期は長くなった。これらは、ひび割れの進展や圧縮破壊領域の拡大に伴う部材の剛性低下や損傷過程を反映したものである。
- (6) 衝撃荷重を受けるRCはりの発生変位量および最大支点反力は、力学的エネルギー保存則とエネルギー一定則により精度よく算定が可能で、繰返し衝撃荷重を受ける場合にも適用可能であった。

6. あとがき

本研究において、衝撃荷重を繰返し受けるRCはりの衝撃応答や破壊性状を把握することができた。また、力学的エネルギー保存則とエネルギー一定則に基づく簡易的な手法で、RCはりの発生変位量および最大支点反力を算定することが可能で、繰返し衝撃荷重を受ける場合にも適用できることが確認された。これらの研究成果は、衝撃荷重を繰返し受ける構造物や部材の設計時に、設計荷重決定の参考となるとともに、将来的に技術基準への反映につながると考える。特に、本実験方法は重錘落下による衝撃載荷法を採用したため、消波ブロック等の剛体の衝突を想定した衝撃設計には適用が十分可能であると思われる。

今後、港湾構造物の耐衝撃設計手法の確立に向け、壁部材への衝撃実験や面圧分布の衝撃載荷方法、ケーソン中詰材の影響の解明等、実構造物に即した検討を行う必要がある。また、衝撃荷重に対する港湾コンクリート構造物の限界状態の設定や、耐衝撃性の向上を目的とした

手法の検討を進めていくことも重要であると考える。

(2007年 2月 6日受付)

謝辞

本研究の一部は、(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り、(株)神戸製鋼所の竹鼻直人氏および山田岳史氏に深く感謝の意を表する。

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(東京理科大学)に感謝の意を表する。

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. 6
- 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) 上田茂, 小島晃: 衝撃的荷重を受ける RC および PC ばりの変形と強度, 港湾技研資料, No.430, 1982.9
- 6) 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
- 7) 土木学会: 衝撃実験・解析の基礎と応用, 2004
- 8) 林卓夫, 田中吉之助: 衝撃工学, 日刊工業新聞社, 1998
- 9) 日本道路協会: 道路橋示方書V耐震設計編, 2002. 3

付録 A 計測配置図

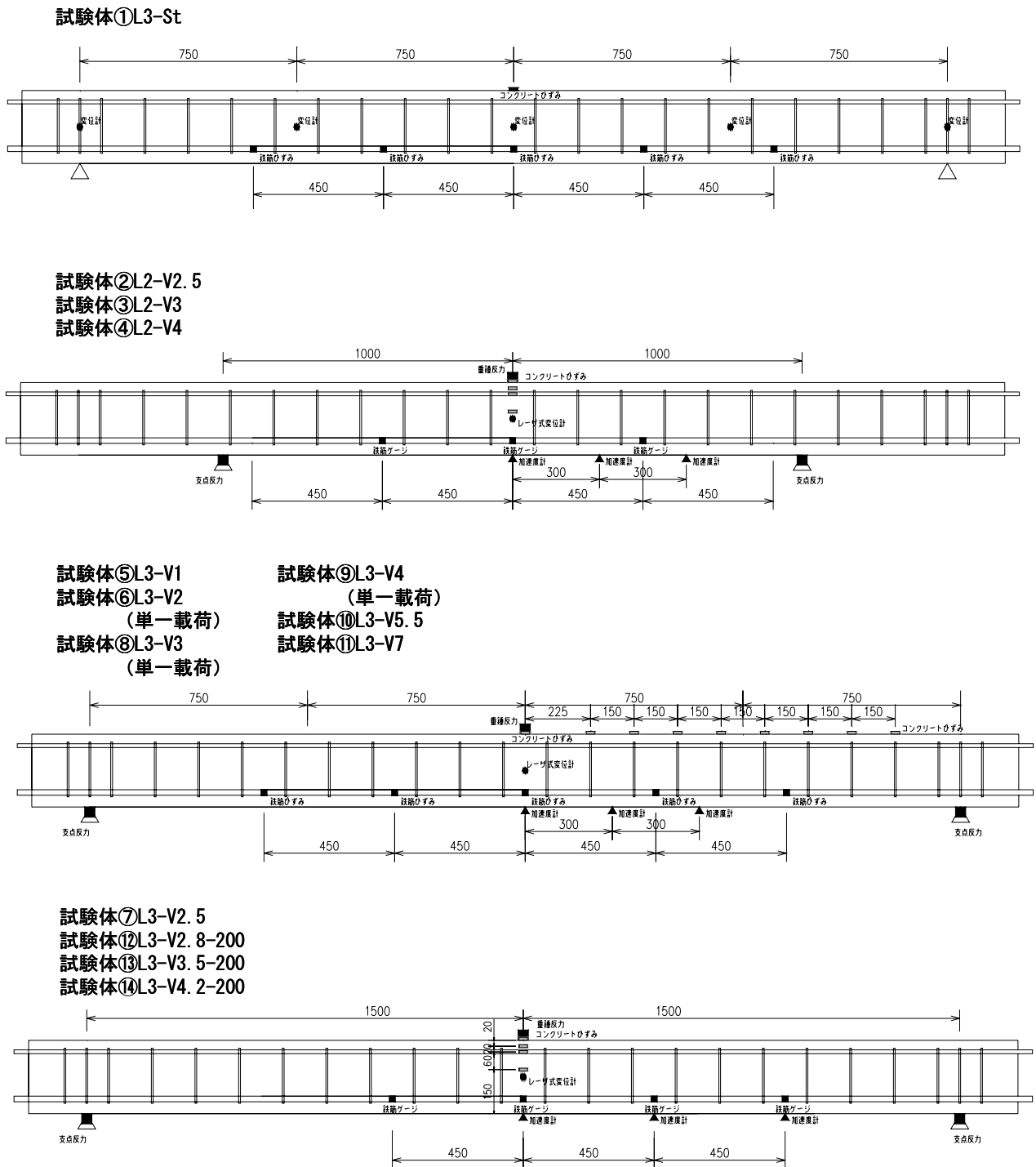
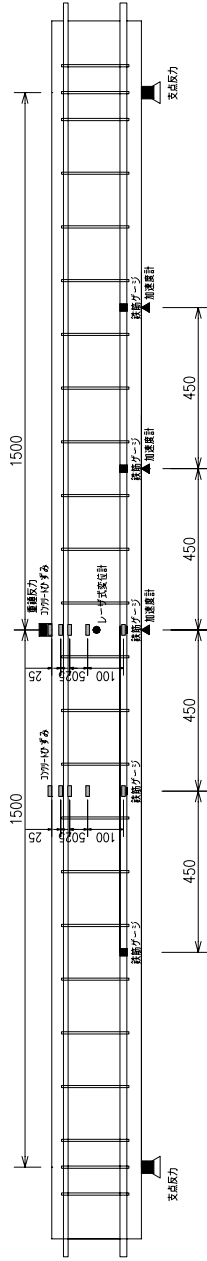
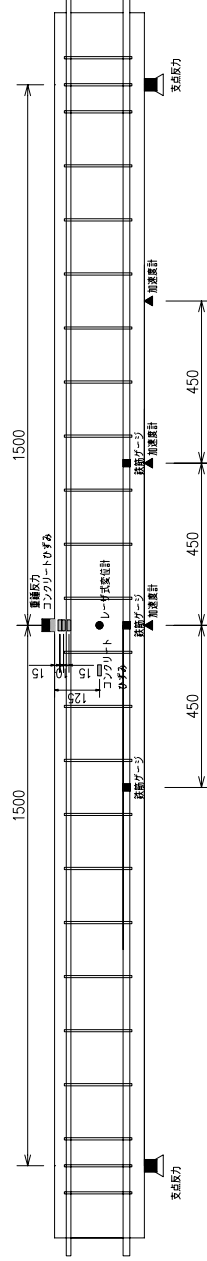


図-A.1 計測配置図(1)

試験体⑥L3-V2
(繰返し載荷)



試験体⑨L3-V4
(繰返し載荷)



試験体⑫L5-V2
試験体⑬L5-V3. 5-200
試験体⑭L5-V5. 7-200

試験体⑯L5-V4

試験体⑰L5-V3. 5-200

試験体⑱L5-V5. 7-200

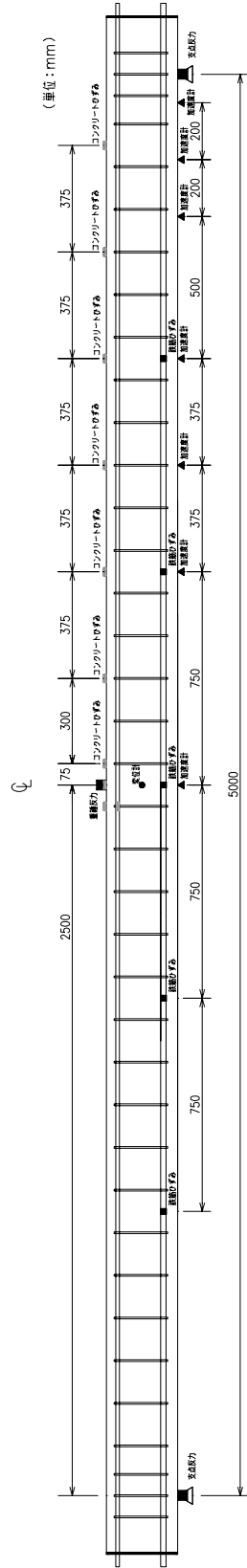


図-A.2 計測配置図(2)

付録B ひび割れ分布図

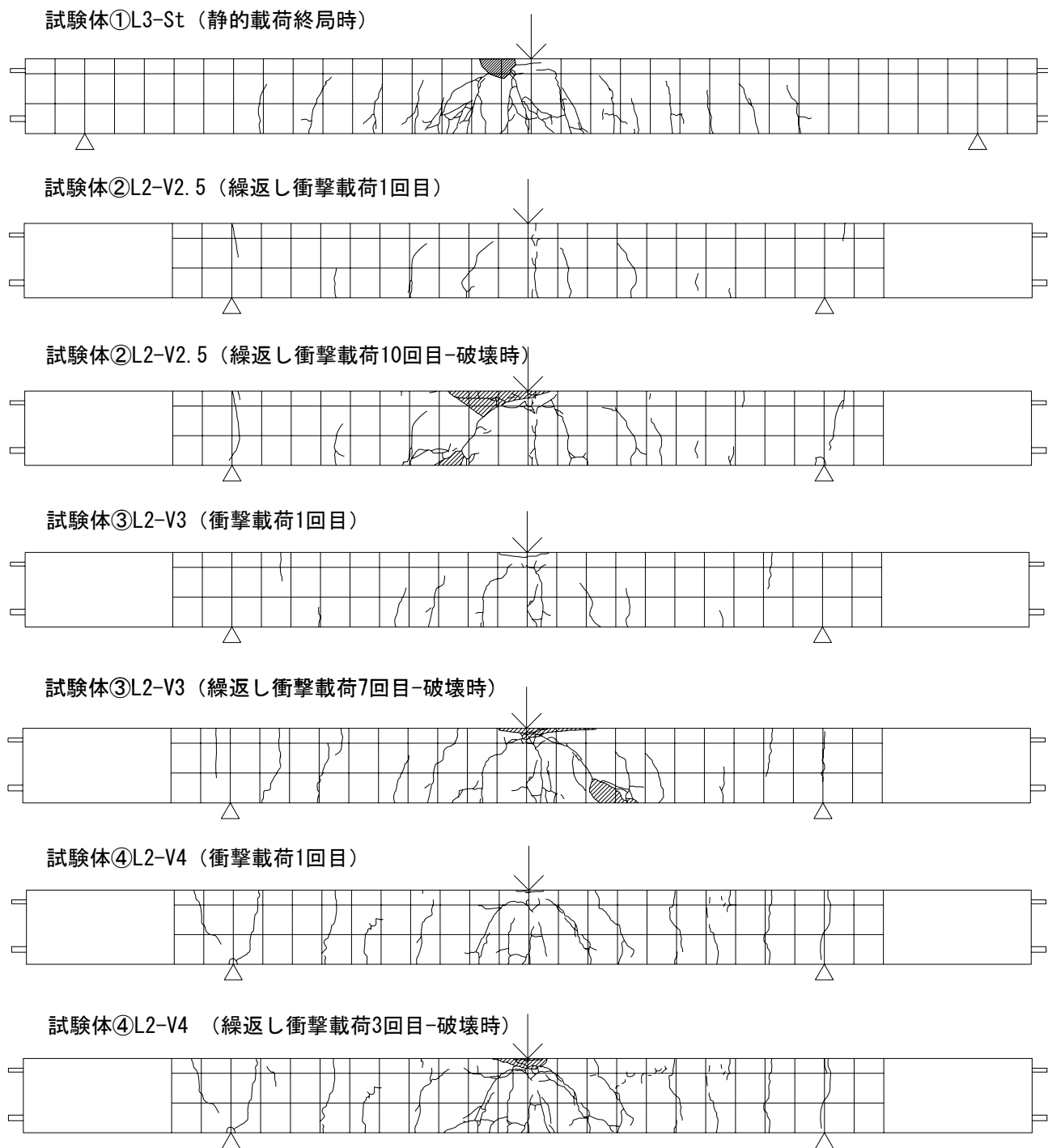


図-B.1 ひび割れ分布図(1)

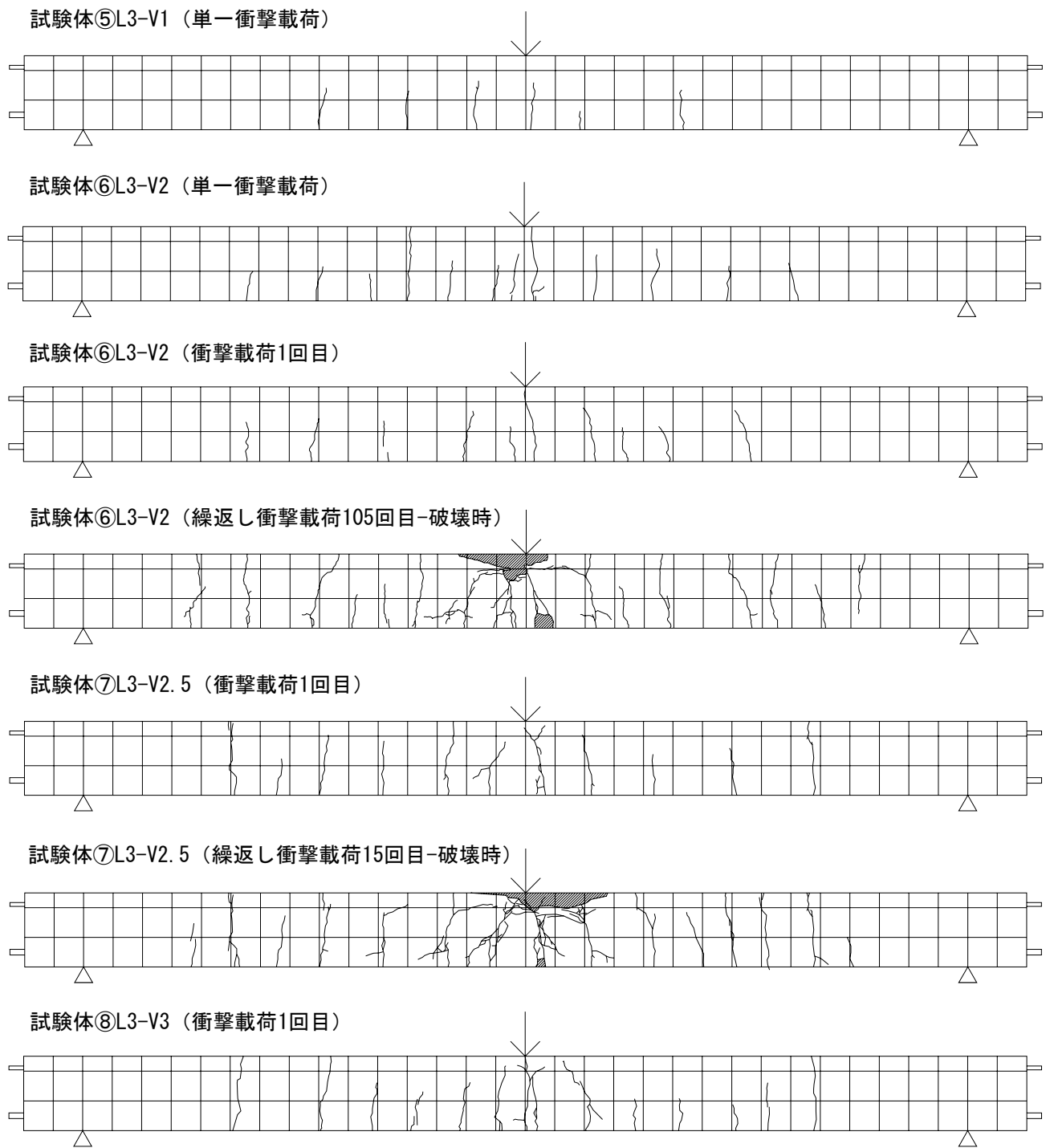


図-B.2 ひび割れ分布図(2)

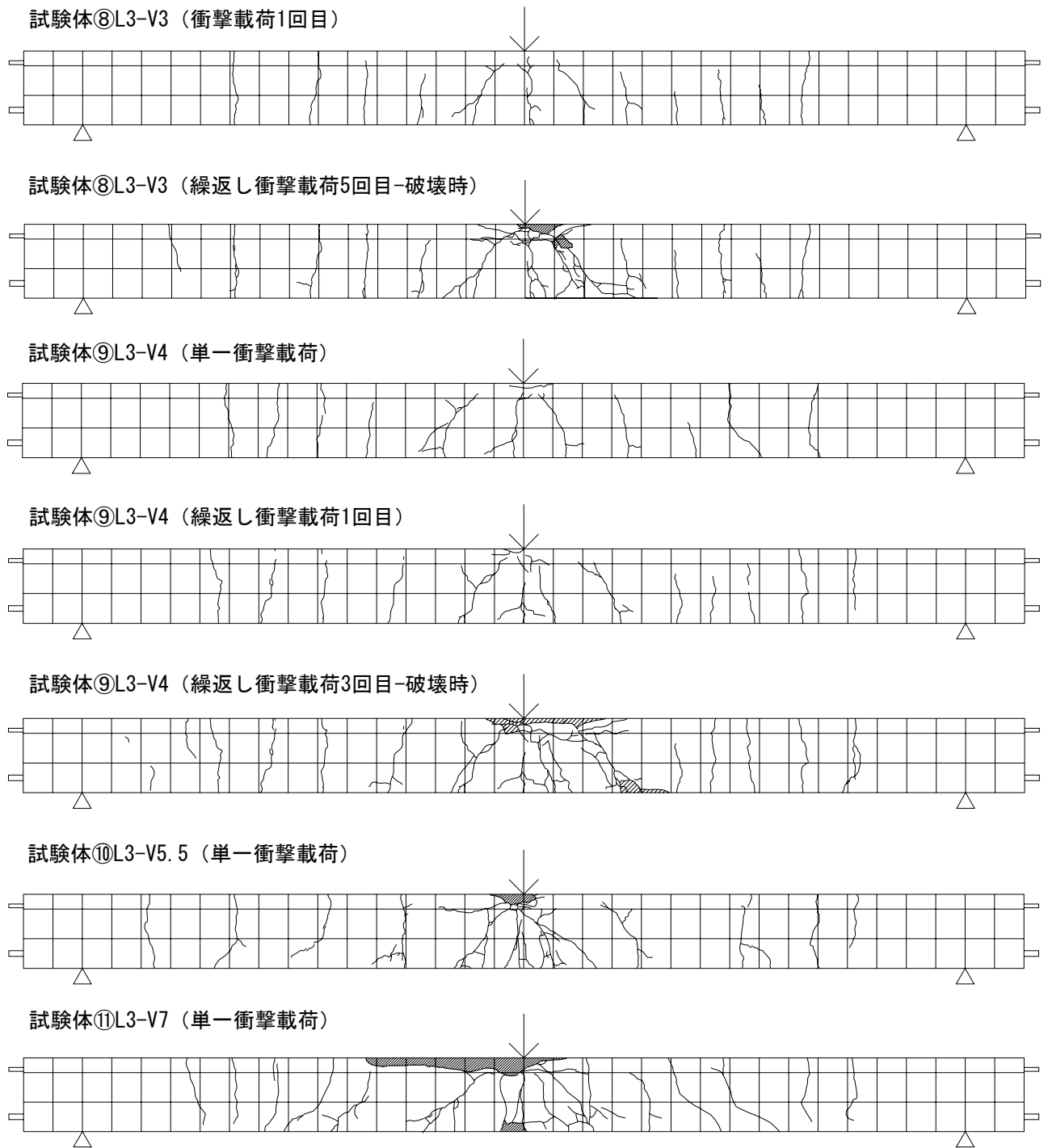
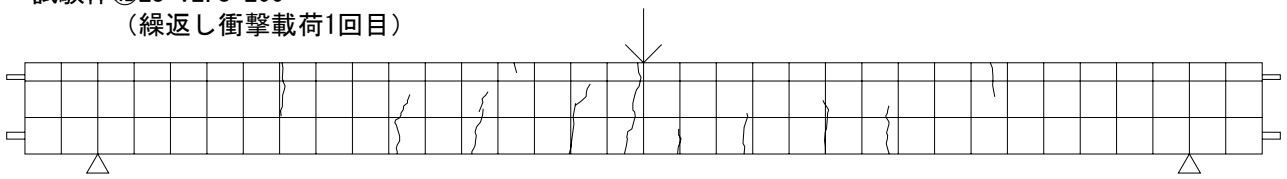
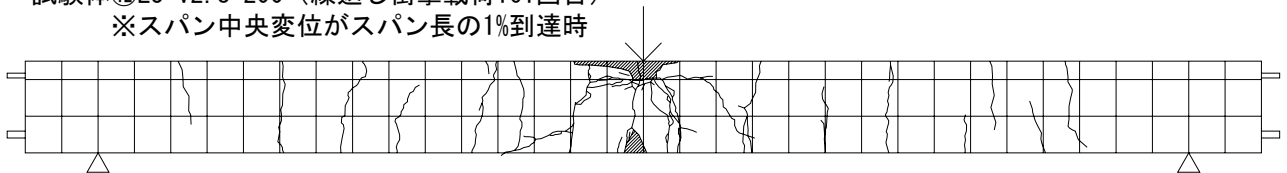


図-B.3 ひび割れ分布図(3)

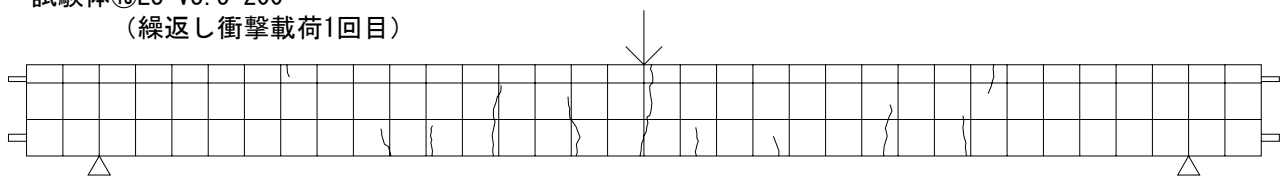
試験体⑫L3-V2. 8-200
 (繰返し衝撃载荷1回目)



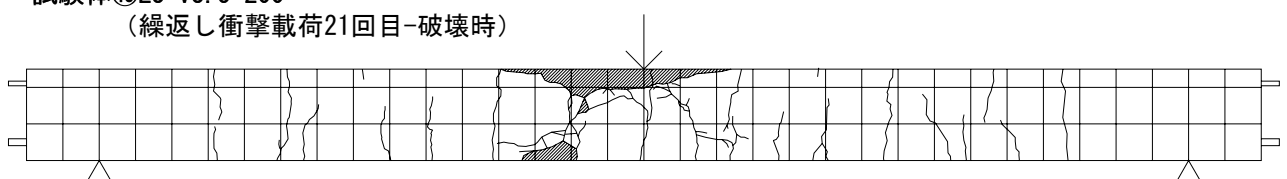
試験体⑫L3-V2. 8-200 (繰返し衝撃载荷161回目)
 ※スパン中央変位がスパン長の1%到達時



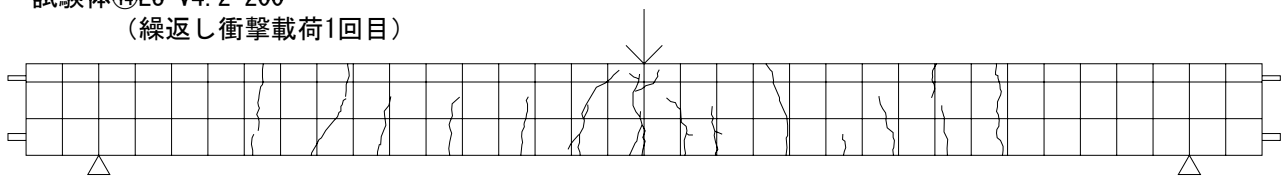
試験体⑬L3-V3. 5-200
 (繰返し衝撃载荷1回目)



試験体⑬L3-V3. 5-200
 (繰返し衝撃载荷21回目-破壊時)



試験体⑭L3-V4. 2-200
 (繰返し衝撃载荷1回目)



試験体⑭L3-V4. 2-200
 (繰返し衝撃载荷6回目-破壊時)

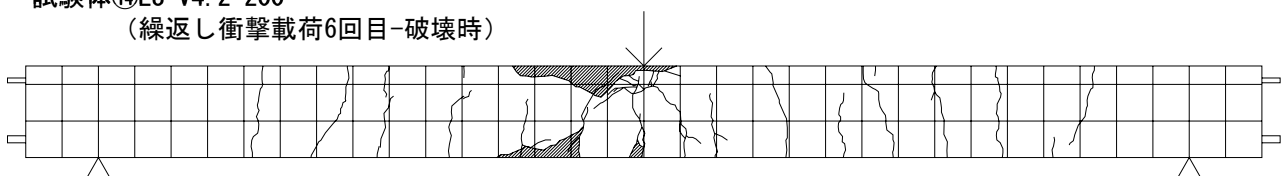
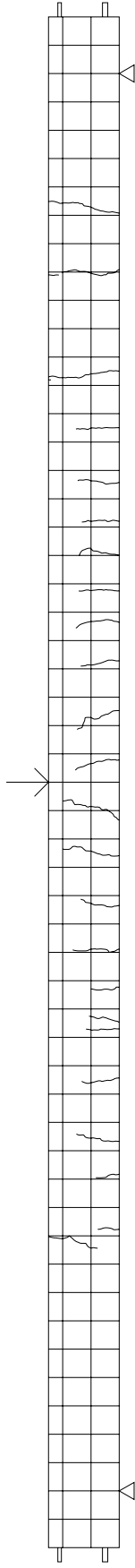
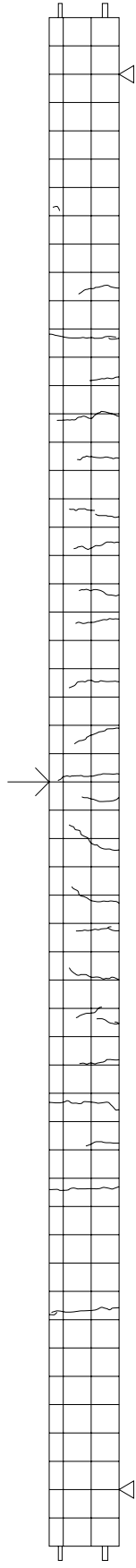


図-B.4 ひび割れ分布図(4)

試験体⑮L5-V2
(単一衝撃載荷)



試験体⑯L5-V2.5
(繰返し衝撃載荷1回目)



試験体⑰L5-V2.5
(繰返し衝撃載荷12回目-破壊時)

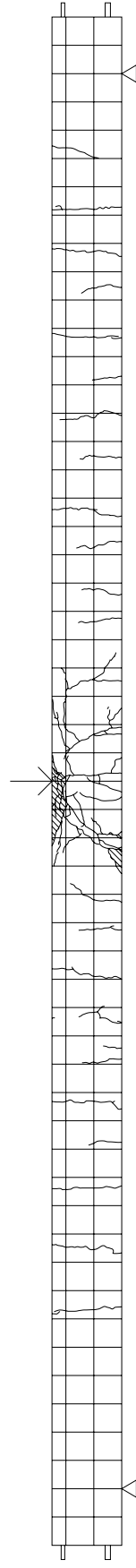
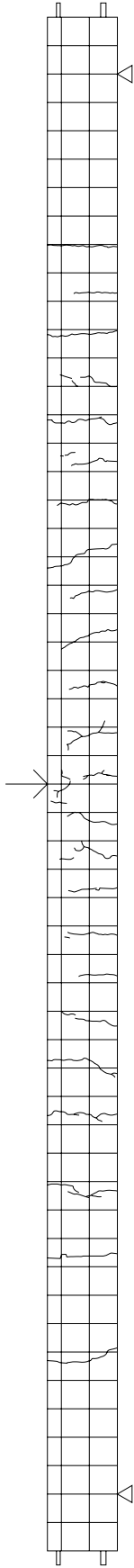
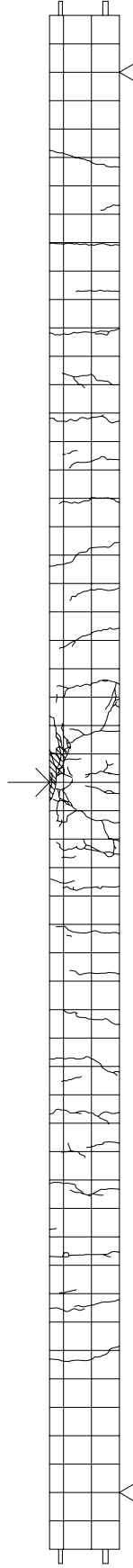


図-B.5 ひび割れ分布図(5)

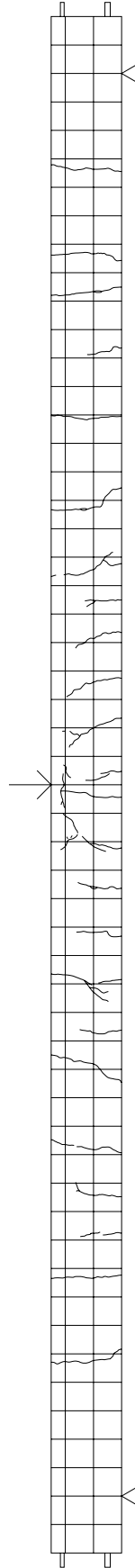
試験体⑰L5-V3
(繰返し衝撃載荷1回目)



試験体⑰L5-V3
(繰返し衝撃載荷6回目-破壊時)



試験体⑱L5-V4
(繰返し衝撃載荷1回目)



試験体⑱L5-V4
(繰返し衝撃載荷3回目-破壊時)

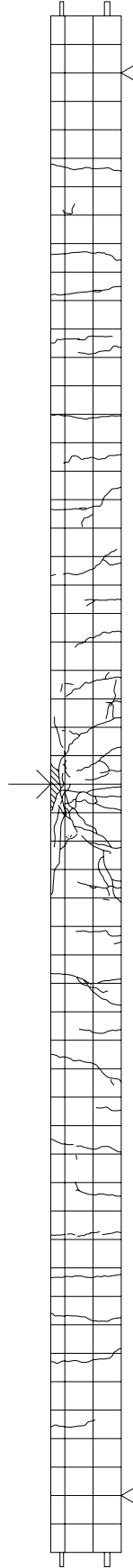
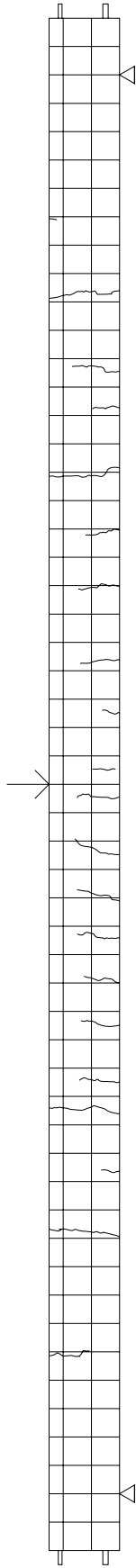
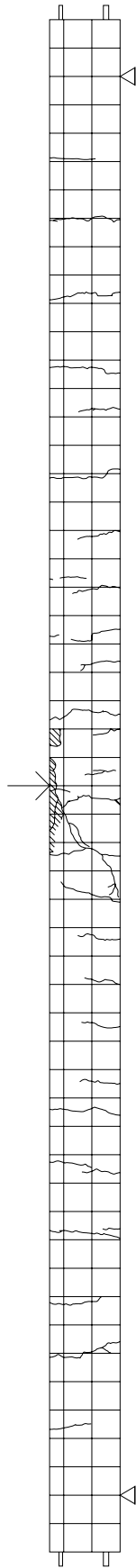


図-B.6 ひび割れ分布図(6)

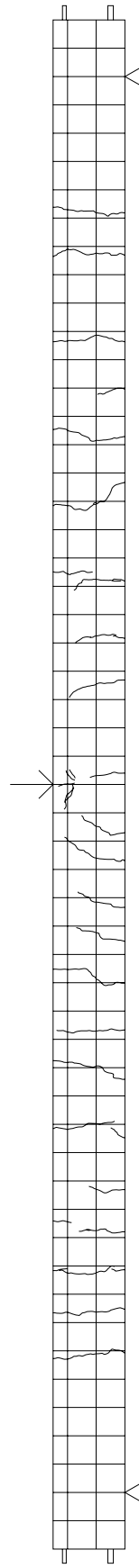
試験体⑨L5-V3. 5-200
(繰返し衝撃載荷1回目)



試験体⑩L5-V3. 5-200
(繰返し衝撃載荷15回目-破壊時)



試験体⑪L5-V5. 7-200
(繰返し衝撃載荷1回目)



試験体⑫L5-V5. 7-200
(繰返し衝撃載荷4回目-破壊時)

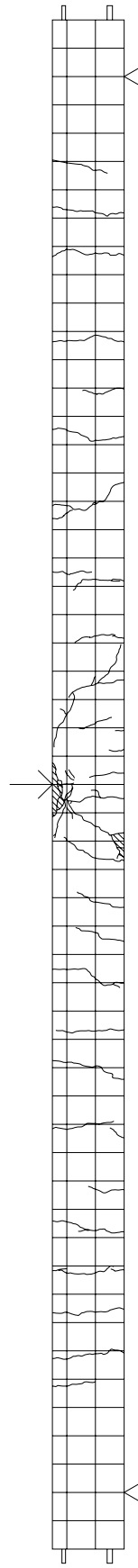
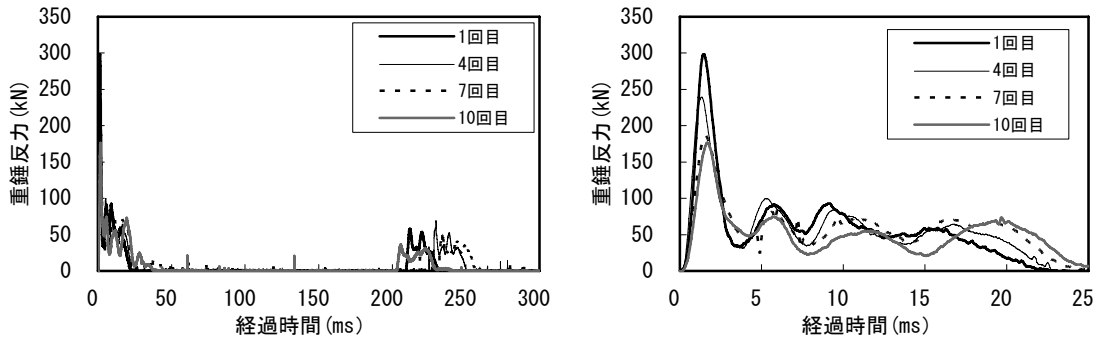
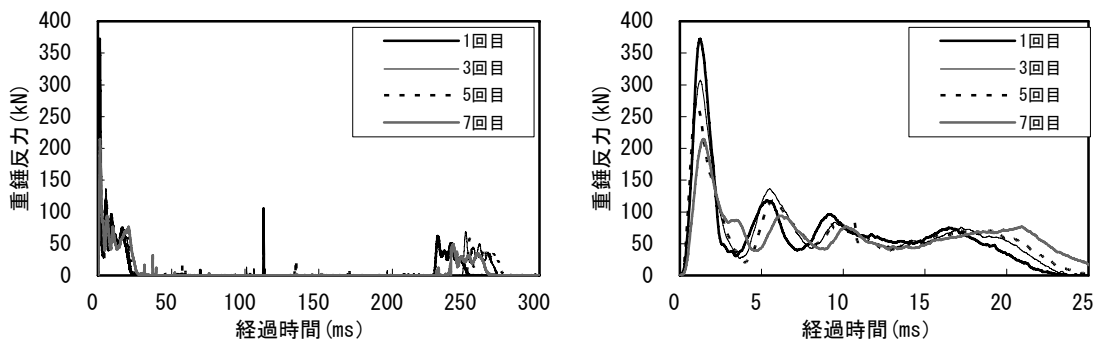


図-B.7 ひび割れ分布図(7)

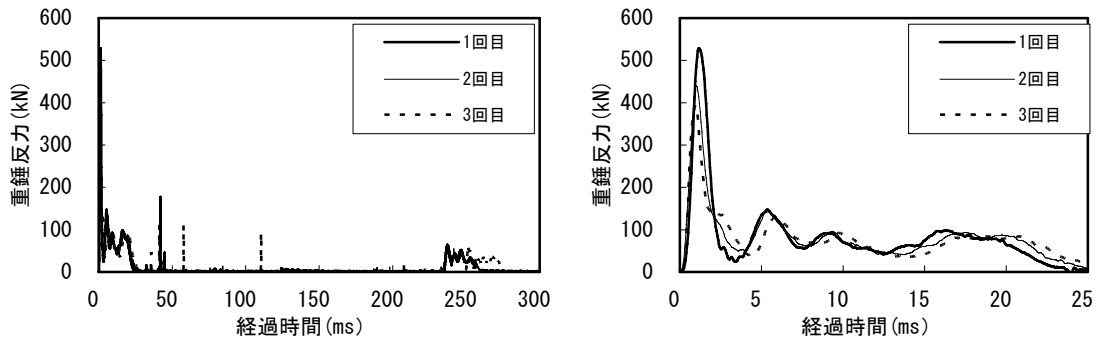
付録 C 重錘反力時刻歴応答



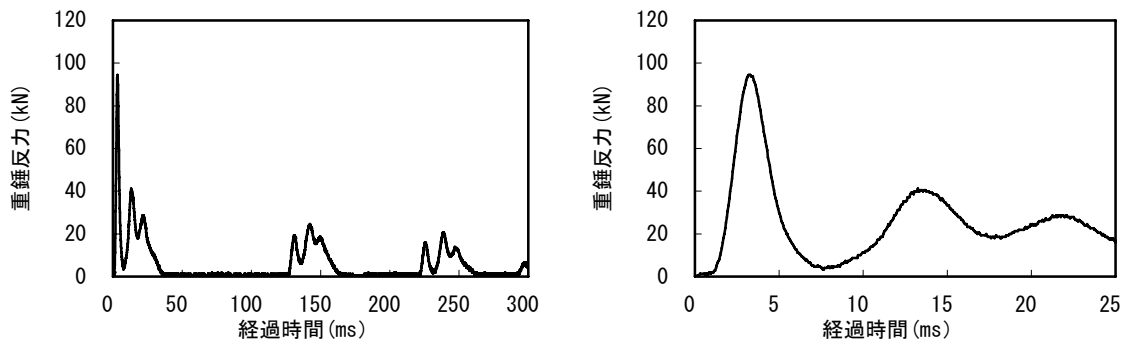
試験体②L2-V2.5 (繰返し衝撃载荷)



試験体③L2-V3 (繰返し衝撃载荷)

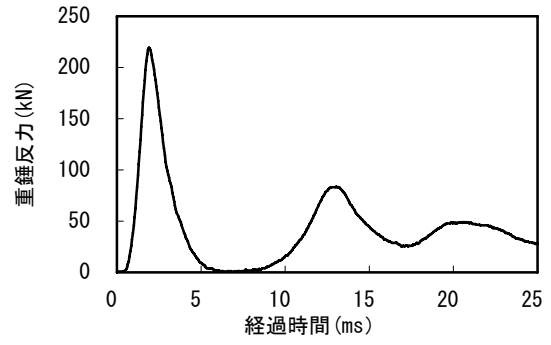
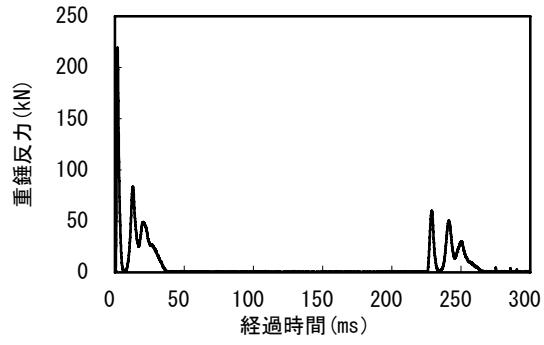


試験体④L2-V4 (繰返し衝撃载荷)

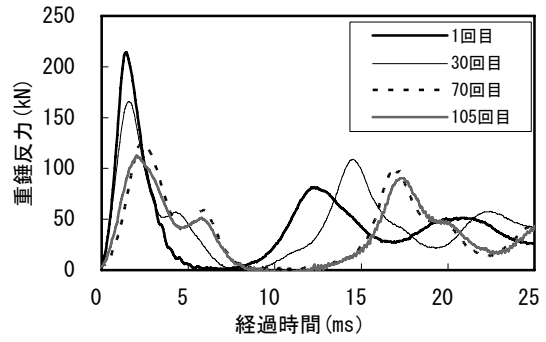
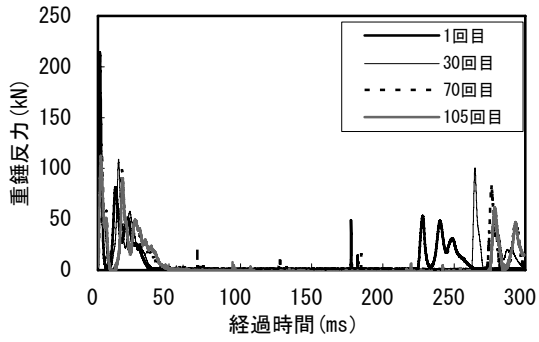


試験体⑤L3-V1 (単一衝撃载荷)

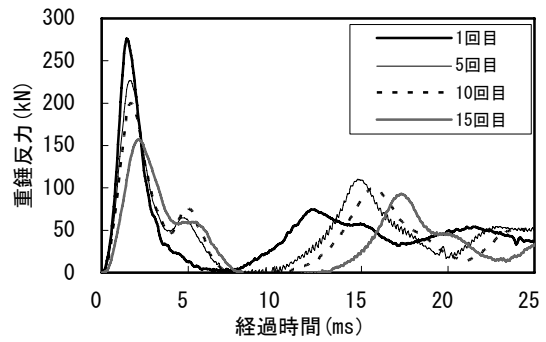
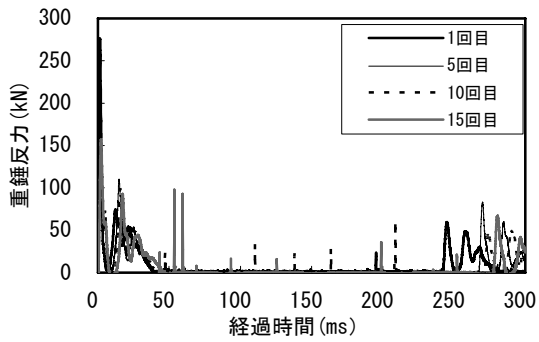
図-C.1 重錘反力時刻歴応答(1)



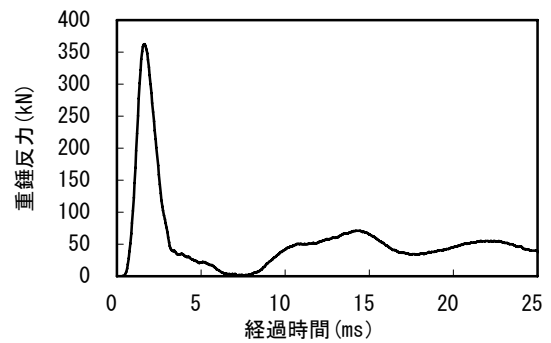
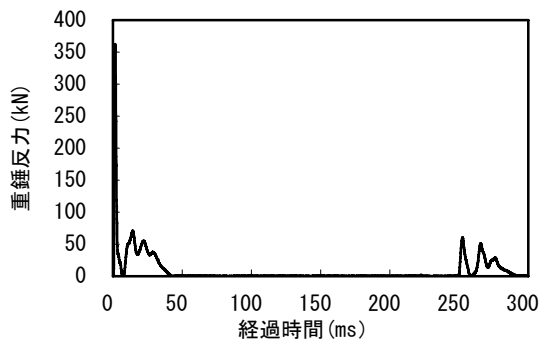
試験体⑥L3-V2 (単一衝撃载荷)



試験体⑥L3-V2 (繰返し衝撃载荷)

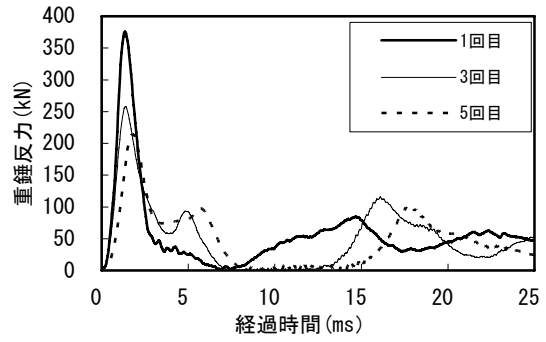
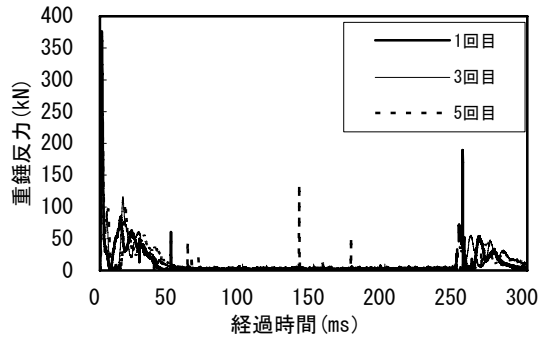


試験体⑦L3-V2.5 (繰返し衝撃载荷)

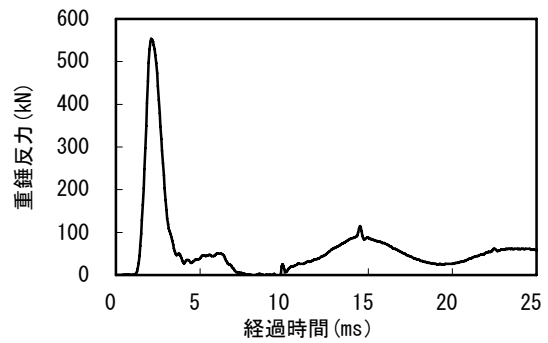
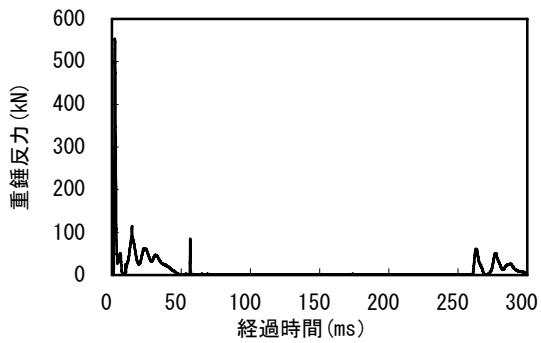


試験体⑧L3-V3 (単一衝撃载荷)

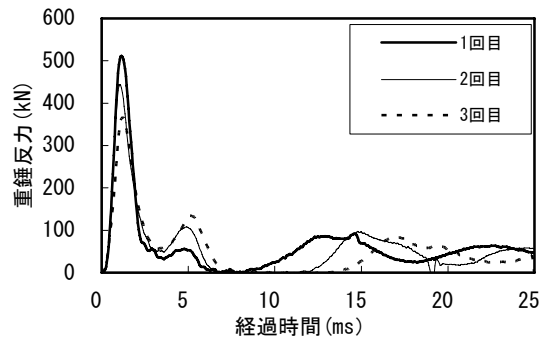
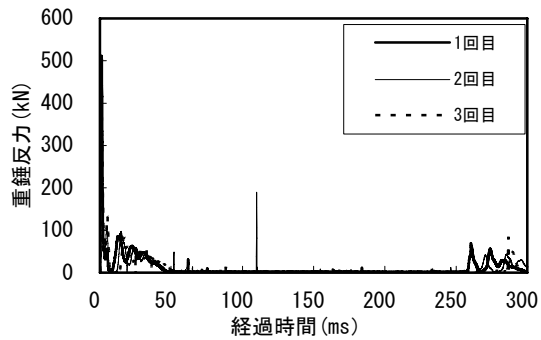
図-C.2 重錘反力時刻歴応答(2)



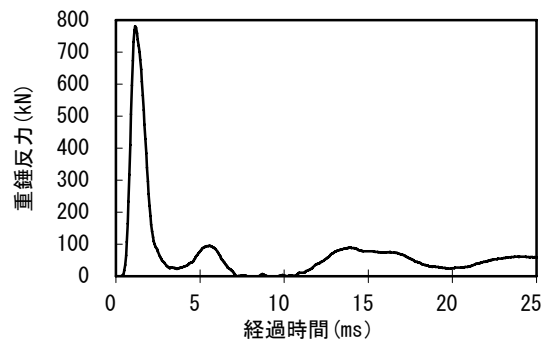
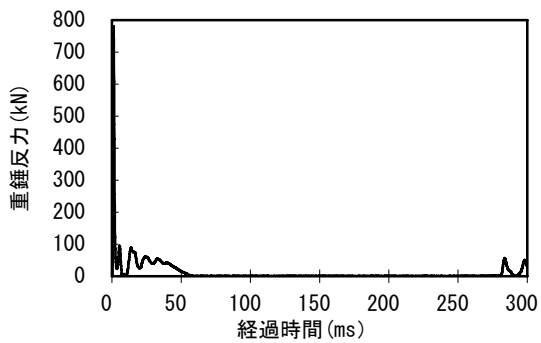
試験体⑧L3-V3 (繰返し衝撃载荷)



試験体⑨L3-V4 (単一衝撃载荷)

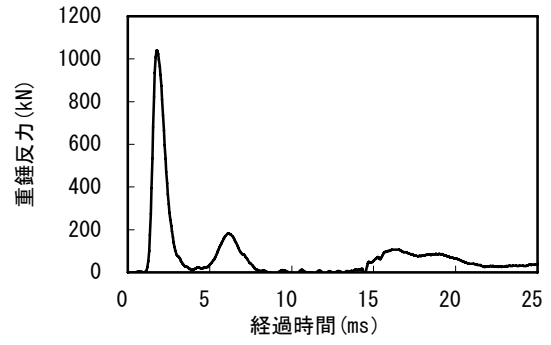
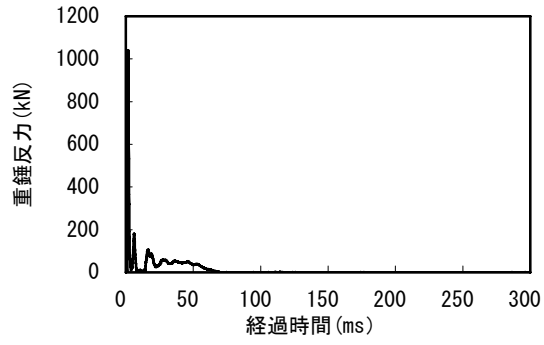


試験体⑨L3-V4 (繰返し衝撃载荷)

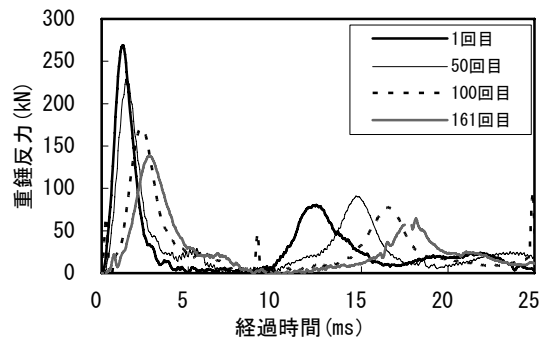
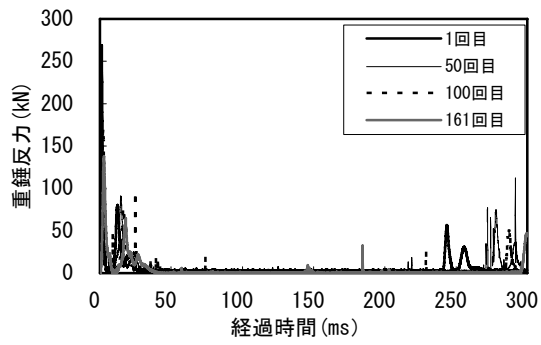


試験体⑩L3-V5.5 (単一衝撃载荷)

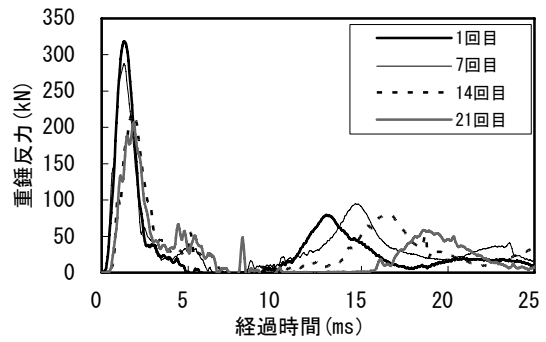
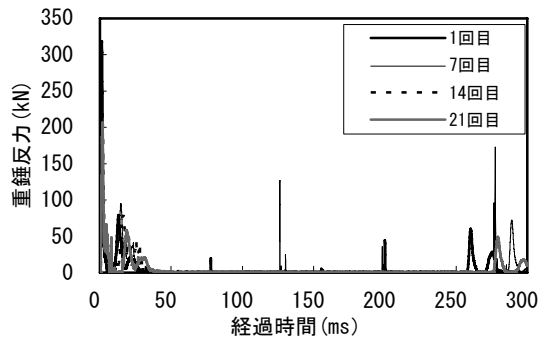
図-C.3 重錘反力時刻歴応答(3)



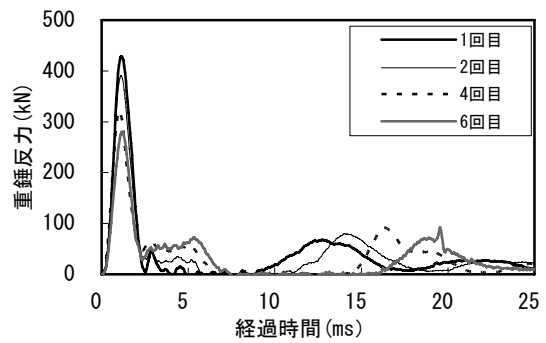
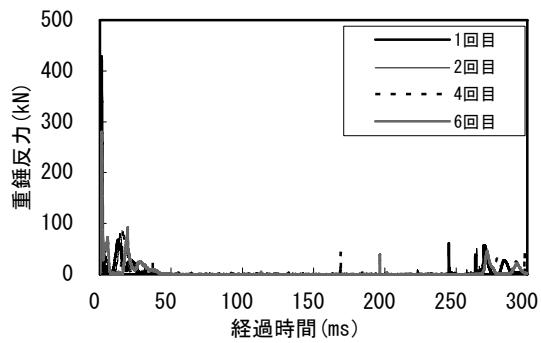
試験体①L3-V7 (単一衝撃载荷)



試験体②L3-V2.8-200 (繰返し衝撃载荷)

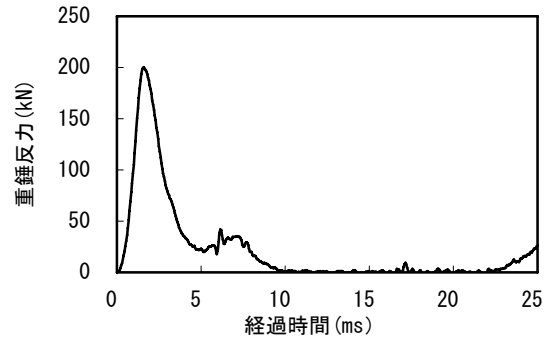
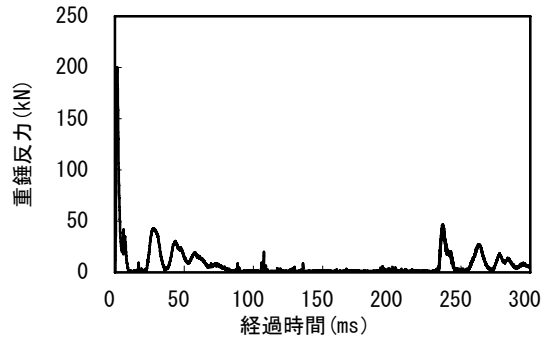


試験体③L3-V3.5-200 (繰返し衝撃载荷)

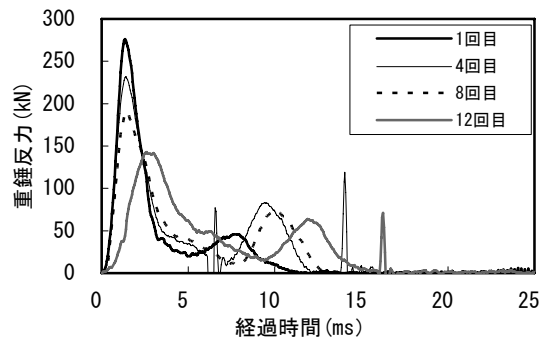
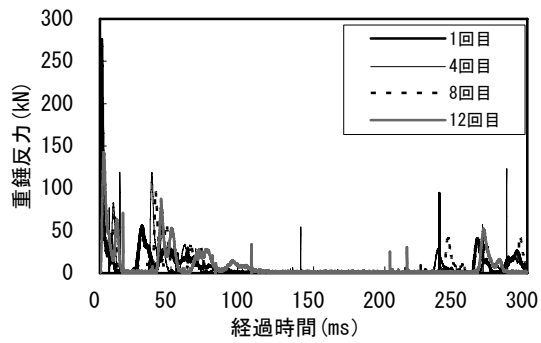


試験体④L3-V4.2-200 (繰返し衝撃载荷)

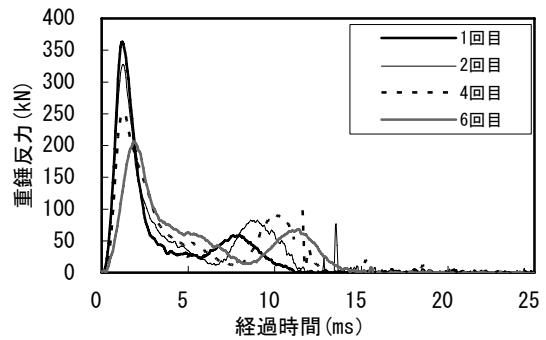
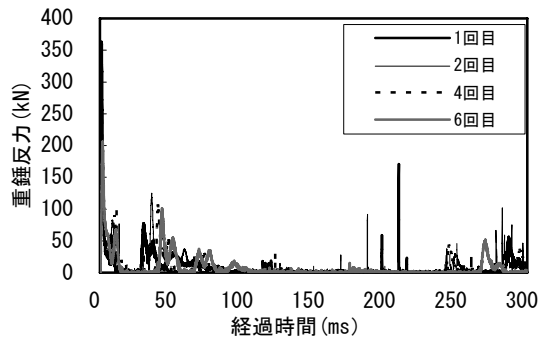
図-C.4 重錘反力時刻歴応答(4)



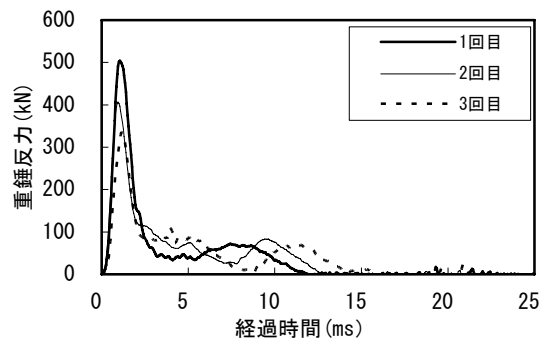
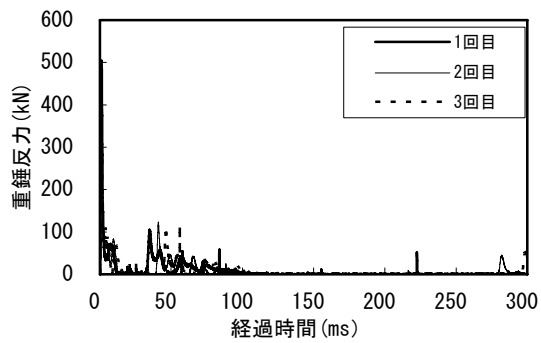
試験体⑮L5-V2 (単一衝撃载荷)



試験体⑯L5-V2.5 (繰返し衝撃载荷)

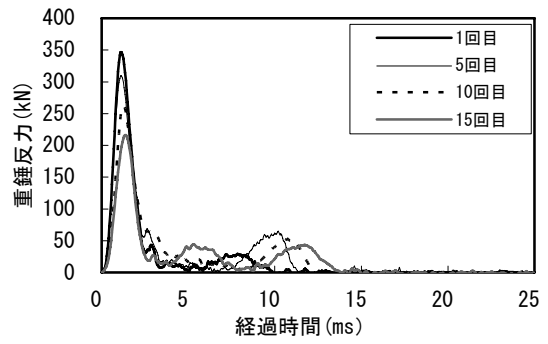
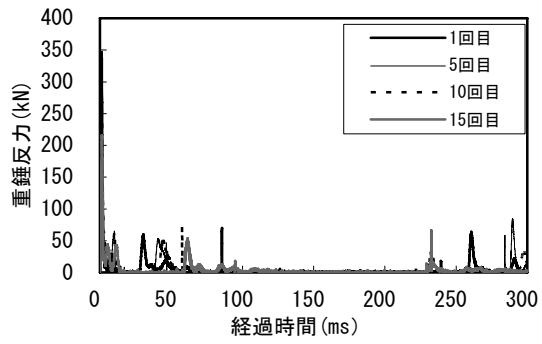


試験体⑰L5-V3 (繰返し衝撃载荷)

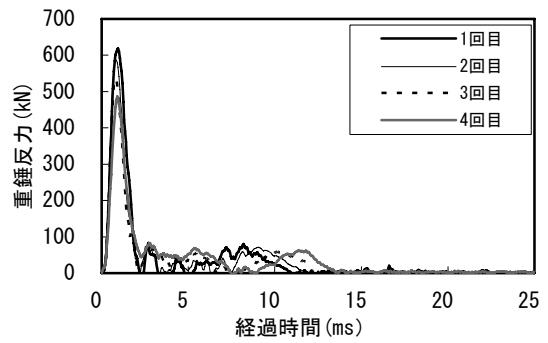
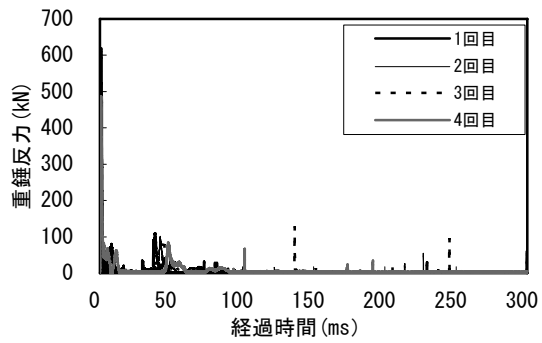


試験体⑱L5-V4 (繰返し衝撃载荷)

図-C.5 重錘反力時刻歴応答(5)



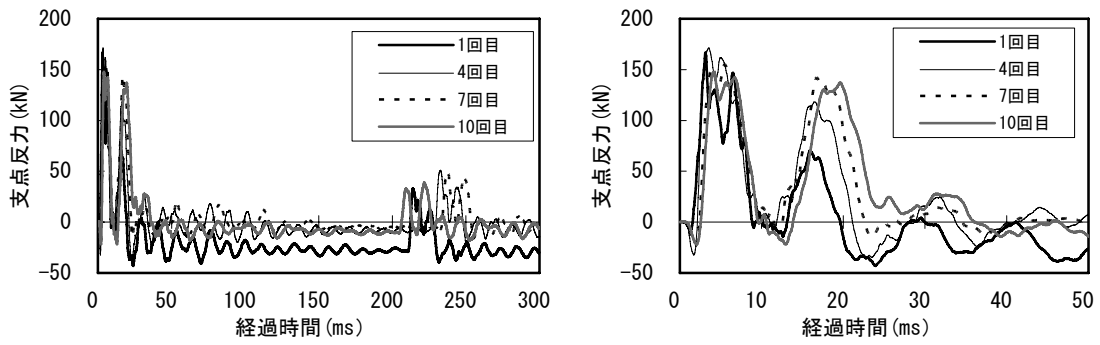
試験体⑱L5-V3.5-200 (繰返し衝撃载荷)



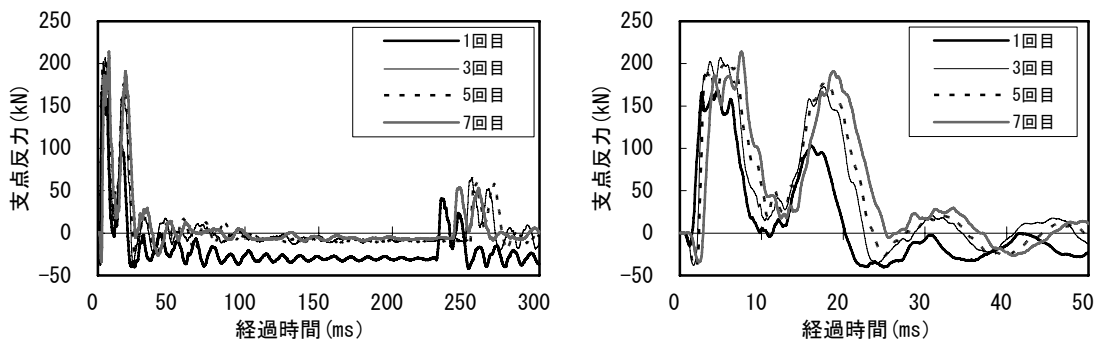
試験体⑳L5-V5.7-200 (繰返し衝撃载荷)

図-C.6 重錘反力時刻歴応答(6)

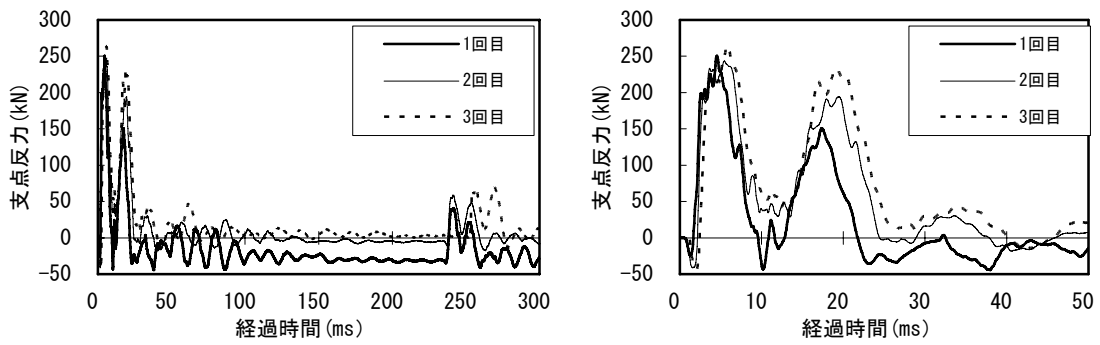
付録D 支点反力時刻歴応答



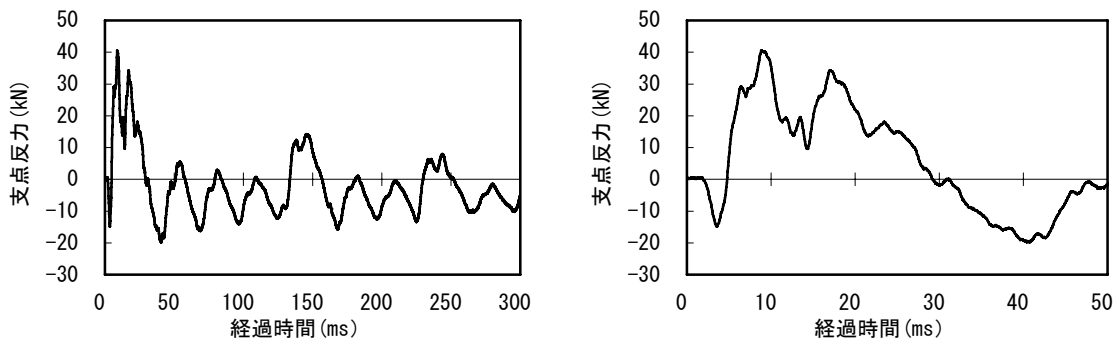
試験体②L2-V2.5 (繰返し衝撃载荷)



試験体③L2-V3 (繰返し衝撃载荷)

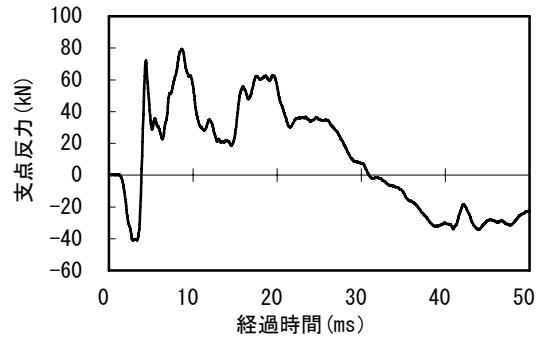
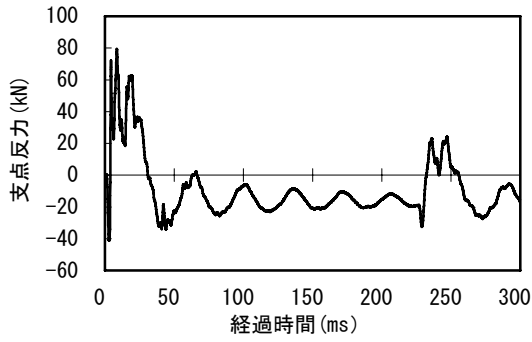


試験体④L2-V4 (繰返し衝撃载荷)

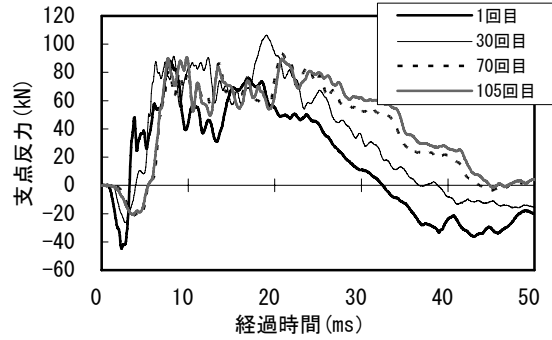
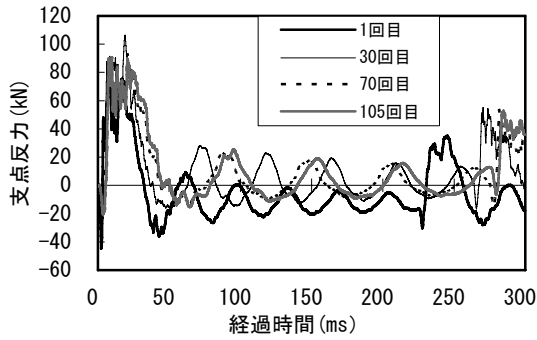


試験体⑤L3-V1 (単一衝撃载荷)

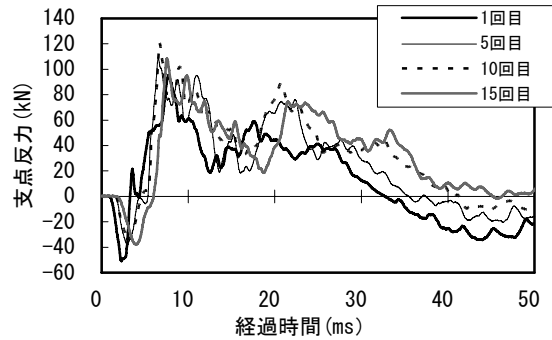
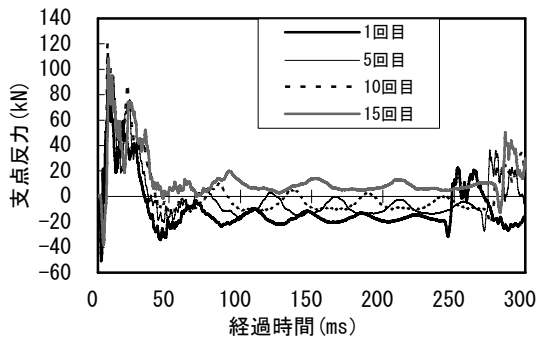
図-D.1 支点反力時刻歴応答(1)



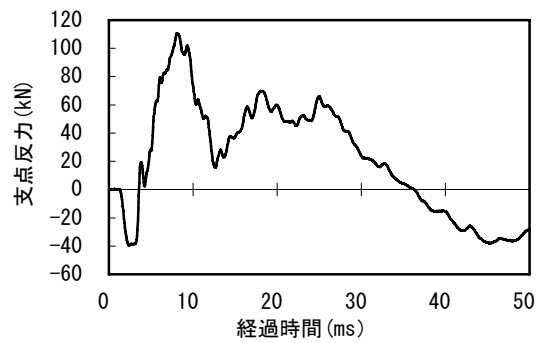
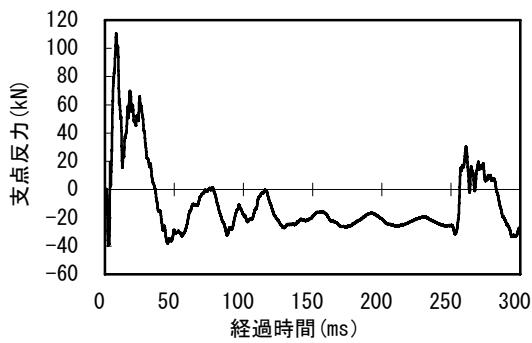
試験体⑥L3-V2 (単一衝撃载荷)



試験体⑥L3-V2 (繰返し衝撃载荷)

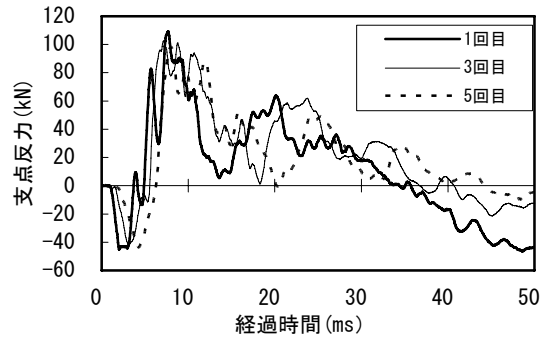
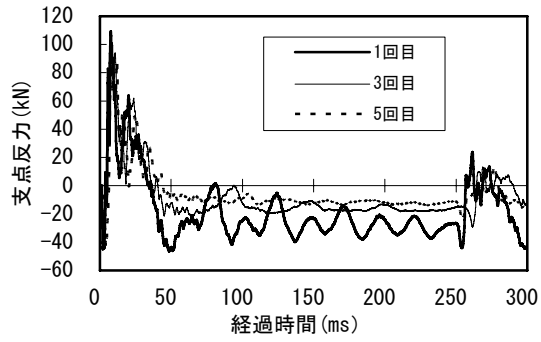


試験体⑦L3-V2.5 (繰返し衝撃载荷)

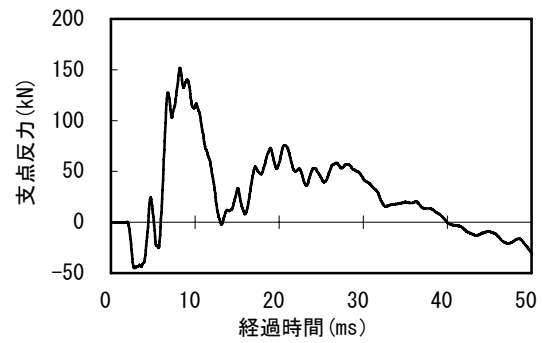
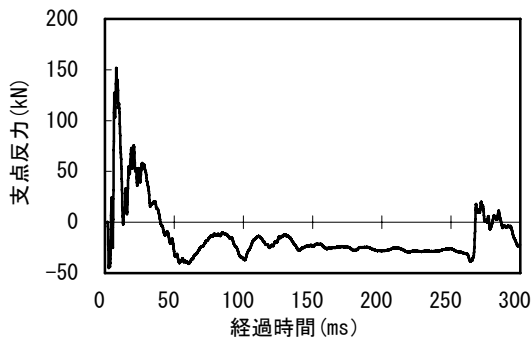


試験体⑧L3-V3 (単一衝撃载荷)

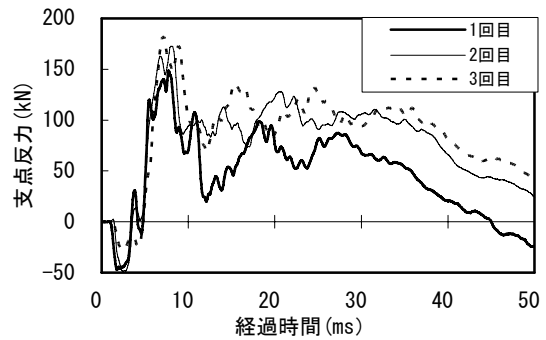
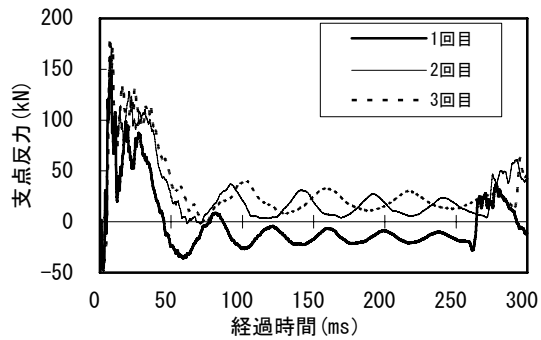
図-D.2 支点反力時刻歴応答(2)



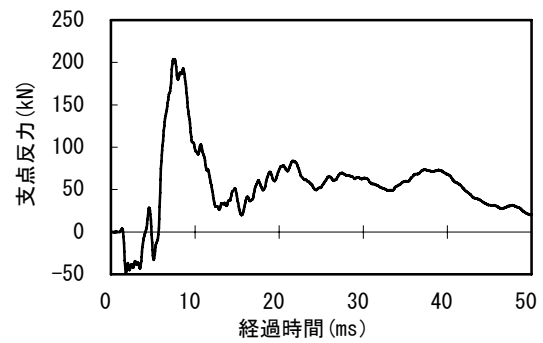
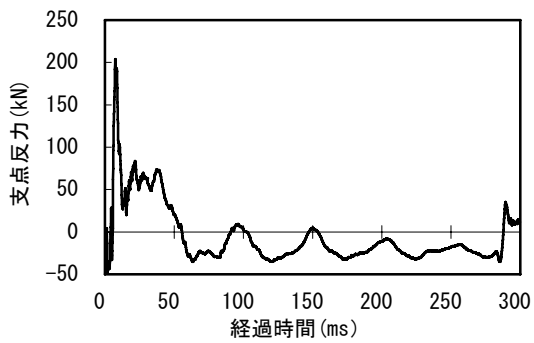
試験体⑧L3-V3 (繰返し衝撃载荷)



試験体⑨L3-V4 (単一衝撃载荷)

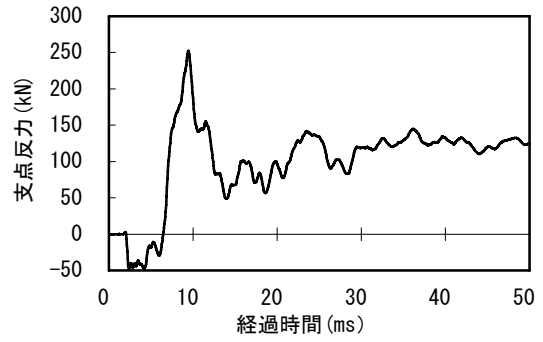
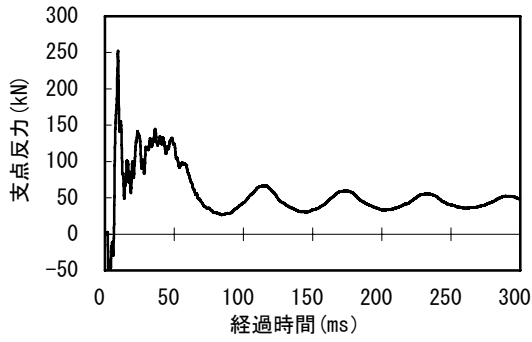


試験体⑨L3-V4 (繰返し衝撃载荷)

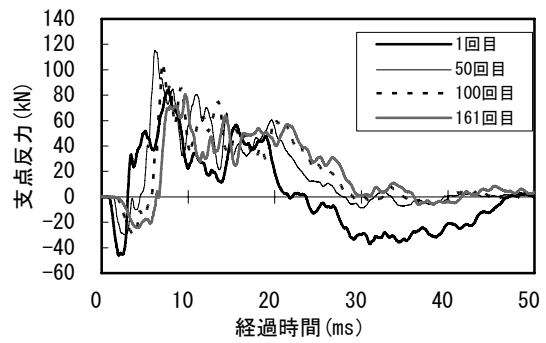
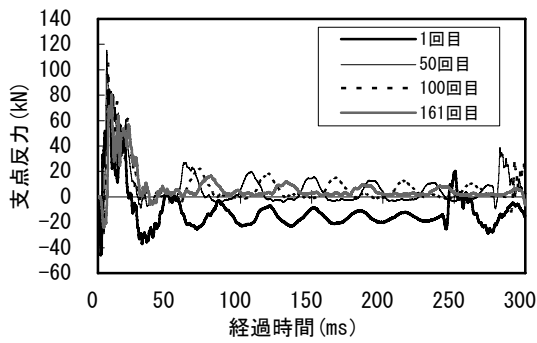


試験体⑩L3-V5.5 (単一衝撃载荷)

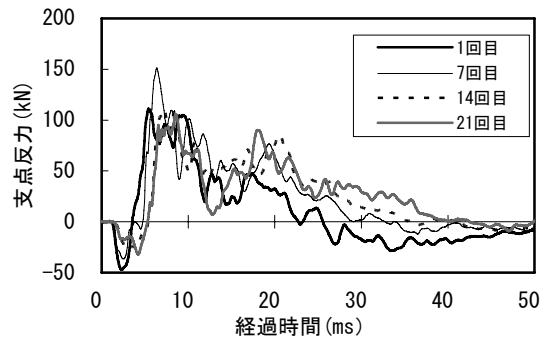
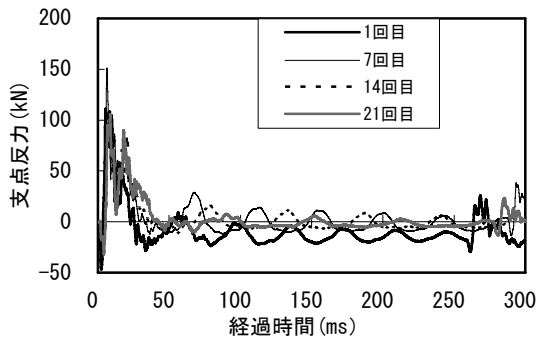
図-D.3 支反力時刻歴応答(3)



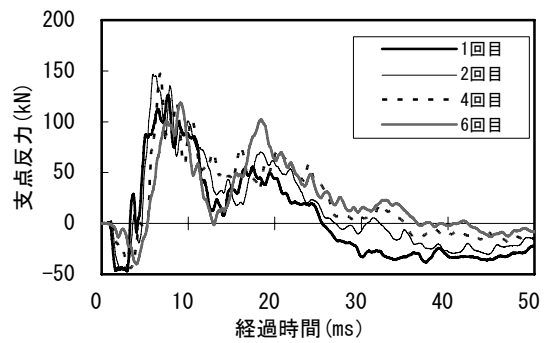
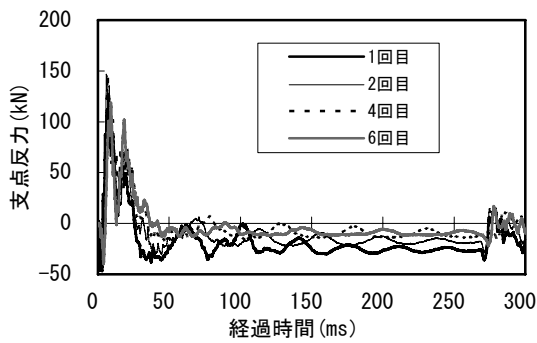
試験体①L3-V7 (単一衝撃载荷)



試験体②L3-V2.8-200 (繰返し衝撃载荷)

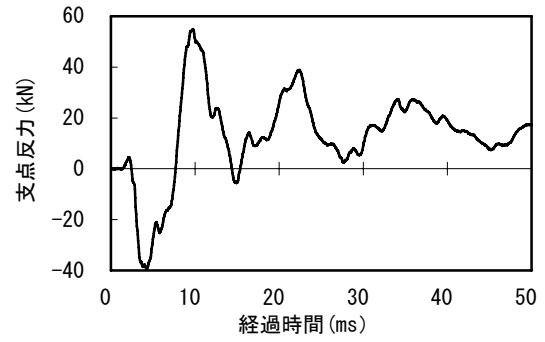
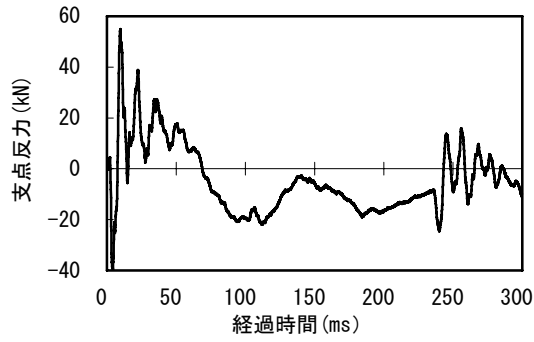


試験体③L3-V3.5-200 (繰返し衝撃载荷)

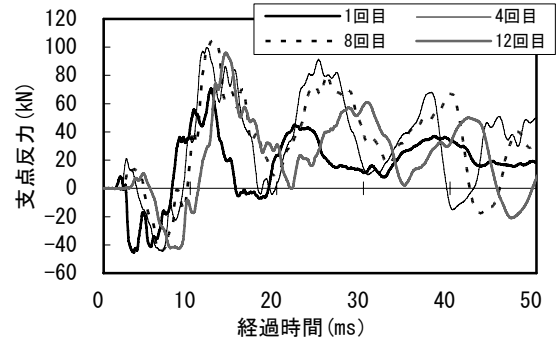
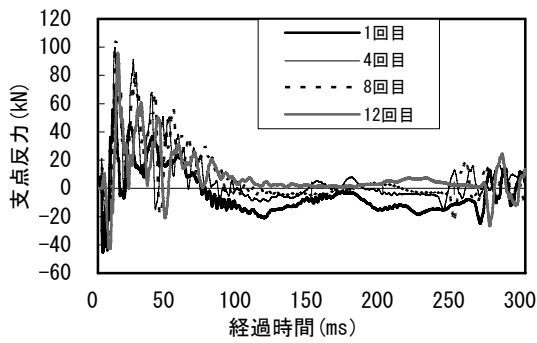


試験体④L3-V4.2-200 (繰返し衝撃载荷)

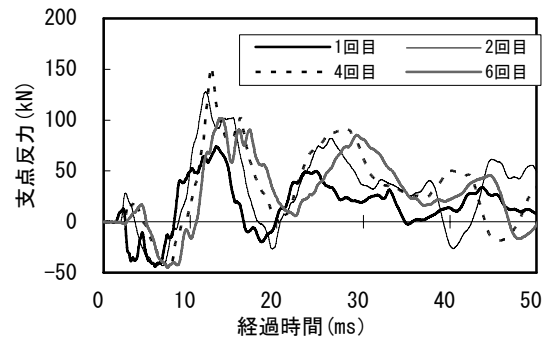
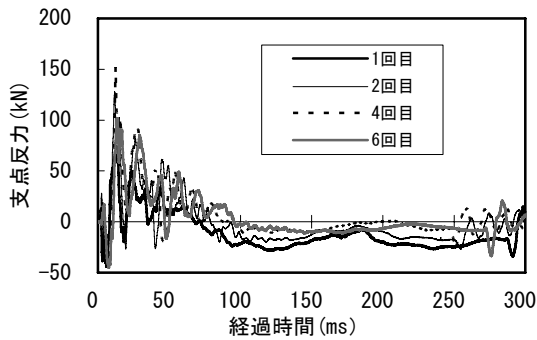
図-D.4 支点反力時刻歴応答(4)



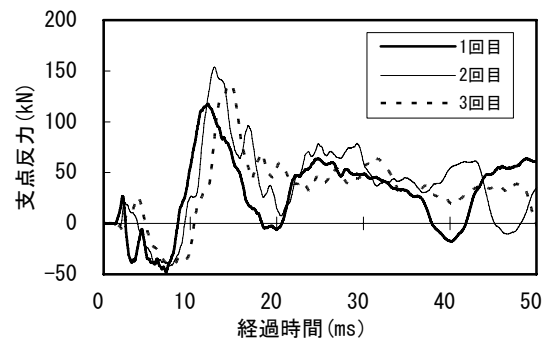
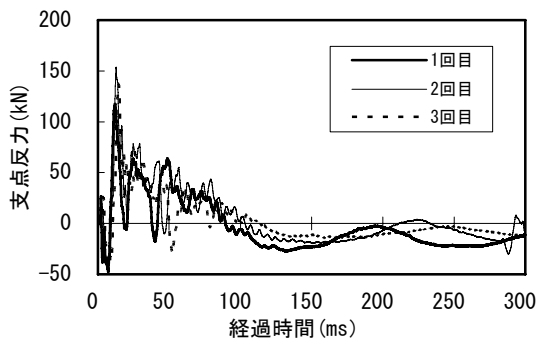
試験体⑮L5-V2 (単一衝撃载荷)



試験体⑯L5-V2.5 (繰返し衝撃载荷)

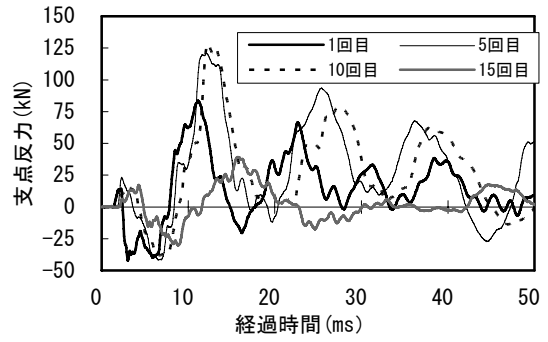
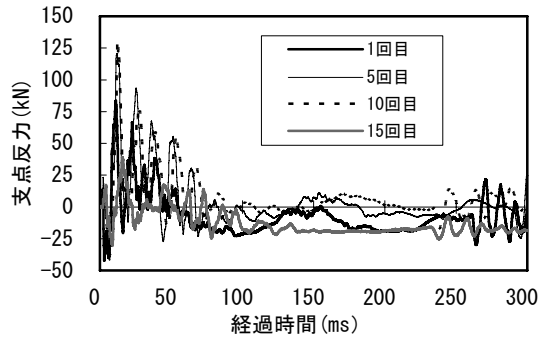


試験体⑰L5-V3 (繰返し衝撃载荷)

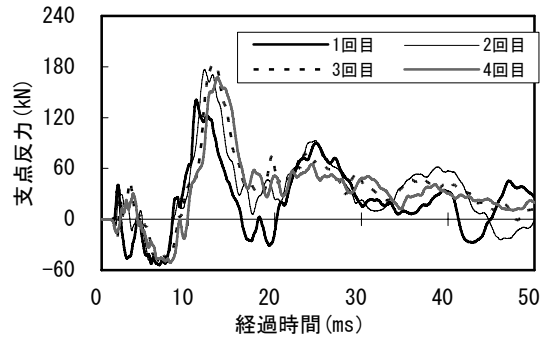
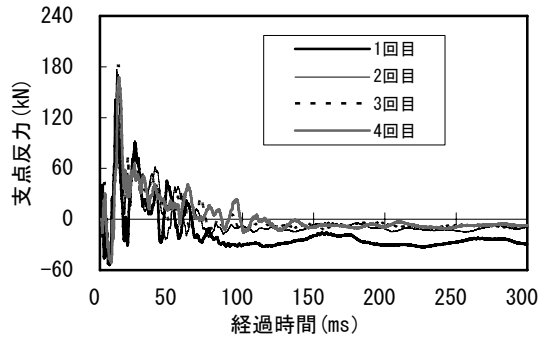


試験体⑱L5-V4 (繰返し衝撃载荷)

図-D.5 支点反力時刻歴応答(5)



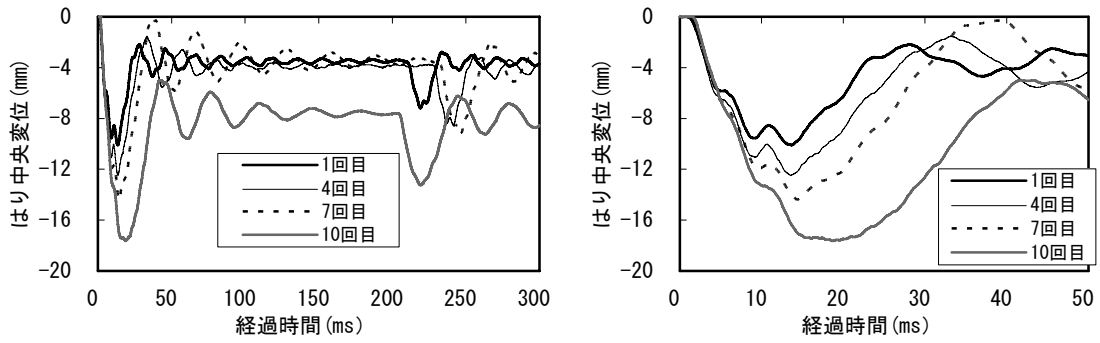
試験体⑱L5-V3.5-200 (繰返し衝撃载荷)



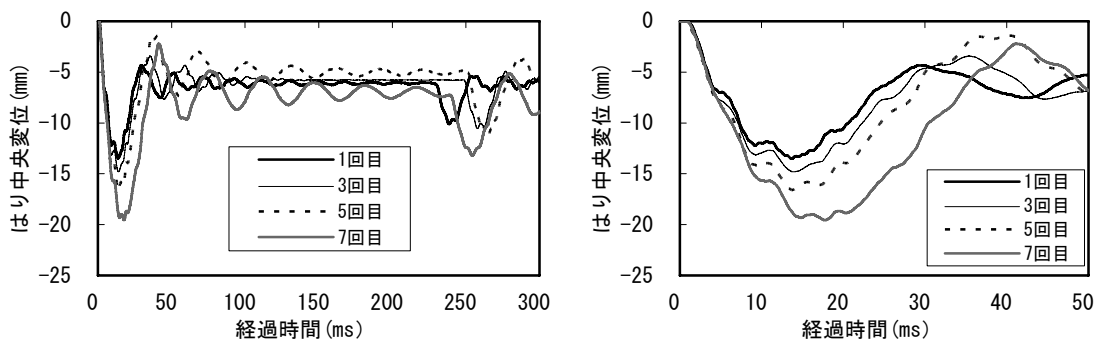
試験体⑳L5-V5.7-200 (繰返し衝撃载荷)

図-D.6 支点反力時刻歴応答(6)

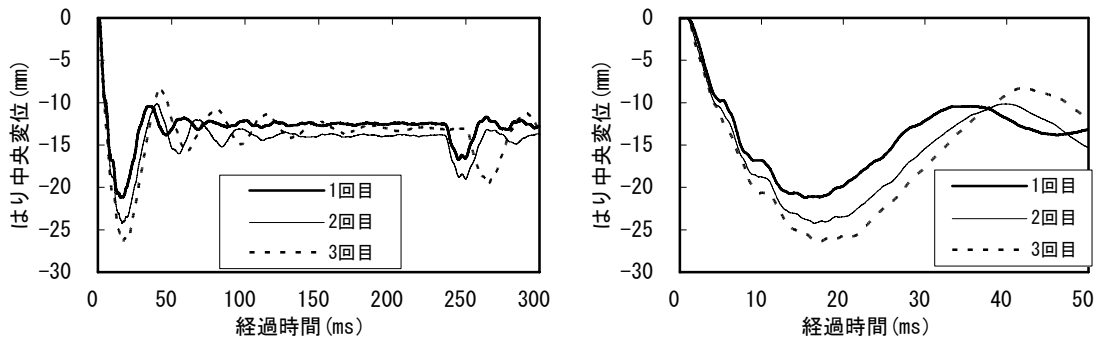
付録 E はり中央変位時刻歴応答



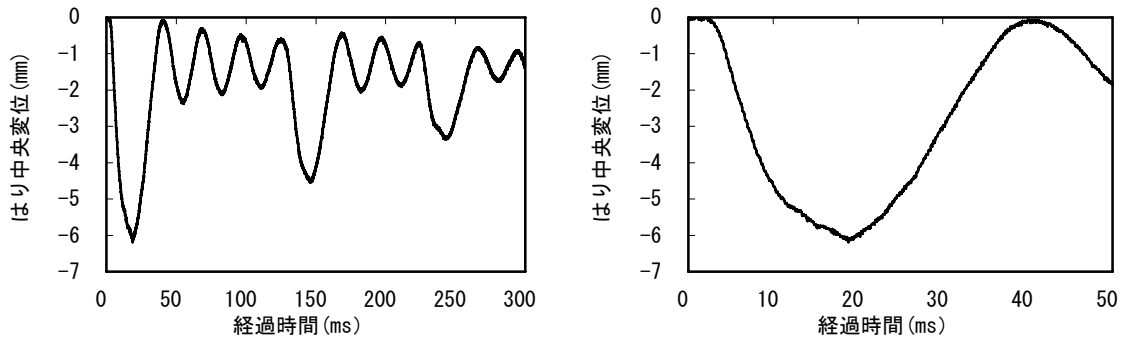
試験体②L2-V2.5 (繰返し衝撃载荷)



試験体③L2-V3 (繰返し衝撃载荷)

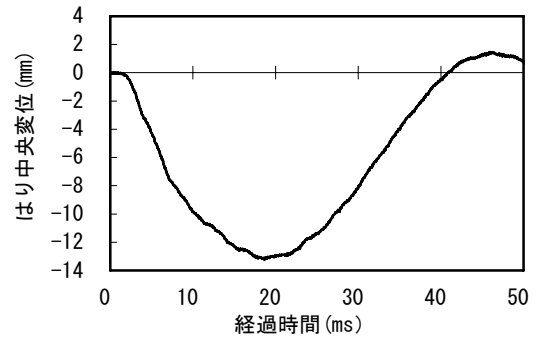
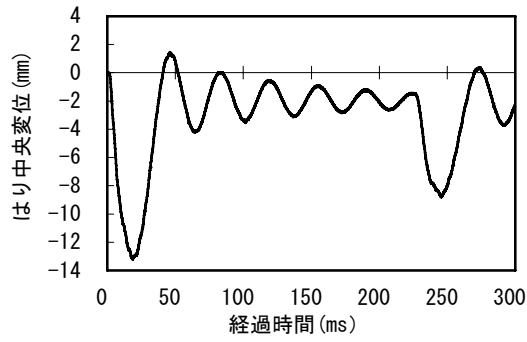


試験体④L2-V4 (繰返し衝撃载荷)

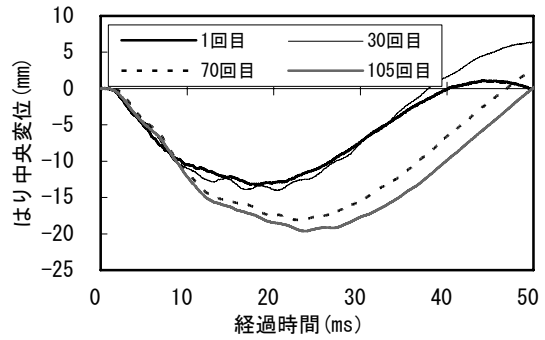
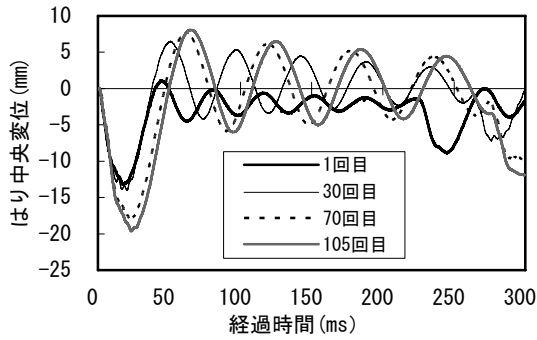


試験体⑤L3-V1 (単一衝撃载荷)

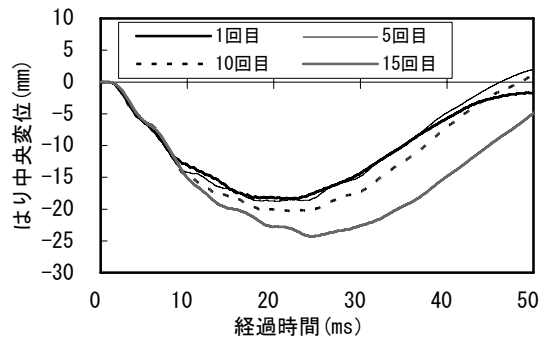
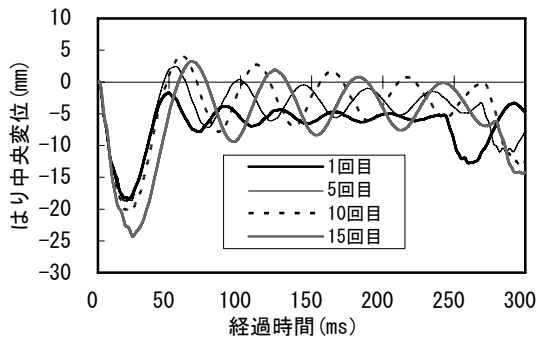
図-E.1 はり中央変位時刻歴応答(1)



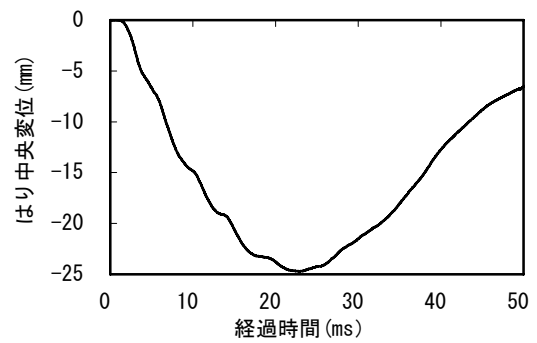
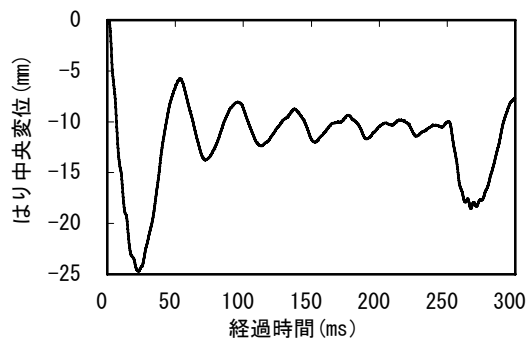
試験体⑥L3-V2 (単一衝撃载荷)



試験体⑥L3-V2 (繰返し衝撃载荷)

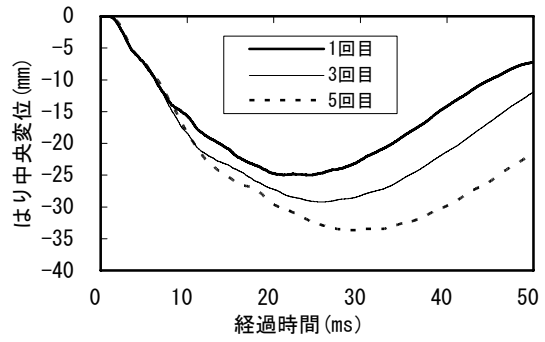
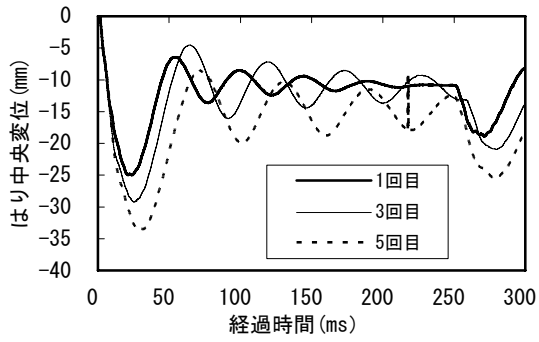


試験体⑦L3-V2.5 (繰返し衝撃载荷)

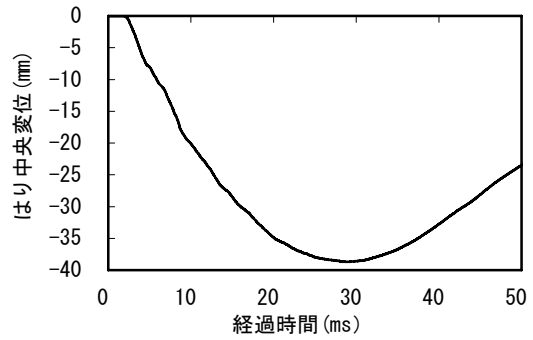
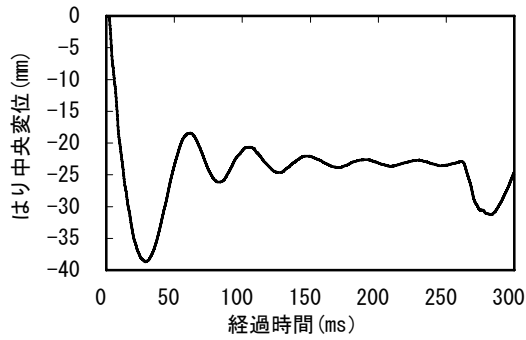


試験体⑧L3-V3 (単一衝撃载荷)

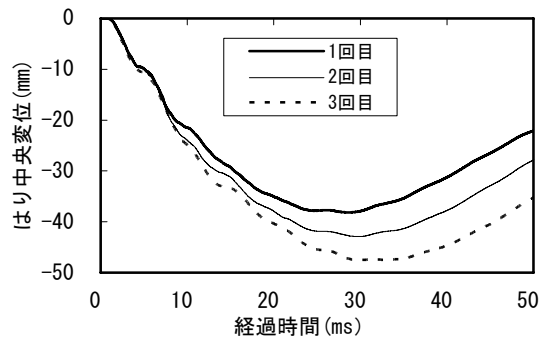
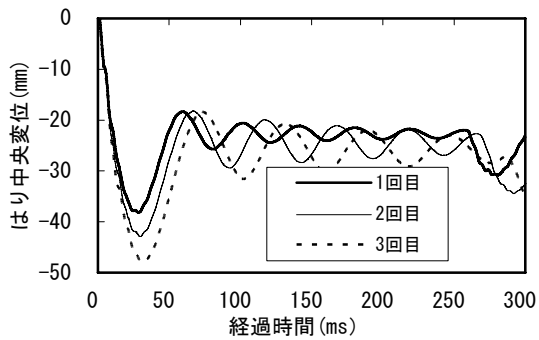
図-E.2 はり中央変位時刻歴応答(2)



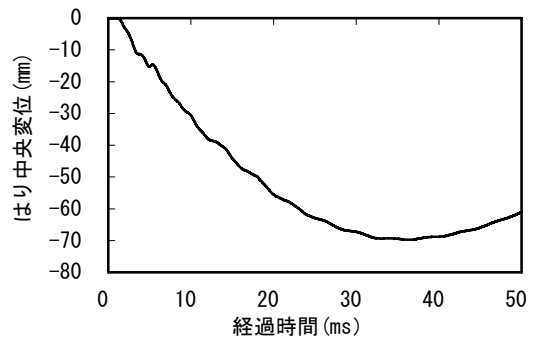
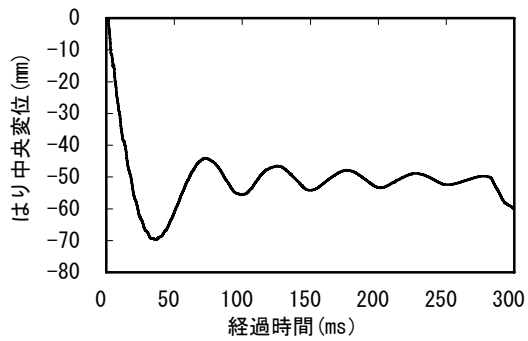
試験体⑧L3-V3 (繰返し衝撃载荷)



試験体⑨L3-V4 (単一衝撃载荷)

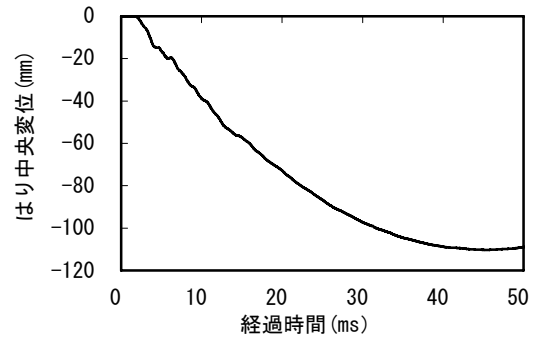
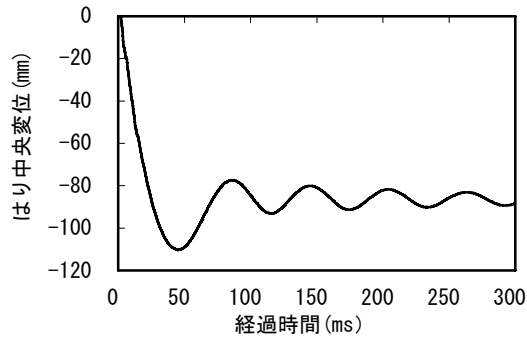


試験体⑨L3-V4 (繰返し衝撃载荷)

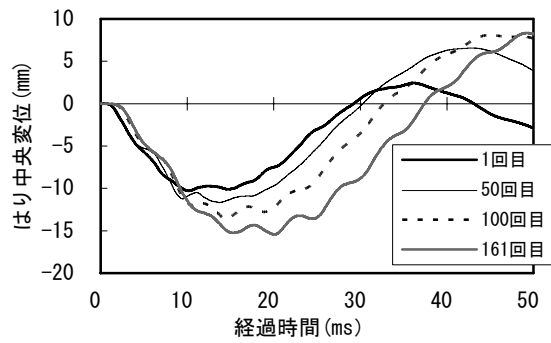
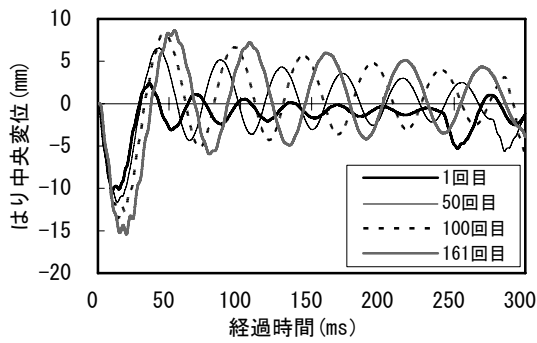


試験体⑩L3-V5.5 (単一衝撃载荷)

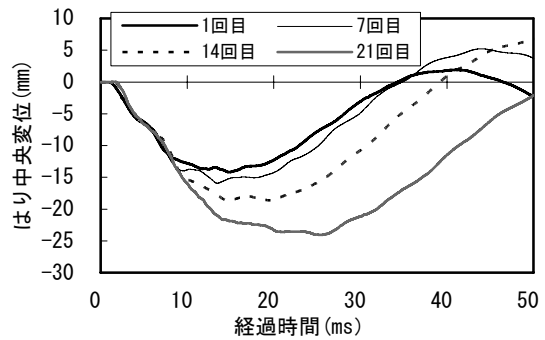
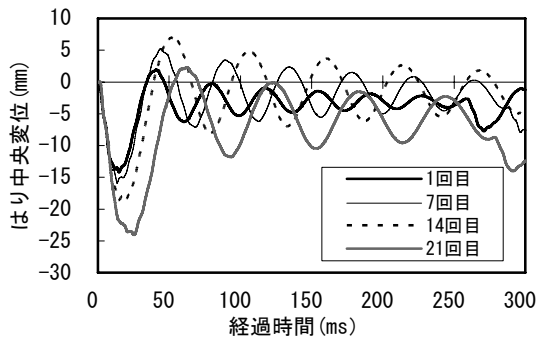
図-E.3 はり中央変位時刻歴応答(3)



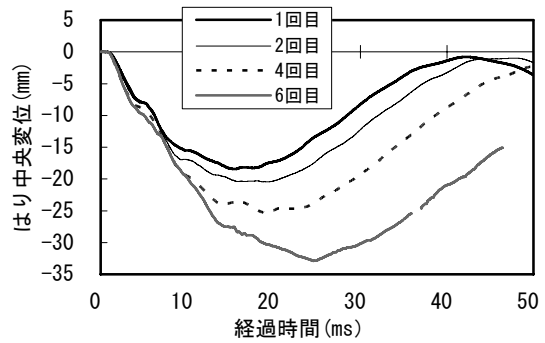
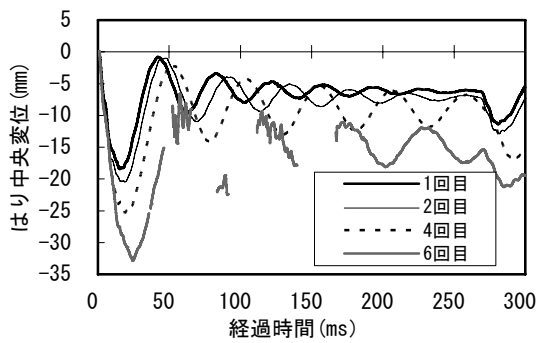
試験体①L3-V7 (単一衝撃载荷)



試験体②L3-V2.8-200 (繰返し衝撃载荷)

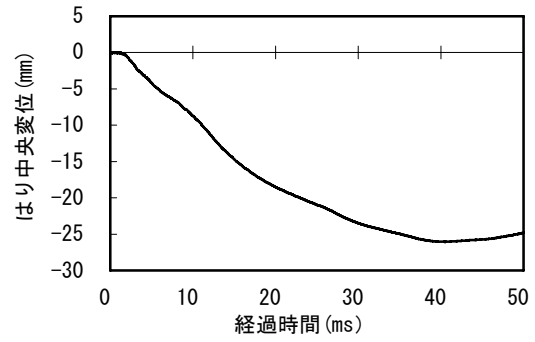
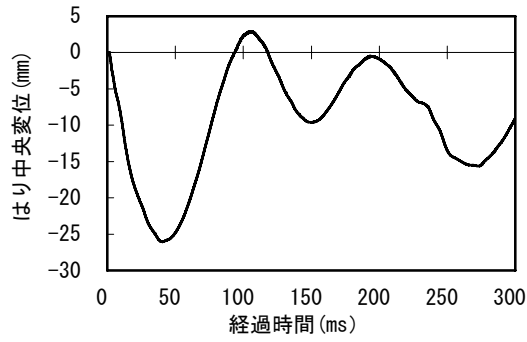


試験体③L3-V3.5-200 (繰返し衝撃载荷)

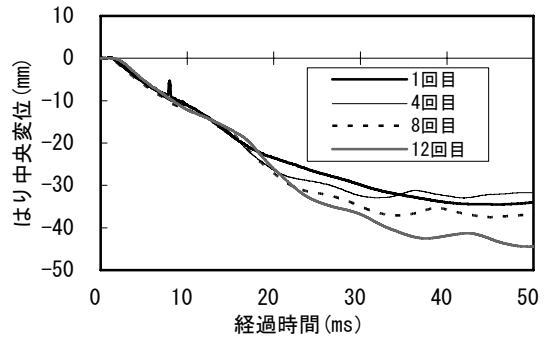
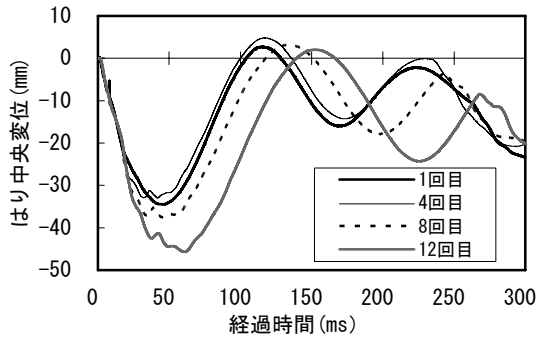


試験体④L3-V4.2-200 (繰返し衝撃载荷)

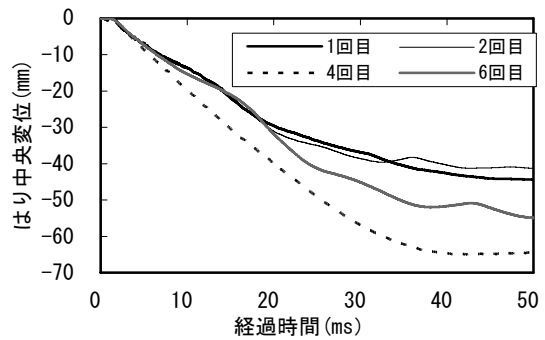
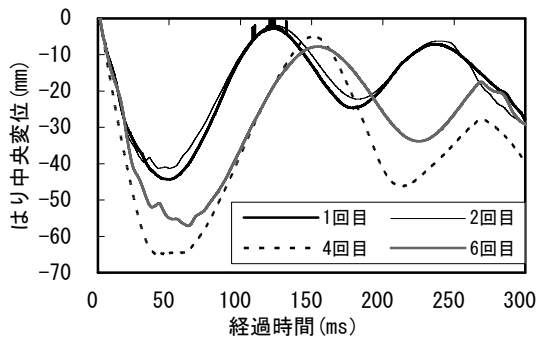
図-E.4 はり中央変位時刻歴応答(4)



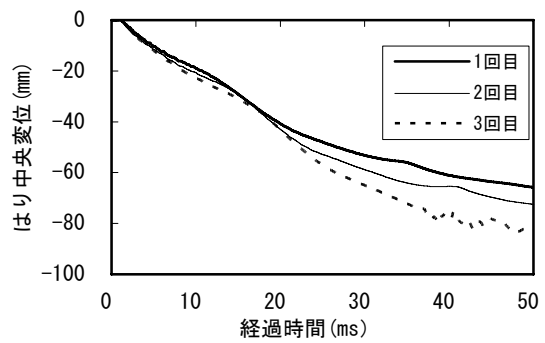
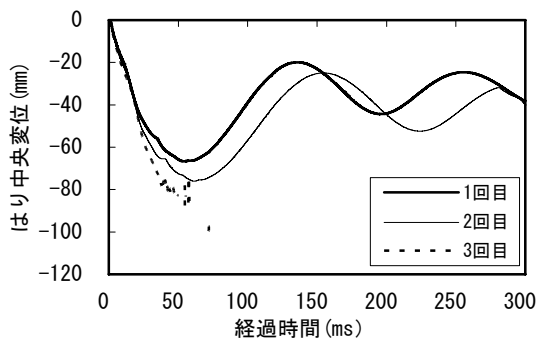
試験体⑮L5-V2 (単一衝撃载荷)



試験体⑯L5-V2.5 (繰返し衝撃载荷)

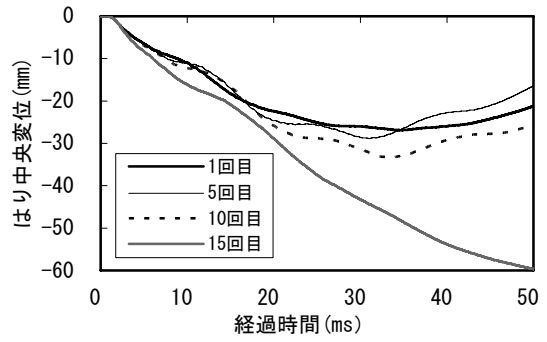
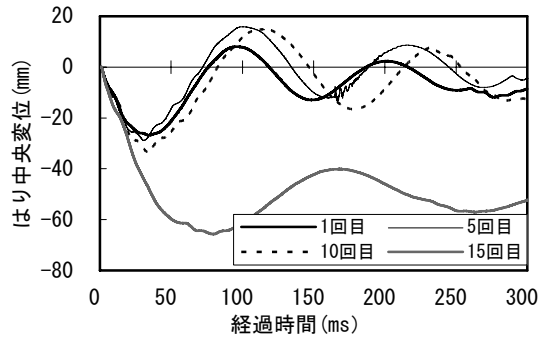


試験体⑰L5-V3 (繰返し衝撃载荷)

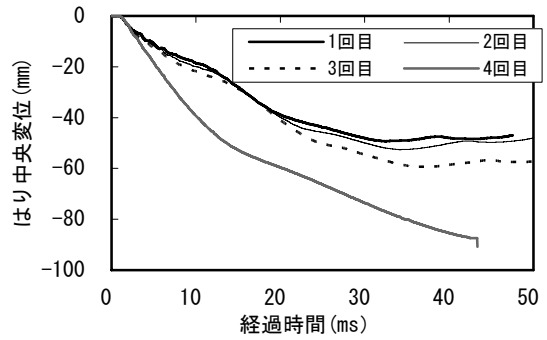
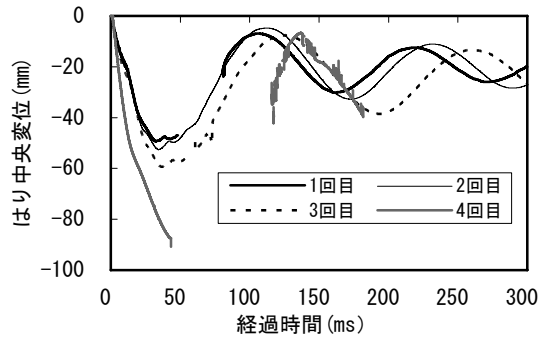


試験体⑱L5-V4 (繰返し衝撃载荷)

図-E.5 はり中央変位時刻歴応答(5)



試験体⑱L5-V3.5-200 (繰返し衝撃载荷)



試験体⑳L5-V5.7-200 (繰返し衝撃载荷)

図-E.6 はり中央変位時刻歴応答(6)

付録F RC はりの変形過程（衝撃载荷 1 回目）

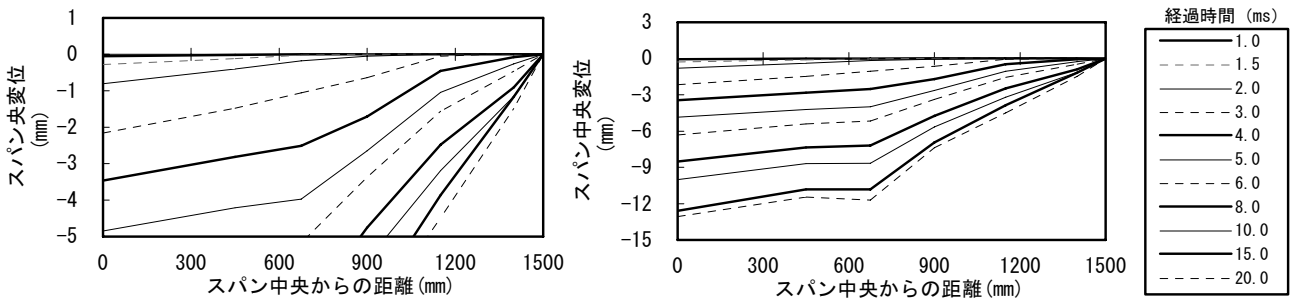
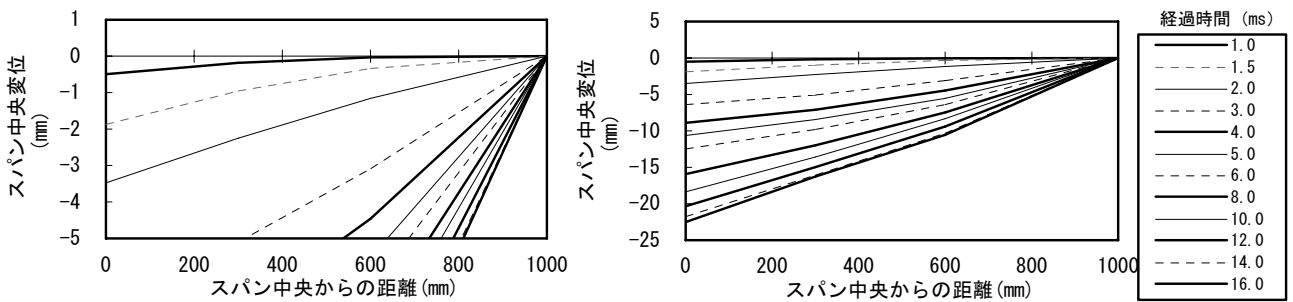
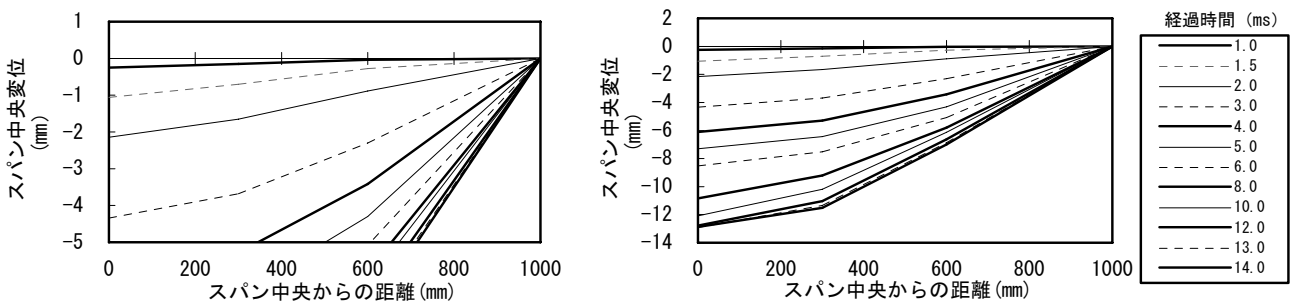
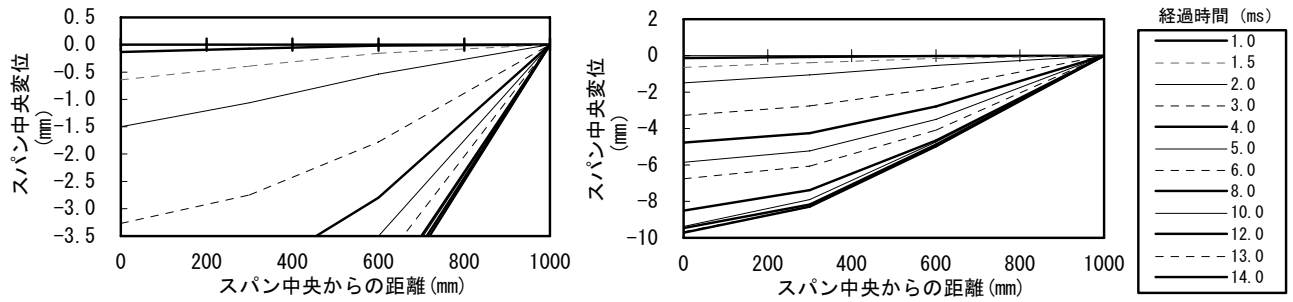


図-F.1 RC はりの変形過程(1)

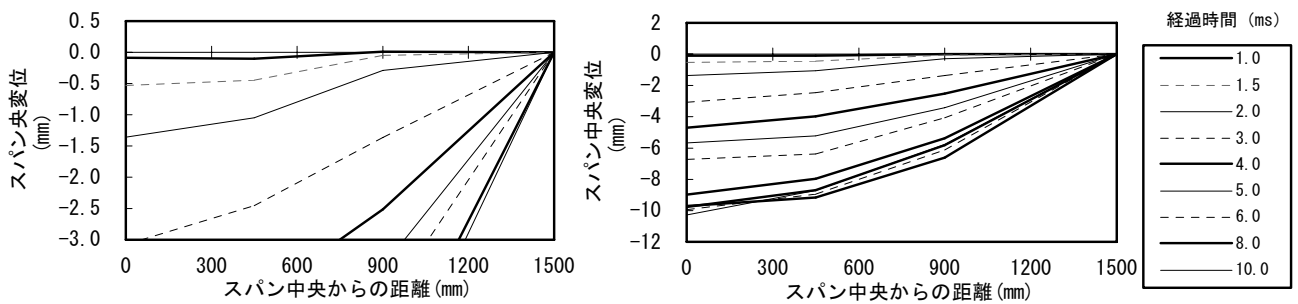
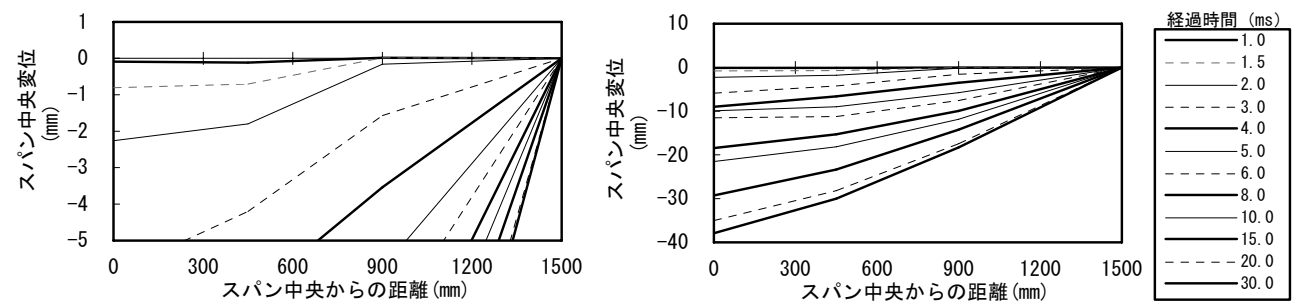
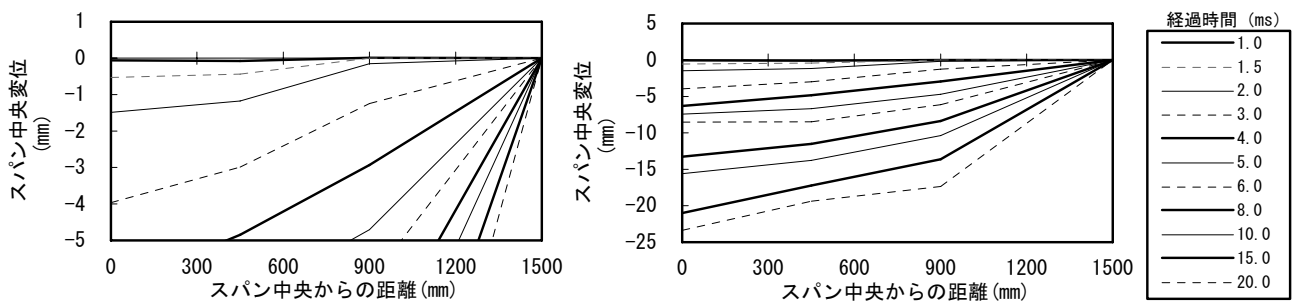
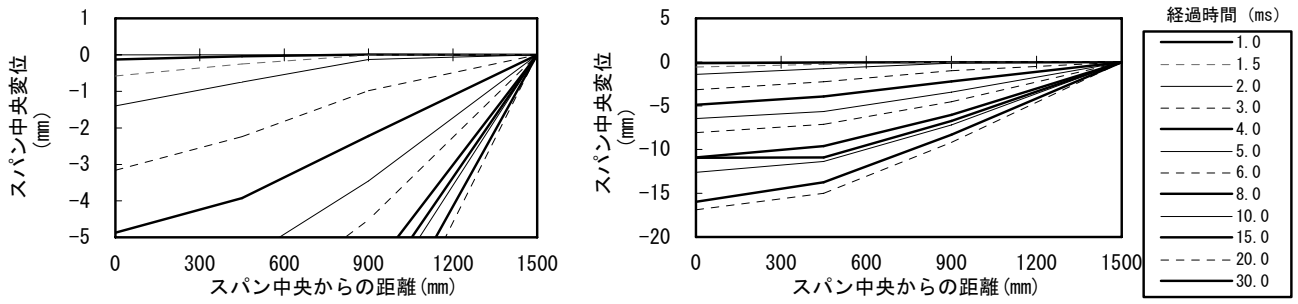
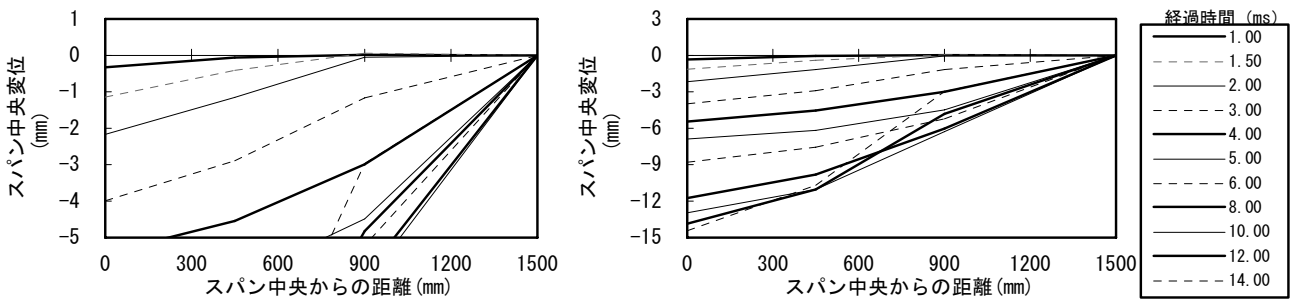
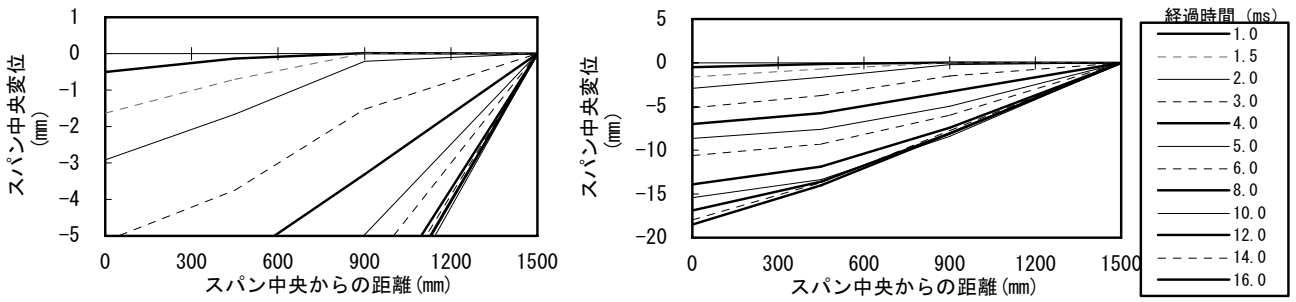


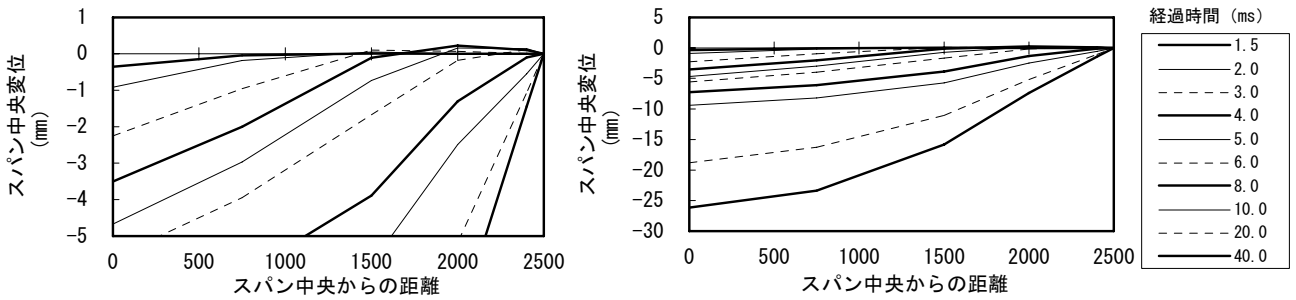
図-F.2 RCはりの変形過程(2)



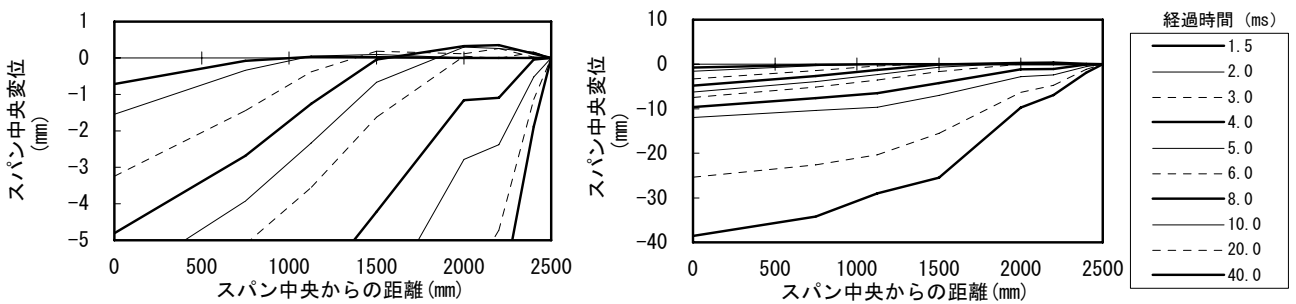
試験体⑬L3-V3.5-200



試験体⑭L3-V4.2-200

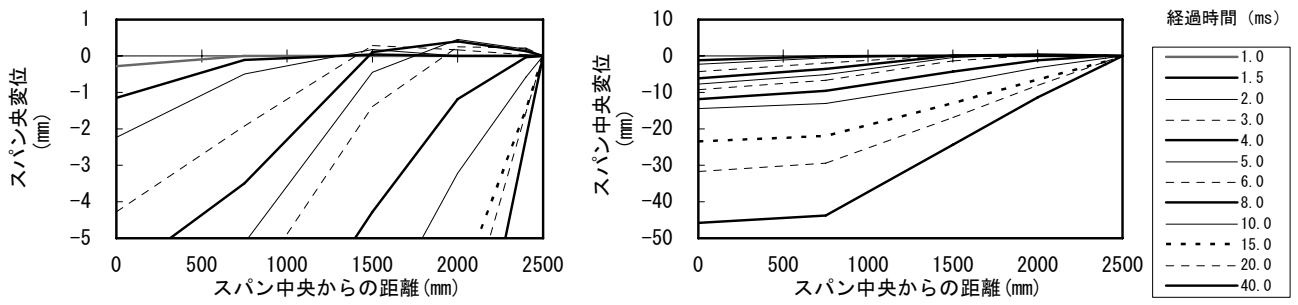


試験体⑮L5-V2

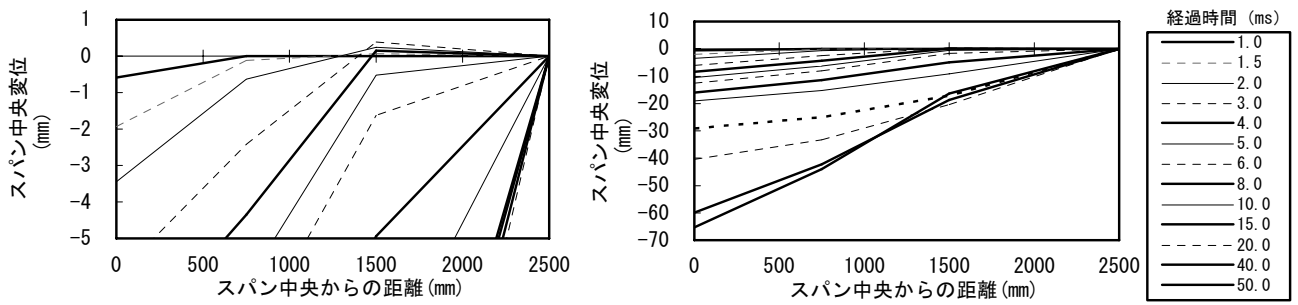


試験体⑯L5-V2.5

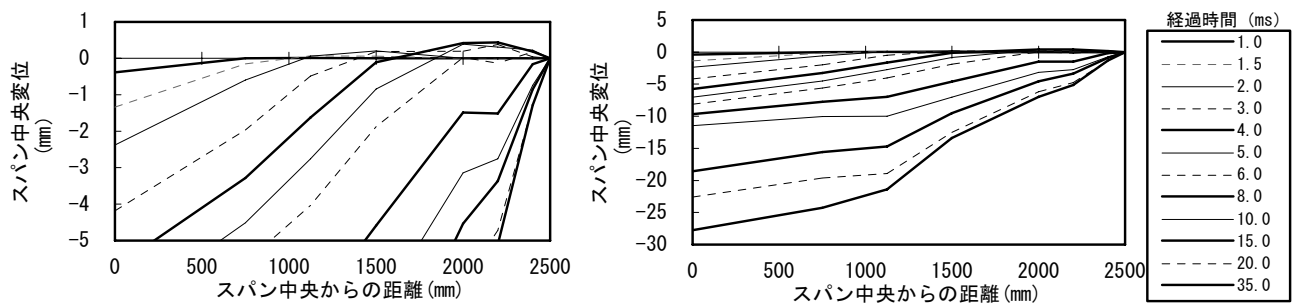
図-F.3 RC はりの変形過程(3)



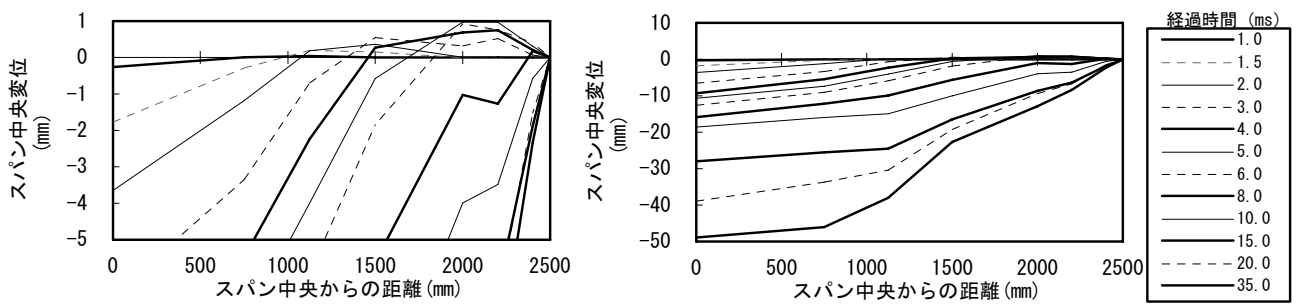
試験体⑰L5-V3



試験体⑱L5-V4



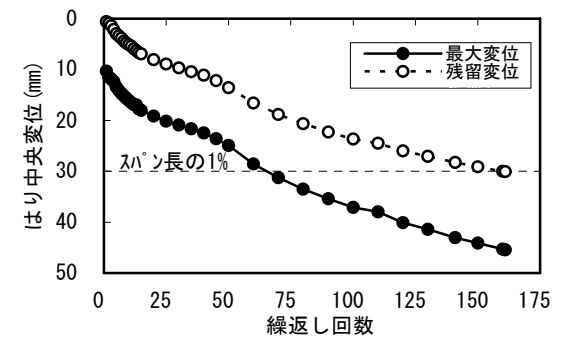
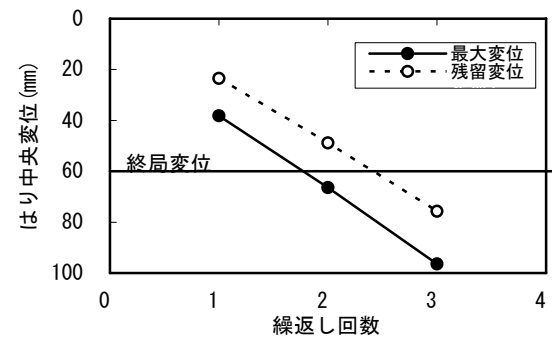
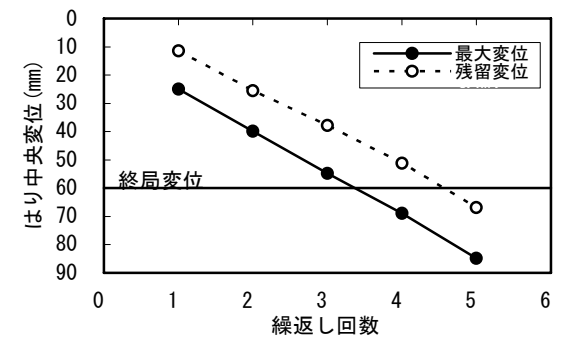
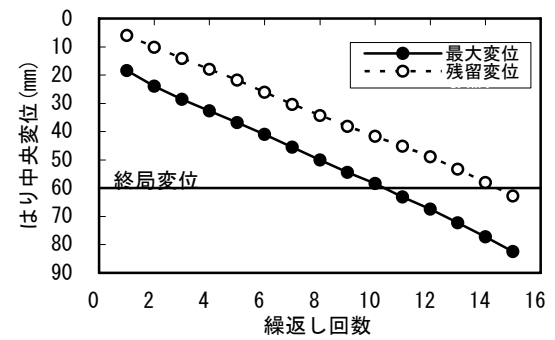
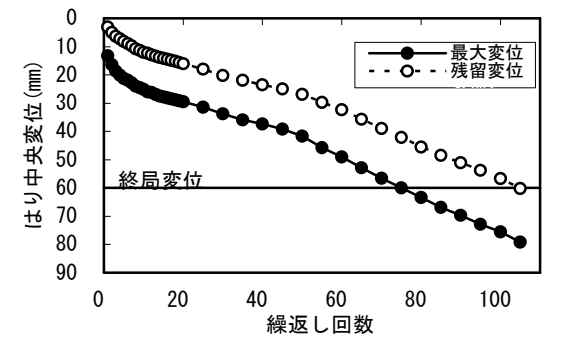
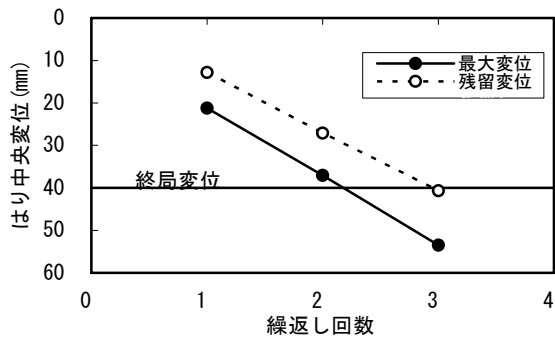
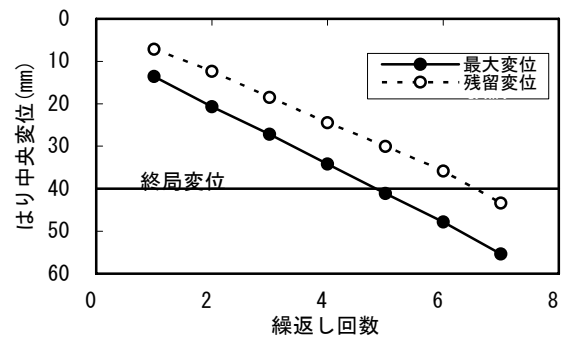
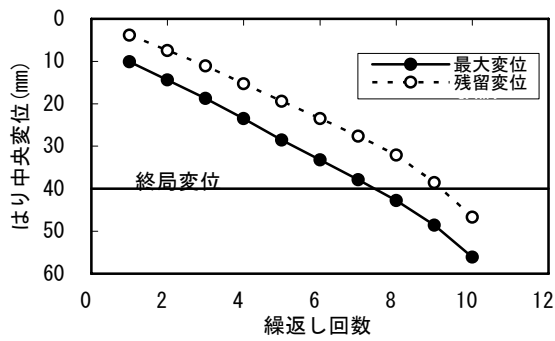
試験体⑲L5-V3.5-200



試験体⑳L5-V5.7-200

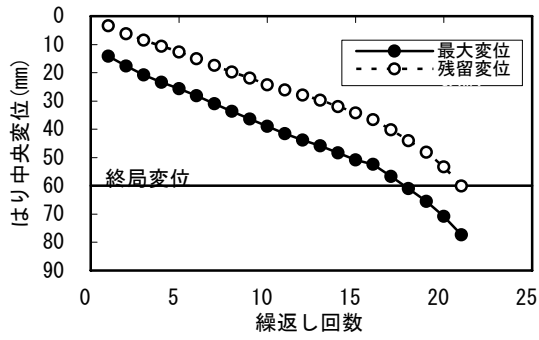
図-F.4 RC はりの変形過程(4)

付録 G 繰返し回数とスパン中央の変位推移

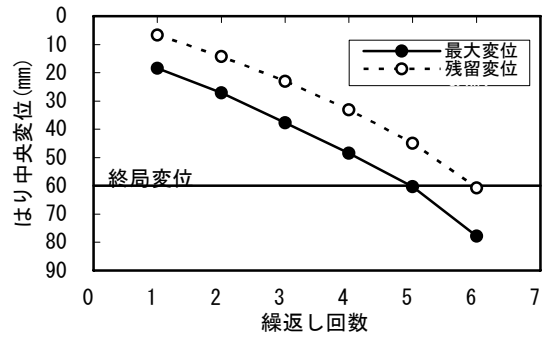


試験体②L2-V2.5 (衝突速度 V=2.5m/s)

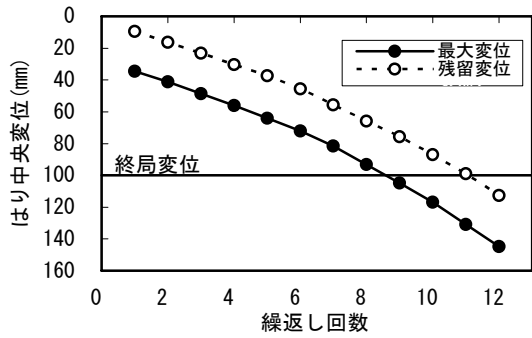
図-G.1 繰返し回数とスパン中央の変位推移(1)



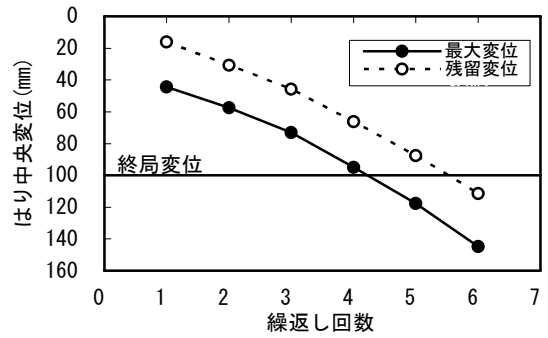
試験体⑬L3-V3. 5-200



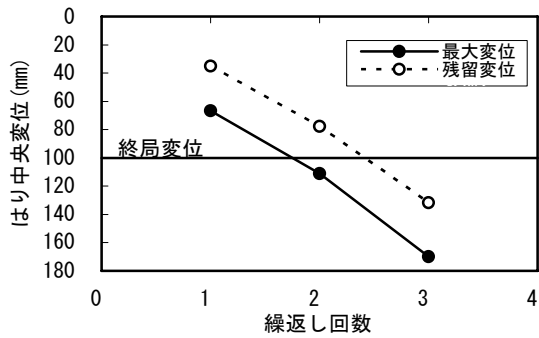
試験体⑭L3-V4. 2-200



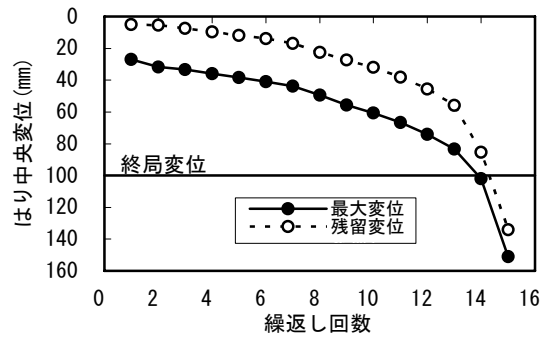
試験体⑯L5-V2. 5



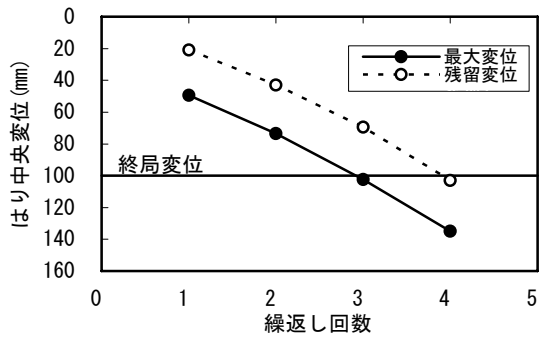
試験体⑰L5-V3



試験体⑱L5-V4



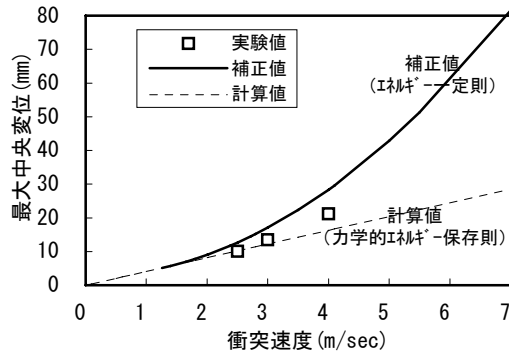
試験体⑲L5-V3. 5-200



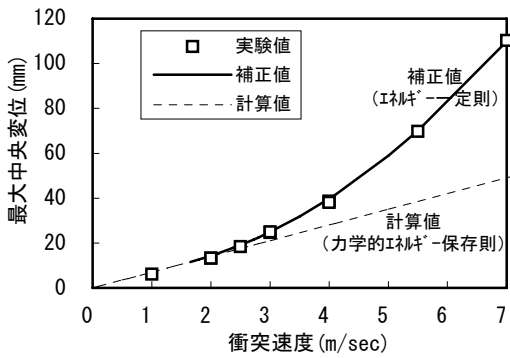
試験体⑳L5-V5. 7-200

図-G.2 繰返し回数とスパン中央の変位推移 (2)

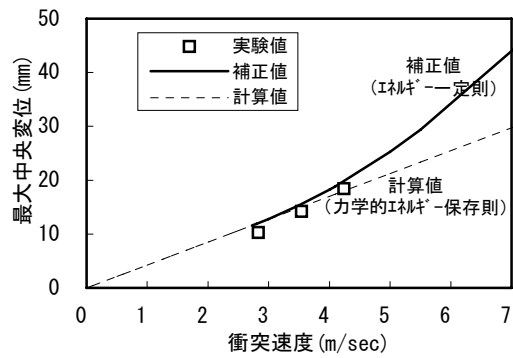
付録H 力学的エネルギー保存則とエネルギー一定則による最大中央変位の算定値



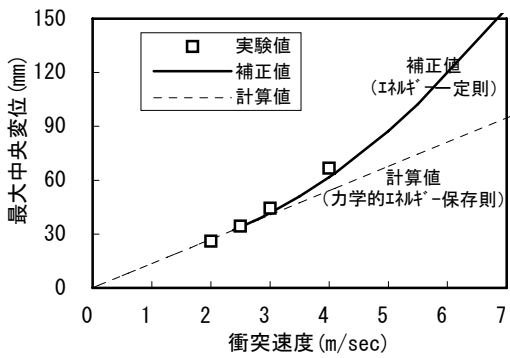
スパン長：2m, 重錘質量：400kg



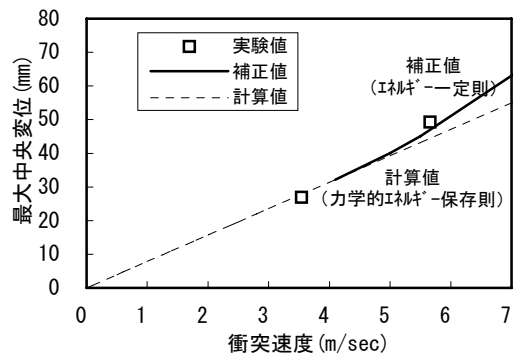
スパン長：3m, 重錘質量：400kg



スパン長：3m, 重錘質量：200kg



スパン長：5m, 重錘質量：400kg



スパン長：5m, 重錘質量：200kg

図-H 力学的エネルギー保存則とエネルギー一定則による最大中央変位の算定値

港湾空港技術研究所資料 No. 1152

2007. 6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 新高速印刷株式会社

Copyright © (2007) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。