

せん断スパン比などを変えた PC 梁の衝撃載荷実験

Impact experiment on PC beams having various shear-span ratios

黒田一郎^{*1}, 塩野谷昇^{*2}, 山本佳士^{*3}, 古屋信明^{*4}, 中村佐智夫^{*5}

Ichiro Kuroda, Noboru Shionoya, Yoshihito Yamamoto, Nobuaki Furuya, Sachio Nakamura

^{*1} 工博, 防衛大学校助教授, 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} 工修, 防衛大学校助手, 建設環境工学科 (〒239-8686神奈川県横須賀市走水1-10-20)^{*4} 工博, 防衛大学校教授, 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 (〒950-0925新潟県新潟市弁天橋通1-8-23)

The authors have investigated shear destruction of PC beams by impact given near support point, and this time we intend to study contribution of concrete itself to the phenomena. The PC beams used in this study have various shear-span ratios (1.5, 3.0 and 4.8), but have no stirrups, and both specimens were made regarding to presence or absence of prestress. Contents of the experiment were static-loading tests, impact-loading test and static loading test of damaged beams by the impact, and these tests lead understanding of the influence of shear-span ratio and effect of prestress on shear destruction of PC beams by impact.

Key Words: PC beam, Shear, Impact, Shear span ratio, Introduced prestressing force

キーワード: PC 梁, せん断, 衝撃, せん断スパン比, 導入プレストレス量

1. はじめに

山岳地帯や傾斜地で発生する災害から道路や鉄道を防護するために使用されている落石防護構造物の中で, 最も効果的で信頼性の高い構造物の一つにロックシェッドがある. ロックシェッドには鉄筋コンクリート(以下RC製)やプレストレスコンクリート(以下PC)製および鋼製のものがあり, 近年PCロックシェッドが多く建設されている. RC製, PC製ロックシェッドの梁部材は, 通常の梁部材と同様に脆性破壊を防止して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されるよう設計される¹⁾²⁾.

しかし, そのように設計されたPC製ロックシェッドでも衝撃荷重の載荷位置が支承近傍の場合, 破壊モードが曲げからせん断に移行して脆性的に破壊した事例も報告されており³⁾, 衝撃荷重を受けるPC梁のせん断破壊挙動については未解明の部分が多い. この問題についての研究は少ない状況にあり, 支点近傍に衝撃荷重を受けるPC梁のせん断破壊挙動についての研究としては, 著者らの研究⁴⁾⁵⁾が挙げられる.

一方, 静的な条件下におけるPC梁のせん断破壊挙動に関する既往の研究では, プレストレス量を大きくするとせん断ひび割れ発生荷重が著しく大きくなることが報告されている⁶⁾. また, 軸方向圧縮力を受けるRC梁のせん断破壊実

験(静的)では, 小さなせん断スパン比において軸方向圧縮力の影響が大きいものの, せん断圧縮破壊モードにおいては, 軸方向圧縮力によるせん断耐力の増加率が, せん断スパン比が小さくなるに従って減少することが明らかになっている⁷⁾. これらから, RC梁のせん断破壊においてせん断スパン比やプレストレス量が重要な影響因子であると考えられるが, 衝撃荷重が作用する条件においてこれらの点を検討した研究はまだなされていない状況にある.

そこで, 本研究では, せん断スパン比およびプレストレス量が, 衝撃荷重を受けるPC梁の破壊挙動に与える影響を把握することを目的とし, 重錘落下衝撃実験とその衝撃によって損傷を生じた梁の静的載荷実験を行ない, 衝撃を受けていない新品梁の静的載荷実験結果との比較から, 衝撃荷重作用時の損傷・破壊性状ならびに衝撃荷重作用後の残存耐荷能力について検討した.

2. 実験概要

2.1 実験供試体

本実験においては, スターラップが無い供試体を中心に, せん断スパン比の比較, プレストレス導入の有無の比較をパラメータとした供試体を使用した. 図-1(a),(b), 図-2, 図-3にPC梁の形状寸法を, 図-4に断面寸法を,

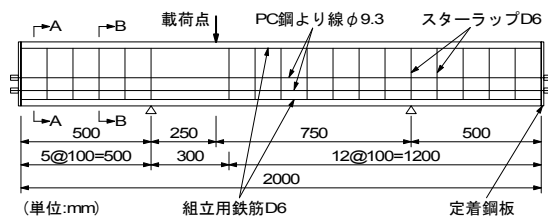


図-1(a) NS 供試体形状寸法(SR1.5)

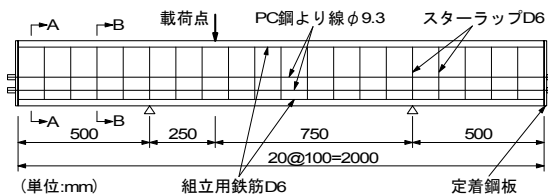


図-1(b) S 供試体形状寸法(SR1.5)

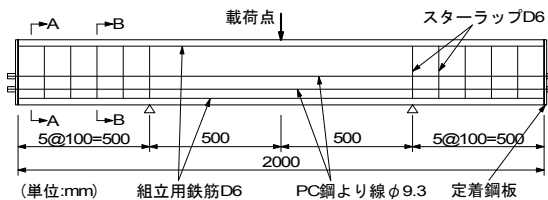


図-2 NS 供試体形状寸法(SR3.0)

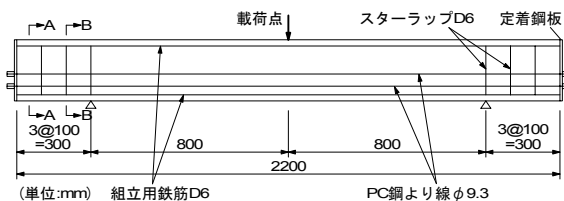


図-3 NS 供試体形状寸法(SR4.8)

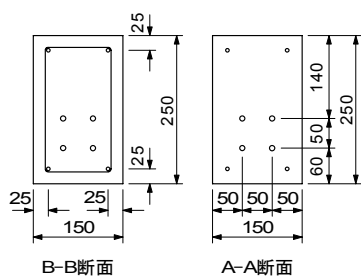


図-4 供試体断面寸法

表-1に材料諸元をそれぞれ示す。

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(ただし、せん断スパン比4.8の供試体は2200mm)とし、さらに梁両端に厚さ12mmで梁断面と同形状の定着鋼板を設けている。この定着鋼板は、PC鋼より線の定着金具からくる支圧応力を断面全体に分布させるとともに、定着部を局部的に補強している。PC鋼より線は2本ずつ2段に計4本設置してお

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)	711
	粗骨材(kg/m ³)	1205
	載荷実験時の圧縮強度(N/mm ²)	63.3
PC鋼より線(SWPR7AN)	0.2%永久伸び強度(N/mm ²)	1328
	直径(mm)	9.3
スターラップ組立用鉄筋D6鉄筋(SD295A)	降伏強度(N/mm ²)	355

表-2 標準示方書による曲げ終局耐力・せん断耐力算定値

供試体シリーズ	せん断スパン比	スターラップ、プレストレス導入の有無	曲げ終局耐力 M_u (kN・m)	曲げ終局耐力 M_u に相当する荷重 (kN)	せん断耐力 V_y (kN)	せん断耐力 V_y に相当する荷重 (kN)	せん断余裕度
1.5	SR	S-P	55.0	293.3	95.0	126.7	0.43
		S-NP			83.1	110.8	0.38
		NS-P			54.1	72.1	0.25
		NS-NP			42.2	69.6	0.24
3.0	SR	NS-P	55.0	220.0	54.1	108.2	0.49
		NS-NP			42.2	84.4	0.38
4.8	SR	NS-P	55.0	137.5	54.1	108.2	0.79
		NS-NP			42.2	84.4	0.61

り、プレテンション方式で作製したため、ボンド状態(コンクリートとの付着有り)となっている。

せん断スパン比(a/d 、以下SRと記述)は、1.5(図-1(a),(b))、3.0(図-2)、4.8(図-3)の3種類とした。

スターラップ有りの供試体には、梁全長にわたってスターラップを配筋している(図-1(b))。スターラップ無しの供試体は、梁端部から支承までの区間にスターラップを配筋したが、支承と支承の間の区間には配筋していない(図-2、図-3)。ただし、図-1(a)に示すせん断スパン比1.5の供試体では、非対称となる載荷スパンのうちの短い方に確実にせん断破壊を発生させるために、長い方の載荷スパンにスターラップを配筋している。これらのスターラップには、D6鉄筋を100mm間隔で用いた。

また、プレストレスを導入しない供試体においては、製作上の理由から配置したPC鋼より線をたわませない程度に、1本あたり約10kNの緊張力を導入している。

表-2は、土木学会コンクリート標準示方書による曲げおよびせん断耐力算定値を算出したものである。せん断余裕度も併せて示す。供試体シリーズ名のうち、S、NSはスターラップの有無、P、NPはプレストレス導入の有無をそれぞれ表わしている。また、SRは前述のせん断スパン比(a/d)である。

2.2 衝撃を受けていない梁の静的載荷実験

衝撃を受けていない新品PC梁の静的耐荷性状を把握

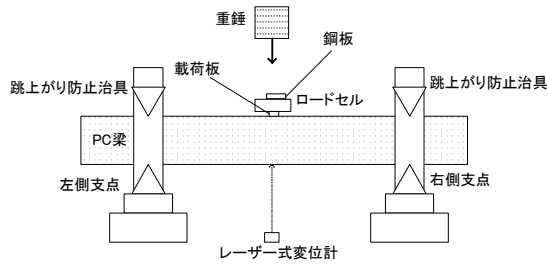


図-5 重錘落下衝撃実験の要領

表-3 計測項目および計測器の性能諸元

計測項目	計測器	性能・諸元
載荷点荷重	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

するために、アムスラー式の静的載荷実験装置を用いて静的載荷実験を行った。載荷点には荷重計測用のロードセル、さらにその下には梁軸方向長さ75mm×幅150mm×厚さ25mmの載荷板(SS400)を設置した。図-1～図-3中に支承位置を記号△で、載荷点を下向き矢印で示す。載荷スパンは、SRが1.5の供試体では、250mm+750mmの左右非対称、SRが3.0では500mm+500mmの対称、およびSRが4.8では800mm+800mmの対称である。

計測項目は、載荷位置のロードセルによる荷重、および鉛直方向変位(高感度変位計による)である。

2.3 重錘落下衝撃実験

図-5に重錘落下衝撃実験要領を示す。質量0.3tの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とし、梁の上面には下から順に、梁軸方向長さ75mm×幅150mm×厚さ25mmの載荷板、ロードセル、その上に保護用の150mm×150mm×厚さ25mmの鋼板を設置した。重錘先端形状は半径100mmの円柱形でその最先端部は球状である。

重錘落下衝撃実験としては、落下高さを次第に大きくしながら繰返し落下させる漸増繰返し落下衝撃実験も広く行なわれているが、本研究においては、衝撃荷重作用後の残存耐力能力を衝撃荷重作用後の静的載荷実験によって把握することを目的としているため、単一落下方式とした。落下高さは、予備的行なった漸増繰返し落下衝撃実験の結果から、単一の落下で供試体に対し損傷を与える落下高さを推定して決定した。

対象とした供試体はSRが1.5とSRが3.0のみで、スパンは2.2節と同じく、250mm+750mmの左右非対称(SR=1.5)、または500mm+500mmの対称(SR=3.0)である。また、支点部においては、跳ね上がり防止用治具で梁の鉛直上方

の移動を拘束しているが、円柱断面支承の上にPC梁を載せたままの状態であり、人力で梁軸方向に滑動可能である。

表-3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。データは動ひずみ測定装置で収集・変換し、文献⁸⁾⁹⁾を参考に決定したローパスフィルターでノイズカットを行った。さらに1秒間に5000コマ撮影可能の高速ビデオカメラを用い、衝撃載荷時の損傷・破壊の進展を観察した。

2.4 重錘落下衝撃実験後の静的載荷実験

これは、2.3節で述べた単一重錘落下衝撃実験により損傷を受けたPC梁供試体に残存する耐力能力を把握するために、静的載荷実験を行った。重錘落下衝撃実験と同じ位置・支承関係で静的に載荷し、測定項目は2.2節と同じである。

2.5 実験ケース

表-4に実験ケースおよび結果の総括を示す。供試体名は頭から、スターラップの有無―プレストレス導入の有無―せん断スパン比―重錘落下高さ(m)である。スターラップの有無は、スターラップを配置した供試体を記号S、しない供試体を記号NSで表し、プレストレス導入の有無は、導入した供試体を記号P、しない供試体を記号NPで表した。せん断スパン比は、SR1.5、SR3.0、SR4.8と数値で表し、落下高さは記号Hのあとにメートル単位で示した。なお、新品のPC梁として静的載荷実験のみを行った供試体には、落下高さの部分に記号Stを付した。また同一の供試体がある場合は、枝番号(#1,#2,...)を付した。

以降、スターラップの有無やプレストレス導入の有無の条件が同じ供試体をまとめて、例えばNS―Pシリーズ(スターラップ無しでプレストレス有りの意味)のように呼称する。また、せん断スパン比によって分類して、例えば、せん断スパン比1.5の供試体全体をSR1.5シリーズと総称する。

表-4においては、残留変位をレーザー式変位計の測定値または高速ビデオの映像から求めた δ_R (mm)、ロードセルにより測定した最大衝撃力 P_{max} (kN)、最大衝撃力の測定値を基に載荷スパンから算出した最大せん断力 Q_{max} (kN)。 $Q_{max}=3/4P_{max}$ または $1/2P_{max}$ 。前者はせん断スパン比1.5、後者は同3.0)、および衝撃後の状態をそれぞれ示した。また、静的載荷実験の項目として、静的載荷時のロードセルにより測定した最大荷重 P_{smax} (kN)と、 P_{smax} を元に載荷スパンに応じて算出した残存せん断耐力 V_R (kN)(重錘落下衝撃実験に供さずに静的載荷実験のみを行なった供試体では静的せん断耐力 V (kN))、ならびに静的載荷後の状態を示した。ここで、せん断破壊に至った供試体のうち、破壊に際して梁幅方向へのコンクリ

表-4 実験ケースおよび結果の総括

シリーズ	せん断スパン比	スターラップ、プレストレス導入の有無	SR	番号	供試体名	衝撃載荷実験					静的載荷実験		
						落下高さ	残留変位	最大衝撃力	最大せん断力	衝撃後状態	最大荷重	静的せん断耐力 V または残存せん断耐力 V_R	載荷後状態
						H (m)	δ_R (mm)	P_{max} (kN)	Q_{max} (kN)		P_{smax} (kN)	(kN)	
1.5	NS-P	a1	NS-P-SR1.5-St#1	0							321.4	241.1	せん断圧縮破壊
		a2	NS-P-SR1.5-St#2	0							345.4	259.1	せん断圧縮破壊
		a3	NS-P-SR1.5-St#3 ^{*1}	0							386.5	289.9	せん断圧縮破壊
		a4	NS-P-SR1.5-H0.7	0.7	0.6	404.0	303.0	曲げひび割れ			339.8	254.9	せん断圧縮破壊
		a5	NS-P-SR1.5-H1.0	1.0	0.6	567.7	425.8	曲げ+せん断ひび割れ			323.2	242.4	せん断圧縮破壊
		a6	NS-P-SR1.5-H1.1#1 ^{*1}	1.1	6.4	487.9	365.9	せん断ひび割れ			82.2	61.7	せん断圧縮破壊
		a7	NS-P-SR1.5-H1.1#2 ^{*1}	1.1	9.5	604.3	453.2	せん断ひび割れ			144.4	108.3	せん断圧縮破壊
	NS-NP	b1	NS-NP-SR1.5-St#1	0							282.5	211.9	せん断圧縮破壊
		b2	NS-NP-SR1.5-St#2	0							248.4	186.3	せん断圧縮破壊
		b3	NS-NP-SR1.5-H0.6	0.6	0 ^{*2}	295.6	221.7	支承転倒 曲げひび割れ入る程度			291.0	218.3	せん断圧縮破壊
		b4	NS-NP-SR1.5-H0.7	0.7	5 ^{*2}	347.5	260.6	せん断圧縮破壊			108.0	81.0	せん断圧縮破壊
	S-NP	b5	S-NP-SR1.5-St#1	0							305.7	229.3	せん断圧縮破壊
		b6	S-NP-SR1.5-St#2	0							328.7	246.5	せん断圧縮破壊
		b7	S-NP-SR1.5-St#3	0							301.7	226.3	せん断圧縮破壊
	S-P	c1	S-P-SR1.5-St#1 ^{*1}	0							357.0	267.8	せん断圧縮破壊
		c2	S-P-SR1.5-St#2 ^{*1}	0							365.0	273.8	せん断圧縮破壊
3.0	NS-P	d1	NS-P-SR3.0-St#1	0							256.6	128.3	斜め引張破壊
		d2	NS-P-SR3.0-St#2	0							288.5	144.3	斜め引張破壊
		d3	NS-P-SR3.0-H0.7	0.7	1 ^{*2}	382.4	191.2	曲げひび割れ			254.5	127.3	せん断圧縮破壊
		d4	NS-P-SR3.0-H1.0	1.0	0.8	368.8	184.4	曲げひび割れ			252.5	126.3	曲げ圧縮破壊
		d5	NS-P-SR3.0-H1.4	1.4	3 ^{*2}	440.5	220.3	曲げひび割れ			280.7	140.4	せん断圧縮破壊
		d6	NS-P-SR3.0-H1.8	1.8	2 ^{*2}	580.9	290.5	曲げひび割れ			217.2	108.6	せん断圧縮破壊
		d7	NS-P-SR3.0-H2.1	2.1	30 ^{*2}	488.0	244.0	曲げ圧縮→せん断破壊			20.6	10.3	せん断圧縮破壊
	NS-NP	e1	NS-NP-SR3.0-St#1	0							257.8	128.9	曲げ圧縮破壊
		e2	NS-NP-SR3.0-St#2	0							255.3	127.7	曲げ圧縮破壊
		e3	NS-NP-SR3.0-H0.5#1	0.5	計測失敗			曲げひび割れ			174.3	87.2	曲げ圧縮破壊
		e4	NS-NP-SR3.0-H0.5#2	0.5	1 ^{*2}	299.7	149.9	曲げひび割れ			155.2	77.6	せん断圧縮破壊
		e5	NS-NP-SR3.0-H0.6	0.6	2 ^{*2}	358.7	179.4	せん断圧縮破壊			60.7	30.4	せん断圧縮破壊
		e6	NS-NP-SR3.0-H0.7#1	0.7	6.2	316.7	158.4	せん断圧縮破壊			39.3	19.7	せん断圧縮破壊
		e7	NS-NP-SR3.0-H0.7#2	0.7	2.4	323.9	162.0	せん断圧縮破壊			153.6	76.8	せん断圧縮破壊
4.8	NS-P	f1	NS-P-SR4.8-St#1	0							181.7	91.0	斜め引張破壊
		f2	NS-P-SR4.8-St#2	0							185.6	93.0	斜め引張破壊
	NS-NP	g1	NS-NP-SR4.8-St#1	0							82.7	41.5	斜め引張破壊
		g2	NS-NP-SR4.8-St#2	0							87.2	43.5	斜め引張破壊

備考 S:スターラップ有り、NS:スターラップ無し、P:プレストレス有り、NP:プレストレス無し。落下高さ0とStは静的載荷を意味する。

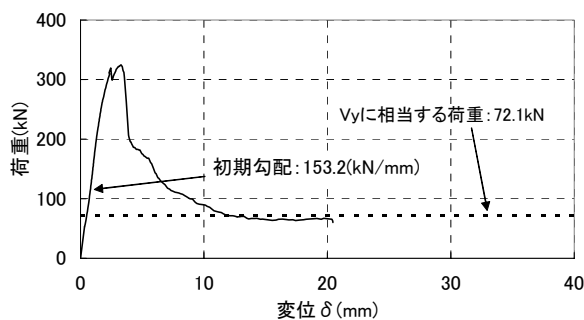
Q_{max} はスパン比により P_{max} から算出した。 *1既往の研究¹⁰⁾ *2高速ビデオの映像より判断。

ートのはらみ出しがあったせん断圧縮破壊と、はらみ出しが無くせん断ひび割れが拡幅するのみであった斜め引張破壊を区別して表記している。静的載荷実験によって曲げ圧縮破壊に至った供試体については、 V_R 、 V の値として最大荷重時の作用せん断力の値を示している。

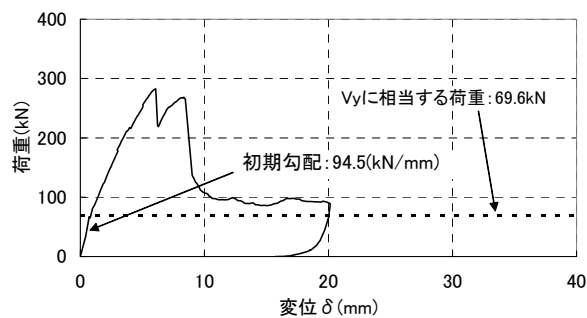
3. 実験結果と考察

3.1 衝撃を受けていない梁の静的載荷実験

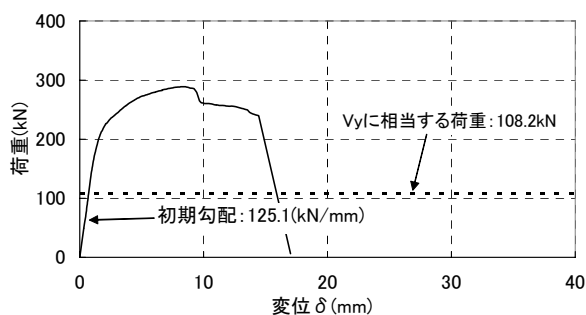
衝撃を受けていない新品梁の静的載荷における荷重一変位関係を図-6(a)～(f)に示す。SR1.5は最大荷重近傍に至るまで高い剛性を保って一直線の荷重一変位関係



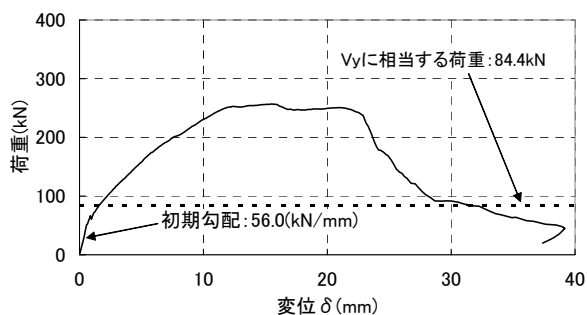
(a) a1: NS-P-SR1.5-St#1



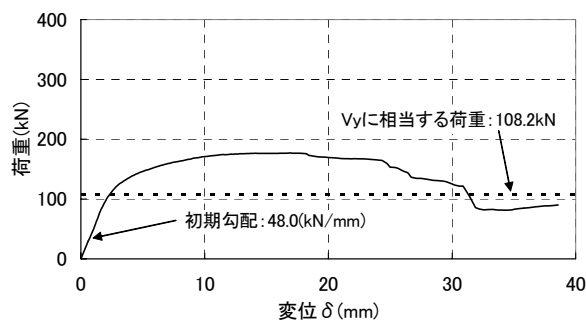
(b) b1: NS-NP-SR1.5-St#1



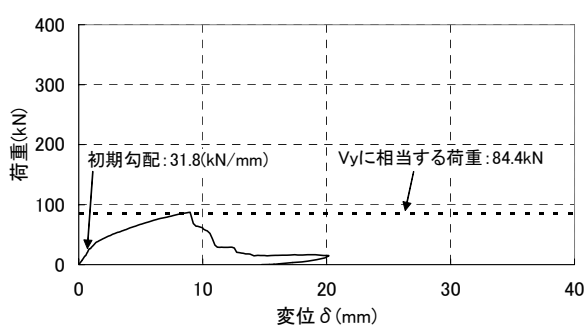
(c) d2: NS-P-SR3.0-St#2



(d) e2: NS-NP-SR3.0-St#2



(e) f2: NS-P-SR4.8-St#2

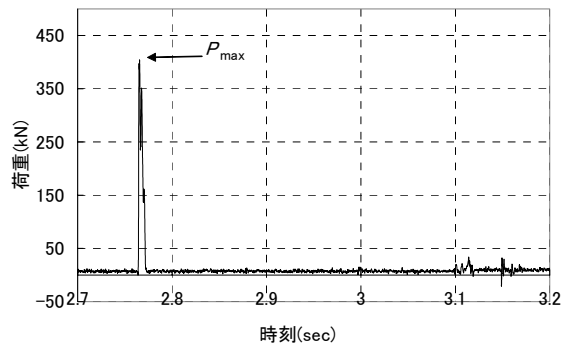


(f) g2: NS-NP-SR4.8-St#2

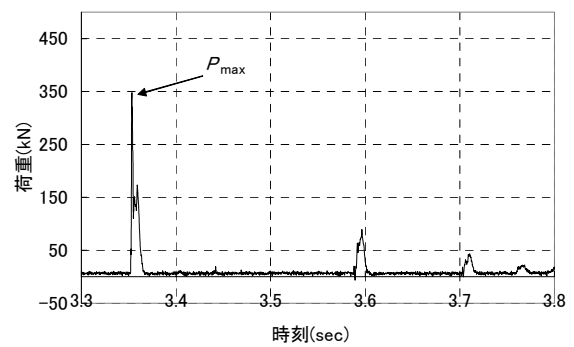
図-6 静的載荷における荷重-変位関係

を示しているのに対し、SR3.0およびSR4.8では、荷重が小さい段階で曲げひび割れが発生したため、荷重-変位関係が折れ曲がり、それ以降の梁の剛性が小さくなっている。図中には、載荷開始から荷重-変位関係が折れ曲がるまでの荷重-変位関係の傾きを初期勾配として示し、また、土木学会コンクリート標準示方書によるせん断耐力算定値 V_y に相当する荷重も破線で示している。それぞれの荷重-変位関係図において、この V_y に相当する荷重と比較して、最大荷重 P_{max} は十分上回っており、せん断スパン比SRが小さい程両者の差は大きくなっている。

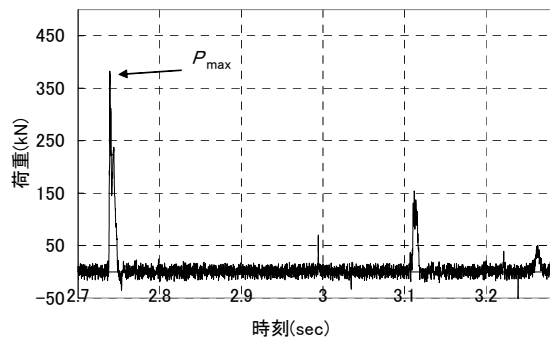
表-4に示す静的せん断耐力 V をプレストレス導入の有無で比較すると、いずれの条件においてもプレストレス導入無しの供試体(記号NP)よりも有りの供試体(記号P)の方が大きな値を示している。その比率はスターラップ無しの場合、せん断スパン比4.8で約2倍(NS-P-SR4.8-StとNS-NP-SR4.8-Stの比較)、せん断スパン比1.5ではばらつきが大きいものの1.3倍程度(NS-P-SR1.5-StとNS-NP-SR1.5-Stの比較)であり、せん断スパン比が大きい方がプレストレスを導入することによる静的せん断耐力向上効果が大きい結果となった。せん断スパン比1.5の供試体のみであるが、スターラップ有



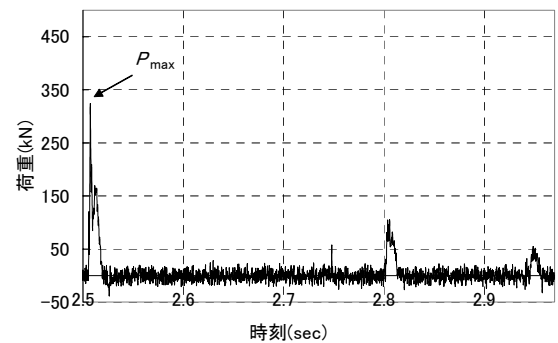
(a) a4: NS-P-SR1.5-H0.7



(b) b4: NS-NP-SR1.5-H0.7



(c) d3: NS-P-SR3.0-H0.7



(d) e7: NS-NP-SR3.0-H0.7#2

図-7 衝撃载荷における荷重—時間関係の例(重錘落下高さ0.7mの場合)

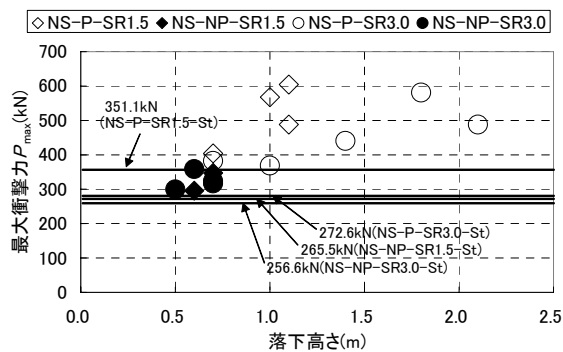


図-8 最大衝撃力と重錘落下高さの関係

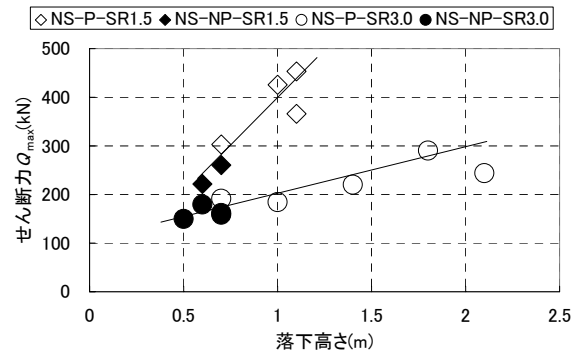


図-9 せん断力と重錘落下高さの関係

りの供試体について、プレストレス導入の有無による V の違いに着目すれば、その比率は1.2倍程度(S-P-SR1.5-StとS-NP-SR1.5-Stの比較)であり、スターラップ無しの供試体(NS-P-SR1.5-StとNS-NP-SR1.5-Stの比較)とほぼ変わらない比率である。

3.2 最大衝撃力および最大せん断力

図-7は衝撃载荷で得られた荷重—時間の例を各シリーズについて示したものである(いずれも落下高さ0.7m)。このような荷重—時間関係の最大値を最大衝撃

力 $P_{\max}$ とし、それと落下高さとの関係を図-8に示す。ここで、最大衝撃力 $P_{\max}$ とは、1回の衝撃载荷時に観測された最大の荷重をいう(図-7に例示)。どのシリーズにおいても落下高さが大きくなるほど最大衝撃力 $P_{\max}$ も大きくなり、右上がりの直線の傾向を示している。また、衝撃を受けていない梁の静的载荷時における荷重—変位関係の初期勾配(図-6参照)が大きかったシリーズは、衝撃载荷実験における最大衝撃力 $P_{\max}$ も大きくなる傾向を示している。図-8中には、新品梁の静的载荷時の最大荷重 P_{static} (各供試体シリーズ毎の平均値)も比較のた

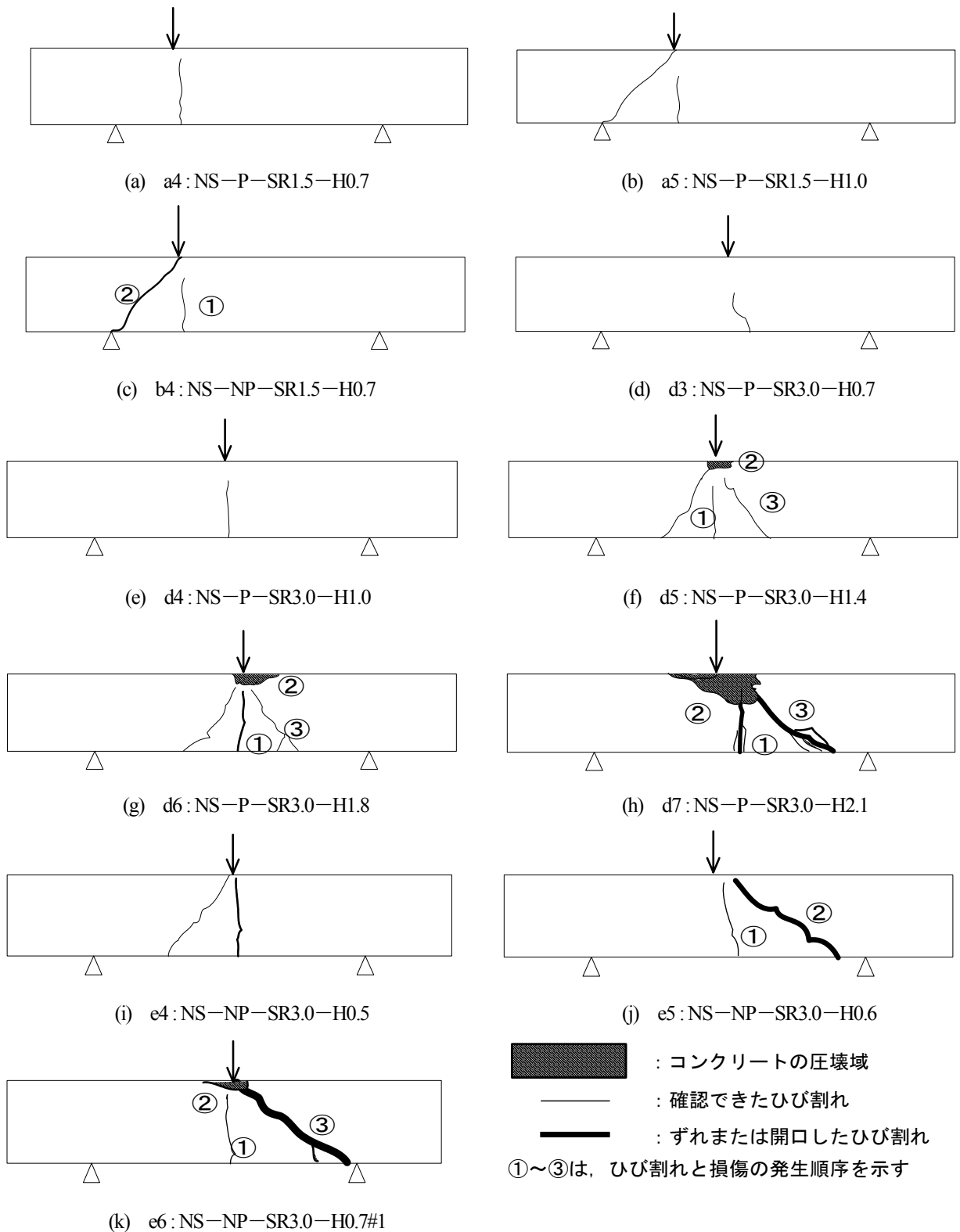


図-10 高速ビデオによる損傷の進捗状況

め横線で表示している。本実験では、いずれの重錘落下高さにおいても、衝撃载荷実験における最大衝撃力 $P_{\max}$ は、この $P_{\max}$ の値を上回っている。

最大衝撃力にせん断スパン比1.5の場合3/4、せん断スパン比3.0の場合1/2を乗じて求めた最大せん断力 $Q_{\max}$ と

落下高さとの関係を図-9に示す。衝撃実験において、梁の中程に加えられた衝撃力が左右の両スパンにどのように伝わるかは、静的载荷と異なる可能性もあるが、ここでは静的载荷と同様であると仮定して最大せん断力を算出し、荷重が加えられた载荷点で測定された最大

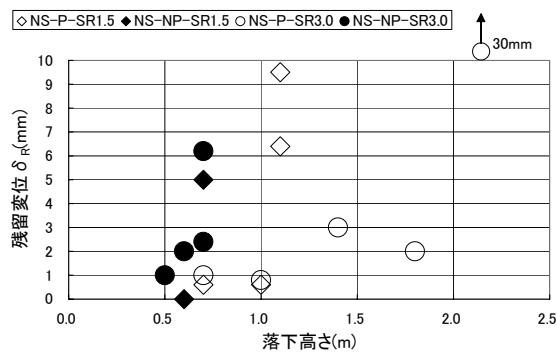


図-11 残留変位と重錘落下高さ

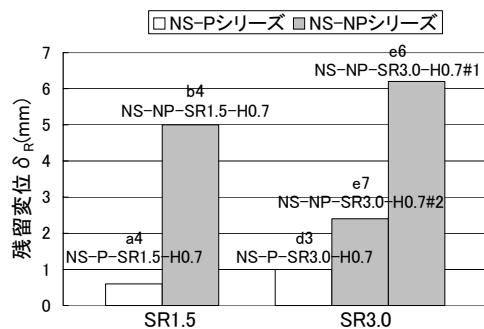


図-12 残留変位の比較(重錘落下高さ 0.7m)

衝撃力ではなく、梁に伝わった内力としての最大せん断力での考察を試みるものである。図-9からわかるように、各シリーズとも最大衝撃力の場合と同様に落下高さが高くなるほど大きくなる傾向を示しているが、せん断スパン比の影響が支配的であるため、SR3.0シリーズのプロットが下の方に移動している。そして、プレストレス導入の有無とは関係なく、せん断スパン比毎に一つの直線の周囲に集まって分布している。

3.3 残留変位とひび割れなどの損傷の進展

図-10に高速ビデオによる損傷の進展状況、図-11に残留変位と落下高さの関係を示す。

前者は、高速ビデオの映像を基に供試体に発生したひび割れおよび損傷の状況をスケッチしたものである。線の太さはひび割れ幅の大きさを表し、太い線ほどひび割れ幅が大きかったことを表している。また、斜線部分は、コンクリートが広範囲に圧壊した部分を示している。

図中の番号は損傷の発生順序である。ひび割れが複数あるが番号が書かれていないものは、ひび割れがほぼ同時に発生し、高速ビデオの映像からは発生した順序が判断できないケースである。

図-10から分かるように、SR1.5シリーズでひび割れの進展は、曲げひび割れ→せん断ひび割れの2段階で進行するのに対し、SR3.0シリーズでは、曲げひび割れ→圧壊→せん断ひび割れの3段階で損傷が進展している。

なお、損傷進展の時間間隔を定量的に把握することは困難であったが、最終的な破壊が激しい供試体では、一つの段階の損傷が十分進行した後に次の損傷発生に移行していたのに対し、最終的な破壊性状が軽微な供試体では、一つの損傷が十分に進展する前に次の損傷段階が現れ、それらがほぼ同時に進行していた。

図-11の残留変位は基本的にはレーザー式変位計による値であるが、変位計の動作が不安定で値の信頼性が低いケースについては高速ビデオの映像も参考にした。残留変位には、プレストレス導入の有無の違いが明らかに現れている。プレストレスを導入したNS-Pシリーズに比べて、導入していないNS-NPシリーズはより小さな落下高さで大きな残留変位を示している。

図-12は落下高さ0.7mにおける残留変位を比較したものである。NS-PとNS-NPを比較した場合、前者は小さな残留変位であるが、後者では同じ落下高さでかなりの残留変位が生じている。損傷の進展状況を示した図-10から考察しても、e6(NS-NP-SR3.0-H0.7#1)の供試体は激しく損傷しているのに対し、NS-Pシリーズのa4(NS-P-SR1.5-H0.7)やd3(NS-P-SR3.0-H0.7)では、曲げひび割れが発生したのみにとどまっている。以上から残留変位や損傷程度に関して、プレストレス導入の有無の影響が顕著であることがわかる。

3.4 衝撃载荷後の残存耐荷能力

残存するせん断耐荷能力を評価するために、静的載荷時の最大荷重 $P_{\max}$ をもとに残存せん断耐力 V_R を算出した。具体的には250mm+750mmの非対称の載荷スパンとしたせん断スパン比SR=1.5の供試体(SR1.5シリーズ)は最大荷重 $P_{\max}$ の3/4を残存せん断耐力 V_R とし、それ以外の対称の載荷スパンとした供試体は最大荷重 $P_{\max}$ の1/2を残存せん断耐力 V_R とした。図-13～図-16はこの残存せん断耐力と衝撃載荷時の落下高さとの関係を示したものである。これらの図のうち、図-13、14は残存せん断耐力 V_R に及ぼすプレストレス導入の有無の影響を比較したものであり、図-15、16はせん断スパン比の違いによる影響を比較したものである。

せん断スパン比1.5の条件においてプレストレス導入の有無の影響を比較した図-13を見れば、プレストレスを導入したNS-Pシリーズ供試体(図中の◇)の残存せん断耐力は、落下高さ0m時の値(即ち、新品梁の静的せん断耐力)にほぼ近い値を落下高さ1mまで維持しているが、落下高さ1.1mでは著しく低下している。一方プレストレスを導入していないNS-NPシリーズ供試体(図中の◆)の残存せん断耐力が低下する落下高さは、0.7mであり、プレストレスの有無による違いが明確である。同様の差異は、せん断スパン比3.0の条件でプレストレスの有無の影響を比較した図-14でも認められる。

次に、プレストレスを導入した供試体に対して、せん断スパン比の違いによる影響を比較した図-15におい

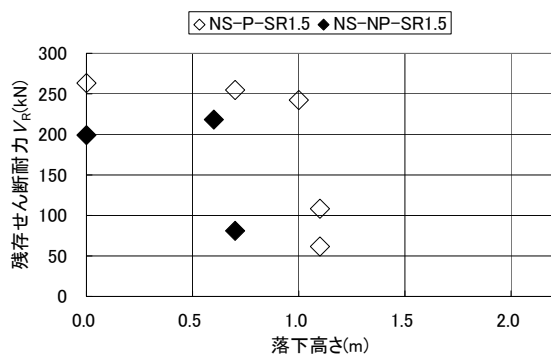


図-13 残存せん断耐力に及ぼすプレストレスの効果(せん断スパン比 SR=1.5)

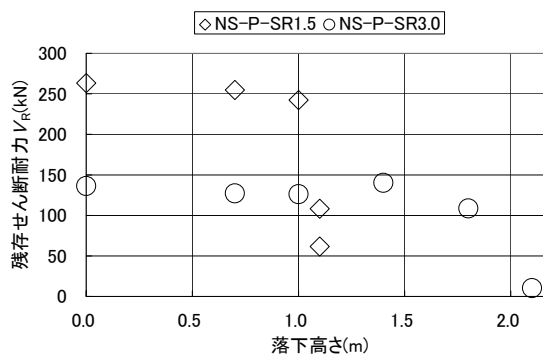


図-15 残存せん断耐力に及ぼすせん断スパン比の影響(NS-P 供試体)

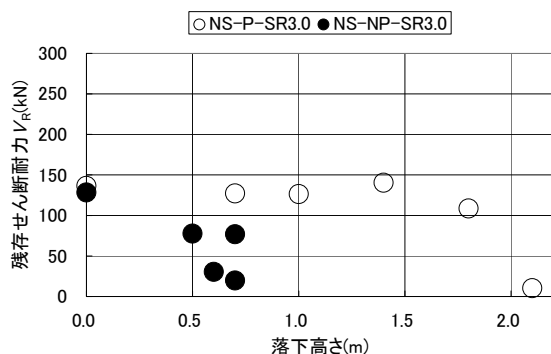


図-14 残存せん断耐力に及ぼすプレストレスの効果(せん断スパン比 SR=3.0)

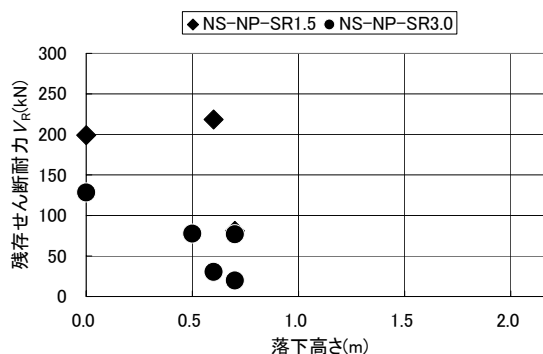


図-16 残存せん断耐力に及ぼすせん断スパン比の影響(NS-NP 供試体)

ては、せん断スパン比1.5の方が静的実験におけるせん断耐力は大きい、衝撃後の静的荷重ではSR3.0シリーズの方が大きな落下高さに至ってもほぼ同等の静的残存せん断耐力を保っているという結果を示している。この差異が生じた原因としては、スターラップがない場合せん断スパン比が小さいと、ディープビーム効果によって静的耐力は大きい、ある程度以上の落下高さからの重錘衝撃を受けた時には、コンクリートにひび割れが入って残存せん断耐力を失うのに対し、せん断スパン比が大きくなると梁の剛性が相対的に小さいため、導入プレストレスに助けられた曲げ変形によってエネルギーを吸収してしまうことも考えられる。しかし、この点については、今後解析的な検討をしたいと考えている。

一方、プレストレスを導入していない供試体に対して、せん断スパン比の違いによる影響を比較した図-16では、SR1.5およびSR3.0のいずれのせん断スパン比においても、残存せん断耐力VRが急激に減少する落下高さは、0.6~0.7m前後であり、せん断スパン比の違いによる影響は顕著でなかった。

4. 結論

本研究は、衝撃荷重を受けるPC梁のせん断破壊挙動に

及ぼすせん断スパン比などの寄与に着目して、せん断スパン比およびプレストレス導入の有無を変化させたPC梁供試体を対象として実験的検討を行った。本研究によって得られた成果を要約すると、以下のようになる。

- (1) 衝撃を受けていない梁の静的荷重実験において、せん断スパン比1.5では、荷重が高いところまでそのまま初期剛性を保っているのに対し、せん断スパン比3.0では、プレストレス有無にかかわらず、低い荷重レベルで曲げひび割れが発生して、剛性が小さくなる傾向を示す。
- (2) 重錘落下高さが高くなるに従って、最大衝撃力 P_{max} は大きくなる。梁に伝わる最大せん断力に着目すると、最大せん断力と落下高さの関係を示すプロットは、プレストレス導入の有無にかかわらず、せん断スパン比ごとに一本の右上がりの直線の上に集まって分布する。
- (3) 損傷の進展状況としては、せん断スパン比が1.5では、曲げひび割れ→せん断ひび割れの2段階でひび割れが入るのに対し、せん断スパン比3.0では、曲げひび割れ→上縁コンクリートの圧壊→せん断ひび割れの3段階で損傷が進展している。また、梁全体の最終的な破壊程度が激しいほど、一つの損傷段階が十分に進行してから次の段階に移行する傾向を示した。
- (4) 衝撃載荷実験後の静的荷重実験によって梁の残存耐力能力を検討した。その結果、衝撃後の梁の残存せん断

耐力 V_R は、ある限界の落下高さまでは衝撃を受けていない梁の静的せん断力 V と同等の値を維持しているが、ある限界落下高さを超えると一気に低減する。その限界落下高さは、プレストレスを導入することによって増大する。

参考文献

- 1) 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8，1998
- 2) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 3) 建設省土木研究所構造研究室・(社)プレストレスト・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・黒田一郎・古屋信明・中村佐智夫：重錘落下実験によるPC梁のせん断挙動，コンクリート工学論文集，Vol.13，No.1，pp.109～118，2002
- 5) 畑野真吾・黒田一郎・古屋信明・中村佐智夫：支承近傍に緩衝材を介した衝撃荷重を受けるPC梁のせん断破壊挙動，コンクリート工学論文集，Vol.16，No.3，pp.49～58，2005
- 6) 三方康弘・井上晋・小林和夫・仁枝保：PCはり部材のせん断耐力に及ぼすプレストレスの効果，土木学会論文集，No.699/V-50，pp.149～159，2001.2
- 7) 山谷敦・檜貝勇・中村光：軸方向圧縮力を受けるRC梁のせん断挙動に関する実験的研究，土木学会論文集，No.695/V-54，pp.143～160，2002.2
- 8) 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
- 9) 別府万寿博・小暮幹太・酒巻勝・大野友則：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，pp.141～156，2003.1
- 10) 畑野真吾：支点近傍に荷重を受けるPC梁の挙動と緩衝材の効果に関する研究，防衛大学校，修士論文，2006.3
(2006年9月11日受付)