

## 論文 支点近傍に衝撃荷重を受けたPC梁の残存耐荷性能評価

黒田 一郎<sup>\*1</sup>・畑野 真吾<sup>\*2</sup>・古屋 信明<sup>\*3</sup>・中村 佐智夫<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究は、支点近傍に衝撃荷重を受けてせん断損傷したPC梁にどれだけの耐荷性能が残っているか、を実験的に検討したものである。具体的には、重錘を所定の高さからPC梁に1回だけ落下させる単一重錘落下をまず行ってPC梁にせん断損傷を与え、その後PC梁が終局状態に至るまで同一の支持条件で静的載荷を続ける方式（2段階載荷実験）と、衝撃を繰返し与える方式とを、重錘によって梁に与えられたエネルギーとPC梁変形量の関係の観点から、比較した。

**キーワード**：PC梁，衝撃荷重，せん断損傷，残存耐荷性能，残留変位

## 1. はじめに

国土の約70%が山岳部であり、温暖湿潤気候に属する我が国で落石から道路や鉄道を守るために落石防護構造物がある。落石覆工は、その中で最も効果的で信頼性の高い構造物であり、近年、種々の利点からPC製落石覆工が多く建設されている。通常、落石覆工に用いられるコンクリート梁は、通常のコンクリート梁と同様に、脆性的でなく、十分に变形させた後に破壊させるべく、曲げ破壊がせん断破壊に先行するように設計されるが<sup>1), 2)</sup>、衝撃荷重の載荷位置が支承近傍であった場合、荷重そのものは大きくなるが、破壊モードが曲げからせん断に移行して脆性的であった事例も報告されている<sup>3)</sup>。また、破壊にまで至らなくともせん断損傷を受けたコンクリート梁が有する残存耐荷性能を知ることが、実務上、大変重要である。

その評価方法には種々あるが、実験的手法として、損傷したコンクリート梁が終局状態に至るまで、繰返し衝撃載荷実験を行う方法と静的載荷実験を行う方法とがあり、現象の本質からすれば前者が適当と考えられるが、実験の簡素さ、実験の再現性・落下高さの再検討の難しさ

という点から、重錘落下衝撃実験後の静的載荷実験方式が多用されてきた<sup>4), 5), 6)</sup>。だが、衝撃荷重を受けた後の残存耐荷性能をこの2段階載荷実験（衝撃載荷と静的載荷）によって評価するか、という検証は十分になされていない。

そこで本研究は、せん断破壊するPC梁を対象として、繰返し衝撃載荷実験および2段階載荷実験を行い、重錘によってPC梁に与えられたエネルギーとPC梁変形量の観点から両方式を比較する。

## 2. 実験概要

## 2.1 実験供試体および載荷板

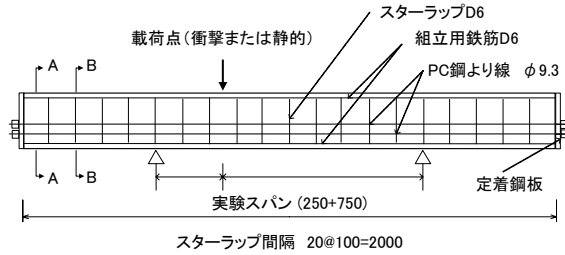
図-1(a), (b)にプレテンションPC梁の形状寸法および断面寸法を、表-1に材料諸元を示す。PC鋼より線（導入緊張力66.6kN/本）の定着を十分確保するために、供試体の全長は2000mmとし、さらに梁両端に厚さ12mmの定着鋼板を設けている。PC鋼より線は2本ずつ2段に分けて計4本設置している。スターラップは、梁全長にわたってD6鉄筋を100mm間隔で19本配置している（せん断補強筋比0.42%）。この量は、通常設計される落石覆工PC梁においてせん断補強筋が一番少

\*1 防衛大学校 建設環境工学科助教授 工博 (正会員)

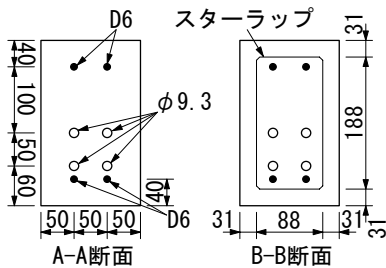
\*2 防衛大学校 理工学研究科前期課程学生 (正会員)

\*3 防衛大学校 建設環境工学科教授 工博 (正会員)

\*4 日本サミコン (株) 技術部



(a) 形状寸法



(b) 断面寸法

図-1 実験供試体

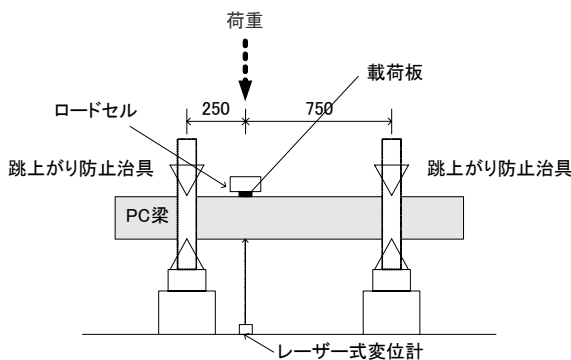


図-2 衝撃および静的載荷実験の要領

ない部類に相当する。また、実在する落石覆工上面には敷砂等の緩衝材が配されており、これらのサンドクッション効果によって落石による衝撃荷重が分散する。この分散効果による荷重分布範囲を一定の幅に限定するために、ロードセルとPC梁の間には梁軸方向長さ75mm・幅150mm・厚さ25mmの鋼板（SS400）（以降、載荷板と呼ぶ）を挟んだ。

## 2.2 実験概要

### (1) 衝撃載荷実験

図-2に実験要領を示す。質量0.3tの重錘を繰返し落下させて終局状態に至らしめる方式と、PC梁に1回だけ重錘を落下させる単一重錘落下方式（終局にはならない）を用いる。載荷点部には荷重計測用のロードセル、さらにその下に前

表-1 材料諸元

材料名	項目	数値等
コンクリート	水セメント比(%)	35
	セメント(kg/m <sup>3</sup> )	389
	水(kg/m <sup>3</sup> )	136
	細骨材(kg/m <sup>3</sup> )	752
	粗骨材(kg/m <sup>3</sup> )	1178
コンクリート	載荷実験時の圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	60.2
	PC鋼より線(SWPR7AN)	0.2%永久伸び強度(N/mm <sup>2</sup> )
スターラップ, 組立筋D6鉄筋(SD295A)	降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )	388

表-2 計測項目および計測器の性能・諸元

載荷方式	計測項目	計測器	性能・諸元
衝撃	荷重	ロードセル	容量: 1000kN
	変位	レーザー式変位計	測定範囲: 300±100mm 応答周波数: 915kHz
静的	荷重	ロードセル	容量: 1000kN
	変位	高感度変位計	測定範囲: 100mm 応答周波数: 12kHz

述した載荷板を設置した。重錘先端形状は半径100mmの円柱形で、その最先端部は平坦である。

載荷スパンは、PC梁を確実にせん断破壊させるために<sup>4)</sup>250mm+750mmの左右非対称（せん断スパン比： $a/d \approx 1.52$ ）とした。本実験では支点の近傍での破壊が予想されるため、PC鋼より線定着部の影響を排することを目的として支点からの張出しを長め(500mm)に確保した。せん断破壊に至るまでの変形量は曲げ破壊と比べて小さいため、この張出し部の慣性力による影響は小さいと考えられる。また、両支点部においては、半円形断面支承の上にPC梁を載せ、梁の上面を跳上がり防止用治具で鉛直方向に拘束しており、回転と梁軸方向の水平移動は自由なローラー支持の状態である。

繰返し衝撃載荷実験の1撃目の重錘落下高さ（ $H=1.1m, 1.4m, 1.7m$ ）は、既往の研究<sup>4)</sup>や単一重錘落下衝撃実験の結果を参考にし、ある程度のせん断ひび割れが発生するであろうとして設定した。2撃目以降の重錘落下高さは、2～3撃程度で終局に至るであろうという見通しで0.35mの一定値とした。載荷停止は、PC梁の損傷状態を目視で判断して決めた。

### (2) 重錘落下衝撃実験後の静的載荷実験

静的載荷実験は、(1)で述べた単一重錘落下衝

表-3 実験ケースおよび結果の一覧

(a) 繰返し衝撃載荷実験

シリーズ	供試体名	繰返し衝撃載荷実験							
		H (m)	P <sub>MAX</sub> (kN)	δ <sub>R</sub> (mm)	Σδ <sub>R</sub> (mm)	E <sub>D</sub> (kN・m)	ΣE <sub>D</sub> (kN・m)	載荷後 状態	
NC/rep.	75R-1.1H	1撃目	1.1	568.4	3.4	3.4	0.90	0.90	△
		2撃目	0.35	194.7	2.7	6.1	0.48	1.38	△
		3撃目	0.35	258.7	2.5	8.6	0.52	1.90	△
		4撃目	0.35	NA	1.0	9.6	NA	NA	×
	75R-1.4H	1撃目	1.4	755.0	4.7	4.7	1.31	1.31	△
		2撃目	0.35	261.4	5.2	9.9	0.52	1.83	△
		3撃目	0.35	263.1	5.6	15.5	0.53	2.36	△
		4撃目	0.35	226.1	10.7	26.2	0.57	2.93	×
	75R-1.7H	1撃目	1.7	763.0	8.5	8.5	2.01	2.01	△
		2撃目	0.35	251.2	2.6	11.1	0.34	2.35	△
		3撃目	0.35	231.2	4.3	15.4	0.64	2.99	×

H: 重錘の落下高さ  
 P<sub>MAX</sub>: 最大衝撃力  
 δ<sub>R</sub>: 衝撃載荷時の残留変位  
 Σδ<sub>R</sub>: 繰返し衝撃載荷による  
 累積残留変位  
 E<sub>D</sub>: 衝撃載荷時の吸収エネルギー  
 ΣE<sub>D</sub>: 繰返し衝撃載荷による  
 累積吸収エネルギー  
 P<sub>R</sub>: 静的残存耐力  
 δ<sub>S</sub>: 静的載荷でP<sub>R</sub>に達した時の変位  
 E<sub>S</sub>: 静的載荷時の吸収エネルギー  
 (この表ではδ<sub>S</sub>に達するまでの値)  
 載荷後の状態: △: せん断ひび割れ  
 ×: せん断破壊

(b) 2段階載荷実験および静的載荷実験

シリーズ	供試体名	衝撃載荷実験					静的載荷実験			
		H (m)	P <sub>MAX</sub> (kN)	δ <sub>R</sub> (mm)	E <sub>D</sub> (kN・m)	載荷後 状態	P <sub>R</sub> (kN)	δ <sub>S</sub> (mm)	E <sub>S</sub> (kN・m)	載荷後 状態
NC	75-1.1H	1.1	583.5	5.2	1.41	△	139.4	3.0	0.24	×
	75-2.0H	2.0	663.2	7.2	2.12	△	92.9	4.8	0.21	×
	75-2.3H	2.3	698.8	12.9	2.83	×	(衝撃載荷にて完全に破壊)			
Static	75S						365.0	7.8	3.60	×

NA: データ採れず  
 斜線部: 測定せず

撃実験により損傷を受けたPC梁の残存耐荷性能を把握するために、静的載荷装置を用いて行った。支持条件や載荷板は衝撃実験と同一であり、衝撃載荷後の残留変位が10mm以下のPC梁に対して行った。その理由は、衝撃実験時の目視観察により変位10mmを越えたPC梁は全て、載荷点と支承を結ぶ面に沿ったコンクリートがある幅で完全に破壊し、この分離面でのずれ量はおおよそ10mm以上にも達し、既にせん断破壊の終局状態に至っていると認められたからである。

2.3 計測項目および実験ケース

表-2に計測項目および計測器の性能・諸元を示す。衝撃実験では、載荷点荷重はロードセルにより、載荷点下縁の鉛直方向変位はレーザー式変位計により計測した。データは波形記憶装置で収集・変換し、ローパスフィルター1000Hzでノイズカットを行い、これを基礎データとした<sup>7), 8)</sup>。

静的載荷実験では、載荷点での荷重をロードセルで測定し、載荷位置におけるPC梁上縁の鉛直方向変位を高感度変位計で測定した。せん断ひび割れは載荷板の支点側端部と支点を結ぶよ

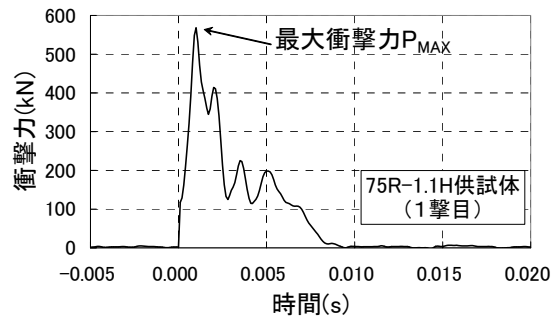
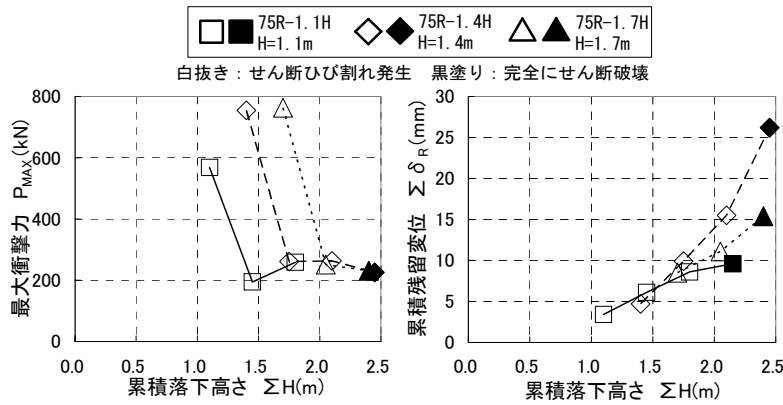


図-3 衝撃力-時間関係

うに入るため、載荷点上縁と下縁の変位は同一であるとみなす。

表-3(a), (b)に実験ケースおよび結果の一覧を示す。供試体名の前半(ハイフン記号より前)はシリーズ(載荷方法)を表わし, "75R"が繰返し衝撃載荷, "75"が2段階載荷である。そして、後半の数値は重錘落下高さ(繰返し衝撃載荷の供試体では1撃目の重錘落下高さ)をメートル単位で表わしている。なお、供試体名75Sは無損傷のPC梁に対して静的載荷を行なった供試体である。以降、繰返し衝撃載荷をNC/rep.シリーズ, 単一衝撃載荷をNC(No-Cushion)シリーズ, 無損傷のPC梁(75S)に対する静的載荷をStaticシリーズと呼ぶことにする。



(a)  $P_{MAX} - \Sigma H$  関係 (b)  $\Sigma \delta_R - \Sigma H$  関係  
 図-4 諸量-累積落下高さ関係 (NC/rep. シリーズ)

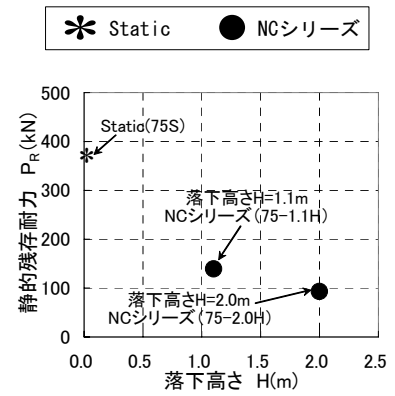


図-5 静的残存耐力-落下高さ関係 (StaticおよびNCシリーズ)

### 3. 実験結果

#### 3.1 最大衝撃力 $P_{MAX}$

衝撃力-時間関係の一例 (75R-1.1H供試体) を図-3に示す。また、各供試体の衝撃力のピークの値を最大衝撃力として表-3(a), (b)にまとめて示す。衝撃力測定値の測定精度は、衝撃力を時間で積分した値、即ち梁が受けた力積と重錘運動量とを比較することによって確認した。

1 ケース (75R-1.1H供試体の4撃目)を除いて力積と運動量がほぼ一致しており、一致しなかったケースについては表-3(a), (b)中の  $P_{MAX}$  の欄にNA (:データ採れず)と表記している。

#### 3.2 繰返し衝撃载荷実験の諸量-累積落下高さの関係

図-4(a), (b)に諸量-累積落下高さ ( $\Sigma H$ ) の関係を示す。記号の形は1撃目の落下高さ  $H$  を示し (□, ■ :  $H=1.1m$ , ◇, ◆ :  $H=1.4m$ , △, ▲ :  $H=1.7m$ )、色は損傷状態 (白抜き : せん断ひび割れ発生, 黒塗り : 完全にせん断破壊) を示す。

図-4(a)は、最大衝撃力  $P_{MAX}$  と  $\Sigma H$  を比較したものである。どのケースも1撃目の衝撃载荷でせん断ひび割れが入り、その後の繰返し衝撃载荷で200~300kNの最大衝撃力  $P_{MAX}$  を受けた後、せん断破壊の終局状態に至ったことがわかる。NC/rep.シリーズの1撃目の  $P_{MAX}$  は、NCシリーズにおいてPC梁をせん断破壊させる  $P_{MAX}$  (698.8kN:75-2.3H供試体) に匹敵しているが、NC/rep.シリーズではPC梁は完全に破壊するこ

となく、さらに2撃目以降への残存耐力を残していた。即ち、衝撃力のピークの値である最大衝撃力  $P_{MAX}$  はPC梁が完全に破壊するか否かとは密接な関係を持っていないことが明らかである。

図-4(b)は、残留変位の累積値 ( $\Sigma \delta_R$ ) と  $\Sigma H$  を比較したものである。どのケースでも、1撃目で大きな変位が与えられ、载荷回数を重ねるごとに  $\Sigma \delta_R$  を伸ばして終局状態に至っている。

#### 3.3 2段階载荷実験の残存耐力-落下高さ関係

図-5に2段階载荷実験によって得られた、静的残存耐力  $P_R$  と衝撃時の重錘落下高さの関係を示す。また、75S供試体の結果も描き入れてある ( $H=0m$ に)。落下高さが上がるほど初期損傷は激しくなるため、静的残存耐力  $P_R$  が小さくなっている。

#### 3.4 2段階载荷方式 (NC) と繰返し衝撃载荷方式 (NC/rep.) の比較

3.2節の結果を踏まえ、衝撃力の瞬間的なピークである最大衝撃力  $P_{MAX}$  ではなく、衝撃力-変位関係 (図-6に一例を示す) において衝撃力を変位で積分することによって算出される吸収エネルギーと残留変位との関係に着目して、NCシリーズの静的载荷実験結果とNC/rep.シリーズの2撃目以降の衝撃载荷実験結果を比較する。せん断破壊は大きな変位、変形を伴わずに生じるから、エネルギーに注目することは意味がないという考え方もあるが、この吸収エネルギーを導入することによって、衝撃载荷と静的载荷で

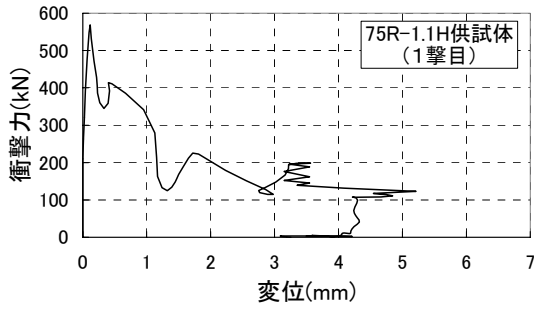


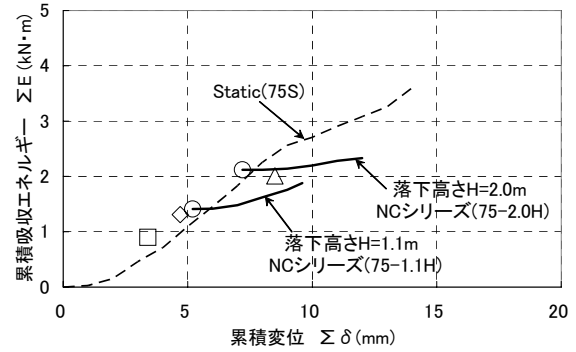
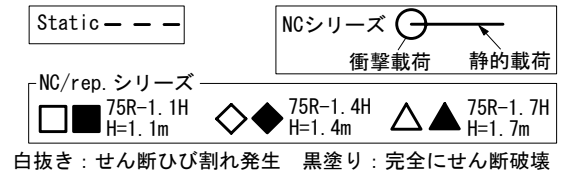
図-6 衝撃力-変位関係

それぞれにPC梁に加えられた入力を，統一的に議論することが可能となる。

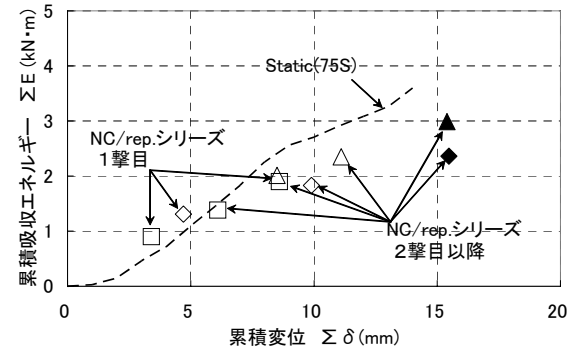
NCシリーズ（2段階荷方式）では衝撃による残留変位 $\delta_R$ をその後の静的荷時の変位に加算したものを，NC/rep.シリーズ（繰返し衝撃荷方式）では各回の衝撃毎に発生した残留変位 $\delta_R$ を合計したものを累積変位 $\Sigma\delta$ と定義し，これと梁の累積吸収エネルギー $\Sigma E$ との比較を試みる。累積吸収エネルギー $\Sigma E$ としては，NCシリーズでは衝撃荷時の吸収エネルギー $E_D$ を静的荷時の吸収エネルギーに加算して求め，NC/rep.シリーズでは各回の衝撃毎の吸収エネルギー $E_D$ を合計して求めることとする。その結果を図-7(a)～(c)に示す。図において破線は無損傷のPC梁（75S）に対する静的荷実験（Static）を示す。丸印はNCシリーズ（75-1.1H，75-2.0H）の衝撃荷の結果を，丸印から伸びる実線は衝撃荷後の静的荷の結果を示す。それ以外はNC/rep.シリーズの結果（記号は図-4と同じ）である。

図-7(a)は，NC，NC/rep.の1撃目の結果およびStaticを比較する。NCの衝撃荷時およびNC/rep.の1撃目の $\Sigma E-\Sigma\delta$ 関係を示すプロットはStaticの $\Sigma E-\Sigma\delta$ 関係を示す破線の近傍に分布しており，このことから，PC梁への1撃目衝撃時の吸収エネルギーと残留変位の関係は無損傷のPC梁の静的荷実験（Static）でとらえることができる。と考える。

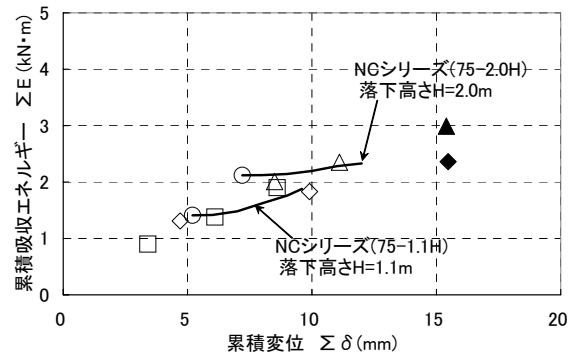
次に図-7(b)では，2撃目以降を含めたNC/rep.シリーズとStaticを比較する。2撃目以降のプロットは，破線よりも下方に位置しStaticから離れてしまっている。



(a) NC，NC/rep. シリーズ 1 撃目と Static シリーズの比較



(b) Static シリーズと NC/rep. シリーズの比較



(c) NC シリーズと NC/rep. シリーズの比較  
図-7  $\Sigma E-\Sigma\delta$  関係

最後に図-7(c)で，NCシリーズの衝撃後の静的荷実験とNC/rep.シリーズの2撃目以降を比較する。NC/rep.シリーズの $\Sigma E-\Sigma\delta$ 関係を示すプロットは，NCシリーズの衝撃後静的荷実験での $\Sigma E-\Sigma\delta$ 関係を表わす実線の近くに分布して

おり、2 撃目以降の衝撃載荷の $\Sigma E - \Sigma \delta$ 関係はNCシリーズで行なった衝撃載荷後の静的載荷実験で把握可能であると考えられる。特に、1 撃目の落下高さが同じ ( $H=1.1m$ ) であった75R-1.1H供試体 (NC/rep.シリーズ) と75-1.1H供試体 (NCシリーズ) について $\Sigma E$ と $\Sigma \delta$ の値を比較すれば良い一致が見られる (表-4参照)。

以上のように、累積吸収エネルギー $\Sigma E$ と累積変位 $\Sigma \delta$ の関係に着目すれば、まだ損傷を受けていない梁に対する1 撃目の衝撃載荷時の $\Sigma E - \Sigma \delta$ 関係は無損傷の梁に対する静的載荷実験で、いったん損傷を受けた後の梁に対する2 撃目以降の衝撃載荷時の $\Sigma E - \Sigma \delta$ 関係はNCシリーズ2 段階載荷実験 (衝撃載荷+静的載荷) で、それぞれ捉えられることが明らかとなった。2 撃目以降の落下高さを0.35mに固定した本実験の条件に限定されるが、衝撃を受けたPC梁がどれだけ残存耐荷性能を残しているかを検討する上では、2 段階載荷実験によって有用な情報を得ることが可能であると考えられる。付け加えるならば、2 段階載荷実験は、繰返し衝撃載荷実験よりも簡便であり、また安全に実施できるという利点がある。

#### 4. 結論

本研究は、支点近傍に衝撃荷重を受けたPC梁がどれだけの残存耐荷性能を有しているかを実験的に把握することを目的とし、繰返し衝撃載荷実験 (NC/rep.シリーズ) と、単一重錘落下衝撃実験に引続く静的載荷実験 (NCシリーズ) をそれぞれ実施し、それらの結果を比較した。本研究によって得られた成果を以下に要約する。

- (1) 繰返し衝撃載荷および2 段階載荷実験において、累積変位が10mmを越えるPC梁は全て、載荷点と支承を結ぶ面に沿ったコンクリートがある幅で完全に破壊してずれ量も大きく、既にせん断破壊の終局状態に至っていると認められた。
- (2) 2 段階載荷実験における静的残存耐力 $P_R$ は、落下高さが大きくなる程小さくなる。

表-4 累積変位と累積

1 撃目 落下高さ H (m)	累積変位 $\Sigma \delta$ (mm)	累積吸収エネルギー $\Sigma E$ (kN·m)	
		NC/rep.シリーズ 75R-1.1H	NCシリーズ 75-1.1H
1.1	6.1	1.38	1.42
	8.6	1.90	1.71
	9.6	1.96	1.88

- (3) 1 撃目の衝撃載荷時の $\Sigma E - \Sigma \delta$ 関係は無損傷の梁に対する静的載荷実験で把握可能である。
- (4) 既に損傷を受けた後の梁に対する2 撃目以降の繰返し衝撃載荷時の $\Sigma E - \Sigma \delta$ 関係は、2 段階載荷実験 (単一重錘落下衝撃実験に引続く静的載荷実験) で捉えることが可能である。

#### 参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧，平成12年6月
- 2) 土木学会：ロックシェットの耐衝撃設計 構造工学シリーズ8，平成10年
- 3) 建設省土木研究所構造研究室・(社)プレストレス・コンクリート建設業協会：PRCロックシェットの設計法に関する共同研究報告書，建設省土木研究所共同研究報告書 第148号，1996.3
- 4) 下山一貴：支点付近に荷重を受けるPC梁のせん断力学特性に関する研究，防衛大学校修士論文，平成14年3月
- 5) 白石博文ほか：礫衝突による損傷を受けたコンクリート充填鋼管の残存耐力に関する実験的研究，土木学会論文集，No.738/I-64，P.85-95，2003.7
- 6) 千賀孝宣：鋼繊維補強超高強度コンクリートはりの衝撃抵抗性に関する研究，防衛大学校修士論文，平成17年3月
- 7) 土木学会：衝撃実験・解析の基礎と応用 構造工学シリーズ15，平成16年
- 8) 別府万寿博ほか：RCはり部材の衝撃実験における衝撃荷重の計測と波形処理法，土木学会論文集，No.724/I-62，P.141~P.156，2003.1