

# 論文 衝撃力を受ける PC 梁の挙動に関する実験的研究

滝澤 一孝\*<sup>1</sup>・高木 仁之\*<sup>2</sup>

要旨：地震時における PC 梁(プレストレストコンクリート梁)の挙動に関し、動的な衝撃力を与える曲げせん断実験を行い、その結果から、プレストレス量、加力速度等が増すと最大耐力及び変形性能が増大し、せん断余裕度が小さい場合でも部材の破壊形式は脆性的なせん断破壊には至らず、RC部材の既往実験結果と同様に、曲げ降伏が先行する破壊形式となり得ること等を確認した。また、使用した動的加力装置の性能について検証した。

キーワード：衝撃力、加力速度、PC 梁、せん断余裕度、プレストレス

## 1. はじめに

地震動による建物被害において、部材の破壊原因には地震力の衝撃的作用、繰り返し作用等の動的要因が影響し、近年の地震被害にも衝撃的破壊を伴った例が観られる<sup>1)</sup>。筆者らは、PC 梁に関して地震力が衝撃力として入力された場合を想定し、せん断余裕度の小さな部材を対象に、加力速度等の影響による部材の破壊形式、変形性能、せん断余裕度等を調査すべく、プレストレス量及び加力速度による影響を主要因子とした無開口 PC 梁の曲げせん断実験を行った。本報では、実験結果を報告すると共に本動的实验装置の性能について検証した。

## 2. 実験概要

### 2. 1 試験体概要および実験要因

試験体概要を表-1に、試験体概略図を図-1に示す。同表には、曲げ強度及びせん断強度(建築学会旧 PC 規準式, B 法)の計算値とせん断余裕度を併記した。試験部の断面(b:梁幅, D:梁せい)及び長さ(L<sub>0</sub>)は、b×D=250×400mm, L<sub>0</sub>=1600mm であり、主筋(普通鉄筋)は上下共に 3-D16(SD345), PC 鋼棒は 2-32φ(C種1号), せん断補強筋は D6(SR295)を用いた。また、コンクリート圧縮強度は F<sub>c</sub>=48, 60N/mm<sup>2</sup>, プレストレスは 600, 900kN, 加力速度は V=0, 40cm/s

以上の各 2 水準とした。PC 鋼棒は対称に距離 20cm で配し、せん断補強筋比は P<sub>w</sub>=0.43%, せん断スパン比は a/d=2.2(有効せい:d=360mm)で共通とし、これらの要因より、静的加力用(S シリーズ)1 体、動的加力用(D シリーズ)3 体の計 4 体の試験体を計画した。せん断余裕度計算値は、建築学会旧 PC 規準式で 0.7 程度, B 法で 1.1 程度である。

表-1 試験体概要

試験体 No.	コンクリート強度 F <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	加力速度 V (cm/s)	プレストレス ΣPe (kN)		σ <sub>g</sub> /F <sub>c</sub>
			上	下	
S-1	48	0	600		0.13
D-1			900		
D-2		40 以上	600		0.10
D-3	60				

試験体 No.	曲げ強度 Q <sub>m</sub> (kN)	せん断強度 (kN)		せん断余裕度	
		F <sub>Qs</sub>	B <sub>Qs</sub>	F <sub>Qs</sub> /Q <sub>m</sub>	B <sub>Qs</sub> /Q <sub>m</sub>
S-1	356.7	240.9	380.4	0.68	1.07
D-1	356.7	240.9	380.4	0.68	1.07
D-2	361.6	271.8	380.4	0.75	1.05
D-3	395.9	259.8	454.3	0.66	1.15

※ σ<sub>g</sub>: 平均プレストレス応力 = ΣPe/A<sub>c</sub> A<sub>c</sub>: コンクリート断面積  
 曲げ強度: 精算, せん断強度: 建築学会旧 PC 規準式, B 法  
 旧 PC 規準式: F<sub>Qs</sub> = {α · (f<sub>t</sub> + 0.1 · σ<sub>g</sub>) + 0.5 · σ<sub>w</sub> · (P<sub>w</sub> - 0.002)} · b · j  
 B 法: B<sub>Qs</sub> = b · j · P<sub>w</sub> · σ<sub>w</sub> + (ν · σ<sub>w</sub> · 2 · P<sub>w</sub> · σ<sub>w</sub>) · b · D · tan θ / 2

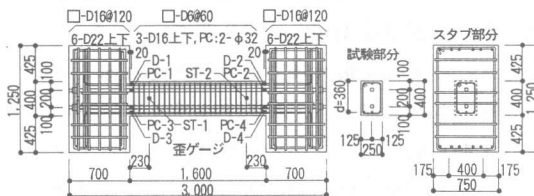


図-1 試験体概略図

\*1 北野建設(株)生産管理本部技術研究所 (正会員)  
 \*2 明治大学講師 理工学部建築学科 工修 (正会員)

## 2. 2 使用材料

コンクリート及び鋼材の力学的性質を表-2及び表-3に示す。試験時材令におけるコンクリート圧縮強度( $\sigma_B$ )は、全ての試験体で設計基準強度をやや上回った。

表-2 コンクリートの力学的性質

試験体 No.	材令 (H)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
S-1	122	50.8	32.3
D-1	112	50.3	33.7
D-2	111	49.7	32.8
D-3	110	64.7	35.7

表-3 鋼材の力学的性質

鋼材	断面積 (cm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
D6	0.32	328.5	530.2	180
D16	1.99	347.1	504.8	170
32φC1	8.16	1213	1231	204

## 2. 3 加力方法および測定方法

加力装置図を図-2に、載荷履歴を図-3に示す。加力方法は、動的加力による一方向逆対称曲げせん断加力とした。試験体は直立させ、下部スタブを反力床に、上部スタブを加力ビームに各々固定し、逆対称曲げせん断応力状態になるように剛性の高いリーハイ機構システム治具を用い、加力ビームに水平に反力壁より取り付けられた動的アクチュエータにより加力した。載荷履歴は変位制御でランプ波による衝撃力を正・負各一回、別々に与えることとし、加力速度は地震力による建物の応答値として梁部材の最大耐力時に40cm/s以上生じると仮定した。なお、衝撃的な動的加力による試験体の耐力は未知であるので、通常の静的加力したPC梁のせん断強度時部材角が概ね1/100radで生じている<sup>2)</sup>ことから、この時点で最大加力速度が得られることを目標とした。測定は、動的アクチュエータの変位・荷重値、レーザー変位計による上下スタブ間の相対変位、加力ビーム及び上部スタブに取り付けた加速度計による加速度、歪ゲージによる鋼材の歪度、変位計による部材端部の伸縮量を、1/1000sec刻みの時刻歴として、加力開始から部材静止までの間のデータを記録した。

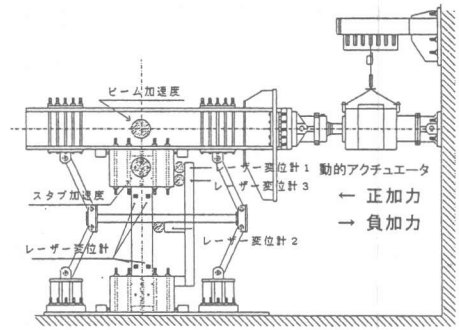


図-2 加力装置図

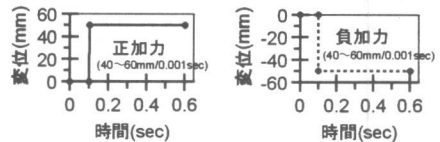


図-3 載荷履歴(変位制御)

## 3. 実験結果

### 3. 1 破壊状況等

実験結果一覧を表-4に示す。また、各試験体の加力速度及び荷重の時刻歴を図-4に、荷重一変位曲線を図-5に、破壊状況図を図-6に示す。なお、同図表において、速度は加速度記録を数値積分し、荷重はアクチュエータ荷重より加力ビーム等の重量による慣性力を差し引き補正して求めた。また、検討対象時間は速度及び荷重の影響がある加力開始から0.2sec間とした。

表-4 実験結果

試験体 No.	最大値(0~0.2sec間)					破壊形式
	変位 (cm)	速度 (cm/s)	加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	荷重 (kN)	部材角 (rad)	
S-1	2.57	—	—	318.1	1/62	FS
D-1 正	3.32	56.9	5394	432.3	1/66	FS
D-1 負	4.50	79.7	4021	377.1	1/45	F
D-2 正	4.58	65.1	6276	500.2	1/46	FS
D-2 負	5.44	93.0	5001	397.2	1/37	F
D-3 正	6.05	81.1	5394	487.8	1/30	FS
D-3 負	*2.74	*74.0	*1961	*452.1	*1/205	F

※ FS:曲げ降伏後せん断破壊, F:曲げ破壊, \*印:参考値  
※ 部材角は最大耐力時の部材角を示す。

本実験で得られた試験体の破壊形式は、静的試験体及び動的試験体の正加力時が曲げ降伏後のせん断破壊(FS)であり、動的試験体の負加力時は曲げ破壊(F)であった。なお、D-3試験体の負加力時については諸事情によりデータの信頼性が劣るため、測定値は全て参考値とした。

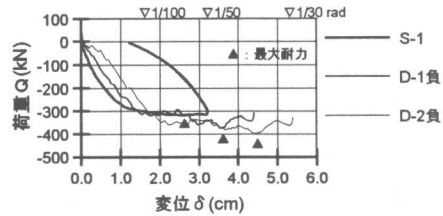
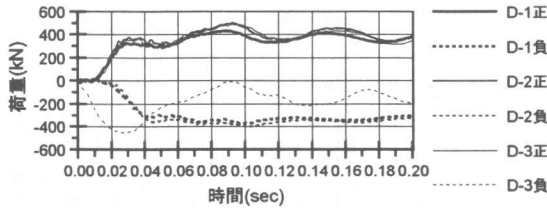
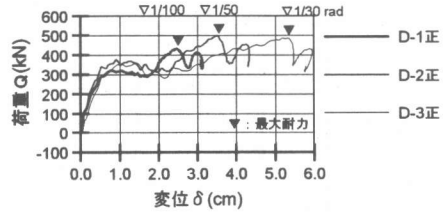
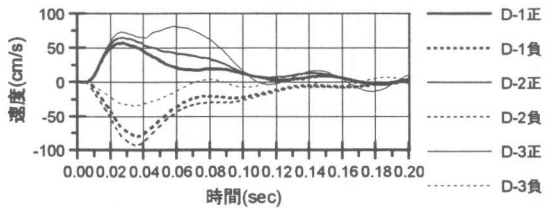


図-4 速度・荷重の時刻歴

図-5 荷重-変位曲線

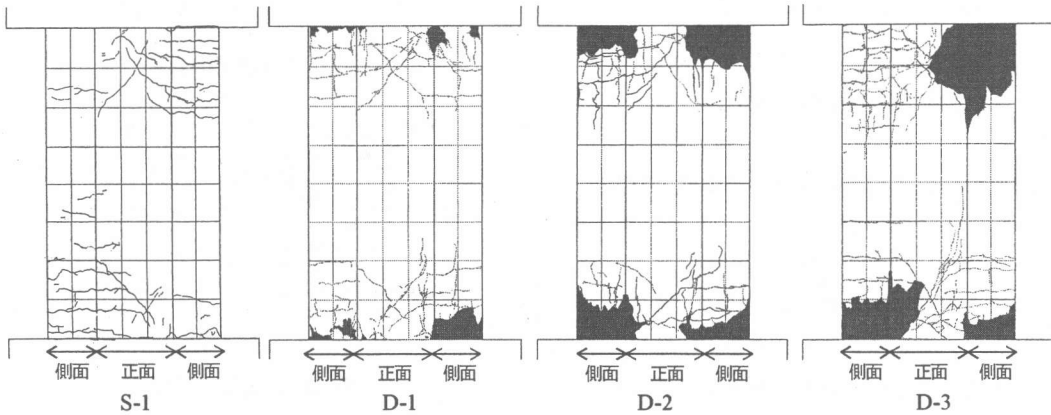


図-6 破壊状況図(展開図)

全ての試験体において、曲げ圧縮端に圧壊を伴う破壊状況となり、最大荷重時部材角は静的試験体が  $1/62\text{rad}$  (変位  $25.7\text{mm}$ )、動的試験体が  $1/66 \sim 1/30\text{rad}$  (変位  $33.2 \sim 60.5\text{mm}$ ) 程度となった。

ひび割れ発生状況は、いずれの試験体も曲げひび割れとせん断ひび割れが発生しており、静的試験体と動的試験体とは発生状況にあまり差異はなく、経験した変形量が大きいほど、ひび割れ発生数や伸展長さが増大している傾向が観られる。

最終破壊状況は試験体により異なるが、これは負方向加力の際に、正方向加力時の残留変形を考慮して制御変位量を調整したことにより、試験体に加わる荷重値に差が生じたことも影響

しているが、当然ながら最大変位の大きい試験体ほど圧壊状況が著しい。

鋼材の歪度については、試験体 D-1 及び D-2 の正加力時に関し、加力開始から  $0.2\text{sec}$  間の時刻歴として図-7に示す。歪ゲージ貼付位置は、PC 鋼棒及び主筋が両端スタブより  $20\text{mm}$ 、せん断補強筋が両端スタブより  $230\text{mm}$  である。最大荷重時において、部材端部のせん断補強筋及び主筋の歪度は全試験体で降伏歪度に達した。引張主筋の歪速度は  $3 \sim 8 \times 10^3 \mu/s$  程度に達し、衝撃的応力が作用したことを裏付けている。なお、PC 鋼棒の歪度については、歪ゲージ貼付位置における計測値は降伏歪度の  $80 \sim 90\%$  程度であった。

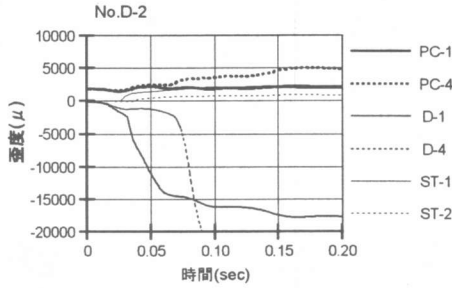
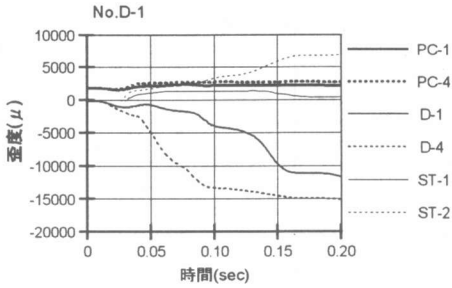


図-7 鋼材の歪度分布

### 3. 2 最大耐力に及ぼす諸要因の影響

最大耐力に及ぼす要因(プレストレス量  $\sigma_g$ , 加力速度  $V$ , 歪速度  $\dot{\epsilon}$ )の影響に関し、動的試験体 D-1 と D-2 の比較結果を図-8~図-10に示す。プレストレス量及び加力速度の増加に伴い、最大耐力及び部材角が増大する傾向が認められた。今回実験における耐力の増大率は、正加力時で 16~24%, 負加力時で 6~19% であり、最大耐力時部材角の増大率は、正加力時で 26~43%, 負加力時で 24~37% であった。なお、筆者らが過去に実施したせん断破壊型の PC 梁の静的加力実験<sup>2)</sup>では、プレストレス量増大に伴って耐力は上昇するが部材角は減少する傾向が認められたのに対し、今回の動的実験では部材角も上昇した。これは、先の実験に比べてプレストレス量が小さいことと、曲げ降伏が先行したことによるものと推定される。

また、歪速度の影響に関しては、プレストレス量が大きい部材でも加力速度の増大に伴って歪速度も上昇し、最大耐力に至るまでに経験する歪速度が大きいほど耐力の上昇に寄与する傾向が観られた。

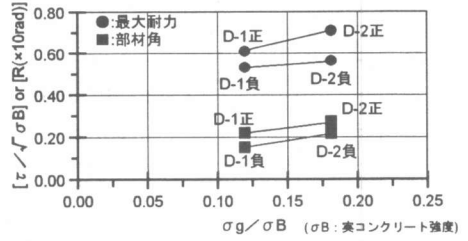


図-8 プレストレス量の影響

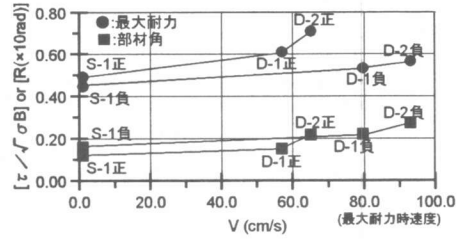


図-9 加力速度の影響

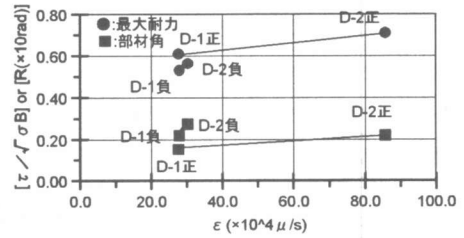


図-10 歪速度の影響

### 3. 3 変形性能とせん断余裕度

最大耐力に関する実験値と計算値の比較結果を表-5 及び 図-11 に示す。同表には、せん断余裕度計算値と破壊形式及び最大耐力時までの部材の吸収エネルギー量 (kN·cm) を併記した。

静的試験体の最大耐力は曲げ強度計算値に対して約 10% 減であったのに対し、動的試験体では正加力時で約 20~35% 増となった。本実験において、負加力時には正加力時の損傷により部材剛性が低下しているが、正加力時同様に曲げ破壊が先行したものと推定され、負加力時においても最大耐力が約 5~10% 増となった。また、コンクリート強度及びプレストレス量が大きいと曲げ強度は増大するが、コンクリート強度の影響による強度の上昇率はプレストレス

量の影響に比べて小さい傾向が認められた。

せん断余裕度計算値は、建築学会旧PC規準式で0.7程度、B法で1.1~1.2程度である。PC部材のせん断終局強度については、B法計算値は実験値との対応がよく、旧PC規準式計算値は耐力を過小評価する傾向にある<sup>2)</sup>が、今回の実験においては、計算値が過小評価され、せん断余裕度が小さい場合でも、動的加力下において脆性的な破壊をせず、優れた靱性能を示した。

また、部材の変形成分に関して、動的試験体D-2について図-12に示す。全体変位は相対変位測定値、回転変位は両スタブから200mmの試験部分において伸縮による回転角より部材長を掛け合わせた変位、せん断変位は全体変位から回転変位を差し引いた変位とした。正加力時では最大耐力付近(0.1~0.14sec)で回転変形の上昇が止まっているが、せん断変形はやや増加している。また、負加力時では最大耐力時経過後も回転変形が上昇を続ける傾向が確認された。

既往のRC柱に関する動的加力実験<sup>3),4)</sup>でも、動的加力による影響として、曲げ破壊型部材の靱性が向上すること、せん断破壊型部材の破壊形式が曲げ降伏先行型のせん断破壊に変わることがあると報告されており、本実験結果からも同様の傾向が確認された。

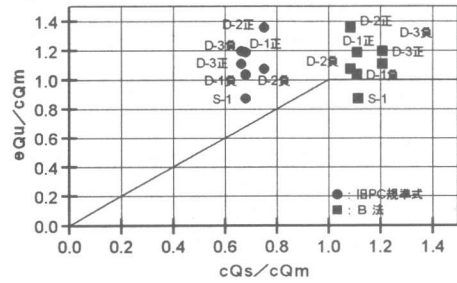


図-11 実験値と計算値の比較

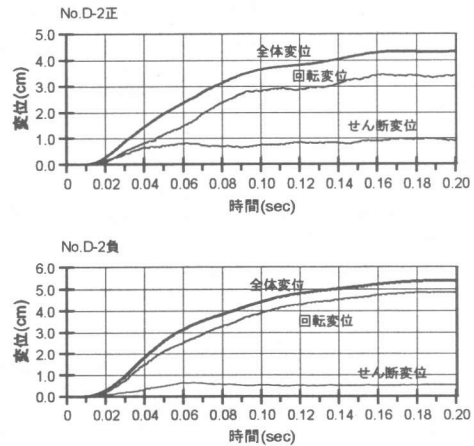


図-12 部材の変形成分

最大耐力時までの部材の吸収エネルギーに関しては、荷重-変形曲線より参考程度に求めたが、動的試験体は静的試験体に比べて吸収エネルギー量が増大しており、コンクリート強度・プレストレス量・加力速度が増すことにより、その上昇割合も大きくなる傾向が観られた。

### 3. 4 動的実験装置の性能検証

以下では、今回使用した動的加力実験装置に関し、想定した加力速度が試験体に入力されたことを確認するための性能検証結果を示す。

動的アクチュエータの荷重、試験体入力荷重及び試験体上部スタブ・加力ビーム・アクチュエータにおける加速度・速度・変位の0.2sec間の各時刻歴を、試験体D-2の正加力時について図-13に、部材角1/100rad(変形16mm)時の速度及び発生時刻を表-6に示す。

表-5 実験値と計算値の比較

	試験体 No.			
	S-1	D-1	D-2	D-3
最大耐力 (kN)	—	432.3	500.2	487.8
eQu	318.1	377.1	397.2	*452.1
破壊形式	—	FS	FS	FS
	FS	F	F	F
曲げ強度 (kN) cQm	365.3	364.1	369.0	408.2
せん断強度 (kN) cQsp: IBPC規準 cQsb: B法	248.3 407.4	247.5 404.4	277.4 400.6	270.3 493.3
せん断余裕度 cQsp/cQm cQsb/cQm	0.68 1.12	0.68 1.11	0.75 1.09	0.66 1.21
実験値/計算値 eQu/cQm	—	1.19	1.36	1.20
実験値/計算値 eQu/cQsp	—	1.75	1.80	1.80
実験値/計算値 eQu/cQsb	—	1.28	1.52	1.43
実験値/計算値 eQu/cQsb	—	1.07	1.25	0.99
吸収エネルギー (kN·cm)	—	724.9	1223.8	1887.7
	—	641.7	1180.3	—

※ 上段: 正加力, 下段: 負加力, \*印: 参考値  
※ 曲げ強度: 精算, せん断強度: 建築学会旧PC規準式, B法

ここで、試験体及び加力ビームの速度・変位は加速度記録を数値積分して求め、アクチュエータの速度・加速度は変位記録を数値微分して求めたものである。

アクチュエータ荷重は、時刻 0.01~0.02sec 間に最大荷重を記録し、その後徐々に低下に至る。加速度はアクチュエータの最大荷重時とほぼ同時に最大値に達し、速度は 0.02~0.03sec 間に最大値を示し、その後緩やかに減衰する。変位は、速度がピーク到達後の 0.03~0.04sec 間に部材角 1/100rad (変形 16mm) のレベルに達し、概ね 0.1 sec までに部材角 1/50rad (変形 32mm) に至る。

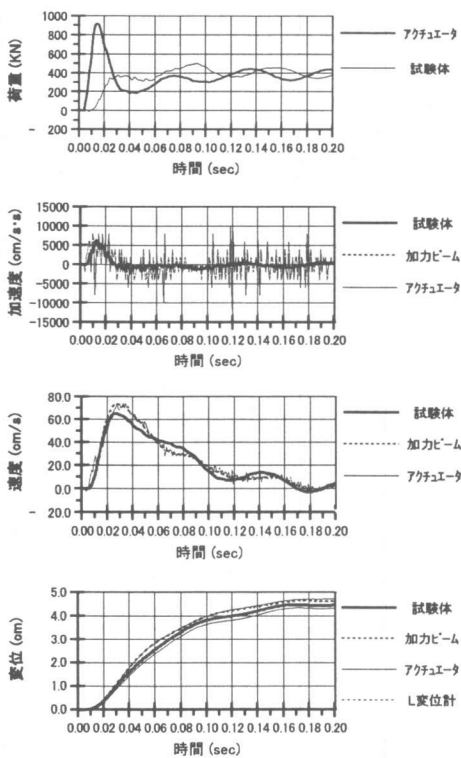


図-13 加速度・速度・変位の時刻歴

表-6 部材角 1/100rad (変形 16mm) 時の速度

試験体 No.	荷重 (kN)	加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	速度 (cm/s)	変位 (cm)	時刻 (sec)
D-1	294.2	1245.4	37.6	1.63	0.045
	307.1	961.1	77.0	1.60	0.039
D-2	345.7	1606.4	54.3	1.61	0.040
	183.1	20.3	92.9	1.68	0.036
D-3	356.9	480.5	66.3	1.62	0.037
	* 186.6	1098.3	54.0	1.66	0.055

※ 上段: 正加力時, 下段: 負加力時, (D-3負: 参考値)

図-13 において加速度及び変位共に測定値と計算値の挙動はよく対応している。また、表-6 に示すように、部材角 1/100rad 時の加力速度は、約 40~90cm/s とばらついたが、目標とした値 (40cm/s 以上) が概ね得られていることから、本動的实验装置の性能の妥当性が検証された。

#### 4. まとめ

衝撃力を受ける PC 梁に関し、プレストレス量及び加力速度を主要因子とした実験結果より、次の事項が確認された。(1) 動的加力の場合もプレストレス量が大いほど最大耐力が増大する傾向がある。(2) 加力速度の増大に伴い、耐力・変形性能が増大する傾向があり、増大率は耐力で約 10~20%、部材角で 20~40% であった。(3) 加力速度の上昇に伴う鉄筋に生じる歪速度の上昇は、プレストレスレベルが大い場合 ( $\sigma_s/Fc=0.19$ ) でも耐力の増大に寄与する。(4) PC 部材でも RC 部材と同様に、動的加力の影響として、破壊形式が曲げ降伏先行型となることがある。(5) せん断余裕度が小さい場合でも、動的加力により脆性的破壊には至らず、曲げ降伏が先行すれば優れた靱性を示す傾向がある。(6) 本動的加力装置は、想定した加力速度を試験体に加え、本装置の性能の妥当性が確認された。

【謝辞】本研究は、平成11年度文部省学術フロンティア推進事業の重点研究 (明治大学理工学研究科) 及び明治大学重点研究によった。黒沢建設(株)鈴木氏及び百武氏には、試験体製作に多大なご協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。

#### 【参考文献】

- 野中泰二郎: 地震が構造物に及ぼす衝撃的破壊作用, structure, No.65, 1998.1
- 滝澤, 高木, 白石: プレストレストコンクリート梁のせん断特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No.3, pp. 697-702, 1998
- 野村, 藤井, 他: 鉄筋コンクリート柱の挙動に及ぼす載荷速度の影響(その 1,2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.411-414, 1986.8
- 藤本, 和田, 他: 高速荷重を受ける鉄筋コンクリート柱に関する実験的研究(その 7,8), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.497-500, 1989.10