

衝撃荷重が作用する PC 梁部材のせん断耐荷性状に及ぼす載荷幅の影響

Effect of loading spread on shear destruction of PC beam subjected to impact load

黒田一郎*1, 吉村太郎*2, 山本佳士*3, 古屋信明*4, 中村佐智夫*5

Ichiro Kuroda, Taro Yoshimura, Yoshihito Yamamoto, Nobuaki Furuya, Sachio Nakamura

*1 博(工), 防衛大学校准教授, システム工学群建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*2 防衛大学校, 理工学研究科前期課程, 土木環境工学専攻(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*3 修(工), 防衛大学校助教, システム工学群建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*4 博(工), 防衛大学校教授, システム工学群建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*5 日本サミコン株式会社, 技術部(〒950-0925 新潟県新潟市中央区弁天橋通 1-8-23)

This research is aimed at grasping influence of loading spread on shear destruction of PC beams which have various structural aspects and receive impact load. Experimental parameters are existence or none of stirrups, share span ratio, loading spread (narrow or wide) and falling height of steel weight. The beams were experimented through static loading test, impact loading test by falling steel weight and static loading test after the impact test, and load vs. displacement, load vs. time, displacement vs. time and residual bearing capacity after the impact were examined. Finally, some relationship between loading spread and shear destruction of PC beams due to impact were concluded.

Key Words: Impact, PC beam, Loading spread, Shear destruction

キーワード: 衝撃, PC 梁, 載荷幅, せん断耐荷性状

1. はじめに

落石防護構造物の一種として, 鉄筋コンクリート(以下, RC と呼ぶ)製, プレストレストコンクリート(以下, PC と呼ぶ)製および鋼製のロックシェッドが多く建設されている。ロックシェッドの上面には通常, その防護のために敷砂が設けられており, 落石とロックシェッド上面の接触は剛体同士の接触ではなく, 敷砂を介して衝撃力が伝播されることとなる。そのため, ロックシェッド上面に伝達される衝撃力は, 剛体同士の接触に比べて分布範囲が広がることを期待できる。敷砂等の緩衝材を介して伝達される衝撃力の分布に関する研究としては, 吉田らの研究¹⁾, 佐々木らの研究²⁾, 鈴木らの研究³⁾が挙げられ, これらの成果も取りこんで, 土木学会から「ロックシェッドの耐衝撃設計」⁴⁾が出版されている。これらの研究では, 敷砂上に重錘を落下させた際の伝達衝撃力分布を, 敷砂下に複数配置した土圧計, ロードセルによって把握しており, 伝達衝撃力分布は重錘落下高さなどの条件によって変化するものの, 重錘寸法程度の分布幅となることが示されている。

一方, RC 梁への静的な載荷では, 載荷幅がせん断耐力に及ぼす影響は顕著であり, 載荷幅が大きいほどせん断耐力が大きくなる⁵⁾。PC 梁に落石のような衝撃的な荷重が作用する場合においても, 載荷幅の増加がせん断耐荷性能の向上に寄与すると考えられ, 点載荷を前提とするのではなく, 載荷幅を考慮したより合理的な設計が期待されるものの, これに関する検討はこれまで行われてこなかった。

そこで, 本研究は, 衝撃荷重が作用する PC 梁部材のせん断耐荷性状に及ぼす載荷幅の影響を把握することを目的として, PC 製ロックシェッドを模した PC 梁供試体を対象とした静的載荷実験ならびに重錘落下衝撃載荷実験を行った。静的載荷実験, 重錘落下衝撃載荷実験とともに, 梁上面の荷重が作用する位置に載荷板として鋼板を置くことによって荷重の分布幅を制御するとともに, せん断スパン比, スターラップの有無をもパラメータとした。具体的には, 静的載荷実験では静的耐力, 重錘落下衝撃載荷実験では衝撃載荷時の残留変位, ならびに衝撃載荷後に再び静的載荷実験を行うことで残存耐

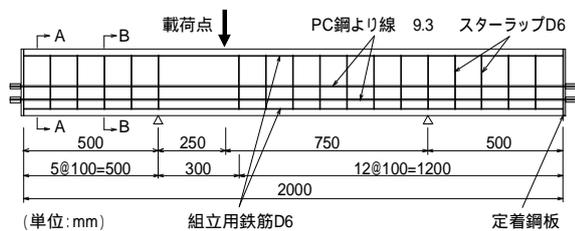


図 - 1(a) 供試体形状寸法 NS-1.5 シリーズ

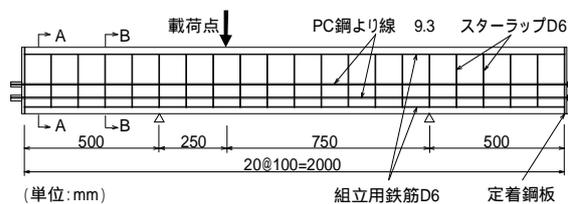


図 - 1(b) 供試体形状寸法 S-1.5 シリーズ

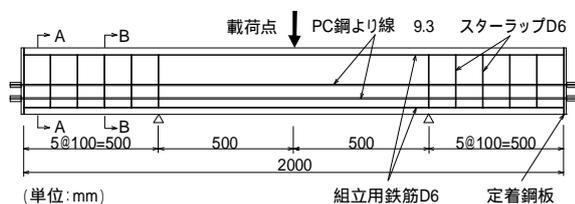


図 - 1(c) 供試体形状寸法 NS-3.0 シリーズ

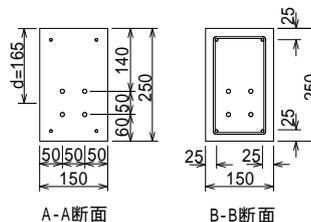


図 - 1(d) 供試体断面寸法

表 - 1 材料諸元

材料名	項目	数値
コンクリート	水セメント比(%)	36
	セメント(kg/m ³)	389
	水(kg/m ³)	140
	細骨材(kg/m ³)	708
	粗骨材(kg/m ³)	1200
	荷重実験時の 圧縮強度(N/mm ²)	74.9
PC鋼より線 (SWPR7AN)	0.2% 永久伸び強度 (N/mm ²)	1337
	直径(mm)	9.3
スターラップ, 組立用鉄筋 D6鉄筋(SD295)	降伏強度 (N/mm ²)	355

- (1) 同一配合で3回に分けて打設したコンクリートの供試体合計9個の平均値
- (2) 分布範囲: 71.2 ~ 78.7 N/mm²

力を計測し、荷重幅とせん断耐荷性状の関係を評価することを試みた。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

図 - 1(a) ~ (d) に PC 梁供試体の形状寸法および断面寸法、表 - 1 に材料諸元を示す。本実験においては、プレストレスが有る供試体を中心に、せん断スパン比およびスターラップの有無をパラメータとした供試体を使用している。供試体の全長は 2000mm で、PC 鋼より線(導入プレストレス力 66.6kN/本)は、梁両端の全面を覆う厚さ 12mm の鋼板上にくさびによって定着されている。PC 鋼より線は 2 本ずつ 2 段に分けて計 4 本配置しており、プレテンション方法で製作したため、コンクリートとの付着有りの状態である。せん断スパン比 (a/d) は、1.5 と 3.0 の 2 種類である。スターラップは、S シリーズは梁の全長にわたって D6 鉄筋を 100mm 間隔で設置している。NS シリーズでは、せん断スパンにスターラップは

表 - 2 曲げおよびせん断耐力算定値

供試体シリーズ		終局曲げ耐力 M_u	終局曲げ耐力 M_u に相当する荷重	せん断耐力 V_y	せん断耐力 V_y に相当する荷重
スターラップの有無	せん断スパン比 a/d	(kN・m)	(kN)	(kN)	(kN)
NS	1.5	55.0	293.3	54.1	72.1
	3.0		220.0		108.2
S	1.5		293.3	95.0	126.7

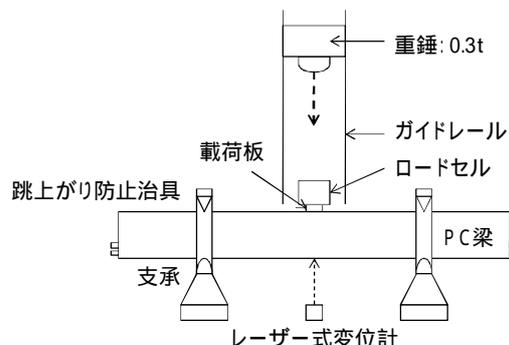


図 - 2 重錘落下衝撃荷重実験の要領

配置していないが、せん断スパン以外で予期せぬせん断破壊が生じることを防ぐために、梁端部から支承までの区間にはスターラップを設置した。以下、せん断スパン比の数値を添えて、例えば NS-1.5 シリーズ(スターラップを持たず、せん断スパン比が 1.5 の意)のように表すこともある。なお、S-3.0 シリーズ(スターラップ有り、 $a/d=3.0$)を今回の実験対象にしていないのは、静的荷重においても曲げ破壊することを確認しているからである⁶⁾。

表 - 2 に、土木学会コンクリート標準示方書⁷⁾による曲げおよびせん断耐力算定値、ならびに算定値を基に荷重スパンから算出した終局曲げ耐力に相当する荷重およびせん断耐力に相当する荷重を示す。ただし、せん断耐力算定値は、表 - 4 に記載している実験値をかなり下

回っている。この算定式は、ディコンプレッションモーメント法によって軸方向圧縮力の影響を評価しているが、プレストレスの効果を評価するには限界があることが報告されている⁸⁾。

2.2 重錘落下衝撃載荷実験要領

図-2 に重錘落下衝撃載荷実験の要領を示す。重錘落下衝撃載荷実験は、質量 0.3ton の鋼製重錘を所定の高さから 1 回だけ落下させる単一落下方式であり、衝突による衝撃力は、ロードセルさらには厚さ 25mm の鋼板（以下、載荷板と呼ぶ）を介して PC 梁上面に到達すること

になる。

載荷板は、サンドクッションを有する実構造物において、荷重の分布幅が落石の寸法程度となることが知られているので、その寸法の効果を実験において再現するためのものである。本実験では、梁軸方向の寸法（以下、載荷幅と呼ぶ）が 75mm と 150mm の 2 種類の載荷板を用いた。なお、載荷板の梁直角方向の幅はすべて梁幅と同じ 150mm である。また、支承部においては、跳上り防止治具で衝撃を受けた PC 梁供試体が上方へ変位しないよう拘束しているが、回転は許す支承構造となっている。

載荷スパンは $a/d=1.5$ の供試体では 250mm+750mm の左右非対称、 $a/d=3.0$ の供試体では 500mm+500mm の左右対称載荷である。ここで、本実験におけるせん断スパン比は、点載荷で考えた場合の $a/d=1.5$ および 3.0 であり、異なる載荷幅でもサンドクッションによって分布する荷重の中心が同じになるように考慮されたものである。そのため、載荷板が大きいことによって載荷板端部から支承までの距離が短くなることの影響は、本実験では考

表-3 計測項目および計測器の性能・諸元

載荷方式	計測項目	計測機器	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

表-4 実験ケースおよび実験結果

シリーズ	スターアップの有無	せん断スパン比	載荷幅	番号	供試体名	重錘落下衝撃載荷実験				静的載荷実験				
						落下高さ H (m)	最大 衝撃力 P_{max} (kN)	残留変位 δ_R (mm)	吸収 エネルギー E_d (kN·m)	衝撃 載荷後の 損傷程度	静的耐力 P_S または 残存耐力 P_R (kN)	吸収 エネルギー E_S (kN·m)	静的 載荷時の 破壊モード	
NS (なし)	a/d=1.5	N(75mm)	a1	NS-1.5-0.0N	1	0.0					321.4	0.88	C	
			a2	NS-1.5-0.0N-2	1	0.0					345.4	1.12	C	
			a3	NS-1.5-0.7N	1	0.7	481.0	0.6	0.66		339.8	1.74	C	
			a4	NS-1.5-0.7N-2	1	0.7	379.7	0.6	1.00		439.2	6.67	C	
			a5	NS-1.5-1.0N	1	1.0	567.7	0.6	1.48		323.2	1.60	C	
			a6	NS-1.5-1.0N-2	1	1.0	522.5	1.1	1.55		240.5	0.68	C	
			a7	NS-1.5-1.1N	1	1.1	487.9	6.4	0.82		82.2	0.34	C	
			a8	NS-1.5-1.1N-2	1	1.1	604.3	9.5	0.98		144.4	0.25	C	
			b1	NS-1.5-0.0W	1	0.0					445.2	8.17	C	
	b2	NS-1.5-1.1W	1	1.1	524.0	0.4	1.73		449.4	9.67	C			
	b3	NS-1.5-1.4W	1	1.4	595.9	0.8	2.26		408.6	7.17	C			
	a/d=3.0	N(75mm)	c1	NS-3.0-0.0N	1	0.0					256.6	1.41	B	
			c2	NS-3.0-0.0N-2	1	0.0					288.5	3.56	B	
			c3	NS-3.0-0.7N	1	0.7	382.4	1.0	2		254.5	1.04	C	
			c4	NS-3.0-1.0N	1	1.0	368.8	0.8	0.88		252.5	1.55	A	
c5			NS-3.0-1.4N	1	1.4	440.5	3.0	2	0.80		280.7	3.08	C	
c6			NS-3.0-1.4N-2	1	1.4	594.3	0.1	2.48		317.9	6.26	A		
c7			NS-3.0-1.8N	1	1.8	580.9	2.0	2	2.80		217.2	2.63	C	
c8			NS-3.0-1.8N-2	1	1.8	669.2	12.9	2	3.07		61.0	0.20	C	
c9			NS-3.0-1.8N-3	1	1.8	710.3	14.4	3	3.12		77.1	0.76	C	
c10			NS-3.0-2.1N	1	2.1	488.0	30.0	2	3.13		20.6	0.33	C	
W(150mm)	d1	NS-3.0-0.0W	1	0.0						319.8	6.54	A		
	d2	NS-3.0-1.4W	1	1.4	617.6	7.3	2.86			72.0	0.23	C		
	d3	NS-3.0-1.8W	1	1.8	628.3	5.8	3.92			131.8	0.37	C		
	e1	S-1.5-0.0N	1	0.0						415.2	4.32	C		
	e2	S-1.5-1.1N	1	1.1	465.4	0.7	1.96			342.9	1.16	C		
	e3	S-1.5-1.4N	1	1.4	488.5	0.0	1.92			291.0	1.44	C		
S (あり)	a/d=1.5	N(75mm)	e4	S-1.5-2.0N	1	2.0	663.2	7.2	2.12		92.9	0.21	C	
			e5	S-1.5-2.0N-2	1	2.0	821.6	5.7	1.51		152.9	0.93	C	
			e6	S-1.5-2.3N	1, 3	2.3	698.8	12.9	2.83					
			f1	S-1.5-0.0W	1	0.0						452.8	5.74	C
			f2	S-1.5-2.3W	1	2.3	825.0	0.9	4.21			446.2	4.32	C
			f3	S-1.5-2.6W	1	2.6	820.0	1.2	4.89			421.2	3.40	C
		W(150mm)	f4	S-1.5-2.9W	1	2.9	1011.4	1.9	4.86			375.1	3.08	C
			f5	S-1.5-2.9W-2	1	2.9	855.5	1.2	4.26			422.5	9.37	C
			f6	S-1.5-3.2W	1	3.2	879.6	1.4	5.99			410.2	3.66	C

1：既往の研究¹⁰⁾， 2：定規による実測値， 3：衝撃載荷による損傷が著しいため、衝撃載荷後の静的載荷は実施せず。

- ・ 衝撃載荷後の損傷程度
 - ：曲げひび割れ，
 - ：せん断ひび割れ，
 - ：曲げ+せん断ひび割れ，
 - ：衝撃載荷のみでほぼ終局（せん断圧縮破壊）
- ・ 静的載荷時の破壊モード
 - A：曲げ引張破壊， B：斜め引張破壊， C：せん断圧縮破壊

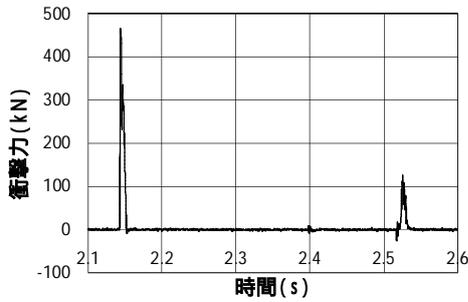


図 - 3 衝撃力 - 時間関係の例
S-1.5-1.1N

慮されていない。

表 - 3 に計測項目を示す。載荷点の衝撃力は載荷板上面に設置したロードセルにより、載荷点位置の PC 梁下縁の鉛直変位はレーザー式変位計により計測した。これらのデータは、サンプリングタイム $10\mu\text{s}$ の動ひずみ測定装置を使用して $100\mu\text{s}$ 間隔で収集した後に、文献⁹⁾を参考にローパスフィルタによるノイズカットを行った。

2.3 静的載荷実験要領

重錘落下衝撃載荷実験によって損傷を受けた供試体は、引続いて静的載荷実験に供し、衝撃載荷後の残存耐力を測定した。載荷スパンや載荷板を敷く位置は重錘落下衝撃載荷実験と同一とした上で静的荷重を加えた。載荷にはアムスラー式載荷試験装置を用い、載荷点の荷重は載荷板上面に設置したロードセルにより、載荷点位置の PC 梁下縁の鉛直変位は高感度変位計により計測した。なお、衝撃による損傷のない PC 梁供試体の静的耐力測定も同様の方法で実施した。

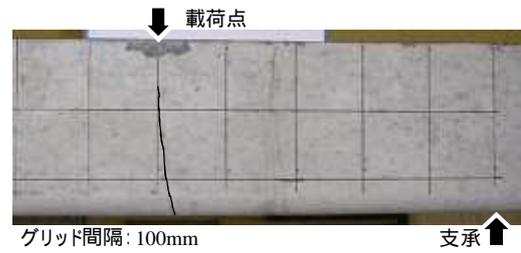
2.4 実験ケース

表 - 4 に実験ケースとその結果を示す。供試体名は先頭からスターラップの有無、せん断スパン比、落下高さ、載荷幅の順で表している。ここで、供試体名について、落下高さの数字は m 単位であり、ロードセル上面から計測したものである。なお、最後に添加されている記号“-2”および“-3”は、同一条件の第 2 号および第 3 号供試体であることを表す。また、重錘落下衝撃載荷実験を経ずに全く無損傷の状態での静的載荷実験のみを行った供試体も、落下高さ 0.0 という表現で表 - 4 に併せて示してある。これ以降、各図中で供試体を表すマーカーの形状はスターラップの有無やせん断スパン比を表しており、は NS-1.5 シリーズ、は S-1.5 シリーズ、は NS-3.0 シリーズを表す。また、載荷幅は 75mm が白抜きのマーカー、150mm が黒塗りのマーカーで表している。

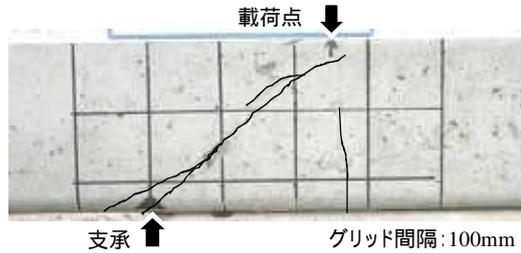
3 実験結果

3.1 重錘落下衝撃載荷実験結果

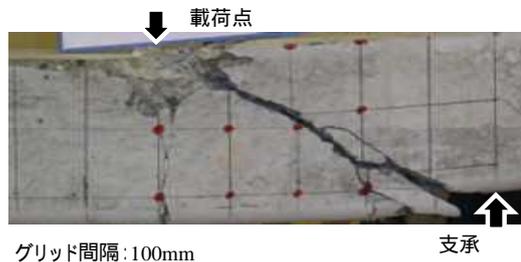
表 - 4 の重錘落下衝撃載荷実験の欄に落下高さ、最大



(a) 曲げひび割れの例
NS-3.0-1.0N



(b) 曲げ + せん断ひび割れの例
NS-1.5-1.0N



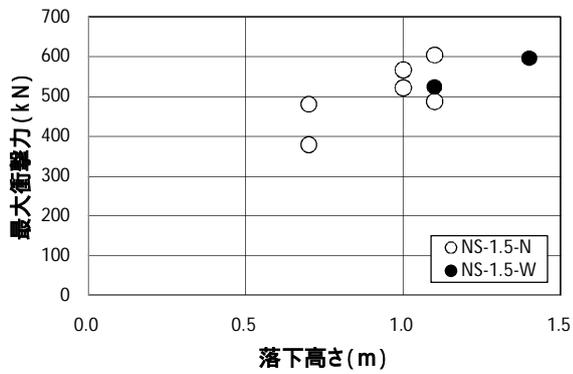
(c) せん断圧縮破壊の例
NS-3.0-2.1N

図 - 4 衝撃載荷後の損傷・破壊形態

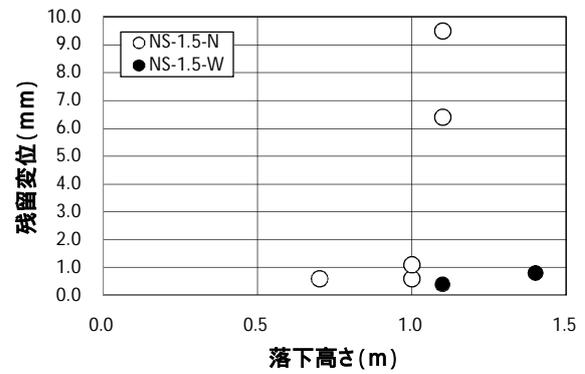
衝撃力、残留変位、吸収エネルギー、載荷後の状態を示す。ここで、図 - 3 (S-1.5-1.1N、すなわち、スターラップ有り、 $a/d=1.5$ 、落下高さ 1.1m、載荷幅 75mm) を例として最大衝撃力について定義する。図 - 3 において 2 つの波が確認できるが、2.15s 時点で 1 回目の衝突を起こした後、リバウンドした重錘が 2.53s 時点で 2 回目の衝突を起こしたことを表している。この中で 1 回目の衝突時の衝撃力の最大値を最大衝撃力としている。また、吸収エネルギーは、衝撃載荷実験で得られた荷重 - 変位曲線のうち、1 回目の衝突時のものを積分して求めた値である。

(1) 供試体損傷・破壊形態

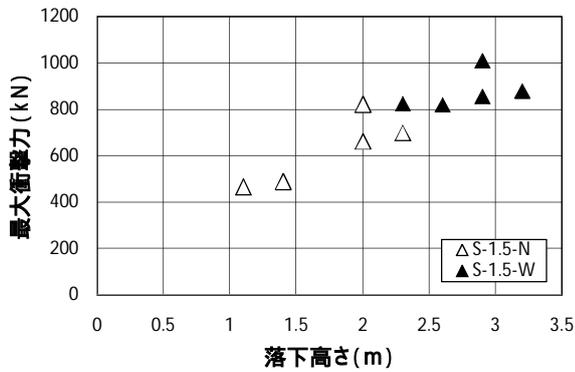
図 - 4(a) ~ (c) に、重錘落下衝撃載荷実験後の供試体損傷・破壊形態の例を示す。図 - 4(a) は曲げひび割れ (黒線がひび割れ位置を示す。) が発生したが、ひび割れは開口していない状態である (除荷後にプレストレスにより、ほぼ閉じた)。図 - 4(b) はせん断ひび割れと曲げひび割れ (黒線がひび割れ位置を示す。) が発生したが、前



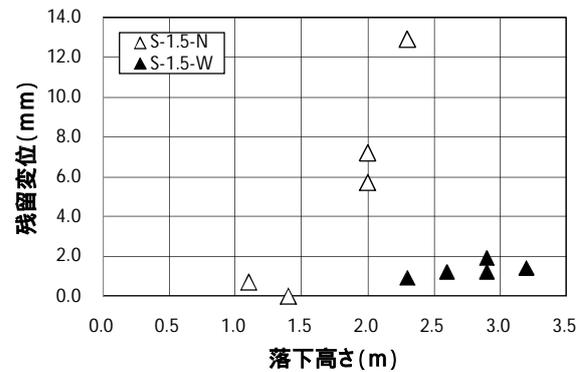
(a) NS-1.5 シリーズ



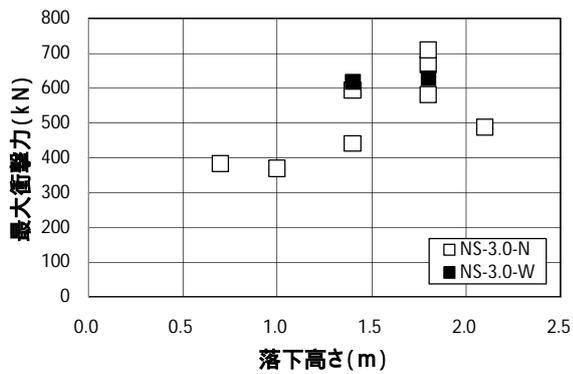
(a) NS-1.5 シリーズ



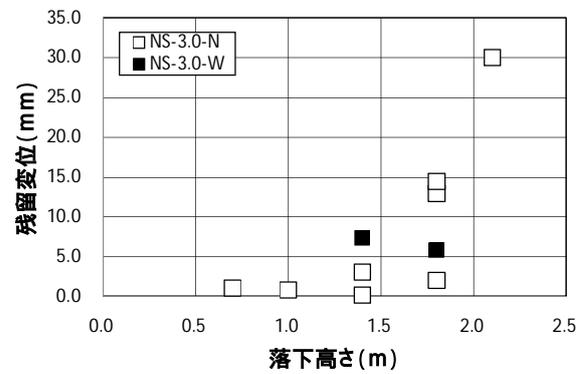
(b) S-1.5 シリーズ



(b) S-1.5 シリーズ



(c) NS-3.0 シリーズ



(c) NS-3.0 シリーズ

図 - 5 最大衝撃力 - 落下高さ関係

図 - 6 残留変位 - 落下高さ関係

者が残っているのに対して、後者はひび割れが開口していない。一方、図 - 4(c)は、発生したひび割れが開口した後に載荷点付近で圧壊したことが契機となってせん断破壊し、ひび割れに沿ってずれも生じた状態である。ひび割れに沿ったずれの発生は、供試体表面にあらかじめ描いたグリッド線の断絶で確認した。ここで、重錘落下衝撃載荷実験後の損傷程度を ~ の4段階に分類して表 - 4 に示した。定義は表 - 4 の脚注に述べた。は図 - 4(a)のような状態、は図 - 4(b)のような状態、は図 - 4(c)のような状態である。は、の状態から曲げひび割れを除いた状態である。今回の実験では、スターラップや PC 鋼より線が破断した供試体はなかった。ま

た、スターラップの有無や載荷幅が同じ条件であれば、落下高さが高いほど損傷程度は大きくなっている。

(2) 最大衝撃力

図 - 5(a) ~ (c)に各供試体シリーズの最大衝撃力 - 落下高さ関係を示す。多くのシリーズでは、落下高さが高くなるに従って最大衝撃力が大きくなる傾向を示している。載荷幅と比較すると、どの供試体シリーズもそれとは関係なく1つの直線の周囲に集まって分布していることから、最大衝撃力は載荷幅に依存しないと言える。

(3) 残留変位

図 - 6(a) ~ (c)に各供試体シリーズの残留変位 - 落下高さ関係を示す。多くのシリーズでは、落下高さが高くな

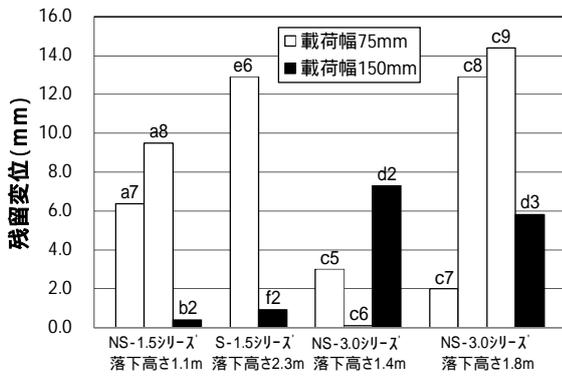


図-7 せん断スパン比と載荷幅の違いによる残留変位の比較

るに従って残留変位が次第に大きくなる傾向を示しているが、ある落下高さを超えると急激に残留変位が大きくなっている。このときの残留変位成分については、せん断圧縮破壊した面に沿う変形（ずれ）が大きいいため、残留変位中に占めるせん断の寄与が大きいと考えられる。

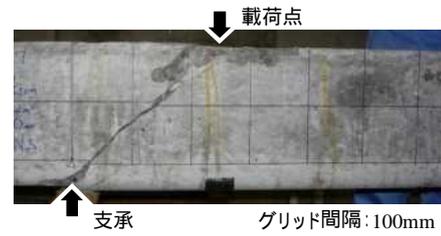
また、同じ落下高さにも関わらず実験結果がばらついているのが散見される。これは、衝撃載荷実験に必然的に伴うものでもあり、また、急激に破壊程度が進行する落下高さであるため、同一条件の供試体間で隔差が大きかったと考えられる（例えば図-6(c)に示すNS-3.0-Nシリーズの落下高さ1.8mの3体）。なお、後述する残存耐力についても同様のことが言える。

各シリーズごとに、代表的な落下高さに対する残留変位を、載荷幅の違いに注目して図-7に示す。概観すると、 $a/d=1.5$ ではスターラップの有無に関わらずに、載荷幅150mmでは75mmに比べて、残留変位が格段に小さい。しかしNS-3.0シリーズでは、載荷幅と残留変位の間に明確な相関は見られない。

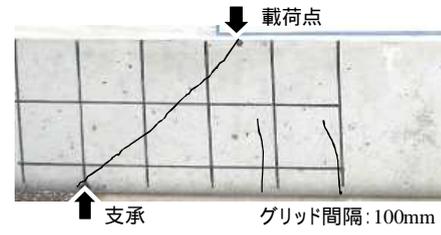
次に、図-8(a)~(d)に各供試体シリーズの損傷・破壊形態を示し、載荷幅の違いによる影響を考察する。NS-1.5-1.1では、載荷幅75mmの時は曲げひび割れはさほど発達せず、載荷点と支承とを結ぶせん断ひび割れが顕著で、損傷が局部に集中する傾向（図-8(a)参照）を示している。一方、載荷幅150mmの時は曲げひび割れや載荷点と支承とを結ぶせん断ひび割れが併存するというように、損傷が分散する傾向（図-8(b)参照、黒線がひび割れ位置を示す。）を示しており、載荷幅75mmと比べて曲げによる損傷が現れており、損傷形態に及ぼす載荷幅による影響が大きいと言える。

しかし、NS-3.0-1.8では、どちらの載荷幅の場合も、曲げひび割れや載荷点と支承とを結ぶせん断ひび割れが併存して、似たような損傷傾向（図-8(c)と(d)参照）を示している。

以上のことから、載荷幅の大小が残留変位と損傷・破壊形態に影響を及ぼすことが確認できた。しかし、せん断スパン比によってその影響の度合いは異なり、 $a/d=1.5$



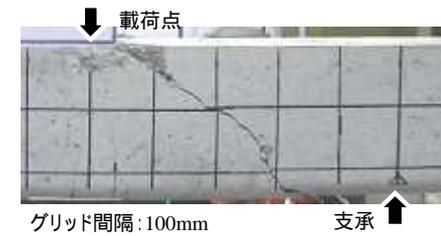
(a) NS-1.5-1.1N, せん断圧縮破壊



(b) NS-1.5-1.1W, 曲げ+せん断ひび割れ



(c) NS-3.0-1.8N, せん断圧縮破壊



(d) NS-3.0-1.8W, せん断圧縮破壊

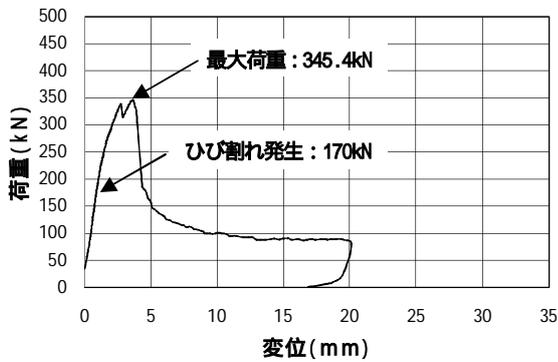
図-8 衝撃載荷実験後の状態

では大きいですが、 $a/d=3.0$ では小さいと言える。

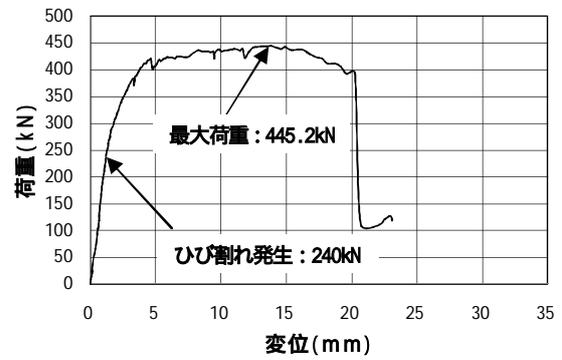
3.2 静的載荷実験の結果

表-4の静的載荷実験欄に静的耐力または残存耐力、吸収エネルギー、載荷後の状態を示す。ここで、各項目について定義すると、静的耐力は、衝撃による損傷のないPC梁に対する静的載荷実験で測定された荷重の最大値、残存耐力は、重錘落下衝撃載荷実験後の静的載荷実験で測定された荷重の最大値である。吸収エネルギーは、静的載荷実験で得られた荷重-変位曲線を終局変位まで積分して求めた値である。なお、終局変位の定義について、本研究では、実験供試体にひずみゲージを貼らなかったため、荷重-変位曲線上で最大荷重から80%低下した位置とした¹¹⁾。

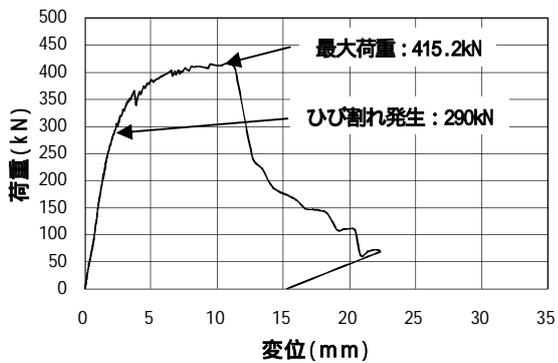
(1) 衝撃による損傷のないPC梁の静的載荷実験結果
表-4中の供試体名の末尾に“0.0N”または“0.0W”



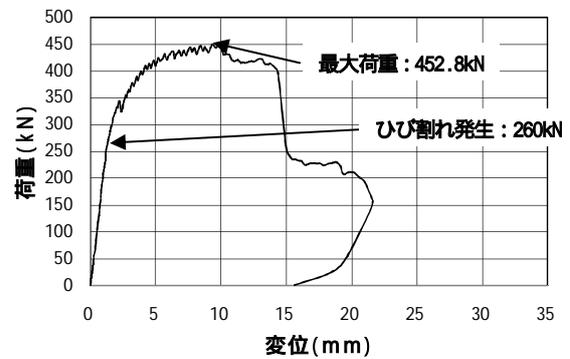
(a) NS-1.5-0.0N-2 (a2)



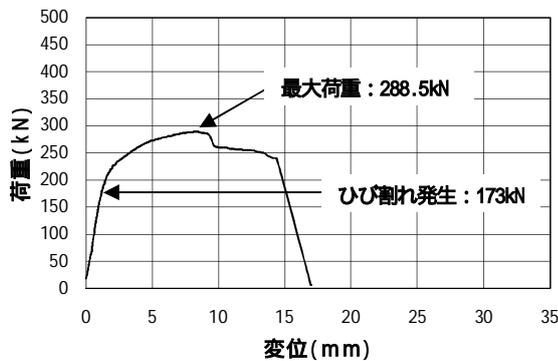
(b) NS-1.5-0.0W (b1)



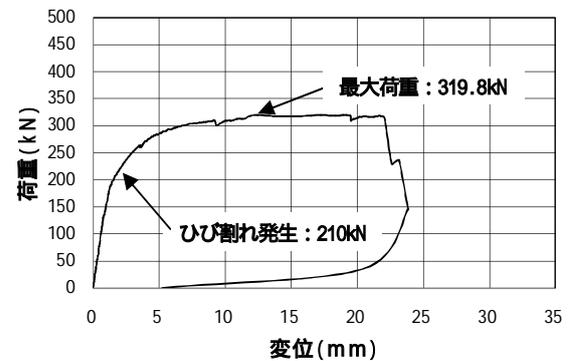
(c) S-1.5-0.0N (e1)



(d) S-1.5-0.0W (f1)



(e) NS-3.0-0.0N-2 (c2)



(f) NS-3.0-0.0W (d1)

図 - 9 衝撃による損傷のない PC 梁の静的載荷時の荷重 - 変位関係

がついたものは、重錘落下衝撃載荷実験に供しなかった、静的載荷実験のみの PC 梁供試体である。それのうち、NS-3.0-0.0W は曲げ引張破壊したが、それ以外はせん断スパン比、載荷幅に関わらず静的載荷によってせん断圧縮破壊または斜め引張破壊に至った。せん断破壊した供試体は、曲げひび割れおよび載荷点と支承とを結ぶせん断ひび割れの両方が載荷途中で生じ、最大荷重に達した以降せん断ひび割れが開くとともに、せん断ひび割れに沿ったずれ変形が増大して終局に至った。一方、曲げ破壊した供試体は、載荷点直下に発生した曲げひび割れがそのまま開口しつつ変位が増大して、終局に至った。

図 - 9(a) ~ (f) に衝撃による損傷のない PC 梁の静的載

荷実験における荷重 - 変位関係を示す。a/d=1.5 の場合、スターラップがない場合は大きな剛性で荷重が上がっていき、突然せん断圧縮破壊を起こして荷重が低下するという脆性的挙動を示していたが(図 - 9(a)参照)、載荷幅の増大(図 - 9(b)参照)またはスターラップの配置(図 - 9(c)参照)により、最大荷重付近での挙動が延性的になっている。この点は、図 - 9(a)と(b)の比較および(a)と(c)の比較では、載荷幅増大の方がより効果があるように見受けられる。

a/d=3.0 では、載荷幅が大きければ、最大荷重およびそれが持続する変位の範囲も広がるが、最大荷重にはせん断スパン比が強く影響するため、荷重値そのものは

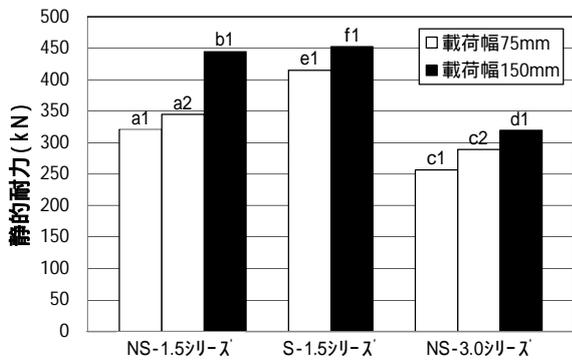


図 - 10 せん断スパン比と載荷幅の違いによる静的耐力の比較

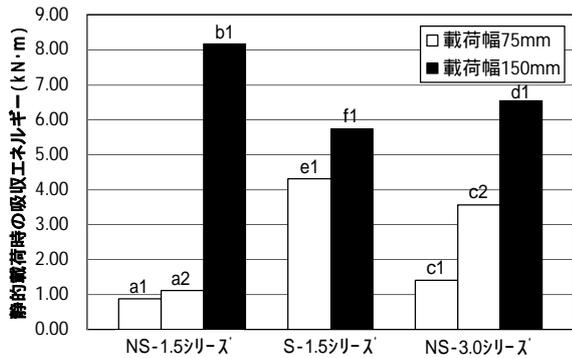


図 - 11 せん断スパン比と載荷幅の違いによる静的載荷時の吸収エネルギーの違い

a/d=1.5 の場合より小さい。

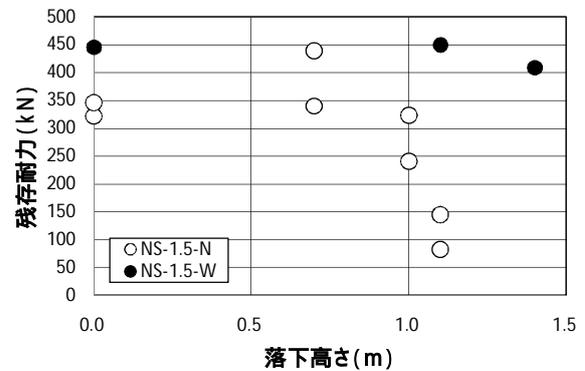
以上述べてきた結果を図 - 10 に整理する。各シリーズとも載荷幅 150mm の方が載荷幅 75mm に比べて大きな値を示しており、具体的な比率としては、NS-1.5 シリーズでは 1.3~1.4 倍、S-1.5 シリーズでは 1.1 倍、NS-3.0 シリーズでは 1.1~1.2 倍となった。

図 - 11 に吸収エネルギーを比較して示す。各シリーズとも載荷幅 150mm の方が載荷幅 75mm に比べてエネルギー吸収量は大きい。具体的な比率は、NS-1.5 シリーズでは 7.3~9.3 倍、S-1.5 シリーズでは 1.3 倍、NS-3.0 シリーズでは 1.8~4.6 倍である。これは、載荷幅が大きい場合は小さい場合と比べて、ピーク値を超えてからの荷重低下が緩やかになっていることが影響している。

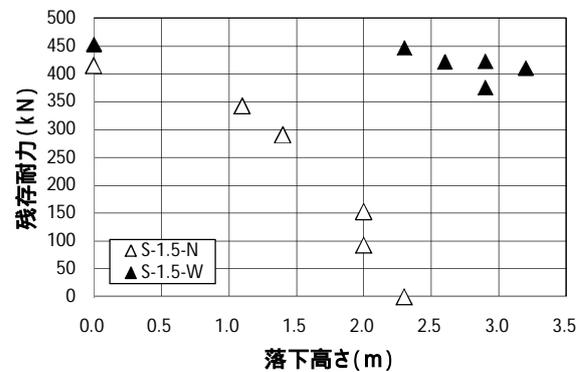
(2) 重錘落下衝撃載荷実験後の残存耐力

図 - 12(a)~(c)に各供試体シリーズの残存耐力 - 落下高さ関係を示す。多くのシリーズにおいて残存耐力は、落下高さが小さいうちは、無損傷梁に対する静的載荷実験時の最大耐力にほぼ近い値を維持しているが、落下高さが高くなると急激に低下する傾向を示している。

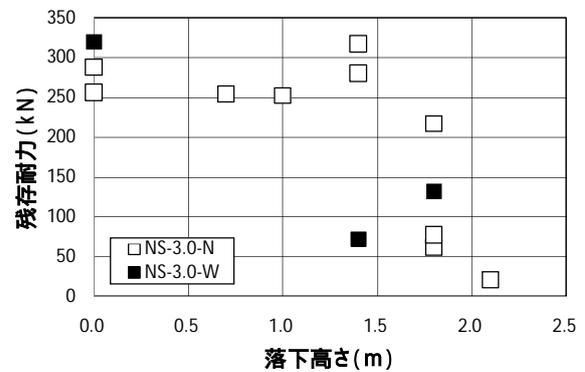
図 - 12(a)より NS-1.5 シリーズでは、載荷幅 75mm で残存耐力が急激に低下する落下高さであっても載荷幅 150mm では静的耐力とほぼ同じ値を維持している。具体的には、落下高さ 1.1m において、載荷幅 150mm は約 450kN 程度の残存耐力を維持しているのに対して、載荷



(a) NS-1.5 シリーズ



(b) S-1.5 シリーズ



(c) NS-3.0 シリーズ

図 - 12 残存耐力 - 落下高さ関係

幅 75mm の残存耐力は 150kN 未満で終局状態である。この傾向は、S-1.5 シリーズ (図 - 12(b)参照) でも同様である。具体的には、載荷幅 150mm は落下高さ 3.2m (実験装置の限界)において約 410kN 程度の残存耐力を維持しているのに対して、載荷幅 75mm の残存耐力は落下高さ 2.3m において 0kN である。

しかし、図 - 12(c)より NS-3.0 シリーズでは、載荷幅の大小に関わらず、残存耐力が急激に低下する落下高さの差はあまり見られない。具体的には、落下高さ 1.4m において、載荷幅 150mm の残存耐力は約 70kN 程度に対して、載荷幅 75mm の残存耐力は 280kN 以上である。また、落下高さ 1.8m において、載荷幅 75mm の残存耐力は 61kN、

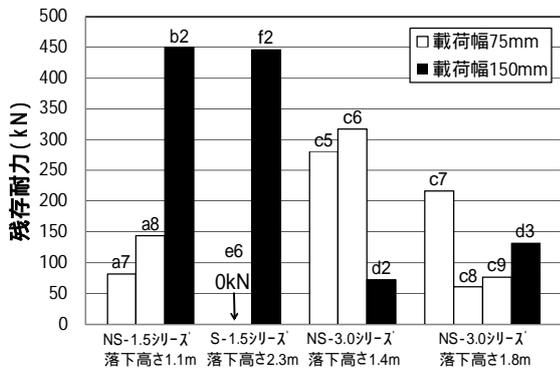


図 - 13 せん断スパン比と載荷幅の違いによる残存耐力の比較

77.1kN, 217.2kN に対して、載荷幅 150mm の残存耐力は約 130kN であるように、結果がばらついている。

以上述べてきたとおり、載荷幅の大小が残存耐力に影響を及ぼすことが確認できた。しかし、せん断スパン比によってその影響の度合いは異なり、 $a/d=1.5$ の供試体シリーズでは大きい、 $a/d=3.0$ の供試体シリーズでは小さいと言える。

3.3 せん断スパン比と載荷幅の影響

本実験では、3.1 および 3.2 で述べてきたように、衝撃的な荷重が作用する場合の載荷幅の違いが、せん断耐荷性状に影響を及ぼすことが確認できた。

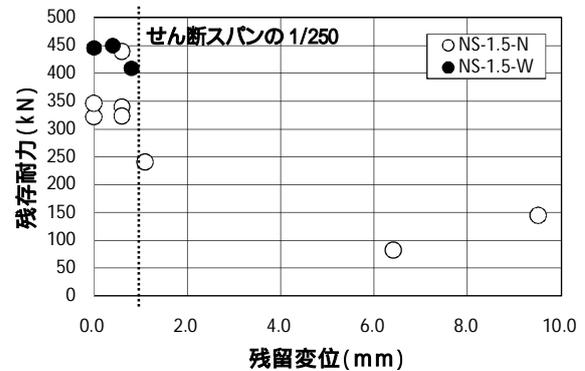
しかし、その影響はせん断スパン比が小さい ($a/d=1.5$) 場合に限定された。これは、既往の研究結果と同様に、載荷幅が大きくなることによる圧縮ストラット幅の増加効果が、せん断スパン比が小さい場合の方が現れやすいためと考えられる。

一方、NS-3.0 シリーズは、NS-1.5 および S-1.5 シリーズに比べて載荷幅による荷重の分散効果は明確ではない。これは、 $a/d=3.0$ では、梁の耐荷能力や変形に占める曲げ成分が大きくなり、これはもともと載荷幅の影響を受けにくいと考えられる。

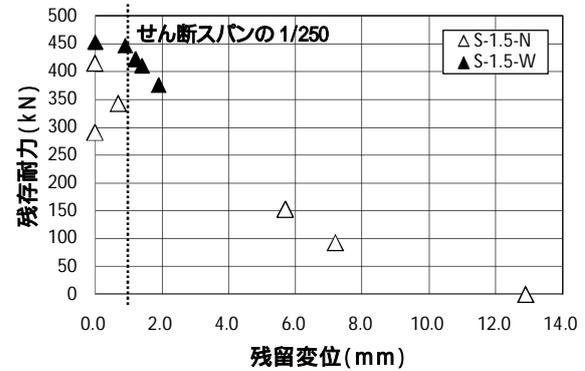
3.4 残留変位と残存耐力の関係

落石によって実在するロックシェッドが損傷を受ける想定をする際、衝突をした落石の質量、落下高さについての情報を把握するのは困難である。しかし、落石の落下位置および衝撃後のロックシェッドの残留変位は把握可能である。そこで、衝撃後のロックシェッドの残留変位に注目し、これと残存耐力との関係について考察することができるのではないかと考えられる。図 - 14(a) ~ (c) に残留変位 - 残存耐力関係を示し、衝撃載荷後の残留変位と静的載荷時の残存耐力の関係に着目する。ここでは、せん断スパンは落石の落下位置と支承の間を指すことにする。

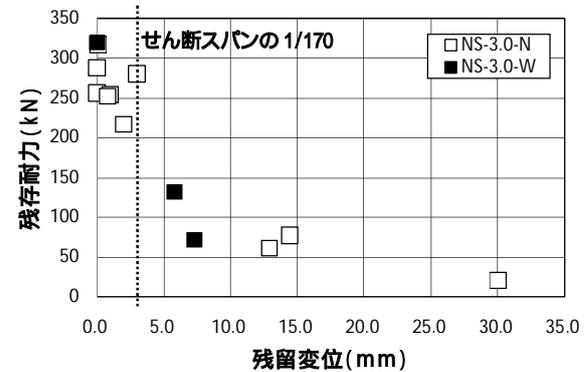
図 - 14(a) より NS-1.5-N シリーズは、残留変位が 1mm 程度までは静的載荷時の最大耐力 360.8kN (平均値) の



(a) NS-1.5 シリーズ



(b) S-1.5 シリーズ



(c) NS-3.0 シリーズ

図 - 14 残存耐力 - 残留変位関係

約 7 割程度の残存耐力を維持しているが、残留変位が 1mm を超えると、残存耐力が著しく低下している。この残留変位 1mm は、今回実験のせん断スパン 250mm の 1/250 に相当する。図 - 14(b) より実構造物では必ずスターラップがあるが、スターラップがあっても S-1.5-N シリーズでは、残留変位が 1mm 程度を超えると残存耐力が低下している。

図 - 14(c) より NS-3.0-N シリーズは、残留変位が 3mm 程度までは静的載荷時の最大耐力 272.7kN の約 8 割程度の残存耐力を維持しているが、残留変位が 3mm を超えると、残存耐力が著しく低下している。

以上に残留変位と残存耐力の関係の一例を示したが、

今後は、実務で応用できるような具体的な手法について検討していきたい。

4 まとめ

本研究では、衝撃荷重が作用する PC 梁部材のせん断耐荷性状に及ぼす載荷幅の影響を把握することを目的とし、無損傷梁への静的載荷実験、重錘落下衝撃載荷実験およびその後の静的載荷実験を通じてせん断耐荷性状を評価することを試みた。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 落下高さが高くなるに従って最大衝撃力は大きくなるが、載荷幅に依存しない。
- (2) 衝撃載荷時の残留変位について、 $a/d=1.5$ では、載荷幅 75mm で大きな残留変位を生じさせる落下高さであっても載荷幅 150mm では僅かな残留変位しか生じていない。すなわち、衝撃荷重を分散させることの効果は大きい。一方、 $a/d=3.0$ では、載荷幅によるこのような効果は認められなかった。
- (3) 無損傷梁に対する静的載荷実験時の静的耐力について、各シリーズとも載荷幅 150mm の方が載荷幅 75mm に比べて大きな値を示した。
- (4) 衝撃載荷後の残存耐力について、 $a/d=1.5$ では、載荷幅 75mm で残存耐力が急激に低下する落下高さであっても載荷幅 150mm では静的耐力とほぼ同じ値を維持している。一方、 $a/d=3.0$ では、載荷幅によるこのような効果は認められなかった。
- (5) 衝撃載荷後の残留変位と静的載荷時の残存耐力の関係について、載荷幅 75mm では、残留変位が $a/d=1.5$ シリーズでは 1mm、 $a/d=3.0$ シリーズでは 3mm を超えると、ほとんどの供試体は残存耐力が急激に低下した。一方、載荷幅 150mm・スターラップ有り・ $a/d=1.5$ の供試体では、実験装置の限界である落下高さ 3.2m の時でも、残留変位は 1.4mm・残存耐力 410kN と、無損傷梁に近い状態であった。

本研究により、載荷幅の増加がせん断耐荷性能の向上に寄与する可能性を示すことができた。今後は、実験結果を解析も含めてシミュレートすることで、衝撃載荷時における載荷幅の違いによるせん断耐荷能力への影響

を具体的に明らかにしていきたい。そして、載荷幅が、また別な要因で配置が決定されているスターラップが、実際のロックシェッド等でどのように安全性向上に寄与しているのかについて検討していきたい。

参考文献

- 1) 吉田博，栢谷浩，鈴木哲次：敷砂上の落石の衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No.352/III-2，pp.61-70，1984.
- 2) 佐々木康，古賀康之：敷砂の落石の衝撃力に関する実験的研究，土木学会論文集，No.340，pp.127-137，1983.
- 3) 鈴木健太郎，岡田慎哉，荻野博紹，牛渡裕二，表真也，岸徳光：衝撃荷重作用時におけるアーチ構造の敷砂緩衝材の緩衝効果，土木学会第 62 回年次学術講演会，1 部門，pp.555-556，2007.
- 4) 土木学会：ロックシェッドの耐衝撃設計，構造工学シリーズ 8，1998.
- 5) 例えば，二羽淳一郎：FEM 解析に基づくディープビームのせん断耐荷力算定式，第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，1983.
- 6) 黒田一郎，下山一貴，古屋信明，中村佐智夫：PC 梁部材の静的および高速せん断載荷実験，構造工学論文集，Vol.47A，pp.1299-1308，2001.
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書，構造性能照査編，2002.
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書（平成 3 年版）改訂資料およびコンクリート技術の今後の動向，コンクリートライブラリー 70，pp.61-64，1991.
- 9) 土木学会：衝撃実験・解析の基礎と応用，構造工学シリーズ 15，2004.
- 10) 黒田一郎，塩野谷昇，古屋信明，山本佳士，中村佐智夫：せん断スパン比などを変えた PC 梁の衝撃載荷実験，構造工学論文集，Vol.53A，pp.1881-1190，2007.
- 11) 大内一：コンクリート系建造物の耐震設計法，森北出版，pp.119-120，2008.

(2008 年 9 月 18 日受付)