

## 既設落石防護構造物の補修・補強技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 24～平 27

担当チーム：寒地構造チーム

研究担当者：西 弘明、今野久志、山口 悟、角間 恒

### 【要旨】

本研究では、既設落石防護構造物の健全度や耐荷力を評価する技術、さらには必要な耐荷力を付与するための合理的な補修・補強技術を開発することを目的に実施している。

既設落石防護構造物の耐荷力評価技術に関する研究では、既設ロックシェットの耐荷力評価に際して重要となる作用衝撃力の評価に関して、緩衝材として敷砂および砕石を用いた場合の実規模重錘落下衝撃実験を実施し、各種衝撃力と入力エネルギーの関係等について検討を行った。また、既設落石防護構造物の補修・補強技術に関する研究では、衝撃作用により損傷を受けた RC 梁に関して AFRP シート接着による補修・補強効果について実験的に検討を行った。

キーワード：落石防護構造物、落石覆道、敷砂緩衝材、砕石緩衝材、AFRP シート、補修、補強

### 1. はじめに

大規模地震あるいはその後の降雨等の影響により多くの落石災害が発生し、道路網が寸断されるなど地域生活に大きな影響を与えている。今後、既往の道路防災総点検結果や震後点検結果を受け、防災対策工検討が実施されることになる。ここで、設計想定最大荷重に満たない落石等により損傷した対策工の再使用性の判断は難しい状況にある。また、特に沿岸道路の既設落石防護構造物には凍害塩害等による劣化損傷が顕在化してきている。既存ストックを有効活用しつつ、効率的・効果的に安全性向上を図り、落石災害に対する減災・防災強化事業を着実に推進していくことが求められている。このような背景のもと、本重点研究では、既設落石防護構造物の健全度や耐荷力を評価する技術、さらには必要な耐荷力を付与するための合理的な補修・補強技術を開発することを目的とした検討を行っている。

平成 25 年度に実施した既設落石防護構造物の耐荷力評価技術に関する研究では、既設ロックシェットの耐荷力評価に際して重要となる作用衝撃力の算定に関して、緩衝材として敷砂および砕石を用いた場合の実規模重錘落下衝撃実験を実施し、各種衝撃力と入力エネルギーの関係等について検討を行った。

既設落石防護構造物の補修・補強技術に関する研究では、損傷を受けた RC 製ロックシェットの耐衝撃補強設計法を確立することを最終的な目的に、緩衝材を設置した場合のロックシェット頂版部の損傷としては

道路軸方向の曲げひび割れが卓越するというこれまでの研究成果を踏まえ、その基礎的な取り組みとして衝撃载荷により損傷を受けた RC 梁を対象として、曲げひび割れ補修後に AFRP シート接着補強を施した場合の耐衝撃補強効果について実験的に検討を行った。

### 2. 敷砂および砕石の緩衝特性に関する大型重錘落下衝撃実験

#### 2. 1 実験方法

##### 2. 1. 1 実験概要

写真-2.1には、重錘落下衝撃実験の状況を示している。実験は、敷砂あるいは砕石緩衝材を 30～90 cm の厚さで設置し、質量 2ton あるいは 5ton の鋼製重錘をラフテレーンクレーンにより所定の高さまで吊り上げ、脱着装置により実験装置の中央部に自由落下させることにより行った。

実験に使用した質量 2ton および 5ton の鋼製重錘は同一の形状寸法であり（図-2.1）、直径が 1.0 m、高さが 97 cm で、底部より高さ 17.5 cm の範囲が半径 80 cm の球状となっている。異なる重錘質量に対して同一の形状寸法としたのは、形状による緩衝性能への影響を排除し重錘質量の影響のみに着目するためである。従って、5ton 重錘の場合には、質量が 2ton の落石と底部形状が同一で長さの異なる円柱状の落石と等価である。なお、個別要素法（DEM）を用いた解析により、本重錘形状による解析結果は、設計と同様に球体とする場合と類似であることを確認している<sup>1)</sup>。

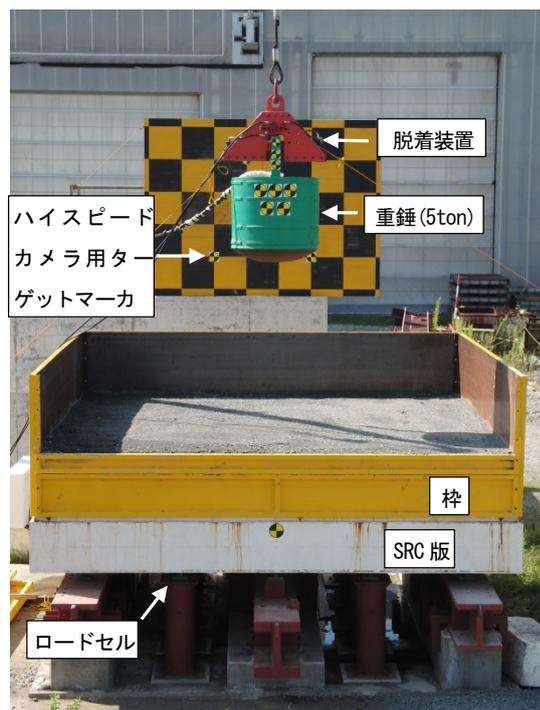


写真-2.1 実験状況(実験装置と重錘)

表-2.1 実験ケース一覧

実験ケース	緩衝材	緩衝材厚 (cm)	落下高さ (m)	入力エネルギー (kJ)	締固め厚さ (cm) (下→上)
G50-H 2.0	碎石	50	2.0	98.1	25+25
G50-H 5.0			5.0	245.2	
G70-H 2.0		70	2.0	98.1	20+25+25
G70-H 5.0			5.0	245.2	25+22+23
G90-H 2.0		90	2.0	98.1	30+30+30
G90-H 5.0-1				245.2	
G90-H 5.0-2	5.0		98.1		
G90-H 5.0-2tf	5.0		245.2		
S30-H 2.0	砂	30	2.0	98.1	30
S30-H 5.0			5.0	245.2	
S50-H 2.5		50	2.5	122.6	25+25
S50-H 5.0			5.0	245.2	
S70-H 2.5		70	2.5	122.6	20+25+25
S70-H 5.0			5.0	245.2	

表-2.2 緩衝材の物性値

緩衝材	産地	種類	粗粒率	最大乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	最適含水比 (%)	最大粒径 (mm)	均等係数 U <sub>c</sub>	50% 粒径 D <sub>50</sub> (mm)
碎石	小樽市見晴	切込碎石	5.65	2.17	7.4	30	-	9.5
砂	石狩市知津狩	細砂	1.39	1.63	18.2	4.75	2.37	0.27

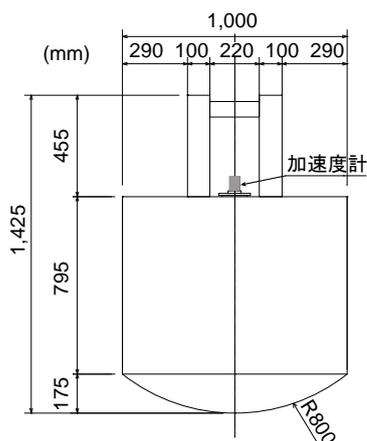


図-2.1 重錘の形状寸法 (2ton, 5ton)

## 2. 1. 2 実験ケース

表-2.1 には、実験ケースの一覧を示している。碎石の緩衝材厚  $T$  は 90 cm を標準とし、さらに薄い場合として 70 cm、50 cm の2種類を設定した。敷砂緩衝材の場合には、過去の研究において緩衝材厚  $T = 90$  cm の実験が数多く実施されていることから、落石径よりも緩衝材厚が薄い実験条件として、 $T = 30, 50, 70$  cm の3種類を設定した。実験ケース名は、緩衝材の種類を示す記号 (碎石 : G、敷砂 : S) とその厚さ (cm)、および 5ton 重錘を用いた実験の落下高さを示す“H”とその高さ (m) を用いて、ハイフンで結び示している。

碎石緩衝材の厚さ  $T = 90$  cm の場合には、実験の再現性を確認するために同一条件で2回の実験を実施しており、実験ケース名の後半にハイフンで番号付けをして区別した。また、入力エネルギーが  $E = 98.1$  kJ の場合には、重錘質量の影響を検討するために 2 ton の重錘を用いた実験を1ケースのみ実施している。

## 2. 1. 3 緩衝材

過年度に実施した北海道内の既設ロックシェッドに設置されている緩衝材の現況調査結果より、その多くは現地発生材の礫質土であり、非常に強固に締固まっていることが明らかになっている<sup>2)</sup>。このことから、本研究では、これらの緩衝材料に類似した碎石と従来より緩衝材として使用されている敷砂材の緩衝特性につ



写真-2.2 砕石緩衝材の転圧状況 (G70-2 層目)



写真-2.3 砕石緩衝材の締固め密度の計測状況

いて比較する形で検討を行なうこととした。ここで、砕石緩衝材の選定にあたっては、共同研究を締結しているスイス連邦工科大学 (ETH) における研究事例<sup>9)</sup>等を参考にしている。

実験に使用した砕石は、比重が大きく、粒度分布が上記スイスでの研究事例と同様の 0 ~ 30 mm 級切込砕石 (小樽市見晴産) を選定した。砂については、これまでの敷砂緩衝材に関する実験と同一とし、細砂を使用した。表-2.2 には実験に使用した砕石と砂の物性値を示している。

敷砂の締固めは、これまでの敷砂緩衝材に関する実験と同様に表-2.1 の実験ケース右欄に示す締固め厚さに仕上がるように、敷砂厚 70 cm の場合には下から 20 cm、25 cm、25 cm の 3 層、敷砂厚 50 cm の場合には 25 cm を 2 層、敷砂厚 30 cm の場合には、30 cm 1 層毎に、それぞれ足踏み式により行った。砕石緩衝材の場合についても同様に、最大の締固め度が得られるように、表-2.1の締固め厚さごとに敷均し、各層は写真-2.2 に示すタンピングランマーを用いてランマーのプレートマークが残らない状態になるまで (縦横それぞれ約 1 往復) 転圧を行った。なお、各実験の終了後には、重錘落下中心部の緩衝材 (3×3m 以上の範囲) をバックホウ (0.8m<sup>3</sup> 級) により取り除き、各緩衝材の再設置を行っている。

また、敷砂緩衝材の場合には、各実験に際してシンウォールサンプリングチューブを用いて、実験前には 3 箇所、実験終了後には重錘落下点直下の 1 箇所ですり採取 ( $\phi$  7.5cm、 $h$  = 15cm) し、締固め密度を確認した。砕石緩衝材の場合にはシンウォールサンプリングチューブを用いての計測ができないため、写真-2.3 に示すように剛基礎上に同様の枠を設置し、実験時と同様の締固めを行い、平板載荷試験と突き砂による土

の密度試験<sup>4)</sup> (JGS 1611-2003) を実施した。

砕石緩衝材の締固め度は、写真-2.3 による密度試験結果より、最適含水比より乾燥側の含水比 6.1% であり、締固め度は 95% であった。既設ロックシェッドの礫質土緩衝材の締固め度が平均で 92% であったことから、本実験時の砕石緩衝材の状態は、現場と類似した強固に締固まった状態であるものと判断される。一方、敷砂緩衝材の実験時の湿潤密度は 1.46 g/cm<sup>3</sup>、含水比は 12.1% であった。

#### 2. 1. 4 実験装置の概要

図-2.2 には、大型緩衝材用実験装置の側面図を示している。本装置は、緩衝材を設置するための鋼・コンクリートからなる鉄骨コンクリート版 (以後、SRC 版) と、緩衝材を介して構造物に作用する衝撃力 (以後、伝達衝撃力) を精度よく計測するために、SRC 版を支持する衝撃用ロードセルから構成されている。図-2.3 には、伝達衝撃力計測用ロードセルの配置図を示している。

これまでの敷砂緩衝材の緩衝特性に関する研究では、剛基礎上に衝撃応力測定用ロードセルを基礎面と面一になるように直線上に埋め込み、かつ伝達衝撃応力が点対称に分布するものと仮定し、台形則により合算して伝達衝撃力を評価している。しかしながら、野外での実規模実験では重錘落下の精度に限界があり、必ずしも設定した対称点に重錘を落下させることができないため、自ずと伝達衝撃力評価に誤差が生じる。このことから、本研究では緩衝材を介した伝達衝撃力を的確に計測することを目的に、緩衝材を設置する剛基礎としての SRC 版全体をロードセルで支持する構造とした。

SRC 版は、各辺 5 m の正方形で、版厚は 0.5 m である。底版には板厚 22 mm の鋼板を使用し、H 形鋼

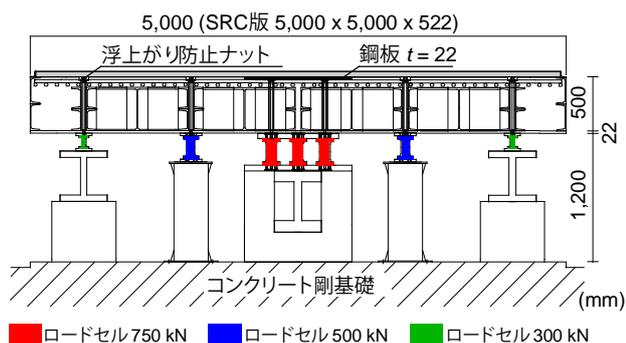


図-2.2 実験装置(側面図)



写真-2.4 伝達衝撃力計測用ロードセル

や溝形鋼を用いて井桁状に主構造を組み、溶接によるひずみが入らないように計測を行いながら製作している。また版上面には D 32 の異形鉄筋を 100 mm 間隔で格子状に配置している。また、重錘による SRC 版の載荷点部における局所的な損傷を防ぐため、版中央部には板厚が 22 mm で 1 m 四方の鋼板を設置しており、各実験後に SRC 版に損傷がないことを確認している。なお、各ロードセルは上面に設置した鋼板と貫通ボルトを通して固定し、実験時の SRC 版の浮き上がりも防止している。

緩衝材設置のための枠は、SRC 版に等辺山形鋼を溶接して設置したため、緩衝材の設置範囲は 4.9 m × 4.9 m の平面形状となっている。

### 2. 1. 5 計測項目

本実験における計測項目は、1) 重錘の頂部表面に設置したひずみゲージ式高応答小型加速度計 (容量 100、200、500 G、応答周波数 DC~2、3.5、5kHz) による重錘衝撃力、2) SRC 版下面に設置した 図-2.3、写真-2.4 に示す 29 個の衝撃用ロードセル (定格容量: 750 kN 5個、500 kN 8 個、300 kN 16 個) の合計値である伝達衝撃力、3) 非接触型レーザ式変位計 (応答周波数約 1 kHz) による SRC 版の変位、4) デジタルハイスピードカメラによる重錘貫入量 (解像度: 640 × 480) である。なお、レーザ式変位計は、 図-2.3 に示すように重錘落下点に対して 定格容量750 kNと500 kNのロードセルの中間に配置している。

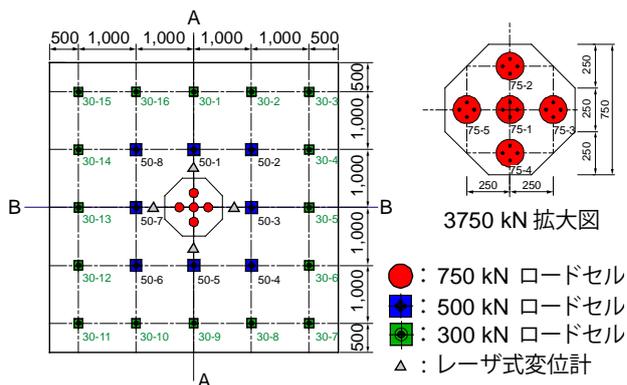


図-2.3 伝達衝撃力計測用ロードセル配置図

## 2. 2 実験結果

### 2. 2. 1 碎石緩衝材の各時刻歴応答波形

図-2.4 (a)~(c) には、入力エネルギー  $E = 98.1$ 、245.2 kJ (落下高さ  $H = 2.0$ 、5.0 m) で、碎石緩衝材の厚さを変化させた場合の重錘衝撃力、伝達衝撃力および重錘貫入量に関する時刻歴応答波形を示している。なお、伝達衝撃力は、 図-2.3 に示した 29 個のロードセルからの応答波形を時間軸を等しくして合算したものである。また、重錘貫入量の時刻歴波形は、高速度カメラからの出力結果である。なお、レーザ式変位計による SRC 版の変位は実験前後とも、0.1 mm 以下のノイズとして計測されており、衝撃力の作用による変形は計測されていない。

(a)~(c) 図より、重錘質量 5 ton (図中、青色、赤色、黒色) の各時刻歴応答波形の最大応答値は碎石緩衝材の緩衝材厚にかかわらず、落下高さ  $h$  が高い場合が大きいことが分かる。

緩衝材厚毎の比較において、緩衝材厚 が 90 cm の場合に注目すると、重錘衝撃力波形 (a 図) はいずれのケースも重錘衝突初期に急激に立ち上がる正弦半波状の第 1 波のみの波形となっている。伝達衝撃力波形 (b 図) に関しては、重錘衝撃力に対して遅れて励起しており、正弦半波状の第 1 ピーク近傍の性状が重錘衝撃力波形と若干異なるとともに、その後続く第 2 波から構成されている。重錘貫入量 (c 図) に関しては、最大貫入量を示した後にリバウンドして若干浮き上がるものの再度貫入する傾向を示し最大貫入量程度の一定値に漸近している。入力エネルギーを同一とした重錘質量 2 ton の場合には、リバウンドの量が若干大きい傾向を示している。

碎石緩衝材の再現性を確認するための実験 (5 ton 重錘、落下高さ  $H = 5.0$  m、入力エネルギー  $E = 245.2$  kJ )

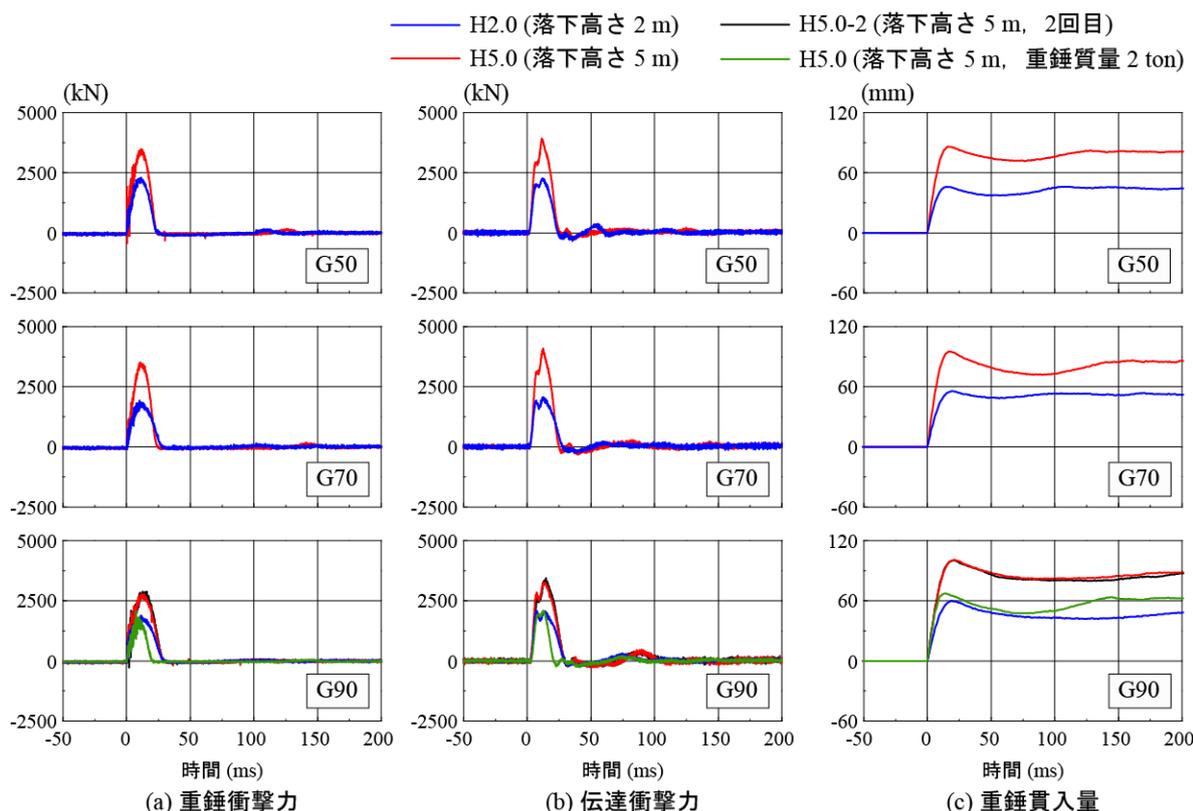


図-2.4 各時刻歴応答波形 ( G90、G70、G50 )

結果より、重錘衝撃力波形 (a 図)、伝達衝撃力波形 (b 図)、重錘貫入量 (c 図) とともに、ほぼ同様の波形性状を示しており、十分再現性があることが明らかになった。

次に、重錘質量の影響を検討するために、入力エネルギーの等しい重錘質量 2 ton、落下高さ  $H=5.0\text{ m}$  の場合と重錘質量 5 ton、落下高さ  $H=2.0\text{ m}$  の場合について応答値および波形を比較する。

図より、重錘衝撃力波形 (a 図) は、重錘質量 2 ton (緑色) の場合が重錘質量 5 ton (青色) の場合より最大ピーク値に達する迄の時間が早い。最大衝撃力は両者類似である。また、波動継続時間は、重錘質量 2 ton の場合が  $t=22\text{ ms}$  で、重錘質量 5 ton の場合の  $t=30\text{ ms}$  より短い。

伝達衝撃力波形 (b 図) において、最大衝撃力は重錘衝撃力と同様にほぼ類似している。また、第 1 波目の波動継続時間も重錘衝撃力と同様に、重錘質量 2 ton の場合が小さい傾向を示している。ただし、その後の第 2 ピークの発生時間はほぼ類似している。

重錘貫入量 (c 図) は、重錘質量 2 ton の場合が重錘質量 5 ton の場合よりも早期に最大値に達していることがわかる。

以上より、砕石緩衝材の入力エネルギーが等しい場合における比較では、重錘衝撃力と伝達衝撃力の最大

値はほぼ同様であるが、重錘質量の大きい方が各最大衝撃力の発生時刻が早く、重錘貫入量が早期に最大値に達することが明らかとなった。

### 2.2.2 敷砂緩衝材と砕石緩衝材の各時刻歴応答波形の比較

図-2.5 (a)、(b)には、表-2.1 の実験ケースに示した重錘質量 5 ton、落下高さ  $H=5.0\text{ m}$  (入力エネルギー  $E=245.2\text{ kJ}$ ) における敷砂と砕石緩衝材の各時刻歴応答波形を緩衝材厚毎に比較して示している。なお、(b) 図は重錘衝突時近傍の 50 ms までの応答波形を拡大して示したものである。

緩衝材厚  $T=90\text{ cm}$  に着目すると、最大重錘衝撃力や最大伝達衝撃力は、砕石緩衝材に重錘が貫入し、最大貫入量に達する前にピーク値が発生していることが分かる。

緩衝材厚  $T=70\text{ cm}$  に着目すると、砕石緩衝材の場合において、重錘は  $T=90\text{ cm}$  の場合より早期に最大貫入量に達している。従って、最大重錘衝撃力や最大伝達衝撃力も、最大貫入量に達すると同時刻程度に発生していることが分かる。この傾向は、砕石緩衝材厚  $T=50\text{ cm}$  の場合においても同様である。

敷砂緩衝材の場合に着目すると、最大重錘衝撃力や最大伝達衝撃力は、砕石緩衝材の場合においては重錘

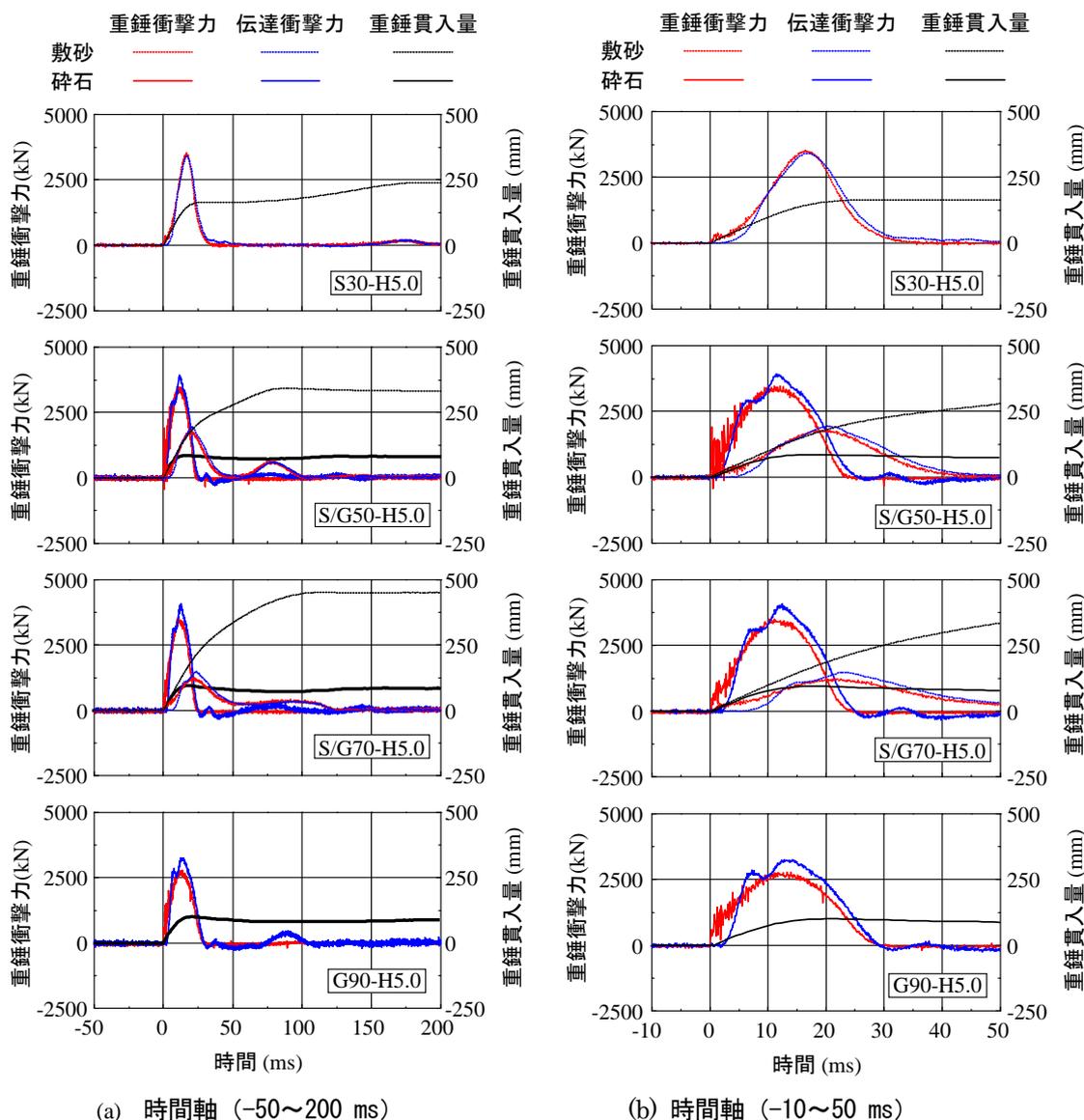


図-2.5 敷砂および碎石緩衝材の時刻歴応答波形図（重錘質量 5 ton H5.0）

衝突後約10 ms 経過後に発生しているのに対して、約 20 ms 後に励起しており、最大値についても1/2～1/4程度となっており緩衝性能に優れていることが分かる。また、重錘が最大貫入量に達する経過時間も約 100 ms 経過後であり碎石に比較して大幅に長く示され、効率的に衝撃エネルギーが吸収されていることが窺える。

緩衝材厚  $T=50\text{ cm}$  に着目すると、その傾向は  $T=70\text{ cm}$  の場合と同様であるが、緩衝材厚が薄くなったことにより最大重錘衝撃力や最大伝達衝撃力および重錘が最大貫入量に達する経過時間は若干短くなる傾向を示している。また、敷砂緩衝材の場合において、重錘貫入量の時間分布はほぼトリリニア状となっており、その折れ点で重錘衝撃力や伝達衝撃力波形は極大値を示していることが分かる。このような性状は、重錘と

敷砂中を伝播する応力波が複雑に関係しているものと推察され、今後個別要素法 (DEM) 等で詳細に検討したいと考えている。

緩衝材厚  $T=30\text{ cm}$  の実験は敷砂緩衝材の場合のみである。層厚が薄いこともあり最大重錘衝撃力および最大伝達衝撃力に達する経過時間は、 $T=50\text{ cm}$  の場合に比較して短く示され、かつ最大衝撃力も大きいことから、緩衝性能も低下していることが分かる。

### 2. 2. 3 各種衝撃力と入力エネルギーの関係

図-2.6 には、表-2.1 の実験ケースに示した重錘質量 5 ton、落下高さ  $H=2.0, 2.5, 5.0\text{ m}$ （入力エネルギー  $E=98.1 \sim 245.2\text{ kJ}$ ）における敷砂緩衝材と碎石緩衝材に対する最大重錘衝撃力と入力エネルギーの関係を示している。

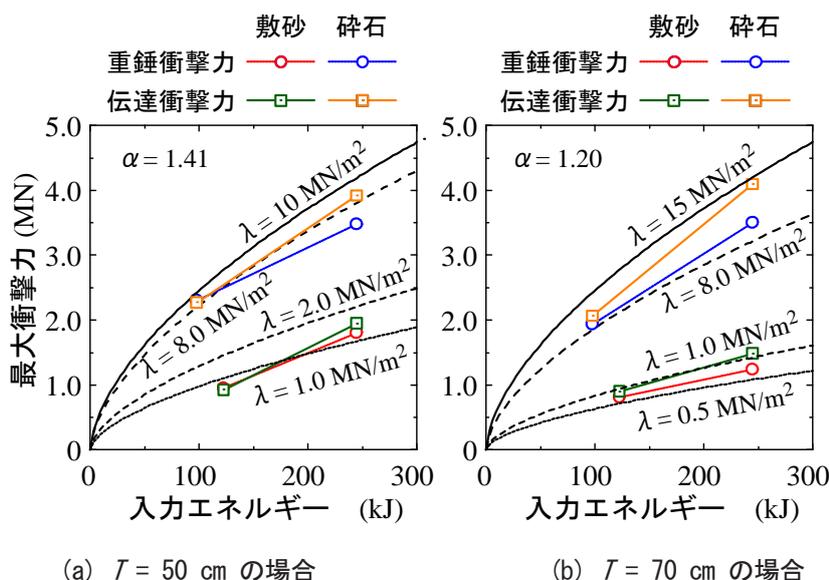


図-2.6 敷砂および碎石緩衝材の最大衝撃力と入力エネルギーの関係（緩衝材厚  $T = 50, 70$  cm）

図中の黒曲線は、振動便覧式<sup>5)</sup>に基づき、緩衝材の層厚  $T$  と重錘径  $D$  の比から決定される割り増し係数を考慮して算出した衝撃力（ラーメの定数： $\lambda = 0.5 \sim 15 \text{ MN/m}^2$ 、割り増し係数： $\alpha = (D/T)^2 = 1.41, 1.20, D$ ：重錘径 1.0m、 $T$ ：敷砂厚 50、70cm）を示している。

図より、敷砂と碎石緩衝材設置時における最大衝撃力は、入力エネルギーの増加に対応して増加しており、かつ最大伝達衝撃力が最大重錘衝撃力よりも大きい傾向にあることが分かる。また、敷砂緩衝材の最大重錘衝撃力および最大伝達衝撃力は共に、ラーメの定数が  $\lambda = 1 \text{ MN/m}^2$  前後の場合に対応していることが分かる。しかしながら、碎石緩衝材の場合には層厚の増加に対応してラーメの定数  $\lambda$  も大きくなる傾向を示し、敷砂緩衝材の傾向とは異なることが分かる。碎石緩衝材設置時の最大重錘衝撃力と伝達衝撃力は敷砂緩衝材設置時に比較して 2 ～ 4 倍程度大きいことが明らかになった。

### 3. 損傷を受けた RC 梁の AFRP シート接着補強による耐荷力検討

#### 3.1 実験概要

##### 3.1.1 試験体概要

図-3.1には、試験体の形状寸法、配筋状況および AFRPシート接着状況を示している。本実験に用いた試験体の形状寸法は、 $200 \times 250 \times 3,000 \text{ mm}$ （梁幅 × 梁高 × 純スパン長）である。軸方向鉄筋には D19 を用い、上下端に複鉄筋配置としている。また、せん断補強鉄筋には D10 を 100 mm 間隔で配筋している。ま

た、軸方向鉄筋は梁端面に設置した厚さ 9 mm の定着鋼板に溶接している。

表-3.1には、RC 梁の静的設計値一覧を示している。表中、静的曲げ耐力  $P_{usc}$  および静的せん断耐力  $V_{usc}$  は、土木学会コンクリート標準示方書に基づき算定している。表-3.2には、本実験に使用した AFRP シートの力学的特性値を示している。また、実験時におけるコンクリートの圧縮強度は、N試験体およびA/DA試験体でそれぞれ23.4MPaおよび32.0MPaであり、軸方向鉄筋の降伏強度はN試験体およびA/DA試験体でそれぞれ355MPaおよび368MPaであった。

#### 3.1.2 実験方法

写真-3.1には、実験状況を示している。衝撃荷重の載荷は、質量 300 kg、先端直径 200 mm の鋼製重錘を所定の高さから試験体スパン中央部に自由落下させることにより行っている。重錘底部は、衝突時の片当たりを防止するために、高さ 2 mm のテーパを有する球面状となっている。RC 梁は、浮き上がり防止治具付きの支点上に設置しており、支点部の境界条件はピン支持に近い状態になっている。衝撃荷重載荷実験における RC 梁の終局状態は、AFRP シートによる補強を行わない場合については、既往の研究と同様に残留変位量が純スパン長の 2 % 程度に達した状態、AFRP シートにより補強を行った場合についてはシートが破断に至った状態を目安としている<sup>6)</sup>。

測定項目は重錘衝撃力  $P$ 、スパン両端の合支点反力（以後、支点反力） $R$ 、載荷点変位（以後、変位） $\delta$ 、である。また、実験終了後には、RC 梁の側面を撮影し、ひび割れ性状を観察している。

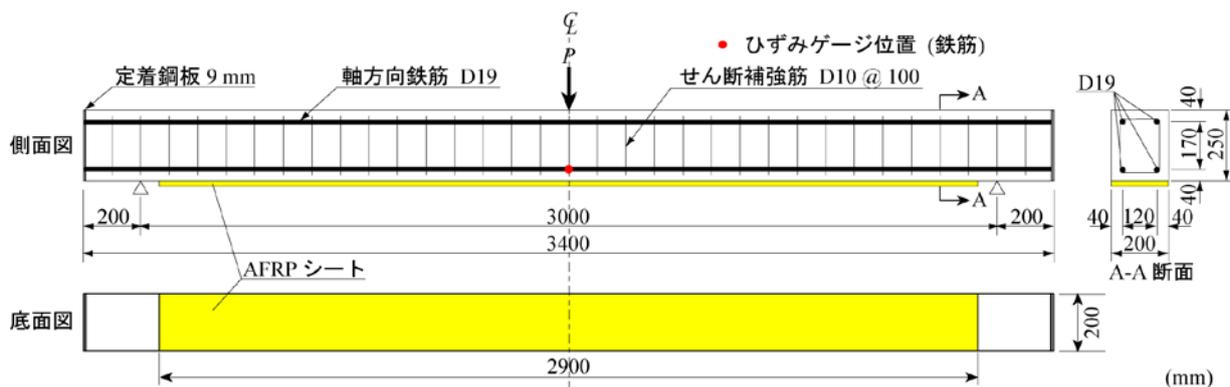


図-3.1 試験体の形状寸法および配筋状況

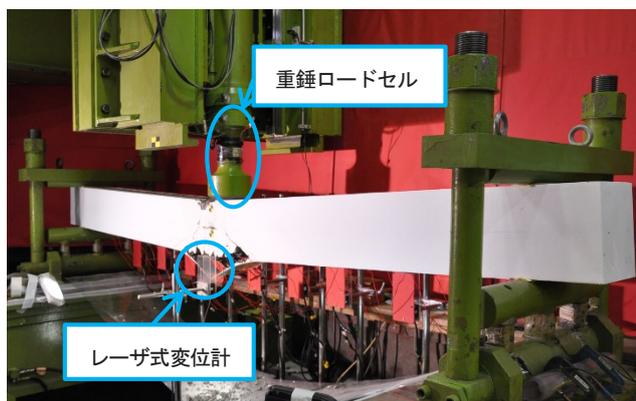


写真-3.1 実験状況

表-3.1 RC梁の静的設計値一覧

主鉄筋比 $P_t$	せん断スパン比 $a/d$	曲げ耐力 $P_{usc}(kN)$	せん断耐力 $V_{usc}(kN)$	せん断余裕度 $\alpha$
0.011	7.14	50.2	289.5	5.77

表-3.2 AFRPシートの力学的特性値（公称値）

目付量 ( $g/m^2$ )	保証耐力 ( $kN/m$ )	設計厚 ( $mm$ )	引張強度 ( $GPa$ )	弾性係数 ( $GPa$ )	破断ひずみ (%)
830	1,176	0.572	2.06	118	1.75

### 3. 1. 3 実験ケース

表-3.3には実験ケース一覧を示している。実験は、AFRPシート補強の有無、損傷の有無をパラメータとしている。表中の試験体名のうち、1次荷重のみ実施した試験体については、第一項目は補強の有無(N:無、A:有)を示し、第二項目は荷重方法(I:衝撃)と重錘落下高さ(m)を示している。1次荷重により損傷を与え補強後に2次荷重を実施している試験体については、第一項目は1次荷重後にひび割れ補修およびシート補強した場合の実験を示す DA と1次荷重時の重錘落下高さ(m)を、第二項目は荷重方法(I:衝撃)と2次荷重時の重錘落下高さ(m)を示している。1次荷重および2次荷重の落下高さは以下の検討により決定した。N試験体については、終局までの耐衝撃挙動データが取得できるように落下高さ  $H=1.0m$  から  $0.5m$  刻みで  $H=2.5m$  までの4ケースとした。A試験体については、AFRPシートによる補強効果を考慮し、 $H=1.5m$  から  $0.5m$  刻みで  $H=3.0m$  までの4ケースとしている。R試験体については、N試験体の衝撃荷重荷重実験結果により、1次荷重の落下高さを決定している。すなわち、落下高さ  $H=2.5m$  における残留変位量が破壊

表-3.3 実験ケース一覧

試験体名	シート補強の有無	一時荷重落下高さ $H_1(m)$	ひび割れ補修・AFRP補強	二時荷重落下高さ $H_2(m)$
N-I1.0	無	1.0	-	-
N-I1.5		1.5		
N-I2.0		2.0		
N-I2.5		2.5		
A-I1.5	有	1.5	-	-
A-I2.0		2.0		
A-I2.5		2.5		
A-I3.0		3.0		
DA1.5-I1.5	無	1.5	有	1.5
DA1.5-I2.0				2.0
DA1.5-I2.5				2.5
DA1.5-I3.0				3.0
DA1.5-I3.5				3.5

の目安とした純スパン長の2%程度に達していることから、補修対応する場合の残留変位量として終局の場合の50%程度以下と仮定し、1次荷重の落下高さとして  $H=1.5m$  を設定した。



写真-3.2 ひびわれ補修状況

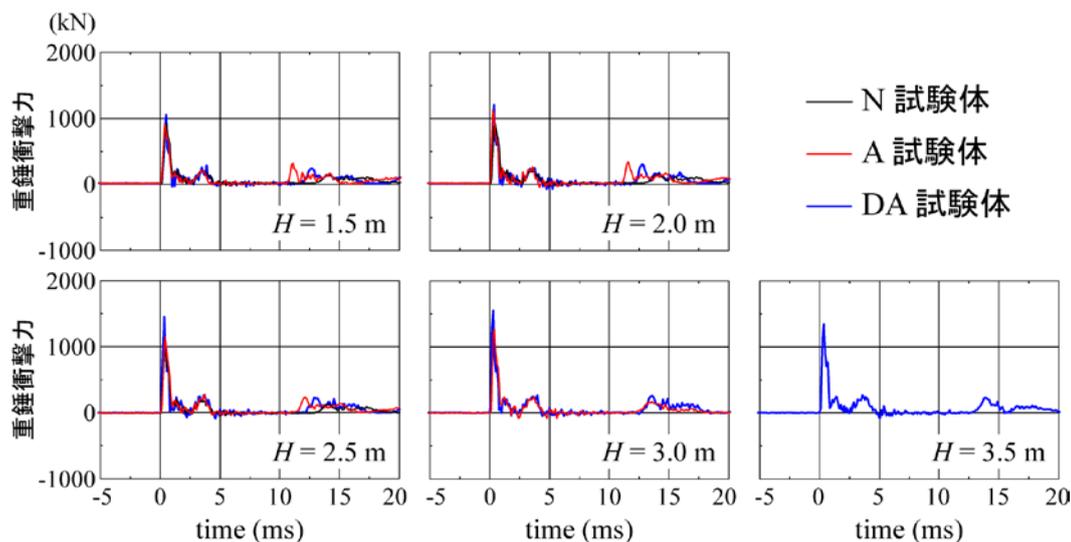


図-3.4 重錘衝撃力に関する応答波形

### 3. 1. 4 ひび割れ補修およびAFRPシート補強

1次荷重によって損傷を受けたRC梁の補修は、長期耐久性に対して有害であるとされる0.2mm以上のひび割れ部を対象にエポキシ樹脂を注入することにより行っている。補修の手順を概説すると、1)0.2mm 以上開口しているひび割れ部を対象として、エポキシ樹脂が表面に漏れないようにするためにパテを用いて密封する。2) 注入針を介してエポキシ樹脂をひび割れ部に注入する(写真-3.2)。3) エポキシ樹脂がひび割れ部に十分浸透し、かつ固化したことを確認後、パテを除去し、ひび割れスケッチ用のポスターカラーを塗布する。以上により、補修の一連の作業が終了する。なお、補修に用いたエポキシ樹脂は圧縮強度および引張強度の公称値はそれぞれ 60 MPa 以上および 30 MPa 以上となっている。ひび割れ補修後に補強対策として使用したAFRP シートの接着は、RC 梁底面のブラスト処理面(処理深さ 1mm 程度)に対してプライマーを塗布し、指触乾燥状態にあることを確認した後、含浸接着樹脂を用いて実施した。養生は 20 °C 程度の環境下で 7 日間以上行った。なお、ブラスト処理は作業性等を考慮し、実験対象試験体に対して1次荷重前にあらかじめ実施している。

## 3. 2 実験結果

### 3. 2. 1 時刻歴応答波形

図-3.4~3.6には、重錘衝撃力、支点反力および荷重点変位に関する応答波形を示している。

図-3.4より、重錘衝撃力波形は、いずれの試験体も類似の性状を示していることが分かる。すなわち、振幅が大きく継続時間が 3 ms 程度の第1波に振幅の小さい第 2 波および第 3 波が後続する性状を示している。また、重錘衝突後 10ms 以降に励起されている波形は初回の重錘衝突後に RC 梁から一旦離れた重錘が再度 RC 梁に衝突することにより発生したものであることを高速カメラの映像により確認している。この 2 度目の重錘衝突時刻は(c)図の荷重点変位波形における初期の立ち上がり勾配の変曲点の時刻に対応している。

図-3.5より、支点反力波形は、いずれの試験体も重錘落下高さによらず、変位波形の第1波目に対応する継続時間の長い波動に高周波成分が合成された波形性状を示していることが分かる。ただし、上記波動の継続時間は、A 試験体および DA 試験体の場合の方がN試験体と比較して短い。これは、シート補強することによって主鉄筋降伏荷重の増加やその後の剛性勾配お

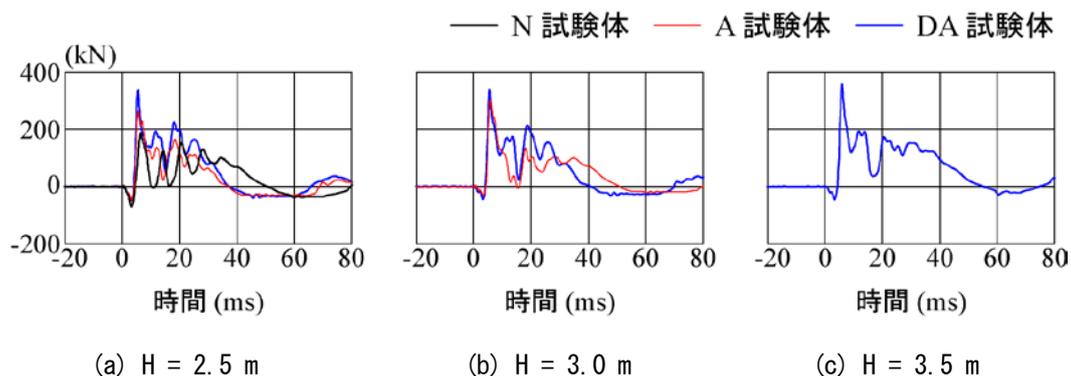


図-3.5 支点反力に関する応答波形

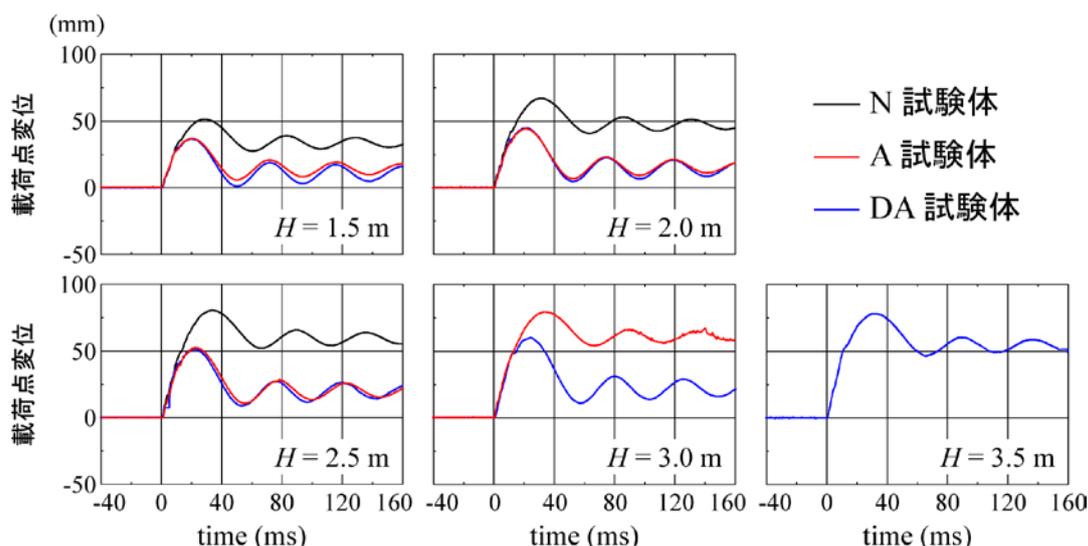


図-3.6 載荷点変位に関する応答波形

よび曲げ耐力が増加し、後述する変位量の低下とそれに伴い変位波形の周期が短くなることに対応している。

図-3.6より、載荷点変位波形は、いずれの試験体も類似の性状を示していることが分かる。すなわち、衝撃荷重載荷初期に正弦半波状の振幅の大きな波形が励起した後、減衰自由振動状態に至り、残留変位が発生している。変位量は、重錘落下高さ  $H$  によらず A 試験体および DA 試験体の方が N 試験体よりも小さく、波動の周期も短くなっており、AFRP シートの補強効果が示されている。AFRP シートで補強した 2 試験体について比較すると、落下高さ  $H = 2.5\text{ m}$  まではほぼ同様の変位波形を示しているが、 $H = 3.0\text{ m}$  では A 試験体において AFRP シートが破断したことにより最大変位および残留変位ともに DA 試験体よりも大きく示されている。また、AFRP シートは最大変位発生以前に破断していることから、DA 試験体の最大変位発生以降の減衰自由振動波形の周期は N 試験体

とほぼ同様となっている。以上より、ひび割れ補修後に AFRP シートにより補強した試験体は、AFRP シートが破断に至るまでは、無損傷 RC 梁の AFRP シート補強供試体と同様な耐衝撃挙動を示し、最大応答変位量や残留変位量を抑制できることが明らかになった。

### 3. 2. 2 ひび割れ分布性状

図-3.7は、衝撃荷重載荷実験終了後における各試験体側面のひび割れ分布性状を示している。図より、衝撃荷重載荷時におけるひび割れ分布性状は、いずれの試験体もスパン全域にわたって梁の上下縁から鉛直方向に進展する曲げひび割れや、載荷点部近傍から梁下縁に向かって約  $45^\circ$  の角度で進展する斜めひび割れとなっている。なお、上縁から曲げひび割れが進展するのは、衝撃初期に発生する曲げの主波動が支点に向かって伝播する場合において、支点近傍が固定端と類似の変形状態になることによるものと推察される。A 試験体に着目すると、 $H = 3.0\text{ m}$  でシートの破断によっ

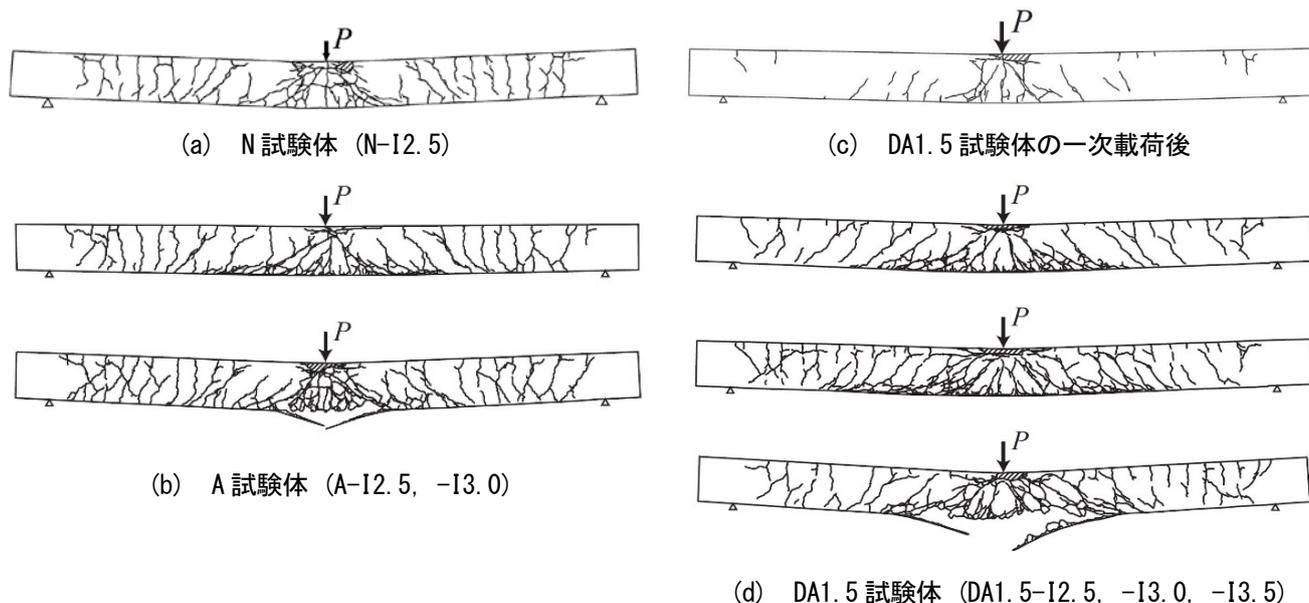


図-3.7 各試験体側面のひびわれ分布性状

て終局に至っている。これは、上縁コンクリートが圧壊してその抵抗力が消失し引張縁の AFRP シートに引張力が急速に作用した状態であると考えられる。DA 試験体に関しては、1 次载荷の影響により载荷点直下のコンクリートの圧壊範囲が A 試験体に比較して大きくなっているものの、全体的なひび割れ性状については同様となっている。また AFRP シートは  $H=3.5$  m において破断している。

#### 4. まとめ

既設ロックシェッドの耐荷力評価に向けて重要となる緩衝材（敷砂および碎石）の緩衝特性について検討より；

- 1)既設ロックシェッドは敷砂緩衝材を設置することとしてその緩衝特性を考慮して設計が実施されている。しかしながら、現実的には礫質土が敷設されており、かつそれらは強固に締固まった状態になっている。
- 2)碎石緩衝材の場合において、衝撃実験の再現性は非常によい。等しい入力エネルギーで重錘質量および落下高さが異なる場合には、最大衝撃力はほぼ類似の値を示すが、重錘貫入量は若干異なる。
- 3)敷砂と碎石緩衝材の緩衝特性の比較において、碎石緩衝材を設置した場合における最大重錘衝撃力と最大伝達衝撃力は敷砂緩衝材を設置した場合の 2 ～ 4 倍となる。

損傷を受けたRC梁のAFRPシート接着補強による耐荷力検討より；

- 1)AFRPシート補強RC梁の破壊性状は、静载荷時にはシート剥離であるのに対して、衝撃荷重载荷時にはシート破断で終局に至る。
- 2)AFRPシートが破断に至らなければ、初期損傷の有無にかかわらずAFRPシート補強RC梁は同様の耐衝撃挙動を示す。
- 3)AFRPシート補強により最大変位量および残留変位量が抑制されることから損傷したRC梁の耐衝撃補強対策として有効である。

#### 参考文献

- 1)内藤直人、前田健一：DEM 解析を用いた落体形状の異なる緩衝砂の衝撃力伝達挙動、土木学会全国大会第 67 回年次学術講演会、III-324、2012.9
- 2)山口 悟、木幡行宏、今野久志、西 弘明、小室雅人、岸 徳光：既設落石防護覆道上の緩衝材の実態調査について、第 48 回地盤工学研究発表会、pp.2055-2056、2013.7
- 3)Schellenberg, Kristian. : On the design of rockfall protection galleries. vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, 2009, ETH e-collection
- 4) (社) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説、2004.6
- 5) (社) 日本道路協会：落石対策便覧、2000.6
- 6)岸 徳光、今野久志、西 弘明、三上 浩：衝撃荷重を受けたRC梁のひび割れ補修前後における残存衝撃耐力、構造工学論文集、Vol.51A、pp.1251-1260、2005.3

## STUDY ON THE TECHNIQUES FOR REPAIRING AND REINFORCING ROCKFALL PROTECTION STRUCTURES

**Budget** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2012-2015

**Research Team** : Structures Research Team

**Author** : NISHI Hiroaki

KONNO Hisashi

YAMAGUCHI Satoru

KAKUMA Kou

**Abstract** : This study aimed to develop techniques for assessing the soundness and load-carrying capacity of rockfall protection structures in use and for repairing and reinforcing such structures to rationally provide the required load-carrying capacity.

In relation to assessment techniques for load-carrying capacity of rockfall protection structures in use, field surveys were done on the buffering members of rock sheds, which is important in assessing how impacts act on the structure. The surveys revealed the types of materials that are used and the thicknesses and densities of those materials. The current conditions of deterioration and damage found in rock sheds on national highways were analyzed and clarified. In the area of study for suggesting techniques for repairing and reinforcing rockfall protection structures in use, an experimental repair was done on an RC beam that had been damaged by impacts; the repair involved the bonding of AFRP sheets. The repairing and reinforcing effects of the experimental repair was analyzed.

**Key words** : Rockfall protection structures, deterioration and damages, rock shed, AFRP sheet, repair, reinforcement