

(2) 衝撃荷重を受けるPC梁の耐衝撃性能に及ぼすせん断スパン比および 導入プレストレス量の影響

Effect of shear span ratio and introduced prestreeing force on crashworthiness of PC beam subjected to impact load

吉村太郎*1, 塩野谷昇*2, 山本佳士*3, 黒田一郎*4, 古屋信明*5, 中村佐智夫*6

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

- *1 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)
- *2 陸上自衛隊, 東部方面隊第1施設団 (〒306-0234茨城県古河市上辺見1195)
- *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)
- *5 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)
- *6 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)

キーワード: PC梁, 衝撃, せん断スパン比, 導入プレストレス量, 耐衝撃性能
(PC beam, Impact, Shear span ratio, Introduced prestreeing force, Crashworthiness)

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。

近年, PC製ロックシェッドにおいて, 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が報告されており¹⁾, 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。

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²⁾。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³⁾。これらから, RC梁の静的な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PC梁に対してこれらの点を検討した研究はまだ少ない状況にある。

そこで, 本研究は, PC梁の耐衝撃性能に及ぼすせん断スパン比および導入プレストレス量の影響を検討する

ことを目的として, スターラップを有さない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。静的載荷実験では静的耐力を計測, 重錘落下衝撃載荷実験およびその後再び静的載荷実験を行うことで最大衝撃耐力を定義し, 2つの値の比率をせん断スパン比およびプレストレス導入の有無の視点から検討した。また, 最大衝撃耐力から算出した最大衝撃せん断耐力と, 静的な載荷を前提とした各種せん断耐力算定式との比較検討も行った。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

図-1(a)~(c)にPC梁供試体の形状寸法及び断面寸法, 表-1に材料諸元を示す。本実験においては, 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ている。供試体の全長は2000mmで, 梁両端に厚さ12mmの定着鋼板を設けてPC鋼より線 (導入プレストレス力66.6kN/本, これをP供試体という) の定着を確保している。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は確保された状態である。また, プレストレスを導入しない供試体 (NP供試体という) 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。

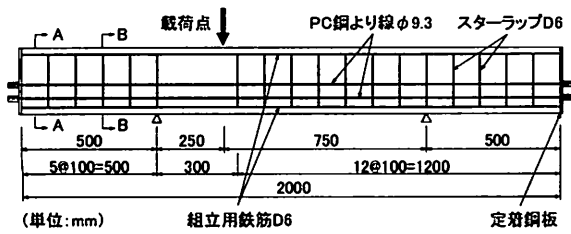


図-1(a) 供試体形状寸法 a/d=1.5 シリーズ

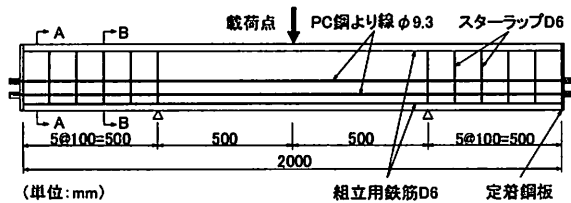


図-1(b) 供試体形状寸法 a/d=3.0 シリーズ

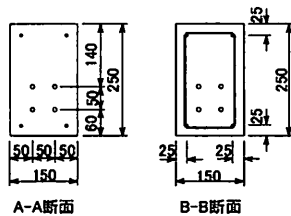


図-1(c) 供試体断面寸法

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、せん断スパンには配筋していないが、梁端部から支承までの区間には配筋した。ただし、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。

以下、せん断スパン比の数値を添えて、例えばNP-1.5シリーズ（プレストレスを導入せず、せん断スパン比が1.5の意）のように表すこととする。

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、その上に保護用の梁軸方向長さ150mm×幅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。

載荷スパンは、a/d=1.5シリーズでは250mm+750mmの左右非対称、a/d=3.0シリーズでは500mm+500mmの左右対称載荷である。また、支点部においては、衝撃を受けたPC梁供試体が飛び上がらないよう跳上がり防止治具で拘束しているが、回転は許す支承構造となっている。

表-2に計測項目および計測器の性能・諸元を示す。

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)	73.4
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(SD295)	降伏強度 (N/mm ²)	355

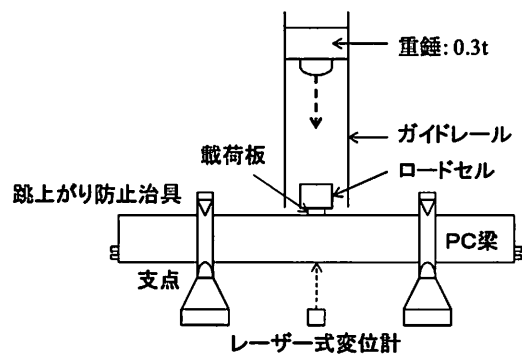


図-2 重錘落下衝撃載荷実験の要領

表-2 計測項目及び計測器の性能・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：100kN
	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：100kN
	変位	高感度変位計	測定範囲：100mm 応答周波数：12kHz

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10μsの動ひずみ測定装置を使用して100μs間隔で収集した後に、文献⁴⁾を参考に1000Hzの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、衝撃載荷前のPC梁供試体に対する静的耐力測定も同様の方法で実施した。

表-3 実験ケースおよび実験結果

シリーズ		番号	供試体名	重錘落下衝撃実験					静的載荷実験		
プレストレスの有無	せん断スパン比			落下高さ H (m)	最大衝撃力 P _{max} (kN)	最大せん断力 Q _{max} (kN)	残留変位 δ _R (mm)	衝撃後の状態	静的耐力P _S または 残存耐力P _R (kN)	静的せん断耐力V _S または 残存せん断耐力V _R (kN)	静的後の状態
P	a/d=1.5	a1	P-1.5-0.0	0.0					321.4	241.1	C
		a2	P-1.5-0.0-2	0.0					345.4	259.1	C
		a3	P-1.5-0.7	0.7	481.0	360.8	0.6	I	339.8	254.9	C
		a4	P-1.5-1.0	1.0	567.7	425.8	0.6	III	323.2	242.4	C
		a5	P-1.5-1.1	1.1	487.9	365.9	6.4	II	82.2	61.7	C
		a6	P-1.5-1.1-2	1.1	604.3	453.2	9.5	II	144.4	108.3	C
	a/d=3.0	b1	P-3.0-0.0	0.0					256.6	128.3	B
		b2	P-3.0-0.0-2	0.0					288.5	144.3	C
		b3	P-3.0-0.7	0.7	382.4	191.2	1.0 ※	I	254.5	127.3	C
		b4	P-3.0-1.0	1.0	368.8	184.4	0.8	I	252.5	126.3	A
		b5	P-3.0-1.4	1.4	440.5	220.3	3.0 ※	I	280.7	140.4	C
		b6	P-3.0-1.8	1.8	580.9	290.5	2.0 ※	I	217.2	108.6	C
		b7	P-3.0-2.1	2.1	488.0	244.0	30.0 ※	IV	20.6	10.3	C
	NP	a/d=1.5	c1	NP-1.5-0.0	0.0					282.5	211.9
c2			NP-1.5-0.0-2	0.0					248.4	186.3	C
c3			NP-1.5-0.6	0.6	295.6	221.7	0.0 ※	I	291.0	218.3	C
c4			NP-1.5-0.7	0.7	347.5	260.6	5.0 ※	II	108.0	81.0	C
a/d=3.0		d1	NP-3.0-0.0	0.0					257.7	128.9	A
		d2	NP-3.0-0.0-2	0.0					255.3	127.7	A
		d3	NP-3.0-0.5	0.5	299.7	149.9	1.0 ※	I	155.2	77.6	B
		d4	NP-3.0-0.6	0.6	358.7	179.4	2.0 ※	IV	60.7	30.4	C
		d5	NP-3.0-0.7	0.7	316.7	158.4	6.2	IV	39.3	19.7	C
		d6	NP-3.0-0.7-2	0.7	323.9	162.0	2.4	IV	153.6	76.8	C

※ 変位計不調のため、定規により実測した値

- 衝撃載荷後の状態 I : 曲げひび割れ, II : せん断ひび割れ, III : 曲げ+せん断ひび割れ, IV : せん断圧縮破壊
- 静的載荷後の状態 A : 曲げ引張破壊, B : 斜め引張破壊, C : せん断圧縮破壊

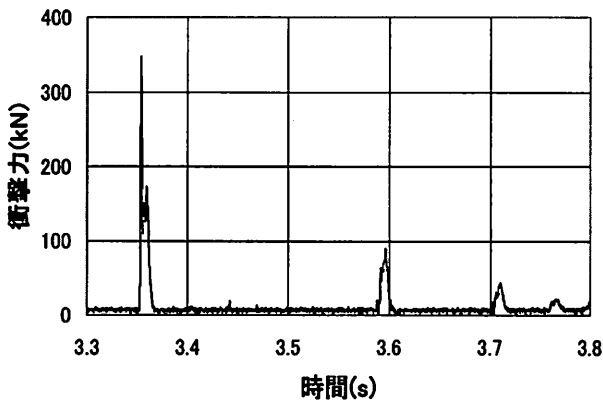


図-3 衝撃力-時間関係の例
NP-1.5-0.7

2.4 実験ケース

表-3に実験ケースとその結果を示す。供試体名は先頭からプレストレス導入の有無，せん断スパン比（1.5または3.0），落下高さ（0.0～2.1m）の順で表している。落下高さは，ロードセル上面から計測したものである。なお，供試体名中の記号“2”は，同一条件の第2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-3に併せて示している。

3. 実験結果

表-3に重錘落下衝撃載荷実験および静的載荷実験結果も示した。

ここで，図-3（NP-1.5-0.7，すなわち，プレストレス導入無し，a/d=1.5，落下高さ0.7mに対する衝撃力-時間関係）を例として最大衝撃力について定義する。図-3において複数の波が確認できるが，3.35s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再度落下してきて3.59s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。最大せん断力は，載荷スパンを考慮し，最大衝撃力にa/d=1.5の場合は3/4，a/d=3.0の場合は1/2を乗じて求めた値である。

また，静的耐力または残存耐力について定義すると，前者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，後者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。静的せん断耐力または残存せん断耐力の値は，最大せん断力と同様に係数を乗じて求めた。

3.1 静的耐力

図-4(a)～(d)に静的載荷実験における荷重-変位関係を示す。a/d=1.5では，最大荷重近傍に至るまで高い剛性

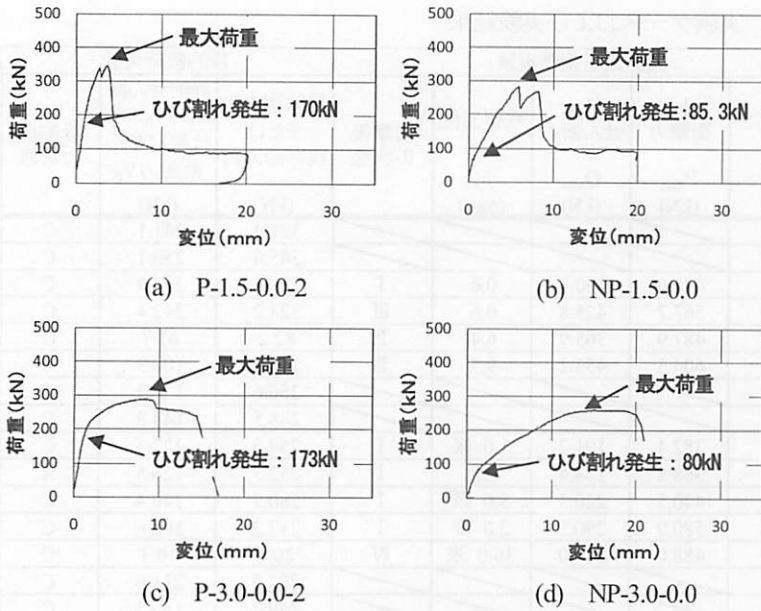


図-4 静的載荷時の荷重-変位関係

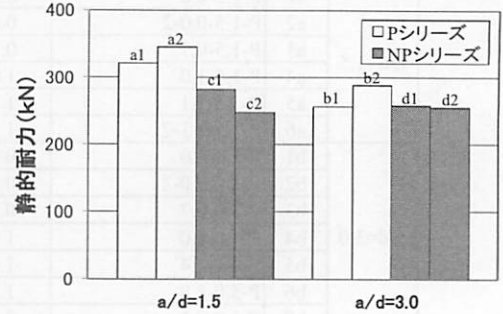


図-5 プレストレス導入の有無による静的耐力の比較

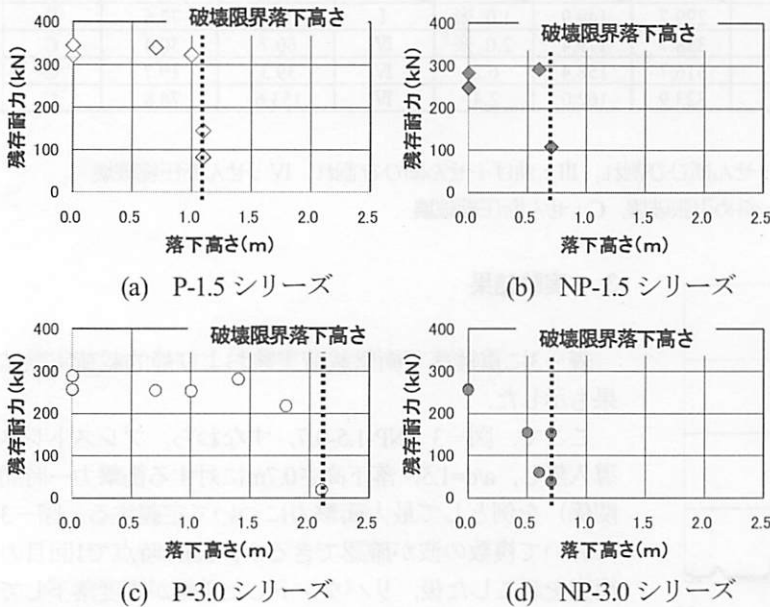


図-6 残存耐力-落下高さ関係

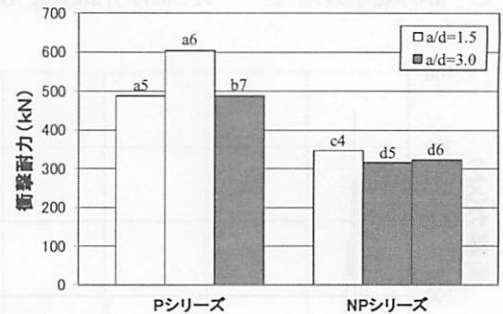


図-7 プレストレス導入の有無による最大衝撃耐力の比較

を保持して一直線の荷重-変位関係を示しているのに対し、 $a/d=3.0$ 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-5に静的耐力をプレストレス導入の有無で比較して示す。 $a/d=1.5$ では、Pシリーズの方がNPシリーズに比べて大きな値を示している。具体的な比率（プレストレス導入有り/無し）は1.1~1.4倍であり、プレストレスを導入することによる静的耐力向上効果は顕著である。 $a/d=3.0$ についても数値上では $a/d=1.5$ と同様な結果を示しているが、Pシリーズが斜め引張破壊またはせん断圧縮破壊で終局に至り、NPシリーズがコンクリート上縁部

の圧壊で終局に至っているように破壊モードが異なるため、単純に比較することはできない。

3.2 最大衝撃耐力

図-6(a)~(d)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、損傷のないPC梁の静的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。ここで、残存耐力が静的耐力のおおむね半分を下回った落下高さを、その供試体シリーズを一回の衝撃のみで残存耐力を失わせ得る破壊限界落下高さとし、その高さにおいて実測した最大衝

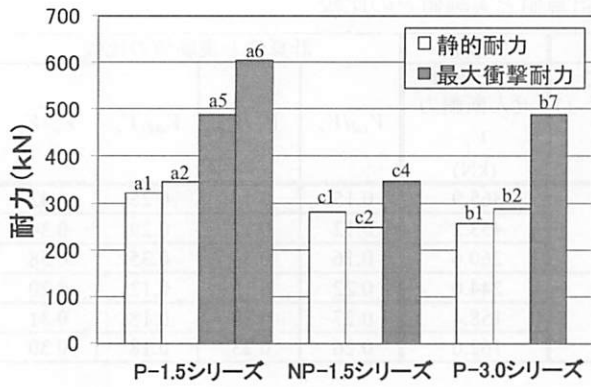


図-8 静的耐力と最大衝撃耐力の比較

撃力をこの供試体の最大衝撃耐力と定義した。

図-7に、以上のようにして定義した最大衝撃耐力をプレストレス導入の有無で比較して示す。実測値は、実験ケースa5, a6, b7, c4, d5, d6で得られた。両せん断スパン比とも、Pシリーズの方がNPシリーズに比べて大きな値を示している。具体的な比率（プレストレス導入有り/無し）は、 $a/d=1.5$ では1.4~1.7倍、 $a/d=3.0$ では1.5倍であり、せん断スパン比が小さい方がプレストレスを導入することによる衝撃耐力向上効果が大きいという結果となった。

3.3 静的耐力と最大衝撃耐力の比較

図-8に、各供試体シリーズの静的耐力と最大衝撃耐力を比較したものを示す。 $a/d=1.5$ の場合では、プレストレスを導入した方が、プレストレスを導入していないものに比べて静的耐力に対する最大衝撃耐力の比率が大きい。具体的には、P-1.5シリーズはばらつきが大きいものの1.4~1.9倍、NP-1.5シリーズは1.2~1.4倍である。コンクリート構造物が重量物による衝撃的な外力を受けた場合、構成材料の力学的性質のひずみ速度効果が生じることにより耐力が向上することについては既往の研究結果により知られている。本実験では、プレストレス導入の有無を問わず、どちらもその効果の影響が表れているが、プレストレスを導入することで供試体自体の耐力が向上したため、衝撃力を受けたときのひずみ速度効果の影響に差が生じたと考えられる。

$a/d=3.0$ については、プレストレスを導入したP-3.0シリーズでは、その比率は1.7~1.9倍であり、P-1.5シリーズと比べても大差はなかった。一方、NP-3.0シリーズでは静的・衝撃載荷時の破壊モードが異なるため、プレストレス導入の有無による比率の比較はできない。

3.4 最大衝撃せん断耐力とせん断耐力算定式との比較

表-4に土木学会コンクリート標準示方書および二羽の式によるせん断耐力計算値を示す。

コンクリート標準示方書⁵⁾におけるせん断設計法では、棒部材のコンクリートのせん断耐力 V_{cd} を次の式で表し

ている。

$$V_{cd} = \beta_d \beta_p \beta_n f_{cd} b_w d / \gamma_b \quad (1)$$

ここで、 $f_{cd} = 0.20 (f'_{cd})^{1/3}$

$$\beta_d = (1/d)^{1/4}$$

$$\beta_p = (100 p_w)^{1/3} \quad (p_w = A_s / b_w d)$$

$$\beta_n = 1 + M_0 / M_d \quad (N'_d \geq 0 \text{ の場合})$$

$$= 1 + 2M_0 / M_d \quad (N'_d < 0 \text{ の場合})$$

f'_{cd} : 設計圧縮強度

A_s : 主鉄筋の総断面積

b_w : 部材腹部の幅

d : 有効高さ

式(1)の f_{cd} , β_d , β_p , β_n は、それぞれ、コンクリート強度に関する項、部材高さに関する項、鉄筋比に関する項、軸方向力（プレストレス）に関する項である。本実験では、PC鋼より線は破断していないので、軸方向鉄筋比の評価の際には、PC鋼より線の強度に応じた割増しは行っていない。また、本実験では軸方向緊張材はすべて部材と平行であるので、軸方向緊張力のせん断力に平行な成分は考慮していない。

二羽によって提案された棒部材のせん断耐力 V_c の算定式⁶⁾は次のとおりである。

$$V_c = \beta_{1c} \beta_{2c} \beta_{3c} \beta_{4c} b_w d \quad (2)$$

ここで、 $\beta_{1c} = 0.2 f'_c{}^{1/3}$

$$\beta_{2c} = (1/d)^{1/4}$$

$$\beta_{3c} = (100 p_w)^{1/3}$$

$$\beta_{4c} = 0.75 + 1.4 / (a/d)$$

a : せん断スパン

コンクリート標準示方書⁵⁾のディープビームおよびローベルのせん断耐力 V_{dd} を次の式で表している。

$$V_{dd} = 0.19 \beta_p \beta_d \beta_a f'_{cd} b_w d / \gamma_b \quad (3)$$

ここで、 $\beta_a = 5 / \{1 + (a/d)^2\}$

a_v : 荷重作用点から支承前面までの距離

二羽によって提案されたディープビームのせん断耐力 V_u の算定式⁷⁾は次のとおりである。

$$V_u = \beta_{1u} \beta_{2u} \beta_{3u} \beta_{4u} b_w d \quad (4)$$

ここで、 $\beta_{1u} = 0.24 f'_c{}^{2/3}$

$$\beta_{2u} = 1 + 3.33 r/d$$

$$\beta_{3u} = 1 + (100 p_w)^{1/2}$$

$$\beta_{4u} = 1 / (1 + (a/d)^2)$$

表-4 せん断耐力算定式による計算値と実験値との比較

	計算値				実験値 最大衝撃 せん断耐力 V_e (kN)	計算値と実験値の比較			
	示方書 (棒部材) V_{cd} (kN)	二羽式 (棒部材) V_c (kN)	示方書 (τ ・ γ ・ β ・ h) V_{dd} (kN)	二羽式 (τ ・ γ ・ β ・ h) V_u (kN)		V_{cd}/V_e	V_c/V_e	V_{dd}/V_e	V_u/V_e
P-1.5	54.1	51.2	90.3	152.0	365.9	0.15	0.14	0.25	0.42
P-1.5-2					453.2	0.12	0.11	0.20	0.34
NP-1.5	42.2	37.1	29.2	49.2	260.6	0.16	0.20	0.35	0.58
P-3.0	54.1				244.0	0.22	0.15	0.12	0.20
NP-3.0	42.2	37.1	29.2	49.2	158.4	0.27	0.23	0.18	0.31
NP-3.0-2					162.0	0.26	0.23	0.18	0.30

r : 載荷板の幅 (軸方向)

これらのせん断耐力算定式は、いずれも静的載荷を前提としているものである。そのため表-4に示すように、それぞれの式の計算値と実験値 (最大衝撃せん断耐力) を比較すると、前者が後者を大きく下回っている。示方書式では、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という研究結果が報告されている⁸⁾。また、その他の算定式も含めて、プレストレスが導入されたコンクリート構造物に対して衝撃力を与えたとき、その耐力に影響を及ぼすひずみ速度効果が考慮されていないことが挙げられる。これらが、この差異が生じた原因として考えられるが、今後さらなる検討が必要であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、PC梁の耐衝撃性能に及ぼすせん断スパン比および導入プレストレス量の影響を検討することを目的として、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静的耐力と最大衝撃耐力の比較を試みた。また、各せん断耐力算定式の適用性についても検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 静的耐力について、 $a/d=1.5$ ではプレストレスを導入した供試体の方が大きな値を示した。一方、 $a/d=3.0$ では、PシリーズとNPシリーズで破壊モードが異なったため比較ができなかった。
- 2) 最大衝撃耐力について、両せん断スパン比ともプレストレスを導入した供試体の方が大きな値を示した。また、せん断スパン比が小さい方がプレストレスを導入することによる衝撃耐力向上効果が大きいという結果となった。
- 3) 静的耐力に対する最大衝撃耐力の比率について、 $a/d=1.5$ の場合では、プレストレスを導入したP-1.5シ

リーズの方が、プレストレスを導入していないNP-1.5シリーズに比べて静的耐力に対する最大衝撃耐力の比率が大きかった。また、プレストレスを導入したP-1.5シリーズとP-3.0シリーズで比較した場合、せん断スパン比の違いによる影響は顕著でなかった。

- 4) 各せん断耐力算定式の計算値と実験値 (最大衝撃せん断耐力) を比較すると、いずれの計算値も実験値を大きく下回り、現行の算定式では極めて過小評価することが確認できた。

参考文献

- 1) 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ロックシェッド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.
- 2) 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.
- 3) 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.697/V-54, pp.143-160, 2002.
- 4) 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.
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書, 構造性能照査編, 2002.
- 6) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.167-176.
- 7) 二羽淳一郎: FEM解析に基づくディーブビームのせん断耐力算定式, 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, 1983.
- 8) 土木学会: RC・PC構造物の設計に関する現状と今後の展望-3.1終局限界状態, コンクリート技術シリーズ, No.22, pp.45-59, 1997.