

論文 RC 高架橋柱における載荷履歴が変形性能に及ぼす影響

仁平 達也^{*1}・谷村 幸裕^{*2}・岡本 大^{*1}・田所 敏弥^{*2}

要旨：RC 柱の変形性能を検討する場合，漸増載荷による方法が一般的であり，軸方向鉄筋の座屈により変形性能が低下することが分かっている。一方，地震動などの不規則波により，座屈を生じた後に小さな変位を経験する場合の変形性能についてはあまり検討されていないため，本研究では，漸減載荷による実験を行い，最大変位による軸方向鉄筋の座屈の有無が，RC 柱の変形性能に与える影響について検討した。その結果，軸方向鉄筋が座屈を経験すると，最大変位より小さい変位であっても履歴曲線が変化し，履歴吸収エネルギー，および等価粘性減衰係数といった RC 柱の変形性能に影響を与えることがわかった。
 キーワード：載荷履歴，変形性能，漸減載荷方法，座屈

1. はじめに

鉄筋コンクリート柱に関する地震時変形性能は，これまで数多くの静的な水平力正負交番載荷実験を基にして検討されてきた。従来の交番載荷実験では，変位制御で一定の変位において数回の繰返し載荷を行い，変位を徐々に増していく，「漸増載荷」が一般的である。耐震性能を照査する場合の応答値の算定に用いられる部材特性モデル¹⁾も。このような実験をもとに提案²⁾されたものである。

しかし，実際の地震波はランダムな波形を有しており，地震時における構造物の応答を適切に推定するためには，載荷履歴が部材特性に及ぼす影響を把握する必要がある。漸増載荷以外の方法による実験³⁾もいくつか行われているが，さらに多様な載荷パターンによる実験と詳細な検討が必要と考えられる。

そこで，本研究では，一定振幅の変位を繰り返す正負交番載荷実験を，最初に最大変位を与えて徐々に変位を減じる「漸減載荷」により行い，最大変位の違いや，漸増載荷との違いおよび繰返し回数による影響を明らかにし，載荷履歴が部材特性に及ぼす影響について検討することとした。

2. 実験の概要

2.1 供試体の諸元および材料特性

供試体は鉄道ラーメン高架橋柱の実大モデル 2 体である。断面形状は 900 mm × 900 mm の正方形断面，せん断スパンは 3300 mm (せん断スパン比：4.02) である。軸方向鉄筋は D32 を，帯鉄筋は D16 を用い，帯鉄筋の接合方法はフレア溶接とした。引張鉄筋比は 1.07%，帯鉄筋比は 0.66%，軸方向圧縮応力度は 3.87 N/mm² である。供試体の形状を図 - 1 に示す。

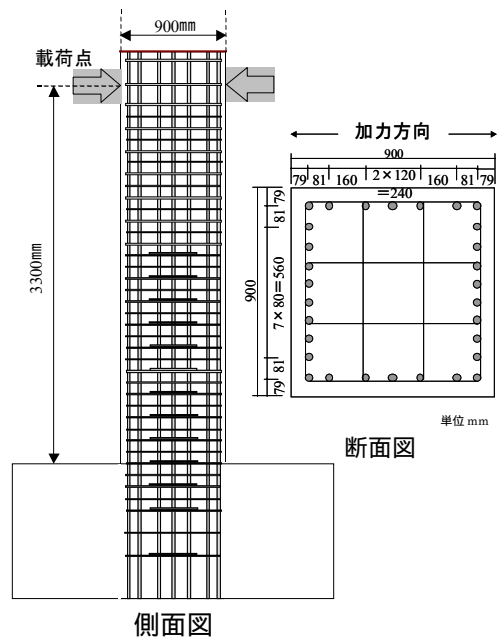


図 - 1 供試体の形状

*1 財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 工修 (正会員)

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

各供試体の鉄筋とコンクリートの材料特性を表 - 1 に示す。No.1 ~ 2 は今回実験の供試体、No.3 ~ 4 は既往の実験に用いた供試体で、文献 1) の「H97 - 1」, 「H97 - 6」である。本実験と既往の供試体は同じ形状、配筋である。

表 - 2 に鉄道標準⁴⁾に基づいて計算した、各供試体の耐力比 (V_{mu}/V_{yd} : ここに、 V_{mu} : M_u/L_a , M_u : 部材の曲げ耐力, L_a : せん断スパン, V_{yd} : 部材のせん断耐力) を示す。計算には表 - 1 の材料特性値を用い、安全係数はすべて 1.0 とした。No.1 ~ 4 の V_{mu}/V_{yd} は 0.60 ~ 0.66 にあり、曲げ破壊先行型の供試体である。

2.2 最大変位量および荷重パターン

図 - 2 の(a), (b)に示すように、No.1 と No.2 の荷重方法は最大変位を与えた後、徐々に変位を小さくする漸減荷重とした。No.1 は軸方向鉄筋の座屈が生じる変位を、No.2 は軸方向鉄筋が降伏し、座屈が生じない変位を最大変位として与えることとした。

最大変位は、図 - 2 の(c), (d)に示す既往の荷重方法による結果から決定した。No.3 は 3 回繰返し、No.4 は 1 回繰返しの漸増荷重である。図 - 3 に No.3 および No.4 の正荷重側の荷重 - 変位関係の包絡線を示す。No.3 は鉄筋降伏時の変形が 27 mm (= δ_y : 降伏変位) であり、136 mm (= 5 δ_y) の繰返し荷重時に荷重が低下し、軸方向鉄筋の座屈が確認され、6 δ_y (= 163 mm) で鉄筋降伏時の荷重を保持できなくなった。この結果を基に、No.1 の最大変位は 150 mm, No.2 の最大変位は 75 mm とした。そして、No.1, No.2 とともに 25 mm を δ_y とし、その整数倍の変位を 1 回繰返す漸減荷重を 1 サイクルとし、これを 3 回繰返した。

表 - 1 材料特性

供試体	鉄筋				コンクリート		
	D32		D16		柱		フーチング
	fsy	Es	fsy	Es	f'c	Ec	f'c
No.1	370	195	377	196	34.8	27.7	32.8
No.2					39.7	28.5	36.2
No.3	368	161	409	153	31.8	24.4	34.0
No.4					26.9	24.4	25.6

fsy: 引張降伏強度(N/mm²) f'c: 圧縮強度(N/mm²)

Es・Ec: ヤング係数(kN/mm²)

表 - 2 各供試体の曲げせん断耐力比

供試体	V_{yd}	M_u	V_{mu}	V_{mu}/V_{yd}
No.1	1946	4225	1280	0.66
No.2	1966	4307	1305	0.66
No.3	2057	4144	1255	0.61
No.4	2033	4036	1223	0.60

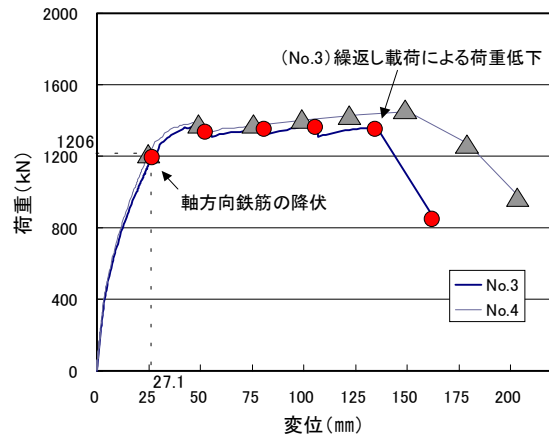


図 - 3 荷重 - 変位関係包絡線 (No. 3・No. 4)

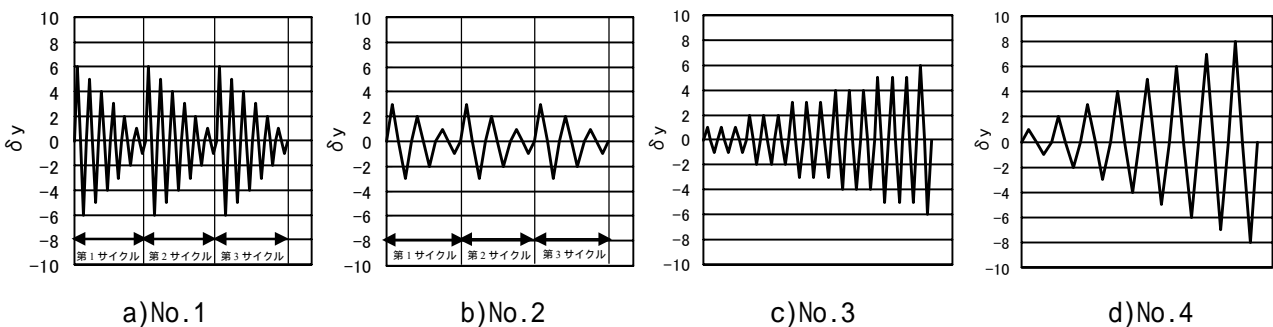


図 - 2 各供試体の荷重サイクル



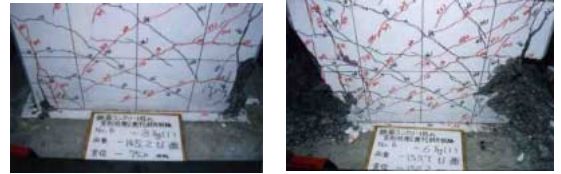
第1サイクル終了 第2サイクル終了 第3サイクル終了
a) No.1



3_y・1回目 6_y終了
a) No.3



第1サイクル終了 第2サイクル終了 第3サイクル終了
b) No.2



3_y 6_y
b) No.4

図 - 4 No.1・No.2 の損傷状況

図 - 5 No.3・No.4 の損傷状況

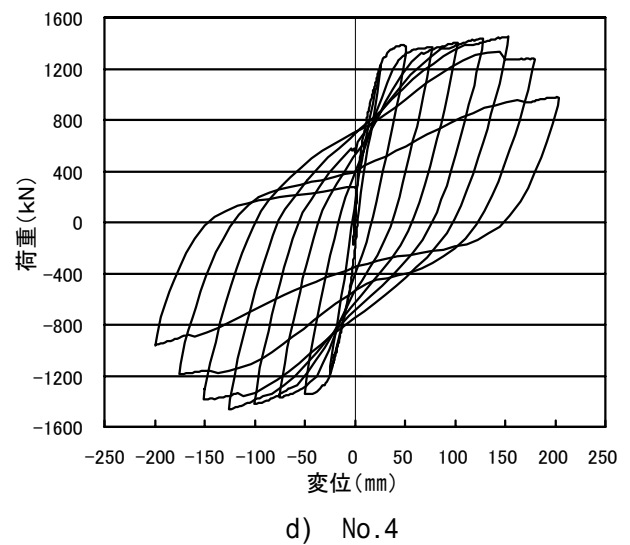
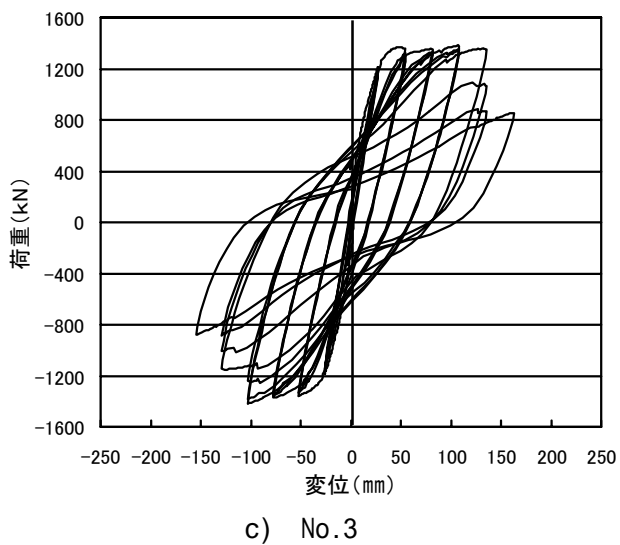
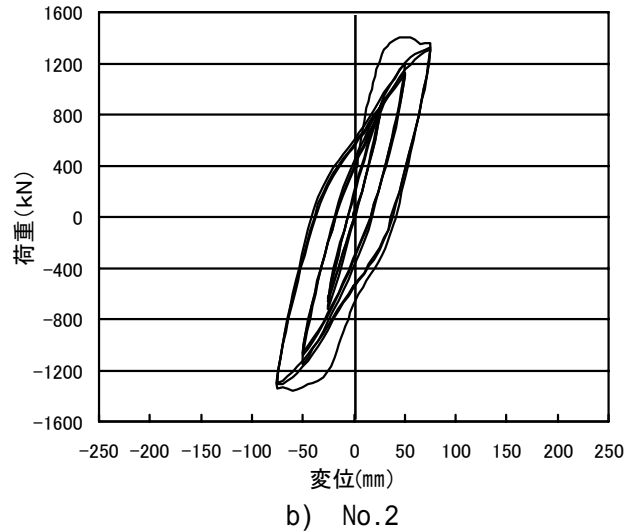
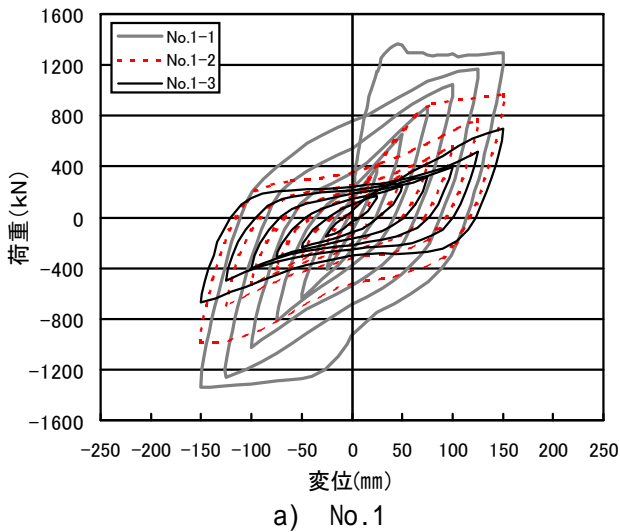


図 - 6 荷重 - 変位関係

3.実験結果

3.1 損傷状況

図 - 4 に No.1, No.2 の各サイクル終了時の損傷状況を示す。No.1 は第 1 サイクルの+6 y へ向かう際の、+2 y 時に圧縮側の基部のコンクリートに圧壊が、+3 y 時に圧縮側のかぶりコンクリートにはく離が生じ、徐々に進行していった。そして、+6 y の除荷時にかぶりコンクリートがはく落し、その範囲は 0.8 ~ 1.0D (D は部材高さ) であった。なお、軸方向鉄筋の座屈開始は、第 1 サイクルの+6 y のピーク時では確認されず、6 y および+5 y のピーク時に確認された。

繰返し載荷に伴い、軸方向鉄筋の座屈は、引張力を受けて塑性化した鉄筋が圧縮力を受けることにより顕著になった。また、かぶりコンクリートのはく落面積が増加し、コアコンクリートが細粒化していった。

No.2 は基部から 0.2 ~ 0.4D の隅角部に部分的なかぶりのはく落が見られたが、軸方向鉄筋の座屈は確認されなかった。またサイクル数が増加しても損傷はほとんど進行しなかった。

図 - 5 に No.3, No.4 の 3 y, 6 y における損傷状況を示す。3 y 載荷終了時は、いずれもかぶりの一部がはく落し、曲げひび割れが生じる程度の損傷であった。6 y では、繰返し回数の多い No.3 は、かぶりが大きくはく落し、軸方向鉄筋の座屈が見られるが、1 回繰返しの No.4 では、軸方向鉄筋の座屈は比較的軽微であった。

3.2 荷重 - 変位関係

図 - 6 に No.1 ~ 4 の荷重 - 変位関係を示す。なお「No.1 - 1」は No.1 の第 1 サイクルを、「No.1 - 2」,「No.1 - 3」はそれぞれ第 2, 第 3 サイクルを示している。図 - 4(a)に示すように、No.1 はサイクル数の増加に伴い、履歴ループが小さくなり、履歴ループ形状は紡錘形から逆 S 字形へ変化した。一方図 - 4(b)に示すように、No.2 は繰返し回数に関わらず、履歴ループの形状は紡錘形を示した。図 - 4(c)および(d)に示す漸増載荷である No.3 と No.4 は、軸方向鉄筋が座屈した以降は荷重が低下し、履歴ループ形状が逆 S

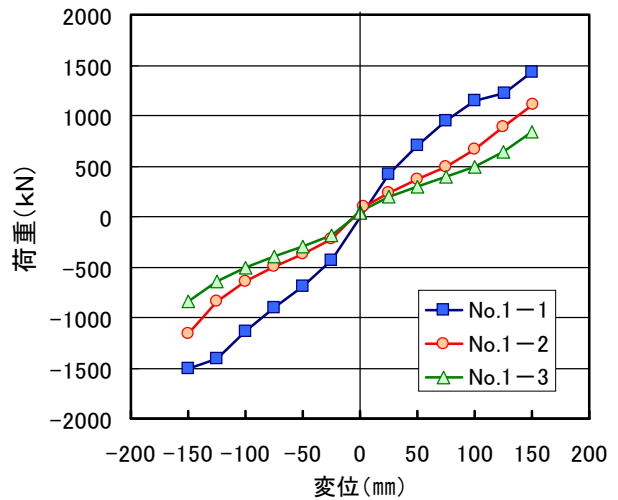


図 - 7 各ピークの荷重 - 変位関係 (No.1)

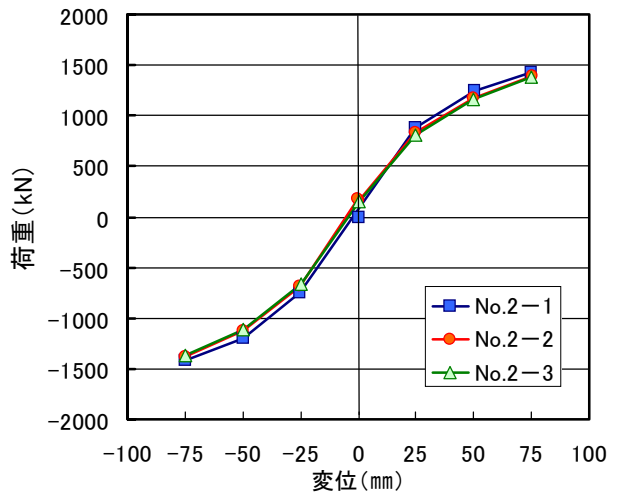


図 - 8 各ピークの荷重 - 変位関係 (No.2)

字形となった。

以上のことより、履歴ループ形状の変化は、軸方向鉄筋の座屈に関連が深いと考えられる。軸方向鉄筋の座屈が生じると、軸方向鉄筋は圧縮力を負担できない。したがって、コアコンクリートが圧縮力を負担し、引張側軸方向鉄筋の座屈が矯正されて引張力を受け持つまで、曲げ剛性が增大しないこととなる。その結果、軸方向鉄筋の座屈に伴って、履歴曲線は逆 S 字形になったと考えられる。

図 - 7 に No.1, 図 - 8 に No.2 の各サイクルのピークにおける荷重と変位の関係を示す。No.1 はサイクル数の増加に伴い、同一変位における荷重が低下したが、No.2 にほとんど変化はなかった。

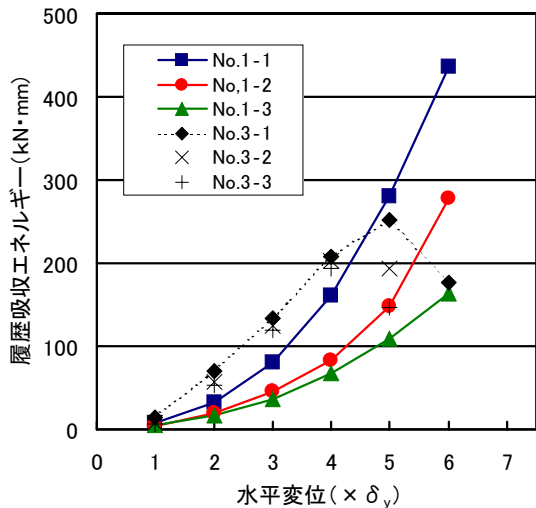


図 - 9 No.1 の履歴吸収エネルギー

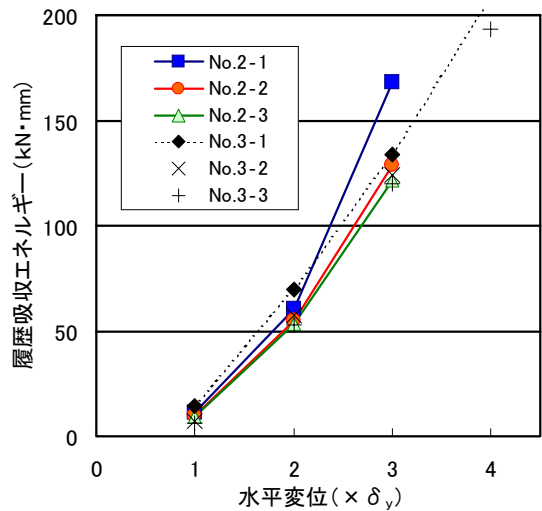


図 - 10 No.2 の履歴吸収エネルギー

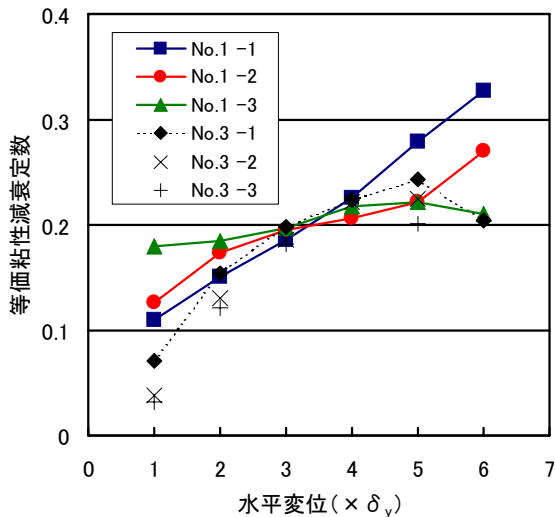


図 - 11 No.1 の等価粘性減衰定数

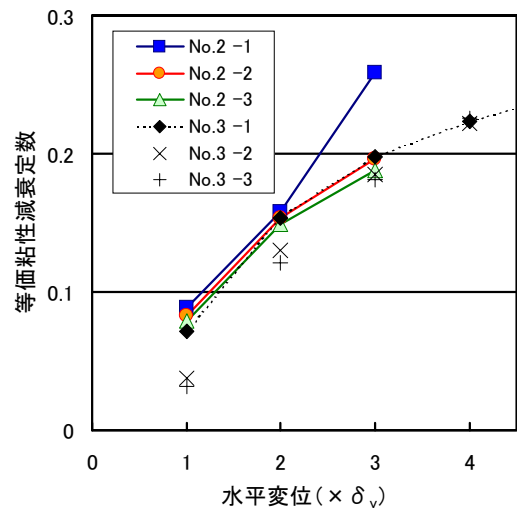


図 - 12 No.2 の等価粘性減衰定数

No.1 は繰返し載荷での軸方向鉄筋の座屈の進行とともに、かぶりコンクリートのはく落による部材断面の減少、コアコンクリートの細粒化により、同一変位における荷重が小さくなったと考えられる。一方 No.2 は、鉄筋が降伏しても座屈しないため、繰返し載荷における、同一変位における荷重にほとんど変化はなかった。

つまり、最大変位による軸方向鉄筋の座屈の有無が、より小さい変位における履歴曲線にも影響を与えることを示している。

3.3 履歴吸収エネルギー

図 - 9、図 - 10 に、それぞれ No.1、No.2 の履歴吸収エネルギーを示す。なお、比較のため、これらの図には No.3 も併せて示した。

図 - 9 において、 $1 \sim 4 y$ の範囲では、No.3 の各サイクルの履歴吸収エネルギーに大きな差異は見られないが、No.1 はサイクル数が増加するのに従って値が減少し、No.1 は No.3 よりも値が小さかった。これは、前節に示したように、軸方向鉄筋の座屈の有無により履歴曲線の形状が異なるためであり、座屈を生じた場合には繰返し載荷による履歴吸収エネルギーの減少が著しいことを示している。なお、 $5 y$ を超えると、No.3 でも座屈が始まり、値が減少した。図 - 10 において、No.2 はサイクル数が増加しても、履歴吸収エネルギーの減少はわずかであり、No.3 と同様な値であった。これは、No.2 には座屈を生じていないためである。

3.4 等価粘性減衰定数

図 - 11 に No.1 , 図 - 12 にそれぞれ No.1 および No.2 と No.3 の等価粘性減衰定数との比較を示す。No.1 はサイクル数が増加するのに従い、等価粘性減衰定数(以下、 h_{eq})が増加し、他の試験体と比べ 2_y よりも小さな範囲で h_{eq} が大きな値を示している。これは、図 - 13、図 - 14 の 3_y における軸方向ひずみに示すように、No.1 は No.2 と比べて繰返し载荷により軸方向鉄筋の塑性化している範囲が増加し、残留変位が大きくなったことに起因していると考えられる。

No.1 および No.2 において、変位が大きい範囲での第 1 サイクルは他のサイクルと比較して大きな値を示している。これは、図 - 6 の荷重 - 変位曲線および図 - 9、図 - 10 の履歴吸収エネルギー - を見ると明らかのように、第 1 サイクルの履歴曲線の形状が他のサイクルと異なり、履歴吸収エネルギーが大きくなっているためであると考えられる。

4.まとめ

本研究は RC 柱の軸方向鉄筋の座屈発生の有無が変形性能に及ぼす影響について考察したものである。まとめを以下に示す。

- (1) 漸減载荷において、最大変位より軸方向鉄筋が座屈する場合、変位が小さな範囲においても、繰返しの影響により荷重が低下し、また履歴曲線が紡錘形から逆 S 字形へ変化する。その結果、履歴吸収エネルギー量が小さくなる。
- (2) 漸減载荷において、最大変位において軸方向鉄筋の座屈がない場合、荷重低下および履歴曲線に変化はみられない。

参考文献

- 1) 渡邊忠朋, 谷村幸裕, 瀧口将志, 佐藤勉: 鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定手法, 土木学会論文集, No.683/ -52, pp.31-45, 2001.8
- 2) 土木学会コンクリート標準示方書(構造性能

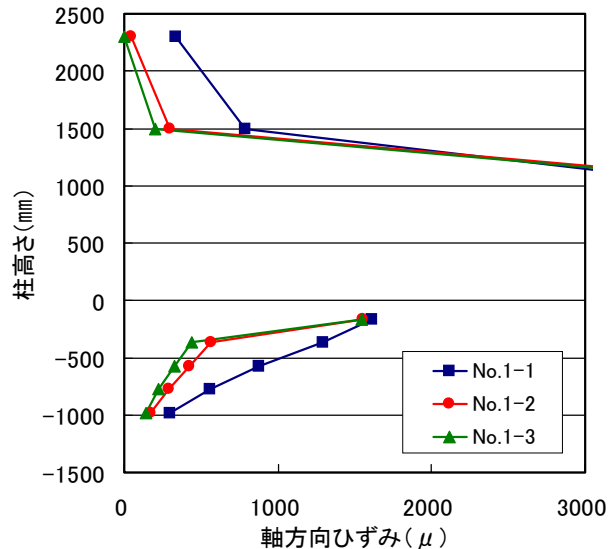


図 - 13 No.1・3 y の軸方向ひずみ

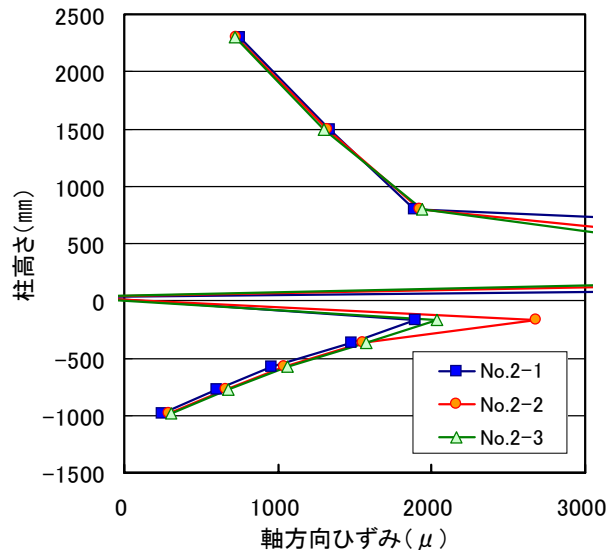


図 - 14 No.2・3 y の軸方向ひずみ

照査編), 丸善, 2004

- 3) 武村浩志, 川村一彦: 载荷履歴特性がコンクリート橋脚の変形性能に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.849-858, 1997.3
- 4) 鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物), 丸善, 2004

謝辞

本実験を実施するにあたり, (株)大林組の田中浩一氏をはじめ多くの方々にご協力頂きました。この場をお借りし深く感謝致します。