

論文 RC ラーメン高架橋柱の復元力特性に及ぼす載荷速度の影響

服部 尚道^{*1}・谷村 幸裕^{*2}・田所 敏弥^{*3}・田中 浩一^{*4}

要旨：載荷速度が曲げ破壊型の RC ラーメン高架橋柱の復元力特性に及ぼす影響を確認するため、入力加速度を漸増増幅させた正弦波による振動台実験と、振動台実験から得られた応答変位を強制入力した静的載荷実験について実施した。その結果、RC 柱部材の降伏耐力がひずみ速度の影響により静的載荷実験と比較して若干上昇するものの、破壊形式、履歴ループ形状、エネルギー吸収量および等価減衰定数は載荷速度に関わらず同様な傾向を示した。本実験の範囲では、載荷速度が RC 柱部材の復元力特性に及ぼす影響は小さいと言える。

キーワード：鉄筋コンクリート柱、載荷速度、復元力特性、ラーメン高架橋

1. はじめに

一般に、鉄筋コンクリート（以下、RC 部材）部材の構成要素であるコンクリートや鉄筋の材料特性は、ひずみ速度の影響を受けることが知られている。土木学会コンクリート標準示方書[耐震性能照査編]¹⁾では、コンクリートの強度、弾性係数、および鉄筋の強度がひずみ速度の対数に比例して増大することが示されている。

従来、RC 部材を対象とした耐震性能は、静的載荷実験の復元力特性に基づいた骨格モデルを用いて、動的解析法により評価している。しかしながら、地震による外力は載荷速度が生じることから、RC 部材の復元力特性と載荷速度の関係を明らかにすることは、RC 部材の耐震性能を評価する上で重要である。既往の研究²⁾では、ひずみ速度による鉄筋の降伏強度の上昇により、RC 部材の降伏耐力が静的載荷に比べて 20～30%程度上昇することを考慮すれば、大変形領域における振動時の RC 部材の復元力特性は静的復元力によりある評価できることが報告されている。ただし、載荷速度により終局時に耐力が急激に減少し、破壊形式に違いが生じる可能性があることも指摘している。このように RC 部材の降伏耐力や破壊形式が載荷速度の影響を受

けることが示されているものの、既往の実験供試体は非常に小さく、配筋量も本研究で対象とする RC 柱部材より少ない。また、振動台実験と静的載荷実験を比較した既往の実験例が少なく、復元力特性がどの程度異なるかは不明である。

本研究では、曲げ破壊型の RC ラーメン高架橋柱を対象とし、載荷速度が RC 柱部材の復元力特性に及ぼす影響を確認することを目的として、入力加速度を漸増増幅させた正弦波による振動台実験と、振動台実験から得られた応答変位を強制入力した静的載荷実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 供試体緒元

図-1 に供試体の形状・配筋、表-1 に供試体の緒元を示す。供試体は、振動台実験用の D 供試体と静的載荷実験用の S 供試体の 2 体を製作し、断面や配筋諸元は全て同じとした。断面形状は 400×400mm、柱高は 1930mm、せん断スパン比 4.83 である。配筋は、軸方向鉄筋比で 2.90% (D22-12 本)、帯鉄筋で 0.21% (D6@75) とした。なお、柱頭部は、D 供試体ではおもりを固定するため、S 供試体ではジャッキを固定するため、実験に影響しない範囲でそれぞれ異なる形

*1 (財) 鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 副主任研究員 工修 (正会員)

*2 (財) 鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 主任研究員 博(工) (正会員)

*3 (財) 鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 研究員 博(工) (正会員)

*4 (株) 大林組 技術研究所 土木構造研究室 副主査 工修 (正会員)

表－1 供試体の緒元

供試体名	断面形状		柱高 a (mm)	せん断 スパン比 a/D	軸方向鉄筋		帯鉄筋		軸圧縮 応力度 (MPa)
	B (mm)	D (mm)			本数-径	ps(%)	ピッチ-径	pw(%)	
D S	400	400	1930	4.83	12-D22	2.90	D6@75	0.21	2.1

状・構造とした。また、D 供試体ではおもりの急激な落下を防止するための治具をスタブに取り付けるため、S 供試体より大きな形状とした。

供試体に用いたコンクリートと鉄筋の材料特性を表－2 に示す。なお、材料特性に基づく曲げせん断耐力比¹⁾は1.64 ($M_u=243\text{kN}\cdot\text{m}$, $V_y=207\text{kN}$) である。試験体の製作は、スタブと柱を配筋後、スタブ、柱の順でコンクリートを打設した。

2.2 載荷方法

載荷方法は、D 供試体では振動台による動的載荷、S 供試体では静的載荷とした。載荷試験装置を図－2 に示す。振動台の仕様は、振動テーブル $5\times 5\text{m}$ 、最大積載重量 500kN 、最大振幅 60cm 、最大速度 200cm/s 、最大加速度 3000cm/s^2 である。D 供試体のおもりの固定は、供試体に対しておもりの回転を拘束しないようにピン結合とした。また、おもりの水平状態を保持するため、慣性力作用直角方向に振動台床とおもり取り付け用の床を連結するパンタグラフを取り付けた。静的載荷装置は、反力壁に 500kN 水平力ジャッキ、反力床に固定した門型フレームに 500kN 軸力ジャッキを配置した。なお、軸力ジャッキはスライド支承により水平に移動する構造とした。

表－2 材料特性

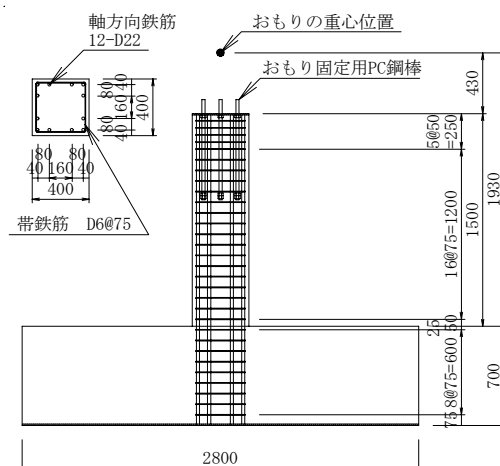
(a) コンクリート

部位	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 ($\times 10^4\text{MPa}$)
柱	25.9	2.17	2.33
スタブ	27.5	2.57	2.48

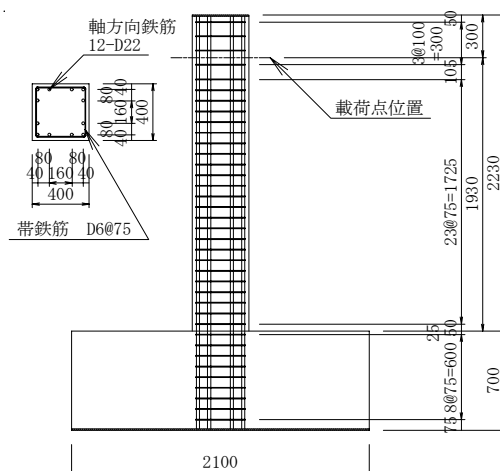
(b) 鉄筋

種別	降伏 強度 (MPa)	降伏 ひずみ ($\times 10^{-6}$)	引張 強度 (MPa)	弾性係数 ($\times 10^5$ MPa)
D6	288	1636	426	1.91
D22	332	1675	515	2.00

載荷計画は、柱が最大耐力を超えて、軸方向鉄筋の座屈が開始する程度の損傷（鉄道構造物等設計標準³⁾の損傷レベル⁴⁾が生じるように、D 供試体では柱の慣性力作用点に生じる目標加速度として 75 (2 回), 150 , 300 , 400cm/s^2 の 1Hz の $\sin$ 波（定常 4 波, 前後調整 2 波）を振動台へ入力した。S 供試体では、振動台実験の慣性力作用点の応答変位を用いて、強制変位で加力した。柱基部の軸圧縮応力は 2.1MPa とし、D 供試体はおもりと付属治具の重量を 338.6kN とした。S 供試体は一定軸力で載荷した。



(a) D 供試体（振動台実験）



(b) S 供試体（静的載荷実験）

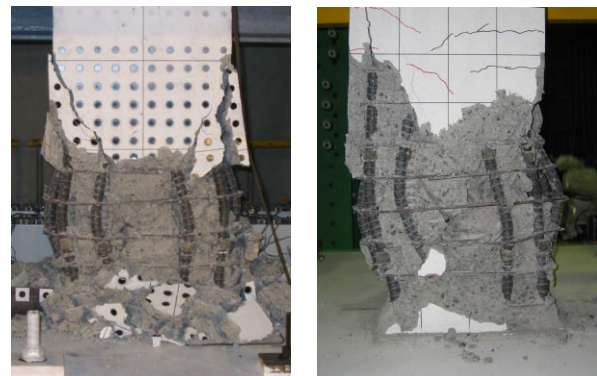
図－1 供試体の形状・配筋

筋の降伏は、D 供試体では 6 サイクル目において、S 供試体では 5 サイクル目で生じた。なお、S 供試体のみ柱基部から 4 本目の帯鉄筋が 8 サイクル目載荷中に破断した。実験終了時の破壊状況を写真-1 に示す。破壊形式は、両供試体とも、軸方向鉄筋降伏後、軸方向鉄筋の座屈により荷重が低下する曲げ破壊であった。

3.2 荷重～変位関係

図-6 に荷重～変位の履歴曲線、図-7 に荷重～変位の包絡線、表-3 に降伏荷重、降伏変位、最大荷重の値を示す。また、図-8 と図-9 に時刻歴の荷重、変位、曲げモーメントが卓越する柱基部の軸方向鉄筋ひずみ、軸方向鉄筋の座屈が顕著な柱基部から 200mm 位置の帯鉄筋ひずみを示す。D 供試体の荷重は、慣性力作用点における応答加速度に、おもりと付属治具の質量に柱質量の 30%³⁾を加算した質量を乗じた値とした。また、軸力偏心による付加水平力については、両供試体とも補正を行った。なお、本論では、柱基部の軸方向鉄筋ひずみが急激に増加する時点を降伏と定義した。

降伏荷重は、表-3 に示すように、D 供試体の方が正側、負側共に約 9%，S 供試体を上回った。また、図-8 と図-9 に示すように、D 供試体の軸方向鉄筋のひずみは材料試験結果の降伏ひずみと S 供試体の降伏ひずみを大きく上回るとともに、D 供試体の降伏後の軸方向鉄筋には 9～12% 程度のひずみ速度が生じた。軸方向鉄筋ひずみは各々 2 箇所測定しているが、いずれもほぼ同時期に降伏ひずみに達した。従って、ひずみ速度の影響により軸方向鉄筋の降伏点が上昇し、D 供試体の降伏荷重が上昇したものと考えられ、既往の研究²⁾と同様な傾向を示したが、その程度は小さかった。また、降伏変位は D 供試



(a) D 供試体 (b) S 供試体
写真-1 破壊状況

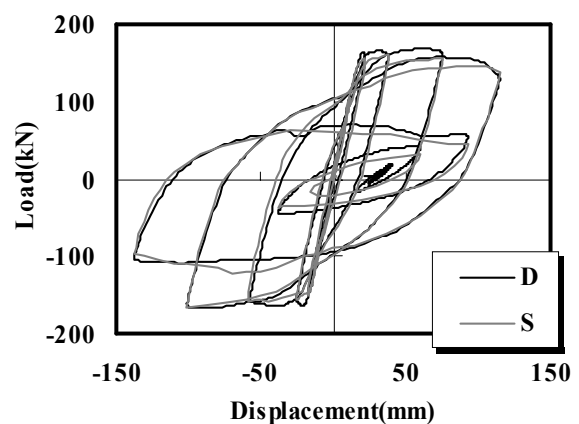


図-6 荷重～変位の履歴曲線

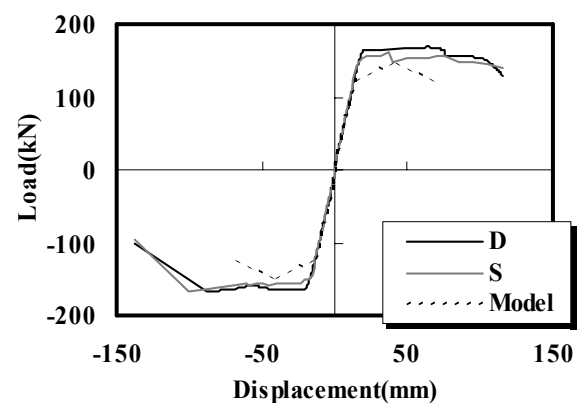
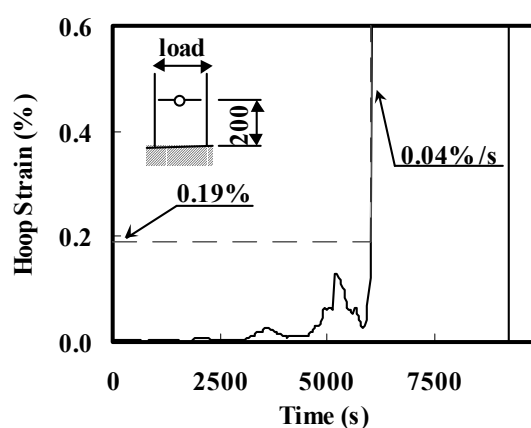
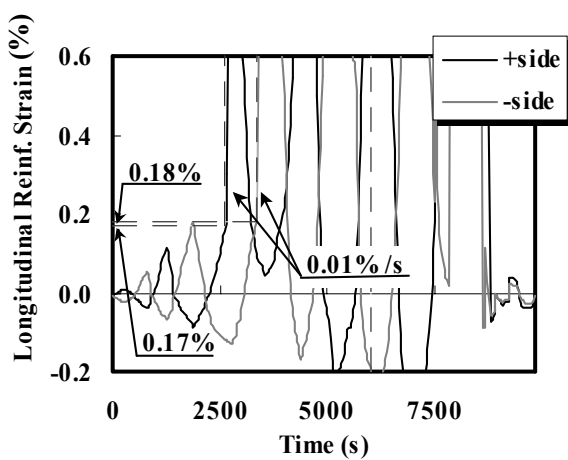
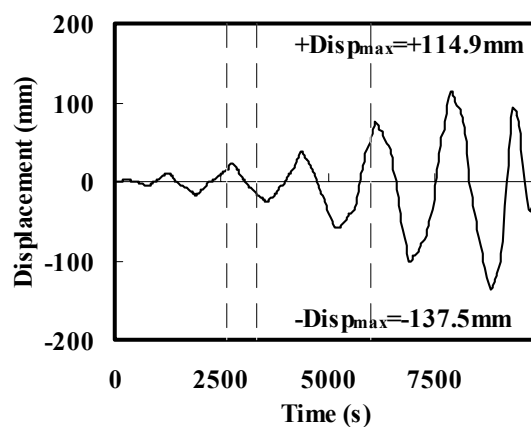
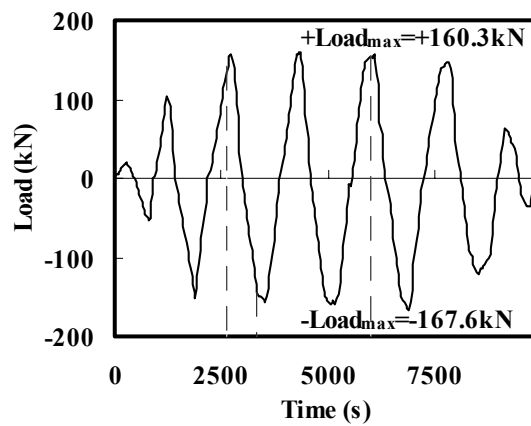
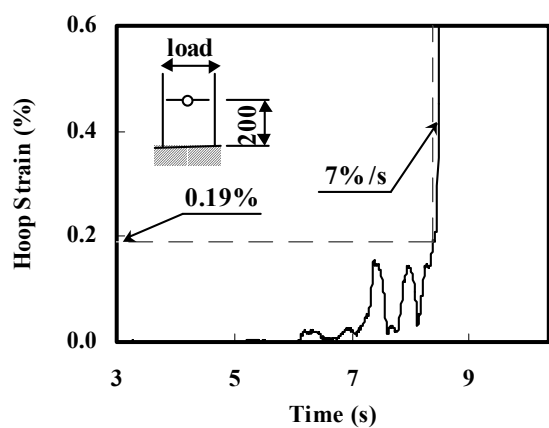
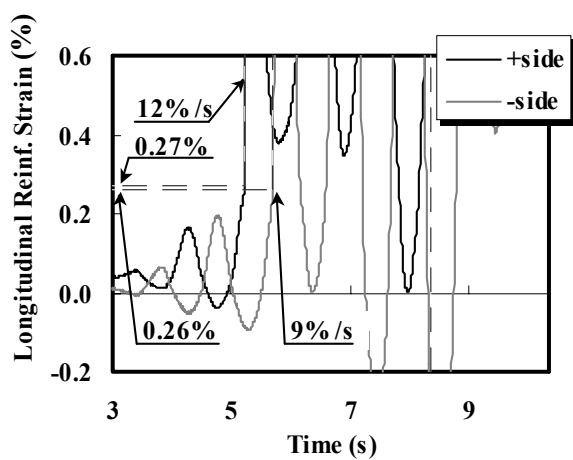
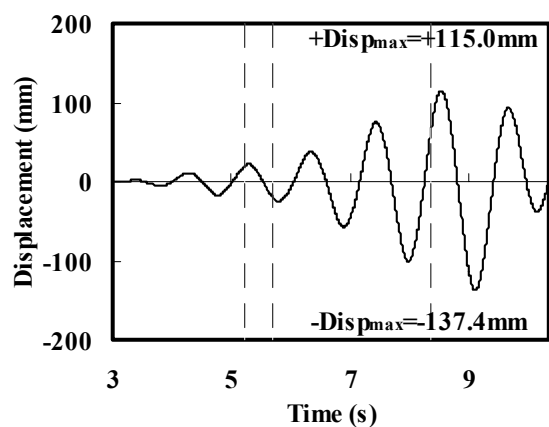
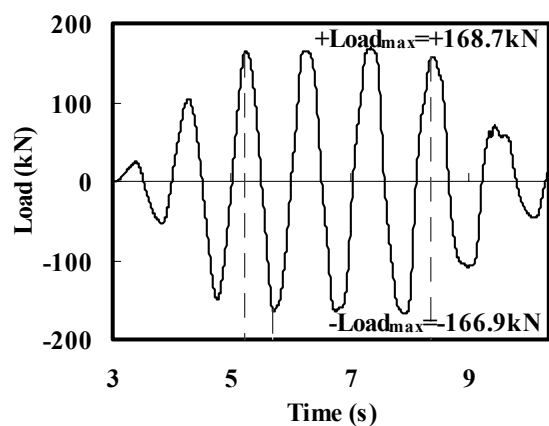


図-7 荷重～変位の包絡線

表-3 降伏荷重、降伏変位、最大荷重

試験 体名	降伏荷重* (kN)		降伏変位* (mm)		最大荷重 (kN)	
	+側	-側	+側	-側	+側	-側
D	+162.4	-162.4	+19.2	-19.6	+168.7	-166.9
S	+149.2	-148.4	+17.0	-18.0	+160.3	-167.6

*) 柱基部の軸方向鉄筋ひずみが急激に増加する時点の値



図一8 時刻歴荷重・変位・鉄筋ひずみ (D 供試体)

図一9 時刻歴荷重・変位・鉄筋ひずみ (S 供試体)

体の方が正側で約 13%，負側で約 9%，S 供試体に対して上回った。従って，降伏荷重，降伏変位がほぼ同率で増加していることから，降伏剛性は載荷速度の影響を受けないと考えられる。

最大荷重については，D 供試体の方が正側で 5%程度 S 供試体を上回ったが，負側はほぼ同程度となった。また，図-8 と図-9 に示すように，帯鉄筋ひずみは両供試体とも同ひずみで降伏したが，D 供試体は S 供試体より 1 サイクル後で降伏した。着目した帯鉄筋ひずみは柱基部から 200mm の位置の 2 箇所における計測結果であり，いずれの帯鉄筋ひずみも同じ傾向であったが，図-6 に示す荷重-変位の履歴ループ形状に与える影響は小さかった。

図-7 に鉄道構造物等設計標準³⁾に準拠した計算値（安全係数 1.0）を併記したが，両供試体とも計算値を上回った。なお，実験では荷重低下域において計算値が極端に安全側の評価となっている理由は，実験では荷重低下域における繰返し回数が少ないことによるものである。

3.3 エネルギー吸収量と等価減衰定数

図-10 にエネルギー吸収量と変位の関係，図-11 に等価減衰定数と変位の関係を示す。両供試体とも変位が大きくなるとともにエネルギー吸収量や等価減衰定数は増加し，その傾向は載荷速度の違いによらずほぼ同様であった。

従って，塑性変形領域においては，RC 部材の減衰機構が速度依存型の粘性減衰が殆ど生じず履歴減衰が支配的であること²⁾を前提とし，履歴減衰は載荷速度の影響をほとんど受けないことを確認した。

4. まとめ

曲げ破壊型の RC 柱部材を対象として，載荷速度の異なる実験を実施し，以下を確認した。

- (1) ひずみ速度の影響により軸方向鉄筋の降伏点が上昇し，RC 部材の降伏荷重が上昇した。
- (2) 降伏荷重，降伏変位は載荷速度の影響によりほぼ同率で増加していることから，降伏剛性は載荷速度の影響を受けないと考えられる。

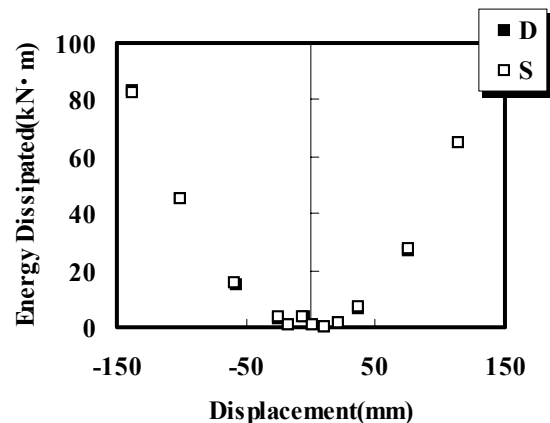


図-10 エネルギー吸収量と変位の関係

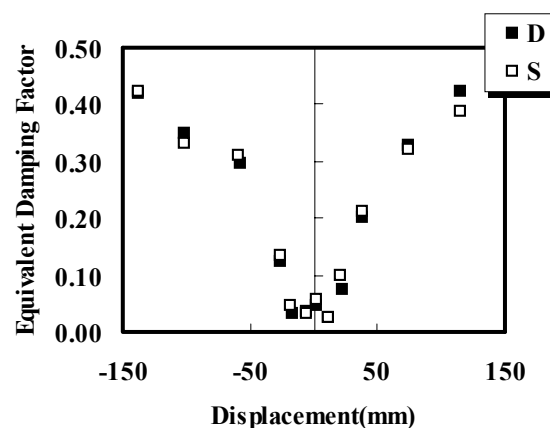


図-11 等価減衰定数と変位の関係

- (3) 降伏荷重，最大荷重は静的載荷実験より若干上昇するものの，降伏剛性，破壊形式，履歴ループ形状，エネルギー吸収量および等価減衰定数はほぼ同様なことから，本実験の範囲では，載荷速度が RC 柱部材の復元力特性に及ぼす影響は小さいと言える。
- (4) 塑性変形領域における履歴減衰は載荷速度の影響をほとんど受けないことを確認した。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002.3
- 2) 睦好，町田：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) 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，2004.4