# 論文 動的衝撃加力を受ける RC 柱のせん断強度に関する研究

高木 仁之<sup>\*1</sup>·白石 一郎<sup>\*2</sup>·三原 愛未<sup>\*3</sup>

要旨:本研究は, RC 柱部材に衝撃力を与えた場合のせん断強度を検討することを目的に 載荷速度を変化させ曲げせん断加力実験を行ったものである。特に,既往の多くの研究と 相違しているのは,最大荷重時に高速度状態を維持させていることにある。このような高速 載荷状態におけるせん断強度の検討において,せん断補強筋およびコンクリート強度を変動 させ,試験体の材料歪み速度を把握し,静的応力場から得られた既往のせん断強度式との適 合性により,衝撃力下のせん断強度を検討した。

キーワード: RC 柱, 衝撃加力, せん断強度, 載荷速度, 歪み速度

#### 1. はじめに

地震動を受ける構造物では,大きな変形速度を 受け,部材の構成材料にはそれに伴い歪み速度が 生じる。この構成材料(コンクリートおよび鉄 筋)に生じる歪み速度が材料強度の上昇に繋が り,部材強度の増大となることが最近の研究<sup>1)で</sup> 示されているが,既往の研究の多くは,交番繰り 返し変形増分加力で多く行われているため,最大 速度は,変形が零付近で生じ,制御最大変形時に は,速度は零となるため材料の歪み速度も大きく 減少していることになる。本研究は,部材の最大 耐力付近で所定の速度が作用状態にあるランプ 波加力を行い,衝撃加力下の試験体の材料歪み速 度を把握し,せん断強度を検討した。

#### 2. 実験計画

## 2.1 試験体概要

試験体概要を表-1 に、概略図を図-1 に示す。 各試験体は,実物の約 1/2 のスケールで計画し,試 験部は 300mm×300mm の正方形断面で,試験区 間長 1200mm である。主筋(異形 PC 鋼棒)は 8-D22(B 種 1 号),せん断補強筋は 2-D6(SD295) を用い,せん断スパン比は 2.0 で,全試験体共通で ある。載荷速度は,部材変形角 1/100 (変位 12mm) の時に目標速度として,高速 (VH シリーズ) で 60kine,中速 (VM シリーズ) で 30kine 以上得ら れるように設定した。試験体構成は,コンクリー ト強度 36, 60N/mm<sup>2</sup> それぞれに対し,せん断補強 筋比 0.39%と同一とし,載荷速度 0, 30, 60kine の 3 段階,及びコンクリート強度 36N/mm<sup>2</sup>に対し ては,載荷速度 60kine の高速に対して,せん断補 強筋比 0.19, 0.39, 0.61%の 3 段階である。

# 2.2 使用材料

各使用材料の力学的性質を表-2に示す。

	試験体名	コンクリー ト強度	せん断 補銷別	載荷 速度				
通称	識唱	$(Nmm^2)$	(%)	(kine)				
D-1	B-36-019-VH		0.19	60				
S-1	B-36-039-V0			0				
D-2	B-36-039-VM	36	0.39	30				
D-3	B-36-039-VH			60				
D-4	B-36-061-VH		0.61	00				
S-2	B-60-039-V0			0				
D-5	B-60-039-VM	60	0.39	30				
D-6	B-60-039-VH			60				

表-1 試験体概要

\*1 明治大学專任講師 建築学科 工修(正会員)

\*2 日本工業大学教授 建築学科 工博(正会員)

\*3 (株)九建設計 工修 (正会員)



# 図-1 試験体概略図

# 2.3 載荷方法及び測定方法

加力装置図を図-2 に示す。載荷方法は,動的 アクチュエータによる一方向逆対称曲げせん断 加力方式とする。衝撃力の加力履歴は,変位制御 のランプ波による衝撃力を 1 回与える。なお, 静的加力(V0 シリーズ)では,同アクチュエー ターを用いて,破壊に至るまで単調載荷とする。

図-3 に測定位置を示す。測定項目は,アクチ ユエーター荷重および変位,加力ビーム・試験体 上部スタブ加速度,試験体水平変位(3ヵ所),試験 体鉛直変位(4ヶ所),主筋歪み(4ヶ所),せん断補 強筋歪み(2ヶ所),コンクリート歪み(2ヶ所)で, 時間刻み 0.001 秒の時刻歴として記録する。

#### 3. 実験結果

### 3.1 荷重-変位曲線

コンクリート強度 36,60N/mm<sup>2</sup>の試験体の最 大耐力直後までの荷重-変位曲線を図-4,5 に示 した。試験体速度の出力結果は等速度運動とは なっていないので,試験体の荷重は,アクチュ エーターの荷重より,質量慣性力 F=mα(m:1 質点型とし,m=試験体質量の1/2+上部加力冶 具質量,α:試験体上部スタブ加速度)を差し引 いて算出した。図中の▲印は,各試験体の最大荷 重点である。コンクリート強度 36,60N/mm<sup>2</sup> と もに,載荷速度の上昇に伴い,最大荷重及び最大 荷重時の変形が増大する傾向を示した。

### 3.2 速度-変位曲線

コンクリート強度 36,60N/mm<sup>2</sup>の速度-変位曲

線を図-6,7 に示した。衝撃力載荷では, 部材変形角 1/100 (変位 1.2cm)の時に, 目標とした高速載荷で 60kine,中速載荷 で 30kine 生じた。また,中速載荷では変位 2.0cm までほぼ速度を保持しているが,高 速では変位 1.5cm 以降,減少する結果とな った。

# 表-2 使用材料の力学的性質

試験体	設計 基準強度	Рч+Г	材齢	ì	コンク! 強度	ノート 度		ヤング	率	
	$[N/mm^2]$		[日]	$[N/mm^2]$		$m^2$ ]	[	$[\times 10^4 \text{ N/mm}^2]$		
D-1	36		63		42.91			4.077		
D-2							4.077			
D-3	36		61		40.66		4.080			
D-4										
D-5	60		60		59.26		4.592			
D-6										
S-1	36		56		38.07			4.381		
S-2	60		49		63.49			4.700		
			八折		阪小	고 178			<b>阪</b> (上)	
呼风	材種	米	ムか 「而積		阿万耐力	うられる	R .	ヤング率	でする	
10.1	1611 E	 	$mm^2$ 1	П	$kN/mm^2$	N/mn	$n^2$	[kN/mm <sup>2</sup> ]	ſul	
里形斜筋		Ľ		Ľ		[- • • • •	]	[]	111	
D6	SD295	(*)	31.67		446	564		178.6	2497	
異形										
PC鋼棒	B種1号	-	387.1		991	1134		187.9	-	
22.0										
PC鋼棒	B種1号	/	115 5		103/	1126	:	188.1		
23.0	SBPR 930/1030	-	+13.3		1034	1120	,	(197.2)	-	



図-2 加力装置図

# 3.3 破壊状況

破壊状況ひび割れ図の一例を図-8に示す。中 速載荷に対し,高速載荷で著しくひび割れが発 生しているが、これは、最終制御変位が大きかっ たことに起因したと考えられ、載荷速度による 影響とは認められない。上下端部付近のせん断 ひび割れ及び曲げ圧縮ゾーンの圧壊があり、せ ん断圧縮破壊したと考えられ、特に破壊モード が変化することはなかった。





500





図-3 測定位置図



図-5 荷重-変位曲線 ( $\sigma_{\rm B}$ =60N/mm<sup>2</sup>)

3







図-4 荷重-変位曲線 ( $\sigma_B$ =36N/mm<sup>2</sup>)



#### 4. 実験結果の検討

# 4.1 平均速度

各変位における試験体速度は、ばらつきがあ るため、検討時には、破壊点までの速度を単純 平均した平均速度を用いる。平均速度の一例を 図-9 に各試験体の平均速度を表-3 に示す。得 られた平均速度は、高速載荷で約 50kine、中速 載荷で約 30kine となった。



図-9 平均速度一変位関係

表-3 各試験体の平均速度

		VHV	VMシノーズ			
	D-1	D-3	D4	D-6	D-2	D-5
平均速度 (kine)	52.2	49.9	49.2	46.3	27.7	30.4

## 4.2 最大荷重と平均速度

#### (1) コンクリート強度

コンクリート強度(B-36-039・B-60-039)につい ての最大荷重と平均速度の関係を図-10 に示す。 図中の数値は,静的載荷を基準とした最大荷重 増大率である。静的加力に対する最大荷重増大 率は,中速では約25%,高速では約50%上昇し ており,線形的に上昇する傾向を示した。

#### (2) せん断補強筋比

高速載荷下での実験値と既往のせん断強度式 (A 法, B 法)<sup>2)</sup>により求めた静的載荷下での計算 値について,最大荷重とせん断補強筋比の関係 を図-11 に示す。図中の数値は,せん断補強筋 比 0.19%を基準とした最大荷重増大率である。 実験値のせん断補強筋比の増加による最大荷重



図-10 最大荷重と平均速度の関係



図-11 最大荷重とせん断補強筋比の関係

増大率は、ほぼ直線的な関係になっている。 また、実験値の増大率は、A 法と B 法の計算値 の中間的な値となっており、せん断補強筋比に 依存した傾向を示した。

# 5. 各構成材料の平均歪み速度と平均速度 の関係

部材変位における構成材料の危険断面位置で の歪み速度測定値は、大きく変動するため、破 壊点までの歪み速度を単純平均したものを平均 歪み速度として用いた。

各構成材料の平均歪み速度と平均速度の関係 を実験値より,最小二乗法を用いて原点を通る 近似式を求め, 図-12(主筋平均歪み速度),図 -13(せん断補強筋平均歪み速度),図-14(コ ンクリート平均歪み速度)にそれぞれ示した。 なお,式中の $\epsilon$ は構成材料に生じる歪み速度( $\mu$ /sec), v<sub>e</sub>は平均速度(kine)を示している。近 似式からは,コンクリート強度の違いによる大 きな差は見られないが,引張主筋,せん断補強 筋,及びコンクリートの歪み速度は,コンクリ ート強度の上昇に伴い増加した。

## 6. 平均歪み速度を考慮した材料強度

各構成材料に生じた歪み速度を用いて, 歪み 速度の影響を考慮した各材料強度の上昇率を算 出した。上昇率の算出では, 野口らの研究<sup>1)</sup>に よって示された以下の式(1)(2)を用いた。コ ンクリートの最大強度は式(1), 主筋・せん断 補強筋の降伏耐力は式(2)を用いた。  $d\sigma_{B}/s\sigma_{B} = 0.066 \log(\dot{\epsilon}) + 0.93$ (1)

 $_{d} f_{y} / _{s} f_{y} = 0.050 \log(\dot{\varepsilon}) + 0.90$  (2)

以上の結果,各構成材料に生じた歪み速度は, 中速載荷に対し,高速載荷で1.5~1.8 倍になっ ているが,鉄筋強度は1.10~1.15 倍, コンクリ ート強度は1.20~1.25 倍の範囲にあり,歪み速 度倍率ほど変化しない。

#### 7. せん断強度式の適合性

本実験のコンクリート強度の適応範囲を考慮 し、 靭性保証型耐震設計指針式<sup>3)</sup>と、 New-RC 式<sup>4)</sup>について、実材料強度から求めた計算値の 適合性を図-15,16に、平均歪み速度を考慮して 求めた計算値の適合性を図-17,18に示す。図中 の点線は静的載荷における実験値を計算値で除 した値から、最小二乗法を用いて求めた原点を 通る近似式である。

実材料強度から求めた計算値の eQu/cQsu は, New-RC 式では,静的 0kine で 0.83~0.85,平均 速度 30kine 級で 0.97~1.11,50 kine 級で 1.16~ 1.43, 靭性保証型式では,静的 0kine で 0.86~0.94, 30kine 級で 1.01~1.20,50kine 級で 1.25~1.60 となっている。実材料強度から求めた計算値は, 全体的に過小評価となっており,速度上昇に伴 い,その傾向は強い。

平均歪み速度を考慮して求めた計算値の eQu/cQsuは, New-RC式では, 30kine 級で 0.86 た~0.99, 50kine 級で 1.02~1.27, 靭性保証型式 では, 30kine 級で 0.91~1.12, 50kine 級で 1.12 ~1.44 となり, 全体的には歪み速度を考慮した











図-14 コンクリート平均歪み速度

ことにより改善されたと言えるが、平均速度 50kine級の高速載荷に関しては、まだ過小評価 となった。

# 8. まとめ

RC 柱の衝撃力下のせん断強度を対象に,衝撃 加力実験より検討した結果,以下のような結論 が得られた。

- 全試験体で,目標とした載荷速度(高速載荷 時平均速度:約50kine)が得られた。
- 載荷速度の上昇に伴い,最大耐力及び最大 耐力時の変形が増大した。
- 破壊性状は,載荷速度に対して特に,破壊モ ードの変化はなく,制御変形の大きなもの で破壊が著しい。
- 4) 載荷速度による材料の歪み速度を考慮した 材料強度を用いることによったせん断強度 計算値の最大荷重増大率は、実験値よりも 小さく、歪み速度による材料強度上昇のみ では、まだせん断強度計算値は過小評価す るが、安全側の結果となった。

# 【参考文献】

- 1)栗山昌之,野口博,他:鉄筋コンクリート柱の動的付着 特性の影響に関する解析的研究,コンクリート工学 年次論文集第23巻3号,pp253-258,コンクリート工 学協会
- 2)日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の終局強度型 耐震設計指針・同解説, 1990
- 3)日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型 耐震設計指針・同解説, 1999
- 4)(財)国土開発技術研究センター:鉄筋コンクリート
  造建物の超軽量化・超高層化技術の開発,平成4年
  度構造性能分科会報告書

本研究は,平成 10 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) 及び平成 12 年度文部省科学研究費補助金(基盤 研究(A)(2),課題番号(12305036),研究代表者(野 口弘行))によった。











図-17 NEW-RC 式の適合性(歪み速度考慮)



図-18 靭性保証型式の適合性(歪み速度考慮)