

# 論文 鋼繊維補強高強度コンクリート柱部材の耐力と変形に関する実験的研究

平澤 征夫\*1・岡本 恒和\*2・伊藤 裕大\*3

要旨：本研究は、鋼繊維を混入した高強度コンクリート柱部材について静的正負交番繰返し載荷実験、および振動台を用いた動的水平一軸加振実験と動的水平・鉛直二軸同時加振実験を行い、高性能コンクリート部材の耐力と変形性能について検証することを目的とした実験的研究である。実験の結果、鋼繊維を1%混入した供試体は鉄筋コンクリート（以下 RC と略称）供試体に比べてエネルギー吸収能および最大耐力が大きくなること、残留変位を抑えるとともに残留変位の発生を遅らせることができること等から、耐震性能を向上させる効果があること、さらに横拘束鉄筋量を減少できる可能性があることを明らかにした。

キーワード：柱部材、鋼繊維補強高強度コンクリート、静的耐力、動的耐力、横拘束鉄筋

## 1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震は、マグニチュード7.2、震度7の都市直下型地震であり、高度成長期に建設された構造物は、甚大な被害を被った。また、2004年の新潟県中越地震、2008年の岩手・宮城内陸地震のように、最近、わが国に発生する大規模地震は、インフラストラクチャーの被害を増大させる傾向がみられている。

これまで鋼繊維補強コンクリートを実構造物に適用した例<sup>1)</sup>や、短繊維を混入した超高強度鋼繊維補強コンクリートを用いた歩道橋の実例<sup>2)</sup>は多数みられるが、前者は施工が複雑であり、後者はコストの面で難がある。

本研究は、耐震性能を飛躍的に増大させた柱部材の開発の一環として、鋼繊維を混入した高強度コンクリートを用いたRC柱部材(以下、SFRC部材と略称する)の静的載荷実験、動的水平一軸加振実験、動的水平・鉛直二軸同時加振実験を行い、鋼繊維の混入量および横拘束鉄筋量が柱部材の耐力と変形特性および載荷実験方法による影響を明確にすることを目的とした実験的研究である。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体形状および寸法

図-1にSFRC柱部材供試体の形状および寸法を示す。供試体の大きさは、柱断面は120mm×120mm、軸方向鉄筋にはD10(SD345)を4本(軸方向鉄筋比1.98%)、帯鉄筋には4を84mm間隔(横拘束鉄筋比1.2%:体積比)と126mm間隔(横拘束鉄筋比0.8%:体積比)で配置した。鋼繊維混入量は、SFRC柱部材モデル全体の体積比とし、2種類の拘束鉄筋間隔を有する供試体にそれぞれ0.5%、1.0%、1.5%の鋼繊維(体積比)を混入した。

図-2に鋼繊維の形状、表-1に鋼繊維の要因を示す。

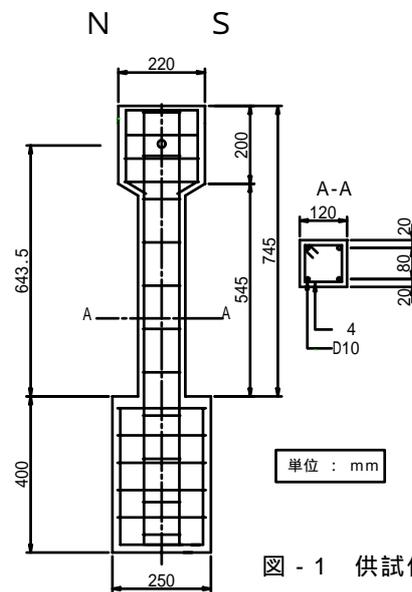


図-1 供試体の形状寸法

セメントは、中庸熟ポルトランドセメントを使用し、AE減水剤は、高性能AE減水剤SSP-104をセメント質量の1.2%使用とし、供試体は打設方向を柱に対して横打ちとした。また、供試体のN面とS面の柱基部にコンクリート用ひずみゲージを貼付した。表-2に、実験種類、供試体名称、鋼繊維混入量、横拘束鉄筋比およびコンクリート強度、等を示す。



図-2 鋼繊維の形状

表-1 鋼繊維の要因

鋼繊維の種類	鋼繊維
長さ(mm)	30
径(mm)	0.6
引張強度(MPa)	1000以上
アスペクト比	50

\*1 中部大学 工学部都市建設工学科教授 工博 (正会員)

\*2 匠技術(株) 技師長 (正会員)

\*3 中部大学 工学部 大学院生

表 - 2 実験種類・供試体名称・供試体コンクリート強度

鋼繊維 混入量 (%)		拘束 鉄筋比 (%)		静的実験						動的実験					
				正負交番繰返し載荷						水平一軸加振			水平・鉛直二軸加振		
				供試体名称			コンクリート強度			供試体名称			コンクリート強度		
			圧縮	引張	$E_c$				圧縮	引張	$E_c$				
			(N/mm <sup>2</sup> )						(N/mm <sup>2</sup> )						
0.0	0.8	SR-SFRC0008	82.9	4.2	37.1	DH-SFRC0008	82.9	5.0	37.1	DHV-SFRC0008	85.1	5.1	45.0		
0.0	1.2	SR-SFRC0012	63.2	4.7	35.9	DH-SFRC0012	88.9	5.7	37.4	DHV-SFRC0012	85.1	5.1	45.0		
0.5	0.8	SR-SFRC0508	87.6	5.9	39.7	DH-SFRC0508	83.2	5.6	36.5	DHV-SFRC0508	97.8	5.8	41.2		
0.5	1.2	SR-SFRC0512	79.2	5.0	37.9	DH-SFRC0512	91.7	6.0	40.5	DHV-SFRC0512	97.8	5.8	41.2		
1.0	0.8	SR-SFRC1008	88.8	6.9	43.5	DH-SFRC1008	90.3	6.1	38.8	DHV-SFRC1008	82.3	6.3	41.0		
1.0	1.2	SR-SFRC1012	76.7	5.3	35.7	DH-SFRC1012	58.9	4.9	31.8	DHV-SFRC1012	82.3	6.3	41.0		
1.5	0.8	SR-SFRC1508	89.6	9.3	41.5	DH-SFRC1508	89.8	8.5	44.4	DHV-SFRC1508	81.5	9.2	42.0		
1.5	1.2	SR-SFRC1512	88.3	7.1	40.5	DH-SFRC1512	89.8	8.5	44.4	DHV-SFRC1512	81.5	9.2	42.0		

注)  $E_c$ : ヤング係数, 拘束鉄筋比:  $\rho_s = 4A_{tr}/sd$  (道路橋示方書 耐震設計編)

各実験による供試体の破壊モードはすべて柱基部の局部的曲げ破壊であったが、参考として表 - 3 に、RC 柱としての耐力計算結果を示す。

表 - 3 供試体の計算耐力

横拘束鉄筋比 (%)	曲げ耐力 (kN)	せん断耐力 (kN)	耐力比
0.8	8.65	22.8	2.64
1.2	8.65	24.97	2.89

なお、実験に用いた供試体寸法が小さいことによる結果のばらつきを少なくするため、実験結果はすべて供試体 2 体の平均値で示している。寸法効果については、本実験では曲げ破壊型の破壊であることから、圧縮強度、鉄筋比、ヤング係数等の力学的性質の影響は小さいと推測されるが、骨材の粒径、鉄筋の径・配置等の影響は考慮できていないため、供試体の終局変位が大きく現れている可能性が考えられる<sup>3)</sup>。また、鋼繊維の長さや供試体寸法との関係については、打設方向を柱に対して横打ちとしたことによって鋼繊維の配向性がよくなり、結果的には影響が小さいものと考えられる。

## 2.2 実験および測定方法

### (1) 静的載荷実験

静的載荷実験は、油圧アクチュエーター試験装置を用いた正負交番繰返し載荷実験とし、変位が(0, ±2.5, ±5.0, ±7.5, ±10, ±20, ±30, ±40, ±50, MAXmm)の各段階の変位制御として静的耐力、変位等を測定した。供試体は柱頂部に仮想質量として 16.3kN の錘を取り付け、柱基部から仮想質量までの距離は 643.5mm(細長比 36)とした。計測は、柱頂部の水平変位を大変位計、N 面と S 面の柱基部中心の伸び量を小変位計、鉄筋ひずみおよびコンクリートひずみをひずみゲージにより計測した。

### (2) 動的載荷実験

動的実験は、動的水平一軸加振実験および動的水平・鉛直二軸同時加振実験とし、加振方法は兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測された地震加速度を

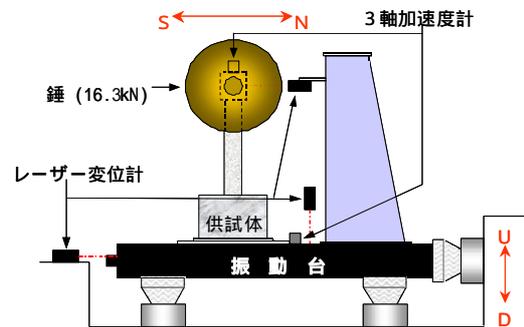


図 - 3 動的載荷実験装置・供試体設置図

5/100, 10/100, 20/100...100/100 倍した地震加速度を加振倍率として段階的に上昇させ、柱部材が破壊するまで実験を行った。図 - 3 に、供試体の振動台への設置状況および計測器設置状況を示す。柱部材の挙動は、柱頂部と振動台に取り付けた加速度計、柱頂部と振動台の水平・鉛直方向の動きをレーザー変位計で計測し、さらに柱基部中心の伸び量、鉄筋ひずみおよびコンクリートひずみを計測した。図 - 4 に、兵庫県南部地震の N - S 方向の波形および U - D 方向の波形を示す。なお本研究では、柱部材としての耐力と変形性能の確認と検証を目的としており、入力加速度の時間軸の短縮は行っていない。

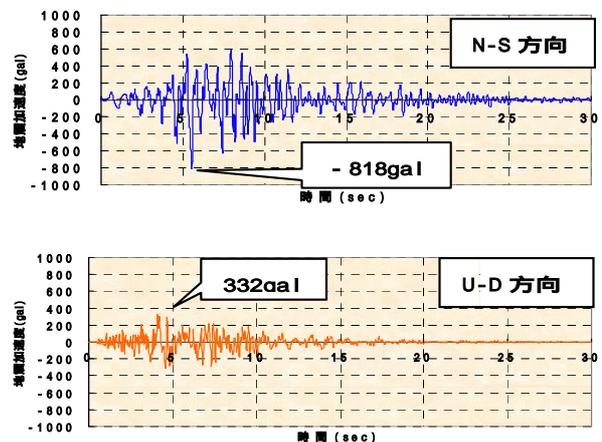


図 - 4 入力地震波形

### 3. 静的実験結果と考察

#### 3.1 荷重～変位履歴曲線

正負交番荷重実験により得られた横拘束鉄筋比 0.8% の場合の荷重～変位履歴曲線を図 - 5 に示す。

図 - 5 よりエネルギー吸収能(荷重～変位履歴曲線で囲まれる面積)に関しては、RC 供試体 (SFRC0008) に比べて鋼繊維を混入した各供試体ともに大きくなっているが、鋼繊維を 0.5%, 1.0%, 1.5% 混入した各 SFRC 供試体においては鋼繊維混入量の違いによる効果は現れていない。なお供試体の破壊モードはすべて柱基部の局部的曲げ破壊であったが、SFRC1508 は、第一象限で急激な耐力低下が生じている。これは計測方法に問題があるが、鋼繊維量が多いことと、コンクリートが高強度であるので鉄筋との付着が大きいため、最初に入ったひび割れ部分(この場合は柱基部)に変形が集中し、柱基部の破壊により急激な耐力低下を生じたことによるものと考えられる。

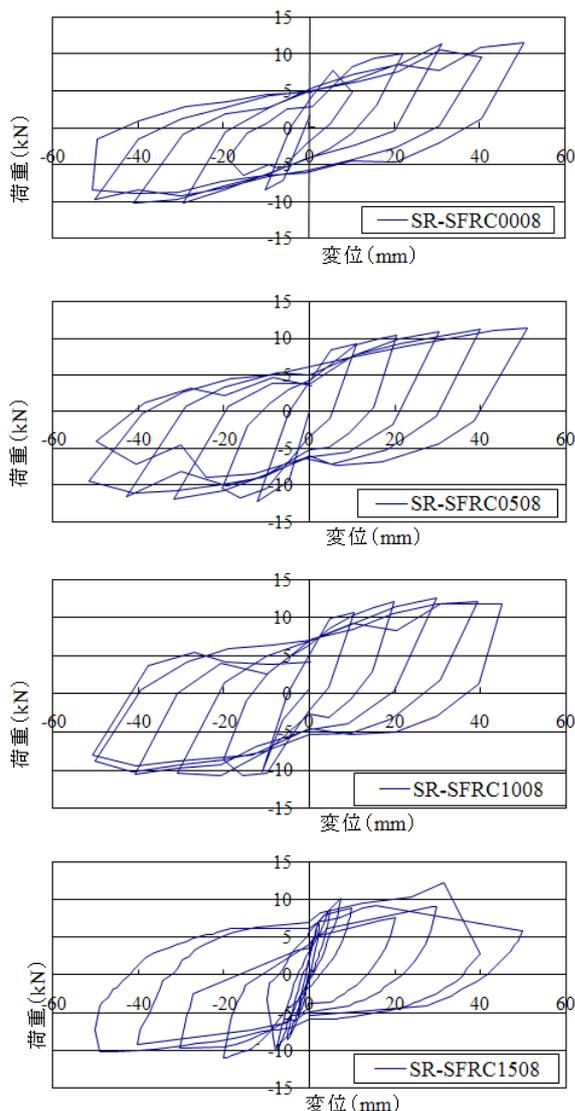
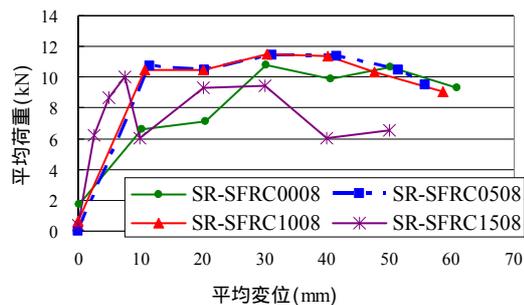
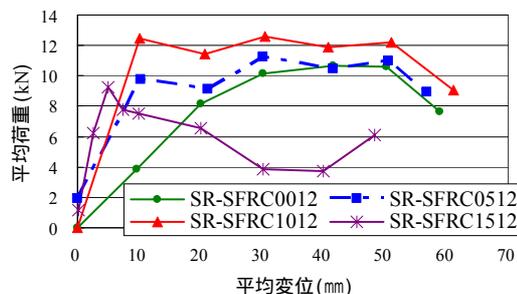


図 - 5 荷重～変位履歴曲線



(a) 横拘束鉄筋比 0.8%



(b) 横拘束鉄筋比 1.2%

図 - 6 平均荷重～平均変位曲線

#### 3.2 平均荷重～平均変位曲線

荷重～変位履歴曲線の荷重と変位の最大値の絶対値を平均した平均荷重～平均変位曲線を横拘束鉄筋比 0.8% と 1.2% のグループ別に図 - 6(a), (b) に示す。また、各供試体の軸方向鉄筋降伏時の荷重と変位および軸方向鉄筋降伏後の最大荷重と変位を表 - 4 に示す。

図 - 6(a) および表 - 4 より、鋼繊維混入量 0.5% および 1.0% の供試体は、鋼繊維を混入することで、エネルギー吸収能および最大荷重が大きくなっているが、ほとんど同値であり、明確な差を生じていない。それに対して、鋼繊維混入量 1.5% の供試体は、軸方向鉄筋の降伏時期も他の供試体より早く、軸方向鉄筋降伏時の荷重および軸方向鉄筋降伏後の最大荷重も小さい。また、図 - 6(b) および表 - 4 では、鋼繊維混入量 0.5% および 1.0% の供試体は、鋼繊維混入量の増加に伴ってエネルギー吸収能および最大耐力が大きくなっているが、鋼繊維混入量 1.5% の供試体は、軸方向鉄筋の降伏時期も他より早く、軸方向鉄筋降伏時の荷重および軸方向鉄筋降伏後の最大荷重も小さくなっている。この結果、鋼繊維混入量が 1.5% では過大となり、ひび割れが基部に集中するため、結果的に耐力やエネルギー吸収能が低下することが明らかとなった。これは、高強度コンクリートに鋼繊維を混入した部材では、曲げあるいはせん断によりひび割れを生じた場合、鋼繊維混入割合が多いほど、ひび割れ部分とひび割れを生じていない部分との曲げ剛性の差が大きくなり、そのひび割れに変形が集中し、そのためひび割れの分散が少なくなりひび割れ本数も少なく、結果として変形能が低下したと考えられる。

表 - 4 各実験結果

供試体名	正負交番載荷実験 (SR)				水平一軸加振実験 (DH)				水平・鉛直二軸加振実験 (DHV)			
	軸方向鉄筋降伏時		軸方向鉄筋降伏後の最大値		軸方向鉄筋降伏時		軸方向鉄筋降伏後の最大値		軸方向鉄筋降伏時		軸方向鉄筋降伏後の最大値	
	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)
SFRC0008	6.6	10.2	10.8	30.2	13.4	12.3	15.7	36.3	13.6	6.6	18.1	44.9
SFRC0508	10.7	11.6	11.4	41.5	10.0	6.0	17.1	54.5	14.3	7.9	19.6	66.9
SFRC1008	10.4	10.8	11.5	30.4	13.9	7.3	16.6	21.5	14.2	6.2	24.1	46.8
SFRC1508	10.0	7.5	9.4	30.0	16.4	7.2	19.2	28.0	14.4	7.8	24.8	34.2
SFRC0012	3.8	9.6	10.6	41.6	7.7	4.4	15.7	36.7	13.7	8.9	18.0	36.3
SFRC0512	9.8	10.3	11.2	30.2	12.7	7.2	18.0	32.5	12.7	7.1	20.5	48.7
SFRC1012	12.5	10.1	12.6	30.5	13.4	9.1	21.3	19.5	19.4	7.3	20.5	31.8
SFRC1512	9.3	5.0	7.8	7.5	15.9	8.0	21.7	40.4	16.2	7.4	25.4	29.0

また、鋼繊維混入量の増加に伴って軸方向鉄筋降伏時の平均荷重の最大値が大きくなったことは、鋼繊維の混入によってコンクリートの引張強度が増加したためであり、軸方向鉄筋降伏後も平均荷重が大きくなるのは、鋼繊維の混入によって、コンクリートの引張側のエネルギー吸収能が大きくなったためと考えられる。

一方、図 - 6(a), (b)および表 - 4 より、横拘束鉄筋比がエネルギー吸収能と最大荷重に与える影響は、鋼繊維混入量 1.0%の場合、横拘束鉄筋比 1.2%の供試体は横拘束鉄筋比 0.8%の供試体に比べて 1.1 倍程度の増加に留まり、その他の鋼繊維混入率の供試体は横拘束鉄筋量の増加とは逆に小さくなっている。このことから、本実験のように曲げが卓越する静的載荷実験では、横拘束鉄筋比によるエネルギー吸収能と最大荷重に与える影響は大きく現れないことが分かる。

#### 4. 動的実験結果と考察

##### 4.1 応答荷重～応答変位関係

動的実験によって得られた各供試体の最大応答荷重～最大応答変位の N 側と S 側の荷重と変位の絶対値を平均した平均応答荷重～平均応答変位曲線について横拘束鉄筋比 0.8%と 1.2%のグループ別に、水平一軸加振実験で得られた結果を図 - 7(a), (b)に示し、水平・鉛直二軸加振実験で得られた結果を図 - 8(a), (b)に示す。また、両実験で得られた各供試体の軸方向鉄筋降伏時および軸方向鉄筋降伏後の最大荷重時の荷重と変位を表 - 4 に示す。

図 - 7, 図 - 8 および表 - 4 より、水平一軸加振実験および水平・鉛直二軸加振実験における横拘束鉄筋比 0.8%, 1.2%の供試体については、軸方向鉄筋降伏時の平均応答荷重の最大値は、鋼繊維混入量 1.0%または 1.5%の供試体が大きくなっており、軸方向鉄筋降伏後の平均応答荷

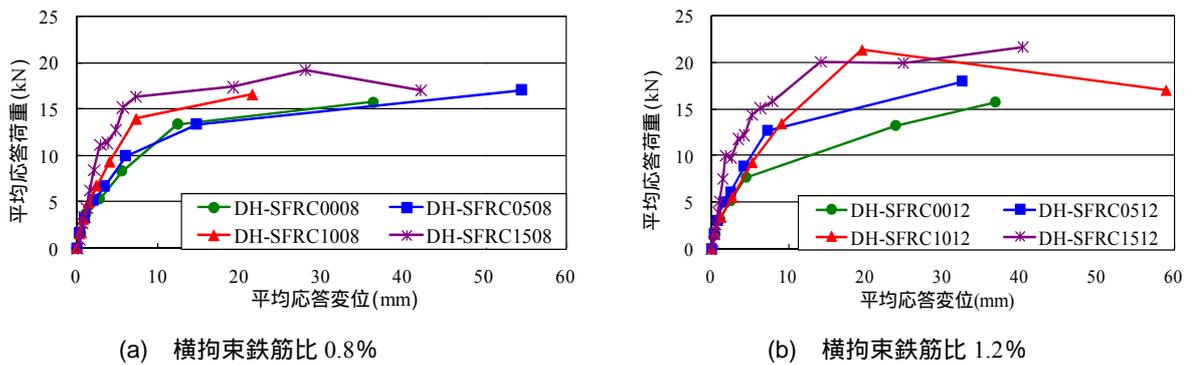


図 - 7 平均応答荷重～平均応答変位曲線 (水平一軸加振実験)

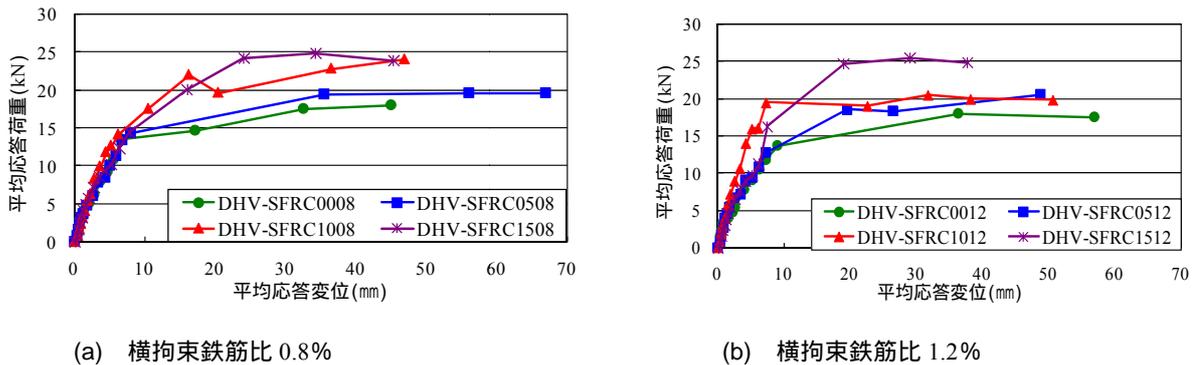


図 - 8 平均応答荷重～平均応答変位曲線 (水平・鉛直二軸同時加振実験)

重の最大値も、鋼繊維混入量 1.5%の供試体が静的実験とは逆に最も大きくなっている。これは、静的実験は 1 次モードのみで柱基部に変形が集中するが、動的実験では 1 次モードの他に 2 次や 3 次の振動モードがあり、ひび割れが柱基部以外にも生じ、柱全体の動的挙動に対しては、鋼繊維混入量が有効に作用していると考えられる。

また、水平・鉛直二軸加振実験においては、横拘束鉄筋比 1.2%の供試体は拘束鉄筋比 0.8%の供試体と概ね同等のエネルギー吸収能と最大耐力となっており、横拘束鉄筋比が高い場合は鋼繊維混入の効果が低下する傾向にある。したがって、これらの結果から、鋼繊維の混入量は 1.0%かつ横拘束鉄筋比 0.8%程度までが柱部材としての耐力向上に対して効果的であることが明らかとなった。

#### 4.2 柱頂部の残留変位～加振倍率関係

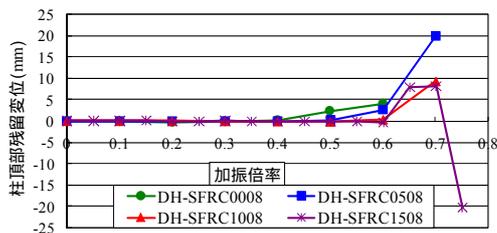
供試体の柱頂部の錘の重心位置(柱基部からの距離 643.5 mm)における残留変位～加振倍率曲線を横拘束鉄筋比 0.8%と 1.2%のグループ別に、水平一軸加振実験で得られた結果を図 - 9(a),(b)に示し、水平・鉛直二軸加振実験で得られた結果を図 - 10(a),(b)にそれぞれ示す。

図 - 9, 図 - 10 より、水平一軸加振実験、水平・鉛直二軸加振実験とも、鋼繊維混入量 0%の RC 供試体が最も早い段階で残留変位が発生しており、鋼繊維混入量に比例して残留変位の発生が抑えられているが、鋼繊維混入量 1.0%と 1.5%の供試体には大きな差は現れていない。また、横拘束鉄筋量による大きな違いは見られず、鋼繊維を 1.0%程度混入したことにより、鋼繊維のブリッジング作用によりひび割れ幅が抑制され、結果として除荷後の残留ひび割れ幅も小さくなり、柱頂部の残留変位の発生を抑える効果が現われたものと考えられる。

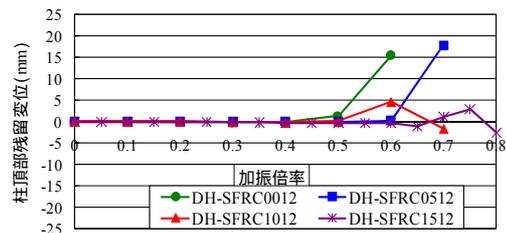
#### 5. 載荷実験方法の違いによる比較と考察

図 - 11 に、鋼繊維混入量別で比べた静的載荷実験と動的載荷実験による平均(応答)荷重～平均(応答)変位曲線の比較図を示す。図 - 11 より、エネルギー吸収能はすべての供試体で「静的載荷実験」<「動的水平一軸加振実験」<「動的水平・鉛直二軸同時加振実験」の順に大きくなっている。また、横拘束鉄筋比に着目すると、静的実験における鋼繊維混入量が 1.5%の供試体を除いて、静的載荷実験と動的載荷実験ともに横拘束鉄筋比にかかわらず概ね同等のエネルギー吸収能および最大荷重となっている。以上より、エネルギー吸収能に関して、静的載荷実験と動的載荷実験について「平均荷重～平均変位曲線」を比較すると、動的水平一軸加振は、静的載荷とは異なり、頂部の錘に作用する水平加速度の影響があり、さらに動的水平・鉛直二軸同時加振では、動的水平一軸加振に鉛直方向の加速度が加わり合成された方向の加速度が増加することにより、応答荷重が大きくなったためであると考えられる<sup>4)</sup>。

また、前出の図 - 9, 図 - 10 より、柱頂部の残留変位～加振倍率曲線について比較すると、動的水平一軸加振実験による残留変位の発生段階が動的水平・鉛直二軸加振実験に比べて早い加振段階で生じている。これはひび割れの方向が動的水平一軸加振はほぼ水平方向に生じるのに対して、動的水平・鉛直二軸加振は水平と鉛直振動を同時に受けるため、斜め方向にひび割れが生じ、また、水平と鉛直振動を同時に受けることによって主応力の方向は常に変化し、せん断耐力も変動することになる。その結果、せん断耐力が増加し、ひび割れに対する抵抗力が大きくなり、動的水平・鉛直二軸加振実験による残留変位が小さくなったと考えられる<sup>4)</sup>。

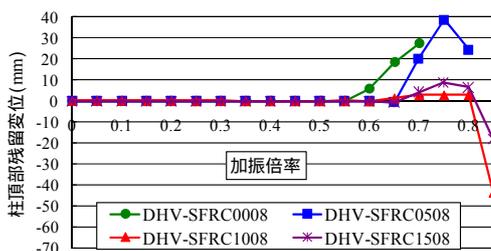


(a) 横拘束鉄筋比 0.8%

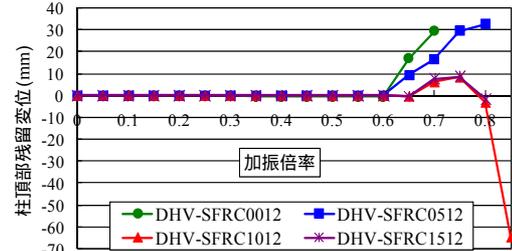


(b) 横拘束鉄筋比 1.2%

図 - 9 柱頂部の残留変位～加振倍率関係(水平一軸加振実験)



(a) 横拘束鉄筋比 0.8%



(b) 横拘束鉄筋比 1.2%

図 - 10 柱頂部の残留変位～加振倍率関係(水平・鉛直二軸同時加振実験)

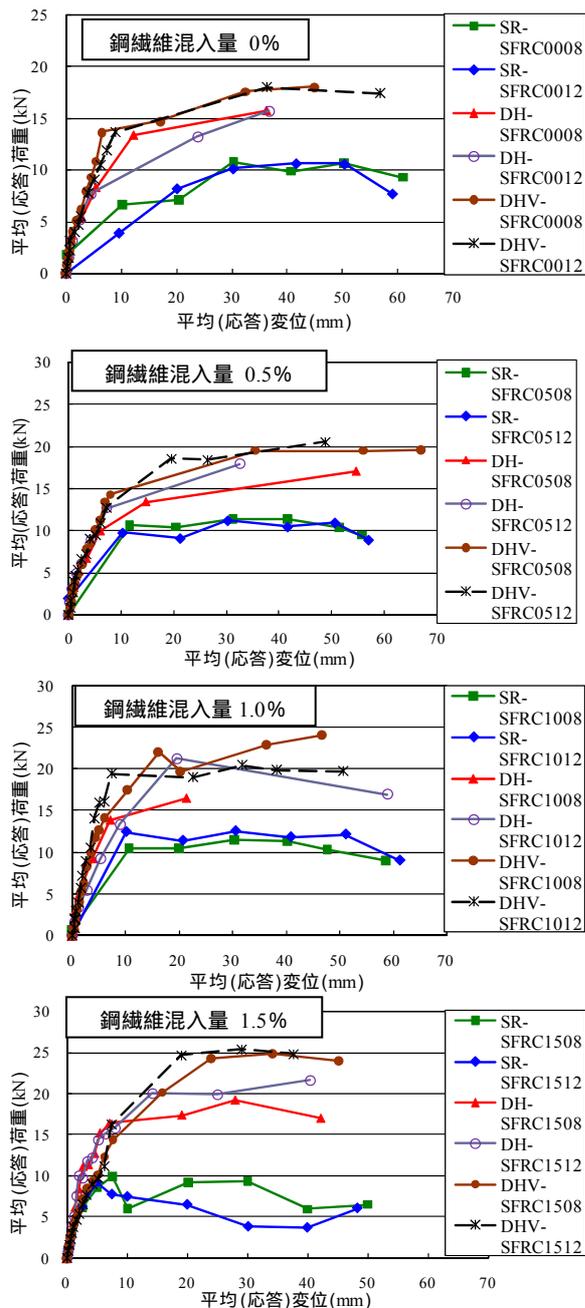


図 - 11 平均(応答)荷重～平均(応答)変位曲線

さらに、残留変位～加振倍率曲線について横拘束鉄筋比に着目すると、動的水平一軸加振実験および動的水平・鉛直二軸同時加振実験ともに横拘束鉄筋比 1.2%の供試体は横拘束鉄筋比 0.8%の供試体に比べて残留変位が小さくなっている。これは横拘束鉄筋比が大きくなるほど圧縮破壊域の範囲の進展が遅れることが原因と考えられる<sup>5)</sup>。

## 6. まとめ

本研究の範囲内で得られた鋼繊維混入量および横拘束鉄筋比が柱部材の耐力と変形特性に及ぼす影響に関する実験結果をまとめると以下ようになる。

(1) 静的載荷実験による平均荷重～平均変位曲線より、鋼繊維混入量 0.5%～1.0%の供試体は、鋼繊維混入量 1.5%の供試体に比べて軸方向鉄筋降伏時および軸方向鉄筋降伏後の平均荷重が大きくなっている。この結果から、鋼繊維の混入量は 1.0%かつ横拘束鉄筋比 1.2%程度までが柱部材としての耐力向上に対して効果的であることが明らかとなった。

(2) 動的載荷実験による平均応答荷重～平均応答変位曲線より、動的水平一軸加振実験および動的水平・鉛直二軸同時加振実験ともに鋼繊維混入量および横拘束鉄筋比の増加に伴って、軸方向鉄筋降伏時および軸方向鉄筋降伏後の平均応答荷重が大きくなることが明らかとなった。ただし、水平・鉛直二軸同時加振実験においては、横拘束鉄筋比 0.8%および 1.2%の供試体は鋼繊維混入量にかかわらず、概ね同等のエネルギー吸収能と最大耐力となっており、横拘束鉄筋比が高い場合は鋼繊維混入の効果低下する傾向にあることが明らかとなった。

(3) 動的載荷実験による柱頂部の残留変位～加振倍率曲線より、動的水平一軸加振実験および動的水平・鉛直二軸同時加振実験ともに鋼繊維混入量および横拘束鉄筋比を増加させることで、柱頂部の残留変位の発生を抑えられることが明らかとなった。

(4) 本研究の結果、柱部材の鋼繊維混入量は 1.0%かつ横拘束鉄筋比を 0.8%とすることで RC 部材に比べて大きなエネルギー吸収能と最大耐力の向上が得られるとともに、鋼繊維の混入によって横拘束鉄筋量を減じることの可能性が示された。

## 参考文献

- 1) 村田昌寛, 佐藤祐司, 他: 鋼繊維補強コンクリートを部分使用した PRC 2主版桁橋の設計・施工, ORIKENN 技報 第 23 号, pp.44-51, 2007.7
- 2) 武者浩透, 大竹明朗, 他: 超高強度コンクリート系新素材「ダクトル」を用いた PC 橋梁の設計・施工 - 酒田みらい橋 -, プレストレストコンクリート, Vol.45, No.2, pp.40-48, Mar. 2003
- 3) コンクリート構造物の構造実験評価研究委員会報告書, (社)日本コンクリート工学協会, 2005
- 4) 平澤征夫, 水野英二, 他: 内部欠陥を有する RC 柱部材の終局挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.271-276, 2005
- 5) 岡本恒和, 平澤征夫, 他: 低プレストレスを導入した RC 橋脚モデルの静的および動的挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.517-522, 2008