

論文 せん断余裕度確保の方法が異なる鉄筋コンクリート梁部材の動的載荷実験

金子 貴司*1・金子 洋*2・小谷 俊介*3・塩原 等*4

要旨：現在の鉄筋コンクリート部材の設計では，せん断余裕度を使って曲げ降伏後のせん断破壊を防止している。せん断余裕度の確保には，横補強筋比の増大による方法と曲げ降伏時のせん断力の低減による方法があり，この両者の違いが及ぼす影響についてはよく知られていない。そこで，動的載荷と静的載荷により曲げ降伏後にせん断破壊する耐力，変形及びひび割れ性状に及ぼす影響を検討した。動的載荷により，曲げ降伏時入力せん断力が 16.0%～20.0%上昇した。同じせん断余裕度であっても，静的載荷時にはせん断スパンを長くした試験体の靱性が大きい，動的載荷時には横補強筋比の大きい試験体の靱性が大きかった。

キーワード：載荷速度，鉄筋コンクリート，せん断余裕度

1. はじめに

曲げとせん断を受ける鉄筋コンクリート部材の載荷速度を変化させた実験は，過去に多く行われ，曲げ降伏強度の上昇に関しては良く検討されているが，変形性能が検討された例は少ない。そこで，せん断余裕度を変化させた試験体を9体作製し，鉄筋コンクリート梁の静的並びに動的載荷実験を行ない，変形性能について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の諸元を表 - 1 に，形状及び配筋を図 - 1 に示す。試験体の断面は，200mm × 300mm(幅×せい)であり，引張鉄筋として断面内に D13 を 4 本ずつ持つ。試験体のせん断スパンが 550, 750, 1150mm の 3 種類の片持ち梁で，試験体を固定するスタブを有する。実験の変数は，せん断スパン比，横補強筋比，載荷速度及び載荷履歴である。

梁主筋は，梁端で厚さ 19mm の鉄板に溶接した。また，4 のせん断補強筋の抜け出しと端部の 135 度フックの開きを防止する為にせん断補強筋の余長を 75mm とし，更に，横補強筋の先端に M6 のナットを溶接して定着を確保した。

鉄筋とコンクリートの材料特性を表 - 2 と表

- 3 に示す。横補強筋として使用した 4 は明確な降伏棚が見られないので，降伏点強度を 0.2%オフセットにより求めた。実験は，コンクリートの材令が 55 日～72 日の間に行われた。

表 - 1 試験体の特徴

試験体	D5 D5-M S5	D6 S6	D7 S7	D8 S8
引張鉄筋比[%]	0.94			
補強筋比 [%]	0.16	0.31	0.16	0.31
せん断スパン比	2.5	2.5	3.8	1.8
せん断余裕度	1.82	2.58	2.48	1.92

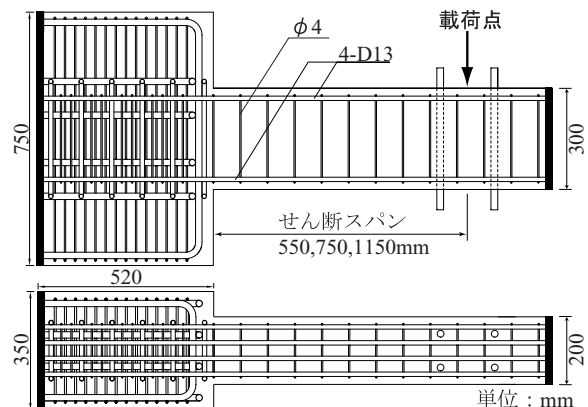


図 - 1 試験体配筋図

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 (正会員)
 *2 芝浦工業大学 工学部建築工学科 (正会員)
 *3 東京大学教授 工学系研究科 工博 (正会員)
 *4 東京大学助教授 工学系研究科 工博 Ph.D (正会員)

試験体の曲げ強度の算定は断面精算により、せん断強度、付着強度の算定は、材料実験の結果と「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型設計指針・同解説」¹⁾によった。試験体は全て曲げ降伏先行型である。

試験体 D5 と試験体 S5 を基準試験体とし、この試験体の横補強筋比を増大させて、せん断余裕度を上昇させた試験体（試験体 D6 及び S6）と横補強筋比を変えずにせん断スパン比を大きくすることにより相対的にせん断余裕度を大きくした試験体（試験体 D7 及び S7）を作製した。また、せん断スパン比の影響を見るため、せん断スパン比を小さくし、且つ、せん断余裕度を保持するため横補強筋を増加させた試験体（試験体 D8 及び S8）を作製した。更に、荷重履歴の違いを検討する為に、試験体 D5 とまったく同じ配筋・形状の試験体を作り D5-M とした。

2.2 加力方法

荷重装置を図 - 1 に示す。試験体は高強度鉄筋を用いて試験体のスタブを反力床に圧着した。アクチュエータを用いて梁端部に正負繰返し荷重を行なった。実験の制御は、アクチュエータのストローク量で行なった。

2.3 荷重履歴

荷重履歴を図 - 2 に示す。加力は配筋が同一な一対の試験体に対して、試験体 D5, D6, D7, D8 では荷重速度を 100mm/sec(動的荷重)とし、試験体 S5, S6, S7, S8 では 0.1mm/sec(静的荷重)として、実験を行なった。荷重は原則として正負交番繰返し荷重であるが、D5-M のみ単調荷重とした。

繰返し荷重は、振幅の部材角を 1/1000, 2/1000, 3/1000, 5/1000, 7.5/1000, 10/1000, 15/1000, 20/1000, 30/1000, 40/1000, 50/1000 と漸増させ、各荷重とも 3 回ずつの繰返しを行なった。更に、大変形経験後の小変形の部材の性能を確認する為に、各荷重のあとに小振幅を荷重した。

単調荷重する試験体 D5-M では、部材角 5/1000 の荷重までは同一であるが、その後の荷重を行なわずに、部材角 5/1000 の準備荷重を 3 サイクル行った後に荷重を止めずに部材角

表 - 2 鉄筋の材料特性

鉄筋種類	降伏点 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	弾性係数 [N/mm ²]
D13	361	499	186 × 10 ³
4	478	509	208 × 10 ³

表 - 3 コンクリートの材料特性

材令 [日]	圧縮強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	弾性係数 [N/mm ²]
28	26.4	2.18	30400
54	27.4	2.49	29100
74	30.4	2.64	27200

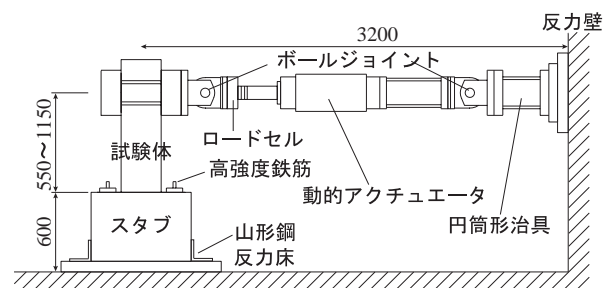


図 - 1 荷重装置

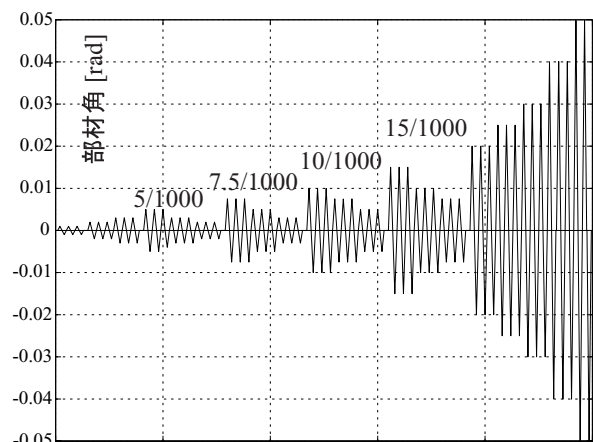


図 - 2 荷重履歴

50/1000 の荷重を正負 3 サイクル行なった。

2.4 計測方法

加力点に加える水平力をロードセルにより、梁の加力点での変形をレーザ変位計により、梁の付け根部分の変形をパイゲージにより、主筋及びせん断補強筋の歪度を歪ゲージによりそれぞれ測定した。

データの取り込みには、動歪測定器を用いた。サンプリング周期は、動的荷重では 1/1000 秒であるが、データを 5 つずつ平均して、実験デ

ータとした。また、静的載荷のサンプリング周期は、2.0 秒とした。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

部材角 15/1000 の載荷終了後の試験体 D5 と S5 の破壊状況を写真 1 に示す。

いずれの試験体とも、初めに梁危険断面において曲げひび割れが発生し、その後、ひび割れが進展した。試験体 S7 を除くすべての試験体でせん断ひび割れが発生し、曲げ降伏に至った。

せん断ひび割れの発生位置は、動的載荷と静定載荷で違いが無かった。

試験体 D7 ではせん断ひび割れが発生したが、対となる試験体 S7 ではせん断ひび割れが発生しなかった。これは、動的載荷により曲げ降伏時入力せん断力が上昇した効果によるものと考えられる。

3.2 入力せん断力 - 全体変形関係

各試験体の入力せん断力と部材角関係を図 - 3 に示す。実際の載荷では、加力方向と直角方向へ大きく変形したため、正負で部材角が揃っていない試験体が多い。

動的載荷により対となる静的載荷試験体について、正負の曲げ降伏時せん断力を平均して比較すると、試験体 D5 では 16.0%、D6 では

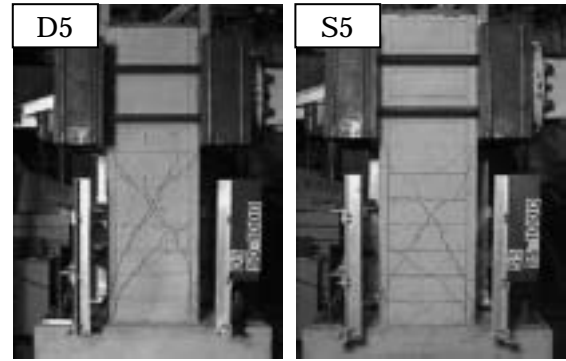


写真 1 破壊状況

17.8%、D7 では 20.0%、D8 では、19.6% 曲げ降伏時入力せん断力が上昇している。また、曲げ変形後の大変形域における荷重も静的載荷より大きくなっている。降伏棚ではあまり顕著な差が見られないとされている論文²⁾もあるが、本実験では曲げ降伏後も大きな差となっている。ただし、曲げ降伏後の大変形域での耐力上昇は、1 サイクル目のみであることが多く、そのような時は、繰返し載荷時の耐力は静的載荷時の耐力と変わらない程度である。

試験体 D5-M は、正方向載荷による曲げ降伏強度は試験体 D5 と変わらないが、負方向載荷による曲げ降伏強度は静的載荷した試験体 S5 と同じ程度の曲げ降伏強度であった。

試験体 D5 と D8 では初期剛性の上昇が見られたが、他の試験体では初期剛性は、動的載荷による変化が無かった。従って、動的載荷によ

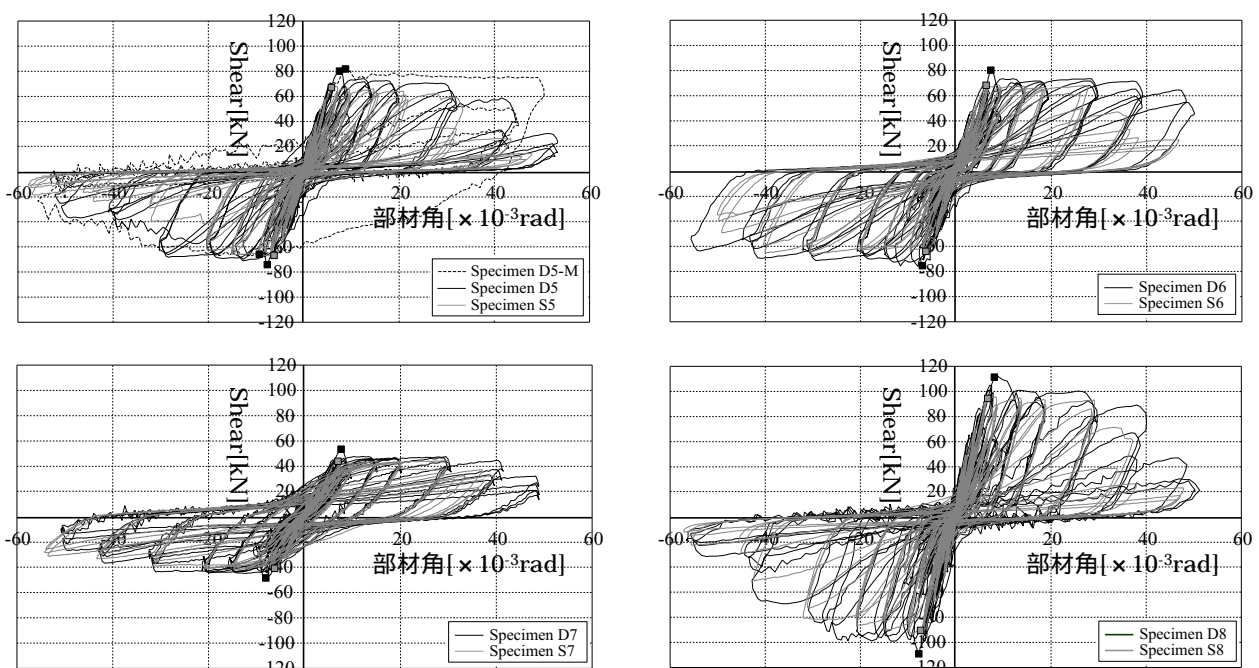


図 - 3 荷重 - 変形関係

る初期剛性の変化については明確でない。

動的載荷したすべての試験体では、各載荷の最大変形点で部材耐力が低下している。これは、最大振幅点で変形速度がゼロになるため、それに伴い、歪速度が急激に低下する。そのため、最大変位位置において急激に耐力が低下し、静的載荷時における同じ部材角程度まで低下しており、歪速度の効果が大きい事を示している。

試験体 D7 及び S7 では、曲げ降伏後、部材角 20/1000 の載荷までは紡錘形の履歴を描いたが、試験体 D6 及び S6 では、部材角が 15/1000 から荷重変形関係が逆 S 字の履歴に変化する。試験体 D8 と S8 も同様に、部材角 15/1000 の載荷以降逆 S 字化の現象が見られる。

載荷点の変形速度が等しいので、せん断スパンの大きな試験体では、部材角速度が小さくなり、せん断スパンの小さな試験体では、部材角速度が大きくなる。しかし、せん断スパン比の大きな試験体 D7 と小さな試験体 D8 の曲げ降伏強度の上昇率が大きく、せん断スパン比が中間の試験体 D5 の上昇率が最小であった。

4. 実験結果の検討

4.1 歪速度による曲げ降伏強度の上昇

引張側鉄筋において時間当たりの歪速度の変化量を歪速度と定義する。ここで、各試験体において、部材が初めて曲げ降伏する時の平均歪速度は、表 - 4 に示すように、 $2.3 \sim 8.6 \times 10^{-2} \text{mm/mm/sec}$ であった。これらの値は、実大鉄筋コンクリート造建物の振動実験³⁾により得られた歪速度に近く、鉄筋及びコンクリートの材料特性に歪速度効果が、明確に現れる範囲の値である。

既往の研究⁴⁾による歪速度を考慮した鋼材の降伏点強度の推定式を式(1)に、コンクリート強度の推定式を式(2)に示す。

$${}_d f_y = (0.90 + 0.05 \log(\dot{\varepsilon})) \cdot {}_s f_y \quad (1)$$

ここで、 ${}_d f_y$: 動的載荷時の降伏強度、 ${}_s f_y$: 静的載荷時の降伏強度、 $\dot{\varepsilon}$: 歪速度 [$\times 10^{-6} \text{mm/mm/sec}$]

$${}_d \sigma_B = (0.94 + 0.06 \log(\dot{\varepsilon})) \cdot {}_s \sigma_B \quad (2)$$

ここで、 ${}_d \sigma_B$: 動的載荷時のコンクリート強度、

表 - 4 歪速度

試験体	D5	D5-M	D6	D7	D8
平均歪速度	3.12	8.67	3.08	2.26	3.60
最大歪速度	13.9	55.2	7.40	2.99	4.55

単位: [$\times 10^{-2} \text{mm/mm/sec}$]

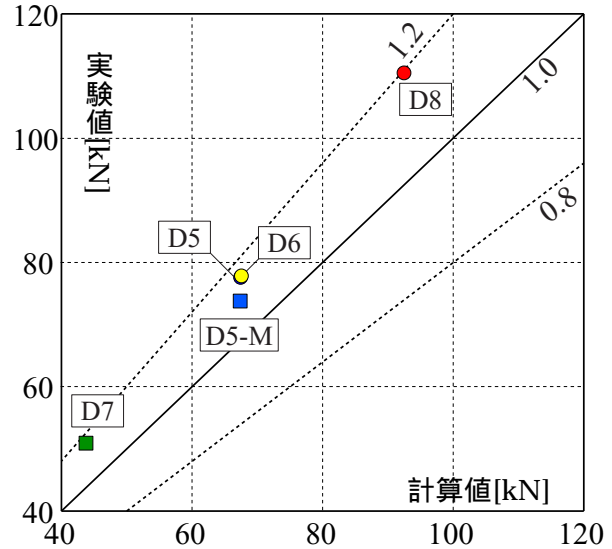


図 - 4 計算値と実験値の比較

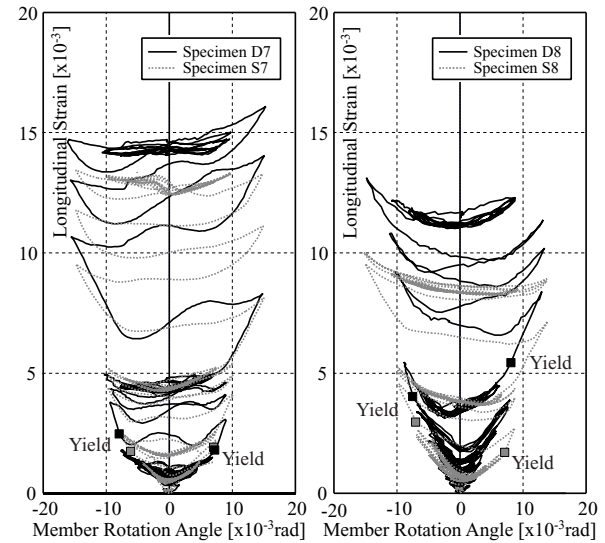


図 - 5 軸歪

${}_s \sigma_B$: 静的載荷時の降伏強度、 ε : 歪速度 [$\times 10^{-6} \text{mm/mm/sec}$]

これら 2 式を用いて、歪速度の影響により鋼材の降伏点強度は、11.9 ~ 13.1%、コンクリートの圧縮強度は 20.1% ~ 23.6%、それぞれ上昇すると推定される。

上昇した材料強度を用いて断面精算により部材の曲げ降伏モーメントを算定した結果は図 - 4 の通りである。実験値と推定値の誤差は、+9.4% ~ +19.4% である。

4.2 軸歪

各試験体の軸歪を図 - 5 に示す。図中の 印は部材が降伏した点を示す。軸歪は試験体の降伏ヒンジ域における変形とする。つまり、軸歪は、梁危険断面付近の変形を測定区間の210mm(0.7D)で除した値を計測値とした。軸歪の測定は、計測機器の性能を考慮して、15/1000まで計測した。

軸歪は、曲げ降伏以前では、大きな変化はないが、曲げ降伏後に急激に増加する鉄筋の伸び及び抜け出しにより急激に増加する。

静的载荷では、軸歪の増加は、今までに経験していない変形に達したときに急激な増加をする。しかし、その大変形域において軸歪が急激に増加するのは、同振幅での1サイクル目だけが顕著である。しかし、動的载荷では、静的試験体と同様に大変形域で急激な増加をするが、2サイクル目以降も急激な増加を示すことがある。そのため、試験体 D7 と D8 では、対応する静的試験体よりも大きな軸歪となっている。試験体 D7 と D8 はせん断スパン比が最大のものと最小のものであり、単純にせん断スパンの影響でない事が分かる。

4.3 歪速度と変位速度

载荷速度を部材長さで除したものを変形角速度とする。変形角速度と梁危険断面の歪速度の関係を図 - 6 に示す。この図より歪速度と変形角速度は単純な一対一の対応ではない事が分かる。また、歪速度が急激な上昇をしている部分(図中の 印)は、鉄筋が降伏した時である。ここで、曲げ降伏時を除けば、概ね変形角速度が上昇すると歪速度も上昇する傾向にある。

また、試験体の部材角と梁上端筋の梁危険断面における歪速度の関係を図 - 7 に示す。各試験体とも、最大変形点では、歪速度がゼロ又はゼロに近くなっている。この時の部材の耐力が低下していることから、最大変形点での部材耐力に及ばず歪速度の影響は大きいと考えられる。

4.4 等価粘性減衰

各試験体の等価粘性減衰 heq を図 - 8 に示す。この図では、小変形における繰返し载荷時の値は省略している。曲げ降伏前では、各試験体と

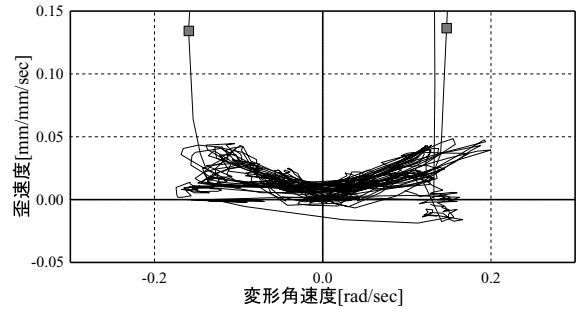


図 - 6 部材角速度 - 歪速度

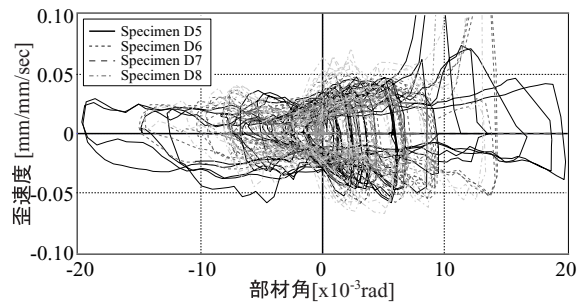


図 - 7 部材角 - 歪速度関係

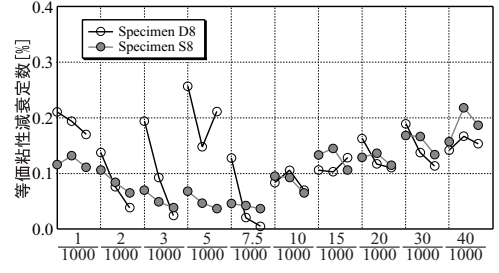
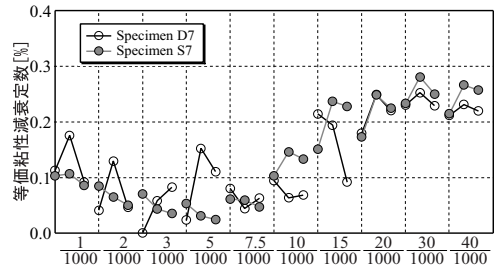
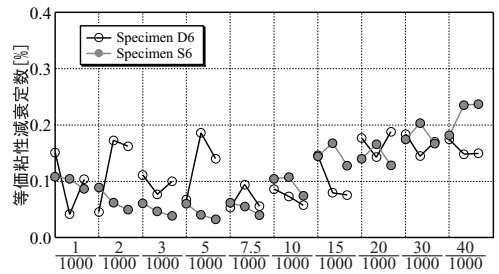
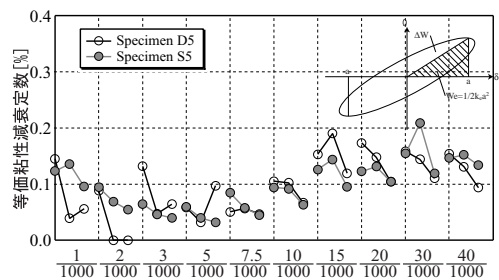


図 - 8 等価粘性減衰

も履歴吸収能は、動的載荷試験体の方が大きい傾向である。しかし、部材の曲げ降伏後は、履歴吸収エネルギーは、1 サイクル目は動的載荷の方が大きいものの、2 サイクル目以降は変わらないか又は、静的載荷試験体の方が大きくなっている。

試験体 D6 と D7 で比較すると、曲げ降伏前では、耐力の大きな試験体 D6 の方が大きくなっているが、部材角 15/1000 の載荷以降は、試験体 D7 の方が大きくなっている。

4.5 耐力低下時の塑性率

曲げ降伏強度の 80% に低下した時を部材耐力の低下が始まる時と定義する。耐力低下時の塑性率を正方向載荷と負方向載荷を平均して表 - 5 に示す。試験体 D5 と S8 以外の試験体では、正負の塑性率に大きな差が見られた。

動的載荷により耐力低下が始まる時の塑性率が低下した試験体は、試験体 D5, D7, D8 である。試験体 D6 では、正方向載荷及び負方向載荷ともに大きな塑性率まで耐力を維持した。

静的載荷時には、せん断スパンを長くして相対的にせん断余裕度を確保した試験体の方が、大きな塑性率まで耐力を維持したが、動的載荷時には、横補強筋比の増大による靱性を確保した試験体の方が大きな塑性率まで耐力を維持した。

表 - 5 耐力低下時の塑性率

試験体	D5	D6	D7	D8
塑性率	3.95	7.03	4.62	4.12
試験体	S5	S6	S7	S8
塑性率	4.41	5.42	6.00	4.36

5. 結論

鉄筋コンクリート梁部材に対する動的並びに静的載荷実験の結果、以下の結論を得た。

- (1) 動的載荷では、載荷速度の影響を受けて部材の曲げ降伏時入力せん断力が 16.0% ~ 20.0% 上昇した。
- (2) 軸歪は、静的載荷では、部材が曲げ降伏後に経験する初めての載荷時の特に 1 サイクル目に顕著な増加を示すが、動的載荷では、部材曲げ降伏後の処女載荷時の 2 サイクル目以降も著しい増加を示すことがある。この時は、静的載荷時よりも動的載荷実験の方が大きくなる可能性がある。
- (3) 部材の曲げ降伏以前の履歴吸収能は、動的載荷した試験体の方が大きい。しかし、曲げ降伏後の履歴吸収能は、載荷の 1 サイクル目では静的載荷した試験体よりも大きい、2 サイクル目以降は、変わらないか、静的載荷試験体の方が大きい傾向である。
- (4) 静的載荷時のせん断余裕度をほぼ等しくした試験体では、静的載荷時には、せん断スパン比を大きくして相対的にせん断余裕度を大きくした試験体の方が大きな塑性率まで耐力を保持したが、動的載荷時には、逆に横補強筋比を増加させた試験体の方が大きな塑性率まで耐力を維持した。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型設計指針・同解説，1999.9.
- 2) 睦好宏史，町田篤彦：動的外力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究，土木学会論文集，第 354 号/V-2，pp.81-90，1985.2.
- 3) 細谷博ほか：ひずみ速度の影響を考慮したファイバーモデルによる鉄筋コンクリート部材の断面解析，日本建築学会構造系論文集，第 482 号，pp.83-92，1996.4.
- 4) 細谷博ほか：実大 3 層鉄筋コンクリート造骨組の振動台実験(その 7 地震時に部材に生じる歪速度の検討)，日本建築学会大会講演梗概集，構造 ， pp.815-816，1996.9.